

青海都兰东北部哈莉哈德山花岗片麻岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及构造意义

许娅玲¹, 巴 金¹, 王勤燕¹, 张 璐¹, 王新宇², 陈能松^{1,3}

XU Ya-ling¹, BA Jin¹, WANG Qin-yan¹, ZHANG Lu¹,

WANG Xin-yu², CHEN Neng-song^{1,3}

1. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 湖北 武汉 430074; 2. 广西壮族自治区地质勘查总院, 广西 南宁 530023;

3. 中国地质大学(武汉)/地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北 武汉 430074

1. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;

2. Guangxi Institute of Geological Survey and Exploration, Nanning 530023, Guangxi, China;

3. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources/China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China

摘要:青海都兰东北部哈莉哈德山花岗片麻岩原岩为具有 S-型花岗岩特征的酸性侵入岩。来自该片麻岩的 20 粒锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 年龄测定表明, 该片麻岩的原岩花岗岩岩浆于约 950Ma 侵位结晶, 岩浆物源区存在中—新元古代的物质成分。正确甄别哈莉哈德山花岗片麻岩的变质围岩是否隶属于全吉地块的达肯大坂岩群, 是理解全吉地块与柴达木地块在新元古代时期构造演化关系的关键。

关键词:全吉地块; 柴达木地块; 花岗片麻岩; LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年; 新元古代构造演化

中图分类号: P588.34^{±5}; P597^{±3} **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2011)07-1037-06

Xu Y L, Ba J, Wang Q Y, Zhang L, Wang X Y, Chen N S. LA-ICP-MS zircon U-Pb age of the Halihadeshan granite-gneiss in northeastern Dulan, Qinghai, and its tectonic implications. *Geological Bulletin of China*, 2011,30(7):1037-1042

Abstract: The Halihadeshan granite-gneiss in northeast Dulan County of Qinghai Province has a protolith of S-type granites. LA-ICP-MS dating of 20 grains of zircon from this gneiss shows that the protolith magma was composed of Mesoproterozoic and Neoproterozoic materials, and that the protolith magma was emplaced and crystallized at ~950 Ma. The correct judgment as to whether the metamorphic wall rocks of the Halihadeshan granite-gneiss belong to Dakendaban Group of Quanji massif seems to be the key to understanding the tectonic evolution relationship between the Quanji massif and Qaidam block in Neoproterozoic period.

Key words: Quanji massif; Qaidam block; granite-gneiss; LA-ICP-MS zircon U-Pb dating; Neoproterozoic tectonic evolution

柴达木地块北缘基底岩系发育一条断续展布数百千米的新元古代花岗片麻岩带, 原岩为花岗岩类侵入岩, 是响应全球 Rodinia 超大陆汇聚事件的岩浆作用的产物^[1-5]。柴达木地块北与近年新厘定的具克拉通性质的全吉地块^[1]相遥望, 两者在新元古代

时期的构造演化关系目前尚不清楚。21 世纪初开展的 1:25 万都兰县幅区域地质调查在都兰县北部沙柳河东哈莉哈德山一带识别出一套花岗片麻岩, 依据前人所获得的该花岗片麻岩组成部分之一的一棵树花岗片麻岩 TIMS 锆石 U-Pb 上交点年龄

收稿日期: 2010-10-14; 修订日期: 2011-04-18

资助项目: 国家自然科学基金项目《全吉克拉通残片基底早元古代片麻状花岗岩成因背景和基底地壳演化》(批准号: 40972042)和教育部科技重点项目《柴北前寒武纪基底群的变质地质学与构造属性研究》(编号: 104039)

作者简介: 许娅玲(1961-), 女, 工程师, 从事锆石形貌特征研究、结晶学矿物学教学及实验管理。E-mail: chennengsong@163.com

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

892.7±7.5Ma^①,以及地质学、岩相学、年龄特点,将之归并为沙柳河花岗片麻岩(Pt₃S_{gn}^δ,图1)。考虑到花岗片麻岩锆石内部构造的复杂性和TIMS法测定锆石年龄的局限性,笔者近期对该花岗片麻岩的锆石开展了LA-ICP-MS法原位U-Pb定年,以期更准确地约束该花岗片麻岩原岩的岩浆作用年龄,更好地解释该地区的相关地质问题。

