

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020071601

山东中部典型冰川岩溶的发现及气候意义

王照波^{1,2,3}, 白伟明^{4,5}, 李宝杰³

1. 自然资源部金矿成矿过程与资源利用重点实验室, 山东省金属矿产成矿地质过程与资源利用重点实验室, 济南 250013
2. 沂蒙山国家地质公园管理局, 临沂 273304
3. 山东指南针矿产勘查有限公司, 临沂 276006
4. 青岛海洋地质研究所, 青岛 266071
5. 青岛海洋地质工程勘察院, 青岛 266071

摘要:冰川岩溶为冰川融水对于下伏灰岩地层侵蚀形成的岩溶地貌, 具有重要的气候意义, 国内少有深入的研究。在山东费县小泉庄一带灰岩面上发现河曲状岩溶槽与冰臼一起构成的岩溶系统。对岩溶通道水流路径进行恢复, 发现岩溶通道水流起源于前端的冰臼, 根据岩溶通道的叠加关系恢复了通道形成的先后次序, 进一步发现了冰臼具有位移特征, 位移量的大小显示出移动过程具有稳定期与快速期。根据河曲状岩溶通道的特征及其与冰臼的关系, 与阿尔卑斯山冰川岩溶特征进行对比, 两者具有特征上的一致性。综合分析认为小泉庄灰岩面上分布的河曲状岩溶通道为冰水成因, 其壶穴为冰水下注冲蚀形成的冰臼, 均属于冰川岩溶。小泉庄典型冰川岩溶在中国东部低山丘陵区的发现, 佐证了中国东部曾经存在广布的冰盖及山谷冰川。

关键词:冰川岩溶; 河曲状岩溶槽; 壶穴; 冰臼

中图分类号:P512.4 文献标识码:A

Discovery of glaciokarst in middle Shandong Province and its climatic significance

WANG Zhaoobo^{1,2,3}, BAI Weiming^{4,5}, LI Baojie³

1. Key Laboratory of Gold Mineralization Process and Resource Utilization of the Ministry of Land and Resources, Shandong Key Laboratory of Geological Processes and Resource Utilization in Metallic Minerals, Jinan 250013, China
2. Yimeng National Geological Park Management Office, Linyi 273304, China
3. Shandong Compass Mineral Exploration co., Ltd, Linyi 276006, China
4. Qingdao Institute of Marine Geology, QIMG, Qingdao 266071, China
5. Qingdao Geo-Marine Engineering Survey, Qingdao 266071, China

Abstract: Glaciokarst is a kind of karst landform of limestone formed by the erosion of surface glacial melt water. It has great climatic significance despite there are few in-depth studies in China. In this research we found a karst system consisting of meandering karst grooves and glacial potholes on the limestone surface in the small village of Xiaoquanzhuang, Feixian, Shandong province. Based on the restoration of the water path of karst channels, it is found that the water flow in the karst channels was originated from the glacial potholes at the front end. Additionally, the time of the formation of channels was restored according to the superposition relationship of karst channels. The displacement features of glacial potholes and the displacement amount also suggest that the movement of glacial is featured by the alternation of stable and rapid stages. The features of the meandering karst channels and their relationship to glacial potholes in Xiaoquanzhuang are similar with those observed in Alps. Integrated analysis further suggests that the meandering shape of karst channels on limestone surface is formed by melt ice water as the potholes are caused by the erosion on the bottom of ice water, they are both typical glaciokarst landforms. The discovery of such a typical glaciokarst in Xiaoquanzhuang proves that ice sheets and valley glaciers was once widely spread in the low-hill region of East China.

Key words: glaciokarst; meandering karst groove; pothole; glacial pothole

资助项目:自然资源部金矿成矿过程与资源利用重点实验室和山东省金属矿产成矿地质过程与资源利用重点实验室项目“山东金刚石成矿规律与侵位时代研究”(201403); 山东指南针矿产勘查有限公司项目“东亚冷槽探索计划”(20180101)

作者简介:王照波(1971—), 男, 高级工程师, 主要从事地质矿产勘查、第四纪冰川与环境演化研究, E-mail: 13805498543@163.com

通讯作者:白伟明(1975—), 男, 高级工程师, 主要从事岩土工程及测量工程研究, E-mail: qdbwm@163.com

收稿日期:2020-07-16; 改回日期:2020-09-11. 周立君编辑

近年来国外学者对冰川岩溶进行了全面而深入的研究，并取得了丰硕的成果^[1-4]。国内相关研究与报道极为稀少，目前只有赵松龄和徐兴永^[5]首次提出了中国东部多地广布的灰岩剥蚀面属于冰川岩溶的观点，并在专著中附录了大量冰川岩溶图片，虽未做更深入的研究，但对于推动中国第四纪研究领域关注“冰川岩溶”这一现象起到积极的促进作用。山东丘陵地区石灰岩广泛分布，但对于由石灰岩组成的崮、长垣等地貌的成因，以往研究者多从岩溶、风化的角度去考虑，均未涉及冰川岩溶的内容^[6-14]。

