

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2018.0078

LIU Yali, WANG Junfeng, WU Qingbai. The linear engineering impact on the eco-environment in permafrost regions: research status and prospect [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(4): 728-737. [刘亚丽, 王俊峰, 吴青柏. 多年冻土区线性工程的生态环境影响研究现状与展望[J]. 冰川冻土, 2018, 40(4): 728-737.]

多年冻土区线性工程的生态环境影响研究现状与展望

刘亚丽^{1,2}, 王俊峰^{1,3}, 吴青柏¹

(1. 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; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院西北生态环境资源研究院青藏高原北麓河冻土工程与环境综合观测研究站, 甘肃兰州 730000)

摘 要: 在多年冻土区, 线性工程(公路、铁路、输油管线、输电线路等)的修建和运营对沿途周边的冻土热状态、土壤理化性质、水文过程以及陆面过程产生显著影响, 生态环境发生明显改变并对冻土的工程稳定性产生显著影响。冻土工程作用下的生态环境变化是冻土学近年来研究的热点之一, 通过文献综述, 对冻土区线性工程的主要特征, 以及近几十年来工程影响下冻土环境和植被变化研究进展与现状进行了总结和归纳, 在此基础上, 探讨了多年冻土区工程建设存在的主要生态问题。目前, 生态环境各要素对工程的反馈研究十分丰富, 但是生态环境要素与工程相互作用的机理、过程的研究还需完善。在以后的研究中应重点拓展有效的监测手段, 为冻土区生态环境监测和研究服务; 同时, 在深入理解寒区工程建设对生态环境作用机理、过程基础上, 积极开展冻土区工程环境容量阈值评估以及生态环境变化预测研究, 为寒区大规模工程建设与生态环境和谐发展提供理论支持与对策建议。

关键词: 多年冻土区; 线性工程; 生态环境; 研究现状; 展望

中图分类号: P642.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2018)04-0728-10

0 引言

随着全球气候变化引起越来越多的讨论, 多年冻土区生态环境也受到更多的关注。我国多年冻土区国土面积的 22.4%, 主要分布在青藏高原和大小兴安岭地区^[1]。近几十年来, 随着国家对青藏高原等地区社会经济发展和基础设施建设的重视, 大批大型线状工程进驻多年冻土区^[2]。在青藏高原多年冻土区, 除与青藏公路并行的青藏铁路、输油管道等交通运输工程, 青藏高速公路和青海、西藏两省区的多条铁路也正在规划建设中^[3]; 在东北地区, 中俄输油管道(漠河-大庆段)穿越不连续多年冻土区的长度占总长的 45%^[4], 这些工程对沿线生态环境将产生不可忽视的影响。线性工程修建规模大、跨越距离长, 在空间上对多年冻土环境产生连续干扰, 尤其在青藏高原工程走廊, 铁路、公路、

输油管道及输电线路等线性工程集中修建, 高密度的工程建设对所经过地区的生态环境产生了深刻影响^[5]。在多年冻土区, 冻土是生态系统的关键组分^[6], 工程通过多种途径干扰冻土环境, 影响土壤水分平衡、土壤肥力等, 从而阻碍植被的生长和影响群落动态, 工程施工更直接对工程周边的植被产生破坏和干扰, 对生态系统稳定性和功能的发挥以及工程稳定性造成威胁。并且由于多年冻土区气候条件普遍严寒恶劣, 当地生态十分脆弱, 一旦遭到破坏就很难恢复^[7-8]; 随着全球气候变暖加剧, 多年冻土区生态受到的压力比其他地区更加显著^[9], 工程的介入更容易引起生态平衡的破坏, 关注该区域工程建设的生态环境效应就显得更为必要, 然而相关研究还十分缺乏。

国外对多年冻土区的开发历史较早, 线性工程引起的生态问题被研究者较早地关注, 目前研究内

收稿日期: 2017-09-29; 修订日期: 2018-01-24

基金项目: 中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDJ-SSW-DQC011); 中国科学院 STS 项目(HHS-TSSSTS-1502); 国家自然科学基金项目(41771080); 冻土工程国家重点实验室自主研究项目(SKLFSE-ZT-36)资助

作者简介: 刘亚丽(1992-), 女, 河南驻马店人, 2015年在浙江农林大学获学士学位, 现为中国科学院西北生态环境资源研究院在读硕士研究生, 从事寒区工程与生态环境变化研究。E-mail: liuyali@lzb.ac.cn

通信作者: 王俊峰, E-mail: wangjf2008@lzb.ac.cn

容也比较全面, 涉及道路、管道和混凝土桩基引起的冻土退化; 随之产生的水文变化^[10]和植被变化^[6,11]; 道路灰尘对土壤酸碱性、植物的影响^[12]; 管道泄漏的污染问题^[13]; 线性工程周围(取、弃土坑等)或工程废弃后的植被恢复^[14]; 景观的变化^[15]; 多种工程的综合影响^[16]; 气候变化与人类干扰的共同作用^[17]等诸多方面。国内多年冻土区建设工程设施历史虽久, 但因线性工程较少或工程规模较小并未引起多年冻土生态领域的广泛关注, 随着 21 世纪之初青藏铁路格拉段开建, 掀起了关于多年冻土区大规模线性工程生态影响的讨论^[18-22]。由于种种条件限制, 目前研究内容还不是十分全面, 主要集中在工程引起的冻土退化、植被影响、对野生动物迁徙的影响和工程施工后期的植被恢复上; 同时还存在长时间序列观测研究数据缺乏、工程集中区域的长期综合影响研究不够全面和深入等问题。

1 多年冻土区线性工程的主要特征

线性工程具有鲜明的“线性”景观特征, 空间上基本呈一狭窄的工程线穿越自然景观, 在人类居住较少和基本无植被遮挡的多年冻土区, 具有从空中容易识别的特点。道路和输油管线是典型的线性工程, 修建历史较长; 输电线路是点线工程^[23], 与典型的线性工程有许多共有的特点。线性工程的特征使研究者能够采取多样的研究方式, 早在 1986 年, Walker 等^[16]就利用航空摄影照片和 GIS 技术追踪了 1968-1983 年 Prudhoe Bay 油田区域范围内工业发展情况, 包括道路的修建规模和里程的变化。随着遥感技术的发展和分辨率的提高, 实现了对研究区域更全面准确的观测, 通过对比线性工程沿线生态环境状态, 可以更容易直观地了解工程的环境效应。Yu 等^[15]利用多时相多空间遥感影像调查了西伯利亚城市 Nadym 的东南部土地覆盖和土地利用变化, 研究了土地覆盖变化与气候变化及人为干扰(道路、管道、施工便道、输电线等)的关系, 分析了干扰作用的范围。在 21 世纪初, 国内研究者就注意到了道路作为一种重要的景观要素, 它的建设对所经过地区土地利用和景观格局会产生不可忽视的影响^[24-25], 从大尺度分析了线性工程的环境效应。陈辉等^[21]采用多个景观指数来分析线性工程对生态系统结构的影响, 道路直接的切割使景观破碎化。

