

造山带中古海山残片的识别 ——以拉脊山缝合带青沙山和东沟地质填图为例

付长垒^{1,2}, 闫臻¹, 王秉璋², 牛漫兰³

FU Changlei^{1,2}, YAN Zhen¹, WANG Bingzhang², NIU Manlan³

1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;

2. 青藏高原北部地质过程与矿产资源重点实验室/青海省地质调查院, 青海 西宁 810012;

3. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009

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

2. Key Laboratory of the Northern Qinghai-Tibet Plateau Geological Processes and Mineral Resources/Qinghai Geological Survey Institute, Xining 810012, Qinghai, China;

3. Department of Resources and Environment, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China

摘要:造山带内海山/洋岛残片的识别是确定古缝合带和古洋盆存在的直接地质证据。祁连造山带被普遍认为是原特提斯洋盆俯冲和闭合的产物,然而南祁连地区是否存在古洋盆长期存在争议。通过对拉脊山关键地段早古生代岩石开展大比例尺地质填图和室内综合研究,在青沙山和东沟地区识别出连续的由洋岛型枕状玄武岩、火山碎屑岩、泥岩、凝灰岩和灰岩组成的火山-沉积组合序列,它们分别呈构造窗和构造残片产出,是拉脊山增生杂岩的重要组成部分,代表中寒武世—早奥陶世原特提斯洋内海山残片。这些海山残片的识别不仅表明拉脊山地区存在早古生代洋盆和缝合带,同时为造山带古洋盆构造演化研究提供了新思路。

关键词:海山;缝合带;古洋盆;大比例尺地质填图;拉脊山

中图分类号:P623;P584;P587 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2021)01-0031-10

Fu C L, Yan Z, Wang B Z, Niu M L. Identification of the relics of paleo-seamount in orogens: A case study from the geological mapping in Qingshashan and Donggou areas within the Lajishan suture zone. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40 (1): 31-40

Abstract: Identification of the relics of seamount/oceanic island in orogens can provide critical geological evidence for the presence of the suture zone and paleo-ocean basin. The Qilian Orogen is widely considered as the product of subduction and closure of the Proto-Tethyan Ocean. However, whether there exists a paleo-ocean basin in the South Qilian is still hotly debated. Based on large-scale geological mapping and comprehensive study on the Early Paleozoic rocks in the key area of Lajishan, a successive volcanic-sedimentary sequence composed of OIB-type pillow basalt, pyroclastic rock, mudstone, tuff, and limestone was recognized in the Qingshashan and Donggou areas. The rocks are outcropped as the tectonic slice and tectonic window respectively. The volcanic-sedimentary sequence is the major components of the accretionary complex within Lajishan, and represents the relics of Middle Cambrian to Early Ordovician seamounts within the Proto-Tethyan Ocean. The identification of these relics of seamount not only indicates that there exist Early Paleozoic ocean basin and suture zone in the Lajishan area but also provides a new idea for the study of tectonic evolution of the paleo-

收稿日期:2020-06-12;修订日期:2020-10-15

资助项目:国家自然科学基金项目《拉脊山古洋盆初始俯冲的地质记录和时限研究》(批准号:42072266)、《拉脊山增生楔结构、组成与古洋盆重建研究》(批准号:41872241)、中国地质调查局项目《中央山系都兰、天水等地区基础地质调查》(编号:DD20190006)和中国地质科学院地质研究所统筹科研项目《共和盆地沉积-构造演化》(编号:S2007)

作者简介:付长垒(1988-),男,博士,副研究员,从事蛇绿岩与古板块构造研究。E-mail:fucl815@126.com

ocean basin in orogens.

Key words: seamount; suture zone; paleo-ocean basin; large-scale geological mapping; Lajishan

海山/洋岛是大洋板块内孤立散布且高出洋底 1000 m 以上的水下平顶山或露出海面的岛屿^[1-2], 它们是大洋板块地层 (OPS) 的重要组成部分^[3-6], 通常呈链状分布于大洋盆地中 (如夏威夷-皇帝海山链、路易维尔海山链、东经 90° 海岭等), 记录了板块运动和洋盆扩张历史^[7]。随着大洋板块在消减板块边缘的俯冲, 海山与少量洋中脊玄武岩、深海硅质岩及海沟浊积岩共同保留在增生楔中, 构成造山带增生杂岩的重要组成部分^[6, 8-10], 成为确定古缝合带和古洋盆存在的直接地质证据。

海山通常被认为是“热点”岩浆作用的产物^[11], 主要由洋岛型玄武岩 (OIB)、碳酸盐岩 (生物礁灰岩) 盖层、斜坡相角砾状碳酸盐岩-火山碎屑岩组合, 以及斜坡前端深海硅质页岩和硅质岩共同组成^[12-13]。海山在仰冲板块前端容易遭受俯冲刮削或底垫托等作用^[14-16], 部分海山残片以“构造岩片”形式保留在增生杂岩中, 其内部独特的岩石组合序列成为识别古海山的基本地质依据。据此, 地质学者通过野外详细研究和大比例尺地质填图, 在日本增生杂岩中识别并重建了多个古海山序列^[3-4, 17-18]。因此, 大比例尺地质填图成为造山带中识别古海山残片的有效手段。

祁连造山带是中央造山带的重要组成部分 (图 1-a), 被认为是早古生代原特提斯洋闭合和微陆块聚合的产物^[19-25], 以发育包含大量早古生代蛇绿岩、高压低温变质岩、增生杂岩、岛弧火山岩、弧前/弧后盆地及俯冲-碰撞相关侵入岩的北祁连缝合带为典型特征^[21, 23, 26-32]。这些岩石构造单元是原特提斯洋盆演化过程的重要证据, 备受广大地质学者的关注。已有地质资料表明, 在南祁连拉脊山地区也发育一条长约 200 km 的孤立蛇绿岩带 (图 1-b)。多数研究者认为, 该蛇绿岩形成于裂隙槽或裂谷环境, 不发育早古生代洋盆^[33-37], 而部分学者根据区域构造和地球化学分析结果提出弧后盆地、大洋高原、构造窗等不同认识^[38-41]。由此可见, 拉脊山地区是否存在古洋盆仍存在争议, 严重制约了对南祁连乃至祁连造山带结构组成及早古生代构造演化的认识。

