

东昆仑中段万宝沟群玄武岩的形成时代和构造意义

许鑫¹, 宋述光¹, 苏犁²

(1. 北京大学地球与空间科学学院, 北京大学造山带和地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871;
2. 中国地质大学地质实验中心, 北京 100083)

摘要: 万宝沟群位于柴达木地块南缘、东昆仑造山带中段, 主要由溢流相玄武岩、火山和陆源碎屑岩以及灰岩组成。万宝沟玄武岩可以分为两类: 高Ti碱性玄武岩和低Ti拉斑玄武岩, 前者具有高的Ti/Y(502~660)、Nb/Y(0.8~1.6)值和TiO₂含量(2.76%~4.97%), 与OIB类似; 后者具有相对低的Ti/Y(383~439)、Nb/Y(0.3~0.4)值和TiO₂含量(1.80%~2.49%), 与E-MORB类似。SIMS锆石年代学结果表明万宝沟玄武岩形成于新元古代(762 ± 2 Ma)。野外地层和地球化学特征显示万宝沟玄武岩可能形成于大陆裂谷或者初始洋盆环境, 代表Rodinia超大陆裂解的峰期阶段。

关键词: 东昆仑; 万宝沟玄武岩; 新元古代; OIB和E-MORB; 大陆裂谷

中图分类号: P588.14⁺5; P597⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2016)06-0965-16

Formation age and tectonic significance of the Wanbaogou basalts in the middle East-Kunlun orogenic belt

XU Xin¹, SONG Shu-guang¹ and SU Li²

(1. Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution (MOE), School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Geological Lab Center, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The Wanbaogou Group is located on the southern margin of the Qaidam block and along the middle segment of the East Kunlun orogenic belt. It consists of effusive basaltic lavas, terrigenous and volcanoclastic rocks, and limestones. The Wanbaogou basalts can be divided into two groups: high-Ti (HT) alkaline and low-Ti (LT) tholeiitic basalts. The former shows high Ti/Y ratios (502~660), Nb/Y ratios (0.8~1.6) and TiO₂ values (2.76%~4.97%), similar to features of OIB. The latter has relatively low Ti/Y ratios (383~439), Nb/Y ratios (0.3~0.4) and TiO₂ values (1.80%~2.49%), which resembles E-MORB. Zircon SIMS analyses indicate that the Wanbaogou basalts were formed in the Neoproterozoic (762 ± 2 Ma). The field occurrence and geochemical characteristics suggest that the Wanbaogou basalts were formed in a continental rift or an initial oceanic basin environment, and represented the peak stage of the Rodinia breakup.

Key words: East Kunlun; Wanbaogou basalt; Neoproterozoic; OIB and E-MORB; continental rift

Fund support: National Natural Science Foundation of China (41372060)

东昆仑造山带位于青藏高原东北缘, 属于中央 昆仑山南坡纳赤台-野牛沟一带, 为一套由浅变质碎屑岩、火山岩和碳酸盐岩组成的地层序列(杨经绥等, 2002)。

收稿日期: 2016-04-28; 接受日期: 2016-05-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41372060)

作者简介: 许鑫(1990-), 男, 汉族, 博士研究生, 主要从事地幔柱和裂谷岩浆作用研究, E-mail: xuxin19900815@163.com; 通讯作者: 宋述光(1963-), 男, 汉族, 教授, 主要从事岩石学和大地构造研究, E-mail: sgsong@pku.edu.cn。

网络优先出版时间: 2016-06-08; 网络优先出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20160608.1042.002.html>

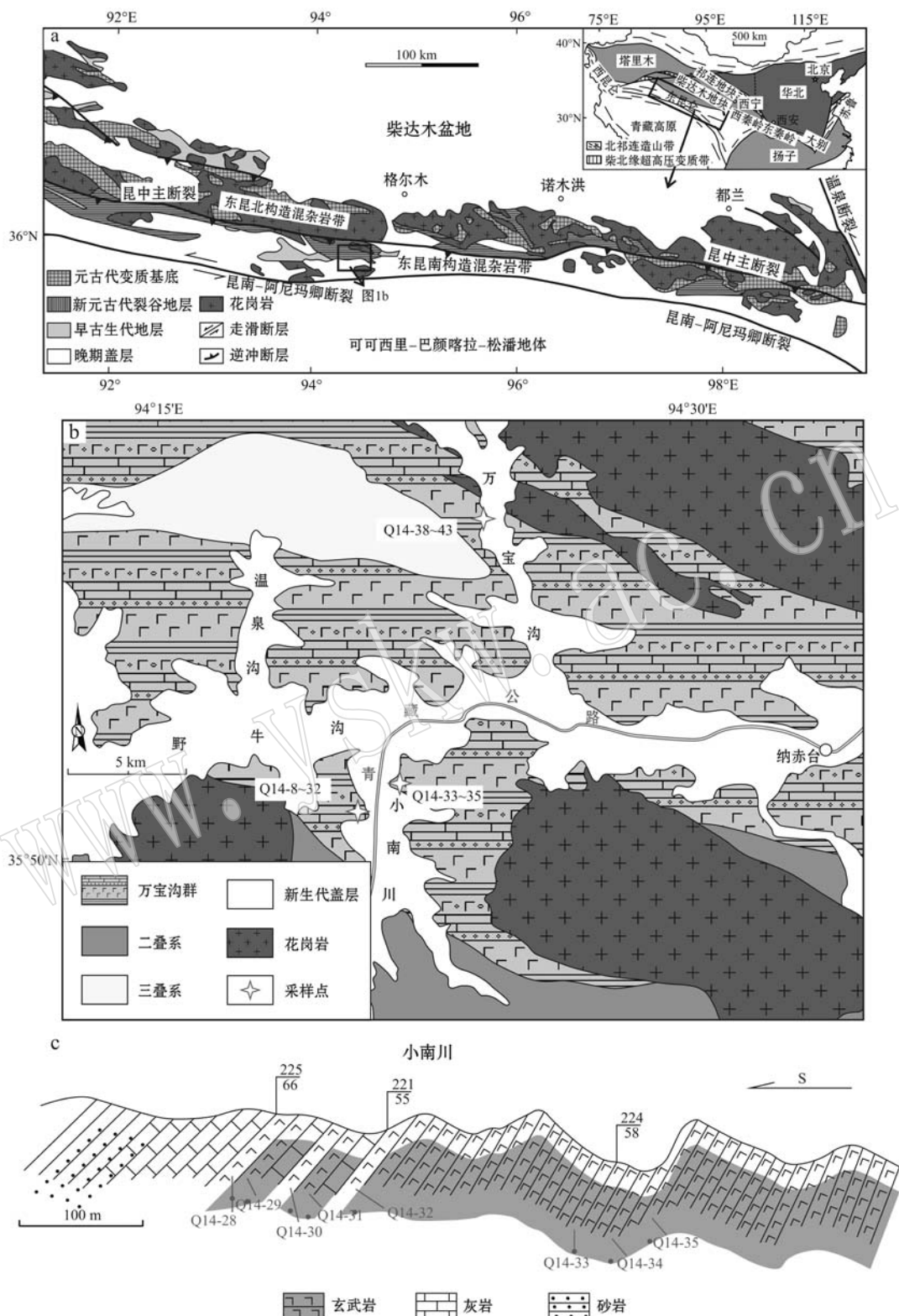


图 1 东昆仑地质图(a)、东昆仑纳赤台附近地质简图(b, 据青海省地质局第一区域地质调查队, 1982^①)和小南川地区万宝沟群地层剖面图(c, 据杨经绥等, 1987)

Fig. 1 Geological map of the East Kunlun orogenic belt (a), geological sketch map of Nachitai and adjacent areas in the East Kunlun (b, after No. 1 Regional Geological Survey Party, Bureau of Geology of Qinghai Province, 1982^①) and cross-section of the Wanbaogou Group in the Xiaonanchuan area (c, modified after Yang Jingsui *et al.*, 1987)

① 青海省地质局第一区域地质调查队. 1982. 1:20 万纳赤台幅地质图.

1987; 青海省地质矿产局, 1991)。有关万宝沟群的形成时代和地质意义一直没有得到很好的研究成果, 这极大地限制了对东昆仑地区前寒武晚期构造演化的认识。最初, 万宝沟群的时代归属于中新元古代(杨经绥等, 1987; 青海省地质矿产局, 1991)。潘裕生等(1996)认为万宝沟群火山岩为亚碱性-碱性过渡系列的板内拉斑玄武岩, 形成时代为 850~700 Ma, 为大陆裂谷环境产物。阿成业等(2003)根据 Sm-Nd 等时线年龄, 提出万宝沟火山岩的形成时代为 $1\,441 \pm 230$ Ma。王国灿等(2007)和魏启荣等(2007)通过锆石 SHRIMP 和地球化学研究, 认为万宝沟玄武岩形成于中元古代($1\,343 \pm 30$ Ma)有限洋盆的洋岛环境。本文通过野外产状、锆石 U-Pb 年龄、主微量元素等方面的研究, 探讨万宝沟玄武岩的形成时代和构造环境。

1 区域地质背景

东昆仑造山带位于柴达木盆地南缘, 东部以温泉断裂为界, 与秦岭相连, 西部以阿尔金南缘断裂为界, 与西昆仑相连, 是一个经历了晋宁、加里东、海西、印支等多期构造旋回的复合型造山带(潘裕生等, 1996; 王国灿等, 2004, 2007; 莫宣学等, 2007; 陈能松等, 2008)。其中东昆仑造山带早古生代构造-岩浆事件序列可以与北祁连造山带对比(莫宣学等, 2007)。

