

祁连—秦岭造山带交接部位 25 亿年 碎屑锆石的发现及其地质意义

裴先治¹, 孟勇^{1,2}, 董平¹, 李佐臣¹,
刘战庆¹, 刘会彬¹, 李高阳¹, 李瑞保¹

(1. 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安地质矿产研究所, 陕西 西安 710054)

摘要: 对来自祁连与秦岭造山带交接部位秦安地区葫芦河流域的“葫芦河群”浅变质砂岩中大量碎屑锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 测年结果发现, 其中含有年龄为 2302~2578 Ma 的锆石颗粒。这些锆石年龄均十分谐和, 且阴极发光图象上显示具有典型岩浆型振荡环带结构和岩浆成因锆石的 $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 为 0.11~1.42, 表明这些锆石为新太古代末期构造岩浆作用的产物。这些锆石是该区域迄今发现的最古老的锆石, 表明祁连与秦岭造山带交接部位可能存在比陇山岩群和秦岭岩群更古老的陆壳。

关键词: 新太古代; 碎屑锆石; LA-ICP-MS; 锆石 U-Pb 定年; 祁连—秦岭造山带

中图分类号: P597 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2007)02-0111-06

Identification of 2.5 Ga Detrital Zircons from Conjoint Area Between Qilian-Qinling Orogenic Belts and Its Geological Implication

PEI Xian-zhi¹, MENG Yong^{1,2}, DING Sa-ping¹, LI Zuo-chen¹,
LIU Zhan-qing¹, LIU Hui-bin¹, LI Gao-yang¹, LI Rui-bao¹

(1. School of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. Xi'an Institute of Geology and Mineral Resource, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract Through LA-ICP-MS U-Pb dating of a large number of detrital zircon grains from metamorphic sandstones of Huluhe Group in the Huluhe River of the Qin'an area, the conjoint area between Qilian and Qinling orogenic belts, 2302~2578 Ma zircon grains were identified. Their $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages coincide well, and CL images exhibit well-developed oscillatory zoning and the Th/U ratios are within 0.11~1.42, implying that they are tectonomagmatic zircons which formed during late Newarchaeozoic. These zircons are the oldest ones discovered in the conjoint area between Qilian and Qinling orogenic belts up to now, which suggests the presence of crust older than high-grade metamorphic Longshan and Qinling groups in the conjoint area between Qilian and Qinling orogenic belts.

Key words: Newarchaeozoic Era; detrital-zircon; LA-ICP-MS; U-Pb dating with zircon; Qilian-Qinling orogenic belt

0 引言

古老岩石和陆壳物质的发现和研究表明, 探讨地壳早期形成与演化历史的主要途径之一, 其中锆石

定年是发现古老陆壳的主要手段^[1]。根据沉积岩碎屑锆石年龄分布确定碎屑沉积岩物质来源、沉积时代和形成构造环境, 具有其他方法不可替代的长处, 已成为近年来的研究热点之一^[2-7]。祁连与秦

收稿日期: 2006-12-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(40572121、40234041); 教育部科技重点项目(104175); 中国地质调查局地质调查项目(200013000154)

作者简介: 裴先治(1963-), 男, 新疆巴里坤人, 教授, 博士生导师, 从事构造地质学和区域地质学研究。E-mail: peixzh@263.net

岭造山带是中国中部中央造山系最重要的构造单元,具有复杂的物质组成与长期的演化历史^[8-11]。

笔者在甘肃东部秦安地区早古生代葫芦河群变质碎屑岩中发现了 U-Pb 年龄为 2.3~2.5 Ga 的碎屑锆石,这一发现将为研究祁连和秦岭造山带的形成演化提供新的资料。

