

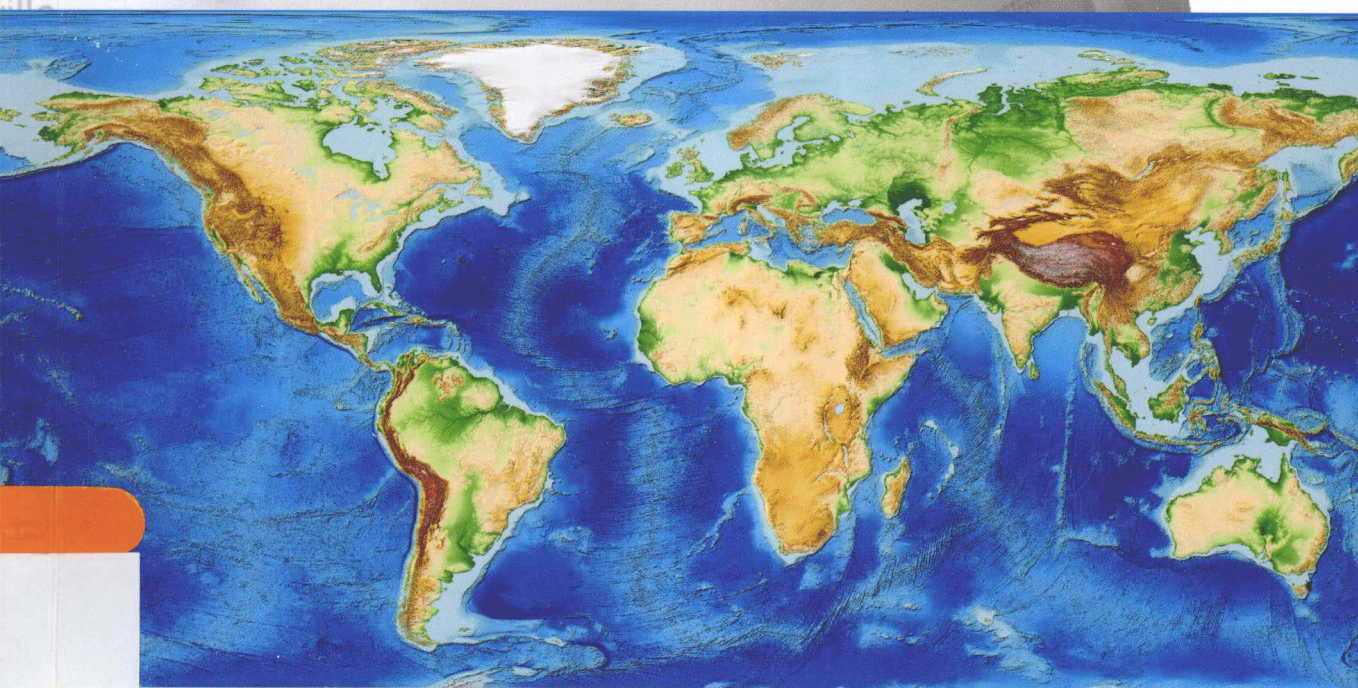
牛耀龄/著

全球构造与地球动力学

——岩石学与地球化学方法应用实例

Global Tectonics and Geodynamics

A Petrological and Geochemical Approach

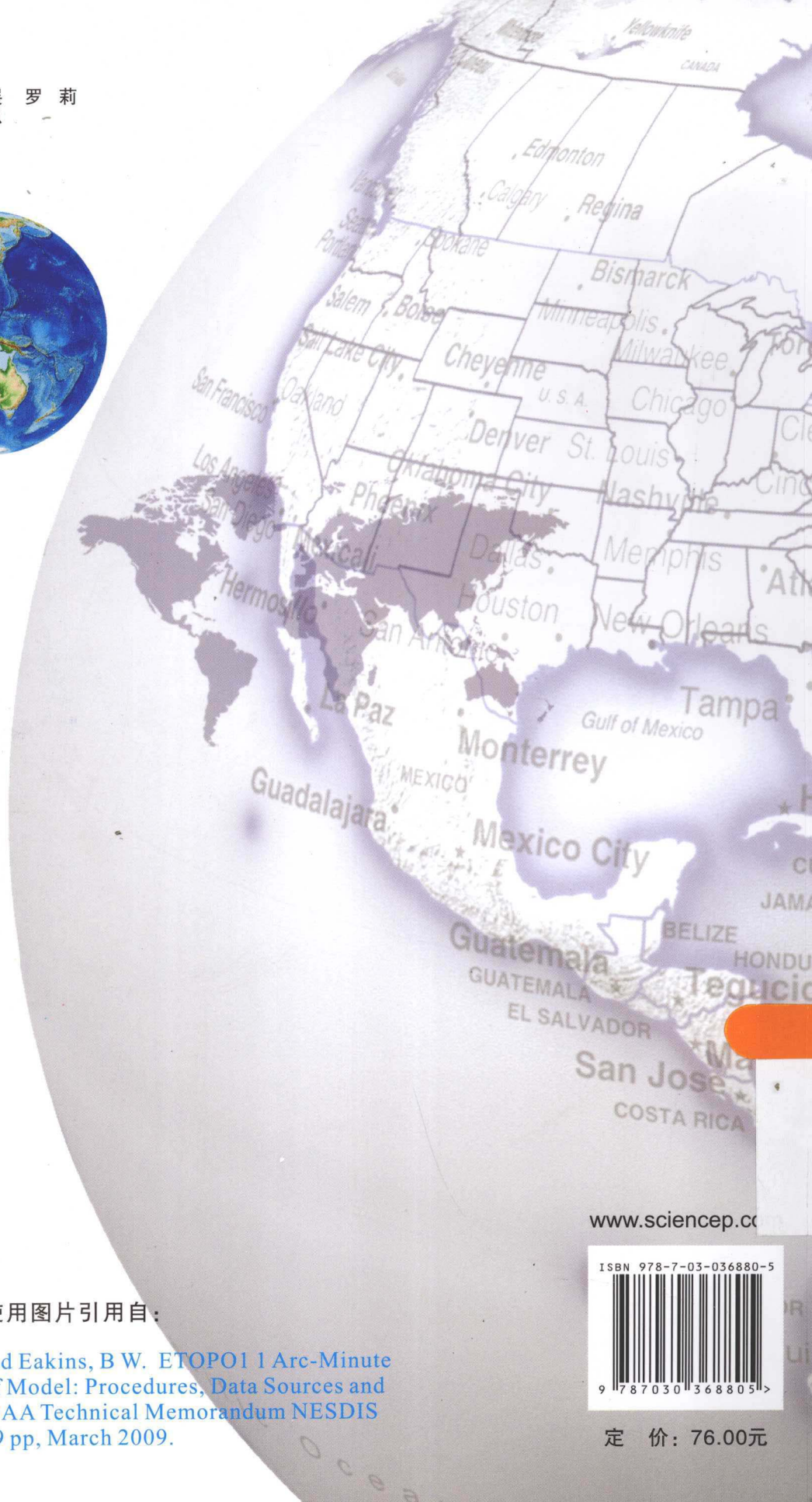


科学出版社

(P-2376.0101)

责任编辑:张展 罗莉

封面设计:陈思思



封面/封底使用图片引用自:

Amante, C and Eakins, B W. ETOPO1 1 Arc-Minute
Global Relief Model: Procedures, Data Sources and
Analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS
NGDC-24, 19 pp, March 2009.

www.sciencep.com

ISBN 978-7-03-036880-5



9 787030 368805 >

定 价: 76.00元

全球构造与地球动力学

——岩石学与地球化学方法应用实例

Global Tectonics and Geodynamics

——A Petrological and Geochemical Approach

牛耀龄 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是以近年来具有代表性的相关科研成果为基础经梳理、提升、补充完成的。以岩石学和地球化学为手段来研究全球地质构造问题,包括俯冲带的成因、大洋中脊动力学、洋岛玄武岩的成因与地幔柱岩浆作用、洋壳的成因、大陆地壳的增生与演化以及地幔对流等。

本书适合高等院校地球科学专业的高年级本科生和研究生阅读使用。

图书在版编目(CIP)数据

全球构造与地球动力学: 岩石学与地球化学方法应用实例
/ 牛耀龄著. —北京: 科学出版社, 2013.3
ISBN 978-7-03-036880-5

I. ①全… II. ①牛… III. ①地质构造-文集 ②地球动力学-文集 IV. ①P54-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 040602 号