线性工程还具有修筑规模大、跨越距离长, 穿

越不同类型冻土区的特征, 工程建设困难维护频繁, 导致当地生态环境保护与恢复任务艰巨。青藏铁路格尔木-拉萨段全长 1 142 km, 其中穿越连续多年冻土区长度约占总长度的 50%, 此外还有少量岛状冻土区分布^[26]; 中俄输油管线我国境内总长 965 km, 其中连崮-大杨气 340 km, 多为岛状融区多年冻土分布, 大杨气-大杨树约 170 km, 为岛状多年冻土分布, 前后两段地形不同, 多年冻土特征也有差异, 前段冻土层厚, 后段冻土年平均地温高^[27]; 此外, 包括格拉成品油管道^[28]和青藏直流联网工程 ±500 kV 输电线路穿越的地区, 冻土环境都比较复杂, 对工程施工要求很高。不当的工程设计和施工方式都会引起冻土融化, 在后期运营中产生工程病害, 大幅度增加维护费用; 同时, 通过多年冻土区生态系统各生态因子与冻土间的积极反馈, 冻土的变化会引起生态系统的变化和问题。因此, 长距离的工程面临的复杂冻土环境不仅要求因地制宜的工程设计, 还要求完善的施工保护措施和注意后期植被恢复。

多年冻土区的线性工程通常还具有分布比较集中的特征, 从而产生群体效应, 加快沿线冻土生态环境的变化进程。早期, 线性工程的修建往往是随着能源资源以及矿藏资源的开发出现的。资源的开发增加了道路、管道等的修建需求, 阿拉斯加 Prudhoe Bay 油田在开发的前 15 年(1968-1983 年), 就修建了超过 350 km 的道路, 由于油田开发的需求, 建立起了北美洲极地地区最密集的道路网络^[13], 为输送原油又建立起跨越长距离的输油管道^[29]。在我国青藏高原, 青藏铁路格拉段、成品油管道和大型输电线路都基本与青藏公路并行, 形成相对集中的工程走廊地带^[5]。然而, 集中的工程修建也对沿线生态环境产生加倍的影响, 尤其在多年冻土区, 早在 1969 年, Ferrians 等^[30]就提醒人们要最大限度地减少并行的线性工程(如管道、道路和电话线)之间的相互影响, 减少工程集中带的植被破坏。多次施工和维护不利于植被的自然恢复, 多项工程的集中建设不但容易造成区间排水困难, 工程产生的热扰动也将联合作用于多年冻土, 加剧冻土的融化和退化。

2 线性工程影响下的寒区土壤环境变化

土壤是生态系统的基础, 影响着生态系统的生产力和生态平衡。多年冻土区大规模的线性工程建设常引起冻土冻融过程和土壤理化性质变化, 冻土

与生态环境之间的反馈非常活跃^[6],冻土层是维持地下水位的重要条件^[5],冻融过程的变化将引起水文和生态过程的变化^[31-32],活动层水热过程的变化、冻土上限的升降都是多年冻土冻融过程变化的重要指示;而工程引起的土壤理化性质改变,通过影响土壤水分含量、有机质成分、养分元素等作用于生态系统的植被^[33-34]。

2.1 水热过程变化

多年冻土水热过程一直是工程建设和冻土研究的重点^[35-37]。线性工程对多年冻土水热过程的影响研究主要集中在道路工程方面,其中路基的水热过程响应引起的关注最多;由于许多埋地输油管道采用加热输送方式,油温与管道间的温度梯度会引起水分热量的传输,也得到较多的关注;输电线无内部热源,水热变化主要是由于施工过程的扰动,相关研究还比较少。活动层冻融过程是该层水热过程的集中体现,是多年冻土区地气交换的主要过程^[36],在工程引起的水热变化研究中是一个热点问题。监测和模拟是研究水热过程的两个重要手段,但目前对多年冻土区长时间序列的水热监测还比较缺乏。

多年冻土活动层温度在线性工程影响下呈现出温度年较差变大、温度升高、自然地表面下的温度分布被工程干扰打破的特点,下垫面性质改变使土壤接收的太阳辐射改变是道路工程下冻土温度场变化的主要原因,输油管道工程沿线的冻土受油温影响更加显著,与此同时,水分迁移和气候变化也在不同程度上参与了温度变化过程。工程对下垫面的干扰改变了地表接收的太阳辐射量,在青藏高原北麓河地区砂砾路面场地在各深度上的地温年较差大于铲除地表植被场地,植被未受工程破坏的草甸场地温度年较差最小,这是由于植被在暖季能够大幅度降低地表温度,在冷季有一定的保温作用^[36,38],而工程施工导致地表植被层的缓冲功能丧失。对青藏公路长期的温度监测也发现不同深度的冻土温度都有所升高,青藏公路运行12年后,6 m深冻土年平均温度平均升高了0.44℃,10 m年平均温度平均升高了0.37℃,气候变暖固然在大范围上提高了冻土温度,但是路基之下路基冻土温度的大幅变化主要是由工程扰动引起的^[39]。浅层土壤受太阳辐射影响大,随深度增加辐射的影响不断减小,不同深度处地温的变化规律是一致的^[40],但在道路工程路基下,天然地表下的温度分布被工程干扰打破,在存在阴阳坡的路基下方,由于路基两侧太阳

辐射状况不同导致了路基温度场不对称,阳坡面地温始终高于阴坡面和路基顶面^[41]。采取加热输送方式的埋地输油管道的热干扰形成一个圆柱状的融化区域^[42],管道上方地表下土壤热平衡在短时间内实现,而下方的增温要持续几十年^[41,43]。油温高低对温度场的影响差异很大,据计算油温30℃融深比80℃减少30%~40%^[41],油温越高引起的水分迁移量也越大,土壤水分在迁移过程中会携带热量,土壤含水量的变化也会改变其热物性参数,影响导热过程和温度场^[44],水分场的变化对温度场的作用在其他工程干扰问题中也同样存在。具体的热干扰过程还受工程设计(如有无敷设保温材料)和冻土条件(水分含量)及气温的季节变化等影响^[43,45-46]。

