

DOI: 10.16788/j.hddz.32-1865/P.2021.03.004

引用格式: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.

冰蚀三角脊链的发现及其在地貌演化研究中的意义

王照波^{1,2,3,4},王江月⁵,田晓明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 济南 250013;
2.沂蒙山国家地质公园管理局,山东 临沂 273304;3.平邑县自然资源与规划局,山东 临沂 273304;
4.山东指南针矿产勘查有限公司,山东 临沂 276006;5.曲阜师范大学地理与旅游学院,山东 日照 276800)

摘要:我国东部中低山区是否存在第四纪冰川作用一直存在争论。冰川作用使山体遗留冰蚀遗迹,通过研究冰蚀遗迹可进一步分析山体地貌的演化过程,辨识是否存在冰川作用。利用卫星遥感技术大视域俯视观察山体地貌,可突破地面视野对山体地貌观察的局限性,为冰蚀地貌结构研究提供技术支撑。喜马拉雅山广泛发育现代冰川,冰蚀地貌清晰且典型。通过研究喜马拉雅山脉冰蚀地貌结构,发现了冰蚀三角脊链,揭示了山体冰斗集群发育过程及规律。根据冰斗系统剥蚀推进方向,分辨出对蚀三角脊链、斜蚀三角脊链与追蚀三角脊链3种基本组合形态。冰蚀三角脊链是冰蚀作用的结构性遗迹,我国东部中低山区广泛发育冰蚀三角脊链,进一步佐证我国东部地区曾广泛发育第四纪冰川。

关键词:冰斗;冰蚀地貌;三角脊链;地貌过程;遥感技术

中图分类号:P343.6

文献标识码:A

文章编号:2096-1871(2021)03-279-07

现存的山体地貌蕴含了山体演化过程的信息。李四光先生曾指出:我国东部基岩山体中的“盲谷”是冰川作用侵蚀的结果^[1-2]。王曰伦等^[3]认为北京房山山体的弧形盆地是冰川作用的结果,把弧形盆地归因于风化流水作用的观点属于“皮相之谈”,并提出现代地形脱胎于古冰川地形的观点^[4]。目前,山体地貌研究主要停留在单一冰斗、刃脊、角峰等形态地貌表述^[5-10],而从外力过程理解山体地貌的研究不多。

冰斗是冰蚀作用形成的三面环山、后壁陡峻的半圆形漏斗状洼地^[11],存在向上溯源的侵蚀作用^[6]。冰蚀作用是一种溯源性弧形剥蚀作用,冰蚀地貌是冰川作用对山体侵蚀的遗迹。三角脊是笔者等^[12-13]研究豫西甘山冰蚀地貌时提出的,是冰斗系统的组成部分,冰斗系统(含冰斗与粒雪盆)由缩口、三角脊、残弧等地貌要素组成。将冰蚀地貌表

述为冰斗、角峰、刃脊,这是地面视野的直观认识,高清卫星遥感技术可从太空视野观察、研究山体地貌。三角脊为冰雪融冻、溯源侵蚀作用形成的3个相邻冰斗弧形组成的遗迹,冰蚀作用受雪线高程与积雪高程(雪线之上的山体高程)控制(图1(a)),位于雪线之上有一定积雪高程的山体发生冰蚀作用后形成冰斗系统集群,在冰斗系统发展过程中山体高程逐渐被侵蚀变低(或因雪线抬升),冰斗积雪高程不足的山体削弱甚至停止生长遗留下众多三角脊(图1(b)),三角脊连在一起构成三角脊链。三角脊链是山脊两侧的冰斗系统耗尽积雪高程冰蚀作用停止的山体地貌残留,代表冰斗系统群体性行为。

三角脊是冰蚀作用的特征性地貌遗迹,以往所述角峰是由尖锐山峰构成的单个三角脊,更多三角脊被后期冰蚀作用(如冰帽、冰盖)或风化作用改造或钝化失去尖锐的角峰,但冰蚀三角脊的3条外切

