

勉略缝合带三岔子辉绿岩墙锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素组成 ——古特提斯洋壳俯冲的年代学证据

赖绍聪^{1,2}, 秦江锋^{1,2}

(1. 西北大学 大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069; 2. 西北大学 地质学系, 陕西 西安 710069)

摘要: 为了弄清楚勉略构造带中三岔子岛弧火山岩的形成时代及源区特征, 对南秦岭勉略缝合带三岔子岛弧蛇绿混杂岩中的辉绿岩墙样品进行了锆石 U-Pb 年代学、锆石 Hf 同位素组成及微量元素组成研究。结果表明, 三岔子辉绿岩中的锆石主要包括 2 个年龄区间: 有 8 颗锆石记录古生代年龄信息, 其 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 年龄为 264~487 Ma, $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 为 0.4~0.8, 其中有 6 颗锆石的 $N(^{176}\text{Hf})/N(^{177}\text{Hf})$ 初始值为 0.281 934~0.282 292, 对应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -9.4~-16.4, 为典型的壳源岩浆锆石, 另外 2 个测点(BQG-014, BQG-021)的 $N(^{176}\text{Hf})/N(^{177}\text{Hf})$ 为 0.282 722~0.282 798, 对应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 4.5~6.3, 为典型的幔源岩浆锆石; 有 15 颗锆石记录了元古代-太古代的年龄信息, $N(^{207}\text{Pb})/N(^{206}\text{Pb})$ 年龄主要为 1 713~2 559 Ma, $N(^{176}\text{Hf})/N(^{177}\text{Hf})$ 初始值为 0.281 288~0.282 263, 对应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -1.3~8.7, 绝大部分锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值大于 2, 显示出幔源岩浆锆石的特征。根据锆石 Hf 同位素组成, BQG-014 和 BQG-021 样品为典型的幔源岩浆锆石, 因此, 其形成年龄(264~295 Ma)应代表了勉略洋消减过程中一次重要的大陆弧岩浆作用时间。

关键词: 锆石; U-Pb 定年; Hf 同位素; 勉略洋; 岛弧; 三岔子

中图分类号: P588.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2010)01-0027-07

Zircon U-Pb Dating and Hf Isotopic Composition of the Diabase Dike Swarm from Sanchazi Area, Mianlue Suture ——Chronology Evidence for the Paleo-Tethys Oceanic Crust Subduction

LAI Shao-cong^{1,2}, QIN Jiang-feng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China;

2. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China)

Abstract In order to make it clear that the formation age and source region of Sanchazi island arc volcanic rocks from the Mianlue suture, Zircon U-Pb dating, Hf isotopic composition and trace element concentration on the Diabase dike swarm collected from island-arc ophiolitic mélange in Mianlue suture, south Qinling are studied. The result indicates two time periods of the zircon U-Pb ages. There are eight zircons recording the Paleozoic U-Pb ages, six of them are typical crust originated magmatic, $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})=264\sim 487\text{ Ma}$, $w(\text{Th})/w(\text{U})=0.4\sim 0.8$, $N(^{176}\text{Hf})/N(^{177}\text{Hf})=0.281\ 934\sim 0.282\ 292$, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)=-9.4\sim -16.4$, the other two Zircons in two test points (BQG-014, BQG-021) are typical mantle originated magmatic, $N(^{176}\text{Hf})/N(^{177}\text{Hf})=0.282\ 722\sim 0.282\ 798$, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)=4.5\sim 6.3$. There are fifteen zircons recording the Proterozoic-Archean U-Pb ages. Zircon shows distinct geochemical characteristics of mantle magmatic origination, $N(^{207}\text{Pb})/N(^{206}\text{Pb})=1\ 713\sim 2\ 559\text{ Ma}$, $N(^{176}\text{Hf})/N(^{177}\text{Hf})=0.281\ 288\sim 0.282\ 263$, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)=-1.3\sim 8.7$, and most exhibit $\epsilon_{\text{Hf}}(t)>2$. According to the zircon Hf isotopic composition,

收稿日期: 2009-05-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(40872060); 陕西省教育厅省级重点实验室科研与设计计划项目(08JZ62); 西北大学大陆动力学国家重点实验室科技部专项项目

作者简介: 赖绍聪(1963-), 男, 四川安岳人, 教授, 博士研究生导师, 从事岩石学及地球化学研究。E-mail: shaocong@nwnu.edu.cn

Zircon in two test points (BQG-014, BQG-021) is typical mantle originated magmatic; therefore, their forming age (264 ~ 295 Ma) indicates an important active continental margin magmatism during the Mianlue ancient ocean crust subduction process.

Key words: Zircon; U-Pb dating; Hf isotopic; Mianlue ancient ocean basin; island-arc; Sanchazi

0 引言

勉略缝合带是一个东西向横贯中国大陆中部的以逆冲推覆断裂构造为骨架的巨型复合构造带, 它的形成标志着扬子和华北陆块的最终拼合, 对研究中国大陆的构造演化具有重要的大地构造意义^[1]。该带以勉县—略阳蛇绿构造混杂岩带为代表, 东西延展, 向西可连接昆仑, 向东则与巴山—大别山南缘相连^[2-5]。

