

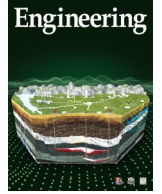


ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/eng](http://www.elsevier.com/locate/eng)



Research  
Civil Engineering—Article

## 高海拔冻土区路基周边近地表流场特征及其工程意义

穆彦虎<sup>a,b</sup>, 马巍<sup>a,b,\*</sup>, 杨朝辉<sup>c,\*</sup>, 栗晓林<sup>d</sup>, 张坤<sup>e</sup>, 毛云程<sup>e</sup>

<sup>a</sup> State Key Laboratory of Frozen Ground Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

<sup>b</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

<sup>c</sup> College of Engineering, University of Alaska Anchorage, Anchorage, AK 99508, USA

<sup>d</sup> College of Civil Engineering and Architecture, Jiaxing University, Jiaxing 314001, China

<sup>e</sup> School of Civil Engineering, Northwest Minzu University, Lanzhou 730024, China

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 15 April 2021

Revised 5 October 2021

Accepted 17 October 2021

Available online 25 January 2022

#### 关键词

近地表流场

现场观测

气冷措施

线性交通工程

青藏高原

#### 摘要

块碎石、通风管和热管等主动冷却措施广泛应用于冻土区工程建设,通过强化冷季与外界空气的换热过程降低下伏多年冻土的温度,进而确保气候变暖背景下工程构筑物的长期稳定性。对于气冷类主动冷却措施而言,对流换热过程至关重要,因此掌握构筑物周边流场特征具有重要的意义。结合青藏高原北麓河高等级公路试验示范工程,沿垂直于路基走向的横剖面开展了路基周边近地表流场的长期定位观测。基于6个观测塔完整的一年观测数据,研究了路基两侧60 m范围内地面上0.5 m、1.5 m、3.0 m和4.5 m高度上风速、风向的空间分布特征及季节变化规律。结果表明,路基的存在对近地表流场有显著的影响,在背风侧的影响距离可达10倍路基高度。路基周边近地表风速沿高度的分布可用综合幂次律描述,幂次值为0.14–0.4;远离路基位置幂次值年均水平为0.19,与以往研究中常用值存在差异。讨论了近地表风场的空间分布和季节变化对包括块石、通风管等气冷路基结构工作机制和长期效果的影响,认为低估近地表风场速度剖面的幂次值、忽略风向的季节变化可能导致气冷类主动冷却降温措施设计的不足。现场测试结果可为高原冻土区工程建设提供有益参考。

© 2022 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. 引言

多年冻土在全球分布广泛,北半球近1/4和全球17%的陆地面积分布多年冻土[1]。广袤的多年冻土区资源丰富,包括近25%未探明的油气资源,对于全球经济发展发挥着重要的作用[2–3]。近几个世纪以来,随着社会经济的发展,冻土区工程建设日益增多,包括油气资源开采,交通基础设施、通讯设施、工业和民用设施建设等[4]。然而,持续的气候变暖引发的多年冻土退化给冻土

区工程构筑物带来了极大的挑战,并造成了巨大的经济损失[5–10]。最新的评估研究表明,至2050年,北半球多年冻土区近33%的构筑物将面临由多年冻土退化引发的承载力丧失和地表沉降而导致的病害问题[11]。因此,在气候变暖情景下,如何经济地维护已建工程、科学修筑未来工程是工程领域一项重大挑战。由于冻土地基的承载力和变形行为与其热状况密切相关,因此如何调控冻土地基与外界环境的换热过程至关重要[12–14]。

在多年冻土区,工程活动对地表局地要素的改造会影

\* Corresponding authors.

E-mail addresses: mawei@lzb.ac.cn (W. Ma), zyang2@alaska.edu (Z. (J.) Yang).

2095-8099/© 2022 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

英文原文: *Engineering* 2022, 14(7): 169–180

引用本文: Yanhu Mu, Wei Ma, Zhaohui (Joey) Yang, Xiaolin Li, Kun Zhang, Yuncheng Mao. Field Observations of Near-Surface Wind Flow Across Expressway Embankment on the Qinghai–Tibet Plateau. *Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.10.020>

响地气能量交换过程，进而影响下部冻土地基的热状况。对于路基这种线性工程而言，工程建设期和运营期对原地表岩土体类型、性质、反射率、地表水体和层上水径流，以及植被等局地要素的改变会显著改变下伏多年冻土的热状况。为此，冻土工程领域提出了一系列主动冷却措施以确保气候变暖和工程扰动双重影响下下伏多年冻土地基的长期热稳定性。块碎石、通风管、热管是目前各类冻土工程常用且有效的三种主动冷却措施，通过强化冷季与外界空气的换热过程，能够有效减缓由冻土升温、退化造成的工程病害问题[15]。在冷季，块碎石层和通风管可以强化路基内部与外界环境的对流换热过程；由于对流是一种高效的传热机制，因此可以加快下伏冻土地基冷季的热量散失[15–18]。热管作为一种换热装置，可以通过内部工质蒸发、冷凝循环过程高效地将热量从蒸发段传递到冷凝段[19]。由于高效的传热能力，目前热管被广泛应用于各类工程系统的热量管理[20–27]。在用于多年冻土降温时，热管仅在冷季工作，将热量从埋设于冻土地基的蒸发段带到暴露在外界空气中的冷凝段[20,22,25]。在过去几十年，这些主动冷却措施已经被广泛应用于加拿大、阿拉斯加、西伯利亚、青藏高原等多年冻土的公路/铁路路基、机场跑道、油气管线、建筑物和输变电线路基础等[12–13,28–30]（图1）。

对于线性工程而言，近地表流场对于主动冷却措施的工作机制和降温效果至关重要。对于块碎石路基，近地表的风速和风向不仅决定着块碎石层内部的对流换热类型（强迫对流和自然对流），同时还决定着对流换热的强度[16–17,31–34]。Wu等[33]基于青藏铁路试验段开展

了块石层冷却降温机制的现场试验研究，结果表明冷季风速大的时候块石层内以强迫对流为主，而风速较小时块石层内以浮力驱动的自然对流为主，由此提出环境风速和风向决定着块石层的冷却降温机制和长期效果。对于通风管路基，在通风管管径和埋设高度确定的情况下，管内空气的流速与环境风速、风向密切相关[17,35–36]。对于热管路基而言，近地表的流场同样是其工作状况的重要一环，影响着热管冷凝段与冷空气间的对流换热过程。然而，目前针对采用气冷类主动冷却措施工程构筑物周边流场的现场观测研究较少。在进行主动冷却措施长期效果评估的研究中，对于周围近地表流场，往往基于一个固定的风向和年平均或者季节变化的风速进行简化[22,25,30,35–43]。这种简化可能导致对主动冷却措施换热效率的高估或者低估，进而影响冻土地基长期热状况预测的精度，由此影响工程的前期设计和后期维护。

依托青藏高原腹地北麓河盆地高等级公路试验示范工程，开展了公路路基周边近地表流场的长期定位观测。在路基两侧60 m范围内建立了6个观测塔，观测了近地表0.5 m、1.5 m、3.0 m、4.5 m共计4个高度的风速和风向，同时收集了试验示范工程附近的气象站数据。基于现场观测数据，研究了路基周边近地表流场的空间分布特征和季节变化规律，讨论了风向、风速和风速剖面对气冷类主动冷却措施降温效能的影响。系统的现场观测数据和结果可为包括青藏高原冻土区拟建、已建线性工程的建设和维护提供依据。

