

北祁连山玉石沟蛇绿岩印度洋MORB型同位素组成特征及其地质意义*

侯青叶^{①②③} 赵志丹^{②③**} 张宏飞^④ 张本仁^④ 陈岳龙^②

(① 中国地质大学研究生院, 武汉 430074; ② 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083; ③ 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; ④ 中国地质大学地球科学院, 武汉 430074)

摘要 系统研究了北祁连山玉石沟蛇绿岩单元内枕状玄武岩的元素与 Sr, Nd, Pb 同位素地球化学特征. 玉石沟蛇绿岩单元内枕状玄武岩属于拉斑玄武岩系列, 球粒陨石标准化稀土元素分配模式为近平坦型, $(La/Yb)_N$ 介于 0.98~1.27 之间; Nb, Ta, Zr 和 Hf 无亏损, 显示出 MORB 型玄武岩的特征; 经构造环境图解判别, 样品落入了 MORB 区域内, 表明其形成于洋中脊环境或者成熟弧后盆地环境. Sr, Nd 和 Pb 同位素组成特征表明其地幔源区主要存在 DMM (亏损地幔) 和 EMII (II 型富集地幔) 两类地幔组分端元. 枕状玄武岩具有印度洋 MORB 型同位素组成特征, 与特提斯洋域地幔的同位素组成类似; 微量元素比值也与中国境内特提斯构造域内已知蛇绿岩的 N-MORB 型玄武岩的特征微量元素比值相一致. 北祁连山其他蛇绿岩单元内枕状玄武岩也表现出印度洋 MORB 型同位素组成特征, 从而初步表明北祁连古洋曾是特提斯构造域的一部分. 这对于研究北祁连的大地构造演化和归属有着重要的意义.

关键词 玉石沟蛇绿岩 印度洋 MORB 型同位素组成特征 特提斯构造域 北祁连

自上世纪 70 年代中期以来, 曾有很多地质学家从多种角度探讨北祁连山的构造演化^[1-7]. 其中在构造归属方面, 存在三种不同的观点: (1) 北祁连曾是古特提斯洋的一部分, 其构造演化应纳入古特提斯构造域的范畴之中^[1]; (2) 它曾经是华北大陆板块(或中朝克拉通)南缘的一个有限洋盆, 是由陆缘拉张, 进一步大洋化, 尔后再拼合而成的造山带^[2-4]; (3) 北

祁连洋盆属于古亚洲洋的一部分^[5]. 因此, 对于该地区的大地构造归属问题目前依然存在着较大的争议.

印度洋 MORB 型和 OIB 型玄武岩与太平洋和北大西洋 MORB 型和 OIB 型玄武岩在 Nd, Pb 和 Sr 同位素组成上存在系统差异^[8-11]. Hart 将南半球这一大规模的同位素异常定义为 Dupal 异常^[10], 而后 Mahoney 等又将其定义为印度洋 MORB 型同位素组成特征^[11].

2004-11-16 收稿, 2005-05-17 收修改稿

* 国家自然科学基金重点资助项目(批准号: 40534052)

** 联系人, E-mail: zdzhao@cugb.edu.cn

本文将统一称其为印度洋MORB型同位素组成特征。Hart认为南半球地幔中大规模同位素异常带(包括印度洋域)已经存在了几十亿年^[10,12]。目前,许多研究者通过研究特提斯构造域蛇绿岩单元内MORB型玄武岩的Nd, Pb和Sr同位素组成特征来研究印度洋MORB型同位素组成特征的成因^[11,13-18]。研究表明:位于劳亚和冈瓦纳古陆之间的古特提斯和新特提斯蛇绿岩均具有与现今印度洋MORB型玄武岩类似的Nd, Pb和Sr同位素异常特征,说明特提斯构造域古洋幔至少自晚古生代至今一直保持这种异常的同位素组成特征,并被印度洋地幔所继承^[13-23]。尽管不同研究者对于印度洋MORB型同位素组成特征及特提斯构造域内蛇绿岩具有印度洋MORB型同位素组成特征的成因持有不同的观点^[10-12,15-18],但印度洋MORB型同位素组成特征仅出现在特提斯构造域蛇绿岩单元内MORB型玄武岩中已经得到大多数研究者的认可^[11,15-18,24,25]。张本仁等通过对秦岭造山带及两侧的克拉通边缘前寒武纪玄武岩(仅选择能够反映早期上地幔特征的变玄武岩)、中生代玄武岩系统的地球化学特征对比,认为:至少自元古宙以来,华北陆块南缘与北秦岭、南秦岭,扬子陆块北缘上地幔在微量元素比值和同位素组成上

存在系统的差异^[25]。鉴于这种地幔所具有的区域上有规律的和长期性(至少 1 Ga)^[26]的不均一性,以及特提斯构造域和周边冈瓦纳陆块地幔所具有的较长期的稳定的特征,应能为通过地球化学方法追踪特提斯洋的演化、判别造山带内古洋幔的构造归属提供科学依据。

北祁连是我国最早研究蛇绿岩的地区之一^[2,27],玉石沟蛇绿岩是北祁连内岩石组合发育最为完整的蛇绿岩套^[1-6]。本文对玉石沟蛇绿岩进行了系统的地球化学和Sr, Nd, Pb同位素组成研究,试图从地球化学角度进一步限定北祁连古洋幔的构造归属。

1 区域地质概况

祁连造山带位于秦祁昆巨型造山带中段,挟持在中朝板块和柴达木板块之间。祁连造山带西端被具有左行走滑特征的阿尔金断裂带所截,它的东端被右行走滑的同心-固原断裂所截(图 1)^[4]。蛇绿岩单元主要出露在北祁连山内,代表性的蛇绿岩带为托勒山蛇绿岩带,走廊南山蛇绿岩带和景泰老虎山蛇绿岩带^[1-7]。玉石沟蛇绿岩出露在托勒山蛇绿岩带内,是北祁连内最具代表性的蛇绿岩单元。其主要岩石类型有斜辉橄榄岩、纯橄岩、辉长岩、角斑岩、细碧

