

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.972>



岩浆作用与地球深部过程

莫宣学

中国地质大学,北京 100083

摘要: 为纪念马杏垣院士诞辰一百周年而作.首先简述了地球系统科学的基本思想和指导意义.指出岩浆作用实质上是地球各层圈之间相互作用的结果,岩浆是地球各层圈之间物质和能量交换的重要载体.通过众多研究实例,重点讨论了岩浆作用的地球动力学意义:一方面,火成岩及其所携带的深源岩石包体可以当作地球深部的“探针”和“窗口”;另一方面,火成岩也是大地构造事件的记录,可以用以恢复古板块构造格局,追溯大地构造演化历史.

关键词: 地球系统科学;岩浆岩与岩浆作用;岩石探针;大地构造事件记录;构造地质.

中图分类号: P54

文章编号: 1000-2383(2019)05-1487-07

收稿日期: 2019-05-01

Magmatism and Deep Geological Process

Mo Xuanxue

China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: This paper is written for commemorating the 100th anniversary of the birth of late Academician Ma Xingyuan. It briefly describes the general idea and significance of the earth system sciences, and it further indicates that magmatism is a result of interaction between geospheres, and magma is the media of transfer of mass and energy between geospheres. The paper discusses with emphasis on the geodynamic significance of magmatism with case studies. On one hand, igneous rocks and their carried deep-seated nodules could be served as lithoprobes and windows to explore the deep earth. On the other hand, igneous rocks are also the records of tectonic events so they could be used to retrace the paleo-tectonic pattern and the history of tectonic evolution.

Key words: earth system sciences; igneous rocks and magmatism; lithoprobe; records of tectonic events; tectonics.

1 怀念敬爱的马杏垣先生

马杏垣先生是我非常敬爱的老一辈大科学家和大教育家.在他100周年诞辰之际,回想起与他相处的一些难忘时刻和给我的教诲,终生难忘.1956年,我从南京地质学校毕业,被保送到北京地质学院读大学,有了我第一次近距离聆听一批著名地学大师讲课和教诲的宝贵机会.马杏垣先生那时不到40岁,英俊潇洒,讲课时充满哲理的构造解析和漂亮的板书与素描,给了我极深刻的印象.1957年我和几个同学跟随游振东老师和邓晋福老师到山西出野外,回来后游老师带着我们向马杏垣先生汇报.马先

生问:“你们这次出野外有什么发现?”我插话说:“没什么大发现,就是看见了一个不整合(指五台群和滹沱群之间的不整合)”.马先生说:“那可是个大发现呀,它代表一次非常重要的构造运动.”这次汇报给我印象很深,使我明白了,知识不够,重要的现象可能视而不见,即便见到了,也认识不到它的价值,必须要努力学习,打好坚实的基础.1960年我刚毕业就被分配去带领北京密云地区几幅1:5万图幅的填图工作.这个地区有大面积的老变质岩,混合岩化发育,构造复杂多样,我感到困难很大.于是我便去找马杏垣先生和程裕淇先生,请他们到野外现场去给我们指导.现在已记不清我当时哪来那么大的胆

作者简介: 莫宣学(1938—),男,教授,中国科学院院士,学科专业为岩石学,研究方向为岩浆—构造—成矿.

引用格式: 莫宣学,2019.岩浆作用与地球深部过程.地球科学,44(5): 1487-1493.

子。可这两位大师并没有看不起我这个初出茅庐的学生,欣然同意前往。他们同我们一起在野外住了好几天,现场考察,听我们的汇报,肯定我们做得对的,指出我们的不足和今后应该怎么做,手把手地教,使我在学识上和思想上都得到极大的收获。每当回想起来,心里总是充满了对马先生和程先生的崇敬与感激之情,并以能够得到两位大师的直接教诲而自豪。