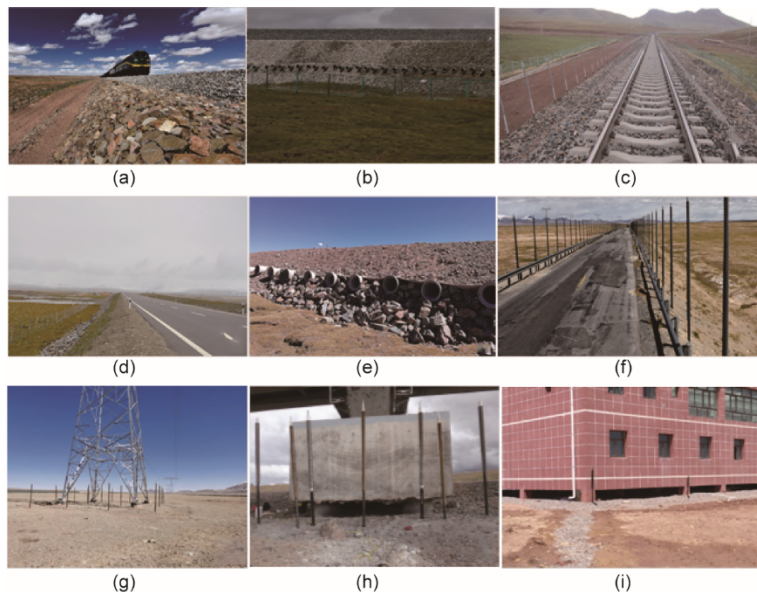


图1. 块碎石、通风管、热管等主动冷却措施在青藏高原各类冻土工程中的应用。



## 2. 研究区域和方法

### 2.1. 研究区域

研究区域位于青藏高原腹地北麓河盆地 (92°55′36″E, 34°49′21″N), 海拔4618 m。如图2所示, 研究区地形平缓, 为高寒草甸, 植被盖度为70%~90%, 为大片连续多年冻土区。冻土年平均地温为-1.0~-0.5 °C。活动层厚度为2~3 m, 钻孔资料显示活动层以下多年冻土含冰量大。研究区东北方向2 km处气象站数据表明, 2003—2015年, 年平均气温为-4.1~-2.8 °C, 年均降雨量为230~460 mm。收集统计了自2018年7月1日至2019年6月30日该气象站2 m和10 m高度的气温、风速、风向数据, 作为路基周边流场空间分布特征和季节变化规律的参考。

### 2.2. 试验路基工程

2009年8月, 在研究区平行青藏铁路修筑了一段高等级公路试验示范路基工程。试验示范工程采用了多种不同主动冷却措施, 为青藏高原高温冻土区高速公路的修筑进行技术验证和数据积累。试验路基总长为300 m, 走向为SW197°, 路基高度为3 m, 顶面宽度为13 m, 边坡坡率为1:1.5。试验路基共分为10段, 每段长度为30 m, 其中9段采用了块碎石、通风管、热管、空心块等单独或复合主动冷却措施, 剩余一段未采用任何措施, 作为对比断面[44]。

### 2.3. 近地表流场观测

如图3所示, 沿垂直于路基走向的一个横剖面建立了6个观测塔, 距离路基左右两侧坡脚分别为0.5 m、30 m和60 m。为方便论述, 朝拉萨方向, 将路基右侧的三个塔记为TR-0.5、TR-30和TR-60, 将路基左侧的三个塔记为TL-0.5、TL-30和TL-60。靠近路基两侧坡脚的两个塔TR-0.5和TL-0.5的观测高度为4.5 m, 其余4个塔的观测高度为3.0 m。整个观测剖面地形相对平坦, 因此各个塔的高程差可以忽略。考虑到研究区的主导风向和路基走向, 路基右侧三个塔位于迎风侧, 而左侧三个塔位于路基背风一侧。

风速和风向的观测均采用美国Mot One公司生产的传感器, 其中风速传感器型号为010C型, 风向传感器为020C型。010C型风速传感器使用一个轻便的三杯风速计来测量水平风速, 其校准工作范围为0~50 m·s<sup>-1</sup>, 分辨率小于0.1 m·s<sup>-1</sup>, 精度为±1%。在3.0 m高观测塔上, 三个风速传感器分别安装在地面以上0.5 m、1.5 m和3.0 m高度, 如图4(a)所示。在靠近路基左右坡脚两个4.5 m高的观测塔上, 分别在0.5 m、1.5 m、3.0 m和4.5 m的高度安装风速传感器, 如图4(b)所示。在每个塔上, 020C风向传感器与最上面的风速传感器配对, 通过耦合一个轻型翼型叶片和一个单精度电位器来提供风向数据(0°~360°), 其分辨率小于0.1°, 精度为±3°。在路基两侧, 三个观测塔统一连接到一台CR3000数据采集仪上, 进行数

