

# 青海共和—花石峡三叠纪碎屑沉积岩的地球化学特征与锆石 U-Pb 年龄及地质意义

陈岳龙<sup>1</sup>, 周建<sup>1</sup>, 皮桥辉<sup>1</sup>, 王忠<sup>2</sup>, 李大鹏<sup>1</sup>

1. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083

2. 内蒙古地质调查院, 内蒙古 呼和浩特 010010

Chen Yuelong<sup>1</sup>, Zhou Jian<sup>1</sup>, Pi Qiaohui<sup>1</sup>, Wang Zhong<sup>2</sup>, Li Dapeng<sup>1</sup>

1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China

2. Geological Survey of Inner Mongolia Autonomous Region, Huhhot 010010, China

**Chen Yuelong, Zhou Jian, Pi Qiaohui, et al. Zircon U-Pb dating and geochemistry of clastic sedimentary rocks in the Gonghe-Huashixia Area, Qinghai Province and their geological implications. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(2):161-174**

**Abstract:** The Triassic clastic sedimentary rocks in the Gonghe-Huashixia Area, Qinghai Province are classified as greywacke and arkose based on petrochemistry. Provenance rocks formed in arc setting during the Paleozoic and were exhumed to surface by subsequent collision, which are mafic or its partial melting product, metamorphosed basement and/or its anatexis magma, as well as granites. Averaged Nd depleted mantle model age is 1.75 Ga, which is consistent with those of basements of the Qilian Mountains, the Qaidam, the Eastern Kunlun Orogens and the Yangtze Craton. The Nd depleted model age suggests that the blocks share common tectonic affinity to the Gondwana. The histogram and probability density distribution of zircon U-Pb ages show significant peaks of 400–500 Ma, 250–300 Ma plus a secondary peak of 750–1 000 Ma, which indicate key tectonomagmatism episodes of the Paleozoic, the Early Mesozoic, and the Neoproterozoic in the Qaidam, the Eastern Kunlun, and the Qilian Mountains. The ages of greater than 1 000 to 2 700 Ma represent basement formation of the Qilian, the Qaidam and the Eastern Kunlun Orogens. Hf isotopic compositions of zircons show three dominant age ranges of 1.7–2.5 Ga, 2.8–3.6 Ga and 1.0–1.7 Ga for accretion of provenance crust. The majority of zircons are mixing products of anatexis melts derived from Neoproterozoic–Paleozoic mafic rocks and basement rocks of the Qilian Mountains, the Qaidam, and the Eastern Kunlun Mountains. The Late Paleozoic–Early Mesozoic zircons originated mainly from anatexis melts of Paleozoic juvenile crust. Contrasting histogram to that of Triassic clastic sedimentary rocks in the western Qinling Mountain suggests that their provenance material were not communicated owing to the barrier of the western Qinling Mountain. In contrast to high reliefs of the Qaidam, the Qilian Mountains, and the Eastern Kunlun, the western Qinling Mountain was in low relief with little contribution to the Gonghe Basin during the Triassic period.

**Key words:** Gonghe Basin; Triassic; clastic sedimentary rocks; provenance; tectonic affinity

**摘要:**通过对青海共和—花石峡出露的三叠纪碎屑沉积岩系统的岩石学、地球化学与锆石 U-Pb 年龄的系统研究,揭示这些碎屑沉积岩主要为岩屑砂岩、长石砂岩,源区岩石是在岛弧构造环境与随后的碰撞过程中被抬升到地表后接受剥蚀的镁铁质及其变质深熔产物、古老基底物质及其深熔产物及花岗岩类。Nd 亏损地幔

模式年龄平均为 1.75 Ga,与祁连、柴达木、东昆仑基底平均的 Nd 亏损地幔模式年龄是一致的,均类似于扬子克拉通,说明它们具有共同的块体构造属性,均从冈瓦纳大陆裂解后拼合到欧亚大陆。碎屑锆石 U-Pb 年龄存在于 400~500 Ma、250~300 Ma 两个主要峰与次要的 750~1 000 Ma 新元古代峰,反映了祁连、柴达木、东昆仑古生代与早中生代及新元古代重要的构造岩浆作用期,还测得一些 >1 000 Ma 到 2 700 Ma 的反映祁连、柴达木、东昆仑基底形成年龄。锆石 Hf 同位素揭示源区地壳增生主要发生于 1.7~2.5 Ga、2.8~3.6 Ga、1.0~1.7 Ga 三个年龄范围,大部分锆石可能是古老基底与新元古代增生地壳变质深熔混合产物,而晚古生代—早中生代的锆石含有更多的古生代增生地壳组分。西秦岭与共和盆地的三叠系在物源上并没有沟通,三叠纪时西秦岭相对于祁连、柴达木、东昆仑应处于相对较低的地形条件,但仍阻挡两个沉积盆地的贯通。

**关键词:** 共和盆地;三叠纪;碎屑沉积岩;沉积物源;构造属性

**中图分类号:** P59 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2321(2009)02-0161-14

无论是现代河流/海洋沉积物还是地质历史中形成的碎屑沉积岩,其组成是对它们沉积时控制地表的构造、风化与搬运过程、源区岩石所处的构造环境的可靠地质记录,在古大陆再造中它成为其他研究对象所不可取代的、揭示地球动力学过程信息的重要载体<sup>[1-4]</sup>。在沉积物源区与沉积物堆积地之间的风化、搬运过程及沉积与成岩作用不同程度上改变了碎屑沉积的组成,但是由于锆石抗物理-化学风化与其 U-Pb 体系高的封闭温度<sup>[5]</sup>可有效地避免这些作用的影响,U-Pb 年龄可提供源区时间与空间变化上的信息及古地理再造与构造分析的关键数据<sup>[6-11]</sup>。因为稀土元素在风化过程中的活动性有限,碎屑沉积物的 Sm-Nd 同位素组成可作为源区暴露上地壳的平均组成<sup>[12]</sup>。Nd 模式年龄填图表明,不同的陆块最初从地幔分离(亏损地幔模式年龄)的时间是不同的,如美国中部大陆形成于 1.7~2.0 Ga,西北部为  $\geq 2.5$  Ga 的地壳,西部的 Mojavia 地块的 Nd 亏损地幔模式年龄为 2.0~2.3 Ga,而南部是约 1.3 Ga 的新生地块<sup>[13]</sup>。中国新疆、扬子克拉通西缘、华北、秦岭的 Nd 同位素填图也说明了其构造分区的有效性<sup>[14-21]</sup>。连接扬子与华北克拉通的中央造山带的秦岭一大别段其基底是在 2.0 Ga 时在洋岛环境下形成的独立块体,但从 Pb 与 Sm-Nd 同位素组成上确定与扬子克拉通具亲缘性,商—丹断裂以北的北秦岭最晚至震旦纪中晚期与南秦岭分离成为华北克拉通南缘的活动大陆边缘<sup>[22-23]</sup>。

共和—花石峡位于青海省境内,大地构造上是西秦岭、南祁连、柴达木、东昆仑等地块衔接转换集结区,呈南北向延伸,又称之为共和坳拉谷。西部以瓦洪山断裂与柴达木地块(包括东昆仑造山带)连接,东以多禾茂断裂带为界与西秦岭相邻,南以勉略—阿尼玛卿缝合带与巴颜喀拉—松潘造山带相邻,北以青海湖南山断裂为界与祁连造山

带相邻(图 1)。

## 1 地质概况

共和盆地,在大地构造上又称为共和坳拉谷,其北部的南祁连出露的基底为湟源群,以片麻岩、角闪岩、大理岩、片岩及石英岩、千枚岩等变质岩系组合为主。这套基底岩石组合进一步划分为刘家台组、东岔沟组、磨石沟组和青石坡组,刘家台组、东岔沟组传统上划分为古元古代。共和坳拉谷南部以南苦海、赛什塘一带断续分布着元古宙断块,以二云母石英片岩、黑云母石英片岩、黑云母变粒岩、黑云斜长片麻岩夹角闪片岩为主<sup>[24]</sup>。在共和坳拉谷周缘印支期花岗岩广泛分布,代表性的岩体有黑马河、温泉、大河坝、同仁岩体<sup>[25]</sup>;在南侧的阿尼玛卿,北侧的宗务隆及南、北两侧之间的苦海—赛什塘分布着丰富的晚古生代镁铁质火山岩<sup>[26]</sup>,其中一些时代可能为晚新元古代—早奥陶世<sup>[27]</sup>。

共和坳拉谷的形成发展过程,总体上基本经历了两大构造体制:晚三叠世以前的板块构造体制和自晚三叠世以来的陆内构造体制。早古生代以被动型裂谷演化过程为特征;晚古生代早期为主动型裂谷演化过程,上泥盆统以陆相组合为特征。晚古生代中晚期(C)为坳拉谷发展演化阶段,早石炭世以海相为主,晚石炭世发育海陆交互相,主要由片理化砂岩、千枚岩、结晶灰岩、变砂岩及火山岩为主;晚古生代末期坳拉谷俯冲碰撞闭合,以发育二叠纪灰绿色碎屑岩、火山岩、碳酸盐系组合为特征。早中三叠世持续俯冲—碰撞过程广泛发育深水复理石沉积,以隆务河群为代表,沉积厚度大,中、下部为海相沉积,以深灰色粉砂岩、细砂岩、泥质板岩为主;上三叠统下部为海陆交互相,上部为陆相沉积,主要由陆相火山岩系夹煤系地层组成<sup>[28]</sup>。

