

第四纪冰川遗迹

崂山华严寺中更新世冰川垄槽序列的发现与测年

王照波^{1,2}, 鲍克飞³, 徐兴永⁴, 扈媛^{3*}, 丁志豪⁵

(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,山东济南 250013;2.平邑县国有林场总场,山东临沂 273301;3.平邑县自然资源和规划局,山东临沂 273301;4.自然资源部第一海洋研究所,山东青岛 273300;5.山东指南针矿产勘查有限公司,山东临沂 276006)

摘要:崂山华严寺一带发育一套完整的冰川体系,由三角脊链、冰斗、刀脊、U形谷、冰川漂砾、冰碛丘陵、冰川垄槽序列等构成。该区巨型冰川漂砾十分常见,重量可达数千吨。冰碛丘陵400 m,高差可达到25 m。冰碛垄槽序列由两套冰碛垄构成,垄槽间隔套合,形态保留完整。冰碛由巨石、泥沙、黏土等物质混杂堆积而成,不显示层理,具有冰碛堆积的一般特征。巨型冰川漂砾、冰期丘陵的存在,表明崂山古冰川规模宏大。崂山冰碛海岸则是我国仅有的地质遗迹,具有重要的科学价值。经光释光测年,获得冰碛垄的堆积年龄分别为(44±3)ka、(68±5)ka、>133 ka,结合以往该区获得的光释光年龄值(141.3±14) ka、(197.0±23) ka,系统性的对应于晚更新世的MIS3b冷期(华严冰期)与东山冰期、中更新世庐山冰期与大姑冰期。崂山华严寺冰碛垄槽序列的发现及测年研究,进一步确证了100年前李四光先生提出的我国东部中低山区存在第四纪冰川的论断准确可靠。

关键词:冰碛丘陵;垄槽序列;光释光测年;冰斗;山东;崂山

中图分类号:P343.6

文献标识码:A

doi:10.12128/j.issn.1672-6979.2025.11.002

0 引言

我国第四纪冰川研究起源于李四光先生于1921年在太行山东麓沙源岭发现的冰川遗迹^[1]。崂山第四纪冰川研究起始于李乃胜等2000年的研究^[2],研究工作确定了崂山大量分布的角峰、刃脊、冰斗等冰蚀地貌,根据遗迹分布建立了鲍鱼岛、前凤凰庵、流清河、束住岭等四个冰期。徐兴永^[3-4]对崂山地区的孢粉进行研究,孢粉显示了冰期时段气候向干冷发展的特征,并广泛调查了山东蒙山、沂山、鲁山、泰山和青岛的浮山、大泽山等地古冰川遗迹。李培英等^[5]对崂山冰碛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^[6]在调查总结了我国东部大量古冰川遗迹的同时,提出了“北路寒潮”为我国东部冰川形成的冷源路线的重要认识。

2021年王照波等基于蒙山、崂山等地的冰碛分布与测年数据,首次恢复建立了山东中更新世以来的雪线高程与环境演化研究^[7]。同年,王照波等完成冰川堆积过程“垄槽序列”相关理论的建立^[8],指出冰碛垄槽序列与泥石流堆积扇之间具有根本性的差别,垄槽序列是冰川堆积所特有的宏观性特征,又是极易辨识的专属性特征。所以,对于任何一个地区山谷冰川遗迹的调查与研究,调查与测绘其冰碛垄槽序列的展布特征,并通过测年获得垄槽序列的演化时序,是冰川遗迹调查研究的核心要务。2021年基于Google Earth卫星图片解译过程中,首次发

收稿日期:2025-09-01;修订日期:2025-10-09;编辑:王敏

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、山东省金属矿产成矿地质过程与资源利用重点实验室开放课题“山东蒙山全新世冰川遗迹测年研究”(编号:KFKT202121),山东指南针矿产勘查有限公司“东亚冷槽追索计划”(编号:20180101)联合资助

作者简介:王照波(1971—),男,山东平邑人,正高级工程师,主要从事金刚石地质、第四纪地质、古冰川与古环境演化、环境考古、山体隆升等研究工作;E-mail:13805498543@163.com

