

董晓朋,李振宏,崔加伟,等. 宁夏清水河中上游发现末次冰期最盛期冰缘遗迹群[J]. 地球科学与环境学报, 2022, 44(3): 524-534.  
DONG Xiao-peng, LI Zhen-hong, CUI Jia-wei, et al. Discovery of Periglacial Phenomena in the Late Stage of Last Glacial Maximum at the Upper to Middle Reaches of Qingshuihe River, Ningxia, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2022, 44(3): 524-534.

DOI: 10.19814/j.jese.2022.02016

· 庆祝西安地质调查中心组建六十周年专辑 ·

# 宁夏清水河中上游发现末次冰期最盛期冰缘遗迹群

董晓朋<sup>1,2</sup>, 李振宏<sup>1,2\*</sup>, 崔加伟<sup>1,2</sup>, 黄婷<sup>1,2</sup>, 马兆颖<sup>1,2,3</sup>, 寇琳琳<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 2. 自然资源部古地磁与古构造重建重点实验室, 北京 100081; 3. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

**摘要:**冰缘遗迹对重建一定区域和时间段的气候状况以及划定多年冻土边界具有重要意义。在宁夏清水河中上游(36°22'5"N~36°25'53"N)发现末次冰期最盛期冰缘遗迹群,包括古冰楔和融冻褶皱。其中,在唐堡村剖面发现有4处古冰楔,其形态呈楔形,上宽下窄;楔壁不平直,楔体周围地层中发育垮塌前形成的裂隙;楔体中充填有周围地层碎块和棕红色粉砂。在三岔河村剖面发现有2层连续的融冻褶皱,褶皱轴面倾向产状杂乱,无统一指向;褶皱轴部无明显加厚或减薄,翼部未发生层间滑动,褶皱层顶部未发育截切现象;层间褶皱未发育层间逆冲或正断裂。根据光释光测年和<sup>14</sup>C测年结果,古冰楔形成于14.06~11.45 ka B. P.,融冻褶皱形成于13 500~11 570 a B. P.。受新仙女木事件影响,清水河流域在末次冰期最盛期发育大面积多年冻土,分布范围至少到达36°22'5"N以南。末次冰期中国北方中纬度约20 ka以来冻土南界西段可以向南推移至少约52'(径向)上距离约97 km)。这一发现为末次冰期中国北方多年冻土南界的划分提供了新的证据。

**关键词:**末次冰期;冰缘遗迹;古冰楔;融冻褶皱;清水河流域;新仙女木事件;冻土南界;宁夏

**中图分类号:**P56;P66 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-6561(2022)03-0524-11

## Discovery of Periglacial Phenomena in the Late Stage of Last Glacial Maximum at the Upper to Middle Reaches of Qingshuihe River, Ningxia, China

DONG Xiao-peng<sup>1,2</sup>, LI Zhen-hong<sup>1,2\*</sup>, CUI Jia-wei<sup>1,2</sup>, HUANG Ting<sup>1,2</sup>, MA Zhao-ying<sup>1,2,3</sup>, KOU Lin-lin<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 2. Key Laboratory of Paleomagnetism and Tectonic Reconstruction of Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China; 3. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Periglacial phenomena are of great significance for reconstructing the paleo-climate in a certain stage or area, and depicting the southern limit of latitudinal permafrost. Periglacial phenomena, including cryoturbations and ice wedge pseudomorphs, formed during the late stage of Last Glacial Maximum, were discovered in the valley at the middle to upper reaches of

收稿日期:2022-02-14;修回日期:2022-05-15 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目:国家自然科学基金项目(41972119);中国地质调查局地质调查项目(DD20190018, DD20221644);  
中国地质科学院院长基金项目(DZLXJK202104)

作者简介:董晓朋(1989-),男,山东潍坊人,中国地质科学院地质力学研究所助理研究员,理学博士,  
E-mail: dongxiaopeng\_geo@163.com.

\* 通讯作者:李振宏(1973-),男,山西运城人,中国地质科学院地质力学研究所研究员,理学博士, E-mail: lizhenhong@126.com.

Qingshuihe River, Ningxia, China ( $36^{\circ}22'5''N - 36^{\circ}25'53''N$ ). Four ice wedge pseudomorphs were discovered in the Tangbaocun section ( $36^{\circ}22'5''N, 106^{\circ}8'25''E$ ). The ice wedge pseudomorphs in the Tangbaocun section are characterized by wedges with wider top and narrower bottom. The wedge wall is irregular, and clasts of wall sediments and brown-red silt lacking of stratifications were filled in the wedges. Adjacent to the wedge wall, there are a series of fractures formed before the collapse of wall sediments. In the Sanchahe section ( $36^{\circ}25'53''N, 106^{\circ}8'34''E$ ), there developed two layers with a series of cryoturbations. As for the cryoturbations in the Sanchahe section, the inclinations of axial planes varied irregularly; the axis did not grow thicker or thin significantly; there was no interlayer sliding in the limbs; the wedge top had not been truncated, and there was no interlayer thrust or normal fault in the interlayer folds. The ice wedge pseudomorphs and cryoturbations might be triggered by the same single cold climate event during the period of  $\sim 14$  to  $\sim 11$  ka B. P. The presence of ice wedge pseudomorphs (14.06–11.45 ka B. P.) and cryoturbations (13 500–11 570 a B. P.) during the last stage of Last Permafrost Maximum (LPM<sub>max</sub>) indicates that the development of permafrost at the upper to middle reaches of Qingshuihe River, Ningxia has significantly lowered paleo-temperature and close relationship with Younger Dryas. Moreover, the southern limit of latitudinal permafrost could have reached as far south to  $36^{\circ}22'5''N$ . Therefore, the west part of southern limit of latitudinal permafrost since  $\sim 20$  ka B. P. in North China at mid-latitudes may have moved southwards by  $\sim 52'$  in latitude and  $\sim 97$  km in surface distance to the locations of cryoturbations in the lower reach of Qingshuihe River. This discovery provides new evidence for the reconstruction of the southern limit of latitudinal permafrost during the Last Permafrost Maximum in North China.

**Key words:** last glacial period; periglacial phenomena; ice wedge pseudomorph; cryoturbation; Qingshuihe river basin; Younger Dryas; southern limit of latitudinal permafrost; Ningxia

## 0 引言

冰缘遗迹是古寒冷气候环境的重要指示标志,所蕴含的气候地层信息对地貌演化过程具有重要的指示意义<sup>[1-11]</sup>,在重建一定区域和时间段的气候状况以及划定多年冻土边界等方面有不可替代的作用<sup>[2,4,12-17]</sup>。在中国北方中纬度的华北地区<sup>[3,18]</sup>、鄂尔多斯高原及周缘<sup>[3-4,11,19-21]</sup>、河西走廊地区<sup>[7-9]</sup>和巴丹吉林沙漠<sup>[22]</sup>,以及中高纬度的内蒙古呼伦贝尔地区和东北地区<sup>[15,23]</sup>,保留了大量末次冰期与多年冻土有关的冰缘遗迹现象,如砂楔、古冰楔、寒冻裂隙和融冻褶皱等,记录了晚更新世末的寒冷气候信息。