近年来, 围绕该带的蛇绿混杂岩进行了一系列岩石学、地球化学及年代学研究。地球化学研究结果表明, 在勉略带中存在高度亏损的洋中脊玄武岩 (MORB) 型古洋壳残片^[6]、双峰式火山岩^[2-7]、洋岛型火山岩^[3] 和岛弧型火山岩^[4, 7], 其地质时代为早石炭世^[8-9]。勉县—略阳结合带黑沟峡变质火山岩系的 Sm-Nd 等时线年龄 (242 ± 21) Ma 表明勉略洋盆在三叠纪晚期已闭合^[7]。然而, 目前还没有有效的年代学研究约束勉略洋俯冲消减的年龄, 只有李曙光等^[7] 通过对略阳三岔子地区的斜长花岗岩的单颗粒锆石 U-Pb 年代学研究获得了 (913 ± 31) Ma 和 (300 ± 61) Ma 两个不同的年龄值, 提出前者为继承锆石年龄, 而后者代表斜长花岗岩的形成年龄, 并由此提出勉略古洋盆的洋壳在石炭纪时已开始消减。

早期的研究工作将三岔子岛弧型火山岩归入蛇绿混杂岩, 并称之为岛弧型蛇绿混杂岩 (图 1^[7])。这一岛弧火山岩块究竟是代表一古岛弧, 还是代表大陆边缘的古岩浆弧, 其形成时代是什么? 这些问题仍需更详细的深入研究。笔者选择略阳三岔子西部偏桥沟剖面中的辉绿岩墙, 进行详细的锆石 U-Pb 年代学、锆石 Hf 同位素组成及微量元素组成研究, 试图探讨三岔子岛弧火山岩的源区性质及勉略洋开始俯冲消减的年龄。

1 地质背景及野外地质样品

勉略构造带南以勉县—略阳断裂为界, 北以状元碑断裂为界, 其南为新元古代碧口群, 北为志留纪白水江群^[10]。在三岔子乡周围集中发育了各种类型的镁铁—超镁铁质岩石 (图 1), 并被称为三岔子“蛇绿混杂岩”。该“蛇绿混杂岩”可划分为两部分: 西部岛弧型杂岩和东部 MORB 型玄武质火山岩。西部杂岩由强烈剪切变形的玄武质和安山质熔岩、辉 (闪) 长岩、超基性岩 (蛇纹岩、滑石片岩) 及岩墙群和少量斜长花岗岩组成。

文中的辉绿岩墙样品主要采自三岔子西部的偏桥沟剖面 (图 2^[7]), 在剖面上可见强烈剪切变形的变质海相火山岩、辉长岩、超基性岩及辉绿岩墙

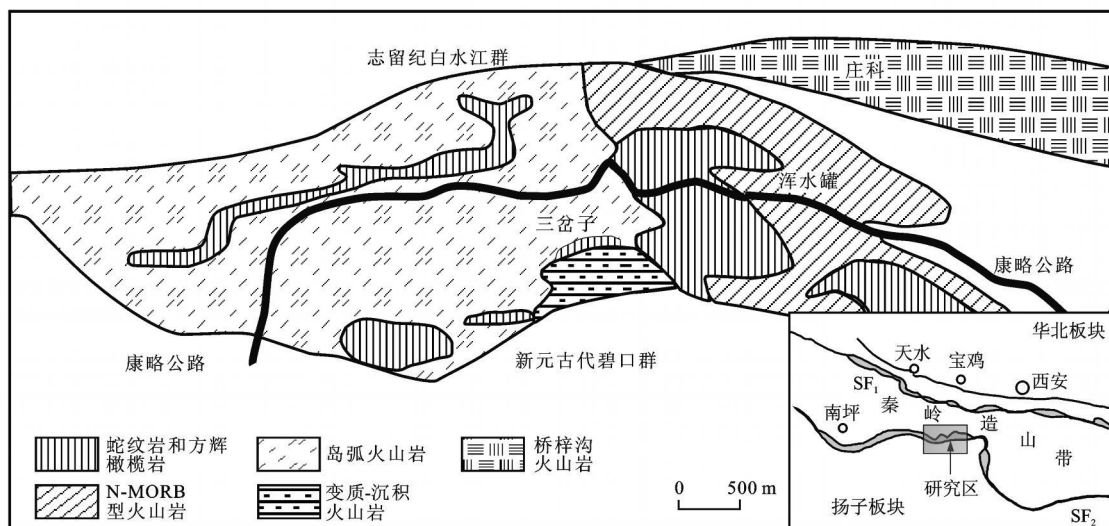
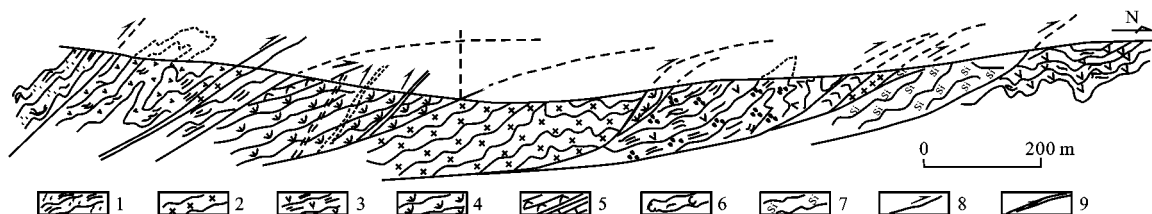


图 1 略阳三岔子地区地质简图

Fig. 1 Sketch Geological Map of the Sanchazi Area of Lueyang County



1—绢云千枚岩; 2—变辉绿岩及辉绿岩; 3—钠长绢云片岩; 4—蛇纹岩; 5—菱镁滑石片岩及大理岩; 6—含炭板岩; 7—变硅质岩;
8—晚期逆冲断层; 9—早期韧性逆冲断层

图 2 三岔子—偏桥沟岩片褶皱-逆冲推覆构造剖面

Fig. 2 Sketch Structure Profile of Slices Fold-thrust Nappe in the Sanchazi-Pianqiaogou Area

