

青藏铁路工程对高寒草地生态系统的影响

王根绪 吴青柏 王一博 郭正刚

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 兰州 730000)

[摘要] 分析了青藏铁路冻土区段高寒生态系统主要分布类型及其变化背景,利用对青藏公路工程的类比调查数据,研究了不同高寒生态系统对工程扰动的抗干扰能力和受损后的自然恢复能力,以及不同生态系统与冻土环境的相互关系。综合考虑干扰场地土壤环境、冻土条件以及不同生态系统对干扰的抵抗与恢复能力等要素,提出了评价青藏铁路对生态环境影响的综合干扰度方法和定量评价模型,基于未来不同气候演变情境及其与人类工程活动耦合下冻土环境变化及其对高寒生态系统的影响;结合青藏铁路施工方案,定量评价了青藏铁路工程对高寒生态系统的可能影响。结果表明:大部分严重干扰施工地带对高寒草甸草地只有中等程度影响,影响区高寒草地植被覆盖度将维持在 50%以上,高寒草原区严重工程扰动地带除了局部有明显影响外,大部分地区只有中等至轻度影响;而中度与轻度工程扰动区域,工程对高寒生态系统的影响轻微。

[关键词] 青藏铁路 高寒生态系统 冻土环境 干扰程度 影响评价 **[中图分类号]** U21 Q143

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2005)01-0008-06

THE IMPACTS OF RAILROAD ENGINEERING ON THE ALPINE GRASSLAND ECOSYSTEM IN THE QINGHAI-TIBET PLATEAU

WANG Gen-xu WU Qing-bo WANG Yi-bo GUO Zheng-gang

(State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and
Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China;)

Abstract: The distribution characteristics and regional changing background of alpine cold ecosystem along the railroad, where the permafrost was located, are analyzed. Based on the comparison of the variation laws of the ecosystem along the Qinghai-Tibet highway line and the relationship between permafrost environment and various alpine ecosystem, the integrative disturbed degree index method and its quantitative assessment model, which comprised with the factors of engineering disturbed soil environmental change, permafrost condition change and the restoration degree and anti-disturbing capacity of the various alpine cold ecosystem, are put forward and used to estimate the impacts of railroad engineering on the alpine cold ecosystem in Tibetan plateau. According to the climate change scene in future 50 years and the construction measures of the Qinghai-Tibet railroad, the impacts estimating results show that the most serious disturbing construction actions have a middle degree of influence on ecosystem with maintaining the disturbed grassland coverage over 50%. Meanwhile, the influence on alpine steppe ecosystem will be in middle and light degree. For the middle and light disturbing construction actions, there will be slight influence on alpine ecosystems.

Key Worlds: Qinghai-Tibet Railroad, alpine cold ecosystem, permafrost environment, disturbing degree, impacts estimation.

CLC Numbers: U21 Q143

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2005)01-0008-06

收稿日期: 2004-10-25。

基金项目: 国家自然科学基金项目(30270255), 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-SX-04)。

作者简介: 王根绪,男,1965~,兰州市东岗西路260号中科院寒区旱区环境与工程研究所研究员,主要从事冻土工程与环境研究;
E-mail: qbwu@ns.lab.ac.cn。

[33] Lai Y M, Li J J, Niu F J, Yu W B. Nonlinear thermal analysis for Qinghai-Tibet Railway embankment in cold regions [J]. Journal Cold Regions Engineering, 2003,17(4): 171~184

[34] Jiang F, Liu S, Wang H G, Chen H Z. Numerical analysis of thermal conduction and convection in crushed rock embankment on permafrost [J]. Science in China (Series D) 33 (Special Issue), 2003: 133~144

[35] Goodrich L E, Some results of numerical study of ground thermal regime [A]. Proceedings 3rd International Conference on

Permafrost, Vol.1 [C]. Ottawa, National Research Council, 1978. 29~34

[36] Kudryavtsev V A, Garagula L S, Kondratyev V G. Foundation of Geocryology [M]. Moscow: Moscow State University Press, 1974. 211~214

[37] Smith M W, Riseborough D W. Climate and the limit of permafrost: A zonal analysis [J]. Permafrost and Periglacial Processes 2002, 13(1): 1~15

(责任编辑 王宏章)

生态系统是区域生态环境最基本的单元,生态系统组织结构与服务功能的改变将导致区域生态环境的深刻变化^[1],因此,区域生态环境保护与受损生态环境恢复的核心是区域生态系统稳定与健康的维护^[2]。青藏高原独特而又脆弱的高寒生态系统,由于冻土环境的极度敏感性,对任何自然的和人为的扰动都具有显著的响应^[3,4]。在很长时期内,一个普遍的认识是:高寒区脆弱的冻土生态系统一旦遭受严重破坏后,几乎不可能再恢复^[4,5,6]这已成为高原大型工程建设的最大障碍,也是青藏铁路建设中广受关注的核心问题之一。

研究工程活动下冻土生态环境的变化,涉及人类工程活动扰动后冻土生态系统的演变特征的认识以及在严酷的冻土环境和全球变化耦合作用下的可恢复性评价,应关注两个方面:(1)铁路工程活动本身对高原生态系统所产生的影响;(2)全球变化与工程活动耦合的双重作用下高原生态系统的可能演变趋势。生态系统所处的状态可由两方面来表征^[7]:一是生物方面的,包括生态系统结构、群落种类、生物多样性以及生物生产力等生态要素;二是生物生境条件如气候、土壤环境、冻土环境等,人类工程活动对生态系统的影响结果就是这两方面要素对工程扰动响应的综合。

