

亚洲重大地质问题研究系列著作

中国中西部及邻区大陆 板内火山作用

夏林圻 夏祖春 李向民 马中平 徐学义 著



科学出版社

亚洲重大地质问题研究系列著作

中国中西部及邻区大陆板内火山作用

夏林圻 夏祖春 李向民 马中平 徐学义 著

“十一五”国土资源大调查工作项目（编号：1212010611804）
国家自然科学基金项目（编号：40472044）

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书反映了“十一五”期间国土资源大调查项目“中亚古生代火山岩形成机制及其与成矿关系研究”和国家自然科学基金项目“天山石炭纪碰撞后火山岩浆作用及其地球动力学研究”的最终研究成果。重点围绕新元古代中-晚期大陆裂谷火山作用与超级大陆裂解,石炭纪一早二叠世、二叠纪—三叠纪中亚大规模裂谷伸展背景火山活动的地质意义、峨眉山-西伯利亚-德干3个大火成岩省火山活动对比及新生代印度-亚洲大陆碰撞与高原隆升的火山作用响应等重大地质问题,从全球构造与火山活动关系的角度认识中国和亚洲大陆地质演化及其成矿地质背景意义。

本书可供地学领域科研、教学及地质调查工作者参考和借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

中国中西部及邻区大陆板内火山作用/夏林圻等著. —北京:
科学出版社, 2013
(亚洲重大地质问题研究系列著作)

ISBN 978-7-03-037575-9

I. ①中… II. ①夏… III. ①大地板块构造-火山作用-研究-中国
IV. ①P317

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 113363 号

责任编辑: 韦 沁 / 责任校对: 张小霞

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 王 浩

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>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 6 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2013 年 6 月第一次印刷 印张: 32

字数: 760 000

定价: 218.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《亚洲重大地质问题研究系列著作》编委会

主 编：任纪舜

副主编(按姓氏拼音排序)

何国琦 洪大卫 陆松年 夏林圻

编 委(按姓氏拼音排序)

高林志 和政军 金小赤 李怀坤

李向民 毛建仁 牛宝贵 任留东

王 涛 邢光福 徐学义 杨崇辉

尹崇玉 张世红 赵 磊 周国庆

出版说明

根据世界地质图委员会 (CGMW) 2004 年佛罗伦萨会议决议, 在中国地质调查局的全力支持下, 从 2005 年到 2012 年, 由 CGMW 南亚和东亚分会 (挂靠中国地质科学院地质研究所) 负责, 联合 CGMW 中东分会、北欧亚分会、海底图分会以及亚欧 20 个国家 100 余名地质学家共同编制了世界上第一份海陆地质同时表示的数字化 1:500 万国际亚洲地质图 (IGMA5000)。与此同时, 为了解决一些重要地质问题, 把编图与专题研究结合起来, 我们组织了包括早前寒武纪地质、晚前寒武纪地质、南华系—震旦系、显生宙地层、东亚中生代火山岩、中亚大陆火山岩、花岗岩、蛇绿岩和大地构造等研究项目。《亚洲重大地质问题研究系列著作》就是在这些项目总结报告的基础上撰写的。系列著作各专题将从 2012 年起陆续出版。

亚洲是世界上面积最大、地质结构和演化历史最复杂的一个大陆, 有许多挑战性和前沿性的问题急需研究。我们期望系列专著随着研究工作的不断扩展和深化而延续, 使其成为了解和研究亚洲地质的重要参考。由于中国位于亚洲的中心位置, 本系列著作的出版必将有助于深化对中国地质的认识。

任纪舜

2012. 5. 10

前 言

本书为中国地质调查局“十一五”国土资源大调查工作项目“中亚古生代火山岩形成机制及其与成矿关系研究”(编号:1212010611804;2006~2010年)的研究成果。该项目由西安地质矿产研究所承担,项目负责人为夏林圻。本书撰写过程中,还融入了本项目人员所承担的国家自然科学基金项目“天山石炭纪碰撞后火山岩浆作用及其地球动力学研究”(编号:40472044;2005~2007年)成果。

项目研究范围为古亚洲构造域的中-西部和东特提斯构造域(帕米尔以东),涵盖了中亚造山系和中央造山系的中-西部和东特提斯造山系及其相间的陆块和盆地。地理坐标为东经 $70^{\circ}\sim 110^{\circ}$,北纬 $28^{\circ}\sim 50^{\circ}$,东西长约3100km,南北最宽达2350km,面积约700万 km^2 。