研究中国东部中低山区的冰川岩溶问题，这首先涉及到中国东部中低山区是否发育第四纪冰川问题。李四光先生于1922年^[15]、1933年^[16]发现了太行山东麓、江西庐山的冰川遗迹，开创了中国第四纪冰川研究的先河^[17]。此后研究逐渐展开，王曰伦和贾兰坡先生从地貌演化角度论证了中国东部冰川的存在^[18-19]，杨怀仁等^[20]与杨达源^[21]从气候演化角度认为中国东部存在第四纪冰川，同时也有研究者对东部冰川提出质疑^[22-25]。山东第四纪冰川研究开始于1959年，德国学者A.舒勒(A.Schuller)对泰山进行了研究^[26]，作者将在泰山后石坞发现众多冰川遗迹与德国中部冰川遗迹进行对比分析得出结论：“泰山的冰川遗迹与德国中部山区相同，是由风化程度高的滚圆物质所组成，被细粒的胶结物胶结地很厚很结实，这种冰砾是很典型的，而且很容易辨别。”“华中与华东第四纪冰川规模很大，这是没有问题的。”此后，张建伟等^[27-28]对泰山南坡冰砾层中的石英砂进行扫描电镜观察并确认属于冰川成因。2003年李乃胜等^[29]对崂山冰川遗迹进行了研究，初步建立了鲍鱼岛冰期、前风庵冰期、流清河冰期和束住岭冰期。徐兴永等^[30-33]对中国东部地区的冰川遗迹进行研究，认为在第四纪冰期时东部海拔高于300 m的山地都有可能出现规模不等的山地冰川。李培英等^[34]对崂山冰砾进行了大量的测年研究，获得了MIS6、MIS4、MIS3b诸阶段的冰期年龄数值。赵松龄^[35]在调查总结中国东部大量古冰川遗迹的同时，提出了第四纪冰期“北路寒潮”是中国东部冰川形成的气候冷源路径的重要认识。

近年，王照波等^[36-42]的研究表明，山东蒙山曾广泛发育冰川作用，根据光释光与宇宙核素测年数据，确认蒙山存在全新世冰川遗迹。王照波等^[43-44]最近的地貌研究发现，蒙阴岱崮一带的冰蚀三角脊链与喜马拉雅山区的形态一致，确认岱崮地貌属于冰蚀地貌，并根据龙纹状三角脊链的特征、冰斗边界定律，确认山东丘陵为冰盖冰蚀地貌，其狭长的

长垣状灰岩山脊为冰盖侵蚀残留^[45]。野外调查过程中发现了典型的冰川岩溶——河曲状冰水冲蚀槽。本文即是对新发现的冰川岩溶进行的详细解析，以期引起相关研究领域的重视。山东灰岩丘陵区的岩溶过程复杂，既有非冰川岩溶，又伴生了冰川岩溶的过程，对典型冰川岩溶进行详细研究，也有利于理解中国东部冰川的演化过程。

1 欧洲冰川岩溶研究概况

由于欧洲大陆更新世斯堪的纳维亚冰盖广泛覆盖在石灰岩上，形成了丰富的冰川岩溶遗迹，这为冰川岩溶的研究提供了丰富的先决条件。1880年开始，戴维斯开始研究英国著名的诺博尔(Norber)地区的冰川岩溶^[4]。1917年，有“岩溶之父”之称的约万·克维吉奇(Jovan Cvijić)研究了巴尔干山脉的冰川岩溶，并创造使用了“karstic glaciers”(冰川岩溶)一词^[46]。在冰川岩溶方面，目前已经形成了丰富的研究资料及完善的理论体系，2018年Dmitry和Jaroslav出版了《Glaciokarsts》，就冰川岩溶的类型、特征、形成环境、形成机理进行了全面的总结。图1a为托特斯山脉伦高湖(Lahngang Lake)一带的冰川岩溶槽，由于岩溶作用的影响，沟槽与隔壁变得浑圆^[47]。图1b为特拉格山峰(Tragl peak)下山谷中直立在岩壁上的冰川岩溶槽，为冰川融水顺岩壁向下流动形成^[48]，在近似倾角的平整灰岩面上可以形成这些类似特征的溶蚀谷群^[4]。图1c为灰岩面上典型冰水成因河曲状岩溶槽，属于具有较快流速^[49]与连续稳定流量的冰川融水长期作用下的冰川岩溶^[4]，具有明显的凹岸、凸岸，其长期冲蚀在凹岸上部形成悬壁^[50]。尽管中国东部山区石灰岩广布，岩溶也广泛发育，像图1a与图1b类似特征的岩溶地貌，野外也多有分布，在欧洲研究中尚可作为冰川岩溶对待，但在山东灰岩丘陵区作为冰川岩溶对待必将引起争议。这就需要寻找如图1c类型的微型河曲状冰水冲蚀槽，对于确定冰川岩溶作用的存在，理解冰水侵蚀的过程，都具有重要意义。图1d是在费县小泉庄灰岩面上发现的微型河曲状冲蚀槽(俯视图)，该冲蚀槽的凹岸、凸岸，以及凹岸中发育的悬壁都极为典型，此微型河曲状岩溶槽及其源头冰臼的演化过程即本文研究的重点对象。

2 小泉庄动态冰川岩溶的特征

野外调查过程中，在费县县城西10 km处的小



图 1 欧洲典型的冰川岩溶与小泉庄河曲状岩溶槽

- a. 托特斯山脉伦高湖(Lahngang Lake)一带的浑圆状冰川岩溶槽^[47]; b. 特拉格山峰(Tragl peak)下山谷中直立在岩壁上的冰川岩溶槽^[48];
c. 冰川岩溶中典型的冰水冲蚀河曲状沟槽, ①凹岸、②凸岸、③悬壁^[50]; d. 小泉庄河曲状岩溶槽, ①凹岸、②凸岸、③悬壁,

图中圆珠笔尾指示下游方向。文中卫星图片取自 Google Earth, 下同。

Fig.1 Typical glaciokarst in Europe and the meandering karst grooves in Xiaoquanzhuang

泉庄村与殷庄之间发现典型冰川岩溶(图 2a), 周边地势平缓, 无陡峻山体分布, 可以确定与山谷冰川无关。小泉庄村与殷庄之间并无规模河流, 仅朱田小河从东面流过。冰川岩溶分布在宽阔平缓的干谷北岸, 干谷无常年性流水, 北部为一片灰岩出露区(图 2b), 与河流相去甚远, 与其没有关联性。根据周边被黄土覆盖的情况分析, 该冰川岩溶曾被厚层黄土覆盖, 后期水土流失使灰岩面露出地面。