* 收稿日期:2020-04-20 修订日期:2020-07-21 责任编辑:谭桂丽

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“山东金矿成矿规律与侵位时代研究(编号:201403)”和山东指南针矿产勘查有限公司“东亚冷槽探索计划(编号:20180101)”项目联合资助。

第一作者简介:王照波,1971年生,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。Email:13805498543@163.com。

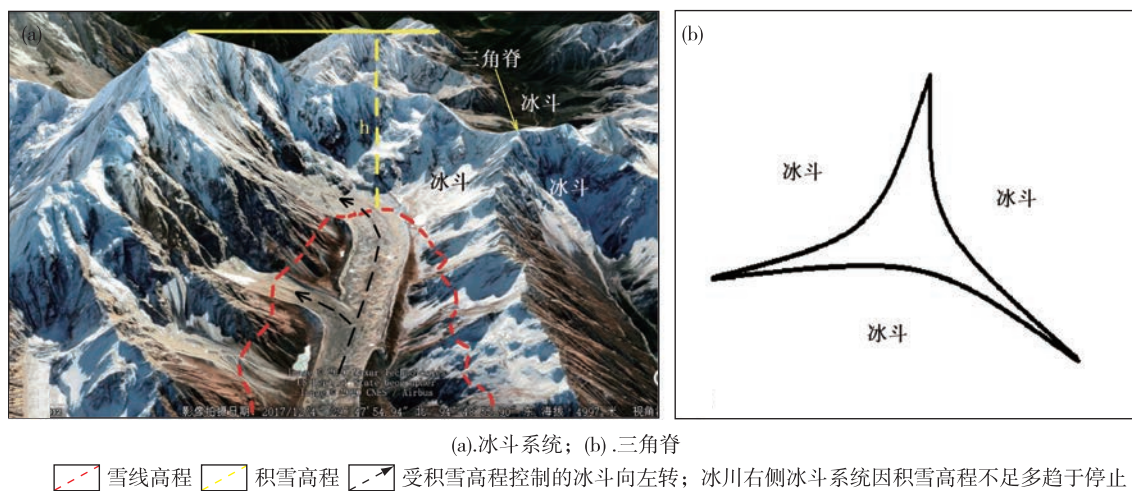


图1 冰斗系统控制因素与三角脊基本特征

Fig. 1 Controlling factors of cirque system and basic characteristics of triangle ridge

弧形边清晰保留。现以冰斗系统研究^[12-14]为基础,以青藏高原区作为冰蚀地貌选区解读三角脊链的基本特征、类型与演化过程,对我国东部中低山区山体地貌进行对比分析,分辨其是否经历冰蚀作用过程,并探讨其地貌演化过程。