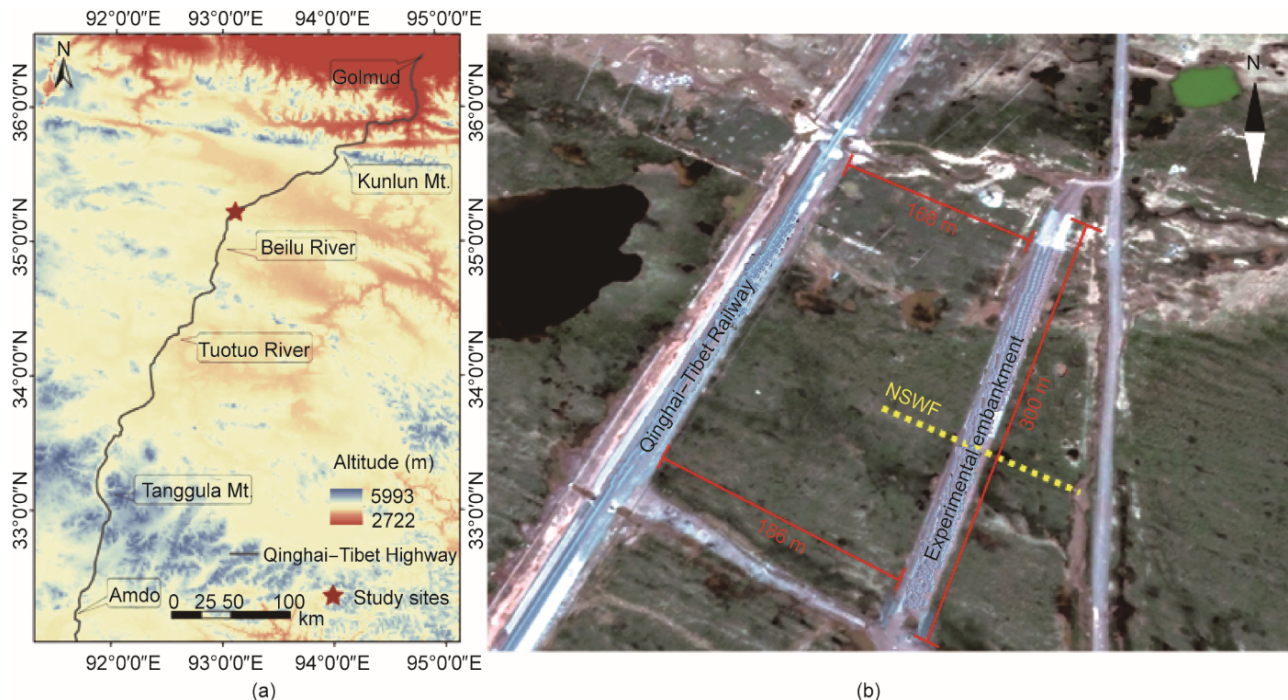


图2. 研究区域及高等级公路试验示范工程。

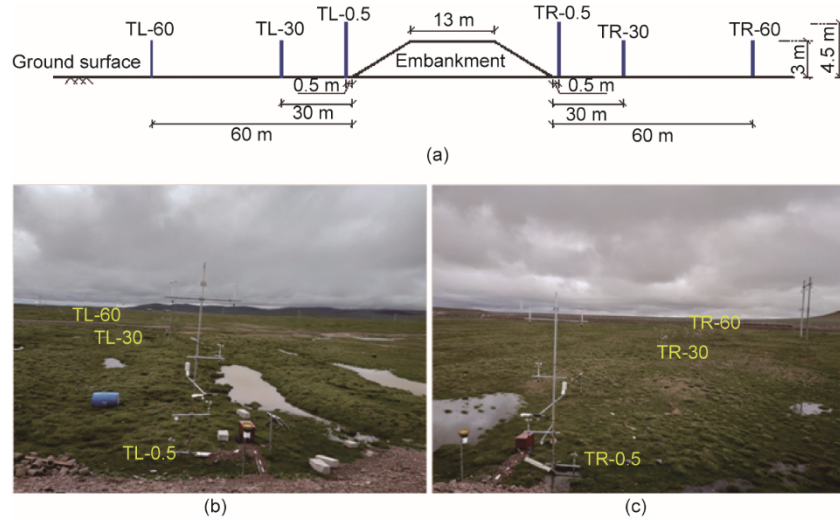


图3. 近地表流场观测系统布设示意图 (a) 以及背风 (b) 和迎风侧 (c) 观测塔现场照片。

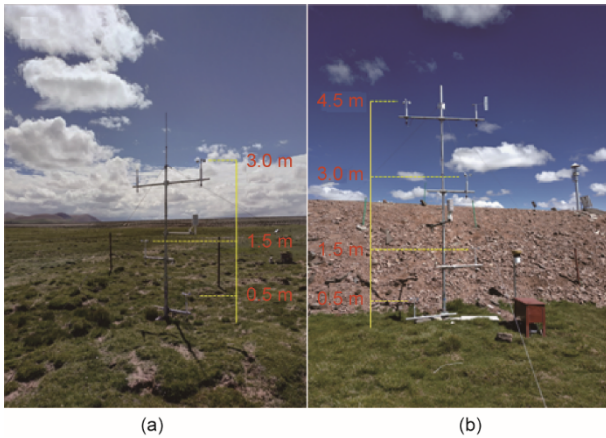


图4. 路基两侧坡3 m (a) 和4.5 m (b) 高观测塔。

据采集和存储，存储10 min 风速、风向平均值。

### 3. 结果与分析

#### 3.1. 研究区风环境特征

图5给出了基于气象站观测数据绘制的研究区风玫瑰图。图中红色虚线代表路基走向。从图5 (a) 可以看出，年尺度上研究区内主要风向为W、WSW和WNW，其出现频率分别为18.5%、14.9%和13.0%，而其他方向的频率相对较低，范围为0.9%~8.5%。

研究区冷季和暖季风向特征差异显著，其中冷暖季以月平均温度高于和低于 $0^{\circ}\text{C}$ 为依据进行划分。如图5 (b) 所示，冷季即10月至次年4月研究区风向相对单一，三个主导风向W、WSW、WNW的频率均在18.5%以上，合计高达65.5%，剩余风向中除SW占11.5%外，其他风向的频率均小于4.3%。而在温暖的5~9月，如图5 (c)，风

向较为分散，单一风向频率均小于12.4%，E、ENE、NE和NNE风出现的频率相对较大，为9.6%~12.4%，而其他风向的频率范围为1.6%~8.1%，合计为55.4%。

风速、气温及季节变化对气冷类主动冷却措施的传热过程和对下伏冻土路基的冷却效果影响显著。图6给出了研究期间环境风速和气温的变化，结果表明风速变化范围为 $0\sim 18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，年均风速为 $4.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，气温变化范围为 $-26.2\sim 17.5^{\circ}\text{C}$ ，年平均值为 $-3.6^{\circ}\text{C}$ 。风速和气温随季节变化呈相反趋势变化，冷季风较强，暖季风较弱；这对于气冷类冷却降温措施在青藏高原冻土路基冷却中的应用至关重要[13,16~17]。表1给出了研究区月平均风速和月平均气温统计结果。11月至次年3月的月平均风速达到或超过 $4.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，2月达到最大值 $7.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，月平均气温为 $-14.6\sim -9.2^{\circ}\text{C}$ 。6~9月的月平均风速下降至 $3.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下，9月最低为 $3.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，月平均气温变化范围为 $3.6\sim 7.9^{\circ}\text{C}$ 。

#### 3.2. 路基周边风向特征

图7为研究期间距离路基最远的两个观测塔TR-60和TL-60的风玫瑰图。由于试验路基高度为3 m，因此两个观测塔与路基间的距离均为路基高度的20倍。从图中可以看出，两个观测塔位置的风玫瑰图非常接近。在TR-60观测塔位置，W、WSW和WNW风的频率分别占17.8%、15.2%和14.1%，合计占47.1%。在TL-60位置，三个主导风的频率为18.5%、13.9%和14.6%，合计占47%。此外，通过与研究区同时段风玫瑰图的对比可以看出，路基两侧60 m位置处的风向特征与研究区环境风向无明显差异，说明在路基高度20倍距离上路基的存在对近地表的风向没有明显的影响。



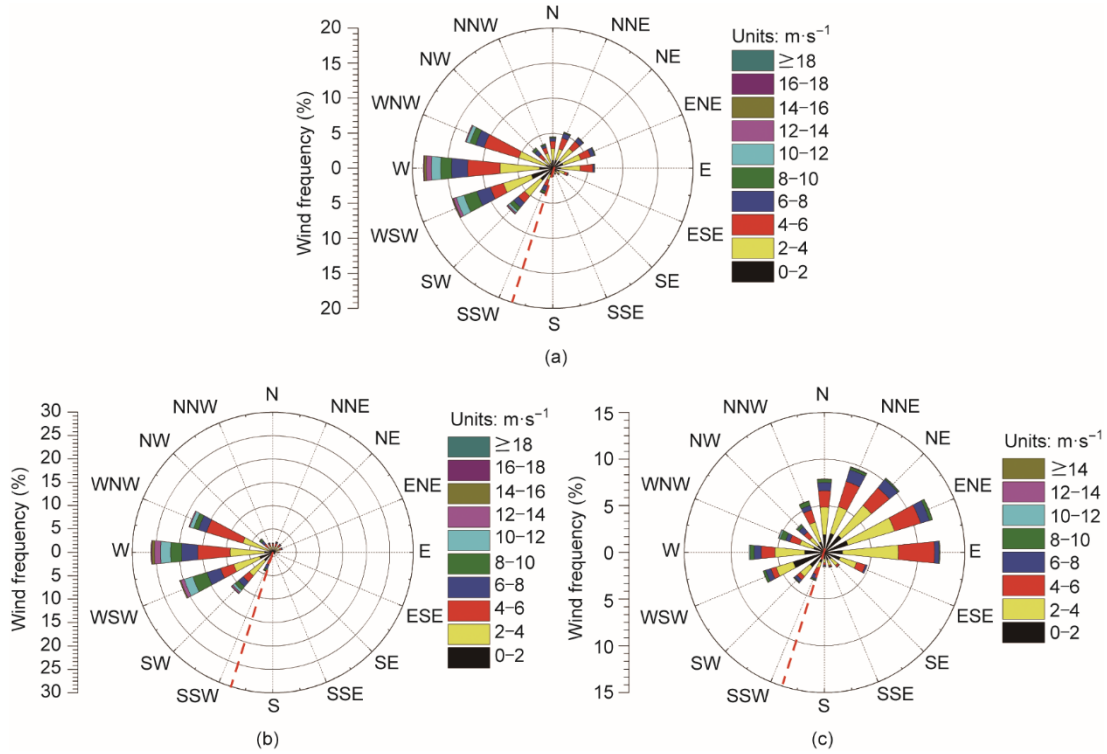


图5. 研究区一年 (a)、冷季 (b) 和暖季 (c) 的风玫瑰图。

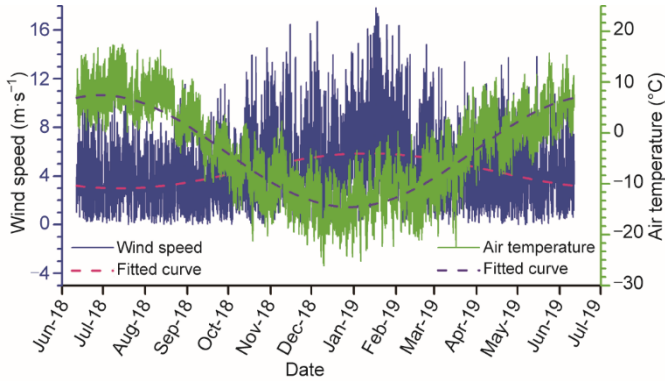


图6. 研究期内环境风速和气温变化过程。

表1 研究期内月平均风速和平均气温

Month	MMWS ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	MMAT ( $^{\circ}\text{C}$ )
July	3.3	7.9
August	3.4	7.5
September	3.1	3.6
October	3.6	-5.1
November	5.0	-9.2
December	5.6	-13.6
January	5.5	-14.6
February	7.1	-11.2
March	4.8	-9.7
April	4.1	-2.8
May	4.3	0.2
June	3.6	3.6

图8给出了靠近路基的4个观测塔TR-30、TL-30、TR-0.5和TL-0.5的风玫瑰图。可以看出在迎风侧，如图8(a)、(c)所示，TR-30和TR-0.5两个观测塔的主导风向与距离路基60m观测塔TR-60和TL-60相同。在TR-30观测塔位置，三个主导风向W、WSW和WNW的频率分别为18.2%、14.9%和14.5%，在TR-0.5观测塔这三个主导风的频率则为17.5%、14.3%和14.1%。这些量值均与TR-60和TL-60观测塔数值接近，表明路基的存在对迎风侧近地表面的风向没有明显的影响。

