小秦岭、熊耳山金矿区中基性岩墙的岩石化学研究

王团华[1], 毛景文[1], 谢桂青[1], 叶安旺[2], 李宗彦[3]

1. 中国地质科学院 矿产资源研究所,北京 100037
2. 灵宝市地质矿产局,河南 灵宝 472500
3. 灵宝市金源矿业有限公司,河南 灵宝 472500

Wang Tuanhua[1], Mao Jingwen[1], Xie Guiqing[1], Ye Anwang[2], Li Zongyan[3]

1. *Institute of Mineral Resource, Chinese Academy of Geology Sciences, Beijing* 100037, *China*
2. *Geological and Mining Bureau of Lingbao City, Lingbao* 472500, *China*
3. *Jinyuan Mining Company of Lingbao City, Lingbao* 472500, *China*

Wang Tuanhua, Mao Jingwen, Xie Guiqing, et al. Petrochemical research on intermediate-basic dykerocks in Xiaoqinling, Xiong'ershan goldfield, Henan province, Central China. Earth Science Frontiers, **2008, 15(1): 250-266**

Abstract: By comprehensive study on geology, petrology and geochemistry of dykerocks in the Xiaoqinling and Xiong'ershan area, we identified the main dykerocks as intermediate-basic rocks, including diabases and lamprophyres. The major elements of dykerocks vary in a large range, with high potassium, met-aluminous and enriched volatile components. The dykerocks are enriched in LILE, LREE, and show negative Ti and Nb anomalies, and positive Pb anomaly relative to primitive mantle. Through our study, we suggest that the magmas evolution relevant to the formation of the dykerocks may be divided into three stages. (a) In the early Mesozoic, fluids and melts with high potassium and silicon had undergone matasomatism with lithospheric mantle in upper mantle source in the Qinling orogenic belt, leading to the formation of basaltic magmas with enriched mantle characteristics. (b) The basaltic magmas mixed with granitic magmas formed by regional thermal effect. (c) The mixed magmas ascended through continental crust, and underwent crystallization, differentiation, assimilation and continued evolution by thermodynamic and dynamic mechanisms.

Key words: intermediate-basic dykerocks; classification of dykerocks; magmas genesis and evolution; Xiaoqinling and Xiong'ershan area

摘 要:通过对小秦岭、熊耳山金矿区岩墙的地质学、岩石学、地球化学的综合研究,查明该岩墙主要由辉绿岩和煌斑岩类组成,属钾质、中等铝质岩石并富含挥发份(>2%)的中基性岩。岩石富集 LILE 和 LREE,与原始地幔相比具有明显的 Ti、Nb 负异常和 Pb 正异常。对形成岩墙的岩浆演化过程研究后认为,其岩浆演化大致分为三个关键环节:(1)早中生代时期富钾、富硅熔体交代秦岭造山带岩石圈地幔,导致具富集地幔特征的玄武质岩浆的形成;(2)玄武质岩浆与区域热效应形成的花岗质岩浆的混合(混染)作用;(3)混合岩浆在深部热力学和动力学机制下的结晶分异和连续演化过程。

关键词:中基性岩墙;岩石分类;岩浆成因和演化过程;小秦岭、熊耳山地区
中图分类号:P588.12;P618.51 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2321(2008)01-250-17

脉岩是一种独特的岩浆岩类,世界上很多金矿 出露有不同时代(从太古宙至第三纪)的脉岩[1-2]。田产出于以造山为背景的变质岩带,且变质岩带内 在我国两个最主要的黄金生产基地(胶东和小秦岭、

收稿日期:2007-10-16;**修回日期**:2007-12-20
基金项目:国家自然科学基金重点项目(40434011)
作者简介:王团华(1973—),男,博士,主要从事岩石学、地球化学研究。E-mail:wangtuanhua@hotmail.com

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

熊耳山金矿区)亦普遍出露燕山期脉岩[3-4]。自 Rock 和 Groves 提出"地幔柱-交代地幔-煌斑岩三位一体的中温热液金矿成矿模式"后[2],国内地质工作者开始重视我国金矿区出露的脉岩,并对脉岩本身及脉岩与金矿成矿作用的关系开展了一些研究和探讨[3-12]。鉴于世界上绝大多数金矿区都有脉岩出露的事实,对脉岩开展成因岩石学的研究将有助于深入认识金矿区形成的大地构造环境和壳-幔相互作用方式和过程。

倪师军等[6]对小秦岭地区脉岩与金矿成因关系开展较为系统的研究后认为,脉岩属中基性浅成、超浅成侵入岩,岩石属于大陆拉斑玄武岩-碱性玄武岩系列,脉岩形成于区域拉张构造环境,岩浆经历了上地幔部分熔融和岩浆分离结晶作用(有地壳物质同化混染)两个阶段的演化过程,脉岩对小秦岭地区金成矿的贡献在于提供矿化剂而非金源。

本文对小秦岭、熊耳山金矿区脉岩开展地质学和岩石化学的综合研究,将有助于加深对小秦岭、熊耳山地区脉岩的岩石化学特征和成因认识,进而为深入了解小秦岭、熊耳山地区以金为主的多金属矿床形成的大地构造环境以及脉岩与金属成矿作用的关系提供更多有价值的资料。

1 区域岩浆活动概况

小秦岭、熊耳山地区西起陕西东部华县,东至河南嵩县,呈长约 250 km,宽约 15～40 km 的狭长地带(图 1)。该地区因产以金为主的多金属矿床而备受国内外地质工作者重视,现已成为我国仅次于胶东地区的第二大黄金生产基地。

在地质历史时期,小秦岭、熊耳山地区的岩浆活动较为频繁,可明显分辨的有三次较为强烈的岩浆活动:太古宙、中元古代及中生代(燕山期)[13]。太古宙以基性、超基性岩浆喷溢活动和岩浆、热变质活动为主,形成了山岭核部的变质片麻岩系;中元古代主要是中基性火山喷发活动和 A 型花岗岩侵入活动,形成了广泛分布的熊耳群火山岩系和局部呈侵入相产出的元古宙花岗岩;而中生代燕山期则以酸性岩浆侵入为主,形成区内较大规模的黑云母二长花岗岩岩体,如华山岩体、文峪岩体、娘娘山岩体和花山岩体等[14]。值得指出的是,小秦岭、熊耳山地区在燕山期还有大量脉岩的侵入活动,产出于金矿区内的脉岩是本文关注的重点。

2 小秦岭、熊耳山金矿区脉岩地质特征

本文研究的脉岩位于河南省灵宝市境内小秦岭地区的西乱峪、仓珠峪、枪马峪、王家峪、樊家岔峪、灵湖、大湖、娘娘山等地及熊耳山地区的秦岭金矿、蒿坪沟等地(图 1)。

20 世纪 70 年代在该区域开采金矿时,在掘金巷道中揭露出大量的脉岩,本文样品主要采于掘金巷道中,还有一部分采于地表露头。

2.1 脉岩产状特征和定名

脉岩的采样位置、产状、岩石和矿物特征及岩石分类定名见表 1。由于小秦岭、熊耳山金矿区脉岩中矿物普遍显示强烈蚀变作用,多数矿物发生绿泥石化、纤闪石化、钠黝帘石化,原生矿物难以辨认。本文依据对薄片下蚀变矿物的观察,判断脉岩中原生矿物组成和结构,结合岩石中挥发份含量普遍较高(多数 > 2 %)的特征,初步将脉岩分为辉绿岩类和煌斑岩类,对煌斑岩类根据其主要矿物种类和含量多少粗略定名为云斜煌岩、斜闪煌岩。表 1 中定名为辉绿岩类和煌斑岩类的岩石,个别 SiO_2 质量分数较高(见表 2),这可能与岩石中普遍有后期石英脉贯入有关,晚期石英脉的贯入导致侵位岩墙的 SiO_2 质量分数明显增加。

脉岩以岩墙、小岩枝形式产出,侵位于太古宙太华群变质岩系或中生代花岗岩体中(图 2,3)。岩墙宽度一般为 0.5～6.0 m,有的宽达 15 m,延长一般较远,有数十米至数千米。脉岩有 4 组产出方向:近东西向、近南北向、北东向、北西向,倾向不固定,倾角一般为 35°～85°,多数在 70°～85°。

笔者在远离小秦岭、熊耳山区的河南信阳地区的商城县和南阳地区的内乡县亦发现了脉岩的较好露头,本文对这些样品(商城县 SC217,内乡县 NX-BC278)也进行分析,以便与小秦岭、熊耳山金矿区的脉岩作比较研究。

2.2 煌斑岩墙的可能侵位年代

由于笔者对小秦岭、熊耳山地区脉岩的年代学研究正在进行,尚未获得数据,目前只能根据前人研究资料大致判断小秦岭、熊耳山地区岩墙可能的侵位年代。

毛景文等(2003,2005)对华北克拉通及邻区中-新生代大规模成矿作用的地球动力学背景的总结研究认为[11-12],中生代时期华北克拉通及邻区经历了

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

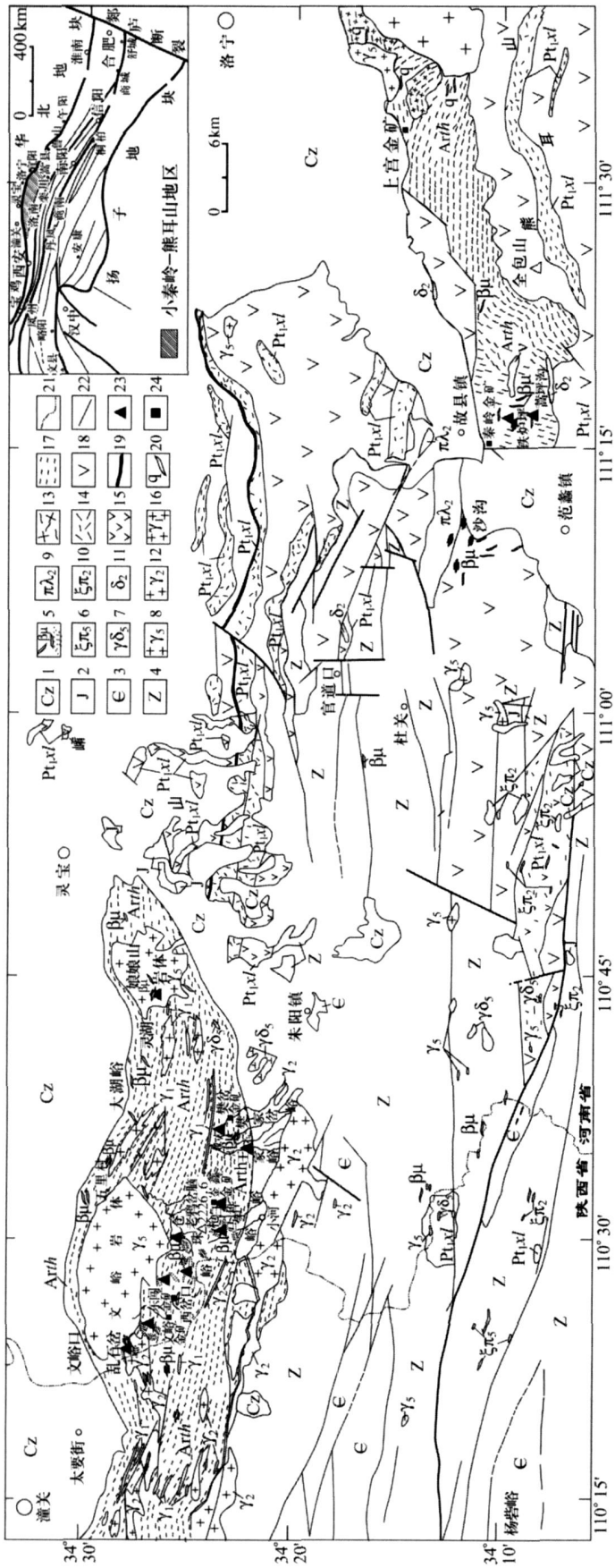


图 1 小秦岭、熊耳山地区中基性脉岩分布及区域地质概况图
(据河南省区域地质图洛南幅、洛宁幅和相关资料修改)