1 地质概况

沙柳河-哈莉哈德山地区位于都兰县北部(图1),发育古元古代达肯大坂岩群、中元古代沙柳河岩群、早古生代滩间山岩群等早前古生代变质岩系。沿该区东部出露的表壳岩系被确定为古元古代达肯大坂岩群,古元古代呼德生二长花岗片麻岩(TIM

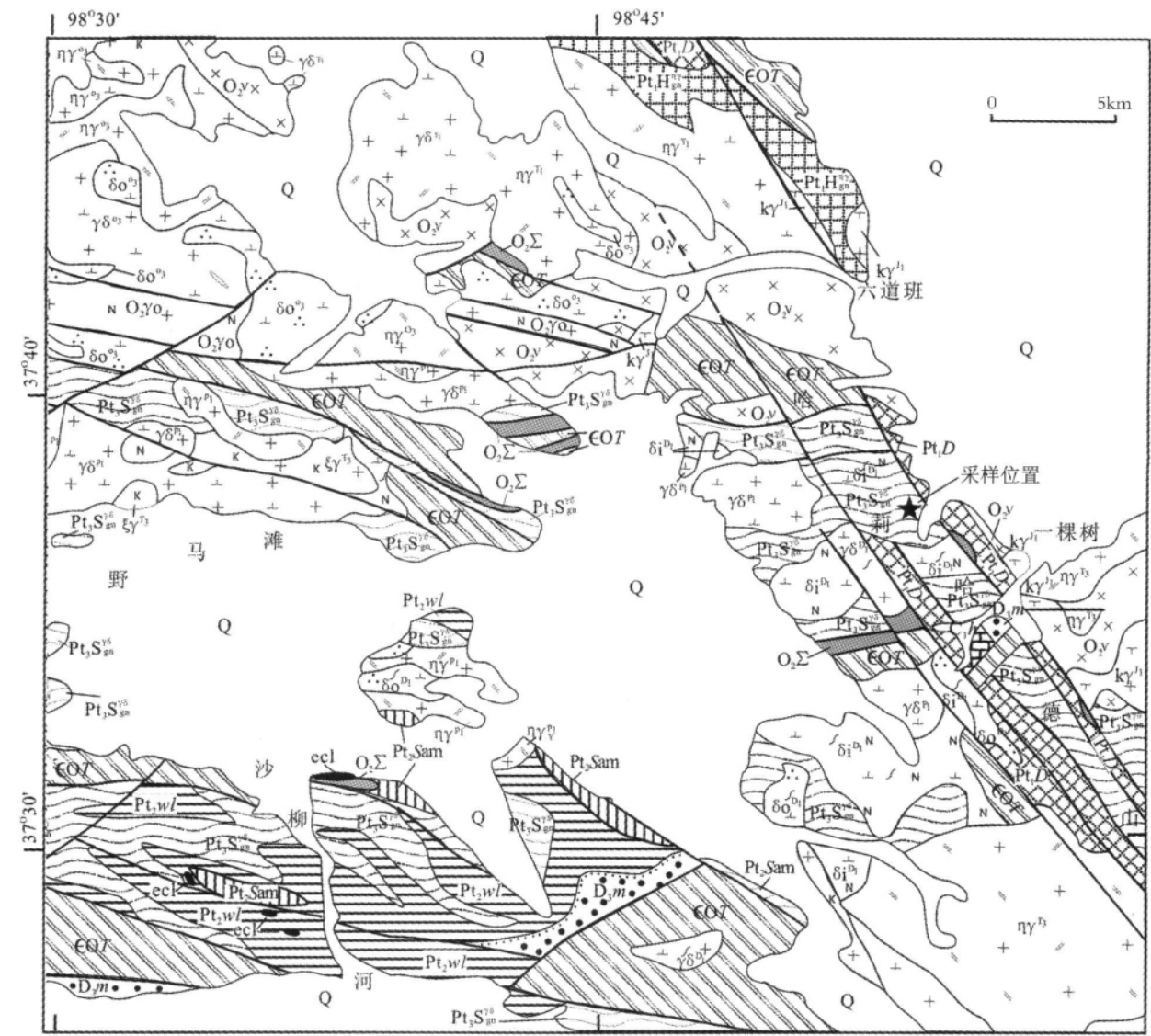


图1 青海省都兰县东北部地质简图(据参考文献②修改)

