

doi:10.3799/dqkx.2012.S1.004

全吉群碎屑锆石的 U-Pb 年龄谱和微量元素： 基底热事件信息和早期演化启示

张璐^{1,2}, 巴金^{1,2}, 陈能松^{1,3*}, 王勤燕¹, 廖梵汐^{1,2}, 李晓彦⁴

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074
2. 中国地质大学研究生院, 湖北武汉 430074
3. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074
4. 德国弗莱堡大学矿物与地球科学学院, 弗莱堡 79104

摘要: 本研究应用 LA-ICP-MS 测定了从塔里木陆块离解出来的一个大陆碎块(片), 即全吉地块盖层全吉群下部南华纪石英砂岩中碎屑锆石的 111 个测点的 U-Pb 年龄和微量元素组成, 87 个谐和年龄构成的锆石年龄谱记录了强烈的古元古代 ~2.45、~2.32、~2.11 和 ~1.95 Ga 热事件以及微弱的太古代热事件信息, 指示南华纪石英砂岩的物源可能是来自全吉地块中、东部的由达肯大坂岩群和未剥露到古元古代末基性岩墙群的德令哈杂岩组成的基底岩系。碎屑锆石的 CL 图像和微量元素组成表明, ~2.45、~2.32 和 ~2.11 Ga 热事件的性质主体为岩浆侵入活动并可能伴随地壳生长; ~1.95 Ga 热事件主要为变质-深熔作用, 但不排除存在岩浆侵入的可能性。本研究结果表明, 全吉地块和其塔里木母陆块基底主要由古元古代岩石组成, 发育区域性古元古代早-中期(~2.32~2.45 Ga)的岩浆侵入作用和地壳生长, 与华北陆块具有相似的地质演化历史或可能发生过构造互动。

关键词: 碎屑锆石年龄谱; 微量元素; 全吉地块; 塔里木陆块; 热事件; 地壳演化; 岩石学。

中图分类号: P597.3

文章编号: 1000-2383(2012)S1-0028-15

收稿日期: 2011-09-03

U-Pb Age Spectra and Trace Elements of Detrital Zircon from Quanji Group: Implications for Thermal Events and Early Evolution in the Basement

ZHANG Lu^{1,2}, BA Jin^{1,2}, CHEN Neng-song^{1,3*}, WANG Qin-yan¹, LIAO Fan-xi^{1,2}, LI Xiao-yan⁴

1. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
2. Graduate School, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
3. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
4. Institute of Geoscience Mineralogy and Geochemistry, University of Freiburg, Freiburg 79104, Germany

Abstract: LA-ICP-MS U-Pb age and trace elements composition have been conducted from 111 spots analyses on detrital zircons from the sandstone of the lower Nanhua-Sinian Quanji Group, the unmetamorphosed sedimentary cover on the Quanji massif (a continental fragment separated from the Tarim block). The age spectra from 87 concordant ages records strong ~2.45, ~2.32, ~2.11 and ~1.95 Ga thermal events in the Paleoproterozoic and two weak thermal events in the Neoproterozoic time, and indicates that sediments of quartz-sandstone were derived from the basement comprising of the Dakendaban Group and Delingha complex with unexposed Ended-Paleoproterozoic mafic dike swarm in the middle to eastern Quanji massif. CL images and trace elements of the detrital zircons suggest that the ~2.45, ~2.32 and ~2.11 Ga thermal events are characterized by magmatic intrusion along with crustal growth and the ~1.95 Ga event by strong regional metamorphism and anatexis, with magmatic intrusion a possible event that could not be ruled out. Our new data demonstrate that basement of the Quanji massif and its inherited Tarim craton are mainly composed of Paleoproterozoic rocks, however, they regionally developed magmatic intrusions accompanying crustal growth during ~2.32–2.45 Ga, thus share a similar geological evolution history or probably

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 40972042, 40772041).

作者简介: 张璐(1987-), 女, 博士研究生, 岩石学专业。* 通讯作者: 陈能松, E-mail: nengsongchen@cug.edu.cn

ever interacted with the North China craton in their early history.

Key words: detrital zircon age spectra; trace elements; Quanji massif; Tarim block; thermal events; crustal evolution; petrology.

锆石具有很高的化学稳定性和物理稳定性,能较好地甚至能完整地保存其微量元素及 U-Pb、Lu-Hf 和 O 同位素组成,因而是其寄主岩石的岩浆-变质热事件年代和地壳生长历史信息的重要载体(Hawkesworth and Kemp, 2006). 多数古老的大陆地(碎)块形成历史久远,演化历史复杂,不同陆块之间可能曾经汇聚然后重新裂解和离散. 这样一来,赋存于不同时代地层(包括变质地层)中的碎屑锆石,既可能来自该陆块本身,也可能源自与其汇聚的陆块. 源自陆块本身的碎屑锆石自然是该陆块自身构造热事件的记录,来自汇聚陆块的混合碎屑锆石可为揭示陆块之间的构造演化关系提供重要线索. 切割不同时代地层和现代堆积物的现代河流的河口碎屑物含时代和成因最复杂的碎屑锆石,是再造区域性重大热事件和地壳生长的重要研究对象(Belousova *et al.*, 2009; Yang *et al.*, 2009). 近年对扬子克拉通的南华纪-震旦纪沉积盖层中的碎屑锆石年龄谱和 Hf 同位素的研究,较好地提供了下伏基底的前寒武纪构造热事件和地壳生长的重要信息(Zhang *et al.*, 2006; Liu *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2010).

中国西北部的全吉地块是从塔里木陆块离解出的一个克拉通碎块(片)(Chen *et al.*, 2012). 该地块基底在元古代发生过多期岩浆作用和变质作用事件(于凤池等, 1994; 张建新等, 2001; 陆松年等, 2002, 2006; 郝国杰等, 2004; Xiao *et al.*, 2004; 李晓彦等, 2007; Lu *et al.*, 2008; 王勤燕等, 2008; Chen *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2009; 廖梵汐, 2010; 张璐等, 2011). 本文测定了全吉地块盖层中南华-震旦纪全吉群下部石英砂岩中碎屑锆石的年龄谱和微量元素组成,其目的是:(1)了解全吉群下部砂岩中的碎屑锆石记录的源区热事件和性质,进一步揭示基底露头研究尚没有发现的一些热事件信息和事件性质;(2)了解全吉群下部砂岩碎屑物质的物源区和源区的演化状况;(3)了解基底早期可能的地壳演化史.

