

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2020.0063

CHANG Xiaoli, TIE Limin, JIN Huijun, et al. The features of permafrost in Xinlin forest area on eastern slope of the Greater Khingan Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(3):823-833. [常晓丽, 帖利民, 金会军, 等. 大兴安岭东坡新林林区冻土变化特征 [J]. 冰川冻土, 2020, 42(3):823-833.]

## 大兴安岭东坡新林林区冻土变化特征

常晓丽<sup>1,2</sup>, 帖利民<sup>1</sup>, 金会军<sup>2</sup>, 何瑞霞<sup>2</sup>, 李晓英<sup>2</sup>, 王永平<sup>3</sup>

(1. 湖南科技大学, 湖南 湘潭 411202; 2. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 3. 北方民族大学, 宁夏 银川 750021)

**摘 要:** 大兴安岭处于欧亚大陆多年冻土带南缘, 其多年冻土形成、发展和保存更多受制于植被、水分等局地因子的影响。采用钻探、探地雷达和冻土温度长期监测等手段研究发现, 放牧活动会影响大兴安岭东坡新林林区活动层厚度, 放牧活动比较强烈的地段, 活动层可达2.5 m, 放牧区边缘至未放牧区域, 活动层缩减至1.5 m。塔头2013年11月2.0 m处的地温仍然在0℃以上(0.04℃), 当放牧行为终止及加漠公路改道后, 2.0 m处的温度开始逐渐恢复, 温度由-0.12℃降到-0.69℃, 1.5 m处的温度则由0.17℃降到-0.42℃, 2018年底塔头的活动层厚度已经小于1.5 m。从地表植被类型上看, 松树林、塔头和灌丛的活动层多年平均厚度分别为0.8 m、1.3 m和0.7 m, 近地表0.5 m处的年平均地温为0.07℃、0.52℃和0.22℃, 年变化深度处(11 m)的年均温度为-1.34℃, -0.98℃和-2.19℃。从地温曲线类型上看, 灌丛下的多年冻土比较稳定, 地温曲线属于正梯度型。松树林和塔头下的冻土温度比较复杂, 松树林地温曲线为偏负梯度型-零梯度型-偏正梯度型, 塔头为负梯度型-扭曲型。在地表植被类型和人类活动的共同影响下, 研究区多年冻土经历了地表干扰开始退化、干扰消除不再退化以及慢慢恢复的过程。

**关键词:** 大兴安岭; 多年冻土温度; 放牧活动; 冻土退化; 地温曲线

**中图分类号:** P642.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2020)03-0823-11

### 0 引言

冻土是地球五大圈层之一的冰冻圈系统的重要组成部分。它的存在、分布以及水热状态对地气能水交换、碳循环、流域生态水文过程和工程建筑等产生重要的影响<sup>[1-8]</sup>。在气候变化的背景下, 冻土温度和冻土分布的时空变化受到了广泛的关注<sup>[9-13]</sup>, 它们既是寒区生态环境与碳循环研究<sup>[14-16]</sup>、工程选址与设计的基础<sup>[17-21]</sup>, 也是区域工程运行和资源综合规划管理的依据<sup>[22-23]</sup>, 对我国生态文明建设与经济规划的实施具有重要的现实意义。

东北地区是我国唯一的高纬度多年冻土区, 也是我国第二大多年冻土区, 多年冻土面积近40万平方公里<sup>[23-25]</sup>。兴安岭北部(牙克石以北)以高纬度

冻土为主, 而其南部则以山地冻土为主, 从多年冻土南界往北, 冻土面积由10.5%~20%, 增加到70%~80%; 冻土温度由0~1.0℃下降到-1.0~-2.0℃, 最低达-4.2℃; 冻土厚度由5~20 m增厚到60~70 m, 局部超过120 m; 多年冻土分布面积上的连续率也由零星岛状, 过渡为岛状融区到最北部呈大片分布<sup>[26-28]</sup>。在兴安岭北部, 广袤无垠的森林和积雪是最具特色的下垫面, 对季节冻土和多年冻土的地温以及冻融作用有着十分重要的影响。在我国东北的兴安岭和俄罗斯的外贝加尔地区, 积雪、植被、水分、地形和大气逆温等局地因素导致的温度位移十分显著, 因而形成与极地和高海拔冻土截然不同的兴安-贝加尔型多年冻土<sup>[29]</sup>。此类冻

收稿日期: 2019-05-13; 修订日期: 2020-06-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671059); 湖南省自然科学基金项目(2019JJ50179; 2020JJ5161); 宁夏自然科学基金项目(2019AAC03138); 北方民族大学校级重点项目(2019KJ32)资助

作者简介: 常晓丽(1983-), 女, 山西平遥人, 副教授, 2011年在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所获博士学位, 从事冻土环境与气候变化研究. E-mail: changxiaoli2002@163.com.

土的形成、发展和保存更多受制于局地因子,例如盆地中部、洼地的沼泽湿地的冻土比高处的山顶和中上部冻土更为发育(温度低、厚度大,热稳定性强)<sup>[29-31]</sup>,与其他环境因子相互作用复杂。有研究表明冻融过程对植物群落生态特征和物种多样性有显著的影响<sup>[32-33]</sup>,反过来林型不同也会制约多年冻土活动层和季节冻土的冻融速率<sup>[34-38]</sup>。值得指出的是,由于多年冻土特殊的物理属性,使得冻土对地表植被类型变化和工程活动等的响应具有一定的滞后性<sup>[39-43]</sup>,冻土环境的破坏往往具有不可逆和灾难性后果<sup>[44-45]</sup>。

为了进一步探讨大兴安岭不同植被类型影响下多年冻土的变化特征,本文采用钻探、探地雷达和冻土温度长期监测等手段,对新林区不同植被下的多年冻土分布、活动层及下伏多年冻土热状况、冻土厚度和退化状况等特征进行分析,为日后研究东北地区乃至全球冻土温度演化及其对周围环境变化的响应等提供基础数据。

## 1 研究区概况

新林区地处大兴安岭东部,伊勒呼里山的北坡,地理坐标为东经 $123^{\circ}41' \sim 125^{\circ}25' E$ ,北纬 $51^{\circ}20' \sim 52^{\circ}10' N$ ,区内以低山为主,中山较少,平均海拔约600 m。这里地处寒温带,属大陆性季风气候。冬季严寒而漫长,夏季短促而炎热,年平均气温为 $-3^{\circ}C$ 。年平均降水量为480~510 mm,主要集中在6~9月份,占全年总降水量的70%左右<sup>[23]</sup>。区内植被属于大兴安岭山地寒温针叶林带,是西伯利亚山地针叶林的南延部分。主要有兴安落叶松、樟子松、云杉、白桦、黑桦、柴桦、杜香、忍冬、塔头、大叶樟、鹿蹄草、笃斯、越橘、莎草、苔藓等<sup>[46]</sup>。土壤主要为棕色针叶林土,占总面积的90%以上,分布在大兴安岭落叶松、樟子松和次生白桦林下<sup>[47]</sup>。从多年冻土分区上看,该区属于岛状融区多年冻土区<sup>[48]</sup>。

本研究中钻孔位于新林镇北原加漠公路西侧的林区(图1),坐标为东经 $124.39^{\circ} E$ ,北纬 $51.69^{\circ} N$ ,地面植被类型分别为兴安落叶松林、塔头湿地和柴桦灌丛,土壤为针叶林土。兴安落叶松林树高平均10.0 m左右,林下有杜香、苔藓、越橘等;塔头湿地主要以塔头草为主;另外1.5 m高的柴桦灌丛下面也有大量塔头草。三个钻孔孔深20.0 m,岩性特征如图2所示,从上到下大致分为

