

重庆南川铝土矿物源分析:碎屑锆石 U-Pb 定年、Hf 同位素和锆石微量元素示踪

钟海仁^{1,2)}, 孙艳¹⁾, 赵芝¹⁾, 王成辉¹⁾

1) 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京, 100037;

2) 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京, 100083

内容提要:重庆南川沉积型铝土矿主产于中下志留统韩家店组与中二叠统梁山组的侵蚀面上, 即赋矿层位为梁山组中下部(大竹园组), 是黔北-渝南铝土成矿带的重要组成部分。铝土矿中碎屑锆石丰富, 具有典型振荡环带特征, 应用 LA-(MC)-ICP-MS 方法分别对碎屑状和土状铝土矿样品进行了全岩地球化学、锆石 U-Pb 定年、Hf 同位素和锆石微量元素分析。结果显示两件样品为陆壳的、与造山/弧作用相关的花岗岩类锆石, 其 U-Pb 年龄分布从晚泥盆世到太古宙(406~3054 Ma)均有出现, 主要显示出 4 个年龄区间: 410~630 Ma、732~1251 Ma、1405~1757 Ma 和 2409~2553 Ma, 但高峰在 732~1251 Ma, 峰值年龄出现在 800 Ma 和 1000 Ma, 且锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值主要分布在 -15~10 间。铝土矿和韩家店组、黄龙组一致的碎屑锆石年龄分布和沉积古地理环境暗示后两者是铝土矿最直接的母岩。通过对比华南板块不同地层的地质特征、锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素, 发现来自江南造山带西段和华夏陆块南岭-云开地块的中新元古代长英质岩石是碎屑锆石最主要的初始物源区, 而扬子西缘和北缘贡献较少。

关键词: 重庆; 铝土矿; 碎屑锆石; U-Pb 定年学; Hf 同位素; 锆石微量元素; 沉积物源

根据下伏基底岩性可将铝土矿分为覆盖于碳酸盐岩上的喀斯特型(沉积型)和由铝硅酸盐岩原位风化形成的红土型铝土矿(Bárdossy, 1982); 或根据铝土矿矿床成因分为古风化壳沉积型、红土型和堆积型(Gao Lan et al., 2014)。其中古风化壳沉积型铝土矿主要产于碳酸盐岩、砂岩、页岩、玄武岩等硅酸盐岩侵蚀面上或其组成的岩系中, 是中国铝土矿资源最丰富、伴生锂资源量最具潜力的类型。黔北-渝南地区分布有大量古风化壳沉积型铝土矿, 是中国铝土矿成矿区带的重要组成部分, 许多学者对该地区铝土矿的矿物组成(Li Zaihui et al., 2013)、矿床地球化学特征(Liu Ping, 1999; Wang Xiaomei et al., 2013; Han Ying et al., 2016)、沉积时代(Du Yuansheng et al., 2013)、沉积古地理(Jin Zhongguo et al., 2018)、成矿过程及模型(Liu Ping et al., 2014)和伴生元素分布规律(Wang

Denghong et al., 2013; Jin Zhongguo et al., 2019)进行了大量工作, 但对铝土矿成因和物质来源的探讨一直未有定论。前人针对该区铝土矿的研究主要集中在黔北务正道地区, 而对渝南南川-武隆地区铝土矿的研究较少。本文研究了重庆南川铝土矿的碎屑锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素和锆石微量元素, 并与区域岩浆-构造活动、古地理沉积环境演化特征相结合, 为示踪铝土矿成矿母岩、追溯初始物源区和探讨铝土矿成矿过程提供了新证据。

1 地质概况

1.1 区域地质背景

华南板块由北西侧的扬子板块和江绍-钦防对接带隔开的华夏造山系(板块)组成(图 1), 其南西界为哀牢山-红河断裂带, 北西界为程江-木里断裂带、龙门山断裂带, 北部为秦祁昆造山系。古华南板

注: 本文为国家重点研发计划项目(编号 2017YFC0602701)和中国地质调查局项目(编号 DD20160056、DD20160346、DD20190379)资助的成果。

收稿日期: 2019-12-12; 改回日期: 2020-02-25; 网络发表日期: 2020-04-15; 责任编辑: 范宏瑞; 责任编辑: 周健。

作者简介: 钟海仁, 男, 1995 年生。硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。Email: hizone920@163.com。通讯作者: 孙艳, 女, 1981 年生。副研究员, 从事三稀资源战略调查研究工作。Email: sunyan517@vip.163.com。

引用本文: 钟海仁, 孙艳, 赵芝, 王成辉. 2020. 重庆南川铝土矿物源分析: 碎屑锆石 U-Pb 定年、Hf 同位素和锆石微量元素示踪. 地质学报, 94(5): 1505~1524. doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2020149.
Zhong Hairan, Sun Yan, Zhao Zhi, Wang Chenghui. 2020. Provenance of bauxite deposits in the Nanchuan district, Chongqing: evidence from U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in detrital zircons. Acta Geologica Sinica, 94(5): 1505~1524.

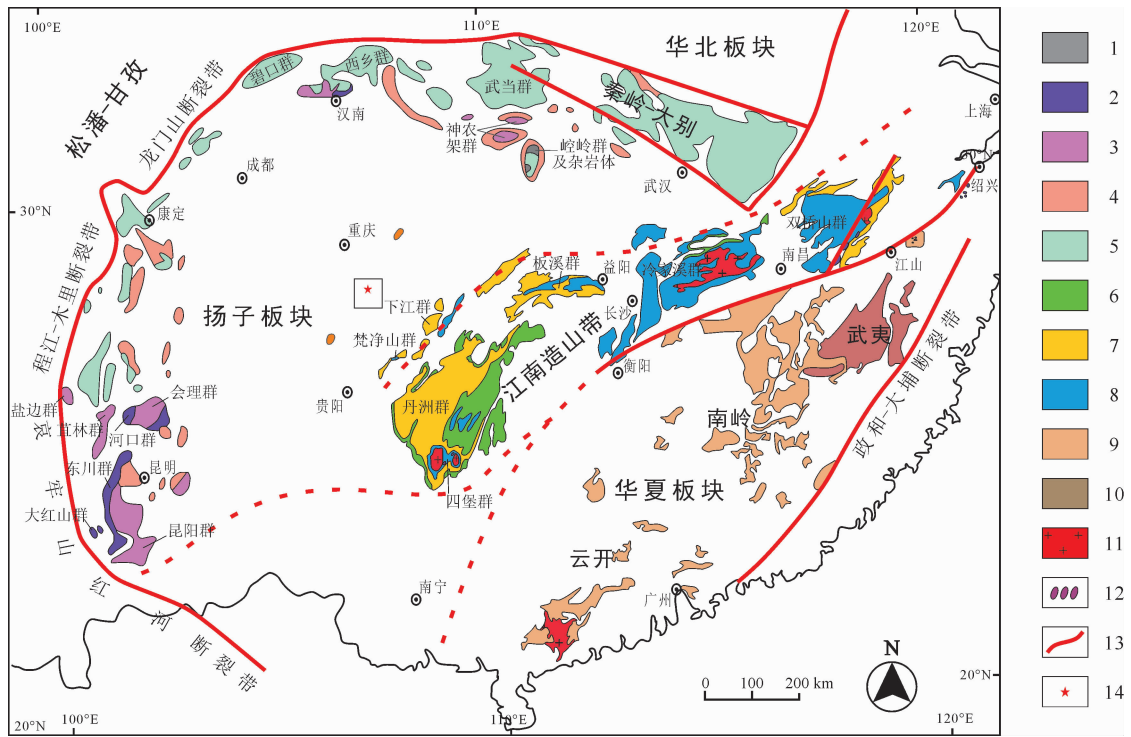


图 1 华南板块大地构造及前寒武纪地层分布简图(底图据 Sun Junjun et al. , 2018)

Fig. 1 The geological map of South China showing the distribution of Precambrian rock in Yangtze (including Jiangnan belt) and Cathaysia(after Sun Junjun et al. , 2018)

1—扬子板块太古宙结晶基底;2—扬子板块元古代地层;3—扬子板块中新元古代地层;4—扬子板块新元古代晚期未变质盖层;5—新元古代攀西-汉南岛弧/裂谷带;6—江南造山带新元古代晚期地层;7—江南造山带新元古中期地层;8—江南造山带新元古早期地层;9—华夏板块新元古代地层;10—华夏板块元古代地层;11—新元古代花岗岩;12—蛇绿混杂岩;13—断裂带;14—研究区及采样位置

1—Archean crystalline basement in Yangtze; 2—Paleoproterozoic strata in Yangtze; 3—Meso-Neoproterozoic strata in Yangtze; 4—Late Neoproterozoic unmetamorphosed cover in Yangtze; 5—Neoproterozoic arc and/or rift-related rocks in the Panxi-Hannan belt; 6—Late Neoproterozoic strata in Jiangnan; 7—Middle Neoproterozoic strata in Jiangnan; 8—Early Neoproterozoic strata in Jiangnan; 9—Neoproterozoic strata in Cathaysia; 10—Paleoproterozoic strata in Cathaysia; 11—Neoproterozoic granite; 12—phiolitic melange; 13—fault; 14—study area and sample location

块拼合(~850 Ma)的重要标志——长约 1500km,宽约 200km 的江南(四堡)造山带从桂北、黔东经湘西、赣北直至皖南、浙西横贯于华南板块,形成了呈区域构造角度不整合接触的两套变质沉积序列。在扬子板块西缘则分布长约 1000km,近 NS 向新元古代岛弧/裂谷带,即攀西-汉南带。黔北—渝南铝土成矿带大地构造位置主体属扬子板块南部碳酸盐台地中部,西接川中前陆盆地,东邻扬子东南缘被动边缘盆地,南川水江铝土矿床位于该成矿带北端。

新元古代早期,武陵(四堡)运动使区域地层褶皱上升为陆并遭受风化剥蚀;新元古代晚期,在 Rodinia 超大陆裂解背景下形成了南华裂谷盆地和川滇裂谷盆地,分别发育了巨厚的海相和陆相沉积并伴有相应的裂谷型岩浆活动,前者一直持续到了奥陶纪(Zhang Guowei et al. , 2013);奥陶纪末期至志留纪早期,雪峰隆起和黔中隆起逐渐抬升,随即

黔中隆起逐步与康滇古陆相连并向东发展渐渐融入雪峰隆起;晚志留世受广西(加里东)运动影响,盆地周缘板内造山带(雪峰隆起)不断隆起和扩张,黔北—渝南地区由内部坳陷盆地转变为前陆盆地(Huang Hanyu et al. , 2018),雪峰隆起和黔中隆起被海水隔开同时在黔中隆起北缘形成了巨厚的韩家店组;泥盆纪至早石炭世为主要的剥蚀夷平期,形成了巨厚的风化沉积物,期内本区逐渐向南漂移并靠近赤道(Liu Ping, 2001);晚石炭世早期,黔北—渝南出现了一次自鄂西—渝东地区经武隆—南川之间(李沛刚等, 2014)向黔北侵入的短暂海侵事件并沿晚志留世—早石炭世剥蚀形成的低洼谷底沉积了黄龙组灰岩,其在海退过程中也遭受了不同程度的风化剥蚀(Liu Ping et al. , 2016);自晚石炭世马平期至二叠纪梁山期,渝南地区沉积环境以半封闭的海湾或滨浅湖为主(Du Yuansheng et al. , 2013),先

期形成的红土风化壳经短距离搬运后沉积在附近的平原或岩溶洼地中形成了含矿岩系。此后受海西—喜马拉雅多期次造山运动影响,含矿岩系回返至地层浅表或暴露于地表,在渗透水的作用下经过长期的淋滤,最终形成了不同品质的铝土矿。

1.2 矿床地质

区内构造发育,受燕山期和喜马拉雅期应力挤压形成了广泛的 NNE-NE 向隔挡式褶皱和逆冲断层,水江铝土矿床主要受九井向斜控制,矿石基本分布于向斜两翼。研究出露寒武系至侏罗系及第四系,但缺失上志留统、泥盆系和下石炭统,核部地层为下三叠统嘉陵江组,向两翼依次为下三叠统飞仙关组,上二叠统长兴组、龙潭组,中二叠统茅口组、栖霞组、梁山组、大竹园组,石炭系黄龙组,志留系韩家店组。其中韩家店组和黄龙组为本区铝土矿主要基底且控制着矿体形态,前者为一套以黄绿—紫红色页岩、黑色碳质页岩和粉砂岩为主夹若干泥质灰岩和生物碎屑灰岩的海相沉积地层,区内分布广泛;后者是一套细—粗晶灰岩、生物碎屑灰岩为主,偶见陆源碎屑的地层,仅部分地区有分布。

重庆铝土矿的含矿岩系通常被划分至梁山组(P_2l)下段,但据区域地层和古生物对比显示铝土矿具有穿时性,故也被独立称为大竹园组($C-P_1d$),类似于黔北铝土矿的地层划分。南川铝土矿含矿岩系一般厚 2~16m,其中铝土矿层厚 0.37~2.52m,平均厚度 1.36m,其平行不整合于中—晚志留统韩家店组粉砂质页岩上,少数不整合于晚石炭世黄龙组灰岩之上,上覆梁山组上段黑色薄层碳质页岩或栖霞组厚层灰岩。岩性可根据颜色和组成为:下部为黑色页岩、含绿泥石黏土岩、铁质黏(铝)土岩及褐铁矿等;上部主要为灰—深灰色碎(砾)屑状、豆鲕状、土状、致密状铝土矿(岩)及黏土岩。矿体多呈层状、似层状产于含铝岩系的中上部,与地层产状趋于一致,单个

矿体长数米至数百米不等,厚度较稳定,品位变化较大,沿走向及倾向常被黏土岩所代替。矿石类型主要有土状、致密块状、碎屑状和豆鲕状(图 2),并以土状铝土矿石质量最好,致密块状铝土矿石最差。

2 样品和研究方法

本文自重庆南川九井矿区水江铝矿山采集 2 件铝土矿石样品用于分析对比:样品 CQSJ-2 为碎屑状铝土矿,质地较硬,可见棱角状、次圆状碎屑颗粒,采自含矿岩系中部的铝土矿层;SJHK-1 为灰白色土状铝土矿,产于含矿层中下部。

样品全岩地球化学分析、碎屑锆石原位微量元素、U-Pb 定年和 Lu-Hf 同位素分析均在国家地质实验测试中心完成。主量元素测试仪器为 PE8300 等离子光谱仪(ICP-OES),微量元素测试仪器为 PE300D 等离子质谱仪(ICP-MS),分析精度一般分别在 1%~5%和 5%~10%以内,分析依据为 GB/T14506.30-2010、JY/T015-1996 等标准。锆石原位微量元素、U-Pb 定年及 Hf 同位素测试方法见 Hou Kejun et al. (2007)。为保证测试结果的可靠性,激光剥蚀选择的位置主要在具有震荡环带的部位,所测定的 U-Pb 年龄主要是锆石寄主岩浆岩的冷却年龄。同时为充分反映碎屑锆石群的年龄分布特征,全面揭示沉积物可能的源区,测点覆盖了不同外形、粒度、环带的锆石。

3 实验结果

3.1 全岩地球化学

样品 CQSJ-2 和 SJHK-1 的主要成分(表 1)均为 Al_2O_3 (63.59%, 73.57%) 和 SiO_2 (15.94%, 4.14%),二者 A/S 值均大于 1.8,均可划为铝土矿。其他主量元素氧化物含量普遍偏低,如 K_2O 、 Na_2O 、 MgO 、 CaO 、 MnO 及 P_2O_5 含量均低于 1%,仅 TiO_2

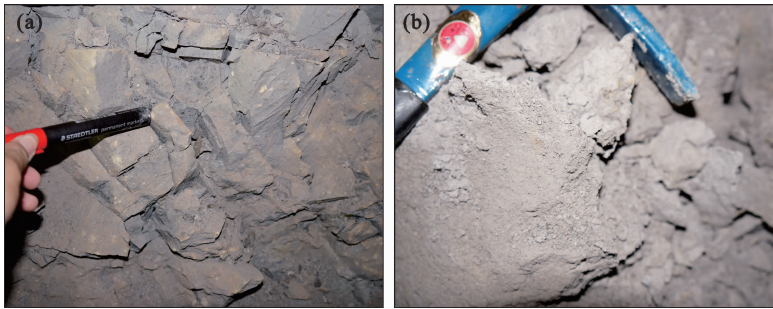


图 2 重庆南川碎屑状铝土矿(a)和土状铝土矿(b)照片

Fig. 2 Photographs of clastic bauxite (a) and earthy bauxite (b) in Nanchuan district, Chongqing

分别为 3.86% 和 3.39%。样品的烧失量分别为 13.69% 和 14.78%，并且 CIA 指数(Nesbitt et al.，1982)均高达 99，指示铝土矿经历了强烈的风化蚀变作用，成熟度较高。其次，碎屑状铝土矿(CQ SJ-2)和土状铝土矿(SJHK-1)的 Nb/Ta、Zr/Hf、Th/U

