

doi: 10.12029/gc20160408

李江涛, 梁斌, 何文劲, 等. 藏北羌塘盆地基底的地质构造演化: 来自侏罗纪雁石坪群砂岩碎屑锆石 U-Pb 同位素年代学证据[J]. 中国地质, 2016, 43(4): 1216-1226.

Li Jiangtao, Liang Bing, He Wenjing, et al. Geological and tectonic evolution of the basement in the Qiangtang basin of northern Tibet: Evidence from detrital zircon U-Pb isotope chronology of sandstone in the Jurassic Yanshipin Group[J]. *Geology in China*, 2016, 43(4): 1216-1226 (in Chinese with English abstract).

藏北羌塘盆地基底的地质构造演化: 来自侏罗纪雁石坪群砂岩碎屑锆石 U-Pb 同位素年代学证据

李江涛^{1,2} 梁斌^{1,2} 何文劲² 徐刚² 文龙^{1,2} 谢启兴²

(1. 西南科技大学环境与资源学院, 四川 绵阳 621010; 2. 四川省地勘局川西北地质队, 四川 绵阳 621010)

摘要:羌塘盆地作为青藏高原面积最大的中—新生代盆地, 是揭示特提斯域演化的关键区域, 其构造属性与演化历史备受关注。然而, 长期以来对于盆地是否具有前寒武纪结晶基底及其地质构造演化等问题一直存在分歧。雁石坪群作为羌塘盆地分布最广, 地层出露最全的一套侏罗纪地层, 其碎屑沉积物中包含了大量关于羌塘盆地地质构造演化的重要信息。为此笔者选择位于羌塘盆地东部唐古拉山北麓温泉地区雁石坪群砂岩进行碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学研究, 以期为解决羌塘盆地基底的地质构造演化提供依据。8 件砂岩样品 429 个有效测试点的年龄结果显示, 雁石坪群碎屑锆石的年龄时间跨度大, 自新太古代至中侏罗世晚期 (2668~166 Ma), 具有明显的阶段性, 可分为 10 个年龄组。结合区域地质特征, 对年龄值大于 486 Ma 碎屑锆石年龄组进行了重点分析探讨, 认为羌塘盆地具有前寒武纪结晶基底, 其形成的主要时期为 1974~1666 Ma, 且结晶基底还遭受了后期地质构造作用的改造, 先后经历了与 Columbia 超级大陆、Rodinia 超大陆演化相关的构造热事件、格林威尔—晋宁构造岩浆运动、泛非运动等一系列地质构造演化, 支持了羌塘地块属冈瓦纳大陆的认识。

关键词:羌塘盆地; 雁石坪群; 碎屑锆石; LA-ICP-MS U-Pb 测年; 基底

中图分类号: P597 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2016)04-1216-11

Geological and tectonic evolution of the basement in the Qiangtang basin of northern Tibet: Evidence from detrital zircon U-Pb isotope chronology of sandstone in the Jurassic Yanshipin Group

LI Jiang-tao^{1,2}, LIANG Bing^{1,2}, HE Wen-jing², XU Gang², WEN Long^{1,2}, XIE Qi-xing²

(1. School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan, China;

2. Northwest Sichuan Geological Party, Mianyang 621010, Sichuan, China)

Abstract: As the largest Mesozoic-Cenozoic basin in the Tibetan Plateau, the Qiangtang Basin is the key area to reveal the evolution of Tethys, and hence its structure and evolution have aroused much interest. However, for a long time the problems

收稿日期: 2015-09-13; 改回日期: 2015-10-15

基金项目: 中国地质调查局“青海龙亚拉地区 1:5 万区域地质调查”项目 (121201122019) 及国家自然科学基金 (41472310) 联合资助。

作者简介: 李江涛, 男, 1989 年生, 硕士, 主要从事区域地质调查研究; E-mail: lijiaogao_cool@163.com。

通讯作者: 梁斌, 男, 1967 年生, 博士, 教授, 主要从事区域地质调查研究; E-mail: earllih@163.com。

concerning the existence or nonexistence of the pre-Cambrian basement in the Qiangtang Basin and its tectonic evolution have been topics of much controversy. Yanshiping Group is the most widely distributed strata which have the most complete set of Jurassic in the Qiangtang Basin, and its detrital sediments contain a lot of important information concerning the tectonic evolution of the Qiangtang Basin. The authors hence selected the sandstone from Yanshiping Group in the east of the Qiangtang Basin, the northern foot of the Tanggula Range in the Wenquan region to perform LA-ICP-MS U-Pb dating so as to provide an important basis for solving tectonic evolution about the basement in the Qiangtang basin. The ages of 429 valid test points from 8 sandstone samples show that the formation of detrital zircons from Yanshiping Group spanned a long period, and the ages of zircons range from New Archean to Late Middle Jurassic (2668-166 Ma), which have evident stage characteristics and can be divided into ten age groups. In combination with regional geology, the authors discussed and analyzed detrital zircon whose ages are greater than 486 Ma. It is held that the Qiangtang Basin has Pre-Cambrian basement, the main period of its formation is approximately 1974-1666 Ma, and the Pre-Cambrian basement also suffered from the post-tectonic reformation, and experienced the tectonic thermal events of the Columbia and Rodinia supercontinent, Greenville-Jinning tectonic movement of magma, Pan-African movement and a series of tectonic evolution. The results obtained by the authors support the opinion that the Qiangtang terrane belongs to the Gondwana.

Key words: Qiangtang Basin; detrital zircons; LA-ICP-MS U-Pb dating; basement; Yanshipin Group

About the first author: LI Jiang-tao, male, born in 1989, master, engages in the study of regional geological survey; E-mail: lijiaogao_cool@163.com.

Fund Support: Supported by China Geological Survey Program (No. 121201122019) and National Natural Science Foundation of China (No. 41472310).

羌塘盆地地处特提斯构造域东段,北与可可西里—金沙江缝合带毗邻,南以班公湖—怒江缝合带为界,龙木错—双湖缝合带从中间通过,由北羌塘坳陷、中央隆起带和南羌塘坳陷3部分组成,具有“两坳夹一隆”的构造格局(图1),是揭示特提斯域地质构造演化的关键区域。然而,长期以来对于盆地是否具有前寒武纪结晶基底以及其地质构造演化等问题一直存在分歧。目前,主要存在两种截然不同的认识,一种观点认为:羌塘盆地存在古老的前寒武纪结晶基底^[1-7],且盆地基底由元古宙变质岩系构成并具双层结构,其下为结晶刚性基底,上部为变质塑性基底,刚性基底和塑性基底之间为角度不整合接触,还可能存在太古宙甚至冥古宙的地壳物质^[8-11],并提出了相关的演化模式。另一种观点认为:羌塘盆地尚无可靠的结晶基底或古老基底存在的同位素年代学依据,且盆地内出露的最老岩石为中泥盆世都古尔花岗岩,据此对羌塘盆地存在古老基底提出质疑^[12-14]。此外,多年来的石油地质调查显示^[15-19],羌塘盆地内古生界至中生界均具有良好的油气地质条件,盆地已成为中国陆上新区最具勘探前景的含油气盆地。因此,对羌塘盆地是否具有古老的结晶基底以及所经历的地质构造演化的研究,不仅关系到羌塘盆地古生代至中生代期间构造

格局的恢复、地质演化历史的重建,而且对于盆地内油气和矿产资源的勘查与评价也具有重要意义。

盆地碎屑沉积物作为区域构造背景控制下的蚀源区与沉积盆地有机结合配置的产物,记录了洋陆变迁、盆山构造格局形成及演化历史,可以用来示踪源区、反演基底隆起等信息^[20-22]。尤其是沉积岩中的副矿物碎屑锆石,其U-Th-Pb同位素体系具有较高的封闭温度(>750℃),且形成后Pb的扩散封闭温度可高达900℃,即使岩石受过部分熔融或区域变质作用的影响,锆石中的源区信息也不会全部丢失^[23-24]。近年来运用沉积岩中碎屑锆石的年龄分布特征已成为确定蚀源区物质组成、沉积时代和形成构造环境的一种新途径^[25-29]。因此,从沉积盆地碎屑锆石的角度来研究造山过程及造山带物质组成的大地构造亲缘性,进而探讨区域构造性质、反演基底隆升信息以及盆山耦合体系等领域,已成为大陆动力学研究的新方法和突破口。

