

# 风沙区高等级公路设施与路基高度耦合对 气流动力学和蚀积特征的影响

王鹏<sup>1</sup>, 高永<sup>1,2</sup>, 韩彦隆<sup>1,2</sup>, 张超<sup>1,3</sup>, 刘宝河<sup>4</sup>, 王嫣娇<sup>4</sup>, 王立国<sup>5</sup>

(1.内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010018;

2.内蒙古杭锦旗荒漠生态系统国家定位观测研究站, 内蒙古 鄂尔多斯 017400;

3.北京大学 深圳研究生院 环境与能源学院, 广东 深圳 518055; 4.内蒙古交通设计研究院有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010010; 5.内蒙古公路交通投资发展有限公司 赤峰分公司, 内蒙古 赤峰 024000)

**摘要:** [目的] 揭示风沙地区不同高度高等级公路附属设施对过境风沙流的扰动效应, 分析不同高度与公路设施影响下的公路路面积沙程度, 为公路工程设计和穿沙公路防护措施的制定提供理论依据。[方法] 采用了计算流体力学(CFD)数值模拟方法, 将普通公路作为对照, 对比分析不同路基高度和公路设施组合对近地表过境气流的影响, 并通过野外实测数据进行验证。[结果] 公路设施显著影响了路基过境气流, 导致公路形成减速区, 不同高度路基产生多样性的水平气流速度变化。当路基高度在1~2 m之间时, 气流扰动较弱, 有助于断面输沙; 当路基高度在3 m高度时, 气流扰动较强, 不利于断面输沙。气流穿过护栏和中央隔离带时, 气流从护栏下方经过, 风速增加, 护栏背风侧最大风速的距离随着路基高度的增加呈现先增加再减小的变化趋势, 路基高度在0, 1, 2, 3 m时, 最大风速距离分别为10, 20, 25, 20 cm。随后在护栏背风侧与上层气流合并, 尾流持续扩散, 形成减速区, 过境气流在该区域发生衰减, 沙粒颗粒产生沉积, 最高积沙高度11.5 cm, 积沙宽度4~4.5 m。[结论] 路基高度和公路附属设施是影响公路沿线沙害的主要因素。路基高度对气流到达路基上方的风速产生显著影响, 而护栏和防眩网的存在可能在背风侧形成弱风区, 从而导致公路上的沙堆积, 存在潜在危险。

**关键词:** 公路设施; 气流场特征; 风沙区; 沙漠公路; 数值模拟

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2024)02-0041-09

**中图分类号:** S157.1

**文献参数:** 王鹏, 高永, 韩彦隆, 等. 风沙区高等级公路设施与路基高度耦合对气流动力学和蚀积特征的影响[J]. 水土保持通报, 2024, 44(2): 41-49. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.02.005; Wang Peng, Gao Yong, Han Yanlong, et al. Impacts of coupled highway structures and roadbed height on aerodynamics and erosion characteristics in a windblown sandy area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(2): 41-49.

## Impacts of Coupled Highway Structures and Roadbed Height on Aerodynamics and Erosion Characteristics in a Windblown Sandy Area

Wang Peng<sup>1</sup>, Gao Yong<sup>1,2</sup>, Han Yanlong<sup>1,2</sup>,

Zhang Chao<sup>1,3</sup>, Liu Baohe<sup>4</sup>, Wang Yanjiao<sup>4</sup>, Wang Ligu<sup>5</sup>

(1.School of Desertification Control, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot,

Inner Mongolia 010018, China; 2.National Station for Observation and Research of Hangjin

Desert Ecosystem, Ordos, Inner Mongolia 017400, China; 3.School of Environment and Energy, Peking

University Shenzhen Graduate School, Shenzhen, Guangdong 518055, China; 4.Inner Mongolia Transportation

Design Research Institute Co., Ltd., Hohhot, Inner Mongolia 010010, China; 5.Chifeng Branch of Inner Mongolia

Highway and Transportation Investment and Development Co., Ltd., Chifeng, Inner Mongolia 024000, China)

**Abstract:** [Objective] The disturbance effects of accessory facilities of high-grade highways were revealed at different heights in windy and sandy areas on the passing sand flow, the degree of sand deposition on the road

收稿日期: 2023-07-27

修回日期: 2023-10-25

资助项目: 内蒙古自治区重大专项“内蒙古荒漠化地区公路风沙灾害形成机理研究”(zdx2018041)

第一作者: 王鹏(1999—), 男(汉族), 内蒙古自治区乌兰察布市人, 硕士研究生, 研究方向为荒漠化防治。Email: 573218121@qq.com。

通信作者: 高永(1962—), 男(汉族), 内蒙古自治区包头市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事荒漠化防治方面的研究。Email: 13948815709@163.com。

surface was explored under the influence of different heights and highway facilities, in order to provide theoretical basis for the design of highway engineering and the formulation of protective measures for sand crossing highways. [Methods] The computational fluid dynamics (CFD) numerical simulation method was used for the analysis, and an ordinary highway was used as a control. The findings regarding the impact of highway structures and different roadbed heights on roadbed transit airflow and the resulting formation of deceleration zones on the highway were validated against field-measured data. [Results] The varying heights of roadbeds resulted in different changes in horizontal airflow velocity. When the height of the roadbed ranged from 1 m to 2 m, the airflow disturbance was relatively weak, thereby facilitating the transport of sand across the highway. In contrast, when the height of the roadbed reached 3 m, the airflow disturbance became stronger, and hindered the transport of sand across the highway. When the airflow traversed the guardrail and the central barrier, it flowed beneath the guardrail, resulting in an increase in wind speed. The distance at which the maximum wind speed occurred on the leeward side of the guardrail initially increased and then decreased with increasing elevation of the roadbed. Specifically, at roadbed heights of 0 m, 1 m, 2 m, and 3 m, the distances at which the maximum wind speed occurred were measured to be 10 cm, 20 cm, 25 cm, and 20 cm, respectively. Subsequently, the airflow combined with the upper layer on the leeward side of the guardrail, resulting in continuous diffusion of the tail flow. This led to the formation of a deceleration zone where the transit airflow weakened. As a result, sand particles began to be deposited, resulting in a maximum height of sand accumulation of 11.5 cm. The width of sand accumulation ranged between 4.0 m and 4.5 m. [Conclusion] The height of the roadbed and the presence of road structures were identified as the primary factors contributing to sand damage along highways. Roadbed height had a significant impact on the wind speed above it. The installation of guardrails and anti-glare nets can create a low wind zone on the leeward side of the structures, resulting in sand accumulation on the highway that can pose potential hazards.