Fig. 1 Geological sketch map and distribution of intermediate-basic dykerocks in Xiaoqinling and Xiong'ershan area

1—新生代风化沉积物;2—侏罗系地层;3—寒武系地层;4—震旦系地层;5—中-基性脉岩;6—中生代正长斑岩、二长岩;7—中生代花岗闪长岩;8—中生代黑云母二长花岗岩;9—元古宙侵入相流纹斑岩;10—元古宙正长斑岩;11—元古宙片麻状闪长岩;12—元古宙黑云母花岗岩;13—混合岩化花岗岩;14—古元古界熊耳群酸性喷出岩;15—古元古界熊耳群中性喷出岩;16—太古宙片麻状花岗岩;17—太古宇太华群黑云母斜长片麻岩、混合岩;18—侵入相辉长岩;19—凝灰岩、凝灰砾岩;20—石英脉;21—省际分界线;22—断层线;23—采样位置;24—金矿

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1 小秦岭、熊耳山地区岩墙的采样位置、产状、岩石矿物特征和岩石定名表

Table 1 Rock types, localities and characteristics of occurrence and minerals of intermediate-basic dykerocks in Xiaoqinling and Xiong'ershan area

序号	样号	岩石名称	采样地点	产状	岩石和矿物特征
1	WY924	云斜煌岩	文峪金矿 2# 坑 924 中段	NW345°～355°, 倾向 NE, ∠85°, 宽约 1.0 m	岩石呈黑灰色, 无斑隐晶结构, 块状构造, 节理发育。手标本可见斜交石英脉。矿物普遍发生强烈绿泥石化蚀变, 依稀可辨认出存在黑云母和斜长石矿物。
2	WY770		文峪金矿 2# 坑斜井下 770 中段	NE55°～60°, 倾向 NW, ∠50°, 宽约 6.0 m	岩石呈黑灰色, 无斑隐晶结构, 块状构造, 节理发育。矿物蚀变强烈, 难以辨认, 可见黄铁矿被交代溶蚀后的残留骸晶。因矿物受交代蚀变作用而无法辨认矿物组成和岩石结构, 故未定名。
3	WYLSC	斜闪煌岩	文峪金矿乱石岔地表露头	近 EW265°～270°, 倾向 N, ∠约 35°～75°, 宽约 6.0 m	岩墙具分枝复合现象, 中间夹有厚约 0.5 m 石英岩, 岩墙下盘倾角缓, 上盘倾角陡。岩石呈灰黑、灰绿色, 斑状结构, 块状构造, 节理发育。矿物主要为原生普通角闪石、斜长石、云母矿物, 角闪石常因溶蚀作用晶形变得不完整。
4	DC1355	辉绿岩	东闯金矿 103# 脉西侧 1355 中段	近 SN340°～360°, 倾向 E, ∠45°～85°, 宽约 0.4 m	岩墙呈贯入花岗质岩石中, 倾角相差较大, 脉岩厚度 0.2～0.4 m, 部分细脉为盲枝。岩石呈灰黑色, 无斑隐晶结构, 致密块状构造。矿物蚀变强烈, 难以辨认。岩石中未见明显的云母、角闪石等暗色矿物, 据岩石依稀可辨的残存结构可推测为辉绿岩。
5	CZY1230		仓朱峪 18# 坑 903# 脉 1230 中段	近 SN350°～360°, 倾向 E, ∠85°～90°, 宽约 5.0 m	岩墙东侧上盘发育石英脉, 石英脉中有轻微矿化, 西侧下盘发育斜长角闪岩等变质岩。岩石呈灰黑色, 无斑隐晶结构, 块状构造, 节理发育。矿物蚀变强烈, 难以辨认, 可见黄铁矿被交代溶蚀后的残留骸晶。矿物受交代蚀变而无法辨认矿物组成和岩石结构, 未定名。
6	DH-1	云斜煌岩	熊耳山区大湖金矿	近 EW265°～270°, 倾向 S, ∠60°～80°	岩石呈灰黑色, 无斑隐晶结构, 致密块状。矿物因发生蚀变而模糊不清, 可辨认出原生云母和斜长石矿物, 矿物晶形不完整。
7	QM1328E	辉长辉绿岩	枪马金矿 1328 中段	近 SN350°～360°, 倾向 E, ∠75°, 宽约 2.0 m	岩石呈灰黑色, 无斑隐晶结构, 块状构造。矿物蚀变明显, 辉石发生纤闪石化, 斜长石发生钠黝帘石化。岩石依稀保留有原始结构。斜长石自形程度高, 他形辉石颗粒充填于斜长石晶体间隙中, 斜长石和辉石颗粒粗大, 结晶程度高。
8	QM1328S	辉绿岩	枪马金矿 1328 中段	近 EW265°～270°, 倾向 S, ∠80°, 宽约 3.0 m	岩石呈灰黑色, 无斑隐晶结构, 块状构造。矿物蚀变明显, 依稀可辨岩石结构, 辉石颗粒呈半自形—他形充填于较为自形的斜长石间隙中, 辉石发生绿泥石化、纤闪石化, 斜长石发生钠黝帘石化。
9	QM1485E	辉绿岩	枪马金矿 112# 脉坑道 1485 中段	NE45°, 倾向 NW, ∠80°, 宽约 15.0 m	岩石呈灰黑色, 无斑隐晶结构, 块状构造。北侧岩墙与花岗岩界限明显, 南侧发育石英脉, 靠近石英脉侧的岩墙硅化明显。辉石发生明显绿泥石化、纤闪石化, 斜长石发生钠黝帘石化, 岩石依稀可辨认出具有辉绿结构。
10	BHY1380S	辉绿岩	枪马金矿白桦峪矿区 16# 坑 618# 脉主巷东延 9# 脉南侧辉绿岩 1380 中段	NE30°, 倾向 NW, ∠70°～85°, 宽约 6.0 m	岩石呈灰黑色, 无斑隐晶结构, 块状构造。矿物绿泥石化蚀变强烈, 岩石结构难以辨认, 因矿物中未见明显的云母、角闪石类暗色矿物, 根据蚀变矿物特征与 QM1328S 的相似性, 推测岩石为辉绿岩。
11	FC1753	云斜煌岩	樊岔金矿 1753 中段坑口地表处	NE10°, 倾向 NW, ∠85°, 宽约 1.5 m	岩石呈黑灰色, 无斑隐晶结构, 块状构造。岩石内可见石英细脉。矿物发生一定程度的蚀变, 明显可见云母矿物, 斜长石因发生强烈蚀变作用而难以辨认。推测为云斜煌斑岩。
12	FC1600	辉绿岩	樊岔金矿 1600 中段坑口处	NE70°, 倾向 NW, ∠80°, 宽约 1.0 m	岩墙侵位于花岗岩中。岩石呈黑灰色, 无斑隐晶结构, 块状构造, 节理发育。岩石中有石英脉贯入。岩石结构难以辨认, 矿物因发生蚀变而模糊不清, 依稀可辨斜长石和辉石, 因未见明显的云母、角闪石等暗色矿物, 故推测为辉绿岩。
13	WJY1447-2	云斜煌岩	樊岔金矿王家峪 1447 中段	NE75°, 倾向 SE, ∠82°, 宽约 1.0 m	岩墙切断石英脉。岩石呈黑灰色, 无斑隐晶结构, 块状构造, 节理发育。薄片下岩石中可见很细的石英脉贯入, 可见大量暗色云母矿物, 斜长石因蚀变模糊不清。推测为云斜煌斑岩。
14	WJY1447-3		樊岔金矿王家峪 1447 中段	NE30°, 倾向 SE, ∠40°, 宽约 1.5 m	岩墙两侧发育近于与脉岩平行的石英脉。岩石呈灰色, 无斑隐晶结构, 块状构造, 节理发育。可见岩石内贯入石英细脉。岩石受交代蚀变作用极其强烈, 矿物几乎不可辨认, 仅可辨认黄铁矿受交代后的残余骸晶。未定名。
15	NNS	云斜煌岩	灵宝市娘娘山地质公园地表。GPS 坐标 110°26.163′E; 34°30.570′N	NW330°, 倾向 NE, ∠85°～90°, 宽约 6.0 m	岩石呈灰黑色, 斑状结构, 致密块状构造, 节理发育。表层岩石因风化蚀变呈灰黄色。可辨认斜长石、辉石的晶形, 但原生矿物普遍发生绿泥石化、纤闪石化、钠黝帘石化蚀变, 可见云母矿物, 自形程度较高, 晶形较好。薄片中可见石英脉贯入岩石中。
16	NXBC278	斜闪煌岩	内乡县板场 278 中段	NW290°～310°, 倾向 NE, ∠60°～70°, 宽约 1.0 m	岩墙在浅部倾角缓, 深部倾角变陡(70°～80°)。岩石呈灰黑色, 斑状结构, 致密块状构造。岩石中可见石英细脉。矿物发生一定程度的蚀变, 明显有斜长石、云母、角闪石等, 云母可能为斜长石蚀变形成。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

