

鄂西走马地区南华纪大塘坡间冰期古气候研究

李明龙^{1,2)}, 杨波涌²⁾, 郑德顺³⁾, 陈林²⁾, 田景春¹⁾

1) 成都理工大学沉积地质研究院, 成都, 610059; 2) 湖北省地质局第二地质大队, 湖北恩施, 445000;

3) 河南理工大学资源环境学院, 河南焦作, 454000

内容提要: 新元古代后期地球经历了至少两次全球规模的冰期, 分别为 Sturtian 冰期和 Marinoan 冰期。鄂西走马地区南华系古城组与南沱组分别属于 Sturtian 和 Marinoan 冰期沉积, 大塘坡组代表间冰期沉积。本文研究了走马地区 ZK701 钻孔岩芯大塘坡组细碎屑岩样品元素地球化学特征, 计算了化学蚀变指数 (*CIA*)、化学风化作用指数 (*CIW*)、 $n(\text{K})/n(\text{Na})$ 、 $n(\text{Mg})/n(\text{Ca})$ 、 Rb/Sr 等古气候代用指标, 探讨了研究区源区南华纪间冰期的古气候演化过程, 结果显示: 源区古城冰期晚期气候寒冷干燥 (两件样品 *CIA* 值分别为 57.1 和 58.1), 大塘坡间冰期早期气候依然寒冷 (*CIA* 值介于 56.5~64.6, 均值 59.8), 大塘坡中晚期气候恢复温暖湿润 (*CIA* 值介于 69.8~78.8, 均值 75.5); *CIW*、 $n(\text{K})/n(\text{Na})$ 、 $n(\text{Mg})/n(\text{Ca})$ 、 Rb/Sr 值等指标反映的古气候演化过程与 *CIA* 值反映一致。此外, 对该钻孔大塘坡组下部的凝灰岩进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年龄测定, 获得了 $658.1 \pm 2.6 \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 1.5, n = 28$) 的 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 加权平均年龄, 结合前人对扬子板块大塘坡组底部凝灰岩的同位素年代学研究成果认为, 大塘坡间冰期早期 (663~658 Ma), 扬子板块上南华盆地内海冰虽已消融, 但古陆物源区气候依然寒冷。该时期扬子板块“源、汇”两区气候条件可能不同步, 其原因涉及深层次的岩石圈、水圈、大气圈和生物圈的耦合关系。

关键词: U-Pb 同位素年龄; 古气候; 大塘坡组; 扬子板块; Sturtian

新元古代地球上共发生了 4 次冰期, 分别为 Kaigas 冰期 (757~741 Ma)、Sturtian 冰期 (718~660 Ma)、Marinoan 冰期 (650~635 Ma) 和 Gaskiers 冰期 (583.7~582.1 Ma), 我国的扬子板块、华北板块、塔里木板块上均发现了相关沉积地层 (赵彦彦等, 2011; 高林志等, 2013; 包秀娟, 2016; 岳亮等, 2020; 邓俊等, 2020), 甚至柴达木北缘欧龙布鲁克微地块上也发现了相关冰期沉积记录 (孙娇鹏等, 2016)。其中 Sturtian 和 Marinoan 属于大洋冰川事件, 尤其是 Marinoan 的全球化程度非常高, 被称为“雪球地球”期 (Hoffman et al., 1998, 2002; 赵彦彦等, 2011), 而 Kaigas 和 Gaskiers 两次冰川可能仅存在于局部大陆或山岳 (赵彦彦等, 2011)。新元古代冰川期之后, 地球上发生了巨变, 如气候变化、大气增氧等, 并最终发展为早寒武纪的“生物大爆发” (Hoffman et al., 2002; 赵彦彦等, 2011)。因此, 新元古代冰期古环境演化过程一直是国际地学界关注热点。

我国扬子板块的新元古代南华纪地层记录了多期冰川事件沉积, 是全球研究的热点地区, 但之前国内对于南华系地层对比存在严重分歧。一方面的原因是相对于湘黔桂地区而言, 扬子陆块内部及其北缘和西缘中—新元古代 (720~635 Ma) 地层发育较为局限 (Wang Jian and Li Zhengxiang, 2003; 汪正江等, 2015), 在莲沱组上下缺失部分青白口系和南华冰期地层, “莲沱组”是否等同于“板溪群”争论较大 (景先庆等, 2018): 一些学者认为莲沱组等同于板溪群, 应为南华纪冰期前的沉积地层 (刘鸿允等, 1980; 刘鸿允, 1991); 另一些学者通过化学地层学研究认为莲沱组应为南华纪沉积地层, 与板溪群为上下关系, 将莲沱组下部与长安组或溁水河组、东山峰组对比, 上部与大塘坡组或富禄组对比 (王自强等, 2006a, b; 高林志等, 2013); 还有一些学者通过岩相学方法则把莲沱组与富禄组进行对比 (彭学军等, 2004; 林树基等, 2013)。另一方面, 对于南华纪开始时间以及其与成冰纪 (Cryogenian) 的对比问题

注: 本文为国家自然科学基金资助项目 (编号: 41872238)、湖北省地质局科技项目 (编号: KJ2017-11、KJ2020-6) 和湖北省地勘基金项目 (编号: 鄂采计 [2017]-04090 号) 的成果。

收稿日期: 2020-04-04; 改回日期: 2020-08-10; 责任编辑: 刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2021.01.004

作者简介: 李明龙, 男, 1988 年生, 博士研究生, 工程师, 主要从事地质矿产勘查与沉积学研究; Email: leeminglong@126.com。通讯作者: 田景春, 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事沉积学与石油地质学教学研究; Email: tjc@cdut.edu.cn。

认识不统一(汪正江等,2013)。高林志等(2011,2013)通过对湘黔桂地区南华系剖面的锆石年代学研究,提出扬子地块南华系应限定在 780~635 Ma,可能包含长安、古城和南沱 3 个冰期,分别对应了 Kaigas、Sturtian 和 Marinoan;汪正江等(2013)通过对湘黔桂地区下江群(与板溪群相当)顶部沉凝灰岩年龄研究,认为长安冰期启动时间约为 720 Ma,南华系底界应设为 720 Ma。而近几年许多学者通过新的同位素年代学研究,更倾向于莲沱组应当与板溪群对比(高维等,2009;汪正江等,2013,2015;张启锐,2014;Lan Zhongwu et al.,2014,2015a,b;周传明,2016;官开萍等,2016;景先庆等,2018;Lang Xianguo et al.,2018;陈建书等,2020),尤其是湖北宜昌地区莲沱组顶部凝灰岩和广西三江地区板溪群顶部的凝灰岩可靠 U-Pb 年龄分别为 714 ± 8 Ma (Lan Zhongwu et al.,2015a) 和 715.9 ± 2.8 Ma (Lan Zhongwu et al.,2014),直接限定了其上覆地层沉积年龄。近期,也有学者报道湖北通山地区莲沱组中上部凝灰岩 U-Pb 年龄为 727.3 ± 6.7 Ma (王田等,2020),因此,南华系的底界年龄应小于 720 Ma,与地球寒冷事件开始的成冰系底界相当(汪正江等,2013;Rooney et al.,2015;Lang Xianguo et al.,2018),南华纪启动时间的分歧逐渐得到弥合(张启锐等,2016)。此外,宜昌地区陡山沱组底部凝灰岩 U-Pb 年龄为 635.2 ± 0.6 Ma (Condon et al.,2005),因此扬子板块莲沱组(板溪群)之上、陡山沱组之下的沉积地层应划归南华系,相当于成冰系(720~635 Ma),具体的沉积序列自下而上包括长安组、富禄组、古城组、大塘坡组、南沱组(林树基等,2013)。

但南华系内部的地层划分仍存在分歧,主要分歧是冰期和间冰期的划分。有学者根据沉积盆地演化和古地理研究认为,南华纪下冰期沉积为湘黔桂地区的长安组(对应湘中—怀化地区的江口组一段)、间冰期沉积包含下部的湘黔桂地区的富禄组(对应湘中—怀化地区的江口组二段)、中部古城组小冰期沉积及上部的大塘坡组,上冰期沉积为南沱组(林树基等,2013;汪正江等,2015);也有学者因大塘坡组底部凝灰岩年龄与国际 Sturtian 冰期结束年龄接近,将江口组(含长安组下冰段、富禄组)和古城组上冰段归为南华纪下冰期沉积,大塘坡组归为间冰期沉积,南沱组为上冰期沉积(周传明,2016)。为方便扬子板块与其他板块成冰系的地层对比,本文中采用周传明(2016)的划分方案。

鄂西南华系古城组与南沱组分别属于 Sturtian

(仅晚期)和 Marinoan 冰期沉积,大塘坡组为间冰期沉积(周传明,2016;包秀娟,2016;Lang Xianguo et al.,2018;图 1a,b)。很多学者对扬子板块不同地区大塘坡组不同层位的凝灰岩开展了同位素年龄研究,约束了古城冰期的结束时间和南沱冰期的启动时间:贵州松桃地区大塘坡组底部含锰页岩中发育稳定的凝灰岩层,不同方法得到其 U-Pb 年龄介于 663~667 Ma (Zhou Chuanming et al.,2004;尹崇玉等,2006;余文超等,2016),表明扬子地区古城冰期结束时间约为 663 Ma (图 1c);湖南吉首和湖北长阳大塘坡组顶部和中部凝灰岩 U-Pb 年龄分别为 654.5 ± 3.5 Ma (Zhang Shihong et al.,2008) 和 654.2 ± 2.7 Ma (Liu Pengju et al.,2015),表明南沱冰期开始时间远晚于 654 Ma。因此,想要建立南华纪冰期更为精准的时间格架,必须对大塘坡组开展进一步的同位素年代学研究。笔者在鄂西走马地区 ZK701 钻孔大塘坡组下部发现了新的凝灰岩层位,本文对其开展了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究。

加之,近年来湖南石门、贵州松桃、湖北鹤峰等多地大塘坡组底部碳质页岩较低的 CIA (化学蚀变指数)值被先后报道,指示了寒冷的古气候环境(冯连君等,2004;齐靓等,2015;李明龙等,2019),说明扬子板块上古城冰期结束后的大塘坡早期,南华盆地的源区气候依然寒冷。本文通过 ZK701 大塘坡组岩芯元素地球化学特征研究了该时期古气候演化,并通过新的凝灰岩年龄限定源区南华纪间冰期古气候转暖时间。

1 区域地质概况

新元古代晚期,在 Rodinia 超大陆解体的背景下,扬子板块东南缘发育了南华裂谷盆地(Wang Jian and Li Zhengxiang,2003)。裂谷早期阶段以盆地西北部陆架浅水环境下沉积的莲沱组和盆地东南部深水环境下沉积的板溪群为代表(图 1a,b);其上覆南华系(相当于成冰系)沉积阶段可分为江口冰期(含长安组下冰期、富禄组间冰期和古城组上冰期)、大塘坡间冰期和南沱冰期(周传明,2016);在伊迪卡拉纪早期,发生了大规模海侵,沉积了陡山沱组“盖帽”碳酸盐岩(Lang Xianguo et al.,2018)。

需要指出的是,研究区位于南华裂谷盆地北部,新元古代晚期主要处于浅海陆棚沉积环境(图 1a),古城组仅代表了 Sturtian 晚期沉积。

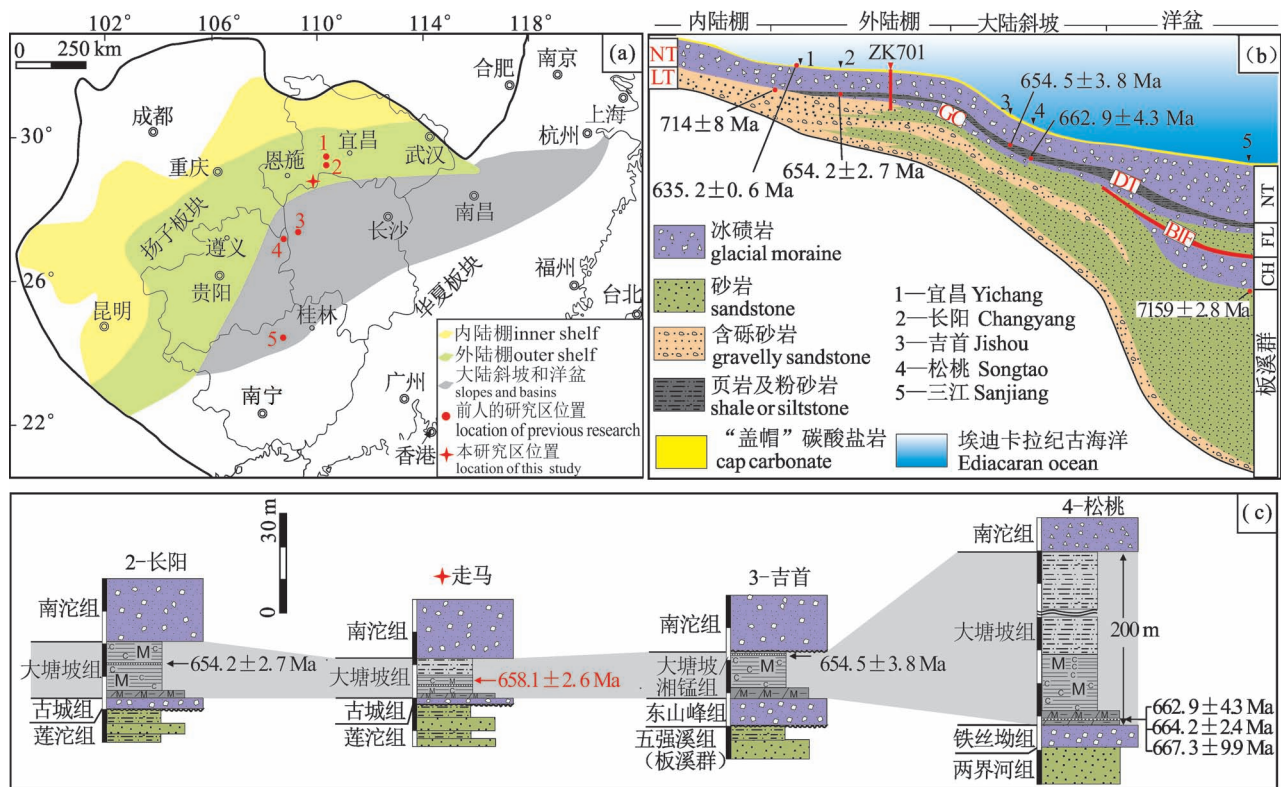


图 1 扬子板块早埃迪卡拉期古地理简图(a, 据 Jiang Ganqing et al. ,2011); 沉积模式图(b, 据 Lang Xianguo et al. , 2018); 不同地区大塘坡组凝灰岩 U-Pb 年龄(c)