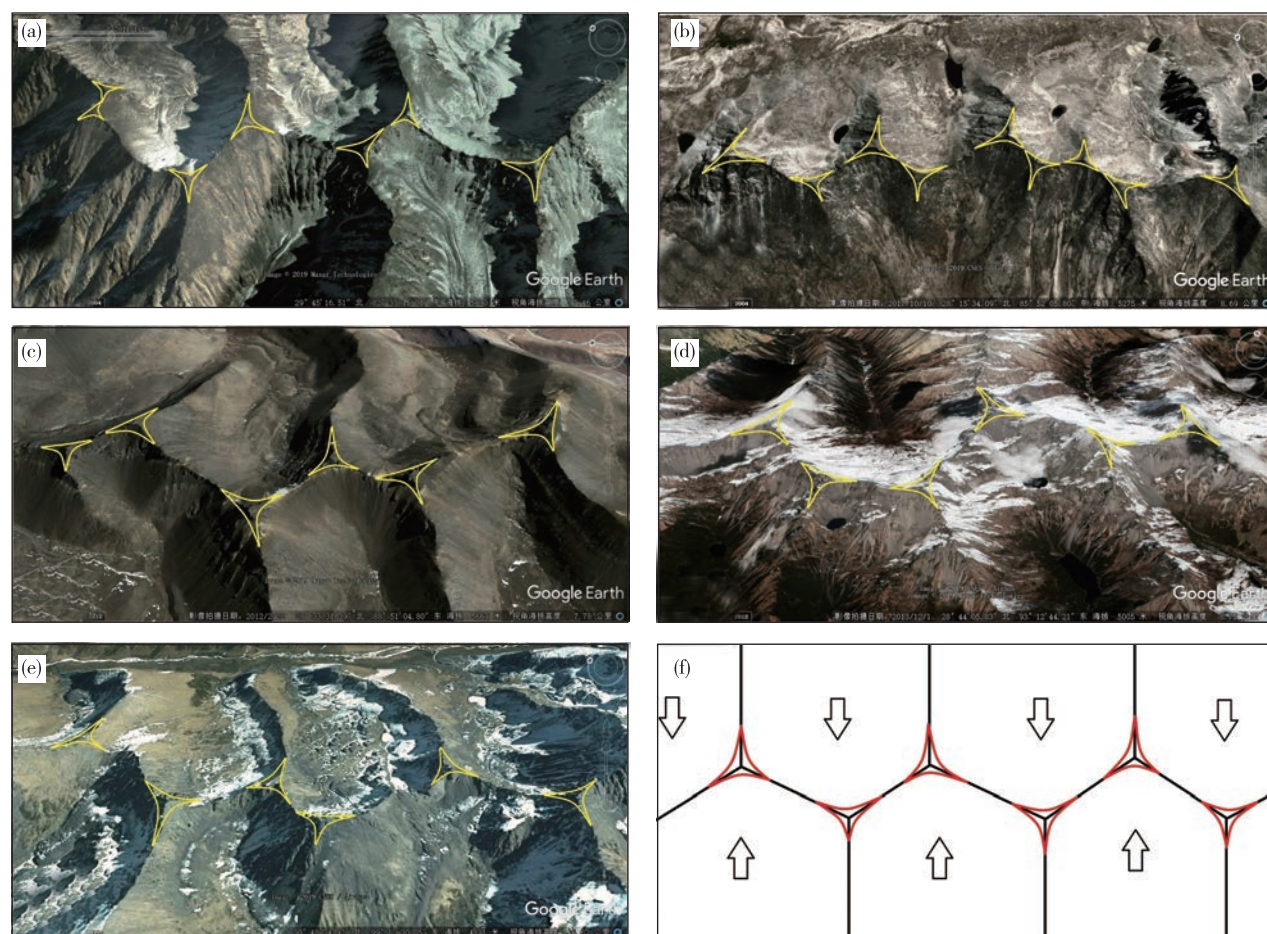
1 喜马拉雅山区典型冰蚀地貌选区特征

喜马拉雅山区海拔较高,至今保留有冰蚀作用形成的众多冰斗系统,为研究山体地貌的冰蚀特征、演化过程及控制因素提供了典型地貌选区。三角脊链在喜马拉雅山区极为发育(图2),选择5处三角脊链卫片地貌典型选区。图2(a)地貌选区为位于喜马拉雅山南侧博克逊国家公园的冰蚀三角脊链,冰斗系统有明显的侧碛垄等冰碛遗迹,海拔约5000 m,地理坐标为29°45′16.51″N,82°33′15.01″E。图2(b)地貌选区为位于聂拉木县北西15 km的冰蚀三角脊,上侧冰斗遗留典型的冰斗湖,海拔约5200 m,地理坐标为28°15′34.09″N,85°52′05.80″E。图2(c)地貌选区为位于岗巴县城北东45 km的冰蚀三角脊链,目前该冰斗系统已位于雪线之下,海拔约5600 m,地理坐标为28°33′31.39″N,88°51′04.80″E。图2(d)地貌选区为位于朗县南东35 km的冰蚀三角脊链,下侧冰斗系统有明显的冰斗湖,海拔约5000 m,地理坐标为28°44′05.83″N,93°12′44.21″E。图2(e)为位于巴塘县北89 km的冰蚀三角脊链,海拔约4800 m,地理坐标为30°48′34.92″N,99°12′30.05″E。图2(f)为根据三角脊链与冰斗系统呈现的蜂巢状地貌模式图。

