科学通报 2013 年 第 58 卷 第 2 期: 115 ~ 130
自然科学基金项目进展专栏 评 述 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

青藏高原多年冻土变化与工程稳定性

吴青柏*, 牛富俊

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
* 联系人, E-mail: qbwu@lzb.ac.cn

2012-06-04 收稿, 2012-10-31 接受
国家杰出青年科学基金(40625004)、国家自然科学基金重点项目(41030741)和国家重点基础研究发展计划(2010CB951402)资助

摘要 气候变化和工程活动引起多年冻土温度升高、活动层厚度增大、地下冰融化, 导致路基工程稳定性变化. 本研究在综述青藏高原多年冻土变化和冻土工程研究重要进展的基础上, 利用青藏公路和青藏铁路沿线冻土与工程监测数据, 给出了青藏高原多年冻土温度和活动层厚度变化及其与气候变化的关系、多年冻土对工程活动的响应过程, 青藏铁路工程稳定性动态变化以及块石结构路基降温机制和过程. 最后, 提出了在气候变化下冻土工程将来亟待解决的关键科学问题.

关键词
气候变化
工程影响
多年冻土温度
活动层厚度
工程稳定性

冻土是北半球冰冻圈中分布最为广泛的因子, 占陆地面积的 56%, 其中多年冻土约占 24%[1], 对气候变化具有强烈的响应和反馈[2,3]. 冻土变化对地表的能水平衡、水文、地气之间的碳交换、寒区生态系统和地表景观等均会产生重要影响, 且冻土融化产生的地表下沉增大了热融灾害风险, 破坏了寒区工程构筑物稳定性和安全运营[4,5]. 青藏高原多年冻土约占陆地面积的 53%, 是地球上分布最广泛的高海拔多年冻土[6,7]. 冻土温度升高、活动层厚度增加和冻土退化正在对青藏高原气候、水文水资源、生态环境和寒区工程产生显著的影响[8~11].

在多年冻土区修筑路基工程, 不可避免要破坏地表能量平衡, 导致多年冻土温度升高和多年冻土上限抬升[12,13]. 然而, 工程下部的多年冻土不仅受工程热扰动的影响, 而且还受气候变化的长期热影响, 特别是年平均地温高于–1.0 ℃和体积含冰量超过 25%的高温高含冰量冻土, 对气候变化和工程影响更加敏感[14~16]. 由于高温冻土受气候和工程的复合叠加影响, 仅采取传统的抬高路基、增加热阻的保护冻土方法难以抵御气候变化和工程作用的综合影响, 需要采取更加积极的主动保护冻土的工程技术措施, 才能使冻土路基保持长期稳定性[14,17,18]. 因此, 在气候变化和工程热扰动影响下多年冻土变化和工程稳定性是冻土工程研究的重点和难点.

1 青藏高原多年冻土变化

多年冻土变化是气候变化敏感指示器[3], 各国相继在北半球建立了大量的观测点来观测多年冻土热状态和活动层厚度的变化, 给出了北半球多年冻土热状态和活动层厚度的空间变化格局[19~23]. 我国从 20 世纪 90 年代初开始对青藏高原多年冻土变化开展了大量的研究, 给出了多年冻土温度变化和退化特征[24,25], 并先后半定量地给出了冻土温度变化特征和气候变化对多年冻土的影响[26~28]. 随着气候变化和冰冻圈研究深入, 在青藏公路沿线相继建立了一系列定位监测场地[29,30], 场地覆盖了青藏公路沿线 550 km 多年冻土区, 涵盖了大片连续多年冻土、不连续多年冻土和岛状多年冻土区. 基于青藏高原多年冻土在全球变化研究中的重要作用, King 等人[31]还提出了一个概念性的监测网络来研究多年冻土和活动层厚度的变化. 同时, 全球能水循环试验(GEWEX)青藏高原亚洲季风试验(Game-Tibet)在青藏高原季节

引用格式: 吴青柏, 牛富俊. 青藏高原多年冻土变化与工程稳定性. 科学通报, 2013, 58: 115–130
英文版见: Wu Q B, Niu F J. Permafrost changes and engineering stability in Qinghai-Xizang Plateau. Chin Sci Bull, 2013, 58, doi: 10.1007/s11434-012-5587-z

冻土和多年冻土区布设了 8 个场地监测土壤水分和温度的变化[32~34]. 大量的监测研究结果表明, 中国冰冻圈正在发生着显著的变化[35], 多年冻土退化引发了显著的环境问题[9,36]. 气候变化情景下多年冻土退化、多年冻土温度和活动层厚度的时空变化趋势显著并引发大量的冻融灾害[37~41], 青藏高原多年冻土分布下界的北界发生了较大幅度的退缩[42], 多年冻土厚度减薄也较为明显[43,44]. 同时, 青藏高原季节冻结深度表现出了显著的时空变化特征[45]. 1990~2010 年间, 新疆天山地区乌鲁木齐河源活动层厚度增加了约 35 cm, 各个深度上冻土温度升高了约 0.4~0.9℃[22,46]. 近 30 年来我国东北大小兴安岭地区多年冻土呈现显著的区域性退化, 活动层厚度增加了 20~40 cm, 年平均地温升高了 0.1~0.2℃[47,48]. 这些研究极大地推动了我国多年冻土变化的研究.

根据青藏公路建立的监测场地(图 1)的数据, 分析了青藏高原多年冻土活动层厚度和温度对气候变化的响应. 气候变化影响下活动层内土体冻融过程发生了显著变化, 地表下 0.5 m 土体起始融化过程时间介于 4 月 25 日到 5 月 11 日, 融化过程持续时间大约在 172~185 d 之间波动, 平均融化时间约为 179.5 d 左右. 冻结和融化衔接时间大约为 2 月 11 日到 3 月 15 日. 青藏公路沿线多年冻土活动层厚度变化介于 132~457 cm, 空间和时间上平均值约为 241 cm[49], 其他场地资料给出的青藏高原活动层厚度介于 105~322 cm[22]. 气候变化影响下, 青藏公路沿线多年冻土监测场地活动层厚度处于持续增加过程, 活动层厚度平均增大了 67 cm, 增加率大约为 2.1~16.6 cm a^{-1}, 平均增加率为 7.5 cm a^{-1} (如图 2)[49], 其他场地活动层厚度年增加率约为 4 cm a^{-1}[22]. 同时, 青藏高原活动层厚度在空间和时间上表现出显著的差异, 中高山区低温多年冻土区(年平均地温<–1.5℃), 活动层厚度变化速率为 5 cm a^{-1}, 而谷地和高平原高温多年冻土区(年平均地温>–1.5℃), 活动层厚度变化速率达 11.2 cm a^{-1} [49].

在过去的几十年里, 多年冻土温度发生了显著的升温, 20 世纪 70~90 年代季节冻土和岛状多年冻土年平均地温(地表下 12~15 m 深) 升高了 0.3~0.5℃, 大片连续多年冻土年平均地温升高 0.1~0.3℃[9,26,27], 1996~2001 年多年冻土上限附近温度升高了约 0.1~ 0.7℃[29]. 最近 10 年来多年冻土呈现出更明显的升温趋势, 多年冻土上限附近温度升温速率达 0.06℃ a^{-1}[22], 6 m

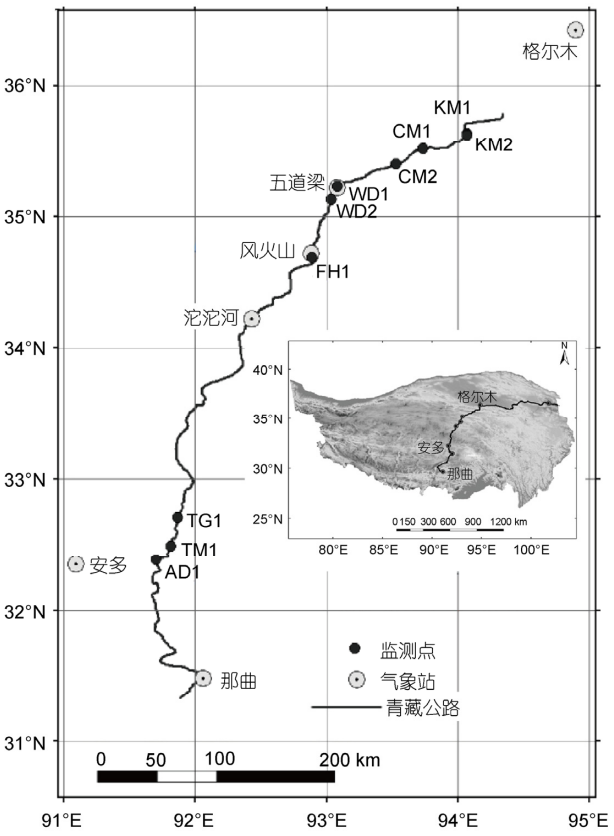

图 1 青藏公路沿线监测场地位置

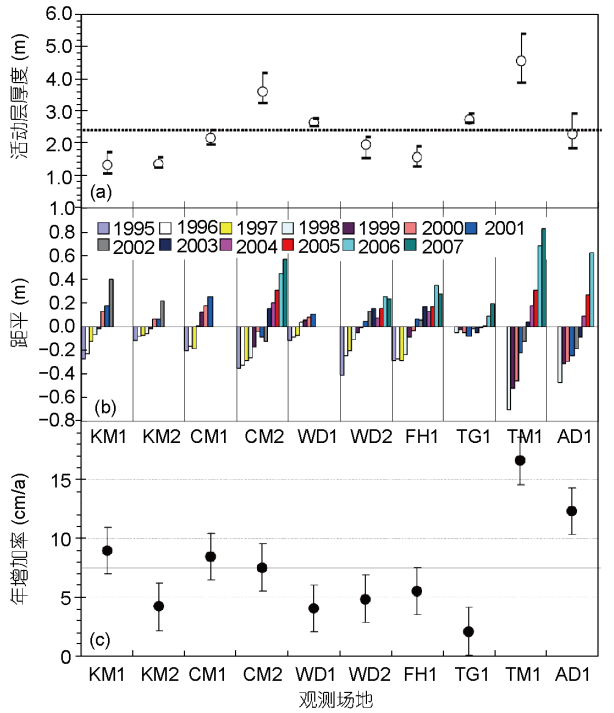

图 2 活动层厚度(a)、活动层厚度距平(b)和活动层厚度年增加率(c)

深多年冻土年平均温度升高了约 0.12~0.67℃，升温速率为0.01~0.06℃ a^{-1}，平均达0.04℃ a^{-1} (如图3)[10]. 青藏高原多年冻土温度在空间上和时间上也表现出显著的差异，中高山区低温多年冻土区，多年冻土升温速率达0.055℃ a^{-1}，而谷地和高平原高温多年冻土区，多年冻土升温速率为 0.023℃ a^{-1}. 多年冻土的相变过程显著地影响了多年冻土对气候变化的响应.

