

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2020.0047

ZHANG Mingli, WANG Bin, ZHOU Zhixiong, et al. Monitoring and analysis of the thermal conductivity of railway subgrade in the permafrost regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(2):457-466. [张明礼, 王斌, 周志雄, 等. 多年冻土区铁路路基导热系数监测与分析[J]. 冰川冻土, 2020, 42(2):457-466.]

多年冻土区铁路路基导热系数监测与分析

张明礼^{1,3,4}, 王 斌², 周志雄³, 颜俊杰¹, 王得楷⁵, 岳国栋³, 李 广³

(1. 公路建设与养护技术、材料及装备交通运输行业研发中心(甘肃路桥建设集团有限公司), 甘肃 兰州 730030; 2. 新疆维吾尔自治区交通规划勘察设计研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000; 3. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 4. 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; 5. 甘肃省科学院 地质自然灾害防治研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 为分析冻融过程、道砟覆盖及降雨对多年冻土区铁路路基土体导热系数的影响, 对青藏高原多年冻土区铁路路基试验段和天然地表土体开展导热系数、温度、水分原位监测。结果表明: 融化期导热系数波动均明显大于冻结期, 天然场地导热系数在冻结期大于融化期, 而无道砟覆盖路基土体和道砟覆盖路基土体的导热系数在冻结期小于融化期, 与通常的认知和温度场模拟取值相反; 道砟层的保温和阻水效应导致道砟覆盖路基土体含水量和导热系数均小于无道砟覆盖路基土体, 冻结期路基土体导热系数有减小趋势, 道砟覆盖路基土体尤为显著; 降雨入渗增大土体导热系数, 低含水量的道砟覆盖路基土体导热系数对降雨的响应最强烈。寒区路基工程数值模拟时, 应考虑水热变化对导热系数的影响, 不宜采用固定相变区间的分段函数或阶跃函数预估导热系数。

关键词: 铁路路基; 多年冻土; 导热系数; 现场监测; 降雨入渗

中图分类号: U213.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2020)02-0457-10

0 引言

冻土对环境变化极其敏感, 土体冻结和融化过程伴生的各种地质现象与温度变化过程密切相关^[1]。冻土工程与外界环境相互作用涉及的热工计算一直是冻土工程的热点问题^[2], 特别是在预报冻土环境、判断冻土工程稳定性过程中, 导热系数是决定温度场的关键参数^[3-4]。正确认识冻土导热系数是寒区工程温度场模拟和病害防治的首要工作^[5-6]。在青藏高原暖湿化趋势下^[7], 明确冻土路基热参数变化规律, 对青藏铁路、青藏公路等冻土工程病害预警及防治尤为重要。

土体热参数受土体组构和环境因素控制^[8-9], 工程设计中通过试验测量和模型预估方法确定其取值和变化规律。试验方面, 已有研究采用稳态法、瞬态法和系统状态法^[10]研究了控制温度条件

下, 导热系数随岩性、孔隙率、含水率、温度的变化规律^[11-13], 重点分析相变区间、冻融循环次数和外界补水对不同类型土壤导热系数的影响^[14-15]; 模型预估方面, 采用混合物理理论模型、数学模型、经验模型对不同土壤类型在不同温度和含水量条件下的导热系数进行预估^[16-17]; 夏锦红等^[18]建立了考虑固-液界面的导热系数计算模型, 模拟了不同负温条件下冻土的导热系数; Dong 等^[19]认为现有的预估模型在模型假设方面存在缺陷, 只适用于特定的土壤类型。而在温度场数值模拟方面, 也通常基于某一特定土壤、或者特定相变区间^[20]展开温度场预测, 不能够反映含水量、温度实时变化对导热系数的影响。

针对冻土区土壤导热系数, 已有研究多采用重塑土在室内给定测试温度和含水率的条件下分析

收稿日期: 2019-07-26; 修订日期: 2020-07-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41801033; 41961010; 41971087); 冻土工程国家重点实验室开放基金项目(SKLFSE201804); 兰州理工大学红柳优秀青年人才计划; 公路建设与养护技术、材料及装备交通运输行业研发中心(甘肃路桥建设集团有限公司)开放基金项目(No.GLKF201809)资助

作者简介: 张明礼(1987-), 男, 陕西安康人, 副教授, 2016年在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所获博士学位, 从事寒区岩土工程研究. E-mail: mingli_0919@126.com.

热参数数值^[21],而未考虑地表覆盖和气象因素(降水、蒸发、冻融)实时动态变化对热参数的影响。米美霞等^[22]和贾东于等^[23]根据融土区监测发现地表覆盖条件和降雨对浅层土壤导热系数影响显著。Yu等^[20]发现温度控制模式和水分边界极大地影响土体热参数结果,建议结合气象资料,综合考虑湿度、降雨等气象因子研究土壤导热系数。Zhao等^[24]通过试验发现重塑冻土和原状冻土试样的导热系数随总含水量和干密度的增大而增大,干密度对导热系数的影响更加显著,重塑土导热系数大于原状土。

针对当前导热系数预估对含水量、温度等因素实时影响考虑的不足,克服室内试验对土体结构扰动导致导热系数测试的不准确问题,在真实高原环境下开展冻土区铁路路基导热系数试验监测避免了室内重塑土对路基土体和天然土体结构的破坏,保证了气温变化和降雨等气象因素导致水分边界变化的真实性。本文以中国科学院青藏高原北麓河冻土工程与环境综合观测研究站路基试验段无道砟(砂砾土)路基土体、道砟覆盖路基土体以及天然场地土体导热系数、温度、含水量监测数据为基础,结合试验场地降雨数据,分析冻融过程中导热系数的变化规律,研究降雨、地表覆盖对导热系数的影响,为青藏铁路热稳定性预测和高原多年冻土环境预报计算参数的选取提供参考和依据。

1 监测场地与监测方法

1.1 监测断面位置

试验段路基位于青藏铁路K1140~K1141范围南侧[图1(a)、1(b)],北麓河冻土观测基地西侧,场地地势开阔,地表基本无起伏,属北麓河冲、洪积高平原地貌。年平均气温为 $-3.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,降雨主要发生在5月至9月,一般在7月或8月达到峰值^[25]。试验场地天然地表高程约4 620 m,活动层以亚砂土和粉质黏土为主,多年冻土上限为2~3 m,年平均地温 $-1.4\sim-1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在北麓河冻土观测基地西侧修筑铁路路基试验段,路基高度4.0 m,道砟材料、路基填料和压实标准与文献[26]相同,在路基上方道路中心线右侧铺设厚度为0.5 m的碎石道砟层。