多年冻土区浅层土壤处在不断的年际冻融循环过程中,土壤水分受温度梯度等驱动不断进行迁移^[36,38,45],线性工程对表层土壤水分的影响在冻融的不同阶段是不同的,工程施工引起的植被破坏是主要原因。多年冻土区土壤水分条件对生态系统至关重要,水分比温度更能影响生态系统生产力^[47],水分条件较好的生态系统自然恢复能力也越好^[22]。在工程施工铲除植被区域,融化期间土壤持水能力下降,降水和融水在重力作用下很快下渗;而在植被覆盖的区域,植被滞留部分降水加上蒸腾消耗,土壤表层含水量低于铲除植被的区域。在青藏高原北麓河多年冻土区,活动层冻结期间受双向冻结影响,中部土壤水分向上、下两个冻结锋面迁移,0.8 m以下植被覆盖区域含水量明显低于铲除植被区域,0.8 m以上前者稍高于后者^[36]。相对而言,多年冻土活动层融化期间表层土壤水分含量对生态环境更重要,如果正处于植被的生长季,铲除植被使水分过快下渗,不利于植被恢复。在早期青藏公路建设的取土迹地,由于缺少植被和有机质层覆盖,且土壤质地发生变化,引起土壤水分变化,研究发现面积越小的取土迹地土壤水分含量越接近于未干扰地内水分含量,并且土壤水分含量的年际波动幅度与迹地面积成正比^[48],工程干扰引起的土壤水分变化存在一定的面积效应。

水热过程变化综合反映在多年冻土冻融过程中,工程的干扰可能导致冻结融化起始时间延迟和年冻结时长缩短。一般情况下以土壤日平均温度持续大于(小于)0℃为开始融化日期(冻结日期)^[49]。在工程影响下,由于下垫面发生变化,青藏公路铺筑沥青路面后年平均地温升高,沥青路面下土层较

天然地表下每年提早融化 20 ~ 30 天,晚冻结约 20 天^[50]。不同温度的冻土类型冻融过程对下垫面变化的反应也不同,沥青路面对高温多年冻土的影响大于低温多年冻土,在高温多年冻土区沥青路面下,活动层融化时间更长,冻结时间更短^[19]。在冻融过程中,植被与活动层的冻结融化过程密切相关,由于植被层的保温作用,随植被盖度减小,活动层开始冻结和融化的时间提前,持续冻结时间减少^[51]。

2.2 冻土上限深度变化

多年冻土上限是指多年冻土层的顶面,在衔接多年冻土中也是地表以下位置最深的冻融土层的界面^[52]。在天然地表下,除少数受地下水影响的地区,季节冻结层和多年冻土上限是衔接的,但在工程下方,由于水热过程变化,季节融化深度大于季节冻结深度^[50],冻土层夏季融化的部分在冬季没有得到补给,冻土上限趋于不断下降,多年冻土不断退化。多年冻土上限与冻结层上水埋深关系密切,在植被可利用深度范围内,冻结层上水埋深随着冻土上限的下降而下降的趋势明显,上限的下降将导致植物可以利用的土壤水分减少^[22,53]。掌握多年冻土上限的变化情况,对工程的设计和稳定性管理以及监测工程施工区域生态环境变化都有重要意义。

有关青藏公路和青藏铁路路基的研究发现,多年冻土人为上限处在不断下降中,但与此同时天然上限也在下降,显然路基下多年冻土热状况变化不仅是工程引起的,也和气候变化有关^[54-56]。王绍令等^[50]通过钻探发现青藏公路沿线多年冻土区内约 60% 路段路基下季节冻结层与多年冻土上限不衔接,而天然条件下未见有融化夹层存在^[57],这说明道路工程的修建仍是导致路基下多年冻土上限下降的主要原因^[35]。孙志忠等^[54]2006-2012 年对青藏铁路安多谷地区区域的观测发现,天然场地下冻土上限的下降速率是 $4 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$,而铁路路基下方冻土上限下降速率达到 $6 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$;有关青藏公路的监测^[39]也发现,不论是低温多年冻土(年平均地温 $\leq -1.5 \text{ }^\circ\text{C}$)还是高温多年冻土(年平均地温 $> -1.5 \text{ }^\circ\text{C}$),路基下多年冻土上限都不同程度下降,高温多年冻土上限下降速率甚至达到 $22.5 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。道路工程路基下方多年冻土上限变化受工程设计影响,特殊的设计,如加高路基^[19]、块碎石边坡路基^[39]可以一定程度上减缓冻土上限下降。输电线路塔基虽然不存在热源,但对多年冻土上限

也有可能产生影响。在青藏直流线路塔基下冻土监测中,个别塔基出现较大的增温现象,上限深度也较深,这可能是地表水渗入塔基回填土中造成的。因此,施工方法不当或不规范都有可能造成对冻土的扰动,施工中移除植被和施工车辆对植被的碾压会造成植被损失,天然保温层被破坏^[30],加上地表开挖排水不当形成积水区,渗入下方多年冻土层,水流携带的热量引起冻土热稳定变化^[58]。距离工程越近,施工扰动越强烈,多年冻土上限深度随之变化,由路基到工程影响带,再到原始地表覆盖区域,冻土上限趋向于不断上升^[53]。因此,工程施工时要注意采取保护措施,移除植被的地表要进行植被快速恢复^[23,59]。

2.3 土壤理化性质变化

土壤的形成是一个复杂的过程,需要多种因素共同参与,同样地,工程对多种因素的干扰都会直接或间接地作用于土壤。多年冻土区线性工程对两侧土壤的影响大致可分为对土壤质地的影响、对土壤养分元素的影响、土壤污染等。线性工程沿线容易出现土壤粗颗粒成分增加、土壤养分流失、一定程度上重金属元素富集等土壤理化性质变化。土壤质地对植物的生长至关重要,土壤质地影响土壤透气性和持水能力,合理的土壤质地构成有利于维持植物养分的供给^[60]。多年冻土区工程干扰会使土壤质地变得粗糙,在青藏工程走廊早期工程取土迹地上,表层土壤成分粒度 $> 0.5 \text{ mm}$ 的砂砾含量显著增加,土壤持水能力下降,土壤退化特征出现。在宏观上,遥感观测发现在工程走廊道路缓冲区 5 km 范围内荒漠化总面积变化最为明显,土地荒漠化总面积与青藏铁路距离呈明显的负相关关系^[61]。工程两侧水土流失引起土壤养分流失,表层土壤的移除导致土壤有机质大量损失,不利于干扰区植被恢复^[13]。高寒草原与高寒草甸生态系统土壤受到干扰后,0 ~ 30 cm 表层土壤有机质含量与土壤总 N 含量显著下降,明显低于未干扰地区,生境条件退化,但高寒草甸有机质和总 N 退化后仍然保持着较高的水平,表层土壤未完全移除的区域土壤的养分状况较好^[34]。受道路灰尘影响,路侧近距离内土壤 pH 值较高,干扰了路侧植物群落^[33]。多年冻土区土壤污染研究主要集中在原油泄漏引起的土壤污染问题,以及道路车辆运营导致的重金属污染。多年冻土区输油管道发生泄漏事故比其他地区更多,这是因为由于冻土的存在使管道面临着差异性融沉和冻胀,进而使管道泄漏的风险大大增加。泄漏的