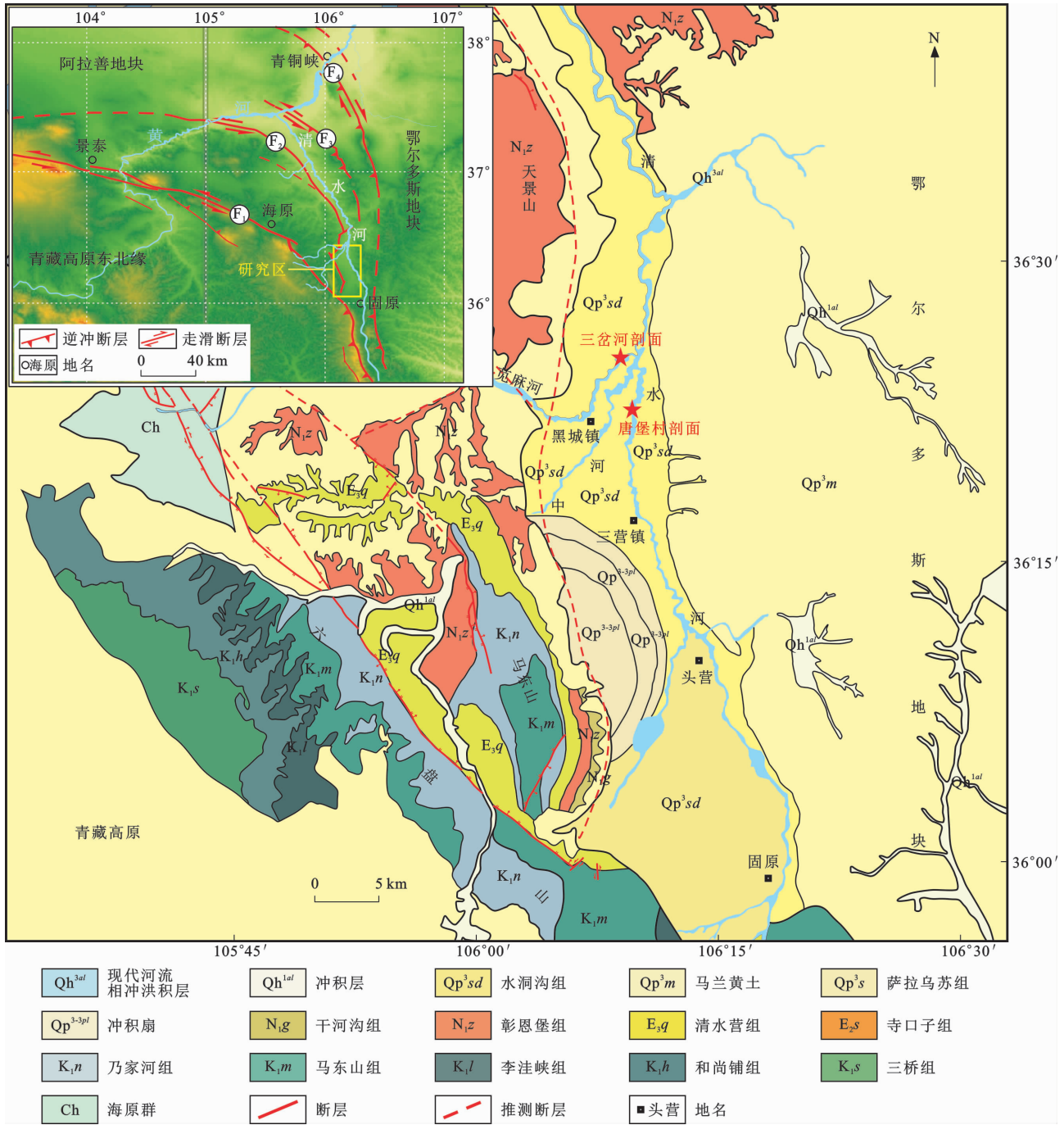
基于中国北方中高纬度地区大面积冰缘遗迹群的统计研究,崔之久等提出中国北方 20 ka 以来中高纬度多年冻土南界的东段沿  $38^{\circ}N \sim 40^{\circ}N$  延伸,西段沿  $37^{\circ}N \sim 39^{\circ}N$  延伸<sup>[4]</sup>。而金会军等则认为末次冰期最盛期冻土南界东段沿  $41^{\circ}N \sim 42^{\circ}N$  延伸,西段则由鄂尔多斯高原南部的靖边、盐池进入陇东,到达  $37^{\circ}N \sim 38^{\circ}N$  以南<sup>[15-17]</sup>。其中,张珂等在宁夏

清水河流域下游谷地发现的晚更新世末融冻褶皱,是末次冰期最盛期冻土南界西段划分的重要证据<sup>[19]</sup>。课题组在宁夏清水河流域中上游谷地发现了末次冰期最盛期发育的冰缘遗迹群(包括融冻褶皱和古冰楔等),本文通过<sup>14</sup>C 测年和光释光测年对冰缘遗迹群的形成时代进行了精确限定,并且深入分析了成因机制,探讨了其对古气候和末次冰期中中国北方多年冻土南界划分的指示意义。

## 1 区域地质概况

青藏高原东北缘弧形构造带由弧形展布的海原断裂带、香山—天景山断裂带、烟筒山断裂带和牛首山—罗山断裂带以及相间分布的山间盆地组成<sup>[19,24]</sup>(图 1)。清水河起源于海原断裂带以南的六盘山构造带,流经香山—天景山断裂带和烟筒山断裂带之间近 SN 向展布的狭长谷地,在宁夏中卫地区汇入黄河。

中晚更新世时期,六盘山构造带南段经历了快速地幕式抬升过程,发育约 541、约 477、约 279 和约



F<sub>1</sub> 为海原断裂带; F<sub>2</sub> 为香山—天景山断裂带; F<sub>3</sub> 为烟囱山断裂带; F<sub>4</sub> 为牛首山—罗山断裂带

图 1 宁夏清水河中上游区域地质简图

Fig. 1 Geological Sketch of the Middle to Upper Reaches of Qingshuihe River, Ningxia

60 ka B. P. 多期河流阶地<sup>[25-27]</sup>。受晚更新世末以来青藏高原东北缘快速的构造抬升和侧向挤出影响,不仅六盘山构造带发生频繁的断裂活动和快速的走滑变形<sup>[28-29]</sup>,而且清水河流域发育了四级河流阶地(T1—T4,约 147.5 ka B. P. 以来)<sup>[30]</sup>。清水河流域在 1.8~1.1 Ma 冰期、间冰期气候差异不大,基本处于干冷气候状态,而在约 0.8 Ma B. P. 以来,气候变化整体呈现高频振荡特征,冰期、间冰期气候两极

分化,冰期更干冷,间冰期更温暖<sup>[31]</sup>。

## 2 冰缘遗迹群分布及特征

在清水河中上游宁夏回族自治区海原县三营镇唐堡村剖面(经纬度为(36°22'5"N,106°8'25"E),海拔为 1 399 m)发现多处古冰楔(图 2~4);在唐堡村剖面北侧 7 km 处的三岔河剖面(经纬度为(36°25'53"N,106°8'34"E),海拔为 1 378 m)发现多处融冻

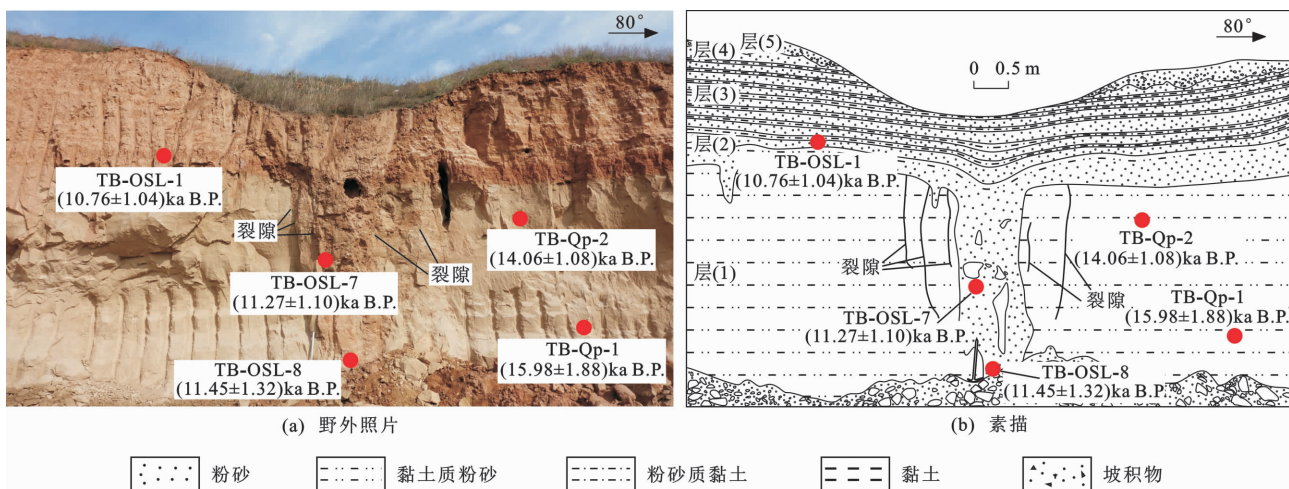


图2 唐堡村剖面楔状体-1野外照片及其素描

Fig. 2 Field Outcrop and Sketch of Ice Wedge Pseudomorph-1 in the Tangbaocun Section

