

中图分类号: P595

单位代码: 10425

学 号: S13010032



中國石油大學

硕士学位论文

China University of Petroleum Master Degree Thesis

山东东部近海晚中生代火山-岩浆系统演化特征
——以五莲及附近地区为例

The Evolution of Late Mesozoic Volcanic-magmatic System in
the Offshore of Eastern Shandong Province—a Case Study of
Wulian and Vicinity

学科专业: 地质学

研究方向: 地球化学

作者姓名: 梁文栋

指导教师: 周瑶琪 教授

二〇一六年六月

**The Evolution of Late Mesozoic Volcanic-magmatic
System in the Offshore of Eastern Shandong
Province—a Case Study of Wulian and Vicinity**

A Thesis Submitted for the Degree of Master

Candidate: Liang Wendong

Supervisor: Prof. Zhou Yaoqi

School of Geosciences

China University of Petroleum (East China)

关于学位论文的独创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在指导教师指导下独立进行研究工作所取得的成果，论文中有关资料和数据是实事求是的。尽我所知，除文中已经加以标注和致谢外，本论文不包含其他人已经发表或撰写的研究成果，也不包含本人或他人为获得中国石油大学（华东）或其它教育机构的学位或学历证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对研究所做的任何贡献均已在论文中作出了明确的说明。

若有不实之处，本人愿意承担相关法律责任。

学位论文作者签名：梁文栋

日期：2016年6月7日

学位论文使用授权书

本人完全同意中国石油大学（华东）有权使用本学位论文（包括但不限于其印刷版和电子版），使用方式包括但不限于：保留学位论文，按规定向国家有关部门（机构）送交、赠送和交换学位论文，允许学位论文被查阅、借阅和复印，将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，采用影印、缩印或其他复制手段保存学位论文。

保密学位论文在解密后的使用授权同上。

学位论文作者签名：梁文栋

日期：2016年6月7日

指导教师签名：何永其

日期：2016年6月7日

摘 要

山东东部地区位于华北克拉通与扬子克拉通的结合部位, 岩浆活动频繁, 其岩浆岩的形成演化、时空展布与断裂活动、盆地演化及深部动力学过程息息相关。本文重点通过对五莲及诸城市部分地区的晚中生代岩浆岩进行研究, 并结合山东东部地区火山岩特征及岩浆活动规律, 对山东东部地区晚中生代的火山岩浆演化及动力学背景进行了探讨。

野外勘探及填图过程中, 通过路线调查与剖面研究相结合的方法, 对火山机构的岩石类型及分布、结构构造特征, 岩层岩相展布, 火山断裂及岩脉等进行了调查, 认为高阁庄-桃林火山机构为一破火山口, 并对该火山机构内部及周边发育的莱阳群、青山群地层、变质基底以及各中酸性侵入体的展布范围进行了划分, 在此基础上对前人编制的地质图进行了补充修改。

诸城桃林地区岩浆岩的主量元素、微量元素及稀土元素等特征显示本区岩浆岩 SiO_2 含量介于 47.79~77.14% 之间, 岩石从基性到酸性都有分布, 以钙碱性系列为主, SiO_2 与主量元素之间大都呈显著的负相关关系。微量元素蛛网图显示 Rb、K、Ba、Th、U 等大离子亲石元素 (LILE) 富集, Nb、P、Ti 等高场强元素 (HFSE) 相对亏损; 部分酸性岩样品还表现出 Ba、Sr 相对亏损的特征。稀土元素配分图显示轻稀土元素 (LREE) 富集、重稀土元素 (HREE) 亏损的右倾配分模式, 轻稀土之间分馏明显, 大多数样品呈现 δEu 的弱负异常; 部分酸性岩稀土元素含量低, 且具明显的 δEu 负异常。

本区样品的蚀变作用较弱, 存在较为明显的结晶分异及部分熔融趋势, 在岩浆演化过程中可能经历了橄榄石、单斜辉石、Ti-Fe 氧化物、磷灰石及斜长石的分离结晶。在岩浆上升过程中, 中基性岩和部分酸性岩的地壳物质的参与程度不一, 中基性岩浆可能经历了不同程度的地壳混染。此外, 样品中不同颜色条带、成分条带、包体及镜下矿物环带等特征表明部分岩浆岩形成过程中存在着岩浆混合作用。

经过数据分析并结合前人资料, 认为本地区中基性岩浆来源于受俯冲流体交代作用影响的含弥散状低 Mg 角闪石的岩石圈地幔, 而后经历了结晶分异作用和地壳混染, 部分地区的岩浆岩还表现出岩浆混合作用。而酸性岩浆来源分为两种情况, 高 Sr 酸性岩浆来自于中基性岩浆的结晶分离, 低 Sr 酸性岩浆则起源于中下地壳的部分熔融。

山东东部晚中生代火山岩年龄分布于 131Ma~72Ma, 其中青山群火山岩年龄介于

126.2~91.4Ma 之间, 中基性火山活动有从东北向西南方向变年龄的趋势, 即越靠近郯庐断裂带地区, 中基性火山活动年龄越新; 而中酸性火山活动以灵山岛地区的流纹岩年龄最老, 胶州及莱阳地区中酸性岩浆活动年龄较新。桃林低 Sr 酸性岩与灵山岛地区酸性岩地化特征特征相似, 可能活动时间较早, 为幔源岩浆底侵加热致使地壳熔融所致; 中基性岩浆活动与之相伴生, 且在上升过程中发生了分离结晶形成高 Sr 酸性岩, 部分地区发生岩浆混合形成了不同性质的岩浆。其岩浆活动与该时期岩石圈伸展、减薄的构造背景相吻合, 可能受古太平洋板块俯冲板片撕裂及后撤的影响。

关键词: 晚中生代; 火山机构; 岩浆来源; 岩浆演化

The Evolution of Late Mesozoic Volcanic-magmatic System in the Offshore of Eastern Shandong Province—a Case Study of Wulian and Vicinity

Liang Wendong (Geology)

Directed by Prof. Zhou Yaoqi

Abstract

Eastern Shandong province which located in the juncture of the North China Craton and Yangtze Craton, has experienced fierce magmatic activities in late Mesozoic. The formation and evolution of magmatic rocks, and their temporal and spacial distribution have relationship with the fault activities, evolution of basins and their deep-earth dynamic processes. With the studies of late Mesozoic igneous rocks in Wulian and Zhucheng, and previous work, the evolution of late Mesozoic igneous rocks and their dynamic background can be studied.

The volcanic rock types and distribution, textural characteristics, distribution of terrane and lithofacies, faults and dykes should be researched clearly by detailed records and descriptions of crossing paths and cross sections. We found that Taolin volcanic edifice is a caldera, which developed Laiyang group, Qingshan group and many intermediate-acidic intrusive mass, and we modified this area's geologic map based on our field investigation.

The characteristics of major elements, trace elements and rare earth elements of igneous rocks in Taolin area show that its magmatic rocks are calc-alkaline series, and have a wide range of SiO_2 (47.79~77.14%). The spider diagram shows that the large ion lithophile elements (LILE) such as Rb, K, Ba, Th and U are relatively enriched, while high field strength elements (HFSE) like Nb, P and Ti are relatively loss; and part of acidic rocks are characterized by Ba and Sr depletion. REE patterns shows that igneous rocks are characterized by enrichment of LREE and depletion of HREE and weak Eu negative anomalies; part of acidic rocks have low REE content and obvious Eu negative anomalies.

This area's samples experienced weak alteration and obvious crystallization differentiation and partial melting trend, and it might experience fractional crystallization of olivine, clinopyroxene, Ti-Fe oxide, apatite and plagioclase. During the ascending process, the intermediate-basic rocks and part of acidic rocks might experience different degree of crustal hybridization. In addition, the different colour bandings, compositional bandings, enclaves and mineral zonings suggest that part of the igneous rocks have experienced process of magma mixing during their formation.

The intermediate-basic rocks generated from the partial melting of enriched mantle which was metasomated by fluid derived from subducted lower crust and contains low magnesium hornblende, then experienced crystallization differentiation and crustal contamination; besides, part of them have been mixed with other types of magma. However, acidic magma may derive from two ways: the high-Sr acidic magma evolved from the intermediate-basic magma and the low-Sr magma generated from the partial melting of middle or lower crust.

The age distribution of late Mesozoic volcanic rocks in eastern Shandong range from 131Ma to 72Ma, and the volcanic rocks's ages of Qingshan group lie between 126.2~91.4Ma. The intermediate-basic volcanic activities become younger from north-east direction to south-west, i.e. the intermediate-basic volcanic rocks which located in areas adjacent to the Tan-Lu fault zone have more younger magmatic ages. However, the acidic volcanic rock in Lingshan island is much younger than that in Jiaozhou and Laiyang. The low-Sr acidic magma in Taolin shares similar characteristics with acidic volcanic rocks in Lingshan island and Huangdao district, suggesting that these acidic volcanic rocks are likely to generated from the same origin and experienced similar magmatic processes. The dating date and field investigation illustrate that the low-Sr acidic magmatic activities have an earlier ages, and it was caused by the heating of upwelling mantle. Part of the intermediate-basic magma experienced magmatic mixing, while some of them evolved to high-Sr acidic magma with the fractional crystallization. The magmatic activities are consistent with the extension and thinning of lithosphere, and may be impacted by slab tear and rollback of paleo-Pacific plate.

Key words: late Mesozoic; volcanic edifice; magmatic origin; magmatic evolution

目 录

第一章 前言	1
1.1 研究目的及意义	1
1.2 国内外研究现状	1
1.2.1 山东东部晚中生代岩浆岩	1
1.2.2 火山岩浆系统演化研究	3
1.3 研究内容及技术路线	3
1.3.1 主要研究内容	3
1.3.2 研究技术路线	4
1.4 完成的主要工作量	4
第二章 区域地质背景	6
2.1 区域地层	6
2.2 区域构造	7
2.3 岩浆岩	8
2.3.1 侵入岩	9
2.3.2 喷出岩	10
第三章 岩相学特征及地质填图	11
3.1 火山机构样品特征	11
3.1.1 样品的采集及岩性	11
3.1.2 典型样品手标本及镜下特征	13
3.2 火山机构地质填图	15
3.2.1 火山机构内部特征	15
3.2.2 火山机构周边特征	18
3.3 山东东部其他地区野外调查	20
第四章 五莲-桃林地区岩浆岩地球化学特征	21
4.1 样品处理及分析	21
4.2 岩浆岩地球化学特征	22

4.2.1 主量元素特征.....	22
4.2.2 微量元素特征.....	26
4.2.3 稀土元素特征.....	26
4.2.4 同位素特征.....	27
第五章 五莲-桃林地区岩浆过程及来源.....	30
5.1 岩浆过程.....	30
5.1.1 蚀变作用.....	30
5.1.2 分离结晶.....	32
5.1.3 地壳混染.....	33
5.1.4 岩浆混合.....	35
5.2 岩浆起源.....	37
5.2.1 中基性岩浆起源.....	37
5.2.2 酸性岩浆起源.....	41
第六章 五莲-桃林地区岩浆时空分布与演化.....	45
6.1 岩浆岩时空分布.....	45
6.1.1 鲁东岩浆岩时空格架.....	45
6.1.2 五莲-桃林地区岩浆时空演化.....	47
6.2 深部动力学特征.....	49
结论.....	52
参考文献.....	54
附录.....	70
攻读硕士学位期间取得的学术成果.....	78
致谢.....	79

第一章 前言

1.1 研究目的及意义

山东东部近海地区位于华北板块与扬子板块碰撞的东段部位，构造位置十分重要。自 2010 年起，所在研究团队先后对日照五莲、潍坊诸城、烟台海阳、莱阳以及青岛垭口、唐岛湾、灵山岛等地区进行了野外地质考察，结合前人发现的胶南海相绒枝藻植物化石（张松梅等，2001）、崂山垭口-八仙墩鲍马序列（付永涛和虞子治，2010；吴拓宇等，2010）、灵山岛远源浊积岩（吕洪波等，2011）等现象，认为山东东部近海地区在晚中生代时期存在一裂陷盆地，并结合陆域资料及海域重磁资料划分出了盆地的断裂及范围（周瑶琪等，2015）。

该盆地以五莲-荣成断裂为北界与胶莱盆地相接，本文的主要研究区域即位于五荣断裂附近的五莲县及诸城市桃林地区，作者曾于 2013 年 4 月，2014 年 5 月、7 月、2015 年 4 月、5 月多次在该地区进行野外地质工作，对出露的莱阳群、青山群地层及晚中生代侵入岩进行了详细考察。该区发育了高阁庄-桃林、分岭山及马耳山等一系列火山机构，其中高阁庄-桃林火山机构是本文的重点关注对象。论文的主要目的在于通过野外地质踏勘，查明本区火山岩及侵入岩展布范围，结合地化数据及前人资料，探明不同的岩浆来源、演化特征，并分析其相关动力学背景。

岩浆活动与构造作用息息相关，且对沉积地层发育有重要影响。山东东部晚中生代裂陷盆地内发育了大量的岩浆侵入和火山喷发活动，通过研究其岩浆来源及喷发，可以帮助阐明盆地边界断裂、地层发育情况，为明确区域火山活动奠定基础。再者，晚中生代时期是中国东部发生大的构造转折的时期，中国东部岩石圈自早古生代（岩石圈厚度 $>200\text{Km}$ ）减薄至如今的 $70\sim 80\text{Km}$ ，以华北板块内部尤甚（郭峰等，2002），因此通过岩浆来源及演化特征研究，可以帮助发掘深部的构造及岩石圈信息，阐明盆地形成的运动学、动力学背景。此外，岩浆活动与金、多金属矿产相关，通过岩浆来源及火山活动的研究，可为金、多金属矿产的勘探提供基础资料。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 山东东部晚中生代岩浆岩

（1）岩浆活动年龄

锆石 U-Pb 法定年技术在岩浆岩中应用比较广泛, 前人利用锆石测年技术对五莲地区的岩浆岩体的年龄进行过测定, 其中侵入岩的形成年龄约为 113~126Ma。五莲县墙夼中粗粒二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 113.6Ma (1:5 万诸城八幅区域地质调查报告, (1995), 转引自王世进等, 2009); 周建波等 (2003) 测得马耳山不等粒二长花岗岩、五莲山晶洞花岗岩、七宝山辉石二长岩的 U-Pb 谐和年龄分别为 $115 \pm 1\text{Ma}$ 、 $116 \pm 4\text{Ma}$ 、 $126 \pm 3\text{Ma}$; 王世进等 (2013) 测得九仙山岩体晶洞二长花岗岩年龄为 $120 \pm 5\text{Ma}$ 。

在火山岩的形成年龄研究方面, 张增奇和刘明谓 (1996) 报道了青山群全岩 K-Ar 同位素年龄为 125~98Ma; 邱检生和王德滋 (2001) 利用 Ar-Ar 定年技术测得分岭山火山机构青山组的中偏碱性富钾火山岩和酸性流纹质火山岩的形成年龄分别为 $109.9 \pm 0.6\text{Ma}$ 和 $108.2 \pm 0.6\text{Ma}$; 凌文黎等 (2006) 测得鲁东地区青山群富钾火山岩 U-Pb 同位素年龄为底部 $106 \pm 2\text{Ma}$, 顶部 $98 \pm 1\text{Ma}$; 唐嘉锋等 (2008) 系统采集了青山群各组的火山岩样品并测得其 K-Ar 年龄大致为 118~93Ma; 匡永生等 (2012) 测得胶东青山群基性火山岩的 Ar-Ar 年龄分布范围在 122~113Ma 之间, 并认为早于酸性岩的年龄 110~98Ma; Wang 等 (2012) 测得灵山岛白色流纹岩年龄为 $125 \pm 1.4\text{Ma}$, 而周瑶琪等 (2015) 测得灵山岛该流纹岩年龄为 $119.2 \pm 0.2\text{Ma}$, 代表了青山群的开始。由以上测年资料可以看出, 不同的测年方式及不同性质和地点的样品, 所得到的火山岩年龄有较大差异。

(2) 岩浆物质来源

关于该地区早白垩世岩浆的来源, 邱检生和王德滋 (1999) 通过对七宝山火山机构杂岩体的辉石二长岩的研究, 认为岩浆起源于富集地幔的部分熔融; 郭峰等 (2002) 对比了鲁东和鲁西地区的基性岩浆岩的地球化学特征, 认为鲁东基性岩浆来源于被俯冲陆壳物质改造的富集的岩石圈地幔减压部分熔融; 闫峻等 (2007) 认为胶莱盆地青山组中性火山岩的地化性质表明其岩浆起源于深俯冲的扬子地壳, 可能为下地壳的部分熔融, 并且有少量的来自软流圈地幔物质的加入; 严莹莹和陆建军 (2009) 认为早白垩世的安山岩类, 产于活动大陆边缘拉张动力背景下, 是由富集型地幔部分熔融形成的岩浆直接喷发所致; Ling 等 (2009) 认为青山群酸性火山岩是拆沉下地壳熔融产物, 并在上升过程中经历了与地幔的相互作用; 匡永生等 (2012) 认为青山群基性火山岩为交代富集地幔部分熔融作用的产物, 而酸性火山岩为古老下地壳和中生代底侵岩浆的熔融产物。由于测试手段、采样地点和岩性的不同, 对本区岩浆的物质来源

及其形成过程的认识仍有较大分歧，还需要进一步研究。

1.2.2 火山岩浆系统演化研究

火山岩浆系统的研究工作主要包括地球物理探测和岩石学两个方面（郭文峰等，2015）。将火山喷发与深部岩浆活动看作一个统一的系统进行研究，主要是要查明其岩浆来源，岩浆上升过程中有无地壳混染、岩浆混合，以及岩浆性质是否随着时间变化而变化。如对长白山地区火山岩浆系统的研究表明其岩浆成分随着火山作用阶段的不同而呈现出系统的变化趋势，具体表现出结晶分异趋势与岩浆混合作用（魏海泉，2010）。更深层次的研究则要结合地球物理和岩石热力学模拟手段（郭文峰等，2015），探明地下岩浆房的信息以及与火山喷发的关系。以长白山地区为例，不同方法的地球物理探测工作都能探测出该区新生代火山之下存在着异常的高温低速体（Song et al., 2007; 赵大鹏等，2004; 仇根根等，2014），并可探得岩浆储库的规模、形态及所处深度，为进一步的研究工作奠定基础。

此外，通过地球化学及岩石学手段也可对岩浆起源、成分演化过程进行推测。微量元素及同位素在岩浆岩成因演化研究中发挥着巨大的作用，地壳、地幔不同来源的岩浆其地化性质差别较大，前人已经提出了多种主量、微量元素图解及同位素判别模式帮助进行源区判断，而同位素如Sr、Nd、Pb等在此判别过程中尤为重要。同时，近些年岩浆岩矿物学的发展，尤其是斜长石环带研究方面的进展，对岩浆过程的反演具有重要作用。斜长石的环带模式与其所处的地质环境和经历的地质过程（岩浆补充注入、岩浆混合、岩浆房分层、火山喷发解压及晶体重熔再生等）密切相关，岩浆房中矿物周边的成分或温压条件的改变可反映在矿物环带的不同层上（吴平霄和吴金平，1997; 陈小明等，2002; Shcherbakov et al., 2011; 张金阳等，2013）。详细的矿物学描述和地球化学数据分析可以帮助判断岩浆过程（Ginibre, 2002; 2007），其中环带矿物的不同环带上的主量、微量元素（如Fe、Mg、Ti、Sr等）可用于反映熔体组成及岩浆混合等过程。岩浆充注过程的时间往往较短（Costa et al., 2008; Druitt et al., 2012），而通过矿物环带的精细研究可以计算该岩浆过程的时间。

1.3 研究内容及技术路线

1.3.1 主要研究内容

- （1）五莲-桃林地区侵入岩及喷出岩的展布及相互关系；

(2) 岩浆岩矿物学特征镜下研究及分析;

(3) 利用岩浆岩地球化学数据, 研究岩浆来源、结晶分异、地壳混染及岩浆混合等过程, 分析其地质意义;

(4) 探究研究区火山活动规律, 并结合大地构造背景, 分析该岩浆活动的深部动力学过程。

1.3.2 研究技术路线

(1) 以五莲-桃林地区为主要研究对象, 通过对高阁庄-桃林火山机构及附近地区详细的野外地质填图, 查明该区莱阳群、青山群地层及侵入岩、变质岩的展布及相互关系。

(2) 野外查明火山岩岩性特征及岩相接触关系, 侵入岩特征及与围岩关系, 明确火山机构整体特征。

(3) 对所采集的样品进行地化测试, 分析其有无蚀变作用、地壳混染、岩浆混合等过程, 并探究不同成分的岩浆来源。

(4) 结合收集的构造资料及年代学资料, 分析火山岩浆活动规律并探究其深部动力学背景。

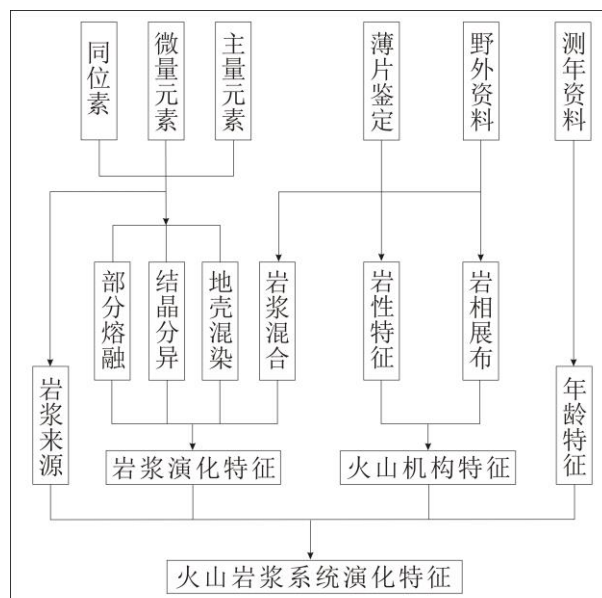


图 1-1 文章技术路线图

1.4 完成的主要工作量

根据论文的研究目的及要求, 完成该论文期间的主要工作量如下:

- (1) 野外地质考察 30 天，采集火成岩样品 78 个，野外照片 2000 余张；
- (2) 制备样品光学薄片 32 张；
- (3) 拍摄薄片的镜下照片 290 张及鉴定报告 32 份；
- (4) 样品的磨粉以及粉末的主微量元素测量分析 17 件；
- (5) 调研国内外文献 200 余篇。

第二章 区域地质背景

郯庐断裂带纵穿山东省中部，以近 NNE 方向入海，并将山东省分成了鲁东和鲁西两大地质构造分区（山东省地质矿产局，1991）。鲁东和鲁西地区晚中生代均有广泛的火山-岩浆活动，并在其沉积地层中有明显反映。

2.1 区域地层

山东东部和西部均出露有中生代-新生代火山岩，其中鲁西地区地层发育较齐全，包括太古宇-元古宇基底，古生界海相地层及中-新生界火山-沉积地层；而鲁东地区缺失古生界地层，中生界-新生界火山-沉积地层直接覆盖于太古宇-元古宇基底之上，即发育二元地层结构（山东省地质矿产局，1991）。鲁东、鲁西地区中生代火山-沉积地层的分布严格地受区域断裂带控制，其火山-沉积盆地的走向随区域构造应力的变化而发生变化，盆地走向的演化与区域构造延伸方向也相一致，这在中国东部比较普遍（陈义贤等，1997；Menzies and Xu，1998；Ren et al.，2002；翟明国等，2003）。

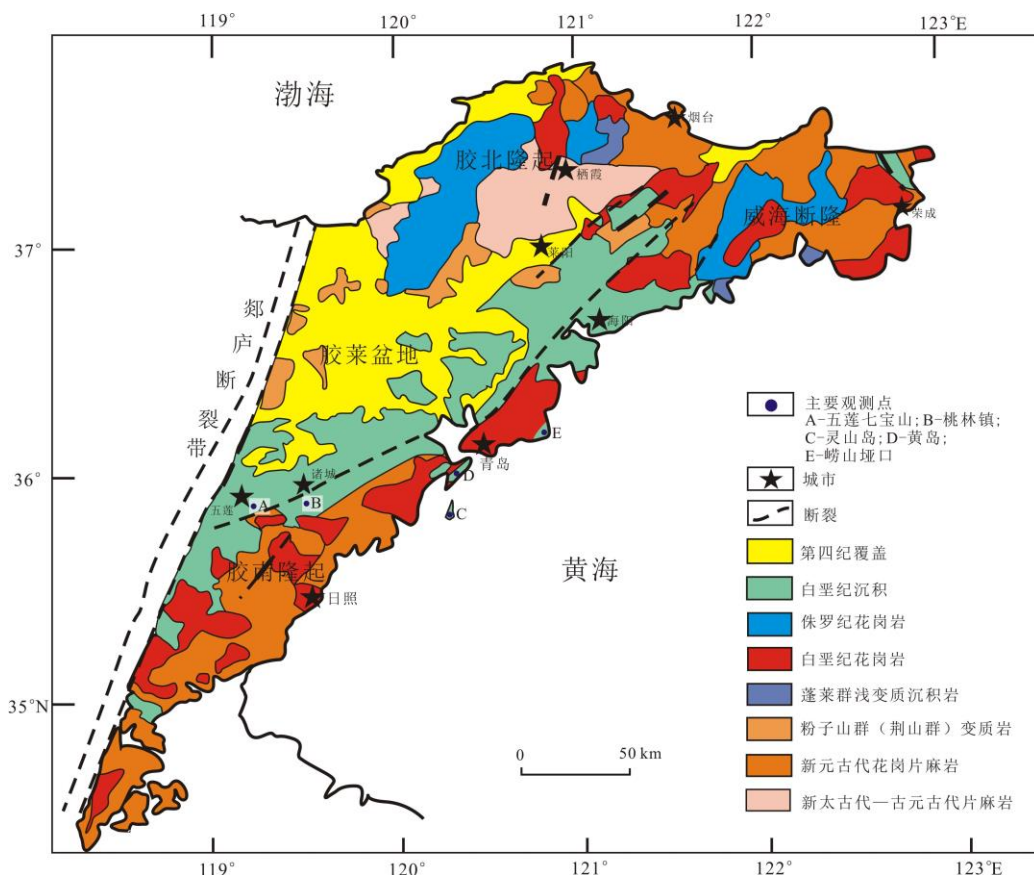


图 2-1 山东东部地质简图（据周瑶琪等，2015）

山东东部近海地区行政区划上主要包括日照、青岛、烟台和威海的近海地区以及

潍坊市诸城南部地区。本区不发育古生代沉积,中生代地层仅发育白垩系火山-沉积地层(图 2-1)。

白垩系地层由下至上可进一步分为莱阳群、青山群和王氏群,其中莱阳群(K_1l)发育河湖相沉积,在曲格庄组及法家莹组沉积地层中可见火山物质;青山群(K_1q)主要沉积了一套火山岩地层,由老及新可分为后乔组、八亩地组、石前庄组及方戈庄组,并以八亩地组沉积时期火山岩浆活动最为剧烈;即墨等地区还分布有一套与青山期沉积相当的紫红色细砂岩、粉砂岩层,归属于大盛群田家楼组;王氏群(K_2w)则为紫红色砂岩、砂砾岩为主的河流相、浅湖相沉积(张增奇和刘明谓,1996;刘明谓等,2003)。

近年来越来越多的学者对山东东部沿海苏鲁造山带地区出露的碎屑岩、火山碎屑岩、火山熔岩等沉积岩系进行了重新考察并不断得出新的认识。此前,该套沉积一直被当做归属于胶莱盆地的一套陆相沉积,并将其划入青山群(山东地质矿产局,1991;山东省第四地质矿产勘查院,2004)。张松梅等(2001)首先在青岛胶南地区的地层中识别出了海相绒枝藻植物化石;付永涛和虞子冶(2010)在崂山垭口-八仙墩剖面识别出了鲍马序列,结合砂页岩地球化学特征(吴拓宇等,2010),判定该套岩层为海相沉积。吕洪波等(2011;2012)对灵山岛该套地层进行了研究,识别出远源浊积岩,认为该套地层为侏罗纪-白垩纪的海相沉积。周瑶琪等(2015)对山东东部出露的该套地层进行了野外考察及分析,发现此套地层不同于胶莱盆地的陆相沉积,并认为该区晚中生代发育了一个海相盆地。

2.2 区域构造

山东东部苏鲁造山带处于华北、扬子陆陆碰撞的东段部分,西以郯庐断裂带为界与鲁西地块相区分(图 2-1)。胶北隆起断块北临渤海,南接胶莱盆地,西侧和东侧分别以郯庐断裂带和五莲-烟台断裂为界(凌贤长和董永胜,1997;Wallis et al.,1999);胶莱盆地东西两侧分别以五莲-烟台断裂和郯庐断裂带为界,与胶北隆起构成了 II 级构造单元胶北断块。胶南隆起和威海断隆均属于胶南-威海造山带,其西界为郯庐断裂带,南界位于嘉山-响水断裂及张八岭一带,以北以五莲-烟台断裂与胶莱盆地相接,整体呈 NNE-SSW 走向。

山东东部断裂体系主要以 NE、NNE 方向为主,五莲-荣成断裂带和牟平-即墨断裂带是区内最主要的断裂带,可能与郯庐断裂带的发育有关,一些燕山期花岗岩体也

大致沿 NE、NNE 向延伸。五莲-烟台断裂和即墨-牟平断裂将胶北地块和胶南-威海造山带分成了属性不同的两大地质块体。胶南-威海造山带基底构造线走向以 NE、NNE 向为主，断裂构造以 NE 及 NNE 为优势方向，靠近郯庐断裂带处断裂构造走向趋于 NNE 向，远离沂沭断裂带则向 NE 向偏转。

2.3 岩浆岩

山东东部地区燕山期发育了大量的岩浆侵入活动(图 2-2)，代表性岩体主要有玲珑花岗岩体、郭家岭花岗岩体、伟德山岩体、大店岩体及崂山岩体。其中胶北地块岩浆岩体以玲珑和郭家岭花岗岩体为主；胶南-威海造山带则以伟德山岩体、大店岩体及崂山岩体更具代表性，且形成时代大致有从 NW 至 SE 变新的趋势(Zhou and Lü, 2000)。鲁东地区发育了大量的基性岩脉，年龄约在 90~140Ma 之间(Liu et al., 2004; 2012)。脉体宽度在几十厘米至数米之间，其长度可达数百米至数千米(周瑶琪等, 2015)，走向以 NE-SW 向为主，可侵入到花岗岩体及围岩中(图 2-2)。

