

西秦岭太白地区岩湾-鹦鸽咀蛇绿混杂岩的地质特征及形成时代

陈隽璐^{1,2}, 徐学义¹, 王宗起³, 闫全人³, 王洪亮^{1,4}, 曾佐勋², 李平¹
CHEN Jun-lu^{1,2}, XU Xue-yi¹, WANG Zong-qi³, YAN Quan-ren³,
WANG Hong-liang^{1,4}, ZENG Zuo-xun², LI Ping¹

1. 中国地质调查局西安地质矿产研究所, 陕西 西安 710054;

2. 中国地质大学地球科学学院, 湖北 武汉 430074;

3. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;

4. 西北大学, 陕西 西安 710069

1. *Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China;*

2. *Faculty of Earth Science, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;*

3. *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;*

4. *Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China*

摘要:岩湾-鹦鸽咀蛇绿混杂岩是秦岭商丹蛇绿混杂岩带的重要组成部分,由变质基性火山岩(玄武岩)、蛇纹岩、变辉长岩、硅质岩、变复理石(云母石英片岩)等构造岩块组成。其中变基性火山岩具有N-MORB的地球化学特征,安山岩具有与俯冲作用密切相关的岛弧火山岩的性质。玄武岩的锆石SHRIMP U-Pb年龄为 $483 \text{ Ma} \pm 13 \text{ Ma}$,与天水关子镇和丹凤蛇绿混杂岩的时代相一致。对岩湾-鹦鸽咀蛇绿混杂岩的岩石组成和形成时代进行研究,可为进一步探讨商丹蛇绿混杂岩带和秦岭造山带的增生造山作用提供重要证据。

关键词:岩湾-鹦鸽咀蛇绿混杂岩;锆石SHRIMP U-Pb测年;增生造山作用;秦岭造山带

中图分类号: P542⁺.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2008)04-0500-10

Chen J L, Xu X Y, Wang Z Q, Yan Q R, Wang H L, Zeng Z X, Li P. Geological features and SHRIMP U-Pb zircon age of the Yanwan-Yinggezui ophiolitic mélangé in the Taibai area, West Qinling, China. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(4): 500-509

Abstract: The Yanwan-Yinggezui ophiolitic mélangé in the West Qinling orogenic belt is an important component part of the Shangdan ophiolitic mélangé. It is composed of tectonic blocks of metabasic volcanic rocks (basalt), serpentinite, metagabbro, cherts and meta-flysch (mica-quartz schist), of which basalt blocks have the geochemical features of N-MORB and andesite is subduction-related island-arc rocks. The zircon SHRIMP U-Pb age of basalt is $483 \pm 13 \text{ Ma}$, which agrees with the age of the Guanzizhen and Danfeng ophiolitic mélangés. The study of the composition and age of the Yanwan-Yinggezui ophiolitic mélangé can provide important geological evidences for a further study of the evolution of the Shangdan ophiolitic mélangé and accretionary orogeny of the Qinling orogenic belt.

Key words: Yanwan-Yinggezui ophiolitic mélangé; zircon SHRIMP U-Pb dating; accretionary orogeny; Qinling orogenic belt

收稿日期:2008-01-16;修订日期:2008-01-28

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:40773044)、国家科技支撑计划项目(编号:2006BAB01A11)和中国地质调查局国土资源调查
研究项目(编号:1212010610319、1212010611807)共同资助。

作者简介:陈隽璐(1964-),男,在读博士,高级工程师,从事区域地质构造研究。E-mail:chjl0116@163.com

秦岭造山带内自北而南发育二郎坪、商丹和勉略3套蛇绿混杂岩^[1-2]。其中商丹蛇绿混杂岩沿着商丹断裂带出露,被认为是秦岭造山带内最为重要的乃至分割华北与扬子板块的主要缝合带^[3]。该蛇绿混杂岩的主要组成为丹凤群,系一套变质火山-沉积岩组合,主要由基性火山岩和多具浊积岩特性的沉积岩组成,呈透镜状块体断续出露于陕西丹凤、商州、周至县黑河和太白-凤州的岩湾、百家店等地^[4]。对于该套蛇绿混杂岩,前人曾做了大量的工作,主要集中于陕西丹凤、商州和周至县黑河一带的蛇绿混杂岩的组成、形成环境和时代方面的研究^[2,3,5-13]。近年来,随着新一轮地质调查的开展和实施,有关商丹蛇绿混杂带的西延问题和西秦岭天水地区蛇绿混杂岩的组成、时代、形成环境均得到了深入的研究^[14-17],但对于该蛇绿混杂带内岩湾-鹦鸽咀一带的蛇绿混杂岩的研究相对比较薄弱。笔者等近几年在进行1:25万宝鸡市幅区域地质调查的过程中,对岩湾-鹦鸽咀蛇绿混杂岩进行了野外调查和岩石组合特征的研究,并对其进行了锆石SHRIMP U-Pb测年。下面将对这些研究结果分别进行介绍和讨论。

1 岩湾蛇绿混杂岩的基本地质特征

1.1 蛇绿混杂岩的组成特征

西秦岭凤县岩湾蛇绿混杂岩出露较好(图1),岩石组合类型相对齐全,主要由基性火山岩、蛇纹岩、硅质岩和辉长岩组成,呈透镜状近东西向展布,出露长度约10 km,宽度变化较大(0.5~1.5 km)。

其南以逆冲断裂覆于下白垩统陆相碎屑岩之上,北与秦岭岩群花岗质糜棱岩断层接触。在剖面上(图2-a),该蛇绿混杂岩岩石组合类型自南而北依次出露灰绿色变玄武岩夹薄层硅质岩、绢云母石英片岩、灰绿色变玄武岩夹薄层硅质岩、辉长岩、蛇纹岩、绢云母石英片岩夹蛇纹岩构造透镜体,其间均为断层接触,构成不同岩性岩片的叠置体。通过室内岩石显微结构分析,根据蛇纹岩中残留橄榄石和辉石等的矿物组合特征,认为其原岩为方辉橄榄岩和二辉橄榄岩。

太白县东部鹦鸽咀一带,由南向北主要出露云母石英片岩、含石墨大理岩、流纹岩、英安岩、安山岩、变基性火山岩(斜长角闪岩)、蛇纹岩、辉长岩。其中流纹岩、英安岩和安山岩发生了弱变质变形作用,仍保留其原始的结构特征;露头上可见辉石岩及富含气孔-杏仁构造的基性火山岩转石。总体上,该套岩石组合经历了强烈的构造改造,多数岩石发生了糜棱岩化,普遍经历过高绿片岩相变质作用。空间上,这些不同岩性单元以构造岩片的形式存在,相互之间以断层接触为典型特征,并构成一个自北而南的逆冲堆垛体;平面上,呈不规则的楔状体,东西长约8 km,南北宽1~3.5 km,面积约20 km²。