责任编辑: 张 展 罗 莉 / 封面设计: 陈思思
责任校对: 罗 莉 / 责任印制: 邝志强

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号
邮政编码: 100717
<http://www.sciencep.com>

四川煤田地质制图印刷厂印刷
科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年3月第 一 版 开本: 787×1092 1/16
2013年3月第一次印刷 印张: 20
字数: 400千字
定价: 76.00元

前 言

应科学出版社罗莉编辑的邀请，对我团队的科研成果做一总结，为地质科学和地质教育事业留下更多更详细的研究资料，对此我表示由衷感谢！我的工作团队尚处于建设初期，目前还没有系统科研成果汇总汇报。令人鼓舞的是，这个团队的成员年轻，个个热爱地质、认真踏实、勤奋好学、奋发向上，有在科研上超越老师、超越前人的可贵品质、精神和毅力。他们的情感和执着使我看到了希望，他们是早晨八九点钟的太阳，一定会为祖国的地质科学事业作出重要贡献。要超越老师，首先要明白老师在做什么。为此，我组织他们以我近年来具有代表性的科研成果作为基础，经梳理、提升和补充编著成书。编著本书的目的是为国内年轻地学工作者、地学高年级本科生和研究生提供如何做原创性基础地球科学问题研究的一些实例。

自 1998 年以来，我和国内同行合作研究岩石地球化学方面的基础科学问题。我先后在国内许多大学、研究机构介绍过我的阶段性成果，这包括 1998 年 12 月首次在中国科学院地质研究所为时一周的系列讲座，以及先后在中国科学技术大学、南京大学、北京大学、中国地质大学（北京）、兰州大学、西北大学、青岛海洋大学、天津地质矿产研究所、同济大学、中国科学院南海研究所等为时一天到两周的系列讲座。“自然科学的美在于简洁”“科学研究需要清晰的逻辑思维”“科学的价值在于创新”“站在学科研究的前沿提出科学研究问题”是对我系列讲座的普遍反映。作为一名科学家，我为这样的评价深感欣慰，因为我的科研对年轻人有感染力。作为一名教师，我深受鼓舞，因为我的讲座激发了年轻人对地质科学的兴趣和热情。同时也有建设性意见，比如，我的文章太长，又是英文的，读起来费劲，要是翻译成中文就好了。的确，文章太长会让人望而却步，英文对初学者无从着手，翻译成中文很有必要，读者面广，效果好。

