

用冷却路基的原则修建青藏铁路

程国栋

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室 兰州 730000)

[摘要] 青藏铁路将要穿越的多年冻土半数以上属高温冻土,有40%为富含冰量冻土。在全球变暖的情况下,青藏铁路的修建必须考虑50~100年的气候变化。最近的预测认为:至2050年青藏高原将升温 $2.2\sim 2.6^{\circ}\text{C}$ 。因而,铁路成败的关键在于能否保护多年冻土使其不融化。世界上在冻土区筑路已有百年以上的历史,但报道的冻土区铁路的病害率平均在30%以上。根据国内外在多年冻土区筑路的经验和教训提出:青藏铁路的设计应该改变单纯依靠增加热阻(增加路堤高度,使用保温材料)消极的保护冻土的思路,而应全面采用“冷却路基”积极的“降低地温”的原则,特别是在高温、富含冰量地段必须如此;进一步提出了通过改变路堤的结构和材料来调控辐射、调控对流和调控传导,以达到“冷却路基”目的的具体措施。

[关键词] 青藏铁路 冷却路基 多年冻土 全球变暖

[中图分类号] U21 P462.5

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2005)01-0004-05

CONSTRUCTING OF QINGHAI-TIBET RAILROAD BY COOLING THE ROADBED

CHENG Guo-dong

(State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and

Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China)

Abstract: More than half of the total length of Qinghai-Tibet Railroad (QTR) traverses warm ($0\sim 1^{\circ}\text{C}$) permafrost areas, and about 40% of its total length is in ice-rich permafrost areas. The construction of the QTR must also consider the impacts of climatic warming along the QTR during the next 50~100 years. The latest projection indicates a warming of $2.2\sim 2.6^{\circ}\text{C}$ on the Qinghai-Tibet Plateau (QTP) by the year 2050. Therefore, the key to the successful construction of the QTR is to protect permafrost from being thawed. Although railroad construction in permafrost areas has had a history of more than 100 years, the troubled sections of the railroads in permafrost areas have been greater than 30% of their total length. Based on the experiences and lessons learned from the road construction in permafrost areas, both in China and abroad, the author proposes that the principle of “active cooling” of the railroad roadbed by lowering permafrost temperatures should be used in the design of the QTR, rather than that of “passive protection” of permafrost through increasing thermal resistance of the roadway, such as increasing fill thickness and/or using insulative materials. This is especially important for the road sections in warm, ice-rich permafrost. In addition, this paper proposes several methods for “cooling the roadbed” by controlling radiation, convection and conduction through modifying roadway structure and using different fill materials.

Key Words: Qinghai-Tibet Railroad, cooling the roadbed, permafrost, climatic warming

CLC Numbers: U21 P462.5

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2005)01-0004-05

1 前言

多年冻土是气候变化的灵敏指示器。温度升高将使冻土的强度降低,而含冰的冻土融化后将完全丧失承载力。所以冻土工程不同于一般岩土工程的一个重要特点是:冻土工程中温度是一个关键参数。由此也决定了冻土工程的稳定性与气候变化的关系十分密切^[1-3]。

近年来,青藏铁路沿线气候变暖是显著的。从上世纪60年代到90年代,40年来气温升高在 1°C 以上^[4]。相应地,从20世纪70年代到90年代,沿线高温冻土的地温平均升高

了 $0.3\sim 0.5^{\circ}\text{C}$,低温冻土的地温平均升高了 $0.1\sim 0.3^{\circ}\text{C}$ ^[5]。从1996~2001年,多年冻土上限处的地温以 $0.08^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}\sim 0.01^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ 的速率上升;高温冻土区上限以 $6.6\text{cm}\cdot\text{a}^{-1}\sim 2.6\text{cm}\cdot\text{a}^{-1}$ 的速率下降;6~8m深处的地温也以 $0.053^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}\sim 0.021^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ 的速率在上升^[6]。气候变暖、冻土退化的事实,向青藏铁路的建设提出了严峻的挑战。本文在总结全世界冻土区筑路的经验教训的基础上,提出用冷却路基的原则修建青藏铁路的思路,并介绍几种在青藏铁路试用的冷却路基的方法,作为应对气候变暖的措施。