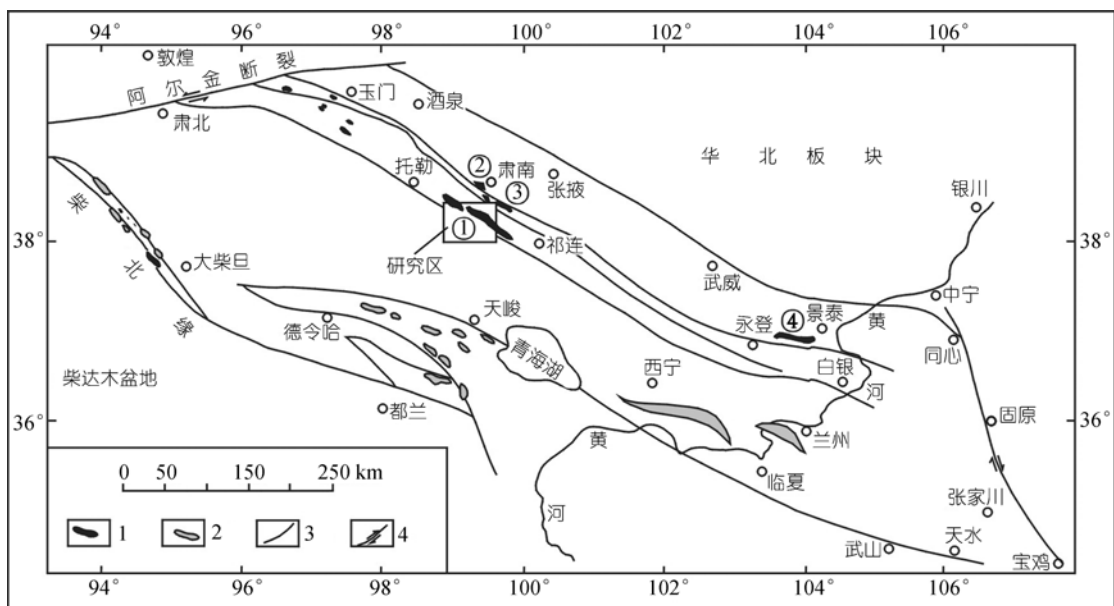


图 1 祁连造山带蛇绿岩分布略图(据文献^[4])

①玉石沟蛇绿岩; ②九个泉蛇绿岩; ③大岔大坂蛇绿岩; ④老虎山蛇绿岩。1. 蛇绿岩单元; 2. 基性超基性岩带; 3. 边界断裂; 4. 大型走滑断裂

质枕状熔岩及团块状含放射虫硅质岩^[4]。前人对其玄武岩微量元素研究表明,该蛇绿岩单元内的玄武岩具有 MORB 特征^[2-5]。宋述光等通过流变学和温压条件计算确定该蛇绿岩底部橄榄岩是大洋岩石圈之下软流圈上涌的产物^[28]。有关玉石沟蛇绿岩的年代学也有一些研究。肖序常等根据覆盖在基性熔岩上板岩夹层灰岩中的化石,认为玉石沟蛇绿岩形成于寒武纪^[27]。该蛇绿岩单元内基性火山熔岩的 Rb-Sr 等时线年龄为 521.48 ± 23.97 Ma, 且托勒山蛇绿岩带中发育的火山岩-沉积岩系中含有丰富的早奥陶世三叶虫、笔石和腕足类化石^[3]。最近有关玉石沟蛇绿岩内堆晶辉长岩的锆石离子探针 (SHRIMP) 年龄报道为 550 ± 17 Ma^[29]。因此, 本文认为 550 Ma 可以代表玉石沟蛇绿岩的形成年龄。本文所采集的 5 件枕状玄武岩样品, 3 件地幔橄榄岩样品分布在冯益民等所测制的玉石沟蛇绿岩剖面内^[4]。地幔橄榄岩具有轻微的蛇纹石化, 枕状玄武岩均遭受了绿片岩相的变质作用。

2 样品处理及分析方法

样品无污染地粉碎至 200 目以下, 在西北大学大陆动力学实验室完成。主量元素、微量元素和 Sr, Nd 同位素测试均在中国科学院地质与地球物理所完成。主量元素用 XRF 方法测定, 精度优于 5%; 微量元素用 ICP-MS 方法测定, 精度优于 10%; Sr 和 Nd 同位素测试在 MAT-262 质谱仪上进行, Sr 和 Nd 同位素的分馏校正分别采用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ 和 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 。在分析期间, JMC 标准 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 测定值的平均值为 $0.511937 \pm 10(2\sigma)$; BCR-1 的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 测定值为 $0.512594 \pm 10(2\sigma)$ 。NBS987 标准 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 测定值的平均值为 $0.710217 \pm 11(2\sigma)$ 。样品 Pb 同位素测试在中国地质科学院测试中心 MC-ICP-MS 质谱仪上进行, NBS981 标准测定值的平均值为: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 16.934 \pm 1$; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.486 \pm 1$; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 36.673 \pm 3$, 铅同位素比值精度优于 0.05%。样品的测试结果见表 1 和 2。

3 元素地球化学特征

3 件地幔橄榄岩常量元素含量的变化特征为: SiO_2 为 35.67%~37.83%, TiO_2 为 0.02%, TFe_2O_3 为 9.01%~9.29%, MgO 为 44.32%~45.51%。球粒陨石标准化稀

土元素分配模式为轻稀土富集型, 其 $(\text{La}/\text{Sm})_N = 3.07\sim 4.63$; $(\text{La}/\text{Yb})_N = 2.13\sim 3.89$ 。世界上大多数蛇绿岩单元内变质橄榄岩的球粒陨石标准化稀土元素分配模式为 LREE 亏损型(二辉橄榄岩)或 V 型(方辉橄榄岩和纯橄岩)^[13]。关于蛇纹石化的变质橄榄岩之所以富集 LREE 的成因, 曾有研究者将其归结为蛇纹石化作用的影响及部分地受到富 LREE 的部分熔融物的加入, 而非反映地幔本质特征^[13]。玉石沟蛇绿岩底部地幔橄榄岩中橄榄石早期流体包裹体成分以甲烷 (CH_4) 为主^[30]。宋述光等通过流变学和温压条件计算确定该蛇绿岩底部橄榄岩是大洋岩石圈之下软流圈上涌的产物^[27]。因此, 该变质地幔橄榄岩组成应反映了古洋幔固有的特征, 而非后期地质作用改造的结果, 即地幔橄榄岩的富集特征是由于地幔柱(或者深部地幔)物质的加入造成的, 而不是蛇纹石化作用的结果。枕状玄武岩的地球化学特征也可以印证这一点(见下文)。

