

秦岭造山带蛇绿岩、 花岗岩和碎屑沉积岩 同位素年代学 和地球化学

张宗清 张国伟 刘敦一 著
王宗起 唐索寒 王进辉

地质出版社

秦岭造山带蛇绿岩、花岗岩和碎屑沉积 岩同位素年代学和地球化学

张宗清 张国伟 刘敦一 著
王宗起 唐索寒 王进辉

地质出版社

· 北 京 ·

前 言

本书报道了作者近 10 多年来对秦岭造山带蛇绿岩、花岗岩和碎屑沉积岩进行同位素年代学、同位素地球化学和元素地球化学研究所取得的成果。工作前期得到国家自然科学基金资助；工作后期得到北京离子探针中心和地调项目资助。

秦岭是我国南北自然地理分界线，也是我国南北两个最大陆块中朝克拉通华北陆块和扬子克拉通陆块结合区域。其形成和演化历史受到中、外地质学家关注。近年多学科联合攻关研究结果表明，秦岭是一条具有复杂地壳组成和结构历经长期不同构造体制演化的复合型大陆碰撞造山带。秦岭地质构造背景十分复杂，致使有关秦岭构造演化的许多基础地质问题长期意见不一、争论激烈。秦岭蛇绿岩的形成年龄就是争论问题之一。多数地质学家认为，秦岭蛇绿岩形成于古生代加里东—早海西期和中生代印支期，也有地质学家认为形成于中—新元古代，或认为蛇绿岩形成于一个漫长时期，由新元古代—早古生代—中生代。这些镁铁质火山岩的性质也存在争论。秦岭花岗岩十分发育，其形成与秦岭造山带构造演化密切相关。花岗岩的分布、产状、类型、岩石组成及与矿产关系已做不少工作，年龄也有不少论述，但是缺乏系统性，矛盾很多，岩石与构造关系讨论不够。秦岭碎屑沉积岩作为造山带构造活动产物已被广泛讨论，有关岩石组成、元素地球化学特征、形成时代和环境有许多文章发表，但是岩石的同位素地球化学特征尚未见系统工作报告。我们在前人工作基础上，根据秦岭多期复杂地质作用特点，选用多种同位素年代学方法、同位素和元素地球化学方法对秦岭蛇绿岩、花岗岩和碎屑沉积岩进行了系统研究。野外地质研究与室内实验室研究密切结合，同位素年代学研究和同位素、元素地球化学研究密切结合，不同同位素年代学方法研究密切结合。通过大量数据综合对比分析，取得重大进展。①基本确定了秦岭具蛇绿岩性质镁铁质火山岩的形成年龄、变质时期、岩石性质和形成环境。秦岭具蛇绿岩性质镁铁质火山岩除个别例外一般都形成于新元古代，或中元古代末至新元古代初，年龄 1037 ~ 716Ma 左右，年龄 400Ma 左右和 352 ~ 197Ma，即加里东—早海西期和晚海西—印支期，北秦岭和南秦岭具蛇绿岩性质镁铁质火山岩各遭受过不同强度变质改造，形成于岛弧或弧后拉张环境。秦岭蛇绿岩形成于古生代—印支期意见没有被证实。②基本确定了秦岭花岗岩的形成时期、物质组成特征、年龄和同位素组成的时空变化。厘定了秦岭中酸性岩浆事件年表。讨论了秦岭花岗岩与秦岭构造的关系。出露秦岭的代表性花岗岩岩体差不多都提供了系统同位素年代学和地球化学资料。秦岭花岗岩主要形成于晋宁期和晋宁期后，年龄低于 1000Ma。形成于晋宁期前的花岗岩不多。秦岭最老的花岗岩形成于太古宙，年龄 $2692 \pm 17\text{Ma}$ 。秦岭花岗岩形成时间具有幕式特点。晋宁期和晋宁期后花岗岩，按所获得的年龄资料能划分为 4 个时期，即晋宁期、加里东—早海西期、印支期和燕山期，峰期年龄 898Ma 左右，412Ma 左右，206 ~ 214Ma 左右，115Ma 左右。秦岭花岗岩 Nd 模式年龄 t_{DM} 和 Nd、Sr、Pb 同位素组成随时间变化明显，并表现明显区域性分

布特征。③给出了秦岭不同地域、不同时代碎屑沉积岩 Nd 模式年龄和 Nd 同位素地球化学结果,揭示了它们在秦岭造山带纵向、横向和随时间变化特点及与构造演化的关系。秦岭碎屑沉积岩组成物质主要来自商丹断裂南、北变质岩石风化物质和晋宁期新增生镁铁质岩地壳风化物质,与华北和扬子碎屑沉积岩组成明显不同。碎屑沉积岩 Nd 模式年龄 t_{DM} 和 Nd 同位素 $\epsilon_{Nd}(t)$ 随时空有规律变化。④在秦岭蛇绿岩、花岗岩和碎屑沉积岩资料基础上对秦岭造山带的地壳物质组成、结构、构造块体关系、拼合历史、秦岭造山带构造性质演变等重大基础地质问题提出了限定。秦岭造山带现今基底和结构由晋宁期强烈地质事件奠定。该时期,扬子和中朝克拉通华北陆块沿秦岭造山带可能已发生联结。

参加本项研究的工作人员有张宗清、张国伟、刘敦一、王宗起、唐索寒、王进辉、石玉若、宋彪、张巧大、杨淳、张玉海、陈文、罗修泉、张思红、郑宝英、陈启桐、付国民、谭惠玲、倪广深等。部分 U-Pb 年龄由天津地质矿产研究所李惠民研究员承担。Pb 同位素由中国科学院地质与地球物理研究所许荣华研究员分析。本书第三章第六节花山蛇绿岩同位素年代学和地球化学由石玉若博士编写,其余章节由张宗清编写。