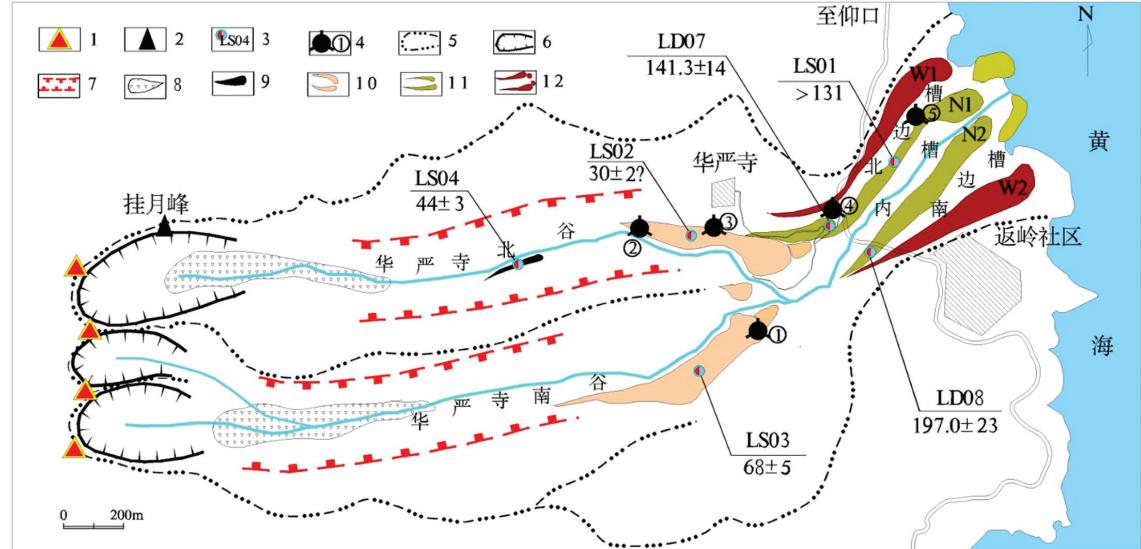
*通信作者:扈媛(1978—),女,山东平邑人,高级工程师,主要从事矿产管理、地质勘查与地貌研究;E-mail:huyuanpy@163.com

现了崂山华严寺一带存在冰川垄槽序列的特征影像,在 2025 年 4 月份对其进行了实地调查得到验证并进行了年龄样品的采集。

1 崂山华严寺冰川体系的特征

华严寺位于青岛崂山的东侧滨海地带,周边最

高处位于挂月峰附近,海拔 748 m。这里发育有华严寺冰川体系^[9](图 1),其特征清晰,保存完整,总体展布方向为 NEE 向。前端由三个冰斗构成的冰斗系统、中间由两条冰川 U 形谷构成的 U 形谷系统、末端由两条冰川汇合后形成垄槽序列。



1—弧边三角脊;2—挂月峰刃脊;3—光释光年龄样品采样位置、编号与年龄,编号下数字为年龄值(ka);4—巨型漂砾位置及编号;5—华严寺冰川体系边界;6—冰斗;7—U形谷;8—冰石河;9—MIS3b 冷期冰碛垄;10—东山冰期冰碛丘陵;11—庐山冰期冰碛垄及编号;12—大姑冰期冰碛垄及编号。

图 1 崂山华严寺冰川体系

冰斗前端由四个弧边三角脊构成三角脊链^[10](图 1),与南侧的冰斗系统分界。挂月峰尖锐陡峭,构成山脊石墙,为典型的冰川刃脊^[11](图 2a)。前端的三个冰斗均呈围椅状,其内广泛分布着冰缘地貌成因的冰石河。华严寺北谷(图 2b、图 2c8)与南谷(图 2c9)为冰斗下接的两条 U 形谷,该 U 形谷的剖面形态与四川螺髻山^[12]日德林沟、侧路洛打、清水沟等处典型冰川 U 形谷(图 2c1—图 2c6)的特征一致,也与山东蒙山九龙潭冰川 U 形谷(图 2c7)具有一致性,这些典型的冰蚀特征表明崂山山体经历了冰川的侵蚀作用。