5 件枕状玄武岩常量元素含量的变化特征如下: SiO_2 为 47.31%~48.46%, TiO_2 为 1.06%~2.52%, TFe_2O_3 为 10.76%~16.65%, MgO 为 4.62%~7.10%。在 TAS 图(图略)中, 5 件玄武岩样品均落入拉斑玄武岩系列内。球粒陨石标准化稀土元素分配模式表现为近平坦型(图 2), $(\text{La}/\text{Sm})_N = 0.82\sim 1.03$; $(\text{La}/\text{Yb})_N = 0.98\sim 1.27$; 有微弱的负钕异常。样品在原始地幔标准化微量元素蜘蛛网图上(图 3), 总体上表现出从强不相容元素到弱不相容元素近平坦型, Rb, K 呈现出负异常; Sr 呈正或负异常; WQ-257 样品具有明显的 U 正异常, 这些易活动元素的变化特征可能与海相玄武岩形成时遭受海水热液蚀变或后期发生绿片岩相变质有关。Nb, Ta, Zr 和 Hf 无负异常排除了玄武岩形成于岛弧环境的可能性。在 2Nb-Zr/4-Y 和 Ti/100-Zr-Y $\times 3$ 构造环境判别图解中(图 4), 所有样品无一例外地均落入 MORB 区域内, 表明玉石沟蛇绿岩形成于洋中脊或者成熟弧后盆地环境。然而玄武岩并不显示典型洋中脊玄武岩所具有的明显亏损 LREE 的球粒陨石标准化稀土元素分配模式, 结合玉石沟地幔橄榄岩富集 LREE 的特征, 认为该蛇绿岩单元中枕状玄武岩物质主要来自软流圈地幔, 但也有一定数量深部地幔物质或地幔柱物质(一般富集强不相容元素)的

表 1 玉石沟蛇绿岩单元内地幔橄榄岩和枕状玄武岩常量元素(%）、微量元素(10^{-6})组成

样品 岩性	WQ-254 枕状玄武岩	WQ-255 枕状玄武岩	WQ-257 枕状玄武岩	WQ-258 枕状玄武岩	WQ-259 枕状玄武岩	WQ-264 超镁铁质岩	WQ-265 超镁铁质岩	WQ-266 超镁铁质岩
SiO ₂	47.31	48.46	47.87	47.87	47.76	36.99	37.83	35.67
TiO ₂	1.44	2.52	1.06	1.31	1.63	0.02	0.02	0.02
Al ₂ O ₃	15.42	13.81	13.81	15.25	14.53	1.26	0.97	0.95
TFe ₂ O ₃	13.33	16.65	10.76	12.49	14.42	9.29	9.02	9.01
Fe ₂ O ₃	4.35	6.78	4.18	3.96	5.35	3.80	3.53	4.74
FeO	8.16	8.97	5.98	7.76	8.25	4.99	5.00	3.89
MnO	0.18	0.20	0.11	0.17	0.14	0.13	0.12	0.13
MgO	6.36	4.62	6.16	6.72	7.10	45.51	46.17	44.32
CaO	10.02	5.99	10.53	9.06	4.40	0.19	0.22	0.22
Na ₂ O	2.67	3.79	2.19	3.35	4.11	0.04	0.04	0.05
K ₂ O	0.08	0.12	0.07	0.12	0.04	0.01	0.02	0.03
P ₂ O ₅	0.14	0.24	0.12	0.13	0.16	0.01	0.01	0.01
LOI	3.53	3.85	6.73	3.12	5.66	4.57	4.01	8.13
TOTAL	100.47	100.26	99.41	99.59	99.96	98.01	98.43	98.53
Li	6.25	5.01	7.04	6.00	4.59	1.17	2.46	2.12
Be	0.41	0.53	0.63	0.30	0.37	0.24	0.12	0.13
Sc	41.6	43.7	32.4	40.5	36.6	4.8	5.4	5.3
V	322	459	321	308	352	87	32	34
Cr	128	21	83	130	26	5217	6557	6993
Co	53	66	42	51	42	191	182	171
Ni	47.5	24.3	47.6	55.8	15.5	2770	2975	2690
Cu	77.9	57.4	38.4	119	37.2	10.1	6.4	5.6
Zn	90.5	173	87.8	82.2	106	114	129	122
Ga	18.5	21.8	19.8	18.3	18.7	1.9	1.4	1.5
Rb	0.53	1.54	0.48	1.08	0.18	1.48	2.65	1.04
Sr	352	303	47.0	365	131	1.0	4.8	2.7
Zr	88.0	151	73.3	83.8	89.7	0.4	5.1	0.7
Nb	5.22	8.33	4.90	5.01	5.76	0.03	0.10	0.12
Cs	0.27	1.01	0.40	0.39	0.82	0.02	0.02	0.01
Ba	37.0	42.6	46.9	55.0	53.9	2.9	2.4	70.8
Hf	2.86	4.72	2.18	2.83	2.87	0.60	0.58	0.29
Ta	0.47	0.57	0.97	0.45	0.44	0.06	0.17	0.18
Pb	1.49	1.97	1.59	1.08	1.08	0.64	1.00	0.75
Th	0.58	0.82	0.53	0.50	0.64	0.45	0.74	0.46
U	0.16	0.27	0.70	0.14	0.23	0.08	0.13	0.09
La	5.73	8.06	4.91	5.37	5.32	0.28	0.58	0.23
Ce	14.16	21.62	11.23	13.37	13.43	0.48	0.67	0.39
Pr	2.23	3.49	1.81	2.12	2.15	0.06	0.12	0.06
Nd	11.27	17.95	9.07	10.69	10.98	0.21	0.38	0.17
Sm	3.82	6.15	3.01	3.48	3.58	0.06	0.08	0.04
Eu	1.26	1.91	1.03	1.28	1.16	0.05	0.05	0.05
Gd	4.72	7.38	3.83	4.61	4.67	0.06	0.08	0.05
Tb	0.89	1.41	0.71	0.84	0.85	0.01	0.01	0.01
Dy	5.77	8.86	4.77	5.42	5.37	0.05	0.08	0.05
Ho	1.22	1.86	1.05	1.16	1.18	0.01	0.02	0.01
Er	3.49	5.28	3.19	3.38	3.29	0.04	0.06	0.04
Tm	0.50	0.75	0.52	0.49	0.47	0.01	0.01	0.01
Yb	3.07	4.55	3.42	3.10	2.98	0.05	0.11	0.07
Lu	0.49	0.71	0.61	0.49	0.46	0.01	0.02	0.01
Y	32.3	46.9	26.2	30.4	28.5	1.1	1.0	0.7

表 2 玉石沟蛇绿岩单元内枕状玄武岩的 Sr, Nd, Pb 同位素组成 ($t = 550$ Ma)

