



河北秦皇岛地区第四纪冰川遗迹研究

刘书燕¹, 犹遵艳², 刘连忠¹, 崔贵云¹, 邵先杰²

1. 河北柳江盆地地质遗迹国家级自然保护区管理中心, 河北 秦皇岛 066001;

2. 燕山大学 石油工程系, 河北 秦皇岛 066004

摘要: 中国东部中低山区是否存在第四纪冰川的争鸣已经持续了近一个世纪, 之所以存在争议, 主要是目前发现的大部分冰川遗迹都是零散的、孤立的, 具有多解性, 不能充分支撑冰川存在的观点. 经过对燕山山脉秦皇岛段长期深入细致的考察, 发现了大量的、类型齐全的与冰川有关的遗迹, 主要类型有冰川漂砾、冰碛、石海、冰臼、冰斗、冰蚀槽、冰擦痕、羊背石、角峰和 U 形谷. 这些遗迹之间都存在着相互关联, 形成了有力的证据群和证据链条, 为中国东部地区第四纪冰期的研究提供了可靠的资料.

关键词: 第四纪冰期; 冰川; 冰斗; 冰臼; 秦皇岛; 河北省

STUDY ON THE QUATERNARY GLACIAL RELICS IN QINHUANGDAO AREA, HEBEI PROVINCE

LIU Shu-yan¹, YOU Zun-yan², LIU Lian-zhong¹, CUI Gui-yun¹, SHAO Xian-jie²

1. National Nature Reserve Management Center of Liujiang Basin Geological Relics, Qinhuangdao 066001, Hebei Province, China;

2. Department of Petroleum Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei Province, China

Abstract: As the discovered glacial relics are mostly scattered and isolated, with multi-interpretation, which cannot fully support the existence of glaciers, the topic whether the Quaternary glaciers exist in the low and middle mountains of eastern China has been controversial for nearly a century. Through the long-term detailed investigation in Qinhuangdao section of Yanshan Mountains, a large number of relics related to glaciers have been found, the main types including glacial boulder, moraine, stone sea, moulin, cirque, glacial trough, glacial striation, sheepback rock, pyramidal peak and U-shaped valley. These relics are all interrelated and form strong evidence group and chain, which provide reliable data for the study of Quaternary glaciation in eastern China.

Key words: Quaternary glaciation; glacier; cirque; moulin; Qinhuangdao City; Hebei Province

收稿日期: 2020-11-16; 修回日期: 2020-12-24. 编辑: 李兰英.

基金项目: 2019 年度中央财政国家级自然保护区补助资金项目“河北省秦皇岛柳江盆地及周边区域地质遗迹资源”(冀林草发[2019]52 号); 河北省林业和草原局批准项目“柳江盆地野外地质实习资源开发、整合与管理”(冀林草发[2019]41 号); 河北省科技支撑计划项目“秦皇岛地质遗迹旅游景观资源调查与开发”(15236007); 河北省高等教育教学改革研究与实践项目“秦皇岛野外地质实习虚拟仿真教学平台研发”(2018CJG083); 教育部 2018 年“产学研协同育人”项目“秦皇岛野外地质实习基地虚拟仿真教学平台建设”(201802032017).

作者简介: 刘书燕(1981—), 女, 高级工程师, 主要从事地质遗迹保护与研究等方面的工作, 通信地址 河北省秦皇岛市海港区燕山大街 221 号, E-mail//liushuyan1203@126.com

通信作者: 邵先杰(1964—), 男, 教授, 博士, 主要从事地质、油气田开发、煤层气工程等方面的教学与科研工作, 通信地址 河北省秦皇岛市海港区河北大街西段 438 号, E-mail//shaoxianjie6@qq.com

