

文章编号:1672-6561(2012)03-0032-12

塔里木柯坪地区下志留统碎屑锆石 U-Pb 年代学特征及其地质意义

常 健^{1,2}, 邱楠生^{1,2}, 李佳蔚^{1,2}

(1. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249;

2. 中国石油大学(北京)盆地与油藏研究中心, 北京 102249)

摘要:柯坪地区物源及演化与塔里木盆地的古地理位置密切相关。通过对下志留统碎屑锆石的形态特征和 U-Pb 年龄分布特征进行分析, 系统研究了柯坪地区下志留统的物源及其演化。结果表明:柯坪地区下志留统锆石均为岩浆锆石, 锆石 U-Pb 年龄反映的是成岩年龄或结晶年龄, 可有效指示物源区;下志留统柯坪塔格组的物源区主要为沙雅隆起西部、塔中隆起及塔西南前缘隆起, 之后受海侵的影响, 塔中隆起被海水淹没, 下志留统塔塔埃尔塔格组的物源区演变为沙雅隆起西部、塔西南前缘隆起及塔中隆起的南部于田、康西瓦地区;满加尔凹陷的存在使得柯坪地区与塔中、塔东地区的物源具有很大的差异;900~700 Ma 的锆石年龄谱表明, 塔里木地块与冈瓦纳大陆具有一定的亲缘关系。

关键词:碎屑锆石; U-Pb 定年; 志留纪; 物源; 沙雅隆起; 塔中隆起; 柯坪地区; 塔里木盆地

中图分类号: P597.3 **文献标志码:** A

U-Pb Dating of Detrital Zircon from Lower Silurian in Keping Area of Tarim Basin and Its Geological Implication

CHANG Jian^{1,2}, QIU Nan-sheng^{1,2}, LI Jia-wei^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. Basin and Reservoir Research Center, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: The provenance and evolution in Keping Area are closely correlated with the paleogeography of Tarim Basin. The morphology of detrital zircon and distribution characteristics of U-Pb age in Lower Silurian were analyzed, and the provenance and evolution from Lower Silurian in Keping Area were systematically studied. The results showed that the zircons from Lower Silurian in Keping Area were magmatic, zircon U-Pb age represented diagenesis age or crystalline age and effectively indicated the provenance; the provenances in Kalpintag Formation of Lower Silurian were mainly western Shaya Uplift, Tazhong Uplift and the frontal uplift in the southwestern of Tarim Basin, and then Tazhong Uplift was covered by seawater due to the transgression, the provenances in Tataaiertag Formation of Lower Silurian became the western Shaya Uplift, the frontal uplift in the southwestern of Tarim Basin and the Yutian and Kangxiwa Areas in the southern of Tazhong Uplift; the provenance in Keping Area was different with that in the central and eastern of Tarim Basin because of Manjiaer Sag; the zircon ages of 900~700 Ma

收稿日期:2011-11-28

基金项目:国家自然科学基金项目(41072103);中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室开放基金项目(PRPMC2008-01)

作者简介:常 健(1982-),男,河北衡水人,理学博士研究生, E-mail: chj1220@163.com。

illustrated that Tarim Block was related to Gondwanaland.

Key words: detrital zircon; U-Pb dating; Silurian; provenance; Shaya Uplift; Tazhong Uplift; Keping Area; Tarim Basin

0 引言

作为研究沉积盆地构造演化及盆山耦合格局的一种手段,物源分析已越来越完善,主要包括碎屑岩类分析法、元素分析法、古水流分析法、重矿物分析法等。目前,对塔里木盆地柯坪地区志留纪的物源已进行古水流、元素地球化学特征、碎屑岩特征等研究^[1-7]。柯坪地区志留系的物源来自被动大陆边缘,但不同学者对海侵和物源方向的认识存在很大的分歧^[1-2,4]。近年来,U-Pb 定年不仅用于火山岩和变质岩的定年研究^[8-10],一些学者还将其用于探讨沉积盆地碎屑岩的物源区,得到了许多有价值的认识^[11-14]。由于碎屑锆石稳定性强,且 U-Pb 定年测定数据精度高,可以提供物源形成的准确年代,进而研究物源沉积时代和周边大地构造背景。前人曾利用钻井碎屑岩样品的锆石 U-Pb 年龄探讨塔中、塔东及塔北等地区的志留系物质来源^[15-19]。而在柯坪地区及周缘,只对火山岩及变质岩的 U-Pb 年龄进行了深入研究^[20-21],关于沉积碎屑岩的 U-Pb 年龄研究却很少。笔者采集了柯坪地区志留系的露头碎屑岩样品,通过测试碎屑锆石的 U-Pb 年龄,揭示碎屑锆石 U-Pb 年龄的分布特征,确定柯坪地区下志留统的物质来源,同时探讨塔里木地块的亲缘性。

1 区域地质背景

塔里木盆地是在太古界、元古界古老变质基底之上发展起来的多期次叠合盆地,在震旦纪—古生代是一个典型的克拉通盆地。古地磁结果和地质特征显示震旦纪塔里木盆地处于南半球,与扬子、澳大利亚等地块相邻,同属冈瓦纳大陆的一部分^[22]。早古生代时,该盆地脱离冈瓦纳大陆,与西伯利亚、东欧(俄罗斯)、哈萨克斯坦、准噶尔等板块同步在古亚洲洋中向北漂移,但它们均不接壤。中—晚奥陶世是塔里木板块构造演化从稳定到活动的重要转折期。受加里东运动影响,塔里木板块边缘火山活动增强,出现了洋壳消减和陆壳增生^[23]。此时,柯坪地区属于开阔泥质岩—碳酸盐岩台地相,以沉积泥岩、粉砂岩和石灰岩为特征。与中—晚奥陶世相比,早志留世塔里木盆地水体明显变浅,盆地内主要为

一套滨岸相—滨外陆棚相沉积^[24]。

位于塔里木盆地西北缘的柯坪地区是塔里木地台的一部分。其西北以南天山深大断裂为界,东南至柯坪—沙井子断裂,东界到阿合奇—乌什洼地东端、台兰河以西^[4]。柯坪地区志留系广泛分布于阿克苏西部、乌什、阿合奇、柯坪等地区,呈北东—南西向条带状展布(图 1^[25])。柯坪地区下志留统包括柯坪塔格组(S_1k)中上段和塔塔埃尔塔格组(S_1t)。下志留统底部与上奥陶统柯坪塔格组下段整合接触,顶部与上志留统依木干他乌组(S_2y)整合接触。柯坪塔格组中段沉积灰绿色泥页岩、粉砂质泥岩夹粗粉—细杂砂岩和泥质粉砂岩;柯坪塔格组上段沉积灰绿色、暗紫色厚层状粗粉—细砂岩及灰绿色、深灰色页岩,它们属于潮坪—滨外相沉积。塔塔埃尔塔格组分为上、下两段:下段岩性为紫红色、灰绿色薄—中层细砂岩、粉砂岩与紫红色泥岩、粉砂质泥岩互层;上段较粗,为紫红色、浅灰色薄—中层细砂岩、粉砂岩夹紫红色泥页岩;塔塔埃尔塔格组为一套潮坪相的红色碎屑岩沉积(图 2^[26-27])。笔者对柯坪塔格组上段和塔塔埃尔塔格组下段分别采样(图 1、2)。其中,样品 DWG5 取自阿克苏市大湾沟剖面的柯坪塔格组上段,为绿色含沥青砂岩;样品 SHC1 取自阿克苏市沙井子四石厂剖面的塔塔埃尔塔格组下段,为粉砂岩。

2 样品处理与测试

首先,利用重矿物分离原理从样品 DWG5 和 SHC1 中共获得 110 粒锆石颗粒,然后进行 U-Pb 年龄测试。本次锆石 U-Pb 年龄测试是在南京大学内生金属矿床成矿机制国家重点实验室完成的。其主要步骤为:①将锆石颗粒置于双目显微镜下,挑选干净清晰、结晶较好的锆石颗粒置于双面胶上,然后用环氧树脂将其固化,制成靶;②利用砂质和磨料将锆石磨去其体积的 1/3,然后利用抛光机对其进行表面抛光,磨至一半,确保锆石颗粒显现最大面;③利用 JXA-8100 电子探针显微分析仪对锆石颗粒进行阴极发光(CL)图像分析,获得锆石图像,工作电压为 15 kV,电流为 20 nA;④利用 Agilent 7500 激光剥蚀等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)测试 U-Pb 年