样品	WQ-254	WQ-255	WQ-257	WQ-258	WQ-259
Sr(10^{-6})	389.8	292.9	44.9	366.8	120.7
Rb(10^{-6})	1.60	1.57	0.63	1.35	0.44
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	0.0118	0.0154	0.0404	0.0105	0.0104
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.70513	0.70546	0.70600	0.70509	0.70530
(2σ)	1	1	2	1	1
($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) _t	0.70504	0.70534	0.70568	0.70500	0.70522
Sm(10^{-6})	3.56	5.93	2.93	3.40	3.66
Nd(10^{-6})	11.03	18.03	9.39	10.46	11.36
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.1955	0.1992	0.1886	0.1971	0.1953
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.512958	0.512967	0.512955	0.512978	0.512958
(2σ)	7	7	12	14	15
($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$) _t	0.512253	0.512249	0.512275	0.512268	0.512255
$\epsilon_{\text{Nd}}(0)$	6.2	6.4	6.2	6.6	6.2
$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	6.3	6.3	6.8	6.6	6.4
$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	18.082	18.456	20.562	18.054	18.812
$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	15.537	15.556	15.743	15.537	15.584
$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	38.068	38.230	38.530	38.116	38.511
($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) _t	17.470	17.684	17.998	17.348	17.606
($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) _t	15.501	15.511	15.593	15.495	15.514
($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) _t	37.374	37.484	37.909	37.291	37.431
$\Delta 7/4\text{Pb}$	11.6	10.3	15.1	12.4	11.4
$\Delta 8/4\text{Pb}$	62.6	47.7	52.2	69.0	51.8

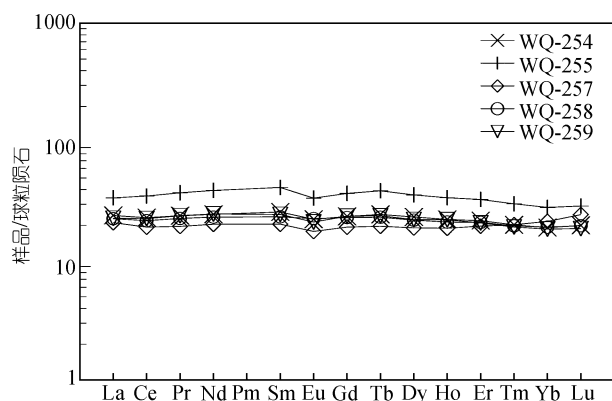


图 2 玉石沟枕状玄武岩球粒陨石标准化稀土元素分配模式(标准化值据文献[31])

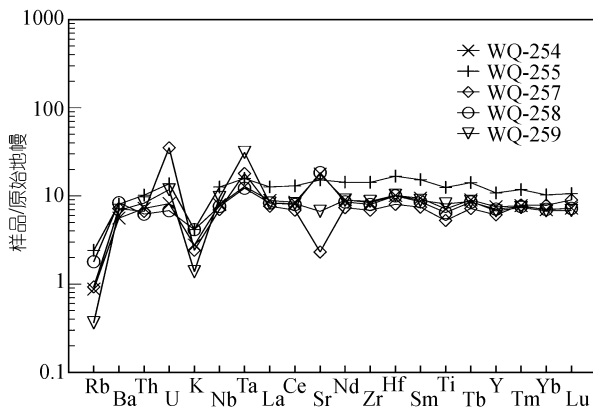


图 3 玉石沟枕状玄武岩原始地幔标准化微量元素蛛网图(标准化值据文献[31])

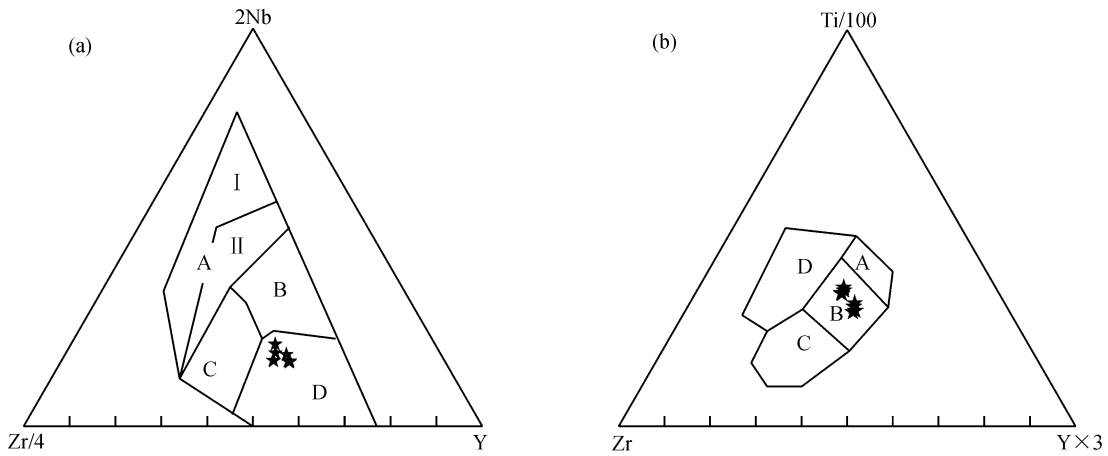


图 4 玉石沟枕状玄武岩构造环境判别图解

(a) 2Nb-Zr/4-Y构造环境判别图解(据文献[32]): AI, 板内碱性玄武岩; AII, 板内碱性玄武岩, 板内拉斑玄武岩; B, E-MORB; C, 板内拉斑玄武岩, 岛弧玄武岩; D, N-MORB; (b) Ti/100-Zr-Y×3 构造环境判别图解(据文献[33]): A, 岛弧拉斑玄武岩; B, MORB; C, 钙碱性玄武岩; D, 板内玄武岩

加入。

4 Sr-Nd-Pb 同位素组成特征

枕状玄武岩样品 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 集中在 0.70509~0.70700 之间; $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 集中在 0.512955~0.512978 之间, $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 变化范围为 6.18~6.64; 取 $t=550\text{ Ma}$ (玉石沟蛇绿岩的形成年龄[29]), 计算得出样品 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 变化范围为 6.25~6.76, ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)变化范围为 0.70509 ~ 0.70600。由于强不相容元素(例如Ba, Pb, Rb, Sr)容易受后期蚀变作用影响而发生改变, 因此避免用这些元素来讨论玄武岩的源区特征。海水Sr的含量较高(8×10^{-6}), 且能较容易地改变洋壳玄武岩Sr同位素比值特征[34]。相对而言, 海水Nd和Pb的含量较低, 分别为 4×10^{-6} 和 2×10^{-6} , 因此, 洋壳玄武岩Nd, Pb 同位素比值不易受到海水蚀变的影响[34]。故尽管玄武岩样品 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 小于现代大洋海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.709), 但本文仍只采用Nd, Pb 同位素组成特征来讨论玄武岩地幔源区的特征, 以期更好地研究玄武岩地幔源区的特征及其归属。

样品 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化范围为 18.054~20.562; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化范围为 15.537~15.743; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化范围为 38.068~38.530。根据样品的 Th, U 和 Pb 含量, 进行 Pb 同位素比值的时间校正计算($t = 550\text{ Ma}$),