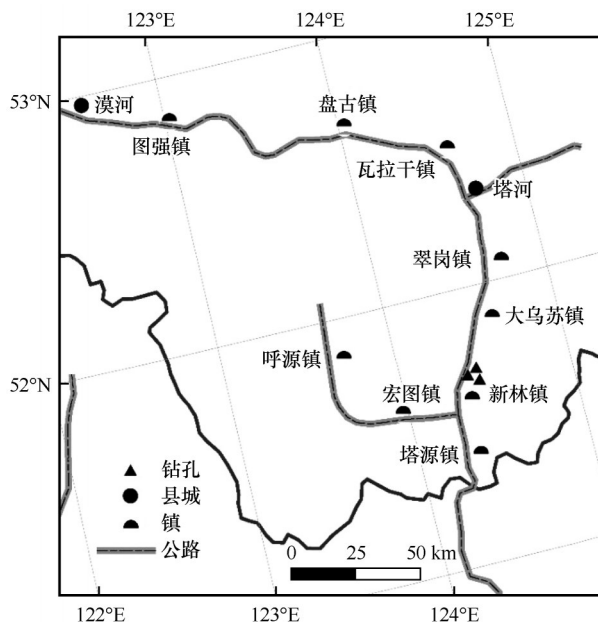


图1 大兴安岭东部新林地区钻孔地理位置

Fig. 1 Map showing the distribution of boreholes in Xinlin Town of the Greater Khingan Mountains

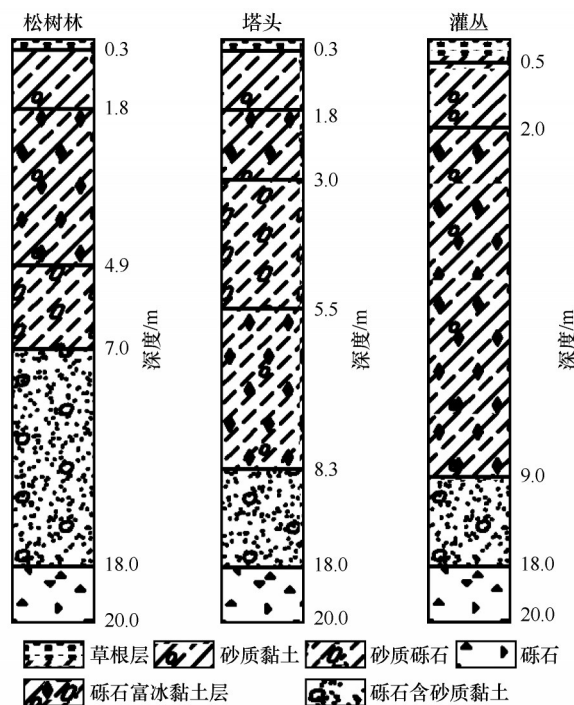


图2 新林钻孔岩性示意

Fig. 2 Three lithological profiles of the boreholes in Xinlin Town

草根层(这一层对应于一般土壤中的泥炭层,由于此处泥炭化程度低,主要是活的植物根系,故本文采用草根层来描述)、砂质黏土层、砂质砾石层、砾石富冰黏土层、砾石含砂质黏土层和砾石层,但各层厚度不一致。砾石富冰黏土层在塔头中不连续,3.0~5.5 m之间夹了砂质砾石,在灌丛中连续,深

度达9.0 m。灌丛的草根层也较厚,约0.5 m。

## 2 研究方法及数据

2011年8-9月,我们在新林林区选取兴安落叶松林(下称松树林)、塔头湿地、柴桦灌丛三种典型植被进行浅孔钻探,并进行岩芯样品采集和描述。终孔三个月后即2011年11月,地温基本恢复至打钻前的状态,正式开始监测地温。所用温度计为冻土工程国家重点实验室特制的电阻式温度计,量程为 $-45 \sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $-30 \sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 精度为 $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,30

$\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或者 $-45 \sim -30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,精度为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。主要采取人工监测,基本每年两次,2017年因故未测,目前数据截至2020年4月。

由于塔头湿地极易在雨季积水,为防止积水进入钻孔影响地温测量,钻孔套管高出地面80 cm。但在2012年6月即终孔后的第二年,套管被本地居民当作桩子拴牛马放养,啃食周围塔头草地。为获取啃食区及其周围活动层情况,我们利用加拿大SSI公司生产的EKKO探地雷达对研究区的冻土特征进行探测(图3)。



(a) 探地雷达探测活动层



(b) 动物践踏啃食过的塔头地表

图3 探地雷达野外工作(左为探测工作中,右为第二段探测起点,啃食过的塔头地表)

Fig. 3 Photos showing the GPR sounding in field (a) and the *Carax tato* (b) grazed by animals

目前探地雷达技术是一种成熟的地球物理勘探方法,用于探测多年冻土地下冰、冻土结构以及冻土上限等<sup>[49-50]</sup>。探地雷达工作原理为:不同性质的地层界面处,上下介质之间的电性(主要是介质的介电常数值)差异会使雷达波在界面处反射,然后利用这种反射特征反推地层分布<sup>[51]</sup>。冻土与非冻土之间的电阻率及介电常数的差异很大,当电磁波遇到冻土层时会产生一个较强的、不同相位特性的反射波,在雷达影像上表现为直达波后的强振幅、同相轴连续性较好的影像层。因此,探地雷达技术探测多年冻土活动层分布效果很好。探测分两段,从西向东第一段松树林至塔头区共50.0 m,第二段从塔头至茂密的灌丛共35.0 m。采用规格为100M的天线并以步长25 cm进行探测,所获影像通过EKKO-view软件分析,辅以钻孔资料验证。

## 3 结果与分析

### 3.1 雷达探测结果

第一段探测剖面结果如图4,图中横坐标为剖面

的水平距离,坐标起点在松树林钻孔西侧15.0 m,终点在塔头湿地钻孔东侧6.0 m。地表起伏不大,纵坐标为距离地面的深度。综合考虑剖面附近钻孔、地温资料及剖面的雷达波形特征,可以看出在地面直达波后有一个强振幅、同向轴连续性好的影响层,也就是图中红色曲线所标志的位置,这个强的反射层是融土与冻土的界面。本次探测时间是2012年10月中旬,此时已经达到最大融化深度,这段的最大融化深度介于0.8~2.5 m之间。松树林区的最大融化深度为0.8~1.5 m,可以看出最大融化深度水平曲线波动还是比较大的,曲线下面最初15.0 m的不连续反射波跟盘根错节的树根有关。离钻孔越近,最大融化深度越大,这可能是钻孔套管的金属导热属性导致的。松树林外和塔头湿地的过渡带,最大融化深度逐渐增大,活动层增加至2.0 m。塔头湿地的啃食区内,最大融化深度持续增加达2.5 m左右,绕塔头中钻孔周围波动极大。