由以上5张卫星图片典型地貌选区可分辨出三角脊、三角脊链与蜂巢状地貌,在冰斗系统中可观察到冰碛垄或冰斗湖,确认这些三角脊链为冰川冰蚀作用的结果,基本特征如图2(f)所示,山脊两侧的冰斗系统近于垂直山脊脊线。由于山脊脊线近于水平,三角脊链呈对面相互侵蚀,称为“对蚀三角脊链”,与冰斗系统共同构成蜂巢状地貌,具有规则的对称分布特征。

图3(a)位于四川甘孜藏族自治州理塘县北44 km处,海拔4721 m,地理坐标为30°23′09.90″N,100°12′08.31″E,在倾斜山脊两侧分布斜列式三角脊链,伴随冰斗系统,称斜列式三角脊链为“斜蚀三角脊链”,图3(b)为斜蚀三角脊链模式图。图3(c)位于西藏自治区昌都市边坝县北48 km处,海拔4993 m,地理坐标为31°21′00.25″N,94°36′16.40″E,冰蚀三角脊链位于倾斜山脊上,冰斗系统进一步发展形成近“众”字型三角脊链,冰斗系统沿山脊方向侵蚀,其前进方向基本与山脊脊线平行,称为“追蚀三角脊链”,图3(d)为追蚀三角脊链模式图。与斜蚀三角脊链及追蚀三角脊链伴随的冰斗均明显增高,其前方推进最突出的位置为三角脊分布处,显示积雪厚度对冰斗系统前进方向具有引导作用。

山脊形态较复杂,通常三角脊链呈上述3种组合形态。冰川的冰蚀作用是集群性作用,在侵蚀过程中有鲜明的个体与集体行为特征。单个冰斗以独立单元推进(个体行为),冰斗系统以“有序推进,互不逾越”单元推进(集体行为),形成规则的蜂巢状地貌,



(a).博克逊多国家公园冰蚀三角脊链; (b).聂拉木县冰蚀三角脊; (c).岗巴县冰蚀三角脊链;
(d).朗县冰蚀三角脊; (e).巴塘县冰蚀三角脊链; (f).三角脊链与冰斗系统组成蜂巢状地貌(箭头示意冰蚀作用前进方向)

图 2 冰蚀三角脊链与蜂巢状地貌示意图

Fig. 2 The schematic diagram of glacial erosion triangle ridge chains landform and honeycomb mosaic structure

原因是相邻冰斗受相同的雪线高程与积雪高程控制,当积雪高程不足时,相邻冰斗系统停止侵蚀推进,显示单个冰斗构成的集群特征。互不逾越的结果是形成了“盲谷”。冰斗系统冰蚀作用的逐高习性与积雪高程不足引起的剥蚀停止是山体形成三角脊链与蜂巢状地貌的内在原因,是特殊动力条件下的产物,也是冰蚀地貌与风化地貌的根本区别。