2 冰川堆积地貌与测年

在华严寺冰川体系的下游,发育了典型的冰碛垄槽序列,因靠近返岭村附近,故命名为返岭垄槽序列(图 1)。

2.1 冰川漂砾

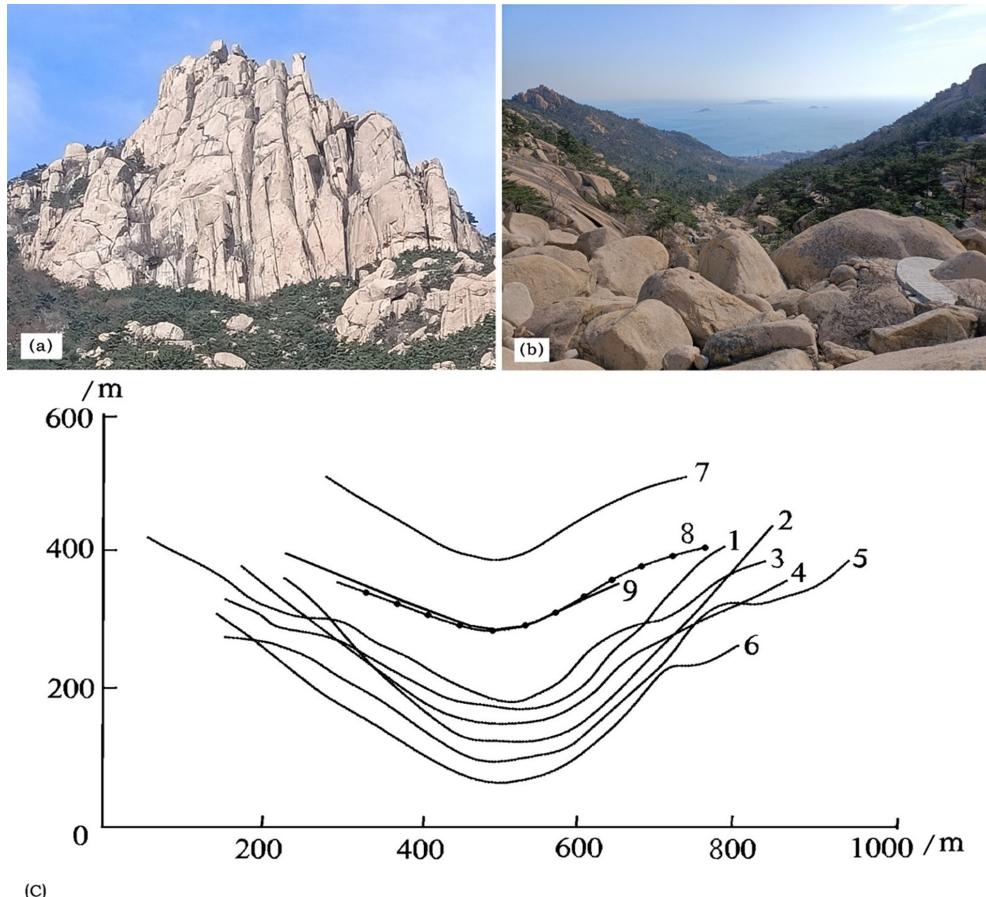
崂山华严寺的冰川体系中,冰川驮运的大量巨型冰川漂砾,这些漂砾位于冰碛垄之中,有些重达数千吨之巨(图 1),其规模之大在我国东部山谷冰川中实为罕见(表 1)。华严寺的许多摩崖石刻,如“山海奇观”(图 3c)“观澜”“云穴”“听涛”等,均雕刻在冰川漂砾之上。