而在背风侧，观测塔TL-30和TL-0.5的风向发生了显著变化。如图8(b)，TL-30的WSW、W、WNW风的频率分别为17.2%、16.8%、11.9%，主导风向由W向WSW转换；与TL-60观测塔〔图7(b)〕相比，WSW风的频率增加了3.3%，而WNW风的频率减少了2.7%。进一步靠近路基，近地表面的风向变化更显著。从图8(d)可以看出，TL-0.5观测塔WSW风的频率达到18.9%，而WNW风频率下降到11.7%。由此表明，在背风侧10倍路基高度范围内，路基的存在改变了近地表流场的风向，阻挡了与其垂直的风，而促进了与其平行的风。

### 3.3. 路基周边风速特征

图9给出了6个观测塔0.5m、1.5m和3.0m高度的月平均风速变化情况。可以看出，不同高度上月平均风速的

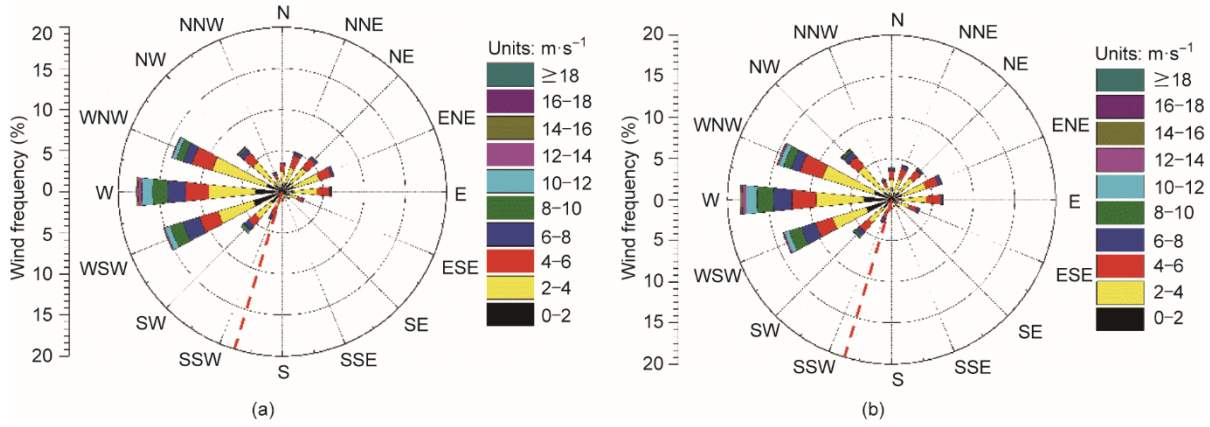


图7. 观测塔TR-60 (a) 和TL-60 (b) 的风玫瑰图。

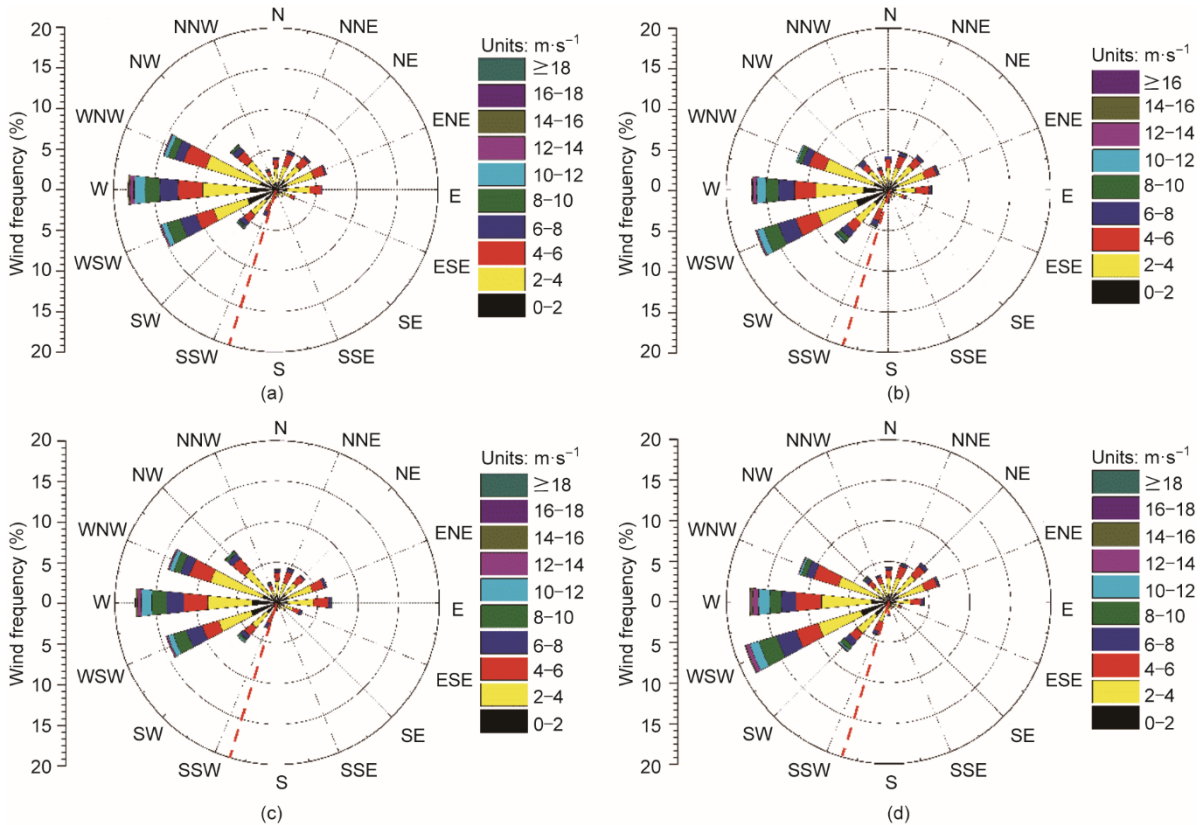


图8. 观测塔TR-30 (a)、TL-30 (b)、TR-0.5 (c) 和TL-0.5 (d) 的风玫瑰图。

变化是同步的，一般在2月份达到最大，9月份降至最小。路基的存在对周边的风速影响显著，尤其靠近坡脚位置的两个观测塔，且越靠近地面路基对风速的影响越大。

在0.5 m高度，如图9 (a) 所示，4个观测塔TR-60、TL-60、TR-30和TL-30位置风速值接近，其中TR-30的风速值比其他塔低 $0.2\sim 0.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。在靠近坡脚位置，路基显著地减缓了风速，在迎风侧TR-0.5的最大月平均风速比TR-60小 $1.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，风速降低了约40%；而在背风侧TL-0.5的最大月平均风速比TL-60低 $2.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，风速降低了

约50%。路基对风速的影响随观测高度的增加而减小。从图9 (b) 可以看出，在距离地面1.5 m高度处，TR-60、TR-30、TL-60和TL-30的月平均风速在整个研究期间几乎重叠，但靠近坡脚的两个塔TR-0.5和TL-0.5与其余塔之间风速的差异仍然显著。例如，TR-0.5观测塔的月平均风速值比其他4个位置小 $0.8\sim 1.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。当观测高度达到3.0 m时，如图9 (c) 所示，同一月份6个塔的月平均风速数据差值减小至 $0.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以内。

值得注意的是，在0.5 m和1.5 m高度，除7月和8月

外, TR-0.5的月平均风速值普遍大于TL-0.5的月平均风速值。从图5(b)可以看出, 暖季主导风向由W转为E, TL-0.5为迎风面而TR-0.5为背风面, 因此这两个月TL-0.5处的月平均风速值较高。但在整个研究期间, TL-0.5的3.0 m处的月平均风速值均略大于TR-0.5。路基周边0.5 m和1.5 m高度处风速值的显著差异, 反映了路基会改变近地表流场。