很明显，青藏高原活动层厚度和多年冻土温度显著大于我国其他多年冻土区的变化，对气候变化的响应区域差异显著，在空间上和时间上呈现出相反的变化趋势，可能局地因素起到了重要的作用. 但是气候因素，如气温和降水，也控制着多年冻土温度和活动层厚度的变化. 从活动层厚度变化与夏季浅层土体平均温度统计关系来看，活动层厚度变化与夏季土体平均温度(6~8 月)的升高有密切关系，与冬季土体平均温度(12~2 月)变化关系不显著[49,50]. 近10 年间青藏公路沿线四站(五道梁、风火山、沱沱河和安多)气温升高了 0.6~1.6℃，这一升温幅度足以引起多年冻土升温，但夏季降水增加和冬季降雪对土体温度升高有一定减缓作用. 6 m 深多年冻土温度升高主要在春夏季节较为显著，但青藏公路沿线四站冬季气温平均升高了约2.9~4.2℃，考虑到气温对6 m 深的多年冻土的影响一般要滞后 6 个月左右，因此，冬季气温升高是多年冻土升温的主要原因[10].

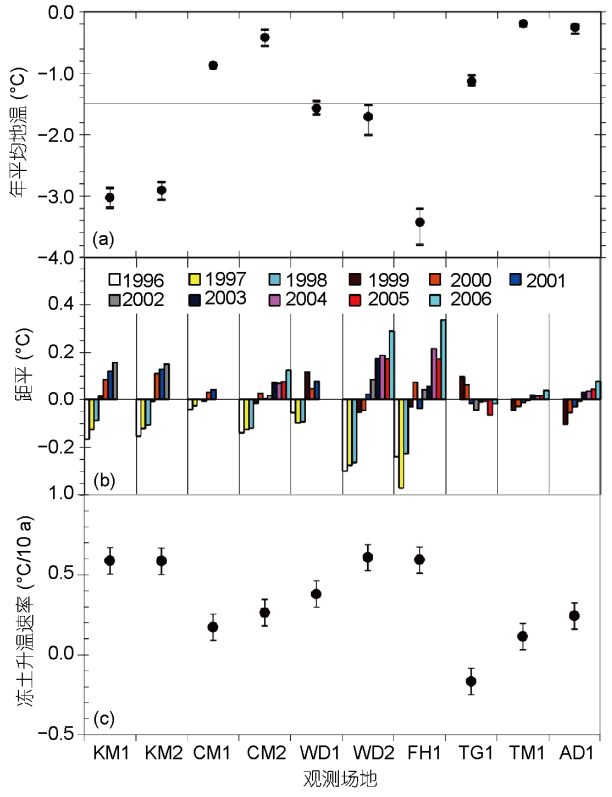

图 3　6 m 深多年冻土温度(a)、温度距平(b)和温度升温速率

2　多年冻土对工程活动的响应过程

多年冻土上修筑工程构筑物，由于改变了地表物理性质，导致了辐射能量结构和地表能量平衡的变化，引起工程结构物下部土体的冻融过程、多年冻土上限和冻土温度变化以及上限附近地下冰融化，进而影响工程结构物的稳定性. 因此，冻土工程设计中必须预估工程活动对多年冻土的影响，更好地采取冻融灾害防治技术措施来确保工程稳定性. 各国针对各种类型工程构筑物的稳定性开展了监测研究，加拿大地质调查局在 20 世纪 80 年代中期就从Mackenzie 三角洲、Tuktoyaktuk 半岛一直到阿尔伯塔北部设置了多年冻土热状态的监测网络，以评估Norman 输油管线工程对多年冻土的影响[51]. 1991 年加拿大与俄罗斯在西西伯利亚的 Nadym 地区及加拿大 Mackenzie River Valley 沿多年冻土区输油管线开展了活动层过程、多年冻土地温、季节融化深度和融化下沉变形的监测[52~54]. 1998 年欧洲设立了欧洲气候变化和多年冻土研究大科学计划，专门研究气候变化、多年冻土退化和岩土工程灾害问题[55]. 我国围绕着青藏公路和青藏铁路建立了工程影响下多年冻土变化的监测网络，主要监测工程活动下多年冻土变化及路基稳定性[56,57]. 近年来，在总结 20 世纪 90 年代到 21 世纪以来青藏公路冻土工程研究取得的重要进展[58]的基础上，围绕着青藏公路与冻土间相互作用[59]、青藏公路工程地质特征与冻土过程[60,61]、人类工程活动对冻土环境的影响[62]、工程活动下冻土热稳定性和热融敏感性[63]等方面开展大量的研究工作，定量研究了沥青路面下部冻土的热状态和能量收支[64]、公路路基变形特征及影响因素[65,66]，总结和剖析了近年来青藏高原多年冻土区公路修筑技术的最新进展[67].

青藏公路修筑后，由于沥青路面吸热效应的影响，路基下部多年冻土上限深度逐年持续增大(图4(a))，多年冻土上限增大幅度存在较大的区域差异(图 4(b)). 图 4(b)表明，路基下部多年冻土上限与冻土热稳定性具有密切的关系，中高山区低温多年冻土(年平均地温<–1.5℃)，如 KM1, KM2, WD2 和 FH1

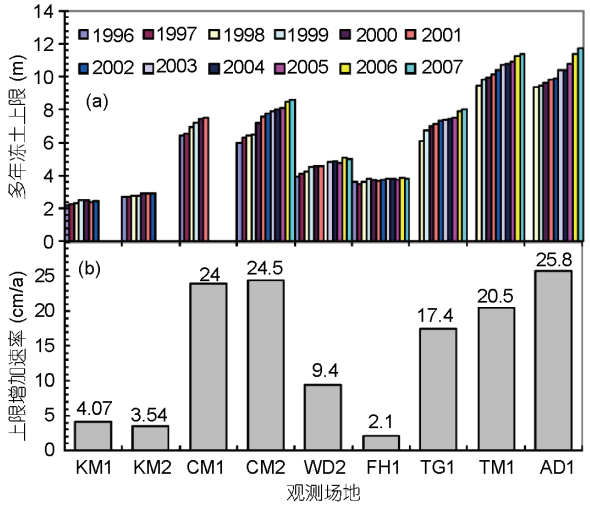

图 4 青藏公路路基下多年冻土上限(a)和上限增加速率(b)

场地, 上限增加速率变化范围介于 2.1~9.4 cm a^{-1} 之间, 平均值为 4.8 cm a^{-1}[68]. 谷底和高平原区高温多年冻土(年平均地温>−1.5℃), 如 CM1, CM2, TG1, TM1 和 AD1 场地, 上限增加率变化范围介于 17.4~25.8 cm a^{-1} 之间, 平均值为 22.5 cm a^{-1}[68]. 低温多年冻土区修筑沥青路面近 35 年, 上限加深最大仅 23 cm, 增加热阻、加高路基可保证路基稳定[59,64,67]. 然而, 高温多年冻土区修筑沥青路面, 上限加深最大超过 2 m, 增加热阻、加高路基无法保证路基稳定性, 需要采取特殊的设计才能保证路基稳定[59,67].

由于工程作用导致了路基内部土体吸热量大于放热量, 年内以吸热为主[64], 显著地引起了冻土温度升高. 近十几年来, 青藏公路路基下部冻土温度持续升高(图 5(a), (c)), 6 m 深冻土年平均温度 12 年间升高了 0.2~0.96℃, 平均升高了 0.44℃, 升温速率变化范围介于 0.018~0.087℃ a^{-1}(图 5(b)). 10 m 深冻土年平均温度 12 年间升高了 0.25~0.54℃, 平均升高了 0.37℃, 升温速率变化范围介于 0.022~0.052℃ a^{-1} (图 5(d))[68]. 路基下部冻土温度变化趋势具有一定的区域差异性, 在中高山区低温多年冻土升温幅度要小于谷底和高平原区高温多年冻土区[56], 但是这一特征在唐古拉山以北是符合的, 唐古拉山以南地区可能还受到其他因素的影响和控制.

多年冻土对工程作用和气候变化的响应过程是存在差异的, 工程影响是短期的快速过程, 气候变化是长期的缓慢过程. 对于中高山区低温多年冻土来说, 气候变化对上限和温度的影响比工程对其的影响要大(图 6), 对于谷底和高平原区高温多年冻土来说, 工程作用对上限和温度影响比气候对其的影响要大(图 6). 这主要是由于工程作用极大地放大了多年冻土变化, 这使得工程状态下的多年冻土变化对气候变化的影响不敏感. 但当工程作用的影响消除后, 气候变化对多年冻土变化的影响会逐渐显现出来. 根据气候变化下多年冻土现在升温速率来计算, 若气候变化对低温多年冻土变化的影响达到工程作用下的状态至少需要 50 年的时间[56]. 从目前青藏公路的修筑历史, 气候对低温多年冻土的影响尚未表现出来, 目前多年冻土热状态变化主要是受工程作

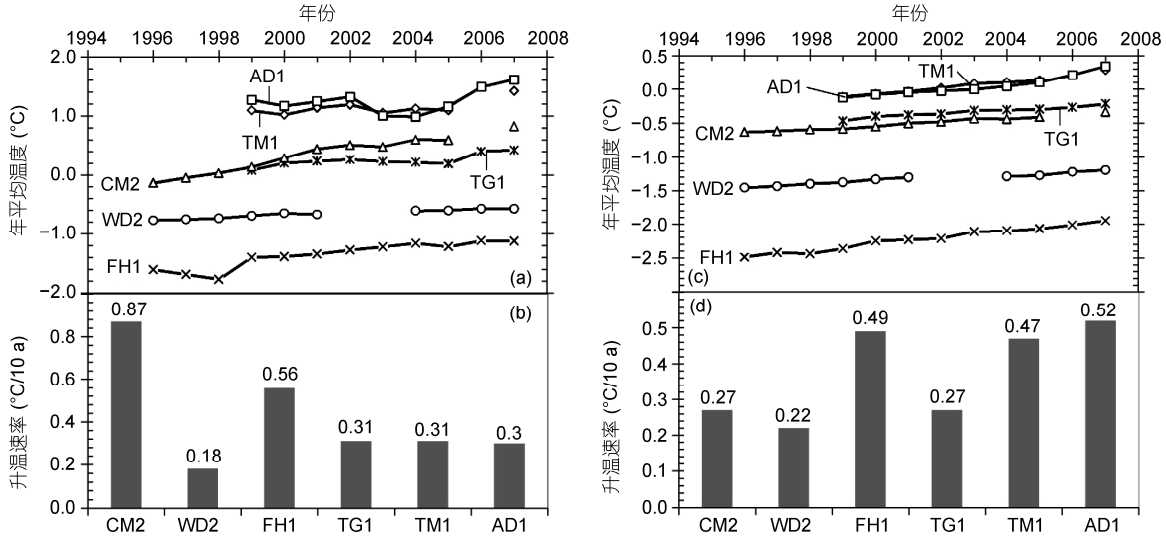

图 5 路基下部 6 m 深多年冻土年平均温度(a)和升温速率(b)、10 m 深多年冻土年平均温度(c)和升温速率(d)

