

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2018.0034

CHEN Shanshan, ZANG 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.]

东北多年冻土退化及环境效应研究现状与展望

陈珊珊, 臧淑英, 孙 丽

(哈尔滨师范大学 寒区地理环境监测与空间信息服务黑龙江省重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150025)

摘 要: 东北多年冻土属中高纬度多年冻土, 对气候变化非常敏感。数据模型模拟表明, 21 世纪东北多年冻土区气温会持续上升, 显著的变暖将导致多年冻土退化。东北多年冻土呈现自南向北的区域性退化趋势, 多年冻土区南部表现为南界的北移、融区的扩大和多年冻土的消失, 而北部表现为多年冻土下限的上移、活动层厚度增大及地温升高等。多年冻土的退化会导致寒区生态环境的恶化, 如兴安落叶松占绝对优势的天然林带锐减, 林带北移, 沼泽湿地萎缩等。随着多年冻土的迅速退缩和变薄, 原多年冻土中蕴藏的碳将释放出来, 对气候变化产生积极的正反馈, 加速变暖, 并影响全球碳循环。多年冻土退化导致其热状态失稳而造成寒区基础设施损坏, 并且影响冻土微生物、碳循环、寒区生态和水文等, 而它们是区域气候变化的重要因子, 也将成为未来多年冻土研究的重点。而这些研究都需要长期的基础数据作支撑, 因此需要进一步完善冻土参数监测网络, 用模型厘清气候变化与多年冻土退化及其环境效应之间的关系。

关键词: 气候变暖; 多年冻土退化; 环境效应; 东北

中图分类号: P642.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2018)02-0298-09

0 引言

北半球中高纬度地区易受到全球气候变化的影响。大量研究表明, 中国平均气温变化趋势与全球平均气温变化趋势一致, 特别是东北地区气温升温幅度高于全国的平均升温幅度^[1], 是增温最快的地区之一^[2-5]。1950–2000 年, 东北地区年平均气温呈显著上升趋势, 且后 25 年(1976–2000 年)的平均气温比前 25 年(1950–1975 年)的平均气温上升了约 1℃, 东北地区东西方向上的气温变化率大于南北方向^[6-7]。东北地区增暖幅度随纬度的升高而增大; 1959–2002 年间最低气温和最高气温均有增温趋势, 而且最低气温的增温趋势明显高于最高气温, 前者的年气候倾向率为后者的 2 倍多; 东北气温的升高存在季节性差异, 冬季和春季对东北地区年平均气温上升趋势贡献最大, 冬季增温最强^[8-10]; 东北地区气温变化的区域性差异表现为大

兴安岭北部和小兴安岭地区是增温最明显的地区^[6]。魏智等^[6]研究表明, 1951–1975 年的–5℃气温等值线在 1976–2000 年已经不存在。Luo 等^[11]、Chang 等^[12]研究发现, 1972–2005 年东北多年冻土区地温、气温和地面融化指数显著上升, 年平均地温和气温增长速率为 0.61℃·(10a)⁻¹和 0.72℃·(10a)⁻¹, 地面融化指数增长速率为 9.96℃·d·a⁻¹。东北地区变暖已成为不争的事实, 多年冻土对气候变化, 尤其对气温的变化具有高度的敏感性^[13-14]。

多年冻土被定义为温度在 0℃或低于 0℃且至少连续存在两年的岩土层^[15], 广泛地分布于高纬度地区和高海拔地区^[16]。多年冻土区占北半球陆地面积的 1/4 左右^[17-18], 我国境内多年冻土约占 22.3% 的国土总面积^[19]。东北多年冻土(图 1)属于高纬度多年冻土, 面积为 3.9×10⁵ km², 冻土层厚度从几米到上百米^[20]。从多年冻土南界向北,

收稿日期: 2017-11-10; 修订日期: 2018-04-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571199)资助

作者简介: 陈珊珊(1994–), 女, 湖北咸宁人, 2016 年在黄冈师范学院获学士学位, 现为哈尔滨师范大学在读硕士研究生, 从事冻土与气候变化研究。E-mail: 1982678357@qq.com

通信作者: 臧淑英, E-mail: zsy6311@163.com.

图,其中包括 1:4 000 000 比例尺的中国冰雪冻土地图^[32]。郭东信等^[33]总结了东北多年冻土分区及特征,绘制了 1:3 000 000 比例尺的东北多年冻土分布图。对于多年冻土南界,许多研究强调了多年冻土“边界”的迁移,多年冻土分布的界线可能不精确。

辛奎德等^[34]根据水文、地质和生产建设经验等大量调查资料,划定了东北地区多年冻土的南界。东北冻土研究协作组^[20]对嘉荫、德都、阿尔山和新巴尔虎右旗等十多个地区进行了实地考察,完善了辛奎德等^[34]的冻土分布图。郭东信等^[33]结合理论分布和数学模型划出了现今多年冻土自然地理南界,南界以年平均气温 0℃等值线为轴线在 0±1℃间南北摆动,与末次冰期极盛期相比,南界北移了 100~150 km。谢又予^[35]依据冰缘现象与气温关系推断晚更新世时的多年冻土南界(40°~42°N)基本与现代年均温等温线 6~10℃相当,现代多年冻土南界(48°N)与年均温 0℃等温线相当,全新世多年冻土南界比现代冻土南界向南推移了 2 个纬度。鲁国威等^[36]根据大量资料划分出了比较公认的大小兴安岭多年冻土“W”形地理南界,即西起阿尔山附近,然后沿大兴安岭东坡向东北延伸,经嫩江南侧沿小兴安岭西坡转向东南,绕过伊春后复向东北。至于嘉荫附近,孙广友等^[37]提出大小兴安岭多年冻土南界需充分考虑山地效应,大兴安岭多年冻土南界应在黄岗梁南麓通过,小兴安岭多年冻土南界应在呼兰河源中山的南麓通过。周幼吾等^[27]提出东北多年冻土地球物理南界与年平均气温 -5℃等温线基本一致,但在划分冻土南界时一般采用自然地理南界。