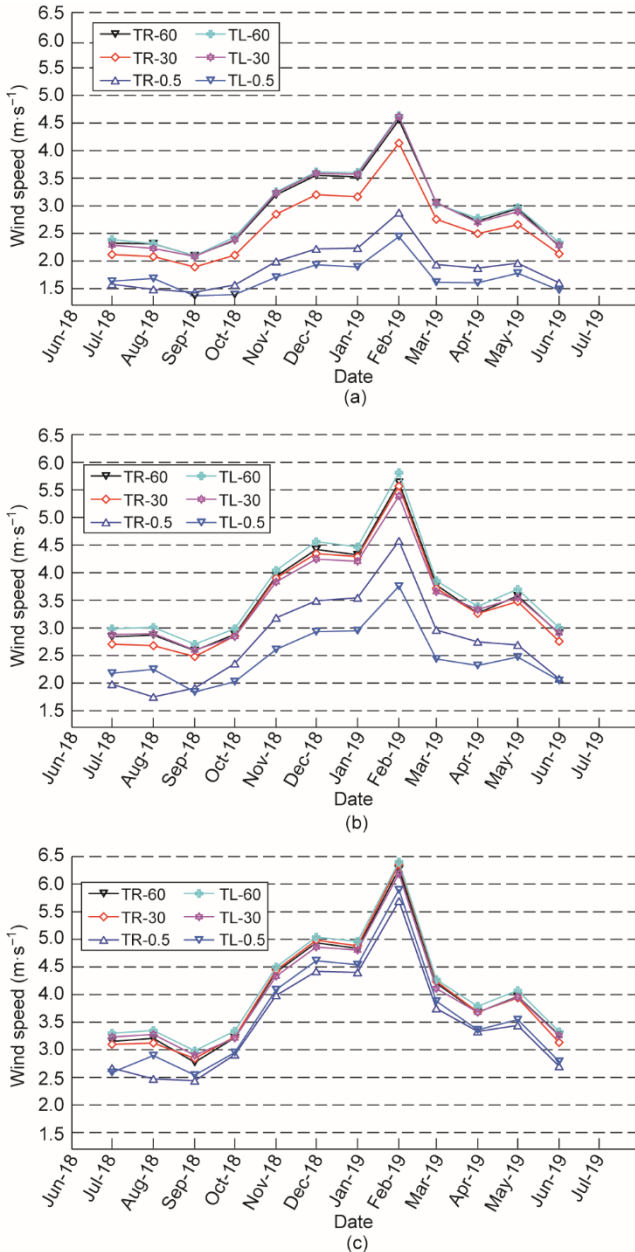


图9. 观测塔0.5 m (a), 1.5 m (b) 和3.0 m (c) 高度月平均风速值。

图10对比了TR-0.5和TL-0.5在4.5 m高度处的月平均风速。在这个高度, 两个位置的月平均风速值在整个研究期间非常接近。暖季时, 两个位置的月平均风速值基本一

致, 而冷季TL-0.5的月平均风速值略大于TR-0.5, 这一结果与流场绕流路基后的加速效应有关。两个位置月平均风速差异在冷季相对明显而在暖季不明显, 这与研究区冷季风向单一, 而暖季风向分散有关。

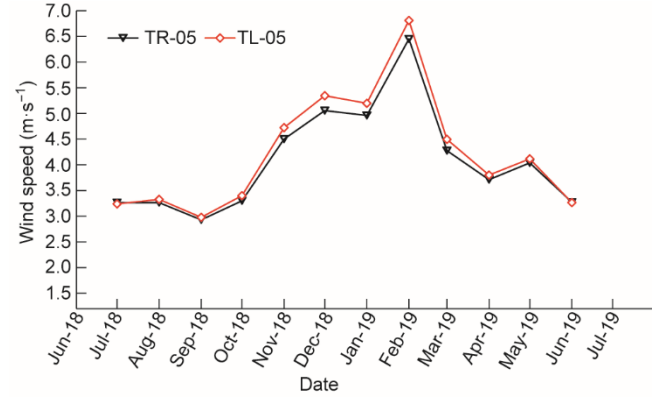


图10. 路基坡脚附近观测塔4.5 m高度月平均风速值。

#### 3.4. 路基周边风速廓线

如前所述, 近地表流场是影响冻土路基主动冷却措施降温效能的主要因素之一。以往, 对于近地表风速往往采用一个给定高度测量的风速数据, 如气象站10 m高度, 然后利用综合幂次律获得不同高度的风速。幂次律形式简单[45-47], 形式如下:

$$V = V_{10} \left( \frac{Z}{Z_{10}} \right)^{\alpha} \quad (1)$$

式中,  $V$ 为任意高度风速;  $V_{10}$ 为10 m高度风速;  $Z$ 为与 $V$ 对应的高度;  $Z_{10}$ 为10 m高度;  $\alpha$ 为幂次值 (PLI), 为取决于地面粗糙度的常数。

基于6个观测塔2月和9月的月平均风速数据, 以及附近气象站2月和9月10 m高度的风速值, 对路基周边近地表流场风速廓线进行拟合分析。图11给出了TR-60、TL-60、TR-30和TL-30观测塔位置的风速廓线。可以看出, 4个位置的风速随高度的变化均可采用幂次律进行较好的拟合, 但PLI值在不同位置、不同月份间差异较大。4个观测塔中, 9月PLI值相对较小, 在0.14~0.18之间, 2月PLI值相对较大, 在0.21~0.24之间。

图12对比了TR-0.5和TL-0.5观测塔位置的风速沿高度分布情况。这两个塔位于路基坡脚位置, 因此直接影响着主动冷却措施的工作状态。可以看出, 尽管这两个位置上的风速受路基影响较大, 但风速廓线仍然能用幂次律进行描述。拟合结果表明, 两个位置的PLI值显著大于前面远离路基的4个塔, 9月TR-0.5和TL-0.5的PLI值分别达到0.28和0.23, 2月分别跃升至0.40和0.38。这两个塔的PLI值明显增大, 清楚地反映了路基对近地表流场的影响。

