

# 格库铁路米兰戈壁区风沙危害成因及防护体系配置模式

彭晓川

(新疆铁道勘察设计院有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830011)

**摘要:** [目的] 探究格库铁路米兰戈壁段风沙危害成因, 提出针对性的风沙防护体系配置模式。[方法] 本研究通过野外观测, 分析区域风况, 监测沿线输沙量, 评价试验段防沙体系防护效益。[结果] ①格库铁路米兰戈壁区属高风能环境, 主要起沙风向为 NE 和 ENE, 区域年输沙量介于  $2.15\sim 3.45\text{ m}^3/\text{a}$ 。②戈壁之上流动性沙丘以中砂和细砂为主, 而戈壁地表以下 40 cm 范围内沙粒以细砂为主, 施工破坏后极易起沙成为新的沙源。③单道 HDPE 板、芦苇束和镀锌铁丝网阻沙障阻沙率依次为 96.42%, 93.85% 和 76.60%, 而其双道阻沙率分别为 97.95%, 98.71% 和 92.78%, 整个防护体系阻沙率均达到 95% 以上。④折线形阻沙障虽然积沙量大, 但折角部位极易被积沙掩埋。[结论] 直线形 HDPE 板阻沙栅栏与芦苇束大网格阻固结合的防沙体系, 是适宜于格库铁路米兰戈壁区的防沙体系配置模式。

**关键词:** 格库铁路; 戈壁; 风沙危害; 防护体系; 效益评价

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1000-288X(2025)02-0091-11

**中图分类号:** P931.3

**文献参数:** 彭晓川. 格库铁路米兰戈壁区风沙危害成因及防护体系配置模式[J]. 水土保持通报, 2025, 45(2): 91-101. Peng Xiaochuan. Aeolian sand hazards and sand-control system configuration mode in Milan Gobi area along Golmud-Korla railway [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(2): 91-101. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.02.011; CSTR:32312.14.stbctb.2025.02.011.

## Aeolian sand hazards and sand-control system configuration mode in Milan Gobi area along Golmud-Korla railway

Peng Xiaochuan

(Xinjiang Railway Survey and Design Institute, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

**Abstract:** [Objective] The causes of aeolian sand hazards in the Milan-Gobi section of the Golmud-Korla railway were investigated to propose a targeted configuration mode for sand-control systems. [Methods] This study analyzed regional wind conditions, monitored the amount of sand transported along the line, and assessed the protection efficiency of the test section of the protection system through field observations. [Results] ① The Milan Gobi area of the Golmud-Korla railway is a high wind energy environment; the main sand driving winds are NE and ENE, and the annual sand transport volume reaches  $2.15\sim 3.45\text{ m}^3/\text{a}$ . ② The sand in Gobi mobile dunes is mainly medium- and fine-grained, whereas sand particles within 40 cm below the surface are mainly fine-grained. After construction damage sand is easily generated, creating a new sand source. ③ The sand resistance rates of the single HDPE plate, reed bundle, and galvanized chicken wire barrier were 96.42%, 93.85%, and 76.60%, respectively; the sand resistance rates of the double fences were 97.95%, 98.71%, and 92.78%, respectively. The sand resistance rate of the entire protection system exceeded 95%. The amount of sand deposited in the zigzag sand barrier was large, and the corner of the barrier was easily buried by sand deposits. [Conclusion] A sand control system that combines a linear HDPE board sand barrier with a large reed bundle grid is suitable for the sand control system configuration mode in the Milan Gobi area of the Golmud-Korla railway.

**Keywords:** Golmud-Korla railway; Gobi; aeolian sand hazards; sand-control system; benefit evaluation

收稿日期: 2024-11-10

修回日期: 2025-01-01

采用日期: 2025-01-02

资助项目: 中国铁路总公司科技研究开发计划课题“新建格尔木至库尔勒铁路新疆段风沙路基防护工程治沙试验研究”(2017G004-E)

第一作者: 彭晓川(1977—), 男(汉族), 四川省泸州市人, 学士, 高级工程师, 主要从事铁路交通运输及风沙灾害治理工作。Email: xcpeng24@163.com。

中国是全球沙区铁路分布里程最长的国家,累计长度约  $1.50 \times 10^4$  km,主要集中在西北地区<sup>[1]</sup>。风沙防治是沙区铁路安全运营的决定性因素之一。自 1958 年第一条沙漠铁路—包兰铁路开通以来,针对沙区铁路风沙危害成因及防治开展了大量研究<sup>[1-3]</sup>。戈壁铁路风沙防治相比一般沙漠地区难度大,这主要是由于戈壁风沙流多呈非饱和搬运状态,跃移高度大,能量强,具有很强的破坏力<sup>[4-7]</sup>。研究表明,戈壁沙粒跃移高度是沙漠地表的 4 倍<sup>[4]</sup>,而戈壁大风区沙粒跃移高度可达 3 m<sup>[7]</sup>。而且,戈壁大风区非饱和风沙流中跃移沙粒具有极高的动能,对铁路构筑物带来了严重的磨蚀危害<sup>[4]</sup>。因此,戈壁独特的风沙运动规律给铁路风沙危害防治提出了更高的要求。

目前,针对戈壁区铁路风沙防治开展了大量研究。干旱区戈壁地区由于水源有限,往往很难实现规模性的植物防护,工程治沙成为铁路风沙防护的首选。Qu Jianjun 等<sup>[8]</sup>揭示了兰新高铁戈壁大风区沙害形成机理,并通过筛选抗风性强的阻沙材料,建立了多道阻沙栅栏组成、进行逐级降风的工程防护体系;经实地观测,阻沙带下风向输沙量减少了 87.87%,防沙效果较为显著。韩庆杰等<sup>[9]</sup>对临哈铁路戈壁区多道 1.5 m 高 PE 网阻沙障和固沙方格组成的防护体系三维风速和防沙效率进行了观测研究,得出在沙源充足地区,戈壁铁路的风沙治理建议使用大网格(2 m × 0.5 m),并将阻沙沙障间距由约 23 H 减小到 13 H,会提高前排沙障对后排沙障的保护作用,增加两道沙障之间的积沙。由于戈壁地区,砾石粒径、盖度及下伏沙粒粒度组成等方面差异大,而且不同区域风沙运动规律不同,风沙防护工程体系模式存在差异。在地下水源条件较好的地区,往往设立工程防沙与植物固沙相结合的铁路风沙危害综合防护体系。例如,兰新铁路军垦一二道沟段以条带状混交防护林带为主体,辅以高立式沙障、空白带输沙综合防沙体系取得了戈壁风沙防治的显著成效<sup>[10]</sup>;和若铁路建立了以芦苇沙障和多条阻、固沙林带组成的综合防护体系,取得了较好的防护效益<sup>[11]</sup>。然而,相对沙漠铁路,目前戈壁铁路工程风沙防治还较为薄弱,缺乏行之有效、可推广的防护体系模式。