Fig. 1 Paleogeographic map of the Early Ediacaran in the Yangtze Plate (a, modified after Jiang Ganqing et al. 2011); map of sedimentary pattern (b, modified from Lang Xianguo et al. , 2018); zircon U-Pb ages of the tuff bed from the Datangpo Formation at different areas (c)

NT—南沱组; GC—古城/铁丝坳组; DT—大塘坡/湘锰组; FL—富禄组; BIF—BIF 铁质条带; CH—长安组; LT—莲沱组
NT—Nantuo Formation; GC—Gucheng/Tiesi' ao Formation; DT—Datangpo/Xiangmeng Formation; FL—Fulu Formation;
BIF—BIF iron ore; CH—Chang'an Formation; LT—Liantuo Formation

2 样品及处理分析

2.1 样品描述

本次研究的 ZK701 钻孔位于湖北省鹤峰县走马镇,地理坐标为北纬 29°48′18″,东经 110°23′42″,孔径 11 cm,终孔深度 272.11 m。钻孔南华系岩芯(图 2a)简述如下:

南沱组 (Nh_2n), 厚 181.53 m (孔深 45.10 ~ 231.30 m), 浅灰、灰绿色厚层—块状含砾砂岩、含砾粉砂岩,砾石成分复杂,分选差,棱角至次圆状。与下伏大塘坡组整合接触。

大塘坡组 (Nh_2d), 厚 12.12 m, 分为上下两段。上段厚 9.11 m (孔深 231.30 ~ 240.53 m), 自下而上由黑色含碳质页岩过渡为灰色粉砂质页岩; 下段厚 3.01 m (孔深 240.53 ~ 243.58 m), 为黑色含锰碳质页岩(含锰岩系), 底部为灰黑色含锰泥灰岩, 未发

现与古城组的明显不整合, 该段顶部(孔深约 240.65 m 处)发育一层厚约 2 cm 的灰色凝灰岩, 大量黄铁矿附于其上, 与上下的黑色页岩极易区分(图 2b), 取样后编号 DTPN1(图 2c)。

古城组 (Nh_1g), 厚 14.38 m (孔深 243.58 ~ 258.0 m), 岩性为灰色中厚层状含砾粉砂岩。

2.2 样品采集与分析

2.2.1 元素地球化学样品采集与分析

细碎屑岩的 CIA (化学蚀变指数) 值能够较好地反映该地区的化学风化程度, 而粗粒度碎屑岩主要是物理风化作用的结果, 不适宜用于 CIA 的古气候研究 (Nesbitt and Young, 1982)。细粒沉积岩的微量元素在后期成岩和风化作用中比粗碎屑岩稳定, 是源区和环境示踪的可靠工具 (Zhang Kaijun et al. , 2012; 李明龙等, 2014)。本研究在 ZK701 钻孔中采集细碎屑岩样品 18 件, 其中古城组 2 件, 大塘坡组

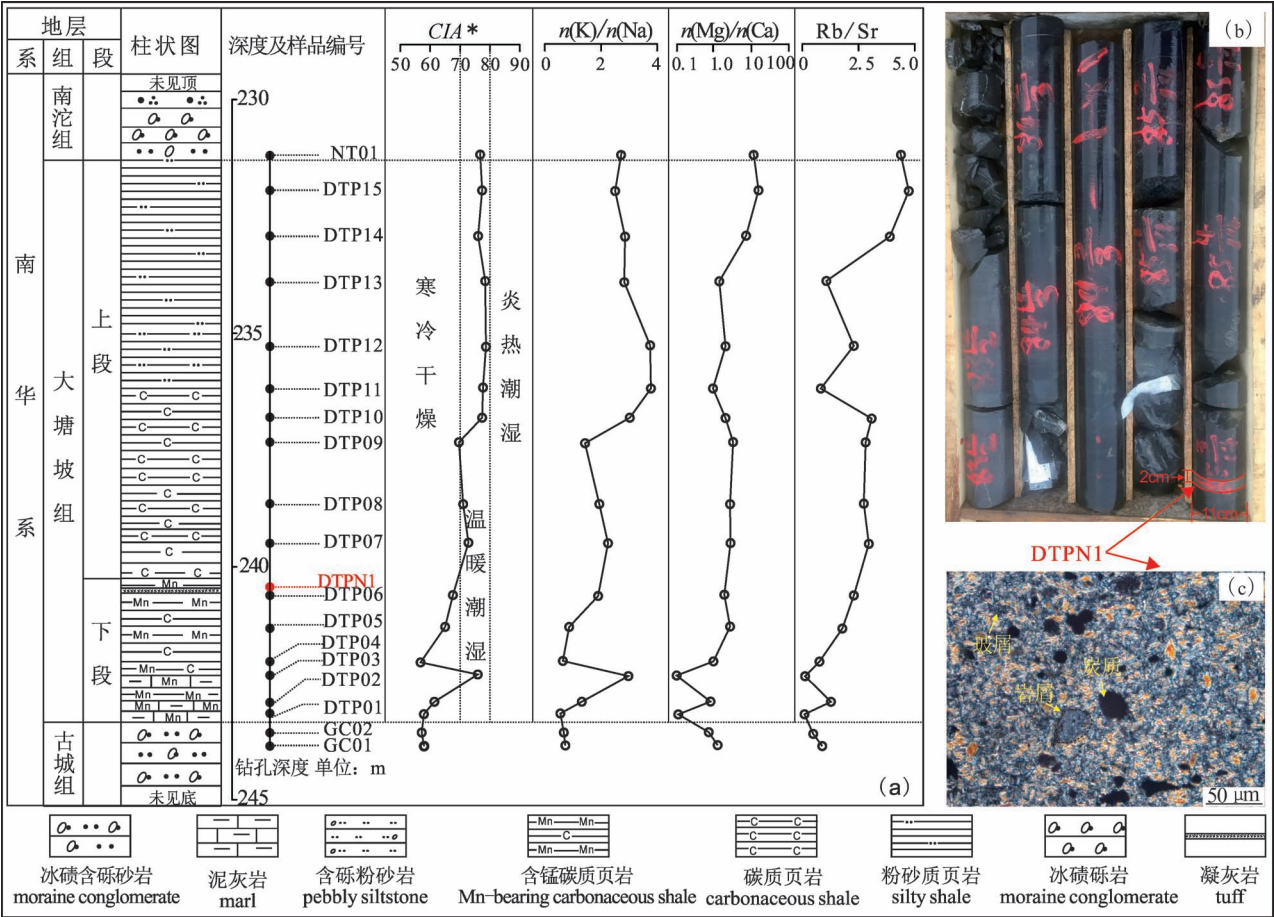


图 2 ZK701 岩芯大塘坡组样品古气候指标演化(a) ;大塘坡组凝灰岩宏观特征(b) ;凝灰岩镜下特征(c)

Fig. 2 Paleoclimate index of Datangpo Formation samples from ZK701 drill core(a) ; macroscopic characteristics of tuff for Datangpo Formation (b) ; Photos of tuff under microscope (c)

下段 6 件、上段 9 件,南沱组底部 1 件(图 2)。样品均取自钻孔中的新鲜基岩,基本不受后期风化影响,大塘坡组样品为无脉充填的泥级或者粉砂级细碎屑岩(DTP01 与 DTP03 氧化钙含量较高,该指标仅作为参考),针对南沱组和古城组冰碛岩样品,笔者利用手钻精细地剔除了全部砾石,只分析其中的泥级或者粉砂级基质。样品经自然风干后,用玛瑙研钵磨细至 200 目过筛。

全岩主量元素含量在武汉上谱分析科技有限责任公司利用日本理学 Primus II X 射线荧光光谱仪(XRF)分析完成,测试精度优于 5%。用于分析的样品处理流程如下:将 200 目样品置于 105℃ 烘箱中烘干 12 h;称取~1.0 g 烘干样品置于恒重陶瓷坩埚中,在 1000℃ 马弗炉中灼烧 2 h,取出待冷却至室温再称量,计算烧失量;分别称取 6.0 g 助熔剂(Li₂B₄O₇: LiBO₂: LiF = 9:2:1)、0.6 g 样品、0.3 g 氧化剂(NH₄NO₃)置于铂金坩埚中,在 1150℃

熔样炉中熔融 14 min,取出坩埚转移到耐火砖上冷却,然后将玻璃片取出以备 XRF 测试。

全岩微量元素含量在武汉上谱分析科技有限责任公司利用 Agilent 7700e ICP-MS 分析完成,测试精度优于 5%。用于 ICP-MS 分析的样品处理如下:将 200 目样品置于 105℃ 烘箱中烘干 12 h;准确称取粉末样品 50 mg 置于 Teflon 溶样弹中;先后依次缓慢加入 1 mL 高纯 HNO₃ 和 1 mL 高纯 HF;将 Teflon 溶样弹放入钢套,拧紧后置于 190℃ 烘箱中加热 24 h 以上;待溶样弹冷却,开盖后置于 140℃ 电热板上蒸干,然后加入 1 mL HNO₃ 并再次蒸干;加入 1 mL 高纯 HNO₃、1 mL MQ 水和 1 mL 内标 In(浓度为 1 μg/g),再次将 Teflon 溶样弹放入钢套,拧紧后置于 190℃ 烘箱中加热 12 h 以上;将溶液转入聚乙烯料瓶中,并用 2% HNO₃ 稀释至 100 g 以备 ICP-MS 测试。

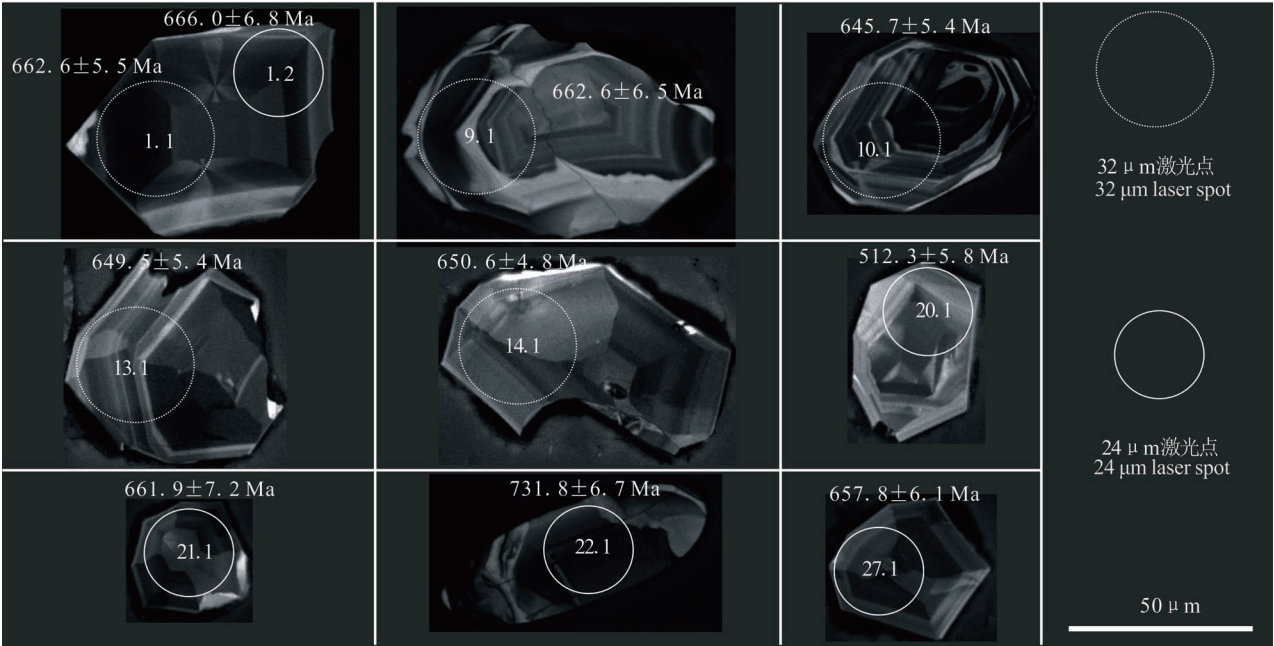


图 3 DTPN1 代表性锆石样品阴极发光图像和激光点位置
Fig. 3 Cathodoluminescence image and location of laser spot for representative zircon samples in DTPN1