1.2 监测方案与方法

土壤导热系数监测采用TP02型针式导热系数传感器(测试范围为 $0.1\sim6\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,精度为 $\pm0.05\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)。TP02测量方法基于非稳态

探针(Non-Steady-State Probe, NSSP)技术实现。NSSP由加热导线、热源、电阻丝和温度传感器组成。根据电阻加热时段 $t(\text{s})$ 内,直接测量的温度变化 $\Delta T(\text{K})$ 、单位长度加热器功率 $q(\text{W}\cdot\text{m}^{-1})$ 和仪器标定常数 B ,求得加热期间的导热系数 λ :

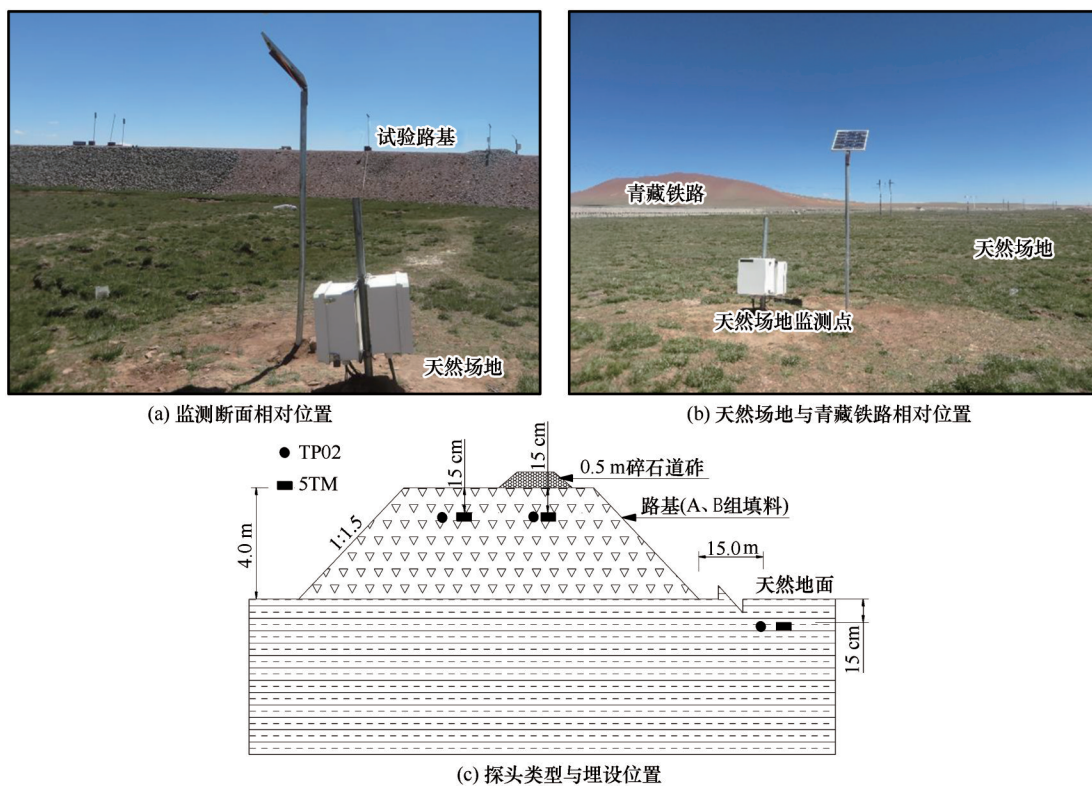
$$\lambda = -\frac{q}{4\pi \cdot \Delta T} (\ln t + B) \quad (1)$$

土壤含水量、温度采用5TM水热监测传感器测量,该传感器可同时测量土壤体积含水量和温度,其含水量测试范围为0~100%,精度为 $\pm 3\%$,温度测试范围为 $-40\sim60\text{ }^{\circ}\text{C}$,精度为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。开展监测试验前均在室内对5TM水热传感器和TP02传感器进行了标定和校准。分别在无道砟覆盖路基土体(砂砾土)、道砟(碎石)覆盖路基的路基表面以下15 cm和天然场地地表下15 cm处埋设TP02型导热系数传感器和5TM水热监测传感器各1个[图1(c)]。路基监测点采用CR1000型和CR10X型数采仪采集数据,天然场地采用CR1000型和CR3000型数采仪采集数据,每30分钟自动采集一次数据,路基监测数据自2012年9月27日~2015年5月21日,天然场地监测数据自2012年9月27日~2014年11月8日。监测时段的降水量等气象资料从北麓河气象站获取。由于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近相变剧烈,温度变化极其缓慢,热功率 q 不稳定。由公式(1)可知导热系数 λ 测试结果在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近可信度不高,故本文中对于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近的剧烈相变区导热系数不作分析。

2 结果与分析

2.1 冻融过程中导热系数变化

当多年冻土区活动层温度降低到 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下时土体开始冻结,温度升高到 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上时处于融化状态。冰的导热系数为 $2.2\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,液态水的导热系数仅为 $0.55\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,冻融过程伴随的土体冰、水相变将改变土体导热系数。图2给出了路基监测断面道砟覆盖路基土体、无道砟路基土体和天然场地下15 cm处导热系数随温度变化的关系。在整个冻融循环过程中,3种地表土体活动层都经历了秋季降温、冬季冻结、春季升温和夏季融化过程,但不同地表下部导热系数变化幅度和规律不同。在融化期(6~10月),3种地表下15 cm处导热系数变化范围分别为 $0.55\sim1.08\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 、 $1.04\sim1.49\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 、 $1.33\sim4.47\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$;冻结期(11月~次年5月)三种场地地表下15 cm处导热系数变化范围分别为 $0.64\sim0.85\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 、 $0.95\sim$



