沙区铁路桥平曲线半径对风沙输移的影响

薛承杰[1], 张克存[2], 安志山[2], 张宏雪[3], 张 娴[2]
(1.莆田学院 土木工程学院, 福建 莆田 351100; 2.中国科学院 西北生态环境资源研究院 敦煌戈壁荒漠生态与环境研究站, 甘肃 敦煌 736200; 3.武汉商学院, 湖北 武汉 430000)

摘 要: [目的]揭示不同沙区铁路桥平曲线半径条件下,铁路桥及其周围风沙输移规律和桥面积沙分布特点,为沙区铁路桥的风沙防护设计提供理论依据。[方法]结合野外风动力环境实测数据,采用计算流体力学(CFD)方法,利用欧拉双流体模型,模拟了在9 m/s来流风速下,净空高度为5 m,平曲线半径(R)分别为200,400和600 m的铁路桥周围流场与桥梁表面积沙情况。[结果]数值模拟结果表明:①铁路桥周围流场存在稳定的功能分区(减速区、加速区、涡流区),分区范围受桥梁曲率影响。②桥梁迎风面的几何形态(凸面迎风或凹面迎风)会对风沙流产生导流或汇聚效应,是影响铁路桥表面积沙分布的关键因素。③铁路桥平曲线半径越大,桥面整体风速分布越均匀,桥梁整体输沙能力越强,桥面积沙量越少。[结论]沙区铁路桥进行设计时,应优先采用较大的平曲线半径,并结合当地主导风向,将桥梁的"凸面"布置为迎风侧,这样可有效疏导风沙流,显著减轻桥面积沙危害。

关键词: 铁路桥; 平曲线半径; 流场; 积沙
文献标识码: B **文章编号:** 1000-288X(2026)03-0160-11 **中图分类号:** U213.2, P931.3

文献参数: 薛承杰, 张克存, 安志山, 等.沙区铁路桥平曲线半径对风沙输移的影响[J].水土保持通报, 2026,46(3):160-170. Xue Chengjie, Zhang Kecun, An Zhishan, et al. Influence of horizontal curve radius of railway bridges on transport of wind-blown sand in sandy regions [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026,46(3):160-170.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.03.024 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.03.024**

Influence of horizontal curve radius of railway bridges on transport of wind-blown sand in sandy regions

Xue Chengjie[1], Zhang Kecun[2], An Zhishan[2], Zhang Hongxue[3], Zhang Xian[2]
(1.*School of Civil Engineering*, *Putian University*, *Putian*, *Fujian* 351100, *China*; 2.*Dunhuang Gobi Desert Ecology and Environment Research Station*, *Northwest Institute of Eco-Environment and Resources*, *Chinese Academy of Sciences*, *Dunhuang*, *Gansu* 736200, *China*; 3.*Wuhan Business University*, *Wuhan*, *Hubei* 430000, *China*)

Abstract: [Objective] The transport patterns of wind-blown sand around railway bridges and the characteristics of sand accumulation on bridge surfaces under different horizontal curve radii in sandy regions were revealed in order to provide a theoretical basis for the design of wind-blown sand protection of railway bridges in sandy regions. [Methods] Based on field-measured wind dynamic environment data, the computational fluid dynamics (CFD) method was employed, and the Eulerian two-fluid model was used to simulate the flow field around a railway bridge and sand accumulation on the bridge surface under an incoming wind velocity of 9 m/s, a clearance height of 5 m, and horizontal curve radii (R) of 200 m, 400 m, and 600 m. [Results] The numerical simulation results revealed that: ① the flow field around the railway bridge exhibited distinct functional zones (deceleration zone, acceleration zone, and vortex zone), and the extent of these zones was influenced by the bridge curvature.② The geometric shape of the windward side of the bridge (convex or concave facing the wind) produced either a guiding

收稿日期: 2025-11-24 **修回日期:** 2025-12-26 **采用日期:** 2026-01-02
资助项目: 国家自然科学基金项目"沙砾质地表风蚀产沙机理与风沙输移过程研究"(42171083); 国家重点研发计划项目专题"荒漠化过程及其治理工程对土地生产力的影响及治理工程生态效应的综合评价"(2020YFA0608403); 莆田学院引进人才科研启动项目"台风影响下海岸沙丘侵蚀破坏作用机理及防护体系研究"(2026028)
第一作者: 薛承杰(1993—),男(汉族),山东省高密市人,博士,副教授,主要从事铁路风沙灾害防治方面的研究。Email:xuechengjie2022@163.com。
通信作者: 张克存(1978—),男(汉族),甘肃省民勤县人,博士,研究员,博士生导师,主要从事沙害形成机理及风沙灾害防治模式等方面的研究。Email:kecunzh@lzb.ac.cn。

or converging effect on the wind-blown sand flow, which was a key factor influencing sand accumulation distribution on the railway bridge surface. ③ With increasing horizontal curve radius, the wind speed distribution across the bridge deck became more uniform, the overall sand transport capacity of the bridge increased, and the sand accumulation on the bridge surface decreased. [Conclusion] When designing railway bridges in sandy regions, larger horizontal curve radii should be preferentially adopted. The convex side of the bridge should be arranged as the windward side according to the prevailing wind direction, which can effectively divert wind-blown sand flow and significantly mitigate sand accumulation hazards on the bridge surface.

Keywords: railway bridge; horizontal curve radius; flow field; sand accumulation

中国是全球沙区铁路里程最长的国家,同时也是受风沙灾害影响最为严重的国家之一[1-5]。近几十年来,中国在沙区建成大量铁路,显著推动了西北内陆地区的经济发展。然而,这些沙区铁路普遍面临风沙侵袭问题,不同程度的风沙危害导致桥涵、路面、桥面及附属设施受损,每年需投入大量的人力与财力进行清沙维护,给地方财政带来持续负担。为减轻风沙对铁路运营的危害,国内外学者从多个角度开展了铁路风沙灾害形成机理及风沙灾害防治方面的研究。早期研究多依托于野外实地观测和室内风洞环境试验,以此揭示了不同地表条件下风沙流的风速廓线及风沙流结构分布特征[6-10];另有学者基于实地勘测的地形、气候与水文数据,分析了沙害发生与自然环境之间的关联;还有学者通过野外监测积沙分布数据,构建了适用于铁路周边风沙输移的预测方程[11-15]。随着计算机数值模拟技术的发展,越来越多的研究开始结合计算流体力学(CFD)方法,开展风沙环境的仿真模拟。例如,采用Fluent软件分析铁路路基高度、宽度与边坡坡度对风蚀过程的影响;运用“欧拉双流体模型”探究风沙流与铁路路基之间的相互作用关系,模拟不同路基结构对风沙输移规律的响应等[16-20]。近年来,学者们在铁路风沙研究领域取得了较多进展,主要集中在铁路路基周围风沙流场特征,断面参数优化,挡沙结构设计及输沙轨道的布设等方面。然而,现有研究多集中于直线段铁路路基,针对铁路桥平面曲线段对风沙输移的影响的研究仍较为缺乏,尤其是不同曲率条件下铁路桥面流场结构与积沙分布的系统对比研究尚有不足。