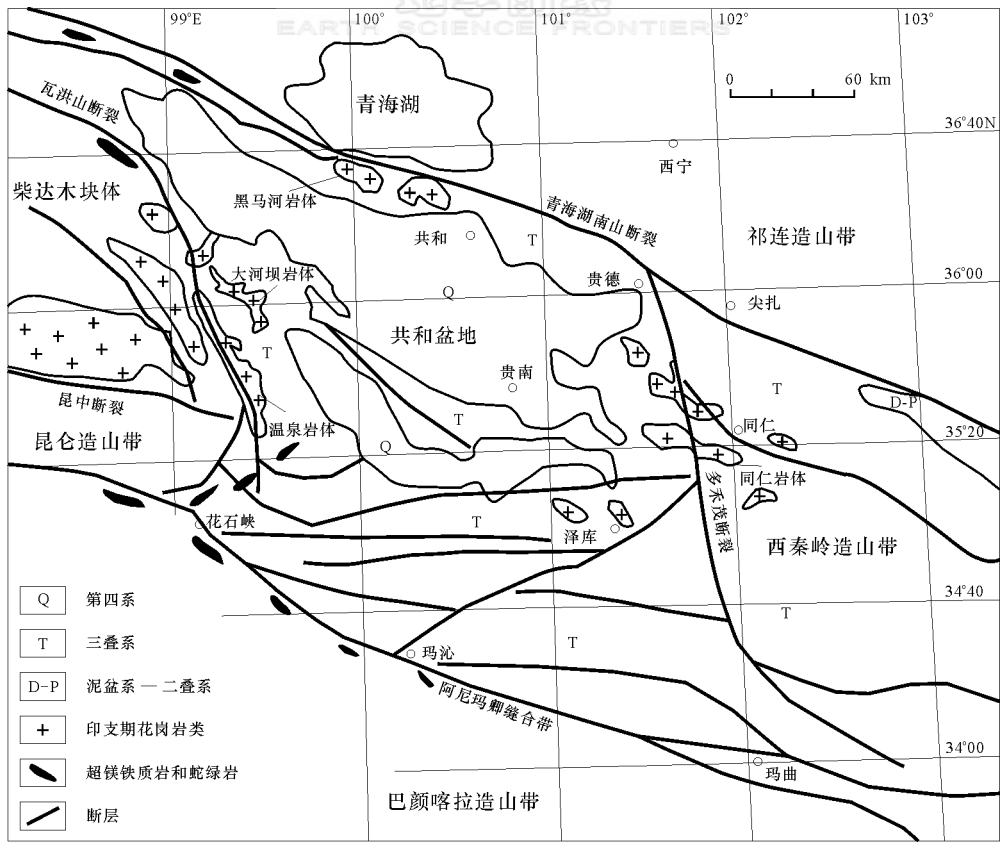


图1 青海共和盆地周缘构造略图  
(据张宏飞等<sup>[24]</sup>修改)

Fig. 1 Simplified geological map around the Gonghe Basin, Qinghai Province

对共和—花石峡一带出露的元古宙变质基底, 石炭—二叠纪、三叠纪碎屑沉积岩进行了详细的野外地质与代表性样品的采集, 样品分布及区域地质如图2、3, 表1所示。本文主要讨论三叠纪碎屑沉积岩。

## 2 分析方法

样品在分析前进行显微镜下矿物组成与结构观察, 挑选未蚀变、风化的样品作进一步分析。适合分析的全岩样品手工粗碎至1~2 cm, 选出大约100 g, 用无污染刚玉碎样机粉碎至200目。每个样品缩分出3份准备进行主量、微量与Sm-Nd同位素组成分析。主量元素在核工业北京地质研究院由X射线荧光光谱分析, 其中二价铁与三价铁由化学法测定, 主量元素分析准确度与精密度优于5%。Sm-Nd同位素分析, 称样0.1 g于聚四氟乙烯溶样罐, 加入16 mL的HF+HNO<sub>3</sub>+HClO<sub>4</sub>(10:5:1), 密封后套上钢套加热溶解样品; 样品完全溶解后, 将

溶液完全蒸干后用25 mL浓度为6 mol/L的HCl溶解样品, 每个样品分成两份, 1份用于Nd同位素比值分析, 另1份准确加入Sm-Nd稀释剂用于Sm-Nd含量测定。Sm-Nd含量测定加入<sup>149</sup>Sm-<sup>150</sup>Nd混合稀释剂, 含量分析精度优于5%; 质谱分析由固体质谱计MAT261完成, Nd同位素质谱分析的分馏校正标准化至<sup>146</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd=0.7219, 标样JMC、BCR-1测定的<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd值(平均)分别为0.511937±10(2σ)、0.512594±10(2σ), 全部分析在中国地质科学院地质研究所完成。

REE与其他微量元素分析样品由带钢套的聚四氟乙烯密封溶样罐溶解样品。样品溶液用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)(VG PQ II)分析, 分析精度优于5%~10%, 全部分析在中国科学院地质与地球物理研究所完成。

锆石的分离, 先将样品粉碎至适当粒度, 视样品量分别用摇床或手淘将重矿物集中。锆石用重液或结合电磁法进一步富集后, 在双目镜下挑纯备测。每个样品随机挑出大约200个颗粒, 将其用环氧树脂



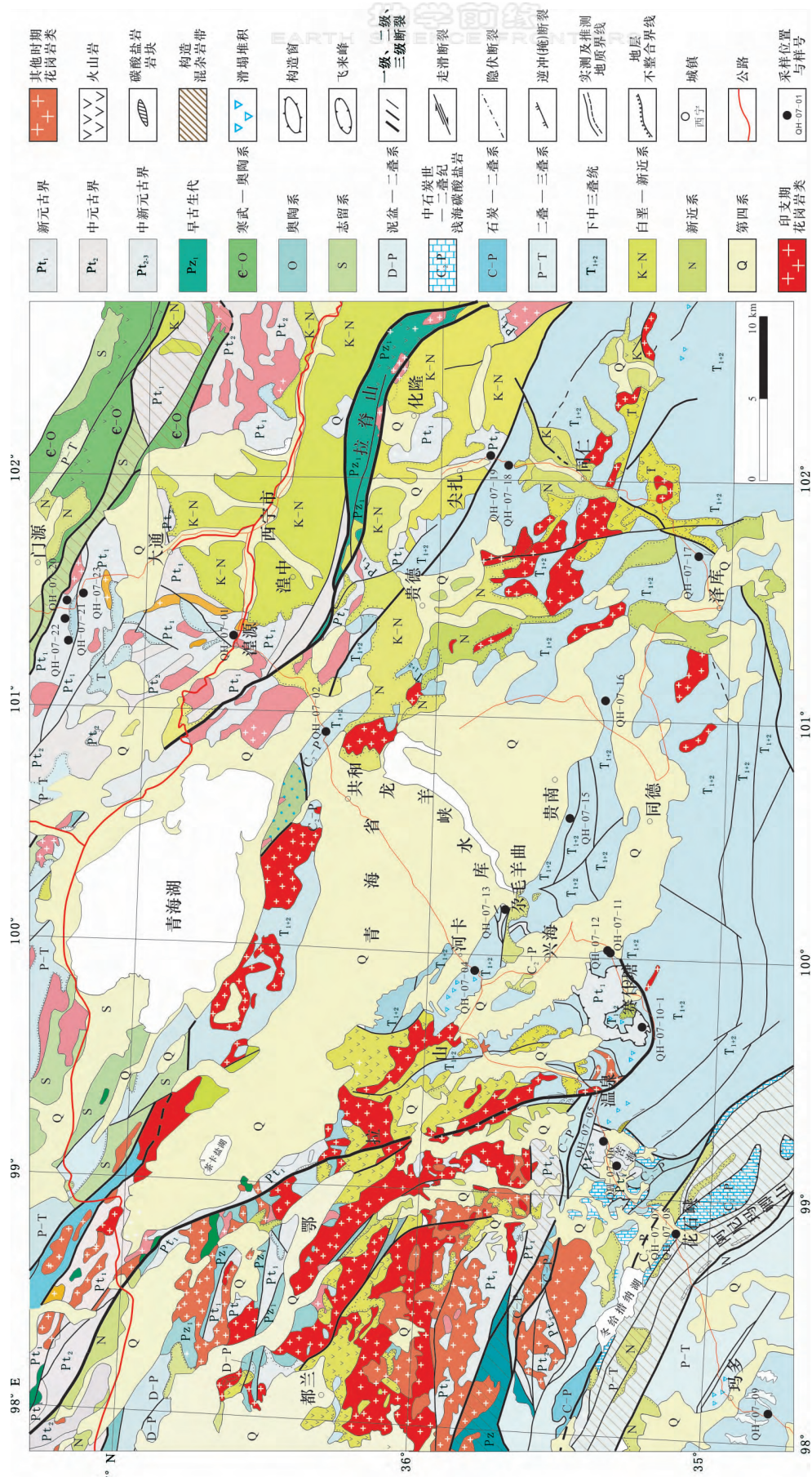


图2 共和—花石峡地质略图与样品分布 (据冯益民等修改<sup>[29]</sup>)

Fig. 2 Sketch geological map of the Gonghe-Huashixia Area and sample distributions