比值十分稳定，但前者更富集 Li、V、Zr、Hf 和亏损 Nb、Ta 元素。尤其样品 CQ SJ-2 的 Li 含量达 1542×10^{-6} ，而 SJHK-1 的 Li 含量仅 1.29×10^{-6} ，二者相比上地壳分别富集 73 倍和亏损 16 倍，即碎屑状铝土矿富锂而土状铝土矿少锂。

表 1 重庆南川铝土矿主量元素(%)和微量元素($\times 10^{-6}$)数据

Table 1 Data of major elements (%) and trace elements ($\times 10^{-6}$) of bauxite in Nanchuan district, Chongqing

样号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	TFe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	LOI	CIA	A/S
CQSJ-2	15.94	63.59	—	1.73	0.37	0.75	0.01	0.09	0.01	3.86	13.69	99.42	3.99
SJHK-1	4.14	73.57	0.05	0.68	0.78	0.07	0.01	0.05	0.07	3.39	14.13	98.8	17.77

样号	Li	V	Nb	Ta	Zr	Hf	Th	U	Nb/Ta	Zr/Hf	Th/U
CQSJ-2	1542	467	17	0.67	1509	41	22	19	25	37	1.14
SJHK-1	1.29	249	31	1.14	1003	27	28	15	27	38	1.83

3.2 锆石形貌和 U-Pb 定年

样品 CQ SJ-2 和 SJHK-1 的碎屑锆石大小和形态特征比较相似，锆石粒度在 60~150 μ m 之间(近 90%)，但也有部分颗粒大于 150 μ m 或小于 60 μ m (约 10%)；晶体主要为半自形—他形，基本无完整晶形，表现为浑圆形、椭圆形及不规则棱角状，且时代越老的锆石晶棱一般越圆润，内部结构也更复杂；晶面多出现裂纹，部分含有包裹体，晶粒被磨圆后长宽比大约在 1:1~1:3。样品 CQ SJ-2 可见广泛而明显的振荡环带(大于 90%)，并且其宽度大部分较窄(图 3，CQ SJ-2-21/23)，为典型岩浆锆石特征。部分锆石晶体可见清晰的扇形分带结构(图 3，CQ SJ-2-53)，样品中还有呈面状分带(图 3，CQ SJ-2-30/64)的变质增生锆石，发育自形—他形的古锆石内核(继承岩浆锆石)和沿边部生长的增生边。样品 SJHK-1 的锆石晶体磨圆度和破碎程度更高，包裹体数量增多，增生边结构愈加明显。锆石仍然发育典型的震荡环带，但出现较多不规则粥状、片状分带现象，可见岩浆成因的变质增生锆石(继承锆石)明显增多(周剑雄等，2007)。

铝土矿样品的碎屑锆石 U-Pb 年龄分布范围比较宽泛(406~3054 Ma)，从晚泥盆世到太古宙均有出现，故对于年龄老(>1.0 Ga)的锆石采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄，而年轻的锆石(<1.0 Ga)采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$ 年龄。本文挑选了谐和度在 90%~110%之间的年龄数据用于分析(表 2)，其中样品 CQ SJ-2 测试 64 点，样品 SJHK-1 分析 42 点，共计 106 个测点。本次仅 5 个测点的 Th/U 比值(图 4a)小于 0.1，显示变质锆石的特征，其余大部分(约 90%)测点 Th/U 比值均大于 0.4，属于岩浆锆石。同时 Th、U 含量和 Th/U 比值是判别锆石成因的

重要参数(Hoskin et al.，2003)，通常花岗岩类锆石具有较高的 Th、U 含量，很少低于 100×10^{-6} ，Th/U 比值可达 0.4 以上；而基性—超基性锆石 Th、U 含量相对前者较低，并且其韵律环带一般较宽或环带间衬度反差较小(周剑雄等，2007)。通过 Th-U 判别图(图 4b)发现 Th、U 存在明显正相关性(r 为 0.68 和 0.48)，且样品 CQ SJ-2 的 Th、U 相关性和 Th/U 比值明显高于 SJHK-1(图 4a、b)，说明前者具有更多花岗岩类锆石的特征，与阴极发光下普遍较窄的韵律环带的图像(图 3)相符；后者变质增生作用更加强烈，而土状铝土矿本身就反映了强烈的后期蚀变作用。

样品 CQ SJ-2 和 SJHK-1 得到的锆石年龄的整體特征相似，绝大部分测点均位于 U-Pb 谐和线上(图 5a、b)，表明在铝土矿成矿过程中锆石 U-Pb 体系未受到破坏。但前者在 800 Ma 明显集中且存在 3 个弱的峰值年龄；后者峰值年龄则在 1000 Ma 左右，大于 2500 Ma 的锆石缺乏而 500~630 Ma 的锆石增多。所有测点 U-Pb 年龄数据主要集中在新元古代早期青白口纪和中元古代晚期狭带纪(待建纪)，即在 732~1251 Ma($n=66$)之间(图 5c、d)，可细分为两个年龄段：773~827 Ma($n=19$)和 847~1134 Ma($n=39$)，峰值年龄分别约为 800 Ma 和 1000 Ma。次要锆石年龄段为 406~630 Ma($n=13$)、2409~2553 Ma($n=7$)以及范围广泛的 1405~1757 Ma($n=10$)，前两者峰值年龄约为 550 Ma 和 2500 Ma。分别对应早古生代及震旦纪、古元古代早期和中元古代中早期。此外，有 3 个测点(表 2) U-Pb 年龄大于 2800 Ma，为新太古代时期锆石，其中最古老锆石年龄为 3054 ± 19 Ma；而最年轻锆石年龄为 406 ± 12 Ma。

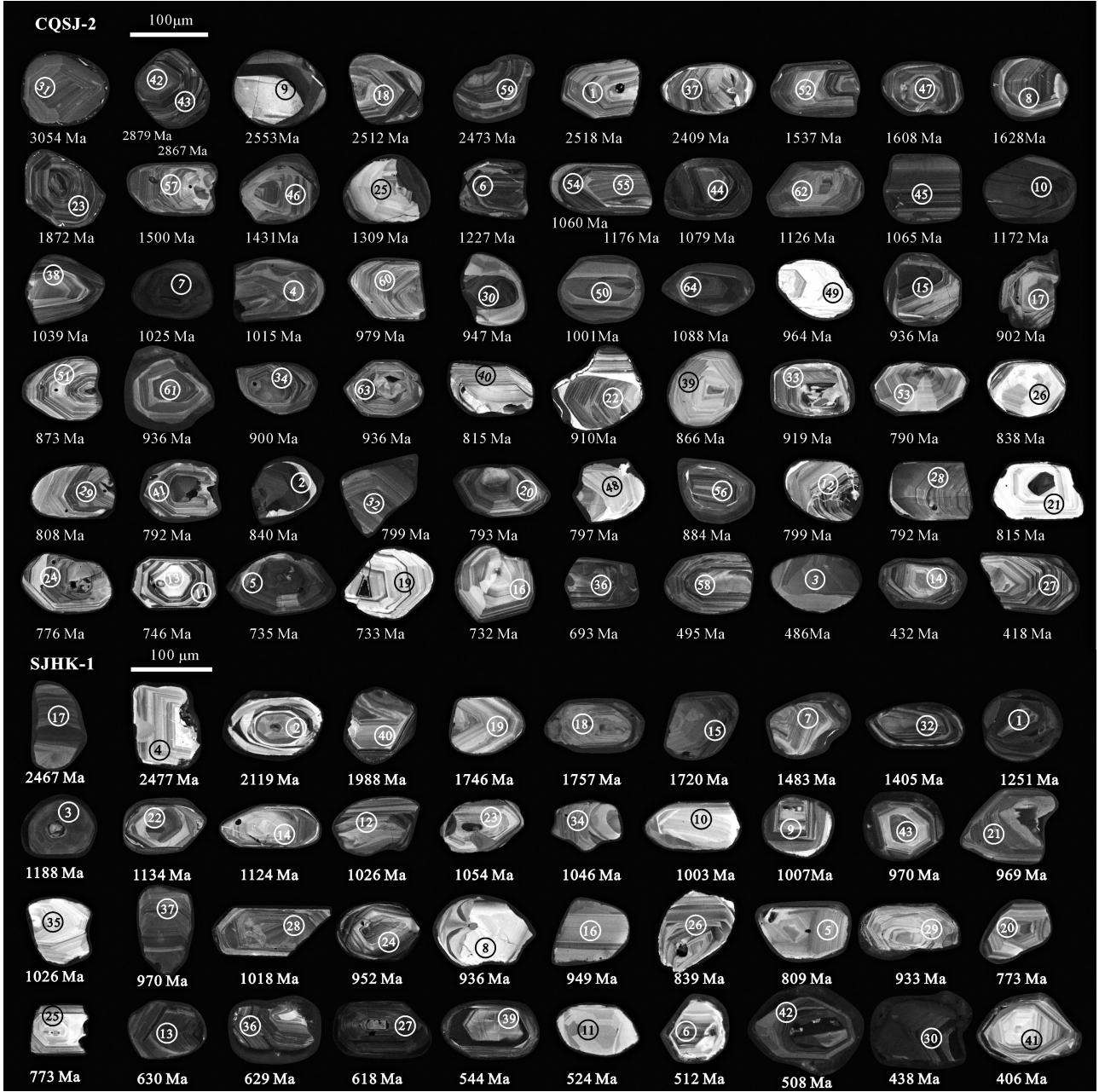


图 3 重庆南川铝土矿锆石阴极发光图像

Fig. 3 Detrital zircon cathodoluminescence of bauxite in Nanchuan district, Chongqing

3.3 锆石 Hf 同位素

本文对 2 件铝土矿样品共完成 97 点(表 3)碎屑锆石 Hf 同位素测试,其中样品 CQSJ-2 测试 57 点,样品 SJHK-1 测试 40 点。锆石¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 比值普遍(约 98%)小于 0.002,显示放射性成因积累的 Hf 极少;¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 介于 0.280686~0.282601 之间,均值为 0.28200。

所有锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围在 -33.54~11.09 之间(表 3,图 6a),60%的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为负值,暗示锆石来自不同的源区且以壳源为主;U-Pb 年龄为 732~

1251 Ma 的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值基本分布在 -15~10 之间,其中 32 颗(51%)锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为正值,显示幔源或年轻壳源物质的贡献;410~630 Ma、1405~1757 Ma 年龄段的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值基本为负值,远低于亏损地幔值,以壳源物质为主;U-Pb 年龄在 2409~2553 Ma 的锆石部分反映了大陆地壳生长,部分来自更古老物质的再循环或改造。锆石 Hf 模式年龄采用两阶段模式(图 6b),以 U-Pb 谐和年龄计算参数。 T_{DMc} 主要分布在 1.3~2.8 Ga 之间,并在 1.85 Ga 出现统计峰值,指示该时期华南地区有明

表 2 重庆南川铝土矿碎屑锆石 U-Pb 定年结果

Table 2 U-Pb dating of detrital zircons from bauxite deposits in Nanchuan district, Chongqing

点号	²⁰⁴ Pb	²³² Th	²³⁸ U	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	
	(×10 ⁻⁶)				比值	±%	比值	±%	比值	±%	年龄 (Ma)	±1σ	年龄 (Ma)	±1σ	年龄 (Ma)	±1σ
CQSJ2_01	5094	185	124	1.49	0.07341	1.27	0.16809	1.23	1.71363	1.68	2517.6	25.4	2422.6	11.4	2456.9	10.7
CQSJ2_02	5188	1091	1131	0.96	0.09024	1.15	0.25467	1.25	3.22091	1.64	839.9	21.8	802.0	16.4	802.0	12.7
CQSJ2_03	3705	700	243	2.88	0.07099	3.38	0.18281	1.75	1.87786	4.94	578.3	67.5	485.9	17.5	490.0	32.7
CQSJ2_04	2605	242	295	0.82	0.06851	2.89	0.13132	1.58	1.20445	3.76	1014.8	58.6	1001.3	11.8	1012.4	20.9
CQSJ2_05	17253	2085	727	2.87	0.09358	1.34	0.25982	1.29	3.3555	2.05	889.5	25.1	734.9	17.2	736.0	16.0
CQSJ2_06	6873	527	763	0.69	0.06319	2.06	0.12026	1.36	1.06366	2.61	1226.5	43.2	1206.2	9.5	1211.1	13.7
CQSJ2_07	5189	491	599	0.82	0.0847	1.49	0.22682	1.28	2.67356	2.22	1025.3	28.8	1001.6	15.3	1013.6	16.4
CQSJ2_08	7484	416	395	1.05	0.06576	1.72	0.13235	1.3	1.20016	2.22	1537.0	35.7	1611.3	9.8	1614.2	12.3
CQSJ2_09	3351	126	80	1.57	0.07062	1.42	0.16349	1.25	1.62164	1.89	2552.5	28.7	2477.2	11.3	2496.3	11.9
CQSJ2_10	2429	314	626	0.5	0.1145	1.02	0.336	1.2	5.33893	1.36	1171.8	18.3	1043.0	19.4	1049.6	11.7
CQSJ2_11	767	314	129	2.44	0.06554	1.14	0.13277	1.24	1.20497	1.47	789.5	23.9	745.7	9.4	751.2	8.2
CQSJ2_12	441	272	176	1.55	0.10019	1.34	0.29055	1.29	4.04656	2.12	798.7	24.6	794.7	18.8	797.7	17.3
CQSJ2_13	522	205	81	2.53	0.09913	1.09	0.29135	1.25	4.0788	1.54	820.8	20.1	801.3	18.1	810.6	12.6
CQSJ2_14	169	128	158	0.81	0.06478	1.28	0.13152	1.26	1.19456	1.66	385.9	26.8	432.4	9.5	435.7	9.2
CQSJ2_15	2998	1819	876	2.08	0.06549	1.39	0.13667	1.28	1.24998	1.81	935.6	29.0	948.4	9.9	945.7	10.2
CQSJ2_16	231	102	61	1.67	0.16166	1.03	0.45645	1.24	10.23082	1.52	714.5	17.2	732.0	25.0	735.6	14.1
CQSJ2_17	523	211	151	1.39	0.0635	3.13	0.12049	1.63	1.07584	4.02	901.7	65.1	946.5	11.3	942.7	21.2
CQSJ2_18	3771	451	600	0.75	0.06558	1.54	0.13231	1.26	1.2124	1.98	2512.4	31.9	2462.4	9.5	2471.8	11.0
CQSJ2_19	181	81	51	1.59	0.05859	2.41	0.07987	1.44	0.64057	2.83	724.9	51.5	733.4	6.9	741.6	11.2
CQSJ2_20	1198	506	237	2.13	0.07121	1.64	0.16126	1.33	1.6012	2.24	793.0	33.2	801.0	11.9	806.3	14.0
CQSJ2_21	117	45	24	1.89	0.07539	1.19	0.18743	1.25	1.98387	1.63	815.1	23.9	788.7	12.8	792.7	11.0
CQSJ2_22	845	282	223	1.27	0.06485	1.57	0.12795	1.31	1.14673	2.04	910.0	32.9	856.2	9.6	859.4	11.0
CQSJ2_23	362	39	485	0.08	0.16948	1.54	0.46855	1.39	10.68659	3.42	1872.0	25.6	1867.4	28.6	1875.1	31.7
CQSJ2_24	696	266	198	1.34	0.07915	1.36	0.19463	1.28	2.09866	1.9	769.5	26.6	776.2	13.5	775.7	13.1
CQSJ2_25	509	114	105	1.09	0.07575	1.65	0.16246	1.3	1.60283	2.24	1308.5	32.8	1317.8	11.7	1321.2	14.0
CQSJ2_26	321	121	47	2.58	0.20509	1.02	0.56049	1.24	15.98373	1.56	837.8	16.4	816.0	28.7	821.0	14.9
CQSJ2_27	586	443	374	1.18	0.0691	1.11	0.15814	1.24	1.53057	1.44	379.3	22.7	418.0	10.9	422.0	8.8
CQSJ2_28	396	131	265	0.49	0.06576	2.4	0.13119	1.47	1.19367	3.13	778.2	49.6	792.2	11.0	795.2	17.3
CQSJ2_29	551	207	224	0.93	0.07718	1.22	0.1862	1.26	1.96606	1.65	718.1	24.1	808.2	12.8	800.1	11.1
CQSJ2_30	367	104	535	0.19	0.06814	1.75	0.15262	1.3	1.47306	2.35	946.6	35.8	976.2	11.2	978.6	14.2
CQSJ2_31	850	111	151	0.73	0.16599	1.16	0.45617	1.24	10.24175	2.01	3054.4	19.3	3032.3	25.1	3041.4	18.6
CQSJ2_32	205	111	140	0.79	0.06905	1.78	0.15104	1.35	1.45211	2.39	798.7	36.2	801.2	11.4	800.7	14.3
CQSJ2_33	1058	671	174	3.87	0.06628	1.21	0.14213	1.25	1.32231	1.56	919.4	24.9	842.0	10.1	849.7	9.0
CQSJ2_34	645	361	281	1.29	0.06182	1.62	0.11345	1.3	0.98553	2.04	900.1	34.1	906.8	8.6	910.7	10.3
CQSJ2_36	708	484	395	1.23	0.07174	1.28	0.16788	1.27	1.67192	1.73	668.0	26.0	692.7	11.7	696.4	11.0
CQSJ2_37	1611	295	204	1.45	0.09545	1.7	0.28397	1.34	3.9023	2.87	2408.8	31.6	2319.6	19.1	2389.4	23.2
CQSJ2_38	203	89	109	0.81	0.06646	1.35	0.13236	1.24	1.22181	1.74	1039.2	28.1	1013.0	9.3	1012.0	9.7
CQSJ2_39	276	154	102	1.51	0.06547	1.85	0.12263	1.36	1.09562	2.37	865.9	38.4	847.4	9.6	853.3	12.6
CQSJ2_40	157	93	62	1.49	0.07392	1.33	0.17017	1.28	1.70922	1.8	815.4	26.6	856.7	12.0	855.5	11.5
CQSJ2_41	783	347	335	1.04	0.07485	1.15	0.17932	1.25	1.86521	1.53	791.7	22.9	803.6	12.2	802.9	10.1
CQSJ2_42	1007	113	151	0.75	0.0593	4.28	0.07829	1.86	0.62024	4.98	2878.8	90.6	2865.3	8.8	2867.2	19.4
CQSJ2_43	2084	232	340	0.68	0.07024	2.05	0.15153	1.37	1.45544	2.78	2867.1	41.6	2868.7	11.6	2875.8	16.7
CQSJ2_44	1126	409	172	2.39	0.16548	1.06	0.46518	1.21	10.40871	1.63	1079.0	17.8	1107.4	24.8	1110.0	15.1
CQSJ2_45	1482	496	278	1.79	0.07253	2.21	0.16258	1.41	1.62126	3.06	1064.5	44.1	1063.3	12.7	1068.8	19.2
CQSJ2_46	801	197	155	1.27	0.05436	1.82	0.06937	1.3	0.53592	2.12	1430.6	40.3	1462.5	5.4	1462.2	7.5
CQSJ2_47	1942	457	342	1.34	0.07303	1.94	0.16803	1.35	1.71019	2.71	1607.9	38.5	1648.2	12.6	1650.1	17.4
CQSJ2_48	188	82	84	0.97	0.07025	1.21	0.1585	1.26	1.53801	1.59	767.2	24.6	796.5	11.1	798.1	9.8
CQSJ2_49	224	94	98	0.96	0.23034	1.02	0.6006	1.24	18.99104	1.59	963.6	16.2	963.8	30.1	970.7	15.3
CQSJ2_50	235	83	259	0.32	0.07026	2.11	0.14993	1.38	1.43474	2.84	1000.8	42.6	971.1	11.6	978.5	17.0
CQSJ2_51	278	119	106	1.12	0.06512	1.21	0.13076	1.25	1.18844	1.57	872.7	25.4	915.6	9.4	919.4	8.7
CQSJ2_52	415	89	141	0.63	0.0697	2.05	0.13953	1.37	1.30895	2.72	1627.6	41.8	1644.3	10.8	1643.6	15.7
CQSJ2_53	380	172	74	2.32	0.20657	1.02	0.55968	1.24	15.8403	1.56	790.1	16.4	825.8	28.7	823.4	14.9