1.2 退化表征

东北多年冻土区是高纬度冻土分布区,位于欧亚大陆冻土区的南缘地带,冻土赋存条件脆弱、热稳定性差,易受气候和外界环境变化的影响,寒区生态系统敏感性强。伴随着气候的变暖和人为活动影响的增强,东北地区多年冻土的退化迹象明显。北部大片连续多年冻土的退化表现为上限下降、由连续到不连续、由衔接到不衔接、地温升高、冻土层变薄等量变,如漠河县的阿木尔地区 10 m 深处地温由 1975 年的 -3.7℃上升到 1978 年的 -2.5℃^[29,38];南部多为质变,岛状多年冻土萎缩退化为季节冻土,近 30 年来,岛状多年冻土面积缩小了 $9 \times 10^4 \sim 10 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[34,39]。

一些学者对未来冻土条件变化进行了预测研

究。吕久俊等^[40]根据气象和雪深数据,采用冻结指数模型预测东北多年冻土的分布,其模拟的结果与孙广友等^[37]提出的东北多年冻土分布结果相似。魏智等^[14]采用东北多年冻土区 47 个气象站资料,结合 SHAW 和非稳态热传导模型的有限元数值计算建立了冻土地表温度分布的等效纬度模型,指出在目前地表温度为 0.5℃和 -0.5℃的区域 50 和 100 年后各自仍有可能存在冻土,区域地温升高,冻土厚度减薄,稳定型(年平均地温小于 -1.0℃)冻土面积逐渐减小,将由 2011 年的 $1.07 \times 10^5 \text{ km}^2$ 分别减小至 $8.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ (2060 年)和 $5.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ (2110 年),不稳定型冻土和季节冻土面积增加。多年冻土退化可能引发生态环境的不利变化,如湿地干缩,土地沙漠化(呼伦贝尔和松嫩沙地)进一步扩展和加速,也可能引起与冻土相互作用保持平衡的区域或局地气候和水文(地质)环境变化。所以,尽量减少或避免人为改变冻土赋存条件是保护冻土环境较可行的途径。

2 东北多年冻土退化的环境效应

2.1 植被生态系统变化

森林、湿地和冻土是东北寒区环境的三大要素,三者紧密相连构成东北植被生态系统。近几十年来,受气温、冻土等因素影响,东北地区生态系统环境发生了一系列变化。

2.1.1 对湿地生态系统的影响

多年冻土与湿地具有共生关系^[41],冻土退化导致有些地区的湿地生态系统向草甸生态系统和农田生态系统转变,并导致林型发生变化。多年冻土退化会使高纬度湿地面积缩小^[42],东北多年冻土区沼泽湿地面积由 20 世纪 50 年代的 114 000 km² 减小至 65 700 km²,50 年间减少了 42.4%^[43];原始湿地逐渐萎缩,很多沼泽湿地被开垦为农田,而新生湿地扩张,林地被湿地取代^[26]。

2.1.2 对森林生态系统的影响

多年冻土退化伴随着多年冻土活动层厚度加深、冻土厚度变薄、融区扩大、热状态失稳等现象,多年冻土环境变化导致森林生态系统发生变化,如植被物种、生物量、植被覆盖度和植被生产力等^[44]。大兴安岭多年冻土退化明显,冻土环境的改变迫使原始兴安落叶松、樟子松等大兴安岭主要建群树种林线抬升,明亮针叶林逐渐向落叶针阔混交林演替^[26];岛状多年冻土大杨树地区,由于冻土的消失大杨树原始兴安落叶松林退化为杨桦次生

林^[45]; 在西伯利亚北部地区, 多年冻土退化会使苔原、森林苔原和针叶林面积缩小, 南部地区的森林草原和草原面积增加, 针叶林向森林草原、草原系统转变^[46]。由于多年冻土退化会改善植被生长环境, 延长生长期, 1982–2009 年东北多年冻土区植被 NPP 整体呈上升趋势, 但其增长速率没有东西伯利亚地区植被 NPP 增长快^[47]。另外, 多年冻土退化造成土壤中可利用水分的快速蒸发, 导致植被生长所需土壤水分减少, 使得多年冻土地区草地退化、植被生物量降低、植被 NPP 下降^[48]。通过分析东北地区植被的 NDVI 指数, 发现植被覆盖度呈下降趋势^[49], 草地 NDVI 值波动最大, 植被 NDVI 指数变化空间异质性显著^[50]。

2.2 土壤碳储量及温室气体排放变化

大量有机碳蕴藏于湿地中, 尤其是泥炭地中, 它在全球碳平衡中具有重要的作用。湿地与多年冻土具有共生关系, 多年冻土中蕴藏着大量的碳^[51–52]。多年冻土的变薄或消失可以加速生物地球化学过程, 寒区湿地可能会转变为大气碳源, 对气候产生积极的反馈作用, 加速变暖。