冰川岩溶分布区的干谷长 1 km 左右, 谷底平

缓, 宽 110 m, 周围主要出露寒武纪白云岩与灰岩地层, 出露标高为 138 m(图 2a)。河曲状岩溶槽位于一处长 2 m、宽 0.8 m 的灰岩原始风化槽沟中(图 2b), 虽然面积不足 2 m², 但由清晰的注水坑穴(图 3a、b、c、d)与河曲状岩溶槽组成一套完整的冰川岩溶体系(图 3a)。整个体系可以分为 A、B、C 三个段(图 3a), 下面按照自下而上的顺序分析各段的特征。

A 段(图 3a、4a): 位于系统最下游, 为上游各冰水通道的共同流经段, 剖面呈规则的 U 型, 上口宽

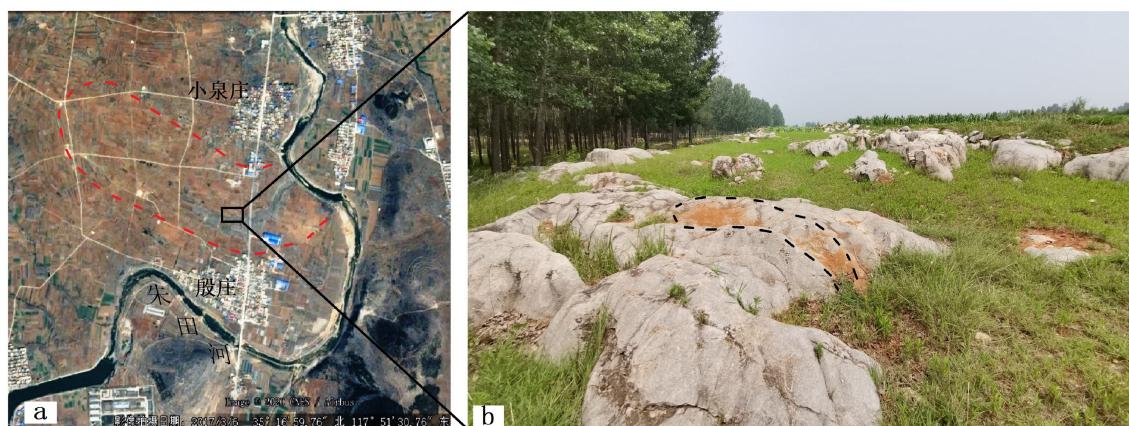


图 2 典型冰川岩溶发现位置及出露情况

- a. 冰川岩溶出露位置, 图中红虚线为流域范围; b. 河曲状岩溶槽周围环境特征(镜头向西),
左侧为平缓干谷, 图中黑虚线为河曲状岩溶槽分布位置。

Fig.2 Location of typical glaciokarst and outcrops

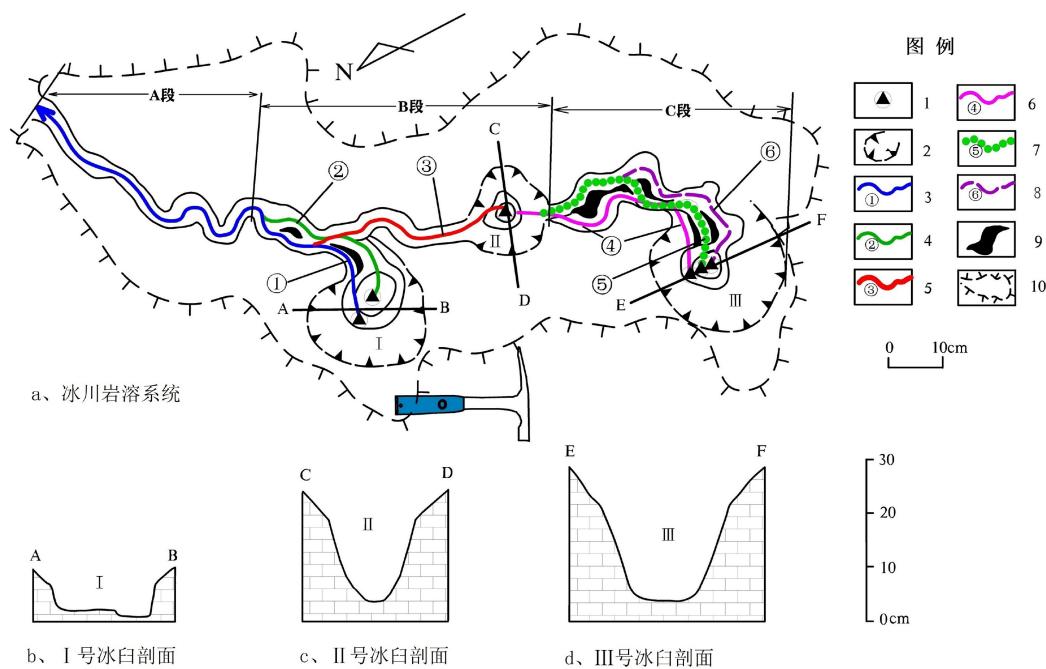


图3 小泉庄冰川岩溶冰臼、沟槽系统图

a. 冰川岩溶系统(图例说明: 1-通道源头, 注水坑穴位置; 2-冰臼分布位置及编号; 3-第1条冰水通道及编号, 箭头示下游方向; 4-第2条冰水通道及编号; 5-第3条冰水通道及编号; 6-第4条冰水通道及编号; 7-第5条冰水通道及编号; 8-第6条冰水通道及编号; 9-多条冰水通道之间残余隔墙; 10-流域边界); b. I号冰臼剖面; c. II号冰臼剖面; d. III号冰臼剖面。

