

山东蒙山九龙潭冰川堆积“垄槽序列”的特征及演化过程研究——兼论冰川、泥石流堆积序列的差异性

王照波^{1,2,3}, 王江月⁴, 何乐龙⁵, 张 剑⁵, 赵向阳⁶, 李宝杰³

WANG Zhaobo^{1,2,3}, WANG Jiangyue⁴, HE Lelong⁵, ZHANG Jian⁵, ZHAO Xiangyang⁶, LI Baojie³

1. 自然资源部金矿成矿过程与资源利用重点实验室, 山东 济南 250013;

2. 沂蒙山世界地质公园管理局, 山东 平邑 273304;

3. 山东指南针矿产勘查有限公司, 山东 临沂 276006;

4. 曲阜师范大学地理与旅游学院, 山东 日照 276800;

5. 青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266071;

6. 平邑县自然资源和规划局, 山东 平邑 273304

1. *Key Laboratory of Gold Mineralization Process and Resource Utilization, Ministry of Land and Resources, Ji'nan 250013, Shandong, China;*

2. *Yimengshan Mountain UNESCO Global Geopark Management Office, Pingyi 273304, Shandong, China;*

3. *Shandong Compass Mineral Exploration Co., Ltd, Linyi 276006, Shandong, China;*

4. *College of Geography and Travel, Normal University of Qufu, Rizhao 276800, Shandong, China;*

5. *Qingdao Institute of Marine Geology-QIMG, Qingdao 266071, Shandong, China;*

6. *Pingyi Natural Resources and Planning Bureau, Pingyi 273304, Shandong, China*

WANG Z B, WANG J Y, HE L L, et al., 2021. Characteristics and evolution process of the ridge-groove sequence of the Jiulongtan glacial accumulation in Mengshan, Shandong: with the discussion on the difference of accumulation sequence of glacier and debris flow [J]. Journal of Geomechanics, 27 (1): 105-116. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.01.011

Abstract: The existence of Quaternary glaciers in the medium-low mountainous areas in the east of China has been disputed for a century. As an important evidence for glacial accumulation in the east, “mud-gravel” (moraine) has long been referred to as debris flow sediments by those who hold a non-glacial view. However, due to the essential difference of the accumulation process between glacier and debris flow, it would inevitably show specific differences in the characteristics of the accumulation body. Therefore, in the cause analysis of moraine and restoration of moraine accumulation process, it is of great significance to identifying and summarizing the specific differences between glacier and debris flow in accumulation characteristics and accumulation process. Based on the comparative analysis, it reveals that, the glacial moraine forms a specific ridge-groove sequence on the plane, and on the section it shows a state of unstratified and mixed accumulation; Debris flow forms an accumulation fan. The fan surface presents a radial ridge accumulation, and the section shows a prosodic sequence. This is what distinguishes glacier from debris flow deposit. On this basis, the diamictons in the Jiulongtan area were investigated and reconstructed. It is found that they have the typical ridge-groove sequence of glacial origin, and meanwhile they present a state of unstratified and mixed accumulation on the section, which proves they are the results of

基金项目: 自然资源部金矿成矿过程与资源利用重点实验室开放课题 (201403); 山东指南针矿产勘查有限公司“东亚冷槽追索计划”项目 (20180101)

第一作者简介: 王照波 (1971-), 男, 高级工程师, 从事地质矿产勘查与第四纪地质研究。E-mail: 13805498543@163.com

收稿日期: 2020-05-04; **修回日期:** 2020-11-12; **责任编辑:** 吴芳

引用格式: 王照波, 王江月, 何乐龙, 等, 2021. 山东蒙山九龙潭冰川堆积“垄槽序列”的特征及演化过程研究: 兼论冰川、泥石流堆积序列的差异性 [J]. 地质力学学报, 27 (1): 105-116. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.01.011

Quaternary glaciation. The ridge-groove sequence is not only the specific feature to judge whether the diamictons are the results of glaciation, but also the theoretical basis to restore the basic geomorphological features and accumulation process of moraine deposits.

Key words: moraine ridge; edge groove; ridge-groove sequence; diamicton; debris flow

摘要: 中国东部中低山区是否存在第四纪冰川已经争议了一个世纪, 作为东部地区冰川堆积重要依据的“泥砾”(冰碛), 一直被持非冰川观点者称作是泥石流沉积物。但是, 由于冰川与泥石流的堆积过程之间存在本质差别, 这必然在堆积体的特征上表现出专属性差异。因此建立冰川与泥石流在堆积特征与堆积过程上的专属性差异, 在冰碛物的成因分析、冰碛堆积过程恢复上就有着重要意义。文章在对比分析了冰川堆积与泥石流堆积的过程差异的基础上, 发现两类堆积体在平面与剖面上都存在明确的专属性差别。冰川冰碛在平面上形成专属性的垄槽序列, 剖面上显示为无层理、混杂堆积状态。泥石流形成堆积扇, 扇面上呈放射状垄岗堆积, 剖面上表现为韵律序列。这是区别冰川与泥石流堆积体的本质所在。在此基础上, 对蒙山九龙潭一带混杂堆积体进行调查与恢复, 发现其具有典型的冰川成因垄槽序列特征, 结合其剖面上表现为无层理、混杂堆积特征, 从沉积序列与沉积过程的角度, 佐证了蒙山九龙潭混杂堆积为第四纪冰川作用的事实。垄槽序列既是堆积体是否为冰川作用属性判断的专属性特征, 也是恢复冰碛堆积体基本地貌特征与堆积过程的理论基础。

关键词: 冰碛垄; 边槽; 垄槽序列; 混杂堆积; 泥石流

中图分类号: P534.63 **文献标识码:** A

0 引言

在中国东部中低山区是否存在第四纪冰川的争论中, 李四光先生研究提出的庐山第四纪冰川的核心证据——混杂堆积(冰碛泥砾), 遂成了近百年来争论的核心焦点(Lee, 1933; 李四光, 1947, 1975), 持非冰川观点者将其论述为泥石流堆积物(施雅风, 1982; 施雅风和邓养鑫, 1982; 姚檀栋和李吉均, 1982; 爱·德比希尔等, 1982; 谢又予和崔之久, 1983; 邓养鑫, 1983; 陈怀录和艾南山, 1983; 何兴, 1983; 崔之久和谢又予, 1984; 张林源和牟昀智, 1984; 邓晓峰, 1984; 王汉存和张林源, 1984, 1986; 唐永仪, 1987; 朱诚等, 1996), 其中, 施雅风(2010)则直言:“论李四光教授的庐山第四纪冰川是对泥石流的误读”。尽管也有研究者对庐山混杂堆积的冰川成因进行了进一步的研究与肯定(景才瑞, 1981; 曹照垣, 1989; 彭汉兴, 1990; 段万倜和何培元, 1990; 潘建英, 1990; 田国强和刘莉, 1991; 刘宗秀等, 2007; 杨明桂和马振兴, 2019), 但各执一词。此后, 持泥石流观点者进一步断定, 中国东部2500~3000 m海拔之下的中低山区都不曾发生过第四纪冰川作用(施雅风等, 1989; 施雅风, 2006)。近些年有学者在蒙山发现了类型丰富、特

征清晰的全新世冰川遗迹(王照波等, 2017a, 2017b; 王照波和王江月, 2019a, 2019b), 并建立了以测年数据为基础的冰期序列与沉积格架(王照波等, 2019; Wang et al, 2020), 以“东亚冷槽”为基础的区域气候演化背景(王照波和王江月, 2017c)、以“冰斗系统”、“三角脊链”为基础的冰蚀地貌演化理论(王照波等, 2018a, 2020a, 2020b)等多角度论证了中国东部广泛存在第四纪冰川遗迹, 同样受到泥石流观点持有者的质疑, 如王乃昂等(2017)表示蒙山冰川研究属于“徒增混乱”。赵井东等(2019)则言:“某些学者主观臆断为主”“其中不乏有些学者缺少对科学的敬畏, 其‘研究’是为了满足地方旅游资源开发的需要, 有被行政管理等职能部门绑架的嫌疑, 甚至沦为商业炒作的噱头”。李吉均和周尚哲(2018)则强调:“山东一带发现的很难站得住脚的所谓‘第四纪冰川遗迹’”。最近, 王乃昂等(2020)又明确指出蒙山所谓的冰川遗迹属于泥石流成因。