本次研究采用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)原位分析技术,首次对出露于羌塘盆地东部唐古拉山北麓温泉地区侏罗系雁石坪群砂岩中的碎屑锆石进行系统的U-Pb年代学研究,同时结合对羌塘盆地区域地质构造背景及岩浆活动的分析,以为研究羌塘盆地的基底特征以及

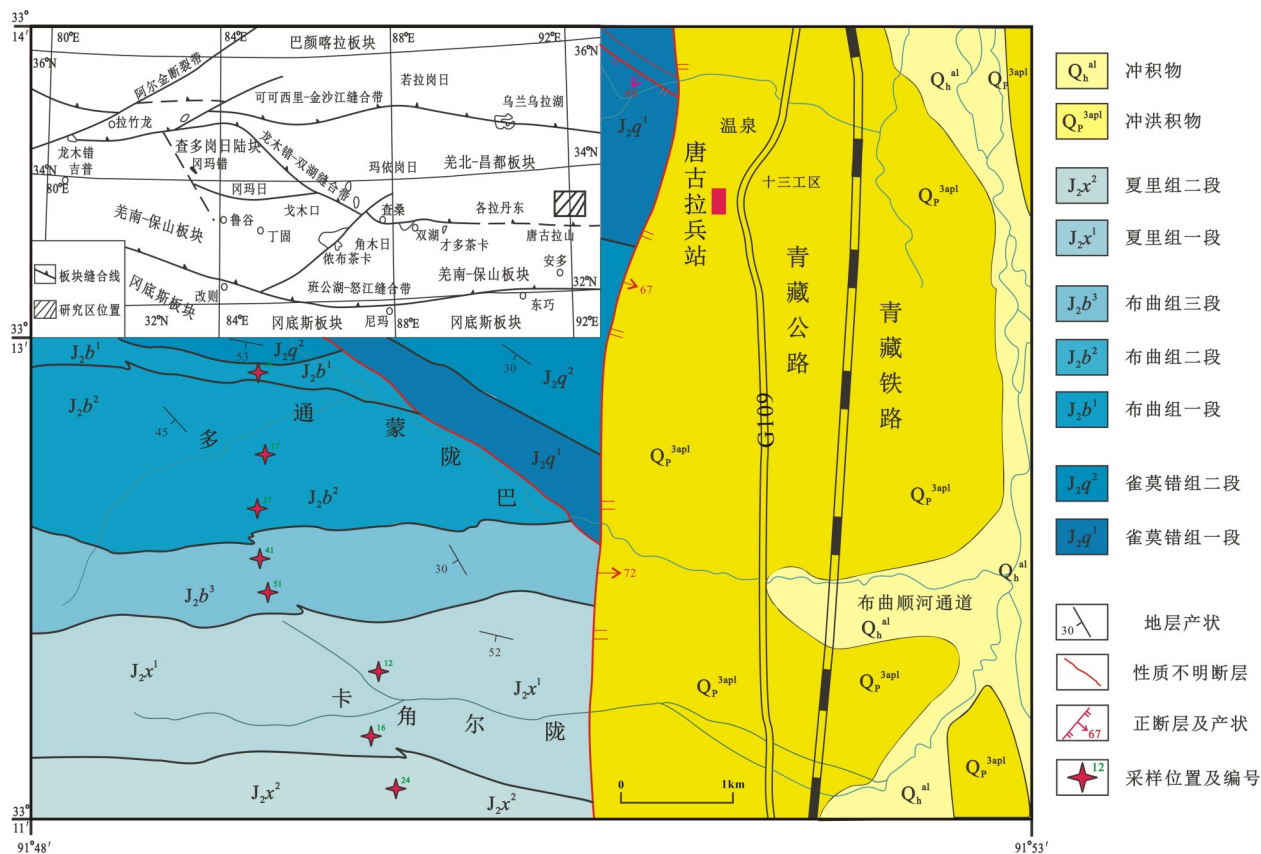


图1 羌塘盆地唐古拉山北麓温泉地区区域构造位置以及地质简图

Fig.1 Geological sketch map and regional tectonic position map of the Wenquan area, the northern foot of the Tanggula Range, Qiangtang Basin

演化历史提供重要的地质依据。

1 地质概况及样品采集

研究区位于羌塘盆地东部唐古拉山北麓温泉地区,夹持于可可西里—金沙江缝合带和龙木错—双湖缝合带之间,隶属于羌北—昌都板块(图1)。位于研究区北侧青藏公路沿线的雁石坪地区是中—晚侏罗世雁石坪群的创名地,也是这一地层发育的最典型地区。雁石坪群(JP)现在定义是指不整合于晚三叠世结扎群及其以前地层之上,为一套碎屑岩夹灰岩,下部局部地区夹火山岩组成的地层,上未见顶^[30]。由下而上可将雁石坪群分为中侏罗世雀莫错组、布曲组、夏里组和晚侏罗世索瓦组、雪山组。其中雀莫错组、夏里组及雪山组岩性以细砂岩夹泥岩为主,布曲组和索瓦组岩性以灰岩为主。

本文研究的2条剖面位于建立雁石坪群标准地层剖面的雁石坪镇南约17 km的唐古拉山北麓温泉

第四系盆地西侧。剖面分别距位于盆地唐古拉山兵站约5 km和3 km处的卡角尔陇沟(PM21)和多通蒙陇巴沟(PM22),剖面全长2844.00 m、4340.00 m。分别在PM21剖面上采取3件(样品编号PM21-12、PM21-16、PM21-24)、PM22剖面上采取5件(样品编号PM22-14、PM22-17、PM22-27、PM22-41、PM22-51),共计8件新鲜的砂岩样品(图1),每件样品重3~5 kg。

2 样品特征及分析方法

2.1 样品特征

8件样品以含钙质岩屑石英砂岩为主,由石英(65%)、岩屑(10%)、钙质(8%)、长石(2%)及泥质充填物(15%)组成,岩石具中—细粒砂状结构,基底式胶结,分选性差,磨圆度差。各组分特征如下:石英,无色透明,粒度0.2~0.45 mm,次棱角状,边缘溶蚀较强呈凹凸状或锯齿状,部分颗粒具波状消光;

长石,无色透明,以斜长石为主,粒度0.35 mm左右,可见聚片双晶,部分颗粒表面具黏土化;岩屑主要为硅质岩屑、粉砂质岩屑及少量玄武岩岩屑等,呈次棱角-次圆状,粒度0.1~0.4 mm,粉砂质岩屑表面有绢云母化;钙质多重结晶为方解石,且具连晶。泥质具强烈的绢云母化,呈针状或鳞片状杂乱分布;另含少量铁质矿物呈浸染状或沿裂隙分布(图2)。

2.2 分析方法

将采集好的砂岩样品破碎成粉末,经淘洗和磁选,得到锆石重砂样品,然后在双目镜下挑选出晶形完好、具有代表性的锆石颗粒。将挑选好的锆石颗粒与标准锆石 91500 和硅酸盐玻璃标准样品 NIST610 一起黏贴在环氧树脂表面,制备成测定年龄用的样品靶;对靶中锆石样品进行抛光,使锆石内核充分暴露,在透射光和反射光显微镜观察的基础上,选择合适的样品进行阴极发光照相(CL),以观察各锆石颗粒内部结构特征,从而帮助选定最佳分析部位进行锆石原位 U-Pb 同位素分析。

锆石 U-Pb 同位素测量采用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)原位分析方法,于西北大学“教育部大陆动力学重点实验室”完成。激光剥蚀系统为 GeoLas200M,激光器为 ComPex102ArF 准分子激光器,波长为 193 nm,ICP-MS 为 Elan6100DRC 型。样品分析时激光束斑直径为 30 μm ,ICP-MS 的运行模式为一般模式,数

