



川东华蓑山褶皱带西天超大型玄武岩矿床地质特征及岩石成因

黄从俊, 李明辉

中国地质调查局 成都地质调查中心, 四川 成都 610218

摘要:通过野外和镜下岩相学观察,结合主、微量元素地球化学方法,研究了四川省广安市邻水县西天超大型纤维用玄武岩矿床的地质特征,分析了矿石工业指标和矿床成因。结果表明:矿床位于川东褶皱带华蓑山背斜东翼,矿体呈似层状赋存于上二叠统峨眉山玄武岩组(P₃β)地层中,矿石储量约 1 594×10⁴ t,达超大型规模;主量元素地球化学特征表明,西天玄武岩岩浆属高钛、高钾钙碱性-钙碱性系列;稀土元素、微量元素地球化学特征与区域内高钛峨眉山玄武岩及 OIB 型玄武岩特征相似;西天玄武岩为峨眉山大火成岩省的外带组成部分,形成于板内构造环境,岩浆演化来源于 OIB 型源区且基本未受地壳物质混染,为地幔热柱成因的产物;矿床中的柱状节理玄武岩、块状玄武岩和气孔状玄武岩可用于纤维拉丝生产。

关键词: 华蓑山褶皱带;玄武岩矿床;纤维材料;岩浆岩;四川省

GEOLOGY AND GENESIS OF XITIAN SUPER-LARGE BASALT DEPOSIT IN HUAYINGSHAN FOLD BELT, EASTERN SICHUAN

HUANG Cong-jun, LI Ming-hui

Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu 610081, China

Abstract: Through field survey and petrographic observation under microscope, combined with geochemical analysis for major and trace elements, the paper studies the geological characteristics of Xitian super-large fiber-used basalt deposit in Linshui County of Sichuan Province, and analyzes the industry indexes of ores and deposit genesis. The results show that the deposit is located in the east wing of Huayingshan anticline of eastern Sichuan fold belt, and the orebody is occurred in stratoid in the Upper Permian Emeishan basalt formation, with the ore reserves about 15.94 Mt, reaching the super-large size. The geochemistry of major elements indicate that the Xitian basaltic magma belongs to high Ti, high K calc alkaline-calc alkaline series. The geochemical characteristics of trace and rare earth elements are similar to those of the regional high Ti Emeishan basalt and OIB-type basalt. The Xitian basalt is the outer zone component of the Emeishan large igneous province, formed in the intraplate tectonic environment, with the magmatic evolution from OIB source area and basically no hybridization of crustal materials, which is of mantle plume origin. The columnar jointed, massive and vesicular basalts in the deposit can be used for fiber drawing production.

Key words: Huayingshan fold belt; basalt deposit; fiber material; magmatite; Sichuan Province

收稿日期: 2022-01-12; 修回日期: 2022-03-07. 编辑: 张哲.

基金项目: 中国地质调查局项目“成渝双城经济圈资源环境承载能力监测评价”(DD20221733);“四川广安资源环境综合地质调查”(DD20190521).

作者简介: 黄从俊(1989—),男,博士,工程师,从事矿床地球化学研究及自然资源综合调查评价工作,通信地址 四川省成都市天府新区科学城北路东段 2211 号, E-mail//huangcongjun@sina.com

通信作者: 李明辉(1968—),男,教授级高级工程师,主要从事水工环方面调查和研究工作,通信地址 四川省成都市天府新区科学城北路东段 2211 号, E-mail//Lmh680408@163.com

0 引言

以往玄武岩仅作为铸石用于路基铺设, 未进行高端产品开发利用. 近年来, 由于玄武岩独特的物理性能及纤维材料技术迅猛发展, 已被列为国家战略性新兴产业中的重点新材料之一. 玄武岩纤维材料是以火山喷发形成的特定玄武岩为原料生产出的连续纤维、岩棉和细微鳞片等产品, 具有良好的综合性能和高性价比等优势, 能满足国防建设、交通运输、建筑、环保、电子、航空航天等领域结构材料的需求, 应用十分广泛, 市场空间巨大^[1-2]. 四川省广安市华蓥山地区出露有条带状的峨眉山玄武岩, 为了使地方资源优势转换为经济优势, 2019年, 中国地质调查局成都地质调查中心对邻水县西天玄武岩矿床开展了普查工作, 圈定玄武岩矿体 2 条, 估算储量 $1\ 594 \times 10^4$ t, 达到超大型矿山规模. 2020年, 由四川帕沃可矿物纤维制品有限公司组建的世界首条玄武岩纤维 2400 孔漏板拉丝智能化窑池生产线, 在四川省广安市启动^[3].

在我国川-滇-黔-桂地区广泛出露的二叠纪峨眉山玄武岩及其相关的镁铁质-超镁铁质侵入岩, 构成了峨眉山大火成岩省(ELIP), 一直以来都是国内外地质界的研究热点. 目前绝大多数学者认为该大火成岩省的形成与地幔柱活动密切相关^[4]. 前人依据地层学及地球化学特征, 将该大火成岩省分为内带、中带和外带, 内带玄武岩具有高 Ti 和低 Ti 两个系列, 而中-外带玄武岩为岩性较单一的高 Ti 玄武岩^[5-6], 目前内带和中带玄武岩的地质地球化学特征研究程度较高^[5-12], 而外带高 Ti 玄武岩研究程度相对较低且成因争议较大^[6-7, 13]. 为了进一步了解外带玄武岩的成因, 本研究以峨眉山大火成岩省外带的广安市邻水县西天超大型玄武岩矿床为对象, 通过野外和镜下岩相学观察, 运用主、微量元素地球化学方法, 分析该矿床的地质特征及岩石成因, 以期加深对峨眉山大火成岩省外带高 Ti 玄武岩成因的认识; 同时, 对纤维用玄武岩矿石的工业指标进行探讨, 为企业生产过程中的选矿活动提供科学依据.

1 区域地质概况与矿床地质特征

西天玄武岩矿床位于川东褶皱带华蓥山复式背斜东翼, 行政区划属广安市邻水县西天乡(图 1a). 区域出露地层齐全, 有寒武系中上统、奥陶系、志留系中下

统、石炭系中统、二叠系、三叠系、侏罗系及第四系地层(图 1b). 研究区内发育 F_{19} 和 F_{20} 两条断层, 其中主断层 F_{19} 为一走向北东、倾向南东、倾角约 65° 的逆断层. 该逆断层使得二叠统茅口组(P_{2m})、上二叠统峨眉山组

