

新元古代以来甘肃西秦岭造山过程的 地球化学证据及其成矿背景

何进忠^{1,2} 姚书振²

(1. 甘肃省地质调查院, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要:通过研究 1980—1998 年获取的西秦岭组(群)级岩石地层单元和花岗岩类的地球化学数据,如地层中稳定元素的比值和含量的接近程度指示的物源关系、A 型花岗岩的微量元素证据、构造环境判别图解等,结合前人的地球物理数据解释成果,论述了新元古代以来西秦岭造山过程;进一步阐明了造山过程与成矿作用之间的关系。利用组级岩石地层单元的相对均一性,引入 I 型花岗岩判别方法—— SiO_2 -P 关系判别法,在印证前人成果的基础上获得新认识。认为新元古代以来,西秦岭的地壳演化可以划分为以下 4 个过程:中元古代末期至震旦纪早期华北和扬子板块的汇聚—分离—汇聚过程,震旦纪晚期—奥陶纪的伸展过程,志留纪—侏罗纪的自东至西的汇聚过程,泥盆纪—中生代自东至西乃至西秦岭全区的板内伸展过程。

华北地块和扬子地块在中元古代、新元古代和震旦纪的某个时期曾相互接近,震旦纪后逐渐相互远离并形成多岛洋盆。志留纪前后,依次发生过洋内俯冲、弧陆碰撞和洋陆俯冲。南北板块的碰撞始于泥盆纪,结束于侏罗纪,但富铝矿物含量高的与碰撞有关的 S-型花岗岩形成于三叠纪。两板块的碰撞自东部的勉略一带逐渐向西迁移至迭部一带,震旦系至三叠系依次增生至华北板块,随后与消减、拆沉的扬子板块有关的板内伸展及相应花岗岩类的入侵自东部的党川地区向西迁移,直至全区整体处于伸展状态。不管早古生代的弧陆碰撞机制是什么,迭部—略阳断裂至少在志留纪以来在西秦岭的地壳演化中起着主要作用。

沉积成矿的峰期是志留纪和泥盆纪,对应于洋盆开裂至洋盆关闭的转换期;热液成矿的峰期是三叠纪和侏罗纪,与印支—燕山期岩浆活动期一致,对应于碰撞向板内伸展的转换期。

关键词:新元古代以来;造山过程;地球化学证据;成矿背景;西秦岭;甘肃

中图分类号:P542⁺.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2011)03-0637-20

1 引言

西秦岭(图 1)是秦岭中央造山带的重要组成部分,有关其演化的一些重要问题至今仍处于争论之中,如是否存在过洋盆?经历了什么类型的造山过程?造山带的格架是什么,尤其是存在多少条因板块碰撞而产生的缝合带^[1-20]?本文目的是,在研究西秦岭地层和花岗岩类地球化学数据的基础上,参照地球物理数据解释结果,论述新元古代以来西秦岭造

山过程,并在此基础上讨论造山过程与成矿作用之间的关系。本文的特点有三方面:一是首次以西秦岭绝大部分地质单元为对象,研究其稳定元素的地球化学特征;二是研究地质单元尺度为组级岩石地层单元,巧妙地利用了岩石地层单元的相对均匀性,而过去对于造山带地球化学的研究主要以系等时间地层为单元;三是直接将造山过程与成矿时空相关联,拓展了造山过程中成矿背景的认识。同时引用 SiO_2 -P 关系及相应的微量元素判据论证了该地区 I

收稿日期:2010-08-10;改回日期:2011-04-18

基金项目:“固体介质中多元素地球化学场的线性与非线性竞争规律及其应用”项目(GPMR200904)资助。

作者简介:何进忠,男,1963年生,正高级工程师,博士,从事矿床学、地球化学与数学地质研究;E-mail:viewsino@163.com。

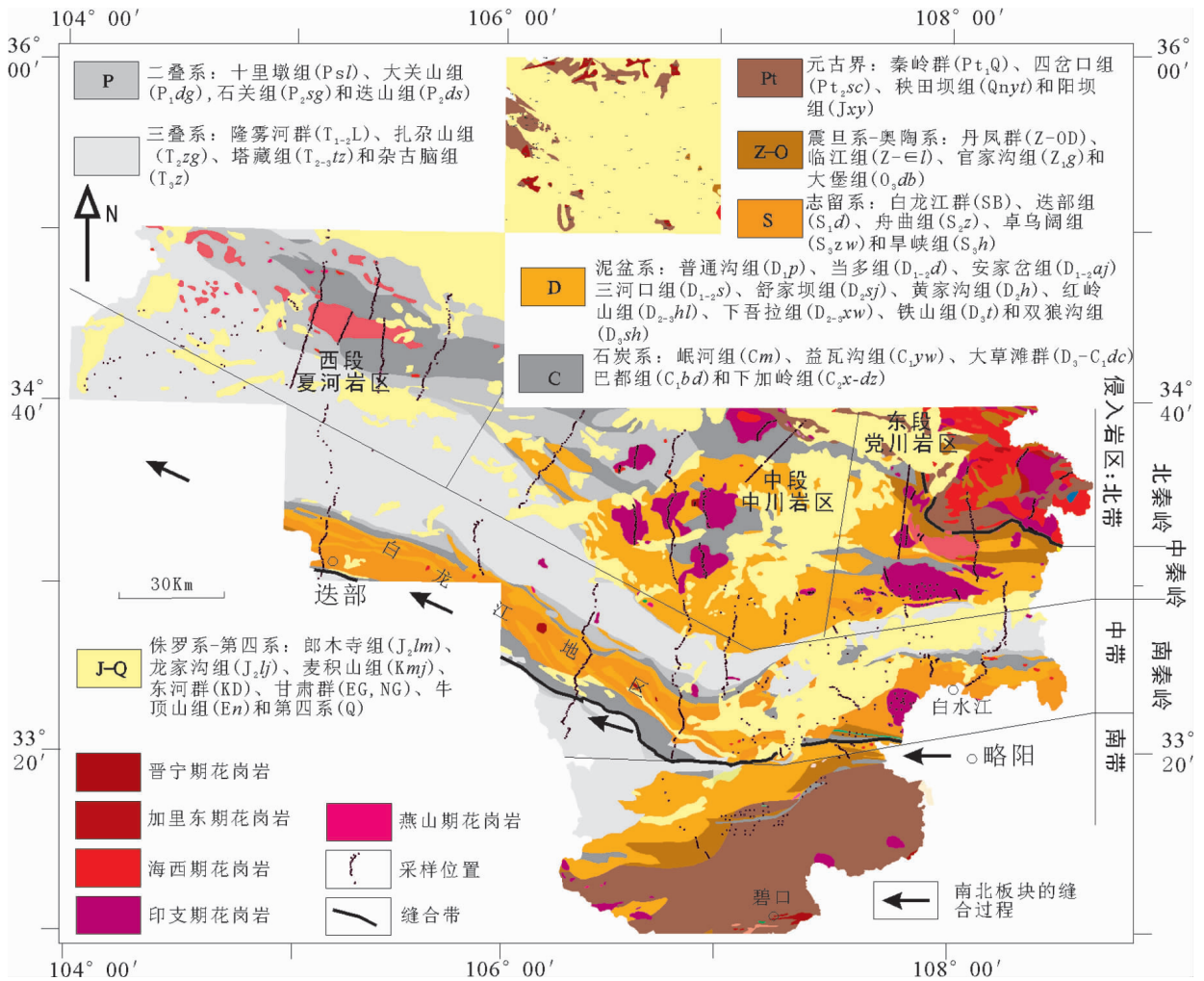


图1 西秦岭地质图及侵入岩分区、古板块碰撞过程和采样位置
 Fig.1 Geological map of West Qinling, showing subareas of intrusives, colliding process of old plates, and locations of rock samples

型、A型花岗岩的时空分布,进而论述了岩石圈拉张与挤压的动力学关系;并将最新获取的深部地球物理资料与古地磁资料、地球化学资料综合研究。文中部分认识与前人一致,但其论述资料、方法与前人不尽相同。当然也难免有一些不足之处,如个别组级岩石地层样本偏小;但就本地区的研究程度而言,由于时间及经济成本高昂,目前尚无更完善的与造山过程有关的微量元素地球化学成果。本文的认识对于今后的基础地质及成矿背景的研究至少具有启发意义。

2 采样和分析方法

2.1 采样方法

在20世纪80年代至90年代,甘肃省地球化学

探矿队在西秦岭穿越几乎所有组级岩石地层单元或许多花岗岩侵入体采集了1982件岩石样品。样品依地球化学剖面 and 极少数随机采样点(图1)采集,具体采样间距由相应项目图幅中每个组级时间地层单元大于30件、每个岩体大于7~10件的样品布置原则来确定(区域地球化学勘查规范DZ/T0167-95);为保证每个地质单元有足够的样品数,地层厚度小者采样间距为3~20m,地层厚度大者按20~100m间距采样,在同一个剖面上的同一地质单元的采样间距相等。为了使数据更具有代表性,本文将以时间地层单元采集的样品转换到岩性相对均匀的群、组级岩石地层单元,其中个别组级地层如牛顶山组(En)、益瓦沟组(C₁γw)、当多组与冷堡子组并层(D₁₋₂d-lb)和

早峡组(S_{3h})样品数偏少,有关其讨论仅供参考。每个样品由采样点周围 5 m 范围内的 3~5 块相同岩性的新鲜岩石组成;样品重量在 100 g 以上。

2.2 分析方法与分析质量

所有样品均由甘肃省地质矿产局兰州中心实验室(1988~1991年)按区域化探规定分析了 39 种元素,笔者从中选择 SiO₂、Al₂O₃、K₂O、Na₂O、CaO、MgO、Fe₂O₃ 等 7 种常量元素和 Ti、Zr、Nb、La、Th、Co、Y、N、Ba、P 等 10 种微量元素来讨论,分析方法为 X-射线荧光法。虽然常量元素未进行总量平衡,分析过程中的报出率、一标对数偏差、二标批次合格率、内检相对误差合格率等 5 项质量监控指标完全满足规范(DZ/T0167-95)要求(仅 Co 的报出率偏低,表 1)。其中的报出率指高于检出限的数据占数据总数的比例,对于实验室给出的低于检出限的分析数据与其他数据同等对待。

另外,第 3 节自内部资料^①引用的 131 件花岗岩类常量元素总量在 99%~101%的比例为 98.47%,仅华儿寨梁花岗闪长岩和岗以石英闪长岩的总量大于 101%,均为 101.13%。

3 组、群级岩石地层单元微量元素示踪源区

3.1 研究方法

为了使研究结果更为可靠,计算了所有组或群级岩石地层单元中不活动元素 Ti、Zr、Nb、La、Th、Co 的几何背景值。该值通过背景分析方法求得:将对数变换后的数据反复循环剔除超过“平均值±3·标准差”范围的特异值,直至无特异值后样本数据的平均值的真值,数据的变化范围在“10^{背景值±3·标准差}”以内,最大值≈10^{背景值+3·标准差},最小值≈10^{背景值-3·标准差},其作用是保证数据的稳定性和无歧义性。但个别地层的样品中包含了碳酸盐岩,如中元古界四岔口组,以致其 SiO₂ 背景值低而与中基性岩石相当;个别地层的岩性相对复杂,包含了中基性火山岩和陆源碎屑岩,如丹凤群,其 SiO₂ 背景值高于其中的中基性岩浆岩。

依据 langmunir 等的思路^[21-23],从不活动元素的几何背景值(表 2),获得了有关比值、Q 型簇群分析及图解用于地层物源研究。

表 1 西秦岭岩石样分析质量监控参数(据甘肃地矿局中心实验室 1988—1991 年的质量监控原始记录计算)
Table 1 Quality-controlling parameters for rock sample analysis in West Qinling

元素	检出限	报出率/%	国家一标 GSR-1 准确度 (测定 8 次)			国家一标 GSR-2 准确度 (测定 8 次)			甘肃二标批次合格率 1%(4 大批 35 小批)		内检 合格率/%
			平均值	推荐值	对数偏差 ΔL	平均值	推荐值	对数偏差 ΔL	ΔlogC 均值	对数偏差 标准差 λ	
SiO ₂ /10 ⁻²	0.0112	100	72.99	72.83	0.001	61.273	60.62	0.005	100	100	100
Al ₂ O ₃ /10 ⁻²	0.0098	100	13.716	13.4	0.010	15.999	16.17	-0.005	100	100	100
K ₂ O/10 ⁻²	0.0028	100	4.975	5.01	-0.003	1.781	1.89	-0.026	100	100	96.96
Na ₂ O/10 ⁻²	0.0165	100	3.226	3.13	0.013	3.891	3.86	0.003	100	100	100
CaO/10 ⁻²	0.0023	100	1.541	1.55	-0.003	5.128	5.2	-0.006	100	100	100
MgO/10 ⁻²	0.0062	100	0.434	0.42	0.014	1.711	1.72	-0.002	100	100	100
Fe ₂ O ₃ /10 ⁻²	0.0012	100	2.115	2.14	-0.005	4.769	4.9	-0.012	100	100	100
Ti/10 ⁻⁶	13	100	1808.9	1720	0.022	3158.5	3090	0.010	100	100	100
Zr/10 ⁻⁶	1.5	100	151.61	167	-0.042	105.0	99	0.026	100	100	100
Nb/10 ⁻⁶	1.2	100	39.788	40	-0.002	7.500	6.8	0.043	100	100	100
La/10 ⁻⁶	1.6	97.69	55.025	54	0.008	23.463	21.8	0.032	100	100	100
Th/10 ⁻⁶	3.7	93.20	51.638	54	-0.019	2.850	2.6	0.040	100	100	96.96
Co/10 ⁻⁶	2.5	85.72	3.550	3.4	0.019	11.175	13.2	-0.072	100	100	100
Y/10 ⁻⁶	1.4	100	63.213	62	0.008	11.713	9.3	0.100	100	100	100
Ni/10 ⁻⁶	3	100	2.513	2.3	0.038	14.450	17	-0.071	100	100	100
Ba/10 ⁻⁶	30	100	347.38	343	0.006	1058.7	1020	0.016	100	100	100
P/10 ⁻⁶	50	100	429.36	405	0.025	980.08	1030	-0.022	100	100	100
监控要求	>90%, 少数>80%	检出限的 3 倍以内为±0.15, 大于 5%为±0.07。							见规范 DZ/ T0167-95	RE%<50%的合 格率>90%	

① 甘肃地质局地质科学研究所. 甘肃省西秦岭内生铜矿的成矿条件及找矿方向研究, 1980:23-95.