虽然许多学者从多方面证明中国东部中低山区存在第四纪冰川作用, 如冰川擦痕、混杂堆积物的特征(Lee, 1922; 孙殿卿等, 1977)、冰蚀地貌(王曰伦和贾兰坡, 1952; 严钦尚, 1952; 周慕林和潘建英, 1982)、冰碛石英颗粒的表面特征(王克钧等, 1989; 吴锡浩等, 1997)、生物化石(孙建中等, 1985)、砾石的声发射应力测量(赵

志中等, 2000) 等, 但持泥石流观点者对这些研究成果均不予认可。

冰川与泥石流堆积之间, 是否存在不易混淆、不易纠缠的专属性特征呢? 冰川堆积毕竟不同于泥石流堆积, 其堆积过程存在着天壤之别, 只有深刻理解冰川与泥石流的堆积过程, 采用堆积过程中形成的规模性、易识别的专属性特征作为依据, 才能避免长期以来在东部中低山区冰川遗迹研究过程中产生的纠缠不清, 各执一辞的问题。冰川遗迹中最关键的核心证据——冰碛垄与边槽共同组合而成的“垄槽序列”, 在中国东部中低山区以往的古冰川研究中一直未能得到很好的恢复重建进而形成研究成果, 这不能不说是中国东部第四纪冰川研究工作中的短板。究其原因, 作为冰川作用标志性遗迹的“垄槽序列”, 其形成条件会受雪线高程、堆积场地、物源多寡等诸多因素的制约而发育程度良莠不齐, 加之东部地区在经历冰期-间冰期循环过程中有着更长的间冰期, 间冰期中汇水面积较大的冰斗系统容易聚集大量的洪水对冰碛垄产生改造与破坏, 再加上时代久远、树林覆盖、垦荒耕种、建筑施工等诸多因素的影响, 使冰碛垄的特征发生改变或遮盖, 为辨识带来困难, 从而使得“垄槽序列”研究迟滞于其他冰川遗迹的研究。基于此, 文章从冰碛与泥石流堆积特征、堆积过程入手, 以遥感解译与资料分析相结合, 从堆积体的平面、剖面上总结建立易识别的专属性特征, 在此基础上, 对蒙山九龙潭混杂堆积进行了调查研究, 恢复其展布特征, 还原堆积演化过程, 进而辨别其成因。

1 冰川与泥石流堆积特征及堆积过程的差异性

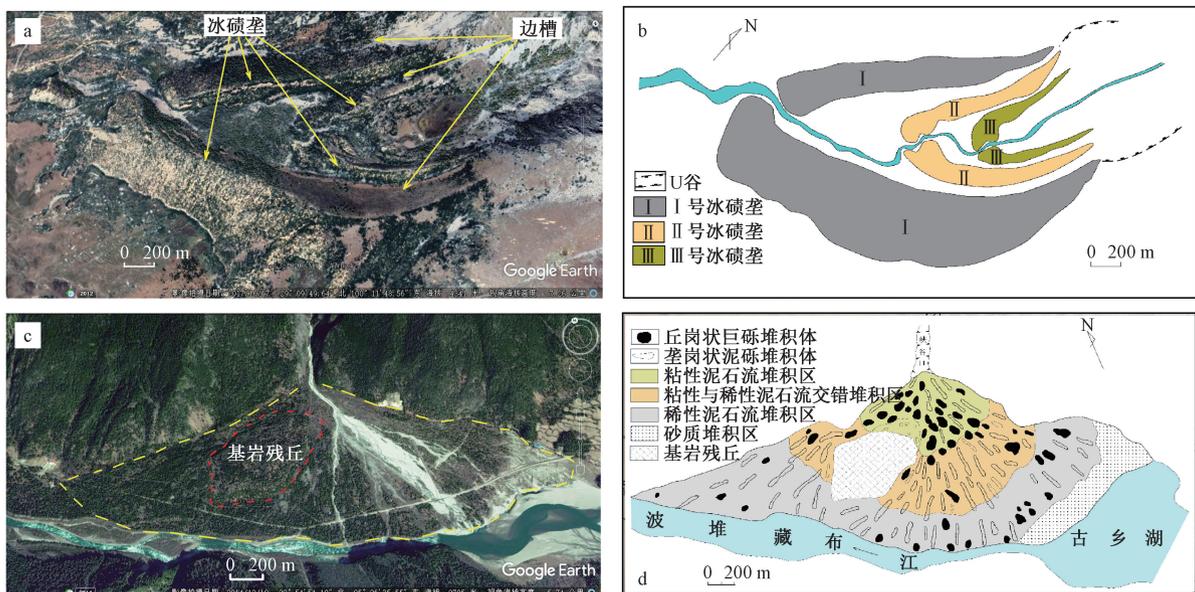
对于冰川与泥石流堆积物, 其在多方面都存在差别, 如平面堆积特征、剖面堆积特征、砾石组构及表面擦痕、石英砂颗粒表面的刻痕特征、颗粒的含量的累积曲线等, 但在东部冰川实际研究中, 研究者对擦痕、冰碛颗粒组成等进行了较多的研究, 却对于宏观的平面与剖面堆积形态较少关注。研究发现, 冰川、泥石流堆积过程中在平面与剖面上都形成了易于分辨识别的专属性地质特征。此次研究选取了四川稻城雄古冰川堆积体与西藏波密古乡泥石流堆积体进行对比分析

(王照波等, 2020c)。

1.1 平面堆积差异特征

位于四川稻城的雄古冰川 ($29^{\circ}08'45''N$; $100^{\circ}11'29''E$), 很好保留了冰碛垄系统, 堆积过程明显。雄古冰碛堆积体平面呈舌状, 由多列冰碛垄构成, 其中有三列非常清晰 (图 1), 分别为 I 号冰碛垄、II 号冰碛垄与 III 号冰碛垄, 在冰碛垄的外侧及两列冰碛垄之间保留了明显的边槽 (图 1a)。其中 I 号冰碛垄的形成时间为 39.2 ± 3.8 ka (TCN), II 号冰碛垄的形成时间为 25.7 ± 2.4 ka (TCN), III 号冰碛垄的形成时间为 16.6 ± 1.5 ka (TCN) (张志刚, 2015), 冰碛垄对称分布, 中间为冰川消融后遗留的内槽。外侧冰碛垄的形成时间早于内侧 (图 1b)。冰川堆积的冰碛垄与边槽间隔出现, 并按照由外到内、由老到新的顺序间隔排列构成序列, 文中称之为垄槽序列。垄槽序列是冰川堆积的基本形式, 反映了冰川堆积的过程, 属于冰川堆积作用的专属性特征, 且具有规模性、易识别性的特点。古冰川研究对冰川堆积垄槽序列进行恢复, 非常重要。张佳佳等 (2018) 对于藏东南嘎龙曲冰川泥石流的物源研究中, 嘎龙拉隧道西 (M02) 冰碛垄则表现出典型的垄槽序列特征。

泥石流堆积在西部山区极为发育, 位于西藏波密的古乡泥石流扇 ($29^{\circ}54'54''N$; $95^{\circ}26'35''E$), 则是中国重点进行观测与研究的对象。整个泥石流堆积体呈现出规则的扇形 (图 1c), 据杜榕桓等 (1985) 研究, 以山谷出口位置为中心, 呈规则的扇形特征展布, 故泥石流堆积体通常被称为泥石流扇。从扇面的形态与物质组成看, 古乡泥石流扇大致分成 3~4 个不同的堆积区段 (图 1d), 距出口 600~700 m 的范围内, 是以粘性泥石流“龙头”为主的堆积区, 一道道的巨砾垄岗呈放射状散布, 扇面地形起伏最大。在垄岗之间是泥石流和洪水冲蚀而成的沟槽。直径大于 5 m 的巨大砾石主要集中在该区, 但仍以粒径 50~150 cm 的砾石为主, 扇面坡度在 8° ~ 10° 之间, 斜坡呈向上凸起的曲线。距离出口 600~1300 m, 属于粘性泥石流与稀性泥石流交错堆积的过渡区段, 这里“龙头”巨砾堆积显著减少, 而以狭长的带状砾石垄占优势, 泥砾垄呈放射状展布, 其间分布着洪水冲刷形成的深沟槽。扇面坡度逐渐减缓为 5° ~ 7° 之间, 斜坡呈下凹的曲线, 扇面物质以粒径 50~100 cm



a—雄古冰川垄槽序列卫星图片；b—雄古冰川垄槽序列平面分布图；c—古乡泥石流扇卫星图片；d—古乡泥石流扇物质组成平面分布图（杜榕桓等，1985）

图1 雄古冰川垄槽序列与古乡泥石流堆积扇特征

Fig. 1 Ridge-groove sequence of the Xionggu Glacier and characteristics of the debris flow accumulation fan in Guxiang