续表

序号	样号	岩石名称	采样地点	产状	岩石和矿物特征
17	SC217	辉绿岩	商城县公路边 GPS 坐标 115°24.444′E; 31°46.452′N	近 EW,倾向 N,∠76°,宽约 5.0 m	岩石呈灰黑色,斑状结构,块状构造,节理面发育,易裂。矿物发生一定程度的蚀变。辉石发生绿泥石化,斜长石蚀变为云母矿物。但矿物晶形和岩石结构明显可辨,可见明显的他形辉石包含较为自形斜长石的嵌晶含长结构。故定名为辉绿岩。
18	ZNG1	辉绿岩	灵宝市故县秦岭金矿金洞岔。GPS 坐标 110°32.430′E; 34°26.238′N	近 EW,倾向 N,∠80°,宽约 4.0 m	岩石呈灰黑色,表层因风化而呈灰黄色,无斑隐晶结构,块状构造,节理发育。矿物因蚀变模糊不清,岩石结构大致可辨。根据岩石中未出现明显的云母、角闪石等矿物,结合岩石结构推测可能为辉绿岩。薄片中可见岩石中有很细小石英脉。
19	QL1	辉绿岩	灵宝市故县秦岭金矿 GPS 坐标 110°31.205′E;34°24.401′N	NW310°,倾向 NE,∠68°,宽约 2.0 m	岩石呈灰色。表层因风化而呈灰黄色,无斑隐晶结构,块状构造,节理发育。矿物普遍发生绿泥石化,岩石结构因矿物蚀变而难于辨认。蚀变残留矿物依稀可辨认出斜长石和辉石矿物,未见明显云母、角闪石等矿物。由此推断岩石可能为辉绿岩。薄片下可见岩石中有石英脉贯入。
20	HPG540	辉绿岩	熊耳山区蒿坪沟 540 中段	NW330°,倾向 NE,∠85°,宽约 4.0 m	岩石呈黑色,无斑隐晶结构,块状构造,节理发育。手标本可见石英细脉,呈淡灰绿色。矿物发生强烈蚀变难于辨认,岩石结构也难于辨认。根据蚀变残存矿物判断,岩石的原生矿物可能主要为斜长石、辉石,以此推断岩石为辉绿岩。

碰撞造山(200～160 Ma)、构造体制大转变(140 Ma 土)和岩石圈拉伸减薄(130～110 Ma,峰期 120 Ma)三个阶段的演化过程。小秦岭燕山期中酸性花岗岩体形成集中发生在 110～140 Ma[15-16],据岩墙侵位于中生代花岗岩体(文峪和娘娘山)及脉岩形成于岩石圈伸展拉张的构造环境[17-18]推测,岩墙可能的侵位年代为约 130 至 110 Ma。

3 样品分析方法及精度

样品主量元素、微量、稀土元素测试在国家地质实验测试中心完成。样品处理过程如下:首先将采集的岩石样品切去表面明显氧化部分,取岩块中心部分在洁净钢钵中粉碎,取过 200 目筛粉末送交实验室分析。主量元素分析仪器为 X 荧光光谱仪(3080E),检测方法依据 GB/T 14506—1993,CO_2 挥发份检测方法依据 GB 9835—1988。由表 2 可见,13 项氧化物质量百分数总和的分析误差小于 1%,表明测试结果具有较高的精度。微量元素、稀土元素分析仪器为 ICP-MS(X-Series),检测方法依据 DZ/T 0223—2001,痕量元素分析下限为 0.05 μg/g,含量低于此下限的元素用小于 0.05 μg/g 代替,可见,微量元素和稀土元素的分析结果具有较高精度。

4 分析结果

4.1 主量元素

小秦岭、熊耳山金矿区脉岩的主量元素分析结果和一些主要岩石化学参数见表 2。从表 2 可见,脉岩的 SiO_2 质量分数变化范围较大(39.83%～59.32%)。表 2 中 $w(SiO_2)$ 为 39.83%的岩石样品(WY924),其挥发性组分含量高达 14.48%,如果扣除挥发组分(CO_2, H_2O^+)后将 11 种氧化物含量归百重算,其 $w(SiO_2)$ 为 46.79%。因此,按硅质含量划分,小秦岭熊耳山金矿区岩墙主要属于中基性岩类。

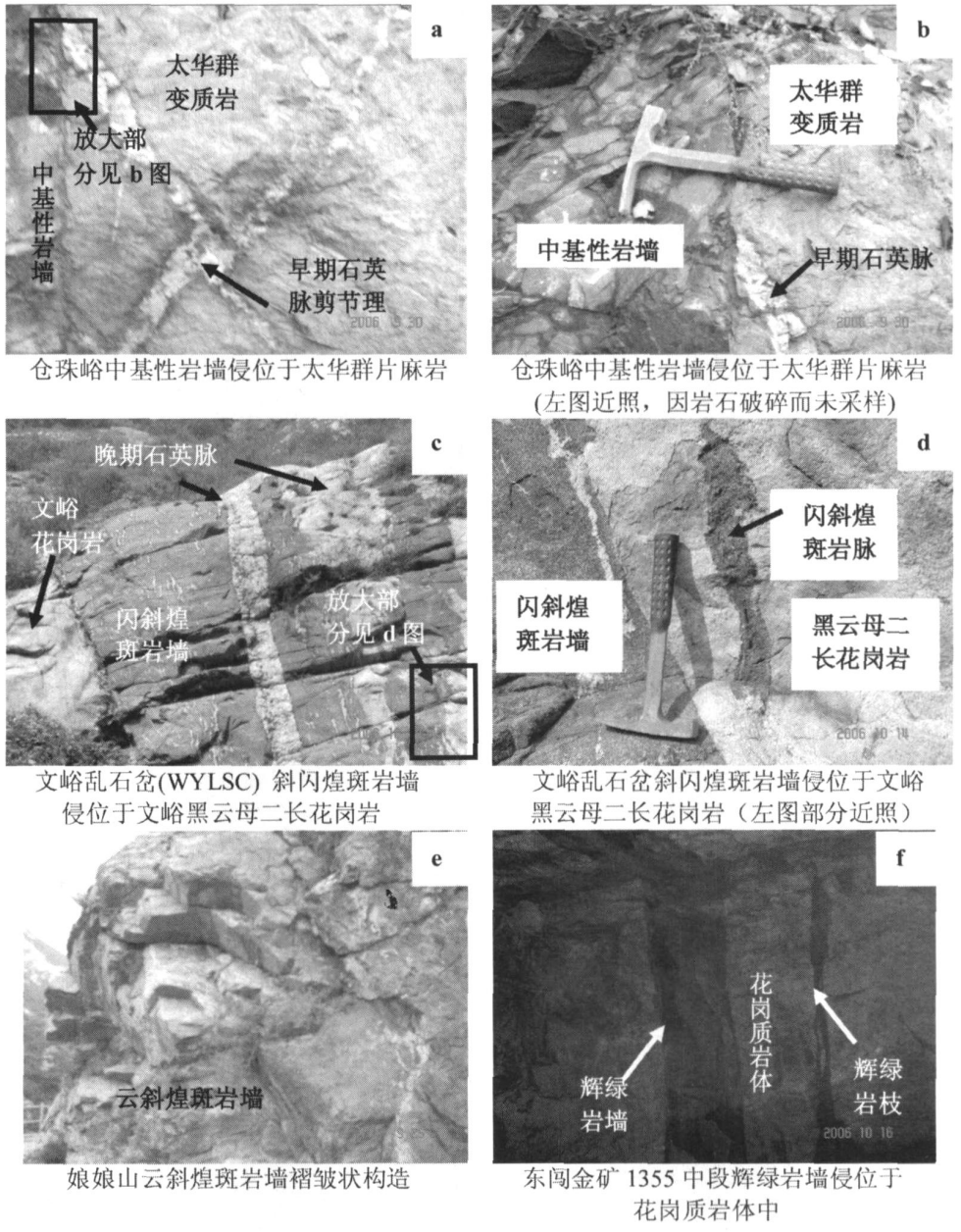
岩墙中岩石的 $Mg^{\#}$ 变化范围较宽(19.3～68.85),多数 $Mg^{\#}$ 变化于 40～68,反映岩浆侵位时可能经历了复杂的岩浆结晶分异过程。

4.2 微量元素、稀土元素和 Sr、Nd 同位素

小秦岭、熊耳山金矿区岩墙的部分微量元素分析数据见表 3。为讨论岩浆演化过程,在表 3 中列出了部分岩墙的 I_{Sr}、I_{Nd} 值。脉岩的微量元素配分型式(图 4)显示,岩石较原始地幔富集 LILE(Cs、Rb、Ba、K、Th、U),多数岩石具有明显的 Ti、Nb 负异常和一定程度的 Sr 负异常,Pb 明显正异常。脉岩的稀土元素分析数据见表 4,岩石富集 REE 且较强富集 LREE,属于右倾型富集轻稀土元素的配分型式。LREE/HREE 值变化于 3.53～22.77,(La/Yb)变化于 2.51～53.91。由图 4 可见,岩石中 La、Ce 等强不相容元素比原始地幔有 10～100 倍以上的富集,显示出岩浆源区的富集(富含 LILE 和 LREE)特征。

小秦岭、熊耳山地区岩墙具有非常显著的高 Sr 低 Nd 特征(表 3),岩石 I_{Sr}(0.708 12～0.073 510)明显高于陆壳平均值(0.707),其 I_{Nd}(0.511 079～0.512 241)明显低于原始地幔值(0.512 638),可能

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



仓珠峪中基性岩墙侵位于太华群片麻岩

仓珠峪中基性岩墙侵位于太华群片麻岩(左图近照，因岩石破碎而未采样)

文峪乱石岔(WYLSC) 斜闪煌斑岩墙侵位于文峪黑云母二长花岗岩

文峪乱石岔斜闪煌斑岩墙侵位于文峪黑云母二长花岗岩（左图部分近照）

娘娘山云斜煌斑岩墙褶皱状构造

东闯金矿 1355 中段辉绿岩墙侵位于花岗质岩体中

图 2 小秦岭、熊耳山地区中基性岩墙典型产状

Fig. 2 Typical outcrops of intermediate-basic dykerocks in Xiaoqinling and Xiong'ershan areas

同样显示出岩浆源区的富集特征。值得说明的是，小秦岭、熊耳山地区中基性岩墙的 Sr、Nd 同位素组成与胶东金矿区煌斑岩[19] (I_{Sr} 和 $^{143}Nd/^{144}Nd$ 分别变化于 0.709 057～0.737 277 和 0.511 650～0.512 536) 和鲁西中基性煌斑岩[20] (I_{Sr} 和 I_{Nd} 分别变化于 0.709 35～0.710 97 和 0.511 573～0.512 005) 的 Sr、Nd 同位素组成具有相似的特征，指示华北地台周缘中生代脉岩的岩浆源区普遍具有富集的特征。

5 讨论

由于小秦岭、熊耳山金矿区的岩墙普遍遭受蚀变作用和后期石英脉的影响，本文主要采用化学性质相对较不活泼的元素和具有相似地球化学行为的元素的比值来讨论脉岩岩浆从源区上升至侵位过程中可能发生的地质作用过程。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 2　小秦岭、熊耳山金矿区中基性岩墙主量元素分析数据及一些主要岩石化学参数

Table 2　Major element analysis data and some petrochemical parameters in Xiaoqinling and Xiong'ershan areas