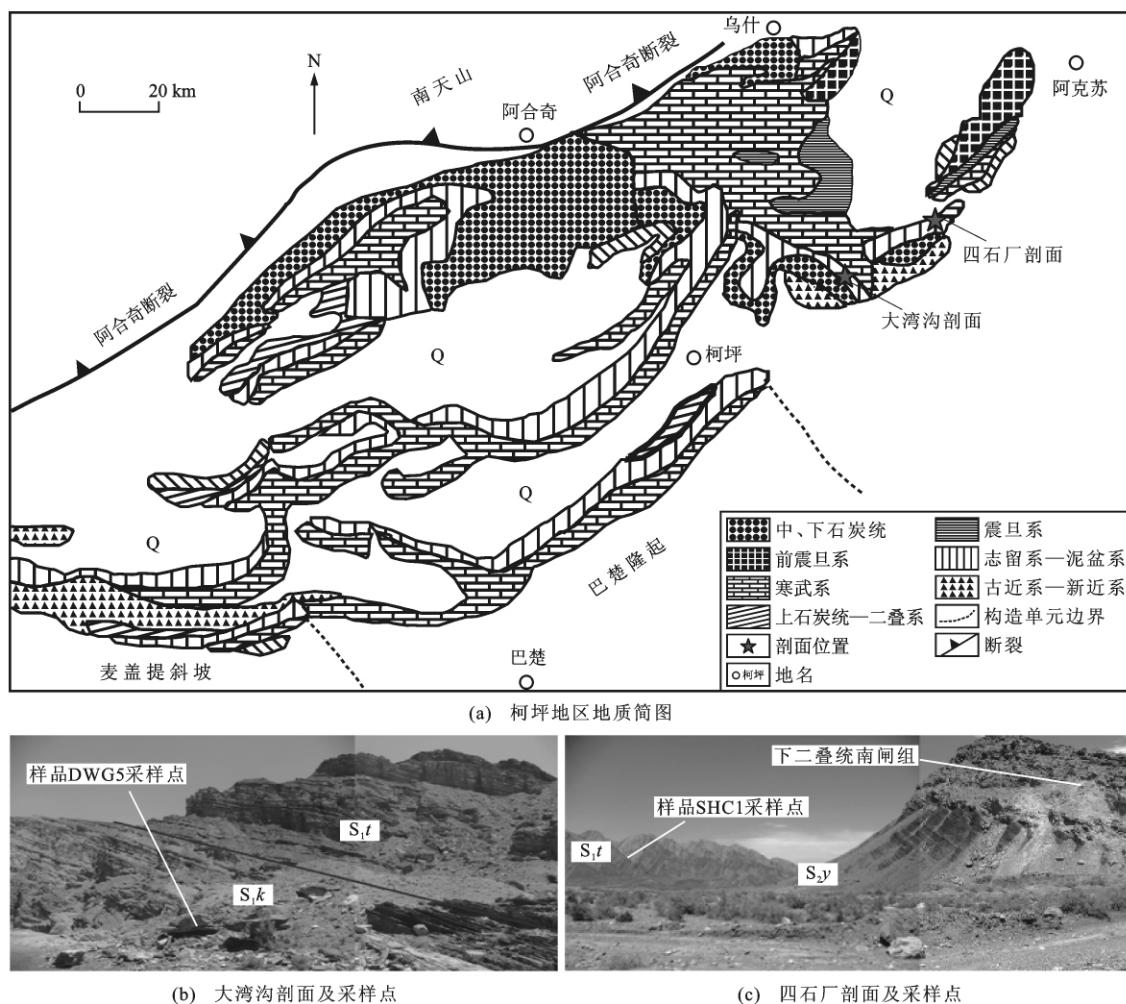


图 1 柯坪地区地质简图、典型剖面及采样点位置

Fig. 1 Geological Map, Typical Sections and Location of Sample Sites in Keping Area

龄。前人已经对试验原理及测试方法做了详细叙述^[28], 笔者不再赘述。本次测试过程中, 仪器的主要参数为: 激光剥蚀系统波长为 $213\ \mu\text{m}$ 、剥蚀孔径 $30\ \mu\text{m}$ 、剥蚀时间为 $80\ \text{s}$ 、背景测量时间为 $40\ \text{s}$ 。利用锆石标样 GJ-1 进行同位素分馏校正, 利用“未知”标样 MT-1 用于监控测试的重现性和仪器的稳定性。利用即时分析软件 GLITTER4.0 对质谱仪分析数据进行计算, 获得相应的同位素比值、年龄以及误差。上述数据采用 3D 坐标法进行普通铅校正^[29]。对于年龄小于 $1\ \text{Ga}$ 的锆石颗粒采用 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 年龄, 大于 $10\ \text{Ga}$ 的锆石颗粒采用 $N(^{207}\text{Pb})/N(^{206}\text{Pb})$ 年龄^[30]。110 粒碎屑锆石的 U-Pb 年龄测试处理结果见表 1。

3 锆石岩石学特征及 U-Pb 年龄分布

柯坪地区下志留统样品的代表性锆石 CL 图像见图 3。锆石直径为 $50\sim 120\ \mu\text{m}$, 颗粒相对较小。

研究表明, 根据锆石的 Th、U 含量(质量分数, 后文同)以及 $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 可以区分岩浆锆石和变质锆石。岩浆锆石 Th、U 含量较高, $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 较大(一般大于 0.4); 而变质锆石的 Th、U 含量低, $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 小(一般小于 0.1)^[31]。基于 $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 可以看出, 所测试的锆石颗粒均为岩浆锆石。根据锆石颗粒的内部结构, 可将锆石颗粒分为 4 种: ①颗粒完整, 自形程度高, 具残留核和明显振荡环带的岩浆锆石, 如颗粒 DWG5-3、SHC1-4(图 3); ②颗粒破碎, 具振荡环带的岩浆锆石, 如颗粒 DWG5-9、DWG5-16(图 3); ③含残留核但无分带或弱分带的岩浆锆石, 如颗粒 DWG5-1、SHC1-6(图 3); ④具有不同内部结构, 被后期变质作用影响的岩浆锆石, 如面状条带(颗粒 DWG5-2)、冷杉叶状分带(颗粒 DWG5-8)、V 字形分带(颗粒 DWG5-30)、弱分带(样品 SHC1-11)(图 3)。另外, 锆石的表面形状与搬运距离有密切的关系。已破碎和磨圆的颗粒表

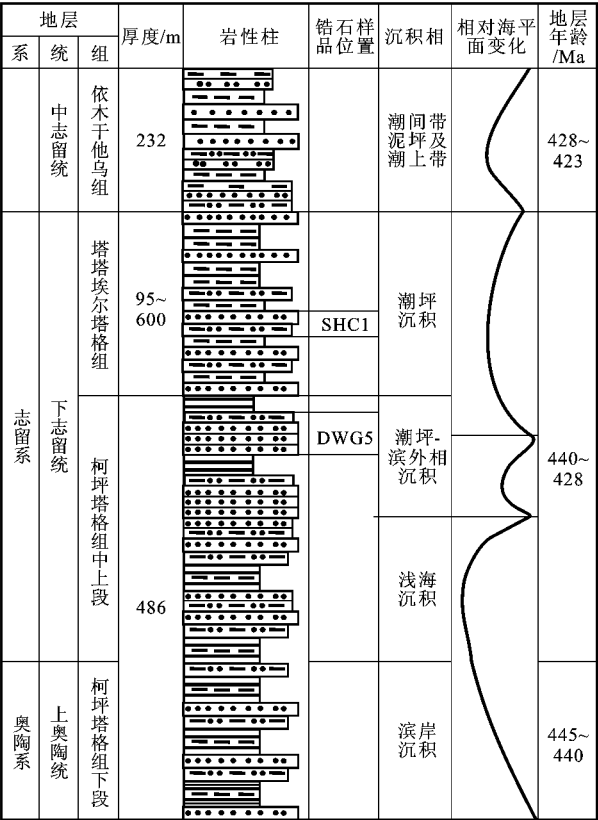


图 2 柯坪地区下志留统剖面

Fig. 2 Profile of Lower Silurian in Keping Area

明,它们曾经历过长距离搬运或沉积循环过程,如颗粒 DWG5-8(图 3);具有溶洞的颗粒表明它们曾被化学物质侵蚀过,如颗粒 DWG5-1(图 3);自形程度高且保存完好的晶体表明它们经历了短距离搬运,如颗粒 SHC1-4(图 3)。

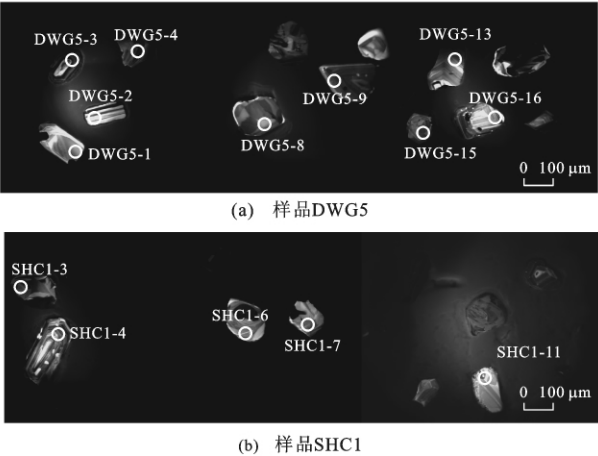


图 3 柯坪地区下志留统碎屑岩代表性锆石 CL 图像

Fig. 3 Typical Zircon CL Images of Detrital Rocks from Lower Silurian in Keping Area