1 地质背景

全吉地块出露于阿尔金断裂东南侧,夹在柴北缘超高压变质带和南祁连构造带之间(图 1),由中深变质基底和基本未变质盖层组成(陆松年等,

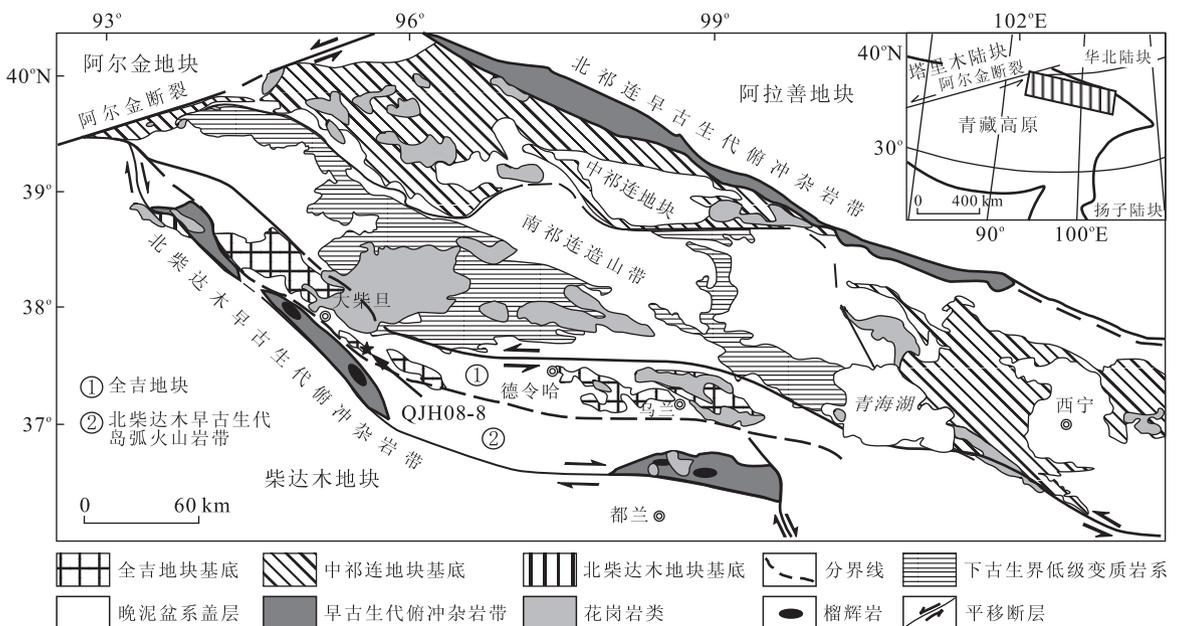


图 1 全吉地块及其邻区构造位置(据 Xu *et al.*, 2006 修改)

Fig. 1 Tectonic position of the Quanji block and adjacent tectonic units

2002). 全吉地块基底由德令哈杂岩、达肯大坂岩群和万洞沟岩群组成(陆松年等, 2002), 在元古代期间存在 6 期热事件记录. (1) 古元古代早期(2.4~2.2 Ga)的构造热事件包括花岗闪长岩—二长花岗岩的侵入作用和可能的基性岩浆岩的形成作用(陆松年等, 2002; 李晓彦等, 2007; Lu *et al.*, 2008); (2) 古元古代晚期(1.92~1.96 Ga)的区域变质作用和深熔作用(张建新等, 2001; 郝国杰等, 2004; Lu *et al.*, 2008; 王勤燕等, 2008; Chen *et al.*, 2009; 张璐等, 2011); (3) 古元古代末镁铁质岩墙群侵入(1 852±15~1 834+27/-19 Ma, 陆松年等, 2006; 廖梵汐, 2010)和变质作用(Wang *et al.*, 2009); (4) 中元古代早期环斑花岗岩侵入作用(锆石 TIMS U-Pb 年龄 1 776±33 Ma, Xiao *et al.*, 2004; 1 763±53 Ma, 陆松年等, 2006)和绿帘角闪岩相变质作用叠加(Wang *et al.*, 2009); (5) 中元古代末—新元古代初的区域绿片岩相变质作用(全岩 Rb-Sr 等时线年龄: 1 022±64 Ma, 于凤池等, 1994); (6) 新元古代早期镁铁质岩墙群侵入作用(锆石 SHRIMP U-Pb 821±11 Ma, Lu *et al.*, 2008).

全吉地块盖层由新元古代以来的火山—沉积岩地层组成, 其最下部地层称全吉群. 全吉群主要分布于全吉山—欧龙布鲁克山一带, 其底部直接不整合于基底之上, 自下而上分别由麻黄沟组、枯柏木组、石英梁组、红藻山组、黑土坡组和红铁沟组构成. 其中麻黄沟组的岩性为砾岩和含砾长石砂岩, 砾石成分为下伏达肯大坂岩群的混合岩和脉石英. 枯柏木组和石英梁组的岩性为发育双向斜层理或平行层理的长石石英砂岩和石英砂岩. 红藻山组的岩性为富含叠层石的碳酸盐岩层, 与石英梁组砂岩层的过渡部位发育有 3 层火山熔岩层. 另外黑土坡组由一套紫色、灰绿色的杂砂岩组成. 而最顶部的红铁沟组局部出现块状杂砾岩层(块状冰碛岩). 前人据石英梁组火山岩锆石 U-Pb 定年推断, 全吉群底界年龄为 760 Ma 左右(陆松年等, 2002), 将全吉群下部层位时代置于早南华纪.

2 样品特征

长石石英砂岩样品(QJH08-8)采自全吉山一带全吉群下部的枯柏木组底部(图 1). 该岩石露头呈紫灰色, 发育交错层理. 用常规方法和流程将锆石从约 1 kg 岩石样中分离出来, 随机取 120 粒锆石用环氧树脂固定靶, 磨至锆石露出近一半后抛光, 拍

摄 CL 图像. CL 图像显示, 碎屑锆石多呈柱状, 少量为短柱状或浑圆状; 晶体以单晶为主, 普遍发育振荡环带结构, 少量具核一边或核—幔一边结构.

3 分析方法

锆石 U-Pb 同位素和微量元素测定在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室的 LA-ICP-MS 上同时进行. 该仪器的激光剥蚀系统为 GeoLas 2005, ICP-MS 为 Agilent 7500a. 测定激光束径为 24 μm, 频率 6 Hz, 能量 75 mJ, 用国际标准锆石 91500 作外标, 用锆石 GJ-1 作内标. 数据采用实验室软件 ICP-MSDataCal(Liu *et al.*, 2010)离线处理. U-Pb 年龄谱和图绘制和年龄权重平均计算均采用 Isoplot/Ex_ver3(Ludwig, 2003)完成. 锆石微量元素含量利用多个 GSE-1 参考玻璃作为外标、Si 作内标的方法进行定量计算(Liu *et al.*, 2010).

4 结果

4.1 同位素年龄

在 91 颗锆石上完成的 111 个测点的同位素测定结果和表面年龄值见表 1. 随同测定的 8 个 GJ-1 标准锆石的²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄平均值为 605±5 Ma, 此值在误差范围内与实验室的长期测定结果(605 Ma)和国际标准结果(²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄 599.8±1.7 Ma(2s))一致(Jackson *et al.*, 2004). 在谐和图解上, 大部分测点落在谐和线上或附近, 少量落在谐和线下方而显示不同程度的铅丢失(图 2a). 由表 1, 所有测点的 3 个表面年龄都大于 1 000 Ma, 故取²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 的年龄值来讨论地质问题. 在 111 个测点中, 谐和度在 100±10%之间的测点有 87 个, 这 87 个谐和年龄的年龄谱构成 3 个年龄峰和 3 个年龄肩(图 2b). 由于一个热事件就是一个地质作用过程, 它从发生、发展到结束通常经历了较长的时间跨度(Belousova *et al.*, 2009), 因此, 根据每个年龄峰两侧半坡高的年龄范围和年龄肩的年龄值及其可能的年龄构成统计结果, 可以确定每个热事件的峰值年龄和大致的年龄范围.

在不考虑铅丢失的情况下, ~2.75 Ga(2 750±31 Ma)热事件由 3 个年龄测点代表, 其²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄值(以下所指的年龄值皆为此表面年龄值)变化于 2 683±36~2 750±31 Ma, 谐和年

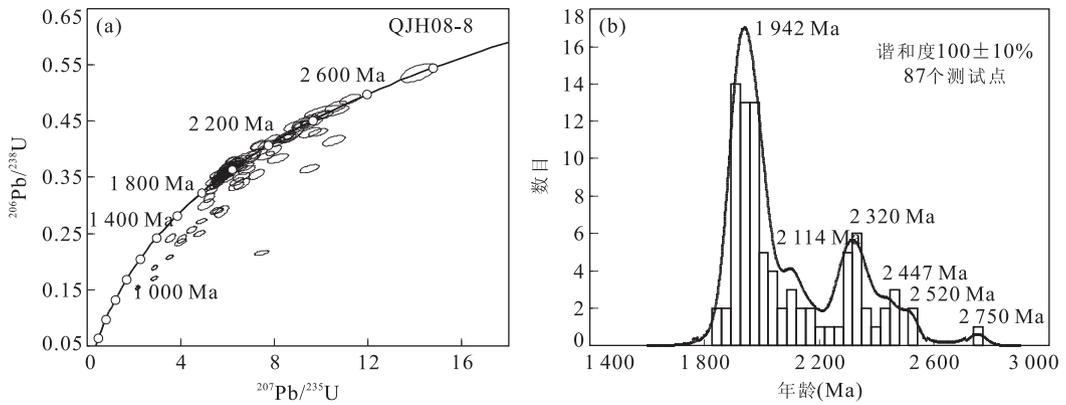


图 2 碎屑锆石 U-Pb 年龄谐和图(a)和锆石 U-Pb 年龄概率分布直方图(b)