Fig.3 Glaciokarst system of potholes and grooves in Xiaoquanzhuang

5 cm左右。其原本为I号冰臼第1注水中心流水沿着原来的V型槽的基础上首先开拓形成的河曲状沟槽,并被后期历次冰水通道所继承,由于受到多期次冰水侵蚀,该段形成了典型的河曲状沟槽特征,沟槽中凹岸、凸岸与悬壁特征极为明显(图4d、4a),这与阿尔卑斯山区冰水成因的河曲状岩溶槽特征极为一致(图4b)。能在狭小的坚硬灰岩面上侵蚀出河曲状沟谷,水流应具有一定的流速,并持续时间较长,短暂而缓慢的流水只能沿着原来槽底地势顺势而流,而不能在岩石槽谷中侵蚀出弯曲的河曲,这与Dubljanskij研究冰水岩溶河曲成因的结论一致^[49]。

B段(图3a、5a):该段包含I号冰臼与II号冰臼,由3个注水中心与对应的3条冰水通道组成。I号冰臼的第1注水中心形成第1条冰水通道(图3a、5a蓝线),由于注水中心的微量位移形成第2注水中心,位移量仅5 cm,同时紧靠第1条冰水通道的右侧开辟了第2条冰水通道(图3a、5a绿线),第2条冰水通道侵蚀出一弧形凹岸后,沿袭并汇入前期第1条冰水遗留的通道。在两条冰水通道之间形成残留的弧形凸起(图5a蓝线与绿线之间)。此后,注水中心发生了较大距离的位移,位移量为32 cm,

形成系统内第3个注水中心,第3注水中心维持时间较长,形成了20 cm深度的II号冰臼(图3c)。第3注水中心形成第3条冰水通道(图3a、5a红线),由于在第3处凹岸的位置与第2条冰水通道遗留的第1处凹岸侵蚀方向相反,遂在第1条冰水通道的右岸开辟了一条新冰水通道,两条通道之间形成残留的鱼背鳍状凸起(图5a红线与蓝线之间)。根据冰水通道的侵蚀情况,以及第3条冰水通道低于第1、2条冰水通道槽底,可以判断第3条冰水通道的形成时间晚于第1、2条冰水通道。

C段(图3a、5b):该段起始于III号冰臼,结束于II号冰臼,包含由于注水中心3次位移开拓的3条冰水通道。注水点由II号冰臼位移到III号冰臼,位移量35 cm,形成系统内第4个注水中心,开辟了新的冰水通道,即第4条冰水通道(图3a粉红线、5b蓝线),流经II号冰臼后汇入第3冰水通道。此后注水中心微量位移形成系统内第5个注水中心,在第4冰水通道右侧开辟第5冰水通道(图3a绿点线、5b绿线),在第4条冰水通道的右侧,在第2个凹岸位置切割第4条冰水通道(图5b蓝线)形成新的通道,汇入II号冰臼,在第5条冰水通道与第4条冰水通道之间形成菱形凸起。此后注水中心再次



图 4 小泉庄冰川岩溶系统 A 段特征与阿尔卑斯山冰水侵蚀河曲状沟槽

a. 小泉庄村冰水侵蚀河曲状岩溶槽(笔尾端指示下游方向), b. 阿尔卑斯山冰水侵蚀河曲状岩溶槽。

Fig.4 Characteristics of section A of the glaciokarst system in Xiaoquanzhuang and the meandering channel eroded by melt ice water in Alps

微量位移后形成系统内第 6 处注水中心, 在第 5 冰水通道右侧开辟了第 6 冰水通道(图 5b 红线), 并在第 5 冰水通道的第三凹岸处沿袭第 5 冰水通道进入Ⅱ号冰臼, 沿袭下游已有通道流出冰川岩溶系统。第 6 冰水通道与第 5 冰水通道之间也残留形成了菱形凸起。

3 讨论

3.1 灰岩中河曲状冲蚀槽的成因

自然界中, 蜿蜒曲折的河床称为河曲^[51]。河曲现象存在于山间基岩中古老的河流或松散堆积体中的小型水系中, 河曲现象的突出特征是形成明显的凹岸与凸岸。小泉庄灰岩面上发育的河曲状冲蚀槽具备河曲的典型特征, 尽管规模小, 分布在不足 2 m² 的灰岩面上, 但显然也属于流水作用的产物。目前国内尚未开展就灰岩中的微型河曲现象进行相关研究, 前文就英国及阿尔卑斯山区的冰川岩溶做了详细的介绍, 要在灰岩中通过流水形成河曲, 其水流必然具备 3 个条件: 较快的流速、稳定的流量与持久的时间。河曲状冲蚀槽内水流存在爬坡现象, 也佐证了水流具有较高的流速。这些特征是短暂性的降雨或洪水分散流所不具备的, 只有作为冰川岩溶的冰盖融水可以满足较高的流速、稳定的流量、持久的时间等条件, 由此分析小泉庄河曲

状冲蚀槽的形成属于冰水冲蚀的产物。

3.2 冰臼的成因分析

冰臼, 在国内学术界争议颇大^[52-56], 由于岩石表面多有壶穴分布, 如山脊壶穴、河道壶穴等, 其成因本身就具有多样性, 如风化成因、流水成因、风沙成因等, 而作为流水成因壶穴中, 又分为河流流水成因的壶穴与冰水成因的冰臼。

本次调查发现的河曲岩状冲蚀槽的源头分布有 3 个独立的壶穴, 壶穴与河曲状冲蚀槽之间供源关系清晰可辨。由于河曲状冲蚀槽为稳定束状流长期作用的结果, 作为冲蚀槽源头的壶穴则为稳定束状流的注水点, 因此可以排除风化作用的成因。根据岩溶槽的分布、动态叠加与供源关系, 以及冲蚀槽显示出的动态位移特征, 且位移表现出快慢的节奏性特征, 冰水注水点可分为稳定期与位移期, 稳定期包含微量位移, 代表一个壶穴的形成时间, 位移期代表两个壶穴之间的移动时间。根据壶穴的剖面特征, 以及在壶穴壁上没有形成旋转痕, 分析水流来自近似垂直的上方稳定束状流, 而非短期的降水或洪水等分散流所为, 综合分析, 发现的小泉庄河曲状冲蚀槽源头的壶穴为冰水成因的冰臼。