2.2.2 凝灰岩样品采集与分析

DTPN1 凝灰岩锆石挑选、制靶、阴极发光图像拍摄和测试分析工作均在武汉上谱分析科技有限责任公司完成。锆石采用常规重力和磁力挑选,在双目镜下选择透明、无裂隙的锆石颗粒,置于环氧树脂中打磨;锆石阴极发光图像拍摄仪器为高真空扫描电子显微镜(JSM-IT100);锆石 U-Pb 同位素定年利用 LA-ICP-MS 分析完成,GeolasPro 激光剥蚀系统由 COMPexPro 102 ArF 193 nm 准分子激光器和 MicroLas 光学系统组成,ICP-MS 型号为 Agilent 7900,详细分析流程见 Zong Keqing 等 (2017)。本次分析的激光能量 80 mJ,频率 5 Hz,激光束斑直径为 32 μm 和 24 μm ,锆石年龄计算采用国际标准锆石 91500 作外标进行校正。

此外,分析了锆石标样 GJ-1 和 Ple 对数据质量进行监控,分析结果分别为 $603.7 \pm 2.5 \text{ Ma}$ ($n=4$) 和 $336.9 \pm 1.1 \text{ Ma}$ ($n=7$),与推荐值在误差范围内一致 (Jackson et al., 2004; Sláma et al., 2004)。锆石样品的 U-Pb 年龄谐和图绘制和年龄加权平均计算采用 Isoplot (Ludwig, 2003) 完成。相关测试分析结果见表 2。

3 分析结果

3.1 元素地球化学分析结果

本研究中的 18 件细碎屑岩主量元素分析结果

见表 1。可以看出,样品中 SiO_2 含量在南华系古城组上部平均为 66.28%,大塘坡组上段较下段 SiO_2 含量逐渐升高,平均值分别为 62.66% 和 51.29%;而 MnO_2 、 CaO 含量则与 SiO_2 含量变化趋势相反;除氧化钙含量较高的 DTP01 和 DTP03 外,16 件样品的 Al_2O_3 含量变化不大,总体介于 12.75% ~ 16.99%,但与 CaO 含量呈负相关 ($r=-0.64$),说明碳酸盐岩矿物可能与碎屑物质输入关系不大,主要为自生矿物;18 件样品 P_2O_5 含量为 0.07% ~ 0.97%,平均 0.11%, Fe_2O_3 含量为 2.05% ~ 6.41%,平均 4.95%, TiO_2 含量为 0.13% ~ 0.71%,平均 0.60%, Na_2O 含量为 0.27% ~ 2.85%,平均 1.52%, K_2O 含量为 1.14% ~ 5.00%,平均 3.79%, MgO 含量为 1.12% ~ 2.99%,平均 1.78%。与本研究相关的微量元素 Rb 和 Sr 分析结果见表 1,样品 Rb 含量为 $34.4 \times 10^{-6} \sim 157.2 \times 10^{-6}$,平均 117.0×10^{-6} ;Sr 含量为 $29.5 \times 10^{-6} \sim 1029.6 \times 10^{-6}$,平均 157.9×10^{-6} 。Rb 和 Sr 元素含量变化范围较大,主要体现在大塘坡组下段沉积期,可能与该期岩性特殊性有关。

3.2 凝灰岩锆石 U-Pb 测年结果

对 DTPN1 样品中的锆石进行阴极发光拍照,绝大部分锆石棱角分明、磨圆度差,表明未经过再旋回,DTPN1 为同沉积喷发的火山凝灰岩。锆石粒径较小,多为粒状和短柱状,长轴介于 30 ~ 100 μm ,大部分显示出清晰规则的韵律环带 (图 3),Th/U 值较

表 1 走马地区 ZK701 钻孔大塘坡组样品相关主、微量元素分析结果及特征值

Table 1 Analysis results and characteristic values of some related main and trace elements in Datangpo Formation of ZK701 drillcore

样品号	岩性	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	烧失	总和	CIA	CIA [*]	CIW	ICV	$\frac{n(K)}{n(Na)}$	$\frac{n(Mg)}{n(Ca)}$	Rb ($\times 10^{-6}$)	Sr	$\frac{Rb}{Sr}$
		(%)																				
GC01	冰碛砾岩基质	65.18	0.67	14.32	5.47	0.14	2.26	1.90	2.35	3.12	0.13	3.92	99.45	57.9	58.1	67.1	1.87	0.87	1.19	86.4	97.5	0.89
GC02	冰碛砾岩基质	67.37	0.65	14.18	4.93	0.23	1.23	1.63	2.85	3.11	0.13	3.03	99.34	56.9	57.1	65.9	1.71	0.72	0.76	60.4	119.9	0.50
DTP01	含锰泥灰岩	27.87	0.24	5.24	2.87	3.03	2.99	26.87	1.19	1.14	0.97	24.75	97.15	57.5	57.8	66.5	1.77	0.63	0.11	34.4	595.1	0.06
DTP02	含锰页岩	48.27	0.66	15.35	6.41	3.48	1.71	2.01	1.97	4.10	0.16	13.07	97.19	58.4	60.4	70.3	1.85	1.37	0.85	126.0	106.8	1.18
DTP03	含锰灰质页岩	54.99	0.13	4.04	2.05	7.03	1.14	11.28	0.27	1.26	0.17	14.91	97.26	67.7	75.2	87.8	1.04	3.11	0.10	38.5	1029.6	0.04
DTP04	含锰页岩	55.90	0.56	12.75	5.54	3.71	1.62	1.53	2.76	2.82	0.22	10.76	98.16	56.4	56.5	65.2	1.22	0.67	1.05	89.5	113.5	0.79
DTP05	含锰页岩	60.63	0.66	14.81	5.09	1.06	1.34	0.51	2.58	3.64	0.12	8.07	98.50	62.7	64.6	75.2	1.27	0.93	2.62	112.8	63.3	1.78
DTP06	含锰页岩	60.08	0.64	15.66	4.85	1.10	1.61	0.82	1.57	4.55	0.10	7.53	98.52	64.1	69.1	80.3	5.99	1.91	1.95	144.7	63.3	2.29
DTP07	含碳页岩	59.62	0.68	15.41	6.17	0.44	1.46	0.49	1.35	4.55	0.08	7.11	97.35	66.3	72.3	84.1	1.72	2.22	2.96	142.8	49.8	2.87
DTP08	含碳页岩	61.18	0.63	15.16	5.23	0.63	1.58	0.57	1.51	4.41	0.08	6.86	97.85	65.2	70.3	82.0	1.29	1.92	2.80	142.3	52.3	2.72
DTP09	含碳页岩	64.10	0.65	15.49	4.03	0.09	1.12	0.30	1.99	4.07	0.07	6.20	98.11	65.7	69.8	80.8	4.26	1.34	3.68	128.7	45.6	2.82
DTP10	粉砂质页岩	61.63	0.65	16.34	5.03	0.14	1.43	0.63	1.07	5.00	0.07	6.13	98.11	69.3	77.1	90.0	3.3	3.06	2.26	157.2	51.1	3.08
DTP11	粉砂质页岩	60.68	0.65	14.88	5.29	0.28	2.13	2.31	0.78	4.43	0.11	6.55	98.08	70.8	77.1	91.7	4.1	3.76	0.92	139.4	170.0	0.82
DTP12	粉砂质页岩	64.17	0.65	15.30	5.17	0.19	1.73	0.77	0.81	4.46	0.09	4.86	98.19	71.1	78.8	91.6	1.37	3.61	2.24	146.2	64.5	2.27
DTP13	粉砂质页岩	62.13	0.64	14.91	5.80	0.25	2.16	1.60	0.98	4.16	0.11	5.60	98.33	70.7	78.6	89.8	1.3	2.79	1.35	131.1	121.8	1.08
DTP14	粉砂质页岩	64.37	0.71	16.99	5.38	0.21	2.27	0.29	1.06	4.63	0.19	3.65	99.75	71.3	76.5	90.3	1.38	2.87	7.75	145.3	37.6	3.87
DTP15	粉砂质页岩	66.11	0.69	16.49	5.02	0.16	2.22	0.13	1.17	4.32	0.08	3.15	99.52	71.3	77.4	89.4	1.2	2.43	17.45	139.2	29.5	4.71
NT01	冰碛砾岩基质	66.03	0.69	16.81	4.74	0.15	2.13	0.18	1.10	4.50	0.11	3.23	99.66	71.4	76.9	90.0	1.1	2.69	12.17	141.5	31.9	4.44

注：CIA、CIA^{*}、CIW、ICV 的含义及计算公式见正文。

高(0.63~1.64),平均 1.25(表 2),显示岩浆锆石成因。

目前用于锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年的常用激光剥蚀束斑直径为 32 μm,采用更小的束斑测试信号可能会下降(李艳广等,2015)。由于 DTPN1 中挑选出的锆石粒径普遍较小(图 3),大部分锆石不具备 32 μm 激光束斑测试条件,本研究优选挑选了 15 颗粒径相对较大的锆石采用 32 μm 的激光束斑进行测试,同时还选择了 13 颗粒径处于普遍范围内的锆石采用 24 μm 的激光束斑进行测试。为了验证 24 μm 的激光束斑测试的准确性,从 15 粒采用 32 μm 束斑测试的锆石中随机挑选出 2 粒(1 和 5 号锆石)另选点采用 24 μm 的激光束斑测试,结果显示:1 号和 5 号锆石的 32 μm 束斑点 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 年龄分别为 662.6 ± 5.5 Ma 和 665.0 ± 5.9 Ma,24 μm 束斑点年龄分别对应为 666.0 ± 6.8 Ma 和 660.9 ± 5.8 Ma(图 3),两者在误差范围内是一致的,且 24 μm 的激光束斑下,年龄并没有偏大或偏小的趋势,说明两种束斑的测试结果均可靠。

28 颗锆石的 30 个测点中(表 2,图 3),20 号锆石 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 年龄明显偏小为 512.3 Ma,其 CL 图像偏白(图 3),可能由于铅丢失或混染导致;22 号锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄明显较大为 731.8 Ma,且其磨圆度较高(图 3),应属继承锆石;剩余 26 颗锆石的 28 个测点测试结果年龄变化范围比较集中(645.7~672.3 Ma),且均位于谐和线上及其附近(图 4a),得到 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 加权平均年龄为 658.1 ± 2.6 Ma (MSWD = 1.5, $n = 28$) (图 4b),一致线谐和年龄为 657.8 ± 2.5 Ma (95% 置信度,MSWD = 1.4); $n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$ 加权平均年龄为 657.3 ± 6.5 Ma(双权 M 估计,95% 置信度, $n = 28$),与 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 加权平均年龄、谐和年龄一致。因此,658 Ma 可视 DTPN1 凝灰岩火山喷发或

表 2 DTPN1 中锆石样品的 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果
Table 2 LA-ICP-MS U-Pb dating results of zircon samples in DTPN1

测点号	元素含量($\times 10^{-6}$)			Th/U	同位素比值						同位素年龄 (Ma)						谐和度
	Pb *	Th	U		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$				
					测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ					
1.1	66.6	569	424	1.34	0.0613	0.0017	0.9154	0.0246	0.1083	0.0009	650.0	59.3	659.9	13.0	662.6	5.5	98%
1.2	42.3	287	293	0.98	0.0618	0.0017	0.9280	0.0255	0.1088	0.0012	664.8	59.3	666.6	13.4	666.0	6.8	97%
2.1	44.8	382	267	1.43	0.0597	0.0058	0.9226	0.0945	0.1081	0.0010	594.5	211.1	663.7	49.9	661.7	6.1	97%
3.1	59.6	471	392	1.20	0.0617	0.0015	0.9126	0.0222	0.1071	0.0009	664.8	53.7	658.4	11.8	656.1	5.0	98%
4.1	48.9	368	325	1.13	0.0591	0.0015	0.8856	0.0226	0.1087	0.0010	572.3	52.8	644.0	12.2	665.0	5.9	99%
4.2	36.9	221	264	0.84	0.0608	0.0018	0.9050	0.0252	0.1080	0.0010	631.5	65.7	654.4	13.4	660.9	5.8	98%
5.1	91.6	967	537	1.80	0.0597	0.0013	0.8826	0.0195	0.1071	0.0008	594.5	50.0	642.4	10.5	655.6	4.4	99%
6.1	61.2	554	387	1.43	0.0605	0.0015	0.8941	0.0211	0.1072	0.0008	620.4	53.7	648.6	11.3	656.7	4.4	99%
7.1	53.3	406	347	1.17	0.0633	0.0016	0.9489	0.0237	0.1085	0.0008	720.4	53.7	677.5	12.3	664.2	4.8	98%
8.1	74.0	740	456	1.62	0.0606	0.0015	0.8853	0.0213	0.1059	0.0009	633.4	51.8	643.8	11.5	648.8	5.1	99%
9.1	14.88	86.0	105	0.82	0.0681	0.0026	1.0152	0.0390	0.1082	0.0011	872.2	79.6	711.5	19.6	662.6	6.5	96%
10.1	37.0	314	241	1.30	0.0601	0.0020	0.8726	0.0277	0.1054	0.0009	609.3	38.0	637.0	15.0	645.7	5.4	99%
11.1	59.8	542	382	1.42	0.0588	0.0017	0.8608	0.0242	0.1061	0.0009	561.1	61.1	630.5	13.2	649.8	5.5	98%
12.1	67.5	583	416	1.40	0.0612	0.0014	0.9174	0.0202	0.1086	0.0009	655.6	48.1	661.0	10.7	664.5	5.2	98%
13.1	51.2	367	343	1.07	0.0622	0.0018	0.9084	0.0254	0.1060	0.0009	683.3	63.0	656.2	13.5	649.5	5.4	95%
14.1	54.0	438	355	1.24	0.0610	0.0018	0.8922	0.0245	0.1062	0.0008	638.9	61.1	647.5	13.1	650.6	4.8	97%
15.1	54.2	469	327	1.44	0.0620	0.0019	0.9231	0.0271	0.1079	0.0008	675.9	64.8	664.0	14.3	660.5	4.6	99%
16.1	53.3	494	328	1.51	0.0612	0.0017	0.9137	0.0248	0.1080	0.0009	655.6	59.3	659.0	13.2	660.9	5.4	96%
17.1	52.0	374	360	1.04	0.0649	0.0017	0.9502	0.0243	0.1059	0.0010	772.2	55.6	678.2	12.7	648.7	5.8	92%
18.1	81.2	747	519	1.44	0.0600	0.0014	0.8822	0.0204	0.1065	0.0010	611.1	51.8	642.2	11.0	652.6	5.7	99%
19.1	48.2	351	317	1.11	0.0644	0.0020	0.9728	0.0282	0.1097	0.0011	766.7	65.9	689.9	14.5	671.0	6.3	99%
20.1	62.6	712	515	1.38	0.0633	0.0020	0.7259	0.0239	0.0827	0.0010	716.7	66.7	554.1	14.1	512.3	5.8	97%
21.1	58.1	472	384	1.23	0.0589	0.0018	0.8811	0.0274	0.1081	0.0012	564.9	68.5	641.6	14.8	661.9	7.2	99%
22.1	65.8	279	440	0.63	0.0638	0.0020	1.0566	0.0322	0.1202	0.0012	744.5	233.3	732.1	15.9	731.8	6.7	92%
23.1	25.4	245	149	1.64	0.0608	0.0027	0.9263	0.0408	0.1099	0.0014	631.5	62.0	665.7	21.5	672.3	8.0	99%
24.1	42.6	328	282	1.16	0.0623	0.0022	0.9382	0.0313	0.1090	0.0011	687.1	78.7	671.9	16.4	667.2	6.6	99%
25.1	15.52	108	104	1.04	0.0630	0.0031	0.9488	0.0467	0.1093	0.0014	709.3	105.5	677.5	24.3	668.8	8.0	99%
26.1	58.1	424	396	1.07	0.0596	0.0015	0.8880	0.0220	0.1078	0.0010	587.1	55.5	645.3	11.9	660.1	5.8	96%
27.1	57.1	446	382	1.17	0.0609	0.0017	0.9044	0.0262	0.1074	0.0010	635.2	63.0	654.1	14.0	657.8	6.1	98%
28.1	59.2	513	386	1.33	0.0598	0.0017	0.8821	0.0263	0.1066	0.0009	594.5	63.0	642.1	14.2	652.9	5.5	99%