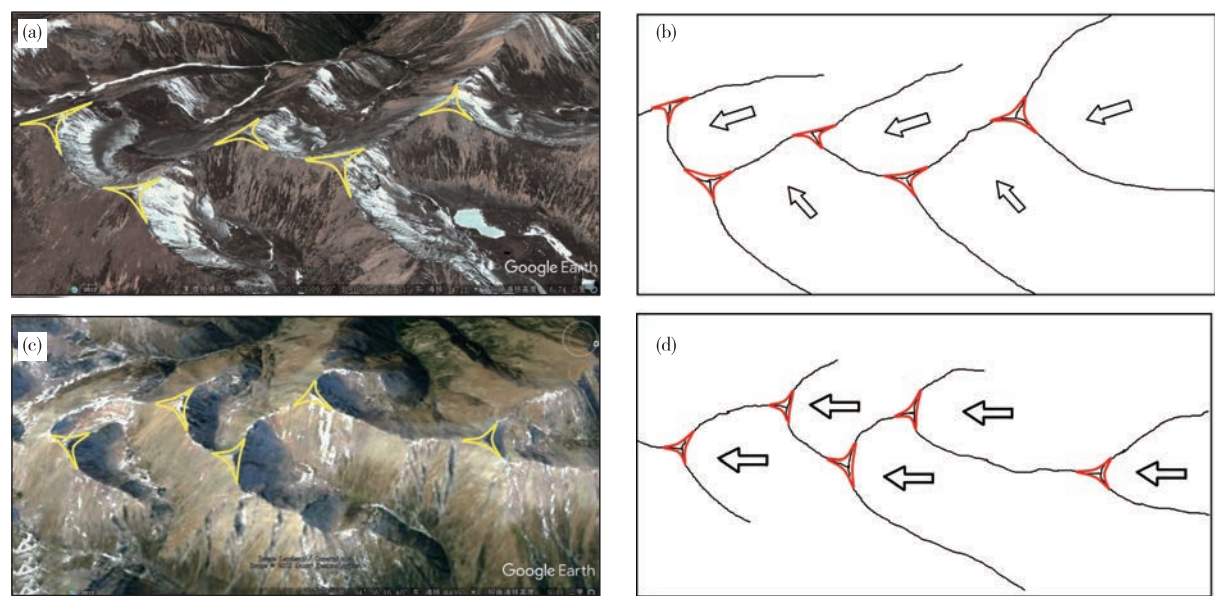
地球上未经冰蚀作用影响的地貌分布有限,除澳大利亚大陆腹地广泛分布典型的风化(流水)地貌外^[13],我国西部局部干旱区也有典型的风化地貌。图 4(a)为新疆柯坪县北部砂泥岩组成的山体,海拔 1 685 m,地理坐标为 40°33′29.10″N,78°51′48.54″E。地层呈单斜,倾向 NW。山体呈 NE 向条带状展布,未经冰蚀作用影响。差异风化作用使砂岩层形成平行展布的山脊,山脊多呈平直线状,软弱岩层构成贯

通性风化沟谷。图 4(b)为内蒙古巴丹吉林沙漠东侧雅布赖山,海拔 1 734 m,地理坐标为 39°37′30.89″N,103°00′13.78″E。主要为花岗岩分布区,山体广泛分布沿构造风化侵蚀沟谷纵横交错,相互贯通,代表风化流水地貌特征(表 1),与冰蚀作用形成的弧形盆地、三角脊链差异明显^[14]。

2 我国东部中低山区冰蚀三角脊链特征

冰川具有独特的环形剥蚀作用,在岩石山体上留下深刻的印记,是后期风化流水作用难以彻底改变的,即现代地形脱胎于古冰川地形^[4]。如果我国东部中低山区经历过冰蚀作用,必然会遗留下冰蚀作用形成的“冰蚀三角脊链”这一独特结构性地貌。