0 引言

苏格兰地质学家格克 1894 年出版《大冰期》一书,其中提到了旅行者威廉生在山东省北部和陕西省潼关附近发现的一些巨大漂砾,认为这些巨大漂砾为第四纪冰川作用所搬运的^[1].李四光先生 1931 年在庐山发现第四纪冰川遗迹,1937 年完成《冰期之庐山》专著,之后拉开了我国第四纪冰期的研究热潮,相继发现了很多冰川证据^[2-3],出版了大量的研究成果,同时也引发了争鸣和讨论.我国著名的地理学家施雅风院士,依据自己长期研究青藏高原现代冰川的经验,指出“李四光教授提出的第四纪庐山冰期冰碛不是冰碛,可能是稀性泥石流堆积”^[4].2006 年施雅风等出版了《中国第四纪冰川与环境变化》一书,观点是:“我们明确无误地认为,中国东部 3 000~2 500 m 以下的中低山在第四纪期间从未有过冰川活动”^[1].孙殿卿院士^[5]依据对长江中下游地区和太行山地区冰川遗迹的研究成果,则认为中国东部中低山地是存在第四纪冰川遗迹的.

学者们之所以对第四纪冰川的研究和讨论投入这么大的热情,是因为冰期是地球演化过程中的突变事件,它关乎地球未来的演化和预测^[6].地质学发展到今天不只是解决矿产资源问题,而且还要解决地球环境问题,更要关注地球未来环境的演化规律以及突发事件.第四纪地质是预测未来地球演化的基础^[7],故第四纪冰期的研究对人类赖以生存和可持续发展的环境具有重大意义^[8].

按照施雅风院士的观点^[1],第四纪冰期只有 3 000 m 以上的高山存在冰川,这样,在中国东部地区就不可能存在冰川,说明气候并没有到极度寒冷期,这还能不能算是冰期,有待商榷.之所以有学者对目前在东部发现的大量冰川遗迹持否定的观点,是因为大部分遗迹都是零散的、孤立的,具有多解性,没有形成有效的证据群或证据链条,不足以支撑冰川存在的观点.笔者对燕山山脉秦皇岛段进行了深入细致的考察,发现了大量的、类型齐全的和冰川有关的遗迹,并且相互之间可以印证,为第四纪冰期的研究提供了可靠的资料.

1 区域背景

秦皇岛地处河北省东北部(图 1),北纬 40°附近,属于暖温带半湿润大陆性季风气候,春夏受东南海洋

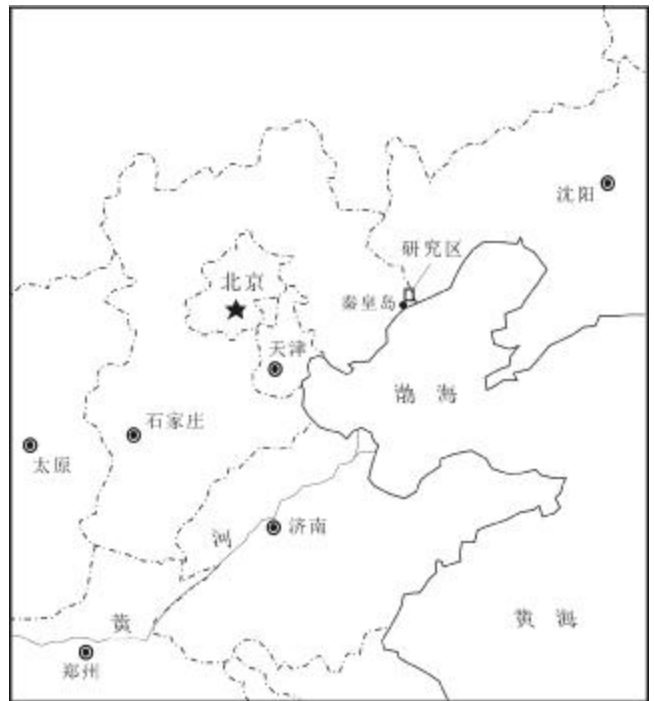


图 1 研究区地理位置图

Fig. 1 Geographical location map of the study area

季风影响,冬季除受东北寒流影响外还受海洋暖流调节.总体趋势是冬季较长偏暖,夏季凉爽,秋季较短,春季干旱多风,四季分明.年平均气温 10.1℃,历史上最高气温 36℃,最低气温-21℃;平均降水量 744.7 mm/a,降水量的 76%集中在 6—8 月份.