3.3 冰川岩溶的气候意义

综合上述分析, 只有冰盖融水可以满足较高的流速、稳定流量的束状流与持续的时间三项条件。

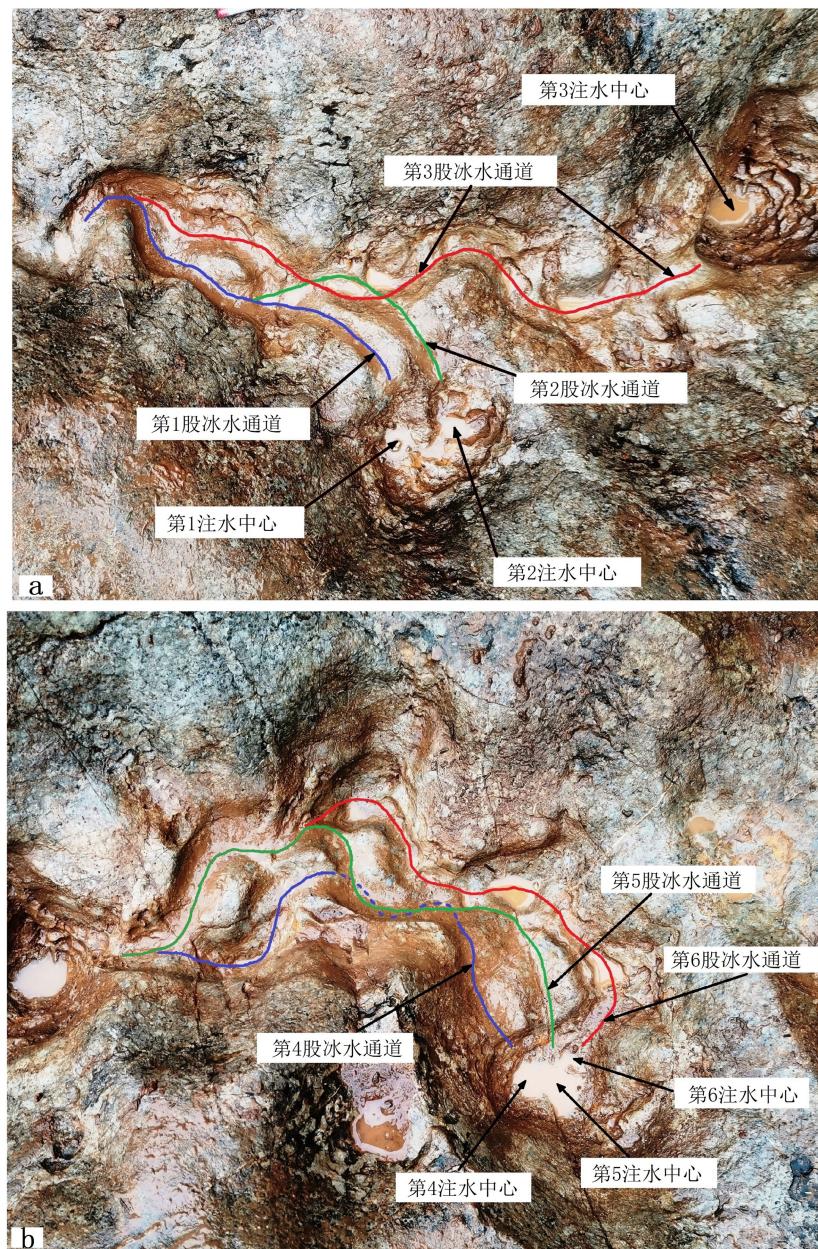


图5 小泉庄冰川岩溶系统B、C段注水中心及冰水通道的位移演化过程

a. B段特征; b. C段特征。

Fig.5 Water injection centres in sections B and C of the glaciokarst system in Xiaoquanzhuang and displacement of ice water channels

冰盖的融化可以提供长期且稳定流量的流水，满足水源方向来自壶穴上方，上覆厚冰层为冰融水提供了较快的流速。冰盖中的泄水通道提供了束状流，冰盖泄水通道冰体的融化导致注水点后退移位，季节变化在位移速度上得到反映，冰臼的形成（含内部微量位移）是冬季完成，冰臼与冰臼之间的位移则在夏季完成。

费县小泉庄冰川岩溶的发现，佐证了中国华北低海拔地区曾经存在较为广泛的冰盖覆盖，冰期降温不仅形成山谷冰川，还可形成规模分布的冰盖，这体现了中国东部曾经存在大幅降温的冰期气候，

冰期-间冰期循环是中国东部气候的基本特征。

4 结论

(1) 山东小泉庄灰岩表面发现的河曲状岩溶槽为冰水冲蚀形成，河曲状岩溶冲蚀槽供水源头的壶穴为冰盖融水下注过程中形成的冰臼，两者均属于冰川岩溶，冰盖融水提供了较快的流速、稳定流量的束状流与持续的时间。

(2) 小泉庄冰臼表现出的节奏性位移现象，初步分析为季节变化所致，冰臼形成过程属于低温期

(冬季), 冰臼与冰臼之间表现出较大位移量的时段应为温暖期(夏季), 冰臼位移速度与冰盖中融水对于冰体中泄水通道的消融速度有关。根据小泉庄冰川岩溶冰臼间距存在的慢-快-慢的特征, 其对应于低温-温暖-低温过程, 分析该冰川岩溶系统的形成大约需要 1~2 年的时间完成, 表现为冰川消退期的产物。

(3) 典型冰川岩溶在山东中部丘陵区的发现, 为中国冰川岩溶的研究提供了实物遗迹样本, 对于更为广泛的其他类型的岩溶冰川遗迹的研究与确认, 以及中国东部地貌过程、气候演化等方面的研究都具有重要意义。

致谢: 该项研究得到了自然资源部第一海洋研究所徐兴永研究员、中科院海洋研究所赵松龄教授、中国石油大学吕洪波教授、南京师范大学黄家柱教授、南京大学杨达源教授、中国地质科学院地质力学所钱方教授、河南地矿职业学院张先教授的大力支持与帮助, 在此表示由衷的谢意!

