

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0031

CHEN Ling, MA Wei, MU Yanhu, et al. Wind tunnel test on wind flow around highway embankment on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(2):474-483. [陈领, 马巍, 穆彦虎, 等. 青藏高原公路路基周边风场特征风洞实验研究[J]. 冰川冻土, 2021, 43(2):474-483.]

## 青藏高原公路路基周边风场特征风洞实验研究

陈领<sup>1,2</sup>, 马巍<sup>1,2</sup>, 穆彦虎<sup>1,2</sup>, 虞洪<sup>3</sup>, 张坤<sup>4</sup>, 栗晓林<sup>1,2</sup>

(1. 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; 2. 中国科学大学, 北京 100049;  
3. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 4. 甘肃省交通科学研究院集团有限公司, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:**路基高度是影响冻土路基工程热力稳定性的一个重要指标。同时,不同高度的路基对其周边风场的扰动也将不同,进而影响到局地的地-气能量交换过程。为揭示不同高度路基对其周边风场特征的影响规律及程度,基于风洞实验,研究了3种环境风速条件下青藏高原典型高度公路路基周边风场分布特征,并进行了量化分区。结果表明:路基坡前为流场减速区,不同高度情况下路基坡前减速区水平范围差异显著。10 m·s<sup>-1</sup>环境风速条件下,3、4和5 m高路基坡前减速区水平范围约为1.8、2.2和2.5倍路基高度( $H$ )。在路基坡前减速区0.3~1.1 m高度范围内,随环境风速增加,同一水平高度流场在靠近路基过程中风速的变化率呈下降趋势。路基上部为流场加速区,路肩处风速增长幅度与路基高度呈正相关。路基坡后为低速回流区,路基高度越大,低速回流区水平范围越大,10 m·s<sup>-1</sup>环境风速条件下,3、4和5 m高度路基坡后低速回流区水平范围分别约为2.0 $H$ 、3.0 $H$ 和4.1 $H$ 。低速回流区后,流场逐渐恢复到初始运动状态,其消散恢复区水平范围与环境风速密切相关,但与路基高度关系不显著,10 m·s<sup>-1</sup>环境风速条件下,3、4和5 m高度路基坡后消散恢复区水平范围均约为9.8 $H$ 。通过考虑路基高度对其周边风场分布的影响,可为块石、通风管、热管等冻土路基结构的设计和布局优化提供参考。

**关键词:**路基周边风场; 风洞实验; 路基高度; 环境风速; 路基结构

**中图分类号:** U419.92    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1000-0240(2021)02-0474-10

### 0 引言

青藏工程走廊全长1 120 km,穿越多年冻土区632 km,大片连续多年冻土区约550 km<sup>[1-2]</sup>。在区域社会经济发展需求推动下,走廊内陆续修筑了大量线性工程。这些重大工程不仅是内地通往西藏的生命线,也是维护国防安全、区域社会稳定的国家战略工程<sup>[3-4]</sup>。在多年冻土区,工程建设和赋存严重影响原有地-气能量的交换过程,使得工程活动区域内多年冻土升温退化、上限下移、融化夹层发育,由此可导致构筑物基础出现不均匀沉降、路基路面纵向裂缝发育和边坡滑塌等一系列工程病害问题<sup>[5-10]</sup>。此外,在气候变暖及人类工程活动加剧双重影响下,冻土升温 and 地下水水位下降导

致走廊内植被退化,土地沙漠化趋势加剧,风沙灾害日益严重。沙粒在块石结构中的填充,将导致其内部多孔介质孔隙率降低,对流换热效率下降,进而影响到块石结构类冻土路基的长期冷却降温效果<sup>[11-16]</sup>。

在青藏工程走廊内,多风气候条件对地表能量收支平衡起着关键作用<sup>[12]</sup>,流场特征的改变将影响工程走廊内冻土路基冷却降温措施(块石、通风管)的应用效果。目前,针对冻土路基的主动降温措施,研究人员从冷却降温机制、工程结构措施、环境因素影响等方面开展了大量的研究工作。穆彦虎等<sup>[17]</sup>、孙志忠等<sup>[18]</sup>研究了块石基底、块石护坡及U型块石路基下部冻土温度场的变化过程,发现冷季的对流降温在保护冻土中发挥着主要作用。吴青

收稿日期: 2020-09-25; 修订日期: 2020-12-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41772325;41630636)资助

作者简介: 陈领, 硕士研究生, 主要从事高海拔地区公路路基周边流场分布研究. E-mail: chenling@lzb.ac.cn

通信作者: 穆彦虎, 研究员, 主要从事青藏高原冻土研究. E-mail: muyanhu@lzb.ac.cn

柏等<sup>[19]</sup>、张明义等<sup>[20]</sup>、赖远明等<sup>[21]</sup>通过现场实体实验和室内模型实验,研究了封闭与开放边界条件下块石气冷路基的降温机理与过程,并对比了两种条件下的降温效果。针对青藏工程走廊内日益严重的风积沙灾害问题,多位学者结合现场监测及数值模拟分析了沙粒差异化堆积状态对路基下部多年冻土的热影响<sup>[22-26]</sup>,结果表明薄沙层有利于保护冻土,而厚沙层将加速冻土的退化。上述研究重点关注块石类冷却路基结构自身以及其内部的对流换热过程对下部多年冻土的热影响,但对于风场绕流路基过程及流场速度分区侧向范围较少关注。风场不仅是地-气能量交换及物质运输的主要媒介,也是块石、通风管等冻土路基降温效果的主要环境边界。因此,对于块石、通风管等冻土路基,研究路基迎风坡、路面和背风坡风场分布特征将有助于准确分析块石、通风管等路基的对流换热机制及降温效果。同时,对于多年冻土区线性工程而言,基于双线冻土路基不同布局条件下,探讨双线冻土路基侧向流场分区可为双线路基合理间距布局提供参考依据<sup>[27-28]</sup>。此外,对于多年冻土区风沙灾害频发区域,冻土路基周边流场速度分区水平范围将直接影响其周围沙粒运移和沉积过程。因此,开展多年冻土区路基周边流场速度分区研究,对于路基工程风沙灾害防治和多年冻土保护同样具有重要意义。