续表 2																
点号	²⁰⁴ Pb	²³² Th	²³⁸ U	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	
	(×10 ⁻⁶)				比值	±%	比值	±%	比值	±%	年龄 (Ma)	±1σ	年龄 (Ma)	±1σ	年龄 (Ma)	±1σ
CQSJ2_54	547	187	238	0.79	0.06628	1.34	0.13014	1.24	1.18304	1.7	1060.2	27.7	1084.5	9.2	1090.8	9.4
CQSJ2_55	782	245	137	1.79	0.06938	1.64	0.14205	1.29	1.33117	2.15	1176.0	33.4	1146.4	10.3	1148.4	12.4
CQSJ2_56	1293	579	337	1.72	0.06329	1.45	0.13357	1.29	1.19887	1.89	884.0	30.7	795.4	9.8	802.6	10.5
CQSJ2_57	1173	352	140	2.51	0.067	1.73	0.13495	1.3	1.24464	2.24	1499.7	35.5	1488.9	10.0	1494.1	12.6
CQSJ2_58	315	587	176	3.34	0.06791	3.64	0.14048	1.79	1.31727	4.88	551.7	73.8	495.3	14.2	502.7	28.2
CQSJ2_59	2405	343	279	1.23	0.08121	1.1	0.20576	1.21	2.2961	1.43	2473.1	21.4	2423.9	13.3	2455.9	10.2
CQSJ2_60	560	208	169	1.23	0.0542	1.4	0.06699	1.24	0.51527	1.66	978.5	31.3	1000.4	5.0	997.9	5.7
CQSJ2_61	398	150	121	1.24	0.07469	1.1	0.18321	1.24	1.92774	1.45	935.5	21.9	909.5	12.4	912.1	9.7
CQSJ2_62	137	39	64	0.61	0.06869	5.34	0.12075	2.32	1.06445	6.81	1125.9	106.6	1100.7	16.1	1104.0	35.6
CQSJ2_63	1512	679	278	2.44	0.15564	1.03	0.43308	1.24	9.51928	1.54	936.0	17.5	900.6	24.2	903.5	14.2
CQSJ2_64	216	60	341	0.18	0.07899	1.65	0.17562	1.3	1.81147	2.29	1088.4	32.3	970.4	12.5	971.3	15.0
SJHK1_01	891	298	314	0.95	0.05808	2.22	0.08461	1.41	0.6798	2.63	1251.0	48.2	1188.6	7.1	1192.0	10.8
SJHK1_02	57	0	134	0	0.07962	1.47	0.19727	1.3	2.16301	2.1	2118.9	28.8	2116.3	13.8	2117.0	14.6
SJHK1_03	287	59	369	0.16	0.07345	1.42	0.17013	1.29	1.72575	1.93	1187.5	28.0	1160.7	12.1	1169.2	12.4
SJHK1_04	1300	182	118	1.54	0.20827	1.05	0.31712	1.25	9.01357	1.57	2477.0	16.9	2411.4	19.4	2436.0	14.3
SJHK1_05	386	204	136	1.5	0.07446	1.54	0.16834	1.31	1.68893	2.12	808.5	31.2	804.4	12.2	797.7	13.5
SJHK1_06	1631	1114	461	2.42	0.13156	1.06	0.38859	1.24	7.0442	1.58	617.7	18.5	512.4	22.4	521.9	14.0
SJHK1_07	634	154	125	1.24	0.07145	1.26	0.16108	1.26	1.58356	1.68	1482.5	25.6	1436.9	11.3	1453.4	10.5
SJHK1_08	211	83	98	0.85	0.07314	1.23	0.15306	1.25	1.47315	1.61	935.7	24.8	874.3	10.8	883.7	9.8
SJHK1_09	763	287	212	1.35	0.07342	1.16	0.16032	1.25	1.58552	1.51	1006.6	23.2	964.5	11.1	968.5	9.4
SJHK1_10	70	24	16	1.5	0.06921	2.54	0.12746	1.51	1.15048	3.3	1003.0	51.7	964.6	11.0	959.8	17.9
SJHK1_11	58	32	84	0.38	0.05823	1.97	0.08798	1.35	0.71747	2.38	532.2	43.1	523.6	7.1	526.7	10.1
SJHK1_12	251	63	276	0.23	0.0707	2.01	0.14148	1.39	1.33141	2.67	1026.4	40.5	1012.8	11.1	1018.2	15.5
SJHK1_13	507	214	417	0.51	0.1041	1.04	0.16996	1.23	2.4258	1.36	629.5	19.1	629.5	11.5	624.9	9.8
SJHK1_14	471	111	145	0.76	0.10533	1.06	0.30152	1.24	4.3183	1.49	1123.7	19.4	1104.8	18.5	1108.5	12.3
SJHK1_15	1213	196	172	1.14	0.07025	2.6	0.14525	1.53	1.38773	3.53	1720.1	52.4	1698.9	12.5	1696.9	20.8
SJHK1_16	1239	408	369	1.11	0.06607	1.09	0.1329	1.23	1.19372	1.38	948.7	22.5	853.0	9.3	859.5	7.6
SJHK1_17	1078	117	98	1.2	0.08223	1.19	0.20248	1.25	2.23471	1.63	2467.3	23.1	2440.3	13.6	2445.9	11.4
SJHK1_18	522	82	113	0.73	0.09274	1.19	0.24969	1.26	3.18456	1.7	1756.5	22.4	1724.6	16.2	1731.8	13.1
SJHK1_19	586	71	108	0.66	0.06039	1.34	0.08272	1.26	0.67192	1.63	1745.5	28.6	1730.5	6.2	1729.0	6.7
SJHK1_20	352	157	106	1.48	0.08956	2.88	0.18903	1.68	2.18769	4.34	905.1	54.1	773.4	17.2	777.5	30.3
SJHK1_21	579	198	235	0.84	0.07418	2.18	0.16202	1.44	1.59541	3.02	968.8	43.5	960.7	13.0	964.2	18.9
SJHK1_22	337	94	310	0.3	0.06073	1.1	0.10258	1.24	0.8504	1.39	1134.2	23.7	1122.1	7.4	1129.0	6.5
SJHK1_23	187	60	82	0.74	0.10744	1.35	0.30674	1.3	4.50429	2.22	1053.7	24.5	1002.9	19.7	1004.4	18.4
SJHK1_24	217	87	58	1.51	0.06101	1.93	0.10068	1.35	0.839	2.38	951.9	41.1	883.8	8.0	890.3	11.1
SJHK1_25	767	330	410	0.81	0.07261	1.35	0.1614	1.28	1.5736	1.8	851.4	27.2	773.3	11.4	777.7	11.2
SJHK1_26	445	197	620	0.32	0.05608	1.78	0.07034	1.32	0.54817	2.1	838.5	39.0	827.0	5.6	827.4	7.6
SJHK1_27	472	246	407	0.6	0.07145	1.12	0.15846	1.24	1.56617	1.44	639.5	22.6	618.4	10.9	618.6	9.0
SJHK1_28	474	161	201	0.8	0.06702	1.37	0.13688	1.27	1.2589	1.78	1017.9	28.4	918.1	9.9	919.4	10.1
SJHK1_29	644	262	393	0.67	0.08905	1.21	0.23774	1.26	2.89279	1.73	933.0	23.0	790.9	15.6	798.0	13.1
SJHK1_30	630	500	332	1.51	0.05916	1.98	0.08198	1.35	0.65178	2.35	455.1	42.4	438.2	6.6	443.8	9.4
SJHK1_32	257	33	180	0.18	0.07274	3.44	0.1614	1.82	1.59565	4.76	1405.2	68.3	1374.9	16.3	1380.0	29.7
SJHK1_33	128.5	32	68	0.47	0.07710	1.39	0.18694	1.28	1.97925	1.94	1416.1	27.5	1116.1	13.05	1177.1	13.05
SJHK1_34	67	14	60	0.24	0.1068	1.11	0.30792	1.25	4.4894	1.62	1046.3	20.1	968.0	18.9	968.4	13.4
SJHK1_35	281	66	312	0.21	0.07081	2.22	0.14694	1.44	1.40312	2.99	1025.6	44.8	958.5	11.9	964.5	17.7
SJHK1_36	40	10	158	0.06	0.06185	1.28	0.10252	1.26	0.85981	1.58	669.0	26.9	629.2	7.5	630.0	7.4
SJHK1_37	93	22	258	0.09	0.06744	1.87	0.12745	1.36	1.15091	2.42	970.2	38.5	948.2	9.9	956.9	13.2
SJHK1_39	175	64	183	0.35	0.12213	1.12	0.35065	1.25	5.76989	1.72	537.7	19.8	543.6	21.0	549.2	14.9
SJHK1_41	129	10	56	0.18	0.16203	1.03	0.45364	1.24	10.01307	1.53	1987.5	17.3	1937.7	24.9	1941.9	14.1
SJHK1_42	115	39	597	0.06	0.0714	1.6	0.16071	1.31	1.58454	2.16	507.6	32.1	405.6	11.7	408.6	13.4
SJHK1_43	108	40	123	0.32	0.05743	1.41	0.06494	1.26	0.49547	1.68	573.1	30.7	507.9	5.0	509.6	5.7
SJHK1_44	44	7	76	0.09	0.07751	1.07	0.19013	1.24	2.04024	1.4	970.2	21.2	962.8	12.7	963.8	9.6

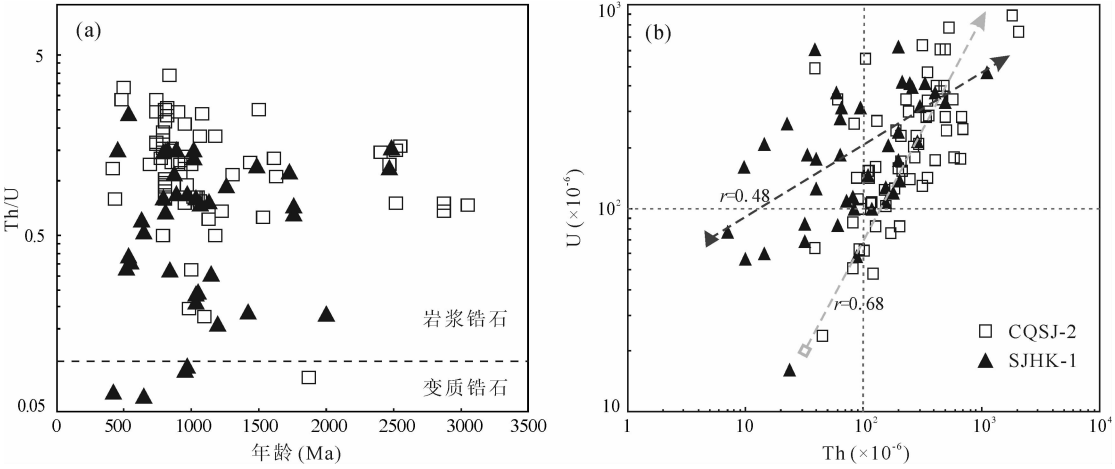


图 4 重庆南川铝土矿碎屑锆石年龄-Th/U(a)及 Th-U 判别图(b)
Fig. 4 Diagram of age-Th/U (a) and Th-U (b) of detrital zircon from bauxite deposits in Nanchuan district, Chongqing

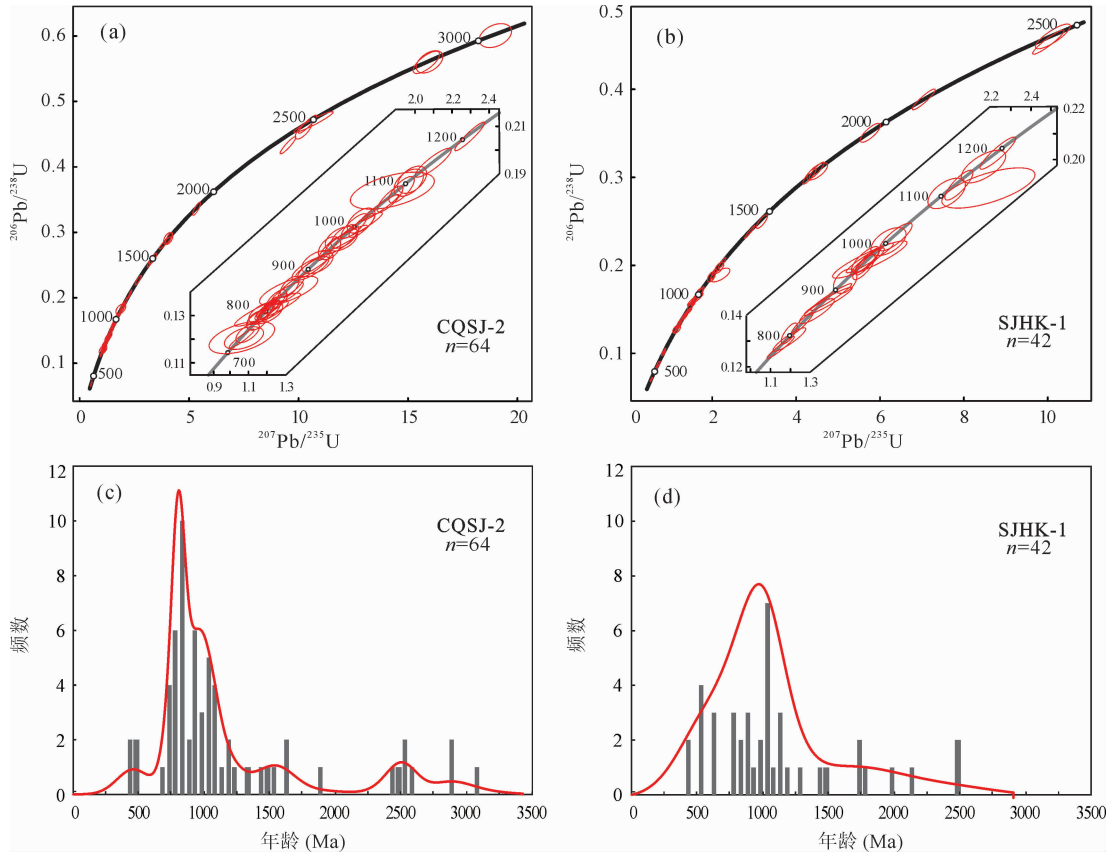


图 5 重庆南川铝土矿碎屑锆石 U-Pb 定年结果
Fig. 5 U-Pb dating results of detrital zircon from bauxite deposits in Nanchuan district, Chongqing