针对铁路桥路段而言,其所遭受的风沙危害表现出区别于普通铁路路基的特殊性与复杂性。铁路桥通常具有架空结构,桥墩扰流及较大的离地净空,这些因素会显著改变铁路桥周边风沙流场结构,导致桥面、梁底及墩台等关键部位出现积沙、磨蚀甚至振动响应,严重影响桥梁结构的耐久性与行车安全。因此,铁路桥的风沙问题不仅涉及路面通行能力,更直接关联桥梁结构自身的抗风沙设计与长期性能维护。为此,本研究基于风沙两相流理论,结合野外实地观测与CFD数值模拟方法,利用Fluent软件中的“欧拉双流体模型”,模拟分析不同平曲线半径铁路桥周围风沙流场特性与积沙分布特点。通过比较铁路桥不同曲率桥面的积沙情况,揭示铁路桥平曲线半径对沙害分布的影响机制,以期为沙区铁路桥的风沙灾害防护设计提供理论依据与工程参考。

1　材料与方法

格库铁路新疆段的部分路段建设有铁路高架桥,由于受到地形、地质、水文等因素的影响,部分高架桥路段设置平曲线形式来加以绕避(图1),而铁路桥的曲面迎风形式和曲线半径的不同对风沙活动具有一定的影响[21-23]。格库铁路台特玛湖路段位于新疆若羌县境内。本文选取该路段作为主要研究区。该区域属于典型的温带大陆性干旱气候区,年平均降水量不足50 mm,年蒸发量却超过2 500 mm。该区域地形上处于阿尔金山冲积扇前缘,地表物质以粉细砂为主,植被覆盖度低于10%。与此同时,该路段大风频发,风蚀作用也较为强烈,沙源丰富,经常处于较高浓度的风沙流环境中[24]。



图1　格库铁路新疆段铁路桥

Fig.1　Railway bridge at Xinjiang section of Ge'ermu-Ku'erle railway

1.1　起沙风分布情况

本次野外观测数据源于2022年5月至2023年5月期间在格库铁路台特玛湖路段高架桥西侧布设

的HOBO自动气象仪所获取的风速与风向观测资料和八方位积沙仪所获取的积沙数据，该观测数据也为后续数值模拟提供关键的“气象边界条件”。通过对该地区气象资料进行整理分析可以得出，格库铁路台特玛湖路段年平均风速为4.04 m/s，全年最大瞬时风速为20.1 m/s，年起沙风频率为26.33%。其中，5月平均风速最大，其数值为6.19 m/s，起沙风频率比例也高达58%。由于该地区春夏季时段的高温使得地表蒸发旺盛，土壤体积含水量普遍降低，导致沙粒间的黏结力减弱，因此抗风蚀能力降低。再加之地表温度的升高也致使近地表大气产生强烈对流，进一步地增强了近地表风速，最终使得春夏季时段起沙风频率普遍较高；12月时由于研究区土壤冻结且湿度偏大，导致该时段的平均风速仅为2.41 m/s，处于全年月平均风速的最低值，起沙风频率也较低仅为5%。综合以上分析，需重点对春夏时段铁路桥周边风沙流运动加以观测（图2）。

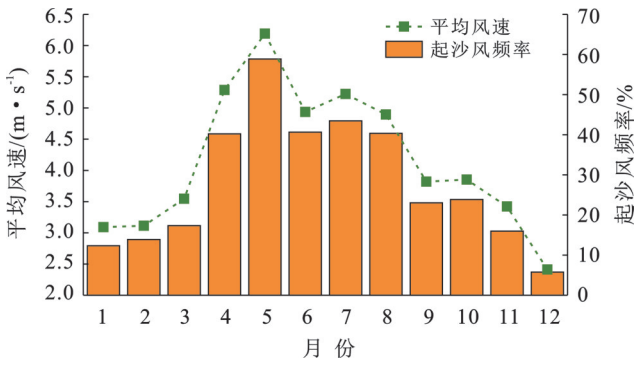


图2 平均风速和起沙风频率月变化

Fig.2 Monthly variations under average wind speed and sand-driving wind frequency

1.2 输沙势

研究区起沙风速根据Bagnold公式计算，通常取5 m/s作为临界值。输沙势（DP）计算采用Fryberger[25]方法：

$$DP = V^2(V - V_t)^2 t \quad (1)$$

式中：DP为输沙势（VU）；V为起沙风风速的平均值（m/s）；V_t为当地起沙风速临界值（m/s）；t为起沙风作用时间，以频率表示（%）。

通过对研究区内各方向输沙势进行矢量合成，可得到合成输沙势（RDP），其核心结果包括指示净输沙宏观趋势的合成输沙方向（RDD），以及表征净输沙能力大小的合成输沙势值。在此基础上，合成输沙势值与总输沙势（各方向输沙势标量和）的比值被定义为风向变率指数，该指数是用以表示该地区风向组合情况及风信复杂程度的重要指标[26-28]，对解析沙丘形态动力学过程（如区分单向风主导的纵向沙丘与多向风作用的格状沙丘）具有关键意义（表1）。

表1 风能环境及风向变率等级划分标准

Table 1 Classification criteria for wind energy environment and wind direction variability

输沙势(DP)/VU	风能环境	RDP/DP	风向变率
＜200	低等风能环境	＜0.3	高变率
200～400	中等风能环境	0.3～0.8	中变率
＞400	高等风能环境	＞0.8	低变率

从格库铁路台特玛湖路段月输沙势（DP）分布玫瑰图可以看出（图3），研究区风动力环境受季节影响较为明显。在春夏季节时段（每年的4—8月），研究区的潜在输沙能力最强，该时间段输沙势数值普遍大于60 VU；秋冬季节（每年的9月至次年3月）输沙势数值普遍偏低，其数值普遍低于40 VU，显示该时段输沙能力较弱。其中，最大月输沙势出现在5月，其输沙势数值为70.19 VU，合成输沙势数值为55.20 VU，合成输沙方向以“西南（SW）”方向为主。5月风玫瑰图显示，大于12 m/s的高风速在东北（NE）方向占据主导，比例达15.3%，这是使得该月输沙势达到峰值的直接原因。4—8月期间，各月风向变率（RDP/DP）介于0.73～0.91，其中5月风向变率值为0.79，表明风能虽高但有一定分散性，而7—8月比值升至0.91以上，显示风向高度集中特点。从8月开始，输沙势数值开始逐渐降低并一直持续到12月，其输沙势逐渐降低到最低值，12月输沙势数值最低为27.57 VU，合成输沙势仅为26.42 VU，合成输沙方向仍以“西南（SW）”方向为主。在风向变率指数（RDP/DP）方面，多个月份的数值普遍在0.8以上，但3月时其数值最低为0.73，显示该时间段的风向较多变。

格库铁路台特玛湖路段的年输沙势（DP）为534.26 VU（≥400 VU），属于高等风能环境，显示出高浓度风沙流的特点，年风向变率指数（RDP/DP）为0.88，属于大比率，显示该地区风向较为稳定单一（图4）。年合成输沙势为471.42 VU（≥400 VU），研究区的潜在输沙能力较强。研究区的年合成输沙方向为240.42°，因此，研究区的主导风向是东北风，主导输沙方向以东北方向为主，由于该方向集中了大于12 m/s的高速风事件，平均频率高达4.2次/月，最终使得该方向贡献了全年输沙势的76.3%。研究区次主导输沙方向为东南方向，该输沙方向主要是以8～12 m/s风速为主，该方向贡献了全年输沙势的12.8%。