据采集选用跳峰方式。实验中采用 He 作为剥蚀物质的载气。样品测定时用哈佛大学的 91500 标准锆石作为计算 U-Pb 同位素年龄的外标,其参考加权值平均 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 (1065.4 ± 0.6) Ma;元素含量计算采用美国国家标准物质局人工合成硅酸盐玻璃 NIST610 作为外标, ^{29}Si 作为内标元素进行校正。样品原始数据处理采用 Glitter 4.0 软件进行计算,并采用 Anderson 软件对测试数据进行普通铅校正^[31],加权平均年龄计算采用 Isoplot3.00 软件完成^[32]。

3 测试结果及年龄特征

布曲组(J_2b)、夏里组(J_2x)8 件样品共分析测试了 576 个点。按照谐和度值对测试点的数据进行了挑选,将谐和度介于 90~105 的分析点作为有效数据来统计,共计 429 个,其他数据舍去。由于测年数据太多,文中仅列出锆石年龄值大于 486 Ma 碎屑锆石的相关数据(表 1),小于 486 Ma 的年龄数据,有兴趣读者可向作者索取。按照碎屑锆石年龄研究的一般原则^[33-34],对于年龄 > 1000 Ma 的锆石,因其含大量放射性成因的 Pb,采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄,对于年龄 < 1000 Ma 的锆石,由于其缺少放射性成因的 Pb 或普通 Pb 校正的不确定性,则采用更为可靠的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄。

阴极发光(CL)图像显示(图 3),大多数锆石颗粒呈浑圆状、粒状或短柱状,边缘具有明显的磨圆,反映了其可能经历过搬运、分选、缓慢沉积的过程

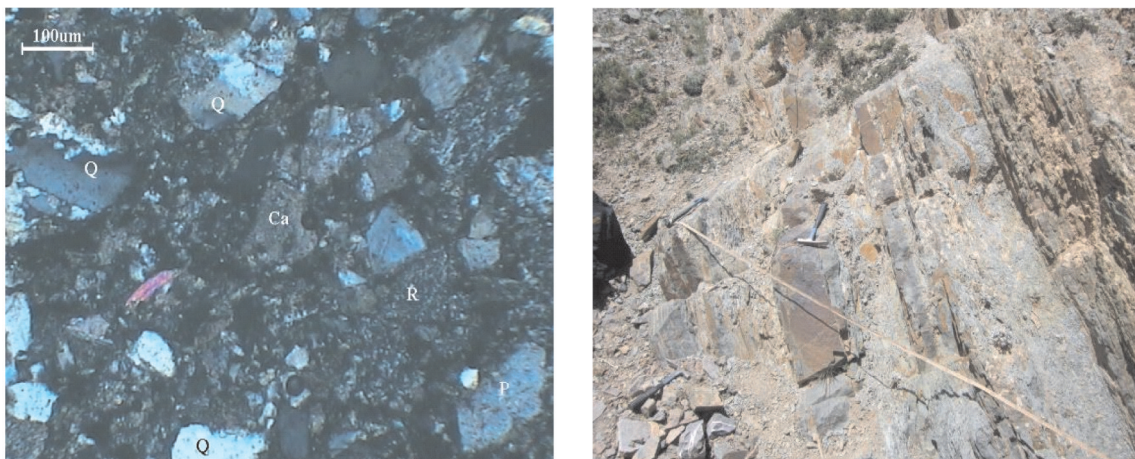


图2 含钙质岩屑石英砂岩镜下特征及野外照片

Q—石英;P—斜长石;R—岩屑;Ca—钙质

Fig.2 Microphotographs and field photographs of the calcareous lithic quartz sandstone

Q—Quartz;P—Plagioclase;R—Rock fragments;Ca—Calcareous

表1 布曲组和夏里砂岩碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析结果(>486 Ma)

Table 1 LA-ICP-MS U-Pb analyses of detrital zircons from sandstones of the Buqu and the Xiali Formation (>486 Ma)

