

王薇, 屈建军, 牛清河, 等. 鸣沙山月牙泉景区风道疏通工程对区域风动力环境影响[J]. 中国沙漠, 2026, 46(3): 231-239.

## 鸣沙山月牙泉景区风道疏通工程 对区域风动力环境影响

王薇<sup>1,2</sup>, 屈建军<sup>1,3</sup>, 牛清河<sup>1</sup>, 信晓磊<sup>4</sup>, 黄文明<sup>5</sup>, 崔全彬<sup>5</sup>,  
陈喜成<sup>5</sup>, 李海江<sup>5</sup>, 安志山<sup>1</sup>, 张克存<sup>1</sup>

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院 干旱区生态安全与可持续发展全国重点实验室/敦煌戈壁荒漠生态与环境  
研究站, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 西北大学 城市与环境学院, 陕西 西安  
710127; 4. 甘肃北方技工学校, 甘肃 兰州 730000; 5. 鸣沙山月牙泉景区服务中心, 甘肃 敦煌 736200)

**摘要:** 针对鸣沙山月牙泉景区南北沙山相向移动威胁月牙泉存续的问题, 景区服务中心于2012年实施风道疏通工程, 但截至目前尚未评估工程对区域风动力环境的影响。鉴于此, 本文基于景区内布设全自动气象观测仪所获取的2009—2025年气象数据, 统计平均风速及频次并计算输沙势, 探讨景区风动力环境对风道疏通工程的响应。结果表明: (1) 观测点年平均风速呈波动上升趋势, 年平均起沙风速为下降趋势; (2) 风向热力图表明近地表风速在空间上受疏通工程影响明显, 风道疏通后对应风向年平均起沙风速增幅约为10%; (3) 区域0~5 m·s<sup>-1</sup>风速区间占全年风速记录比例在90%以上, 随着风速等级升高, 对应比例下降; (4) 风道疏通工程影响着对应方向输沙势, 2013—2017年工程实施期间, 对应风向输沙势增大。综上可知风道疏通工程对景区风动力环境恢复有着积极作用。

**关键词:** 风动力; 风沙危害; 工程效益; 鸣沙山月牙泉景区; 输沙势

文章编号: 1000-694X(2026)03-231-09

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2026.00052

中图分类号: P931.3

文献标志码: A

### 0 引言

鸣沙山月牙泉景区“沙山抱泉, 泉映沙山”的独特景观兼具科研与旅游价值, 沙泉共生成因机制也一直是干旱区风沙地貌研究热点之一<sup>[1]</sup>。前人利用遥感、野外观测等技术手段, 系统揭示了研究区多尺度地形与局地环流共同作用下的复杂近地表流场特征<sup>[2-4]</sup>, 阐明了以金字塔沙丘和线性沙丘为主体的沙山动态变化规律, 反映了风沙活动主导下沙粒粒度分异与空间迁移的风沙沉积特征<sup>[5-6]</sup>, 揭示了敦煌绿洲和鸣沙山之间的局地环流, 提出景区内部沙山与月牙泉因热力差异形成的小尺度山谷风增加了景区近地表流场复杂性<sup>[7-10]</sup>, 这一动力特征为沙山与月牙泉长期共存提供了有利条件。胡世雄等<sup>[11]</sup>揭示了区域全年盛行西北风、东北风和南风, 三向风力动态平衡共同维持沙丘稳定状态<sup>[12-13]</sup>, 并

阐明地形放大上升气流和局地环流促使金字塔沙丘增高增大<sup>[14]</sup>。受上述风力与地形共同影响, 域内沙脊线短期内呈现往复摆动而非单向迁移<sup>[15]</sup>, 但长期航拍相片解译发现月牙泉受南北沙山夹击态势明显<sup>[16-17]</sup>。除区域环流和局部地形调控作用外, 月牙泉为地形低洼切割至地下水位而形成的下降泉, 其与地下水为同一水体, 地下水不断上涌维系着月牙泉的存在<sup>[17-20]</sup>。上述区域风场、局地环流、地形地貌与地下水等多要素协同作用, 共同维持了鸣沙山与月牙泉生态系统的长期稳定存在。

然而, 在自然因素和人为活动的共同影响下, 南北两山对月牙泉形成夹击之势<sup>[21]</sup>, 月牙泉存续面临威胁。基于相关研究结果, 研究者指出南北沙山夹击所引发的沙害根源在于上风向林带建植密度过高、规模过大<sup>[22]</sup>, 可通过疏通主风向风道, 提高近地表风速, 恢复景区近地表风沙流场动态平衡, 从