显的初生物质加入,发生了古老地壳物质的增生演化事件;最大锆石 Hf 模式年龄达 4.1 Ga。

3.4 锆石微量元素

样品 CQSJ-2 和 SJHK-1 的锆石微量元素分别测试 12 点和 8 点(表 4、5),其中 732~1251 Ma 的锆石颗粒 14 颗(70%)。碎屑锆石稀土元素配分图(图 7a)呈明显左倾趋势,表现出轻稀土亏损和重稀

土逐步富集的特征,同时存在强烈的铈负异常(0.03~0.71)和铈正异常(1.29~178.45)。在微量元素蛛网图(图 7b)中,可见碎屑锆石富集 Ce、Th、U、Hf、Ta 元素,亏损 Sr、Pr、Eu、Sn、Ti 等元素,具有明显的岩浆锆石特征(Hoskin et al., 2003)。Hf 平均值 15415.46×10^{-6} , Nb 平均值 3.56×10^{-6} , Ta 平均值 1.96×10^{-6} , P 平均值 661.60×10^{-6} , Y 平均

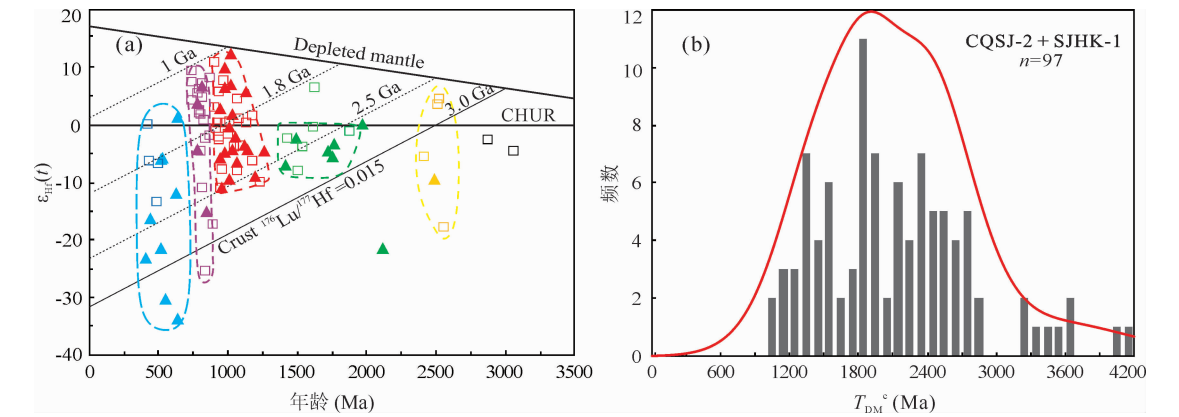


图 6 重庆南川铝土矿碎屑锆石 Hf 同位素组成(a)及模式年龄直方图(b)
Fig. 6 Diagram of $\epsilon_{Hf}(t)$ -U-Pb age (a) and histograms Hf model age of detrital zircons (b) from bauxite deposits in Nanchuan district, Chongqing

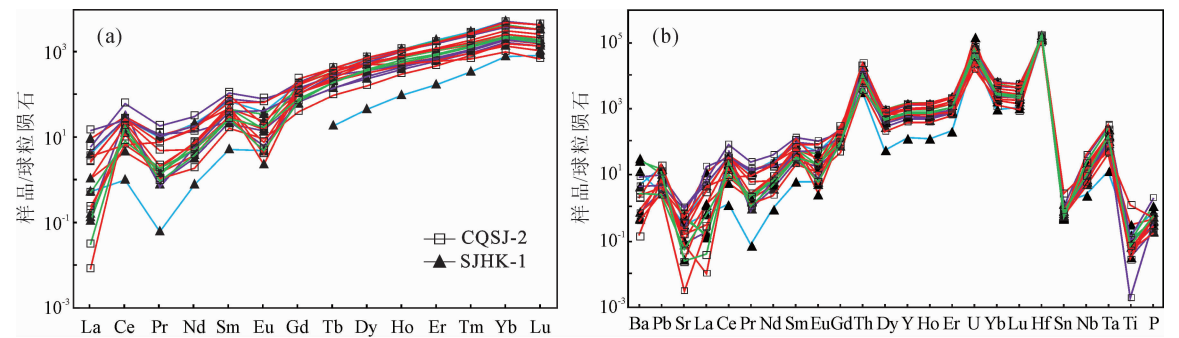


图 7 重庆南川铝土矿碎屑锆石球粒陨石标准化稀土元素配分图(a)和微量元素蛛网图(b)(标准化据 Sun et al. , 1989)
Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns (a) and trace element spidergram (b) of detrital zircon from bauxite deposit in Nanchuan district, Chongqing (chondrite normalizing value from Sun et al. , 1989)

值 1433.51×10^{-6} , Th 平均值 298.77×10^{-6} , U 平均值 361.52×10^{-6} ; Zr/Hf 比值介于 28~47 之间, 平均值为 35; REE 平均值 1238.40×10^{-6} , 范围为 $264.48 \times 10^{-6} \sim 2225.35 \times 10^{-6}$; Nb/Ta 平均比值为 1.94, 二者呈高度相关 ($r=0.92$, 图 8a); P 和 ($\Sigma Re+Y$) 也显示出较明显的正相关性, 结合 $(Sm/La)_N$ -La 判别图解(图 8b,d)可发现本文碎屑锆石主要为含微量磷钇矿、磷灰石等矿物包裹体的岩浆锆石, 无热液锆石存在 (Hoskin et al. , 2005; Zhong Shihua et al. , 2018)。锆石 Hf-Y 判别图解(图 8c)和 CART 分类树(图 9)常应用于岩浆锆石的源岩研究, 其准确率可达 80% (Belousova et al. , 2002)。结果显示 U-Pb 年龄为 732~1251 Ma 的碎屑锆石母岩以富长英质的中酸性岩(花岗岩类)为主, 部分为中基性岩石, 这与该年龄区间的碎屑锆石 Hf 同位素和阴极发光特征相吻合。同时, 该时期碎屑(岩浆)锆石的结晶环境以陆壳环境为主(图 8e), 形成时的构造环境与板内造山或弧岩浆作用相关(图 8f,g), 这与区域沉积序列反映的同期构造一致

(Wang Lijuan et al. , 2010; Shu Liangshu et al. , 2012; Gu Jing et al. , 2013; Zhang Guowei et al. , 2013; Wang Ruixue et al. , 2018)。

4 讨论

沉积物从源区风化剥蚀开始, 经历了不同地表动力机制的搬运、沉积卸载、水动力改造以及后期的成岩作用等影响。而锆石作为一种抗物理风化和化学风化能力较强的矿物, 可以在不同的风化和水动力搬运条件下仍然保持着最初的物源信息, 因此广泛应用于物源分析 (Xu Jie et al. , 2019)。在分析铝土矿碎屑锆石物源时, 可以根据各个峰值的分布情况, 去对比寻找相应的潜在物源区, 并结合其他区域地质资料来判断碎屑物质的潜在源区和搬运路径。

4.1 铝土矿成矿母岩分析

以往研究表明, 几乎所有的红土型铝土矿床都与下伏基岩直接相关, 但沉积型铝土矿与下伏基岩的关系则值得探讨。南川铝土矿样品按锆石 U-Pb

表 3 重庆南川铝土矿碎屑锆石 Hf 同位素数据

Table 3 Hf isotope data of detrital zircons from bauxite deposits in Nanchuan district, Chongqing

点号	年龄 (Ma)	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf _i	ε _{Hf} (t)	T _{DM} (Ma)	T _{DMc} (Ma)	f _{Lu/Hf}
CQSJ2-01	2518	0.039824	0.001145	0.281359	0.000020	0.281304	4.6	2652	2731	−0.97
CQSJ2-02	802	0.022890	0.000679	0.282219	0.000026	0.282208	−1.4	1444	1814	−0.98
CQSJ2-03	486	0.010459	0.000291	0.282098	0.000022	0.282095	−13.3	1595	2292	−0.99
CQSJ2-04	1015	0.037248	0.001030	0.282173	0.000023	0.282153	0.6	1522	1825	−0.97
CQSJ2-05	735	0.079904	0.002585	0.282475	0.000035	0.282439	4.5	1147	1366	−0.92
CQSJ2-06	1227	0.029932	0.000998	0.281751	0.000031	0.281728	−9.7	2105	2630	−0.97
CQSJ2-08	1628	0.030312	0.000912	0.281958	0.000026	0.281930	6.5	1815	1928	−0.97
CQSJ2-09	2553	0.023529	0.000677	0.280686	0.000025	0.280653	−17.7	3522	4115	−0.98
CQSJ2-10	1172	0.020899	0.000583	0.282100	0.000024	0.282087	1.8	1605	1872	−0.98
CQSJ2-13	801	0.060985	0.001938	0.282330	0.000030	0.282300	1.4	1335	1622	−0.94
CQSJ2-14	432	0.036366	0.001170	0.282340	0.000032	0.282331	−6.1	1293	1802	−0.96
CQSJ2-15	948	0.032269	0.001063	0.282130	0.000036	0.282111	−2.7	1583	1969	−0.97
CQSJ2-16	732	0.031477	0.000959	0.282541	0.000030	0.282528	7.5	1005	1169	−0.97
CQSJ2-17	947	0.039566	0.001293	0.282516	0.000028	0.282494	10.1	1049	1135	−0.96
CQSJ2-18	2512	0.023322	0.000701	0.281312	0.000022	0.281278	3.6	2685	2791	−0.98
CQSJ2-19	733	0.036489	0.001187	0.282601	0.000024	0.282585	9.6	926	1040	−0.96
CQSJ2-20	801	0.067656	0.002152	0.282368	0.000023	0.282336	2.1	1288	1560	−0.94
CQSJ2-21	789	0.045427	0.001344	0.282438	0.000026	0.282417	5.5	1161	1363	−0.96
CQSJ2-22	856	0.024614	0.000740	0.282236	0.000022	0.282223	0.7	1423	1736	−0.98
CQSJ2-23	1872	0.006105	0.000164	0.281570	0.000019	0.281564	−1.0	2303	2576	−1
CQSJ2-24	776	0.039728	0.001326	0.282462	0.000021	0.282443	5.5	1127	1332	−0.96
CQSJ2-25	1309	0.021317	0.000713	0.281798	0.000025	0.281780	−6.1	2025	2462	−0.98
CQSJ2-26	816	0.030186	0.000910	0.281562	0.000027	0.281548	−24.8	2359	3275	−0.97
CQSJ2-27	418	0.042449	0.001235	0.282525	0.000024	0.282515	0.1	1035	1398	−0.96
CQSJ2-28	792	0.027588	0.000812	0.282366	0.000024	0.282354	2.7	1245	1520	−0.98
CQSJ2-29	808	0.027546	0.000824	0.281976	0.000022	0.281964	−10.7	1786	2378	−0.98
CQSJ2-30	976	0.032682	0.000996	0.281873	0.000025	0.281855	−11.5	1936	2528	−0.97
CQSJ2-31	3054	0.027306	0.000790	0.280747	0.000023	0.280701	−4.4	3451	3692	−0.98
CQSJ2-32	801	0.016691	0.000544	0.282152	0.000018	0.282144	−4.6	1531	1983	−0.98
CQSJ2-33	842	0.027211	0.000954	0.282271	0.000029	0.282255	2.1	1382	1660	−0.97
CQSJ2-34	907	0.027998	0.000943	0.282309	0.000025	0.282293	3.0	1329	1587	−0.97
CQSJ2-35	957	0.023347	0.000766	0.281970	0.000022	0.281956	−7.7	1791	2298	−0.98
CQSJ2-37	2409	0.031671	0.000941	0.281136	0.000023	0.281093	−5.4	2941	3261	−0.97
CQSJ2-38	1039	0.061894	0.001858	0.282053	0.000026	0.282017	−3.7	1726	2112	−0.94
CQSJ2-39	847	0.025286	0.000863	0.282210	0.000023	0.282196	−1.2	1464	1825	−0.97
CQSJ2-41	804	0.063020	0.002096	0.282512	0.000028	0.282480	7.7	1078	1223	−0.94
CQSJ2-43	2867	0.027189	0.000964	0.280930	0.000022	0.280877	−2.5	3221	3433	−0.97
CQSJ2-44	1079	0.058350	0.001858	0.282165	0.000022	0.282127	1.1	1567	1841	−0.94
CQSJ2-45	1065	0.047364	0.001620	0.282271	0.000026	0.282239	4.7	1407	1603	−0.95
CQSJ2-46	1431	0.013730	0.000435	0.281825	0.000022	0.281813	−2.1	1974	2312	−0.99
CQSJ2-47	1608	0.033090	0.000971	0.281783	0.000021	0.281753	−0.3	2059	2329	−0.97
CQSJ2-48	797	0.016540	0.000548	0.282339	0.000021	0.282331	2.0	1274	1569	−0.98
CQSJ2-49	964	0.038358	0.001203	0.282414	0.000021	0.282392	7.9	1190	1323	−0.96
CQSJ2-50	1001	0.023544	0.000564	0.282115	0.000022	0.282104	−1.5	1583	1942	−0.98
CQSJ2-51	916	0.029715	0.001036	0.282455	0.000019	0.282438	7.5	1128	1280	−0.97
CQSJ2-52	1537	0.044020	0.001298	0.281741	0.000024	0.281703	−3.6	2135	2485	−0.96
CQSJ2-53	826	0.055055	0.001706	0.282464	0.000024	0.282439	5.7	1135	1331	−0.95
CQSJ2-54	1060	0.034070	0.000883	0.281904	0.000021	0.281886	−7.9	1888	2388	−0.97
CQSJ2-55	1176	0.029594	0.000844	0.281879	0.000026	0.281860	−6.2	1920	2370	−0.97
CQSJ2-56	795	0.010909	0.000432	0.281794	0.000023	0.281787	−15.3	2016	2721	−0.99
CQSJ2-57	1500	0.027044	0.000845	0.281632	0.000018	0.281608	−7.8	2259	2718	−0.97
CQSJ2-58	495	0.024956	0.000836	0.282282	0.000024	0.282274	−6.7	1363	1888	−0.97
CQSJ2-60	1000	0.018231	0.000639	0.282170	0.000020	0.282158	−0.1	1510	1836	−0.98
CQSJ2-61	910	0.026940	0.000754	0.282157	0.000023	0.282144	−1.5	1533	1897	−0.98

