

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

崔之久 杨建强 赵亮 张威 谢又予

(北京大学环境学院, 北京 100871; 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710075; 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101. E-mail: czj@urbao.pku.edu.cn)

摘要 此前, 中国晚更新世晚期多年冻土南界的研究有两点不足, 一是限于中国北方东段, 二是年代数据不够系统. 通过对中国北方晚更新世晚期冰缘现象的研究, 认为中国北方高纬度多年冻土南界基本上沿 38°~40°N(东段)和 37°~39°N(西段)延伸, 并第 1 次绘出分布图. 同时, 综合其他方面的研究成果, 重建了晚更新世晚期以来纬度冻土带南界的变迁, 并提出 26 和 23~13 kaBP 有两次寒冷期, 年均温在不同地段较今降低 8~12 .

关键词 末次冰期 全新世大暖期 多年冻土 冰楔假型 砂楔

在全球变化研究中, 深海沉积物、冰芯和黄土沉积普遍受到人们关注, 其研究结果也极大的推进了全球气候变化研究的进程. 但多年冻土作为一种与寒冷气候紧密联系的事件, 对于重建一定区域和一定时间段的气候状况也同样具有不可替代的作用. 我们近年在鄂尔多斯中南部发现的大面积多类型的冰楔群及其年代测定, 就很有利于确定 20 ka 前后中国冻土南界.

在中国北方广大地区, 晚更新世以来存在大片和岛状多年冻土, 保留了大量与多年冻土相关的冰缘现象, 如砂楔、冰楔假型、寒冻裂隙及冰卷泥等. 这些现象深埋土中, 易于保留, 也对古温度有较可靠的指示作用. 本文通过对这些冰缘现象的研究, 恢复了晚更新世晚期中国北方高纬度多年冻土南界的分布, 并综合其他方面的研究成果, 重建了相应的气候变化. 此前, 国内利用冰缘现象重建古冻土和古气候已有多项成果^[1~4].

1 现代中国多年冻土的分布

为了讨论多年冻土南界及环境的演化, 有必要先列出中国现代纬度冻土分布及有关的气候指标. 多年冻土可分为纬度多年冻土和高海拔多年冻土.

中国现代纬度多年冻土主要分布于 53°30' ~ 46°36'N 的东北地区, 包括大、小兴安岭, 海拔一般几百米到 1000 m, 自北向南, 纬度每降低 1°, 冻土层的年平均气温升高 1 , 地温升高 0.5 . 其中, 大片多年冻土带, 冻土厚度 50~100m, 年均气温低于 -5 , 年均地温 -1.0 ~ -3.5 . 岛状融区冻土带, 厚度 20 ~

50 m, 年均气温 -3 ~ -5 , 年均地温 0.5 ~ -1.5 . 岛状冻土带, 厚度 5 ~ 20 m, 年均气温 0 ~ -3 , 年均地温 0 ~ -1.0 ^[5].

阿尔泰山属高山多年冻土带, 但因其与中国北方纬度冻土带交叉, 故略作介绍. 阿尔泰山多年冻土区: 山麓至海拔 2200m 为季节冻土带; 2200 ~ 2800 m 为高山多年岛状冻土带, 年均气温为 -5.4 ~ -6.8 ; 2800 m 以上为高山大片多年冻土带, 年均气温为 -9.4 , 年均地温为 0 ~ -5.0 ^[2].

在北方的中山山地, 如中国东部的长白山、大兴安岭黄岗梁、太白山、贺兰山、五台山等也有高山多年冻土发育. 黄岗梁是大兴安岭山地南端的最高山, 有零星岛状多年冻土分布, 其下界在 1500 ~ 1700 m^[5]. 长白山冻土下界 1800~1900 m, 年均气温为 -3.0 ~ -4.0°C^[6]. 五台山海拔 3058 m, 冻土下界为 2800 m, 贺兰山与之类似. 太白山主峰 3767 m, 年均温 -2.0 ~ -4.0 , 推测在 3400 ~ 3500 m 以上存在高山岛状多年冻土.