路基高度是影响冻土路基工程热力稳定性的

一个重要因素<sup>[29]</sup>。同时,不同高度的路基其周边风场分布特征也将不同,这会进一步影响到局地的地-气能量交换过程。为此,以青藏公路为研究对象,选取三种典型路基高度,研究不同高度路基周边风场分布特征并进行分区量化。利用中国科学院沙漠与沙漠化重点实验室大型风洞设备,开展了不同环境风速、路基高度条件下,单幅路基周边风场的分布特征,考察在路基阻碍条件下周边风场的分布特征,以及环境风速和路基高度对风场分布的影响规律及程度,以期为青藏工程走廊路基工程的选线、设计和维护以及沙害频发地区风沙防治提供科学依据。

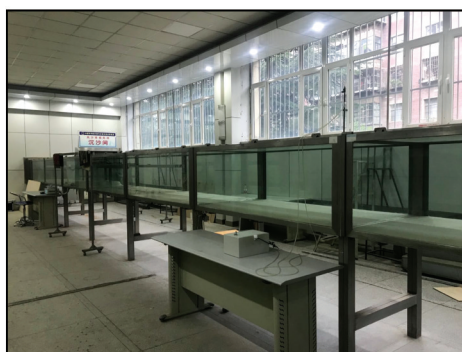
## 1 实验设计及方法

### 1.1 实验设备介绍

本文开展的风洞实验于中国科学院沙漠与沙漠化重点实验室进行。该风洞为室内闭口直流式风洞,全长 37.78 m,实验设备包括实验段、驱动系统和测试系统三部分内容。驱动系统位于实验设备前端由动力段及整流段两部分,前者为实验提供来流流场,流场风速可实现  $1\sim 40\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  连续可调,后者是将动力段产生的来流进行处理为实验段提供稳定流场,如图 1(a)所示。实验段位于驱动系统后侧,全长 16.23 m,横断面尺寸为  $0.6\text{ m}\times 1.0\text{ m}$ ,如图 1(b)所示。风洞边界层厚度约为  $12\text{ cm}$ <sup>[30]</sup>。



(a) 驱动系统



(b) 实验段

图1 直流式风洞

Fig. 1 Non-circulating blow-type wind tunnel: dynamic system (a) and test section (b)

### 1.2 实验原理及设计

为保证风洞实验的可靠性,模型实验需要与野外实际情况相似,满足三大相似准则,即几何相似、运动相似和动力相似,相似度越高,实验结果可靠性越高。

#### (1) 几何相似

即模型路基参数(高度、宽度和粗糙度)满足同一比例缩尺,根据已有研究结果和青藏公路路基高度实际统计数据,青藏高原冻土区段路基一般在  $2\sim 5\text{ m}$  以内<sup>[31]</sup>。因此,实验选取路基高度为 3、4 和

5 m,考虑到风洞中边界层厚度及实验段横断面尺寸,几何相似比取为1:50,对应模型路基高度分别为6、8和10 cm(均小于边界层厚度12 cm),路基边坡坡

度为1:1.5,如图2所示。由于实验条件的有限,模型尺寸存在误差,实验段表面粗糙度不能完全满足野外实际情况。因此,几何相似条件仅能部分满足。

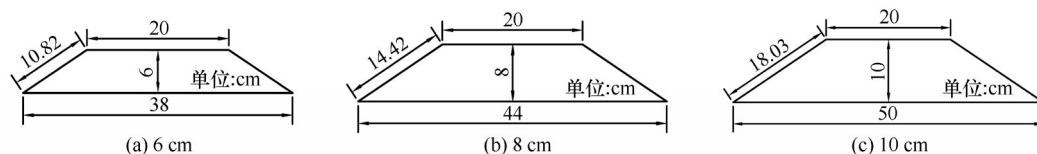


图2 实验模型路基设计图

Fig. 2 Schematic of the embankment models with different heights: 6 cm (a), 8 cm (b) and 10 cm (c)

## (2) 运动相似

风速廓线形式及流动状态相似(即雷诺数 $Re$ 相等)。  $Re$ 定义为

$$Re = \frac{\rho v l}{\eta} \quad (1)$$

风洞实验中选取的三种风速分别为10、15和20  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。根据流体力学定义可得,当 $Re$ 值大于 $Re_{cr}$ (临界雷诺数)时,流场运动为湍流状态。由式(1)可知,当实验风速大于2  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,实验段流场的运动状态均为湍流运动,即实验段流场可模拟自然状态下流场湍流运动形式。关于风速廓线形式,根据风洞实验段初始风速的测定结果(图3),在3种实验风速条件下,实验段的风速廓线均能满足指数型分布,该廓线形式与青藏高原野外观测风速廓线吻合<sup>[32]</sup>。

## (3) 动力相似

即模型流动与原型流动应该受同种外力作用,

且对应点上的应力成比例。即满足

$$C_F = \frac{F_p}{F_m} = \frac{G_p}{G_m} = \frac{P_p}{P_m} = \frac{R_p}{R_m} = \frac{F_{\sigma p}}{F_{\sigma m}} \quad (2)$$

式中: $F$ 、 $G$ 、 $P$ 、 $R$ 和 $F_{\sigma}$ 分别为合力、重力、阻力及表面张力;下标 $p$ 和 $m$ 分别表示原型量和模型量。

动力相似条件下两种流场中力场必定相似,且动力相似是力学相似的重要条件,是实现运动相似的主导因素。本次实验在中国科学院沙漠与沙漠化重点实验室风沙环境风洞完成,该风洞能够满足风沙环境动力过程模拟的动力相似准则。

## 1.3 数据采集及处理方法

为研究不同高度单幅路基对周边风场分布与风速分区的影响,将实验区设置于所选实验段中部。实验区长度介于4~5 m,以保证路基迎风坡和背风坡两侧受扰动流场能恢复到环境风速状态。图4给出了实验段测量布设方案。如图所示,在沿洞体轴线水平方向,路基模型迎风坡一侧布设5个测量点,分别为 $-1H$ 、 $-3H$ 、 $-5H$ 、 $-8H$ 和 $-10H$ ( $H$ 为模型路基高度, $-$ 表示迎风坡侧);路基背风坡一侧布设10个测量点,分别为 $+1H$ 、 $+3H$ 、 $+5H$ 、 $+7H$ 、 $+9H$ 、 $+11H$ 、 $+13H$ 、 $+15H$ 、 $+17H$ 和 $+19H$ ( $+$ 表示背风坡侧)。对于路基迎风坡坡面、背风坡坡面和路面,分别均匀布置3个测量点。风速的测定采用可移动毕托管,毕托管共计设置10个测量高度,沿竖向高度分别为0.6、0.9、1.5、2.2、4.3、8.3、12.3、16.2、20.3和24.2 cm。实验过程中通过移动毕托管的位置来测定不同位置风速廓线变化。实验数据的采集使用FSKX-10数字式风速廓线采集仪,该仪器由设备由中国科学院沙漠与沙漠化重点实验室研制,结合配套的数据采集软件可得到每一个测点的风速廓线,数据采集时间间隔为2 s,采集时间为30 s,实验数据通过配套的软件可得到该测点在该时间段内的平均值风速。