续表 3

点号	年龄 (Ma)	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf _i	ε _{Hf} (<i>t</i>)	<i>T</i> _{DM} (Ma)	<i>T</i> _{DMc} (Ma)	<i>f</i> _{Lu/Hf}
CQSJ2-62	1126	0.027886	0.000883	0.282098	0.000022	0.282079	0.4	1620	1918	−0.97
CQSJ2-63	901	0.044104	0.001464	0.282399	0.000020	0.282373	6.6	1220	1384	−0.96
CQSJ2-64	1088	0.002640	0.000064	0.281996	0.000026	0.281995	−3.4	1724	2130	−1
SJHK1-01	1251	0.027031	0.000825	0.281881	0.000026	0.281862	−4.5	1917	2320	−0.98
SJHK1-02	2119	0.020552	0.000667	0.280855	0.000033	0.280828	−21.5	3296	4017	−0.98
SJHK1-03	1188	0.006026	0.000180	0.281786	0.000027	0.281782	−8.7	2013	2536	−0.99
SJHK1-04	2477	0.028700	0.000893	0.280985	0.000020	0.280943	−9.2	3141	3541	−0.97
SJHK1-05	804	0.043420	0.001474	0.282491	0.000022	0.282469	7.2	1090	1253	−0.96
SJHK1-06	512	0.023544	0.000688	0.281858	0.000024	0.281851	−21.3	1941	2815	−0.98
SJHK1-07	1483	0.017206	0.000504	0.281793	0.000023	0.281779	−2.2	2021	2354	−0.98
SJHK1-08	874	0.028200	0.000840	0.282327	0.000024	0.282312	4.4	1300	1520	−0.97
SJHK1-09	1007	0.026308	0.000786	0.281893	0.000025	0.281878	−9.4	1898	2439	−0.98
SJHK1-10	1003	0.027141	0.000810	0.282158	0.000030	0.282143	−0.1	1534	1856	−0.98
SJHK1-11	524	0.006451	0.000270	0.282295	0.000026	0.282292	−5.5	1325	1829	−0.99
SJHK1-12	1026	0.035623	0.001055	0.282035	0.000036	0.282015	−4.1	1715	2126	−0.97
SJHK1-13	630	0.019676	0.000592	0.282433	0.000026	0.282426	1.7	1145	1462	−0.98
SJHK1-14	1124	0.012586	0.000430	0.282248	0.000025	0.282239	6.1	1395	1564	−0.99
SJHK1-15	1720	0.027870	0.000798	0.281591	0.000020	0.281565	−4.4	2313	2673	−0.98
SJHK1-16	853	0.038449	0.001200	0.281618	0.000022	0.280682	−53.0	2300	5082	−0.96
SJHK1-17	2467	0.032995	0.001000	0.281558	0.000031	0.282013	28.7	2370	1205	−0.97
SJHK1-18	1757	0.055068	0.001779	0.282429	0.000021	0.281578	−3.1	1188	2620	−0.95
SJHK1-19	1746	0.028436	0.000842	0.282060	0.000025	0.281525	−5.2	1671	2743	−0.97
SJHK1-20	773	0.072737	0.002181	0.281996	0.000026	0.282403	4.0	1823	1422	−0.93
SJHK1-21	961	0.018876	0.000604	0.281944	0.000033	0.282045	−4.3	1820	2096	−0.98
SJHK1-22	1134	0.051913	0.001512	0.281943	0.000028	0.281949	−4.0	1865	2200	−0.95
SJHK1-23	1054	0.030028	0.000930	0.282189	0.000028	0.281932	−6.4	1496	2291	−0.97
SJHK1-24	884	0.025328	0.000777	0.281847	0.000025	0.281916	−9.2	1961	2391	−0.98
SJHK1-25	773	0.026684	0.000704	0.282065	0.000027	0.282176	−4.0	1658	1931	−0.98
SJHK1-26	827	0.021490	0.000634	0.282505	0.000029	0.281835	−14.6	1046	2643	−0.98
SJHK1-27	618	0.022574	0.000747	0.282131	0.000025	0.282057	−11.7	1569	2293	−0.98
SJHK1-28	1018	0.060609	0.001615	0.282057	0.000021	0.282493	12.7	1710	1063	−0.95
SJHK1-29	791	0.044410	0.001450	0.282371	0.000024	0.282118	−2.5	1259	1956	−0.96
SJHK1-30	438	0.019194	0.000645	0.281715	0.000026	0.282044	−16.1	2135	2437	−0.98
SJHK1-31	1405	0.019216	0.000557	0.281988	0.000019	0.281698	−6.8	1757	2583	−0.98
SJHK1-32	1116	0.043828	0.001379	0.282089	0.000026	0.281976	−3.4	1654	2153	−0.96
SJHK1-33	1046	0.021991	0.000707	0.282205	0.000029	0.282062	−2.0	1465	2008	−0.98
SJHK1-34	1026	0.041410	0.001425	0.281449	0.000025	0.282191	2.2	2547	1733	−0.96
SJHK1-35	629	0.018265	0.000595	0.282380	0.000025	0.281432	−33.6	1219	3660	−0.98
SJHK1-36	948	0.021391	0.000652	0.281589	0.000023	0.282369	7.2	2306	1372	−0.98
SJHK1-37	2892	0.024893	0.000787	0.281953	0.000023	0.281758	29.5	1816	1498	−0.98
SJHK1-39	544	0.021637	0.000692	0.281553	0.000025	0.281582	−30.1	2358	3387	−0.98
SJHK1-40	—	0.013626	0.000362	0.281870	0.000027	—	—	1909	—	−0.99
SJHK1-41	1988	0.017304	0.000544	0.282297	0.000026	0.281527	0.4	1332	2584	−0.98
SJHK1-42	406	0.026539	0.000900	0.282472	0.000028	0.281867	−23.1	1100	2849	−0.97
SJHK1-43	508	0.017304	0.000544	0.282297	0.000026	0.282292	−5.8	1332	1841	−0.98
SJHK1-44	963	0.026539	0.000900	0.282472	0.000028	0.282456	10.3	1100	1178	−0.97

年龄的占比顺序可分出 5 个年龄区间:1134~847 Ma、827~773 Ma、630~410 Ma、2553~2409 Ma 及不明显的 1757~1405 Ma。通过对比渝南和黔北铝土矿的碎屑锆石年龄谱,发现二者除在震旦纪末期(~550 Ma)和古元古代早期出现谱峰(~2500 Ma)外,其主要的峰值年龄按不同占比出现在 800 Ma 和 1000 Ma(图 10a、10b)。韩家店组的年龄谱图(图 10c)与铝土矿的谱图比较相似,但来自震旦纪和古元古代的锆石占比明显增多,并且 1000 Ma 左右的锆石明显多于 800 Ma 的;黄龙组的锆石年龄谱(图 10d)特征明显,主要在 800 Ma 和 2500 Ma 出现峰值;二者碎屑锆石年龄谱图的共性指示了下伏

表 4 重庆南川铝土矿碎屑锆石微量元素(×10⁻⁶)数据

Table 4 Data of trace elements (×10 ⁻⁶) in detrital zircons from bauxite deposits in Nanchuan district, Chongqing																
测点	年龄(Ma)	P	Ti	Mn	Sc	Ga	Sr	Y	Nb	Sn	Ba	Hf	Ta	Pb	Th	U
CQSJ2_28	792	2533.38	57.08	14.18	779.48	0.88	7.16	2052.55	8.76	1.96	11.55	18221.75	4.42	12.73	414.81	524.92
CQSJ2_12	795	335.75	48.67	19.29	939.91	1.72	7.59	1100.28	2.83	1.71	20.78	15810.92	1.20	25.88	596.16	444.26
CQSJ2_29	808	636.01	0.00	3.63	717.28	0.41	1.68	896.92	2.08	0.97	1.67	14104.84	1.11	8.28	136.83	230.25
CQSJ2_53	826	509.02	0.92	0.14	819.88	0.73	1.61	2123.09	2.99	1.57	—	13097.51	1.55	12.00	223.56	176.98
CQSJ2_39	847	222.32	24.45	—	695.58	0.16	0.02	630.86	1.15	1.09	1.71	14684.75	0.60	6.37	121.54	132.44
CQSJ2_22	856	361.84	24.72	0.71	692.42	0.41	0.61	1524.18	9.85	1.02	—	15553.92	4.56	16.78	245.65	221.25
CQSJ2_49	964	667.86	24.41	2.08	771.11	0.62	1.47	1595.56	3.80	1.40	0.97	14646.69	2.01	6.92	108.72	114.58
CQSJ2_04	1015	711.62	13.73	0.35	769.11	0.17	1.23	2282.78	2.66	1.19	0.37	17169.78	1.92	17.92	266.29	300.96
CQSJ2_45	1066	389.24	—	2.02	714.66	0.69	2.74	2234.53	1.58	1.27	5.09	11711.47	1.12	50.88	708.69	613.88
CQSJ2_62	1126	654.78	566.83	3.71	780.14	24.76	4.24	1070.98	2.94	5.02	5.79	16911.41	0.74	10.15	209.18	188.52
CQSJ2_25	1309	736.98	34.64	0.88	1001.40	0.23	0.43	1309.65	2.39	1.35	6.96	18703.46	2.16	6.61	115.53	494.72
CQSJ2_46	1431	259.41	—	—	654.40	0.20	0.19	1130.41	5.94	1.00	—	15941.61	3.65	33.91	318.79	332.09
SJHK1_11	524	249.87	73.30	1.29	685.96	0.01	2.38	209.26	0.62	2.54	33.78	13228.71	0.19	7.14	92.96	274.13
SJHK1_36	629	973.76	72.33	9.80	707.58	0.56	2.43	2387.85	3.42	1.34	11.74	14523.93	1.62	41.38	380.22	522.16
SJHK1_29	933	267.44	15.37	1.47	721.70	0.36	0.63	812.08	1.38	1.32	—	15648.45	1.38	18.73	263.78	347.39
SJHK1_44	963	396.55	32.10	2.68	766.92	0.31	0.82	981.95	4.67	1.13	1.36	18830.55	2.17	20.02	568.72	1177.16
SJHK1_33	1116	718.30	16.04	0.02	780.57	—	0.21	1671.17	1.98	1.03	1.23	18176.55	2.32	22.18	246.59	660.46
SJHK1_14	1124	581.67	146.05	1.74	719.09	2.10	4.64	1081.88	1.58	1.50	2.04	13416.39	1.01	16.04	222.07	255.42
SJHK1_07	1483	541.00	48.47	3.26	701.91	0.42	4.46	1448.56	6.12	0.97	80.29	15059.44	3.48	28.06	388.95	221.95
SJHK1_18	1757	1541.99	46.81	2.67	777.33	0.12	3.51	2363.29	2.93	0.86	68.11	15628.20	2.28	38.72	294.18	295.76

表 5 重庆南川铝土矿碎屑锆石稀土元素(×10⁻⁶)数据

Table 5 Data of REE (×10 ⁻⁶) in detrital zircons from bauxite deposits in Nanchuan district, Chongqing																	
测点	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	δEu	δCe
CQSJ2_28	1.40	21.70	1.27	10.98	15.66	4.94	50.62	20.31	236.44	80.37	348.90	83.14	845.97	109.90	1831.60	0.54	3.98
CQSJ2_12	1.84	49.94	2.30	18.88	21.66	6.17	37.87	13.69	123.28	38.06	160.70	38.77	430.35	59.67	1003.18	0.66	5.96
CQSJ2_29	4.48	20.97	1.45	8.24	4.60	0.48	18.58	6.63	89.03	31.57	151.07	36.52	410.95	55.28	839.87	0.16	2.02
CQSJ2_53	—	35.15	0.08	3.52	7.65	3.25	28.01	13.55	186.97	72.91	360.16	92.73	1107.15	148.57	2059.70	0.68	—
CQSJ2_39	0.06	9.87	0.13	1.12	3.30	0.70	10.24	4.50	54.01	21.89	101.88	27.50	327.65	46.30	609.17	0.37	26.53
CQSJ2_22	0.00	18.47	0.26	4.47	9.03	0.58	33.37	14.14	161.34	57.48	243.74	56.71	577.53	71.28	1248.42	0.10	178.45
CQSJ2_49	0.85	21.30	0.60	3.18	6.04	1.17	27.09	12.22	162.77	61.16	266.74	64.87	700.09	87.17	1415.25	0.28	7.26
CQSJ2_04	0.07	5.55	0.23	4.63	10.77	0.31	47.29	20.18	242.74	87.19	369.74	85.23	886.71	111.30	1871.92	0.04	10.45
CQSJ2_45	0.79	21.62	0.94	9.71	13.37	5.04	44.11	16.60	210.36	76.40	352.26	90.77	1064.87	141.74	2048.57	0.63	6.16
CQSJ2_62	1.13	5.41	0.93	9.06	19.19	1.49	63.24	19.40	169.70	40.08	128.87	22.64	214.85	23.43	719.41	0.13	1.29
CQSJ2_25	0.16	6.57	0.23	3.26	5.50	1.27	20.55	9.23	130.80	46.18	192.47	45.79	482.42	62.02	1006.46	0.36	8.48
CQSJ2_46	0.01	15.19	0.12	2.26	5.36	0.37	18.56	9.49	121.36	42.34	178.38	43.40	467.07	55.19	959.11	0.11	111.03
SJHK1_11	0.16	0.82	0.01	0.46	1.01	0.37	0.00	0.90	14.84	7.22	36.04	11.51	163.45	27.67	264.48	0.71	5.73
SJHK1_36	1.25	22.17	1.20	12.56	13.86	3.00	46.38	19.40	232.47	86.93	398.74	100.20	1139.79	147.39	2225.35	0.36	4.43
SJHK1_29	0.05	18.78	0.10	1.90	4.07	1.03	16.51	6.71	74.89	27.89	127.88	31.24	344.24	45.73	701.01	0.38	66.68
SJHK1_44	0.33	15.18	0.18	4.20	9.43	0.16	28.47	10.13	106.15	33.76	136.65	30.83	307.22	35.23	717.93	0.03	15.27
SJHK1_33	0.33	3.67	0.18	2.34	6.29	0.34	29.93	16.55	185.37	59.33	231.31	50.23	480.91	57.18	1123.95	0.08	3.68
SJHK1_14	2.97	24.99	1.35	11.11	9.68	1.83	28.31	10.91	117.04	38.54	157.41	38.23	403.14	52.40	897.91	0.34	3.06
SJHK1_07	0.03	13.39	0.16	4.35	8.96	2.62	34.43	14.44	162.28	55.03	230.02	53.11	545.58	64.14	1188.54	0.46	44.62
SJHK1_18	0.04	10.07	0.19	3.21	9.64	1.11	44.37	19.92	242.83	86.97	379.98	90.33	919.39	113.75	1921.79	0.16	27.89

注：ΣREE=Σ(La-Lu)；δCe=Ce_N/(La_N·Pr_N)^{1/2}；δEu=Eu_N/(Sm_N·Gd_N)^{1/2}；N 表示球粒陨石标准化。

地层和铝土矿之间的相似性和继承性。同时铝土矿和韩家店组更相似的碎屑锆石谱峰则说明后者经过彻底的风化剥蚀在原地或者近物源区成为了铝土矿的一部分；而黄龙组则为本区再次带入了新的物质并在后续剥蚀过程中为铝土矿提供了部分物源。此外，前人通过对稳定元素含量、微量及稀土元素标准

化图解和矿床地质特征等(Liu Ping, 2001;李沛刚等, 2014)进行对比分析也显示了铝土矿和下伏基岩存在较高亲缘性,区内广泛分布的韩家店组和黄龙组地层为铝土矿提供了最直接的物质。

本区自晚志留世韩家店期开始至晚石炭世黄龙期进入了长达亿万年的抬升剥蚀阶段,铝土矿的碎

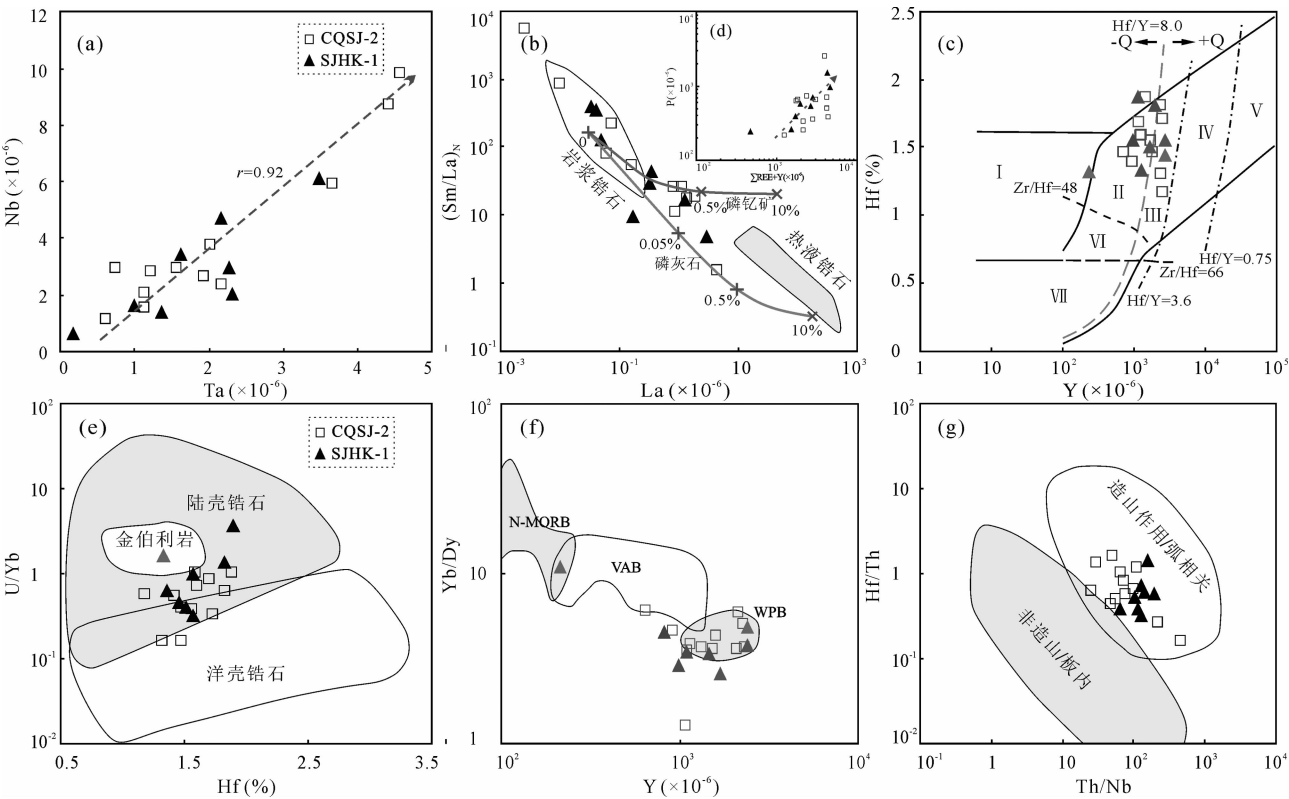


图 8 重庆南川铝土矿碎屑锆石微量元素判别图

Fig. 8 Discrimination diagram of trace elements in detrital zircon from bauxite deposits in Nanchuan district, Chongqing (a)—Nb-Ta 相关性图解;(b)—锆石类型与矿物包裹体混合判别图(据 Hoskin, 2005; Zhong Shihua et al., 2018);(c)—Hf-Y 判别图(据 Belousova et al., 2002; I—金伯利岩; II—超镁铁质、镁铁质和中性岩; III—富石英的中性岩和长英质岩; IV—高 SiO₂ 的长英质岩; V—云英岩; VI—碱性杂岩和杂岩体中的碱性交代岩; VII—碳酸盐岩);(d)—P-(ΣREE+Y) 相关性图解;(e)—U/Yb-Hf 锆石结晶环境判别图(据 Grimes et al., 2007);(f)—Yb/Dy-Y 锆石构造环境判别图(据 Schulz et al., 2006);(g)—Hf/Th-Th/Nb 锆石构造环境判别图(据 Yang Jinghai et al., 2012)