2 末次冰期晚期以来中国纬度多年冻土南界及其变化

末次冰期是距今最近的一次寒冷时期, 在距今 18 ka 左右达到最盛, 其后气候逐渐转暖, 进入全新世. 我们在华北和内蒙古鄂尔多斯高原以及东北地区发现大量的古冰缘现象, 其年代最老为 35 kaBP 左右, 属于末次冰期中后期, 据此, 我们可以初步确定末次冰期最盛时我国高纬度多年冻土的南界.

我们 2001 年在内蒙古东胜东西两侧、向南到乌审旗和成川总共 12000 km² 的范围内, 发现连片的冰楔假型和砂楔, 以及众多的冰卷泥现象。如此大范围连片的冰缘现象在中纬度是罕见的。在内蒙古鄂尔多斯高原发现的大面积古冰缘现象包括冰楔假型、砂楔和不同规模的冰卷泥。在东胜(39°44'N, 海拔 1400 m)周围, 我们发现成群出现的发育于半固结砂砾石层中的楔形构造(图 1(a)), 大部分楔壁有明显的挤压变形, 一些砂楔的填充物有比较明显的垂直成层现象(图 1(b)), 少数填充砂有微弱水平层理和沿楔壁的崩塌堆积砾石, 我们认为是冰楔假型¹⁾, 指示了其形成时这里有大片多年冻土的存在。楔内底部填充砂热释光(TL)年代为 26 kaBP 左右和 16 kaBP 左右(表 1)。另一形态特点是这些冰楔假型一般表现为上宽下窄, 上部锅状, 深度为 1 ~ 1.2 m, 下部楔形, 显示了其成因上的特点; 上部形成于多年冻土的活动层中, 下部形成于多年冻土层中。由此, 我们可以推断当时多年冻土顶部距地表的深度约 1 m 左右。在其南部的乌审旗也发现了一连串存在于紫红色土层中的砂楔, 规模比东胜周围小, 深 1 m 左右, 地层无明显变形, 我们认为多数为存在于多年冻土活动层中的原生砂楔。这些砂楔同样具有上宽下窄的现象, 上部深度 0.5 m 左右。同一剖面中, 还发现不同时代的砂楔叠加的现象, 整个楔明显分上下两部分, 上部锅形部分楔壁走向为南东向, 下部楔壁走向为北东向, 这种差异说明此楔上下两部分为两个不同时代的楔。TL 测年证实了这种推断, 上部楔填充砂年代为(23.21 ± 1.79) kaBP, 下部楔填充砂年代为(33.44 ± 2.54) kaBP(图 2)。在本区最南部位于内蒙与陕西交接处的白城子附近发现大型冰卷泥, 卷动层为湖相粉砂, 上覆砂黄土, 卷幅达 1.8 m, 半波长 1 m 左右。这种大型冰卷泥存在于多年冻土的活动层中, 指示了多年冻土的存在^[2]。卷动的湖相粉砂层中的贝壳的¹⁴C 年龄为 20.31 kaBP(图 1(c), 表 1)。

按地面的直径大小及冰楔、砂楔规模的大小, 可以划分为两套相互穿插的冰楔群, 按年代也可以把它们划分为两代冰楔群。较老一代的规模大, 是冰楔, 直径达 8 ~ 9 m, 楔深达 2 ~ 2.5 m; 较新一代规模小, 内叠在老一代冰楔的多边形里, 直径 3 ~ 4 m, 深 0.5 ~ 1 m。大者是连续多年冻土存在的标志, 而小者是

原生砂楔, 可能存在于多年冻土活动层中, 也可能出现于季节冻土区。一般而言, 冰楔的发育需要更潮湿的环境, 年代多在 26 ~ 20 kaBP, 当时的年均温较今要低 13 左右。