东昆仑造山带以昆中断裂(缝合带)为界, 可以划分为昆南和昆北两个构造单元(图 1a)。北部基底为角闪岩相-麻粒岩相变质的金水口群, 包括太古宙-古元古代的白沙河岩组和中元古代的小庙岩组, 长期以来被认为是柴达木地块的变质基底(张建新等, 2003; 王国灿等, 2004, 2007; 陈有焯等, 2011)。然而陆松年等(2009)通过对表壳岩的碎屑锆石进行研究, 证明金水口岩群的沉积时代不老于 $1\,270$ Ma。金水口岩群之上不整合覆盖浅变质的震旦纪-奥陶纪滨浅海相碎屑岩和碳酸盐岩建造(王晓霞等, 2012)。

南部基底为一套角闪岩相变质岩系, 即苦海杂岩, 包括片麻岩、斜长角闪岩、片岩、混合岩等。王国灿等(2007)认为苦海杂岩形成时代为古元古代-中元古代, 最后固结的时间为中元古代末。莫宣学等(2007)提出昆中断裂两侧出露的前寒武纪变质岩系均代表柴达木地块的基底。其上覆盖的万宝沟群是一套浅变质碎屑岩、火山岩和碳酸盐岩组合, 时代归

属于中新元古代(杨经绥等, 1987; 青海省地质矿产局, 1991; 阿成业等, 2003; 王国灿等, 2007; 魏启荣等, 2007)。

现有的定年结果表明, 东昆仑地区保存有新元古代基性岩浆记录, 其中诺木洪南金水口地区的变余辉长岩(796 ± 41 Ma)侵入到万宝沟群中, 而小庙辉绿岩脉(734 ± 7 Ma)侵位于金水口群变质基底中(任军虎等, 2010, 2011)。东昆仑东段与西秦岭结合部位出露的塔洞斜长角闪岩的原岩为基性火山岩, 形成于 $743 \sim 711$ Ma(Li *et al.*, 2015)。

2 野外产状和岩石学

研究区位于格尔木以南纳赤台附近的万宝沟、温泉沟和小南川一带(图 1b)。万宝沟群与周围地层呈断层接触关系, 岩石普遍遭受不同程度的变质变形, 均呈构造岩片形式产出。万宝沟群火山-沉积序列主要由玄武岩、玄武质火山角砾岩、玄武质凝灰岩和少量的沉积夹层(灰岩、砂岩和板岩)组成, 代表了多个火山喷发-沉积旋回, 其中火山熔岩厚达 $1\,000$ m, 而火山碎屑岩厚 200 m, 表明万宝沟群玄武岩为典型的溢流相火山岩(魏启荣等, 2007)。

在小南川剖面(图 1c)中, 火山岩厚度约 $1\,000$ m, 主要由块状的少斑晶玄武质熔岩和斑晶较粗的粗玄武岩组成, 后者发生片理化, 两者之间无明显界线。其上为碳酸盐岩和砂岩, 二者为整合接触(图 2a)。万宝沟剖面北部以火山熔岩为主, 部分具有枕状构造和气孔结构; 南部为玄武岩和火山碎屑岩, 夹多层灰岩和砂岩, 并被奥陶纪花岗岩侵入(441 Ma, 王晓霞等, 2012)。

玄武岩具有斑状、似斑状或粗玄结构, 主要由辉石、斜长石和 Fe-Ti 氧化物以及隐晶质基质组成(图 2b), 经受了强烈的蚀变, 辉石已经全部变成角闪石和绿泥石, 而斜长石发生绿帘石化和斜黝帘石化。砂岩主要由斜长石、石英和颗粒细小的基质以及少量锆石和不透明矿物组成, 部分岩石发生强烈的片理化。

3 分析方法

3.1 主微量元素

全岩主量和微量元素的分析工作在中国地质大学(北京)地学实验中心完成。主量元素利用等离子

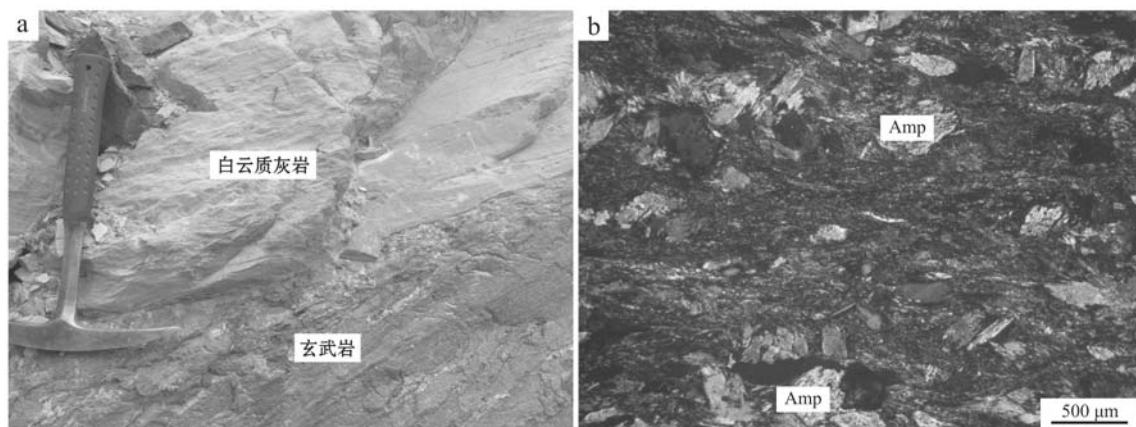


图 2 万宝沟群玄武岩的野外产状及镜下照片

Fig. 2 Field attitude and photomicrograph of the Wanbaogou basalts

a—玄武岩和白云质灰岩整合接触; b—斑状结构, 单斜辉石斑晶被角闪石(Amp)替代(Q14-30)

a—conformity between basalts and limestones; b—porphyritic texture with Cpx phenocrysts replaced by Amp (Q14-30)

体发射光谱仪(ICP-OES)进行检测。根据 AGV-2、GRS-1 国际标样和 GSR-3 国家标样的数据质量监控,除了 TiO_2 (~1.5%) 和 P_2O_5 (~2.0%), 其他主要元素的精度均优于 1%。微量元素丰度由等离子质谱仪(ICP-MS)分析测定,样品前处理过程和分析流程见 Song 等(2015)。通过对比标样 AGV-2 和 GSR-3 的测量值和参考值,从而监控微量元素分析的精度,其中大部分微量元素分析精度均优于 5%,而 Gd 和 Ta 的分析精度介于 10%~15%。

3.2 锆石年代学

采用常规的重选和磁选技术粗选出锆石,然后在双目镜下进一步提纯锆石。提纯的锆石与标样(Plésovice 和 Qinghu)置于环氧树脂中,然后抛光使其暴露一半晶面。对待测锆石进行透射光和反射光显微照相以及阴极发光(CL)图像分析,以检查锆石的内部结构,从而帮助选择适宜的测试点位。

利用中国科学院地质与地球物理研究所的二次离子探针(SIMS)对样品(Q14-29)中的锆石进行了分析,详细方法见 Li 等(2009)。U-Th-Pb 同位素比值用标准锆石 Plésovice (337 Ma, Sláma *et al.*, 2008)校正获得,U 含量采用标准锆石 91500 (81×10^{-6} , Wiedenbeck *et al.*, 1995)校正获得。以长期监测标准样品获得的标准偏差 ($1\sigma = 1.5\%$, Li *et al.*, 2010)和单点测试内部精度共同传递得到样品单点误差。以标准样品 Qinghu (159.5 Ma, Li *et al.*, 2009)作为未知样监测数据的精确度。普通 Pb 校正采用实测 ^{204}Pb 值。由于测得的普通 Pb 含量非常

低,假定普通 Pb 主要来源于制样过程中带入的表面 Pb 污染,以现代地壳的平均 Pb 同位素组成(Stacey and Kramers, 1975)作为普通 Pb 组成进行校正。

样品(Q14-38、Q14-39)是用电感耦合等离子质谱仪(LA-ICP-MS)进行锆石 U-Pb 定年及微量元素分析,测试在中国地质大学(北京)地学实验中心完成。年龄计算时以标准锆石 91500(Wiedenbeck *et al.*, 1995)为外标进行同位素比值校正,TEMORA (417 Ma, Black *et al.*, 2003)和 Qinghu 为监控标样,元素含量以 NIST SRM610 为外标、Si 为内标计算,NIST SRM612 和 NIST SRM614 为监控标样。普通铅校正采用 Andersen (2002)的方法。详细的分析步骤见 Song 等(2010)。数据的处理软件为 ISOPLOT(Ludwig, 2001)。同位素比值及年龄误差均为 1σ 。

4 锆石 U-Pb 年代学研究

玄武岩(Q14-29)中的锆石主要呈破碎的板状或柱状,长 $50 \sim 200 \mu\text{m}$,宽 $20 \sim 100 \mu\text{m}$,阴极发光图像显示大部分锆石具有宽且平直的环带,为典型基性岩浆结晶的锆石(图 3)。U-Pb 同位素年龄分析结果列于表 1。13 个锆石点具有变化的 Th ($173 \times 10^{-6} \sim 1160 \times 10^{-6}$)和 U ($476 \times 10^{-6} \sim 1709 \times 10^{-6}$)含量以及高的 Th/U 值(0.35~0.86)。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 观年龄(775~745 Ma)在分析误差范围内一致,加权平均值为 $759 \pm 6 \text{ Ma}$ (MSWD=1.1),与谐和年龄($762 \pm$