群组成的混杂岩块。超基性岩均已蚀变成为致密块状的蛇纹岩, 蛇纹石可达 90% 以上, 以胶蛇纹石、叶蛇纹石为主, 少量纤维蛇纹石, 少数薄片见斜方辉石假象及橄榄石假象, 原岩主要为方辉橄榄岩和纯橄榄岩^[2]。变质火山岩包括基性的绿片岩、中基性和中性的绿泥钠长片岩及中酸性的浅色绿泥钠长片岩。

所采集的辉绿岩呈岩墙状产出, 岩石受剪切变形影响, 矿物已发生显著的定向排列, 手标本观察浅色矿物(基性斜长石)呈米粒状, 暗色矿物(普通辉石)呈不对称眼球状, 镜下观察岩石具碎裂结构, 或粗糜棱结构。部分辉绿岩样品中见有长石旋转碎斑系, 基性斜长石大多已蚀变为高岭土及绢云母, 普通辉石明显绿泥石化。分析结果表明^[3], 辉绿岩 $w(\text{SiO}_2)$ 偏高 (50% ~ 55%), 碱质较富 ($w(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ 为 5.18% ~ 6.13%), 而 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 14% ~ 15.70%, $w(\text{CaO})$ 为 5.53% ~ 7.89%, 属亚碱性拉斑系列。

2 分析方法

锆石按常规重力和磁选方法分选, 在英国 Gatan 公司生产的 Mono CL3+ 阴极发光装置系统上进行阴极发光 (CL) 照相。锆石定年采用 Agilent 公司 Agilent 7 500 a。锆石原位 Lu-Hf 同位素测定采用 Nu Plasma HR (Wrexham UK) 多接收电感耦合等离子体质谱仪完成 (MC-ICP-MS)。采用的激光剥蚀系统为德国 MicroLas 公司生产的 GeoLas200M 型激光剥蚀系统, 分析方法详见文献 [9, 11-15]。

3 测试结果

三岔子辉绿岩中锆石的阴极发光图像见图 3。本次一共完成 23 个点的测试 (表 1)。锆石主要可

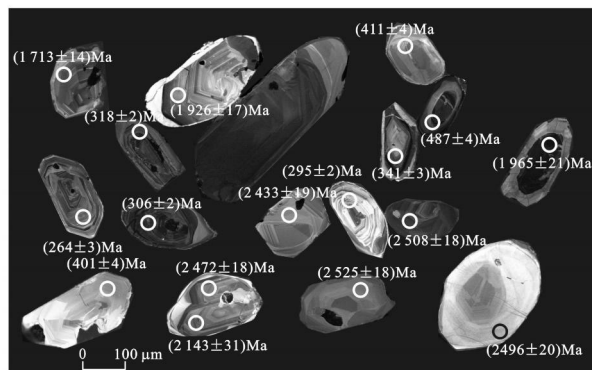


图 3 锆石的阴极发光图像

Fig. 3 Cathodoluminescent Electron Images for the Zircon Grains

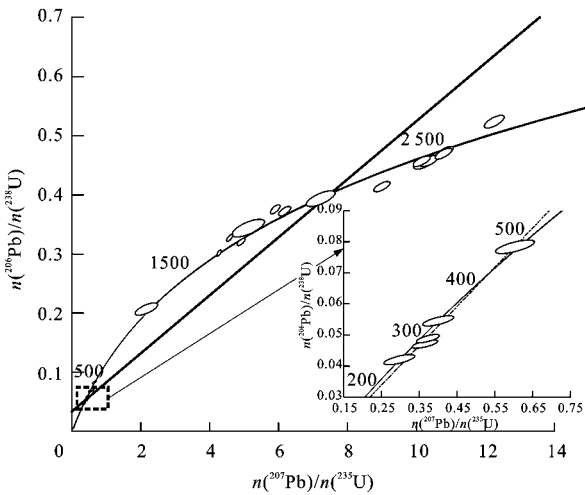
以分为 2 种, 一种为自形透明长柱状, 阴极发光图像显示很好的岩浆锆石震荡环带, 其 $w(\text{Th})$ 、 $w(\text{U})$ 分别为 $(27.7 \sim 180.7) \times 10^{-6}$ 和 $(55 \sim 313) \times 10^{-6}$, $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 为 0.4 ~ 0.8, 这些证据初步表明这类锆石为岩浆锆石。其 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 年龄为 264 ~ 487 Ma, 由于年龄点较分散, 较难获得谐和年龄。另一种锆石晶体有不同程度的磨圆, 晶棱不明显, 其 $n(\text{Th})$ 、 $n(\text{U})$ 分别为 $(34 \sim 463) \times 10^{-6}$ 和 $(16 \sim 1224) \times 10^{-6}$, $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 为 0.1 ~ 1.2。根据 $w(\text{Th})/w(\text{U})$, 初步判断得到测点 BQG-022 应为变质锆石。这类锆石的年龄普遍偏老, 其 $N(^{207}\text{Pb})/N(^{206}\text{Pb})$ 年龄主要为 1.713 ~ 2.559 Ma, 其中测点 BQG-019 记录的 $N(^{207}\text{Pb})/N(^{206}\text{Pb})$ 年龄为 1.145 Ma。

从图 4a 可以看出, 三岔子辉绿岩中锆石的 U-Pb 年龄分布比较松散, 既有古生代年龄, 又有太古代和元古代年龄, 表明岩石中锆石来源比较复杂, 这可能是由于辉绿岩浆中结晶的锆石本身比较少, 岩浆在上升过程中有大量捕获锆石; 岩石本身经历强烈的变质变形作用, 在这个过程中也可能有其他来源的锆石混入。从图 4b 可以看出, 三岔子辉绿岩中锆石的年龄主要集中在古生代和太古代。