1 地质背景与样品来源

甘肃东部的天水地区是祁连与秦岭造山带的构造交接部位,已知最古老的构造岩石单元是南部唐藏—花庙河—李子园—关子镇—新阳—线的古元古代秦岭岩群和北部陇县—张家川—秦安莲花—线的古元古代陇山岩群,它们均为造山带中古老的深变质基底杂岩系,其中陇山岩群很可能是新太古—古元古代形成的,并经历了 2500、2350、1900 Ma 的岩浆事件和变质事件^[12]。该变质杂岩主要由长英质片麻岩—富铝片麻岩—斜长角闪岩—大理岩—钙硅酸粒岩—长英质片岩等组成,其中包含有新元古代早期的花岗质片麻岩。秦岭岩群(或牛头河岩群)主要由长英质片麻岩—富铝片麻岩—(石墨)大理岩—钙硅酸粒岩等岩石组合组成,迄今已知的片麻岩最老的锆石 U-Pb 年龄为 1531.9、1010.3 Ma^[13]。在渭河沿线已经发现内部赋存有新元古代早期的花岗质片麻岩,其中 LA-ICP-MS 和 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 $(924.2 \pm 2.7) \sim (978.5 \pm 7.2) \text{Ma}$ ^[14-16]。

根据最新地质调查成果^[17](图 1),介于两套变质基底杂岩之间的地层自北向南依次为早古生代的陈家河群、红土堡变质基性火山岩组和狭义的“葫芦河群”。早古生代陈家河群为一套浅变质中酸性火山岩(北侧)和陆缘碎屑岩沉积组合(南侧),有限的古生物化石和同位素年代学资料表明其主体形成于中晚奥陶世,其中的中酸性火山岩包括同成分火山碎屑岩具有岛弧钙碱性地球化学特征^[18]。早古生代红土堡岩组主要由绿片岩相变质玄武岩组成,夹有少量深水硅质岩和黑色泥岩,变质玄武岩普遍发育有枕状构造,同时发育有同成分同时代的辉绿岩墙,具有 IAB、MORB 和 WPB 的多重地球化学特征^[18],表明其形成于汇聚板块边缘的板内裂隙——小洋盆构造环境。变玄武岩全岩 Sm-Nd 等时线年龄为 $(463 \pm 38) \text{Ma}$ (MSWD=0.26),全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 $(484 \pm 32) \text{Ma}$,表明其形成于早奥陶—中奥陶世早期。而狭义的葫芦河群则主

要由中浅变质碎屑沉积岩组成,其时代原划归为中元古代长城纪^[19-20]或震旦纪^[21]或寒武纪^[13]。长安大学地质调查研究院则划归中新元古代^[17],现依据最新的碎屑锆石定年研究确定为志留纪。上述各构造岩石地层单位之间均呈构造接触关系。