2.2 冰碛丘陵

华严寺南沟右岸与北沟左岸,分别发育了两道巨大的冰碛丘陵,根据位置分别命名为北沟冰碛丘陵(图 1、图 4)与南沟冰碛丘陵(图 1、图 4)。这些冰碛丘陵分布在前期形成的 U 形谷内部,规模巨大,如同绵延的山岗,故名冰碛丘陵。南沟冰碛丘陵长 380 m,宽 80~98 m,高出北侧谷底 15~25 m。北沟冰碛丘陵长 420 m,宽 40~106 m,高出南侧谷底 12~23 m。冰碛丘陵的组成物质均为巨大的冰碛

石与泥沙混杂而成,不显示层理,具备冰川堆积物的一般特征。崂山巨型漂砾与冰碛丘陵的存在,显示

了崂山冰川的规模巨大,且远远大于对应冰期的蒙山冰川的规模。



a—挂月峰刃脊(镜头向西);b—华严寺北沟冰蚀U形谷(镜头向东);c—典型冰川U形谷的剖面特征:1~6—四川螺髻山日德林沟、侧路洛打、清水沟等地冰川U形谷横切剖面^[10];7—山东蒙山九龙潭冰川U形谷横切剖面(谷底海拔393 m);8—崂山华严寺北沟冰川U形谷横切剖面(谷底海拔281 m);9—崂山华严寺南沟冰川U形谷横切剖面(谷底海拔284 m)。

图2 崂山华严寺冰蚀地貌特征与国内典型U形谷的剖面特征

表1 华严寺巨型冰川漂砾特征一览表

编号 (图1)	位置	坐标	海拔/m	规模/m			大约 质量/t	岩石 类型
				长	宽	高		
①	华严寺南沟右垄前端,图3a	36°12'14",120°40'35"	107	21	14	8	4000	花岗岩
②	华严寺北沟渔鼓石	36°12'23",120°40'18"	185	15	11	7	2000	花岗岩
③	塔院漂砾,图3b	36°12'24",120°40'30"	137	8	4	3	200	花岗岩
④	砾柱石漂砾,图3c	36°12'26",120°40'43"	60	16	11	8	1600	花岗岩
⑤	返岭垄槽序列左垄前端,图3d	36°12'35",120°40'54"	18	9	8	5	700	花岗岩

2.3 返岭垄槽序列

返岭垄槽序列主要分布在崂山海岸公路至海岸线之间的区域(图1),共由四条侧碛垄组成,冰碛垄上游狭窄,向下游变宽,结束段膨大为终碛,侧碛垄表现出冰碛特有的对称特征^[13](表2),侧碛垄由大

小不等的石块、细砂与黏土混杂而成,不显示层理。垄上常见零星分布有突兀的漂砾。两条内冰碛垄之间为内槽(图4c),内槽宽缓而平整,为冰川冰体融化后的遗留。内槽两列冰碛垄之外为对称的边槽,边槽之外为大姑冰期形成的对称侧碛垄。