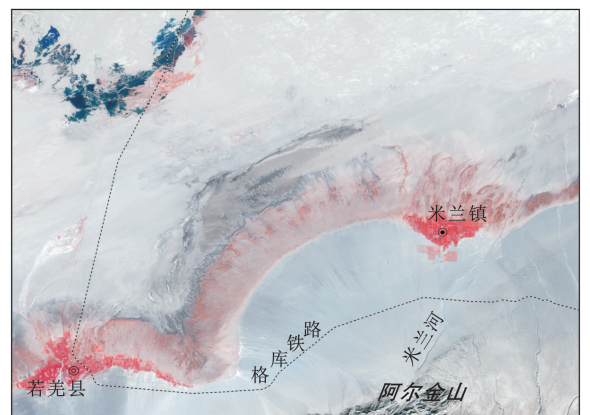
格库铁路东起青海省格尔木市,西至新疆库尔勒市,全长 1 214 km,于 2014 年底开工建设,2020 年 12 月通车。格库铁路是新疆第三条出疆铁路,对完善我国西北铁路网骨架,推动国家“一带一路”倡议深入实施,加强民族地区团结和巩固国防安全具有重要意义。格库铁路新疆段沿线遭受风沙危害路段约占线路全长的 60%以上,风沙危害防治是该条铁路亟

须解决的关键问题<sup>[12]</sup>。格库铁路穿越阿尔金山后,经长达 161 km 的阿尔金山山前戈壁区后至若羌。经调查分布有流动性沙丘,灌丛沙包等风沙地貌类型,形成典型的山前冲洪积戈壁风沙流<sup>[13]</sup>。据实地勘测,除米兰河有流水之外,无地下水出露,地下水埋深 70 m 以下,且水量为 20~50 t/d,为阿尔金山融雪水下渗形成的潜水,水量极其有限,无植物防护条件。因此,格库铁路新疆段戈壁区以工程防沙为本段风沙治理的主要手段。为探讨该区戈壁风沙危害治理方案,本研究监测了区域风沙环境,调查沙害沙源,分析沙害成因,并通过实地观测,评价防沙工程试验段风沙防护效益,提出适宜的风沙防护体系配置模式,为本段及类似戈壁区铁路风沙防治提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于阿尔金山山前冲积—洪积戈壁平原上,沿米兰和其他季节性河流的沟壑沿岸分布着大量流动性沙丘(图 1)。戈壁表面主要由细粒砾石组成,粒径多在 6 cm 以下,砾石覆盖率为 40%~50%,下伏沙粒以细沙为主(中值粒径 0.20 mm)<sup>[14]</sup>。在强风条件下,戈壁风沙流已成为威胁格库铁路安全的重要因素。若羌县气象资料显示,该县年平均气温 11.8 ℃,年平均降水量 23.33 mm,年潜在蒸发量高达 2 673.2 mm,平均相对湿度为 41.1%。沙尘天气频繁,年平均大风(10 m 风速  $\geq 17.2$  m/s) 28 d,盛行东北风和偏东风。



图例  
—— 格库铁路    □ 戈壁    ■ 植被    ■ 水体    0 5 10 km

图 1 格库铁路米兰戈壁段区位置图

Fig.1 Location map of Milan Gobi area of Golmud-Korla railway

### 1.2 研究方法

1.2.1 现场观测 戈壁风动力环境观测采用 10 m 高气象观测塔(图 2),包括风速、风向和温湿度,风速、风向包括 2,6 和 10 m 3 个高度,空气温湿度高度

为 2 m。风速、风向传感器为二维超声风速仪,采样频率为 1 Hz,每 1 min 记录一次,采集器为 Campbell CR300。观测数据为 2018—2021,2023 年共 5 a 数据,2022 年仪器出现故障,数据缺失。不同方位年输沙量数据通过八方位集沙仪观测获得,观测年份分别为 2018,2019 和 2023 年。

戈壁近地表风沙流结构观测采用 3 m 高 BSNE 梯度式集沙仪,架设高度为 0.025, 0.175, 0.285, 0.585, 1.16, 1.79, 3.00 m。监测时间为 2018 年 5 月 7 日,为 ENE(东北东)风沙尘暴,2 m 高最大风速为 22.11 m/s。

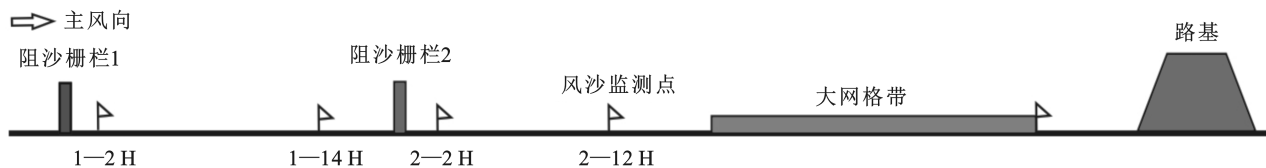
防沙体系抑风效应和阻沙效益监测:分别在第一道栅栏上风向外围无影响区(对照,20 H 以上,H 为沙障高度),第一道后 2 H(障后涡流区)和 14 H(障后减速区),第二道栅栏后 2 H(障后涡流区)和 12 H(障后减速区)以及路基边缘大网格阻沙带架设

HOBO H21 气象站和 1 m 便携式集沙仪进行风沙观测(图 3—4)。观测时间 2018 年 4 月 30 日至 5 月 8 日,现场测定风向为偏东风(ENE)和东北风(NE)。



图 2 研究区气象观测塔

Fig.2 Meteorological observation tower in study area



注:①小旗表示风沙监测点。②1—2 H 表示第一道栅栏后 2 H;2—2 H 表示第二道栅栏后 2 H。依次类推。

图 3 防护体系风沙断面监测点布置示意图

Fig.3 Schematic diagram of monitoring points in section of sand-control system

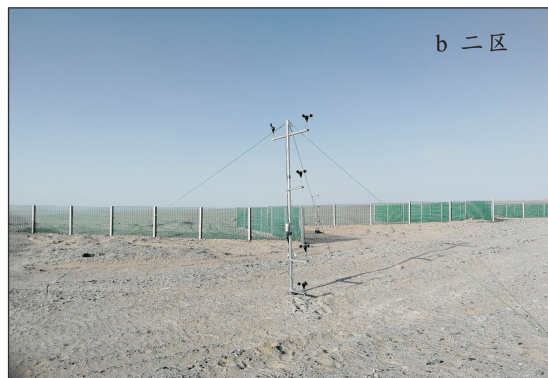
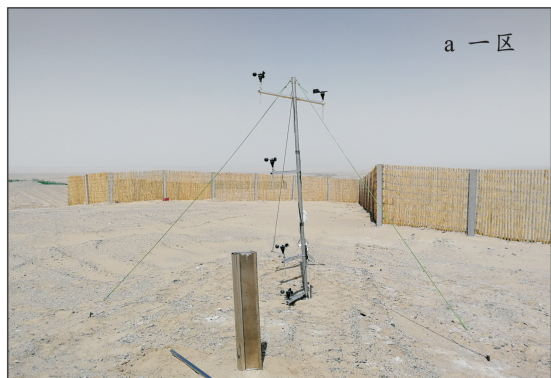


图 4 现场风沙监测仪器布设场景

Fig.4 Layout condition of on-site wind-blown sand monitoring instruments

### 1.2.2 数据处理 输沙势(DP)计算公式为<sup>[15]</sup>:

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

式中:DP 为输沙势,是矢量单位(VU); $V$  为大于起砂风速值的风速,单位为节; $V_i$  为起砂风速,单位为节; $t$  为起砂风作用时间,在统计表中以频率(%)表示。