从 1978 年春天上大学的第一天起我就发现时间不够用，对学习和工作几乎是废寝忘食，但学习工作之余并未丢下我的业余爱好——读史书，尤其是中国近代史。从鸦片战争的割地赔款、八国联军的火烧圆明园，到日寇的“三光”政策、亡国灭种的威胁，屈辱的近代史让国人产生强国心态。新中国的成立，“两弹一星”的相继研制成功和载人航天的顺利实现等，极大地鼓舞了中国人民的志气，振奋了中华民族的精神。过去 30 多年里，中国在“实现社会主义现代化”的战略指引下，在许多方面都有了突飞猛进的发展，从经济穷国跨入了经济大国和强国的行列，在科学技术方面也取得了前所未有的可喜成绩。在我出国留学、工作的 20 多年里，对国内地质科学发展的具体贡献甚少，但我很幸运，走南闯北，足迹遍及世界各地，依靠中国人的勤奋、刻苦和不卑不亢的自信赢得了国际同行的尊重。我也看到了海外华人因中国的崛起而备受尊重。中国要强大！其实；

“强”和“大”是两个不同的概念，这在科学技术领域尤其如此。中国是个研究大国，而不是研究强国。就地球科学而言，科研成果越来越多，但具有国际引领地位的新理论和新认识还很少。“大”做到了，但“强”还没有！从大国迈向强国是一个从量变到质变的漫长过程，但我们可以努力缩短这个过程。的确，“科学的价值在于创新”。本书的目的就是鼓励年轻人努力学做创新研究，从而加快迈向强国的步伐！

讲到创新或原创，有必要更正一些误导性的流行概念。比如，我们常常鼓励追踪国际“前沿”和研究“热点”，这似乎合理，但实际上成了“赶时髦”，无意中鼓励我们模仿别人，不知不觉地放弃了我们原创的机会，在某种程度上也扼杀了我们原创能力的发现和发展。这些“追踪”虽有必要，但不是原创，这阻碍迈向强国的步伐。科学家的责任是发现问题，开拓性地找出解决问题的方法、途径，包括研制解决问题的工具并最终解决问题。本书的每一章都是针对某个/某些科学问题的原创性成果，共同特点是以岩石学和地球化学为手段来研究全球地质构造问题。内容包括俯冲带的成因、大洋中脊动力学、洋岛玄武岩的成因与地幔柱岩浆作用、洋壳的成因、大陆地壳的增生与演化以及地幔对流等。每章均深入浅出，用通俗易懂的表达方式论证了为什么以及如何用岩石学和地球化学的基本概念和原理探索并力图解决全球固体地球科学问题。因此，本书是对有关科学方法论实例的成果展示，即如何用岩石学与地球化学方法来研究一系列全球构造/地球动力学的重要科学问题。有助于引导年轻地质、地球科学工作者从事原创性研究。

比如，玄武岩浆的起源在宏观上是相对比较简单物理过程。因此，地幔熔融一定会有其产物（玄武岩或地幔残余橄榄岩）中留下能够反映物理过程的岩石化学烙印。我的工作方法之一是在全球规模上寻找这些烙印，即岩石地球化学组成和某些全球地质现象或变量间的相关关系，从而找到岩浆起源和演化的物理控制因素。这种从寻找全球规律为指导思想的科学方法有助于真正理解岩石的成因和地质、地球物理过程，并获得具有普遍意义的模型。“Global Pattern Recognition”是这一方法最为贴切的英文表述，直译可以是“全球模式（图案）识别”，但确切地讲，应该是“识别全球地质现象呈现的规律”，更确切地讲应该是“寻找全球地质、地球现象和事件的相关关系”。从大陆漂移到海底扩张，再到板块构造，以及地幔柱假说的许多方面都是“Global Pattern Recognition”的结果。应该强调的是，成功运用这一方法要求培养我们区别主要变量与次生现象变量的习惯和能力。而后者必须建立在坚实的综合基础知识之上，这包括数学、物理、化学、物理化学、矿物学、岩石学、实验岩石学、综合地质学、地球物理学、地球化学等。有了这个坚实基础，我们就有了正确思考问题所必需的基本概念。基本概念对了，结论就可能是正确的，如果基本概念错了，最终结论正确的几率很小，即便是对了，也是碰巧，没有科学意义。

本书还体现了一个哲学思想，即“开放的思维和客观的头脑是造就科学洞察力和引导科学发现的两个必要前提”。我希望本书的年轻读者还能体会到原创科学研究需要研究人员：①注重翔实的基本观察；②保证获取最高质量的数据；③不怕犯错误；④站得高看得远，有全球头脑，但不忽略重要细节；⑤有敢于争议的胆识和能力；⑥并具备向传统和权威挑战的勇气。

最后我感谢我团队的年轻人（孟凡雪、张宇、郭鹏远、崔慧霞、孙普、马玉鑫、孙

文礼、刘金菊、叶蕾、邵凤丽、胡振兴、胡妍和叶小璐)和科学出版社的罗莉编辑为此书的出版付出的辛勤劳动,他们每个人都参与了本书编译的全部过程,是真正的贡献者。我感谢多年来和我合作的国内外同事和朋友,没有他们的友谊和学术探讨就不会有本书里的科学内容。我也感谢我以往的学生——研究生和本科生。我在大学教书有 30 年了,本科生(国内外)大多是 20 岁左右的年轻人,他们充满活力,使我感到年轻,使我对我的科研和教学永远充满热情和激情!最后,我衷心感谢我夫人张黎军几十年如一日的无私奉献和支持!