表 1 万宝沟玄武岩(Q14-29)的 SIMS 锆石 U-Pb 数据
Table 1 In-situ SIMS zircon U-Pb data for the Wanbaogou basalt (Q14-29)

样品点	$\epsilon_{\text{Pb}}/10^{-6}$		Th/U	$f_{206}/\%$	同位素比值					年龄/Ma					
	U	Th			$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} \pm 1\sigma(\%)$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} \pm 1\sigma(\%)$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} \pm 1\sigma(\%)$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} \pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} \pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} \pm 1\sigma$	7	8	9		
1	1 456	560	0.38	0.01	0.064 9	0.35	1.11	1.54	0.124	1.50	772	759	8	755	11
2	742	260	0.35	0.01	0.065 1	0.41	1.15	1.55	0.128	1.50	776	776	9	776	11
3	1 206	725	0.60	0.01	0.065 5	0.40	1.15	1.55	0.128	1.50	789	779	8	775	11
4	215	282	1.31	0.12	0.070 7	0.55	1.56	1.62	0.160	1.52	948	954	10	956	14
5	1 186	557	0.47	0.01	0.065 3	0.25	1.15	1.52	0.128	1.50	785	778	8	775	11
6	1 644	1 160	0.71	0.09	0.065 8	0.23	1.11	1.52	0.123	1.50	801	760	8	745	11
7	1 709	943	0.55	0.01	0.065 3	0.26	1.14	1.52	0.127	1.50	785	773	8	768	11
8	744	378	0.51	0.05	0.064 2	0.35	1.09	1.54	0.123	1.50	748	750	8	750	11
9	1 266	1 093	0.86	0.01	0.065 0	0.24	1.12	1.52	0.125	1.50	775	762	8	757	11
10	476	173	0.36	0.02	0.064 4	0.97	1.09	1.80	0.123	1.52	756	750	10	748	11
11	1 150	558	0.49	0.07	0.065 0	0.33	1.10	1.57	0.123	1.54	773	753	8	746	11
12	888	388	0.44	0.03	0.064 8	0.58	1.12	1.62	0.125	1.51	767	763	9	762	11
13	1 071	408	0.38	0.01	0.064 6	0.26	1.11	1.59	0.125	1.57	762	759	9	758	11
14	1 216	593	0.49	0.01	0.065 2	0.56	1.11	1.60	0.124	1.50	780	759	9	751	11

f_{206} 为普通 ^{206}Pb 与全部 ^{206}Pb 的比值,年龄及同位素误差均为 1σ 。

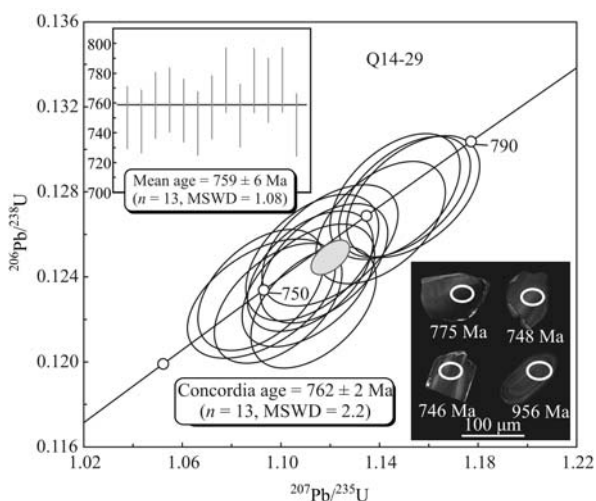


图3 万宝沟群玄武岩(Q14-29)中锆石 SIMS U-Pb 谐和图和 CL 图像

Fig. 3 U-Pb concordia diagram by SIMS analyses and CL images of zircons from the Wanbaogou basalt (Q14-29)

2 Ma, MSWD=2.2)一致,代表万宝沟群玄武岩喷发的年龄。另外点4具有古老的²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄(956 Ma),锆石形态较为磨圆,震荡环带发育,为基性岩浆就位过程中捕获基底的锆石,相应年龄的锆石在

万宝沟砂岩和前寒武基底岩石中普遍存在(下述)。

砂岩(Q14-38 和 Q14-39)中的锆石主要呈半自形到自形,阴极荧光显示震荡环带发育,无明显的核边结构,为典型的岩浆锆石(图4)。U-Pb 定年分析结果列于表2。Q14-38 中 28 个点具有较好谐和度,²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 表观年龄变化范围为 2 464 ~ 904 Ma, Th/U 值主要为 0.23 ~ 1.39, 主要峰值范围为 1 227 ~ 994 Ma, 次要峰值包括 1 460、1 887 和 2 437 Ma。Q14-39 中 29 个点具有较好谐和度,²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 表观年龄变化范围为 3 308 ~ 909 Ma, Th/U 值为 0.14 ~ 1.08, 主要峰值范围为 1 288 ~ 970 Ma, 次要峰值为 1 464、1 791 和 3 317 Ma。两个样品中主要峰值(1 300 ~ 900 Ma)的锆石可能代表 Rodinia 超大陆聚合事件在东昆仑的响应,区域上格林威尔造山相关的岩浆和变质作用已经被广泛报道(陈能松等, 2006; 王国灿等, 2004, 2007; 孟繁聪等, 2013; 陈有焯等, 2015)。最小的岩浆锆石年龄(904 和 909 Ma)暗示万宝沟玄武岩的形成时代晚于 900 Ma, 而 3 300 ~ 3 200、2 500 ~ 2 400、1 900 ~ 1 800 Ma 和 1 460 的年龄与东昆仑地区前寒武基底岩系碎屑锆石年龄峰值一致(王国灿等, 2004, 2007; 陆松年等, 2009)。

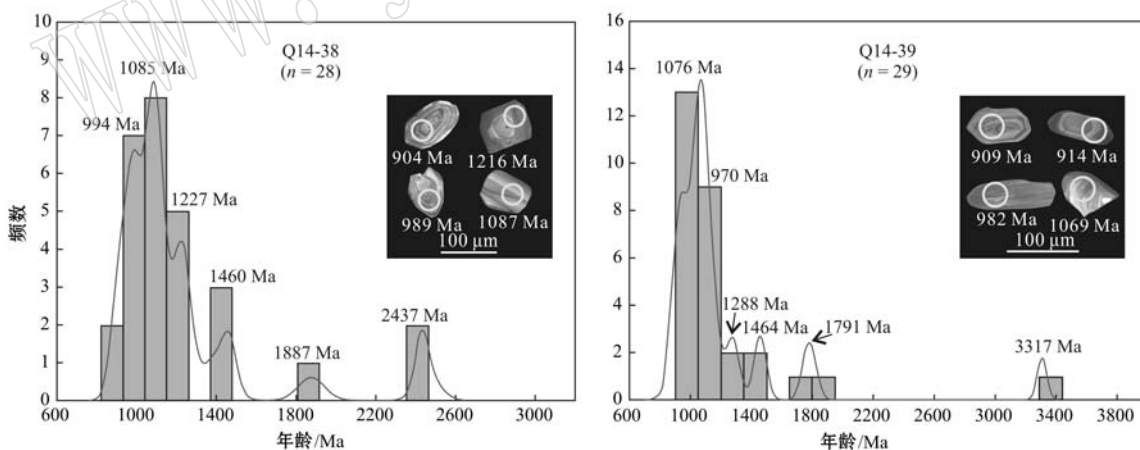


图4 万宝沟群砂岩(Q14-38 和 Q14-39)中锆石²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄直方图和 CL 图像

Fig. 4 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb age histograms and CL images of zircons from the Wanbaogou sandstones (Q14-38 and Q14-39)

5 地球化学

5.1 主量元素

11 个万宝沟群玄武岩的主量和微量元素分析结果列于表 3。它们具有不同程度的蚀变(LOI =

0.53% ~ 3.50%),变化的主量元素(去除烧失量之后标准化)组成: SiO₂(40.33% ~ 47.04%)、MgO(3.20% ~ 7.87%)、Fe₂O₃^T(11.11% ~ 18.89%)、Al₂O₃(13.89% ~ 19.15%)、Na₂O(2.50% ~ 5.16%)、K₂O(0.10% ~ 1.93%)和 CaO(5.57% ~ 12.74%);演化的岩浆成分:低Mg[#](40 ~ 55)、Cr(25 × 10⁻⁶ ~

表 2 万宝沟砂岩(Q14-38 和 Q14-39)的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 数据
Table 2 In-situ LA-ICP-MS zircon U-Pb data for the Wanbaogou sandstones (Q14-38 and Q14-39)