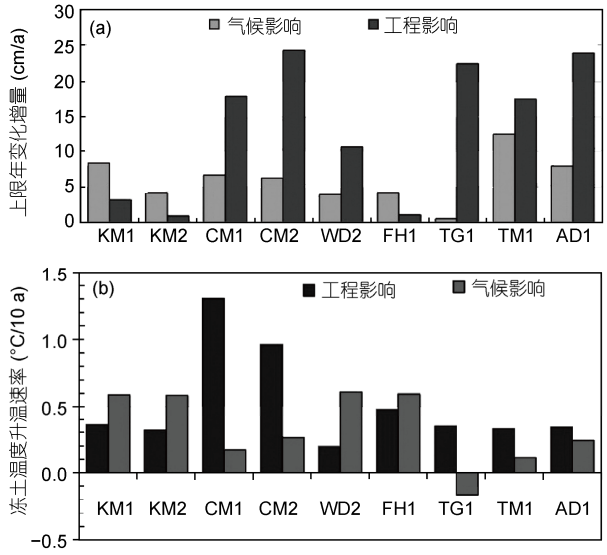

图 6　工程和气候影响下多年冻土上限(a)和 6 m 深冻土温度(b)变化

用的影响. 对于高温多年冻土, 若按照现在升温速率来计算, 气候变化对多年冻土影响要达到工程下多年冻土的热状态仅需要 20 年左右[56]. 而青藏公路修筑历史已远超过工程下多年冻土热状态, 因此, 目前的高温多年冻土要受到气候和工程的双重作用, 且主要受气候的长周期、缓慢过程和工程的短周期、快速过程的耦合作用的控制.

受多年冻土变化影响, 青藏公路路基稳定性受到极大的影响, 路基变形也与多年冻土的热稳定性有密切的关系, 当年平均地温高于−1.5℃, 路基变形速率达到了 4~10 cm a^{-1}, 年平均地温低于−1.5℃, 路基变形小于 4 cm a^{-1} [59,65,66]. 高含冰量多年冻土(体积含冰量>25%)发生融化常导致较大路基沉降, 且与多年冻土融化速率成正比, 相关系数均在 0.85 以上[68], 说明较大的路基变形是以冻土融化为主要的变形源.

3　青藏铁路工程稳定性动态变化

青藏铁路与公路工程地表有较大差异, 公路沥青路面相对封闭不透气, 铁路道咋可以透气, 因而青藏铁路工程对其下部多年冻土热力稳定性影响是不同的. 虽然公路和铁路都要面临高温高含冰量冻土对工程作用和气候变化影响的高敏感性问题[14,69], 但由于工程构筑物使用寿命和服役性能不同, 对冻土影响的关注角度也差异较大. 为了解决青藏铁路高温高含冰量冻土对气候变化和工程活动的高敏感性问题, 提出了“冷却路基、降低多年冻土温度”的设计思想[70], 并提出了通过调控热的传导、对流和辐射的技术措施实现“冷却路基”的设计思想[13,17,18]. 同时针对青藏铁路建设难度和复杂性, 又提出了“动态反馈设计”思路, 通过“设计-监测-预测-反馈管理”循环往复来实践青藏铁路冻土工程优化设计[71]. 设计参数、监测和预测环节是实施“冷却路基、降低多年冻土温度”的核心. 因此, 青藏铁路冻土工程研究主要围绕着这些方面开展了大量的研究工作.

青藏铁路建设之初, 在清水河、北麓河和沱沱河建立了 3 个不同冻土类型的试验段, 开展了大量的工程技术措施研究, 对不同工程技术措施对冻土的保护作用给予了工程实践评价[72,73]. 路基中铺设保温材料尽管可以延缓路基下部冻土的融化, 但不能根本上解决冻土路基稳定性的问题[74,75]. 然而, 热棒和保温材料结合可以较好地弥补保温材料单纯依靠热阻保护冻土的缺陷, 可以很好地抵御气候变化的影响[76,77]. 热棒结构主要是一种将冬季空气冷量导入到路基土体, 将路基下部冻土中的热量带出路基一种单向导热装置, 具有显著的冷却路基工程效果, 在美国和加拿大的多年冻土区广泛使用[78~80], 在青藏公路和青藏铁路冻土工程也得到了广泛应用[81~84]. 通风管路基结构主要是通过强迫对流来有效地降低路基下部多年冻土的温度[85,86], 具有抵御气候变暖能力[87~89]. 块石结构路基, 如块石基底路基结构、块碎石护坡、U 型块石路基, 对多年冻土均具有较强的保护作用, 且 50 年气温升高 2.6℃路基下部冻土仍不会发生融化[90~93], 在青藏铁路冻土工程得以广泛使用[72]. 遮阳板和遮阳蓬通过大幅减少路基表面的太阳辐射以保护冻土路基, 遮阳板下坡面平均温度比遮阳板外的坡面低 3.2℃, 比天然地表低 1.5℃, 减少了进入路基的热量[13,94,95]. 近年来提出了一些新型路基结构, 以达到冷却路基结构的目的[96], 整体上工程技术措施对多年冻土的保护作用对于青藏铁路冻土工程设计和建设起到了重要的作用.

青藏铁路运营阶段, 青藏铁路冻土路基工程热力稳定性是最重要的研究工作之一. 为此在青藏铁路沿线布设了多年冻土和路基稳定性监测系统[57,97], 通过这些数据开展了路基下部冻土热力稳定性的动态变化、路基阴阳坡辐射影响差异分析, 全面掌握了冻土变化和路基稳定性的动态过程[98~102].

3.1 青藏铁路多年冻土的热状态和路基变形

从青藏铁路块石基底路基的应用效果及对多年冻土的降温作用来看, 多年冻土热稳定性不同, 对路基下部多年冻土保护作用机制是不同的. 对于年平均地温低于–2.0℃的低温多年冻土区, 无论是块石基底路基还是普通路基下部, 土体温度具有显著的降温趋势(图 7(a)和(b)), 即块石基底路基和普通路基土体在冬季冷量除用于夏季融化的土层的冻结, 尚有多余“冷量”用于下部土体降温[98~99]. 对于块石基底路基来说, 2006~2010 年路基下部土体年平均降温速率在 0.088~0.11℃ a^{-1} 范围变化, 5 m 范围内土体降温速率随深度逐渐增大, 甚至路基下部 10 m 深土体也处于降温状态(图 7(a)). 对于普通路基, 2006~2010 年, 路基下部土体年平均降温速率在 0.13~0.10℃ a^{-1} 范围变化, 且随深度降温速率在逐渐减小[103]. 同时块石基底路基和普通路基多年冻土上限已抬升至路堤本体中, 且新形成的上限相对稳定, 整体上呈现降温趋势. 路基变形主要是以冻胀为主, 5 年冻胀总变形量小于 2 cm, 路基总体是稳定的[100].

对于年平均地温为–1~–2℃的低温基本稳定多年冻土来说, 无论是块石基底路基还是普通路基下部土体均具有显著的降温趋势(图 8(a)和(b)), 但块石基底路基下部土体温度的降温幅度要比普通路基下部土体的降温幅度大约 1~1.5℃[98,99,101,102]. 块石基底路基具有显著的抬升多年冻土上限的作用, 且新形成的上限附近多年冻土温度具有显著的降低趋势. 对于普通路基来说, 多年冻土上限虽也有显著抬升, 但抬升幅度小于块石基底路基, 同时新形成的上限附近土体温度趋于稳定. 路基变形主要以沉降变形为主, 5 年内总变形量小于 5 cm, 冻土路基基本是稳定的, 但普通路基变形要大于块石基底路基, 且存在显著的不均匀沉降变形[100].

对于年平均地温高于–1.0℃高温不稳定和极不稳定多年冻土来说, 块石基底路基下部土体温度随时间逐渐降低, 具有明显的降温趋势, 但降温幅度比低温多年冻土要小. 由于高温不稳定多年冻土本身热稳定较差, 块石基底路基随着时间发展逐渐发挥保护多年冻土的作用, 冻土未出现显著升温趋势[98~101]. 路基变形相对是稳定的, 且路基差异性变形较小. 对于普通路基来说, 相同深度的土体温度比块石基底路基下的温度高 2℃左右, 且具有显著的升高趋势. 路基下部土体在受到工程热扰动或路堤土