a—华严寺南沟冰碛丘陵前端三大漂砾之一;b—华严寺北沟冰碛丘陵漂砾(塔院旁);c—砾柱石巨型漂砾;
d—返岭垄槽序列左垄内垄前端巨大漂砾。

图 3 崂山华严寺一带的巨型漂砾

表 2 反岭冰碛垄槽序列各冰碛垄的分布与规模

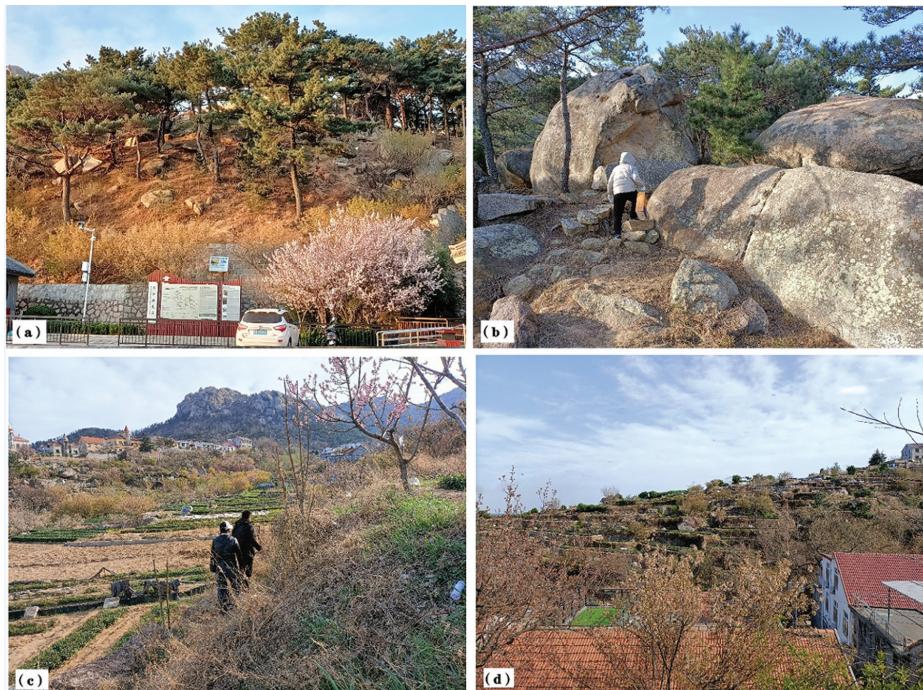
编号(图 1)	名称	长/m	宽/m	槽底高差/m	主体延伸方向/(°)	形成冰期	对应图片
W1	北外垄	730	14~62	13~21	35	大姑冰期	
BBC	北边槽	590	29~68		37		图 3d 右侧沟谷
N1	北内垄	805	17~72	8~15	40	庐山冰期	图 4c 右侧垄岗
NC	内槽	815	60~78		40		图 4c 中间沟谷
N2	南内垄	815	30~59	12~17	41	庐山冰期	图 4c 左侧垄岗
NBC	南边槽	460	35~78		47		图 4d 近处沟谷
W2	南外垄	576	13~78	16~25	56	大姑冰期	图 4d 远处垄岗

在内侧两条侧的前端分别存在一截断开的终碛,由于受到海水的淘洗而多表现为巨石遗存。其形成冰期为内侧碛垄相同,也即庐山冰期的产物。

2.4 光释光测年与冰期划分

2025 年 4 月份野外调查过程中采集了 4 件光释光样品,样品均采自冰碛垄中,返岭垄槽序列内垄采集了一个样品,编号为 LS01(图 5a),两条冰碛丘陵各采集了 1 件样品,编号为 LS02(图 5b)、LS03(图 5c),在华严寺北沟上游右岸采集了 1 件样品,编号为 LS04(图 5d)。样品采用 4 cm 直径钢管采集,采集过程中进行了避光处理。

样品由中国地质大学(北京)海洋学院光释光测年实验室测定, U、Th、K 含量由 ICP-MS 仪器测试获得,样品都采用细颗粒(4~11 μm)混合矿物的 PIRIR290(红外释光信号)测试获得等效剂量。测试结果见表 3。LS01 样品年龄为 >131 ka, 该年龄与以往徐兴永等^[7]在该冰碛垄获得的两个光释光样品(LD07、LD08)年龄数据(141.3 ± 14) ka、(197.0 ± 23) ka 具有较高的吻合性,显示了返岭垄槽序列的内部两条侧碛垄的形成时间为庐山冰期^[9]的产物。根据垄槽序列理论^[8]分析,其外侧两条侧碛垄的形成时间则对应于大姑冰期^[9]。



a—华严寺北沟冰碛丘陵侧面; b—华严寺南沟冰碛丘陵及顶部的漂砾; c—返岭冰碛垄槽序列内槽(中间凹槽)及内槽北垄(右侧, 图 1; N1)、内槽南垄(左侧, 图 1; N2); d—外垄右垄(前方垄岗, 图 1; W2)与南边槽(房屋所处沟谷)。