此前, 董光荣等人^[3]也报道了这一地区存在这一时期的冰缘现象, 主要位于该区南部的萨拉乌苏河流域, 与白城子冰卷泥的纬度相近, 多为小型冰卷泥和砂楔。此外, 在榆林、靖边一带也有砂楔出现。上述这些地区的海拔高度都不超过 1500 m。据此, 我们认为白城子-榆林-靖边一线是晚更新世晚期我国华北地区多年冻土的南界, 亦即纬度多年冻土的南界所在。根据冰缘现象推测当时的年均温约比今天低 10 ~ 13 。

在山西大同(40°N, 1100 m 左右)附近也发现了大量的冰缘现象存在于粉砂质地层中, 楔的规模不大, 深 1 ~ 1.5 m 左右。包括砂楔、寒冻裂隙和冰卷泥, 其年代也包括两段, 26 kaBP 左右, 以砂楔为主; 16 ~ 20 kaBP 左右则出现寒冻裂隙和小型冰卷泥(图 1(d))。大致在相同纬度, 河北阳原虎头梁曾发现冰卷泥, 北京附近的百花山顶部曾发现古石海^[4]。这些冰缘现象同样表明了晚更新世晚期纬度多年冻土的南界到达此处。但却比西部鄂尔多斯地区偏北 2 ~ 3 个纬度。这主要是由于东部比西部海拔低使多年冻土的发育受到限制。

张珂等人^[4]在宁夏清水河下游发现了晚更新世晚期的小型冰卷泥, 年代为 17 kaBP 左右, 其纬度是 37.4°N, 海拔 1230 m。王乃昂等人^[10]在河西走廊的酒泉、安西和敦煌等地发现古砂楔群, 其时代为晚更新世晚期, 距今 20 ka 左右, 纬度介于 39° ~ 40°N 之间, 其海拔为 1200 m 左右, 可能是我国西部高纬度多年冻土南界所经之处。而祁连山北坡多年冻土在当时只下降到 2800 m, 与山麓带的酒泉、安西的 1200 ~ 1300 m 左右的海拔高度之间还有 1500 m 左右的高度差距, 应有一个非冻土走廊存在。

至此, 结合前人资料^[1], 我们得到了晚更新世晚期中国北方高纬度多年冻土的南界(图 3): 由东北的大连(39°N)至北京、大同(40°N), 在鄂尔多斯地区向南凸出至榆林、靖边(37°N)附近, 经中宁(37.4°N)进入河西走廊的酒泉、敦煌(39° ~ 40°N)。在这条线以北, 晚更新世晚期发育着多年冻土, 这条界线附近的年

1) 有人认为只有砂楔具有垂直结构, 因砂土顺楔壁向下填充所致, 而冰楔在冰融化时不易出现同样过程, 故无垂直结构。但也有人持相反意见



图1 砂楔、冰卷泥照片图(崔之久摄)

(a) 内蒙古鄂尔多斯(原东胜)西公路边出露的成群砂楔; (b) 砂楔上部两侧地层上扰变形(东胜西2 km); (c) 白城子二级阶地上的大型冰卷泥, 所含螺壳测年为 $20.31 \text{ kaBP} (^{14}\text{C})$; (d) 大同东砂板梁楔 ($29.5 \pm 2.2 \text{ kaBP, TL}$)

均温平均比今天低 $8 \sim 12 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

从测年数据(表 1)来看, 这条界线在晚更新世晚期也是有所波动的, 可分为前后两段: 26 kaBP 以前

和 $23 \sim 13 \text{ kaBP}$, 代表了两次寒冷期。而 $26 \sim 23 \text{ kaBP}$ 缺少冰缘现象, 应是冰缘环境的一个间断期, 代表了一次温暖气候期, 可能使冻土南界北移。同时发现,