Fig. 1 Simplified geological map of northeast Dulan County, Qinghai Province

ky¹_i—早侏罗世碱长花岗岩;ζγ³₃—晚三叠世正长花岗岩;ηγ³₃—晚三叠世二长花岗岩;γδ¹₁—早三叠世花岗闪长岩;ηγ¹₁—早二叠世二长花岗岩;γδ¹₁—早二叠世花岗闪长岩;δi¹₁—早泥盆世英云闪长岩;γδ¹₁—早泥盆世花岗闪长岩;δo¹₁—早泥盆世石英闪长岩;δi³₃—晚奥陶世英云闪长岩;ηγ³₃—晚奥陶世二长花岗岩;γδ³₃—晚奥陶世花岗闪长岩;δi³₃—晚奥陶世石英闪长岩;O₂γo—中奥陶世斜长花岗岩;O₂γ—中奥陶世辉长岩;O₂Σ—中奥陶世超镁铁质岩;ecl—榴辉岩;Pt₃S_{gn}^δ—沙柳河片麻岩;Pt₃H_{gn}^m—呼德生片麻岩;Q—第四系;C_h—怀头他拉组;D₂m—牦牛山组;εOT—滩间山岩群;Pt₃Sam—沙柳河岩群角闪岩岩组;Pt₃wl—沙柳河岩群乌龙滩岩组;Pt₃D—达肯大坂岩群;图中粗线为断裂

锆石 U-Pb 年龄为 $2202\text{Ma} \pm 26\text{Ma}^{[1]}$) 出露于东北角, 与达肯大坂岩群呈断裂接触。中元古代沙柳河岩群出露于中南部, 普遍发育榴辉岩透镜体并被沙柳河花岗岩片麻岩 (SHRIMP 锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄 $917 \pm 21\text{Ma}^{[1]}$) 侵入。早古生代滩间山岩群与下伏的达肯大坂岩群和新元古代花岗岩片麻岩呈构造接触。区内发育晚奥陶世辉长岩、花岗岩和二叠纪—三叠纪花岗岩。

哈莉哈德山花岗岩片麻岩包括前人命名的一棵树花岗岩片麻岩^①, 是在 1:25 万都兰县幅区域地质调查过程中从原沙柳河岩群中解体出来的, 因其与东部沙柳河花岗岩片麻岩的宏观特征一致, 年龄也大体相近, 因而被归并为沙柳河花岗岩片麻岩单元^②。本文为叙述方便将其称为哈莉哈德山花岗岩片麻岩。哈莉哈德山花岗岩片麻岩的岩石呈灰白色, 眼球状构造和变余似斑状结构, 变余斑晶为钾长石, 含量约 30%。钾长石变余斑晶大小总体在 2~3cm 之间, 个别可达 4cm, 呈眼球状且定向排列, 两端具对称—不对称拖尾。变质基质成分由石英 (约 30%)、钾长石 (约 25%)、斜长石 (约 15%) 及少量白云母、黑云母组成。矿物组成显示原岩具 S-型花岗岩的特征。

2 锆石年龄测定结果

取全岩样品重约 2kg, 由廊坊诚信地质服务公司用常规方法将锆石分离出来。将锆石制成环氧树脂样靶, 打磨到锆石中心部位将要露出来时抛光, 然后喷碳, 拍摄 CL 图像, 在中国地质大学 (武汉) 地质过程与矿产资源国家重点实验室进行 LA-ICP-MS U-Pb 年龄测定。测定仪器和型号、方法、详细的实验流程和数据处理见文献 [6-8], 原始数据用标准锆石 91500 的测定值校正, 年龄用 Isoplot 程序^[9]计算。代表性锆石的 CL 图像见图 2, 分析结果列于表 1。与待测锆石样平行测定的标准锆石 GJ-1 的 8 个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄平均值为 $598.6\text{Ma} \pm 3.3\text{Ma}$ (2σ) (95%conf., MSWD=1.19), 与该标准锆石的 TIMS 法测定的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值 ($599.8 \pm 1.7\text{Ma}$ (2σ)^[10]) 一致, 表明本测定数据是可靠的。