注: 3种地表类型分别为: 道砟覆盖路基土体、无道砟覆盖(砂砾)路基土体及天然场地

图1 监测系统布置

Fig. 1 Monitoring system layout

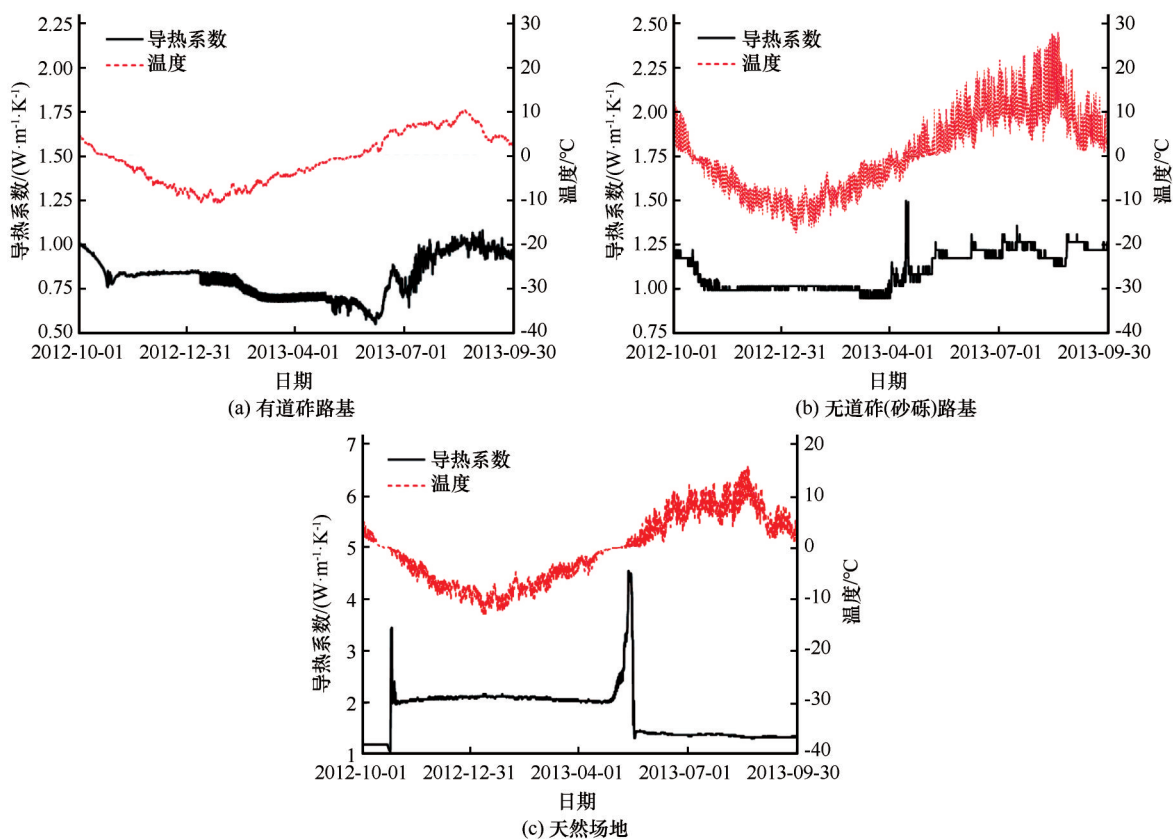


图2 冻融过程中导热系数随温度的变化

Fig. 2 Variations of thermal conductivity with temperature during freeze-thaw cycles

$1.15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 、 $1.96 \sim 2.17 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。可以看出,融化期导热系数波动明显大于冻结期,天然场地在冻结期导热系数大于融化期,而无道砟路基土体和道砟覆盖路基土体的导热系数在融化期要大于冻结期。

由于冰的导热系数是液态水的4倍,天然场地土体冻结期的导热系数大于融化期[图2(c)],而路基监测结果却呈现出相反的规律。土体固体颗粒导热系数在冻融过程中保持恒定,导热系数变化主要受温度和含水量影响。结合图3导热系数随含水量变化的关系发现:天然场地土体总含水量全年一直较高($12.2\% \sim 18.9\%$),冰水相变控制了土体导

热系数的变化,即融化期导热系数小于冻结期。路基填料(碎石土、砾砂土为主)在冻结期,道砟覆盖和无道砟覆盖路基土体15 cm处的总含水量(取土体春季融化时的含水量)分别为 3.9% 、 5.4% ,而融化后在降雨作用下最大含水量达到 4.9% 和 8.6% ,即路基土体在冻结期总含水量小于融化期。导热系数对含水量的敏感性随着含水量的减小而增大^[10],路基含水量极低,对水分的影响也更加敏感,且融化期的土体含水量大于冻结期的总含水量,冻结期较少水分冻结对导热系数的增大效应低于融化期含水量增加对导热系数的增大效应,导致路基土体的导热系数在融化期大于冻结期。

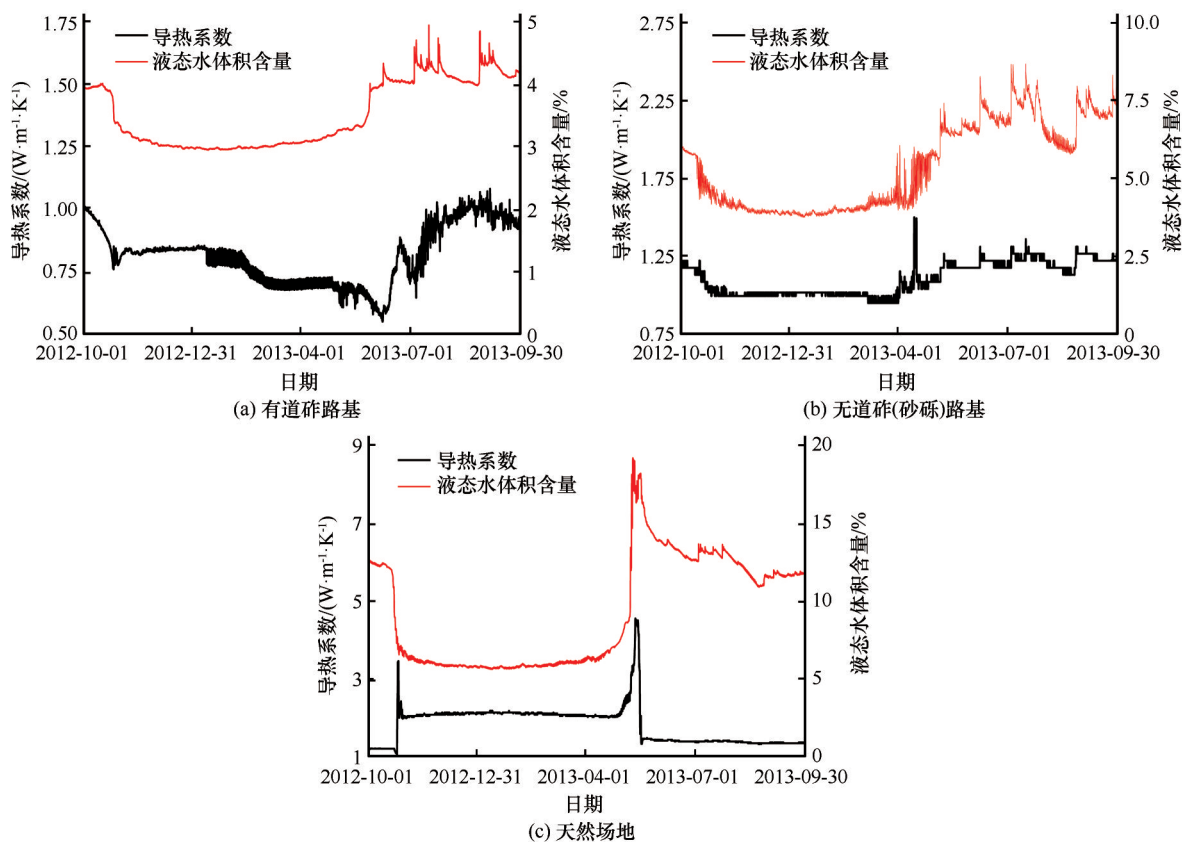


图3 冻融过程中导热系数与含水量变化

Fig. 3 Variations of soil thermal conductivities and water contents during freezing and thawing process