项目是在国家自然科学基金、北京离子探针中心和地调项目资助下完成的。在项目立项和执行过程中得到沈其韩院士、任纪舜院士、李廷栋院士、肖序常院士、许志琴院士、马福臣研究员、姚玉鹏研究员、郭进义研究员、耿元生研究员、姚培毅研究员支持和帮助;任纪舜院士为专著编写提出了许多宝贵意见并提供了有关地质图件;采样过程中得到陕西省区调院陈家义高工,杨永成高工,河南省地质研究所卢欣祥高工和西北大学地质系董云鹏教授帮助;许荣华研究员和李惠民研究员百忙中为之分析了 U-Pb 年龄和 Pb 同位素数据;江博明(Borming Jahn)教授,姜春华研究员、许荣华研究员、张旗研究员、李曙光院士、肖庆辉研究员、王涛研究员、牛宝贵研究员、朱炳泉研究员、李惠民研究员、张寿广研究员、张维吉研究员、万渝生研究员、杨崇辉研究员提供了有关资料并进行了有益讨论;书稿由周玮打印,地质图件由张森、宋迎年清绘,在此一并表示衷心谢意。

目 录

前 言

第一章 秦岭区域地质概况	(1)
第一节 区域地层	(1)
一、华北区和华北南缘区	(1)
二、北秦岭区	(2)
三、南秦岭区	(3)
四、扬子区北缘	(3)
第二节 岩浆活动	(4)
第三节 区域变质作用	(4)
第四节 区域地质构造	(4)
第二章 实验方法和参数	(5)
第一节 主元素和微量元素分析实验方法	(5)
第二节 同位素年代学和同位素地球化学数据测定实验方法	(5)
一、Sm - Nd 同位素年龄和 Nd 同位素测定实验方法	(5)
二、Rb - Sr 同位素年龄和 Sr 同位素测定实验方法	(6)
三、锆石 U - Pb 年龄和 Pb 同位素测定实验方法	(6)
(一) 颗粒锆石 U - Pb 年龄测定实验方法	(6)
(二) 锆石 SHRIMP U - Pb 年龄测定实验方法	(7)
(三) Pb 同位素测定实验方法	(7)
四、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素年龄测定实验方法	(7)
第三节 Nd 模式年龄和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值的计算	(7)
第三章 秦岭蛇绿岩同位素年代学和地球化学	(9)
第一节 秦岭蛇绿岩的分布和研究程度	(9)
第二节 丹凤蛇绿岩的年龄和地球化学	(9)
一、丹凤变质镁铁质火山岩带和争论	(9)
二、陕西省丹凤县郭家沟丹凤变质镁铁质火山岩的年龄和地球化学	(10)
(一) 变质镁铁质火山岩产出地质概况和岩石元素地球 化学特征	(10)
(二) 郭家沟丹凤变质镁铁质火山岩同位素年龄测定结果 和岩石同位素地球化学特征	(15)
(三) 郭家沟侵入丹凤变质镁铁质火山岩的碎裂花岗岩的年龄	(24)

三、陕西省商州市三十里铺丹凤变质镁铁质火山岩的年龄和地球化学	(25)
(一) 变质镁铁质火山岩产出地质概况和样品元素地球化学特征	(25)
(二) 三十里铺丹凤变质镁铁质火山岩同位素年龄测定结果和岩石同位素地球化学特征	(28)
四、陕西省周至县黑河地区小王洞丹凤变质镁铁质火山岩年龄和地球化学	(33)
(一) 黑河小王洞一带地质概况和岩石元素地球化学特征	(33)
(二) 黑河小王洞丹凤变质镁铁质火山岩年龄测定结果和同位素地球化学特征	(37)
(三) 黑河小王洞中酸性侵入岩年龄、地球化学特征及对丹凤变质镁铁质火山岩形成年龄的限制	(41)
五、陕西省商南县松树沟变质超镁铁质—镁铁质岩年龄和地球化学	(44)
(一) 松树沟变质超镁铁质—镁铁质岩产出地质概况和变质镁铁质岩主、微量元素地球化学特征	(44)
(二) 松树沟变质镁铁质火山岩同位素年龄测定结果和同位素地球化学特征	(50)
(三) 富水变质辉长岩同位素年龄测定结果和同位素地球化学特征	(52)
六、小结：丹凤变质镁铁质火山岩的年龄和性质	(55)
第三节 二郎坪蛇绿岩的年龄和地球化学	(56)
一、二郎坪蛇绿岩的分布、组成和年龄研究程度	(56)
二、河南省西峡县长探河—湾潭二郎坪变质镁铁质火山岩年龄和地球化学	(57)
(一) 河南省西峡县长探河—湾潭一带地质概况和该地区二郎坪变质镁铁质火山岩元素地球化学特征	(57)
(二) 长探河—湾潭二郎坪变质镁铁质火山岩年龄测定结果和岩石同位素地球化学特征	(60)
(三) 湾潭含化石硅质岩和互层凝灰质火山岩产状、元素地球化学特征和年龄测定结果及与二郎坪变质镁铁质火山岩关系	(63)
(四) 西庄河石英闪长岩同位素年龄测定结果及对二郎坪变质镁铁质火山岩原岩形成年龄的限制	(68)
三、河南省内乡县湍河上游二郎坪变质镁铁质火山岩年龄和地球化学	(72)
(一) 河南省内乡县湍河上游葛条爬一带地质概况和该地区二郎坪变质镁铁质火山岩元素地球化学特征	(72)
(二) 湍河葛条爬一带变质镁铁质火山岩年龄测定结果和同位素地球化学特征	(76)
(三) 后坪硅质岩和互层变质中酸性火山岩年龄测定结果和	