收稿日期:2004-10-25。

基金项目:中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-SW-04),国家自然科学基金重大项目(90102006),“973”国家重点基础研究发展规划项目(2002CB412704)。

作者简介:程国栋,男,1943~,中国科学院院士,兰州市东岗西路260号中国科学院寒区旱区环境与工程研究所研究员,主要从事冻土学、寒区水资源等的研究;E-mail: gdcheng@ns.lzb.ac.cn。

2 冻土区修筑铁路的历史

世界上在多年冻土区修筑铁路已有百年以上的历史。俄罗斯早在 1895 年就开始修建第一条西伯利亚大铁路(The Trans-Siberian Railway)。该线全长 9 446km, 穿越多年冻土 2 200km。21 世纪 70 年代末, 又开始修建第二条西伯利亚大铁路(BAM, 贝阿铁路), 该线全长 3 500km, 通过多年冻土 2 500km。目前正在建设的别尔卡基特(Berkakit)-托莫特(Tommot)-雅库茨克(Yakutsk)铁路全长 818km, 几乎全部位于多年冻土区。1984~1995 年已完成别尔卡基特-托莫特 375km 的路基工程。另外有一条秋明(Tyumen)-鄂毕湾(OB Bay)的冻土区铁路也正在修建中。美国于 1919 年修建阿拉斯加铁路, 线路长 756km, 通过多年冻土 378km。加拿大在多年冻土区建有 5 条铁路。最早的哈德逊湾铁路建于 1910 年, 全长 820 km, 穿越多年冻土 611 km。

在中国, 多年冻土区兴建的道路工程有大、小兴安岭地区的两条主要干线: 牙林线和嫩林线, 穿越多年冻土 800 km 左右。西北地区有两条铁路遇到多年冻土: 其一是青海海西热水专用线; 其二是穿越天山的南疆铁路。高原多年冻土区修筑的青藏公路(跨越多年冻土 550 km)和青康公路(跨越多年冻土 330 km)已有 40 多年连续通车运营的历史^[7]。

多年冻土区由于反复的冻融作用, 产生许多特殊的自然地质现象, 如冻胀、融沉、冻拔、冻裂、冰椎、冻融分选、融冻泥流等, 对工程建筑有极大的影响。多年冻土区常见的道路工程病害是融沉和冻胀, 以青藏公路为例, 85% 的路基病害是融沉造成的, 15% 为冻胀和翻浆所致^[8]。桥梁和涵洞的病害主要由冻胀引起。在高温冻土区的高路堤上, 由于阴、阳坡下的融沉不同, 因而在向阳面的公路一侧产生纵向裂缝。

铁路作为线型工程要跨越各种不同的地质地貌单元, 遇到多种多样的不良冻土现象, 所以修建的难度很大。尽管世界上在多年冻土区修筑铁路已有百年以上的历史, 但回顾这些铁路的运营情况, 却并不令人乐观。据 1994 年俄罗斯贝阿铁路的统计, 线路病害率为 27.7%; 1996 年对后贝加尔铁路(Zabajkalsk Railway)的调查表明, 运营了 100 多年后, 线路的病害率仍达 40.5%^[9]。中国在青藏公路改建工程完成后, 在 1999 年进行了一次调查, 报道的线路病害率也达 31.7%。东北冻土区铁路运营的情况更差一些, 估计线路病害率不会小于 40%, 运营早期还发生过路基突然大量下沉的事故。如 1962 年, 牙林线潮乌段 8km 处曾发生 5 小时内路基下沉 1.4 m 造成机车掉道的事故; 牙林线 K197 处, 也发生过 1 次下沉 1.5m, 迫使旅客列车停车 4 小时的事故^[10]。