多年冻土退化会使多年冻土区土壤的冻融循环过程发生变化, 尤其是冻结和融化的时间长度变化, 加之会改变冻土土壤原来的物理属性, 多年冻土土壤碳存储和释放与这些变化息息相关, 它们的变化影响着土壤碳循环过程。多年冻土区土壤冻融循环过程会产生温室气体(CO_2 、 CH_4 和 N_2O), 多年冻土退化会改变温室气体排放的季节分配模式和排放量。多年冻土退化会使湿地 CH_4 排放出现多个峰值和峰值期提前, 在生长季之外, 湿地 CH_4 排放也会出现高值; 随着气候变暖和多年冻土退化, 春季的土壤融冻期提前, 使得春季 CH_4 排放高峰期提前, 土壤融冻期提前可能会延长生长季, 导致生长季 CH_4 排放量在全年中所占的比例可能会提高^[53]。融化期变长会使多年冻土区泥炭地 CO_2 和 N_2O 的潜在排放变高^[54]。在春季冻融过渡期, 湿地 CH_4 最大排放量为 $48.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 是湿地 CH_4 在生长季排放的 3 倍^[55]。同时, Song 等^[56] 在三江平原淡水沼泽地也发现了同样的现象, 在冻融交替期 CO_2 、 CH_4 、 NO_2 排放量会达到一年中的峰值。随着活动层厚度的增加, 多年冻土退化不仅会改变温室气体的排放模式和排放量, 还会使多年冻土中存储的古碳以 CO_2 或 CH_4 的形式排放出来。

此外, 东北多年冻土区气候变暖, 多年冻土退化还影响着土壤湿度和温度的关系, 且低土壤湿度

和低温会限制矿化速率。这种气候变化影响着泥炭地碳的矿化, 随着地温升高, 甲烷菌的活性增强, 可能会增加 CH_4 转化速率和潜在的 CO_2 排放。所以在气候变暖的情况下, 大兴安岭不连续多年冻土泥炭地的碳矿化速率加快, 对大气层来说, 泥炭地将成为潜在的碳源^[57]。西伯利亚多年冻土区土壤湿度变化是决定该地区温室气体排放模式和排放量的重要因素, 土壤湿度变化会影响原来的好氧和厌氧环境, 改变碳的矿化速率。在潮湿条件下, 西伯利亚高山苔原是 CH_4 汇, 然而由于多年冻土退化引起地面沉降, 高山苔原转变成 CH_4 源, 并且在干燥条件下西伯利亚多年冻土苔原生态区的旧碳会流失^[58–59]。另外, 湿地类型、土壤深度、火灾频率会造成小兴安岭土壤碳和总氮浓度的不同。不同类型的湿地其土壤有机碳的浓度不同, 如小兴安岭沼泽地的土壤碳浓度比大兴安岭泥炭地的土壤碳浓度低^[57]。而不连续的多年冻土退化, 引起多年冻土区湿地微地形的变化, 形成斑块状热喀斯特湖和池塘, 使得多年冻土暴露性增加和深层土壤碳的释放^[60], 而在东西伯利亚多年冻土针叶林地区形成的热喀斯特洼地会使这个森林系统可能成为 CH_4 源^[61]。Sun 等^[62] 在东北多年冻土区利用涡度相关技术和原位野外试验发现, 地表土壤温度和空气压力控制着 CH_4 的季节性动态排放, 而且 CH_4 排放空间分布受湿地植物空间分布的影响; 涡度相关技术模型的 CH_4 流通量比原位野外监测模型的 CH_4 流量高 28%。多年冻土退化对气候有正、负两种反馈, 哪种反馈占主导地位与区域自然地理环境有很大的关系, 但都会扰动现有的碳循环过程和碳平衡, 影响气候变化。

2.3 工程基础设施稳定性变化

东北多年冻土区的许多工程问题与气候变化所导致的多年冻土退化有关, 多年冻土退化导致地基承载力变小, 土壤渗透性的增加, 引发冻胀和融沉灾害, 使得工程基础设施遭到破坏。铁路是东北多年冻土区最先开发建设的工程项目, 由于气候和人为因素的影响, 铁路路基下的多年冻土上限变化、地下冰融化会造成地基的冻胀和融沉, 并成为铁路病害的两大重要原因^[63], 铁路和公路在运营后还会出现路基融沉变形, 而灰色系统、生长曲线、混沌时间序列、人工神经网络、支持向量机等方法都可以用来预测路基融沉值, 为工程建设提供重要的参考依据, 从而提高路基的性能和寿命^[64–66]。在气候变暖的背景下, 对于穿过“温暖”的多年冻土区

的工程,采用“路基冷却”方法可以提高路基稳定性^[67]。另外,东北多年冻土区是中俄油气资源传输的必经之地之一,多年冻土区会出现威胁管道安全的冻胀、融沉、冻胀丘等冻土次生地质灾害以及由管道修建和正油温运营所带来的热融灾害。针对这些灾害,范善智等^[68]、李国玉等^[69]、王永平等^[70]从管道属性本身和管道后期维护上提出建立冻胀效应、油压效应、热应力效应的输油管道轴向应变设计理论以更好地利用管材的变形性能,同时提出修筑或疏通管道附近的排水通道、钻孔放水和保温排水渗沟等防治措施。