褶皱(图5、6)。该冰缘遗迹群的发现位置在清水河流域下游冰卷泥构造发现位置南侧约52',径向上距离相差约97 km。

## 2.1 唐堡村剖面

在唐堡村剖面[图2(a)]中,层(1),0~330 cm,灰白色厚层块状黏土质粉砂,无明显层理,较坚硬;层(2),330~375 cm,棕红色粉砂夹薄层深棕红色黏土质粉砂,与下伏层(1)不整合接触;层(3),375~482 cm,灰白色薄层黏土质粉砂与浅棕红色粉砂质黏土互层,其中黏土质粉砂单层厚8~10 cm,粉砂质黏土单层厚3~5 cm;层(4),482~507 cm,浅棕红色细砂层;层(5),现代耕植土。

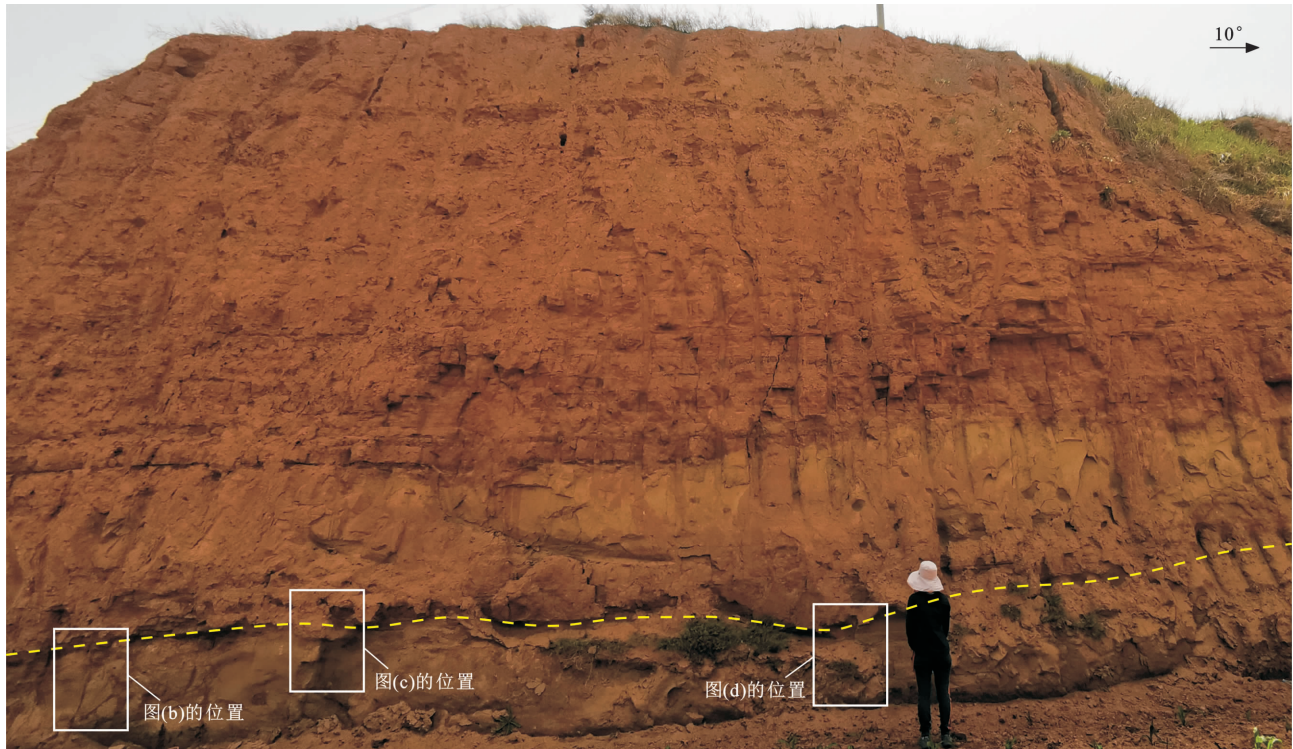
楔状体-1(图2)发育于层(1)灰白色厚层块状黏土质粉砂层中,深度大于285 cm,宽56~102 cm;出露地表的部分呈楔形,上宽下窄,楔壁不平直,凹凸不平。同时,楔体中充填有周围地层的碎块和棕红色粉砂,无明显层理。楔壁凹凸不平可能是形成发育过程中受冻胀作用影响,周围地层破碎塌陷造成的。周围地层崩塌的碎屑充填于楔体中。在临近两侧楔壁周围地层中还发育裂隙,自上而下逐渐尖灭[图2(b)]。这些裂隙的顶部与层(1)、层(2)间的不整合面近乎垂直,向下逐渐向楔壁弯曲,但均未与楔壁相交[图2(b)]。裂隙中还充填有与上覆地层相同的粉砂[图2(a)]。这些裂隙与自下而上发育的活动断层和与主干断层相交的伴生断层不同。由于古冰楔是脉冰融化后充填而形成,并且楔体中常充填周围地层塌落的块体<sup>[15]</sup>,所以这些裂隙可能是周围地层向楔体内塌落前形成的。综合判断该楔体为古冰楔。

在图2中,楔状体-1北东侧(53°方向)约18 m

处新开挖的田地旁发现3处楔状体(楔状体-2~4),相互间隔1.8~5.0 m。该处地层序列为[图3(a)]:层(1),0~110 cm,灰白色厚层块状黏土质粉砂,层理不清,未见底,并且顶部被水流冲刷,发育侵蚀面;层(2),110~160 cm,棕红色、浅棕红色细砂与棕红色黏土互层,细砂单层厚3~15 cm,棕红色黏土单层厚3~5 cm,发育平行层理、斜层理和透镜状层理;层(3),160~350 cm,灰白色粉砂夹多层薄层状棕红色细砂,其中粉砂单层厚15~18 cm,而细砂单层厚约2 cm;层(4),350~365 cm,紫红色细砂,偶夹细砾,发育平行层理和斜层理;层(5),365~545 cm,棕红色厚层块状黏土质粉砂,夹灰白色薄层或透镜状细砂或粉砂;层(6),545~635 cm,灰白色粉砂与棕红色黏土质粉砂互层,其中灰白色粉砂单层厚5~8 cm,棕红色黏土质粉砂单层厚10~15 cm;层(7),635~785 cm,棕红色厚层块状粉砂质黏土,夹透镜状细砂;层(8),785~825 cm,浅棕红色黏土质粉砂;层(9),825~855 cm,棕红色黏土,发育少量石膏晶体;层(10),855~875 cm,青灰色黏土层,发育大量石膏晶体;层(11),875~955 cm,棕红色粉砂质黏土与黏土质粉砂互层,其中粉砂质黏土单层厚8~10 cm,而黏土质粉砂单层厚5~8 cm。