通过矢量合成法将 16 个方位输沙势进行合成后可以得到合成输沙势(RDP)和合成输沙方向(RDD),它反映了一个地区输沙能力的大小和输沙净走向。合成输沙势与输沙势的比值称为方向变率(RDP/DP),用来反映一个地区风向组合情况和风信复杂的程度。S. G. Fryberger 等<sup>[15]</sup> 根据输沙势大小分为高、中、低 3 种风能环境。RDP/DP 值越大说明风信情况越单一,越小则说明风信越复杂。一般而言,小比率( $<0.3$ )往往与复合风况相对应;中比率( $0.3 \sim 0.8$ )对应锐双峰或钝双峰风况;而大比率( $>0.8$ )则对应于单峰风况。对 10 m 高气象观测塔记录的 1 min 间隔风速进行平均得到 10 min 平均风速,然后进行输沙势计算。

抑风效应( $\eta$ )是防护体系对风速的影响,其计算公式为:

$$\eta=(W_{0z}-W_{1z})/W_{0z} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $W_{0z}$  为防护体系外围对照点高度  $z$  处的风速(m/s); $W_{1z}$  为防护体系内部某监测点  $z$  高度处的风速(m/s)。

防沙体系阻沙效益( $f$ )的计算公式为:

$$f=(Q_0-Q_1)/Q_0 \times 100\% \quad (3)$$

式中: $Q_0$  为防护体系外围对照点处的输沙率 $[g/(m \cdot s)]$ ;  $Q_1$  为防沙体系内部某监测点处的输沙率 $[g/(m \cdot s)]$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 风沙环境特征

#### 2.1.1 研究区风况

(1) 起砂风频率。通过对研究区 2018—2021, 2023 年的风况数据分析,研究区大于起砂风(据现场观测为 7.0 m/s,距地表 10.0 m 高度)频率介于 16.35%~22.16%(表 1),其中 NE 所占频率最高(图 5),占起砂风频率的 38.61%~53.27%;其次为 ENE,起砂风频率所占比例介于 16.20%~19.61%。

表 1 研究区起砂风频率及不同风向频率的比例

Table 1 Frequency ratios of sand-driving wind and different wind directions in study area

年份	起砂风频率/%	不同风向比例/%	
		NE	ENE
2018	21.73	41.01	19.62
2019	21.45	38.61	17.35
2020	22.27	45.22	16.20
2021	16.35	53.27	18.47
2023	17.71	42.70	19.09

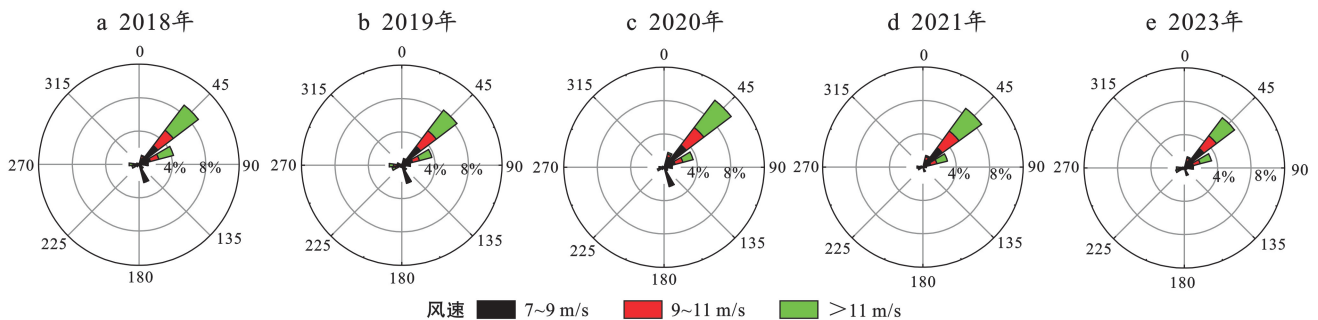


图 5 研究区起砂风玫瑰图

Fig.5 Rose map of sand-driving wind in study area

(2) 年输沙势。输沙势的计算结果可用输沙势玫瑰图表示(见图 6)。区域年输沙势介于 527.8~679.2 VU,属于高能环境。合成输沙势(RDP)介于 372.0~491.5 VU,合成输沙方向为(RDD)介于 229.3°~235.4°,RDP/DP 值介于 0.59~0.80 之间,属锐双峰风况(图 6)。其中,NE 风输沙势介于 255.4~361.3 VU,占年输沙势的 45.43%~58.70%,其次为 ENE,输沙势介于 109.7~155.0 VU,占年输沙势的 18.33%~22.82%。在 3 个风速段中, $>11$  m/s 输沙

势占主导,输沙势之和介于 275.9~358.5 VU,占输沙势的 48.50%~52.79%。

2.1.2 输沙量 图 7 是 2018,2019,2023 年 DK734 处年输沙量的玫瑰图。研究区戈壁年输沙量介于 3 442~5 520 kg/m,相应体积输沙量约为 2.15~3.45 m<sup>3</sup>/m。可以看出,NE 和 E 方位输沙量较大,单宽输沙量介于 746~1 250 和 607~1 316 kg/m,分别占年总输沙量的 21.67%~22.64%和 17.63%~23.85%。这与 NE 和 ENE 所在风向输沙势占主导的结论一致。