马杏垣先生毕生为祖国的地质教育事业与科学事业做出了重大贡献。他的崇高思想品德,给我们留下了宝贵的精神财富。他早年投身革命,参加过“一二·九”运动,是 1938 年入党的老党员。1945—1948 年赴英国爱丁堡大学留学并获博士学位。中华人民共和国成立前夕毅然回国参加建设新中国的事业,先后在北京大学、北京地质学院任教授、副院长,后来又服从国家安排调任国家地震局副局长兼地震地质研究所所长。他培育和领导了北京地质学院(现中国地质大学)的构造地质学科,开创了构造解析学,在构造地质学、前寒武纪地质与构造、地震地质学、岩石圈结构与动力学等领域都作出了重大贡献。

他热爱祖国山川,足迹遍布中华大地。十上嵩山,锲而不舍 22 年,完成了在构造地质学上具里程碑意义的专著《嵩山构造变形——重力构造、构造解析》,成为科坛佳话。他写下了这样的诗句:“嵩山是我师,我是嵩山友! 群山是我师,我是群山友!”,充分表达了他对嵩山、对祖国大好山河无比热爱之情,也充分体现了他重视实践,求实创新的科学精神。这首诗的手迹至今还保留在河南地质博物馆。

他在 20 世纪 80 年代担任国际岩石圈委员会执行局委员和岩石圈计划喜马拉雅委员会主席,主编了《中国岩石圈动力学图集》,为全球地学断面计划(GGT)“做出了最出色的成果”,“为岩石圈的结构演化和动力学提供了重要轮廓”(国际岩石圈委员会主席 K.Fucks、国际地学断面计划委员会两任主席 J.W.H.Monger 和 H.J.Gotze 的评价)。尤其应当指出,马先生在当时就提出要“把地球构造当作一个系统来研究”的科学远见,几乎与美国提出“地球系统科学”概念同时,充分体现了马杏垣先生的高瞻远瞩。在纪念马杏垣先生诞辰一百周年的时候,本文拟沿着这个主题,结合自己从事的学科专业,就地球系统科学及岩浆作用与地球深部过程谈一谈自己的体会。

2 地球系统科学的时代

地球是已知星球中最适合人类居住的星球,是

人类美好的家园。地球是已知行星中正在进行地质运动的活星球,是已知行星中唯一有生命的星球,是已知行星中唯一具有液态水体的星球,是已知行星中唯一在大气成分、温度、湿度、季节(四季分明)上适合人类生存居住的星球,地球是已知行星中唯一具有地磁场、大气圈、水圈、臭氧层保护的星球,地球在太阳系中的位置(以及太阳系在银河系中的位置)有利于生命的产生和存在。因此,爱护地球,保护地球,是我们每个人的神圣责任。

当前我们正处在一个以地球系统科学为旗帜的新的地学革命时代,这对我们既是一个挑战,又是一个极为宝贵的机遇。

“地球系统科学”的概念最早由美国国家航空航天局(NASA)于 1983 年提出。NASA 并于 1998 年发表了 Fact Book《Understanding Our Changing Planet: NASA's Earth Science Enterprise》,提出了研究地球系统的目标、任务和方法,很快就得到世界各国的响应。当时主要是为了全球环境变化这个主题,但以后却不限于此,发展成为对整个地球行为及所有层圈间相互作用的探索。如果说 19 世纪是以“生物进化论”为旗帜、20 世纪是以“板块构造理论”为旗帜的时代,那么,21 世纪就是以“地球系统科学”为旗帜的时代。

由于众所周知的原因,20 世纪 60 年代我们失去了在以板块构造理论为旗帜的地学革命中发展我国地学的宝贵机遇,落后了几十年。这次一定要抓住。只有这样,我国地学才能迎头赶上世界先进水平。

简言之,地球系统科学,就是将地球当作一个统一的大系统,研究地球整体运动的规律及各圈层间的相互作用。圈层相互作用,是地球系统科学的核心。地球系统科学有两大主题:地球动力学和全球环境变化(简称全球变化)。三大基本任务是:在认识地球系统的基础上,为人类开发资源、改善环境、减轻灾害的需求服务(Wyllie, 1976; Kump, 2004; Condie, 2005; Stanley, 2005; Christiansen and Hamblin, 2014)。