另外,由于冻土中的冻胀现象使得土体孔隙率增大,使土壤颗粒间的接触状态发生变化,这是导致冻土有效导热系数减小的另一个可能原因。这与青藏高原北部可可西里、开心岭(QT05)、通天河等地区发现的冻结期导热系数小于融化期一致^[27-28]。监测结果发现3种地表类型土体在冻结和融化过程中,含水量变化和导热系数变化是随着温度的变化逐渐发生的,特别是在 $-4 \sim 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度区间

含水量和导热系数变化显著,即说明土体的冰水相变区间分布较广,而非通常数值模拟设定的固定狭小区间^[29]。同时,监测结果显示在土体融化过程和冻结过程中的 $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近导热系数出现突变。其主要原因在于土体在相变区间温度变化极为缓慢,温度变化也越缓慢。根据导热系数换算公式(1)可知,TP02传感器监测结果在 $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近数值突变越明显,即监测结果在 $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近可信度不高。

2.2 道砟覆盖对导热系数的影响

图4和图5分别给出了2012年10月–2013年9月期间3种地表覆盖层下15 cm处土体导热系数对比和含水量对比。可以看出,路基导热系数都呈现出冬季小、夏季大的特点,这与天然土体相反。其主要原因在于土体导热系数受温度和含水量控制,而降雨入渗润湿作用、地表蒸发作用和冻融作用导致路基土体融化期的含水量大于冻结期的总含水量,冻结期较少水分冻结对导热系数的增大效应低于融化期含水量增加对导热系数的增大效应(图2中已具体分析)。同时,道砟层的存在大大削减了融化期降雨入渗到达下覆路基表层的水量^[26],这种阻水效应直接导致地表以下一定范围内土体含水量较低,使得无道砟覆盖路基土体含水量大于道砟覆盖路基土体含水量,导致无道砟覆盖路基土体导热系数大于道砟覆盖路基土体的导热系数。在冬季冻结和夏季融化阶段导热系数发生突变,突变程度为天然场地>无道砟覆盖路基土体>道砟覆盖路基土体。其原因在于监测场地含水量表现为:天然场地>无道砟覆盖路基土体>道砟覆盖路基土体(图5)。土体含水量越高相变越剧烈,温度变化越缓慢,由导热系数换算公式(1)可知,其导热系数突变越显著。由于仪器在0℃附近可信度不高,故在相变区间的导热系数数据不做具体分析。

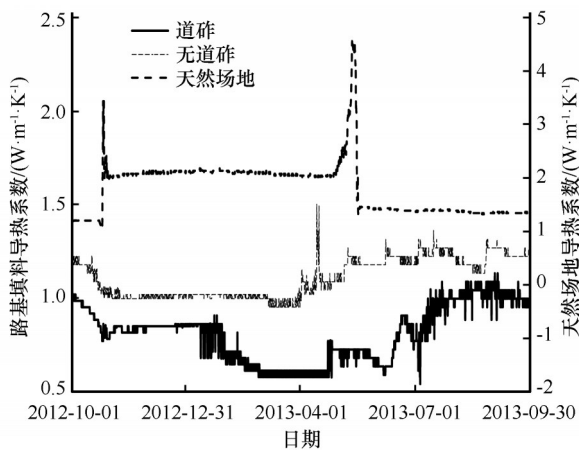


图4 不同地表类型导热系数变化

Fig. 4 Soil thermal conductivity under different ground surfaces

对比冬季导热系数和含水量变化发现:冻结期间,路基土体液态水体积含量变化较小,而导热系数有减小趋势,道砟覆盖层下尤为显著。而路基土体导热系数减小处于冻结期向融化期的过渡阶段,在此期间冻土在升温,土体含冰量减小,未冻水含

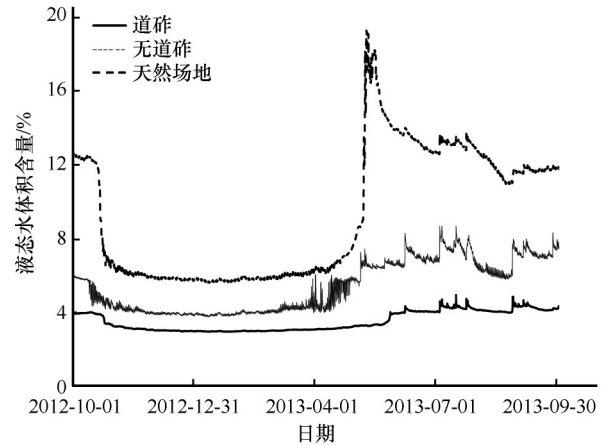


图5 不同地表类型含水量变化

Fig. 5 Variations of soil water content under different ground surfaces

量增加,导致导热系数呈减小趋势。此外,由于监测场地冬季降水极小^[30],排除了大气降水入渗的可能性,低含水量路基内,空气中水汽压低于饱和蒸汽压,负温下的冰直接升华为水蒸气,且温度越高升华速率越大^[31],这进一步减少土体含冰量,加剧路基土体导热系数减小。由于冬季道砟覆盖路基土体温度比无道砟覆盖路基土体高[图2(a)、2(b)],另一方面,道砟覆盖层的阻水效应使得道砟覆盖路基土体内部空气中的水汽压低于无道砟覆盖路基土体,负温下冰的升华作用更显著,这两种作用导致道砟覆盖路基土体含冰量降低更多,因此道砟覆盖路基土体导热系数降低比无道砟覆盖路基土体更明显。综上,道砟覆盖层具有减小路基含水量、增大路基土体温度的作用,即通过改变土壤温度和含水量变化进而改变土体导热系数。