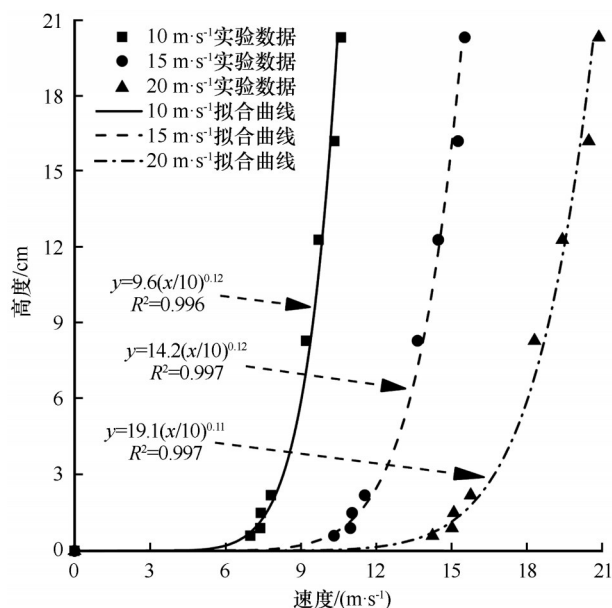


图3 风洞初始流场测定结果

Fig. 3 Initial wind flow profiles measured in the wind tunnel test



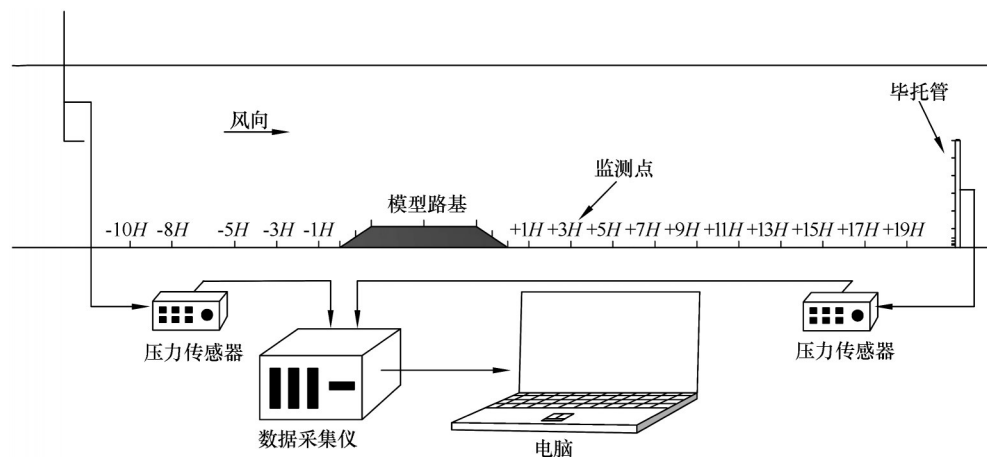


图4 风洞路基风速测点布设

Fig. 4 The layout of test sites around the embankment in the wind tunnel test

## 2 结果与分析

### 2.1 不同高度条件下路基周边流场特征

图5中给出实际路基高度为3 m(模型路基高度6 cm)、路面宽度为10 m(模型路面宽度20 cm)、环境风速为 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 条件下路基周边流场速度云图。由图中可以看出,流场在靠近、翻越、远离路基过程中,在路基的影响下坡前、路面及坡后不同区域内流场变化趋势不同。其主要表现为:路基迎风坡前侧,流场速度降低在迎风坡坡前形成减速区(I)。

随后,在迎风坡坡面上,流场气流沿坡面遇阻抬升,速度逐渐增加,在路基路面上部形成一个明显的加速区(II),且受路肩“集中”效应影响,迎风坡路肩处风速增长幅度达到最大值。当风场越过后,流场与路基路面分离,流场气流下沉,形成坡后扰动区(III),该区域存在流场速度的最小值,且受路基高度及环境风速影响,甚至在坡脚附近出现流场回流现象。而随着流场背向远离路基,路基对流场的扰动减弱消散,流场风速逐渐恢复原始运动状态。

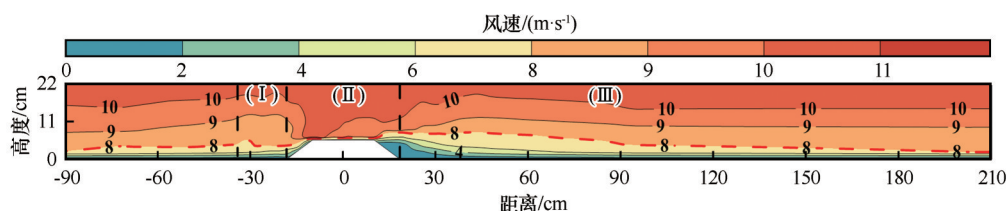
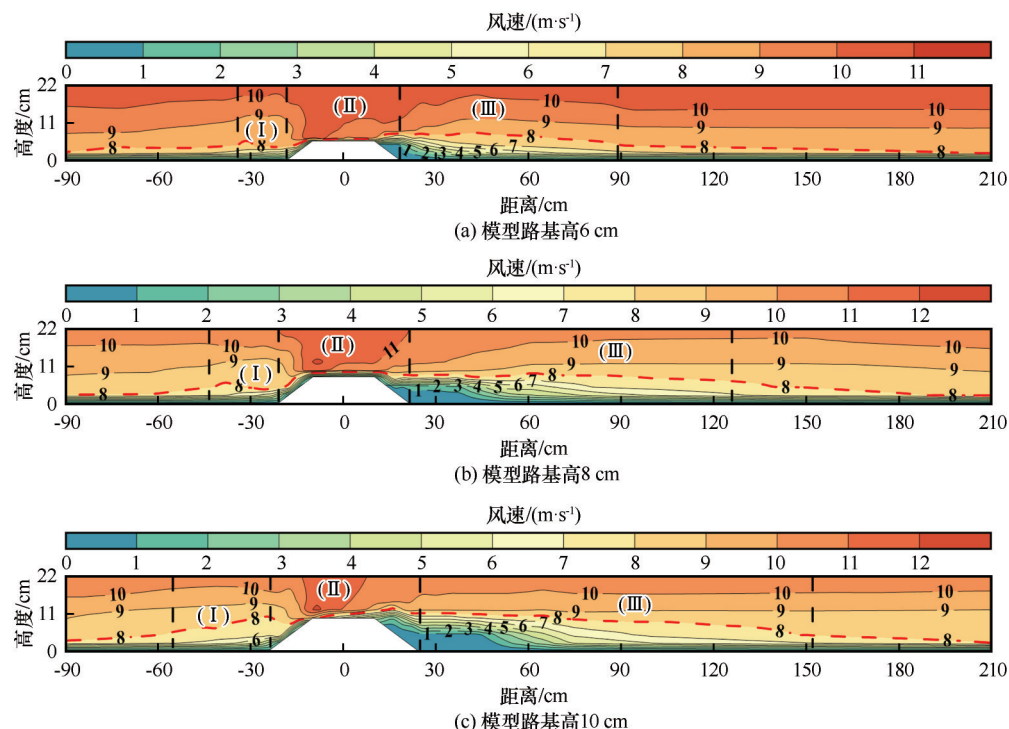