样品点	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		Th/U		同位素比值					年龄/Ma					
	U	Th	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$
Q14-38															
1	297	197	0.66	0.071 63	0.001 74	1.577 60	0.046 83	0.159 68	0.002 22	0.975	38	961	18	955	12
2	678	243	0.36	0.088 27	0.003 18	2.827 86	0.093 86	0.232 34	0.003 26	1.388	71	1 363	25	1 347	17
3	1 171	287	0.24	0.069 22	0.001 63	1.447 83	0.042 16	0.151 64	0.002 10	0.905	37	909	17	910	12
4	445	260	0.58	0.076 04	0.001 82	1.811 65	0.053 25	0.172 72	0.002 40	1.096	37	1 050	19	1 027	13
5	123	129	1.05	0.080 77	0.002 05	2.246 23	0.068 43	0.201 62	0.002 83	1.216	38	1 196	21	1 184	15
6	330	183	0.56	0.069 16	0.001 71	1.426 31	0.042 69	0.149 51	0.002 08	0.904	39	900	18	898	12
7	227	239	1.05	0.076 01	0.001 89	1.837 61	0.055 34	0.175 27	0.002 45	1.095	38	1 059	20	1 041	13
8	88	122	1.39	0.080 43	0.002 06	2.373 03	0.072 77	0.213 90	0.003 02	1.208	38	1 235	22	1 250	16
9	222	67	0.30	0.070 19	0.001 78	1.494 39	0.045 55	0.154 35	0.002 16	0.934	40	928	19	925	12
10	338	131	0.39	0.071 64	0.001 76	1.536 81	0.045 77	0.155 51	0.002 16	0.976	38	945	18	932	12
11	148	128	0.87	0.075 71	0.001 90	1.969 35	0.059 58	0.188 58	0.002 64	1.087	38	1 105	20	1 114	14
12	215	138	0.64	0.074 84	0.001 92	1.823 22	0.056 01	0.176 62	0.002 48	1.064	39	1 054	20	1 048	14
13	189	66	0.35	0.081 79	0.002 03	2.353 93	0.070 73	0.208 64	0.002 91	1.240	37	1 229	21	1 222	16
14	160	111	0.69	0.076 05	0.001 93	1.934 84	0.058 95	0.184 43	0.002 58	1.096	39	1 093	20	1 091	14
15	199	89	0.45	0.078 64	0.002 00	1.777 79	0.054 17	0.163 90	0.002 29	1.163	38	1 037	20	978	13
16	345	190	0.55	0.072 18	0.001 81	1.510 70	0.045 55	0.151 72	0.002 11	0.991	39	935	18	911	12
17	345	114	0.33	0.073 56	0.001 84	1.750 48	0.052 79	0.172 53	0.002 40	1.029	39	1 027	19	1 026	13
18	159	74	0.47	0.091 89	0.002 31	3.168 35	0.095 86	0.249 96	0.003 49	1.465	36	1 449	23	1 438	18
19	460	233	0.51	0.075 65	0.001 90	1.774 58	0.053 64	0.170 06	0.002 37	1.086	38	1 036	20	1 012	13
20	616	55	0.09	0.077 28	0.001 91	2.041 11	0.061 08	0.191 48	0.002 66	1.128	38	1 129	20	1 129	14
21	274	115	0.42	0.114 75	0.004 18	5.202 53	0.174 57	0.328 82	0.004 68	1.876	67	1 853	29	1 833	23
22	224	97	0.43	0.088 56	0.003 44	2.916 14	0.105 24	0.238 82	0.003 42	1.395	76	1 386	27	1 381	18
23	850	523	0.62	0.082 46	0.002 05	2.590 14	0.077 63	0.227 73	0.003 16	1.256	37	1 298	22	1 323	17
24	327	74	0.23	0.075 04	0.001 93	1.828 94	0.056 06	0.176 69	0.002 47	1.070	39	1 056	20	1 049	14
25	154	118	0.77	0.072 12	0.001 97	1.624 11	0.051 84	0.163 27	0.002 30	0.989	42	980	20	975	13
26	268	113	0.42	0.160 83	0.005 61	9.951 98	0.317 29	0.448 77	0.006 38	2.464	60	2 430	29	2 390	28
27	235	95	0.41	0.072 23	0.001 97	1.511 30	0.048 11	0.151 68	0.002 14	0.992	42	935	19	910	12
28	277	205	0.74	0.157 73	0.003 98	9.276 60	0.280 70	0.426 39	0.005 95	2.431	32	2 366	28	2 289	27

续表 2
Continued Table 2

样品点	$w_B/10^{-6}$		Th/U		同位素比值				年龄/Ma						
	U	Th	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$
Q14-39															
1	255	123	0.48	0.075 03	0.001 96	1.830 97	0.056 52	0.176 91	0.002 47	1.069	40	1.057	20	1.050	14
2	315	184	0.59	0.082 66	0.002 15	2.337 33	0.072 08	0.205 00	0.002 86	1.261	39	1.224	22	1.202	15
3	387	285	0.74	0.084 13	0.002 18	2.410 16	0.073 98	0.207 69	0.002 89	1.296	38	1.246	22	1.216	15
4	156	84	0.54	0.071 15	0.001 96	1.548 35	0.049 62	0.157 77	0.002 23	962	42	950	20	944	12
5	201	62	0.31	0.069 52	0.001 87	1.463 80	0.046 06	0.152 65	0.002 14	914	42	916	19	916	12
6	112	111	1.00	0.074 18	0.002 08	1.798 97	0.058 35	0.175 84	0.002 49	1.046	43	1.045	21	1.044	14
7	104	21	0.20	0.270 41	0.007 03	24.738 03	0.760 87	0.663 28	0.009 30	3.308	31	3.298	30	3.280	36
8	114	42	0.37	0.070 71	0.002 07	1.516 81	0.050 69	0.155 52	0.002 22	949	45	937	20	932	12
9	400	220	0.55	0.069 35	0.001 89	1.396 86	0.044 43	0.146 04	0.002 05	909	42	888	19	879	12
10	274	169	0.61	0.076 73	0.002 17	1.928 34	0.062 81	0.182 22	0.002 59	1.114	42	1.091	22	1.079	14
11	429	229	0.53	0.074 29	0.002 05	1.636 97	0.052 37	0.159 76	0.002 25	1.049	42	985	20	955	13
12	192	54	0.28	0.107 51	0.002 92	4.619 39	0.146 12	0.311 54	0.004 39	1.758	37	1.753	26	1.748	22
13	410	234	0.57	0.073 79	0.003 36	1.738 56	0.074 87	0.170 89	0.002 51	1.036	94	1.023	28	1.017	14
14	110	27	0.24	0.074 52	0.002 38	1.804 29	0.064 44	0.175 54	0.002 54	1.056	49	1.047	23	1.043	14
15	434	469	1.08	0.077 35	0.002 17	1.948 88	0.063 15	0.182 68	0.002 59	1.130	42	1.098	22	1.082	14
16	186	162	0.87	0.074 02	0.002 40	1.713 10	0.061 82	0.167 82	0.002 45	1.042	49	1.013	23	1.000	14
17	731	147	0.20	0.071 53	0.002 70	1.480 94	0.051 88	0.150 16	0.002 11	973	79	923	21	902	12
18	206	185	0.90	0.074 20	0.002 19	1.807 39	0.060 70	0.176 63	0.002 53	1.047	45	1.048	22	1.049	14
19	897	244	0.27	0.075 52	0.002 89	1.707 81	0.060 85	0.164 00	0.002 31	1.083	79	1.011	23	979	13
20	580	188	0.32	0.071 85	0.002 92	1.519 19	0.057 82	0.153 36	0.002 19	982	85	938	23	920	12
21	283	45	0.16	0.069 62	0.002 09	1.447 56	0.049 10	0.150 76	0.002 15	917	46	909	20	905	12
22	238	139	0.59	0.110 35	0.003 10	4.834 31	0.156 32	0.317 66	0.004 50	1.805	38	1.791	27	1.778	22
23	460	325	0.71	0.091 85	0.002 58	3.084 03	0.099 71	0.243 49	0.003 44	1.464	40	1.429	25	1.405	18
24	312	104	0.33	0.076 02	0.002 22	1.909 78	0.063 50	0.182 18	0.002 60	1.096	44	1.085	22	1.079	14
25	332	46	0.14	0.070 86	0.002 18	1.483 59	0.051 17	0.151 83	0.002 18	953	47	924	21	911	12
26	314	101	0.32	0.091 19	0.002 63	3.114 70	0.102 36	0.247 69	0.003 51	1.451	41	1.436	25	1.427	18
27	502	486	0.97	0.078 89	0.002 31	1.963 38	0.065 22	0.180 49	0.002 57	1.169	43	1.103	22	1.070	14
28	372	119	0.32	0.075 26	0.002 23	1.788 61	0.060 01	0.172 35	0.002 46	1.075	44	1.041	22	1.025	14
29	496	318	0.64	0.075 83	0.002 23	1.798 22	0.060 06	0.171 98	0.002 45	1.091	44	1.045	22	1.023	13

表 3 万宝沟玄武岩的全岩主、微量元素数据
Table 3 Whole-rock major and trace element data of the Wanbaogou basalts