参考文献 (References)

- [1] Williams P W. The role of the epikarst in karst and cave hydrogeology: a review [J]. *International Journal of Speleology*, 2008, 37(1): 1-10.
- [2] Veress M. Glacial erosion and karst evolution (Karren formation on the surfaces formed by glaciers)[M]//Veress B, Szigethy J. Horizons in Earth Science Research 8. New York: Nova, 2012: 1-94.
- [3] Smart C. Glacierized and glaciated karst[M]//Gunn J. Encyclopedia of Caves and Karst Science. New York, London: Fitzroy-Dearborn, 2004: 389-391.
- [4] Veress M, Telbisz T, Tóth G, et al. Glaciokarsts[M]. Switzerland: Springer, 2019.
- [5] 赵松龄, 徐兴永. 低海拔冰川遗迹典型图谱[M]. 北京: 海洋出版社, 2019: 8-20. [ZHAO Songling, XU Xingyong. Typical Atlas of Low Elevation Glacial Remains[M]. Beijing: China Ocean Press, 2019: 8-20.]
- [6] 赵建. 山东的喀斯特地貌[J]. 山东师范大学学报: 自然科学版, 1990 (3): 54-60. [ZHAO Jian. The karst landforms in Shandong province [J]. Journal of Shandong Normal University: Natural Science, 1990 (3): 54-60.]
- [7] 姜鲁光. 鲁中南山地地貌面与地貌演进研究: 以泰山山地为例[D]. 山东师范大学硕士学位论文, 2003: 1-23. [JIANG Luguang. Study on geomorphologic surface and Geomorphologic evolution in the Mountainous area of South-central Shandong province: Taking the Mountainous area of Tialu as an example[D]. Master Dissertation of Shandong Normal University, 2003: 1-23.]
- [8] 安仰生, 张旭, 孙茂田, 等. 鲁中南岱崮地貌的成因及演化: 以抱犊崮为例解析[J]. *山东国土资源*, 2010, 26(2): 9-11, 14. [AN Yangsheng, ZHANG Xu, SUN Maotian, et al. Origin and evolution of flat slope landscape in middle and south part of Shandong province: Setting Baodugu as an example [J]. *Shandong Land and Resources*, 2010, 26(2): 9-11, 14.]
- [9] 彭凯, 赵有美, 李岚. 鲁中南岩溶发育的控制因素[J]. *山东国土资源*, 2010, 26(10): 26-30. [PENG Kai, ZHAO Youmei, LI Lan. Controlling factors for karst development in middle and south part of Shandong Province [J]. *Shandong Land and Resources*, 2010, 26(10): 26-30.]
- [10] 赵有美, 彭凯, 李岚. 鲁中南岩溶分区初步研究[J]. *山东国土资源*, 2010, 26(11): 28-32. [ZHAO Youmei, PENG Kai, LI Lan. Primary study on karst division in central and south part of Shandong province [J]. *Shandong Land and Resources*, 2010, 26(11): 28-32.]
- [11] 丁新潮, 徐树建, 倪志超. 山东岱崮地貌研究综述[J]. *山东国土资源*, 2014, 30(11): 32-35. [DING Xinchao, XU Shujian, NI Zhichao. Research on Daigu landform in Shandong province [J]. *Shandong Land and Resources*, 2014, 30(11): 32-35.]
- [12] 储皓, 武法东. 沂蒙山地质公园地质遗迹保护模式探讨[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(S2): 186-188. [CHU Hao, WU Fadong. An approach to the protection mode of geoheritages in Mount Yimeng Geopark [J]. China Population, Resources and Environment, 2017, 27(S2): 186-188.]
- [13] 刘瑞峰, 李婷婷, 商婷婷, 等. 岱崮地质公园地质遗迹的形成及评价研究[J]. *能源技术与管理*, 2014, 39(3): 186-188. [LIU Ruifeng, LI Tingting, SHANG Tingting, et al. Study on formation and evaluation of geological relics in Daigu Geological Park [J]. *Energy Technology and Management*, 2014, 39(3): 186-188.]
- [14] 韦跃龙, 蒋忠诚, 陈伟海, 等. 山东岩溶地貌特征及其形成演化分析[J]. *地球学报*, 2020, 41(4): 561-574. [WEI Yuelong, JIANG Zhongcheng, CHEN Weihai, et al. An analysis of characteristics, formation and evolution of the Karst Landforms, Shandong Province [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2020, 41(4): 561-574.]
- [15] Lee J S. Notes on Traces of Recent Ice Action in Northern China[M]. London: Geol. Mag. LIX, 1922: 14-21.
- [16] Lee J S. Quaternary glaciation in the Yangtze valley [J]. *Bulletin of the Geological Society of China*, 1934, 13(1): 15-62.
- [17] 景才瑞, 刘会平. 论李四光教授对中国第四纪地质研究之贡献[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1990, 10(3): 99-105. [JING Cairui, LIU Huiping. On Prof. Li Siguang's great contributions to quaternary researches of China [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1990, 10(3): 99-105.]
- [18] 王曰伦, 贾兰坡. 周口店第四纪冰川现象的观察[J]. 地质学报, 1952 (1-2): 16-25. [WANG Yuelun, JIA Lanpo. Observation of quaternary glacial phenomena in Zhoukoudian [J]. *Journal of Geological*, 1952(1-2): 16-25.]
- [19] 王曰伦. 中国第四纪冰川论证[C]//中国地质科学院天津地质矿产研究所文集(26-27). 北京: 中国地质学会, 1992: 19-46. [WANG Yuelun. Quaternary glacier demonstration in China[C]//Proceedings of Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences (26-27). Beijing: Geological Society of China, 1992: 19-46.]
- [20] 杨怀仁, 徐馨. 中国东部第四纪自然环境的演变[J]. 南京大学学报: 自然科学版, 1980(1): 121-144. [YANG Huairen, XU Xin.