Fig. 2 U-Pb concordia plots of concordant detrital zircons (a) and relative probability plots of U-Pb ages for concordant detrital zircons (b)

表 2 锆石标样 91500 微量元素数据与前人数据对比

Table 2 Trace elements data (10^{-6}) for the 91500 zircon standard compared with previously reported data

微量元素	本次研究(n=42)	Belousova <i>et al.</i> (2002)(n=4)	Wiedenbeck <i>et al.</i> (1995)	
Y	145.5±9.5	147±22		
La	0.04±0.03	<0.08±0.05		
Ce	2.6±0.2	2.5±0.5	2.0±0.1	n=4, IP
Pr	0.03±0.02	<0.05±0.05		
Nd	0.315±0.275	<0.35±0.07	0.4	n=1, IP
Sm	0.395±0.275	0.41±0.2	0.3	n=1, IP
Eu	0.26±0.12	0.37±0.17	0.26±0.07	n=6, IP/NAA
Gd	2.365±0.455	2.1±0.35	1.93±0.10	n=4, IP
Dy	11.8±1.0	12±2.1	8.0±1.4	n=4, IP
Ho	4.85±0.45	4.9±0.7		
Er	28.7±2.8	26±3.6	20.4±0.8	n=4, IP
Yb	69.3±4.1	66±7.3	57.4±16.7	n=6, IP/NAA
Lu	13.8±1.0	14±1.9	12.4±0.9	n=2, NAA
Th	30.6±2.7	31±4.9	34.6±6.9	n=4, ID/NAA
U	82.85±5.15	88±15	81.2±4.5	n=11, ID
			0.59±0.01	n=18, PMP
Hf(%)	0.64±0.03	0.64±0.09	0.73±0.05	n=16, IP
			0.59±0.03	n=4, ID
			0.56±0.01	n=99, EMP

龄为 2750 ± 31 Ma, 指示新太古代早期热事件. ~ 2.52 Ga (2520 ± 28 Ma) 热事件由 2 个谐和年龄测点代表, 其年龄变化从 $2517 \pm 28 \sim 2522 \pm 28$ Ma, 平均年龄为 2520 ± 28 Ma, 指示新太古代晚期的热事件. ~ 2.45 Ga ($2447 \pm 21/-31$ Ma) 热事件由 6 个谐和年龄测点代表, 其年龄值变化于 $2416 \pm 28 \sim 2468 \pm 29$ Ma, 平均年龄为 $2447 \pm 21/-31$ Ma, 指示古元古代初期的热事件. ~ 2.32 Ga ($2320 \pm 16/-36$ Ma) 热事件由 14 个谐和年龄测点代表, 其年龄值变化于 $2253 \pm 36 \sim 2376 \pm 25$ Ma, 平均年龄为 $2320 \pm 16/-36$ Ma, 指示古元古代早期的热事件. ~ 2.11 Ga ($2114 \pm 55/-27$ Ma) 热事件

由 11 个谐和年龄测点代表, 其年龄值变化于 $2087 \pm 35 \sim 2170 \pm 35$ Ma, 平均年龄为 $2114 \pm 55/-27$ Ma, 指示古元古代中-晚期的热事件. ~ 1.95 Ga ($1942 \pm 12/-18$ Ma) 热事件由 53 个谐和年龄测点代表, 其年龄值变化于 $1883 \pm 28 \sim 1988 \pm 33$ Ma, 平均年龄为 $1942 \pm 12/-18$ Ma, 指示古元古代晚期的热事件. 据每一期热事件记录的锆石测点数(相对峰高)可知, 作用最强和影响最广的热事件是 ~ 1.95 Ga 热事件, 其次为 ~ 2.32 、 ~ 2.11 和 ~ 2.45 Ga 这 3 个热事件, 而 ~ 2.52 Ga 热事件和 ~ 2.75 Ga 热事件的显示度最弱(图 2b). 另外, 第 109 号测点的 3 个表面年龄高度不谐和, 其中 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年

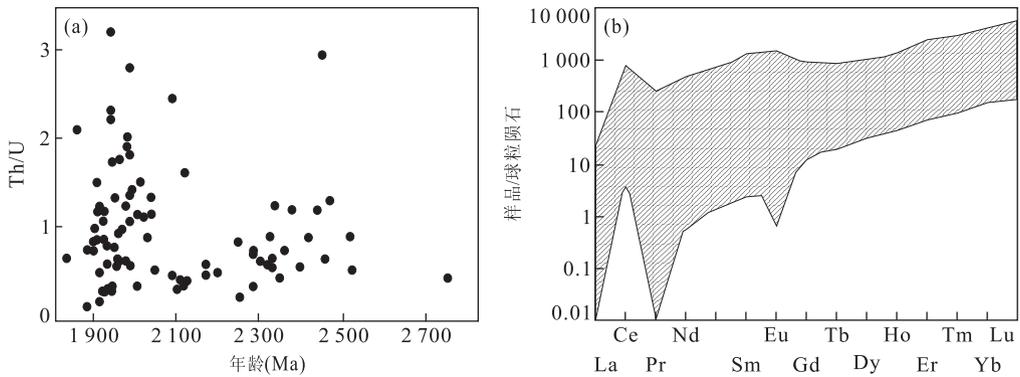


图3 锆石 U-Pb 年龄与 Th/U 比值关系(a)和锆石 REE 球粒陨石标准化分配模式(b)

Fig. 3 Diagram showing relationship between Th/U ratios and U-Pb ages for detrital zircons (a) and chondrite-normalized REE patterns of zircon grains (b)

龄值为 $3\,184 \pm 25$ Ma, 不排除存在古太古代热事件的可能性。

4.2 微量元素

分析的微量元素包括 P、Ti、Y、Zr、Nb、REEs、Hf、Ta、Pb、Th 和 U。随同分析的 20 个标准锆石 91500 测点的部分微量元素与前人 (Wiedenbeck *et al.*, 1995; Belousova *et al.*, 2002) 测量结果一致 (表 2)。锆石 Th/U 比值在 0.08~3.24 之间 (图 3a), 除 1 个测点 < 0.1 外, 大多 > 0.4 ; 在稀土元素特征上, 锆石 LREE 含量较低, 具明显的 Ce 正异常 (图 3b)。

5 讨论

5.1 碎屑锆石记录的热事件

锆石是岩浆作用和变质作用的产物, 其晶形、Th/U 比值、REEs 配分曲线和内部结构特征 (结构分带性和环带特征), 结合结晶 (或重结晶) 的 U-Pb 年龄可用来约束锆石的成因特征, 从而为热事件性质 (岩浆作用或变质作用) 提供启示。一般来说, 岩浆锆石的 Th、U 含量较高、Th/U 比值较大 (一般 > 0.4), 变质锆石的 Th、U 含量低、Th/U 比值小 (一般 < 0.1) (Vavra *et al.*, 1996; Belousova *et al.*, 2002; Rubatto, 2002; Wu and Zheng, 2004)。但也发现一些明显为变质结晶成因的锆石具有高 Th/U 比值的特征 (Vavra *et al.*, 1999)。Belousova *et al.* (2002) 在前人研究的基础上, 总结了已知岩浆岩类型与其结晶锆石的微量元素关系, 提出了“分类树”的概念 (图 4a)。利用分类树, 人们可以根据锆石的微量元素组成来判别该锆石晶体的寄主岩浆岩类型 (金伯利岩、碳酸岩、玄武岩、辉绿岩、正长岩、正