测点 编号	Th/ ^{10⁻⁶} U/ ^{10⁻⁶}			同位素比值						年龄/Ma						谐和度 /%
	Th/ ^{10⁻⁶}	U/ ^{10⁻⁶}	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	
样品PM22-14 (布曲组)																
28	129	393	0.33	0.07380	0.00245	1.75418	0.03214	0.17240	0.00235	1036	66	1029	12	1025	13	99.67
30	255	304	0.84	0.11553	0.00359	5.36722	0.07476	0.33695	0.00441	1888	55	1880	12	1872	21	99.60
34	275	305	0.90	0.06846	0.00269	1.38443	0.03803	0.14667	0.00222	883	79	882	16	882	12	100.00
35	11	228	0.05	0.07185	0.00237	1.61704	0.02830	0.16325	0.00220	982	66	977	11	975	12	99.80
样品PM22-17 (布曲组)																
5	395	842	0.47	0.07155	0.00222	1.59707	0.02549	0.16178	0.00217	973	62	969	10	967	12	99.75
18	21	62	0.33	0.10639	0.00330	4.43596	0.07084	0.30227	0.00418	1738	56	1719	13	1703	21	99.04
21	224	338	0.66	0.06648	0.00203	1.21596	0.01801	0.13259	0.00177	822	62	808	8	803	10	99.36
23	554	880	0.63	0.05972	0.00183	0.79677	0.01197	0.09672	0.00129	594	65	595	7	595	8	100.03
26	78	859	0.09	0.10940	0.00328	4.73872	0.06607	0.31404	0.00420	1789	54	1774	12	1761	21	99.24
29	86	125	0.69	0.13389	0.00399	6.81699	0.09237	0.36915	0.00492	2150	51	2088	12	2025	23	97.01
32	21	201	0.11	0.13568	0.00406	7.49130	0.10303	0.40032	0.00537	2173	51	2172	12	2171	25	99.94
38	242	547	0.44	0.13105	0.00397	6.97091	0.10184	0.38571	0.00529	2112	52	2108	13	2103	25	99.77
39	41	112	0.37	0.06556	0.00202	1.18603	0.01834	0.13118	0.00177	792	63	794	9	795	10	100.06
40	21	63	0.34	0.10796	0.00328	5.38012	0.07980	0.36138	0.00495	1765	54	1882	13	1989	23	105.69
43	230	306	0.75	0.15374	0.00470	7.79847	0.11938	0.36784	0.00516	2388	51	2208	14	2019	24	91.45
46	10	237	0.04	0.07681	0.00233	1.78467	0.02616	0.16849	0.00227	1116	59	1040	10	1004	13	96.53
51	21	64	0.33	0.05719	0.00178	0.63640	0.01027	0.08071	0.00110	498	68	500	6	500	7	100.04
53	347	445	0.78	0.06124	0.00281	0.82999	0.03070	0.09829	0.00164	648	96	614	17	604	10	98.50
样品PM22-27 (布曲组)																
27	130	992	0.13	0.07168	0.00238	1.33751	0.02526	0.13534	0.00187	977	66	862	11	818	11	94.91
31	141	756	0.19	0.06336	0.00300	1.00908	0.03862	0.11550	0.00197	720	97	708	20	705	11	99.46
32	8	234	0.04	0.11776	0.00356	5.01200	0.06737	0.30869	0.00406	1923	53	1821	11	1734	20	95.22
样品PM22-51 (布曲组)																
9	581	572	1.02	0.05957	0.00229	0.78578	0.02114	0.09567	0.00143	588	81	589	12	589	8	100.03
17	10	246	0.04	0.11484	0.00364	5.31050	0.08644	0.33534	0.00470	1877	56	1871	14	1864	23	99.66
26	11	254	0.04	0.15270	0.00493	9.02581	0.15772	0.42865	0.00631	2376	54	2341	16	2300	28	98.25
27	287	287	1.00	0.11335	0.00350	5.05241	0.07184	0.32323	0.00433	1854	55	1828	12	1806	21	98.76
28	137	1403	0.10	0.11521	0.00359	4.49246	0.06709	0.28277	0.00384	1883	55	1730	12	1605	19	92.81
34	241	914	0.26	0.17076	0.00590	11.38587	0.24981	0.48351	0.00824	2565	57	2555	20	2543	36	99.50
35	10	243	0.04	0.07982	0.00264	2.14846	0.03927	0.19520	0.00272	1192	64	1165	13	1150	15	98.70
36	122	863	0.14	0.06999	0.00411	1.29791	0.06667	0.13447	0.00279	928	116	845	29	813	16	96.27
37	128	90	1.42	0.05879	0.00281	0.64423	0.02485	0.07946	0.00131	560	101	505	15	493	8	97.62
39	411	1487	0.28	0.11574	0.00364	4.82299	0.07379	0.30217	0.00411	1892	56	1789	13	1702	20	95.15
42	219	420	0.52	0.07278	0.00256	1.51592	0.03292	0.15104	0.00217	1008	70	937	13	907	12	96.80
43	10	245	0.04	0.07330	0.00246	1.73439	0.03322	0.17159	0.00239	1022	67	1021	12	1021	13	99.95
45	43	287	0.15	0.07537	0.00273	1.75287	0.04097	0.16865	0.00248	1078	71	1028	15	1005	14	97.71
样品PM21-12 (夏里组)																
2	227	338	0.67	0.06527	0.00286	1.15151	0.03972	0.12788	0.00213	783	89	778	19	776	12	99.72
5	140	417	0.34	0.12118	0.00366	5.10651	0.07409	0.30547	0.00423	1974	53	1837	12	1718	21	93.53
7	754	918	0.82	0.18165	0.00634	11.89507	0.28296	0.47468	0.00877	2668	57	2596	22	2504	38	96.45
11	213	292	0.73	0.06425	0.00246	1.00757	0.02737	0.11368	0.00175	750	79	708	14	694	10	98.09
13	169	245	0.69	0.14276	0.00434	7.41288	0.10775	0.37642	0.00523	2261	51	2163	13	2060	24	95.24
14	260	516	0.50	0.07406	0.00275	1.51550	0.03886	0.14834	0.00229	1043	73	937	16	892	13	95.20
17	494	784	0.63	0.06346	0.00319	1.03990	0.04362	0.11880	0.00216	724	103	724	22	724	12	99.97
20	10	211	0.05	0.10229	0.00319	3.99113	0.06377	0.28286	0.00399	1666	57	1632	13	1606	20	98.37
21	51	546	0.09	0.15839	0.00482	9.91716	0.14364	0.45392	0.00631	2439	51	2427	13	2413	28	99.41
22	134	217	0.62	0.12428	0.00522	6.09988	0.20229	0.35582	0.00736	2019	73	1990	29	1962	35	98.60
24	65	175	0.37	0.06552	0.00211	1.13499	0.02005	0.12559	0.00176	791	66	770	10	763	10	99.04
26	21	61	0.34	0.06334	0.00261	0.96762	0.02978	0.11075	0.00176	720	85	687	15	677	10	98.53
28	94	163	0.58	0.07094	0.00245	1.39783	0.03000	0.14286	0.00209	956	69	888	13	861	12	96.94
35	114	123	0.93	0.10981	0.00361	4.81323	0.09104	0.31781	0.00474	1796	59	1787	16	1779	23	99.54
37	21	61	0.34	0.14255	0.00505	8.22614	0.19444	0.41840	0.00726	2258	60	2256	21	2253	33	99.87
39	236	519	0.46	0.06562	0.00208	1.18086	0.01954	0.13047	0.00181	794	65	792	9	791	10	99.86
41	58	581	0.10	0.12761	0.00401	6.48305	0.10355	0.36837	0.00524	2065	54	2044	14	2022	25	98.93
44	192	178	1.08	0.16242	0.00505	10.24761	0.15656	0.45748	0.00647	2481	51	2457	14	2428	29	98.82
53	7	40	0.16	0.11608	0.00371	5.20256	0.08639	0.32500	0.00464	1897	56	1853	14	1814	23	97.90
样品PM21-16 (夏里组)																
29	38	641	0.06	0.07388	0.00266	1.62298	0.03764	0.15929	0.00245	1038	71	979	15	953	14	97.31
45	124	318	0.39	0.11627	0.00365	4.97130	0.07656	0.31001	0.00447	1900	55	1815	13	1741	22	95.94
48	86	254	0.34	0.16375	0.00512	10.41016	0.15783	0.46094	0.00665	2495	52	2472	14	2444	29	98.86
62	97	702	0.14	0.11110	0.00393	4.77437	0.10819	0.31156	0.00512	1817	63	1780	19	1748	25	98.20

及离物源区较远。锆石内部结构较为清晰,且绝大多数锆石不同程度地保留有岩浆结晶成因特征的振荡环带,仅部分锆石外围发育有暗色的较单一的细窄增生边(加大边),表明其经历了较强构造热事件的改造,具后期生长特征;其环带具弱分带、扇形

分带、面状分带等变质锆石特征。

此外,锆石中Th含量均值为 159×10^{-6} ,U含量均值为 419×10^{-6} ,其Th、U含量呈较好的正相关性,Th/U比值高,均值为0.42(大于0.1),占80.7%的Th/U比值大于0.1,与CL图像分析结果和形貌特征一致,进一

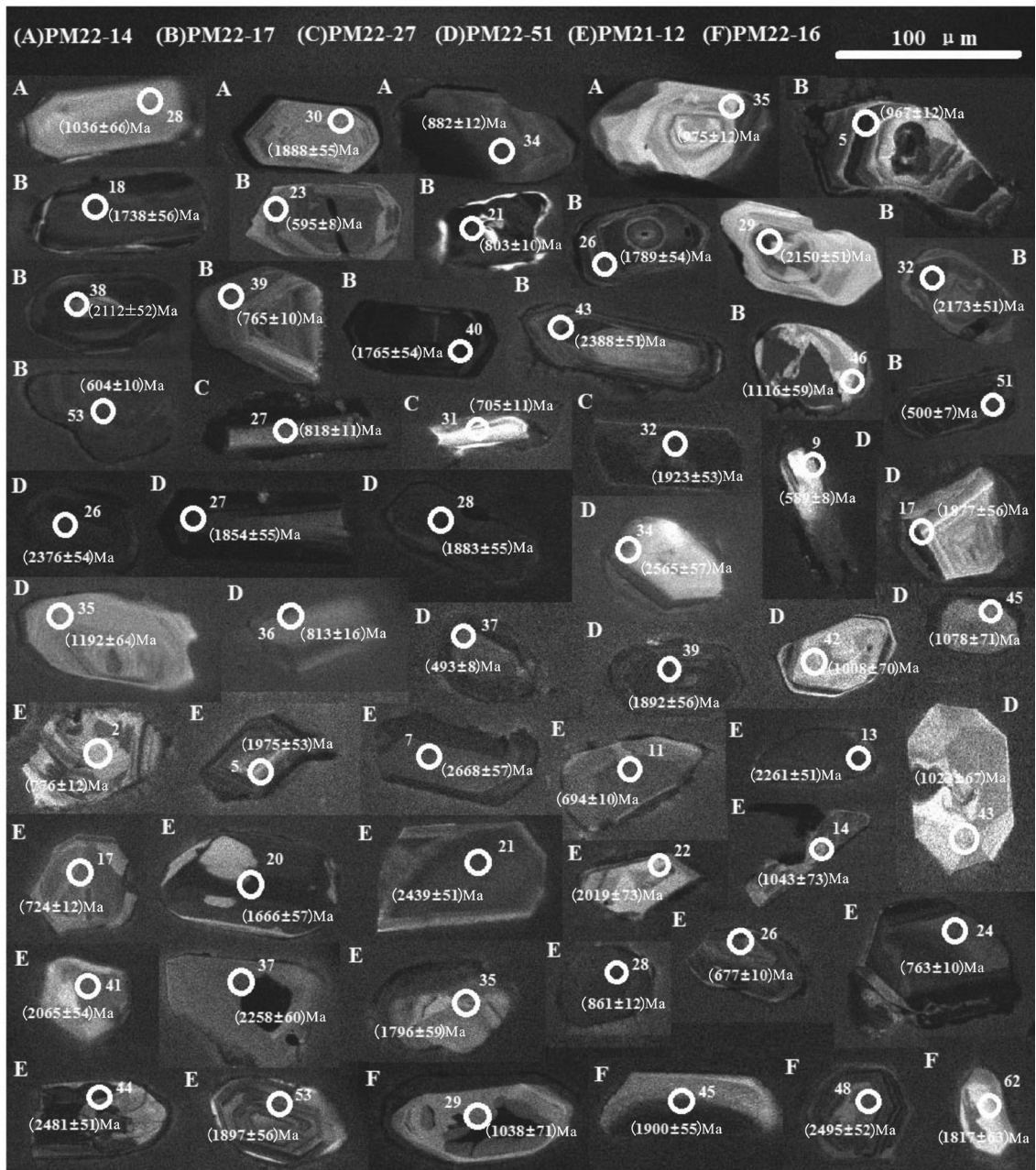


图3 布曲组和夏里砂岩中碎屑锆石的阴极发光图像和年龄(>486 Ma)