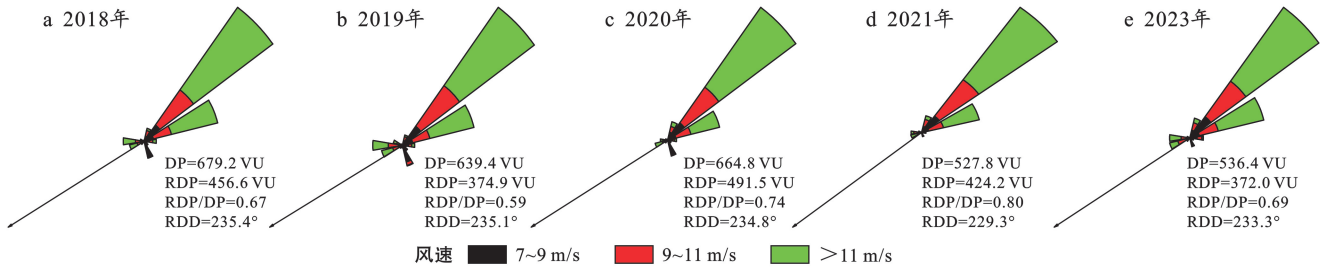


图 6 研究区输沙势玫瑰图

Fig.6 Rose map of sand drift potential in study area

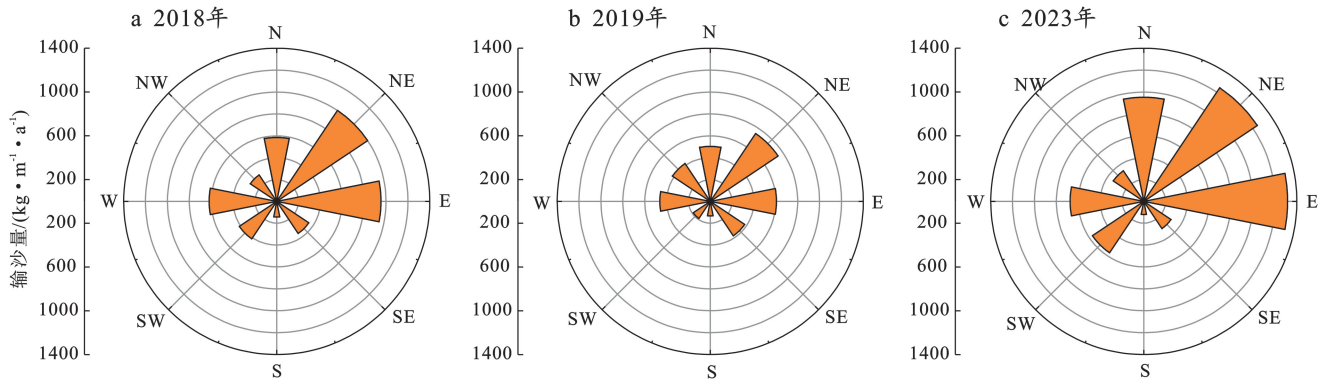


图 7 格库铁路 DK734 不同方位年输沙量

Fig.7 Sand transport quantity in different directions of Golmud-Korla railway at DK734

2.1.3 戈壁风沙流结构 观测结果表明,戈壁近地表风沙流结构遵循指数递减规律,输沙通量随高度增加

而减小(图 8a)。近地表 60 cm 集中了 99% 的输沙量,高于沙漠地表的 20 cm(图 8b)。

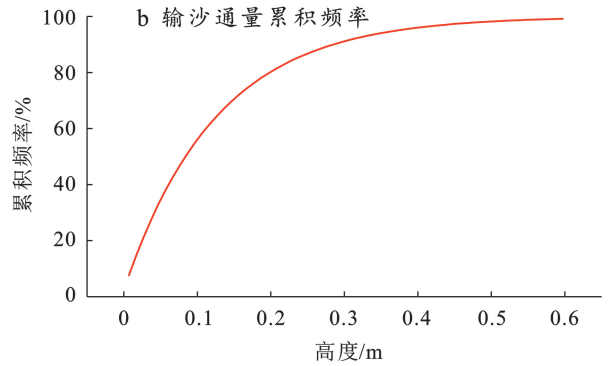
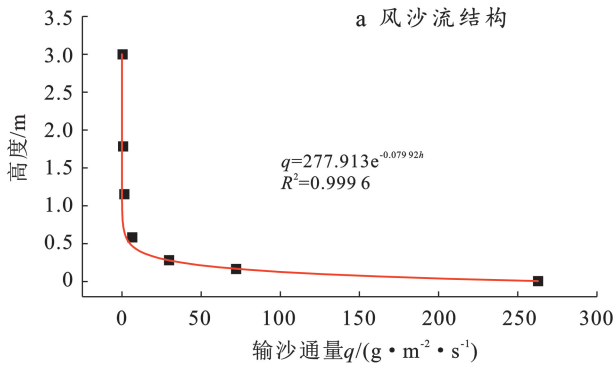


图 8 戈壁风沙流结构及输沙通量累积频率随高度变化

Fig.8 Wind-blown sand flow structure and cumulative frequency of sand flux over Gobi change with height

### 2.2 沙源特征与沙害成因

根据调查与监测显示,本段戈壁区铁路风沙灾害主要分布在 DK725—742 区段内。对铁路沿线地表 40 cm 以内土质取样测试,统计分析结果表明,根据 J. A. Udden<sup>[16]</sup> 和 C. K. Wentworth<sup>[17]</sup> 粒级分级标准,地表以下颗粒物粒径主要以 0.125~0.25 mm 的细砂为主(图 9),施工使稳定地表遭受破坏而风蚀,沙颗粒出露成为新的沙源(图 10)。

上新月形沙丘及沙丘链,对铁路栅栏积沙的贡献率达 75.2%<sup>[13]</sup>。新月形沙丘及沙丘链主要集中于米兰河和其他季节性河流沟谷西南侧(主风向下风侧)(图 11),是影响路基 DK725—742 的主要沙源。米兰河区域沙丘,中砂(0.25~0.5 mm)含量最高,占 38.89%,其次为细砂(0.125~0.25 mm),占 26.72%,再次是粗砂(0.5~1 mm),占 23.18%,三者共占总沙量的 88.79%(图 11)。在偏东风的作用下形成戈壁风沙流,遇铁路路基形成积沙,对铁路造成危害。

研究表明,该区段影响铁路的沙源主要为戈壁之

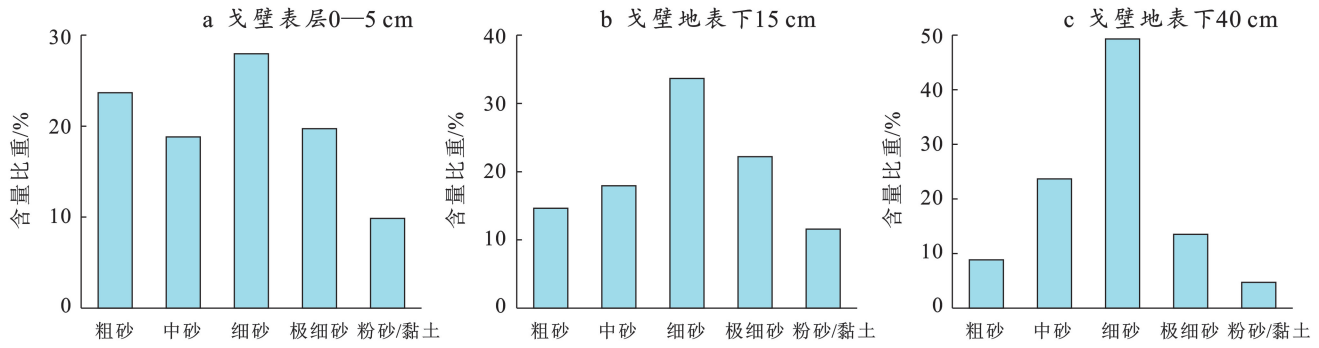


图 9 戈壁剖面沙尘颗粒粒度组成

Fig.9 Composition of grain size in Gobi profile

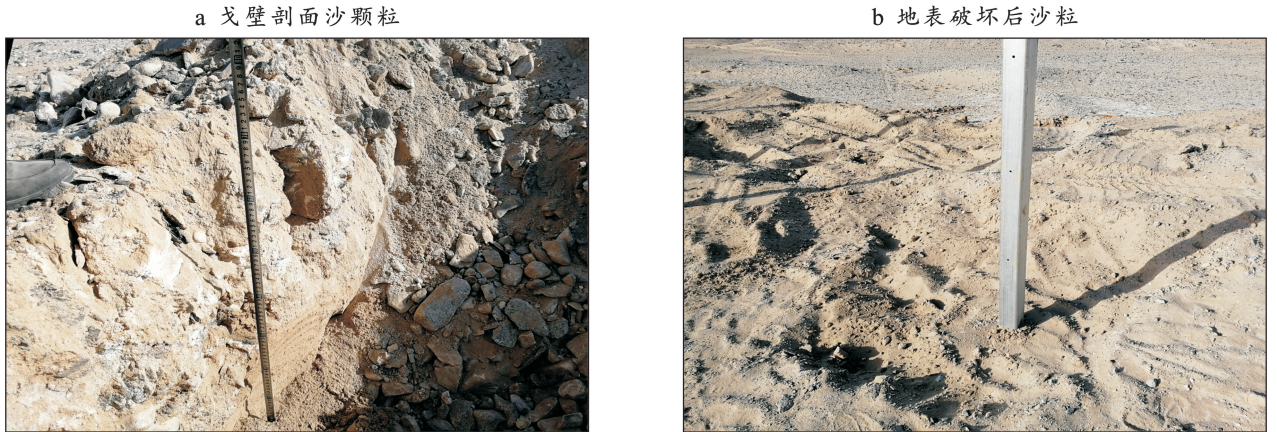


图 10 戈壁剖面沙颗粒(a)与地表破坏后沙粒(b)