长岩/二长岩、霞石正长岩/正长伟晶岩和花岗岩类等), 从而大致判别碎屑锆石的寄主岩浆岩类型 (Belousova *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2010)。然而, 继承性碎屑锆石不可能仅属单一的岩浆成因, 古老克拉通基底通常都发生过多期变质事件, 其中的高级变质作用将导致新生变质锆石结晶或先存锆石的固态重结晶。此外, 变质流体作用也会导致热液锆石的生长或对先存锆石的改造。因此, 盖层陆源碎屑岩必定包含岩浆成因和复杂变质成因的继承性碎屑锆石。本文结合锆石的内部结构特征和微量元素组成特征对上述 111 个测点进行锆石成因区分, 选择 41 个振荡环带清晰且 Th/U 比值 > 0.4 的测点, 其锆石应为岩浆成因, 用 Belousova *et al.* (2002) 分类树 (short-CART) 对 41 个测点的寄主岩浆岩类型进行判别, 结果 27 个测点为辉长岩 (D), 13 个测点为 $\text{SiO}_2 < 65\%$ 的花岗岩类 (G1), 1 个测点为 $\text{SiO}_2 = 70\% \sim 75\%$ 的花岗岩类 (G2) (表 1, 图 4b)。当然, 由于锆石通常更普遍地分布在花岗岩而非基性岩浆岩中, 所以多数寄主岩为辉长岩的判别结果, 合理的说法是其寄主花岗岩中混入了较多的 Fe、Mg 物质, 可能与地幔物质的加入有关 (Belousova *et al.*, 2009)。

代表 ~ 2.75 Ga 热事件的 3 颗锆石, 其中 2 颗发育振荡环带 (测点 16、21), Th/U = 0.41~0.79, 指示岩浆成因, 其寄主岩石都被判别为辉绿岩 (表 1, 图 5a)。代表 ~ 2.52 Ga 热事件的 2 个测点中, 1 个测点 (测点 15 号) 呈增生边增生在 ~ 2.75 Ga 锆石核 (测点 16 号) 上 (表 1, 图 5b), 发育弱板片状环带, Th/U = 0.90, 半自形柱状, 可能为深熔浅色体中结晶产物, 指示变质作用事件。另一颗锆石 (测点 111) 呈大比例的自形锆石核, 具有宽而明亮的弱振荡环带 (图 5c), Th/U = 0.51, 寄主岩石被判别为辉绿

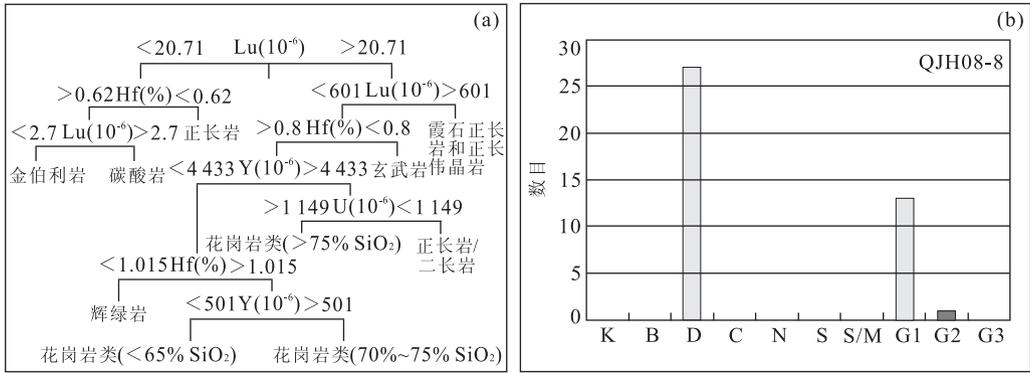


图 4 锆石分类回归判别树(Belousova *et al.*, 2002)(a)和锆石成分判别岩石类型(b)

Fig. 4 “Short” classification and regression trees for the recognition of zircons from different rock types (a) and relative of rock types derived from zircon compositions (b)

K. 金伯利岩; B. 玄武岩; D. 辉绿岩; C. 碳酸岩; N. 碱性正长岩和正长伟晶岩(Ne-S/SP); S. 正长岩; S/M. 正长岩/二长岩; G1. 花岗岩类($<65\% SiO_2$); G2. 花岗岩类($70\% \sim 75\% SiO_2$); G3. 花岗岩类($>75\% SiO_2$)

岩,可能为变质重结晶的岩浆成因锆石,因而可能指示高级变质作用。

代表 ~ 2.45 Ga 热事件的 6 个谐和年龄测点的锆石,其中 5 个(测点 06、10、32、61、65)呈自形柱状,具典型的振荡环带, $Th/U=0.54 \sim 1.32$,应为岩浆成因;4 个测点的寄主岩石判为辉绿岩;1 个测点判为低硅花岗岩(表 1,图 5d),指示该期热事件可能以强烈的岩浆作用为特征;1 个测点(测点 18)呈无环带强发光特征(图 5e),呈不规则状发育在锆石的边部,应为变质重结晶成因。

代表 ~ 2.32 Ga 热事件的 17 个测点的锆石多呈自形晶,发光弱而呈深灰,但具有清晰和较窄的振荡环带(如测点 20、94), Th/U 比值除测点 14 和测点 19 分别为 0.20 和 0.31 外,其余在 $0.42 \sim 1.21$ (表 1,图 5f)。测点 19 为残余核虽被强烈重置,却保存清晰的振荡环带,为典型的岩浆成因,其寄主岩石为低硅花岗岩(表 1,图 5e)。对其中 11 个典型岩浆成因的锆石进行寄主岩石判别,其中 8 个为辉绿岩、3 个为低硅花岗岩,都显示是岩浆作用的产物,指示强烈的岩浆作用事件。

代表 ~ 2.11 Ga 热事件的 19 个测点中有 11 个测点的锆石发育弱发光(灰—深灰色)的振荡环带(如测点 48、99), $Th/U=0.44 \sim 0.95$, (表 1,图 5g);8 个测点的寄主岩石被判为辉绿岩,其中 3 个测点为低硅花岗岩。因此,本期热事件也以强烈的岩浆作用为特征。

代表 ~ 1.95 Ga 热事件的 63 个测点中, $Th/U=0.08 \sim 3.24$,虽然低于 0.4 的 Th/U 比值只有 8 个测点,高于 0.4 的有 55 个测点(占 87.3%),但多

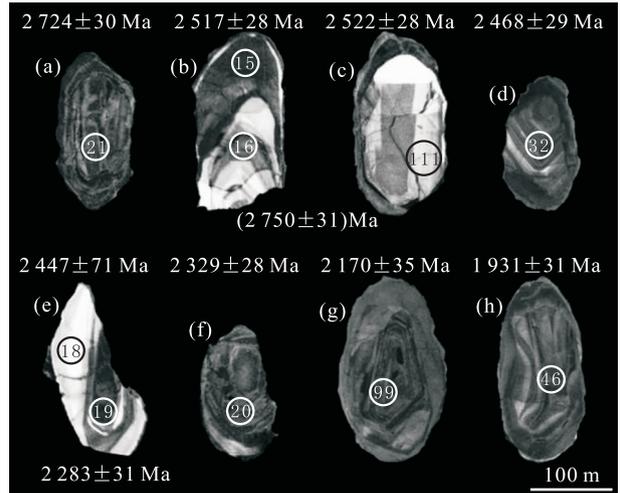


图 5 锆石阴极发光图及 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄

Fig. 5 CL images of the zircons and $^{207}Pb/^{206}Pb$ age

数锆石显示强发光的重结晶边和深灰色环带或扇状—补丁状环带的特征。锆石内部结构和产状特征表明它们并不是典型的岩浆成因,而应为变质重结晶和变质深熔浅色体结晶成因,有的还可能属于变质流体(热液)的产物。11 个测点具有明显的振荡环带(测点 46、70)(图 5h), $Th/U=0.42 \sim 3.24$,应为岩浆成因,其中 4 个测点的寄主岩石类型被判为辉绿岩,6 个测点为低硅花岗岩,1 个测点为中硅花岗岩($SiO_2=70\% \sim 75\%$)(表 1)。

5.2 碎屑源区和对基底热事件和地壳演化的启示

露头地质研究表明,全吉地块基底经历了 6 期构造热事件(于凤池等, 1994; 张建新等, 2001; 陆松年等, 2002, 2006; 郝国杰等, 2004; Xiao *et al.*, 2004; 李晓彦等, 2007; Lu *et al.*, 2008; 王勤燕

等, 2008; Chen *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2009; 廖梵汐, 2010; 黄婉等, 2011; 张璐等, 2011). 全吉群底部含有来自下伏基底混合岩的砾石, 表明主要源区为其下伏的全吉地块基底. 因此, 全吉群下部地层中的碎屑锆石年龄谱可以提供基底经历的热事件, 而锆石的微量元素组成可以为该事件性质和与地壳演化的关系提供有益信息.