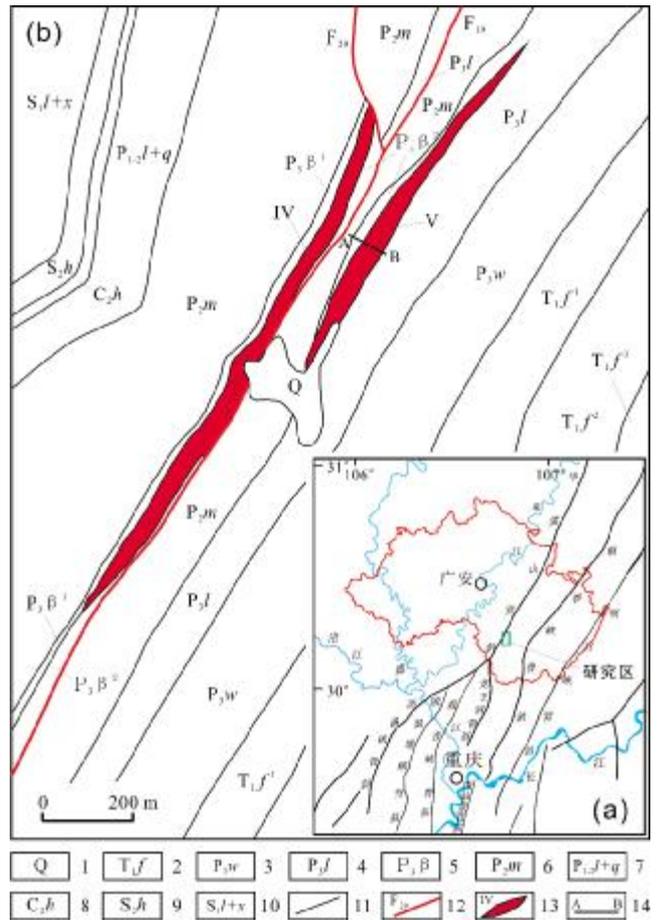


图 1 西天玄武岩矿床地质特征简图

Fig.1 Geological sketch map of Xitian basalt deposit

a—川东褶皱带构造纲要图及西天玄武岩矿区位置(tectonic sketch map of the eastern Sichuan fold belt and location of Xitian basalt orefield); b—西天玄武岩矿床 IV 和 V 号矿体分布图 (distribution map of Nos. IV and V orebodies in Xitian basalt deposit); 1—第四系 (Quaternary); 2—三叠系下统飞仙关组 (Lower Triassic Feixianguan fm.); 3—二叠系上统吴家坪组(Upper Permian Wujiaping fm.); 4—二叠系上统龙潭组(Upper Permian Longtan fm.); 5—上二叠统峨眉山玄武岩组 (Upper Permian Emeishan basalt fm.); 6—二叠系中统茅口组 (Middle Permian Maokou fm.); 7—二叠系中-下统梁山组+栖霞组 (Middle-Lower Permian Liangshan and Qixia fms.); 8—石炭系中统黄龙组(Middle Carboniferous Huanglong fm.); 9—志留系中统韩家店组 (Middle Silurian Hanjiadian fm.); 10—志留系下统龙马溪组+小河坝组(Lower Silurian Longmaxi and Xiaohoba fms.); 11—地质界线 (geological boundary); 12—断层及编号 (fault and number); 13—玄武岩矿体及编号 (basalt orebody and number); 14—剖面位置(profile position)

玄武岩($P_3\beta$)和上二叠统龙潭组炭质页岩(P_3l)3套地层重复出现。 F_{20} 为 F_{19} 的次级断层。

西天玄武岩矿床共探明矿体2条,矿体形态简单,均呈较稳定的顺层状产出,且倾角较大;矿体底板围岩为中二叠统茅口组灰岩(图1b、图2),顶板围岩为上二叠统龙潭组薄层状炭质页岩(图2和图3a)。IV号矿体连续分布,控制矿体长463.45 m,厚24.58~38.55 m,平均厚度31.56 m,倾向120~128°,倾角71~86°;V号矿体也连续分布,控制矿体长749.94 m,控制厚度26.47~30.20 m,平均厚度28.27 m,倾向108~156°,倾角30~79°。

玄武岩矿石以块状构造为主,次为柱状节理构造(图3b),再次为气孔状构造(图3c)和杏仁状构造,杏仁体主要为石英。;矿石以隐晶质结构为主,少量斑状结构。玄武岩矿石主要由斜长石、辉石、绿泥石组成,含少量黄铁矿(图3d)。其中,斜长石含量55%~75%,粒径约0.5 mm;辉石含量10%~25%,呈粒状充填于斜长石三角孔中,构成典型辉绿结构;绿泥石含量2%~6%。

2 样品及分析测试方法

本研究的6件玄武岩样品,均采自西天玄武岩矿床的V号矿体,采样位置见图2。其中,XT01、XT02为柱状节理构造玄武岩,XT01样品含斜长石斑晶;XT03号为杏仁状玄武岩;XT04、XT05为块状玄武岩,XT04样品含斜长石斑晶;XT06为气孔状玄武岩。为避免风化和蚀变作用的影响,采样时尽量采集新鲜样品。测试前先磨制薄片,经显微镜下观察,挑选无风化、未蚀变或风化蚀变程度相对较小的样品进行分析测试。所

有样品测试均在四川省地质矿产勘查开发局成都综合岩矿测试中心进行。其中,主量元素采用X射线荧光光谱仪(XRF)测定,测试相对偏差小于5%;稀土元素与微量元素采用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)测试,分析精度优于10%。

3 分析测试结果

3.1 主量元素

玄武岩矿石样品的主量元素分析结果见表1。从分析数据来看,矿石的含量为 SiO_2 45.54%~49.86%,平均47.28%; Al_2O_3 11.63%~13.67%,平均13.07%; Fe_2O_3 5.00%~7.48%,平均6.26%; FeO 8.37%~8.82%,平均8.63%; MgO 4.28%~5.66%,平均5.02%; CaO 6.93%~8.83%,平均7.73%; Na_2O 2.39%~2.97%,平均2.74%; K_2O 0.56%~1.29%,平均0.97%; TiO_2 2.95%~3.58%,平均3.11%。在 K_2O-SiO_2 岩石系列判别图(图4a)中,西天玄武岩矿石全部投入高钾钙碱性-钙碱性岩浆系列;在TAS判别图解(图4b)上,矿石投点全部落入玄武岩区。表明西天玄武岩为高钾钙碱性-钙碱性系列玄武岩,反映其岩浆形成部位较深^[14]。前人对峨眉山玄武岩 TiO_2 含量研究认为, TiO_2 含量高于2.80%为高Ti型玄武岩,低于2.80%为低Ti型玄武岩^[5,9]。西天玄武岩 TiO_2 含量为2.95%~3.58%,均大于2.80%,属于高Ti型玄武岩。

3.2 稀土与微量元素

从玄武岩矿石样品的稀土元素分析结果(表1)可知,样品的REE总量变化于 257.46×10^{-6} ~ 330.91×10^{-6} ,平均 290.75×10^{-6} 。其中轻稀土LREE含量变化于