结果表明, 样品($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_t 变化范围为 17.348~17.998, ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_t 变化范围为 15.501~15.593, ($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_t 变化范围为 37.291~37.909。在 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ -($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_t 图解中(图 5), 样品成分点落入了经时间校正($t = 550\text{ Ma}$)的印度洋 MORB 区域内, 表明该玄武岩地幔源区具有印度洋 MORB 型同位素组成特征。北祁连山九个泉及老虎山蛇绿岩内枕状玄武岩

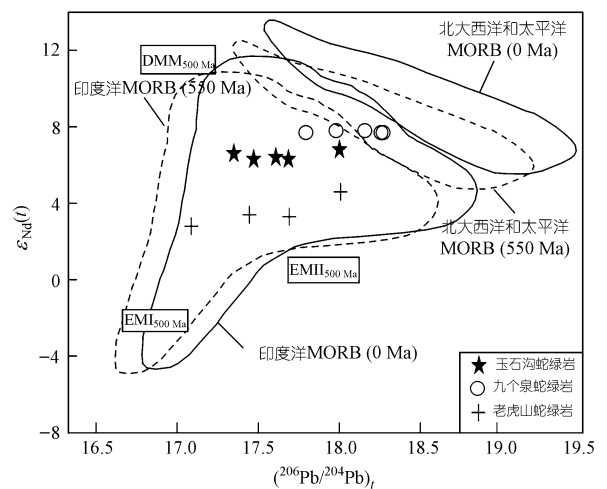


图 5 玉石沟枕状玄武岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ -($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_t 图解

印度洋MORB和北大西洋-太平洋MORB 现在值的范围据参考文献[11, 16, 17]圈定。其中MORB区域时间校正所采用的参数为: $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.24$, $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb} = 4.67$ (据文献[35])。DMM(亏损地幔), EMI(第一类富集地幔)和EMII(第二类富集地幔)地幔端元组成据参考文献[12, 36, 37]。时间校正所参考的 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 和 $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ 值据文献[35~40]

经时间校正($t = 550$ Ma)的 Nd, Pb 同位素组成大多数也表现出印度洋 MORB 型同位素特征(未发表数据);个别样品点落入经时间校正($t = 550$ Ma)的印度洋 MORB 区域和北大西洋和太平洋 MORB 区域界限处。从图 5 中可以看出样品点主要分布在经时间校正($t = 550$ Ma)的亏损地幔(DMM)和 EMII 地幔端元之间,大致构成了负相关趋势。

在 $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t - (^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t$ 和 $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t - (^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t$ 图解中(图 6), 玉石沟玄武岩样品成分点分布于经时间校正($t = 550$ Ma)的北半球参考线(NHRL)以上; 落入了经时间校正($t = 550$ Ma)的印度洋 MORB 区域内; 样品成分点也主要分布在经时间校正($t = 550$ Ma)的亏损地幔(DMM)和 EMII 地幔

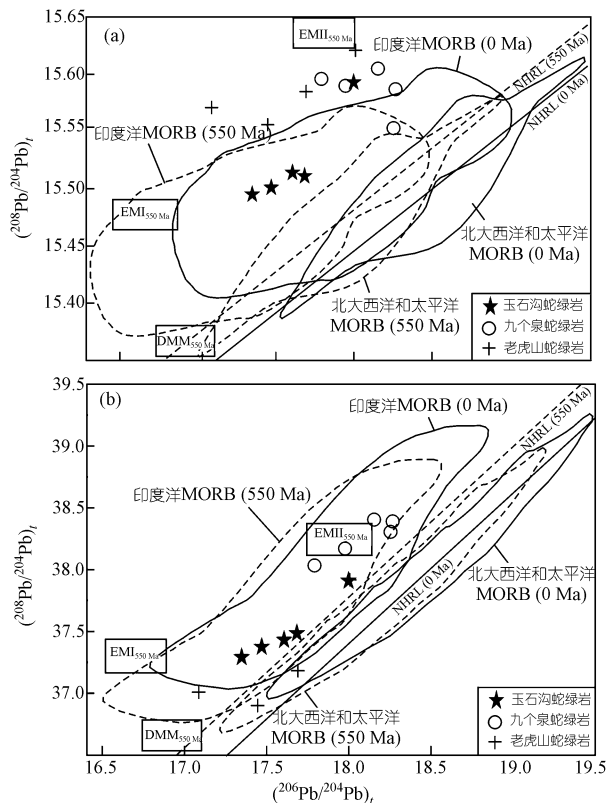


图 6 玉石沟枕状玄武岩 Pb 同位素比值图解

(a) $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t - (^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t$ 图解; (b) $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t - (^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t$ 图解
印度洋MORB和北大西洋-太平洋MORB现在值的范围据文献[11, 16, 17]圈定。MORB区域时间校正的参数为: $\omega = 5.0$ 和 $\mu = 2.3$ (据文献[35])
北半球参考线时间校正所参考的参数值为 $\omega = 9.07$ 和 $\mu = 23.9$ 据文献[40]。
DMM(亏损地幔), EM I(第一类富集地幔)和EMII(第二类富集地幔)地幔端元时间校正所参考的 $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}(\mu)$ 和 $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}(\kappa)$ 参数值据文献[35-40]

端元之间。北祁连九个泉和老虎山蛇绿岩单元内大多数枕状玄武岩同样也表现印度洋MORB型同位素组成特征(图 6), 但九个泉枕状玄武岩 $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t$, $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t$ 和 $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t$ 比玉石沟枕状玄武岩相应的Pb同位素比值更高, 靠近EMII地幔端元。根据Hart给出的 $\Delta 7/4\text{Pb}$ 和 $\Delta 8/4\text{Pb}$ 的计算公式[41], 计算的玉石沟枕状玄武岩 $\Delta 7/4\text{Pb}$ 变化范围为 10.3 ~ 15.1(平均值为 12.2), $\Delta 8/4\text{Pb}$ 变化范围为 47.7 ~ 69.0(平均值为 56.7), ΔSr 变化范围为 51.3~60.0 (平均值为 53.96)。由于Sr同位素比值因海水蚀变影响有所增大, ΔSr 值也有一定程度的偏高。上述结果可以表明枕状玄武岩具有典型的印度洋MORB型同位素组成特征(传统意义上的Dupal型同位素异常特征), 尤其在Pb同位素组成上更为肯定。在 $\Delta 7/4\text{Pb} - \Delta 8/4\text{Pb}$ 图解(图 7)中, 玉石沟枕状玄武岩样品点大多数分布在亏损地幔经时间校正($t = 550$ Ma)的DMM和EMII地幔端元之间, 且靠近EMII地幔端元。这些特征均可表明玉石沟蛇绿岩单元中拉斑玄武岩的源区主体上表现出亏损地幔(DMM)和EMII地幔端元的混合特征, 但也无法排除少量其他地幔端元组分的加入, 即很可能属于过渡型洋脊玄武岩(T-MORB)。在Zr/4- 2Nb-Y图解中(图 4(a)), 拉斑玄武岩的成分点虽然落于N-MORB区内, 但却偏向 N - M O R B 与 E - M O R B 区界限一侧, 可能就是反映了亏损地幔源岩浆和洋岛玄