收稿日期: 2026-02-09; 改回日期: 2026-03-26

资助项目: 中国科学院西部之光青年学者项目; 甘肃省陇原青年英才项目

作者简介: 王薇(2002—), 女, 四川泸州人, 硕士研究生, 主要从事风沙工程研究。E-mail: wang\_wei@niecr.ac.cn

通信作者: 安志山(E-mail: an1986wen@163.com)

而实现沙害的有效治理。基于此,景区服务中心于2012—2017年提出并实施了风道疏通工程。但截至当前,尚未评估风道疏通工程对区域风动力环境的影响。鉴于此,亟须系统剖析区域风动力环境,评估风道疏通工程对区域风场格局和风动力环境影响,为鸣沙山月牙泉景区生态保护与可持续发展提供科学依据和决策依据。

## 1 研究区与研究方法

### 1.1 研究区概况

位于中亚极端干旱区东部边缘的敦煌<sup>[23]</sup>,属于典型大陆性荒漠气候。冬半年受蒙古高压影响,区域气流下沉,全年干旱少雨,降水量不足40 mm,日照时间长,蒸发量可高达2 400 mm<sup>[24-25]</sup>。鸣沙山月牙泉景区位于敦煌市市区南5 km处,南接鸣沙山,

北靠敦煌绿洲,东邻戈壁滩与三危山相望。鸣沙山月牙泉景区由大泉湾(I)、小泉湾(II)和四周沙山组成(图1),其中大泉湾北部环绕着北沙山(III)东南和西南两沙臂,南部则为西北-东南走向南沙山(IV),西侧外部是西沙山(V),小泉湾处在南沙山和东沙山(VI)的半包围之中。

### 1.2 研究方法

月牙泉东观测站地处大泉湾与小泉湾交会地带,对景区近地表流场变化高度敏感,利用其观测数据可有效阐明局地环流特征及强度变化规律。于2009年1月在此处架设一台全自动气象观测仪,监测要素包括风速和风向,风速测量高度为2 m,风速采集时间步长10 min,站点具体位置见图1。基于此观测仪,获取了2009—2025年连续风向和风速观测数据,其中2018年因仪器损坏,数据缺失。

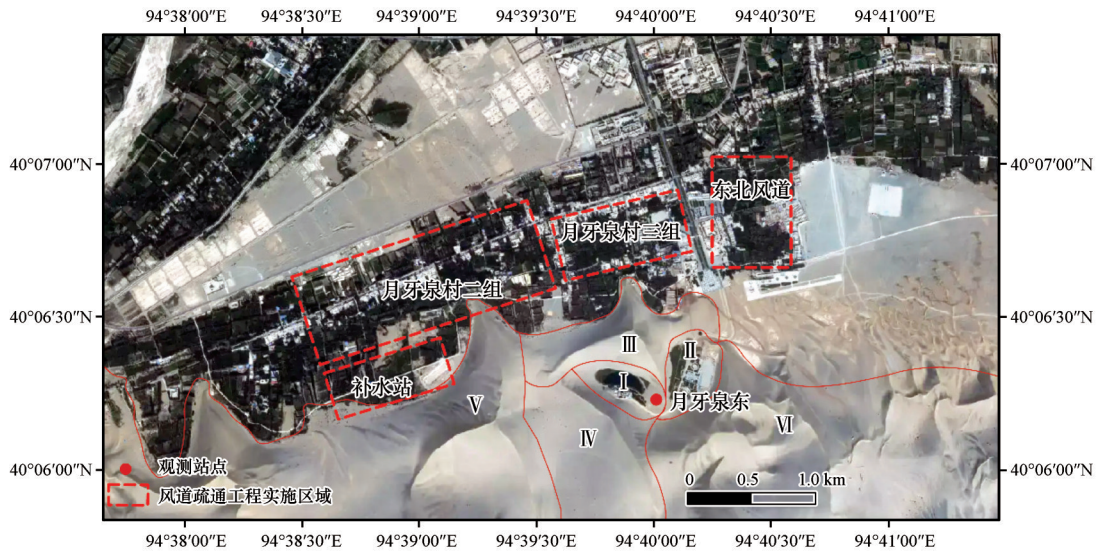


图1 鸣沙山月牙泉景区风道疏通工程实施区域及气象站点位置示意图

Fig.1 Schematic map of the wind corridor dredging project area and a meteorological station around Mingsha Mountain and Crescent Moon Spring

汇总整理上述监测数据后,分别计算年平均风速和年平均起沙风速,以及16个风向上年平均风速和年平均起沙风速,并对0~5、5~6、6~7、7~8、8~9、9~10、10~11、11~12、>12 m·s<sup>-1</sup>风速区间进行频次统计并计算百分比、输沙势,绘制风玫瑰图。参照前人研究成果,该区域的2 m高度处起沙风为5 m·s<sup>-1</sup><sup>[26-27]</sup>