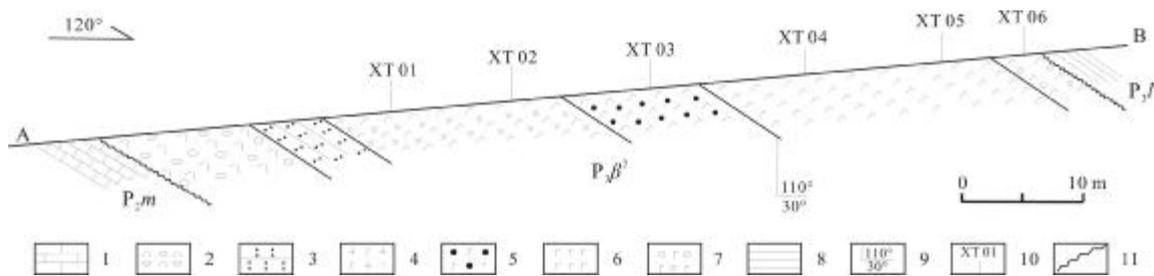


图2 西天玄武岩矿床V号矿体地质剖面图

Fig. 2 Profile of No.V orebody in Xitian basalt deposit

1—石灰岩(limestone); 2—凝灰-砾石层(tuff gravel layer); 3—沉积凝灰岩(sedimentary tuff); 4—柱状节理构造玄武岩(columnar jointed basalt); 5—杏仁状玄武岩(amygdaloidal basalt); 6—块状玄武岩(massive basalt); 7—气孔状玄武岩(vesicular basalt); 8—炭质页岩(carbonaceous shale); 9—地层产状(stratigraphic occurrence); 10—采样位置(sampling location); 11—角度不整合界线(angular unconformity)

表 1 西天玄武岩矿床矿石主量、稀土、微量元素组成
Table 1 Contents of major, rare earth and trace elements of ores from Xitian basalt deposit

样品号	XT01	XT02	XT03	XT04	XT05	XT06
SiO ₂	48.46	47.29	49.86	48.46	45.54	47.88
Al ₂ O ₃	13.51	13.19	13.67	13.23	13.21	13.63
Fe ₂ O ₃	5	6.37	5.64	5.89	7.17	7.48
FeO	8.51	8.37	8.82	8.72	8.59	8.77
MgO	4.28	5.55	4.33	4.78	5.51	5.66
CaO	7.82	8.83	6.93	7.84	7.6	7.34
Na ₂ O	2.93	2.68	2.7	2.97	2.39	2.79
K ₂ O	1	0.84	0.98	1.29	1.14	0.56
TiO ₂	3.07	2.95	2.99	3.07	2.97	3.58
烧失量	5.26	3.87	3.84	3.62	5.81	2.08
总量	99.84	99.94	99.76	99.87	99.93	99.77
La	53.46	54.63	51.74	43.64	45.38	45.52
Ce	119.73	124.65	109.51	96.25	98.16	97.67
Pr	17.38	18.42	16.56	13.47	13.47	14.52
Nd	74.21	78.04	72.46	57.97	60.19	64.12
Sm	16.53	17.08	15.63	12.63	12.55	13.31
Eu	4.38	4.58	4.31	3.67	3.49	3.57
Gd	12.57	12.73	12.07	10.53	10.69	10.38
Tb	1.76	1.81	1.64	1.61	1.67	1.72
Dy	8.27	8.65	9.07	8.22	8.46	8.85
Ho	1.58	1.65	1.58	1.49	1.54	1.63
Er	4.15	4.28	4.39	3.59	3.81	4.12
Tm	0.53	0.52	0.56	0.57	0.63	0.61
Yb	3.25	3.41	3.52	3.33	3.65	3.61
Lu	0.44	0.46	0.48	0.49	0.51	0.53
ΣREE	318.24	330.91	303.52	257.46	264.2	270.16
LREE	285.69	297.4	270.21	227.63	233.24	238.71
HREE	32.55	33.51	33.31	29.83	30.96	31.45
δEu	0.93	0.95	0.96	0.97	0.92	0.93
δCe	0.96	0.96	0.92	0.97	0.97	0.93
Rb	29.18	37.43	35.26	30.25	31.48	30.93
Ba	567.83	519.47	538.72	415.62	347.37	437.71
Th	5.74	6.61	5.76	5.19	4.96	5.69
U	1.34	1.25	1.46	1.43	1.52	1.29
Nb	48.25	51.65	44.77	42.08	40.51	39.38
Ta	5.32	5.88	5.03	4.92	5.12	5.75
Zr	358.73	378.39	346.37	359.43	367.62	413.24
Hf	8.89	9.13	8.74	8.75	9.24	10.07
Sr	444.63	436.72	447.48	438.19	455.31	369.48
Y	36.58	39.72	37.92	34.43	36.11	38.63

含量单位:主要元素%,稀土、微量元素 10⁻⁶.

227.63×10⁻⁶~297.40×10⁻⁶, 平均 258.81; 重稀土 HREE 含量变化于 29.83×10⁻⁶~33.51×10⁻⁶, 平均 31.94×10⁻⁶. LREE 含量远大于 HREE 含量, LREE/HREE 平均为 8.09. δEu 变化于 0.92~0.97, 平均 0.94, 具弱负 Eu 异常特征; δCe 变化于 0.92~0.97, 平均 0.95, 具弱负 Eu 异常特征. 在球粒陨石标准化配分模式图上(图 5), 表现为 LREE 富集、HREE 亏损的右倾型弱负 Eu 异常特征, 与区域上高 Ti 峨眉山玄武岩及 OIB(洋岛玄武岩)型玄武岩特征相似, 说明它们具有相似的岩浆成因特征; 此外, 弱负 Eu 异常特征还指示玄武质岩浆在侵入过程中, 可能在岩浆房的底部存在轻微的斜长石堆晶作用.

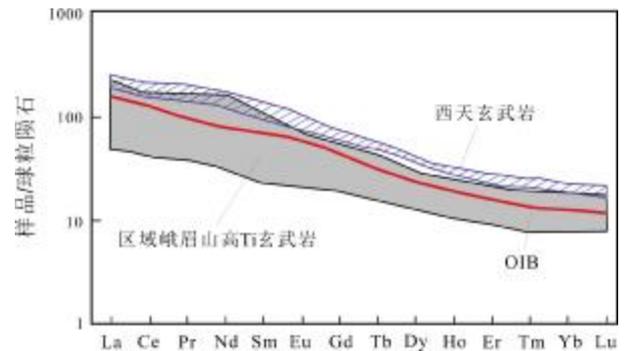


图 5 西天玄武岩稀土元素球粒陨石标准化配分模式图

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns of Xitian basalts 球粒陨石数据据文献[15] (chondrite data after Reference [15]); 峨眉山玄武岩及 OIB 数据据文献[8] (Emeishan basalt and OIB data after Reference [8])

在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 6)中, 西天玄武岩样品的 Ti 元素表现出正异常, Ta、Nb、Zr、Hf 为弱负异常, Sr 为强烈负异常特征, 具有显著的幔源岩浆特征, 与区域上高 Ti 峨眉山玄武岩特征一致. 除元素 Sr 外, 标准化曲线与 OIB 型玄武岩相似, 也说明其岩浆成因特征相似.