利用 Isoplot 软件绘制样品 DWG5、SHC1 的 U-Pb 年龄谐和图(图 4)。对样品 DWG5 进行 60 颗

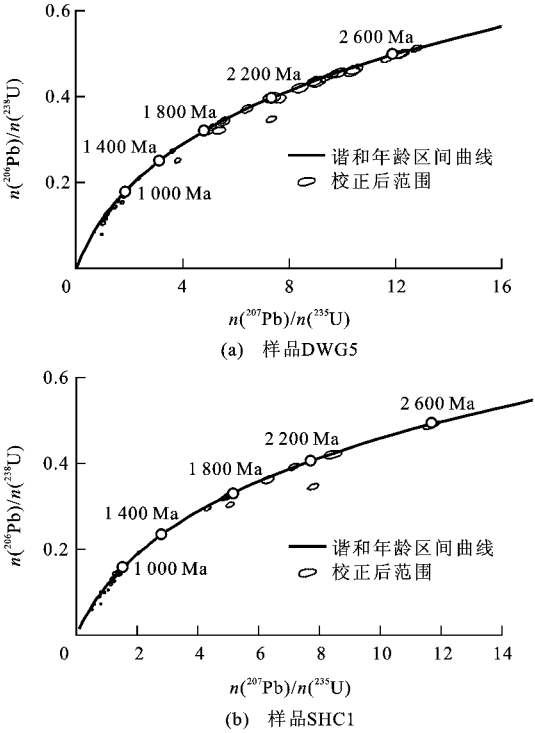


图 4 柯坪地区下志留统碎屑锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 4 U-Pb Concordia Diagrams of Detrital Zircon from Lower Silurian in Keping Area

锆石分析,获得 2 629~524 Ma 的 U-Pb 年龄范围。其中,颗粒 DWG5-10、DWG5-14、DWG5-26、DWG5-48 的不谐和度大于 10%,未落在谐和线上,无地质意义;对样品 SHC1 进行 50 颗锆石分析,获得 2 586~405 Ma 的 U-Pb 年龄范围。其中,颗粒 SHC1-10、SHC1-12、SHC1-20、SHC1-22、SHC1-31 的不谐和度大于 10%,未落在谐和线上,也无地质意义。两个样品中不谐和度小于 10% 的锆石颗粒都落在谐和线上,表明这些锆石颗粒自形成后,其 U-Pb 体系是封闭的,在地质历史时期几乎没有 U 或 Pb 的丢失或加入,锆石年龄反映的是成岩年龄或结晶年龄,对探讨物源区有很好的指示作用。

4 讨论

4.1 柯坪地区锆石 U-Pb 年龄特征及与冈瓦纳大陆的关系

柯坪地区下志留统的锆石 U-Pb 年龄主要集中于 2 600~2 400、2 000~1 700、1 200~1 000、900~700、650~400 Ma 等 5 个年龄段(图 5),分别反映了新太古代、早元古代、中元古代、新元古代和早古生代的构造-热事件。在 2.6~2.4 Ga 期间,塔里木古陆核发生了广泛的裂解作用,形成了大规模的基性岩浆侵入活动[32]。柯坪地区下志留统柯坪塔格

表 1 柯坪地区碎屑锆石 U-Pb 同位素分析

Tab. 1 U-Pb Isotopic Analysis of Detrital Zircon in Keping Area

样品颗粒 编号	$w(\text{Th})/$ $w(\text{U})$	$N(^{207}\text{Pb})/$ $N(^{206}\text{Pb})$	$n(^{207}\text{Pb})/$ $n(^{235}\text{U})$	$n(^{206}\text{Pb})/$ $n(^{238}\text{U})$	$N(^{207}\text{Pb})/$ $N(^{206}\text{Pb})$ 年龄/Ma	$n(^{207}\text{Pb})/$ $n(^{235}\text{U})$ 年龄/Ma	$n(^{206}\text{Pb})/$ $n(^{238}\text{U})$ 年龄/Ma	不谐和 度/%	年龄/Ma
DWG5-1	1.59	$0.111\ 82 \pm 0.001\ 99$	$4.844\ 94 \pm 0.087\ 93$	$0.314\ 26 \pm 0.004\ 19$	$1\ 829 \pm 33$	$1\ 793 \pm 15$	$1\ 762 \pm 21$	4	$1\ 829 \pm 33$
DWG5-2	1.41	$0.164\ 60 \pm 0.002\ 99$	$10.374\ 66 \pm 0.193\ 35$	$0.457\ 25 \pm 0.006\ 36$	$2\ 503 \pm 31$	$2\ 469 \pm 17$	$2\ 427 \pm 28$	3	$2\ 503 \pm 31$
DWG5-3	0.35	$0.071\ 67 \pm 0.001\ 03$	$1.565\ 09 \pm 0.023\ 67$	$0.158\ 37 \pm 0.001\ 92$	977 ± 30	956 ± 9	948 ± 11	1	948 ± 11
DWG5-4	1.23	$0.121\ 51 \pm 0.003\ 67$	$5.379\ 28 \pm 0.158\ 56$	$0.321\ 06 \pm 0.005\ 35$	$1\ 979 \pm 55$	$1\ 882 \pm 25$	$1\ 795 \pm 26$	10	$1\ 979 \pm 55$
DWG5-5	0.52	$0.066\ 75 \pm 0.001\ 04$	$1.167\ 75 \pm 0.019\ 10$	$0.126\ 88 \pm 0.001\ 57$	830 ± 33	786 ± 9	770 ± 9	2	770 ± 9
DWG5-6	0.15	$0.074\ 06 \pm 0.001\ 93$	$1.456\ 90 \pm 0.037\ 87$	$0.142\ 68 \pm 0.002\ 21$	$1\ 043 \pm 54$	913 ± 16	860 ± 12	6	860 ± 12
DWG5-7	0.89	$0.077\ 79 \pm 0.001\ 75$	$1.793\ 77 \pm 0.039\ 85$	$0.167\ 22 \pm 0.002\ 24$	$1\ 142 \pm 46$	$1\ 043 \pm 14$	997 ± 12	5	997 ± 12
DWG5-8	0.75	$0.068\ 27 \pm 0.001\ 52$	$1.200\ 71 \pm 0.026\ 62$	$0.127\ 56 \pm 0.001\ 70$	877 ± 47	801 ± 12	774 ± 10	3	774 ± 10
DWG5-9	0.98	$0.064\ 84 \pm 0.002\ 38$	$1.023\ 22 \pm 0.036\ 27$	$0.114\ 45 \pm 0.001\ 88$	769 ± 79	716 ± 18	699 ± 11	2	699 ± 11
DWG5-10	0.90	$0.088\ 73 \pm 0.002\ 50$	$0.956\ 31 \pm 0.026\ 44$	$0.078\ 50 \pm 0.001\ 32$	$1\ 398 \pm 55$	681 ± 14	487 ± 8	40	—
DWG5-11	0.80	$0.071\ 02 \pm 0.001\ 83$	$1.133\ 29 \pm 0.028\ 85$	$0.115\ 75 \pm 0.001\ 71$	958 ± 54	769 ± 14	706 ± 10	9	706 ± 10
DWG5-12	0.63	$0.075\ 34 \pm 0.001\ 12$	$1.844\ 25 \pm 0.029\ 44$	$0.177\ 55 \pm 0.002\ 28$	$1\ 078 \pm 31$	$1\ 061 \pm 11$	$1\ 054 \pm 12$	2	$1\ 078 \pm 31$
DWG5-13	0.65	$0.081\ 96 \pm 0.001\ 09$	$2.370\ 44 \pm 0.034\ 64$	$0.209\ 78 \pm 0.002\ 65$	$1\ 245 \pm 27$	$1\ 234 \pm 10$	$1\ 228 \pm 14$	1	$1\ 245 \pm 27$
DWG5-14	0.30	$0.081\ 39 \pm 0.001\ 95$	$1.722\ 11 \pm 0.040\ 87$	$0.153\ 47 \pm 0.002\ 29$	$1\ 231 \pm 48$	$1\ 017 \pm 15$	920 ± 13	11	—
DWG5-15	1.40	$0.067\ 11 \pm 0.002\ 13$	$1.214\ 80 \pm 0.037\ 74$	$0.131\ 29 \pm 0.002\ 11$	841 ± 68	807 ± 17	795 ± 12	2	795 ± 12
DWG5-16	1.19	$0.064\ 94 \pm 0.001\ 21$	$1.087\ 65 \pm 0.020\ 89$	$0.121\ 48 \pm 0.001\ 62$	772 ± 40	747 ± 10	739 ± 9	1	739 ± 9
DWG5-17	3.44	$0.065\ 09 \pm 0.002\ 46$	$1.131\ 94 \pm 0.041\ 58$	$0.126\ 14 \pm 0.002\ 17$	777 ± 81	769 ± 20	766 ± 12	0	766 ± 12
DWG5-18	1.36	$0.109\ 82 \pm 0.002\ 26$	$4.842\ 42 \pm 0.100\ 09$	$0.319\ 83 \pm 0.004\ 71$	$1\ 796 \pm 38$	$1\ 792 \pm 17$	$1\ 789 \pm 23$	0	$1\ 796 \pm 38$
DWG5-19	1.15	$0.173\ 95 \pm 0.002\ 11$	$11.731\ 75 \pm 0.160\ 13$	$0.489\ 19 \pm 0.006\ 19$	$2\ 596 \pm 21$	$2\ 583 \pm 13$	$2\ 567 \pm 27$	1	$2\ 596 \pm 21$
DWG5-20	0.33	$0.178\ 43 \pm 0.002\ 14$	$12.289\ 59 \pm 0.166\ 33$	$0.499\ 59 \pm 0.006\ 30$	$2\ 638 \pm 20$	$2\ 627 \pm 13$	$2\ 612 \pm 27$	1	$2\ 638 \pm 20$
DWG5-21	0.92	$0.071\ 76 \pm 0.002\ 06$	$1.562\ 37 \pm 0.044\ 39$	$0.157\ 94 \pm 0.002\ 50$	979 ± 60	955 ± 18	945 ± 14	1	945 ± 14
DWG5-22	0.79	$0.155\ 46 \pm 0.001\ 99$	$9.686\ 01 \pm 0.141\ 10$	$0.451\ 93 \pm 0.005\ 98$	$2\ 407 \pm 22$	$2\ 405 \pm 13$	$2\ 404 \pm 27$	0	$2\ 407 \pm 22$
DWG5-23	1.22	$0.096\ 13 \pm 0.001\ 46$	$3.621\ 54 \pm 0.059\ 75$	$0.273\ 28 \pm 0.003\ 69$	$1\ 550 \pm 29$	$1\ 554 \pm 13$	$1\ 557 \pm 19$	0	$1\ 550 \pm 29$
DWG5-24	1.14	$0.065\ 83 \pm 0.001\ 11$	$1.140\ 85 \pm 0.020\ 48$	$0.125\ 70 \pm 0.001\ 69$	801 ± 36	773 ± 10	763 ± 10	1	763 ± 10
DWG5-25	1.45	$0.068\ 09 \pm 0.001\ 26$	$1.315\ 53 \pm 0.025\ 50$	$0.140\ 14 \pm 0.001\ 93$	871 ± 39	853 ± 11	845 ± 11	1	845 ± 11
DWG5-26	1.38	$0.110\ 18 \pm 0.002\ 15$	$3.812\ 48 \pm 0.076\ 19$	$0.251\ 00 \pm 0.003\ 69$	$1\ 802 \pm 36$	$1\ 595 \pm 16$	$1\ 444 \pm 19$	25	—
DWG5-27	0.73	$0.067\ 62 \pm 0.001\ 05$	$1.163\ 08 \pm 0.019\ 57$	$0.124\ 75 \pm 0.001\ 66$	857 ± 33	783 ± 9	758 ± 10	3	758 ± 10
DWG5-28	0.96	$0.109\ 20 \pm 0.002\ 44$	$4.782\ 52 \pm 0.107\ 30$	$0.317\ 66 \pm 0.004\ 98$	$1\ 786 \pm 42$	$1\ 782 \pm 19$	$1\ 778 \pm 24$	0	$1\ 786 \pm 42$
DWG5-29	1.93	$0.068\ 55 \pm 0.004\ 76$	$0.994\ 16 \pm 0.065\ 92$	$0.105\ 20 \pm 0.002\ 85$	885 ± 148	701 ± 34	645 ± 17	9	645 ± 17
DWG5-30	0.66	$0.153\ 79 \pm 0.001\ 83$	$9.397\ 89 \pm 0.130\ 67$	$0.443\ 26 \pm 0.005\ 74$	$2\ 389 \pm 21$	$2\ 378 \pm 13$	$2\ 365 \pm 26$	1	$2\ 389 \pm 21$
DWG5-31	1.31	$0.150\ 28 \pm 0.002\ 41$	$8.999\ 79 \pm 0.153\ 95$	$0.434\ 39 \pm 0.006\ 21$	$2\ 349 \pm 28$	$2\ 338 \pm 16$	$2\ 325 \pm 28$	1	$2\ 349 \pm 28$
DWG5-32	1.13	$0.065\ 24 \pm 0.001\ 37$	$1.163\ 06 \pm 0.025\ 00$	$0.129\ 30 \pm 0.001\ 84$	782 ± 45	783 ± 12	784 ± 11	0	784 ± 11
DWG5-33	0.99	$0.068\ 03 \pm 0.001\ 70$	$1.188\ 25 \pm 0.029\ 72$	$0.126\ 68 \pm 0.001\ 91$	869 ± 53	795 ± 14	769 ± 11	3	769 ± 11
DWG5-34	3.26	$0.125\ 58 \pm 0.002\ 79$	$6.424\ 78 \pm 0.143\ 50$	$0.371\ 08 \pm 0.005\ 93$	$2\ 037 \pm 40$	$2\ 036 \pm 20$	$2\ 034 \pm 28$	0	$2\ 037 \pm 40$
DWG5-35	1.39	$0.075\ 35 \pm 0.001\ 72$	$1.847\ 21 \pm 0.042\ 73$	$0.177\ 82 \pm 0.002\ 63$	$1\ 078 \pm 47$	$1\ 062 \pm 15$	$1\ 055 \pm 14$	2	$1\ 078 \pm 47$
DWG5-36	1.18	$0.164\ 03 \pm 0.003\ 17$	$10.466\ 85 \pm 0.206\ 65$	$0.462\ 84 \pm 0.007\ 28$	$2\ 498 \pm 33$	$2\ 477 \pm 18$	$2\ 452 \pm 32$	2	$2\ 498 \pm 33$
DWG5-37	1.45	$0.065\ 49 \pm 0.002\ 49$	$1.136\ 01 \pm 0.042\ 19$	$0.125\ 82 \pm 0.002\ 21$	790 ± 82	771 ± 20	764 ± 13	1	764 ± 13
DWG5-38	0.64	$0.062\ 88 \pm 0.001\ 34$	$0.967\ 92 \pm 0.021\ 14$	$0.111\ 65 \pm 0.001\ 58$	704 ± 46	687 ± 11	682 ± 9	1	682 ± 9