图 4 华严寺冰碛丘陵与返岭垄槽序列冰碛垄



a—LS01 样品采样位置(返岭垄槽序列内侧左垄, 局部显示纹层); b—LS02 样品采样位置(华严寺北沟冰碛丘陵); c—LS03 样品采样位置(华严寺南沟冰碛丘陵); d—LS04 样品采样位置。

图 5 光释光年龄样品采集位置及周边环境

表3 崂山华严寺光释光样品采集地点与测试结果

样品编号	坐标	采样位置	海拔/m	U/ $\times 10^{-6}$	T/ $\times 10^{-6}$	K/%	含水量/%	剂量率/(Gy/ka)	剂量率误差/(Gy/ka)	剂量/Gy	年龄/ka
LS01	36°12'30", 120°40'51"	返岭垄槽序列内垄左垄,黏土质粉砂	43.7	7.46±0.45	9.72±0.87	3.09±0.15	16.36	6.30	0.33	>824.4	>131
LS02	36°12'23", 120°40'27"	华严寺塔南冰碛垄漂砾,黏土质粉砂	158.7	2.54±0.15	13.60±1.22	1.86±0.09	14.58	4.07	0.22	123±5	30±2
LS03	36°12'9", 120°40'26"	华严寺南沟冰碛丘陵顶部,黏土质粉砂	163.5	2.41±0.14	14.30±1.29	1.61±0.08	5.92	3.88	0.23	263±12	68±5
LS04	36°12'17", 120°40'9"	华严寺西沟上游右岸冰碛垄,粉细砂	249.3	2.45±0.15	12.20±1.10	3.10±0.16	7.02	4.99	0.23	220±10	44±3

在华严寺两条冰碛丘陵上分别采集了LS02与LS03两件样品,LS03的年龄值为(68±5)ka,对应与末次冰期早冰阶的东山冰期,其与下游庐山冰期、大姑冰期垄槽序列在空间上与时间上具有对应性。但是LS02样品的年龄值为(30±2)ka,数据偏小,且小于其上游LS04样品的年龄值,出现数值异常,具体原因需待将来的进一步研究。

在华严寺北沟上游侧碛垄中采集了一件LS04样品,获得的年龄值为(44±3)ka,对应于MIS3b冷期,该年龄段的冰碛年龄值在以往崂山的研究中也有发现^[7],以往没有命名对应的冰期,但本次研究有明确的冰碛垄与排列序列约束,故本文将我国东部的MIS3b阶段的冰期命名为华严冰期。

3 结语

经过野外调查与测年研究,可以得到如下几点认识:

(1)崂山华严寺冰川体系由三角脊链、刃脊、冰斗、U形谷、冰碛丘陵、冰碛垄槽序列等构成,涵盖了冰川侵蚀地貌与冰川堆积地貌,特征典型,类型丰富。这些地貌与我国西部高原区的冰川地貌具有一致性,有力支持了李四光先生100年前提出的中国东部中低山区存在第四纪冰川的论断。

(2)通过光释光测年研究,获得了中更新世庐山冰期、大姑冰期、末次冰期的东山冰期、华严冰期冰川沉积年龄,理清了崂山华严寺一带冰期垄槽序列的排列顺序,为我国东部气候重建、环境演化提供了准确的年龄数据,也反证了垄槽序列理论在古冰川研究中的重要理论意义。

(3)崂山冰碛已抵达现在的黄海海岸线,是地质历史演化过程中沧海桑田的真实写照,崂山冰碛海岸是目前我国发现的唯一的大规模冰碛海岸。崂山

巨型冰川漂砾与巨大的冰碛丘陵的存在,表现出崂山古冰川规模宏大,在海陆变迁、地质旅游等领域具有无可比拟的价值。

致谢:本研究得到了中科院海洋研究所赵松龄教授,中国地质大学(北京)海洋学院李琰教授,中国石油大学吕洪波教授。山东省地质科学研究院李大鹏研究员、熊玉新研究员的大力支持与帮助,在此表示深切的谢意!