1 青藏铁路沿线主要生态系统的类型、区域和背景

新建青藏铁路格尔木至拉萨段全长 1 138km,跨越了青藏高原几乎所有的高寒生态系统类型,主要有高寒荒漠、高寒草甸、高寒草原、高寒灌丛草甸以及高寒沼泽草甸等。本项目研究区段为 550km 多年冻土区,由于该区域对于气候与人类活动扰动异常敏感的冻土环境以及严酷的高原寒冷干旱的气候条件,人们普遍认为该区域生态系统不仅对任何干扰都极其脆弱,而且扰动后几乎没有自然恢复能力,因此,该区段最为人们所关注。

研究区段内与工程活动有关的自然生态系统主要划分为高寒草原生态系统、高寒草甸生态系统、高寒沼泽湿地生态系统三大类型^[7,8]。在各类型分布区,根据主要优势植物组成种的不同,又进一步划分为不同亚类。其中高寒草原生态系统是由耐寒的多年生旱生草本植物或小灌木为主要植物种群所形成的高寒植被为基础的生态系统,主要分布于青藏公路沿线的昆仑山至沱沱河一带海拔 4 100~5 100m 的地区,是研究区域内分布最广、面积最大的生态系统类型;根据建群植物种的不同,又可分为紫花针茅(*Stipa purpurea*)高寒草原、青藏苔草(*Carex moorcroftii*)草原、扇穗茅(*Littledalea racemosa*)高寒草原等。高寒草甸生态系统是以耐寒的多年生草本植物组成的植被群落为基础,具有适中水分条件的生态系统,是青藏公路及建设中的青藏铁路沿线最重要的生态体系,主要有高山嵩草(*Kobresia pygmaea*)草甸、矮嵩草(*Kobresia humilis*)草甸、藏嵩草(*Kobresia tibetica*)草甸以及杂类草草甸等类型,分布于研究区段的五道梁、风火山、北麓河、开心岭以及雁石坪至唐古拉山和唐古拉山以南至安多一带的山地、宽谷阶地以及浑圆山丘,多呈片状或带状分布。沼泽湿地生态系统

由耐寒多年生湿生或湿中生草本植物建群的在地表积水或土壤过湿状态下形成的生态体系,在研究区段主要分布于风火山、开心岭以及唐古拉山以南一带。研究区段现有种子植物 45 科 163 属 433 种。就植物种类数量而言,比可可西里地区要丰富得多,但作为唐古特植物区系的一个组成部分,则属于种类相对贫乏地区^[9,10]。研究区段内在高寒草原生态系统区域的铁路长度约占总长的 39.1%,高寒草甸区长度约占 50.4%,高寒沼泽湿地地区约为 10.5%。

高寒生态系统的变化主要受 3 个方面的因素制约,即自然气候条件、冻土环境和人类活动。该区域人类经济活动对区域性生态系统的影响主要是畜牧业经济活动。调查结果显示^[10],放牧对区域草地生态的影响有限。然而,该区域气候变化十分显著,突出表现在气温从上世纪 50 年代以来持续升高,近 40 年来平均增温 0.44℃,与整个青藏高原平均增温 0.45℃一致,局部地区高达 0.55℃以上;但与此同时,80 年代中期以来降水量出现持续减少态势^[11,12]。冻土环境对气候变化异常敏感,气温持续升高无疑对冻土环境产生了显著影响,同时人类活动,尤其是不适当的人类工程活动亦对冻土环境具有较大影响^[3,9],因此,区域生态系统的上述变化背景,是气候及其与人类工程活动耦合作用下的冻土环境因素变化的共同作用;要正确评价人类工程活动对高寒生态系统的影响,就必须了解高寒生态系统与冻土环境的相互关系。

2 主要高寒生态系统与冻土环境的关系及其意义

由于冻土工程不可避免地造成冻土环境发生一定程度变化,而冻土环境变化可能对依赖其生存的冻土生态系统产生区域性的影响,因此,要客观评价青藏铁路对高寒生态系统的影响,需要认识冻土环境与高寒生态系统间的相互关系。

2.1 冻土上限深度与植被覆盖度的关系

利用大量经过多种物理勘探手段获取的数据,对冻土要素与植被群落覆盖度相关性的统计分析结果表明,冻土上限深度与高寒植被覆盖度之间的关系,存在明显的不同生态系统间的差异,如图 1 所示。高寒草甸生态系统的覆盖度与冻土上限之间具有较好的统计相关性,随冻土上限深度增加,高寒草甸草地的覆盖度显著减小,两者之间具有近似的抛物线方程关系,由于两者间的关系还受地貌、土壤、冻土层岩性以及气候条件的制约,因此可以认为两者之间的这一统计相关程度已经反映了其相互依赖的较高密切程度。对于高寒草甸生态系统(包括高寒沼泽湿地生态),覆盖度低于 50%就可认为出现了中等程度退化;覆盖度低于