第二段探测剖面结果如图5,坐标起点在塔头钻孔东侧啃食区(图3),终点在灌丛钻孔东侧



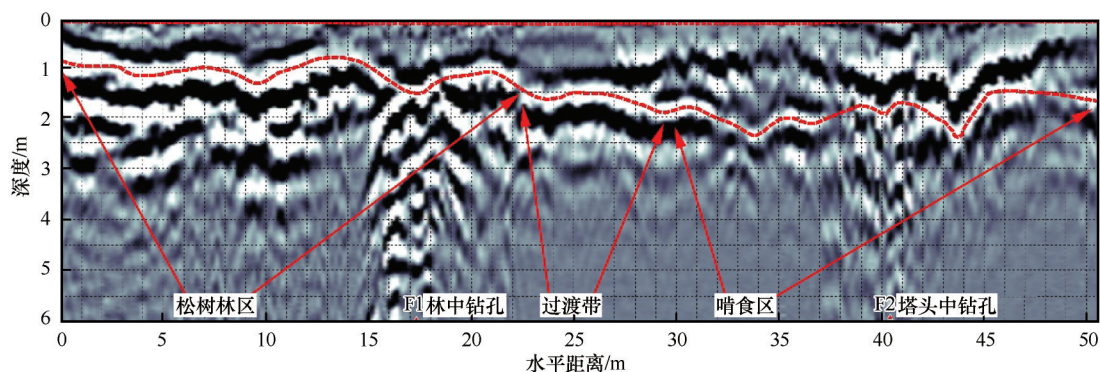


图4 松树林-塔头区雷达实测剖面图

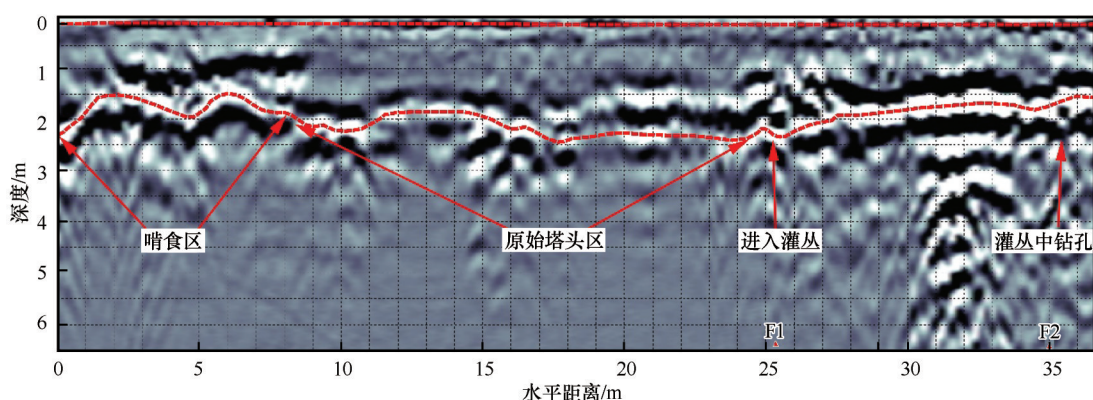
Fig. 4 GPR sounded geological section in the area between larch forest zone and *Carax tato* zone

图5 塔头-灌丛区雷达实测剖面图

Fig. 5 GPR sounded geological section in the area between *Carax tato* zone and shrub zone

2.0 m。可以看出剖面0~8.0 m的啃食区最大融化深度依然波动极大,波动范围1.5~2.5 m。说明放养过程中动物啃食塔头草地、践踏土地等行为打破了冻土原有的水热平衡,对活动层的影响很大。没有经过啃食的原始塔头区波动相对平稳2.0~2.5 m,进入灌丛后,最大融化深度又开始逐渐减小,到测量终点活动层变薄只1.5 m。

从探测结果看,塔头区活动层最厚,其次是灌丛和松树林,这与观测资料基本相符。只是柴桦灌丛较高较密,极不利于实际过程中探地雷达贴地探测,100M的天线难以放平稳,人员行进也十分困难,只进行到钻孔东侧2.0 m左右的地方,测量结果与钻孔观测资料比较误差较大。松树林中探测到的活动层有一定波动,除了树干树根的干扰外,林中有无树木遮荫、草本类植物生长的多少和水分的分配都会影响局部小环境内地面温度的高低,进而导致最大融化深度不一致。塔头区内啃食区明显比原始塔头区活动层波动大,一来动物的啃食会导致地面失去植被的保护和散发更多的热量,使得活动层加厚;二来动物的践踏作用会

使土壤总孔隙度减少,特别是大孔隙( $>50\ \mu\text{m}$ )和较大中等孔隙( $9\sim 50\ \mu\text{m}$ )减少<sup>[52]</sup>,容重增加<sup>[53-54]</sup>,渗透阻力加大,保水持水能力下降<sup>[55]</sup>,地面积水区域,不利于能量向下传输,活动层反而变薄,无积水的地方能量散失快,活动层相对较厚。原始塔头区土壤物理性质较为均衡,活动层稳定,波动不大。

### 3.2 冻土温度

从松树林-塔头-灌丛2011年11月至2020年4月的地温观测数据统计来看,松树林0.5、1.0、1.5、2.0 m处的年平均地温分别为0.08、-0.91、-1.28、-1.44℃,5.0、8.0、10.0、20.0 m处为-1.44、-1.33、-1.35、-1.33℃,冻土活动层多年平均厚度0.8 m左右。塔头0.5、1.0、1.5、2.0 m处的年平均地温分别为0.52、0.05、-0.50、-0.62℃,5.0、8.0、10.0、20.0 m处为-0.77、-0.89、-0.95、-1.25℃,活动层多年平均厚度约1.3 m。灌丛0.5、1.0、1.5、2.0 m处的年平均地温分别为0.06、-1.41、-1.97、-2.27℃,5.0、8.0、10.0、20.0 m处为-2.50、-2.30、-2.23、