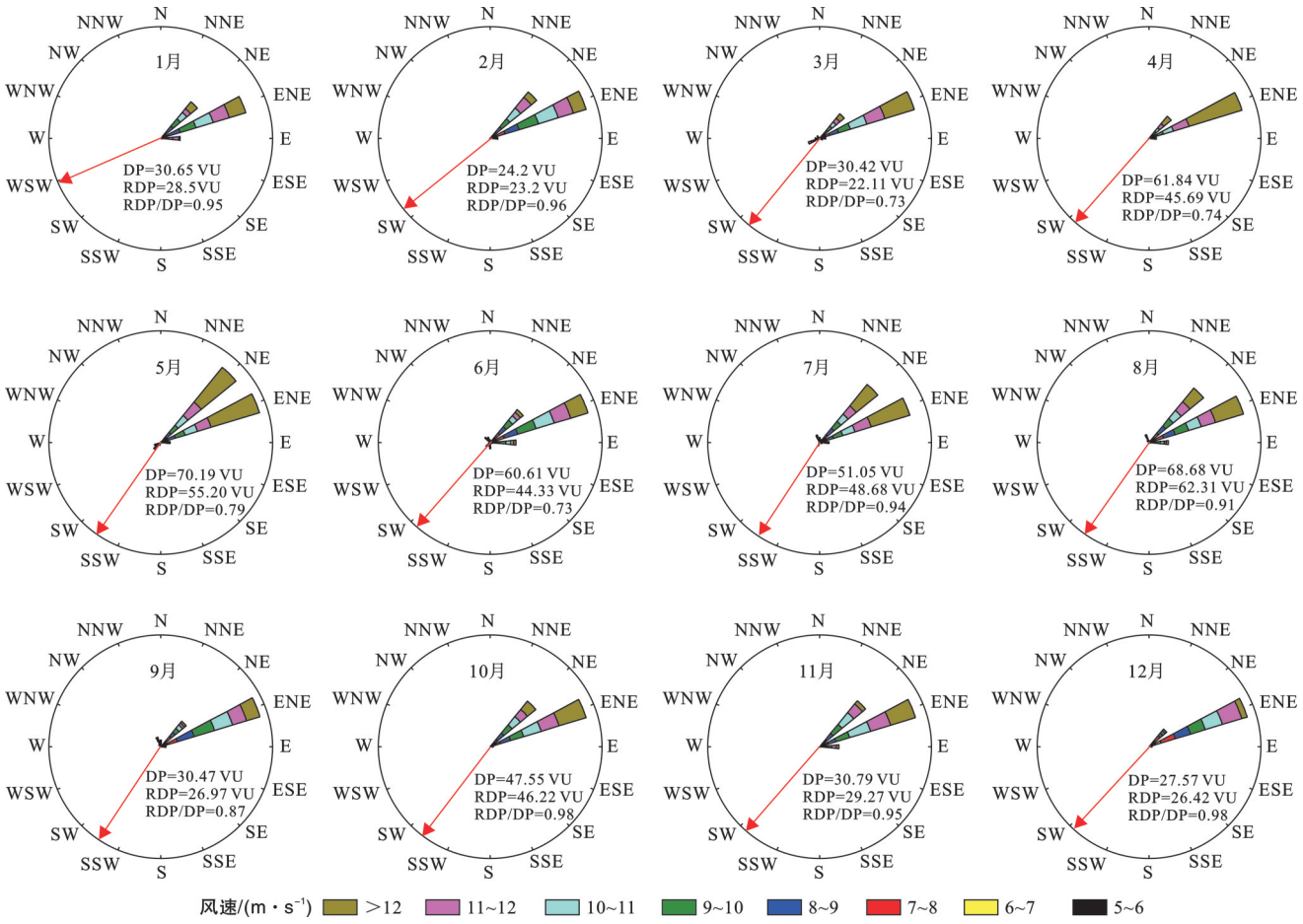


图 3　格库铁路台特玛湖路段月输沙势分布

Fig.3　Distribution of monthly sand drift potential at Taitema Lake section of Ge'ermu-Ku'erle railway

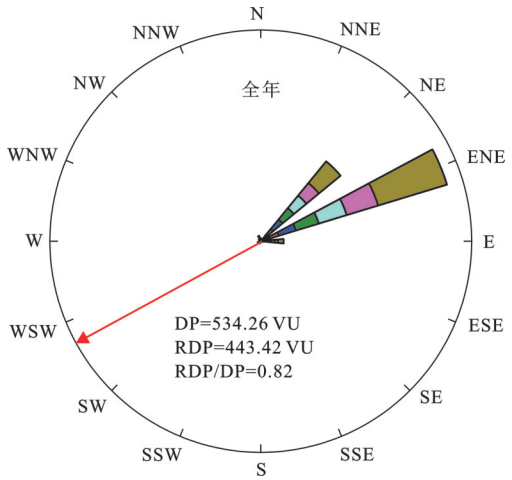


图 4　格库铁路台特玛湖路段年输沙势分布图

Fig.4　Annual sand drift potential distribution at Taitema Lake section of Ge'ermu-Ku'erle railway

1.3　输沙量

该路段毗邻库姆塔格沙漠且多为流动性沙丘,沙源极为丰富。根据研究区布设的八方位积沙仪所获取的积沙数据显示,台特玛湖路段主要沙物质来源主要是以“东北(NE)”方向为主,经换算该方向的年单宽输沙率高达 729.3 kg/m。综上所述,研究区沙物质是以“东北(NE)-西南(SW)”方向运移为主,该路段的风沙防护工程可主要针对“东北(NE)”方向进行布设。

1.4　数值模拟

1.4.1　理论基础

风沙流在自然界中较为常见,其产生过程较为随机、偶然,属于一种特殊形态的流体。虽然它看似是风,但又跟风存在一定的区别,规律性较弱。但是,其仍是属于自然界的一部分,同样遵循物理学的三大基本定律,即质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律。根据这三大基本物理学定律,就可以建立起相应的数学模型对风沙流这种气固两相流进行分析[27-30]。在风沙两相流中,风是属于气流,沙粒属于固体颗粒流,将两者分别假设为连续性介质进行方程求解。同时,风沙两相流又具有湍流的特点,所以建立的连续性方程也需要满足湍流输运原理[31]。

(1)质量守恒方程。对于不可压缩的流体流动,密度为常数,表达式为

$$\frac{\partial(\alpha_i\rho_i)}{\partial_t}\nabla\left(\alpha_i\rho_i\vec{v}\right)=0 \tag{2}$$

式中：$i=1$时代表气相；$i=2$时代表固相；α_i为i相的体积分数，且$\alpha_1+\alpha_2=1$；ρ_i为i相的密度；$\vec{v}$为i相的速度；∇为算子。

（2）动量守恒方程气相表达式为

$$\frac{\partial(\alpha_1\rho_1\vec{v_1})}{\partial_t}+\nabla\cdot(\alpha_1\rho_1\vec{v_1}\vec{v_1})=-\alpha_1\nabla_p+\nabla\cdot\vec{\vec{\tau_1}}+\alpha_1\rho_1\vec{g}+k_{12}(\vec{v_1}-\vec{v_2}) \tag{3}$$