图5 路基周边风速分布云图

Fig. 5 Wind speed distribution around the embankment

为掌握不同高度路基对其周边流场速度分区范围的影响,图6给出了实际路基路面宽度为10 m(模型路面宽度为20 cm)、环境风速为 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,实际路基高度3、4和5 m(模型路基高度为6、8和10 cm)路基高度条件下的路基周边风速分布云图。从图6可以看出,不同路基高度周边流场速度变化形式基本相同,但受路基高度影响,路基周边速度分区的侧向范围存在显著差异性。路基坡前扰动区为流场减速区(I),该区域风速值小于初始环境风速下同高度处风速值,且由图6中可知,三种高度路基坡前扰动风速最大达到 $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。因此,根据 $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风速等值线变化可以看出,当路基高度 $H=$

3 m时,坡前减速区(I)水平范围约为 $1.8H$ ,而当路基高度 $H=4$ 和5 m时,减速区(I)水平范围分别为 $2.2H$ 和 $2.5H$ 。对于路基上部加速区,由于路基坡面上流场遇阻抬升,风速值逐渐增大,路基高度为3 m时,迎风坡路肩对应的风速值约为 $10.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,路基高度增加到4和5 m时,路基迎风坡路肩对应风速分别为 $12.2$ 和 $13.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。与环境风速中同一高度处风速值相比,三种路基迎风坡路肩对应风速分别增加了24%、34%和41%,其说明路基高度越大迎风坡路肩“集中”效应越显著,风速增加幅度越大。而对于路基坡后扰动区而言,3、4和5 m高度路基所对应扰动区水平范围分别为 $11.0H$ 、 $12.2H$ 和 $12.9H$ 。

图6 环境风速为 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 条件下不同高度路基周边流场分布云图Fig. 6 Wind speed distribution around the embankments with different heights under the ambient wind speed of  $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ : 6 cm (a), 8 cm (b) and 10 cm (c)

此外,由图6中坡后扰动区(Ⅲ)可以看出,在背风坡坡面和坡脚附近流场风速下降趋势明显,并随着流场背向远离路基,路基对流场的扰动效应逐渐弱化直至消失,流场逐渐恢复初始运动状态。因此,根据坡后流场风速值大小及风向,可进一步将坡后扰动区流场划分为低速回流区和消散恢复区。受实验毕托管限制,实验无法测得背风坡坡面处流场的回流风速,但结合已有的研究结果<sup>[33]</sup>及流场气压分布梯度可以看出,三种高度路基背风坡坡面及坡脚附近均存在流场风速回流现象,当路基高度为3、4和5 m时,其坡后低速回流区水平范围分别为 $2.0H$ 、 $3.0H$ 和 $4.1H$ 。消散恢复区位于回流区后侧,3、4和5 m路基对应消散恢复区水平范围均约为 $9.8H$ 。

对比分析 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 环境风速条件下三种高度路基迎风坡前减速扰动区与坡后低风速扰动区可以看出,路基高度与路基两侧扰动范围存在良好的线性关系(图7)。随着路基高度增加,路基坡前减速区、坡后低速回流区水平范围均逐渐增加,说明随着路基高度的增加,其对原始流场运动状态的扰动越显著。

## 2.2 不同环境风速条件下路基周边流场特征

图8给出了环境风速为10、15和 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 条件

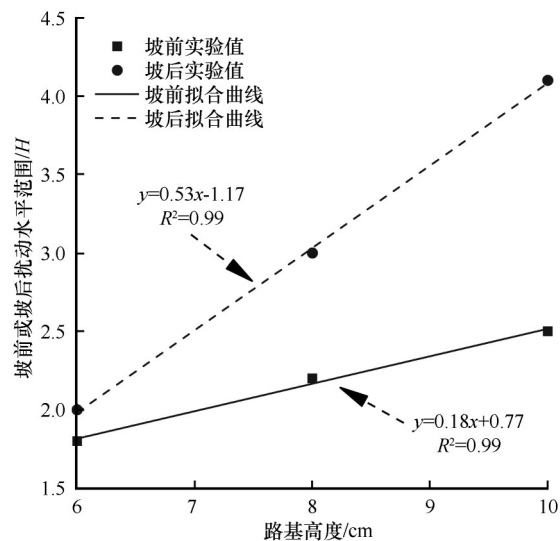


图7 坡前/坡后扰动水平范围与路基高度关系曲线

Fig. 7 Horizontal range of disturbed area at windward/leeward slope toes vs. embankment height

下,3 m高路基(模型路基高为6 cm)周边流场分布云图。由图8可以看出,环境风速为10、15和 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,路基对其周边近地表流场的最大扰动速度分别为8、12和 $18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,对应竖向高度分别为1.1、1.4和3.0 m。以最大扰动速度为标准来看,随环境风速增加,同一路基高度条件下路基坡前、路面、坡

