

【工程应用】

# 风积沙路基工程特性和稳定性防护研究综述

李瑞杰<sup>1,2</sup>, 李学丰<sup>1\*</sup>

(1. 宁夏大学 物理与电子电气工程学院 / 固体力学研究所, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏公路管理中心, 宁夏 银川 750011)

**摘要:** 风积沙是重要的沙漠公路路基填料, 其工程特性受到广泛关注。为深入梳理沙漠公路风积沙路基工程特性及稳定性防护, 对风积沙的静力试验特性、压实特性、稳定特性和路基稳定性防护等方面有关工程实践和研究成果进行了综述。研究表明: 风积沙是沙漠公路理想的路基填料; 风积沙最大干密度和最佳含水率对控制风积沙压实特性具有重要影响; 使用土工格室及化学添加剂等方法可有效改良风积沙路基的稳定性。沙漠风蚀和沙害会对风积沙路基产生不利且持续的影响, 建议采取生物防护等多种防护措施。最后, 对当前沙漠公路风积沙路基研究中存在的问题进行讨论, 并展望了未来的研究方向。

**关键词:** 道路工程; 沙漠公路; 风积沙; 工程特性; 路基填筑; 边坡防护; 研究现状

中图分类号: TU44

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)S-0105-10

## State-of-the-art review on aeolian sand subgrade engineering characteristic and stability protection in desert highway

LI Rui-jie<sup>1,2</sup>, LI Xue-feng<sup>1\*</sup>

(1. School of Physics and Electronic-Electrical Engineering / Solid Mechanics Institute, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China;

2. Ningxia Highway Administration Center, Yinchuan 750011, Ningxia, China)

**Abstract:** Aeolian sand is an important desert highway subgrade filler, and its engineering properties have received extensive attention. To thoroughly sort out the engineering characteristics and stability protection of aeolian sand subgrade on desert highways, the engineering practice and research results of the static test, compaction, stability, and subgrade stability protection of aeolian sand were reviewed. The research results show that aeolian sand is an ideal subgrade filler for desert highways. The maximum dry density and optimal moisture content of aeolian sand have important effects on controlling the compaction characteristics of aeolian sand. Using geocells and chemical additives could effectively improve the stability of the aeolian sand subgrade. Wind erosion and sand damage would have adverse and continuous impacts on the aeolian sand subgrade in the desert, and it is recommended to take various protective measures such as biological protection. Finally, the problems existing in the current desert highway aeolian sand subgrade research are discussed, and future research directions have prospected.

**Key words:** road engineering; desert highway; aeolian sand; engineering characteristics; subgrade filling; slope protection; state-of-the-art review

## 0 引言

我国是一个沙漠化严重的国家, 沙漠连同戈壁总面积达 128 万 km<sup>2</sup>, 占到了国土总面积的 13.3%。沙漠地区干旱缺水、昼夜温差大、蒸发量大、流动沙丘多、沙尘暴频发, 修建沙漠公路常面临筑路材

料运输困难、风沙侵蚀严重等诸多难题。为了实现沙漠地区的经济发展, 我国陆续修建了塔里木沙漠公路、S21 阿勒泰至乌鲁木齐高速公路、G1816 乌玛高速青铜峡至中卫段等一批沙漠公路, 在沙海中打造了一条生态廊道, 有力地促进了沙漠地区经济发展。

收稿日期: 2022-03-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (1216020092); 宁夏科技创新领军人才计划项目 (KJT2019001); 宁夏“多尺度力学与工程应用自治区科技创新团队”。

作者简介: 李瑞杰 (1987—), 男, 宁夏隆德人, 博士研究生, 工程师, 主要从事公路工程和岩土工程方面研究。E-mail: lrj456@163.com。

\*通信作者: 李学丰 (1976—), 男, 宁夏平罗人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土本构理论应用及环境岩土工程方面的研究, E-mail: lixuefeng1928@163.com。

本文旨在对近年来国内外沙漠公路风积沙的路基工程特性、建设运行养护等方面综述,介绍了沙漠公路建设和路基边坡防护的最新进展。

# 1 风积沙的工程特性

## 1.1 风积沙静力试验特性

风积沙是经过长期风化,在风力作用下不断搬运和堆积形成的沙层,具有储量丰富、取材方便、抗压能力强的优点,是沙漠地区修建公路路基的主要填料。风积沙粒径范围在 0.001~0.75 mm 之间(如图 1),主要粒径在 0.075~0.25 mm 之间,大量分布在广袤的沙漠地区。

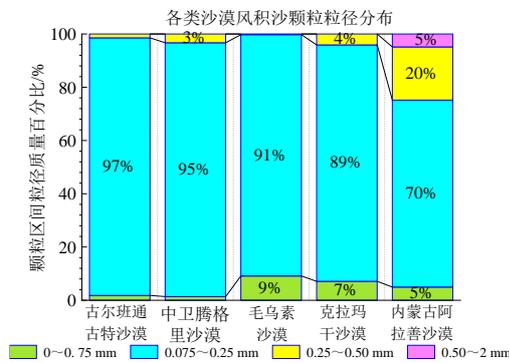


图 1 沙漠风积沙颗粒区间粒径分布  
Fig. 1 Aeolian sand particle size distribution

ELIPE 等<sup>[1]</sup>对世界各地风积沙开展研究,发现不同地域风积沙具有一定相似性,如绝大多数风积沙 PH 值介于 7.5~8.9,天然含水率为 0~4.0%,比重为 2.44~2.78,最佳含水率介于 11.0%~14.5%,最大干密度介于 1.642~1.765 g/cm<sup>3</sup>。无塑性,黏聚力为 0 kPa,有效内摩擦角为 39°~42°,渗透率介于 3.4×10<sup>-7</sup>~1.0×10<sup>-4</sup> m/s,小于 0.075 mm 颗粒质量百分比为 0.1%~8.0%。现有工程实践已证实,级配良好的风积沙可以作为沙漠公路路基填料,但对于部分级配不良的风积沙(不均匀系数 C<sub>u</sub><5.0,