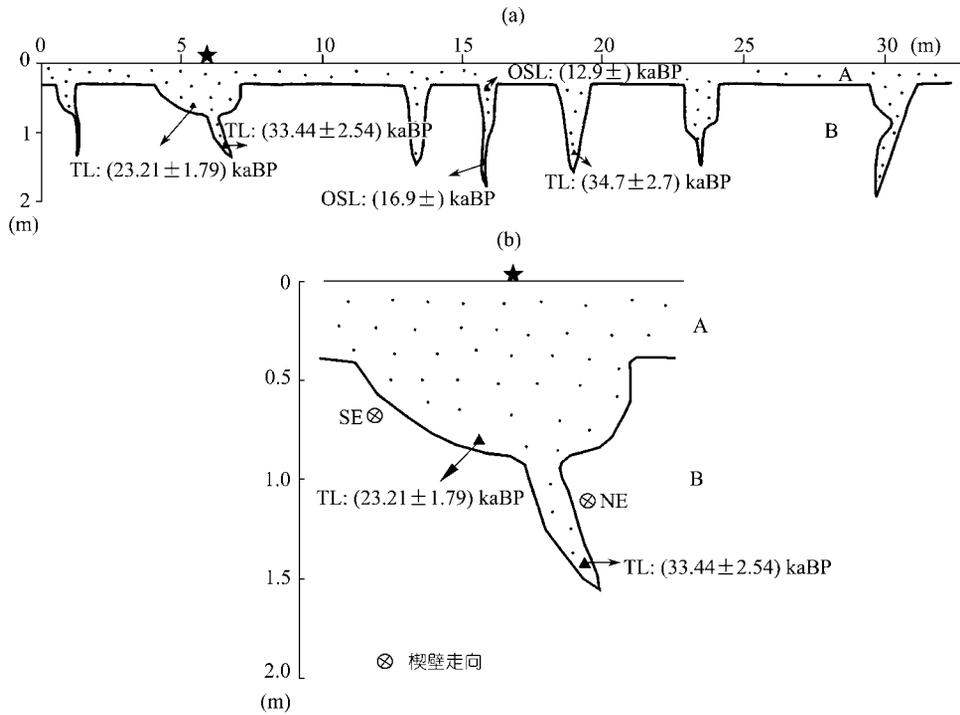


图 2 乌审旗南 14 km 处之砂楔

(a) 剖面示意图; (b) 剖面中的一个砂楔, 上下两部分时代不同、楔壁走向不同, 是两个砂楔的叠置: A. 黄色细砂层; B. 紫红色土层, 含有砾石

表 1 冰缘现象年代表

地点与经纬度	冰缘现象类型	年代(kaBP)及方法	资料来源
大同许堡 40°10' N, 113°15' E	寒冻裂隙	15.8 ± 1.3, TL	
大同砂板梁 40°10' N, 113°10' E	砂楔	29.5 ± 2.2, TL	
内蒙古大河湾 40°30' N, 113°20' E	砂楔	7.59 ± 0.58, TL	
东胜东 2 km 39°50' N, 113°20' E	冰楔假型	26.89 ± 2.10, TL	
东胜西 4~5 km 39°50' N, 110°5' E	砂楔	16.9 ± 1.3, TL	本文
东胜西 6~7 km	冰楔假型	25.57 ± 1.97, TL	
东胜南 29°5' N, 109°10' E	砂楔	7.05 ± 0.54, TL	
乌审南 38°10' N, 109°10' E	砂楔	23.21 ± 1.79, TL	
		33.44 ± 2.54, TL	
白城子 38°5' N, 108°50' E	冰卷泥	20.31, ¹⁴ C	
大同东大沟 40°10' N, 114°5' E	小型冰卷泥	下部地层: 25.85 ± 0.3	
大同许堡 40°10' N, 114°0' E	砂楔(冰楔假型)	上部地层: 晚更新世 ~ 全新世	王乃樑等人 ^[8]
萨拉乌苏河流域 38°10' N, 109°20' E	融冻褶皱	26 ± 2	杨景春等人 ^[9]
		25 左右	董光荣等人 ^[3]
河西走廊安西 40°30' N, 95°40' E	砂楔	19.1 ± 0.125	王乃昂等人 ^[10]
宁夏中宁 37°30' N, 105°40' E	冰卷泥	上部地层: 17.48 ± 1.25	张珂等人 ^[4]