样品	低 Ti 拉斑玄武岩					高 Ti 碱性玄武岩					
	Q14-28	Q14-29	Q14-30	Q14-32	Q14-33	Q14-34	Q14-35	Q14-40	Q14-41	Q14-42	Q14-43
主量元素(w _B /%)											
SiO ₂	44.38	46.14	40.62	42.58	42.11	41.78	39.75	42.47	43.66	44.49	39.95
TiO ₂	2.45	1.89	1.96	1.75	3.48	3.52	3.52	2.88	4.83	2.66	3.38
Al ₂ O ₃	13.66	16.07	17.24	15.50	14.51	14.97	15.05	16.08	17.35	16.62	18.62
Fe ₂ O ₃ T	17.76	12.78	15.56	14.71	17.86	18.15	18.62	15.21	13.89	10.70	14.00
MnO	0.22	0.17	0.18	0.19	0.23	0.22	0.24	0.16	0.13	0.20	0.24
MgO	5.16	5.65	7.03	7.66	5.73	5.74	6.33	5.08	5.58	3.08	5.81
CaO	11.63	10.68	11.31	11.16	10.13	10.04	11.62	9.79	5.41	12.27	9.44
Na ₂ O	2.46	4.48	3.31	3.44	3.64	3.47	2.89	3.44	3.93	4.97	4.80
K ₂ O	0.50	0.11	0.10	0.23	0.86	0.40	0.28	0.37	1.88	1.02	0.58
P ₂ O ₅	0.14	0.12	0.12	0.13	0.27	0.27	0.27	0.29	0.50	0.32	0.40
LOI	0.89	1.09	1.90	1.94	0.53	0.74	0.76	3.50	2.25	2.93	2.12
Total	99.25	99.18	99.33	99.29	99.35	99.30	99.33	99.27	99.41	99.26	99.35
Mg#	40.4	50.7	51.3	54.8	42.8	42.4	44.2	43.8	48.3	40.1	49.2
微量元素(w _B /10 ⁻⁶)											
Sc	37.3	35.8	37.3	33.4	33.1	36.3	35.4	38.1	32.4	27.2	35.6
Ti	14 548	11 118	10 674	9 300	18 822	20 520	20 140	16 916	28 020	14 938	19 004
V	504	346	373	323	416	433	432	317	346	246	322
Cr	25	55	92	95	68	74	74	330	4	105	136
Co	52	40	51	46	51	53	54	43	39	28	41
Ni	46	62	93	94	58	67	63	128	38	59	57
Rb	10.34	0.86	0.49	3.42	22.24	5.78	1.84	6.44	38.26	10.71	6.08
Sr	805	505	710	685	262	197	138	321	180	470	409

续表 3
Continued Table 3

样品	低 Ti 拉斑玄武岩					高 Ti 碱性玄武岩					
	Q14-28	Q14-29	Q14-30	Q14-32	Q14-33	Q14-34	Q14-35	Q14-40	Q14-41	Q14-42	Q14-43
Y	33.2	29.0	27.8	24.1	37.5	40.4	39.7	31.2	42.4	27.5	35.0
Zr	126	104	103	92	213	229	225	204	328	196	248
Nb	9.5	7.5	6.9	9.2	30.1	32.4	31.6	41.3	69.5	38.5	50.8
Ba	212	35	20	82	249	94	63	96	388	250	202
La	7.6	6.3	6.2	5.5	21.7	23.2	20.9	25.6	40.1	25.0	30.4
Ce	20.9	17.6	17.2	15.2	51.6	55.2	52.7	58.7	91.8	56.5	70.0
Pr	3.24	2.75	2.69	2.37	7.22	7.82	7.38	8.15	12.66	7.47	9.43
Nd	15.9	13.5	13.1	11.5	31.0	33.8	32.3	33.9	51.9	30.5	38.7
Sm	4.87	4.18	4.05	3.57	7.66	8.40	8.14	7.65	11.45	6.69	8.58
Eu	2.30	1.71	1.62	1.36	2.52	2.67	2.66	2.55	3.78	2.25	2.76
Gd	5.91	5.12	4.94	4.33	8.08	8.86	8.62	7.54	10.96	6.58	8.40
Tb	1.007	0.871	0.847	0.748	1.272	1.392	1.363	1.138	1.640	0.989	1.258
Dy	5.98	5.24	5.07	4.44	7.18	7.83	7.69	6.21	8.85	5.47	6.96
Ho	1.235	1.091	1.042	0.915	1.427	1.562	1.525	1.213	1.688	1.068	1.364
Er	3.32	2.91	2.79	2.45	3.71	4.04	3.98	3.14	4.31	2.77	3.55
Tm	0.464	0.406	0.391	0.344	0.511	0.554	0.545	0.431	0.579	0.378	0.484
Yb	2.80	2.44	2.35	2.05	3.05	3.33	3.26	2.59	3.48	2.28	2.95
Lu	0.412	0.352	0.345	0.303	0.444	0.486	0.477	0.380	0.505	0.337	0.432
Hf	3.21	2.62	2.59	2.39	5.28	5.65	5.54	4.90	7.96	4.72	6.12
Ta	0.63	0.43	0.39	0.63	1.98	2.11	2.10	2.37	4.22	2.35	3.01
Pb	1.50	1.32	1.86	0.94	2.76	2.09	2.53	2.62	2.17	2.34	2.53
Th	0.71	0.58	0.58	0.52	2.45	2.65	2.64	2.94	4.94	2.71	3.61
U	0.327	0.213	0.195	0.215	0.741	0.816	0.844	0.721	1.317	0.674	0.784
Ti/Y	438.5	383.4	383.5	385.3	502.4	507.5	507.5	543.0	660.3	544.1	543.3

LOI 为烧失量, $Mg^{\#} = 100 \times Mg^{2+} / (Mg^{2+} + Fe^{2+})$, $Fe^{3+} / Fe = 0.1$ 。

330×10^{-6})和 $Ni(38 \times 10^{-6} \sim 128 \times 10^{-6})$ 。一般常用 Ti/Y 值(500)作为岩浆类型的判别标志(Xu *et al.*, 2001)。万宝沟群玄武岩可以被分为两类:高Ti碱性玄武岩和低Ti拉斑玄武岩(图5),其中前者具

有高的 $Ti/Y(502 \sim 660)$ 、 $Nb/Y(0.8 \sim 1.6)$ 值和 TiO_2 含量(2.76%~4.97%),后者具有低的 $Ti/Y(383 \sim 439)$ 、 $Nb/Y(0.3 \sim 0.4)$ 值和 TiO_2 含量(1.80%~2.49%)。

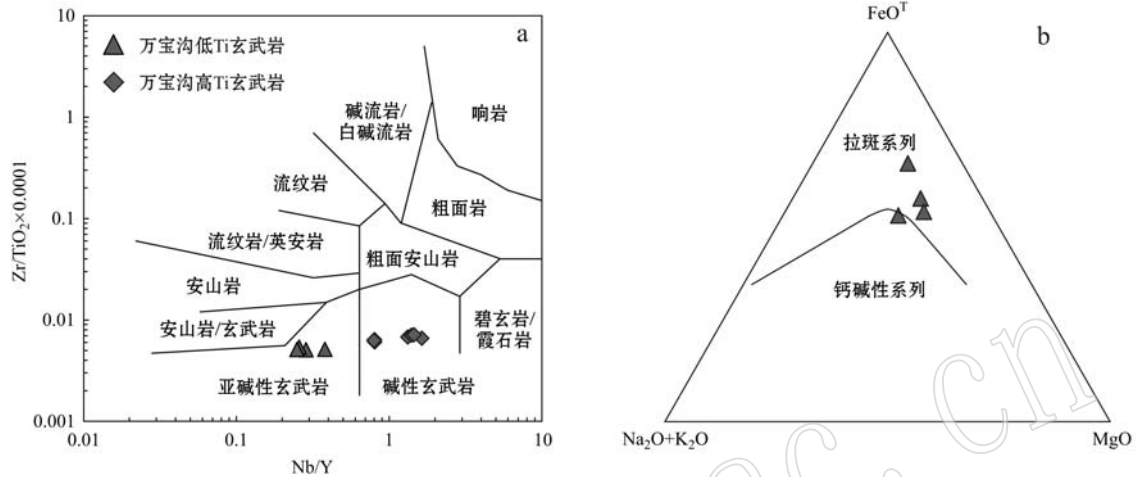


图5 $Zr/TiO_2 \times 0.0001 - Nb/Y$ 图解(a, 据 Winchester and Floyd, 1976)和 $(Na_2O + K_2O) - FeO^T - MgO(AFM)$ 图解(b)
Fig. 5 Plots of $Zr/TiO_2 \times 0.0001 - Nb/Y$ (a, after Winchester and Floyd, 1976) and $(Na_2O + K_2O) - FeO^T - MgO(AFM)$ (b)

5.2 微量元素

稀土元素配分图中(图6b、6d),万宝沟低Ti拉斑玄武岩具有较为平坦的轻重稀土元素分馏[$(La/Yb)_n = 1.87 \sim 1.94$],而高Ti碱性玄武岩具有强烈的轻稀土元素的富集[$(La/Yb)_n = 4.60 \sim 8.27$].除了Q14-28具有明显Eu的正异常($\delta Eu = 1.31$)外,其他的万宝沟玄武岩样品都具有弱的Eu异常($\delta Eu = 0.95 \sim 1.13$).在微量元素蛛网图中(图6a、6c),低Ti玄武岩具有LILE和HFSE等不相容元素的弱富集($Nb/La = 1.12 \sim 1.68$ 和 $Nb/Th = 12.0 \sim 17.6$),与E-MORB和前人报道的万宝沟拉斑玄武岩类似(Sun and McDonough, 1989; 魏启荣等, 2007);相反,高Ti玄武岩具有强烈右倾的微量元素分布形式以及明显的Nb-Ta的正异常($Nb/La = 1.39 \sim 1.73$ 和 $Nb/Th = 12.0 \sim 14.2$),与OIB(Sun and McDonough, 1989)和万宝沟碱性玄武岩(魏启荣等, 2007)相似。

6 形成时代和构造环境

有关万宝沟群的形成时代和地质意义一直没有得到很好的限制。阿成业等(2003)、魏启荣等(2007)和王国灿等(2007)分别通过Sm-Nd等时线和锆石SHRIMP定年方法确定万宝沟火山岩形成