曲率系数 C<sub>c</sub><1.0)而言,当处于最佳含水率时,其承载比试验实测值大于 18%时,仍可作为路基填料<sup>[2]</sup>。从矿物组成上对内蒙古科尔沁沙漠区风积沙的化学成分进行的测试结果表明, SiO<sub>2</sub>为风积沙的主要化学成分,含量约为 65%~68%,如图 2 所示,基础区间为 65% (蓝色部分),可变部分为 3% (黄色部分);从矿物成分看,构成风积沙的颗粒主要为岩屑、长石和石英<sup>[3]</sup>。

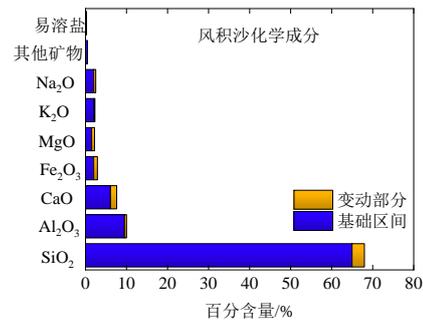


图 2 科尔沁沙漠风积沙化学成分  
Fig. 2 Chemical composition of aeolian sand in Horqin Desert

张宏等<sup>[4]</sup>开展了温度变化对非饱和风积沙土-水特性影响试验,为温湿度影响下的风积沙路基力学性质提供理论支撑和依据。LI 等<sup>[5]</sup>对腾格里沙漠进行了真三轴排水力学试验,结果表明,在不同中间主应力系数 *b* 条件下,3 个正交方向的应力应变关系存在显著差异,呈现显著的各向异性。

LI 等<sup>[6]</sup>对不同密度和围压范围的腾格里沙漠风积沙开展了排水和不排水静力三轴试验,结果证实,排水试验和不排水试验均趋于同一临界状态线,风积沙的剪切特性与密度密切相关(如图 3 所示)。在不排水条件下,三轴应力空间中的 *q-ε<sub>1</sub>* 曲线和有效应力路径可表现出流动、受限流动、应变硬化和应变软化 4 种不排水剪切行为(如图 4 所示)。在不同应力条件下,风积沙试样会表现出流动滑移、胀形破坏和剪切带破坏 3 种破坏类型。

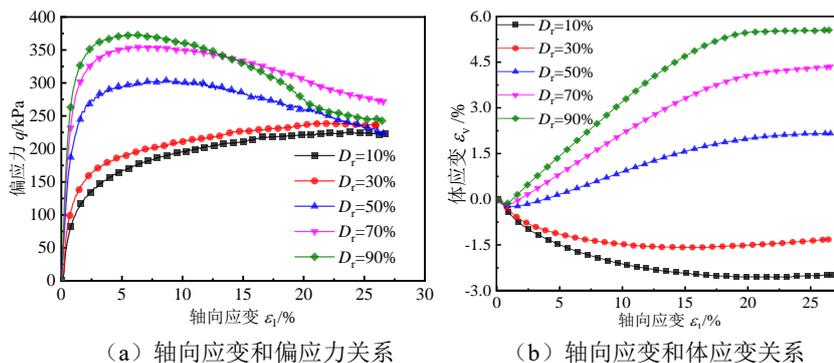


图 3 腾格里沙漠风积沙在排水条件下应力应变关系  
Fig. 3 Stress-strain relation of the aeolian sand of Tengger Desert under drained condition

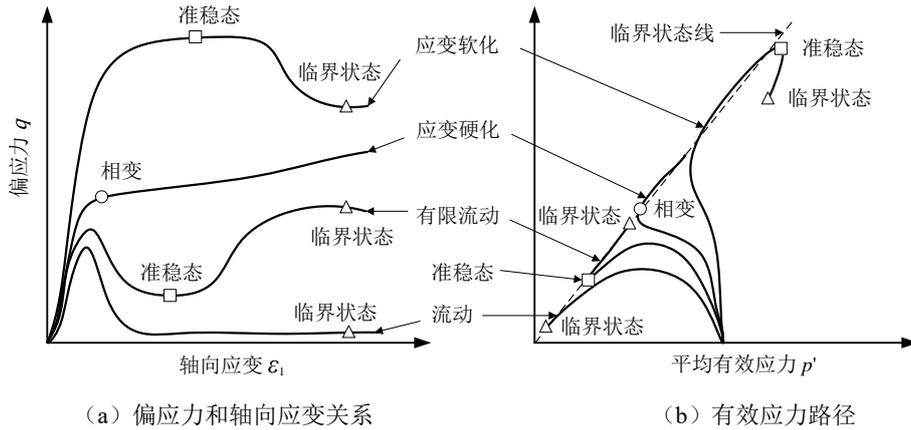


图 4 腾格里沙漠风积沙剪切排水特性

Fig. 4 Undrained shear behaviour of aeolian sand of Tengger Desert

1.2 风积沙击实试验特性

特定密实度下的风积沙扫描电子显微镜照片 (SEM) 显示, 风积沙表面呈现不规则类椭圆或细长成片状的颗粒 (见图 5)。宏观上, 风积沙在天然状态下呈现松散特性, 压实曲线呈现“双峰”型, 其压实机理为: 当风积沙颗粒在干燥状态和外力振动冲击能作用下, 风积沙细观颗粒间发生位移和错动, 此时颗粒组构重新排列, 颗粒之间孔隙减小, 整体趋于密实, 可以得到较大干密度; 随风积沙含水率增大 (一般小于 2%) 引起的非润滑效应会导致风积沙内摩擦阻力增大; 同时在颗粒结合水的主导作用下, 风积沙的内聚力、抗剪性逐渐增大, 整体不易压实且出现干密度下降的现象; 随着含水率持续增大, 结合水膜变厚, 水的润滑作用进一步加强, 引起内摩擦力减小; 当风积沙达到或者接近最佳含水率时, 颗粒间的黏结力较小, 干密度最大; 当含水率超过最佳含水率并持续增大时, 风积沙的内摩擦力和黏聚力进一步减小。考虑到水的不可压缩性, 随着水的体积增大, 沙的干密度再次减小<sup>[7-8]</sup>。