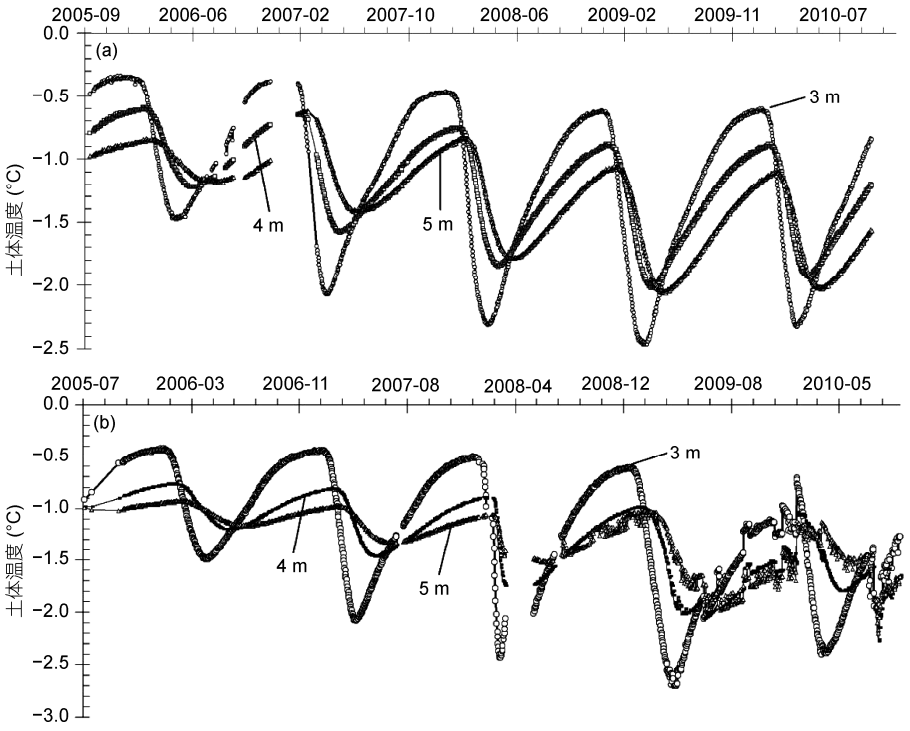

图 7 低温多年冻土区块石基底(a)和普通路基(b)下部冻土温度变化

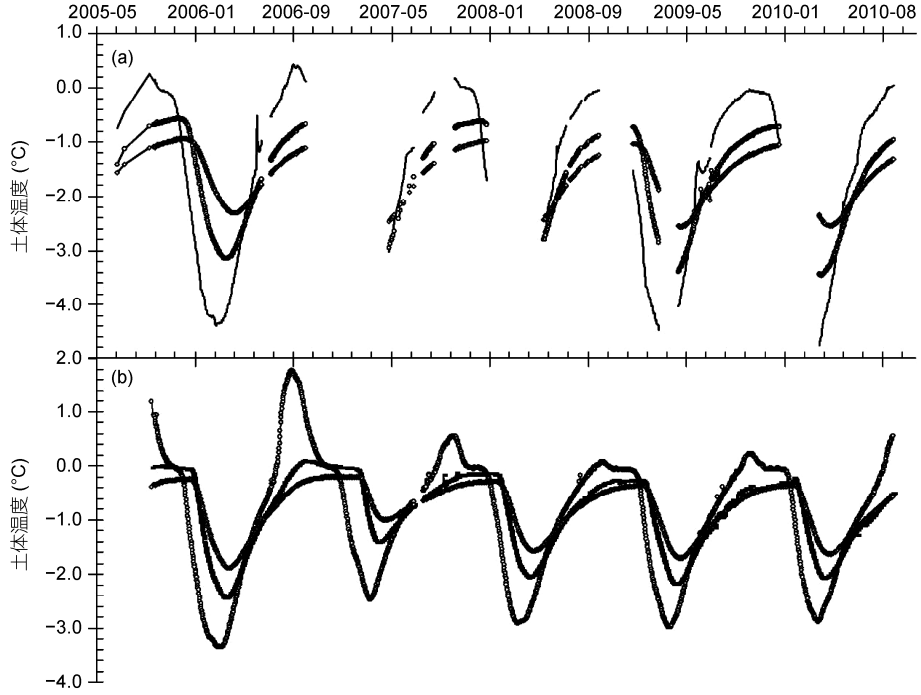

图 8　低温基本稳定多年冻土区块石基底(a)和普通路基(b)下部冻土温度变化

体热阻影响改变了原有土体的热平衡状态，导致了下部土体温度逐渐升高，多年冻土上限已开始下降[98,103]. 路基下部冻土融化已导致普通路基变形较大，路基变形超过 5 cm，5 个监测断面路基变形已超过 10 cm [100].

总体而言，块石基底结构能有效地降低路基下部冻土温度，抬升多年冻土上限，路基总体是稳定的. 普通路基下低温多年冻土也可获得多余冷量用于土体降温，上限抬升. 对于高温多年冻土来说，冻土热稳定性较差，路基下冻土上限下降，路基变形较大，且路基差异性变形较大，严重影响路基稳定性.

3.2　路基边坡的阴阳坡热效应

由于太阳辐射对路基边坡的热影响，使路基向阳坡和背阴坡接收太阳辐射差异较大，从而引起了多年冻土温度差异和上限表现出不均匀现象[104,105]，并导致大量的工程问题，如不均匀变形、纵向裂缝等[66,106,107]. 路基边坡内土体热状态差异导致了路基下部土体冻结和融化特征也存在差异[106,107]，路基向阳坡和背阴坡浅层地温与太阳辐射有密切的关系[108]. 青藏铁路采用了块碎石边坡厚度不等的特殊设计减缓了这种阴阳坡效应，使温度场趋于对称，减少了不均匀沉降[109].

根据青藏铁路长期监测数据，路基边坡阴阳坡下部冻土温度场和多年冻土上限存在较大差异，但低温多年冻土区路基的阴阳坡效应差异明显比高温冻土要弱，路基阳坡下多年冻土上限比阴坡深 1.5~2 m，使路基下部形成倾斜的冻融界面[110]. 所有监测断面温度差异较大，整体上路基边坡下部阴阳坡温度相差 0.5~3℃. 普通路基下部浅层阴阳坡温度平均相差 0.7~1.58℃，有工程措施路基下部浅层阴阳坡温度平均相差 0.23~1.2℃，说明工程技术措施显著抑制路基的阴阳坡差异，路基阴阳坡温度差主要是由冬季温度差异造成的[110]. 通过对这些断面的阴阳坡太阳辐射和边坡表面温度的计算，发现太阳辐射和边坡表面温度差异与路基走向成正相关关系(图 9)，这就给我们一个极为重要的启示，未来路基设计需要考虑路基走向对阴阳坡效应影响[110].

3.3　块石结构路基的降温机制和过程

块石结构路基是青藏铁路应用最为广泛的工程技术措施，包括有块石基底路基、块碎石护坡路基、U-型块石结构路基[17,70,71]，然而建设初期块石结构

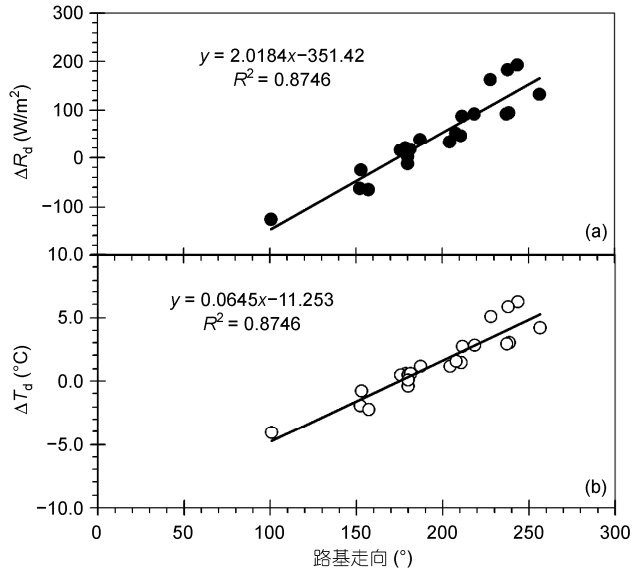

图 9 路基走向与路基边坡太阳辐射差(a)和表面温度差(b)关系

路基的降温机制还不十分清楚. 自然界广泛存在块石结构的降温现象[111~113], 常导致在年平均气温在0℃甚至更高温度的区域存在多年冻土, 这一现象主要与斜坡块石结构的"烟囱"效应[114]有关. 早在 1973 年, 程国栋等人[115~117]在祁连山区热水煤矿开展了块石路基试验段研究, 重点开展其降温效果观测研究. Goering 等人[118,119]开展了沥青路面下块石路基试验研究, 结果表明块石路基存在自然对流效应, 使路基下部冻土体大幅降温, 数值模拟也模拟到了块石路基的自然对流降温机制[120]. 青藏铁路冻土路基建设中要求在块石结构上铺设土层, 称为块石基底路基[72], 铺设于路基边坡的结构为块石护坡结构. 然而, 建设初期块石基底路基表现出何种降温机制、对路基下部的降温作用到底如何、块石结构路基被风沙堵塞后降温效果是否仍然存在等问题并未得到很好的解决. 因此, 在北麓河厚层地下冰多年冻土区建设了 300 m 长度块石结构降温机制试验段, 主要围绕块石路基结构在开放和封闭两种条件下开展了降温机制和过程研究[121~123]. 其中, 所谓开放条件是块石与大气之间相通的, 封闭条件是块石与大气之间是用土工布隔开并铺设厚 5 cm 土层.

(ⅰ) 块石基底路基. 块石基底路基设计和施工要求保证其具有大空隙结构, 室内实验结果表明一般 10~15 cm 粒径块石填筑空隙率大约为 45%左右[124]. 现场块石基底结构层内温度场监测数据表明, 在开放状态下, 块石基底路基在冬季主要表现为以通风作用为主的强迫对流效应和较弱的块石层侧向空气自然对流的复合过程(图 10(a)), 这一复合过程主要与风速和风向有关(图 11(a)~(c))[121~123]. 当风速较大时, 块石层内产生强迫通风效应; 当风速较小时, 在阴坡侧块石层内一定厚度内产生自然对流效应. 块石基底路基夏半年青藏高原风速相对较小, 强迫对流效应较弱, 块石层内主要以热传导作用为主, 但由于块石层内部的大空隙结构而产生一定的隔热作用. 因此, 在这种降温机制的驱动下, 块石基底路基对下部冻土产生了较强的降温效果, 土体温度表现出了较强的降温过程(图 12), 甚至块石基底路基下 10 m 深度冻土温度具有降低的趋势[121~123]. 然而, 在封闭状态下(如被风沙堵塞后), 由于阻断或大幅度地减弱了风的影响, 块石基底路基结构弱化了强迫对流过程(图 10(b)); 同时由于块石基底路基上部填土的影响, 块石层顶底板温差不足以驱动自然对流过程(图 11(d)). 因此, 在封闭状态下块石层内部主要以热传导过程为主, 块石层内的空隙起到了一定的隔热保温的作用. 然而, 尽管封闭状态不具有强迫对流效应, 但由于较强的隔热效应, 使得路基下部土体仍具有较强的降温趋势(图 12), 块石基底路基封闭后降温作用大幅度减弱[121~123].