在地貌上,秦皇岛北部为燕山山脉,南部濒临渤海,自北向南依次为山地—低山丘陵—小型山间盆地—沿海冲积平原—滨海沙滩.区内最高的山峰是都山,位于青龙满族自治县县城西北 15 km 处,海拔 1 846.3 m.

秦皇岛段的燕山山脉主要由中生代燕山运动一期侵入的闪长玢岩、正长斑岩和燕山运动二期侵入的花岗岩和火山喷发形成的安山岩、粗面岩组成.

在当前气候条件下,秦皇岛结冰的时间在 12 月份到第二年的 2 月份,山区的冰雪厚度一般不会超过 0.5 m,通常情况下不会形成现代的冰川.在前人研究的基础上,笔者根据地质考察,发现秦皇岛祖山、板厂峪、鸭水河村西山、长寿山等地发育类型比较全的第四纪冰川遗迹,并且特征都十分明显,特别是在祖山地区的冰川遗迹相互之间存在着联系,构成了证据链条.

祖山位于秦皇岛市区北 15 km 处,面积大约 150 km²,

最高峰 1428 m. 山体主要是由中生代花岗岩组成,形成于燕山运动的晚期,为小型岩基,侵入于新太古代花岗片麻岩、早古生代寒武纪、奥陶纪以及晚古生代石炭纪地层中. 经过地质历史时期的构造运动、风化剥蚀以及新构造运动,峰峦叠嶂,流水潺潺,植被发育,是 4A 景区.

2 主要冰川遗迹及特征

2.1 冰川漂砾

从祖山景区东门,沿景区道路向深部进入,在山谷中可看到大片分布的巨石(图 2),巨石的直径最大可达 3 m,重量超过 18 t,这些巨石与该地点两侧山峰的岩石不同. 要分析这些岩石的母岩和来源地需要详细论述一下祖山花岗岩的分带性.

祖山花岗岩具有一定的分带性,可划分为中心相、过渡相和边缘相.

中心相为灰白色粗粒花岗岩,颗粒大小 8~20 mm,斜长石含量 60%,石英 30%,角闪石 5%,其他有少量的黑云母、褐铁矿. 矿物晶型完好,粗粒、不等粒结构,块状构造.

过渡相为肉红色、浅肉红色中细粒花岗岩,正长石含量 55%,石英含量 22%,斜长石含量 15%,其他为黑云母和角闪石等矿物. 颗粒大小 2~5 mm,中细粒结构、似斑状结构,块状构造,在某些地段纵向节理发育.

边缘相分布在岩基与围岩接触带附近,主要为棕色正长斑岩,斑状结构,块状构造. 斑晶大小 1~2 mm,斑晶含量 30%. 斑晶主要为正长石,含量超过 80%,另有少量的石英及其他矿物.

沟谷中这些巨石为灰白色粗粒花岗岩,与中心相

岩石类型一致,因此判断其来源于中心相,而该处是位于过渡相,两侧山体上的岩石为浅肉红色中粒花岗岩,距中心相的距离仍有 1 500 m,实际上在祖山山口处(岩体的边缘相)也能见到直径达 1.5 m 的中心相的灰白色粗粒花岗岩,距中心相的距离达 4 500 m. 水流是无法推动这些巨石的,因此,分析认为这些巨石是冰川搬运过来,属于巨型冰漂砾.

2.2 冰碛

在祖山山谷中,多处发育有冰碛堆积,大小砾石混杂堆积(图 3),个体最大的可达 1 m × 1 m,小的只有几厘米. 堆积层的厚度一般 0.5~2 m,分布宽度 10~30 m,表面已经被风化的土壤层覆盖,土壤层厚度 0.1~0.3 m,植被发育.