总之,岩湾蛇绿混杂岩的岩石组合类型相对复杂,但相对缺乏中酸性火山岩;鹦鸽咀蛇绿混杂岩相对缺乏超镁铁质岩石,普遍经历了较强的构造剪切变形和变质作用,并发生了较强的碳酸盐化和糜棱岩化。

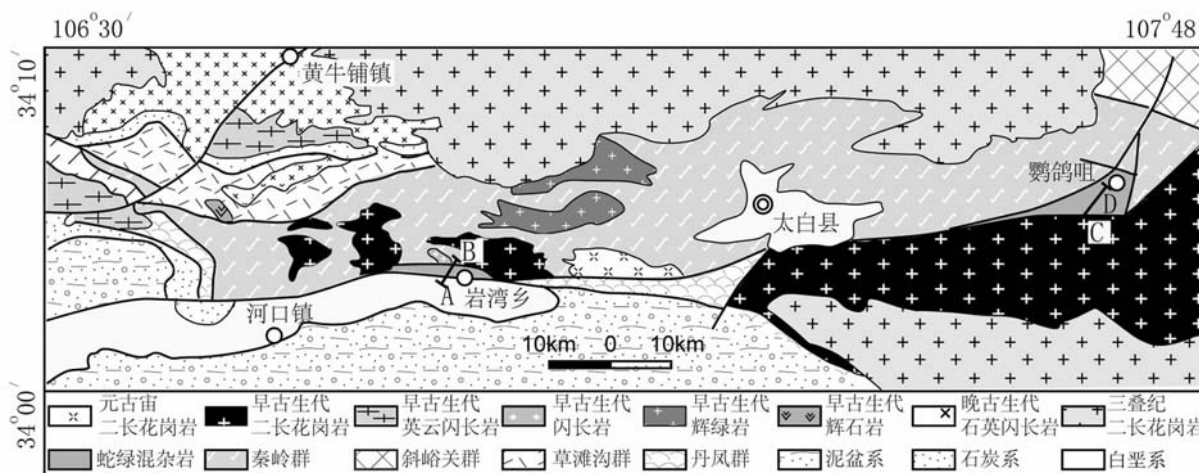


图1 岩湾-鹦鸽咀蛇绿混杂岩地质简图

Fig.1 Geological sketch map of the Yanwan-Yinggezui ophiolitic mélange
A-B为岩湾剖面;C-D为鹦鸽咀剖面

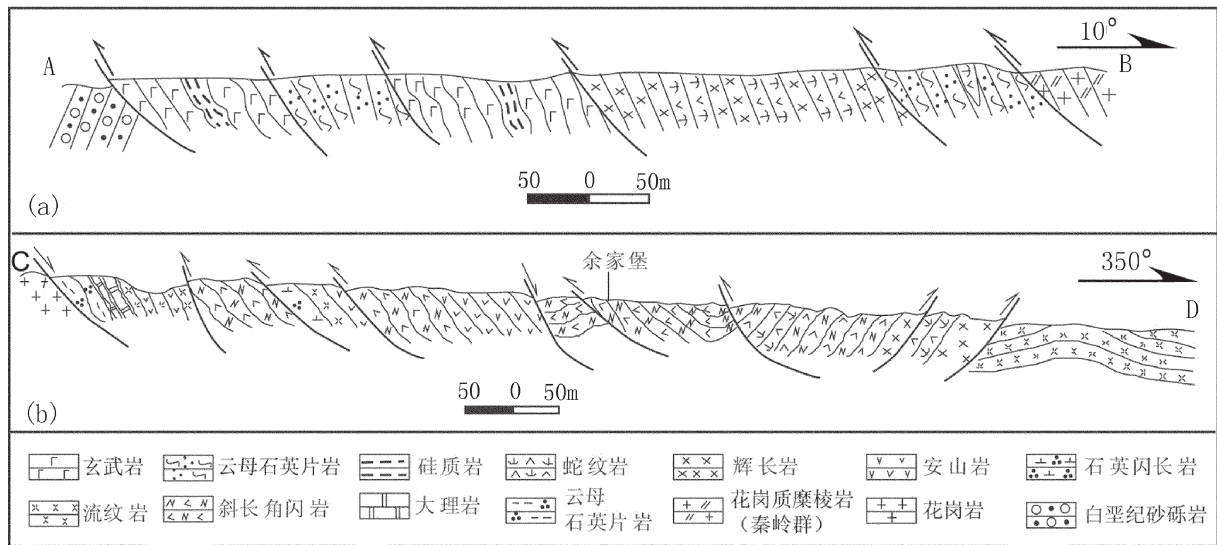


图2 岩湾(a)和鸚鵡咀(b)蛇绿混杂岩实测剖面(剖面位置见图1)

Fig.2 Cross sections of the Yanwan (a) and Yinggezui (b) ophiolitic mélanges

1.2 蛇绿混杂岩的岩石学特征

西秦岭岩湾-鸚鵡咀蛇绿混杂岩带内的基性火山岩尽管发生了强烈的构造变形,但其经历的变质作用却不完全相同。其中岩湾地区的基性火山岩主要经了低绿片岩相变质作用,露头表现为灰—灰绿色,块状,局部残留有枕状构造,显微结构具鳞片粒状变晶结构;而鸚鵡咀一带则主要经历了高绿片岩相变质作用,甚至达角闪岩相,露头主要为灰绿—深灰绿色斜长角闪岩和糜棱岩,具粒状—纤柱状变晶结构和碎裂结构,片状构造,主要组成矿物为角闪石、斜长石和少量绿帘石、阳起石等,具较强的定向排列,裂隙内普遍发育后期的方解石脉。混杂岩带内的辉长岩尽管发生了不同程度的韧性剪切变形作用,但仍残留有完好的辉长辉绿结构;主要矿物为斜长石(45%~50%)、角闪石(30%~35%)、石英(15%~20%),少量钾长石和黝帘石,强烈地定向排列。

蛇纹岩呈灰绿—深绿色,块状,具显微鳞片变晶结构、变余半自形粒状结构和片状构造,主要由蛇纹石组成(60%~70%),通常发生透闪石化和碳酸盐化,残余少量辉石和橄榄石(25%~30%);副矿物主要为磁铁矿(3%~4%)。蛇纹石化残斑晶具半自形粒状及短柱状晶形轮廓,原生矿物为辉石。蛇纹石多呈显微鳞片状及纤柱状,定向平行绕残斑分布,形成糜棱结

构及片状构造。

薄层硅质岩表现为深灰—黑灰色,厚度多为3~5 cm,岩石具隐晶质结构,块状构造,颗粒0.001 mm,主要矿物为隐晶质石英。此外,在岩湾混杂岩带内的枕状玄武岩之间可见浅灰绿色纹层状凝灰质硅质岩,厚度通常为2~3 cm。

云母石英片岩为灰—浅灰色,残余变粒结构,块状构造;主要矿物除了斜长石、钾长石、石英外,绢云母和绿泥石十分丰富。其原岩可能为粉砂质泥岩或凝灰质砂岩,具有复理石特征。