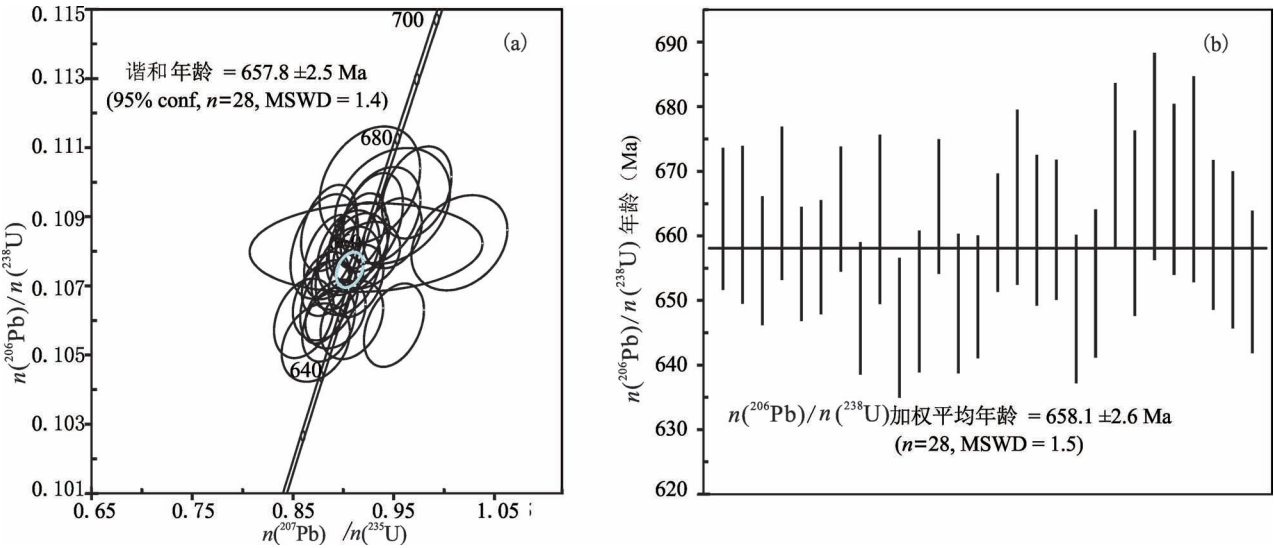


图 4 DTPN1 的锆石 U-Pb 年龄谐和图(a)与 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 加权年龄分布图(b)
Fig. 4 U-Pb age concordance of zircon samples in DTPN1(a) and distribution of $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ weighted age for zircon samples (b)

沉积的最佳估计年龄。

4 讨论

4.1 鄂西走马地区大塘坡期 CIA 值及源区古气候演化

近年来,细碎屑岩的化学蚀变指数(CIA: Chemical index of alteration)被广泛用来反映源区的化学风化程度及古气候(McLennan 1993;冯连君等, 2004,2006; 孙娇鹏等,2016; 李通通等,2019):

$$CIA = \frac{100 \cdot n(\text{Al}_2\text{O}_3)}{n(\text{Al}_2\text{O}_3) + n(\text{CaO}^*) + n(\text{K}_2\text{O}) + n(\text{Na}_2\text{O})}$$

其中 $n(\text{CaO}^*)$ 是指仅计硅酸盐矿物中的 Ca, CIA 值越高指示硅酸盐矿物中 Na, K 和 Ca 矿物从母岩中淋失越多,化学风化越强(Nesbitt et al. , 1982)。本文 $n(\text{CaO}^*)$ 校正方法为,令 $n(\text{CaO}_{\text{剩余}}) = n(\text{CaO}) - n(\text{P}_2\text{O}_5) \cdot \frac{10}{3}$,若 $n(\text{CaO}_{\text{剩余}}) < n(\text{Na}_2\text{O})$, 则取 $n(\text{CaO}^*) = n(\text{CaO}_{\text{剩余}})$; 若 $n(\text{CaO}_{\text{剩余}}) > n(\text{Na}_2\text{O})$, 则取 $n(\text{CaO}^*) = n(\text{Na}_2\text{O})$ (McLennan, 1993)。在不同的气候条件下,风化搬运后沉积的碎屑岩的 CIA 值明显不同:炎热潮湿的热带气候条件下的沉积产物的 CIA 值一般介于 80~100;温暖湿润气候条件下则介于 70~80;而寒冷干燥气候条件下的冰碛岩和冰碛黏土大致介于 55~70(冯连君等,2006)。但利用 CIA 判断物源区风化程度时需要排除沉积再旋回、沉积分异、成岩作用影响

(Gaillardet et al. ,1999; Garzanti et al. ,2013)。

4.1.1 风化指标影响因素的讨论

(1) ICV 与样品准确性。与年轻沉积物相比,再旋回沉积物中氧化物除 K_2O 表现出上升趋势、 SiO_2 与 Al_2O_3 没有明显规律外,其他氧化物呈下降趋势,成分变异指数(ICV) 可以反映再旋回趋势(Cox, 1995):

$$ICV = [n(\text{Fe}_2\text{O}_3) + n(\text{K}_2\text{O}) + n(\text{Na}_2\text{O}) + n(\text{CaO}^*) + n(\text{MgO}) + n(\text{MnO}) + n(\text{TiO}_2)] / n(\text{Al}_2\text{O}_3)$$

式中 $n(\text{CaO}^*)$ 含意及校正方法同 CIA 的计算。Cullers 等(2002) 指出细屑岩 ICV 值 >1 时,表明该岩石含黏土矿物较少,代表了构造活动带的首次沉积;当 ICV 值 <1 时,表明沉积物中有大量的黏土矿物,可能是经历了再沉积的产物或者是强化化学风化环境的首次沉积物。本研究 18 样品的 ICV 值介于 0.91~2.59,均值为 1.15(表 1),主要为构造活动带的首次沉积,可以准确地反映源区风化程度。

(2) 水动力分选对样品 CIA 值的影响。邵菁清等(2012) 研究表明,水动力分选可以影响河流悬浮物 CIA 值的变化:粒度越细,黏土组分相对富集, CIA 值越高。而 $n(\text{Al})/n(\text{Si})$ 值来反映沉积物颗粒大小(Bouchez et al. ,2011)。本研究古城组上部、大塘坡组的样品均为细粒沉积物,且氧化钙含量低于 2% 的碎屑岩样品 $n(\text{Al})/n(\text{Si})$ 介于 0.22~0.26,应该说变化不大,样品粒度对 CIA 值影响可以忽略。

(3) 成岩期钾交代作用的影响。在成岩作用过

程中,黏土物质易受到钾交代的影响,使得钾含量发生变化,造成 CIA 值不能代表原始信息,需要利用 $A-CN-K$ 图解判断样品钾交代程度(冯连君等,2004)。 $A-CN-K$ 中,预测风化趋势线为理论上从初始成分开始风化的路径,它平行于 $A-CN$ 边,而 ZK701 中多数样点落在偏离理论趋势的直线附近(图 5),表明样品一定程度上遭受了钾交代作用。因此需通过 $A-CN-K$ 三角图对样品 CIA 进行钾校正以获得钾交代作用前样品的 K_2O 的含量(冯连君等,2004),经过校正后的样品 CIA 值用 CIA^* 表示(表 1)。

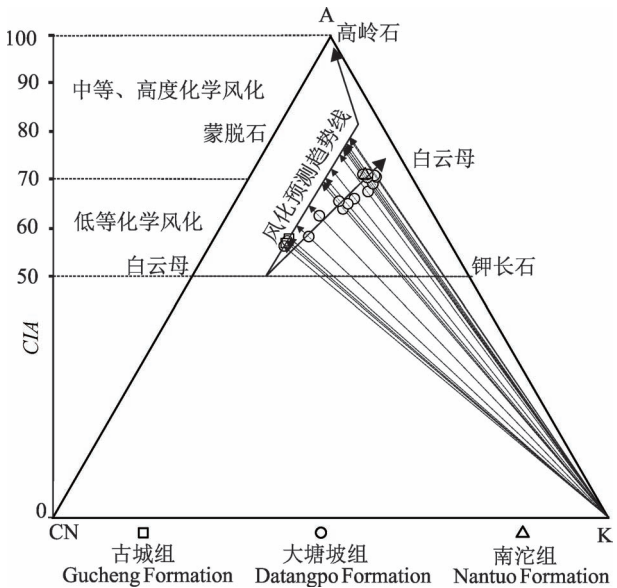


图 5 走马地区 ZK701 样品的 $A-CN-K$ 图解
(据 Fedo et al., 1995)

Fig. 5 $A-CN-K$ diagram of ZK701 drillcore samples
in Zouma area(After Fedo et al., 1995)

(4)物源的影响。此外,汪正江等(2000)研究指出,利用 CIA 等地球化学方法分析古气候之前,必须先判定其大地构造背景,以排除源岩影响。由于南华裂谷活动(Wang Jian and Li Zhengxiang,2003),扬子板块南华纪处于北高南低的古地理格局(汪正江等,2013),鄂西地区北部为鄂中古陆,南部为湘桂断陷盆地。研究区处于上述古陆与盆地间的浅海陆棚带(宋芳等,2016),南华系物源主要来自北部的鄂中古陆(胡蓉等,2016;宋芳等,2016),源区相对稳定,在相同的气候条件下,物源本身应该不会造成 CIA 值的较大波动。

4.1.2 大塘坡组 CIA 反映的古气候演化过程

ZK701 钻孔岩芯样品的 CIA^* 反映出,研究区源

区南华纪古城冰期的晚期处于干冷气候下(两件样品 CIA 值分别为 57.1 和 58.1),大塘坡间冰期早期气候依然寒冷(除 CaO 含量较高的 DTP03 和上下段过渡期沉积的 DTP06 样品外, CIA^* 值介于 56.5 ~ 64.6,均值 59.8),大塘坡中晚期气候恢复温暖湿润(CIA^* 值介于 69.8 ~ 78.8,均值 75.5)。此外,需要指出的是,南沱组底部 NT01 样品 CIA^* 为 76.9,反映了相对温暖湿润的气候条件,但该样品却采集于冰碛岩的基质,似乎存在矛盾。但 CIA 值反映的是源岩的化学风化特征,考虑到源—汇体系的时间尺度, CIA 值反映气候条件具有一定滞后,NT01 样品可能为源区大塘坡间冰期晚期的风化搬运产物,可能也间接指示了大塘坡组与南沱组属连续沉积或沉积间断较短。

笔者早前研究了走马地区 ZK702 钻孔南华系细碎屑岩元素地球化学特征,结果与 ZK701 反映的古气候演化趋势完全一致:古城冰期气候寒冷干燥(CIA^* 值从底部的 69.2 过渡至顶部的 57.8,均值为 62.2),大塘坡间冰期早期气候依然寒冷(CIA^* 值介于 54.3 ~ 62.7,均值 59.7),大塘坡中晚期气候恢复温暖湿润并趋于稳定(CIA^* 值介于 70.2 ~ 81.1,均值 75.8)(李明龙等,2019)。

