

张家口坝缘一带晚更新世冰川遗迹与 深部地质作用的关系及其古气候意义

刘 广¹⁾, 李俊录¹⁾, 程海峰¹⁾, 段先乐¹⁾, 薛鹏远¹⁾, 赵麒寓¹⁾, 曾普胜^{2)*}

1)河北省区域地质调查院, 河北廊坊 065000;

2)自然资源部生态地球化学重点实验室, 国家地质实验测试中心, 北京 100037

摘 要: 深大断裂的强烈活动为火山喷发提供了重要的岩浆通道, 火山喷发后形成的火山口、高出夷平面 300~450 m, 最大厚度可达 500 m 的火山熔岩垂向堆积, 加上深部地质作用导致的地壳抬升, 为冰川形成-滑动提供了有利的地形条件和气候条件。张家口西北坝缘一带首次发现的冰川遗迹主要有冰碛物、冰水沉积物及冰川地貌。电镜扫描石英砂粒表面可见冰川成因的冰蚀擦痕和碾磨压坑, 孢粉显示为干燥寒冷的气候环境。获得了(121.22±6.54) ka 和(81.13±4.48) ka 的光释光年龄, 与河北省第四纪第五冰期和第六冰期相对应, 与平原区的黄骅海退和大城海退时间相吻合, 显示张家口坝缘一带在晚更新世早中期经历了两期冰川作用。这一发现填补了研究区冰川遗迹研究的空白, 为我国东部中低山区第四纪冰川的存在提供了有力的证据, 丰富了我国东部中低山区第四纪冰川研究的年代学数据, 对认识本区及我国东部大陆气候特征和第四纪环境变化具有重要意义。

关键词: 晚更新世; 冰川遗迹; 火山口; 深大断裂; 张家口

中图分类号: P343.6; P532 **文献标志码:** A **doi:** 10.3975/cagsb.2021.092201

Relationship between Late Pleistocene Glacial Remnants and Deep Geological Processes in Bayuan Area, Zhangjiakou and Its Paleoclimatic Significance

LIU Guang¹⁾, LI Jun-lu¹⁾, CHENG Hai-feng¹⁾, DUAN Xian-le¹⁾,
XUE Peng-yuan¹⁾, ZHAO Qi-yu¹⁾, ZENG Pu-sheng^{2)*}

1) The Institute of Regional Geological Survey of Hebei Province, Langfang, Hebei 065000;

2) Key Laboratory of Eco-geochemistry, Ministry of Natural Resources, National Research Center for Geoanalysis, Beijing 100037

Abstract: The strong activities of the deep faults provide the important magma channel for volcanic eruption. The volcanic crater formed after volcanic eruption, the vertical accumulation of volcanic lava 300~450 m above planation surface, and the maximum thickness of volcanic lava up to 500 m, plus the uplift of the crust caused by deep geological processes, provide favorable topographic and climatic conditions for glacier formation and slipping. The glacial remnants first discovered in the northwest of Zhangjiakou mainly, consist of glacial moraines, glacial sediments and glacial landforms. The surface of the quartz sand grains by scanning of electron microscope shows glacial erosion scratches and grinding pits; and the pollens show a dry and cold climate environment. The OSL ages of (121.22±6.54) ka and (81.13±4.48) ka which correspond to the fifth and sixth glaciations in Hebei Province, and coincide with the Huanghua and Dacheng regressions in the plain area, indicating that Bayuan area, Zhangjiakou experienced two periods of glaciation in the early and middle of Late

本文由河北省自然资源厅区域地质调查项目——河北省万全、苏家桥、左卫、张家口 1:5 万区域地质调查(编号: 4540401YBNVVG)、中国地质调查局特殊地质地貌区填图试点项目——河北 1:5 万大厂回族自治县等四幅第四系覆盖区地质填图(编号: DD20160060)、中国地质科学院基本科研业务费项目(编号: JYYWF20180101)和国家自然科学基金项目(编号: 41072073)联合资助。

收稿日期: 2021-06-08; 改回日期: 2021-09-06; 网络首发日期: 2021-09-24。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 刘广, 男, 1986 年生。硕士, 工程师。主要从事区域地质矿产调查研究工作。E-mail: 593668927@qq.com。

*通讯作者: 曾普胜, 男, 1964 年生。博士, 教授。长期从事岩石学、矿床学、勘查地球化学研究。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号。E-mail: zengpusheng@qq.com。

Pleistocene. This discovery fills the blank in the research of glacial remnants in the study area, and supply evidence for the existence of the quaternary glacier at the middle-low mountains in the eastern China, has enrich the quaternary glacial chronology data. It is of great significances for understanding characteristics of continental climate and the quaternary environmental changes in the study region and eastern China.

Key words: Late Pleistocene; glacial remnants; the crater; deep faults; Zhangjiakou

第四纪环境及其演化的研究与人类活动关系尤为密切,一直备受关注,而第四纪冰川的研究作为一项重要内容更是研究的热点。1933年,李四光先生以庐山为中心创立的四次“冰期”,开启了中国的第四纪冰川研究,自此关于中国东部(105°E以东)中低山区是否存在第四纪冰川就成为了地质界长期争论的焦点,这一争论已持续近一个世纪,并形成两种截然相反的观点:反对者多从西部高原现代冰川的研究入手,认为东部的冰碛砾石为泥石流成因,并以青藏高原的雪线研究成果对东部进行推演,断论中国东部2000 m以下的中低山区第四纪时气温、雪线及冰川积累区面积比率(AAR)等指标都不具备发育冰川的条件(施雅风, 2010a, b; 赵井东等, 2011; 施雅风等, 2011; 王乃昂等, 2019);支持者多从中国东部中低山区发现的冰川遗迹入手进行推论,从宏观地貌学、运动学、微观显微学、古生物学、年代学等方面提供了中国东部中低山区存在第四纪冰川的有力证据(吕洪波等, 2012; 韩同林, 2010; 王照波等, 2017, 2018)。笔者认为,寻找确凿且易识别的野外证据,结合多学科、多手段的交叉研究,才会推进我国东部中低山区第四纪冰川的研究。

前人在张家口坝上地区塔拉图一带发现了第四纪冰川遗迹(闫永福, 1997),本次研究在坝缘一带首次发现了第四纪晚更新世冰川遗迹,印证了张家口地区

存在第四纪冰川且范围更大。本文通过对研究区内深大断裂控制的火山活动,以及火山口-火山高地与冰川的内在联系、冰川遗迹的地貌特征、沉积物特征、孢粉特征和年代学特征开展综合研究,结合第四纪冰期对比和海平面变化,为中国东部中低山区第四纪冰川的存在提供了强有力的证据,对研究本区及我国东部大陆气候特征和第四纪环境变化具有重要意义。

1 地质背景

研究区位于河北省西北部张家口地区境内,属华北克拉通中部造山带北缘(图1a),地貌分区南北向横跨内蒙古高原区和华北中低山区两个二级地貌单元,二者以坝缘为界,高差100~200 m,基本与尚义—隆化大断裂重合(河北省区域地质矿产调查研究所, 2017)。

尚义—隆化深大断裂位于冀北地区尚义—崇礼—赤诚—丰宁—隆化一带,前人根据叠加改造与区域变质作用的活动方式及其与区域构造运动主应力的对应关系,将该深大断裂分为2个构造阶段、9个构造活动期。始新世—第四纪属于中元古代—新生代继承性活动与叠加改造阶段的第9期,该断裂以伸展拉张型脆、韧性变形与正断层活动为特征,活动于NW—SE向拉张构造环境(马超等, 2020)。与NE向的汾渭地堑在新生代呈区域上的共轭伸展断裂(图1a)。