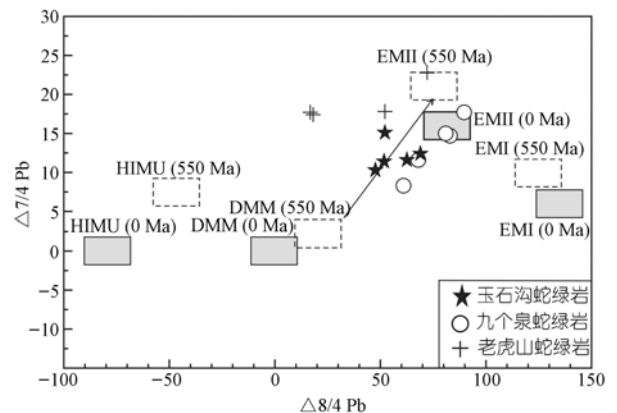


图 7 玉石沟枕状玄武岩 $\Delta 7/4\text{Pb} - \Delta 8/4\text{Pb}$ 图解

DMM: 亏损地幔; EM I: 第一类富集地幔; EMII: 第二类富集地幔;
HIMU: 高 U/Pb 比地幔端元; 地幔端元同位素组分的时间校正所采用的 $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}(\mu)$ 和 $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}(\kappa)$ 参数值据文献[35-40]

武岩源(或地幔柱源)岩浆的混合特征. 同样九个泉和老虎山枕状玄武岩在 $\Delta 7/4\text{Pb}-\Delta 8/4\text{Pb}$ 图解中也表现出与玉石沟枕状玄武岩相一致的 Pb 同位素特征(图 7).

5 讨论

本文收集和总结了我国境内蛇绿岩单元内 MORB 型玄武岩的微量元素数据^[41-52], 并将计算得出的特征元素对的比值列于表 3. 本文在选择特征元素对比值的过程中, 主要考虑两种强不相容元素的比值及两种化学性质十分相似的不相容元素的比值, 这些微量元素比值已被证明在地幔岩石部分熔融形成玄武质岩浆的过程中不随熔融程度而变化, 其比值可以代表它们在地幔源区中的比值^[53]. 表中多数蛇绿岩产于已知特提斯构造域, 同时以便对比, 也列出了南天山哈尔克山蛇绿岩单元内 MORB 型玄武岩的数据. 对比表中数据可以看出: 玉石沟蛇绿岩单元内拉斑玄武岩与已知特提斯构造域的蛇绿岩单元内 MORB 型玄武岩的微量元素比值变化范围基本一致.

表现为, 共同具有较高的 Zr/Nb (15.38~54.75), La/Nb (0.5~2.15), Ti/Zr (73.60~108.06), Ti/V (17.86~35.64), $\text{TiO}_2/\text{P}_2\text{O}_5$ (9.81~13.83) 及较低的 Th/La (0.03~4.87), Rb/Sr (0.029~0.129) 和 Zr^* (0.90~1.21). 玉石沟蛇绿岩单元内 MORB 型玄武岩在微量元素比值特征上明显不同于南天山哈尔克山蛇绿岩单元内 MORB 型玄武岩^[51], 后者相对于特提斯洋域内同类岩石而言, 具有明显较低的 Zr/Nb (2.35), La/Nb (0.04), Ti/Zr (42.20), Ti/V (17.53), $\text{TiO}_2/\text{P}_2\text{O}_5$ (2.02) 和较高的 Th/La (17.93), Rb/Sr (0.332) 和 Zr^* (2.18) 比值特征. 初步对比结果表明玉石沟蛇绿岩单元内 MORB 型玄武岩在微量元素比值上与特提斯构造域蛇绿岩单元内同类岩石相一致, 而不同于塔里木以北的南天山哈尔克山蛇绿岩单元内 MORB 型玄武岩.

北祁连内玉石沟蛇绿岩单元内枕状玄武岩在 Nd, Pb 同位素组成上都表现出印度洋 MORB 型同位素组成特征, 并与古特提斯和新特提斯蛇绿岩具有一致的同位素组成. 因此, 北祁连山古洋幔应属于特提斯构造域. 前人对祁连山地区古生物区系和基底年

表 3 玉石沟及中国已知构造域中蛇绿岩单元内 MORB 型玄武岩的微量元素比值^{a)}

蛇绿岩	样数	Zr/Nb	La/Nb	Th/La	Rb/Sr	Ti/Zr	Ti/V	$\text{TiO}_2/\text{P}_2\text{O}_5$	Zr^*	
步青山	8	变化范围	29.12~69.71	0.77~2.23	0.05~0.09	0.005~0.186	83.46~106.34	10.55~15.57	0.95~1.20	
		平均值	42.25	1.24	0.07	0.074	90.85	13.83	1.08	
德尔尼	4	变化范围				0.022~0.045	79.60~87.71	34.38~36.33	11.92~12.50	1.16~1.24
		平均值				0.031	84.13	35.64	12.17	1.21
勉略	26	变化范围	7.40~88.38	0.31~3.42	0.02~0.17	0.007~0.207	71.24~111.4	16.60~47.11	6.57~14.11	0.80~1.63
		平均值	33.94	1.70	0.08	0.129	95.00	33.29	10.02	1.03
康县-琵琶寺-南坪	5	变化范围	25.51~50.81	1.26~2.10	0.04~0.06	0.016~0.034	71.97~126.66	21.75~31.36	6.61~15.71	0.83~1.04
		平均值	39.27	1.69	0.04	0.029	92.14	26.05	11.36	0.91
金沙江	15	变化范围	7.42~98.00	0.61~4.51	0.04~1.83	0.01~0.173	71.60~114.41	19.57~38.40	7.10~12.25	0.63~1.51
		平均值	24.12	1.20	0.87	0.042	86.42	24.81	9.81	1.11
昌宁-孟连	2	平均值	15.38	0.50	4.67	0.048	73.60	17.86	10.85	1.50
西藏	15	变化范围	22.87~71.02	1.40~5.07	0.01~0.05	0.001~0.122	84.28~218.80	23.30~43.13	3.42~14.29	0.44~1.04
		平均值	53.75	2.15	0.03	0.036	108.06	30.45	10.08	0.90
哈尔克山	6	变化范围	2.09~3.14	0.03~0.05	14.38~23.66	0.178~0.506	38.81~50.21	16.58~18.57	1.86~2.36	1.90~2.55
		平均值	2.35	0.04	17.93	0.332	42.20	17.53	2.02	2.18
玉石沟	5	变化范围	14.96~18.12	0.92~1.10	0.10~0.12	0.01	94.55~105.37	19.11~31.77	9.23~10.64	0.91~0.97
		平均值	16.45	1.01	0.10	0.01	94.14	25.61	10.08	0.95

a) $\text{Zr}^* = \text{Zr}_N / (\text{Sm}_N + \text{Nd}_N) / 2$, 其中 Zr_N , Sm_N , Nd_N 为样品 Zr, Sm, Nd 含量经原始地幔标准化值后的值, 原始地幔平均成分见文献^[31]