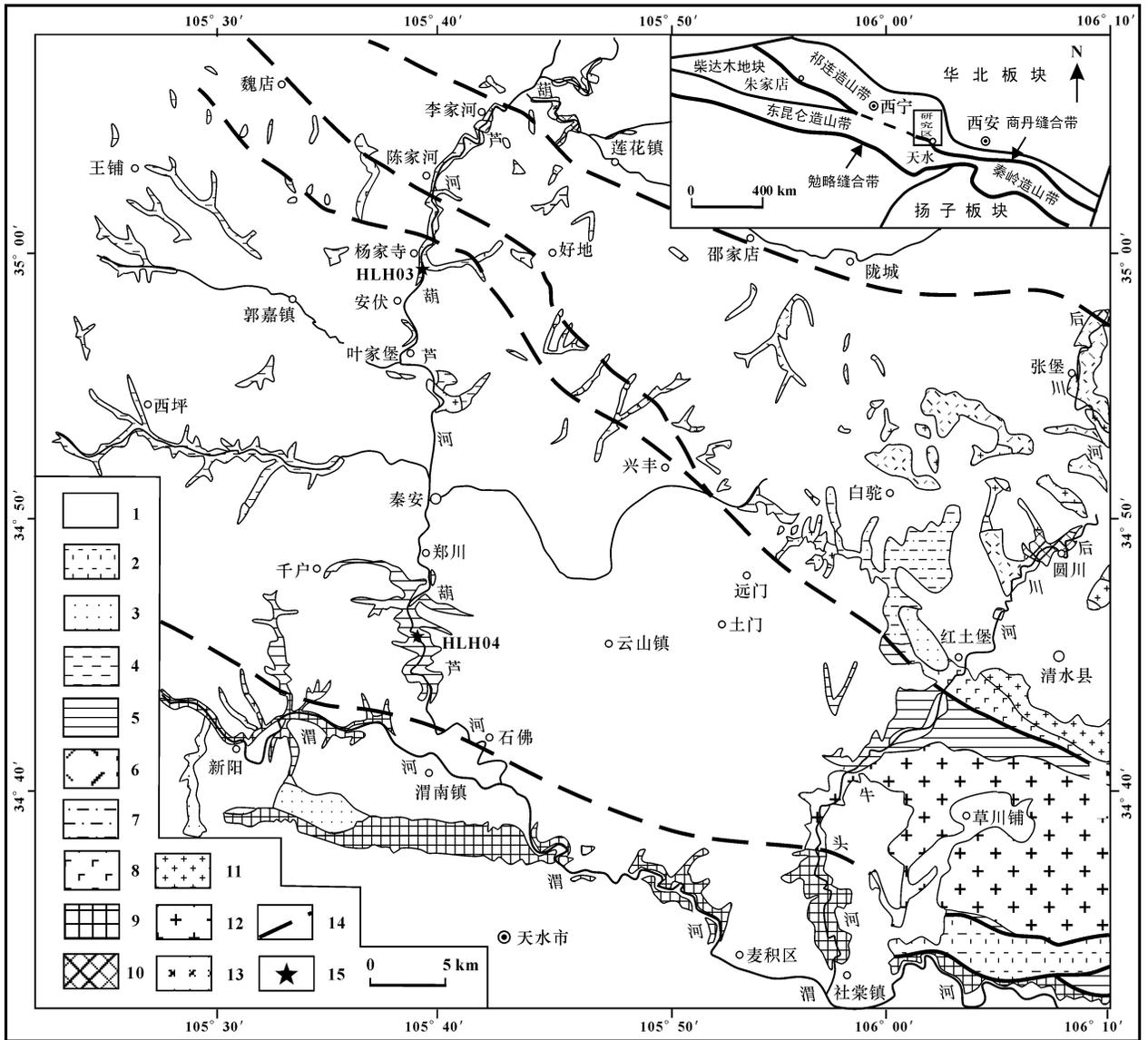
笔者用于碎屑锆石年代学测试样品采自秦安县葫芦河流域的葫芦河群中,变质碎屑岩样品(HLH03、HLH04)分别采自秦安县北的杨家寺南和秦安县南的葫芦河,采样点地理坐标分别为 $N34^{\circ}59'23.3''$ 、 $E105^{\circ}39'15.1''$ 和 $N34^{\circ}45'51.4''$ 、 $E105^{\circ}33'59.9''$ (见图 1)。样品 HLH03 为变质长石石英细砂岩,具有复理石沉积特征,主要由石英、长石和细小黑云母等组成。样品 HLH04 为黑云母石英片岩,原岩为(长石)石英砂岩,主要由石英、黑云母、斜长石和少量白云母组成。岩石经受了低角闪岩相—绿片岩相区域变质作用,但由于锆石稳定性很强,区域变质作用不会对锆石中的源区信息产生丢失。

2 分析方法与结果

2.1 分析方法

所采测年样品(HLH03、HLH04)在陕西地质勘查局区域地质矿产研究院用常规方法粉碎至 0.180~0.154 mm (80~100 目),并用常规浮选和电磁选方法进行分选,得到 200~300 粒锆石后,再在双目镜下挑选出晶形和透明度较好的锆石颗粒作为测定对象。将锆石颗粒粘在双面胶上,再用无色透明的环氧树脂固定,待环氧树脂充分固化后,对其表面进行抛光至锆石内部暴露,然后进行锆石显微(反射光和投射光照相)、阴极发光(CL)显微图象研究及 LA-ICP-MS 分析。锆石的反射光和透射光显微照相以及阴极发光显微照相在中国地质科学院北京离子探针中心扫描电镜及阴极发光实验室完成。阴极发光显微照相用日立 HITACHI S3000-N 型扫描电子显微镜和 GATAN 公司 Chroma 阴极发光探头进行锆石内部结构分析。