此外,东北多年冻土区工程建设会破坏工程区内植被和土壤,导致工程区地温的升高、活动层厚度加深、地下水位上升等,使工程区内出现冻胀丘、冰椎、流涎冰等现象^[71]。针对多年冻土区冰冻灾害,学者提出了很多防治措施,如热棒、XPS 保温板、EPS 保温板、保温护道^[72-74]。

多年冻土退化对地表和大气之间的能量和水交换过程的影响是值得进一步研究的问题。应在未来实施全面的长期监测方案,以进一步了解多年冻土退化对寒区环境的影响机制。另外,要制定或者加强适当的法律法规,保护多年冻土免受退化,如森林禁火,改善环境管理。寒区铁路和公路对环境和可持续发展的影响在寒区内长期存在。但是,要提高以保护多年冻土为原则的工程实践和环保意识,减少工程活动对环境的影响。

3 小结与展望

冰冻圈是全球气候系统五大圈层之一,冻土是冰冻圈的重要组成部分,对气候变化极为敏感。受气候变化的影响,东北多年冻土发生了显著变化,多年冻土上限下降、活动层厚度加深、融区扩大、面积减小等。多年冻土自身对气候的响应使得多年冻土所处的寒区环境发生了一系列变化,湿地面积减小,森林植被物种发生演替,植被覆盖度、植被生产力等发生变化;多年冻土土壤物理属性变化和冻融期的变化影响多年冻土碳的释放,对区域甚至全球碳平衡和碳循环带来影响。另外,多年冻土退化也将导致热稳定性差异,进而引起寒区基础设施损坏。

目前对东北多年冻土退化表征、寒区生态系统和寒区工程建设以及工程维护的研究较多,但对引起多年冻土退化的原因研究尚还存在不足,以及多年冻土退化带来的碳效应和区域气候的影响等问题

研究得还不够深入。而多年冻土变化的环境效应在东北地区正日趋显著,多年冻土的未来变化势必会对东北生态与环境安全和水资源产生广泛和深刻的影响,未来应加强以下研究:

(1) 多年冻土动态过程及其对气候变化响应机理。明确气候变化背景下的东北多年冻土的时空变化过程与机理及敏感性分析。多年冻土变化的实质是相变过程,但在这看似简单的固液态水转变过程的背后,将会导致多年冻土各要素变化对气候、生态、水文及环境的影响在时空尺度上产生巨大差异。以东北多年冻土诸要素观测网络为基础,构建大气、土壤、植被、多年冻土有机联系的冻土分布耦合模型,利用耦合全球和区域气候系统模式,开展典型浓度路径(RCP)下 21 世纪东北区域气候与冻土变化情景的预估研究,定量评估气候变化对多年冻土的作用,深入研究冰冻圈与气候相互作用的物理过程与反馈机制,科学地预估未来气候与多年冻土变化,提升对气候系统变化的科学认识水平,减少气候系统模拟和未来气候变化预估的不确定性。

(2) 多年冻土变化影响的多因素相互作用及互馈耦合机制。揭示多年冻土变化对生态系统影响的生物地球化学循环过程及其互馈作用机理;认识多年冻土对陆地生态系统碳氮循环的影响,明确多年冻土变化对生态系统分布和服务功能的影响;预估未来多年冻土变化的碳源汇效应。定量评价东北多年冻土碳库及其变化、多年冻土区 CO₂ 和 CH₄ 的地-气交换通量及影响机制,明确决定碳转换形式的重要因子;评价多年冻土和活动层变化对全球碳循环和碳源汇效应的影响^[75]。

(3) 多年冻土变化的适应对策。如何适应由于多年冻土变化所导致的气候、碳循环、生态与基础设施影响,及由此引发的社会经济问题。在已有的基础性研究上,对东北多年冻土变化进行宏观研究,了解东北多年冻土变化的区域特征,并运用模型预测。以典型案例研究为切入点,以宏观认知为依据,综合考虑自然、社会、经济和人文因素,构建东北多年冻土变化的脆弱性评价体系,提出应对东北多年冻土变化的适应性途径,进而提出应对我国多年冻土变化的科学对策。

参考文献 (References):

[1] Ding Yihui, Dai Xiaosu. Temperature variation in China during the last 100 years[J]. Meteorology Monthly, 1994, 20(12): 19-26. [丁一汇,戴晓苏. 中国近百年来的温度变化[J]. 气