Fig.10 Sand particles in Gobi profile (a) and surface sand particles after damage (b)

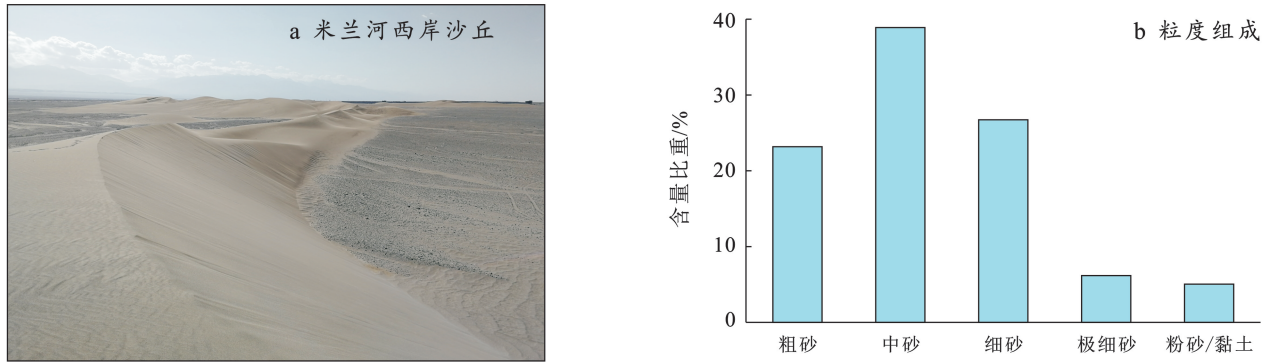


图 11 米兰河西岸沙丘(a)及粒度组成(b)

Fig.11 Sand dunes on west bank of Milan River (a) and their grain size composition (b)

### 2.3 风沙防护试验段体系配置及防护效益评价

2.3.1 风沙防护模式设计 格库铁路米兰戈壁位于阿尔金山山前冲、洪积平原区,区域内地势平坦开阔,地表粗糙度较大,起沙风速高。针对上述情况,拟采用“以阻为主,以固为辅,阻固结合”的防理念。其目的是通过阻沙措施,逐层阻截过境风沙流,避免铁路路基本体及附属设施形成积沙。主要是通过多重阻沙措施来降低来流风速值,实现减弱地表风蚀,净化过境风沙流的效果;但当阻沙措施距离铁路路基过近时,随着时间的推移,沙障后方会出现大量的积沙,

如不及时清理,会在近铁路区域形成一道道沙垄,对铁路安全运营产生潜在的威胁,因此需要在路基和阻沙措施之间布设固沙措施,在避免就地起沙的同时,保证阻沙措施和路基本体之间存在一定的安全距离。

2.3.2 试验段防沙体系配置 为观测各种沙障的阻沙形态以及拦截沙量的大小,分析戈壁地区工程防护措施的防护效果,在格库铁路 DK732—734 段建设 2 000 m 的试验段。由于主风向来自铁路右侧(铁路大里程至小里程去向为参考),所以试验段设置在主风向侧,主风向侧试验段共分为 4 个区

(图 12),每个区长度约 500 m。该区段防护体系走向大致为 E—W(97°),主风向与栅栏存在小夹角情况(<30°),前沿阻沙措施分别采用折线形和直线形两种,包括折线形和直线形芦苇束阻沙障、折线形

HDPE 板阻沙障、直线形镀锌铁丝网阻沙障等,沙障高度均为 2 m。在阻沙措施和路基之间布设了 40 m 宽的 4 m×4 m×0.8 m 芦苇把大方格进行阻沙和固沙。

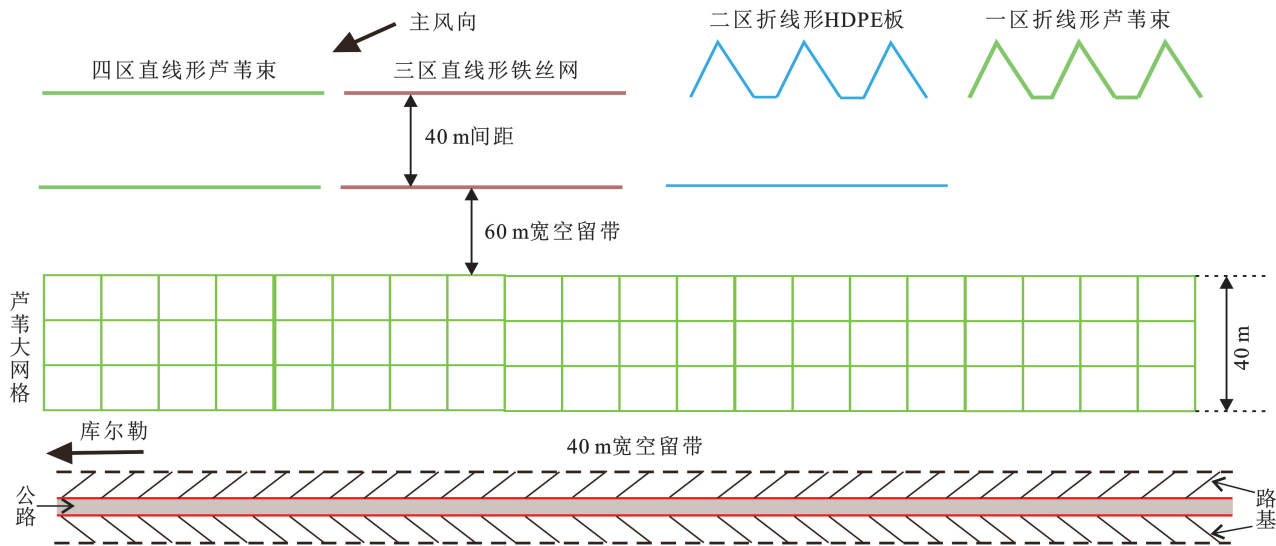


图 12 格库铁路米兰段防沙体系试验段配置示意图

Fig.12 Configuration diagram for test section of sand control system at Milan section of Golmud-Korla railway

2.3.3 防沙体系效益评价

(1) 抑风效应。格库铁路米兰 DK732—734 防沙体系试验段监测的沙尘天气特征参数见表 2。根据防风效应计算公式(2)分别对该试验段一至四区各监测断面风速衰减比值(即抑风效应)进行计算分析,结果表明,阻沙栅栏对风速的影响主要集中于栅栏高度以下,相比 2 和 3 m 监测高度,0.2 和 0.8 m 高度抑风效应较为明显,且随高度增大抑风效应逐渐减小。