表2 西秦岭地层岩体部分元素几何背景值 (由甘肃省化探队的原始数据求得,氧化物单位:10⁻²,其他元素为10⁻⁶)

Table 2 Background values of part of elements in strata and intrusives of West Qinling calculated from raw data of Gansu Party of Geochemical Exploration for Mineral Resources (2000) (concentration unit of oxides is 10⁻², and that of other elements is 10⁻⁶)

Table with 17 columns: 地层岩组 (Strata and Intrusives), 地层代码 (Strata Code), 样品数 (Sample Number), SiO2, Al2O3, K2O, Na2O, CaO, MgO, Fe2O3, Co, Ni, Ti, Y, Nb, La, Zr, Th, Ba. Rows include various geological units like 秦岭群, 四岔口组, 丹凤群, etc., with their respective chemical composition values.

3.2 组、群级岩石地层单元的 La/Th

地层中细粒碎屑岩的 La、Th 含量及 La/Th 比值能反映其源区特征,张本仁^[23]已证明,扬子板块北缘和北秦岭的 La/Th 值差异明显。如表 3 所示,本文秦岭群和其他地层(除部分二叠系和石炭系外)的 La/Th 与张本仁的结果一致,北秦岭或华北地台南缘四岔口组(Pt_{2sc})、丹凤群(Z-O₂D)、早峡组(S_{3h})的 La/Th 比值与扬子地块的一样高,可能意味着四岔口组、丹凤群曾经是扬子板块的一部分或当时接近扬子板块,华北板块和扬子板块在晚志留世已经互相靠近。下吾拉组(D_{2-3xw})及石炭系至三叠系具有与秦岭群一样低的 La/Th,结合下吾拉组的复理石建

造属性、石炭系由海相转化为陆相的前陆盆地磨拉石^[24]属性以及上泥盆统大草滩组的北东向古流向^[25]推断,中晚泥盆世至二叠纪西秦岭北东区域的秦岭群可能因华北板块和扬子板块在该区的碰撞而成为其主要物源。

3.3 组、群级岩石地层单元的 Q 型聚类分析结果

图 2 为用不活动元素 Ti、Zr、Nb、La、Th、Co 所做的欧氏距离 Q 型聚类分析谱系图,阈值为 D₀=400 时,西秦岭地区的地层分为以下 4 类:

第一类仅由白龙江群组成,是一个特别富集多种元素的地质体,如富集 Si、Al、K、Na、Fe、Ti、Ni、Co、Y、Nb、La、Zr、Th、Ba (表 2)等,其意义有待于进一步研究。

第二类包括迭部组(S_{1d})、舟曲组与卓乌阔组并层(S_{2-3z-zw})、卓乌阔组(S_{3zw})、普通沟组(D_{1p})、当多组与冷堡子组并层(D_{1-2d-lb})、当多组(D_{1-2d})、下吾拉组(D_{2-3xw})、铁山组(D_{3t})、下加岭组与东扎口组并层(C_{2x-dz})、大关山组(P_{1dg})、石关组(P_{2sg})、迭山组(P_{2ds})、扎尕山组(T_{1zg})、塔藏组(T_{2-3tz})、新近系甘肃群(NG),共 16 个岩组,构造上均处于南秦岭白龙江复背斜核部或两翼,体现了志留系—三叠系继承性和连续性。

第三类包括阳坝组(J_{xv})、秧田坝组(Q_{nyt})、早峡组(S_{3h})、舒家坝组(D_{2sj})、郎木寺组(J_{2lm})、麦积山组(K_{mj}),因为早峡组属于华北板块南部边缘地层,其他地层均属于扬子板块,所以该类说明华北板块和扬子板块在晚志留世已互相接近。前 4 个岩组之间的关系较之与同类其他岩组的关系更密切,并均以富含火山物质为特征。

第四类包括秦岭群(Pt_{1Q})、四岔口组(Pt_{2sc})、关家沟组(Z_g)、丹凤群(Z-O₂D)、舟曲组(S_{2z})、黄家沟组(D_{2h})、红岭山组(D_{2-3hl})、大草滩组(D_{3-C₁dc})、巴都组(C_{1bd})、岷河组(C_{1m}, C_{2m})、十里墩组(P_{sl})、隆雾河群(T_{1-2L})、扎尕山组(T_{3z})、东河群(KD)、古近系甘肃群(EG),其中有上古生界、南秦岭和中秦岭的三叠系,及南秦岭关家沟组、北秦岭的秦岭群和四岔口组。由此可见,北秦岭和南秦岭的关家沟组可能是西秦岭上古生界和三叠系的主要源区,在印支运动以前,碧口群阳坝组和秧田坝组尚未出露。由于丹凤群被认为形成于洋内弧环境^[26]或不成熟岛弧^[27],笔者赞同早古生代的古地理模式是多岛洋的观点^[3]。在晚古生代,西秦岭东部的党川一带可能因南北板块碰撞而隆升。

表 3 地层中 La/Th 比值

Table 3 La/Th ratios of strata in West Qinling

地区	地层	La/Th	资料来源
北秦岭	Pt _{1Q}	1.48	
	Pt _{2sc}	3.97	
	Z-O ₂ D	2.43	
	S _{3h}	3.04	
中秦岭	C _{1bd}	2.08	
	C _{2x-d}	1.78	
	D _{3-C₁d}	2.56	
	D _{2-3hl}	2.37	
	D _{2sj}	2.47	
	D _{2h}	2.57	
	EG	2.18	
	K _{mj}	2.48	
	KD	2.24	
	J _{2lm}	2.2	
南秦岭	T _{1-2L}	2.09	
	P _{2ds}	0.4	
	P _{2sg}	1.34	
	P _{1dg}	1.34	
	P _{sl}	2.22	从表 2 计算
	C _m	2.29	
	C _{1yw}	1.15	
	D _{3t}	1.95	
	D _{1p}	1.67	
	D _{2-3xw}	1	
	D _{1-2d}	4.56	
	S _{3zw}	2.31	
	S _{2-3 z-zw}	2.24	
	S _{2z}	1.7	
	S _{1d}	1.98	
	SB	3.09	
	T _{3z}	1.66	
	T _{2-3 tz}	0.54	
	T _{2zg}	1.55	
	C _{1m}	2.2	
D _{1-2 d-lb}	0.55		
Z _{1g}	2.61		
Q _{nyt}	2.96		
J _{xv}	8.35		
扬子地台	元古宇	2.5~10	
	古生界	2.25~6	
留坝—郧县	下古生界	3.0~6.0	
	志留系	1.25~3	
白云—榨水	泥盆系	2.25~3.5	
	泥盆系	2.25~4.0	
浙川—内乡	刘岭群	2.25~3.5	
	秦岭群	1.29~2.9	
北秦岭	宽坪—二郎平群	1.9~3.5	[23]
	丹凤群	1.7~6.6	

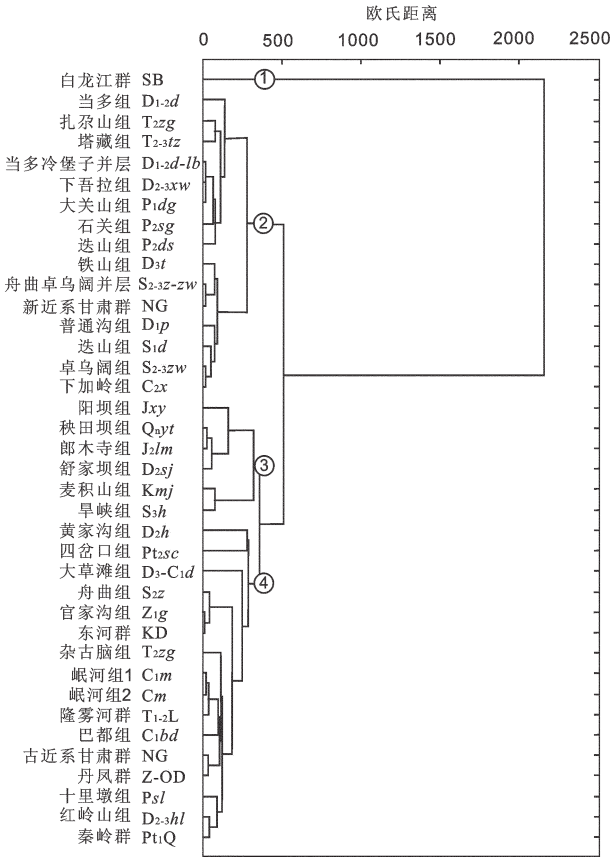


图2 地层的稳定元素欧氏距离谱系图

Fig.2 Hierarchical diagram of cluster analysis by Euclidean distance of immobile elements

第3类和第4类相关程度较高, 依此推测, 华北地台的古元古界秦岭群和中元古界四岔口组与扬子地台的中元古界阳坝组和新元古界秧田坝组有一定的物源关系, 即在中元古代和新元古代, 它们之间曾相互接近。

3.4 组、群级岩石地层单元的 La/Y—La/Co 图解

遵循 langmunir 等 [21-23] 思路设计了 La/Y—La/Co 图解, 用来识别地层之间的物源关系。理论上讲, 对于二元混合模式来说, 图中点应该分布在一条直线上。

如图3所示, 所有地层分别落入6个环形区域 C₁、C₂、C₃、C₄、C₅、C₆ 内, 其中大部分点落入 C₂、C₄、C₆ 内, 并且大致呈直线分布, 但 C₁、C₃、C₅ 距其较远。

C₁ 仅由牛顶山组(En)组成。该岩组为超基性火山岩, 源于 92 km 以下深度岩石圈底部热边界层的低度部分熔融 [28]。

C₂ 中有震旦系关家沟组 (Z_{1g})、志留系早峡组 (S_{3h})及泥盆系安家岔组(D_{1-2aj})、红岭山组(D_{2-3hl})和双狼沟组(D_{3sl}), 均由细粒碎屑岩组成, 其 La/Y 和 La/Co 比值低于北秦岭的早志留世岛弧花岗岩和花岗闪长岩 [29-30], 但高于其他所有地层。除关家沟组位于扬子地台, 早峡组位于华北地台南缘外, 其余所有地层均位于华北地台南侧的造山带地区, 或者说北秦岭是泥盆系的主要源区 [31-32]。总体暗示震旦纪时

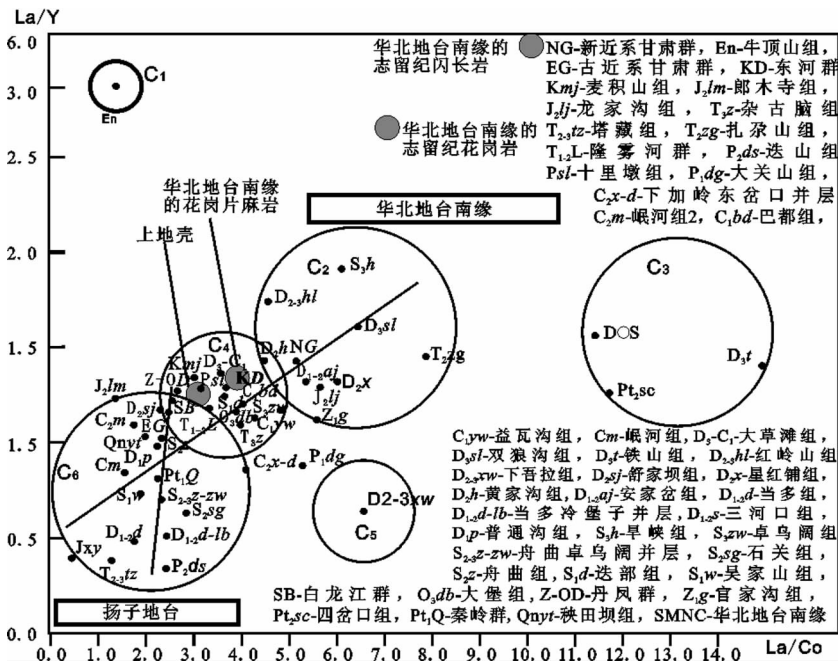


图3 La/Co—La/Y 图解
Fig.3 Diagram of La/Co—La/Y

扬子板块和华北板块相互接近,志留纪先后存在弧-陆碰撞和洋陆俯冲。

C_3 明显远离其他岩组,包括中元古代四岔口组(Pt_{2-3C})及泥盆纪铁山组(D_3f)和三河口组(D_{1-2S})。四岔口组由云母石英片岩夹中基性火山岩、碳酸盐岩的变质岩组成, La/Th 显示其可能曾经属于或接近扬子板块;三河口组是以碳酸盐岩为主,卷入了白龙江群陆源碎屑岩系和元古宇碧口群火山岩的构造混杂岩^①,两者之间化学成分近似并远离其他岩组,这可能与其中均存在中元古代火山-沉积建造、并与其他岩组无显著的化学成分的演化关系有关;而“四岔口组、铁山组与三河口组的成分相似”的意义暂难以论证。