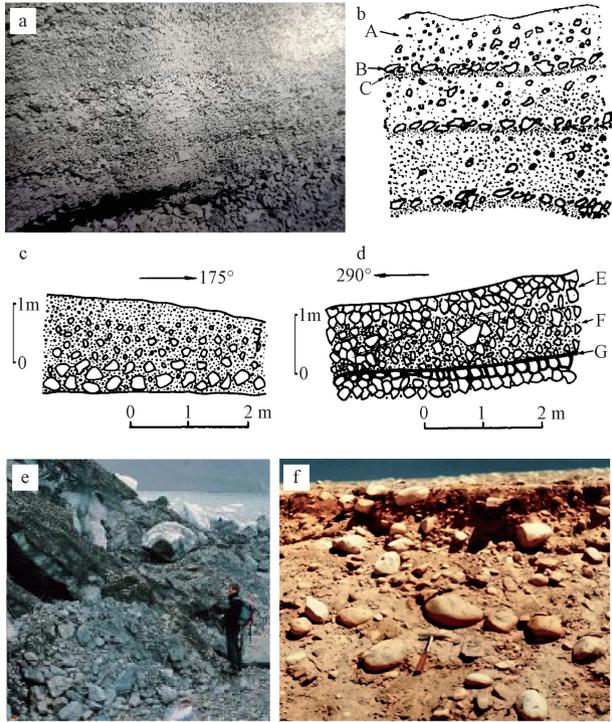
的石块占优势，仅有少量3~5 m或更大的巨砾散布其上。距出口1200~1700 m，属于稀性泥石流为主的堆积区，狭长的泥砾垄与垄岗状“龙头”堆积体在这个区段比较少见，而以粒径小于50 cm的石块与砂质物质占优势，扇面坡度进一步减缓为 $3^{\circ}\sim 4^{\circ}$ 左右，斜坡呈微斜的直线。该区段边缘地带仅有少量泥石流“龙头”堆积和巨砾。在堆积扇的边缘，则为大片的砂质平地（杜榕桓等，1985）。泥石流扇上的物质按照粒径大小以出口为起点呈现出明显的带状分布，同时扇体上的垄岗与沟槽表现出以出口为起点呈典型的放射状排列特征，这些特征都与泥石流的流体运输、动能有关。

1.2 剖面堆积差异特征

泥石流堆积是由无数阵次的小规模股状流叠加而成，因此在泥石流的剖面上会反映出阵次与阵次之间的韵律序列（图2a；杜榕桓等，1987）。泥石流堆积物被石线分割成明显的层次，但在层内表现为砾石大小不一，杂乱无章的混合堆积，显示出“有层无理”的特征（图2b；熊黑刚，1983）。在泥石流堆积层的底部往往形成薄薄的一层“底泥层”，向上逐渐过渡为泥石流混杂堆积层与表砾层，三层多次重复，形成泥石流堆积的阵次韵律层。天山奎屯河源公路边（K84）的泥石流剖面厚达12 m，可大体划分出9层，层厚最大可

达3 m，最小仅为0.3 m，每一层代表一次泥石流堆积，如图2c、2d（邓养鑫，1995）。底泥层的形成是由于泥石流爆发之前，其前缘富含泥沙的水流首先在前期泥石流堆积（多为流水冲洗的表砾层）顶部涂上一层泥浆体有关。关于泥石流扇的堆积过程，李泳等（2003）对云南东川蒋家沟泥石流进行野外观察与试验研究表明，泥石流的堆积过程是经过无数次阵流随机的“元堆积”叠加而成。张金山等（2010）研究后提出，泥石流首先堆积位置与周围地形高差逐渐增大，使后期泥石流“龙头”受阻而寻找新的突破口向两侧低洼处改道，在新的位置堆积，经多次“改道—堆积—再改道—再堆积”的过程，最终形成扇形堆积体（张金山等，2010）。这些研究与王文睿等（1985）进行的统计相吻合，1954年5~8月份古乡沟泥石流共爆发38次，1963年爆发70多次，1964年爆发85次。

山麓或山谷冰川的冰碛垄堆积过程是冰川携带的巨石、砾石与沙土等物质，伴随冰川融化析出而在冰川边缘随机掉落堆积而成，美国南乔治亚州诺登斯克冰川中融出的泥沙、砾石在冰川边缘地带正在形成的冰碛混杂堆积体图（图2e；Benn and Evans, 2010）则清楚的反映了这一堆积过程。由于冰川堆积过程中没有流水作用进行粒



a—云南小江粘-稀性泥石流堆积剖面照片 (杜榕恒等, 1987); b—泥石流堆积体剖面韵律素描图 (A 为砂、砾石、粘土的混合层; B 为大砾石组成的石线; C 为清砂或粘土层, 最厚仅十几厘米; 熊黑钢, 1983); c—新疆奎屯河源稀性泥石流显示的粒序垂向变化 (邓养鑫, 1995); d—新疆奎屯河源粘性泥石流剖面 (E 为表砾层; F 为主流层; G 为底泥层; 邓养鑫, 1995); e—美国南乔治亚州诺登斯克冰川中融出的泥沙、砾石在冰川边缘地带正在形成冰碛混杂堆积体 (Benn and Evans, 2010); f—喜马拉雅山北麓聂聂雄拉冰期命名地的冰碛混杂堆积剖面

图 2 泥石流与冰碛堆积体的剖面特征

Fig. 2 Sectional characteristics of the debris flows and moraine deposits

级上的分选, 因此冰碛剖面上会显示出无明显层理、砾石大小混杂、砾石表面多发育擦痕等特征。据邓养鑫 (1995) 研究, 在天山奎屯河源公路 (K85 处) 东侧沟内, 存在厚达 25 m 的新冰期冰碛堆积剖面, 剖面上丝毫没有任何层次显示。这种特征在天山博格达峰、托木尔峰、喜马拉雅山、昆仑山等地的新老冰碛中也广泛存在。喜马拉雅山北麓聂聂雄拉冰期命名地的冰碛剖面 (图 2f), 由混杂堆积构成, 表现出无层理、混杂堆积的特征。尽管冰碛堆积类型还存在其他一些如冰下碛等, 但作为发育最广、最常见的侧碛垄、终碛垄, 可以用无层理、混杂堆积来概述其核心特征。

从上述对比分析可知, 山谷冰川或山麓冰川堆积体为多期次的冰碛垄套合形成的舌状体, 冰碛垄由外到内表现为由老到新, 冰碛垄与边槽形

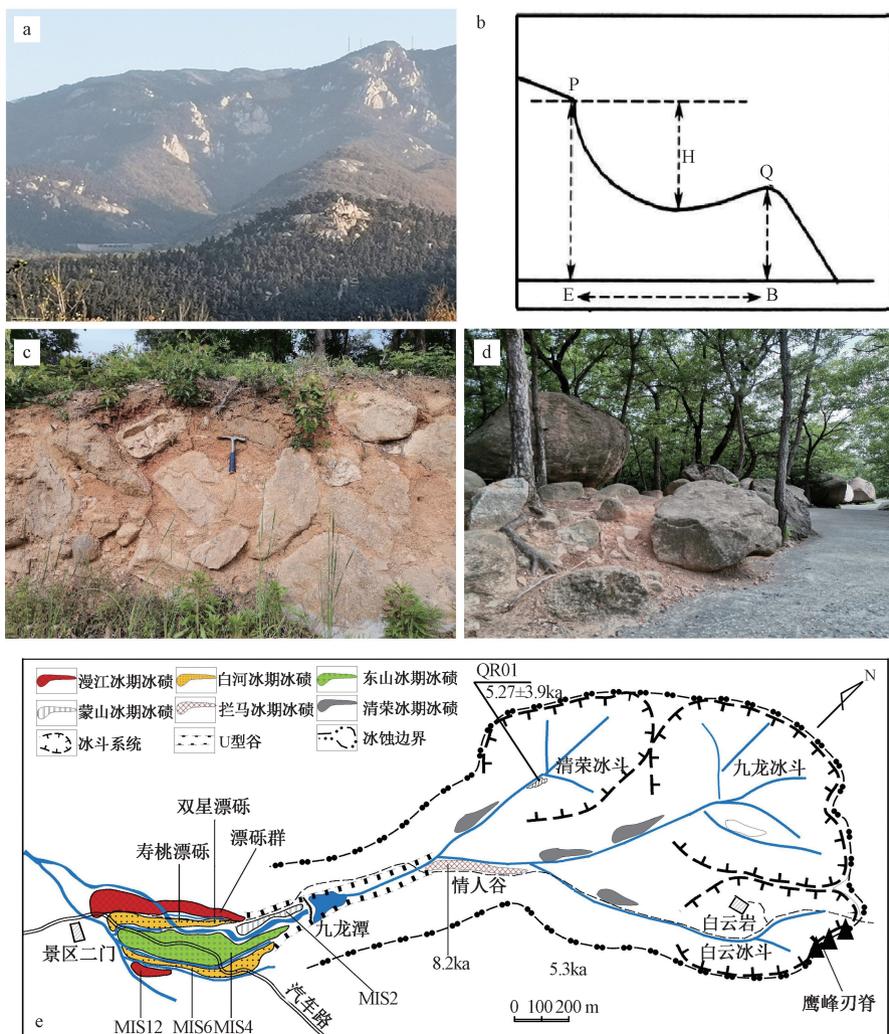
成特有的垄槽序列, 冰碛堆积时, 地势低洼一侧形成冰碛垄的规模往往大于地势较高一侧。泥石流堆积平面上显示为泥石流扇, 扇面物质距出口远近具有粒度分选, 并呈典型的放射状; 剖面上显示, 泥石流在层内也存在混杂堆积的特点, 但是仅限于层内, 阵次与阵次之间则形成韵律序列, 这种韵律序列在冰碛堆积剖面中毫无显示, 冰碛堆积表现为典型的无层理、混杂堆积的特征。这些平面、剖面上的宏观特征, 非常便于野外观察与识别。