一区经一道 2 m 高折线形芦苇束阻沙栅栏,0.2 和 0.8 m 高度 2 H 处抑风效应分别为 76%和 92%,经 14 H 距离后抑风效应分别衰减到 31%和 46%,到 40 m 大网格后抑风效应分别增大到 89%和 79%,表明体系防风效应明显(图 13a)。二区经第一道 2 m 高折线形 HDPE 板阻沙栅栏,0.2 和 0.8 m 高度抑风效应达 98%和 91%,经 14 H 距离后防风效应分别衰减到 37%和 32%,经第二道直线形 HDPE 板阻沙栅栏,0.2 和 0.8 m 2 H 处抑风效应分别增大到 54%和

47%,到 12 H 抑风效应分别减小至 50%和 42%,经 40 m 大网格后抑风效应增大到 94%和 73%(图 13b)。三区经第一道 2 m 直线形高镀锌铁丝网阻沙栅栏,0.2 和 0.8 m 高度 2 H 处抑风效应仅 43%和 36%,经 14 H 距离后抑风效应分别衰减到 35%和 27%,经第二道直线形镀锌铁丝网阻沙栅栏 0.2 和 0.8 m 2 H 处抑风效应分别增大到 48%和 42%,到 12 H 抑风效应分别减小至 38%和 33%,经 40 m 大网格后抑风效应分别增大到 85%和 62%(图 13c)。四区经第一道 2 m 高芦苇把阻沙栅栏,0.2 和 0.8 m 的高度 2 H 处抑风效应均为 87%,经 14 H 距离后抑风效应衰减到 39%左右,经第二道直线形阻沙栅栏 0.2 和 0.8 m 的 2 H 处抑风效应增大到 85%左右,到 12 H 抑风效应减小至 32%,经 40 m 大网格后抑风效应分别增大到 86%和 62%(图 13d)。

综上所述,HDPE 板阻沙栅栏抑风效应最好,芦苇束阻沙栅栏次之,而镀锌铁丝网阻沙栅栏抑风效应较差。

表 2 格库铁路米兰段 DK732—734 监测的沙尘天气特征参数

Table 2 Characteristic parameters of sand transport events monitored at DK732—734 of Milan section of Golmud-Korla Railway

段落分区	观测日期	观测时段	平均风向	2 m 平均风速/ (m·s <sup>-1</sup> )	2 m 最大阵风速/ (m·s <sup>-1</sup> )	输沙率/ (g·m <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> )
一区	20180502	13:30—22:00	49.99°	7.4	15.6	0.54
二区	20180501	15:40—20:40	38.53°	8.46	13.09	0.65
三区	20180504	12:02—18:41	36.57°	7.89	14.09	0.61
四区	20180502—03	20:05—16:37	46.60°	9.77	17.11	3.37

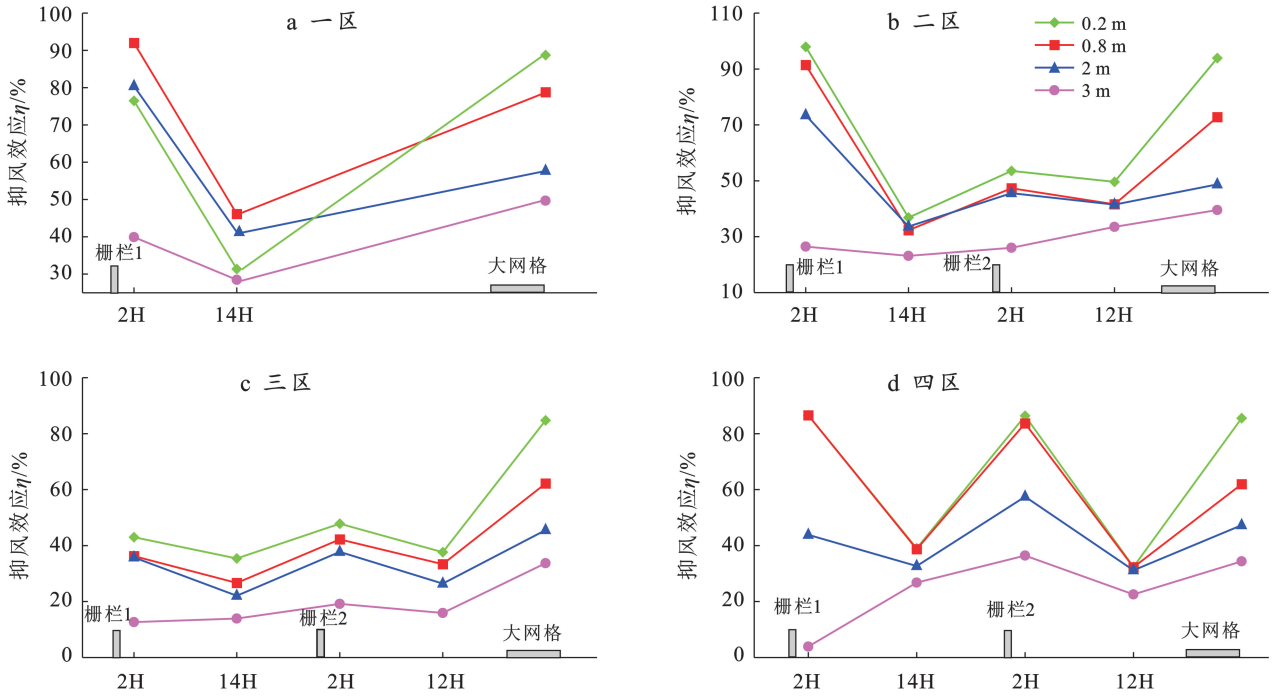


图 13 不同防护体系断面抑风效应变化

Fig.13 Changes of wind suppression effect in sections of different sand-control systems

(2) 防沙效率。风沙输移过程中受防护体系影响,输沙率呈现明显的下降趋势,尤其是经过最外侧第一道阻沙措施时,下降趋势十分显著,之后风沙流中所携带的沙颗粒减少,输沙通量下降趋势趋于平缓(图 14)。DK732—734 阻沙率沿体系断面变化情况表明,HDPE 板、芦苇束和镀锌铁丝网沙障都起到了很好的防沙效果,单道阻沙率依次为 98.84%, 93.85% 和 61.11%,双道的累积阻沙率则依次为: 99.05%, 98.71% 和 92.78%,整体都表现出了良好的阻沙效果(如图 15 所示)。对比 3 种类型沙障,HDPE 板沙障阻沙效果最好,芦苇束沙障和镀锌铁丝网沙障稍差,经过整个防护体系净化后,其累积阻沙率达到 99% 以上,防护效果优良。