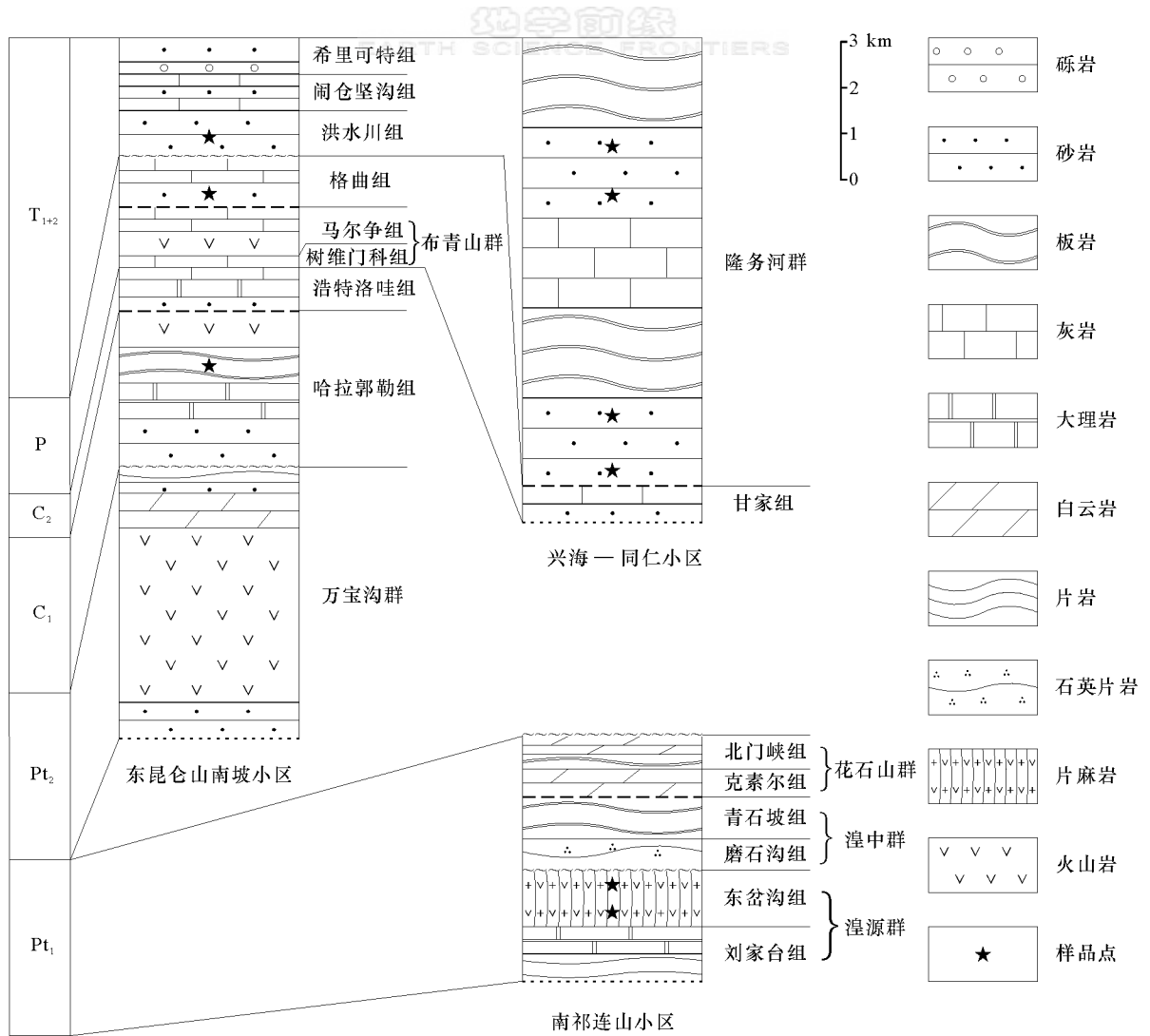


图3 共和盆地及有关地层的地质柱状图与样品分布层位  
(据青海省地质志修改<sup>[24]</sup>)

Fig.3 Stratigraphical columns of the Gonghe Basin and adjacent tectonic units and sample horizons

表1 共和—花石峡三叠纪碎屑沉积岩取样地点与岩性

Table 1 Localities and lithologies of Triassic clastic sedimentary rocks in the Gonghe-Huashixia Area, Qinghai Province

样号	地点	岩性	层位	东经/(°)	北纬/(°)
QH-07-02	倒淌河	灰黑色中细粒砂岩	T <sub>1-2</sub>	100.562 4	36.231 3
QH-07-02-1	倒淌河	粉砂岩	T <sub>1-2</sub>	100.562 4	36.231 3
QH-07-04	河卡	中细粒黄绿色砂岩	T <sub>2</sub>	99.545 8	35.501 0
QH-07-04-1	河卡	黄绿色泥岩	T <sub>2</sub>	99.545 8	35.501 0
QH-07-15	贵南—泽库	红棕色细粒砂岩	T <sub>2</sub>	100.584 3	35.250 4
QH-07-15-1	贵南—泽库	灰绿色板岩	T <sub>2</sub>	100.584 3	35.250 4
QH-07-16	贵南—泽库	灰色细粒砂岩	T <sub>2</sub>	101.011 8	35.150 0
QH-07-16-1	贵南—泽库	黑色页岩	T <sub>2</sub>	101.011 8	35.150 0
QH-07-17	泽库—同仁	灰绿色细粒砂岩	T <sub>2</sub>	101.015 0	35.150 9
QH-07-17-1	泽库—同仁	灰绿色泥岩	T <sub>2</sub>	101.015 0	35.150 9
QH-07-18	同仁—尖扎	灰绿色中粒砂岩	T <sub>2</sub>	102.030 3	35.442 1
QH-07-18-1	同仁—尖扎	灰黑色板岩	T <sub>2</sub>	102.030 3	35.442 1

固定,而后抛光至锆石晶体中部暴露在表面<sup>[30]</sup>。抛光后的锆石由光学显微镜在透射、反射光下观察其形态与内部结构,然后在阴极发光下进一步观察其精细结构。

锆石 U-Pb 同位素分析在中国地质大学(武汉)由激光剥蚀等离子体质谱(LA-ICP-MS)分析。激光剥蚀系统是装有 193 nm ArF 准分子激光器的均一化与图像光学系统(GeoLas2005,德国哥廷根 MicroLas)。分析是在 Agilent7500a 上完成的,利用氦气作为载气以增强剥蚀物的传输效率。大剥蚀腔内,氦载气与氩在进入感应耦合等离子体前充分混合以维持稳定与最佳的激发条件。激光束直径为 4~200  $\mu\text{m}$ ,可调节,剥蚀坑的直径平均大约为 32  $\mu\text{m}$ ,信号与背景测量时间分别为 40、30 s。平均输出功率 $>200$  mJ(10 Hz, 30 kV),能量稳定性优于 2%。均一化与激光束聚焦后在样品表面的能量密度大于 10 J/cm<sup>2</sup>。在 LA-ICP-MS 常规测定过程中,每个点的信号峰强度均进行仔细监测以识别出穿过不同结构域<sup>[31]</sup>的双峰。对于 40  $\mu\text{m}$  剥蚀坑  $1 \times 10^{-6}$  的 U 质量分数对应的 <sup>238</sup>U 灵敏度大于 800 cps,背景值低于 5 cps。由于多数分析的锆石颗粒中 <sup>238</sup>U 的质量分数大于  $50 \times 10^{-6}$ ,相应的 <sup>238</sup>U 强度通常大于 40 000 cps,此灵敏度为锆石 U-Pb 定年提供了良好的精确度与准确度。普通 Pb 的校正仅对普通 <sup>206</sup>Pb $>1\%$  的点进行,采用加载在 Excel 上的 ComPbCorr # 3\_151 模板<sup>[32]</sup>。每分析 5 个样品点后对锆石 91500<sup>[33]</sup> 进行分析,作为年龄计算的外部校正标准,NIST SRM610 每分析 20 个样品点后测定一次以计算样品的 U、Th、Pb 含量。

锆石 Hf 同位素组成的分析,是在阴极发光(CL)图像及锆石 U-Pb 定年的基础上进行的,分析前将锆石样品靶再次清洗干净并晾干。测试在中国地质科学院矿产资源研究所 MC-ICP-MS 同位素实验室 Thermo Finnigan Neptune 型多接收电感耦合等离子体质谱计(MC-ICP-MS)上进行,系统配有 213 nm 紫外激光系统(Newwave UP213 Laser Ablation System),剥蚀光斑直径在 10~150  $\mu\text{m}$  可调,输出能量可调,其最大实际功率为 35 J/cm<sup>2</sup>。分析时大部分分析点激光束直径约为 32  $\mu\text{m}$ ,所有的激光脉冲速度为 8 Hz;部分结构简单且颗粒粗大的锆石,激光束直径约为 64  $\mu\text{m}$ ,所用的激光脉冲速度为 6 Hz。激光剥蚀时间为 27 s(0.131 s $\times$ 200 组),分析过程中以国际标准锆石 GJ1(GEMOC 中

心编号 GJ1/53)作为外标,测定值平均为 0.282 003  $\pm$  0.000 016(2 $\sigma$ )。

### 3 结果

#### 3.1 岩石学

共和一花石峡三叠纪砂岩,多数为灰绿、灰黄到灰黑色,中到细粒。显微镜下观察到的主要组分为石英(14%~29%)、斜长石(2%~33%)、花岗质岩屑(0%~17%)及粘土矿物(20%~60%),碳酸盐类含量变化在 0%~16% 的范围内;此外可见到磁铁矿、磷灰石、锆石等副矿物。

#### 3.2 主量与微量元素

主量元素与微量元素组成如表 2 所示。由 Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 变化关系<sup>[34]</sup>(图 4)确定三叠纪砂岩主要由杂砂岩与长石砂岩组成,说明源区岩石没有经历充分的搬运与分选,成熟度较低。砂岩的 REE 球粒陨石<sup>[35]</sup> 标准化分布型式(图 5)表明,

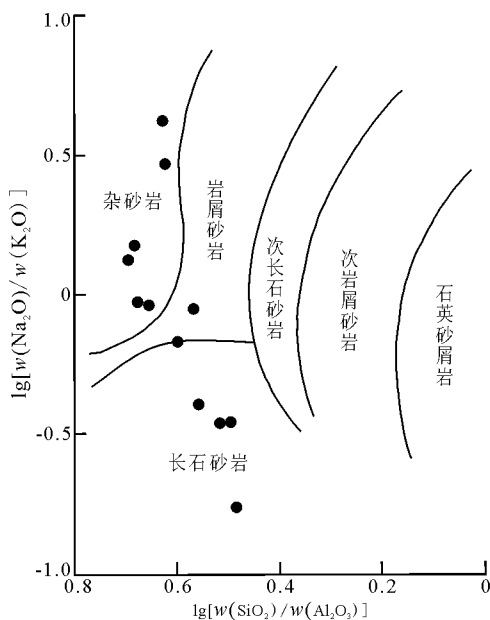


图 4 共和一花石峡三叠纪碎屑沉积岩 Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 分类图<sup>[34]</sup>