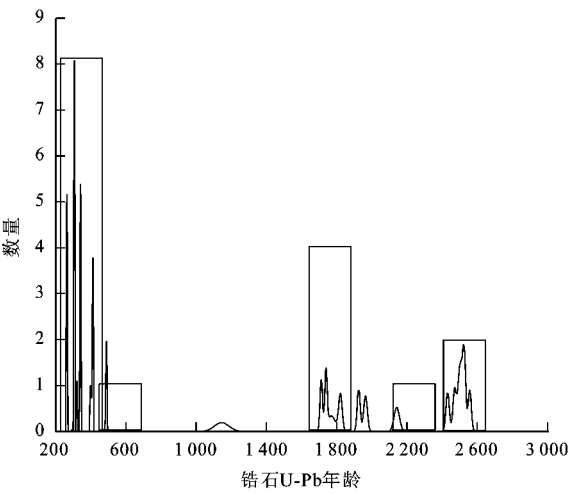
表 1 三岔子辉绿岩锆石 U-Pb 同位素分析结果

Tab. 1 Zircon U-Pb Isotopic Analysis Result of the Diabase from Sanchazi Area

点号	元素质量 分数(10 ⁻⁶)及同位素比值							U-Pb 年龄/Ma			
	Th	U	Th/U	$N(^{207}\text{Pb})/N(^{206}\text{Pb})$	$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$	$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$	$n(^{208}\text{Pb})/n(^{232}\text{Th})$	$N(^{207}\text{Pb})/N(^{206}\text{Pb})$	$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$	$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$	$n(^{208}\text{Pb})/n(^{232}\text{Th})$
BQG-001	102	197	0.5	0.161 51±0.001 77	0.455 56±0.002 55	10.153 94±0.068 98	0.116 32±0.001 06	2 472±18	2 420±11	2 449±6	2 224±19
BQG-002	34.1	29.1	1.2	0.133 37±0.002 38	0.391 87±0.003 6	7.211 94±0.115 65	0.106 4±0.001 51	2 143±31	2 132±17	2 138±14	2 044±28
BQG-003	192	548	0.4	0.111 38±0.001 23	0.318 16±0.001 7	4.889 59±0.033 22	0.093 08±0.000 84	1 822±20	1 781±8	1 801±6	1 799±16
BQG-004	181	314	0.6	0.059 53±0.001 19	0.050 5±0.000 33	0.414 83±0.007 29	0.017 45±0.000 24	587±43	318±2	352±5	350±5
BQG-005	56.8	190	0.3	0.157 84±0.001 77	0.412 78±0.002 38	8.988 81±0.065 2	0.109 68±0.001 27	2 433±19	2 228±11	2 337±7	2 104±23
BQG-006	27.7	55.3	0.5	0.057 97±0.002 58	0.064 22±0.000 71	0.513 57±0.022 04	0.020 75±0.000 7	528±95	401±4	421±15	415±14
BQG-007	60.3	102	0.6	0.163 83±0.001 95	0.452 75±0.002 87	10.231 56±0.085 57	0.122 36±0.001 31	2 496±20	2 408±13	2 456±8	2 333±24
BQG-008	63.7	212	0.3	0.164 99±0.001 82	0.456 54±0.002 61	10.389 05±0.072 52	0.110 72±0.001 25	2 508±18	2 424±12	2 470±6	2 123±23
BQG-009	377	417	0.9	0.167 04±0.001 76	0.468 76±0.002 51	10.798 79±0.065 71	0.127 75±0.000 93	2 528±18	2 478±11	2 506±6	2 430±17
BQG-010	39.6	90.3	0.4	0.059 7±0.001 96	0.065 75±0.000 6	0.541 21±0.016 8	0.020 71±0.000 56	593±69	411±4	439±11	414±11
BQG-011	463	553	0.8	0.166 75±0.001 77	0.471 46±0.002 55	10.839 18±0.066 56	0.126 58±0.000 93	2 525±18	2 490±11	2 509±6	2 409±17
BQG-012	99.1	154	0.6	0.055 82±0.001 41	0.078 39±0.000 6	0.603 32±0.014 04	0.026 39±0.000 43	445±55	487±4	479±9	527±9
BQG-013	102	159	0.6	0.053 3±0.001 61	0.054 3±0.000 45	0.399 02±0.011 34	0.017 93±0.000 35	342±67	341±3	341±8	359±7
BQG-014	113	208	0.5	0.056 32±0.001 56	0.046 81±0.000 37	0.363 36±0.009 38	0.016 12±0.000 3	464±61	295±2	315±7	323±6
BQG-015	16.8	16.4	1.0	0.108 23±0.002 86	0.341 61±0.004 1	5.096 52±0.129 05	0.106 85±0.002 16	1 770±48	1 894±20	1 836±21	2 052±39
BQG-016	114	221	0.5	0.055 52±0.001 36	0.048 57±0.000 36	0.371 7±0.008 37	0.015 66±0.000 28	433±53	306±2	3 218±6	314±6
BQG-017	184	267	0.7	0.170 15±0.001 84	0.523 09±0.002 95	12.267 38±0.080 64	0.146 01±0.001 18	2 559±18	2 712±12	2 625±6	2 755±21
BQG-018	44.5	165	0.3	0.120 62±0.001 43	0.370 55±0.002 22	6.160 34±0.050 83	0.102 78±0.001 2	1 965±21	2 032±10	1 999±7	1 978±22
BQG-019	7.40	19.4	0.4	0.077 93±0.003 4	0.203 35±0.002 86	2.121 45±0.090 27	0.061 28±0.002 16	1 145±84	1 193±15	1 156±29	1 202±41
BQG-020	123	284	0.4	0.118 02±0.001 1	0.373 96±0.002 11	5.890 78±0.038 56	0.065 38±0.000 52	1 926±17	2 048±10	1 960±6	1 280±10
BQG-021	86.4	109	0.8	0.053 07±0.002 09	0.041 75±0.000 45	0.295 52±0.011 2	0.008 16±0.000 18	332±87	264±3	263±9	164±4
BQG-022	139	1 225	0.1	0.106 49±0.000 77	0.298 95±0.001 41	4.252 22±0.017 12	0.050 09±0.000 35	1 740±13	1 686±7	1 684±3	988±7
BQG-023	298	436	0.7	0.104 94±0.000 82	0.324 65±0.001 62	4.555 55±0.023 34	0.049 11±0.000 25	1 713±14	1 812±8	1 741±4	969±5