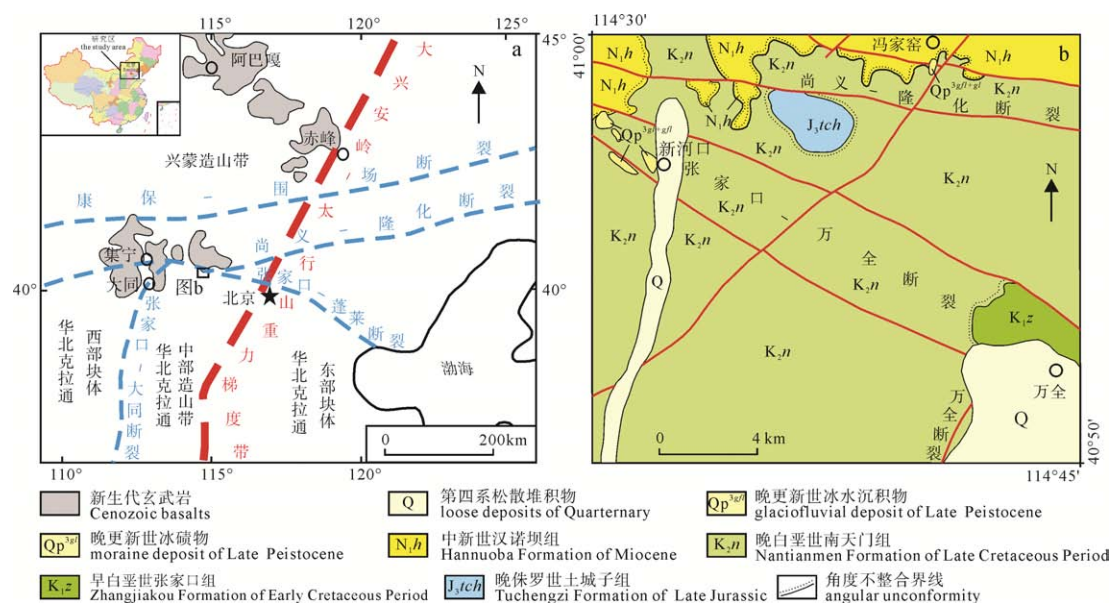


图1 华北北部新生代构造-火山活动简图(a, 据樊祺诚等, 2015; Zhao et al., 2001)和研究区区域地质简图(b)
Fig. 1 Cenozoic tectonic-volcanic activity diagram in the northern part of north China(a, after FAN et al., 2015; Zhao et al., 2001) and regional geological map of the study area (b)

汾渭地堑系是我国重要的一条张性断裂带, 主要由 NNE、NE 向断裂带组成, 总体呈 NE-SW 向“S”形展布, 由一系列的张性断陷盆地组成, 由北向南依次发育张家口—怀安、延庆—怀来、大同、忻定、太原、临汾和运城盆地(吴奇等, 2013)。

研究区位于汾渭地堑北端张家口—怀安盆地北界, 除发育尚义—隆化断裂外还有张家口—万全断裂(图 1b), 该断裂是张家口—北京—蓬莱断裂带西部的主断裂, 与汾渭地堑的北界交汇, 是控制张家口地区新生代玄武岩的深源断裂(马超等, 2020)。

中新世, 强烈的汉诺坝组玄武岩喷发事件沿尚义—隆化断裂、张家口—大同断裂和康保—围场断裂强烈活动, 集宁—尚义—张北一带汉诺坝玄武岩基本分布于尚义—隆化断裂以北, 以及尚义—隆化断裂与张家口—大同断裂交汇处, 呈近东西向展布(图 1a), 堆积厚度自南向北变薄趋势明显, 坝缘最厚处可达 454 m; 围场—赤峰一带汉诺坝玄武岩基本分布于康保—围场断裂以北, 最大喷发堆积区位于响水林场—老牛槽山尖一带, 呈近东西向带状展布, 厚度一般在 300 ~ 450 m, 最大厚度可达 500 m 左右。与此同时张家口—万全断裂同期复活, 并沿断裂喷发基性岩浆, 形成小面积汉诺坝玄武岩岩株。

新近纪以来, 张家口—万全断裂持续强烈活动, 研究区内表现为南倾高角度正断层, 断裂带北东侧持续抬升, 南西侧持续下降, 形成张家口盆地; 上新世至中更新世, 汉诺坝火山台地初步形成, 尚义—隆化断裂活动明显, 构造面仍向南陡倾, 发生多次垂直升降运动, 造成坝上地区的持续抬升, 形成了坝上、坝下的地貌分区; 晚更新世以来, 坝上地区整体上升缓慢, 剥蚀、堆积作用占主导地位。

火山喷发堆积作用和深部地质作用对地形地貌塑造有重要意义(曾普胜, 2021a, b)。汉诺坝玄武岩的喷发堆积使坝缘地区原始地貌的海拔升高了约 450 m, 尚义—隆化断裂和张家口—万全断裂的垂直升降活动使坝缘地区海拔增加了 100 ~ 200 m, 相当于中更新世研究区内发生冰川事件时深部地质作用使海拔高度较汉诺坝玄武岩形成前升高了 550 ~ 650 m。海拔的升高使气候环境变得寒冷, 易形成冰川; 火山喷发后形成的火山口高地, 是冰川形成的最佳位置, 如新河口村西北火山口; 垂直升降活动形成的坝缘陡坎, 有利于冰川的滑动。

研究区自西向东调查发现发育三个火山口, 分别为新河口村西北火山口(高程 1531.20 m)、水沟台村西火山口(高程 1508.30 m)、菜山沟村北火

山口(高程 1421.70 m)(图 2a)。新河口村西北火山口与新河口冰川遗迹关系密切, 位于尚义—隆化断裂与张家口—万全断裂的交汇处, 东西长 1300 m, 南北宽 520 m, 深 100 余 m, 由于后期破坏, 该火山口仅保留北半部分, 地貌上形成“马蹄坑”(图 3a, 350°)。

2 冰川遗迹及活动时代确定

张家口西北坝缘一带首次发现的冰川遗迹有两处, 其中新河口一带的冰川遗迹出露面积 1.51 km², 冯家窑一带的冰川遗迹出露面积 0.17 km²。

2.1 地貌特征

新河口冰川遗迹: 位于新河口村西低缓丘陵区, 冰川地貌发育较全, 由北西向南东依次可见冰斗、“U”形谷、侧碛堤和冰阜阶地(图 2a)。冰斗背靠汉诺坝组玄武岩陡峭岩壁(新河口村西北火山口残留部分), 整体呈不规则勺状, 地势中间低两侧高, 北侧坡度较陡, 可达 50° ~ 60°, 高差 100 ~ 150 m, 南侧坡度较缓, 一般 10° ~ 20°, 高差 25 ~ 40 m, 斗底可见冰川湖, (图 3b, 250°); “U”形谷位于冰斗南东, 谷底开阔、平坦, 谷坡较陡, 谷宽 280 m, 长 900 m, 走向南东, 但大部分被现代沟谷破坏, 垂向高差为 80 ~ 120 m; 侧碛堤呈垄状北西向带状展布, 北西高南东低, 垂向高差为 40 ~ 80 m, 分布于狼山沟两侧: 南侧侧碛堤长约 1.5 km, 宽 100 ~ 300 m(图 3c, 130°); 北侧侧碛堤长约 1.6 km, 宽 100 ~ 250 m, 末端被全新世冲积物所破坏; 冰阜阶地紧邻狼山沟北侧侧碛堤, 呈北西向长条状展布, 上游被现代冲沟所改造, 中部保存良好, 下部被全新世冲积物所破坏, 长约 500 m, 宽约 150 m, 高差 40 ~ 60 m。

冯家窑冰川遗迹: 位于冯家窑村南约 1.3 km 处, 地貌形态为冰砾阜(图 2a, 3d, 200°), 整体呈近南北向椭圆状, 长约 650 m, 宽约 280 m, 中间高四周低, 高差约 20 m。