2.3 降雨对导热系数的影响

降雨作用通过改变土体含水量改变土体导热系数,但不同地表覆盖情况下土体导热系数对降雨的响应程度不同。在2013年7月5日18:00–21:00(北京时间,下同)试验场地累积降雨4.7 mm,道砟覆盖路基下方15 cm处土壤导热系数增大 $0.31 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,无道砟覆盖路基土体和天然场地下方土体导热系数虽有增加但增幅不大(图6);7月9日08:00–10:00累积降雨6.6 mm,道砟覆盖路基下方15 cm处土壤导热系数增大 $0.24 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,无道砟覆盖路基土体和天然场地下方土体导热系数变化较小,这与7月5日降雨作用下的土体导热系数与含水量变化规律一致;而其他短历时、少量降雨对土体含水量和导热系数的影响极小。说明土体导热系数增大与降雨强度、降雨

持时和含水量正相关,降雨对导热系数影响程度为:道砟覆盖路基土体>无道砟覆盖路基土体>天然场地。由于道砟覆盖路基下土体含水量最低(图7),其导热系数对降雨的响应最强烈。在降雨作用下,土壤含水量明显增大,水分入渗润湿作用使得水分取代了土壤孔隙中的空气,由于液态水的导热系数大于土壤孔隙中空气的导热系数,因此,降雨后土壤导热系数增大。但由于道砟覆盖层的存在,降雨入渗滞后效应显著,道砟覆盖层下土体导热系数增大滞后于降雨作用。

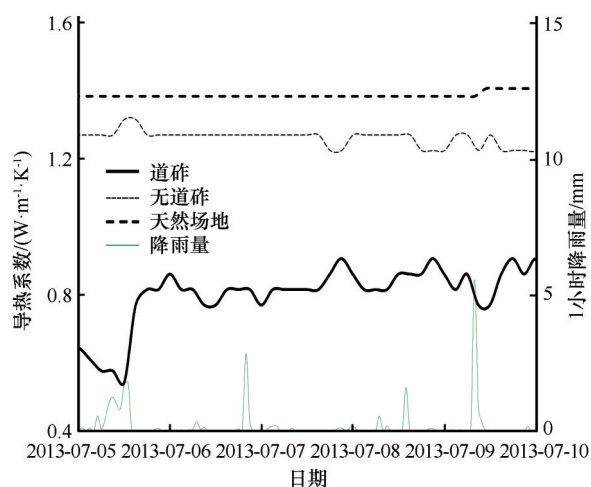


图6 降雨对不同地表类型土体导热系数的影响

Fig. 6 Effects of rainfall on soil thermal conductivity under different ground surfaces

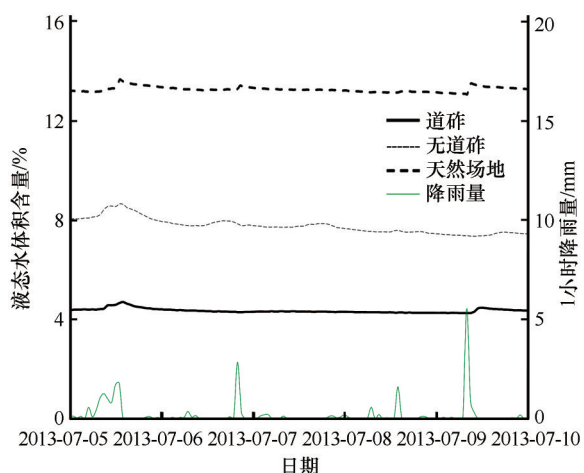


图7 降雨对不同地表类型土体含水量的影响

Fig. 7 Effects of rainfall on soil water contents under different ground surfaces

3 讨论

冻土工程温度场数值模拟中通常将土壤热参

数看作是仅与温度有关的分段函数^[29],即完全冻结时取冻土的导热系数 $\lambda_f(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$,完全融化时取融土导热系数 $\lambda_u(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$,相变区间 $\Delta T(^{\circ}\text{C})$ 内采用直线内插。如式(2)和图8(a)所示:

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_f & T \leq T_0 - \Delta T \\ \lambda_m = \lambda_f + \frac{\lambda_u - \lambda_f}{\Delta T} [T - (T_0 - \Delta T)] & T_0 - \Delta T < T < T_0 \\ \lambda_u & T \geq T_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: T_0 为初始冻结温度, T 为土体温度, T_0 、 T 和 ΔT 单位均为 $^{\circ}\text{C}$ 。

分段函数在冻融交界点产生不连续的导数,影响数值模拟的收敛性。文献[32]引入 Heaviside 阶跃函数实现了冻结状态热参数向融化状态热参数的平滑过渡。如式(3)、(4)和图8(b)所示:

$$\lambda = \lambda_f + H(T)(\lambda_u - \lambda_f) \quad (3)$$

$$H(T) = \begin{cases} 1 & T > T_0 \\ \frac{3T}{4\Delta T} - \frac{T^3}{4\Delta T^3} + \frac{1}{2} & T_0 - \Delta T \leq T \leq T_0 \\ 0 & T < T_0 - \Delta T \end{cases} \quad (4)$$

式中: H 为 Heaviside 阶跃函数(单位: 1)。

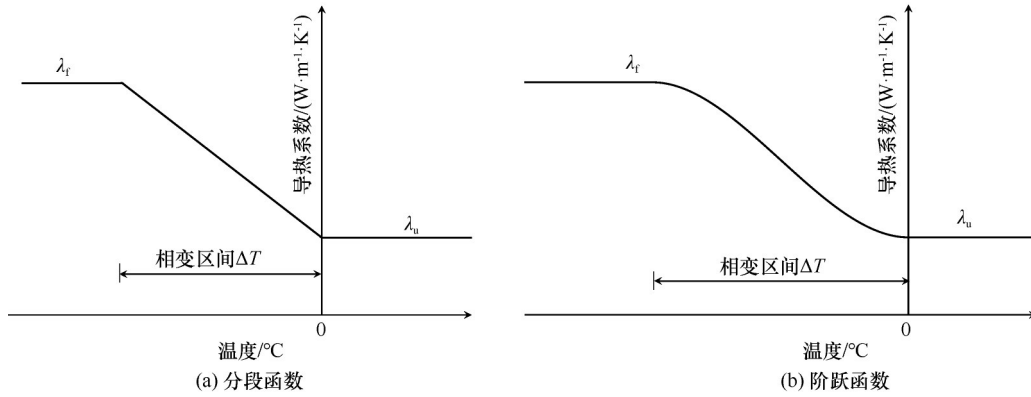
这两种热参数简化方法在冻土工程中应用最为广泛,但存在3个明显的问题:(1)冻结区间的选取;(2)冻结温度的确定;(3)降水、冻融等水分迁移对导热系数的影响如何考虑。数值模拟中,通常假设 0°C 为初始冻结温度,相变区间限定在 $[-2, 0]$ 或其子集。在含水量较低时,阶跃或者给定相变区间都不能有效反映出本文监测的路基土体导热系数在冻结期小于融化期这一现象。同时,本文监测结果显示:土壤冻结过程中,相变区间分布范围较宽, $-10.4 \sim 0^{\circ}\text{C}$ 之间都存在着相变作用,相变区间较大。这与文献[33]开展的莫玲黏土冻结试验一致(图9, T_0 为初始冻结温度),土体的冻结温度不是一个固定值,相变区间也不固定,都与初始含水量有关。冻结过程中的最大未冻水含量可表示为:

$$W_u = a|T|^{-b} \quad (5)$$

$$\theta_u = W_u \cdot \rho_d \quad (6)$$

式中: W_u 为未冻水质量含水量(%); a 、 b 为与土壤性质相关的参数; θ_u 为未冻水体积含量(%); ρ_d 为土体干密度数值($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)。