(ⅱ) 块石护坡结构路基. 开放的块石结构铺设在路基边坡上后, 在温差和空气密度差的驱动下, 块石层大空隙结构使块石护坡结构层内表现出了烟囱效应, 是自然对流一种形式[125]. 块石护坡层内一年四季均可表现出涡状温度等值线分布的自然对流特征(图 13)[123,126], 也表现出密集平行温度等值线分布的隔热保温特征(图 14)[123,126], 自然对流和隔热保温特征在四季出现的时间有较大差异. 同时块石护坡层内烟囱效应和隔热保温效应具有日变化过程. 对于隔热保温效应, 夏秋季节主要发生在 9:00~18:00 气温升温时间段内, 对保护冻土具有显著的作用; 冬季主要发生在 0:00~9:00 低温时间段内, 对保护冻土是不利的; 春季由于气温频繁变化难以确定主要发生时间段. 对于自然对流的烟囱效应, 春夏秋季主要发生在 18:00~24:00 降温时间段内, 对保护冻土有利; 冬季主要发生在 12:00~18:00 高温时间段内, 但由于冬季气温仍为负温, 因此这一时段内发生的烟囱效应对保护冻土仍然是有利的[123]. 因此, 随着气候条件昼夜温差和季节性温度变化, 块石护坡层内隔热

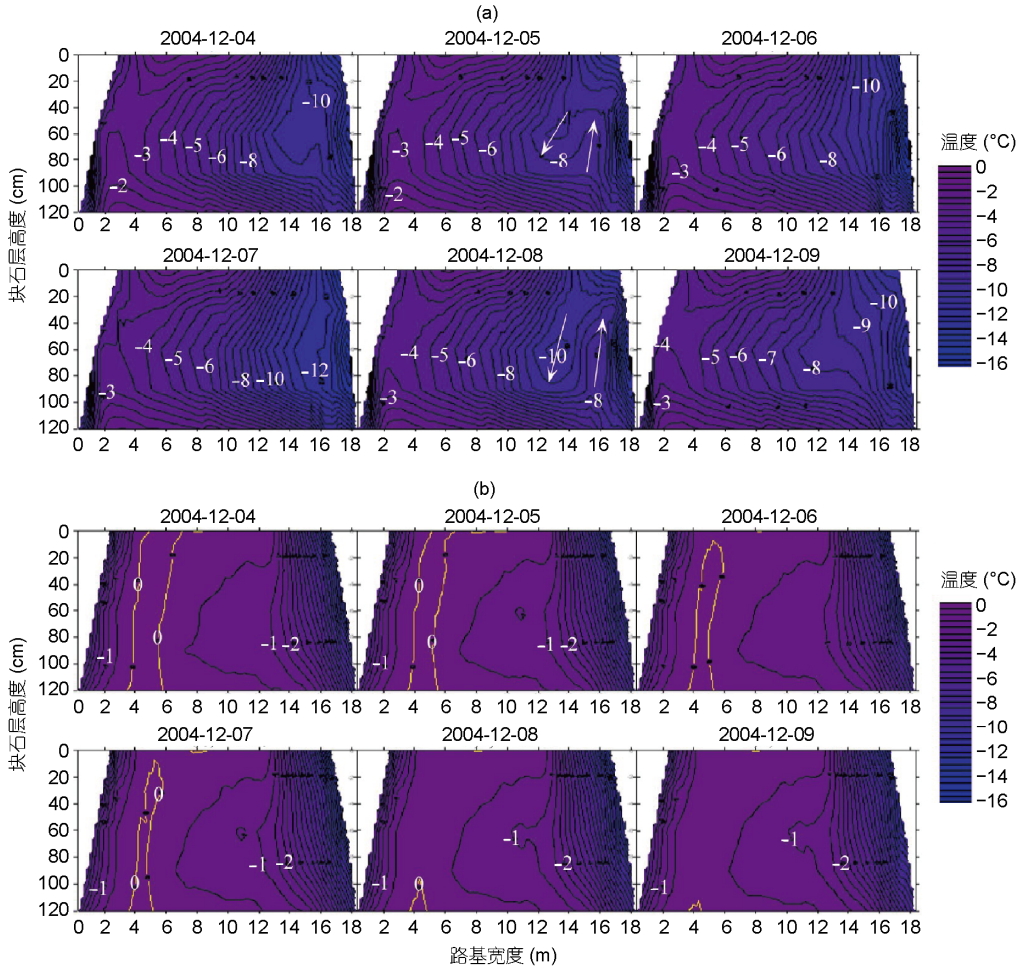

图 10　开放状态(a)和封闭状态(b)块石基底路基层温度等值线

保温和自然对流效应表现出了昼夜、季节性交替组合过程，这一交替组合过程引起了块石护坡层内热量传递过程变化，从而影响块石护坡下部多年冻土热状态. 块石护坡封闭后会弱化降温机制，而块石护坡结构增厚会强化降温机制.

由于块石护坡结构层铺设在路基边坡上，其对下部土体的降温作用受到了路堤本体热状态随气温变化的扰动，因此对路基下部的土体降温作用短期内不能够很好地显示出来(图 15)，且封闭和开放以及增厚条件下降温的差异在工程初期不显著. 随着时间推移，块石护坡层降温作用逐渐累积，土体温度逐年降低，其差异越加显著(图 15)[122].

4　讨论

气候变化对冻土工程有显著的影响，冻土工程需要考虑气候变化以保证长期稳定性和可靠性，考虑气候变化的冻土区工程设计已经突显其重要性. 过去几十年来青藏公路沥青路面修筑并未考虑气候变化影响，无论是在合理路基高度还是在工程技术措施上没有考虑气候变化的应对措施，从而引起了大量的冻土融化下沉病害. 青藏铁路工程设计和建设尽管考虑了气候变化和生态环境的影响，但由于无法定量评价和区分气候变化和工程热扰动对路基下部多年冻土的叠加影响程度和对工程稳定性影响的贡献，也只能够在工程设计中给出一个大的原则，后期通过监测进行工程设计的合理性和对气候变化的适应性评价，同时也使得未来类似工程设计中气候变化影响的考虑仍然只能泛泛而谈，相应的工程设计方法和思路还难以推广.

气候变化和人类工程活动影响导致了冻土区生

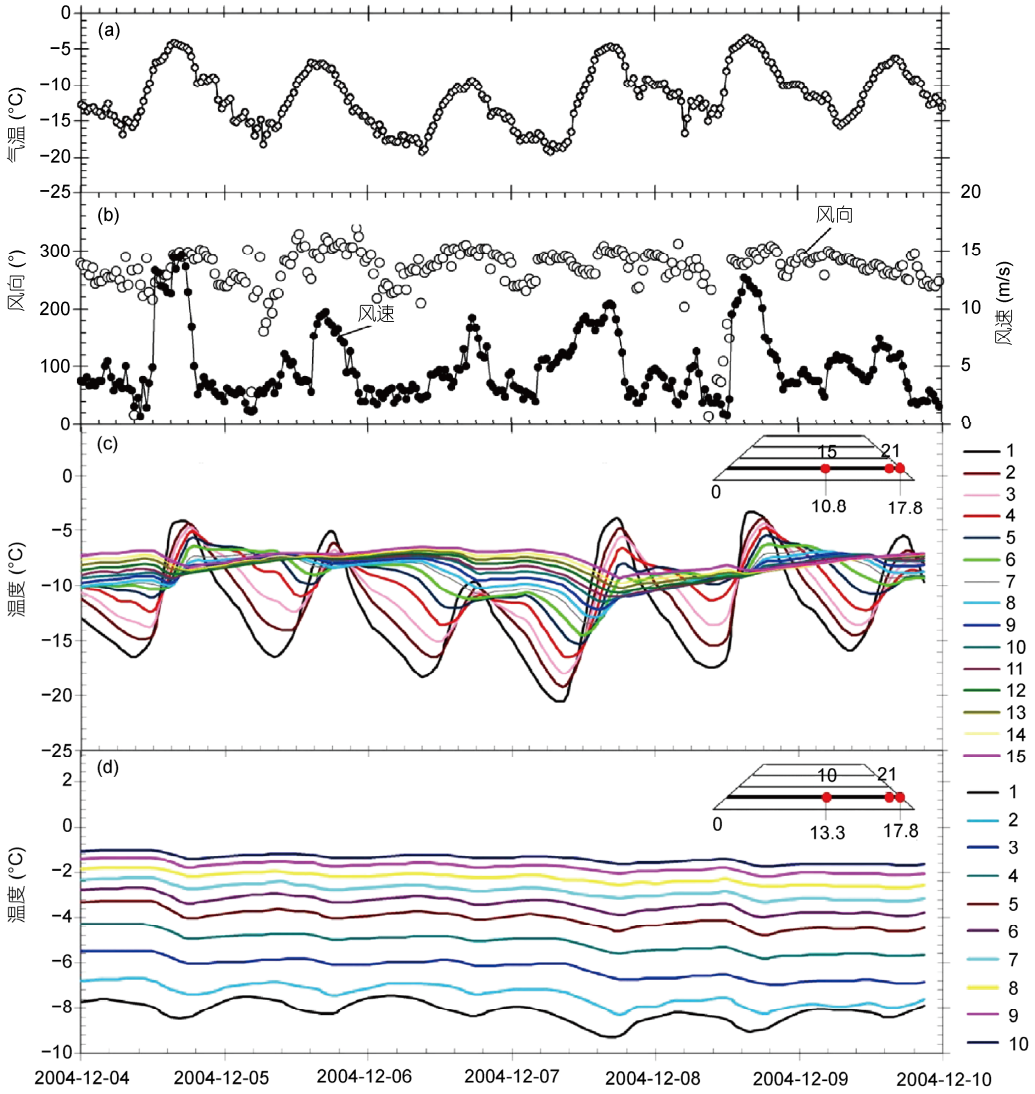

图 11 冬季气温(a)、风速(b)和开放状态(c)、封闭状态(d)块石层内部温度变化

态环境发生变化，生态环境变化诱发了局地地表沉降等地表过程，地表下沉已逐渐威胁和影响寒区工程稳定性. 目前冻土区路基工程所出现的较大路基变形的变形源无法给出合理的解释，是否与气候变化和人类工程活动所造成的地表整体下沉有关也有待研究. 工程活动引起了冻土环境发生较大的变化，反过来引起了生态环境的变化，包括植被退化、沙漠化等. 青藏铁路建设采取的环境保护措施和冷却路基的工程措施对生态系统影响较小，但可能仍然会存在对生态环境的长期潜在的影响，影响范围也许会扩大到区域尺度. 因此，如何来考虑敏感性地表下沉的影响是寒区工程设计亟待解决的问题.

综上所述，在气候变化和生态环境变化的背景下，需对多年冻土、气候、环境和工程置于一个系统中来综合分析研究. 因此，气候变化、工程活动和生态环境变化对冻土工程稳定性叠加影响机制，以及多年冻土热力稳定性对气候变暖和生态环境变化、人类工程活动的响应过程和机理研究成为制约冻土工程考虑气候变化和生态环境设计的瓶颈和难点，也将成为今后研究工作中的新趋势.