### 1.3 输沙势

输沙势是衡量区域风沙活动强度的重要指标之一。基于风速廓线的对数分布规律,本研究将月

牙泉东观测点2 m高度的风速数据转换为10 m高度的对应数据,风向数据保持不变。2 m和10 m高度风速换算公式为:

$$U_{10} = \frac{U_2(\ln 10 - \ln z_0)}{\ln 2 - \ln z_0}$$

式中: $U_{10}$ 为10 m高度风速; $U_2$ 为2 m高度风速; $z_0$ 为粗糙度,参照前人研究成果,此处 $z_0$ 取值为 $9.3 \times 10^{-4}$  m<sup>[28]</sup>。

输沙势计算利用10 m高度风速,并采用Fryberger等<sup>[29]</sup>提出的经典输沙势公式:

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

式中:  $DP$  表示输沙势, 以矢量单位 (Vector Unit, 简称 VU) 进行量化;  $V$  为超过临界起动风速的风速,  $V_c$  为临界起动风速 ( $V_c$  取值为  $11.66 \text{ n mile} \cdot \text{h}^{-1}$ ), 二者单位均为  $\text{n mile} \cdot \text{h}^{-1}$ ;  $t$  表示起沙风持续作用的时间, 通常以该风速出现的频率来表征。

#### 1.4 风道疏通工程

研究区主导风向为东北风与偏西风, 风道疏通工程则以月牙泉为圆心、 $3 \text{ km}$  为半径作为施工范围, 划定  $33.75^\circ \sim 78.75^\circ$  偏东北风通道扇区与  $236.25^\circ \sim 303.75^\circ$  偏西风通道扇区为核心作业区域。通过对区域内高大林木实施修剪、截干和砍伐等措施, 拓宽东北、西北两大主导风道的通风断面, 提升进风通量。鉴于风道疏通工程规模较大、影响范围广且生态效应深远, 为防止区域风动力环境与生态系统发生剧烈扰动, 工程采用分期、分阶段方式实施, 整体实施周期为 2012—2017 年。其中, 2012 年重点疏通东北风通道。2013 年砍伐月牙泉村二组高大杨树以疏通西北风道。2015 年疏通两个区域以恢复西北风道, 区域一为月牙泉二组沙排场周围至景区北沙山一线, 区域二为月牙泉村二组闫家湾至景区

西沙山一线, 砍伐部分高大树木, 对经济林则是修剪树冠, 降低风阻。2017 年再次对西北风道和东北风道进行疏通, 东北片区砍伐月牙泉三组约 2 100 株高大杨树, 西北片区砍伐月牙泉景区渗水工程补水站约 810 株高大杨树, 保留杏树、桃树等经济林。

## 2 结果与分析

### 2.1 平均风速

如图 2 所示, 2009—2025 年, 观测点年平均风速先降后升, 变化范围为  $1.5 \sim 2.29 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 最大值出现在 2021 年, 最小值出现在 2015 年。其中, 2009—2012 年, 年平均风速逐年下降, 由  $2.21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  降至  $1.91 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 降幅达 14%。风道疏通工程实施后, 年平均风速略有上升, 2013 年年平均风速为  $2.05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 较 2012 年增加  $0.14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。2016 年年平均风速再次回升为  $2.01 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 且 2016—2025 年稳定在  $2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  之上, 最大值为  $2.29 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 出现在 2021 年, 其次为  $2.28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 出现在 2025 年。工程结束后, 区域通风条件改善, 进入域内的气流增强, 年平均风速呈小幅上升趋势。