结合不同初始含水量莫玲黏土冻结试验(图9),认为只有负温下的总体积含水量 θ 超过 θ_u 时才会冻结,超过的部分为参与冻结成冰过程的含水量^[34-35]。此时的负温才是土体的冻结温度,而非通常假设的 0°C ,避免了假定相变区间^[25-26]和冻结温度造成的土体导热系数计算误差。因此,冻融过程



注: λ 为导热系数; f, u 分别代表完全冻结和完全融化状态

图8 导热系数随温度变化的函数关系

Fig. 8 Relation of thermal conductivity with temperature

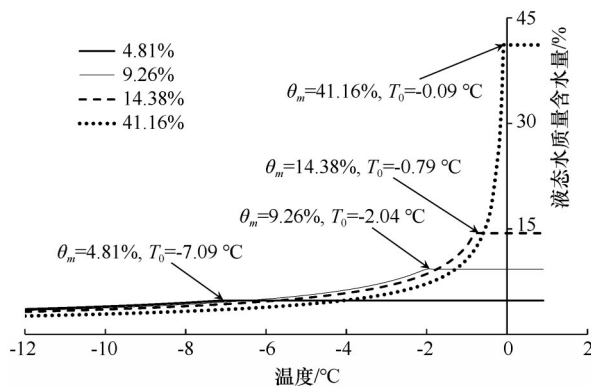


图9 不同初始含水量莫岭黏土冻结曲线

Fig. 9 Soil freezing curve of Mo Ling clay with different initial water contents

中的液态水含量为:

$$\theta_w = \begin{cases} \theta & \text{其他} \\ \theta_u & T < 0^\circ\text{C} \text{ 和 } \theta > \theta_u \end{cases} \quad (7)$$

式中: θ_w 为液态水体积含量(%).

在解决了导热系数确定过程中冰水相变区间和冻结温度的取值问题, 还需要考虑降水、蒸发、水分迁移等引起土壤总含水量的变化对热参数的影响。监测结果表明: 土体导热系数受温度和含水量控制, 降雨入渗润湿作用、地表蒸发作用和冻融作用引起路基土体含水量变化, 导致路基土体冬季导热系数小于夏季, 这与传统的分段函数法和阶跃函数法预估的结果相反。针对土体构成成分及其相应体积比的动态变化, Zhang 等^[16]通过 8 组土样试验验证了加权算术平均模型[式(8)]、加权调和平均模型[式(9)]和加权几何平均模型[式(10)]对预估导热系数的适用性。其中, 加权几何均值模型与实验数据吻合程度最高。

$$\lambda_p = \lambda_s \theta_s + \lambda_w \theta_w + \lambda_i \theta_i + \lambda_a \theta_a \quad (8)$$

$$\frac{1}{\lambda_p} = \frac{\theta_s}{\lambda_s} + \frac{\theta_w}{\lambda_w} + \frac{\theta_i}{\lambda_i} + \frac{\theta_a}{\lambda_a} \quad (9)$$

$$\lambda_p = \lambda_s^{\theta_s} \lambda_w^{\theta_w} \lambda_i^{\theta_i} \lambda_a^{\theta_a} \quad (10)$$

式中: λ_p 为土的有效导热系数($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); λ_s 、 λ_w 、 λ_i 和 λ_a 分别为干燥土体颗粒、液态水、冰和空气的导热系数($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); θ_s 、 θ_i 和 θ_a 分别为干燥土体颗粒、冰和空气的体积含量。

Bi 等^[36]基于 Fredlund 和 Xing 模型以及归一化导热系数的方法, 提出三参数模型来预估细颗粒土在整个饱和度范围内的导热系数, 并通过 6 种土样的试验数据验证该模型计算结果的可靠性, 取得了较好的预估效果。文献[36]和加权几何平均模型[式(10)]为导热系数的预估提供了新的途径。但实际铁路、公路等冻土工程中, 温度和水分边界条件(降雨、蒸发)实时变化。在数值模拟的每个计算时间步长中, 必须将温度场和水分场进行耦合分析, 在确定了温度和含水量后, 结合土体四相(土颗粒、冰、水、气)的比例关系确定导热系数, 以此在多个时间步长中实现温度场和水分场的合理预测。

本文野外监测结果表明, 冻融、地表覆盖和降雨等因素引起的含水量变化是影响路基土体导热系数的主要因素。已有研究表明, 道砟覆盖路基 75 cm 以上水热变化受到降雨的强烈影响^[26, 30]。因此, 在对裸露在大气中的铁路碎石土路基进行水热分析时, 应当考虑冻融过程中水热动态变化, 不宜采用分段函数或阶跃函数预估导热系数。虽然, 已有考虑含水量变化的加权几何模型等能够预估室内特定温度下的热参数, 但在多年冻土区大气降雨、地表蒸发作用下的水热耦合适用性还有待验证; 本次路基热参数监测中, 路基冻结期冰的升华

现象还需要室内控制实验验证。特别是在青藏高原气候暖湿化趋势下^[7],不同区域土体导热系数预估及其对暖湿化的响应需要进一步深入研究。同时,青藏高原铁路路基浅层含水量较低,本文采用的野外导热系数监测仪器和水分监测仪器测试精度还有待提高,需要在今后的仪器研发和理论分析中不断改进,以提高分析的可信度。本文提出的未冻水含量、总含水量与温度之间的定量关系式(7)解决了导热系数确定过程中冰水相变区间和冻结温度取值问题,但其合理性还需要在今后的试验和理论研究中验证和不断完善。

4 结论

通过对青藏高原北麓河多年冻土铁路路基试验段土体导热系数、温度、含水量进行监测,分析了冻融过程、地表覆盖和降雨对土壤热参数的影响,得到以下结论:

(1)融化期导热系数波动均明显大于冻结期;天然场地在冻结期(11月-次年5月)导热系数大于融化期(6-10月),而道砟覆盖路基土体和无道砟覆盖路基土体的导热系数在冻结期小于融化期,与通常温度场模拟中导热系数的取值相反。