从地层序列和岩性特征来看,楔状体-2~4与楔状体-1所在剖面的层(1)均为灰白色厚层块状黏土质粉砂,顶部均发育侵蚀面(图2、3),层(2)均为棕红色细砂或粉砂与黏土质粉砂或黏土互层,顶部均发育含大量石膏的青灰色黏土层。因此,其地层序列可以对比,区别在于地层厚度不一致。

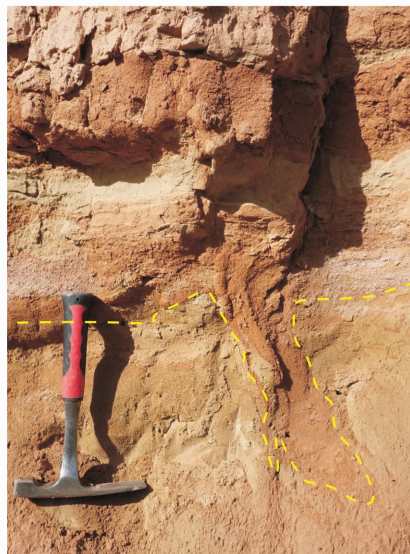
楔状体-2~4[图3(b)~(d)]均发育在侵蚀面之下的层(1),楔体内均被棕红色粉砂、棕红色黏土



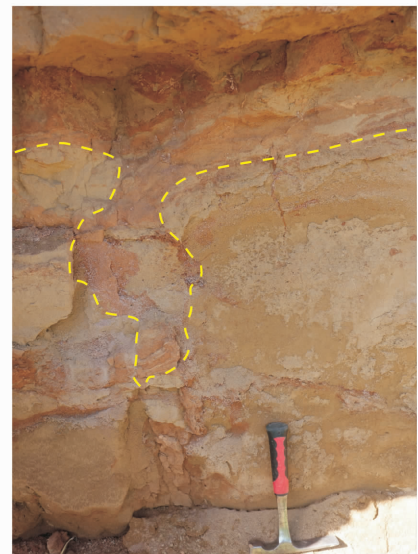
(a) 楔状体-1北东侧(53°方向)约18 m处剖面



(b) 楔状体-2



(c) 楔状体-3



(d) 楔状体-4

图3 唐堡村剖面楔状体-2~4野外照片

Fig. 3 Field Outcrops of Ice Wedge Pseudomorph-2~4 in the Tangbaocun Section

质粉砂或粉砂质黏土充填。楔状体-2上宽下窄,楔体顶部宽约5 cm,深度约90 cm;楔壁平直、整齐,周围地层未发生明显变形[图4(b)];楔体中无周围地层碎块。楔状体-3也呈现上宽下窄的形态特征,但是楔壁形态不规则[图4(c)];楔体顶部宽约13 cm,深度约30 cm;楔壁相对整齐平滑,楔体内充填棕红色细砂和棕红色黏土。楔状体-4形态不规则,总体来看也呈现上宽下窄的形态特征,顶部宽约15 cm,向下稍变宽后立即变窄,深约78 cm[图4(d)];楔体

内充填有棕红色细砂,含少量周围地层碎块。

楔状体-3和楔状体-4的楔壁形态不规则,楔壁凹凸不平,周围地层中层理发生明显变形[图4(c)、(d)]。这可能是在古冰楔发育过程中受脉冰挤压和冻胀作用影响,周围地层发生变形造成的。在靠近楔状体-3和楔状体-4的周围地层中还发育少量裂隙,充填有少量与上覆地层相同的棕红色细砂或黏土。裂隙仅发育在层(1)中,未穿入层(2),形态不规则,但均未与楔壁相交,自下而上逐渐尖灭[图4

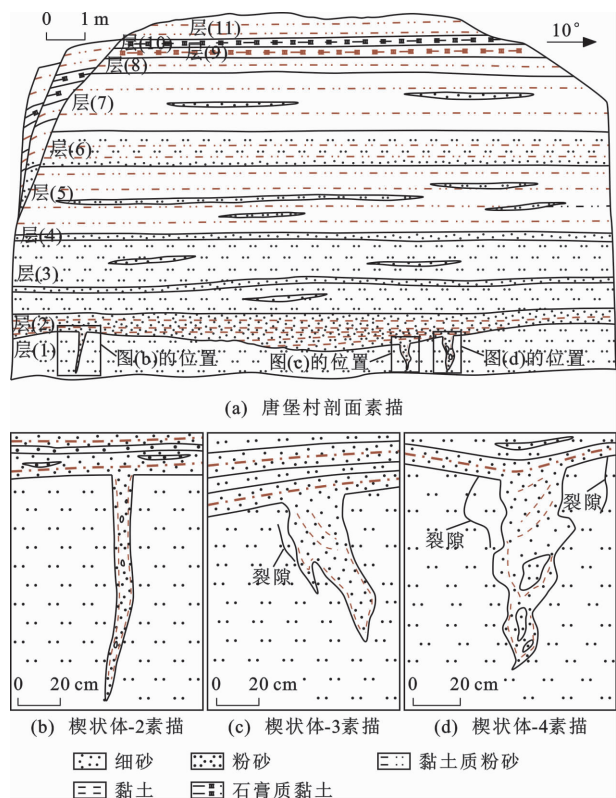


图4 唐堡村剖面楔状体-2~4素描

Fig. 4 Sketches of Ice Wedge Pseudomorph-2~4 in the Tangbaocun Section

(c)、(d)]。因此,这些裂隙与楔状体-1 两侧周围地层中的裂隙成因一致,是周围地层向楔体内塌落前形成的。

楔状体-2~4 内,充填有棕红色细砂夹棕红色黏土,其层理与楔壁近于平行或斜交。这说明楔体先形成,在多年冻土的消融过程中,沉积物沿楔体内脉冰与楔壁之间空隙多次充填,形成与楔壁近于平行或斜交的层理[图4(b)~(d)]。

根据以上特征综合判断,楔状体-1~4 为古冰楔。受热胀冷缩作用影响,在极端寒冷干燥的气候条件下,地表多年冻土收缩形成裂隙,并且裂隙中的脉冰不断生长挤压周围地层,造成楔壁凹凸不平,而在气候条件逐渐变暖之后,多年冻土逐渐消融,楔体被沉积物充填。

## 2.2 三岔河剖面

三岔河剖面[图5(a)、6(a)]中,层(1),0~74 cm,灰白色粉砂夹薄层棕红色黏土,发育平行层理;层(2),74~122 cm,浅棕红色粉砂,夹薄层棕红色黏土;层(3),122~187 cm,浅褐黄色粉砂,夹薄层浅棕红色黏土;层(4),187~247 cm,灰白色粉砂与浅棕红色黏土互层,其中粉砂单层厚20~30 cm,黏土单层厚5 cm;层(5),247~279 cm,浅棕红色黏土层;

层(6),279~359 cm,灰白色粉砂,夹薄层浅棕红色黏土;层(7),359~439 cm,青灰色石膏质黏土层,与层(6)不整合接触;层(8),439~484 cm,棕红色石膏质黏土层;层(9),484~544 cm,青灰色粉砂层,含大量石膏;层(10),544~569 cm,棕红色石膏质黏土层;层(11),569~639 cm,浅棕红色粉砂层,夹薄层棕红色黏土层。其中,层(6)与层(7)之间发育侵蚀面,褶皱发育在层(2)和层(3)中。

