

文章编号: 1671-1505(2024)06-1305-20 DOI: 10.7605/gdxb.2024.06.092

扬子西南缘滇中成冰系南沱组沉积特征 及其上红层归属讨论*

祁柯宁^{1,2} 旷红伟¹ 柳永清¹ 彭楠¹ 王玉冲^{1,3} 陈晓帅¹

1 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

2 合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽合肥 230009

3 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083

摘要 扬子克拉通滇中地区新元古界南沱组与陡山沱组之间过渡段“红层”不同学者认识尚有分歧。以扬子克拉通西南缘昆明晋宁鲁纳村剖面 and 飞大田剖面为主, 对其成冰系南沱组开展了详细的地质学、沉积学研究。南沱组砾岩段及其上覆红层泥岩段具擦痕、坠石、韵律性纹层等典型冰川沉积特征, 据此划分出 4 个沉积亚相, 即冰下滞积亚相、冰缘河道亚相、冰前三角洲前缘亚相和滨岸亚相, 反映了冰期演化的不同阶段。红层段顶部最年轻碎屑锆石年龄为 636 Ma, 表明南沱组上段紫红色粉细砂岩顶部沉积时限可能晚于 636 Ma。区域地层对比发现, 平面上, 滇中地区南沱组砾岩段和泥岩段分布稳定; 垂向上, 自下而上为冰川冰下堆积砾岩, 向上过渡为冰缘河道砾岩, 再向上为冰前三角洲前缘泥岩和滨岸细砂岩, 表现为冰川逐渐融化并逐步海侵的规律。研究认为南沱组应当二分: 下段杂砾岩段, 上段紫红色泥岩段, 即南沱组—陡山沱组界限置于红层段顶部。论文深化了对扬子西南缘成冰纪沉积古地理的理解, 为完善四川盆地周缘成冰纪—埃迪卡拉纪等时地层格架和四川盆地及周缘深层油气勘探提供了沉积学新资料。

关键词 扬子西南缘 南沱组 红层 冰川沉积相**第一作者简介** 祁柯宁, 男, 1990 年生, 博士研究生, 主要研究方向为前寒武纪沉积学。E-mail: damiads@foxmail.com。**通讯作者简介** 旷红伟, 女, 1969 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为前寒武纪沉积学、地层学及油气地质。E-mail: kuanghw@126.com。柳永清, 男, 1960 年生, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为沉积地质学和地层学。E-mail: liuyongqing@cags.ac.cn。

中图分类号: P531 文献标志码: A

Sedimentary characteristics of the Cryogenian Nantuo Formation and stratigraphic attribution of red beds in central Yunnan, southwestern margin of Yangtze Craton

QI Kening^{1,2} KUANG Hongwei¹ LIU Yongqing¹ PENG Nan¹ WANG Yuchong^{1,3} CHEN Xiaoshuai¹

1 Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2 School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China

3 College of Geosciences and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China

* 国家自然科学基金(编号: 42072135)、中国地质调查局项目(编号: DD20221649)和北京科委国际创新资源合作项目(编号: Z201100008320007)共同资助。[Co-funded by the National Natural Science Foundation of China (No. 42072135), the China Geological Survey (No. DD20221649), and the Beijing Science and Technology Commission's International Innovation Resources Cooperation Project (No. Z201100008320007)]

收稿日期: 2024-02-26 改回日期: 2024-04-01

Abstract In the central Yunnan region of the Yangtze Craton, the “red beds” that develop in the transitional section between the Nantuo Formation and the Doushantuo Formation of the Neoproterozoic, are still debated among scholars. This study carried out detailed stratigraphic and sedimentological studies on the Nantuo Formation in the Lunacun and Feidatian sections in the central Yunnan region. The sections were located on the southwestern margin of the Yangtze craton. The conglomerate member and its overlying red mudstone member of the Nantuo Formation exhibit typical glacial sedimentary features such as striae, dropstone, and rhythmic laminae, base on which, four sedimentary subfacies can be divided, *i.e.*, sub-glacial lag, periglacial channel, pre-glacial delta front, and pre-glacial shoreline subfacies, reflecting different stages of glaciation. The youngest detrital zircon age at the top of the red mudstone is 636 Ma, indicating that the deposition time of the top of the purple-red fine sandstone in the upper member of the Nantuo Formation may be later than 636 Ma. The regional stratigraphic comparison reveals that the spatial distribution of the conglomerate and mudstone members of the Nantuo Formation in central Yunnan is stable; it represents accumulation of conglomerates under glacier ice, transitioning upwards to the conglomerates of periglacial river channels, and then upwards to the mudstones and fine sandstone of the pre-glacial delta front and the pre-glacial shoreline, exhibiting a pattern of gradual melting of glaciers and marine invasion. In summary, this study suggests that the Nantuo Formation should be divided into two parts, with the lower member consisting of conglomerate and the upper member consisting of purple-red mudstone. The boundary between the Nantuo Formation and the Doushantuo Formation should be placed at the top of the red layer. This study deepens the understanding of the Cryogenian palaeogeography, the southwestern margin of the Yangtze craton. It provides new sedimentological data for improving the isochronous stratigraphic framework from the Cryogenian to Ediacaran, and assists in deep oil and gas exploration in the Sichuan Basin and its surrounding areas.

Key words southwestern margin of Yangtze Craton, Nantuo Formation, red beds, glacial sedimentary facies

About the first author QI Kening, born in 1990, is a Ph.D. candidate. He is mainly focused on the study of Precambrian sedimentology. E-mail: damiads@foxmail.com.

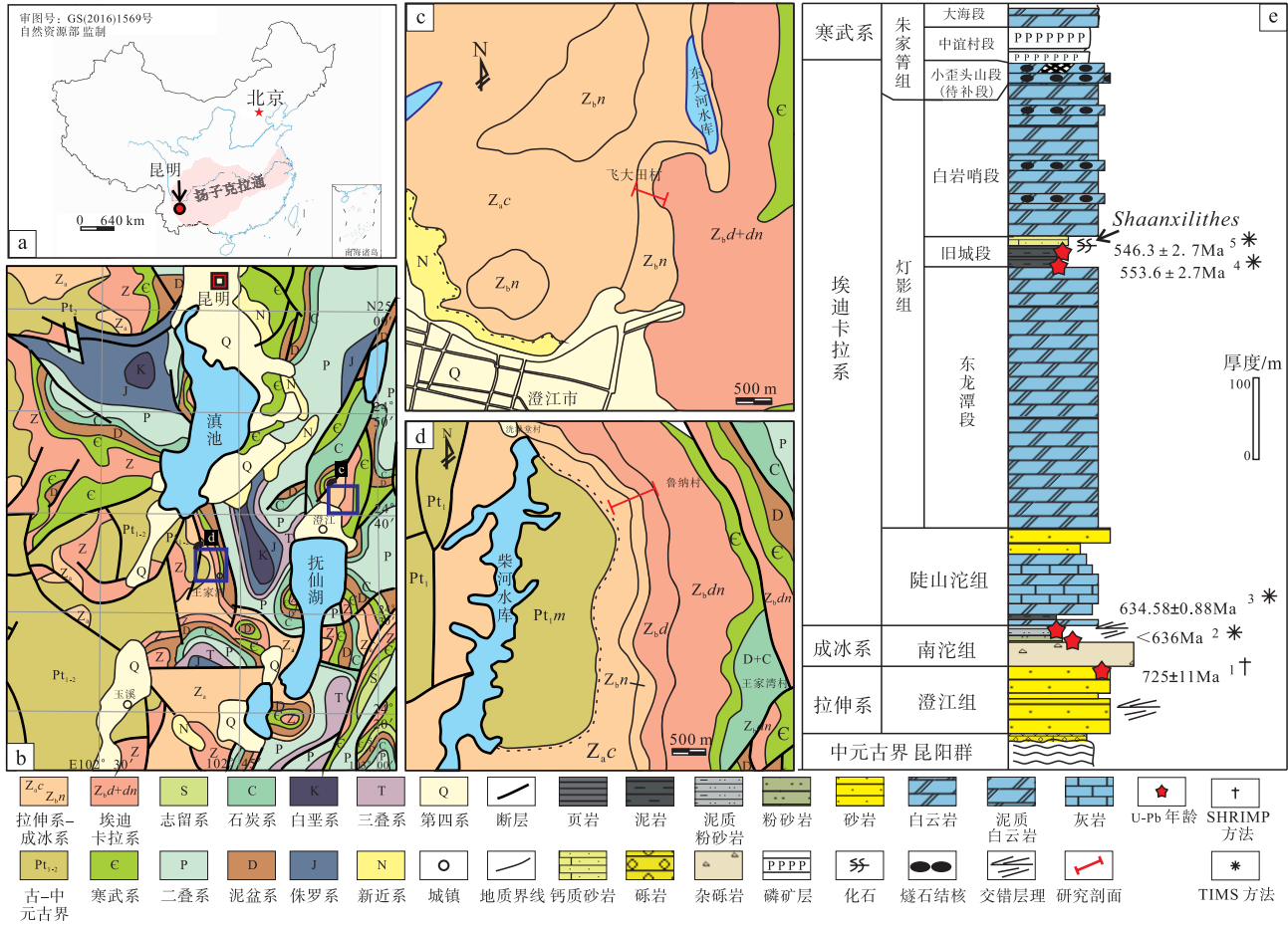
About the corresponding authors KUANG Hongwei, born in 1969, is a professor and doctoral supervisor. She is engaged in sedimentology, stratigraphy, and oil and gas geology. E-mail: kuanghw@126.com. LIU Yongqing, born in 1960, is a research fellow and doctoral supervisor. He is engaged in sedimentology and stratigraphy. E-mail: liuyongqing@cags.ac.cn.

1 概述

成冰纪的 2 次全球性冰川事件 (Sturtian 冰期和 Marinoan 冰期) (Kenndey *et al.*, 1997; Hoffman *et al.*, 1998; Hoffman and Schrag, 2002; Hoffman and Li, 2009), 在扬子克拉通以长安冰期和南沱冰期为代表, 对应地层分别为长安组和南沱组, 2 次冰期之间的间冰期以大塘坡组为代表 (王曰伦等, 1980), 而成冰系与埃迪卡拉系界线则以埃迪卡拉系底部全球广泛发育的盖帽碳酸盐岩为划分标志 (Hoffman *et al.*, 1998; Hoffman and Schrag, 2002; Kuang *et al.*, 2022)。然而扬子克通西南缘

滇中地区未见典型盖帽碳酸盐岩发育 (刘鸿允和刘钰, 1963; 杨暹和陈远德, 1981; 林尧明等, 1990; 王剑, 2000), 使成冰系/埃迪卡拉系的界线标志变得难以辨识。

云南中部晋宁—澄江地区新元古代成冰纪—埃迪卡拉纪地层发育良好 (王剑, 2000; 朱茂炎等, 2001; Zhu *et al.*, 2007; 崔晓庄等, 2014; 张志亮等, 2015; Yang *et al.*, 2017; Zhou *et al.*, 2019) (表 1)。成冰系南沱组与下伏拉伸系澄江组砂岩角度不整合接触, 与上覆埃迪卡拉系陡山沱组海相碳酸盐岩—碎屑岩整合接触。南沱组底部杂砾岩以紫红色、



a—滇中地区的地理位置；b—滇中地区地质图和剖面位置；c—飞大田剖面位置；d—鲁纳村剖面位置；e—云南地区新元古界柱状图（据 Steiner, 1994；有修改）；年龄数据（1：崔晓庄等，2013；2：本次研究；3：Zhou *et al.*, 2019；4 和 5：Yang *et al.*, 2017）

图 1 扬子西南缘研究剖面位置及地质概况

Fig. 1 Study section location and geological view in south western margin of Yangtze Craton

琛, 1980; 曹仁关等, 1985; Zhu *et al.*, 2007)。

再之上整合覆盖灯影组(又名渔户村组), 其下部东龙潭段发育富藻白云岩, 中部旧城段浅黄、浅褐色粉砂岩, 上部白岩峭段磷酸盐岩、硅质白云岩。Yang 等(2017)报道了旧城段底部和中部火山灰锆石 SIMS U-Pb 年龄分别为 $553.6 \pm 2.7/3.8$ Ma 和 $546.3 \pm 2.7/3.8$ Ma, 而且该段上部产埃迪卡拉纪晚期标志性管状化石 *Shaanxilithes* (蔡耀平, 2011; 张志亮等, 2015)(图 1)。

下寒武统朱家箐组可划分为小歪头山段(待补段)、中谊村段和大海段, 其中小歪头山段是跨阶地层单位(刘鸿允和刘钰, 1963; 王剑, 2000; Wang and Li, 2001; 房瑞森等, 2021)(图 1)。

3 材料和研究方法

研究选取 2 条南沱组剖面(即鲁纳村剖面和飞大田剖面)开展详细实测, 采集手标本并磨制薄片, 系统描述沉积地层宏观、微观特征。根据野外实测资料以及薄片观察结果绘制 1:100 岩性柱状图和剖面图。样品 LNC-4 采集自鲁纳村剖面过渡段红层粉细砂岩上部, 重约 2 kg, 为剥离表面的新鲜岩石。

锆石单矿物分选工作由首钢地质研究院完成, 锆石 U-Pb 年龄以及微量元素测试分析在北京科荟测试技术有限公司完成。锆石定年分析所用仪器为 AnalytikJena PQMS Elite 型 ICP-MS 及与之配套的 RESOLUTION 193 nm 准分子激光剥蚀系统。激光剥蚀所用斑束直径为 $24 \mu\text{m}$, 频率为 6 Hz, 能量密度约为 $6 \text{ J}/\text{cm}^2$, 以 He 为载气。LA-ICP-MS 激光剥蚀采样采用单点剥蚀的方式, 测试前先用锆石标样