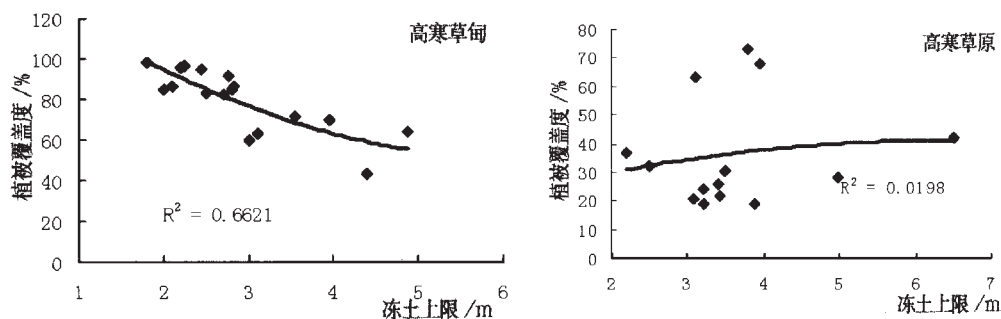


图 1 不同高寒生态系统覆盖度与冻土上限的相互关系

30%, 则可认为出现了严重退化并演变为黑土滩地或草原化。依据高寒草甸覆盖度与冻土上限深度间的关系, 当冻土环境出现退化, 上限深度在地表 3.5m 以下, 高寒草甸草地将可能出现中度退化; 冻土上限深度在 4.5m 以下, 高寒草甸草地将可能出现严重退化, 逐渐成为黑土滩地或草原化。但对于高寒草原生态系统, 草地覆盖度与冻土上限之间的相互关系不明显(图 1), 两者之间不具有任何统计意义上的相关性, 反映出高寒草原生态系统的分布和变化与冻土环境变化的关系不密切。这就从一个侧面说明了高寒草甸生态系统为何对于区域气候变化更加敏感且退化剧烈, 以及高寒草原相对稳定的原因。

2.2 其它冻土要素与生态系统间的关系

由于冻土上限实际上是冻结层上地下水的隔水底板, 因此冻结层上地下水埋深大小, 与冻土上限之间就具有十分明显的相互依赖关系(图 2); 尽管受到诸如地貌、含水层岩层结构与分布特性等的影响, 但随冻土上限升高, 冻结层上地下水埋深随之变浅, 尤其是当冻土上限深度在 3.0m 以上时。这种情况主要发生在高寒草甸生态系统分布区, 地下水位埋深随冻土上限抬升而变浅的幅度更加显著, 而充足的水分条件对于维护高寒草甸生态系统的稳定十分重要, 这就不难理解高寒草甸生态系统更加密切依赖冻土上限深度的原因。尽管高寒草原植被覆盖度与冻土上限之间没有明显的关系, 但较高的地下水位显然对于维持高寒草原草地良好的生态功能具有重要作用。

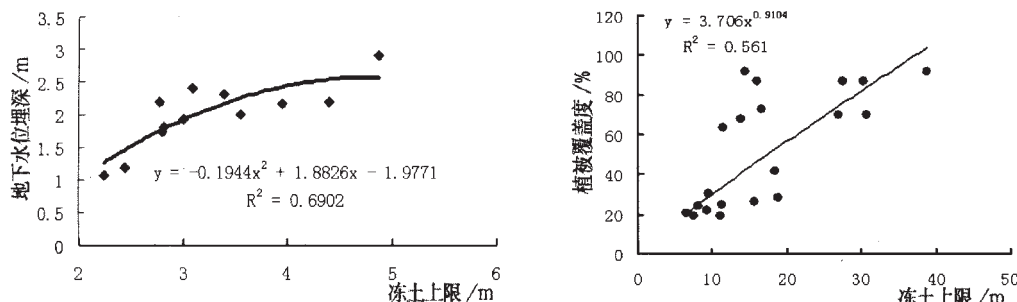


图 2 冻土上限与冻结层上地下水、冻土厚度与植被覆盖度之间的相互关系

冻土厚度与植被覆盖度之间具有较好的相关性, 呈指数函数关系, 表明冻土厚度越大, 地表植被覆盖度将近似呈指数形式增加。具有较高植被覆盖的高寒草甸与高寒沼泽草甸区域一般具有较大厚度的冻土分布。受外界干扰引起的冻土退化, 一个主要的表现形式就是冻土厚度变薄, 因此伴随冻土厚度减小, 草地植被将出现退化。这种关系与冻土上限是一致的, 一般较大厚度冻土的上限深度较浅, 对于高寒草原生态而言, 这种关系意味着具有较大厚度冻土分布的地区更加有利于维持气候变化的稳定性。

冻土环境在很大程度上影响高寒草甸与高寒沼泽草甸生态系统的分布与变化, 冻土退化将直接导致高寒草甸与高寒沼泽草甸生态出现显著退化, 而冻土环境变化对于高寒草原生态系统的影响不大。

3 青藏公路工程对生态系统的影响及其恢复状况的启示

基于上述区域生态系统背景以及冻土环境与高寒生态系统的相互关系, 可以分析区域内不同生态系统对人类工程活动的响应特征及其与气候变化耦合下的变化趋势。在上世纪 70 年代修建并投入运行的青藏公路为此提供了进