Fig. 4 Classification diagram of Triassic clastic sedimentary rocks in the Gonghe-Huashixia Area, Qinghai Province based on Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

源区岩石总体具较明显的负 Eu 异常,平均为 0.70,与上地壳平均<sup>[12]</sup> 负 Eu 异常值 0.71 基本一致;轻稀土元素之间、重稀土元素之间及轻-重稀土元素间的分馏程度均低于大陆上地壳平均值,有关参数<sup>[36]</sup> 分别为 (La/Sm)<sub>N</sub>: 平均为 3.84,变异系数(标准偏



表 2 共和—花石峡三叠纪碎屑沉积岩的主量、微量元素含量

Table 2 Concentrations of major (%) and trace elements ( $10^{-6}$ ) in Triassic clastic sedimentary rocks from the Gonghe-Huashixia Area, Qinghai Province

样号	主量元素 $w_B/\%$												烧失量
	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	
QH-07-02	59.58	1.38	14.11	4.71	4.15	0.12	2.21	3.96	4.20	1.00	0.41	2.40	3.33
QH-07-02-1	58.43	0.77	18.80	2.70	3.89	0.12	2.66	2.45	1.12	3.23	0.12	4.20	6.03
QH-07-04	66.40	0.65	14.10	2.63	1.95	0.06	1.95	2.31	2.43	2.60	0.13	2.44	3.70
QH-07-04-1	59.81	0.70	18.42	3.20	3.53	0.09	3.02	1.16	1.36	3.97	0.12	3.55	4.07
QH-07-15	64.44	0.70	16.36	3.31	2.81	0.05	2.49	0.94	1.79	2.65	0.13	2.70	3.80
QH-07-15-1	63.29	0.54	13.22	3.21	0.54	0.17	0.72	6.12	3.12	2.10	0.13	1.55	6.60
QH-07-16	63.87	0.70	14.21	2.98	3.88	0.06	2.85	2.81	1.57	1.73	0.11	2.99	4.57
QH-07-16-1	59.14	0.79	19.53	2.51	4.41	0.03	2.79	0.89	0.65	3.78	0.13	4.53	4.83
QH-07-17	63.42	0.61	12.87	2.20	2.03	0.06	2.32	4.73	2.78	2.09	0.14	2.00	5.30
QH-07-17-1	55.90	0.63	15.23	4.19	2.43	0.09	3.58	5.43	1.96	2.21	0.13	3.84	7.73
QH-07-18	54.94	0.52	13.18	2.00	2.58	0.17	2.05	10.13	3.62	1.23	0.16	2.48	9.00
QH-07-18-1	61.71	0.72	17.21	2.42	3.77	0.08	2.64	1.77	1.34	3.34	0.15	3.43	4.40

样号	微量元素 $w_B/10^{-6}$															$(La/Sm)_N^*$	$(La/Yb)_N^*$	$(Tb/Yb)_N^*$	$\delta Eu$
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu					
QH-07-02	36.71	73.18	9.02	34.10	7.23	1.86	7.22	1.17	7.24	1.50	4.13	0.60	3.88	0.60	3.19	6.38	1.33	0.78	
QH-07-02-1	42.85	84.44	9.96	37.57	7.06	1.46	5.98	0.91	5.50	1.08	3.01	0.45	2.94	0.46	3.82	9.83	1.36	0.67	
QH-07-04	27.48	53.04	6.50	24.70	4.72	1.03	4.18	0.66	3.90	0.78	2.18	0.33	2.11	0.32	3.66	8.78	1.38	0.70	
QH-07-04-1	34.44	68.77	8.29	30.80	6.08	1.26	5.00	0.79	4.87	0.97	2.72	0.41	2.85	0.43	3.56	8.15	1.22	0.68	
QH-07-15	33.20	67.44	8.15	30.66	5.39	1.11	4.96	0.78	4.54	0.93	2.58	0.39	2.60	0.39	3.87	8.61	1.32	0.65	
QH-07-15-1	38.41	72.99	8.36	31.33	5.51	1.24	5.19	0.78	4.55	0.93	2.61	0.38	2.38	0.37	4.38	10.9	1.45	0.70	
QH-07-16	36.08	72.31	8.47	31.37	5.90	1.22	5.07	0.77	4.30	0.81	2.16	0.32	2.03	0.30	3.85	12.0	1.67	0.67	
QH-07-16-1	41.99	85.02	9.77	35.78	6.68	1.26	6.01	0.96	5.69	1.19	3.28	0.50	3.28	0.51	3.95	8.63	1.29	0.60	
QH-07-17	32.64	62.18	7.16	25.81	4.67	1.03	4.07	0.60	3.45	0.68	1.85	0.28	1.83	0.26	4.40	12.0	1.45	0.71	
QH-07-17-1	30.42	58.58	7.16	26.75	5.15	1.00	4.60	0.71	4.13	0.85	2.39	0.37	2.39	0.36	3.72	8.58	1.31	0.62	
QH-07-18	29.29	55.90	6.81	24.55	4.67	1.07	4.50	0.66	3.67	0.72	1.92	0.28	1.80	0.28	3.95	11.0	1.62	0.71	
QH-07-18-1	38.36	75.05	9.18	33.84	6.41	1.28	5.87	0.90	5.31	1.05	2.93	0.45	2.92	0.45	3.76	8.86	1.36	0.63	

注: \* 为样品球粒陨石标准化后的比值, 球粒陨石标准采用 Boynton(1984)<sup>[35]</sup>推荐数据。

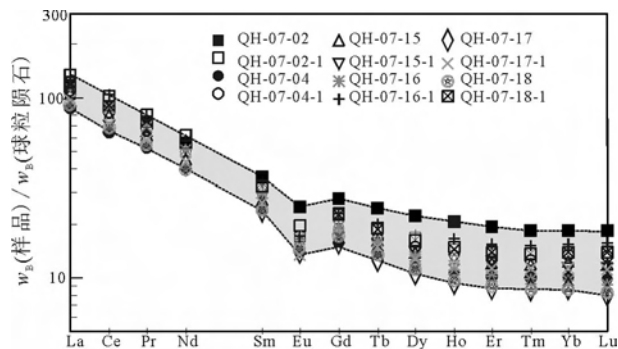


图 5 共和—花石峡三叠纪碎屑沉积岩稀土元素球粒陨石标准化分布型式

Fig. 5 Chondrite-normalized REE distribution patterns of Triassic clastic sedimentary rocks in the Gonghe-Huashixia Area, Qinghai Province

差/平均值  $\times 100$ ) 为 8.54%;  $(Tb/Yb)_N$ : 平均为 1.40, 变异系数为 9.5%;  $(La/Yb)_N$ : 平均为 9.48, 变异系数为 17.9%。这些值均低于大陆上地壳相

应的  $(La/Sm)_N$  (4.15)、 $(Tb/Yb)_N$  (1.57) 与  $(La/Yb)_N$  (10.7) 值<sup>[12]</sup>; 稀土总量(质量分数)平均为  $168 \times 10^{-6}$ , 变异系数为 14.5%, 比大陆上地壳平均值  $148 \times 10^{-6}$  高。这些数据说明, 三叠纪碎屑沉积岩源区岩石总体上与大陆地壳组成基本一致, 但是稀土元素分馏程度不及平均大陆上地壳充分, 源区的中酸性火成岩起源上可能再循环地壳组分所占比例较低, 幔源镁铁质岩石在壳内深熔作用过程中占有较高的比例, 且熔融程度较低, 残留相中富重稀土元素的石榴子石等矿物比例不高。

### 3.3 Nd 同位素组成

共和—花石峡三叠纪碎屑沉积岩的 Nd 同位素组成如表 3 所示。经计算得到的亏损地幔模式年龄分布于 1.49~1.96 Ga, 平均值为 1.75 Ga。较老的亏损地幔模式年龄与中南祁连深变质基底、柴达木北缘片麻岩<sup>[40-41]</sup>, 昆仑的基底及花岗岩类<sup>[42-43]</sup> 及共和

表3 共和—花石峡三叠纪碎屑沉积岩 Sm-Nd 同位素组成

Table 3 Sm-Nd isotopic compositions of Triassic clastic sedimentary rocks in the Gonghe-Huashixia Area, Qinghai Province

样号	$w_B/10^{-6}$		$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} (2\sigma^1)$	$t_{\text{DM}}^2/\text{Ga}$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)^3$
	Sm	Nd				
QH-07-02	6.66	31.9	0.127 4	0.512 262(6)	1.57	-5.3
QH-07-02-1	6.12	32.7	0.114 6	0.511 980(8)	1.80	-12
QH-07-04	4.29	22.0	0.118 8	0.512 170(10)	1.57	-6.9
QH-07-04-1	4.99	26.1	0.116 8	0.512 122(5)	1.62	-7.7
QH-07-15	5.10	27.14	0.114 7	0.512 048(5)	1.70	-9.1
QH-07-15-1	5.23	27.71	0.115 3	0.511 952(10)	1.85	-11
QH-07-16	5.34	29.06	0.112 0	0.511 941(9)	1.81	-11
QH-07-16-1	5.90	30.77	0.116 9	0.511 906(6)	1.96	-12
QH-07-17	4.45	24.42	0.110 8	0.511 857(12)	1.91	-13
QH-07-17-1	4.90	23.74	0.120 7	0.511 952(10)	1.96	-11
QH-07-18	4.16	21.5	0.118 1	0.512 214(15)	1.49	-6.0
QH-07-18-1	5.72	29.8	0.117 4	0.512 049(8)	1.74	-9.2