- Quaternary environmental changes in eastern China [J]. Journal of Nanjing University: Natural Science, 1980(1): 121-144.]
- [21] 杨达源. 中国东部第四纪冰期气候与环境的基本特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1990(1): 71-79. [YANG Dayuan. On basic features of climate and environment in quaternary glacial period in eastern China [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1990(1): 71-79.]
- [22] 黄培华. 《冰期之庐山》质疑[J]. 自然辩证法通讯, 1982(3): 43-45. [HUANG Peihua. "Lushan During the Ice Age" questioned [J]. Journal of Dialectics of Nature, 1982(3): 43-45.]
- [23] 施雅风. 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, 2006: 1-67. [SHI Yafeng. The Quaternary Glaciations and Environmental Variations in China [M]. Shijiazhuang: Hebei Science and Technology Press, 2006: 1-67.]
- [24] 施雅风, 崔之久, 李吉均, 等. 中国东部第四纪冰川与环境问题[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 21-25. [SHI Yafeng, CUI Zhijiu, LI Jijun, et al. China's Eastern Quaternary Glacier and Environmental Problems [M]. Beijing: Science Press, 1989: 21-25.]
- [25] 施雅风. 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, 2010, 56(5): 683-692. [SHI Yafeng. On Prof. Lee's having misread debris flow deposits as quaternary glaciations in the Lushan area, Jiangxi Province [J]. Geological Review, 2010, 56(5): 683-692.]
- [26] 舒勒A, 常子文, 国兴源. 泰山中部的水川现象[J]. 地质科学, 1959(3): 82-83. [Shouler A, CHANG Ziwen, GUO Xingyuan. The water phenomenon in the middle of Mount Tai [J]. Chinese Journal of Geology, 1959(3): 82-83.]
- [27] 张建伟, 刘建霞, 郭慧玲, 等. 泰山地区第四纪末次冰期古气候特征[J]. 海洋地质前沿, 2011, 27(11): 45-50. [ZHANG Jianwei, LIU Jianxia, GUO Huiling, et al. Paleo-climatic characteristics during the last glacial stage of quaternary in the Taishan [J]. Marine Geology Letters, 2011, 27(11): 45-50.]
- [28] 张建伟, 王锡魁, 袁西龙, 等. 泰山南坡第四纪沉积物石英砂表面特征及沉积环境指示[J]. 世界地质, 2011, 30(3): 463-468. [ZHANG Jianwei, WANG Xikui, YUAN Xilong, et al. Quartz sand surface characteristics of Quaternary sediments and sedimentary environment indicator in south slope of Mount Tai [J]. Global Geology, 2011, 30(3): 463-468.]
- [29] 李乃胜, 石学法, 赵松龄, 等. 崂山地质与古冰川研究[M]. 北京: 海洋出版社, 2003: 1-380. [LI Naisheng, SHI Xuefa, ZHAO Songling, et al. Study on Geology and Palaeo-Glaciation of Mt. Laoshan [M]. Beijing: China Ocean Press, 2003: 1-380.]
- [30] 徐兴永. 崂山古冰川的形成及其环境效应的研究[D]. 中国科学院海洋研究所博士学位论文, 2004: 33-51. [XU Xingyong. Study on paleo-glaciation in Mt. Laoshan and its environmental effect [D]. Doctor Dissertation of the Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2004: 33-51.]
- [31] 徐兴永, 石学法, 于洪军, 等. 崂山顶、洞、沟、坡、麓、滩、岬一带巨砾成因研究[J]. 海洋科学, 2004, 28(6): 10-13. [XU Xingyong, SHI Xuefa, YU Hongjun, et al. Study on great gravel on mountaintop, gully, channel, slope, beach, cape and foot of mountain Laoshan [J]. Marine Sciences, 2004, 28(6): 10-13.]
- [32] 徐兴永, 肖尚斌, 李萍. 崂山古冰川遗迹的地质证据[J]. 石油大学报: 自然科学版, 2005, 29(4): 5-9. [XU Xingyong, XIAO Shangbin, LI Ping. Geologic proof on paleo-glaciation remains in Laoshan Mountain [J]. Journal of the University of Petroleum, China, 2005, 29(4): 5-9.]
- [33] 徐兴永, 于洪军. 冰消期地貌[M]. 北京: 海洋出版社, 2012: 11-13. [XU Xingyong, YU Hongjun. Glaciation Geomorphology [M]. Beijing: China Ocean Press, 2012: 11-13.]
- [34] 李培英, 徐兴永, 赵松龄. 海岸带黄土与古冰川遗迹[M]. 北京: 海洋出版社, 2008: 1-320. [LI Peiying, XU Xingyong, ZHAO Songling. Coastal Loess and Ancient Glacial Remains [M]. Beijing: China Ocean Press, 2008: 1-320.]
- [35] 赵松龄. 中国东部低海拔型古冰川遗迹[M]. 北京: 海洋出版社, 2010: 143-152. [ZHAO Songling. Low-altitude ancient glacial remains in eastern China [M]. Beijing: China Ocean Press, 2010: 143-152.]
- [36] 王照波, 卞青, 李大鹏, 等. 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, 2017, 63(1): 134-142. [WANG Zhaobo, BIAN Qing, LI Dapeng, et al. Discovery of the quaternary glacial relics in Mount Mengshan, Shandong province [J]. Geological Review, 2017, 63(1): 134-142.]
- [37] 王照波, 张剑, 王江月, 等. 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, 2017, 63(3): 694-702. [WANG Zhaobo, ZHANG Jian, WANG Jiangyue, et al. 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, 2017, 63(3): 694-702.]
- [38] 王照波, 王江月, 冯金华, 等. 山东蒙山全新世冰川遗迹的发现及确认: 来自宇宙核素年龄证据[J]. 山东国土资源, 2018, 34(6): 1-7. [WANG Zhaobo, WANG Jiangyue, FENG Jinhua, et al. Discovery and recognition of Holocene glacial remains in Mengshan mountain in Shandong province: Evidences from cosmogenic isotopes dating age [J]. Shandong Land and Resources, 2018, 34(6): 1-7.]