Nd、Sr 同位素地球化学特征	(80)
四、河南省南召县乔端上青石峡二郎坪变质镁铁质—安山质火山岩 年龄和地球化学	(84)
(一) 河南省南召县乔端上青石峡一带地质概况和样品元素 地球化学特征	(84)
(二) 乔端上青石峡二郎坪变质火山岩年龄测定结果和同位 素地球化学特征	(87)
五、板山坪英云闪长岩和变质镁铁质火山岩包体的年龄及对二郎坪 蛇绿岩年龄的限制	(89)
六、讨论：二郎坪蛇绿岩的形成年龄和环境	(92)
第四节 广东坪蛇绿岩的年龄和地球化学	(94)
一、广东坪蛇绿岩的分布和研究程度	(94)
二、陕西省商州市北宽坪广东坪变质镁铁质火山岩年龄和地球化学	(94)
(一) 陕西省商州市北宽坪一带地质概况和广东坪变质镁铁 质火山岩元素地球化学特征	(94)
(二) 陕西省商州市北宽坪广东坪变质镁铁质火山岩年龄测 定结果和岩石同位素地球化学特征	(98)
三、陕西省洛南县马河广东坪变质镁铁质火山岩年龄和地球化学	(103)
(一) 陕西省洛南县马河一带地质概况和变质镁铁质火山岩 元素地球化学特征	(103)
(二) 陕西省洛南县马河广东坪变质镁铁质火山岩年龄测定 结果和岩石同位素地球化学特征	(104)
四、小结：广东坪蛇绿岩的年龄和形成环境	(107)
第五节 勉略蛇绿构造混杂岩带蛇绿岩的年龄和地球化学特征	(109)
一、勉略蛇绿构造混杂岩带概况	(109)
二、陕西省略阳县三岔偏桥沟变质火山岩年龄和地球化学	(110)
(一) 略阳三岔偏桥沟一带地质概况和变质火山岩元素地球 化学特征	(110)
(二) 三岔偏桥沟变质火山岩年龄测定结果和同位素地球化 学特征	(113)
(三) 三岔偏桥沟斜长花岗岩年龄及与火山岩的关系	(115)
三、陕西省勉县安子山变质镁铁质火山岩年龄和地球化学	(122)
(一) 勉县安子山一带地质概况和变质镁铁质火山岩元素地 球化学特征	(122)
(二) 勉县安子山变质镁铁质火山岩年龄测定结果和岩石同 位素地球化学特征	(124)
四、陕西省略阳县庄科变质镁铁质火山岩年龄和地球化学	(128)
(一) 庄科变质镁铁质火山岩产出地质概况和岩石元素地球 化学特征	(128)

(二) 庄科变质镁铁质火山岩年龄测定结果和岩石同位素地球化学特征	(131)
(三) 讨论: 庄科变质镁铁质火山岩原岩形成年龄	(134)
五、陕西省略阳县三岔四房坝放射虫硅质岩和与之共存变质镁铁质火山岩年龄和地球化学	(136)
(一) 硅质岩产出地质概况和样品元素地球化学特征	(136)
(二) 四房坝硅质岩年龄测定结果和同位素地球化学特征	(138)
(三) 四房坝与硅质岩互层变质火山岩年龄测定结果和同位素地球化学特征	(141)
六、勉略蛇绿构造混杂岩带变质超镁铁质岩年龄和地球化学	(145)
(一) 变质超镁铁质岩产出地质概况和样品元素地球化学特征	(145)
(二) 勉(县) - 略(阳) 蛇绿构造混杂岩带变质超镁铁质岩年龄测定结果和同位素地球化学特征	(147)
七、讨论: 勉略蛇绿构造混杂岩带的复杂性	(150)
(一) 勉略蛇绿构造混杂岩带的年龄	(150)
(二) 蛇绿构造混杂岩带蛇绿岩年龄: 古生物证据和同位素年代学证据关系	(150)
第六节 花山蛇绿岩的年龄和地球化学	(151)
一、湖北随州市花山一带地质概况和岩石样品元素地球化学特征	(152)
二、花山蛇绿岩年龄测定结果和同位素地球化学特征	(156)
(一) 杨家棚变质镁铁质火山岩年龄和同位素地球化学特征	(156)
(二) 杨家棚变辉长岩 Rb - Sr 年龄和同位素地球化学特征	(158)
(三) 小阜变质镁铁质 - 安山质火山岩年龄和同位素地球化学特征	(160)
三、蛇绿岩侵入岩——三里岗二长花岗岩 Sm - Nd、Rb - Sr、锆石 U - Pb 年龄同位素分析结果	(161)
(一) 岩体产状和矿物组成	(161)
(二) 岩体年龄测定结果和同位素地球化学特征	(162)
四、小结	(163)
第七节 秦岭具蛇绿岩性质的变质镁铁质火山岩的年龄和地球化学特征的地理分布	(164)
一、主元素组成的地理分布特征	(164)
二、微量元素组成的地理分布特征	(164)
三、秦岭具蛇绿岩性质变质镁铁质火山岩形成年龄的地理分布特征	(166)
四、秦岭具蛇绿岩性质的变质镁铁质火山岩源区 Nd 同位素组成地理分布特征	(167)
五、秦岭具蛇绿岩性质变质镁铁质火山岩 Pb 同位素组成	(168)
六、小结	(171)
第四章 秦岭花岗岩同位素年代学和地球化学	(175)
第一节 秦岭花岗岩的分布、类型和研究程度	(175)