-1.96 °C, 活动层多年平均厚度约 0.7 m。无论是地表层还是较深处地温, 塔头高于松树林, 0.5 m

以下松树林高于灌丛, 不同覆被类型下各深度地温分布情况如图 6 所示。

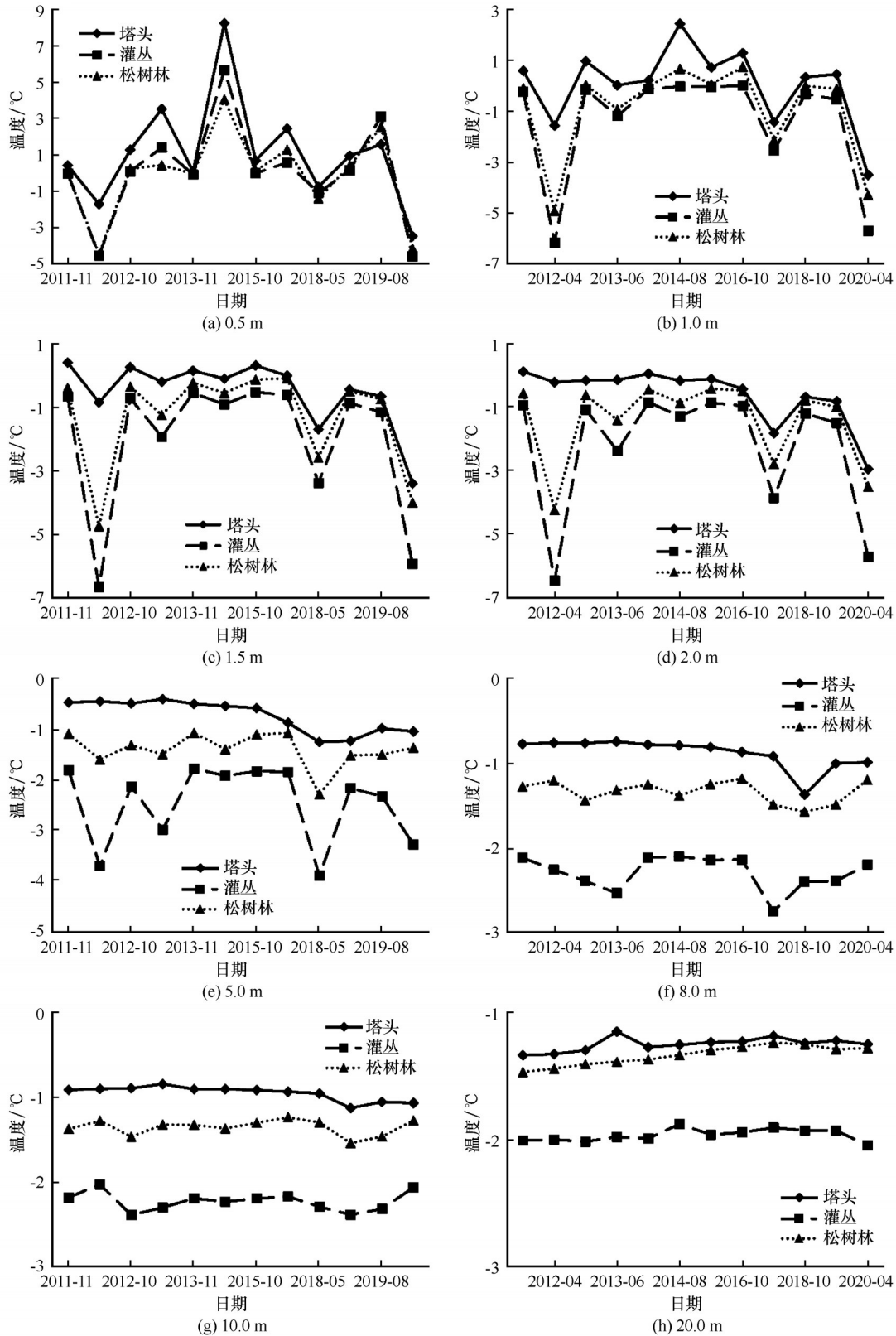


图6 松树林-塔头-灌丛地表层温度随时间分布特征

Fig. 6 Variations of ground temperatures of the three ground surfaces (larch forest, *Carax tato* and shrub zone) at depths of 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 5.0, 8.0, 10.0 and 20.0 m

这与大兴安岭西坡根河生态站的观测情况正好相反<sup>[34]</sup>, 主要是因为生态站属于原始林, 未有人类和动物的任何破坏, 生态环境及其湿地功能完好, 塔头有良好的吸水保水能力, 避免地面升温降温幅度过高。而位于新林研究区内的塔头由于放牧以及人类活动(如中俄输油管线工程施工、加漠公路从旁边穿过)影响, 地表植被破坏, 土壤孔隙度减小, 密实度增大<sup>[56-57]</sup>, 地表积水和蒸发增大, 导热能力增加<sup>[58]</sup>, 地温偏高。这里的松树林冠层大, 能够有效阻挡到达地面的直接太阳辐射, 并且形成阴影降低地面温度, 使得松树林地温较低。灌丛密度大, 同样可以有效阻挡太阳辐射, 又有大量的原始塔头草覆被地表, 吸水保水能力增强, 灌丛钻孔岩芯富冰层厚达 9 m, 这样既能阻碍夏季地温升高, 又使地层冬季散失较多热量, 因此尽管表层温度略高于松树林, 其他深度处的地温还是很低。

从时间上来看, 由于放牧行为的影响, 塔头

2012 年和 2013 年的活动层温度整体偏高, 厚度偏大。最大融化深度一般出现在 10 月末 11 月初, 监测结果显示, 塔头 2012 年 10 月的最大融化深度在 1.5 ~ 2.0 m 之间, 而 2013 年 11 月 2.0 m 处的地温仍然在 0℃以上(0.04℃)。2014 年以后, 牛马等动物不再破坏活动层, 其温度也开始逐渐恢复, 2.0 m 处的温度由 -0.12℃(2015 年 10 月)降到 -0.69℃(2018 年 10 月), 1.5 m 处的温度则由 0.17℃(2015 年 10 月)降到 -0.42℃(2018 年 10 月)。也就是说, 到 2018 年底, 塔头的活动层厚度已经小于 1.5 m。

3.3 多年冻土厚度

目前, 一般是根据钻孔测温结果来确认多年冻土层的厚度。从新林观测资料来看, 松树林-塔头-灌丛的年变化深度(即年较差等于零的深度)<sup>[23]</sup>基本为 11 m, 年变化深度处年平均地温分别为 -1.34、-0.98、-2.19℃, 年变化深度以下各个钻孔测得的地温梯度如表 1。

表 1 年变化深度以下各钻孔的地温梯度统计[单位: (℃·m<sup>-1</sup>)]

	深度									
	11 m	12 m	13 m	14 m	15 m	16 m	17 m	18 m	19 m	20 m
松树林	0.00	0.03	-0.03	0.03	0.00	0.00	-0.01	-0.01	-0.03	0.01
塔头	-0.08	-0.06	-0.04	0.03	-0.03	-0.04	-0.03	-0.02	-0.03	-0.02
灌丛	0.04	0.04	0.03	0.06	0.01	0.04	0.03	0.01	-0.01	0.03

多年冻土厚度与年平均地温关系密切。程国栋等<sup>[59]</sup>统计分析(以下称程氏推算)青藏高原多年冻土厚度( $H$ , m)与年平均地温( $t_h$ , ℃)间的关系, 公式为:  $H=15.91-31.43t_h$ (相关系数  $R=0.94$ ); 童长江等<sup>[60]</sup>(以下称童氏推算)也统计了我国西部地区多年冻土厚度与年平均地温之间的关系, 所得公式为:  $H=15.84-27.17t_h$ (相关系数  $R=0.94$ )。目前东北地区还没有这种关系的统计。根据上述两种推算和地温梯度得到松树林-塔头-灌丛下伏多年冻土厚度的结果如表 2。

表 2 不同方式推算的松树林-塔头-灌丛多年冻土厚度(单位: m)

Table 2 Permafrost thickness under the three ground surfaces calculated with different ways (unit: m)			
推算方式	程氏推算	童氏推算	地温梯度计算值
松树林	58.0	52.2	63.8
塔头	46.7	42.5	60.3
灌丛	84.7	75.3	84.6

从推算结果看, 塔头下的多年冻土最薄, 其次是松树林, 灌丛最厚。但无论是哪种推算方式, 新林林区的多年冻土厚度均不超过 100 m, 这与原苏联科学院冻土研究所在与研究区相邻的研究结果相符<sup>[23]</sup>。程氏推算和童氏推算均比地温梯度计算值小, 估计是前二者经验公式均由青藏高原高海拔多年冻土地区资料获得, 而青藏高原和西部地区地温梯度和地中热流比大兴安岭高造成的, 说明两个公式在大兴安岭地区不太适用。因此本文根据研究区钻孔自由地温梯度的推算, 松树林、塔头、灌丛的多年冻土厚度分别为 63.8、60.3、84.6 m。