**Keywords:** road structures; airflow field characteristics; wind-sand areas; desert roads; numerical modelling

荒漠是全球陆地生态系统中重要的组成部分之一。荒漠地区虽干旱、水资源匮乏、风沙运动强烈,却拥有丰富的可利用能源。然而要合理开发和利用沙漠资源,需要修建不同等级的穿沙公路促进发展,发挥连通纽带作用<sup>[1-2]</sup>。在风沙区修建公路,由于路基、路堑等不同的公路设施会出现不同程度的沙害,因此穿沙公路的防沙治沙工作仍然严峻。

高等级公路与二级、三级公路相比,高等级公路增加护栏和防眩网等公路设施,设施的设立是为了保障道路的安全,但是荒漠地区不合理的公路设施的设立会对气流造成扰动,影响公路的输沙能力,从而导致路面积沙的现象,反而影响到了出行安全。Han Feng 等<sup>[3]</sup>人针对乌海至马琴高速公路段进行研究,发现受公路设施影响多处公路积沙段,公路沙害明显。德令哈至香日德高速公路 K85—K87 段高填方河滩风积沙路段,受到原有的护栏与防眩网的影响,路面积沙严重<sup>[4]</sup>,李生宇等<sup>[5]</sup>分析了 315 国道恰哈桥段风沙灾害成因,发现台阶式横断面和波形板护栏对风沙流结构的扰动导致桥面积沙,护栏改变了风场和风沙流活动,导致路面积沙。因此,不同路基断面与公路设施导致的路面积沙问题引起了众多学者的关注<sup>[6-9]</sup>。前期的研究试图探寻适宜的公路设计方案以减少公路产生的风蚀沙埋危害,并取得了一定的

成果,提出了相关的解决方案。为了减少公路产生的风蚀沙埋灾害,需要考虑沙漠地区公路等级设计标准等参数变化<sup>[10]</sup>。一些研究者采用模拟研究的方式探究高等级公路沙害形成机理,深入研究公路设施和路基对气流和输沙能力的影响规律,并提出了一些解决方案。Wang Cui 等<sup>[11]</sup>人发现,中央隔离带和公路护栏设施会阻碍风沙的运动,导致沙粒在路面沉积。Li Gao<sup>[12]</sup>提出了穿沙高速不同类型护栏下的断面输沙情况,提出在穿沙公路环境中布设条索状护栏可减少小公路积沙。王翠<sup>[13]</sup>基于数值模拟的手段,探究不同湍流环境下高速公路波形梁护栏对气流的影响,以及护栏影响下的高速公路路面积沙问题。鱼燕萍<sup>[14]</sup>通过风洞模拟,对比不同路基高度下防眩网与防眩板组合下,路面形成的不同沙粒堆积形式,进而对公路沙害进行探究。关于公路设施和路基对气流和输沙能力的影响规律方面已有多项研究成果。然而,实际气流通过公路时是一个动态的过程,不同设施间的组合作用将产生不同的影响规律,从而影响公路的输沙能力并导致路面积沙的现象。目前对高等级公路路基整体气流结构特征的影响尚不十分清楚。并且随着路基高度的升高,使得路基迎风侧来流不是水平气流,更多的是受到迎风面坡度与长度影响下形成带有角度的气流。当公路设施一定时,路基高度的升高对

于路基上方气流产生二次影响。基于此,本研究运用计算流体力学(CFD)数值模拟技术,对公路设施、路基高度组合下的气流特征进行研究,并通过野外试验进行验证,揭示公路沙害形成机理,预测风沙流在高等级公路的活动和积沙特点,为之后高等级公路防沙固沙工程提供理论指导。

## 1 试验设计

### 1.1 数值模拟

根据内蒙古地区沙漠公路勘测设计规范(DB15T939—2015)与公路路基设计规范(JTGD30—

2015),建立了边坡比为 1:3 的 4 种不同路基高度的高等级公路模型与普通公路模型,路基高度分别为 0,1,2 和 3 m 公路路基,具体情况如图 1 所示。本次试验考虑到护栏与防眩网周边的圆柱绕流运动以及护栏之后气流的卡门涡街现象,模型构建采用 3D 模拟方法。

具体的模型包括:公路路堤、中央屏障和护栏。模型中,护栏的高度为 0.71 m,护栏面呈三朵形式,宽度为 0.4 m;防眩网高度为 1.73 m,立柱高度为 0.71 m,路面宽度为 26 m,路基边坡坡度均为 1:3,如图 1—2 所示。

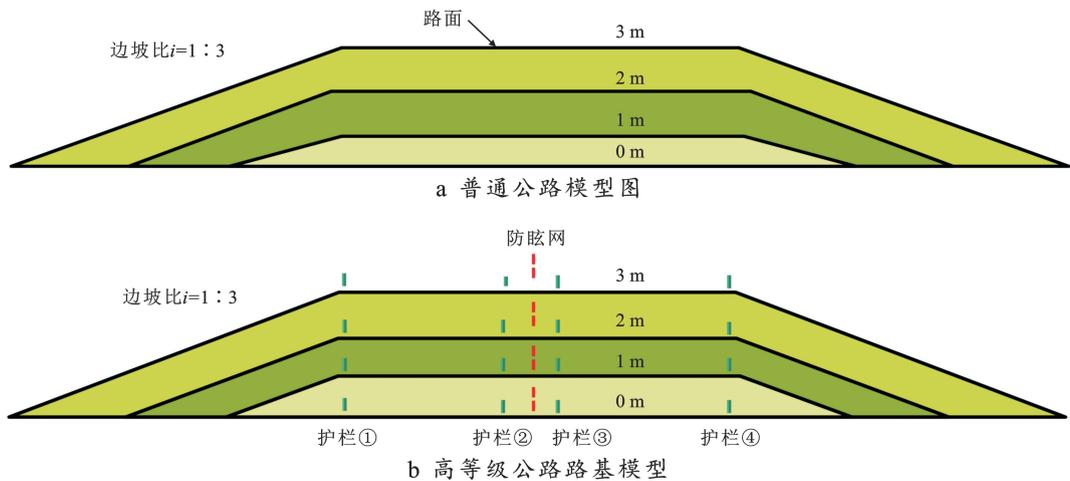


图 1 公路路基模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of highway roadbed model

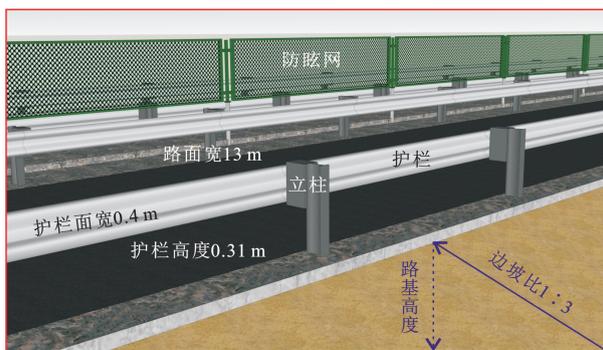


图 2 公路 3D 模型

Fig.2 Highways of 3D modeling

1.1.1 流体域设定与网格划分 考虑到需要涵盖所需计算的流场区域以及包括不同路基高度的模拟研究,流体域的尺寸为 60 m×20 m×5 m(X,Y,Z 方向),计算域空间受到模型的尺寸的制约,因此保证模型总高度的 6 倍以上,以确保路基上方的气流能够完全流动;上部模型(由入口至迎风侧坡脚)为 3 H 距离,后部区域为 5 H 距离(出口至公路模型背风侧坡脚),将模型的左右两侧设置为对称面,以满足试验需