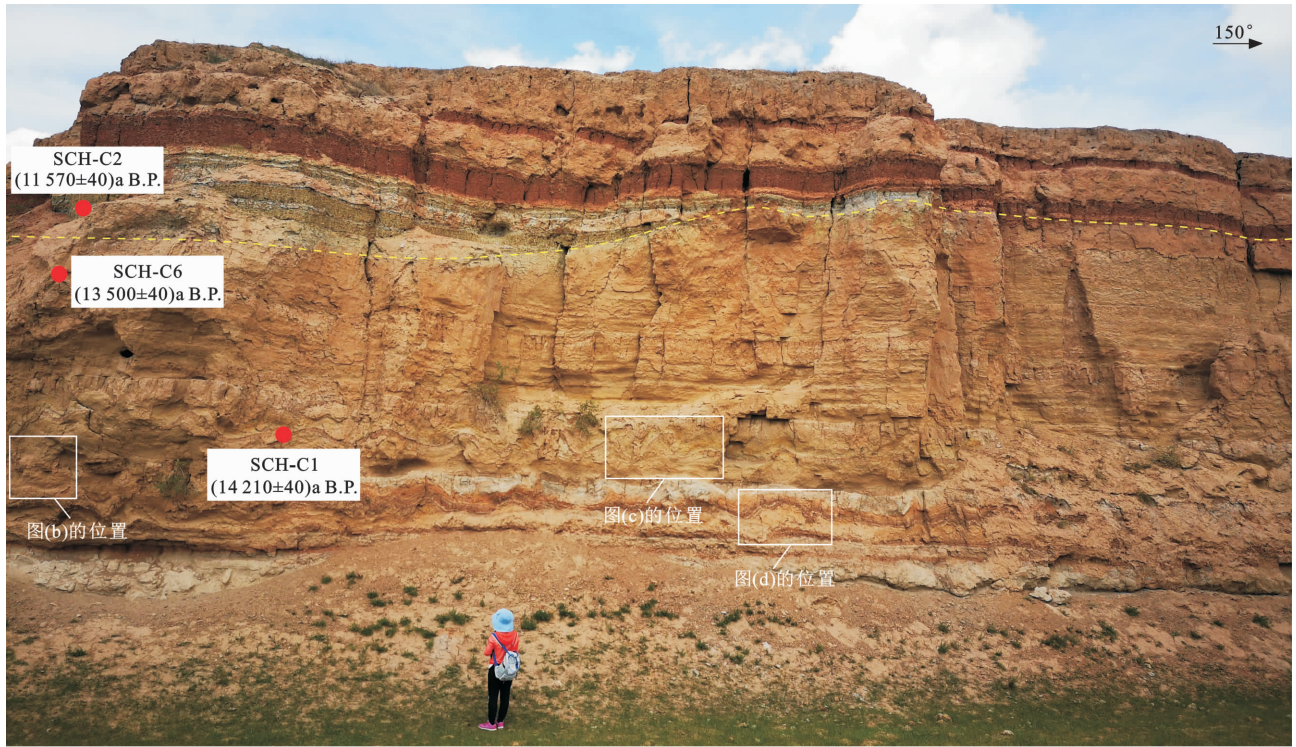
褶皱层距侵蚀面172~230 cm,距地表约280 cm。层(2)中褶皱层水平延伸连续,但褶皱大小不一,形态各异,有对称的波浪状或丘状[图5(d)、6(d)],也有不对称的舌状[图5(b)、6(b)],褶皱轴面倾向多变;褶皱间距30~120 cm不等,高30~50 cm,宽40~110 cm。层(3)中褶皱层水平延伸连续,褶皱规模普遍比层(2)中大,形态以波浪状或丘状,多对称[图5(c)、6(c)];褶皱间距40~100 cm不等,高30~50 cm,宽40~120 cm。层(2)和层(3)褶皱轴面倾向产状杂乱,无统一指向;轴部无明显加厚或减薄,翼部未发生层间滑动;褶皱层顶部未发育截切现象,层间褶皱未发育层间逆冲或正断裂,符合冻融作用形成的褶曲变形特征<sup>[19,22-23]</sup>,而与典型滑塌褶皱有明显区别<sup>[32-35]</sup>。根据以上特征综合判断,层(2)和层(3)中褶皱层为融冻褶皱。

## 3 冰缘遗迹群形成时代

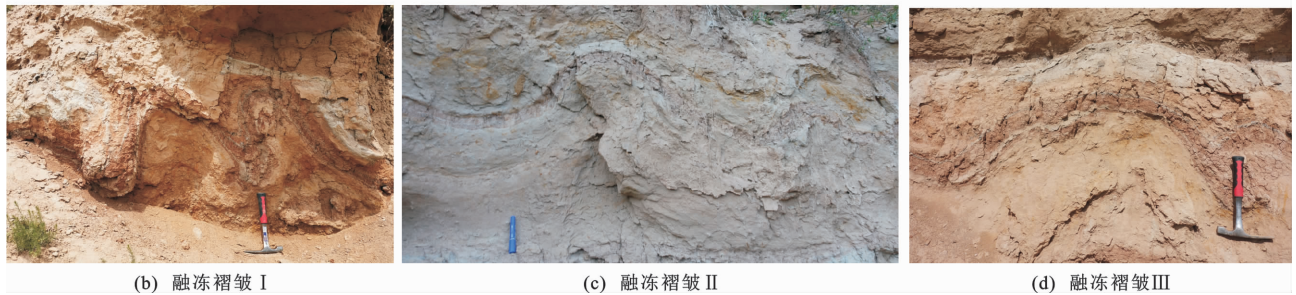
唐堡村剖面(图2)中,在层(1)底部和顶部采集光释光测年样品TB-Qp-1和TB-Qp-2,测年结果分别为 $(15.98 \pm 1.88)$ 和 $(14.06 \pm 1.08)$  ka B. P.;在层(2)采集光释光测年样品TB-OSL-1,测年结果为 $(10.76 \pm 1.04)$  ka B. P.;在楔体中采集光释光样品TB-OSL-7和TB-OSL-8,测年结果分别为 $(11.27 \pm 1.10)$ 和 $(11.45 \pm 1.32)$  ka B. P.(表1)。

三岔河剖面[图5(a)、6(a)]中,在层(3)、层(6)和层(7)底部分别采集<sup>14</sup>C测年样品SCH-C1、SCH-C6和SCH-C2,测年结果分别为 $(14\ 210 \pm 40)$ 、 $(13\ 500 \pm 40)$ 和 $(11\ 570 \pm 40)$  a B. P.(表2)。

古冰楔和融冻褶皱作为冰缘遗迹现象,无法直接测定其形成时代,而只能通过地层以及填充物质的年龄来限定其上限和下限年龄<sup>[3]</sup>。对于古冰楔,其形成时代应是楔体内开始充填之前的某一段时间,而融冻褶皱的形成时代则只能根据褶皱层的上下地层及特殊界面来推测<sup>[3,11]</sup>。唐堡村剖面中发育古冰楔的层(1)顶界年龄约为14.06 ka B. P.,层(2)年龄约为10.76 ka B. P.,而楔体内填充地层的年龄



