

张克存,潘加朋,安志山,等.戈壁地表风沙动力过程及道路工程沙害防治研究进展[J].中国沙漠,2025,45(3):39-49.

# 戈壁地表风沙动力过程及道路工程 沙害防治研究进展

张克存<sup>1</sup>, 潘加朋<sup>1,2</sup>, 安志山<sup>1</sup>, 谢胜波<sup>1</sup>, 薛承杰<sup>1,2</sup>, 王军战<sup>1</sup>

(1.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/干旱区生态安全与可持续发展全国重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2.中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 戈壁是干旱区典型荒漠景观,也是沙区道路工程沿线的主要地表类型。受下垫面性质、地表物质组成和沙源储量的影响,戈壁地区风沙动力机制及道路工程沙害防治侧重点不同。针对砾质戈壁与沙砾质戈壁,深入探究了近地表风动力环境与风沙输移过程的差异,围绕道路工程沿线的2种戈壁沙害特点、形成机理以及防护体系构建及其效益评价等,系统总结了戈壁地区道路工程沙害防治研究进展,梳理了戈壁地区道路工程主要防沙措施及其应用情景。沙砾质地表为隐性潜在沙源,兼具沙、砾和粉沙夹层分布的特点,加强沙砾质地表风沙过程研究有助于保障西部戈壁地区道路工程行车安全和提升交通运输能力。

**关键词:** 戈壁; 地表类型; 风沙动力过程; 防沙工程; 效益评价

**文章编号:** 1000-694X(2025)03-039-11

**DOI:** 10.7522/j.issn.1000-694X.2025.00032

**中图分类号:** X43

**文献标志码:** A

## 0 引言

戈壁指地面较平坦、组成物质粗疏、气候干旱且植被稀少的地区,地表一般覆盖有砾石或碎石<sup>[1-3]</sup>。中国戈壁面积达66.1万 km<sup>2</sup>,约占国土面积的6.9%,连片分布在新疆东部、河西走廊西北部及阿拉善高原<sup>[4]</sup>。戈壁平坦稳定的优势使其成为工程建设、交通线路、清洁能源等的优先选址对象。但戈壁地区风速大、沙粒弹跳高、高空携沙气流强、风沙致灾距离长、影响范围大,较普通沙区更具危害性<sup>[5-9]</sup>。为有效解决戈壁地区风沙问题,近年来诸多学者针对风沙环境、防护工程等进行了深入研究并取得了显著成果<sup>[10-11]</sup>。然而,受自然环境、交通和通信条件的影响,戈壁地区长时序风沙传输资料仍相对匮乏,现有戈壁风沙理论体系不够完善,近地表风沙动力过程及致灾机理尚未理清。此外,戈壁环境复杂多样,砾质地表及沙砾质地表均有广泛分布,深刻影响着区域沙源特征<sup>[12]</sup>。前者沙源稳定、分布集中;后者沙源稳定性较差,对道路工程、城镇和基础设施等造成的沙害更复杂,其风沙防治措施

选择、体系配置和空间布局难度较大<sup>[13]</sup>。

随着中国“一带一路”倡议的稳步推进,构建西部道路工程网络体系已成为推动区域协调发展与促进国际合作交流的关键之举<sup>[14]</sup>。为保障沙区重要节点城市的互联互通,部分线路不得不延伸至沙漠或戈壁地区,大大增加了筑路的难度,对道路工程风沙防治提出了切实需求<sup>[15-17]</sup>。近年来,中国西部戈壁地区新建与在建的交通干线面临严重的风沙危害<sup>[18]</sup>。道路工程的介入将导致局地风场的改变,影响风沙流在路基两侧的迁移与沉积过程,产生风蚀或积沙危害,威胁行车安全(图1)<sup>[10,13]</sup>。本文针对戈壁地区道路工程沿线地表类型的差异,从风动力环境、风沙输移过程、沙害特点、风沙防护体系与效益评估等方面,系统总结戈壁地表风沙动力过程及道路工程沙害防治研究进展,提出未来戈壁地区风沙研究重点及道路工程沙害防治关键。论文结果有助于理解不同戈壁地表的风沙活动特点与动力机制,提升道路工程沿线风沙防护体系的适宜性与针对性,完善沙区道路工程风沙防治理论体

收稿日期:2025-03-07; 改回日期:2025-03-27

资助项目:国家自然科学基金项目(42171083);甘肃省自然科学基金项目(23JRRA601)

作者简介:张克存(1978—),男,甘肃民勤人,研究员,主要从事风沙灾害与防沙工程研究。E-mail: kecunzh@lzb.ac.cn



图1 戈壁地区道路沙害

Fig.1 Sand hazards on road in gobi regions

系,为类似地区道路工程风沙防治方案制定与防护措施选择提供科学依据。

## 1 两种典型戈壁地表形成条件与风沙输移过程

风是导致沙粒起动的动力来源,风沙动力过程是直观反映区域风沙活动强度、评估风沙灾害的重要依据<sup>[19-20]</sup>。因地貌演化过程差异,戈壁的风沙动力过程在物源属性、形成环境、动力机制和空间格局等方面与沙漠有着明显不同<sup>[21-23]</sup>。此外,地表类型差异导致不同戈壁的地表沉积物所受的外营力作用不尽相同,致使其风沙动力过程更为复杂<sup>[24-25]</sup>。

### 1.1 砾质与沙砾质地表形成条件

戈壁地表平坦、干旱缺水、植被稀疏,且大都由砾石覆盖。戈壁分类主要遵循外部营力、物质组成和景观特征。砾质戈壁与沙砾质戈壁的区别在于其形成条件及地表覆盖物不同,加之受地域环境、岩性和地形等因素的影响,二者存在显著差异(图2)<sup>[26-27]</sup>。

砾质地表主要分布在干旱、半干旱区的山前地带及内陆盆地边缘,其成因包括山地侵蚀造成的岩屑冲积与坡积及历史地质时期风力、流水对砾石的搬运、侵蚀,导致地表主体组成物质较粗<sup>[26,28]</sup>。这些砾石对近地表风沙活动有一定抑制作用,使其结构相对稳定,能在一定程度上抵御风力侵蚀<sup>[13,28]</sup>。但因其所处区域大都为大风区,仍会对区域内道路造成严重的风沙威胁。因此,对于砾质地表,道路工程的防治以增强地表稳定性与降风消能为主,譬如设置防风栅栏。

沙砾质地表多分布在地势平坦开阔的平原或

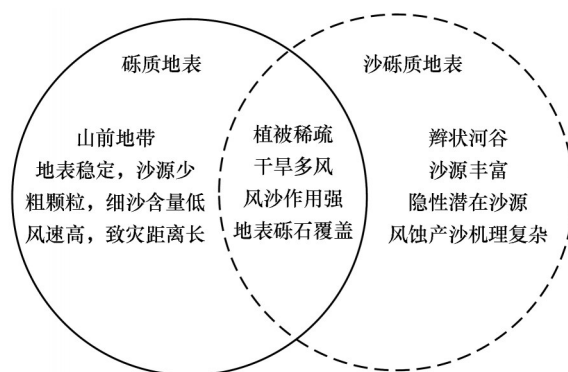


图2 典型戈壁地表风沙环境对比

Fig.2 Particularity of aeolian environment in gobi regions

冲洪积扇,尤其在辫状河谷更为发育,其物质组成与地形条件、流水作用、沉积环境及冲积物的搬运距离密切相关<sup>[29-32]</sup>。沙砾质地表覆盖的砾石磨圆度较好,间杂细颗粒冲洪积物,地表以下由沙、砾和粉沙等组分夹层分布<sup>[1]</sup>。与砾质地表相比,沙砾质地表稳定性较差,其地表一旦被破坏,砾石覆盖层下的沙物质就会释放继而导致扬沙或沙尘天气,加剧局地风沙过程甚至引发次生沙害<sup>[33]</sup>。特别在道路修建过程中,地表的破坏加之局地风场的改变将对沙砾质地表的风沙过程造成深刻影响。相较于砾质地表,沙砾质地表风沙活动持续时间延长、累积效应明显、致灾机制更复杂,其道路工程的沙害防治除了防风措施外,固沙和阻沙措施也至关重要。