a U-Pb 谐和年龄图



b U-Pb 年龄分布频谱图

在 U-Pb 年龄分布频谱图中, 小于 1 000 Ma 的年龄用 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 年龄, 大于 1 000 Ma 的用 $N(^{206}\text{Pb})/N(^{207}\text{Pb})$ 年龄

图 4 三岔子辉绿岩中锆石 U-Pb 谐和年龄图和锆石 U-Pb 年龄分布频谱

Fig. 4 Zircon U-Pb Concordia Diagram and Probability Density Plot for the Diabase from the Sanchazi Area

在 U-Pb 年代学研究的基础上, 对其中 21 颗锆石进行了 Hf 同位素测定。从表 2 可以看出, 记录了古生代年龄信息的锆石 $N(^{176}\text{Hf})/N(^{177}\text{Hf})$ 初始值为 0.281 934~0.282 292, 对应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -9.4~-16.4, 为典型的壳源岩浆锆石。其中有 2 个测点 (BQG-014、BQG-021) 的 $N(^{176}\text{Hf})/N(^{177}\text{Hf})$ 为 0.282 722~0.282 798, 对应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 4.5~6.3, 为典型的幔源岩浆锆石, 这 2 个点的两阶段亏损地

幔 Hf 模式年龄为 765~885 Ma, 表明其可能与扬子板块晋宁期的幔源岩浆作用有成因联系。记录元古代—太古代年龄信息锆石的 $N(^{176}\text{Hf})/N(^{177}\text{Hf})$ 初始值为 0.281 288~0.282 263, 对应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -1.3~8.7, 绝大部分锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值大于 2, 显示出幔源岩浆锆石的特征。这些颗粒的两阶段亏损地幔 Hf 模式年龄为 1 457~2 768 Ma, 表明其源岩为元古代—太古代的幔源岩浆岩石。

表 2 三岔子辉绿岩锆石 Hf 同位素分析结果

Tab. 2 Zircon Hf Isotopic Analysis Result of the Diabase from Sanchazi Area

分析点号	年龄/Ma	$N(^{176}\text{Hf})/N(^{177}\text{Hf})$	$n(^{176}\text{Yb})/n(^{177}\text{Hf})$	$n(^{176}\text{Lu})/n(^{177}\text{Hf})$	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	T_{DM}/Ma	$f(\text{Lu}/\text{Hf})$
BQG-002	2 143	0.281 213±0.000 034	0.009 772±0.000 038	0.000 332±0.000 002	-55.1	-7.7	2 996	-0.99
BQG-003	1 822	0.281 602±0.000 026	0.011 341±0.000 181	0.000 445±0.000 006	-41.4	-1.3	2 419	-0.99
BQG-004	318	0.282 115±0.000 036	0.022 004±0.000 375	0.000 851±0.000 012	-23.2	-16.4	1 968	-0.97
BQG-006	401	0.282 267±0.000 046	0.038 195±0.000 199	0.001 524±0.000 007	-17.8	-9.4	1 680	-0.95
BQG-007	2 496	0.281 323±0.000 021	0.017 957±0.000 031	0.000 754±0.000 002	-51.2	3.5	2 729	-0.98
BQG-008	2 508	0.281 371±0.000 035	0.019 580±0.000 463	0.000 776±0.000 018	-49.5	5.5	2 643	-0.98
BQG-009	2 528	0.281 288±0.000 020	0.014 243±0.000 035	0.000 584±0.000 001	-52.5	3.3	2 768	-0.98
BQG-010	410	0.282 128±0.000 040	0.014 062±0.000 062	0.000 535±0.000 003	-22.8	-13.9	1 914	-0.98
BQG-011	2 525	0.281 208±0.000 025	0.027 342±0.000 453	0.001 064±0.000 018	-55.3	-0.5	2 949	-0.97
BQG-012	486	0.281 934±0.000 042	0.017 646±0.000 238	0.000 725±0.000 008	-29.6	-19.2	2 240	-0.98
BQG-013	341	0.282 041±0.000 031	0.039 563±0.000 393	0.001 240±0.000 015	-25.8	-18.6	2 098	-0.96
BQG-014	295	0.282 722±0.000 03	0.034 484±0.000 673	0.001 256±0.000 025	-1.8	4.5	885	-0.96
BQG-015	1 770	0.281 960±0.000 028	0.043 877±0.001 093	0.001 752±0.000 044	-28.7	8.7	1 877	-0.95
BQG-016	306	0.282 292±0.000 041	0.022 799±0.000 264	0.000 843±0.000 008	-17.0	-10.4	1 654	-0.97
BQG-017	2 559	0.281 304±0.000 045	0.018 275±0.000 049	0.000 630±0.000 003	-51.9	4.5	2 734	-0.98
BQG-018	1 965	0.281 624±0.000 035	0.018 859±0.000 366	0.000 653±0.000 009	-40.6	2.4	2 349	-0.98
BQG-019	1 145	0.282 263±0.000 035	0.019 712±0.000 148	0.000 729±0.000 004	-18.0	6.8	1 457	-0.98
BQG-019	1 145	0.282 141±0.000 034	0.018 583±0.000 212	0.000 712±0.000 008	-22.3	2.5	1 676	-0.98
BQG-020	1 926	0.281 734±0.000 037	0.031 213±0.000 245	0.001 007±0.000 004	-36.7	5.0	2 189	-0.97
BQG-021	264	0.282 798±0.000 043	0.070 469±0.000 618	0.002 370±0.000 023	0.9	6.3	765	-0.93