冰碛堆积所特有的垄槽序列特征, 也是恢复重建古冰川堆积体的理论依据, 对于发育较好的冰碛垄槽序列, 由于垄槽规模一般较大, 且多含巨石, 而流水本身具有沿袭低洼路径的特点, 顺谷展布的边槽往往会成为流水依赖的路径, 后期洪水很难从根本上摧毁冰碛的垄槽序列, 这些特征都为冰碛垄槽序列的恢复提供了条件。

2 蒙山九龙潭冰碛及垄槽序列特征

蒙山九龙潭上下一带发育有完整的龟蒙冰川系统 (图 3), 源头由三个并排的冰斗系统组成, 由西向东分别为清荣冰斗、九龙冰斗与白云冰斗。清荣冰斗 ($35^{\circ}32'43.79''N$, $117^{\circ}50'15.94''E$), 外形具有典型的冰斗特征 (图 3a)。张威等 (2008) 曾采用 Derbyshire 建立的平坦指数来衡量冰斗的特征, 平坦指数的计算公式为 $F = a/2c$ (图 3b), 其中 a 代表冰斗长度 (图 3b 中 E-B 线段), c 代表冰斗高度 (图 3b 中 H 线段)。真正由冰川塑造的冰斗平坦指数为 1.7~5.0, 雪蚀洼地为 4.25~11 (张威等, 2008)。施雅风 (2010)、姚檀栋和李吉均 (1982) 也曾利用该参数评价庐山大坳冰斗的成因属性。平坦指数 F 值越小, 表示冰斗深度越大, 冰川活动强, 反之, 则冰斗深度小, 冰川活动弱。经计算, 清荣冰斗的平坦指数 $F = a/2c = 735/2(805-608) = 1.87$, 位于 1.7~5.0 之间, 且靠近 1.7, 属于典型冰斗平坦指数的数值范围。

冰斗向下为 U 形谷, U 形谷出口处被后期修建的九龙潭占据。九龙潭之下为垄槽序列分布区, 位于蒙山龟蒙景区二门至九龙潭之间, 由三套冰碛垄及对应的边槽组合而成, 特征明显, 易于识别, 命名为“九龙潭垄槽序列”。经实地调查发现, 九龙潭垄槽序列保存的极为完好 (图 3e, 图 4a、



a—清荣冰斗（下面连接 U 形谷）；b—冰斗平坦指数计算公式（P 为冰斗后缘高程，Q 为冰坎高程，H 冰斗高度，EB 冰斗长度；张威等，2008）；c—混杂堆积冰碛剖面（位于样品 SX01 附近）；d—侧碛垄及表面的漂砾群；e—龟蒙冰川系统分布图（QR01 为宇生核素样品编号）

图 3 蒙山清荣冰川系统与九龙潭垄槽序列分布图

Fig. 3 Distribution diagram of the Qingrong glacier system and the Jiulongtan ridge-groove sequence in Mengshan

4b), 呈对称分布, 在冰碛垄上分布有大量的冰川漂砾, 漂砾集中地段可以形成漂砾群, 个别直径可达 10 m, 漂砾为暗红色二长花岗闪长岩, 周边基底岩性为条带状英云闪长岩, 根据该区岩石分布分析, 漂砾多来源于冰斗分布区 (图 3a 清荣冰斗周边壁上的巨石陡崖即为二长花岗闪长岩分布区)。堆积体表现为典型的无层理、混杂堆积特征 (图 3c、3d, 图 4b、4c, 图 4b 位于样品 GL02 附近), 其中图 4b 冰碛堆积剖面可观察到的厚度可达 5.5 m, 堆积体呈无层理混杂堆积, 顶部为漂砾, 堆积体中没有泥石流特有的“阵次性”韵律层显示。根据垄槽分布特征绘制剖面 (图 4d), 由于植被覆盖, 在航拍图片中可隐约显现垄槽序列特征, 植被茂密者为边槽, 稀疏者为垄岗。垄槽之间高差在 5~10 m 间, 垄槽

展布特征明显 (图 4a)。

3 蒙山九龙潭垄槽序列的形成时间及演化过程

3.1 九龙潭上游全新世冰碛分布特征及形成时间

九龙潭上游各冰斗中分布有棱角状、次棱角状巨砾构成的侧碛垄, 巨石叠置, 空隙发育, 空隙间缺少泥沙质细粒物质。经采集宇生核素测年样品 (QR01, 位置见图 3c), 获得堆积体的堆积年龄为 5.27 ± 0.9 ka (表 1), 并以此在蒙山地区确定了全新世清荣冰期 (王照波等, 2018b; Wang Zhaobo et al, 2020)。情人谷一带, 分布有规模庞大的冰上融出碛侧碛垄, 由巨石叠置而成, 砾石

多呈次棱角状, 巨石间空隙发育, 缺少泥沙质细粒充填, 垄体、砾石特征与拦马墙一致, 根据砾石的分布海拔、表面风化轻微等特征分析, 其形成时间可以与拦马墙侧碛垄进行对比, 分析其形成年龄为距今 8.2 ka 左右的拦马冰期 (王照波等, 2017b; Wang et al., 2020)。在清荣冰碛与拦马冰碛之间, 尚有多列侧碛垄沿山谷分布, 其形成时间应介于清荣冰期与拦马冰期之间。

3.2 九龙潭下游冰碛垄槽序列特征及形成时间

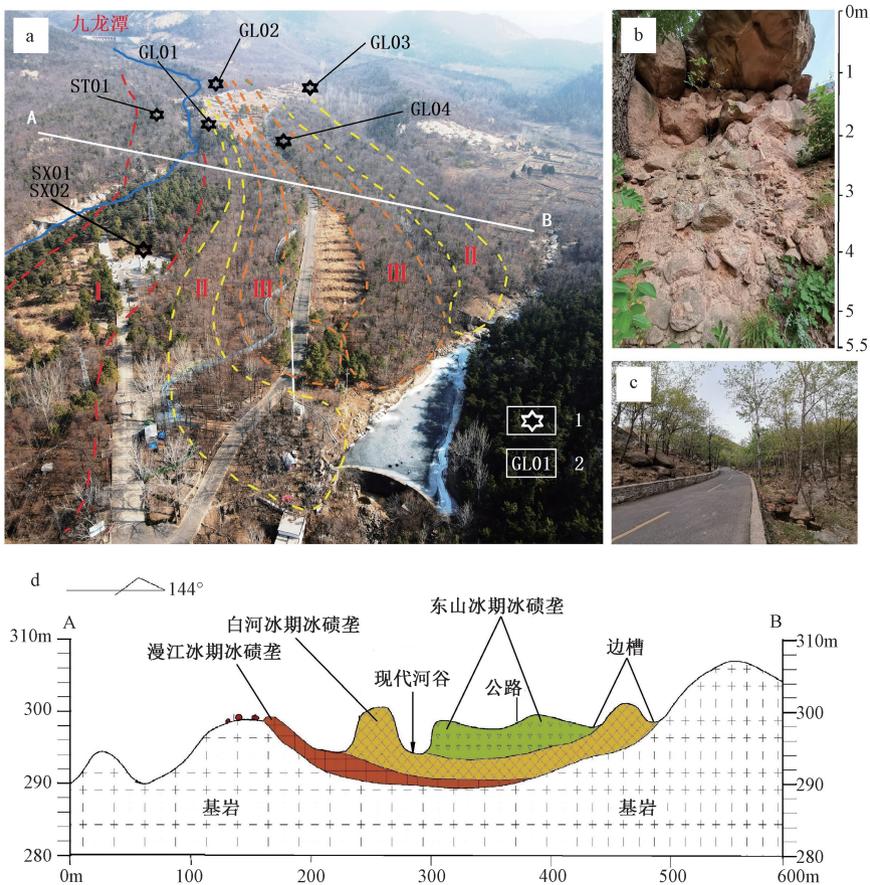
九龙潭下游的冰碛垄槽序列, 根据冰碛垄的分布可以划出三期冰碛垄 (图 4a、4b), 最内侧的冰