为此, 笔者对拉脊山蛇绿岩及相关岩石进行了

大比例尺填图, 并在青沙山和东沟识别出一套连续的由枕状玄武岩、火山碎屑岩、泥岩、凝灰岩和灰岩组成的火山-沉积组合序列, 与古海山组成一致。本文在介绍拉脊山古海山残片岩石组合特征和室内研究的基础上, 进一步探讨古海山与增生杂岩和岛弧火山岩的相互关系, 以及空间展布特征, 揭示拉脊山地区古缝合带和古洋盆存在的证据, 为南祁连洋早古生代板块构造格局研究提供新思路和新证据。

1 拉脊山地质概况

拉脊山位于祁连造山带南部, 是一条呈 NNW—SEE 向展布并向 NE 凸出的弧形山脉 (图 1-b)。拉脊山长期以来被认为是中祁连内部的裂谷^[33-35], 南北两侧分别与代表前寒武纪基底的化隆岩群和湟源群呈断层接触^[22, 42]。已有地质资料显示, 拉脊山地区主要发育寒武纪—奥陶纪火山岩和沉积岩, 其中寒武系以中基性熔岩为主, 夹大量火山碎屑岩、硅质岩和碳酸盐岩透镜体, 以及不同规模的超基性岩块, 奥陶系为中基性熔岩、凝灰岩和碎屑岩组合。另外, 在寒武系和奥陶系之上不整合覆盖一套由砾岩、含砾粗砂岩和砂岩构成的晚奥陶世—志留纪陆相碎屑岩^[43]。

为深入研究拉脊山地区的岩石组合类型、结构特征及其时空分布特征, 对拉脊山中部早古生代地层和蛇绿岩出露齐全的地段开展大比例尺地质填图 (1:2.5 万), 结合各类与俯冲相关的大地构造相单元特征, 在系统分析填图区不同地段出露的岩石组合、构造变形、空间分布、形成时代等的基础上, 将寒武纪—早奥陶世岩石划分为 4 个构造单元: 早—中寒武世蛇绿岩、寒武纪岛弧、中寒武世—早奥陶世增生杂岩和晚寒武世弧前盆地^[24, 43] (图 2)。其中, 早—中寒武世蛇绿岩由地幔橄榄岩、蛇纹岩、辉石岩、辉长岩、斜长花岗岩、辉绿岩和枕状熔岩组成^[24, 44]; 寒武纪岛弧由辉石岩、辉长岩、辉绿岩、枕状和块状熔岩、火山角砾岩、凝灰岩、安山岩、英安岩和流纹岩组成^[24, 43]; 中寒武世—早奥陶世增生杂岩由玄武岩、硅质岩、泥岩、凝灰岩和灰岩组成^[24, 43, 45]; 晚寒武世弧前盆地由砾岩、砂岩和凝灰岩组成^[43]。蛇绿岩、岛弧和增生杂岩相互之间为断层

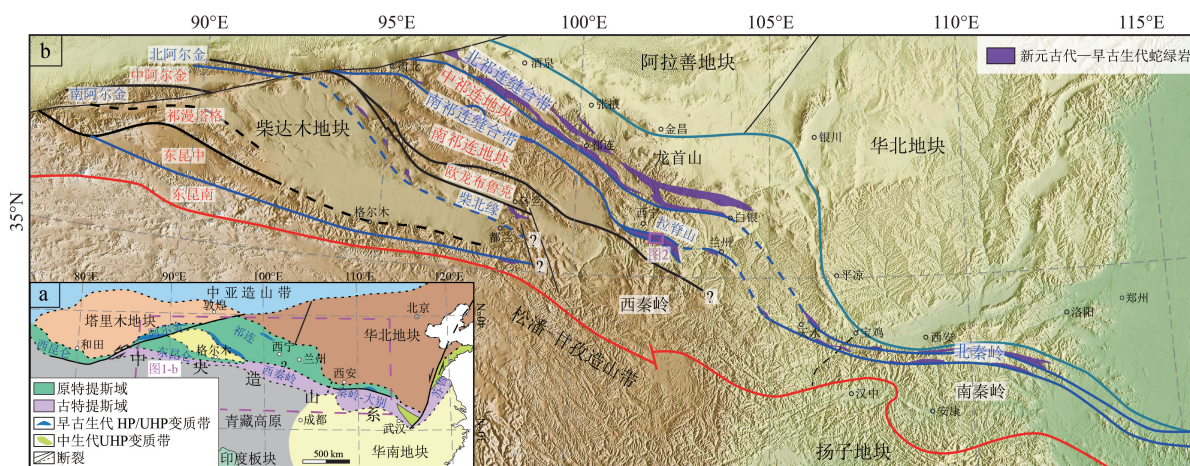


图 1 中央造山系大地构造格架(a)、秦岭-祁连-阿尔金-东昆仑造山带构造分区和晚新元古代—早古生代蛇绿岩分布图(b, 据参考文献[26]修改)

Fig. 1 Tectonic framework of the Chinese Central Orogenic Belts (a) and tectonic framework of the Qinling-Qilian-Altun-East Kunlun orogenic belts showing the spatial distribution of the Late Neoproterozoic-Early Paleozoic ophiolite (b)

接触,弧前盆地不整合覆盖于增生杂岩和岛弧之上(图 2)。蛇绿岩主要分布于元石山、六台、药水泉、野牛圈滩、西沟、东沟等地区,岛弧总体位于拉脊山南侧,自西向东沿青沙山、花石岩和马阴山连续分布,增生杂岩主要位于岛弧北侧,连续出露于元石山、石灰窑、东沟等地区,局部被晚奥陶世—早志留世沉积岩覆盖,另外在填图区南侧的青沙山和泥旦山地区也有发育。

2 青沙山和东沟海山地质特征

地质填图结果显示,拉脊山增生杂岩发生了强烈的构造变形,以发育大量双重逆冲构造为典型的构造特征,不同岩石之间主要表现为断层接触,部分地段保留相对连续,主要为玄武岩和灰岩组成的岩石序列。详细的地质剖面观察表明,青沙山地区发育连续的玄武岩、火山碎屑岩、硅质泥岩和凝灰岩组合(图 3-a、b、c)。其中玄武岩保留较好的枕状构造,单个岩枕长轴最大可达 60 cm,小者为 10 cm,一般为 50 cm(图 3-d),内部气孔和杏仁构造较发育。显微结构显示,玄武岩呈间粒-间隐结构(图 3-d),发育大量针状斜长石(50%~60%),长度较均一,多为 0.5 mm;颗粒间镁铁矿物已蚀变为绿泥石等,未见镁铁矿物残余;杏仁体多为椭球-球形,大小不等,粒径小者为 0.2×0.4 mm,大者可达 1×4 mm,充填物为方解石和玉髓。火山碎屑岩中发育大量棱角状玄武岩角砾;凝灰岩夹于枕状玄武岩中