固相表达式为

$$\frac{\partial(\alpha_2\rho_2\vec{v_2})}{\partial_t}+\nabla\cdot(\alpha_2\rho_2\vec{v_2}\vec{v_2})=-\alpha_2\nabla_p-\nabla_{p_2}+\nabla\cdot\vec{\vec{\tau_2}}+\alpha_1\rho_1\vec{g}+k_{12}(\vec{v_1}-\vec{v_2}) \tag{4}$$

式中：p为气相和固相的共享压力；p_2为固相的压力；$\vec{\vec{\tau_1}}$和$\vec{\vec{\tau_2}}$分别为气相、固相的应力-应变张量；$\vec{g}$为重力加速度；k_{12}，k_{21}分别为气相、固相的动量变换系数，且$k_{12}=k_{21}$。

本文使用“标准k-ε湍流模型”，由于沙粒相体积分数较小，因此气体相的湍流运动在风沙流中占主导作用，假设湍流完全发展，且不考虑源相的影响。

（3）湍流动能方程为

$$\rho\frac{Dk}{Dt}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_i}\right]+G_k+G_b-\rho\varepsilon \tag{5}$$

（4）湍流耗散率ε方程为

$$\rho\frac{D\varepsilon}{Dt}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\delta\varepsilon}{\delta x_j}\right]+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k+G_{3\varepsilon}G_b)-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{6}$$

式中：$\mu=\mu_t+\mu_l$；$\mu_t=\rho C_u\frac{k^2}{\varepsilon}$。其中：$G_k$为由层流速度梯度而产生的湍流动能；$G_b$为由浮力产生的湍流动能；$\mu$为有效黏性系数；$\mu_l$为层流黏性系数；$\mu_t$是湍流黏性系数；$C_{1\varepsilon}$，$C_{2\varepsilon}$，$C_{3\varepsilon}$，$\sigma_k$，$\sigma_\varepsilon$为经验常数；$C_u$为湍流常数。

1.4.2 数值模拟步骤

CFD数值模拟方法主要包括“前处理、计算、后处理”共3个步骤（图5）。前处理使用Fluent2020 R2自带的Design Modeler及Mesh模块进行几何建模及网格划分，数值计算过程采用Fluent 2020 R2软件自带的求解器，后处理使用Tecplot 360软件。

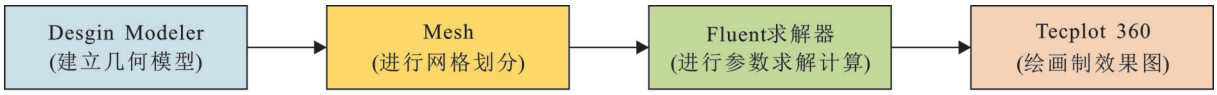


图5 风沙运动数值模拟步骤

Fig.5 Flowchart of numerical simulation of aeolian sand movement

1.4.3 模型建立与网格划分

根据沙区铁路桥实际形式，经合理简化建立三维铁路桥数值模型。铁路桥三维数值模型的基本参数如图6所示。经过试算，流体域取长×宽×高为150 m×120 m×30 m，保证湍流的充分发展。桥梁模型设置在距离入口50 m、距离出口150 m处，桥底净空高度（H）为5 m。靠近底部壁面设置以1.2的比率递增的5层边界层网格。利用Mesh模块自动划分网格，网格划分类型采用四边形网格和三角形网格混合的形式（Quad/Tri），划分方法采用Pave法，即将区域划分为“非结构性网格”。计算域内网格最大尺寸为0.2 m，总共生成约150万个网格单元。空间离散化都采用“二阶迎风格式”，时间步长选择0.1 s[32]。

为验证数值模拟的可靠性，选定X方向75 m处断面风速进行验证，并比较点1（75，5，50），点2（75，15，50），点3（75，25，50）三点处的风速。选取100，150万和300万用于网格独立性验证；选取0.05，0.1和0.2 s用于时间步长独立性验证。由图7可知，随着网格数量增加，三点风速值变化甚微，表明网格数量对计算结果影响较小，不同时间步长下风速值也基本保持稳定。综合考虑计算精度与计算周期，最终采用150万网格点与0.1 s时间步长进行计算。地面和桥梁区域网格进行局部加密，相对密集，其余区域网格较为稀疏。平均网格质量约为0.85。平均网格纵横比与平均正交质量系数均大于0.85且接近1，表明网格质量优良。

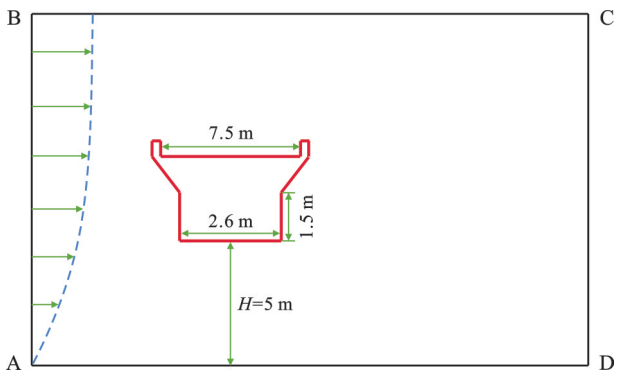


图6 铁路桥及流体域示意图

Fig.6 Schematic diagram of railway bridge and fluid domain

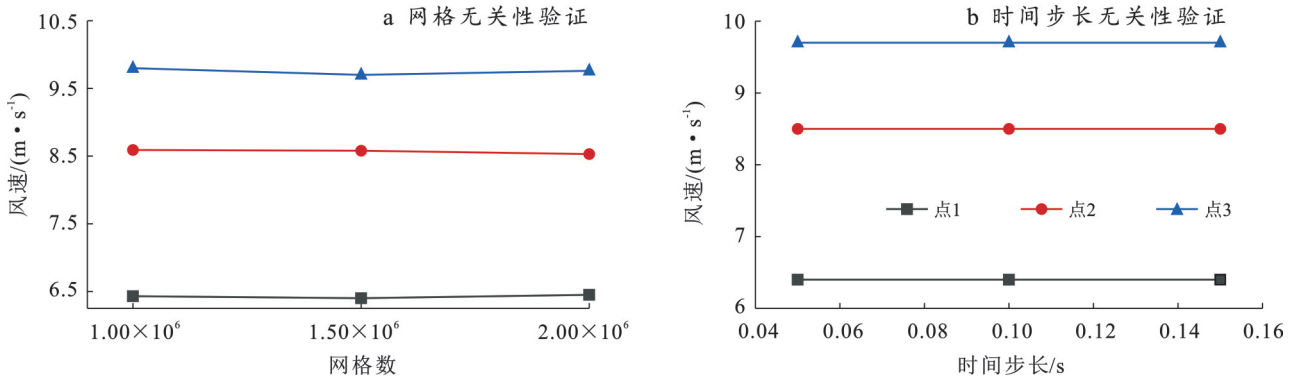


图 7　网格无关性和时间步长无关性检验

Fig.7　Grid independence and time-step independence test

1.4.4　模型参数设置

本次风沙流数值模拟借助“欧拉双流体模型”进行模拟分析,同时附加“标准 k-ε 湍流模型”(k 为湍流动能;ε 为湍流耗散率)方程,忽略湍流方程、气体可压缩性以及温度的影响,流场求解采用了 Phase Coupled SIMPLE 算法。数值模型物性参数设置如下[37]:空气密度(ρ_g)为 1.225 kg/m^3;砂粒密度(ρ_s)为 2 650 kg/m^3;沙粒粒径集中分布在 0.05~0.25 mm,本文取 0.1 mm;由于研究区属于高风能环境,风沙流密度较大,因此沙粒相体积分数(α)设定为 0.05。数值模型流体域边界条件设置如下:流场进口设定为速度入口(velocity-inlet)、流场出口设定为自由出流口(out-flow)、流体域顶部设定为对称边界(symmetry)、地面设定为无滑移边界(wall)[33]。流场进口处风速采用 UDF 函数自定义编写风速廓线:

$$V=\frac{u^*}{k}\ln\frac{Z}{Z_0} \tag{6}$$

式中:u^* 为摩阻风速(m/s),结合前人研究结果取值为 0.35 m/s[34];k 为卡曼常数(为 0.4);Z 为任意高度(m)。

1.4.5　数值模拟与野外实测对比

首先,结合前人研究结果[35],台特玛湖干涸湖盆地表颗粒物粒度组成以极细沙、粉沙为主。其中,极细沙含量最高,占总颗粒物的 45.54%,其次为粉沙,占总颗粒物的 36.08%,其余大粒径沙粒无分布。台特玛湖湖区的风沙活动以风沙流为主,在风沙输移运动过程中,最主要的输沙形式是跃移(通常占 75%~80%)。

跃移颗粒的粒径范围相对集中,0.1~0.2 mm 的沙粒最容易发生跃移,并且在风沙流中质量比例和能量比例最高。鉴于此,本文设置的沙粒粒径统一采用 0.1 mm 符合野外沙粒分布实际情况。其次,根据野外实测梯度风速分布数据,本次数值模拟采用 9 m/s 来流风速,对应于野外实测中起沙风频率较高的风速区间(5~10 m/s)。

通过将数值模拟中入口处对数律风速廓线与野外实测梯度风速数据进行对比分析,两者的风速数值与变化趋势基本一致(图 8),确保本次数值模拟入口边界条件设置的真实性。

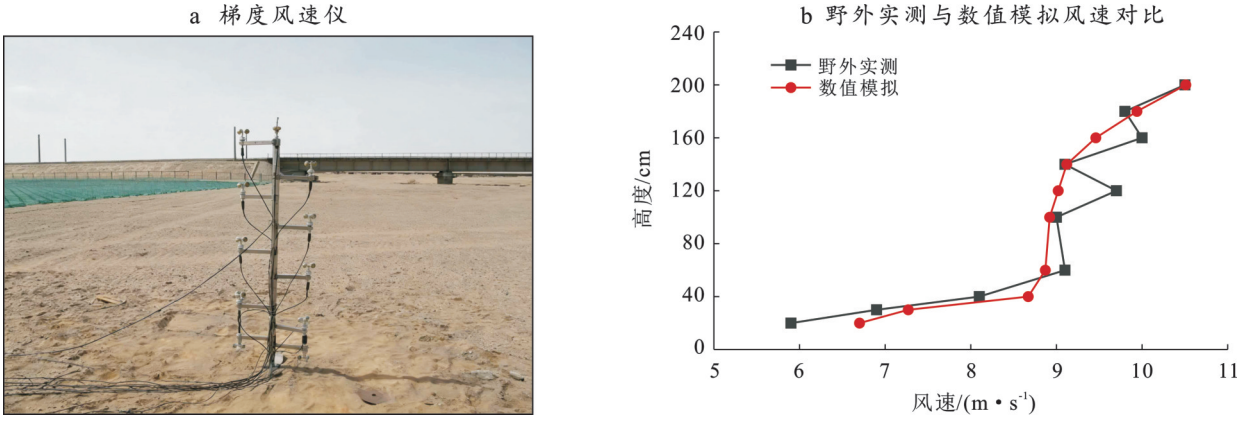


图 8　梯度风速仪及梯度风速分布对比

Fig.8　Comparison of gradient anemometer and gradient wind speed distribution

2 结果与分析

铁路桥平曲线半径的选择与铁路等级息息相关(表 2),格库铁路是一条国铁Ⅰ级客货共线电气化铁路,根据《铁路线路设计规范(TB 10098—2010)》,本文结合铁路桥梁正常情况最小曲线半径设计值,依次选取 3 种类型的铁路桥曲线半径(R=200,400,600 m)进行铁路桥曲线半径的数值模拟,并针对不同曲线半径的铁路桥周围流场与桥面积沙分布特点进行分析。

表 2 客货共线Ⅰ,Ⅱ级铁路区间线路最小曲线半径

Table 2 Minimum curve radius of passenger-freight shared railway sections of class Ⅰ and class Ⅱ

项 目	铁路等级				
	Ⅰ			Ⅱ	
路段设计行车速度/(km·h^{-1})	160	120	80	120	80
一般地段最小曲线半径R_{min}/m	2 000	1 200	500	1 000	450
特殊困难地段最小曲线半径R_{min}/m	1 600	800	450	800	400

2.1 桥梁周围流场分区

由图 9 可知(以来流风速 9 m/s 为例),风沙流途经铁路桥时,速度发生显著变化,气流速度形成不同分区,在桥梁迎风侧形成减速区、桥肩及桥底净空区域形成加速区;在贴近桥梁表面形成低速区,在距桥面一定高度处形成风速高速区;桥梁背风侧由多个涡旋流组成紊流区,且受涡旋中下沉气流的影响,紊流区内存在速度突增区,增加了风沙上轨的风险。由于铁路桥表面存在低速区,增加了铁路桥表面存在积沙的可能性。

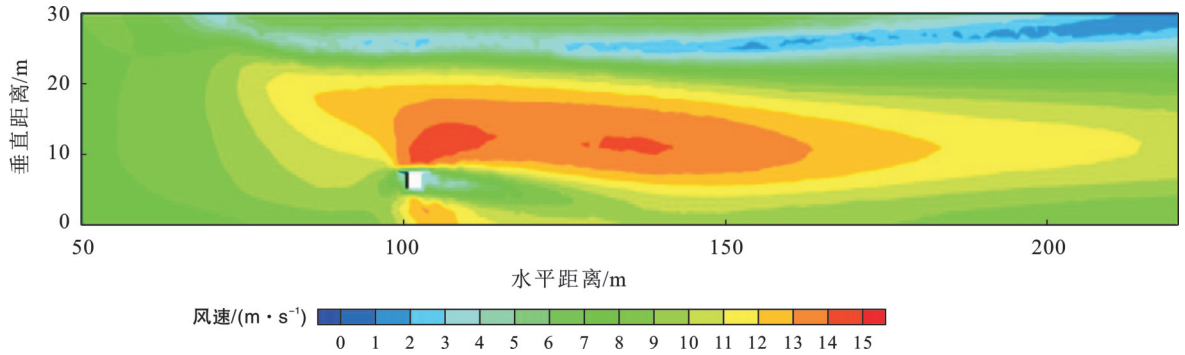


图 9 桥梁周围流场分布

Fig.9 Flow field distribution around bridge

2.2 铁路桥凹凸面周围流场变化

不同平曲线半径铁路桥梁周围的流场分区基本相同,但范围存在差异。本文选取铁路桥平曲线半径(R)为 400 m 时凹凸面作为铁路桥迎风侧时的周围流场与原始桥梁流场分区进行对比分析,三者显示出相同的风速流场分区即风速减速区、加速区、高速区、紊流区和风速恢复区,说明桥梁周围流场分区受平曲线大小和桥梁凹凸面的影响较小。通过对图 10 做进一步的对比分析可以发现,当凸侧为桥梁的迎风侧时,桥梁中间区域的风速线分布较为密集,而桥梁前后两边的风速线较稀疏,说明此时桥梁中间区域风速较大,具有向两侧导流的作用(图 10a);当凹侧为桥梁的迎风侧时,桥梁中间区域风速与两边风速差异较小,桥梁表面导流作用较弱(图 10b),桥梁表面汇聚风沙作用增强,桥面更易出现风沙上桥现象。