时代为中元古代(1440~1340 Ma)。然而王国灿等(2007)的测年样品(BP17-22)中锆石形态主要呈卵圆形或自形晶,内部环带呈斑杂状或补丁状,并且具有低的Th/U值(小于0.3),我们认为这些锆石并不是典型基性岩浆结晶的锆石,可能代表捕获基底的锆石(1343 ± 30 Ma)。相似地,王国灿等(2007)报道了东昆仑野牛沟北部万宝沟群变玄武岩(BP15-20)捕获大量围岩的变质深熔锆石的年龄(~ 2366 Ma)。但Sm-Nd等时线年龄(1441 ± 230 Ma,阿成业等,2003)具有较大的不确定性和误差范围。

潘裕生等(1996)研究认为,万宝沟群火山岩为亚碱性-碱性过渡系列的板内拉斑玄武岩,岩石组合包括碎屑岩、大理岩、灰岩和白云岩等,表明其形成于大陆边缘的裂谷环境。然而王国灿等(2007)和魏启荣等(2007)提出万宝沟群火山岩和碳酸盐岩构成了洋岛的“双层”结构,形成于有限洋盆环境(具有陆壳基底的小洋盆)。我们的野外观察表明万宝沟玄武岩主要以块状熔岩为主,少量具有枕状构造,沉积岩(灰岩、砂岩和板岩)与玄武岩层整合接触,并组成多个火山喷发-沉积旋回。与玄武岩共生的砂岩中长石、石英斑晶和碎屑锆石磨圆和分选较差,体现了近陆源沉积的特点。其中碎屑锆石年龄谱峰可以和东昆仑地区前寒武基底岩系碎屑锆石峰值高度对应(王国灿等, 2004, 2007; 陆松年等, 2009)。玄武质

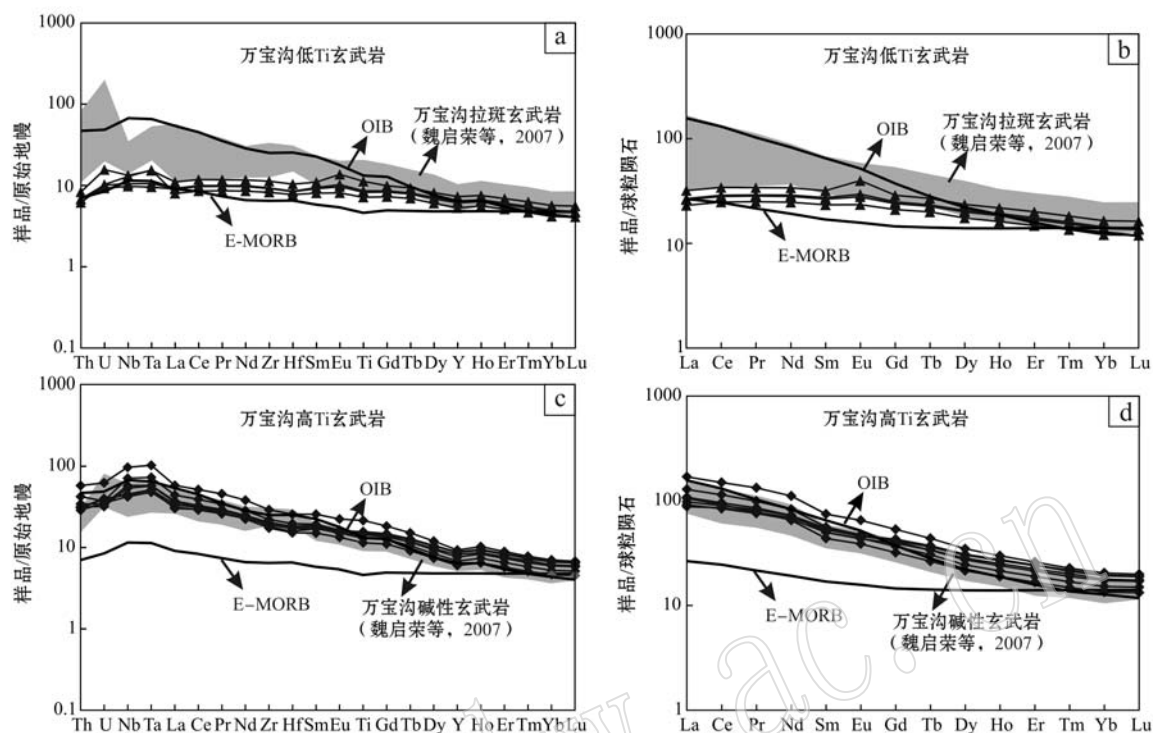


图 6 万宝沟低 Ti 玄武岩和高 Ti 玄武岩的微量元素蛛网图和稀土元素配分图(原始地幔和球类陨石的标准值以及 OIB 和 E-MORB 数据来自 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 Primitive mantle-normalized incompatible trace element spidergrams and chondrite-normalized REE patterns for the Wanbaogou low-Ti basalts and high-Ti basalts (the values of primary mantle, chondrite, OIB and E-MORB are from Sun and McDonough, 1989)

熔浆捕获基底锆石(956 Ma)表明万宝沟玄武岩可能形成于大陆环境,而砂岩中最年轻的碎屑锆石年龄(~ 900 Ma)可以为玄武岩的形成提供下限。结合 SIMS 锆石年代学研究,我们认为万宝沟玄武岩的形成时代晚于中元古代,为新元古代(~ 760 Ma)。

微量元素地球化学特征表明万宝沟玄武岩与现代 E-MORB 和 OIB 类似。Nb-Ta 等高场强元素的正异常($Nb/La=1.12\sim 1.73$, $Nb/Th=12.0\sim 17.6$, $La/Ta=8.6\sim 15.9$)证明其并没有经历明显的地壳混染。在 Ti-V 相关图中,低 Ti 拉斑($Ti/V>20$)和高 Ti 碱性玄武岩($Ti/V\geq 50$)分别落入大陆溢流拉斑玄武岩和洋岛碱性玄武岩区域(图 7a);在 Zr-Nb-Y 判别图中,万宝沟低 Ti 组投入 E-MORB 和板内拉斑玄武岩区域,而高 Ti 组则落入板内碱性玄武岩范围(图 7b)。值得注意的是,在小南川剖面中,高 Ti 玄武岩主要位于地层的下部,而低 Ti 玄武岩位于上部,并被万宝沟群灰岩整合覆盖(图 2a)。前者具有相对高的 Nb/Y、Sm/Yb 和 La/Sm 值,可能来自于石榴石残留源区低程度的部分熔融;后者具有低

的 Nb/Y、Sm/Yb 和 La/Sm 值,可能起源于地幔更高层次的部分熔融(图 8)。这一过程可能与岩石圈的伸展减薄和熔融深度变浅有关,暗示了大陆裂谷的发展,与塔里木西北缘的苏盖提布拉克玄武岩类似(Zhang *et al.*, 2012)。因此结合野外火山-沉积地层和地化特征,我们认为万宝沟火山岩可能形成于大陆裂谷或者初始洋盆环境。

Li 等(2015)通过锆石年代学和地球化学的研究,认为东昆仑和西秦岭结合部位的塔洞斜长角闪岩的原岩形成于 743~711 Ma 的大陆裂谷环境。任军虎等(2010, 2011)报道东昆仑造山带中段侵入基底的辉长-辉绿岩年龄为 796~734 Ma,形成于典型的大陆裂谷环境。柴北缘超高压带中榴辉岩的原岩为 850~750 Ma,可能形成于初始洋盆或者大陆裂谷环境(孟繁聪等, 2004; Chen *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2005, 2006, 2010; Yu *et al.*, 2013)或者代表大陆溢流玄武岩的残片(Song *et al.*, 2010)。北祁连造山带的西、中和东段的片麻状花岗岩形成于 770~750 Ma,被认为与 Rodinia 超大陆裂解有关,代

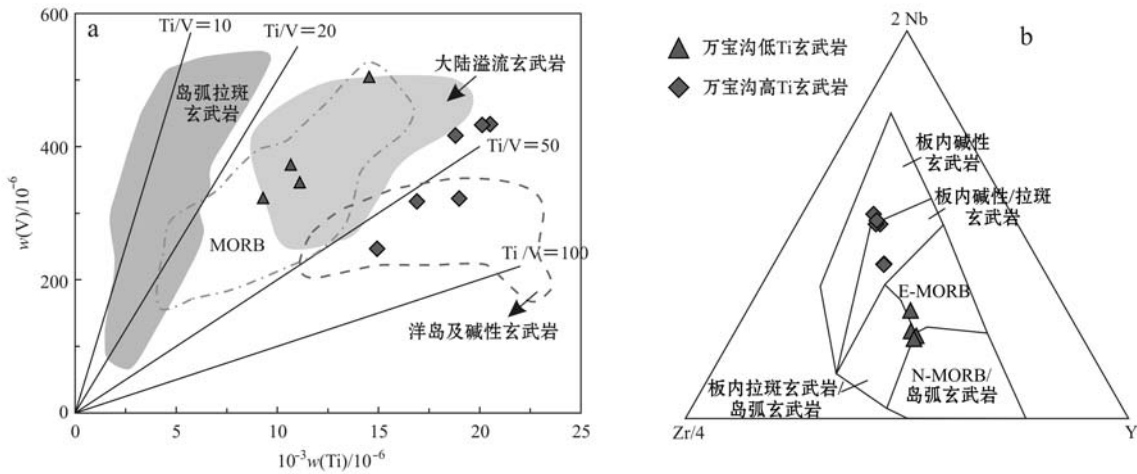


图 7 万宝沟群玄武岩的 V-Ti(a, Shervais, 1982; Rollinson, 1993)和 Zr-Nb-Y(b, Meschede, 1986)构造判别图
Fig. 7 Tectonic discrimination diagrams of the Wanbaogou basalts V-Ti (a, after Shervais, 1982; Rollinson, 1993) and Zr-Nb-Y (b, after Meschede, 1986)