2.2 沉积物宏观特征

新河口冰水沉积物+冰碛物: 因后期改造及地表植被覆盖, 冰碛物露头普遍较差, 仅冰阜阶地外侧可见良好断面。冰斗地表多为大小不一的玄武岩冰川漂砾, 呈棱角状, 砾径多大于 0.5 m, 部分砾石可见冰川擦痕, 擦痕窄而深, 数量多间距小, 形态基本呈直线型(图 3e, 140°), 指示长期受冰川稳定作用力所致; “U”形谷多被现代河谷破坏, 谷底出露南天门组砂岩夹砾岩, 谷肩可见少量熨斗石(图 3f, 70°), 熨斗石长轴方向与“U”形谷长轴

方向一致,表面可见平行于长轴方向的冰川擦痕;侧碛堤沉积物主体为冰碛砾石,砾石间充填少量砂和泥,整体呈无序混合堆积,砾石多呈棱角状,大小略小于冰斗处漂砾,成分以汉诺坝组玄武岩为主,南天门组内砂岩、砾岩次之;冰阜阶地整体为一套杂色砾石、砂、黏土的混合堆积,自下而上依次为深灰色粗砾石层、黄灰色细砾石层夹黄色细砂、黏土,灰色、深灰色粗砾石层,出露厚度约 35 m,地层层序见万全区新河口村西晚更新世冰川遗迹剖面图(P69)(图 2b)。

新河口冰水沉积物	厚度 > 34.8 m
3.灰色、深灰色粗砾石层	> 16.5 m
2.黄灰色细砾石层,夹黄色细砂、黏土	9.7 m
1.灰色、深灰色冰粗砾石层	8.6 m

~~~~~微角度不整合~~~~~

下伏:晚白垩世南天门组砾岩

砾石层中玄武岩砾石普遍发生磨圆,呈次棱角状-次圆状,部分砾石发育钙质薄膜,流纹岩砾石多成次圆状-浑圆状,继承于南天门组砾岩中砾石原始形态,细砂夹黏土夹层内发育微弱平行层理,细砾石层内发育斜层理(图 3g, 285°),层理产状为 195° ∠ 21°,上述特征指示该套沉积物为冰水沉积环境,且物质来源于北部汉诺坝玄武岩和南天门碎屑岩。冰碛物和冰水沉积物不整合覆盖于南天门组碎屑岩和汉诺坝组玄武岩之上。

冯家窑冰水沉积物+冰碛物:因修路可见良好人工断面,其地层层序见万全区冯家窑村南晚更新世冰川遗迹剖面图(P68)(图 2b)。

冯家窑冰碛物,未见顶:

7.灰色、深灰色冰碛砾石,成分以玄武岩为主  
厚度 > 7.8 m

|          |           |
|----------|-----------|
| 冯家窑冰水沉积物 | 厚度 14.4 m |
|----------|-----------|

|          |       |
|----------|-------|
| 6.土黄色砂砾石 | 3.2 m |
|----------|-------|

|                                                  |       |
|--------------------------------------------------|-------|
| 5.紫红色含砾黏土,顶部有 0.2 m 的紫灰色含砾黏土,向两侧快速尖灭,相变为灰白色含砾中粗砂 | 0.8 m |
|--------------------------------------------------|-------|

|                         |       |
|-------------------------|-------|
| 4.带黄色斑点的紫红色泥砾,砾石与泥质混杂堆积 | 0.6 m |
|-------------------------|-------|

|                       |       |
|-----------------------|-------|
| 3.灰白色细砂,偶含砾石,砾石成分为玄武岩 | 5.4 m |
|-----------------------|-------|

|               |       |
|---------------|-------|
| 2.灰白色夹紫红色含砾粗砂 | 3.9 m |
|---------------|-------|

|              |       |
|--------------|-------|
| 1.暗红色含砾黏土质粉砂 | 0.5 m |
|--------------|-------|

~~~~~微角度不整合~~~~~

下伏:晚白垩世南天门组灰色砾质粗砂岩

冰水沉积物组合为砖红色黏土、灰白色砂、灰白色细砾和深灰色玄武岩的混合堆积,具有明显的水流型层理,但这些层理因冰川挤压而发生褶

皱(图 3h, 290°)。沉积物内部见有大量冰碛泥砾透镜体,泥砾大小不一,形状各异,成分复杂,包括玄武岩、砂岩、泥岩和砾岩,指示冰水沉积物的物质来源于沉积物北侧的汉诺坝组和下伏的南天门组(图 3i, j, 290°)。冰水沉积物顶部发育一套以玄武岩为主的冰碛物,冰碛砾石表面可见冰蚀擦痕和碾磨压坑(图 3k, 200°),冰蚀擦痕平滑均一、窄而深、形态呈直线型,碾磨压坑形态为圆形,深度可达 0.5 ~ 1 cm,二者均为冰川作用长时间稳定作用力所致,而非其它快速堆积不稳定受力成因(王斯文, 2015)。冰碛物内局部可见冰碛玄武岩羊背石,其宏观展布方面近南北,北面坡度较陡,可达 40° ~ 50°,南面坡度较缓,为 10° ~ 20°(图 3l, 200°),指示冰川运动方向自北向南,冰川主体位于北部坝上地区。沉积物特征与我国西部冰川沉积物特征相同(朱大岗等, 2006),其出露厚度约 22 m,不整合覆盖于南天门组砾质粗砂岩和汉诺坝组玄武岩之上。

2.3 沉积物微观特征

石英颗粒表面的形态对其沉积环境及其演变历史具有鉴定意义(尹雪斌等, 2003; 石磊等, 2010; 陈安东等, 2016),为进一步研究沉积物的成因,我们在冰水沉积物中采取了 4 件电镜扫描样品(图 2b, c),在河北省区域地质矿产调查研究所实验室运用 JSM-IT300 扫描电子显微镜对样品进行了扫描鉴定,4 件样品结果基本一致。样品中石英砂外形以棱角和尖棱角状颗粒占绝对优势,部分石英砂呈次棱角状(图 3m),石英砂边缘多为次棱脊形状,部分颗粒边缘出现棱脊磨损,少部分为尖棱脊形状,机械磨圆较差。除见有贝壳状断口外,石英砂表面可见冰川作用所特有冰蚀擦痕(图 3n)、碾磨压坑(图 3o)和平行解理面(图 3p):冰蚀擦痕,位于石英砂颗粒平整的或者凸起的表面上,在形态上与宏观冰川擦痕无异,擦痕的一端可以观察到明显的切入点,随着往另一端的延伸,擦痕变得越来越浅,长度为 20 ~ 25 μm;碾磨压坑,表现为圆形深坑,坑口直径约为 30 μm,深度可达 10~15 μm,坑底及坑壁可见明显的挤压研磨特征,与宏观冰川碾磨压坑特征基本一致;平行解理面,系由石英砂在冰川外力作用挤压下破碎所致,延展性好,平整光滑。石英砂粒的棱角状形态是因为机械碰撞、压碎等作用造成的,证明区内的沉积环境为水动力成因而非风动力成因;石英砂粒表面的冰蚀擦痕和碾磨压坑是因为较长时间固定在某一点上挤压研磨造成的,证明区内的沉积环境为冰川成因而非泥石流成因(谢又予和崔之久, 1981)。将其表面结构与石英砂表面结构模式图集(王颖和迪纳

瑞尔, 1985)相对照, 也证明沉积环境属冰川成因。

2.4 孢粉及时代

植物孢子花粉外壁由有机化合物和近似角质纤维素组成, 300℃不分解, 高压不变形, 强酸强碱中不溶解, 保存广、数量多, 所以植物的孢子花粉化石广泛用于第四纪古气候研究(曹伯勋, 1995)。为进一步验证研究区内冰川遗迹形成的古气候环境与冰川作用是否匹配, 我们在冰水沉积物中采取了5件孢粉样品(图2b, c), 样品送至国土资源部地下水矿泉水及环境监测中心鉴定。鉴定结果(表1)显示孢粉组合中草本植物花粉(49.76%~94.12%, 平均76.68%)占绝对优势, 其中以耐干旱的蒿属(15.64%~50.00%, 平均34.97%)和喜冷干藜科(19.87%~41.57%, 平均30.49%)为主, 还可见蕈草属(1.99%~3.70%, 平均3.08%)、旋花科(0~6.62%, 平均3.35%)、白刺属、禾本科、菊科、蒲公英属、毛茛科、唐松草属、蓼科、十字花科、豆科、亚麻科等; 木本植物花粉(5.88%~43.30%,