本研究的任务和目标是:配合1:500万国际亚洲地质图的编制,在已有工作的基础上,结合区域地质调查新成果资料,对中国中西部及其相邻地区陆内火山岩的性质和时空分布规律开展综合研究,探索亚洲大陆显生宙地质演化过程中壳-幔-核相互作用的地表火山响应及成矿地质背景意义。重点围绕新元古代中-晚期大陆裂谷火山作用与超级大陆裂解,石炭纪一早二叠世、二叠纪—三叠纪中亚大规模裂谷伸展背景火山活动的地质意义,新生代印度-亚洲大陆碰撞与高原隆升的火山作用响应等重大地质问题,从全球构造与火山活动关系的角度对中国和亚洲大陆地质演化产生新的认识,为丰富和完善亚洲地质图的编制提供专题研究技术支撑。

本书以重塑亚洲大陆中部新元古代以来陆内构造-火山岩浆作用性质及演化历史为主线,重点研究:①新元古代中-晚期大陆裂解与火山活动关系;②石炭纪一早二叠世和二叠纪—三叠纪之交(距今260~250Ma)的大火成岩省(天山-塔里木、峨眉山、西伯利亚)火山活动机制;③德干大火成岩省(距今66Ma)和青藏高原新生代火山活动的地质构造意义。该研究对“大陆岩石圈拉伸与火山作用的关系”这一大陆地质与大陆动力学前沿领域的原创性探索研究,自始至终给予了特别的关注。

作者历经5年,研究工作取得如下主要进展:

(1)查明了亚洲地质演化过程中,自新元古代以来,在现今亚洲中部及其相邻地区不同时代的陆块和地块中,曾经发生过5次大规模大陆板内火山活动(图1)。

①新元古代中-晚期(距今846~540Ma)若干中国古陆块(和微陆块)上的裂谷火山活动;②石炭纪一早二叠世(距今345~270Ma)天山-塔里木裂谷火山活动;③晚二叠世(距今260Ma)峨眉山大火成岩省火山活动及与其近于同期的二叠纪—三叠纪(距今250Ma)西伯利亚大火成岩省火山活动;④白垩纪末(距今66Ma)德干大火成岩省火山活动;⑤青藏高原新生代火山活动。这些大规模大陆板内火山活动与古大陆的裂谷化-裂解和会聚-碰撞关系密切。

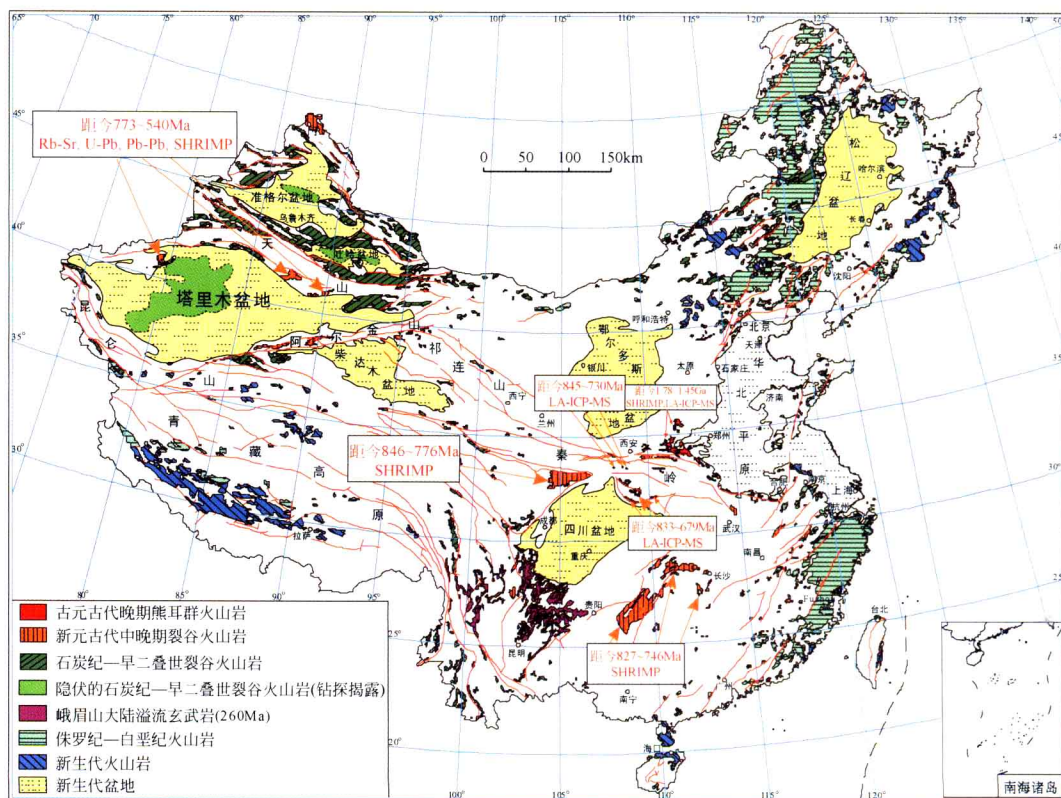


图1 中国(大陆板内)火山岩分布示意图

LA-ICP-MS. 锆石激光剥蚀电感耦合等离子体定年; SHRIMP. 高灵敏度离子探针定年; Rb-Sr. 铷-锶等时线定年; Pb-Pb. 铅-铅等时线定年; U-Pb. 化学法和蒸发法定年