愿本书的读者和编译者一道为中国的地质研究从大国迈向强国做出积极的贡献。

牛耀龄 (Niu Yaoling)

兰州大学地质科学与矿产资源学院

英国杜伦 (Durham) 大学地球科学系

niuy1@lzu.edu.cn; yaoling.niu@durham.ac.uk

2012. 06. 12



作者: 前排(坐)左起牛耀龄、崔慧霞、邵凤丽、孟凡雪、张宇、刘金菊、叶蕾
后排(站)左起叶小璐、胡振兴、郭鹏远、孙文礼、孙普、马玉鑫、胡妍

孟凡雪, 女, 1981 年, 现任兰州大学讲师。2005 年于吉林大学获学士学位, 2008 年于西北大学获硕士学位, 2011 年于中国地质大学(武汉) 获博士学位。研究兴趣包括 Hf 同位素和中国东部中-新生代岩石圈演化, 大洋中脊玄武岩 Nd-Hf 同位素体系耦合和解耦的成因关系、大陆地壳增长模式。

张 宇, 男, 1983 年, 兰州大学 2011 级博士研究生。2005 年于华东地质学院获学士学位, 2008 年于西北大学获硕士学位。研究内容包括太平洋近洋脊海山 Hf 同位素研究, 中国东部地幔橄榄岩 Re-Os 同位素研究, 青藏高原同碰撞花岗岩的成因和陆壳增长。

郭鹏远, 男, 1987 年, 兰州大学 2010 级硕士研究生、2012 级博士研究生。2010 年于吉林大学获学士学位。研究内容包括西秦岭碳酸岩与钾霞橄黄长岩的成因, 中国东部中-新生代岩石圈演化的岩石学和地球化学证据。

崔慧霞, 女, 1987 年, 兰州大学 2011 级硕士研究生。2011 年于兰州大学获学士学位。研究内容包括大陆碱性玄武岩的成因和橄榄石、辉石及斜长石巨晶的形成环境及意义, 祁连山同碰撞 S-型花岗岩的成因。

孙 普, 男, 1989 年, 兰州大学 2011 级硕士研究生。2011 年于兰州大学获学士学位。研究内容包括大陆碱性玄武岩的成因和岩石圈地幔包裹体的就位机制, 祁连山同碰撞 S-型花岗岩的成因。

马玉鑫, 男, 1987 年, 兰州大学 2011 级硕士研究生。2011 年于华侨大学获学士学位。研究内容包括新疆北部阿勒泰地区晚古生代火山岩地层中的磁铁矿及邻区铜镍硫化物矿床的成因, 祁连山同碰撞 I-型花岗岩的成因。

孙文礼, 男, 1990 年, 兰州大学 2011 级硕士研究生。2011 年于中国地质大学(北京) 获学士学位。研究内容包括新疆北部晚古生代赋存于安山质火山岩中的大型超大型磁铁矿床的成因, 祁连山同碰撞 I-型花岗岩的成因。

刘金菊, 女, 1988 年, 兰州大学 2012 级硕士研究生。2012 年于兰州大学获学士学位。本科阶段研究华北地区新生代火山岩的岩石地球化学特征, 硕士阶段研究西昆仑造山带花岗岩的特征、成因和地质意义。

叶 蕾, 女, 1990 年, 兰州大学 2012 级硕士研究生。2012 年于兰州大学获学士学位。本科阶段研究华北地区新生代火山岩的岩石地球化学特征, 硕士阶段研究东昆仑造山带花岗岩的特征、成因和地质意义。

邵凤丽, 女, 1989 年, 中国地质大学(北京) 2012 级硕士研究生。2012 年于中国地质大学(北京) 获学士学位。本科阶段研究碱流岩(长白山和澳大利亚 Glass House Mountain) 的成因与演化。硕士阶段研究西秦岭—东昆仑造山带花岗岩的特征和成因。

胡振兴, 男、1989 年, 兰州大学 2012 级硕士研究生。2012 年于中国地质大学(武汉) 获学士学位。本科阶段研究华南地幔包体的岩石学特征和就位条件。硕士阶段研究典型阿尔卑斯型格铁矿的成因。

胡 妍, 女, 1989 年, 兰州大学 2012 级硕士研究生。2012 年于兰州大学获学士学位。本科阶段研究阿拉善地块古生代花岗岩的成因。硕士阶段研究东昆仑新生代中-酸性火山岩的特征、成因及大地构造意义。