根据对 500 多颗锆石 CL 图像的观察, 哈莉哈德山花岗岩片麻岩的锆石以短柱状晶体为主, 仅数粒为长柱状 (如图 2 中的 13 号颗粒)。由 CL 图像 (图 2) 判别, 6 颗锆石具有明显的核-边结构, 锆石核被模糊的振荡环带锆石增生边包裹 (如颗粒 3、5、6、8、9、10), 应为来自围岩中的捕掳晶锆石, 而锆石增生

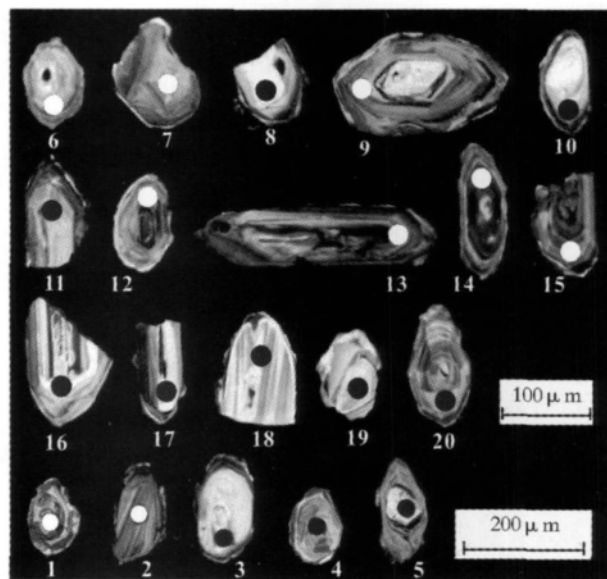


图 2 锆石 CL 图像

Fig. 2 CL images of zircons

锆石下方的数字为颗粒编号和对应表 1 的测点号, 黑色和白色圆点示测定部位, 200μm 和 100μm 比例棒分别对应于 1~5 号颗粒和 6~20 号颗粒, 测定激光束径分别为 32μm 和 24μm, 9 号颗粒虽发育完好的继承性锆石核, 但在测定过程中受损而未获得数据

边被解释为与花岗岩片麻岩原岩岩浆同期结晶的产物。其余 14 颗锆石为岩浆成因的单晶锆石, 在边缘处被不同程度的流体改造边叠加, 仍显示清晰程度不等的振荡环带。本研究分别测定了 3 个被岩浆锆石增生边包裹的继承性锆石核 (测点 3、5、8)、被流体改造边包绕的 11 个岩浆成因单晶锆石的核部 (测点 1、2、4、7、11~15、17、19)、5 个岩浆增生锆石边 (测点 6、9、10、19、20) 和 1 个流体改造边 (测点 16), 共 20 个数据 (表 1)。在 20 个测点中, 除 5 号测点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $1635\text{Ma} \pm 27\text{Ma}$ 外, 其余 19 个测点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄变化于 1030~901Ma 之间, 且普遍低于 1000Ma, 因此用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄来描述和讨论其地质含义。由表 1 可见, 3 个被岩浆锆石增生边包裹的锆石核的测量值变化于 $(973 \pm 8) \sim (1635 \pm 27)\text{Ma}$ 之间, 5 个岩浆锆石增生边的测量值变化于 $(909 \pm 6) \sim (962 \pm 8)\text{Ma}$ 之间, 1 个流体改造边的年龄为 $(922 \pm 7)\text{Ma}$, 11 个被流体改造边包绕的岩浆锆石单晶的测量值变化于 $(854 \pm 10) \sim (1010 \pm 7)\text{Ma}$ 之间。在谐和图上, 除测点 5 以外的 19 个数据点分布在一组线上或其附近 (图 3-a), 且在 1020~920Ma 的范围内分布着若干近于谐和的数据点, 从约 920Ma

开始,其余数据点开始逐渐离开一致线并呈近于线性排列,暗示发生了明显的 Pb 丢失。用其中的 9 个数据拟合不一致线,得到上交点年龄 $938\text{Ma} \pm 22\text{Ma}$ ($\text{MSWD}=0.77$)。