平均19.65%)以针叶林松属(5.88%~38.86%, 平均16.98%)为主, 还有零星的桦属、栎属、榆属、榛属、麻黄属等; 蕨类孢子(0~6.64%, 平均3.67%)中可见卷柏属(1.99%~3.93%, 平均3.08%)和水龙骨科(0~6.16%, 平均3.57%)。通过对孢粉种属及其所占比例进行统计, 反映寒冷、干燥条件的孢粉比例(蒿属34.97%、藜科30.49%和松属16.98%)达到了82.44%, 表明当时植被类型属森林草原型, 主体为干冷草原型, 符合第四纪冰川的发育环境(许青海等, 2005; 李月丛等, 2005; 刘德梅等, 2016)。

2.5 冰碛物光释光年代

河北省山区第四纪冰川遗迹较多, 但有同位素年龄支撑的极少, 绝大多数依靠化石、古气候、海平面变化的类比归属时代, 仅坝上张北县塔拉图一带冰碛物获得了(142.3±0.12) ka的光释光年龄(河北省区域地质矿产调查研究所, 2017)。为了准确判定研究区内冰川遗迹的形成时代, 在冯家窑冰水

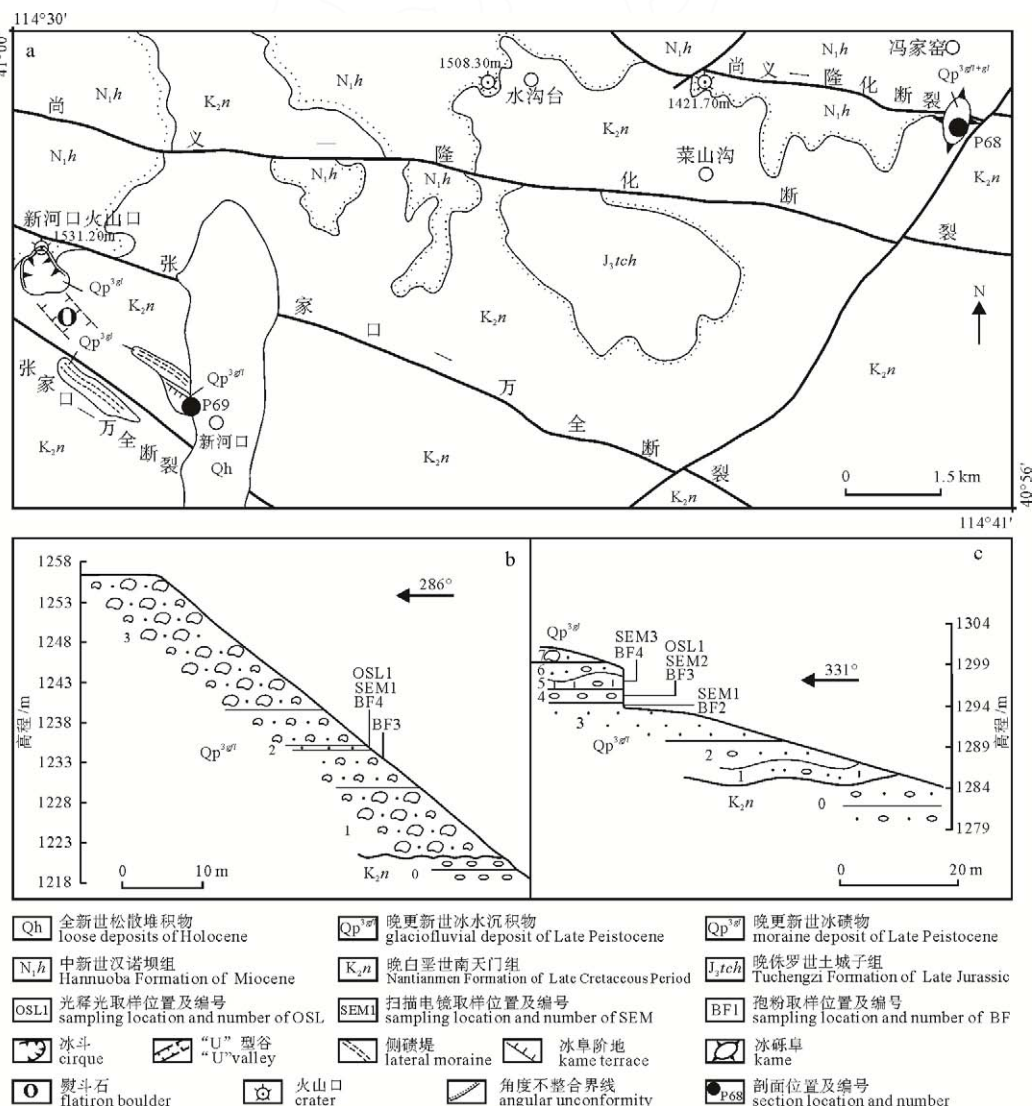


图2 研究区火山口及冰川遗迹分布图(a)、P69冰川遗迹剖面图(b)和P68冰川遗迹剖面图(c)

Fig. 2 Distribution of craters and glaciers in the study area (a), P69 profile of glaciers (b), and P68 profile of glaciers (c)

表 1 孢粉种属统计表
Table 1 Statistics of spores

| 野外编号 | Field number | P68BF-4 | P68BF-3 | P68BF-2 | P69BF-4 | P69BF-3 |
|--------|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 深度/m | Depth/m | 2.2 | 2.6 | 3.9 | 20.0 | 20.5 |
| 下样量/g | Sample size/g | 50 | 50 | 200 | 80 | 200 |
| 孢粉总浓度 | Concentration | 19 | 3 | 6 | 15 | 2 |
| 植物花粉/粒 | Sum | 151 | 27 | 178 | 211 | 34 |
| 木本植物花粉 | Trees & Shrubs | 27 | 5 | 22 | 92 | 2 |
| 草本植物花粉 | Herbs | 117 | 21 | 150 | 105 | 32 |
| 蕨类植物孢子 | Ferns | 7 | 1 | 6 | 14 | 0 |
| 松属 | Pinus | 23 | 4 | 18 | 82 | 2 |
| 桦属 | Betula | 2 | 0 | 0 | 3 | 0 |
| 栎属 | Quercus | 0 | 0 | 2 | 2 | 0 |
| 榆属 | Ulmus | 0 | 1 | 1 | 3 | 0 |
| 榛属 | Corylus | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 麻黄属 | Ephedra | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 白刺属 | Nitraria | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 |
| 禾本科 | Graminaceae | 1 | 1 | 0 | 2 | 1 |
| 藜科 | Chenopodiaceae | 30 | 10 | 74 | 58 | 9 |
| 菊科 | Compositae | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 蒿属 | Artemisia | 71 | 8 | 58 | 33 | 17 |
| 蒲公英属 | Taraxacum | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 毛茛科 | Ranunculaceae | 1 | 0 | 1 | 2 | 0 |
| 唐松草属 | Thalictrum | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 蓼科 | Polygonaceae | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 十字花科 | Cruciferae | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 旋花科 | Convolvulaceae | 10 | 0 | 5 | 3 | 2 |
| 豆科 | Leguminosae | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 亚麻科 | Linaceae | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 葎草属 | Humulus | 3 | 1 | 7 | 6 | 1 |
| 卷柏属 | Selaginella | 7 | 1 | 6 | 13 | 0 |
| 水龙骨科 | Polypodiaceae | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |

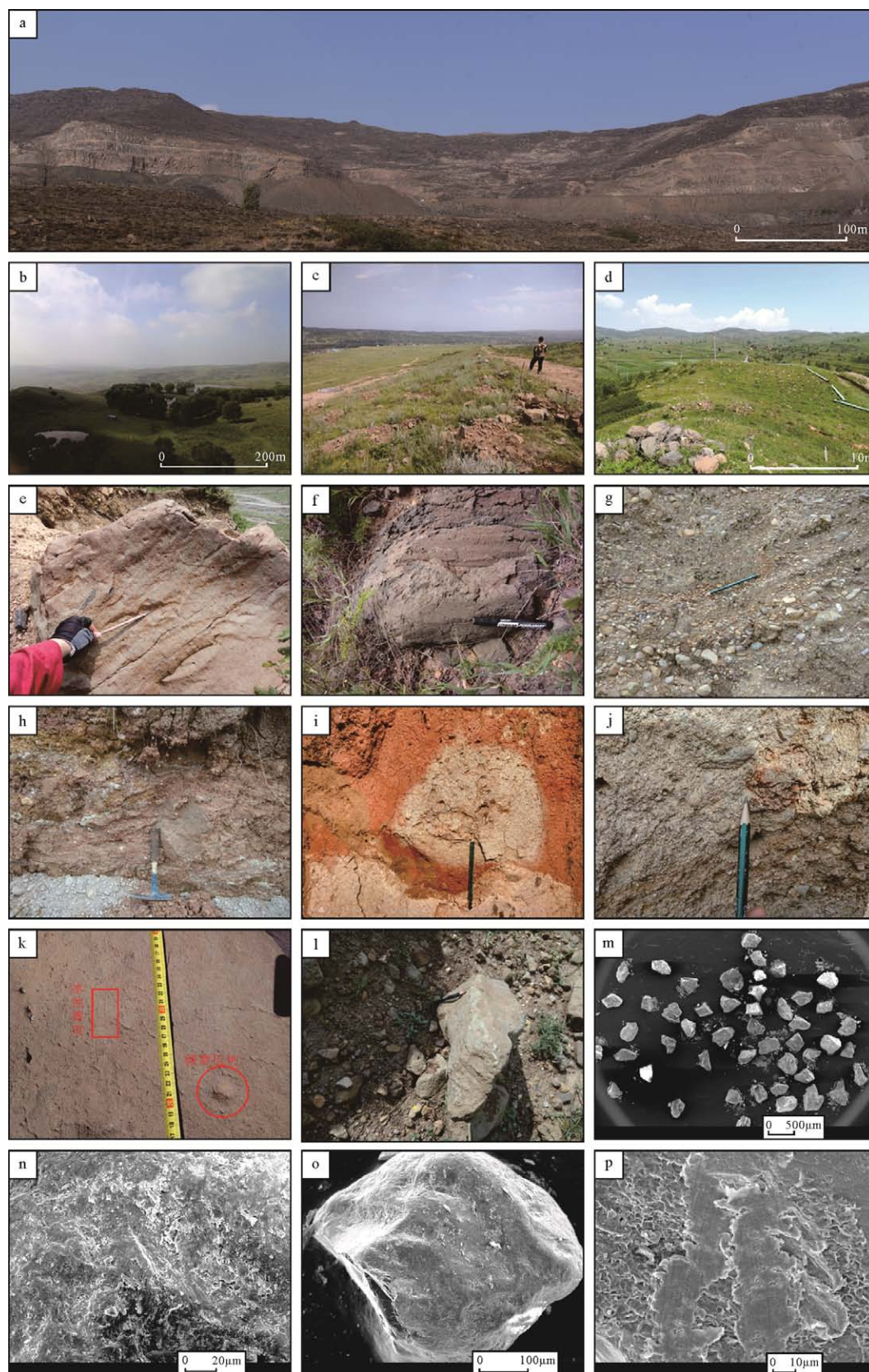
注：孢粉鉴定由自然资源部地下水矿泉水及环境监测中心鉴定, 2019 年。

沉积物中的灰白色细砂和新河口冰水沉积物中的黄色细砂内各采取了一件光释光样品，样品编号分别为 P68OSL1 和 P69OSL1(图 2b, c)。

样品采集：采样时先剥离剖面表层物质，将钢管一侧用黑色塑料袋束紧，将钢管另一侧砸入新鲜剖面中，取出钢管时用黑色塑料纸束紧两头。在暗室内将样品从钢管中取出，并去除两端有可能曝光部分样品，将剩余样品装入厚层黑色不透光塑料袋中用于实验测试。

样品的前处理：在实验室弱红光条件下，取约 100 g 未曝光样品放置于 1000 mL 的烧杯中，用蒸馏水浸泡；先用 30%的双氧水去除有机质，再用 30%的盐酸去除碳酸盐类矿物，然后用蒸馏水将悬浊液洗至中性，根据 Stokes 定理，分离出 4~11 μm 的细颗粒混合矿物，再将它们浸泡在氟硅酸中 3 天，提纯细颗粒石英，最后用乙醇将提纯的细颗粒石英样品均匀沉淀在直径为 9.7 mm 的不锈钢片上，供测量使用。

样品测试：北京光释光实验室科技有限公司使用丹麦 Risø 实验室生产的 Risø TL/OSL-DA-20 光释光仪器对样品进行了测试，每个样品的测试包括预热、辐照和激发等步骤。预热温度(preheat)选择 200~260℃，时间为 10 s，实验剂量的预热温度(cut-heat)为 160℃，10 s。辐照源为(⁹⁰Sr/⁹⁰Y)β 源。激发光源选择强度为 90%的蓝光发光二极管(λ=(470±20) nm)。样品在 130℃温度条件下用蓝光激发 60 s，激发后的光信号经由厚 7.5 mm 的 Hoya U-340 滤光片进入 9235QA 光电倍增管进行记录。根据不同的剂量产生不同的 OSL 信号强度，经过 test dose 对其感量变化进行校正，使用各辐照剂量校正后 OSL 信号强度建立起一条剂量生长曲线，然后将校正后的天然 OSL 信号强度投影到该生长曲线上，经过反推计算出相应的等效剂量。首先每个样品准备 10 个天然测片，即在直径为 0.97 cm 的不锈钢片上均匀涂一层硅油，将样品均匀粘附在测片上。为减小光激发和辐照对相邻样片的影响，



a—马蹄坑; b—冰川湖; c—侧碛堤; d—冰砾阜; e—冰川擦痕; f—熨斗石; g—斜层理特征; h—混合堆积及层理变形特征;
i—砾岩泥砾; j—泥岩泥砾; k—冰蚀擦痕和碾磨压坑; l—羊背石; m—石英砂粒形态特征;
n—石英砂粒冰蚀擦痕; o—石英砂粒碾磨压坑; p—石英砂粒平行解理面。
a—horseshoe pit; b—glacial lake; c—lateral moraine; d—kame; e—glacial scratches; f—flatiron boulder; g—oblique bedding;
h—mixed accumulation and bedding deformation; i—muddy gravel of conglomerate; j—muddy gravel of mudstone;
k—glacial scratches and grinding craters; l—glacier; m—morphological characteristics of quartz sand;
n—glacial scratches of quartz sand; o—grinding craters of quartz sand; p—parallel cleavage plane of quartz sand.