行类比研究的场所。应从生态系统结构、群落种类、生物多样性等生态要素和生物生境条件如土壤环境、冻土环境等几方面出发, 综合研究工程活动下高寒生态系统的演化特征及其可恢复性。

3.1 主要生态系统生物特性变化

在公路建设施工干扰地带, 经过近 30 年的自然恢复, 在原来施工期遭受严重破坏的基础上 (可以认为系统的生物部分为零) 各类受损生态系统发生了较大变化。高寒草原生态系统中, 分布范围最大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, 植被覆盖度从未干扰的 30%~60% 下降为 4%~6%; 扇穗茅草原和青藏苔草草原演变为碱茅草原, 植被覆盖度从未干扰的 18%~26% 下降为 3%~5%。一些主要的优势和伴生植物物种也发生了变化, 但在大部分干扰地带, 高寒草原的建群植物种类如青藏苔草、紫花针茅以及扇穗茅等已出现并占据一定优势。

高寒草甸生态系统的变化最为剧烈。与自然状态的高寒草甸比较, 人类工程干扰后 20 余年, 受损高寒草甸生态系统无论从植物群落类型、组成物种还是植被覆盖度方面都相差甚远: 分布较广的高山嵩草草甸演变为早熟禾(*Poa indattenuata*) + 扇穗茅草原、垂穗披肩草(*Elymus nutans*) 草原化草甸等类型, 原有优势物种如高山嵩草尚未出现, 作为先锋种的早熟禾成为优势种或主要伴生种, 群落覆盖度仅有 4%~10%, 相距原有植被覆盖度 58%~84% 的差值较大; 典型的矮嵩草草甸和藏嵩草沼泽草甸演变为以早熟禾为优势种

的草原化草甸, 大量先锋物种侵入, 组成覆盖度达到 25%~40% 的恢复性植被群落, 虽然未见原有优势物种出现, 但展现出较好的有利于植被恢复的水分条件。

如果认为在公路施工完成并投入运行的 20 世纪 70 年代, 工程严重扰动区域生物物种多样性为零 (全铲除), 在经过人类工程干扰后 30 余年的自然恢复, 绝大部分高寒草原地带生物物种多样性均不同程度地显著提高, Shannon-Weiner 指数一般在 0.4 以上, 有些地带如清水河、乌鲁盆地等, 强度干扰迹地的生物多样性高于未干扰地带的自然紫花针茅草原(表 1); 受损高寒草甸生态系统经过自然恢复, 风火山地区工程干扰迹地生物物种多样性提高了 20%, 温泉一带提高了 28%, 在五道梁以及开心岭一带分别提高了 67% 和 51%; 但在物种平均多度方面, 干扰迹地与自然生态系统之间相差 61.5%~83.2%, 虽有一定恢复但与原有状况的差距还较大。因此, 从生物物种多样性恢复程度来看, 高寒草原生态系统在人类工程干扰受损后生物物种多样性的恢复程度高, 在 30 年后局部地带生物物种多样性与分布密度已恢复到高于自然未

表 1 典型高寒生态系统生物多样性指数及其变化

指数	昆仑山南坡		清水河		乌鲁		不冻泉	
	未干扰	干扰迹地	未干扰	干扰迹地	未干扰	干扰迹地	未干扰	干扰迹地
H	1.22	0.61	1.23	1.24	0.60	0.71	1.78	0.59
指数	五道梁		风火山		温泉		开心岭	
	未干扰	干扰迹地	未干扰	干扰迹地	未干扰	干扰迹地	未干扰	干扰迹地
H	1.55	1.03	1.91	0.38	1.49	0.42	2.11	1.06

干扰草原系统;当然其中大部分恢复物种属于非顶级的不稳定或过渡性物种类型。与高寒草原生态系统相比,高寒草甸生态系统干扰迹地生物多样性的恢复程度较低。

3.2 生态系统的生境条件——土壤环境变化

高寒草原生态系统的土壤为青藏高原典型地带性寒性干旱土

(Cryic Aridisols),土壤母质多为冲洪积物、湖积物、冰水沉积物和坡积残积物等。自然状态下该类土壤由于成土过程微弱而土质粗糙疏松,当工程扰动后,表层 20cm 深度范围内粒度 > 0.5mm 的粗砂及砾石含量显著增加。在调查的大部分样带上(如昆仑山南坡、清水河、66 道班、楚玛尔河以及乌鲁等地),与未干扰寒性干旱土壤相比粗砂及砾石含量平均增加 23.6%以上,个别地带可超出 16 倍;但细粒物质(粒度小于 0.05 mm)含量在工程扰动前后没有明显变化规律。高寒草甸生态系统土壤为典型地带性寒冻锥形土(Gelic Cambosols),质地以轻壤为主,在大部分地区(如可可西里、五道梁、风火山等地)表层 20cm 深度内粒度 > 0.5mm 的粗砂及砾石含量较少,工程扰动后有所增加,但幅度不大,含量在 0.25%~0.90%之间;在工程扰动前后寒冻锥形土壤表层细粒物质也没有明显变化规律。上述分析结果说明,无论高寒草原还是高寒草甸,其土壤表层结构在工程扰动前后的显著变化是粗砂化,粗砂及砾石含量显著增加。分析粒度介于 0.1~0.05mm 之间的物质组成变化,可以发现(见表 2),无论高寒草原还是高寒草甸,在受到工程干扰后其表层土壤中的细砂及粗粉砂类物质含量均不同程度减少,递减幅度在 1.8%~40.1%左右,其中高寒草原中的清水和昆仑山南坡样点区、高寒草甸的五道梁样点区土壤结构的破坏程度最低。