注: $f(\text{Lu}/\text{Hf})$ 为 Lu、Hf 的分异系数

表 3 表明, 记录古生代年龄信息锆石的 $w(\sum\text{REE})$ 为 $(295\sim948)\times 10^{-6}$, 其中 2 个测试点 (BQG-014、BQG-016) 表现出轻稀土超量的特征, 其 $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Sm})_{\text{N}}$ 为 0.17~2.70, $\delta(\text{Eu})$ 为 0.07~0.39, 其余 5 个颗粒的 $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Sm})_{\text{N}}$ 为 0~0.40, $\delta(\text{Eu})$ 为 0.06~0.54。记录元古代—太古代年龄信息的锆石中有 4 颗锆石表现出轻稀土超量的特征, 其 $w(\sum\text{REE})$ 为 $(468\sim753)\times 10^{-6}$, $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Sm})_{\text{N}}$ 为 0.19~4.35, $\delta(\text{Eu})$ 为 0.19~0.58, 其余 10 颗锆石的 $w(\sum\text{REE})$ 为 $(165\sim637)\times 10^{-6}$, $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Sm})_{\text{N}}$ 为 0~0.11, $\delta(\text{Eu})$ 为 0.18~0.47。

所有轻稀土超量的锆石均不发育 Ce 的正异常。

根据锆石 Ti 温度计^[16] 对所有锆石的形成温度 t 进行了计算, 计算公式为

$$t = \frac{5\,080 \pm 30}{(6.01 \pm 0.03) - \text{Log } c(\text{Ti})}$$

记录古生代年龄信息的锆石中, 轻稀土超量的两颗锆石 Ti 温度为 643~653 ℃, 其余颗粒的 Ti 温度为 632~700 ℃, 点 BQG-004 记录的 Ti 温度最高, 为 997 ℃。在记录古老年龄信息的锆石中, 轻稀土超量颗粒记录的 Ti 温度为 654~741 ℃, 其余颗粒记录的 Ti 温度为 690~903 ℃。