Fig.3 Cathodoluminescence (CL) images of typical detrital zircons from sandstones in the Buqu Formation and Xiali Formation (>486 Ma)

步证实了多数锆石应为岩浆结晶成因锆石。

锆石样品测试结果显示(图4),布曲组(J₂b)、夏里组(J₂x)剖面碎屑锆石429个有效测试点的年龄分布在2668~166 Ma,其时间跨度较大和阶段性多,既反映了沉积物源区组成的复杂性,也暗示其与一定的阶段性构造热事件相关。

根据碎屑锆石²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb年龄和²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄的频率分布特征(图4),以及区域地质背景反映的地壳形成与演化的阶段性,可将年龄结果大致分为10组:①2668~2019 Ma;②1974~1666 Ma;③1192~803 Ma;④795~677 Ma;⑤604~493 Ma;⑥484~405 Ma;⑦392~303 Ma;⑧300~252 Ma;⑨252~201 Ma;

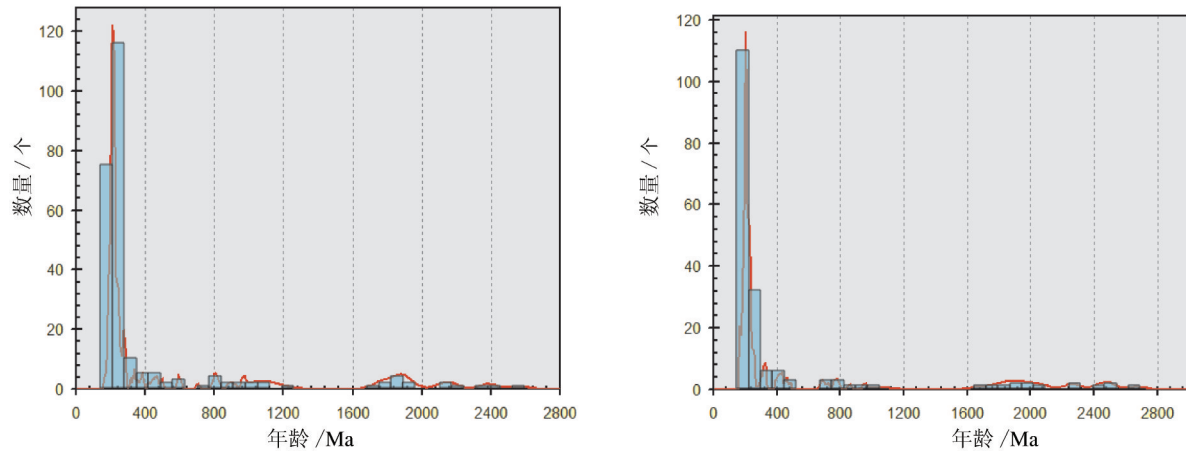


图4 布曲组、夏里组砂岩中全部碎屑锆石U-Pb年龄频率分布

Fig.4 Relative probability plots of U-Pb ages for concordant detrital zircons from all sandstones of the Buqu and Xiali Formation

⑩201~167 Ma。其相应的碎屑锆石时代为新太古代至古元古代、中元古代、中元古代晚期至新元古代早期、新元古代中期成冰纪、新元古代晚期至早寒武纪、奥陶纪至早泥盆世、中晚泥盆世至石炭纪、二叠纪、三叠纪、早中侏罗世,共10个时段。

4 讨 论

羌塘盆地是否存在古老基底,基底的时代和性质直接决定羌塘盆地的大地构造属性,这一问题青藏高原大地构造研究的关键问题之一,也是地质界长期争论的焦点。围绕这一关键问题,近年来已有专家学者对羌塘盆地的基底的时代和性质进行了研究,提出了不同的认识,分歧较大。结合前人研究情况,本次研究认为,在没有成规模基底岩石出露以及没有深部钻井资料的情况下,要更进一步解决基底问题,只能通过对羌塘盆地演化时期周缘出露的地质体的研究加以探讨。由于碎屑锆石U-Pb同位素测年能很好地反映出源岩所经历的构造热事件,不同的测年数据是不同构造热事件的响应。因此,从锆石年龄分析测试结果可以看出,处于冈瓦纳与欧亚两大陆接壤地区的羌塘地块受到了多次构造热事件的影响,而研究区雁石坪群碎屑岩从新太古代到中生代的锆石年龄则记录了该区几乎所有特提斯域演化的关键事件。另外,新近的地表地质调查成果显示^[35],羌塘地区奥陶纪—泥盆纪地层变质程度极浅,地层中没有发现火山岩夹层,也没有观察到有明显的构造运动现象,是稳定

环境下的大陆边缘台型沉积建造。据此,可以判断羌塘盆地结晶基底变质岩的形成年龄应该早于奥陶纪(大于486 Ma),相关的讨论应该主要考虑前奥陶纪时期盆地地质体的组成。

于是,本文重点对锆石年龄值大于486 Ma碎屑锆石年龄组进行讨论,共5组,即①2668~2019 Ma、②1974~1666 Ma、③1192~803 Ma、④795~677 Ma、⑤604~493 Ma。由表1可见,该5组碎屑锆石中Th含量均值为 159×10^{-6} ,U含量均值为 419×10^{-6} ,其Th、U含量正相关性强,Th/U平均值为0.42(大于0.1),结合CL图像分析结果和形貌特征(图3),表明几乎所有这些碎屑锆石都是岩浆成因的,并且与基性—酸性岩浆中的锆石类似,揭示出在羌塘盆地中,具以上5个时期的基性—酸岩浆岩的存在。此外,通过与前人的相关研究进行对比,进一步探讨羌塘盆地结晶基底的年代及地质构造演化过程。

(1)2668~2019 Ma年龄组包含14个碎屑锆石值,指示了新太古代—古元古代的构造热事件。从全球地质背景看,华北、北美、瑞芬以及其他克拉通在2.5 Ga左右发生了大规模的拼合事件(如Grenville事件,Pan-African事件等),形成了可能是有记载的最古老的超级大陆^[36]。近年来,在青藏高原泛非基底中发现了大量早前寒武纪岩石和锆石,时代大多为1.8~2.7 Ga,主要集中在1.8~2.0 Ga和2.4~2.7 Ga两个年龄区间^[37-38]。而在羌塘盆地中也发现大量1.8~2.7 Ga的锆石,如在盆地中央隆起带查桑—茶布一带的戈木日群中^[8]、盆地北部拉竹龙

—西金乌兰湖—金沙江结合带西段若拉岗日一带的浅变质地层中^[9]、盆地中部冈玛错—双湖地区蓝闪石片岩中^[10]、盆地东部昌都地块宁多岩群中^[11]、盆地西南部龙木错—双湖缝合带南侧荣玛温泉地区石英岩中^[39]。本次在羌塘盆地北部唐古拉山温泉地区雁石坪群中也获得了较多的该年龄段锆石年龄信息,这都暗示羌塘盆地有太古宙的地壳物质,支持羌塘盆地存在前寒武纪结晶基底的可能性,推断本次获得的最老年龄2668 Ma为羌塘盆地变质结晶基底的原岩年龄。