(图 3-b),可见原始沉积层理。剖面南侧可见断层接触的灰岩与枕状玄武岩(图 3-a),灰岩发生明显的重结晶作用(图 3-d)。青沙山枕状玄武岩-灰岩组合展布较广,向东西两侧尖灭,与寒武纪岛弧火山岩呈断层接触。

东沟地区发育宽约 60 m 的连续玄武岩、钙质泥岩、泥岩、凝灰岩和灰岩组合(图 4-a),其中玄武岩呈残余枕状构造(图 4-b);薄层紫红色钙质泥岩、泥岩和灰绿色凝灰岩呈互层产出(图 4-c),局部夹大量灰岩透镜体,灰岩透镜呈角砾状(图 4-d),显微结构显示灰岩中含大量玄武岩岩屑和长石晶屑(图 4-e)。上述玄武岩-灰岩组合变形较弱,不同岩石间为连续整合接触,与典型的海山岩石组合一致。

3 玄武岩地球化学特征

为进一步限定玄武岩的形成构造背景,对青沙山玄武岩进行了全岩主量、微量和 Sr-Nd 同位素组成分析。分析工作分别在中国地质科学院国家测试中心和中国科学技术大学固体同位素地球化学实验室完成。主量元素利用 Phillips 4400 X-荧光光谱仪进行测试,分析结果精度优于 1%,误差小于 5%;微量和稀土元素采用等离子体质谱仪(ICP-MS)测定,分析误差为 5%~10%;Sr-Nd 同位素比值测试在 MAT-262 热电离子质谱计上完成。

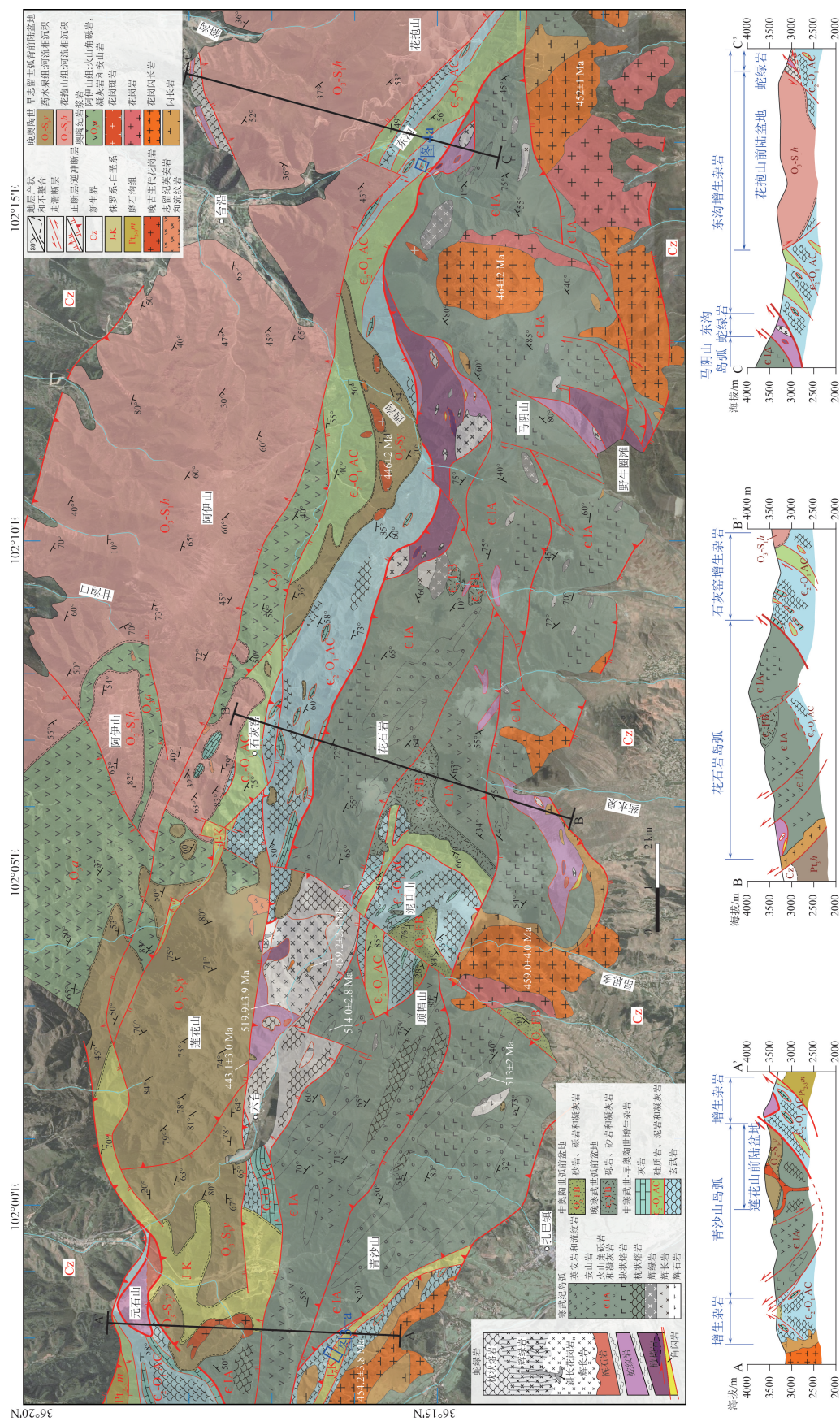


图2 拉脊山缝合带中部地区地质图(据参考文献[24, 43]修改)
Fig. 2 Geological map of the central part of the Lajishan suture