C_4 中除丹凤群($Z-OD$)、大堡组(O_3db)、白龙江群(SB)、迭部组(S_{1d})及个别地层如隆雾河群(T_{1-2L})外,均属于上古生界,如大草滩组(D_3-C_{1dc})、巴都组(C_{1bd})、益瓦沟组(C_{1yw})和十里墩组(Psl)。意味着华北地台南缘早古生代丹凤群火山岩与迭部-舟曲一带的上奥陶统-志留系有类似的物源或相互接近,自晚古生代以来构造背景相对持续稳定,或者说上古生界可能是 C_2 和 C_6 的混合物。鉴于丹凤群形成于不成熟岛弧环境^[27]、南秦岭早古生代存在洋盆^[33]、 C_2 中早峡组和早志留世花岗岩指示的洋内俯冲过程、迭部-略阳北侧的中上志留统白水江群是活动大陆边缘或古洋盆沉积的产物^[34]等,有理由认为早志留世前后在东北部北秦岭丹凤群分布区域存在洋内俯冲、弧陆碰撞,随后洋内俯冲转化为沿迭部-略阳断裂的洋陆俯冲;而且不管早古生代弧-陆碰撞的具体机制如何,自志留纪以来迭部-略阳断裂在西秦岭的地壳演化中起着主导作用。

C_5 显示泥盆系下吾拉组沉积的特殊性,可能与其富含热水沉积成因的赤铁矿和菱铁矿层有关。

C_6 汇集了包括秦岭群、阳坝组、吴家山组等富含火山物质的古、中元古代地层^[35],再次表明这些老地层在中元古代曾经相互接近,而与其同在 C_6 内的地层物质可能源于这些老地层。

地层的物源关系表明,北秦岭和南秦岭在中元古代、新元古代和震旦纪的某个时期曾分别相互接近,震旦纪后相互远离,并逐渐形成海盆。志留纪前

后存在洋内俯冲、弧陆碰撞和洋陆俯冲;晚古生代,东部的前石炭系均可能因华北板块与扬子的碰撞而隆升。不管早古生代的弧陆碰撞机制如何,至少自志留纪以来,迭部-略阳断裂在西秦岭的地壳演化中起着主导作用。

4 花岗岩类构造环境的地球化学判别

借助于花岗岩类的物源、成因及可利用的图解来识别构造环境。为了便于从时空角度阐述,所有花岗岩类侵入体被按地域分布情况划分为北带、中带和南带,其中北带又从西至东被划分为西段的夏河岩区、中段的中川岩区及东段的党川岩区(图 1)。

4.1 花岗岩成因类型指示的构造环境

通常,花岗岩类被分为 I 型、S 型、A 型和 M 型^[36],或者幔源型、壳幔混源型和改造型^[37]等,主要判别标志有特征矿物、岩石化学、微量元素及基于磷灰石在准铝质和过铝质花岗岩中的结晶分异过程不同而提出的 SiO_2-P 相关关系^[36,38]。迄今为止,关于西秦岭花岗岩成因类型的大多数认识是 I 型或 S 型^[39-40],极少数学者认为是同熔型^[41-42]。下面根据一系列矿物学和地球化学参数进行系统探讨。

副矿物揭示出(表 4),党川岩区的个别花岗岩,如燕山期秦岭梁花岗岩和印支期辽家河坝花岗岩具有 A 型花岗岩的特征矿物萤石,指示西秦岭东北部在印支-燕山期处于拉张背景;夏河地区印支期牙日尕花岗岩,具有 S 型花岗岩的特征矿物刚玉、矽线石和红柱石,指示南北板块碰撞在东部自泥盆纪开始,至三叠纪已发展至西部;同时,东北部在印支-燕山期逐渐转变为拉张背景。

131 个花岗岩类的岩石化学参数(表 5)中多数具有 I 型花岗岩特点:97 个的铝碱指数(ACNK)小于 1.1;71 个岩体的 K/Na 比值小于 1;63 个岩体的 SiO_2 含量大于 65%;53 个岩体的 66% SiO_2 标准化 CaO 含量大于 3.7%;67 个岩体的 CIPW 刚玉分子数小于 1;用现有原始数据获得的 SiO_2-P 相关系数均显著负相关^[43](表 5);所有闪长岩、部分花岗岩,如北带中段温泉印支期花岗岩和东段荒草梁花岗岩富集相容元素 Cr 、 Ni 、 Co (表 6)。

北带的一些花岗岩具有高 K 特征,如东段幔坪

①杨志华,李勇,苏春乾.甘肃省文县—康县摩天岭北缘地质构造图说明书.长安大学地调院内部资料,2002: 22-23.

表 4 西秦岭花岗岩类侵入体副矿物含量

(含量单位 g/t, +表示 1~2 粒, ++表示几粒, +++表示少量^①)Table 4 Concentrations of accessory minerals of granitoid in West Qinling
(Concentration unit is g/t, + denotes one or two grains, ++ several grains, and +++ a few grains^①)

地区	期次	侵入体	榍石	磁铁矿 ^②	钛铁矿 ^③	堇青石 红柱石 矽线石	萤石	
北带西段的 夏河岩区	燕山期	仁达光梁花岗斑岩	+	++		+		
		年木耳二长花岗斑岩		+				
		羊龙青二长花岗岩	+	+++				
		老豆花岗闪长玢岩	1514	++	+	+		
		德乌鲁花岗闪长岩	0.2	+	++	+		
		德乌鲁石英闪长玢岩	+	+		+	+	
		岗以石英闪长岩	+	+	++	++		
	年木耳闪长岩	+	++	503.5			+	
	印支期	铁沟二长花岗斑岩	1.8	++				+
		阿米方日二长花岗岩	++	++			+	
		牙日杂二长花岗岩		++	++	3.0	+++	
		黑河花岗闪长岩	6.4	1.4	2.6	++	+	
		沙楼斜长花岗斑岩	+++	++	+			
		安扎沟斜长花岗岩	++					
铁沟石英正长斑岩		612.5	+++	+++		+		
海西期	窑沟闪长岩	++						
北带中段的 中川岩区	印支期	平山石英闪长岩	235	4150		+		
		双石门石英闪长玢岩	+++			+++	+	
		噶虎桥石英闪长岩	164	107.8	++	+	+	
	大牛圈石英闪长岩	+	0.2	+	+			
海西期	耿扎西石英闪长岩		+					
北带东段党 川岩区	燕山期	庙王山石英闪长岩	4.2	724.3	338.7		0.2	
		秦岭梁二长花岗岩	373.9	780.6	203.6		127.3	
	印支期	上先坪花岗岩	196.6	2398.2	1.1		0.5	
		鱼鳞沟二长花岗斑岩	++	+	++		+	
		黄渚关二长花岗岩	462.7	802.3	23.2	+	5.1	
		侯家庄花岗闪长玢岩		+	+			
		草关石英正长斑岩	277.8	15.8	28.1			
		太阳寺石英闪长岩	+	++		+		
		杨家河石英闪长岩	++	++	++	+		
		平道里石英闪长岩		++	++		++	
	华灵山石英闪长岩	11.2	12.1	64.2	+			
	海西期	大卜峪花岗斑岩	+++					
		太白牙二长花岗岩	0.7	0.8			0.2	
下甸子花岗闪长玢岩		+++						
加里东期	百花闪长岩	15.8	1223.5	2.7				
南带	印支期	庙坪闪长岩		++		+++	+++	
		赵家沟石英闪长岩	63	+++	8.6	++		

石炭纪二长花岗岩和柴家庄三叠纪二长花岗岩,可能反映其碰撞后隆升构造背景;一些花岗岩具有明显的低 K 高 Ca 特征,如东段百花志留纪石英闪长岩、利桥石炭纪石英闪长岩、草关三叠纪花岗闪长岩和西段华儿寨侏罗纪花岗闪长岩,可能反映边缘弧在东段自志留纪一直发育至石炭纪南北两板块发生碰撞为止,之后至侏罗纪,随着两板块向西敛合而逐渐

向西发育。南带坪头山新元古代闪长岩的 K、Ca 含量处于中等水平,暗示其构造背景可能为岛弧环境。

北带花岗岩的一些样品具有富 SiO₂、K₂O+Na₂O (表 5)和 Zr+Nb+Y (表 6)的 A 型花岗岩特征:东段幔坪海西期正长花岗岩、二长花岗岩,中段—东段印支期的中川二长花岗岩、八挂山花岗岩、利桥花岗岩和糜署岭石英闪长岩,东段和西段燕山期的天

① 甘肃地质局地质科学研究所,甘肃省西秦岭内生铜矿的成矿条件及找矿方向研究, 1980:23-95。

表 5 判别侵入体成因的岩石化学参数
(据内部资料①及甘肃省地球化学探矿队(2000)资料计算)

Table 5 Petrogeochemical data for discrimination of genesis of intrusives, calculated from reference ① and raw data of Gansu Party of Geochemical Exploration for Mineral Resources (2000)

侵入体	时代	样本	SiO ₂ /%	(K ₂ O +Na ₂ O) /%	K/Na	A/CNK	TFeO /%	Si 与 P 相 关系系数	SiO ₂ =66%时 CaO 含量	CIPW 刚玉 分子数
北带东段党川岩区:										
八挂山二长花岗岩	T	20	70.485	9.0685	1.0748	1.0285	2.716	-0.8426	1.1321	0.79
百花闪长岩	S	4	55.33	6.83	0.7694	0.7277	7.942		8.1113	0
草关花岗岩闪长岩	T	1	58.41	6.41	0.9723	0.8221	5.931		5.9661	0
柴家庄二长花岗岩	T	35	71.212	8.53	2.4252	1.1892	2.227	-0.6722	1.2660	4.1
厂坝花岗岩	T	1	74.63	8.44	1.2567	1.1085	1.193		0.7340	0.17
大卜峪花岗岩斑岩	D	2	74.53	8.77	1.5569	1.0918	2.221		0.5490	1.82
党川二长花岗岩	T	8	73.03	9.11	0.8979	0.9690	1.751		0.8586	0
党川正长花岗岩	D	11	71.559	8.8273	1.2800	1.1.648	0.9441	-0.3623	0.8153	2.98
苟大沟闪长岩	C	1	55.96	4.21	0.8879	0.8577	6.965		8.5390	0.11
和尚堡二长花岗岩	K	3	75.81	8.37	1.0821	1.0704	1.007		0.3744	2.12
侯家庄闪长岩	T	2	54.67	5.88	0.7294	0.9046	6.87		7.2797	1.31
桦树坪二长花岗岩	T	5	67.27	8.22	1.0448	0.9882	2.73		2.2566	0.46
荒土梁花岗岩	T	3	64.112	5.42	1.0467	0.9516	2.759	-0.7868	2.4336	1.27
黄渚关二长花岗岩	T	1	66.74	7.48	0.9684	0.9565	3.244		3.4909	0
利桥闪长岩	C	4	51.208	5.7275	0.6637	0.7567	6.4197	-0.5854	9.0865	0
利桥二长花岗岩	T	5	67.125	9.388	0.3663	0.9946	2.2968	-0.2363	2.1749	1.22
利桥花岗岩	T	17	70.503	6.7535	0.2515	1.0030	2.7306	-0.8507	2.1388	0.09
辽家河坝正长花岗岩	T	2	71.289	8.17	1.4312	1.0396	1.832	-1.0000	0.9415	0.34
鳞鱼沟二长花岗岩斑岩	T	2	66.58	7.52	1.2183	0.9769	3.093		2.6765	4.95
鳞鱼沟花岗岩闪长斑岩	T	2	66.21	7.31	1.2219	1.0017	3.071		2.7313	5
塄坪闪长岩	S	3	53.45	6.59	0.9909	0.8385	8.496		7.4211	0
塄坪二长花岗岩	T	17	61.07	8.4282	0.8969	0.9454	3.582	-0.7637	2.9482	0.47
塄坪正长花岗岩	D	6	66.315	8.5983	0.9850	0.9616	2.5443	-0.9625	2.1975	0
塄坪闪长岩	C	8	49.79	5.74	0.7547	0.7496	9.1026	-0.8706	8.9856	0
塄坪二长花岗岩	C	17	67.031	8.4282	1.5164	0.9500	2.7694	-0.7465	1.9506	0
糜署岭花岗岩闪长岩	T	7	64.3	7.42	1.3115	1.0035	5.663		3.4796	1.27
糜署岭石英闪长岩	T	23	62.713	7.4432	1.3814	1.1002	3.9276	-0.7408	2.2237	3.14
庙山花岗岩	J	6	75.83	8.56	1.1241	1.0023	2.026		0.4613	0
磨房沟二长花岗岩	T	8	71.27	8.03	1.1021	1.0390	2.754		1.5187	0
平道里石英闪长岩	T	1	63.27	7.1	0.9944	0.9760	4.108		3.2442	0
秦岭大堡二长花岗岩	T	9	71.56	8.02	1.6645	1.0958	3.211		0.9500	0.83
秦岭沟花岗岩闪长岩	T	3	67.89	7.78	0.6731	0.9857	3.216		2.3721	0
秦岭梁二长花岗岩	J	1	76.62	8.83	1.1856	1.0024	2.331		0.3618	0.97
上伏家花岗岩闪长斑岩	T	1	66.06	7.19	1.3420	0.9405	3.511		2.9074	0
上先坪二长花岗岩	T	3	72.22	8.56	1.0333	0.9508	3.412		1.0692	0.27
石庄下花岗岩闪长斑岩	T	1	61.07	5.58	5.3409	0.8188	2.93		6.4627	0
太白牙二长花岗岩	T	12	70.846	9.3258	1.2211	1.0768	2.319	-0.7930	1.0248	1.69
太阳山石英二长斑岩	T	3	66.13	7.41	1.2252	1.0111	3.809		3.3833	1.3
天金山闪长岩	C	1	60.19	6.23	0.7402	1.0732	5.685		3.8378	3.48
天子山二长花岗岩	J	18	68.466	9.0189	1.9491	1.1395	2.276	-0.6198	0.8146	4.95
铜牛山二长花岗岩斑岩	T	1	68.64	9.06	1.2206	1.2789	2.937		0.3942	4.12
伍家湾二长花岗岩	T	3	67.18	9.14	1.4837	1.1086	3.111		1.2673	4.54
下店子花岗岩闪长斑岩	D	17	63.6	9	1.3499	0.9402	4.297		2.9575	0
小塄坪闪长岩	S	2	62.87	8.17	0.5303	1.0275	3.6954	-1.0000	3.0811	0.87
油房坪二长花岗岩	T	6	72.75	8.36	1.2967	1.0226	2.606		0.9344	0
张家山闪长岩	C	2	46.54	5.21	1.0431	0.8591	9.478		12.0400	2.89
北带中段中川岩区:										
茹树沟石英二长岩	T	1	60.89	8.49	0.6171	0.7727	5.973		4.7584	0
柏家庄二长花岗岩	T	26	72.792	8.2773	1.6015	1.3199	1.781	-0.6548	0.7136	4.6
二流水二长花岗岩	T	24	69.43	8.1	1.4923	1.0222	3.727		1.5495	0
华灵山闪长岩	T	1	52.24	7.85	2.2041	0.9836	1.661		5.6853	5.11
华灵山东闪长岩	T	6	54.35	7.14	1.8560	0.7766	8.078		6.5211	0
教场坝二长花岗岩	T	30	67.365	7.803	1.1867	1.0558	3.195	-0.5429	1.8801	1.03
教场坝闪长岩	P	9	63.186	7.2744	1.1403	0.9252	3.2814	0.9718	3.3571	0
碌础坝二长花岗岩	T	2	68.68	7.84	1.2857	0.9012	4.21		2.7003	0
阎井二长花岗岩	T	38	67.039	8.1447	1.4987	1.1435	3.004	-0.8378	1.7160	1.01
温泉二长花岗岩	T	28	63.678	8.34	1.3369	0.9703	3.325	-0.8167	2.2740	0.47
杨家河沟里石英二长闪长岩	T	1	62.3	6.85	0.8267	0.9335	4.193		4.5236	0
正沟二长花岗岩	T	30	71.686	8.7481	1.4166	1.1419	1.4247	-0.7399	0.9888	2.22
中川二长花岗岩	T	42	68.7	7.5259	1.3133	1.0245	4.492	-0.8853	1.5285	1.3
北带西段夏河岩区:										
华儿寨梁花岗岩闪长岩	J	2	61.66	5.37	0.8081	1.0471	4.381		5.1057	3.11
什木德二长花岗岩斑岩	J	1	72.94	5.16	0.3508	1.5943	1.468		0.7329	5.8
阿芒沙吉石英闪长岩	J	3	62.68	5.19	0.8536	1.0794	4.927		5.0016	3.11
阿芒沙吉花岗岩斑岩	J	1	70.67	7.29	0.8886	1.1135	2.127		1.8211	1.55
阿芒沙吉花岗岩闪长斑岩	J	12	66.89	5.95	0.8770	1.0475	4.078		3.8777	0.53
阿芒沙吉北辉石闪长岩	J	3	55.68	3.8	0.6102	0.8205	7.172		9.1627	0