### 1.2 近地表沙粒起动机制与输移过程

近地表沙粒起动机制与输移过程是揭示戈壁风沙动力机制的关键。近年来,许多学者在砾质戈壁沙粒起动机制、风沙输移过程以及阻力系数等方面取得了重要成果(表1)<sup>[34-43]</sup>,阐明了戈壁砾质地表的风沙动力学特征<sup>[44-45]</sup>,构建了输沙模型<sup>[46]</sup>。成果

表1 戈壁风沙起动及输移过程关键参数及其定量化表征

| Table 1 Key parameters and quantitative characterization of sand initiation and transport processes in gobi regions |   |                                   |                                    |      |
|---|---|-----------------------------------|------------------------------------|------|
| 名称  | 公式  | 提出者(提出年份)                         | 应用范围                               | 编号   |
| 起沙风速  | $u = 5.75A \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho}} g d \lg \frac{Z}{Z_0}$       | Bagnold (1941) <sup>[34]</sup>    | 表征能使戈壁地表松散沙粒起动的最低风速                | (1)  |
| 风沙流结构特征值  | $\lambda = \frac{Q_{2-10}}{Q_{0-2}}$                                      | Wu 等 (1965) <sup>[35]</sup>       | 评估戈壁地区沙与砾石表面上的风沙流输送状态              | (2)  |
| 粗糙元   | $R_s = \left( \frac{\tau_s}{\tau_R} \right) \left( \frac{S_s}{S} \right)$ | Gillette 等 (1989) <sup>[36]</sup> | 确定位于戈壁砾石间的可蚀表面所承受的动量通量分量           | (3)  |
| 阻力系数  | $\ln C_d = a + b/C^{0.5}$   | Dong 等 (2002) <sup>[37]</sup>     | 不同自由来流风速下戈壁砾石与阻力系数的关系              | (4)  |
| 沙粒起动剪切风速  | $R_t = \frac{1}{(1 - m\sigma\lambda)^{0.5} (1 + m\beta\lambda)^{0.5}}$    | Raupach 等 (1993) <sup>[38]</sup>  | 评估戈壁砾石对地表的保护作用                     | (5)  |
| 比值  | $R_t = \frac{u_{*tS}}{u_{*tR}}$   | Tan 等 (2019) <sup>[39]</sup>      |                                    | (6)  |
| 输沙率   | $Q = C \sqrt{\frac{d}{D}} \frac{\rho}{g} u_*^3$                           | Bagnold (1941) <sup>[34]</sup>    | 评估戈壁地区的输沙能力,侧重于相对平坦开阔的戈壁地形且有一定松散沙源 | (7)  |
|   | $Q = K_4 \frac{\rho_s}{g} (u_* - u_{*t}) (u_* + u_{*t})^2$                | Kawamura (1951) <sup>[40]</sup>   |                                    | (8)  |
|   | $Q = C e^{\beta(v \cdot u)}$  | 尹永顺 (1989) <sup>[41]</sup>        |                                    | (9)  |
| 输沙通量垂直分布方程  | $q = \left( \frac{b}{z + a} \right)^{1/n}$                                | Zingg (1953) <sup>[42]</sup>      | 评估戈壁地区的输沙能力,侧重于相对均一的戈壁地貌且沙源有一定的流动性 | (10) |
|   | $q = a + b \exp \left[ -0.5 \left( \frac{h - c}{d} \right)^2 \right]$     | Dong 等 (2004) <sup>[43]</sup>     |                                    | (11) |
|   | $q = k_1 \exp \left( -\frac{h}{k_2} \right)$                              |                                   |                                    | (12) |

注:式(1)中, $u$ 为高度为 $z$ 处的风速( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), $A$ 为经验系数, $\rho_s$ 为沙粒密度( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), $\rho$ 为空气密度( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), $g$ 为重力加速度( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ), $d$ 为沙粒粒径( $\text{m}$ ), $z_0$ 为地表粗糙度( $\text{m}$ );式(2)中, $\lambda$ 为特征值, $Q_{2-10}$ 与 $Q_{0-2}$ 分别为距地面2~10 cm与0~2 cm高度气流层内搬运的沙量;式(3)中, $R_s$ 为粗糙元, $\tau_s$ 与 $\tau_R$ 分别为砾石与裸露表面的剪应力(Pa), $S_s$ 为砾石之间的表面积( $\text{m}^2$ ), $S$ 为实验区域面积( $\text{m}^2$ );式(4)中, $C_d$ 为阻力系数, $a$ 、 $b$ 为回归系数, $C$ 为砾石覆盖率(%);式(5)中, $R_t$ 为沙粒起动剪切风速比值, $m$ 为经验常数, $\sigma$ 为不可蚀粗糙元底面积与迎风面积的比值, $\lambda$ 为不可蚀粗糙元密度( $\text{个}\cdot\text{m}^{-3}$ ), $\beta$ 为作用在单个不可蚀粗糙元的阻力系数与原始床面的比值;式(6)中, $R_t$ 为沙粒起动剪切风速比值, $u_{*tS}$ 为裸露地表沙砾起动临界摩阻风速( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), $u_{*tR}$ 为戈壁层临界摩阻风速( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ );式(7)中, $Q$ 为输沙率( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ), $C=1.5$ 、 $C=1.8$ 、 $C=2.8$ 分别为均匀沙、天然混合沙和粒径分布较广的沙的经验系数, $d$ 与 $D$ 分别为所研究的沙与0.25 mm标准沙的粒径( $\text{m}$ ), $g$ 为重力加速度( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ), $u_*$ 为摩阻风速( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ );式(8)中, $Q$ 为输沙率( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ), $K_4$ 为实验确定的常数, $\rho_s$ 为沙粒密度( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), $g$ 为重力加速度( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ), $u_*$ 与 $u_{*t}$ 分别为摩阻风速与起动摩阻风速( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ );式(9)中, $Q$ 为输沙率( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ), $C$ 为沙阻系数,决定于地区沙源丰富程度、地表粗糙度, $\beta$ 为指数系数, $v$ 与 $u$ 分别表示实际风速与起沙风速( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ );式(10)中, $q$ 为输沙通量( $\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), $z$ 为高度( $\text{m}$ ), $b$ 为随沙粒粒径和剪切力而变化的常数, $n$ 为指数, $a$ 为参考高度( $\text{m}$ );式(11)中, $q$ 为输沙通量( $\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), $h$ 为高度( $\text{m}$ ), $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 均为回归系数;式(12)中, $q$ 为输沙通量( $\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), $h$ 为高度( $\text{m}$ ), $k_1$ 与 $k_2$ 均为回归系数。