4 讨论

4.1 纤维用玄武岩工业指标

玄武岩矿石制造连续纤维主要包括将玄武岩捣碎、加热、拉丝等一系列工艺流程. 玄武岩中基本氧化物 SiO₂ 和 Al₂O₃ 的含量决定了纤维成型的性能和连续玄武岩纤维的强度、热稳定性和化学稳定特性^[16]. SiO₂ 的影响主要表现在, 玻璃状氧化物中 SiO₂ 含量偏低,

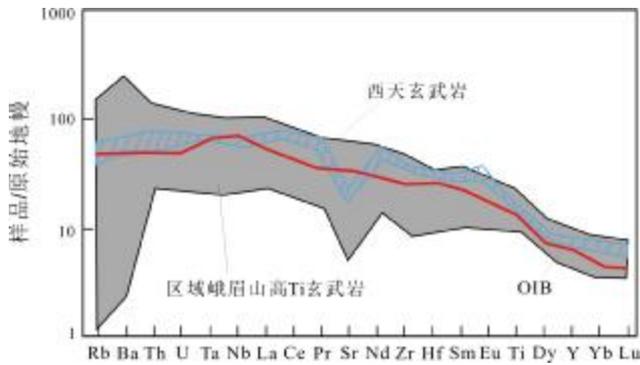


图6 西天玄武岩微量元素原始地幔标准化蛛网图

Fig. 6 Primitive mantle-normalized trace element spidergrams of Xitian basalts

原始地幔数据据文献 [15] (primitive mantle data after Reference [15]); 峨眉山玄武岩及 OIB 数据据文献 [8] (Emeishan basalt and OIB data after Reference [8])

会在拉丝温度区间形成弱硅酸离子键, 提高溶液的黏度, 造成纤维成型的间断, 增加连续玄武岩纤维成型的难度. 存在一定比例的 Al_2O_3 可以把拉丝时的玄武岩黏度调整到所需的范围并赋予连续玄武岩纤维的性能. 而 SiO_2 和 Al_2O_3 含量增加会提高熔化温度、拉丝温度和熔融物黏度, 从而增加了连续纤维制造难度. $SiO_2+Al_2O_3$ 含量在 60%~80% 时, 纤维具有较好的强度、热稳定性和化学稳定性^[16-17]. CaO 和 MgO 含量增加会减少熔融物的黏度, 反之则提高. K_2O 和 Na_2O 含量的增加, 会降低熔融物的析晶能力, 有利于成型工艺的实施. Fe_2O_3 和 FeO 的含量则影响熔化温度、拉丝成型温度范围、熔融物黏度等成型工艺参数以及连续纤

维的化学稳定性、热稳定性和强度等, 当 $FeO/Fe_2O_3 \geq 0.5$ 时才能保证温度和黏度稳定. TiO_2 含量越高则玄武岩纤维的热稳定性和化学稳定性越强^[17].

将西天纤维用玄武岩矿床玄武岩矿石的主量元素含量, 与四川帕沃可矿物纤维制品有限公司所需纤维用玄武岩矿石工业指标进行对比(表 2), 可见柱状节理玄武岩、块状玄武岩和气孔状玄武岩的主量元素含量满足工业指标要求; 含斑柱状节理玄武岩、含斑块状玄武岩因 Fe_2O_3 和 MgO 含量低于工业指标而不满足要求, 其主要原因可能为斜长石含量的增加降低了 Mg 、 Fe 含量; 杏仁状玄武岩因 SiO_2 含量高于工业指标且 Fe_2O_3 、 MgO 和 CaO 低于工业指标而不满足要求, 其主要原因可能是杏仁状玄武岩中杏仁体为石英所造成的. 西天纤维用玄武岩矿石特有而普遍的高 TiO_2 含量则使其成为优质的纤维生产原料.

综上可知, 四川帕沃可矿物纤维制品有限公司在纤维用玄武岩矿石选矿过程中, 应选择均质、细粒、无大的斑晶, 没有石英、玉髓、碎石及外来杂质的柱状节理玄武岩、块状玄武岩和气孔状玄武岩矿石, 其主量元素含量可满足连续玄武岩纤维用矿石工业指标.

4.2 矿石形成环境

西天玄武岩矿床赋矿地层为上二叠统峨眉山玄武岩组, 总体上介于海相茅口组灰岩和海陆交互相龙潭组含煤细碎屑岩之间, 主要属于滨海-浅海环境下的基性岩浆喷溢产物. 但从岩相学特征看, 玄武岩以块状构造和柱状节理构造为主, 未见枕状熔岩, 这些特征又表明该套玄武岩总体应形成于陆相喷发环境. 结合

表 2 西天玄武岩矿床矿石主量元素含量与企业纤维用玄武岩工业指标对比

Table 2 Comparison between major element contents of ores from Xitian basalt deposit and industrial indexes of fiber-used basalt

样品号	矿石构造	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	TiO_2	是否满足
XT01	含斑柱状节理玄武岩	48.46	13.51	5.00	8.51	4.28	7.82	2.93	1.00	3.07	否
XT02	柱状节理玄武岩	47.29	13.19	6.37	8.37	5.55	8.83	2.68	0.84	2.95	是
XT03	杏仁状玄武岩	49.86	13.67	5.64	8.82	4.33	6.93	2.70	0.98	2.99	否
XT04	含斑块状玄武岩	48.46	13.23	5.89	8.72	4.78	7.84	2.97	1.29	3.07	否
XT05	块状玄武岩	45.54	13.21	7.17	8.59	5.51	7.60	2.39	1.14	2.97	是
XT06	气孔状玄武岩	47.88	13.63	7.48	8.77	5.66	7.34	2.79	0.56	3.58	是
矿物纤维制品工业指标		44~49	10~14	6~15	—	5.5~10	7~12	—	—	1.5~3.0	—

含量单位: %.

玄武岩矿石的岩石地球化学特征, 对其形成的构造环境进行进一步判别。

由于玄武岩中的辉石、斜长及黑云母容易遭受后期蚀变, K、Na 等元素容易因蚀变而发生迁移, 因此采用 Al_2O_3 、MgO、 FeO^T 、Zr、Hf、Nb、Y 等相对稳定组分/元素来探讨玄武岩的形成环境. 在 Al_2O_3 -MgO- FeO^T 三角判别图解(图 7)中, 西天玄武岩投点全部落入大陆构造环境; 在 Ti/100-Zr-3Y 三角判别图解(图 8)中, 西天玄武岩投点全部落入板内玄武岩构造环境; 在 2Nb-Zr/4-Y 三角图解(图 9)中, 西天玄武岩投点全部落入板内碱性玄武岩区; 在 Ta/Hf-Th/Hf 图解(图 10)中, 西天玄武岩投点全部落入地幔热柱玄武岩区. 以上结果表明, 西天玄武岩形成环境为地幔热柱作用下的板内环境。

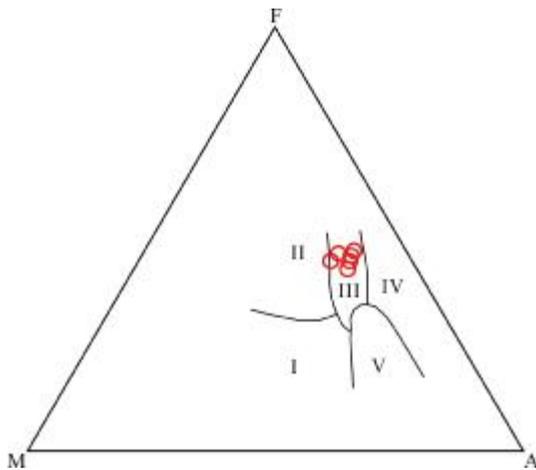


图 7 西天玄武岩 AMF 构造环境判别图解
(底图据文献[18])