续表 1

样品颗粒 编号	$w(\text{Th})/$ $w(\text{U})$	$N(^{207}\text{Pb})/$ $N(^{206}\text{Pb})$	$n(^{207}\text{Pb})/$ $n(^{235}\text{U})$	$n(^{206}\text{Pb})/$ $n(^{238}\text{U})$	$N(^{207}\text{Pb})/$ $N(^{206}\text{Pb})$ 年龄/Ma	$n(^{207}\text{Pb})/$ $n(^{235}\text{U})$ 年龄/Ma	$n(^{206}\text{Pb})/$ $n(^{238}\text{U})$ 年龄/Ma	不谐和 度/%	年龄/Ma
DWG5-39	1.51	0.065 97±0.002 09	1.178 48±0.036 89	0.129 57±0.002 11	805±68	791±17	785±12	1	785±12
DWG5-40	1.10	0.113 01±0.001 88	5.125 42±0.090 58	0.328 98±0.004 63	1 848±31	1 840±15	1 833±22	1	1 848±31
DWG5-41	0.72	0.066 48±0.001 23	1.182 50±0.022 86	0.129 01±0.001 78	822±40	792±11	782±10	1	782±10
DWG5-42	1.05	0.058 79±0.001 26	0.686 66±0.015 07	0.084 72±0.001 19	559±48	531±9	524±7	1	524±7
DWG5-43	0.89	0.134 52±0.004 15	7.365 39±0.220 18	0.397 14±0.007 78	2 158±55	2 157±27	2 156±36	0	2 158±55
DWG5-44	2.42	0.145 32±0.003 55	8.416 35±0.203 55	0.420 07±0.007 27	2 292±43	2 277±22	2 261±33	1	2 292±43
DWG5-45	2.31	0.150 96±0.003 90	9.044 40±0.228 97	0.434 56±0.007 88	2 357±45	2 343±23	2 326±35	1	2 357±45
DWG5-46	0.71	0.067 28±0.001 29	1.265 44±0.025 23	0.136 43±0.001 90	846±41	830±11	824±11	1	824±11
DWG5-47	3.78	0.062 48±0.001 97	0.911 97±0.028 31	0.105 87±0.001 73	691±69	658±15	649±10	1	649±10
DWG5-48	1.01	0.153 49±0.002 45	7.342 93±0.124 97	0.346 99±0.004 92	2 385±28	2 154±15	1 920±24	24	—
DWG5-49	0.74	0.112 44±0.002 85	4.953 63±0.124 35	0.319 55±0.005 35	1 839±47	1 811±21	1 788±26	3	1 839±47
DWG5-50	0.51	0.116 65±0.001 74	5.534 04±0.090 10	0.344 11±0.004 69	1 906±27	1 906±14	1 906±22	0	1 906±27
DWG5-51	1.26	0.157 69±0.002 97	9.896 36±0.191 41	0.455 22±0.006 97	2 431±33	2 425±18	2 418±31	1	2 431±33
DWG5-52	2.05	0.071 93±0.001 41	1.568 86±0.031 89	0.158 21±0.002 21	984±41	958±13	947±12	1	947±12
DWG5-53	0.51	0.077 11±0.001 36	1.971 38±0.036 62	0.185 43±0.002 54	1 124±36	1 106±13	1 097±14	2	1 124±36
DWG5-54	0.38	0.140 98±0.002 89	7.658 56±0.158 43	0.394 03±0.006 17	2 239±36	2 192±19	2 141±29	5	2 239±36
DWG5-55	0.76	0.065 92±0.001 41	1.176 73±0.025 71	0.129 48±0.001 82	804±46	790±12	785±10	1	785±10
DWG5-56	1.98	0.064 65±0.002 43	1.088 04±0.040 11	0.122 08±0.002 07	763±81	748±20	743±12	1	743±12
DWG5-57	2.64	0.067 00±0.002 00	1.241 88±0.036 62	0.134 46±0.002 14	838±64	820±17	813±12	1	813±12
DWG5-58	0.32	0.177 41±0.002 20	12.209 77±0.173 77	0.499 21±0.006 52	2 629±21	2 621±13	2 610±28	1	2 629±21
DWG5-59	0.25	0.076 31±0.001 04	1.954 30±0.029 81	0.185 76±0.002 42	1 103±28	1 100±10	1 098±13	0	1 103±28
DWG5-60	1.43	0.117 99±0.003 21	5.551 67±0.147 87	0.341 28±0.005 98	1 926±50	1 909±23	1 893±29	2	1 926±50
SHC1-1	1.42	0.145 23±0.003 20	8.433 28±0.185 85	0.421 22±0.006 17	2 291±39	2 279±20	2 266±28	1	2 291±39
SHC1-2	1.55	0.105 87±0.001 52	4.320 39±0.067 87	0.296 08±0.003 89	1 729±27	1 697±13	1 672±19	3	1 729±27
SHC1-3	1.24	0.071 34±0.000 97	1.566 38±0.024 07	0.159 31±0.002 10	967±28	957±10	953±12	0	953±12
SHC1-4	1.34	0.066 99±0.000 91	1.234 63±0.018 84	0.133 73±0.001 74	837±29	816±9	809±10	1	809±10
SHC1-5	2.36	0.059 98±0.000 85	0.517 22±0.008 23	0.062 56±0.000 82	603±31	423±6	391±5	8	391±5
SHC1-6	3.79	0.062 25±0.001 63	0.770 86±0.020 24	0.089 84±0.001 30	683±57	580±12	555±8	5	555±8
SHC1-7	2.93	0.132 02±0.001 90	7.151 13±0.113 52	0.393 02±0.005 37	2 125±26	2 130±14	2 137±25	—1	2 125±26
SHC1-8	2.33	0.110 24±0.001 43	4.873 56±0.072 30	0.320 75±0.004 24	1 803±24	1 798±12	1 793±21	1	1 803±24
SHC1-9	1.07	0.067 37±0.000 98	1.239 25±0.019 54	0.133 45±0.001 71	849±31	819±9	808±10	1	808±10
SHC1-10	1.38	0.120 65±0.001 83	5.061 87±0.081 25	0.304 28±0.003 93	1 966±28	1 830±14	1712±19	15	—
SHC1-11	1.75	0.172 88±0.002 24	11.671 11±0.171 11	0.489 67±0.006 55	2 586±22	2 578±14	2 569±28	1	2 586±22
SHC1-12	2.21	0.062 70±0.001 67	0.519 07±0.013 82	0.060 05±0.000 89	698±58	425±9	376±5	13	—
SHC1-13	3.94	0.126 09±0.002 48	6.302 87±0.126 60	0.362 56±0.005 50	2 044±36	2 019±18	1 994±26	3	2 044±36
SHC1-14	2.47	0.068 34±0.002 14	1.175 04±0.036 32	0.124 72±0.001 98	879±66	789±17	758±11	4	758±11
SHC1-15	1.14	0.072 17±0.001 27	1.638 31±0.030 27	0.164 66±0.002 25	991±37	985±12	983±12	0	983±12
SHC1-16	1.35	0.112 04±0.001 42	4.984 55±0.072 25	0.322 70±0.004 21	1 833±23	1 817±12	1 803±21	2	1 833±23