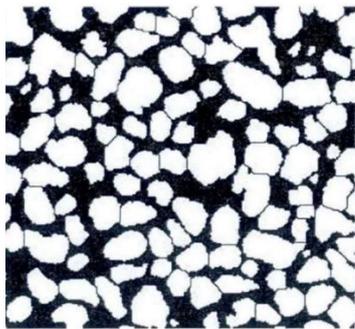


图 5 风积沙颗粒 SEM 照片

Fig. 5 SEM photo of aeolian sand particles

通过击实试验可以有效获得不同状态下风积沙的击实特性, 获得最大干密度和最佳含水率, 为沙漠公路路基压实提供参考和依据。杨振茂等<sup>[9]</sup>通

过动三轴循环荷载试验发现, 压实含水率、循环应力比和围压是循环荷载下风积沙变形的主要因素, 因此在现场风积沙压实中要考虑压实含水率的变化。含水率对风积沙密度具有较大影响, 一般随着风积沙含水率的增加, 其干密度先降低后上升再降低。当风积沙内含水率较大时, 结合水的润滑性大于黏滞性, 内部摩擦阻力减小, 当处在最佳含水率时即可得到风积沙的最大干密度<sup>[10]</sup>。考虑到不同沙漠地域风积沙形成条件和颗粒特性不尽相同, 其最大密实度和最佳含水率之间略有差异 (见表 1)。

表 1 不同风积沙击实试验

Table 1 Compaction tests for different aeolian sands

风积沙地域	最大干密度/g·cm <sup>3</sup>	最佳含水率/%
内蒙古库布其沙漠风积沙	1.71	10.54
古儿班通古特沙漠风积沙	1.78	14.10~14.60
毛乌素沙漠风积沙	1.76	12.00
阿拉善沙漠风积沙	1.82	12.63
毛乌素沙漠风积沙 (乌审旗)	1.79	14.00
乌兰布和沙漠风积沙	1.71	10.80~11.50
宁夏腾格里沙漠风积沙	1.79	15.40

此外, 王磊<sup>[11]</sup> 基于室内试验和现场测试结果, 提出可依据风积沙中小于 0.075 mm 颗粒粒径及其含量百分比 (23%), 确定采用标准重型击实或振动台振动的方法确定风积沙最大干密度。尹文华等<sup>[12]</sup> 以宁夏腾格里沙漠腹地风积沙为例进行风积沙击实试验, 虽然干法振动试验可获得最大干密度, 但鉴于施工现场风积沙实际含水率 (1.5%~2.0%), 建议采用天然含水率下的最大干密度更符合工程实际。

### 1.3 改良风积沙的稳定特性

风积沙具有较好的压实性,风积沙颗粒间组构排列和孔隙大小虽然决定了风积沙的密实情况但由于沙颗粒无黏性,较为分散,抗剪能力差,在不均匀长期应力作用下易产生不同程度的侧向变形,影响路基稳定性,进而产生各种路面病害,影响车辆运行安全。一般交通荷载作用下动应力时程曲线接近正弦波,以风积沙为主的沙漠路基填料须充分考虑路基稳定性,常用的方法是使用土工格室加固风积沙或添加多种矿物来增加风积沙的稳定性。

土工格室的环箍效应和侧向约束效应可有效控制风积沙路基侧向变形,能进一步改善风积沙的稳定特性。但随着路基风积沙层深度的增加,动应力幅值和动加速度进一步衰减<sup>[13]</sup>。张冰冰等<sup>[14]</sup>对比分析土工格室加固风积沙动应力力学特性,根据动应力衰减系数提出了等代路基层厚度计算方法,可换算出土工格室加固风积沙与砾石填筑层之间的厚度关系。土工格栅-非织造布复合材料加固沙土在沙漠公路工程领域具有广阔的应用前景,如 FENG 等<sup>[15]</sup>研究发现非织造布、双轴土工格栅和土工格栅-非织造复合材料 3 种土工织物均具有加固沙土的应力-应变特性和较好抗剪性能。基于莫尔-库仑准则的分析结果进一步发现,土工布对沙土的抗压强度、延性和承载力有显著的增强作用;土工格栅-非织造布复合材料加固砂的抗压强度和延性最高,承载力最好;双向土工格栅和土工格栅-非织造布由于横向梁的存在而起到屏障作用,能够增强沙土与土工格栅界面的相互作用。

大量研究发现,基于水泥、煤灰石、沥青乳液、聚合物乳液、石灰等添加剂材料与风积沙拌合产生的一系列物理化学反应,可进一步改进风积沙的固化特性,提升混合料路基的稳定性。苏跃宏等<sup>[16]</sup>基于固化风积沙材料,研究发现高钙粉煤灰为基质的固化剂(FCS型)比 32.5 级水泥固化风积沙更为可靠经济。ARIAS-TRUJILLO 等<sup>[17]</sup>采用低剂量的乙烯基丙烯酸聚合物乳液对风积沙的性能进行改进,通过扫描电子显微镜(SEM)和能量色散 X 射线光谱(EDX)定性定量分析,证实了该乳液在压实和承载能力(以 CBR 表示)方面对沙土的改性作用。AMHADI 等<sup>[18]</sup>在利比亚沙漠道路建设中研究了水泥加固软弱材料(沙土)技术,尝试用风积沙、人工砂和少量硅酸盐水泥不同比例设计混合料来稳定现有的路基基层,并对处理后的试样进行了水泥重量配比为 0、3%、5%和 7%的压实、无侧限抗压