包括:①通过野外实地考察并借助高分辨率遥感影像,阐明了戈壁形成条件、沉积环境、物源属性和植被特征等,构建了戈壁分类体系和标准,为后续风沙动力过程的系统研究奠定基础<sup>[47-49]</sup>;②借助风洞实验、高速摄影与数值模拟,阐明了砾质地表沙粒运动轨迹与能量分布特征,建立了阻力系数、摩阻速度与砾石粒径、覆盖度之间关系,初步揭示了戈壁近地表风沙动力学机制<sup>[37, 50-51]</sup>;③针对戈壁地表

属性和风动力环境的地域差异,基于摩阻起动风速和地表粗糙度,揭示了典型戈壁沙尘释放机制,明确提出沙砾属性是影响其风蚀产沙过程的关键<sup>[52-54]</sup>。

相较于砾质地表,沙砾质地表风蚀产沙过程及动力机制更具特殊性<sup>[46]</sup>,近年来研究成果包括:①基于粒度分析,揭示了沙砾质地表沉积物组分的搬运过程及成因,验证了风沙过程对地表组分的分



选作用具有重要指示意义<sup>[55]</sup>;②在风洞中设计了各类扰动方式,阐明了沙砾质地表近地表风蚀量与扰动强度的内在机理,指出小砾石的作用使得近地表气流内沙粒更粗<sup>[33]</sup>;③利用气-固两相流模型进行数值模拟,发现了沙砾质地表沙粒碰撞及风沙互馈机理,明确了沙砾质地表砾石盖度对沙尘释放影响的阈值为40%<sup>[56]</sup>。以上研究主要针对沙粒释放、输移及沉积过程,为进一步阐明沙砾质地表的风沙动力过程奠定了理论依据和数据支持。但现有研究仍缺乏野外系统监测,风沙起动与输移相关模型与公式相对缺乏,难以揭示沙砾质地表风蚀产沙过程与传输机制。

## 2 戈壁地区道路工程沙害特点及形成机理

风沙危害严重威胁沙区道路安全,风蚀与沙埋是造成道路沙害最常见的两种形式<sup>[57-59]</sup>。随着中国沙区交通体系日臻完善,穿越戈壁地区道路里程逐年增加(表2),沿线风沙危害日益加剧,严重制约交通运输能力发挥与行车安全<sup>[60]</sup>。与流沙地表相比,戈壁地表同样表现为生态环境脆弱、降水稀少、植被匮乏、风力强劲、沙源丰富多变等特点,但其道路风沙致灾机理与防治更复杂。一是,戈壁地区强风携带沙砾会对铁路道床和路基造成风蚀打磨,毁坏铁路动力设施和弓网系统,从而影响通视条件并制约线路效能发挥<sup>[61]</sup>,还会导致公路路面、路基及附属设施风蚀或沙埋,严重影响公路的行车安全;二是,在复杂风况环境和沙源丰富地段,风沙流途经铁路时遇阻堆积,甚至沙埋路基、道床或轨道,易造

成列车侧翻脱轨的潜在威胁,也会导致大量沙粒堆积在公路上,严重时甚至导致交通中断。

### 2.1 砾质地表

道路工程沙害形成机理是风沙防治措施选择与综合防护体系的构建的基础。近年来,针对砾质地表道路工程沙害时空分布、致灾机理与风沙防治等,研究成果包括:①通过实地调查分析与现场测试,发现砾质地表铁路沙害以大风和风沙/砾流为主,揭示了铁路沙害形成机制<sup>[62-64]</sup>,确定了路基沙害形式,包括路堑积沙与路基积沙,前者积沙主要分布在背风侧,后者积沙程度取决于坡度及路堑深度<sup>[65]</sup>;②基于野外观测,发现地形起伏是导致砾质地表细颗粒迎风面跃移、悬移,在背风面下落沉积的主要原因,阐明了戈壁地区公路沙害形成机理<sup>[58,66]</sup>;借助风洞模拟实验,分析了路基高度、路堑深度及路基边坡坡率对流场的影响,从微观上理清了公路沙害影响因素及防治准则<sup>[58]</sup>;③运用FLU-ENT软件,对公路、铁路路基周围风沙流场、路堤边坡稳定性等进行数值模拟分析,解决了野外观测与风洞实验所存在的局限性,为精细化研究戈壁地区复杂工况及环境下的沙害形成机理研究奠定基础<sup>[9]</sup>。

### 2.2 沙砾质地表

与砾质地表相比,沙砾质地表道路工程沿线风沙过程研究相对较少。主要成果有:①基于风洞模拟实验,通过设置不同类型公路路基断面模型,发现不饱和风沙流是路基风沙危害的主要原因,路基边坡则为重点防护对象;②利用粒子图像测速系统(Particle Image Velocimetry),对公路路基模型的流场变化进行研究,揭示了沙砾质地表造成风沙危害的根本原因<sup>[67]</sup>;③通过野外观测,发现沙砾质地表在稳定情况下不易起沙,造成道路沙害根源来自地表扰动或二次沙源<sup>[13]</sup>;④利用三维超声风速仪等,分析了道路工程沿线风沙防护体系的防风阻沙效率和地表沉积物属性,为今后深入揭示沙害形成机理和科学制定风沙防治模式提供数据支撑<sup>[68]</sup>。