地球系统科学的形成,是地球科学观的深刻革命,从根本上颠覆了孤立地研究地球各圈层、静止地认识地球的思维观念和方法。我们要树立地球系统科学观,以地球系统科学的整体观和层圈相互作用思想为指导,研究与发展具体学科,探寻地学真谛。同时,要以地球系统科学观为指导,爱护保护地球,天地人和谐共存,合理开发和保护自然资源,减轻自然灾害。

3 岩浆岩:探寻地球深部的“探针”和“窗口”

如前所说,要以地球系统科学观为指导,来研究与发展具体学科.这也是我们研究岩浆岩岩石学的指导思想.从地球动力学的角度说,岩浆作用实质上是地球各层圈之间相互作用的结果.岩浆是地球各层圈之间物质和能量交换的重要载体(莫宣学,2019.高级岩浆岩石学课件).

岩浆作用具有重要的地球动力学意义:(1)岩浆岩及其所携带的深源岩石包体被当之无愧地称作探测地球深部的“探针”(lithoprobe)和“窗口”(window).它们的时间坐标,为人们研究地球深部的演化过程提供了可能.(2)岩浆岩也是大地构造事件的记录.通过岩浆岩的研究,可以恢复古构造格局,追溯大地构造演化历史.研究岩浆作用与岩浆岩的目的,归根到底,同样是服务于人类对合理利用资源、保护自然环境、减轻灾害的需求(Carmichael *et al.*, 1974; Wilson, 1989; 莫宣学, 1993, 2009, 2011; Best, 2003; 邓晋福等, 2004).

“岩石探针”可以获得哪些深部信息?(1)反演壳幔的物质组成与结构,建立区域壳幔岩石学(柱状)剖面.(2)反演壳幔的热结构和热状态.(3)估算地壳厚度、岩石圈厚度,及其空间变化.(4)反演软流圈顶面埋深及起伏、软流圈的温度、压力、熔浆含量、物质状态等.(5)反演壳幔的氧化-还原状态.(6)反演壳幔深部流体特征,研究地幔交代作用.(7)记录壳、幔成分及上述各种性质随时间的变化,反演壳幔深部过程.

例如,可以通过对某个火山喷出的火山岩及其所携带的深源岩石包体的研究,知道地下什么深度是什么岩石?哪里是地幔?哪里是下地壳?哪里是中上地壳?就像绘制一个钻井的柱状剖面图一样.如果这个火山喷出了不同时代的火山岩并携带着深源岩石包体,那就可以绘制出不同时代的地下柱状剖面图,这样就可以知道该火山下面壳、幔在不同时期的变化.世界上最深的大陆科学深钻科拉半岛深钻约13 km深.如果将岩浆岩及其所携带的深源岩石包体比喻为一井深钻的话,那么最深的天然“钻井”深度可达200 km以上.而如果许多这样的天然“深钻”分布在一个大的区域,那么人们甚至就可以依托这些天然“深钻”获得这个区域地下壳-幔结构总貌.20世纪80年代,池际尚院士曾带领中国地质

大学的师生,系统地研究中国东部新生代玄武岩及其所携带的幔源岩石包体,发现新生代玄武岩起源于52~113 km(平均值为77 km)深度,暗示新生代时中国东部的岩石圈厚度比正常的岩石圈厚度要薄数十到上百千米.我们根据当时23座火山群的研究资料粗绘了一张中国东部新生代玄武岩起源深度(相当于岩石圈厚度)的等值线图,可以看出中国东部新生代岩石圈厚度的空间变化(莫宣学,2011),结果与地球物理探测可以对比,证明了“岩石探针”方法的有效性.大量研究表明,自晚中生代以来,中国东部克拉通发生了岩石圈的巨大减薄与破坏(Deng *et al.*, 2004; 邓晋福等, 2004).国家自然科学基金委员会设立的重大研究计划“华北克拉通破坏”,细致地揭示了这一过程.通过长期的研究,人们越来越清楚地认识到,这个巨大的深部事件,是造成中国克拉通不稳定性及中国大地构造独特性(如“准地台”、“地台活化”)的深部原因,也是形成中国东部巨大岩浆岩带与成矿带,以及一系列能源盆地与地热田的深部原因.