GJ-1 进行调试仪器,使之达到最优状态。锆石 U-Pb 定年以标样 GJ-1 为外标,微量元素含量利用 NIST 610 作为外标、Si 做内标的方法进行定量计算 (Liu *et al.*, 2010)。测试过程中在每测定 10 个样品前后重复测定 2 个锆石标样 GJ-1 对样品进行校正,并测量 1 个锆石 Plesovice,观察仪器的状态以保证测试的精确度。数据处理采用 ICPMSData-Cal 程序 (Liu *et al.*, 2010),测量过程中绝大多数分析点 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 1000$,未进行普通铅校正, ^{204}Pb 含量异常高的分析点可能受包体等普通 Pb 的影响,对 ^{204}Pb 含量异常高的分析点在计算时剔除,锆石年龄谱和图用 Isoplot 3.0 程序获得。详细实验测试过程可参见侯可军等 (2009)。样品分析过程中, Plesovice 标样作为未知样品的分析结果为 $337.13 \pm 0.68 \text{ Ma}$ ($n = 74, 2\sigma$),对应的年龄推荐值为 $337.13 \pm 0.37 \text{ Ma}$ (2σ) (Sláma *et al.*, 2008),两者在误差范围内完全一致。

4 研究结果

4.1 拉伸系澄江组—成冰系南沱组—埃迪卡拉系陡山沱组实测剖面

4.1.1 晋宁鲁纳村剖面

鲁纳村剖面位于云南省昆明市晋宁区鲁纳村南 (图 1-d),地层出露良好,整体将之分为 9 个岩性段,其中南沱组和过渡段红层又可细分 11 个小层 (图 2)。与邻区王家湾剖面地层序列一致 (刘鸿允, 1991; 王剑, 2000),自下而上依次为澄江组、南沱组、陡山沱组和灯影组。

第 1 段即为澄江组,由第 1 小层组成,为浅紫红色粗砂岩,不整合面之上为南沱组紫红色冰碛砾岩 (图 2-a)。

第 2 段南沱组由 2-10 小层组成,主要为冰碛杂砾岩 (图 2-b 至 2-e; 图 3)。又进一步可分为 2 个部分。下部由 2-5 小层组成 (图 3-a),自下而上,依次分别厚 1.41 m、0.4 m、3.22 m、2.61 m,共厚 7.64 m。2、4 和 5 小层砾石分选差,砾径 1~10 cm 为主,偶见大于 50 cm 的砾石,大砾石多呈椭球状,呈近北方向叠瓦状排列 (图 2-b),砾石成分多以紫红色砾岩、灰绿色泥质粉砂岩、青灰色深灰色石英岩为主 (图 2-c),镜下表现为分选差、杂基支撑、石英碎屑颗粒的特征。2 小层和 4 小层

中间夹 3 小层透镜体状细砾岩 (图 2-b),砾径 1~10 cm,其中偶见粗砾 20~30 cm。上部由 6-10 小层组成 (图 3-b),自下而上,依次分别厚 3.86 m、0.79 m、0.57 m、1.8 m、1.55 m,共厚 8.57 m。6、9 小层呈现多个向上变细韵律旋回,粗砾岩叠瓦状排列,组成大型交错层理 (图 2-d),与下部叠瓦排列砾石不同处在于其方向变为近南方向排列、且排列更紧密、砾石砾径相对变小。6、9 小层之中 7、8 小层为透镜状展布的含巨砾粗砾岩 (图 2-e),砾石成分以紫红色砂岩为主,磨圆中等,分选差,颗粒支撑,填隙物为紫红色砂质泥质。10 小层为巨砾—粗砾岩 (图 3-b),成分以紫红色粗砂岩为主,向上逐渐变为灰绿色、深灰色石英为主,向上砾石砾径变细,砾石长轴排列有一定方向性。

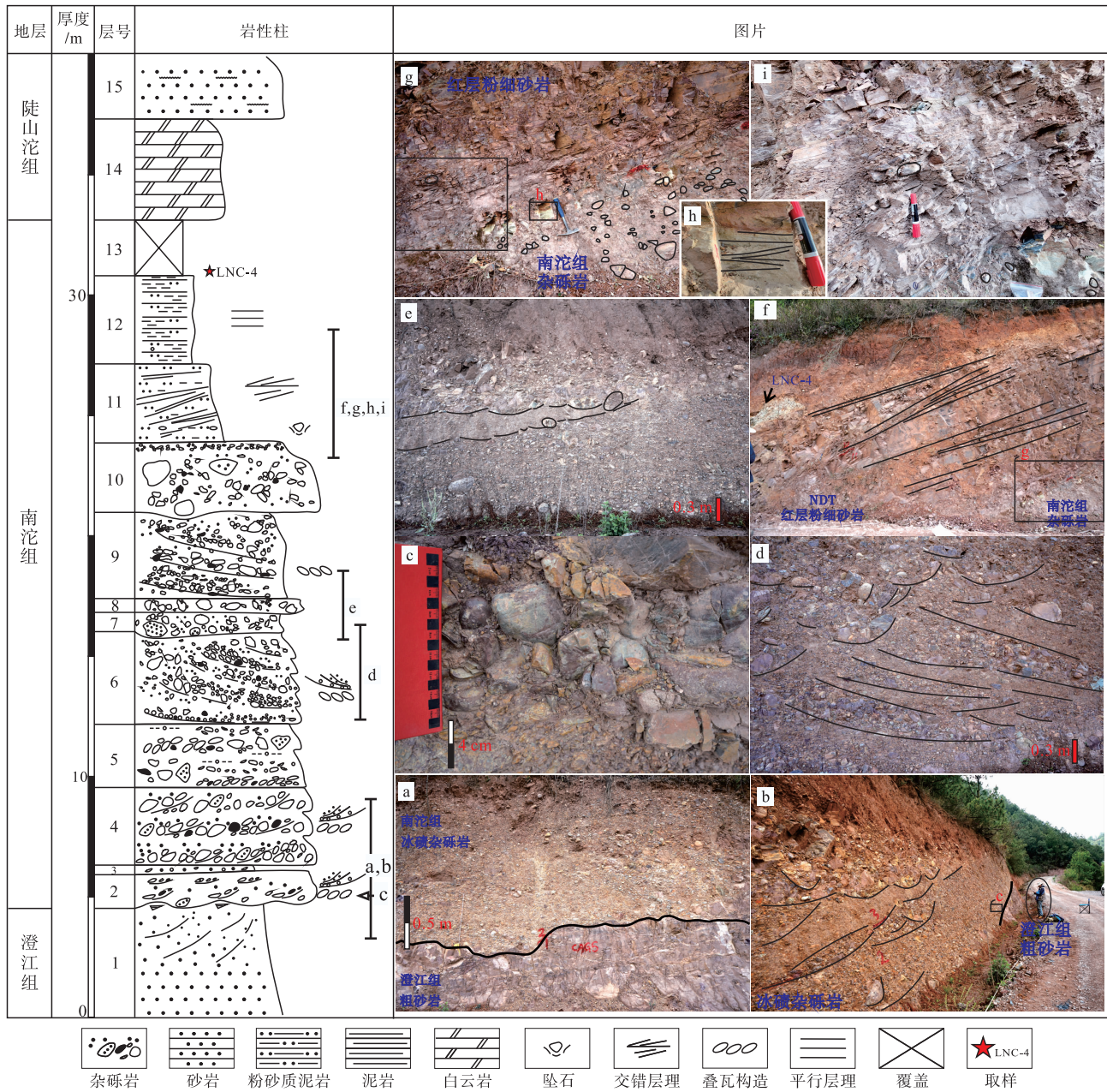
第 3 段南沱组—陡山沱组过渡段红层 (NDT) 由 11-12 小层组成,为浅紫红色薄层夹灰绿色条带的含砾细砂岩和粉砂岩。11 小层为紫红色薄—中层泥质粉砂岩,厚 3.28 m,发育大型低角度斜层理 (图 2-f),底部见约 10 cm 呈透镜状、发育双向交错层理的灰绿色细砂岩 (图 2-g, 2-h),偶见细砾砾石 (图 2-i); 12 小层,厚 3.67 m,为中—薄层紫红色与灰绿色互层粉砂质细砂岩到泥岩,具向上变细、层厚变薄韵律,镜下观察见微观交错层理、粒序层理、冲刷面。

第 4-8 段为陡山沱组 (14 和 15 小层),为海相碳酸盐岩—碎屑岩混合沉积建造。底部 4 段为泥质细晶白云岩,之上过渡为薄层石英粗砂岩。向上 5 段为薄层灰色—青灰色粗晶—细晶—泥晶白云岩。中部 6 段为薄层灰白色石英砂岩,向上过渡为灰绿色薄层泥质白云岩。再之上,7 段下部为紫红色中薄层白云质泥岩与青灰色泥—细晶白云岩互层,之上黑褐色泥岩。顶部 8 段为浅红色厚层石英粗砂岩,夹呈波状、透镜状薄层粉砂岩,向上层厚减薄。再之上整合接触的是第 9 段灯影组灰色厚层块状藻白云岩。

4.1.2 澄江飞大田剖面

飞大田剖面位于澄江市北飞大田村东侧山坡一带 (图 1-e),地层出露较好。自下而上依次发育澄江组、南沱组、陡山沱组和灯影组,可以分为 9 个岩性段,其中南沱组又可细分为 10 个小层 (图 4)。

第 1 段 1 小层为澄江组浅紫红色、浅白色粗砂



a—澄江组紫红色粗砂岩和南沱组杂砾岩之间不整合面；b—南沱组冰碛杂砾岩，砾石叠瓦状排列呈交错层理状；c—南沱组底部分选差、次圆一次棱角为主、杂基支撑、紧密堆积的中粗砾岩；d—多层叠瓦排列的中—粗砾岩，呈大型类槽状交错层理状；e—中—粗砾岩夹细砾岩透镜体；f—过渡段红层紫红色粉砂岩和细砂岩，发育斜层理；g—南沱组下段砾岩顶部向上砾石逐渐变小且减少；h—过渡段粉砂岩底部见双向交错层理；i—过渡段粉砂岩底部见细砾漂砾

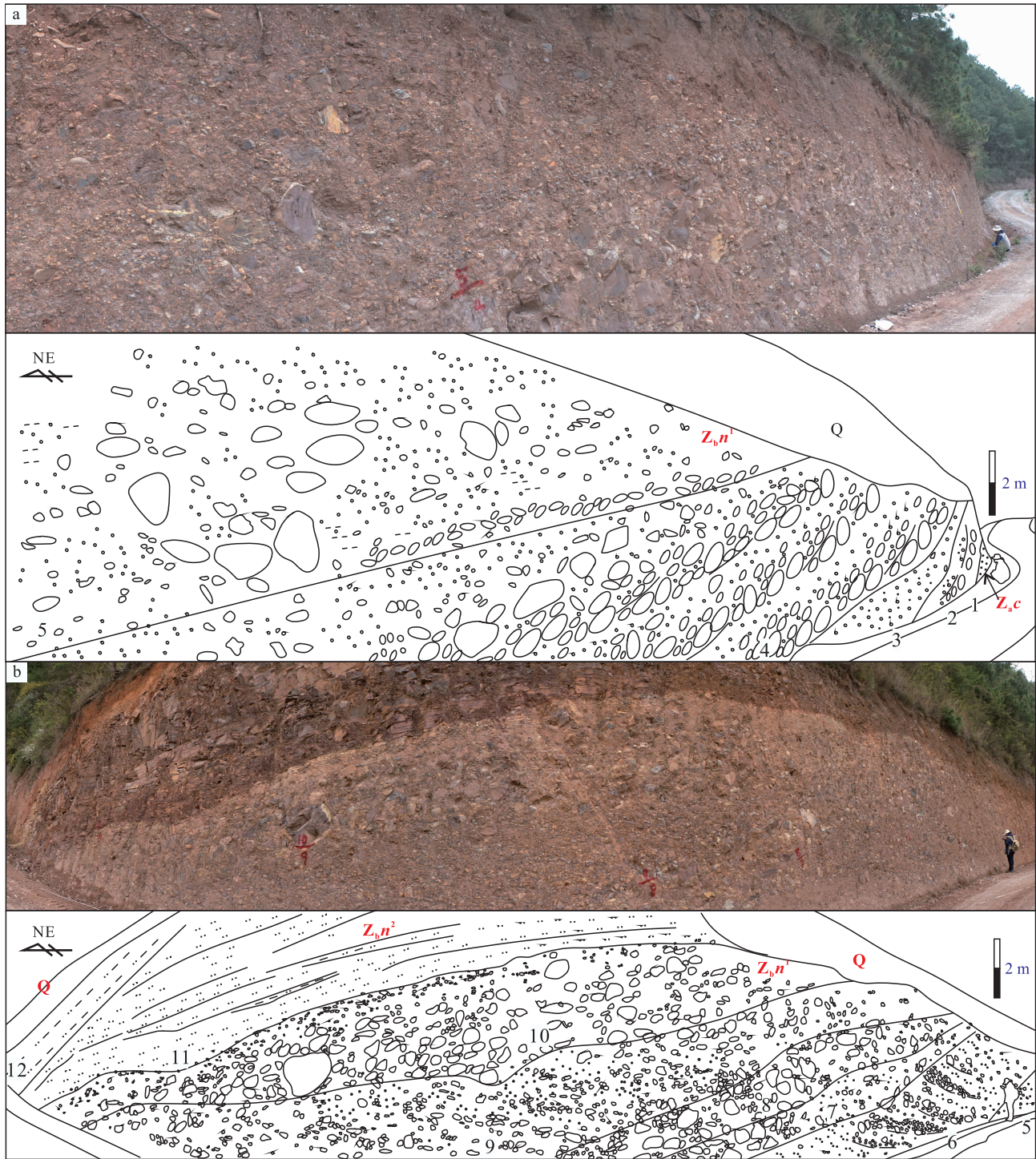
图 2 滇中鲁纳村剖面南沱组柱状图和典型沉积特征

Fig. 2 Histogram of the Nantuo Formation with typical sedimentary characteristics in Lunacun section in central Yunnan