图3 冰川遗迹宏观和微观证据特征

Fig. 3 Macroscopic and microscopic evidence characteristics of glacial remains

测片间隔放置,即样品盘上有48个位置,间隔放置10个测片。

通过单片再生剂量法在冯家窑冰川遗迹和新河口冰川遗迹分别获得了 (121.22 ± 6.54) ka 和 (81.13 ± 4.48) ka 的光释光年龄(表2),其形成时代限定为晚更新世早期和中期,对应于河北省第四纪冰期的第五冰期和第六冰期(河北省区域地质矿产调查研究所,2017)。

3 讨论

3.1 深部地质作用与冰川遗迹的关系

深大断裂的强烈活动,为火山喷发提供了重要的岩浆通道,本区火山喷发前深部地质作用导致地壳隆升了100~200 m,火山喷发后形成的火山口、火山熔岩的垂向堆积厚度可达450 m,累计增加的高度可达550~650 m,为之后的冰川形成、保存和滑动提供了有力的地形条件和气候条件。冀西北张家口坝缘一带发现了第四纪冰川遗迹,为相似地质条件和相近地理纬度的内蒙古集宁一带和承德塞罕坝林场一带的汉诺坝玄武岩分布区可能存在第四纪冰川遗迹打开思路,值得深入探究。这对于确定冀北—蒙南的第四纪冰川规模,有着实际的古气候和古环境意义。

3.2 冰川遗迹对判断第四纪冰川存在的作用

中国东部中低山区是否存在第四纪冰川,在我国已经持续了近一个世纪的学术之争:支持者多从东部山区发现的冰川遗迹入手进行推论,反对者多从西部高原现代冰川的研究入手,认为东部中低山区出现的冰碛物、擦痕、碾磨压坑等冰川遗迹为泥石流成因而非冰川成因。王斯文研究认为冰川擦痕因受力相对稳定而平滑均一、窄而深、形态呈直线型,数量多间距小,擦痕方向能指示冰川的运动方向;而泥石流擦痕因受力方向多变而粗糙不平,形态不一还可能出现转折,数量少间距大,擦痕方向不能指示泥石流运动方向。谢又予等从扫描电镜下石英砂的表面特征研究认为冰川作用下的石英砂粒与泥石流作用下的石英砂粒虽然在外形与贝壳状断口等特征有一定的相似性,但放大几千倍后延展性差、平直的冰蚀擦痕,形态规整有一定深度的圆形碾磨压坑和平整解理面则是冰川作用所特有的产物,

能够有效判别其形成环境为冰川沉积或泥石流沉积。研究区内冰川飘砾上发现的擦痕形态稳定,呈窄而深的直线型;扫描电镜下的石英砂表面可见与冰川飘砾擦痕特征相同的冰蚀擦痕以及冰川外力作用下产生的碾磨压坑和平行解理面。所以无论是宏观上,还是微观上,冰川遗迹都能判断研究区内第四纪冰川的存在。

3.3 冰水沉积物中的孢粉来源

第四纪冰川的发育环境为寒冷干燥的气候环境,植被类型为干冷草原型(曹伯勋,1995)。研究区内冰水沉积物中孢粉统计结果显示耐干旱的蒿属、喜冷干藜科和耐寒冷松属所占比例分别为34.97%、30.49%和16.98%(表1),那么以干冷草原型为主的植被类型怎么会出现高含量的松属花粉呢。许清海等(2007)研究认为松属花粉与植被盖度间有一定的相关性,为超代表性类型,只有松属花粉含量高于30%(远高于区内的16.98%)以上时,周围才有可能有松林存在,说明区内松属花粉为远距离搬运产物。闫永福(1997)在研究区东北侧塔拉图圈一带发现的中更新世晚期冰川遗迹中采集的孢粉样品结果显示,木本植物花粉占30.7%,其中以Pinus(松)72.7%、Cupressus(柏)14.5%为主,次为Betula(桦)、Picea(云杉)等,松属花粉比例(22.3%)大于本区内的16.98%,但仍然小于30%,显示自研究区向塔拉图圈冰川遗迹松属花粉比例有增加趋势。综合考虑,笔者认为研究区内松属花粉可能来源于塔拉图圈冰川遗迹东北方向的异地搬运,而研究区内冰川遗迹的植被类型为干冷草原型。

3.4 冰川遗迹与第四纪冰期的对应关系

通过第四纪冰期对比,张家口坝缘一带冯家窑冰川遗迹的形成时代与阿尔卑斯地区的里斯冰期、中国东部的庐山冰期、北京西山碧云寺冰期、河北省第四纪第五冰期相对应,具有全球范围内的冰期对比性。而新河口冰川遗迹的形成时代仅与河北省第四纪第六冰期相对应,显示有限区域性对比特征,而在全球范围内却对应于阿尔卑斯地区的里斯—玉木间冰期、中国东部的庐山—大理间冰期、北京西山的马兰间冰期。但新河口冰川遗迹与北京西山冰川遗迹和中国东部冰川遗迹在气候条件、地貌条件和海平面变化上都极为相似,仅是纬度略有偏差,

表2 光释光年龄结果表
Table 2 OSL dating results

| 样品编号 | 埋藏深度
/m | 含水率
/% | U/ 10^{-6} | Th/ 10^{-6} | K/% | 剂量率/(Gy/ka) | 等效剂量/Gy | 年龄/ka |
|---------|------------|-----------|--------------|---------------|-----------|-------------|--------------|-------------|
| P68OSL1 | 0.5 | 16±5 | 2.46±0.11 | 12.30±0.53 | 2.18±0.02 | 4.06±0.21 | 492.05±5.72 | 121.22±6.54 |
| P69OSL1 | 0.5 | 12±5 | 2.77±0.24 | 15.55±1.00 | 3.75±0.05 | 6.12±0.31 | 496.58±10.11 | 81.13±4.48 |

注:在北京光释光实验室科技有限公司实验室测定。

笔者认为在同一时间段三者不可能存在两种截然相反的气候环境。因此新河口冰川遗迹形成时, 北京西山和中国东部同样处于极寒干燥环境, 曾发育第四纪冰川, 只是当下未发现相应的具有年龄数据的冰川证据, 即在庐山—大理间冰期和马兰间冰期内存在大冰期或小冰期, 只是目前没有发现而已。新河口一带与阿尔卑斯地区在地理位置、自然条件和地形地貌条件都存在着千差万别, 故新河口冰川遗迹的形成时代可能与里斯—玉木间冰期内小冰期对应。

3.5 冰期与海平面变化

气候的冷暖影响着海平面的升降, 海平面的变化又反演了气温的波动。冰期时气候干冷, 海水蒸发转移到大陆, 形成冰川凝固在大陆上, 使海平面下降(低海平面、海退); 间冰期时气候湿热, 冰川融化成水汇入海洋, 使海平面上升(高海平面、海进), 第四纪多次冰期、间冰期交替, 使海平面发生多次升降, 导致沿海和岛屿环境多变。中国东部沿海地区 12.8 万年来已发现有 5 次高海面时期, 年代距今分别为 1.5 ~ 2.5 ka、7.5 ka、11 ka、5 ~ 7 ka、89 ~ 108 ka, 本区(121.22±6.54) ka 和(81.13±4.48) ka 均恰逢低海面时期, 海平面变化分别与黄骅海退和大城海退相对应, 冰期与河北省第四纪冰期内第五冰期和第六冰期相对应(河北省区域地质矿产调查研究所, 2017), 当属寒冷气候, 符合第四纪冰川的发育环境。

3.6 人类工业活动与地球冷暖气候周期性变化的关系

全球变暖是当今最受关注的热门课题, 有关其成因的争议也一直存在。有的学者认为, 工业革命以来人类活动所释放的温室气体是造成近百年地球升温的最主要原因(Richard et al., 1998); 而另一些学者认为全球气候冷暖变化主要是自然驱动力的结果(Haigh, 1996; Courtillot et al., 2006; Matthews et al., 2009; 钟萃相, 2021), 全球变暖主要受太阳的照射、地球轨道的变动、磁场的强度、月球和极地冰川的极涡活动等影响。中国区域地质志·河北志将河北省第四纪时期划分为 7 个冰期(2500 ka、2000 ka、1300 ka、750 ka、128 ~ 108 ka、89 ~ 70 ka、50 ~ 11 ka)、6 个间冰期(2200 ka、1800 ka、900 ka、69 ~ 128 ka、108 ~ 89 ka、70 ~ 50 ka)和一个冰后期(11 ka 至今), 共经历 12 个冷→暖变化周期, 寒冷期对应海退事件, 温暖期对应海进事件, 研究区内两处冰川遗迹的形成时间((121.22±6.54) ka 和(81.13±4.48) ka)分别与第五冰期和第六冰期相对应。说明在没有人类工业活动排放大量温室气体的