又如,我们研究团队和其他许多作者运用“岩石探针”(包括同位素填图)对青藏高原壳幔结构进行了研究.研究表明,西藏冈底斯带存在两类地壳:新生(初生)地壳和再循环的老地壳,这两类地壳及其空间分布对矿产分布具有制约关系,碰撞带是地壳净生长(新生地壳形成)的最有利的环境.关于青藏高原巨厚地壳的成因:有构造加厚和地幔物质注入(通过岩浆作用)加厚两种机制,我们并估算了两种加厚机制所占的比例,以及加厚的时间;青藏高原存在着地幔物质的侧向流动等(莫宣学等, 2003, 2005, 2009; Deng *et al.*, 2004; Mo *et al.*, 2005, 2006, 2007, 2008; Zhao *et al.*, 2008, 2009; Hou *et al.*, 2009, 2015; Zhu *et al.*, 2011; Niu *et al.*, 2013).

由于“岩石探针”方法能够提供时间坐标,所以,将它与地球物理等方法相结合,是我们了解地球深部结构、组成及其演化过程的最有效的途径.

深部过程研究的重要性科学家已有共识.虽然资源、环境、灾害问题主要表现在地球的浅表层,然而其推动力却来源于地球深部,地球深部过程控制了浅部运动与变化.

例如,青藏高原是地球上最高、最大的高原,蕴含着丰富的自然资源,又对亚洲乃至全球的气候、生态、环境有重大的影响.然而,造成这一切的根本原因,却是印度-欧亚碰撞以来青藏高原壳幔各圈层物质和能量的调整、再分配、再平衡.正是这个物质

与能量的调整和再平衡过程,从根本上控制着青藏高原的隆升、形成演化和资源环境效应。如前所述,中国东部的构造、岩浆、矿产、能源和环境,也是由重大深部事件所控制的。

由此可见,只有阐明了地球深部过程,即地球内部的物质组成、性质、运动演化过程及动力学,才能抓住资源环境问题的关键(莫宣学,2018)。

4 岩浆岩:大地构造事件与过程的记录

岩浆和岩浆岩不仅是探测地球深部的“探针”和“窗口”,而且是大地构造事件与过程的记录。岩浆岩—构造组合类型有:(1)洋中脊岩浆岩组合,(2)洋岛岩浆岩组合,(3)俯冲带岩浆岩组合,(4)碰撞带岩浆岩组合,(5)碰撞后陆内岩浆岩组合,(6)大陆裂谷岩浆岩组合,(7)克拉通岩浆岩组合。

从大地构造角度进行归纳,上述 7 种组合可以归并为 3 类:分离性板块边界岩浆岩—构造组合;汇聚性板块边界岩浆岩—构造组合;板内(大洋板内、大陆板内)岩浆岩—构造组合。

不同构造环境所形成的岩浆岩,在岩石类型、岩石组合、主要元素、微量元素、稀土元素、同位素上都是不同的。因此可以应用岩浆岩记录来判断大地构造环境,恢复再造大地构造的空间格局及时间演化(过程)。这可以称为构造—岩浆分析。

构造—岩浆分析原则:(1)充分运用岩石构造组合,考虑区域地质背景。(2)全面考虑常量、痕量及稀土元素的特点,正确运用判别图解(不应简单地使用和依赖判别图解)。(3)在构造复杂地区对构造—岩片的研究方法:先解析、后综合。(4)通过全面综合分析,再造构造格局、恢复演化历史。

例如,利用火山岩结合其他证据,恢复南大西洋打开的历史,是众所周知的例子。地质学家发现,在南大西洋两侧(南美洲的 Parana 和非洲的 Etendeka)都存在着一套 130 Ma 的火山岩,其岩石类型及特征都相同,应是同一火山系统的产物。这证明当时 Parana 和 Etendeka 还在一起,中间没有大洋相隔。于是,根据南大西洋的宽度以及现代洋中脊与两侧火山岩之间洋底磁条带记录,恢复了南大西洋从 130 Ma 开始张开到现在的扩张历史。