岩，不整合面之上为南沱组紫红色冰碛砾岩（图 4-a）。

第 2 段南沱组为冰碛杂砾岩（由 2-5 小层组成）（图 4-a 至 4-d），与晋宁鲁纳村剖面明显不同的是砾岩段薄、紫红粉砂质泥岩和细砂岩段厚。

2-3 小层，分别厚 0.56 m、1.13 m，为紫红色细砾—粗砾冰碛岩，砾石粒径为 1~30 cm，砾石主要来自澄江组的石英岩和砂岩，磨圆以次圆—圆状为主；4-5 小层，分别厚 2.82 m、2.82 m，为多期向上变细韵律旋回的弱层状冰碛砾岩；很多砾石呈板



a—南沱组下部杂砾岩下半部分叠瓦排列的中—粗砾岩夹细砾岩透镜体；b—南沱组下部杂砾岩上半部分叠瓦排列粗砾岩和冰川巨漂砾，以及上部浅紫红色泥质粉砂岩和泥岩

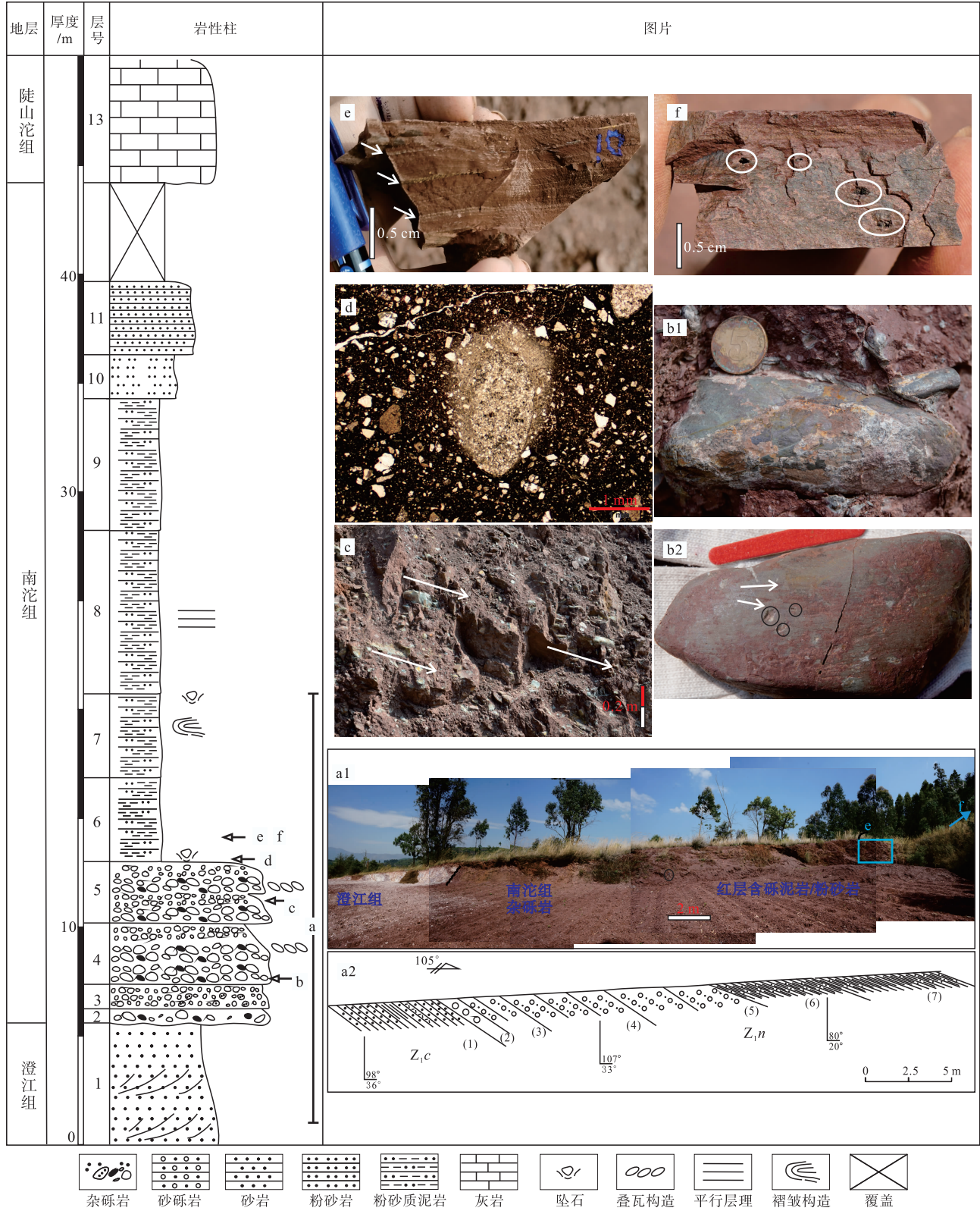
图 3 滇中鲁纳村剖面南沱组野外宏观照片

Fig. 3 Field photos of the Nantuo Formation in Lunacun section in central Yunnan

片状、扁平状以及子弹状形态，砾石表面见多组交错擦痕以及撞击坑(图 4-b)，砾石长轴方向具有明显的定向形(图 4-c)，镜下特征表现出分选差、

磨圆差以及见坠落构造的杂砾岩(图 4-d)。

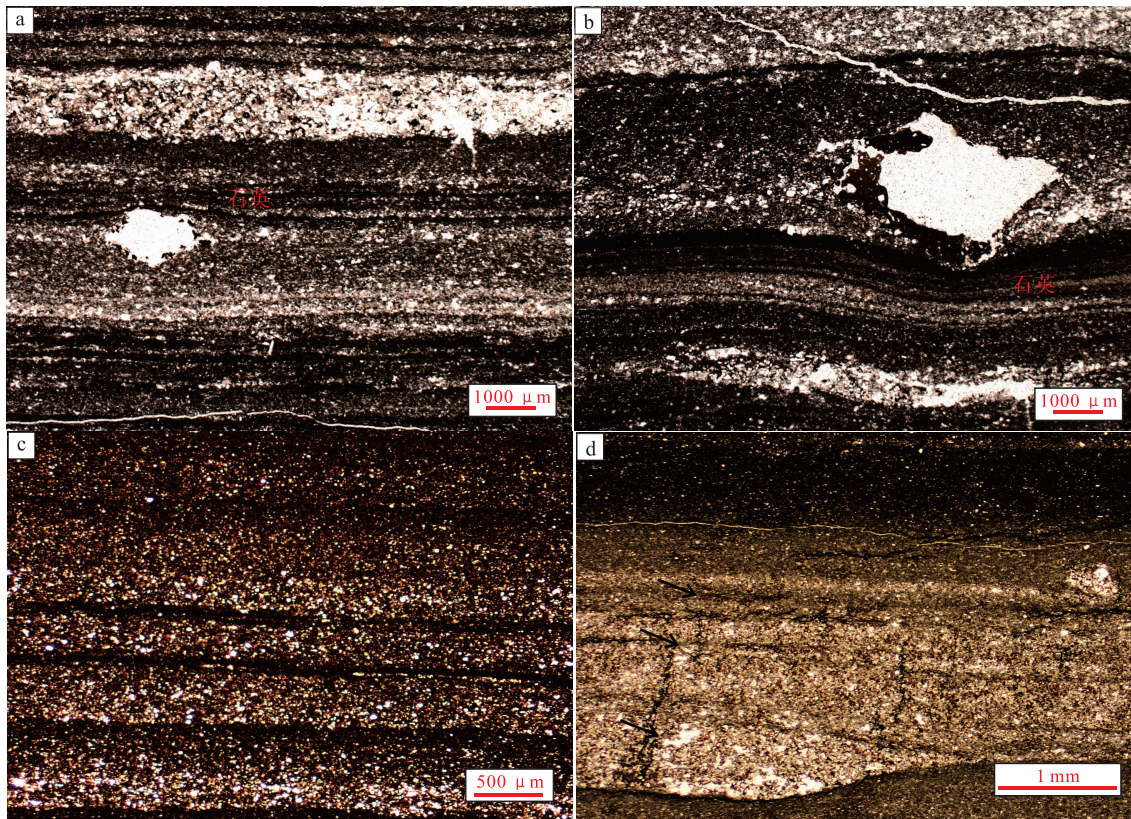
第 3 段南沱组—陡山沱组过渡段红层 (NDT)，由 6-11 小层组成。下部 6-9 小层自下而上，依次



a1、a2—南沱组下段砾岩和上段泥岩—粉砂岩；b1、b2—子弹状砾石以及砾石表面擦痕和撞击坑；c—砾石定向排列；d—镜下特征见坠落状碎屑颗粒；e—含粉砂泥岩，发育粒序纹层；f—粉砂质泥岩，发育纹层以及风化残余孔洞

图 4 滇中澄江飞大田村剖面南沱组柱状图和典型冰川特征照片

Fig. 4 Histogram of the Nantuo Formation with typical glacial pictures in Feidatian section of Chengjiang in centra Yunnan



a、b—发育平行层理的泥质粉砂岩，并见坠石构造；c—发育粒序纹层的粉砂质泥岩；
d—泥质粉砂岩，发育粒序层理以及冲刷面。均为单偏光照片

图 5 滇中成冰系南沱组红层冰水沉积特征照片

Fig. 5 Photos of aqueoglacial sedimentary characteristics of the Cryogenian Nantuo Formation in central Yunnan

分别厚 3.86 m、4.7 m、7.5 m、6.06 m，为紫红色薄层粉砂质泥岩、泥岩(图 4-e)，平行层理发育，特别是镜下见坠石构造(图 5-a, 5-b)、正粒序纹层(图 5-c)以及细小泥砾和风化残余孔洞。10-11 小层分别厚 2 m、3.36 m，为紫红色薄层粉砂岩和细砂岩。

第 4-8 段为陡山沱组。埃迪卡拉系陡山沱组碳酸盐岩序列，可以分为 5 个岩性组合段。底部 4 段为灰色中厚层块状颗粒灰岩；之上 5 段为页岩与薄层纹层状泥质灰岩互层，向上泥质白云岩增多；再向上 6 段由薄层灰岩与泥岩互层组成；7 段向上灰岩增多，为中至厚层内碎屑白云岩；8 段为黑色页岩夹纹层状灰岩和粉砂质白云岩。

第 9 段为灯影组。为厚块状白云岩或硅质白云岩。

4.2 沉积相

4.2.1 沉积相划分依据

在滇中新元古代鲁纳村剖面 and 飞大田剖面的南

沱组及 NDT 段中发现多种典型冰川沉积特征：

1) 砾石表面见多组交错擦痕以及撞击坑，而一些砾石呈板片状、扁平状以及子弹状的形态(图 4-b)，区别于泥石流砾石表面可能存在的纤细、粗短的刻痕(郑本兴和马正海，1985)。

2) 在 NDT 段纹层状泥岩、粉砂岩中，镜下观察识别出了多个坠石构造(图 4-d；图 5-a, 5-b)，指示着冰川融化后退过程中向着冰川远端深水区域漂浮的冰山上掉落的碎屑(Eyles, 1993; Le Heron *et al.*, 2009)，是冰川沉积成因的直接证据。发育坠石构造的红层泥岩、粉砂岩与发育交错层理的细砂岩，分别属于冰前三角洲前缘亚相和滨岸亚相。

3) NDT 段岩石手标本和显微镜下观察发现，纹理发育，以淡色层(颗粒相对较粗的细粉砂)与暗色层(颗粒较细的粉砂和黏土)韵律组成(图 5-c, 5-d)，淡色层清晰界限开始，向上递变为暗色层，表现出纹泥韵律层理特征。这种纹泥韵律层理也是冰川融水沉积过程中(温暖期沉积粗粒，

寒冷期沉积细粒)重要的相标志之一(朱筱敏, 2008)。

4) 前人文献中还记录了滇中个别地区, 南沱组底部与下伏地层接触部分保存有较好的基岩冰溜面(杨暹和和陈远德, 1981; 林尧明等, 1990)、冰流河槽刨蚀面(刘鸿允和刘钰, 1963)。