① 甘肃地质局地质科学研究所. 甘肃省西秦岭内生铜矿的成矿条件及找矿方向研究, 1980:23-95.

续表 5

侵入体	时代	样本	SiO ₂ /%	(K ₂ O +Na ₂ O) /%	K/Na	A/CNK	TFeO/ %	Si 与 P 相 关系数	SiO ₂ =66% 时 CaO 含量	CIPW 刚玉 分子数
阿米方日二长花岗岩	T	5	70.97	7.59	1.2064	1.1496	2.345		1.4508	2.12
阿姚山花岗岩闪长岩	T	5	63.41	6.04	1.1571	0.9765	4.8		4.9440	0
安扎沟斜长花岗岩	T	1	66.78	6.55	0.7655	1.0838	1.947		2.8661	7.73
白石山石英二长闪长岩	T	1	58.57	5.56	0.1780	0.9632	2.957		7.6964	0
藏布沟石英闪长岩	T	2	62.08	5.4	0.3107	0.9742	4.236		5.9642	0
察岗卡花岗岩闪长岩	T	1	67.55	7.05	1.1364	1.0094	3.303		3.0679	0.26
窗儿山石英闪长岩	T	1	62.57	6	0.9355	1.0275	4.744		4.6307	1.55
达里加二长花岗岩	J	1	73.52	7.98	1.1223	1.0165	2.538		1.1670	0.26
答拉山石英闪长岩	T	1	65.4	5.96	0.7275	1.1521	4.168		3.5220	3.45
大槐沟西石英二长岩	T	1	66.11	8.62	0.8739	0.9371	3.007		1.9068	0
大牛圈石英闪长岩	T	1	61.55	5.19	0.3803	0.9543	4.821		5.7904	0.23
代岗山闪长岩	J	1	51.09	2.09	0.2151	0.7686	8.499		11.7428	0
德乌鲁花岗岩闪长岩	J	4	64.74	5.89	0.9061	0.9977	3.816		4.4245	1.53
德乌鲁石英闪长岩	J	4	63.86	5.63	0.7873	0.9686	4.134		5.1572	0
岗以石英闪长岩	J	1	63	5.84	0.7805	1.0711	4.075		4.3895	6.06
耿年西石英闪长岩	P	1	59.42	4.89	0.4215	1.1352	5.628		5.0872	2.99
黑河花岗岩闪长岩	T	14	64.48	6.73	1.1502	1.0226	3.609		3.3573	0.27
黑河石英闪长岩	T	5	63.66	6.54	1.0631	0.9464	4.433		4.2300	0
鸡儿沟石英闪长岩	T	2	62.61	4.78	0.9352	0.8659	3.808		6.9784	0.11
卡儿寨二长花岗岩	T	3	66.5	7.09	1.2580	1.2153	3.683		2.0147	3.14
卡加沙格西闪长岩	T	2	56.3	4.14	0.9256	0.9529	8.344		7.3972	0
郎依可沟二长花岗岩斑岩	J	2	72.56	5.24	0.5277	1.3993	1.888		1.3189	7.7
老日斗卡花岗岩闪长岩	T	1	61.44	4.55	0.9362	1.0929	5.065		5.0918	1.51
龙沟石英闪长岩	T	2	57.29	4.67	0.3655	0.8967	6.074		8.0182	0
龙洼鲁乎二长花岗岩斑岩	J	1	72.42	4.62	0.6861	1.3608	1.069		2.1326	9.16
妈妈山闪长岩	T	1	53.99	4.01	0.3191	0.4477	7.488		9.8652	0
马九勒花岗岩闪长岩	J	1	62.93	5.75	0.9759	1.1049	4.2		4.6776	2.52
曼宅花岗岩闪长岩	T	2	60.23	4.58	0.9004	1.1209	5.558		5.6982	3.5
美武花岗岩闪长岩	J	139	63.701	6.4532	1.0910	1.0370	2.8755	-0.3166	3.4056	0
年木耳石英闪长岩	T	7	63.9	5.82	1.1241	1.0216	4.571		4.4516	0.53
暖水沟斜长花岗岩斑岩	T	1	67.43	7.28	0.4648	1.0695	3.248		1.9772	3.42
平山石英二长闪长岩	T	3	62.82	3.93	0.0650	1.1414	4.11		4.3075	2.22
清水沟斜长花岗岩斑岩	T	1	65.8	6.52	0.4751	1.2742	2.517		2.3170	8.25
人光达梁花岗岩斑岩	J	2	70.38	6.09	1.1444	1.1735	2.489		2.2413	3.33
日多玛花岗岩闪长岩	T	4	64.46	5.82	0.9272	1.0274	4.139		4.1877	0.53
日根喀石英闪长岩	J	2	55.17	4.26	0.5778	0.8348	8.593		8.7091	0
沙楼斜长花岗岩斑岩	T	1	64.57	6.32	0.5919	1.0657	2.654		3.6082	8
石板沟石英闪长岩	J	3	54.67	4.55	0.6914	1.0280	7.214		6.6640	1.31
刷沟寺石英闪长岩	T	2	64.45	6.07	0.9148	0.9758	3.92		4.5058	0.54
双石门沟石英闪长岩	T	1	57.68	4.8	0.2598	0.9006	5.867		7.3575	0.74
唐晒日二长花岗岩斑岩	J	2	66.52	4.62	0.4667	1.8697	2.338		0.7541	8.04
铁沟兴时沟二长花岗岩斑岩	T	3	68.46	8.78	1.3351	0.9473	2.259		2.0727	0
渭源牧场北石英闪长岩	T	1	61.28	5.88	0.3835	0.9996	4.935		4.8466	1.51
温抓沟脑石英闪长岩	T	1	58.85	4.03	0.8318	0.9402	5.916		7.1776	0
小河口石英闪长岩	P	2	58.53	4.68	0.5000	0.9161	3.943		8.2091	0.47
小峡石英闪长岩	T	1	63.18	7	0.4831	0.9705	4.907		3.9905	0
牙日杂花岗岩闪长岩	T	1	65.93	6.24	1.1010	1.1524	4.119		2.8730	2.37
牙日杂北花岗岩闪长岩	T	1	64.98	6.44	1.0000	1.1902	3.999		3.0572	2.42
羊龙青二长花岗岩	J	1	71.59	8.03	1.4632	1.1330	1.735		1.2907	2.85
窑沟石英闪长岩	P	1	62.68	6.56	0.7826	1.0784	3.307		2.9167	6.86
也虎桥闪长岩	T	1	50.85	4.57	0.3363	0.7735	7.959		11.7853	0
月亮湾石英闪长岩	T	1	67.17	6.37	0.5965	1.1678	2.62		2.9183	2.87
月亮湾东石英闪长岩	T	1	60.14	4.78	0.5672	0.9797	4.7		6.5956	1.31
砸尔加二长花岗岩斑岩	J	1	71.8	5.39	0.5760	1.4518	2.52		1.2961	6.39
枣仁道石英闪长岩	J	1	57.79	4.33	0.7390	1.1970	5.616		4.7967	3.43
中带:										
憨班花岗岩	S?	1	68.06	8.58	1.0725	1.0043	2.272		1.8716	2.78
黑峪沟花岗岩	T	1	66.08	9.3	1.2683	1.0029	1.787		1.8078	2.75
迷坝二长花岗岩	T	2	70.23	8.13	0.9085	1.2117	4.008		0.7236	2.28
魏家庄石英闪长岩	T	3	64.65	7.02	1.0115	1.0365	3.796		3.1137	3.58
小金厂石英闪长岩	T	3	61.78	6.92	0.8652	0.7793	3.793		5.7795	0
赵家庄石英闪长岩	T	2	59.67	6.83	0.8117	0.9086	5.918		5.4862	0
南带:										
摩天岭二长花岗岩	T	1	68.24	7.04	1.8971	1.2497	3.603		1.8280	3.75
坪头山闪长岩	Pt3	1	59.76	6.38	1.4259	0.8404	10.102		5.3343	0
西沟河石英闪长岩	S	1	62.04	8	0.9370	0.9889	5.959		2.4681	2.81
阳坝黑云母花岗岩	T	1	73.45	6.74	1.5627	1.1545	2.203		1.5366	1.09
鹰咀山黑云母花岗岩	T	1	70.73	8.21	1.2493	1.1770	1.978		1.6610	0

表 6 西秦岭花岗岩类侵入体相容元素或不相容元素之间的比值或累加值
Table 6 Ratios or additive values between compatible elements or incompatible elements of granitoid intrusives in West Qinling