(a) 三岔河村剖面



(b) 融冻褶皱 I

(c) 融冻褶皱 II

(d) 融冻褶皱 III

图 5 三岔河剖面融冻褶皱野外照片

Fig. 5 Field Outcrops of Cryoturbations in the Sanchahe Section

表 1 唐堡村剖面光释光测年样品信息及测年结果

Table 1 OSL Dating Results of Samples Collected from the Tangbaocun Section

样品编号	层位	埋深/ m	地层岩性	$w(U)/$ $10^{-6}$	$w(Th)/$ $10^{-6}$	$w(K)/$ $10^{-6}$	测试粒 径/ $\mu m$	测试 方法	环境剂量率/ ( $Gy \cdot ka^{-1}$ )	等效剂量/ Gy	年龄/ ka B. P.
TB-Qp-1	晚更新世滨 湖相沉积层	3.96	灰白色黏土质 粉砂	$2.23 \pm 0.16$	$9.90 \pm 0.77$	$1.86 \pm 0.20$	4~11	SMAR	$3.53 \pm 0.29$	$56.33 \pm 4.73$	$15.98 \pm 1.88$
TB-Qp-2	晚更新世滨 湖相沉积层	2.30	灰白色黏土质 粉砂	$3.58 \pm 0.11$	$21.50 \pm 0.64$	$3.58 \pm 0.11$	4~11	SMAR	$3.93 \pm 0.24$	$55.16 \pm 2.52$	$14.06 \pm 1.08$
TB-OSL-1	全新世河流 相沉积层	1.43	棕红色粉砂	$2.45 \pm 0.12$	$9.49 \pm 0.56$	$2.03 \pm 0.23$	4~11	SMAR	$4.15 \pm 0.37$	$44.60 \pm 1.79$	$10.76 \pm 1.04$
TB-OSL-7	全新世河流 相沉积层	4.27	棕红色细砂	$2.08 \pm 0.04$	$8.80 \pm 0.11$	$1.87 \pm 0.22$	4~11	SMAR	$3.68 \pm 0.34$	$41.47 \pm 1.33$	$11.27 \pm 1.10$
TB-OSL-8	全新世河流 相沉积层	3.07	棕红色细砂	$2.26 \pm 0.15$	$8.58 \pm 0.37$	$1.71 \pm 0.18$	4~11	SMAR	$3.59 \pm 0.25$	$41.09 \pm 2.32$	$11.45 \pm 1.32$

注: $w(\cdot)$ 为元素含量(质量分数)。

表2 三岔河剖面<sup>14</sup>C测年样品信息及测年结果Table 2 AMS <sup>14</sup>C Dating Results of Samples Collected from the Sanchahe Section

样品编号	层位	埋深/m	地层岩性	测试物质	年龄/a B.P.	实验室编号
SCH-C1	全晚更新世滨湖相沉积层	5.96	棕红色黏土	有机沉积物	14 210±40	Beta-541852
SCH-C2	全新世沼泽相沉积层	3.25	青灰色石膏质黏土	有机沉积物	11 570±40	Beta-541842
SCH-C6	全晚更新世滨湖相沉积层	2.70	灰黄色粉砂质黏土	有机沉积物	13 500±40	Beta-569916

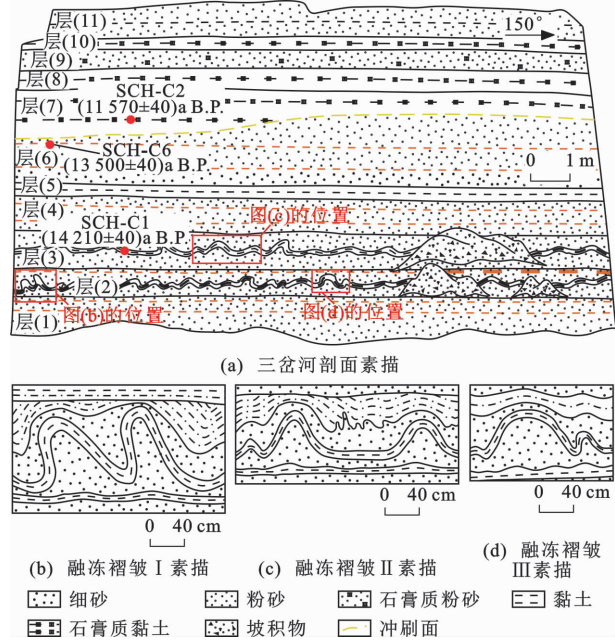


图6 三岔河剖面融冻褶皱素描

Fig. 6 Sketches of the Cryoturbations in the Sanchahe Section

为11.45~11.27 ka B.P.。据此可推断古冰楔的形成时限为14.06~11.45 ka B.P.。三岔河剖面中[图5(a)、6(a)]发育融冻褶皱的层(3)年龄约为14 210 a B.P.,侵蚀面之下层(6)的年龄约为13 500 a B.P.,侵蚀面之上层(7)底界的年龄约为11 570 a B.P.。融冻褶皱发育在多年冻土上限以上活动层内,发育位置距地表一般不会超过2~3 m范围<sup>[1,23]</sup>。三岔河剖面中融冻褶皱层距现今地表约452 cm,距层(6)与层(7)间侵蚀面约172 cm。故推断该侵蚀面可能是融冻褶皱发育时期的古地面。根据融冻褶皱层[层(3)]和侵蚀面之上沉积底界[层(7)]年龄,可以推断融冻褶皱的形成时限为13 500~11 570 a B.P.。

## 4 古气候指示意义

宁夏清水河流域中上游发现的冰缘遗迹群主要包括古冰楔和融冻褶皱,形成于河流相沉积地层中。根据光释光测年和<sup>14</sup>C测年结果,古冰楔的形成时限为14.06~11.45 ka B.P.,融冻褶皱的形成时限为13 500~11 570 a B.P.。新仙女木事件(Youn-

ger Dryas)为末次冰期最盛期后晚冰阶内发生的最后一个极冷事件,此阶段持续时间为12.9~11.7 ka B.P.,降温幅度较大<sup>[17]</sup>。通过对比本研究测年结果与新仙女木事件持续时间可发现,不仅发育古冰楔的地层沉积时代(早于约14.06 ka B.P.)和发育融冻褶皱的地层沉积时代(早于约13 500 a B.P.)均早于新仙女木事件的开始时间(约12.9 ka B.P.),而且不整合面之上地层沉积时代(晚于约11 570 a B.P.)或楔体内的填充地层沉积时代(晚于约11.45 ka B.P.)又晚于新仙女木事件的结束时间(约11.7 ka B.P.)。据此可推断,受到新仙女木事件的影响,清水河流域在末次冰期晚冰阶仍然发育大面积的多年冻土。根据冰缘遗迹类型与围岩岩性、古温度环境的关系<sup>[36-37]</sup>综合判断,古冰楔发育时古地温不超过-5℃~-4℃,以地气温差2.5℃~3.0℃推算,冷事件期间古气温为-8.0℃~-6.5℃。

## 5 对中国北方末次冰期多年冻土南界划分的指示意义

目前,晚更新世末末次冰期最盛期中国北方中纬度多年冻土南界的西段,在鄂尔多斯地区向南凸出至陕西省榆林市、靖边县(37°N)附近(内蒙古自治区乌审旗县城南15 km)<sup>[11,38]</sup>,在河西走廊地区由宁夏回族自治区中卫市(37°14'N)<sup>[19]</sup>进入甘肃省酒泉市、敦煌市和内蒙古自治区阿拉善盟(39°N~40°N)<sup>[7-9,22,39-40]</sup>。金会军等认为在25~13 ka B.P.鄂尔多斯高原及周缘气温达到最低,多年冻土范围可向南扩展至37°N~38°N以南<sup>[16]</sup>。其中,在宁夏清水河流域下游(37°14'N)发现的晚更新世末融冻褶皱为末次冰期最盛期多年冻土南界的划分提供了重要依据。而本次研究中,在清水河流域中上游(36°22'5"N~36°25'53"N)发现的末次冰期最盛期冰缘遗迹群为中国北方中纬度多年冻土南界西段的划分提供了新的证据。清水河流域中上游冰缘遗迹群的发现位置在宁夏中卫地区融冻褶皱发现位置(37°14'N)<sup>[19]</sup>以南,纬度上相差约52',径向上距离相差约97 km。因此,末次冰期最盛期清水河流域中上游发育大面积的多年冻土,并且分布范围至少到达

36°22′5″N 以南。

## 6 结 语

(1)宁夏清水河流域中上游发育末次冰期最盛期冰缘遗迹群,包括古冰楔和融冻褶皱等,形成时代分别为 14.06~11.45 ka B. P. 和 13 500~11 570 a B. P.。本次冰缘遗迹群的发现表明在新仙女木事件的影响下清水河流域在末次冰期最盛期发育大面积的多年冻土。

(2)末次冰期最盛期清水河流域中上游发育的多年冻土分布范围至少到达 36°22′5″N 以南。末次冰期最盛期中国北方中纬度约 20 ka 以来冻土南界西段可以向南推移至少约 52′(径向上距离约 97 km)。

**李振宏:**恰逢西安地质调查中心组建六十周年,谨以此文表示衷心祝贺!自“特殊地区地质填图工程”实施以来,中国地质科学院地质力学研究所长期在西北地区开展基础地质调查和地质填图工作,与西安地质调查中心在地质填图、地球科学研究和人才培养等方面开展了很多富有成效的深入合作,得到了西安地质调查中心李荣社教授级高工、王永和教授级高工等多位同行的大力支持和帮助。衷心祝愿西安地质调查中心在西北地区地质调查与科技创新中取得更大的成绩!