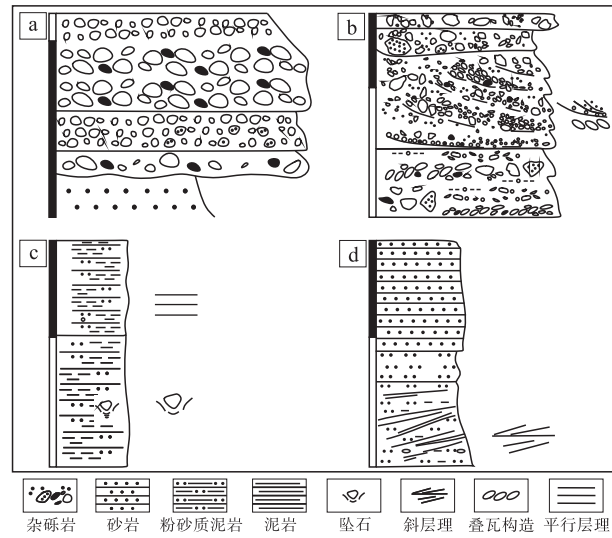
以上典型冰川沉积构造为将滇中—滇东地区南沱组砾岩段及其上紫红色泥岩段(NDT过渡段)划为冰川沉积相提供了切实证据。

4.2.2 沉积相类型及特征

借鉴前人冰川沉积相划分理论体系(Eyles, 1993; Le Heron *et al.*, 2009; Prothero and Schwab, 2014), 结合研究区研究层段岩石类型、结构和沉积构造与沉积序列, 可划分出陆相、海陆过渡相和海相3种沉积相类型, 冰下滞碛亚相、冰缘河道亚相、冰前(海陆过渡)三角洲前缘亚相、滨岸亚相4种沉积亚相类型。沉积相、亚相划分及特征如表2所示。

1) 冰下滞碛亚相。冰下滞碛亚相砾岩(图6-a)主要发育在南沱组紫红色冰碛砾岩段下部, 鲁纳村剖面 and 飞大田剖面均有发育(图2; 图4), 多呈块状, 分选差, 砾径一般1~12 cm。砾石成分复杂, 有石英岩、砂岩和砾岩以及少量白云岩等。杂基成分主要是黏土、粉砂和砂。砾石大都呈次棱角状, 表面可见冰川擦痕和冰蚀凹坑(图4-b), 并且具有定向排列(图4-c)。这是典型冰下滞碛、底碛砾岩相, 冰川底部移动搬运、剥蚀过程的沉积产物。

2) 冰缘河道亚相。冰缘河道亚相砾岩(图6-b)主要发育在南沱组紫红色冰碛砾岩段中上部, 主要见于鲁纳村剖面(图2; 图3), 砾石分选差, 砾径1~30 cm为主, 甚至可见半米级巨砾石(图3)。自下而上, 由若干下粗上细的沉积旋回叠置发育, 每



a—冰下滞碛亚相砾岩; b—冰缘河道亚相砾岩; c—冰前三角洲前缘亚相泥岩; d—滨岸亚相细砂岩

图6 滇中成冰系南沱组岩相组合分类

Fig. 6 Classification of lithofacies associations of the Croyogenic Nantuo Formation in central Yunnan

个旋回底部砾石叠瓦状排列、向上粒度减小, 砾石排列呈大型槽状交错层理, 夹砂砾岩透镜体, 并且大型交错层理状叠瓦排列存在2期不同方向(图2-d; 图3)。这是冰川融水作用下冰缘河道砂砾岩—河道间沉积产物。

3) 冰前三角洲前缘亚相。冰前三角洲前缘亚相泥岩(图6-c)主要由红层泥岩、粉砂质泥岩构成, 主要见于飞大田剖面(图4), 该泥岩由冰碛砾岩向上整合过渡发育, 即宏观砾石逐渐减少至肉眼不见, 但在显微镜下发现发育平行层理、小型斜层理以及粒序层理, 特别是微观下见到石英颗粒坠落压弯纹层的坠石构造(图5-a, 5-b)。“下弯上绕”的坠石一直被认作冰海沉积最直接证据。冰筏携带的陆源颗粒卸载坠入平行层理砂岩层中, 早期平行

表2 滇中南沱组冰川沉积相分类及其沉积特征(据 Eyles, 1993; Le Heron *et al.*, 2009; Prothero and Schwab, 2013 修改)

Table 2 Classification of glacier sedimentary facies and sedimentary characteristics of the Nantuo Formation in central Yunnan (modified from Eyles, 1993; Le Heron *et al.*, 2009; Prothero and Schwab, 2013)

沉积相	沉积亚相	岩石组合	沉积构造
陆相	冰下滞碛	发育在序列底部的杂砾岩	发育擦痕、面状石、子弹状或压扁砾石
	冰缘河道	杂砾岩	发育大型槽状交错层理或楔状交错层理, 砾石具有定向性, 底部具冲刷面
海陆过渡相	冰前三角洲前缘	韵律粉细砂岩夹砂岩或细砾岩透镜体, 偶含漂砾, 镜下见坠石	高频韵律粉细砂岩、泥岩, 含漂砾, 发育小型斜层理、平行层理、粒序层理, 夹砂岩透镜体
海相	滨岸	薄层偶含细小砾石夹灰绿色条带的细砂岩和粉砂岩	发育大型低角度交错层理, 底部见双向交错层理

层理被压弯或压断，后期的沉积物受凸出的砾石影响、层理发生弯曲绕过砾石，形成“下弯上绕”的冰海坠石构造（孙娇鹏等，2014）。本次发现坠石构造的石英颗粒边界凹凸曲折结构，可能其经历了一定的后期成岩改造。冰川纹泥是韵律层理的一个重要类型，每一套韵律层由颗粒较粗（粗至细粉砂）的淡色层与颗粒较细（细粉砂和黏土）的暗色层组成。淡色层以清晰界面开始，向上递变为暗色层（图 5-c）。温暖期冰迅速消融，释放出大量碎屑物质，形成淡色层；寒冷期没有新的陆源物质来源，悬浮细粒物质在冬季沉积下来，形成暗色层。这种层序每年重复，构成韵律（朱筱敏，2008）。所以飞大田剖面南沱组上段红层泥岩、粉砂质泥岩应属于冰前三角洲前缘沉积产物。

4) 滨岸亚相。滨岸亚相细砂岩（图 6-d）主要由紫色薄层偶含细小砾石夹灰绿色条带的细砂岩和粉砂岩为特征（图 2；图 3；图 4-f），由下部冰碛砾岩段向上整合过渡，其界线部分宏观砾石逐渐不见（图 2-g，2-i），且发育大型低角度交错层理（图 2-f）、底部见双向交错层理（图 2-h）。显微镜下该套粉细砂岩见泥质纹层与细粒碎屑形成斜层理、平行层理、粒序层理与冲刷面（图 5-d）。因此鲁纳村剖面南沱组上段红层粉砂岩、细砂岩为滨浅海沉积产物。

4.3 锆石年龄谱系

碎屑锆石样品 LNC-4 采集自鲁纳村剖面过渡段红层砂岩的上部，为灰绿色粉砂岩。表 3 中给出了样品 LNC-4 碎屑锆石 U-Pb 测年结果，其中年龄小于 1000 Ma 和大于 1000 Ma 的锆石分别使用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄，省略谐和度小于 95% 的样品来讨论。

锆石在透射光下主要呈浅黄色、黄色或无色透明状，锆石颗粒晶形变化较大，少数呈浑圆状，多数晶形较好呈短柱状，显示近源搬运特征。样品中锆石粒径差别较大，完整颗粒的长轴 50~200 μm ，短轴在 20~150 μm ，长宽比值介于 1.3~2.0 之间。锆石阴极发光图像显示，大部分锆石颗粒振荡环带发育，属岩浆锆石，少量锆石具核边结构或均质结构（图 7-a）。根据锆石的谐和图和年龄分布直方图，可以分为 4 组（图 7-b，7-c）。除 2 颗锆石外，其余锆石 Th/U 值主要介于 0.15~1.84 之间

（图 7-d）。这 2 颗锆石中，一颗锆石 Th/U 值为 0.09，阴极发光图显示为均质结构，为变质成因锆石，其年龄为 2191 Ma；另一颗锆石 Th/U 值为 9.72，阴极发光图显示其具有明显振荡环带发育，其年龄为 650 Ma。4 组年龄分别为：第 1 组年龄共有 14 个点，年龄范围为 636~879 Ma，主峰峰值为 780 Ma，其加权平均年龄 796 Ma，MSWD = 75，说明其年龄过于分散。第 2 组年龄共 12 个点，年龄范围为 1565~1988 Ma。第 3 组年龄共 16 个点，年龄范围为 2104~2455 Ma。第 4 组年龄共 5 个点，年龄范围为 2518~2887 Ma。

5 讨论与分析

5.1 红层归属

5.1.1 沉积环境

前文对有关研究层段沉积特征研究与沉积环境判别表明，滇中南沱组与陡山沱组过渡段的紫红色泥岩、粉细砂岩沉积相划归冰川沉积可能更为合适，具体有以下几个沉积特征。

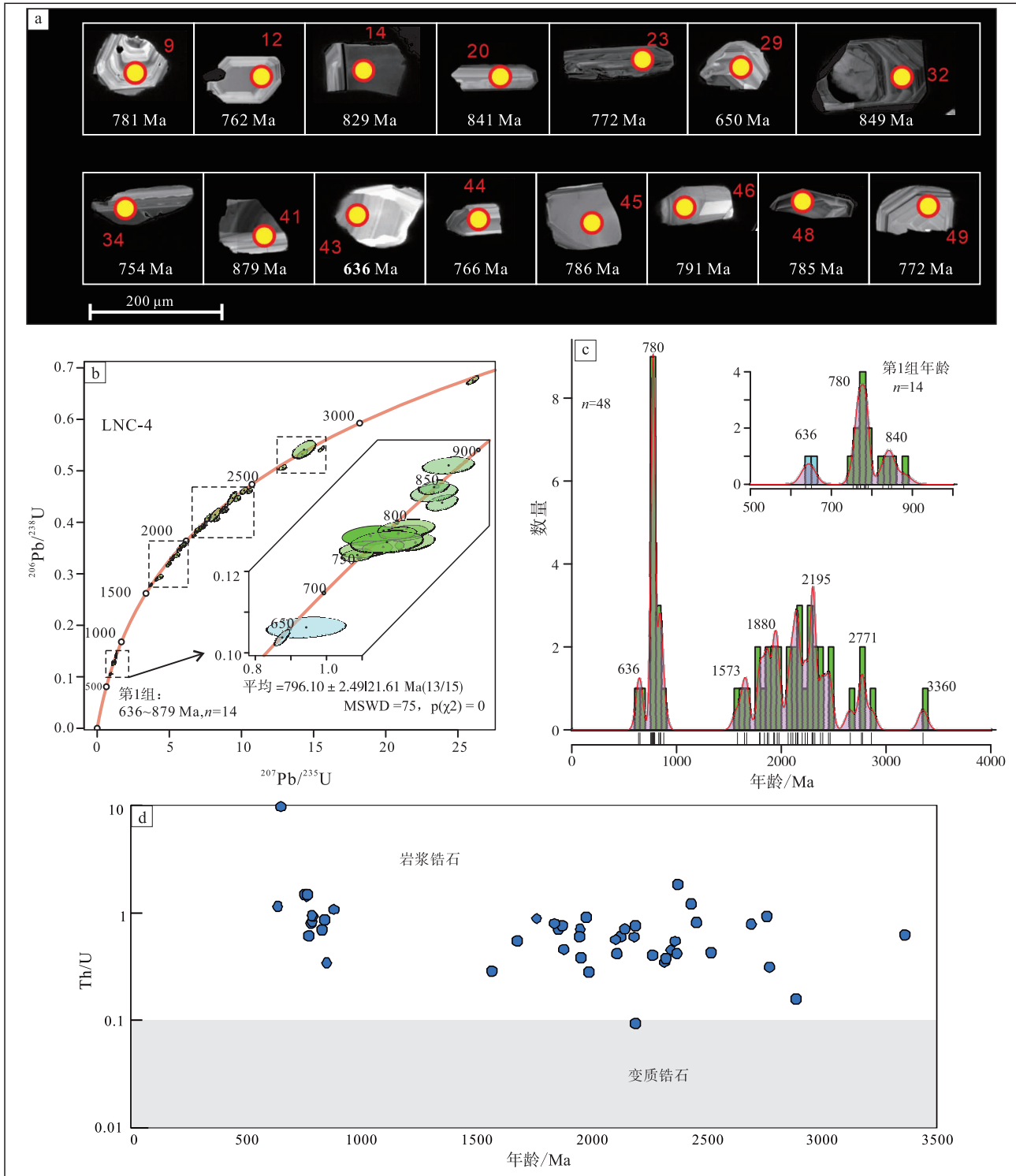
首先，南沱组下段杂砾岩上部其砾石含量逐渐减少（图 2；图 3），在上段紫红色泥岩、粉砂岩底部明显可见零星漂砾（图 2-g，2-i），再向上的紫红色泥岩中肉眼不易观察到砾石，但是镜下可见明显坠石构造（图 4-d；图 5-a，5-b）。Zhou 等（2019）也曾提及紫红色泥岩、粉砂岩段中发现代表冰筏碎屑输入的落石沉积构造。其文中提到落石构造的层位属于狭义南沱组冰川杂砾岩之上，红层最底部，可对比文中讨论的过渡段最底部，说明 NDT 段沉积时，红层中的砾石逐渐减少、变小，坠石的存在表明，随着冰川的消融海平面上升，该处接受冰川携带碎屑影响逐渐减弱，但冰川沉积尚未完全结束。

其次，韵律性纹泥代表冰川融水过程冷热交替的冰冻和冻融的交替变化。镜下观察发现颗粒较粗（细粉砂）的淡色层与颗粒较细（细粉砂和黏土）的暗色层组成（图 5-c）以及肉眼可见的粒序层理。反映出夏季冰迅速消融，纹泥层理具有极其细密和高频韵律性的特征，释放出大量碎屑物质，形成淡色碎屑层；冬季陆源物质断供，悬浮细粒物质沉降、沉积下来，形成暗色层，年复一年重复，构成细密的韵律层理（朱筱敏，2008）。