样号	岩性	w_B/%													岩石化学参数			
		SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	H_2O^+	CO_2	合计	A/CNK	A/NK	$Mg^{\#}$	K_2O/Na_2O
WY924	Ksn	39.83	1.62	11.59	2.76	8.75	0.23	8.37	7.66	0.08	4.08	0.16	3.20	11.28	99.61	0.63	2.55	63.03	51.00
WY770		53.69	2.37	12.97	4.94	8.03	0.19	3.09	6.53	2.09	2.83	1.07	1.28	0.57	99.65	0.71	1.99	40.69	1.35
WYLSC	Spr	49.74	2.37	12.30	6.97	9.23	0.20	4.74	8.80	2.49	1.08	0.41	1.16	0.14	99.63	0.58	2.34	47.79	0.43
DC1355	Dbs	45.39	1.72	15.39	2.03	7.29	0.13	8.34	9.93	1.69	3.67	0.30	1.80	1.68	99.36	0.62	2.28	67.1	2.17
CZY1230		53.65	1.62	14.44	2.16	10.08	0.16	4.98	3.65	2.92	1.30	0.55	4.26	0.48	100.25	1.12	2.32	46.83	0.45
DH-1	Ksn	59.12	1.97	12.87	3.96	6.66	0.13	1.82	4.86	2.85	3.14	0.82	0.98	0.22	99.40	0.76	1.59	32.76	1.10
QM1328E	Gdb	59.32	1.65	12.35	3.09	8.35	0.18	1.12	4.97	2.37	3.78	0.83	0.60	1.08	99.69	0.73	1.55	19.30	1.59
QM1328S	Dbs	56.25	2.39	13.31	3.45	7.99	0.19	2.41	6.46	2.08	2.42	0.76	1.48	0.39	99.58	0.75	2.20	34.97	1.16
QM1485E	Dbs	55.79	1.69	13.86	3.97	7.42	0.15	3.20	6.64	2.91	2.60	0.54	1.12	0.14	100.03	0.70	1.82	43.46	0.89
BHY1380S	Dbs	53.27	2.02	14.40	2.68	8.84	0.20	4.37	5.88	1.98	1.48	0.76	3.34	1.17	100.39	0.93	2.96	46.84	0.75
FC1753	Ksn	45.37	0.54	12.28	1.44	9.68	0.16	10.38	6.34	0.84	3.55	0.10	4.44	5.02	100.14	0.73	2.35	65.65	4.23
FC1600	Dbs	53.38	1.46	14.11	2.81	7.78	0.13	4.93	5.06	2.45	4.45	0.51	1.82	1.34	100.23	0.78	1.59	53.04	1.82
WJY1447-2	Ksn	52.42	2.48	13.63	3.12	4.17	0.10	4.17	5.67	2.95	6.01	1.85	1.22	1.85	99.64	0.63	1.20	64.06	2.04
WJY1447-3		52.30	1.22	11.59	0.83	8.12	0.13	8.53	5.20	1.88	2.37	0.40	3.36	3.65	99.58	0.77	2.05	65.19	1.26
NNS	Ksn	54.88	1.07	15.32	2.45	7.38	0.15	4.93	7.68	2.46	1.25	0.30	1.22	0.48	99.57	0.79	2.84	54.36	0.51
NXBC278	Spr	49.00	1.85	14.24	3.2	10.27	0.16	6.86	8.44	2.20	1.22	0.15	2.58	0.39	100.56	0.70	2.88	54.35	0.55
SC217	Dbs	52.46	1.07	16.30	2.92	4.96	0.14	4.62	6.24	3.37	4.81	0.75	1.66	1.08	100.38	0.74	1.52	62.41	1.43
ZNG1	Dbs	53.19	1.97	14.31	4.19	7.45	0.18	4.27	7.16	1.99	2.49	0.76	1.58	0.65	100.19	0.75	2.40	50.54	1.25
QL1	Dbs	47.18	0.38	17.69	2.63	7.17	0.14	8.89	9.64	1.48	1.03	0.09	3.44	0.39	100.15	0.84	4.98	68.85	0.70
HPG540	Dbs	57.99	1.78	13.03	3.52	7.89	0.15	2.19	4.37	2.97	2.82	0.76	1.54	0.57	99.58	0.82	1.64	33.1	0.95

注:表中 Ksn=Kersantite(云斜煌岩),Spr=Spessartite(斜闪煌岩),Dbs=Diabase(辉绿岩),Gdb=Gabbro-diabase(辉长辉绿岩)。

主量元素分析数据在国家地质实验测试中心完成,分析方法:X 荧光光谱,检测执行标准 GB/T 14506;分析者:邓月金。

表中参数用 Maitre[23]的方法计算,按侵入岩调整氧化铁;

$Mg^{\#}=100Mg^{2+}/(Fe^{2+}+Mg^{2+})$($Fe^{2+}$、$Mg^{2+}$为摩尔分数)

$A/CNK=Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$(摩尔分数);$A/NK=Al_2O_3/(Na_2O+K_2O)$(摩尔分数)。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表3 小秦岭、熊耳山金矿区中基性岩墙微量元素分析数据

Table 3 Trace element analysis data of Xiaoqinling and Xiong'ershan areas

样品号	岩性	$w_B/10^{-6}$										La/Ce	Sm/Nd	Sr/Nd	La/Nb	Ti/Zr	I_{Sr}	I_{Nd}
		Rb	Cs	Sr	Ba	Th	U	Nb	Ta	Zr	Hf							
WY924	云斜煌斑岩	167	4.05	315	817	1.02	0.23	13.3	0.79	118	3.19	0.44	0.25	19.94	0.89	137.29	0.73510	0.511945
WY770		99.8	4.14	407	1411	5.39	1.57	19.1	1	328	8.23	0.48	0.19	5.57	3.70	72.26	0.71343	0.511178
WYLSC	闪斜煌斑岩	20.9	0.26	188	333	2.6	0.74	13.8	0.84	267	7.14	0.43	0.24	4.74	2.30	88.76	0.71232	0.511719
DC1355	辉绿岩	194	2.51	809	492	3.73	0.93	41.4	2.03	161	3.97	0.52	0.19	26.70	0.90	106.83	0.71934	0.511576
CZY1230		54.8	0.37	241	456	2.16	0.51	11.3	0.58	241	6.2	0.46	0.19	5.38	3.71	67.22	0.73267	0.511217
DH-1	云斜煌斑岩	96.2	1.18	362	2188	7.25	1.47	20.2	0.98	370	9.41	0.50	0.18	4.66	4.08	53.24	0.72354	0.511079
QM1328E	辉长辉绿岩	128	1.64	349	2054	5.48	0.96	29.7	1.29	540	14.9	0.53	0.18	3.06	3.91	30.56	—	—
QM1328S	辉绿岩	71.6	2.19	564	1707	6.15	1.35	21.6	1.03	343	8.93	0.50	0.17	6.54	4.17	69.68	—	—
QM1485E	辉绿岩	111	3.08	373	1209	5.15	1.65	14.23	0.79	255	6.56	0.47	0.18	7.08	3.70	66.27	0.72425	0.511122
BHY1380S	辉绿岩	77.8	1.29	326	779	2.31	0.44	14.4	0.68	269	6.84	0.46	0.19	5.56	3.79	75.09	0.72842	0.511537
FC1753	云斜煌斑岩	178	8.26	143	345	1.99	0.34	4.96	0.32	126	3.19	0.47	0.20	7.30	4.25	42.86	—	—
FC1600	辉绿岩	243	7.37	265	1293	3.35	0.88	14.3	0.73	230	5.63	0.48	0.17	4.61	4.34	63.48	0.72570	0.511093
WJY1447-2	云斜煌斑岩	103	4.17	1150	3998	5.91	1.86	78.6	2.81	483	12.4	0.47	0.16	12.74	1.14	51.35	—	—
WJY1447-3		98.3	4.51	318	934	4.04	0.98	12.9	0.66	213	5.13	0.49	0.16	6.87	4.09	57.28	—	—
NNS	云斜煌斑岩	55.8	1.79	562	664	2.26	0.56	9.32	0.51	171	4.49	0.47	0.19	14.67	4.14	62.57	0.71648	0.511131
NXBC278	云闪煌斑岩	56	17.3	158	197	1.87	0.62	13.7	0.75	128	3.47	0.44	0.24	8.63	1.10	144.53	0.70944	0.512241
SC217	辉绿岩	131	2.73	921	1196	6.6	2.87	14.5	0.6	330	7.81	0.48	0.20	12.70	4.87	32.42	0.70812	0.512077
ZNG1	辉绿岩	67.9	1.16	466	1673	2.34	0.43	14.4	0.69	273	6.76	0.47	0.19	7.86	3.88	72.16	0.71231	0.511253
QL1	辉绿岩	37.2	0.27	323	391	0.33	0.075	1.75	0.16	58	1.55	0.46	0.22	38.36	4.32	65.52	0.71752	0.511403
HPG540	辉绿岩	125	13.1	271	1755	6.09	1.18	13.4	0.68	270	7.87	0.48	0.19	5.26	3.84	65.93	0.73234	0.511086
原始地幔	—	0.550	0.018	17.80	5.10	0.064	0.018	0.56	0.04	8.30	0.27	0.38	0.325	16.68	0.96	183.83	0.7045	0.512638

注:I_{Sr}、I_{Nd}值以 $t=130\times10^6$a 计算。

微量元素分析数据在国家地质实验测试中心完成,测试方法:等离子质谱(ICP-MS);分析者:邓月金。

Sr、Nd 同位素分析在中国地质科学院地质研究所完成,分析者:王进辉、唐索寒。

原始地幔微量元素数据引自 Taylor 等(1985),La/Ce、Sm/Nd 据 Boynton(1984)。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 4　小秦岭、熊耳山金矿区中基性岩墙稀土元素分析数据