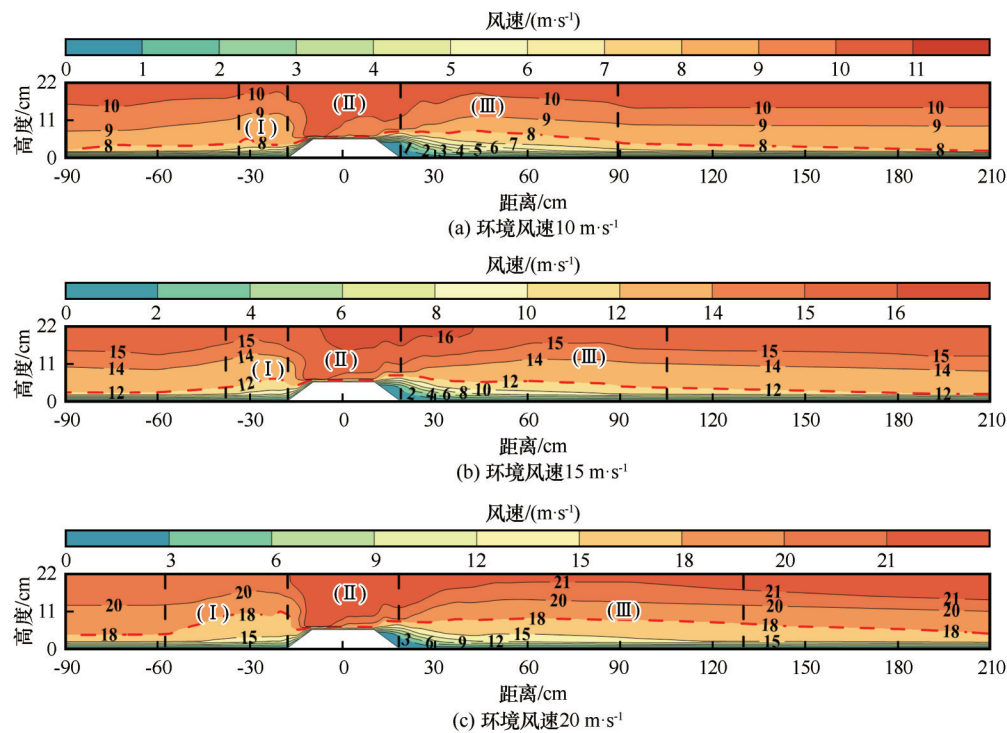


图8 不同环境风速条件下6 cm高路基周边流场分布云图

Fig. 8 Wind speed distribution around 6-cm high embankment with different ambient wind speeds: 10 m·s<sup>-1</sup> (a), 15 m·s<sup>-1</sup> (b), and 20 m·s<sup>-1</sup> (c)

后速度分区范围差异较大。环境风速为10、15和20 m·s<sup>-1</sup>时,3 m高路基坡前风速减速区(Ⅰ)水平范围分别为1.8H、2.2H和5.5H。在路基迎风坡坡面上风速梯度逐渐增加,等值线分布愈加密集。流场平均风速(实验所测10个高度处风速的平均值)最大值出现在路基迎风坡路肩处(图9)。然而,在路基坡后,环境风速的增加对坡后低速回流区影响较小,其影响水平范围主要集中在坡后2.0H内。

考虑到路基高度及环境风速对路基周边流场

速度分区的共同作用,表1~2中分别给出不同环境风速条件下,路基高度为4和5 m时,路基周边风速分区的相关参数。从表1、2和图8可以看出,三种路基高度下,坡前减速区(Ⅰ)水平范围均随着环境风速的增加而增大。此外,环境风速增加,三不同种高度路基路肩处风速变化幅度均呈上升趋势,表明随着环境风速的增加,路肩处的“集中”效应越显著。而在坡后低速回流区,同一路基高度下,不同环境风速对低速回流区的影响较小。因此,对于普通填土路基而言,布置合理的防护措施有利于减小路肩“集中”效应对路基的风蚀作用。

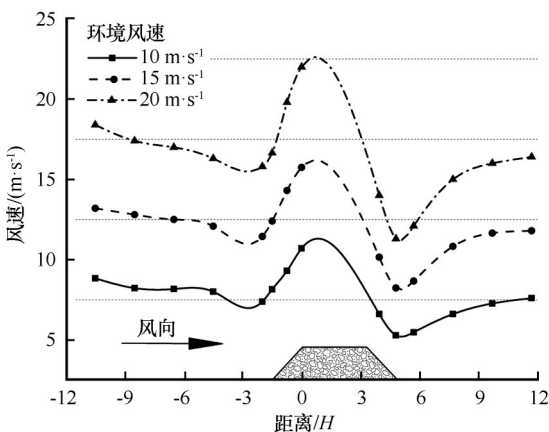


图9 不同风速条件下路基周边平均风速变化曲线

Fig. 9 Variations of average wind speeds around the embankment under different ambient wind speeds

表1  $H=4$  m路基周边风速分区相关参数

Table 1 Zoning parameters of wind flow around the 4-m high embankment

环境风速/(m·s <sup>-1</sup> )	坡前减速范围/H	坡后低速回流区/H	路肩风速增加幅度/%
10	2.3	2.8	33.3
15	2.8	2.9	34.6
20	4.6	3.0	37.1

2.3 路基坡前不同高度处风速变化特征

为掌握不同环境风速条件下,路基坡前减速区(Ⅰ)范围内不同高度处流场风速变化情况,图10中

表2  $H=5\text{ m}$ 路基周边风场分区相关参数  
Table 2 Zoning parameters of wind flow around  
the 5-m high embankment

环境风速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	坡前减速范围/ $H$	坡后低速 回流区/ $H$	路肩风速增 加幅度/%
10	2.5	3.1	35.8
15	3.0	3.0	38.5
20	3.3	3.4	41.3

给  $H=3\text{ m}$  高路基(模型路基高度为  $6\text{ cm}$ )坡前  $5H$  范围内  $0.3$ 、 $0.6$ 、 $1.1\text{ m}$  高度处风速沿水平方向的变

化。由图9中可以看出,随着流场距离路基坡脚距离的减小,流场风速受路基扰动状态越显著。因此,通过引入速度曲线平均变化率来衡量流场在坡前减速区(Ⅰ)范围内扰动风速平均变化率。表达式为

$$K \approx \frac{U_{\max} - U_{\min}}{\Delta H}$$

(3)

式中: $U$ 为流场水平方向速度; $U_{\max}$ 和  $U_{\min}$  分别为某一高度水平方向上流场最大速度和最小速度; $\Delta H$ 为最大速度与最小速度之间距离(单位为路基高度  $H$ )。