叶小璐, 女, 1991 年, 中国地质大学(北京) 09 级本科生, 论文题目是西秦岭西段 S-型和 I-型花岗岩的对比研究。

目 录

前 言	i
第 1 章 玄武岩浆起源和演化的一些基本概念	1
1.1 岩浆起源的概念	1
1.1.1 部分熔融与全部熔融	1
1.1.2 玄武质岩浆的幔源物质	2
1.1.3 部分熔融的发生——岩浆的形成	3
1.1.4 减压熔融和绝热梯度	5
1.1.5 等压和变压熔融反应	6
1.2 玄武岩浆的成因和构造环境	8
1.2.1 离散型板块边界岩浆的形成	9
1.2.2 汇聚板块边界岩浆的形成	9
1.2.3 转换断层岩浆的形成	13
1.2.4 板内火山活动	13
1.3 岩浆演化	14
1.3.1 液相线温度和液相演化趋势 (LLDs) 的概念	14
1.3.2 “湿”玄武质岩浆的液相线温度	16
1.3.3 含水和无水玄武岩浆不同的演化轨迹	18
1.4 中国东部中生代火山活动起源的假说	19
1.4.1 地势、重力、地壳厚度和地幔地震层析图像的启示	19
1.4.2 导致中国东部岩石圈减薄的因素	21
1.4.3 中国东部中生代玄武岩浆火山活动	25
1.4.4 中国东部新生代玄武岩浆火山活动	26
1.5 小结	29
第 2 章 俯冲带的成因和板块构造	31
2.1 历史回顾及新概念的诞生	31
2.2 导向新概念的观察	32
2.3 定性描述及定量计算	37
2.3.1 大洋高原模式	37
2.3.2 定量考虑	38

2.4	新概念与现有模型之比较	41
2.5	新概念的有效性 & 预测性	42
2.5.1	Hawaii-Emperor 海山链 43 Ma 前折曲的成因	42
2.5.2	蛇绿岩定位、玻安岩的产生以及前弧英云闪长岩—奥长花岗岩—花岗岩 (TTG) 组合的成因	43
2.5.3	大陆增生机制	43
2.5.4	被动大陆边缘——未来俯冲带的轨迹	45
2.6	小结	45
第3章	洋中脊动力学	47
3.1	研究现状	47
3.2	全球 MORB 数据库及新观点	49
3.3	分异影响校正	53
3.3.1	Klein 和 Langmuir (1987) 的方法和解释	53
3.3.2	Klein 和 Langmuir (1987) Fe_8 校正存在的问题	54
3.3.3	校正分异影响到 $Mg^{\#}=0.72$	55
3.3.4	化学组成—洋脊水深相关性: Fe_8 和 Na_8 等同于未进行分异校正的原始数据	55
3.3.5	化学组成—洋脊水深相关性: 分异校正数据的平均值	56
3.3.6	化学组成—洋脊水深之间相关性: 主要讨论 Fe_{72} 与 Fe_8 和 Na_{72} 与 Na_8	59
3.3.7	小的 Fe_{72} 变化可能没有压力意义	61
3.4	全球洋脊水深变化——基本限定	62
3.4.1	地幔潜在温度变化的意义	62
3.4.2	地幔组分变化的意义	67
3.5	几点思考	74
3.5.1	控制全球洋脊水深变化的因素	74
3.5.2	全球 MORB 组分变化控制的因素	76
3.5.3	控制初始熔融深度 (P_o) 的因素	77
3.5.4	控制终止熔融深度 (P_f) 的因素	77
3.5.5	浅脊的 MORB 熔体演化程度更高的缘由	78
3.5.6	我们提出深脊下是富石榴石橄榄岩而不是榴辉岩或石榴辉石岩	78
3.5.7	洋脊是浅源还是深源的	79
3.6	小结	80
第4章	洋岛玄武岩的成因	82
4.1	岩石学和地球化学制约	82

4.1.1 俯冲洋壳的熔融不能产生高镁的 OIB 熔体	82
4.1.2 古洋壳在同位素上太亏损, 不能产生 OIB	83
4.1.3 俯冲带脱水后的循环洋壳很难成为 OIB 的源区	87
4.1.4 OIB 缺少俯冲带脱水的 Sr-Nd-Hf 同位素特征	89
4.2 矿物物理学制约	92
4.2.1 俯冲到下地幔的洋壳密度太大而不能返回上地幔	92
4.2.2 下地幔条件下玄武质熔体密度比周围固态地幔物质密度大得多	93
4.3 OIB 源区的成因	93
4.3.1 大洋玄武岩地幔源区的两端元组分(复合岩性)	95
4.3.2 两种端元都很古老, 但是它们有不同的同位素演化历史	95
4.3.3 低熔融程度岩浆成因的富集组分	96
4.3.4 LVZ 和增生的大洋岩石圈界面低分熔熔体的交代作用	96
4.3.5 循环的被交代大洋岩石圈物质补给热点火山作用和 OIB 源区	97
4.3.6 地幔源区富集的两个时间尺度	97
4.3.7 对地幔地球化学结构的启示	97
4.4 小结	98
第 5 章 洋岛玄武岩源区物质的性质, 俯冲洋壳、岩石圈地幔的命运	99
5.1 简要回顾	100
5.2 俯冲洋壳(SOC)不是 OIB 的主要源区	100
5.2.1 SOC 太亏损, 不可能是 OIB 源区组成	101
5.2.2 改进的“ROC”模型有更多不足	103
5.3 俯冲的陆源沉积物不是 OIB 源区的主要组成	105
5.4 大陆岩石圈地幔可能是 OIB 的富集源区	106
5.5 大洋岩石圈地幔交代作用可以解释 OIB 源区的富集过程	107
5.5.1 地幔交代作用	107
5.5.2 地幔交代作用发生的场所	108
5.5.3 地幔交代作用机制	109
5.5.4 交代介质的性质	110
5.6 地幔动力学的一些新思路	112
5.6.1 对亏损 MORB 地幔性质及起源的新认识	112
5.6.2 俯冲大洋岩石圈的归宿	113
5.7 小结	116
第 6 章 岩石圈厚度与全球洋岛玄武岩地球化学组成的成因关联	118
6.1 基本原理	119
6.2 盖层效应及其地球动力学意义	119
6.2.1 大洋岩石圈厚度(L)的影响——盖层效应	124