(2) 1974~1666 Ma 年龄组包含 15 个碎屑锆石值,指示了中元古代的构造热事件。研究表明^[40-41],Columbia 超级大陆各个组成陆块是在 2.1~1.8 Ga 碰撞事件中拼合在一起的,并在中元古代早—中期 Columbia 超级大陆边缘向外增生,随后开始裂解(1600~1300 Ma),在格陵兰、波罗的、南美、北美及西非等地都有该时代非造山期岩浆岩分布。近年来,在羌塘盆地也相继发现了该时期岩浆热事件年龄记录,谭富文等^[6]在羌塘盆地中央隆起带北缘俄久卖地区变质岩的锆石 SHRIMP 测年发现了具 1666 Ma、1707 Ma、1780 Ma 的锆石年龄,将这 3 颗锆石定为羌塘盆地结晶基底主期变形变质作用年龄;张士贞等^[42]在羌塘盆地南侧比如盆地砂岩中获得了 11 颗年龄为(1992±23)Ma~(1770±37) Ma 的碎屑锆石,认为是羌塘结晶基底主期变质作用年龄。与之相比,本研究所测得的在该年龄段的锆石年龄值更多。因此,研究区雁石坪群碎屑锆石 1974~1666 Ma 年龄为羌塘地区存在前寒武纪基底提供了直接证据,且结晶基底还遭受了后期多期变质变形作用。在全球尺度下,该年龄组可能也是 Columbia 超级大陆边缘向外增生事件在羌塘地区的反映。

(3) 1192~803 Ma 年龄组包含 15 个碎屑锆石值,指示了中元古代晚期至新元古代早期发生的构造热事件,其时代与格林威尔期造山作用时代相当(1090~980 Ma),与 Rodinia 超大陆的聚合相对应。研究表明^[43-44],Rodinia 超大陆的聚合造山发生在 1300~1000 Ma,基本形式表现为早期弧陆碰撞和晚期陆陆碰撞,并在 1000~900 Ma 继以伸展作用,裂解发生于 830 Ma 之后,但其过程具有明显的时、空分

布不均一性。近年来,在喜马拉雅泛非基底中发现了较多该时期岩浆热事件的年龄记录,如东喜马拉雅构造结前奥陶纪南迦巴瓦岩群获得大量 1100~780 Ma 锆石年龄^[45];西尼泊尔喜马拉雅地区前奥陶纪 Bhimphedi 群中获得大量 1200~900 Ma 锆石年龄^[37];高喜马拉雅变质基底片麻岩中存在大量 1300~800 Ma 碎屑锆石^[46]。位于喜马拉雅以北的南羌塘地块荣玛温泉地区,在该区石英岩中发现了大量 1200~800 Ma 碎屑锆石^[39],表明石英岩物源区格林威尔晚期构造岩浆热事件和晋宁运动都十分发育,而且其物源上显示了与喜马拉雅泛非基底和印度克拉通更为密切的成因联系,表明羌南地块属冈瓦纳大陆的一部分。本文 1192~803 Ma 碎屑锆石的发现,为北羌塘地块存在格林威尔晚期构造岩浆热事件和晋宁运动提供了新的依据,其碎屑锆石年龄分布特征同样暗示了北羌塘地块属冈瓦纳大陆的一部分。

(4) 795~677 Ma 年龄组包含 8 个碎屑锆石值,指示了新元古代中期成冰纪时期的构造热事件。对 Rodinia 超级大陆的重建研究表明^[47-48],Rodinia 超级大陆从 830 Ma 开始发育裂谷作用,到 725 Ma 可能已经解体,Rodinia 超级大陆全球性裂谷作用,使劳伦古陆与南美和原南极—澳大利亚相分离。对照前人研究^[2,10],在全球尺度下,研究区 795~677 Ma 年龄组可能与 Rodinia 超级大陆全球性裂谷作用使劳伦古陆与南美和原南极—澳大利亚相分离有关。

(5) 604~493 Ma 年龄组包含 5 个碎屑锆石值,指示了新元古代晚期—早寒武纪的构造热事件,该组年龄值可能是泛非运动在本地区的反映。泛非事件是指(550±100) Ma 前发生的一次重要的深成事件,其影响的非洲大部分及相邻的冈瓦纳地区被称为泛非造山带^[49]。近年来,青藏高原发现了大量泛非运动的年龄信息,泛非事件在青藏高原波及范围、作用时间及性质也成为众多学者专家所关注的焦点,因为这是限定冈瓦纳大陆范围的重要依据。许志琴等^[50]对不同类型片麻岩进行了 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年,在西藏亚东、聂拉木、吉隆、康玛等地区获得大量 529~457 Ma 的泛非期变质年龄数据;1:25 万安多县幅^①在聂荣地块获得侵入聂荣岩群的片麻状二长花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为(515±14)

①中国地质大学(北京)地质调查院.1:25万安多县幅区域地质调查报告[R].2006.

Ma,是目前在青藏高原发现的位置最靠北的泛非事件年龄记录。此外,在青藏高原中部的羌塘盆地中央隆起带出露的片麻岩^[6]、蓝闪石片岩^[10]、矽线石片麻岩和片麻状花岗岩^[51]、花岗片麻岩^[52]以及奥陶纪温泉石英岩^[39]中碎屑锆石也均发现了泛非运动的年龄证据。本文于青藏高原北羌塘盆地唐古拉山温泉地区所获得的碎屑锆石年龄信息与泛非造山热事件时代相吻合。由此,可以说明研究区雁石坪群碎屑岩中493~604 Ma年龄组的碎屑锆石记录了泛非构造热事件年龄,表明有碎屑物质来自于冈瓦纳大陆变质基底,同样也暗示北羌塘地块起源于冈瓦纳大陆,这为探讨整个青藏高原地区泛非运动增添了新的基础资料。

5 结 论

(1)通过对羌塘盆地雁石坪群碎屑锆石U-Pb年龄的分析,进一步确定羌塘盆地具有前寒武纪结晶基底,其形成的主要时期大致为1974~1666 Ma,且结晶基底还遭受了后期地质构造作用的改造。其中,2668~2019 Ma碎屑锆石的出现,暗示了羌塘盆地具有古元古代、甚至新太古代的地壳物质的存在,推测为羌塘盆地变质结晶基底原岩年龄。

(2)根据碎屑岩中获得的几组锆石U-Pb年龄对所经历的构造热事件与区域构造热事件进行了对比分析,认为羌塘盆地还先后经历了羌塘地块与太古宙末最古老超级大陆、Columbia超级大陆、Rodinia超大陆演化相关的构造热事件、格林威尔晚期构造岩浆热事件和晋宁运动、泛非运动等一系列地质构造演化,且支持了羌塘地块属冈瓦纳大陆的认识。

参考文献(References):