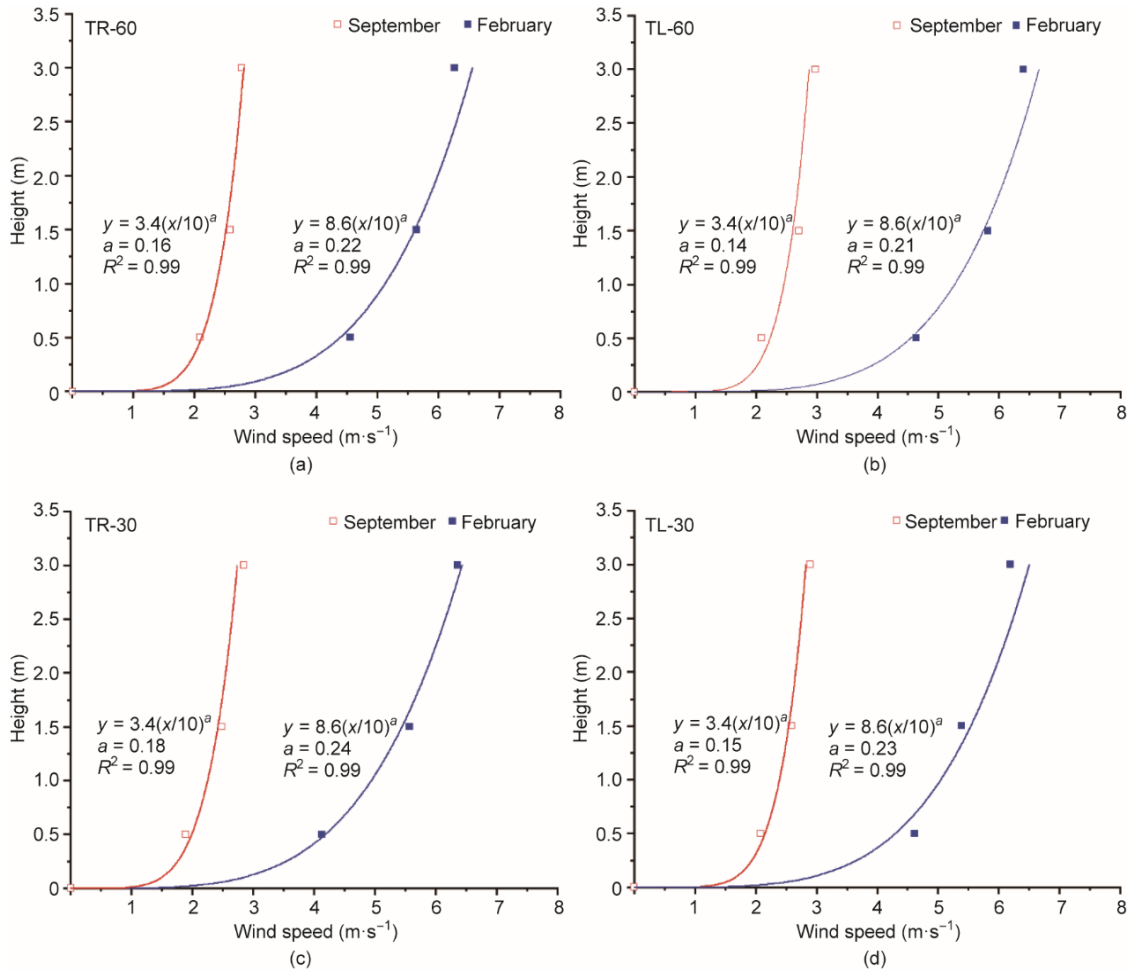


图 11. 远离路基 4 个观测塔 2 月和 9 月的风速廓线及拟合结果。

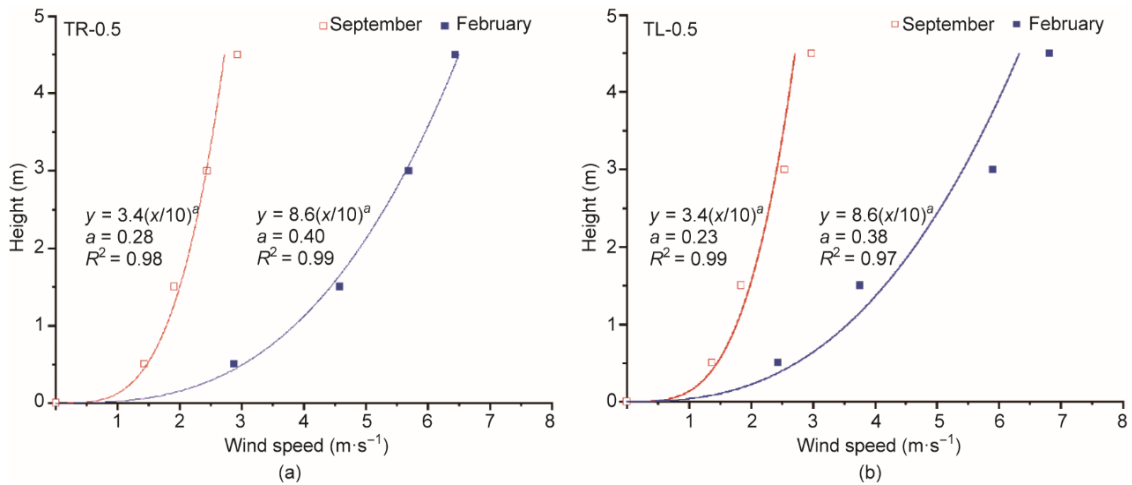


图 12. 路基坡脚附近两个观测塔 2 月和 9 月的风速廓线及拟合结果。

为了量化路基周边风速廓线 PLI 值的时空变化, 图 13 给出了整个研究期间 TR-60、TR-30、TL-60 和 TL-30 的 PLI 值。可以看出, 不同位置 PLI 值的季节性变化是同步并且显著的。在暖季风速较低时 PLI 值较小, 在冷季风速较高时 PLI 值较大, 这与城市地形的观测结果一致[45–

47]。此外, 在同一月内, 在距路基相同距离处, 迎风侧塔 PLI 值略大于背风侧塔。距路基 60 m 处, 冷季时 PLI 值为 0.18~0.23, 平均值为 0.21, 而暖季时为 0.15~0.22, 平均值为 0.16。距路基 30 m 处, PLI 值略有增加, 冷季 PLI 均值为 0.23, 暖季均值为 0.18。在这 4 个地点中, 全



年只有少数PLI值小于0.16，即以青藏高原主动冷却措施长期降温效果模拟评估中的常用值[16,22,25,27,30,35-43]。

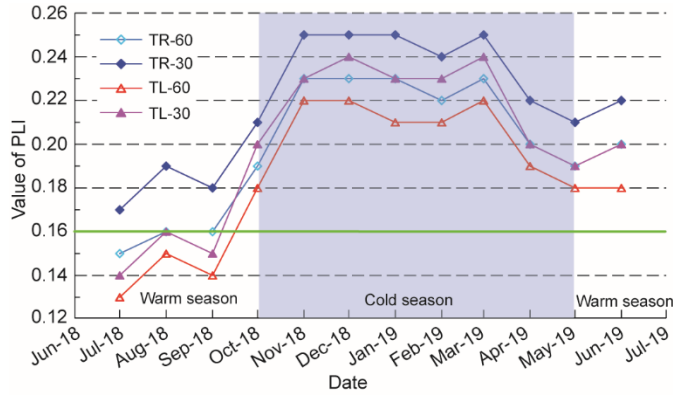


图13. 远离路基4个观测塔位置PLI指数的季节变化。

## 4. 讨论

### 4.1. 近地表风速的重要性

主动冷却降温措施长期热性能的可靠评估是冻土工程的合理设计和科学维护的前提。在数值模拟预测中，近地表风速是流固耦合传热的重要边界条件，以往常采用10 m高度观测到的风速与综合幂次律来确定近地表风速，其中PLI值常取0.12和0.16 [16,22,25,27,30,35-43]。然而，如图11所示，由观测数据拟合得到的PLI值表现出明显的季节变化规律，同时平均值也明显大于以往常用值。

对TR-60和TL-60观测塔0.5 m、1.5 m和3.0 m高度年平均风速值进行拟合分析，同时以气象站10 m高度风速值和PLI值分别为0.12和0.16时绘制的风速廓线进行比较，如图14所示。可以看出，使用PLI值为0.12和0.16得

到的近地表风速值明显大于现场观测值。例如，在离地面0.5 m和1.5 m处，风速分别被高估了12%~25%和5%~13%。在3.0 m高度，PLI为0.12的预测风速仍被高估10%。

在青藏高原多年冻土区，大多数铁路和公路路基高度一般在5 m以下[48-49]，这意味着在包括块石、通风管和热管在内的主动冷却路基长期热性能的评估研究中，应用较低的PLI指数可能导致过高的近地表风速。而这些被高估的近地表风速会导致主动冷却措施效能被高估，引发对主动冷却路基降温效果评估过于乐观。例如，被高估的近地表风速将导致通风管内空气流速和热管冷凝端的散热效率被高估。而对于块石路基而言，被过高估计的近地表风速不仅可能会影响块石层内的对流类型还会影响其对流强度。

### 4.2. 近地表风向的重要性

风向也是影响主动冷却路基长期降温效果的重要因素。以通风管路基为例，主导风向与路基走向决定了风向与通风管的夹角，从而决定了环境风速与通风管内空气流速的关系。

选取2018年8月15日和12月15日两天的现场观测数据，分析暖季和冷季环境风速和通风管内空气流速之间的关系，如图15所示。图16显示了两个选定日的半小时平均环境风向。通风管内径为0.4 m，埋地高度为1.0 m。环境风速数据从2 m高度的气象站采集，通风管内空气流速数据由安装在管内轴线上的超声风速仪测量。12月15日，环境风向相对稳定在242°~332°，平均值为282°，与路堤路线大致垂直。当日环境风速与风道气流速度呈明显正相关，管道内空气流速最大可达 $5.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。相反，8月15日的环境风向变化很大，为4°~360°。例如，18:00环境风向