1.3 蛇绿混杂岩中超镁铁质—镁铁质岩石的地球化学特征

岩湾-鸚鵡咀蛇绿混杂岩中的蛇纹岩、辉长岩的化学成分见表1。其中蛇纹岩(变质橄榄岩)的化学成分相对稳定, SiO_2 含量介于37.44%~41.22%之间,显示富Mg、贫Al、Ca和碱的地球化学特征, $\text{Mg}^\#$ 值变化于98.02~98.80之间。在 Al_2O_3 -CaO-MgO和 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{FeO}-\text{MgO}$ 图解(图3)中,全部落入变质橄榄岩(阿尔卑斯型橄榄岩)区,表明是以纯橄榄岩和方辉橄榄岩为主的岩石类型^[18]。Cr、Ni、Co含量较高, ΣREE 含量低($0.07\times 10^{-6}\sim 0.89\times 10^{-6}$),LREE/HREE比值为0.47~1.24, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 介于0.49~2.42之间, $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 介于0.99~5.27之间,显示出轻、重稀土元素分馏作用不明显的平坦型分布曲线;Eu呈正异常(δEu 为1.02~

表1 岩湾-鸚鵡咀蛇绿混杂岩主量元素、微量元素和稀土元素的含量

Table 1 Contents of major, trace and rare earth elements of the Yanwan-Yinggezui ophiolitic mélange

编号 岩石 位置	TB1	TB2	TB3	TB4	TB5	TB9	TB10	TB11	TB12	dz3	TB6	TB8	dz1	dz2
	蛇纹岩 岩湾							辉长岩 岩湾	辉石岩 鸚鵡咀	安山岩 岩湾	玄武岩 鸚鵡咀			
SiO ₂	37.76	37.44	39.47	40.09	39.73	41.52	40.63	42.61	42	40.22	56.1	57.6	51.61	48.91
TiO ₂	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.32	0.36	0.03	0.23	0.61	0.83	1.75
Al ₂ O ₃	0.14	0.15	0.88	0.34	0.49	0.37	0.68	15.67	15.9	1.05	17.4	16.15	17	12.88
FeO	1.2	1.1	1	0.82	0.95	1.42	1.22	14.2	14	1.42	6.25	6.7	5.52	9.3
Fe ₂ O ₃	6.92	7.01	6.43	6.01	6.49	5.55	6.48	1.97	1.66	6.59	2.12	1.56	2.05	3.28
MnO	0.1	0.09	0.06	0.06	0.08	0.06	0.06	0.17	0.16	0.08	0.13	0.09	0.11	0.21
MgO	37.88	37.78	38.8	39.12	38.31	39.1	38.6	7.64	8.47	37.23	4.47	4.28	6	6.48
CaO	2.2	2.06	0.37	0.44	0.74	0.11	0.08	9.74	8.16	0.71	7.25	2.87	10.64	9.29
Na ₂ O	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.03	0.07	3.95	3.94	0.19	3.76	3.62	3.62	2.87
K ₂ O	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.25	0.18	0.14	0.18	1.92	0.16	0.41
P ₂ O ₅	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.07	0.06	0.02	0.08	0.29	0.28	0.18
灼失	14.11	13.96	12.69	12.8	13.11	12.17	12	1.79	3.02	12.48	1.11	4.24	1.34	3.42
总量	100.36	99.64	99.75	99.74	99.97	100.36	99.85	98.38	98.00	100.2	99.1	99.93	99.16	98.98
Sr	53.23	110.3	59.5	0.49	18.04	2.19	3.43	153.4	185	18	317	601.1	309.8	114
Rb	0.74	0.22	0.05	0.01	0.05	0.2	0.08	5.79	7.5	5	3.46	63.12	184.1	13
Ba	7.98	4.19	1.81	0.53	3.67	1.91	2.61	43.97	41.7	38	37.6	91.57	112.2	141
Th	0.06	0.05	0.03	0.001	0.005	0.05	0.02	0.02	0.03		0.37	7.95	16	2
Ta	0.04	0.03	0.004	0.001	0.004	0.009	0.008	0.02	0.03		0.08	0.36	1	
Nb	0.24	0.24	0.03	0.005	0.04	0.18	0.1	0.3	0.36	2	0.5	5.73	4.4	6
Ce	0.25	0.12	0.12	0.009	0.07	0.12	0.09	1.79	1.64	2.12	3.67	40.34	131.6	18.4
Zr	0.5	0.26	0.42	0.01	0.16	0.31	0.72	8.79	10.7	6	24	78.3	76.6	103
Hf	0.01	0.01	0.014	0.001	0.002	0.005	0.025	0.39	0.44		0.9	1.97	4.6	
Sm	0.03	0.01	0.01	0.001	0.01	0.01	0.02	0.7	0.74	0.74	1.01	3.93	6.8	4.32
Y	0.18	0.12	0.21	0.01	0.23	0.13	0.2	5.2	5.45	1.26	6.24	19.16	22.5	36.4
Yb	0.03	0.02	0.04	0.003	0.03	0.02	0.04	0.61	0.62	0.48	0.64	1.84	2.04	4.69
Sc	4.39	4.27	7.95	0.001	6.93	5.24	6.42	85.86	84.9	5.9	39.5	28.38	20.9	54
Cr	3257	4571	1786	283.2	2421	1947	2247	19.33	18.3	2254	45.3	85.09	127.1	198
La	0.11	0.05	0.08	0.01	0.04	0.05	0.03	0.57	0.47	1.38	1.21	20.6	56.6	8.38
Ce	0.25	0.12	0.12	0.01	0.07	0.12	0.09	1.79	1.64	2.07	3.76	40.31	131.6	18.4
Pr	0.03	0.02	0.02	0.001	0.01	0.01	0.01	0.33	0.33	0.2	0.61	5.08	10.2	3.4
Nd	0.13	0.06	0.06	0.01	0.03	0.05	0.05	0.92	0.91	0.56	3.03	18.97	47.1	14.9
Sm	0.03	0.01	0.01	0.001	0.01	0.01	0.02	0.7	0.74	0.17	1.01	3.93	6.8	4.32
Eu	0.01	0.01	0.01	0.001	0.01	0.01	0.01	0.26	0.25	0.04	0.32	1.07	2.67	1.66
Gd	0.03	0.01	0.02	0.001	0.02	0.01	0.02	0.81	0.84	0.22	1	3.46	5.49	6.26
Tb	0.01	0.01	0.01	0.001	0.01	0.01	0.01	0.15	0.16	0.03	0.18	0.51	1.05	1.14
Dy	0.03	0.01	0.03	0.01	0.03	0.02	0.03	0.9	0.92	0.19	0.99	2.86	6.82	8.05
Ho	0.01	0.01	0.01	0.001	0.01	0.01	0.01	0.2	0.2	0.04	0.21	0.62	1.09	1.73
Er	0.02	0.01	0.02	0.001	0.02	0.01	0.02	0.51	0.53	0.1	0.55	1.68	2.33	5.2
Tm	0.01	0.01	0.01	0.001	0.01	0.01	0.01	0.08	0.09	0.02	0.09	0.26	0.39	0.76
Yb	0.03	0.02	0.04	0.01	0.03	0.02	0.04	0.61	0.62	0.12	0.64	1.84	2.04	4.69
Lu	0.01	0.01	0.01	0.001	0.01	0.01	0.01	0.09	0.1	0.03	0.11	0.29	0.46	0.67
Y	0.18	0.12	0.21	0.01	0.23	0.13	0.2	5.2	5.45	1.26	6.24	19.16	22.5	36.4
ΣREE	0.89	0.48	0.66	0.07	0.54	0.48	0.56	13.12	13.3	6.43	20	120.6	297.1	115.96
(La/Yb) _N	2.42	1.65	1.32	0.66	0.88	1.45	0.49	0.62	0.5	7.58	1.25	7.37	18.28	1.18
(La/Sm) _N	2.23	3.04	5.27	4.87	2.63	3.29	0.99	0.5	0.39	5.45	0.73	3.19	5.06	1.18
δEu	1.02	3.05	2.4	3.05	2.14	0.88	3.05	1.53	1.06	1.31	0.99	0.98	0.61	0.88