分析认为,这些不是泥石流形成的,因为泥石流堆积具有分带性,即平面上可以根据砾石的大小和含量划分出扇根、扇中、扇端相,同时,岩石也会出现一定的定向排列,不明显的平行层理. 在纵向上会因为不同期次出现明显的界限和粒序的变化. 在祖山的这些杂乱堆积的个别岩石面上还可以看到有冰擦痕,冻裂痕,因此根据其特征,综合分析认为该山谷多处堆积物为冰碛.

2.3 石海

在祖山西侧的冰糖峪半山腰处发育了一片石海(图 4),面积 15 m × 20 m,由大小不等的岩块堆积而成,堆积厚度 1 m 左右. 岩石呈棱角状,杂乱堆积,最大的岩块可达 0.5 m × 1.5 m,小的只有十多厘米. 这些岩块都是山坡高处的山体经过冰的刨蚀,脱离山体崩塌下来的. 当然,这些岩块中也有现代风化滚落下来的,现代风化滚落下来的岩石与冰刨蚀下来的不完



图 2 祖山山谷中大面积分布的巨型冰漂砾

Fig. 2 Photograph of widely-distributed giant glacial boulders in Zushan valley



图3 祖山山谷中的冰碛

Fig. 3 Photograph of moraines in Zushan valley

全一样,冰刨蚀下来的岩块其棱角明显^[9],其他风化形式脱落的岩石其表面风化比较严重.像这样比较大规模的石海在板厂峪也有分布.



图4 冰劈作用形成的石海

Fig. 4 Rock sea formed by frost splitting

2.4 冰臼

冰臼被公认是冰川作用的结果,是冰川遗迹的重要证据^[10].在祖山和鸭水河村西山多处发现有冰臼的

存在,最为典型的是在祖山山顶(图5a).两个冰臼相连,单个直径大小15~20 cm,深度8~10 cm.后期又经过风、雨水的改造,其中一个成箕状,一侧深度大,一侧深度浅,并有一个出水口.另外在长寿山也见到了成群分布的冰臼(图5b),在不到100 m²的范围内分布着大大小小的冰臼20多个,个体最大的直径可达1.5 m,深度0.8 m,小的冰臼直径不足10 cm,深度只有5 cm左右.

2.5 冰斗、冰坎和冰蚀槽

鸭水河村西山的岩石主要由新太古界花岗片麻岩和中生代侵入的辉绿岩构成,岩石表面风化比较严重.在靠近山顶的一处斜坡上出露了一大片基岩,基岩上面可见小型冰斗、冰坎、冰臼和冰蚀槽.

小型冰斗发育在辉绿岩之上(图6),长1.5 m,宽0.3 m,深0.18 m,延伸方向58°,倾角30°.三面陡壁,一面开口,呈簸箕状,内部可见条形擦痕.

冰坎发育在花岗片麻岩之上(图7),陡坎宽15~35 cm,各陡坎之间的高差10~25 cm,在5 m长度的斜坡上连续出现了5个阶梯状冰坎,并在陡坎上可见顺斜坡方向的擦痕.

阶梯状的陡坎是由于冰川迁移时磨蚀基岩,而基岩存在抗磨蚀的差异性,相对软的部位磨蚀程度高,成为凹坑,坚硬抗磨蚀的部位成为了陡坎.

在裸露的花岗片麻岩的表面见到5条大型的冰蚀槽(图8),槽宽10~30 cm,槽深3~8 cm,延伸长度4.7 m,延伸方向75°.槽内见擦痕和垂直擦痕方向的颤痕.