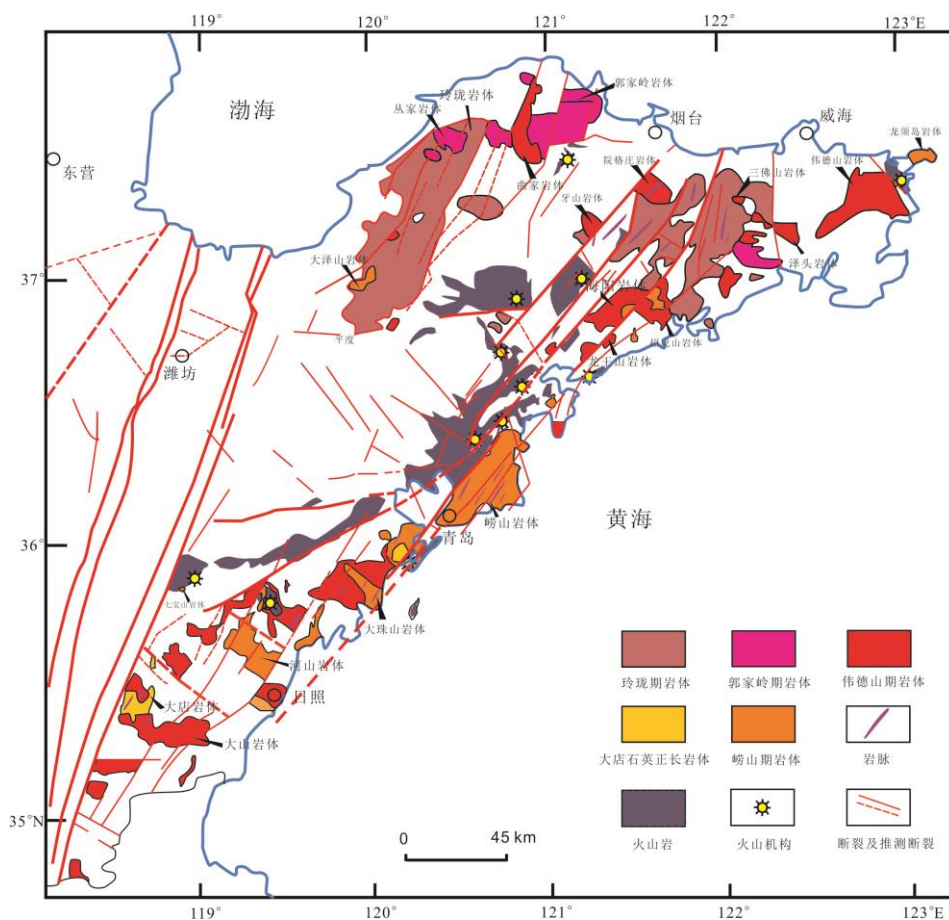


图 2-2 山东东部晚中生代火成岩分布图(据周瑶琪等, 2015)

山东省早白垩世火山活动主要发育于青山期(图 2-2)，青山群地层主要由安山岩、

流纹岩、凝灰岩、凝灰质砂岩、集块岩、火山碎屑岩夹红色泥岩组成。（山东省地质矿产局，1991）。

2.3.1 侵入岩

鲁东地区花岗岩体形成时代不同。玲珑岩体形成于晚侏罗世时期，年龄约为160~150Ma（Charles et al., 2013; Ma et al., 2013; Yang et al., 2014），岩性多为钾质花岗岩，轻稀土富集，弱正异常或负铷异常（王吉珺，2000），锶同位素 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为0.710~0.718，指示该花岗岩体为陆壳重熔型花岗岩（宋明春，2008）。

郭家岭岩体、伟德山岩体、大珠山岩体、大店岩体及崂山岩体形成于早白垩世（宋明春，2008），花岗岩体以 I-A 复合型为主，两者一般呈复合产出。其中 I 型花岗岩类主要有花岗闪长岩、二长花岗岩等，其侵位时间先于 A 型花岗岩类，后者则包括碱长花岗岩和碱性花岗岩等（王德滋等，1995）。郭家岭花岗岩主要岩性为二长闪长岩、石英二长岩、花岗闪长岩等。岩浆锆石 U-Pb 年代为130~123Ma（Wang et al., 1988; 常裕林等，2006; Yang et al., 2014）。岩石属钙碱性系列，轻稀土富集，没有铷异常（江胜国，2011），含较多幔源闪长质包体，可能为来自地壳和地幔的岩浆混合并结晶分异而成（于学峰等，2013）。伟德山花岗岩主要为闪长岩、石英二长岩、花岗闪长岩等系列侵入岩，在鲁东地区分布广泛，岩体大致呈 NE 向串珠状分布。同位素测年显示其年龄集中于127~105Ma 之间，岩石化学成分具有 I 型花岗岩特点，且由早期向晚期呈现钙碱性岩演化特征（宋明春，2008）。大店岩体于鲁东南地区分布较普遍，以正长岩、石英正长岩为主，SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 $120 \pm 4\text{Ma}$ （王世进等，2009）。崂山岩体以二长花岗岩、正长花岗岩、碱长花岗岩等为主，SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 $115 \pm 2\text{Ma}$ （Goss et al., 2010），崂山岩体主体形成于120~100Ma，处于早、晚白垩世之间（王世进等，2010），可能为下地壳古老基底岩石受热重熔形成（赵广涛，1998）。

五莲地区中生代岩浆岩分布约占该地区岩石出露面积的40%，以五莲山岩体、七宝山杂岩体、马耳山岩体、大店岩体和大珠山岩体等为主（黄洁等，2005; Huang et al., 2006）。周建波等（2003）测得五莲山岩体晶洞花岗岩、马耳山岩体不等粒二长花岗岩、七宝山辉石二长岩和大店角闪二长岩的锆石 U-Pb 年龄分别为 $116 \pm 4\text{Ma}$ 、 $115 \pm 1\text{Ma}$ 、 $126 \pm 3\text{Ma}$ 、 $123 \pm 4\text{Ma}$ 。

五莲山岩体是呈岩株状产出于胶南-威海造山带内部的一块较大的侵入体，主要

分布于五莲县南部五莲山、九仙山一带，以中粒晶洞花岗岩为代表；七宝山杂岩体主要为中基性侵入体，分布于沂沭断裂带以东的七宝山一带，岩体中心为火山口，周围为青山期火山岩；马耳山岩体呈岩基状产出于五莲东南部马耳山-墙夼附近，岩性为不等粒含角闪黑云二长花岗岩，受后期脉体切穿作用而形态不规则；大店岩体为中酸性复式侵入杂岩体，岩体由中心部位的钾长花岗岩向外围地区二长岩类过渡，主要分布于沂沭断裂带以东的大店地区（Zhou et al., 2003；黄洁等，2005；Huang et al., 2006）。大珠山复式岩体主要由中粗粒钾长花岗岩、中粒灰白色晶洞花岗岩组成，在胶南大珠山、松山子、潘家庄一带分布普遍，呈 NE 向展布（张娟，2011）。

2.3.2 喷出岩

鲁东地区晚中生代火山岩主要分布于莱阳、即墨、胶州等地，以中基性火山岩为主。不同地区的青山群火山岩虽然发育情况明显不同，但在空间上可进行对比；鲁西区火山岩仅出露八亩地组和方戈庄组，而山东东部相对出露完全（凌文黎等，2006）。青山群上、下的莱阳群和王氏群地层中均可见火山岩沉积，其中莱阳群以中基性为主，并见少量酸性火山岩，而晚白垩世王氏群史家屯组可见橄榄玄武岩零星分布。

表 2-1 山东东部白垩纪火山旋回岩石类型及年龄特征（据周瑶琪等，2015 修改）

地质时代		旋回名称	主要岩石类型	测年数据	
白 垩 纪	晚 白 垩 世	王氏 期	史家屯旋回	橄榄玄武岩	73.2±0.3 Ma
		青 山 期	方戈庄旋回	玄武粗安岩、潜粗面岩	93.3Ma
	石前庄旋回		流纹质火山碎屑岩、流纹岩、粗面岩	103.7~93.3Ma	
	八亩地旋回		玄武安山岩、安山岩、中基性火山碎屑岩	109~103Ma	
	后夼旋回		流纹质熔岩和火山碎屑岩，夹安山岩	117Ma	
	早 白 垩 世	莱 阳 期	莱阳旋回	沉火山碎屑岩、安山岩、酸性火山碎屑岩	129.7Ma、131Ma

胶莱盆地及周边地区为代表的山东东部晚中生代火山活动按喷发时间、火山岩岩性、岩相等由早到晚可以分为 6 个火山活动旋回（吴冲龙等，2009），如表 2-1 所示。青山期火山活动最为频繁，其中又以八亩地旋回火山活动最剧烈，空间分布最广。

第三章 岩相学特征及地质填图

3.1 火山机构样品特征

本次所采样品主要来自于桃林火山机构南部，样品均为岩浆岩。以下将对部分典型样品野外特征及镜下特征进行描述。

3.1.1 样品的采集及岩性

通过 2014 年 5 月、7 月，2015 年 4 月、5 月的五莲-桃林地区火山岩地质考察，采集了大量的岩浆岩样品（表 3-1），采样点大多位于桃林火山机构内。对所采样品进行详细的岩性岩相分析是进行地区地质填图的基础。

表 3-1 五莲-桃林地区岩浆岩样品采集点及岩性特征

样品编号	坐标 (N)	坐标 (E)	岩性	采样点
BS-1	35°44'43"	119°29'44"	灰绿色安山玢岩	北山村西山
BS-2	35°44'37"	119°29'50"	灰绿色安山玢岩	北山村
BS-3	35°44'35"	119°29'46"	花岗斑岩	北山村
YJP-1	35°43'38"	119°30'28"	肉红色流纹岩	于家崮子
YJP-2	35°43'44"	119°30'28"	紫红色粗安岩	于家崮子
YJP-3	35°43'41"	119°30'34"	流纹质凝灰岩	于家崮子
YJP-4	35°43'51"	119°30'50"	安山质火山碎屑岩	于家崮子
YJP-5	35°43'47"	119°30'55"	灰绿色火山碎屑岩	于家崮子
YJP-6	35°43'58"	119°31'11"	火山碎屑岩	于家崮子
LBY-2	35°43'43"	119°31'12"	砖红色英安岩	于家崮子
LBY-3	35°43'45"	119°31'12"	石英二长斑岩	于家崮子
LBY-5	35°43'48"	119°31'13"	粗面安山岩	于家崮子
YJG-1	35°43'46"	119°30'15"	肉红色流纹岩	尹家坪
YJG-2	35°43'46"	119°30'15"	闪长岩	尹家坪
YJG-3	35°43'46"	119°30'14"	玄武质安山岩	尹家坪
YJG-4	35°43'54"	119°30'22"	灰绿色/紫红色闪长玢岩	尹家坪
YJG-5	35°43'58"	119°30'28"	紫红色火山碎屑岩	尹家坪
YJG-6	35°43'59"	119°30'29"	玄武质安山岩	尹家坪
YJG-7	35°44'01"	119°29'41"	含角砾英安岩	尹家坪
MLK-1	35°45'03"	119°30'56"	流纹岩	马连口村
MLK-2	35°44'48"	119°30'41"	辉绿岩	马连口村
MLK-3	35°44'45"	119°30'30"	花岗细晶岩	马连口村
MLK-4	35°44'45"	119°30'30"	火山碎屑岩	马连口村
MLK-5	35°44'37"	119°30'51"	玄武质安山岩	马连口村
MLK-6	35°44'14"	119°32'04"	流纹岩	马连口村
MLK-7	35°44'13"	119°31'05"	玄武质安山岩	马连口村

续表 3-1

样品编号	坐标 (N)	坐标 (E)	岩性	采样点
BHT-1	35°44'09"	119°28'47"	火山碎屑岩	北回头村
BHT-2	35°44'09"	119°28'47"	安山岩	北回头村
BHT-3	35°44'19"	119°28'47"	安山岩	北回头村
BHT-4	35°44'34"	119°28'26"	硅质与铝土质泥岩层	北回头村
TYL-1	35°44'11"	112°58'26"	酸性侵入体 (风化)	桃园路边
BFZ-1	35°49'27"	119°28'07"	安山岩	白汾子沟
BFZ-2	35°49'24"	119°28'09"	火山碎屑岩	白汾子沟
BFZ-3	35°48'46"	119°27'42"	流纹岩	白汾子沟
BFZ-4	35°48'47"	119°27'43"	熔结凝灰岩	白汾子沟
BFZ-5	35°46'12"	119°25'47"	玄武质安山岩	白汾子沟
BFZ-6	35°45'11"	119°25'51"	正长岩	白汾子沟
SMG-1	35°47'39"	119°31'59"	闪长岩岩体	上马家沟
SMG-2	35°47'39"	119°31'59"	辉绿岩脉	上马家沟
SMG-3	35°47'39"	119°31'59"	闪长岩包体	上马家沟
SMG-4	35°47'19"	119°30'31"	凝灰岩	小横岭南
SMG-5	35°47'29"	119°30'34"	流纹岩	小横岭南
SMG-7	35°47'41"	119°30'28"	沉火山岩	上张家沟
SMG-8	35°47'44"	119°30'29"	闪长花岗岩	上张家沟
LJG-1	35°46'49"	119°31'33"	流纹岩	刘家沟
LJG-2	35°46'44"	119°31'33"	流纹岩	刘家沟西南 200m
LJG-3	35°46'43"	119°31'33"	火山角砾岩	刘家沟西南 230m
LJG-4	35°46'41"	119°31'38"	火山碎屑岩	小杨家沟
LJG-5	35°46'44"	119°31'44"	流纹岩	小杨家沟
AZG-1	35°46'09"	119°31'49"	辉绿岩	安子沟村
AZG-2	35°46'12"	119°31'47"	玄武质火山角砾岩	安子沟村北 100m
AZG-3	35°46'15"	119°31'46"	玄武质火山碎屑岩	安子沟村北 300m
HLZ-1	35°46'35"	119°31'27"	火山碎屑岩	合乐子村
HLZ-2	35°46'36"	119°31'21"	闪长玢岩	合乐子村
HLZ-4	35°46'38"	119°31'03"	流纹岩	合乐子村
HLZ-6	35°46'35"	119°31'04"	玄武岩	合乐子村西
HBLN-1	35°44'25"	119°26'06"	正长花岗岩	户部岭水库东南
HBLN-2	35°44'07"	119°26'23"	辉绿岩墙	户部岭水库东南
HHD-3	35°43'19"	119°32'16"	白色流纹岩	龙擢生态园西北
HHD-4	35°42'40"	119°32'24"	流纹岩	后河西村
HHD-5	35°42'06"	119°31'47"	辉绿岩	董家洼
HHD-6	35°42'06"	119°31'47"	流纹岩	董家洼
HHD-7	35°42'06"	119°31'47"	花岗闪长岩	董家洼
LHHD	35°42'06"	119°31'47"	二长岩	董家洼
DS-1	35°43'36"	119°30'53"	安山玢岩	李家沟
DS-2	35°43'48"	119°31'00"	安山玢岩	李家沟
XLJ-4	35°46'14"	119°31'45"	安山质玄武岩	安子沟村

续表 3-1

样品编号	坐标 (N)	坐标 (E)	岩性	采样点
XLJ-5	35°46'14"	119°31'45"	安山岩	安子沟村
XBG-1	35°44'57"	119°27'18"	流纹斑岩	北平村
XBG-3	35°45'18"	119°27'37"	熔结凝灰岩	北平村东北
QT-5	35°47'47"	119°31'57"	安山岩	桥头往北
QT-7	35°47'50"	119°31'57"	英安质侵入岩	桥头往北
BG-1	35°48'04"	119°31'48"	玄武岩	宾馆东
BG-5	35°48'43"	119°31'12"	火山碎屑岩	宾馆东
TL-1	35°48'40"	119°31'03"	流纹斑岩	上刘家沟村
TL-68	35°48'02"	119°30'42"	英安岩	上刘家沟村
TL-69	35°48'02"	119°30'41"	闪长玢岩	上刘家沟村
TL-70	35°47'57"	119°30'39"	英安岩	上刘家沟村

3.1.2 典型样品手标本及镜下特征

薄片镜下观察与手标本特征相结合，可以帮助判断岩性，发掘岩石的成因信息。下面将对部分典型样品的手标本和镜下特征进行描述。

BHT-1 样品采集于北回头村采石场，为火山碎屑岩，发生轻微变质作用。表面呈灰白色，碎屑颗粒以灰黑色为主，斑状，一般小于 1cm，略呈定向排列。镜下可见假流纹构造、火山岩岩屑（图 3-1a）、塑性岩屑、环带斜长石晶屑等。

BS-2 样品采集于北山村西山，为花岗闪长岩。块状构造，斑状结构，斑晶含量约为 20%，基质呈灰绿色，斑晶以斜长石为主，大小约为 0.5cm，部分黑色长板状斑晶为角闪石。镜下为斑状结构，见角闪石、黑云母及斜长石等矿物（图 3-1b），部分斜长石见明显的环带结构。

BS-3 样品发育于北山村西山，为花岗斑岩侵入体。手标本整体呈肉红色，块状构造，斑状结构，斑晶含量 60%~70%，分布不均匀，以正长石和石英为主，正长石斑晶可达 1.5cm，石英斑晶约为 0.5cm。镜下为斑状结构，基质呈显微斑状结构，斑晶主要为斜长石、石英及钾长石等，斜长石发育卡钠复合双晶，石英多被溶蚀（图 3-1c）。

样品 **YJG-1** 采集于尹家坪村西，为流纹岩。手标本呈肉红色，块状构造，斑晶较小且含量较少，钾长石含量较高。镜下可见明显的球粒结构（图 3-1d）、文象结构，石英大多被溶蚀。

样品 **YJG-2** 采集于尹家坪村北，为闪长岩。基质为灰绿色，斑状结构，块状构造，斑晶含量约为 40%~50%，以斜长石为主，含少量钾长石。镜下为斑状结构，基

质中见许多微晶斜长石杂乱排列并充填有黑色隐晶质，呈玻晶交织结构（图 3-1e），斑晶可见环带斜长石、角闪石、黑云母以及溶蚀的石英颗粒。

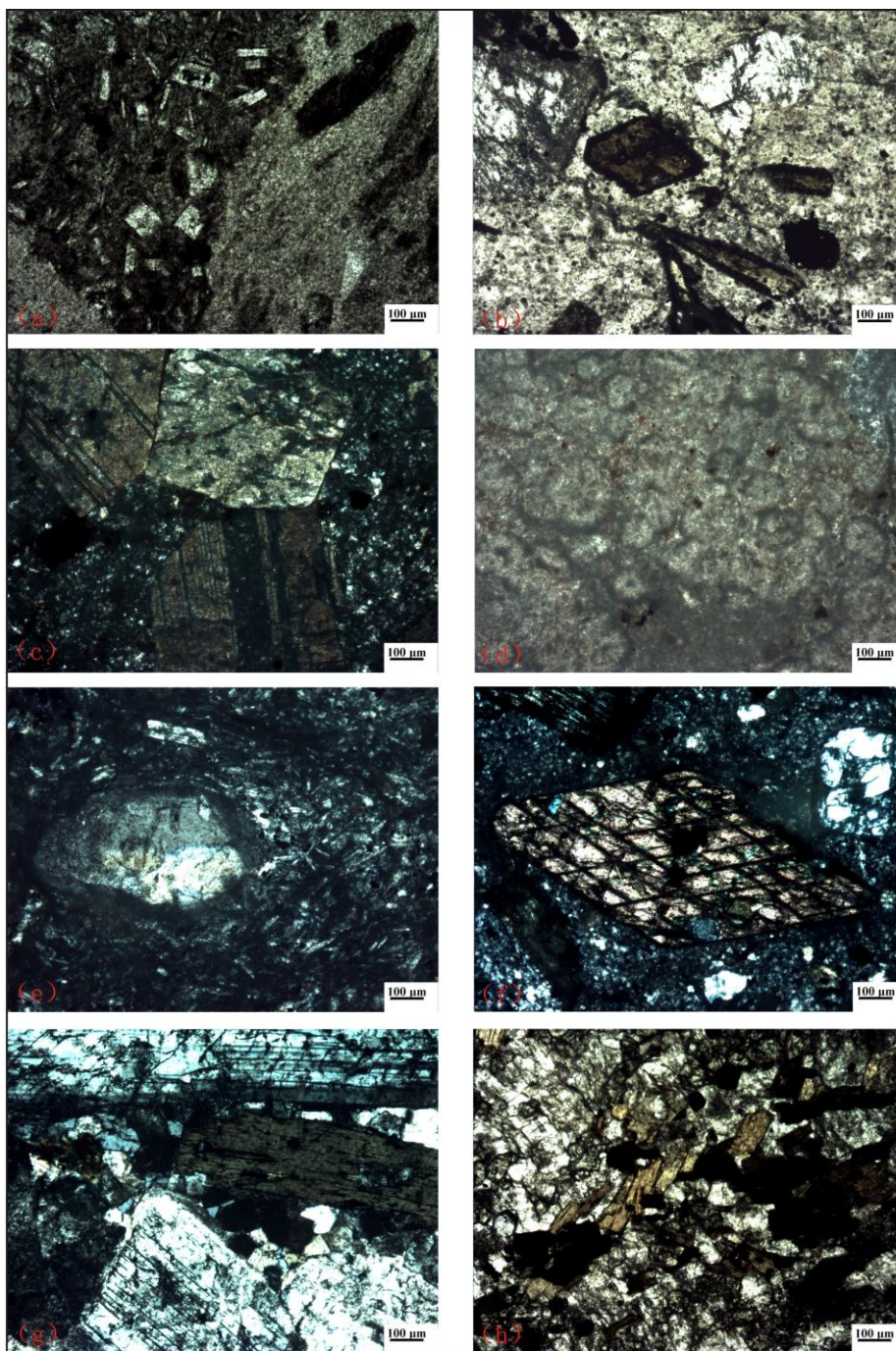


图 3-1 桃林地区典型样品镜下照片

a: 火山碎屑岩（单偏光）；b: 花岗闪长岩（单偏光）c: 花岗斑岩（正交光）；d: 流纹岩（单偏光）；e: 闪长岩（正交光）；f: 粗安质熔岩（正交光）；g: 闪长岩（正交光）；h: 闪长岩中的包体（单偏光）

样品 YJP-2 采集于于家崮子村北，为粗安质熔岩。手标本呈紫红色，块状构造，斑状结构，基质呈紫红色，斑晶以斜长石为主，含少量角闪石、黑云母。镜下为斑状

结构, 基质为显微粒状结构, 基质中可见斜长石及玻璃质; 斑晶中以斜长石为主, 环带结构明显, 含少量角闪石(图 3-1f)、黑云母; 此外, 可见明显的火山岩岩屑。

样品 SMG-1 采集于上刘家沟村, 为闪长岩岩体。手标本呈灰白色, 块状构造, 斑晶含量约为 60%~70%, 以斜长石为主。镜下为半自形粒状结构, 晶体以斜长石为主, 聚片双晶常见, 而环带结构不明显, 此外含少量黑云母(图 3-1g)。

样品 SMG-3 来自于上刘家沟村闪长岩体中的暗色包体。整体呈灰黑色, 块状构造, 暗色矿物略呈定向排列。镜下为半自形粒状结构, 晶体以黑云母、辉石、角闪石等暗色矿物为主, 部分矿物定向排列(图 3-1h)。

3.2 火山机构地质填图

3.2.1 火山机构内部特征

五莲-桃林地区火山机构出露于元古界变质岩中, 南部出露青山群火山岩及侵入岩, 而北部出露多为莱阳群地层。

(1) 北部火山机构

上马家沟剖面路线沿途经过上马家沟村—上刘家沟村—小横岭—上张家沟村, 地层出露良好, 起始坐标为 $35^{\circ}47'39''\text{N}$, $119^{\circ}31'58''\text{E}$, 终止于 $35^{\circ}47'43''\text{N}$, $119^{\circ}30'28''\text{E}$ 。剖面以莱阳群地层为主, 产状约为 $220^{\circ}\angle 40^{\circ}$; 小横岭剖面处可见流纹质凝灰岩层及沉火山岩层, 地层产状为 $160^{\circ}\angle 35^{\circ}$; 此外可见大量闪长玢岩、流纹斑岩侵入体。剖面中发育多条辉绿岩墙, 走向约为 $220^{\circ}\sim 250^{\circ}$ 。

下张家沟剖面路线起始于 $35^{\circ}48'04''\text{N}$, $119^{\circ}30'44''\text{E}$, 终止于 $35^{\circ}47'54''\text{N}$, $119^{\circ}30'28''\text{E}$, 地层仍以莱阳群上段的硅质岩与铝土质泥岩互层(图 3-2a)、粉砂岩、细砂岩、硅质岩等为主, 地层产状为 $225^{\circ}\angle 36^{\circ}$, 多处地层被流纹斑岩、英安岩及闪长玢岩等侵入体及辉绿岩墙切断。

下刘家沟路线的起始和终点坐标分别为 $35^{\circ}47'22''\text{N}$, $119^{\circ}32'03''\text{E}$ 和 $35^{\circ}46'14''\text{N}$, $119^{\circ}31'45''\text{E}$, 地层以莱阳群中细砂岩、硅质泥岩与铝土质泥岩互层为主, 且粉砂岩中可见明显的硅质条带和结核, 地层产状约为 $230^{\circ}\angle 70^{\circ}$; 中酸性侵入体较为发育。据野外擦痕等现象推断, 剖面中发育有滑脱断层, 剖面所在即为断层上升盘。且南段剖面发育厚度近 100m 的中细砂岩, 仅部分砂岩中见由粗到细的韵律变化, 其余韵律变化不明显。在 $35^{\circ}46'49''\text{N}$, $119^{\circ}31'32''\text{E}$ 处的莱阳群顶部地层中可见含砾砂岩(图 3-2b),

砾石以变质岩砾石为主，磨圆、分选均不好。莱阳群地层之上为流纹质凝灰岩，推测为青山群地层的开始。



图 3-2 桃林地区典型野外照片

a: 硅质岩与铝土质泥岩互层; b: 含砾砂岩; c: 花岗闪长岩及其中的包体; d: 流纹质凝灰岩; e: 隐爆角砾岩; f: 火山碎屑岩; g: 变质岩; h: 青灰色与灰白色粉砂岩互层

安子沟村坐标为 $35^{\circ}46'43''N$, $119^{\circ}31'32''E$, 发育安山质玄武岩、安山岩、流纹岩、安山质隐爆角砾岩的喷发序列。坐标 $35^{\circ}46'14''N$, $119^{\circ}31'45''E$ 剖面处, 可见一断层面产状为 $220^{\circ}\angle 65^{\circ}$ 的大型冲断断层, 将莱阳群地层向上逆推, 并发送动力变质

作用，地层发生绢云母化、片理化。推测发生时间为青山期后的反转期（约 90Ma）。

合乐子村路线起始坐标为 $35^{\circ}46'35''\text{N}$ ， $119^{\circ}31'27''\text{E}$ ，向西此处可见火山碎屑岩、中酸性浅成侵入岩、流纹岩，以及莱阳群砂岩。由于植被覆盖及风化作用等影响，往西莱阳群地层不易辨认，且可见走向为 90° 的气孔发育的玄武岩层。

（2）南部火山机构

后河东路线经由后河东村—后河西村—董家洼村—黄山前村—臧家庄村，以大量的岩浆岩侵入体为特征，部分地区可见莱阳群沉积。该路线起始坐标为 $35^{\circ}42'48''\text{N}$ ， $119^{\circ}33'25''\text{E}$ ，发育闪长玢岩；在 $35^{\circ}43'10''\text{N}$ ， $119^{\circ}32'00''\text{E}$ 处发现约 15m 厚的白色流纹岩，推测为青山群地层的开始，但由于植被覆盖及风化作用，难以辨别其与周围岩层的接触关系。部分地区可见青绿色和灰色粉砂岩薄互层，属于莱阳群沉积，地层产状为 $160^{\circ}\angle 25^{\circ}$ 。董家洼村露头可见大型含包体（图 3-2c）的二长岩侵入体，包体略有拉伸，且二长岩体被辉绿岩墙贯穿，其走向为 25° 。

北山村路线均为岩浆岩体，未见沉积地层，其经纬度坐标为 $35^{\circ}44'37''\text{N}$ ， $119^{\circ}29'51''\text{E}$ 。北山村西山为大片的花岗斑岩体积闪长玢岩体，斑状结构明显。坐标 $35^{\circ}44'39''\text{N}$ ， $119^{\circ}29'42''\text{E}$ 处长约 20m 的剖面中连续可见六条宽度不一的 NE-SW 走向辉绿岩墙密集发育；在周边的闪长玢岩岩体中也见多个辉绿岩墙发育，走向 $220^{\circ}\sim 260^{\circ}$ 之间。

于家崮子路线起始和终点坐标分别为 $35^{\circ}43'38''\text{N}$ ， $119^{\circ}30'27''\text{E}$ 和 $35^{\circ}43'50''\text{N}$ ， $119^{\circ}31'12''\text{E}$ 。起始点处为肉红色流纹岩以及侵入流纹岩中的安山玢岩和花岗斑岩。路线向北发育大套安山玢岩侵入体。坐标 $35^{\circ}43'41''\text{N}$ ， $119^{\circ}30'34''\text{E}$ 处见一基本直立的灰白色流纹质凝灰岩层（图 3-2d），走向 235° ，假流纹构造发育，左侧被花岗斑岩侵入，右侧发育肉红色流纹岩。坐标 $35^{\circ}43'52''\text{N}$ ， $119^{\circ}30'50''\text{E}$ 处发育约 5m 厚的安山质火山角砾岩，由于植被覆盖，其上下接触关系不明确。往东可见火山碎屑岩与流纹岩的互层，由于未见地层层面，因此测其走向约为 $220^{\circ}\sim 228^{\circ}$ 。

尹家坪路线起始和终点坐标分别为 $35^{\circ}43'46''\text{N}$ ， $119^{\circ}30'14''\text{E}$ 和 $35^{\circ}44'00''\text{N}$ ， $119^{\circ}30'23''\text{E}$ 。该路线以闪长玢岩、正长斑岩岩体为主，部分地区夹流纹岩和火山碎屑岩。坐标 $35^{\circ}43'57''\text{N}$ ， $119^{\circ}30'28''\text{E}$ 处发育灰绿色和紫红色火山碎屑岩角砾岩。在 $35^{\circ}44'08''\text{N}$ ， $119^{\circ}29'41''\text{E}$ 处发现出露不完整的含角砾英安岩，角砾由下往上逐渐减少。

李家沟路线主要观察其北部元宝山，山顶坐标为 $35^{\circ}44'00''\text{N}$ ， $119^{\circ}31'08''\text{E}$ ，是

诸城市、五莲县和黄岛区的交界。山脚往上沿路发育安山岩、安山质火山碎屑岩及安山质角砾熔岩。安山岩中斑晶较大，暗示着喷发前已结晶。山顶火山角砾岩、火山集块岩发育，并可见安山质隐爆角砾岩（图 3-2e）。岩体中侵入的辉绿岩墙走向仍为 NE-SW 走向，且被走向 NW-SE 的砖红色正长岩脉切断。