第二节 秦岭代表性花岗岩岩体年龄和地球化学特征测定结果	(176)
一、路家沟岩体、石牌河岩体和石称岩体	(176)
二、合峪岩体	(178)
三、伏牛山岩体	(180)
四、板山坪岩体	(184)
五、五朵山岩体	(185)
六、龙王磴岩体	(186)
七、老君山岩体	(190)
八、满子营岩体	(192)
九、西庄河岩体	(193)
十、二郎坪岩体	(193)
十一、甘沟岩体和侵入陡岭群花岗岩体	(193)
十二、吐雾山岩体	(195)
十三、德河岩体	(195)
十四、蟒岭岩体	(199)
十五、枣园岩体	(201)
十六、宽坪岩体	(204)
十七、灰池子岩体	(205)
十八、铁峪铺岩体	(206)
十九、沙河湾岩体	(208)
二十、曹坪岩体	(210)
二十一、柞水岩体	(212)
二十二、东江口岩体	(214)
二十三、沔峪岩体	(218)
二十四、牧护关岩体	(220)
二十五、蓝田岩体	(222)
二十六、张家坪岩体	(224)
二十七、老牛山岩体	(227)
二十八、华山岩体	(229)
二十九、胭脂坝岩体	(232)
三十、老城岩体	(234)
三十一、汉南侵入杂岩	(236)
三十二、铁瓦殿岩体	(241)
三十三、碑坝花岗岩体	(244)
三十四、宝鸡岩体	(244)
(一) 马尾河黑云母二长花岗岩	(244)
(二) 太白梁环斑花岗岩	(246)
(三) 黄牛铺环斑花岗岩	(248)
(四) 红花铺石英闪长岩	(251)

三十五、太白岩体	(253)
三十六、西坝岩体	(256)
三十七、高桥铺、枣木兰、庙台岩体	(259)
三十八、留坝岩体	(260)
三十九、张家河岩体	(263)
四十、光头山岩体	(265)
四十一、铜厂岩体	(268)
四十二、鱼洞子岩体	(271)
四十三、白雀寺岩体	(273)
四十四、罗素河岩体	(276)
四十五、大安岩体	(278)

第三节 秦岭花岗岩年龄和同位素地球化学特征时空分布规律及与秦岭

造山带构造演变关系	(281)
一、秦岭花岗岩岩浆活动时期和岩体年龄地理分布特征	(281)
(一) 秦岭花岗岩岩浆活动时期	(281)
(二) 秦岭花岗岩形成年龄地理分布特征	(284)
二、秦岭花岗岩 Nd 模式年龄 t_{DM} 特点、时间演化和地理分布特征	(285)
(一) 秦岭花岗岩 Nd 模式年龄 t_{DM} 大小及其随时间演变特征	(285)
(二) 秦岭花岗岩 Nd 模式年龄 t_{DM} 地理分布特征	(289)
三、秦岭花岗岩 Nd 同位素组成、时间演化和地理分布特征	(291)
(一) 秦岭花岗岩 Nd 同位素组成及其随时间演化特征	(291)
(二) 秦岭花岗岩 Nd 同位素 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值地理分布特征	(292)
四、秦岭花岗岩 Sr 同位素组成、时间演化和地理分布特征	(293)
(一) 秦岭花岗岩 Sr 同位素组成及随时间演化特征	(293)
(二) 秦岭花岗岩 Sr 同位素 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) _i 值地理分布特征	(294)
五、秦岭花岗岩长石 Pb 同位素组成、时间演化和地理分布特征	(295)
(一) 秦岭花岗岩长石 Pb 同位素组成和随时间演化特征	(295)
(二) 秦岭花岗岩长石 Pb 同位素地理分布特征	(296)
六、秦岭花岗岩年龄和同位素地球化学特征及与秦岭造山带关系	(299)
(一) 秦岭中、下地壳年龄和组成物质性质	(300)
(二) 秦岭造山带下部构造块体分布和构造带划分	(301)
(三) 秦岭造山带重大花岗岩浆事件年表和秦岭地质构造性 质演变	(301)

第五章 秦岭碎屑沉积岩年龄和地球化学

第一节 秦岭碎屑沉积岩的分布和研究程度

一、秦岭碎屑沉积岩的分布	(303)
(一) 华北区	(303)
(二) 北秦岭区	(303)
(三) 南秦岭区	(304)