代学组成的研究也能印证北祁连应属于特提斯构造域的观点. 祁连地区中晚寒武世和奥陶纪存在着与华南相似的过渡型动物群^[54]. 祁连造山带及邻区前寒武纪深变质基底的时代和组成表明, 祁连-柴北缘地体和阿拉善-敦煌地体在晋宁期以前相互分离, 分属于扬子和华北不同的板块体系^[55]. 故北祁连山内蛇绿岩单元内枕状玄武岩的地球化学特征应代表了原特提斯洋域地幔的地球化学特征.

前人对古特提斯和新特提斯蛇绿岩单元内玄武岩系统的同位素研究表明特提斯构造域古洋幔自晚古生代至今一直保持印度洋 MORB 型同位素组成特征^[11,14-18]. 本文的研究表明印度洋 MORB 型同位素组成特征至少由晚震旦世(550 Ma)开始就已经在特提斯构造域古洋地幔中存在. 从而表明特提斯洋域(包括原特提斯, 古特提斯和新特提斯)地幔均具有印度洋 MORB 型同位素组成特征, 换句话说, 至少自原特提斯以来该构造域的地幔特征就一直保持到现今, 并为印度洋洋幔所继承. 尽管目前国际上对印度洋 MORB 型同位素组成特征的成因有着很大的争议, 但特提斯构造域异常的同位素组成特征长期存在的事实, 不仅为研究地幔不均一性提供了重要的约束, 而且也应为判别造山带构造归属的一种途径.

作为北祁连山最有代表性的玉石沟蛇绿岩, 其 MORB 型玄武岩在特征微量元素对的比值及 Pb, Nd 和 Sr 同位素组成上均可同已知特提斯域蛇绿岩单元内同类岩石相对比, 而且最近北祁连山内其它主要蛇绿岩套(九个泉蛇绿岩和老虎山蛇绿岩)的研究也表明, 它们 MORB 型玄武岩均具有与玉石沟蛇绿岩套同类岩石相似的地球化学特征(将另文发表). 因此, 可以有根据地认为北祁连山应归属于特提斯构造域, 鉴于该区蛇绿岩多形成于晚震旦世到早古生代, 故北祁连山应属于原特提斯构造域北侧的一个分支.

致谢 许继峰和宋述光对本文初稿提出了中肯的修改意见; 实验室工作中国科学院地质与地球物理研究所靳新娣、陈福坤、储著银、李潮峰的帮助与支持; 吴汉泉、张利参加部分野外工作, 在此一并表示感谢.

参 考 文 献

- 王 荃, 刘雪亚. 我国西部的古海洋地壳及其大地构造意义. 地质科学, 1976, (1): 42~55
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 北祁连山海相火山岩岩石成因. 北京: 地质出版社, 1996. 5~146
- 夏林圻, 夏祖春, 任有祥, 等. 祁连山及邻区火山作用与成矿. 北京: 地质出版社, 1998. 4~55
- 冯益民, 何世平. 祁连山大地构造与造山作用. 北京: 地质出版社, 1996. 37~70
- 张 旗, 孙晓猛, 周德进, 等. 北祁连蛇绿岩特征、形成环境及其构造意义. 地球科学进展, 1997, 12(4): 366~393
- 宋述光. 北祁连山俯冲杂岩带的构造演化. 地球科学进展, 1997, 12(4): 151~165
- 宋述光, 张立飞, Niu Y, 等. 北祁连山榴辉岩锆石 SHRIMP 定年及其构造意义. 科学通报, 2004, 49(6): 592~595[摘要]
- Dupre B, Allegre C J. Pb-Sr isotope variation in Indian ocean basalts and mixing phenomena. *Nature*, 1983, 303:142~146[DOI]
- Hamelin B, Allegre C J. Large-scale regional units in the depleted upper mantle revealed by an isotope study of the South-West Indian ocean ridge. *Nature*, 1985, 315:196~199[DOI]
- Hart S R. A large scale isotope anomaly in the southern hemisphere mantle. *Nature*, 1984, 309: 753~757[DOI]
- Mahoney J J, Frei R, Tejada M L, et al. Tracing the Indian ocean mantle domain through time: isotopic results from old west Indian, east Tethyan, and south Pacific seafloor. *J Petrol*, 1998, 39(7): 1285~1306[DOI]
- Hart S R. Heterogeneous mantle domains: signatures, genesis and mixing chronologies. *Earth Planet Sci Lett*, 1988, 90: 273~296[DOI]
- 张 旗, 周德进, 李秀云, 等. 云南双沟蛇绿岩的特征和成因. 岩石学报, 1995, 11(增): 190~202
- 许继峰, 韩吟文. 秦岭古 MORB 型岩石的高放射性成因铅同位素组成: 特提斯型古洋幔存在的证据. 中国科学, D 辑, 1996, 26(增刊): 34~41
- Weis D, Frey F. Role of the Kerguelen plume in generating the eastern Indian ocean seafloor. *J Geophys Res*, 1996, 101: 13841~13849
- Xu J F, Castillo P R, Li X H, et al. MORB-type rocks from the Paleo-Tethyan Mian-Lueyang northern ophiolite in the Qinling Mountains, central China: implications for the source of the low $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and high $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ mantle component in the Indian Ocean. *Earth Planet Sci Lett*, 2002, 198: 323~337[DOI]
- Xu J F, Castillo P R. Geochemical and Nd-Pb isotopic characteristics of the Tethyan asthenosphere: Implications for the origin of the Indian Ocean mantle domain. *Tectonophysics*, 2004, 393: 9~27[DOI]
- Zhang S Q, Mahoney J J, Mo X X, et al. Evidence for a widespread Tethyan upper mantle with Indian-ocean-type isotopic characteristics. *J Petrol*, 2005, 46: 1~30[DOI]
- 周 肃, 莫宣学, Mahoney J J, 等. 西藏罗布莎蛇绿岩中辉长辉绿岩 Sm-Nd 定年及 Pb、Nd 同位素特征. 科学通报, 2001, 46(16): 1387~1390