原油严重抑制了植被的生长发育,并通过减弱地表反照率增加冻土融化,降低土壤的持水能力从而影响多年冻土生态环境^[62]。路侧人为重金属来源主要为路面径流和道路灰尘,汽车尾气、轮胎磨损和道路抛洒是路侧重金属污染的主要方式^[63]。交通源重金属污染具有主要在路侧近距离富集,随着与道路距离增加含量迅速降低的特点^[64]。重金属的富集对路侧生态构成潜在的威胁,在青藏高原的研究发现,许多路段均不同程度地受到 Cd 的生态威胁,路侧重金属 Cu、Zn、Pb 也都产生了不同程度的富集,随着海拔升高,与燃油相关的重金属的排放也越高^[65]。

3 线性工程影响下的植被变化

多年冻土区植被是气候、土壤、水文、地形、人类活动等因素相互作用的结果,线性工程建设对植被的影响有多种途径,直接移除、取土、设置施工便道,以及工程后期对工程扰动区的人工植被恢复等都直接对工程周边植被产生影响;间接地,工程活动作用于生态环境诸要素,通过各要素之间的相互影响最后作用于植被,这种影响持续的时间和影响范围可能远远超过工程本身对植被的改变^[53]。线性工程对植被干扰的研究中最受研究者关注的是对植被群落的研究,从植被种群结构、植物多样性、生物量变化可以了解植物群落动态。

3.1 植被种群结构变化

多年冻土区植被种群结构极易受下覆冻土的影响,植被的生长状况受包气带中的含水量控制,当含水量低于凋萎系数(植物的萎蔫点)时,植物的生长受到抑制。冻土层作为隔水底板,多年冻土上限降低将导致冻结层上水水位降低,地表土壤含水量下降,容易引起植被退化或植被类型变化^[18]。郭正刚等^[66]研究发现,多年冻土退化会引起植被群落物种组成从湿生或中湿生逐渐向中生、中旱生乃至旱生转变,植被类型也会由于水分条件变化由沼泽化草甸向典型草甸、草原化草甸演替。对青藏公路沿线 50 m 范围内的高寒生态系统调查^[18,53]发现,冻土退化使该生态系统中分布最广泛的紫花针茅草原演变为青藏苔草草原和紫花针茅-青藏苔草草原,植被覆盖度显著降低;由湿中生植物组成的优势种属逐渐被中生植物取代。工程活动引发的热融现象也会改变地表微地形,地表积水会淹没植被,热融湖疏干会改变湿地植被群落的演替过程^[29]。在加拿大北部,道路工程对冻土的扰动使

路边土壤水分增加,对高灌木侵入该区域起到了重要的促进作用^[6]。另外,植被生态系统对土壤水分要求不同也会影响植被的自然恢复,在青藏高原,高寒草原生态系统恢复能力强于高寒草甸生态系统,高寒草原生态系统经过恢复期,一些植被群落建群种又重新出现并占据一定优势,在高寒草甸区并未出现^[22]。

土壤化学性质受工程影响容易引起植物种的变化。在阿拉斯加,早期的道路建设为防止冻融会铺设厚层的砾石垫层,这一措施产生了严重的道路周边灰尘干扰,在靠近道路灰尘严重影响的区域内,地表植物种产生了一系列变化,由于灰尘主要来源于砾石垫层,地衣和噬酸的苔藓减少,树生的苔藓消失,能够利用矿物营养的苔藓增加,此外,杜鹃花科植物类群和针叶树种也受到一些影响^[12]。使用碱砾石作为路基材料的道路,通过路面流水和道路灰尘改变了附近土壤的 pH 值,吸引了喜氮的植物侵入工程廊道^[67]。土壤 pH 值有时也会决定工程干扰的作用机制,在土壤呈酸性的苔原区公路,干扰导致的物种组成变化会比土壤为非酸性的苔原物种组成变化大^[33]。随植被群落与工程距离的增加,受到的工程干扰变小,植被更趋于天然群落,种群结构、物种多样性等变化更小^[33]。

3.2 植被物种多样性变化

植被物种多样性是指生境中植物群落及群落间的植物种的丰富度,物种多样性的高低反映了群落或生态系统的稳定性。丰富度指数(出现在样地内的物种总数)、均匀度指数(一个群落或生境中全部种的个体数目的分配情况)和多样性指数(反映群落的复杂程度)常用来测度植被群落的物种多样性。鄢燕等^[68]研究了青藏公路沿线开挖和碾压迹地上形成的 9 个次生草地群落,三个指数都出现了显著的下降,开挖后植被全部被破坏,碾压迹地上表层土壤物理特性变化很大,使土壤养分大量流失,有机质缺失和气候限制了植被恢复。周国英等^[69]按照青藏铁路工程干扰的强弱将植被群落分为 5 个梯度,随干扰强度的减弱,群落物种丰富度和多样性指数增加,重度干扰的植物群落物种丰富度和多样性显著低于其他群落,一种或少数几种植物种占据群落的优势地位,早熟禾在重度干扰的群落中重要值高达 48。 β 多样性用来描述不同生境群落间的物种多样性,不同群落间共有种越少 β 值越大。郭正刚等^[70]研究了原生群落与青藏公路干扰迹地上的次生群落,次生群落的 β 多样性大于原

生群落, 干扰增加了公路周边生境的异质性, 不同群落由于生境的差异共有种较少, 随空间变化物种的替代速率增大。总的来说, 受工程干扰的区域物种多样性较低, 植物群落结构相对简单, 也相对不稳定, 如果干扰停止或辅助以人工恢复手段将有助于群落的正向演替, 若干扰继续下去则有植被全面退化的风险。

3.3 植被生物量变化

植被生物量在一定程度上反映了植被生态系统的生产力。在多年冻土区工程干扰区域, 植被生态系统生产力的恢复有着重要意义, 良好的植被覆盖有利于减少土壤温度年较差, 工程完工后进行植被恢复有利于保护下方的多年冻土, 从而有利于维持工程稳定性。发达的根系可以保持水土, 防止土壤进一步退化。在铁路施工干扰迹地, 干扰产生初期生物量几乎为零, 经过 20 年的自然恢复, 和未干扰样地比较仍有较大差距, 差距在 26.6% ~ 66.4% 之间, 生态系统生产力比干扰初期有较大提高^[34]。陈辉等^[21]计算了因青藏公路和青藏铁路工程永久占地(路基、车站、桥梁等)而损失的各种植被生态系统的生物量。但并不是所有关于工程对生物量的影响的研究都指向生物量的减少, 有的研究者认为工程造成的热干扰使土壤变暖, 热融引起土壤水分增加、有机质的分解速度加快、提高了养分有效性、从而导致初级生产量增加^[11]。除永久占地区域, 受工程干扰的植被生态系统的生物量的变化, 是工程干扰和多种因素共同作用的结果。