蔡雄飞等(2018)研究指出, CIA 值精度受采样岩性、采样精度、汇源关系等多种因素控制,利用 CIA 研究古气候时,必须结合传统的相—古气候分析法,才能相互验证。湖南省石门县的壶瓶山剖面大塘坡组下段碳质页岩的 CIA 值介于 66.5 ~ 67.6,接近该剖面东山峰组(古城组)的 65.2 ~ 68.9,远低于该剖面大塘坡组上段的 74(冯连君等,2004);重庆酉阳大塘坡组 CIA 由底部的 67 逐渐升高为上部的 74(郭宇等,2018);贵州松桃地区大塘坡组底部碳质页岩的 CIA 也较低,介于 52 ~ 68(齐靓等,2015)。因此,鄂西地区大塘坡组的 CIA 演化规律并不是特例,鄂、渝、黔、湘地区大塘坡组 CIA 演化趋势基本一致,均反映了南华盆地物源区大塘坡早期至晚期古气候逐渐转暖的规律。此外,岩石学也能为大塘坡早期寒冷的古气候提供证据,黔东南松桃地区大塘坡组底部广泛发育冰成砾石夹层(齐靓等,2015),本研究区大塘坡组底部含锰岩系也发现了类似的冰成砾岩层(李明龙等,2019),可能大塘坡间冰期早期,虽然扬子板块上南华盆地内大洋冰盖已经解冻,但源区气候依然寒冷,陆地高海拔区的残留冰川可随陆源碎屑一起汇入沉积盆地。

4.2 大塘坡组 *CIW* 值及 *Na/K*、*Mg/Ca*、*Rb/Sr* 值与源区古气候演化

4.2.1 *CIW* 值与古气候

大量研究表明,由于钾的交代作用使得钾元素在沉积物中要比其在物源区母岩中更为富集 (Nesbitt et al., 1989),为消除 K_2O 的影响,Harnois (1988)引入了化学风化作用指数(*CIW*):

$$CIW = \frac{n(Al_2O_3)}{n(CaO^*) + n(Na_2O) + n(Al_2O_3)} \times 100\%$$

式中 $n(CaO^*)$ 含意及校正方法同 *CIA* 的计算。*CIW* 值越高,代表源区风化程度越强,反映源区古气候越趋向于温暖潮湿 (徐小涛等, 2018; 王忠伟等, 2020)。本研究样品 *CIW* 值与 *CIA*^{*} 值呈显著正相关,相关系数接近 1.0 (图 6a),古城组、大塘坡组下段 (除 DTP03 和 06) 和上段样品 *CIW* 均值分别为 66.5、69.3 和 87.8,演化趋势与 *CIA* 完全一致。

4.2.2 *n(K)/n(Na)* 值与古气候

n(K)/n(Na) 值是衡量样品中斜长石风化程度

的指标,长石特别是斜长石富含 Na,而钾长石、伊利石和云母富含 K;由于斜长石的风化速率远大于钾长石,风化物中的 $n(K)/n(Na)$ 值与其风化程度呈正比 (陈 旻 等, 2001)。ZK701 钻孔中样品 $n(K)/n(Na)$ 与 *CIA*^{*} 呈高度正相关 (图 6b), $r = 0.93$,这与辽河三角洲湿地表层沉积物样品的 $n(K)/n(Na)$ 和 *CIA* 值 (李通通等, 2019) 具有一致规律。其中大塘坡组下段 $n(K)/n(Na)$ 均值为 1.24,明显低于上段的均值 2.59,说明大塘坡间冰期早期源区斜长石化学风化程度远低于大塘坡中晚期。

4.2.3 *n(Mg)/n(Ca)* 值与古气候

沉积物中 $n(Mg)/n(Ca)$ 值能很好指示古温度的变化,因为较高的温度更利于 Mg 的沉积,导致 $n(Mg)/n(Ca)$ 增大 (吴艳宏等, 2004)。ZK701 大塘坡组下段 $n(Mg)/n(Ca)$ 均值为 1.11,接近古城组上部的 0.97,远低于大塘坡组上段的 4.60,说明自大塘坡早期至中晚期,古气温明显升高。

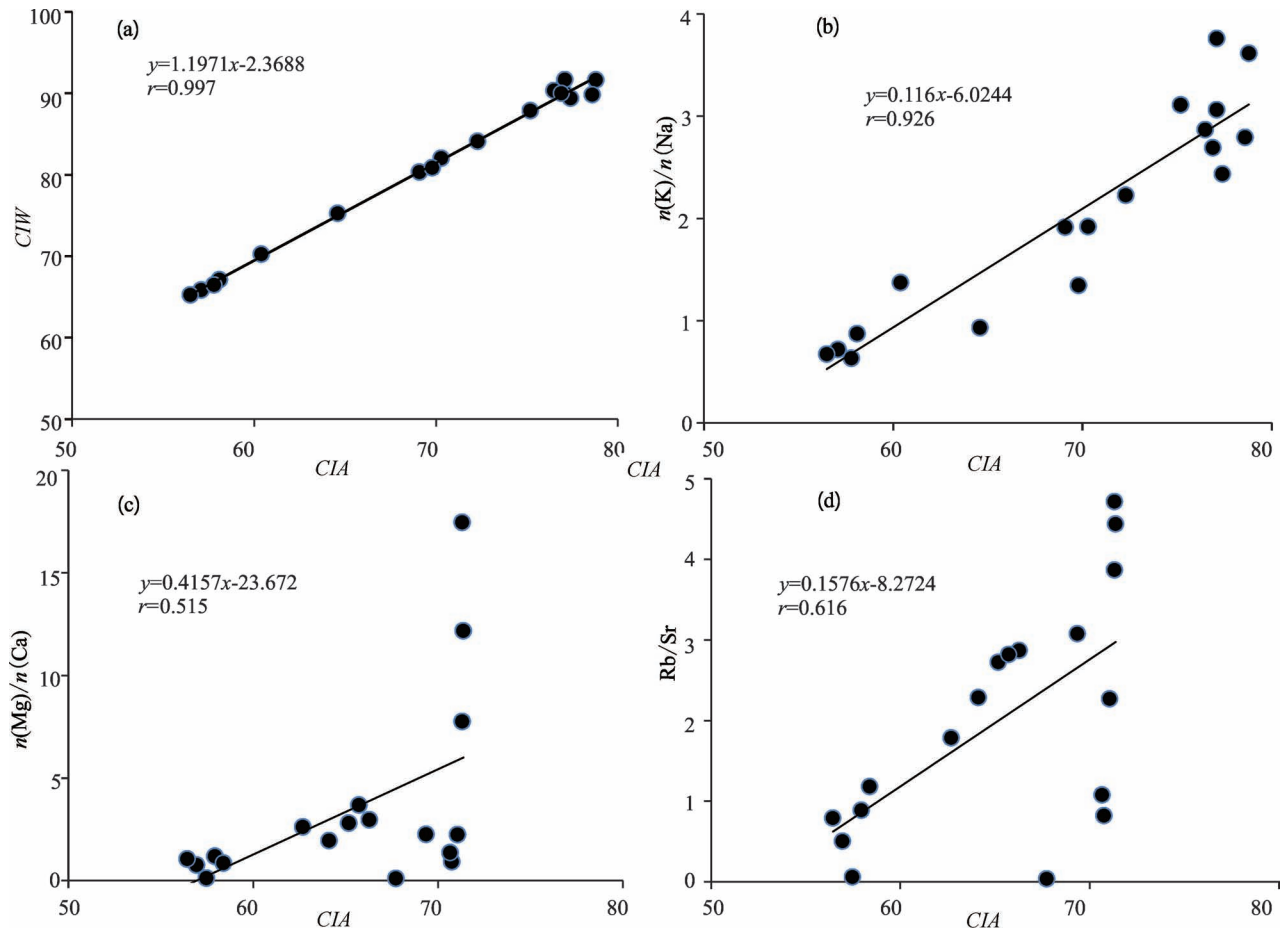


图 6 走马地区 ZK701 样品有关指标的相关关系图

Fig. 6 Correlation diagrams of relevant indexes for ZK701 drillcore samples in Zouma area

$n(\text{Mg})/n(\text{Ca})$ 与 CIA^* 也具有正相关关系, 相关系数为 0.52 (图 6c)。

4.2.4 Rb/ Sr 值与古气候

Rb 的离子半径较大, 吸附性较强, 容易被黏土矿物吸附而保留下来, 而 Sr 的离子半径较小, 容易被地表水或者地下水带走, 因此, Rb/Sr 值的大小可以反映淋溶程度, 即降雨量的大小。对于陆源碎屑岩来说, Rb/Sr 值与源区古气候具有正相关关系 (张坤等, 2018)。ZK701 大塘坡组样品的 Rb/Sr 值自下而上依次增大 (图 2), 下段和上段的 Rb/Sr 均值分别为 1.02、2.69 (表 1), 与 CIA^* 值在纵向上具有较好的一致性 (相关系数为 0.62, 图 6d), 反映出研究区源区大塘坡早期至中晚期降水逐渐增多, 气候由干燥转为湿润。

综上, CIW 值及 $n(\text{K})/n(\text{Na})$ 、 $n(\text{Mg})/n(\text{Ca})$ 、Rb/Sr 值, 反映了研究区源区古气候由大塘坡早期的干燥寒冷转向中晚期的温暖湿润, 化学风化程度对应由低转高。

4.3 DTPN1 锆石 U-Pb 年龄对扬子板块大塘坡期古气候转暖时间的制约

目前, 扬子板块古城冰期的结束时间主要受贵州松桃地区大塘坡组底部含锰岩系中凝灰岩 U-Pb 年龄限制。由于南华裂谷活动, 松桃地区南华纪期间处于地垒区与地堑区相隔出现的盆地格局 (周琦等, 2017), 地垒区与地堑区大塘坡组底部含锰岩系中均广泛发育稳定的凝灰岩层, 地堑区寨郎沟剖面大塘坡组底部凝灰岩的 TIMS 锆石 U-Pb 年龄为 $662.9 \pm 4.3 \text{ Ma}$ ($MSWD = 1.24$, $n = 6$; Zhou Chuanming et al., 2004), 黑水溪剖面凝灰岩 SHRIMP II 锆石 U-Pb 年龄 $667.3 \pm 9.9 \text{ Ma}$ ($MSWD = 1.6$, $n = 19$; 尹崇玉等, 2006); 地垒区将军山剖面 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 $664.2 \pm 2.4 \text{ Ma}$ ($MSWD = 0.57$, $n = 28$; 余文超等, 2016), 三个年龄的加权平均值为 $664.0 \pm 4.0 \text{ Ma}$, 年龄交集为 $618.8 \sim 666.6 \text{ Ma}$, 较小的年龄为 $662.9 \pm 4.3 \text{ Ma}$, 表明扬子板块古城冰期结束时间应为约 663 Ma。

走马 ZK701 钻孔中 DTPN1 凝灰岩的可靠年龄为 $658.1 \pm 2.6 \text{ Ma}$, 其产出于大塘坡组 CIA 值由低转向中高的过渡层位 (图 2a), 说明大塘坡间冰期早期 (663~658 Ma), 研究区仍然主要接受源区寒冷气候下风化产物的沉积。前文所述, 受“源—汇”沉积过程的影响, CIA 反映源区古气候信息会有所延迟, 但笔者认为, 在近源沉积条件下, 鄂西地区在 658 Ma 时不可能仍主要接受源区 (鄂中古陆) 663 Ma 之前

(古城冰期) 风化产物的搬运和沉积。更可能的情况是, 大塘坡间冰期早期 (663~658 Ma), 虽然扬子板块上南华盆地内海冰已消融, 但其源区 (如鄂中古陆) 仍处于寒冷气候条件下, 可能还存在大陆冰川, 只不过因冰川存在于剥蚀区而未保存沉积记录。直至 658 Ma, 扬子板块上盆地和古陆区气候完全转暖, 换言之, 扬子板块上大塘坡间冰期早期很可能仍然属于 Sturtian 冰期末期。

扬子板块 Sturtian 冰期海冰消融时间早于古陆剥蚀区的原因很可能蕴藏在扬子板块黔东地区大塘坡组底部的含锰岩系中: 在 Rodinia 超大陆裂解背景下, 南华裂谷盆地黔东、渝东南等地区发生大规模断陷活动, 同沉积断层与下地壳或地幔贯通, 海底热液活动剧烈 (郭宇等, 2018), 使海水温度得到一定程度上的升高; 与此同时, 壳幔源的气液上涌, 在大塘坡组底部含锰岩系中形成了大量古天然气渗漏喷溢沉积构造 (周琦等, 2017), 其 $\delta^{13}\text{C}$ 同位素组成也与地幔去气作用产生的无机成因甲烷气相似 (周琦等, 2013), 伴随着这些深部渗漏的温室气体, 南华盆地冰盖区首先形成了“温室效应”, 冰川消融, 随着火山活动的继续、二氧化碳不断聚集, 最终使得扬子板块古陆区的冰川消融, 地球彻底结束了 Sturtian 冰期。