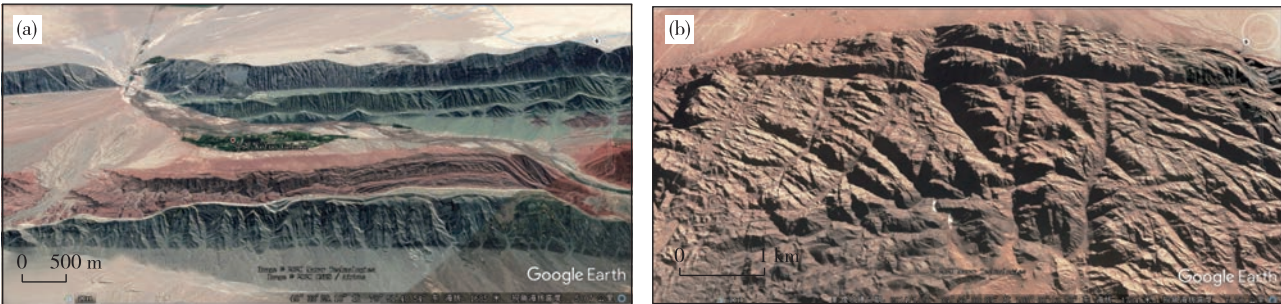
在我国东部中低山区选择典型的山体地貌选区,海拔均低于“我国东部 2 500~3 000 m 无冰川



(a).斜蚀三角脊链地貌卫片；(b).斜蚀三角脊链示意图；(c).追蚀三角脊链地貌卫片；(d).追蚀三角脊链示意图（箭头示意冰斗系统前进方向）

图 3 斜蚀三角脊链与追蚀三角脊链地貌及模式示意图

Fig. 3 Landforms and the schematic diagrams of oblique and following erosion triangle ridge chains



(a).新疆柯坪县北；(b).内蒙古雅布赖山

图 4 风化流水侵蚀地貌特征

Fig. 4 Geomorphologic characteristics of weathering and water erosion

表 1 冰蚀作用与风化作用控制因素及地貌差异对比^[14]

Table 1 The difference in controlling factors and landform between glaciation and weathering^[14]

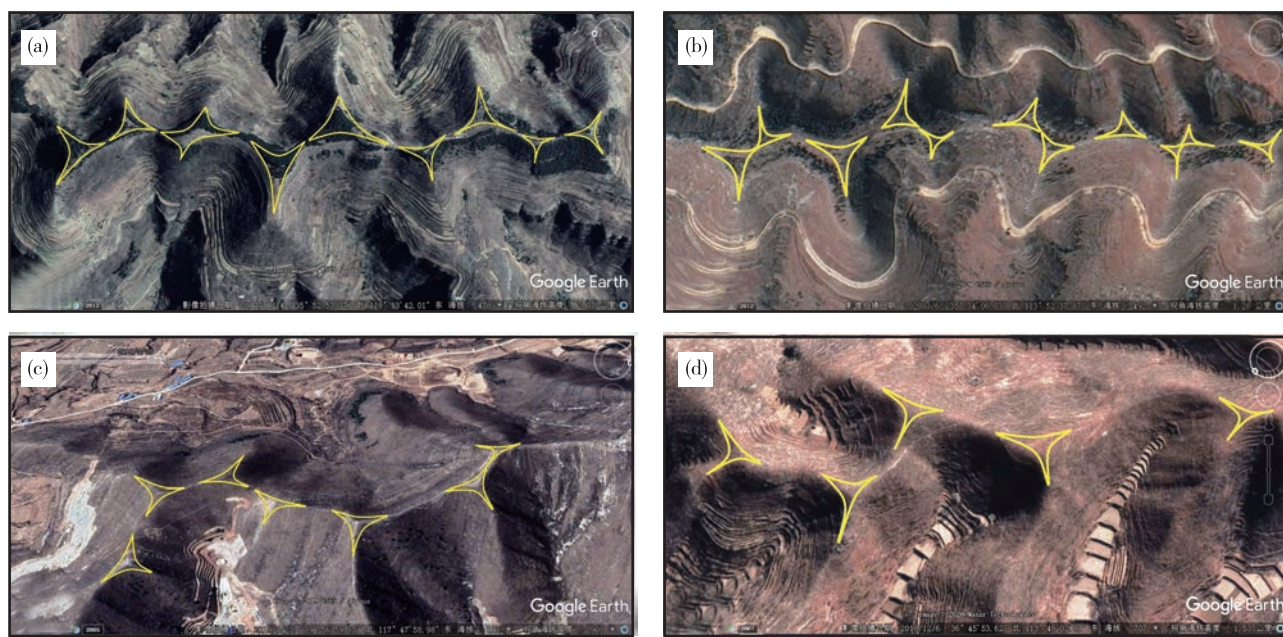
类型	剥蚀方式	作用趋势	控制因素	山峰变化过程	山坡作用过程	沟谷特征	谷口特征
冰蚀作用	环形剥蚀	趋高	雪线与积雪高程	尖化	切壁穿梁	弧形盲谷	缩口
风化作用	线性侵蚀	趋弱	岩性与构造	圆化	双坡同蚀	线性通谷	敞口