注:主量元素为%;微量和稀土元素为 10⁻⁶

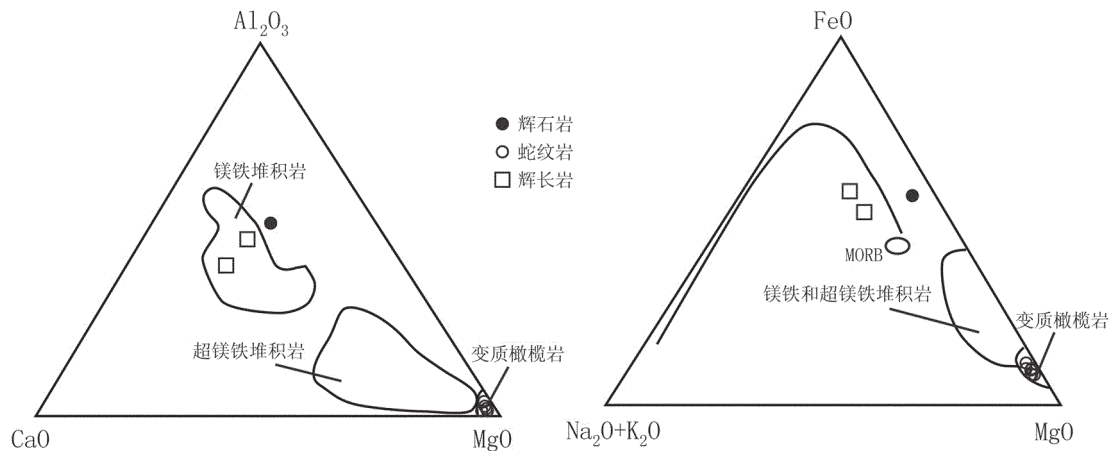


图3 超镁铁—镁铁质岩石的ACM和AFM图解

Fig.3 ACM and AFM diagrams of ultramafic-mafic rocks

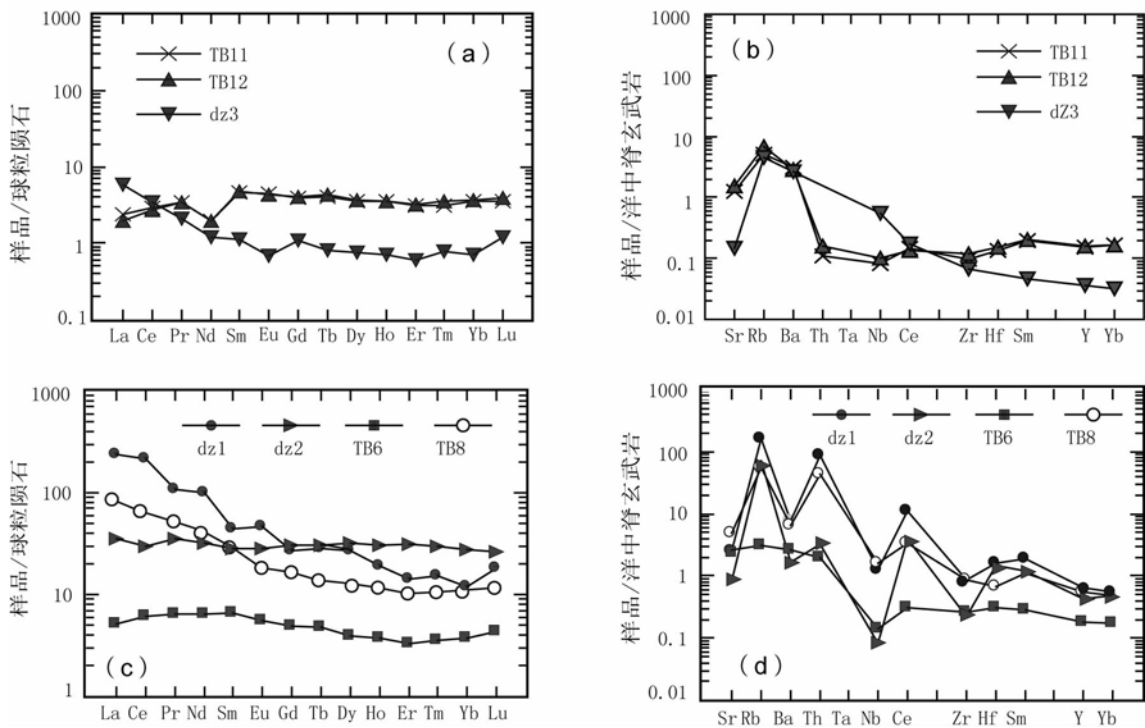


图4 岩湾-鸚鵡咀蛇綠混雜岩中鎂鐵質岩石和中基性火山岩的稀土元素和微量元素配分曲線

Fig.4 Chondrite-normalized REE and N-MORB-normalized trace element distribution patterns for mafic rocks and intermediate-basic volcanic rocks of the Yanwan-Yinggezui ophiolitic mélange

3.05)。这些特征表明这些超镁铁质岩属于与蛇纹岩有关的超镁铁质岩石^[19]。与原始地幔岩石相比,微量元素相对亏损;而与MORB相比,仅有不相容元素Sr、Rb、Th、Ba强烈富集。在Nb-Zr和Y-Zr图解中,分析样品的投影点落入原始地幔与亏损地幔的过

渡区。这些特征与世界上大多数蛇纹岩组合的地幔橄榄岩相似。

2个辉长岩和1个辉石岩样品的SiO₂含量分别为42.00%、42.61%和40.22%;该辉石岩样品的Mg[#]值高(97.90)。在Al₂O₃-CaO-MgO和Na₂O+K₂O-FeO-