(四) 扬子北缘区	(304)
二、秦岭碎屑岩研究程度	(304)
第二节 秦岭碎屑沉积岩 Nd 模式年龄 t_{DM} 和 Nd 同位素 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 测定结果及其特征	(304)
一、碎屑沉积岩 Nd 模式年龄 t_{DM} 和 Nd 同位素 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 研究意义	(304)
二、秦岭碎屑岩 Nd 模式年龄 t_{DM} 和 Nd 同位素 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 测定结果	(305)
(一) 碎屑沉积岩样品采集和分布	(305)
(二) 碎屑沉积岩 Nd 模式年龄 t_{DM} 和 Nd 同位素 ε_{Nd} 值测定结果	(306)
三、秦岭碎屑沉积岩 Nd 模式年龄 t_{DM} 和 Nd 同位素 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值特征	(317)
(一) 秦岭碎屑沉积岩 Nd 模式年龄 t_{DM} 时空分布特征	(317)
(二) 秦岭碎屑沉积岩 Nd 同位素 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值时空分布特征	(321)
第三节 秦岭造山带上部沉积物陆壳年龄、物质源区、流向及与秦岭造山带构造演化关系	(324)
一、秦岭造山带上部沉积物陆壳年龄	(324)
二、秦岭变质碎屑沉积岩物质性质和源区	(324)
三、秦岭地表物质流向	(325)
四、秦岭碎屑沉积岩 Nd 模式年龄和 Nd 同位素组成对秦岭造山带构造演化认识的意义	(326)
第六章 小结和讨论：由秦岭蛇绿岩、花岗岩和碎屑沉积岩同位素年代学和地球化学研究得出的基本事实和对秦岭造山带结构和构造性质演变的认识	(328)
第一节 由秦岭蛇绿岩、花岗岩和碎屑沉积岩同位素年代学和地球化学研究得出的基本事实	(328)
一、由秦岭蛇绿岩同位素年代学和地球化学研究得出的基本事实	(328)
二、由秦岭花岗岩同位素年代学和地球化学研究得出的基本事实	(329)
三、由秦岭碎屑沉积岩同位素年代学和地球化学研究得出的基本事实	(330)
第二节 秦岭造山带结构	(331)
一、秦岭造山带曾经存在太古宙结晶基底	(331)
二、秦岭造山带现今基底和结构	(331)
(一) 垂直方向结构特征	(332)
(二) 水平方向结构特征	(332)
(三) 块体缝合带和拼合历史	(333)
第三节 秦岭造山带构造性质演变	(336)
一、古元古代秦岭造山带构造活动机制	(336)
二、中、新元古代秦岭造山带构造活动机制	(336)
三、早古生代秦岭造山带构造活动机制	(337)
参考文献	(339)

第一章 秦岭区域地质概况

秦岭横亘我国中部，是我国南、北自然地理分界线，也是我国南、北两个最大陆块——中朝克拉通华北陆块和扬子克拉通陆块结合处，东连大别山，西连祁连山、昆仑山，在我国大地构造格局研究中占着十分重要地位。

秦岭处于不同大地构造单元结合处，历经长期多阶段发展，地质构造背景十分复杂。秦岭造山带及邻区构造简图如图 1-0-1。

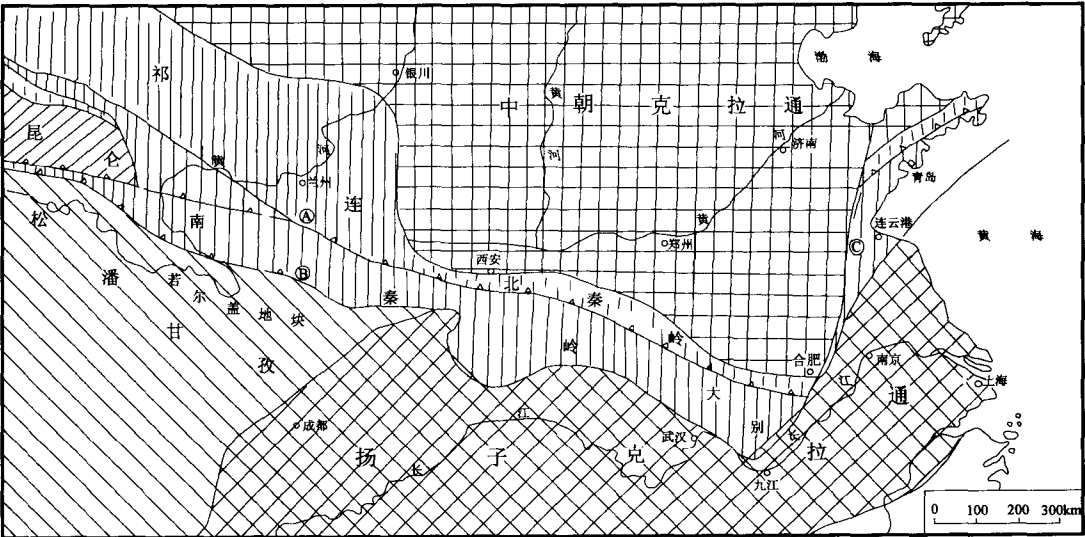


图 1-0-1 秦岭造山带及邻区构造简图

(据任纪舜等, 1991)

①秦岭主缝合带； ②大滩-玛沁缝合带； ③郯庐断裂带

第一节 区域地层

一、华北区和华南北缘区

华北区或华南北缘区——洛南-栾川断裂以北地区，出露该区域地层以太古宇和元古宇地层为主，古生界地层分布范围局限。志留系、泥盆系缺失。

太古宇太华群出露于陕西省太华山、老牛山、河南省崤山、熊耳山、外方山及舞阳一带，主要由片麻岩、斜长角闪岩、变粒岩、大理岩和石英岩组成。《陕西省区域地质志》

(1989)根据地层层序、岩石组合及含矿性将小秦岭地区太华群划分为下、中、上3个亚群。下亚群主要由黑云斜长片麻岩组成,夹斜长角闪岩、黑云角闪斜长片麻岩、变粒岩。混合岩化强烈;中亚群主要由长石石英岩、黑云斜长片麻岩、黑云角闪斜长片麻岩、黑云角闪片麻岩组成,夹大理岩、斜长角闪岩、石墨片岩;上亚群主要由黑云斜长片麻岩组成,夹斜长角闪岩、角闪斜长片麻岩、黑云变粒岩和磁铁石英岩。总厚度超过5000m。豫西太华群具有较多火山岩物质,出露河南洛宁熊耳山北侧太华群剖面:下部,草沟组,主要由黑云斜长片麻岩、角闪黑云斜长片麻岩组成,夹黑云角闪斜长片麻岩、斜长角闪片麻岩和斜长角闪岩;中部,石板沟组,主要由角闪斜长片麻岩、斜长角闪片麻岩和斜长角闪岩组成,夹黑云斜长片麻岩、变粒岩和变质超镁铁质岩石;上部,段沟组,主要由石榴黑云斜长片麻岩、黑云斜长片麻岩、变粒岩组成。采自石板沟组的角闪质岩石的Nd模式年龄 t_{DM} 为 2914 ± 79 (σ) Ma (张宗清和黎世美, 1998c)。