马连口路线坐标 $35^{\circ}45'02''\text{N}$ ， $119^{\circ}30'55''\text{E}$ 处可见硫磺矿，原岩为流纹岩。该路线以安山质火山岩及侵入岩为主，在坐标 $35^{\circ}44'50''\text{N}$ ， $119^{\circ}30'48''\text{E}$ 处可见紫红色火山碎屑岩，向东南方向流纹岩变多，且部分地区由于风化等呈现黑红色。流纹岩多明矾石化，形成明矾矿床。

北回头路线起始坐标为 $35^{\circ}43'45''\text{N}$ ， $119^{\circ}28'49''\text{E}$ ，发育细晶花岗岩，部分岩体发生变质作用，表面见大量定向性排列的云母。东北方向的采石场内露头出露良好，可见火山碎屑岩（图 3-2f）、闪长玢岩侵入体。西北方向主要发育闪长玢岩，岩体中间斜长石斑晶较大且密集，岩体周围斑晶小。坐标 $35^{\circ}44'34''\text{N}$ ， $119^{\circ}28'26''\text{E}$ 处见莱阳群沉积与侵入岩岩体的接触界线，莱阳群地层产状为 $120^{\circ}\angle 30^{\circ}$ 。

3.2.2 火山机构周边特征

山东头路线始于 $35^{\circ}44'40''\text{N}$ ， $119^{\circ}33'12''\text{E}$ ，起点处发育流纹岩，由于风化等原岩，上下接触关系难以辨认。在坐标 $35^{\circ}42'48''\text{N}$ ， $119^{\circ}30'28''\text{E}$ 处可见花岗岩体及侵入其中的中性浅成岩体，两者风化均较严重。路线往南发育有层理的元古代变质岩（图 3-2g），表面见大量云母。

白汾子沟路线始于 $35^{\circ}50'36''\text{N}$ ， $119^{\circ}28'11''\text{E}$ ，该经由白汾子沟村—双庙村—大刘家槎子—核桃旺，终点坐标为 $35^{\circ}55'36''\text{N}$ ， $119^{\circ}26'10''\text{E}$ 。起点处发育片麻岩，路线往南，可见中基性安山玄武岩、流纹岩，属于青山期火山喷发产物。终点核桃旺处可见酸性岩浆侵入到变质岩中，两者界线明显。

户部岭路线始于户部岭水库，终于小北沟村，该路线中大部分地区发育变质岩，产状为 $130^{\circ}\angle 46^{\circ}$ ；酸性岩浆沿断裂呈放射状侵入变质岩中。路线中多条辉绿岩强侵入酸性岩体和变质岩中，走向约为 74° 。

小北沟路线起始点为 $35^{\circ}44'25''\text{N}$ ， $119^{\circ}26'25''\text{E}$ ，发育变质岩及中性浅成侵入岩。在坐标 $35^{\circ}44'57''\text{N}$ ， $119^{\circ}27'18''\text{E}$ 处出现含硅质条带的砂岩，为莱阳群沉积，与流纹斑岩接触。往东北方向见青绿色细砂岩，下部为硅质与铝土质泥岩互层，地层产状为 $130^{\circ}\angle 50^{\circ}$ ，可能为莱阳群上部沉积。沿路线往东可见厚层灰黑色砂岩夹灰白色砂岩

及闪长玢岩侵入体，肉红色流纹斑岩侵入到闪长玢岩岩体中。终点处见厚层灰黑色砂岩，地层向上逐渐见黄绿色砂岩。

宾馆对面路线起始和终点坐标分别为 $35^{\circ}48'04''N$ ， $119^{\circ}31'48''E$ 和 $35^{\circ}48'43''N$ ， $119^{\circ}31'12''E$ 。起点处见玄武岩，沿路线向西北可见莱阳群青灰色与灰白色粉砂岩互层（图 3-2h），产状为 $223^{\circ}\angle 42^{\circ}$ 。

桥头路线从起始和终点坐标分别为 $35^{\circ}47'46''N$ ， $119^{\circ}32'03''E$ 和 $35^{\circ}48'04''N$ ， $119^{\circ}31'46''E$ 。起始坐标处可见硅质岩，并发生角闪岩化。沿路线向东北方向可见莱阳群青灰色铝土质泥岩-粉砂岩-细砂岩沉积。终点坐标处发育英安质侵入岩体、玄武质安山岩、玄武岩，以及灰绿色粉砂质泥岩，产状为 $191^{\circ}\angle 37^{\circ}$ 。

在前人地质图的基础上，结合以上野外探勘资料，对本区的地质概况进行了进一步明确，并依此修改了本区地质图（图 3-3）。

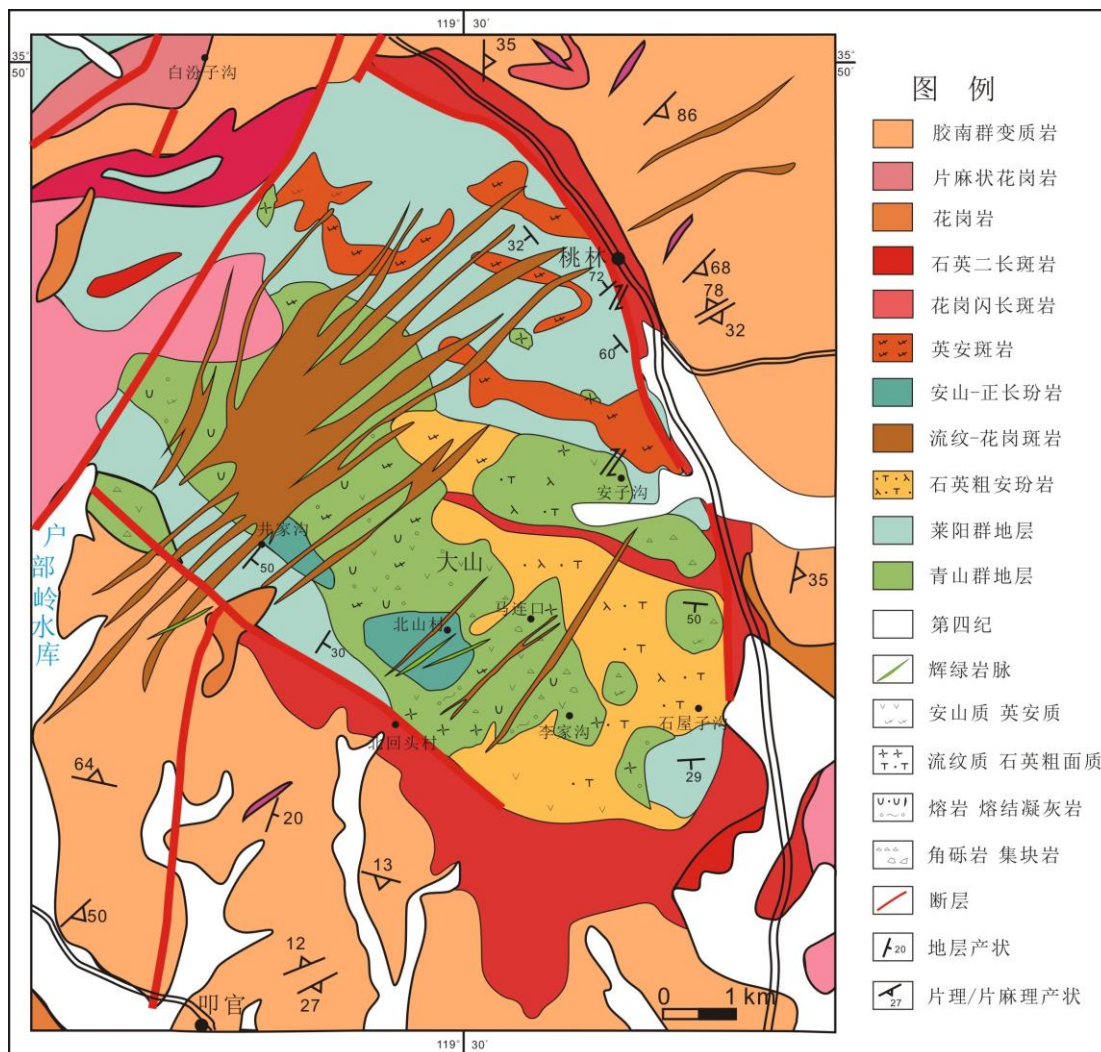


图 3-3 桃林地区火山机构地质图（据山东省地质局 1:20 万日照幅区调报告，1982 改）

3.3 山东东部其他地区野外调查

山东东部晚中生代岩浆活动频繁,发育了大量的岩浆岩。胶州市杨河镇、河套镇分布有不同喷发期次的火山岩,前人据此建立了鲁东青山群后乔组、八亩地组、石前庄组和方戈庄组,并对其成因、年代等进行了探讨(凌文黎等,2006;闫峻和陈江峰,2007; Ling et al., 2007; 2009; 严莹莹和陆建军, 2009; 付文钊等, 2014); 五莲地区(邱检生等, 2001; 周建波等, 2003; 黄洁等, 2005; Huang et al., 2006; 张娟, 2011) 莱阳、即墨地区(匡永生等, 2012b; 庞崇进, 2015)、青岛、海阳地区(匡永生等, 2012b) 的火山岩年代、成因等也有报道。

据野外实地调查,青岛灵山岛、积米崖地区也有较好的火山岩出露。灵山岛位于山东省青岛胶南市东南的黄海近海海域中,下部地层海相浊积岩,发育时期相当于莱阳期,之上发育一套厚度不均的流纹岩,其锆石 U-Pb 年龄为 $119.2 \pm 2.2\text{Ma}$, 相当于青山期的开始。该套流纹岩不整合于下部浊积岩之上,在老虎嘴处厚度较大,且见明显的流动构造,在船厂处减薄至 2m 左右。羊礁洞剖面处也发育此套流纹岩,厚度较大;流纹岩之上渐变为扇三角洲平原沉积和火山碎屑流沉积,在扇三角洲沉积中间发育三套顺岩层侵入的基性岩。上部发育七套火山碎屑流沉积,所含砾石多为变质岩砾石,砾石分选差,磨圆多次棱角状,无熔结结构,部分层位可见卷入的砂岩团块,表明搬运距离不远。镜下观察为凝灰结构,见晶屑、岩屑,其中 2/3 的成分为火山灰,故为火山灰流。之上不整合接触安山质火山集块熔岩、火山角砾熔岩,总厚度可能大于 100m。此外,沟南崖湾和背来石处也发现火山碎屑流沉积,但以羊礁洞剖面出露最全。小灵山顶可见巨厚的紫红色安山质火山集块熔岩、火山角砾熔岩,可与羊礁洞顶部的火山岩相对比。

黄岛地区炮台山剖面位于积米崖港西北 1km 处,主要发育为灰绿色、紫红色安山质火山碎屑岩层及上覆的安山质熔岩地层。火山碎屑岩含大量角砾,其中厚层沉积物碎屑较粗,分选较差,砾石次圆状到圆状;薄层火山灰沉积,含砾石较小,分选较好。石油大学周边地区如小黄山以流纹岩为主,塔山以安山玢岩为主,下伏紫红色砂岩和火山碎屑岩,均指示该地区有过强烈的火山活动。

第四章 五莲-桃林地区岩浆岩地球化学特征

本章节主要介绍了对五莲-桃林地区的样品的处理及主量、微量、稀土元素及同位素等地球化学特征，以便进一步分析其岩浆过程和源区特征。

4.1 样品处理及分析

本次研究选取了 8 件侵入岩、9 件喷出岩样进行了主量元素、微量元素及稀土元素分析。主量元素与微量元素分析由山东省第八地质矿产勘查院实验测试中心完成。

(1) 样品的制备

地球化学样品制备阶段先将其敲成小块并烘干，并依次使用高铝颚式破碎机（中碎）和 ZHM-1B 型碳化钨振动磨（细碎）将岩石碎块样品磨成 200 目粉末状。再将粉末样放入烘箱（105℃温度下）烘烤 3 小时，以除去样品表面的吸附水。然后将其放入干燥皿中保存 8 小时以上，以备后续实验之用。

(2) 全岩主量元素分析

分析前先准确称取 1g（精确至 0.0001g）左右烘干样品，称重，然后在高温马弗炉内先低温后逐渐升温至 1000℃灼烧 40 分钟，取出、干燥、冷却后称重，依此计算样品的烧失量（LOI）。

主量元素分析：将烘干好的分析试样与熔剂（无水四硼酸锂）质量比为 1:8 在 HMS-II-MZ 型智能高频熔样机上（1150℃-1125℃）熔融，制成玻璃样片。在 Axios 型 X 射线荧光光谱仪上进行测量。选择与样品矿物岩性接近的国家一级标准物质随同样品相同条件制备玻璃样品建立标准曲线，根据荧光强度计算未知样品的主元素含量。大部分主量元素的重复测定值误差小于 1%。样品分析误差一般为 2~5%。

(3) 全岩稀土元素分析

稀土元素分析使用酸溶法，步骤简要描述如下：称取 0.1g（精确至 0.0001g）试样，加入聚四氟乙烯烧杯中，加入 HNO₃、HF、H₂SO₄，并蒸发至硫酸烟冒尽，加入王水加热至溶液体积剩余约 1ml，微热 5-10min 至溶液清亮，冷却，稀释、摇匀静置。移取 1ml 上层清液于比色管，用稀硝酸稀释至刻度，摇匀。之后用 ICAP Qc 电感耦合等离子体质谱仪进行测试。利用线内标法进行质量控制，同时每隔 5 个未知样品插入一个国家一级标准物质随同测定，作为数据的外部校正依据。

(4) 全岩痕量元素分析

分析步骤(除 Zr、Hf 以外):称取试料 0.2500g 于聚四氟乙烯烧杯中,加入硝酸、氢氟酸、高氯酸,并加热;再依此加入上述药品加热,放置过夜后,再次加热至高氯酸烟冒尽。加入王水加热至溶液体积剩余 2-3ml,微热 5-10 分钟至溶液清亮,冷却;将溶液转入聚乙烯试管中稀释至刻度。摇匀,澄清。移取清液 1.00ml 于聚乙烯试管中,用稀硝酸稀释至 10.0ml,摇匀,备上机测定。痕量元素测试所用仪器为 ICAP Qc 电感耦合等离子体质谱仪。

分析步骤(Zr、Hf 部分):称取 0.1000g 样品于刚玉坩埚中,加入 Na_2O_2 混匀,置于 700 °C 的高温马弗炉中,保温熔融 15 分钟。冷却后,加入 100ml 热水使熔块溶解,放置过夜。用慢速滤纸过滤,用 2% 的氢氧化钠溶液洗涤沉淀 10 次,并用 1% 的硝酸将沉淀冲入预先加有两滴酚酞的容量瓶中,至容量瓶中溶液刚好无色时,加入 2ml 浓硝酸,用水定容,摇匀待测。然后上机测试。

4.2 岩浆岩地球化学特征

4.2.1 主量元素特征

主量元素分析结果见附表 1,对 17 个岩浆岩样品的全岩氧化物分析结果能够看出,桃林地区岩浆岩 SiO_2 含量介于 47.79~77.14% 之间,全碱($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)含量的变介于 4.54~8.45%, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 介于 0.36~2.12 之间, Al_2O_3 含量集中于 12.09~17.73% 之间。 MgO 含量介于 0.06~6.00% 之间,根据其含量可将样品分为明显的两组,YJG-1 和 YJP-3 的 MgO 含量介于 0.06~0.08% 之间,其它样品 MgO 含量介于 0.59~6.00% 之间;样品 YJG-1 和 YJP-3 的 $\text{Mg}^\#$ 介于 11.7~19.7 之间,其他样品的 $\text{Mg}^\#$ 介于 30.8~48.3 之间。 TiO_2 含量介于 0.0753~1.2167% 之间,整体含量较低,YJG-1 和 YJP-3 的 TiO_2 含量介于 0.0753~0.0759% 之间,其他样品的 TiO_2 含量介于 0.2626~1.2167% 之间。全铁(TFe_2O_3)含量的变化范围在 0.56~9.15% 之间,样品 YJG-1 和 YJP-3 的全铁含量仅为 0.56~0.60%,其他样品的全铁含量为 2.13~9.15%。

将样品的主要氧化物含量去除 CO_2 、 H_2O 及烧失量 LOI 后重新换算成 100%,并分别投入火山岩 TAS 图(LemaitreRW et al., 1986)和岩浆岩 TAS 图(Middlemost, 1994)中。如图 4-1 所示,该火山机构火山岩以安山岩、英安岩为主,也发育流纹岩及粗面安山岩。而在火山岩 TAS 图中仅用到了 Na_2O 、 K_2O 的加和,没有考虑其相对含量,且由于 $\text{Na}_2\text{O}-2<\text{K}_2\text{O}$,故可判断落入 S3 处的样品为安粗岩,与岩相学观察的

结果一致。火山岩岩石富 K_2O ，在 TAS 图上均处于 Ir 线以下，属亚碱性；样品点在 SiO_2-K_2O 关系图上大多落入高钾钙碱性系列，少数样品点处于钾玄岩系列（图 4-2）。

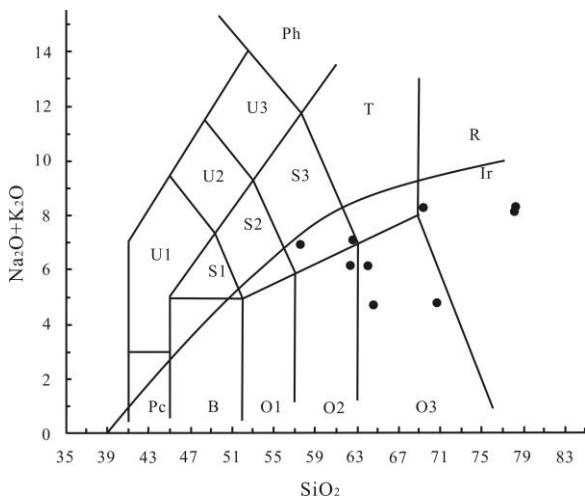


图 4-1 五莲-桃林地区火山岩 TAS 图

（图版据 LemaitreRW et al., 1986）

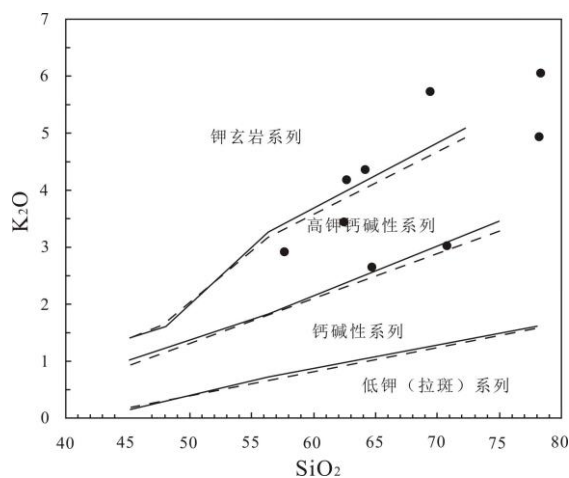


图 4-2 五莲-桃林地区火山岩 SiO_2-K_2O 图

（图版 Peccerillo and Taylor, 1976）

Pc—苦橄玄武岩；B—玄武岩；O1—玄武安山岩；O2—安山岩；O3—英安岩；R—流纹岩；S1—粗面玄武岩；S2—玄武质粗面安山岩；S3—粗面安山岩；T—粗面岩、粗面英安岩；F—副长石岩；U1—碱玄岩、碧玄岩；U2—响岩质碱玄岩；U3—碱玄质响岩；Ph—响岩；Ir—Irvine 分界线，上方为碱性，下方为亚碱性。

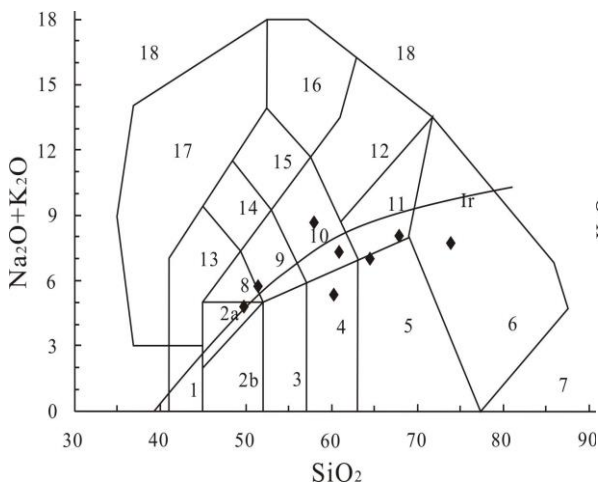


图 4-3 五莲-桃林地区侵入岩 TAS 图

（图版据 LemaitreRW et al., 1986）

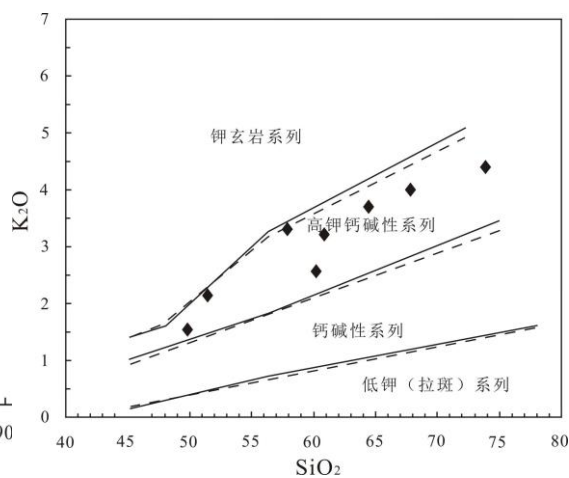


图 4-4 五莲-桃林地区侵入岩 SiO_2-K_2O 图

（图版 Peccerillo and Taylor, 1976）

Ir—Irvine 分界线，上方为碱性，下方为亚碱性。

1—橄榄辉长岩；2a—碱性辉长岩；2b—亚碱性辉长岩；3—辉长闪长岩；4—闪长岩；5—花岗闪长岩；6—花岗岩；7—石英岩；8—二长辉长岩；9—二长闪长岩；10—二长岩；11—石英二长岩；12—正长岩；13—副长石辉长岩；14—副长石二长闪长岩；15—副长石二长正长岩；16—副长正长岩；17—副长深成岩；18—霓方钠岩/磷霞岩/粗白榴岩

如图 4-3 所示，本区侵入岩从基性到酸性都有分布，以中性闪长岩类、二长岩类为主，也发育花岗岩与辉长岩。在 TAS 图中，样品多位于 Ir 线以下，为亚碱性岩类；

在 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ 关系图 (图 4-4) 上, 样品投点全部落入高钾钙碱性区域。

本地区岩浆岩具有较高的赖特碱度率, 除辉绿岩 (不适用于碱度率计算) 外, $\text{AR}=1.66\sim 4.80$ 。对 SiO_2 含量处于 $42\%\sim 70\%$ 之间的样品计算其里特曼指数 σ , 并判断岩石的碱性程度 ($\sigma < 3.3$ 的岩石为钙碱性, $\sigma > 3.3$ 的岩石为碱性岩), 研究区岩浆岩的 σ 变化范围为: $0.82\sim 5.33$, 大部分为钙碱性岩, 只有 4 个样品 $\sigma > 3.3$ 属于碱性岩。付文钊等 (2014) 对胶莱盆地南缘的青山群火山岩剖面进行了系统的取样分析, 认为火山岩的碱度由后乔组、八亩地组向右前庄组和方戈庄组逐渐增高, 方戈庄组的部分样品处于 Ir 线以上的碱性范围。

FAM 图解 (图 4-5) 可显示火山岩的钙碱性分异趋势, 研究区样品全部落入 CA 钙碱性区域, 其变异线基本垂直于 FM 边并指向 A 端。以上表明, 桃林火山机构火山岩属于钙碱性岩。

同时, 该套岩石具有较高的 Al_2O_3 含量 ($12.09\sim 17.73$), 在 A/CNK-A/NK 图解 (图 4-6) 上, 除了少数样品点落入过铝质范围内, 其余样品点均落入准铝质范围, 表明该套火山岩以准铝质火山岩为主。

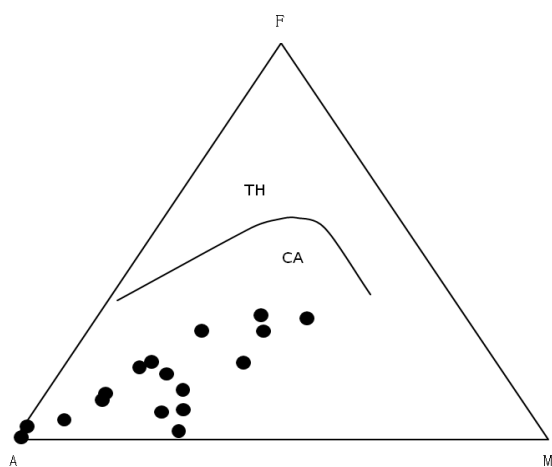


图 4-5 五莲-桃林地区岩浆岩 FAM 图
(图版据 Irvine and Baragar, 1971)

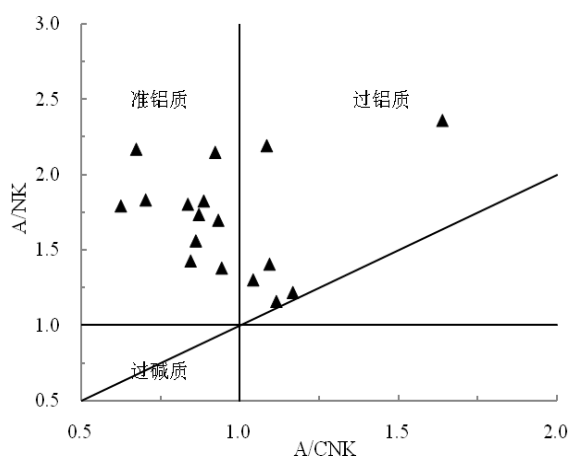


图 4-6 五莲-桃林地区岩浆岩 A/CNK-A/NK 图
(图版据 Maniar and Piccoli, 1989)

在主量元素与 SiO_2 协变图上 (图 4-7), SiO_2 与 MgO 、 CaO 、 TFe_2O_3 、 TiO_2 、 P_2O_5 呈显著的负相关, 表明成岩过程中可能存在单斜辉石、Fe-Ti 氧化物、磷灰石的分离结晶作用; SiO_2 与 Al_2O_3 呈较弱的负相关关系, 表明岩浆可能经历了较弱的斜长石分离结晶作用或岩浆源区有斜长石残余; SiO_2 与 K_2O 呈显著的正相关关系, 而与 Na_2O 相关关系不明显, Na、K 元素在结晶分异过程中都表现为类似的不相容元素特征, 也暗示了一定的斜长石的结晶分异。该图解较好的相关性则暗示了岩浆可能为同源岩

浆演化而成。

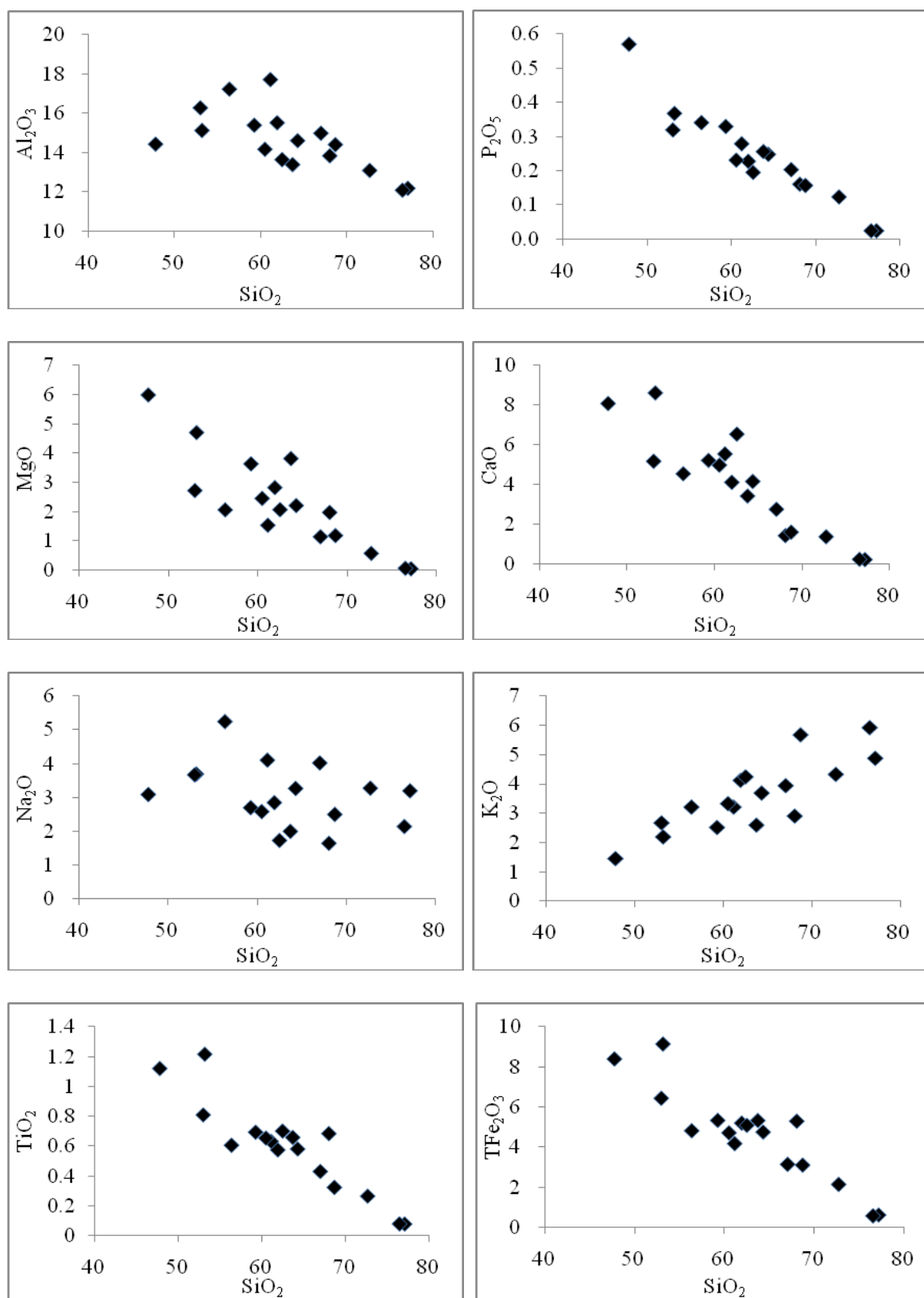


图 4-7 五莲-桃林地区火成岩主量元素与 SiO_2 协变图

4.2.2 微量元素特征

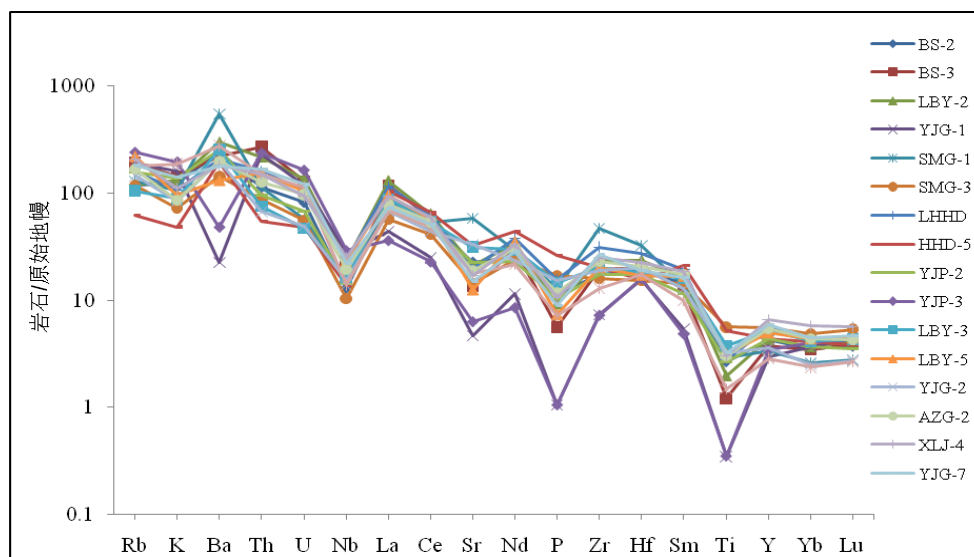


图 4-8 火成岩微量元素原始地幔标准化图（原始地幔数据参考 Sun and McDonough, 1989）

微量元素含量见附表 2，据微量元素原始地幔标准化图（图 4-8），样品曲线基本可以分为两组，大部分样品的曲线形态基本一致，Rb、K、Ba、Th、U 等大离子亲石元素（LILE）富集，Nb、P、Ti 等高场强元素（HFSE）相对亏损；酸性岩浆岩 YJG-1 和 YJP-3（两条紫色线）的微量元素蛛网图上表现出与其它样品不同的特征，其 Rb、K、Th、U 等大离子亲石元素（LILE）相对富集，Nb、Sr、P、Ti 等高场强元素（HFSE）亏损。此外，样品 SMG-1 相对于其它样品更富 Ba、Zr 和 Hf 等元素，且 Sr 出现正异常。酸性岩浆岩与其它样品相比，微量元素总量较低，标准化后曲线处于其它样品之下，其 Sr、P、Ti 更加亏损，且 Ba 含量呈现出与其它样品相反的亏损趋势。