(2)道砟覆盖层的保温隔热作用和阻水效应削减了到达下伏路基的水分入渗量,使得道砟覆盖路基土体的含水量和导热系数小于无道砟覆盖路基土体;冻结期间,路基土体导热系数有减小趋势,道砟覆盖路基土体尤为显著。

(3)降雨入渗增大土体含水量进而增大土体导热系数,其增大程度与降雨强度、降雨持时正相关,道砟覆盖层下的低含水量土体导热系数对降雨的响应最强烈。

(4)对多年冻土区铁路路基进行水热分析时,应当考虑水热动态变化对土体导热系数的影响,不宜采用分段函数或阶跃函数预估导热系数。

参考文献(References):

- [1] He Haihong, Zhao Ying, Dyck M F, et al. A modified normalized model for predicting effective soil thermal conductivity [J]. *Acta Geotechnica*, 2017, 12(6): 1281-1300.
- [2] Ma Wei, Zhou Guoqing, Niu Fujun, et al. Progress and prospect of the basic research on the major permafrost projects in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *China Basic Science*, 2016, 18(6): 9-19. [马巍, 周国庆, 牛富俊, 等. 青藏高原重大冻土工程的基础研究进展与展望[J]. *中国基础科学*, 2016, 18(6): 9-19.]
- [3] Peters-Lidard C D, Blackburn E, Liang X, et al. The effect of soil thermal conductivity parameterization on surface energy

- fluxes and temperatures [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1996, 55(7): 1209-1224.
- [4] Chen Zhixiang, Li Shunqun, Xia Jinhong, et al. Test and calculation situation analysis of thermal conductivity of frozen soil [J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2019, 36(2): 101-115. [陈之祥, 李顺群, 夏锦红, 等. 冻土导热系数测试和计算现状分析[J]. *建筑科学与工程学报*, 2019, 36(2): 101-115.]
- [5] Zhang Yonghui, Gao Zhiqiu, Tong Bing. Estimating the soil thermal parameters and modeling the soil temperature in Litang of Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Plateau Meteorology*, 2017, 36(1): 33-44. [章永辉, 高志球, 童兵. 青藏高原理塘地区土壤热参数的确定及其土壤温度模拟试验[J]. *高原气象*, 2017, 36(1): 33-44.]
- [6] Miao Yucong, Liu Shuhua, Lü Shihua, et al. A comparative study of computing methods of soil thermal diffusivity, temperature and heat flux [J]. *Chinese Journal Geophysics*, 2012, 55(2): 441-451. [缪育聪, 刘树华, 吕世华, 等. 土壤热扩散率及其温度、热通量计算方法的比较研究[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(2): 441-451.]
- [7] Tian Hui, Lan Yongchao, Wen Jun, et al. Evidence for a recent warming and wetting in the source area of the Yellow River (SAYR) and its hydrological impacts [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2015, 25(6): 643-668.
- [8] Chen Yifeng, Wang Min, Zhou Song, et al. An effective thermal conductivity model for unsaturated compacted bentonites with consideration of bimodal shape of pore size distribution [J]. *Science China: Technological Sciences*, 2015, 58(2): 369-380.
- [9] Zhang Nan, Wang Zhaoyu. Review of soil thermal conductivity and predictive models [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2017, 117: 172-183.
- [10] He Ruixia, Jin Huijun, Zhao Shuping, et al. Review of status and progress of the study in thermal conductivity of frozen soil [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(1): 116-126. [何瑞霞, 金会军, 赵淑萍, 等. 冻土导热系数研究现状及进展[J]. *冰川冻土*, 2018, 40(1): 116-126.]
- [11] Tao Zhaoxiang, Zhang Jingsen. The thermal conductivity of thawed and frozen soils with high water(ice) content [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1983, 5(2): 75-80. [陶兆祥, 张景森. 大含水(冰)量融冻土导热系数的测定研究[J]. *冰川冻土*, 1983, 5(2): 75-80.]
- [12] Bovesecchi G, Coppa P. Basic problems in thermal-conductivity measurements of soils [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2013, 34(10): 1962-1974.
- [13] Wang Lixia, Hu Qingli, Ling Xianzhang, et al. Test study on unfrozen water content and thermal parameters of Qinghai-Tibet Railway frozen silty clay [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2007, 39(10): 1660-1663. [王丽霞, 胡庆立, 凌贤长, 等. 青藏铁路冻土未冻水含量与热参数试验[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2007, 39(10): 1660-1663.]
- [14] Nikolaev I V, Leong W H, Rosen M A. Experimental investigation of soil thermal conductivity over a wide temperature range [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2013, 34(6): 1110-1129.
- [15] Yang Zongwei. Experimental study on thermal conductivity of typical soils in northeastern Inner Mongolia during freezing/thawing [D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2018. [杨宗维. 冻/融过程中内蒙古东北部典型土体导热系数的试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2018.]
- [16] Zhang Mingyi, Lu Jianguo, Lai Yuanming, et al. Variation of