求。有公路设施和无公路设施。对于无公路设施的情况,模型相对简单,本研究对路基和路面的网格进行加密处理。

而对于有公路设施的情况,本研究主要关注护栏和防眩网对风速的主要影响,因此在地面、路基和护栏周围采用局部加密。不同高度的公路路基具有相同的路面结构,因此我们采用了公式(1)来进行网格独立性检验,确保网格划分位于壁面黏性地层的湍流区,同时保证边界层厚度大于边界层函数的要求。网格加密方式在不同情况下保持一致,首层网格高度为 2 cm,网格增加率为 1.2 倍,共划分 6 层。本网格采用 Poly-Hexcore 划分方式。进行网格质量检查后,本研究的网格偏度均大于 0.7。

为了对流场进行精确的模拟计算,需要合理地定义边界条件和介质类型,并采用适当的数值方法和算法进行计算。将计算域左侧边界定义为速度进口边界条件(velocity-inlet),右侧为完全发展出流边界条件(out-flow),计算区域顶部采用对称边界条件(symmetry)。路基模型及地面则被定义为无滑移壁面

(wall), 介质类型为 fluid, 空气密度  $\rho$  为  $1.225 \text{ kg/m}^3$ , 气压为标准大气压。采用均匀流作为入口条件, 来流速度为  $8 \text{ m/s}$ , 出口为压力出口。地表与壁面粗糙度

为  $0.5 \text{ m}$ , 采用二阶迎风格式进行空间离散化, 时间步长取  $0.001 \text{ s}$ , 流场求解采用 SIMPLE-Consistent 算法(图 3)。

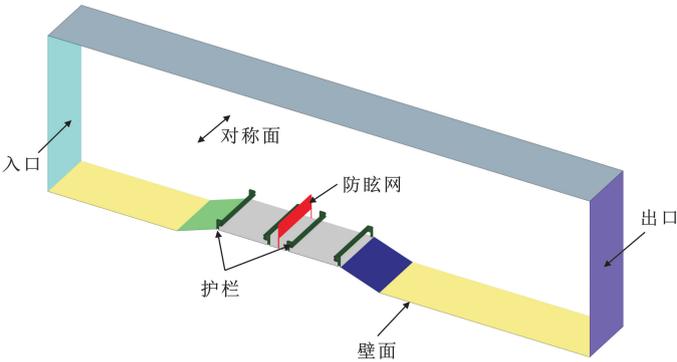
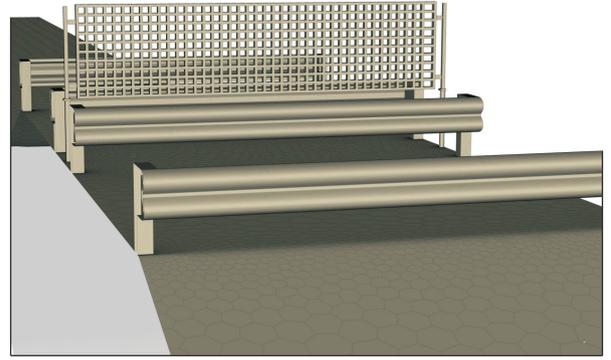


图 3 计算流体力学(CFD)前处理示意图

Fig.3 Computational fluid dynamics (CFD) preprocessing schematic



### 1.1.2 控制方程

网格边界层划分:

$$y_T = y_H \frac{1-G^N}{1-G} \quad (1)$$

式中:  $y_T$  代表边界层厚度;  $y_H$  代表单个网格中心质点至壁面的距离;  $N$  代表指定层数;  $G$  为几何增长比。

$$\sigma_{99} = y_T \quad (2)$$

式中:  $\sigma_{99}$  为参数恢复至 99% 时点到壁面的法向距离, 及湍流边界层厚度。

$$\sigma_{99} = \frac{0.38L}{R_{eL}^{1/5}} \quad (3)$$

式中:  $R_e$  为雷诺数, 本次试验属于高湍流环境  $R_e > 5 \times 10^5$ ;  $L$  为特征长度故本次模拟采用的  $k-\epsilon$  模型求解器。

$k$  方程为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (4)$$

$\epsilon$  方程为:

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\epsilon}}{k} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

式中:  $G_k$  表示由于平均速度梯度而产生的湍动能;  $C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}$  为公式中的经验常数;  $\sigma_k, \sigma_\epsilon$  分别对应湍流动能与湍流耗散率普朗特数。

## 1.2 野外调查

2023 年 4—5 月沿着 G6—G7 高速公路、红吉一级公路 S227, 哈吉线, 进行沙害的勘测(图 4)。野外勘测发现不同路基高度、不同坡度、不同风向、附属设施(中央防眩网和护栏组合、单纯防眩网)均有不同程

度的积沙。选取公路典型积沙区作为研究对象。G7 沿线高速公路, 主要积沙段为 K960—K991 为主要积沙区域, 其中 K969 段为严重积沙区; 红吉公路途经乌兰布和沙漠地段, 主要积沙段为 K205—K235。其中 K202—K203 与 K200—K202 严重积沙地段, 该路段路面前后无主要沙源, 受路基断面尺寸与公路设施影响, 路面积沙严重, 将该线路作为主要研究区对当地路面积沙进行勘测, 利用无人机与野外测量提取公路环境信息进行几何建模。