强度和 CBR 试验,实验结果表明,这种 70%/30%的混合料适合作为道路建筑材料的地基处理材料,通过节约材料和时间来降低道路建设的成本,而且它对沙漠地区的环境影响也更小。

此外,风积沙中掺入油污泥热解残渣废料<sup>[19]</sup>也可明显改善风积沙力学特性,可用作路基填料。

### 1.4 风积沙的振动压实特性

《沙漠公路地区设计与施工指南》(JTG/T D31—2008)<sup>[20]</sup>建议路基压实度一般要求高速、一级公路满足压实度 $\geq 96\%$ ,二级公路压实度 $\geq 95\%$ 。为了使风积沙压实满足工程需要,一般施加外力荷载压实或通过控制振动条件降低风积沙孔隙至合格的路基密实度,采用方法常有重型击实试验、震动压实试验等。薛成等<sup>[21]</sup>分析了路基压实因素,不同地域风积沙的颗粒级配、含水率、碾压方法、碾压机具、载荷大小及振动频率均是影响风积沙路基压实的主要因素。艾尼瓦尔<sup>[22]</sup>结合 S21 阿勒泰至乌鲁木齐高速公路工程实例,进一步证实路基振动干压施工工艺在天然含水率小于 2%的风积沙公路路基路段的适用性。

大量室内振动压实试验可进一步确定最佳振动参数(振动频率、振幅、振动压实速度等)。大量试验结果表明,在一定初始振动范围内,风积沙的压实度和模量会随着振动时间而增加;但振动时间过长后,会导致原有最大密实度状态下的风积沙组构受到影响,从而出现压实度和模量降低的情况。当振动频率在 0~45 Hz 时,风积沙干密度随着振动频率的增加而增加。张生辉等<sup>[23]</sup>基于室内试验和理论分析,给出了震动压路机工作速度、震动加速度、碾压遍数计算方法,提出了风积沙路基的压实工艺。袁玉卿等<sup>[24]</sup>通过现场干法振动压实试验,发现风积沙最佳振动频率在 45~50 Hz 之间,当小振幅(0.4~1.0 mm),振动速度在 3~6 km/h 时,会得到最佳压实度。张浩等<sup>[25]</sup>以陕北毛乌素沙漠为例,进一步证实了不良级配风积沙仍可通过干压法和湿压法达到压实状态,44 Hz 左右的高频、0.8~1.0 mm 小振幅及 4~6 g 的振动加速度的组合冲击振动方法也可取得较为理想的压实效果。

### 1.5 风积沙的承载比试验特性

承载比试验是被用来评估公路路基、地基或基层材料强度的最常用方法之一,常用于设计和确定高速公路和机场路面的厚度,评估道路的路基承载能力。XIA 等<sup>[26]</sup>采用 CBR 法测试了不同含水率、泥浆含量和级配对风沙强度和承载能力的影响。毛

乌素沙漠风积沙室内试验发现, 风积沙的含水率、含泥量和干密度对压实有较大影响, 当含水率达到最佳含水率时, 干密度达到最大值, 此时风积沙颗粒更难移动, 抗剪强度和 CBR 达到最大值。JIN 等<sup>[27]</sup> 以中国的塔克拉玛干沙漠公路为例, 解决了沙漠公路建设的部分难题, 特别是干压实沙底基层, 最大 CBR 值可达 21.5%, 提出了沉降速率与荷载、孔隙率的近似表达式。

## 2 沙漠公路路基

风积沙的密实程度与颗粒细观组构与孔隙空间分布密切相关, 但在不均匀压力下会产生一定的侧向变形, 影响路基稳定性。工程实践表明, 在沙漠腹地及边缘地带, 沙害和风蚀严重, 特别是在沙漠公路迎风边坡及路肩边缘, 如不采取有效措施对路基边坡进行稳定性防护, 将会直接影响到沙漠公路的使用寿命。因此, 风沙防护与治理对高速公路建设与养护具有重要意义。

### 2.1 路基边坡与稳定性防护

除了保证风积沙路基在交通荷载下的稳定性外, 还需要采取必要措施保证路基边坡稳定性, 防止风积沙路基边坡失稳, 将沙害和风蚀危害降到最低, 图 6 为腾格里沙漠采用的生物矿化防沙固沙应用示范。



图 6 腾格里沙漠风沙防治应用

Fig. 6 Sandstorm prevention and control in Tengger Desert

DONG 等<sup>[28]</sup> 借助塔克拉玛干沙漠 (世界第二大移动沙丘) 的综合研究表明, 有效可行的风沙防治措施包括芦苇隔栅、直立丛生芦苇栅栏、直立芦苇栅栏、直立尼龙网栅栏、化学固化剂和黏土固化剂以及人工植被。HAN 等<sup>[29]</sup> 使用化学固沙法控制风沙对塔克拉玛干沙漠高速公路的影响。研制了几种与当地环境相适应的液体聚合物稳定剂作为固沙剂, 如聚乙烯醇乳液、聚乙烯醇乳液、水玻璃-氯化钙混合物、水玻璃-尿素混合物等, 几种稳定剂可快速形成黏结壳体, 具有良好的抗破碎强度、抗风

蚀性能、渗透、抗压强度和弹性, 可有效控制塔克拉玛干沙漠风沙对公路的破坏。LI 等<sup>[30]</sup> 对塔克拉玛干沙漠公路沿线风沙灾害及防沙措施的效果进行综述, 提出了沙漠公路生物防沙体系的可持续发展的建议。毛乌素国道 338 道路对于路基边坡采取缓坡式路堤植草加种沙柳网格防护, 进一步促进沙的成土作用, 取得了一定的防护效果<sup>[31]</sup>。除此之外, 可因地制宜充分发挥生物的防护优势, 如在沙漠水资源较好地地段采用公路沿线广泛使用的芦苇、沙蒿等柴草类防护; 在缺水地段利用沙棘、紫穗槐等耐寒植物的根系固定边坡土壤; 或使用黏性土包路基边坡, 实施路基全面防护; 或采用沥青沙防护, 使用一定比例风积沙混合热沥青, 平铺排实在路基边坡; 或使用一定配比风积沙与水泥的混合材料平铺路基边坡和路肩<sup>[32]</sup>。也可采取工程常用浆砌片石等边坡砌护, 设置高聚酯纤维等材料的土工格栅边坡加固技术, 从而进一步改善风积沙材料抗剪强度弱的缺点, 提高沙漠路基整体内摩擦角<sup>[33]</sup>。