### 参 考 文 献 :

### References :

- [1] 崔之久. 试论多年冻土的冰缘标志及冰川与冰缘作用的关系问题[J]. 冰川冻土, 1980, 2(2): 1-6.  
CUI Zhi-jiu. The Mark About Periglacial of Permafrost and the Relation of Glacial and Periglacial[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1980, 2(2): 1-6.
- [2] 崔之久, 谢又予. 论我国东北、华北晚更新世晚期多年冻土南界与冰缘环境[J]. 地质学报, 1984, 58(2): 165-176.  
CUI Zhi-jiu, XIE You-yu. On the Southern Boundary of Permafrost and Periglacial Environment During the Late Period of Late Pleistocene in North and Northeast China[J]. Acta Geologica Sinica, 1984, 58(2): 165-176.
- [3] 崔之久, 赵 亮, VANDENBERGHE J, 等. 山西大同、内蒙古鄂尔多斯冰楔、砂楔群的发现及其环境意义[J]. 冰川冻土, 2002, 24(6): 708-716.  
CUI Zhi-jiu, ZHAO Liang, VANDENBERGHE J, et al. Discovery of Ice Wedge and Sand Wedge Networks in Inner Mongolia and Shanxi Province and Their Envi-

ronmental Significance[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(6): 708-716.

- [4] 崔之久, 杨建强, 赵 亮, 等. 鄂尔多斯大面积冰楔群的发现及 20 ka 以来中国北方多年冻土南界与环境[J]. 科学通报, 2004, 49(13): 1304-1310.  
CUI Zhi-jiu, YANG Jian-qiang, ZHAO Liang, et al. Discovery of a Large Area of Ice Wedge Networks in Ordos: Implications for the Southern Boundary of Permafrost in the North of China as Well as for the Environment in the Latest 20 ka BP[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(13): 1304-1310.
- [5] 潘保田, 陈发虎. 青藏高原东北部 15 万年来的多年冻土演化[J]. 冰川冻土, 1997, 19(2): 123-132.  
PAN Bao-tian, CHEN Fa-hu. Permafrost Evolution in the Northeastern Qinghai-Tibetan Plateau During the Last 150 000 Years[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1997, 19(2): 123-132.
- [6] 单鹏飞, 贺兰山西侧紫泥湖地区晚更新世以来冰缘地貌过程与环境变化[J]. 地质论评, 1997, 43(4): 428-433.  
SHAN Peng-fei. Periglacial Landform Process and Its Environmental Changes in the Zinihu Region at the Western Side of the Helan Mountains Since the Late Pleistocene[J]. Geological Review, 1997, 43(4): 428-433.
- [7] 王乃昂, 王 涛, 史正涛, 等. 河西走廊末次冰期砂楔的发现及其古气候意义[J]. 冰川冻土, 2001, 23(1): 46-50.  
WANG Nai-ang, WANG Tao, SHI Zheng-tao, et al. The Discovery of Sand Wedges of the Last Glaciation in the Hexi Corridor and Its Paleoclimatic Significance[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, 23(1): 46-50.
- [8] 王乃昂, 王 涛, 高顺尉, 等. 河西走廊末次冰期芒硝和砂楔与古气候重建[J]. 地学前缘, 2000, 7(增): 59-66.  
WANG Nai-ang, WANG Tao, GAO Shun-wei, et al. The Sand Wedge and Mirabilite of the Last Ice Age and Paleoclimatic Reconstruction in Hexi Corridor, Gansu, West China[J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(S): 59-66.
- [9] WANG N A, ZHAO Q, LI J J, et al. The Sand Wedges of the Last Ice Age in the Hexi Corridor, China: Paleoclimatic Interpretation [J]. Geomorphology, 2003, 51(4): 313-320.
- [10] 程 捷, 张绪教, 田明中, 等. 黄河源区冰楔假型群的发育及其古气候意义[J]. 第四纪研究, 2006, 26(1): 92-98.

- CHENG Jie, ZHANG Xu-jiao, TIAN Ming-zhong, et al. Ice-wedge Casts Discovered in the Source Area of Yellow River, Northeast Tibetan and Their Paleoclimatic Implications[J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(1): 92-98.
- [11] 何瑞霞, 金会军, 蒋观利, 等. 内蒙古鄂尔多斯高原古冰缘遗迹科学考察研究进展[J]. *冰川冻土*, 2021, 43(1): 263-273.
- HE Rui-xia, JIN Hui-jun, JIANG Guan-li, et al. Progress in the Study on the Periglacial Phenomena on the Ordos Plateau, Inner Mongolia, China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, 43(1): 263-273.
- [12] 潘保田, 李吉均, 周尚哲. 青藏高原倒数第二次冰期冰楔的发现及其意义[J]. *科学通报*, 1992, 37(17): 1599-1602.
- PAN Bao-tian, LI Ji-jun, ZHOU Shang-zhe. The Discovery of Sand Wedges of the Penultimate Glaciation in the Tibetan Plateau and Its Paleoclimatic Significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1992, 37(17): 1599-1602.
- [13] ZHAO L, JIN H J, LI C C, et al. The Extent of Permafrost in China During the Local Last Glacial Maximum(LLGM)[J]. *Boreas*, 2014, 43(3): 688-698.
- [14] VANDENBERGHE J, FRENCH H M, GORBUNOV A, et al. The Last Permafrost Maximum(LPM) Map of the Northern Hemisphere, Permafrost Extent and Mean Annual Air Temperatures, 25 - 17 ka BP[J]. *Boreas*, 2014, 43(3): 652-666.
- [15] 金会军, 常晓丽, 郭东信, 等. 呼伦贝尔高平原全新世早晚期砂、土楔及其古环境意义[J]. *第四纪研究*, 2011, 31(5): 765-779.
- JIN Hui-jun, CHANG Xiao-li, GUO Dong-xin, et al. Holocene Sand and Soil Wedges on the South-central Hulun Buir High Plain in Northeast China[J]. *Quaternary Sciences*, 2011, 31(5): 765-779.
- [16] 金会军, 金晓颖, 何瑞霞, 等. 两万年来中国多年冻土形成演化[J]. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49(8): 1197-1212.
- JIN Hui-jun, JIN Xiao-ying, HE Rui-xia, et al. Evolution of Permafrost in China During the Last 20 ka[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2019, 49(8): 1197-1212.
- [17] JIN H J, VANDENBERGHE J, LUO D L, et al. Quaternary Permafrost in China: Framework and Discussions[J]. *Quaternary*, 2020, 3(4): 32.
- [18] 杨景春, 孙建中, 李树德, 等. 大同盆地古冰楔(砂楔)和晚更新世自然环境[J]. *地理科学*, 1983, 3(4): 339-344.
- YANG Jing-chun, SUN Jian-zhong, LI Shu-de, et al. Fossil Ice Wedges and Late Pleistocene Environment in Datong Basin, Shanxi Province[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1983, 3(4): 339-344.
- [19] 张珂, 刘开瑜, 杨景春. 宁夏清水河下游晚更新世冰卷泥的发现及意义[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2000, 36(5): 714-718.
- ZHANG Ke, LIU Kai-yu, YANG Jing-chun. The Discovery and Its Significance of Late Quaternary Involution in the Area of Lower Reach of Qingshuihe River, Ningxia, China[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2000, 36(5): 714-718.
- [20] 李大伟, 李德文, 沈晓明, 等. 乌海盆地内末次冰期砂楔/冰楔铸型的发现及古气候意义[J]. *地球科学与环境学报*, 2016, 38(3): 410-419.
- LI Da-wei, LI De-wen, SHEN Xiao-ming, et al. Discovery of Sand Wedge/Ice Wedge Cast of Last Glaciation in Wuhai Basin and Its Paleoclimatic Significance[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2016, 38(3): 410-419.
- [21] HE R X, JIN H J, FRENCH H M, et al. Cryogenic Wedges and Cryoturbations on the Ordos Plateau in North China Since 50 ka BP and Their Paleoenvironmental Implications[J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2021, 32(2): 231-247.
- [22] 余莺潇, 王乃昂, 隆浩, 等. 巴丹吉林沙漠东南缘砂楔年代及其环境意义[J]. *科学通报*, 2017, 62(30): 3461-3469.
- YU Ying-xiao, WANG Nai-ang, LONG Hao, et al. The Age of Sand Wedges and Its Environmental Significance at the Southeast Edge of Badain Jaran Desert[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2017, 62(30): 3461-3469.
- [23] 杨思忠, 金会军, 郭东信, 等. 内蒙古及东北地区古冻土及古环境考察研究新进展[J]. *冰川冻土*, 2009, 31(6): 1043-1049.
- YANG Si-zhong, JIN Hui-jun, GUO Dong-xin, et al. Recent Progress in the Study of Paleo-permafrost and Paleo-environments in the Inner Mongolia Region and Northeast China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(6): 1043-1049.
- [24] 雷启云, 张培震, 郑文俊, 等. 青藏高原东北缘三关口—牛首山断裂的右旋走滑与弧形构造带扩展[J]. *中国科学: 地球科学*, 2016, 46(5): 691-705.
- LEI Qi-yun, ZHANG Pei-zhen, ZHENG Wen-jun, et al. Dextral Strike-slip of Sanguankou-Niushoushan Fault Zone and Extension of Arc Tectonic Belt in the Northeastern Margin of the Tibet Plateau[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2016, 46(5): 691-705.
- [25] 向宏发, 魏顺民, 张秉良, 等. 六盘山东麓活动逆断裂