表 1 蒙山九龙潭冰川系统冰碛宇生核素测年结果 (王照波等, 2018b)

Table 1 Dating results of CRN from glacial till in Mengshan (Wang et al., 2018b)

样品编号	采样位置	纬度 (N)	经度 (E)	海拔/m	年龄/ka
QR01	清荣峡谷	35.5°	117.8°	752	5.27±0.9

碛垄 (III) 表现为冰舌堆积, 其两侧侧碛垄高程较小, 向外依次由边槽与冰碛垄相间排列形成了。此次研究共采集了 7 件光释光样品 (表 2), 中间偏东的侧碛垄获得的年龄为 67.4±8.5 ka, 属于东山冰期的冰碛堆积 (Wang et al., 2020)。



a—九龙潭垄槽序列平面特征与年龄样品位置分布图 (1 采样位置; 2 样品编号); b—西列 III 号侧碛垄剖面 (厚 5.5 m, 无分选, 呈典型混杂堆积); c—东列 II 号侧碛垄 (道路附近沟谷为边槽, 左侧为冰碛垄及漂砾, 右侧为基岩); d—九龙潭垄槽序列剖面图

图 4 九龙潭冰碛“垄槽序列”特征及典型照片

Fig. 4 Characteristics of the Jiulongtan ridge-groove sequence and typical photos

东山冰期冰碛外侧为对称分布的冰碛垄 (II), 该垄的两侧均为边槽所限, 在西侧冰碛垄采集光释光年龄样品 4 件, ST01 堆积年龄为 >88.3 ka, GL01 堆积年龄为 >129.2 ka, SX01 与 SX02 两件样品未获得有效年龄 (表 2), 东侧冰碛垄采集光释光样品 GL04, 获得年龄 >111.0 ka。根据获得的年

龄数值与冰碛垄的排列, 初步分析为距今约 15 万年左右的白河冰期 (MIS6 阶段) 的冰碛堆积 (王照波等, 2020b)。

最外侧的冰碛垄 (I), 在东侧冰碛垄采集 1 个光释光样品 GL03, 获得堆积年龄数据为 >121.6 ka (表 2)。根据冰碛垄的排列次序, 初步推断该

表 2 蒙山九龙潭冰川系统冰碛光释光测年结果

Table 2 OSL dating results of the Jiulongtan moraine

样品编号	采样位置	纬度 (N)	经度 (E)	U/($\mu\text{g/g}$)	Th/($\mu\text{g/g}$)	K/%	质量含水量/%	等效剂量/Gy	年龄/ka
GL01	西Ⅱ道垄	35°31'52"	117°49'42"	1.27	9.58	1.96	22.59	>447.7	>129.2
GL02	西Ⅲ道垄	35°31'54"	117°49'50"	1.09	8.36	1.88	21.64	215.4	67.4±8.5
GL03	东Ⅰ道垄	35°31'52"	117°49'56"	1.45	9.37	1.95	17.25	>429.5	>121.6
GL04	东Ⅲ道垄	35°31'45"	117°49'46"	1.48	9.10	1.86	28.58	>371.7	>111.0
SX01	生肖广场	35°31'47"	117°49'33"	2.32	8.28	2.22	4.47	/	/
SX02	生肖广场	35°33'47"	117°49'33"	2.38	8.26	2.20	7.35	/	/
ST01	寿桃石上边	35°31'51"	117°49'40"	2.40	9.19	2.10	10.89	>360.0	>88.3

测试单位：自然资源部海洋地质实验检测中心

垄为 45 万年左右的漫江冰期 (MIS12 阶段) 的产物 (王照波等, 2020b)。

据调查, 更早期的冰碛沉积分布于九龙潭垄槽序列的下游, 即景区二门之下的区域, 存在着大面积无层理混杂堆积, 并有巨型漂砾零星分布, 但由于时代久远, 加之人为改造较为严重, 垄体外貌特征辨认困难, 但其突出的无层理混杂堆积, 则显示了蒙山更为古老冰碛的存在。

由于光释光测年范围的影响, 不能有效控制中更新世诸冰期, 不排除九龙潭垄槽序列中存在中更新世早期 65 万年左右的锦江冰期的可能。

3.3 九龙潭垄槽序列的演化过程分析

在 45 万年左右的 MIS12 阶段 (漫江冰期; 王照波等, 2020b), 蒙山冰川沿着情人谷下移, 在九龙潭离开槽谷出口, 形成山麓冰川第一道侧碛垄 (I) 堆积, 也即最外侧的侧碛垄, 由于西侧地势要低于东侧, 因此西侧的侧碛垄的规模要大于东侧, 这一特征一直被后期的冰碛堆积延续。侧碛垄限制了河流的路径, 河流沿着两列侧碛垄中间偏右的位置流出。

在 15 万年前, 即 MIS6 阶段 (白河冰期; 王照波等, 2020b), 蒙山再次发育冰川, 在第一道侧碛垄内侧, 对称形成第二道侧碛垄 (II), 两侧遗留有边槽。气候 MIS5 阶段的河流被限制在中间两道侧碛垄之间偏右的位置流出。韩建恩等 (2020) 在黄河源区利用 ESR 获得了 130ka 左右的湖相沉积, 则证实了 MIS5 阶段的暖湿气候与洪水背景。

在 7 万年前, 即 MIS4 阶段 (东山冰期), 蒙山再次发育冰川, 这次冰川作用的冰碛充填整个中间通道 (III), 在东侧遗留了典型的边槽, 但由于冰碛在地势低的西侧堆积了更多, 没能形成完整的边槽而堵塞了河流通, 冰川结束时形成短期的堰塞湖。

此后进入 MIS3 阶段的洪水泛滥期, 该期洪水在蒙山地区留下了明显的印记, 在西侧佛塔谷中遗留了巨大的 MIS3 冲蚀弧。该期洪水在九龙潭冰碛序列被东山冰期冰碛堵塞的情况下, 向右侧冲蚀跨过原来的两道侧碛垄 (I 与 II), 形成新的河道, 至此, 九龙潭冰碛垄槽序列与河流水系保存至今。其后的冰期堆积为山谷冰川类型, 分布在九龙潭及之上的山谷内, 不再影响垄槽序列。

4 结论

经过调查研究与综合分析, 可以得到以下几项新的认识。

(1) 垄槽序列为冰川作用专属性特征, 与泥石流形成的扇形堆积体存在本质差别, 垄槽序列遗迹规模宏大, 特征差异明显, 易于识别与分辨。垄槽序列在混杂堆积体的成因判断中具有冰川成因的专属性特征, 因此研究冰川作用时, 恢复重建其垄槽序列, 在冰碛遗迹的确定、垄槽展布特征、冰期序列的划分上, 有着重要地质意义。垄槽序列理论的建立, 以及九龙潭垄槽序列的发现, 为中国东部其他地区冰碛垄槽序列的恢复与重建提供了重要的理论参考。

(2) 蒙山九龙潭垄槽序列的发现, 无论从平面展布形态, 还是剖面堆积特征, 都反映出其为冰川作用的产物, 这进一步佐证了蒙山, 以及李四光先生提出的中国东部中低山区曾经发育第四纪冰川作用的事实。

(3) 研究表明, 由于山麓冰川有较为开阔的堆积空间, 因此可以形成较为完好的垄槽序列, 但山谷冰川由于空间狭窄很难形成完好的垄槽序列。后期洪水多顺地势低洼一侧的冰碛边槽流淌, 即便有所破坏, 但地势稍高一侧的垄槽序列因不受干扰得到完好的保存, 由于洪水很难从根本上

摧毁发育完好的垄槽序列, 因此在中国东部中低山区还会保存有较好的冰碛垄槽序列。

致谢: 本项研究得到了中国地质科学院地质力学研究所钱方研究员、中国石油大学吕洪波教授、南京师范大学黄家柱教授、中科院海洋研究所赵松龄教授、南京大学杨达源教授、自然资源部第一海洋研究所徐兴永研究员、中国地质科学院地质研究所苏德辰教授的帮助与支持, 在此表示深切的谢意!