3.4 地温曲线与多年冻土退化

冻土层地温曲线状态是内部与外部条件热力交换过程的真实记录, 它反映了冻土层生成、存在环境和发展趋势。冻土层在其生命的不同时期地温曲线状态在不断变化, 戴竞波<sup>[61]</sup>将年变化深度以下的地温曲线划分为四种类型, 即正梯度型、负梯度型、零梯度型和扭曲型。这四种地温曲线类型在新林区钻孔地温监测中均有体现。



图7结合表2可以看出, 灌丛的地温曲线类型属于正梯度型。截至2018年末, 这种类型未有改变, 说明灌丛下的多年冻土比较稳定, 附近人类活动还未影响到其基本状态, 没有退化迹象。塔头的地温曲线类型2018年10月为扭曲型, 其他时期为负梯度型, 负梯度型地温曲线反映长期强烈人为活动影响多年冻土。众所周知, 塔头吸水保水能力强, 是大兴安岭北部湿地沼泽和多年冻土的指示性植物之一。但在研究区, 由于之前加漠公路从旁边穿过, 这里就成了来往车辆、管道施工以及钻井机器等的用水源地, 受人为影响最大, 地表层水量减少导致塔头草减少, 保水能力下降; 并且终孔之后人为放牧, 动物践踏, 使得多年冻土吸热增多, 发生退化。2014年8月以后, 加漠公路改道不从研究区经过, 研究区周围围上护栏防止动物进入, 地表生

态开始进入恢复期。从地温廓线来看, 恢复初期, 塔头地温曲线依旧为负梯度型, 2018年5月在冻土层上部开始出现正梯度, 下部仍为负梯度型, 2018年10月为扭曲型地温曲线。这里的扭曲型地温曲线反映冻土层的不均匀性, 以及冻土恢复的差异性。2019年8月与2020年4月的测量结果亦为负梯度型, 但人为干扰期和恢复期10~20 m的地温梯度分别为 $-0.04\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ 和 $-0.02\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ , 再次说明塔头下多年冻土正在经历着逐渐恢复的过程。松树林的地温曲线2012年4月属于负梯度型, 但梯度很小, 接近于零梯度型, 2018年5月转为偏正梯度型, 说明松树林下的多年冻土也经历了人为扰动-开始退化-扰动消除-逐渐恢复的过程。庆幸的是, 研究区的人为扰动程度较轻且持续时间不长, 否则这里的多年冻土极有可能会经历不可逆的退化, 甚至消失。

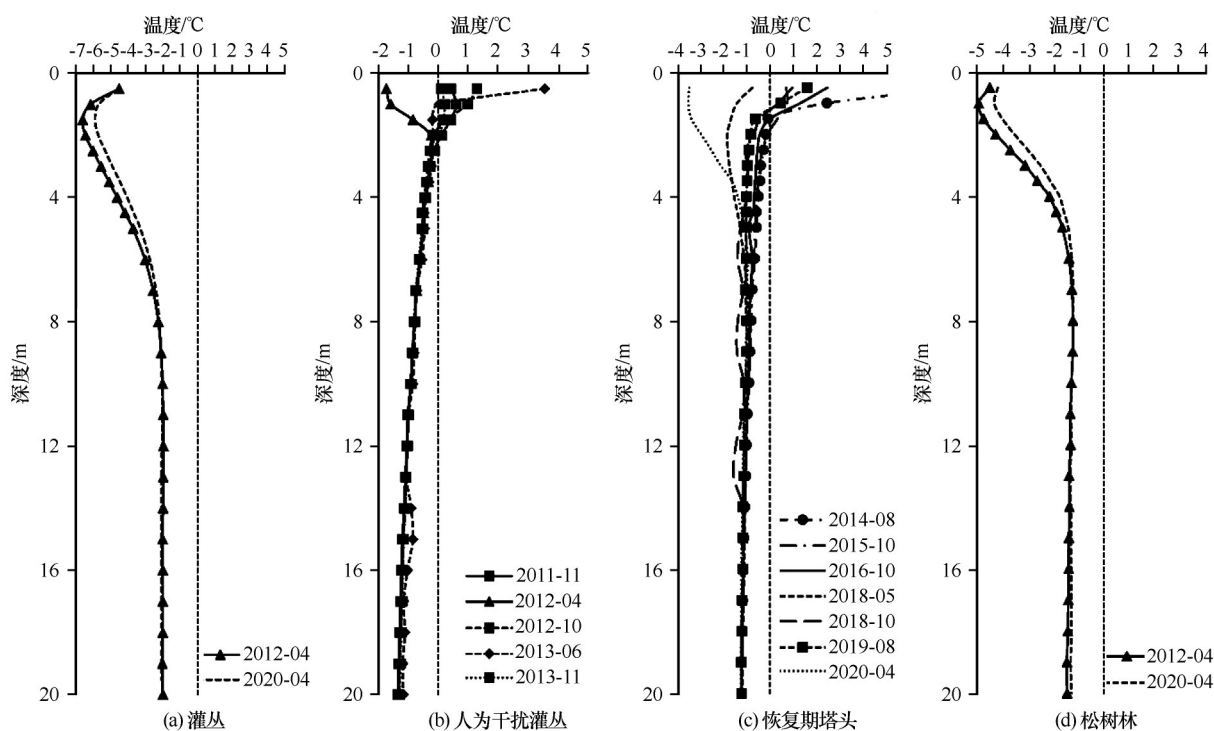


图7 松树林-塔头-灌丛地温曲线

Fig. 7 Ground temperature profiles of the three ground surfaces at various times

上述地温曲线类型大致可以反映植被和人为活动影响下新林林区的多年冻土退化情况, 显然人为活动对新林多年冻土活动层厚度及退化状态有至关重要的作用。无独有偶, 2001年后青藏工程走廊中激增的居民和旅客使当地生态恶化, 多年冻土活动层加深<sup>[62]</sup>。同时, 大型工程活动还会影响深层地温, 弱化地表植被的隔热效应<sup>[63]</sup>。无论是哪种情况, 人为活动可以通过改变多年冻土区近地表

植被类型以及相应的水分能量平衡来影响冻土变化特征, 只是影响程度较难定量确定, 取决于活动量的大小和持续程度, 以及植被气候等其他综合因素。

#### 4 结论

无论是探地雷达探测还是长期地温监测, 都可以发现新林林区多年冻土对外界环境变化很敏感。

首先,放牧活动会影响活动层厚度。即便放牧程度很轻,动物的踩踏和啃食都会导致地表植被、土壤物理属性发生改变,使得更多的热量进入冻土,活动层加厚。放牧对地表破坏的不均匀性导致活动层下限曲线在啃食区波动剧烈,波动范围1.5~2.5 m。其次,地表植被类型对冻土活动层及其以下地温有一定的影响,表现为松树林、塔头和灌丛的活动层厚度分别为0.8、1.3 m和0.7 m,年平均地温分别为-1.33、-0.95℃和-2.23℃。无论是地表层还是较深处地温,塔头高于松树林,松树林地温0.5 m以下高于灌丛地温。这与植被对太阳辐射在地表的重分布有密切关系。塔头地表遭人为干扰破坏,水分流失,岩土含冰量减少也是塔头地温较高的直接原因;松树林冠层大,能够有效阻挡到达地面的直接太阳辐射,并且形成阴影降低地面温度;而密度大的灌丛加厚实的塔头不仅阻挡太阳辐射,超强的吸水保水能力致使富冰层厚达9.0 m,这样既能阻碍夏季地温升高,又使地层冬季散失较多热量。冻土地温的高低直接影响到冻土层厚度的大小,经计算松树林-塔头-灌丛的多年冻土厚度分别为63.8、60.3、84.6 m。最后,从长期观测获得的地温曲线来看,受地表植被类型和人为活动的影响,研究区多年冻土经历着地表干扰开始退化、干扰消除不再退化以及慢慢恢复的过程。灌丛下的多年冻土比较稳定,轻微的人为干扰没有对其造成太大影响,但塔头和松树林下的多年冻土响应强烈。尤其是塔头下的多年冻土,地温曲线一度为负梯度型,干扰消除三年以后,才在上部出现正梯度,开始向扭曲型转变,负梯度逐渐减小,松树林地温曲线则经历了偏负梯度型-零梯度型-偏正梯度型这样的过程。