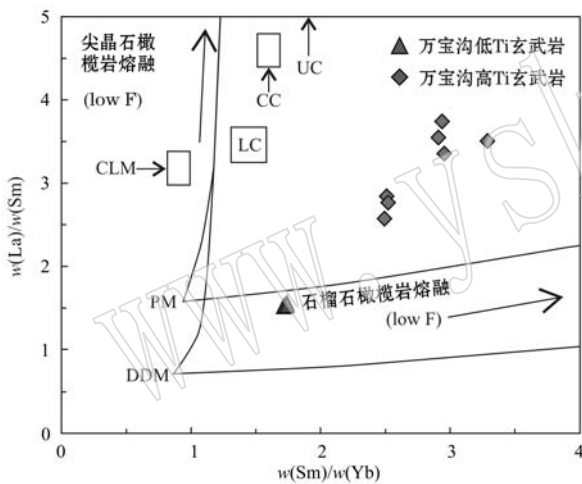


图 8 La/Sm-Sm/Yb 图解(改自 Lassiter and DePaolo, 1997)
Fig. 8 La/Sm-Sm/Yb diagram (modified after Lassiter and DePaolo, 1997)

表被动陆缘加积楔部分(苏建平等, 2004; 曾建元等, 2006; Chen *et al.*, 2014)。董国安等(2007)和雍拥等(2008)报道了中祁连东段出露有 790~750 Ma 的花岗片麻岩。同时代(780~750 Ma)板内岩浆活动也广泛分布于扬子、澳大利亚、塔里木、印度、韩国和北美等地区,代表 Rodinia 超大陆裂解峰期阶段的产物(Wang and Li, 2003; Li *et al.*, 2003; Li *et al.*, 2006)。万宝沟玄武岩正是 Rodinia 超大陆峰期裂解事件的一部分,标志着祁连-柴达木板块南缘与华南板块(?)的分离。

7 结论

- (1) 万宝沟群主要由溢流相玄武岩、火山和陆源碎屑岩以及灰岩组成, SIMS 锆石年代学表明万宝沟玄武岩的形成时代为 762 Ma;
- (2) 万宝沟玄武岩可以分为高 Ti 碱性和低 Ti 拉斑两种类型, 分别与 OIB 和 E-MORB 类似, 均未经过岩石圈混染;
- (3) 结合野外火山-沉积地层和地球化学特征, 认为万宝沟玄武岩可能形成于大陆裂谷或者初始洋盆环境, 代表 Rodinia 超大陆裂解的峰期阶段。

References

A Chengye, Wang Yizhi, Ren Jinqi, *et al.* 2003. Disintegration of the Wanbaogou Group and discovery of Early Cambrian strata in the East Kunlun area[J]. Chinese Geology, 30(2): 199~206(in Chinese with English abstract).

Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ²⁰⁴Pb[J]. Chemical Geology, 192: 59~79.

Black L P, Kamo S L, Allen C M, *et al.* 2003. TEMORA 1: A new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology[J]. Chemical Geology, 200: 155~170.

Bureau of Geology and Mineral Resources, Qinghai Province. 1991. Geology of Qinghai Province[M]. Beijing: Geological Publishing

- House(in Chinese).
- Chen D L, Liu L, Sun Y, *et al.* 2009. Geochemistry and zircon U-Pb dating and its implications of the Yukahe HP/UHP terrane, the North Qaidam, NW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35: 259~272.
- Chen Nengsong, Li Xiaoyan, Wang Xinyu, *et al.* 2006. Zircon SHRIMP U-Pb age of Neoproterozoic metagranite in the North Kunlun unit on the southern margin of the Qaidam block in China [J]. *Geological Bulletin of China*, 25(11): 1 311~1 314(in Chinese with English abstract).
- Chen Nengsong, Sun Min, Wang Qinyan, *et al.* 2008. Zircon U-Pb geochronology of the Middle Belt of East Kunlun and the enlightenment on tectonic evolution[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 38(6): 657~666(in Chinese).
- Chen Youxin, Pei Xianzhi, Chen Guochao, *et al.* 2011. Zircon U-Pb age of Xiaomiao Formation of Proterozoic in the eastern section of the East Kunlun orogenic belt[J]. *Geoscience*, 25(3): 510~521 (in Chinese with English abstract).
- Chen Youxin, Pei Xianzhi, Li Zuochen, *et al.* 2015. Geochronology, geochemical features and geological significance of the granitic gneiss in Balong area, east section of East Kunlun[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(8): 2 230~2 244(in Chinese with English abstract).
- Chen Y X, Song S G, Niu Y L, *et al.* 2014. Melting of continental crust during subduction initiation: A case study from the Chaidanuo-aluminous granite in the North Qilian suture zone [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 132(3): 311~336.
- Lassiter J C and DePaolo D J. 1997. Plume/lithosphere interaction in the generation of continental and oceanic flood basalts: chemical and isotopic constraints[A]. Mahoney J J and Coffin M F. *Large Igneous Province: Continental, Oceanic, and Planetary Flood Volcanism* [C]. American Geophysical Union Geophysical Monography, 335~355.
- Li Q L, Li X H, Liu Y, *et al.* 2010. Precise U-Pb and Pb-Pb dating of Phanerozoic baddeleyite by SIMS with oxygen flooding technique [J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 25: 1 107~1 113.
- Li R B, Pei X Z, Yang S H, *et al.* 2015. Mid-Neoproterozoic Tandong amphibolites at the junction of the East Kunlun and Western Qinling Orogens—a record of continental rifting during the break-up of Rodinia[J]. *International Geology Review*, 58(4): 455~470.
- Li X H, Li Z X, Wingate M T D, *et al.* 2006. Geochemistry of the 755 Ma Mundine Well dyke swarm, northwestern Australia: Part of a Neoproterozoic mantle superplume beneath Rodinia? [J]. *Precambrian Research*, 146: 1~15.
- Li X H, Liu Y, Li Q L, *et al.* 2009. Precise determination of Phanerozoic zircon Pb/Pb age by multicollector SIMS without external standardization[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 10(4): Q04010.
- Li Z X, Li X H, Kinny P D, *et al.* 2003. Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze Craton South China and correlations with other continents: Evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia[J]. *Precambrian Research*, 122: 85~109.
- Lu Songnian, Li Huaikun, Wang Huichu, *et al.* 2009. Detrital zircon population of Proterozoic meta-sedimentary strata in the Qinling-Qilian-Kunlun Orogen[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(9): 2 195~2 208(in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2001. *User's Manual for Isoplot/Ex rev. 2.49* [J]. Berkeley Geochronology Centre, 56, Special Publication 1.
- Meng Fancong, Cui Meihui, Wu Xiangke, *et al.* 2013. Magmatic and metamorphic events recorded in granitic gneisses from the Qimantag, East Kunlun Mountains, Northwest China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(6): 2 107~2 122(in Chinese with English abstract).
- Meng Fancong, Zhang Jianxin, Yang Jinsui, *et al.* 2004. Tectonic setting and geochemistry of amphibolites in the North Qaidam[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(5): 1 271~1 282(in Chinese with English abstract).
- Meschede M. 1986. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram[J]. *Chemical Geology*, 56(3): 207~218.
- Mo Xuanxue, Luo Zhaohua, Deng Jinfu, *et al.* 2007. Granitoids and crustal growth in the East Kunlun Orogenic Belt[J]. *Geological Journal of China Universities*, 13(3): 403~414(in Chinese with English abstract).
- Pan Yusheng, Zhou Weiming, Xu Ronghua, *et al.* 1996. Geological characteristics and evolution of the Kunlun Mountains region during the early Paleozoic[J]. *Science in China Series D*, 26(4): 302~307(in Chinese).
- Ren Junhu, Liu Yiqun, Zhou Dingwu, *et al.* 2010. Geochemical characteristics and LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of basic dykes in the Xiaomiao area, Eastern Kunlun[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 40(4): 859~868(in Chinese with English abstract).