Fig. 7 The AMF discrimination diagram of Xitian basalts
(After Reference [18])

I—洋中脊或洋底 (mid-ocean ridge or ocean floor); II—洋岛 (ocean island); III—大陆 (continent); IV—扩张性中央岛 (expansive central island); V—造山带 (orogenic belt)

4.3 地壳混染

前人研究表明, 上地壳岩石中通常强烈亏损 Ti, 在微量元素原始地幔标准化蛛网图中常表现出强烈的负 Ti 异常特征^[21]; 同时, 上地壳岩石具有富 Rb 和高 Sr 含量特征, 在原始地幔标准化比值蛛网图中, 往往会表现出 Rb 和 Sr 的正异常特征^[22]. 因此, 如果幔源岩浆在上升侵入过程中受到上地壳物质的混染, 势必会出现 Ti 的负异常和 Sr 的正异常. 而西天高 Ti 玄武岩的微量元素蛛网图中则表现出正 Ti 和负 Sr 异常

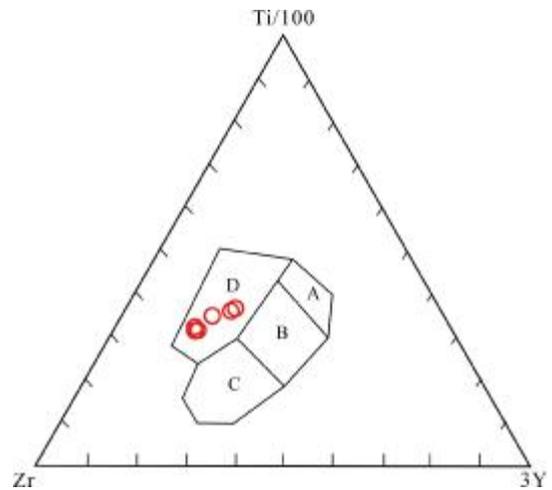


图 8 西天玄武岩 Ti-Zr-Y 构造环境判别图解
(底图据文献[18])

Fig. 8 The Ti-Zr-Y discrimination diagram of Xitian basalts
(After Reference [18])

A—岛弧拉斑玄武岩 (island arc tholeiite); B—洋中脊玄武岩、岛弧拉斑玄武岩和钙碱性玄武岩 (mid-ocean ridge basalt, island arc tholeiite, and calc-alkaline basalt); C—钙碱性玄武岩 (calc-alkaline basalt); D—板内玄武岩 (within plate basalt)

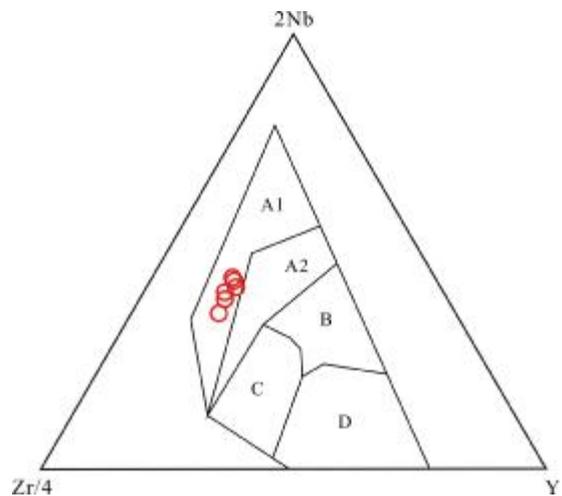


图 9 西天玄武岩 Nb-Zr-Y 构造环境判别图解
(底图据文献[19])

Fig. 9 The Nb-Zr-Y discrimination diagram of Xitian basalts
(After Reference [19])

A1+A2—板内碱性玄武岩 (within plate alkali basalt); A2+C—板内拉斑玄武岩 (within plate tholeiite); B—P 型洋中脊玄武岩 (P-type mid-ocean ridge basalt); D—N 型洋中脊玄武岩 (N-type mid-ocean ridge basalt); C+D—火山弧玄武岩 (volcanic arc basalt)

(图 6), 说明玄武质岩浆在侵入位过程中没有受到明显的上地壳混染作用。

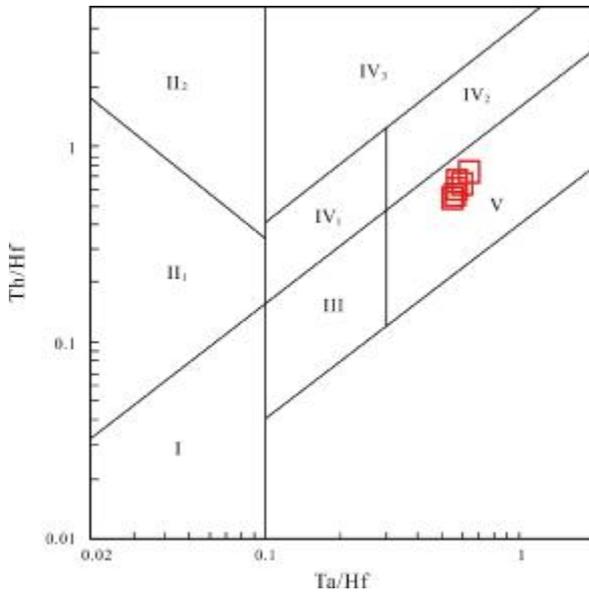


图 10 西天玄武岩 Th/Hf-Ta/Hf 判别图解

(底图据文献[20])

Fig. 10 The Th/Hf-Ta/Hf discrimination diagram of Xitian basalts

(After Reference [20])

I—N型洋中脊玄武岩(N-type mid-ocean ridge basalt); II₁—大洋岛弧玄武岩(ocean island arc basalt); II₂—陆缘岛弧及陆缘火山弧玄武岩(continental margin arc and marginal volcanic arc basalt); III—大洋板内洋岛、海山玄武岩及过渡型洋中脊玄武岩、富集型洋中脊玄武岩(oceanic within plate island, seamount basalt and transitional mid-ocean ridge basalt, and enriched mid-ocean ridge basalt); IV₁—陆内裂谷及陆缘裂谷拉斑玄武岩(intracontinental rift and continental marginal rift tholeiite); IV₂—陆内裂谷碱性玄武岩(intracontinental rift alkaline basalt); IV₃—大陆拉张带(或初始裂谷)玄武岩(continental tension zone/initial rift basalt); V—地幔热柱玄武岩(mantle plume basalt)

此外, Lu/Yb 比值可用于研究地壳混染的判别, 地幔起源的岩浆具有低 Lu/Yb 比值特征(平均值大致在 0.14~0.15 之间), 大陆地壳具有高 Lu/Yb 比值特征(平均值大致在 0.16~0.18 之间)^[21]. 西天玄武岩的 Lu/Yb 比值变化于 0.135~0.147 之间, 平均 0.14, 明显低于大陆地壳值, 表明其岩浆源自地幔且没有受到大陆地壳混染作用.