前提下, 完全依靠自然驱动力研究区内至少发生了两次周期性冷→热环境变化, 也就是说人类工业活动的碳排放对气候冷暖变化的作用微乎其微。

4 结论及意义

(1) 深大断裂的强烈活动为火山喷发提供了重要的岩浆通道, 火山喷发后形成的火山口、火山熔岩的垂向堆积及深部地质作用导致的地壳抬升, 为冰川形成、保存和滑动提供了有利的地形条件好和气候条件, 晚更新世冰川遗迹的存在正是当时冰期环境与早期构造-岩浆活动-地壳抬升共同作用的产物。

(2) 对张家口坝缘一带首次发现的第四纪晚更新世冰川遗迹, 经构造学、地貌学、沉积学、电子显微学、孢粉学、古气候学、海平面变化、光释光年代学等方面证实了该冰川遗迹的存在, 为我国东部中低山区第四纪冰川的存在提供了有力的证据。

(3) 冯家窑和新河口冰水沉积物中获得了(121.22±6.54) ka 和(81.13±4.48) ka 的冰期光释光测年数据, 证明了张家口坝缘一带在晚更新世早中期经历了两期冰川作用, 对应于河北地区的第五冰期和第六冰期。

致谢: 感谢河北省区域地质调查院胡醒民教授级高级工程师和河北地质大学张振利教授对本文提出的宝贵意见; 感谢河北省万全项目组在研究过程中给予的支持和帮助; 感谢河北省区域地质矿产调查研究所实验室在电镜扫描测试过程中提供的帮助, 感谢自然资源部地下水矿泉水及环境监测中心在孢粉鉴定过程中提供的帮助, 感谢北京光释光实验室科技有限公司实验室在光释光样品测试过程中给予的鼎力相助; 感谢审稿专家和编辑部老师建设性的修改意见。

Acknowledgements:

This study was supported by Department of Natural Resources of Hebei Province (No. 4540401YBNVVG), China Geological Survey (No. DD20160060), Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund (No. JYYWF20180101), and National Natural Science Foundation of China (No. 41072073).

参考文献:

- 曹伯勋. 1995. 地貌学及第四纪地质学[M]. 北京: 中国地质大学出版社.
- 陈安东, 顾佳妮, 赵志中, 钱方, 王海雷. 2016. 云南大理点苍山末次冰期冰碛物石英砂扫描电镜形态特征分析[J]. 冰川冻土, 38(2): 453-462.
- 樊祺诚, 赵勇伟, 陈生生, 李霓, 隋建立. 2015. 大兴安岭—太

- 行山重力梯度带以西的第四纪火山活动[J]. 矿物岩石地球化学通报, 34(4): 674-681.
- 韩同林. 2010. 驳施雅风“冰臼”“负球状风化”成因论[J]. 地质论评, 56(4): 538-542.
- 河北省区域地质矿产调查研究所. 2017. 中国区域地质志·河北志[M]. 北京: 地质出版社.
- 李月丛, 许清海, 阳小兰, 郑振华. 2005. 中国草原区主要群落类型花粉组合特征[J]. 生态学报, 25(3): 555 - 564.
- 刘德梅, 杨倩, 陈志国, 曾方明, 魏海成. 2016. 藏嵩草高寒湿地中孢粉记录的古植被与古环境状况[J]. 冰川冻土, 38(2): 539-548.
- 吕洪波, 徐兴永, 易亮, 李萍. 2012. 山东鲁山混合岩表面发现第四纪冰川剥蚀的直接证据——颤痕[J]. 地质学报, 86(3): 514-521.
- 马超, 王金贵, 张鑫全, 张子轩, 李典, 张新征, 许凡. 2020. 冀北尚义—隆化区域断裂形成与演化历史探讨[J]. 中国地质调查, 7(5): 88-94.
- 石磊, 张跃, 陈艺鑫, 傅海荣, 刘耕年. 2010. 贡嘎山海螺沟冰川沉积的石英砂扫描电镜形态特征分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 46(1): 96-102.
- 施雅风, 赵井东, 王杰. 2011. 中国第四纪冰川新论[M]. 上海: 上海科学普及出版社.
- 施雅风. 2010a. 韩同林的“冰臼论”是对花岗岩类岩石“负球状风化”的误解[J]. 地质论评, 56(3): 349-354.
- 施雅风. 2010b. 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.
- 王乃昂, 张律吕, 余菡潇, 于昕冉, 田璐. 2019. 山东中低山丘陵古冰川遗迹质疑[J]. 地理科学, 39(2): 221-231.
- 王斯文. 2015. 浅析冰川擦痕与泥石流凹痕的区别[J]. 经济研究导刊, (4): 303-304.
- 王颖, 迪纳瑞尔 B. 1985. 石英砂表面结构模式图集[M]. 北京: 科学出版社.
- 王照波, 卞青, 李大鹏, 王金玉, 刘彩玲, 郭启鹏. 2017. 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, 王江月, 王全义, 徐宪立, 李宝杰. 2018. 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.
- 吴奇, 许立青, 李三忠, 刘鑫, 王鹏程, 曹现志, 索艳慧. 2013. 华北地块中部活动构造特征及汾渭地堑成因探讨[J]. 地学前缘(中国地质大学(北京); 北京大学), 20(4): 104-114.
- 谢又予, 崔之久. 1981. 电子扫描镜下我国若干冰碛石英砂的表面特征[J]. 冰川冻土, 3(2): 52-55.
- 许清海, 李月丛, 阳小兰, 陈辉, 吕新苗. 2005. 青藏高原东北部典型花粉类型埋藏特征及其与植被关系的研究[J]. 地球科学进展, 20(1): 89-98.
- 许清海, 李月丛, 阳小兰, 郑振华. 2007. 中国北方几种主要花粉类型与植被定量关系[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 37(2): 192-205.
- 闫永福. 1997. 冀西北第四纪冰期冰缘期划分及塔拉冈组组的建立[J]. 中国区域地质, 16(3): 239-258.
- 尹雪斌, 孙立广, 刘晓东. 2003. 南极无冰区典型沉积环境石英砂表面结构特征及其在沉积环境识别中的应用[J]. 极地研究, 15(1): 1-10.
- 曾普胜, 李睿哲, 刘斯文, 温利刚, 赵九江, 王十安. 2021a. 中国东部燕山期大火成岩省: 岩浆-构造-资源-环境效应[J]. 地球学报, 42(6): 721-748.
- 曾普胜, 丘顺帆, 李睿哲, 刘斯文, 王十安, 赵九江. 2021b. 五大连池第四纪火山岩层序划分及其构造与生态意义[J]. 地球学报, 42(6): 785-802.
- 赵井东, 施雅风, 王杰. 2011. 中国第四纪冰川演化序列与 MIS 对比研究的新进展[J]. 地理学报, 66(7): 867-884.
- 钟萃相. 2021. 极地冰川的变化是影响全球气候变化的主要因素[J]. 长江技术经济, 5(S1): 1-4.
- 朱大岗, 孟宪刚, 邵兆刚, 杨朝斌, 韩建恩, 余佳, 杜建军, 孟庆伟. 2006. 西藏札达盆地及周缘高山区第四纪冰川堆积及冰川进退程讨论[J]. 中国地质, 33(1): 86-97.