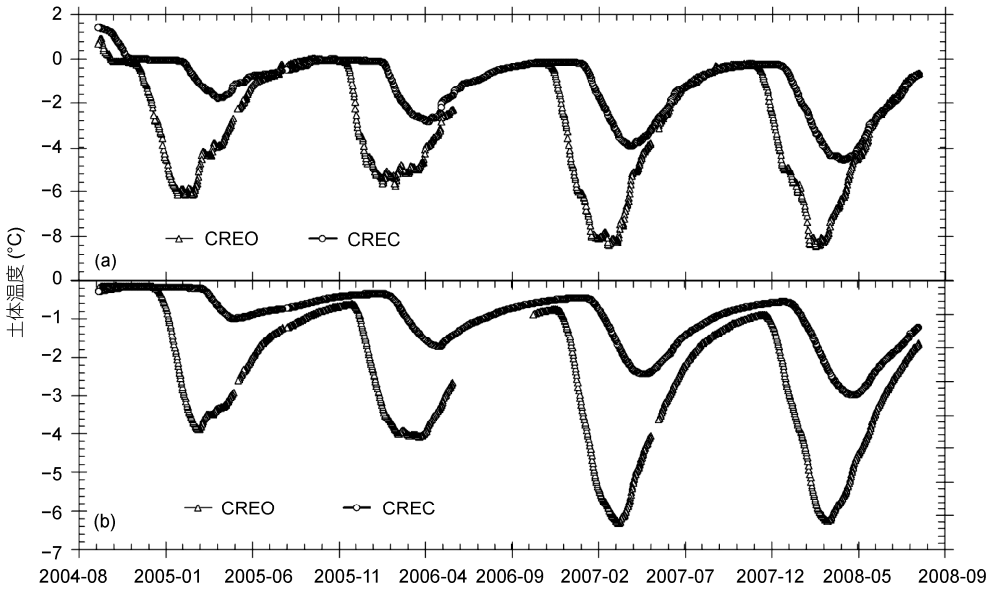

图 12　块石基底结构下部 0.5 m (a)和 2.5 m (b) 深土体温度状态

CREO 为开放状态, CREC 为封闭状态

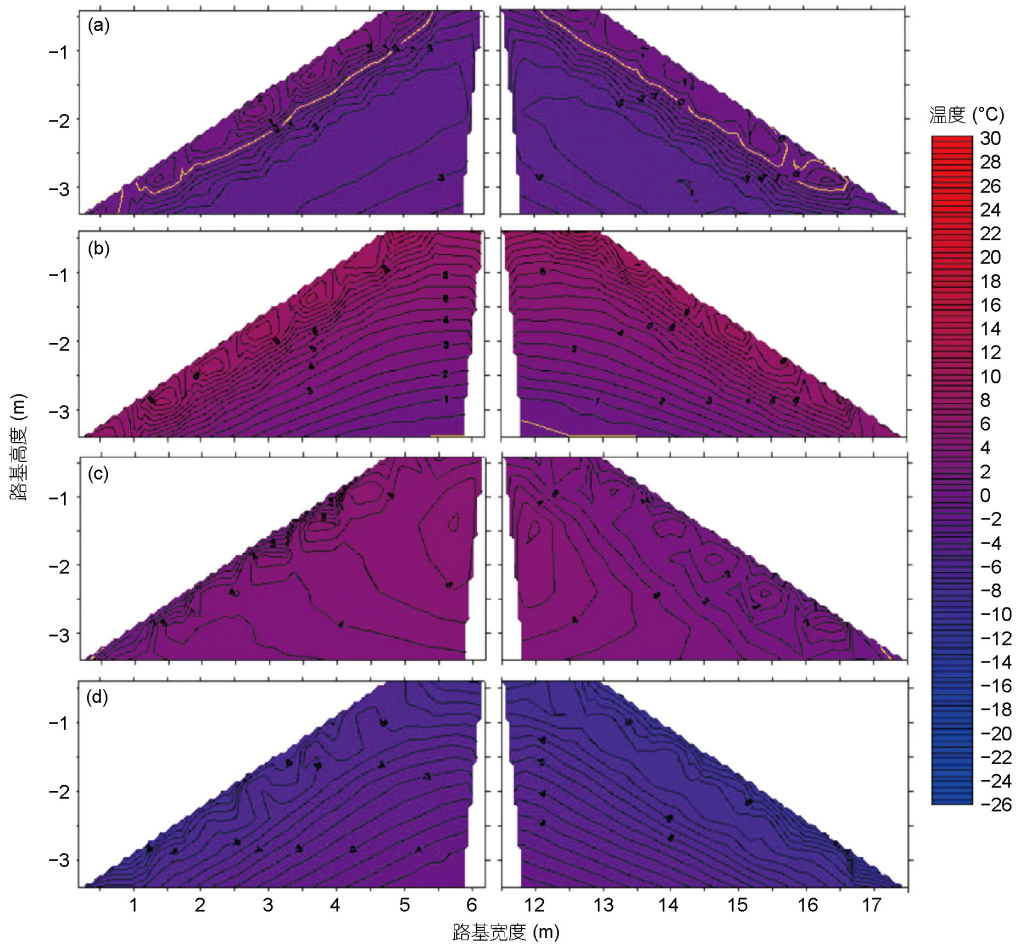

图 13　块石护坡层内春夏秋冬季节((a)~(d))自然对流特征

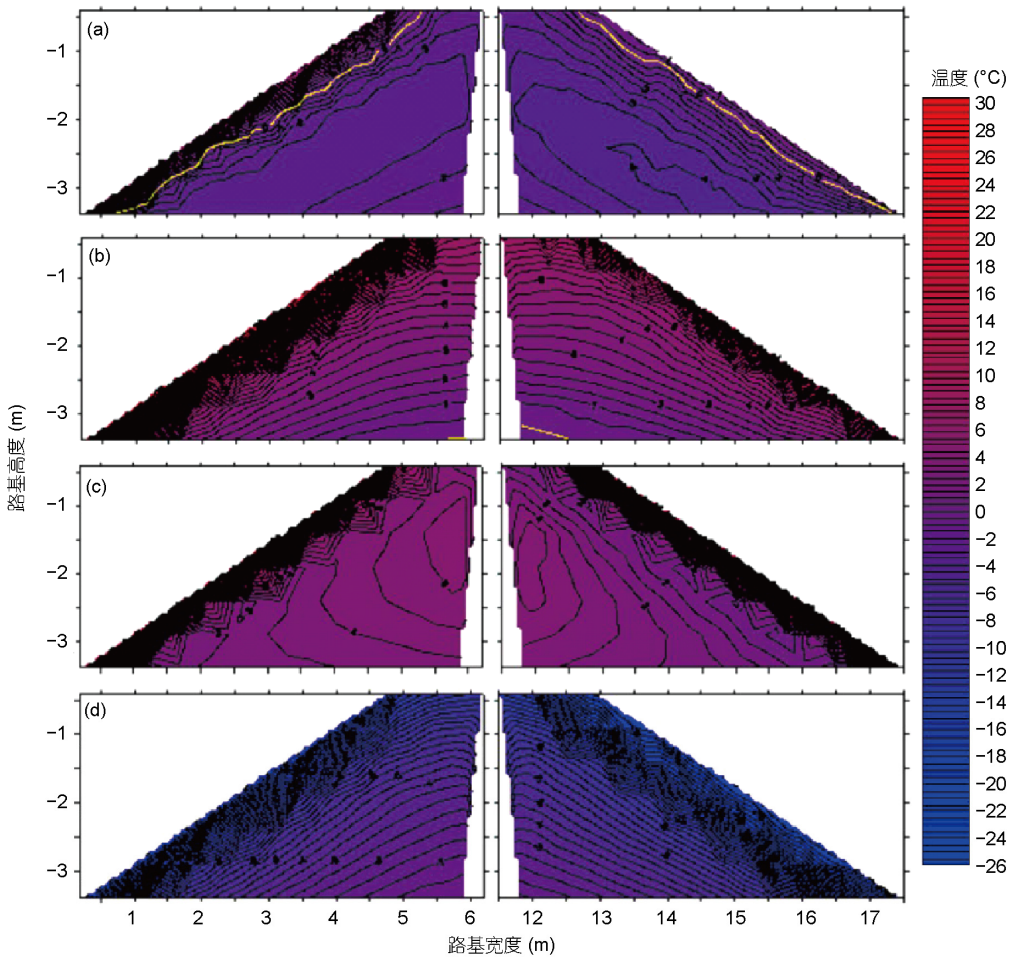

图 14　块石护坡层内春夏秋冬季节((a)~(d))隔热保温特征

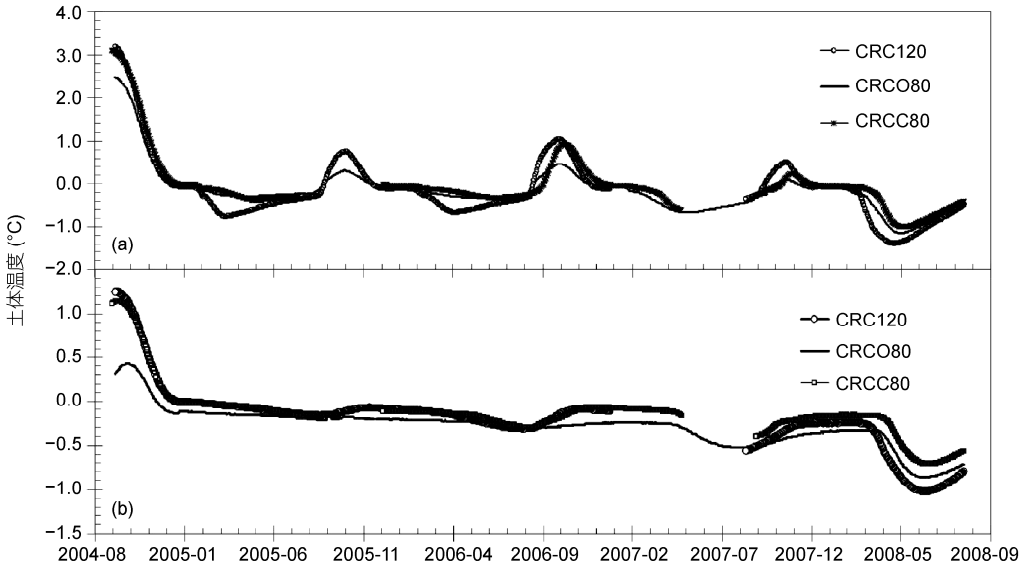

图 15　块石护坡结构路基下部 0.5 m (a)和原天然地表上限 2.5 m (b)土体温度变化

CRC120 为 120 cm 厚开放块石护坡, CRCO80 和 CRCC80 分别为 80 cm 厚开放和封闭块石护坡

参考文献

1 Zhang T, Barry R G, Knowles K, et al. Statistics and characteristics of permafrost and ground-ice distribution in the Northern Hemisphere. Polar Geogr, 1999, 23: 132–154
2 Zimov S A, Schuur E A G, Chapin F S. Permafrost and the global carbon budget. Science, 2006, 312: 1612–1613
3 Lachenbruch A H, Marshall B V. Changing climate: Geothermal evidence from permafrost in the Alaskan Arctic. Science, 1986, 234: 689–696
4 Nelson F E, Anisimov O E, Shiklomanov N I. Climate change and hazard zonation in the circum-Arctic Permafrost Regions. Nat Hazards, 2002, 26: 203–225
5 Jorgenson M T, Racine C H, Walters J C, et al. Permafrost degradation and ecological change associated with a warming climate in central Alaska. Clim Change, 2001, 48: 551–557
6 程国栋, 王绍令. 试论中国高海拔多年冻土带的划分. 冰川冻土, 1982, 4: 1–17
7 周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土. 北京: 科学出版社, 2000
8 王根绪, 李元寿, 吴青柏, 等. 青藏高原冻土区冻土与植被的关系及其对高寒生态系统的影响. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2006, 36: 743–754
9 Cheng G D, Wu T. Responses of permafrost to climate change and their environmental significant, Qinghai-Tibet Plateau. J Geophys Res, 2007, 112: F02S03, doi: 10.1029/2006/JF000631
10 Wu Q B, Zhang T J. Recent permafrost warming on the Qinghai-Tibetan Plateau. J Geophys Res, 2008, 113: D13108, doi: 10.1029/2007JD009539
11 Harris R B. Rangeland degradation on the Qinghai-Tibetan plateau: A review of the evidence of its magnitude and causes. J Arid Environ, 2010, 74: 1–12
12 Sheng Y, Zhang J M, Liu Y Z, et al. Thermal regime in the embankment of Qinghai-Tibet Highway in permafrost regions. Cold Regions Sci Technol, 2002, 35: 35–44
13 Wu Q B, Cheng G D, Ma W, et al. Technical approaches on permafrost thermal stability for Qinghai-Tibet Railway. Geomech Geoeng: Int J, 2006, 1: 119–127
14 吴青柏, 程国栋, 马巍. 多年冻土变化对青藏铁路工程的影响. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2003, 33: 115–122
15 Tong C J, Wu Q B. The effect of climate warming on the Qinghai-Tibet Highway. Cold Reg Sci Technol, 1996, 24: 101–106
16 程国栋. 青藏铁路工程与多年冻土相互作用及环境效应. 中国科学院院刊, 2002, 1: 21–25
17 马巍, 程国栋, 吴青柏. 多年冻土地区主动冷却地基方法研究. 冰川冻土, 2002, 24: 579–587
18 Cheng G D. A roadbed cooling approach for the construction of Qinghai-Tibet Railway. Cold Reg Sci Technol, 2005, 42: 169–176
19 Romanovsky V E, Smith S L, Christiansen H H. Permafrost thermal state in the Polar northern hemisphere during the International Polar Year 2007–2009: A Synthesis. Permafrost Periglac Process, 2010, 21: 106–110
20 Smith S L, Romanovsky V E, Lewkowicz A G, et al. State of permafrost in North America: A contribution to the International Polar Year. Permafrost Periglac Process, 2010, 21: 117–135
21 Romanovsky V E, Drozdov D S, Oberman N G, et al. Thermal state of permafrost in Russia. Permafrost Periglac Process, 2010, 21: 136–155
22 Zhao L, Wu Q B, Marchenko S S, et al. Thermal state of permafrost and active layer incentral Asia during the International Polar Year. Permafrost Periglac Process, 2010, 21: 198–207
23 Christiansen H H, Etzelmuller B, Isaksen K, et al. The thermal state of permafrost in the Nordic area during the International Polar Year 2007–2009. Permafrost Periglac Process, 2010, 21: 156–181
24 Cheng G D, Dramis F. Distribution of mountain permafrost and climate. Permafrost Periglac Process, 1992, 3: 83–91
25 Cheng G D, Huang X M, Kang X C. Recent permafrost degradation along the Qinghai-Tibet Highway. In: Proceedings of 6th International Conference on Permafrost. Guangzhou: South China University of Technology Press, 1993. 1010–1013
26 王绍令. 近数十年来青藏公路沿线多年冻土变化. 干旱区地理, 1993, 16: 1–7
27 Jin H, Li S, Cheng G, et al. Permafrost and climatic change in China. Glob Planet Change, 2000, 26: 387–404
28 Wang S L, Jin H J, Li S X, et al. Permafrost degradation on the Qinghai-Tibet Plateau and its environmental impacts. Permafrost Periglac Process, 2000, 11: 43–53
29 Wu Q, Liu Y. Ground temperature monitoring and its recent change in Qinghai-Tibet Plateau. Cold Reg Sci Technol, 2004, 38: 85–92
30 赵林. 青藏高原多年冻土活动层的冻融过程以及季节冻土的变化. 博士学位论文. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2004. 98

31 King L, Herz T, Hartmann H, et al. The PACE monitoring strategy: A concept for permafrost research in Qinghai-Tibet. Quat Int, 2006, 154-155: 149–157