## 3 戈壁地区道路工程风沙防护体系及效益评价

戈壁地区砂砾岩风化或与底层沙粒的活化产

表2 部分穿越戈壁地区的道路工程

Table 2 Representative road engineering projects traversing the gobi regions

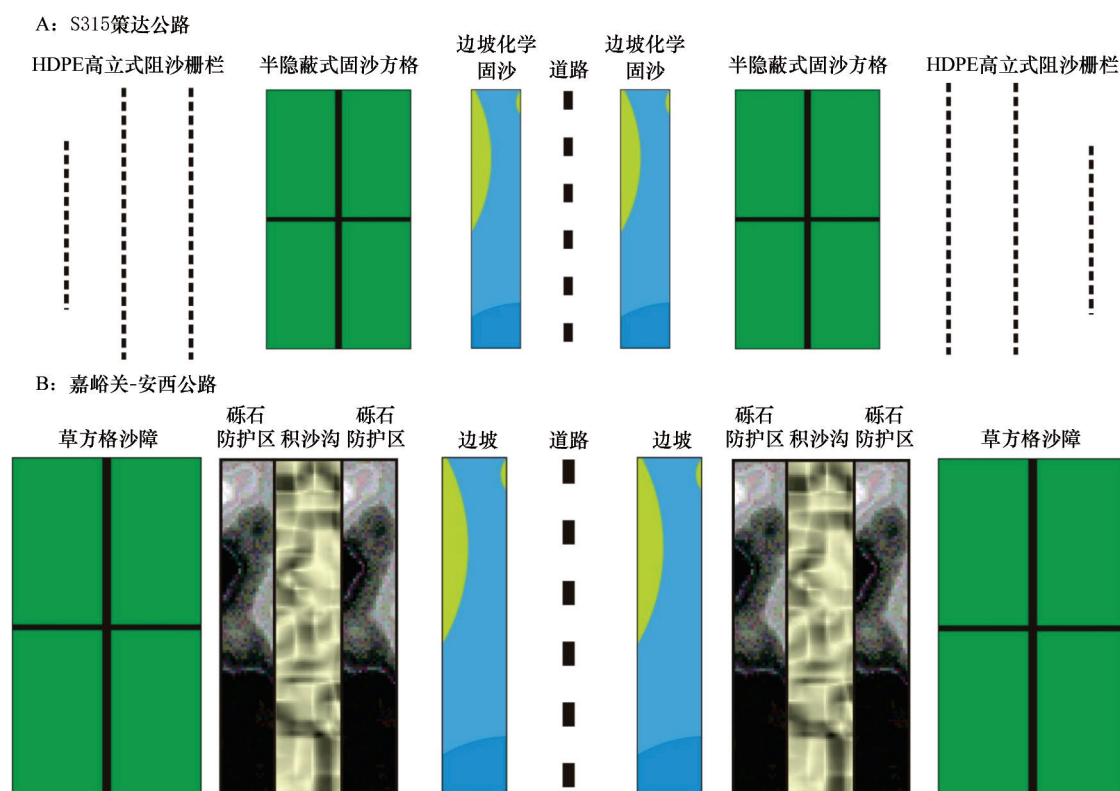
| 区间      | 地表类型   | 长度       | 道路类型  | 通车时间  |
|---------|--------|----------|-------|-------|
| 大草滩-玉门  | 砾质     | 130 km   | 国铁I级  | 1962年 |
| 镜铁山-烟墩  | 砾质、沙砾质 | 400 km   | 国铁I级  | 1962年 |
| 西宁-格尔木  | 沙砾质    | 816.5 km | 国铁I级  | 1984年 |
| 库尔勒-喀什  | 砾质、沙砾质 | 1075 km  | 国铁I级  | 1999年 |
| 嘉峪关-安西  | 沙砾质    | 235 km   | 一级公路  | 2006年 |
| 临河-策克   | 砾质     | 707 km   | 国铁II级 | 2010年 |
| 额济纳旗-哈密 | 砾质、沙砾质 | 629.9 km | 国铁I级  | 2015年 |
| 酒泉-额济纳旗 | 砾质、沙砾质 | 395 km   | 国铁II级 | 2021年 |

生风沙/砾流,形成舌状或片状积沙,成为道路沙害的潜在源区<sup>[69]</sup>,对交通运输及行车安全产生了严重影响。同时,道路工程建设将改变区域微地形,导致局地风场发生改变,致使沙砾在路基、边坡和涵洞处堆积,大大缩短了道路的使用寿命<sup>[63,70]</sup>。此外,公路与铁路由于其自身结构的差异风沙防治的侧重点不同。公路路面平坦,对过境风沙流场扰动相对较小,风沙防治以路面输导为主;而铁路有道床、轨道、道砟等,风沙防治除了考虑路基边坡积沙外,还需防止道床积沙和轨道沙埋。为解决上述问题,根据不同戈壁地表的风沙环境及致灾机理,针对不同道路具体情况,设置了一系列道路沙害防治工程并获得了良好的防护效益。

### 3.1 途经砾质地表的道路工程

大风与风沙流是造成砾质地表道路工程沙害的主要原因,现有的防沙工程多以降低风速、阻截沙源和疏导过境风沙流为设计方针进行道路工程沙害防治。建立了以“外阻内固”为核心的防护体系,能有效减少道路积沙量,降低道路养护成本<sup>[71]</sup>

(图3A)。但由于道路沿线风沙环境与自然条件各不相同,相应的防护体系也会有所差异:在特大风区,逐级设置了金属阻沙栅栏,除了降低风速的作用外,更着重于防止沙砾破坏栅栏而导致防护体系失效;当道路附近有季节性干河床时,在河岸阶地设置栅栏阻截枯水期河床沙粒向河岸输送,利用丰水期将沉积的沙粒向下游输移<sup>[10]</sup>;在水土条件较好路段可采用植物措施,设置灌木林带、乔灌混交林带或乔木林带,并通过机井沟灌或地下滴灌的方式确保林带成活<sup>[72]</sup>;前沿阻沙带也会随道路所处环境与主导风向适当地调整防沙材料类型和结构功能,和田-若羌铁路戈壁盐碱区设置高立式“Z”字形阻沙沙障、连霍高速百里风区采用柔性防风阻沙栅栏<sup>[73-74]</sup>。在道路沿线设置风沙防护体系后,近地表风速降低、输沙量减少,沙粒粒径变小,防护效益显著<sup>[10,75]</sup>。道路工程两侧的防风林带在滴灌条件下植被覆盖度明显增加,提高了防护体系中植被的固阻沙能力。同时,也改变了原有植物群落组分、改善了区域小气候,使沙区道路工程周边生态环境和生态效益得到了明显提升<sup>[72]</sup>。



注:各防护带间宽度及间隔因公路所受沙害空间分异而不同,故在此不标明具体宽度,仅展示防沙工程设计方式

图3 戈壁地表道路沙害防治工程示意图

Fig.3 Diagram of sand damage prevention and control engineering for gobi surface roads



### 3.2 途经沙砾质地表的道路工程

不同于砾质地表,沙砾质地表多为隐性潜在沙源并呈间歇式分布。道路修建对地表风蚀面的破坏,致使砾石底层可蚀性沙粒释放,造成风沙危害<sup>[13]</sup>。沙砾质地表常伴有干涸湖盆、河床、半固定沙丘等,为风沙灾害发育提供了丰富的沙源,对道路工程造成更复杂的沙害、风沙防治难度也大大增加<sup>[76-77]</sup>。沙砾质地表道路工程风沙防治主要包括:以高立式大网格沙障与平面PE(Polythene)固沙网沙障相结合的立面防治体系,以实现长效的固沙能力及对多风向来沙进行阻遏<sup>[76]</sup>;建立阻-固-输相结合的机械-植物复合防沙体系,其中植物选取高抗逆沙生植物<sup>[77]</sup>;利用栅栏阻滞外来沙源,在栅栏与路基间设置网格固定流沙,采用包坡及护道方式防止风蚀,并在重度沙害路段设置多道栅栏<sup>[78]</sup>;在道路外侧通过草方格沙障、砾石压沙对沙源进行覆盖,并在砾石防护区设置积沙沟,促使沙物质沉积、减弱对道路的风蚀(图3B)<sup>[67]</sup>。相较于砾石地表,沙砾质地表沙源丰富,对道路工程固沙和阻沙要求更高。这些防护体系使得沙砾对道路的风蚀明显降低,道心、路肩、边坡等关键位置积沙量大幅降低,

道路涵洞无积沙堵塞。固沙带内的植物成活率明显提高,区域环境改善显著,实现了可持续发展,表现出良好的防护功能及生态效益,为沙砾质地表风沙防护工程建设提供了范式。

## 4 戈壁地区道路工程主要防沙措施和应用情景

### 4.1 以阻截沙源为主的前沿阻沙栅栏

沙区道路工程风沙防治主要有固、阻、输、导四大措施<sup>[79]</sup>。其中,阻沙栅栏改变局部流场,促使风沙流中的沙砾在栅栏后沉积,抑制风沙对道路的破坏<sup>[80-81]</sup>。经过多年防沙实践,阻沙栅栏已成为戈壁地表道路工程风沙防治重要组成,一般平行设置在道路两侧的前沿阻沙带,能对主风向的沙源进行有效拦截<sup>[81]</sup>。对阻沙栅栏的高度、孔隙度、间距等几何参数进行了详尽研究,并评估了不同形式阻沙栅栏的防护效益,发现阻沙栅栏的形态及材料很大程度上取决于地域环境特征<sup>[82-85]</sup>(图4)。戈壁地表风力强劲、沙源丰富多变且紫外线强度高,在沙漠地区广泛应用的阻沙栅栏在大风与强紫外线条件下容易失效,并不适合直接推广应用。