(a)—Diagram of correlation between Nb and Ta; (b)—(Sm/La)_N vs. La diagrams with mixing curves between zircon and mineral inclusions (after Hoskin, 2005; Zhong Shihua et al., 2018); (c)—discriminant diagrams for Hf and Y (after Belousova et al., 2002; I—kimberlite; II—ultramafic, mafic and intermediate rocks; III—quartz-bearing intermediate and felsic rocks; IV—felsic rocks with 'high' SiO₂ content; V—greisen; VI—alkaline rocks and alkaline metasomatites of alkaline complexes; VII—carbonatites); (d)—diagram of correlation between P and (ΣREE+Y); (e)—U/Yb-Hf discrimination diagram of zircon crystal environment (after Grimes et al., 2007); (f)—Yb/Dy-Y discriminant diagram of zircon tectonic environment (after Schulz et al., 2006); (g)—Hf/Th-Th/Nb discriminant diagram of zircon tectonic environment (after Yang Jianghai et al., 2012)

屑锆石特征显示其主要是来自晚志留世沉积地层的再循环锆石,故该时期的古地理环境决定着不同时代、不同构造环境下形成的锆石进入韩家店组、黄龙组的占比,也间接圈定了铝土矿碎屑锆石的初始物源区。其次,通过沉积岩中的碎屑锆石年龄累积概率曲线可以揭示其沉积盆地的构造背景,板块会聚边缘的沉积物中锆石年龄大部分接近沉积物的沉积年龄,而伸展和克拉通背景下的沉积物中较老锆石年龄更多(Cawood et al., 2012)。南川和黔北务正道铝土矿的碎屑锆石年龄特征(图 11)指示二者沉积时构造环境为后碰撞的伸展盆地。而渝南-黔北铝土成矿带位于华南板块中西部,故在示踪碎屑锆

石的物源区时应综合考虑扬子(古)板块和华夏(古)板块的影响。

据研究区晚志留世韩家店期的古地理环境图(图 12A)显示,韩家店组及其后续风化沉积物的物源区主要有扬子东南缘与江南造山带构造位置相当的雪峰隆起、黔中隆起,扬子西北缘与新元古代攀西-汉南带具有亲缘性的川中隆起、汉南古陆和摩天岭古陆,以及扬子西缘的康滇古陆。前人对川东南—黔北地区志留系韩家店组及其下伏的石牛栏组地层的物质来源进行了沉积学、重矿物(Wang Guoru et al., 2011)、地球化学(Li Shuangjian et al., 2008)和钻探工作(Huang Hanyu et al.,

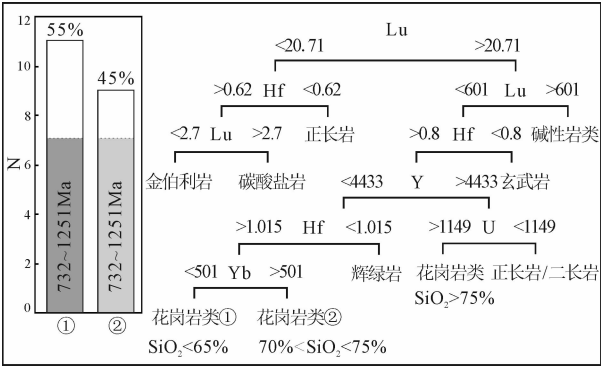


图 9 用于岩石类型区分的锆石分类树 (CART)的原理(据 Belousova et al., 2002)及结果

Fig. 9 The principle (after Belousova et al., 2002) and results of CART tree for classification of zircons by rock type

2018),排除了川中、黔中隆起碳酸盐岩侵蚀提供志留系物源的可能性,认为该地区自志留纪石牛栏期以来形成了较厚的来源于雪峰隆起的砂岩堆积物,其源岩主要来自新元古代带板溪群和雪峰隆起以西的基性侵入岩、花岗岩及沉积岩。

沉积型铝土矿前期大多经历了红土风化壳过程,成矿物源来自大陆风化碎屑物(Liu Ping et al., 2016),而本区铝土矿在成矿前期则经历了黄龙期短暂的海侵作用,对红土风化壳的运移和集聚有促进作用。晚石炭世—早二叠世南川铝土矿沉积时的古地理环境(图 12B)同样显示了陆源碎屑对本区的供给,并且其初始物源区主要与先期雪峰隆起、黔中隆起的构造位置相当,与陆内造山运动密切相关。据前人资料,早二叠世梁山(大竹园)期铝土矿在环四川盆地周缘的重庆南川、武隆、巫溪,贵州务正道、凯里、黄平,湖南泸溪、保靖、怀化,四川广元、芦山,昆明老煤山等地广泛分布(Gao Lan et al., 2014; Zhong Hairen et al., 2019)。而沉积型铝土矿是早先形成的红土风化壳经过短距离搬运后就近沉积形成的,即不同地区的沉积型铝土矿具有不同物源区(Liu Ping et al., 2001)。综合来说,沉积型铝土矿的成矿物质主要来自周缘的古陆或隆起,黔北-渝南铝土矿的物源区主要来自扬子邻近的东南缘雪峰隆起、黔中隆起,来自扬子西缘和北缘的物质较少。

4.2 碎屑锆石初始物源区探讨

1251~732 Ma 的碎屑锆石在铝土矿中分布最广,其峰值年龄约为 1000 Ma 和 800 Ma。扬子板块中元古代末期的锆石记录主要分布在扬子板块边缘,如西南缘荇林群的 1050 Ma 拉斑玄武岩和 1045 Ma 花岗岩,会理群天宝山组的 1020 Ma 基性岩脉

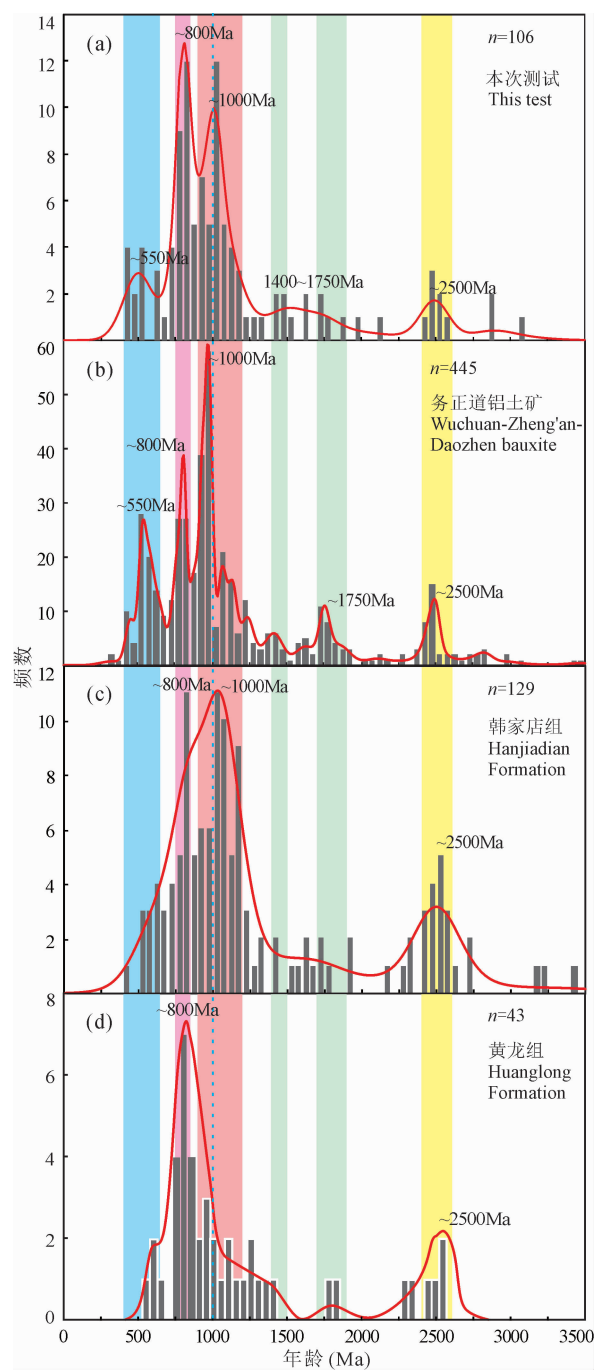


图 10 渝南-黔北铝土矿及下伏地层碎屑锆石年龄直方图

Fig. 10 Histogram of detrital zircons from bauxite deposits and their underlying strata in southern Chongqing and northern Guizhou

数据(date); (b) after Jin Zhongguo et al., 2013; Zhao Zhi et al., 2013; Wang Ruixue et al., 2018; (c) after Gu Jin et al., 2013; (d) after Xiang Xianli et al., 2015

和 1052 Ma 流纹岩(Chen et al., 2018);北缘神农架群约 1.1Ga 的中基性侵入岩和约 1.2 Ga 的凝灰岩,打鼓石群 1239 Ma 的凝灰岩(Geng Yuansheng et al., 2017)。1.0~0.9 Ga 的岩浆岩在扬子板块

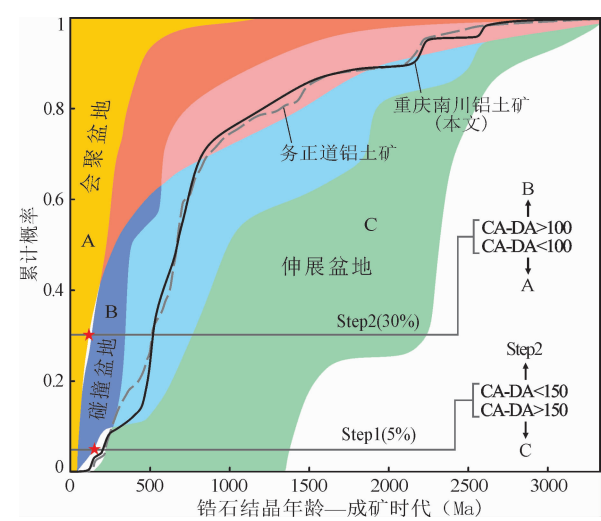


图 11 重庆南川铝土矿碎屑锆石 U-Pb 年龄累计概率曲线判别图(据 Cawood et al. , 2012)

Fig. 11 Cumulative proportion diagrams of U-Pb ages of detrital zircon from bauxite deposits in Nanchuan district, Chongqing (after Cawood et al. , 2012)

分布较少,仅在扬子板块东南缘和西北缘零星分布,如江南造山带东部形成于 913~905 Ma 指示洋壳俯冲的 I 型花岗岩(Ye Meifang et al. ,2007),西乡柳树店基性侵入岩锆石年龄约 890 Ma, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 平均值为 10.4(Zhou Jiulong et al. , 2018)。但在扬子板块东南侧的华夏板块东部德兴—东乡、浙闽诸暨—丽水—武夷—梅州一线则广泛发育了 1.0~0.9Ga 的蛇绿岩和相关火山碎屑岩(Shu Liangshu, 2012)。

新元古代侵入岩和火山-沉积岩广泛分布于华南板块,但主要锆石年龄集中于 850~740 Ma,如江

南造山带西段基底地层(875~825 Ma)和区域不整合面分隔的上覆盖层(825~730 Ma)。前者包括桂北四堡群、湘西冷家溪群和黔东北梵净山群(图 13),主要由具复理石韵律的巨厚碎屑岩和同时代的岛弧岩浆作用形成的层状钙碱性基性—超基性岩组成;后者包括桂北丹洲群、湘西板溪群和黔东下江群(图 13),为一套发育层理的灰岩-板岩-片岩沉积组合,基性—超基性岩相对减少。据前人研究,江南造山带经历了早期洋洋俯冲(约 970~880 Ma)、弧-陆碰撞(约 880~860 Ma)、洋陆俯冲和弧后盆地沉积(约 860~825 Ma)过程,并在约 825~810 Ma 造山作用结束后进入板内伸展(裂谷)阶段(Wang Xiaolei et al. , 2017)。江南造山带基底和盖层的碎屑锆石年龄以 825 Ma 为界,而本文铝土矿碎屑锆石年龄谱也在 827 Ma 出现低谷;并且造山带弧后盆地沉积期(约 860~825 Ma)和铝土矿碎屑锆石年龄谱图低谷期(847~827 Ma)相近;而新元古代华夏古板块和扬子古板块的相互作用,也为南川铝土矿中富集而扬子板块缺少的约 1.0Ga 碎屑锆石主要来自华夏板块提供了可能。同时,江南造山带西段地层的锆石 Hf 同位素与铝土矿碎屑锆石具有非常相似特征(图 14),如在 1000~750 Ma, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -20~15;约 2500 Ma, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -15~10;约 1800 Ma, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -10~2。

此后,在罗迪尼亚超大陆形成之后又开始进入裂解的背景下,古华南板块亦沿江绍一线裂解(800~760 Ma),除形成以浙赣湘桂为中心的南华陆内裂谷盆地外,在华夏陆块还形成了三个新的不同构造域,即武夷、南岭和云开。其中南岭和云开构造域

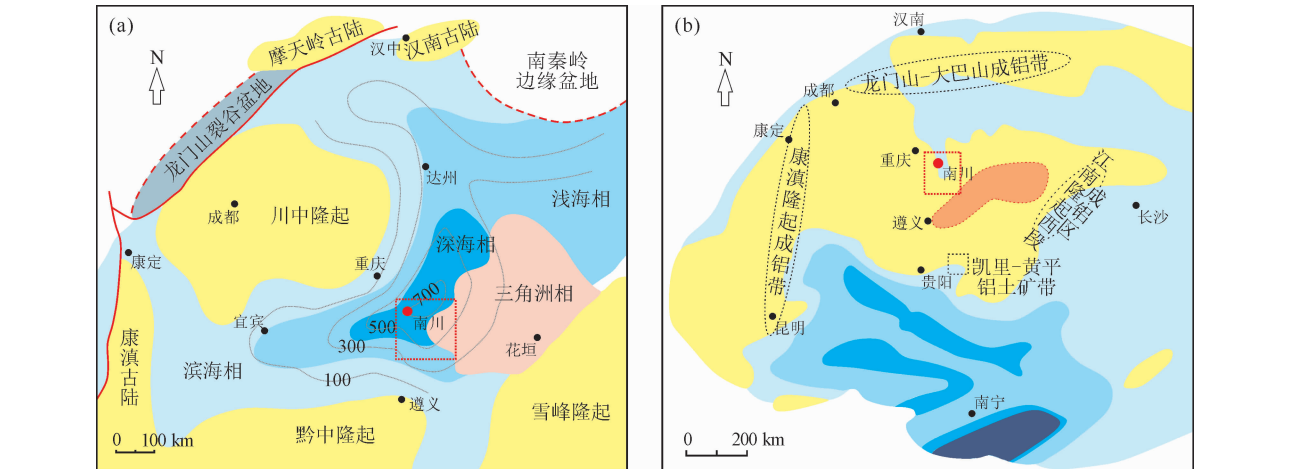


图 12 志留纪韩家店期(a)(据 Huang Hanyu et al. , 2018)及早二叠世(b)(据 Wang Ruixue et al. , 2018)古地理简图

Fig. 12 Paleogeography of the Yangtze plate in the Hanjiadian stage of Silurian (a) (after Huang Hanyu et al. , 2018) and Early Permian (b) (after Wang Ruixue et al. , 2018)