元素 Th、Nb、Ta 在蚀变及变质过程中比较稳定, 但容易受地壳混染的影响, 是地壳混染的重要标志^[23]. 由于大陆地壳通常富集 Th (中地壳平均为 10.5×10^{-6} , 上地壳平均 6.5×10^{-6} ^[21]), 强烈亏损 Nb 和 Ta, 因而常在微量元素蛛网图上表现出强烈的 Nb、Ta 负异常特征. 因此, 如果玄武岩岩石强烈亏损 Nb 和 Ta, 则可能反映受到了地壳物质混染. 西天玄武岩岩石 Th 含量

变化于 $4.96 \times 10^{-6} \sim 6.61 \times 10^{-6}$, 平均 5.65×10^{-6} , 低于中上地壳平均值. 在微量元素比值蛛网图上, Nb、Ta 表现为正常—弱负异常特征(图 6); 在 $(Th/Nb)_{PM} - (La/Nb)_{PM}$ 图解(图 11)上, 数据点均集中于玄武岩区范围内, 且靠近原始地幔区域(PM). 以上特征均表明, 西天纤维用玄武岩矿床的玄武岩矿石岩浆源自地幔且基本未受大陆地壳混染.

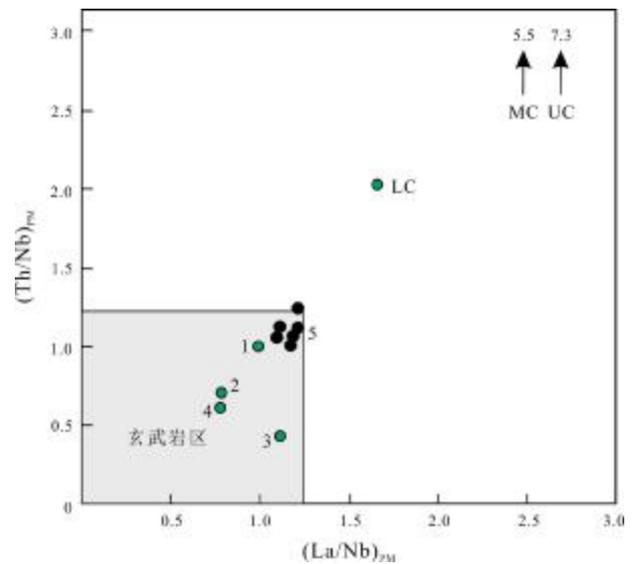


图 11 西天玄武岩原始地幔 Th/Nb-La/Nb 图解

(底图据文献[11])

Fig. 11 The primitive mantle Th/Nb-La/Nb diagram of

Xitian basalts

(After Reference [11])

1—原始地幔(primitive mantle); 2—洋岛型玄武岩(ocean island basalt); 3—正常型洋中脊玄武岩(normal mid-ocean ridge basalt); 4—富集型洋中脊玄武岩(enriched mid-ocean ridge basalt); 5—西天玄武岩(Xitian basalt); LC—下地壳(lower crust); MC—中地壳(mid-crust); UC—上地壳(upper crust)

4.4 源区特征

前人研究表明, TiO_2 的含量通常能够指示成岩物质的源区, 由地壳岩石部分熔融形成的岩浆 TiO_2 含量平均约为 0.72%, 而演化来源于软流圈的岩浆 TiO_2 含量平均约 1.27%, 与深部地幔物质活动有关的岩浆的 TiO_2 含量通常大于 2.0%^[24]. 西天玄武岩矿床玄武岩矿石的 TiO_2 含量为 2.95%~3.58%, 平均 3.11%, 反映其形成很可能与深部地幔活动有关. 此外, 西天玄武岩的 Nb ($39.38 \times 10^{-6} \sim 51.65 \times 10^{-6}$), Zr ($336.37 \times 10^{-6} \sim 413.24 \times 10^{-6}$) 含量接近于 OIB 型玄武岩的 Nb (48×10^{-6}) 和 Zr (280×10^{-6}) 含量, 球粒陨石标准化 REE 配分模式图与

原始地幔标准化微量元素比值蛛网图也与 OIB 型玄武岩相似(图 5、6),表明西天玄武岩岩浆演化来源于 OIB 型地幔源区. 在 La/Nb-La 判别图解(图 12)上,西天纤维用玄武岩矿床的玄武岩矿石均落在 OIB 型玄武岩区,与区域上云南昭通^[25]、贵州地区^[26]和广西西部地区^[27]玄武岩特征相似,指示形成玄武岩的岩浆来自 OIB 型地幔源区.

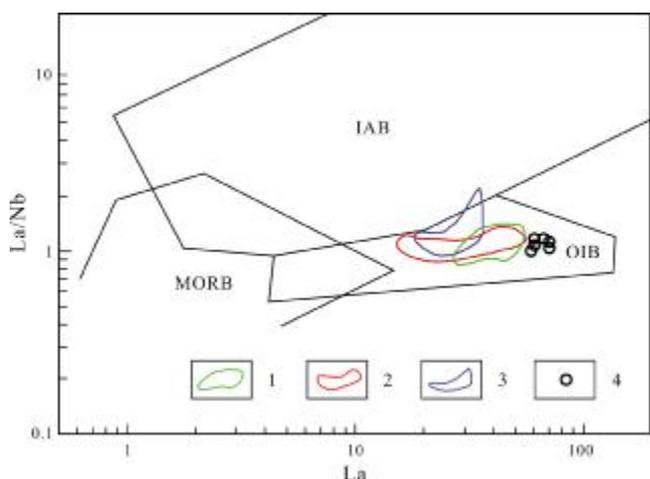


图 12 西天玄武岩矿石 La/Nb-La 源区判别图解
(底图据文献[22])

Fig. 12 The La/Nb-La source discrimination diagram of
Xitian basalts
(After Reference [22])

MORB—洋中脊玄武岩 (mid-ocean ridge basalt); IAB—岛弧玄武岩 (island-arc basalt); OIB—洋岛玄武岩 (ocean island basalt); 1—云南昭通地区玄武岩(据文献[25]) (Zhaotong basalt, from Reference [25]); 2—贵州地区玄武岩(据文献[26]) (Guizhou basalt, from Reference [26]); 3—广西地区玄武岩(据文献[27]) (Guangxi basalt, from Reference [27]); 4—西天玄武岩(Xitian basalt)

4.5 西天玄武岩成因

二叠系峨眉山玄武岩及其伴生的镁铁质-超镁铁质侵入岩在中国西南地区大面积出露,构成了峨眉山大火成岩省(ELIP). 目前绝大多数学者认为该大火成岩省的形成与地幔柱活动密切相关^[4-5, 7-10, 12, 28-30]. 前人依据 ELIP 玄武岩的 Ti 含量和 Ti/Y 比值,将其划分为高 Ti 和低 Ti 两个系列^[7];依据生物地层学、沉积地层学和地球化学,又将 ELIP 玄武岩细分为内带、中带和外带^[5],从内带到外带,具有 Ti 含量逐渐增加的特征^[29],其中外带玄武岩为岩性单一的高 Ti 玄武岩^[8]. 西天玄武岩具有典型的高 Ti 含量特征,表明其应分布于 ELIP 溢流玄武岩外带. 空间上广安西天玄武岩位

于峨眉山玄武岩喷发中心的东部,表明西天玄武岩应为 ELIP 的东缘外带.