32 丁永建, 叶佰生, 刘时银, 等. 青藏高原大尺度冻土水文监测研究. 科学通报, 2000, 45: 208–213

33 Yang M X, Yao T D, Gou X H, et al. The soil moisture distribution and melting-freezing processes and their effects on seasonal transition in Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau. J Asian Earth Sci, 2003, 21: 456–464

34 杨梅学, 姚檀栋, 勾晓华, 等. 青藏高原表层土壤的日冻融循环. 科学通报, 2006, 51: 1974–1976

35 Li X, Cheng G D, Jin H J. Cryospheric change in China. Glob Planet Change, 2008, 62: 210–218

36 Yang M X, Nelson F E, Shiklomanov N I, et al. Permafrost degradation and its environmental effects on the Tibetan Plateau: A review of recent research. Earth-Sci Rev, 2010, 103: 31–44

37 Wu Q B, Li X, Li W J. The prediction of permafrost change along the Qinghai-Tibet Highway, China. Permafrost Periglac Process, 2000, 11: 371–376

38 Li X, Cheng G D, Wu Q B, et al. Modeling Chinese cryospheric change by using GIS technology. Cold Reg Sci Technol, 2003, 36: 1–9

39 南卓铜, 李述训, 程国栋. 未来 50 与 100 a 青藏高原多年冻土变化情景预测. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, 34: 528–534

40 Pang Q Q, Cheng G D, Li S X, et al. Active layer thickness calculation over the Qinghai-Tibet Plateau. Cold Reg Sci Technol, 2009, 57: 23–28

41 Zhang Z Q, Wu Q B. Freeze-thaw hazard zonation and climate change in Qinghai-Tibet Plateau permafrost. Nat Hazards, 2012, 61: 403–423

42 Wu T H, Li S X, Cheng G D, et al. Using ground-penetrating radar to detect permafrost degradation in the northern limit of permafrost on the Tibetan Plateau. Cold Reg Sci Technol, 2005, 41: 211–219

43 金会军, 赵林, 王绍令, 等. 青藏公路沿线冻土的地温特征及退化方式. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2006, 36: 1009–1019

44 吴吉春, 盛煜, 吴青柏, 等. 青藏高原多年冻土退化过程及方式. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, 39: 1570–1578

45 Zhao L, Ping C L, Yang D, et al. Changes of climate and seasonally frozen ground over the past 30 years in Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau, China. Glob Planet Change, 2004, 43: 19–31

46 赵林, 刘广岳, 焦克勤, 等. 1991 年以来天山乌鲁木齐河源地区多年冻土变化. 冰川冻土, 2010, 32: 223–230

47 金会军, 王绍令, 吕兰芝, 等. 兴安岭多年冻土退化特征. 地理科学, 2009, 29: 223–228

48 Jin H J, Hao J Q, Chang X L, et al. Zonation and assessment of frozen-ground conditions for engineering geology along the China-Russia Crude Oil Pipeline route from Mo'he to Daqing, Northeastern China. Cold Reg Sci Technol, 2010, 64: 213–225

49 Wu Q, Zhang T. Changes in active layer change on the Qinghai-Tibetan Plateau from 1995–2007. J Geophys Res, 2010, 115: D09107, doi: 10.1029/2009JD01297

50 吴青柏, 陆子建, 刘永智. 青藏高原多年冻土监测及近期变化. 气候变化研究进展, 2005, 1: 26–28

51 Brown J, Hemming J E. Workshop on environmental protection of permafrost terrain. Northern Eng, 1980, 12: 30–36

52 Burgess M M, Smith S L. 17 years of thaw penetration and surface settlement observations in permafrost terrain along the Norman Wells pipeline, Northwest Territories, Canada. In: Herberli W, Brandova D, eds. Proceedings of the 8th International Conference on Permafrost, Zurich, Switzerland, 2003. 107–112

53 Smith S L, Burgess M M, Riseborough D W. Ground temperature and thaw settlement in frozen peatlands along the Norman Wells pipeline corridor, NWT Canada: 22 years of monitoring. In: Kane D L, Hinkel K M, eds. Proceedings of Ninth International Conference on Permafrost, Vol.2. Fairbanks Alaska: Institute of Northern Engineering, University of Alaska Fairbanks, 2008. 1665–1670

54 Smith S L, Nguyen T N, Riseborough D W, et al. Baseline geotechnical and permafrost data from new field sites established in the Mackenzie corridor south of Norman Wells, Northwest Territories. Geol Survey Can, Current Res, 2010, 2: 15

55 Harris C, Arenson L U, Christianen H H, et al. Permafrost and climate in Europe: Monitoring and modeling thermal, geomorphological and geotechnical responses. Earth-Sci Rev, 2009, 92: 117–171

56 Wu Q B, Dong X F, Liu Y Z. Responses of permafrost on the Qinghai-Tibet Plateau to climate change and engineering action. Arct Antarct Alp Res, 2007, 39: 682–687

57 Wu Q B, Liu Y Z, Yu H. Monitoring network of the permafrost conditions and embankment performance along the Qinghai-Tibet Railway. In: Kane D L, Hinkel K M, eds. Proceedings of 9th International Conference on Permafrost, Vol 1. Fairbanks Alaska: Institute of Northern Engineering, University of Alaska Fairbanks, 2008. 1963–1968

58 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. Permafrost Periglac Process, 2002, 13: 199–205

59 吴青柏, 施斌, 刘永智. 青藏公路沿线多年冻土与公路间相互作用过程研究. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2002, 32: 214–520

60 Wu Q B, Shi B, Fan H Y. Engineering geological characteristics and processes of permafrost along the Qinghai-Xiang (Tibet) Highway. Eng Geol, 2003, 68: 387–396