4.4 扬子板块大塘坡早期古气候与古生产力的关系探讨

但需要指出的是, 黔、湘、鄂、渝毗邻区大塘坡组下部均发育含锰碳质页岩, 一般情况下富有机质沉积需要较高的古生产力提供物质基础。本研究显示大塘坡早期扬子板块气候寒冷, 似乎与能产生较高生产力的气候条件并不匹配, 说明大塘坡组含锰岩系中的有机质可能并不是直接来源于当时浮游生物的原始生产力。杨瑞东等 (2002) 对贵州松桃地区大塘坡组微体藻类化石数量进行了研究, 发现大塘坡组下部含锰岩系 (菱锰矿和碳质页岩) 样品中微体藻类化石数量 (0~54 个) 远低于其上部灰色及灰白色泥岩、粉砂岩 (201~690 个), 表明大塘坡早期古生产力较低, 当时虽然海冰已消融, 但寒冷的气候条件并不利于生物的生存, 之后随着古气候恢复温暖湿润, 古生产力迅速提高, 松桃地区大塘坡组含锰岩系之上的相对浅色泥岩、粉砂岩中微体化石数量明显增多, 这很好印证了本研究大塘坡期古气候演化过程。

大塘坡早期沉积的大量有机质可能来源于南华盆地深部。Peng Xi 等 (2019) 对南华盆地不同水深

大塘坡组的有机碳同位素比值进行了连续的高分辨率研究,发现南华盆地浅水剖面(贵州松桃和湖南民乐)存在明显的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 偏移(6‰ ~ 8‰),而深水剖面(湖南湘潭) $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 基本无变化($\pm 1\text{‰}$),这种 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 空间分布的差异性证实在大塘坡期南华盆地的深水区域存在一个巨大的有机碳库,研究区大塘坡组下部的富有机质沉积应该主要来源于古城期海冰消融引起的海侵。虽然研究区大塘坡早期处于浅海环境,但可能当时古海水氧逸度相对较低(张飞飞,2014)、加之古气候寒冷,为有机质保存提供了有利条件。大塘坡中期古气候恢复温暖湿润后微体藻类迅速发展,但大塘坡组中上部有机质含量却明显低于下段(Peng Xi et al., 2019),其原因可能与大塘坡中期的大气增氧事件有关(张飞飞,2014)。

湖北长阳和贵州松桃大塘坡组黄铁矿的硫同位素和铁同位素研究结果表明,南华纪间冰期古海洋具有逐步氧化的演化趋势,并且在大塘坡中期大气可能存在一次明显的增氧事件,甚至导致了深海氧化(张飞飞,2014)。随着海洋中的有机碳快速氧化,释放了大量二氧化碳,导致大气升温,陆地风化作用也显著增强,大塘坡中晚期 *CIA* 持续升高,大塘坡组上段有机碳含量明显降低,可能正是由于海洋中的有机碳库被进一步被氧化,形成了海洋氧化的正反馈作用机制,使得大气和海洋中的氧含量进一步增加。

本研究发现,扬子板块 Sturtian 与 Marinoan 冰期的间冰期古气候并非一直处于暖湿状态,近期有学者研究了贵州松桃地区 Marinoan 冰期薄层白云岩地球化学特征,发现该区 Marinoan 冰期存在开放水体(沈洪娟等,2020),说明扬子板块南华纪冰期和间冰期均存在气候的冷暖波动。总之,扬子板块南华纪古气候的演化涉及岩石圈、水圈、大气圈和生物圈这四个密不可分的圈层的相互作用,但它们具体的耦合关系还需要长期的研究和探索。

5 结 论

(1) 本文通过对鄂西走马地区 ZK701 钻孔南华系大塘坡组岩芯样品 *CIA*、*CIW*、*K/Na*、*Mg/Ca*、*Rb/Sr* 等古气候代用指标的研究表明,扬子板块古陆区南华纪大塘坡间冰期早期气候寒冷干燥,与古城冰期接近,中晚期气候逐渐恢复温暖湿润。

(2) 对 ZK701 钻孔大塘坡组下部凝灰岩开展了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年,获得了 $658.1 \pm 2.6 \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 1.5, n = 28$) 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均

年龄。

(3) 扬子板块南华纪大塘坡期古气候完全转暖时间约为 658 Ma,大塘坡间冰期早期(663 ~ 658 Ma)可能属于 Sturtian 冰期末期。扬子板块南华纪冰期—间冰期的转换可能受控于这一特殊时期岩石圈、水圈、大气圈和生物圈的相关关系。

致谢:诚挚感谢成都地质矿产研究所汪正江教授级高工及另外一位匿名审稿人给本文提出的宝贵意见。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

包秀娟. 2016. 华南新元古代大塘坡组旋回地层学研究及其意义. 导师: 张世红. 北京: 中国地质大学(北京) 硕士学位论文: 1~43.

蔡雄飞, 叶琴, 肖明元. 2018. 对南华系下统莲沱组 *CIA* 值寒冷气候认识的几点商榷——以鄂西神农架、湘西北南华系莲沱组为例. 岩石矿物学杂志, 37(4): 621~636.

陈建书, 代雅然, 唐烽, 彭成龙, 张嘉玮, 朱和书, 陈兴, 王文明, 龚桂源. 2020. 扬子地块周缘中元古代末—新元古代主要构造运动梳理与探讨. 地质论评, 66(3): 533~554.

陈旸, 陈骏, 刘连文. 2001. 甘肃西峰晚第三纪红粘土的化学组成及化学风化特征. 地质力学学报, 7(2): 167~175.

邓俊, 刘传朋, 葛跃进, 刘同, 王凯凯. 2020. 新疆库鲁克塔格地区特瑞爱肯冰期下限及沉积物源分析. 地质论评, 66(2): 324~336.

冯连君, 储雪蕾, 张启锐, 张同钢, 李禾, 姜能. 2004. 湘西北南华系溁水河组寒冷气候成因的新证据. 科学通报, 49(12): 1172~1178.

冯连君, 储雪蕾, 张同钢, 黄晶. 2006. 莲沱砂岩——南华大冰期前气候转冷的沉积记录. 岩石学报, 22(9): 2387~2393.

高林志, 丁孝忠, 庞维华, 张传恒. 2011. 中国中—新元古代地层年表的修正—锆石 U-Pb 年龄对年代地层的制约. 地层学杂志, 35(1): 1~7.

高林志, 郭宪璞, 丁孝忠, 宗文明, 高振家, 张传恒, 王自强. 2013. 中国塔里木板块南华纪成冰事件及其地层对比. 地球学报, 34(1): 39~57.

高维, 张传恒. 2009. 长江三峡黄陵花岗岩与莲沱组凝灰岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其构造地层意义. 地质通报, 28(1): 45~50.

官开萍, 田力, 安志辉, 叶琴, 胡军, 童金南. 2016. 湖北神农架西部南华纪地层序列及其区域对比. 地学前缘, 23(6): 236~245.

郭宇, 李余生, 凌云, 张怀国, 侯元军. 2018. 渝东南地区含锰岩系沉积地球化学特征及成因机制. 地质学报, 92(11): 2331~2348.

胡蓉, 李双庆, 王伟, 陈福坤. 2016. 扬子北部三峡地区南沱组冰碛岩的物源特征: 锆石年龄和地球化学证据. 地球科学, 41(10): 1630~1654.

景先庆, 杨振宇, 全亚博, 王恒, 徐颖超. 2018. 三峡地区新元古代莲沱组底部凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年代学及其地质意义. 吉林大学学报(地球科学版), 48(1): 165~180.

李明龙, 郑德顺, 戴光忠, 刘昌雄, 周璐, 程涌, 李成成. 2014. 豫西济源盆地侏罗系泥质岩地球化学特征及其环境和物源示踪. 地质学报, 88(2): 228~238.

李明龙, 陈林, 田景春, 郑德顺, 许克元, 方喜林, 曹文胜, 赵军, 冉中夏. 2019. 鄂西走马地区南华纪古城期—南沱早期古气候和古氧相演化: 来自细碎屑岩元素地球化学的证据. 地质学报, 93(9): 2158~2170.

李通通, 叶思源, 韩宗珠, 袁红明, 裴理鑫. 2019. 辽河三角洲湿地表层沉积物的风化特征及其对生物作用的指示意义. 地质论评, 65(1): 40~51.

李艳广, 汪双双, 刘民武, 孟恩, 魏小燕, 赵慧博, 靳梦琪. 2015. 斜锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年方法及应用. 地质学报, 89(12): 2400~2418.

林树基, 卢定彪, 肖加飞, 熊小辉, 李艳桃. 2013. 贵州南华纪冰期地层的主要特征. 地层学杂志, 37(4): 542~557.

刘鸿允, 董榕生, 李建林, 杨彦均. 1980. 论震旦系划分与对比问题. 地质科学, 15(4): 307~321.

刘鸿允. 1991. 中国震旦系. 北京: 科学出版社.

彭学军, 刘耀荣, 吴能杰, 陈建超, 李建清. 2004. 扬子陆块东南缘南华纪地层对比. 地层学杂志, 28(4): 354~359.

齐靓, 余文超, 杜远生, 周琦, 郭华, 王佳武, 王萍, 徐亚军. 2015. 黔东南华纪铁丝垌期—大塘坡期古气候的演变: 来自 CIA 的证据. 地质科技情报, 34(6): 47~57.

邵菁清, 杨守业. 2012. 化学蚀变指数 (CIA) 反映长江流域的硅酸盐岩化学风化与季风气候? 科学通报, 57(11): 933~942.

沈洪娟, 顾尚义, 赵思凡, 吴忠银, 冯永. 2020. 华南南华纪南沱冰期海洋环境的沉积地球化学记录——来自黔东南南华系南沱组白云岩碳氧同位素和微量元素的证据. 地质论评, 66(1): 214~228.

宋芳, 牛志军, 何壹砚, 杨文强. 2016. 中扬子地区南华纪早期碎屑锆石 U-Pb 年龄及其对物源特征和古地理格局的约. 地质学报, 90(10): 2661~2680.

孙娇鹏, 陈世悦, 彭渊, 马帅, 邵鹏程, 刘金. 2016. 欧龙布鲁克地块新元古代早期冰川事件: 来自 CIA 指数的证据. 地质论评, 62(1): 29~36.

汪正江, 陈洪德, 张锦泉. 2000. 物源分析的研究与展望. 沉积与特提斯地质, 20(4): 104~110.

汪正江, 王剑, 江新胜, 孙海清, 高天山, 陈建书, 邱艳生, 杜秋定, 邓奇, 杨菲. 2015. 华南扬子地区新元古代地层划分对比研究新进展. 地质论评, 61(1): 1~20.

汪正江, 许效松, 杜秋定, 杨菲, 邓奇, 伍皓, 周小琳. 2013. 南华冰期的底界讨论: 来自沉积学与同位素年代学证据. 地球科学进展, 28(4): 477~489.

王田, 汪正江, 肖渊甫, 杨菲, 杜秋定. 2020. 扬子陆块新元古代首次冰期前的区域沉降及其沉积响应研究. 地质论评, 66(4): 1060~1080.

王忠伟, 占王忠, 高远, 余飞, 肖杨. 2020. 羌塘盆地北缘上三叠统藏夏河组沉积物源及构造背景分析. 地质论评, 66(5): 1199~1215.

王自强, 尹崇玉, 高林志, 柳永清, 唐烽, 张传恒. 2006a. 用化学地层学研究新元古代地层划分和对比. 地学前缘, 13(6): 268~279.

王自强, 尹崇玉, 高林志, 唐烽, 柳永清, 刘鹏举. 2006b. 宜昌三斗坪地区南华系化学蚀变指数特征及南华系划分、对比的讨论. 地质论评, 52(5): 577~585.

吴艳宏, 李世杰. 2004. 湖泊沉积物色度在短尺度古气候研究中的应用. 地球科学进展, 19(5): 97~100.

徐小涛, 邵龙义. 2018. 利用泥质岩化学蚀变指数分析物源区风化程度时的限制因素. 古地理论, 20(3): 515~522.

杨瑞东, 欧阳自远, 朱立军, 王世杰, 姜立君, 张位华, 高慧. 2002. 早震旦世大塘坡期锰矿成因新认识. 矿物学报, 22(4): 329~334.

尹崇玉, 王砚耕, 唐烽, 王渝生, 王自强, 高林志, 邢裕盛, 刘鹏举. 2006. 贵州松桃南华系大塘坡组凝灰岩锆石 SHRIMP II U-Pb 年龄. 地质学报, 80(2): 273~278.

余文超, 杜远生, 周琦, 王萍, 袁良军, 徐源, 潘文, 谢小峰, 齐靓, 焦良轩. 2016. 黔东南松桃地区大塘坡组 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 地质论评, 62(3): 539~549.

岳亮, 刘自亮, Veerle VANDEGINSTE, 马永生, 陈洪德, 张成见. 2020. 华北克拉通东南缘新元古代凤台组冰期沉积序列及演化. 地质论评, 66(2): 307~323.

张飞飞. 2014. 华南南华系含锰建造的形成机制与南华纪间冰期海洋的氧化还原状态. 导师: 朱祥坤. 北京: 中国地质科学院硕士学位论文: 1~99.

张坤, 季宏兵, 褚华硕, 宋长顺, 吴燕飞. 2018. 利用 Rb/Sr 值、有机碳氮同位素及 ¹⁴C 重建贵州喀斯特地区古环境变化. 地球与环境, 46(2): 107~113.

张启锐, 兰中伍. 2016. 南华系、莲沱组年龄问题的讨论. 地层学杂志, 40(3): 297~301.

张启锐. 2014. 关于南华系底界年龄 780 Ma 数值的讨论. 地层学杂志, 38(3): 336~339.

赵彦彦, 郑永飞. 2011. 全球新元古代冰期的记录和时限. 岩石学报, 27(2): 545~565.

周传明. 2016. 扬子区新元古代前震旦纪地层对比. 地层学杂志, 40(2): 120~135.

周琦, 杜远生, 覃英. 2013. 古天然气渗漏沉积型锰矿床成矿系统与成矿模式——以黔湘渝毗邻区南华纪“大塘坡式”锰矿为例. 矿床地质, 32(3): 457~466.