华北区元古宇地层发育,由下至上,依次出露:古元古界铜铁沟组,中元古界熊耳群,洛南群(或官道口群),新元古界栾川群及震旦系地层。铜铁沟组由石英岩、石英片岩组成,分布范围狭窄,不整合于太古宇太华群之上。熊耳群广泛出露于陕西金城城南,豫西崤山、熊耳山一带,主要由玄武质和安山质火山岩组成。火山岩年龄有很大争论,已获得的锆英石U-Pb年龄介于 1731 ± 29 Ma ~ 1840 ± 14 Ma (孙大中、胡维兴, 1993; 任富根等, 1996)。洛南群由下至上由高山河组、龙家园组、巡检司组、杜关组和冯家湾组组成,下部为碎屑岩,中、上部为碳酸盐岩。栾川群中、下部以浅海相陆源碎屑沉积为主,上部以碳酸盐岩沉积为主,顶部夹一层粗面质火山岩。震旦系罗圈组下段为冰川沉积,上段为滨海相沉积,主要由冰碛砾岩、板岩、砂岩、粉砂岩组成。

陶湾群也出露于华北南缘,系一套浅变质泥砂质为主岩石地层单元。下部不整合于栾川群鱼库组白云质大理岩之上,上部被寒武系大理岩不整合覆盖。由砾岩、千枚岩、云母片岩、片状大理岩组成。陶湾群岩石组成物质有二元性,主体由北秦岭秦岭群岩石风化物质组成,Nd模式年龄 ≈ 2000 Ma,其次为太华群岩石风化物质(张宗清等, 1994)。陶湾群的形成年龄长期争论,张宗清等(1991, 1994)获得的陶湾群绢云片岩Rb-Sr等时年龄为 586 ± 60 Ma,下伏栾川群大红口组火山岩Sm-Nd等时年龄为 682 ± 62 Ma。岩群层位和震旦系相当。

二、北秦岭区

北秦岭区,位于华北区或华北南缘区之南,洛南-栾川断裂和商(州)丹(凤)断裂之间区域^①。出露该区域地层主要为火山-沉积岩系。由南向北,依次出露:丹凤变质镁铁质火山岩带,秦岭岩群,二郎坪变质镁铁质火山岩带,广东坪变质镁铁质火山岩带。秦岭岩群下部由黑云斜长片麻岩、含石榴子石黑云斜长片麻岩、石榴矽线黑云斜长片麻岩组成,夹斜长角闪岩;中部主要由变粒岩、大理岩、石榴矽线片麻岩和黑云斜长片麻岩组成;上部主要为含石墨厚层白云质大理岩(刘国惠、张寿广等, 1993)。下部系一套泥砂质岩、火山岩变质产物,中、上部为泥灰岩、硅质白云岩变质产物。秦岭岩群形成于

① 商州市, 2006年更名为商洛市商州区,后同。

2000Ma 左右。河南西峡蛇尾（双龙镇）秦岭岩群黑云斜长片麻岩锆英石 U - Pb 年龄 2226^{+173}_{-153} Ma, 颗粒锆石逐层蒸发法 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄 2172 ± 5.3 Ma, 同一层位斜长角闪岩 Sm - Nd 等时年龄 1987 ± 49 Ma。片麻岩 Nd 模式年龄 $t_{\text{DM}} 1991 \pm 63$ (σ) Ma (张宗清等, 1991、1994)。出露北秦岭镁铁质火山岩具有蛇绿岩性质, 其年龄长期争论, 或认为形成于早古生代, 或认为形成于中、新元古代, 或认为形成于新元古代 - 早古生代, 是本专著重点讨论课题。新获得的同位素年代学资料不支持镁铁质火山岩形成于早古生代或形成于新元古代 - 早古生代意见。

三、南秦岭区

南秦岭区位于北秦岭区之南, 商丹断裂带和勉略断裂带之间区域。在秦岭造山带研究中, 这一区域也经常被称为“秦岭微板块” (张国伟等, 1995b)。出露该区域地层齐全、发育良好。

太古宇鱼洞子群变质岩出露于本区西南略阳鱼洞子一带, 主要由斜长角闪岩、浅粒岩组成, 夹磁铁石英岩, 是一套变质火山 - 沉积岩系。岩石可能形成于中太古代。变质岩锆英石 U - Pb 年龄 2655 ± 27 Ma (秦克令等, 1990), 全岩样品 Sm - Nd 等时年龄 2688 ± 100 (2σ) Ma, $I_{\text{Nd}} = 0.509128 \pm 72$ (2σ), MSWD 3.6。相应 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -0.4$ 。Nd 模式年龄 $t_{\text{DM}} 3017 \pm 39$ Ma (张宗清等, 2001a、2002b)。近年还发现, 该区陕西佛坪 - 商南 - 河南西峡瓦屋场一线也可能存在或曾经存在过太古宙岩块。商南湘河楼房沟斜长角闪岩 - 浅粒岩锆英石 SHRIMP U - Pb 年龄 $\geq 2488 \pm 8$ Ma (张宗清等, 2005b), 全岩 Sm - Nd 等时年龄 2518 ± 81 Ma, $I_{\text{Nd}} = 0.509183 \pm 9$ (2σ), 相应 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -3.7$ 。Nd 模式年龄 $t_{\text{DM}} 3141 \pm 131$ (σ) Ma^①。西峡瓦屋场陡岭群中透辉变粒岩块 Nd 模式年龄 $t_{\text{DM}} 2673 \pm 88$ (σ) Ma, SHRIMP 锆英石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄 2652 ± 3 Ma (张寿广等, 2004)。佛坪变质岩中存在 SHRIMP $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄老至 2745 ± 20 Ma 锆英石 (张宗清等, 2004)。