6.2.2	大洋岩石圈的厚度变化是全球 OIB 地球化学特征最主要的控制因素	125
6.2.3	受限于岩石圈厚度的浅部熔融过程稀释 OIB 中的“石榴子石”痕迹	126
6.2.4	OIB 中 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素特征显示盖层及源区的效应	126
6.2.5	OIB 的化学成分记录了熔融的最终深度 (P_f), 而不是初始熔融深度 (P)	127
6.2.6	大洋岩石圈作为热边界层具有岩石学意义	129
6.2.7	OIB 的地球化学特征要求主动上涌和减压熔融	130
6.3	盖层对 OIB 矿物成分的影响	131
6.3.1	Niu 和 O'Hara (2007) 的解释	132
6.3.2	盖层效应在解释橄榄石成分中的作用	134
6.4	成熟大洋岩石圈的恒定厚度	142
6.5	小结	143
第 7 章	洋脊“吸引力”、洋脊—“地幔柱”相互作用和浅部地幔对流	145
7.1	两个概念	145
7.1.1	地幔柱	145
7.1.2	洋脊	148
7.2	实例	151
7.2.1	近端和远端柱—脊相互作用	151
7.2.2	扩张速率决定地幔柱流动	153
7.2.3	实例和现象	154
7.3	小结	159
第 8 章	地幔熔融和深海橄榄岩的成因	162
8.1	研究进展	162
8.2	数据和模型解释	163
8.2.1	深海橄榄岩全岩成分间的相关关系	163
8.2.2	定量方法	166
8.2.3	模型应用	170
8.3	结果讨论	174
8.3.1	深海橄榄岩的成因	174
8.3.2	与其他模型的对比	176
8.3.3	其他重要应用	177
8.4	小结	184
第 9 章	深海橄榄岩的地球化学特征及成因	185
9.1	研究现状概要	185
9.1.1	存在主要问题	185

9.1.2 新的研究方法	186
9.2 样品	187
9.3 分析方法和数据	187
9.4 可行的模型框架	188
9.5 数据和解释	189
9.5.1 深海橄榄岩全岩主量元素	189
9.5.2 深海橄榄岩全岩微量元素特征	194
9.6 主要问题及讨论	207
9.6.1 再富集作用发生的地点	207
9.6.2 熔体再富集作用似乎没有影响残余单斜辉石	208
9.6.3 过量 LREE、HFSE 和其他不相容元素的储存和分配	208
9.6.4 Nb-Ta 和 Zr-Hf 分异机制	210
9.6.5 洋脊下 Nb-Ta、Zr-Hf 分异的一种假说	211
9.6.6 单斜辉石是残余还是出溶产物	213
9.6.7 蛇纹石化和海底风化的地球化学效应	213
9.6.8 熔体-残余的互补性	214
9.7 地球化学动力学意义	215
9.7.1 Eu 异常	215
9.7.2 部分熔融和熔体-残余反应的直接标志	217
9.7.3 丢失的 Nb 储库	217
9.7.4 俯冲带蛇纹石化和海底风化的可能结果	218
9.8 小结	219
第 10 章 洋壳与陆壳的成因关系、大陆地壳增生的场所和机制、亏损地幔的成因	221
10.1 原始 MORB 中过量的 Eu 和 Sr	221
10.1.1 稀土元素和岩石成因	221
10.1.2 普遍观点: 幔源熔体中不存在 Eu 异常	222
10.1.3 大陆地壳中显著的负 Eu 异常	223
10.1.4 原始 MORB 熔体都具有显著的正 Eu 异常	223
10.1.5 MORB 熔体中 Eu 和 Sr 异常的起源	225
10.1.6 DMM 具有过量的 Eu 和 Sr	227
10.2 对两个主要固体地球问题的新认识	227
10.2.1 大陆地壳来源和壳幔分异	227
10.2.2 大洋上地幔的化学结构	236
10.3 小结	243
第 11 章 元素分异和地质过程	245
11.1 理论	245

11.2 观察	245
11.3 讨论	247
11.3.1 MORB 和 MORP 中的 Zr-Hf 和 Nb-Ta 分异	247
11.3.2 海水中的 Zr-Hf 和 Nb-Ta 分异	248
11.4 小结	250
关于地幔柱大辩论	252
1. 地幔柱假说: 起源、有限性	252
2. 其他可能模型和警告	253
3. 地幔柱大辩论有关的定义和概念	253
全地幔对流模型	254
分层地幔对流	255
4. 结语	256
主要参考文献	257
附录I 常用术语索引	299