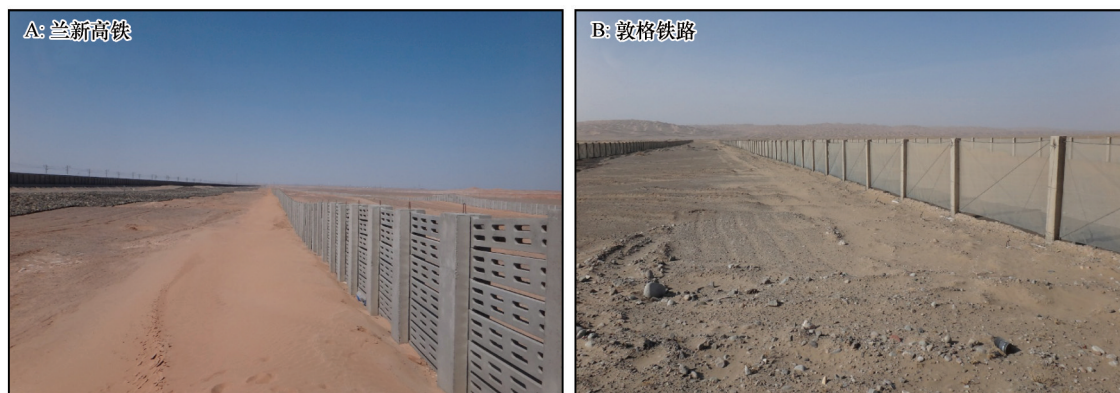


图4 戈壁地区道路沿线阻沙栅栏

Fig.4 Sand-blocking fences along the roads in gobi regions

为解决上述问题,基于道路沿线的戈壁地表类型,设计并布设了不同类型的阻沙栅栏。针对具有典型戈壁砾质地表的兰新高铁特大风区,湍流强、沙砾弹跳高,设计并布设了编织网及冲孔板金属栅栏<sup>[10,86]</sup>。该类栅栏不仅能有效防止沙砾起动对栅栏的破坏,同时能有效降低风速、阻遏风沙流的运移过程,并在栅栏后形成了明显的减速区,起到了显著的防护效益。但当道路沿线为沙砾质

地表时,其风力相较于砾质地表较小,故栅栏所受风压小,可摒弃金属材料,采用更经济的阻沙材料。在南疆地区,盛产芦苇且价格低廉,同时具有环保耐老化的特点。将芦苇用镀锌铁丝扎排而成芦苇栅栏,将其布设于格库铁路新疆段的米兰戈壁区<sup>[87]</sup>。芦苇在经过捆扎成把后防风能力大大提升,风沙经栅栏后的沙砾粒级明显降低,有效削弱了铁路沙害。

## 4.2 以降风消能为主的挡风墙

途经戈壁地区的道路工程沿线风力强劲,部分道路工程走向甚至与主风向垂直,加之附近分布有大量沙源,严重威胁交通安全。为保障大风地区道路工程交通安全,常采用的防沙措施是挡风墙<sup>[69,88]</sup>。现有研究从多种挡风墙的流场特征、涡流长度、积沙形态等进行了详尽分析,主要成果包括:①挡风墙高度和风速是影响涡流区长度的主要因素,呈正相关关系;②挡风墙的积沙主要集中在墙角及涡流尾部<sup>[89]</sup>;③对拉式挡风墙背风侧存在明显的涡流特征,而大风流经土堤式挡风墙背风侧流场变化极小<sup>[90]</sup>。这些结果为挡风墙的选择提供了理论依据和参考,使其能因地制宜地布设于戈壁地区道路工程两侧。

目前,根据戈壁地区沙源状况及自然环境特

点,挡风墙已被广泛应用于道路工程风沙防护体系中(图5)。①直插板式挡沙墙:平行道路设置在防护区最外侧,立柱及板均采用C35钢筋混凝土为材料,垂直于地面布设,以确保有效阻遏来流风<sup>[82]</sup>;②对拉式挡风墙:截面为矩形,气流会在其背风侧形成一个包裹车辆的大涡流区,从而保证交通安全,通常用C20钢筋混凝土进行现浇;③土堤式挡风墙:布设于路基较低、地势起伏不大的地表,其结构简单、稳定性较好,但背风侧气流分离严重,会使车辆迎风面受到较大的正压力,一般采用C15钢筋混凝土制造板面<sup>[90-91]</sup>。基于野外观测及数值模拟研究发现,挡沙墙减小了车辆行驶所受的风压、降低了其倾覆的风险,减弱风沙对道路的危害<sup>[91]</sup>。但在实际工况中,仍需在详尽的现场调查后进行适当补强,并定期进行维护,防止挡沙墙倾斜倒塌而失去防沙功效。

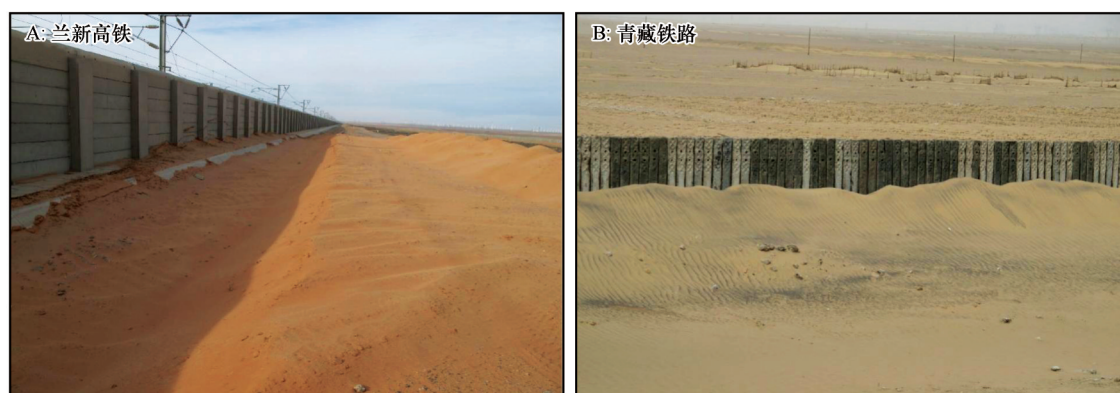


图5 戈壁地区道路沿线挡风墙

Fig.5 Wind-blocking walls along the roads in gobi regions

## 5 戈壁地表风沙动力过程及道路沙害防治研究趋势

综上所述,对于不同地表类型的戈壁,其风动力过程及道路工程防治体系均存在显著差异,仍需在以往研究的基础上进一步深入与完善。首先,砾质与沙砾质地表沙砾起动与传输机制存在显著差异,沙砾组分及其空间分布将进一步影响近地表风沙输移过程,风与沙/砾间协同传输机制和级联耦合对道路工程致灾机理迥然不同。当前研究并未明晰风沙运动与不同地表相互作用机制,在一些关键过程上仍存在较大争议。其次,受地区风沙环境和监测手段等影响,缺乏2种戈壁地表高精度、高时间分辨率的实验数据,致使两者间沙害差异及形