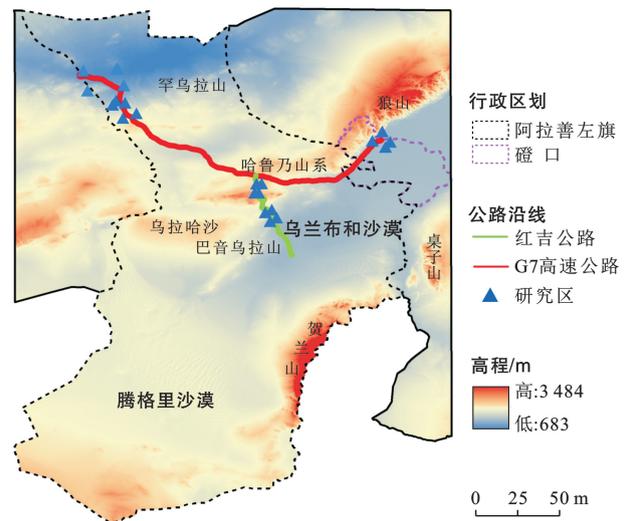


图 4 研究区地形示意图

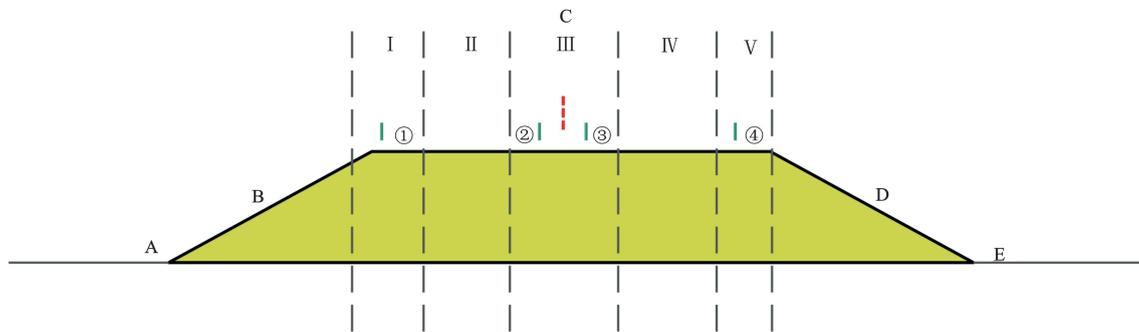
Fig.4 Schematic map of topography at study area

## 1.3 数据处理

如图 5 所示, 分为 A, B, C, D, E 进行分区。其中 A 代表迎风坡风速削减区, B 代表沿路基向上风速增

加区,C 路基上方气流变化区,D 背风坡风速沉降区, E 风速恢复区。为了反映路面上方气流变化,将区域 C 细分为 I, II, III, IV, V, 得到明显的功能划分区。将路面前后位置均匀地分为 100 个测点进行观测,每

个测点相距 11 cm。其中,0—6 测点代表护栏(1) 前后为 I 的区域,7—38 测点代表 II 区域的风速变化, 38—62 测点代表 III 区域,63—94 测点代表 IV 区域, 95—100 测点代表 V 区域的风速情况。



注:图中①,②,③,④分别为护栏编号。A,B,C,D,E 分别为将路基前后不同区域进行分区的编号,其中 A 代表迎风坡风速削减区,B 代表沿路基向上风速增加,C 为路基上方气流变化区,D 为背风坡风速沉降区,E 为风速恢复区。

图 5 路面气流分区

Fig.5 Airflow division on pavement

## 2 结果与分析

### 2.1 高度高等级公路气流场变化规律

2.1.1 公路设施对气流的扰动 图 6 展示了研究区域 8 m/s 稳定均匀流在不同路基高度下的气流运动规律。

图 6a 表示不受路基高度影响下,气流沿  $x$  轴水平运动, $y$  轴方向垂直运动。图 6b 表示受公路附属设施影响下,公路近地表气流场变化规律。在护栏结

构的影响下,气流发生分离,产生  $y$  轴方向的分流。气流受阻后沿  $y$  轴分为三部分变化。一部分沿护栏向下运动,受狭管效应影响加速,形成加速区。另一部分遇波形结构阻碍抬升,高度为护栏上方 20 cm 位置。两股气流相遇形成涡流和风速减弱区。气流沿  $x$  轴继续运动,逐渐恢复。但运移到护栏②、中心防眩网、护栏③位置时,气流再次受到公路设施影响,运动形式改变,形成弱风区。中央防眩网背风侧的减速带导致路面易于堆积沙粒。

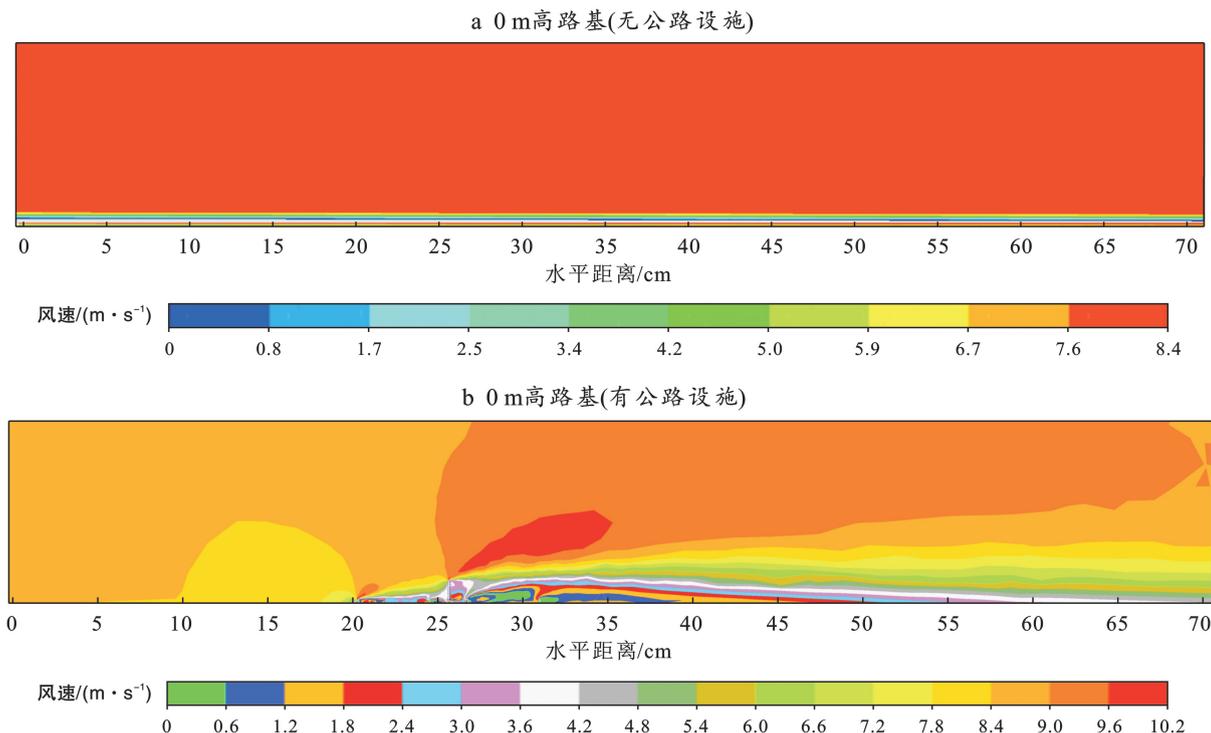


图 6 风速为 8 m/s 的纯净风下 0 m 高路基气流场示意图

Fig.6 Schematic diagram of airflow field on 0 m high roadbed under a clean wind of 8 m/s