在实践中, 上述各类防护方式各有优缺点, 但根据风沙危害的类型和程度, 只有将各种防治措施结合起来, 才会形成有效的防护体系, 如尼龙网栅栏可广泛应用于流沙较弱的地方, 以加快工程建设; 化学固化剂及黏土固化剂虽可用于加固沙漠路基边坡, 但由于成本高昂, 故不宜大规模扩建; 如采用人工植被控制风沙, 则必须提供良好的环境和较为充足的水源。

### 2.2 公路路基风沙流的防治

风沙危害的程度与风沙活动强度密切相关, 可用输沙强度、输沙量、风速等物理量表征<sup>[34]</sup>。沙漠地区公路主要面临风沙灾害的影响, 在风持续作用下, 沙粒完全或部分掩埋路面, 会持续对路基侵蚀。

HAN 等<sup>[35]</sup> 研究塔克拉玛干沙漠公路所处 3 种典型风积沙地形, 在对风沙地貌成因、形态类型和分布特征进行调查分析的基础上, 提出 2 种典型的地貌组合, 将塔克拉玛干沙漠复杂的横向沙丘链-冲积平原和巨大的纵向沙丘岭-垄间低地划分为几个风沙运动状态特征带, 由此可以定性判断工程安装区域内不同地形位置的沙害类型和严重程度, 进而提出具体的防治沙害方案和措施。LEI 等<sup>[36]</sup> 针对通过系统的野外调查与观测、因子量化和指标设定, 运用模糊数学方法对塔里木沙漠公路沿线的风沙灾害环境进行了分类与区划。结果表明, 公路沿线灾害形成等级指数由北向南递减, 在小尺度上呈现重复空间格局。ABLIMIT 等<sup>[37]</sup> 将风沙流场与沙

漠公路耦合,对沙漠公路沿线风沙波纹形成及运动过程数值模拟研究,结果表明当风向垂直于公路时,风沙更易进入公路;当公路高度大于风沙面范围大小时,风沙更易进入公路。CHENG等<sup>[38]</sup>介绍塔克拉玛干沙漠公路气流和风成沙运动、侵蚀沉积过程连续监测情况,研究发现防沙系统内的风速约为流动沙面以上同一高度风速的33%~100%,风积沙通量约为流动沙面通量的0~31.21%,风速基本遵循对数运算规律,但沿经典剖面的气流主要由地形和植被决定,防沙体系内地表以上存在明显的侵蚀沉积现象。

研究风沙变化规律可为沙漠公路路基风沙流的防治提供技术支撑。大量学者通过风洞实验,进一步了解道路的运动轨迹、转速、受力和碰撞轨迹,为沙漠地区道路风致灾害的研究提供参考。鱼燕萍等<sup>[39]</sup>基于内蒙古S315一级公路风沙危害现状,通过风洞模拟试验研究了不同坡角公路路基附近风沙流运动规律,结果支持工程应用加强路基迎风坡脚和迎风坡肩处工程防护措施,能有效降低风蚀作用。LI等<sup>[40]</sup>模拟沙粒对沙漠道路的破坏过程,在风洞中进行了按比例缩小的试验,并利用高速摄像机捕捉了沙粒的冲击轨迹,结果如图7~8示意图所示。

碰撞轨迹可分为4种类型,每种类型的比例基本稳定,轨迹统计曲线近似于泊松分布,在马格努斯力作用下,沙粒的旋转方向和角速度控制着碰撞轨迹的性质,路基模型的形状和沙粒半径对碰撞轨迹的影响较小。但是路基模型影响沙粒的碰撞角度,沙粒半径影响沙粒的质量和惯性矩,使得碰撞轨迹由图7(c)向图7(b)演化。研究指出,沙粒的形状、风洞内的湍流和沙粒之间的碰撞等因素会改变沙粒的旋转方向,沙粒的径向加速度影响转速。

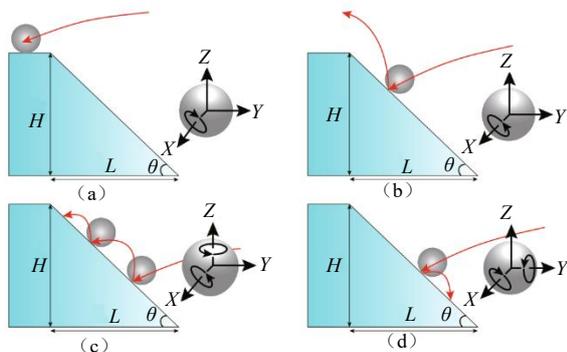


图7 沙粒撞击路基轨迹的类型<sup>[40]</sup>

Fig. 7 Types of trajectories for sand particles which impact on the roadbed<sup>[40]</sup>

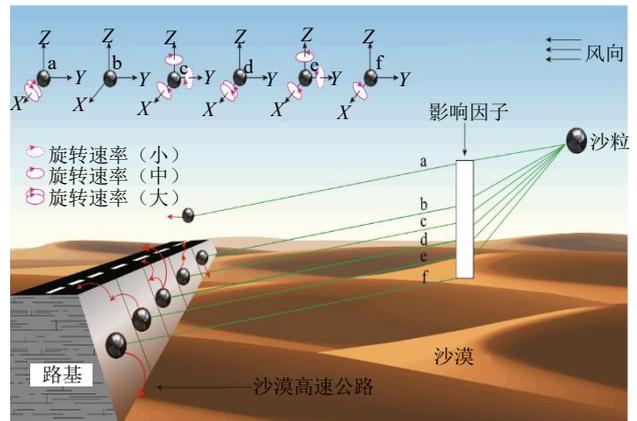


图8 沙粒对风积沙路基破坏<sup>[40]</sup>

Fig. 8 Destruction process of sand grains to wind-blown sands roadbed<sup>[40]</sup>