4 展望

多年冻土区线性工程对生态环境的影响过程复杂, 生态环境各要素与工程相互作用的机理、过程是未来气候变化情景下冻土工程建设与生态环境和谐发展过程中的重要科学问题。在深入探索寒区工程建设对生态环境作用机理、过程的基础上, 基于现有研究成果, 未来还应积极开展以下几个方面的研究工作:

(1) 加强多年冻土区生态环境与工程相互作用研究。目前, 针对多年冻土区线性工程的生态效应的研究内容十分丰富, 涵盖了冻土环境、土壤、植被、动物、水文、微地形等诸多方面, 但是我国多年冻土区的生态环境研究与其他地区相比还处于较低的水平, 生境与工程相互作用研究则更加缺乏, 相关研究大多还停留在对生态环境单一要素短时间影响的研究。我国青藏高原是低纬度高山高原多年

冻土集中分布的区域, 随着当地经济发展和旅游业发展需求增加, 线性工程的修建也将继续增加, 加强多年冻土区生态环境与工程相互作用研究势在必行。

(2) 促进新技术在多年冻土区环境监测中的应用。现阶段的相关研究主要采用传统的植被调查方法、野外监测和室内试验, 遥感影像、探地雷达等方法也有一定的应用, 但有效的长期监测手段还比较缺乏, 未来应借助无人机技术、微波遥感技术、高通量测序等先进的技术手段, 全面深入探索多年冻土区工程建设影响下植被群落结构和功能、冻土水热过程及其稳定性、土壤微生物群落和功能等变化过程及其响应机理。

(3) 重视多个工程共同影响下的群体效应。随着多年冻土区线性工程密度的增加, 在较小的空间范围内可能有多个工程同时存在, 加上冻土区气候恶劣生态环境恢复能力差, 工程建设密度增大对生态的影响可能急剧增加。所以, 要充分重视多个工程共同影响下的群体效应, 深入研究不同工程密度下的生态环境过程变化。

(4) 科学评估和计算生态环境的承载能力。多年冻土区生态环境独特而脆弱, 促进工程建设与生态环境保护和谐发展是整个社会共同的责任。为了促进区域经济发展和社会进步, 基础设施建设是重中之重, 但是多年冻土区生态环境的承载力是有限的。因此, 在全面深入研究寒区工程建设对生态环境作用过程、机理及其演变的基础上, 将区域作为一个整体, 科学估算其环境承载能力, 用于衡量区域工程建设的环境效应, 进行工程环境容量的安全评估, 进而预测生态环境变化是未来研究的一个新思路。

(5) 认识工程与气候变化的协同作用。气候变化对高纬度和高海拔地区的影响显著大于其他地区, 目前关于多年冻土区气候对生态环境影响的讨论迅速升温, 在工程建设上研究者也逐渐重视气候变化对未来工程稳定的影响, 但工程和气候变化对生态环境的协同作用相关的考虑和研究还比较少。今后的研究应重视气候变化大背景下工程对生态环境影响力的放大作用。

参考文献(References):

- [1] Zhou Youwu, Guo Dongxin, Qiu Guoqing, et al. Geocryology in China[M]. Beijing: Science Press, 2000: 40-46. [周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 40-46.]