大部分样品的微量元素原始地幔标准化曲线特征一致，类似于岛弧型火山岩的地球化学特征，与方城、蒙阴等玄武岩和中国东部中生代基性岩相似（Guo et al., 2001; Zhang et al., 2002）。具有此类特征的火山岩通常出现在俯冲带（Briqueu et al., 1984），并可能与岩石圈地幔的交代作用有关（Arndt and Christensen, 1992）。

4.2.3 稀土元素特征

研究区岩浆岩样品的稀土元素数据见附表 3，稀土元素总量 ΣREE 为 91.315~290.220 $\mu\text{g/g}$ ，其中可分为明显的两组，酸性岩浆岩 YJG-1 和 YJP-3 的 ΣREE 为 91.315~105.421 $\mu\text{g/g}$ ，其他样品的 ΣREE 为 178.850~290.220 $\mu\text{g/g}$ ，明显高于酸性岩浆岩稀土元素含量（附表 3，图 4-9）。轻稀土元素含量（ ΣLREE ）为 83.26~272.39 $\mu\text{g/g}$ ，也

分为明显的两组，酸性岩浆岩 YJG-1 和 YJP-3 的 ΣLREE 为 $83.26\sim 97.05\mu\text{g/g}$ ，其他样品的 ΣLREE 为 $161.78\sim 272.39\mu\text{g/g}$ ，明显高于酸性岩浆岩轻稀土元素含量（附表 3，图 4-9）。重稀土元素含量（ ΣHREE ）为 $8.06\sim 21.12\mu\text{g/g}$ ，酸性岩浆岩 YJG-1 和 YJP-3 的 ΣHREE 为 $8.06\sim 8.37\mu\text{g/g}$ ，其他样品 ΣHREE 为 $9.056\sim 21.12\mu\text{g/g}$ ，略高于酸性岩浆岩重稀土元素含量（附表 3）。

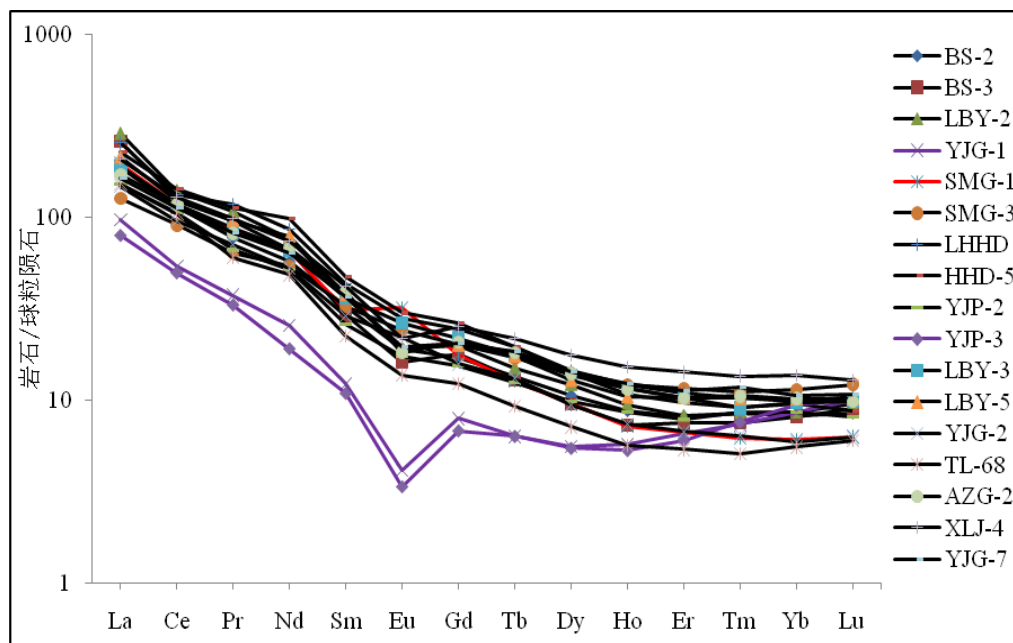


图 4-9 五莲-桃林地区火成岩稀土元素球粒陨石标准化图（球粒陨石数据参考 Sun and McDonough, 1989）

稀土元素的球粒陨石标准化图中（图 4-9），整个稀土配分模式为右倾型，即 LREE 富集，HREE 亏损， LREE/HREE 为 $9.48\sim 19.33$ ， $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 $9.01\sim 35.27$ ，且 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 为 $4.00\sim 9.10$ ， $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 为 $0.74\sim 2.97$ ，轻稀土分馏相对明显，重稀土分馏不太显著。酸性岩浆岩 YJG-1 和 YJP-3 的稀土元素标准化曲线近似两端高，中间低，呈近似右倾的海鸥型。

大部分样品的稀土元素球粒陨石标准化后的特征一致， LREE/HREE 较大，重稀土分馏不明显。大部分样品 δEu 处于 $0.61\sim 0.98$ 之间，样品呈现弱的负 Eu 异常；样品 YJG-1 和 YJP-3 的 δEu 值分别为 0.41 和 0.38 ，表现为显著的负异常；而样品 SMG-1 的 δEu 值为 1.30 ，表现为正 Eu 异常。

4.2.4 同位素特征

前人对五莲地区及鲁东其他地区的岩浆岩同位素进行了相关测试及分析，所测数

据基本位于低 $\epsilon \text{Nd}(t)$ 值和相对较高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值区域 (图 4-10)。

闫峻等 (2007) 测得鲁东青山群中性岩浆岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 0.70698~0.70874, $\epsilon \text{Nd}(t)$ 值为 -16.44~-13.78, 与鲁西方城组玄武岩相比, Nd 同位素组分相似, 而 Sr 值略小。庞崇进 (2015) 测得莱阳地区青山群安山岩和即墨英安岩都具有相对低的 $\epsilon \text{Nd}(t)$ 值和相对高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值, 其中前者 $\epsilon \text{Nd}(t)$ 值为 -16.6~-17.6, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值为 0.7087~0.7110, 而即墨英安岩的 $\epsilon \text{Nd}(t)$ 值和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值分别为 -16.7~-17.2 和 0.70839~0.70843。在 $\epsilon \text{Nd}(t)$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 相关图解中, 两地区的样品均处于 EM2 地幔域 (高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, 低 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$) 内。即墨部分安山、英安岩样品位于 EM2 区域内, 而部分样品落入了 EM1 和 EM2 之间的区域。

匡永生等 (2012) 测得海阳、胶州、即墨等地的青山群基性岩浆岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值和 $\epsilon \text{Nd}(t)$ 值分别为 0.7058~0.7095 和 -16.8~-7.8。郭峰等 (2002) 则认为鲁东地区晚中生代基性火成岩的 Sr-Nd 同位素具有 EM1+EM2 的特征, 可能来源于富集岩石圈地幔部分熔融。

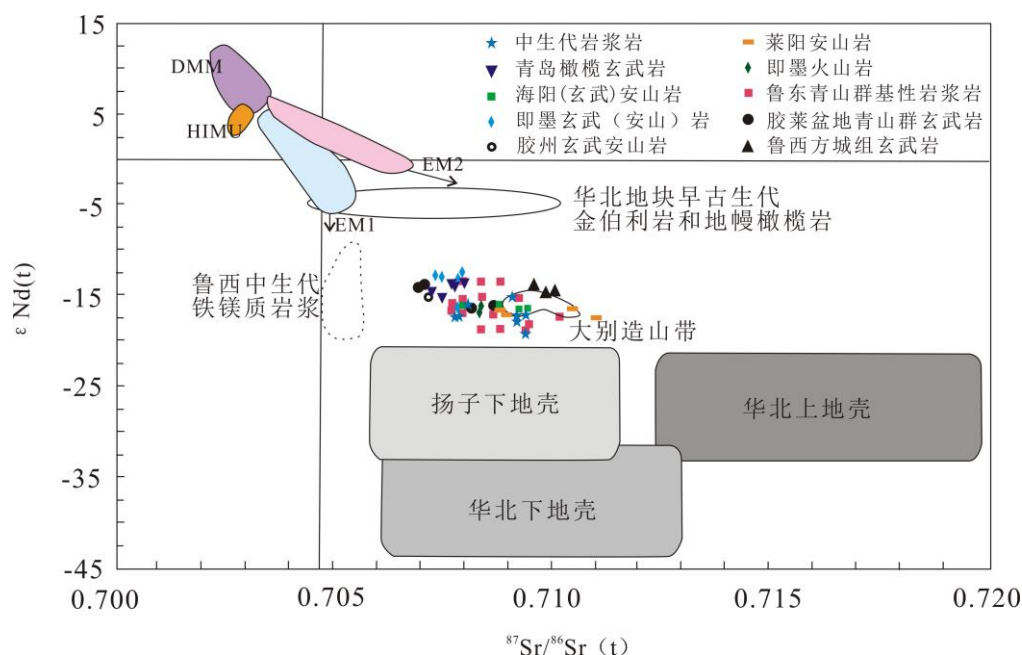


图4-10 鲁东地区早白垩世岩浆岩 $\epsilon \text{Nd}(t)$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 图解

数据中生代岩浆岩来自黄洁等 (2005), 莱阳安山岩和即墨火山岩来自庞崇进 (2015), 青岛橄榄玄武岩、海阳(玄武)安山岩、即墨玄武(安山)岩和胶州玄武安山岩数据来自匡永生等 (2012), 鲁东青山群基性岩浆岩数据来自郭峰等 (2002), 胶莱盆地青山群玄武岩数据来自闫峻等 (2007), 鲁西方城组玄武岩数据来自Zhang et al. (2002), 扬子下地壳、华北上地壳和华北下地壳数据来自Jahn et al. (1999), 地幔端元组分数据来自Zindler and Hart (1986)

黄洁等（2005）计算得到五莲地区中生代岩浆岩初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 0.7075~0.7091, $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值为 -19.2~-15.3, 且大部分岩浆锆石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值与地幔锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 的值相一致。Ling 等（2009）测得胶州地区铁镁质岩的 Sr、Nd 同位素组分呈负相关, 其 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 为 -14.0~-17.5, 初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 为 0.7078~0.7084; 胶州地区长英质岩有分布较宽但总体呈正相关的 Sr-Nd 同位素组分, 初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 为 0.7033~0.7095, $\epsilon\text{Nd}(t)$ 为 -14.1~-24.0。

华北东部中生代中基性岩浆的演化大致由早期富集岩石圈地幔 ($\epsilon\text{Nd}(t)$ 均为负值) (Xu, 2001; Xu et al., 2004a, 2004b; Zhang et al., 2002; Chen et al., 2004; Yang et al., 2004) 向晚期软流圈地幔 ($\epsilon\text{Nd}(t)$ 大多为正值) (Xu, 2001; 闫峻等, 2003; Zhang et al., 2003; Shao et al., 2005) 转变, 这一趋势与华北岩石圈减薄过程相对应, 可能暗示着地幔熔融方式的改变 (Xu, 2001; 徐义刚, 2006; 徐义刚等, 2009)。早白垩纪岩浆岩中无亏损同位素组成 (图 4-10), 暗示着此时岩石圈仍然较厚 (> 100 km) (徐义刚等, 2009)。

第五章 五莲-桃林地区岩浆过程及来源

本章主要根据测得的主量、微量元素数据以及本区域的相关的同位素数据判断岩浆源区以及岩浆在形成后经历的结晶分异、地壳混染及岩浆混合等过程，进而把握岩浆从形成至成岩过程中演化规律及成因联系。

5.1 岩浆过程

岩浆在形成后可能经历了岩浆演化、岩浆混合、围岩对岩浆的混染直至成岩后的风化蚀变等过程，在探讨岩浆来源之前，需要对岩浆是否经历过这些过程进行辨别。

5.1.1 蚀变作用

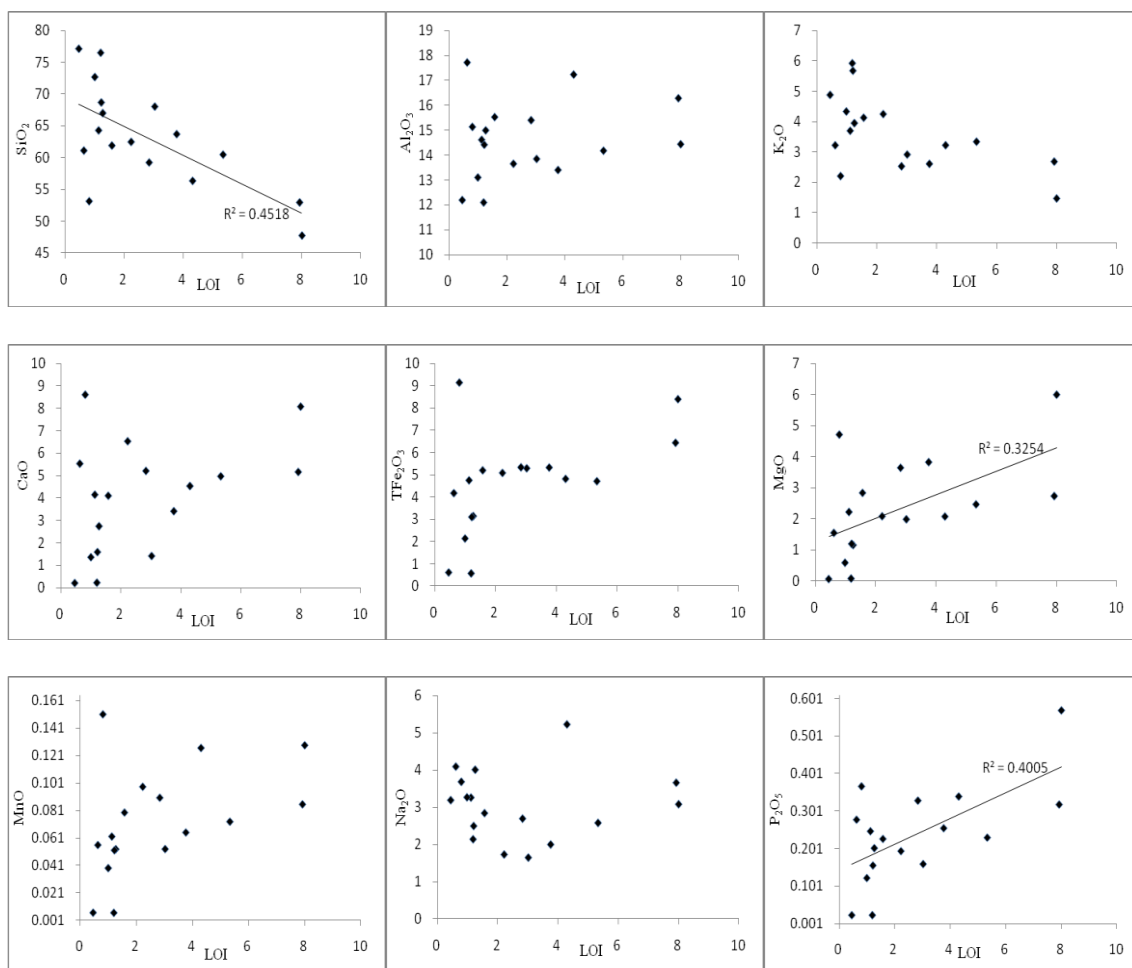


图 5-1 研究区样品 LOI 与主量元素关系图

研究区样品的烧失量 (LOI) 在 0.45%~8.00% 之间，其中酸性岩浆岩的烧失量较低，且手表本及镜下观察俱显示样品较为新鲜，而碱性辉长岩 (LOI=8.00%)、粗

面安山岩（LOI=7.92%）、安山岩（LOI=5.33%）、二长岩（LOI=4.30%）的烧失量较高，说明这些样品具有相对较高的蚀变程度。其他样品的烧失量相对较低，LOI 均 <4%，蚀变程度较小。

LOI 与 SiO₂ 显示较为明显的负相关关系，R²=0.4518（图 5-1），说明在蚀变过程中样品的 SiO₂ 含量有所降低；P₂O₅ 和 MgO 可见稍明显的正相关关系，可能在蚀变过程中也发生了活动；其他元素与 LOI 没有形成相关关系，表明这些元素在蚀变过程中受影响程度较低。

微量元素中锆元素（Zr）活动性较弱，尤其体现在蚀变过程和低级变质过程中，因此可以通过作 Zr 元素与其他微量元素的协变关系图来反映其他元素的活动性（Polat et al., 2002; Wang et al., 2008）。如图 5-2 所示，本区火山岩样品的 REE（La、Ce、Nd、Eu、Sm、Gd、Lu、Yb）、HFSE（Hf）与 Zr 之间显示了较为明显的相关性，表明这些元素在蚀变过程是活动性较弱或是不活动的（如 Wang et al., 2008）。

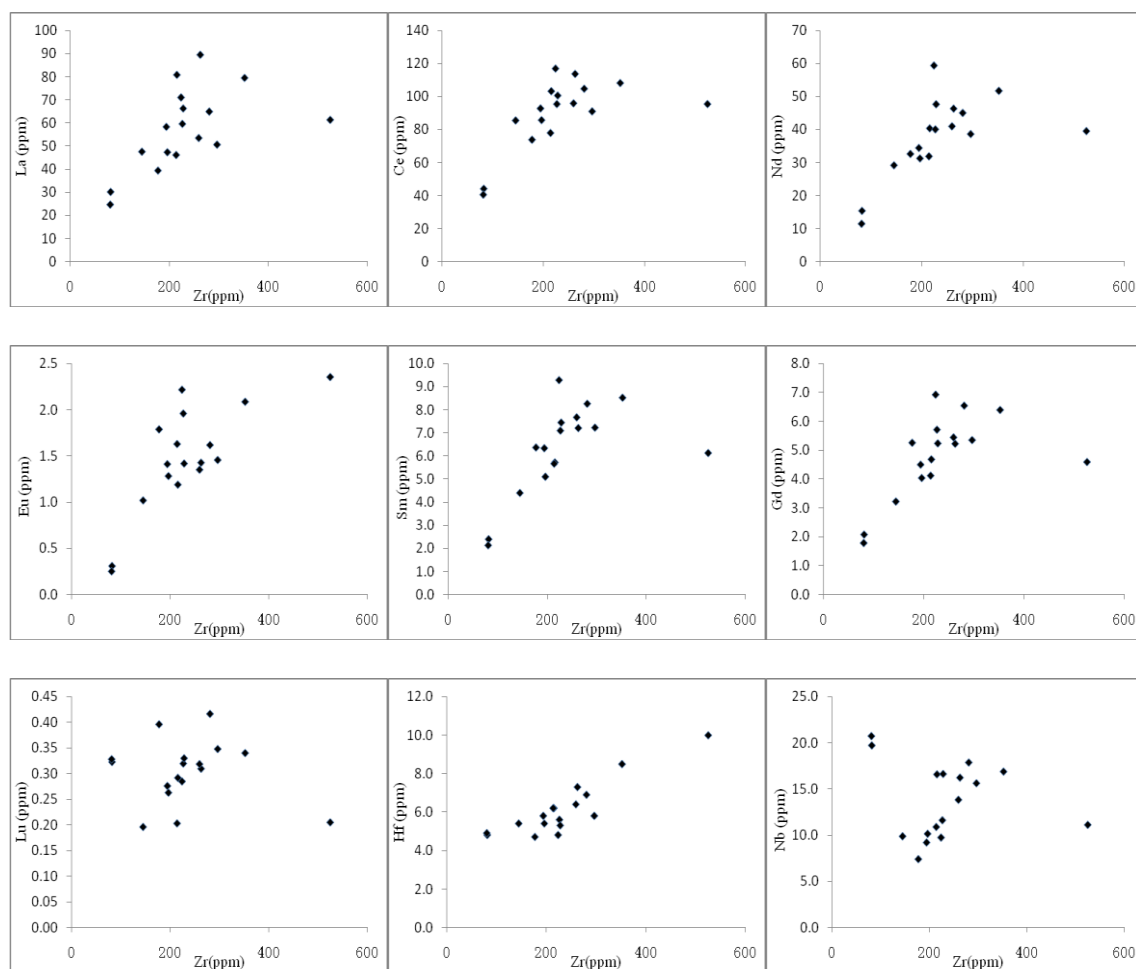
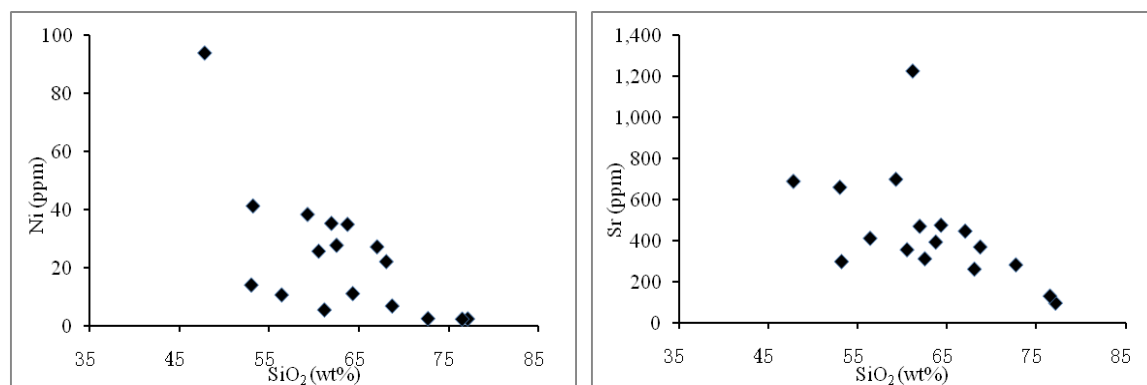
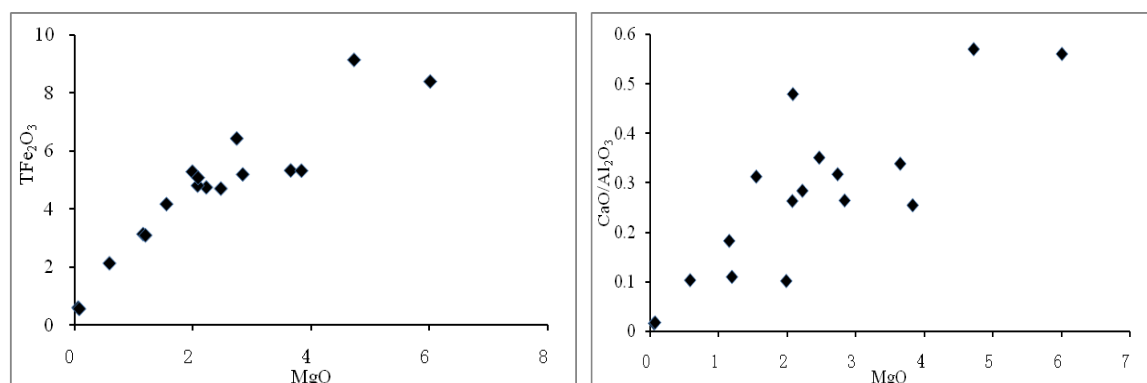


图 5-2 研究区样品 Zr 元素与微量元素之间相关关系

5.1.2 分离结晶

除了样品 HHD-5, 本区火山岩普遍具有高的 SiO_2 (≥ 50 wt%), 低的 MgO (< 8 wt%), Cr (≤ 105 ppm) 和 Ni (≤ 45 ppm) (附表 1、附表 2), 表明岩浆可能经历了分离结晶作用。尽管此类变化特征也可以由地幔的部分熔融所造成, 但所测样品中 MgO 、 Ni 和 Cr 含量的亏损暗示着他们不与地幔橄榄岩相平衡 (如 Frey et al., 1978; Wang et al., 2014), 因此更可能为分离结晶作用的结果。

图 5-3 研究区样品 SiO_2 与 Ni 、 Cr 、 Sr 含量关系图图 5-4 研究区样品 MgO 与 TFe_2O_3 、 $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量关系图

样品的 MgO 、 CaO 、 Ni 、 Cr 含量随着 SiO_2 含量的升高而降低 (图 4-7、图 5-3), 表明母岩浆经历了橄榄石和单斜辉石的分离结晶作用; 再者, MgO 与 TFe_2O_3 、 $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量呈正相关关系 (图 5-4), 也暗示着橄榄石和单斜辉石的分离结晶作用。样品的 TiO_2 、 TFe_2O_3 、 P_2O_5 含量随着 SiO_2 含量的增加而降低 (图 4-7) 表明存在 Ti-Fe 氧化物和磷灰石的结晶分异作用。 SiO_2 与 Al_2O_3 呈较弱的负相关关系, Sr 、 Ba 含量随着 SiO_2 含量的增加而降低 (图 5-3), 以及 Sr 的负异常 (图 4-8) 表明岩浆过程中有斜长石结晶分异作用。 SiO_2 与 K_2O 呈显著的正相关关系, 而与 Na_2O 相关关系不明显, Na 、 K 元素在结晶分异过程中都表现为类似的不相容元素特征, 暗示了一定的

斜长石的结晶分异作用。大部分样品都具有轻微的 Eu 负异常（图 4-9）也说明有大量斜长石产生。因此，本区岩浆岩可能经历了橄榄石、单斜辉石、Ti-Fe 氧化物、磷灰石及斜长石的结晶分异作用。

在 La-La/Yb 及 La-La/Sm 图解（图 5-5）中也显示研究区岩浆岩存在部分熔融和岩浆结晶分异作用，部分样品的混合或混染趋势也较为明显。

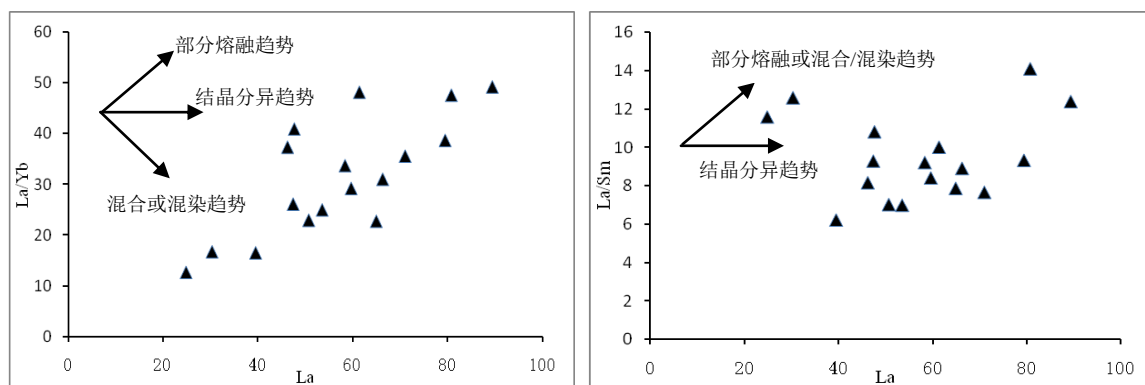


图 5-5 研究区样品 La-La/Yb 与 La-La/Sm 关系图

5.1.3 地壳混染

地壳内部或地幔来源的岩浆在经过较厚的地壳向上运移过程中，可能会受到地壳物质的混染，且因混染程度不一而使得岩浆成分变得更为复杂。通常可以根据地球化学特征探讨某些岩浆成分特征是幔源岩浆的自身性质，抑或是地壳混染所致，再或是二者的叠加，但判断地壳混染及其程度往往难度较大（Barling et al., 1994）。

研究区的岩浆岩普遍不含幔源捕虏体或捕虏晶，可能代表了岩浆上升速度较慢，在上升过程中存在与地壳物质相互作用的可能性（Glazaer and Farmer, 1992）。大陆地壳通常以 Nb 的负异常为特征，暗示地壳物质参与了岩浆过程。Nb、Ti 负异常也被解释为与俯冲作用有关的火山岩的特征（Condie, 2001）。在原始地幔标准化蛛网图（图 4-8）上，样品中 Nb、Ta 和 Ti 等高场强元素具有明显的负异常，表明岩浆演化过程中有地壳物质的加入（Yang et al., 2005a）或是来源于下地壳，并与扬子板块俯冲有关（付文钊等，2014）。Th/Ta 比值也较高，其范围为 3.49~20.00，也暗示着地壳混染作用。

中、上地壳具有较高的负 Eu 异常，Rb、Th、U 等元素强烈富集而 Sr 相对亏损（Taylor and McLennan, 1985），SMG-1 相对富集 Ba，Rb/Ba 比值（0.02）极低，稀土元素配分图显示具有 Eu 正异常，且在微量元素蛛网图中显示 Sr 的相对富集，故该

二长岩岩体经受中上地壳混染的可能性较小。其他样品具有较为明显负 Eu 异常，且原始地幔标准化蛛网图（图 4-8）显示 Rb、Th、U 相对富集，且 Sr 具有相对亏损的特征，表明其受地壳混染或来自于中上地壳。