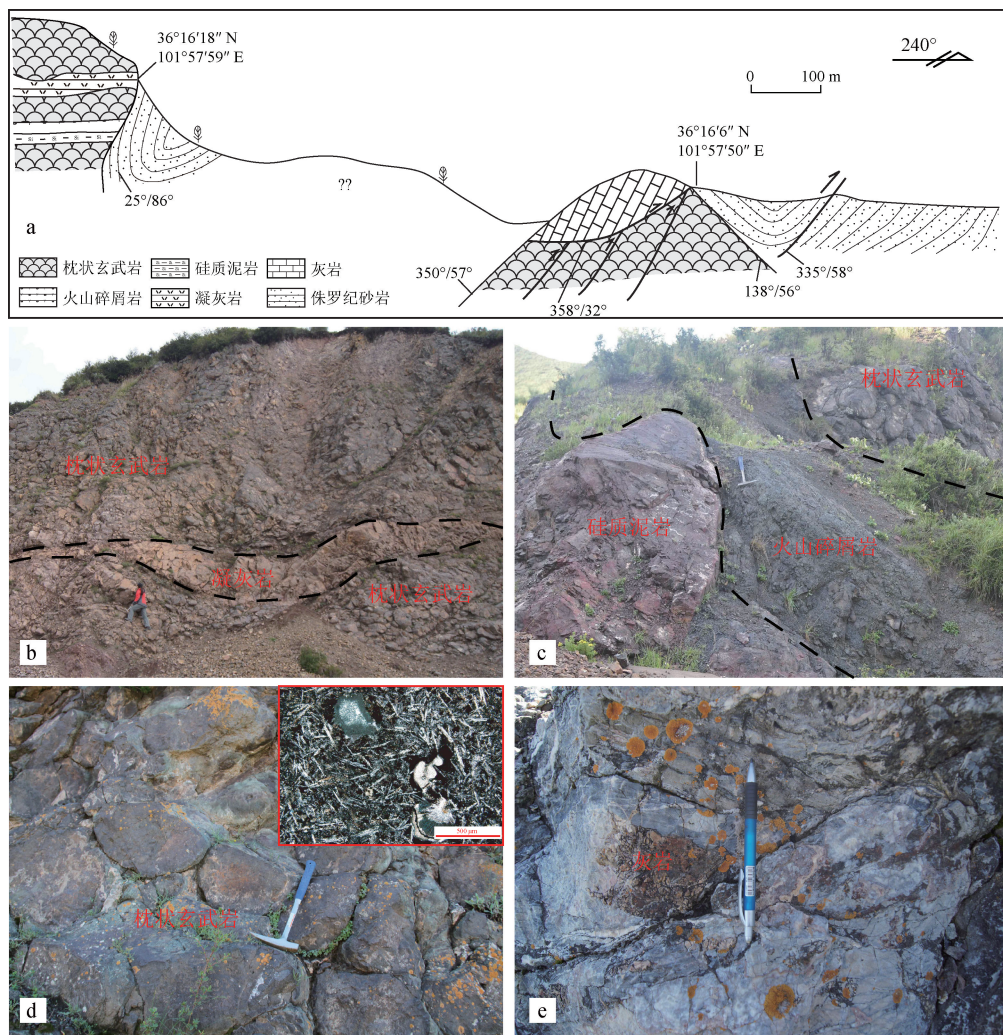


图 3 青沙山海山岩石组成特征

Fig. 3 The rock assemblage of the Qingshashan seamount

a—青沙山海山地质剖面;b—枕状玄武岩夹凝灰岩;c—枕状玄武岩、火山碎屑岩和硅质泥岩野外关系;d—枕状玄武岩;e—灰岩

7 件青沙山玄武岩主量、微量和稀土元素分析结果见表 1。枕状玄武岩的 SiO_2 含量为 39.9% ~ 44.6%, MgO 为 3.99% ~ 6.14%, TFeO 为 11.3% ~ 12.6%, TiO_2 含量较高,为 1.80% ~ 2.24%, $\text{Mg}^\#$ 值为 36.0 ~ 46.7, 烧失量较高,为 6.12% ~ 9.51%。Nb/Y-Zr/Ti 图解显示它们属于碱性系列(图 5-a)。青沙山玄武岩稀土元素总量较高,为 124.0×10^{-6} ~ 163.6×10^{-6} 。球粒陨石标准化稀土元素配分曲线为右倾型(图 5-b),具明显的轻、重稀土元素分馏特征, LREE/HREE 值为 7.38 ~ 9.07, $(\text{La/Yb})_N$ 值为 9.68 ~ 15.10, δEu 值为 0.95 ~ 0.98, 基本无 Eu 异常, 总体呈现出与 OIB 型碱性玄武岩一致的稀土元素配分模式^[46]。在 Nb/Yb-TiO₂/Yb 图解中,青沙山

玄武岩也落在碱性 OIB 范围(图 5-c)。

青沙山 2 件枕状玄武岩 Sr-Nd 同位素分析结果见表 2。按照 510 Ma 计算(灰岩时代为中—晚寒武世^[47]), 初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 0.70482 ~ 0.70492, 初始 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值为 0.512050 ~ 0.512069, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值介于 +1.10 ~ +1.47 之间, 位于地幔演化线范围, 具有类似 OIB 的富集地幔源区特征^[48](图 5-d)。