表 3 滇中鲁纳村剖面碎屑锆石 U-Pb 年龄测试结果

Table 3 U-Pb age test results of detrital zircon in the Lunacun section, central Yunnan

测试 点号	元素含量 (10^{-6}) 及比值			$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		谐和度 /%
	^{232}Th	^{238}U	Th/U	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄/Ma	1σ	年龄/Ma	1σ	年龄/Ma	1σ	
LNC-4-01	74	265	0.28	0.1223	0.0009	6.0456	0.0748	0.3585	0.0017	1988.7	14.1	1982.4	24.5	1974.9	9.4	99.62
LNC-4-02	23	67	0.35	0.1474	0.0017	8.2696	0.1323	0.4077	0.0027	2314.9	26.2	2261.0	36.2	2204.4	14.7	97.47
LNC-4-03	104	148	0.70	0.1196	0.0011	5.7205	0.0743	0.3474	0.0019	1950.1	17.7	1934.5	25.1	1922.0	10.6	99.35
LNC-4-04	89	114	0.78	0.1846	0.0015	12.8506	0.1619	0.5063	0.0025	2693.5	22.4	2668.8	33.6	2640.6	13.1	98.94
LNC-4-05	75	106	0.71	0.1135	0.0014	4.9868	0.0759	0.3200	0.0019	1854.8	22.5	1817.1	27.6	1789.7	10.6	98.48
LNC-4-06	113	148	0.76	0.1145	0.0012	5.1722	0.0720	0.3292	0.0016	1871.4	19.6	1848.1	25.7	1834.3	9.1	99.25
LNC-4-07	141	117	1.21	0.1579	0.0015	9.6695	0.1282	0.4466	0.0024	2432.2	22.5	2403.8	31.9	2379.9	12.8	99.00
LNC-4-08	161	213	0.76	0.1370	0.0011	7.4050	0.0964	0.3964	0.0018	2189.3	17.6	2161.6	28.1	2152.6	9.6	99.58
LNC-4-09	60	75	0.80	0.0633	0.0018	1.1166	0.0326	0.1288	0.0011	717.7	20.3	761.3	22.2	781.0	6.5	97.45
LNC-4-10	101	642	0.16	0.2078	0.0008	15.4157	0.1640	0.5440	0.0024	2887.6	11.4	2841.3	30.2	2800.2	12.4	98.54
LNC-4-11	67	113	0.59	0.1367	0.0015	7.6709	0.1265	0.4093	0.0031	2185.5	23.2	2193.2	36.2	2211.9	16.8	99.15
LNC-4-12	136	96	1.41	0.0642	0.0017	1.0890	0.0337	0.1256	0.0010	747.7	19.9	748.0	23.1	762.9	5.8	98.04
LNC-4-13	96	231	0.42	0.1309	0.0009	6.8752	0.0964	0.3820	0.0016	2109.9	15.1	2095.5	29.4	2085.6	8.8	99.53
LNC-4-14	374	538	0.69	0.0702	0.0009	1.3271	0.0228	0.1373	0.0009	933.8	11.4	857.6	14.8	829.7	5.2	96.68
LNC-4-15	194	427	0.45	0.1150	0.0008	5.3119	0.0733	0.3350	0.0014	1879.8	12.6	1870.8	25.8	1862.7	7.9	99.57
LNC-4-16	58	96	0.60	0.1194	0.0017	5.5512	0.1036	0.3371	0.0020	1946.6	27.8	1908.6	35.6	1872.8	11.2	98.11
LNC-4-17	73	171	0.43	0.1662	0.0012	10.5855	0.1521	0.4617	0.0018	2518.8	18.2	2487.4	35.7	2447.2	9.8	98.37
LNC-4-18	91	167	0.55	0.1030	0.0010	4.1400	0.0670	0.2904	0.0017	1678.3	16.7	1662.2	26.9	1643.6	9.6	98.87
LNC-4-19	36	61	0.60	0.1321	0.0017	7.0838	0.1241	0.3871	0.0022	2124.7	27.8	2122.0	37.2	2109.3	12.1	99.40
LNC-4-20	98	115	0.86	0.0678	0.0013	1.2778	0.0328	0.1394	0.0011	860.6	17.1	835.9	21.5	841.3	6.7	99.36
LNC-4-21	52	58	0.91	0.1214	0.0016	5.9746	0.1523	0.3555	0.0022	1976.7	26.7	1972.2	50.3	1960.6	11.9	99.41
LNC-4-22	58	143	0.40	0.1431	0.0019	8.2383	0.2419	0.4150	0.0051	2263.9	30.4	2257.6	66.3	2237.9	27.4	99.13
LNC-4-23	195	376	0.52	0.0712	0.0012	1.2516	0.0343	0.1274	0.0009	963.2	16.2	824.1	22.6	772.8	5.3	93.57
LNC-4-24	220	353	0.62	0.2794	0.0012	25.5300	0.4293	0.6768	0.0039	3359.1	14.1	3328.7	56.0	3332.0	19.0	99.90
LNC-4-25	35	113	0.31	0.1936	0.0014	14.2171	0.3348	0.5329	0.0037	2772.3	20.7	2764.3	65.1	2753.8	19.2	99.62
LNC-4-26	94	208	0.45	0.1498	0.0010	8.8780	0.1997	0.4308	0.0019	2343.0	15.4	2325.5	52.3	2309.1	10.4	99.29
LNC-4-27	92	242	0.38	0.1199	0.0009	5.7547	0.1321	0.3494	0.0015	1953.2	14.1	1939.6	44.5	1931.6	8.5	99.58
LNC-4-28	80	99	0.81	0.1600	0.0014	10.1513	0.2377	0.4622	0.0028	2455.1	21.8	2448.7	57.3	2449.3	14.6	99.97
LNC-4-29	338	35	9.72	0.0644	0.0030	0.9386	0.0462	0.1063	0.0014	753.8	35.5	672.2	33.1	651.0	8.3	96.80
LNC-4-30	19	21	0.93	0.1922	0.0037	14.2858	0.4199	0.5427	0.0073	2760.5	52.8	2768.9	81.4	2794.8	37.7	99.07
LNC-4-31	181	482	0.38	0.1480	0.0007	8.7268	0.1600	0.4269	0.0016	2322.1	11.1	2309.9	42.4	2291.9	8.4	99.22
LNC-4-32	126	369	0.34	0.0671	0.0008	1.3104	0.0286	0.1408	0.0007	841.3	10.6	850.3	18.5	849.4	4.3	99.90
LNC-4-33	59	109	0.54	0.1515	0.0015	8.9144	0.1777	0.4248	0.0023	2361.8	23.9	2329.3	46.4	2282.0	12.5	97.95
LNC-4-34	331	223	1.48	0.0636	0.0010	1.1010	0.0262	0.1241	0.0007	726.6	11.7	753.8	17.9	754.1	4.2	99.96
LNC-4-35	70	80	0.88	0.1077	0.0018	4.4306	0.1072	0.2942	0.0024	1760.6	29.5	1718.1	41.6	1662.5	13.4	96.71
LNC-4-36	170	239	0.71	0.1335	0.0009	7.3611	0.1406	0.3927	0.0020	2144.2	14.3	2156.3	41.2	2135.2	10.9	99.02
LNC-4-37	97	122	0.79	0.1125	0.0012	5.0547	0.1030	0.3192	0.0018	1838.7	18.8	1828.5	37.3	1785.8	10.0	97.63
LNC-4-38	177	315	0.56	0.1305	0.0009	6.9199	0.1301	0.3763	0.0014	2104.3	14.2	2101.2	39.5	2058.9	7.8	97.97
LNC-4-39	79	274	0.29	0.0970	0.0009	3.8354	0.0754	0.2789	0.0015	1565.6	14.6	1600.2	31.5	1585.7	8.4	99.09
LNC-4-40	34	368	0.09	0.1372	0.0008	7.6490	0.1435	0.3923	0.0018	2191.1	13.3	2190.6	41.1	2133.6	9.8	97.36
LNC-4-41	137	127	1.08	0.0667	0.0014	1.3898	0.0320	0.1462	0.0010	828.3	17.8	884.6	20.4	879.7	5.8	99.45
LNC-4-42	384	209	1.84	0.1525	0.0013	9.1927	0.1176	0.4242	0.0019	2373.5	20.7	2357.4	30.2	2279.3	10.2	96.63
LNC-4-43	62	54	1.14	0.0613	0.0004	0.9026	0.0108	0.1038	0.0010	647.1	4.4	653.1	7.8	636.7	6.2	97.45
LNC-4-44	216	146	1.48	0.0667	0.0013	1.1921	0.0261	0.1262	0.0008	828.5	16.4	796.9	17.5	766.0	5.0	96.05
LNC-4-45	89	108	0.83	0.0685	0.0013	1.2536	0.0269	0.1298	0.0009	882.4	17.2	825.0	17.7	786.4	5.5	95.21
LNC-4-46	60	65	0.93	0.0681	0.0018	1.2535	0.0352	0.1306	0.0011	870.4	22.6	825.0	23.2	791.2	6.7	95.82
LNC-4-47	89	114	0.79	0.0519	0.0028	0.1776	0.0095	0.0244	0.0003	279.7	15.4	166.0	8.9	155.2	2.0	93.30
LNC-4-48	169	180	0.94	0.0674	0.0012	1.2236	0.0241	0.1296	0.0007	847.8	14.6	811.4	16.0	785.5	4.1	96.76
LNC-4-49	30	50	0.61	0.0667	0.0023	1.1878	0.0408	0.1273	0.0014	828.0	28.6	795.0	27.3	772.6	8.2	97.15
LNC-4-50	48	115	0.42	0.1523	0.0013	9.5034	0.1691	0.4474	0.0049	2370.7	19.8	2387.9	42.5	2383.9	26.2	99.83



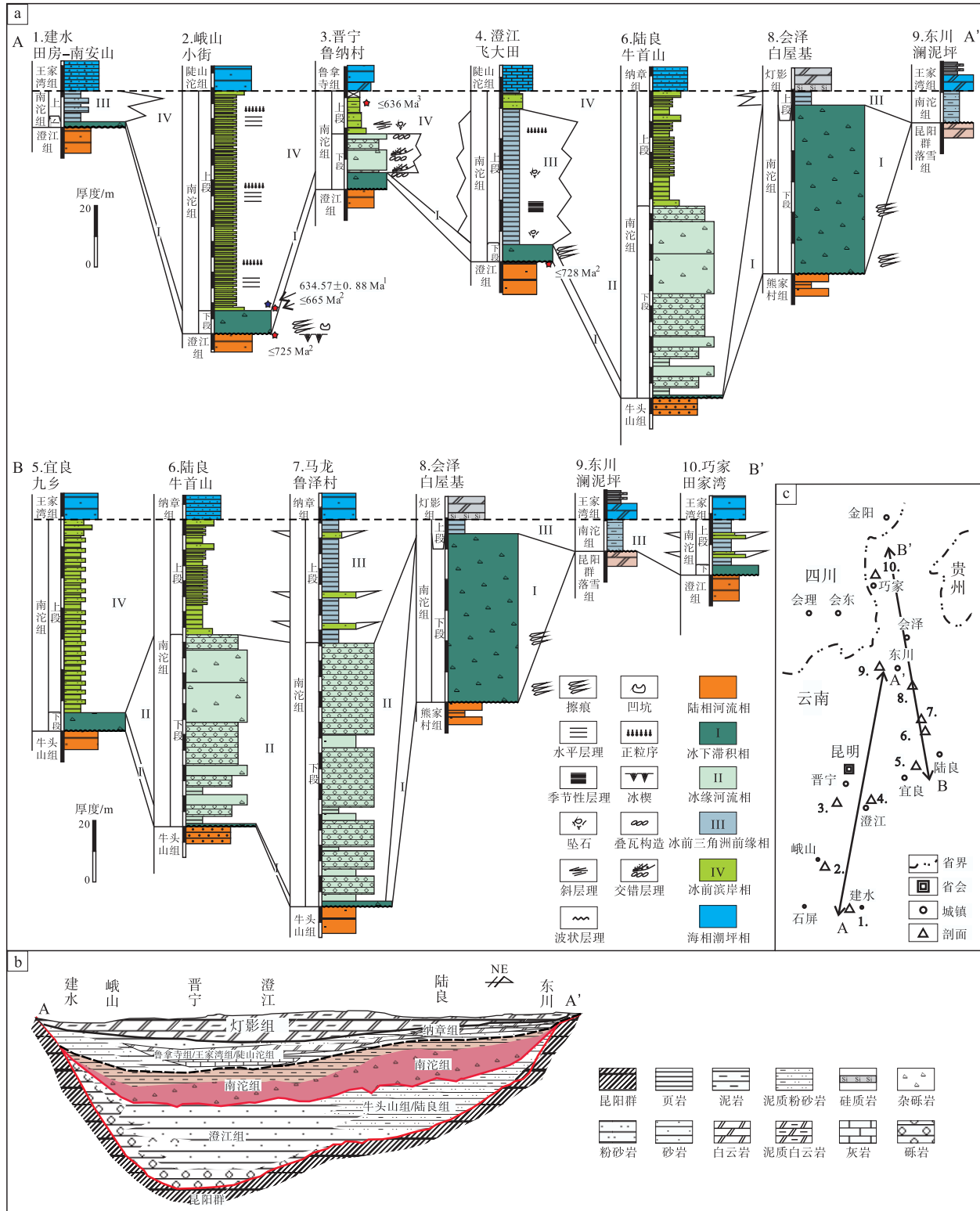
a—LNC-4碎屑锆石阴极发光图像（小于 1000 Ma）；b—碎屑锆石协和图；c—碎屑锆石年龄分布直方图；d—锆石Th/U值和年龄散点图