侵入体	时代	Zr/Nb	La/Nb	Ba/Nb	Ba/Th	K/Nb	Th/Nb	La/Th	Ba/La	Cr+Ni +Co /10 ⁻⁶	Max(Zr+ Nb+Y) /10 ⁻⁶	资料来源
北带西段夏河岩区:												
美武	J	20.18	3.40	65.11	33.97	2869.1	1.917	1.771	19.179	96.13	358.6	
北带中段中川岩区:												
柏家庄	T	3.17	1.12	9.79	12.67	1745.0	0.773	1.451	8.731	14.82	218.4	
闰井	T	22.36	2.14	35.81	26.97	2524.8	1.328	1.611	16.736	33.55	377.9	
温泉	T	12.09	1.82	64.63	72.20	1884.5	0.894	2.032	35.567	38.47	339.2	
正沟	T	8.56	2.09	39.78	31.34	3189.5	1.270	1.647	19.027	31.10	209.1	
教场坝	T	9.80	1.65	37.37	40.12	1792.4	0.932	1.767	22.708	52.57	333.8	
教场坝	P	14.28	2.07	69.62	52.30	1846.2	1.331	1.557	33.594	120.48	310.0	
中川	T	12.08	2.10	42.07	35.11	2513.3	1.198	1.753	20.026	58.56	308.5	
中川	T	14.09	2.35	54.60	60.44	1425.0	0.903	2.603	23.216	123.38	640.1	
北带东段党川岩区:												
草关	C	14.47	3.99	54.44		4273.7			13.647	113.32	256.0	
八挂山	T	8.78	1.28	20.04	27.59	1405.8	0.726	1.763	15.646	18.21	374.7	
柴家庄	T	13.82	2.79	61.48	47.89	2565.4	1.284	2.170	22.068	39.57	348.5	
官店	T	8.54	0.66	46.75		2636.9			70.767	8.55	200.0	
河桥子	T	11.00	4.25	142.50		4273.4			33.529	116.2	112.0	从表 2 计
荒土梁	T	20.47	3.97	29.45	30.26	838.5	0.973	4.080	7.417	40.10	236.7	算
黄渚关	T	13.01	2.58	89.91		2442.0			34.880	192.51	220.0	
糜署岭	T	14.98	2.50	62.777	51.57	2358.5	1.217	2.053	25.122	72.71	608.2	
太白牙	T	13.17	2.26	34.60	43.79	2225.2	0.790	2.863	15.291	21.56	574.4	
天子山	J	14.69	2.52	122.01	87.81	3634.8	1.389	1.816	48.351	33.66	352.2	
西沟	C	9.33	2.93	53.76	44.64	2537.6	1.204	2.433	18.347			
利桥	T	12.39	2.20	35.11	31.83	1197.7	1.103	1.996	15.950	52.09	400.1	
辽家河坝	T	7.03	1.01	33.02	30.41	2238.8	1.086	0.931	32.656	14.90	247.2	
党川	D	1.57	1.01	10.45	20.05	1927.2	0.521	1.944	10.316	17.62	290.2	
塄坪	T	19.72	3.91	80.84	70.35	1897.4	1.149	3.404	20.663	72.85	608.2	
小塄坪	S	46.30	9.42	208.01	114.55	2347.8	1.816	5.185	22.091	61.90	525.2	
中带:												
迷坝	T	22.48	3.12	133.52		3490.4			42.812	39.93	205.3	
对照地质单元:												
秦岭群		9.89	1.35	21.28	23.29	759.9	0.914	1.476	15.783			
丹凤群		11.40	2.17	36.99	41.53	1347.1	0.891	2.432	17.074			
秧田坝组		19.40	2.06	52.80	75.59	1654.9	0.698	2.955	25.578			
阳坝组		16.29	1.55	11.95	64.34	211.0	0.186	8.350	7.705			
秦岭群拉斑玄武岩		10.08	0.96	15.5	88.5	581	0.17	5.555	16			
原始地幔		14.8	0.94	9	77	323	0.117	8	9.6			[44]
亏损地幔		30	1.07	4.3	60	296	0.07	14.285	4			
大陆地壳		16.2	2.2	54	124	1341	0.44	5	25			

子山二长花岗岩和美武花岗闪长岩。表明海西期至燕山期花岗岩产出的张性背景自东向西的发育过程。

强相容元素之间或强不相容元素之间的比值(表 6)揭示,西秦岭地区几乎所有花岗岩均源于大陆地壳,其中有极个别花岗岩的 Zr/Nb 和 La/Nb 具有幔源特征,如三叠纪柏家庄二长花岗岩、官店二长花岗岩、党川二长花岗岩;而 La/Th 和 Th/Nb 清晰地表明,所有花岗岩类侵入体均源于富含火山物质的基底地层,如秦岭群、阳坝组、丹凤群等。收集到的为数不多的氧同位素组成 $\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$ 、锶同位素组成 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_t (表 7)显示,所有花岗岩类侵入体均具

有壳幔混合型花岗岩的特征,即属于同熔型花岗岩。因此,各个侵入期次的花岗岩均主要源于中地壳基底地层,如富含火山岩的元古宇,源于深部地幔或下地壳的 I 型花岗岩岩浆是西秦岭花岗岩类岩浆的诱导因素。

4.2 花岗岩类构造环境图解

尽管岩浆源区压力条件制约着花岗岩中与斜长石、角闪石、石榴石等残留矿物有关的微量元素分配,传统上用来判别花岗岩类构造环境的地球化学图解在岩浆源区深度较大(如下地壳)的情况下不能得到正确的结果,大多数花岗岩事实上也存在于消

减带和造山后伸展环境^[38],对于该区主要源于中地壳基底地层的花岗岩来说,仍然有一些图解能提供与前述地层地球化学及花岗岩类的成因研究一致的结果。

在 Nb-Y 图解中(图 4),晋宁期至燕山期的所有花岗岩均落入“火山弧+同碰撞”花岗岩区,但北带中川岩区和党川岩区的海西期至燕山期花岗岩同时落入自造山型花岗岩至板内花岗岩的广泛区域,寓意一个板块消减—碰撞和碰撞后隆升并存的构造格局。

R₁-R₂ 图解所示的晋宁期—加里东期花岗岩构

造背景为碰撞后隆升区,该结果与前述地层地球化学、花岗岩类地球化学、Nb-Y 图解及前人^[30]研究结果不一致(图 4)。南带扬子地块北缘碧口地块中的晋宁期(649~750Ma)花岗岩的岩石组合(辉长岩—闪长岩)和前述岩石化学表明,其形成于岛弧环境,可能指示南北板块之间的一个汇聚过程。系统的微量元素和岩石化学研究揭示,北带东段党川地区的加里东期花岗岩属于岛弧花岗岩,与洋内俯冲有关^[30]。中带加里东期憨班花岗岩是与下地壳局部融熔有关的板内深熔型花岗岩,但同类岩体的成岩年龄均为

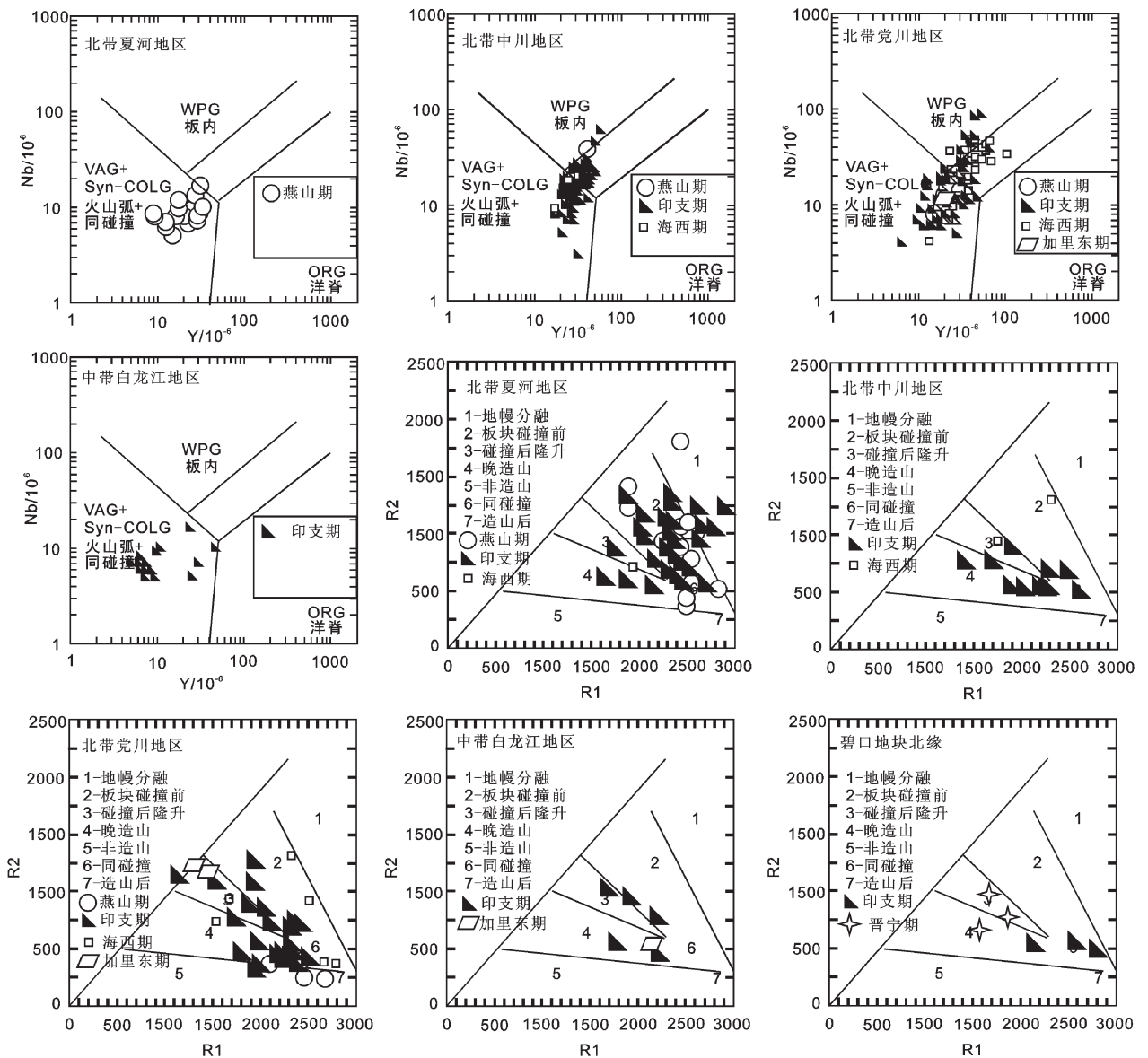


图 4 西秦岭花岗岩的 Nb-Y 和 R₁-R₂ 图解(据 Batchelor et al, 1985, and Pearce et al, 1984)

Fig.4 Diagram of Nb-Y and R₁-R₂ for granites of West Qinling (after Batchelor et al., 1985, and Pearce et al., 1984)

表 7 西秦岭部分花岗岩的稳定同位素组成
Table 7 The stable isotopic data of part of granites in west Qinling

花岗岩类侵入体	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$	同时代地壳的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_m$	同时代地幔的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_0$	资料来源
柴家庄花岗岩	9.43	>0.7078	0.7177	0.7019~0.7057	
中川花岗岩	9.22~10.37	0.7075	0.7175	0.7018~0.7057	[40]
中川花岗岩	9.65	0.710	0.7175	0.7018~0.7057	
秦岭大堡正长花岗岩		0.70771	0.7175	0.7019~0.7057	
石门二长花岗岩		0.70780	0.7171	0.7018~0.7056	
党川二长花岗岩		0.70727	0.7164	0.7017~0.7054	[29]
火炎山花岗岩		0.70900	0.7163	0.7017~0.7054	
百花花岗岩		0.71005	0.7181	0.7019~0.7058	
黄渚关二长岩和闪长岩		0.708346	0.7174	0.7018~0.7056	[45]
过渡地壳同熔型花岗岩	<10	0.705~0.710			
地壳改造型花岗岩	>10	>0.710			[37]

燕山期^[9],此处因年龄问题搁置与该岩体有关的讨论。

海西期花岗岩的构造背景与前人从地质学和微量元素角度的研究结果完全一致^[30]。北带中—东段的一些泥盆纪花岗岩形成于碰撞后隆升区,可能是对泥盆纪前弧陆碰撞的后续响应。北带东段党川岩区的一些石炭纪花岗岩形成于碰撞前,中段中川岩区二叠纪花岗岩形成于同碰撞区,它们可能与志留纪以来的洋陆消减和南北大陆的碰撞有关。除此而外,党川岩区尚有一些中泥盆世花岗岩形成于同碰撞区,可能反映南北两大陆的碰撞发生于泥盆纪,同时也验证了地层的 La/Th 比值给出的结论。

北带西段夏河岩区的大多数三叠纪—侏罗纪花岗岩形成于碰撞前区,但有个别靠近同碰撞区,可能意味着当时在西秦岭西段存在扬子板块向西秦岭或华北板块之下的消减;北带中段中川岩区和东段党川岩区的三叠纪—侏罗纪花岗岩主要形成于同碰撞、晚造山、造山后隆升区。总体反映出自泥盆纪至侏罗纪,碰撞过程由东部的略阳一带向西部的迭部一带迁移,该过程与前述 A 型花岗岩的时空发育顺序一致,但 A 型花岗岩应滞后于碰撞型花岗岩。

南带碧口地块北缘的三叠纪花岗岩(包括鹰嘴山黑云母花岗岩、阳坝黑云母花岗岩和摩天岭二长花岗岩)形成于同碰撞区,可能是缝合带附近地壳增厚的结果,基本上验证了前人^[46]的认识。

5 古海底热流与成矿时代

从地层的物源分析和花岗岩的构造背景知道,志留纪至泥盆纪是南北两大陆由分裂至聚合的过激期。通过志留系和泥盆系的岩性和微量元素亦能获得古热流的演化情况。高热流的标志之一是地层中火山岩或热水沉积岩的丰富程度,如硅质岩;另一个指标应该是地层的 Co/Ni,因为 Co 和 Ni 主要存在于黄铁矿中,并且岩浆热液型黄铁矿的 Co/Ni 大于 1。

如表 8 所示,尽管在西成地区泥盆纪铅锌矿带中存在一些硅质岩^[7],但志留系中的硅质岩相当丰富,以致 1:500 000 地质图中地层的岩性描述难以忽略它。与之相对应,志留系的 Co/Ni 约为泥盆系的两倍。所有这些证据证明,古热流自志留纪至泥盆纪逐渐下降。

成矿年龄的统计结果显示,沉积型矿床如沉积型铁、铜、铅锌矿的成矿高峰期是志留纪和泥盆纪。热液成矿作用主要存在于石炭纪之后,其中热液型铁、铜、钨、金、锑、汞和铅锌的成矿高峰期是三叠纪和侏罗纪(图 5^[1234])。

6 讨论与结论

6.1 造山过程

地层的物源关系、侵入岩的构造环境相互印证

① 甘肃省地质局地质科学研究所.甘肃省西秦岭内生铜矿的成矿条件及找矿方向研究,1980.