表 2 土壤表层 0.1~0.05mm 粒径物质含量变化(重量%)

	乌鲁	清水河	楚玛尔河	昆仑	66 道班	可可西里	温泉	五道梁
未干扰	107.7	88.1	104.5	54.8	88.1	57.3	28.5	96.9
扰动	68.4	79.5	62.4	52.6	54.5	48.4	18.5	95.1
减少(%)	36.5	9.8	40.1	3.9	38.1	15.5	35.2	1.8

通过对比未干扰高山草原草地与干扰迹地土壤表层(0~30cm)养分状况,结果如图 3。在工程强烈扰动后,经过 20 余年的自然恢复,高寒草原干扰迹地土壤的有机质、全氮含量显著低于未干扰草原土壤,有机质含量平均减少 61.7%,最高减少幅度可达 93.1%;全氮含量减少 52.5%,最高减少幅度可达 89.2%;同时,干扰迹地土壤有机质和全氮含量具有明显的空间分布的相依性,有机质含量高(低)的区域,全氮含量也高(低)。尽管高寒草原干扰迹地土壤有机

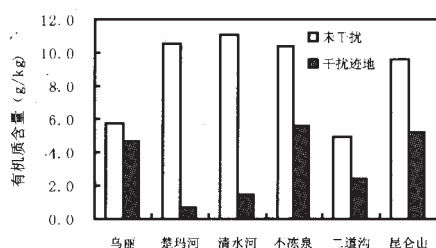


图 3 高寒草原生态系统土壤有机质与全氮含量变化

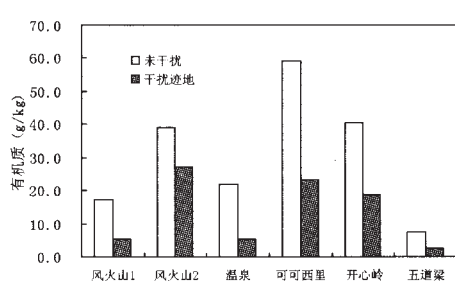
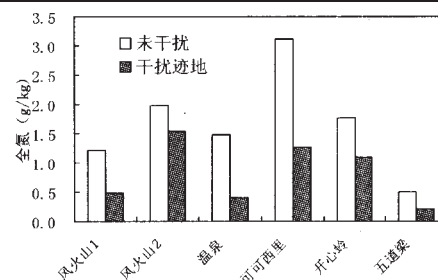


图 4 高寒草甸生态系统土壤有机质与全氮含量变化



质与全氮含量明显低于未干扰草原土壤,但大部分地区表层土壤平均的有机质含量在 2.0g/kg 以上,全氮含量在 0.2 g/kg 以上,与干旱区主要草原土壤相当。其中在乌鲁、不冻泉以及昆仑山南坡等地带,有机质与全氮含量高达 4.0 g/kg 和 0.3 g/kg 以上,接近未干扰自然寒冻干旱土壤的水平。

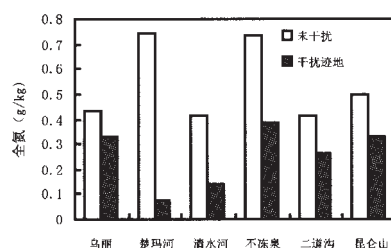
高寒草甸生态系统土壤在工程扰动后,其养分含量显著减少,生境条件恶化(图 4)。干扰迹地土壤有机质平均比未干扰寒冻锥形土壤少 55.7%、全氮含量少 50.3%,变化幅度略低于寒冻干旱土壤。工程干扰 20 多年后高寒草甸干扰迹地土壤有机质与全氮含量水平要明显高于未干扰高山草原土壤养分含量的平均水平。图 4 中风火山 1 和风火山 2 分别代表高山嵩草草甸和矮嵩草草甸工程扰动后的土壤养分状况,由于矮嵩草草甸区域土壤除了严重扰动以外基本没有剥离,或铲除较少,尚保留较好的土层,因此扰动迹地土壤具有较高的养分含量;开心岭样点区干扰迹地土壤也保留得较好,同样具有较高的土壤养分含量。这也是为什么前述的风火山和开心岭样点区工程扰动迹地具有较高的植被覆盖度和生物生产量的主要原因。

上述分析结果说明两点。(1)工程活动影响最大的高寒草原与高寒草甸两类生态系统在经过 20 余年自然恢复后,从群落构成、优势种类型以及群落覆盖度等方面比较,受损高寒草原生态和高寒草甸均出现一定程度的植被恢复,其中受损高寒草原生态系统的恢复程度要明显强于受损的高寒草甸生态系统的恢复程度,表现在高寒草原的原有建群植物种类在干扰迹地已出现并占据一定的优势地位而高寒草甸干扰迹地只有先锋物种或过渡性物种类型。(2)无论高寒草原还是高寒草甸,工程活动严重干扰后的自然恢复程度与表层土壤结构和养分状况密切相关,表层土壤结构破坏程度越低、土壤养分含量越高,植被恢复程度就越高。