周琦, 杜远生, 袁良军, 张遂, 杨炳南, 潘文, 余文超, 王萍, 徐源, 齐靓, 刘雨, 覃永军, 谢小峰. 2017. 古天然气渗漏沉积型锰矿床找矿模型——以黔湘渝毗邻区南华纪“大塘坡式”锰矿为例. 地质学报, 91(10): 2285~2298.

Bao Xiujuan. 2016&. Cyclostratigraphy and Floating Astronomical Time Scale of the Neoproterozoic Datangpo Formation in South China. Tutor: Zhang Shihong. Beijing: A Dissertation Submitted to China University of Geosciences (Beijing): 1~43

Bouchez J, Gaillardet J, France-Lanord C, Maurice L, Dutra-Maia P. 2011. Grain size control of river suspended sediment geochemistry: Clues from Amazon River depth profiles. Geochemistry Geophysics Geosystems, 12(3): 428~452.

Cai Xiongfei, Ye Qin, Xiao Mingyuan. 2018&. Some opinions concerning the understanding of CIA cold climate of the Liantuo Formation of Nanhua System: Exemplified by the Nanhua System from Shennongjia in western Hubei and western Hunan. Acta Petrologica et Mineralogica, 37(4): 621~636.

Chen Yang, Chen Jun, Liu Lianwen. 2001&. Chemical composition and characterization of chemical weathering of late Tertiary red clay in Xifeng, Gansu Province. Journal of Geomechanics, 7(2): 167~175.

Chen Jianshu, Dai Yaran, Tang Feng, Peng Chenglong, Zhang Jiawei, Zhu Heshu, Chen Xing, Wang Wenming, Gong Guiyuan. 2020&. Discussion on the Mesoproterozoic and Neoproterozoic major tectonic events in marginal area of the Yangtze Block. Geological Review, 66(3): 533~554.

Condon D, Zhu M, Bowring S, Wang W, Yang A, Jin Y. 2005. U-Pb ages from the Neoproterozoic Doushantuo Formation, China. Science, 308(5718): 95~98.

- Cox R, Lowe D R, Cullers R L. 1995. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(14): 2919~2940.
- Cullers R L, Podkovyrov V N. 2002. The source and origin of terrigenous sedimentary rocks in the Mesoproterozoic Uj group, southeastern Russia. *Precambrian Research*, 117(3~4): 157~183.
- Deng Jun, Liu Chuanpeng, Ge Yuejin, Liu Tong, Wang Kaikai. 2020. The lower limit and provenance analysis of the Neoproterozoic Tereeken glaciation in Quruqtagh area, Xinjiang. *Geological Review*, 66(2): 324~336.
- Fedo C M, Nesbitt H W, Young G M. 1995. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology*, 23(10): 921~924.
- Feng Lianjun, Chu Xuele, Zhang Qirui, Zhang Tonggang, Li He Jiang Neng. 2004. New evidence of deposition under cold climate for the Xieshuihe Formation of the Nanhua System in northwestern Hunan, China. *Chinese Science Bulletin*, 49(13): 1420~1427.
- Feng Lianjun, Chu Xuele, Zhang Tonggang, Huang Jing. 2006. Liantuo sandstones: sedimentary records under cold climate before the Nanhua big glaciations. *Acta Petrologica Sinica*, 22(9): 2387~2393.
- Gaillardet J, Dupré B, Allègre C J. 1999. Geochemistry of large river suspended sediments: Silicate weathering or recycling tracer? *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(23~24): 4037~4051.
- Gao Linzhi, Ding Xiaodong, Yin Chongyu, Zhang Chuanheng, Frank R. 2013. Qingbaikouan and Cryogenian in South China: Constraints by SHRIMP zircon U-Pb dating. *Acta Geologica Sinica*, 87(6): 1540~1553.
- Gao Linzhi, Ding Xiaozhong, Pang Weihua, Zhang Chuanheng. 2011. New geologic time scale of Meso- and Neoproterozoic of China and geochronologic constraint by SHRIMP zircon U-Pb dating. *Journal of Stratigraphy*, 35(1): 1~7.
- Gao Linzhi, Guo Xianpu, Ding Xiaozhong, Zong Wenming, Gao Jiazhen, Zhang Chuanheng, Wang Ziqiang. 2013. Nanhuan glaciation event and its stratigraphic correlation in Tarim plate, China. *Acta Geoscientia Sinica*, 34(1): 39~57.
- Gao Wei, Zhang Chuanheng. 2009. Zircon SHRIMP U-Pb ages of the Hnangling granite and the tuff beds from Liantuo Formation in the Three Gorges area of Yangtze River, China and its geological significance. *Geological Bulletin of China*, 28(1): 45~50.
- Garzanti E, Padoan M, Setti M, Najman Y, Peruta L, Villa I M. 2013. Weathering geochemistry and Sr—Nd fingerprints of equatorial upper Nile and Congo muds. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 14(2): 292~316.
- Guan Kaiping, Tian Li, An Zhihui, Ye Qin, Hu Jun, tong Jinnan. 2016. Stratigraphic succession of the Nanhuan Period in the Shennongjia area in western Hubei and its regional correlation. *Earth Science Frontiers*, 23(6): 236~245.
- Guo Yu, Li Yucheng, Ling Yun, Zhang Huaiguo, Hou Yuanjun. 2018. The sedimentary geochemical characteristics and metallogenic mechanism of manganese-bearing rock series in southeastern Chongqing, China. *Acta Geologica Sinica*, 92(11): 2331~2348.
- Harnois L. 1988. The CIW index: A new chemical index of weathering. *Sedimentary Geology*, 55(3~4): 319~322.
- Hoffman P F, Schrag D P. 2002. The snow ball Earth hypothesis: testing the limits of global change. *Terra Nova*, 14(3): 129~155.
- Hoffman P F, Kaufman G P, Halverson G P, Schrag D P. 1998. A Neoproterozoic Snow ball Earth. *Science*, 281(5381): 1342~1346.
- Hu Rong, Li Shuangqing, Wang Wei, Chen Fukun. 2016. Source Characteristics of Tillite the Nantuo Formation in Three Gorges, Northern Yangtze Block: Evidences from Zircon Ages and Geochemical Composition. Editorial Committee of Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 41(10): 1630~1654.
- Jackson S E, Pearson N J, Griffin W L, Belousova E. 2004. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology. *Chemical Geology*, 211(1~2): 1~69.
- Jiang Ganqing, Shi Xiaoying, Zhang Shihong, Wang Yue, Xiao Shuhai. 2011. Stratigraphy and paleogeography of the Ediacaran Doushantuo Formation (ca. 635 ~ 551Ma) in South China. *Gondwana Research*, 19: 831~849.
- Jing Xianqing, Yang Zhenyu, Gong Yabo, Wang Heng, Xu Yinchao. 2018. A SHRIMP U-Pb zircon geochronology of a tuff bed from the bottom of Liantuo Formation in the Three Gorges Area and its geological implications. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 48(1): 165~180.
- Lan Zhongwu, Li Xianhua, Zhang Qirui, Li Qiuli. 2015b. Global synchronous initiation of the 2nd episode of Sturtian glaciation: SIMS zircon U-Pb and O isotope evidence from the Jiangkou Group, South China. *Precambrian Research*, 267(1): 28~38.
- Lan Zhongwu, Li Xianhua, Zhu Maoyan, Chen Zhongqiang, Zhang Qirui, Li Qiuli, Lu Dingbiao, Liu Yu, Tang Guoqiang. 2014. A rapid and synchronous initiation of the wide spread Cryogenian glaciations. *Precambrian Research*, 255(1): 401~411.
- Lan Zhongwu, Li Xianhua, Zhu Maoyan, Zhang Qirui, Li Qiuli. 2015a. Revisiting the Liantuo Formation in Yangtze Block, South China: SIMS U-Pb zircon age constraints and regional and global significance. *Precambrian Research*, 263(1): 123~141.
- Lang Xianguo, Chen Jitao, Cui Huan, Man Ling, Huang Kangjun, Fu Yong, Zhou Chuanming, Shen Bing. 2018. Cyclic cold climate during the Nantuo Glaciation: Evidence from the Cryogenian Nantuo Formation in the Yangtze Block, South China. *Precambrian Research*, 310: 243~255.
- Li Tongtong, Ye Siyuan, Han Zongzhu, Yuan Hongming, Pei Lixin. 2019. Weathering Characteristics of the Surface Sediments and Their Indications for Biological Process in the Liaohe Delta Wetlands. *Geological Review*, 65(1): 40~51.
- Li Minglong, Chen Lin, Tian Jingchun, Zheng Deshu, Xu Keyuan, Fang Xilin, Cao Wensheng, Zhao Jun, Ran Zhongxia. 2019. Paleoclimate and paleo-oxygen evolution during the Gucheng Period—early Nantuo Period of Nanhua System in the Zouma area, West Hubei: evidence from elemental geochemistry of fine clastic rocks. *Acta Geologica Sinica*, 93(9): 2158~2170.
- Li Minglong, Zheng Deshun, Dai Guangzhong, Liu Changxiong, Zhou Lu, Cheng Yong, Li Chengcheng. 2014. Geochemical characteristics of the Jurassic argillaceous rocks of the Jiuyuan basin, western Henan and the implications for environments and provenances. *Acta Geologica Sinica*, 88(2): 228~238.
- Li Yanguang, Wang Shuangshuang, Liu Minwu, Meng En, Wei Xiaoyan, Zhao Huibo, Jin Mengqi. 2015. U-Pb dating study of baddeleyite by LA-ICP-MS: technique and application. *Acta Geologica Sinica*, 89(12): 2400~2418.
- Lin Shuji, Lu Dingbiao, Xiao Jiafei, Xiong Xiaohui, Li Yantao. 2013. Stratigraphy of the Nanhuan System in Guizhou Province.