图5 祖山冰臼与长寿山冰臼群

Fig. 5 Photographs of moulin in Zushan Mountain and moulin groups in Changshou Mountain



图6 鸭水河村西山上的冰斗

Fig. 6 Photograph of glacial cirque on the west hill in Yashuihe village

2.6 羊背石与冰擦痕

在祖山峡谷的山坡上有一巨大的羊背石,顶部呈穹状,可见宽度 20 cm、长度 60 cm、深度 5~10 cm 的擦痕凹坑,擦痕条带清晰,朝向山坡的下倾方向(图 9)。

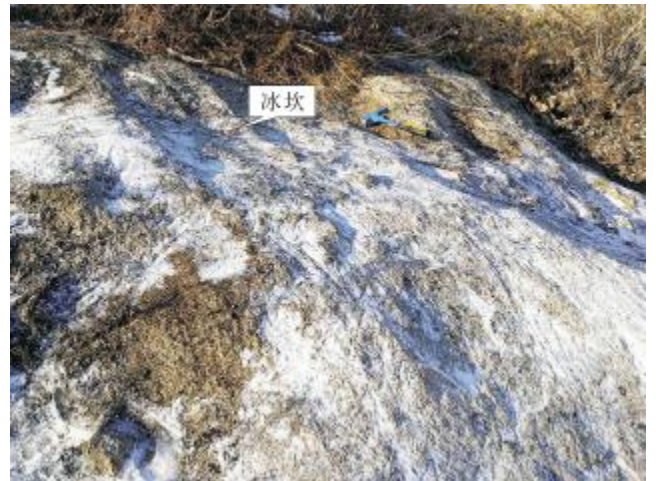


图7 鸭水河村西山的冰坎

Fig. 7 Photograph of glacial threshold on the west hill in Yashuihe village

通过分析,首先不是断层擦痕,因为断层擦痕不会形成如此深的凹坑;第二也不是雨水侵蚀形成的凹坑,雨水侵蚀的凹坑里面是光滑的,不会有擦痕,因此确定是冰擦痕.在沟谷两侧的斜坡上多处见到这类冰擦痕。

2.7 冰川拖曳脊状磨蚀痕

在祖山峡谷的山坡上有一些巨石的底部见脊状磨蚀痕迹(图 10),顶部呈穹状的羊背石.这类岩石首先不是从山顶滚落下来的,也不是泥石流携带下来的,因为底部存在明显的脊状磨蚀擦痕,并且磨蚀的厚度、深度和痕迹十分明显.如果是山顶滚落下来的话,只会有撞击的痕迹,棱角分明,不会形成稳定的磨蚀;如果



图 8 鸭水河村西山上的冰蚀槽

Fig. 8 Photograph of glacial trough on the west hill in Yashuihe village



图 10 巨石底部脊状磨蚀痕

Fig. 10 Photograph of ridge abrasion mark at the bottom of boulder



图 11 角峰及 U 形谷

Fig. 11 Photograph of pyramidal peak and U-shaped valley



图 9 祖山的羊背石及上面的冰擦痕

Fig. 9 Photograph of sheepback rock with glacial striation in Zushan Mountain

是泥石流形成的巨石,是在漂浮状态下搬运来的,也不会有磨蚀痕,顶面也不会呈穹状. 因此,认为这类巨石是在冰川的拖曳下向前推进,并不断地与基底摩擦,导致底面呈脊状磨蚀痕^[11],顶部又被冰川磨蚀呈穹状.

2.8 角峰和 U 形谷

角峰和 U 形谷在祖山十分常见,图 11 是其中的一处. 角峰和 U 形谷的相对高差一般 10~50 m,角峰的倾角一般 40~65°.

角峰多表现为山的一侧刨蚀严重,另一侧刨蚀相对较弱,这可能与当时面对的是阳面或是阴面有关,因此刨蚀后的角峰多呈“单面山”. U 形谷多和角峰伴生,并在谷壁上可见冰斗和擦痕.