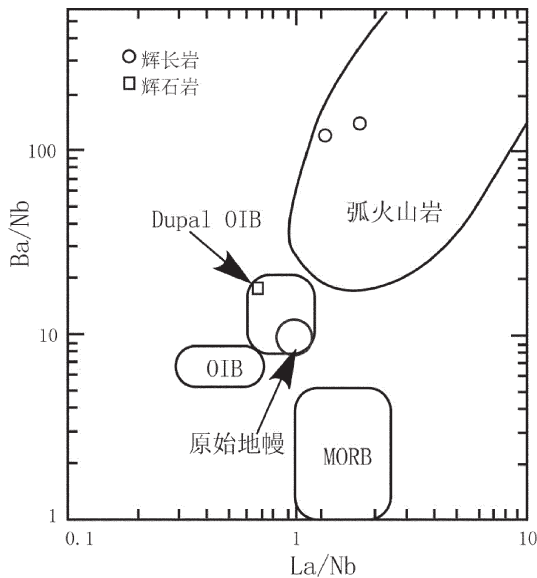


图5 镁铁—超镁铁质岩石的形成构造环境 Ba/Nb-La/Nb判别图解

Fig.5 Ba/Nb vs. La/Nb tectonic setting discrimination diagrams for the formation of mafic-ultramafic rocks

MgO图解(图3)中,样品投点分别落入镁铁质堆积岩区内及外侧,表明其属于蛇绿岩中的镁铁质堆积岩^[8]。岩石的 Σ REE含量明显高于变质橄榄岩,为 $6.43 \times 10^{-6} \sim 13.30 \times 10^{-6}$;辉石岩的LREE/HREE比值为7.58, $(La/Yb)_N$ 为7.58, $(La/Sm)_N$ 为5.45,显示LREE富集、HREE亏损并具有弱的负Eu异常(δEu 为0.61)的稀土元素配分曲线;而辉长岩的LREE/HREE比

值为0.50~0.62, $(La/Yb)_N$ 为0.50~0.62, $(La/Sm)_N$ 介于0.39~0.50之间,显示平坦型并具有弱的正或负Eu异常(δEu 为0.98~1.06)的稀土元素配分曲线(图4-a)。与原始地幔相比,大离子亲石元素Sr、Rb、Ba相对富集,Nb和Ti相对亏损(图4-b)。在Ba/Nb-La/Nb形成环境图(图5)上,2个辉长岩样品的投点均落入火山弧及麻粒岩区域,辉石岩落入洋岛辉长岩区域内^[20]。这些特征表明,辉石岩样品来自地幔,而辉长岩样品则是与大洋板块消减作用密切相关的弧火山岩。

1.4 蛇绿混杂岩中基性火山岩的地球化学特征及其构造环境

基性火山岩和中性火山岩的地球化学分析结果见表1。这两类火山岩分别为玄武岩和安山岩。其中玄武岩的SiO₂含量为48.91%~51.61%;TiO₂含量较低(0.83%~1.75%,平均1.29%),介于MORB(平均1.50%)和岛弧玄武岩之间(平均0.80%);MgO含量中等(6.00%~6.48%),相应的Mg[#]值变化于55.64~66.20之间,且FeO>Fe₂O₃;K₂O和P₂O₅含量低,分别为0.16%~0.41%和0.18%~0.28%。安山岩的SiO₂含量为56.10%~57.60%;TiO₂含量低(0.23%~0.61%,平均0.42%);MgO含量中等(4.28%~4.47%),相应的Mg[#]值变化于53.50~56.00之间,且FeO>Fe₂O₃;K₂O和P₂O₅含量低,分别为0.18%~1.92%和1.11%~4.24%。

2个玄武岩样品的稀土元素配分曲线分别表现为平坦型和右倾型(图4-c), Σ REE的含量高,分别为 115.96×10^{-6} 和 297.10×10^{-6} ,LREE/HREE分别为

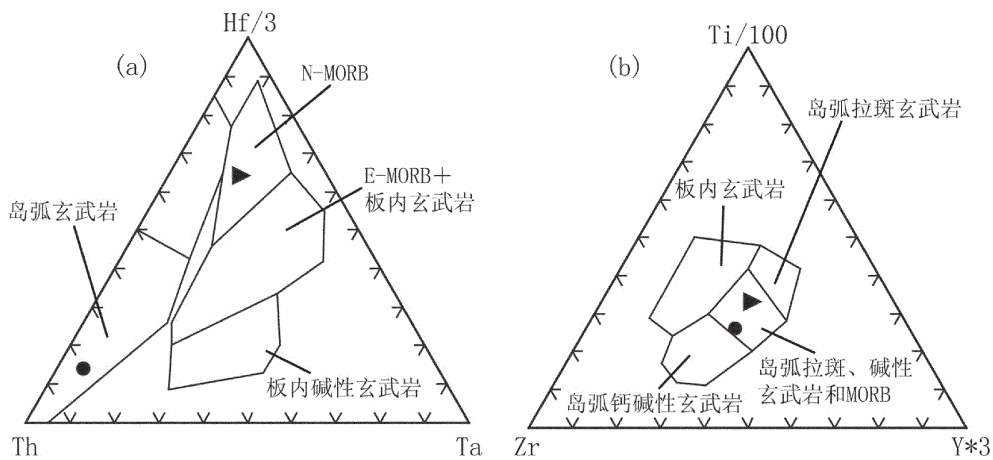


图6 岩湾-鸚鵡咀蛇绿混杂岩中玄武岩的构造环境判别图

Fig.6 Tectonic setting discrimination diagrams for basalts in the Yanwan-Yinggezui ophiolitic mélangé

0.79和6.05, $(La/Yb)_N$ 分别为1.18和18.28, $(La/Sm)_N$ 分别为1.18~5.06, 无明显的正或负Eu异常, 显示出E-MORB的特征^[2]。微量元素的MORB标准化分布图(图4-d)具有与洋脊拉斑玄武岩相似的特征, 表现为大离子亲石元素丰度低、高场强元素不分异, 类似于富集型洋中脊玄武岩(E-MORB)的特征。在Ti-Zr-Y图解(图6-b)中, 样品投点落入岛弧拉斑、钙碱性玄武岩和MORB叠合区内, 而在Hf-Th-Ta图解(图6-a)中全部落入N-MORB和板内玄武岩重合区内。这表明该玄武岩样品属于N-MORB型玄武岩。

2个安山岩样品的微量元素含量与克拉克维氏值相比较, 普遍富集。Th和La的含量分别为 7.95×10^{-6} 和 20.6×10^{-6} , Zr/Y和Hf/Yb比值分别为4.09和0.1, LREE/HREE为0.98~2.93, 呈现右倾型-平坦型稀土配分曲线, 这些特征与岛弧安山岩的特征十分相似。