从新林林区多年冻土的研究结果来看,大兴安岭地区多年冻土的存在对外界环境的依赖性很大,轻微干扰即可引起地温升高冻土退化,而恢复则要经过三年以上。因此,这里的人类活动要尽量避开多年冻土区,以免冻土发生不可逆的退化。除此之外,冬季积雪、冻土水分迁移以及气候变化等因素也会对林区多年冻土变化造成影响,但其影响机制及影响程度是我们下一步深入研究的内容。

## 参考文献(References):

- [1] Cheng Guodong, Zhou Youwu. State of the art and prospect of Geocryology in China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1988, 10(3): 221 - 227. [程国栋, 周幼吾. 中国冻土学的现状和展望[J]. 冰川冻土, 1988, 10(3): 221 - 227.]
- [2] Schuur E, McGuire A, Schädel C, et al. Climate change and the permafrost carbon feedback[J]. Nature: International weekly journal of science, 2015, 520(7): 171 - 179.
- [3] Lai Y, Wu D, Zhang M. Crystallization deformation of a saline soil during freezing and thawing processes[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 120: 463 - 473.
- [4] Qin Y, Yang D, Gao B, et al. Impacts of climate warming on the frozen ground and eco-hydrology in the yellow river source region, china[J]. Science of the Total Environment, 2017, 605: 830 - 841.
- [5] Mu C, Li L, Zhang F, et al. Impacts of permafrost on above- and belowground biomass on the northern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Arctic Antarctic & Alpine Research, 2018, 50(1): e1447192.
- [6] Zhao L, Wu X, Wang Z, et al. Soil organic carbon and total nitrogen pools in permafrost zones of the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Scientific reports, 2018, 8(1): 3656.
- [7] Hou Xin, Ma Wei, Li Guoyu, et al. Effects of freezing thawing cycles on mechanical properties of loess solidified by sodium silicate[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(1): 86 - 93. [侯鑫, 马巍, 李国玉, 等. 冻融循环对硅酸钠固化黄土力学性质的影响[J]. 冰川冻土, 2018, 40(1): 86 - 93.]
- [8] Li Guoyu, Jin Huijun, Sheng Yu, et al. Recent advances in frozen ground engineering geology survey along the China-Russia crude oil pipeline route (Mo'he-Daqing Section) [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(1): 170 - 175. [李国玉, 金会军, 盛煜, 等. 中国-俄罗斯原油管道工程(漠河-大庆段)冻土工程地质考察与研究进展[J]. 冰川冻土, 2008, 30(1): 170 - 175.]
- [9] Ran Y, Li X, Cheng G. Climate warming over the past half century has led to thermal degradation of permafrost on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. The Cryosphere, 2018, 12(2): 595 - 608.
- [10] Beck I, Ludwig R, Bernier M, et al. Assessing permafrost degradation and land cover changes (1986 - 2009) using remote sensing data over Umiujaq, sub-arctic Québec [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2015, 26(2): 129 - 141.
- [11] Bockheim J. Global distribution of cryosols with mountain permafrost: an overview [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2015, 26(1): 1 - 12.
- [12] Yin G, Zheng H, Niu F, et al. Numerical mapping and modeling permafrost thermal dynamics across the Qinghai-Tibet Engineering Corridor, China integrated with remote sensing [J]. Remote Sensing, 2018, 10(12): 69.
- [13] Wang T, Yang D, Fang B, et al. Data-driven mapping of the spatial distribution and potential changes of frozen ground over the Tibetan Plateau [J]. Science of the Total Environment, 2019, 649: 515 - 525.
- [14] Zhang Tao, Wang Genxu, Yang yan, et al. The seasonal variation of ecosystem respiration in different vegetation types in the permafrost regions of Qinghai Tibet Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(6): 1255 - 1264. [张涛, 王根绪, 杨燕, 等. 青藏高原多年冻土区不同草地类型生态系统呼吸季节差异性[J]. 冰川冻土, 2018, 40(6): 1255 - 1264.]
- [15] Wang Junfeng, Wang Genxu, Wu Qingbai. A study of CO<sub>2</sub> fluxes from the high cold swap meadows with different degradation on the hinterland of Tibetan Plateau during growing season [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(3): 408 - 414. [王俊峰, 王根绪, 吴青柏. 青藏高原腹地不同退