- [2] Liu Houjian, Cheng Dongxing, Yu Qihao, et al. Study on permafrost engineering problems and engineering countermeasure of transmission line [J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2009, 37(4): 32–36. [刘厚健, 程东幸, 俞祁浩, 等. 高海拔输电线路的冻土工程问题及对策研究[J]. *工程勘察*, 2009, 37(4): 32–36.]
- [3] Zhang Limin, Xu Dengyuan, Zhang Shouhong. Study on development plan of railway network in two provinces of Qinghai and Tibet [J]. *Chinese Railways*, 2016(6): 32–36. [张立民, 徐登元, 张寿红. 青藏两省区铁路网发展规划研究[J]. *中国铁路*, 2016(6): 32–36.]
- [4] Yang Sizhong, Jin Huijun, Yu Shaopeng, et al. An investigation into the permafrost environment along the Chinese-Russian Oil Pipeline route from Mohe to Daqing [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(2): 358–366. [杨思忠, 金会军, 于少鹏, 等. 中俄输油管道(漠河-大庆段)主要冻土环境问题探析[J]. *冰川冻土*, 2010, 32(2): 358–366.]
- [5] Ma Wei, Niu Fujun, Mu Yanhu. Basic research on the major permafrost projects in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(11): 1185–1191. [马巍, 牛富俊, 穆彦虎. 青藏高原重大冻土工程的基础研究[J]. *地球科学进展*, 2012, 27(11): 1185–1191.]
- [6] Cameron E A. *Ecological impacts of roads in Canada's north* [D]. Victoria, BC, Canada: University of Victoria, 2015.
- [7] Yu Bohua, Lü Changhe. Assessment of ecological vulnerability on the Tibetan Plateau [J]. *Geographical Research*, 2011, 30(12): 2289–2295. [于伯华, 吕昌河. 青藏高原高寒区生态脆弱性评价[J]. *地理研究*, 2011, 30(12): 2289–2295.]
- [8] He Ruixia, Jin Huijun, Hao Jiaqian, et al. Impact assessment of permafrost environments along the China-Russia Crude Oil Pipeline from Mohe to Wu'erqi [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2011, 33(Suppl 2): 128–134. [何瑞霞, 金会军, 郝加前, 等. 中俄输油管道(漠河-乌尔其段)沿线冻土环境影响评价[J]. *土木建筑与环境工程*, 2011, 33(增刊2): 128–134.]
- [9] Wang Chenghai, Jin Shuanglong, Shi Hongxia. Area change of the frozen ground in China in the next 50 years [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(1): 1–8. [王澄海, 靳双龙, 施红霞. 未来 50 a 中国地区冻土面积分布变化[J]. *冰川冻土*, 2014, 36(1): 1–8.]
- [10] Williams T J, Quinton W L, Baltzer J L. Linear disturbances on discontinuous permafrost: implications for thaw-induced changes to land cover and drainage patterns [J]. *Environmental Research Letters*, 2013, 8(2) [2018-01-17]. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/8/2/025006/meta>.
- [11] Truett J C, Kertell K. Tundra disturbance and ecosystem production: implications for impact assessment [J]. *Environmental Management*, 1992, 16(4): 485–494.
- [12] Walker D A, Everett K R. Road dust and its environmental impact on Alaskan taiga and tundra [J]. *Arctic & Alpine Research*, 1987, 19(4): 479–489.
- [13] Walker D A. Disturbance and recovery of Arctic Alaskan vegetation [M] // *Landscape function and disturbance in Arctic tundra*. Berlin: Springer, 1996: 35–71.
- [14] Harper K A, Kershaw G P. Natural revegetation on borrow pits and vehicle tracks in shrub tundra, 48 years following construction of the CANOL No. 1 pipeline, N. W. T., Canada [J]. *Arctic & Alpine Research*, 1996, 28(2): 163–171.
- [15] Yu Q, Epstein H E, Engstrom R, et al. Land cover and land use changes in the oil and gas regions of Northwestern Siberia under changing climatic conditions [J]. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(12) [2018-01-17]. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/10/12/124020?pageTitle=IOP-science>.
- [16] Walker D A, Webber P J, Walker M D, et al. Use of geobotanical maps and automated mapping techniques to examine cumulative impacts in the Prudhoe Bay oilfield, Alaska [J]. *Environmental Conservation*, 1986, 13(2): 149–160.
- [17] Smith S L, Riseborough D W. Modelling the thermal response of permafrost terrain to right-of-way disturbance and climate warming [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2010, 60(1): 92–103.
- [18] Dong Ruikun, Xu Zhaoyi, Yang Chengyong. Study on linear engineering and ecological environment of Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2000, 11(4): 283–286. [董瑞琨, 许兆义, 杨成永. 青藏高原线型工程及其生态环境研究[J]. *地质灾害与环境保护*, 2000, 11(4): 283–286.]
- [19] Wu Qingbai, Shi Bin, Liu Yongzhi. Interaction study of permafrost and highway along Qinghai-Xizang Highway [J]. *Science in China: Series D Earth Sciences*, 2003, 46(2): 97–105. [吴青柏, 施斌, 刘永智. 青藏公路沿线多年冻土与公路相互作用研究[J]. *中国科学: D 辑 地球科学*, 2002, 32(6): 514–520.]
- [20] Wu Qingbai, Zhu Yuanlin, Liu Yongzhi. Evaluating model of frozen soil environment change under engineering actions [J]. *Science in China: Series D Earth Sciences*, 2002, 32(2): 141–148. [吴青柏, 朱元林, 刘永智. 人类工程活动下环境评价模型[J]. *中国科学: D 辑 地球科学*, 2002, 45(10): 893–902.]
- [21] Chen Hui, Li Shuangcheng, Zheng Du. Features of ecosystems alongside Qinghai-Xizang Highway and Railway and the impacts of road construction on them [J]. *Mountain Research*, 2003, 21(5): 559–567. [陈辉, 李双成, 郑度. 青藏公路铁路沿线生态系统特征及道路修建对其影响[J]. *山地学报*, 2003, 21(5): 559–567.]
- [22] Wang Genxu, Wu Qingbai, Wang Yibo, et al. The impacts of railroad engineering on the alpine grassland ecosystem in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Science & Technology Review*, 2005, 23(1): 8–13. [王根绪, 吴青柏, 王一博, 等. 青藏铁路工程对高寒草地生态系统的影响[J]. *科技导报*, 2005, 23(1): 8–13.]
- [23] Yu Qihao, Liu Houjian, Qian Jin, et al. Research on frozen engineering of Qinghai-Tibet 500 kV DC power transmission line [J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2009, 6(6): 806–812. [俞祁浩, 刘厚健, 钱进, 等. 青藏直流联网工程±500 kV 输电线路的工程问题分析[J]. *工程地球物理学报*, 2009, 6(6): 806–812.]
- [24] Zhang Yili, Yan Jianzhong, Liu Linshan, et al. Impact of Qinghai-Xizang Highway on land use and landscape pattern change: from Golmud to Tanggulahshan pass [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(3): 253–266. [张懿理, 阎建忠, 刘林山, 等. 青藏公路对区域土地利用和景观格局的影响: 以格尔木至唐古拉山段为例[J]. *地理学报*, 2002, 57(3): 253–266.]
- [25] Wang Xiaodan, Chen Binru, Gao Pan, et al. Changes of land use and landscape patterns of the Gongga Mountain area on the eastern edge of Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2005, 27(3): 40–45. [王小丹, 陈斌如, 高攀, 等. 青藏高原东缘贡嘎山地区土地利用与景观格局演变[J]. *北京林业大学学报*, 2005, 27(3): 40–45.]