区”^[18]。图 5(a)位于沂蒙山世界地质公园岱崮园区,海拔 478 m,地理坐标为 35°52′53.37″N,118°13′42.01″E,岩性为寒武纪灰岩,呈典型的对蚀三角脊链与规则的蜂巢状地貌,且冰斗出现典型的弧形,三角脊链两侧的冰斗排列较规律,与该山脊地层产状近水平有关。该区对蚀三角脊链、蜂巢状

地貌均与喜马拉雅山区对蚀三角脊链相似。图 5(b)为河南省辉县市北太行山南麓三角脊链,海拔 492 m,地理坐标为 35°34′06.03″N,113°52′37.87″E,其山脊脊线平直,形成标准的对蚀三角脊链,伴随两侧的冰斗系统显示规整的蜂巢状地貌。图 5(c)为河北唐山市玉田县北三角脊链,海拔 113 m,地理

坐标为 $39^{\circ}56'59.85''\text{N}$, $117^{\circ}47'58.98''\text{E}$, 山体为寒武纪灰岩, 地层倾斜, 倾角约 60° , 冰蚀作用未受地层产状影响, 泥页岩等软弱层未显示风化流水作用形成的沟谷。图 5(d) 为河北邯郸市西太行山东麓

的三角脊链, 海拔 707 m, 地理坐标为 $36^{\circ}45'53.62''\text{N}$, $113^{\circ}48'02.01''\text{E}$, 山脊脊线倾斜, 形成标准的斜蚀三角脊链, 其东侧 45 km 处即为李四光先生 1921 年首次发现的我国东部冰川遗迹——白错盆地^[15]。



(a). 山东蒙山岱崮三角脊链; (b). 河南辉县市北太行山三角脊链; (c). 河北唐山三角脊链; (d). 河北邯郸市西斜蚀三角脊链

图 5 我国东部中低山区三角脊链地貌特征

Fig. 5 Geomorphologic features of triangle ridge chains in the middle and low mountain areas of eastern China

我国东部中低山区的三角脊链与对应的蜂巢状地貌, 均与青藏高原冰川分布区的冰蚀三角脊链相一致, 也与近几年王照波等^[16-23]对我国东部中低山区各类冰川遗迹、尹国胜等^[24]对江西庐山等研究结果相配套, 进一步佐证我国东部中低山区曾经历过第四纪冰川作用。

3 结论

(1) 冰蚀三角脊链与蜂巢状地貌是冰蚀作用形成的地貌类型, 从冰斗系统群体性行为的角度理解地貌演化过程, 在恢复山体冰蚀作用、风化作用的演化过程具有较强的理论意义。

(2) 我国东部中低山区广泛发育冰蚀三角脊链和蜂巢状地貌, 进一步佐证了我国东部中低山区曾经历过第四纪冰川作用。

致谢: 该研究得到了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、国家海洋局徐兴永研究员、中国地质科学院地质力学所钱方教授、河南地矿职业技术学院张先教授的大力支持与帮助, 在此表示谢意!