3 讨 论

3.1 铁路桥平曲线半径对积沙分布的影响

本文将原直线型铁路桥梁表面积沙与选取的平曲线半径(R)为 200,400,600 m 时桥梁表面积沙情况进行对比分析(红色代表积沙区域),对比结果详见图 11。

随着铁路桥平曲线半径数值的增大即桥梁曲率变小,桥梁表面中部区域风速与桥梁两侧(桥头、桥尾)区域风速差异逐渐减小,桥梁表面整体风速分布变得较为均衡,桥梁表面积沙可能性减小的同时积沙分布也变得相对均匀。桥梁表面积沙量随铁路桥平曲线半径增大呈现出逐渐减小的趋势,说明铁路桥平曲线半径对桥梁表面积沙存在一定的影响。

这一现象也进一步表明,较大的平曲线半径桥

梁表面积沙量更少,桥梁中部区域降低携沙风能力相对偏弱,这样会更有利于增强桥梁表面输沙能力。当桥梁整体为直线时,桥梁表面整体输沙能力最大。

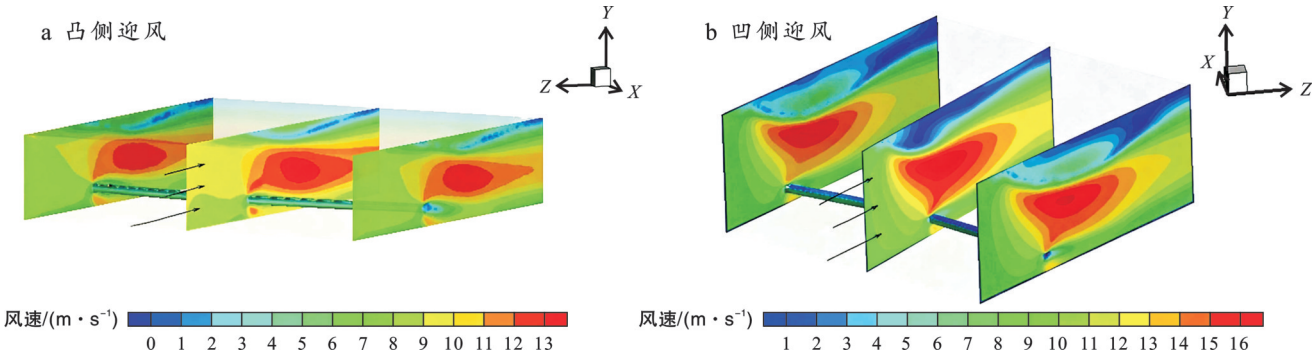


图 10　不同迎风形式下桥梁周围风速流场分布(*R*=400 m)

Fig.10　Wind speed and flow field distribution around bridges under different windward configurations (*R*=400 m)

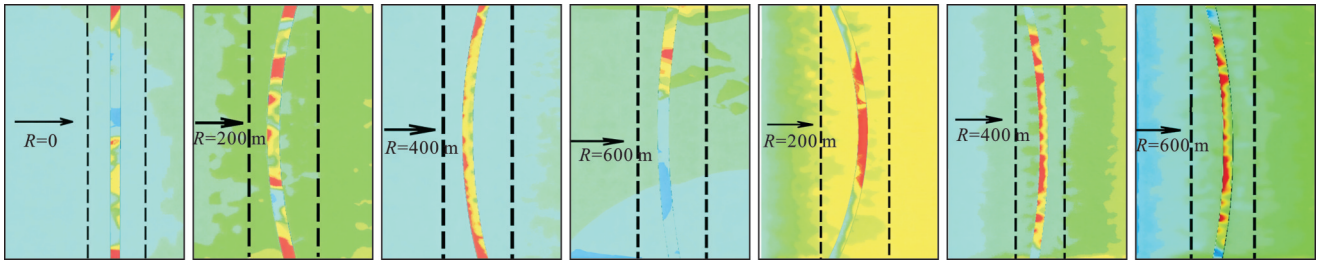


图 11　不同平曲线半径条件下桥梁表面积沙分布

Fig.11　Sand accumulation distribution on bridge surface with different horizontal curve radii

3.2　铁路桥凹凸面迎风对积沙分布的影响

相同来流风速作用于铁路桥的凹面和凸面时,桥梁表面的积沙特性存在明显差异。结合桥梁不同位置(桥头、桥中、桥尾)的风速和输沙量数值模拟结果,当桥梁的凹面处于迎风侧时,桥梁中部区域风速减小程度较明显,使得铁路桥中间位置的低风速区域明显变大,桥梁中部区域风速明显小于桥头和桥尾区域风速值(图 12a),导致大量沙粒更易在桥梁表面的中部区域发生堆积,桥梁表面中部区域对于周围沙粒表现出一定的聚集作用,数值模拟结果显示此时桥梁中部区域输沙量仅为 0.015 g/s;当桥梁的凸面处于迎风侧时,铁路桥中间位置的风速最大(图 12a),桥梁表面的低速区范围相对较小,桥梁对于桥面周围积沙具有一定导流疏浚作用,即大量沙粒更易向铁路桥的桥头和桥尾处发生运移,使得桥梁中部区域不易产生积沙。由于桥梁表面中部区域风速值的增大,也使得桥梁表面中部区域的输沙量增加到 0.019 g/s,桥梁中部区域的输沙能力进一步增强;整体来看,桥梁凸侧迎风面不同位置的输沙量普遍大于凹侧迎风面输沙量(图 12b)。

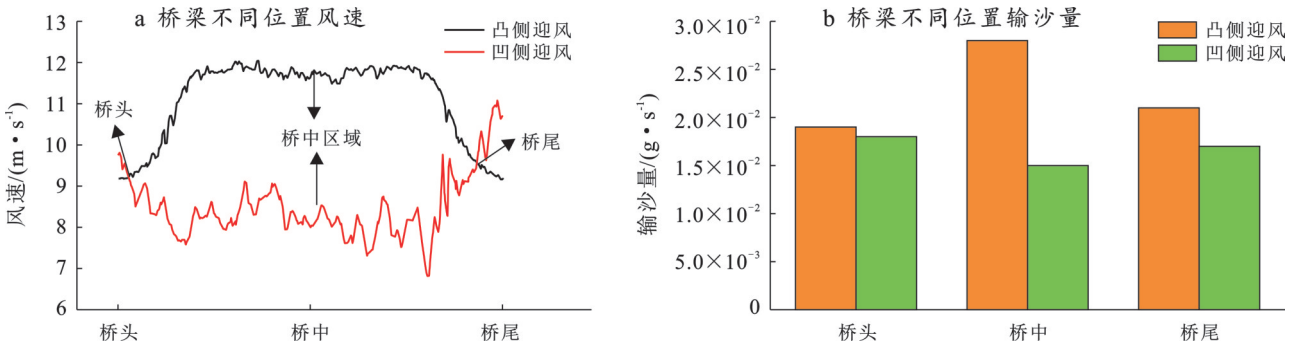


图 12　桥梁不同位置风速和输沙量

Fig.12　Wind speeds and sand transport rates at different locations on bridge

4 结 论

（1）铁路桥周围流场呈现稳定的功能分区结构，包括迎风侧减速区、桥底架空加速区和背风侧涡流区。该分区模式在不同平曲线半径条件下保持一致，但其空间分布范围受到来流风速与桥面曲率的共同影响。