第1章 玄武岩浆起源和演化的一些基本概念

40 多年前, 板块构造理论的诞生给地球科学领域带来了一场革命, 为理解地质过程提供了全新思路。比如说, 板块构造理论合理地解释了板块边界的地震和火山活动: ①新生洋壳在洋中脊不断形成; ②大洋岩石圈通过俯冲带不断返回地幔产生岛弧岩浆作用。然而, 板块构造理论并不能解释板内地震和火山活动。热点和深源地幔柱被广泛用来解释板内火山活动。板内火山活动很普遍, 是地幔岩浆作用的一个重要表现形式。很多板内火山活动与广泛接受的热点/地幔柱有关, 如 Hawaii、Samoa、Tahiti, 但也有很多地方并非如此, 像新生代火山活动活跃的澳大利亚东部 (Johnson et al., 1989)、中国东部 (Deng et al., 1998; Zhang et al., 1998; Liu, 1999)、欧洲中西部 (Wilson & Patterson, 2001) 以及著名的大西洋—非洲板块 Cameroon 火山链 (Fitton & Dunlop, 1985; Halliday et al., 1988) 和在海底零星分布的大量海山 (Batiza, 1982), 它们远离板块边界, 用板块构造理论和地幔柱假说都很难解释。地幔源“湿点” (Green & Falloon, 1998) 也许可以解释一些“板内”熔融异常, 但仅靠这种机制不能解释广泛分布的大规模板内火山活动。

因此, 玄武岩浆的起源与演化仍需进一步探讨。其研究的重要性体现在以下几个方面: ①岩浆的形成是地球热演化的结果, 也是导致地球从基本均一的原始地球 (如假设其为球粒陨石质的) 演化到现今具有圈层结构 (即, 金属合金地核以及硅酸盐的地幔和地壳) 的最有效的地球化学分异过程。②岩浆冷却和与浅部围岩反应过程中发生演化, 导致岩浆岩具有不同成分、矿物组成、结构构造及不同的岩石系列和岩石类型。源岩组成的多样性和熔融条件的不同也是导致岩浆岩多样性的重要原因。③与岩浆岩成因有关的矿化作用是岩浆演化的“副产物”。因此, 作为地质工作者, 理解岩浆起源与演化的基本概念至关重要。值得强调的是, 现代分析技术已被广泛应用于岩浆岩研究, 但是, 新技术不能替代基本的矿物学、岩石学、岩相学研究及野外观察, 仅依靠地球化学数据 (如微量元素和同位素) 得出的解释是不可靠的。

1.1 岩浆起源的概念

1.1.1 部分熔融与全部熔融

上地幔橄榄岩发生部分熔融形成富镁的苦橄质熔体, 进一步演化为玄武质岩浆。方

便起见, 本书中提及的玄武岩浆/熔体包括苦橄质熔体。地幔目前的热状态不允许全部熔融的发生, 由于岩浆物理分离和热量平衡的缘故, 全部熔融在地幔和地壳都不可能发生。因此不论原岩的性质和岩浆种类怎样, 岩浆的形成都是部分熔融的结果。部分熔融有两种产物: 熔体和残余。熔体代表原岩中易熔的组分, 残余代表原岩中相对难熔的组分。熔体组分比原岩更富硅、更贫镁 (更低 MgO 、 MgO/FeO 值)。换言之, 地幔橄榄岩发生部分熔融形成玄武质岩浆, 而玄武质岩石 (玄武岩、辉长岩、辉绿岩等) 发生部分熔融不能产生玄武质岩浆, 只能产生更富硅的岩浆 (如奥长花岗质、英云闪长质、安山质和花岗质的熔体)。相反, 残余比原岩更贫硅、富镁铁 (MgO/FeO 高), 且更加难熔。总之, 部分熔融就是把一种组分简单且相对均一的岩石“转化”为两种组分完全不同岩石的过程: ①熔体 (或岩浆), 在冷却的过程中形成矿物组合、结构构造、化学组成不同的岩浆岩, 其相对富集不相容元素, 亏损相容元素。②残余, 亏损不相容元素, 富集相容元素。岩浆的起源是地球热演化的结果, 在全球范围内时刻发生, 贯穿整个地球历史, 可以说, 它是导致地球化学分异最有效的过程。

1.1.2 玄武质岩浆的幔源物质

玄武质岩浆的源岩是地幔橄榄岩, 组成以橄榄石为主, 其次还有斜方辉石、单斜辉石和少量富 Al_2O_3 矿物。富铝矿物依压力 (深度) 不同, 可以是斜长石 (约 <30 km)、尖晶石 (约 $30\sim80$ km) 或者石榴子石 (约 >80 km)。地幔橄榄岩进一步分为二辉橄榄岩 (>10 vol% Cpx) 和方辉橄榄岩 (<10 vol% Cpx)。二辉橄榄岩是玄武质岩浆的主要源岩, 而方辉橄榄岩一般是熔融残余。辉石岩常呈岩脉分布于地幔橄榄岩中, 对玄武质岩浆形成也有一定贡献, 但不是主要源区物质。地幔橄榄岩中可能出现的角闪石、金云母 (及次要的硫化物、氧化物等) 对富集型玄武岩有重要贡献。根据定义, 岩石圈代表冷的热边界层。因此, 岩石圈地幔不是玄武岩浆的主要源区 (其温度太低达不到熔融温度, 除非岩石圈地幔在某些特殊情况下受到扰动)。软流圈才是幔源玄武岩浆的重要源区。地幔熔体的组成随源区矿物组成和熔融深度的变化而变化。如果地幔像太古代那样足够的热, 熔融开始于更大深度 (如 >120 km, 石榴子石二辉橄榄岩稳定的区域), 可产生富镁的科马提熔体 (图 1.1); 如果熔