61 Jin H J, Wei Z, Wang S L, et al. Assessment of frozen-ground conditions for engineering geology conditions along the Qinghai-Tibet highway and railway, China. Eng Geol, 2008, 101: 96–109
62 吴青柏, 朱元林, 刘永智. 人类工程活动下冻土环境变化评价模型. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2002, 32: 141–148
63 Wu Q B, Zhu Y L, Liu Y Z. Evaluation model of permafrost thermal stability and thermal thawing sensibility under Engineering Activity. Cold Reg Sci Technol, 2002, 34: 19–30
64 Sheng Y, Zhang J M, Liu Y Z, et al. Thermal regime in the embankment of Qinghai-Tibetan Highway in permafrost regions. Cold Reg Sci Technol, 2002, 35: 35–44
65 刘永智, 吴青柏, 张建明. 多年冻土路基变形研究. 冰川冻土, 2002, 24: 10–15
66 俞祁浩, 刘永智, 童长江. 青藏公路路基变形分析. 冰川冻土, 2002, 24: 623–627
67 汪双杰, 陈建兵, 章金钊, 等. 青藏高原多年冻土区公路修筑技术之进展. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2009, 39: 8–15
68 Wu Q B, Zhang Z Q, Liu Y Z. Long-term thermal effect of asphalt pavement on permafrost under embankment. Cold Reg Sci Technol, 2010, 60: 221–229
69 程国栋, 赵林. 青藏高原开发中的冻土问题. 第四纪研究, 2000, 20: 521–531
70 程国栋. 用冷却路基的方法修建青藏铁路. 中国铁道科学, 2003, 24: 1–4
71 Ma W, Cheng G D, Wu Q B, et al. Application on idea of dynamic design in Qinghai-Tibet Railway construction. Cold Reg Sci Technol, 2005, 41: 165–173
72 程国栋, 吴青柏, 马巍. 青藏铁路主动冷却路基的工程效果. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2009, 39: 16–22
73 孙永福. 青藏铁路多年冻土区工程的研究与实践. 冰川冻土, 2005, 27: 153–162
74 Sheng Y, Wen Z, Ma W, et al. Long-term evaluations of insulated road in the Qinghai-Tibetan Plateau. Cold Reg Sci Technol, 2006, 45: 23–30
75 Wen Z, Sheng Y, Ma W, et al. *In situ* experimental study on thermal protection effects of the insulation method on warm permafrost. Cold Reg Sci Technol, 2008, 53: 369–381
76 Wen Z, Sheng Y, Ma W. Analysis on effect of permafrost protection by two-phase closed thermosyphon and insulation jointly. Cold Reg Sci Technol, 2005, 43: 150–163
77 温智, 盛煜, 马巍, 等. 青藏铁路保温板热棒复合结构路基保护冻土效果数值分析. 兰州大学学报, 2006, 42: 14–19
78 Smith L B, Graham J P, Nixon J F, et al. Thermal analysis of force-air and thermosyphon cooling system for the Inuvik airport expansion. Can Geothch J, 1991, 28: 399–409
79 John J, Zarling P. Thermosyphon application in cold regions. In: Proceedings of 4th International Symposium on Thermal Engineering & Science for Cold Regions, CREERL, Special Report 1993, 93-22: 24–38
80 Mckenna J K, Biggar K W. The rehabilitation of a passive-ventilated slab on grade foundation using horizontal thermosyphons. Can Geotech J, 1998, 35: 684–691
81 汪双杰, 陈建兵, 黄晓明. 热棒路基降温效应的数值模拟. 交通运输工程学报, 2005, 5: 41–46
82 潘卫东, 赵肃昌. 热棒技术加强高原多年冻土区路基稳定性的应用研究. 冰川冻土, 2003, 25: 433–438
83 李永强, 吴志坚, 王引生, 等. 青藏铁路冻土路基热棒应用效果试验研究. 中国铁道科学, 2008, 29: 6–11
84 郭宏新, 吴青柏, 张鲁新. 寒冷地区热棒技术的研究与应用. 冰川冻土, 2009, 31: 1137–1142
85 牛富俊, 程国栋, 俞祁浩. 多年冻土区铁路通风路基地温调控研究. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2003, 33(增刊): 145–152
86 俞祁浩, 程国栋, 牛富俊. 自动温控通风路基在青藏铁路中的应用研究. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2003, 33(增刊): 160–167
87 Lai Y M, Wang Q S, Niu F J. Three-dimensional nonlinear analysis for temperature characteristic of ventilated embankment in permafrost regions. Cold Reg Sci Technol, 2004, 38: 165–184
88 Li G Y, Li N, Quan X J. The temperature features for different ventilated-duct embankments with adjustable shutters in the Qinghai-Tibet railway. Cold Reg Sci Technol, 2006, 44: 99–110
89 赖远明, 张鲁新, 张淑娟, 等. 气候变暖条件下青藏铁路抛石路基的降温效果. 科学通报, 2003, 48: 292–297
90 Zhang M Y, Lai Y M, Niu F J, et al. A numerical model of the coupled heat transfer for duct-ventilated embankment under wind action in clod regions and its application. Cold Reg Sci Technol, 2006, 45: 103–113
91 Zhang M Y, Lai Y M, Gao Z H, et al. Influence of boundary conditions on the cooling effect of crushed-rock embankment in permafrost regions of Qinghai-Tibetan Plateau. Cold Reg Sci Technol, 2005, 44: 225–239
92 Zhang M Y, Lai Y M, Li S Y, et al. Laboratory investigation on cooling effect of sloped crushed-rock revetment in permafrost regions. Cold Reg Sci Technol, 2006, 46: 27–35
93 Yu W B, Lai Y M, Sun Z Z, et al. Experimental studies on the ripped-rock revetment embankment in permafrost regions of the Qinghai-Tibet railroad. Cold Reg Sci Technol, 2006, 45: 1–7

94 Feng W J, Ma W, Li D Q, et al. Application investigation of awning to roadway engineering on the Qinghai-Tibet Plateau. Cold Reg Sci Technol, 2006, 45: 51–58

95 冯文杰, 马巍, 张鲁新, 等. 遮阳棚在寒区道路工程中的应用研究. 岩土工程学报, 2003, 25: 567–570

96 俞祁浩. 冻土路基传热过程及调控新技术研究. 博士学位论文. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2006. 107

97 于晖, 吴青柏, 刘永智. 青藏铁路多年冻土区工程长期监测系统. 冰川冻土, 2008, 30: 475–481

98 Wu Q B, Lu Z J, Zhang T J, et al. Analysis of cooling effect of crushed-based rock Embankment of the Qinghai-Xizang Railway. Cold Reg Sci Technol, 2008, 53: 271–282

99 Ma W, Feng G L, Wu Q B, et al. Analyses of temperature fields under the embankment with crushed-rock structures along the Qinghai-Tibet Railway. Cold Reg Sci Technol, 2008, 53: 259–270

100 Ma W, Mu Y H, Wu Q B, et al. Characteristics and mechanisms of embankment deformation along the Qinghai-Tibet Railway in permafrost regions. Cold Reg Sci Technol, 2011, 67: 178–186

101 Mu Y H, Ma W, Wu Q B, et al. Thermal regime of conventional embankments along the Qinghai-Tibet Railway in permafrost regions. Cold Reg Sci Technol, 2012, 70: 123–131

102 Mu Y H, Ma W, Wu Q B, et al. Cooling processes and effects of crushed rock embankment along the Qinghai-Tibet Railway in permafrost regions. Cold Reg Sci Technol, 2012, 78: 107–114

103 Wu Q B, Li M Y, Liu Y Z. Thermal interaction of permafrost and the Qinghai-Tibet Railway. J Cold Reg Eng, 2010, 24: 112–125

104 胡泽勇, 钱泽雨, 程国栋, 等. 太阳辐射对青藏铁路路基表面热状况的影响. 冰川冻土, 2002, 4: 121–128

105 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. 岩石力学与工程学报, 2005, 24: 3197–3201

106 Chou Y L, Sheng Y, Ma W. Study on the effect of the thermal regime differences in roadbed slopes on their thawing features in permafrost regions of Qinghai-Tibetan Plateau. Cold Reg Sci Technol, 2008, 53: 334–345

107 Chou Y L, Sheng Y, Wei Z M, et al. Calculation of temperature differences between the sunny slopes and the shady slopes along railways in permafrost regions on Qinghai-Tibet Plateau. Cold Reg Sci Technol, 2008, 53: 346–354

108 Chou Y L, Sheng Y, Zhu Y P. Study on the relationship between the shallow ground temperature of embankment and solar radiation in permafrost regions on Qinghai-Tibet Plateau. Cold Reg Sci Technol, 2012, 78: 122–130

109 Zhang M Y, Lai Y M, Liu Z Q, et al. Nonlinear analysis for the cooling effect of Qinghai-Tibetan railway embankment with different structures in permafrost regions. Cold Reg Sci Technol, 2005, 42: 237–249

110 Wu Q B, Liu Y Z, Hu Z Y. The thermal effect of differential solar exposure on embankments along the Qinghai-Tibet Railway. Cold Reg Sci Technol, 2011, 66: 30–38

111 Harris S A, Pedersen D E. Thermal regimes beneath coarse blocky materials. Permafrost Periglac Process, 1998, 9: 107–120

112 Gorbunov A P, Marchenko S S, Seversky E V. The Thermal environment of blocky materials in the mountains of central Asia. Permafrost Periglacial Process, 2004, 15: 95–98

113 程国栋. 局地因素对多年冻土分布的影响及其对青藏铁路设计的启示. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2003, 33: 602–607

114 Harris S A. Lower mean annual ground temperature beneath a block stream in the Kunlun Pass, Qinghai Province, China. In: Proceedings 5th Chinese Permafrost Conference, Lanzhou, 1996. 227–237

115 程国栋, 童伯良, 罗学波. 厚层地下冰地段路堤建筑中的两个重要问题. 冰川冻土, 1981, 3: 6–11

116 Cheng G D, Tong B L. Experimental research on an area with massive ground ice at the lower limit of slpine permafrost. In: Proceeding 3rd International Conferece on Permafrost. Ottawa: National Research Council of Canada, 1978, 2: 199–222

117 王国尚, 林清, 金会军. 寒区道路块片石通风路堤试验研究. 见: 第五届全国冰川冻土大会论文集(上). 兰州: 甘肃文化出版社, 1996. 377–382

118 Goering D J, Kumar P. Permeability effects on winter-time natural convection in gravel embankments. Adv Cold Regions Thermal Eng Sci, 1999, 455–464

119 Goering D J. Passively Cooled railway embankments for use in permafrost areas. J Cold Reg Eng, 2003, 17: 119–133

120 姜凡, 刘石, 王海刚, 等. 冻土碎/块石路基传热与对流特性的数值计算研究. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2003(增刊), 33: 133–144

121 吴青柏, 程红彬, 蒋观利, 等. 青藏铁路块石夹层路基结构的冷却作用机理. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2007, 37: 613–620

122 Wu Q B, Li M Y, Liu Y Z. Cool effect of crushed rock structure on permafrost under embankment. Sci Cold Arid Reg, 2009, 1: 39–50

123 Wu Q B, Liu G, Zhang T J, et al. *In-situ* experimental study of heat transfer process within crushed rock layer along the Qinghai-Tibet Railway. Int J Offshore Polar Eng, 2010, 20: 1–8

124 He P, Zhang Z, Cheng G D, et al. Ventilation properties of blocky stones embankments. Cold Reg Sci Technol, 2007, 47: 271–275

125 Cheng G D, Lai Y M, Sun Z Z, et al. The "thermal semi-conductor" effect of crushed rocks. Permafrost Periglac Process, 2007, 18: 151–160

126 吴青柏, 于晖, 蒋观利, 等. 青藏铁路块石护坡路基冷却作用机理研究. 岩土工程学报, 2008, 30: 1011–1016