- 象, 1994, 20(12): 19–26.]
- [2] Zuo Hongchao, Lü Shihua, Hu Yinqiao. Variations trend of yearly mean air temperature and precipitation in China in the last 50 years[J]. *Plateau Meteorology*, 2004, 23(2): 238–244. [左洪超, 吕世华, 胡隐樵. 中国近 50 年气温及降水量的变化趋势分析[J]. *高原气象*, 2004, 23(2): 238–244.]
- [3] Chen Longxun, Zhou Xiujie, Li Weiliang, et al. Characteristics of the climate change and its formation mechanism in China in last 80 years[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2004, 62(5): 634–646. [陈隆勋, 周秀骥, 李维亮, 等. 中国近 80 年来气候变化特征及其形成机制[J]. *气象学报*, 2004, 62(5): 634–646.]
- [4] Shi Neng, Chen Jiaqi, Tu Qipu. 4-phase climate change features in the last 100 years over China[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1995, 53(4): 431–439. [施能, 陈家其, 屠其璞. 中国近 100 年来 4 个年代际的气候变化特征[J]. *气象学报*, 1995, 53(4): 431–439.]
- [5] Gao Feng, Wang Baoshu. A study on global warming and the temperature changes in the Northeast region[J]. *Marine Forecasts*, 2008, 25(1): 25–30. [高峰, 王宝书. 全球变暖与东北地区气温变化研究[J]. *海洋预报*, 2008, 25(1): 25–30.]
- [6] Wei Zhi, Jin Huijun, Luo Chongxu, et al. Characteristics of atmospheric environmental changes of permafrost in Northeastern China in 50 years[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2008, 44(3): 39–42. [魏智, 金会军, 罗崇旭, 等. 东北地区冻土近 50 年来的气温环境变化[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2008, 44(3): 39–42.]
- [7] He Wei, Bu Rencang, Xiong Zaiping, et al. Characteristics of temperature and precipitation in Northeastern China from 1961 to 2005[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(2): 519–531. [贺伟, 布仁仓, 熊在平, 等. 1961–2005 年东北地区气温和降水变化趋势[J]. *生态学报*, 2013, 33(2): 519–531.]
- [8] Dong Manyu, Wu Zhengfang. Analysis of temporal and spatial characteristics of temperature change over the last 50 years in Northeast China[J]. *Resources Science*, 2008, 30(7): 1093–1099. [董满宇, 吴正方. 近 50 年来东北地区气温变化时空特征分析[J]. *资源科学*, 2008, 30(7): 1093–1099.]
- [9] Sun Fenghua, Yang Xiuqun, Lu Shuang, et al. The contrast analysis on the average and extreme temperature trend in Northeast China[J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2006, 26(2): 157–163. [孙风华, 杨修群, 路爽, 等. 东北地区平均、最高、最低气温时空变化特征及对比分析[J]. *气象科学*, 2006, 26(2): 157–163.]
- [10] Sun Fenghua, Yuan Jian. Characteristics of spatial-temporal variability of maximum and minimum temperatures in Northeast China during 1959–2002[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2005, 1(4): 168–171. [孙风华, 袁健. 东北地区 1959–2002 年最高、最低气温时空变化特征[J]. *气候变化研究进展*, 2005, 1(4): 168–171.]
- [11] Luo Dongliang, Jin Huijun, Jin Rui. Spatiotemporal variations of climate warming in northern Northeast China as indicated by freezing and thawing indices[J]. *Quaternary International*, 2014, 349: 187–195.
- [12] Chang Xiaoli, Jin Huijun, Zhang Yanlin, et al. Thermal impacts of boreal forest vegetation on active layer and permafrost soils in northern Da Xing'anling (Hinggan) Mountains, Northeast China[J]. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 2015, 47(2): 267–279.
- [13] Jin Huijun, Yu Qihao, Lü Lanzhi, et al. Degradation of permafrost in the Xing'anling Mountains, Northeastern China[J]. *Permafrost and Periglacial Process*, 2007, 18(3): 245–258.
- [14] Wei Zhi, Jin Huijun, Zhang Jianming, et al. Prediction of permafrost changes in Northeastern China under a changing climate[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2011, 54(6): 924–935. [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.]
- [15] Qin Dahe, Yao Tandong, Ding Yongjian, et al. Glossary of cryospheric science[M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 2016. [秦大河, 姚檀栋, 丁永建, 等. *冰冻圈科学辞典*[M]. 2 版. 北京: 气象出版社, 2016.]
- [16] Zhang T, Nelson F E, Gruber S. Introduction to special section: permafrost and seasonally frozen ground under a changing climate[J/OL]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2007, 112(F2) [2018-04-05]. <https://www.researchgate.net/publication/248804009>.
- [17] Zhang T, Barry R G, Knowles K, et al. Statistics and characteristics of permafrost and ground-ice distribution in the northern hemisphere[J]. *Polar Geography*, 1999, 23(2): 132–154.
- [18] Wu T H, Wang Q X, Watanabe M, et al. Mapping vertical profile of discontinuous permafrost with ground penetrating radar at Nalaikh depression[J]. *Mongolia Environmental Geology*, 2009, 56(8): 1577–1583.
- [19] Zhou Y, Guo D. Some features of permafrost in China[C]// *Proceedings of the 4th International Conference on Permafrost*: vol. 1. Washington, D. C.: National Academy Press, 1983: 1496–1501.
- [20] The Study Group on Permafrost in Northeast China. Distribution characteristics of permafrost in Northeast China[C]// *Proceedings of the 2nd National Conference on Permafrost (Selection)*. Lanzhou: Gansu People's Publishing House, 1983: 36–42. [东北冻土研究协作组. 中国东北部多年冻土分布的基本特征[C]//第二届全国冻土学术会议论文选集. 兰州: 甘肃人民出版社, 1983: 36–42.]
- [21] 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.]
- [22] Streletskiy D A, Anisimov O, Vasiliev A. Permafrost degradation[M]// *Snow and ice-related hazards, risks and disasters*. 2nd ed. Berlin: Springer-Verlag, 2014: 303–344.
- [23] 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.]
- [24] 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.]
- [25] He Ruixia, Jin Huijun, Chang Xiaoli, et al. Degradation of permafrost in the northern part of Northeastern China: present state and causal analysis[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(5): 829–834. [何瑞霞, 金会军, 常晓丽, 等. 东北北部多年冻土的退化现状及原因分析[J]. *冰川冻土*, 2009, 31(5): 829–834.]
- [26] Gu Zhongwei, Zhou Youwu. The effects of climate warming and