2.1.2 不同高度公路路基与公路设施组合对气流的多重影响 路基高度和附属设施会影响气流,改变迎风侧来流的方向和速度。随着路基高度的增加,迎风面坡度和长度对气流的影响更大,形成带有角度的气流。对于相同的公路设施,路基高度升高会对路基上方的气流产生二次影响。如图7所示,气流在迎风面运动到路面时受到抬升,在路肩部位风速达到最大值。图7分别显示了2 m高普通公路和2 m高等级公路的气流场变化。高等级公路迎风侧减速区长度较大,形成的减速区面积大于普通公路。当气流到达

背风侧减速区时,普通公路背风侧沉降区形成的距离受路基高度的影响。高等级公路背风侧沉降区形成的距离受到路基高度与公路附属设施的影响。随着路基高度的升高,普通公路形成的气流沉降区增大。而高等级公路的气流沉降区在路基高度升高的情况下,受到路基高度与附属设施高度之间的相互作用影响,这将在路基后方形成一个稳定的减速区,其中防眩网和护栏抬升的气流进一步导致风速下降,形成二次减速。在相同路基高度下,高等级公路的背风侧风速削减程度更为显著。

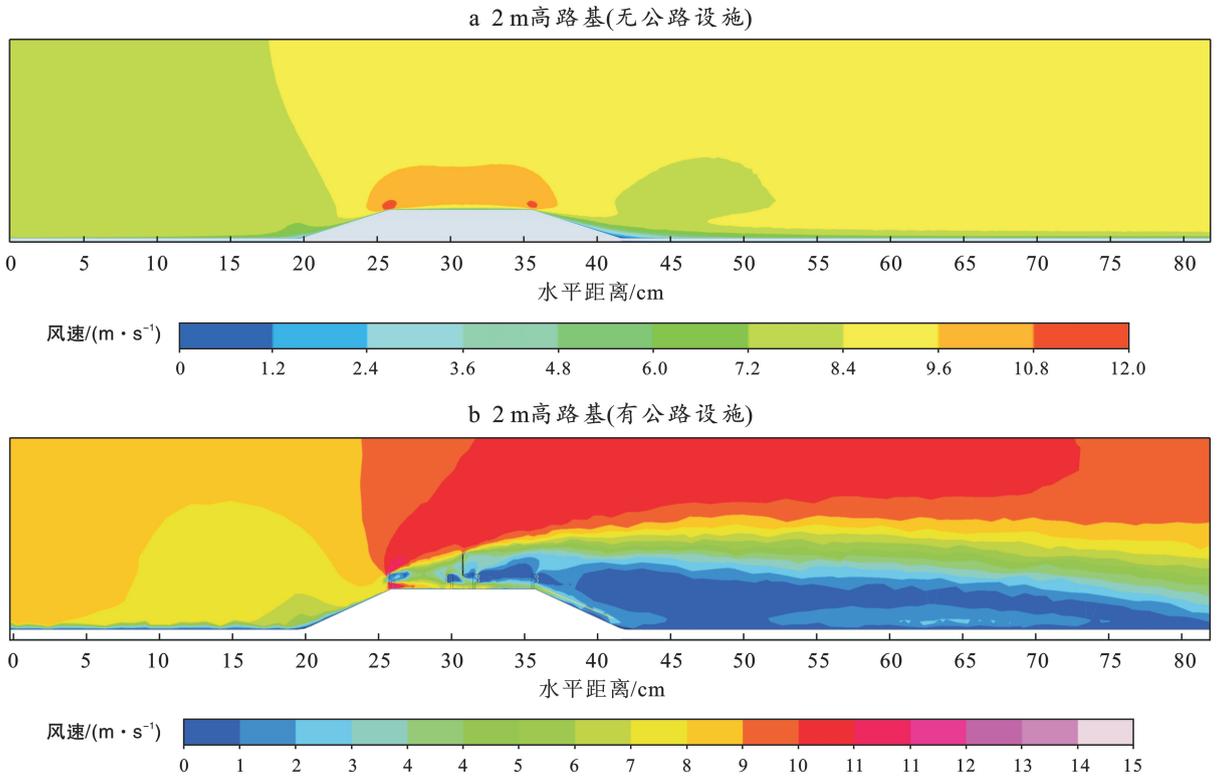


图7 风速为8 m/s纯净风下2 m高路基气流场示意图

Fig.7 Schematic diagram of airflow field on 2 m high roadbed under a clean wind of 8 m/s

## 2.2 不同高度高等级公路路基水平气流速度变化

气流受路基高度影响,形成垂直气流,影响风应力。不同路基高度和测点位置导致气流差异。选择10 cm和30 cm高度分析水平气流速度变化。如图8所示,近地表水平风速随路基高度增加而阶梯状变化。气流受护栏和防眩网影响,风速在IV区域后急剧降低,V区域最低。2 m高路基的脉动性最强,3 m高路基的风速变化最大。在I区域,气流通过护栏①后通常会形成加速区,使气流在这里加速,有助于沙粒通过路面。随着公路高度梯度的增加,护栏对气流的影响使得背风侧的相对风速发生变化,分别为8.56,10.62,11.79和12.5 m/s。随着路基高度的增加,风速最大值的位置呈现出先增加后减小的趋势,

位置分别为10,11,12和11。2 m高路基在I和II区域内,特别有利于沙粒的输送。区域III内,气流受中央隔离带影响,导致公路上方水平风速呈现先降低再增加的趋势,在63号测点位置处,风速基本维持在7.5 m/s。除0 m高度路基呈现先减小再增加再减小的“W”形变化趋势外,其他路基高度的风速大小沿x轴方向呈现减小的变化。根据相对风速的削减速率排序,从高到低分别为2 m高路基,1 m高路基,3 m高路基和0 m高路基。在IV区域内,2 m高路基在83号测点位置,风速最低值为2.03 m/s;路基高度为0 m时,该区域风速改变较小,随着路基高度增加,该区域相对风速变化显著。2 m高路基曲线波动性最强,其次为1 m高路基,3 m高路基,0 m高路基。

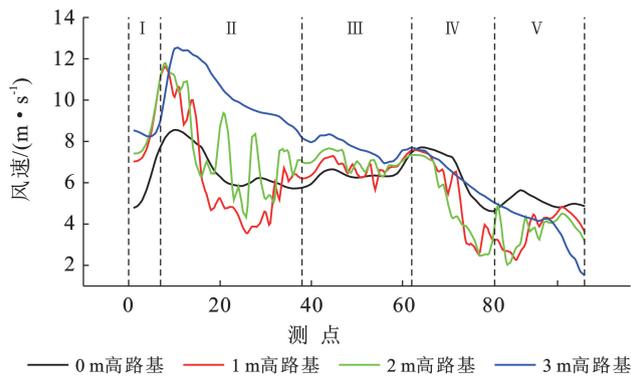


图 8 路面近地表 10 cm 水平风速

Fig.8 Horizontal wind speed at a height of 10 cm above road surface

根据图 9 所示,当测点高度为 30 cm 时,整体上看,2 m 高路基在 I 和 II 区域内的相对风速变化较小,而不同高度的路基都在 6 号测点处达到最大风速,分别为 8.17,11.01,11.3 和 12.32 m/s。在区域 II 内,由于公路设施的影响,整体呈减速趋势。0,1,2 和 3 m 高路基相对削减率分别为 54%,54%,48.2%,62%。3 m 高公路路基风速削减最明显,气流扰动最剧烈;2 m 高路基,风速削减最弱,对于气流的抵抗能力最强,对气流影响最小。在 III 号区域和 IV 号区域内,风速整体变化规律类似,都是先减小再增加,再减小再增加的变化趋势。其中 3 m 高路基风速降至最低,0 和 1 m 高路基风速变化比较接近,3 m 高路基风速变化幅度最大,2 m 高路基改变幅度最小。