锆石原位 U-Pb 同位素年龄分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室的 LA-ICP-MS 仪器上用标准测定程序进行。分析仪器为 Elan 6100DRC 型四极杆质谱仪和 Geolas 200M 型激光剥蚀系统,激光器为 193 nm ArF 准分子激光器。激光剥蚀斑束直径为 30 μm 。锆石年龄计算采用国际标准锆石 91500 作为外标,元素含量采用美国国家标准物质



1—新生界, 2—古近纪陆相酸性火山岩; 3—白垩系红色砂砾岩; 4—葫芦河群 b 岩组变质碎屑岩; 5—葫芦河群 a 岩组变质碎屑岩、云母石英片岩; 6—陈家河群变中性火山岩组; 7—陈家河群变质碎屑岩组; 8—红土堡岩组变质基性火山岩; 9—秦岭岩群; 10—陇山岩群; 11—印支期花岗岩; 12—加里东期花岗岩—花岗闪长岩; 13—加里东期辉长岩—辉长闪长岩—闪长岩; 14—边界断裂; 15—采样位置

图 1 甘肃东部天水地区葫芦河流域地质简图

Fig. 1 Sketch Geological Map of the Huluhe River Area in Northern Tianshui on the Eastern Gansu Province

局人工合成硅酸盐玻璃 NIST SRM 610 作为外标,²⁹Si 作为内标元素进行校正。样品的同位素比值和元素含量数据处理采用 GLITTER (4.0 版, Macquarie University) 软件, 并采用 Andersen (2002) 软件对测试数据进行普通铅校正, 年龄计算及成图采用 ISOPLOT (2.49 版) (Ludwig, 2003) 软件完成。详细的实验原理和流程及仪器参数参见文献[22]。

2.2 分析结果

对碎屑岩样品 (HLH03、HLH04) 分别随机测定了 60 个锆石颗粒, 基本满足作为物源研究一般

需要测定的碎屑锆石颗粒数量和代表性。在这 2 个样品中共发现 16 颗 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 表面年龄大于 2.3 Ga 的锆石颗粒。这 16 颗古老锆石的分析测试数据见表 1, 部分锆石颗粒的阴极发光图象见图 2, 锆石 U-Pb 年龄谐和图见图 3。按照碎屑锆石年龄分布范围, 对于年龄大于 1 200 Ma 的锆石, 由于含大量放射性成因 Pb, 因而采用 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 表面年龄。所有数据点都以 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 计算锆石年龄, 用普通铅作年龄校正。

从阴极发光图象可以看出(见图 2), 所有年龄大于 2.3 Ga 的锆石均具浑圆、椭圆状外形, 为典型

碎屑锆石。部分锆石具明显的核-边结构, 锆石核部具有岩浆成因锆石的振荡环带结构。边部锆石比核部锆石具有强的发光性, 且具变质或深熔锆石特征。这些测试点部位的锆石 Th、U、Th/U 质量分数分别为 $(43 \sim 771) \times 10^{-6}$ 、 $(56 \sim 2777) \times 10^{-6}$ 、 $0.11 \sim 1.42$, 表明为岩浆锆石成因^[23-25]。

由表 1 和图 3 可见, 2 个样品中有 3 个测点

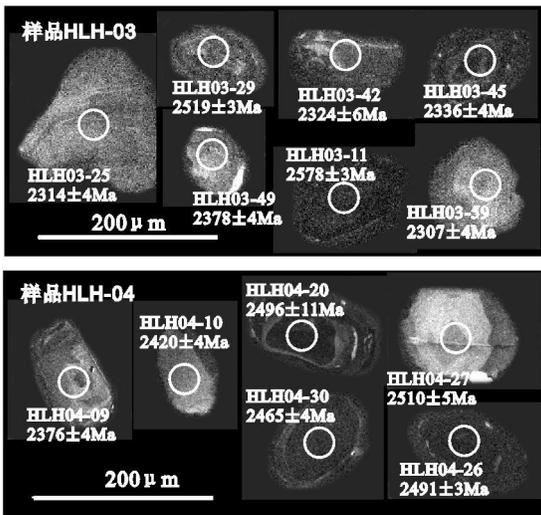
表 1 早古生代葫芦河群变质碎屑岩中碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素年龄分析