（2）铁路桥平曲线半径是影响桥面积沙分布的关键参数。随着铁路桥平曲线半径数值增大，桥面曲率减小，风速分布更均匀，桥面整体输沙能力增强，积沙量与积沙集中程度均显著降低。

（3）桥梁迎风面的几何形态是控制风沙流分布的关键因素。当采用凸面迎风设计时，桥面中部风速提升，形成有效的沙粒导流作用，显著减少桥面中部区域积沙；而凹面迎风设计则导致桥面中部风速降低，产生风沙汇聚效应，显著增加积沙风险。

（4）在设计沙区铁路桥时建议优先采取较大平曲线半径，并结合当地主导风向，将桥梁凸面布设为迎风侧。这一设计方式能够有效增强桥梁表面输沙能力，减弱桥面积沙可能性，对提升沙区铁路桥风沙输移能力有一定的参考价值。

参考文献（References）

[1] Mehdipour R, Baniamerian Z. A new approach in reducing sand deposition on railway tracks to improve transportation [J]. Aeolian Research, 2019,41:100537.

[2] 李驰，高瑜，黄浩.沙漠公路风蚀破坏规律的数值模拟研究[J].岩土力学，2011,32(S1):642-647.
Li Chi, Gao Yu, Huang Hao. Numerical simulation of wind erosion damage rules for desert highway [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011,32(S1):642-647.

[3] 李良英，石龙，蒋富强，等.青藏铁路巴索曲特大桥沙害形成原因分析[J].铁道学报，2016,38(12):111-117.
Li Liangying, Shi Long, Jiang Fuqiang, et al. Analysis of formation causes of sand disasters on Basuoqu bridge of Qinghai-Tibet railway [J]. Journal of the China Railway Society, 2016,38(12):111-117.

[4] 李强.单一正交来风条件下路基对风沙流场响应的实验研究及数值模拟[D].甘肃 兰州：兰州交通大学，2018.
Li Qiang. The experimental research and numerical simulation of response between subgrade of highway and wind sand flow in single orthogonal wind conditions [D]. Lanzhou, Gansu: Lanzhou Jiaotong University, 2018.

[5] 刘金苗，李菊艳，尹忠东，等.干枯骆驼刺对风沙流场影响的数值模拟研究[J].干旱区研究，2022,39(5):1514-1525.
Liu Jinmiao, Li Juyan, Yin Zhongdong, et al. Numerical simulation study on the influence of dry *Alhagi camelorum* on the wind-sand flow field [J]. Arid Zone Research, 2022,39(5):1514-1525.

[6] 倪晋仁，李振山.风沙两相流理论及其应用[M].北京：科学出版社，2006.
Ni Jinren, Li Zhenshan. Theory and application of wind-sand two-phase flow [M]. Beijing: Science Press, 2006.

[7] 屈建军，黄宁，拓万全，等.戈壁风沙流结构特性及其意义[J].地球科学进展，2005,20(1):19-23.
Qu Jianjun, Huang Ning, Ta Wanquan, et al. Structural characteristics of gobi sand-drift and its significance [J]. Advance in Earth Science, 2005,20(1):19-23.

[8] 师景瑞，石龙.风沙地区低净空桥梁下部流场结构及积沙特征分析[J].铁道标准设计，2022,66(9):111-115.
Shi Jingrui, Shi Long. Analysis on flow field structure and sand accumulation characteristics under low clearance bridges in windblown sand area [J]. Railway Standard Design, 2022,66(9):111-115.

[9] 石龙，蒋富强，韩峰.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.
Shi Long, Jiang Fuqiang, Han Feng. 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.

[10] 孙兴林，张宇清，张举涛，等.青藏铁路路基对风沙运动规律影响的数值模拟[J].林业科学，2018,54(7):73-83.
Sun Xinglin, Zhang Yuqing, Zhang Jutao, et al. Numerical simulation on the influence of subgrade of Qinghai-Tibet railway on wind-sand movement [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2018,54(7):73-83.

[11] Dong Zhibao, Liu Xiaoping, Wang Hongtao, et al. The flux profile of a blowing sand cloud: A wind tunnel investigation [J]. Geomorphology, 2003,49(3/4):219-230.

[12] 王奭，崔晓宁，梁柯鑫.格库铁路青海段沙害成因及防沙措施[J].铁道建筑，2019,59(7):97-101.
Wang Shi, Cui Xiaoning, Liang Kexin. Causes of sand damage and its control measures in Qinghai section of Golmud-Korla railway [J]. Railway Engineering, 2019, 59(7):97-101.

[13] 武建军，罗生虎，闫光虎，等.脉动风场下风沙流结构的数值模拟[J].中国沙漠，2011,31(3):602-606.
Wu Jianjun, Luo Shenghu, Yan Guanghu, et al. Numerical simulation on windblown sand cloud in the fluctuating wind field [J]. Journal of Desert Research, 2011,31(3):602-606.

[14] 谢虎雄，马发跃，武生智.风沙环境中公路风沙灾害的数值模拟[J].中国沙漠，2019,39(2):151-157.
Xie Huxiong, Ma Fayue, Wu Shengzhi. Numerical simulation of sand transport around the highway in

sandy desert area [J]. Journal of Desert Research, 2019,39(2):151-157.

[15] 谢胜波,屈建军,刘冰,等.青藏铁路沙害及其防治研究进展[J].中国沙漠,2014,34(1):42-48.
Xie Shengbo, Qu Jianjun, Liu Bing, et al. Advances in research on the sand hazards and its controls along the Qinghai-Tibet railway [J]. Journal of Desert Research, 2014,34(1):42-48.

[16] 薛承杰,张克存,安志山,等.铁路高架桥对局地风动力的影响:以敦格铁路沙山沟为例[J].干旱区研究,2023,40(10):1678-1686.
Xue Chengjie, Zhang Kecun, An Zhishan, et al. Influences of railway viaducts on local wind power: A case study of the Shashangou Bridge used by the Dunge Railway [J]. Arid Zone Research, 2023, 40(10): 1678-1686.

[17] 鱼燕萍,肖建华,屈建军,等.不同坡角公路路基流场的风洞实验[J].中国沙漠,2018,38(3):464-472.
Yu Yanping, Xiao Jianhua, Qu Jianjun, et al. Wind tunnel test on flow field of highway subgrade with different slope angles [J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(3):464-472.

[18] 岳高伟,蔺海晓,贾慧娜.风沙运动中沙粒旋转角速度变化规律的数值模拟[J].河南理工大学学报(自然科学版),2011,30(5):600-607.
Yue Gaowei, Lin Haixiao, Jia Huina. Numerical simulation of variation of sands angular speed in wind-blown sand movement [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2011,30(5):600-607.