3 用冷却路基原则修建青藏铁路

正在修建的青藏铁路格尔木至拉萨段全长 1 142km, 新建 1 110km, 将穿越连续多年冻土区 550 km, 岛状多年冻土区 82km。如果将年平均地温 0~-1.0℃ 的多年冻土定为高温冻土, 则线路将穿越的连续多年冻土中有 275km, 约一半以上为高温冻土, 40% 为高含冰量冻土^[8]。青藏铁路建设乃百年大计, 在全球转暖的情况下, 必须考虑 50~100 年的气候变化。IPCC 在 2001 年发布的预测称“全球表面温度预计在 1990~2100 年间升高 1.4~5.8℃”。青藏高原是气候变化的“先兆区”, 其升温要早于周围地区; 青藏高原也是气候变化

的“放大器”, 其升温值要高于全球平均值。据最近发布的预测, 2050 年, 青藏高原将升温 2.2~2.6℃^[11]。冻土在冻结时强度很大, 相当于次坚石, 但含冰冻土融化后则完全丧失承载力。因此, 能否防止路基下冻土融化, 就成为青藏铁路成败的关键。

多年来, 青藏和青康公路已积累了大量冻土区道路的观测资料。分析冻土区公路修筑的经验和教训, 无疑会对青藏铁路的建设提供有益的启示。

对青藏和青康公路资料的分析可得到如下的重要结论。

(1) 冻土区路基的稳定与地温关系密切。青藏公路改建沥青面后, 60% 的路段下冻土在垂向上不衔接, 形成融化夹层, 而形成融化夹层的路段大多位于高温冻土区^[12]。

(2) 对青藏公路沿线 2 组地温观测孔 5 年观测资料的分析发现: 对已形成融化夹层的高温冻土区的路基, 进入路基内活动层的热收支呈明显的热量积累状态, 下伏多年冻土层的热收支处于持续不断的吸热状态; 低温冻土区路基内的热收支也呈现出吸热明显大于放热的周期性变化^[13]。

(3) 对采用保温材料的路基热状况的分析证明: 保温材料的热阻效应可以减少其下地温的年变幅, 起到延缓多年冻土融化的效果, 但不能改变因修筑路基而引起的吸热趋势; 保温材料在低温冻土区使用有一定的效果, 但在高温冻土区保温处理措施的长期效果不佳^[14]。

上述结论说明了一个重要的概念: 单纯依靠增加热阻(增加路堤高度、使用保温材料)保护冻土的方法是一种消极的方法。在气候转暖的背景下, 这种方法难以保证青藏高原多年冻土区路堤的稳定性, 特别在高温冻土区, 大量的工程实践已证明, 这种消极方法的成功率不高, 因此青藏铁路的设计思想应由“被动保温”转向“主动降温”, 采用“冷却地基”的原则确保路基稳定。

4 冷却路基方法

传热的基本形式有 3 种: 辐射、对流和传导。可以通过改变路堤的结构和材料以调控辐射、调控对流和调控传导, 达到冷却路基的目的。

4.1 调控辐射的措施

增加表面的反射率可减少表面接收的太阳辐射, 降低地温。铁路可考虑采用浅色或白色的道碴和改变边坡的颜色以减少表面的吸热。

俄罗斯科学家^[15]Kondratyev 提出采用遮阳棚的方法遮



图 1 风火山遮阳板试验

蔽太阳辐射。根据铁科院西北分院在风火山的现场试验结果, 遮阳棚内地表年平均温度比棚外地表的年平均温度低 8℃, 其降温效果是十分明显的。另一种更简便的方法是在

坡面设置遮阳板(图1)。根据风火山的资料,1月份遮阳板下的地表温度比板外地表温度低 $6\sim 15^{\circ}\text{C}$,效果也很明显,是一种很有应用前途的冷却路基的方法^[16]。