3 讨论

3.1 哈莉哈德山花岗片麻岩的原岩年龄

本文所测锆石大部分具有典型的振荡环带,属于岩浆成因。除少量颗粒发育岩浆锆石增生边外,多数锆石边缘呈现不规则的弥漫性环带,表明流体对原锆石有过改造^[11]。野外观察发现,柴达木地块北缘早古生代高压超高压变质作用与构造变形作用使元古宙花岗岩侵入体成为花岗片麻岩。这些花岗片麻岩都发育新生的变质矿物白云母,指示存在强烈的流体活动。另外,无混合岩化现象表明锆石增生边不是先存锆石溶解-再沉淀而成的。因此,本花岗片麻岩的锆石 U-Pb 年龄只可能存在继承性锆石年龄、岩体结晶年龄和流体改造年龄 3 个年龄。继承性锆石年龄记录在捕虏晶锆石中,岩体结晶年龄记录在与该岩体相关的岩浆锆石增生边或岩浆成因锆石单晶中。被岩浆锆石增生的捕虏晶锆石和流体改造的锆石边较易识别,无岩浆增生边的捕虏晶锆石与该岩体结晶的锆石单晶就不易区分,必须借助年龄结果来综合分析,才能确定岩浆成因的锆石单晶是属于捕虏晶锆石还是与该岩体侵位同期结晶的锆石。由于受到柴北缘加里东期构造热事件的影响,与岩体同期结晶的锆石都可能发生 Pb 丢失,而由这些发生 Pb 丢失的测点拟合的不一致线的上交点年龄应当等于或接近于岩体的结晶年龄,该年龄与未发生 Pb 丢失的岩体岩浆结晶锆石的谐和年龄值应当相等或相近。因此,对于无岩浆增生边的岩浆锆石,岩体结晶锆石的谐和年龄与不一致线上交点年龄值大体相同或相近,而捕虏晶锆石的谐和年龄应明显偏老,甚至老于具岩浆增生边的捕虏晶锆石的最小年龄($>970\text{Ma}$)。流体改造年龄可由不一致线的下交点年龄指示,但该年龄通常误差极大而无法使用。

由图 2 和表 1 可看出,无增生边的岩浆锆石单晶的最大谐和年龄为 $1010\text{Ma} \pm 7\text{Ma}$,指示为捕虏晶锆石的结晶年龄,2 个年轻的谐和年龄分别为 $943\text{Ma} \pm 5\text{Ma}$ (测点 7) 和 $959\text{Ma} \pm 10\text{Ma}$ (测点 2),在误差范围内近于一致,其加权平均值为 $950\text{Ma} \pm$

10Ma 。其余测点年龄都存在不同程度的 Pb 丢失。用发生 Pb 丢失的部分测点拟合不一致线,得上交点年龄 $938\text{Ma} \pm 22\text{Ma}$ ($\text{MSWD}=0.77$),约 940Ma ,接近于岩浆结晶的最小年龄。因此,从统计角度考虑,可将哈莉哈德山花岗片麻岩原岩的结晶年龄确定为约 950Ma 。显然,本次获得的岩浆结晶年龄值明显高于前人获得的哈莉哈德山花岗片麻岩组成部分的一棵树花岗片麻岩的 TIMS 法锆石 U-Pb 年龄 ($892.7\text{Ma} \pm 7.5\text{Ma}$)^①。

1:25 万都兰县幅区域地质调查在研究区中南部用 TIMS 法测得酷似哈莉哈德山花岗片麻岩的沙柳河花岗片麻岩的锆石 U-Pb 上交点年龄约 942Ma ^②。考虑到沙柳河花岗片麻岩的锆石都不同程度地具有捕获晶锆石核,有学者进一步采用原位高精度测年技术来测定该片麻岩体的锆石 U-Pb 年龄:用 SHRIMP 法测得锆石的平均 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $917\text{Ma} \pm 21\text{Ma}$ ^[1],用 LA-ICP-MS 原位 U-Pb 法测得的岩浆结晶锆石 10 个测点的平均 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $920\text{Ma} + 31/-17\text{Ma}$ ($97.9\% \text{ conf.}$)^[5]。显然,这些原位测定的年龄明显低于本文测得的哈莉哈德山花岗片麻岩的原岩结晶年龄,究其原因可能是其锆石也与哈莉哈德山花岗片麻岩的岩浆锆石一样,因变质变形而发生了不同程度的 Pb 丢失。这些 Pb 丢失锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的统计值通常小于真正的岩浆结晶年龄值。例如在本研究中,对发生 Pb 丢失的 9 个点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄做概率统计,其峰值年龄也仅为约 915Ma ,即约 920Ma (图 3-b),明显小于上述综合分析得到的结晶年龄值。因此,沙柳河花岗片麻岩原岩的合理的结晶年龄应为约 942Ma ,该值在误差范围内与哈莉哈德山花岗片麻岩原岩的结晶年龄一致。这表明,柴北缘新元古代碰撞花岗岩类的侵入作用在约 950Ma 前就开始了。