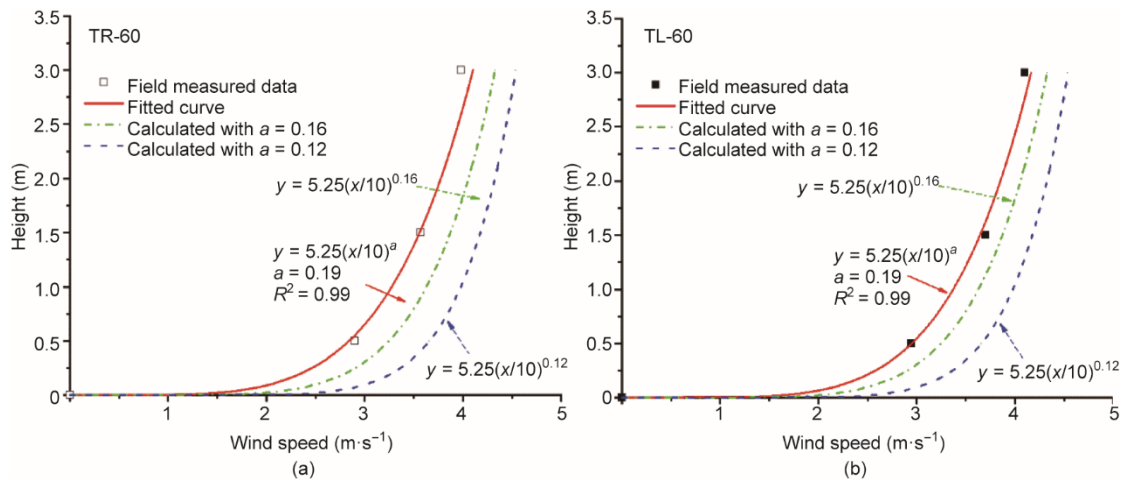


图14. 远离路基两个观测塔位置观测和拟合的风速廓线。

几乎垂直于路堤路线或几乎平行于通风管轴线，管道内空气流速为 $2.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，约为环境风速 $4.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的一半，但21:30环境风向近似平行于路基走向，即近似垂直于通风管轴线，管内风速仅为 $0.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，仅为环境风速 $6.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的1/30。

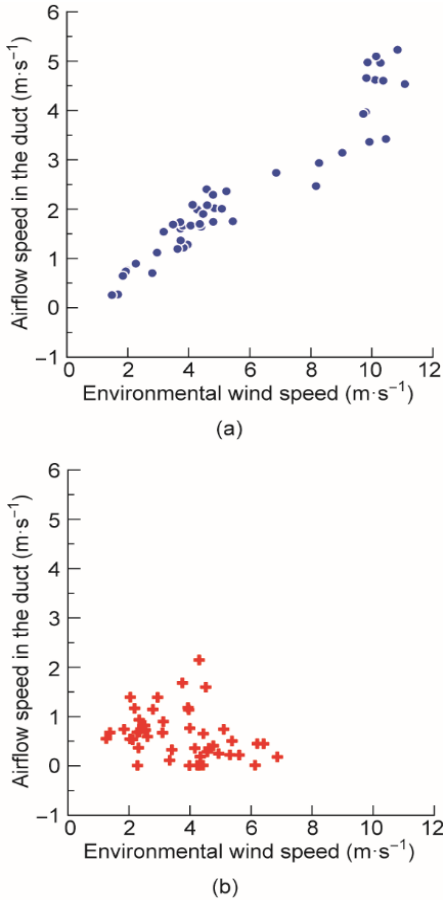


图15. 2018年12月15日和8月15日环境风速与通风管内风速关系。

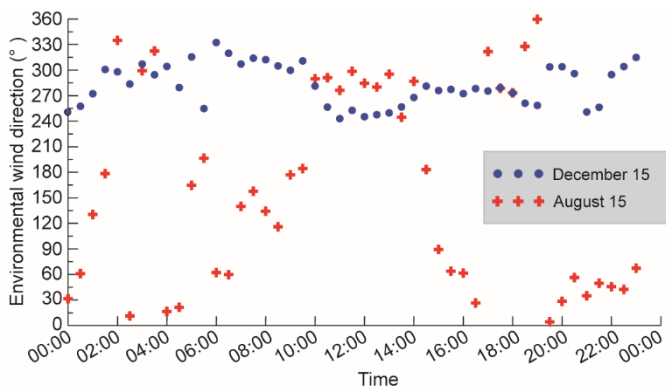


图16. 2018年12月15日和8月15日环境风向。

以上讨论表明，在评价采用主动冷却路基长期降温效果时，需要同时考虑环境风速和风向。然而，由于风向变化的复杂性，现有大多数模拟研究忽略了风向的时间变化

过程[16,22,25,27,30,35-43]。值得注意的是，冬季青藏高原风向相对稳定、单一，这为模拟研究中采用单一主导风向提供了一定的基础。在工程应用方面，在设计时应考虑实际环境主导风向与路基走向之间的夹角。例如，当主导风向靠近公路路基走向时，热管或者块石路基是较好的选择。如采用通风管路基，则应在选线过程中考虑路基与冷季主导风向之间的夹角问题。

## 5. 结论

近地表流场对于评估冻土路基主动冷却措施降温效能至关重要。为此，基于青藏高原北麓河盆地高等级公路试验示范工程，开展了为期一年路基周边近地表流场空间分布和季节变化的现场观测研究。结合现场观测数据，分析路基迎风和背风两侧60 m范围内近地表的风速、风向以及风速剖面。在此基础上，针对线性工程，讨论了近地表流场对包括块石路基、通风管路基、热管路基冷却降温性能的意义，主要结论如下。

(1) 研究区冷季风向相对单一，W、WNW、WSW风出现频率均在22%以上，合计占74.4%。暖季时，风向较为分散，单一风向出现频率未超过15%。冷季的风速明显高于暖季，有利于气冷类主动冷却措施对冻土地基的降温。

(2) 路基的存在对迎风侧的风向没有影响，但背风面垂直于路堤方向的风减缓，而平行于路堤方向的风有所加强。路基高度范围内，路基显著降低了迎风和背风侧风速，路基顶面以上背风侧风速明显增强。在路基高度15~20倍范围，近地表流场逐渐恢复。

(3) 采用综合幂次律可以较好地拟合路基周边近地表风速剖面，幂次PLI值随季节和与路基之间距离的变化较大。在远离路基位置，冬季PLI均值为0.21，夏季为0.16，年均水平PLI值为0.19，显著大于已有研究中的常用值0.12和0.16。对PLI值的低估可导致对主动冷却措施降温效能的高估，进而引发主动冷却路基设计的不足。

(4) 风向也是影响块石路基和通风管路基冷却降温效果的关键因素，忽略风向变化同样会导致对冷却降温效果的高估和路基设计的不足，因此建议在主动冷却路基设计时考虑区域主导风向与路基走向之间的夹角。

值得注意的是，本文主要结论均来自一个场地的观测结果，包括地表条件、地形、路基几何形状等因素，均对构筑物周边近地表流场特征产生影响，因此后续还需要在更多不同环境下进行现场观测研究。

## 致谢

感谢刘永智研究员和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工作人员在高原现场监测仪器设备安装、维护、数据采集工作中给予的大力支持和帮助。

## Compliance with ethics guidelines

Yanhu Mu, Wei Ma, Zhaohui (Joey) Yang, Xiaolin Li, Kun Zhang, and Yuncheng Mao declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