(2) 建立了有效确定古大陆内火山岩形成环境的4条重要准则。

鉴于源自软流圈地幔的大陆玄武岩岩浆在通过岩石圈(包括岩石圈地幔和地壳)到达地壳岩浆房和上升至地表途中,会受到不同程度大陆地壳或岩石圈的混染,这种混染作用往往十分强烈;并同时给出似消减带信号,使得原始大陆玄武岩的微量元素和同位素地球化学性质遭受到强有力的改造和调整,常常导致一些研究者将大陆玄武岩误判成岛弧玄武岩或活动大陆边缘玄武岩,从而给利用大陆玄武岩的地球化学性质判断其形成环境带来诸多困惑和不便。

本研究提出,当我们面对造山带或古大陆中一些形成环境未知或形成环境争议很大尚不能确切判定的古老火山岩系时,先不要急于运用包含有 Ti、Nb、Ta 等元素作为判别因子的玄武岩构造环境判别图解对它们的形成环境匆匆加以判别;更不能只根据火山岩石的多元素原始地幔标准化分配型式出现 Nb、Ta 和 Ti 负异常,就立即认定它们是形成于岛弧或活动大陆边缘环境。较为可行的办法是:

① 首先,对所研究的火山岩系产出的区域地质背景和与火山岩系共生的沉积岩系特点进行比较全面地综合分析,详细地区域地质学、地层学和沉积学分析,可以为判别共生火山岩系的产出环境提供十分有效的信息。

② 仔细认真地分析研究该火山岩系的岩石共生组合特点,查明其中是否有 $\text{Th}_\text{N}/\text{Nb}_\text{N} < 1$, $\text{Nb}/\text{La} \geq 1$, La/Nb 和 La/Ba 的值与洋岛玄武岩 (OIB) 相似,具有缺乏 Ti、Nb、Ta 负异常的多元素原始地幔标准化分配型式,具有低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$ 值和高 $\epsilon_\text{Nd}(t)$ 值的玄武质岩石,因为这些乃是没有受到地壳或岩石圈混染的软流圈 (或地幔柱) 源大陆板内玄武岩的特点。若所研究的火山岩系中存在此类玄武质熔岩,基本上就可以排除它们有属于岛弧或活动陆缘火山岩系的可能。

③ 对于那些具有似消减带信号的玄武质熔岩,则可以根据其 Zr 含量和 Zr/Y 的值,或利用 Zr/Y-Zr 图解和其他一些不包含有 Ti、Nb、Ta 等元素作为判别因子的玄武岩构造环境判别图解,判断它们是否真正是岛弧或活动大陆边缘玄武岩。

④ 大陆板内玄武岩的不相容微量元素浓度总体较高,岛弧和活动大陆边缘玄武岩的不相容微量元素浓度总体较低。

(3) 查明了新元古代中-晚期若干中国古陆块 (和微陆块) 上的大规模裂谷火山活动为 Rodinia 超级大陆裂谷化-裂解的地质过程。

① 现今中国的一些前寒武纪古陆块和微陆块,如中国西北部的塔里木陆块及其北部相邻天山中的一些微陆块 (伊犁、塞里木、卡瓦布拉克等)、中国中部扬子陆块北缘和南秦岭的一些微陆块 (碧口、汉南、牛山、平利、武当山) 及中国东南部的扬子陆块和华夏陆块等,在大约 900Ma 前,经晋宁运动 (即四堡运动,相当于世界上的 Grenville 造山运动) 汇聚拼合成为 Rodinia 超大陆的组成部分。在这些陆块和微陆块上广泛地分布着新元古代中-晚期 (距今 846~540Ma) 裂谷火山岩系,它们主要由巨量的基性火山岩和体积变化的酸性火山岩组成,中性火山岩少见或缺失,显示清晰的双峰式成分结构。

② 虽然这些双峰式火山岩系产出的构造环境至今仍有争议,但我们的研究证明,它们是形成于大陆板内裂谷环境,不是形成于岛弧环境。

③ 根据地球化学研究,中国的新元古代中-晚期基性熔岩可以划分为 HT ($\text{Ti}/\text{Y} > 500$) 和 LT ($\text{Ti}/\text{Y} < 500$) 两个岩浆类型。再据 Nb/La 值,HT 和 LT 熔岩可进一步被分别划分为 HT1 ($\text{Nb}/\text{La} > 0.85$)、HT2 ($\text{Nb}/\text{La} \leq 0.85$) 与 LT1 ($\text{Nb}/\text{La} > 0.85$)、LT2 ($\text{Nb}/\text{La} \leq 0.85$) 4 个亚类。这些所研究的火山岩浆中保存了源自深部地幔柱的地球化学信号。火山岩元素和同位素数据揭示,HT2 和 LT2 熔岩中的地球化学变异系由地幔柱源岩浆经受地壳混染所致;相反,HT1 和 LT1 熔岩的母岩浆在其上升过程中,却没有遭受明显的地壳混染。