成机制研究并不深入,导致现有防护工程措施缺乏针对性、区域内的道路工程仍面临潜在沙害威胁。此外,当前对沙砾质地表风沙动力过程研究相对较少,对其风蚀产沙机制和道路沙害防治存在不足:①从道路风沙防治措施与技术来看,戈壁道路风沙防治措施多参照传统流沙地区的防治经验,但二者沙源状况和地表属性有显著差异,沙害形成机制与防治措施不尽相同,盲目借鉴将导致风沙体系缺乏针对性、防护措施失当,极大地影响防护效益和年限;②从道路沙害形成机制来看,过去多基于道路沿线风动力环境和沙源状况,侧重道路沙害特征及时空分布研究,而对道路外围下垫面属性与隐性潜在沙源考虑相对不足,缺乏道路沙害形成机理的深入研究;③从道路沙害防护距离来看,以往多围绕



路基两侧及有限距离内,忽视了道路外围潜在沙源、微地形和风动力环境的空间差异,尤其是在间歇性沙源和复杂风况条件下近地表风沙蚀积和输移过程尚不清楚,导致对戈壁道路沿线沙害预判不准,最终影响道路风沙防治体系的科学配置。为解决上述问题,应加强沙砾质地表风沙动力过程与沙害形成机理研究。以沙砾质地表风蚀产沙机制为切入点,考虑复杂风况和间歇性沙源条件,

研究沙砾质地表道路沿线风能环境时空变化及近地表空气动力学特征,对比分析不同下垫面近地表风速廓线、剪切速度和动力学粗糙度在路基两侧的沿程分布与梯度变化,系统监测道路工程沿线沙砾释放、输移和沉积过程,揭示沙害形成机理,构建道路工程风沙灾害防治模式和综合体系,为道路工程风沙防治提供理论依据与技术支持(图6)。

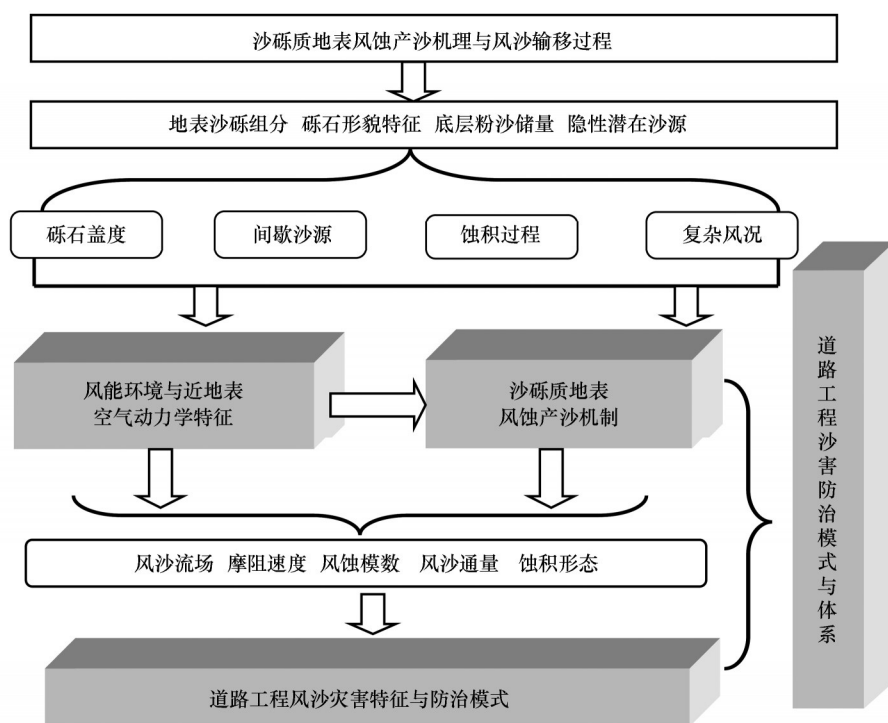


图6 沙砾质地表风沙动力过程及道路工程沙害防治研究框架

Fig.6 Research framework for aeolian dynamical processes on sandy-gravelly surfaces and prevention of sand hazards in road engineering

近年来,随着风沙监测仪器、无线传输技术及实验方法的更新与应用,所获得的数据更加丰富多元,对阐明不同类型戈壁地表风动力过程及沙害形成机制有积极作用。这将促进沙区道路工程风沙灾害与防治研究,从而提升戈壁地区道路沿线风沙防护体系的合理性与科学性。戈壁地区的道路工程为中国西北地区交通体系的重要组分,系统开展道路工程风沙致灾机理及防治研究,不仅能满足当前国家“一带一路”基础设施互联互通的战略需求,更将切实提高连通区域的社会经济水平、改善沿线居民出行环境。因此,对比研究戈壁地表风沙动力过程的差异与道路工程致灾机理以及高效的防护体系构建将是今后亟须解决的科学问题,也是未来完善西部沙区交通体系和保障道路安全运营的重

要研究方向。

#### 参考文献:

- [1] 赵松桥.河西走廊西北部戈壁类型及其改造利用的初步建议[M]//中国科学院治沙队.治沙研究(第三号).北京:科学出版社,1962:78-89.
- [2] 朱震达,吴正,刘恕,等.中国沙漠概论[M].北京:科学出版社,1980:79-81.
- [3] Sinclair S J, Avirmed O, White M D, et al. Rangeland condition assessment in the gobi desert: a quantitative approach that places stakeholder evaluations front and centre[J]. Ecological Economics, 2021, 181: 106891.
- [4] 冯益明,吴波,姚爱冬,等.戈壁分类体系与编目研究[J].地理学报, 2014, 69: 391-398.
- [5] 赵延岩,应江,李振朝,等.戈壁光伏电站下垫面陆面参数特征[J].高原气象, 2022, 41(4): 988-995.