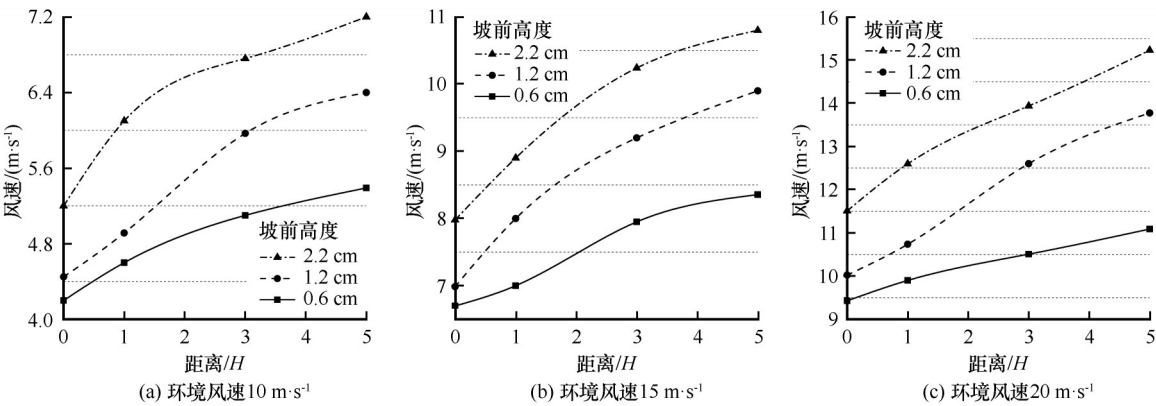


图10 不同环境风速条件下6 cm高路基坡前不同高度处风速变化曲线

Fig. 10 The wind speeds at the heights of  $0.6\text{ cm}$ ,  $1.2\text{ cm}$  and  $2.2\text{ cm}$  before  $6\text{-cm}$  high embankment with different ambient wind speeds:  $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (a),  $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (b) and  $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (c)

根据扰动区内流场风速的变化趋势,式(3)中三种高度处  $U_{\max}$  均为  $5H$  处对应的风速值,  $U_{\min}$  为坡脚处对应风速值。因此,由式(3)可得,当环境风速为  $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时,坡前三种高度处风速的平均变化率  $K_{0.3}$ 、 $K_{0.6}$  和  $K_{1.1}$  分别为  $0.22\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot H^{-1}$ 、 $0.30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot H^{-1}$  和  $0.28\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot H^{-1}$  ( $K_{0.3}$ 、 $K_{0.6}$ 、 $K_{1.1}$  分别对应  $0.3$ 、 $0.6$ 、 $1.1\text{ m}$  高度处速度变化曲线的  $K$  值)。当环境风速增加时,坡前减速区(Ⅰ)内风速的变化总体规律基本不变。不同高度处,随着风场距路基坡脚距离的减小,风速呈下降趋势。然而,对比同一高度处风速变化率,随着环境风速的增加,风速变化率逐渐降低(表3)。因此,通过对比不同环境风速条件下三种高度处的风速变化率可以得出,流场在朝

向路基运移过程中,在三种环境风速下,不同高度处风速的衰减率不同,最大衰减率出现的位置为  $0.6\text{ m}$  处,衰减幅度为对应高度处初始环境风速的  $27\%\sim 30\%$ 。

3 结论

针对多年冻土区线性工程周边流场风速的分布特征,以青藏公路路基为对象,通过室内风洞实验,研究了不同高度、不同环境风速条件下路基周边流场风速分布特征并进行了分区量化,结论如下:

(1) 未受扰动流场自远场靠近、翻越、远离路基过程中,根据路基周边流场风速变化特征可分为3个区域,即坡前减速区、路面加速区和坡后扰动区。针对块石、通风管等气冷冻土路基而言,路基坡前减速区、坡后扰动区流场风速变化应当重点关注,该区域速度大小及方向将影响气冷类冻土路基内部的对流换热效率。此外,在风沙灾害频发区域,路基坡前减速区和坡后扰动区沙粒沉积可能存在差异。

表3 环境风速为15和  $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  条件下不同高度处  
流场的衰减率

环境风速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$K_{0.3}$	$K_{0.6}$	$K_{1.1}$
15	0.19	0.29	0.27
20	0.15	0.27	0.24



(2) 同一环境风速条件下,随着路基高度增加风场扰动水平范围逐渐扩大。当环境风速为  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,3、4 和 5 m 高模型路基坡前减速区水平范围分别为  $1.8H$ 、 $2.2H$  和  $2.5H$ ;坡后低速回流区分别为  $2.0H$ 、 $3.0H$  和  $4.2H$ 。在冻土区修筑分幅路基时,建议考虑流场分布对主动冷却路基降温效果,分幅路基布设间距应大于低速回流区范围。

(3) 随环境风速增加,路基坡前风速扰动水平范围逐渐扩大,环境风速由  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  增加至  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,3 m 高路基坡前减速区水平范围由  $1.8H$  增加至  $5.5H$ 。此外,在坡前减速区内,同一高度处,随环境风速的增加,风速沿水平方向衰减幅度呈下降趋势。对于坡后低速回流区,环境风速的增加对其分区影响较小,10、15 和  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  环境风速条件下,3 m 高路基低速回流区水平范围均集中在坡后  $1.8H$  内。此外,环境风速增加将强化路肩处流场“集中”效应,风速越大路肩处风速增加幅度越大。

(4) 路基对风场的最大扰动水平范围包括低速回流区和消散恢复区两部分。同一环境风速条件下,在扰动区水平范围内,路基高度的增加,对低速回流区水平范围的影响大于消散恢复区。当环境风速为  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,3、4 和 5 m 路基坡后水平扰动范围分别为  $11.0H$ 、 $12.2H$  和  $12.9H$ ,而对应的消散恢复区水平范围均约为  $9.8H$ 。