- the thermal conductivity of a silty clay during a freezing-thawing process[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 124: 1059 – 1067.
- [17] Tan Xianjun, Chu Yidun, Chen Weizhong, et al. A new method to study thermal conductivity of geomaterials considering phase change[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(2): 70 – 74. [谭贤君, 褚以惇, 陈卫忠, 等. 考虑冻融影响的岩土类材料导热系数计算新方法[J]. *岩土力学*, 2010, 31(2): 70 – 74.]
- [18] Xia Jinhong, Chen Zhixiang, Xia Yuanyou, et al. Theoretical model and experimental verification of thermal conductivity of frozen soil under negative temperature conditions[J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(5): 118 – 126. [夏锦红, 陈之祥, 夏元友, 等. 不同负温条件下冻土导热系数的理论模型和试验验证[J]. *工程力学*, 2018, 35(5): 118 – 126.]
- [19] Dong Yi, McCartney John S, Lu Ning. Critical review of thermal conductivity models for unsaturated soils[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2015, 33(2): 207 – 221.
- [20] Yu Qihao, Mu Yanhu, Yuan Chang, et al. The cold accumulative effect of expressway embankment with a combined cooling measure in permafrost zones[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2019, 163: 59 – 67.
- [21] Wang Enliang, Jiang Haiqiang, Cui Entong, et al. Study on the effect of freezing and thawing on thermal conductivity of remolded clay[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2018, 39(4): 871 – 879. [汪恩良, 姜海强, 崔恩彤, 等. 冻融对重塑黏土导热系数影响的试验研究[J]. *工程热物理学报*, 2018, 39(4): 871 – 879.]
- [22] Mi Meixia, Fan Jun, Shao Mangan, et al. Study of effects of the surface mulch on soil thermal properties using heat pulse technology[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(1): 58 – 66. [米美霞, 樊军, 邵明安, 等. 地表覆盖对土壤热参数变化的影响[J]. *土壤学报*, 2014, 51(1): 58 – 66.]
- [23] Jia Dongyu, Wen Jun, Zhang Tangtang, et al. Response of soil water content and soil thermal conductivity on precipitation in Loess Plateau[J]. *Plateau Meteorology*, 2014, 33(3): 712 – 720. [贾东宇, 文军, 张堂堂, 等. 黄土高原降水对土壤含水量和导热率的影响[J]. *高原气象*, 2014, 33(3): 712 – 720.]
- [24] Zhao Xiaodong, Guoqing Zhou, Xiong Jiang. Measurement of thermal conductivity for frozen soil at temperatures close to 0 °C[J]. *Measurement*, 2019, 140: 504 – 510.
- [25] Wen Zhi, Zhang Mingli, Ma Wei, et al. Thermal-moisture dynamics of embankments with asphalt pavement in permafrost regions of central Tibetan Plateau[J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2015, 19(4): 387 – 399.
- [26] Zhang Mingli, Wen Zhi, Xue Ke, et al. Monitoring and analysis of the impact of the ballast layer on the thermal-moisture dynamics in railway subgrade in the permafrost regions[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2017, 39(4): 94 – 100. [张明礼, 温智, 薛珂, 等. 道砟层对多年冻土区铁路路基水热影响监测与分析[J]. *铁道学报*, 2017, 39(4): 94 – 100.]
- [27] Li Ren, Zhao Lin, Ding Yongjian, et al. Study on soil thermodynamic characteristics at different underlying surface in northern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2013, 34(6): 1076 – 1084. [李韧, 赵林, 丁永建, 等. 青藏高原北部不同下垫面土壤热力特性研究[J]. *太阳能学报*, 2013, 34(6): 1076 – 1084.]
- [28] Li Ren, Zhao Lin, Wu Tonghua, et al. Soil thermal conductivity and its influencing factors at the Tanggula permafrost region on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Agricultural and forest meteorology*, 2019, 264: 235 – 246.
- [29] Hou Yandong, Wu Qingbai, Dong Jianhua, et al. Numerical simulation of efficient cooling by coupled RR and TCPT on railway embankments in permafrost regions[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 133: 351 – 360.
- [30] Zhang Mingli, Wen Zhi, Xue Ke, et al. The effects of precipitation on thermal-moisture dynamics of active layer at Beiluhe permafrost region[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, 30(4): 159 – 164. [张明礼, 温智, 薛珂, 等. 降水对北麓河地区多年冻土活动层水热影响分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(4): 159 – 164.]
- [31] Wang Zhaohui, Shi Mingheng. A sublimation phenomenon for the microwave freeze drying of unsaturated porous media[J]. *Science China: Technological Sciences*, 1998, 28(3): 225 – 231. [王朝晖, 施明恒. 微波冷冻干燥过程的升华冷凝现象[J]. *中国科学E辑: 技术科学*, 1998, 28(3): 225 – 231.]
- [32] Zhou Jiazuo, Li Dongqing, Fang Jianhong, et al. Numerical analysis of heat and mass transfers in saturated freezing soil in an open system[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(4): 791 – 795. [周家作, 李东庆, 房建宏, 等. 开放系统下饱和正冻土热质迁移的数值分析[J]. *冰川冻土*, 2011, 33(4): 791 – 795.]
- [33] Xu Xiaozu, Wang Jiacheng, Zhang Lixin. *Physics of frozen soils*[M]. Beijing: Science Press, 2010. [徐敦祖, 王家澄, 张立新. *冻土物理学*[M]. 北京: 科学出版社, 2010.]
- [34] Zhang M, Wen Z, Xue K, et al. A coupled model for liquid water, water vapor and heat transport of saturated-unsaturated soil in cold regions: model formulation and verification[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(8): 701. DOI: 10.1007/s12665-016-5499-3.
- [35] Shang Songhao, Lei Zhidong, Yang Shixiu. Numerical simulation improvement of coupled moisture and heat transfer during soil freezing[J]. *Journal of Tsinghua University*, 1997, 37(8): 62 – 64. [尚松浩, 雷志栋, 杨诗秀. 冻结条件下土壤水热耦合迁移数值模拟的改进[J]. *清华大学学报*, 1997, 37(8): 62 – 64.]
- [36] Bi Jun, Zhang Mingyi, Chen Wenwu, et al. A new model to determine the thermal conductivity of fine-grained soils[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 123: 407 – 417.

Monitoring and analysis of the thermal conductivity of railway subgrade in the permafrost regions

ZHANG Mingli^{1,3,4}, WANG Bin², ZHOU Zhixiong³, XIE Junjie¹, WANG Dekai⁵,
YUE Guodong³, LI Guang³

(1. Research and Development Center of Transport Industry of Technologies, Materials and Equipments of Highway Construction and Maintenance (Gansu Road & Bridge Construction Group), Lanzhou 730030, China; 2. Xinjiang Transportation Planning Surveying and Design Institute, Urumqi 830000, China; 3. College of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 4. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environmental and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 5. Geological Hazards Prevention Institute, Gansu Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In order to analyze the effects of freezing and thawing process, ballast cover and rainfall on thermal conductivity, the in-situ monitoring of thermal conductivity, temperature and moisture of subgrade and natural soil in the test section of permafrost railway roadbed was carried out in the Qinghai-Tibet Plateau. The results show that the fluctuation of thermal conductivity during the melting period is more obvious than the freezing period. The thermal conductivity during the thawing period is larger than the freezing period in natural site, but the thermal conductivities of gravel soil subgrade and ballast covered subgrade during the freezing period are smaller than the thawing period. The monitoring results of subgrade soil are contrary to the general cognition and simulation value of temperature field. Moisture content and thermal conductivity of gravel soil subgrade are higher than ballasted subgrade soil due to the thermal insulation and water blocking effects of ballast layer. Meanwhile, the thermal conductivity of subgrade soil during freezing period tends to decrease, especially for the ballast subgrade soil. The rainfall infiltration increases the thermal conductivity of the soil. And the thermal conductivity of the low water content ballast subgrade has a considerable response to rainfall. In the numerical simulation of railway subgrade engineering in cold area, the influence of hydrothermal change on thermal conductivity should be considered. It is not appropriate to use the piecewise function or step function of the fixed phase change interval to estimate the thermal conductivity.

Key words: railway subgrade; permafrost; thermal conductivity; field monitoring; rainfall infiltration

(责编委: 张明义; 编辑: 庞瑜, 周成林)