前段的冰缘现象比后段丰富, 显示多年冻土比较发育, 表明前段气候以冷湿为主, 后段则表现为干冷。内蒙古高原西部的巴丹吉林沙漠的查格勒布鲁剖面中发现两层融冻褶皱(4 ~ 12.8 m), 其下部湖相地层的¹⁴C年龄分别为(22.071 ± 0.397)和(29.610 ± 0.774) kaBP, 说明这两层融冻褶皱应分别与上述两次寒冷

期相对应^[11,12], 中部 22 kaBP前后的湖相层则代表了其间的温暖期。陕西关中发现距今 20 ka的菱齿象-披毛犀化石, 代表了凉湿的气候及其后变冷变干^[13], 对应于后一寒冷时段。毛乌素沙漠南部米浪沟湾剖面湖相层中发现大量代表暖湿气候的软体生物化石, 其年代为 33 和 23 ~ 24 kaBP^[14], 表明存在前后两

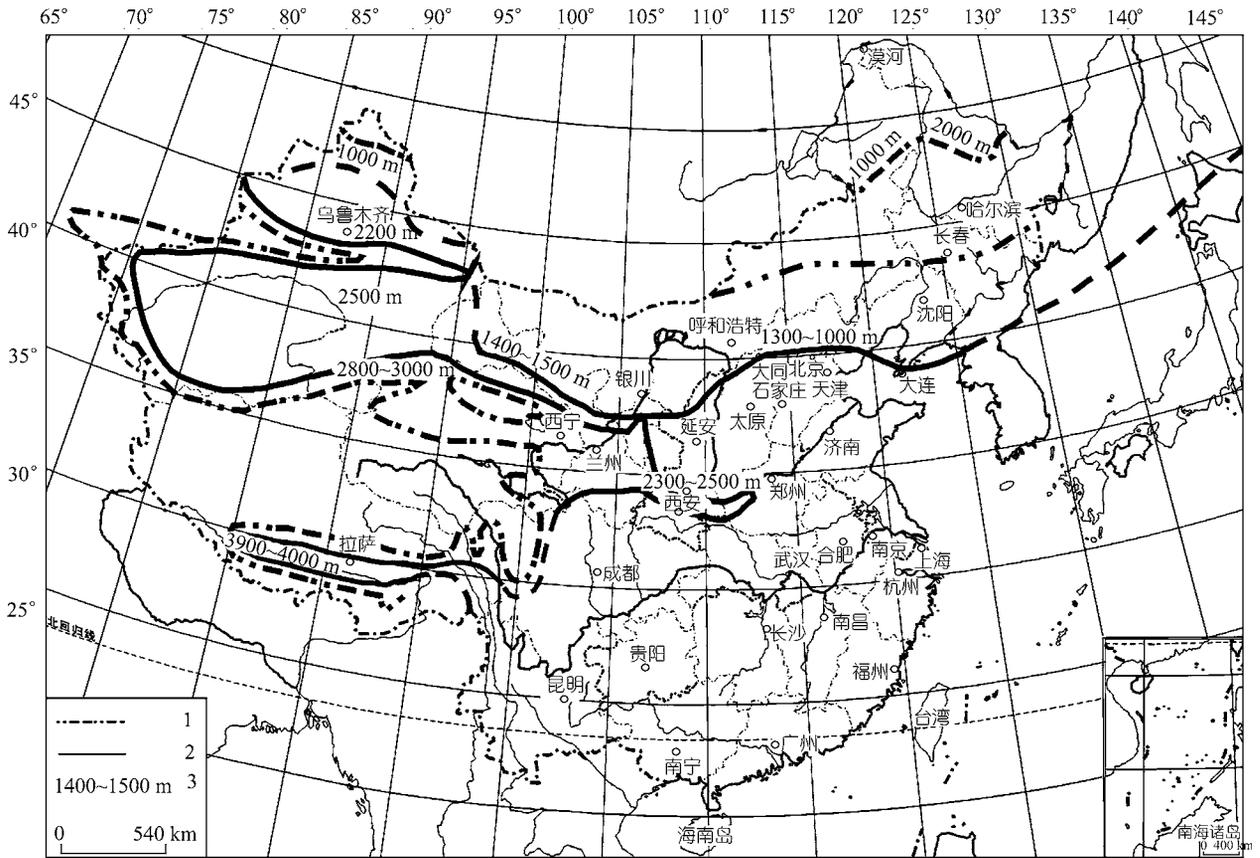


图3 中国末次冰期南界与下界多年冻土界限演化图

1. 现代多年冻土南界, 2. 末次冰期最盛期时纬度多年冻土的南界和高海拔冻土的下界, 3. 冻土南界海拔高度

个温暖期. 同时我们在内蒙古乌审旗南部所发现之砂楔的填充砂年龄为 33 kaBP, 同样反映了 33 kaBP 左右出现了一次冷暖变化, 这表明测年结果为 26 kaBP 左右的冰缘现象其发育期的上限年龄应在 30 kaBP 左右, 亦即这条界线形成的已知的最早年代. 而 33 kaBP 左右则代表较早的一次温暖期.

在东北亦存在末次冰期最盛期的冰缘现象, 如大兴安岭南端黄岗梁地区的融冻泥流堆积及其下伏的不对称谷, 黑龙江克东和小兴安岭罕达气的砂砾层中的典型冰楔等. 古冰楔集中分布在 44°~45°N 以北地区, 零星见于吉林(43°N)、辽西(42°N). 同一时期, 在东北大面积分布的冰缘动物群——披毛犀、猛犸象动物群化石, 特别是猛犸象动物化石对冰缘环境具有指示意义, 是典型的苔原和多年冻土带的指示动物, 它们主要分布在晚更新世细砂砾石层中及其上覆的黄土粉砂亚粘土层和黄土层中. 而上层化