② 甘肃省地质局地质科学研究所.西秦岭铁矿成矿规律找矿方向研究报告,1984:80-245.

③ 甘肃省地质局地质科学研究所.甘肃省西秦岭层控铅锌矿成矿条件研究报告,1985:1-155.

④ 甘肃省地质局地质科学研究所.甘肃省西秦岭汞锑矿产地质特征的初步研究,1985:1-98.

表8 西秦岭志留系和泥盆系中与古热流有关的岩性和 Co/Ni 比值(Co/Ni 从表2 数据计算得到)
Table 8 Lithology and Co/Ni of Silurian and Devonian strata in West Qinling for indication of old heat flow, in which the Co/Ni were calculated from Table 2

地层	1:500000 地质图中的岩性描述 ^①	Co/Ni
下志留统(S _{1d})	千枚岩、板岩和硅质岩	0.6269
中志留统(S _{2z})	板岩、千枚岩和变砂岩夹硅质岩	0.5940
上志留统(S _{3zw})	板岩、灰岩夹变砂岩	0.5489
中下泥盆统(D _{1-2S})	千枚岩、片岩夹灰岩, 局部夹中酸性火山岩	0.3271
中泥盆统(D _{2xw})	灰口 深灰色微晶灰岩、生屑灰岩、碎屑灰岩、生物礁灰岩夹浅变质石英	0.3118
中泥盆统(D _{2yj})	灰绿色板岩、变砂岩、变粉砂岩韵律性互层, 夹少量灰岩、泥灰岩	0.4146
中上泥盆统(D _{2-3fl})	灰白口 灰色中厚口 巨厚层灰岩、生物灰岩夹泥灰岩、局部夹板岩。下部	0.3387
上泥盆统(D _{3sl})	灰色、灰绿色浅变质细砂岩、粉砂岩与板岩互层, 局部夹紫红色粉砂岩	0.2968

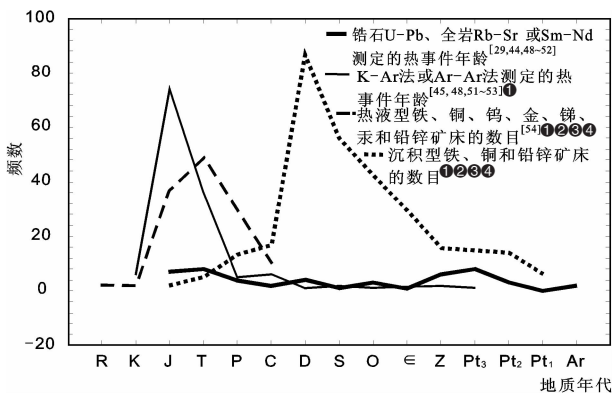


图5 西秦岭与地质年代对应的热事件和金属矿床的频数
Fig.5 Frequency of thermal events and metallic ore deposits corresponding to geological ages in West Qinling

并证明:

华北地台和扬子地台在中元古代、新元古代和震旦纪的某时期曾相互接近, 自震旦纪开始相互远离, 并逐渐形成多岛洋盆。实际上, 南北板块在中—新元古代的分离过程已见述及^[55-57]; 张文治^[58]已依据古地磁资料得到青白口纪—震旦纪华北陆块与华南陆块较详细的相对位置关系(图6), 青白口纪早期, 两板块较为接近, 之后逐渐远离, 至震旦纪, 二者又稍微靠近。将其与本文推论相结合可得, 新元古代中晚期, 华北和扬子板块是相互远离的, 但在中元古代末—晚元古代初及震旦纪可能相互接近。

志留纪前后存在洋内俯冲、弧陆碰撞和洋陆俯冲。石炭—二叠系的物源及泥盆纪碰撞型花岗岩的

出现表明, 东部华川地区南北两板块的碰撞可能始于泥盆纪, 前石炭系均可能因华北板块与扬子的碰撞而隆升。夏河地区侏罗纪碰撞型花岗岩的存在表明, 南北板块的碰撞可能于侏罗纪结束^[59], 但富铝矿物含量高的与碰撞有关的S型花岗岩出现于三叠纪, 如碧口地块北缘三叠纪同碰撞花岗岩。南北两板块自泥盆纪从略阳一带开始碰撞, 然后逐渐向西迁移至迭部一带(图1), 震旦系至三叠系依此增生至华北板块, 并非华南板块简单地增生到华北板块^[1]。来自峨眉山二叠纪玄武岩的古地磁数据也指示, 碰撞起初发生于中国的东部, 就象华南板块相对于华北板块顺时针旋转一样, 碰撞过程逐渐向西迁移^[59]。

前述海西—燕山期A型花岗岩、夏河县晚中生界的镁质火山岩^[60]、礼县新生代钾霞黄长岩^[28]指示, 尽管存在新生代向东挤出, 自古生代以来, 随着板块碰撞过程由东向西进行, 伸展过程也自东向西跟进, 燕山期西秦岭整体处于伸展环境。不管早古生代的弧陆碰撞机制如何, 至少自志留纪以来, 迭部—略阳断裂在西秦岭的地壳演化中起着主导作用。各个侵入期次的花岗岩均主要源于中地壳基底地层, 如富含火山岩的元古宇, 与扬子板块消减、拆沉有关的I型花岗岩岩浆是西秦岭花岗岩类岩浆的诱导因素。四川黑水至甘肃甘谷的大地电磁测深反演剖面(图7)^[61]显示, 一个类似于松潘地块上地壳的高阻带位于西秦岭之下, 暗示松潘陆块沿迭部—略阳断裂消减到西秦岭之下, 并已断离。

① 中国地质调查局(CGS).1:500000 甘肃省数字图.2000.

② 甘肃地质局地质科学研究所.西秦岭铁矿成矿规律找矿方向研究报告, 1984:80-245.

③ 甘肃地质局地质科学研究所.甘肃省西秦岭层控铅锌矿成矿条件研究报告, 1985:1-155.

④ 甘肃地质局地质科学研究所.甘肃省西秦岭汞锑矿产地质特征的初步研究, 1985:1-98.

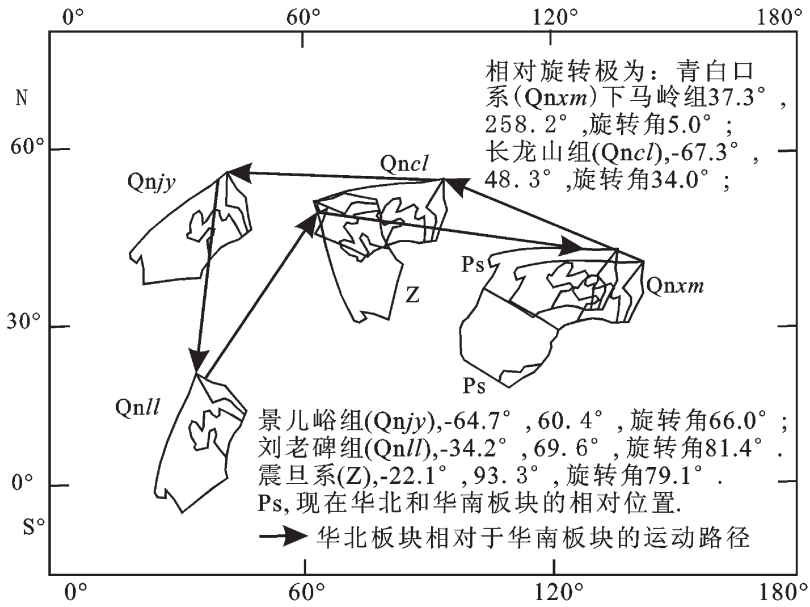


图 6 新元古代华北板块相对于华南板块的运动(据张文治,2002)^[58]
 Fig.6 Movement of North China block relative to South China block in Neoproterozoic period (after Zhang, 2002)

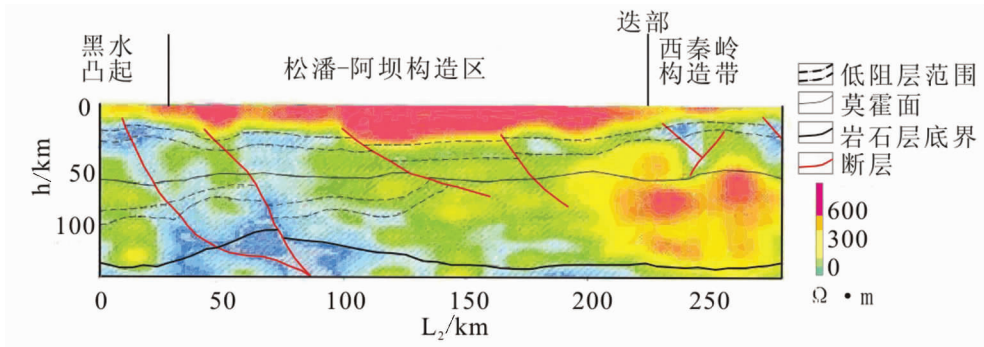


图 7 四川黑水—甘肃甘谷 MT 剖面反演结果(据陈高,2006)
 Fig.7 MT inversion result of the profile from Heishui to Gangu (after CHEN. 2006)

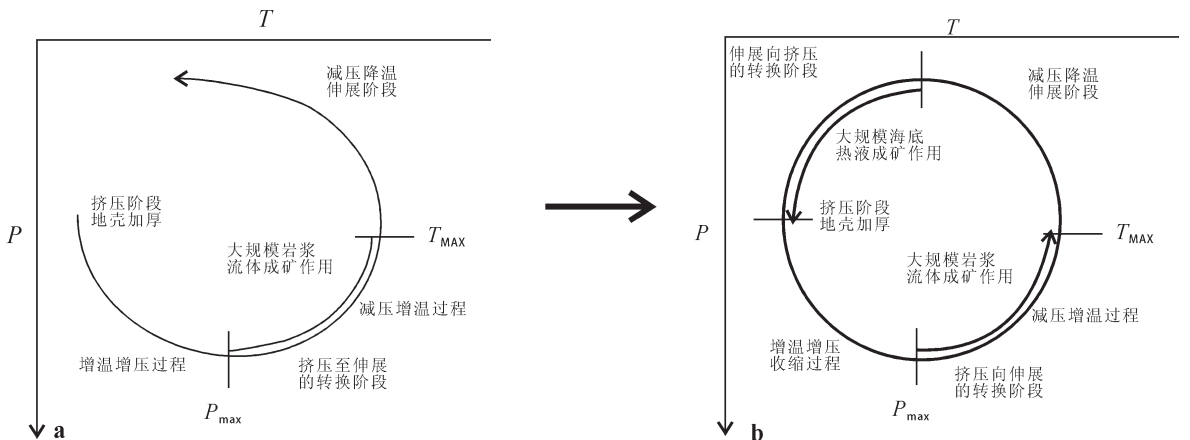


图 8 板块聚散过程中成矿作用的 p-T-t 轨迹(a.据陈衍景等, 2003; b, 本文)
 Fig.8 Common p-T-t path for mineralization of convergence and split of plates (a. after Chen et al., 2003; b, this paper)

6.2 成矿背景

陈衍景等^[62]提出了关于构造演化和大规模成矿作用的三阶段成矿模式(图 8-a),其中的大规模岩浆热液的成矿作用发生于挤压至伸展的转换阶段,或者说处于伴随消减板块熔融的压力减小、温度升高的阶段。

在西秦岭,沉积成矿作用的峰期是志留纪和泥盆纪,如造山过程和古热流所示,正好处于洋盆扩张至聚敛的转换阶段,或者说是一个压力增加和温度减小的过程。热液成矿作用主要存在于石炭纪以后,其中成矿的峰期是三叠纪和侏罗纪,或者说处于压力减小和温度增加的过程(图 8),该过程基本与陈衍景^[63]的模式一致,岩浆起源机制与消减、断离的扬子板块的拆沉有关^[63-64]。

6.3 结论

综合考虑地层的物源特征、印支—燕山期花岗岩和中新生代火山岩指示的伸展过程,西秦岭新元古代以来的演化过程可以分为 4 个阶段:

中元古代末期至震旦纪早期汇聚—分离—汇聚过程:华北地台和扬子板块在中元古代末至早元古代初曾相互接近,新元古代中晚期相互远离,至震旦纪早期又相互接近。

震旦纪晚期—奥陶纪伸展过程:华北与扬子板块逐渐分裂,先后发生过洋内俯冲和弧陆碰撞。

志留—侏罗纪收缩过程:自志留纪开始发生洋陆俯冲,至泥盆纪由略阳一带开始发生南北两板块之间的陆陆碰撞,并逐渐向西迁移至迭部一带,随之存在碰撞后隆升过程;但富铝矿物含量高的与碰撞有关的 S 型花岗岩形成于三叠纪。不管早古生代的弧陆碰撞机制是什么,迭部—略阳断裂至少在志留纪以来在西秦岭的地壳演化中起着主要作用。

泥盆纪至中生代板内伸展过程:主要源于碰撞后消减或断离的扬子板块的拆沉作用,时空上,泥盆纪自东部的党川地区,三叠纪至中部的中川地区,侏罗—白垩纪到西部的夏河地区和整个西秦岭。