Table 4　Rare earth element analysis data in Xiaoqinling and Xiong'ershan areas

样品号	岩性	$w_B/10^{-6}$													LREE/HREE	La_N/Yb_N	δEu
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu			
WY924	二长辉长岩	11.8	27	3.66	15.8	3.92	1.28	3.85	0.7	3.85	0.74	1.98	0.28	1.66	0.25	4.77	5.10	1.00
WY770	闪长岩	70.6	146	18.2	73.1	13.9	3.12	11.2	1.87	10.2	2.03	5.82	0.82	5.23	0.8	8.56	9.69	0.74
WYLSC	辉长闪长岩	31.7	73.3	9.51	39.7	9.44	3.6	9.43	1.73	10.6	2.12	6.23	0.89	5.73	0.83	4.45	3.97	1.16
DC1355	碱性辉长岩	37.1	70.8	7.94	30.3	5.7	2.13	4.74	0.8	4.34	0.8	2.09	0.3	1.75	0.26	10.21	15.21	1.22
CZY1230	英云闪长岩	41.9	91.6	11.1	44.8	8.56	1.69	7.15	1.2	6.9	1.41	4.18	0.61	3.87	0.6	7.70	7.77	0.64
DH-1	英云闪长岩	82.4	165	20	77.6	13.6	2.79	10.7	1.77	9.84	1.95	5.76	0.79	5.13	0.78	9.84	11.53	0.68
QM1328E	英云闪长岩	116	219	29.2	114	21	4.32	17.3	2.87	16.4	3.24	9.68	1.36	8.81	1.3	8.26	9.45	0.67
QM1328S	闪长岩	90.1	182	22	86.2	14.6	3.02	10.8	1.68	8.81	1.62	4.62	0.62	3.93	0.58	12.18	16.45	0.70
QM1485E	闪长岩	52.6	112	13.2	52.7	9.74	2.26	7.98	1.29	7.43	1.46	4.41	0.62	4.05	0.61	8.71	9.32	0.76
BHY1380S	闪长岩	54.6	118	14.3	58.6	11.3	2.46	9.2	1.53	8.67	1.7	4.89	0.67	4.28	0.65	8.21	9.15	0.72
FC1753	辉长闪长岩	21.1	44.6	5.14	19.6	3.85	0.74	3.38	0.61	3.78	0.79	2.38	0.36	2.36	0.35	6.78	6.42	0.61
FC1600	二长岩	62	129	15.1	57.5	9.78	2.16	7.33	1.17	6.31	1.21	3.4	0.48	3.03	0.44	11.79	14.68	0.75
WJY1447-2	正长闪长岩	89.4	190	23.4	90.3	14.3	3.09	8.46	1.09	4.46	0.69	1.77	0.2	1.19	0.17	22.77	53.91	0.79
WJY1447-3	闪长岩	52.8	108	12.3	46.3	7.53	1.53	5.29	0.82	4.24	0.79	2.27	0.3	1.91	0.28	14.37	19.84	0.71
NNS	闪长岩	38.6	81.5	9.68	38.3	7.2	1.78	5.84	0.96	5.64	1.1	3.28	0.46	2.99	0.46	8.54	9.26	0.81
NXBC278	辉长闪长岩	15.1	34.7	4.31	18.3	4.43	1.37	4.48	0.85	5.41	1.09	3.19	0.44	2.84	0.41	4.18	3.82	0.93
SC217	正长闪长岩	70.6	147	18	72.5	14.5	3.74	11.1	1.6	7.57	1.24	3.21	0.4	2.54	0.36	11.65	19.95	0.87
ZNG1	闪长岩	55.9	119	14.4	59.3	11.3	2.43	9.39	1.53	8.68	1.68	4.84	0.67	4.32	0.64	8.26	9.29	0.70
QL1	辉长苏长岩	7.56	16.4	1.99	8.42	1.88	0.58	1.91	0.37	2.7	0.62	2.03	0.31	2.16	0.34	3.53	2.51	0.93
HPG540	英云闪长岩	51.5	108	12.8	51.5	9.9	2.27	8.33	1.37	7.9	1.56	4.53	0.63	4.16	0.62	8.11	8.88	0.74

注:稀土元素分析数据在国家地质实验测试中心完成,测试方法:等离子质谱(ICP-MS);分析者:邓月金。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

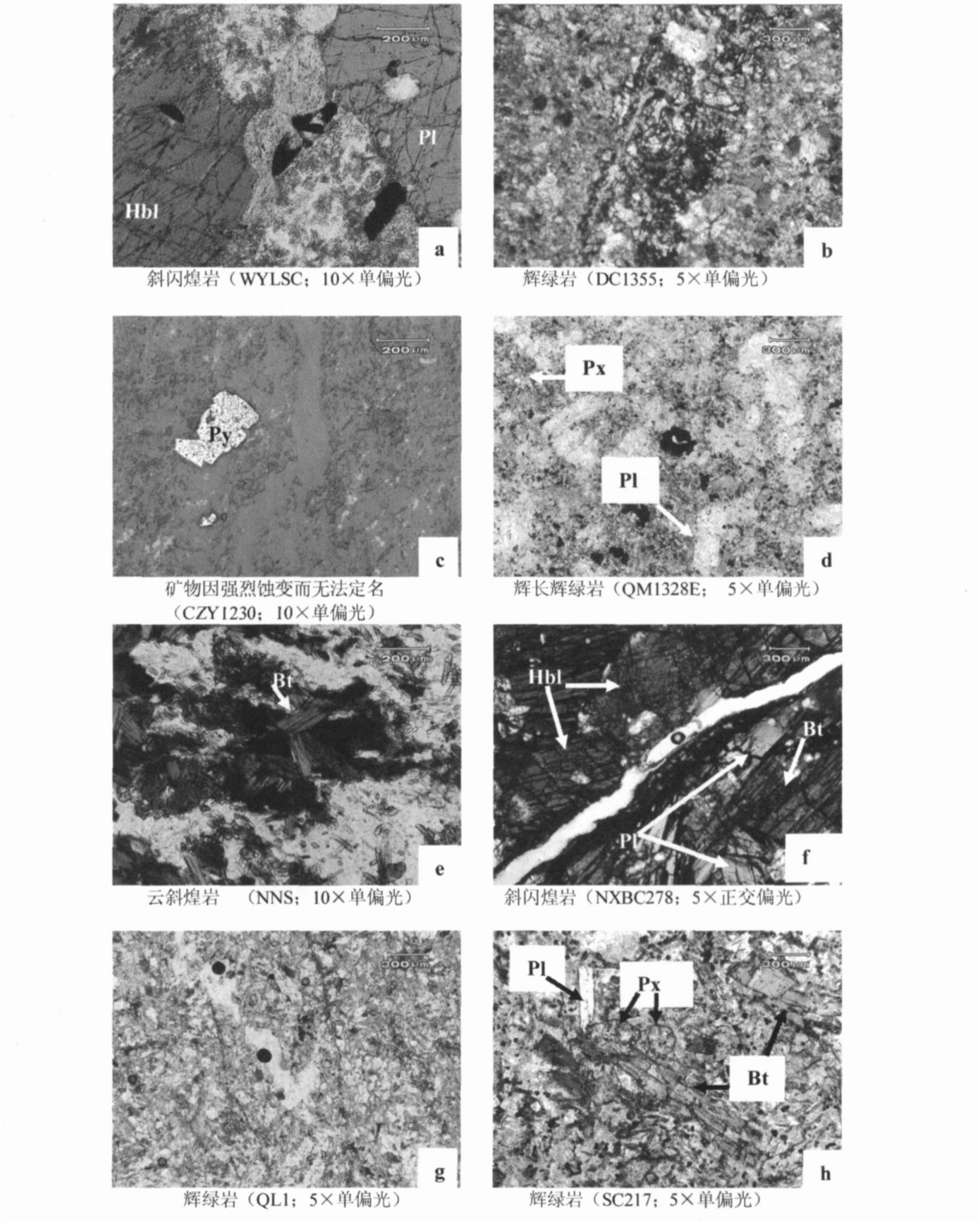


图 3 小秦岭、熊耳山地区中基性岩墙中岩石结构和主要矿物特征(岩石定名依据见表 1)

Fig. 3 Main characteristics of structure and minerals in intermediate-basic dykerocks from Xiaoqinling and Xiong'ershan areas

Hbl —普通角闪石; Pl —斜长石; Px —辉石; Bt —黑云母; Py —黄铁矿

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

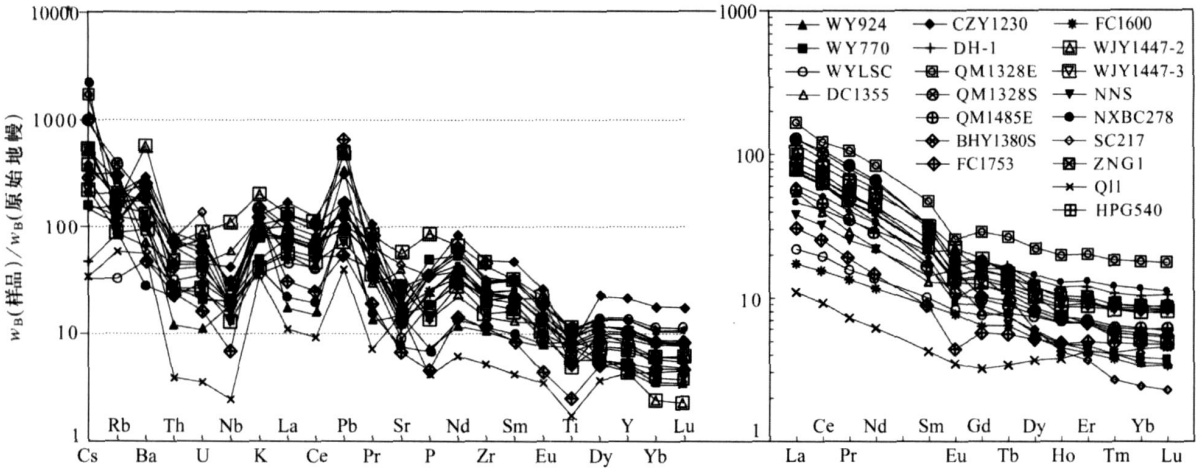


图4 小秦岭、熊耳山地区中-基性脉岩微量元素和稀土元素配分型式图解
(原始地幔标准化数据引自 Sun 和 McDonough,1989)

Fig. 4 Primitive mantle-normalized distribution patterns of trace element and REE for intermediate-basic dykerocks in Xiaoqinling and Xiong'ershan areas

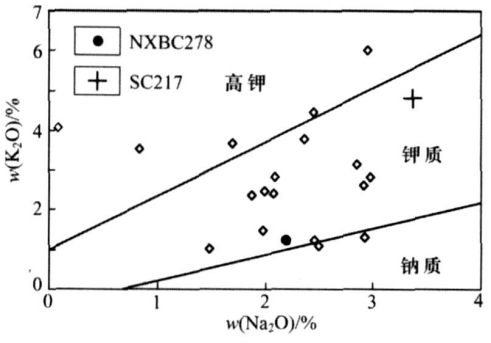


图5 小秦岭、熊耳山金矿区中基性岩墙 Na_2O-K_2O 图
(据 Middlemost,1972)

Fig. 5 The plot of Na_2O-K_2O for intermediate-basic dykerocks in Xiaoqinling and Xiong'ershan areas

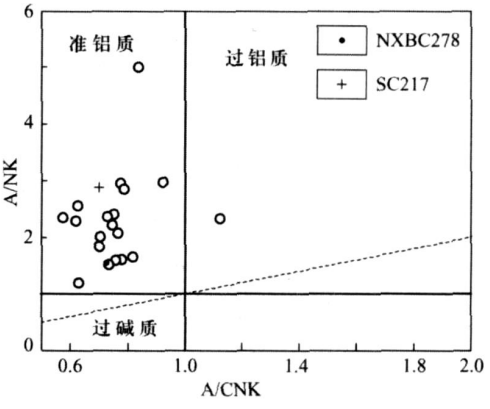


图6 小秦岭、熊耳山金矿区中基性岩墙 A/CNK-A/NK 图

Fig. 6 The plot of A/CNK-A/NK for intermediate-basic dykerocks in Xiaoqinling and Xiong'ershan areas

A/CNK = Al_2O_3/($CaO + Na_2O + K_2O$); A/NK = Al_2O_3/($Na_2O + K_2O$)

5.1 岩石系列划分

小秦岭、熊耳山金矿区岩墙的 Na_2O-K_2O 图(图5)显示,岩石主体属钾质类型的岩石。岩石的 A/CNK-A/NK 关系图(图6)显示,岩石主体属中等铝质岩石。岩石的 $FeO_{总}$/MgO 图(图7)指示岩石主体属拉斑玄武岩系列的岩石。远离小秦岭和熊耳山金矿区的岩墙(NXBC278,SC217)在岩石化学组成和地球化学特征上与小秦岭、熊耳山地区的脉岩一致,这表明沿秦岭-大别造山带,脉岩岩浆形成于相同的大地构造背景,并经历了相似的岩浆演化过程。