前人研究认为,高 Ti 玄武岩是地幔柱活动相对较弱的阶段,特别是在地幔柱活动中心的边缘地带岩石圈较厚、熔融程度相对较低的条件下形成的^[7]. 广安西天高 Ti 玄武岩空间上位于 ELIP 东缘外带,远离峨眉山地幔柱头部,位于边缘地区,岩石圈较厚且温度较低,部分熔融程度小,因而其应当是地幔热柱边缘低程度部分熔融的产物.

5 结论

四川省广安市邻水西天纤维用玄武岩矿床为超大型玄武岩矿床. 玄武岩矿石为高钛、高钾钙碱性-碱性玄武岩,形成于板内环境,岩浆未受到地壳物质混染,为地幔热柱边缘低程度部分熔融成因产物,是峨眉山玄武岩的东缘外带组成部分.

相关生产企业纤维用玄武岩矿石选矿过程中,应选择均质、细粒、无大的斑晶,没有石英、玉髓、碎石及外来杂质的柱状节理玄武岩、块状玄武岩和气孔状玄武岩矿石.

参考文献(References):

- [1]王跃忠. 四川省纤维用玄武岩找矿远景分析[J]. 矿物学报, 2019, 39(6): 664-672.
Wang Y Z. A prospective appraisal for the exploration of fiber-applied basalts in Sichuan province, China [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2019, 39(6): 664-672.
- [2]张剑, 徐小明, 刘作磊. 四川省峨眉山玄武岩组连续纤维用玄武岩特征分析[J]. 高科技纤维与应用, 2019, 44(3): 52-59.
Zhang J, Xu X M, Liu Z L. Feature analysis of continuous fibre used basalt deposits in Emeishan basalt formation, Sichuan Province [J]. Hi-Tech Fiber and Application, 2019, 44(3): 52-59.
- [3]申桂英. 世界首条玄武岩纤维 2400 孔漏板拉丝智能化池窑生产线在广安点火[J]. 精细与专用化学品, 2020, 28(7): 29.
Shen G Y. The world's first basalt fiber 2400-hole bushing wire drawing intelligent pool kiln production line starts in Guang'an City [J]. Fine and Specialty Chemicals, 2020, 28(7): 29. (in Chinese)
- [4]Ali J R, Thompson G M, Zhou M F, et al. Emeishan large igneous province, SW China [J]. Lithos, 2005, 79(3/4): 475-489.
- [5]He B, Xu Y G, Huang X L, et al. Age and duration of the Emeishan flood volcanism, SW China: Geochemistry and SHRIMP zircon U-Pb dating of silicic ignimbrites, post-volcanic Xuanwei Formation and clay tuff at the Chaotian section [J]. Earth and Planetary Science

- Letters, 2007, 255(3/4): 306–323.
- [6] Xu J F, Suzuki K, Xu Y G, et al. Os, Pb, and Nd isotope geochemistry of the Permian Emeishan continental flood basalts: Insights into the source of a large igneous province[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71(8): 2104–2119.
- [7] Xu Y G, Chung S L, Jahn B M, et al. Petrologic and geochemical constraints on the petrogenesis of Permian-Triassic Emeishan flood basalts in southwestern China[J]. *Lithos*, 2001, 58(3/4): 145–168.
- [8] Xu Y G, He B, Chung S L, et al. Geologic, geochemical, and geophysical consequences of plume involvement in the Emeishan flood-basalt province[J]. *Geology*, 2004, 32(10): 917–920.
- [9] Xu Y G, Luo Z Y, Huang X L, et al. Zircon U-Pb and Hf isotope constraints on crustal melting associated with the Emeishan mantle plume[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, 72(13): 3084–3104.
- [10] 张招崇, 王福生, 郝艳丽, 等. 峨眉山大火成岩省中苦橄岩与其共生岩石的地球化学特征及其对源区的约束[J]. *地质学报*, 2004, 78(2): 171–180.
Zhang Z C, Wang F S, Hao Y L, et al. Geochemistry of the picrites and associated basalts from the Emeishan large igneous basalt province and constraints on their source region[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(2): 171–180.
- [11] 程文斌, 董树义, 金灿海, 等. 四川省沐川地区峨眉山玄武岩元素地球化学特征与成因探讨[J]. *矿物岩石*, 2019, 39(4): 49–60.
Cheng W B, Dong S Y, Jin C H, et al. Characteristics of elemental geochemistry and petrogenesis discussion of the Emeishan basalts in Muchuan area, Sichuan Province[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2019, 39(4): 49–60.
- [12] 宋谢炎, 侯增谦, 汪云亮, 等. 峨眉山玄武岩的地幔热柱成因[J]. *矿物岩石*, 2002, 22(4): 27–32.
Song X Y, Hou Z Q, Wang Y L, et al. The mantle plume features of Emeishan basalts[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2002, 22(4): 27–32.
- [13] Lai S C, Qin J F, Li Y F, et al. Permian high Ti/Y basalts from the eastern part of the Emeishan large igneous province, southwestern China: Petrogenesis and tectonic implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 47: 216–230.
- [14] 万渝生, 伍家善, 耿元生. 碱性玄武岩形成的时限及其地质意义[J]. *地球学报*, 1995(4): 365–374.
Wan Y S, Wu J S, Geng Y S. The time limit of the formation of alkaline basalts and its geological significance [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 1995(4): 365–374.
- [15] 孙贤初. 安山岩连续纤维成型工艺的研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2008: 1–65.
Sun X C. Research on the continuous andesite fiber forming technics [D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2008: 1–65.
- [16] 陈兴芬. 连续玄武岩纤维的高强度化研究[D]. 南京: 东南大学, 2018: 1–124.
Chen X F. Study on the high strength and performance of continuous basalt fiber[D]. Nanjing: Nanjing University, 2018: 1–124.
- [17] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [C]//Saunders A D, Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins*. London: Geological Society Publication, 1989: 313–345.
- [18] Pearce T H, Gorman B E, Birkett T C. The relationship between major element chemistry and tectonic environment of basic and intermediate volcanic rocks[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1977, 36(1): 121–132.
- [19] Meschede M. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram[J]. *Chemical Geology*, 1986, 56(3/4): 207–218.
- [20] 汪云亮, 张成江, 修淑芝. 玄武岩类形成的大地构造环境的 Th/Hf-Ta/Hf 图解判别[J]. *岩石学报*, 2001, 17(3): 413–421.
Wang Y L, Zhang C J, Xiu S Z. Th/Hf-Ta/Hf identification of tectonic setting of basalts[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17(3): 413–421.
- [21] Rudnick R L, Cao S. Composition of the continental crust [C]//Holland H D, Turekian K K. *The Crust: Treatise on Geochemistry*. Oxford: Elsevier, 2003: 1–64.
- [22] 魏菊英, 王关玉. 同位素地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 1988: 1–166.
Wei J Y, Wang G Y. *Isotopic geochemistry*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988: 1–166. (in Chinese)
- [23] 李曙光. 蛇绿岩生成构造环境的 Ba-Th-Nb-La 判别图[J]. *岩石学报*, 1993, 9(2): 146–157.
Li S G. Ba-Nb-Th-La diagrams used to identify tectonic environments of ophiolite[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1993, 9(2): 146–157.
- [24] 朱弟成, 莫宜学, 王立全, 等. 新特提斯演化的热点与洋脊相互作用: 西藏南部晚侏罗世—早白垩世岩浆作用推论[J]. *岩石学报*, 2008, 24(2): 225–237.
Zhu D C, Mo X X, Wang L Q, et al. Hotspot-ridge interaction for the evolution of Neo-Tethys: Insights from the Late Jurassic-Early Cretaceous magmatism in southern Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(2): 225–237.
- [25] Li J, Zhong H, Zhu W G, et al. Elemental and Sr-Nd isotopic geochemistry of Permian Emeishan flood basalts in Zhaotong, Yunnan Province, SW China[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2017, 106(2): 617–630.
- [26] Qi L, Zhou M F. Platinum-group elemental and Sr-Nd-Os isotopic geochemistry of Permian Emeishan flood basalts in Guizhou Province, SW China[J]. *Chemical Geology*, 2008, 248(1/2): 83–103.