石主要分布在北纬 45°以北. 下层化石主要集中于两个年代: 35~26 和 21~12 kaBP, 分布可达北纬 39°左右, 而 25 kaBP 前后也是猛犸象北移的时期. 39°~40°N 界线正代表了晚更新世晚期东北地区纬度多年冻土的南界, 推测年均温比今天降低约 10 左右^[1].

在古植物方面, 发现融冻褶皱的巴丹吉林沙漠查格勒布鲁剖面 4~12.8 m 的孢粉组合自下而上也可分为三段: 上段和下段类似: 孢粉数量少, 草本仅以蒿属(*Atremisui*)和藜科(*Chenopodiaceae*)花粉为主, 代表了温带干旱荒漠景观; 中段以草本和小灌木花粉为主, 木本花粉占 3%左右, 还有少量水龙骨(*Polgodiaceae*), 植被类型为少量松、桦的荒漠草原^[2], 证明了前后两个寒冷期的存在. 毛乌素沙漠南部的萨拉乌苏河流域米浪沟湾剖面为古风成砂与河湖相或古土壤互层, 其中 55, 28~30 和 19~15 kaBP 为流动沙丘的风砂层, 表明气候干冷, 沙丘活动^[4]. 大

兴安岭地区在(24.683 ± 0.523) kaBP左右的孢粉分析发现, 乔木的桦属、栎属占优势, 占孢粉的 50%以上, 水龙骨科占 15%, 植被为阔叶为主的针阔混交林^[15], 这些都表明 25 kaBP前后是一温暖时期. 而在 19 kaBP左右, 乔木花粉大量减少, 草本以蒿、藜为主, 为森林草原、干草原植被^[15,16]. 东北呼伦湖附近发现 33 kaBP的猛犸象和披毛犀化石, 并有 26 kaBP的古土壤层, 而 19 ~ 13 kaBP的孢粉结果表明, 当时以草本植物为主, 蒿、藜科、禾本科、小型桦占优势, 为极为干冷的环境^[17]. 可见, 在晚更新世晚期前后两段寒冷期多年冻土界线以北的植被是以蒿、藜为主的荒漠草原, 只有少量针叶林出现.