续表 1

样品颗粒 编号	$w(\text{Th})/$ $w(\text{U})$	$N(^{207}\text{Pb})/$ $N(^{206}\text{Pb})$	$n(^{207}\text{Pb})/$ $n(^{235}\text{U})$	$n(^{206}\text{Pb})/$ $n(^{238}\text{U})$	$N(^{207}\text{Pb})/$ $N(^{206}\text{Pb})$ 年龄/Ma	$n(^{207}\text{Pb})/$ $n(^{235}\text{U})$ 年龄/Ma	$n(^{206}\text{Pb})/$ $n(^{238}\text{U})$ 年龄/Ma	不谐和 度/%	年龄/Ma
SHC1-17	1.60	0.067 89±0.000 95	1.185 47±0.018 49	0.126 64±0.001 65	865±30	794±9	769±9	3	769±9
SHC1-18	0.89	0.077 78±0.000 94	2.071 96±0.029 08	0.193 22±0.002 48	1 141±25	1 140±10	1 139±13	0	1 141±25
SHC1-19	1.28	0.067 26±0.001 32	1.270 03±0.025 86	0.136 97±0.001 89	846±42	832±12	828±11	0	828±11
SHC1-20	3.98	0.163 24±0.002 10	7.791 34±0.113 36	0.346 20±0.004 59	2 489±22	2 207±13	1 916±22	30	—
SHC1-21	1.31	0.056 83±0.001 20	0.588 67±0.012 83	0.075 13±0.001 03	485±48	470±8	467±6	1	467±6
SHC1-22	1.86	0.071 88±0.001 17	1.046 57±0.018 16	0.105 61±0.001 42	983±34	727±9	647±8	12	
SHC1-23	1.90	0.068 47±0.005 49	1.356 77±0.104 19	0.143 74±0.004 31	883±171	870±45	866±24	0	866±24
SHC1-24	1.76	0.112 50±0.001 78	5.072 13±0.085 95	0.327 02±0.004 52	1 840±29	1 831±14	1 824±22	1	1 840±29
SHC1-25	2.96	0.111 63±0.002 25	4.988 12±0.102 85	0.324 10±0.004 84	1 826±37	1 817±17	1 810±24	1	1 826±37
SHC1-26	4.55	0.057 68±0.001 15	0.791 87±0.016 34	0.099 58±0.001 36	518±45	592±9	612±8	-3	612±8
SHC1-27	3.00	0.069 77±0.003 04	1.213 21±0.050 93	0.126 12±0.002 51	922±92	807±23	766±14	5	766±14
SHC1-28	2.32	0.064 38±0.001 57	1.159 97±0.028 56	0.130 69±0.001 91	754±53	782±13	792±11	-1	792±11
SHC1-29	2.80	0.060 24±0.002 06	0.604 94±0.020 44	0.072 84±0.001 17	612±76	480±13	453±7	6	453±7
SHC1-30	2.83	0.069 40±0.001 84	1.386 05±0.036 66	0.144 86±0.002 21	911±56	883±16	872±12	1	872±12
SHC1-31	14.08	0.080 20±0.001 45	0.810 44±0.015 24	0.073 30±0.001 01	1 202±36	603±9	456±6	32	—
SHC1-32	10.40	0.065 43±0.001 76	1.206 65±0.032 63	0.133 76±0.001 98	788±58	804±15	809±11	-1	809±11
SHC1-33	2.31	0.056 18±0.001 03	0.565 10±0.010 83	0.072 96±0.000 98	459±42	455±7	454±6	0	454±6
SHC1-34	3.20	0.066 09±0.001 16	1.193 94±0.022 16	0.131 03±0.001 77	809±38	798±10	794±10	1	794±10
SHC1-35	2.19	0.056 36±0.000 89	0.568 25±0.009 69	0.073 14±0.000 96	467±36	457±6	455±6	0	455±6
SHC1-36	3.08	0.056 24±0.001 30	0.541 49±0.012 67	0.069 83±0.000 99	462±52	439±8	435±6	1	435±6
SHC1-37	1.72	0.067 78±0.000 99	1.342 61±0.021 49	0.143 68±0.001 88	862±31	864±9	865±11	0	865±11
SHC1-38	1.78	0.065 68±0.001 58	1.128 69±0.027 34	0.124 66±0.001 84	796±52	767±13	757±11	1	757±11
SHC1-39	1.78	0.069 59±0.001 87	1.141 42±0.030 47	0.118 97±0.001 84	916±57	773±14	725±11	7	725±11
SHC1-40	3.53	0.056 37±0.001 88	0.503 34±0.016 51	0.064 76±0.001 03	467±76	414±11	405±6	2	405±6
SHC1-41	1.76	0.067 44±0.000 87	1.309 99±0.019 11	0.140 89±0.001 80	851±27	850±8	850±10	0	850±10
SHC1-42	1.36	0.066 80±0.001 56	1.239 66±0.029 22	0.134 60±0.001 96	832±50	819±13	814±11	1	814±11
SHC1-43	2.01	0.056 27±0.001 28	0.588 88±0.013 62	0.075 90±0.001 05	463±52	470±9	472±6	0	472±6
SHC1-44	1.00	0.066 52±0.001 06	1.275 30±0.021 74	0.139 05±0.001 83	823±34	835±10	839±10	0	839±10
SHC1-45	1.59	0.067 09±0.001 00	1.258 78±0.020 35	0.136 09±0.001 77	841±32	827±9	823±10	0	823±10
SHC1-46	1.37	0.066 94±0.001 58	0.923 04±0.021 85	0.100 02±0.001 46	836±50	664±12	615±9	8	615±9
SHC1-47	1.39	0.067 30±0.001 23	1.279 76±0.024 35	0.137 93±0.001 87	847±39	837±11	833±11	0	833±11
SHC1-48	1.69	0.072 52±0.001 11	1.661 36±0.027 43	0.166 17±0.002 19	1 001±32	994±10	991±12	0	991±12
SHC1-49	0.64	0.068 05±0.000 97	1.330 26±0.020 91	0.141 79±0.001 84	870±30	859±9	855±10	0	855±10
SHC1-50	1.37	0.145 23±0.003 20	8.433 28±0.185 85	0.421 22±0.006 17	2 291±39	2 279±20	2 266±28	1	2 291±39