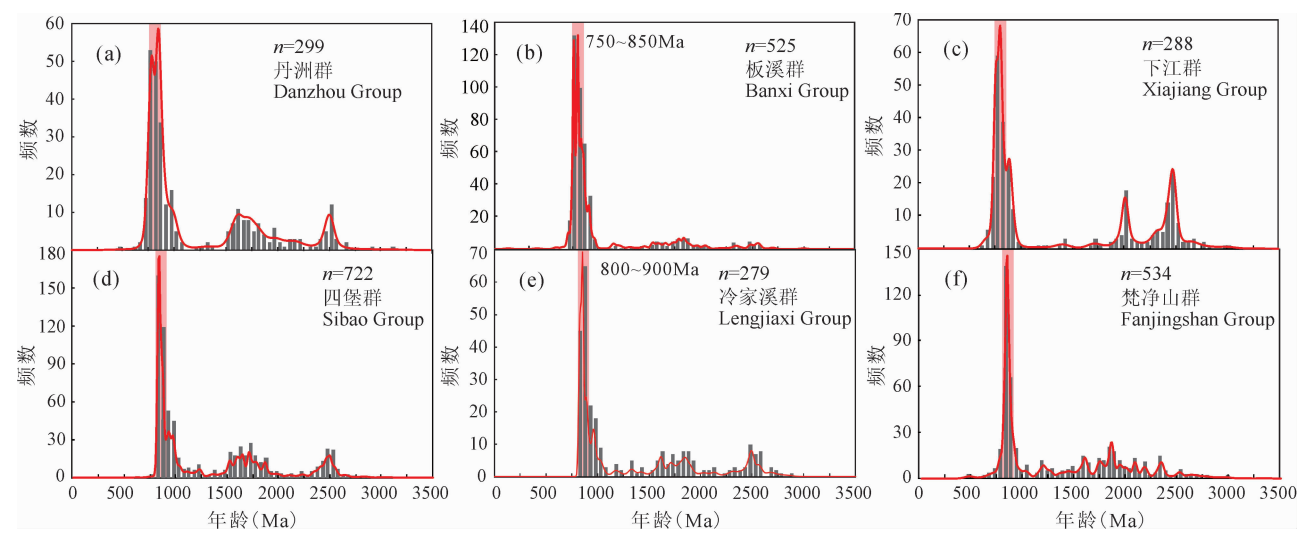


图 13 江南造山带西段新元古代青白口纪地层碎屑锆石直方图

Fig. 13 Histogram of detrital zircon from Neoproterozoic Qingbaikou strata in the western section of Jiangnan orogenic belt
数据来源(data from): Wang Lijuan et al., 2010; Wang Wei et al., 2012; Yang Chuan et al., 2015; Lin Musen et al., 2016; Wang Jingqiang et al., 2017; Kou Caihua et al., 2018; Yan Chaolei et al., 2019

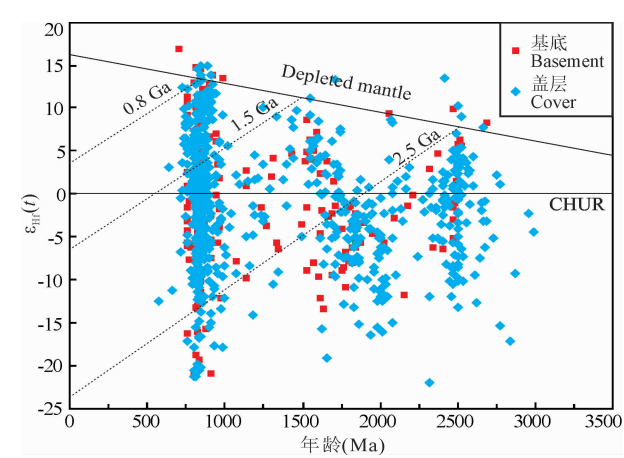


图 14 江南造山带西段碎屑锆石 Hf 同位素组成
(数据同图 13)

Fig. 14 Hf isotopic composition of detrital zircons from West of the Jiangnan orogenic belt (data sources as Fig. 13)

发育一套变质沉积序列,碎屑锆石年龄谱峰(图 15a、b)主要出现在 1.0~0.9 Ga、0.85~0.75 Ga,以及次要的 650~550 Ma、~2500 Ma 的 U-Pb 年龄峰值。同时,在华夏板块所获锆石的 Hf 同位素组成(图 15c)与南川铝土矿碎屑锆石基本一致。这些特征进一步指示了扬子东南缘和华夏板块作为初始物源对重庆南川铝土矿碎屑锆石的贡献。

630~410 Ma 是铝土矿最年轻的一个碎屑锆石年龄段。震旦纪—奥陶纪期间,扬子板块主体为进积性的碳酸盐岩台地以碳酸盐岩-硅质碎屑岩为主,华夏区则在南岭、云开等构造域之间的海盆(槽)沉

积了韵律砂质岩层,同时代的火山岩和侵入岩整体少见(Shu Liangshu, 2012)。据华南板块下古生界地层内的碎屑锆石年龄(Wang Ruixue et al., 2018; Zhao Zhi et al., 2013)显示其不仅具有约 650~430 Ma 的峰值,而且地层继承了大量 1000~800 Ma 的锆石,与重庆南川铝土矿的碎屑锆石年龄分布相似。早志留世开始受广西运动影响,华南地区正式进入到陆内演化阶段,花岗岩的形成开始以地壳物质重熔作用为主。在雪峰隆起以东,包括扬子板块东部与华夏板块内广泛发育了过铝质花岗岩,锆石结晶年龄为 480~398 Ma,峰值年龄为 456~419 Ma, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值在 $-19.4 \sim 2.4$ 之间(Shu Liangshu, 2012),与铝土矿中 630~410 Ma 的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 一致(图 6a)。

约 2500 Ma 是铝土矿最古老的碎屑锆石峰值年龄,也是韩家店组 and 黄龙组的两个主要锆石峰值年龄之一,虽然在扬子板块并未直接出露该时期地层或岩体,但在扬子板块周缘沉积地层中发现了大量该时期的碎屑锆石且在崆岭杂岩体有更古老的锆石年龄约 3.3~2.9 Ga 的 TTG 片麻岩。此外,铝土矿碎屑锆石年龄谱还存在一个中元古代(约 1.8~1.4 Ga)的不明显峰值,并且碎屑锆石 Hf 模式年龄 T_{DMC} (图 6b)在约 1.85 Ga 上下出现峰值。扬子西缘康滇地区(图 15)分布着沉积年龄约 1.7~1.6 Ga 的大红山群(Greentree et al., 2008)、1.7~1.65 Ga 的河口群(Geng Yuansheng et al., 2017)和 1.7~1.5 Ga 的东川群(Zhao Xinfu et al.,

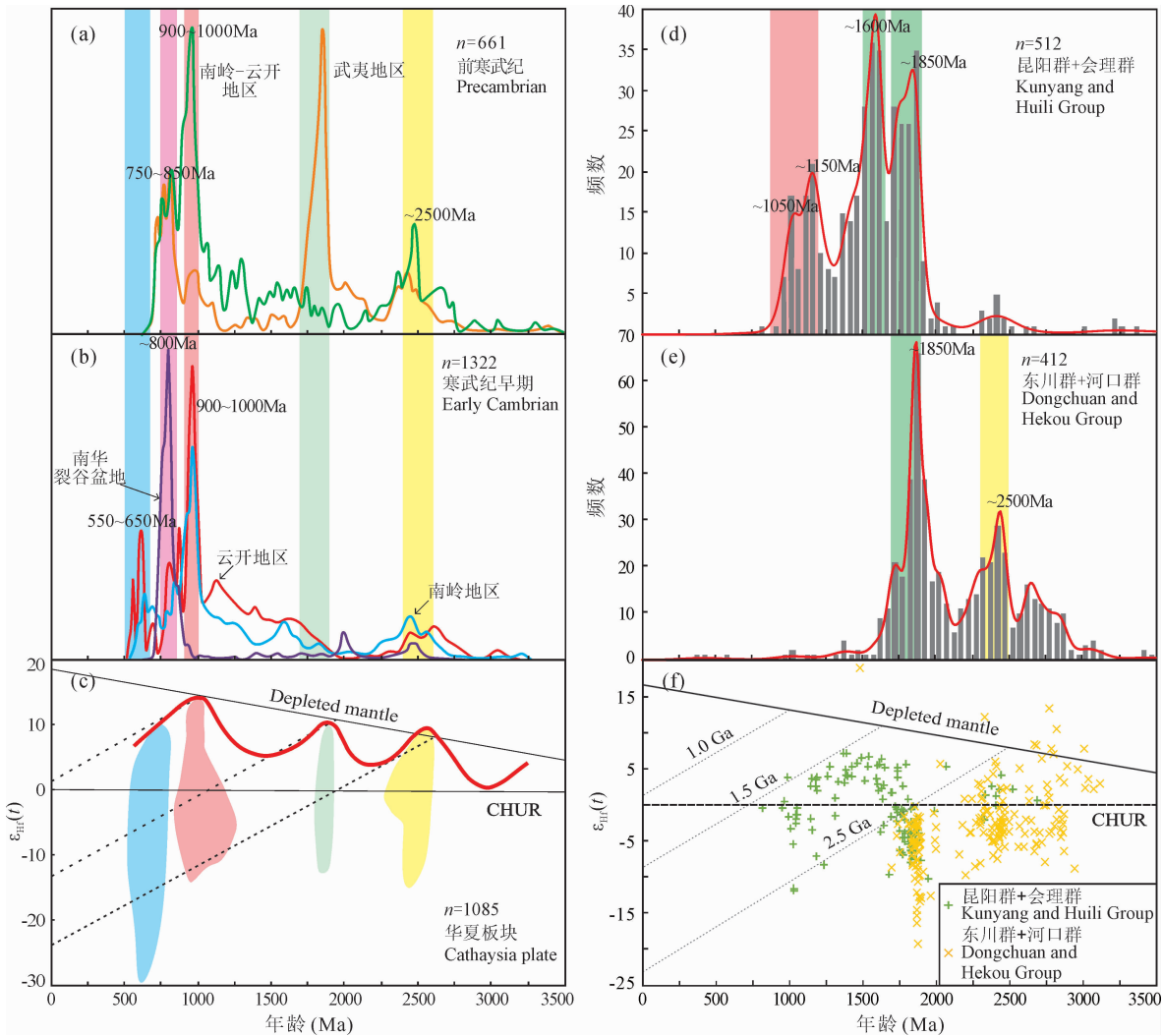


图 15 华南板块早前寒武纪地层碎屑锆石年龄直方图及 Hf 同位素组成

Fig. 15 Histogram and diagram of $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ -U-Pb age of detrital zircons from Early-Precambrian strata in South China plate (a), (b), (c)—华夏板块; (d), (e), (f)—扬子板块西缘; (a), (b)数据据 Wang Xuance et al., 2012; Wang Xiaolei et al., 2014; Zhao Yaoyang et al., 2019; (c)据 Li Xianhua et al., 2014 修改; (d)据 Greentree et al., 2006; Sun Weihua et al., 2009; Wang Lijuan et al., 2012; (e)据 Greentree et al., 2006; Wang Lijuan et al., 2012; Chen et al., 2013; (f)数据源同(d)、(e) (a), (b), (c)—Cathaysia plate; (d), (e), (f)—west edge of Yangtze plate; data sources: (a), (b) after Wang Xuance et al., 2012; Wang Xiaolei et al., 2014; Zhao Yaoyang et al., 2019; (c) modified from Li Xianhua et al., 2014; (d) after Greentree et al., 2006; Sun Weihua et al., 2009; Wang Lijuan et al., 2012; (e) after Greentree et al., 2006; Wang Lijuan et al., 2012; Chen et al., 2013; (f) data source is the same as (d), (e)

2010),并且在昆阳群和会理群中也发现了该时期(1.85~1.6Ga)的锆石。然而该套地层普遍缺少1000~800 Ma的碎屑锆石并且锆石 Hf 同位素组成也与铝土矿碎屑锆石不同,这说明扬子西缘地层对铝土矿碎屑锆石的贡献微不足道。

5 结论

重庆南川沉积型铝土矿的碎屑锆石 U-Pb 年龄主要分布在 1251~732 Ma,峰值年龄出现在 800 Ma 和 1000 Ma,锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值主要在-15~10,主要为与造山/弧作用相关的具有典型振荡环带的花

岗岩类锆石。韩家店组、黄龙组为铝土矿提供了最直接的成矿物质。而铝土矿碎屑锆石的初始物源则主要来自扬子东南缘江南造山带西段和华夏陆块南岭-云开地块的中新元古代长英质岩石(花岗岩类),来自扬子西缘和北缘的物质较少。

致谢:感谢中国地质科学院矿产资源研究所王登红研究员、杨岳清研究员和匿名审稿人对文中不足之处提出的宝贵建议,在此表示衷心的感谢!

References

Bárdossy G. 1982. Karst bauxites: bauxite deposits on carbonate

- rocks. *Developments in Economic Geology*, 14:1~441.
- Belousova E, Griffin W, O'Reilly S Y, Fisher N. 2002. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143: 602~622.
- Cawood P A, Hawkesworth C J, Dhuime B. 2012. Detrital zircon record and tectonic setting. *Geology*, 40(10): 875~878.
- Chen Wei Terry, Zhou Meifu, Zhao Xinfu. 2013. Late Paleoproterozoic sedimentary and mafic rocks in the Hekou area, SW China: implication for the reconstruction of the Yangtze Block in Columbia. *Precambrian Research*, 231: 61~77.
- Chen Wei Terry, Sun Weihua, Zhou Meifu, Wang Wei. 2018. Ca. 1050 Ma intra-continental rift-related a-type felsic rocks in the southwestern Yangtze Block, South China. *Precambrian Research*, 309:22~44.
- Du Yuansheng, Zhou Qi, Jin Zhongguo, Ling Wenli, Zhang Xionghua, Yu Jianxin, Wang Xiaomei, Yu Wenchao, Huang Xing, Cui Wei, Lei Zhiyuan, Weng Shenfu, Wu Bo, Yan Yongjun, Cao Jianzhou, Peng Xianhong, Zhang Zhen, Deng Hu. 2013. Advances in basic geology and metallogenic regularity study of bauxite in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou Province. *Geological Science and Technology Information*, 32(1):1~6 (in Chinese with English abstract).
- Gao Lan, Wang Denghong, Xiong Xiaoyun, Yi Chengwei. 2014. Summary on aluminum ore deposits minerogenetic regulation in China. *Acta Geologica Sinica*, 88(12): 2284~2295 (in Chinese with English abstract).
- Geng Yuansheng, Kuang Hongwei, Liu Yongqing, Du Lilin. 2017. Subdivision and correlation of the mesoproterozoic stratigraphy in the western and northern margins of Yangtze Block. *Acta Geologica Sinica*, 91(10): 2151~2174 (in Chinese with English abstract).
- Greentree M R, Li Zhengxiang, Li Xianhua, Wu Huaichun. 2006. Late Mesoproterozoic to earliest Neoproterozoic basin record of the Sibao orogenesis in western South China and relationship to the assembly of Rodinia. *Precambrian Research*, 151:79~100.
- Greentree M R, Li Zhengxiang. 2008. The oldest known rocks in south-western China: SHRIMP U-Pb magmatic crystallisation age and detrital provenance analysis of the Paleoproterozoic Dahongshan Group. *Journal of Asian Earth Sciences*, 33(5-6): 289~302.
- Grimes C B, John B E, Kelemen P B, Mazdab F K, Wooden J L, Cheadle M J, Hanghoj K, Schwartz J J. 2007. Trace element chemistry of zircons from oceanic crust: a method for distinguishing detrital zircon provenance. *Geology*, 35(7): 643~646.
- Gu Jing, Huang Zhilong, Fan Hongpeng, Lin Ye, Jin Zhongguo. 2013. Provenance of lateritic bauxite deposits in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou Province, China; LA-ICP-MS and SIMS U-Pb dating of detrital zircons. *Journal of Asian Earth Sciences*, 70-71:265~282.
- Han Ying, Zou Lin, Wang Jingbin, Zhu Xinyou, Jin Zhongguo, Lu Xuanxuan, Guo Jiao. 2016. Geochemical characteristics of bauxite in the Wuzhengdao area, Guizhou Province. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 35(4): 653~662 (in Chinese with English abstract).
- Hoskin P W O, Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 27~62.
- Hoskin P W O. 2005. Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of hadean zircon from the Jack Hills, Australia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(3): 637~648.
- Hou Kejun, Li Yanhe, Zou Tianren, Qu Xiaoming, Shi Yurao, Xie Guiqing. 2007. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10):2595~2604.
- Huang Hanyu, He Dengfa, Li Yingqiang, Li Jiao, Zhang Li. 2018. Silurian tectonic-sedimentary setting and basin evolution in the Sichuan area, southwest China: implications for palaeogeographic reconstructions. *Marine and Petroleum Geology*, 92:403~423.
- Jin Zhongguo, Zhou Jiayi, Huang Zhilong, Gu Jing, Liu Ling, Dai Longsheng. 2013. Detrital zircon U-Pb dating and its geological significance for the bauxite in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen al metallogenic province, Guizhou, SW China. *Earth Science Frontier*, 20(6):226~239 (in Chinese with English abstract).
- Jin Zhongguo, Liu Chensheng, Zou Lin, Zheng Minghong, Zhang Li, Han Ying. 2018. Geochemical evidence of sedimentary environment of Permian bauxite in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, Guizhou Province. *Acta Geologica Sinica*, 92(4):817~827 (in Chinese with English abstract).
- Jin Zhongguo, Liu Ling, Huang Zhilong, Liu Chensheng, Zheng Minghong, Gu Jin, Zou Lin, Wang Lin. 2019. Occurrence state, enrichment mechanism and resource potential of rare earth, rare metal and rare-scattered elements in ore-bearing rocks in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen bauxite deposit, Guizhou Province. *Acta Geologica Sinica*, 93(11):2847~2861 (in Chinese with English abstract).
- Kou Caihua, Liu Yanxue, Huang He, Li Tingdong, Ding Xiaozhong, Zhang Heng. 2018. The Neoproterozoic arc-type and OIB-type mafic-ultramafic rocks in the western Jiangnan Orogen: implications for tectonic settings. *Lithos*, 312~313: (38~56).
- Li Shuangjian, Xiao Kaihua, Wo Yujin, Long Shengxiang, Cai Ligu. 2008. REE geochemical characteristics and their geological significance in Silurian, west of Hunan Province and north of Guizhou Province. *Geoscience*, 22(2):273~280.
- Li Xianhua, Li Zhengxiang, Li Wuxian. 2014. Detrital zircon U-Pb age and Hf isotope constrains on the generation and reworking of Precambrian continental crust in the Cathaysia Block, South China: a synthesis. *Gondwana Research*, 25:1202~1215.
- Li Zaihui, Din Jun, Xu Jinsha, Liao Chaogui, Yin Fuguang, Lü Tao, Cheng Li, Li Junmin. 2013. Discovery of the REE minerals in the Wulong-Nanchuan bauxite deposits, Chongqing, China: insights on conditions of formation and processes. *Journal of Geochemical Exploration*, 133:88~102.
- Liu Ping. 1999. Geochemical characteristics of carboniferous bauxite deposits in central Guizhou-southern Sichuan. *Regional Geology of China*, 18(2):210~217 (in Chinese with English abstract).
- Liu Ping. 2001. Discussion on the metallogenic setting of the Qianzhong-Yu'nan bauxite in Guizhou and its genesis. *Geology of Guizhou*, 18(4): 238~243 (in Chinese with English abstract).
- Liu Ping, Liao Youchang. 2014. Regional metallogenic model and prospecting criteria of sedimentary bauxite deposits in central Guizhou-Southern Chongqing region. *Geology in China*, 41(6): 2063~2082 (in Chinese with English abstract).
- Liu Ping, Liao Youchang, Zhang Yajing. 2016. The sedimentary environment and formation mechanism of bauxite-bearing rock series in Dazhuyuan area, northern Guizhou Province. *Geology in China*, 43(6): 2173~2191 (in Chinese with English abstract).
- Lin Musen, Peng Songbai, Jiang Xingfu, Polat A, Kusky T, Wangqing, Deng Hao. 2016. Geochemistry, petrogenesis and tectonic setting of Neoproterozoic mafic-ultramafic rocks from the western Jiangnan orogen, South China. *Gondwana Research*, 35:338~356.
- Nesbitt H W, Young G M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299:715~717.
- Schulz B, Klemd R, Bratz H. 2006. Host rock compositional controls on zircon trace element signatures in metabasites from the Austroalpine basement. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(3): 697~710.
- Shu Liangshu. 2012. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block. *Geological Bulletin of China*, 31(7):1035~1053 (in Chinese with English abstract).