以上综合资料表明末次冰期晚期我国北方出现几次冷暖交替, 寒冷期为: 30 ~ 26 和 23 ~ 13 kaBP, 其中 15 kaBP 左右有一个变暖的波动, 而 33 kaBP 左右和 26 ~ 23 kaBP 为相对温暖湿润时期. 当然, 我们发现的冰楔、砂楔底部填充砂的年代代表的并不是楔体发育的准确年代, 而是稍为滞后的年代.

在东部高山地区晚更新世晚期, 随着末次冰期最盛期的来临, 在纬度冻土带南界南移的同时, 高海拔多年冻土下界也发生下移. 根据已经发现的多种冰缘现象, 如冰楔假型和冰卷泥, 东北-华北地区高海拔多年冻土下界可达到海拔 1000 m左右, 如长白山古冻土下界为 700 ~ 1000 m^[18]. 而此时这一地区的纬度多年冻土的海拔也在 1000 m左右, 在西部, 贺兰山山麓为 1900 m, 说明在东北和华北, 特别是在东北, 高纬度多年冻土与高海拔多年冻土已连成一片. 而在冻土南界以南的高山, 如长白山、五台山、神农架等处则为山地岛状冻土区. 如长白山古冻土达到 2500 m, 气温下降了 5 °C; 五台山冻土下界为 1700 m, 低于现在 1100 m; 湖北神农架为 2100 ~ 2300 m^[1]. 总观各个山地, 冻土下界下降约 1000 m左右.

需要指出的是中国北部的阿尔泰山, 其南坡现代多年冻土下界为 2500 m 左右, 就纬度而言, 阿尔泰山向东南延伸到蒙古境内, 南端达 45°N 左右, 按纬度和亚洲大陆冻土南界走向, 此地肯定在中国东部古纬度冻土带南界以北. 同样也在此线以北的贺兰山, 在山麓带低于 2000 m 的高度也应在纬度冻土带南界以北, 而在五台山的台怀镇 1700 m 处见到古冰缘现象, 可以推测五台山应是末次冰期纬度冻土带南界以南的一个冻土岛. 因此, 从阿尔泰山到贺兰

山应该就在纬度冻土带南界以北并连成一片, 而在河西走廊南侧与祁连山之间多年冻土可能缺失, 表现为一个“无冻土走廊”, 向东延伸可到六盘山以西. 推测惟一可能把纬度冻土带与高度冻土带连接起来的地区是六盘山北段. 因为秦岭太白山北坡末次冰期冻土下界在 2500 m 左右, 而六盘山中部的子午岭一线古冻土下界在 2800 m 左右, 从海拔高度上看两者相连是完全可能的.

总之, 根据最新发现的古冰缘证据, 对中国距今 20 ka前后的冻土界线作了新的界定, 在华北地区东段证实了作者以前所作冻土南界的划分及温度降低值的推测是可信的^[1]. 但在西段冻土南界的研究有新的进展: 自内蒙古乌审旗、陕西榆林一线往西经宁夏中宁进入河西走廊南侧, 再经古浪、酒泉、安西; 冻土南界在 1300 ~ 1400 m 的海拔高度延伸, 此线以北均在此高度以上. 推测古冻土南界自安西可能沿着相近高度向西延伸过马鬃山(2583 m)与天山东段相连, 并向西进入准噶尔盆地中西部山地, 与阿尔泰山南区部分相汇, 而塔里木盆地绝大部分海拔低于 1000 m 的沙漠地区(主要在中西部)和准噶尔盆地(主要在西部)可能为非多年冻土区, 即天山北麓低于海拔 2200 m 的山地已无多年冻土. 因为天山北麓明显的冻土下界在 2200 m, 证明没有与经过准噶尔盆地东部的纬度冻土南界相连.

3 结论

() 作者第 1 次绘出了中国末次冰期纬度冻土带和高度冻土带南界和下界的分布图, 并对其走向和分布进行了讨论. 表明冻土和冰缘现象作为晚更新世晚期一个重要的环境指标, 表征冻土南界的空间分布的基本规律已经展现.