- [1] 纪云龙.藏北羌塘地块的归属问题[J].地学前缘, 2000, 7(4): 370.
Ji Yunlong. The ownership of the Qiangtang basin, Tibet, China[J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(4): 370(in Chinese with English abstract).
- [2] 王成善,伊海生,李勇,等.西藏羌塘盆地地质演化与油气远景评价[M].北京:地质出版社, 2001: 1-59.
Wang Chengshan, Yi Haisheng, Li Yong, et al. Geological Evolution and Hydrocarbon Potential Evaluation in the Qiangtang Basin, Tibet, China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2001: 1-59(in Chinese with English abstract).
- [3] 黄继钧.羌塘盆地基底构造特征[J].地质学报, 2001, 75(3): 333-337.
Huang Jijun. Structural characteristics of the basement of the Qiangtang Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2001, 75(3): 333-337 (in Chinese with English abstract).
- [4] 卢占武,高锐,薛爱民,等.羌塘盆地石油地震反射新剖面及基底构造浅析[J].中国地质, 2006, 33(2): 286-289.
Lu Zhanwu, Gao Rui, Xue Aimin, et al. New seismic reflection profiles and basement structure in Qiangtang basin, Northern Tibet[J]. Geology in China, 2006, 33(2): 286-289(in Chinese with English abstract).
- [5] 谭富文,陈明,王剑,等.西藏羌塘盆地中部发现中高级变质岩[J].地质通报, 2008, 27(3): 351-355.
Tan Fuwen, Chen Ming, Wang Jian, et al. Discovery of middle- and high-grade metamorphic rocks in the central Qiangtang basin, Tibet, China[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(3): 351-355(in Chinese with English abstract).
- [6] 谭富文,王剑,付修根,等.藏北羌塘盆地基底变质岩的锆石SHRIMP年龄及其地质意义[J].岩石学报, 2009, 25(1): 139-146.
Tan Fuwen, Wang Jian, Fu Xiugen, et al. U-Pb zircon SHRIMP of metamorphic rocks from the basement age of the Qiangtang basin, northern Tibet, and its geological significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(1): 139-146(in Chinese with English abstract).
- [7] 何世平,李荣社,王超,等.昌都地块宁多岩群形成时代研究:北羌塘基底存在的证据[J].地学前缘, 2013, 20(5): 15-24.
He Shipin, Li Rongshe, Wang Chao, et al. Research on the formation age of Ningduo rock group in Changdu Block: Evidence for the existence of basement in the North Qiangtang[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(5): 15-24(in Chinese with English abstract).
- [8] 王国芝,王成善.西藏羌塘基底变质岩系的解体和时代厘定[J].中国科学(D辑), 2001, 31(增刊): 77-82.
Wang Guozhi, Wang Chengshan. Age determinations and disintegration of the basement metamorphic rock series in central Qiangtang, Tibet[J]. Science in China(Series D) 2001, 31(Supp.): 77-82(in Chinese).
- [9] 杨子江,李咸阳.藏北若拉岗日结合带中的浅变质地层及其锆石SHRIMP U-Pb年龄测定[J].地质通报, 2006, 25(1/2): 118-123.
Yang Zhijiang, Li Xianyang. SHRIMP U-Pb dating of zircons from low-grade metamorphic rocks in the Rola Kangri junction zone, northern Tibet, China[J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(1/2): 118-123(in Chinese with English abstract).
- [10] 邓希光,张进江,张玉泉,等.藏北羌塘地块中部蓝片岩中捕获锆石SHRIMP U-Pb定年及其意义[J].地质通报, 2007, 26(6): 698-702.
Deng Xiguang, Zhang Jingjiang, Zhang Yuquan, et al. SHRIMP U-Pb dating of zircons from blueschist in the central part of the Qiangtang block, northern Tibet, China and its implications[J]. Geological Bulletin of China, 2007, 26(6): 698-702(in Chinese with English abstract).
- [11] 何世平,李荣社,王超,等.青藏高原北羌塘昌都地块发现~4.0 Ga碎屑锆石[J].科学通报, 2011, 56(8): 573-582.
He Shipin, Li Rongshe, Wang Chao, et al. Discovery of about 4.0

- Ga detrital zircons in the Changdu Block, North Qiangtang, Tibetan Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(8): 573–582(in Chinese).
- [12] 李才, 王天武, 杨德明, 等. 西藏羌塘中部都古尔花岗质片麻岩同位素年代学研究[J]. 长春科技大学学报, 2000, 30(2): 105–109.
Li Cai, Wang Tianwu, Yang Deming, et al. Isotopic chronology of Duguer granitic gneiss of central Qiangtang, Tibet[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2000, 30(2): 105–109(in Chinese with English abstract).
- [13] 李才. 羌塘基底质疑[J]. 地质论评, 2003, 49(1): 5–9.
Li Cai. Question about the basement of the Qiangtang micro-plate[J]. Geological Review, 2003, 49(1): 5–9(in Chinese with English abstract).
- [14] 李才, 翟庆国, 程立人, 等. 青藏高原羌塘地区几个关键地质问题的思考[J]. 地质通报, 2005, 24(4): 295–301.
Li Cai, Zhai Qingguo, Cheng Liren, et al. Thoughts on some key geological problems in the Qiangtang area, Qinghai–Tibet Plateau[J]. Geological Bulletin of China, 2005, 24(4): 295–301. (in Chinese with English abstract).
- [15] 赵政璋, 李永铁, 叶和飞, 等. 青藏高原羌塘盆地石油地质[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 344–394.
Zhao Zhengzhang, Li Yongtie, Ye Hefei, et al. Petroleum geology of the Qiangtang Basin on the Qinghai–Xizang Plateau, China[M]. Beijing: Science Press, 2000: 344–394(in Chinese with English abstract).
- [16] 谭富文, 王剑, 王小龙, 等. 西藏羌塘盆地——中国油气资源战略略区的首选目标[J]. 沉积与特提斯地质, 2002, 22(1): 16–21.
Tang Fuwen, Wang Jian, Wang Xiaolong, et al. The Qiangtang Basin in Xizang as the target area for the oil and gas resources in China[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2002, 22(1): 16–21(in Chinese with English abstract).
- [17] 王剑, 谭富文, 王小龙, 等. 藏北羌塘盆地早侏罗世—中侏罗世早期沉积构造特征[J]. 沉积学报, 2004, 22(2): 198–205.
Wang Jian, Tan Fuwen, Wang Xiaolong, et al. The sedimentary and tectonic characteristics of Qiangtang basin in the early Jurassic in northern Xizang (Tibet) [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(2): 198–205(in Chinese with English abstract).
- [18] 赵文津, 赵逊, 蒋忠惕, 等. 西藏羌塘盆地的深部构造特征与含油气远景评价[J]. 中国地质, 2006, 33(1): 1–13.
Zhao Wenjin, Zhao Xun, Jiang Zhongti, et al. Deep structure and petroleum prospect evaluation of the Qiangtang basin, Tibet [J]. Geology in China, 2006, 33(1): 1–13(in Chinese with English abstract).
- [19] 付修根, 廖忠礼, 刘建清, 等. 南羌塘盆地扎仁地区中侏罗统布曲组沉积环境特征及其对油气地质条件的控制作用[J]. 中国地质, 2007, 34(4): 599–605.
Fu Xiugen, Liao Zhongli, Liu Jianqing, et al. Sedimentary environment of the Middle Jurassic Bu qu Formation and its controls on petroleum geology in the Zaring area, southern Qiangtang basin [J]. Geology in China, 2007, 34(4): 599–605(in Chinese with English abstract).
- [20] Dickinson W R. Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstones[J]. Provenance of Arenites, 1985, 333–361.
- [21] Roser B P, Korsch R J. Determination of tectonic setting of sandstone–mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio[J]. The Journal of Geology, 1986, 94: 159–162.
- [22] Patchett P J, Roth M A, Canale B S, et al. Nd isotopes, geochemistry, and constraints on sources of sediments in the Franklinian mobile belt, Arctic Canada[J]. Journal of the Geological Society, 1999, 111: 578–589.
- [23] Lee J, Williams I, Ellis D. Pb, U and Th diffusion in nature zircon[J]. Nature, 1997, 390(13): 159–162.
- [24] Cherniak D J, Watson E B. Pb diffusion in zircon[J]. Chemical Geology, 2000, 172: 5–24.
- [25] Bruguier O, Lancelot J R. U–Pb dating on single detrital zircon grains from the Triassic Songpan–Ganze flysch(central China): Provenance and tectonic correlations[J]. EPSL, 1997, 152: 217–231.
- [26] Thomas P B, William A T, Scott D S, et al. Detrital zircon evidence of Laurentian crustal dominance in the lower Pennsylvanian deposits of the Alleghanian clastic wedge in eastern North America[J]. Sedimentary Geology, 2005, 182: 59–86.
- [27] Liu X C, Jahn B M, Li S Z, et al. U–Pb zircon age and geochemical constraints on tectonic evolution of the Paleozoic accretionary orogenic system in the Tongbai orogen, central China[J]. Tectonophysics, 2013, 29: 233–249.
- [28] 陈伟男, 裴先治, 刘成军, 等. 西秦岭舒家坝地区太阳寺岩组碎屑锆石 U–Pb 年龄及其地质意义[J]. 中国地质, 2014, 41(3): 741–755.
Chen Weinan, Pei Xianzhi, Liu Chengjun, et al. U–Pb ages of detrital zircons from Taiyangsi Rock Group in Shujiba area of West Qinling Mountains and their geological significance[J]. Geology in China, 2014, 41(3): 741–755(in Chinese with English abstract).
- [29] 白建科, 李智佩, 徐学义, 等. 西天山乌孙山地区大哈拉军山组碎屑锆石 U–Pb 定年及其地质意义[J]. 中国地质, 2015, 42(1): 85–95.
Bai Jianke, Li Zhipei, Xu Xueyi, et al. Detrital zircon U–Pb dating of Dahalajunshan Formation in Wusun Mountain region, western Tianshan, and its geological implications[J]. Geology in China, 2015, 42(1): 85–95(in Chinese with English abstract).
- [30] 青海省地质矿产局. 青海省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997, 275–287.
Qinghai Bureau of Geology and Mineral Resource. Qinghai Lithostratigraphic[M]. Wuhan: China University of Geosciences, 1997: 275–287(in Chinese English abstract).
- [31] Anderson T. Correction of Pb in U–Pb analyses that do not report ²⁰⁴Pb[J]. Chemical Geology, 2002, 192: 59–79.
- [32] Ludwig K R. User's manual for Isoplot 3.00. A geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley Geochronology Center,