5.2 岩浆源区

目前关于煌斑岩等脉岩形成的岩浆源区还存在不同的认识,多数研究者认为脉岩形成于上地幔层位岩石的部分熔融[2-3,6,18,20],根据小秦岭、熊耳山地区中基性岩墙的微量、稀土元素和 $Mg^{\#}$ 值特征,笔者倾向于认为其脉岩起源于上地幔层位。

前人研究结果表明,中酸性硅酸盐岩浆在其分异演化过程中 K/Na 值不断增大,使残余岩浆富 K 而贫 Na[21]。在硅酸盐岩浆体系中 $Mg^{\#}$ 降低通常指示岩浆的结晶分离作用,$Mg^{\#}$ 值降低和 K_2O/Na_2O 值增加的方向大致是岩浆正常结晶分异作用的演化趋势。小秦岭、熊耳山地区岩墙中岩石主体属钾质类型的岩石(图5),但是岩石的富钾特征是来自于岩浆源区,还是在岩浆上升过程中逐渐富集了钾质?$Mg^{\#}$-K_2O/Na_2O 关系图(图8)显示,岩石中存在较

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

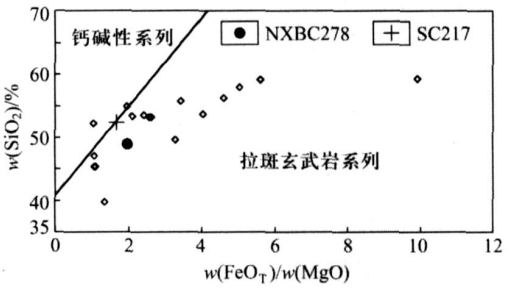


图 7 小秦岭、熊耳山金矿区中基性岩墙 FeO_T/MgO-SiO_2 图
(据 Miyashiro, 1975)

Fig. 7 The plot of FeO_T/MgO-SiO_2 for intermediate-basic dykerocks in Xiaoqinling and Xiong'ershan areas
$w(FeO)_T = w(FeO) + 0.9w(Fe_2O_3)$

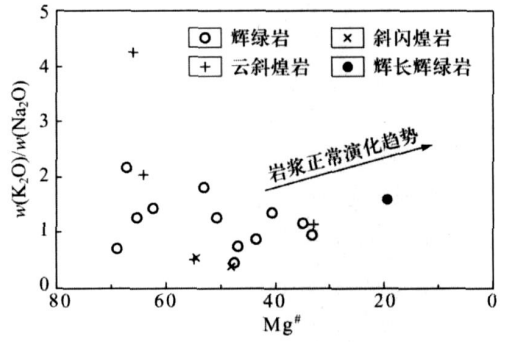


图 8 小秦岭、熊耳山地区脉岩 $Mg^{\#}$-K_2O/Na_2O 图
(○辉绿岩, + 云斜煌岩, ×斜闪煌岩, ●辉长辉绿岩)

Fig. 8 The diagram of $Mg^{\#}$-K_2O/Na_2O for intermediate-basic dykerocks in Xiaoqinling and Xiong'ershan areas

高 $Mg^{\#}$ 且 K_2O/Na_2O 值也较高的样品(样品 WY924 未计算在内,其 $Mg^{\#}$ 为 63.03, K_2O/Na_2O 高达 51.0),并且岩石中具有高 $Mg^{\#}$ 的岩石也具有较高的 K_2O/Na_2O 值,这说明可能在岩浆形成之初就有高 $Mg^{\#}$ 且 K_2O/Na_2O 较高的岩浆存在,据此推断脉岩的岩浆源区可能遭受过富钾质流体的交代作用。

地幔岩石在部分熔融作用过程中,两种高度不相容元素的比值几乎不变,在此后的岩浆分异过程中也变化不大,因此可以用高度不相容元素的比值来示踪岩浆源区的性质[22-24]。本文用 La/Ce、Sm/Nd、Sr/Nd、La/Nb 值示踪小秦岭、熊耳山地区岩墙的岩浆源区特征。由表 3、4 可见,岩石的 La/Ce、Sm/Nd 值普遍高于原始地幔中对应元素的比值,表明岩墙的岩浆源区具有富集地幔的特征。脉岩中多数岩石的 La/Nb、Sr/Nd 值分别高于原始地幔的对应比值,也有少部分岩石的 La/Nb、Sr/Nd 值低于原始地幔对应值,这可能暗示岩浆经历了不同程度的壳源物质混染作用。根据以上元素比值特征,结合前述的岩石中富含钾质,$Mg^{\#}$ 与 K_2O/Na_2O 存在异常的协变关系的特征,认为小秦岭和熊耳山地区的岩石圈上地幔可能曾经发生过富集化作用,导致岩浆中富集不相容元素,上地幔发生富集作用的动力机制可能与扬子板块在晚古生代的俯冲作用有关。小秦岭、熊耳山地区脉岩所具有的 $Mg^{\#}$-K_2O/Na_2O 异常协变关系,SiO_2 含量变化大的特征,可能指示导致该地区岩石圈地幔发生富集化作用的熔体可能是一种富钾、富硅的熔体。岩石的初始 Sr、Nd 同位素组成(表 3)也表明岩浆源区具有富集地幔特征(另文讨论)。

5.3 岩浆的壳源物质混染作用

小秦岭、熊耳山地区岩墙的微量元素和稀土元素对原始地幔的配分图解(图 4)所显示出的配分曲线之间不完全一致的关系,表明岩墙岩浆经历了较为复杂的演化过程,岩浆演化过程中可能的地质作用为岩浆受到不同程度的壳源物质混染和不同程度的结晶分异作用。

脉岩 Ti/Zr 值能很好地指示基性岩浆受陆壳混染的程度,陆壳中 Ti/Zr 值要明显低于多种类型地幔中的 Ti/Zr 值[25-26]。从表 3 可见,岩石中 Ti/Zr 值变化于 30.56～144.53,低于原始地幔 Ti/Zr 值 183.83[27],表明岩浆在演化过程中经历了不同程度的壳源物质的混染作用。

Zr、Hf、Nb、Ta 是中等不相容的高场强元素,具有非常相似的地球化学行为特征。它们具有较高的稳定性,对后期热液活动不敏感[28-29],单纯的结晶分异作用过程形成的岩浆,Zr/Hf 和 Nb/Ta 值大致保持恒定。小秦岭、熊耳山地区岩墙的 Zr/Hf-Nb/Ta、La/Nb-La/Ba 图(图 9)显示,Zr/Hf 和 Nb/Ta 的投点在一个较大区域内变化,显示出 Nb、Ta、Zr、Hf 有一定程度的分馏,造成 Zr/Hf 和 Nb/Ta 分馏最可能的原因是岩浆在演化过程中经历了不同程度的陆壳物质的混染作用[30]。La/Nb-La/Ba 图也显示出岩浆受到陆壳物质的混染。

硅酸盐岩浆体系中,K、Ba、Rb、Cs 是易于存留于岩浆熔体中的大离子强不相容元素。Zr、Nb、Nd 是中等不相容元素,K_2O/Ba-100Rb/Ba 和 Nd/Nb-Zr/Nb 图解具有与 Zr/Hf-Nb/Ta 图解相似的地球化学意义。在小秦岭、熊耳山地区脉岩 K_2O/Ba-100Rb/Ba 和 Nd/Nb-Zr/Nb 图解中(图 10), K_2O/

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

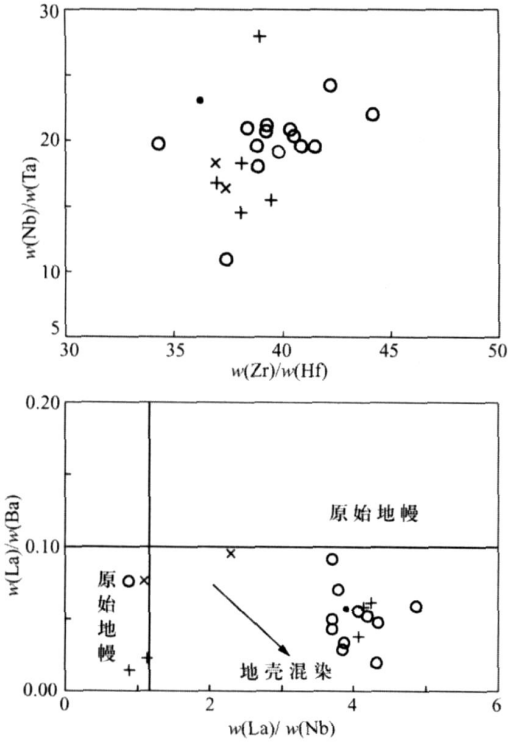


图9 小秦岭、熊耳山地区脉岩Zr/Hf-Nb/Ta和La/Nb-La/Ba图
(La/Nb-La/Ba图引自夏林圻等[31],2007)岩性符号同图8
Fig. 9 Diagram of Zr/Hf-Nb/Ta and La/Nb-La/Ba for intermediate-basic dykerocks in Xiaoqinling and Xiong'ershan areas

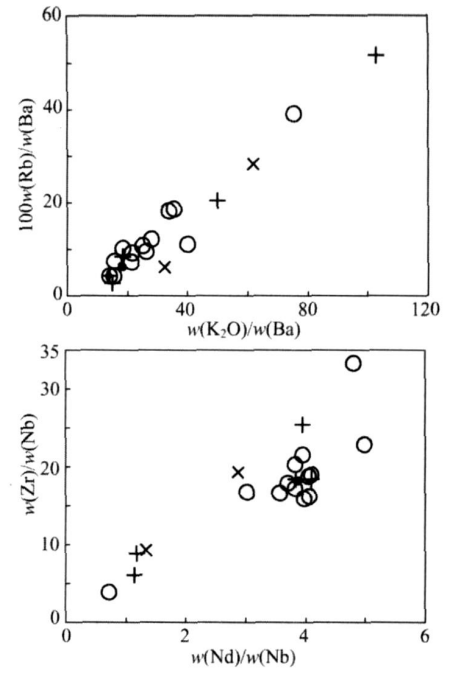


图10 小秦岭、熊耳山地区脉岩K_2O/Ba-100Rb/Ba和Nd/Nb-Zr/Nb图解
岩性符号同图8
Fig. 10 Diagram of K_2O/Ba-100Rb/Ba and Nd/Nb-Zr/Nb for intermediate-basic dykerocks in Xiaoqinling and Xiong'ershan areas

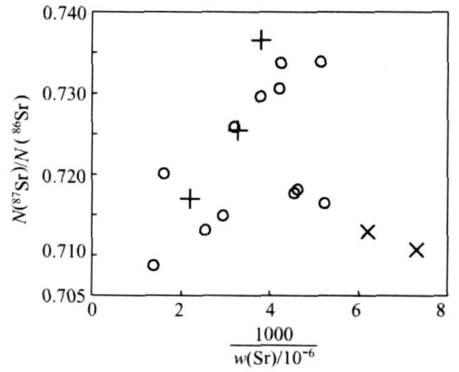


图11 小秦岭和熊耳山地区脉岩的$^{87}Sr/^{86}Sr$-1000/Sr图
(据Briqueu等,1979)岩性符号同图8
Fig. 11 The diagram of $^{87}Sr/^{86}Sr$-1000/Sr for intermediate-basic dykerocks in Xiaoqinling and Xiong'ershan areas