表 3 三岔子辉绿岩锆石微量元素分析结果

Tab. 3 Zircon Trace Element Analysis Result of the Diabase from Sanchazi Area

元素	分析点号																						
	BQG-001	BQG-002	BQG-003	BQG-004	BQG-005	BQG-006	BQG-007	BQ G-008	BQ G-009	BQG-010	BQG-011	BQG-012	BQG-013	BQG-014	BQG-015	BQG-016	BQ G-017	BQ G-018	BQG-019	BQG-020	BQG-021	BQG-022	BQG-023
Ti	20.5	5.46	5.74	102	6.49	6.13	6.63	5.78	9.98	3.10	3.85	2.49	3.63	2.91	25.8	3.36	3.40	6.50	49.0	7.57	4.24	6.29	6.77
Sr	0.22	0.09	0.17	0.50	0.09	0.59	0.15	0.47	5.37	0.10	15.7	0.23	0.12	12.8	0.11	1.52	37.0	5.14	0.44	1.40	0.18	0.47	0.58
Y	507	259	464	1 036	352	297	892	189	470	502	834	342	947	633	329	877	358	265	415	712	1 211	551	776
Nb	1.16	1.07	10.7	7.87	1.07	0.63	0.71	0.68	1.32	0.82	3.32	1.00	0.93	2.45	1.81	4.87	1.42	3.85	2.27	3.15	0.94	1.15	2.63
Ba	2.78	0.03	0.09	11.5	0.03	0.02	0.37	0.20	8.38	0.03	2.41	0.03	0.02	0.08	0.02	0.11	0.11	0.09	5.19	1.80	0.10	0.50	0.74
La	0.02	0.02	0.02	0.04	0.02	0.66	0.07	0.15	18.7	0.02	10.8	0.22	0.01	106	0.21	41.0	53.2	55.3	0.07	1.56	2.33	0.05	0.23
Ce	14.9	15.9	36.0	12.7	9.20	9.89	6.84	12.7	76.8	5.56	101	11.0	14.0	252	29.4	118	169	150	8.25	24.8	15.8	6.74	28.9
Pr	0.05	0.06	0.10	0.08	0.03	0.17	0.15	0.15	5.11	0.05	4.87	0.11	0.06	30.5	0.15	12.4	16.4	15.8	0.11	0.98	0.96	0.04	0.21
Nd	0.75	0.95	1.06	1.25	0.52	1.08	2.28	1.03	20.3	0.79	21.9	0.74	1.17	132	1.93	54.0	69.6	58.6	1.29	6.74	8.02	0.69	3.19
Sm	1.53	1.34	1.92	3.72	1.27	1.07	4.03	0.92	4.62	1.76	7.24	1.01	2.57	25.3	2.43	11.6	12.4	8.20	2.28	5.36	8.64	1.47	4.11
Eu	0.56	0.21	0.44	0.15	0.17	0.41	0.67	0.28	1.08	0.37	2.31	0.27	0.30	1.05	0.68	0.37	1.86	0.49	0.24	0.96	2.11	0.39	0.84
Gd	8.62	5.88	8.44	19.1	6.34	5.07	21.0	3.55	10.7	8.17	20.7	4.91	15.7	27.7	10.2	21.9	14.6	7.75	9.77	16.0	32.3	8.68	17.4
Tb	3.14	1.92	2.78	7.22	2.38	1.73	6.95	1.15	3.29	2.97	6.36	1.97	6.15	5.99	2.94	6.28	3.12	1.75	3.38	5.54	10.2	3.17	5.92
Dy	40.0	22.0	34.0	92.6	29.4	21.8	82.4	14.4	37.3	37.8	67.4	25.7	80.2	58.3	32.1	74.5	30.6	19.0	39.6	64.4	116	42.6	67.8
Ho	16.6	8.20	13.2	35.4	11.4	9.03	30.2	5.59	14.6	15.7	24.8	10.8	31.7	20.8	11.0	29.2	10.7	7.74	14.0	22.9	41.4	16.7	25.2
Er	80.7	37.5	64.9	160	53.6	46.8	134	27.9	69.7	80.9	117	55.3	149	96.7	47.2	137	51.2	41.8	63.6	104	182	84.1	116
Tm	18.1	7.79	15.0	33.1	11.5	11.2	26.6	6.64	15.8	18.6	26.2	12.8	30.0	21.1	9.62	29.4	11.6	10.4	14.0	24.6	40.2	21.8	26.8
Yb	194	77.7	155	321	117	127	246	74.4	172	201	288	140	280	213	93.6	295	126	122	148	266	423	258	295
Lu	42.9	15.3	30.4	60.6	23.4	28.2	47.2	16.4	37.0	43.4	64.8	30.8	51.6	42.8	17.9	58.9	27.6	28.7	22.9	42.7	66.8	43.4	45.5
Hf	8 832	9 095	11 624	8 604	9 970	7 609	8 255	9 842	8 814	7 303	9 184	8 547	8 266	8 131	7 845	9 703	9 374	10 425	6 443	8 759	5 986	8 239	6 358
Ta	0.37	0.27	2.73	1.83	0.51	0.16	0.30	0.34	0.47	0.31	0.85	0.35	0.43	0.82	0.39	1.34	0.46	1.50	0.44	1.30	0.27	1.24	0.90
<i>t</i> /℃	808	690	694	997	704	700	706	695	741	648	663	632	659	643	832	653	654	704	903	717	671	702	708
w(∑REE)	422	195	363	747	266	263	609	165	468	417	753	295	662	927	259	848	544	473	328	584	948	488	637
w(La) _N / w(Sm) _N	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.40	0.01	0.11	2.61	0.00	0.96	0.14	0.00	2.70	0.06	2.29	2.77	4.35	0.00	0.19	0.17	0.01	0.04
δEu	0.47	0.23	0.34	0.06	0.18	0.54	0.22	0.47	0.47	0.30	0.58	0.37	0.15	0.12	0.42	0.07	0.42	0.19	0.16	0.32	0.39	0.33	0.30

注：表中元素质量分数/10⁻⁶

4 讨论

前人研究表明, 三岔子火山岩块实际上是以岛弧火山岩为主要成分的火山岩块^[2], 而勉略洋开始发生俯冲的时间, 则成为地质学界关注的焦点。

三岔子辉绿岩中共有 8 颗锆石记录了古生代的年龄信息, 其 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 年龄为 264 ~ 487 Ma, 由于年龄点较分散, 较难得到有效的谐和年龄, 这可能是因为所采样品是多次岩浆作用的产物。因为在勉略洋俯冲消减过程中, 岛弧岩浆作用是一个持续的过程, 会有多次岩浆作用产生, 因而

很难有一致的年龄。在记录古生代年龄信息的 8 颗锆石中, 有 2 颗锆石表现出轻稀土超量的特征。一般来讲, 锆石中轻稀土超量可能是由以下几种原因造成: ①锆石结晶时 LREE 优先进入锆石的晶格缺陷中; ②锆石结晶时的熔体成分与全岩成分不一致; ③分析点中包含了富 LREE 的磷酸盐矿物(如独居石和磷灰石); ④后期地质事件扰动时 LREE 优先进入被扰动的锆石中。目前, 对于造成这种特征的原因尚不十分清楚。根据锆石 Hf 同位素组成, BQG-014 和 BQG-021 两个分析点具有 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 4.5 ~ 6.3, 为典型的幔源岩浆锆石, 其

$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 年龄分别为 295、264 Ma, 代表古生代岩浆事件, 这 2 个点的两阶段亏损地幔 Hf 模式年龄为 765~885 Ma, 表明其可能与扬子板块晋宁期的幔源岩浆作用有成因联系。