- human turbulence on the permafrost in the northward slope of Mt. Da Hinggan Ling; take a sample from Amur area[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1994, 49(2): 182–187. [顾钟炜, 周幼吾. 气候变暖和人为扰动对大兴安岭北坡多年冻土的影响: 以阿木尔地区为例[J]. *地理学报*, 1994, 49(2): 182–187.]
- [27] Zhou Youwu, Wang Yinxue, Gao Xingwang, et al. Ground temperature, permafrost distribution and climate warming in Northeastern China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1996, 18(Suppl 1): 139–147. [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): 139–147.]
- [28] Chang Xiaoli, Jin Huijun, He Ruixia, et al. Review of permafrost monitoring in the northern Da Hinggan Mountains, Northeast China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(1): 93–100. [常晓丽, 金会军, 何瑞霞, 等. 大兴安岭北部多年冻土监测进展[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(1): 93–100.]
- [29] Wang Chunhe, Zhang Baolin, Liu Futao. A preliminary analysis on the regularity of permafrost degradation, its advantages and disadvantages in the Great and Lesser Xing'an Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1996, 18(Suppl 1): 174–180. [王春鹤, 张宝林, 刘福涛. 大、小兴安岭多年冻土退化规律及利弊的初步分析[J]. *冰川冻土*, 1996, 18(增刊1): 174–180.]
- [30] Wang Shaoling, Jin Huijun, Li Shuxun, et al. Permafrost degradation on the Qinghai-Tibet Plateau and its environmental impacts[J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2000, 11(1): 43–53.
- [31] Jorgenson M T, Racine C, Walters J C, et al. Permafrost degradation and ecological changes associated with a warming climate in central Alaska[J]. *Climatic Change*, 2001, 48(4): 551–579.
- [32] Shi Yafeng, Mi Desheng. Map of snow, ice and frozen ground in China (1: 4 000 000) [M]. Beijing: China Cartographic Publishing House, 1988. [施雅夫, 米德生. 中国冰雪冻土图(1: 400 万) [M]. 北京: 中国地图出版社, 1988.]
- [33] Guo Dongxin, Wang Shaoling, Lu Guowei, et al. Division of permafrost regions in the Da and Xiao Hinggan Mountains, Northeast China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1981, 3(3): 1–9. [郭东信, 王绍令, 鲁国威, 等. 东北大小兴安岭多年冻土分区[J]. *冰川冻土*, 1981, 3(3): 1–9.]
- [34] Xin Kuide, Ren Qijia. The distribution of permafrost in China[J]. *Journal of Geological Knowledge*, 1956(10): 15–18. [辛奎德, 任奇甲. 中国冻土地区多年冻土的分布[J]. *地质知识*, 1956(10): 15–18.]
- [35] Xie Youyu. Climatic condition in the formation and evolution of permafrost in Northeast China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1985, 7(4): 323–330. [谢又予. 试论东北地区多年冻土形成的气候条件及其演化[J]. *冰川冻土*, 1985, 7(4): 323–330.]
- [36] Lu Guowei, Weng Binglin, Guo Dongxin. The geographic boundary of permafrost in the Northeast of 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.]
- [37] Sun Guangyou, Yu Shaopeng, Wang Haixia. Causes, south borderline and subareas of permafrost in Da Hinggan Mountains and Xiao Hinggan Mountains[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, 27(1): 68–74. [孙广友, 于少鹏, 王海霞. 大小兴安岭多年冻土的主导成因及分布模式[J]. *地理科学*, 2007, 27(1): 68–74.]
- [38] Jin Huijun, Li Shuxun, Wang Shaoling, et al. Impacts of climatic change on permafrost and cold regions environments in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(2): 161–173. [金会军, 李述训, 王绍令, 等. 气候变化对中国多年冻土和寒区环境的影响[J]. *地理学报*, 2000, 55(2): 161–173.]
- [39] Jin Huijun, Wang Shaoling, Lü Lanzhi, et al. Features of permafrost degradation in Hinggan Mountains, Northeast China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2009, 29(2): 224–229. [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): 224–229.]
- [40] Lü Jiujun, Li Xiuzhen, Hu Yuanman, et al. Application of frost number model in Northeast China permafrost regionalization[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(10): 2271–2276. [吕久俊, 李秀珍, 胡远满, 等. 冻结数模型在中国东北多年冻土分区中的应用[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(10): 2271–2276.]
- [41] Sun Guangyou, Jin Huijun, Yu Shaopeng, et al. The symbiosis models of marshes and permafrost: a case study in Daxingan and Xiaoxingan Mountain range[J]. *Wetland Science*, 2008, 6(4): 479–485. [孙广友, 金会军, 于少鹏, 等. 沼泽湿地与多年冻土的共生模式: 以中国大兴安岭和小兴安岭为例[J]. *湿地科学*, 2008, 6(4): 479–485.]
- [42] Avis C A, Weaver A J, Meissner K J. Reduction in areal extent of high-latitude wetlands in response to permafrost thaw[J]. *Nature Geoscience*, 2011, 4(7): 444–448.
- [43] Wen Hua, Zhou Xiaofeng, Liu Xingtu. Research on forest and wetland conservation and forestry development strategy in Northeast China: forestry volume[M]. Beijing: Science Press, 2007. [文华, 周晓峰, 刘兴土. 东北地区森林与湿地保育及林业发展战略研究: 林业卷[M]. 北京: 科学出版社, 2007.]
- [44] Davis N. Permafrost: a guide to frozen ground in transition[M]. Fairbanks, AK, USA: University of Alaska Press, 2000.
- [45] Zhou Mei, Yu Xinxiao, Feng Lin, et al. Effects of permafrost and wetland in forests in Great Xing'an Mountains on ecology and environment[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2003, 25(6): 91–93. [周梅, 余新晓, 冯林, 等. 大兴安岭林区冻土及湿地对生态环境的作用[J]. *北京林业大学学报*, 2003, 25(6): 91–93.]
- [46] Tchebakova N M, Parfenova E, Soja A J. The effects of climate, permafrost and fire on vegetation change in Siberia in a changing climate[J]. *Environment Research Letters*, 2009, 4(4): 940–941.
- [47] Sato H, Kobayashi H, Iwahana G, et al. Endurance of larch forest ecosystems in eastern Siberia under warming trends[J]. *Ecology and Evolution*, 2016, 6(16): 5690–5704.
- [48] Mao Dehua, Wang Zongming, Luo Ling, et al. Dynamic changes of vegetation net primary productivity in permafrost zone of Northeast China in 1982–2009 in response to global change[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(6): 1511–1519. [毛德华, 王宗明, 罗玲, 等. 1982–2009年东北多年冻土区植被净初级生产力动态及其对全球变化的响应[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(6): 1511–1519.]
- [49] Guo Zhixing, Wang Zongming, Song Kaishan, et al. Changes of vegetation coverage in Northeast China from 1982 to 2003[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2008, 28(1): 155–163. [国志兴, 王宗明, 宋开山, 等. 1982–2003年东北地区植被覆盖变化特征分析[J]. *西北植物学报*, 2008, 28(1): 155–163.]
- [50] Mao Dehua, Wang Zongming, Song Kaishan, et al. The vegeta-