### 3 沙漠公路路基设计与养护

沙漠公路的建设为沙漠公路路基设计和养护提供了宝贵经验。目前全国已建成通车运营的京新高速内蒙古段、阿拉善盟左旗英雄会公路、乌玛高速青铜峡至中卫段等公路涉及的风沙病害主要形式为风蚀及风沙流、积沙、沙埋、沙打、沙割等。典型病害如风蚀会冲击路基填料,掏空局部路基土体,吹蚀路肩和磨蚀交通安全标志;而常见的积沙病害在风力作用下掩埋路基,影响行车安全。此外,堆状沙埋,造成公路附属设施(如通道、管(涵)、涵洞等结构物)堵塞。

LEI等<sup>[41]</sup>对世界最长的沙漠公路,即中国新疆的塔里木沙漠公路面临风沙灾害(风蚀和积沙)开展研究,沙漠公路沿线地理环境为风沙灾害提供了沙源和风源,优化的公路选线,合适的路基横截面和完善的防沙体系,对控制风沙的形成具有重要作用。DUTTA<sup>[42]</sup>讨论了水泥对沙漠风积沙工程性质的评估和影响,水泥添加改善了沙土的工程性质,而具有水泥的稳定沙体可用作公路路面中基础材料。MAO等<sup>[43]</sup>首次对我国沙漠公路的自然区域划分进行了评价,揭示自然环境的时空分布及其对公路建设工程的影响,提出了沙漠公路评价的原则、方法和指标体系。PAN等<sup>[44]</sup>研究了风积沙堆积对沥青路面(AC-13和AC-16沥青混合料)抗滑性能的影响,发现风积沙的存在对沥青路面的宏观和微观结构有显著影响,导致沥青路面的防滑性能下降,可进一步在沙漠公路路面的设计和养护中考虑不良影响。MARSH等<sup>[45]</sup>提出绿化、沙障和抗沙漠植被等典型方法虽然可以防止高速公路积沙,但建

设和维护成本较高, 因此讨论分析在易积沙地区, 使用不同类型的道路安全屏障的影响, 并以一段钢丝绳屏障试验段替换现有 w 型钢中间屏障的影响为例进行了研究, 该试验被证明在减轻局部积沙方面是成功的, 被建议在沙漠环境中考虑。刘刚等<sup>[46]</sup>提出了防治沙漠区公路风沙病害的设计原则, 建议按照“因地制宜、因害设防”的原则, 注重封闭、固定、阻拦、疏导、改向、消散防沙方法确保沙漠公路通行安全。

约旦沿海地区和沙漠地区的道路和地基面临承载能力低的难题, 迫切需要进行有效改良, 但是紧缺的水资源增加了高速公路建设成本。ISMEIK 等<sup>[47]</sup>使用盐水处理了 4 种常见的土壤, 开展界限含水率试验测试土的液限、塑限和塑性指数, 还开展了压实和无侧限剪切强度试验, 试验结果证实利用盐水可用于改善细粒土的工程性质, 具有潜在的经济效益。

## 4 讨论与展望

风积沙作为重要路基填料, 在沙漠公路建设中发挥了巨大作用, 但沙漠路基的建设仍然离不开路基防护和生态保护。

(1) 当前已有大量的工程实践表明, 在特定区域沙漠环境下开展路基稳定性、阻沙性能等研究, 仍以经验居多, 理论和数值模拟分析较少。现有关于沙漠路基的研究多侧重于室内试验压实特性、振动特性、路基稳定性方面的试验研究, 而建立在风沙流、沙漠病害特点、风沙物理力学原理、应用空气动力学等基础上机理研究较少, 较少考虑沙漠地区温度梯度、水分、风沙耦合影响; 工程应用中也缺乏开展大温差沙漠环境的长效耐久路基及其稳定性相关理论研究。

(2) 沙漠公路“以阻为主, 固阻结合”的防沙体系建设成本高, 公路运营维护成本大, 对生态和地貌有重要影响, 如图 9 所示为腾格里沙漠腹地的第一条沙漠高速公路乌玛高速中卫段。从地理图看, 高速公路对沙漠腹地的切割会一定程度阻挡沙漠流的运动, 因此需从生态保护、路基稳定性、防护成本等多方面考虑, 基于疏堵结合进一步深入研究风积沙路基工程特性。

(3) 风积沙路基工程的养护除了解决风沙对公路主体及附属设施的侵害外, 还应考虑发挥大数据和智慧交通优势, 建立风沙灾害安全预警平台,

实现沙漠公路路基防护的安全、可靠、经济、绿色发展。



图 9 腾格里沙漠腹地的乌玛高速中卫段

Fig. 9 Zhongwei section of the Wuhai-Maqin expressway in the Tengger Desert hinterland

## 参考文献

- [1] ELIPE M G M, LOPEZ-QUEROL S. Aeolian sands: characterization, options of improvement and possible employment in construction the state-of-the-art[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 73: 728-739.
- [2] 甫尔海提·艾尼瓦尔. 沙漠地区高速公路风积沙路基湿压法施工工艺与质量控制[J]. *公路交通技术*, 2021, 37(3): 1-7.  
FUERHAITI Ainiwaer. Construction technology and quality control of wet compaction method for aeolian sand subgrade of expressway in desert area[J]. *Technology of Highway and Transport*, 2021, 37(3): 1-7.
- [3] 张宏, 王智远, 刘润星. 科尔沁沙漠区风积沙动力压实特性研究[J]. *岩土力学*, 2013, 34(增刊 2): 100-104.  
ZHANG Hong, WANG Zhi-yuan, LIU Run-xing. Research on dynamic compaction characteristics of aeolian sand in desert region of Keerqin[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(S2): 100-104.
- [4] 张宏, 刘海洋, 李聪. 风积沙路基土土-水特征曲线温度效应研究[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(7): 42-49.  
ZHANG Hong, LIU Hai-yang, LI Cong. Temperature effect of soil-water on characteristic curve of aeolian sand subgrade soil[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 33(7): 42-49.
- [5] LI X F, MA Z G, LU W N, et al. True-triaxial drained test of tengger desert sand[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 2020: 8851165.
- [6] LI X F, XU W D, LEI C, et al. Shear behaviour of aeolian