注: <sup>1</sup> 括号中数字为  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  值测定的  $2\sigma$  绝对误差, 即为比值的小数点位最后一位(1 位数)或两位(2 位数)上的绝对偏差; <sup>2</sup> 亏损地幔模式年龄计算采用 Goldstein 等<sup>[37]</sup> 的模式, 亏损地幔现今  $\epsilon_{\text{Nd}}(0) = +10.4\ 560\ \text{Ma}$  时,  $\epsilon_{\text{Nd}}(4\ 560) = 0$ ; 球粒陨石现今  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512\ 638$ ,  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.196\ 6$  (陈岳龙等<sup>[38]</sup>); <sup>3</sup> 地层年龄根据层位均取自中三叠世末(228 Ma)<sup>[39]</sup>。

盆地周缘的花岗岩类<sup>[25]</sup>的 Nd 亏损地幔模式年龄具有一致性, 说明其物质来源主要为共和盆地周缘的祁连、柴达木与东昆仑。

### 3.4 锆石 U-Pb 年龄

碎屑沉积岩中锆石 U-Pb 年龄不谐和度  $< 20\%$  的分布直方图与概率密度曲线如图 6 所示(另文详细讨论)。峰值主要是 400~500 Ma、250~300 Ma, 其次是 750~1 000 Ma 的新元古代峰。

400~500 Ma 是祁连山<sup>[45-51]</sup>—柴北缘<sup>[52-53]</sup>、东昆仑<sup>[26-27, 42, 46]</sup>重要的早古生代构造-岩浆活动期, 也是柴北缘超高压变质作用的主要形成期<sup>[47]</sup>, 在祁连山—柴北缘存在 750~1 000 Ma 的蛇绿岩与花岗岩类<sup>[53-54]</sup>, 从而说明新元古代、早古生代祁连—柴北缘、东昆仑的地壳增生事件形成的组分构成了共和—花石峡碎屑沉积物的主要物源。250~300 Ma 的年龄峰说明东昆仑此期大规模岩浆活动产物且被剥蚀搬运—并沉积于共和盆地中<sup>[42, 55]</sup>。此外, 也测得一些  $> 1\ 000\ \text{Ma}$  到 2 700 Ma 少量古老碎屑锆石, 它们代表了祁连—柴北缘<sup>[41, 56-57]</sup>、东昆仑<sup>[42, 58]</sup>基底岩石的暴露-剥蚀。

锆石 Hf 同位素组成与 U-Pb 年龄相结合得到的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  随时间变化关系如图 7 所示(另文详细讨论)。Hf 亏损地幔模式年龄由下式计算:

$$t_{\text{DM}} = \frac{1}{\lambda} \ln \left[ \frac{\left( \frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}} \right)_0^{\text{Zr}} - \left( \frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}} \right)_0^{\text{DM}} - \left( \frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}} \right)_0^{\text{Zr}} (e^{\lambda t} - 1) + 0.015(e^{\lambda t} - 1)}{0.015 - \left( \frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}} \right)_0^{\text{DM}}} + 1 \right] \quad (1)$$

式(1)中 0.015 代表大陆地壳平均的  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  比值<sup>[59]</sup>,  $\left( \frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}} \right)_0^{\text{Zr}}$ 、 $\left( \frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}} \right)_0^{\text{Zr}}$  分别为锆石原位测定比值<sup>[60]</sup>; 亏损地幔现今的  $\left( \frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}} \right)_0^{\text{DM}}$ 、 $\left( \frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}} \right)_0^{\text{DM}}$  分别为 0.283 25、0.038 4<sup>[61]</sup>;  $\lambda$  为  $^{176}\text{Lu}$  衰变常数  $= 1.867 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ <sup>[61]</sup>;  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  的计算中采用球粒陨石现今的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282\ 772$ ,  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.033\ 2$ <sup>[61]</sup>。

Hf 亏损地幔模式年龄(图 7)说明源区地壳的增长主要发生于 1.7~2.5 Ga、2.8~3.6 Ga、1.0~1.7 Ga, 这些锆石主要结晶于 250~2 500 Ma, 它们可能是新元古代—早古生代地壳增生组分与古老地壳深熔组分的混合产物, 晚古生代—早中生代的锆石大部分应该以新元古代—早古生代增生地壳组分的熔融为主。

## 4 讨论

由于碎屑沉积岩记录着源区地壳组成信息, 根据  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$  的关系<sup>[62]</sup>(图 8), 共和—花石峡三叠纪碎屑沉积岩均落在岛弧与活动大陆边缘区, 说明三叠纪时源区存在大量的岛弧/或活动大陆边



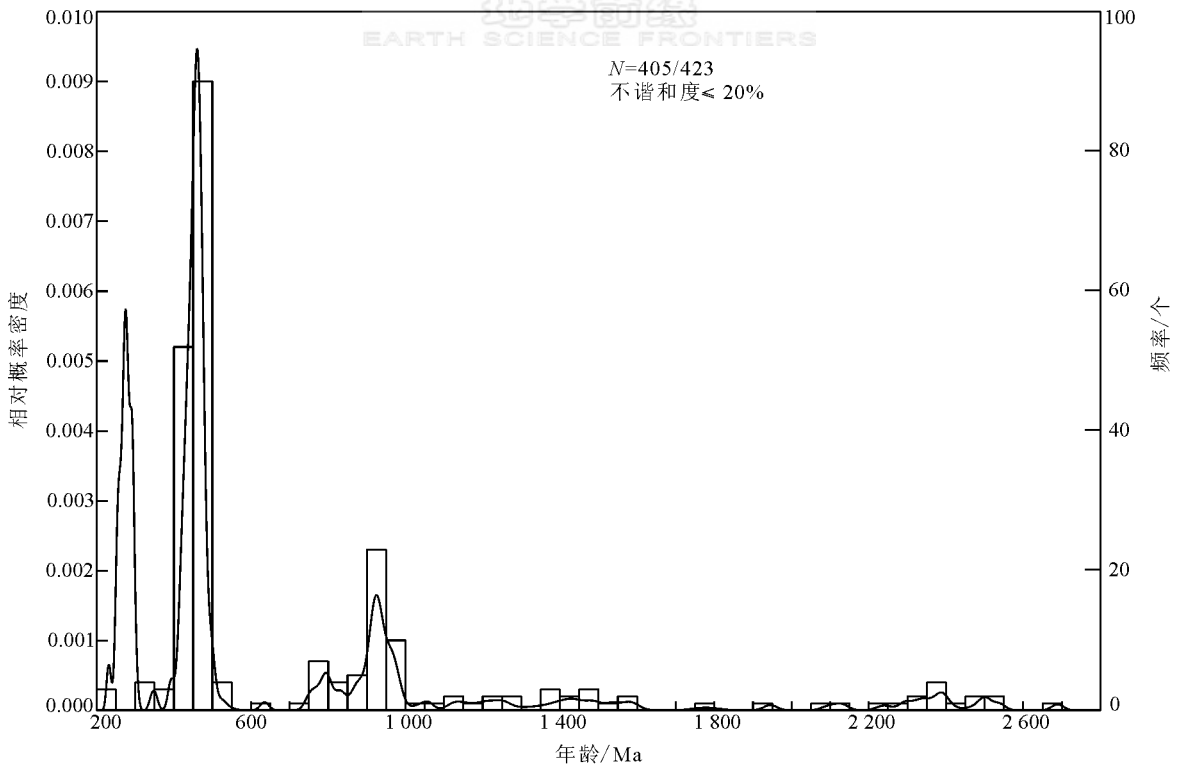


图6 共和—花石峡三叠纪碎屑沉积岩中锆石 U-Pb 年龄分布直方图与概率密度曲线  
(由 Sircombe<sup>[44]</sup> 编写的加载在 Excel 上的宏绘制)

Fig. 6 Histogram and probability density distribution of zircon U-Pb ages in Triassic clastic sedimentary rocks from the Gonghe-Huashixia Area, Qinghai Province (constructed through a macro added in Excel, Sircombe<sup>[44]</sup>)

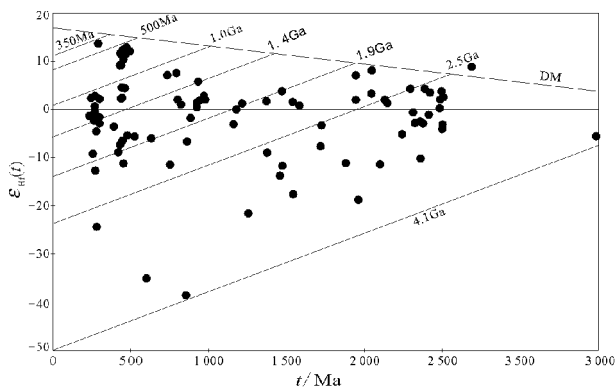


图7 共和—花石峡三叠纪碎屑沉积岩中锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  随年龄演化关系

Fig. 7 Evolution of  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  with age on zircons in Triassic clastic sedimentary rocks from the Gonghe-Huashixia Area, Qinghai Province

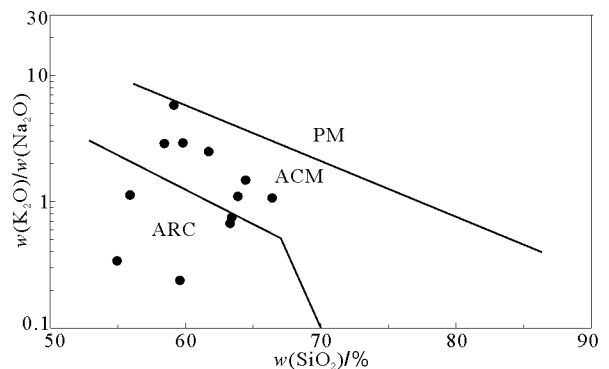


图8 青海共和—花石峡三叠纪碎屑沉积岩的  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$  构造环境判别