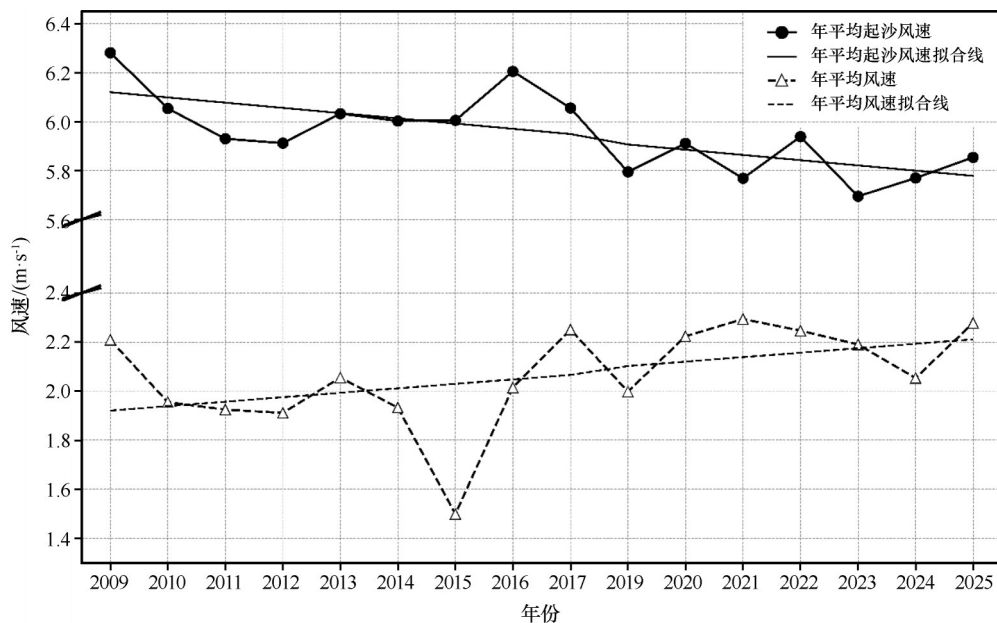


图2 2009—2025 年月牙泉东观测点年平均风速和年平均起沙风速年际变化特征

Fig.2 Interannual variation characteristics of the average wind speed and the average sand-driving wind speed at the Crescent Spring east observation point from 2009 to 2025

2009—2025 年观测点年平均起沙风速呈现先降后升再降的变化趋势, 波动范围为  $5.70 \sim 6.28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 最大值出现在 2009 年, 最小值出现在 2023 年。其

中, 2009—2012 年年平均起沙风速逐年下降, 2012 年为  $5.91 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 相较于 2009 年下降  $0.37 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 降幅为 5%。2013—2017 年, 年平均起沙风速略有回升,

2013年相较于2012年增长 $0.12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。2019—2025年,年平均起沙风速波动变化,波动范围为 $5.70\sim 5.94\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

### 2.2 风向-年份热力图

如图3所示,不同风向上平均风速的年际变化差别较大。SSE、S和WSW方向呈现上升趋势,E和NW方向则呈现下降趋势,其余风向均有波动,但风速稳定在 $1\sim 2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

2009—2016年,整体风速偏低。仅少数风向(SSW、SSE、WNW和E方向)年平均风速稳定在 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,其中SSW向出现了大于 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速。2014年,NE、ENE、SSE方向年平均风速增加,相较

于2013年分别增加 $0.97、1.48、1.86\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,增幅分别为85%、125%、60%。与之相反,SSW、SW、W、WNW、NW方向分别下降 $2.11、0.65、0.79、1.66、1.27\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,降幅分别为62%、30%、30%、61%、55%。2017—2025年,整体年平均风速相较于前期增大,尤其是S和SSE方向。发生上述变化原因在于:疏通后的东北风道和西北风道使得区域整体风力增强,东风年平均风速随之上升。同时,西风环流加强,增加了绕南沙山进入景区的气流,使得观测点南风的年平均风速明显增强。另一方面,西沙山对偏弱风力的阻挡作用依然存在,一定程度抑制了偏西风方向微风的进入,使得该观测点记录的偏西风风速仍维持先前水平。