注： $w(\cdot)$ 为元素的含量； $N(\cdot)/N(\cdot)$ 为同一元素同位素比值， $N(\cdot)$ 为该元素的原子数； $n(\cdot)/n(\cdot)$ 为不同元素同位素比值， $n(\cdot)$

为元素的物质的量；“—”表示当不谐和度大于 10% 时，其 3 种 U-Pb 年龄均不能反映样品的真实年龄。

组地层中，U-Pb 年龄为 2.6~2.4 Ga 的锆石极有可能来自这些岩浆岩，对研究古陆核裂解具有重要的指示意义。另外，柯坪地区下志留统 U-Pb 年龄为 900~700 Ma 的锆石含量最多，这类锆石在样品 DWG5、SHC1 分别占 37.5% 和 44.4%，这表明塔里木地块可能与冈瓦纳大陆具有亲缘性。因为在亲冈瓦纳大陆的地块（如华南、秦岭、祁连地块等）中，有大量新元古代构造—热事件形成的岩浆岩^[33-36]。

4.2 利用锆石年龄推测沉积物源区

志留系中的交错层理、波痕及沟槽等特征表明，柯坪地区在志留纪时期具有多个物源方向^[37]。本研究的 U-Pb 年龄分布范围宽且具有多个峰值，也表明柯坪地区含有多物源区（图 5）。柯坪地区下志留统 U-Pb 年龄为 900~700 Ma 的锆石含量最多，与塔北和塔中地区锆石含量的分布特征类似（图 5）^[16-17]。塔中地区 U-Pb 年龄为 900~700 Ma

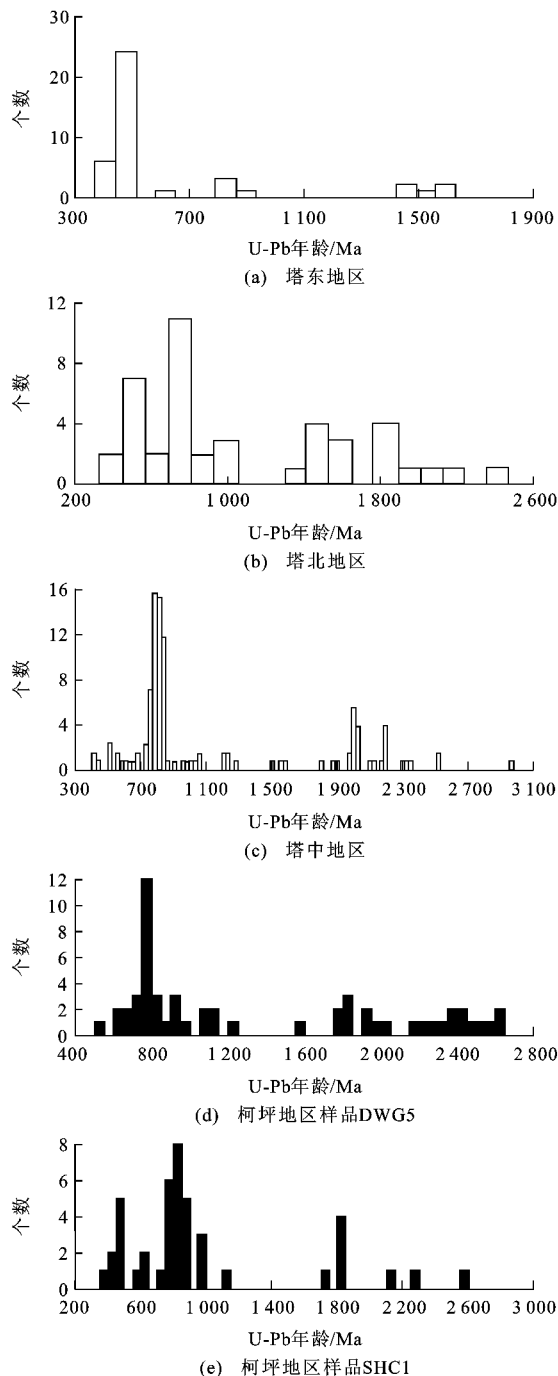


图5 塔里木盆地不同地区下志留统碎屑锆石 U-Pb 年龄概率分布

Fig. 5 U-Pb Age Probability Diagrams of Detrital Zircon from Lower Silurian in Different Areas of Tarim Basin

的锆石主要来自塔西南隆起,而塔北地区这个年龄段的锆石来自库车—塔北前寒武纪基底^[16]。从地理位置看,柯坪地区这个年龄段的锆石应与塔北地区来自同一个物源区。塔东地区碎屑岩样品的锆石年龄谱相对简单,大部分锆石颗粒的 U-Pb 年龄集中于 500~450 Ma,其物源主要来自于阿尔金地区奥陶纪火成岩^[15,18]。在柯坪地区下志留统塔塔埃

尔塔格组和塔北地区也见到少量 U-Pb 年龄介于 500~450 Ma 的锆石,但它们不可能来自阿尔金地区的火成岩。因为塔里木盆地北部与阿尔金山之间隔着前寒武纪形成的巨大满加尔凹陷,在志留纪时,满加尔凹陷为塔里木盆地的沉降中心,沉积了厚达 1 900 m 的沉积物^[24]。而在塔里木盆地南缘的于田和康西瓦地区发现的这个年龄段的火山岩有可能为其提供物源^[38-39]。另外,塔西南前缘隆起也是柯坪地区早志留世的一个主要物源区^[23]。结合前人对塔里木盆地早志留世沉积环境的研究成果^[27],认为柯坪地区下志留统的物源主要来自沙雅隆起西部、塔中隆起及塔西南前缘隆起(图 6)。柯坪塔格组到塔塔埃尔塔格组时期,海侵范围扩大,塔中隆起的剥蚀边界向南移动,塔里木南缘于田、康西瓦地区出露的火山岩直接为柯坪地区提供物源(图 6)。柯坪塔格组地层内不含年龄为 500~450 Ma 的锆石,而塔塔埃尔塔格组地层含有这个年龄段的锆石,有力地证明了塔里木南缘于田、康西瓦物源区。

5 结 语

(1)柯坪地区下志留统碎屑锆石均为岩浆锆石,其 U-Pb 年龄反映的是成岩年龄或结晶年龄,可有效地指示物源区。

(2)柯坪地区下志留统碎屑锆石 U-Pb 年龄谱分布很宽,主要集中在 2 600~2 400、2 000~1 700、1 200~1 000、900~700、650~400 Ma 等 5 个年龄段,反映了塔里木地块曾经历过多期次构造—热事件。其中分布最密集的 900~700 Ma 的年龄谱表明,塔里木地块与冈瓦纳大陆具有一定的亲缘关系。

(3)沙雅隆起西部、塔中隆起及塔西南前缘隆起在早志留世柯坪塔格组时期是柯坪地区主要的物源供应区。受海侵的影响,塔塔埃尔塔格组的物源区有所变化,塔中隆起由于被海水覆盖,无法提供物源,塔中隆起的南部于田、康西瓦地区此时为柯坪地区直接提供物源。由于满加尔凹陷的存在,使得塔里木盆地不同地区早志留世的物源存在差异,而塔北地区与柯坪地区具有一定的相似性。

野外工作得到了中国石油化工集团公司西北石油局的大力支持,河北省区域地质矿产调查所为锆石晶体的分离与富集提供了帮助,样品制备和测试得到了南京大学胡文瑄教授、张文兰高级工程师、姚素平教授及武兵工程师等的帮助和指导,中国石油大学(北京)李真老师在数据处理和分析方面给予了