3 讨论

根据近几十年学者们讨论的情况来看,普遍承认存在第四纪冰期^[12],但也有一些学者认为,东部的冰碛砾石是泥石流成因,并以青藏高原的雪线研究成果对东部进行推演,断论中国东部低于 2500 m 以下的中低山区不存在冰川^[13]. 他们认为目前发现的冰川遗迹证据没有说服力. 根据施雅风院士的估算^[14],第四纪冰期的温度比现在的温度低 12~13 °C,据此推算,冰期时的秦皇岛年平均温度应该在 -2 °C 以下,冬季极端低温度会在 -30 °C 以下,祖山海拔比市区高 500 m 左右,温度应该比市区统计温度还要低 3~5 °C,这样的

话,在第四纪冰期时祖山的年平均气温应该在 -5°C 以下,冬季极端低温应该在 -33°C 以下.这样的气温条件已经比现在新疆天山、青藏高原冰川区的气温还要低 $7\sim 10^{\circ}\text{C}$ ^[15-16].因此,无论是理论估算,还是丰富的、多类型的冰川遗迹证据都足以证明秦皇岛北部的燕山山脉在第四纪冰期曾经广泛地被冰雪覆盖,冰川十分发育.

4 结束语

关于中国东部中低山区第四纪冰期是否存在冰川、冰川发育的范围、冰期雪线的高度等已经争鸣了近一个世纪,要解开这一地质和古气候演化的科学问题,关键还是要充分的证据.

秦皇岛燕山山脉发现的第四纪冰川遗迹类型丰富,保存完好,特别是祖山发育的冰川遗迹分布规律明显,在山顶处发育冰臼、角峰和U形谷,在山腰发育羊背石、冰擦痕和石海,在山坡的下部发育冰碛,在山谷和山谷的出口处见冰漂砾,相互之间构成了完整的证据链条,为研究第四纪冰期提供了可靠的资料.无论从理论上推算,还是依据大量分布的冰川遗迹分析,或者是与现代冰川的比较有很多的相似性^[17-18],这些都证明秦皇岛地区在第四纪冰河期大面积的被冰雪覆盖,冰川普遍发育.

第四纪冰期的研究对于研究现代地球气候的演化十分重要,而目前的研究基本上依据冰川遗迹来作为证据,在准确确定时间、划分冰川期次等方面还不够精确,因此下一步需要开展光释光测年、微体古生物等研究^[19-20],丰富第四纪冰期的证据.

参考文献(References):

- [1]景才瑞, 揭毅, 景高了. 论中国第四纪冰川研究的历史[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2010, 44(2): 330-336.
Jing C R, Jie Y, Jing G L. On the history of China Quaternary glaciation research [J]. Journal of Huazhong Normal University (Natural Science), 2010, 44(2): 330-336.
- [2]张信宝. 运用地貌垂直地带性理论判别庐山第四纪冰川有无[J]. 山地学报, 2016, 34(2): 129-133.
Zhang X B. Discrimination of Quaternary glaciation in the Lushan Mountain of East China by using vertical geomorphology zone theory [J]. Journal of Mountain Science, 2016, 34(2): 129-133.
- [3]赵志中, 丁原辰, 钱方, 等. 冰川沉积物成因确定的一种新方法[J].

地球学报, 2000, 21(4): 396-400.

Zhao Z Z, Ding Y C, Qian F, et al. A new method for identifying moraine[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2000, 21(4): 396-400.

[4]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 Y F. 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.

[5]孙殿卿, 周慕林, 潘建英. 中国第四纪冰期[J]. 地质学报, 1977, 51(2): 101-108.

Sun D Q, Zhou M L, Pan J Y. Quaternary glaciations in China[J]. Acta Geologica Sinica, 1977, 51(2): 101-108.

[6]Derbyshire E. A History of glacial stratigraphy in China[J]. Quaternary Science Reviews, 1987, 6(3/4): 301-314.

[7]孙殿卿, 何培元. 近20年来中国第四纪冰川研究的进展[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1994, 19(6): 838-844.

Sun D Q, He P Y. On advancement in study of quaternary glaciation in recent 20 Years[J]. Earth Science — Journal of China University of Geosciences, 1994, 19(6): 838-844.

[8]童潜明. 第四纪冰川可为人类生存指引方向[J]. 国土资源导刊, 2012, 9(12): 70-74.