- [39] 王照波, 王江月. 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, 2019, 35(6): 11-18. [WANG Zhaobo, WANG Jiangyue. Characteristics comparison and the origin analysis of glacier scratches in Hailuogou of Sichuan province and Mengshan in Shandong province [J]. Shandong Land and Resources, 2019, 35(6): 11-18.]
- [40] 王照波, 王江月. 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, 2019, 65(3): 603-622. [WANG Zhaobo, WANG Jiangyue. 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, 2019, 65(3): 603-622.]
- [41] 王照波, 王江月, 张剑. 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, 2019, 40(2): 81-90. [WANG Zhaobo, WANG Jiangyue, ZHANG Jian. Comparison of the Quaternary sediments from glaciers, loess and stream with the marine isotope stages (MIS) in Mengshan, Shandong [J]. East China Geology, 2019, 40(2): 81-90.]
- [42] Wang Z B, Wang J Y, He L L, et al. 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)*, 2020, 94(1): 141-151.
- [43] 王照波, 王江月, 王全义, 等. 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*, 2018, 34(7): 1-7. [WANG Zhaoobo, WANG Jiangyue, WANG Quanyi, et al. The discovery of quaternary cirques system in Ganshan of Western Henan province and analysis of coupling relation with MIS [J]. *Shandong Land and Resources*, 2018, 34(7): 1-7.]
- [44] 王照波, 司荣军, 王江月. 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*, 2020, 36(1): 1-11. [WANG Zhaoobo, SI Rongjun, WANG Jiangyue. Comparative study of glacial geomorphology between the Himalayas and the middle and low mountain areas in Eastern China [J]. *Shandong Land and Resources*, 2020, 36(1): 1-11.]
- [45] 王照波, 王江月, 田晓明. 冰蚀“三角脊链”的发现及其在地貌演化过程中的判读意义[J]. *华东地质*, 2020(待刊). [WANG Zhaoobo, WANG Jiangyue, TIAN Xiaoming. Discovery of glacial triangle ridge chains and its significance in geomorphologic interpretation [J]. *East China Geology*, 2020 (For publication).]
- [46] Cvijić J. L'époque glaciaire dans la péninsule balkanique [J]. *Annales de Géographie*, 1917, 26(141): 189-218.
- [47] Veress M, Samu S, Mitre Z. The effect of slope angle on the development of type a and type b channels of rinnenkarren with field and laboratory measurements [J]. *Geomorphology*, 2015, 228: 60-70.
- [48] Veress M. Morphology and solution relationships of three Karren slopes in different environments (Totes Gebirge, Eastern Alps) [J]. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 2012, 56(S2): 47-62.
- [49] Dubljanskij J V. Teoreticzeskoje modelirovaniye dinamiki formirovaniya gidrotermokarsztovyh poloszyej – Metodi i izuchsenyija geologiceszkikh javlenij [J]. Novosibirsk, 1987(62): 97-111.
- [50] Veress M. Meanderkarren[M]//Ginés Á, Knez M, Slabe T, et al. Karst Rock Features, Karren Sculpturing Zalozba ZRC. Institut za raziskovanje krasa ZRC SAZU, Postojna-Ljubljana. Carsologica. 2009, 9, 223-235.
- [51] 林承坤, 陈钦峦. 荆江河曲的成因与演变[J]. 南京大学学报: 自然科学版, 1965 (1): 97-122. [LIN Chengkun, CHEN Qinluan. ПРОИСХОЖДЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИОННЫЙ ПРОЦЕСС МЕАНДРА Р. ЦИНЦЗЯН [J]. *Journal of Nanjing University: Natural Sciences*, 1965 (1): 97-122.]
- [52] 韩同林, 劳雄, 郭克毅. 河北、内蒙古中低山区发现罕见的冰臼群[J]. *地质论评*, 1999, 45(5): 456-462. [HAN Tonglin, LAO Xiong, GUO Keyi. Rare moulin swarms discovered in the medium-low mountains areas in Hebei and Inner Mongolia [J]. *Geological Review*, 1999, 45(5): 456-462.]
- [53] 李洪江, 崔之久, 赵亮. 内蒙、河北山区壶穴的成因探讨: 兼论壶穴成因分类[J]. *地理学报*, 2001, 68(2): 223-231. [LI Hongjiang, CUI Zhijiu, ZHAO Liang. Origin of pots in Inner Mongolia and Northern Hebei: Also about the classification of pots [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 68(2): 223-231.]
- [54] 施雅风. 中国科学院院士施雅风谈“冰臼”与“壶穴”[J]. *热带地理*, 2002, 22(1): 1-2. [SHI Yafeng. Shi Yafeng, Academician of Chinese Academy of Sciences, on "Ice mortar" and "Pot Cave" [J]. *Tropical Geography*, 2002, 22(1): 1-2.]
- [55] 章雨旭. “冰臼”成因争鸣: 以克什克腾旗青山岩臼群为例[J]. *地质论评*, 2005, 51(6): 680, 712. [ZHANG Yuxu. The cause of the ice cube is disputed, Take the Hexigten Banner Qingshan acetabular group as an example [J]. *Geological Review*, 2005, 51 (6): 680, 712.]
- [56] 韩同林. 驳施雅风“冰臼”“负球状风化”成因论[J]. *地质论评*, 2010, 56(4): 538-542. [HAN Tonglin. An argument with academician Shi Yafeng on the genesis of “Glacial Potholes” formed by granite negative spheroidal weathering [J]. *Geological Review*, 2010, 56 (4): 538-542.]