4 讨论

4.1 拉脊山海山残片组成和分布特征

当以海山/洋岛为代表的洋底凸起地质体进入俯冲带后, 它们容易发生错断进入增生楔中^[16, 49]。由于“负浮力”的影响, 海山难以发生深俯冲并保留

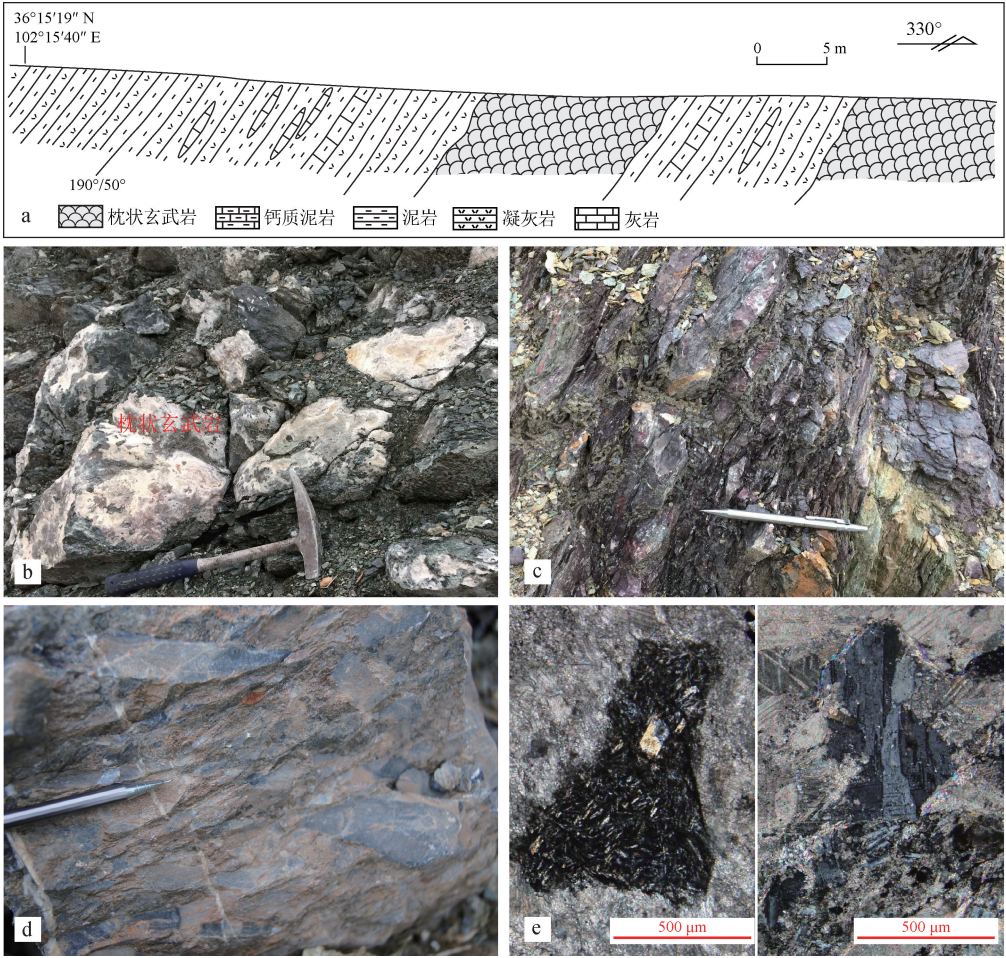


图 4 东沟海山岩石组成特征

Fig. 4 The rock assemblage of the Donggou seamount

a—东沟海山地质剖面;b—枕状玄武岩;c—泥岩与凝灰岩互层;d—角砾状灰岩;e—含玄武岩和长石碎屑灰岩

表 1 青沙山枕状玄武岩全岩主量、微量和稀土元素组成

Table 1 Major, trace and rare earth elements compositions of the pillow basalts in the Qingshashan area

样品号	12QSS1	12QSS2	12QSS3	12QSS4	12QSS5	12QSS6	12QSS7
SiO ₂	42.72	42.24	43.51	39.86	40.29	42.22	44.57
TiO ₂	2.17	2.01	2.04	1.82	1.80	1.89	2.24
Al ₂ O ₃	14.34	14.27	13.34	12.26	11.74	12.96	14.67
Fe ₂ O ₃	11.74	12.82	12.09	11.79	10.27	10.74	12.07
FeO	1.53	1.10	1.60	1.56	2.03	2.14	1.31
MnO	0.13	0.11	0.12	0.13	0.12	0.12	0.10
MgO	4.40	3.99	6.14	5.99	5.47	5.34	4.91
CaO	7.76	7.80	8.23	11.69	12.94	9.59	5.60
Na ₂ O	4.78	4.98	4.45	3.14	3.77	3.75	4.42
K ₂ O	1.45	1.14	0.90	1.48	0.91	1.62	2.58
P ₂ O ₅	0.44	0.44	0.48	0.46	0.40	0.46	0.48
烧失量	7.68	8.27	6.12	8.90	9.51	8.18	6.52

续表 1

样品号	12QSS1	12QSS2	12QSS3	12QSS4	12QSS5	12QSS6	12QSS7
总计	99.14	99.17	99.02	99.08	99.25	99.01	99.47
TFeO	12.09	12.64	12.48	12.17	11.27	11.80	12.17
Mg [#]	39	36	47	47	46	45	42
La	22.9	22.2	31.7	28.9	26.0	32.3	25.1
Ce	48.6	47.7	64.3	58.3	54.5	63.7	53.4
Pr	6.30	6.21	8.16	7.47	6.93	8.11	7.08
Nd	26.0	26.3	32.6	31.0	27.8	34.0	29.2
Sm	5.40	5.47	6.35	6.29	5.50	6.59	6.10
Eu	1.66	1.70	1.94	1.93	1.73	2.01	1.89
Gd	5.04	5.33	6.09	5.88	5.33	6.22	5.83
Tb	0.78	0.78	0.88	0.88	0.77	0.92	0.88
Dy	3.91	3.90	4.30	4.31	3.85	4.57	4.49
Ho	0.74	0.72	0.79	0.81	0.70	0.85	0.84
Er	1.86	1.81	1.92	2.00	1.69	2.12	2.14
Tm	0.27	0.26	0.28	0.28	0.24	0.29	0.32
Yb	1.57	1.45	1.51	1.60	1.36	1.69	1.86
Lu	0.22	0.21	0.23	0.24	0.20	0.25	0.28
δEu	0.97	0.96	0.95	0.97	0.98	0.96	0.97
REE	125.25	124.04	161.05	149.89	136.60	163.62	139.41
LREE/HREE	7.70	7.58	9.07	8.37	8.66	8.68	7.38
(La/Yb) _N	10.46	10.98	15.06	12.96	13.71	13.71	9.68
Li	17.0	15.6	15.7	14.5	11.9	14.1	18.5
Sc	21.8	21.8	21.2	20.1	19.5	20.6	22.5
V	239	258	223	205	191	199	227
Cr	335	414	354	327	306	306	311
Ni	185	220	229	210	203	190	148
Co	47.4	47.8	52.7	50.8	46.6	51.7	42.9
Cu	81.3	50.0	83.1	103.0	69.9	101.0	100.0
Pb	3.17	4.12	3.42	3.93	4.10	4.76	2.41
Cs	4.67	7.41	3.24	2.48	3.57	3.45	3.36
Ga	18.6	18.2	19.2	20.0	16.6	19.1	17.6
Rb	21.0	19.8	15.6	31.0	14.9	29.1	34.4
Ba	327	253	289	419	237	520	435
Sr	475	446	504	442	511	448	393
Th	2.21	2.10	3.22	2.94	2.77	3.08	2.19
U	0.40	0.43	0.57	0.61	0.55	0.62	0.43
Nb	23.6	22.1	30.3	28.5	26.7	30.3	22.9
Ta	1.30	1.26	1.84	1.67	1.60	1.74	1.34
Zr	159	152	185	180	163	185	173
Hf	3.87	3.70	4.33	4.18	3.89	4.37	3.94
Y	17.7	17.8	20.0	20.9	17.0	22.2	20.2