Tab. 1 LA-ICP-MS U-Pb Isotopic Analytic Date of Detrital Zircon for Meta-Detrital Rocks from Early Palaeozoic Huluhe Group

锆石测点编号	同位素比值							
	$N(^{207}\text{Pb})/N(^{206}\text{Pb})$	1σ	$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$	1σ	$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$	1σ	$n(^{208}\text{Pb})/n(^{232}\text{Th})$	1σ
H LH03-11	0.172 06	0.001 56	11.564 83	0.048 99	0.487 77	0.002 26	0.084 89	0.000 4
H LH03-12	0.150 23	0.001 37	9.873 09	0.043 71	0.476 95	0.002 24	0.124 83	0.000 5
H LH03-25	0.147 24	0.001 38	9.248 93	0.045 40	0.455 86	0.002 22	0.123 33	0.000 5
H LH03-29	0.166 15	0.001 51	11.449 59	0.049 12	0.500 10	0.002 32	0.130 26	0.000 5
H LH03-35	0.151 45	0.001 38	9.319 44	0.040 26	0.446 58	0.002 08	0.107 87	0.000 4
H LH03-38	0.146 19	0.001 33	8.826 31	0.038 82	0.438 16	0.002 05	0.116 36	0.000 4
H LH03-42	0.148 05	0.001 57	8.767 11	0.063 63	0.429 75	0.002 50	0.116 29	0.000 8
H LH03-45	0.149 14	0.001 37	8.915 87	0.040 05	0.433 85	0.002 04	0.100 03	0.000 4
H LH03-49	0.152 85	0.001 50	8.781 16	0.050 90	0.416 91	0.002 17	0.108 06	0.000 5
H LH03-59	0.146 62	0.001 37	9.136 57	0.045 03	0.452 23	0.002 20	0.109 47	0.000 5
H LH04-09	0.152 70	0.001 43	9.148 72	0.041 03	0.434 73	0.002 02	0.117 05	0.000 4
H LH04-10	0.156 70	0.001 55	10.461 78	0.057 79	0.484 46	0.002 46	0.121 85	0.000 6
H LH04-20	0.163 83	0.001 08	9.491 71	0.044 46	0.420 20	0.001 93	0.116 81	0.000 6
H LH04-26	0.163 36	0.001 52	9.583 06	0.041 44	0.425 67	0.001 96	0.118 09	0.000 4
H LH04-27	0.165 20	0.001 73	10.534 54	0.070 50	0.462 70	0.002 59	0.122 48	0.000 6
H LH04-30	0.160 88	0.001 51	9.787 31	0.043 26	0.441 44	0.002 05	0.109 17	0.000 4

锆石测点编号	$w_{\text{B}}/10^{-6}$			$w(\text{Th})/w(\text{U})$	同位素年龄/ Ma							
	^{206}Pb	^{232}Th	^{238}U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ
H LH03-11	1 517.0	77.0	697.70	0.11	2 578	3	2 570	4	2 561	10	1 647	7
H LH03-12	705.4	214.0	331.80	0.65	2 349	4	2 423	4	2 514	10	2 378	8
H LH03-25	226.8	114.0	111.60	1.03	2 314	4	2 363	4	2 421	10	2 351	8
H LH03-29	1 097.0	233.0	492.00	0.47	2 519	3	2 560	4	2 614	10	2 475	8
H LH03-35	1 199.0	388.0	602.10	0.64	2 362	4	2 370	4	2 380	9	2 071	7
H LH03-38	852.8	198.0	436.60	0.45	2 302	4	2 320	4	2 342	9	2 225	8
H LH03-42	127.1	43.4	66.35	0.65	2 324	6	2 314	7	2 305	11	2 224	14
H LH03-45	889.4	188.0	459.90	0.41	2 336	4	2 329	4	2 323	9	1 927	7
H LH03-49	245.4	103.0	132.00	0.78	2 378	4	2 316	5	2 246	10	2 074	10
H LH03-59	262.0	99.4	130.00	0.76	2 307	4	2 352	5	2 405	10	2 100	8
H LH04-09	688.0	176.0	354.60	0.50	2 376	4	2 353	4	2 327	9	2 237	8
H LH04-10	159.7	50.7	74.95	0.68	2 420	4	2 477	5	2 547	11	2 324	10
H LH04-20	3 613.0	438.0	2 091.00	0.21	2 496	11	2 387	4	2 261	9	2 233	10
H LH04-26	4 863.0	648.0	2 778.00	0.23	2 491	3	2 396	4	2 286	9	2 256	7
H LH04-27	105.8	79.2	55.82	1.42	2 510	5	2 483	6	2 451	11	2 335	11
H LH04-30	3 292.0	771.0	1 851.00	0.42	2 465	4	2 415	4	2 357	9	2 094	7

锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄主要为 2 302 ~ 2 378 Ma。



圆圈和数字分别表示 U-Pb 年龄测点位置、测点编号和 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄

图 2 代表性碎屑锆石的阴极发光图象

Fig. 2 CL Images of the Representative Analyzed Detrital Zircons

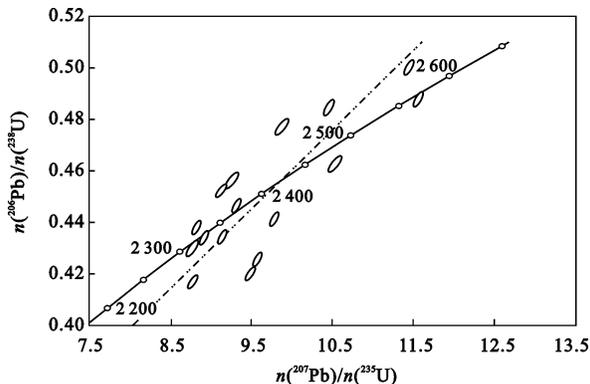


图 3 单颗粒碎屑锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 年龄谐和图

Fig. 3 LA-ICP-MS U-Pb Age Concordancy Diagram of Single Detrital Zircons

3 讨论与结论

迄今为止, 祁连造山带中最古老变质基底的时代为祁连西段的古元古代北大河岩群、托赖岩群和祁连中段的古元古代湟源群、马衔山群^[10-11, 14, 19-21, 26], 在研究区北侧张家川—陇县地区的古元古代陇山岩群也是造山带中古老的变质基底, 南侧的西秦岭造山带北缘地区秦岭岩群(牛头河岩群)一般也认为属于古元古代^[13, 19-21]。无论是祁连造山带还是北秦岭造山带, 目前均没有发现确切地新太古代年龄信息, 也即祁连造山带和北秦岭造山带中并未发现有确切地新太古代变质基底岩系^[8-11, 19-21, 26-28]。因此, 研究发现的 2 302 ~ 2 578 Ma

的碎屑锆石应当是该区域迄今发现的最古老的锆石, 为新太古代末构造岩浆作用的产物。

最近的研究表明^[12], 位于研究区北侧的陇山岩群位于华北克拉通西南缘, 现今处于祁连造山带的东段与华北克拉通交接部位, 并被北北西向六盘山断裂带截切, 其组成特征具有太古代 TTG 岩套特征, 同时具有华北克拉通内部的岩石地球化学以及同位素年代学特征。它很可能是残留于祁连造山带中的华北克拉通南缘的新太古代变质基底杂岩, 与位于小秦岭地区华北克拉通南缘的太华岩群相似^[12]。对陇县地区陇山岩群长英质片麻岩的同位素年代学研究表明, 其中也包含 2.50 Ga (2.45 ~ 2.50 Ga)、2.35 Ga (2.35 ~ 2.40 Ga) 的岩浆事件和 1.90 Ga (1.85 ~ 1.95 Ga) 的变质事件信息^[12]。