这些特征表明, 岩湾-鸚鹄咀地区蛇绿混杂岩带内的玄武岩和安山岩总体分别属于洋脊和岛弧火山岩组合。

2 蛇绿混杂岩中基性火山岩的锆石SHRIMP U-Pb同位素年龄

2.1 样品采集和分析方法

样品采自凤县岩湾蛇绿混杂岩(GPS坐标: $34^{\circ}00.924'$ 、 $106^{\circ}58.212'$)中相对新鲜且蚀变相对较弱的玄武岩(60 kg, 样品号D07-1TW), 室内经人工破碎至80目, 按常规方法进行锆石分选, 在双目镜下挑选无包裹体、无裂纹、透明度好的单颗粒锆石作为测试对象。然后, 将选好的单颗粒锆石置于环氧树脂中, 待固结后抛磨至锆石粒径的大约1/2, 使锆石内部充分暴露, 然后通过锆石的阴极发光(CL)图像(图7)研究锆石的内部结构特征, 以便于进行锆石SHRIMP U-Pb年龄测试。

锆石U-Pb同位素测年在北京离子探针中心利用SHRIMP-II仪器进行测试, 详细的分析流程见刘敦一等^[23]的文献。测试过程中利用澳大利亚国家地质调查局的标准锆石TEM进行元素间的分馏校正, 同时用澳大利亚国立大学地学院的标准锆石SL13(572Ma , $U=238 \times 10^{-6}$)标定样品的U、Th和Pb的含量。数据处理采用Isoplot软件, 普通Pb由实测 ^{204}Pb 校正。所有测点的误差均为 2σ , 所采用的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄具95%的置信度。

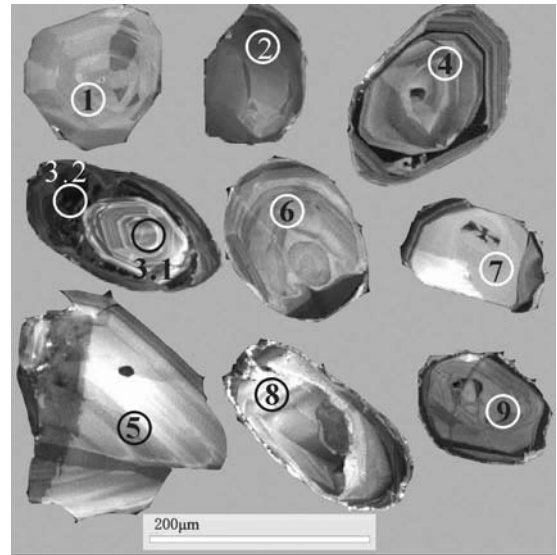


图7 岩湾-鸚鹄咀蛇绿混杂岩玄武岩中锆石的阴极发光图像

Fig.7 Cathodoluminescence images of zircons from basalts of the Yanwan-Yinggezui ophiolitic mélange

2.2 锆石的特征

锆石CL图像在中国地质科学院北京离子探针中心完成。锆石反射光、透射光光学特征和CL图像的研究结果表明, 锆石测试样品总体表现为无色、淡黄色, 短柱状, 透明的自形—半自形晶, 具有清晰的振荡环带构造(图7)。其中, D07-1TW-3锆石具明显的核幔结构, 核部图像较明亮, 振荡环带清晰, Th含量较高, $Th/U=0.65$; 边部呈暗色不规则环带状, $Th/U=0.02$, Th含量较低, 此粒锆石总体具有继承性岩浆锆石的成因特征。D07-1TW-9锆石环带清楚, 边部有明亮的变质边, 为继承性岩浆锆石; D07-1TW-5为连生岩浆锆石, 其余所测锆石晶体大小介于 $(82 \times 129) \sim (254 \times 129) \mu\text{m}$ 之间, 长宽比介于1.1~2之间; D07-1TW-3、D07-1TW-9点的Th/U分别为0.08、0.02, 其余各点的Th/U大于0.7, 呈现岩浆成因锆石的特征。

2.3 测试结果

样品D07-1TW中9粒锆石的U-Pb测试结果见表2, 单个数据点的误差均为 1σ 。在锆石U-Pb谐和曲线图(图8)上, 2粒锆石(编号3、9)为继承性锆石, 具有清晰的核幔结构和明亮的变质边, 对其边部的测试结果表明, U含量较高, Th/U比值变化大

表2 岩湾-鸚鵡咀蛇绿混杂岩内玄武岩的锆石SHRIMP U-Pb年龄分析结果

Table 2 Analytic results of zircon SHRIMP U-Pb ages of basalts from the Yanwan-Yinggezui ophiolitic mélange

分析点	U /10 ⁻⁶	Th /10 ⁻⁶	²⁰⁶ Pb /%	²³² Th / ²³⁸ U	²⁰⁶ Pb* /10 ⁻⁶	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U 年龄/Ma	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb 年龄/Ma	1σ	²⁰⁷ Pb* / ²⁰⁶ Pb*	1σ	²⁰⁷ Pb* / ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb* / ²³⁸ U	1σ
TW-1	207	185	0.27	0.92	12.6	439	13	1007	110	0.0727	5.6	0.707	6.3	0.0705	3.0
TW-2	668	53	0.30	0.08	46.2	498	14	532	67	0.0581	3.1	0.642	4.2	0.0802	2.8
TW-3.1	248	157	0.10	0.65	98.6	2,445	60	2528	13	0.1670	0.76	10.62	3.0	0.461	2.9
TW-3.2	1964	42	0.01	0.02	752	2,377	55	2283.5	5.0	0.14464	0.29	8.89	2.8	0.446	2.7
TW-4	165	114	0.99	0.71	11.4	494	14	973	110	0.0716	5.3	0.786	6.1	0.0796	3.0
TW-5	199	179	0.80	0.93	12.6	455	22	1553	75	0.0962	4.0	0.971	6.5	0.0732	5.1
TW-6	142	101	2.30	0.73	9.67	482	15	1648	220	0.101	12	1.08	12	0.0777	3.2
TW-7	141	113	1.05	0.83	9.51	483	16	1329	110	0.0856	5.7	0.918	6.6	0.0778	3.4
TW-8	167	163	0.86	1.01	11.1	478	14	1078	120	0.0753	6.1	0.799	6.8	0.0769	3.0
TW-9	167	81	0.23	0.50	43.0	1,685	43	1825	26	0.1115	1.4	4.59	3.2	0.2988	2.9

注: ²⁰⁶Pb 为普通 Pb; Pb* 为放射性成因 Pb; 普通 Pb 校正采用 ²⁰⁴Pb

(0.02~0.65), 年龄分散不集中。其余7粒锆石具有清晰的振荡环带, 呈现出岩浆锆石的结构特征, 除测点D07-1TW-2.1的测年数据值较低外, 其余6个测点聚集在谐和线上及其附近很小的区域范围内, 其²⁰⁶Pb/²³⁸U加权平均年龄为483 Ma±13 Ma, 与各测点的²⁰⁶Pb/²³⁸U表面年龄近于一致, 可能代表了锆石的形成年龄。