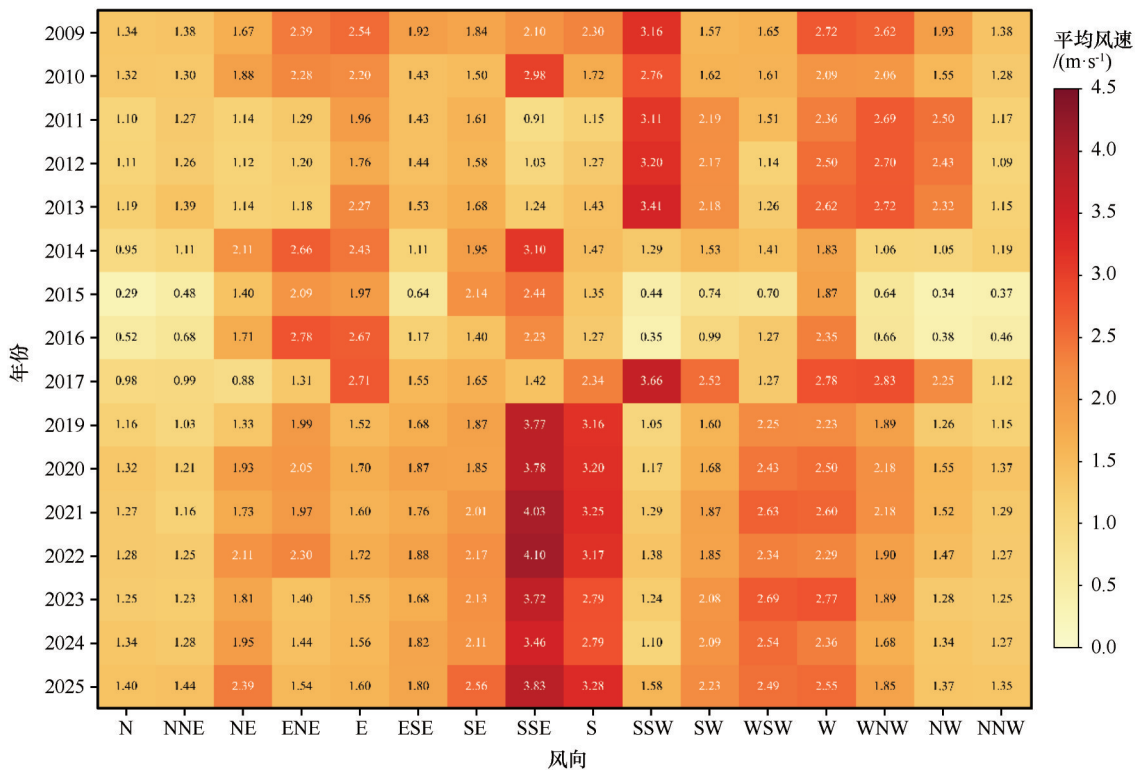


图3 月牙泉东观测点2009—2025年年平均风速的年际-风向变化热力图  
Fig.3 Annual-directional variation heatmap of average wind speed at the Crescent Spring east observation point from 2009 to 2025

如图4所示,2009—2025年,观测点年平均起沙风速整体变化趋势可分为3个阶段。第一阶段为2009—2012年,此阶段各风向年平均起沙风速多大于 $6.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,热力图呈现橙色和浅红色,高速风集中出现在东北向和西北向。2009年E、ENE、W、WNW方向年平均起沙风速分别为 $6.68、6.46、6.46、6.41\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。第二阶段为2013—2017年,该时段内风速高值集中在ENE、E、W和WNW方向。2012年东

北风道疏通后,2013年ENE与E风向平均起沙风速分别提升 $1.03\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $0.41\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,增幅为18%和6%;2013年西北风道疏通后,2014年W风向平均起沙风速增加 $0.61\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,增幅为9%;2015年西北风道疏通后,2016年W与WNW风向平均起沙风速分别提高到 $6.37\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $7.16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,增幅为6%与18%。这一阶段风速变化与风道疏通的影响高度同步,疏通后风速增高,尤其是在西北方向和东南方向。第