- 化程度高寒沼泽草甸生长季节 CO<sub>2</sub> 排放量及其主要环境控制因子研究[J]. 冰川冻土, 2008, 30(3): 408 – 414. ]
- [16] Euskirchen E S, Bretharte M S, Scott G J, et al. Seasonal patterns of carbon dioxide and water fluxes in three representative tundra ecosystems in northern Alaska[J]. *Ecosphere*, 2012, 3(1): 1088 – 1104.
- [17] Cheng Guodong, Yang Chengsong. Mechanics related with frozen ground in construction of Qinghai-Tibet Railway[J]. *Mechanics in Engineering*, 2006, 28(3): 1 – 8. [程国栋, 杨成松. 青藏铁路建设中冻土力学问题[J]. 力学与实践, 2006, 28(3): 1 – 8. ]
- [18] Zhang Qinglong, Li Ning, Ma Wei, et al. Analyses of the thawing consolidation of fill embankments in warm permafrost regions[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(3): 614 – 621. [张青龙, 李宁, 马巍, 等. 高温冻土区填土路基融化固结变形分析[J]. 冰川冻土, 2014, 36(3): 614 – 621. ]
- [19] Wang Hengxin, Yang Lin. Experimental study on the reinforcement of herbaceous plant roots under freezing thawing cycles[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(4): 792 – 801. [王恒星, 杨林. 冻融作用下草本植物根系加固土体试验研究[J]. 冰川冻土, 2018, 40(4): 792 – 801. ]
- [20] Bordonì M, Meisina C, Vercesi A, et al. Quantifying the contribution of grapevine roots to soil mechanical reinforcement in an area susceptible to shallow landslides[J]. *Soil & Tillage Research*, 2016, 163: 195 – 206.
- [21] Veylon G, Ghestem M, Stokes A, et al. Quantification of mechanical and hydric components of soil reinforcement[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2015, 52(11): 1839 – 1849.
- [22] Li Guoyu, Ma Wei, Zhou Zhiwei, et al. The limit state of pipeline based on strain design in cold regions[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(4): 1099 – 1105. [李国玉, 马巍, 周志伟, 等. 寒区输油管道基于应变设计的极限状态研究[J]. 冰川冻土, 2016, 38(4): 1099 – 1105. ]
- [23] Zhou Youwu, Guo Dongxin, Qiu Guoqing, et al. *Geocryology in China*[M]. Beijing: Science Press, 2000. [周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000. ]
- [24] Jin H J, Li S X, Cheng G D, et al. Permafrost and climatic change in China[J]. *Global and Planetary Change*, 2000, 26: 387 – 404.
- [25] Xu Xiaozu, Wang Jiacheng, Zhang Lixin. *Physics of frozen soil* [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2010: 74 – 97. [徐学祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2010: 74 – 97. ]
- [26] Zhou Youwu, Guo Dongxin. Major features of permafrost in China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1982, 4(1): 1 – 19. [周幼吾, 郭东信. 我国多年冻土的主要特征[J]. 冰川冻土, 1982, 4(1): 1 – 19. ]
- [27] Lu Guowei, Weng Binglin, Guo Dongxin. Geographical southern limit of permafrost in northeastern China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1993, 15(2): 214 – 218. [鲁国威, 翁炳林, 郭东信. 中国东北部多年冻土的地理南界[J]. 冰川冻土, 1993, 15(2): 214 – 218. ]
- [28] Zhou Youwu, Wang Yinxue, Gao Xingwang, et al. Temperatures and distribution of permafrost in northeastern China under a warming climate[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1996, 18(Suppl 1): 139 – 146. [周幼吾, 王银学, 高兴旺, 等. 我国东北部冻土温度和分布与气候变暖[J]. 冰川冻土, 1996, 18(增刊1): 139 – 146. ]
- [29] Guo Dongxin. *Permafrost in China*[M]. Lanzhou: Gansu Education Press, 1990: 84 – 95. [郭东信. 中国的多年冻土[M]. 兰州: 甘肃教育出版社, 1990: 84 – 95. ]
- [30] Chang Xiaoli, Jin Huijun, He Ruixia, et al. Advances in permafrost and cold regions environments studies in the Da Hinggan Mountains, Northeastern China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(1): 176 – 181. [常晓丽, 金会军, 何瑞霞, 等. 中国东北大兴安岭多年冻土与寒区环境考察和研究进展[J]. 冰川冻土, 2008, 30(1): 176 – 181. ]
- [31] Jin Huijun, Wang Shaoling, Lü Lanzhi, et al. Features of permafrost degradation in Hinggan Mountains, Northeastern China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2009, 29(2): 223 – 228. [金会军, 王绍令, 吕兰芝, 等. 兴安岭多年冻土退化特征[J]. 地理科学, 2009, 29(2): 223 – 228. ]
- [32] Guo Jintong, Han Fenglin, Hu Yuanman, et al. Ecological characteristics of vegetation and their responses to permafrost degradation in the north slope of Great Khingan Mountain valley of northeast China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(19): 6552 – 6561. [郭金停, 韩凤林, 胡远满, 等. 大兴安岭北坡多年冻土区植物生态特征及其对冻土退化的响应[J]. 生态学报, 2017, 37(19): 6552 – 6561. ]
- [33] Guo Jintong, Han Fenglin, Bu Rencang, et al. Classification of plant communities and species diversity responses to changes in permafrost depths of the north slope of the Great Khingan Mountain valley of Northeast China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(21): 6834 – 6841. [郭金停, 韩凤林, 布仁仓, 等. 大兴安岭北坡多年冻土区植物群落分类及其物种多样性对冻土融深变化的响应[J]. 生态学报, 2016, 36(21): 6834 – 6841. ]
- [34] Chang Xiaoli, Jin Huijun, Yu Shaopeng, et al. Influence of vegetation on frozen ground temperatures the forested area in the Da Xing'anling Mountains, Northeastern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(18): 5138 – 5147. [常晓丽, 金会军, 于少鹏, 等. 大兴安岭林区不同植被对冻土地温的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(18): 5138 – 5147. ]
- [35] Wang Shengting, Sheng Yu, Wu Jichun, et al. The characteristics and changing tendency of permafrost in the source region of Datong River, Qilian Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(1): 27 – 37. [王生廷, 盛煜, 吴吉春, 等. 祁连山大通河源区冻土特征及变化趋势[J]. 冰川冻土, 2015, 37(1): 27 – 37. ]
- [36] Liu Guangyue, Xie Changwei, Yang Shuhua. Spatial and temporal variation characteristics on the onset dates of freezing and thawing of active layer and its influence factors in permafrost regions along the Qinghai-Tibet Highway[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(6): 1067 – 1078. [刘广岳, 谢昌卫, 杨淑华. 青藏公路沿线多年冻土区活动层起始冻融时间的时空变化特征和影响因素[J]. 冰川冻土, 2018, 40(6): 1067 – 1078. ]
- [37] Guo Dongnan, Zang Shuying, Zhao Guangying. Effect of freezing and thawing cycles on soil microbial activity and organic carbon density in forest swamp wetland with various drainage afforestation years[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(1): 175 – 184. [郭东楠, 臧淑英, 赵光影. 冻融交替对不同年代排水造林湿地土壤微生物活性及有机碳密度的影响[J]. 冰川冻土, 2017, 39(1): 175 – 184. ]
- [38] Cheng Huiyan, Wang Genxu, Wang Yibo, et al. Variations of soil temperature and water moisture coverages in the source region of the Yellow River, China[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2008, 44(2): 15 – 21. [程慧艳, 王根绪, 王一博, 等. 黄河源区不同植被类型覆盖下季节冻土冻融过程中的土壤温湿空间变化[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2008, 44(2): 15 – 21. ]