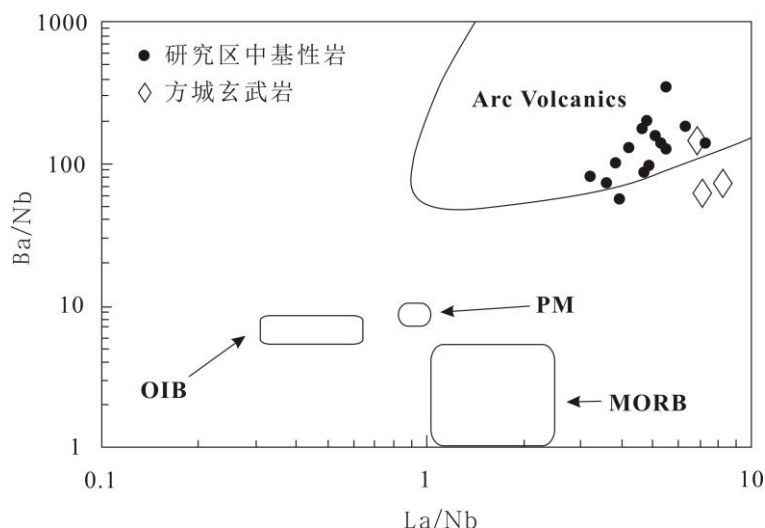


图 5-6 研究区样品 Ba/Nb-La/Nb 判别图

方城玄武岩数据来自于 Zhang et al. (2002); 洋岛玄武岩 (OIB)、洋中脊玄武岩 (MORB)、原始地幔 (PM) 和岛弧火山岩 (Arc Volcanics) 数据来自于 Jahn et al. (1999)

中基性岩浆岩的 La/Nb 比值为 3.24~7.27, Ba/Nb 比值为 55.61~342.62, 与方城玄武岩的特征接近 (图 5-6)。通常认为岛弧岩浆受地壳混染而具有较高的 La/Nb 和 Ba/Nb 比值, 也说明本区岩浆在上升、储存过程中发生过地壳混染。

酸性岩浆岩 YJG-1 和 YJP-3 的 K_2O/TiO_2 较高, 分别为 64.77 和 77.97, 花岗岩 BS-3 和 TL-68 的 K_2O/TiO_2 值分别为 16.47 和 17.64, 也高于中基性岩类; YJG-1 和 YJP-3 的 K_2O/P_2O_5 的比值分别高达 212.69 和 258.16, 表明可能为地壳来源的物质, BS-3 和 TL-68 的 K_2O/P_2O_5 比值也高于中基性岩, 分别为 35.47 和 36.44。中基性岩的 K_2O/TiO_2 和 K_2O/P_2O_5 分别 <10 和 <22, 比值变化相对较小, 表明地壳物质的混染作用较小。酸性岩 YJG-1 和 YJP-3 的 La/Nb 比值分别为 1.20 和 1.53, 小于中国东部大陆地壳平均值 (1.7, Gao et al., 1998), 而其他样品的 La/Nb 比值 (3.24~7.27) 明显高于中国东部大陆地壳的平均值; Nb/U (4.12~11.80) 低于华北大陆下地壳平均值 20 (Gao et al., 1998)。上述特征不能单纯的用地壳混染进行解释, 可能一定程度上代表了岩浆源区的性质。用 Nb-Ta-La/Yb 关系图 (图 5-7) 进一步检验, 各数据点之间存在一定的负相关性 ($R^2=0.4828$), 也表明岩浆在上升侵位过程中经历过一定的地壳混染 (Munker, 1998)。

Ling 等（2009）测得胶州安山岩显示 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}-\text{MgO}$ 呈负相关， $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}-\text{MgO}$ 呈正相关，可能指示了地壳混染的影响，然而胶州安山岩有相对低初始 Nd 和高 Sr 同位素比值，因此不能用地壳混染进行合理地解释。

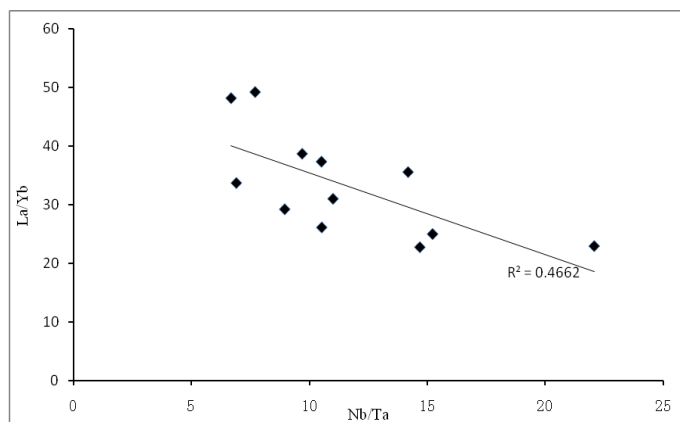


图 5-7 研究区样品 La/Yb- Nb/Ta 关系图

以上特征反映了酸性岩浆岩和中基性岩浆岩形成过程中的地壳物质参与程度不一，酸性岩浆岩更接近地壳性质，暗示可能起源于地壳的熔融；而中基性岩浆在上升过程中则可能经历了不同程度的地壳混染。

5.1.4 岩浆混合

混合岩浆通常指的是 2 种或 2 种以上不同成分的岩浆以不同比例混合所形成的岩浆。岩浆混合的相遇机制主要有多种，包括新生的岩浆周期性地注入岩浆房并与岩浆房中的原有岩浆混合、岩浆房内部应不同熔体层对流而发生混合、岩浆上升过程中发生于火山通道内的与相邻岩浆层之间的混合以及形成于深部的岩浆上升进入不同成分的浅部岩浆房发生的混合（路凤香和桑隆康，2002）。

岩浆混合作用发生在不同密度差和温度差的岩浆中。熔点性质相近的研究可能发生均匀混合而熔点性质差别较大的岩浆更倾向于发生不均匀混合。此外，岩浆的混合也是导致岩浆房不稳定并引起火山喷发的原因之一。

研究区的野外及镜下研究中发现多种岩浆混合的证据，以中性岩浆岩居多。花岗闪长质岩浆的 SiO_2 含量高于玄武质岩浆，而温度低于玄武质岩浆，由于发生混合作用的岩浆端元不同的热状态会影响其发生混合的方式和规模，熔点相差较大的岩浆以不均匀混合为主，因此玄武质岩浆注入花岗闪长质岩浆中时往往形成骤冷淬碎的岩块，两者仅依赖扩散作用进行成分交换，其元素扩散速度慢，扩散影响的范围小，只能在高熔点的岩浆固结前达到数米的距离。而熔点相近的岩浆可能会发生大规模的均

匀混合。上述理论与野外现象相一致（图 5-8）：不同安山质岩浆之间或粗面质与安山质岩浆之间可观察到明显的不同颜色、成分条带以及岩浆包体等现象。



图 5-8 岩浆混合特征野外照片

(a) 花岗闪长质岩浆与玄武质岩浆混合；(b) 粗安质岩浆与玄武安山质岩浆混合；(c) 不同安山质岩浆混合；(d) 不同安山质岩浆混合

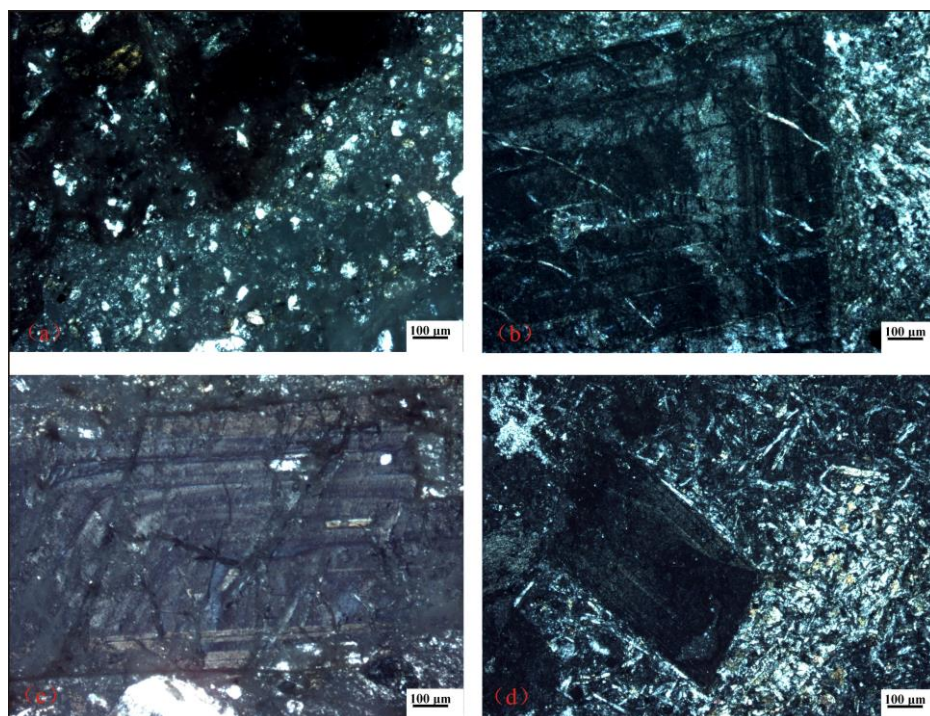


图 5-9 岩浆混合特征镜下照片

(a) 紫红色与灰绿色基质混合；(b) 安山岩中斜长石环带；(c) 火山碎屑岩中斜长石环带；(d) 辉绿岩中的环带

镜下观察中也可见基质混合现象(图 5-9a 左上角基质为紫红色, 右下角呈灰绿色), 不平衡矿物结构和矿物组合如辉石、黑云母、斜长石等矿物环带(图 5-9b、c、d) 及溶蚀边结构等也代表着岩浆混合作用。其中以斜长石的成分环带最为常见, 暗色环带可能暗示着基性岩浆对岩浆房的充注或是岩浆上升喷发过程中的岩浆混合。

上述包体、混合条带及矿物环带等岩浆混合特征主要出现在中性岩浆岩体中, 因此暗示着岩浆混合作用在中性岩浆形成过程中可能更为重要。

5.2 岩浆起源

酸性岩浆和中基性岩浆可能来自不同的岩浆源区, 这与前人(张娟, 2011; 匡永生等, 2012b) 认识相同。

5.2.1 中基性岩浆起源

一种可能的推测是原位基性下地壳的部分熔融可以产生类似地化特征的中基性岩浆。然而, 华北下地壳的 $\epsilon \text{Nd}(t)$ 值为 $-32 \sim 44$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$ 比值范围在 $0.706 \sim 0.713$ 之间(图 4-10), 本区岩浆岩的 $\epsilon \text{Nd}(t)$ 约为 $-14 \sim -20$ 之间, 单纯的华北下地壳部分熔融不能达到此要求。当有来自软流圈的亏损地幔的加入时, 闫峻等(2007) 估算在理论上可以产生类似的同位素组成所需的玄武质熔体混合量约在 40% 以上, 但会使其 Nb/U 和 Ce/Pb 比值分别上升到 20 和 13 以上。Nb/U 受岩浆过程作用较小而与源区性质有关, 结晶分异作用基本不会改变 Nb/U 和 Ce/Pb 比值, 本研究中测得 Nb/U 比值为 $5.69 \sim 11.80$ (图 5-10), 明显低于洋岛玄武岩(OIB) 和洋中脊玄武岩(MORB) Nb/U 值 (47 ± 7)(Hofmann et al., 1986), 且中国东部大陆地壳 Nb/U 比值为 9.6, 大部分样品低于该值, 单一的地壳混染或地壳熔融也很难解释其特征。本区样品的 Ce/Pb 比值为 $2.34 \sim 7.23$, 同样远小于软流圈物质的 Ce/Pb 比值(25)(Hofmann, 1988)。因此, 下地壳部分熔融以及下地壳熔融物质与软流圈地幔物质的混合都不符合本区岩浆岩的成因模式。

中基性岩类样品的 MgO 含量(1.16%~6.00%) 低于原生岩浆参考值(MgO=10%~12%), $\text{Mg}^\#$ (30~45) 也低于原生岩浆参考值 ($\text{Mg}^\#=68 \sim 75$)(Frey et al., 1978), 表明母岩浆不是原始地幔岩浆, 而是其经历了橄榄石、辉石等镁铁矿物结晶分异作用。根据 $\text{SI} = \text{MgO} * 100 / (\text{MgO} + \text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 计算其固结指数为 $9.53 \sim 32.56$, SI 与 SiO_2 含量呈负相关关系, SI 远小于 40, 也说明母岩浆可能是由幔源岩浆分异而

成（邱家骧和林景仟，1991）。而样品的 MgO 、 CaO 、 TiO_2 、 TFe_2O_3 、 P_2O_5 等含量随着 SiO_2 含量的升高而降低（图 4-7），也暗示了良好的分异结晶趋势。

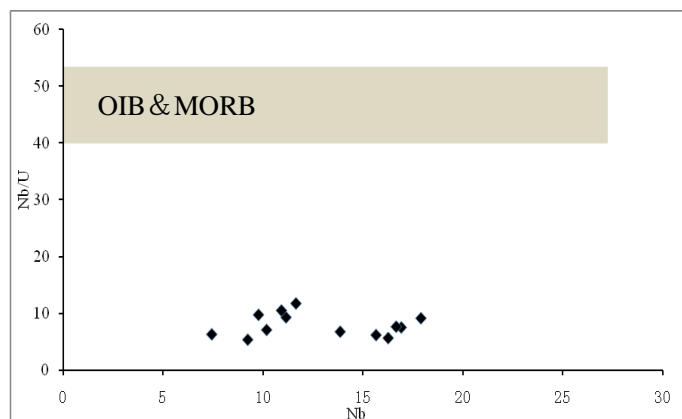


图 5-10 研究区样品 Nb/U 与 Nb 关系图

中基性岩的 Nb/La 比值、Ti/Gd/1000 值随 MgO 减少而基本不变（图 5-11），说明 Nb、Ti 的负异常是岩浆的原始特征，经历了地壳混染。

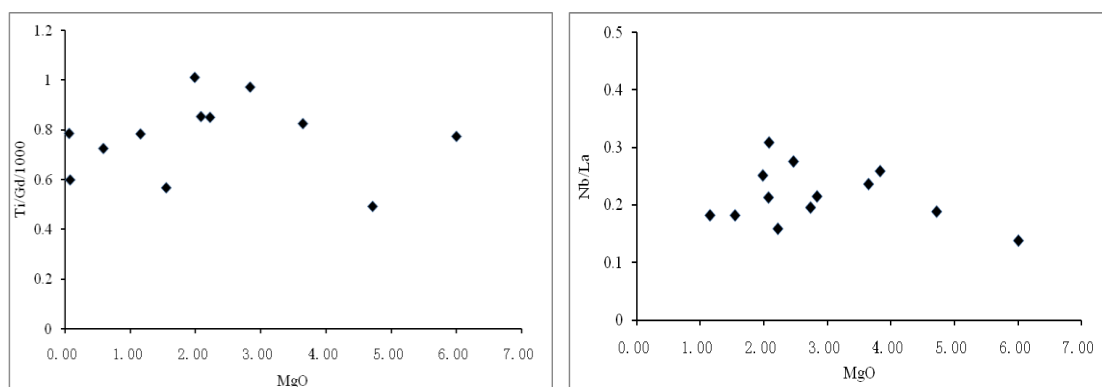


图 5-11 研究区样品 MgO 与 Nb/La、Ti/Gd/1000 关系图

强不相容元素的比值（LILE/HFSE、LREE/HFSE）在一定规模的部分熔融过程及岩浆有限程度的低压分离结晶过程中性质稳定，且基本不受海水蚀变和后期蚀变等过程的影响（李曙光，1994），可以藉此示踪其源区。

研究区 YJG-7 (Nb/Ta 值高达 22.08) 除和酸性岩外，其他样品的 Nb/Ta 值 6.68~15.23，变化范围较大，且部分样品明显高于大陆地壳（12~13；Barth et al., 2000）和苏鲁造山带典型壳源花岗岩（11.2~13.6；Yang et al., 2005a），小于原始地幔（14.0~22.5，平均值 17.5 ± 2 ），单纯的地壳原因的部分熔融难以解释其形成，源区有幔源物质参与，可能为地幔源区受俯冲板块派生的富水流体交代或地壳混染所致。

原始地幔和 MORB 的 Nb/La 比值 >1.0 ，大陆地壳 Nb/La 平均值为 $0.7 \pm$ (Zhao and Zhou, 1997)，研究区中基性岩浆岩的 Nb/La = 0.14~0.31，远小于 1；Th/Nb 比值较

高，为 0.35~1.30；Th/Ta 比值也较高，其范围为 3.49~20.00，高于原始地幔 Th/Ta 比值（2.2），较好的反映了源区受俯冲流体交代作用的影响（Elliott et al., 1997）。中基性岩的 Ba/Nb 比值变化幅度大，其范围为 55.61~342.62，而 Ce/Nb 比值范围为 5.81~11.96，变化幅度较小，也可反映源区特征与流体交代作用趋势相近。

Thompson and Morrison(1988)研究表明，软流圈来源的玄武岩 $La/Nb < 1.5$ ， $La/Ta < 22$ ，而岩石圈地幔来源的玄武岩则与之相反。本研究区中基性岩具有高的 La/Nb （3.24~7.27）、 La/Ta （36.80~103.18）、 Ba/Nb （55.61~342.62）比值，说明成岩物质主要来自岩石圈地幔。来自软流圈的玄武质岩浆相对高 Ti（如 OIB 的 TiO_2 平均为 2.86%），而来自岩石圈地幔的玄武质岩浆相对低 Ti（Ewart et al., 1998）。尽管地幔橄榄岩熔融程度不同可以导致玄武岩的 TiO_2 含量有所差别，研究区中基性的低的 TiO_2 含量说明其主要来自岩石圈地幔。

本研究区样品普遍具有 LREE 和 LILE 富集，HFSE 亏损的地球化学特征，也反映了地幔源区曾经历了与俯冲流体或熔体相关的富集交代事件。岩浆岩样品均具较平坦的 HREE 分布模式，且部分样品 LREE/HREE 较高，暗示了岩浆源区可能有石榴子石存在（Miller et al., 1999）， $(Sm/Yb)_N (< 5.16)$ 和 $FeO/MnO (< 50)$ 值较低，说明即使存在石榴子石，其含量也极低。富集亲石元素 Ba、Rb、Th、U，LILE/LREE 比值高，表现出富集地幔的特征。

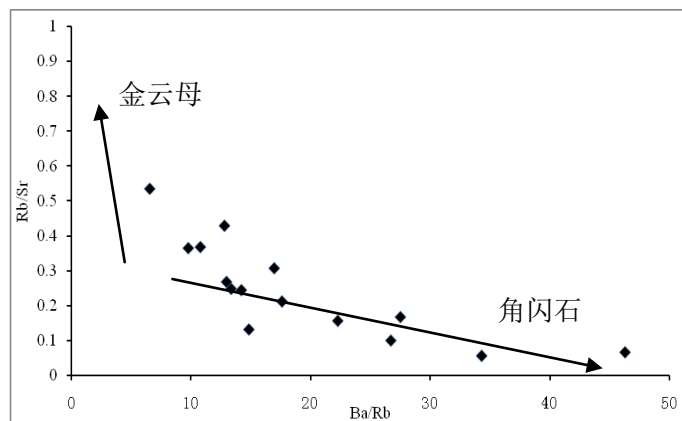


图 5-12 研究区样品 Ba/Rb-Rb/Sr 协变图

Rb、Sr、Ba 和 Nb 在角闪石中的相容性较大，而 Ba、K 在金云母中的相容性更大（Adam et al., 1993）。因此，由角闪石分解所形成的熔体具有较高的 Ba 含量和 Ba/Rb、Nb/Th 比值，而与金云母相平衡的熔体则具有较高的 Rb/Sr 和较低 Ba/Rb 值（LaTourette et al., 1995）。研究区中基性样品的 Rb/Sr（0.05~0.53）比值较低且变化较小，略高于原始地幔 Rb/Sr 比值（0.03，Sun and McDonough, 1989），Ba/Rb 比值

(6.57~46.3)变化较大且高于原始地幔 Ba/Rb 比值 (11, Sun and McDonough, 1989) (图 5-12)。说明中基性岩应主要源于含角闪石的橄榄岩部分熔融。另外,相对于脉状金云母或角闪石相橄榄岩,弥散状金云母或角闪石相橄榄岩更加富集 Ba (Ionov et al., 1997; Schmidt et al., 1999),因此研究区中基性岩强烈的 Ba 富集特征可能是源区地幔存在弥散状角闪石的缘故。岩浆岩中较高的 Al_2O_3 含量暗示地幔源区可能含有富 Al 的单斜辉石或角闪石,然而较低的 CaO 含量和低的 CaO/ Al_2O_3 值 (0.10~0.57) 排除了源区有大量单斜辉石的可能。因此研究区中基性岩浆可能起源于含角闪石的岩石圈地幔。

Nb 与 Ta、Zr 与 Hf 之间地球化学行为相似,其 Nb/Ta、Zr/Hf 比值在岩浆过程中较稳定 (Jochum et al., 1989),球粒陨石的 Nb/Ta 比值和 Zr/Hf 比值分别为 19.9 ± 0.6 、 34.3 ± 0.3 。然而金红石的存在可以导致熔体中出现高于球粒陨石的 Nb/Ta 比值,而低镁角闪石的存在可使熔体中出现低 Nb/Ta 值和高 Zr/Hf 值 (Pfander et al., 2007)。本区中基性岩 Nb/Ta 比值 (3.45~15.22, 除 YJG-7 为 22.08) 低于球粒陨石, Zr/Hf 比值 (26.85~52.47) 高于球粒陨石,因此可判断中基性岩浆源区中有低镁角闪石存在。Nb 在角闪石中相容性较大 (Pearce and Norry, 1979),因此本区岩石中明显的 Nb 负异常,也暗示了岩浆形成时源区有角闪石残留。综上所述,该套岩石的地幔源区存在弥散状的低 Mg 角闪石。

前人测得山东东部早白垩世岩浆岩的 $\epsilon \text{Nd}(t)$ 均为负值 (图 4-10),表明来源主要来源于富集岩石圈地幔。在岩浆岩 $\epsilon \text{Nd}(t)$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$ 图中,样品点主要落入 EM1 和 EM2 型地幔域,也代表了受俯冲流体改造的岩石圈地幔来源。

庞崇进 (2005) 认为对莱阳安山岩同位素研究表明,其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$ 初始值高于即墨地区中基性和酸性火山岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$ 值,而 $\epsilon \text{Nd}(t)$ 值与酸性火山岩相似,明显低于即墨中基性火山岩 $\epsilon \text{Nd}(t)$ 值,与两端元混合模型的解释不符。结合其主量元素的协变关系图及相关微量元素特征,可判断中性岩为结晶分异而非岩浆混合的产物。再结合本研究发现的闪长岩体中的岩浆混合的野外和镜下特征,认为不同岩浆房中经历的岩浆过程不同,岩浆混合仅发生在部分地区的岩浆房中。

因此,中基性岩浆来源于受俯冲流体交代作用影响的含弥散状低 Mg 角闪石的岩石圈地幔,而后经历了结晶分异作用和地壳混染,部分地区的岩浆上升过程中发生了岩浆混合作用。

5.2.2 酸性岩浆起源

酸性岩浆可根据其地化性质分为两类，一类以样品 YJG-1 和 YJP-3 为代表，主量元素如 CaO、MgO、MnO、TiO₂、TFe₂O₃、P₂O₅ 等的含量明显小于其它样品的相应主量元素含量（附表 1）；SiO₂ 含量明显高于其他样品含量。微量元素（如 Ni、Nb、Sr、Zr、Hf、Gd 等）含量也与其它样品区别为明显的两类（图 4-8、附表 2）；其稀土元素配分曲线处于其它样品的配分曲线之下（图 4-9），且 YJG-1 和 YJP-3 的 REE 总量低于其他样品的 REE 总量，均表明该酸性岩浆岩不是中基性岩浆结晶分异的结果。

另一类以 BS-3 和 TL-68 为代表，其 SiO₂ 含量分别为 72.70%和 68.71%，主量元素、微量元素及稀土元素特征均区别于样品 YJG-1 和 YJP-3，而与其它中基性岩类的值相似或呈过渡关系（附表 1、附表 2）。

表 5-1 研究区酸性岩浆岩的微量元素比值及与大陆流纹岩的比较

项目	高 Sr 酸性火山岩（本文）	低 Sr 酸性火山岩（本文）	中国大兴安岭高 Sr 流纹岩	中国大兴安岭低 Sr 流纹岩	巴西南部帕拉那流纹岩	印度德干流纹岩	韩国庆尚盆地流纹岩	东非肯尼亚裂谷流纹岩
Rb/Ba	0.06-0.08 (0.07)	0.46-0.76 (0.61)	0.07-0.42 (0.23)	2.34-8.60 (5.47)	0.17-0.34 (0.25)	0.07-0.19 (0.13)	0.10-0.23 (0.17)	4.66-692 (226)
Rb/Sr	0.31-0.43 (0.37)	1.15-1.22 (1.19)	0.12-2.58 (1.35)	6.67-16.4 (11.5)	0.69-2.46 (1.57)	0.02-2.64 (1.30)	0.47-1.23 (0.85)	23.3-692 (210)
Ba/Sr	5.22-5.50 (5.36)	1.60-2.53 (2.07)	0.89-12.1 (6.48)	1.17-4.13 (2.65)	3.22-8.28 (5.75)	2.60-18.0 (10.3)	3.00-7.96 (5.48)	0.39-3.13 (1.76)
Zr/Ba	0.08-0.14 (0.11)	0.24-0.52 (0.38)	0.05-0.44 (0.24)	1.78-6.54 (4.16)	0.41-0.54 (0.48)	0.34-1.12 (0.73)	0.10-0.26 (0.19)	17-2573 (751)
δEu	0.68-0.79 (0.74)	0.38-0.41 (0.40)	0.44-0.74 (0.59)	0.09-0.24 (0.16)			0.57-0.70 (0.64)	0.04-0.06 (0.05)
Ba	(1752.0)	(247.3)	(826)	(45.3)	(768)	(1132)	(860)	(6.0)
Sr	(328.24)	(115.74)	(232)	(16.9)	(164)	(145)	(171)	(2.8)
P	(605.93)	(100.05)	(341)	(100)	(1333)		(516)	(55.6)
Ti	(1752.3)	(453.4)	(2024)	(919)	(6322)		(1245)	(1451)
Co	(5.01)	(1.00)	(2.55)	(0.7)	(15.4)		(101)	(0.27)
Th	(17.92)	(19.95)	(11.4)	(22.6)	(13.9)	(24.4)	(9.00)	(66.00)

括号内数值为平均值，微量元素单位为 μg/g。中国大兴安岭数据来自林强等，（2003）；巴西南部帕拉那流纹岩数据来自 Garland et al.,（1995）和 Harris and Milner,（1997）；印度德干流纹岩数据来自 Lightfoot et al.,（1987）；韩国庆尚盆地流纹岩数据来自 Won et al.,（1991）；东非肯尼亚裂谷流纹岩数据来自 Black et al.,（1997）；Macdonald et al.,（1987）

样品 YJG-1 和 YJP-3 以高 SiO_2 含量, 明显亏损 Ba、Sr、P、Ti、Co 和 Eu, 富集 Rb、Th 等为特征, 而样品 BS-3 和 TL-68 的 SiO_2 含量略低于 YJG-1 和 YJP-3, 但 MgO 、 TFe_2O_3 、 TiO_2 、 P_2O_5 和 CaO 的含量远高于 YJG-1 和 YJP-3, 且其 Ba、Sr、P、Co 等微量元素相对富集, Eu 负异常不显著。通过与中国大兴安岭地区火山岩、巴西帕拉那、印度德干、韩国庆尚盆地流纹岩和东非肯尼亚裂谷流纹岩特征的对比(表 5-1), 可将本区 YJG-1 和 YJP-3 样品称为低 Sr 酸性岩, 而以样品 BS-3 和 TL-68 为代表的酸性岩称为高 Sr 酸性岩。

高 Sr 酸性岩与钙碱性系列的中基性岩之间的主量元素、微量元素的相关性特征(图 4-7 和图 5-4) 暗示该酸性岩浆为中基性岩浆分离结晶而来, 且在分离结晶过程中经历了不同矿物的分离。值得注意的是高 Sr 酸性岩样品 TL-68 的 Sr/Y 比值为 28.5, 大于 20, 且在 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}-\text{Yb}_{\text{N}}$ 图中位于埃达克岩区域, 可能为下地壳基性岩石部分熔融的产物。

低 Sr 酸性岩虽然在主量元素协变图上(图 4-7) 具有分离结晶的趋势, 但其主量、微量元素特征、稀土元素配分特征(图 4-9) 以及有关各元素的相关图解等都表明该酸性岩浆不可能来源于中基性岩浆的结晶分异。

低 Sr 酸性岩 YJG-1 和 YJP-3 的 Nb/Ta 值分别为 12.35 和 12.30, 与大陆地壳值(12.3) 相当, 而小于原始地幔比值(14.0~22.5, 平均值 17.5 ± 2) (Zhao and Zhou, 1997), 暗示其岩浆来源为地壳熔融。

大陆地壳通常以 Nb 负异常为特征, 指示地壳物质对岩浆过程的参与, 岩浆岩的原始地幔和 MORB 的 Nb/La 比值 > 1.0 , 大陆地壳 Nb/La 平均值为 $0.7 \pm$, 且结晶分异作用不会导致 Nb/La 比值降低(Nb 比 La 更不相容) (Zhao and Zhou, 1997), 本区低 Sr 酸性岩 YJG-1 的 Nb/La 值为 0.65, YJP-3 的 Nb/La 值为 0.84, 均表明其岩浆来源于地壳熔融。

根据微量元素蛛网图(图 4-8) 及稀土元素配分模式(图 4-9), Rb、K、Th、U 等大离子亲石元素(LILE) 相对富集, Nb、Sr、P、Ti 等高场强元素(HFSE) 亏损, 轻稀土(LREE) 富集而重稀土(HREE) 亏损的右倾趋势, 也可判断岩浆来自于地壳。

酸性岩浆岩 YJG-1 和 YJP-3 的微量元素 Ba 相对于 Th、Rb 具有明显的亏损特征, 与高成熟度的陆壳特征相似(马昌前等, 2004), 暗示着原岩可能来源于地壳。研究区低 Sr 酸性岩浆岩的 Rb/Nb 比(6.10~7.39) 明显高于大陆壳的 Rb/Nb 比(2.2~4.7), 表明受陆壳物质的影响使其 Rb 含量增加(Sylvester, 1989)。