- Special Publication, 2003, No. 4a.
- [33] Cherniak D J, Watson E B. Pb diffusion in zircon[J]. *Chemical Geology*, 2000, 172: 5–24.
- [34] Blank L P, Kamo S L, Williams I S, et al. The application of SHRIMP to Phanerozoic geochronology: A critical appraisal of four zircon standards[J]. *Chemical Geology*, 2003, 200 (1/2): 171–188.
- [35] 李才,程立人,张以春,等.西藏羌塘南部发现奥陶纪—泥盆纪地层[J]. *地质通报*, 2004, 23(5/6): 602–604.
Li Cai, Chen Liren, Zhang Yichun, et al. Thought on some key geological problems in the Qiangtang area, Tibet[J]. *Geological Bulletin of China*, 2004, 23 (5/6): 602–604(in Chinese with English abstract).
- [36] Windley B F. *The Evolving Continents*. 3rd ed[M]. Chichester: John Wiley & Sons, 1995, 1–526.
- [37] Gehrels G E, DeCelles P G, Ojha T P, et al. Geologic and U–Pb geochronologic evidence for early Paleozoic tectonism in the Dadelthur thrust sheet, far–west Nepal Himalaya[J]. *J. Asian Earth Sci.*, 2006, 28: 385–408.
- [38] Cawood P A, Johnson M R W, Nemchin A A. Early Palaeozoic orogenesis along the Indian margin of Gondwana: Tectonic response to Gondwana assembly[J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 2007, 255: 70–84.
- [39] 董春艳,李才,万渝生,等.西藏羌塘龙木错—双湖缝合带南侧奥陶纪温泉石英岩碎屑锆石年龄分布模式:构造归属及物源区制约[J]. *中国科学(地球科学)*, 2011, 41(3): 299–308.
Dong Chunyan, Li Cai, Wan Yusheng, et al. Detrital zircon age model of Ordovician Wenquan quartzite south of Lungmuco–Shuanghu Suture in the Qiangtang area, Tibet: Constraint on tectonic affinity and source regions[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2011, 41(3): 299–308(in Chinese).
- [40] Rogers J, Santosh M. Configuration of Columbia, a Mesoproterozoic Supercontinent Gondwana[J]. *Res.*, 2002, 5: 5–22.
- [41] Zhao G C, Sun M, Wilde S A, Li S Z. A Pale–Mesoproterozoic Supercontinent: Assembly, growth and break up[J]. *Earth Science Review*, 2004, 67(1–2): 91–123.
- [42] 张士贞,向树元,万俊,等.西藏比加盆地碎屑锆石 LA–ICP–MS U–Pb 测年及其地质意义[J]. *地质科技情报*, 2010, 29(5): 15–22.
Zhang Shizhen, Xiang Shuyuan, Wan Jun, et al. LA–ICP–MS U–Pb geochronology of detrital zircons from Biru basin of Tibet and its tectonic significance[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2010, 29 (5): 15–22(in Chinese with English abstract).
- [43] Hoffman P F. Did the breakout of Laurentia turn Gondwanaland inside–out?[J]. *Science*, 1991, 252: 1409–1411.
- [44] 徐备. Rodinia 超大陆构造演化研究的新进展和主要目标[J]. *地质科技情报*, 2001, 20(1): 15–19.
Xu Bei. Recent study of the Rodinia Supercontinent evolution and its main goal[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2001, 20 (1): 15–19(in Chinese with English abstract).
- [45] 张泽明,王金丽,沈昆,等.环东冈瓦纳大陆周缘的古生代造山作用:东喜马拉雅构造结南迦巴瓦岩群的岩石学和年代学证据[J]. *岩石学报*, 2008, 24(7): 1627–1637.
Zhang Zheming, Wang Jinli, Shen Kun, et al. Paleozoic circum–Gondwana orogens: Petrology and geochronology of the Namche Barwa Complex in the eastern Himalayan syntaxis, Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24 (7): 1627–1637(in Chinese with English abstract).
- [46] Yoshida M, Upreti B N. Neoproterozoic India within East Gondwana: Constraints from recent geochronologic data from Himalaya[J]. *Gondwana Res.*, 2006, 10: 349–356.
- [47] 王江海.元古宙罗迪尼亚(Rodinia)泛大陆的重建研究[J]. *地学前缘*, 1998, 5(4): 235–242.
Wang Jianghai. New advances in reconstruction of the Proterozoic Rodinia supercontinent[J]. *Earth Science Frontiers*, 1998, 5(4): 235–242(in Chinese with English abstract).
- [48] Li Z X, McA Powell C. An outline of the palaeogeographic evolution of the Australasian region since beginning of the Neoproterozoic[J]. *Earth–Science Review*, 2001, 53: 237–277.
- [49] Kennedy W Q. The structural differentiation of Africa in the Pan–Africa (± 500m.y.) tectonic episode. *Res. Inst.*[J]. *African Geol.*, 1964, Univ. Leeds 8th Ann. Rep., 48.
- [50] 许志琴,杨经绥,梁凤华,等.喜马拉雅地体的泛非—早古生代造山事件年龄记录[J]. *岩石学报*, 2005, 21(1): 1–12.
Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Liang Fenghua, et al. Pan–African and Early Paleozoic orogenic events in the Himalaya terrane: Inference from SHRIMP U–Pb zircon ages[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(1): 1–12(in Chinese with English abstract).
- [51] 郑艺龙,王根厚,郭志文,等.藏北羌塘泛非和印支事件的记录:来自俄久卖变质杂岩地球化学与锆石 U–Pb 年代学的证据[J]. *岩石学报*, 2015, 31(04): 1137–1152.
Zheng Yilong, Wang Genhou, Guo Zhiwen, et al. The record of the Pan–African and the Indosinian tectono–thermal event in Qiangtang terrane, northern Tibet: Evidence from geochemical characteristics and U–Pb geochronology of the metamorphic complex in Ejiumai area[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31 (4): 1137–1152(in Chinese with English abstract).
- [52] 胡培远,李才,苏犁,等.青藏高原羌塘中部蜈蚣山花岗岩片麻岩锆石 U–Pb 定年——泛非与印支事件的年代学记录[J]. *中国地质*, 2010, 37(4): 1050–1061.
Hu Peiyuan, Li Cai, Su Li, et al. Zircon U–Pb dating of granitic gneiss in Wugong Mountain area, central Qiangtang, Qinghai–Tibet Plateau: Age records of Pan–African movement and Indo–China movement[J]. *Geology in China*, 2010, 37(4): 1050–1061 (in Chinese with English abstract).