3.2 岩浆源岩物质的沉积时代及其源区启示

哈莉哈德山花岗片麻岩中存在近于谐和且 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄约 1635Ma 的继承性碎屑锆石核(见测点 5),个别具有极薄岩浆成因边的继承性锆石核的谐和年龄为 $981\text{Ma} \pm 7\text{Ma}$ (测点 8)。这与柴北缘的沙柳河花岗片麻岩和全吉河花岗片麻岩继承性碎屑锆石的年龄谱相一致^[5],指示其岩浆源岩碎屑物的蚀源区含有中元古代—新元古代的物质成分,相关地层的时代应为中—新元古代。这表明,哈莉哈德山花岗片麻岩的源岩物质并不是仅来自类似于柴达木

表 1 哈莉哈德山花岗岩片麻岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄数据

Table 1 LA-ICP-MS U-Pb data of zircons from the Halihadeshan granite-gneiss

编号	Pb/10 ⁻⁶	Th/10 ⁻⁶	U/10 ⁻⁶	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb 年龄/Ma	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U 年龄/Ma	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U 年龄/Ma
1	48.7	53.4	319.8	0.17	0.0723±0.0031	1.529±0.066	0.1543±0.0024	994±44	942±13	925±7
2	75.3	75.0	465.8	0.16	0.0714±0.0018	1.569±0.044	0.1605±0.0035	969±26	958±9	959±10
3	40.3	95.1	233.5	0.41	0.0731±0.0026	1.628±0.057	0.1629±0.0029	1017±36	981±11	973±8
4	37.0	43.4	232.6	0.19	0.0736±0.0024	1.716±0.058	0.1697±0.0025	1031±32	1015±11	1010±7
5	37.7	74.4	127.7	0.58	0.1005±0.0029	3.783±0.114	0.2736±0.0049	1635±27	1589±12	1559±13
6	59.6	111.8	338.6	0.33	0.0712±0.0011	1.488±0.024	0.1515±0.0010	963±33	926±10	909±6
7	45.9	78.4	250.6	0.31	0.0706±0.0013	1.536±0.027	0.1576±0.0010	946±36	945±11	943±5
8	25.8	79.8	124.1	0.64	0.0719±0.0018	1.629±0.039	0.1643±0.0012	983±50	981±15	981±7
9	76.6	75.8	439.8	0.17	0.0712±0.0011	1.512±0.023	0.1538±0.0009	961±30	935±9	922±5
10	58.5	75.3	318.4	0.24	0.0704±0.0012	1.564±0.029	0.1610±0.0014	939±37	956±11	962±8
11	52.5	96.8	303.4	0.32	0.0715±0.0013	1.453±0.027	0.1471±0.0014	972±35	911±11	884±8
12	106.2	101.0	615.5	0.16	0.0709±0.0010	1.492±0.021	0.1522±0.0008	954±29	927±9	914±5
13	114.9	392.5	600.9	0.65	0.0730±0.0011	1.506±0.023	0.1492±0.0009	1013±30	933±9	896±5
14	122.5	103.6	722.8	0.14	0.0705±0.0010	1.479±0.021	0.1518±0.0010	943±24	922±9	911±6
15	96.8	106.1	562.3	0.19	0.0708±0.0012	1.490±0.025	0.1520±0.0010	954±34	926±10	912±5
16	42.3	51.0	239.4	0.21	0.0702±0.0013	1.494±0.029	0.1537±0.0012	1000±39	928±12	922±7
17	28.4	52.7	168.7	0.31	0.0741±0.0026	1.450±0.049	0.1417±0.0017	1044±75	910±20	854±10
18	48.2	167.1	254.8	0.66	0.0692±0.0011	1.421±0.023	0.1487±0.0009	906±31	898±10	893±5
19	30.0	49.7	168.4	0.30	0.0721±0.0016	1.510±0.033	0.1515±0.0011	991±44	935±13	909±6
20	67.2	43.3	393.5	0.11	0.0701±0.0013	1.488±0.026	0.1535±0.0010	931±37	926±10	921±6