2021 年是我国著名地质学家李四光先生发现太行山东麓冰川遗迹 100 周年, 谨以此文向我国第四纪冰川事业的开创者——李四光先生, 致以崇高的敬意!

References

- BENN D I, EVANS D J A, 2010. *Glaciers and glaciation* [M]. 2nd ed. London: Hodder Education.
- CAO J Y, 1989. Quaternary glacial remnants in the eastern part of china are authentic [J]. *Journal of Geomechanics* (2): 31-43. (in Chinese with English abstract)
- CHEN H L, AI N S, 1983. Preliminary calculation results of mixed deposits and gravel in Lushan area [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 19 (2): 128-129. (in Chinese)
- CUI Z J, XIE Y Y, 1984. Argument on and future of the problems of the Pleistocene glaciers in the eastern part of China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 6 (3): 77-86. (in Chinese with English abstract)
- DENG X F, 1984. Fabric characteristics and genesis of the Diamicton at Yangjiaoling, Lushan [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 6 (3): 87-90. (in Chinese with English abstract)
- DENG Y X, 1983. An explanation of the boulder clay formation near Yangjiaoling ridge of the Lushan by debris flow [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 5 (1): 33-46. (in Chinese with English abstract)
- DENG Y X, 1995. Process of accumulation and characteristics of glacial debris flow deposits transformed by moraine [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 13 (4): 37-48. (in Chinese with English abstract)
- DERBYSHIRE E, 1982. The Lushan dilemma: Pleistocene glaciation south of the ChangJiang (Yangtze River) [J]. CHEN JY, DENG Y X, SHI Y F, trans. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 4 (4): 1-26. (in Chinese with English abstract)
- DU R H, KANG Z C, CHEN X Q, et al., 1987. A comprehensive investigation and control planning for debris flow in the Xiaojiang River basin of Yunnan Province [M]. Chongqing: Chongqing Branch of Science and Technology Literature Publishing: 99-102. (in Chinese with English abstract)
- DU R H, WANG L L, QIAN Z L, 1985. Characteristics of debris flow accumulation in Guxianggou, Xizang province [M] //Lanzhou institute of glacial permafrost, Chinese academy of sciences, Lanzhou institute of glacial permafrost, Chinese academy of sciences. Beijing: Science Press; 48-55. (in Chinese)
- DUAN W T, HE P Y, 1990. A new note on quaternary glacial period in the Lushan mountain, East China [J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences* (20): 159-161. (in Chinese with English abstract)
- HAN J E, LUO P, YU J, et al., 2020. Pan-lake during the late Pleistocene in the source area of the Yellow River and its significance [J]. *Journal of Geomechanics*, 26 (2): 232-243. (in Chinese with English abstract)
- HE X, 1983. The real face of Lushan mountain: is there really quaternary glacier on Lushan mountain? [J]. *Chinese Journal of Nature*, 6 (3): 191-195. (in Chinese)
- JING C R, 1981. Is there no quaternary glacier on lushan mountain? [J]. *Journal of Dialectics of Nature* (4): 42-46. (in Chinese)
- LEE J S, 1922. Notes on the traces of recent Ice actions in Northern China [J]. *Geol. Mag* LIX, 14-21, London.
- LEE J S, 1933. Quaternary glaciations in the Yangtze Valley [J]. *Bull. Geol. Soc. China*, 13: 15-62.
- LEE J S, 1947. Quaternary glaciations in the Lushan area of Central China [M]. Nanking (Nanjing): Institute of Geology, Academia Sinica: 1-27. (in Chinese)
- LI J J, ZHOU S Z, 2018. What glacier is the “ultra-maritime glacier”? A discussion with Professor Jing Cairui [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 40 (1): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- LIS G, 1975. Quaternary glacial relics in China [M]. Beijing: Science Press: 1-82. (in Chinese)
- LI Y, YAO S F, HU K H, et al., 2003. Surges and deposits of debris flow in Jiangjia Gully [J]. *Journal of Mountain Science*, 21 (6): 712-715. (in Chinese with English abstract)
- LIU Z X, ZHAO Z Z, TIAN J R, et al., 2007. Origin of quaternary muddy gravel deposits in the Lushan area [J]. *Journal of Geomechanics*, 13 (4): 322-332, 314. (in Chinese with English abstract)
- PAN J Y, 1990. New studies in the quaternary glaciation of eastern China [J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences* (20): 165-167. (in Chinese with English abstract)
- PENG H X, 1990. Discussion on the formatation of the debris flow of the red boulder clay in the Lushan [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 12 (1): 87-90. (in Chinese with English abstract)
- SHI Y F, 1982. Is there really quaternary glaciation on Lushan? [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 4 (1): 64-69. (in Chinese with English abstract)
- SHI Y F, 2006. The Quaternary glaciations and environmental variations in China [J]. Shijiazhuang: Hebei Science and Technology Press, 66-67. (in Chinese with English abstract)
- SHI Y F, 2010. On Prof. Lee’s having misread debris flow deposits as quaternary glaciations in the Lushan Area, Jiangxi Province [J]. *Geological Review*, 56 (5): 683-692. (in Chinese with English abstract)