区域元古宙、显生宙地层发育。元古宙地层为火山 - 沉积岩系, 年龄中、新元古代。显生宙地层, 寒武系至二叠系均有出露, 其中志留系和泥盆系最为发育, 出露面积大, 主要由砂岩、片岩和灰岩组成。

南秦岭区域中生代地层分布局限, 仅佛坪以西凤州盆地有出露。

南秦岭南缘勉略构造带显生宙地层中夹有大量变质镁铁质火山岩块, 具岛弧火山岩 - 蛇绿岩性质, 过去认为形成于泥盆纪 - 石炭纪。新获得的同位素年代学资料, 没有被证实。

四、扬子区北缘

扬子北缘区位于勉略构造带南。区内元古宙火山岩沉积地层发育, 正常沉积地层分布局限, 仅在镇巴 - 鱼渡一带, 有较大面积出露, 主要由砂岩、板岩和碳酸盐岩组成, 时代震旦纪, 寒武纪至侏罗纪。

① 陕西地质矿产勘查开发局, 1:5 万徐家店幅区域地质图说明书, 1996; Nd 模式年龄 t_{DM} 计算公式和参数见本书第二章。

第二节 岩浆活动

秦岭岩浆活动强烈,超镁铁质岩、镁铁质岩、中酸性侵入岩广泛分布。超镁铁质岩呈带状分布在陕西省商南松树沟、勉略构造带、留坝楼房沟、河南淅川毛堂至陡岭一带。镁铁质火山岩构成了秦岭众多火山-沉积地层主体。中酸性侵入岩,主要由花岗岩类和闪长岩类组成,北秦岭,扬子北缘区,及南秦岭佛坪以西地区广泛分布。

出露秦岭超镁铁质岩和镁铁质岩年龄尚有争论,但是新获得的同位素年代学资料显示,它们多形成于中、新元古代。中酸性侵入岩年龄是本专著研究课题之一,所获得资料显示,出露秦岭中酸性侵入岩主要形成于中、新元古代,显生宙加里东-早海西期,印支期和燕山期。并且,年龄和同位素地球化学特征有明显随时间演变特征和地域差异。

第三节 区域变质作用

秦岭地区遭受过多期强烈区域变质事件。岩石变质程度绿片岩相至角闪岩相,局部地区达麻粒岩相。变质时期,据目前所获得资料,晋宁期以来能划分为3期,即晋宁期,年龄1000Ma左右;加里东-早海西期,年龄400Ma左右;晚海西-印支期,年龄280~200Ma左右(张宗清等,1996a、2002b)。晋宁期,南、北秦岭都遭受过强烈区域变质作用,老的岩石变质,部分重熔,同时伴随强烈镁铁质火山作用和大量花岗岩侵位。加里东-早海西期,北秦岭强度大,强烈变质作用,并伴随大量花岗岩岩浆活动。晚海西-印支期,变质作用强度南秦岭比北秦岭强,佛坪以西秦岭比佛坪以东秦岭强。晋宁期前变质事件,由于年代久远,资料不足。

第四节 区域地质构造

秦岭是横亘我国中部中朝克拉通华北陆块和扬子克拉通陆块结合区域。较早研究认为,秦岭是以商丹断裂为缝合带,南、北具有不同基底大陆碰撞造山带。商丹断裂北侧,即北秦岭,具有华北陆块基底;南侧,即南秦岭,具有扬子克拉通陆块基底。碰撞时间印支期,或加里东期。但是近年新获得资料显示,该造山带比想像的复杂。秦岭造山带具有漫长、多阶段发展复杂演化历史。据张国伟等(1995a、b、1996a、2001)研究,秦岭经历过3个不同构造体制演化阶段。①新太古代-古中元古代,造山带前寒武纪基底形成与演化。早前寒武纪,秦岭不同来源非均一陆块拼合,结晶基底形成。中元古代,裂谷和小洋盆并存,强烈火山作用,地壳垂向增生,火山岩过渡性基底形成。②新元古代至中三叠世,板块构造体制演化阶段。沿商丹断裂带古秦岭洋和沿勉略构造带古特提斯洋打开,华北、扬子和秦岭微板块(南秦岭块体)沿商丹带和勉略带消减,俯冲碰撞,T₂末秦岭隆起成山。③中生代陆内造山作用,强烈伸展、隆升,并伴随大规模岩浆活动。本书所获得秦岭蛇绿岩、花岗岩和碎屑沉积岩同位素年代学和地球化学资料不完全赞同上述认识。