3 讨论

岩石学和地球化学研究结果表明, 岩湾-鸚鵡咀蛇绿混杂岩中的超镁铁质岩石由纯橄榄岩和方辉橄榄岩组成, 具有亏损地幔与原始地幔过渡类型的特征, 属于大洋中脊岩石的组成部分; 玄武岩和安山岩分别具有N-MORB和岛弧安山岩的特征; 辉石岩和辉长岩则分别为与洋岛和岛弧相关的岩石组成。这些不同构造属性的岩石与硅质岩、变砂泥质复理石(绢云母石英片岩)和秦岭群含石墨大理岩在空间上以构造岩块(片)的形式相互共存, 其间均为断层接触。其中, 岩湾蛇绿混杂岩显示了以出露代表洋壳的岩石组合为主和岛弧环境岩石为辅的组合特征, 而鸚鵡咀蛇绿混杂岩则表现了以出露岛弧环境为主洋壳组成为辅的岩石组

合特征。

岩湾-鸚鵡咀蛇绿混杂岩中的玄武岩锆石SHRIMP U-Pb年龄数据与商丹蛇绿混杂岩带西段关子镇、武山蛇绿混杂岩的形成年龄471 Ma±1.4 Ma^[17]、457 Ma±3 Ma^[23], 东段丹凤蛇绿混杂岩奥陶纪放射虫化石^[12]和其中浅色侵入岩的锆石SHRIMP

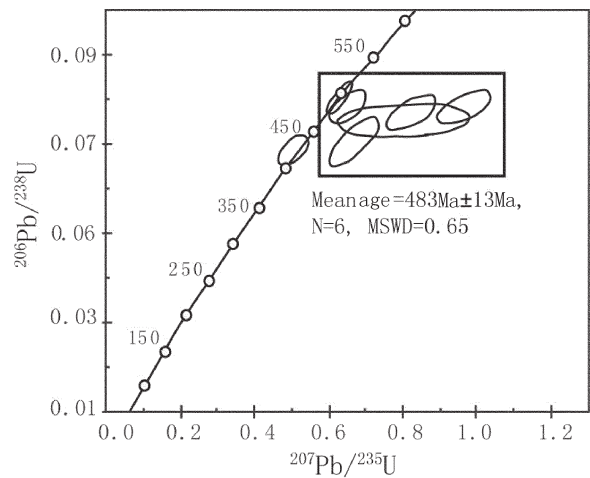


图8 玄武岩锆石SHRIMP U-Pb年龄谐和图

Fig.8 SHRIMP U-Pb concordia diagram for zircons from basalts of the Yanwan-Yinggezui ophiolitic mélange

U-Pb年龄 $442\text{ Ma}\pm 7\text{ Ma}$ ^[24]在误差范围内基本一致。这些年龄数据进一步表明, 商丹蛇绿混杂岩带中普遍存在有代表早古生代(奥陶纪, 450~498 Ma)洋壳的岩石组合单元, 同时也显示在秦岭造山带内存在有早古生代的大洋残迹。横向上, 岩湾-鸚鵡咀蛇绿混杂岩与武山、关子镇、丹凤蛇绿混杂岩共同构成一条断续出露于秦岭造山带内部的早古生代蛇绿混杂岩带。纵向上, 在该蛇绿混杂岩带的北侧发育有以四方台-垃圾庙苏长-辉长岩^[8]、富水杂岩体^[25-26]、天水关子镇流水沟变质中基性岩浆杂岩^[16]、凤县唐藏-红花铺一带石英闪长岩^[27]、英云闪长岩^[28]等为代表的早古生代增生岩浆弧。在该岛弧地体的北侧发育有以奥陶纪-泥盆纪^[29-30]二郎坪群为代表的弧后盆地^[31]。

此外, 在北秦岭南缘发育大量晚古生代的花岗岩, 其地球化学和同位素年代学研究结果表明, 这些花岗岩为与俯冲作用密切相关的钙碱性弧花岗岩, 其时代为 410 Ma ^[32-36]。对沉积环境、物源及盆地构造环境的综合研究结果表明, 位于商丹蛇绿混杂岩带南侧的泥盆系为一套与这些增生岩浆弧岩石的发展密切相关的沉积^[37-38], 且在该弧前盆地南侧沿着西乡-石泉-白水江一带发育晚古生代(泥盆纪-石炭纪)的增生楔^[38-40]。同时, 古生物化石的时代^[30]表明, 以二郎坪群为代表的弧后盆地沉积可以持续到泥盆纪。

这些数据进一步表明, 秦岭造山带存在有多期俯冲-增生造山作用。其中商丹蛇绿混杂岩带是早古生代俯冲-增生造山作用的产物和记录, 分布于其南北两侧的晚古生代增生楔、增生岩浆弧与其间的弧前盆地则是晚古生代增生造山作用的记录。因此, 分布于东、西秦岭过渡部位的岩湾-鸚鵡咀蛇绿混杂岩带虽然经历了造山后期构造作用的强烈改造, 但仍客观地记录了秦岭早古生代俯冲增生造山作用在这一结合部位的存在, 该混杂岩带的岩石组合特征及形成时代的厘定为进一步研究东、西秦岭造山作用的历史和商丹蛇绿混杂岩带的向西延伸提供了重要的基本地质依据。

致谢: 野外工作得到陕西省区域地质矿产研究院陈家义、李海平、张占武、陈有仓、陈永杰和赵选社工程师的大力支持, 同时得到中国科学院地质与地球物理研究所李继亮研究员和西北大学孙勇教授的指导, 成文过程中得到中国地质科学院地质研究所

闫臻博士和西安地质矿产研究所孙吉明研究生的帮助, 在此一并深表谢意。此外, 审稿人对本文提出了富有建设性的修改意见, 深表谢意!

参考文献:

- [1] 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 450-581.
- [2] 张宗清, 张国伟, 刘敦一, 等. 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[M]. 北京: 地质出版社, 2006: 9-174.
- [3] 张国伟, 于在平, 孙勇, 等. 秦岭商丹断裂边界地质体基本特征及其演化[C]//张国伟, 等. 秦岭造山带的形成及其演化. 西安: 西北大学出版社, 1988: 29-47.
- [4] 张国伟, 周鼎武, 郭安林, 等. 北秦岭商丹地区“秦岭群”的构成及其变形变质特征[C]//张国伟, 等. 秦岭造山带的形成及其演化. 西安: 西北大学出版社, 1988: 99-115.
- [5] 肖思云, 张维吉, 宋子季, 等. 北秦岭变质地层(上卷)[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988: 29-138.
- [6] 孙勇, 于在平, 张国伟. 东秦岭蛇绿岩的地球化学[C]//张国伟, 等. 秦岭造山带的形成及其演化. 西安: 西北大学出版社, 1988: 65-74.
- [7] 薛峰, 张国伟. 秦岭造山带丹凤变质岛弧火山岩系的岩石组合与地球化学特征[J]. 地球化学, 1993, (1): 80-92.
- [8] 李曙光, 陈移之, 张宗清, 等. 北秦岭垃圾庙苏长辉长岩的痕量元素和Sr、Nd同位素地球化学[J]. 地质学报, 1993, 67(4): 310-321.
- [9] 张宗清, 刘敦一, 付国民. 北秦岭变质地层同位素年代研究[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 145-161.
- [10] 张成立, 周鼎武, 韩松. 陕西商州地区丹凤变质火山岩的地球化学特征[J]. 地质科学, 1994, 29(4): 384-292.
- [11] 张旗, 张宗清, 孙勇, 等. 陕西商县-丹凤地区丹凤群变质玄武岩的微量元素和同位素地球化学[J]. 岩石学报, 1995, 11(1): 43-54.
- [12] 崔智林, 孙勇, 王学仁. 秦岭丹凤蛇绿岩带放射虫的发现及其地质意义[J]. 科学通报, 1995, 40(18): 1686-1688.
- [13] 孟庆任, 于在平, 梅志超. 北秦岭南缘弧前盆地沉积作用及盆地发展[J]. 地质科学, 1997, 32(2): 136-145.
- [14] 杨军录, 冯益民, 潘晓平. 武山蛇绿岩的特征、同位素年代及其地质意义[J]. 前寒武纪研究进展, 2001, 24(2): 98-106.
- [15] 裴先治, 丁仁平, 胡波, 等. 西秦岭天水地区关子镇蛇绿岩的厘定及其地质意义[J]. 地质通报, 2004, 23(12): 1202-1208.
- [16] 裴先治, 李勇, 陆松年, 等. 西秦岭天水地区关子镇中基性岩浆杂岩体锆石U-Pb年龄及其地质意义[J]. 地质通报, 2005, 24(1): 23-29.
- [17] 杨钊, 董云鹏, 柳小明, 等. 西秦岭天水地区关子镇蛇绿岩锆石LA-ICP-MS U-Pb定年[J]. 地质通报, 2006, 25(11): 1321-1325.
- [18] Coleman R. G. Ophiolites: ancient oceanic lithosphere[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1977.
- [19] Henderson P. General geochemical properties and abundances of the rare earth elements[C]// Henderson P. Rare Earth Element Geochemistry. Elsevier, Amsterdam, 1984: 1-32.
- [20] Jahn B M, Wu F, Lo C-H, et al. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic intru-

- sions of the northern Dabie complex, central China [J]. *Chemical Geology*, 1999, 157:119-146.
- [21] Frey F A, Haskin M A, Poetz J A, et al. Rare earth abundances in some basic rocks[J]. *J. Geophys. Res.*, 1968, 73:6085-6098.
- [22] 刘敦一, 简平, 张旗, 等. 内蒙古图林凯蛇绿岩中埃达克岩SHRIMP测年: 早古生代洋壳消减的证据[J]. *地质学报*, 2003, 77(3): 317-327.
- [23] 李王晔, 李曙光. 西秦岭和东昆仑早古生代岩浆事件的锆石SHRIMP U-Pb定年[C]//2005年全国岩石学与地球动力学研讨会论文摘要. 2005:239-400.
- [24] 闫全人, 陈隽璐, 王宗起, 等. 北秦岭小王洞枕状熔岩中淡色侵入岩的地球化学特征、SHRIMP年龄及地质意义[J]. *中国科学(D辑)*, 2007, 37(10):1301-1313.
- [25] 董云鹏, 周鼎武, 张国伟. 东秦岭富水基性杂岩体地球化学特征及其形成环境[J]. *地球化学*, 1997, 16(3):231-238.
- [26] 陈志宏, 陆松年, 李怀坤, 等. 秦岭造山带富水中基性侵入杂岩的成岩时代——锆石U-Pb及全岩Sm、Nd同位素年代学新证据[J]. *地质通报*, 2004, 23(4):322-328.
- [27] 陈隽璐, 徐学义, 王洪亮, 等. 北秦岭西段唐藏岩体形成时代及地质意义[J]. *现代地质*, 2008, 22(1): 45-52.
- [28] 王洪亮, 何世平, 陈隽璐, 等. 北秦岭西段红花铺俯冲型侵入体LA-ICP-MS定年及其地质意义[J]. *现代地质*, 2006, 20(4):536-544.
- [29] 王学仁, 华洪, 孙勇. 河南西峡湾潭地区二郎坪群微体化石研究[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 1995, 25(4):353-358.
- [30] 高联达, 王宗起, 王涛, 等. 河南西峡地区二郎坪群火神庙组中发现泥盆纪孢子化石[J]. *地质通报*, 2006, 25(11):1287-1294.
- [31] 孙勇, 卢欣祥, 韩松, 等. 北秦岭早古生代二郎坪群蛇绿岩片的组成和地球化学[J]. *中国科学(D辑)*, 1996, 26(supp):49-55.
- [32] Lerch M F, Xue F, Kroner A, et al. A middle Silurian-early Devonian magmatic arc in the Qinling Mountains of central China [J]. *Journal of Geology*, 1995, 103:437-449.
- [33] Xue F, Lerch M F, Kroner A, et al. Tectonic evolution of the east Qinling Mountains, China, in the Paleozoic: a review and new tectonic model[J]. *Tectonophysics*, 1996, 253:271-284.
- [34] Zhang H-F, Gao S, Zhang B-R, et al. Pb isotopes of granitoids suggest Devonian accretion of Yangtze (South China craton to North China craton)[J]. *Geology*, 1997, 25:1015-1018.
- [35] Zhang H-F, Zhang B-R, Harris N. U-Pb zircon SHRIMP ages, geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of intrusive rocks from the Longshan-Tianshui area in the southeast corner of the Qilian orogenic belt, China: Constraints on petrogenesis and tectonic affinity[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2006, 27:751-764.
- [36] Zhai X, Day H W, Hacker B R, et al. Paleozoic metamorphism in the Qinling orogen, Tongbai Mountains, central China[J]. *Geology*, 1998, 26:371-374.
- [37] Yan Z, Wang Z Q, Wang T, et al. Provenance analysis and tectonic setting of the clastic deposits of the Xicheng Basin in the Qinling orogen, central China[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2006, 76:557-574.
- [38] Yan Z, Wang Z Q, Yan Q R, et al. Devonian Sedimentary environments and provenances of the Qinling orogen: Constraints on Late Paleozoic southward accretion of the North China craton [J]. *International Geology Review*, 2006, 48:585-618.
- [39] 王宗起, 陈海泓, 郝杰南. 秦岭晚古生代—三叠纪弧前增生楔的初步认识[C]//陈海泓, 等. 中国碰撞造山带研究. 北京:海洋出版社, 1999:100-113.
- [40] 王宗起, 王涛, 闫臻, 等. 秦岭晚古生代弧前增生的背驮型盆地体系[J]. *地质通报*, 2002, 21(8/9):456-464.