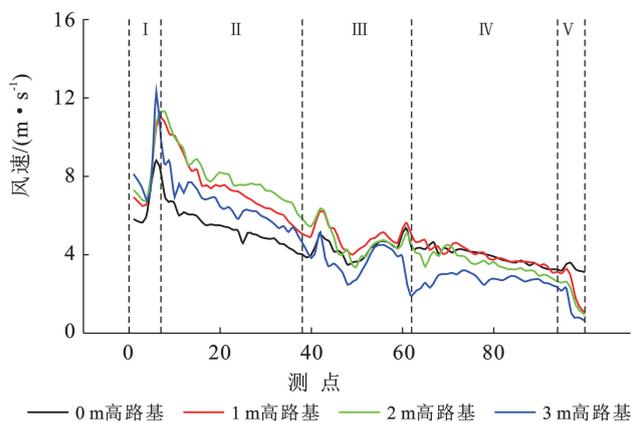


图 9 路面近地表 30 cm 水平风速

Fig.9 Horizontal wind speed at a height of 30 cm above road surface

### 2.3 公路积沙野外实地验证

经过实地考察,G7—S227 公路的 G7 公路 991—960 段与红吉公路 K200—K227 段均存在严重的积沙现象。特别是红吉公路,其南北走向的特性使得西

北风和东南风成为主要的风害来源。根据野外勘测数据,当积沙当天风速达到平均 6.6 m/s,且持续 6 h 的情况下,沙尘暴在护栏的作用下,导致路面积沙的路段达到 5~6 处。这些路段的路基高度分别为 0,1,2 和 3 m,且均设有防眩网和护栏组合。

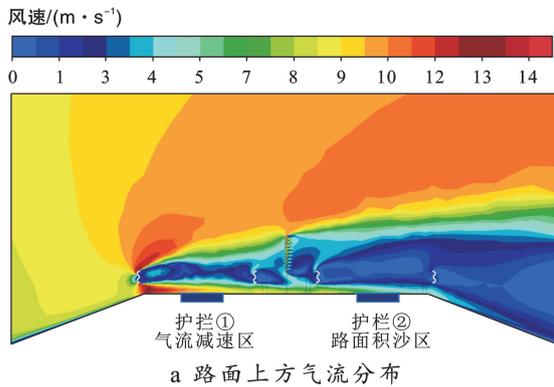
如图 10 所示,高等级公路路面的气流场示意图清晰地展现了高路基与公路设施对气流的影响。在护栏与中央防眩网的背风侧,形成了明显的减速区,这使得沙粒的堆积规律与路面气流场相吻合。从图中可以看到,当风沙流经过护栏时,在图 10a 的①位置形成了减速区,这与图 10b 中护栏背风侧的积沙情况相一致。此外,当风沙流沿垂直公路沿线剖面继续运动时,经过中央隔离带的影响,会在图 10a 的②位置形成弱风区。这一区域内风速显著降低,从而导致沙粒在此处累积(如图 10c 所示)。

通过野外测量与数值模拟的综合分析,我们发现气流在通过护栏近地表时,会形成加速区。这一加速区的距离与积沙距离之间存在一定的关系。当气流在近地表 10 cm 高度时,受护栏影响形成加速区,大约 3 m 后气流开始削减,风速降低,从而开始积沙。积沙从风速最低点处开始,并逐渐向背风侧方向移动。受到路面防滑带的影响,沙粒会沿地表逐渐蠕移至背风侧,直至完全覆盖防滑带。待积沙稳定后,我们测量了积沙带的宽度与高度。积沙体的形态如图 11 所示。通过无人机观测,路面积沙长度约为 6~7 km。实际测量长度为 1 000 m,最高积沙高度达到 11.5 cm,积沙体宽度在 4~4.5 m 之间。

## 3 讨论

本研究采用数值模拟的方法,研究了不同路基高度以及有无公路设施情况下的风速流场。气流在水平方向上移动,当气流通过护栏下方的缝隙时,气流在间隙中会受到较低的压力,这进一步促使气流加速通过间隙,速度增加。随着气流沿风向前行一段距离,它与上层气流合并,速度减小,沿风向形成扩散尾流,形成减速区。气流通过中央防眩网后,受到防眩网孔隙的影响,会在接近地表与网状结构相结合后的一段距离内形成一个加速区,然后进入一个稳定的减速区。气流受到阻碍时,风速下降,这会导致部分悬浮的沙粒摆脱风力束缚,最终在护栏背风侧的公路上形成逐渐积聚的沙床。值得注意的是,与单个护栏结构相比,中央防眩网背风侧的加速距离与风速削减程度表现出更强的作用。公路设施的建设会改变公路上的气流,从而导致路面积沙。这一结果与 Wang Cui, Li Gao、鱼燕萍<sup>[11,14-17]</sup>等人研究结果一致。公路

设施的设置会导致气流变化,尤其是在设施的背风侧形成了一个风速较弱的区域。这个区域的形成使得穿越的风沙流难以正常通过,气流下沉,沙粒逐渐堆积在公路上方,从而危及行车安全。



a 路面上方气流分布



b 护栏① 沉积前期

c 护栏② 沉积区

图 10 野外沙害调查与气流场关系示意图

Fig.10 Schematic diagram illustrating correlation between sand field measurements and airflow

度的变化,固定测点的风速大小并非呈现线性变化。该结论与江兴旺<sup>[18]</sup>、李驰<sup>[15]</sup>、袁媛等<sup>[19]</sup>人的研究结果一致。在路基高度为 0 m 的情况下,路面上方的风速变化主要受到公路设施的影响,气流主要沿水平方向流动,特别是在穿越护栏下方时,气流显著增加。然而,随着路基高度的提高,路基高度的变化会引起气流的变化。当路基高度升高时,气流在迎风侧受到阻碍并上升,形成夹角较大的气流,而在接近护栏时,气流再次发生变化。此时,固定测点的风速不再呈线性变化。具体来说,当路基高度低于 2 m 时,增加路基高度有助于风沙流畅地通过路基横断面。但当路基高度超过 2 m 时,增加路基高度会导致风沙流难以顺利通过路基断面,从而在公路上方积聚沙粒。对于 2 m 高的高等级公路,路基高度和公路设施的综合影响使气流扰动最小。当气流穿过护栏进入路面时,路基高度对其产生影响,气流逐渐向路基中心移动,减速区的长度也向内部移动。因此,随着路基高度的增加,沙粒通常会在离中央防眩网较远的地方积聚。