第二章 实验方法和参数

随着技术的进步,同位素年代学方法和地球化学方法发展很快,许多重大基础地质问题的解决都与其应用密切相关,已成为地球科学和行星科学研究不可缺少的工具。

秦岭位于不同大地构造单元结合处,是一条具有复杂地壳组成和结构,历经长期不同构造体制演化的大陆碰撞造山带,地质作用十分复杂。多期强烈地质事件叠加,原有地质面貌被强烈改造,或完全被破坏。在这种情况下,通过保存在岩石中的同位素和元素地球化学信息的提取、辨认和研究对恢复造山带的演化历史是一条非常有效的途径。基于秦岭强烈多期地质事件叠加复杂背景,我们在加强野外地质研究基础上,采用多种母、子体稳定性不同的同位素年代学方法和同位素地球化学方法,并配合主、微量元素地球化学方法,对秦岭蛇绿岩、花岗岩和碎屑沉积岩年龄和地球化学特征进行了研究。每一种年代学方法和地球化学方法都有其优缺点和使用范围,通过多种方法结果限定,其数据地质意义可以揭示。本章介绍了采用同位素年代学方法、同位素地球化学方法和元素地球化学方法数据获得的实验流程、计算公式和应用参数。

第一节 主元素和微量元素分析实验方法

主、微量元素分别用 XRF、ICP-MS 方法测定,由中国地质科学院岩矿测试研究所完成。部分样品 REE 由同位素稀释法完成,分析方法见文献(张宗清、叶笑江,1987;张宗清,1998a)。

稀土分布模式用 Leedy/1.2 球粒陨石值标准化(Masuda et al., 1973),微量元素/N-MORB 分布模式用 Pearce (1982) 数据标准化。

第二节 同位素年代学和同位素地球化学 数据测定实验方法

一、Sm-Nd 同位素年龄和 Nd 同位素测定实验方法

Sm-Nd 同位素年龄和 Nd 同位素测定在中国地质科学院地质研究所同位素年代学实验室内完成,实验方法张宗清等已报道(张宗清、叶笑江,1987;叶笑江、张宗清,1990;张宗清,1998a)。Sm-Nd 含量用同位素稀释法分析。称取粉碎至 200 目以下的粉

未样品, 置于 Teflon 低压密封溶样罐中, 加入 HF + HNO₃ 溶解。待样品完全溶解后, 蒸干, 用 HCl 溶解, 将样品分为两部分, 一份用于 Nd 同位素比值测定; 另一份用于 Sm、Nd 含量测定。

含量分析: 样品加入 Sm, Nd 混合稀释剂 (如同时测定 Rb - Sr 年龄, 还加入 Rb, Sr 稀释剂), 混匀、蒸干, 转为过氯酸盐, 用阳离子交换柱 (20cm × φ1cm, AG50w × 8 (H⁺), 200 ~ 400 目) 分离主元素, Rb、Sr, 并把稀土元素分成若干部分。收集 Rb, Sr, LREE 部分, 蒸干, 转为硝酸盐, 质谱分析。

Nd 同位素分析: 样品蒸干, 转为过氯酸盐, 用阳离子交换柱 (柱条件同含量分析) 分离。REE 被作为一组解吸下来。如果同一流程要分析 Sr 同位素组成, 将含 Sr 解吸液收集, 蒸干, 送质谱分析。含 REE 溶液蒸干, 再经 HDEHP 交换柱分离, 收集 Nd 解吸液, 蒸干, 质谱分析。

质谱测定用 MAT - 261 固体同位素质谱计, 双 (Re) 带, M⁺ 离子型式, 可调多法拉第筒接收器接收。质量分馏用 (¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd) = 0.7219 校正。标准测定结果: J. M. Nd₂O₃ ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd = 0.511125 ± 8 (2σ), BCR - 1 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd = 0.512643 ± 12 (2σ), GBS04419 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd = 0.512731 ± 8 (2σ)。Sm/Nd 比值测定精度优于 0.1%。Sm, Nd 流程空白 ≈ 5 × 10⁻¹¹ g。年龄用 Lodwing (2000) Isoplot 软件计算。衰变常数 λ (¹⁴⁷Sm) = 6.54 × 10⁻¹² a⁻¹。

二、Rb - Sr 同位素年龄和 Sr 同位素测定实验方法

Rb - Sr 同位数年龄测定由两个流程完成。

(1) Rb - Sr 年龄测定和 Sm - Nd 年龄测定由同一流程完成。实验方法见前面叙述。

(2) 称取一定量粉碎至 200 目以下的粉末样品于 Teflon 烧杯中, 加入 Rb, Sr 稀释剂, 用 HF + HClO₄ 混合酸溶解。待样品完全溶解后, 蒸干, 用 HCl 溶解样品, 溶液载入 Dowex50w × 8 (H⁺) (200 ~ 400 目) 离子交换柱, 分离 Rb、Sr 及其他元素。收集 Rb, Sr 解吸液, 蒸干, 质谱分析。

Rb, Sr 同位素分析用 MAT - 260 或 MAT - 261 固体同位素质谱计进行。双 (Re) 带, M⁺ 离子型式, 法拉第筒接收器接收。Sr 同位素质量分馏用 ⁸⁸Sr/⁸⁶Sr = 8.37521 校正。标准测定结果: NBS987SrCO₃ ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = 0.71025 ± 2 (2σ), Rb/Sr 比值测定精度优于 0.1%。Rb、Sr 流程空白 10⁻⁹ ~ 10⁻¹⁰ g。年龄计算用 Ludwing (2000) Isoplot 软件计算。λ (⁸⁷Rb) = 1.42 × 10⁻¹¹ a⁻¹。

三、锆石 U - Pb 年龄和 Pb 同位素测定实验方法

(一) 颗粒锆石 U - Pb 年龄测定实验方法

颗粒锆石 U - Pb 年龄测定在天津地质矿产研究所完成, 实验方法见文献 (李惠民等, 1997)。

将镜下挑选的无包裹体、无裂纹、透明度好的锆英石晶体置于 0.25mL 容积氟塑料容