与晚中生代基性火山岩类似,北带夏河—党川地区的海西—燕山期花岗岩的起源与扬子板块的消减、拆沉有关,但花岗岩类侵入体的成分主要源于中地壳,如富含火山岩的元古宇。

沉积成矿峰期是志留纪和泥盆纪,对应于洋盆开裂至洋盆关闭的转换期;热液成矿的峰期是三叠纪和侏罗纪,与印支—燕山期岩浆活动期一致,对应

于碰撞向陆内伸展的转换期。

致谢:感谢原甘肃省地球化学探矿队的工作伙伴王文臣、张鸿林、刘建宏、杨文敏等,他们和笔者一起于 1980—1998 年完成了区域内的野外采样工作!感谢甘肃地矿局第三地质矿产勘查院龚全胜总工及维小刚副总工在作者查找、借阅分析质量原始监控记录时给予大力支持!感谢本文的评审专家以高度负责、严谨的科学精神提供了建设性意见和修订。

参考文献 (References):

- [1] Mattauer M, Matte Ph, Malavieille J, et al. Tectonics of the Qinling Belt: build-up and evolution of eastern Asia [J]. *Nature*, 1985, 317: 496-500.
- [2] 安三元, 北秦岭地质新知及一些有关问题[J]. *西安地质学院学报*, 1992, 15(4):52-56.
An Sanyuan. Recent tiding of geology and some problems of the northern Qinling[J]. *Journal of Xi'an College of Geology*, 1993, 15 (4):52-56(in Chinese with English abstract).
- [3] 邓清禄, 杨巍然. 秦岭造山带早古生代“开”“合”构造格局及加里东运动[J]. *地质科技情报*, 1996, 15(2):45-50.
Deng Qinglu, Yang Weiran. Early Paleozoic tectonics and Caledonian movement in the Qinling orogenic belt [J]. *Geological Science and Technology Information*, 1996, 15 (2):45-50 (in Chinese with English abstract).
- [4] 周国藩, 杨森楠. 秦岭造山带的壳幔结构及其形成、演化特征[J]. *地质科技情报*, 1992, 11(3):19-24.
Zhou Guofan, Yang Sennan. Structure of crust and upper mantle in Qingling orogen and its evolution characteristics [J]. *Geological Science and Technology Information*, 1992, 11 (3):19-24 (in Chinese with English abstract).
- [5] 程裕淇主编. 中国区域地质概论 [M]. 北京: 地质出版社, 1994: 235-236.
Chen Yuqi, ed. A Conspectus of Regional Geology of China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994:235-236(in Chinese).
- [6] 周鼎武, 张成立. 论北秦岭加里东期造山作用 [J]. *西北大学学报 (自然科学版)*, 1994, 24(3):245-260.
Zhou Dingwu, Zhang Chengli. On the Caledonian Orogeny of the Northern Qinling [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 1994, 24 (3):245-260 (in Chinese with English abstract).
- [7] 周鼎武, 张成立, 韩松, 等. 东秦岭早古生代两条不同构造—岩浆杂岩带的形成构造环境[J]. *岩石学报*, 1995, 11(2):115-126.
Zhou Dingwu, Zhang Chengli, Han Song, et al. Tectonic setting on the two different tectonics—magma complex of the east Qinling in Early Paleozoic[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1995, 11(2):115-126 (in Chinese with English abstract).
- [8] 周鼎武, 刘良, 华洪, 等. 北秦岭中、晚元古代地质演化特征及其有关问题讨论[J]. *高校地质学报*, 1996, 2(2):166-175.

- Zhou Dingwu, Liu Liang, Hua Hong, et al. The middle and late Proterozoic geological evolution of north Qinling with discussion on some related problems [J]. *Geological Journal of Universities*, 1996, 2(2):166-175(in Chinese with English abstract).
- [9] 周鼎武, 刘良, 张成立, 等. 华北和扬子古陆块中新元古代聚合、伸展事件的比较研究 [J]. *西北大学学报 (自然科学版)*, 2002, 32(2):109-113.
- Zhou Dingwu, Liu Liang, Zhang Chengli, et al. The comparative research on convergence and extension events of ancient North China block and Yangtze block in the Middle-Neoproterozoic [J]. *Journal of Northwest University(Natural Science Edition)*, 2002, 32(2):109-113(in Chinese with English abstract).
- [10] 曹宣铎, 胡云绪. 秦岭加里东晚期-华力西早期复式前陆盆地 [J]. *西北地质科学*, 2000, 21(2):1-14.
- Cao Xuanduo, Hu Yunxu. Qinling polygenic foreland basin in late Caledonian to early Variscan [J]. *Northwest Geoscience*, 2000, 21(2):1-14(in Chinese with English abstract).
- [11] Lin Jinlu, Fuller M, Zhang Wenyong. Preliminary Phanerozoic polar wander paths for the North and South China blocks [J]. *Nature*, 1985, 313:444-449.
- [12] 李亚林, 李三忠, 张国伟. 秦岭勉略缝合带组成与古洋盆演化 [J]. *中国地质*, 2002, 29(2):131-136.
- Li Yalin, Li Sanzhong, Zhang Guowei. Composition of the Mianlue suture zone and its relation with evolution of the old ocean basin [J]. *Geology in China*, 2002, 29(2):131-136(in Chinese with English abstract).
- [13] 裴先治, 张国伟, 赖绍聪, 等. 西秦岭南缘勉略构造带主要地质特征 [J]. *地质通报*, 2002, 21(8/9):486-497.
- Pei Xianzhi, Zhang Guowei, Lai Shaocong, et al. Main geological features of the Mianlue tectonic belt on the southern margin of the west Qinling [J]. *Geological bulletin of China*, 2002, 21(8/9):486-497(in Chinese with English abstract).
- [14] 杨志华, 郭俊锋, 苏生瑞, 等. 秦岭造山带基础地质研究新进展 [J]. *中国地质*, 2002, 29(3):246-257.
- Yang Zhihua, Guo Junfeng, Su Shengrui, et al. New advances in the geological study of the Qinling orogen [J]. *Geology in China*, 2002, 29(3):246-257(in Chinese with English abstract).
- [15] 张国伟, 孟庆任, 赖绍聪. 秦岭造山带的结构构造 [J]. *中国科学 (B 辑)*, 1995, 25(9):994-1003.
- Zhang Guowei, Meng Qingren, Lai Shaocong. The framework and tectonics of Qinling orogenic belt [J]. *Science in China (Series B)*, 1995, 25(9):994-1003(in Chinese).
- [16] 张国伟, 张宗清, 董云鹏. 秦岭造山带主要构造岩石地层单元的构造性质及其大地构造意义 [J]. *岩石学报*, 1995, 2003, 11(2):101-114.
- Zhang Guowei, Zhang Zongqing, Dong Yunpeng. Nature of main tectono-lithostratigraphic units of the Qinling orogen: implications for the tectonic evolution [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1995, 11(2):101-114(in Chinese with English abstract).
- [17] 张本仁. 秦岭地幔柱源岩浆活动及其动力学意义 [J]. *地学前缘*, 2001, 8(3):57-66.
- Zhang Benren. Magmatic activities from Plume-source in the Qinling orogenic belt and its dynamic significance [J]. *Earth Science Frontiers*, 2001, 8(3):57-66(in Chinese with English abstract).
- [18] 董云鹏, 张国伟, 赵霞, 等. 北秦岭元古代构造格架与演化 [J]. *大地构造与成矿学*, 2003, 24(1):3-10.
- Dong Yunpeng, Zhang Guowei, Zhao Xia, et al. Proterozoic tectonics and evolutionary history of the north Qinling terrane [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2003, 24(1):3-10 (in Chinese with English abstract).
- [19] 冯益民, 曹宣铎, 张二朋, 等. 西秦岭造山带的演化、构造格局和性质 [J]. *西北地质*, 2003, 36(1):1-10.
- Feng Yimin, Cao Xuanduo, Zhang Erpeng. Tectonic evolution framework and nature of west Qinling orogenic belt [J]. *Northwestern Geology*, 2003, 36(1):1-10(in Chinese with English abstract).
- [20] 冯益民, 曹宣铎, 张二朋. 勉县-略阳带大地构造属性之探讨 [J]. *地质论评*, 2004, 50(3):295-307.
- Feng Yimin, Cao Xuanduo, Zhang Erpeng. Discussion on the tectonic features of the Mianxian-Lueyang zone [J]. *Geological Review*, 2004, 50(3):295-307(in Chinese with English abstract).
- [21] Langmuir C H., Vocke R D, Hanson G N, et al. A general mixing equation with application to Icelandic basalts [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1978, 37:380-392.
- [22] Taylor S R, McLennan S M. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution* [M]. Blackwell, Oxford, 1985:312.
- [23] 张本仁, 骆庭川, 高山. 秦巴地区地球化学特征、岩石圈演化及其地质意义 [C]//张本仁主编, 秦巴地区区域地球化学. 武汉:中国地质大学出版社, 1990:1-20.
- Zhang Benren, Luo Tingchuan, Gao Shan, et al. Geochemical characteristics and evolution of the lithosphere in the Qinling-Dabashan region, and their geological significance [C]//Zhang Benren, et al.,(eds.). *Contribution to the Regional Geochemistry of Qinling -Bashan Mountains*. Wuhan:China University of Geosciences Press, 1990:1-20(in Chinese).
- [24] 周鼎武, 董云鹏, 华洪, 等. “磨拉石建造”和“不整合”在地层对比中的意义—以扬子地块及其北缘晚前寒武纪地层为例 [J]. *地质论评*, 1996, 42(5):416-423.
- Zhou Dingwu, Dong Yunpeng, Hua Hong, et al. The significance of molasse formation and unconformity in the stratigraphic division and correlation [J]. *Geological Review*, 1996, 42(5):416-423(in Chinese with English abstract).
- [25] 闫臻, 王宗起, 王涛, 等. 西秦岭大草滩群的沉积环境及构造意义 [J]. *地质通报*, 2002, 21(8/9):505-515.
- Yan Zhen, Wang Zongqi, Wang Tao, et al. Sedimentary environment and tectonic significance of the Dacota Group of the western Qinling mountains [J]. *Geologica Bulletin of China*, 2002, 21(8/9):505-515.
- [26] Xue Feng, Zhang Guowei. Rock association and geochemistry of the Danfeng meta-volcanics in the Qinling orogenic belt: its