又如,研究表明青藏高原是在新特提斯洋关闭、印度大陆与欧亚大陆碰撞之后隆升而成的。因此,印

度—欧亚大陆初始碰撞时间就是一个非常重要的问题。这个问题在国际地学界的争论很大。有人认为在晚白垩世就已开始碰撞(Jaeger *et al.*, 1989; Yin and Harrison, 2000),也有的人认为到 34 Ma 才开始碰撞(Aitchison *et al.*, 2007)。中国地质学家发现,沿着西藏南部主碰撞带存在着一个巨大的延伸千余公里的不整合面,不整合面以下是强烈褶皱的海相地层(时代为晚白垩世,有的地方为二叠纪地层),之上是 5 000 多米厚近水平的陆相火山—沉积地层。经过在林周盆地标准剖面的同位素测年(周肃等, 2004; Zhou *et al.*, 2004),其年龄为 65~40 Ma,底部年龄为 65 Ma。经岩石学、同位素地球化学与元素地球化学的研究,表明这套火山—沉积岩系具有同碰撞的性质。沿碰撞带走向,起始碰撞时间略有不同(可达 70 Ma)。因此,一部分学者(Mo *et al.*, 2002; Wan *et al.*, 2002; Ding *et al.*, 2005)认为印度—欧亚大陆碰撞开始于 65(70)Ma, 65(70)~40 Ma 为同碰撞阶段,40 Ma 以后转为后碰撞阶段。

此外,一些学者还运用火山岩的同位素年龄和化学成分来判断古洋盆的打开—扩张—收缩—闭合过程,判断造山带中微陆块的构造归属(例如属冈瓦纳还是属扬子)和特提斯洋地幔的同位素属性等(莫宣学等, 1993; Zhang *et al.*, 2005)。

5 关于岩浆与岩浆岩的成因

然而,要理解岩浆岩组合与构造环境的本质联系,必须深入揭示它们的成因机制。对岩浆岩成因机制的研究,是揭示岩浆作用与构造运动、深部过程之间内在联系的关键环节。岩浆岩的成因包括岩浆起源和岩浆演化两大过程。

岩浆起源,就是在一定的温、压等物理化学条件下,地壳或上地幔发生部分熔融(partial melting)产生原生岩浆的作用过程。导致固体地幔/地壳发生部分熔融的原因有:(1)地温异常:由于软流圈上隆、地幔柱上升、或板块俯冲引起地温异常,超过源岩的固相线温度(即起始熔融温度)。(2)挥发份的加入:挥发份的加入会使源岩的固相线温度降低。这里要注意在发生部分熔融时源岩属于什么样的物理化学系统:乾系统(不含挥发份的系统);不饱和挥发份系统;过饱和挥发份系统。3 种不同系统的固相线温度、起始熔融程度、初始熔体成分等是不同的。(3)压力改变:由于地幔对流、拆沉、去根作用或大断裂诱发的减压熔融;在某些情况下,增压也可以引起部分

熔融,称为增压熔融。

固体地幔/地壳源岩部分熔融产生后没有经过演化的岩浆称为原生岩浆(primary magma),反之,经过演化的岩浆称为进(演)化岩浆(evolved magma)。影响原生岩浆类型、成分的主要因素:(1)源岩及源区的性质和组成;(2)起源温度与熔融程度;(3)起源压力与深度;(4)挥发份的类型及含量。其中,岩浆源区对原生岩浆类型与成分的影响是第一位的。

岩浆源区有地幔、陆壳、俯冲洋壳3类。(1)地幔:幔源岩浆主要起源于软流圈上部与岩石圈下部,在这里发生部分熔融产生岩浆。与地幔柱(mantle plume)有关的岩浆虽然也是岩石圈/软流圈部分熔融形成的,但归根结底它们是地球核/幔相互作用产生的地幔柱的产物,带有地幔柱的标志。由于岩浆源区特点和形成时的物理化学条件不同,幔源岩浆有各类玄武岩浆(拉斑玄武岩浆、碱性玄武岩浆等)、碧玄岩浆、霞石岩浆、苦橄岩浆、科马提岩浆、金伯利岩浆、碳酸岩浆等。(2)陆壳:陆壳的部分熔融产生广义的长英质岩浆。壳源岩浆的研究对揭示大陆的形成演化非常重要。(3)俯冲洋壳:洋壳厚度很薄(0~10 km),只有在俯冲的条件下才可能发生部分熔融产生岩浆。过去曾长期认为,造山安山岩是洋壳俯冲形成的,但后来实验岩石学否定了这种认识(Wyllie *et al.*, 1984)。后来的研究发现,在特定的条件下,俯冲洋壳可以形成埃达克岩岩浆(Defant and Drummond, 1990)。