④ 中国的新元古代中-晚期裂谷火山作用是 Rodinia 超大陆裂谷化和裂解过程中爆发的全球裂谷火山作用的组成部分。

⑤ Rodinia 超级大陆的裂解作用是穿时发生的。例如:新元古代中期之末发生的裂谷火山活动,在时间上,与澳大利亚-东南极、华南和劳伦等古陆块间的裂离相吻合;而早寒武世初的裂谷火山活动,在时间上,则与澳大利亚和塔里木古陆块间的裂离相一致。

⑥ 与此时期裂谷火山作用共生的同时代 (距今约 820Ma; Li *et al.*, 2005) 基性-超基性侵入体中,产出有 Ni-Cu-PGE 矿床和 V-Ti 磁铁矿矿床,如:阿拉善陆块上的金川世界级特大型 Ni-Cu-PGE 矿床和汉南微陆块上的 V-Ti 磁铁矿矿床。

(4) 进一步研究和探讨了中亚石炭纪-一早二叠世大规模裂谷火山作用与古特提斯裂解

的关系。

① 中亚地区大面积(达约 170 万 km^2)分布的天山(中亚)石炭纪—早二叠世裂谷火山岩系是世界上最古老的显生宙大火成岩省之一,它又可以进一步划分为天山和塔里木两个亚省。该大火成岩省主要由玄武质熔岩构成,中性和酸性熔岩及火山碎屑岩次之,并有浅成镁铁质-超镁铁质和花岗质侵入体相共生。

② 虽然对天山地区广泛分布的石炭纪火山岩系产出的地质构造环境至今仍存在强烈争议,但已有的地层学、沉积学和地球化学记录表明,这套广袤分布的火山岩系的确是形成于大陆板内裂谷环境,不是形成于岛弧或活动大陆边缘环境。

③ 地球化学研究揭示,天山(中亚)大火成岩省的玄武质熔岩可以划分为 HT ($\text{Ti/Y} > 500$) 和 LT ($\text{Ti/Y} < 500$) 两个主要岩浆类型。根据 Nb/La 的值,HT 和 LT 熔岩又可以进一步分别被划分为 HT1 ($\text{Nb/La} > 0.85$)、HT2 ($\text{Nb/La} < 0.85$) 和 LT1 ($\text{Nb/La} > 0.85$)、LT2 ($\text{Nb/La} < 0.85$) 4 个亚类。该大火成岩省岩浆中保存了源自于深部地幔柱的地球化学信号。元素和 Sr-Nd 同位素数据表明:HT2 和 LT2 熔岩中的地球化学变化系由地幔柱源岩浆受到地壳混染作用所致;相反,HT1 和 LT1 熔岩的母岩浆在上升过程中,没有遭受明显的地壳混染。

④ 天山(中亚)石炭纪—早二叠世裂谷玄武质熔岩显示有明显的时间上和空间上的地球化学变异。石炭纪时,没有受到地壳混染和受到轻微地壳混染的 LT1 熔岩主要喷发于天山中段裂谷之中,而遭受强烈地壳混染的 LT2 和 HT2 熔岩则是喷发于天山中段裂谷四周的区域之中。LT1 熔岩系由地幔柱石榴子石稳定区的较高程度(10%~30%)部分熔融所产生;而 HT2 和 LT2 熔岩,则是在相对较低的地热梯度条件下,由地幔柱尖晶石-石榴子石过渡带的较低程度(<10%)部分熔融所产生。早二叠世时,没有受到地壳混染和受到轻微地壳混染的 HT1 和 LT1 熔岩主要喷发于塔里木和北山裂谷之中,而遭受强烈地壳混染的 HT2 和 LT2 熔岩则是主要喷发于西部的柯坪裂谷和北部的天山地区。上述变化特点暗示:石炭纪时,天山(中亚)大火成岩省的地幔柱中心可能是位于天山中段裂谷之下;而到早二叠世时,该地幔柱中心可能已经向南迁移到塔里木和北山之下。

⑤ 地壳(或岩石圈)上隆先于岩浆作用是鉴别古老地幔柱的最重要标志之一。根据石炭纪火山岩系之下区域性不整合面上的剥蚀记录推断,天山(中亚)大火成岩省的区域性地表隆升是先于该大火成岩省的岩浆作用,由此进一步证明该大火成岩省活动是与古地幔柱上涌有关。