综上所述,本研究揭示了公路设施对气流的影响形成机理,为公路路基的设计和建设提供了理论依据和实际指导意义。未来应该对不同的路基形式进行更加全面和深入的研究,并采用更加全面和准确的方法进行研究,以便更好地了解公路设施对气流的影响和路面积沙的形成机理,为公路建设提供更加科学和可靠的指导。

## 4 结论

(1) 有公路设施的高等级公路与无设施的普通公路相比,高等级公路路面近地表气流场变化复杂,整体呈现减速趋势。公路设施的存在一定程度影响公路路基气流运移规律。

(2) 相同公路设施下,不同路基高度对气流场扰动程度不同,路基高度为 0 m 时,气流场稳定,路基高度在 1~2 m 对气流扰动较弱、路基高度为 3 m 时气流扰动较强,路基高度在 1~2 m 的高等级公路有利于断面输沙。路基高度为 3 m 时在近地表 30 cm 范围内,相对风速变化剧烈波动最强,对过境气流扰动强烈,路基高度为 2 m 水平风速曲线波动较小,相对风速变化最弱,过境气流较弱,有利于断面输沙。

(3) 气流沿高等级公路近地表运行时,气流越过护栏,由于下疏上密结构,最大风速出现在护栏背风侧近地表范围,护栏与最大风速的距离随着路基高度的增加呈现先增加再减小的变化趋势,路基高度在 0,1,2 和 3 m 时,最大风速距离分别为 10,20,25 和 20 cm。

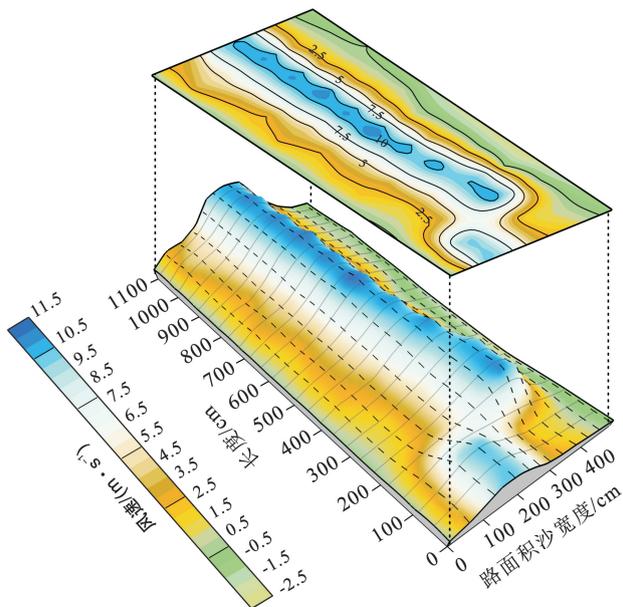


图 11 路面积沙体形态

Fig.11 Topography of accumulated sand bodied on road surface

此外,针对有路基高度的问题,研究人员选择水平方向和垂直方向进行研究。研究发现,随着路基高

(4) 野外调查发现,气流通过中央隔离带,在近地表形成 3 m 加速带,加速带后形成稳定的弱风区,过境气流在该区域发生衰减,沙粒颗粒产生沉积,最高积沙高度 11.5 cm,积沙宽度 4~4.5 m 之间。

## 参考文献 (References)

- [1] 邓友生,彭程谱,刘俊聪,等.沙漠公路灾害防治方法及其工程应用[J].公路,2021,66(6):345-351.  
Deng Yousheng, Peng Chengpu, Liu Juncong, et al. Prevention and control methods for highway disaster in desert area and its application in projects [J]. Highway, 2021,66(6):345-351.
- [2] 彭文顺.京新高速公路内蒙沙漠段综合防沙体系设计[J].公路,2021,66(3):314-318.  
Peng Wenshun. Design of comprehensive sand control system in Inner Mongolia desert section of Beijing-Xinjiang expressway [J]. Highway, 2021,66(3):314-318.
- [3] Han Feng, Wang Chengxiang, Liu Zhibo, et al. Study on sand-accumulation changes of highway and formation mechanism of sand damage in drifting dunes areas [J]. Applied Sciences, 2022,12(19):10184.
- [4] 韩石.德香高速公路路面风积沙严重路段安全护栏选型及处置效果分析[J].青海交通科技,2018(1):62-66.  
Han Shi. Selection and disposal effect analysis of safety guardrail for road surface aeolian sand in De-Xiang Expressway [J]. Qinghai Transportation Science and Technology, 2018(1):62-66.
- [5] 李生宇,范敬龙,王海峰,等.315 国道策勒恰哈桥段风沙灾害成因初步分析与治理对策[J].干旱区地理,2016,39(4):754-760.  
Li Shengyu, Fan Jinglong, Wang Haifeng, et al. Causes and thoughts of comprehensive control of blown sand disaster at Qiaha Bridge of National Highway 315, in Cele County, Xinjiang, Northwest China [J]. Arid Land Geography, 2016,39(4):754-760.
- [6] Zhang Kai, Zhang Hailong, Deng Yuhui, et al. Effects of sand sedimentation and wind erosion around sand barrier: Numerical simulation and wind tunnel test studies [J]. Journal of Mountain Science, 2023,20(4):962-978.
- [7] 张克存,安志山,何明珠,等.中国沙区公路风沙危害及防治研究进展[J].中国沙漠,2022,42(3):222-232.  
Zhang Kecun, An Zhishan, He Mingzhu, et al. Progress of research on wind-blown sand prevention and control along highways in China [J]. Journal of Desert Research, 2022,42(3):222-232.
- [8] 党兵,符亚儒,施智宝,等.基于缓解沙漠高速公路风沙危害的路基参数优化:以榆靖高速公路为例[J].中国沙漠,2007,27(6):946-954.  
Dang Bing, Fu Yaru, Shi Zhibao, et al. Optimization of roadbed parameters based on alleviation of sand damage to desert expressway [J]. Journal of Desert Research, 2007,27(6):946-954.
- [9] 王金国,安志山,张克存,等.乌玛高速公路中卫段风沙环境及输移规律[J].水土保持研究,2021,28(6):183-189.  
Wang Jinguo, An Zhishan, Zhang Kecun, et al. Surface sand grain characteristics along Zhongwei section of Wuhai-Maqin highway [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021,28(6):183-189.
- [10] 李楠.戈壁沙漠地区高速公路线路设计[J].建筑技术开发,2021,48(12):137-138.  
Li Nan. Highway route design in gobi desert area [J]. Building Technology Development, 2021,48(12):137-138.
- [11] Wang Cui, Li Shengyu, Lei Jiaqiang, et al. Effect of the W-beam central guardrails on wind-blown sand deposition on desert expressways in sandy regions [J]. Journal of Arid Land, 2020,12(1):154-165.
- [12] Li Gao, Cheng Jianjun, Wang Haifeng, et al. Effects of different types of guardrails on sand transportation of desert highway pavement [J]. Journal of Arid Land, 2022,14(9):993-1008.
- [13] 王翠,李生宇,朱丽,等.风沙区高速公路波形梁护栏附属设施影响下的气流变化及蚀积特征[J].干旱区资源与环境,2023,37(5):155-161.  
Wang Cui, Li Shengyu, Zhu Li, et al. Air flow variation and erosion characteristics under the influence of the W-beam guardrail of the expressway in aeolian sand area [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023,37(5):155-161.
- [14] 鱼燕萍,肖建华,屈建军,等.两种典型高等级公路路基断面风沙过程的风洞模拟[J].中国沙漠,2019,39(1):68-79.  
Yu Yanping, Xiao Jianhua, Qu Jianjun, et al. Wind tunnel simulation of aeolian sand process in subgrade section of two typical high-grade highway [J]. Journal of Desert Research, 2019,39(1):68-79.
- [15] 李驰,高瑜.沙漠公路风沙土路基风蚀破坏试验研究[J].岩土力学,2011,32(1):33-38.  
Li Chi, Gao Yu. Experimental studies of wind erosion failure of aeolian soils subgrade for desert highway [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011,32(1):33-38.
- [16] 李朝妹,袁树杰,张振彬.风沙绕流建筑物流场的数值模拟研究[J].建筑热能通风空调,2012,31(2):66-68.  
Li Chaomei, Yuan Shujie, Zhang Zhenbin. Numerical simulation of flow field of wind with sands around buildings [J]. Building Energy & Environment, 2012,31(2):66-68.