- sand with different density and confining pressure[J]. *Applied Sciences-Basel*, 2022, 12(6): 3020.
- [7] 杨玉泉, 赵立东. 基于回弹弯沉值的风积沙路基性能研究[J]. *公路工程*, 2019, 44(5): 247-251.  
YANG Yu-quan, ZHAO Li-dong. Study on the performance of aeolian sand subgrade based on resilience deflection[J]. *Highway Engineering*, 2019, 44(5): 247-251.
- [8] 李志勇, 曹源文, 梁乃兴, 等. 风积沙的压实机理[J]. *中国公路学报*, 2006, 19(5): 6-11.  
LI Zhi-yong, CAO Yuan-wen, LIANG Nai-xing, et al. Compaction mechanism of aeolian sand[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2006, 19(5): 6-11.
- [9] 杨振茂, 侯永峰, 孔恒, 等. 风积沙的压实特性与循环荷载下变形性状的试验研究[J]. *中国公路学报*, 2002, 15(2): 8-10.  
YANG Zhen-mao, HOU Yong-feng, KONG Heng, et al. Compaction property of aeolian sand and its deformation behavior under cyclic loading[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2002, 15(2): 8-10.
- [10] 牟献友, 谷攀. 国内风积沙工程特性研究综述[J]. *内蒙古农业大学学报*, 2010, 31(1): 307-310.  
MOU Xian-you, GU Pan. Review on engineering characteristics of wind-blown sand[J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University*, 2010, 31(1): 307-310.
- [11] 王磊. 风积沙路基压实控制方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.  
WANG Lei. The research on compaction quality control methods of aeolian sand[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [12] 尹文华, 王旭, 张继周, 等. 沙漠腹地高速公路风积沙填料压实特性及填筑方法试验研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2021, 18(5): 1177-1187.  
YIN Wen-hua, WANG Xu, ZHANG Ji-zhou, et al. Experimental study on compaction characteristics and filling method of subgrade aeolian sand for expressway in desert hinterland[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2021, 18(5): 1177-1187.
- [13] 张冰冰, 刘杰, 阿肯江·托呼提, 等. 土工格室加固风积沙路基不同深度动力响应试验研究[J/OL]. *地质科技通报*, 2021, <http://doi.org/10.19509/j.cnki.dzkq.2021.0097>.  
ZHANG Bing-bing, LIU Jie, TOHUTI Akangjiang, et al. Experimental study on dynamic response of aeolian sand subgrade reinforced by geocell at different depths[J/OL]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2021, <http://doi.org/10.19509/j.cnki.dzkq.2021.0097>.
- [14] 张冰冰, 刘杰, 阿肯江·托呼提, 等. 土工格室加固风积沙路基动应力响应现场试验研究[J]. *公路交通科技*, 2021, 38(12): 37-46.  
ZHANG Bing-bing, LIU Jie, TOHUTI Akangjiang, et al. Field experimental study on dynamic stress response of aeolian sand subgrade strengthened by geocell[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2021, 38(12): 37-46.
- [15] FENG G Y, WANG X Y, ZHANG D T, et al. Influence of geotextile type on strength and failure behavior of geotextiles reinforced desert sand based on Mohr-Coulomb criterion[J]. *Materials Research Express*, 2019, 6(1): 015509.
- [16] 苏跃宏, 吕川, 王晓敏, 等. 固化风积沙底基层路用性能研究[J]. *中外公路*, 2021, 41(6): 271-275.  
SU Yue-hong, LYU Chuan, WANG Xiao-min, et al. Study on road performance of cured aeolian sand subbase[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2021, 41(6): 271-275.
- [17] ARIAS-TRUJILLO J, MATIAS-SANCHEZ A, CANTERO B, et al. Effect of polymer emulsion on the bearing capacity of aeolian sand under extreme confinement conditions[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 236: 117473.
- [18] AMHADI T S, ASSAF G J. Assessment of strength development of cemented desert soil[J]. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 2019, 14(4): 543-549.
- [19] 冉武平, 王亚强, 李玲, 等. 油污泥热解残渣处治风积沙路基力学性能研究[J/OL]. *湖南大学学报*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1061.n.20211229.1653.001.html>.  
RAN Wu-ping, WANG Ya-qiang, LI Ling, et al. Study on mechanical properties of aeolian sand subgradetreated by pyrolysis residue of oil sludge[J/OL]. *Journal of Hunan University*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1061.n.20211229.1653.001.html>.
- [20] 中华人民共和国交通运输部. 沙漠地区公路设计与施工指南: JTG D31—2008[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China.