⑥ 世界地质学界注意到大陆大火成岩省活动与大陆裂解在时间上的一致性已经有近 40 年的历史。我们同样在天山(中亚)大火成岩省活动和早石炭世中期(距今 344~325Ma)北天山洋盆的开启之间,也发现了这种时间上的耦合。中国地质学界将此称作为“古特提斯裂解”。不过,北天山洋在地质历史中存在的时间十分短暂,它在晚石炭世初期即已经消亡。

⑦ 天山(中亚)大火成岩省为一“含矿”大火成岩省,在这个大火成岩省中产出有各种类型的岩浆、热液矿床和矿化。我们的研究查明,与世界上许多“含矿”大火成岩省(如 Bushveld、Siberia、Midcontinent、Emeishan 和 Karoo 等)相似,天山(中亚)大火成岩省的没有遭受地壳混染的原生玄武岩,显示地幔柱-EM1 的同位素变化趋势,这乃是

预测该大火成岩省利于大规模成矿的一个有用的地球化学标志。

(5) 系统地对峨眉山、西伯利亚和德干大火成岩省火山岩岩石成因进行了对比研究。

① 晚二叠世以来, 亚洲大陆上曾发生过 4 次大火成岩省活动(喜马拉雅-潘伽、峨眉山、西伯利亚和德干), 其中, 峨眉山(距今约 260Ma)、西伯利亚(距今约 250Ma) 和德干(距今约 66Ma) 3 个大火成岩省研究程度较高。这 3 个大火成岩省均由大陆溢流玄武岩构成, 以玄武岩为主, 酸性岩石次之, 还有极少量苦橄岩和苦橄玄武岩, 并有浅成侵入体共生。喜马拉雅-潘伽(距今约 280Ma) 大火成岩省研究程度很低, 可利用数据甚少, 本研究中未涉及。

② 根据地球化学变化特点, 峨眉山、西伯利亚和德干大火成岩省的熔岩可以划分成两个主要岩浆类型: HT ($Ti/Y > 500$) 和 LT ($Ti/Y < 500$)。按照 Nb/La 值, HT 和 LT 熔岩又可以各自进一步划分为 HT1 ($Nb/La < 1$)、HT2 ($Nb/La \geq 1$) 熔岩和 LT1 ($Nb/La < 1$)、LT2 ($Nb/La \geq 1$) 熔岩。这 3 个大火成岩省岩浆的主要地球化学信号推断是源于深部地幔柱。现有的元素和同位素数据表明, HT1 和 LT1 熔岩的地球化学变化系由地幔柱源岩浆遭受地壳混染所致; 相反, HT2 和 LT2 熔岩的母岩浆在上升过程中, 并没有受到明显的地壳混染。

③ 峨眉山和西伯利亚大火成岩省含有各种类型、大小和级别的岩浆矿床和矿化, 为“含矿”大火成省; 德干大火成岩省中至今尚没有发现有意义的矿床和矿化, 为“不含矿”大火成岩省。虽然“含矿”和“不含矿”大火成岩省都同样是源自于原始地幔柱, 但是“含矿”大火成岩省(即峨眉山和西伯利亚大火成岩省)的母岩浆在上升过程中经受了与地球化学上和古老克拉通岩石圈地幔相同的源(EM1 型源)的相互作用, 而“不含矿”大火成岩省(即德干大火成岩省)没有受到地壳混染的原生玄武岩却显示界于地幔柱和 EM2 地球化学信号间的同位素变异。因此, “含矿”大陆溢流玄武岩的存在乃是发生大规模成矿的有利条件。

④ 地壳隆升先于岩浆作用, 是鉴别古老地幔柱最重要的标志之一。根据剥蚀记录推断, 峨眉山、西伯利亚和德干 3 个大火成岩省都与地表隆升相共生, 而且区域地壳隆升先于岩浆作用。生物地层学数据对于峨眉山大火成岩省隆升和剥蚀的时间约束得最好, 在峨眉山大火成岩省中, 岩浆作用开始前不到 3Ma 就发生了重要的地壳隆升。

⑤ 通过比较, 发现生物灭绝事件的时间与大火成岩省的形成年龄密切对应, 因此, 推断生物灭绝可能系由大火成岩省的气候效应所致。例如, 峨眉山大火成岩省、西伯利亚大火成岩省、和德干大火成岩省的形成年龄分别与瓜得鲁普世末(也就是中-晚二叠世的界限)、二叠纪末和白垩纪末生物灭绝事件的年龄相对应。但是, 某些生物灭绝事件, 如二叠纪末和白垩纪末生物灭绝事件也具有与当时地球上重大陨石撞击事件相同的年龄。因此, 二叠纪末和白垩纪末生物灭绝事件, 也有可能是同时发生的陨石撞击事件和大火成岩省事件的叠加环境效应所致。