## References

- [1] Gruber S. Derivation and analysis of a high-resolution estimate of global permafrost zonation. *Cryosphere* 2012;6(1):221–33.
- [2] Hossain K. Arctic melting: a new economic frontier and global geopolitics. *Curr Dev Arct Law* 2017;5:40–5.
- [3] Chong ZR, Yang SHB, Babu P, Linga P, Li XS. Review of natural gas hydrates as an energy resource: prospects and challenges. *Appl Energy* 2016;162:1633–52.
- [4] Nelson FE, Anisimov OA, Shiklomanov NI. Climate change and hazard zonation in the circum-arctic permafrost regions. *Nat Hazards* 2002;26(3):203–25.
- [5] Instanes A, Anisimov O, Brigham L, Goering D, Khrustalev LN, Ladanyi B, et al. Infrastructure: buildings, support systems, and industrial facilities. In: *Arctic climate impact assessment*. New York: Cambridge University Press; 2005. p.907–44.
- [6] Larsen P, Goldsmith S, Smith O, Wilson M, Strzepek K, Chinowsky P, et al. Estimating future costs for Alaska public infrastructure at risk from climate change. *Glob Environ Change* 2008;18(3):442–57.
- [7] Wu QB, Niu FJ. Permafrost changes and engineering stability in Qinghai–Xizang Plateau. *Chin Sci Bull* 2013;58(10):1079–94.
- [8] Ma W, Niu FJ, Mu YH. Basic research on the major permafrost projects in the Qinghai–Tibet plateau. *Adv Earth Sci* 2012; 11(27): 1185–1191. Chinese.
- [9] Streletskiy DA, Suter LJ, Shiklomanov NI, Porfiriev BN, Eliseev DO. Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost. *Environ Res Lett* 2019;14(2):025003.
- [10] Suter L, Streletskiy D, Shiklomanov N. Assessment of the cost of climate change impacts on critical infrastructure in the circumpolar Arctic. *Polar Geogr* 2019;42(4):267–86.
- [11] Hjort J, Karjalainen O, Aalto J, Westermann S, Romanovsky VE, Nelson FE, et al. Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by mid-century. *Nat Commun* 2018;9(1):5147.
- [12] Andersland OB, Ladanyi B. *Frozen ground engineering*. 2nd ed. New York City: John Wiley & Sons, Inc.; 2003.
- [13] Ma W, Cheng GD, Wu QB. Construction on permafrost foundations: lessons learned from the Qinghai–Tibet Railroad. *Cold Reg Sci Technol* 2009;59(1):3–11.
- [14] Bommer C, Phillips M, Arenson LU. Practical recommendations for planning, constructing and maintaining infrastructure in mountain permafrost. *Permafrost Periglacial Process* 2010;21(1):97–104.
- [15] Goering DJ, Kumar P. Winter-time convection in open-graded embankments. *Cold Reg Sci Technol* 1996;24(1):57–74.
- [16] Cheng GD, Lai YM, Sun ZZ, Jiang F. The ‘thermal semi-conductor’ effect of crushed rocks. *Permafrost Periglacial Process* 2007;18(2):151–60.
- [17] Niu FJ, Cheng GD, Xia HM, Ma LF. Field experiment study on effects of duct-ventilated railway embankment on protecting the underlying permafrost. *Cold Reg Sci Technol* 2006;45(3):178–92.
- [18] Chataigner Y, Gosselin L, Doré G. Optimization of embedded inclined open-ended channel in natural convection used as heat drain. *Int J Therm Sci* 2009; 48(6):1151–60.
- [19] Jafari D, Franco A, Filippeschi S, Di Marco P. Two-phase closed thermosyphons: a review of studies and solar applications. *Renew Sustain Energy Rev* 2016;53:575–93.
- [20] Wu J, Ma W, Sun Z, Wen Z. *In-situ* study on cooling effect of the two-phase closed thermosyphon and insulation combinational embankment of the Qinghai–Tibet Railway. *Cold Reg Sci Technol* 2010;60(3):234–44.
- [21] Chotivisarut N, Nuntaphan A, Kiatsiriroat T. Seasonal cooling load reduction of building by thermosyphon heat pipe radiator in different climate areas. *Renew Energy* 2012;38(1):188–94.
- [22] Mu Y, Li G, Yu Q, Ma W, Wang D, Wang F. Numerical study of long-term cooling effects of thermosyphons around tower footings in permafrost regions along the Qinghai–Tibet Power Transmission Line. *Cold Reg Sci Technol* 2016; 121:237–49.
- [23] Ersöz MA. Effects of different working fluid use on the energy and exergy performance for evacuated tube solar collector with thermosyphon heat pipe. *Renew Energy* 2016;96:244–56.
- [24] Yan C, Shi W, Li X, Wang S. A seasonal cold storage system based on separate type heat pipe for sustainable building cooling. *Renew Energy* 2016;85:880–9.
- [25] Pei WS, Zhang MY, Lai YM, Yan ZR, Li SY. Evaluation of the ground heat control capacity of a novel air-L-shaped TPCT-ground (ALTG) cooling system in cold regions. *Energy* 2019;179(15):655–68.
- [26] Junior AAM, Mantelli MBH. Thermal performance of a novel flat thermosyphon for avionics thermal management. *Energy Convers Manag* 2019; 202:112219.
- [27] Li X, Li J, Zhou G, Lv L. Quantitative analysis of passive seasonal cold storage with a two-phase closed thermosyphon. *Appl Energy* 2020;260:114250.
- [28] Esch DC. Road and airfield design for permafrost conditions. In: Vinson TS, Rooney JW, Haas WH, editors. *Roads and airfields in cold regions: a state of the practice report*. New York City: American Society of Civil Engineers; 1996. p.121–49.
- [29] Doré G, Niu F, Brooks H. Adaptation methods for transportation infrastructure built on degrading permafrost. *Permafrost Periglacial Process* 2016;27(4):352–64.
- [30] Mu YH, Li GY, Ma W, Song ZM, Zhou ZW, Wang F. Rapid permafrost thaw induced by heat loss from a buried warm-oil pipeline and a new mitigation measure combining seasonal air-cooled embankment and pipe insulation. *Energy* 2020;203:117919.
- [31] Zhang MY, Lai YM, Yu WB, Zhang JM. Contrast experimental study on cooling effect and mechanism between closed and open riprapped-embankment. *Chin J Rock Mech Eng* 2005; 24(15): 2671–7. Chinese.
- [32] Zhang M, Lai Y, Li S, Zhang S. Laboratory investigation on cooling effect of sloped crushed-rock revetment in permafrost regions. *Cold Reg Sci Technol* 2006;46(1):27–35.
- [33] Wu QB, Cheng HB, Jiang GL, Ma W, Liu YZ. Cooling mechanism of embankment with block stone interlayer in Qinghai–Tibet railway. *Sci China Ser E* 2007;50(3):319–28.
- [34] Qian J, Yu QH, You YH, Hu J, Guo L. Analysis on the convection cooling process of crushed-rock embankment of high-grade highway in permafrost regions. *Cold Reg Sci Technol* 2012;78:115–21.
- [35] Zhang M, Lai Y, Niu F, He S. A numerical model of the coupled heat transfer for duct-ventilated embankment under wind action in cold regions and its application. *Cold Reg Sci Technol* 2006;45(2):103–13.
- [36] Li XN, Yu QH, You YH, Guo L. Study of air flow characteristics in ventilation duct of ventilated embankment. *J Glaciol Geocry* 2016; 38(5):1300–7. Chinese.
- [37] Zhang M, Lai Y, Zhang J, Sun Z. Numerical study on cooling characteristics of two-phase closed thermosyphon embankment in permafrost regions. *Cold Reg Sci Technol* 2011;65(2):203–10.
- [38] Pei W, Zhang M, Li S, Lai Y, Long J, Zhai W, et al. Geotemperature control performance of two-phase closed thermosyphons in the shady and sunny slopes of an embankment in a permafrost region. *Appl Therm Eng* 2017;112:986–98.
- [39] Sun B, Yang L, Liu Q, Xu X. Numerical modelling for crushed rock layer thickness of highway embankments in permafrost regions of the Qinghai–Tibet Plateau. *Eng Geol* 2010;114(3–4):181–90.
- [40] Lebeau M, Konrad JM. Non-Darcy flow and thermal radiation in convective embankment modeling. *Comput Geotech* 2016;73:91–9.
- [41] Yu W, Liu W, Chen L, Yi X, Han F, Hu D. Evaluation of cooling effects of crushed rock under sand-filling and climate warming scenarios on the Tibet Plateau. *Appl Therm Eng* 2016;92:130–6.
- [42] Liu M, Ma W, Niu F, Luo J, Yin G. Thermal performance of a novel crushed-rock embankment structure for expressway in permafrost regions. *Int J Heat Mass Transf* 2018;127(B):1178–88.
- [43] Hou YD, Wu QB, Wang KG, Ye ZG. Numerical evaluation for protecting and reinforcing effect of a new designed crushed rock revetment on Qinghai–Tibet



- Railway. *Renew Energy* 2020;156:645–54.
- [44] Gu W, Yu QH, Qian J, Jin HJ, Zhang JM. Qinghai–Tibet expressway experimental research. *Sci Cold Arid Reg* 2010;2(5):396–404.
- [45] Hussain M. Dependence of power law index on surface wind speed. *Energy Convers Manag* 2002;43(4):467–72.
- [46] Lim J, Ooka R, Kikumoto H. Effect of diurnal variation in wind velocity profiles on ventilation performance estimates. *Energy Build* 2016;130:397–407.
- [47] Kikumoto H, Ooka R, Sugawara H, Lim J. Observational study of power-law approximation of wind profiles within an urban boundary layer for various wind conditions. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 2017;164:13–21.
- [48] Mu Y, Ma W, Niu F, Liu Y, Fortier R, Mao Y. Long-term thermal effects of air convection embankments in permafrost zones: case study of the Qinghai–Tibet Railway, China. *J Cold Reg Eng* 2018;32(4):05018004.
- [49] Chai M, Mu Y, Zhang J, Ma W, Liu G, Chen J. Characteristics of asphalt pavement damage in degrading permafrost regions: case study of the Qinghai–Tibet Highway, China. *J Cold Reg Eng* 2018;32(2):05018003.