全吉群枯柏木组下部砂岩碎屑锆石记录的热事件有新太古代(~ 2.75 Ga、 ~ 2.52 Ga)热事件、古元古代早—中期(~ 2.45 Ga、 ~ 2.32 Ga)热事件、古元古代中—晚期(~ 2.11 Ga)热事件和古元古代晚期(~ 1.95 Ga)热事件. 其中 ~ 2.75 、 ~ 2.52 、 ~ 2.45 和 ~ 2.11 Ga 热事件信息见于达肯大坂岩群副片麻岩的碎屑锆石中(黄婉等, 2011; Chen *et al.*, 2012), 而 ~ 2.32 Ga 热事件和 ~ 1.95 Ga 热事件分别对应于基底的区域性花岗片麻岩侵入作用和变质—深熔作用事件. 据锆石内部结构和微量元素组成, ~ 2.52 、 ~ 2.32 和 ~ 2.11 Ga 热事件都以强烈的岩浆作用为特征, 其岩浆作用不仅有花岗岩的侵入, 更伴随着 Fe、Mg 物质的加入. 这可能表明, 全吉地块基底在古元古代早—中期存在上地幔物质的持续加入, 形成初生地壳. 这些初生地壳在后续的热事件中持续遭受部分熔融产生花岗质岩浆, 成为古元古代大陆地壳的一部分, 从而指示地壳生长. Chen *et al.* (2012)对基底副片麻岩碎屑锆石的 Hf 同位素组成的研究结果也得出了相同的结论. 此外, ~ 1.95 Ga 热事件不仅有区域变质—深熔作用, 可能还存在尚未报道的岩浆作用事件. 该碎屑锆石年龄谱只有 ~ 1.95 Ga 热事件及其之前的热事件的记录, 缺乏地块中、西部 $\sim 1.83\sim 1.85$ Ga 的基性岩墙群侵入作用(Lu *et al.*, 2008; 廖梵汐, 2010)和变质作用事件(Wang *et al.*, 2009)、 ~ 1.78 Ga 的环斑花岗岩侵入作用事件(Xiao *et al.*, 2004; 陆松年等, 2006)、 ~ 1.02 Ga 的绿片岩相变质作用事件(于凤池等, 1994)和 ~ 0.82 Ga 的基性岩墙群(Lu *et al.*, 2008)侵入作用事件这 4 个热事件的年代记录. 表明其寄主砂岩的物源区主要位于主体包括德令哈杂岩和达肯大坂岩群的中、东部的德令哈和乌兰等地. 可能由于该地区的德令哈杂岩当时还没有剥露到 $\sim 1.83\sim 1.85$ Ga 基性岩墙的产出深度, 因而在全吉群下部石英砂岩缺失记录该事件的碎屑锆石.

5.3 塔里木陆块与扬子陆块和华北陆块基底演化关系启示

有关全吉地块前寒武纪基底构造属性的认识仍

存在不同意见. 陈炳蔚等(1995)和 Xiao *et al.* (2004)等依据地质事件性质以及年代学研究认为全吉地块基底可能是华北陆块的一部分. 据基底岩石的 Nd-Pb 同位素组成特征, 曾认为全吉地块基底与扬子陆块基底具有亲缘性(万渝生等, 2003; 张建新等, 2003; Wan *et al.*, 2006; 张宏飞等, 2006; 陈能松等, 2007). 全吉地块和塔里木陆块都发育南华纪以来的稳定盖层, 在新元古代以来具有极其相似的地质演化历史(陆松年等, 2002). 和塔里木陆块基底一样, 全吉地块不仅发育 2.2~2.4 Ga 时期的花岗岩类侵入事件(陆松年等, 2002, 2006; Lu *et al.*, 2008), 而且在变质地层组成、变质作用事件和地壳生长等方面与塔里木陆块都存在可比性, 因而被认为可能是从塔里木陆块中分离出来的一个大陆碎块(Chen *et al.*, 2012). 因此, 对全吉地块基底构造属性的认识可为研究其塔里木母陆块基底的构造属性提供重要启示.

热事件序列和性质上的一致性 or 相似性是判断两个陆块基底之间是否存在亲缘性或互动史的重要依据之一. Liu *et al.* (2008)通过对湖北宜昌崆岭地区的扬子陆块南华纪—震旦纪盖层碎屑锆石年龄谱的研究获得 4 个主要的年龄组: 720~910 Ma, 1.90~2.05、2.40~2.55 和 2.60~2.70 Ga. Wang *et al.* (2010)对贵州梵净山地区南华纪碎屑锆石年龄谱的研究也得出了相似的结果. 前人在研究古元古代副变质岩中测定的继承性碎屑锆石 U-Pb 年龄显示, 古元古代早期不仅份额小而且谐和度普遍低于 90%, 这些数据在谐和图上整体上与其他数据点一道沿一条不一致线排列(Qiu *et al.*, 2000; Gao *et al.*, 2001; Zhang *et al.*, 2006), 显示为 ~ 2.7 Ga 或 ~ 2.9 Ga 热事件的产物. 总之, 古元古代沉积岩中的碎屑锆石并没有记录到 2.1~2.5 Ga 的热事件; 更重要的是, 目前也没有发现这一时期的岩浆侵入活动证据. Yang *et al.* (2009)对流经华北陆块内部的永定河和栾河的河口碎屑锆石年龄谱的研究表明, 华北陆块基底在元古代时期的主要热事件发生在 1.8~1.9、2.1~2.2 和 2.3~2.5 Ga, 而 2.3~2.5 Ga 的热事件表现为区域性的花岗岩类侵入和酸性火山活动(孙勇和于在平, 1988; Zhao *et al.*, 2000, 2001, 2005; Kröner *et al.*, 2005; 陈斌等, 2006; 耿元生等, 2006; 第五春荣等, 2007). 因此, 古元古代早—中期(2.3~2.4 Ga)的热事件是华北陆块的特征事件. 在古元古代晚期, 华北陆块发生过两期重要的变质作用事件. 第 1 期源于鄂尔多斯地

块与阴山地块在 1.90~1.95 Ga 沿北部孔兹岩带碰撞汇聚形成西部陆块的构造事件,第 2 期源于在 ~1.85 Ga 东部地块与西部地块沿中部造山带碰撞汇聚最终形成统一华北陆块的构造事件(Zhao *et al.*, 2005; Wan *et al.*, 2006). 扬子陆块基底古元古代麻粒岩相变质作用发生在 ~2.0 Ga(Zhou *et al.*, 1999; 吴元保等, 2002; 陈能松等, 2006; Sun *et al.*, 2008; Wu *et al.*, 2008, 2009), 结束于 ~1.90 Ga(Zhang *et al.*, 2006), 其变质作用事件显然比华北陆块发生得稍早, 也结束得略早. 更重要的是, 扬子陆块目前尚无类似于华北陆块那样的两期构造—变质事件的确切报道. 除热事件时代以外, 基底的主要组成时代、克拉通化时代和盖层时代的差异(即物质组成差异), 是鉴别不明微陆(地)块与华北陆块和扬子陆块亲缘性的基本依据. 研究表明, 华北陆块主要由新太古代—古元古代岩石组成(Liu *et al.*, 1992; Song *et al.*, 1996; Zhao *et al.*, 2000, 2001, 2005; Zheng *et al.*, 2004; Wu *et al.*, 2005), 最终克拉通化完成于古元古代末, 其盖层由中元古代以来的地层组成; 扬子陆块主要由中元古代以来的岩石组成, 最终克拉通化完成于中元古代甚至新元古代之初, 其盖层由南华纪以来的地层组成.