**致谢:** 感谢中国科学院沙漠与沙漠化重点实验室屈建军、李宏、谢胜波和谭立海四位老师在实验过程中的指导与帮助。

## 参考文献(References):

- [1] Jin Huijun, Yu Qihao, Wang Saoling, et al. Changes in permafrost environments along the Qinghai-Tibet engineering corridor induced by anthropogenic activities and climate warming [J]. Cold Regions Science and Technology, 2008, 53(3): 317-333.
- [2] Ma Wei, Mu Yanhu, Xie Shengbo, et al. Thermal-mechanical influences and environmental effects of expressway construction on the Qinghai-Tibet permafrost engineering corridor [J]. Advances in Earth Science, 2017, 32(5): 459-464. [马巍, 穆彦虎, 谢胜波, 等. 青藏高速公路修筑对冻土工程走廊的热力影响及环境效应[J]. 地球科学与进展, 2017, 32(5): 459-464.]
- [3] Wang Chengjin, Ding Jinxue, Yang Wei. Policy and spatial effect of expressway planning network in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(8): 1076-1088. [王成金, 丁金学, 杨威. 中国高速公路规划网的空间效应与政策机制[J]. 地理学报, 2011, 66(8): 1076-1088.]
- [4] Wang Shaoling. Study on permafrost degradation and permafrost environment change in Qinghai-Tibet Plateau [J]. Arid Land Geography, 1997, 16(1): 1-7. [王邵令. 青藏高原冻土退化与冻土环境变化探讨[J]. 干旱区地理, 1993, 16(1): 1-7.]
- [5] Niu Fujun, Ma Wei, Wu Qingbo. Thermal stability of roadbeds of the Qinghai-Tibet Railway in permafrost regions and the main freezing-thawing hazards [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33(2): 196-206. [牛富俊, 马巍, 吴青柏. 青藏铁路主要冻土路基工程热稳定性及主要冻融灾害[J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(2): 196-206.]
- [6] Wei Ma, Yanhu Mu, Qingbai Wu, et al. Characteristics and mechanisms of embankment deformation along the Qinghai-Tibet Railway in permafrost regions [J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 67: 178-186.
- [7] Cheng Guodong, Zhao Lin. The problems associated with permafrost in the development of the Qinghai-Xizang Plateau [J]. Quaternary Sciences, 2000(6): 521-531. [程国栋, 赵林. 青藏高原开发中的冻土问题[J]. 第四纪研究, 2000(6): 521-531.]
- [8] Guo Zhenggang, Niu Fujun, Shen Hu, et al. Changes of grassland ecosystem due to degradation of permafrost frozen soil in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(8): 3294-3301. [郭正刚, 牛富俊, 湛虎, 等. 青藏高原北部多年冻土退化过程中生态系统的变化特征[J]. 生态学报, 2007, 27(8): 3294-3301.]
- [9] Qing Dahe, Ding Yihui, Wang Shaowu. A study of environment changes and its impacts in western China [J]. Earth Science Frontiers, 2002, 9(2): 321-328. [秦大河, 丁一汇, 王绍武, 等. 中国西部环境演变及其影响研究[J]. 地学前缘, 2002, 9(2): 321-328.]
- [10] Wang Yibo, Wang Gengxu, Chang Juan. Impacts of human activity on permafrost environment of the Tibetan Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(5): 523-527. [王一博, 王根绪, 常娟. 人类活动对青藏高原冻土环境的影响[J]. 冰川冻土, 2004, 26(5): 523-527.]
- [11] Cheng Guodong, Jin Huijun. Groundwater in the permafrost regions on the Qinghai-Tibet Plateau and it changes [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(1): 1-11. [程国栋, 金会军. 青藏高原多年冻土区地下水及其变化[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(1): 1-11.]
- [12] Huang Runqiu, Wang Shijing. Interaction between human engineering activity and geoenvironment and its environment effects [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 1997, 8(1): 19-26. [黄润秋. 论人类工程活动与地质环境的相互作用及其环境效应[J]. 地质灾害与环境保护, 1997, 8(1): 19-26.]
- [13] Zhang Kecun, Qu Jianjun, Yao Zhengyi, et al. Sand damage and its control along the Golha Section of the Qinghai-Tibet Railway [J]. Arid Land Geography, 2014, 37(1): 74-80. [张克存, 屈建军, 姚正毅, 等. 青藏铁路格拉段风沙危害及其防治[J]. 干旱区地理, 2014, 37(1): 74-80.]
- [14] Li Sunping, Jiang Fuqiang, Xue Chunxiao, et al. Field investigation of sand disaster and prevention research on the Golmud-Lhasa Section of Qinghai-Tibet Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014, 31(5): 1-5. [李顺平, 蒋富强, 薛春晓, 等. 青藏铁路格拉段沙害现场调查及防治研究[J]. 铁道工程学报, 2014, 31(5): 1-5.]
- [15] Xie Shengbo, Qu Jianjun, Zu Ruiping, et al. Findings and implications of the effect of desertification on permafrost land temperature on the Tibetan Plateau [J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(6): 393-396. [谢胜波, 屈建军, 祖瑞平, 等. 沙漠化对青藏高原冻土地温影响的新发现及意义[J]. 科学通报, 2012, 57(6): 393-396.]
- [16] Chen Lin, Yu Wenbing, Han Fenglei, et al. Impacts of aeolian