- SHI Y F, CUI Z J, LI J J, et al., 1989. China's eastern Quaternary glaciers and environmental problems [M]. Beijing: Science Press: 363-374. (in Chinese)
- SHI Y F, DENG Y X, 1982. Confirmation of quaternary debris flow accumulation at the foot of Lushan mountain: a case study of Yangjiaoling at the northwest foot of Lushan mountain [J]. Chinese Science Bulletin, 27 (20): 1253-1258. (in Chinese)
- SUN D Q, ZHOU M L, PAN J Y, 1977. Quaternary glaciations in China [J]. Acta Geologica Sinica (2): 101-108. (in Chinese with English abstract)
- SUN J Z, WANG S Y, WANG Y Z, et al., 1985. Paleoenvironment of the last ice age in northeast China [J]. Quaternary Research, 6 (1): 82-89. (in Chinese)
- TANG Y Y, 1987. A preliminary research on the genesis and environment of the sediments in the Lushan Mountain from some of their microtextures and microstructures [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 9 (2): 165-170. (in Chinese with English abstract)
- TIAN G Q, LIU K, 1991. Fabric analysis of quaternary Yangjiaoling of MT. Lushan gravel bed and its origin [J]. Bulletin of the Institute of Geomechanics CAGS (14): 155-165. (in Chinese with English abstract)
- WANG H C, ZHANG L Y, 1984. Ancient glacier problem of Lushan mountain and modern debris flow in middle and low mountainous areas of Jiangxi [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 6 (2): 89-91. (in Chinese)
- WANG H C, ZHANG L Y, 1986. Analysis of debris flow and its cause in the historical period of lushan mountain [J]. Journal of Nanchang College of Water Conservancy and Hydroelectric Power (2): 64-67. (in Chinese)
- WANG K J, LONG S T, QUAN S X, 1989. Stratigraphic classification and genetic types of quaternary sediments in Guilin [J]. Carsologica Sinica, 8 (4): 291-299. (in Chinese with English abstract)
- WANG N A, YU X R, ZHUANG L C, et al., 2020. The logical fallacies on identification of the "glacial relics" in Mengshan Mountain: The paper "types, characteristics and dating data of glacial relics in Mount Mengshan Geopark, Shandong Province" as an example [J]. Geological Review, 66 (3): 555-569. (in Chinese with English abstract)
- WANG N A, ZHAO J D, YU Y X, et al., 2017. The gradually improving scientific research paradigm on Quaternary glaciation in China: a review of the 4th Conference on Quaternary Glaciation and Environmental Variation in China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 39 (5): 1029-1038. (in Chinese with English abstract)
- WANG W R, ZHANG S C, WANG J Y, et al., 1985. Characteristics of glacier debris flow in Guxianggou, Xizang province [M] // Journal of Lanzhou institute of glacial permafrost, Chinese academy of sciences, journal of Lanzhou institute of glacial permafrost, Chinese academy of sciences. Beijing: Science Press: 1-35. (in Chinese)
- WANG Y L, JIA L P, 1952. Observations on quaternary glacial phenomena in Zhoukoudian [J]. Acta Geologica Sinica (Z1): 16-25. (in Chinese)
- WANG Z B, WANG J Y, 2019a. Characteristics comparison and the origin analysis of glacier scratches in Hailuoguo of Sichuan province and Mengshan in Shandong province [J]. Shandong Land and Resources, 35 (6): 11-18. (in Chinese with English abstract)
- WANG Z B, BIAN Q, LI D P, et al., 2017a. Discovery of the Quaternary glacial relics in Mount Mengshan, Shandong province [J]. Geological Review, 63 (1): 134-142. (in Chinese with English abstract)
- WANG Z B, SI R J, WANG J Y, 2020a. Comparative study of glacial geomorphology between the Himalayas and the Middle and Low Mountain Areas in Eastern China [J]. Shandong Land and Resources, 36 (2): 1-11. (in Chinese with English abstract)
- WANG Z B, WANG J Y, 2017. Reconstruction of snow line elevation and preliminary analysis on climatic characteristics in last glacial period in eastern China [J]. Shandong Land and Resources, 33 (11): 1-5. (in Chinese with English abstract)
- WANG Z B, WANG J Y, 2019b. Types, characteristics and dating data of glacial relics in Mount Mengshan Geopark, Shandong province: An answer to the query from Professor WANG Nai' ang and Academician LI Jijun [J]. Geological Review, 65 (3): 603-622. (in Chinese with English abstract)
- WANG Z B, WANG J Y, WANG Q Y, XU X L, LI B J. 2018a. The Discovery of Quaternary Cirques System in Ganshan, Western Henan Province and Analysis of Coupling Relation with MIS. Shandong Land and Resources Magazine, 34 (7): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- WANG Z B, WANG J Y, FENG J H, et al., 2018b. Discovery and recognition of holocene glacial remains in Mengshan Mountain in Shandong Province: Evidences from cosmogenic isotopes dating age [J]. Shandong Land and Resources, 34 (6): 1-7. (in Chinese with English abstract)
- WANG Z B, WANG J Y, HE L L, et al., 2020. Glacier relics of the last glacial and holocene periods discovered in the middle-low Mountains of Eastern China: Sedimentary sequences and environmental evolution of Mengshan Mountain in Shandong Province since 80 ka [J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 94 (1): 141-151.
- WANG Z B, WANG J Y, LI B J, 2020b. Coupling relation between cyclic eruption of Quaternary volcano and ancient glacier in Tianchi, Changbai Mts [J]. East China Geology, 41 (2): 108-115. (in Chinese with English abstract)
- WANG Z B, WANG J Y, ZHANG J, 2019. Comparison of the Quaternary sediments from glaciers, loess and stream with the marine isotope stages (MIS) in Mengshan, Shandong [J]. East China Geology, 40 (2): 81-90. (in Chinese with English abstract)
- WANG Z B, ZHANG J, WANG J Y, et al., 2017b. A study on Quaternary glaciation moraines in Mount Mengshan, Shandong Province with optically stimulated luminescence (OSL) and comparison of glacial period division [J]. Geological Review, 63 (3): 694-702. (in Chinese with English abstract)
- WU X H, JIANG F C, XU H L, et al., 1997. Macroscopic and microscopic features of the quaternary glacial vestiges in the

- Tanzhesiarea of the western hills of Beijing [J]. *Journal of Geomechanics*, 3 (4): 3-12. (in Chinese with English abstract)
- XIE Y Y, CUI Z J, 1983. On nonglacial genesis of “glaciated relics” of Lushan [J]. *Acta Geographica Sinica*, 38 (3): 298-308. (in Chinese with English abstract)
- XIONG H G, 1983. Difference between glacial till and debris flow [J]. *Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition) (Z1)*: 142-149. (in Chinese)
- YAN Q S, 1952. Glacial topography near the greater Hinggan mountains [J]. *Acta Geologica Sinica (Z1)*: 1-15. (in Chinese)
- YANG M G, MA Z X, 2019. Observation and consideration of the vestiges of Quaternary glacier on Lushan mountain [J]. *Geological Bulletin of China*, 38 (2-3): 189-199. (in Chinese with English abstract)
- YAO T D, LI J J, 1982. Reassessment on the geneses of “glacial cirque, trough and boulder clay” in the Lushan region [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 4 (4): 27-42. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG J J, LIU J K, GAO B, et al., 2018. Characteristics of material sources of Galongqu glacial debris flow and the influence to Zhamo road [J]. *Journal of Geomechanics*, 24 (1): 106-115. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG J S, SHEN X J, WEI J L, 2010. Observational study on the characteristics of development and evolvement of debris flow deposit fan [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 19 (12): 1478-1483. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG L Y, MOU Y Z, 1984. Features and geneses of the diamicton in the Lushan region [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 4 (2): 167-176. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Z G. 2014. Research on Quaternary Glacial Chronology of Daocheng Ancient Ice Cap [D]. Nanjing Normal University: 64-68. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO J D, WANG J, YANG X H, 2019. Review, progress and prospect of the quaternary glaciations in eastern China (east to 105° E) [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 41 (1): 75-92. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG W, YAN L, CUI Z J. 2008. Factors controlling the development of mountain glacier ice bucket and climate change [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 27 (2): 266-273. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO Z Z, DING Y C, QIAN F, et al., 2000. A new method for identifying moraine [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 21 (4): 396-400. (in Chinese with English abstract)
- Quaternary Research Committee of China, Liaison Group of Quaternary Glacier Research Center of China. 1964. Quaternary Glacier Relics in China [M]. Beijing: Science Press, 55 (in Chinese)
- ZHOU M L, PAN J Y, 1982. The Quaternary glaciation on Mt. Huangshan [J]. *Bulletin Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences* (2): 149-155. (in Chinese with English abstract)
- ZHU C, YU S Y, LIU X N, 1996. The application of fractal method to studying quaternary sedimental environment in Lushan area [J]. *Geography Research*, 15 (3): 64-69. (in Chinese with English abstract)
- 附中中文参考文献**
- 爱·德比希尔, 1982. 庐山的困境: 长江以南的更新世冰川作用 [J]. 陈吉阳, 邓养鑫, 施雅风, 译. *冰川冻土*, 4 (4): 1-26.
- 曹照垣, 1989. 中国东部山区的第四纪冰川遗迹证据确凿 [J]. *地质力学学报* (2): 31-43.
- 陈怀录, 艾南山, 1983. 庐山地区混杂堆积物砾向计算初步结果 [J]. *兰州大学学报 (自然科学版)*, 19 (2): 128-129.
- 崔之久, 谢又予, 1984. 论分歧的现状和展望: 关于中国东部第四纪冰川问题 [J]. *冰川冻土*, 6 (3): 77-86.
- 邓晓峰, 1984. 庐山羊角岭附近混杂堆积的组构特征及其成因 [J]. *冰川冻土*, 6 (3): 87-90.
- 邓养鑫, 1983. 庐山羊角岭附近“泥砾”成因的泥石流解释 [J]. *冰川冻土*, 5 (1): 33-46.
- 邓养鑫, 1995. 冰碛转化为冰川泥石流堆积过程及其沉积特征 [J]. *沉积学报*, 13 (4): 37-48.
- 杜榕桓, 王立伦, 钱宗麟, 1985. 西藏古乡沟泥石流堆积特征 [M] //中国科学院兰州冰川冻土研究所. 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊 (泥石流研究专辑). 北京: 科学出版社: 48-55.
- 杜榕桓, 康志成, 陈循谦, 等, 1987. 云南小江泥石流综合考察与防治规划研究 [M]. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社: 99-102.
- 段万倜, 何培元, 1990. 庐山第四纪冰期研究的新认识 [J]. *中国地质科学院院报* (20): 159-161.
- 韩建恩, 罗鹏, 余佳, 等, 2020. 黄河源地区晚更新世湖泛事件及其意义 [J]. *地质力学学报*, 26 (2): 232-243.
- 何兴, 1983. 再识庐山真面目: 庐山真的有第四纪冰川吗? [J]. *自然杂志*, 6 (3): 191-195.
- 景才瑞, 1981. 庐山没有第四纪冰川吗? [J]. *自然辩证法通讯* (4): 42-46.
- 李吉均, 周尚哲, 2018. 极海洋型冰川是什么冰川: 与景才瑞先生商榷 [J]. *冰川冻土*, 40 (1): 1-6.
- 李四光, 1947. 冰期之庐山 [M]. 中央研究院地质研究所专刊乙种 2 号, 南京: 1-27.
- 李四光, 1975. 中国第四纪冰川 [M]. 北京: 科学出版社: 1-82.
- 李泳, 姚寿福, 胡凯衡, 等, 2003. 从蒋家沟泥石流阵流看泥石流堆积 [J]. *山地学报*, 21 (6): 712-715.
- 刘宗秀, 赵志中, 田姣荣, 等, 2007. 庐山地区第四纪泥砾沉积物的成因探讨 [J]. *地质力学学报*, 13 (4): 322-332, 314.
- 潘建英, 1990. 中国东部第四纪冰川地质的新研究 [J]. *中国地质科学院院报* (20): 165-167.
- 彭汉兴, 1990. 庐山红色泥砾泥石流成因商榷 [J]. *冰川冻土*, 12 (1): 87-90.
- 施雅风, 1982. 庐山真的有第四纪冰川吗? [J]. *冰川冻土*, 4 (1): 64-69.
- 施雅风, 邓养鑫, 1982. 庐山山麓第四纪泥石流堆积的确定: 以庐山西北麓羊角岭为例 [J]. *科学通报*, 27 (20): 1253-1258.
- 施雅风, 崔之久, 李吉均, 等, 1989. 中国东部第四纪冰川与环境问题 [M]. 北京: 科学出版社: 363-374.
- 施雅风, 2006. 中国第四纪冰川与环境变化 [M]. 石家庄: 河北科