岩浆演化是形成岩浆岩的另一个重要机制。岩浆演化就是原生岩浆产生后变化为各种不同演化岩浆的过程。岩浆演化机制主要有:(1)岩浆分异作用:又可分为结晶分异作用(又称分离结晶作用,是最重要的分异作用)、扩散作用、液态不混溶作用、气运作用和压滤-扩容作用等;(2)同化混染作用;(3)岩浆混合作用。岩浆岩演化的机制和程度不同,是影响或控制不同成矿作用的一个关键因素。

岩浆过程的物理作用的研究,是过去岩浆岩石学研究的薄弱环节,近些年来取得了许多重要进展。其主要内容是研究岩浆从源区到地表的运动规律,包括熔体从源区分离出来聚合成岩浆团,岩浆的上升与传输,岩浆房内作用,岩浆的侵位,岩浆的喷发等作用。流体力学是研究岩浆运动的理论基础。对岩浆过程的物理作用的研究,直接涉及岩浆的运动学与动力学,进而涉及一些地球动力学问题,因而有重要意义。

致谢:感谢《地球科学》杂志主编赖旭龙教授、本

期责任编辑金振民院士、颜丹平教授邀请撰写本文。本文是在多年科学研究和教学工作的基础上完成的,感谢科技部、国家自然科学基金委员会、自然资源部(原国土资源部、原地质矿产部)、教育部的长期支持和资助!

References

- Aitchison, J. C., Ali, J. R., Davis, A. M., 2007. When and Where did India and Asia Collide?. *Journal of Geophysical Research*, 112 (B5): B05423. <https://doi.org/10.1029/2006jb004706>
- Best, M. G., 2003. *Igneous and Metamorphic Petrology* (2nd Edition). Oxford Blackwell Science, Oxford.
- Carmichael, I. S. E., Turner, F. J., Verhoogen, J., 1974. *Igneous Petrology*. McGraw-Hill Company, New York.
- Christiansen, E. H., Hamblin, W. K., 2014. *Dynamic Earth*. Jones & Bartlett Learning, Burlington.
- Condie, K. C., 1997. *Plate Tectonics and Crustal Evolution* (4th Edition). Butterworth-Heinemann, Oxford.
- Condie, K. C., 2005. *Earth as an Evolving Planetary System*. Elsevier Academic Press, New York.
- Defant, M. J., Drummond, M. S., 1990. Derivation of Some Modern Arc Magmas by Melting of Young Subducted Lithosphere. *Nature*, 347(6294): 662-665. <https://doi.org/10.1038/347662a0>
- Deng, J. F., Luo, Z. H., Su, S. G., et al., 2004. *Petrogenesis, Tectonic Environments and Mineralization*. Geological Publishing House, Beijing, 1-381 (in Chinese).
- Deng, J. F., Mo, X. X., Zhao, H. L., et al., 2004. A New Model for the Dynamic Evolution of Chinese Lithosphere: 'Continental Roots-Plume Tectonics'. *Earth-Science Reviews*, 65 (3-4): 223-275. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2003.08.001>
- Ding, L., Kapp, P., Wan, X. Q., 2005. Paleocene-Eocene Record of Ophiolite Obduction and Initial India-Asia Collision, South Central Tibet. *Tectonics*, 24 (3): 1-18. <https://doi.org/10.1029/2004tc001729>
- Hou, Z. Q., Cook, N. J., 2009. Metallogensis of the Tibetan Collisional Orogen: A Review and Introduction to the Special Issue. *Ore Geology Reviews*, 36(1-3): 2-24. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2009.05.001>
- Hou, Z. Q., Duan, L. F., Lu, Y. J., et al., 2015. Lithospheric Architecture of the Lhasa Terrane and Its Control on Ore Deposits in the Himalayan-Tibetan Orogen. *Economic Geology*, 110 (6): 1541-1575. <https://doi.org/10.2113/econgeo.110.6.1541>
- Jaeger, J. J., Courtillot, V., Tapponnier, P., 1989. Paleontological View of the Ages of the Deccan Traps, the Creta-