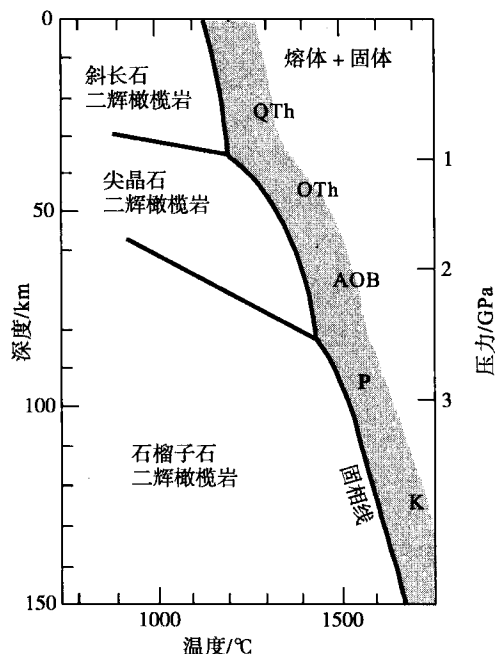


图 1.1 地幔固相线及地幔二辉橄榄岩在不同温压条件下的稳定范围: 斜长石二辉橄榄岩 (浅)、尖晶石二辉橄榄岩 (深) 及石榴石二辉橄榄岩 (更深); 固相线之上的阴影部分示意理想状况下各种原始岩浆的形成: K—科马提岩, P—苦橄岩, AOB—碱性橄榄玄武岩, OTh—橄榄拉斑玄武岩, QTh—石英拉斑玄武岩 (Wyllie, 1992)

融深度为约 80~110 km, 就会产生富镁的苦橄玄武岩浆 (图 1.1); 如果地幔相对较冷, 发生部分熔融的深度较浅, 则产生碱性橄辉玄武岩熔体或者橄辉拉斑玄武岩熔体 (图 1.1)。大量文献中讲: 玄武岩浆形成在斜长石二辉橄辉岩稳定区域, 这在实验条件下是可能的 (图 1.1), 但实际上这是概念上的误导, 因为这个深度范围在洋中脊之下是“冷”的热边界层, 在其他地方是冷的岩石圈地幔, 在大陆环境相当于地壳, 因此, 很少有玄武岩浆在斜长石二辉橄辉岩稳定区域产生 (Niu, 2004)。

我们必须强调虽然岩石圈不是玄武岩浆的主要源区, 但在一定的情况下可以产生岩浆。岩石圈地幔的加厚是通过传导热损失导致底部增生实现的 (如下), 也就是把软流圈顶部物性转变为岩石圈物性的过程 (Niu & O'Hara, 2003)。这个过程对大洋岩石圈增生很好理解, 对大陆岩石圈增生同样如此, 虽然后者年龄老且演化历史更复杂。岩石圈增生往往伴随“地幔交代作用” (Niu & O'Hara, 2003, 2009; Niu, 2008), 比如, 古老大陆岩石圈底部常有富含挥发分 (CO_2 、 H_2O 等)、交代矿物 (角闪石、金云母等) 和不相容元素的岩脉。这些交代产物具有易熔的特点, 在条件允许时就会发生熔融。与碰撞造山带有关的深源岩石圈断裂和断裂带的再活化可能会产生体积很小、却高度富集的岩浆。青藏高原及周边地区发现的高度富集岩浆 (Yu & Zhang, 1998; Yu et al., 2004) 可能与这样的岩石圈物质交代有关。大陆裂解早期形成的高度富集岩浆也来源于这种交代的岩石圈地幔 (Barberi et al., 1982)。许多洋岛上发现的高度富集的玄武岩浆也很可能是同化这种交代大洋岩石圈的结果 (Niu & O'Hara, 2003, Niu & O'Hara, 2009; Niu, 2008, 2009; Niu et al., 2012)。在地幔柱—岩石圈相互作用的背景下, 如果地幔柱提供的热量足够, 热侵蚀或者同化作用有可能使岩石圈地幔发生熔融 (O'Hara, 1998)。这里强调的是, 虽然岩石圈对玄武岩浆的形成并非至关重要, 但确实会参与岩浆形成, 特别是富含交代组分的古老大陆岩石圈。后者导致高度富集挥发分、不相容元素和同位素的碱性镁铁质岩浆的形成。

1.1.3 部分熔融的发生——岩浆的形成

理论上讲, 固体岩石发生部分熔融形成岩浆的机制可能有 4 种: ①加热; ②减压; ③挥发分的加入; ④加压。加热是导致岩石部分熔融最容易理解的机制, 然而它对玄武岩浆的形成并不重要, 但当热的幔源玄武岩浆上升侵入陆壳时, 它对花岗岩岩浆的形成至关重要。加压从热力学的角度来讲是可能的, 但是它在岩浆形成中的真正作用尚未完全证实。就地幔橄辉岩发生部分熔融形成玄武岩浆的过程来说, 减压 (Carmichael et al., 1974; Yoder, 1975) 和挥发分的加入是最重要的两个机制。这里重点强调概念, 下文中将会给出实例。

在图 1.2a 的 P - T 图中, 我们不难理解前三种机制, 如果岩石位于固相线之下的任意点 A, 岩石保持固态。如果移到液相线之上的点 C, 它就会全部熔融。如果岩石处于固相线和液相线之间的点 B, 只有部分岩石发生熔融, 称之“部分熔融”。理论上讲, 随着点 B 位置的变化, 熔融程度在 0% 到 100% 之间变化 (如图 1.2a)。因为全部熔融是不可能实现的 (见上文), 实际讨论岩浆形成时不考虑液相线。因此, 我们重点关注固相