Sun Junjun, Shu Liangshu, Santosh M., Wang Liangshu. 2018. Precambrian crustal evolution of the central Jiangnan Orogen (South China): Evidence from detrital zircon U-Pb ages and Hf isotopic compositions of Neoproterozoic metasedimentary rocks. *Precambrian Research*, 318:1~24.

Sun Shensu, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implications for mantle composition and processes. *Geological Society Special Publication*, 42:313~345.

Sun Weihua, Zhou Meifu, Gao Jianfeng, Yang Yueheng, Zhao Xinfu, Zhao Junhong. 2009. Detrital zircon U-Pb geochronological and Lu-Hf isotopic constraints on the Precambrian magmatic and crustal evolution of the western Yangtze Block, SW China. *Precambrian Research*, 172: 99~126.

Wang Denghong, Li Peigang, Qu Wenjun, Lei Zhiyuan, Liao Youchang. 2013. Discovery and preliminary study of the high tungsten and lithium contents in the Dazhuyuan bauxite deposit, Guizhou, China. *Science China: Earth Sciences*, 56: 145~152.

Wang Guoru, Chen Hongde, Zhu Zhijun, Lin Liangbiao, Fan Yu. 2011. Characteristics and geological implications of heavy minerals in lower silurian Xiaoheba Formation sandstones in southeast Sichuan-west Hunan. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 38(1):7~14 (in Chinese with English abstract).

Wang Lijuan, Griffin W L, Yu Jinhai, O'Reilly S Y. 2010. Precambrian crustal evolution of the Yangtze Block tracked by detrital zircons from Neoproterozoic sedimentary rocks. *Precambrian Research*, 177:131~144.

Wang Lijuan, Yu Jinhai, Griffin W L, O'Reilly S Y. 2012. Early crustal evolution in the western Yangtze Block: evidence from U-Pb and Lu-Hf isotopes on detrital zircons from sedimentary rocks. *Precambrian Research*, 222~223:368~385.

Wang Jingqiang, Shu Liangshu, Santosh M. 2017. U-Pb and Lu-Hf isotopes of detrital zircon grains from Neoproterozoic sedimentary rocks in the central Jiangnan orogen, South China; implications for Precambrian crustal evolution. *Precambrian Research*, 294:175~188.

Wang Ruixue, Wang Qingfei, Huang Yuanxiao, Yang Shujuan, Liu Xuefei, Zhou Qi. 2018. Combined tectonic and paleogeographic controls on the genesis of bauxite in the Early Carboniferous to Permian Central Yangtze Island. *Ore Geology Reviews*, 101:468~480.

Wang Wei, Zhou Meifu, Yan Danping, Li Jianwei. 2012. Depositional age, provenance, and tectonic setting of the Neoproterozoic Sibao group, southeastern Yangtze Block, South China. *Precambrian Research*, 192~195:107~124.

Wang Xiaolei, Zhou Jincheng, Griffin W L, Zhao Guochun, Yu Jinhai, Qiu Jiansheng, Zhang Yanjie, Xing Guangfu. 2014. Geochemical zonation across a Neoproterozoic orogenic belt: isotopic evidence from granitoids and metasedimentary rocks of the Jiangnan orogen, China. *Precambrian Research*, 242:154~171.

Wang Xiaolei, Zhou Jincheng, Chen Xin, Zhang Fengfeng, Sun Ziming. 2017. Formation and evolution of the Jiangnan Orogen. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 36(5):714~735 (in Chinese with English abstract).

Wang Xuance, Li Xianhua, Li Zhengxiang, Li Qiuli, Tang Guoqiang, Gao Yuya, Zhang Qirui, Liu Yu. 2012. Episodic Precambrian crust growth: evidence from U-Pb ages and Hf-O isotopes of zircon in the Nanhua basin, central South China. *Precambrian Research*, 222~223:386~403.

Xiang Xianli, Jin Zhongguo, Huang Zhilong, Zhou Jiaxi, Gu Jing. 2015. Origin of ore-forming materials for bauxite deposits in Northern Guizhou Province, China: evidence from detrital zircon U-Pb dating. *Acta Mineralogica Sinica*, 35(4): 463~472 (in Chinese with English abstract).

Xu Jie, Jiang Zaixing. 2019. Research progress and prospect of clastic rock sources. *Journal of Palaeogeography*, 21(3):379~396 (in Chinese with English abstract).

Yan Chaolei, Shu Liangshu, Faure M, Chen Yan, Huang Renbo. 2019. Time constraints on the closure of the Paleo-South China ocean and the Neoproterozoic assembly of the Yangtze and Cathaysia blocks: insight from new detrital zircon analyses. *Gondwana Research*, 73:175~189.

Yang Chuan, Li Xianhua, Wang Xuance, Lan Zhongwu. 2015. Mid-Neoproterozoic angular unconformity in the Yangtze Block revisited: insights from detrital zircon U-Pb age and Hf-O isotopes. *Precambrian Research*, 266:165~178.

Yang Jianghai, Cawood P A, Du Yuansheng, Huang Hu, Huang Hongwei, Tao Ping. 2012. Large igneous province and magmatic arc sourced Permian-Triassic volcanogenic sediments in China. *Sedimentary Geology*, 261~262:120~131.

Ye Meifang, Li Xianhua, Li Wuxian, Liu Ying, Li Zhengxiang. 2007. SHRIMP zircon U-Pb geochronological and whole-rock geochemical evidence for an early Neoproterozoic Sibaoan magmatic arc along the southeastern margin of the Yangtze Block. *Gondwana Research*, 12(1~2):144~156.

Zhang Guowei, Guo Anlin, Wang Yuejun, Li Sanzhong, Dong Yunpeng, Liu Shaofeng, He Dengfa, Cheng Shunyou, Lu Rukui, Yao Anping. 2013. Tectonics of South China continent and its implications. *Science China: Earth Sciences*, 56:1804~1828 (in Chinese with English abstract).

Zhao Xinfu, Zhou Meifu, Li Jianwei, Sun Min, Gao Jianfeng, Sun Werihua, Yang Jinhui. 2010. Late Paleoproterozoic to early Mesoproterozoic Dongchuan group in Yunnan, SW China: implications for tectonic evolution of the Yangtze Block. *Precambrian Research*, 182:57~69.

Zhao Yaoyang, Jiang Shaoyong. 2019. Detrital zircons in metasedimentary rocks of Mayuan and Mamiashan group from Cathaysia Block in northwestern Fujian province, South China: new constraints on their formation ages and paleogeographic implication. *Precambrian Research*, 320:13~30.

Zhao Zhi, Wang Denghong, Li Peigang, Lei Zhiyuan. 2013. Detrital zircon U-Pb geochronology of the Dazhuyuan formation in Northern Guizhou: implications for bauxite mineralization. *Rock and Mineral Analysis*, 32(1):166~173 (in Chinese with English abstract).

Zhong Hairan, Sun Yan, Yang Yueqing, Wang Denghong, Huang Fan, Zhao Zhi. 2019. Bauxite (aluminums)-type lithium resources and analysis of its development and utilization potential. *Mineral Deposits*, 38(4):898~916 (in Chinese with English abstract).

Zhong Shihua, Feng Chengyou, Seltmann R, Li Daxin, Qu Hongying. 2018. Can magmatic zircon be distinguished from hydrothermal zircon by trace element composition? The effect of mineral inclusions on zircon trace element composition. *Lithos*, 314~315:646~657.

Zhou Jiulong, Li Xianhua, Tang Guoqiang, Gao Bingyu, Bao Zhian, Ling Xiaoxiao, Wu Liguang, Lu Kai, Zhu Yusheng, Liao Xin. 2018. Ca. 890 Ma magmatism in the northwest Yangtze block, South China: SIMS U-Pb dating, insitu Hf-O isotopes, and tectonic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 151:101~111.

参 考 文 献

杜远生,周琦,金中国,凌文黎,张雄华,喻建新,汪小妹,余文超,黄兴,崔滔,雷志远,翁申富,吴波,覃永军,曹建州,彭先红,张震,邓虎. 2013. 黔北务正道地区铝土矿基础地质与成矿作用研究进展. *地质科技情报*, 32(1):1~6.

高兰,王登红,熊晓云,易承伟. 2014. 中国铝矿成矿规律概要. *地质学报*, 88(12):2284~2295.

耿元生,旷红伟,柳永清,杜利林. 2017. 扬子地块西、北缘中元古代地层的划分与对比. *地质学报*, 91(10):2151~2174.

韩英,邹林,王京彬,祝新友,金中国,路轩轩,郭娇. 2016. 贵州省务正道地区铝土矿地球化学特征及意义. *矿物岩石地球化学通*

- 报, 35(4): 653~662.
- 侯可军, 李延河, 邹天人, 曲晓明, 石玉若, 谢桂青. 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用. 岩石学报, 23(10): 2595~2604.
- 金中国, 周家喜, 黄智龙, 谷静, 刘玲, 代龙省. 2013. 贵州务川—正安一道真地区铝土矿碎屑锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 地学前缘, 20(6): 226~239.
- 金中国, 刘辰生, 邹林, 郑明泓, 张力, 韩英. 2018. 贵州务—正一道地区二叠纪铝土矿沉积环境地球化学证据. 地质学报, 92(4): 817~827.
- 金中国, 刘玲, 黄智龙, 刘辰生, 郑明泓, 谷静, 邹林, 王林. 2019. 贵州务—正一道地区铝土矿含矿岩系中三稀元素赋存状态、富集机理及资源潜力. 地质学报, 93(11): 2847~2861.
- 李沛刚, 王登红, 李沛刚, 王登红, 赵芝, 雷志远, 翁丰富, 杜芳迎, 叶德书, 顾文鳌, 高兰, 熊星. 2014. 贵州大竹园铝土矿矿床地质、地球化学与成矿规律. 北京: 科学出版社, 111~186.
- 刘平. 1999. 刘平. 黔中—川南石炭纪铝土矿的地球化学特征. 中国区域地质, 18(2): 210~217.
- 刘平. 2001. 八论贵州之铝土矿——黔中—渝南铝土矿成矿背景及成因探讨. 贵州地质, 18(4): 238~243.
- 刘平, 廖友常. 2014. 黔中—渝南沉积型铝土矿区域成矿模式及找矿模型. 中国地质, 41(6): 2063~2082.
- 刘平, 廖友常, 张雅静. 2016. 北大竹园地区铝土矿含矿岩系沉积环境及形成机制. 中国地质, 43(6): 2173~2191.
- 舒良树. 2012. 华南构造演化的基本特征. 地质通报, 31(7): 1035~1053.
- 王国茹, 陈洪德, 朱志军, 林良彪, 范昱. 2011. 川东南—湘西地区志留系小河坝组砂岩中重矿物特征及地质意义. 成都理工大学学报(自然科学版), 38(1): 7~14.
- 王孝磊, 周金城, 陈昕, 张凤凤, 孙梓铭. 2017. 江南造山带的形成与演化. 矿物岩石地球化学通报, 36(5): 714~735.
- 向贤礼, 金中国, 黄智龙, 周家喜, 谷静. 2015. 黔北北部铝土矿床成矿物质源碎屑锆石 U-Pb 年代学证据. 矿物学报, 35(4): 463~472.
- 徐杰, 姜在兴. 2019. 碎屑岩物源研究进展与展望. 古地理学报, 21(3): 379~396.
- 赵芝, 王登红, 李沛刚, 雷志远. 2013. 黔北大竹园组碎屑锆石年代学及成矿指示意义. 岩矿测试, 32(1): 166~173.
- 钟海仁, 孙艳, 杨岳清, 王登红, 黄凡, 赵芝. 2019. 铝土矿(岩)型锂资源及其开发利用潜力. 矿床地质, 38(04): 898~916.
- 周剑雄, 陈振宇. 2007. 电子探针下锆石阴极发光的研究. 电子科技大学出版社, 40~50.

Provenance of bauxite deposits in the Nanchuan district, Chongqing: evidence from U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in detrital zircons

ZHONG Hairen^{1,2)}, SUN Yan^{*1)}, ZHAO Zhi¹⁾, WANG Chenghui¹⁾

1) *Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Ministry of Natural Resources, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037;*

2) *China University of Geoscience (Beijing), School of Earth Science and Resources, Beijing, 100083*

** Corresponding author: sunyan517@vip.163.com*

Abstract

The sedimentary-type lithium-rich bauxite deposit in the Nanchuan district of Chongqing is mainly located on the erosional surface between the Middle-Lower Silurian Hanjiadian Formation and the Liangshan Formation of Middle Permian i. e. the ore bearing bed is located in the middle and lower part of the Liangshan Formation (Dazhuyuan Formation), which is an important part of the northern Guizhou and southern Chongqing bauxite metallogenic belt. As detrital zircon is abundant in bauxite, we applied a variety of analytical techniques on clastic and earthy bauxite samples, including all-rock geochemistry, zircon U-Pb dating, zircon Hf isotopes, and zircon trace elements. The results show that the two samples are mainly granite-type zircons that are related to orogenic/arc interactions. Their U-Pb age distributions appear to be from the Late Devonian to the Archean (406~3054 Ma), showing four main age ranges: 410~630 Ma, 732~1251 Ma, 1405~1757 Ma and 2409~2553 Ma. The peak age appears at 800 Ma and 1000 Ma, and the zircon $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values are mainly distributed in -15 to 10. The consistent age distribution of clastic zircon and the sedimentary paleogeographic environment of the bauxite, the Hanjiadian Formation and the Huanglong Formation indicate that the latter are the most direct parent rock of bauxite. By comparing the geological characteristics and zircon U-Pb ages and Hf isotopes from different strata in the South China Plate, we found that the Sino-Neoproterozoic perilitic rocks from the western part of the Jiangnan Orogen and the Nanling-Yunkai block of the Huaxia continental plate are the most important source area, with smaller contribution from the western and northern margins of the Yangtze.

Key words: Chongqing; bauxite; detrital zircon; U-Pb dating; Hf isotope; zircon trace element; provenance