Fig. 8 Discrimination diagram of tectonic settings of  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$  for Triassic clastic sedimentary rocks in the Gonghe-Huashixia Area, Qinghai Province  
ARC—岛弧构造环境; ACM—活动大陆边缘; PM—被动大陆边缘

缘构造环境下形成的岩浆岩, 这些岩石可能是在古生代的岛弧构造机制下形成的, 至三叠纪时这些岩石已由碰撞作用抬升剥露到地表, 并为共和—花石峡盆地提供物源。

由稀土总量与  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  值关系<sup>[63]</sup> (图 9) 可

知, 共和—花石峡三叠纪碎屑沉积岩均落在镁铁质 (MF)、镁铁质深熔产物 (AMF)、长英质或其深熔产物 (AFS) 构成的三角形区域内, 说明这些碎屑沉积岩主要是镁铁质岩石及其深熔产物 (英云闪长质-花岗闪长质-奥长花岗岩, TTG) 与长英质岩石 (花岗岩

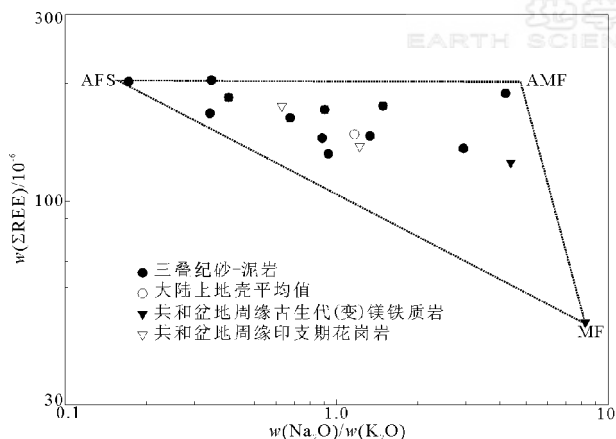


图9 青海共和—花石峡三叠纪碎屑沉积岩类稀土总量与  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  值图解

Fig. 9 Plot of the total REE content vs.  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  ratio for Triassic clastic sedimentary rocks from the Gonghe-Huashixia Area, Qinghai Province

(大陆上地壳平均值引自文献[12], 共和盆地周缘古生代(变)镁铁质岩石引自文献[26, 45], 印支期花岗岩引自文献[25])

与长英质火山岩)的风化产物混合形成的;部分样品位于长英质岩石的左端,可能是基底偏酸性岩石壳内多次熔融过程的产物,这类组分以高的稀土总量、非常低的  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  值为特征。

理论上证明,如果一物质是两端员混合的产物,其不同比例的混合产物在同位素比值与相应元素含量的倒数确定的两个端员间形成线性关系<sup>[38]</sup>。由于稀土元素在颗粒与水之间的分配系数极大<sup>[12]</sup>,也就是迁移过程中基本不溶于水,选择 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值与 $1/\text{Nd}$ 作图,结果如图10所示。从图10可知,共和—花石峡三叠纪所有碎屑沉积岩均位于低 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值、高Nd含量的基底(BS)与高 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值、Nd含量较高(MF-1)与较低Nd含量(MF-2)的三角形区域内,并构成不同的线性分布趋势,从而再次证明它们是基底或其深熔融产物、镁铁质岩石或其深熔产物之间混合的结果。MF-2应直接代表镁铁质岩石,而MF-1可能是镁铁质岩石深熔产物。一些碎屑沉积岩与花岗岩类具有一致的特征,说明可能是花岗岩类直接风化剥蚀的产物,而花岗岩本身就是镁铁质与基底岩石变质深熔的混合产物<sup>[24, 43]</sup>,更多的碎屑沉积岩中基底变质岩所占的比例比花岗岩中的高。

共和—花石峡三叠纪碎屑沉积岩中锆石U-Pb年龄分布直方图与概率密度曲线与西秦岭三叠纪<sup>[64]</sup>的明显不同,后者基本没有930~730 Ma的锆石颗粒,以 $>1600$  Ma的碎屑锆石为主体,由此说

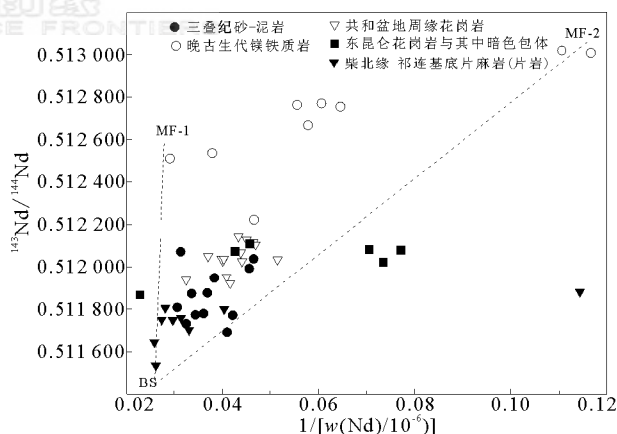


图10 青海共和—花石峡三叠纪碎屑沉积岩的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值与Nd含量倒数关系

Fig. 10 Plot of  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  ratio vs. inverse Nd content for Triassic clastic sedimentary rocks in the Gonghe-Huashixia, Qinghai Province

所有样品 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值依 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 值校正到228 Ma。晚古生代镁铁质岩石据文献[26]、柴北缘—祁连基底片麻岩(片岩)据文献[40-41]、共和盆地周缘花岗岩据文献[25]、东昆仑花岗岩及其中暗色包体据文献[43]

明,西秦岭与共和盆地三叠系物源上存在明显的差别。对西秦岭已经发表的年龄结果统计表明,缺少300~400 Ma这一时间段的记录,同样在中—上三叠世的碎屑沉积岩也没有此时间段的碎屑锆石颗粒。共和—花石峡三叠纪碎屑沉积岩大量存在300~400 Ma的碎屑锆石(图6),比西秦岭<sup>[64]</sup>低的Nd亏损地幔模式年龄说明西秦岭不可能单独为共和盆地提供物质。前已证明,柴达木、祁连、东昆仑的基底,新元古代、古生代及早中生代的年龄结构与共和—花石峡三叠纪碎屑沉积岩记录的年龄结构是一致的,Nd亏损地幔模式年龄也与这些构造单元的一致。因此,共和—花石峡三叠纪碎屑沉积岩应主要来自柴达木、祁连造山带、东昆仑造山带,多方面证据表明,西秦岭、柴达木、东昆仑及祁连造山带具有统一的地壳基底,并具有扬子克拉通型块体的构造属性<sup>[25]</sup>,均由冈瓦纳大陆裂解后增生到欧亚大陆,但在后期的构造演化过程中各块体有一定的差异,尤其是西秦岭与其上述其他块体之间。

## 5 结论

由岩石学、地球化学与地质年代学的纪统研究,对共和—花石峡三叠纪碎屑沉积岩可得到以下认识:

(1) 岩石主要是岩屑砂岩与长石砂岩, 源区岩石由镁铁质及其变质深熔产物、基底变质岩及其深熔产物、花岗岩类组成。这些源区岩石是在古生代的岛弧构造环境及随后碰撞过程中形成的产物。

(2) 碎屑沉积岩的 Nd 亏损地幔模式年龄变化于 1.49~1.96 Ga, 平均为 1.75 Ga, 与共和—花石峡周缘的柴达木、东昆仑和祁连造山带的 Nd 亏损地幔模式年龄是一致的, 说明三叠系的物源区主要是祁连、东昆仑与柴达木, 它们与扬子克拉通的 Nd 亏损地幔模式年龄类似, 地壳形成与演化历史类似于扬子克拉通, 它们可能均是从冈瓦纳大陆裂解增生到中国大陆的产物。

(3) 碎屑锆石 U-Pb 年龄主要分布于 400~500 Ma, 250~300 Ma, 其次是 750~1 000 Ma 的新元古代峰, 这些是祁连、柴北缘、东昆仑主要的构造岩浆作用期; 此外是 >1 000 Ma 到 2 700 Ma 的古老锆石, 代表着祁连、柴达木、东昆仑的基底组分的存在。

(4) 锆石 Hf 同位素组成揭示祁连、柴达木、东昆仑地壳增长主要发生于 1.7~2.5 Ga, 2.8~3.6 Ga, 1.0~1.7 Ga 三个阶段, 这些锆石结晶于 250~2 500 Ma, 它们可能是新元古代—早古生代地壳增生组分与古老地壳深熔组分的混合产物, 晚古生代—早中生代的锆石大部分应该以新元古代—早古生代增生地壳组分的熔融为主。

(5) 共和—花石峡与西秦岭三叠纪碎屑沉积岩在物源上存在明显的差别, 说明三叠纪时两块体在沉积物源上并没有沟通, 西秦岭应没有明显地为共和—花石峡的沉积提供物质, 相对于祁连、柴达木、昆仑, 西秦岭应处于相对低的地形条件。

中国地质大学(武汉)刘勇胜教授对本文中碎屑锆石 U-Pb 定年提供了便利条件, 前期工作中得到张宏飞教授的关心与帮助; 锆石 Hf 同位素分析得到了中国地质科学院矿产资源研究所李延河教授、侯可军的鼎力相助, 在此表示衷心感谢!

## References:

[1] Saha A, Basu A R, Garzzone C N, et al. Geochemical and petrological evidence for subduction-accretion processes in the Archean Eastern Indian Craton[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 220(1-2): 91-106.

[2] Li R W, Wan Y S, Cheng Z Y, et al. Provenance of Jurassic sediments in the Hefei Basin, East-Central China and the contribution of high-pressure and ultrahigh-pressure meta-

morphic rocks from the Dabie Shan[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 231: 279-294.