1 王 荃, 刘雪亚. 我国西部的古海洋地壳及其大地构造意义. 地

- 20 周德进, 沈丽璞, 张旗. 滇西古特提斯构造带玄武岩 Dupal 异常. 地球物理学进展, 1995, 10(2): 39~44
- 21 陈亮, 孙勇, 裴先治, 等. 古特提斯蛇绿岩的综合对比及其动力学意义——以德尔尼蛇绿岩为例. 中国科学, D 辑, 2003, 33(12): 1136~1142
- 22 Zhang Q, Zhou D J, Sen L, et al. Pb isotopic anomaly in ophiolitic and oceanic island basalt, Western Yunnan, Mem Lithosph. Tect Evol Res. Beijing: Seismological Press, 1993, (1): 102~106
- 23 潘桂棠, 陈智梁, 李兴振, 等. 东特提斯地质构造形成演化. 北京: 地质出版社, 1997. 1~215
- 24 Hamelin B, Dupre, Allegre C J. The Lead isotope systematics of ophiolite complexes. Earth Planet Sci Lett, 1984, 67: 351~366[DOI]
- 25 张本仁, 高山, 张宏飞, 等. 秦岭造山带地球化学. 北京: 科学出版社, 2002. 42~46
- 26 Hofmann A W. Sampling mantle heterogeneity through oceanic basalts: Isotopes and trace elements. In: Carlson R W, eds. Treatise on geochemistry. Oxford: Elsevier-Pergamon, 2004, 2: 61~101
- 27 肖序常, 陈国铭, 朱志直. 祁连山古蛇绿岩的地质构造意义. 地质学报, 1978, 54(4): 281~295
- 28 Song S G, Su L. Rheological properties of mantle peridotites at Yushigou in the North Qilian Mountains and their implications for plate dynamics. Acta Geologica Sinica, 1998, 72(2): 131~141
- 29 史仁灯, 杨经绥, 吴才来, 等. 北祁连玉石沟蛇绿岩形成于晚震旦世的 SHRIMP 年龄证据. 地质学报, 2004, 78(5): 649~657
- 30 苏犁, 宋述光, 王志海. 北祁连山玉石沟地幔橄榄岩中富 CH_4 流体包裹体及其意义. 科学通报, 1999, 44(8): 855~858
- 31 McDonough W F, Sun S S. The composition of the earth. Chem Geol, 1995, 120: 223~253[DOI]
- 32 Meschede M. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram. Chem Geol, 1986, 56: 207~218[DOI]
- 33 Pearce J A, Cann G H. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. Earth Planet Sci Lett, 1973, 19: 339~349
- 34 McCulloch M T, Gregory R T, Wasserburg G J. Sm-Nd, Rb-Sr, and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ isotopic systematics in an oceanic crustal section: Evidence from the Samail ophiolites. J Geophys Res, 1981, 86: 2721~2735
- 35 White W M. $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ in MORB and open system evolution of the depleted mantle. Earth Planet Sci Lett, 1993, 115: 211~226[DOI]
- 36 Hugh R. Rollison. Using geochemical data: Presentation, interpretation. Singapore: Longman Scientific & Technical Limited, 1993, 186~187
- 37 Zindler A, Hart S. Chemical geodynamics. Annu Rev Earth Planet Sci, 1986, 14: 493~571[DOI]
- 38 Chauvel C, Hofmann A W, Vidal P. HIMU and EM: The french polynesian connection. Earth Planet Sci Lett, 1992, 110: 99~109[DOI]
- 39 Weaver B L. The origin of ocean island basalt end-member compositions: Trace element and isotopic constraints. Earth Planet Sci Lett, 1991, 104: 381~439[DOI]
- 40 Hofmann A W. Chemical differentiation of the Earth: Relationship between mantle, continental crust and oceanic crust. Earth Planet Sci Lett, 1988, 90: 297~314[DOI]
- 41 Bian Q T, Li D, Pospelov I, et al. Age, geochemistry and tectonic setting of Buqingshan ophiolites, north Qinghai-Tibet Plateau, China. Journal of Asian Earth Sciences, 2004, 23: 577~596[DOI]
- 42 陈亮, 孙勇, 柳小明, 等. 青海省德尔尼蛇绿岩的地球化学特征及其大地构造意义. 岩石学报, 2000, 16(1): 106~110
- 43 赖绍聪, 张国伟, 董云鹏. 秦岭-大别勉略缝合带湖北随州周家湾变质玄武岩地球化学及其大地构造意义. 矿物岩石, 1998, 18(2): 1~8
- 44 魏永峰, 罗森林. 甘孜-理塘结合带中段蛇绿岩的地质特征. 四川地质学报, 2003, 23 (3): 134~140
- 45 姚学良, 兰艳. 甘孜-理塘蛇绿混杂岩带存在 N 型洋脊玄武岩. 西昌地质, 2000, (3): 11~13
- 46 尹显科. 甘孜-理塘断裂带北段蛇绿混杂岩构造岩片特征. 四川地质学报, 1995, 15(4): 248~256
- 47 赖绍聪, 张国伟. 勉略结合带五里坝火山岩的地球化学研究及其构造意义. 大地构造与成矿学, 2002, 26(1): 43~50
- 48 赖绍聪, 张国伟, 杨瑞璞. 南秦岭巴山弧两河-饶峰-五里坝岛弧岩浆带的厘定及其大地构造意义. 中国科学, D 辑, 2000, 30: 53~63
- 49 赖绍聪, 张国伟, 裴先治, 等. 南秦岭康县-琵琶寺-南坪构造混杂带蛇绿岩与洋岛火山岩地球化学及其大地构造意义. 中国科学, D 辑, 2003, 33(1): 10~19[摘要][PDF]
- 50 赖绍聪, 张国伟, 裴先治. 南秦岭勉略结合带琵琶寺洋壳蛇绿岩的厘定及其大地构造意义. 地质通报, 2002, 21(8-9): 465~470
- 51 高俊, 汤耀庆, 赵民, 等. 新疆哈尔克山蛇绿岩的形成环境. 地球科学, 1995, 20(6): 682~688
- 52 莫宣学, 路凤香, 沈上越, 等. 三江特提斯火山作用与成矿. 北京: 地质出版社, 1993. 1~199
- 53 Bougault H, Joron J, Treuil M. The primordial chondritic nature and large-scale heterogeneities in the mantle: Evidence from high and low partition coefficient elements in oceanic basalts. London: Philo Trans R Soc, 1980, Ser. A297: 203~213
- 54 姚建新, 许志琴, 杨经绥. 祁连和秦岭地区寒武纪和奥陶纪古生物区系关系的探讨. 古地理学报, 2004, 6(3): 347~354
- 55 万渝生, 许志琴, 杨经绥. 祁连造山带及邻区前寒武纪深变质基底的时代和组成. 地球学报, 2003, 24(3): 319~324