4 青藏铁路工程建设对高寒生态系统的影响评价

人类工程活动影响下高寒生态系统的变化实际上是人类活动、气候以及冻土环境变化等多种因素共同作用的结果。在现阶段气候业已发生显著变化,且在外来全球变化影响下单独考虑人类工程活动的影响是不现实的,因为人类

工程活动对生态系统的影响既有直接作用,也有通过对气候影响的叠加、促进等间接作用,这在青藏公路工程对高原冻土环境影响的众多研究结果中已有充分体现——人类工程活动加剧了气候对冻土环境的影响^[13,14]。因此,本次研究将人类工程活动与气候变化的影响耦合起来,



以共同作用后的冻土环境变化结果来体现。应从两方面来定量评价铁路工程对高寒生态系统的影响:一是铁路工程活动本身对其所产生的影响;二是全球变化与工程活动耦合的双重作用下严重干扰的高原生态系统的可能演变趋势。

4.1 受扰动高原生态系统的可能演变趋势——生态恢复程度与能力评价

类比已建成运行 30 年的青藏公路工程,分析冻土工程严重扰动后高寒生态系统的恢复能力与程度,可以反映高寒生态系统受到人类活动严重干扰后的演变趋势。体现工程扰动场地生态系统恢复程度与能力的因素主要有恢复植被覆盖度、恢复生物生产力、顶级群落物种种数与频度以及物种多样性与分布均匀度等。大量过度性物种可提高覆盖度和生产力,能在一定意义上反映生态系统的恢复程度与状况,但其原有优势群落物种(顶级物种)的出现种数与频度才能体现生态系统真正的恢复能力与恢复程度。综合考虑破坏场地植被覆盖度、物种多样性与均匀度以及顶级物种种数与出现频度等多种因素,可定义下列方程来定量评价不同地带受损生态系统的恢复程度与恢复能力。

$$S_L = \frac{H}{H_0} (1 - \Delta F) I \quad (1)$$

其中: I 表示顶级物种侵入指数,是天然原有建群优势物种种数与出现频度的函数, $I = 1 + \sum_{i=1}^n P_i$, P_i 和 n 分别表示原优势建群物种出现的频度(相对多度,或优势植物种的相对重要值,本文采用相对多度)与种数; H 、 H_0 分别代表工程扰动场地与天然场地的 Shannon-Weiner 指数; ΔF 为相同地点工程扰动场地与天然场地植被覆盖度差值; S_L 就是受损生态系统的恢复程度与恢复能力指标,无量纲。

表 3 公路沿线生态环境恢复程度与潜力评价

指标	高寒草原生态系统					高寒草甸生态系统				
	昆仑山	不冻泉	66 道班	清水河	乌丽	五道梁	风火山	可可西里	温泉	开心岭
S_L	0.91	0.76	0.92	1.64	1.31	0.28	0.53	0.46	0.45	0.41
平均	1.108					0.426				

如表 3 所示,高寒草原生态系统分布区域大部分工程扰动地带的 S_L 值明显较高,显示出工程强烈扰动后经过 30 余年自然恢复的恢复程度较高,已经具有了较好的生态结构和生物物种组成体系;而高寒草甸生态系统分布的大部分地区恢复程度较低,尚未形成稳定的生态结构与物种优势组份。在高寒草原生态系统分布区域中,不冻泉样点区位于河谷冻土融化区,干扰迹地生态恢复程度最低,高寒草甸生态系统分布区域的恢复程度相差不大。

4.2 冻土工程对高寒生态系统的影响——综合干扰度

引入综合评价指标——综合干扰度,定义为一个区域的高寒生态系统受人类工程活动及其叠加的气候变化影响的程度,其测算方程如下。

对高寒草甸(包括高寒沼泽草甸)生态系统:

$$P = \frac{I}{S_r} f(h) + \alpha S_L \quad (2)$$

$$\text{对高寒草原生态系统: } P = \frac{I}{S_r} (1 + b f(d)) + \beta S_L \quad (3)$$

其中, $f(h)$ 是冻土上限深度的函数,由上述统计关系获得; $f(d)$ 是冻土厚度的函数,同样由上述分析的统计关系获得。 $S_r = h$

$\Delta G \Delta S_e$,是一个综合考虑土壤结构与土壤养分状况影响的土壤环境因素变化指标,其中 ΔG 、 ΔS_e 分别表示干扰场地与天然场地土壤细颗粒物组成差值和有机质含量差值(单位均以%表示), h 是计算土壤层深度(考虑到研究区域大部分植物根系分布于 20~40cm 深度范围,本文取 0.5m); b 是冻土环境作用系数,本文取 0.65; α 、 β 为生态系统自然恢复潜力系数,考虑气候条件、干扰程度等综合因素给定。