[3] Galy A, France-Lanord C, Derry L A. The Late Oligocene-Early Miocene Himalayan belt constraints deduced from isotopic compositions of Early Miocene turbidites in the Bengal Fan[J]. *Tectonophysics*, 1996, 260(1-3): 109-118.

[4] Gao S, Zhang B R, Gu X M, et al. Silurian-Devonian provenance changes of South Qinling Basins: Implications for accretion of the Yangtze (South China) to the North China Cratons[J]. *Tectonophysics*, 1995, 250(1-3): 183-197.

[5] Dodson M H. Closure temperature and geospeedometry: A comparative review[J]. *Mineralogical Magazine*, 1998, 62A: 395-396.

[6] Cawood P A, Nemchin A A, Freeman M, et al. Linking source and sedimentary basin: Detrital zircon record of sediment flux along a modern river system and implications for provenance studies[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 210: 259-268.

[7] Cawood P A, Landis C A, Nemchin A A, et al. Permian fragmentation, accretion and subsequent translation of a low-latitude Tethyan seamount to the high-latitude east Gondwana margin: Evidence from detrital zircon age data[J]. *Geological Magazine*, 2002, 139: 131-144.

[8] Pell S D, Williams I S, Chivas A R. The use of protolith zircon-age fingerprints in determining the protosource area for some Australian dune sands[J]. *Sedimentary Geology*, 1997, 109: 233-260.

[9] Sircombe K, Freeman M J. Provenance of detrital zircons on the Western Australia coastline—Implications for the geologic history of the Perth Basin and denudation of the Yilgarn[J]. *Geology*, 1999, 27: 879-882.

[10] Ross G M, Parrish R R, Winston D. Provenance and U-Pb geochronology of the Mesoproterozoic Belt Supergroup (northern United States): Implications for age of deposition and pre-Panthalassa plate reconstructions [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1992, 113: 57-76.

[11] Morton A C, Claoué-Long J C, Berge C. SHRIMP constraints on sediment provenance and transport history in the Mesozoic Statfjord Formation, North Sea[J]. *Journal of the Geological Society, London*, 1996, 153: 915-929.

[12] Rudnick R L, Gao S. Composition of the continental crust [M]//Rudnick R L. *Treatise on Geochemistry: The Crust*. Oxford: Elsevier-Pergamon, 2003, 3: 1-64.

[13] Nelson B K, DePaolo D J. Rapid production of continental crust 1.7 to 1.9 b. y. ago: Nd isotopic evidence from the basement of the North American mid-continent[J]. *Geological Society of American Bulletin*, 1985, 96: 746-754.

[14] Hu A Q, Wang Z G, Tu G Z. *Geological Evolution, Petrogenesis and Mineralization Characteristic of Northern Xinjiang, China* [M]. Beijing: Science Press, 1997: 1-246 (in Chinese).



- [15] Chen Y L, Luo Z H. Nd-Pb isotopes of basement rocks, granitoids and basalts from the Western margin of the Yangtze Craton: Implications for crustal evolution[J]. Journal of China University of Geosciences, 2005, 16(2): 97-102.
- [16] Chen Y L, Luo Z H, Zhao J X, et al. Petrogenesis and dating of the Kangding Complex, Sichuan Province[J]. Science in China: Series D, 2005, 48(5): 622-634(in Chinese).
- [17] Li X H, McCulloch M T. Secular variation in the Nd isotopic composition of Neoproterozoic sediments from the southern margin of the Yangtze Block: Evidence for a Proterozoic continental collision in southeast China[J]. Precambrian Research, 1996, 76: 67-76.
- [18] Li S G, Liu D L, Chen Y Z, et al. Nd isotopic compositions and tectonic significance of the northern Yangtze Crust[J]. Geochimica, 1994, 23(Suppl): 10-17(in Chinese).
- [19] Chen J F, Zhou T X, Xing F M, et al. Nd isotopic compositions and provenance region of epimetamorphic and sedimentary rocks from South Anhui Province[J]. Chinese Science Bulletin, 1989, 34(20): 1572-1574(in Chinese).
- [20] Chen Y L, Yang Z F. Nd model ages of sedimentary profile from the northwest Yangtze Craton, Guangyuan, Sichuan Province, China and their geological implication[J]. Geochemical Journal, 2000, 34: 263-270.
- [21] Zhang B R, Gao S, Zhang H F, et al. Geochemistry of the Qinling Orogen[M]. Beijing: Science Press, 2002: 1-187(in Chinese).
- [22] Zhang G W, Meng Q R, Yu Z P, et al. Orogenesis and dynamics of the Qinling Orogen[J]. Science in China: Series D, 1996, 39(3): 225-234(in Chinese).
- [23] Zhang G W, Zhang B R, Yuan X C, et al. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics[M]. Beijing: Science Press, 2001: 1-855(in Chinese).
- [24] Bureau of Geology and Mineral Resources of Qinghai Province. Regional Geology of Qinghai Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 1-661(in Chinese).
- [25] Zhang H F, Chen Y L, Xu W C, et al. Granitoids around Gonghe Basin in Qinghai Province: Petrogenesis and tectonic implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22 (12): 2910-2922(in Chinese).
- [26] Guo A L, Zhang G W, Sun Y G, et al. Geochemistry and spatial distribution of late-Paleozoic mafic volcanic rocks in the surrounding areas of the Gonghe Basin: Implications for Majixueshan triple-junction and east Paleotethyan archipelagic ocean[J]. Science in China: Series D, 2007, 50(Suppl 2): 292-304(in Chinese).
- [27] Li W Y, Li S G, Guo A L, et al. Zircon SHRIMP U-Pb ages and trace element geochemistry of the Kuhai gabbro and the Dur'ngoi diorite in the southern east Kunlun tectonic belt, Qinghai, Western China and their geological implications[J]. Science in China: Series D, 2007, 50(Suppl 2): 331-338(in Chinese).
- [28] Sun Y G. Gonghe Aulacogen and Conjugate and Transfer Belt between the West Qinling and East Kunlun Orogens[D]. Xi'an: Northwest University, 2004: 1-195(in Chinese).
- [29] Feng Y M, Cao X D, Zhang E P. Orogenic Belt of the Western Qinling—Structure, Process and Dynamics[M]. Xi'an: Xi'an Cartography Publishing House, 2002: 1-263(in Chinese).
- [30] Song B, Zhang Y H, Wan Y S, et al. Mounting zircons for SHRIMP dating and discussion on relevant phenomena[J]. Geological Review, 2002, 48(Suppl): 26-30(in Chinese).
- [31] Campbell I H, Reiners P W, Allen C M, et al. He-Pb double dating of detrital zircons from the Ganges and Indus Rivers: Implication for quantifying sediment recycling and provenance studies[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 237: 402-432.
- [32] Andersen T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report  $^{204}\text{Pb}$ [J]. Chemical Geology, 2002, 192: 59-79.
- [33] Wiedenbeck M, Alle P, Corfu F, et al. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses[J]. Geostandard Newsletter, 1995, 19: 1-2.
- [34] Pettijohn F J, Potter P E, Siever R. Sand and Sandstone[M]. New York: Springer Verlag, 1973: 1-618.
- [35] Boynton W V. Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies[C]//Henderson P. Rare Earth Element Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 1984: 63-114.
- [36] Han Y W, Ma Z D. Geochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003: 181-212(in Chinese).
- [37] Goldstein S R, O'Nion R K, Hamilton P J. A Sm-Nd isotopic study of atmospheric dusts and particulates from major river system[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1984, 70: 223-265.
- [38] Chen Y L, Yang Z F, Zhao Z D. Isotopic Geochronology and Geochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005: 46-75(in Chinese).
- [39] Gradstein F M, Ogg J G, Smith A G. A new geologic time scale, with special reference to Precambrian and Neogene[J]. Episodes, 2004, 27(2): 83-100.
- [40] Zhang J X, Wan Y S, Meng F C, et al. Geochemistry, Sm-Nd and U-Pb isotope study of gneisses (schists) enclosing eclogites in the North Qaidam Mountains—Deeply subducted Precambrian metamorphic basement [J]? Acta Petrologica Sinica, 2003, 19(3): 443-451(in Chinese).
- [41] Wan Y S, Xu Z Q, Yang J S, et al. The Precambrian high-grade basement of the Qilian terrane and neighboring areas: Its ages and compositions[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2003, 24(4): 319-324(in Chinese).
- [42] Mo X X, Luo Z H, Deng J F, et al. Granitoids and crustal growth in the East-Kunlun Orogenic Belt[J]. Geological Journal of China Universities, 2007, 13(3): 403-414(in Chinese).