注: 主量元素含量单位为%, 微量和稀土元素含量单位为 10⁻⁶

表 2 青沙山枕状玄武岩全岩 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素组成
Table 2 Rb-Sr and Sm-Nd isotopic compositions of the pillow basalts in the Qingshashan area

样品号	年龄/Ma	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	2σ	(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _t	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	2σ	(¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd) _t	ε _{Nd} (0)	ε _{Nd} (t)	f _{Sm/Nd}
12QSS2	510	0.1285	0.705828	0.000015	0.70489	0.1257	0.512462	0.000011	0.512042	-3.4	1.2	-0.36
12QSS3	510	0.0896	0.705452	0.000011	0.70480	0.1178	0.512455	0.000012	0.512062	-3.6	1.6	-0.40

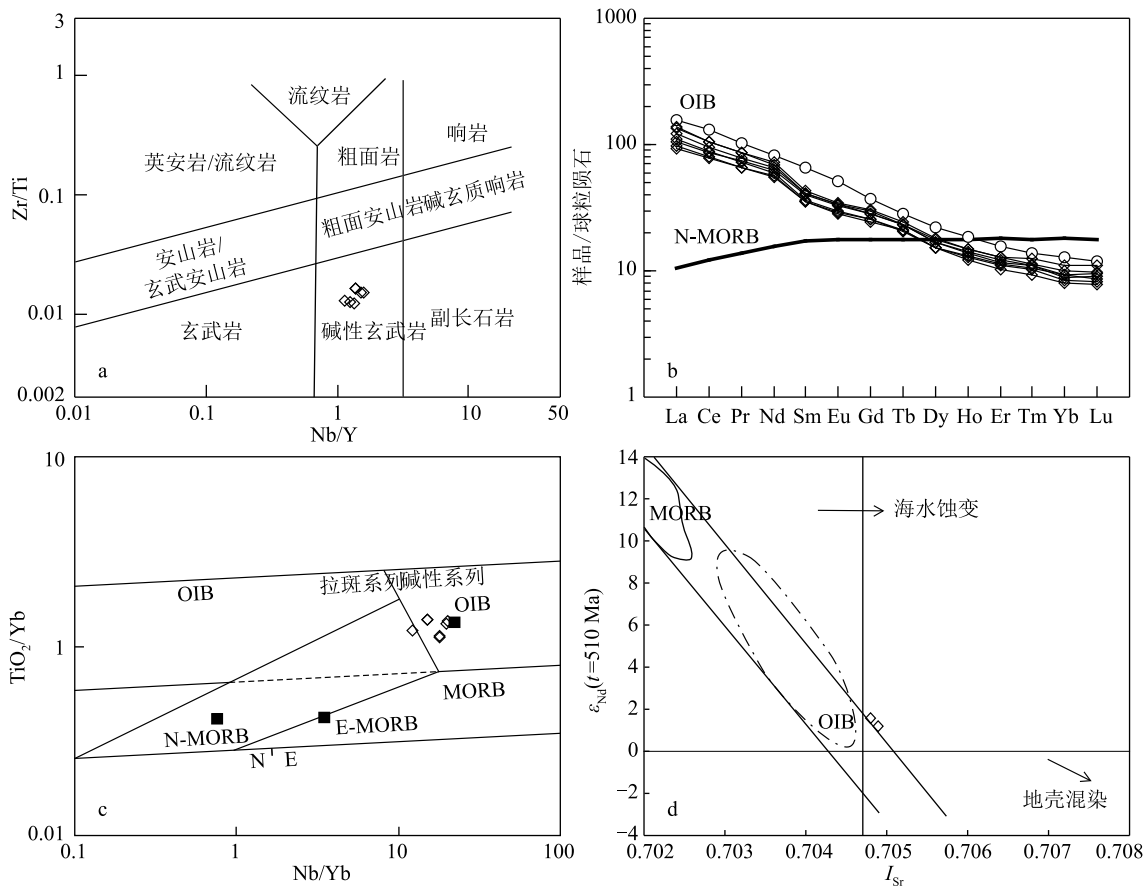


图 5 青沙山玄武岩地球化学组成特征
Fig. 5 Geochemical compositions of the Qingshashan basalts
a—Nb/Y—Zr/Ti 图解;b—球粒陨石标准化稀土元素配分曲线;c—Nb/Yb—TiO₂/Yb 图解;d—I_{Sr}—ε_{Nd}(510 Ma);
MORB—洋中脊玄武岩;N-MORB—正常型洋中脊玄武岩;E-MORB—富集型洋中脊玄武岩;OIB—洋岛玄武岩

在增生楔中下部,而较大的海山俯冲甚至会阻塞俯冲带,引起俯冲带形态和变形特征的重大变化^[49-50]。这些已有研究为深入分析造山带中海山及增生杂岩分布特征提供了重要的理论依据。

野外地质填图和室内研究结果表明,拉脊山增生杂岩主要由寒武纪海山 OPS 和深海 OPS 两部分组成(图 2)。其中,青沙山海山残片在野外露头上表现为 OIB 型枕状玄武岩、火山碎屑岩、硅质泥岩、凝灰岩和灰岩“盖层”组合序列,东沟海山残片表现

为连续的玄武岩、钙质泥岩、泥岩、凝灰岩和灰岩组合。东沟海山呈小型“构造残片”夹于强烈剪切变形的页岩、硅质岩和凝灰岩中,与其他 OPS 共同构成了 EW 向展布的东沟-石灰窑-元石山增生杂岩,而青沙山海山面积较大且呈孤立出露于寒武纪岛弧火山岩中。岛弧火山岩与青沙山海山 OPS 的断层接触关系表明,该海山残片也是北侧东沟-石灰窑-元石山增生杂岩的重要组成部分,代表俯冲至增生楔下部并出露于岛弧火山岩内部的海山“构造