- sand on cooling effect of crushed-rock embankment of Qinghai-Tibet Railway [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(1): 147-155. [陈琳, 喻文兵, 韩风雷, 等. 风积沙对青藏铁路块碎石路基降温效果的影响[J]. 冰川冻土, 2015, 37(1): 147-155.]
- [17] Mu Yanhu, Ma Wei, Sun Zhizhong, et al. Comparative analysis of cooling effect of crushed rock embankment along the Qinghai-Tibet Railway [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(1): 284-292. [穆彦虎, 马巍, 孙志忠, 等. 青藏铁路块碎石路基冷却降温效果对比分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 284-292.]
- [18] Sun Zhizhong, Ma Wei, Li Dongqing. Study of adjusting temperature effect of ripped-rock in-situ [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(11): 2001-2004. [孙志忠, 马巍, 李东庆. 冻土区块石护坡路基调温效果试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(11): 2001-2004.]
- [19] Wu Qingbai, Dong Xianfu, Jiang Guanli. Cooling effect differences of soil beneath open and closed block-stone embankments [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(12): 2565-2571. [吴青柏, 董献付, 蒋观利. 开放和封闭条件下块石结构路基下部土体降温效果差异[J]. 岩土力学与工程学报, 2006, 25(12): 2565-2571.]
- [20] Zhang Mingyi, Lai Yuanming, Yu Wenbing, et al. Contrast experimental study on cooling effect and mechanism between closed and open riprapped-embankments [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(15): 2671-2677. [张明义, 赖远明, 喻文兵, 等. 封闭与开放抛石路基降温效果及机理对比试验研究[J]. 岩土力学与工程学报, 2005, 24(15): 2671-2677.]
- [21] Lai Yuanming, Zhang Mingyi, Yu Wenbing, et al. Experimental study on the cooling effect and mechanism of closed ripped-rock embankment [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(5): 576-581. [赖远明, 张明义, 喻文兵, 等. 封闭条件下抛石路基降温效果及机理的实验研究[J]. 冰川冻土, 2004, 26(5): 576-581.]
- [22] Yu Wenbing, Liu Weibo, Chen Lin, et al. Evaluation of cooling effects of crushed rock under sanding-filling and climate warning scenarios on the Tibet Plateau [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 92: 130-136.
- [23] Chen Lin, Yu Wenbing, Yang Chensong, et al. Conductivity of aeolian sand on the Tibetan Plateau based on microstructure [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(5): 1220-1226. [陈琳, 喻文兵, 杨成松, 等. 基于微观结构的青藏高原风积沙导热系数变化机理研究[J]. 冰川冻土, 2014, 36(5): 1220-1226.]
- [24] Shi Long, Jiang Fuqiang, Han Fenglei. Numerical simulation of response law of wind-blown sand flow around the railway embankment [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2014, 36(5): 82-87. [石龙, 蒋富强, 韩峰雷. 风沙两相流对铁路路堤响应规律的数值模拟研究[J]. 铁道学报, 2014, 36(5): 82-87.]
- [25] Zu Ruiping, He Zhilin, Zong Yumei, et al. Review on the influences of sand accumulation on permafrost in the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Desert Research*, 2014, 34(5): 1208-1214. [祖瑞平, 贺志霖, 宗玉梅, 等. 青藏高原风沙堆积对多年冻土影响研究进展[J]. 中国沙漠, 2014, 34(5): 1208-1214.]
- [26] Zhang Kecun, Niu Qinghe, Qu Jianjun, et al. Study on the characteristics of flow field and the mechanism of wind-blown sand disasters in the Tuotuohe region along the Qinghai-Tibet Railway [J]. *Arid Land Geography*, 2010(2): 303-308. [张克存, 牛清河, 屈建军, 等. 青藏铁路沱沱河路段流场特征及沙害形成机理[J]. 干旱区研究, 2010(2): 303-308.]
- [27] Xie Shengbo, Qu Jianjun, Han Qingjie, et al. Experimental definition and its significance on the minimum safe distance of blown sand between the proposed Qinghai-Tibet Expressway and the existing Qinghai-Tibet Railway [J]. *Science China: Technological Sciences*, 2020, 63: 2664-2676.
- [28] Li Xiaolin, Ma Wei, Mu Yanhu, et al. Comparing thermal performances of expressways constructed with an integral embankment and two separated embankments in permafrost zones [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2020, 170: 102939.
- [29] Zhang Jianming, Zhang Jinzhao, Liu Yongzhi, et al. Study on the reasonable embankment height of Qinghai-Tibet Railway in permafrost regions [J]. *China Railway Science*, 2006, 27(5): 28-34. [张建明, 章金钊, 刘永智. 青藏铁路冻土路基合理路堤高度研究[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(5): 28-34.]
- [30] Dong Zhibao, Wang Hongtao, Liu Xiaoping, et al. The blown sand flux over a sandy surface: a wind tunnel investigation on the fetch effect [J]. *Geomorphology*, 2004, 57(1/2): 117-127.
- [31] Chai Mingtang, Mu Yanhu, Zhang Jianming, et al. Characteristics of asphalt pavement damage in degrading permafrost regions: case study of the Qinghai-Tibet Highway, China [J]. *Journal of Cold Regions Engineering*, 2018, 32(2): 05018003.
- [32] Niu Fujun, Ma Wei, Lai Yuanming. Preliminary analysis on engineering effect of ventilation embankment at Beiluhe testing section of Qinghai-Tibet Railway [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(2): 2652-2658. [牛富俊, 张建明, 张钊. 青藏铁路北麓河试验段冻土工程地质特征及评价[J]. 冰川冻土, 2002, 24(3): 264-269.]
- [33] Xin Guowei, Huang Ning, Zhang Jie. Wind-tunnel experiment on sand deposition mechanism and optimal measures of wind-break wall along railway on strong wind area [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2020, 52(3): 635-644. [辛国伟, 黄宁, 张洁. 大风区铁路沿线挡风墙积沙机理及优化措施的风洞实验研究[J]. 力学学报, 2020, 52(3): 635-644.]

## Wind tunnel test on wind flow around highway embankment on the Qinghai-Tibet Plateau

CHEN Ling<sup>1,2</sup>, MA Wei<sup>1,2</sup>, MU Yanhu<sup>1,2</sup>, YU Hong<sup>3</sup>, ZHANG Kun<sup>4</sup>, LI Xiaolin<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 4. Gansu Provincial Transportation Research Institute Group Co., Ltd., Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The height is an important factor for the long-term thermo-mechanical stability of highway embankment in permafrost zones. Moreover, the embankment with different heights will exert different impacts on the wind flow around it, which would furtherly affect the ground-air energy exchange process. In order to reveal the influence of embankment height on the wind flow around the embankment, the distribution characteristics of wind flow around highway embankment with different heights were investigated with three ambient wind speeds by the wind tunnel test. The results showed that the front of embankment was a deceleration zone of wind flow, and the range of the zone was close related to the embankment height. When the ambient wind speed was  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , the deceleration zones of the embankment with the heights of 3, 4 and 5 m were 1.8, 2.2 and 2.5 times of the embankment height ( $H$ ), respectively. Within the heights from 0.3 to 1.1 m before the windward side of embankment, the change rate of the wind speed decreased with the increasing ambient wind speed when the flow field got close to the embankment. The upper part of the embankment was the acceleration zone of wind flow, and the increase of the wind speed on the embankment shoulder was positively correlated with the height. There was a reflux zone with low wind speed at the leeward side of the embankment. The greater the embankment height was, the wider the reflux zone would be. When the ambient wind speed was  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , the horizontal range of the reflux zone was  $2.0H$ ,  $3.0H$  and  $4.1H$  corresponding to the embankment heights of 3, 4 and 5 m, respectively. When the wind flow away from the leeward side of embankment, the wind flow recovered gradually to the natural conditions. The horizontal range of the recovery zone of the wind flow was closely related to the ambient wind speed, but had no significant relationship with the embankment height. The horizontal range of the recovery zone of the wind flow was approximately  $9.8H$  when the ambient wind speed was  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . The study could provide informative reference for the design and construction of embankment equipped with the air-cooled structures, including the crushed rock layers, ventilation ducts and thermosyphons.

**Key words:** wind flow around highway embankment; wind tunnel test; embankment height; ambient wind speed; embankment structures

(责任编辑: 牛富俊; 编辑: 武俊杰)