由于冻土类型、所处的地形地貌条件以及冻土土壤特性的差异,不同地区冻土对气候变化和人类活动的作用具有不同的响应,根据不同气温条件下冻土温度的变化,吴青柏等人将冻土温度对气候变化的响应分为 6 种类型^[3,13],各种类型在不同气温情境下的厚度与冻土上限变化设定如表 4 所示。根据工程性质及其对生态环境的扰动特点,可将工程扰动强度分为 4 级。(1)严重扰动:无任何保护措施的大规模工程开挖、大型土石料采场以及永久性工程占地。(2)较严重扰动:不开挖的主要施工便道与施工场地、工程弃土(碴)场地以及地表浅层推铲开挖等,大型排水与防水工程,永久性工程占地带外围 0.5km 范围。(3)中度扰动:非主要车辆运行便道、施工临时营地、路堑与涵洞开挖、桥梁桩基开挖与施工等,永久占地带外围 1.5km 范围。(4)轻度扰动:工程永久占地带外围 3.0km 范围,施工人员践踏、生活垃圾堆弃场地以及诸如勘探、扬尘(渣)等扰动区域。其对应的土壤结构与养分含量变化率是与上述青藏公路沿线的调查结果比较后而获得的(表 4)。

表 4 冻土条件与土壤条件的分级评价参数值

冻土条件分级	I	II	III	IV	V	VI
冻土温度/℃	$T > 0$	$-0.5 \leq T \leq 0$	$-1 \leq T < -0.5$	$-2 \leq T < -1$	$-3 \leq T < -2$	$T < -3$
冻土上限深度/m	> 5	3.5~4.5	2.8~3.5	2.8~2.2	2.2~1.5	< 1.5
冻土平均厚度/m	< 5	5.0~10.0	10.0~20.0	20~30	30~45	> 45
工程扰动分级	严重扰动	较严重扰动	中度扰动	轻度扰动		
土壤结构变化/%	> 45	30~45	20~30	< 20		
土壤养分变化/%	≥ 70	70~40	40~20	< 20		
评价准则	极严重退化	严重退化	中度退化	轻度退化	未明显变化	
高寒草原	< 1.0	1.0~3.0	3.0~5.0	5.0~8.0	> 8.0	
高寒草甸	< 5.0	10.0~5.0	20.0~10.0	35.0~20.0	> 35.0	

有关研究表明,未来 50 年(到 2050 年)青藏高原气温可能升高 2.2~2.6 度。本文评价未来工程对生态系统的干扰程度时,基于下列情景:(1)未来 50 年气温升高 2℃的气候情景;(2)由于冻土对于气候与工程双重影响的变化趋势预测是基于青藏公路工程而获得的,因此不考虑青藏铁路工程性质,而以青藏公路工程性质为类比,据此分析工程和气候双重影响下的高寒生态系统的干扰度(如表 5 和表 6)。

表 5 未来 50 年气温升高 2℃时工程对高寒草甸生态系统的综合干扰度

	五道梁	风火山	可可西里	开心岭	温泉	唐古拉山北坡	头儿九山区
严重扰动较	4.72	5.86	5.56	4.93	5.17	5.86	4.62
严重扰动	7.12	8.89	8.44	7.45	7.82	8.89	6.97
中度扰动	18.28	23.08	21.85	19.18	20.18	23.08	17.87
轻度扰动	34.28	43.28	40.97	35.97	37.84	43.28	33.50

对于高寒草甸生态系统,如果青藏铁路工程不采取任何冻土环境保护措施,类比青藏公路工程,未来 50 年在气温升高 2℃的情景下,位于五道梁、开心岭以及头儿九山一带的工程严重扰动区域高寒草甸生态将急剧退化而成为黑土滩或草原化,草地覆盖度下降为 30%左右;在较严重工程扰动区域,包括这些区域在内的几乎所有高寒草甸草地均会出现严重退化趋势,大部分区域草地覆盖度将下降到

50%以下,但在风火山和唐古拉山区则可能维持在40%~60%;在中等程度的工程扰动区域,五道梁、开心岭和头儿九山等地带的高寒草甸草地将出现中等程度退化,草地覆盖度可下降到70%左右,对其它区域高寒草甸则仅有轻度干扰;轻度工程活动的扰动,对全线高寒草甸生态系统没有明显影响。对于非工程扰动区,本次研究表明,高寒草甸生态系统因受冻土环境变化的影响均将不同程度出现退化趋势,表现在高覆盖草甸的分布面积萎缩。

对于高寒草原生态系统,类比青藏公路工程,未来50年在气温升高2℃的情景下,高寒草原草地不会因工程扰动而出现严重的荒漠化倾向。位于清水河、楚玛尔河两岸平原、乌丽盆地以及沱沱河以北谷地等工程严重扰动区域,高寒草原草地可能出现显著退化,草地覆盖度减少到10%以下;在较严重的工程扰动区域,除了昆仑山区和不冻泉一带以外的大部分高寒草原草地将出现严重退化,草地覆盖度减少到20%以下;在工程活动的中度扰动区,位于清水河与沱沱河以北谷地等地区的高寒草原将出现中等程度的退化,草地覆盖度在30%以下,其它区域将不会受到明显影响;在工程轻度扰动区域,位于清水河和沱沱河北部河谷地带草原也将存在轻度退化趋势,其它区域则没有明显影响。

表6 未来50年气温升高2℃时工程对
高寒草原生态系统的综合干扰度

	昆仑山	不冻泉	清水河	楚玛尔河	乌丽盆地	托托河
严重扰动	3.34	2.58	1.51	1.79	1.65	1.37
较重扰动	4.68	3.57	2.01	2.41	2.21	1.80
中度扰动	12.55	9.27	4.65	5.85	5.25	4.04
轻度扰动	24.08	17.24	7.61	10.10	8.87	6.34