通风基础是多年冻土区房屋建筑行之有效的方法,已在世界各国冻土区普遍采用,可以把这一方法移植到冻土区的路基工程。青藏高原的气温通常比地表温度低 3°C 以上,所以可以利用路堤遮阳,在堤身中设置通风管,利用比路堤土温度低的空气的流通,带走堤身的热量^[17-19]。我们进行的室内模型试验和数值模拟均证明这种方法是有效的^[20-22]。在青藏高原北麓河试验站的通风路堤试验表明,通风管可以有效地降低路堤填土的温度。在施工后的第2个冻融循环时,其周围土体的温度均降到了 0°C 以下,并使得通风管下全年的热收支表现为放热^[23]。为了提高效率,在通风管口安装了能根据气温高低自动关闭或开启的风门(图2)。观测表明,安装了自动温控风门后,最热月份进入路基的热量仅为没有安装自动温控风门通风路基的 $1/2$,降温效率有所提高^[24]。

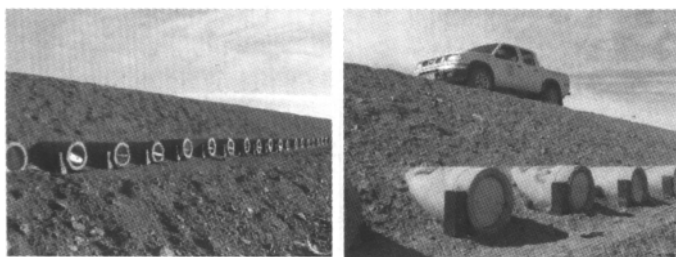


图2 自动温控通风路堤:气温低时自动开启;气温高时自动关闭

4.2 调控对流的措施

1969~1970年,前全苏铁路运输研究院斯科沃罗丁冻土研究试验室根据实测资料提出:用大块碎石修筑的路堤较之用其它类型土修筑的路堤,其基底土的温度大大降低,并用 Balch 效应解释了这一现象^[25]。1973年原中国科学院冰川冻土所在青海省热水煤矿的厚层地下冰地段用直径 0.3m 的块石修筑了高 2.7m 的试验路堤(图3)。观测表明,块石路堤有明显的降低地温的效果^[26,27]。1997年,Rooney 著文介绍了贝阿铁路使用块石路堤的经验^[28]。1996~2001年,阿拉斯加大学完成了块石路堤的数值模拟和实体工程试验,充分证明了块石路堤冷却路基的作用。阿拉斯加公路部把这种路堤称为气冷路堤^[29,30](Air cooled embankment, ACE)。



图3 青海热水块石路堤试验(1973年)

块石路堤降温作用的物理基础是 Rayleigh-Benard 对流^[31]。在气温周期性变化的自然条件下,块石层能起到“热半导体”的作用,冷却其下的土体。我们所进行的室内模型试验^[32]和数值模拟^[33,34],以及现场的实体工程试验均证明,在青藏高原的条件下,块石路堤和块石护坡均能起到冷却路

基的作用。特别是块石护坡施工方便、成本不高,已在青藏铁路上推广应用(图4)。



图4 北麓河坡碎石护坡试验
碎石直径: $5\sim 8\text{cm}$ 和 $40\sim 50\text{cm}$

利用自然对流换热的热管和热桩也是冷却路基的十分有效的措施。用于多年冻土地区的热桩是在21世纪60年代由前苏联的 Gapeyev 和美国的 Long 差不多同时开发出来的。70年代,阿拉斯加输油管工程使用了122 000根冷锚式热桩,成功地解决了在冻土区输送高温油的难题。但在路基工程中使用热管成本偏高,可考虑在特殊地段使用。近年来,阿拉斯加公路部正在试验的 hairpin thermosyphons 应比现在在青藏铁路上试用的直立式热管更适合道路工程。