() 纬度冻土南界在华北、东北向西向南延伸时有两处地方与中纬度的高度冻土带相重合(见图 2). 一处是陇东六盘山北段, 一处是东天山(哈尔里克山)东端. 本文也是首次同时展现纬度和高度冻土带及其“分”和“合”的特色, 揭示了北半球中低纬地区特有的地理现象.

() 末次冰期时中国东西部差异不像现在这样巨大, 中国东部和西部现代自然条件虽然差异巨大, 但当时高山冻土下界的下降幅度均在 1000 m 左右. 说明末次冰期时中国广大地区的自然条件比较

1) 徐叔鹰等. 中国东部末次冰期多年冻土带的界线问题 (油印本), 1986

严酷但比较近似,气候和环境差异不如现在间冰期时这样明显.

() 纬度冻土带南界与高度冻土带下界在阿尔泰山相交汇,由此联系到中国西部高度冻土带下界随纬度变化的规律,即纬度坡降值的存在意义:末次冰期垂直冻土带下界在喜马拉雅山北坡是 3900 ~ 4000 m,地处 29°N;在天山北坡为 2200 m,地处 44°30' N,其纬度坡降值为 117 m.与此前计算的青藏高原上现代冰缘现象与现代冻土下界和有关冰缘地貌下界纬度坡降值 110 m 非常近似^[18],这不但可以互相检验,也共同反映一种规律.即相同或相似水热条件的出现随纬度变化而改变海拔高度,这是一种有趣也是有理论和实践意义的自然地带性的表现形式.

致谢 本工作受国家自然科学基金项目(批准号:40071015)资助.

参 考 文 献

- 1 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.地质学报,1984,(2):165~176
- 2 周幼吾,郭东信.我国多年冻土的主要特征.冰川冻土,1982,4(1):1~19
- 3 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.地理研究,1985,4(1):1~11
- 4 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.北京大学学报(自然科学版),2000,36(5),714~718

- 5 中国科学院兰州冰川冻土研究所.中国冰雪冻土图,中国冻土简要说明书.北京:地图出版社,1988
- 6 东北冻土研究协作组.中国东北多年冻土分布的基本特征.见:中国地理学会、中国土木工程学会第二届全国冻土学术会议论文集.兰州:甘肃人民出版社,1983
- 7 Vandenberghe C J. Observed in Advances in Periglacial Geomorphology ed. Clark M J. New York: John Wiley & Sons Ltd, 1988. 179~198
- 8 王乃樑,杨景春,夏正楷,等.山西地堑系新生代沉积与构造地貌.北京:科学出版社,1996.1~72
- 9 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.地理科学,1983,3(4):339~344
- 10 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.地学前缘,2000,7(增刊):59~66
- 11 高全洲,董光荣,李保生,等.晚更新世以来巴丹吉林南缘地区沙漠演化.中国沙漠,1995,15(4):345~352
- 12 高全洲,董光荣,邹学勇,等.查格勒布鲁剖面 晚更新世以来东亚季风进退的地层记录.中国沙漠,1996,16(2):112~119
- 13 薛祥煦,周卫建,周杰.末次冰期极盛期陕西关中地区古气候古环境演变的生物记录.科学通报,1999,44(22):2444~2448
- 14 李保生,靳鹤龄,吕海燕,等.50 ka 以来毛乌素沙漠的堆积与变迁过程.中国科学,D辑,1998,28(1):85~90
- 15 那平山,李寒雪,张汝民,等.大兴安岭根河地区晚更新世晚期以来生态环境变迁.内蒙古林学院学报(自然科学版),1997,19(3):5~11
- 16 黎劲松,霍文毅.大兴安岭北部冰缘地貌及其形成环境初探.地理科学,1999,19(6):543~548
- 17 羊向东,王苏民,薛滨,等.晚更新世以来呼伦湖地区孢粉植物群发展与环境变迁.古生物学报,1995,34(5):647~656
- 18 崔之久.青藏高原冰缘地貌的基本特征.中国科学,1981,(6):724~733

(2003-11-10 收稿,2004-03-18 收修改稿)