注:同位素比值误差为 1σ 绝对误差,年龄误差为 2σ

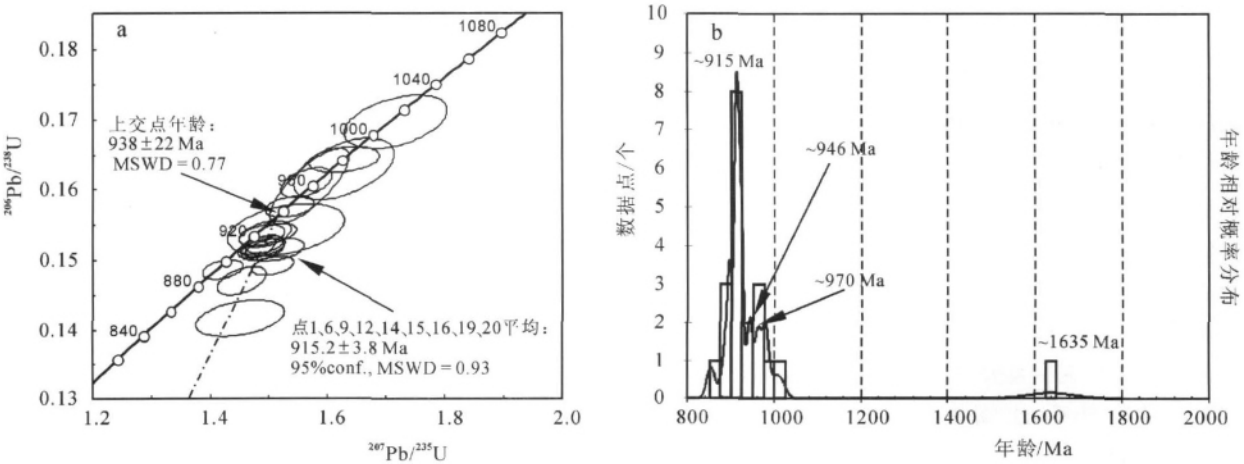


图 3 19 个测点的锆石 U-Pb 年龄谐和图(a)和全部锆石的年龄概率分布(b)

Fig. 3 Concordia plot for 19 spots (a) and relative probability plots of U-Pb ages for total zircon grains (b)

地块沙柳河岩群乌笼滩岩组变质的中元古代陆源碎屑沉积岩,还可能是新元古代的陆源碎屑沉积岩,与以古元古代变质表壳岩和花岗岩片麻岩类岩石为基底的全吉地块^[1,3-4,12]无关。

3.3 构造演化启示

柴达木地块北缘发育一条新元古代大型同碰撞

花岗岩带——柴北缘花岗片麻岩带^[1],表明它曾与邻侧的不明古大陆块体沿此带汇聚过。现今位于柴达木地块以北的全吉地块的基底虽然存在响应全球 Rodinia 超大陆汇聚或裂解事件的地质记录,如上部浅变质中元古代万洞沟群发生(1022±64)Ma 的绿片岩相变质作用^[13],乌兰县城城东的莫河花岗闪长片麻岩的浅色体锆石发育约 1.0Ga 的增生边^[14],达肯大坂岩群古元古代晚期的变质锆石受到新元古代热事件的叠加^[15],全吉山一带南华纪—震旦纪全吉群盖层底部与基底呈高角度不整合接触^[16]等,但迄今还没有发现同时期的同碰撞花岗岩侵入体。作为柴达木地块与全吉地块构造边界的柴北缘超高压变质带东延至沙柳河东的哈莉哈德山一带,其确切的位置和走向因缺乏榴辉岩而无法界定(图 1)。据 1:25 万都兰县幅区域地质调查资料,在沙柳河一带,沙柳河岩群与达肯大坂岩群均呈构造接触关系,新元古代沙柳河花岗片麻岩原岩的围岩为柴达木地块北缘基底的沙柳河岩群,而哈莉哈德山花岗片麻岩的花岗岩原岩的围岩则为发育于全吉地块的达肯大坂岩群。若确定如此,那么全吉地块与柴达木地块可能在新元古代曾经汇聚过,反之亦然。因此,甄别展布在哈莉哈德山一带的达肯大坂岩群的真伪,将有助于进一步理解柴达木地块与全吉地块在新元古代早期的构造演化关系。