酸性花岗岩一般可分为 S 型、I 型和 A 型。S 型花岗岩以壳源沉积物为原岩部分熔融并分类结晶而来；I 型是未受风化的岩浆岩熔融而来，为准铝质钙碱性岩；A 型花岗岩则通常是产于裂谷带和非造山期大陆板块内部的碱性花岗岩。在 $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})-10000\text{Ga}/\text{Al}$ 和 $\text{Zr}-10000\text{Ga}/\text{Al}$ 判别图（图 5-13）上，该区酸性岩浆岩点落入 I 型或 S 型花岗岩区域，进一步通过 $\text{Ce}-\text{SiO}_2$ 和 TiO_2-Zr 判别图（图 5-14）判断酸性岩浆岩为 I 型花岗岩。而黄洁等（2005）认为五莲花岗岩 $\epsilon \text{Nd}(t)$ 值为 $-19.2 \sim -15.3$ ，锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值与典型地幔锆石值相似，其源岩可能为未经受强烈热液蚀变的新元古代花岗岩脱水熔融而成。

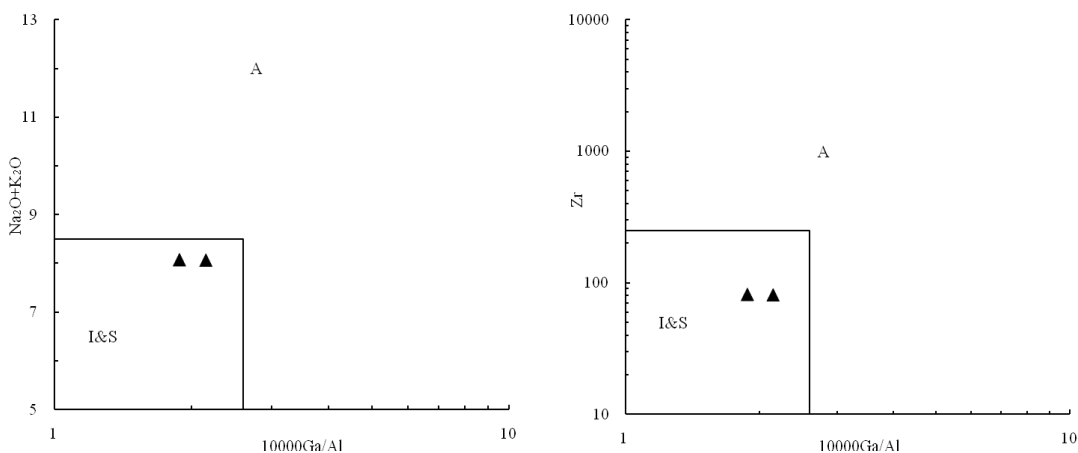


图 5-13 研究区样品 $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})-10000\text{Ga}/\text{Al}$ 和 $\text{Zr}-10000\text{Ga}/\text{Al}$ 判别图（据 Whalen et al., 1987）

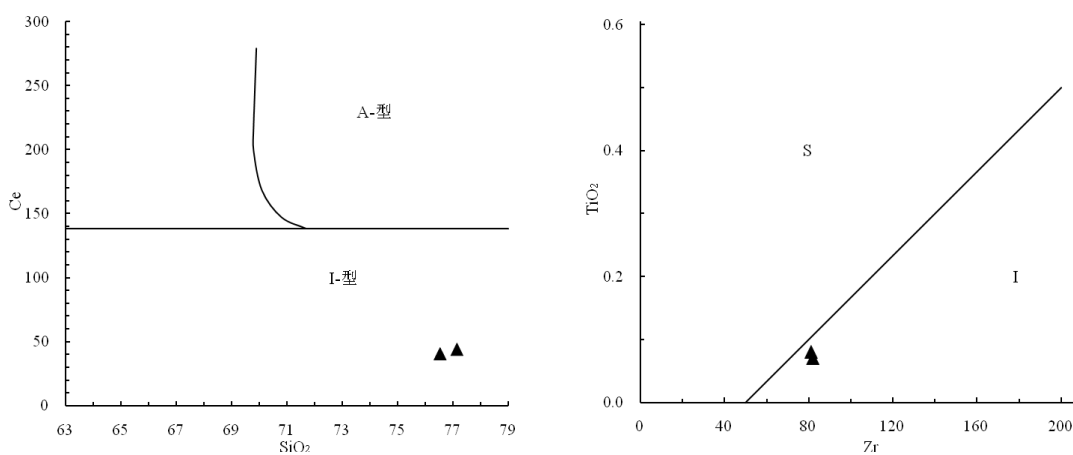


图 5-14 研究区样品 $\text{Ce}-\text{SiO}_2$ 和 TiO_2-Zr 判别图（据 Collis et al., 1982）

此外，青山群酸性火山岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$ 比值范围在 $0.7033 \sim 0.7095$ 之间， $\epsilon \text{Nd}(t)$ 比值范围在 $-14.1 \sim -24.0$ 之间，部分样品与下地壳组成（Zhou et al., 2002; Huang et al., 2004）相吻合。且 Ling 等（2009）测得其二阶段 Nd 模式年龄为 $1.77 \sim 2.44\text{Ga}$ ，表明其岩浆为研究区古老下地壳熔融的产物。付文钊等（2014）根据青山群四个期次的岩

浆喷发产物的地化特征推测其属于同源岩浆喷发,且认为青山期火山岩的高场强元素 Nb、P、Ti 的负异常代表了岩浆来源于地壳,并在喷发过程中经历了某些高度演化。

因此认为低 Sr 酸性岩浆来源于地壳部分熔融,且其高 Th 含量、低 Co、P、Ti、Ba 含量及高的 Rb/Ba、Rb/Sr 和 Zr/Ba 比值类似于东非裂谷碱性流纹岩(表 5-1),形成原因为中下地壳受热而发生部分熔融形成低 Sr 酸性岩浆。且低 Sr 酸性岩与钙碱性中基性岩形成 Daly 间断(缺乏中性成分),类似于东非裂谷双峰式火山岩。

综上所述,本研究区高 Sr 酸性岩浆岩来自于中基性岩浆的结晶分离作用,而低 Sr 酸性岩浆起源于中下地壳的部分熔融。

第六章 五莲-桃林地区岩浆时空分布与演化

山东东部晚中生代岩浆火山活动频繁，且具有一定的规律性。本章将在调研本地区火山岩及侵入岩的时空分布的基础上，探讨本区晚中生代时期岩浆活动规律，以及影响其活动性的深部动力学特征。

6.1 岩浆岩时空分布

6.1.1 鲁东岩浆岩时空格架

鲁东地区晚中生代发生了广泛的岩浆活动，对已发表的山东东部火山岩、基性侵入岩、煌斑岩、闪长岩体及花岗岩体的年龄数据进行整理（附表 4），并作出各类岩浆岩的年龄序列特征图（图 6-1、6-2 和 6-3）。鲁东晚中生代火山岩年龄分布于 131~72Ma（图 6-1），其中 131Ma 和 129.7Ma 的火山岩年龄来自于胶莱盆地莱阳群中玄武质火山岩夹层（张岳桥等，2008），青山群火山岩年龄主要分布于 126.2Ma~91.4Ma，与莱阳群火山岩的年龄相差不到 4Ma；王氏群玄武岩的年龄分布于 76.2Ma~71.9Ma（闫峻等，2003；孟繁聪等，2006），与青山群火山岩年龄相差达 15Ma。

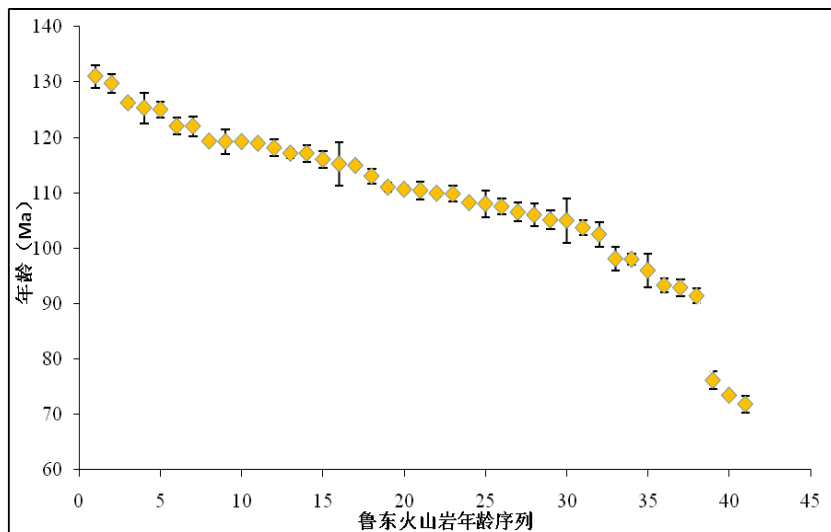


图 6-1 鲁东晚中生代火山岩年龄序列特征图（数据见附表 4）

基性侵入岩的年龄也主要分布于三部分（图 6-2），鲁东地区早白垩世基性侵入岩年龄约为 133Ma~106Ma，早侏罗纪基性侵入岩为 213Ma~200Ma，与早白垩世基性岩浆岩相差近 70Ma；晚白垩世基性岩脉年龄为 86Ma~77Ma，与早白垩世基性岩浆侵入岩相差约 20Ma。

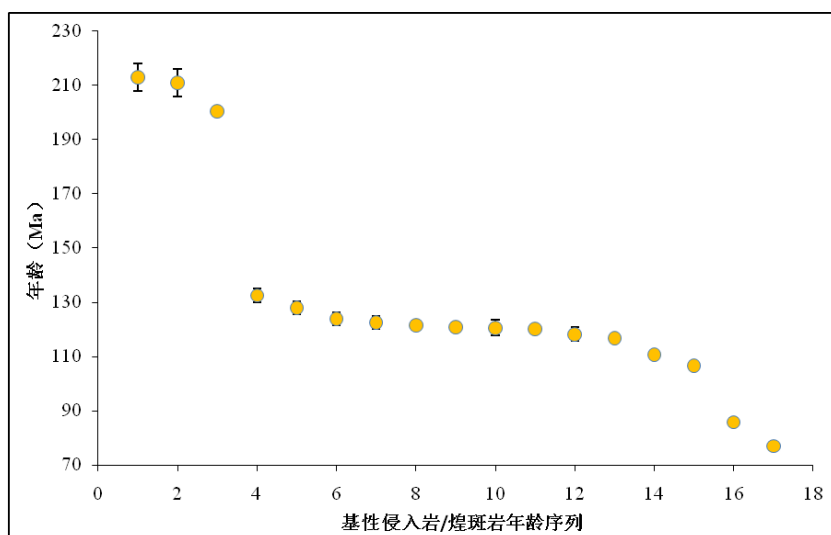


图 6-2 鲁东晚中生代基性侵入岩年龄序列特征图（数据见附表 4）

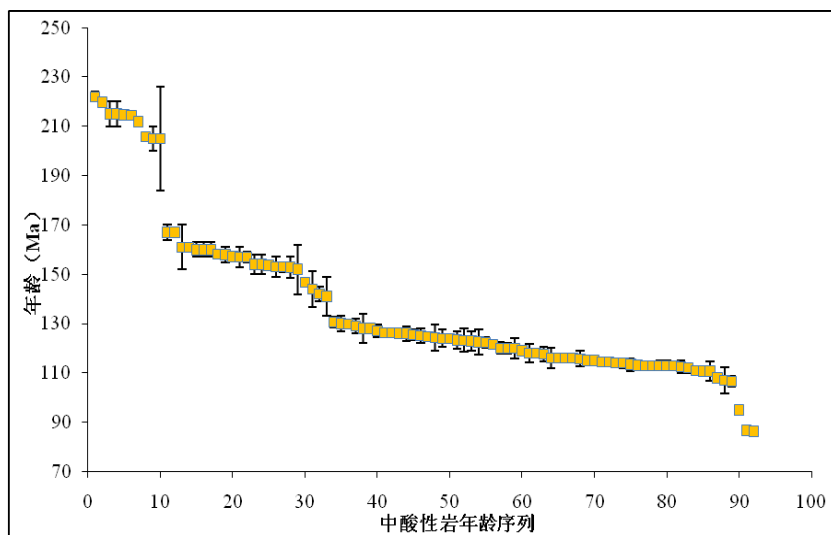


图 6-3 鲁东晚中生代中酸性侵入岩年龄序列特征图（数据见附表 4）

中酸性侵入岩的年龄也主要分布于三部分（图 6-3），鲁东地区晚侏罗世至早白垩世中酸性侵入岩年龄约为 167Ma~95Ma，且在 141Ma 与 130Ma 之间中酸性岩浆不活跃，存在约 10Ma 的时间差；晚三叠世至早侏罗世中酸性侵入岩为 222Ma~205Ma，与早白垩世中酸性岩浆岩相差近 40Ma；晚白垩世中酸性岩浆岩年龄约为 86Ma，与早白垩世中酸性岩浆侵入岩相差约 10Ma。

在对鲁东地区火山岩喷发年龄进行统计的基础上，由靠近郯庐断裂带的莒县沿着海岸线向东北方向，以五莲、诸城、胶州、即墨、青岛（该样品点位于即墨以北，见匡永生等，2012b）、海阳、莱阳为顺序作火山岩喷发年龄图（图 6-4）。莱阳地区在莱阳期有基性火山活动，且该地区青山期火山活动频繁，中基性火山活动一般早于酸性火山活动。海阳地区中基性岩浆活动时间为 120Ma~113Ma，集中于早白垩世阶段，

与即墨、青岛地区的玄武质安山岩、玄武岩的喷发年龄接近。胶州地区火山活动由早期的中基性岩到时间跨度较大的中酸性岩火山活动，也有晚白垩世玄武岩分布。灵山岛莱阳期沉积之上不整合覆盖的流纹岩的年龄为 120Ma 左右，早于胶州地区的中酸性岩浆活动。诸城地区也有晚白垩世玄武岩分布。五莲地区基性和中酸性火山活动产物都有分布，且年龄接近。莒县地区主要为中基性火山活动，年龄为 118Ma~108Ma，时间跨度小于莱阳地区。因此可以看出，中基性火山活动有从东北向西南方向变年轻的趋势，即越靠近郯庐断裂带地区，中基性火山活动年龄越新；中酸性火山活动以灵山岛地区的流纹岩年龄最老，胶州及莱阳地区中酸性岩浆活动年龄较新。

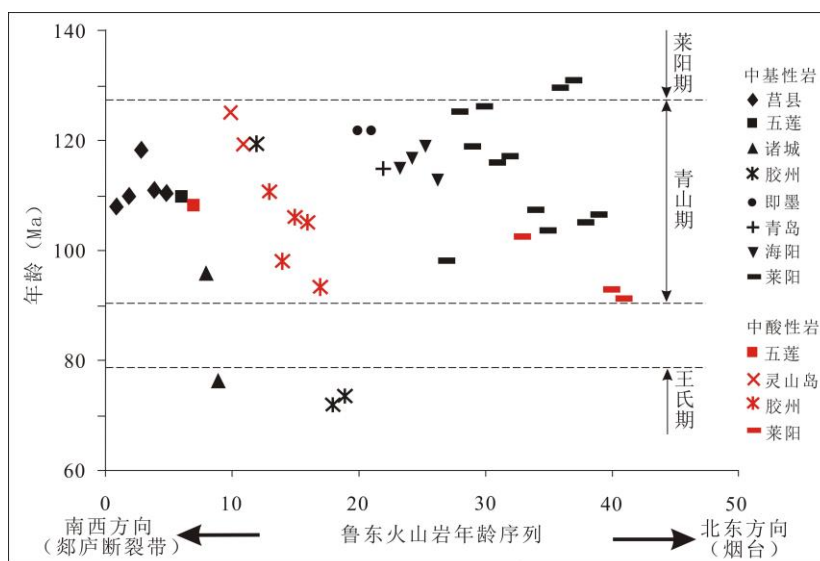


图 6-4 鲁东地区晚中生代火山岩时空分布图（数据见附表 4）

中基性岩包括玄武质玄武质安山岩和安山岩类；中酸性岩包括英安岩、流纹岩

6.1.2 五莲-桃林地区岩浆时空演化

桃林地区酸性火山岩 YJG-1 和 YJP-3 的 CaO、TiO₂、Ba、Sr 等元素含量与桃林山东头的 SDT-21 和 TL-11 火山岩相似（表 6-1），暗示其来源于同一岩浆房。同时，灵山岛老虎嘴处的流纹岩 LSD-LHZ、黄岛小黄山流纹岩 XHS-1 的 CaO、TiO₂、Ba、Sr 等地化特征与桃林低 Sr 酸性岩相同（表 6-1），表明其来源和经历的岩浆过程可能相似。

灵山岛流纹岩不整合于下部莱阳期浊积岩地层之上，其年龄为 119.2±2.2Ma。黄岛小黄山流纹岩性质与灵山岛流纹岩相似，且下部未发现其他火山活动产物，因此，可以认为黄岛地区该套流纹岩代表了青山期火山活动的开始。桃林地区 YJP-3 流纹岩被后期的安山质次火山岩体包围，表明该酸性岩浆活动早于安山质岩浆活动。因此可

以大胆推测低 Sr 酸性岩浆岩的形成时间早于高 Sr 岩浆岩形成时间。

表 6-1 山东东部地区部分流纹岩地化特征表

样品编号	SiO ₂ (%)	MgO(%)	CaO(%)	TiO ₂ (%)	Ba(ppm)	Sr(ppm)	数据来源
BS-3	72.70	0.59	1.36	0.26	1564.58	284.69	本文
TL-68	68.71	1.20	1.59	0.32	1939.46	371.79	本文
YJG-1	77.14	0.06	0.20	0.08	157.92	98.63	本文
YJP-3	76.52	0.08	0.22	0.08	336.64	132.85	本文
LSD-LHZ	78.4	0.4	0.3	0.11	464.3	177.3	本文
XHS-1	83.6	0.3	0.2	0.11	260.8	38	本文
SDT-21	75.38	0.29	0.65	0.13	102.1	131.8	本文
TL-11	74.6	0.3	0.4	0.12	261.8	156.7	本文
MJZ-ZC-01	73.97	0.4	1.3	0.25	2164	53.1	凌文黎等, 2006
MJZ-ZC-02	73.76	0.37	0.44	0.22	944	202	凌文黎等, 2006
MJZ-ZC-03	68.18	0.53	0.51	0.48	1856	84.9	凌文黎等, 2006

地壳部分熔融的热源主要来自于 (1): 地壳内部产生的热和 (2) 地幔向地壳传递的热 (徐义刚等, 2009)。前者在碰撞造山而使得地壳加厚的情况下 (Patin et al., 1990), 岩石中富集的 K、U、Th 等生热元素产生额外热能且上覆地层隔热性较好, 热量不断积聚而导致地壳温度大于地壳固相线温度, 产生熔融, 且地壳加厚情况下也有产生 S 型花岗岩的可能。后者为地壳熔融所需热量的主要来源方式, 地幔对地壳的热传递可以分为地幔热传导和底侵岩浆热对流 (Gibson et al., 2006; Xu et al., 2008)。Gibson 等(2006)的热模拟计算研究表明, 地幔柱产生的热通过岩石圈(100km)传导至下地壳致其熔融至少需要 50Ma, 而无地幔柱的情况下所需时间更长, 因此, 以华北板块大于 200km 的初始岩石圈厚度来看, 通过此方法引起地壳熔融是不可行的, 还需要岩浆发生底侵作用或是发生岩石圈减薄 (匡永生等, 2012b)。岩浆发生底侵作用时会给下地壳带来较大的热量, 使得底侵过程中幔源岩浆活动一般先于或者与壳源岩浆活动同时作用 (Patin et al., 1990)。该情况下一般是岩石圈拉张引起幔源岩浆通过岩浆底侵作用对地壳进行热量传递并引发地壳熔融 (Xu et al., 2008)。本区酸性岩浆岩属于 I 型花岗岩, 可能为拉张区岩浆内侵作用导致的部分熔融。

华北板块地壳加厚发生在侏罗纪时期, 在白垩纪时期为岩石圈减薄的主要时期 (徐义刚等, 2009), 因此, 推测本区地壳熔融所需热量主要来自于岩石圈减薄导致的上升的幔源岩浆对地壳加热, 使地壳物质的温度大于地壳固相线温度而产生熔融, 形成低 Sr 酸性岩浆。

匡永生等 (2012) 测得鲁东基性岩浆岩的形成年龄为 122~113Ma, 而周瑶琪等

(2015) 测得灵山岛流纹岩年龄为 119.2Ma, 稍晚于即墨玄武岩的喷发年龄, 也符合上述岩浆底侵的模式。

桃林地区莱阳群沉积内发育两套基性火山活动, 可能代表了该地区的岩浆底侵作用的开始。桃林地区发育的中基性岩浆来源于受俯冲流体交代作用影响的含弥散状低 Mg 角闪石的岩石圈地幔, 其地壳混染特征表明其在上升过程中在地壳浅部岩浆房中可能经历了较长时间的停留。在部分地壳岩浆房内岩浆不断发生结晶分异, 岩浆性质逐渐向中酸性转变, 形成本区高 Sr 酸性岩浆; 也有部分岩浆房内的已经演化的岩浆与深部形成并充注到岩浆房的岩浆发生混合, 形成包体和矿物环带、溶蚀边等不平衡结构, 并可能打破岩浆房内的温度、压力平衡, 引起岩浆上升喷发。火山碎屑岩中发育的斜长石环带即证明了岩浆在喷发前或喷发过程中有过不同岩浆的混合作用。当地幔源区含更多地壳物质时会使得原始岩浆富含水而分异形成高密度的中酸性岩浆, 其容易喷出地表形成无双峰态的基性向中酸性岩浆演化、喷发的火山岩系列 (林强等, 2003)。

因此, 桃林地区岩浆岩来自于地壳熔融形成的酸性岩浆, 以及与之相伴生的幔源岩浆岩活动。中基性岩浆在上升至喷发过程中发生了不同程度的地壳混染, 且在此过程中发生结晶分异形成酸性岩浆; 部分地区的岩浆房或岩浆通道内有岩浆的混合作用发生。

6.2 深部动力学特征

华北克拉通破坏作为研究华北地区中生代地质问题的一大热点, 其本质是岩石圈的巨量减薄。目前关于华北克拉通破坏的动力学机制主要有: 热-化学侵蚀作用 (Zheng et al., 2005, 2006; Zhai et al., 2007)、拆沉作用 (Gao et al., 2004, 2008; Wu et al., 2005; Deng et al., 2007)、橄榄岩-熔体相互作用 (Zhang, 2005; Tang et al., 2006) 以及岩石圈拉张和俯冲脱水模型 (Niu, 2005)。Ling 等 (2009) 认为青山群酸性岩浆来源于拆沉下地壳的熔融, 且有部分地幔物质的作用; 而匡永生等 (2012) 则认为与自上而下的岩石圈侵蚀模式相吻合。

岩石圈减薄过程中伴随着岩石圈热结构改变和软流圈上涌, 对华北克拉通破坏及岩石圈减薄的认识主要借助于华北地区的基性岩浆作用, 其岩浆作用中地幔组分的参与可作为克拉通破坏的一大特征。但对此时限仍存在着争论, 如三叠纪 (Wu et al., 2006; 韩宝福等, 2004)、侏罗纪 (Griffin et al., 1998; Zhang et al., 2005; Yang et

al., 2007)、中侏罗世 (Gao et al., 2004)、晚侏罗世 (姜耀辉等, 2005)、早白垩世 (Wu et al., 2005; 吴福元等, 2008)、中生代 (Menzies and Xu, 1998)、新生代 (Menzies et al., 1993; 路凤香等, 2006) 等。徐义刚等 (2001; 2004a; 2004b; 2006; 2009) 认为华北克拉通破坏持续时间较长 (超过 100Ma), 开始于晚石炭世-三叠纪, 破坏高峰约为 130Ma~120Ma, 结束时间为晚白垩世到早新生代。岩石圈减薄过程中, 随着地温梯度的上升, 岩浆源区会由早期的富集岩石圈地幔向后期的亏损软流圈地幔过渡, 可视为岩石圈破坏的一个标志 (徐义刚等, 2009)。闫峻等 (2003) 认为在 73Ma 时岩石圈厚度减薄为 65~95km, 其富集地幔主体已基本不存在, 因此岩石圈减薄的时间约为 120Ma~73Ma。孟繁聪等 (2006) 在诸城玄武岩 (76Ma) 中发现了富集岩石圈地幔的信息, 而胶州玄武岩 (73Ma) 中未见富集地幔的特征, 推测晚白垩世以来软流圈地幔不断上涌。虽然华北克拉通破坏的起始时间在空间上不均匀 (徐义刚等, 2009), 但本研究区在晚中生代白垩纪时期仍为岩石圈巨量减薄期, 早白垩世时期岩浆主要来源于富集岩石圈地幔, 在晚白垩世时期软流圈亏损地幔物质的作用才逐渐增强。胶东地区白垩纪花岗岩相比于侏罗纪花岗岩更具埃达克质岩石特征, 也暗示了该时期胶东地区经历了地壳减薄 (徐义刚等, 2009)。白垩纪酸性和基性岩浆活动均有分布, 且岩浆活动强度远高于侏罗纪时期。苏鲁造山带和太平洋俯冲带等岩石圈薄弱带通常为克拉通破坏的起始位置, 岩石圈底部的起伏会加强地幔对流 (Tommasi and Vauchez, 2001) 并使得减薄作用向克拉通腹地发展, 这也是白垩纪岩浆活动范围大于侏罗纪时期的原因 (徐义刚等, 2009)。

此外, 克拉通内部的造山带、大型断裂带作为岩石圈薄弱带也为克拉通破坏和软流圈物质上涌等过程提供了方便。华北板块内部郯庐断裂带在早白垩纪时的左行走滑, 为幔源物质上升提供了通道。五-荣断裂在航磁异常图上处于正负异常带交接处的 NEE 向负异常区; 布伽重力异常图上该断裂处为 NEE 向重力高区域和重力低区域交接处; 在莫氏面等深图上则显示为北部幔隆区与南部幔坳区结合部位, 反映该断裂已切割至上地幔; 而地壳测深结果显示五-荣断裂已深切地壳达 40km 且地壳在断裂两侧有明显错断 (姜同海, 2005)。因此, 五-荣断裂可视为一条区域大断裂, 对研究区的岩浆活动和盆地演化都有着重要影响。

本区白垩纪大规模岩浆作用还与盆地和变质核杂岩 (刘俊来等, 2006; Ni et al., 2013, 2014; 夏增明等, 2016) 形成时代相一致。鲁东地区五莲变质核杂岩 (Ni et al., 2013, 2014)、玲珑变质核杂岩 (Charlse et al., 2011)、鹊山变质核杂岩 (杨金中和

沈远超, 2000; 夏增明等, 2016)、拆离断层系统和胶莱盆地(张岳桥等, 2006, 2008)等构造均表明该区早白垩世大规模的地壳伸展作用。五莲拆离断层带作为五莲变质核杂岩体的组成部分, 延伸超过 150km, 为 NE-SW 向的低角度正断层, 该断层穿过马耳山岩体和桃林火山机构(Ni et al., 2014)。

因此, 白垩纪时期研究区岩石圈伸展减薄引起软流圈减压上升, 地温线与地幔固相线相交进而导致地幔熔融, 五-荣断裂作为超壳断裂(佟彦明, 2007)为中基性岩浆提供了上升的通道。

五莲地区 $\sim 128\text{Ma}$ 至 123Ma , 即莱阳期沉积时期的剥露速度特别高, 为 2.0kmMa^{-1} , 而王氏期沉积时期的剥露速度中等, 为 0.35kmMa^{-1} (Ni et al., 2014), 反映了不同时期具有地壳拉伸速度不同, 其深部的动力学特征也不同。据 Maruyama (1997) 研究, 中侏罗世古太平洋板块以 4.7cm/yr 的速度 NW 向俯冲, 在早白垩世变为以 30cm/yr 的速度 NNW 向俯冲, 早白垩世中期保持着 20.7cm/yr 的速度逐渐向北俯冲, 而后至晚白垩世俯冲方向变为正北方向。俯冲方向及速度的不断变化会对俯冲板片产生影响, 造成俯冲板片撕裂及后撤(Zhu et al., 2012)。俯冲板片的速度、方向的突然改变与研究区广泛的岩浆作用和盆地拉张在时间上相一致。中侏罗世至早白垩世古太平洋俯冲速度、方向的改变可能使得俯冲板片沿莒县-五莲-莱阳一线撕裂(庞崇进, 2015), 幔源物质上涌并形成了带有软流圈地幔印记的中基性岩浆作用。早白垩世至晚白垩世古太平洋板块的俯冲方向和速度仍不断发生变化, 可能会发生板片后撤(庞崇进, 2015), 控制了研究区的地壳伸展及岩浆活动。

结论

本文以五莲-桃林地区为主要研究对象,结合山东东部地区火山岩特征及岩浆活动规律,通过对山东东部地区岩浆岩的野外及镜下特点、地化特征及时空展布等研究,总结了山东东部地区晚中生代的火山岩浆演化关系及动力学背景,取得主要认识如下:

(1) 通过野外勘探及地质填图,对桃林地区火山机构的岩石类型、结构构造特征、岩层岩相展布、火山断裂及岩脉等进行了详细调查,对相关地层、基底及各侵入体的展布进行了划分,并对前人编制的地质图进行了补充修改。

(2) 通过诸城桃林地区岩浆岩地化特征分析研究,得出本区岩浆岩以钙碱性系列为主, SiO_2 含量跨度较大,且与各主量元素之间负相关关系显著。微量元素蛛网图显示 Rb、K、Ba、Th、U 等大离子亲石元素(LILE)富集,Nb、P、Ti 等高场强元素(HFSE)相对亏损;部分酸性岩样品还表现出 Ba、Sr 相对亏损的特征。稀土元素配分图显示轻稀土元素(LREE)富集、重稀土元素(HREE)亏损的右倾配分模式,轻稀土之间分馏明显,大多数样品呈现 δEu 的弱负异常;部分酸性岩稀土元素含量低,且具明显的 δEu 负异常。

(3) 本区样品的蚀变作用较弱,结晶分异作用明显,岩浆演化过程中可能经历了橄榄石、单斜辉石、Ti-Fe 氧化物、磷灰石及斜长石的分离结晶。在岩浆上升过程中,中基性岩和部分酸性岩的地壳物质的参与程度不一,中基性岩浆可能经历了一定程度的地壳混染。此外,样品中不同颜色条带、成分条带、包体及镜下矿物环带等特征表明部分岩浆岩形成过程中存在着岩浆混合作用。

(4) 本地区中基性岩浆来源于受俯冲流体交代作用影响的含弥散状低 Mg 角闪石的岩石圈地幔,而后经历了结晶分异和地壳混染作用,部分地区的岩浆岩中显示发生了岩浆混合作用。而酸性岩浆来源分为两种情况,高 Sr 酸性岩浆来自于中基性岩浆的结晶分离,低 Sr 酸性岩浆则起源于中下地壳的部分熔融。

(5) 山东东部晚中生代中基性火山活动有从东北向西南方向变年龄的趋势,即越靠近郯庐断裂带地区,中基性火山活动年龄越新;而中酸性火山活动以灵山岛地区的流纹岩年龄最老,胶州及莱阳地区中酸性岩浆活动年龄较新。桃林低 Sr 酸性岩的活动时间可能较早,由幔源岩浆底侵加热所导致的地壳熔融形成;中基性岩浆活动与之相伴生,且在上升过程中发生了分离结晶及岩浆混合,形成了不同性质的岩浆。其

岩浆活动与该时期岩石圈伸展、减薄的构造背景相吻合，可能受古太平洋板块俯冲板片撕裂及后撤的影响。

参考文献

- 常裕林, 郑小礼, 王晖. 胶东西北部玲珑、郭家岭超单元花岗岩成因探讨[J]. 地质找矿论丛, 2006, 21(B10):90-94.
- 陈小明, 谭清泉, 赵广涛. 海底玄武岩中斜长石研究及其岩石学意义[J]. 岩石学报, 2002,18(4): 482-488.
- 陈义贤, 陈文寄, 周新华, 等. 辽西及邻区中生代火山岩-年代学、地球化学和构造背景[M]. 北京: 地震出版社, 1997:1-279.
- 付文钊, 杨锋杰, 周新玉, 等. 胶莱盆地南缘白垩系青山群火山岩地球化学特征[J]. 地质学报, 2014, 88(6): 1106-1119.
- 付永涛, 虞子治. 青岛垭口-八仙墩变质海相碎屑岩的属性和构造意义[J]. 地质科学, 2010,45(1):207-227.
- 关康, 罗镇宽, 苗来成, 等. 胶东招掖郭家岭型花岗岩锆石 SHRIMP 年代学研究[J]. 地质科学, 1998, 33:318-328.
- 郭锋, 范蔚茗, 王岳军, 等. 华北陆块东部晚中生代基性岩浆作用的地球化学研究[J]. 大地构造与成矿学, 2002, 26(3): 247-254.
- 郭敬辉, 陈福坤, 张晓曼, 等. 苏鲁超高压带北部中生代岩浆侵入活动与同碰撞—碰撞后构造过程: 锆石 U-Pb 年代学[J]. 岩石学报, 2005, 21(4): 1281-1301.
- 郭良, 相石宝, 徐兴永. 山东崂山花岗岩地质地貌特征[J]. 地质论评, 2007, 53(B08): 138-142.
- 郭文峰, 刘嘉麒, 徐文刚, 等. 长白山天池火山岩浆系统再认识: 岩石热力学模拟[J]. 科学通报, 2015 (35): 3489-3500.
- 韩宝福, 李惠民. 河北平泉光头山碱性花岗岩的时代、Nd-Sr 同位素特征及其对华北早中生代壳幔相互作用的意义[J]. 岩石学报, 2004, 20(6): 1375-1388.
- 胡芳芳, 范宏瑞, 杨进辉, 等. 胶东乳山含金石英脉型金矿的成矿年龄: 热液锆石 SHRIMP 法 U-Pb 测定[J]. 科学通报, 2004, 49(12): 1191-1198.
- 胡芳芳, 范宏瑞, 杨进辉, 等. 鲁东昆嵛山地区宫家辉长闪长岩成因: 岩石地球化学, 锆石 U-Pb 年代学与 Hf 同位素制约[J]. 岩石学报, 2007, 23(2): 369-380.
- 黄洁, 郑永飞, 吴元保, 等. 苏鲁造山带五莲地区岩浆岩元素和同位素地球化学研究[J]. 岩石学报, 2005,21(3):545-568.
- 江胜国. 山东胶东地区郭家岭花岗岩岩石地球化学特征及其意义[D]. 青岛:山东科技大学, 2011.