图 7 滇中鲁纳村剖面碎屑锆石年代数据

Fig. 7 Detrital zircons age data from the Lunacun section, central Yunnan

从岩相组合上看，南沱组下段紫红色砾岩和上段紫红色泥岩、粉细砂岩也更具连续性（刘鸿允和刘钰，1963；王宝琛，1980；曹仁关等，1985；

刘鸿允，1991；王剑，2000），与上覆陡山沱组灰白色、灰绿色碳酸盐岩和含海绿石砂岩具有明显的区别。说明红层与海相混合碎屑岩—碳酸盐岩沉积



a: 1. 建水田房-南安山剖面, 5. 宜良九乡, 8. 会泽白屋基, 9. 东川澜泥坪, 这些剖面据曹仁关等 (1985); 2. 峨山小街剖面, 据江卓斐等 (2018); 3. 晋宁鲁纳村与 4. 澄江飞大田这 2 个剖面据本次研究; 6. 陆良牛首山剖面据刘鸿允 (1991); 10. 巧家田家湾剖面据江卓斐 (2016); b—滇中新元古代地层发育剖面图, 据刘鸿允和刘钰 (1963) 修改; c—剖面位置; 凝灰岩锆石年龄 1 据 Zhou 等 (2019); 碎屑锆石年龄 2 据江卓斐等 (2018); 碎屑锆石年龄 3 据本次研究

图 8 滇中成冰系南沱组对比图

Fig. 8 Stratigraphic correlation map of the Cryogenian Nantuo Formation in central Yunnan

属于不同沉积体系产物。

5.1.2 沉积年限

碎屑锆石 U-Pb 测年结果主要被用于物源分析、构造热事件重建以及地层最大沉积年龄的限定 (Gehrels *et al.*, 1995)。

在扬子北缘, 不同学者相继报道了一系列成冰系/埃迪卡拉系界线附近的凝灰岩 U-Pb 年龄 ca. 635 Ma 数据 (Condon *et al.*, 2005; Yin *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2005; Xing *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2020)。其中, 陡山沱组盖帽白云岩下部年龄 635.23 ± 0.57 Ma (Condon *et al.*, 2005) 与 Hoffman 等 (2004) 报道纳米比亚 Ghaub 组冰川沉积顶部的 U-Pb 年龄 635.5 ± 1.2 Ma 相近。这准确限定了南沱组冰期结束和陡山沱组开始时间在 635 Ma (周传明等, 2019, 2021)。

本次在鲁纳村剖面南沱组砾岩之上红层粉砂岩、细砂岩中采集样品 LNC-4 (图 7)。其最年轻锆石 U-Pb 年龄值为 636 ± 6 Ma, 分布于谐和线上, 且涵盖了次年轻锆石 U-Pb 年龄值 (650 ± 8 Ma), 加权平均年龄 642 ± 7 Ma (MSWD = 3.3, $n = 2$) (图 7)。尽管前人在峨山地区冰碛岩顶部火山灰中获得锆石 TIMS U-Pb 年龄为 634.57 ± 0.88 Ma ($n = 4$, MSWD = 1.4, 置信度 95%) (Zhou *et al.*, 2019), 但该测试 ES-1 样品有效加权评价年龄是从 7 颗锆石中选出 4 颗锆石计算获得, 其年代学数据的代表性随数据增多或可进一步提升。其次测年所用火山灰样品来自峨山剖面, 该处南沱组到陡山沱组过渡部分并不发育盖帽白云岩, 也无灰岩或白云岩透镜体。从目前看, 扬子西南缘滇中地区陡山沱组底部盖帽白云岩不发育, 虽个别剖面冰碛岩之上红层中有灰岩透镜体 (Zhou *et al.*, 2019; 周传明等, 2021), 但是否是盖帽白云岩有待深入研究。实际上, 在冰后期沉积岩中夹有一些灰岩或白云岩透镜体并不少见, 全球多个地区的 Marinoan 冰期冰碛岩有此报道 (Condon *et al.*, 2002; Xiao *et al.*, 2004; Fairchild *et al.*, 2016; Bai *et al.*, 2020)。在云南宜良禄丰村剖面红层底部夹 1 层 50 cm 厚的黄灰色泥质白云岩 (杨暹和陈远德, 1981; 江卓斐, 2016)。Bai 等 (2020) 报道了神农架南沱组中部红色沉积物包括分层的碎屑岩、层状的粉砂岩和黏土岩, 甚至还有碳酸盐岩, 并研究其地球化学指标反映了其形成于温暖且风化强度较高的环境,

为马里诺冰期的部分退冰提供了新的线索。因此可以合理推断云南地区这些碳酸盐岩夹层也可能是 Marinoan 期沉积物组成部分, 并被作为冰盖被打开的证据。作者虽仅从碎屑锆石测年结果得到该红层沉积时限可能晚于 636 Ma, 但不能排除其沉积于南沱期 (成冰纪末期) 的可能性。

5.1.3 区域对比

新元古代沉积期, 在 Rodinia 超大陆裂解背景下, 滇中地区形成了夹持于西侧康滇古陆、东北侧川中古陆和东侧黔桂古陆的南北向裂谷盆地 (杨暹和陈远德, 1981; 刘鸿允, 1991; Zhu *et al.*, 2007; 崔晓庄等, 2014)。区域对比发现, 其间澄江组砂岩之上到陡山沱组沉积之前, 表现为相同物源控制下的统一沉积盆地连续充填过程 (Zhou *et al.*, 2002; Sun *et al.*, 2009; 江新胜等, 2012; 江卓斐, 2016; 刘石磊等, 2020; Yang *et al.*, 2020; 高永娟等, 2021; 潘江涛等, 2022; 彭杰等, 2023)。但沿建水—峨山—澄江—晋宁—陆良—东川一线, 自下而上, 从澄江组陆相碎屑岩之上, 南沱组块状或层状冰碛杂砾岩及其上覆渐变过渡为紫红色间以绿色的纹层状泥岩—粉砂岩, 虽薄厚不等, 但其岩石组合基本一致, 空间展布十分稳定 (图 8)。而过渡段红层之上, 滇中陡山沱组下部岩性组合变化较大, 在玉溪、石屏、牛头山等地区陡山沱组下部碎屑岩层系中发现海绿石砂岩 (刘鸿允和刘钰, 1963; 杨暹和陈远德, 1981; 刘旭辉, 1998), 并伴之板状交错层理、冲洗交错层理 (刘鸿允和刘钰, 1963; 刘旭辉, 1998), 在澄江、华宁一带, 陡山沱组下部发育薄层泥质灰岩夹泥页岩 (杨暹和陈远德, 1981; 刘旭辉, 1998)。因此滇中陡山沱组下部被认为是由近物源供给的滨岸相向局部陆棚相时空演化沉积 (刘鸿允和刘钰, 1963; 杨暹和陈远德, 1981; 刘旭辉, 1998; Zhu *et al.*, 2007)。由此可见, 从区域对比与沉积充填序列看, 过渡段红层划分到南沱组也更合适一些。

5.2 沉积演化

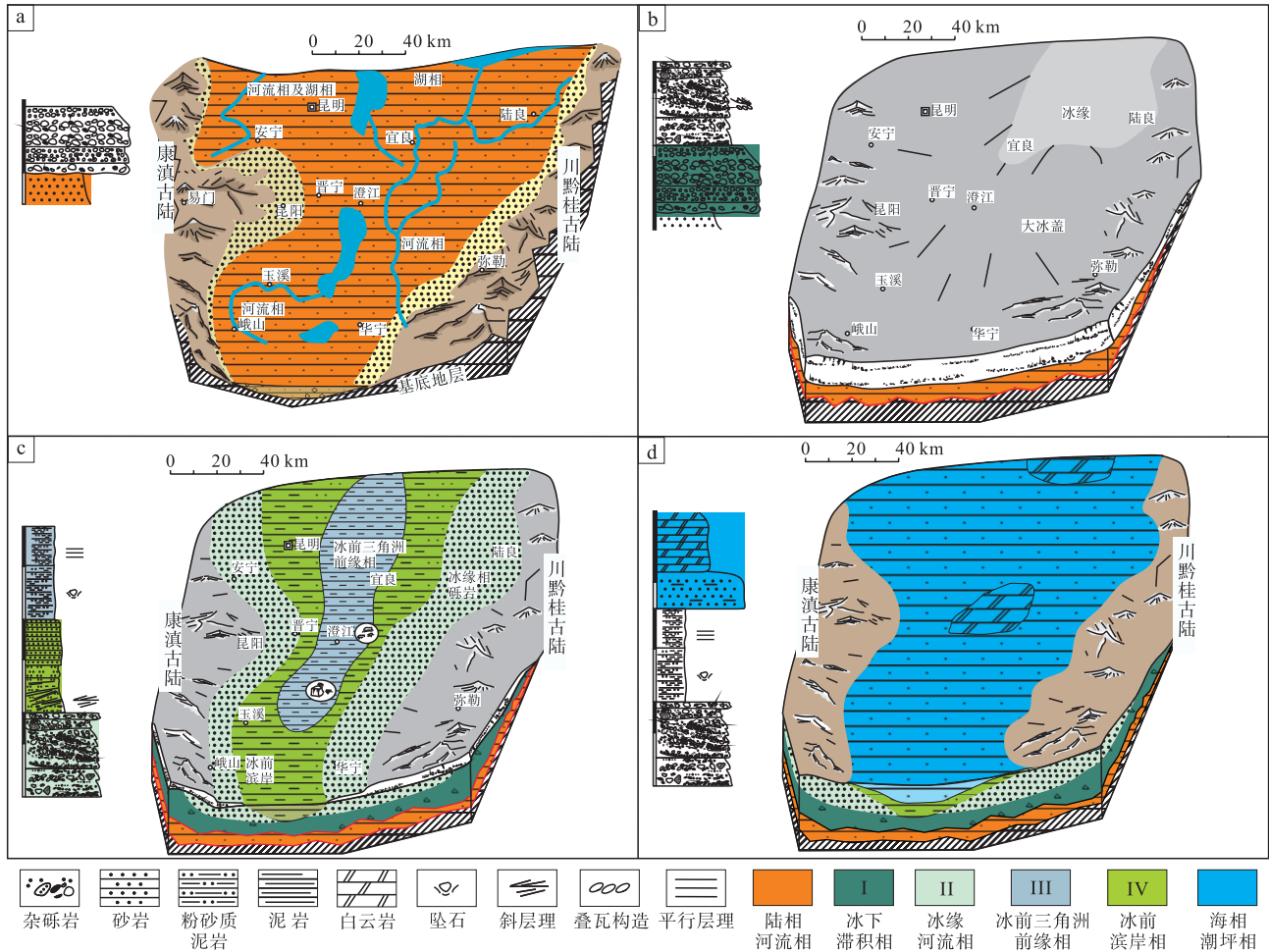
滇中地区受到东西两侧古陆夹持形成了一个南北向裂谷盆地 (杨暹和陈远德, 1981; 刘鸿允, 1991; Zhu *et al.*, 2007), 在成冰纪盆地中充填了大量冰碛岩。滇中地区南沱组厚度变化大, 显示出南西薄, 从中部向北东方向增厚的趋势 (图 8) (曹

仁关等, 1985; 刘鸿允, 1991; 江卓斐等, 2018), 这是区域上沉积相、沉积中心和物源供给方向不同所致。

晋宁运动后扬子西南缘形成了宽广的陆相盆地(刘鸿允和刘钰, 1963; 刘鸿允, 1991)。澄江组沉积晚期(图 9-a), 在东西两侧古陆的持续供源下, 滇中裂谷两侧以河流冲积作用为主, 沉积了澄江组砾岩、粗砂岩, 盆地中心则为细粒湖泊沉积, 到了宜良—陆良一线以北, 河流、洪泛和湖泊作用增强, 从而沉积了牛头山组的薄层泥质细砂岩和砂岩。

南沱组沉积早期(图 9-b), 云南中东部地区冰盖初始消融广泛堆积了南沱组底部冰下滞积亚相的块状砾岩。冰川擦痕、冰溜面以及砾石定向排列等沉积构造指示东西向的冰川运动方向(刘鸿允和刘钰, 1963; 杨暹和陈远德, 1981; 林尧明

等, 1990; 刘鸿允, 1991)。随着云南中东部地区冰盖的进一步消融, 在底部冰下滞积砾岩的基础上继续堆积冰缘融水河流沉积物, 以层状或弱层状砾岩夹砂砾岩透镜体为特征。特别是在鲁纳村剖面这部分砾岩的砾石叠瓦状排列、向上粒度减小, 砾石排列呈大型交错层理状, 夹砂砾岩透镜体, 河流沉积特征明显。在南西处石屏、建水地区该套砾岩仅 1~2 m 厚, 北东部的东川地区甚至缺失该套砾岩, 晋宁地区该套砾岩厚为 8~20 m、澄江地区砾岩厚 8 m、宜良地区砾岩厚 2~5 m, 马龙鲁泽—陆良牛头山地区是南沱组砾岩段最厚的地方, 累计近 177~125 m。陆良砾岩段表现出紫红色显层理的泥砾岩, 发育少量薄层细砂岩或页岩夹层(刘鸿允, 1991; 江卓斐, 2016)。表明沉积盆地在北东、南西两侧古地形相对较高, 来自东西两侧的冰川逐步沿北东方向卸载冰碛物, 并在中部沉降中心(陆



a—澄江组沉积晚期; b—南沱组沉积早期; c—南沱组沉积晚期; d—陡山沱组沉积早期

图 9 滇中成冰系南沱组冰期及其前后沉积演化

Fig. 9 Sedimentary evolution of the Cryogenian Nantuo Formation glacier with before and after period in central Yunnan