窗”(图2)。

4.2 拉脊山海山形成时代

玄武岩-灰岩组合是海山 OPS 的重要组成和识别标志^[3-4, 6, 17],海山上部生物碎屑灰岩中的古生物成为限定海山形成时代的最佳对象。周志强等^[51]和林天瑞等^[47, 52]对拉脊山生物碎屑灰岩中三叶虫的属、种及其归类进行了系统研究,认为该地区存在多节类、球接子类等三叶虫,时代为寒武纪后半期(中—晚寒武世)。另外,拉脊山增生杂岩被470~450 Ma的花岗岩侵入^[24](图2),因此该增生杂岩及内部的海山时代上限应为早奥陶世^[45]。这些地质资料进一步表明,拉脊山海山形成于中寒武世—早奥陶世。

4.3 构造意义

海山/洋岛是大洋板内“热点”岩浆作用和大洋盆地演化的最重要地质记录^[3, 11]。不同于具有多解性的蛇绿岩,海山 OPS 鲜明的岩石组合特征无疑成为识别海山残片和确定古洋盆存在的最有效媒介。

本文从大比例尺地质填图和详细的地质剖面观察入手,在青沙山和东沟地区识别出连续的海山 OPS 组合,证明拉脊山地区存在中寒武世—早奥陶世海山,这些海山发育于原特提斯洋内并在洋盆俯冲过程中就位于增生杂岩中。上述研究结果不仅表明拉脊山地区存在早古生代洋盆和缝合带,而且充分证明大比例尺地质填图是解决复杂造山带关键地质问题的有效手段。

5 结 论

(1)拉脊山关键地段大比例尺地质填图表明,青沙山和东沟地区发育一套连续的由枕状玄武岩、火山碎屑岩、泥岩、凝灰岩和灰岩组成的火山-沉积组合序列,与典型海山岩石组合一致。

(2)青沙山枕状玄武岩含较高的 TiO_2 和稀土元素,具有与 OIB 型碱性玄武岩一致的右倾稀土元素配分曲线和 Sr-Nd 同位素组成,表明其形成于海山/洋岛构造环境。

(3)东沟和青沙山海山分别呈构造岩片和构造窗产出,是拉脊山增生杂岩的重要组成部分,代表中寒武世—早奥陶世原特提斯洋内的海山残片。

致谢:中国科学院地质与地球物理研究所钱青研究员对本文提出了建设性修改意见,在此表示感谢。

参考文献

- [1] Wilson J T. A Possible Origin of the Hawaiian Islands [J]. *Candian Journal of Physics*, 1963, 41: 863-870.
- [2] Menard H W. *Marine Geology of the Pacific* [M]. New York: McGraw-Hill, 1964: 1-271.
- [3] Isozaki Y, Maruyama S, Furuoka F. Accreted oceanic materials in Japan [J]. *Tectonophysics*, 1990, 181: 179-205.
- [4] Wakita K. OPS mélange: a new term for mélanges of convergent margins of the world [J]. *International Geology Review*, 2015, 57(5/8): 529-539.
- [5] 冯益民, 张越. 大洋板块地层 (OPS) 简介及评述 [J]. *地质通报*, 2018, 37(4): 523-531.
- [6] 闫臻, 王宗起, 付长垒, 等. 混杂岩基本特征与专题地质填图 [J]. *地质通报*, 2018, 37(2/3): 167-191.
- [7] Condie K C. *Plate Tectonics and Crustal Evolution* [M]. Oxford: Butterworth Heinemann, 1997: 1-282.
- [8] Robertson A H F. Role of tectonic facies concept in orogenic analysis and its application to Tethys in the Eastern Mediterranean region [J]. *Earth-Science Reviews*, 1994, 37: 139-213.
- [9] 李继亮. 增生型造山带的基本特征 [J]. *地质通报*, 2004, 23(9/10): 947-951.
- [10] 肖文交, 李继亮, 宋东方, 等. 增生型造山带结构解析与时空制约 [J]. *地球科学*, 2019, 44(5): 1661-1687.
- [11] White W M. Oceanic island basalts and mantle plumes: The geochemical perspective [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2010, 38: 133-160.
- [12] Sano H, Kanmera K. Paleogeographic reconstruction of accreted oceanic rocks, Akiyoshi, southwest Japan [J]. *Geology*, 1988, 16(7): 600.
- [13] Safonova I Y, Santosh M. Accretionary complexes in the Asia-Pacific region: Tracing archives of ocean plate stratigraphy and tracking mantle plumes [J]. *Gondwana Research*, 2014, 25: 126-158.
- [14] Moore J C, Silver E A. Continental margin tectonics: submarine accretionary prisms [J]. *Reviews of Geophysics*, 1987, 25(6): 1305-1312.
- [15] Cloos M, Shreve R L. Subduction-channel model of prism accretion, melange formation, sediment subduction, and subduction erosion at convergent plate margins: 1. Background and description [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1988, 128(3): 455-500.
- [16] 张继恩, 陈艺超, 肖文交, 等. 洋底凸起地质体及其对造山带中蛇绿岩组分的贡献 [J]. *岩石学报*, 2018, 34(7): 1977-1990.
- [17] Wakita K. Origin of chaotically mixed rock bodies in the Early Jurassic to Early Cretaceous sedimentary complex of the Mino terrane, central Japan [J]. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, 1988, 39: 675-757.
- [18] Safonova I, Maruyama S, Kojima S, et al. Recognizing OIB and MORB in accretionary complexes: A new approach based on ocean plate stratigraphy, petrology and geochemistry [J]. *Gondwana Research*, 2016, 33: 92-114.