[19] 张军平,王引生,蒋富强.兰新铁路戈壁地区路基周围风沙流运动特征数值分析[J].中国铁道科学,2011,32(4):14-18.
Zhang Junping, Wang Yinsheng, Jiang Fuqiang. Numerical analysis on the features of sand flow movement around the embankment of Lan-Xin railway in gobi Region [J]. China Railway Science, 2011,32(4): 14-18.

[20] 张凯,赵沛雯,张兴鑫,等.风速廓线形式对HDPE板高立式沙障风沙流场的差异性研究[J].铁道学报,2020,42(9):143-149.
Zhang Kai, Zhao Peiwen, Zhang Xingxin, et al. Study on difference of wind-sand flow field of HDPE board high vertical sand fence by wind velocity profile [J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(9): 143-149.

[21] Raffaele L, Bruno L, Pellerey F, et al. Windblown sand saltation: A statistical approach to fluid threshold shear velocity [J]. Aeolian Research, 2016,23:79-91.

[22] 张克存,牛清河,屈建军,等.青藏铁路沱沱河路段风沙危害特征及其动力环境分析[J].中国沙漠,2010,30(5):1006-1011.
Zhang Kecun, Niu Qinghe, Qu Jianjun, et al. Wind-blown hazard and its dynamic environment in Tuotuohe region along Qinghai-Tibet railway [J]. Journal of Desert Research, 2010,30(5):1006-1011.

[23] 李丙文,张洪江,邱永志,等.咸水灌溉对塔里木沙漠公路防护林植物生长的影响[J].干旱区地理,2011,34(2):215-221.
Li Bingwen, Zhang Hongjiang, Qiu Yongzhi, et al. Effects of saline water irrigation on plants growth of the Tarim Desert Highway shelter-belt [J]. Arid Land Geography, 2011,34(2):215-221.

[24] 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,2010,27(2):303-308.
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 Zone Research, 2010,27(2):303-308.

[25] Fryberger S G, Dean G. Dune forms and wind regime [A] //Mckee E D. A study of global sand seas [C]. Washington DC: U.S.Geological Survey, 1979.

[26] 张伟民,谭立海,张克存,等.不同砾石覆盖度床面蚀积过程的野外风洞实验研究[J].地理科学,2012,32(11):1370-1376.
Zhang Weimin, Tan Lihai, Zhang Kecun, et al. Field wind tunnel simulation of the process of aeolian erosion and deposition of gravel beds with different coverage [J]. Geographical Science, 2012,32(11):1370-1376.

[27] 周倩,江艳冰,谭立海,等.格库铁路台特玛湖干涸湖盆段风沙环境特征[J].中国沙漠,2025,45(2):102-110.
Zhou Qian, Jiang Yanbing, Tan Lihai, et al. Characteristics of aeolian environment in the Taitema Lake dry lake-basin section of the Golmud-Korla railway [J]. Journal of Desert Research, 2025,45(2):102-110.

[28] 张亚宾,刘文晓.风沙流对青藏铁路路基影响的研究[J].中国建材科技,2017,26(3):88-89.
Zhang Yabin, Liu Wenxiao. Study on the influence of wind-blown sand on Qinghai-Tibet railway subgrade [J]. China Building Materials Science & Technology, 2017,26(3):88-89.

[29] Zhang Hua, Zhang Yili, Wang Zhaofeng, et al. Heavy metal enrichment in the soil along the Delhi-Ulan section of the Qinghai-Tibet railway in China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, 185(7): 5435-5447.

[30] 安志山,张克存,谭立海,等.三维激光扫描仪在风沙观

测中的应用[J].测绘科学,2017,42(10):196-200.
An Zhishan, Zhang Kecun, Tan Lihai, et al. Application of 3D laser scanner in the sand drift observation [J]. Science of Surveying and Mapping, 2017, 42(10): 196-200.

[31] 陈忠灿,王京学,杨长乐,等.林带断面形状及布置形式对防护林带防风效应影响的大涡模拟[J].应用生态学报,2024,35(7):1877-1886.
Chen Zhongcan, Wang Jingxue, Yang Changle, et al. Effects of cross-sectional shapes and arrangement patterns on windbreak effects of shelterbelts by large eddy simulation [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024,35(7):1877-1886.

[32] 张克存,屈建军,鱼燕萍,等.中国铁路风沙防治的研究进展[J].地球科学进展,2019,34(6):573-583.
Zhang Kecun, Qu Jianjun, Yu Yanping, et al. Progress of research on wind-blown sand prevention and control of railways in China [J]. Advances in Earth Science, 2019,34(6):573-583.

[33] 丁录胜,程建军,陈柏羽,等.铁路高立式芦苇沙障防风阻沙的现场测试与流场模拟计算[J].水土保持通报,2019,39(3):156-162.
Ding Lusheng, Cheng Jianjun, Chen Boyu, et al. Field test and numerical simulation of windbreak and sand-resisting on high-parallel reed sand-barriers along railway [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019,39(3):156-162.

[34] 张凯,杨子江,王起才,等.格库铁路HDPE板沙障孔隙率与有效防护距离关系[J].中国铁道科学,2019,40(5):16-21.
Zhang Kai, Yang Zijiang, Wang Qicai, et al. Relationship between porosity and effective protection distance of HDPE board sand barrier on Golmud: Korla railway [J]. China Railway Science, 2019,40(5):16-21.

[35] 杨旭.格库铁路台特玛湖区段风沙流特征及工程设置[J].铁道工程学报,2017,34(10):25-29.
Yang Xu. The wind-sand flow characteristics and engineering installation of the section of taitema lake on Golmud-Korla railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017,34(10):25-29.

(上接第159页)

[26] 刘怡然,安奉钧.典型相关分析与结构方程模型方法的比较研究[J].统计与决策,2024,40(10):40-45.
Liu Yiran, An Fengjun. A comparative study of canonical correlation analysis and structural equation modeling [J]. Statistics and Decision, 2024,40(10):40-45.

[27] 冀正欣,许月卿,黄安,等.冀北山区"三生"空间识别与演化特征分析:以张家口市为例[J].北京大学学报(自然科学版),2022,58(1):123-134.
Ji Zhengxin, Xu Yueqing, Huang An, et al. Spatial pattern and evolution characteristics of the production-living ecological space in the mountainous area of northern Hebei Province: A case study of Zhangjiakou City [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2022,58(1):123-134.

[28] 马寅秋,李佳慧,曹巍,等.京津冀地区退耕还林还草碳增汇潜力及贡献预估[J].地理学报,2024,79(3):732-746.
Ma Yinqiu, Li Jiahui, Cao Wei, et al. Projecting the carbon sink potential and contribution of Grain for Green Program in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Acta Geographica Sinica, 2024,79(3):732-746.

[29] 朱琳娜,赵牡丹,李云绯,等.西安都市圈生态系统服务价值与人类活动强度的时空关系[J].生态与农村环境学报,2024,40(3):325-334.
Zhu Linna, Zhao Mudan, Li Yunfei, et al. The space-time relationship between the ecosystem service value and the human activity intensity in Xi'an metropolitan area [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2024,40(3):325-334.

[30] Doetterl S, Berhe A A, Heckman K, et al. A landscape-scale view of soil organic matter dynamics [J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2025,6(1):67-81.