良一带) 汇聚, 强烈冰川沉积作用向盆地内填平补齐。

南沱组沉积晚期(图 9-c), 经过大冰盖强烈夷蚀作用、填平补齐后, 随着冰盖的进一步打开, 海水逐步侵入, 冰川相关的碎屑砾石供给逐步减弱。厚度也表现为北东、南西薄, 从中部向北东方向增厚(图 8)。在南西处石屏小老卫寨和建水田房该红层厚 3~10 m, 北东处会泽白屋基红层厚 4.6 m, 东川澜泥坪红层厚 10 m, 多以平行层理、粒序层理、斜层理发育的粉细砂岩滨岸沉积为特征。其中, 石屏、峨山到宜良北部—陆良一带的滨岸沉积相对较厚, 以底部偶见细小漂砾、向上粒度变细的粉细砂岩高频韵律层系组为特征(1:20 万宜良幅)。而在中部晋宁—澄江到陆良北部一带, 晋宁偏头山红层厚 30 m, 澄江飞大田红层厚 50 m, 其中, 陆良—马龙地区红层段以紫红色砂岩、粉砂岩、页岩三者呈略等厚互层发育, 厚近 75 m, 多以紫红色底部含砾、向上偶含坠石或不含砾的泥岩、粉砂岩冰前三角洲前缘沉积为特征。因此, 沉降中心仍在陆良一带, 而沉积物粒度更细的沉积中心则稍微向西南方向迁移, 主要在陆良北部到晋宁—澄江一带。由盆地边缘向盆地中心, 表现出沉积水体逐渐变深, 从滨岸亚相高频韵律细砂岩向冰前三角洲前缘亚相紫红色泥页岩夹粉砂岩过渡(图 9-c)。

直到冰盖/冰川完全消融后, 没有了相应的砾石粒级的物源输入, 由于经过填平补齐, 海水更进一步侵入, 到了陡山沱早期为正常的海相碳酸盐岩—碎屑岩混合沉积。但是陡山沱组沉积早期(图 9-d), 海水深度较浅, 陡山沱组下部以浅海相碎屑岩和潮坪相碳酸盐岩为主, 包括滨岸相石英砂岩和滨外海绿石砂岩, 以及灰岩、泥质白云岩或碎屑灰岩等。滇东的鲁拿寺组、纳章组、川西—川北喇叭岗组、观音崖组等都是类似特征(杨暹和陈远德, 1981; 云南省区域地质志, 1990; 刘鸿允, 1991)。

滇中南沱组的沉积序列典型特征为下部冰川冰下滞砾岩, 向上过渡为冰缘河道砾岩, 再向上为冰前三角洲前缘泥岩和滨岸细砂岩, 表现出逐渐冰川融化、逐步海侵的规律(图 9)。

综上, 沉积特征上 NDT 段红层具有冰川属性特征, 碎屑锆石结果也指示红层形成于成冰纪, 区

域上成冰系南沱组冰川沉积对比关系好, 且与上覆陡山沱组海相砂岩和碳酸盐岩具有明显差异。因此, 建议暂将 NDT 段其划归南沱组, 即将南沱组和陡山沱组界线置于红层顶部。

6 结论

1) 通过对扬子西南缘鲁纳村剖面和飞大田剖面沉积学研究, 发现滇中南沱组下段杂砾岩和上段紫红色泥岩、粉细砂岩发育典型冰川沉积特征。据此划分出陆相、海陆过渡相和海相 3 种冰川类型, 冰下滞砾亚相、冰缘河道亚相、冰前(海陆过渡)三角洲前缘亚相和滨岸亚相 4 种沉积亚相, 反映冰期演化不同阶段。

2) 沉积学、碎屑锆石年代学以及区域对比研究发现 NDT 段红层具有冰川属性特征; 最年轻碎屑锆石结果指示红层不排除形成于成冰纪; 沉积序列与南沱组砾岩段呈向上变细的连续沉积, 区域上对比关系好, 且与上覆陡山沱组海相沉积具有明显差异。因此, 建议暂将 NDT 段划归南沱组, 即将南沱组和陡山沱组界线置于红层顶部。

3) 南沱组沉积时期, 滇中裂谷夹持于康滇古陆与川中—黔桂古陆之间, 为一个南北向裂谷盆地。早期广泛发育冰川冰下滞砾岩, 随着冰盖的融化, 部分区域发育冰缘河道砾岩; 晚期随着冰盖进一步融化打开, 受古地形限制, 不同区域分别发育冰前三角洲前缘泥岩和滨岸细砂岩。整体表现逐渐冰川融化、逐步海侵的规律。

参考文献 (References)

- 蔡耀平. 2011. 陕西宁强埃迪卡拉纪晚期高家山生物群中的 *Conotubus hemiannulatus* 及 *Gaojiashania cyclus*: 化石埋藏学与古生态学. 西北大学博士学位论文: 20-108. [Cai Y P. 2011. Taphonomy and paleoecology of Ediacaran tubular fossil *Conotubus hemiannulatus* and *Gaojiashania cyclus* from the Gaojiashan Lagerstätte in southern Shaanxi Province, South China. Doctoral dissertation of Northwest University: 20-108]
- 曹仁关, 张为鹏, 李季. 1985. 云南东部震旦系的划分与对比. 地层学杂志, (3): 170-179. [Cao R G, Zhang W L, Li J. 1985. Classification and comparison of the Sinian System in Eastern Yunnan. Journal of Stratigraphy, (3): 170-179]
- 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. [Chen J S, Dai Y R, Tang F, Peng C L, Zhang J W, Zhu H S, Chen X, Wang W M, Gong

- G Y. 2020. Discussion on the Mesoproterozoic and Neoproterozoic major tectonic events in marginal area of the Yangtze Block. *Geological Review*, 66(3): 533-554]
- 崔晓庄,江新胜,王剑,卓皆文,熊国庆,陆俊泽,邓奇,伍皓,刘建辉. 2013. 滇中新元古代澄江组层型剖面锆石 U-Pb 年代学及其地质意义. *现代地质*, 27(3): 547-556. [Cui X Z, Jiang X S, Wang J, Zhuo J W, Xiong Q G, Lu J Z, Deng Q, Wu H, Liu J H. 2013. Zircon U-Pb Geochronology for the stratotype section of the Neoproterozoic Chengjiang Formation in central Yunnan and its geological significance. *Geoscience*, 27(3): 547-556]
- 崔晓庄,江新胜,王剑,卓皆文,伍皓,熊庆国,陆俊泽,邓奇,江卓斐. 2014. 滇中新元古代裂谷盆地充填序列及演化模式: 对 Rodinia 超大陆裂解的响应. *沉积学报*, 32(3): 399-409. [Cui X Z, Jiang X S, Wang J, Zhuo J W, Wu H, Xiong Q G, Lu J Z, Deng Q, Jiang Z F. 2014. Filling sequence and evolution model of the Neoproterozoic rift basin in central Yunnan Province, South China; response to the breakup of Rodinia Supercontinent. *Acta Sedimentologica Sinica*, 32(3): 399-409]
- 房瑞森,梁悦,华洪,张志飞. 2021. 埃迪卡拉纪晚期疑难化石 *Shaanxilithes* 在云南会泽朱家箐剖面的首现及其意义. *古生物学报*, 60(1): 25-41. [Fang R S, Liang Y, Hua H, Zhang Z F. 2021. First report of the problematic Ediacaran fossil *Shaanxilithes* from the Jiucheng Member of Zhujiqing Section in Huize, Yunnan Province. *Acta Palaeontologica Sinica*, 60(1): 25-41]
- 高永娟,林仕良,秦雅东,任光明,庞维华,楼雄英. 2021. 扬子陆块西缘云南东川地区澄江组碎屑锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及其对物源和地壳演化的约束. *地质通报*, 40(11): 1943-1956. [Gao Y J, Lin S L, Qin Y D, Ren G M, Pang W H, Lou X Y. 2021. U-Pb age and Hf isotope composition of detrital zircons from the Chengjiang Formation in Dongchuan area, Yunnan Province of the western Yangtze Block and its constraints on provenance and crustal evolution. *Geological Bulletin of China*, 40(11): 1943-1956]
- 侯可军,李延河,田有荣. 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术. *矿床地质*, 28(4): 481-492. [Hou K J, Li Y H, Tian Y Y. 2009. *In situ* U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS. *Mineral Deposits*, 28(4): 481-492]
- 江新胜,王剑,崔晓庄,卓皆文,熊庆国,陆俊泽,刘建辉. 2012. 滇中新元古代澄江组锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究及其地质意义. *中国科学: 地球科学*, 42(10): 1496-1507. [Jiang X S, Wang J, Cui X Z, Zhuo J W, Xiong Q G, Lu J Z, Liu J H. 2012. Zircon SHRIMP U-Pb geochronology of the Neoproterozoic Chengjiang Formation in central Yunnan Province (SW China) and its geological significance. *Science China Earth Sciences*, 42(10): 1496-1507]
- 江卓斐. 2016. 扬子西缘新元古代冰川启动时间、期次及其构造-岩相古地理演化. 中国地质大学(北京)博士学位论文: 1-168. [Jiang Z F. 2016. Onset time and periods of the Neoproterozoic glaciers in western Yangtze Block and the tectonic-lithofacies palaeogeography. Doctoral dissertation of China University of Geosciences (Beijing): 1-168]
- 江卓斐,崔晓庄,伍皓,卓皆文,王剑,熊庆国,陆俊泽,蔡娟娟. 2018. 滇东成冰纪南沱组碎屑锆石 U-Pb 年代学研究及其地质意义. *矿物岩石*, 38(1): 42-54. [Jiang Z F, Cui X Z, Wu H, Zhuo J W, Wang J, Xiong Q G, Lu J Z, Cai J J. 2018. Study of detrital zircon U-Pb age of the Cryogenian Nantuo Formation in eastern Yunnan Province and its geological significance. *Journal of Mineral Petrology*, 38(1): 42-54]
- 旷红伟,柳永清,耿元生,彭楠,王玉冲,陈晓帅,刘燕学,杨锋杰,赵峰华,刘鹏举,杜利林,宋换新,王德海,王昌勇,白华青,东归霖,祁柯宁. 2023. 中国中一新元古代地层研究进展及建议划分,对比方案. *地质学报*, 97(12): 3861-3901. [Kuang H W, Liu Y Q, Geng Y S, Peng N, Wang Y C, Chen X S, Liu Y X, Yang F J, Zhao F H, Liu P J, Du L L, Song H X, Wang D H, Wang C Y, Bai H Q, Dong G L, Qi K N. 2023. Research advances, a subdivision and correlation of the Meso-Neoproterozoic stratigraphy in China. *Acta Geologica Sinica*, 97(12): 3861-3901]
- 林尧明,田化鑫,伦志强. 1990. 云南省区域地质志. 全国地质资料馆: 5-43. [Lin Y M, Tian H X, Lun Z Q. 1990. Regional Geological Records of Yunnan Province. National Geological Data Museum: 5-43]
- 刘鸿允. 1991. 中国晚前寒武纪构造、古地理与沉积演化. *地质科学*, (4): 309-316. [Liu H Y. 1991. Tectonic, paleogeographic, and sedimentary evolution of the Late Precambrian in China. *Cientia Geologica Sinica*, (4): 309-316]
- 刘鸿允,刘钰. 1963. 云南中东部震旦纪地层的组成、划分与发育. *地质学报*, 43(1): 53-80. [Liu H Y, Liu Y. 1963. Succession, classification, and paleogeographic evolution of the Sinian sediments of central eastern Yunnan. *Acta Geologica Sinica*, 43(1): 53-80]
- 刘石磊,崔晓庄,汪长林,任光明,王鹏,彭维华,任飞. 2020. 扬子西缘新元古代中期裂谷作用: 来自年代学与沉积学的新证据. *地球科学*, 45(8): 3082-3093. [Liu S L, Cui X Z, Wang C L, Ren G M, Wang P, Peng W H, Ren F. 2020. New sedimentological and geochronological evidence for Mid-Neoproterozoic rifting in western Yangtze Block, South China. *Earth Science*, 45(8): 3082-3093]
- 刘旭辉. 1998. 玉溪地区震旦系陡山沱组沉积相、地层层序及其控矿意义. *云南地质*, (1): 89-93. [Liu X H. 1998. The sedimentary facies, stratigraphic sequence of Sinian Doushantuo Formation in Yuxi region and their significance in controlling metallogenesis. *Yunnan Geology*, (1): 89-93]
- 潘江涛,吴亮,余莉,李仕忠,胡关云. 2022. 滇东北待补地区碎屑锆石 U-Pb 年龄及其对新元古代康滇裂谷盆地沉积古地理演化的启示. *地质通报*, 41(10): 1745-1756. [Pan J T, Wu L, Yu L, Li S Z, Hu G Y. 2022. U-Pb ages of detrital zircons from Daibu area, northeastern Yunnan Province: the implication Neoproterozoic paleogeographic evolution of the Kangtian rift basin. *Geological Bulletin of China*, 41(10): 1745-1756]
- 彭杰,谢渊,庞维华,任光明,崔晓庄,任飞,陈凤霖,刘星宇. 2023. 扬子西缘新元古代裂谷盆地演化的年代学新证据及其意义. *沉积与特提斯地质*, 43(2): 452-463. [Peng J, Xie Y, Pang W H, Ren G M, Cui X Z, Ren F, Chen F L, Liu X Y. 2023. New zircon U-Pb chronology of the Neoproterozoic rift basin evolution in the west-