全吉群下部砂岩的碎屑锆石年龄谱记录了至少 6 个热事件, 但记录太古代热事件的锆石份额极小(图 2b), 古元古代热事件的锆石份额占绝对优势. 这表明, 全吉地块基底及其塔里木母陆块基底的组成应以古元古代岩石为主. 全吉群下部的石英砂岩碎屑锆石年龄谱记录了 ~2.45、~2.32、~2.11 和 ~1.95 Ga 这 4 个主要热事件, 其中 ~2.32 Ga 和 ~2.45 Ga 热事件对应于基底发育的区域性花岗岩侵入作用(陆松年等, 2002, 2006; 李晓彦等, 2007; Lu *et al.*, 2008), 与华北陆块发育的同时期花岗岩侵入作用一致(孙勇等, 1988; Zhao *et al.*, 2000, 2001, 2005; Kröner *et al.*, 2005; 陈斌等, 2006; 耿元生等, 2006; 第五春荣等, 2007). 全吉地块基底发育的 ~1.95 Ga 的麻粒岩相—角闪岩相区域变质作用和 ~1.80~1.83 Ga 的绿帘角闪岩相—角闪岩相变质作用(未发表)与华北陆块统一过程中发生过的两期区域变质作用一致(Zhao *et al.*, 2003). 综上所述, 全吉地块及其塔里木母陆块虽然自新元古代以来与扬子陆块具有极其相似的地质演化历史而有别于华北陆块, 但在整个古元古代期间发生的热事件却与华北陆块基底的热事件相似. 这为全吉

地块及其塔里木母陆块在古元古代期间与华北陆块演化历史相似、或曾与之发生过构造互动、或具有亲缘的构造属性的认识(陈炳蔚等, 1995; Xiao *et al.*, 2004)提供了一个新证据.

6 结论

(1) 克拉通盖层中的碎屑锆石既可以提供物源区的位置和源区的剥露深度信息, 也可以提供因剥蚀而缺失了的部分地质体或因调查尺度所限而漏失的基底源区早期热事件信息. 研究表明, 全吉群下部砂岩的碎屑物源区位于全吉地块中、东部地区的包括达肯大坂岩群和未剥露出古元古代末期变质基性岩墙群的德令哈杂岩所组成的基底岩系.

(2) 全吉群下部的石英砂岩中的碎屑锆石的年龄谱和微量元素组成揭示全吉地块的德令哈杂岩主要由变质变形的 ~2.11~2.45 Ga 的花岗岩组成, 指示全吉地块和其塔里木母陆块基底主要由古元古代岩石组成. 全吉地块和其塔里木母陆块在 ~2.32~2.45 Ga(可能包括 ~2.11 Ga) 发生区域性花岗岩浆侵入事件, 并可能曾伴随着初生地壳的形成和地壳生长. 在 ~1.95 Ga, 全吉地块和其塔里木母陆块发生了区域性变质作用, 响应全球 Columbia 超大陆汇聚事件, 基底受到强烈再造.

(3) 全吉地块及其塔里木母陆块基底中记录的新太古代至古元古代构造热事件及其性质与华北陆块的相同或相似, 指示此间它们可能发生过构造互动, 其构造属性可能亲缘于华北陆块.

References

- Belousova, E. A., O'Reilly, W. G., Griffin, W. L., et al., 2002. Igneous zircon; trace-element composition as an indicator of source rock type. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 143(5): 602—622. doi:10.1007/s00410-002-0364-7
- Belousova, E. A., Reid, A. J., Griffin, W. L., et al., 2009. Rejuvenation vs. recycling of Archean crust in the Gawler craton, South Australia; evidence from U-Pb and Hf isotopes in detrital zircon. *Lithos*, 113(3—4): 570—582. doi:10.1016/j.lithos.2009.06.028
- Chen, B., Liu, S. W., Geng, Y. S., et al., 2006. Zircon U-Pb ages, Hf isotopes and significance of the Late Archean-Paleoproterozoic granitoids from the Wutai-Lüliang terrain, North China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2): 296—304 (in Chinese with English abstract).
- Chen, B. W., Wang, Y. B., Zuo, G. C., 1995. Terrain subdivision

- of the northern Qinghai-Xizang (Tibet) plateau and its tectonic evolution, *Acta geophysica sinica*, 38(Suppl. II):98—113 (in Chinese with English abstract).
- Chen, N. S., Liu, R., Sun, M., et al., 2006. LA-ICPMS U-Pb zircon dating for felsic granulite, Huangtuling area, north Dabieshan; constraints on timing of its protolith and granulite-facies metamorphism, and thermal events in its provenance. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(3):294—300 (in Chinese with English abstract).
- Chen, N. S., Wang, X. Y., Zhang, H. F., et al., 2007. Geochemistry and Nd-Sr-Pb isotopic compositions of granitoids from Qaidam and Oulongbuluke Micro-Blocks, NW China: constraints on basement nature and tectonic affinity. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(1):7—21 (in Chinese with English abstract).
- Chen, N. S., Gong, S. L., Sun, M., et al., 2009. Precambrian evolution of the Quanji block, northeastern margin of Tibet; insights from zircon U-Pb and Lu-Hf isotope compositions. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35(3—4):367—376. doi:10.1016/j.jseaes.2008.10.004
- Chen, N. S., Zhang, L., Sun, M., et al., 2012. U-Pb and Hf isotopic compositions of detrital zircons from the paragneisses of the Quanji massif, NW China; implications for its early tectonic evolutionary history. *Journal of Asian Earth Sciences* (accepted).
- DiWu, C. R., Sun, Y., Lin, C. L., et al., 2007. Zircon U-Pb ages and Hf isotopes and their geological significance of Yiyang TTG gneisses from Henan Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2):253—262 (in Chinese with English abstract).
- Gao, S., Qiu, Y. M., Ling, W. L., et al., 2001. SHRIMP Single zircon U-Pb dating of the Kongling high-grade metamorphic terrain; evidence for >3.2 Ga old continental crust in the Yangtze craton. *Science in China (Ser. D)*, 44(4):326—335. doi:10.1007/BF02907103
- Geng, Y. S., Yang, C. H., Wan, Y. S., 2006. Paleoproterozoic granitic magmatism in the Lüliang area, North China craton; constraint from isotopic geochronology. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2):305—314 (in Chinese with English abstract).
- Hao, G. J., Lu, S. N., Wang, H. C., et al., 2004. The Pre-Devonian tectonic framework in the northern margin of Qaidam basin and geological evolution of Olongbuluck palaeo-block. *Earth Science Frontiers*, 11(3):115—122 (in Chinese with English abstract).
- Hawkesworth, C. J., Kemp, A. I. S., 2006. Using hafnium and oxygen isotopes in zircons to unravel the record of crustal evolution. *Chemical Geology*, 226(3—4):144—162. doi:10.1016/j.chemgeo.2005.09.018
- Huang, W., Zhang, L., Ba, J., et al., 2011. Detrital zircon LA-ICP-MS U-Pb dating for K-feldspar leplite of Quanji massif in the north margin of Qaidam block: constraint on the age of Dakendaban Group. *Geological Bulletin of China*, 30(9):1353—1359 (in Chinese with English abstract).
- Jackson, S. E., Pearson, N. J., Griffin, W. L., et al., 2004. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology. *Chemical Geology*, 211(1—2):47—69. doi:10.1016/j.chemgeo.2004.06.017
- Kröner, A., Wilde, S. A., Li, J. H., et al., 2005. Age and evolution of a Late Archean to Paleoproterozoic upper to lower crustal section in the Wutaishan/Hengshan/Fuping terrain of Northern China. *Journal of Asian Earth Science*, 24(5):577—595. doi:10.1016/j.jseaes.2004.01.001
- Li, X. Y., Chen, N. S., Xia, X. P., et al., 2007. Onstraints on timing of the Early-Paleoproterozoic magmatism and crustal evolution of the Oulongbuluke microcontinent: U-Pb and Lu-Hf isotope systematics of zircons from Mohe granitic pylon. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2):513—522 (in Chinese with English abstract).
- Liao, F. X., 2010. Chronology and geochemistry of Delingha metamorphosed mafic dyke swarms (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan, 1—33 (in Chinese).
- Liu, D. Y., Nutman, A. P., Compston, W., et al., 1992. Remnants of ≥ 3800 Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean craton. *Geology*, 20(4):339—342. doi:10.1130/0091-7613(1992)020<0339:ROMCIT>2.3.CO;2
- Liu, X. M., Gao, S., DiWu, C. R., et al., 2008. Precambrian crustal growth of Yangtze craton as revealed by detrital zircon studies. *American Journal of Science*, 308(4):421—468. doi:10.2475/04.2008.02
- Liu, Y. S., Hu, Z. C., Zong, K. Q., et al., 2010. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 55(15):1535—1546. doi:10.1007/s11434-010-0052-3
- Lu, S. N., Yu, H. F., Zhao, F. Q., et al., 2002. Preliminary study of Precambrian geology in the North Tibet-Qinghai plateau. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Lu, S. N., Yu, H. F., Li, H. K., et al., 2006. Early Paleozoic suture zones and tectonic divisions in the “Central China orogen”. *Geological Bulletin of China*, 25(12):1368—1380 (in Chinese with English abstract).