- 构造带晚第四纪以来的活动特征[J]. 地震地质, 1998, 20(4): 321-327.
- XIANG Hong-fa, GUO Shun-min, ZHANG Bing-liang, et al. Active Features of the Eastern Liupanshan Piedmont Reverse Fault Zone Since Late Quaternary[J]. *Seismology and Geology*, 1998, 20(4): 321-327.
- [26] 王伟涛, 张培震, 郑德文, 等. 青藏高原东北缘海原断裂带晚新生代构造变形[J]. 地学前缘, 2014, 21(4): 266-274.
- WANG Wei-tao, ZHANG Pei-zhen, ZHENG De-wen, et al. Late Cenozoic Tectonic Deformation of the Haiyuan Fault Zone in the Northeastern Margin of the Tibetan Plateau[J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(4): 266-274.
- [27] 赵秋晨, 张绪教, 何泽新, 等. 六盘山东麓泾河上游河流阶地的形成年代及新构造运动意义[J]. 现代地质, 2014, 28(6): 1202-1212.
- ZHAO Qiu-chen, ZHANG Xu-jiao, HE Ze-xin, et al. Age of Upper Jinghe River Terraces at the Eastern Piedmont of Liupanshan and Its Significance for Neotectonic Movement[J]. *Geoscience*, 2014, 28(6): 1202-1212.
- [28] ZHANG P Z, BURCHFIEL B C, MOLNAR P, et al. Late Cenozoic Tectonic Evolution of the Ningxia-Hui Autonomous Region, China[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1990, 102(11): 1484-1498.
- [29] ZHANG P Z, SHEN Z K, WANG M, et al. Continuous Deformation of the Tibetan Plateau from Global Positioning System Data[J]. *Geology*, 2004, 32(9): 809-812.
- [30] 马兆颖. 清水河盆地晚更新世以来沉积特征及地质意义[D]. 北京: 中国地质科学院研究生院, 2021.
- MA Zhao-ying. Sedimentary Characteristics and Geological Significance of Qingshuihe Basin Since Late Pleistocene[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy Geological Sciences, 2021.
- [31] 杨东, 方小敏, 彭子成, 等. 陇西六盘山黄土及最近 1.8 Ma B. P. 以来的构造运动与气候变化[J]. 地理科学, 2006, 26(2): 192-198.
- YANG Dong, FANG Xiao-min, PENG Zi-cheng, et al. Liupanshan Loess Since Last 1.8 Ma B. P. on Longxi Basin of Western China and Its Response to Tectonic Movement and Climate[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2006, 26(2): 192-198.
- [32] 吕洪波, 王俊, 张海春. 山东灵山岛晚中生代滑塌沉积层的发现及区域构造意义初探[J]. 地质学报, 2011, 85(6): 938-946.
- LU Hong-bo, WANG Jun, ZHANG Hai-chun. Discovery of the Late Mesozoic Slump Beds in Lingshan Island, Shandong, and a Pilot Research on the Regional Tectonics[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(6): 938-946.
- [33] 董晓朋, 吕洪波, 张星, 等. 山东灵山岛早白垩世复理石软沉积物变形期次解析[J]. 地质论评, 2013, 59(6): 1060-1067.
- DONG Xiao-peng, LU Hong-bo, ZHANG Xing, et al. Stage Analysis on the Soft-sediment Deformation in the Early Cretaceous Flysch, Lingshan Island, Shandong Province[J]. *Geological Review*, 2013, 59(6): 1060-1067.
- [34] ALSOP G I, MARCO S, WEINBERGER R, et al. Sedimentary and Structural Controls on Seismogenic Slumping Within Mass Transport Deposits from the Dead Sea Basin[J]. *Sedimentary Geology*, 2016, 344: 71-90.
- [35] ALSOP G I, WEINBERGER R, MARCO S, et al. Identifying Soft-sediment Deformation in Rocks[J]. *Journal of Structural Geology*, 2019, 125: 248-255.
- [36] VANDENBERGHE J, PISSART A. Permafrost Changes in Europe During the Last Glacial[J]. *Permafrost Periglacial Processes*, 1993, 4(2): 121-135.
- [37] 周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- ZHOU You-wu, GUO Dong-xin, QIU Guo-qing, et al. *Geocryology in China* [M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [38] 董光荣, 高尚玉, 李保生, 等. 鄂尔多斯高原晚更新世以来的古冰缘现象及其气候地层学意义[J]. 地理研究, 1985, 4(1): 1-13.
- DONG Guang-rong, GAO Shang-yu, LI Bao-sheng, et al. The Phenomenon of Fossil Ice Margins and Its Significance in Climatic Stratigraphy in the Ordos Plateau During the Late Pleistocene [J]. *Geographical Research*, 1985, 4(1): 1-13.
- [39] 单鹏飞, 腾格里沙漠东北缘末次冰期冰楔的首次发现及其意义[J]. 科学通报, 1996, 41(2): 160-163.
- SHAN Peng-fei. Northeast of Tengger Desert Edge at the End of the Last Glacial Ice Wedge Was First Discovered and Its Significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1996, 41(2): 160-163.
- [40] 宁凯, 王乃昂, 胡文峰, 等. 巴丹吉林沙漠季节冻土特征[J]. 冰川冻土, 2015, 37(5): 1209-1216.
- NING Kai, WANG Nai-ang, HU Wen-feng, et al. Freeze Characteristic of Seasonally Frozen Ground in Badain Jaran Desert [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(5): 1209-1216.