参考文献:

- [1] LEE J S. Notes on traces of recent ice action in northern China [J]. Geol. Mag(London), 1922, 69(59): 14-21.
- [2] 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.
- [3] 徐兴永.崂山古冰川的形成及其环境效应的研究[D].青岛:中国海洋大学,2004:33-51.
- [4] 徐兴永.冰消期地貌[D].青岛:中国海洋大学,2012:11-13.
- [5] 李培英.海岸带黄土与古冰川遗迹[M].北京:海洋出版社,2008:1-320.
- [6] 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.
- [7] 王照波,何乐龙,张剑,等.山东中更新世以来冰碛年龄、雪线高程与气候演化:以蒙山、崂山为例[J].山东国土资源,2021,37(2):10-21.
- [8] 王照波,王江月,何乐龙,等.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,2021,27(1):105-116.
- [9] 王照波.中国新生代冰川与环境演化[M].北京:地质出版社,2021:1-133.
- [10] 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研究中的意义[J].华东地质,2021,42(3):279-285.
- [11] LU H B, YAN S Y, ZHANG Y. Quaternary glacio-erosional landforms in Laoshan Mountain and their constraints on the origin of Jiaozhou Bay, Qingdao, east of China [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2007, 25(2): 139-148.
- [12] 刘耕年.川西螺髻山冰川侵蚀地貌研究[J].冰川冻土,1989

(3):249-259.

[13] 王照波,王江月,孟庆瑞,等.山东蒙山拦马墙全新世复合冰川

堆积体的发现与测年:兼论冰川堆积的对称性及其成因[J].

东华理工大学学报(自然科学版),2024,47(5):421-430.

Discovery and Dating of Ridge and Trough Sequence of Middle Pleistocene Glacier in Huayansi in Laoshan Mountain in Shandong Province

WANG Zhaobo^{1,2}, BAO Kefei³, XU Xingyong⁴, HU Yuan³, DING Zhihao⁵

(1. Key Laboratory of Gold Mineralization Processes and Resources Utilization of the Ministry of Land and Resources, Shandong Provincial Key Laboratory of Metallogenic Geological Process and Resource Utilization, Shandong Jinan 250013, China; 2. Pingyi County State owned Forest Farm, Shandong Linyi 273301, China; 3. Pingyi Bureau of Natural Resources and Planning, Shandong Linyi 273301, China; 4. No.1 Institute of Oceanography of the Ministry of Natural Resources, Shandong Qingdao 273300, China; 5. Shandong Compass Mineral Exploration Limited Corporation, Shandong Linyi 276006, China)

Abstract: A complete glacier system is developed around Huayan Temple in Laoshan Mountain. It is composed of triangular ridge chain, ice bucket, blade ridge, U-shaped valley, glacier boulders, moraine hills, glacier ridge and groove sequence. Giant glacier boulders are very common in this area, and the weight can reach thousands of tons. The moraine hills are 400m long and altitude difference can reach 25 m. The moraine ridge and groove sequence consists of two sets of moraine ridges. The ridges and grooves are nested at intervals, and the shape remains intact. Moraine is a mixture of boulder, sediment, clay and other materials. It does not show bedding and has general characteristics of moraine accumulation. The existence of giant glacier boulders and glacial hills shows that the ancient glaciers in Laoshan Mountain are large in scale. The moraine coast of Laoshan Mountain is the only geological relic in China, which has important scientific value. The accumulated ages of moraine ridges are (44 ± 3) ka, (68 ± 5) ka and > 133 ka respectively. Combining with previous photoluminescence ages of (141.3 ± 14) ka and (197.0 ± 23) ka in this area, they systematically correspond to the MIS3b cold period of the late Pleistocene (Huayan Glaciation), Dongshan Glaciation and Lushan Glaciation of the Middle Pleistocene. The discovery and dating study of moraine ridge and trough sequence in Huayan Temple in Laoshan Mountain has further confirmed the accuracy and reliability of Mr. LI Siguang's assertion that there are Quaternary glaciers in the middle and low mountainous areas in eastern China 100 years ago.

Key words: Moraine hills; ridge and groove sequence; photoluminescence dating; Ice bucket; Shandong province; Laoshan Mountain