- ceous/Tertiary Boundary, and the India-Asia Collision. *Geology*, 17 (4): 316. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1989\)017<0316:pvtao>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1989)017<0316:pvtao>2.3.co;2)
- Kump, L., 2004. *The Earth System* (2nd Edition). Prentice Hall, New Jersey.
- Mo, X. X., 2011. Magma and Magmatic/Igneous Rocks: A Lithoprobe into the Deep Earth and Records of the Earth's Evolution. *Chinese Journal of Nature*, 33 (5): 255—259, 313 (in Chinese with English abstract).
- Mo, X. X., 2018. Earth Deep Process and Mineralization. *Chinese High Science and Technology*, 32:1—3 (in Chinese).
- Mo, X. X., Dong, G. C., Zhao, Z. D., et al., 2005. Spatial and Temporal Distribution and Characteristics of Granitoids in the Gangdese, Tibet and Implication for Crustal Growth and Evolution. *Geological Journal of China Universities*, 11(3):281—290 (in Chinese with English abstract).
- Mo, X. X., Dong, G. C., Zhao, Z. D., et al., 2005. Timing of Magma Mixing in the Gangdisé Magmatic Belt during the India-Asia Collision: Zircon SHRIMP U-Pb Dating. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 79(1):66—76. <https://doi.org/10.1111/j.1755-6724.2005.tb00868.x>
- Mo, X. X., Hou, Z. Q., Niu, Y. L., et al., 2007. Mantle Contributions to Crustal Thickening during Continental Collision: Evidence from Cenozoic Igneous Rocks in Southern Tibet. *Lithos*, 96(1—2):225—242. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2006.10.005>
- Mo, X. X., Lu, F. X., Shen, S. Y., et al., 1993. Sanjiang Tethyan Volcanism and Mineralization. Geological Publishing House, Beijing, 1—267 (in Chinese with English abstract).
- Mo, X. X., Niu, Y. L., Dong, G. C., et al., 2008. Contribution of Syncollisional Felsic Magmatism to Continental Crust Growth: A Case Study of the Paleogene Linzizong Volcanic Succession in Southern Tibet. *Chemical Geology*, 250(1—4):49—67. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.02.003>
- Mo, X. X., Zhao, Z. D., Deng, J. F., et al., 2003. Response of Volcanism to the India-Asia Collision. *Earth Science Frontiers*, 10 (3): 135—148 (in Chinese with English abstract).
- Mo, X. X., Zhao, Z. D., Deng, J. F., et al., 2006. Petrology and Geochemistry of Postcollisional Volcanic Rocks from the Tibetan Plateau: Implications for Lithosphere Heterogeneity and Collision-Induced Asthenospheric Mantle Flow. *Geological Society of America Special Paper*, 409:507—530.
- Mo, X. X., Zhao, Z. D., Yu, X. H., et al., 2009. Cenozoic Collisional-Postcollisional Igneous Rocks in the Tibetan Plateau. Geological Publishing House, Beijing, 1—396 (in Chinese with English abstract).
- Mo, X. X., Zhao, Z. D., Zhou, S., et al., 2002. Evidence for Timing of the Initiation of India-Asia Collision from Igneous Rocks in Tibet. *EOS Trans. AGU*, 83(47):F10003.
- Niu, Y. L., Zhao, Z. D., Zhu, D. C., et al., 2013. Continental Collision Zones are Primary Sites for Net Continental Crust Growth—A Testable Hypothesis. *Earth-Science Reviews*, 127:96—110. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.09.004>
- Stanley, S. M., 2005. *Earth System History*. W. H. Freeman, San Francisco.
- Wan, X. Q., Jansa, L. F., Sarti, M., 2002. Cretaceous and Paleogene Boundary Strata in Southern Tibet and Their Implication for the India-Eurasia Collision. *Lethaia*, 35 (2): 131—146. <https://doi.org/10.1080/002411602320183999>
- Wilson, M., 1989. *Igneous Petrogenesis: A Global Tectonic Approach*. Chapman & Hall, London.
- Wyllie, P. J., 1976. The Way the Earth Works: An Introduction to the New Global Geology and Its Revolutionary Development. *The Journal of Geology*, 84 (4): 502—502. <https://doi.org/10.1086/628222>
- Wyllie, P. J., Osmaston, M. F., Morrison, M. A., 1984. Constraints Imposed by Experimental Petrology on Possible and Impossible Magma Sources and Products (and Discussion). *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 310(1514): 439—456. <https://doi.org/10.1098/rsta.1984.0003>
- Yin, A., Harrison, T. M., 2000. Geologic Evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28 (1): 211—280. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.28.1.211>
- Zhang, S. Q., Mahoney, J. J., Mo, X. X., et al., 2005. Evidence for a Widespread Tethyan Upper Mantle with Indian-Ocean-Type Isotopic Characteristics. *Journal of Petrology*, 46 (4):829—858. <https://doi.org/10.1093/petrology/egi002>
- Zhao, Z. D., Mo, X. X., Dilek, Y., et al., 2009. Geochemical and Sr-Nd-Pb-O Isotopic Compositions of the Post-Collisional Ultrapotassic Magmatism in SW Tibet: Petrogenesis and Implications for India Intra-Continental Subduction beneath Southern Tibet. *Lithos*, 113(1—2):190—212. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.02.004>
- Zhao, Z. D., Mo, X. X., Sun, C. G. et al., 2008. Mantle Xenoliths in Southern Tibet: Geochemistry and Constraints for the Nature of the Mantle. *Acta Petrologica Sinica*, 24 (2):193—202.
- Zhou, S., Mo, X. X., Dong, G. C., et al., 2004. ⁴⁰Ar-³⁹Ar Geo-