- [39] Ye Renzhang, Chang Juan. Study of groundwater in permafrost regions of China: status and process[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(1): 183 – 196. [叶仁政, 常娟. 中国冻土地下水研究现状与进展综述[J]. 冰川冻土, 2019, 41(1): 183 – 196.]
- [40] Cheng Shanshan, Zhang Shuying, Sun Li. Permafrost degradation in Northeast China and its environmental effects: present situation and prospect[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(2): 298 – 306. [陈珊珊, 臧淑英, 孙丽. 东北多年冻土退化及环境效应研究现状与展望[J]. 冰川冻土, 2018, 40(2): 298 – 306.]
- [41] Wei Zhi, Jin Huijun, Zhang Jianming, et al. Prediction of permafrost changes in Northeastern China under changing climate[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2011, 41(1): 74 – 84. [魏智, 金会军, 张建明, 等. 气候变化条件下东北地区多年冻土变化预测[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(1): 74 – 84.]
- [42] Zhang T J, Nelson F E, Gruber S. Introduction to special section: permafrost and seasonally frozen ground under a changing climate[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2007, 112: F02S01.
- [43] He Ruixia, Jin Huijun, Lü Lanzhi, et al. Recent changes of permafrost and cold regions environments in the northern part of Northeastern China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(3): 525 – 531. [何瑞霞, 金会军, 吕兰芝, 等. 东北北部冻土退化与寒区生态环境变化[J]. 冰川冻土, 2009, 31(3): 525 – 531.]
- [44] Wang Yongping, Jin Huijun, Li Guoyu, et al. Secondary geohazards along the operating Mohe-Jagdaqi section of China-Russia crude oil pipeline in permafrost regions: a case study on a seasonal frost mound at the Site MDX364[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(3): 731 – 739. [王永平, 金会军, 李国玉, 等. 漠河 – 加格达奇段多年冻土区中俄原油管道运营以来的次生地质灾害研究: 以 MDX364 处的季节性冻胀丘为例[J]. 冰川冻土, 2015, 37(3): 731 – 739.]
- [45] Fan Shanzhi, Li Guoyu, Mu Yanhu, et al. Study on thermal hazards assessment at a typical site along the Mohe-Daqing section of China-Russia crude oil pipeline[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2017, 37(3): 456 – 461. [范善智, 李国玉, 穆彦虎, 等. 中俄原油管道漠河至大庆线典型区域热融灾害评价研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(3): 456 – 461.]
- [46] Zhou Yiliang. Vegetation of Da Hinggan Ling in China[M]. Beijing: Science Press, 1991: 3 – 6. [周以良. 中国大兴安岭植被[M]. 北京: 科学出版社, 1991: 3 – 6]
- [47] Zhang Wanru. Forest soil in China[M]. Beijing: Science Press, 1986: 20 – 26. [张万儒. 中国森林土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1986: 20 – 26.]
- [48] Jin Huijun, Yu Shaopeng, Lü Lanzhi, et al. Degradation of permafrost in the Da and Xiao Hinggan Mountains, Northeast China, and preliminary assessment of its trend[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(4): 467 – 476. [金会军, 于少鹏, 吕兰芝, 等. 大小兴安岭多年冻土退化及其趋势初步评估[J]. 冰川冻土, 2006, 28(4): 467 – 476.]
- [49] Gu Zhongwei. The applications of ground probing radar to geological investigation on ground in cold regions[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1994, 16(3): 283 – 288. [顾钟炜. 测地雷达在寒区浅层地质调查中的应用[J]. 冰川冻土, 1994, 16(3): 283 – 288.]
- [50] Wu Tonghua, Li Shuxun, Cheng Guodong, et al. Using ground-penetrating radar to detect permafrost degradation in the northern limit of permafrost on the Tibetan Plateau[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2005, 41: 211 – 219.
- [51] Li Daxin. The method and application of GPR[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994: 59 – 63. [李大心. 探地雷达方法与应用[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 59 – 63.]
- [52] María B V, Nilda M A, Norman P. Soil degradation related to overgrazing in the semi-arid southern Caldenal area of Argentina[J]. *Soil Science*, 2001, 166(7): 441 – 452.
- [53] Wheeler M A, Trlica M J, Frasier G W, et al. Seasonal grazing affects soil physical properties of a montane riparian community[J]. *Journal of Range Management*, 2002, 55: 49 – 56.
- [54] Li Xiangzhen, Chen Zuozhong. Influence of stocking rates on C, N, P contents in plant-soil system[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 1998, 6(2): 90 – 98. [李香真, 陈佐忠. 不同放牧率对草原植物与土壤 C、N、P 含量的影响[J]. 草地学报, 1998, 6(2): 90 – 98.]
- [55] Wu Jiahua, Wang Lixin, Zhang Jinghui, et al. Response of soil properties and microbial biomass to different grazing intensities in temperate typical steppe[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2018, 26(4): 832 – 840. [邬嘉华, 王立新, 张景慧, 等. 温带典型草原土壤理化性质及微生物量对放牧强度的响应[J]. 草地学报, 2018, 26(4): 832 – 840.]
- [56] Proffit A P B, Jarvis R J, Bendotti S. The impact of sheep trampling and stocking rate on the physical properties of a red duplex soil with two initially different structures[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46: 733 – 747.
- [57] Greenwood K L, MacLeod D A, Hutchinson K J. Long-term stocking rate effects on soil physical properties[J]. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 1997, 37: 413 – 419.
- [58] He Ruixia, Jin Huijun, Zhao Shuping, et al. Review of status and progress of the study in thermal conductivity of frozen soil[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(1): 116 – 126. [何瑞霞, 金会军, 赵淑萍, 等. 冻土导热系数研究现状及进展[J]. 冰川冻土, 2018, 40(1): 116 – 126.]
- [59] Cheng Guodong, Wang Shaoling. On the zonation of high-altitude permafrost in China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1982, 4(2): 1 – 17. [程国栋, 王绍令. 试论中国高海拔多年冻土带的划分[J]. 冰川冻土, 1982, 4(2): 1 – 17.]
- [60] Tong Changjiang, Wu Qingbai. Permafrost zonation of ground temperature and stability of engineering constructions in the western region, China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1996, 18(Suppl 1): 166 – 173. [童长江, 吴青柏. 我国西部多年冻土地温带与工程建筑物稳定性[J]. 冰川冻土, 1996, 18(增刊 1): 166 – 173.]
- [61] Dai Jingbo. Characteristics of ground temperature in permafrost areas in the northern part of Great Xin'an Mountain[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1982, 4(3): 53 – 63. [戴竞波. 大兴安岭北部多年冻土地区地温特征[J]. 冰川冻土, 1982, 4(3): 53 – 63.]
- [62] Luo L H, Ma W, Zhuang Y L, et al. The impacts of climate change and human activities on alpine vegetation and permafrost in the Qinghai-Tibet Engineering Corridor[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 93: 24 – 35.
- [63] Wu Q B, Zhang Z Q, Gao S R, et al. Thermal impacts of engineering activities and vegetation layer on permafrost in different alpine ecosystems of the Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *The Cryosphere*, 2016, 10: 1695 – 1706.

## The features of permafrost in Xinlin forest area on eastern slope of the Greater Khingan Mountains

CHANG Xiaoli<sup>1,2</sup>, TIE Limin<sup>1</sup>, JIN Huijun<sup>2</sup>, HE Ruixia<sup>2</sup>, LI Xiaoying<sup>2</sup>, WANG Yongping<sup>3</sup>

(1. Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411202, Hunan, China; 2. State Key Laboratory of Frozen Soil

Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences,

Lanzhou 730000, China; 3. North Minzu University, Yinchuan 750021, China)

**Abstract:** In the southern margin of permafrost zone of the Eurasian continent, permafrost in the Greater Khingan Mountains is greatly sensitive to local factors such as vegetation and moisture for its formation, development and preservation. In order to reveal the specific features of permafrost in these areas, drilling, ground penetrating radar (GPR) and long-term monitoring of permafrost temperature were conducted in Xinlin forest area on eastern slope of the Greater Khingan Mountains. In the Greater Khingan Mountains, the active layer thickness (ALT) is significantly affected by vegetation type and grazing intensity. The ALT reaches 2.5 m at severe grazing plots, but shrinks to 1.5 m at light and non-grazing plots. The ground temperature at the depth of 2.0 m was 0.04 °C at *Carax tato* zone in November 2013, and began to recover gradually after grazing termination and the Gammu Highway diversion, from -0.12 °C to -0.69 °C. Meanwhile, the ground temperature at the depth of 1.5 m was reduced from 0.17 °C to -0.42 °C. Thus the ALT was less than 1.5 m at *Carax tato* zone. Changing with vegetation type, the annual ALT was 0.8 m, 1.3 m and 0.7 m, respectively, at larch forest zone, *Carax tato* zone and shrub zone. The annual average temperature at 11m depth were -1.34, -0.98 and -2.19 °C for the three ground surfaces. According to the profiles of ground temperature, the geothermal profiles belonged to the positive gradient type, indicating a relatively stable permafrost at shrub zone. However, it is more complicated at larch forest plot with negative - zero - positive gradient type geothermal curve and *Carax tato* zone with negative - twist type geothermal curve. Permafrost thickness in larch forest, *Carax tato* zone and shrub zone is 63.8 m, 60.3 m and 84.6 m, respectively. Because of the combined effect of vegetation and human activities, permafrost in the study area experienced a slight degradation, degradation of termination due to disturbance removal and gradual recovery.

**Key words:** Greater Khingan Mountains; permafrost temperature; grazing; permafrost degradation; ground temperature profile

(责任编辑: 李国玉; 编辑: 周成林)