- [43] Liu C D, Mo X X, Luo Z H, et al. Pb-Sr-Nd-O isotope characteristics of granitoids in East Kunlun orogenic belt[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2003, 24(6): 584-588(in Chinese).
- [44] Sircombe K N. Age display: An excel workbook to evaluate and display univariate geochronological data using binned frequency histograms and probability density distributions[J]. *Computers & Geosciences*, 2004, 30: 21-31.
- [45] Song S G, Zhang L F, Niu Y L, et al. Evolution from oceanic subduction to continental collision: A case study from the Northern Tibetan Plateau based on geochemical and geochronological Data[J]. *Journal of Petrology*, 2006, 47: 435-455.
- [46] Bian Q T, Li D H, Pospelov I, et al. Age, geochemistry and tectonic setting of Buqingshan ophiolites, North Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. *Journal of Asian Earth Science*, 2004, 23: 577-596.
- [47] Wu C L, Yang J S, Ireland T, et al. Zircon SHRIMP ages of Aolaoshan granite from the south margin of Qilian Shan and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17(2): 215-221(in Chinese).
- [48] Su J P, Hu N G, Zhang H F, et al. U-Pb zircon dating and genesis of the Heigouliangzi granitic intrusion in the western segment of the middle Qilian Mountains [J]. *Geoscience*, 2004, 18(1): 70-74(in Chinese).
- [49] Wu C L, Yang J S, Yang H Y, et al. Dating of two types of granite from north Qilian, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(3): 425-432(in Chinese).
- [50] Shi R D, Yang J S, Wu C L. The discovery of adakitic dacite in Early Palaeozoic island arc volcanic rocks on the northern margin of Qaidam Basin and its geological significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2003, 22(3): 229-236(in Chinese).
- [51] Shi R D, Yang J S, Wu C L, et al. First SHRIMP dating for the formation of the Late Sinian Yushigou ophiolite, North Qilian Mountains[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(5): 649-657(in Chinese).
- [52] Wu C L, Yang J S, Xu Z Q, et al. Granitic magmatism on the Early Paleozoic UHP Belt of Northern Qaidam, NW China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(5): 658-674(in Chinese).
- [53] Yang J S, Shi R D, Wu C L, et al. Recognition of Neoproterozoic ophiolite on the northern margin of the Qaidam Basin: Evidence of the breakup of Rodinia[J]? *Geological Bulletin of China*, 2004, 23(9-10): 892-898(in Chinese).
- [54] Tseng C Y, Yang H Y, Wan Y S, et al. 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*, 2006, 51(8): 963-970(in Chinese).
- [55] Liu C D, Mo X X, Luo Z H, et al. Mixing events between the crust- and mantle-derived magma in Eastern Kunlun: Evidence from zircon SHRIMP II chronology[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(8): 828-833(in Chinese).
- [56] Yang J S, Liu F L, Wu C L, et al. Two ultrahigh pressure metamorphic events recognized in the central orogenic belt of China: Evidence from the U-Pb dating of coesite-bearing zircons[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2003, 77(4): 463-477(in Chinese).
- [57] Zhang Z C, Zhou M F, Robinson P T, et al. SHRIMP dating of the Aoyougou ophiolite in the west sector of the north Qilian Mountains and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17(2): 222-226(in Chinese).
- [58] Zhu Y H, Lin Q X, Jia C X, et al. SHRIMP zircon U-Pb age and significance of Early Paleozoic volcanic rocks in East Kunlun orogenic belt, Qinghai Province, China [J]. *Science in China: Series D*, 2006, 49(1): 88-96(in Chinese).
- [59] Griffin W L, Wang X, Jackson S E, et al. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: *In-situ* analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes [J]. *Lithos*, 2002, 61: 237-269.
- [60] Wu F Y, Li X H, Zheng Y F, et al. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(2): 185-220(in Chinese).
- [61] Harrison T M, Blichert-Toft J, Müller W, et al. Heterogeneous Hadean Hafnium: Evidence of continental crust at 4.4 to 4.5 Ga[J]. *Science*, 2005, 310: 1947-1950.
- [62] Roser B P, Korsch R J. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO<sub>2</sub> content and K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O ratio[J]. *Journal of Geology*, 1986, 94: 635-650.
- [63] Chen Y L, Tang J R, Liu F, et al. Elemental and Sm-Nd isotopic geochemistry of clastic sedimentary rocks in the Garzê-Songpan block and Longmen Mountains[J]. *Geology in China*, 2006, 33(1): 109-118(in Chinese).
- [64] Chen Y L, Li D P, Zhou J, et al. U-Pb ages of zircons in western Qinling Shan, China, and their tectonic implications [J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(4): 88-107(in Chinese).

## 参考文献:

- [14] 胡霁琴, 王中刚, 涂光炽. 新疆北部地质演化及成岩成矿规律[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 1-246.
- [16] 陈岳龙, 罗照华, 赵俊香, 等. 从锆石 SHRIMP 年龄及岩石地球化学特征论四川冕宁康定杂岩的成因[J]. *中国科学: D 辑*, 2004, 34(8): 687-697.
- [18] 李曙光, 刘德良, 陈移之, 等. 扬子陆块北缘地壳的钨同位素组成及其构造意义[J]. *地球化学*, 1994, 23(增刊): 10-17.
- [19] 陈江峰, 周泰禧, 邢凤鸣, 等. 皖南浅变质岩和沉积岩的钨同位素组成及沉积物物源区[J]. *科学通报*, 1989, 34(20): 1572-1574.
- [21] 张本仁, 高山, 张宏飞, 等. 秦岭造山带地球化学[M]. 北京:

- 科学出版社, 2002: 1-187.
- [22] 张国伟, 孟庆任, 于在平, 等. 秦岭造山带的造山过程及其动力学特征[J]. 中国科学: D辑, 1996, 26(3): 193-200.
- [23] 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 1-855.
- [24] 青海省地质矿产局. 青海区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1991: 1-661.
- [25] 张宏飞, 陈岳龙, 徐旺春, 等. 青海共和盆地周缘印支期花岗岩类的成因及其构造意义[J]. 岩石学报, 2006, 22(12): 2910-2922.
- [26] 郭安林, 张国伟, 孙延贵, 等. 共和盆地周缘晚古生代镁铁质火山岩地球化学及空间分布[J]. 中国科学: D辑, 2007, 37(增刊): 249-261.
- [27] 李王晔, 李曙光, 郭安林, 等. 青海东昆仑构造带苦海辉长岩和德尔尼闪长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及痕量元素地球化学——对“祁-柴-昆”晚新元古代一早奥陶世多岛洋南界的制约[J]. 中国科学: D辑, 2007, 37(增刊): 288-294.
- [28] 孙延贵, 西秦岭—东昆仑造山带的衔接与共和坳拉谷[D]. 西安: 西北大学, 2004: 1-195.
- [29] 冯益民, 曹宣铎, 张二朋. 西秦岭造山带——结构、过程及动力学[M]. 西安: 西安地图出版社, 2002: 1-263.
- [30] 宋彪, 张玉海, 万渝生, 等. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论[J]. 地质论评, 2002, 48(增刊): 26-30.
- [36] 韩吟文, 马振东. 地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2003: 181-212.
- [38] 陈岳龙, 杨忠芳, 赵志丹. 同位素地质年代学与地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2005: 46-75.
- [40] 张建新, 万渝生, 孟繁聪, 等. 柴北缘夹榴辉岩的片麻岩(片岩)地球化学、Sm-Nd 和 U-Pb 同位素研究——深俯冲的前寒武纪变质基底[J]? 岩石学报, 2003, 19(3): 443-451.
- [41] 万渝生, 许志琴, 杨经绥, 等. 祁连造山带及邻区前寒武纪深变质基底的年代和组成[J]. 地球学报, 2003, 24(4): 319-324.
- [42] 莫宣学, 罗照华, 邓晋福, 等. 东昆仑造山带花岗岩及地壳增长[J]. 高校地质学报, 2007, 13(3): 403-414.
- [43] 刘成东, 莫宣学, 罗照华, 等. 东昆仑造山带花岗岩类 Pb-Sr-Nd-O 同位素特征[J]. 地球学报, 2003, 24(6): 584-588.
- [47] 吴才来, 杨经绥, Ireland T, 等. 祁连南缘噶喇山花岗岩 SHRIMP 锆石年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 2001, 17(2): 215-221.
- [48] 苏建平, 胡能高, 张海峰, 等. 中祁连西段黑沟子花岗岩的锆石 U-Pb 同位素年龄及成因[J]. 现代地质, 2004, 18(1): 70-74.
- [49] 吴才来, 杨经绥, 杨宏仪, 等. 北祁连东部两类 I 型花岗岩定年及其地质意义[J]. 岩石学报, 2004, 20(3): 425-432.
- [50] 史仁灯, 杨经绥, 吴才来. 柴北缘早古生代岛弧火山岩中埃达克质英安岩的发现及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2003, 22(3): 229-236.
- [51] 史仁灯, 杨经绥, 吴才来. 北祁边玉石沟蛇绿岩形成于晚震旦世的 SHRIMP 年龄证据[J]. 地质学报, 2004, 78(5): 649-657.
- [52] 吴才来, 杨经绥, 许志琴, 等. 柴达木盆地北缘古生代超高压带中花岗质岩浆作用[J]. 地质学报, 2004, 78(5): 658-674.
- [53] 杨经绥, 史仁灯, 吴才来, 等. 柴达木盆地北缘新元古代蛇绿岩的厘定——罗迪尼亚大陆裂解的证据[J]? 地质通报, 2004, 23(9-10): 892-898.
- [54] 曾建元, 杨宏仪, 万渝生, 等. 北祁连山变质杂岩中新元古代 (~775 Ma) 岩浆活动记录的发现: 来自 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年的证据[J]. 科学通报, 2006, 51(5): 575-581.
- [55] 刘成东, 莫宣学, 罗照华, 等. 东昆仑壳-幔岩浆混合作用: 来自锆石 SHRIMP 年代学的证据[J]. 科学通报, 2004, 49(6): 596-602.
- [56] 杨经绥, 刘福来, 吴才来, 等. 中央碰撞造山带中两期超高压变质作用: 来自含柯石英锆石的定年证据[J]. 地质学报, 2003, 77(4): 463-477.
- [57] 张招崇, 周美夫, Robinson P T, 等. 北祁连山西段熬油沟蛇绿岩 SHRIMP 分析结果及其地质意义[J]. 岩石学报, 2001, 17(2): 222-226.
- [58] 朱云海, 林启祥, 贾春兴, 等. 东昆仑造山带早古生代火山岩锆石 SHRIMP 年龄及其地质意义[J]. 中国科学: D辑, 2005, 35(12): 1112-1119.
- [60] 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报, 2007, 23(2): 185-220.
- [63] 陈岳龙, 唐金荣, 刘飞, 等. 松潘—甘孜碎屑沉积岩的地球化学与 Sm-Nd 同位素地球化学[J]. 中国地质, 2006, 33(1): 109-118.
- [64] 陈岳龙, 李大鹏, 周建, 等. 中国西秦岭碎屑锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. 地学前缘, 2008, 15(4): 88-107.