4.3 调控传导的措施

自然界中泥炭具有保护多年冻土的功能,其主要作用机制之一是由于泥炭能充分饱水,而冰的导热系数是水的4倍,所以饱水泥炭冻结后其导热系数远大于融化时的值。这样在自然条件下,冬季通过冻结泥炭的放热,就要大于夏季通过融化泥炭的吸热,从而使地表温度与多年冻土上限处的温度出现一个差值,称为热补偿^[35],或者在俄文文献中称为温度位移^[36]。饱和泥炭融化时的导热系数与冻结时的导热系数之比可达0.33。在这种条件下,年平均气温为 0°C 的地区热补偿的理论值可达 4°C ^[37]。据此,可以用能产生大的热补偿值的材料来冷却路基。如果这种材料的承重能力足够,可用于堤身;如果承重能力不足,则可用于坡面。

在坡面种草也不失为一种可选用的措施。这一措施既能改善路基的热状况,又能防止坡面的风蚀和水蚀,有利于美化和保护环境。

除了单项的调控措施,也可考虑综合利用上述原理,如设置旱桥(图5),既能遮阳,又可通风,且有很高的承载能力。但这种措施的成本很高,可在特别困难的高温、高含冰量冻土段使用。



图5 清水河旱桥

5 结论

(1)面对青藏高原高温、高含冰量的多年冻土,以及气候

转暖的事实, 青藏铁路的建设必须改变单纯依靠增加热阻消极保护冻土的思路, 全面采用“冷却路基”的积极的降低地温原则, 特别对高温、高含冰量地段必须如此。

(2)可以通过改变路基的结构和填料, 以调控辐射、调控对流和调控传导, 达到“冷却路基”的目的。

参考文献(References)