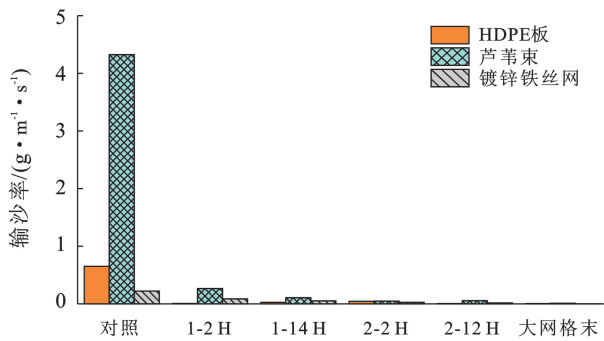


图 14 输沙率沿防护体系断面变化

Fig.14 Variation of sand transport rate along sections of sand control systems

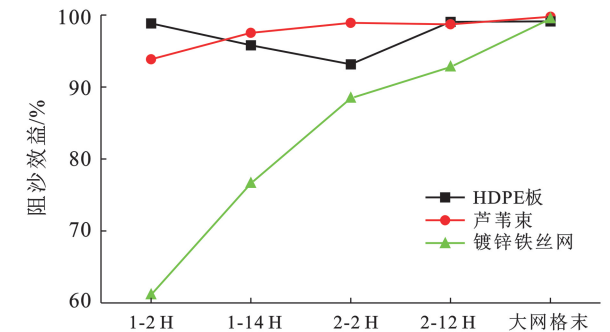


图 15 阻沙效益沿防护体系断面变化

Fig.15 Change of sand-control benefit along sections of sand-control systems

现场调查发现,防沙体系试验段外侧各阻沙障形成的积沙形态明显不同。折线形布置的沙障积沙主要集中于折线拐角区域,其平缓区域无积沙或积沙较少,整体积沙分配极不均匀。直线形布置的沙障积沙形态也各有不同,HDPE 板阻沙障其板面孔大,孔隙度为 44%,其积沙距沙障相对较远,而芦苇束沙障孔隙度为 37.5%,障后积沙呈弧状,距沙障较近,而铁丝网沙障孔隙度 54%,障后积沙分布较均匀,积沙宽度较大(图 16)。根据积沙形态分析,直线形布置沙障后积沙形态与各阻沙障孔隙分布有极大关系,与沙障材料无关,折线形布置沙障不论沙障孔隙如何分布,折线顶部积沙约占 90% 以上,极易被积沙掩埋;直线形芦苇束沙障由于其孔隙竖向排列,而芦苇束捆不透风,因此积沙堆高而弧状沿沙障分布,较折线形积沙少;直线

形 HDPE 板由于孔在板面上分布均匀,但孔较大,因此积沙与沙障有 1 H 左右距离,积沙呈沙垄形态沿

HDPE 板分布;而铁丝网孔小而密均匀分布在板面上,孔隙度大,积沙较宽且积沙厚度分布基本均匀。



a 折线形芦苇束栅栏



b 直线形芦苇束栅栏



c 折线形HDPE板栅栏



d 直线形HDPE板栅栏

图 16 折线和直线形阻沙沙障积沙形态

Fig.16 Sand deposition patterns for broken line and straight line sand fences

### 3 讨论

戈壁区铁路风沙防治研究主要针对兰新高铁戈壁大风区<sup>[18]</sup>、兰新铁路玉门段<sup>[19]</sup>、和若铁路<sup>[11,20-21]</sup>以及哈罗铁路等<sup>[22]</sup>开展。在明晰沙害形成机理的基础上,兰新高铁烟墩风区建立了 3 排抗风性能较强的冲孔钢板栅栏和镁水泥基固沙障组成的防沙体系,有效降低了风速,拦截了戈壁风沙流,并消减了戈壁就地起沙量,取得了较好的风沙防护效益<sup>[1]</sup>。针对沙砾质戈壁风沙危害,和若铁路若羌至瓦石峡段建立了以高立式芦苇沙障和芦苇方格以及灌木固沙带、乔灌阻沙带组成的综合防护体系,防护效益显著<sup>[11]</sup>。

然而,米兰戈壁区沙源主要来自戈壁地表之上的流动性沙丘,沙源极为丰富。同时,研究区为高能环境,风力作用下极易形成戈壁过境风沙流,铁路积沙危害相比兰新高铁戈壁大风区和和若铁路若羌至瓦石峡戈壁区段更为严重。针对研究区高能特性,可以借鉴兰新高铁烟墩戈壁大风区,建立多道阻沙栅栏,进行逐级降风的工程防护体系。在防沙材料方

面,研究得出,HDPE 板和芦苇束阻沙栅栏具有较好的阻沙效果,且折线形布置的阻沙障由于积沙主要分布在折角顶部,极易被积沙掩埋而失效,而直线形布置的沙障积沙分布沿沙障较均匀,不易沙埋,使用较久,因此采用直线形布置。直线形 HDPE 板和芦苇束阻沙栅栏及大网格组成防沙体系是米兰戈壁区效果较好的防沙体系模式。从材料价格上讲,一延米 HDPE 板约是芦苇束的 3 倍,但 HDPE 板的耐久性和抗风性能更好,更适宜于戈壁大风地区。研究表明,4 m×4 m×0.8 m 芦苇束大网格至少 2 组才能达到防护效果<sup>[23]</sup>。综上所述,直线形 HDPE 板栅栏与芦苇束大网格阻固结合的防沙体系,是适宜于格库铁路米兰戈壁区的防沙体系配置模式。此外,针对米兰戈壁区铁路上风向流动沙丘,采取固沙措施进行固定也是今后铁路风沙危害有效防治的重要措施之一<sup>[13]</sup>。

### 4 结论

(1) 格库铁路米兰戈壁区年输沙势为 695.4 VU,

属高风能环境,主要起沙风向为 ENE 和 E,属锐双峰风况,合成输沙方向为(RDD)为 250.7°。

(2) 格库铁路米兰戈壁区年输沙量介于 2.15~3.45 m<sup>3</sup>/a,戈壁之上流动性沙丘造成铁路风沙危害的主要沙源,以中砂和细砂为主。戈壁地表 0—40 cm 范围内以细砂为主,粒径介于 0.125~0.25 mm 之间,施工破坏后极易起沙成为新的沙源。

(3) 单道 HDPE 板、芦苇束和镀锌铁丝网阻沙障阻沙率依次为 96.42%,93.85%和 76.60%,双道提高到 97.95%,98.71%和 92.78%。对比 3 种沙障类型,HDPE 板沙障阻沙效果最好,芦苇束沙障和镀锌铁丝网沙障稍差,经芦苇大网格后,整个防护体系阻沙率达到 95%以上,防护效果优良。

(4) 折线形阻沙沙障虽然积沙量大,但折角部积沙约占 90%以上,该部位极易被积沙掩埋,相比较,直线形阻沙沙障更优。直线形 HDPE 板栅栏与芦苇束大网格阻、固结合的防沙体系,是适宜于格库铁路米兰戈壁区的防沙体系配置模式。

## 参考文献 (References)

[1] 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.

[2] 屈建军,凌裕泉,刘宝军,等.我国风沙防治工程研究现状及发展趋势[J].地球科学进展,2019,34(3):225-231.  
Qu Jianjun, Ling Yuquan, Liu Baojun, et al. The research status and development trends of wind-sand engineering in China [J]. *Advances in Earth Science*, 2019, 34(3):225-231.

[3] 冯连昌,卢继清,邸耀全.中国沙区铁路沙害防治综述[J].中国沙漠,1994,14(3):47-53.  
Feng Lianchang, Lu Jiqing, Di Yaoquan. Review on the prevention of sand damages to railway line in desert areas of China [J]. *Journal of Desert Research*, 1994, 14(3):47-53.