- formation setting and mechanism and tectonic implications [J]. *Geochimica*, 1993,(1):80-92.
- [27] 杨根生, 陈彦文, 胡晓隆. 西秦岭丹凤群变质火山岩的地质地球化学特征及其成矿环境初探[J]. *现代地质*, 2004, 18(4):518-523. Yang Gensheng, Chen Yanwen, Hu Xiaolong. Geochemistry and tectonic setting of the meta-volcanic rocks from Danfeng group in western Qinling [J]. *Geoscience*, 2004, 18(4):518-523 (in Chinese with English abstract).
- [28] 王建, 李建平. 西秦岭礼县地区新生代钾霞橄黄长岩系地球化学特征及地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2003, 22(1):11-19. Wang Jian, Li Jianping. Geochemical characteristics and geological implications of the Cenozoic Kamafugites from Lixian county, west Qinling [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2003, 22(1):11-19 (in Chinese with English abstract).
- [29] 李永军, 李锁成, 杨俊泉, 等. 西秦岭党川地区花岗岩的“解体”及其同位素年龄证据 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2005, 24(2):114-120. Li Yongjun, Li Suocheng, Yang Junquan, et al. The disintegration of granite bodies in Dangchuan area of western Qinling; evidence from the isotopic dating ages [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2005, 24(2):114-120 (in Chinese with English abstract).
- [30] 李永军, 辜平阳, 刘静, 等. 西秦岭党川岩基的地球化学特征[J]. *西北地质*, 2007, 40(1):35-41. Li Yongjun, Gu Pingyang, Liu Jing, et al. Geochemistry of Dangchuan granitic batholith in west Qinling [J]. *Northwestern Geology*, 2007, 40(1):35-41 (in Chinese with English abstract).
- [31] 闫臻, 王宗起, 王涛, 等. 秦岭造山带泥盆系形成构造环境: 来自碎屑岩组成和地球化学方面的约束 [J]. *岩石学报*, 2007, 23(5):1023-1042. Yan Zhen, Wang Zongqi, Wang Tao, et al. Tectonic setting of Devonian sediments in the Qinling orogen: Constraints from detrital modes and geochemistry of clastic rocks [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(5):1023-1042 (in Chinese with English abstract).
- [32] 周炼, 高山, 刘勇胜, 等. 扬子克拉通北缘碎屑沉积岩地球化学特征及意义[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2007, 32(1):29-38. Zhou Lian, Gao Shan, Liu Yongsheng, et al. Geochemistry and implications of clastic sedimentary rocks from northern margin of Yangtze Craton [J]. *Earth Sciences—Journal of China University of Geosciences*, 2007, 32 (1):29-38 (in Chinese with English abstract).
- [33] 董云鹏, 张国伟, 杨钊, 等. 西秦岭武山 E-MORB 型蛇绿岩及相关火山岩地球化学[J]. *中国科学(D 辑)*:37(增刊):199-208. Dong Yunpeng, Zhang Guowei, Yang Zhao, et al. Geochemistry of E-MORB type of ophiolite and related volcanic rocks of Wushan in west Qinling [J]. *Science in China (Series D)*, 2007, 37 (Supp.):199-208 (in Chinese).
- [34] 王涛, 王宗起, 闫全人, 等. 西秦岭南缘康县-留坝一带白水江群碎屑岩的地球化学特征及构造背景 [J]. *地质通报*, 2006, 25(6):730-736. Wang Tao, Wang Zongqi, Yan Quanren, et al. Geochemical characteristics and tectonic setting of clastic rocks of the Baishuijiang Group in the Kunoxian-Liuba area on the southern margin of the west Qinling, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25(6):730-736 (in Chinese with English abstract).
- [35] 温志亮, 吴金刚, 郭周平, 等. 西秦岭北部地区的元古宙地层特征[J]. *西北地质*, 2008, 41(1):37-43. Wen Zhiliang, Wu Jingang, Guo Zhouping, et al. The characteristics of Proterozoic stratum in northern area of western Qinling [J]. *Northwestern Geology*, 2008, 41(1):37-43 (in Chinese with English abstract).
- [36] 路凤香, 桑隆康. 岩石学[M]. 北京:地质出版社, 2002:92-95. Lu Fengxiang, Sang Longkang. *Lithology* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002:92-95 (in Chinese).
- [37] 徐克勤, 涂光炽, 华南花岗岩成因与成矿域 [C]//花岗岩地质和成矿关系 (国际学术会议论文集). 南京:江苏科学技术出版社, 1984:1-20. Xu Keqin, Tu Guangchi. Granitic genesis and metallogenic domain [C]//Granite Geology and Metallogenesis (A Compilation of International Conference for Geoscience). Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1984: 1-20 (in Chinese).
- [38] 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. *岩石学报*, 2007, 23(6):12217-1238. Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, et al. Discussions on the petrogenesis of granites [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(6):12217-1238 (in Chinese with English abstract).
- [39] 李永军, 霍福臣. 西秦岭东段侵入岩的构造成因类型[J]. *甘肃地质学报*, 1996, 5(1):47-66. Li Yongjun, Huo Fuchen. Tectonic-genetic types of the intrusive rocks in the eastern part of west Qinling [J]. *Acta Geologica Gansu*, 1996, 5(1):47-66 (in Chinese with English article).
- [40] 殷勇, 赵彦庆. 甘肃西秦岭金矿富集区花岗岩与金成矿作用的关系[J]. *甘肃地质*, 2006, 15(1):36-41. Yin Yong, Zhao Yanqing. Relationship between granite; and gold mineralization in the gold enrichment area of western Qinling, Gansu Province [J]. *Gansu Geology*, 2006, 15(1):36-41 (in Chinese with English abstract).
- [41] 尚瑞均, 严阵. 秦巴花岗岩 [M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1988:1-68. Shang Ruijun, Yan Zhen. *Granites of Qinling -Dabashan mountains* [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1988:1-68 (in Chinese).
- [42] 闫升好, 王安建, 高兰, 等. 大水式金矿床地质特征及成因探讨 [J]. *矿床地质*, 2000, 19(2):126-137. Yan Shenghao, Wang Anjian, Gao Lan, et al. Geological characteristics and genesis of the Dashui type gold deposits [J]. *Mineral deposits*, 2000, 19 (2):126-137 (in Chinese with English abstract).
- [43] 李献华, 李武显, 李正祥. 再论南岭燕山早期花岗岩的成因类型与构造意义[J]. *科学通报*, 2007, 52(9):981-992.

- Li Xianhua, Li Wuxian, Li Zenxiang. A second study on genetic types and structural significance of early Yanshanian granites in Nanling [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52 (9):981-992 (in Chinese).
- [44] 韩吟文, 马振东, 主编. 地球化学[M]. 北京:地质出版社, 2003: 283.
- Han Yinwen, Ma Zhendong. Geochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003:283(in Chinese).
- [45] 李永军, 谢其山, 栾新东, 等. 西秦岭糜褶皱岩浆带成因及构造意义[J]. 新疆地质, 2004, 22(4):374-377.
- Li Yongjun, Xie Qishan, Luan Xindong, et al. The origins and tectonic significance of the Mishuling magma zone in west Qinling [J]. Xinjiang Geology, 2004, 22 (4):374-377 (in Chinese with English abstract).
- [46] Zhang Chengli, Zhang Guowei, Yan Yunxian, et al. Origin and dynamic significance of Guangtoushan granitic plutons to the north of Mianlue zone in southern Qinling [J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(3):711-720.
- [47] 陈光. 西成铅锌矿化集中区热水沉积成矿作用的岩矿证据[J]. 甘肃地质学报, 2002, 11(1):32-43.
- Chen Guang. Rock and ore evidence of thermal - water - sedimentary metallogenesis in Xi-Cheng Lead - zinc metallogenic provinces[J]. Acta Geologica Gansu, 2002, 11(1):32-43(in Chinese with English abstract).
- [48] 祁思敬, 李英. 南秦岭晚古生代海底喷气沉积成矿系统[J]. 地学前缘, 1999, 6(1):171-178.
- Qi Sijing, Li Ying. The upper Paleozoic submarine exhalative - sedimentary metallogenic system in south Qinling[J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(1):171-178(in Chinese with English abstract).
- [49] 张宗清, 张国伟, 付国民. 秦岭变质地层年龄及其构造意义[J]. 中国科学(D 辑), 1996, 26(3):216-222.
- Zhang Zongqing, Zhang Guowei, Fu Guoming. The ages of metamorphic strata in Qinling and its tectonic significance [J]. Science in China(Series D), 1996, 26(3):216-222(in Chinese).
- [50] 陈明扬, 庞春勇. 煎茶岭镍矿成矿作用同位素地球化学[C]//陈好寿, 主编. 同位素地球化学研究. 杭州:浙江大学出版社, 1994:56-81.
- Chen Mingyang, Pang Chunyong. Isotopic Geochemistry of Mineralization of Jianchaling Nickel Deposit [C]//Chen Haoshou (ed.). Study on Isotopic Geochemistry. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1994:56-81(in Chinese).
- [51] 赵祥生, 马少龙, 邹湘华. 秦巴地区碧口群时代层序、火山作用及含矿性研究 [J]. 中国地质科学院西安地质研究所所刊, 1990, 29:55-812.
- Zhao Xiangsheng, Ma Shaolong, Zou Xianghua, et al. Age, sequence, volcanism and mineralization characteristics of Bikou Gr in the Qinba district [J]. Journal of Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources of Chinese Academy of Geological Science, 1990, 29:55-812(in Chinese with English abstract).
- [52] 秦克令, 孙述光, 何世平. 陕西勉略宁地区鱼洞子花岗岩-绿岩地体地质特征及含金性[J]. 西北地质科学, 1992, 13(1):65-73.
- Qin Keling, Song Shuguang, He Shiping. Geological characteristics of Yudongzi granite-greenstone terrane in Mianxian-Lueyang-Ningqiang district of Shaanxi and its ore-bearing characteristics[J]. Northwest Science of Geology, 1992, 13 (1):65-73 (in Chinese with English abstract).
- [53] 杨军禄, 冯益民. 西秦岭吴家山隆起的隆升过程及时代[J]. 西北地质, 1999, 32(4):1-4.
- Yang Junlu, Feng Yiming. The process and times of uprising of Wujiashan uplift in west Qinling [J]. Northwestern Geology, 1999, 32 (4):1-4 (in Chinese with English abstract).
- [54] 殷先明. 甘肃岩金地质[M]. 兰州:甘肃科学技术出版社, 2000: 1-387.
- Yin Xianming. Geology of Original Gold Deposits of Gansu [M]. Lanzhou: Gansu of Science and Technology Press, 2000:1-387(in Chinese with English abstract).
- [55] 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 南秦岭中-晚元古代火山岩性质与前寒武纪大陆裂解[J]. 中国科学(D 辑), 1996, 26(3):237-243.
- Xia Linqi, Xia Zhuchun, Xu Xueyi. The relation of Meso - Neoproterozoic volcanic rocks in south Qinling and continental splitting of Precambrian[J]. Sciences in China (Series D), 1996, 26 (3):237-243(in Chinese).
- [56] Gao Shan, Zhang Benren, Wang Dongpo, et al. Geochemical evidence for the Proterozoic tectonic evolution of the Qinling Orogenic Belt and its adjacent margins of the North China and Yangtze cratons[J]. Precambrian Research, 1996, 80:23-48.
- [57] Ouyang J P, Zhang B R. Geochemical evidences on the formation and evolution of the north Qinling microcontinent [J]. Science in China (Series D), 1996, 26 (Suppl.):42-48.
- [58] 张文治. 述评:Rodinia 超大陆拼合和裂解的古地磁检验[J]. 前寒武纪研究进展, 2001, 24(4):222-236.
- Zhang Wenzhi. Review:Paleo-geomagnetic verification of amalgamation and split of Rodinia supercontinent [J]. Progress of Study on Precambrian, 2001, 24(4):222-236(in Chinese).
- [59] Zhao Xixi, Robert S, Coe. Paleomagnetic constraints on the collision and rotation of North and South China [J]. Letters to Nature, 1987, 327(14):141-144.
- [60] 李晓勇, 范立勇. 西秦岭地区晚中生代 OIB 型玄武岩的发现及其意义[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2007, 45(3):127-128.
- Li Xiaoyong, Fan Liyong. Geochemistry of late Mesozoic mafic volcanic rocks in western Qinling and its implication [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2007, 45(3):127-128(in Chinese with English abstract).
- [61] 陈高, 吴建生, 于鹏. 松潘-阿坝地区深部电性特征 [J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2006, 31(6):857-860.
- Chen Gao, Wu Jiansheng, Yu Peng. Electrical property of deep structure in Songpan-Aba district [J]. Earth Sciences-Journal of China University of Geosciences, 2006, 31(6):857-860(in Chinese with English abstract).
- [62] 陈衍景, 隋颖慧, Franco Pirojno. CMF 模式的排他性依据和造山

- 型银矿实例:东秦岭铁炉坪银矿同位素地球化学[J]. 岩石学报, 2003, 19(3):551-568.
- Chen Yanjing, Sui Yinghui, Franco Pirojno, et al. Exclusive evidences for CMF model and a case of orogenic silver deposits: Isotope geochemistry of the Tieluping silver deposit, east Qinling orogen[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2003, 19(3):551-568(in Chinese with English abstract).
- [63] 陈衍景, 肖文交, 张进江. 成矿系统: 成矿动力学的有效探针[J]. 中国地质, 2008, 35(6):1059-1064.
- Cheng Yanjing, Xiao Wenjiao, Zhang Jinjiang. Ore-system as a geodynamic probe[J]. *Geology in China*, 2008, 35(6):1059-1064 (in Chinese with English abstract).
- [64] 何进忠. 西秦岭金属矿床成矿地球化学场研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2008:201-202.
- He Jinzhong. Study on Geochemical Fields of Metallogenesis in West Qinling [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2008:201-202(in Chinese with English abstract).

Geochemical evidence for the orogenic process of West Qinling in Gansu since Neoproterozoic and its metallogenic background

HE Jin-zhong^{1,2}, YAO Shu-zhen²

(1. Geological Surveying Institute of Gansu Province, Lanzhou 730000, Gansu, China; 2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: Based on geochemical data of stratigraphic units of different levels and granitoid intrusives acquired in West Qinling from the 1980s to 1990s, such as concentrations and ratios of immobile elements and trace element indicators of A-type granites in combination with previous interpretation of geophysical data, the authors investigated the orogenic process of West Qinling since Neoproterozoic, and probed into the relationship between the orogenic process and the metallic mineralization. In comparison with previous studies, the formation-level stratigraphic unit was reasonably adopted on account of its relative homogeneity, the SiO₂-P relation was introduced to differentiate I-type granites from other types, and the results have validated previous knowledge with the obtaining of some new understanding. The authors consider that the evolution of West Qinling since Neoproterozoic may be divided into four processes, i.e., the convergence-split-convergence process from late Mesoproterozoic to early Sinian, the extensional process from late Sinian to Ordovician, the westward contraction process from Silurian to Jurassic, and the westward intraplate extension process, which even extended to the whole West Qinling region from Devonian to Mesozoic-Cenozoic.

The north China block and the Yangtze block was close to each other in certain periods of Mesoproterozoic, Neoproterozoic and Sinian; after Sinian, they were gradually away from each other and developed a multi-island sea basin between them. There were intra-oceanic subduction, arc continent collision and ocean continent subduction before or in Silurian. The collision of the North China craton and the Yangtze craton might have started in Devonian and ended in Jurassic, whereas the S-type granites which were enriched in aluminum-rich minerals and related to syn-collision were formed in Triassic. The collision of the two plates migrated westward from Lueyang to Diebu, so that the Sinian to Triassic strata accreted successively to the North China craton. Subsequent intraplate extension and granitoid intrusion related to subduction and delamination of Yangtze plate also migrated westward from eastern Dangchuan till the development of the extension in whole West Qinling region in Meso-Cenozoic. No matter what the mechanism of arc continent collision was in early Paleozoic, the Diebu-Lueyang fault must have played a leading role in the evolution of West Qinling since at least Silurian.

The peaks of sedimentary mineralization were Silurian and Devonian, corresponding to the transitional period from ocean splitting to ocean closing. The peaks of hydrothermal mineralization were Triassic and Jurassic during which the Indosinian-Yanshanian magmatism prevailed, corresponding to the transitional period from collision to intracontinental extension.

Key words: since Neoproterozoic; orogenic process; geochemical evidence; metallogenic background; West Qinling; Gansu

About the first author: HE Jin-zhong, male, born in 1963, doctor, senior engineer, engages in the study of mineral deposits, geochemistry, and mathematical geology; E-mail: viewsino@163.com.