- [6] 柴亚凡,马金珠,周波,等.戈壁荒漠区风电场建设对水土流失的影响[J].水土保持通报,2014,34(2):124-127.
- [7] 谭立海,张伟民,边凯,等.兰新高铁烟墩风区戈壁近地表风沙流跃移质垂直分布特征[J].中国沙漠,2018,38(5):919-927.
- [8] Liu J Q, Kimura R, Wu J. Vertical profiles of wind-blown sand flux over fine gravel surfaces and their implications for field observation in arid regions[J]. Atmosphere, 2020, 11(10): 1029.
- [9] 张军平,王引生,蒋富强.兰新高铁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.
- [10] 屈建军,王涛,牛清河,等.兰新高铁戈壁特大风区风沙灾害形成机理及防沙技术[J].中国科学:地球科学,2023,53(2):277-286.
- [11] 胡菲,张克存,安志山,等.敦煌沙漠、绿洲和戈壁地表风动力环境特征同步对比[J].中国沙漠,2020,40(4):113-119.
- [12] 高扬,张伟民,谭立海,等.兰新高铁烟墩大风区风沙地貌制图与风沙灾害成因[J].中国沙漠,2018,38(3):500-507.
- [13] 尤全刚,薛炯,王涛,等.戈壁地区风沙活动对公路影响的初步研究[J].中国沙漠,2011,31(1):9-15.
- [14] 石璟晶,赵红星,聂江龙,等.交通信息化对中国“一带一路”沿线省域交通碳排放影响的时空分异格局[J].中国环境科学,2024,44(10):5885-5900.
- [15] 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.
- [16] 姚宏乐.敦煌-格尔木铁路高大沙丘区的风沙环境特征及风沙危害综合防护体系[J].中国沙漠,2015,35(3):555-564.
- [17] 李强.酒额铁路酒泉至东风段典型沙害区段风沙环境特征[J].中国沙漠,2023,43(6):220-228.
- [18] Shi L, Wang D Y, Li K C. Windblown sand characteristics and hazard control measures for the Lanzhou-Wulumuqi high-speed railway[J]. Nature Hazards, 2020, 104: 353-374.
- [19] 张克存,屈建军,董治宝,等.风沙流中风速脉动对输沙量的影响[J].中国沙漠,2006,26(3):336-340.
- [20] 李良英,王振强,王旭,等.乌玛高速沙漠段风沙环境特征及格状沙丘移动规律[J].水土保持研究,2025,32(1):160-171.
- [21] 郭晓敏,王海兵,廖承贤,等.苏宏图戈壁地表沉积物组分变异性及其成因[J].中国沙漠,2024,44(5):95-104.
- [22] 苏松领,毛东雷,蔡富艳,等.新疆策勒沙漠与砾质戈壁新月形沙丘表面沉积物粒度特征及其沉积环境[J].干旱区资源与环境,2020,34(8):124-132.
- [23] Lancaster K. Grain-size characteristics of linear dunes in the Southwestern Kalahari [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1986, 56(3): 395-405.
- [24] 申元村,王秀红,程维明,等.中国戈壁综合自然区划研究[J].地理科学进展,2016,35(1):57-66.
- [25] 钱广强,董治宝,罗万银,等.基于数字图像的中国西北地区戈壁表面砾石形貌特征研究[J].中国沙漠,2014,34(3):625-633.
- [26] 王贵勇,董光荣,李森,等.试论戈壁面及指相意义[J].中国沙漠,1995,15(2):124-130.
- [27] 高君亮.干旱区洪积扇戈壁表层沉积物特征研究[D].北京:中国林业科学研究院,2019.
- [28] 谭立海.戈壁近地表风沙(尘)运动规律研究:以莫高窟窟顶戈壁为例[D].北京:中国科学院大学,2015.
- [29] Klinge M, Schlütz F, Zander A, et al. Late Pleistocene lake level, glaciation and climate change in the Mongolian Altai deduced from sedimentological and palynological archives [J]. Quaternary Research, 2021, 99: 168-189.
- [30] 董治宝,吕萍.70年来中国风沙地貌学的发展[J].地理学报,2020,75:509-528.
- [31] Kim J, Dorjsuren M, Choi Y, et al. Reconstructed aeolian surface erosion in southern Mongolia by multi-temporal InSAR phase coherence analyses [J]. Frontiers Earth Science, 2020, 8: 531104.
- [32] Abell J T, Rahimi S R, Pullen A, et al. A quantitative model-based assessment of stony desert landscape evolution in the Hami Basin, China: implications for Plio-Pleistocene dust production in eastern Asia [J]. Geophysical Research Letters, 2020, 47: 20.
- [33] 殷代英,屈建军,俎瑞平,等.不同扰动方式对沙砾质戈壁地表风蚀量的影响[J].中国沙漠,2014,34(1):1-8.
- [34] Bagnold R A. The Physics of Wind-blown Sand and Desert Dunes [M]. London, UK: Methuen, 1941: 265.
- [35] Wu Z, Ling Y Q. A preliminary study of wind-blown sand movement and sand disaster prevention [J]. Resource and Sand Disaster Prevention, 1965, 7: 14.
- [36] Gillette D A, Stockton P H. The effect of nonerodible particles on wind erosion of erodible surfaces [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1989, 94(D10): 12885-12893.
- [37] Dong Z B, Zhang W M, Wang X M, et al. Experimental investigation of drag coefficients of gobi surfaces [J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2002(7): 609-615.
- [38] Raupach M R, Gillette D A, Leys J F. The effect of roughness elements on wind erosion threshold [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1993, 98(D2): 3023-3029.
- [39] Tan L H, Zhang W M, An Z S, et al. The effect of roughness density of gobi beds on the entrainment of sediment by wind: a wind tunnel study [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2019, 190: 183-189.
- [40] Kawamura R. Study on Sand Movement by Wind [R]. 1951.
- [41] 尹永顺.砾漠大风地区风沙流研究[J].中国沙漠,1989,9(4):30-39.
- [42] Zingg A W. Wind-tunnel studies of the movement of sedimentary material [C]//Atlanta, USA: Proceedings of the Fifth Hydraulics Conference, 1953: 111-135.
- [43] Dong Z B, Wang H T, Liu X P, et al. A wind tunnel investigation of the influences of fetch length on the flux profile of a sand cloud blowing over a gravel surface [J]. Earth Surface Process and Landforms, 2004, 29: 1613-1626.
- [44] 哈斯.腾格里沙漠东南缘沙丘表面风沙流结构变异的初步研究[J].科学通报,2004,49(11):1099-1104.