- 38(3):176-184.
- [29] 王冬梦.基于空间优先级的郑州市绿色基础设施网络分析与优化研究[D].河南 郑州:河南农业大学,2023.  
Wang Dongmeng. Analysis and optimization of green infrastructure network in Zhengzhou based on spatial priority [D]. Zhengzhou, Henan: Henan Agricultural University, 2023.
- [30] 霍锦庚,时振钦,朱文博,等.郑州大都市区生态网络构建及格局优化[J].应用生态学报,2023,34(3):742-750.  
Huo Jingeng, Shi Zhenqin, Zhu Wenbo, et al. Construction and pattern optimization of ecological network in Zhengzhou metropolitan area [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023,34(3):742-750.
- [31] 刘曼舒.国土空间规划背景下郑州市城市增长边界划定[D].河南 郑州:河南农业大学,2020.  
Liu Manshu. Delineation of urban growth boundaries in Zhengzhou under the background of national spatial planning [D]. Zhengzhou, Henan: Henan Agricultural University, 2020.
- [32] 韦宝婧,苏杰,胡希军,等.基于“HY-LM”的生态廊道与生态节点综合识别研究[J].生态学报,2022,42(7):2995-3009.  
Wei Baojing, Su Jie, Hu Xijun, et al. Comprehensive i-
- dentification of eco-corridors and eco-nodes based on principle of hydrological analysis and Linkage Mapper [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(7):2995-3009.
- [33] 覃彬桂,林伊琳,赵俊三,等.基于 InVEST 模型和电路理论的昆明市国土空间生态修复关键区域识别[J].中国环境科学,2023,43(2):809-820.  
Qin Bingui, Lin Yilin, Zhao Junsan, et al. Identification of key areas for the ecological restoration of territorial space in Kunming based on the InVEST model and circuit theory [J]. China Environmental Science, 2023,43(2):809-820.
- [34] 吴映梅,李琛,高彬斌,等.高原湖泊城市生态安全格局构建:以大理市为例[J].生态学报,2023,43(19):8153-8166.  
Wu Yingmei, Li Chen, Gao Binpin, et al. Construction of urban ecological security pattern in highland lakes cities: The case of Dali City [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(19):8153-8166.
- [35] 宋利利,秦明周.整合电路理论的生态廊道及其重要性识别[J].应用生态学报,2016,27(10):3344-3352.  
Song Lili, Qin Mingzhou. Identification of ecological corridors and its importance by integrating circuit theory [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016,27(10):3344-3352.

(上接第 49 页)

- [17] 王海峰,吴永祥,丁新建,等.风沙环境下高速公路路基风压及沙粒沉积分析研究[J].科技风,2022(31):70-72.  
Wang Haifeng, Wu Yongxiang, Ding Xinjian, et al. Highway roadbed sand environment wind and sand deposition analysis research [J]. Technology Wind, 2022(31):70-72.
- [18] 江兴旺,张婷,王琳,等.沙漠戈壁地区高等级公路风沙防治研究[J].公路,2015,60(4):251-254.  
Jiang Xingwang, Zhang Ting, Wang Lin, et al. Study on the prevention and control of wind-blown sand in high-grade highways in desert Gobi area [J]. Highway, 2015,60(4):251-254.
- [19] 袁媛,刘宽河.沙害对公路路基高度的影响[J].内蒙古公路与运输,2004(3):1-4.  
Yuan Yuan, Liu Kuanhe. Effect of sand damage on the height of highway subgrade [J]. Highways and Transportation in Inner Mongolia, 2004(3):1-4.

(上接第 118 页)

- [36] Chow T L, Rees H W. Effects of coarse-fragment content and size on soil erosion under simulated rainfall [J]. Canadian Journal of Soil Science, 1995,75(2):227-232.
- [37] Sekucia F, Dlapa P, Kollár J, et al. Land-use impact on porosity and water retention of soils rich in rock fragments [J]. Catena, 2020,195:104807.
- [38] Hlaváčíková H, Novák V, Holko L. On the role of rock fragments and initial soil water content in the potential subsurface runoff formation [J]. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 2015,63(1):71-81.
- [39] Poesen J, De Luna E, Franca A, et al. Concentrated flow erosion rates as affected by rock fragment cover and initial soil moisture content [J]. Catena, 1999,36(4):315-329.
- [40] 宋月君,黄炎和,杨洁,等.赣中第四纪红壤区马尾松林下水土流失特征及防治成效分析[J].干旱区资源与环境,2018,32(4):119-125.  
Song Yuejun, Huang Yanhe, Yang Jie, et al. The characteristics of soil and water loss in *Pinus massoniana* forest in red soil region of Jiangxi Province and the effect of soil and water conservation [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018,32(4):119-125.