Tong Q M. Quaternary glaciers can guide human survival[J]. Land & Resources Herald, 2012, 9(12): 70-74. (in Chinese)

[9]Owen L A, Robinson R, Benn D I, et al. Quaternary glaciation of Mount Everest [J]. Quaternary Science Reviews, 2009, 28(15/16): 1412-1433.

[10]韩同林, 郭克毅. 河北及内蒙古中低山区罕见的冰臼群[J]. 中国地质, 1998(6): 42-45.

Han T L, Guo K Y. A rare group of glacial mortar in Hebei and Inner Mongolia[J]. Geology in China, 1998(6): 42-45. (in Chinese)

[11]韩同林, 劳雄, 陈尚平, 等. 四川彭州葛仙山巨型冰川漂砾的发现及意义[J]. 中国区域地质, 1999, 18(1): 59-68.

Han T L, Lao X, Chen S P, et al. Discovery and significance of a huge glacial boulder in Gexianshan, Pengzhou, Sichuan[J]. Regional Geology of China, 1999, 18(1): 59-68.

[12]Denton G H, Anderson R F, Toggweiler J R, et al. The last glacial termination[J]. Science, 2010, 328(5986): 1652-1656.

[13]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 Z B, Bian Q, Li D P, et al. Discovery of the Quaternary glacial relics in Mount Mengshan, Shandong Province[J]. Geological Review, 2017, 63(1): 134-142.

[14]施雅风. 庐山真的有第四纪冰川吗? [J]. 冰川冻土, 1982, 4(1): 64-69.

Shi Y F. Is there really Quaternary glaciation on Lushan? [J]. Journal of Glaciology and Cryopedology, 1982, 4(1): 64-69.

(下转第 569 页/Continued on Page 569)