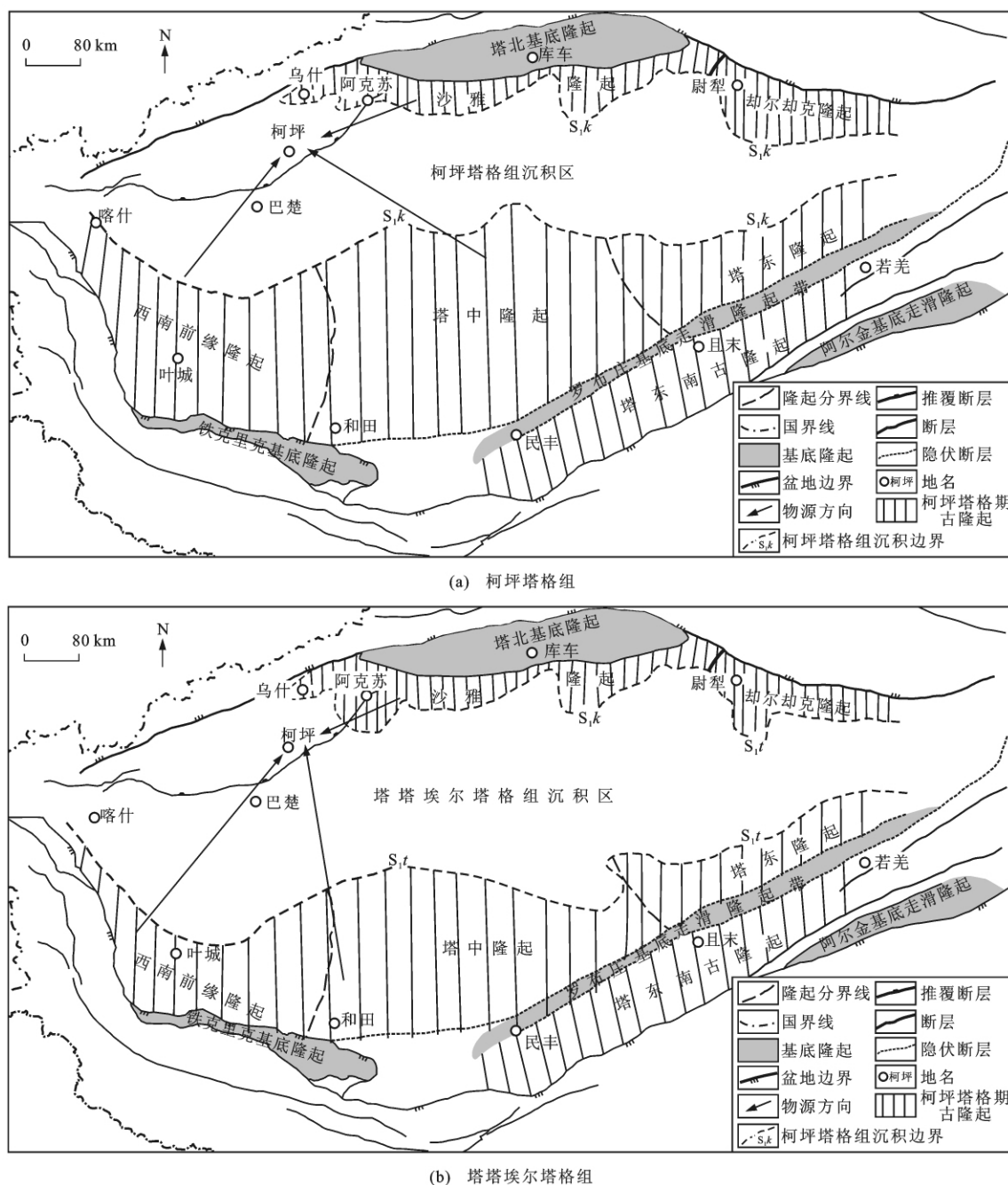


图 6 塔里木盆地早志留世沉积边界、古隆起及物源区

Fig. 6 Sedimentary Boundaries, Paleo-uplifts and Provenances During Early Silurian in Tarim Basin

大力帮助,在此一并致谢!

参考文献:

References:

- [1] 周新源,李曰俊,王招明,等. 塔里木盆地西北缘下志留统沉积构造背景初探[J]. 地质科学,2002,37(增): 57-63.
ZHOU Xin-yuan, LI Yue-jun, WANG Zhao-ming, et al. A Preliminary Study on Tectonic Setting of the Lower Silurian in NW Tarim [J]. Chinese Journal of

Geology, 2002, 37(S): 57-63.

- [2] 郭战峰,刘新民,刘 颀. 塔里木盆地柯坪、巴楚断隆志留—泥盆系砂岩碎屑组分与构造背景关系分析[J]. 河南石油,2004,18(4): 7-10.
GUO Zhan-feng, LIU Xin-min, LIU Jie. An Analysis of Relationship Between Clastic Constituents of Silurian-Devonian Sandstone and Structural Settings in Keping and Bachu Faulted Uplifts, Tarim Basin [J]. Henan Petroleum, 2004, 18(4): 7-10.
- [3] 张金亮,张 鑫. 塔里木盆地志留系古海洋沉积环境

- 的元素地球化学特征[J]. 中国海洋大学学报, 2006, 36(2): 200-208.
- ZHANG Jin-liang, ZHANG Xin. The Element Geochemical Features of Ancient Oceanic Sedimentary Environments in the Silurian Period in the Tarim Basin[J]. Periodical of Ocean University of China, 2006, 36(2): 200-208.
- [4] 张鑫, 张金亮, 覃利娟. 塔里木盆地志留系柯坪塔格组砂岩岩石学特征与物源分析[J]. 矿物岩石, 2007, 27(3): 106-115.
- ZHANG Xin, ZHANG Jin-liang, QIN Li-juan. Petrological Characteristics and Provenance Analysis of Sandstones in the Kepingtage Formation of Silurian in the Tarim Basin[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2007, 27(3): 106-115.
- [5] 郭倩, 蒲仁海, 杨林, 等. 塔里木盆地塔河地区志留系上倾尖灭圈闭油气成藏[J]. 石油实验地质, 2011, 33(2): 120-123.
- GUO Qian, PU Ren-hai, YANG Lin, et al. Hydrocarbon Accumulation in Silurian Updip Pinchout Traps, Tahe Region, Tarim Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2011, 33(2): 120-123.
- [6] 马晓娟, 张忠民, 陈占坤. 塔河南部志留系柯坪塔格组层序地层及沉积相[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2011, 33(3): 35-40.
- MA Xiao-juan, ZHANG Zhong-min, CHEN Zhan-kun. Stratigraphic Sequence and Sedimentary Facies of Kepingtage Formation in the Silurian at the South Area of Tahe Oilfield[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science and Technology Edition, 2011, 33(3): 35-40.
- [7] 楼仁兴, 董清水, 聂辉, 等. 塔里木盆地巴楚—麦盖提地区志留—泥盆纪岩相古地理特征及油气勘探前景[J]. 石油实验地质, 2011, 33(6): 580-586.
- LOU Ren-xing, DONG Qing-shui, NIE Hui, et al. Lithofacies-paleogeography and Petroleum Exploration Potential in Silurian-Devonian, Bachu-Maigaiti Region, Tarim Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2011, 33(6): 580-586.
- [8] 徐学义, 马中平, 夏林圻, 等. 北天山巴音沟蛇绿岩形成时代的精确厘定及意义[J]. 地球科学与环境学报, 2005, 27(2): 17-20.
- XU Xue-yi, MA Zhong-ping, XIA Lin-qi, et al. Accurate Dating of Bayingou Ophiolite in Northern Tianshan Mountains and Its Tectonic Significance[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2005, 27(2): 17-20.
- [9] 王涛, 王宗起, 闫臻, 等. 西秦岭南缘白水江群晚古生代微体化石的发现及其地质意义[J]. 地球科学与环境学报, 2007, 29(2): 120-125.
- WANG Tao, WANG Zong-qi, YAN Zhen, et al. Discovery of Late Paleozoic Microfossils and Significance of Baishuijiang Group in South Belt of West Qingling Mountain[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2007, 29(2): 120-125.
- [10] JOHNSTON S M, HARTZ E H, BRUECKNER H K, et al. U-Pb Zircon Geochronology and Tectonostratigraphy of Southern Liverpool Land, East Greenland; Implications for Deformation in the Overriding Plates of Continental Collisions[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2010, 297(3/4): 512-524.
- [11] BECKER T P, THOMAS W A, SAMSON S D, 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(1/2): 59-86.
- [12] 兰中伍, 陈岳龙, 苏本勋, 等. 四川松潘—甘孜盆地砂岩的物质来源: 来自锆石 U-Pb (SHRIMP) 年龄证据[J]. 沉积学报, 2006, 24(3): 321-332.
- LAN Zhong-wu, CHEN Yue-long, SU Ben-xun, et al. The Origin of Sandstones from the Songpan-Ganze Basin, Sichuan, China: Evidence from SHRIMP U-Pb Dating of Clastic Zircons[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(3): 321-332.
- [13] 韩天佑, 李慧, 李文厚, 等. 鄂尔多斯盆地延河剖面延长组碎屑锆石 U-Pb 年龄分布特征及地质意义[J]. 西北地质, 2011, 44(1): 105-111.
- HAN Tian-you, LI Hui, LI Wen-hou, et al. Distribution Characteristics and Geological Significance of U-Pb Age of Detrital Zircon in Yanchang Formation of Yanhe Strata Section of Ordos Basin[J]. Northwestern Geology, 2011, 44(1): 105-111.
- [14] 武富礼, 姚志刚. 碎屑锆石 U-Pb 定年在准噶尔盆地南缘物源研究中的应用[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2011, 26(3): 6-13.
- WU Fu-li, YAO Zhi-gang. Application of U-Pb Dating in the Study on the Provenance Analysis of Detrital Zircons in the Southern Margin of Junggar Basin, China[J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2011, 26(3): 6-13.
- [15] 邬光辉, 张宝收, 张承泽, 等. 英吉苏凹陷碎屑锆石测年及其对沉积物源的指示[J]. 新疆地质, 2007, 25(4): 351-355.
- WU Guang-hui, ZHANG Bao-shou, ZHANG Cheng-ze, et al. Detrital Zircon U-Pb Ages and Its Significance from Yingjisu Sag in Tarim Basin[J]. Xinjiang Geology, 2007, 25(4): 351-355.