- Ren Junhu, Zhang Kun, Liu Yiqun, *et al.* 2011. Geochemical characteristics and zircon dating of blasto-gabbro from the South Jinshuiou area, Eastern Kunlun[J]. *Journal of Northwest University*, 41(1): 100~106(in Chinese with English abstract).
- Rollinson H R. 1993. Using geochemical data: Evaluation, Presentation, Interpretation[J]. Longman Geochemistry Society: 184~186.
- Shervais J W. 1982. Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 59(1): 101~118.
- Sláma J, Košler J, Condon D J, *et al.* 2008. Plešovice zircon-A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis [J]. *Chemical Geology*, 249: 1~35.
- Song S G, Su L, Li X H, *et al.* 2010. Tracing the 850 Ma continental flood basalts from a piece of subducted continental crust in the North Qaidam UHPM belt, NW China[J]. *Precambrian Research*, 183: 805~816.
- Song S G, Wang M M, Xu X, *et al.* 2015. Ophiolites in the Xing'an- Inner Mongolia accretionary belt of the CAOB: Implications for two cycles of seafloor spreading and accretionary orogenic events[J]. *Tectonics*, 34(10): 2 221~2 248.
- Stacey J S and Kramers J D. 1975. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 26: 207~221.
- Su Jianping, Hu Nenggao, Zhang Haifeng, *et al.* 2004. Single-zircon U-Pb dating and geological significance of the Diaodaban granitic gneiss in the western segment of North Qilian Mountains[J]. *Geological Science and Technology Information*, 23(3): 11~14(in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. , 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313~345.
- Tseng C Y, Yang H Y, Wan Y S, *et al.* 2006. Finding of Neoproterozoic (~775 Ma) magmatism recorded in metamorphic complexes from the North Qilian orogen: Evidence from SHRIMP zircon U-Pb dating[J]. *Chinese Science Bulletin*, 51(8): 963~970.
- Tung K A, Yang H J, Yang H Y, *et al.* 2007. SHRIMP U-Pb geochronology of the zircons from the Precambrian basement of the Qilian Block and its geological significances[J]. *Chinese Science Bulletin*, 52(19): 2 687~2 701.
- Wang Guocan, Wang Qinghai, Jian Ping, *et al.* 2004. Zircon SHRIMP ages of Precambrian metamorphic basement rocks and their tectonic significance in the eastern Kunlun Mountains, Qinghai Province, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(4): 481~490(in Chinese with English abstract).
- Wang Guocan, Wei Qirong, Jia Chunxing, *et al.* 2007. Some ideas of Precambrian geology in the East Kunlun[J]. *Geological Bulletin of China*, 26(8): 929~937(in Chinese with English abstract).
- Wang J and Li Z X. 2003. History of Neoproterozoic rift basins in South China: Implications for Rodinia break-up[J]. *Precambrian Research*, 122: 141~158.
- Wang Xiaoxia, Hu Nenggao, Wang Tao, *et al.* 2012. Late Ordovician Wanbaogougranitoid pluton from the southern margin of the Qaidam basin: Zircon SHRIMP U-Pb age, Hf isotope and geochemistry[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(9): 2 950~2 962(in Chinese with English abstract).
- Wei Qirong, Li Dewei and Wang Guocan. 2007. Geochemical characteristics and tectonic setting of volcanic rocks from the Wanbaogou Group in East Kunlun orogenic belt[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 27(1): 97~106(in Chinese with English abstract).
- Wiedenbeck M, Alle P, Corfu F, *et al.* 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace-element and REE analyses [J]. *Geostandards Newsletter*, 19(1): 1~23.
- Winchester J A and Floyd P A. 1976. Geochemical magma type discrimination: Application to altered and metamorphosed basic igneous rocks[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 28(3): 459~469.
- Xu Y G, Chung S L, Jahn B M, *et al.* 2001. Petrologic and geochemical constraints on the petrogenesis of Permian-Triassic Emeishan flood basalts in southwestern China[J]. *Lithos*, 58: 145~168.
- Yang Jingsui, Chai Yaochu and Feng Binggui. 1987. The basic volcanic rocks of Wanbaogou Group in the Eastern Kunlun Mts and their geological significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 6(2): 121~130(in Chinese with English abstract).
- Yong Yong, Xiao Wenjiao, Yuan Chao, *et al.* 2008. LA-ICPMS zircon U-Pb ages of granitic plutons from the eastern sector of the Central Qilian and their geologic implication[J]. *Xinjiang Geology*, 26(1): 62~70(in Chinese with English abstract).
- Yu S Y, Zhang J X, Li H K, *et al.* 2013. Geochemistry, zircon U-Pb geochronology and Lu-Hf isotopic composition of eclogites and their host gneisses in the Dulan area, North Qaidam UHP terrane: New evidence for deep continental subduction[J]. *Gondwana Research*, 23(3): 901~919.
- Zhang J X, Mattinson C G, Yu S Y, *et al.* 2010. U-Pb zircon

- geochronology of coesite-bearing eclogites from the southern Dulan area of the North Qaidam UHP terrane, northwestern China: Spatially and temporally extensive UHP metamorphism during continental subduction[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 28(9): 955–978.
- Zhang Jianxin, Meng Fancong, Wan Yusheng, *et al.* 2003. Early Paleozoic tectono-thermal event of the Jinshuikou Group on the southern margin of Qaidam: Zircon U-Pb SHRIMP age evidence[J]. *Geological Bulletin of China*, 22(6): 397–404 (in Chinese with English abstract).
- Zhang J X, Yang J S, Mattinson C G, *et al.* 2005. Two contrasting eclogite cooling histories, north Qaidam HP/UHP terrane, western China: Petrological and isotopic constraints[J]. *Lithos*, 84(1): 51–76.
- Zhang J X, Yang J S, Meng F C, *et al.* 2006. U-Pb isotopic studies of eclogites and their host gneisses in the Xitieshan area of the North Qaidam Mountains, western China: New evidence for an Early Paleozoic HP-UHP metamorphic belt[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 28: 143–150.
- Zhang Z C, Kang J L, Kusky T, *et al.* 2012. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of Neoproterozoic basalts from Sugetbrak, northwest Tarim block, China: Implications for the onset of Rodinia supercontinent breakup[J]. *Precambrian Research*, 220–221: 158–176.
- ### 附中文参考文献
- 阿成业, 王毅智, 任晋祁, 等. 2003. 东昆仑地区万保沟群的解体及早寒武世地层的新发现[J]. *中国地质*, 30(2): 199–206.
- 陈能松, 李晓彦, 王新宇, 等. 2006. 柴达木地块南缘昆北单元变质新元古代花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄[J]. *地质通报*, 25(11): 1311–1314.
- 陈能松, 孙敏, 王勤燕, 等. 2008. 东昆仑造山带中带的锆石 U-Pb 定年与构造演化启示[J]. *中国科学*, 38(6): 657–666.
- 陈有炳, 裴先治, 陈国超, 等. 2011. 东昆仑造山带东段元古界小庙岩组的锆石 U-Pb 年龄[J]. *现代地质*, 25(3): 510–521.
- 陈有炳, 裴先治, 李佐臣, 等. 2015. 东昆仑东段巴隆花岗岩片麻岩年代学、地球化学特征及地质意义[J]. *岩石学报*, 31(8): 2230–2244.
- 董国安, 杨怀仁, 杨宏仪, 等. 2007. 祁连地块前寒武纪基底锆石 SHRIMP U-Pb 年代学及其地质意义[J]. *科学通报*, 52(13): 1572–1585.
- 陆松年, 李怀坤, 王惠初, 等. 2009. 秦-祁-昆造山带元古宙副变质岩层碎屑锆石年龄谱研究[J]. *岩石学报*, 25(9): 2195–2208.
- 孟繁聪, 崔美慧, 吴祥珂, 等. 2013. 东昆仑祁漫塔格花岗岩片麻岩记录的岩浆和变质事件[J]. *岩石学报*, 29(6): 2107–2122.
- 孟繁聪, 张建新, 杨经绥, 等. 2004. 柴北缘斜长角闪岩的地球化学特征及其构造背景[J]. *岩石学报*, 20(5): 1271–1282.
- 莫宣学, 罗照华, 邓晋福, 等. 2007. 东昆仑造山带花岗岩及地壳生长[J]. *高校地质学报*, 13(3): 403–414.
- 潘裕生, 周伟明, 许荣华, 等. 1996. 昆仑山早古生代地质特征与演化[J]. *中国科学*, 26(4): 302–307.
- 青海省地质矿产局. 1991. 青海省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
- 任军虎, 柳益群, 周鼎武, 等. 2010. 东昆仑小庙基性岩脉地球化学及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年[J]. *吉林大学学报地球科学版*, 40(4): 859–868.
- 任军虎, 张琨, 柳益群, 等. 2011. 东昆仑金水口南变余辉长岩地球化学及锆石定年[J]. *西北大学学报自然科学版*, 41(1): 100–106.
- 苏建平, 胡能高, 张海峰, 等. 2004. 北祁连山西段吊大坂花岗岩片麻岩的锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. *地质科技情报*, 23(3): 11–14.
- 王国灿, 王青海, 简平, 等. 2004. 东昆仑前寒武纪基底变质岩系的锆石 SHRIMP 年龄及其构造意义[J]. *地学前缘*, 11(4): 481–490.
- 王国灿, 魏启荣, 贾春兴, 等. 2007. 关于东昆仑地区前寒武纪地质的一点认识[J]. *地质通报*, 26(8): 929–937.
- 王晓霞, 胡能高, 王涛, 等. 2012. 柴达木盆地南缘晚奥陶世万宝沟花岗岩: 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄、Hf 同位素和元素地球化学[J]. *岩石学报*, 28(9): 2950–2962.
- 魏启荣, 李德威, 王国灿. 2007. 东昆仑万保沟群火山岩(P_{T_2w})岩石地球化学特征及其构造背景[J]. *矿物岩石*, 27(1): 97–106.
- 杨经绥, 柴耀楚, 冯秉贵. 1987. 东昆仑万宝沟群中的基性火山岩特征及其成因探讨[J]. *岩石矿物学杂志*, 6(2): 121–130.
- 雍拥, 肖文交, 袁超, 等. 2008. 中祁连东段花岗岩 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. *新疆地质*, 26(1): 62–70.
- 曾建元, 杨宏仪, 万渝生, 等. 2006. 北祁连山变质杂岩中新元古代(~ 775 Ma)岩浆活动纪录的发现: 来自 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年的证据[J]. *科学通报*, 51(5): 575–581.
- 张建新, 孟繁聪, 万渝生, 等. 2003. 柴达木盆地南缘金水口群的早古生代构造热事件: 锆石 U-Pb SHRIMP 年龄证据[J]. *地质通报*, 22(6): 397–404.