此外, 勉略带是一个复杂的构造混杂带, 带内除蛇绿岩、岛弧火山岩、洋岛火山岩块外, 实际上还包含了众多古老结晶基底岩块(岩片), 在勉略带中除了 320~200 Ma 的同位素年龄外, 还获得了一些 $(8\sim 10)\times 10^8$ 年的古老岩块岩石年龄^[17-18]。本研究共有 15 颗锆石记录了元古代—太古代的年龄信息, 其中 BQG-019 记录的 $N(^{207}\text{Pb})/N(^{206}\text{Pb})$ 年龄为 1 145 Ma, 其余 14 颗锆石的 $N(^{207}\text{Pb})/N(^{206}\text{Pb})$ 均大于 1 700 Ma (1 713~2 559 Ma), 其 $N(^{176}\text{Hf})/N(^{177}\text{Hf})$ 初始值为 0.281 288~0.282 263, 对应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -1.3~8.7, 绝大部分锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值大于 2, 两阶段 Hf 模式年龄 ($T_{2\text{DM}}$) 为 1 457~2 768 Ma, 暗示勉略构造带中存在显著的古老基底物质混入。

5 结语

(1) 三岔子辉绿岩中含有元古代—太古代锆石捕虏晶, 表明岛弧玄武质岩浆在侵位过程中曾受到上覆地壳物质的强烈混染, 而且这些地壳中含有大量元古代—太古代基底物质。

(2) 锆石 Hf 同位素组成特征表明, 辉绿岩中古老锆石来源于古元古代—太古代的幔源岩浆作用, 这说明三岔子岛弧火成杂岩可能代表了南秦岭微陆块(在石炭纪以前已拼合到华北陆块上)南侧石炭纪活动陆缘岩浆弧, 而不是位于古勉略洋中的岛弧。

(3) 根据锆石 Hf 同位素组成, BQG-014 和 BQG-021 两个分析点具有 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 4.5~6.3, 为典型的幔源岩浆锆石, 其 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 年龄分别为 295、264 Ma, 代表古生代岩浆事件, 这 2 个点的两阶段亏损地幔 Hf 模式年龄为 765~885 Ma, 表明其可能与扬子板块晋宁期的幔源岩浆作用有成因联系。

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, 2001.

[2] 赖绍聪, 张国伟, 杨永成, 等. 南秦岭勉县—略阳结合带蛇绿岩与岛弧火山岩地球化学及其大地构造意义[J]. 地球化学, 1998, 27(3): 283-293.

[3] 赖绍聪, 张国伟, 杨永成, 等. 南秦岭勉县—略阳结合带变质火山岩岩石地球化学特征[J]. 岩石学报, 1997, 13(4):

563-573.

[4] Lai S C, Zhang G W, Yang R Y. Identification of the Island-arc Magmatic Zone in the Lianghe-Raofeng-Wuliba Area, South Qinling and Its Tectonic Significance[J]. Science in China D: Earth Sciences, 2000, 43(Suppl): 69-81.

[5] Lai S C, Li S Z. Geochemistry of Volcanic Rocks from Wuliba in the Mianlue Suture Zone, Southern Qinling[J]. Scientia Geologica Sinica, 1999, 10(3): 169-179.

[6] 许继锋, 于学元, 李献华, 等. 高度亏损的 N-MORB 型火山岩的发现: 勉略古洋盆存在的新证据[J]. 科学通报, 1997, 42(22): 2414-2418.

[7] 李曙光, 孙卫东, 张国伟, 等. 南秦岭勉略构造带黑沟峡变质火山岩的年代学和地球化学——古生代洋盆及其闭合时代的证据[J]. 中国科学(D 辑), 1996, 26(3): 223-230.

[8] 冯庆来, 杜远生, 殷鸿福, 等. 南秦岭勉略蛇绿混杂岩带中放射虫的发现及其意义[J]. 中国科学(D 辑), 1996, 26(增刊): 78-82.

[9] 殷鸿福, 杜远生, 许继锋, 等. 南秦岭勉略古缝合带中放射虫动物群的发现及其古海洋意义[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1996, 21(2): 184.

[10] Sun W D, Li S G, Chen Y D, et al. Timing of Synorogenic Granitoids in the South Qinling, Central China: Constraints on the Evolution of the Qinling-Dabie Orogenic Belt[J]. The Journal of Geology, 2002, 110(4): 457-468.

[11] Blichert-Toft J, Albarede F. The Lu-Hf Isotope Geochemistry of Chondrites and the Evolution of the Mantle-Crust System[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1997, 148(1/2): 243-258.

[12] Chu N C, Taylor R N, Chavagnac V, et al. Hf Isotope Ratio Analysis Using Multi-collector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry: an Evaluation of Isobaric Interference Corrections[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2002, 17(12): 1567-1574.

[13] Vervoort J D, Blichert-Toft J. Evolution of the Depleted Mantle: Hf Isotope Evidence from Juvenile Rocks Through Time-implications for Magma Origins and Crust-mantle Evolution[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, 63(3): 533-556.

[14] Wiedenbeck M, Alle P, Cokfu F, et al. Three Natural Zircon Standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, Trace Element and REE Analyses[J]. Geostandards and Geoanalytical Research, 1995, 19(1): 1-23.

[15] Wu F Y, Yang Y H, Xie L W, et al. Hf Isotopic Compositions of the Standard Zircons and Baddeleyites Used in U-Pb Geochronology[J]. Chemical Geology, 2006, 234(1/2): 105-126.

[16] 王宗起, 陈海泓, 李继亮, 等. 南秦岭西乡群放射虫化石的发现及其地质意义[J]. 中国科学(D 辑), 1999, 29(1): 38-44.

[17] 杨志华, 李勇, 邓亚婷. 秦岭造山带结构与演化若干问题的再认识[J]. 高校地质学报, 1999, 5(2): 121-136.

[18] 张宗清, 张国伟, 付国民, 等. 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.