4 结 论

哈莉哈德山花岗片麻岩的原花岗岩岩浆的源区物质来自中元古代甚至极有可能来自新元古代蚀源区,其岩浆侵位结晶作用发生在约 950Ma。整个柴北缘新元古代碰撞成因花岗岩类的侵入作用在约 950 Ma 前就开始了。查明哈莉哈德山花岗片麻岩周围的变质岩系是属于柴达木地块的沙柳河岩群抑或全吉地块的达肯大坂岩群,可为解决这 2 个地块新元古代的构造演化关系提供重要启示,值得进一步研究。

致谢: 锆石 CL 图像先后在中国科学院地质与地球物理研究所的电子探针室和扫描电镜室拍摄,在此表示感谢。

参考文献

[1] 陆松年, 于海峰, 赵凤清, 等. 青藏高原北部前寒武纪地质初

探[M]. 北京: 地质出版社, 2002: 1-125.

- [2] 陆松年, 于海峰, 李怀坤, 等. “中央造山带”早古生代缝合带及构造分区概述[J]. 地质通报, 2006, 25(12): 1368-1380.
- [3] 陆松年, 王惠初, 李怀坤, 等. 柴达木盆地北缘“达肯大坂群”的再厘定[J]. 地质通报, 2002, 21(1): 19-23.
- [4] 陆松年, 于海峰, 李怀坤, 等. 中国前寒武纪重大地质问题研究——中国西部前寒武纪重大地质事件群及全球构造意义[M]. 北京: 地质出版社, 2006: 1-206.
- [5] 陈能松, 夏小平, 李晓彦, 等. 柴北缘花岗片麻岩的岩浆作用计时和前寒武纪地壳增生: 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素证据[J]. 岩石学报, 2007, 23(2): 501-512.
- [6] Liu Y S, Hu Z C, Gao S, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. Chemical Geology, 2008, 257: 34-43.
- [7] Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons of mantle xenoliths[J]. Journal of Petrology, 2010, 51: 537-571.
- [8] Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, et al. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55: 1535-1546.
- [9] Ludwig K R. User's Manual for Isoplot/EX Version 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, Special Publication, 2003, 4: 1-70.
- [10] 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: 47-69.
- [11] Corfu F, Hancher J M, Hoskin P W O, et al. Atlas of zircon textures[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2003, 53: 469-495.
- [12] Chen N S, Gong S L, Sun M, et al. Precambrian evolution of the Quanji Block, northeastern margin of Tibet: Insights from zircon U-Pb and Lu-Hf isotope compositions[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 35: 367-376.
- [13] 于凤池, 魏刚锋, 孙继东. 黑色岩系同构造金矿床成矿模式——以滩间山金矿床为例[M]. 西安: 西北大学出版社, 1994: 1-130.
- [14] Wang S Q, Li X Y, Chen N S, et al. LA-ICPMS U-Pb ages of zircon from metaleucosomes, Olongbuluke micro-continent, North Qaidam, and implications on the Response to the Global Rodinia Supercontinent assembly event in NW China[J]. Journal of China University of Geosciences, 2006, 17(3): 238-245.
- [15] 王勤燕, 陈能松, 李晓彦, 等. 全吉地块基底达肯大坂岩群和热事件的 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年[J]. 科学通报, 2008, 53: 1693-1701.
- [16] 李怀坤, 陆松年, 王惠初, 等. 青海柴北缘新元古代超大陆裂解的地质记录——全吉群[J]. 地质调查与研究, 2003, 26(1): 27-37.
- ① 青海地质矿产局区综队. 1:50000 哈莉哈德山幅区域地质调查报告. 2000.
- ② 天津地质矿产研究所, 等. 1:250000 都兰县幅区域地质调查报告. 2006.