- [26] Ma Hui, Liu Jiankun, Zhang Mi, et al. Frozen soil problems in Qinghai-Tibet Railway construction and engineering measures [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006, 39(2): 85-92. [马辉, 刘建坤, 张弥, 等. 青藏铁路建设中的冻土工程问题及其应对措施[J]. *土木工程学报*, 2006, 39(2): 85-92.]
- [27] Wang Jianliang, Niu Huaijun, Yang Yongpeng, et al. Study of the engineering geological problems in permafrost region along China-Russia Oil Pipeline and prevention countermeasures [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2009, 26(11): 5-9. [王剑亮, 牛怀俊, 杨永鹏, 等. 中俄输油管道沿线多年冻土工程地质问题及防治对策[J]. *铁道工程学报*, 2009, 26(11): 5-9.]
- [28] He Ruixia, Jin Huijun, Lü Lanzhi, et al. Permafrost and environmental problems along the Golmud-Lhasa Oil Product Pipeline and their mitigation [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(1): 18-27. [何瑞霞, 金会军, 吕兰芝, 等. 格尔木-拉萨成品油管道沿线冻土工程和环境问题及其防治对策[J]. *冰川冻土*, 2010, 32(1): 18-27.]
- [29] Walker D A, Webber P J, Binnian E F, et al. Cumulative impacts of oil fields on northern Alaskan landscapes [J]. *Science*, 1987, 238(4828): 757-761.
- [30] Ferrians O J, Kachadoorian R, Greene G W. Permafrost and related engineering problems in Alaska [R]. Washington, D. C.: Library of Congress, 1969: 41.
- [31] Woo M K, Winter T C. The role of permafrost and seasonal frost in the hydrology of northern wetlands in North America [J]. *Journal of Hydrology*, 1993, 141(1): 5-31.
- [32] Braverman M. Impact of linear disturbances on a discontinuous permafrost peatland environment [D]. Waterloo, Ontario, Canada: Wilfrid Laurier University, 2017.
- [33] Auerbach N A, Walker M D, Walker D A. Effects of roadside disturbance on substrate and vegetation properties in arctic tundra [J]. *Ecological Applications*, 1997, 7(1): 218-235.
- [34] Wang Genxu, Yao Jinzhong, Guo Zhenggang, et al. The permafrost ecosystem changes under engineering activity and its of railway construction [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(15): 1556-1564. [王根绪, 姚进忠, 郭正刚, 等. 人类工程活动影响下冻土生态系统的变化及其对铁路建设的启示[J]. *科学通报*, 2004, 49(15): 1556-1564.]
- [35] Wu Qingbai, Shen Yongping, Shi Bin. Relationship between frozen soil together with its water-heat process and ecological environment in the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(3): 250-255. [吴青柏, 沈永平, 施斌. 青藏高原冻土及水热过程与寒区生态环境的关系[J]. *冰川冻土*, 2003, 25(3): 250-255.]
- [36] Lu Zijian, Wu Qingbai, Sheng Yu, et al. Heat and water difference of active layers beneath different surface conditions near Beiluhe in Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(5): 642-647. [陆子健, 吴青柏, 盛煜, 等. 青藏高原北麓河附近不同地表覆被下活动层的水热差异研究[J]. *冰川冻土*, 2006, 28(5): 642-647.]
- [37] Yuan Sicheng, Zhang Luxin, Han Limin, et al. Influences of environmental conditions on construction safety reliability of Qinghai-Tibet Railway in permafrost region [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2006, 14(4): 433-437. [原思成, 张鲁新, 韩利民, 等. 青藏铁路冻土区环境问题对工程安全可靠性影响[J]. *工程地质学报*, 2006, 14(4): 433-437.]
- [38] Wang Junfeng, Wu Qingbai. Influences of the vegetation degradation on the shallow cryic soil environment in the wet meadow areas on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2011, 47(6): 39-45. [王俊峰, 吴青柏. 青藏高原沼泽草甸区植被退化对浅层寒冻土壤环境的影响[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2011, 47(6): 39-45.]
- [39] Wu Qingbai, Niu Fujun. Permafrost changes and engineering stability in Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(10): 1079-1094. [吴青柏, 牛富俊. 青藏高原多年冻土变化与工程稳定性[J]. *科学通报*, 2013, 58(2): 115-130.]
- [40] Zhang Minli, Wen Zhi, Xue Ke. Soil moisture-heat migration characteristics within the permafrost active layer in Beiluhe [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(9): 176-181. [张明礼, 温智, 薛珂. 北麓河多年冻土活动层水热迁移规律分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(9): 176-181.]
- [41] Sheng Yu, Ma Wei, Wen Zhi, et al. Analysis of difference in thermal state between south faced slope and north faced slope of railway embankment in permafrost region [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(17): 3197-3201. [盛煜, 马巍, 温智, 等. 多年冻土区铁路路基阴阳坡面热状况差异分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(17): 3197-3201.]
- [42] Jin Huijun, Yu Wenbing, Chen Youchang, et al. (Differential) frost heave and thaw settlement in the engineering design and construction of oil pipeline in permafrost regions: a review [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(3): 454-464. [金会军, 喻文兵, 陈友昌, 等. 多年冻土区输油管道工程中的(差异性)融沉和冻胀问题[J]. *冰川冻土*, 2005, 27(3): 454-464.]
- [43] He Shusheng, Yu Wenbing, Chen Wenguo, et al. Non-linear analysis of temperature fields around the buried oil-pipeline in permafrost regions, Northeast China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(2): 287-295. [何树生, 喻文兵, 陈文国, 等. 东北多年冻土区埋地输油管道周围温度场特征非线性分析[J]. *冰川冻土*, 2008, 30(2): 287-295.]
- [44] Zheng Ping. Numerical simulation for couplings of water, temperature and stress fields of underground oil pipeline in cold region [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2011. [郑平. 冻土区埋地管道周围土壤水热耦合作用的数值模拟[D]. 北京: 中国石油大学, 2011.]
- [45] Yu Shaoshui, Pan Weidong, Shi Conghui, et al. Investigation and mechanism analysis of the major secondary harmful frozen soil phenomena along Qinghai-Tibetan Railway [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(6): 1082-1085. [余绍水, 潘卫东, 史聪慧, 等. 青藏铁路沿线主要次生不良冻土现象的调查和机理分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(6): 1082-1085.]
- [46] Yi Xin, Hu Da, Yu Wenbing, et al. Study on the temperature boundary of embankment and its calculation model of the Qinghai-Tibet Highway in permafrost area [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(2): 336-342. [易鑫, 胡达, 喻文兵, 等. 多年冻土区青藏公路路基边界温度及计算模型研究[J]. *冰川冻土*, 2017, 39(2): 336-342.]
- [47] Chen Zhong. Integrated orderly classification and remote sensed monitoring of natural grassland on Tibetan Plateau [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2010. [陈钟. 青藏高原天然草地综合顺序分类与遥感监测研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2010.]
- [48] Mao Liang. Response of natural restoration of land used for roadbed construction to areas in the alpine steppe of the Qinghai-Tibet