注: 文中所用卫星图片均取自 Google Earth。

参考文献

- [1] 李四光. 冰期之庐山[M]. 南京: 国立中央研究院地质研究所专刊乙种第 2 号, 1947: 1-27.
- [2] 李四光. 华北平原西北边缘地区的冰碛和冰水沉积[A]//中国第四纪研究委员会. 中国第四纪冰川遗迹研究文集. 北京: 科学出版社, 1964: 1-3.
- [3] 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(增刊): 16-25.
- [4] 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, 1992: 19-46.
- [5] DOUGLAS I, BENN, DAVID J A. Evans. Glacier and Glaciation. British Library Cataloguing in Publication Data[M]. British Library Cataloguing in Publication

- Data, 2010: 451-662.
- [6] 崔之久. 青藏高原(及其邻近山地)冰川侵蚀地貌发育的基本特征与影响因素[J]. 地理学报, 1980, 47(2): 43-54.
- [7] 吕洪波. 地球科学概论[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2006: 237-242.
- [8] 南京大学地理系地貌学教研室. 中国第四纪冰川与冰期问题[M]. 北京: 科学出版社, 1974: 1-152.
- [9] 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.
- [10] 施雅风, 崔之久, 苏珍. 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, 2005: 66-67.
- [11] 马永立. 地理学词典[M]. 上海: 上海辞书出版社, 1983: 225.
- [12] 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.
- [13] 王照波, 王江月. 渐新世“雪球事件”的发现及其意义——基于全球冰斗系统的解读与研究[J]. 山东国土资源, 2018, 34(9): 1-8.
- [14] 王照波, 司荣军, 王江月. 喜马拉雅山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(2): 1-11.
- [15] LEE J S. Note on traces of recent ice action in Northern China[M]. London: Geological Magazine, 1922: 14-21.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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——来自宇生核素年龄的证据[J]. 山东国土资源, 2018, 34(6): 1-7.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 王照波, 王江月, 李宝杰. 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, 2020, 41(2): 108-115.
- [23] 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.
- [24] 尹国胜, 杨明桂. 庐山世界地质公园及其周边地区的主要地质景观[J]. 资源调查与环境, 2004, 25(4): 304-310.

Discovery of glacial triangle ridge chains and its significance in geomorphologic interpretation

WANG Zhaobo^{1,2,3,4}, WANG Jiangyue⁵, TIAN Xiaoming³

(1. *Key Laboratory of Gold Mineralization Process and Resource Utilization of the Ministry of Land and Resources, Jinan 250013, Shandong, China*; 2. *Yimeng National Geological Park Management Office, Linyi 273304, Shandong, China*; 3. *Natural Resources and Planning Bureau of Pingyi County, Linyi 273304, Shandong, China*; 4. *Shandong Compass Mineral Exploration co., Ltd, Linyi 276006, Shandong, China*; 5. *College of Geography and Travel, Normal University of Qufu, Rizhao 276800, Shandong, China*)

Abstract: Whether Quaternary glaciation exists in the middle and low mountains of eastern China has been debated for a century. Because glacial landforms are formed by glaciation, further studying on the mountain glacial erosion relics and analyzing on the evolution of geomorphology are significant to identify the existence of glaciation. The satellite remote sensing with a large overlook view breaks the limitation of observation the mountain geomorphology from the ground in the past, and provides the condition to study the structure of glacial erosion geomorphology. Modern glaciers are widespread in the Himalayas with the clear and typical glacial erosion landforms that provide a basis for us to study the ice cirque system. Meanwhile, according to the erosion direction of ice cirque, we distinguish three fundamental combinations such as the symmetrical erosion triangle ridge chains, oblique erosion triangle ridge chains and following erosion triangle ridge chains. Glacial erosion triangle chains are the structural relics of glaciation. Comparative analysis of the mountain landforms in the middle and low mountains of eastern China using the triangle ridge theory, we found glacial erosion triangle ridge chains are widespread in that areas, which proves Quaternary glaciation existing in the eastern China.

Key words: ice cirque system; glacial erosion landform; triangle ridge chains; geomorphologic process; remote sensing