5 结论

(1)在青藏铁路550km冻土分布区段,占沿线分布面积60%的高寒草甸与高寒沼泽草甸生态系统的分布变化与冻土环境关系密切。近30年来,由于气温持续升高和人类活动及其影响下的冻土退化等因素的作用,该区域所具有的一个显著的生态环境变化背景是高寒草甸和沼泽草甸的大面积萎缩和草原化,分别减少了8%和28%,而高寒草原草地面积则增加了10%;高寒草甸与沼泽草甸生态系统具有极其重要的生物多样性和水源涵养功能,是国家三江源保护区最为核心的生态系统类型,两者具有对冻土环境高度依赖性和对气候变化与人类活动扰动的高度敏感性,是青藏铁路工程重点保护的生态类型。人类工程活动对高寒生态系统的影响,不仅有其直接作用,而且还存在其对气候变化影响的加剧和促进等间接叠加作用。研究区段内高寒草甸和高寒沼泽草甸生态系统的变化,可能就是气候与人类工程与经济生产活动叠加的结果。

(2)研究表明,受扰动的高寒生态系统均具有一定的自然恢复能力和抵御干扰的能力,类比青藏公路工程,高寒草原生态系统的抗干扰能力和受扰动后的自然恢复能力明显优于高寒草甸生态系统;受严重扰动后高寒生态系统的恢复程度和恢复潜力与干扰场地表层土壤环境(土壤结构与养分)、原有植被群落物种的保留程度和冻土条件密切相关。综合考虑干扰场地土壤环境、冻土条件以及不同生态系统对干扰的抵抗与恢复能力等要素,利用综合干扰度方法和测算模型分析,结果表明:在未来50年气温升高2℃的情景下,青藏铁路建设所采用的一系列创新的主动冷却冻土

的施工技术与措施,将可以大幅度降低青藏铁路工程对生态系统的影响;与传统工程相比,即便保守地考虑未来气候对工程区冻土产生0.6℃的影响,其严重扰动区对生态系统的影响程度也将显著降低2~3个等级;高寒草甸草地区域内,大部分严重干扰施工地带对高寒草甸草地只有中等程度影响,影响区高寒草地植被覆盖度将维持在50%以上,而原传统施工工程将造成高寒草甸的严重退化甚至裸土化,草地覆盖度将在30%以下;高寒草原区严重工程扰动地带除了局部将会受到明显影响外,大部分地区也只有中等至轻度影响,而对那些中度与轻度工程扰动区域的影响只可能是轻微甚至不明显的。

(3)由于高寒草原生态系统具有较强的抗干扰能力和扰动后的恢复能力,在未来气候不至于严重干旱、回填土壤表层厚度能够在20cm以上并力求其完整性时,高寒草原草地区域的取土场、临时施工便道与施工场地等较严重和严重的干扰区,地表植被在较短的时间内将得以明显恢复;对于高寒草甸和高寒沼泽草甸草地,尽管工程设计方案和采取的措施大大减轻了对它的破坏,但由于其对干扰的极度敏感性和受严重扰动的植被恢复能力较弱,因此应尽量避免在高寒草甸和沼泽草甸区设立较大规模的取弃土场地,施工通道也应尽可能避开沼泽草地区。

参考文献(References)

- [1] Boughton D A, Smith E R, O'Neill R V. Regional vulnerability: a conceptual framework[J]. Ecosystem Health, 1999, 5: 312~322
- [2] Calow P. Ecosystem health: a critical analysis of concept. In: Rapport D J, Gaudet C L, Calow P, eds. Evaluating and Monitoring the Health of Large-scale Ecosystems[M]. Heidelberg: Springer-verlag, 1995. 33~42
- [3] 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, 2002, 32(6): 514~520
- [4] Zhao Lin, Chen Guichen, Cheng Guodong, et al. Permafrost: status, variation and impacts. In: Zheng Du, Zhang Qingsong, Shaohong, eds. Mountain Geocology and Sustainable Development of the Tibetan Plateau [M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2000. 113~137
- [5] 王国尚,金会军,林清,等. 青藏公路沿线多年冻土变化及环境意义[J]. 冰川冻土, 1998, 20(4): 444~450
- [6] 王绍令,赵秀峰. 青藏公路南段岛状冻土区内冻土环境变化[J]. 冰川冻土, 1997, 19(3): 231~239
- [7] 王根绪,姚进忠,郭正刚,吴青柏,王一博. 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): 1 556~1 564
- [8] 国家环保总局. 青藏铁路工程环境保护措施. www.china.org.cn/chinese/PI-c
- [9] 李文华,周兴民. 青藏高原生态系统及优化利用模式[M]. 广州: 广东科学技术出版社, 1998. 19~67
- [10] 周兴民. 中国嵩草草甸[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 188~206
- [11] 王根绪,程国栋,沈永平. 江河源区的生态环境与综合保护研究[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2001
- [12] 王根绪,程国栋,沈永平. 近40年来江河源区的气候变化特征及其生态环境效应分析[J]. 冰川冻土, 2001, 23(4): 346~352
- [13] Wu Qingbai, Li Xin, Li Wenjun. The Prediction of Permafrost Change along the Qinghai-Tibet Highway[J]. Permafrost Periglacial Process, 2000, 11: 371~376

(责任编辑 王宏章)