- Plateau[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014. [毛亮. 青藏高原高寒草原区路基取土迹地自然恢复的面积效应[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.]
- [49] Yang Meixue, Yao Tandong, He Yuanqing. The role of soil moisture-energy distribution and thawing-freezing processes on seasonal shift in Tibetan Plateau[J]. *Journal of Mountain Science*, 2002, 20(5): 553–558. [杨梅学, 姚檀栋, 何元庆. 青藏高原土壤水热分布特征及冻融过程在季节转换中的作用[J]. *山地学报*, 2002, 20(5): 553–558.]
- [50] Wang Shaoling, Mi Haizhen. The change of permafrost under roadbed with asphalt pavement along the Qinghai-Tibet Highway[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1993, 15(4): 566–573. [王绍令, 米海珍. 青藏公路铺筑沥青路面后路基下多年冻土的变化[J]. *冰川冻土*, 1993, 15(4): 566–573.]
- [51] Liu Guangsheng, Wang Genxu, Hu Hongchang, et al. Influence of vegetation coverage variation on water and heat process of the active layers in permafrost region of Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(1): 89–95. [刘光生, 王根绪, 胡宏昌, 等. 青藏高原多年冻土区植被盖度变化对活动层水热过程的影响[J]. *冰川冻土*, 2009, 31(1): 89–95.]
- [52] Qiu Guoqing, Liu Jingren, Liu Hongxu. *Geocryological glossary* [M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1994: 72. [邱国庆, 刘经仁, 刘鸿绪. *冻土学辞典*[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1994: 72.]
- [53] Wang Yibo, Wang Genxu, Chang Juan. Impacts of human activity on permafrost environment of the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(5): 523–527. [王一博, 王根绪, 常娟. 人类活动对青藏高原冻土环境的影响[J]. *冰川冻土*, 2004, 26(5): 523–527.]
- [54] Sun Zhizhong, Wu Guilong, Yun Hanbo, et al. Permafrost degradation under an embankment of the Qinghai-Tibet Railway in the southern limit of permafrost[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(4): 767–771. [孙志忠, 武贵龙, 袁汉伯, 等. 多年冻土南界附近青藏铁路路基下的冻土退化[J]. *冰川冻土*, 2014, 36(4): 767–771.]
- [55] Wu Qingbai, Tong Changjiang. Problem of permafrost change and stability of Qinghai-Tibet Road[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1995, 17(4): 350–355. [吴青柏, 童长江. 冻土变化与青藏公路的稳定性问题[J]. *冰川冻土*, 1995, 17(4): 350–355.]
- [56] Xu Xiaoming, Wu Qingbai, Zhang Zhongqiong. Responses of active layer thickness on the Qinghai-Tibet Plateau to climate change[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(1): 1–8. [徐晓明, 吴青柏, 张中琼. 青藏高原多年冻土活动层厚度对气候变化的响应[J]. *冰川冻土*, 2017, 39(1): 1–8.]
- [57] Wang Shuangjie, Zhang Jinzhao, Lu Xun, et al. Analysis of permafrost distribution and its influencing factors along the Qinghai-Tibet Highway[C]// *Symposium on Road Engineering Academic Communication 2004*. Beijing: China Communications Press, 2004: 133–139. [汪双杰, 章金钊, 路勋, 等. 青藏公路沿线多年冻土分布及影响因素分析[C]//2004年道路工程学术交流会论文集. 北京: 人民交通出版社, 2004: 133–139.]
- [58] Yin Guo'an, Niu Fujun, Lin Zhanju, et al. The distribution characteristics of permafrost along Qinghai-Tibet Railway and their response to environment change[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(4): 772–781. [尹国安, 牛富俊, 林战举, 等. 青藏铁路沿线多年冻土分布特征及其对环境变化的响应[J]. *冰川冻土*, 2014, 36(4): 772–781.]
- [59] Chen Yonggui, Luobu Ciren, Ciren Nima. Environmental protection method for power transmission line construction in high-altitude alpine regions[J]. *Electric Power Construction*, 2012, 33(5): 97–101. [陈永贵, 罗布次仁, 次仁尼玛. 高海拔高寒地区输电线线路施工环保措施[J]. *电力建设*, 2012, 33(5): 97–101.]
- [60] Densmore R V. Succession on regraded placer mine spoil in Alaska, U. S. A., in relation to initial site characteristics[J]. *Arctic and Alpine Research*, 1994, 26(4): 354–363.
- [61] Lu Tao. Research on extraction of desertification and sand source area along Qinghai-Tibet Engineering Corridor and analysis[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2014. [卢涛. 青藏工程走廊沿线土地荒漠化信息提取及分析[D]. 北京: 中国地质大学, 2014.]
- [62] Yang Sizhong, Jin Huijun, Ji Yanjun, et al. Advances in contamination of spilled oils in cold regions and their cleanup techniques[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(3): 501–507. [杨思忠, 金会军, 吉延峻, 等. 冻土区石油污染物迁移及清除研究进展[J]. *冰川冻土*, 2008, 30(3): 501–507.]
- [63] Lin Hai. Study on soil heavy metal pollution and migration process on both sides of highway[D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2014. [林海. 公路两侧土壤重金属污染状况及迁移过程研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2014.]
- [64] Gao Dan. Study on distribution patterns of heavy metals concentrations in roadside soils and plants in Qinghai-Tibet Plateau[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013. [高丹. 青藏高原路侧土壤及植物的重金属含量分布特征与规律研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.]
- [65] Wang Guanxing, Yan Xuedong, Zhang Fan, et al. Influencing factors of heavy metal concentration in roadside-soil of Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(2): 431–438. [王冠星, 闫晓东, 张凡, 等. 青藏高原路侧土壤重金属含量分布规律及影响因素研究[J]. *环境科学学报*, 2014, 34(2): 431–438.]
- [66] Guo Zhenggang, Niu Fujun, Zhan Hu, et al. Changes of grassland ecosystem due to degradation of permafrost frozen soil in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(8): 3294–3301. [郭正刚, 牛富俊, 湛虎, 等. 青藏高原北部多年冻土退化过程中生态系统的变化特征[J]. *生态学报*, 2007, 27(8): 3294–3301.]
- [67] Müllerová J, Vítková M, Vítek O. The impacts of road and walking trails upon adjacent vegetation: effects of road building materials on species composition in a nutrient poor environment[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, 409(19): 3839–3849.
- [68] Yan Yan, Zhang Jinhua, Zhang Jianguo. A research on the secondary community character and the ecosystem rehabilitation of the alpine meadows along the Qinghai-Tibet Highway[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2006, 14(2): 156–159. [鄢燕, 张锦华, 张建国. 青藏公路沿线高寒草甸次生群落特征及生态修复[J]. *草地学报*, 2006, 14(2): 156–159.]
- [69] Zhou Guoying, Chen Guichen, Chen Zhiguo, et al. Response of the characteristics of alpine meadow plant community to disturbance gradient of human along Qinghai-Tibet Railway: a case study in the alpine meadow in Fenghuoshan area[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(2): 240–248. [周国英, 陈桂琛, 陈志国, 等. 青藏铁路沿线高寒草甸植物群落特征对人为干扰梯度的响应: 以凤火山高山嵩草草甸为例[J]. *冰川冻土*, 2006, 28(2): 240–248.]

[70] Guo Zhenggang, Liu Huixia, Wang Genxu, et al. Effect of the Qinghai-Tibetan Highway on the β diversity of grassland plant communities in the northern region of the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(2): 384-388. [郭

正刚, 刘慧霞, 王根绪, 等. 人类工程对青藏高原北部草地群落 β 多样性的影响[J]. *生态学报*, 2004, 24(2): 384-388.]

The linear engineering impact on the eco-environment in permafrost regions: research status and prospect

LIU Yali^{1,2}, WANG Junfeng^{1,3}, WU Qingbai¹

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Beiluhe Observation Station of Frozen Soil Engineering and Environment, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In permafrost regions, the construction and operation of linear engineering (roads, railways, pipelines, power line and so on) significantly affect the permafrost thermal state, the soil physicochemical properties, the hydrological processes and land surface processes along the linear engineering, further visibly change the ecological environment and have a significant impact on the stability of frozen soil engineering. Study on the change of ecological environment under the action of permafrost engineering is one of the research foci of permafrost in recent years. Through literature review, the main characteristics of linear engineering as well as the permafrost environment and vegetation change due to frozen soil engineering are summarized, and the main ecological problems due to the engineering construction in permafrost regions are discussed, including associated research progress and present situation. At present, there are many studies about the feedback of ecological environment to engineering. However, the corresponding mechanisms and processes of interrelation between the elements of the ecological environment and the engineering are still unclear. In the future research, effective testing methods should be developed to provide services for the ecological environment monitoring and research in the permafrost regions. Based on clarification of the mechanisms and processes of engineering acting on the ecological environment in cold regions, evaluation on the environmental capacity threshold and prediction on the eco-environment-changes should be carried out further, which will be helpful for providing theoretical support and countermeasures in harmoniously developing the large-scale engineering and ecological environment constructions.

Key words: permafrost regions; linear engineering; ecological environment; research status; prospect

(本文编辑: 武俊杰)