- Journal of Stratigraphy, 37(4): 542~557.
- Liu Hongyun, Dong Rongsheng, Li Jianlin, Yang Yanjun. 1980&. Problems of classification and correlation of the Sinian system. Chinese Journal of Geology, 15(4): 307~321.
- Liu Hongyun. 1991#. Sinian System in China. Beijing: Science Press.
- Liu Pengju, Li Xianhua, Chen Shouming, Lan Zhongwu, Yang Ben, Shang Xiaodong, Yin Chongyu. 2015. New SIMS U-Pb zircon age and its constraint on the beginning of the Nantuo glaciation. Chinese Science Bulletin, 60(10): 958~963.
- Ludwig K R. 2003. Isoplot / Ex version 3. 00, a geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley, CA, Berkeley Geochronology Center.
- McLennan S M. 1993. Weathering and global denudation. The Journal of Geology, 101(2): 295~303.
- Nesbitt H W, Young G M. 1982, Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. Nature, 299(5885): 715~717.
- Nesbitt H W, Young G M. 1989. Formation and diagenesis of weathering profiles. Journal of Geology, 97(2): 129~147.
- Peng Xi, Zhu Xiangkun, Shi Fuqiang, Yan Bin, Zhang Feifei, Zhao Nina, Peng Pingan, Li Jin, Wang Dan, Shields GA. 2019. A deep marine organic carbon reservoir in the non-glacial Cryogenian ocean (Nanhua Basin, South China) revealed by organic carbon isotopes. Precambrian Research, 321: 212~220.
- Peng Xuejun, Liu Yaorong, Wu Nengjie, Chen Jianchao, Li Jianqing. 2004&. Correlation of the Nanhuan strata on the Northern margin of the Nangtze landmass. Journal of Stratigraphy, 28(4): 354~359.
- Qi Liang, Yu Wenchao, Du Yuansheng, Zhou Qi, Guo Hua, Wang Jiawu, Wang Ping, Xu Yajun. 2015&. Paleoclimate evolution of the cryogenian Tiesi'ao Formation Datangpo Formation in eastern Guizhou province: evidence from the chemical index of alteration. Geological Science and Technology Information, 34(6): 47~57.
- Rooney A D, Strauss J V, Brandon A D, Macdonald F A. 2015. A Cryogenian chronology: Two long-lasting synchronous Neoproterozoic glaciations. Geology, 43(5): 459~462.
- Shao Jingqing, Yang Shouye. 2012&. Does chemical index of alteration (CIA) reflect silicate weathering and monsoonal climate in the Changjiang River basin? Chinese Science Bulletin, 57(10): 1178~1187.
- Shen Hongjuan, Gu Shangyi, Zhao Sifan, Wu Zhongyin, Feng Yong. 2020&. The sedimentary geochemical records of ocean environment during the Nantuo (Marinoan) glaciation in South China —Carbon and oxygen isotopes and trace element compositions of dolostone in Nantuo Formation, Nanhuan System, in Eastern Guizhou. Geological Review, 66(1): 214~228.
- Sláma J, Kosler J, Condon D J, Crowley J L, Gerdes A, Hanchar J M, Horstwood M S A, Morris G A, Nasdala L, Norberg N, Schaltegger U, Schoene B, Tubrett M N, Whitehouse M J. 2008. Plesovice zircon—A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis. Chemical Geology, 249(1~2): 1~35.
- Song Fang, Niu Zhijun, He Yaoyan, Yang Wenqiang. 2016. U-Pb Age of detrital zircon and its restriction of provenance & paleogeographic characteristics of Early Nanhua Period in Middle Yangtze. Acta Geologica Sinica, 90(10): 2661~2680.
- Sun Jiaopeng, Chen Shiyue, Peng Yuan, Ma Shuai, Shao Pengcheng, Liu Jin. 2016&. Early Neoproterozoic Glacier Event in Oulongbuluke Block: Evidence from CIA Index. Geological Review, 62(1): 29~36.
- Wang Tian, Wang Zhengjiang, Xiao Yuanfu, Yang Fei, Du Qiuding. 2020&. Study on the regional subsidence and its sedimentary response before the first Neoproterozoic glaciation in Yangtze Block. Geological Review, 66(4): 1060~1080.
- Wang Jian, Li Zhengxiang. 2003. History of Neoproterozoic rift basins in South China: implications for Rodinia break-up. Precambrian Research, 122(1): 141~158.
- Wang Zhengjiang, Chen Hongde, Zhang Jinquan. 2000&. Provenance analysis: perspectives. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 20(4): 104~110.
- Wang Zhengjiang, Wang Jian, Jiang Xinsheng, Sun Haiqing, Gao Tianshu, Chen Jianshu, Qiu Yansheng, Du Qiuding, Deng Qi, Yang Fei. 2015&. New progress for the stratigraphic division and correlation of Neoproterozoic in Yangtze Block, South China. Geological Review, 61(1): 1~20.
- Wang Zhengjiang, Xu Xiaosong, Du Qiuding, Yang Fei, Deng Qi, Wu Hao, Zhou Xiaolin. 2013&. Discussion on the bottom of Nanhua System: evidences from sedimentology and isotopic geochronology. Advances in Earth Science, 28(4): 477~489.
- Wang Ziqing, Yin Chongyu, Gao Linzhi, Liu Yongqing, Tang Feng, Zhang Chuanheng. 2006a&. Chemostratigraphic studies to explain Neoproterozoic stratigraphic division and correlation. Earth Science Frontiers, 13(6): 268~279.
- Wang Ziqing, Yin Chongyu, Gao Linzhi, Tang Feng, Liu Yongqing, Liu Pengju. 2006b&. The character of the chemical index of alteration and discussion of subdivision and correlation of the Nanhua System in Yichang area. Geological Review, 52(5): 577~585.
- Wang Zhongwei, Zhan Wangzhong, Gao Yuan, Yu Fei, Xiao Yang. 2020&. Provenance and tectonic setting analysis of the Upper Triassic Zangxiahe Formation sandstone in the Northern Qiangtang Basin. Geological Review, 66(5): 1199~1215.
- Wu Lijun, Li Minglong, Chen Lin, Zhang Biyun, Cao Wensheng, Zhao Jun. 2019&. Geochemistry characteristics of major elements and their indication to paleoclimate in the Datangpo formation of Nanhua system of ZK701 drillcore in Zouma area of western Hubei province. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 38(6): 47~54.
- Wu Yanhong, Li Shijie. 2004&. Significance of lake sediment color for short time scale climate variation. Advances in Earth Science, 19(5): 97~100.
- Xu Xiaotao, Shao Longyi. 2018&. Limiting factors in utilization of chemical index of alteration of mudstones to quantify the degree of weathering in provenance. Journal of Palaeogeography, 20(3): 515~522.
- Yang Ruidong, Ouyang Ziyuan, Zhu Lijun, Wang Shijie, Jiang Lijun, Zhang Weihua, Gao Hui. 2002&. A new understanding of manganese carbonate deposits in early Sinian Datangpo stage. Acta Mineralogica Sinica, 22(4): 329~334.
- Yin Chongyu, Wang Yangeng, Tang Feng, Wan Yusheng, Wang Ziqiang, Gao Linzhi, Xing Yusheng, Liu Pengju. 2006&. SHRIMP II U-Pb zircon date from the Nanhuan Datangpo Formation in Songtao County, Guizhou Province. Acta Geologica Sinica. 80(2): 273~278.
- Yu Wenchao, Du Yuansheng, Zhou Qi, Wang Ping, Yuan Liangjun, Xu Yuan, Pan Wen, Xie Xiaofeng, Qi Liang, Jiao Liangxuan. 2016&. LA-ICP-MS zircon U-Pb dDating from the Nanhuan Datangpo Formation in Songtao area, east Guizhou and its geological significance. Geological Review, 62(3): 539~549.
- Yue Liang, Liu Ziliang, Veerle Vandeginste, Ma Yongsheng, Chen Hongde, Zhang Chengjian. 2020&. Glacial sedimentary sequence and evolution of the Fengtai Formation, southeastern margin of the North China Craton. Geological Review, 66(2): 307~323.
- Zhang Feifei. 2014&. The Formation Mechanism of Datangpo Manganese

- Ore Deposits during Nanhua Period in South China and the Paleoredox Conditions of Nanhua Marine Basin. Tutor: Zhu Xiangkun. Beijing: A Dissertation Submitted to Chinese Academy of Geological Sciences for Master Degree: 1~99.
- Zhang Kaijun, Li Bing, Wei Qingguo. 2012. Diversified provenance of the Songpan—Ganzi Triassic turbidites, Central China: Constraints from geochemistry and Nd isotopes. *Journal of Geology*, 120(1): 69~82.
- Zhang Kun, Ji Hongbing, Chu Huashuo, Song Changshun, Wu Yanfei. 2018&. Reconstruct paleoenvironmental changes based on the results of Rb/Sr, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$, $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$ and ^{14}C in Guizhou karst area. *Earth and Environment*, 46(2): 107~113.
- Zhang Qirui, Lan Zhongwu. 2016&. An update on the chronostratigraphy of the Nanhua System. *Journal of Stratigraphy*, 40(3): 297~301.
- Zhang Qirui. 2014&. Comment on the age 780 Ma at the lower boundary of the Nanhua period. *Journal of Stratigraphy*, 38(3): 336~339.
- Zhang Shihong, Jiang Ganqing, Han Yigui. 2008. The age of the Nantuo Formation and Nantuo glaciation in South China. *Terra Nova*, 20(4): 289~294.
- Zhao Yanyan, Zheng Yongfei. 2011&. Record and time of Neoproterozoic glaciations on Earth. *Acta Petrologica Sinica*, 27(2): 545~565.
- Zhou Chuanming, Tucker R, Xiao Shuhai, Peng Zhanxiong, Yuan Xunlai, Chen Zhe. 2004. New constraints on the ages of Neoproterozoic glaciations in south China. *Geology*, 32(5): 437~440.
- Zhou Chuanming. 2016&. Neoproterozoic lithostratigraphy and correlation across the Yangtze Block, South China. *Journal of Stratigraphy*, 40(2): 120~135.
- Zhou Qi, Du Yuansheng, Qin Ying. 2013&. Ancient natural gas seepage sedimentary-type manganese metallogenic system and ore-forming model: A case study of 'Datangpo type' manganese deposits formed in rift basin of Nanhua Period along Guizhou—Hunan—Chongqing border area. *Mineral Deposits*, 32(3): 457~466.
- Zhou Qi, Du Yuansheng, Yuan Liangjun, Zhang Sui, Yang Binnan, Pan Wen, Yu Wenchao, Wang Ping, Xu Yuan, Qi Liang, Liu Yu, Qin Yongjun, Xie Xiaofeng. 2017&. Exploration models of ancient natural gas seep sedimentary-type manganese ore deposit: a case study of the Nanhua Period "Datangpo" type manganese ore in the conjunction area of Guizhou, Hunan and Chongqing. *Acta Geologica Sinica*, 91(10): 2285~2298.
- Zong Keqing, Klemm R, Yuan Yu, He Zhenyu, Guo Jingliang, Shi Xiaoli, Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Zhang Zeming. 2017. The assembly of Rodinia: The correlation of early Neoproterozoic (ca. 900 Ma) high-grade metamorphism and continental arc formation in the southern Beishan Orogen, southern Central Asian Orogenic Belt (CAOB). *Precambrian Research*, 290: 32~48.

Study on the paleoclimate during the Datangpo interglacial stage of the Nanhua Period in the Zouma area, western Hubei Province

LI Minglong^{1, 2)}, YANG Boyong²⁾, ZHENG Deshun³⁾, CHEN Lin²⁾, TIAN Jingchun¹⁾

1) *Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu, 610059;*

2) *Second Geological Brigade of Hubei Geological Bureau, Enshi, Hubei, 445000;*

3) *Institute of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan, 454000*

Objectives: The Gucheng Formation and the Nantuo Formation of Nanhua System ($\approx$ Cryogenian System) in Western Hubei belong to Sturtian and Marinoan glacial deposits respectively, and the Datangpo Formation represents interglacial deposits. In this paper, the evolution of paleoclimate in the Datangpo interglacial period was studied, and the zircon U-Pb age of the tuff in the lower part of the Datangpo Formation was used to restrict the time of paleoclimate warming, and to provide the basis for the establishment of the time framework of the glaciation.

Methods: In this paper, the main and trace elements of the fine clastic rock samples from the Datangpo Formation of the ZK701 drillcore in the Zouma area were measured, and the paleoclimate proxy indexes, such as *CIA*, *CIW*, $n(\text{K})/n(\text{Na})$, $n(\text{Mg})/n(\text{Ca})$, Rb/Sr, were calculated. Zircon U-Pb age of tuff was determined by LA-ICP-MS.

Results: The *CIA* values of the two samples in the upper part of the Gucheng Formation were 57.1 and 58.1, respectively. The *CIA* values of the lower part of the Datangpo Formation were 56.5~64.6, with an average of 59.8, and the *CIA* values of the upper part were 69.8~78.8, with an average of 75.5. The evolution process of *CIW*, $n(\text{K})/n(\text{Na})$, $n(\text{Mg})/n(\text{Ca})$, Rb/Sr was consistent with the *CIA*. The $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ weighted average age of zircon in DTPN1 tuff sample was 658.1 ± 2.6 Ma (MSWD = 1.5, $n = 28$).

Conclusions: The climate of the provenance area in the Yangtze Plate was cold and dry during the late Gucheng glacial period. The climate in the early Datangpo interglacial stage was still cold, and the climate of the middle and late Datangpo stage was warm and humid. The paleoclimate warming time of the Datangpo interglacial was about 658 Ma, and the early Datangpo period in the Yangtze Plate (663~658 Ma) may still belong to the end

of Sturtian.

Keywords: U-Pb isotopic age; paleoclimate; Datangpo Formation, Nanhua System; Yangtze Plate; Sturtian

Acknowledgements: This research is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41872238) and the Science and Technology project of Hubei Geological Bureau (No. KJ2017-11) and the Geological Exploration Fund Project of Hubei (No. [2017]-04090)

First author: LI Minglong, male, born in 1988, now he is a Ph. D. student at Chengdu University of Technology, and is engaged in sedimentary study; Email: leeminglong@126.com

Corresponding author: TIAN Jingchun, male, born in 1963, Professor, doctoral supervisor, engaged in sedimentology and petroleum geology teaching and research; Email: tjc@cdut.edu.cn

Manuscript received on: 2020-04-04; Accepted on: 2020-08-10; Edited by: LIU Zhiqiang

Doi: 10.16509/j.georeview.2021.01.004

中国地质学会第十届黄汲清青年地质科学技术奖公布

根据《黄汲清青年地质科学技术奖基金章程》《黄汲清青年地质科学技术奖奖励条例》规定,中国地质学会于 2020 年 7 月 1 日启动了第十届黄汲清青年地质科学技术奖的评选活动。

经过候选人申报、院士或单位推荐、中国地质学会秘书处资格审查等环节,确定有效候选人 91 名。2020 年 10 月 25 日,第十届黄汲清青年地质科学技术奖初评会议上,通过无记名投票产生了 15 名候选人,并于 2020 年 10 月 26 日—11

月 6 日进行了为期 10 个工作日的公示。2020 年 11 月 21 日,第十届黄汲清青年地质科学技术奖终评会议召开,投票产生了 15 名获奖者:授予唐朝生等 7 人黄汲清青年地质科学技术奖—地质科技研究者奖;授予胡彩萍等 7 人黄汲清青年地质科学技术奖—野外地质工作者奖;授予刘华黄汲清青年地质科学技术奖—教师奖。

(中国地质学会成果和人才评选处供稿)

第十届黄汲清青年地质科学技术奖获奖者名单
(按姓名汉语拼音字母排序)

姓名	工作单位	推荐单位
地质科技研究者奖		
郭泽清 黄迪颖 李建华 马晓丽 (Marie-Luce Chevalier) (女) 聂海宽 唐朝生 谢桂青	中国石油勘探开发研究院 中国科学院南京地质古生物研究所 中国地质科学院地质力学研究所 中国地质科学院地质研究所 中国石化石油勘探开发研究院非常规资源研究所 南京大学 中国地质科学院矿产资源研究所	中国石油天然气股份有限公司 中国科学院南京地质古生物研究所 院士推荐:赵国春院士、杨经绥院士、高锐院士、金之钧院士 中国地质科学院地质研究所 中国石油化工股份有限公司 工程地质专业委员会 中国地质学会矿床地质专业委员会
野外地质工作者奖		
高宝龙 胡彩萍 (女) 黄少英 李慧勇 刘道荣 刘叶青 万建领	中国冶金地质总局中南地质调查院 山东省第一地质矿产勘查院 (山东省地质矿产勘查开发局第一地质大队) 中国石油天然气股份有限公司塔里木油田分公司 中海石油 (中国) 有限公司天津分公司 中化地质矿山总局浙江地质勘查院 中煤地质集团有限公司上海分公司 新疆地矿局第八地质大队	中国冶金地质总局 中国地质学会青年工作委员会 中国石油天然气股份有限公司 天津市地质学会 中化地质矿山总局 中煤地质集团有限公司 新疆维吾尔自治区地质学会
教师奖		
刘华 (女)	中国石油大学 (华东)	中国石油大学 (华东)