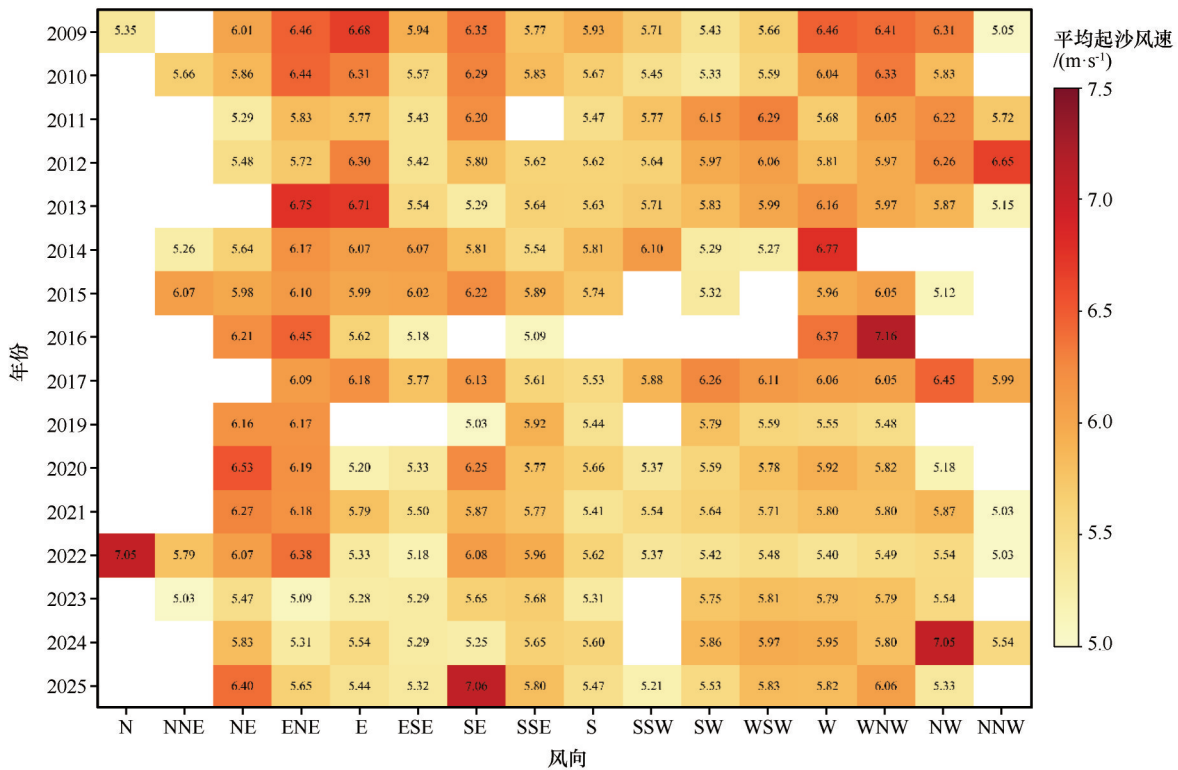


图4 月牙泉东观测点2009—2025年年平均起沙风速的年际-风向变化热力图

Fig.4 Annual-directional variation heatmap of average sand-driving wind speed at the Crescent Spring east observation point from 2009 to 2025

三阶段为2019—2025年,此阶段工程基本结束,年平均起沙风速变化趋于稳定,波动范围为5.5~6.0 m·s<sup>-1</sup>,部分风向出现7.0 m·s<sup>-1</sup>以上的高值。第三阶段热力图多为浅色,较前期平均起沙风速整体水平较低。出现该现象的原因是:风道疏通后,外部阻挡物减少,使得原本受阻滞的低风速起沙风更易进入景区,而高风速起沙风受到的疏导作用相对有限。因此疏通风道方向进入起沙风频次增加,且新增部分以低风速风为主,高风速部分基本保持不变,年平均起沙风风速略有下降。

### 2.3 风速等级

根据图5可知,除2017年外,月牙泉东观测点0~5 m·s<sup>-1</sup>风速占比均超过90%,仅有不到10%的频次分布在其他区间,表明小风速区间是研究区环流的主要构成部分。2009—2025年0~5 m·s<sup>-1</sup>风速占比波动,变化范围为89.3%~95.6%,最大值出现在2014年。

随着风速等级升高,对应风速区间百分比逐渐降低。5~6 m·s<sup>-1</sup>区间的占比约为3%~6%,呈波动上升趋势,2017年达到峰值,为6.14%,与风道疏通后

低风速起沙风增多的现象相符。≥6 m·s<sup>-1</sup>的中高风速事件合计占比通常低于5%。风速8~9 m·s<sup>-1</sup>区间年占比仅为0.1%~0.6%,9~10 m·s<sup>-1</sup>多低于0.1%,≥10 m·s<sup>-1</sup>的风速出现频次多年为零。仅2012、2013、2015年记录到极少量风速>12 m·s<sup>-1</sup>的极端大风情况,对应占比均未超过0.02%。

从时间演变趋势看,2010—2016年0~5 m·s<sup>-1</sup>风速占比较大,均大于93%,随后略有波动,但始终保持在较高水平。2017年占比为89.26%,对应中高风速5~8 m·s<sup>-1</sup>比例阶段性上升。2017—2025年中高风速占比保持着较高水平,可能与疏通风道后局地环流变化有关。其他风速区间并无明显的变化。总体而言,研究区风速等级分布相对稳定。

### 2.4 输沙势

根据风能环境标准,2009—2025年月牙泉东观测点均属于低风能环境,DP呈现先降后升的变化特征,其中2009年DP最大,达到75.18 VU,2024年DP最小,为25.96 VU(图6)。

2009—2012年,DP从75.18 VU下降至最低值29.84 VU,降幅达60.3%,同时WNW、W和E方向风

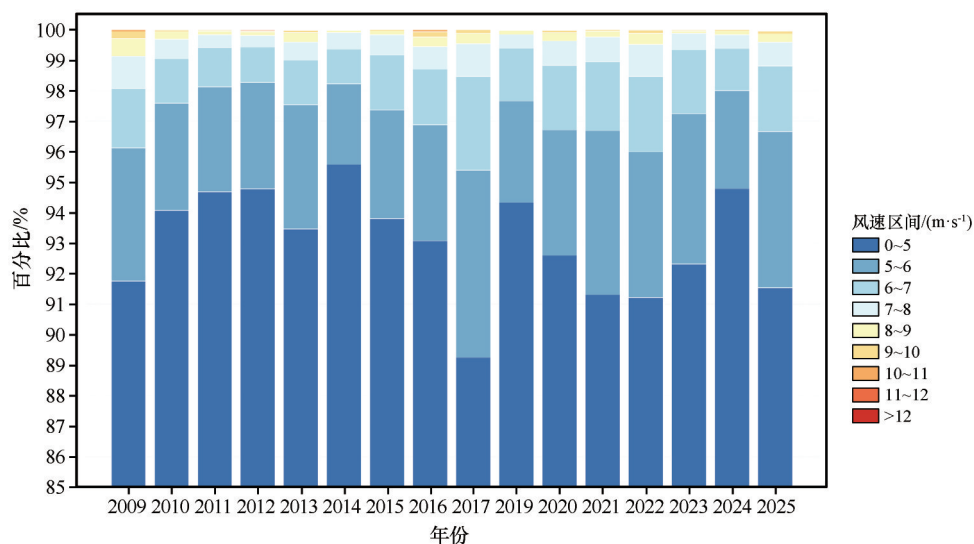


图5 月牙泉东观测点2009—2025年风速区间百分比

Fig.5 Wind speed frequency and percentage at the Crescent Spring east observation point from 2009 to 2025