[4] Tan Lihai, Qu Jianjun, Wang Tao, et al. Field observation evidence for kink points in the vertical kinetic energy flux profiles of wind-blown sand over Gobi and its significance [J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(3): e2020GL091224.

[5] 邹学勇,董光荣,王周龙.戈壁风沙流若干特征研究[J].中国沙漠,1995,15(4):368-373.  
Zou Xueyong, Dong Guangrong, Wang Zhoulong. A study on some characteristics of drifting sand flux over gobi [J]. *Journal of Desert Research*, 1995, 15(4):368-373.

[6] 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 Sciences*, 2005, 20(1):19-23.

[7] 李凯崇,蒋富强,薛春晓,等.兰新铁路十三间房段的戈壁风沙流特征分析[J].铁道工程学报,2010,27(3):15-18.  
Li Kaichong, Jiang Fuqiang, Xue Chunxiao, et al. Analysis of the characteristics of Gobi sand-driving wind in Shisanjianfang section of Lanzhou-Xinjiang railway [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2010, 27(3):15-18.

[8] Qu Jianjun, Wang Tao, Niu Qinghe, et al. Mechanisms of the formation of wind-blown sand hazards and the sand control measures in Gobi areas under extremely strong winds along the Lanzhou-Xinjiang high-speed railway [J]. *Science China Earth Sciences*, 2023, 66(2): 292-302.

[9] 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.  
Han Qingjie, Hao Caiyuan, Qu Jianjun, et al. Characteristics of three-dimensional flow field and sand control efficiency at typical sand control engineering area along the Linhe-Hami railway [J]. *Journal of Desert Research*, 2020, 40(6):1-12.

[10] 耿宽宏.戈壁地区铁路防沙林带的防护效应[J].地理学报,1981,36(4):435-441.  
Geng Kuanhong. Protective effect of railway sand control forest belt in Gobi area [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1981, 36(4):435-441.

[11] 赵加海.和田—若羌铁路“七带一体”综合防沙技术[J].科技创新与应用,2024,14(16):144-147.  
Zhao Jiahai. Comprehensive sand control technology of “seven belts in one” on Hotan-Ruoqiang railway [J]. *Technology Innovation and Application*, 2024, 14(16): 144-147.

[12] 谭吉睿.格库铁路芦苇把阻沙栅栏风沙防护参数优化设计[J].甘肃科技,2023,39(4):33-37.  
Tan Jirui. Optimal design of reed-bundle sand fences in the sand control system along the Golmud-Korla railway [J]. *Gansu Science and Technology*, 2023, 39(4):33-37.

[13] Niu Baicheng, Tan Lihai, Zhang X J, et al. Targeted control of sand hazards for a railway in extremely arid regions using fingerprinting approaches [J]. *Geomorphology*, 2020, 361:107189.

[14] Tan Lihai, An Zhishan, Zhang Kai, 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):e2019JF005329.
- [15] Fryberger S G, Dean G. Dune forms and wind regime [M] // Mckee E D. A Study of Global Sand Seas. Washington, USA: U.S. Geological Survey Professional Paper, 1979.
- [16] Udden J A. Mechanical composition of clastic sediments [J]. Geological Society of America Bulletin, 1914, 25(1): 655-744.
- [17] Wentworth C K. A scale of grade and class terms for clastic sediments [J]. Journal of Geology, 1922, 30(5): 377-392.
- [18] 王涛. 兰新高铁戈壁大风区风沙灾害形成机理及防治研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.  
Wang Tao. Study on formation mechanism and prevention of sandstorm disaster in Gobi windy area of Lanzhou-Xinjiang high-speed railway [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [19] 张宏川, 杨爱军, 武开平. 兰新线玉门段防护体系经济效益分析[J]. 中国沙漠, 1998, 18(4): 390-393.  
Zhang Hongchuan, Yang Aijun, Wu Kaiping. The economic effect of railway's protecting system at Yumen section of Lanzhou Xinjiang railway [J]. Journal of Desert Research, 1998, 18(4): 390-393.
- [20] 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.  
Wang Wei, Song Yanhong. Wind tunnel experimental study on actual setup of upright Z-shaped sand barriers in Gobi saline zone along Hetian-Ruoqiang railway [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(2): 50-56.
- [21] 丁雪宁, 和田—若羌铁路大风沙区绿化林带配置的风洞模拟试验[J]. 水土保持通报, 2024, 44(4): 257-264.  
Ding Xuening. Wind tunnel simulation experiments on configuration of railway green belts in intensely blown sand areas of Hetian-Ruoqiang railway [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(4): 257-264.
- [22] Wang Tao, Qu Jianjun, Tan Lihai. Aeolian sediment transport over sandy Gobi: Field studies in the Nanhu Gobi along the Hami-Lop Nor railway [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2023, 11(1): 125-134.
- [23] 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.  
Ding Lusheng. Observation and numerical simulation of the protective effect of the reed-bundle sand control system along the Golmud-Korla railway [J]. Journal of Desert Research, 2024, 44(3): 42-50.

(上接第 80 页)

- [28] 陈洪松, 岳跃民, 王克林. 西南喀斯特地区石漠化综合治理: 成效、问题与对策[J]. 中国岩溶, 2018, 37(1): 37-42.  
Chen Hongsong, Yue Yuemin, Wang Kelin. Comprehensive control on rocky desertification in karst regions of south Western China: Achievements, problems, and countermeasures [J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(1): 37-42.
- [29] 史敏莉, 罗为群, 林佳欣, 等. 岩溶石山火龙果不同套种模式对土壤水稳性团聚体的影响[J]. 现代园艺, 2023(9): 59-60.  
Shi Minli, Luo Weiqun, Lin Jiabin, et al. Effects of different intercropping patterns of pitaya on soil water-stable aggregates in karst rocky mountain [J]. Contemporary Horticulture, 2023(9): 59-60.
- [30] 卢玉鹏, 高柱, 张小丽, 等. 果园生态系统复合经营的开展模式及生态机制综述[J]. 中国果树, 2021(12): 9-15.  
Lu Yupeng, Gao Zhu, Zhang Xiaoli, et al. Review on the development model and ecological mechanism of compound management of orchard ecosystem [J]. China Fruits, 2021(12): 9-15.

(上接第 90 页)

- [30] 何腾兵, 董玲玲, 刘元生, 等. 贵阳市乌当区不同母质发育的土壤理化性质和重金属含量差异研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(6): 157-162.  
He Tengbing, Dong Lingling, Liu Yuansheng, et al. Change of physical-chemical properties and heavy mental element in soil from different parent material/rock [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(6): 157-162.
- [31] 何园球. 红壤质量演变与调控[M]. 北京: 科学出版社, 2008.  
He Yuanqiu. Evolvement and Regulation of Red Soil Quality [M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [32] 田培, 刘嘉欣, 曲丽莉. 土壤可蚀性研究进展与展望[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2024, 58(5): 561-570.  
Tian Pei, Liu Jiabin, Qu Lili. Research progress and prospects on soil erodibility [J]. Journal of Central China Normal University (Natural Sciences), 2024, 58(5): 561-570.