- Lu, S. N., Li, H. K., Zhang, C. L., et al., 2008. Geological and geochronological evidence for the Precambrian evolution of the Tarim craton and surrounding continental fragments. *Precambrian Research*, 160 (1–2): 94–107. doi: 10.1016/j.precamres.2007.04.025
- Ludwig, K. R., 2003. User's manual for isoplot/EX version 3.00: a geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 4: 1–70.
- Qiu, Y. M., Gao, S., McNaughton, N. J., et al., 2000. First evidence of ≥ 3.2 Ga continental crust in the Yangtze craton of South China and its implications for Archean crustal evolution and Phanerozoic tectonics. *Geology*, 28 (1): 11–14. doi: 10.1130/0091-7613(2000)028<0011:FEOGCC>2.0.CO;2
- Rubatto, D., 2002. Zircon trace element geochemistry: partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism. *Chemical Geology*, 184 (1–2): 123–138. doi: 10.1016/S0009-2541(01)00355-2
- Song, B., Nutman, A. P., Liu, D. Y., et al., 1996. 3 800 to 2 500 Ma crustal evolution in the Anshan area of Liaoning Province Northeastern China. *Precambrian Research*, 78(1–3): 79–94. doi: 10.1016/0301-9268(95)00070-4
- Sun, M., Chen, N. S., Zhao, G. C., et al., 2008. U-Pb zircon and Sm-Nd isotopic study of the Huangtuling granulite, Dabie-Sulu belt, China: implication for the Paleoproterozoic tectonic history of the Yangtze craton. *American Journal of Science*, 308(4): 469–483. doi: 10.2475/04.2008.03
- Sun, Y., Yu, Z. P., 1988. Geochemistry of Archean Shushui complex. *Geochimica*, (4): 319–325 (in Chinese with English abstract).
- Vavra, G., Gebauer, D., Schmid, R., et al., 1996. Multiple zircon growth and recrystallization during polyphase Late Carboniferous to Triassic metamorphism in granulites of the Ivrea zone (Southern Alps): an ion microprobe (SHRIMP) study. *Contrib Mineral Petrol*, 122 (4): 337–358. doi: 10.1007/s004100050132
- Vavra, G., Schmid, R., Gebauer, D., 1999. Internal morphology, habit and U-Th-Pb microanalysis of amphibolite-to-granulite facies zircons: geochronology of the Ivrea zone (Southern Alps). *Contrib Mineral Petrol*, 134(4): 380–404. doi: 10.1007/s004100050492
- Wan, Y. S., Xu, Z. Q., Yang, J. S., et al., 2003. The Precambrian high-grade basement of the Qilian terrane and neighboring areas: its ages and compositions. *Acta Geoscientia Sinica*, 24(4): 319–324 (in Chinese with English abstract).
- Wan, Y. S., Zhang, J. X., Yang, J. S., et al., 2006. Geochemistry of high-grade metamorphic rocks of the North Qaidam Mountains and their geological significance. *Journal of Asian Earth Sciences*, 28(2–3): 174–184. doi: 10.1016/j.jseaeas.2005.09.018
- Wang, L. J., Griffin, W. L., Yu, J. H., et al., 2010. Precambrian crustal evolution of the Yangtze block tracked by detrital zircons from Neoproterozoic sedimentary rocks. *Precambrian Research*, 177(1–2): 131–144. doi: 10.1016/j.precamres.2009.11.008
- Wang, Q. Y., Chen, N. S., Li, X. Y., et al., 2008. LA-ICPMS zircon U-Pb dating for timing of the formation and thermal events in Dakendaban Group of the basement of the Quanji block, Delingha, NW China. *Chinese Science Bulletin*, 53(14): 1693–1701 (in Chinese).
- Wang, Q. Y., Pan, Y. M., Chen, N. S., et al., 2009. Proterozoic polymetamorphism in the Quanji block, Northwestern China: evidence from microtextures, garnet compositions and monazite CHIME ages. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(5): 686–698. doi: 10.1016/j.jseaeas.2008.10.008
- Wiedenbeck, M., Alle, P., Corfu, F., et al., 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Th, trace element and REE analyses. *Geostandards Newsletter*, 19(1): 1–23. doi: 10.1111/j.1751-908X.1995.tb00147.x
- Wu, F. Y., Zhao, G. C., Wilde, S. A., et al., 2005. Nd isotopic constraints on crustal formation in the North China craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5): 523–545. doi: 10.1016/j.jseaeas.2003.10.011
- Wu, Y. B., Chen, D. G., Xia, Q. K., et al., 2002. SIMS U-Pb dating of zircons in granulite of Huangtuling from northern Dabieshan. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3): 378–382 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y. B., Zheng, Y. F., 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1554–1569. doi: 10.1360/04wd0130
- Wu, Y. B., Zheng, Y. F., Gao, S., et al., 2008. Zircon U-Pb age and trace element evidence for Paleoproterozoic granulite-facies metamorphism and Archean crustal rocks in the Dabie orogen. *Lithos*, 101(3–4): 308–322. doi: 10.1016/j.lithos.2007.07.008
- Wu, Y. B., Gao, S., Gong, H. J., et al., 2009. Zircon U-Pb age, trace element and Hf isotope composition of Kongling terrane in the Yangtze craton: refining the timing of Palaeoproterozoic high-grade metamorphism. *Journal of Metamorphic Geology*, 27(6): 461–477. doi: 10.1111/j.1525-1314.2009.00826.x
- Xiao, Q. H., Lu, X. X., Wang, F., et al., 2004. Age of Yingfeng rapakivi granite pluton on the north flank of Qaidam