- [16] 邬光辉,张宝收,郭春利,等. 塔里木盆地北部志留系碎屑锆石测年及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 2009,33(3):418-426.
WU Guang-hui, ZHANG Bao-shou, GUO Chun-li, et al. Detrital Zircon U-Pb Dating for the Silurian in Northern Tarim Basin and Its Significance [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2009,33(3):418-426.
- [17] 邬光辉,张宝收,苏文,等. 塔中地区志留系碎屑锆石测年及其地质意义[J]. 地质科学, 2009, 44(3): 1025-1035.
WU Guang-hui, ZHANG Bao-shou, SU Wen, et al. Detrital Zircon U-Pb Ages and Its Significance of Silurian from Tazhong Area in Tarim Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2009, 44(3):1025-1035.
- [18] 邬光辉,孙建华,郭群英,等. 塔里木盆地碎屑锆石年龄分布对前寒武纪基底的指示[J]. 地球学报, 2010, 31(1):65-72.
WU Guang-hui, SUN Jian-hua, GUO Qun-ying, et al. The Distribution of Detrital Zircon U-Pb Ages and Its Significance to Precambrian Basement in Tarim Basin [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2010, 31(1):65-72.
- [19] 黄继文,顾忆,陈强路,等. 塔北地区志留系沥青砂岩热模拟实验及其供烃意义[J]. 石油实验地质, 2012,34(4):445-450.
HUANG Ji-wen, GU Yi, CHEN Qiang-lu, et al. Thermal Simulation of Silurian Bituminous Sandstone and Its Significance of Hydrocarbon Supply in Northern Tarim Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2012, 34(4):445-450.
- [20] 张达玉,周涛发,袁峰,等. 塔里木柯坪地区库普库兹曼组玄武岩锆石 LA-ICP-MS 年代学、Hf 同位素特征及其意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(3):963-974.
ZHANG Da-yu, ZHOU Tao-fa, YUAN Feng, et al. LA-ICP-MS U-Pb Ages, Hf Isotope Characteristics of Zircons from Basalts in the Kupukuziman Formation, Keping Area, Tarim Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(3):963-974.
- [21] 王飞,王博,舒良树. 塔里木西北缘阿克苏地区大陆拉斑玄武岩对新元古代裂解事件的制约[J]. 岩石学报, 2010, 26(2):547-558.
WANG Fei, WANG Bo, SHU Liang-shu. Continental Tholeiitic Basalt of the Akesu Area (NW China) and Its Implication for the Neoproterozoic Rifting in the Northern Tarim [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(2):547-558.
- [22] 李永安,李强,张慧,等. 塔里木及其周边古地磁研究与盆地形成演化[J]. 新疆地质, 1995, 13(4): 293-376.
LI Yong-an, LI Qiang, ZHANG Hui, et al. Palaeomagnetic Study of Tarim and Its Adjacent Area as Well as the Formation and Evolution of Tarim Basin [J]. Xinjiang Geology, 1995, 13(4):293-376.
- [23] 张光亚. 塔里木古生代克拉通盆地形成演化与油气[M]. 北京:地质出版社, 2000.
ZHANG Guang-ya. The Formation and Evolution of Tarim Cratonic Basin in Paleozoic and Its Hydrocarbon [M]. Beijing:Geology Publishing House, 2000.
- [24] 顾家裕. 塔里木盆地沉积层序特征及其演化[M]. 北京:石油工业出版社, 1996.
GU Jia-yu. Depositional Sequence Characteristic and Its Evolution in Tarim Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996.
- [25] 何文渊,李江海,钱祥麟,等. 塔里木盆地柯坪断隆断裂构造分析[J]. 中国地质, 2002, 29(1):37-43.
HE Wen-yuan, LI Jiang-hai, QIAN Xiang-lin, et al. Analysis of Fault Structures in the Keping Fault Uplift, Tarim Basin [J]. Geology in China, 2002, 29(1):37-43.
- [26] 张师本,倪寓南,龚福华,等. 塔里木盆地周缘地层考察指南[M]. 北京:石油工业出版社, 2003.
ZHANG Shi-ben, NI Yu-nan, GONG Fu-hua, et al. A Guide to the Stratigraphic Investigation on the Periphery of the Tarim Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.
- [27] 许效松,刘宝珺,牟传龙,等. 中国中西部海相盆地分析与油气资源[M]. 北京:地质出版社, 2004.
XU Xiao-song, LIU Bao-jun, MOU Chuan-long, et al. The Analysis of Marine Basins in Central and Western China and Its Hydrocarbon Resource [M]. Beijing: Geology Publishing House, 2004.
- [28] JACKSON S E, PEARSON N J, GRIFFIN W L, et al. The Application of Laser Ablation-inductively Coupled Plasma-mass Spectrometry to in Situ U-Pb Zircon Geochronology[J]. Chemical Geology, 2004, 211(1/2): 47-69.
- [29] ANDERSEN T. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses That Do Not Report ^{204}Pb [J]. Chemical Geology, 2002, 192(1/2):59-79.
- [30] GLEASON J D, GEHRELS G E, DICKINSON W R, et al. Laurentian Sources for Detrital Zircon Grains in Turbidite and Deltaic Sandstones of the Pennsylvanian Haymond Formation, Marathon Assemblage, West Texas, USA [J]. Journal of Sedimentary Research, 2007, 77(11):888-900.
- [31] RUBATTO D, GEBAUER D. Use of Cathodoluminescence for U-Pb Zircon Dating by IOM Microprobe:

- Some Examples from the Western Alps[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2000.
- [32] 黎敦朋,李新林,周小康,等. 塔里木西南缘新太古代变质辉长岩脉的锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J]. 中国地质, 2007, 34(2): 262-269.
- LI Dun-peng, LI Xin-lin, ZHOU Xiao-kang, et al. SHRIMP U-Pb Zircon Dating of Neoproterozoic Metagabbro Dikes on the Southwestern Margin of the Tarim Plate and Its Significance[J]. Geology in China, 2007, 34(2): 262-269.
- [33] 陆松年,李怀坤,陈志宏. 塔里木与扬子新元古代热—构造事件特征、序列和时代——扬子与塔里木连接(YZ-TAR)假设[J]. 地学前缘, 2003, 10(4): 321-326.
- LU Song-nian, LI Huai-kun, CHEN Zhi-hong. Characteristics, Sequence and Ages of Neoproterozoic Thermo-tectonic Events Between Tarim and Yangzi Blocks—a Hypothesis of Yangzi-Tarim Connection[J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(4): 321-326.
- [34] 谢士稳,高山,柳小明,等. 扬子克拉通南华纪碎屑锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素对华南新元古代岩浆事件的指示[J]. 地球科学, 2009, 34(1): 117-126.
- XIE Shi-wen, GAO Shan, LIU Xiao-ming, et al. U-Pb Ages and Hf Isotopes of Detrital Zircons of Nanhua Sedimentary Rocks from the Yangtze Gorges: Implications for Genesis of Neoproterozoic Magmatism in South China[J]. Earth Science, 2009, 34(1): 117-126.
- [35] 凌文黎,段瑞春,柳小明,等. 南秦岭武当山群碎屑锆石 U-Pb 年代学及其地质意义[J]. 科学通报, 2010, 55(12): 1153-1161.
- LING Wen-li, DUAN Rui-chun, LIU Xiao-ming, et al. U-Pb Dating of Detrital Zircons from the Wudangshan Group in the South Qinling and Its Geological Significance[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(12): 1153-1161.
- [36] 王杰,秦建中,刘文汇,等. 川东北元坝地区中生代构造与动态热演化史——磷灰石、锆石(U-Th)/He 定年分析[J]. 石油实验地质, 2012, 34(1): 19-24.
- WANG Jie, QIN Jian-zhong, LIU Wen-hui, et al. Mesozoic Tectonics and Dynamic Thermal History in Yuanba Area of Northeastern Sichuan Basin—Application of (U-Th)/He Dating of Apatite and Zircon[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2012, 34(1): 19-24.
- [37] CARROLL A R, GRAHAM S A, CHANG E Z, et al. Sinian Through Permian Tectonostratigraphic Evolution of the Northwestern Tarim Basin, China[C] // HENDRIX M S, DAVIS G A. Paleozoic and Mesozoic Tectonic Evolution of Central Asia: from Continental Assembly to Intracontinental Deformation. Boulder: Geological Society of America, 2001: 47-69.
- [38] XU Rong-hua, ZHANG Yu-quan, XIE Ying-wen, et al. Isotopic Geochemistry of Plutonic Rocks[C] // PAN Yu-sheng. Geological Evolution of the Karakorum and Kunlun Mountains. Beijing: Seismological Press, 1996: 442-485.
- [39] 许荣华,张玉泉,谢应雯,等. 西昆仑山北部早古生代构造—岩浆带的发现[J]. 地质科学, 1994, 29(4): 313-328.
- XU Rong-hua, ZHANG Yu-quan, XIE Ying-wen, et al. A Discovery of an Early Paleozoic Tectono-magmatic Belt in the Northern Part of West Kunlun Mountains[J]. Scientia Geologica Sinica, 1994, 29(4): 313-328.