- from the Paoma lead-zinc deposit in Sichuan province and its implications[J]. *Geology in China*, 2010, 37(2): 488-494.
- [27]张宗清, 张国伟, 唐索寒, 等. 秦岭勉略带中安子山麻粒岩的年龄[J]. *科学通报*, 2002, 47(22): 1751-1755.
- Zhang Z Q, Zhang G W, Tang S H, et al. Age of Anzishan granulites in the Mianxian-Lueyang suture zone of Qingling orogen: With a discussion of the timing of final assembly of Yangtze and North China craton blocks[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(22): 1925-1930.
- [28]李龚健, 王庆飞, 禹丽, 等. 哀牢山古特提斯洋缝合时限: 晚二叠世花岗岩类锆石 U-Pb 年代学与地球化学制约[J]. *岩石学报*, 2013, 29(11): 3883-3990.
- Li G J, Wang Q F, Yu L, et al. Closure time of the Ailaoshan Paleotethys Ocean: Constraints from the zircon U-Pb dating and geochemistry of the Late Permian granitoids[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(11): 3883-3990.
- [29]李文渊. 古亚洲洋与古特提斯洋关系初探[J]. *岩石学报*, 2018, 34(8): 2201-2210.
- Li W Y. The primary discussion on the relationship between Paleo-Asian Ocean and Paleo-Tethys Ocean[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2018, 34(8): 2201-2210.
- [30]Selby D, Creaser R A. Direct radiometric dating of hydrocarbon deposits using rhenium-osmium isotopes [J]. *Science*, 2005, 308(5726): 1293-1295.
- [31]Muhling J R, Fletcher I R, Rasmussen B. Dating fluid flow and Mississippi Valley Type base-metal mineralization in the Paleoproterozoic Earahedy Basin, Western Australia [J]. *Precambrian Research*, 2012, 212-213: 75-90.
- [32]李厚民, 张长青. 四川盆地富硫天然气与盆地周缘铅锌铜矿的成因联系[J]. *地质论评*, 2012, 58(3): 495-510.
- Li H M, Zhang C Q. The genetic relationship between the H₂S-bearing gas in Sichuan basin and lead-zinc-copper deposits around the basin[J]. *Geological Review*, 2012, 58(3): 495-510.
- [33]龚银杰, 张遵遵, 陈立波, 等. 川东南褶皱带洞岩铅锌矿床闪锌矿 Rb-Sr 同位素测年及其构造变形时代[J]. *中国地质*, 2020, 47(2): 485-496.
- Gong Y J, Zhang Z Z, Chen L B, et al. Sphalerite Rb-Sr isotopic dating of the Dongyan Pb-Zn deposit in southeastern Sichuan fold belt and its constraint on the timing of tectonic deformation[J]. *Geology in China*, 2020, 47(2): 485-496.
- [34]许志琴, 侯立玮, 王宗秀, 等. 中国松潘-甘孜造山带的造山过程[M]. 北京: 地质出版社, 1992: 1-192.
- Xu Z Q, Hou L W, Wang Z X, et al. Orogenic processes of the Songpan-Ganze orogenic belt of China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992: 1-192.
- [35]刘树根, 罗志立, 戴苏兰, 等. 龙门山冲断带的隆升和川西前陆盆地的沉降[J]. *地质学报*, 1995, 69(3): 204-214.
- Liu S G, Luo Z L, Dai S L, et al. The uplift of the Longmenshan thrust belt and subsidence of the western Sichuan foreland basin[J]. *Acta Geological Sinica*, 1995, 69(3): 204-214.
- [36]杜远生, 黄虎, 杨江梅, 等. 晚古生代—中三叠世右江盆地的格局和转换[J]. *地质论评*, 2013, 59(1): 1-11.
- Du Y S, Huang H, Yang J M, et al. The basin translation from Late Paleozoic to Triassic of the Youjiang Basin and its tectonic significance[J]. *Geological Review*, 2013, 59(1): 1-11.
- (上接第 532 页/Continued from Page 532)
- [15]金国平, 甄世财, 侯玉华, 等. 天山山区气候变化对草地植被的影响[J]. *中国农业信息*, 2016(7): 116, 125.
- Jin G P, Zhen S C, Hou Y H, et al. Effects of climate change on grassland vegetation in Tianshan Mountain Area [J]. *China Agricultural Information*, 2016(7): 116, 125. (in Chinese)
- [16]赵越, 钱方, 朱大岗, 等. 青藏高原第四纪冰川的早期记录及其构造与气候含义[J]. *中国地质*, 2009, 36(6): 1195-1207.
- Zhao Y, Qian F, Zhu D G, et al. Early records of quaternary glaciation in Qinghai-Tibet Plateau and their tectonic and climatic implications[J]. *Geology in China*, 2009, 36(6): 1195-1207.
- [17]支瑞荣, 谷延群, 李战. 高分一号遥感数据在冰川变化监测中的应用[J]. *地质与资源*, 2017, 26(6): 616-619, 624.
- Zhi R R, Gu Y Q, Li Z. Application of remote sensing data with GF-1 satellite in glacier change monitoring[J]. *Geology and Resources*, 2017, 26(6): 616-619, 624.
- [18]段志明, 李勇, 李亚林, 等. 青藏高原唐古拉山口第四纪冰碛层划分及其地质环境意义[J]. *中国地质*, 2005, 32(1): 128-134.
- Duan Z M, Li Y, Li Y L, et al. Quaternary tills at the pass of the Tanggula Mountains on the Qinghai-Tibet Plateau and their geological-environmental significance [J]. *Geology in China*, 2005, 32(1): 128-134.
- [19]吴瑞棠, 杨玉卿. 冰川事件的识别标志[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 1991, 16(4): 353-359.
- Wu R T, Yang Y Q. The indicators for recognizing glacial event [J]. *Earth Science — Journal of China University of Geosciences*, 1991, 16(4): 353-359.
- [20]冯丽杰, 郭伟静, 陈树良, 等. 松辽盆地南缘第四纪环境特征——以四平-双辽地区为例[J]. *地质与资源*, 2007, 16(2): 81-85.
- Feng L J, Guo W J, Chen S L, et al. Quaternary environment characteristics in the southern margin of Song-Liao Basin: A case study of Siping-Suangliao area [J]. *Geology and Resources*, 2007, 16(2): 81-85.