⑥ 近 40 年来, 已经注意到, 大陆溢流玄武岩和大陆裂解在时间上重合。已经发现, 距今 260Ma 的峨眉山大陆溢流玄武岩和新特提斯洋的开启; 距今 66Ma 的德干大陆溢流玄武岩和印度洋西北部的开启, 就具有这种类似的对应关系; 距今 250Ma 的西伯利亚大陆溢流玄武岩似乎是与夭折了的裂谷事件有关。

· (6) 系统地研究探讨了青藏高原新生代火山作用的成因特点及其地质构造意义。

① 印度-亚洲大陆碰撞开始于距今约 65Ma, 大约在距今 45~40Ma 完成。青藏高原的新生代火山作用是印度-亚洲大陆碰撞的火山响应。

② 随着印度-亚洲碰撞从接触-碰撞(即“软碰撞”或“同碰撞”)转变到全面碰撞(即“硬碰撞”或“碰撞后”), 火山作用逐渐从钠质+钾质变为钾质-超钾质+埃达克质。与此同时, 火山作用也显示规律性的时、空迁移: 距今 65~40Ma, 主要发生在高原南部; 距今 45~26Ma, 发生于高原中部; 距今 26~10Ma, 发生于高原南部; 距今 18Ma 至今, 发生于高原北部。

③ 青藏高原新生代火山作用系统的时-空变化对形成广袤青藏高原的深部地球动力学过程提供了重要约束。该过程包括: 板片回转及随后的板片断离、碰撞前峰后侧的伸展和盆地形成、增厚岩石圈盖子拆离以及因此导致印度岩石圈向北下插。

④ 研究证明, 青藏高原的演化和隆升, 由南向北是穿时的。藏南在距今约 45Ma 和距今约 26Ma 经受了两个阶段隆升, 它们分别响应了新特提斯大洋板片的断离和巨大拉萨岩石圈根的丧失。自此, 青藏高原南部被创建。尔后, 高原的演化就受控于向北推进的印度岩石圈。距今约 18Ma 时, 下插印度岩石圈的持续向北挤压, 最终导致西羌塘和松潘-甘孜地块之下增厚的岩石圈下部不稳定, 开始塌陷、拆离, 诱发产生钾质和埃达克质火山作用。因此直到中新世中期, 高原北部才达到其现今的高度和规模。

⑤ 青藏高原的新生代大规模成矿作用主要与碰撞期(65~45Ma B. P.、40Ma B. P.) 花岗质岩浆-热液活动和碰撞后(45~40Ma B. P. 至今) 埃达克质岩浆-热液活动有关。

在本次研究项目的实施和本书的撰写过程中, 得到了工作单位西安地质矿产研究所的大力支持和中国地质调查局科技外事部的深入指导和关怀, 使研究工作得以顺利完成, 我们表示诚挚的感谢。

本书的参加人员有夏林圻、夏祖春、徐学义、李向民和马中平, 最终经全体成员充分讨论、磋商, 夏林圻等执笔完成。

目 录

出版说明

前言

第一篇 概 论

第 1 章 研究区地质背景	3
1.1 全球背景	3
1.2 古亚洲构造域	6
1.3 特提斯构造域	7
第 2 章 与大陆火山事件相关的关键性地质问题	8
2.1 国际概况	8
2.2 研究区若干关键性地质问题	9
2.2.1 新元古代中-晚期大陆裂谷火山作用与 Rodinia 超大陆裂解	9
2.2.2 中亚石炭纪—早二叠世大规模裂谷火山作用与古特提斯裂解	10
2.2.3 新生代印度-亚洲大陆碰撞与高原隆升的火山作用响应	11
2.2.4 大火成岩省与地幔柱	12
第 3 章 古大陆火山岩研究中若干研究方法讨论	14
3.1 正确利用地球化学方法判别大陆板内玄武岩和岛弧玄武岩	14
3.1.1 引言	14
3.1.2 大陆玄武岩受到岩石圈混染的成分证据	14
3.1.3 典型事件的启示	16
3.1.4 应用实例——天山及邻区石炭纪—早二叠世火山岩的形成环境	21
3.1.5 结论	25
3.2 地质历史中古地幔柱的鉴别	25
3.2.1 引言	25
3.2.2 地幔柱说与非地幔柱说的争论	26
3.2.3 古地幔柱的若干鉴别标志	27