- tion NDVI variation and its responses to climate change and LUCC from 1982 to 2006 year in Northeast permafrost region [J]. *China Environmental Science*, 2011, 31(2): 283–292. [毛德华, 王宗明, 宋开山, 等. 东北多年冻土区植被 NDVI 变化及其对气候变化和土地覆被变化的响应[J]. *中国环境科学*, 2011, 31(2): 283–292.]
- [51] Jin Huijun, Wu Jie, Cheng Guodong, et al. Estimation of CH₄ emissions from cold wetland ecosystems on the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1999, 21(4): 339–350. [金会军, 吴杰, 程国栋, 等. 青藏高原冷湿地生态系统 CH₄ 排放量估算[J]. *冰川冻土*, 1999, 21(4): 339–350.]
- [52] Schuur E A G, Bockheim J, Canadell J G, et al. Vulnerability of permafrost carbon to climate change: implications for the global carbon cycle[J]. *BioScience*, 2008, 58(8): 701–714.
- [53] Sun Xiaoxin, Song Changchun, Wang Xianwei, et al. Effect of permafrost degradation on methane emission in wetlands: a review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(18): 5379–5386. [孙晓新, 宋长春, 王宪伟, 等. 多年冻土退化对湿地甲烷排放的影响研究进展[J]. *生态学报*, 2011, 31(18): 5379–5386.]
- [54] Wang Jiaoyue, Song Changchun, Miao Yuqing, et al. Greenhouse gas emissions from southward transplanted wetlands during freezing-thawing periods in Northeast China [J]. *Wetlands*, 2013, 33(6): 1075–1081.
- [55] Song Changchun, Xu Xiaofeng, Sun Xiaoxin, et al. Large methane emission upon spring thaw from natural wetlands in the northern permafrost region [J]. *Environmental Research Letters*, 2012, 7(3): 34009–34016.
- [56] Song Changchun, Wang Yuesi, Wang Yiyong, et al. Emission of CO₂, CH₄ and N₂O from freshwater marsh during freeze-thaw period in Northeast of China [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(35): 6879–6885.
- [57] Wang Xiaowei, Li Xiuzhen, Hu Yuanman, et al. Potential carbon mineralization of permafrost peatlands in Great Hing'an Mountains[J]. *China Wetlands*, 2010, 30(4): 747–756.
- [58] Jørgensen C J, Johansen K M L, Westergaard-Nielsen A, et al. Net regional methane sink in High Arctic soils of northeast Greenland[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(1): 20–23.
- [59] Susan M N, Schuur A G E, Marguerite M, et al. Permafrost thaw and soil moisture driving CO₂ and CH₄ release from upland tundra[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2015, 120(3): 525–537.
- [60] Wang Xianwei, Song Changchun, Sun Xiaoxin, et al. Soil carbon and nitrogen across wetland types in discontinuous permafrost zone of the Xiao Xing'an Mountains, northeastern China[J]. *Catena*, 2013, 101: 31–37.
- [61] Takakai F, Desyatkin A R, Larry Lopez C M, et al. CH₄ and N₂O emissions from a forest-alas ecosystem in the permafrost taiga forest region, eastern Siberia, Russia[J/OL]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2015, 113(G2) [2018-04-05]. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2007JG000521>.
- [62] Sun Li, Song Changchun, Miao Yuqing, et al. Temporal and spatial variability of methane emissions in a northern temperate marsh[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 81(2): 356–363.
- [63] Wang Chunhe. The freezing effect and cold zone development in Northeast China's tundra[M]. Beijing: Science Press, 1993. [王春鹤. 中国东北冻土区融冻作用与寒区开发建设[M]. 北京: 科学出版社, 1993.]
- [64] Sun Quansheng, Chang Jifeng. Based on support vector machine, the prediction of the melting deformation of permafrost subgrade[J]. *Journal of Highway Engineering*, 2014, 39(5): 136–140. [孙全胜, 常继锋. 基于支持向量机的多年冻土路基融沉变形预测[J]. *公路工程*, 2014, 39(5): 136–140.]
- [65] Liu Qiuhua, Chen Mengqiao. The prediction of roadbed state of permafrost region based on grey model[J]. *Low Temperature Architecture Technology*, 2012, 34(2): 119–120. [刘秋华, 陈孟乔. 基于灰色模型的多年冻土区路基状态预测[J]. *低温建筑技术*, 2012, 34(2): 119–120.]
- [66] Cheng Guodong. Permafrost studies in the Qinghai-Tibet Plateau for road construction[J]. *Journal of Cold Regions Engineering*, 2005, 19(1): 19–29.
- [67] Wang Jinye, Kang Ersi, Jin Bowen. Hydrological function of frozen soil in forest area in the upper reaches of Heihe River[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2001, 16(Suppl 1): 30–34. [王金叶, 康尔泗, 金博文. 黑河上游林区冻土的水文功能[J]. *西北林学院学报*, 2001, 16(增刊1): 30–34.]
- [68] 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.]
- [69] 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.]
- [70] 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.]
- [71] Bai Junren. Harm and control of permafrost along Daxinganling railway[J]. *Journal of Geological Hazard and Control*, 1990, 1(1): 95–99. [白俊仁. 大兴安岭铁路沿线多年冻土的病害与防治[J]. *地质灾害与防治*, 1990, 1(1): 95–99.]
- [72] Ma Lifeng, Liu Jiankun, Li Qingwu. Measures of roadbed problems of railways in permafrost regions of Northeast China[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(3): 475–479. [马立峰, 刘建坤, 李庆武. 既有东北铁路多年冻土区路基病害整治效果研究[J]. *岩土工程学报*, 2009, 31(3): 475–479.]
- [73] Yi Chenggui, Zhou Changyi. The experimental study on the treatment of roadbed diseases in the tundra of Northeast railway[J]. *Chinese Railways*, 2005(10): 54–56. [伊承贵, 周常义. 东北铁路冻土区路基病害整治的试验研究[J]. *中国铁路*, 2005(10): 54–56.]
- [74] Li Junfu, Liu Jiankun, Li Qingwu, et al. Analysis of the experimental effect of hot rod in the permafrost area of the Yakeshi-Linhai railway[J]. *Railroad Construction*, 2006(3): 73–75. [李君富, 刘建坤, 李庆武, 等. 牙林线多年冻土区热棒试验效果分析[J]. *铁路建筑*, 2006(3): 73–75.]
- [75] Ding Yongjian, Xiao Cunde. Challenges in the study of cryo-