- erm Yangtze Block and its geological significance. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 43(2): 452-463]
- 孙娇鹏,陈世悦,彭渊,胡忠亚,庄毓凯,马帅,刘姚. 2014. 全吉地区新元古代滨岸冰川沉积特征及地质意义. *地质学报*, 88(7): 1334-1340. [Sun J P, Chen S Y, Peng Y, Hu Z Y, Zhuang Y K, Ma S, Liu Y. 2014. Sedimentary characteristic of Neoproterozoic glaciomarine in the Quanji area and its geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 88(7): 1334-1340]
- 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): 1-22. [Wang Z J, Wang J, Jiang X S, Sun H Q, Gao T S, Chen J S, Qiu Y S, Du Q D, Deng Q, Yang F. 2015. New progress for the stratigraphic division and correlation of Neoproterozoic in Yangtze Block, South China. *Geological Review*, 61(1): 1-22]
- 王宝琛. 1980. 昆明市晋宁王家湾震旦系剖面兼论云南东部震旦系的划分. *地质论评*, (1): 1-6. [Wang B C. 1980. The Sinian section of Wangjiawan, Jinning, Kunming City, with a discussion on the division of the Sinian system in eastern Yunnan. *Geological Review*, (1): 1-6]
- 王剑. 2000. 华南新元古代裂谷盆地演化: 兼论与 Rodinia 解体的关系. 北京: 地质出版社, 32-45. [Wang J. 2000. Evolution of the Neoproterozoic Rift Basin in South China: A Discussion on Its Relationship with Rodinia Disaggregation. Beijing: Geological Publishing House, 32-45]
- 王曰伦,陆松年,高振家,林蔚兴,马国干. 1980. 中国震旦纪冰川特征、分期及对比. *中国地质科学院天津地质矿产研究所分刊*, 1(1): 1-17. [Wang Y L, Lu S N, Gao Z J, Lin W X, Ma G G. 1980. The features, division and correlation of Sinian glacial deposits in China. *Journal of Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences*, 1(1): 1-17]
- 熊秉信. 1940. 昆明县内古生代下部地層之初步研究. *地质论评*, (Z1): 37-43. [Xiong B X. 1940. Preliminary study on the Lower Paleozoic Strata in Kunming County. *Geological Review*, (Z1): 37-43]
- 杨暹和,陈远德. 1981. 西南地区地层总结《震旦系》. 成都: 地质矿产部成都地质矿产研究所, 18-36. [Yang X H, Chen Y D. 1981. Summary of Stratigraphy in Southwest China, Sinian Series. Chengdu: Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources. Chengdu: Ministry of Geology and Mineral Resources, 18-36]
- 张长俊. 1990. 云南南沱组杂砾岩的成因及沉积相. *成都地质学院学报*, 17(4): 53-60, 138. [Zhang C J. 1990. Sedimentary facies and origin of purplish red diamictites of the Nantuo Formation (Lower Sinian) in Yunnan. *Journal of Chengdu College of Geology*, 17(4): 53-60, 138]
- 张志亮,华洪,张志飞. 2015. 埃迪卡拉纪疑难化石 *Shaanxilithes* 在云南王家湾剖面的发现及地层意义. *古生物学报*, 54(1): 12-28. [Zhang Z L, Hua H, Zhang Z F. 2015. Problematic Ediacaran fossil *Shaanxilithes* from the Jiucheng member of Wangjiawan section in Jinning, Yunnan Province. *Acta Palaeontologica Sinica*, 54(1): 12-28]
- 郑本兴,马正海. 1985. 冰川沉积与非冰川沉积中砾石和碎屑矿物表面的形态特征. *第四纪研究*, (1): 69-72. [Zheng B X, Ma Z H. 1985. Surface morphological characteristics of the gravels and the debris minerals in glacial and non-glacial deposits. *Quaternary Sciences*, (1): 69-72]
- 周传明,袁训来,肖书海,陈哲,华洪. 2019. 中国埃迪卡拉纪综合地层和时间框架. *中国科学: 地球科学*, 49(1): 7-25. [Zhou C M, Yuan X L, Xiao S H, Chen Z, Hua H. 2019. Ediacaran integrative stratigraphy and timescale of China. *Science China Earth Sciences*, 49(1): 7-25]
- 周传明,欧阳晴,王伟,万斌,关成国,陈哲,袁训来. 2021. 中国埃迪卡拉纪岩石地层划分和对比. *地层学杂志*, 45(3): 211-221. [Zhou C M, Ouyang Q, Wang W, Wan B, Guan C G, Chen Z, Yuan X L. 2021. Lithostratigraphic subdivision and correlation of the Ediacaran in China. *Journal of Stratigraphy*, 45(3): 211-221]
- 朱茂炎,李国祥,张俊明, M Steiner, 钱逸, 蒋志文. 2001. 云南东部早寒武世地层学. *古生物学报*, 40(增刊): 4-39. [Zhu M Y, Li G X, Zhang J M, Steiner M, Qian Y, Jiang Z W. 2001. Early Cambrian stratigraphy in eastern Yunnan. *Acta Palaeontologica Sinica*, 40(S): 4-39]
- 朱茂炎,赵方臣,殷宗军,曾晗,李国祥. 2019. 中国的寒武纪大爆发研究: 进展与展望. *中国科学: 地球科学*, 49(10): 1455-1490. [Zhu M Y, Zhao F C, Yin Z J, Zeng H, Li G X. 2019. The Cambrian explosion: advances and perspectives from China. *Science China Earth Sciences*, 49(10): 1455-1490]
- 朱筱敏. 2008. *沉积岩石学*. 北京: 石油工业出版社, 80-87. [Zhu X M. 2008. *Sedimentary Petrology*. Beijing: Petroleum Industry Press, 80-87]
- Bai H Q, Kuang H W, Liu Y Q, Peng N, Chen X S, Wang Y C. 2020. Marinoan-aged red beds at Shennongjia, South China: evidence against global-scale glaciation during the Cryogenian. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 559: 109967.
- Condon D, Zhu M Y, Bowring S, Wang W, Yang A H, Jin Y G. 2005. U-Pb ages from the Neoproterozoic Doushantuo Formation, China. *Science*, 308: 95-98.
- Condon D J, Prave A R, Benn D I. 2002. Neoproterozoic glacial-rainout intervals: observations and implications. *Geology*, 30(1): 35-38.
- Eyles N. 1993. Earth's glacial record and its tectonic setting. *Earth-Science Reviews*, 35(1-2): 1-248.
- Fairchild I J, Bonnand P, Davies T, Fleming E J, Grassineau N, Halverson G P, Hambrey M J, McMillan E M, McKay E, Parkinson I J, Stevenson C T E. 2016. The Late Cryogenian warm interval, NE Svalbard: chemostratigraphy and genesis. *Precambrian Research*, 281: 128-154.
- Gehrels G E, Dickinson W R, Ross G M, Ross G M, Stewart J H, Howell D G. 1995. Detrital zircon reference for Cambrian to Triassic miogeoclinal strata of western North America. *Geology*, 23(9): 831-834.
- Hoffman P F, Schrag D P. 2002. The snowball Earth hypothesis: testing

- the limits of global change. *Terra Nova*, 14: 129–155.
- Hoffman P F, Li Z X. 2009. A palaeogeographic context for Neoproterozoic glaciation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 277(3–4): 158–172.
- Hoffman P F, Kaufman A J, Halverson G P, Schrag D P. 1998. A Neoproterozoic Snowball Earth. *Science*, 281: 1342–1346.
- Kennedy M J, Runneger B, Prave A R, Hoffmann K H, Arthur M A. 1997. Two or four Neoproterozoic glaciations? *Geology*, 26: 1059–1063.
- Hoffman K H, Condon D J, Bowring S A, Crowley J L. 2004. U-Pb zircon date from the Neoproterozoic Ghaub Formation, Namibia: constraints on Marinoan glaciation. *Geology*, 32(9): 817–820.
- Kuang H W, Liu Y Q, Peng N, Vandyk T M, Le Heron D P, Zhu Z C, Bai H Q, Wang Y C, Wang Z X, Zhong Q, Chen J X, Yu H L, Chen X S, Song C G, Qi K N. 2022. Ediacaran cap dolomite of Shennongjia, northern Yangtze Craton, South China. *Precambrian Research*, 368: 106483.
- Le Heron D P, Craig J, Etienne J L. 2009. Ancient glaciations and hydrocarbon accumulations in North Africa and the Middle East. *Earth-Science Reviews*, 93: 47–76.
- Li S Z, Li X Y, Wang G Z, Liu Y M, Wang Z C, Wang T S, Gao X Z, Guo X Y, Somerville I, Li Y, Zhou J, Dai L M, Jiang S H, Zhao H, Wang Y, Wang G, Yu S. 2019. Global Meso-Neoproterozoic plate reconstruction and formation mechanism for Precambrian basins: constraints from three cratons in China. *Earth-Science Reviews*, 198: 102946.
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, Gao C G, Zong K Q, Wang D B. 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen; U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths. *Journal of Petrology*, 51: 537–571.
- Misch P. 1942. Sinian stratigraphy of central eastern Yunnan. National University of Peking, College of Science. Contributions, No. 4.
- Prothero D R, Schwab F L. 2013. *Sedimentary Geology: An Introduction to Sedimentary Rocks and Stratigraphy*. New York: W. H. Freeman and Company, 160–168.
- Sláma J, Kosler J, Condon D J, Crowley J L, Gerdes A, Hancher 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: 1–35.
- Steiner M. 1994. Die Neoproterozoischen Megaalgen Sud Chinas. *Berliner Geowissenschaftliche Abhandlungen (E)*. Selbstverlag Fachbereich Geowissenschaften, FU Berlin Druck: 1–146.
- Sun W H, Zhou M F, Gao J F, Yang Y H, Zhao X F, Zhao J H. 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(1–2): 99–126.
- Wang H, Wu W H, Liu S G, Zhang X H, Song J M, Li S J, Ran B, Wang Z J, Han Y Y, Wang W D, Wang Z, Li Z W. 2020. Initial separation of the South Qinling Terrane from the Yangtze Block during the Ediacaran: insights from sequence correlation and zircon Hf isotope of tuff. *Marine and Petroleum Geology*, 122: 104613.
- Wang J, Li Z X. 2001. Sequence stratigraphy and evolution of the Neoproterozoic marginal basins along southeastern Yangtze, south China. *Gondwana Research*, 4(1): 17–26.
- Xiao S H, Bao H M, Wang H F, Kaufman A J, Zhou C M, Li G X, Yuan X L, Ling H F. 2004. The Neoproterozoic Quruqtagh Group in eastern Chinese Tianshan; evidence for a post-Marinoan glaciation. *Precambrian Research*, 130: 1–26.
- Xing L C, Luo T Y, Huang Z L, Qian Z K, Zhou M Z, He H T. 2018. U-Pb zircon age of the base of the Ediacaran System at the southern margin of the Qinling Orogen. *Acta Geochimica*, 37(3): 414–421.
- Yang C, Li X H, Zhu M Y, Condon D J. 2017. SIMS U-Pb zircon geochronological constraints on upper Ediacaran stratigraphic correlations, South China. *Geological Magazine*, 154(6): 1202–1216.
- Yang C, Li X H, Li Z X, Zhu M Y, Lu K. 2020. Provenance evolution of age calibrated strata reveals when and how South China Block collided with Gondwana. *Geophysical Research Letters*, 47(19): e2020GL090282, 1–9.
- Yin C Y, Tang F, Liu Y Q, Gao L Z, Liu P J, Xing Y S, Yang Z Q, Wan Y S, Wang Z Q. 2005. U-Pb zircon age from the base of the Ediacaran Doushantuo Formation in the Yangtze Gorges, South China: constraint on the age of Marinoan glaciation. *Episodes*, 28(1): 48–49.
- Zhang S H, Jiang G Q, Zhang J M, Song B, Kennedy M J, Christie-Blick N. 2005. U-Pb sensitive high-resolution ion microprobe ages from the Doushantuo Formation in south China: constraints on late Neoproterozoic glaciations. *Geology*, 33(6): 473–476.
- Zhao G C, Guo J H. 2012. Precambrian geology of China. *Precambrian Research*, 222–223: 1–12.
- Zhou C M, Huyskens M H, Lang X G, Xiao S H, Yin Q Z. 2019. Calibrating the terminations of Cryogenian global glaciations. *Geology*, 251: 251–254.
- Zhou M F, Yan D P, Kennedy A K, Li Y Q, Ding J. 2002. SHRIMP U-Pb zircon geochronological and geochemical evidence for Neoproterozoic arc-magmatism along the western margin of the Yangtze Block, South China. *Earth and Planetary Science Letters*, 196: 51–67.
- Zhu M Y, Zhang J M, Yang A H. 2007. Integrated Ediacaran (Sinian) chronostratigraphy of South China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 254(1): 7–61.

(责任编辑 郑秀娟; 英文审校 陈吉涛)