第二篇 新元古代中-晚期大陆裂谷火山作用与超大陆裂解

第 4 章 天山-塔里木北缘新元古代—早寒武世裂谷火山作用	33
4.1 引言	33
4.2 地质背景	34

4.3	新元古代—早寒武世裂谷火山岩时空分布特征	35
4.3.1	空间分布特征	35
4.3.2	火山岩喷发时代的判定	38
4.4	火山岩组合和类型	39
4.4.1	库鲁克塔格微地块	39
4.4.2	阿克苏-柯坪微地块	41
4.4.3	卡瓦布拉克微地块	42
4.4.4	塞里木微地块	42
4.5	岩石地球化学特征	42
4.5.1	岩浆系列和分类	46
4.5.2	主元素和微量元素变化特点	47
4.5.3	稀土元素变化特点	50
4.5.4	不相容微量元素变化特点	51
4.5.5	Sr、Nd 同位素比值变化特点	53
4.6	岩石成因讨论	54
4.6.1	天山及邻区新元古代—早寒武世火山岩的形成环境	54
4.6.2	源的部分熔融条件和源区特点	55
4.6.3	天山及邻区新元古代—早寒武世裂谷玄武岩形成过程中地幔柱和岩石圈的贡献	57
4.6.4	岩石成因探讨	61
4.7	小结	62
第5章	南秦岭西段碧口群火山岩岩石成因	64
5.1	引言	64
5.2	地质概况	64
5.3	样品及测试方法	67
5.4	火山岩分类	71
5.5	岩浆结晶分离作用	72
5.6	地壳混染作用	75
5.7	碧口群火山岩的形成环境	78
5.8	幔源性质与熔融条件	78
5.8.1	幔源性质	78
5.8.2	幔源熔融条件	81
5.8.3	地幔柱成分的推断	82
5.9	小结	82
第6章	南秦岭东段耀岭河群、陨西群和武当山群火山岩岩石成因	84
6.1	引言	84
6.2	地质概况	85
6.3	火山岩分类	88

6.4	岩浆结晶分离作用	97
6.5	地壳混染作用	100
6.6	南秦岭东段新元古代中-晚期火山岩的形成环境	103
6.7	幔源性质与熔融条件	106
6.7.1	幔源性质	106
6.7.2	幔源熔融条件	108
6.7.3	地幔柱成分的推断	110
6.8	结论和讨论	111
第7章	南秦岭中段西乡群火山岩岩石成因	113
7.1	引言	113
7.2	地质概况	114
7.3	火山岩分类	128
7.3.1	西乡群(孙家河组、大石沟组、白勉峡组)各岩组特征概述	128
7.3.2	岩石类型和岩浆系列	128
7.4	岩浆结晶分离作用	135
7.5	地壳混染作用	138
7.6	南秦岭中段新元古代中期西乡群火山岩的形成环境	142
7.7	幔源性质与熔融条件	145
7.7.1	幔源性质	145
7.7.2	幔源熔融条件	147
7.7.3	地幔柱成分的推断	148
7.8	三湾组火山岩岩石成因讨论	148
7.9	结论和讨论	150
第8章	华南新元古代中期裂谷火山作用	153
8.1	引言	153
8.2	地质概况	153
8.3	火山岩分类	155
8.3.1	岩浆类型	155
8.3.2	岩石类型	157
8.4	岩浆结晶分离作用	163
8.5	地壳混染作用	166
8.6	华南新元古代中期火山岩的形成环境	170
8.7	幔源性质与熔融条件	174
8.7.1	幔源性质	174
8.7.2	幔源熔融条件	175
8.7.3	地幔柱成分的推断	177
8.8	新元古代大陆裂谷火山作用与 Rodinia 超大陆裂解	178
8.9	结论和讨论	179

第三篇 天山及邻区（中亚）石炭纪—早二叠世大火成岩省裂谷火山作用

第9章 天山及邻区（中亚）石炭纪—早二叠世基性熔岩岩石成因	185
9.1 引言	185
9.2 地质背景	185
9.3 样品采集和分析方法	197
9.4 岩石地球化学基本特征	209
9.4.1 天山石炭纪—早二叠世裂谷基性熔岩分类	209
9.4.2 岩石学特征简述	211
9.4.3 主量元素变化特点	212
9.4.4 微量元素变化特点	215
9.4.5 Sr、Nd、Pb 同位素比值的变化特点	222
9.5 岩石成因讨论	224
9.5.1 蚀变作用对岩浆成分的影响	224
9.5.2 天山及邻区石炭纪—早二叠世裂谷火山岩的形成环境	224
9.5.3 岩浆结晶分离作用	229
9.5.4 天山及邻区石炭纪—早二叠世裂谷基性熔岩中保存的地幔柱信号	230
9.5.5 地壳混染作用	232
9.5.6 天山大火成岩省形成中岩石圈地幔的作用	238
9.5.7 源区性质和源区熔融程度的鉴别	239
9.5.8 地幔柱的鉴别和地幔柱组分成分的推断	241
9.6 石炭纪基性熔岩和早二叠世基性熔岩间的时空关系	244
9.7 天山（中亚）大火成岩省的成矿背景意义	245
9.8 小结	246
第10章 天山石炭纪酸性火山岩岩石成因：大陆裂谷环境中基性和酸性岩浆作用的关系	250
10.1 引言	250
10.2 地质背景	250
10.3 样品采集和分析技术	251
10.4 岩石地球化学基本特征	255
10.4.1 天山石炭纪裂谷酸性火山岩的分类	255
10.4.2 主量元素变化特点	257
10.4.3 微量元素变化特点	259
10.4.4 Sr、Nd 和 Pb 同位素比值变化特点	260
10.5 岩石成因讨论	261
10.5.1 前寒武纪地壳的熔融	265
10.5.2 年轻底侵玄武岩壳的熔融和玄武岩分离结晶作用的区分	266