- 姜同海. 胶莱盆地构造特征及演化 [D]. 青岛:山东科技大学, 2005.
- 姜耀辉, 蒋少涌, 赵葵东, 等. 辽东半岛煌斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其对中国东部岩石圈减薄开始时间的制约[J]. 科学通报, 2005, 50(19): 2161-2168.
- 匡永生, 庞崇进, 洪路兵, 等. 胶莱盆地晚白垩世玄武岩的年代学和地球化学特征及其对华北岩石圈减薄-增生的制约[J]. 大地构造与成矿学, 2012a, 36(4): 559-571.
- 匡永生, 庞崇进, 罗震宇, 等. 胶东青山群基性火山岩的 Ar-Ar 年代学和地球化学特征: 对华北克拉通破坏过程的启示[J]. 岩石学报, 2012b, 28(4): 1073-1091.
- 李曙光. ϵNd —La/Nb, Ba/Nb, Nb/Th 图对地幔不均一性研究的意义——岛弧火山岩分类及 EMII 端元的分解[J]. 地球化学, 1994, 23(2): 105-114.
- 李曙光, 陈移之, 葛宁洁, 等. 青岛榴辉岩及胶南群片麻岩的锆石 U-Pb 年龄——胶南群中晋宁期岩浆事件的证据[J]. 科学通报, 1993, 38(19): 1773-1777.
- 李曙光, 陈移之, 宋明春, 等. 胶东海阳所斜长角闪岩的锆石 U-Pb 年龄——多期变质作用对锆石不一致线年龄影响的实例[J]. 地球学报-中国地质科学院院报, 1994, (1-2):37-42.
- 林强, 葛文春, 曹林, 等. 大兴安岭中生代双峰式火山岩的地球化学特征[J]. 地球化学, 2003, 32(3): 208-222.
- 凌文黎, 谢先军, 柳小明, 等. 鲁东中生代标准剖面青山群火山岩锆石 U-Pb 年龄及其构造意义 [J].中国科学: D 辑, 2006, 36(5): 401-411.
- 凌贤长, 董永胜. 初论胶北隆起地壳伸展作用[J]. 长春地质学院学报, 1997, 27(1): 31-35.
- 刘明渭, 张庆玉, 宋万千. 山东省白垩纪岩石地层序列与火山岩系地层划分. 地层学杂志, 2003, 27(3): 247-253.
- 刘俊来, 关会梅, 纪沫, 等. 华北晚中生代变质核杂岩构造及其对岩石圈减薄机制的约束[J]. 自然科学进展, 2006, 16(1): 21-26.
- 路凤香, 桑隆康. 岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 2002:134-135.
- 路凤香, 郑建平, 邵济安, 等. 华北东部中生代晚期—新生代软流圈上涌与岩石圈减薄[J]. 地学前缘, 2006, 13(2): 86-92.
- 吕洪波, 王俊, 张海春. 山东灵山岛晚中生代滑塌沉积层的发现及区域构造意义初探[J].地质学报, 2011, 85(6):938-946.
- 吕洪波, 张海春, 王俊, 等. 山东胶南灵山岛晚中生代浊积岩中发现巨大滑积岩块[J]. 地质论评, 2012, 58(1): 80-81.
- 马昌前, 余振兵, 许聘, 等. 桐柏-大别山南缘的志留纪 A 型花岗岩类: SHRIMP 锆石年代学和地

- 球化学证据[J]. 中国科学: D 辑, 2004, 34(12): 1100-1110.
- 孟繁聪, 李天福, 薛怀民, 等. 胶莱盆地晚白垩世不同地幔源区的两种基性岩浆——诸城玄武岩和胶州玄武岩的对比[J]. 岩石学报, 2006, 22(6): 1644-1656.
- 苗来成, 罗镇宽, 关康, 等. 玲珑花岗岩中锆石的离子质谱 U-Pb 年龄及其岩石学意义[J]. 岩石学报, 1998, 14(2): 198-206.
- 庞崇进. 华北克拉通东部白垩纪中基性火山岩的年代学和地球化学特征[D]. 广州: 中国科学院研究生院(广州地球化学研究所), 2015.
- 仇根根, 裴发根, 方慧, 等. 长白山天池火山岩浆系统分析[J]. 地球物理学报, 2014, 57(10): 3466-3477.
- 邱家骧, 林景任. 岩石化学[M]. 北京: 地质出版社, 1991:1-276.
- 邱检生, 王德滋. 山东五莲七宝山辉石二长岩的地球化学及岩浆源区性质[J]. 地质论评, 1999, 45: 612-617.
- 邱检生, 王德滋. 鲁东胶莱盆地青山组火山岩的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年——以五莲分岭山火山机构为例[J]. 高校地质学报, 2001, 7(3): 351-355.
- 山东省第四地质矿产勘查院. 山东省区域地质[M]. 济南: 山东省地图出版社, 2003:1-970.
- 山东省地质矿产局. 山东省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1991:1- 597.
- 山东省区域地质调查队. 山东省地质局 1:20 万日照幅区调报告[R]. 山东省地质矿产局, 1982.
- 宋明春. 山东省大地构造格局和地质构造演化[D]. 北京: 中国地质科学院, 2008.
- 宋明春, 韩景敏, 宫述林. 苏鲁造山带大规模岩浆活动的证据:新元古代多成因花岗质片麻岩[J]. 矿物岩石, 2007, 27(2): 22-32.
- 唐嘉锋, 刘玉琳, 王启飞. 山东中生代火山岩年代学研究[J]. 岩石学报, 2008, 24(6): 1333-1338.
- 唐俊, 郑永飞, 吴元保, 等. 胶东地块东部变质岩锆石 U-Pb 定年和氧同位素研究[J]. 岩石学报, 2004, 20(5): 1039-1062.
- 佟彦明. 胶莱盆地构造演化研究[D]. 武汉:中国地质大学, 2007.
- 吴拓宇, 赵淑娟, 付永涛. 青岛八仙墩海相碎屑岩的岩石地球化学特征及其油气研究意义[J]. 地质科学, 2010,45(4) :1156-1169.
- 王德滋, 赵广涛, 邱检生. 中国东部晚中生代 A 型花岗岩的构造制约[J]. 高校地质学报, 1995, 1(2): 13-21.
- 王吉珺. 玲珑花岗岩成因探讨[J]. 地质找矿论丛, 2000,15(4) :289-298.
- 王世进, 王来明, 万渝生, 等. 鲁东地区侵入岩形成时代和期次划分——锆石 SHRIMP U-Pb 年龄

- 的证据[J]. 山东国土资源, 2009, 25(12): 8-20.
- 王世进, 万渝生, 王伟, 等. 山东崂山花岗岩形成时代——锆石 SHRIMP U-Pb 定年[J]. 山东国土资源, 2010, 26(010) :1-5.
- 王世进, 万渝生, 郑明伟, 等. 山东五莲山-九仙山省级地质公园地质遗迹资源及形成时代——锆石 SHRIMP 测年的证据[J]. 山东国土资源, 2013 (3): 1-6.
- 魏海泉. 长白山火山岩岩浆柱岩浆上升作用过程[J]. 地学前缘, 2010 (1): 11-23.
- 吴冲龙, 张善文, 毛小平, 等. 胶莱盆地原型与盆地动力学分析[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 2009:1-193.
- 吴福元, 徐义刚, 高山, 等. 华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究的主要学术争论[J]. 岩石学报, 2008, 24(6): 1145-1174.
- 吴平霄, 吴金平. 斜长石环带的成因机制[J]. 地质地球化学, 1997 (4): 40-49
- 夏增明, 刘俊来, 倪金龙, 等. 胶东东部鹊山变质核杂岩结构、演化及区域构造意义[J]. 中国科学:D 辑, 2016, 46(3): 356-373.
- 徐义刚. 用玄武岩组成反演中—新生代华北岩石圈的演化[J]. 地学前缘, 2006, 13(2): 93-104.
- 徐义刚, 李洪颜, 庞崇进, 等. 论华北克拉通破坏的时限[J]. 科学通报, 2009, 54(14): 1974-1989.
- 闫峻, 陈江峰, 谢智, 等. 鲁东晚白垩世玄武岩中的幔源捕虏体: 对中国东部岩石圈减薄时间制约的新证据[J]. 科学通报, 2003, 48(14): 1570-1574.
- 闫峻, 陈江峰, 谢智, 等. 鲁东晚白垩世玄武岩及其中幔源包体的岩石学和地球化学研究[J]. 岩石学报, 2005, 21(1) :99-112.
- 闫峻, 陈江峰. 鲁东青山组中性火山岩的地球化学特征: 岩石成因和地质意义[J]. 地球化学, 2007, 36(1): 1-10.
- 严莹莹, 陆建军. 山东东部中生代中基性火山岩的地球化学特征及成因探讨[J]. 南京大学学报: 自然科学版, 2009, 45(3): 377-391.
- 杨金中, 沈远超. 胶东东部鹊山变质核杂岩与金矿成矿[J]. 地质地球化学, 2000, 28(1): 15-19.
- 于学峰, 李洪奎, 单伟. 山东胶东矿集区燕山期构造热事件与金矿成矿耦合探讨[J]. 地质学报, 2013, 86(12):1946-1956.
- 翟明国, 朱日祥, 刘建明, 等. 华北东部中生代构造体制转折的关键时限[J]. 中国科学:D 辑, 2003, 33(10): 913-920.
- 张金阳, 马昌前, 王人镜, 等. 周口店岩体矿物学, 年代学, 地球化学特征及其岩浆起源与演化[J]. 地球科学:中国地质大学学报, 2013, 38 (1): 68-86.

- 张娟. 苏鲁造山带中生代岩浆岩地球化学研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学博士学位论文, 2011.
- 张松梅, 程立人, 刘典涛. 胶南地区莱阳群绒枝藻化石的发现[J]. 长春科技大学学报, 2001, 31(3): 209-212.
- 张田, 张岳桥. 胶东半岛中生代侵入岩浆活动序列及其构造制约[J]. 高校地质学报, 2007, 13(2): 323-336.
- 张岳桥, 李金良, 柳宗泉, 等. 胶莱盆地深部拆离系统及其区域构造意义[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(4): 504-511.
- 张岳桥, 李金良, 张田, 等. 胶莱盆地及其邻区白垩纪-古新世沉积构造演化历史及其区域动力学意义[J]. 地质学报, 2008, 82(9): 1229-1257.
- 张增奇, 刘明谓. 山东省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996: 202-239.
- 赵大鹏, 雷建设, 唐荣余. 中国东北长白山火山的起源: 地震层析成像证据[J]. 科学通报, 2004, 49(14): 1439-1446.
- 赵广涛. I—A 型复合花岗岩体的热演化及其意义: 以崂山花岗岩体为例[J]. 中国科学:D 辑, 1998, 28(4): 296-302.
- 赵广涛, 王德滋. 崂山花岗岩锆石 U—Pb 年龄测定及其意义[J]. 青岛海洋大学学报: 自然科学版, 1997, 27(3): 382-388.
- 郑永飞, 吴元保, 周建波. 苏鲁造山带西北缘五莲花岗岩中锆石 U—Pb 年龄及其地质意义[J]. 科学通报, 2002, 47(22): 1745-1750.
- 周建波, 郑永飞, 赵子福. 山东五莲中生代岩浆岩的锆石 U—Pb 年龄[J]. 高校地质学报, 2003, 9(2): 185-194.
- 周瑶琪, 张振凯, 梁文栋, 等. 山东东部晚中生代构造-岩浆活动及原型盆地恢复[J]. 地学前缘, 2015, 22(1): 137-156.
- Adam J, Green T H, Sie S H. Proton microprobe determined partitioning of Rb, Sr, Ba, Y, Zr, Nb and Ta between experimentally produced amphiboles and silicate melts with variable F content[J]. Chemical Geology, 1993, 109(1): 29-49.
- Arndt N T, Christensen U. The role of lithospheric mantle in continental flood volcanism - thermal and geochemical constraints. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 1992, 97(B7): 10967-10981.
- Barling J, Goldstein S L, Nicholls I A N A. Geochemistry of Heard Island (southern Indian Ocean): Characterization of an enriched mantle component and implications for enrichment of the sub-Indian Ocean mantle[J]. Journal of Petrology, 1994, 35(4): 1017-1053.

- Barth M G, McDonough W F, Rudnick R L. Tracking the budget of Nb and Ta in the continental crust[J]. *Chemical Geology*, 2000, 165(3): 197-213.
- Black S, Macdonald R, Kelly M R. Crustal origin for peralkaline rhyolites from Kenya: evidence from U-series disequilibria and Th-isotopes[J]. *Journal of Petrology*, 1997, 38(2): 277-297.
- Briqueu L, Bougault H, Joron J L. Quantification of nb, ta, ti and v anomalies in magmas associated with subduction zones: petrogenetic implications[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 1984, 68(2): 297-308.
- Charles N, Augier R, Gumiaux C, et al. Timing, duration and role of magmatism in wide rift systems: Insights from the Jiaodong Peninsula (China, East Asia)[J]. *Gondwana Research*, 2013, 24(1) :412-428.
- Charles N, Chen Y, Augier R, et al. Palaeomagnetic constraints from granodioritic plutons (Jiaodong Peninsula): New insights on Late Mesozoic continental extension in Eastern Asia[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2011, 187(3): 276-291.
- Chen B, Jahn B M, Arakawa Y, et al. Petrogenesis of the Mesozoic intrusive complexes from the southern Taihang Orogen, North China Craton: elemental and Sr-Nd-Pb isotopic constraints[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2004, 148(4): 489-501.
- Chen J F, Xie Z, Li H M, et al. U-Pb zircon ages for a collision-related K-rich complex at Shidao in the Sulu ultrahigh pressure terrane, China[J]. *Geochemical Journal*, 2003, 37(1): 35-46.
- Collins W J, Beams S D, White A J, et al. Nature and origin of A -type granite with particular reference to South eastern Australia[J]. *Contro. Mineral. Petrol*, 1982,80:189-200.
- Condie K C. Mantle plume and their record in earth history[M]. London: Cambridge University Press,2001:1-326.
- Costa F, Dohmen R, Chakraborty S. Time scales of magmatic processes from modeling the zoning patterns of crystals[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2008, 69(1): 545-594.
- Deng J F, Su S G, Niu Y L, et al. A possible model for the lithospheric thinning of North China Craton: evidence from the Yanshanian (Jura-Cretaceous) magmatism and tectonism[J]. *Lithos*, 2007, 96(1): 22-35.
- Druitt T H, Costa F, Deloule E, et al. Decadal to monthly timescales of magma transfer and reservoir growth at a caldera volcano[J]. *Nature*, 2012, 482(7383): 77-80.
- Elliott T, Plank T, Zindler A, et al. Element transport from slab to volcanic front at the Mariana arc[J].

- Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1997, 102(B7): 14991-15019.
- Ewart A, Milner S C, Armstrong R A, et al. Etendeka volcanism of the Goboboseb mountains and Messum Igneous Complex, Namibia. Part I: geochemical evidence of early cretaceous Tristan plume melts and the role of crustal contamination in the Paran ́-Etendeka CFB[J]. Journal of Petrology, 1998, 39(2): 191-225.
- Frey F A, Green D H, Roy S D. Integrated models of basalt petrogenesis: a study of quartz tholeiites to olivine melilitites from south eastern Australia utilizing geochemical and experimental petrological data[J]. Journal of petrology, 1978, 19(3): 463-513.
- Gao S, Luo T C, Zhang B R, et al. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1998, 62(11): 1959-1975.
- Gao S, Rudnick R L, Xu W L, et al. Recycling deep cratonic lithosphere and generation of intraplate magmatism in the North China Craton[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2008, 270(1): 41-53.
- Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, et al. Recycling lower continental crust in the North China craton[J]. Nature, 2004, 432(7019): 892-897.
- Garland F, Hawkesworth C J, Mantovani M S M. Description and Petrogenesis of the Paran ́Rzhyolites, Southern Brazil[J]. Journal of Petrology, 1995, 36(5): 1193-1227.
- Gibson S A, Thompson R N, Day J A. Timescales and mechanisms of plume–lithosphere interactions: ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology and geochemistry of alkaline igneous rocks from the Paran ́-Etendeka large igneous province[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 251(1): 1-17.
- Griffin W L, Andi Z, O'reilly S Y, et al. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino - Korean craton[J]. Mantle dynamics and plate interactions in East Asia, 1998: 107-126.
- Ginibre C, W ́rner G, Kronz A. Minor-and trace-element zoning in plagioclase: implications for magma chamber processes at Parinacota volcano, northern Chile[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2002, 143(3): 300-315.
- Ginibre C, W ́rner G, Kronz A. Crystal zoning as an archive for magma evolution[J]. Elements, 2007, 3(4): 261-266.
- Glazner A F, Farmer G L. Production of isotopic variability in continental basalts by cryptic crustal contamination[J]. Science, 1992, 255(5040): 72-74.
- Gu H O, Xiao Y, Santosh M, et al. Spatial and temporal distribution of Mesozoic adakitic rocks along

- the Tan-Lu fault, Eastern China: constraints on the initiation of lithospheric thinning[J]. *Lithos*, 2013, 177: 352-365.
- Guo F, Fan W M, Wang Y J, et al. Late Mesozoic mafic intrusive complexes in North China Block: constraints on the nature of subcontinental lithospheric mantle[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 2001, 26(9): 759-771.
- Guo F, Fan W M, Wang Y J, et al. Petrogenesis and tectonic implications of Early Cretaceous high - K calc - alkaline volcanic rocks in the Laiyang Basin of the Sulu Belt, eastern China[J]. *Island Arc*, 2005, 14(2): 69-90.
- Goss S C, Wilde S A, Wu F, et al. The age, isotopic signature and significance of the youngest Mesozoic granitoids in the Jiaodong Terrane, Shandong Province, North China Craton[J]. *Lithos*, 2010, 120(3): 309-326.
- Harris C, Milner S. Crustal origin for the Paraná rhyolites: discussion of ‘Description and petrogenesis of the Paraná rhyolites, southern Brazil’ by Garland et al.(1995)[J]. *Journal of Petrology*, 1997, 38(2): 299-302.
- Hofmann A W. Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1988, 90(3): 297-314.
- Hofmann A W, Jochum K P, Seufert M, et al. Nb and Pb in oceanic basalts: new constraints on mantle evolution[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1986, 79(1-2): 33-45.
- Huang J, Zheng Y F, Zhao Z F, et al. Melting of subducted continent: element and isotopic evidence for a genetic relationship between Neoproterozoic and Mesozoic granitoids in the Sulu orogen[J]. *Chemical Geology*, 2006, 229(4): 227-256.
- Huang X L, Xu Y G, Liu D Y. Geochronology, petrology and geochemistry of the granulite xenoliths from Nushan, east China: Implication for a heterogeneous lower crust beneath the Sino-Korean Craton[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68(1): 127-149.
- Ionov D A, Griffin W L, O'Reilly S Y. Volatile-bearing minerals and lithophile trace elements in the upper mantle[J]. *Chemical Geology*, 1997, 141(3): 153-184.
- Irvine T N, Baragar W R A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1971, 8(5): 523-548.
- Jahn B, Wu F, Lo C H, et al. Crust–mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: geochemical and Sr–Nd isotopic evidence from post-collisional mafic–ultramafic intrusions

- of the northern Dabie complex, central China[J]. *Chemical geology*, 1999, 157(1): 119-146.
- Jochum K P, McDonough W F, Palme H, et al. Compositional constraints on the continental lithospheric mantle from trace elements in spinel peridotite xenoliths[J]. 1989, 340: 548-550.
- Lan T G, Fan H R, Santosh M, et al. Early Jurassic high-K calc-alkaline and shoshonitic rocks from the Tongshi intrusive complex, eastern North China Craton: implication for crust–mantle interaction and post-collisional magmatism[J]. *Lithos*, 2012, 140: 183-199.
- LaTourrette T, Hervig R L, Holloway J R. Trace element partitioning between amphibole, phlogopite, and basanite melt[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1995, 135(1): 13-30.
- Lemaitre R W B P, Dudek A K J, Lameyre Le Basm J, et al. A classification of igneous rocks and glossary of terms[J]. *Oxford Blackwell*, 1989, 10: 4-8.
- Lightfoot P C, Hawkesworth C J, Sethna S F. Petrogenesis of rhyolites and trachytes from the Deccan Trap: Sr, Nd and Pb isotope and trace element evidence[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, 95(1): 44-54.
- Ling W L, Duan R C, Xie X J, et al. Contrasting geochemistry of the Cretaceous volcanic suites in Shandong province and its implications for the Mesozoic lower crust delamination in the eastern North China craton[J]. *Lithos*, 2009, 113(3): 640-658.
- Ling W L, Xie X J, Liu X M, et al. Zircon U-Pb dating on the Mesozoic volcanic suite from the Qingshan Group stratotype section in eastern Shandong Province and its tectonic significance[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 50(6): 813-824.
- Liu S, Hu R Z, Gao S, et al. Geochemical and isotopic constraints on the age and origin of mafic dikes from eastern Shandong Province, eastern North China Craton[J]. *International Geology Review*, 2012, 54(12): 1389-1400.
- Liu S, Hu R Z, Zhao J H, et al. K - Ar Geochronology of Mesozoic Mafic Dikes in Shandong Province, Eastern China: Implications for Crustal Extension[J]. *Acta Geologica Sinica - English Edition*, 2004, 78(6): 1207-1213.
- Ma L, Jiang S Y, Dai B Z, et al. Multiple sources for the origin of Late Jurassic Linglong adakitic granite in the Shandong Peninsula, eastern China: Zircon U–Pb geochronological, geochemical and Sr–Nd–Hf isotopic evidence[J]. *Lithos*, 2013, 162: 251-263.
- Macdonald R, Davies G R, Bliss C M, et al. Geochemistry of high-silica peralkaline rhyolites, Naivasha, Kenya Rift Valley[J]. *Journal of Petrology*, 1987, 28(6): 979-1008.

- Maruyama S. Pacific-type orogeny revisited: Miyashiro-type orogeny proposed[J]. *Island Arc*, 1997, 6(1): 91-120.
- Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological society of America bulletin*, 1989, 101(5): 635-643.
- Menzies M A, Fan W, Zhang M. Palaeozoic and Cenozoic lithoprobes and the loss of >120 km of Archaean lithosphere, Sino-Korean craton, China[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1993, 76(1): 71-81.
- Menzies M A, Xu Y G. Geodynamics of the north China Craton. In: Flower M, Chung S L, Lo C H, et al, eds. *Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia*, American Geophysical Union, Washington, DC, 1998:155-165.
- Middlemost E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth-Science Reviews*, 1994, 37(3): 215-224.
- Miller C, Schuster R, Klötzli U, et al. Post-collisional potassic and ultrapotassic magmatism in SW Tibet: geochemical and Sr–Nd–Pb–O isotopic constraints for mantle source characteristics and petrogenesis[J]. *Journal of Petrology*, 1999, 40(9): 1399-1424.
- Münker C. Nb/Ta fractionation in a Cambrian arc/back arc system, New Zealand: source constraints and application of refined ICPMS techniques[J]. *Chemical Geology*, 1998, 144(1): 23-45.
- Ni J L, Liu J L, Tang X L, et al. The Wulian metamorphic core complex: A newly discovered metamorphic core complex along the Sulu orogenic belt, eastern China[J]. *Journal of Earth Science*, 2013, 24: 297-313.
- Ni J L, Liu J L, Tang X L, et al. Early Cretaceous exhumation of the Sulu orogenic belt as a consequence of the eastern Eurasian tectonic extension: insights from the newly discovered Wulian metamorphic core complex, eastern China[J]. *Journal of the Geological Society*, 2015: 2014-122.
- Niu Y L. Generation and evolution of basaltic magmas: some basic concepts and a new view on the origin of Mesozoic–Cenozoic basaltic volcanism in eastern China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2005, 11(1): 9-46.
- Patin A E, Humphreys E D, Johnston A D. Anatexis and metamorphism in tectonically thickened continental crust exemplified by the Sevier hinterland, western North America[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1990, 97(3): 290-315.
- Pearce J A, Norry M J. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y, and Nb variations in volcanic rocks[J].

- Contributions to mineralogy and petrology, 1979, 69(1): 33-47.
- Peccerillo A, Taylor S R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. Contributions to mineralogy and petrology, 1976, 58(1): 63-81.
- Pfänder J A, Münker C, Stracke A, et al. Nb/Ta and Zr/Hf in ocean island basalts-implications for crust-mantle differentiation and the fate of Niobium[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2007, 254(1): 158-172.
- Polat A, Hofmann A W, Rosing M T. Boninite-like volcanic rocks in the 3.7–3.8 Ga Isua greenstone belt, West Greenland: geochemical evidence for intra-oceanic subduction zone processes in the early Earth[J]. Chemical Geology, 2002, 184(3): 231-254.
- Ren J Y, Tamaki K, Li S T, et al. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamics setting in eastern China and adjacent areas. Tectonophysics, 2002, 344: 175-205.
- Schmidt K, Bottazzi P, Vannucci R, et al. Trace element partitioning between phlogopite, clinopyroxene and leucite lamproite melt[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1999, 168(3): 287-299.
- Shao J A, Lu F X, Zhang L Q, et al. Discovery of xenocrysts in basalts of Yixian Formation in west Liaoning Province and its significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(6): 1547-1558.
- Shcherbakov V D, Plechov P Y, Izbekov P E, et al. Plagioclase zoning as an indicator of magma processes at Bezymianny Volcano, Kamchatka[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2011, 162(1): 83-99.
- Song J, Hetland A, Wu F T, et al. P-wave velocity structure under the Changbaishan volcanic region, NE China, from wide-angle reflection and refraction data[J]. Tectonophysics, 2007, 433(1): 127-139.
- Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42(1): 313-345.
- Sylvester P J. Post-collisional alkaline granites[J]. The Journal of Geology, 1989, 97(3): 261-280.
- Tang Y J, Zhang H F, Ying J F. Asthenosphere–lithospheric mantle interaction in an extensional regime: implication from the geochemistry of Cenozoic basalts from Taihang Mountains, North China Craton[J]. Chemical Geology, 2006, 233(3): 309-327.
- Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: its composition and evolution[M]. Blackwell : Oxford Press, 1985(1):1-312.
- Thompson R N, Morrison M A. Asthenospheric and lower-lithospheric mantle contributions to

- continental extensional magmatism: an example from the British Tertiary Province[J]. *Chemical Geology*, 1988, 68(1): 1-15.
- Tommasi A, Vauchez A. Continental rifting parallel to ancient collisional belts: an effect of the mechanical anisotropy of the lithospheric mantle[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 185(1): 199-210.
- Wallis S, Enami M, Banno S. The Sulu UHP terrane: a review of the petrology and structural geology[J]. *International Geology Review*, 1999, 41(10): 906-920.
- Wang L G, Qiu Y M, McNaughton N J, et al. Constraints on crustal evolution and gold metallogeny in the Northwestern Jiaodong Peninsula, China, from SHRIMP U–Pb zircon studies of granitoids[J]. *Ore Geology Reviews*, 1998, 13(1): 275-291.
- Wang J, Chang S C, Lu H B, et al. Detrital zircon U–Pb age constraints on Cretaceous sedimentary rocks of Lingshan Island and implications for tectonic evolution of Eastern Shandong, North China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 96: 27-45.
- Wang X C, Li Z X, Li J, et al. Genesis of the 1.21 Ga Marnda Moorn large igneous province by plume–lithosphere interaction[J]. *Precambrian Research*, 2014, 241: 85-103.
- Wang X C, Li X H, Li W X, et al. The Bikou basalts in the northwestern Yangtze block, South China: Remnants of 820–810 Ma continental flood basalts?[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2008, 120(11-12): 1478-1492.
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to mineralogy and petrology*, 1987, 95(4): 407-419.
- Won C K, Lee M W, Lee J M. A study on the Cretaceous volcanic activity of the Bupseongpo area[J]. *J. Geol. Soc. Korea*, 1991, 27: 416-433.
- Wu F Y, Lin J Q, Wilde S A, et al. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 233(1): 103-119.
- Wu F Y, Walker R J, Yang Y H, et al. The chemical-temporal evolution of lithospheric mantle underlying the North China Craton[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(19): 5013-5034.
- Xu Y G. Thermo-tectonic destruction of the Archaean lithospheric keel beneath the Sino-Korean Craton in China: Evidence, timing and mechanism[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 2001, 26(9): 747-757.