- am and its geological significance. *Science in China (Ser. D)*, 47(4): 357—365. doi:10.1360/02yd0472
- Xu, Z. Q., Yang, J. S., Wu, C. L., et al., 2006. Timing and mechanism of formation and exhumation of the Northern Qaidam ultrahigh-pressure metamorphic belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 28(2—5): 160—173. doi: 10.1016/j.jseas.2005.09.016
- Yang, J., Gao, S., Chen, C., et al., 2009. Episodic crustal growth of North China as revealed by U-Pb age and Hf isotopes of detrital zircons from modern rivers. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(9): 2660—2673. doi:10.1016/j.gca.2009.02.007
- Yu, F. C., Wei, G. F., Sun, J. D., 1994. The pattern of mineralization of gold deposit syn-tectonics in dark rocks series; by Tanjianshan gold deposit, Northwest University Press, Xi'an (in Chinese).
- Zhang, H. F., Jin, L. L., Zhang, L., et al., 2006. Pb and Nd isotopic compositions of basement and granitoid in the Qilianshan; constraints on tectonic affinity. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(1): 59—65 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. X., Wan, Y. S., Xu Z. Q., et al., 2001. Discovery of basic granulite and its formation age in Delingha area, North Qaidam Mountains. *Acta Petrologica Sinica*, 17(3): 453—458 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. X., Wan, Y. S., Meng, F. C., et al., 2003. Geochemistry, Sm-Nd and U-Pb isotope study of gneisses (schists) enclosing eclogites in the North Qaidam Mountains—deeply subducted Precambrian metamorphic basement? *Acta Petrologica Sinica*, 19(3): 443—451 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L., Liao, F. X., Ba, J., et al., 2011. Mineral evolution and zircon geochronology of mafic enclave in granitic gneiss of the Quanji block and implications for Paleoproterozoic regional metamorphism. *Earth Science Frontiers*, 18(2): 79—84 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. B., Zheng, Y. F., Wu, Y. B., et al., 2006. Zircon U-Pb age and Hf-O isotope evidence for Paleoproterozoic metamorphic event in South China. *Precambrian Research*, 151(3—4): 265—288. doi: 10.1016/j.precamres.2006.08.009
- Zhao, G. C., Cawood, P. A., Wilde, S. A., et al., 2000. Metamorphism of basement rocks in the central zone of the North China craton; implications for Paleoproterozoic tectonic evolution. *Precambrian Research*, 103(1—2): 55—88. doi:10.1016/S0301-9268(00)00076-0
- Zhao, G. C., Wilde, S. A., Cawood, P. A., et al., 2001. Archean blocks and their boundaries in the North China craton; lithological, geochemical, structural and *P-T* path constraints and tectonic evolution. *Precambrian Research*, 107(1—2): 45—73. doi: 10.1016/S0301-9268(00)00154-6
- Zhao, G. C., Sun, M., Wilde, S. A., 2003. Major tectonic units of the North China craton and their Paleoproterozoic assembly. *Science in China (Ser. D)*, 46(1): 23—38. doi:10.1360/03yd9003
- Zhao, G. C., Sun, M., Simon, A. W., et al., 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China craton; key issues revisited. *Precambrian Research*, 136(2): 177—202. doi:10.1016/j.precamres.2004.10.002
- Zheng, J. P., Griffin, W. L., O'Reilly, S. Y., et al., 2004. 3.6 Ga lower crust in Central China; new evidence on the assembly of the North China craton. *Geology*, 32(3): 229—232. doi:10.1130/G20133.1
- Zhou, H. W., Li, X. H., Liu, Y., et al., 1999. Age of granulite from Huangtuling, Dabie Mountain; Pb-Pb dating of garnet by a stepwise dissolution technique. *Chinese Science Bulletin*, 44(10): 941—944. doi: 10.1007/BF02885071

附中文参考文献

- 陈斌, 刘树文, 耿元生, 等, 2006. 吕梁—五台地区晚太古宙—古元古代花岗岩锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素性质及其地质意义. *岩石学报*, 22(2): 296—304.
- 陈炳蔚, 王彦斌, 左国朝, 1995. 青藏高原北部地体划分及其构造演化. *地球物理学报*, 38(增刊 II): 98—113.
- 陈能松, 刘嵘, 孙敏, 等, 2006. 北大别黄土岭长英质麻粒岩的原岩、变质作用及源区热事件年龄的锆石 LA-ICPMS U-Pb 测年约束. *地球科学——中国地质大学学报*, 31(3): 294—300.
- 陈能松, 王新宇, 张宏飞, 等, 2007. 柴—欧微地块花岗岩地球化学和 Nd-Sr-Pb 同位素组成: 基底性质和构造属性启示. *地球科学——中国地质大学学报*, 32(1): 7—21.
- 第五春荣, 孙勇, 林慈鑫, 等, 2007. 豫西宜阳地区 TTG 质片麻岩锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素地质学. *岩石学报*, 23(2): 253—262.
- 耿元生, 杨崇辉, 万渝生, 2006. 吕梁地区古元古代花岗岩浆作用——来自同位素年代学的证据. *岩石学报*, 22(2): 305—314.
- 郝国杰, 陆松年, 王惠初, 等, 2004. 柴达木盆地北缘前泥盆纪构造格架及欧龙布鲁克古陆块地质演化. *地学前缘*, 11(3): 115—122.
- 黄婉, 张璐, 巴金, 等, 2011. 柴达木地块北缘全吉地块钾长石浅粒岩碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄——对达肯大坂岩群时代的约束. *地质通报*, 30(9): 33—39.
- 李晓彦, 陈能松, 夏小平, 等, 2007. 莫河花岗岩的锆石 U-Pb

- 和 Lu-Hf 同位素研究: 柴北欧龙布鲁克微陆块始古元古代岩浆作用年龄和地壳演化约束. 岩石学报, 23(2): 513—522.
- 廖梵汐, 2010. 德令哈变质镁铁质岩墙群的年代学和地球化学研究(学士学位论文). 武汉: 中国地质大学, 1—33.
- 陆松年, 于海峰, 赵凤清, 等, 2002. 青藏高原北部前寒武纪地质初探. 北京: 地质出版社.
- 陆松年, 于海峰, 李怀坤, 等, 2006. “中央造山带”早古生代缝合带及构造分区概述. 地质通报, 25(12): 1368—1380.
- 孙勇, 于在平, 1988. 涑水杂岩的地球化学特征. 地球化学, (4): 319—325.
- 万渝生, 许志琴, 杨经绥, 等, 2003. 祁连造山带及其邻区前寒武纪深变质基底的时代及组成. 地球学报, 24(4): 319—324.
- 王勤燕, 陈能松, 李晓彦, 等, 2008. 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. 科学通报, 53(14): 1693—1701.
- 吴元保, 陈道公, 夏群科, 等, 2002. 北大别黄土岭麻粒岩锆石 U-Pb 离子探针定年. 岩石学报, 18(3): 378—382.
- 于凤池, 魏刚锋, 孙继东, 1994. 黑色岩系同构造金矿床成矿模式——以淮涧山金矿床为例. 西安: 西北大学出版社.
- 张宏飞, 靳兰兰, 张利, 等, 2006. 基底岩系和花岗岩类 Pb-Nd 同位素组成限制祁连山带的构造属性. 地球科学——中国地质大学学报, 31(1): 59—65.
- 张建新, 万渝生, 许志琴, 等, 2001. 柴达木北缘德令哈地区基性麻粒岩的发现及其形成时代. 岩石学报, 17(3): 453—458.
- 张建新, 万渝生, 孟繁聪, 等, 2003. 柴北缘夹榴辉岩的片麻岩(片岩)地球化学、Sm-Nd 和 U-Pb 同位素研究——深俯冲的前寒武纪变质基底? 岩石学报, 19(3): 443—451.
- 张璐, 廖梵汐, 巴金, 等, 2011. 全吉地块花岗片麻岩中镁铁质岩包体的矿物演化和锆石定年与古元古代区域变质作用. 地学前缘, 18(2): 79—84.