- [1] Tong C J, Wu Q B. The effect of climate warming on the Qinghai-Tibet Highway, China [J]. Cold Regions Science and Technology 1996, 24: 101~106
- [2] Nelson F E., Anisimov. O A, Shiklomanov N I. Subsidence risk from thawing permafrost[J]. Nature, 2001, 410: 889~890
- [3] Nelson F E. frozen in time[J]. Science, 2003, 299: 1 673~1 675
- [4] Li D L, Guo H, Wang W, Wei L. The influences of sunspot cycle and concentration of CO₂ on air temperature along the Qinghai-Tibet Railway and its prediction[J]. Science in China(Series D) 33 (Special Issue), 2003: 123~132
- [5] Wang S L, Zhao X F, Guo D X, Huang Y Z. Response of permafrost to climate change in the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology 18 (special Issue), 1996: 157~165
- [6] Wu Q B, Cheng G.D, Ma W. The impact of permafrost change on the Qinghai-Tibet Railway [J]. Science in China (Series D) 33 (Special Issue), 2003: 114~122
- [7] Cheng G D, He P. The linear engineering construction in permafrost regions [J]. Glaciology and Geocryology, 2001, 23(3): 213~217
- [8] Wu Q B, Liu Y Z, Zhang J M, et al. A review of recent frozen soil engineering in permafrost regions along Qinghai-Tibet Highway, China [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2002, 13 (3), 199~205
- [9] Kondratyev V G, Pozin V A. An Introduction to Monitoring System of Engineering -Geocryology for Railway under Construction[M]. Print Complex, Chita, Russia, 2000. 84
- [10] The 3rd Railway Survey and Design Institute, Permafrost Engineering[M]. China Railway Press, Beijing, 1994. 154
- [11] Qing D H, ed. Environmental Change Evaluation of Western China[J]. Science Press, Beijing, 2002: 31~48
- [12] Wang S L, Mi H Z. Permafrost change under roadbed after construction of asphalt pavement along with Qing-Zang Highway [J]. Glaciology and Geocryology, 1993, 15(4): 566~573
- [13] Sheng Y, Zhang J M, Liu Y Z, et al. Thermal regime in the embankment of Qinghai-inetan Highway in permafrost regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2002, 35(1): 35~44
- [14] Sheng Y, Zhang L X, Yang, C S, Fang J H. Application of thermal - insulation treatment to roadway engineering in permafrost regions [J]. Glaciology and Geocryology 2002, 24(5): 618~622
- [15] Kondratyev V G. New methods of strengthening roadbed bases on very icy permafrost soils [A]. Proceedings, International Symposium of Cold Regions Engineering[C]. Harbin, University of Harbin Industry Technology Press, 1996. 1~6
- [16] Feng W J. An application study of the riprap and awning for the roadbed in Qinghai-Tibet Plateau permafrost regions [A]. Master thesis, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute[C]. Lanzhou, China, 2002
- [17] Zarling J P, Connor B, Goering D L. Air duct system for roadway stabilization over permafrost areas [A]. Proceedings 4th International Conference on Permafrost Vol.1 [C]. Fairbanks, Alaska, National Academy Press, 1983. 1 463~1 468
- [18] Esch D C. Evaluation of experimental design features for roadway construction over permafrost [A]. Proceedings 4th International Conference on Permafrost, Vol.1 [C]. Fairbanks, Alaska, National Academy Press, 1983. 283~288
- [19] Nixon J F. Geothermal aspects of ventilated pad design [A]. Proceedings 3rd International Conference on Permafrost, Vol.1 [C]. National Research Council of Canada, Ottawa, 1978. 841~846
- [20] Su B, Li N, Quan X J. The numerical study on the ventilated embankment in permafrost regions in Qinghai-Tibet Railway [J]. Cold Regions Science and Technology, 2004, 38: 229~238
- [21] Lai Y M, Wang Q S, Niu F J, Zhang K H. Three-dimensional nonlinear analysis for temperature characteristic of ventilated embankment in permafrost regions [J]. Cold Regions Science and Technology, 2004, 38: 165~184
- [22] Yu W B, Lai Y M, Niu F J, Zhang X F, Zhang S J. Temperature field features in the laboratory experiment of the ventilated railway embankment in permafrost regions [J]. Glaciology and Geocryology, 2002. 24(5): 601~607
- [23] Niu F J, Cheng G D, Yu Q H. Study on ground temperature control of ventilated railway embankment in permafrost regions [J]. Science in China(Series D) 33 (Special Issue). 2003: 145~152
- [24] Yu Q H, Cheng G D, Niu F J. Application of ventilated embankment with automatic temperature-control device to the Qinghai-Tibet Railway [J]. Science in China(Series D) 33 (Special Issue), 2003: 160~167
- [25] Mikhailov G P. Temperature regime of embankment consisting of coarse rock on permafrost [J], Transportation Construction, 1971, 12: 32~33
- [26] Cheng G D, Tong B L. Experimental research on an embankment in an area with massive ground ice at the lower limit of alpine permafrost [A]. Proceedings of the 3rd International Conference on Permafrost, Vol. 2 [C]. Ottawa, National Research Council of Canada, 1978. 199~222
- [27] Cheng G D, Tong B L. and Luo X B. Two important problems of embankment construction in the section of massive ground ice [J]. Journal of Glaciology and Cryopedology, 1981, 3(2): 6~11
- [28] Rooney J W. Rock fill embankment applications for convective foundation cooling on BAM railway system [A]. Proceedings of the 5th International Symposium on Cold Regions Development [C]. Anchorage, ASCE, 1997. 399~402
- [29] Goering D J, and Kumar P. Winter-time convection in open-graded embankments [J]. Cold Regions Science and Technology, 1996, 24(1): 57~74
- [30] Goering D J. Passively cooled railway embankments for use in permafrost areas [J]. Journal Cold Regions Engineering, 2003, 17 (3): 119~133
- [31] Narasimhan A. Rayleigh-Bénard Convection: Physics of a Widespread Phenomenon [J]. Resonance: Journal of Science Education, 1999, 4(6): 82~90
- [32] Yu W B, Lai Y M, Zgang X F, Zhang S J, Xiao J Z. Laboratory investigation on cooling effect on coarse rock layer and fine rock layer in permafrost regions [J]. Cold Regions Science and technology, 2004, 38: 31~42

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)