- Xu Y G, Huang X L, Ma J L, et al. Crust-mantle interaction during the tectono-thermal reactivation of the North China Craton: constraints from SHRIMP zircon U–Pb chronology and geochemistry of Mesozoic plutons from western Shandong[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2004a, 147(6): 750-767.
- Xu Y G, Luo Z Y, Huang X L, et al. Zircon U–Pb and Hf isotope constraints on crustal melting associated with the Emeishan mantle plume[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, 72(13): 3084-3104.
- Xu Y G, Ma J L, Huang X L, et al. Early Cretaceous gabbroic complex from Yinan, Shandong Province: petrogenesis and mantle domains beneath the North China Craton[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2004b, 93(6): 1025-1041.
- Yang J H, Chung S L, Wilde S A, et al. Petrogenesis of post-orogenic syenites in the Sulu Orogenic Belt, East China: geochronological, geochemical and Nd–Sr isotopic evidence[J]. *Chemical Geology*, 2005b, 214(1): 99-125.
- Yang J H, Chung S L, Zhai M G, et al. Geochemical and Sr–Nd–Pb isotopic compositions of mafic dikes from the Jiaodong Peninsula, China: evidence for vein-plus-peridotite melting in the lithospheric mantle[J]. *Lithos*, 2004, 73(3): 145-160.
- Yang J H, Wu F Y, Chung S L, et al. Petrogenesis of Early Cretaceous intrusions in the Sulu ultrahigh-pressure orogenic belt, east China and their relationship to lithospheric thinning[J]. *Chemical Geology*, 2005a, 222(3): 200-231.
- Yang J H, Wu F Y, Chung S L, et al. Rapid exhumation and cooling of the Liaonan metamorphic core complex: Inferences from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronology and implications for Late Mesozoic extension in the eastern North China Craton[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2007, 119(11-12): 1405-1414.
- Yang Q Y, Santosh M, Shen J F, et al. Juvenile vs. recycled crust in NE China: Zircon U–Pb geochronology, Hf isotope and an integrated model for Mesozoic gold mineralization in the Jiaodong Peninsula[J]. *Gondwana Research*, 2014, 25(4): 1445-1468.
- Zhai M G, Fan Q C, Zhang H F, et al. Lower crustal processes leading to Mesozoic lithospheric thinning beneath eastern North China: underplating, replacement and delamination[J]. *Lithos*, 2007, 96(1): 36-54.
- Zhang H F. Transformation of lithospheric mantle through peridotite-melt reaction: a case of

- Sino-Korean craton[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 237(3): 768-780.
- Zhang H F, Sun M, Zhou X H, et al. Mesozoic lithosphere destruction beneath the North China Craton: evidence from major-, trace-element and Sr-Nd-Pb isotope studies of Fangcheng basalts[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2002, 144(2): 241-254.
- Zhang H F, Sun M, Zhou X H, et al. Secular evolution of the lithosphere beneath the eastern North China Craton: evidence from Mesozoic basalts and high-Mg andesites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, 67(22): 4373-4387.
- Zhang J, Zhang H F, Ying J F, et al. Contribution of subducted Pacific slab to Late Cretaceous mafic magmatism in Qingdao region, China: a petrological record[J]. *Island Arc*, 2008, 17(2): 231-241.
- Zhao G T, Wang D Z, Cao Q C, et al. Thermal evolution and its significance of IA type granitoid complex[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 1998, 41(5): 529-536.
- Zhao Z H, Zhou L D. REE geochemistry of some alkali-rich intrusive rocks in China[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 1997, 40(2): 145-158.
- Zheng J P, Griffin W L, O'REILLY S Y, et al. Mineral chemistry of peridotites from Paleozoic, Mesozoic and Cenozoic lithosphere: constraints on mantle evolution beneath eastern China[J]. *Journal of Petrology*, 2006, 47(11): 2233-2256.
- Zheng J P, Sun M, Zhou M F, et al. Trace elemental and PGE geochemical constraints of Mesozoic and Cenozoic peridotitic xenoliths on lithospheric evolution of the North China Craton[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, 69(13): 3401-3418.
- Zhou J, Zheng Y, Wu Y. Zircon U-Pb ages for Wulian granites in northwest Sulu and their tectonic implications[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(4): 379-384.
- Zhou T, Lü G. Tectonics, granitoids and Mesozoic gold deposits in East Shandong, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2000, 16(1-2): 71-90.
- Zhou X, Sun M, Zhang G, et al. Continental crust and lithospheric mantle interaction beneath North China: isotopic evidence from granulite xenoliths in Hannuoba, Sino-Korean craton[J]. *Lithos*, 2002, 62(3): 111-124.
- Zhu G, Jiang D, Zhang B, et al. Destruction of the eastern North China Craton in a backarc setting: Evidence from crustal deformation kinematics[J]. *Gondwana Research*, 2012, 22(1): 86-103.
- Zindler A, Hart S. Chemical geodynamics[J]. *Annual review of earth and planetary sciences*, 1986, 14: 493-571.

附录

附表1 桃林地区岩浆岩主量元素数据表

送样号	FeO	Al ₂ O ₃	CaO	TFe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	S	TiO ₂	LOI	SiO ₂
BS-2	1.83	14.61	4.15	4.75	3.69	2.22	0.062	3.27	0.247	0.013	0.348	1.12	64.32
BS-3	0.44	13.10	1.36	2.13	4.33	0.59	0.039	3.28	0.122	0.017	0.158	0.99	72.70
LBY-2	1.02	14.99	2.74	3.14	3.94	1.16	0.053	4.02	0.202	0.012	0.257	1.26	67.03
YJG-1	0.29	12.19	0.20	0.60	4.87	0.06	0.007	3.20	0.023	0.010	0.045	0.45	77.14
SMG-1	1.98	17.73	5.54	4.17	3.21	1.55	0.056	4.10	0.278	0.019	0.378	0.62	61.15
SMG-3	4.85	15.13	8.62	9.15	2.20	4.72	0.151	3.69	0.367	0.059	0.730	0.80	53.18
LHHD	2.57	17.24	4.54	4.82	3.21	2.08	0.126	5.24	0.340	0.171	0.363	4.30	56.38
HHD-5	4.67	14.44	8.08	8.41	1.46	6.00	0.128	3.09	0.569	0.163	0.672	8.00	47.79
YJP-2	1.41	15.53	4.10	5.20	4.12	2.84	0.080	2.85	0.226	0.007	0.344	1.57	61.93
YJP-3	0.06	12.09	0.22	0.56	5.92	0.08	0.007	2.15	0.023	0.010	0.046	1.19	76.52
LBY-3	0.75	16.29	5.17	6.44	2.67	2.74	0.085	3.67	0.318	0.022	0.485	7.92	52.99
LBY-5	0.15	13.84	1.41	5.29	2.91	1.99	0.053	1.65	0.159	0.010	0.410	3.02	68.05
YJG-2	2.15	15.40	5.21	5.34	2.52	3.65	0.090	2.70	0.328	1.050	0.415	2.83	59.27
TL-68	1.25	14.41	1.59	3.10	5.67	1.20	0.052	2.50	0.156	0.013	0.193	1.21	68.71
AZG-2	3.19	13.40	3.41	5.33	2.60	3.83	0.065	2.01	0.255	0.029	0.394	3.76	63.72
XLJ-4	3.18	14.17	4.97	4.71	3.33	2.47	0.073	2.59	0.230	0.021	0.392	5.33	60.51
YJG-7	0.61	13.65	6.54	5.09	4.24	2.08	0.098	1.74	0.194	0.028	0.420	2.22	62.51

附表 2 桃林地区岩浆岩微量元素数据表

送样号	Li	Be	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Nb
BS-2	8.56	1.38	64.85	25.16	13.35	11.10	23.31	79.99	40.52	74.99	477.56	9.23
BS-3	6.18	2.26	27.55	15.10	3.40	2.50	6.12	39.94	39.51	122.07	284.69	16.60
LBY-2	8.44	1.95	45.63	18.87	7.50	27.17	30.57	60.86	49.44	75.33	448.83	16.24
YJG-1	4.64	2.70	36.68	15.30	1.00	2.40	6.85	21.92	12.13	120.39	98.63	19.73
SMG-1	12.31	1.62	55.71	13.78	9.42	5.47	16.84	63.59	87.94	82.42	1227.87	11.14
SMG-3	22.75	1.89	153.11	103.09	34.42	41.25	34.42	99.64	29.62	74.74	300.76	7.42
LHHD	16.21	2.01	85.65	26.58	13.50	10.64	31.01	155.47	39.33	101.28	413.67	16.90
HHD-5	33.18	1.38	117.15	193.82	39.53	93.86	60.13	93.67	36.85	39.48	691.23	9.76
YJP-2	11.96	1.35	79.08	94.79	17.49	35.25	57.54	77.60	44.30	100.27	472.38	10.17
YJP-3	1.22	2.45	6.73	15.10	1.00	2.30	1.40	23.24	13.75	153.21	132.85	20.74
LBY-3	17.19	1.35	77.58	37.14	19.56	14.05	6.33	74.77	45.38	66.65	662.14	11.63
LBY-5	12.25	2.26	57.00	53.66	12.83	22.09	5.90	60.10	29.03	140.97	263.87	16.65
YJG-2	15.98	1.43	65.77	66.96	19.75	38.32	23.28	84.27	37.07	92.76	701.30	10.91
TL-68	10.71	1.30	41.23	15.10	6.62	6.83	7.30	91.91	45.48	114.27	371.79	9.90
AZG-2	30.68	1.78	63.14	67.44	16.59	34.90	25.75	76.24	36.48	106.11	395.52	13.84
XLJ-4	31.31	2.23	85.35	73.35	13.32	25.67	21.85	79.48	34.47	130.78	358.55	17.88
YJG-7	15.32	2.55	109.61	63.89	13.71	27.71	11.23	77.64	33.62	115.57	314.17	15.64

续附表 2

送样号	Sb	Cs	Ba	Ta	Pb	Th	U	Zr	Hf	As	B
BS-2	0.083	0.83	1671.07	1.34	23.05	9.64	1.71	194.2	5.8	1.0	6.0
BS-3	0.078	0.95	1564.58	1.86	19.39	23.09	2.72	215.5	6.2	1.0	<5.0
LBY-2	0.117	0.29	2073.23	2.11	22.74	18.47	2.86	262.7	7.3	1.0	<5.0
YJG-1	0.075	0.63	157.92	1.60	26.79	19.72	2.47	81.9	4.8	1.0	<5.0
SMG-1	0.086	1.17	3815.94	1.67	22.60	9.64	1.19	524.7	10	1.0	<5.0
SMG-3	0.067	2.53	999.57	2.15	17.21	7.50	1.17	177.4	4.7	1.0	<5.0
LHHD	0.075	1.36	1441.35	1.74	45.97	13.70	2.24	352	8.5	1.0	10.0
HHD-5	0.061	0.90	1354.69	0.69	32.71	4.61	1.00	223.9	4.8	1.2	11.0
YJP-2	0.140	1.27	1767.40	0.97	20.81	8.17	1.43	196.3	5.4	1.0	7.5
YJP-3	0.112	1.11	336.64	1.69	31.57	20.18	3.45	81.1	4.9	1.0	8.2
LBY-3	0.122	0.61	1781.29	1.30	19.16	6.37	0.99	226.6	5.6	1.0	<5.0
LBY-5	0.614	6.36	925.73	1.51	27.90	13.00	2.16	228.2	5.3	8.2	<5.0
YJG-2	0.201	1.39	1378.38	1.04	18.20	5.70	1.03	214	6.2	1.5	<5.0
TL-68	0.116	0.62	1939.46	1.30	121.04	12.75	2.40	145	5.4	1.6	<5.0
AZG-2	0.136	3.35	1377.91	0.91	13.24	10.71	2.04	259.5	6.4	1.1	<5.0
XLJ-4	0.196	3.58	1279.89	1.22	30.05	12.89	1.95	280.7	6.9	7.5	<5.0
YJG-7	0.364	0.67	1248.02	0.71	30.42	14.16	2.52	296.4	5.8	2.9	8.7

附表 3 桃林地区岩浆岩稀土元素数据表

送样号	La	Ce	Pr	Nd	Eu	Sm	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
BS-2	58.32	92.64	9.53	34.44	1.41	6.34	4.49	0.64	3.43	0.63	1.71	0.28	1.73	0.28
BS-3	80.74	103.09	11.68	40.37	1.19	5.73	4.68	0.62	3.09	0.53	1.58	0.25	1.70	0.29
LBY-2	89.38	113.55	13.25	46.33	1.43	7.21	5.22	0.72	3.96	0.68	1.74	0.28	1.82	0.31
YJG-1	30.27	44.02	4.60	15.45	0.31	2.40	2.07	0.30	1.80	0.42	1.40	0.24	1.82	0.32
SMG-1	61.34	95.32	10.42	39.54	2.36	6.13	4.58	0.61	3.08	0.52	1.41	0.20	1.27	0.20
SMG-3	39.46	73.69	7.83	32.64	1.79	6.37	5.25	0.81	4.52	0.88	2.44	0.36	2.40	0.40
LHHD	79.42	108.02	14.46	51.68	2.09	8.52	6.39	0.93	4.71	0.87	2.32	0.33	2.06	0.34
HHD-5	70.99	116.78	13.78	59.33	2.22	9.28	6.92	0.93	4.59	0.77	2.04	0.30	2.00	0.28
YJP-2	47.37	85.58	8.13	31.29	1.28	5.11	4.03	0.59	3.17	0.62	1.66	0.28	1.82	0.26
YJP-3	24.80	40.45	4.08	11.55	0.25	2.14	1.78	0.30	1.77	0.38	1.27	0.25	1.97	0.33
LBY-3	59.60	95.30	10.67	40.06	1.96	7.10	5.70	0.84	4.41	0.84	2.17	0.30	2.05	0.32
LBY-5	66.25	100.47	11.78	47.64	1.42	7.45	5.23	0.83	4.17	0.75	2.19	0.33	2.14	0.33
YJG-2	46.19	77.80	8.68	31.92	1.63	5.67	4.11	0.63	3.06	0.54	1.43	0.21	1.24	0.20
TL-68	47.61	85.37	7.41	29.21	1.02	4.40	3.21	0.44	2.32	0.41	1.14	0.17	1.16	0.20
AZG-2	53.50	95.75	10.04	40.98	1.35	7.67	5.44	0.86	4.53	0.83	2.17	0.34	2.15	0.32
XLJ-4	64.89	104.59	12.12	45.02	1.62	8.26	6.54	1.04	5.71	1.10	3.01	0.44	2.86	0.42
YJG-7	50.66	90.87	10.15	38.64	1.46	7.23	5.34	0.88	4.65	0.89	2.37	0.38	2.22	0.35

附表4 山东东部岩浆岩年龄分布表

序号	位置	岩石类型	年龄	误差 (2 σ)	参考文献
1	胶莱盆地	火山岩 (玄武岩)	73.5	0.3	闫峻等, 2003
2	胶莱盆地	火山岩 (玄武质火山岩)	129.7	1.7	张岳桥等, 2008
3	胶莱盆地	火山岩 (玄武质火山岩)	131	2	张岳桥等, 2008
4	海阳	火山岩 (玄武质火山岩)	115.2	3.9	张岳桥等, 2008
5	海阳	火山岩 (玄武质火山岩)	117.1	0.8	张岳桥等, 2008
6	海阳	火山岩 (玄武质火山岩)	119.2	0.6	张岳桥等, 2008
7	莒县	火山岩 (玄武质火山岩)	111	0.8	张岳桥等, 2008
8	莒县	火山岩 (玄武质火山岩)	110.4	1.6	张岳桥等, 2008
9	莒县	火山岩 (玄武岩)	108	2.4	唐嘉锋等, 2008
10	莒县	火山岩 (玄武岩)	109.8	1.4	唐嘉锋等, 2008
11	莒县	火山岩 (安山玢岩)	118.1	1.5	唐嘉锋等, 2008
12	莱阳	火山岩 (安山玢岩)	116	1.5	唐嘉锋等, 2008
13	莱阳	火山岩 (安山玢岩)	117.1	1.5	唐嘉锋等, 2008
14	莱阳	火山岩 (安山玄武岩)	98.1	2.1	唐嘉锋等, 2008
15	莱阳	火山岩 (安山玢岩)	102.5	2.2	唐嘉锋等, 2008
16	莱阳	火山岩 (安山玢岩)	107.5	1.4	唐嘉锋等, 2008
17	莱阳	火山岩 (长石石英斑岩)	103.7	1.3	唐嘉锋等, 2008
18	胶州	火山岩 (流纹岩)	93.3	1.2	唐嘉锋等, 2008
19	诸城	火山岩 (玄武岩)	96	3	匡永生等, 2012a
20	胶州	火山岩 (英安岩)	110.6	0.6	庞崇进, 2015
21	莱阳	火山岩 (安山岩)	125.3	2.8	庞崇进, 2015
22	莱阳	火山岩 (安山岩)	118.9	0.4	庞崇进, 2015
23	莱阳	火山岩 (安山岩)	126.2	0.7	庞崇进, 2015
24	胶州	火山岩 (玄武安山岩)	119.3	0.5	匡永生等, 2012b
25	即墨	火山岩 (玄武安山岩)	122	1.5	匡永生等, 2012b

续附表 4

序号	位置	岩石类型	年龄	误差 (2σ)	参考文献
26	即墨	火山岩 (玄武安山岩)	122	1.79	匡永生等, 2012b
27	青岛	火山岩 (橄欖玄武岩)	114.9	0.6	匡永生等, 2012b
28	海阳	火山岩 (玄武安山岩)	113	1.3	匡永生等, 2012b
29	五莲	火山岩 (安粗岩)	109.9	0.6	邱检生等, 2001
30	五莲	火山岩 (粗面流纹岩)	108.2	0.6	邱检生等, 2001
31	胶州	火山岩 (流纹岩)	106	2	凌文黎等, 2006
32	胶州	火山岩 (流纹岩)	105	4	凌文黎等, 2006
33	胶州	火山岩 (英安岩)	98	1	凌文黎等, 2006
34	胶莱盆地	火山岩 (粗面玄武岩)	105.1	1.7	Guo et al., 2005
35	胶莱盆地	火山岩 (粗面玄武岩)	106.5	1.7	Guo et al., 2005
36	胶莱盆地	火山岩 (粗面英安岩)	92.9	1.5	Guo et al., 2005
37	胶莱盆地	火山岩 (粗面英安岩)	91.4	1.4	Guo et al., 2005
38	诸城	火山岩 (粗面玄武岩)	76.2	1.6	孟繁聰等, 2006
39	胶州	火山岩 (碱性玄武岩)	71.9	1.5	孟繁聰等, 2006
40	灵山岛	火山岩 (流纹岩)	123.9	1.6	Wang et al., 2014
41	灵山岛	火山岩 (流纹岩)	119.2	2.2	周瑶琪等, 2015
42	海阳	玄武岩脉	116.8	0.7	张岳桥等, 2008
43	海阳	玄武岩脉	106.7	0.9	张岳桥等, 2008
44	海阳	玄武岩脉	110.6	1	张岳桥等, 2008
45	甲子山	基性岩脉	200.6	0.2	Yang et al., 2005b
46	玲珑	基性岩脉	127.9	2.4	Yang et al., 2004
47	玲珑	基性岩脉	122.6	2.4	Yang et al., 2004
48	玲珑	基性岩脉	123.9	2.5	Yang et al., 2004
49	玲珑	基性岩脉	132.5	2.6	Yang et al., 2004
50	玲珑	基性岩脉	120.1	1.1	Yang et al., 2004
51	劈石口	基性岩脉	85.8	1.5	Zhang et al., 2008

续附表 4

序号	位置	岩石类型	年龄	误差(2 σ)	参考文献
52	劈石口	基性岩脉	77	1.7	Zhang et al., 2008
53	莒县	辉石闪长岩	118.2	2.5	唐嘉锋等, 2008
54	邢家	辉长岩	213	5	郭敬辉等, 2005
55	邢家	辉长岩	211	5	郭敬辉等, 2005
56	胶家	煌斑岩	120.8	1.8	Ma et al., 2014
57	胶家	煌斑岩	121.6	1.7	Ma et al., 2014
58	胶家	煌斑岩	120.6	2.9	Ma et al., 2014
59	莒南	正长岩	123.9	0.8	Lan et al., 2011
60	莒南	正长岩	124.8	0.8	Lan et al., 2011
61	郭家岭	高镁埃达克	130.6	2.2	Gu et al., 2013
62	玲珑	高镁埃达克	141	8	Gu et al., 2013
63	营盘	高镁埃达克	123.3	3.6	Gu et al., 2013
64	日照	低镁埃达克	124	3.6	Gu et al., 2013
65	日照	低镁埃达克	123.2	4.7	Gu et al., 2013
66	官水	低镁埃达克	152.9	4.3	Gu et al., 2013
67	五莲	低镁埃达克	127.1	2.6	Gu et al., 2013
68	五莲	低镁埃达克	124.3	5.3	Gu et al., 2013
69	薛家岛	低镁埃达克	119	1.7	Gu et al., 2013
70	五莲	花岗岩	125.5	2.2	Gu et al., 2013
71	崂山	花岗岩	125.1	3.1	Gu et al., 2013
72	姚家山	花岗岩	118	3.9	Gu et al., 2013
73	崂山	花岗岩	122.4	2.1	Gu et al., 2013
74	甲子山	正长岩	215	5	Yang et al., 2005b
75	甲子山	正长岩	214.6	0.6	Yang et al., 2005b
76	甲子山	正长岩	214.4	0.3	Yang et al., 2005b
77	甲子山	正长岩	211.9	1.5	郭敬辉等, 2005

续附表 4

序号	位置	岩石类型	年龄	误差(2 σ)	参考文献
78	搓山	花岗岩	205.7	1.4	郭敬辉等, 2005
79	搓山	花岗岩	222	2	Chen et al., 2003
80	搓山	花岗岩	205	5	Chen et al., 2003
81	玲珑	花岗岩	160	3	苗来成等, 1998
82	玲珑	花岗岩	158	3	苗来成等, 1998
83	玲珑	花岗岩	157	4	苗来成等, 1998
84	玲珑	花岗岩	154	4	苗来成等, 1998
85	玲珑	花岗岩	153	4	苗来成等, 1998
86	栾家河	花岗岩	152	10	苗来成等, 1998
87	文登	花岗岩	161	9	郭敬辉等, 2005
88	文登	花岗岩	160	3	郭敬辉等, 2005
89	垛崮山	花岗岩	161	1	郭敬辉等, 2005
90	崂山	花岗岩	146.8	0.8	赵广涛等, 1997
91	榆山	花岗岩	156.9	2.2	张田等, 2007
92	栾家河	花岗岩	154	4	Wang et al., 1998
93	昆嵛山	花岗岩	160	3	胡芳芳等, 2004
94	昆嵛山	花岗岩	142	3	郭敬辉等, 2005
95	郭家岭	花岗岩	130	3	关康等, 1998
96	郭家岭	花岗岩	129	3	关康等, 1998
97	郭家岭	花岗岩	128	6	关康等, 1998
98	郭家岭	花岗岩	128	2	关康等, 1998
99	郭家岭	花岗岩	126	2	关康等, 1998
100	大店	花岗岩	123	4	周建波等, 2003
101	马耳山	花岗岩	115	1	周建波等, 2003
102	七宝山	花岗岩	126	3	周建波等, 2003
103	五莲山	花岗岩	116	4	周建波等, 2003

续附表 4

序号	位置	岩石类型	年龄	误差(2 σ)	参考文献
104	文德山	花岗岩	108	2	郭敬辉等, 2005
105	姜团南部	花岗岩	122.5	5.1	张田等, 2007
106	牙山	花岗岩	117.7	2.9	张田等, 2007
107	牙山	花岗岩	116	0.5	张田等, 2007
108	院格庄	花岗岩	116	0.6	张田等, 2007
109	院格庄	花岗岩	113.4	2.5	张田等, 2007
110	朱吾	花岗岩	115.7	3.1	张田等, 2007
111	海阳	花岗岩	114.5	1.6	张田等, 2007
112	六度寺	花岗岩	114.5	0.8	郭敬辉等, 2005
113	三佛山	花岗岩	113	1	郭敬辉等, 2005
114	三佛山	花岗岩	112	2	郭敬辉等, 2005
115	泰薄顶	花岗岩	114	1	郭敬辉等, 2005
116	崂山	花岗岩	126.2	0.8	赵广涛等, 1997
117	崂山	花岗岩	113	0.9	赵广涛等, 1997
118	崂山	花岗岩	110.8	0.9	赵广涛等, 1997
119	崂山	花岗岩	120.02	2.4	Zhao et al., 1998
120	崂山	花岗岩	106.64	2.13	Zhao et al., 1998
121	昆崮山	花岗岩	113	2	胡芳芳等, 2007
122	三佛山	花岗岩	118	1	Goss et al., 2010
123	艾山	花岗岩	116	1	Goss et al., 2010
124	艾山	花岗岩	113	2	Goss et al., 2010
125	崂山	花岗岩	115	2	Goss et al., 2010
126	崂山	碱长花岗岩	114	2	王世进等, 2009
127	小平兰	碱长花岗岩	129.92	1.84	王世进等, 2009
128	大平兰	碱长花岗岩	86.74	1.75	王世进等, 2009
129	崂山	碱长花岗岩	110.7	3.9	王世进等, 2009

续附表 4

序号	位置	岩石类型	年龄	误差(2 σ)	参考文献
130	崂山	碱长花岗岩	110.83	0.8	郭良等, 2007
131	崂山	正长花岗岩	112.5	2.6	王世进等, 2009
132	崂山	正长花岗岩	113.03	0.8	郭良等, 2007
133	浮山	二长花岗岩	120	2	王世进等, 2009
134	崂山	二长花岗岩	126.23	0.9	张田等, 2007
135	独单山后	石英正长岩	120	4	王世进等, 2009
136	尹家大山	石英二长岩	153.58		宋明春等, 2008
137	虎头石	二长花岗岩	95		宋明春等, 2008
138	莒南	石英二长岩	86.3		郑永飞等, 2002
139	固庄	二长闪长岩	113		李曙光等, 1994
140	乳山	闪长岩	121.5		宋明春等, 2007
141	双山	二长花岗岩	158.14		李曙光等, 1993
142	文登	二长花岗岩	153	2	王世进等, 2009
143	草庙子	二长花岗岩	144	7.2	李曙光等, 1994
144	草庙子	二长花岗岩	157.1	1.4	王世进等, 2009
145	文登	二长花岗岩	167	3	王世进等, 2009
146	文登	二长花岗岩	167	2	王世进等, 2009
147	姑娘坟	二长花岗岩	107	5.4	郑永飞等, 2002
148	红门石	正长岩	205	21	李曙光等, 1993
149	红门石	石英正长岩	215	5	唐俊等, 2004
150	红门石	石英正长岩	219.7	2.1	唐俊等, 2004

攻读硕士学位期间取得的学术成果

发表论文情况:

- (1) 梁文栋,周瑶琪,孙棋,岳会雯. 青岛唐岛湾潮间带沉积物粒度及水动力分析[J]. 海洋地质前沿,2015,31(12):27-34.
- (2) 周瑶琪,张振凯,梁文栋,李素,岳会雯. 山东东部晚中生代构造-岩浆活动及原型盆地恢复[J].地学前缘,2015,22(1):137-156.
- (3) 岳会雯,周瑶琪,梁文栋. 深水浊积岩有机质富集规律研究进展[J].地质科技情报. (录用待刊)
- (4) 张振凯,周瑶琪,梁文栋,岳会雯. 山东灵山岛构造期次研究及意义[J].海洋地质前沿. (录用待刊)

会议论文:

- (1) 梁文栋,周瑶琪,张振凯,周腾飞. 山东东部近海裂陷盆地早白垩世岩浆演化特征.收录于中国矿物岩石地球化学学会第15届学术年会论文摘要集以及吉林大学学报(地球科学版),2015,45(S):198-199.
- (2) 张振凯,周瑶琪,梁文栋.山东东部晚中生代岩浆演化历史.第二届全国青年地质大会,并收录于地质论评,2015,61(S):778-779.
- (3) Huiwen Yue, Yaoqi Zhou, Wendong Liang. Progress on Source Rock Potential of Deepwater Turbidite and Case Study of Lingshan Island. 35th International Geological Congress.

专著章节:

- (1) Yaoqi Zhou, Wenyan Qin, Yuncui Zhang, Qian Liu, Wendong Liang, Huiwen Yue, Qi Sun, Han Zhang. Laser Raman Spectroscopy Study on the Growth Zoning of Feldspar, Zircon, Apatite and their Geological Meaning.

致谢

三年硕士生活行将结束，新的学习生涯即将开始，三年的成长得益于师长朋友们的帮助，在此容我对你们表示由衷的感谢。

首先，要感谢我的导师周瑶琪教授。从入门做本科毕业设计一直到三年后的硕士毕业设计，他言传身教，循循善诱，给予了多方面的肯定和支持，使我不仅在学业上有了极大的进步，在生活态度上也有了提高和积极的转变。他敏锐的思维，严谨的态度，为我树立了极好的榜样，而乐观的生活态度和真诚的待人接物的方式也给我留下了深刻的印象。因此，能得周老师的指导而深感荣幸，谨此向周瑶琪教授表示衷心的感谢！

再者，衷心感谢在我求学过程中给予过指导的所有老师们，尤其是吕洪波老师、颜世永老师等在野外过程中给予的指导和帮助！衷心感谢在我论文阶段给予我帮助和支持的张振凯等师兄师姐和实验中给我帮助的师弟师妹们，以及在生活中给予我支持和陪伴的舍友和平朋友们。尤其感谢岳会雯同学在我硕士生涯中的陪伴和帮助。

感谢我的父母家人在我求学过程中默默支持，以及交给我的诚实待人、尊敬师长的谆谆教导，衷心的感谢并祝福他们！

最后，衷心感谢对我硕士论文进行评审的各位专家教授，感谢他们对论文的指导 and 宝贵意见！