减弱,ENE方向风完全消失,反映起沙风能量显著减弱。RDP与DP变化趋势相反,并非同步于DP,反映主导风向的关键作用。2009年RDP仅为4.88 VU,RDP/DP为0.06,说明起沙风高度分散,输沙效率较低。2011年RDP升至18.47 VU,RDP/DP达0.62,表明西风主导下风力集中、输沙效率提升。在这一阶段,RDD主要指向东南。

2013—2017年,DP逐步恢复并维持在较高水平,2017年增至70.56 VU,较2013年增加26.27 VU,增幅为60%。其间,东风和西风增强,ENE、E和W风向交替主导输沙活动,此变化与风道疏通工程在时间和空间上有高度对应。具体表现为:2012年疏通东北风道后,2013年E风向DP增大,且变为起沙风主导风向;2013年疏通西北风道后,2014年起沙风主导风向为ENE、W;2015年起沙风主导风向为ENE、SSE;2016年为ENE。2014年RDP变化剧烈,降为4.67 VU,伴随RDD由东北转向正西,体现风向格局变化。2015年后稳步上升,2017年达38.74 VU。RDP/DP逐年上升,起沙风由分散变为集中。

2019—2025年,DP略有波动,2020—2022年连续三年超过40 VU,2024年略低,为25.96 VU,2025年上升为49.85 VU,增幅为48%,尽管DP波动,SSE起沙风主导输沙活动,RDD指向北方。这表明近年景区风沙动力系统趋于稳定且具备较强定向输沙能力。RDP波动范围为7.81~31.52 VU,最大值和最小值分别出现在2022年和2024年,其余年份RDP变化稳定,RDP/DP也表现出稳定趋势。

### 3 讨论

全球气候背景下,2009—2025年鸣沙山月牙泉景区风动力环境变化复杂。在此背景下,月牙泉东观测点2009—2012年风速下降,与北半球近地面风速在20世纪90年代到21世纪初的下降趋势相符<sup>[30-31]</sup>,但2012—2017年风道疏通工程实施期间,观测点风速增大。其中,2012年疏通东北风道后,2013年ENE、E风向平均起沙风速分别提升1.03  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和0.41  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,同年东风成为主要的起沙风来源。2013年疏通西北风道后,W风向平均起沙风速增加0.61  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,并成为主导风向。2015年再次疏通西北风道后,2016年W与WNW风向平均起沙风速分别提高0.41  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和1.11  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。此阶段风速变化与风道疏通工程的干预措施在时间和空间上高度吻合,初步证实风道疏通对局地风场有明显的定向增强作用。在同一风动力环境中,年平均起沙风速波动下降,年平均风速波动上升,两者出现相反的变化趋势。这一现象无法通过气候波动解释,唯一合理机制为风道疏通工程优化了主导风向通道、降低气流阻力,使局地气流动力条件显著改善。可见景区风况变化与风道疏通工程高度对应,工程通过疏通外部风通道增强西风、东风和南风入区能力,维持了区域风动力环境的稳定,间接影响输沙势分布。