- 学技术出版社: 66-67.
- 施雅风, 2010. 论李四光教授的庐山第四纪冰川是对泥石流的误读 [J]. 地质论评, 56 (5): 683-692.
- 孙殿卿, 周慕林, 潘建英, 1977. 中国第四纪冰期 [J]. 地质学报 (2): 101-108.
- 孙建中, 王淑英, 王雨灼, 等, 1985. 东北末次冰期的古环境 [J]. 第四纪研究, 6 (1): 82-89.
- 唐永仪, 1987. 从庐山某些堆积物的微观特征讨论其成因与环境 [J]. 冰川冻土, 9 (2): 165-170.
- 田国强, 刘莉, 1991. 庐山羊角岭地区第四纪砾石层的组构分析及其成因意义 [J]. 中国地质科学院地质力学研究所所刊 (14): 155-165.
- 王汉存, 张林源, 1984. 庐山古冰川问题与赣中低山区的现代泥石流 [J]. 冰川冻土, 6 (2): 89-91.
- 王汉存, 张林源, 1986. 庐山历史时期的泥石流及其成因分析 [J]. 南昌水专学报 (2): 64-67.
- 王克钧, 龙少廷, 全顺兴, 1989. 桂林第四纪地层层序及成因类型 [J]. 中国岩溶, 8 (4): 291-299.
- 王乃昂, 赵井东, 余莺潇, 等, 2017. 渐趋完善的第四纪冰川研究范式: 记第四届中国第四纪冰川与环境变化研讨会 [J]. 冰川冻土, 39 (5): 1029-1038.
- 王乃昂, 于昕冉, 庄立超, 等, 2020. 蒙山“冰川遗迹”辨识中的逻辑谬误分析: 以“山东蒙山冰川遗迹的类型、特征和年代”一文为例 [J]. 地质论评, 66 (3): 555-569.
- 王文睿, 章书成, 王家义, 等, 1985. 西藏古乡沟冰川泥石流特征 [M] //中国科学院兰州冰川冻土研究所. 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊 (泥石流研究专辑). 北京: 科学出版社: 1-35.
- 王曰伦, 贾兰坡, 1952. 周口店第四纪冰川现象的观察 [J]. 地质学报 (Z1): 16-25.
- 王照波, 王江月, 2017. 中国东部末次冰期雪线高程重建与成冰气候分析 [J]. 山东国土资源, 33 (11): 1-5.
- 王照波, 卞青, 李大鹏, 等, 2017a. 山东蒙山第四纪冰川组合遗迹的发现及初步研究 [J]. 地质论评, 63 (1): 134-142.
- 王照波, 张剑, 王江月, 等, 2017b. 山东蒙山第四纪冰川遗迹光释光测年研究及冰期划分与对比 [J]. 地质论评, 63 (3): 694-702.
- 王照波, 王江月, 王全义, 等, 2018a. 豫西甘山第四纪冰斗系统的发现及其与 MIS 的耦合关系分析 [J]. 山东国土资源, 34 (7): 1-7.
- 王照波, 王江月, 冯金华, 等, 2018b. 山东蒙山全新世冰川遗迹的发现及确认: 来自宇生核素年龄证据 [J]. 山东国土资源, 34 (6): 1-7.
- 王照波, 王江月, 张剑, 2019. 山东蒙山第四纪冰川、黄土、水系沉积物与 MIS 对比研究 [J]. 华东地质, 40 (2): 81-90.
- 王照波, 王江月, 2019a. 山东蒙山与四川海螺沟冰川擦痕特征对比及成因分析 [J]. 山东国土资源, 35 (6): 11-18.
- 王照波, 王江月, 2019b. 山东蒙山冰川遗迹的类型、特征和年代: 答王乃昂教授、李吉均院士质疑 [J]. 地质论评, 65 (3): 603-622.
- 王照波, 司荣军, 王江月, 2020a. 喜马拉雅山脉与我国东部中低山区冰蚀地貌对比研究 [J]. 山东国土资源, 36 (2): 1-11.
- 王照波, 王江月, 李宝杰, 2020b. 吉林长白山天池第四纪火山旋回性喷发与冰川作用的耦合关系 [J]. 华东地质, 41 (2): 108-115.
- 吴锡浩, 蒋复初, 徐和聆, 等, 1997. 北京潭柘寺地区第四纪冰川遗迹的宏观和微观特征 [J]. 地质力学学报, 3 (4): 3-12.
- 谢又予, 崔之久, 1983. 庐山“冰川遗迹”质疑 [J]. 地理学报, 38 (3): 298-308.
- 熊黑刚, 1983. 冰碛物与泥石流堆积物的区别 [J]. 新疆大学学报 (自然科学版) (Z1): 142-149.
- 严钦尚, 1952. 大兴安岭附近冰川地形 [J]. 地质学报 (Z1): 1-15.
- 杨明桂, 马振兴, 2019. 庐山第四纪冰川遗迹的观察与思考 [J]. 地质通报, 38 (2-3): 189-199.
- 姚檀栋, 李吉均, 1982. 庐山地区“冰斗”、“U 谷”及“泥砾”成因之辨析 [J]. 冰川冻土, 4 (4): 27-42.
- 张佳佳, 刘建康, 高波, 等, 2018. 藏东南嘎洛曲冰川泥石流的物源特征及其对扎墨公路的影响 [J]. 地质力学学报, 24 (1): 106-115.
- 张金山, 沈兴菊, 魏军林, 2010. 泥石流堆积扇发育演化特征观测研究 [J]. 长江流域资源与环境, 19 (12): 1478-1483.
- 张林源, 牟昀智, 1984. 庐山地区混杂沉积的特征和成因 [J]. 地理科学, 4 (2): 167-176.
- 张威, 闫玲, 崔之久, 2008. 山地冰川冰斗发育的控制因素与气候变化 [J]. 冰川冻土, 27 (2): 266~273.
- 张志刚, 2014. 稻城古冰帽第四纪冰川年代学研究 [D]. 南京: 南京师范大学: 64-68.
- 赵井东, 王杰, 杨晓辉, 2019. 中国东部 (105°E 以东) 第四纪冰川研究回顾、进展及展望 [J]. 冰川冻土, 41 (1): 75-92.
- 赵志中, 丁原辰, 钱方, 等, 2000. 冰川沉积物成因确定的一种新方法 [J]. 地球学报, 21 (4): 396-400.
- 中国第四纪研究委员会, 中国第四纪冰川研究工作组中心联络组, 1964. 中国第四纪冰川遗迹研究文集 [M]. 北京: 科学出版社: 55.
- 周慕林, 潘建英, 1982. 安徽黄山第四纪冰川遗迹 [J]. 中国地质科学院地质力学研究所所刊 (2): 149-155.
- 朱诚, 于世永, 刘晓宁, 1996. 分形方法在庐山第四纪沉积环境研究中的应用 [J]. 地理研究, 15 (3): 64-69.

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):

可扫码直接下载文章电子版, 也有可能听到作者的语音介绍及更多文章相关资讯