- Guidelines for Highway Design and Construction in Sandy Desert Area: JTG D31—2008[S]. Beijing: China Communications Press, 2008.
- [21] 薛成, 李洪文, 胡冰. 沙漠路基风积沙特性和压实机理研究[J]. 公路, 2013(6): 20-24.  
XUE Cheng, LI Hong-wen, HU Bing. Study on aeolian sand properties of desert subgrade and compaction mechanism[J]. Highway, 2013(6): 20-24.
- [22] 甫尔海提·艾尼瓦尔. 沙漠地区高速公路风积沙路基干压法施工工艺与质量控制[J]. 中国公路, 2021(3): 100-103.  
FULHEITI Anwar. Construction technology and quality control of dry compaction method for aeolian sand subgrade of expressway in desert area[J]. China Highway, 2021(3): 100-103.
- [23] 张生辉, 王新民, 陈忠明. 沙漠地区高速公路风积沙路基压实方法研究[J]. 公路交通科技, 2004, 21(8): 29-33.  
ZHANG Sheng-hui, WANG Xin-ming, CHEN Zhong-ming. Study on compaction method for aeolian-sand roadbed of expressway in desert area[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(8): 29-33.
- [24] 袁玉卿, 王选仓. 风积沙压实特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(3): 360-365.  
YUAN Yu-qing, WANG Xuan-cang. Experimental research on compaction characteristics of aeolian sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(3): 360-365.
- [25] 张浩, 胡江洋, 折学森, 等. 沙漠地区某高速公路风积沙压实特性与压实工艺研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(4): 806-811.  
ZHANG Hao, HU Jiang-yang, SHE Xu-sen, et al. Research on compaction characteristics and compaction process of aeolian sand for a highway in desert[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2015, 12(4): 806-811.
- [26] XIA H, ZHANG J T, DU G Y. Aeolian sand bearing capacity in the mu us desert of China based on the California bearing ratio[J]. Journal of Engineering Research, 2020, 8(1): 28-41.
- [27] JIN C N, DONG Z B, LI Z N, et al. Construction techniques for the Taklamakan desert highway: research on the construction materials and the results of field tests[J]. Environmental Geology, 2006, 49(6): 915-922.
- [28] DONG Z B, CHEN G T, HE X D, et al. Controlling blown sand along the highway crossing the Taklimakan desert[J]. Journal of Arid Environments, 2004, 57(3): 329-344.
- [29] HAN Z, WANG T, DONG Z, et al. Chemical stabilization of mobile dunefields along a highway in the Taklimakan desert of China[J]. Journal of Arid Environments, 2007, 68(2): 260-270.
- [30] LI C J, WANG Y D, et al. Damage by wind-blown sand and its control measures along the Taklimakan desert highway in China[J]. Journal of Arid Land, 2020, 13(1): 98-106.
- [31] 薛飞. 风积沙填筑路基的边坡稳定性与工程防护措施[J]. 黑龙江交通科技, 2019, 42(6): 15-18.  
XUE Fei. Slope stability and engineering protection measures of the drift-sand filled subgrade[J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2019, 42(6): 15-18.
- [32] 刘玉华. 风积沙路基边坡稳定性分析及防护对策研究[J]. 黑龙江交通科技, 2010, 33(2): 45-47.  
LIU Yu-hua. Stability analysis and protection countermeasures of aeolian sand subgrade slope[J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2010, 33(2): 45-47.
- [33] 唐忠亮, 严少发. 风积沙路基边坡防护及防沙害关键施工技术[J]. 施工技术, 2020, 49(增刊 1): 1375-1377.  
TANG Zhong-liang, YAN Shao-fa. Key construction technologies for aeolian sand roadbed slope protection and prevention of sand damage[J]. Construction Technology, 2020, 49(S1): 1375-1377.
- [34] 韩致文, 王涛, 孙庆伟, 等. 塔克拉玛干沙漠公路风沙危害与防治[J]. 地理学报, 2003, 58(2): 201-208.  
HAN Zhi-wei, WANG Tao, SUN Qing-wei, et al. Sand harm in Taklimakan desert highway and sand control[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(2): 201-208.
- [35] HAN Z W, DONG Z B, WANG T, et al. Observations of several characteristics of aeolian sand movement in the Taklimakan desert[J]. Science in China Series D-Earth Sciences, 2004, 47(1): 86-96.
- [36] LEI J Q, LI S Y, FAN D D, et al. Classification and regionalization of the forming environment of windblown sand disasters along the Tarim desert highway[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(S2): 1-7.
- [37] ABLIMIT A, GEN I, ABDIKEREM X. Numerical study

- on aeolian sand ripples forming and moving process in desert highway[J]. *Key Engineering Materials*, 2011, 20(1): 1032-1037.
- [38] CHENG H, HE J J, XU X R, et al. Blown sand motion within the sand-control system in the southern section of the Taklimakan desert highway[J]. *Journal of Arid Land*, 2015, 7(5): 599-611.
- [39] 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 Yan-ping, XIAO Jian-hua, QU Jian-jun, 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.
- [40] LI S H, LI C, YAO D, et al. Wind tunnel experiments for dynamic modeling and analysis of motion trajectories of wind-blown sands[J]. *European Physical Journal E*, 2020, 43(4): 22.
- [41] LEI J Q, WANG X Q, WANG D, et al. The blown sand disaster to the Tarim desert highway in Xinjiang, China[J]. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 2002, 45(12): 165-173.
- [42] DUTTA R K. Effect of cement on the engineering properties of sand comparative study[J]. *Road Materials and Pavement Design*, 2008, 9(2): 323-332.
- [43] MAO X S, WANG F C, WANG B Z. Nationwide desert highway assessment: a case study in China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2011, 8(7): 2734-2746.
- [44] PAN J S, ZHAO H, WANG Y, et al. The influence of aeolian sand on the anti-skid characteristics of asphalt pavement[J]. *Materials*, 2021, 14(19): 5523.
- [45] MARSH F, WEBSTER R. Mitigating localised sand accumulation using wire rope safety barrier[J]. *Journal of the Australasian College of Road Safety*, 2018, 29(2): 20-26.
- [46] 刘刚, 高海男. 沙漠地区公路风沙病害分析及处治措施研究[J]. *公路*, 2018, 63(4): 57-59.  
LIU Gang, GAO Hai-nan. Analysis and treatment measures of highway sandstorm diseases in desert area[J]. *Highway*, 2018, 63(4): 57-59.
- [47] ISMEIK M, ASHTEYAT A M, RAMADAN K Z. Stabilisation of fine-grained soils with saline water[J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2013, 17(1): 32-45.