- [19] 许志琴,徐惠芬,张建新,等.北祁连走廊南山加里东俯冲杂岩增生地体及其动力学[J].地质学报,1994,68(1): 1-15.
- [20] 张雪亭,杨生德.青海省板块构造研究 1/100 万青海省大地构造说明书[M].北京:地质出版社,2007: 1-221.
- [21] Xiao W J, Windley B F, Yong Y, et al. Early Paleozoic to Devonian multiple-accretionary model for the Qilian Shan, NW China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 35(3/4): 323-333.
- [22] Yan Z, Aitchison J, Fu C L, et al. Hualong Complex, South Qilian terrane: U-Pb and Lu-Hf constraints on Neoproterozoic micro-continental fragments accreted to the northern Proto-Tethyan margin[J]. Precambrian Research, 2015, 266: 65-85.
- [23] Xia L Q, Li X M, Yu J Y, et al. Mid-late Neoproterozoic to early paleozoic volcanism and tectonic evolution of the Qilianshan, NW China[J]. Geo. Res. J., 2016, 9/12: 1-41.
- [24] Fu C L, Yan Z, Wang Z Q, et al. Lajishankou Ophiolite Complex: Implications for Paleozoic Multiple Accretionary and Collisional Events in the South Qilian Belt[J]. Tectonics, 2018, 37(5): 1321-1346.
- [25] Li S Z, Zhao S J, Liu X, et al. Closure of the Proto-Tethys Ocean and Early Paleozoic amalgamation of microcontinental blocks in East Asia[J]. Earth-Science Reviews, 2018, 186: 37-75.
- [26] 付长垒,闫臻,王秉璋.秦祁结合部清水-张家川基性岩形成时代和构造归属探讨[J].岩石学报,2019,35(10): 3141-3160.
- [27] 钱青,张旗,孙晓猛.北祁连九个泉玄武岩的形成环境及地幔源区特征:微量元素和 Nd 同位素地球化学制约[J].岩石学报,2001, 17(3): 385-394.
- [28] 闫臻,李继亮,雍拥,等.北祁连石灰沟奥陶纪碳酸盐岩-硅质岩形成的构造环境[J].岩石学报,2008,24(10): 2384-2394.
- [29] Yan Z, Xiao W J, Windley B F, et al. Silurian clastic sediments in the North Qilian Shan, NW China: Chemical and isotopic constraints on their forearc provenance with implications for the Paleozoic evolution of the Tibetan Plateau[J]. Sedimentary Geology, 2010, 231(3): 98-114.
- [30] Song S G, Niu Y L, Su L, et al. Tectonics of the North Qilian orogen, NW China[J]. Gondwana Research, 2013, 23: 1378-1401.
- [31] Zhang J X, Yu S Y, Mattinson C G. Early Paleozoic polyphase metamorphism in northern Tibet, China [J]. Gondwana Research, 2017, 41: 267-289.
- [32] Fu C L, Yan Z, Aitchison J C, et al. Multiple subduction processes of the Proto-Tethyan Ocean: Implication from Cambrian intrusions along the North Qilian suture zone [J]. Gondwana Research, 2020, 87: 207-223.
- [33] 左国朝,张淑玲,程建生,等.祁连地区蛇绿岩带划分及其构造意义[C]//张旗等.蛇绿岩与地球动力学研究.蛇绿岩与地球动力学研讨会,北京,1996: 129-134.
- [34] 曾广策,邱家骧,朱云海.拉鸡山造山带的蛇绿岩套及古构造环境[J].青海地质,1997, (1): 1-6.
- [35] 邱家骧,曾广策,王思源,等.拉脊山早古生代海相火山岩与成矿[M].武汉:中国地质大学出版社,1997: 1-118.
- [36] 侯青叶,张宏飞,张本仁,等.祁连造山带中部拉脊山古地幔特征及其归属:来自基性火山岩的地球化学证据[J].中国地质大学学报,2005,30(1): 61-70.
- [37] 李瑞保,裴先治,王兴,等.祁连造山带东段中寒武世深沟组中-基性火山岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及构造环境[J].地质通报,2018,37(4): 589-603.
- [38] 高延林.青藏高原板块构造图及其编制方法[J].青海科技,2000,7 (4): 14-18.
- [39] 王二七,张旗, Burchfiel C B. 青海拉鸡山: 一个多阶段抬升的构造窗[J].地质科学,2000,35(4): 493-500.
- [40] Zhang Y Q, Song S G, Yang L M, et al. Basalts and picrites from a plume-type ophiolite in the South Qilian Accretionary Belt, Qilian Orogen: Accretion of a Cambrian Oceanic Plateau? [J]. Lithos, 2017, 278/281: 97-110.
- [41] Gao Z, Zhang H F, Yang H, et al. Geochemistry of Early Paleozoic boninites from the Central Qilian block, Northwest China: Constraints on petrogenesis and back-arc basin development [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2018, 158: 227-239.
- [42] Fu C L, Yan Z, Guo X Q, et al. Assembly and dispersal history of continental blocks within the Altun-Qilian-North Qaidam mountain belt, NW China[J]. International Geology Review, 2019, 61(4): 424-447.
- [43] Yan Z, Fu C L, Aitchison J C, et al. Retro-foreland Basin Development in Response to Proto-Tethyan Ocean Closure, NE Tibet Plateau[J]. Tectonics, 2019, 38(12): 4229-4248.
- [44] Fu C L, Yan Z, Aitchison J C, et al. Abyssal and Suprasubduction Peridotites in the Lajishan Ophiolite Belt: Implication for Initial Subduction of the Proto-Tethyan Ocean [J]. The Journal of Geology, 2019, 127(4): 393-410.
- [45] 付长垒,闫臻,王宗起,等.南祁连拉脊山口增生楔的结构与组成特征[J].岩石学报,2018,34(7): 2049-2064.
- [46] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42: 313-345.
- [47] 林天瑞,彭善池,周志强.青海化隆拉脊山寒武纪球接子类三叶虫[J].古生物学报,2015,54(2): 184-206.
- [48] Zindler A, Hart S. Chemical geodynamics [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1986, 14: 493-571.
- [49] Okamura Y. Large-Scale mélange formation due to seamount subduction: An example from the Mesozoic accretionary complex in central Japan [J]. The Journal of Geology, 1991, 99: 661-674.
- [50] Cloos M. Lithospheric buoyancy and collisional orogenesis: Subduction of oceanic plateaus, continental margins, island arcs, spreading ridges, and seamounts [J]. Geological Society of America Bulletin, 1993, 105(6): 715-737.
- [51] 周志强,曹宣铎,赵江天,等.祁连山东部早古生代地层和沉积-构造演化[J].西北地质科学,1996,17(1): 1-58.
- [52] 林天瑞,彭善池,周志强,等.青海化隆拉脊山寒武纪多节类三叶虫[J].古生物学报,2013,52(4): 424-458.