References:

- CAO Bo-xun. 1995. Geomorphology and Quaternary Geology[M]. Beijing: China University of Geosciences Press(in Chinese).
- CHEN An-dong, GU Jia-ni, ZHAO Zhi-zhong, QIAN Fang, WANG Hai-lei. 2016. Quartz grains SEM surface microtextures of Quaternary glacial sediments along the Diancang Mountain in Yunnan, Southwest China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 38(2): 453-462(in Chinese with English abstract).
- COURTILLOT V, GALLET Y, Le MOUËL J L, FLUTEAU F, GENEVEY A. 2007. Are there connections between the Earth's magnetic field and climate?[J]. Earth and Planetary Science Letters, 253: 328-339.
- FAN Qi-cheng, ZHAO Yong-wei, CHEN Sheng-sheng, LI Ni, SUI Jian-li. 2015. Quaternary volcanic activities in the west of the Daxing'anling-Taihangshan gravity lineament[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 34(4): 674-681(in Chinese with English abstract).
- HAN Tong-lin. 2010. An argument with academician SHI Yafeng on the genesis of “glacial potholes” formed by granite negative spheroidal weathering[J]. Geological Review, 56(4): 538-542(in Chinese with English abstract).
- HAIGH J D. 1996. The impact of solar variability on climate[J]. Science, 272(5264): 981-984.
- Hebei Institute of Regional Geological and Mineral Resource Survey. 2017. Editorial Committee of the Regional Geology of China, Hebei Province[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- LI Yue-cong, XU Qing-hai, YANG Xiao-lan, ZHENG Zhen-hua. 2005. Pollen assemblages of major steppe communities in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 25(3): 555-564(in Chinese with English abstract).
- LIU De-mei, YANG Qian, CHEN Zhi-guo, ZENG Fang-ming, WEI Hai-cheng. 2016. Pollen record and paleovegetation and paleoenvironment in Kobresia tibetica alpine wetland[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 38(2): 539-548(in Chinese with English abstract).
- LÜ Hong-bo, XU Xing-yong, YI Liang, LI Ping. 2012. A direct erosion evidence of Quaternary glaciation-chatter marks found in Mt. Lushan, Shandong Province, east of China[J]. Acta Geologica Sinica, 86(3): 514-521(in Chinese with English abstract).
- MA Chao, WANG Jin-gui, ZHANG Xin-quan, ZHANG Zi-xuan, LI Dian, ZHANG Xin-zheng, XU Fan. 2020. Discussion on

- the formation and evolutionary history of Shangyi-Longhua regional fault in northern Hebei Province[J]. *Geological Survey of China*, 7(5): 88-94(in Chinese with English abstract).
- MATTHEWS H D, GILLET N P, STOTT P A, ZICKFELD K. 2009. The proportionality of global warming to cumulative carbon emissions[J]. *Nature*, 459: 829-832.
- SCHMALENSSEE R, STOKER T M, JUDSON R A. 1998. World carbon dioxide emission: 1950-2050[J]. *Review of Economics and Statistics*, 80(1): 15-27.
- SHI Lei, ZHANG Yue, CHEN Yi-xin, FU Hai-rong, LIU Geng-nian. 2010. Quartz grain SEM microtextures analyses of sub-glacial deposits at Hailuoguo Glacier[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 46(1): 96-102(in Chinese with English abstract).
- SHI Ya-feng, ZHAO Jing-dong, WANG Jie. 2011. New understanding of Quaternary Glaciation in China[M]. Shanghai: Shanghai Popular Science Press(in Chinese).
- SHI Ya-feng. 2010. Comments on the moulin argument provided by Mr. HAN Tonglin, a misunderstanding of granite negative spheroidal weathering[J]. *Geological Review*, 56(3): 349-354(in Chinese with English abstract).
- SHI Ya-feng. 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).
- WANG Nai-ang, ZHANG Lyu-lyu, YU Ying-xiao, YU Xin-ran, TIAN Lu. 2019. Question the so-called glacial landforms in the middle and low Massifs in Shandong Province, Eastern China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 39(2): 221-231(in Chinese with English abstract).
- WANG Si-wen. 2015. Analysis of the difference between glacial scratches and debris flow dents[J]. *Economic Research Guide*, (4): 303-304(in Chinese).
- WANG Ying, Deonarine B. 1985. Model atlas of surface textures of Quartz sand[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- WANG Zhao-bo, BIAN Qing, LI Da-peng, WANG Jin-yu, LIU Cai-ling, GUO Qi-peng. 2017. Discovery of the Quaternary glacial relics in Mount Mengshan, Shandong Province[J]. *Geological Review*, 63(1): 134-142(in Chinese with English abstract).
- WANG Zhao-bo, WANG Jiang-yue, WANG Quan-yi, XU Xian-li, LI Bao-jie. 2018. The discovery of Quaternary cirques system in Ganshan of Western Henan Province and analysis of coupling relation with MIS[J]. *Shandong Land and Resources*, 34(7): 1-7(in Chinese with English abstract).
- WU Qi, XU Li-qing, LI San-zhong, LIU Xin, WANG Peng-cheng, CAO Xian-zhi, SUO Yan-hui. 2013. Active tectonics in the Central North China Block and the cause of the formation of the Fenwei Graben[J]. *Earth Science Frontiers(China University of Geosciences(Beijing); Peking University)*, 20(4): 104-114(in Chinese with English abstract).
- XIE You-yu, CUI Zhi-jiu. 1981. Some surfacial characteristics of till quartz sand in China under electronic scanning microscope[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 3(2): 52-55(in Chinese with English abstract).
- XU Qing-hai, LI Yue-cong, YANG Xiao-lan, CHEN Hui, LÜ Xin-miao. 2005. A study of some typical pollen types taphonomy and relationships with vegetation in the northeast of Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Advances in Earth Science*, 20(1): 89-98(in Chinese with English abstract).
- XU Qing-hai, LI Yue-cong, YANG Xiao-lan, ZHENG Zhen-hua. 2007. Relationship between contemporary pollen and vegetation data in major plant communities of northern China[J]. *Science in China(Series D: Earth Science)*, 37(2): 192-205(in Chinese).
- YAN Yong-fu. 1997. Derermination of the glacial stage and epiglacial stage and establishment of the Talahulun Formation in northwestern Hebei[J]. *Regional Geology of China*, 16(3): 239-258(in Chinese with English abstract).
- YIN Xue-bin, SUN Li-guang, LIU Xiao-dong. 2003. Characteristics of quartz grain surface textures in the Antarctic ice-free area[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 15(1): 1-10(in Chinese with English abstract).
- ZENG Pu-sheng, LI Rui-zhe, LI Si-wen, WEN Li-gang, ZHAO Jiu-jiang, WANG Shi-an. 2021a. Yanshanian Large Igneous Provinces in Eastern China: Magmatism-Tectonics-Resources-Environment Effects[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 42(6): 721-748(in Chinese with English abstract).
- ZENG Pu-sheng, QIU Shun-fan, LI Rui-zhe, LIU Si-wen, WANG Shi-an, ZHAO Jiu-jiang. 2021. Sequences Division of Quaternary Volcanic Rocks in Wudalianchi and Its Tectonic and Ecological Significances[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 42(6): 785-802(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Jing-dong, SHI Ya-feng, WANG Jie. 2011. Comparison between Quaternary glaciations in China and the Marine Oxygen Isotope Stage(MIS): An improved schema[J]. *Acta Geographica Sinica*, 66(7): 867-884(in Chinese with English abstract).
- ZHONG Cui-xiang. 2021. Changes in polar glaciers are a major factor affecting global climate change[J]. *Technology and Economy of Changjiang*, 5(S1): 1-4(in Chinese with English abstract).
- ZHAO G C, WILDE S A, CAWOOD P A, SUN M. 2001. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: lithological, geochemical, structural and *P-T* path constraints and tectonic evolution[J]. *Precambrian Research*, 107: 45-73.
- ZHU Da-gang, MENG Xian-gang, SHAO Zhao-gang, YANG Chao-bin, HAN Jian-en, YU Jia, DU Jian-jun, MENG Qing-wei. 2006. Quaternary glacial deposition and glacial advance and retreat in the Zanda basin and its surrounding mountains in Ngari, Tibet[J]. *Geology in China*, 33(1): 86-97(in Chinese with English abstract).