Ba和100Rb/Ba显示出非常好的线性关系,这恰好证明了岩浆演化过程中存在富含大离子亲石元素的熔体或物质混入了原有的岩浆体系中,壳源物质或其形成的熔体(流体)正好具有这种特征。Nd/Nb-Zr/Nb图解也显示了与K_2O/Ba和100Rb/Ba图相似的投点分布特征(图10)。

在$^{87}Sr/^{86}Sr$-1/Sr图[31]中(图11),单纯的结晶分异作用在图解中投点呈水平趋势,若岩浆演化过程中有地壳物质的加入,$^{87}Sr/^{86}Sr$与1/Sr表现为同步增长的正相关关系。图11显示,岩石的$^{87}Sr/^{86}Sr$与1000/Sr主要表现为松散的同步增长关系,这也证明岩浆演化过程中有地壳物质的加入。

综上所述,作者认为小秦岭、熊耳山金矿区岩墙经历了源区交代作用形成原始岩浆,原始岩浆在上升侵位过程中经历不同程度的结晶分异作用和壳源物质混染作用,岩浆演化具有AFC过程的特征。

6 岩浆演化过程中地质作用探讨

小秦岭、熊耳山地区岩墙侵位于文峪黑云母二长花岗岩、石英脉侵入岩墙(图2c、d)以及石英脉与岩墙互相穿切、分支复合的地质现象都表现出成分截然、不存在明显成分过渡的特征,这种现象可用不同性质岩浆接触混合来解释。Sakuyama(1984)对岛弧区Myoko火山的岩浆混合现象研究后指出[32],岩浆混合方式主要有两种:对流混合和接触

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

混合。对流混合特征是混合充分,不形成成分截然不同的岩石,发生对流混合的条件是基性岩浆注入量要大于酸性岩浆量,岩浆房小且浅;接触混合特征是混合不充分,混合岩浆接触处成分截然,有的可见包体。Herbert 等对基性、超基性岩浆在陆壳上升过程中的冷却和混染作用研究后指出[33],混染作用形成岩石的地球化学图解不同于岩浆房中发生同化作用和分离结晶作用的岩浆(岩石),混染作用形成的岩浆 $Mg^{\#}$ 高且 SiO_2 含量低,$^{87}Sr/^{86}Sr$、REE(尤其是 LREE)、LILE 和其他不相容元素高的地球化学图解特征,基性玄武质岩浆对所同化的围岩表现出高度的选择性,混染作用可以改变岩石的同位素年龄和岩浆来源特征。Herbert 的研究成果证实了基性和酸性岩浆的混合作用能够形成成分截然不同的脉岩。

王晓霞[34-35]对北秦岭地区环斑结构花岗岩中暗色岩浆包体成因研究显示,环斑结构花岗岩中含有来自于地幔玄武质岩浆的暗色包体。暗色包体是由上地幔部分熔融形成的玄武质岩浆底侵于下地壳,在此过程中产生的热和挥发份导致秦岭造山带基底岩石部分熔融,形成壳源酸性岩浆,玄武质岩浆与酸性岩浆的混合方式为基性岩浆注入已经开始结晶的酸性岩浆,形成花岗质岩浆中包含玄武质岩浆包体。

小秦岭、熊耳山地区广泛发育的岩墙和石英脉的成因,可能与秦岭造山带的造山期后伸展构造背景有关[11-12]。中生代时期,在小秦岭、熊耳山地区的岩石圈上地幔受到富钾、富硅熔体交代形成基性岩浆时,岩浆体系中富含大量的以水为主要组分的挥发份。这些基性岩浆在上升过程中,在中、下地壳层位与酸性岩浆发生混合(混染)作用和第一次结晶分异作用,主要导致橄榄石、辉石、基性斜长石的结晶分离,发生岩浆组成的一次重要重组,形成 SiO_2、K_2O、$Mg^{\#}$ 含量不同的岩浆。在岩浆继续上升过程中,由于压力、温度等条件的变化,岩浆体系不断通过自身的结晶分离作用发生相的分异,形成"晶粥相"和"流体相",晶粥相暗色成分较为富集,流体相则携带了大量易熔组分和比重小的组分(如 SiO_2、H_2O、CO_2 等)。岩浆中晶粥相部分易于形成结构较为疏松的黑云母、角闪石和碱性长石等矿物,同时造成已结晶的辉石、基性斜长石发生溶蚀,并在后期的热液活动下发生强烈蚀变。在来自深部的挤压应力和浅部的伸展拉张构造背景下,晶粥相的硅酸盐岩浆体系侵入于古老结晶基底和未完全固结的花岗岩构造薄弱部位形成岩墙,一些较厚的、冷却缓慢的岩墙在深部挤压应力的作用下形成褶皱状构造(图 2e)。

岩浆分异出来的流体相组分可能具有与"晶粥相"硅酸盐体系岩浆同样的侵位机制。富含 SiO_2、H_2O 和 CO_2 的流体相组分经历一定时间的演化之后,在相似的构造应力条件下侵入于古老结晶基底和未完全固结的花岗岩、脉岩的构造薄弱部位,形成石英脉。

当岩浆上升到上地壳层位(约 6 km 深度)时,岩浆体系中水的饱和度达到顶峰,在此深度以上,水将大量脱离岩浆体系,岩浆中含水越少,则水脱离岩浆体系的部位可以越向浅部移动[35]。岩浆体系在上地壳层位的大量失水,使得岩浆体系中又一次发生大规模的结晶分离作用,晶出矿物以云母、角闪石、碱性长石、磷灰石、沸石等富含挥发份矿物为主。

值得指出的是,可能由于构造断裂系统发育程度的差异及基性岩浆与花岗质岩浆不同程度的混合(混染)作用,岩浆在上升过程中经历不同程度的结晶分异作用,形成岩石化学组分变化范围较大的脉岩。但由于岩浆在相同的构造机制下形成并侵位,经历相似的演化过程,不同产状岩墙的地质和地球化学特征基本保持一致。

综上所述,小秦岭、熊耳山地区中基性岩墙的岩浆过程大致分为三个关键环节:(1)中生代时期富钾、富硅熔体交代秦岭造山带岩石圈地幔,导致具富集地幔特征的大量玄武质岩浆形成;(2)玄武质岩浆与区域热效应形成的花岗质岩浆的混合(混染)作用;(3)岩浆在深部热力学和动力学机制下的结晶分异和演化。

7 结论

(1)小秦岭、熊耳山地区中基性岩墙主要为辉绿岩和煌斑岩类。

(2)岩浆在上升过程中发生两次较为重要的结晶分异作用。第一次结晶分异作用发生在中、下地壳层位基性岩浆与花岗质岩浆混合(混染)之后,主要导致橄榄石、辉石、基性斜长石的结晶分离,形成 SiO_2、K_2O、$Mg^{\#}$ 含量不同的岩浆。第二次结晶分异作用发生在岩浆上升过程中的中上地壳层位,大约在上地壳层位(约 6 km 深度)达到最大。此次结晶分异作用主要是由于水等挥发性组分大量脱离岩浆

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

体系,晶出的矿物以云母、角闪石、碱性长石、磷灰石、沸石等富含挥发份矿物为主。

(3)脉岩的岩浆形成和演化过程经历了三个主要阶段:首先,中生代时期在造山带构造背景下的富钾、富硅熔体交代秦岭造山带岩石圈地幔,形成具富集地幔特征的玄武质岩浆;其次,玄武质岩浆与区域热效应形成的花岗质岩浆的混合(混染)作用;再次,岩浆在深部热力学和动力学机制下的结晶分异和演化过程。

笔者在野外工作期间,得到小秦岭金矿区在第一线工作的地勘人员郝蛟龙、张勇、祖宗虎、宋战波等人的鼎力帮助,在此深表谢忱!文章在修改过程中得到邵济安教授,樊祺诚研究员的有益指点,特向二位老师深表谢意。感谢 Vojtech Janousek, Colin M. Farrow, Vojtech Erban 免费发布了岩石地球化学处理软件 GCDkit,本文部分图解用该软件绘制。

References:

[1] Groves D I, Goldfarb R J, Robert F, et al. Gold deposits in metamorphic belts: overview of current understanding problems, future research, and exploration significance[J]. Economic Geology, 2003, 98: 1-29.

[2] Rock N M S, Groves D I. Can lamprophyres resolve the genetic controversy over mesothermal gold deposits[J]? Geology, 1988, 16: 538-541.

[3] Sun F Y, Shi Z L, Feng B Z. Geology of gold deposits and mantle-CHO fluid differentiation in leading to genesis of orebody and igneous rocks[M]. Changchun: People Publishing House, 1995: 1-170(in Chinese).

[4] Luo T M. The relationship between gold deposits and lamprophyre[J]. Science and Technology Trends of Gold, 1991, 2: 19-21(in Chinese).

[5] Hu R Z, Jin J F. Genesis of lamprophyre inside granite in Eastern Guizhou, Southwest China[J]. Mineralogy and Petrology, 1990, 10(4): 1-7(in Chinese).

[6] Ni S J, Li C Y, Zhang C, et al. Contribution of meso-basic dykerocks to gold deposits: an example from gold deposits in Xiaoqinling area[J]. Journal of Chengdu Institute of Technology, 1994, 21(3): 70-78(in Chinese).

[7] Sun J G, Hu S X, Ling H F, et al. Element geochemistry and origin of high potassic-potassic dike rocks in two types of goldfields in Northwest Jiaodong, Shandong, China[J]. Geochemica, 2000, 29(2): 143-152(in Chinese).

[8] Hu S X, Sun J G, Ling H F, et al. Genetic relationship between eclogite, lamprophyre, gold deposit and enriched mantle of Su-Lu active continental margin in the Mesozoic, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17(3): 425-435(in Chinese).

[9] Zhou X H, Yang J H, Zhang L C. The ore-forming of super large scale gold deposits in Jiaodong area and processes of deep lithosphere reaction in Huabei craton, North China[J]. Science in China: Series D, 2002, 32(Suppl): 11-20(in Chinese).

[10] Mao J W, Wang Y T, Zhang Z H, et al. Geodynamic settings of Mesozoic large-scale mineralization in North China and adjacent areas: implication from the highly precise and accurate ages of metal deposits[J]. Science in China: Series D, 2003, 46(8): 838-851.

[11] Mao J W, Xie G Q, Zhang Z H, et al. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings[J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(1): 169-188(in Chinese).

[12] Zhai M G, Fan H R, Yang J H, et al. Non-orogenic gold deposits: the model of inter continent ore-forming in Jiaodong, Shandong province, Eastern China[J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(1): 85-98(in Chinese).

[13] Zhang H F, Zhao Z D, Luo T C, et al. Crustal growth and lower crust nature of north Qinling: study of Sm-Nd isotopic model ages[J]. Acta Petrologica Sinica, 1995, 11(2): 160-170(in Chinese).