- [45] 王静璞,刘连友,沈玲玲.基于Google Earth的毛乌素沙地新月形沙丘移动规律研究[J].遥感技术与应用,2013,28(6):1094-1100.
- [46] Dong Z B, Lu J F, Man D Q, et al. Equations for the near-surface mass flux density profile of wind-blown sediments [J]. *Earth Surface Process and Landforms*, 2011, 36: 1292-1299.
- [47] 冯益明,吴波,周娜,等.基于遥感影像识别的戈壁分类体系研究[J].中国沙漠,2013,33(3):635-641.
- [48] Wang X M, Cai D W, Zhu B Q, et al. Dust-sized fractions from dustfall and physical weathering in the gobi desert [J]. *Aeolian Research*, 2020, 43: 100565.
- [49] Rosen A M, Hart T C, Farquhar J, et al. Holocene vegetation cycles, land-use, and human adaptations to desertification in the Gobi Desert of Mongolia [J]. *Vegetation History and Archaeobotany*, 2019, 28: 295-309.
- [50] Tan L H, An Z S, Zhang K, et al. Intermittent aeolian saltation over a gobi surface: threshold, saltation layer height, and high-frequency variability [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2020, 125: 1.
- [51] Zhang K C, Zhang W M, Tai L H, et al. Effects of gravel mulch on aeolian transport: a field wind tunnel simulation [J]. *Journal of Arid Land*, 2015, 7: 296-303.
- [52] Wang X M, Zhang C X, Wang H T, et al. The significance of gobi desert surfaces for dust emissions in China: an experimental study [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 64: 1039-1050.
- [53] 张正儒,潘凯佳,梁爱民,等.戈壁沙尘释放过程与机理研究进展[J].地球科学进展,2019,34(9):891-900.
- [54] Liu Y, Wang G P, Hu Z Y, et al. Dust storm susceptibility on different land surface types in arid and semiarid regions of northern China [J]. *Atmospheric Research*, 2020, 243: 105031.
- [55] 熊鑫,王海兵,肖建华,等.戈壁沙砾质地表沉积物全粒径分布模式及其对分选作用的指示意义[J].中国沙漠,2019,39(2):202-208.
- [56] 廖承贤,王海兵,刘茜雅,等.以计算流体动力学模型(CFD)模拟的戈壁地表风沙两相流运动特征[J].中国沙漠,2023,43(6):71-78.
- [57] 彭世古.沙漠地区公路设计、施工与环保养护[M].北京:人民交通出版社,2004.
- [58] 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.
- [59] 段民杰,郝才元,李付军.铁路工务技术手册绿化[M].北京:中国铁道出版社,2017:403-420.
- [60] 韩庆杰,郝才元,张宏杰,等.临哈铁路典型防沙工程区阻风效率与积沙量特征[J].中国沙漠,2021,41(1):1-10.
- [61] Jabbar A Z. Investigation on railway track maintenance in sandy-dry areas [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2012, 8(2): 135-140.
- [62] 王锡来,王在广,张登绪.戈壁地区铁路沙害成因及工程防护初步研究[J].路基工程,2000(6):44-51.
- [63] 黄清友,童家申.沙漠公路路堤高度与沙埋关系的调查与分析[J].内蒙古公路与运输,2004(1):30-31.
- [64] 姚立强,左合君,李钢铁,等.临策铁路戈壁段路堤二维风速流场特征研究[J].铁道标准设计,2013(9):4-9.
- [65] 曾广勇.对戈壁大风地区铁路路基沙害的初步认识[J].路基工程,1990(4):17-25.
- [66] 李成,周学军.临河至策克铁路防风治沙措施设计方案初步研究[J].中国沙漠,2006,26(6):920-925.
- [67] 尤全刚,薛炯,王涛,等.戈壁地区公路防沙措施防沙效应的风洞试验[J].中国沙漠,2011,31(3):550-557.
- [68] 韩庆杰,郝才元,屈建军,等.临哈铁路典型路段风沙防治工程的三维气流场特征与防沙效率[J].中国沙漠,2020,40(6):1-12.
- [69] 程建军,蒋富强,杨印海,等.戈壁铁路沿线风沙灾害特征与挡风沙措施及功效研究[J].中国铁道科学,2010,31(5):15-20.
- [70] 铁道部兰州铁路局玉门工务段.兰新线玉门段戈壁风沙流地区铁路沙害的治理[J].中国沙漠,1992,12(2):4-17.
- [71] 马茜茜.S315策达一级公路防沙体系及效益分析[D].北京:中国科学院大学,2021.
- [72] 康才周,王理德,朱淑娟.兰新线黑山湖段铁路防护林地下滴灌灌水量的确定及效益分析[J].甘肃林业科技,2006(1):15-17.
- [73] 王伟,宋彦宏.和田-若羌铁路戈壁盐碱区高立式“Z”字形沙障配置的风洞试验[J].水土保持通报,2024,44(2):50-56.
- [74] 程鹏,薛万新,马毓娟,等.高速公路强横风区间新型柔性防风网设计方案研究:以连霍高速百里风区为例[J].中国科技信息,2012(8):169-172.
- [75] 吴丽华,李凯崇,葛盛昌,等.南疆铁路吐鱼段风沙活动规律研究[J].铁道标准设计,2014(6):41-43.
- [76] 唐玉龙.青藏铁路西格段戈壁风沙流防治体系研究[J].中国沙漠,2013,33(1):72-76.
- [77] 蔡东旭,李生字,王海峰,等.新疆S214公路台特玛湖干涸湖盆段风沙危害及防治[J].中国沙漠,2020,40(1):1-11.
- [78] 王锡来,张登绪,蒋育华,等.南疆铁路沿线风沙危害与工程防治[J].中国地质灾害与防治学报,2007(1):59-63.
- [79] 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.
- [80] McClure S, Kim J J, Sang J L, et al. Shelter effects of porous multi-scale fractal fences [J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2017, 163: 6-14.
- [81] 王海龙,张治,孙婧,等.戈壁铁路沿线防风沙栅栏设计参数优化分析[J].铁道科学与工程学报,2019,16(6):1420-1426.
- [82] 鲍正明.戈壁地区铁路沙害成因及工程防护初步研究[J].甘肃科技,2018,34(15):69-70.
- [83] 潘加朋,张克存,安志山,等.基于风洞模拟试验的典型机械防沙工程防护效益对比[J].水土保持学报,2023,37(6):104-110.
- [84] 贾燕.荒漠区铁路风沙防治关键技术[J].干旱区资源与环境,2021,35(12):86-92.
- [85] Zhang K, Zhao P, Zhao J, et al. Protective effect of multi-row HDPE board sand fences: a wind tunnel study [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2021, 9(1): 103-115.

- [86] Wang T, Qu J J, Ling Y Q, et al. Shelter effect efficacy of sand fences: a comparison of systems in a wind tunnel [J]. *Aeolian Research*, 2018, 30: 32–40.
- [87] 丁录胜. 格库铁路芦苇把栅栏和大网格防沙体系防护效益 [J]. *中国沙漠*, 2024, 44(3): 42–50.
- [88] 葛盛昌, 蒋富强. 兰新铁路强风地区风沙成因及挡风墙防风效果分析 [J]. *铁道工程学报*, 2009, 26(5): 1–4.
- [89] 庞巧东, 刘建军, 程建军, 等. 戈壁铁路挡风墙背风侧涡流长度及积沙的研究 [J]. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2011, 29(5): 629–632.
- [90] 庞巧东, 程建军, 蒋富强, 等. 戈壁铁路挡风墙背风侧流场特征与挡风功效研究 [J]. *铁道标准设计*, 2011(2): 1–5.
- [91] 程建军, 庞巧东. 戈壁强风区挡风构筑物限制下列车气动力学特性分析 [J]. *铁道标准设计*, 2013(1): 1–5.

## Research progress on aeolian dynamics and sand hazard prevention along road in gobi regions

Zhang Kecun<sup>1</sup>, Pan Jiapeng<sup>1,2</sup>, An Zhishan<sup>1</sup>, Xie Shengbo<sup>1</sup>, Xue Chengjie<sup>1,2</sup>, Wang Junzhan<sup>1</sup>

(1. *Dunhuang Gobi and Desert Ecological and Environmental Research Station / National Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** Gobi is a typical arid desert landscape and a major surface type along road in sandy regions. Influenced by underlying surface properties, surface material composition, and sand source reserves, the aeolian dynamic mechanisms and the focus of sand hazard prevention priorities in road engineering differ in gobi regions. This study delved into the differences in near-surface wind dynamics and aeolian transport processes between gravelly gobi surface and sandy-gravelly gobi surface. It systematically summarized the research progress on sand disaster prevention and control in road engineering in gobi regions, focusing on the characteristics, formation mechanisms, protective system, and their effectiveness evaluation of the two types of gobi sand hazards along road engineering routes. It also reviewed the main sand control measures and their applications in gobi road engineering. The sandy-gravelly surface, being a latent potential sand source with a mixed distribution of sand, gravel, and powdery sand layers, made it essential to strengthen the study of aeolian processes on sandy-gravelly surfaces. This helped ensure road safety and enhanced transport capacity in the gobi regions of the western China.

**Key words:** gobi; surface type; aeolian dynamics; sand control engineering; effectiveness evaluation