chronology of Cenozoic Linzizong Volcanic Rocks from Linzhou Basin, Tibet, China, and Their Geological Implications. *Chinese Science Bulletin*, 49 (18): 1970 – 1979. <https://doi.org/10.1007/bf03184291>

Zhou, S., Mo, X.X., Dong, G.C., et al., 2004. ^{40}Ar - ^{39}Ar Geochronology of Cenozoic Linzizong Volcanic Rocks from Linzhou Basin, Tibet, China, and Their Geological Implications. *Chinese Science Bulletin*, 49 (20): 2095 – 2103 (in Chinese).

Zhu, D.C., Zhao, Z.D., Niu, Y.L., et al., 2011. The Lhasa Terrane: Record of a Microcontinent and Its Histories of Drift and Growth. *Earth and Planetary Science Letters*, 301 (1–2): 241 – 255. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.11.005>

附中文参考文献

邓晋福, 罗照华, 苏尚国, 等, 2004. 岩石成因、构造环境与成

矿作用. 北京: 地质出版社, 1–381.

莫宣学, 2011. 岩浆与岩浆岩: 地球深部“探针”与演化记录. 自然杂志, 33(5): 255–259, 313.

莫宣学, 2018. 地球深部过程与成矿作用. 中国高科技期刊, 32: 1–3.

莫宣学, 董国臣, 赵志丹, 等, 2005. 西藏冈底斯带花岗岩的时空分布特征及地壳生长演化信息. 高校地质学报, 11(3): 281–290.

莫宣学, 路凤香, 沈上越, 等, 1993. 三江特提斯火山作用与成矿. 北京: 地质出版社, 1–26.

莫宣学, 赵志丹, 邓晋福, 等, 2003. 印度—亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应. 地学前缘, 10(3): 135–148.

莫宣学, 赵志丹, 喻学惠, 等, 2009. 青藏高原新生代碰撞—后碰撞火成岩. 北京: 地质出版社, 1–396.

周肃, 莫宣学, 董国臣, 等, 2004. 西藏林周盆地林子宗火山岩 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代格架. 科学通报 49(20): 2095–2103.