spheric changes and their impacts[J]. Advances in Earth Science, 2013, 28(10): 1067 – 1076. [丁永建, 效存德. 冰冻圈变化及其影响研究的主要科学问题概论[J]. 地球科学进展, 2013, 28(10): 1067 – 1076.]

Permafrost degradation in Northeast China and its environmental effects:
present situation and prospect

CHEN Shanshan, ZANG Shuying, SUN Li

(Heilongjiang Province Key Laboratory of Geographical Environment Monitoring and Spatial Information Service in Cold Regions,
Harbin Normal University, Harbin 150025, China)

Abstract: Permafrost in northern part of Northeast China developed at high latitudes is very sensitive to climate change. Numerical simulations indicate that air temperature in the permafrost regions of Northeast China will continue to rise in the 21st century. Significant warming leads to degradation of permafrost. Northeast China has been warming since the 1950s. The warming trend of Da and Xiao Xing'anling Mountains is most obvious. Permafrost in the Northeast China presents the trend of regional degeneration from south to north. Permafrost degradation in southern part shows: (1) permafrost southern boundary is moving northwards, (2) the permafrost talik is enlarging, (3) the permafrost vanish gradually. Permafrost degradation in northern part of Northeast China shows: (1) permafrost base is moving upwards, (2) the thickness of active layer is increasing and the ground temperature is rising. The permafrost degradation leads to the deterioration of ecological environment in the cold regions. As a result, the belt of natural forests, dominated by *Larix gmelinii*, has shifted northward and wetlands have shrunk extensively, among many others. With rapid retreating and thinning of permafrost, large carbon pools sequestered in permafrost could be released to increase net sources of atmospheric carbon, creating a positive feedback, accelerating warming and influencing the global carbon cycle. Subsequently, permafrost degradation causes difference in thermal stability of permafrost and thus cause damage to engineered infrastructures in the cold regions. In addition, it affects microbes in permafrost, carbon cycle, along with ecology and hydrology in the cold region, etc. , which are important factors of regional climate change and will be the focus of future research. The long-term fundamental data are the foundation of these research. Therefore, researchers need to further refine the permafrost parameters monitoring network, to clarify the relationships between climate change and permafrost degradation, and for evaluating the environmental effects of permafrost degradation.

Key words: climate warming; permafrost degradation; environmental effects; Northeast China

(本文编辑: 武俊杰)