10.5.3 天山东段泥盆纪岛弧玄武岩的熔融	269
10.5.4 同化作用和分离结晶作用 (AFC)	270
10.5.5 双峰式火山作用与正常火山作用之间的空间分布关系	270
10.6 小结	271
第 11 章 巴音沟蛇绿岩: 古特提斯裂解的地质纪录	273
11.1 引言	273
11.2 地质背景	274
11.3 岩石学	275
11.4 样品采集与分析技术	276
11.5 岩石地球化学基本特征	280
11.5.1 巴音沟地区“基底单元”和“蛇绿岩单元”中火成岩的分类	280
11.5.2 主量元素和相容性微量元素变化特点	281
11.5.3 微量元素变化特点	282
11.5.4 放射性同位素比值变化特点	284
11.6 岩石成因讨论	286
11.6.1 巴音沟地区早石炭世镁铁质熔岩产出构造环境的判别	286
11.6.2 分离结晶作用	286
11.6.3 地壳混染作用	287
11.6.4 幔源信号	287
11.6.5 岩石成因演化	290
11.7 小结	291
第 12 章 天山石炭纪火山岩系中不含有富 Nb 岛弧玄武岩、埃达克岩和高镁安山岩组合	294
12.1 引言	294
12.2 背景	294
12.3 典型富 Nb 岛弧玄武岩和大火成岩省大陆玄武岩的基本地球化学特点	296
12.3.1 富 Nb 岛弧玄武岩	296
12.3.2 大陆玄武岩	301
12.4 讨论	301
12.4.1 富 Nb 大陆玄武岩不同于富 Nb 岛弧玄武岩	301
12.4.2 天山大火成岩省中是否有“埃达克岩”产出?	304
12.4.3 天山大火成岩省中存在有高 Mg 安山岩吗?	306
12.5 结论	307

第四篇 亚洲若干大火成岩省火山作用

第 13 章 亚洲三个大火成岩省 (峨眉山、西伯利亚、德干) 对比研究	311
13.1 引言	311

13.2 地质背景	312
13.2.1 峨眉山大火成岩省	312
13.2.2 西伯利亚大火成岩省	314
13.2.3 德干大火成岩省	315
13.3 玄武岩岩石成因	317
13.3.1 岩石类型划分	317
13.3.2 峨眉山、西伯利亚和德干玄武岩中的地幔柱信号	320
13.3.3 地幔柱-岩石圈相互作用	325
13.3.4 熔融条件和源区特点	326
13.3.5 峨眉山、西伯利亚和德干溢流玄武岩地球化学特征对比	328
13.4 与大火成岩省相伴的区域性隆升	331
13.4.1 峨眉山大火成岩省	331
13.4.2 西伯利亚大火成岩省	332
13.4.3 德干大火成岩省	333
13.5 大火成岩形成与生物灭绝间的关联	334
13.6 大火成岩省和成矿	335
13.7 结论	336

第五篇 新生代印度-亚洲大陆碰撞与高原隆升的火山作用响应

第14章 青藏高原古新世—始新世早期 (65~40Ma B. P.) 火山岩-同碰撞火山作用的产物	339
14.1 引言	339
14.2 地质背景	340
14.3 古新世—始新世早期 (65~40Ma B. P.) 火山岩系	340
14.3.1 林子宗火山岩系	340
14.3.2 拉嘎拉玄武岩 (LB)	343
14.3.3 邦达错碱性玄武岩 (BAB)	343
14.3.4 主量元素和微量元素变化特点	344
14.3.5 古新世—始新世早期 (65~40Ma B. P.) 基性熔岩 ($\text{SiO}_2 \leq 56\%$) 分类	351
14.3.6 Sr-Nd 同位素变化特点	352
14.4 讨论	355
14.4.1 岩浆结晶分离作用	355
14.4.2 古新世—始新世早期 (65~40Ma B. P.) 基性熔岩——软流圈-岩石圈相互作用的产物	356
14.4.3 利用 REE 模型约束源区特点	358
14.4.4 西藏中部和南部古新世—始新世早期火山岩浆作用成因模式	359
14.4.5 碰撞期 (或同碰撞) 成矿作用和成矿类型	361