- [35] Wada H. Microscale isotopic zoning in calcite and graphite crystals in marble[J]. *Nature*, 1988, 331(6151): 61–63.
- [36] Zhang C, Yu X Y, Jiang T L. Mineral association and graphite inclusions in nephrite jade from Liaoning, Northeast China: Implications for metamorphic conditions and ore genesis[J]. *Geoscience Frontiers*, 2019, 10(2): 425–437.
- [37] Zhang C, Santosh M. Coupled laser Raman spectroscopy and carbon stable isotopes of graphite from the khondalite belt of Kerala, southern India[J]. *Lithos*, 2019, 334–335: 245–253.
- [38] Schidlowski M. Carbon isotopes as biogeochemical recorders of life over 3.8 Ga of earth history: Evolution of a concept[J]. *Precambrian Research*, 2001, 106(1/2): 117–134.
- [39] Wang J Y, Liu J C, Zhang H D, et al. Metamorphism, geochemistry, and carbon source on sedimentary-metamorphic graphite deposits in eastern Shandong, China [J]. *Geological Journal*, 2020, 55(5): 3748–3769.
- [40] Yan M Q, Zhang D H, Huizenga J M, et al. Mineralogical and isotopic characterization of graphite deposits in the western part of the North Qaidam Orogen and East Kunlun Orogen, northeast Tibetan Plateau, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 126: 103788.
- [41] Cui N, Sun L, Bagas L, et al. Geological characteristics and analysis of known and undiscovered graphite resources of China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 91: 1119–1129.
- [42] 史会娟. 辽宁省北镇市石墨矿地质地球化学特征及原岩恢复[D]. 北京: 中国地质大学, 2015.
- Shi H J. The geochemical fractures and protolith restoration of Beizhen City graphite mine in Liaoning Province[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2015.
- [43] Valley J W, Taylor H P, Moorbath S. Isotopic assessment of relative contributions from crust and mantle sources to the magma genesis of Precambrian granitoid rocks [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1984, 310(1514): 605–625.
- [44] 蔡文春, 曾忠诚, 宋曙光, 等. 陕西商南湘河晶质石墨矿床地质特征与成因探讨[J]. *西北地质*, 2020, 53(3): 220–232.
- Cai W C, Zeng Z C, Song S G, et al. Geological characteristics and genesis of the Xianghe crystalline graphite deposit in Shangnan County of Shaanxi Province[J]. *Northwestern Geology*, 2020, 53(3): 220–232.
- [45] 柴广路, 李双应. 北淮阳东段佛子岭群变质岩地球化学特征及其地质意义[J]. *地学前缘*, 2016, 23(4): 29–45.
- Chai G L, Li S Y. Geochemical characteristics and geological implications for the metamorphic rocks of Foziling Group in eastern of North Huaiyang Tectonic Belt[J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(4): 29–45.
- [46] 杨守业, 李从先. REE 示踪沉积物物源研究进展[J]. *地球科学进展*, 1999, 14(2): 164–167.
- Yang S Y, Li C X. Research progress in REE tracer for sediment source[J]. *Advance in Earth Sciences*, 1999, 14(2): 164–167.
- [47] 刘英俊, 曹励明, 1987. 元素地球化学导论[M]. 北京: 地质出版社: 34–56.
- Liu Y J, Cao L M. An introduction to element geochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987. (in Chinese)
- [48] Ma Y, Huang Y, Liu L. Genesis of the Tianping flake graphite deposit at the western margin of Yangtze Block, SW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2021, 139: 104434.
- [49] 白家全, 郭道军, 凌亚军, 等. 攀枝花石墨矿成矿地质规律及成矿模型初探[J]. *四川地质学报*, 2021, 41(3): 398–405.
- Bai J Q, Guo D J, Ling Y J, et al. A preliminary study of metallogenic regularities and metallogenic model of crystalline graphite deposits in Panzhihua[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 2021, 41(3): 398–405.
- [50] 于海军, 王雪, 白家全. 攀枝花石墨矿床控矿构造特征与找矿模型[J]. *四川有色金属*, 2020(4): 33–35.
- Yu H J, Wang X, Bai J Q. Main ore-controlling structural characteristics and prospecting model of Panzhihua graphite deposit [J]. *Sichuan Nonferrous Metals*, 2020(4): 33–35.

(上接第 310 页/Continued from Page 310)

- [27] Fan W M, Zhang C H, Wang Y J, et al. Geochronology and geochemistry of Permian basalts in western Guangxi Province, Southwest China: Evidence for plume-lithosphere interaction [J]. *Lithos*, 2008, 102(1/2): 218–236.
- [28] 肖龙, 徐义刚, 梅厚钧, 等. 云南金平晚二叠纪玄武岩特征及其与峨眉地幔柱关系——地球化学证据[J]. *岩石学报*, 2003, 19(1): 38–48.
- Xiao L, Xu Y G, Mei H J, et al. Late Permian flood basalts at Jinping area and its relation to Emei mantle plume: Geochemical evidences[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2003, 19(1): 38–48.
- [29] 肖龙, 徐义刚, 何斌. 峨眉地幔柱-岩石圈的相互作用: 来自低钛和高钛玄武岩的 Sr-Nd 和 O 同位素证据[J]. *高校地质学报*, 2003, 9(2): 207–217.
- Xiao L, Xu Y G, He B. Emei mantle plume-subcontinental lithosphere interaction: Sr-Nd and O isotopic evidences from low-Ti and high-Ti basalts [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2003, 9(2): 207–217.
- [30] 鄢圣武, 白宪洲, 秦宇龙, 等. 四川昭觉-美姑地区峨眉山玄武岩古火山机构的发现及其喷发旋回的确定[J]. *中国地质*, 2021, 48(2): 536–548.
- Yan S W, Bai X Z, Qin Y L, et al. Discovery of paleo-volcanic edifice and determination of its eruptive circles of Emeishan basalt in Zhaojue-Meigu area, Sichuan Province [J]. *Geology in China*, 2021, 48(2): 536–548.