[14] Lu X X, Wei X D, Yu Z P, et al. Characteristics of ore-forming fluids in gold deposits of Xiaoqinling-Xiong'ershan areas[J]. Mineral Deposits, 2003, 22(4): 377-385(in Chinese).

[15] Lu X X, Wang X X, Xiao Q H, et al. Comparison of Qinling-Kunlun orogenic-type rapakivi granite with world typical rapakivi granite[J]. Geological Science and Technology Information, 2007, 26(1): 1-10(in Chinese).

[16] Jin X, Ren G H, Zeng J H, et al. The thermal structure of lithosphere and fracture model in orogen of east Qinling area [J]. Science in China: Series D, 1996, 26(Suppl): 13-22(in Chinese).

[17] Halls H C, Fahrig W F. Mafic dyke swarms[J]. Geology Assoc Can Spec Paper, 1987, 34: 331-348.

[18] Shao J A, Zhang L Q. Mesozoic dyke swarms in the north of North China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2002, 18(3): 312-318(in Chinese).

[19] Xu H, XU G P. Geochemical characteristics of the lamprophyres from Jiaodong: implications for petrogenesis[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2000, 19(1): 36-44(in Chinese).

[20] Qiu J S, Wang, D Z, Zeng, J H, et al. Study on trace element and Nd Sr isotopic geochemistry of the Mesozoic K-rich volcanic rocks and lamprophyres in Shandong province[J]. Geological Journal of China Universities, 1997, 3(4): 384-395 (in Chinese).

[21] Zhu Y F, Sobolev R N. The formation conditions and magmatic evolution of the Eldjurti granite, Caucasus, Russia[J]. Geological Review, 1994, 40(6): 554-564(in Chinese).

[22] Weaver B L, Rubenstone J L, Zindler A, et al. Geochemis-

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

try of volcanic rocks of Saint Helena and implications for the origin of HIMU OIB[J]. Eos, Transactions, 1991,72(17): 318.

[23] Saunders A D, Storey M, Kent R W, et al. Consequences of plume-lithosphere interactions (in Magmatism and the causes of continental break-up)[J]. Geological Society Special Publications, 1992, 68:41-60.

[24] Zhao Z H. Theory of geochemistry on trace elements[M]. Beijing: Science Press, 1997: 1-238(in Chinese).

[25] Hergt J M, Peate D W, Hawkesworth C J. The petrogenesis of Mesozoic Gondwana low Ti flood basalts[J]. Earth and Planet Science Letters,1991,105: 134-148.

[26] Li S G, Nie Y H, Hart S R, et al. Interaction between upper mantle and subduction crust (Ⅱ): the constraints of Sr-Nd isotope from syn-collision mafic-ultramafic intrusions in North Dabie area, Anhui province[J]. Science in China: Series D, 1998,28:18-22(in Chinese).

[27] Taylor S R, Mclennan S M. The continental crust: its composition and evolution[M]. [S.l.]:Blackwell Scientific Pub, 1985: 45-69.

[28] Winchester J A, Floyd P A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. Chemical Geology, 1977, 20: 325-343.

[29] Shao J A, Zhang Y B, Zhang L Q, et al. Early Mesozoic dike swarms of carbonatites and lamprophyres in Datong area[J]. Acta Petrologica Sinica, 2002, 19(1):93-104.

[30] Guo F, Fan W M, Wang Y J, et al. Origin of early Cretaceous calc-alkaline lamprophyres from the Sulu orogen in eastern China: implications for enrichment processes beneath continental collisional belt[J]. Lithos, 2004,78:291-305.

[31] Xia L Q, Xia Z C, Xu X Y, et al. Petrogenesis of the Bikou group volcanic rocks[J]. Earth Science Frontiers, 2007,14(3):84-101(in Chinese).

[32] Briqueu L, Lancelot J R. Rb-Sr systematics and crustal contamination models for calc-alkaline igneous rocks[J]. Earth and Planetary Science Letters,1979, 43(3):385-396.

[33] Sakuyama M. Magma mixing and magma plumbing systems in island arcs[J]. Bulletin of Volcanology, 1984,47:685-703.

[34] Huppert H E, Sparks R S J. Cooling and contamination of mafic and ultramafic magmas during ascent through continental crust[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1985,74: 371-386.

[35] Wang X X, Wang T, Lu X X, et al. Laojunshan and Qinlingliang rapakivi-textured granitoids in North Qinling and their tectonic setting: a possible orogenic-type rapakivi granitoids[J]. Acta Petrologica Sinica, 2003, 19(4): 650-660(in Chinese).

[36] Wang X X, Wang T, Ilmari H, et al. Genesis of mafic enclaves from rapakivi-textured granites in the Qinling and its petrological significance: evidence of elements and Nd, Sr isotopes[J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(3): 935-946(in Chinese).

[37] Wyllie P J, Huang W L, Sterm C R, et al. Granitic magmas: possible and impossible sources, water contents and crystallization sequences[J]. Canada Journal of Earth Sci, 1976, 13(8):1007-1019.

[38] Chang L H. Authentication handbook of transparent mineral flake[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006(in Chinese).

[39] Lu Y F. Geo Kit—a geochemical toolkit for Microsoft Excel[J]. Geochimica, 2004, 33(5): 459-464(in Chinese).

[40] Qiu J X. Petrology of magmatic rocks[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2001: 99-171, 223-314(in Chinese).

参考文献:

[3] 孙丰月,石准立,冯本智. 胶东金矿地质与幔源CHO流体分异成岩成矿[M]. 长春:吉林人民出版社, 1995: 1-170.

[4] 罗天明. 煌斑岩与金矿的关系[J]. 黄金科技动态, 1991,2: 19-21.

[5] 胡瑞忠, 金景福. 贵东花岗岩体内的煌斑岩的成因[J]. 矿物岩石, 1990, 10(4): 1-7.

[6] 倪师军, 李朝阳, 张诚, 等. 中基性脉岩对金矿成矿的贡献——以小秦岭金矿区为例[J]. 成都理工学院院报,1994, 21(3): 70-78.

[7] 孙景贵, 胡受奚, 凌洪飞,等. 胶西北两类金矿的高钾-钾质脉元素地球化学与成岩作用研究[J]. 地球化学, 2000,29 (2): 143-152.

[8] 胡受奚,孙景贵,凌洪飞,等. 中生代苏-鲁活动大陆边缘榴辉岩、煌斑岩、金矿及富集地幔间的成因联系[J]. 岩石学报, 2001,17(3): 425-435.

[9] 周新华, 杨进辉, 张连昌. 胶东超大型金矿的形成与中生代华北大陆岩石圈深部过程[J]. 中国科学:D辑, 2002,32(增刊):11-20.

[11] 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 等. 中国北方大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景[J]. 岩石学报, 2005,21(1): 169-188.

[12] 翟明国, 范宏瑞, 杨进辉,等. 非造山带型金矿——胶东型金矿的陆内成矿作用[J]. 地学前缘, 2004,11(1): 85-98.

[13] 张宏飞,赵志丹,骆庭川,等. 从岩石Sm-Nd同位素模式年龄论北秦岭地壳增生和地壳深部性质[J]. 岩石学报,1995,11(2):160-170.

[14] 卢欣祥, 尉向东, 于在平,等. 小秦岭—熊耳山地区金矿的成矿流体特征[J]. 矿床地质, 2003,22(4):377-385.

[15] 卢欣祥,王晓霞,肖庆辉,等. 秦岭—昆仑造山型环斑花岗岩与世界典型环斑花岗岩的对比[J]. 地质科技情报, 2007,26(1): 1-10.

[16] 金昕, 任光辉, 曾建华, 等. 东秦岭造山带岩石圈热结构及断面模型[J]. 中国科学:D辑,1996,26(增刊):13-22.

[18] 邵济安,张履桥. 华北北部中生代岩墙群[J]. 岩石学报,2002, 18(3):312-318.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[19] 徐红,徐光平. 胶东煌斑岩的地球化学特征及成因探讨[J]. 岩石矿物学杂志,2000,19(1):36-44.
[20] 邱检生,王德滋,曾家湖,等. 鲁西中生代富钾火山岩及煌斑岩微量元素和 Nd-Sr 同位素地球化学[J]. 高校地质学报,1997,3(4):384-395.
[21] 朱永峰, Sobolev R N. 高加索 Eldjurti 花岗岩体的生成环境及岩浆岩化特征[J]. 地质论评, 1994,40(6): 554-564.
[24] 赵振华. 微量元素地球化学原理[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 1-238.
[26] 李曙光,聂永红, Hart S R,et al. 上地幔-俯冲陆壳相互作用(Ⅱ):北大别同碰撞镁铁-超镁铁质侵入岩的 Sr-Nd 同位素制约[J]. 中国科学:D 辑,1998,28:18-22.
[29] 邵济安,张永北,张履桥,等. 大同地区早中生代煌斑岩-碳酸盐岩墙群[J]. 岩石学报,2002,19(1):93-104.
[31] 夏林圻,夏祖春,徐学义,等. 碧口群火山岩岩石成因研究[J]. 地学前缘,2007,14(3):84-101.
[35] 王晓霞,王涛,卢欣祥,等. 北秦岭老君山和秦岭梁环斑结构花岗岩及构造环境:一种可能的造山带型环斑花岗岩[J]. 岩石学报,2003, 19(4): 650-660.
[36] 王晓霞,王涛, Ⅱmari H, 等. 秦岭环斑结构花岗岩中暗色包体的岩浆混合成因及岩石学意义——元素和 Nd、Sr 同位素地球化学证据[J]. 岩石学报,2005,21(3):935-946.
[38] 常丽华. 透明矿物薄片鉴定手册[M]. 北京:地质出版社, 2006.
[39] 路远发. GeoKit:一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包[J]. 地球化学,2004,33(5):459-464.
[40] 邱家骧. 岩浆岩岩石学[M]. 北京:地质出版社, 2001: 99-171,223-314.

Themes of Earth Science Frontiers Issues

As of 2006 *Earth Science Frontiers* (*ESF*) is transitioning from a quarterly publication to bi-monthly publication. Each year, issues of *ESF* will be developed along three themes:

1. Earth Materials for Nos. 1 and 2.
2. Earth Tectonics and Dynamics for Nos. 3 and 4.
3. Earth Surface Processes for Nos. 5 and 6.

"**Earth Materials**" will focus on the study of the Earth's composition, principally dealing with mineralogy and crystallography, petrology, fluids, mineral deposits and mineral exploration, and geochemistry.

"**Earth Tectonics and Dynamics**" will focus on studies of displacement and deformation of lithosphere, including structural geology, regional tectonics and plate tectonics, continental dynamics, geophysics and tectonophysics.

"**Earth Surface Processes**" will publish studies on the interactions and relationships between the lithosphere, the hydrosphere, the biosphere and the atmosphere. This topic will include environmental geology and global climate change, disaster geology, hydrogeology and engineering geology, geomorphology and Quaternary geology, energy geology, palaeobiology, sedimentology and stratigraphy, applied geochemistry and applied geophysics.

Manuscripts dealing with these themes and with other topics are welcomed by the *ESF* Editorial Office.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net