在北秦岭造山带广泛分布的秦岭岩群中长英质片麻岩锆石 U-Pb 年龄和变质基性岩 Sm-Nd 同位素年龄为 2 226 ~ 1 987 Ma^[29], 目前多数学者认为属于古元古代^[8, 10-11, 14, 27]。天水地区迄今已经报道的秦岭岩群(牛头河岩群)中片麻岩最老的锆石 U-Pb 年龄为 1 531.9、1 010.3 Ma^[13], 在渭河沿线已发现其内部赋存有新元古代早期的花岗质片麻岩, 其 LA-ICP-MS 和 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 (924.2 ± 2.7) ~ (978.5 ± 7.2) Ma^[14, 16]。

对华北克拉通前寒武纪构造格局和地质事件的研究表明^[29-32], 华北克拉通最强烈和最早的构造热事件发生在新太古代末期的 2.5 Ga 左右, 并通过大量 TTG 花岗岩增生与侵位造成华北克拉通的大陆地壳增生。本研究报道的甘肃东部秦安地区早古生代葫芦河群中的 16 粒碎屑锆石的年龄为 2.3 ~ 2.5 Ga, 其碎屑物质显然有来自华北克拉通的新太古代晚期陆壳物源区, 并与华北克拉通的基底组成及新太古代末期有大量 TTG 岩套和壳源花岗岩岩石形成密切相关^[8, 29-32]。虽然研究区东北侧邻近华北克拉通西南缘, 但那里并没有新太古代变质基底的直接出露, 而且自中元古代开始华北克拉通总体进入稳定发展演化阶段, 在古生代期间只有垂直升降运动并没有发生强烈的造山作用。可能的解释是早古生代随着祁连造山带和北秦岭造山带发生俯冲碰撞造山作用, 曾有造山带变质基底(如研究区北侧的陇山杂岩)抬升隆起作为早古生代晚期葫芦河群沉积碎屑岩的物源区; 或者是华北克拉通的新太古代变质基底作为物源区, 而该物源区后被华北克拉通广泛分布的盖层沉积岩覆盖。

这表明研究区在早古生代时期邻近华北克拉通,或者是华北克拉通西南侧大陆边缘的组成部分。

研究工作得到西北大学地质学系张国伟院士的指导和支 持,测试工作得到西北大学大陆动力学国家重点实验室柳小明博士、第五春荣博士和北京离子探针中心杨之青研究员、周慧工程师的指导和帮助,在此深表谢意。

参考文献:

- [1] 柳小明,高山,凌文黎,等. 扬子克拉通 35 亿年碎屑锆石的发现及其地质意义[J]. 自然科学进展, 2005, 15(11): 1334-1337.
- [2] Geslin J K, Link P K, Fanning C M. High-Precision Provenance Determination Using Detrital-Zircon Ages and Petrography of Quaternary Sands on the Eastern Snake River Plain, Idaho[J]. *Geology*, 1999, 27: 295-298.
- [3] Bohm C O, Heaman L A, Creaser R A, et al. Discovery of Pre-3.5 Ga Exotic Crust at the North western Superior Province Margin, Manitoba[J]. *Geology*, 2000, 28: 75-78.
- [4] Cawood P A, Nemchin A A. Provenance Record of a Rift Basin: U/Pb Ages of Detrital Zircons from the Perth Basin, Western Australia[J]. *Sedimentary Geology*, 2000, 134: 209-234.
- [5] Cawood P A, Nemchin A A. Paleogeographic Development of the East Laurentian Margin: Constraints from U-Pb Dating of Detrital Zircons in the Newfoundland Appalachians[J]. *GSA Bulletin*, 2001, 113: 1234-1246.
- [6] Cawood P A, Nemchin A A, Smith M, et al. Source of the Damadian Supergroup Constrained by U-Pb Dating of Detrital Zircon and Implications for the East Laurentian Margin[J]. *Journal of the Geological Society*, 2003, 160: 231-246.
- [7] Cawood P A, Nemchin A A, Strachan R A, et al. Laurentian Provenance and an Intracratonic Setting for the Moine Supergroup, Scotland, Constrained by Detrital Zircons from the Loch Eil and Glen Urquhart Successions[J]. *Journal of the Geological Society*, 2004, 161: 861-874.
- [8] 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, 2000.
- [9] 许志琴,杨经绥,吴才来,等. 柴达木北缘超高压变质带形成与折返的时限及机制[J]. *地质学报*, 2003, 77(2): 163-176.
- [10] 陆松年,李怀坤,陈志宏,等. 秦岭中一新元古代地质演化及对 RODINIA 超级大陆事件的响应[M]. 北京: 地质出版社, 2003.
- [11] 陆松年,陈志宏,李怀坤,等. 秦岭造山带中一新元古代(早期)地质演化[J]. *地质通报*, 2004, 23(2): 107-112.
- [12] 何艳红,孙勇,陈亮,等. 陇山杂岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2005, 21(1): 125-134.
- [13] 宋志高,张治洮,张莓,等. 陕、甘边界“牛头河群”的分解及其构造意义[J]. 中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊, 1991, 31: 1-14.
- [14] 陆松年,陈志宏,李怀坤,等. 秦岭造山带中两条新元古代岩浆岩带[J]. *地质学报*, 2005, 79(2): 165-173.
- [15] 刘会彬,裴先治,丁仁平,等. 西秦岭天水市元龙地区新元古代花岗岩片麻岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义[J]. *地质通报*, 2006, 25(11): 1315-1320.
- [16] 丁仁平,裴先治,刘会彬,等. 西秦岭天水地区新元古代花岗岩片麻岩的锆石 LA-ICP-MS 定年及其地质意义[J]. *中国地质*, 2006, 33(6): 1217-1225.
- [17] 裴先治,李勇,丁仁平,等. 天水市幅 1:25 万区域地质调查(修测)成果报告[R]. 西安: 长安大学地质调查研究院, 2004.
- [18] 胡波,裴先治,丁仁平,等. 甘肃天水地区红土堡变基性岩的地球化学特征及其构造意义[J]. *地质通报*, 2005, 24(3): 258-263.
- [19] 甘肃省地质矿产局. 甘肃省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1989.
- [20] 甘肃省地质矿产局. 甘肃省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997.
- [21] 张维吉,孟宪恂,胡健民,等. 祁连—北秦岭造山带接合部位构造特征与造山过程[M]. 西安: 西北大学出版社, 1994.
- [22] 袁洪林,吴福元,高山,等. 东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析[J]. *科学通报*, 2003, 48(14): 1511-1520.
- [23] Vavra G, Gebauer D, Schmid R. Multiple Zircon Growth and Recrystallization During Polyphase Late Carboniferous to Triassic Metamorphism in Granulites of the Ivrea Zone (Southern Alps): Anion Microprobe (SHRIMP) Study[J]. *Contrib Mineral Petro*, 1996, 122: 337-358.
- [24] Vavra G, Schmid R, Gebauer D. Internal Morphology, Habit and U-Th-Pb Microanalysis of Amphibole to Granulite Facies Zircon: Geochronology of the Ivrea Zone (Southern Alps)[J]. *Contrib Mineral Petro*, 1999, 134: 380-404.
- [25] 吴元保,郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. *科学通报*, 2004, 49(16): 1589-1604.
- [26] 中国地质调查局成都地质矿产研究所. 青藏高原及邻区地质图(1:1 500 000)说明书[M]. 成都: 成都地图出版社, 2004.
- [27] 张宗清,刘敦一,付国民. 北秦岭变质地层同位素年代研究[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [28] 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时代和组成[J]. *地球学报*, 2003, 24(4): 319-324.
- [29] 李江海,侯贵廷,黄雄南,等. 华北克拉通对前寒武纪超大陆旋回的基本制约[J]. *岩石学报*, 2001, 17(2): 177-186.
- [30] 彭澎,翟明国. 华北陆块前寒武纪两次重大地质事件的特征和性质[J]. *地球科学进展*, 2002, 17(6): 818-825.
- [31] 赵国春,孙敏, Wilde S A. 早—中元古代 Columbia 超级大陆研究进展[J]. *科学通报*, 2002, 47(18): 1361-1364.
- [32] 赵国春,孙敏, Wilde S A. 华北克拉通基底构造单元特征及早元古代拼合[J]. *中国科学: D 辑*, 2002, 32(7): 538-549.