### 4 结论

2009—2025年,月牙泉东观测点风速波动变

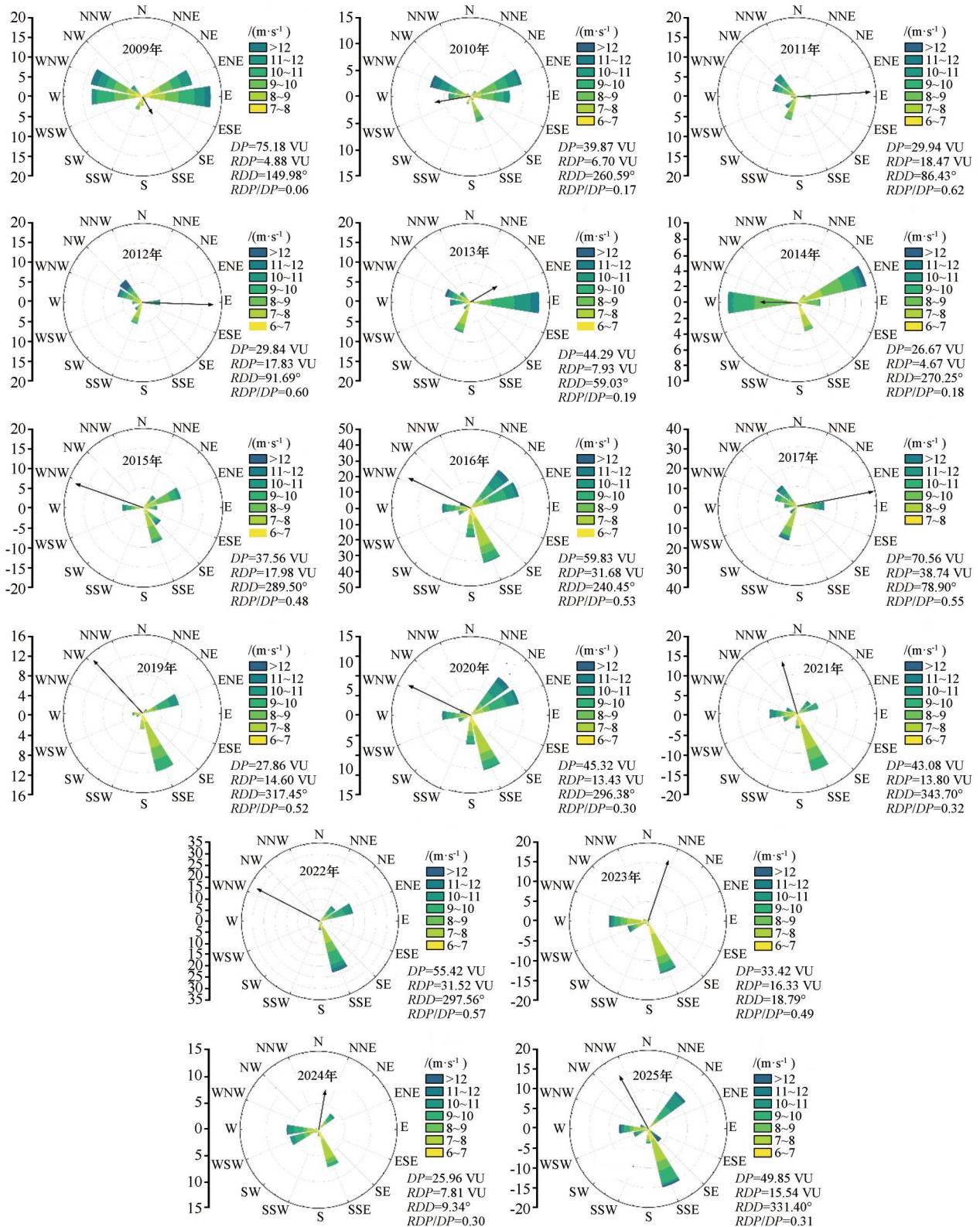


图6 月牙泉东观测点2009—2025年风况玫瑰图

Fig.6 Wind rose at the Crescent Spring east observation point from 2009 to 2025

化。2009—2012年风速逐年下降,风道疏通工程实施后年平均风速和年平均起沙风速分别增加0.14 m·s<sup>-1</sup>和0.12 m·s<sup>-1</sup>,工程结束后,年平均风速波动上

升,此后逐渐稳定,同期年平均起沙风速呈缓慢下降趋势。

风向热力图反映风向上风速的年际变化趋势。

SSE和S风向年平均风速升高最明显,疏通工程结束后,年平均风速均大于 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,其余风向上年平均风速也有不同程度上升。从年平均起沙风热力图可看出,工程实施期间,区域风向以西北和偏东风为主,与工程实施前对比无明显偏移,但年平均起沙风速变化明显,ENE、E、W、WNW风向上均出现研究期间的最大值,分别为6.75、6.71、6.77、7.16 $\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,工程结束后年平均起沙风速略微下降。

2009—2025年,鸣沙山月牙泉景区全年风速集中于 $0\sim 5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,占比超90%, $\geq 5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风速等级占比较小,且随着风速等级升高,占比逐渐下降。在风道疏通工程影响下, $\geq 5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速等级占比升高。

2009—2025年,鸣沙山月牙泉景区输沙势变化范围为25.96~75.18 VU,依据划分标准,属于低风险环境。2013—2017年风道疏通工程施工期间,输沙势波动变化,具体表现为2013年东风输沙势提升,2014年西风输沙势提升。2019年之后南风逐渐占据主导地位。输沙势和合成输沙势表现出相似的变化趋势,呈现逐步抬升后波动的变化特点。合成输沙方向在工程竣工后由早期东西方向逐步转为偏北方向。

#### 参考文献:

- [1] 尹念文,魏玉涛.月牙泉的成因分析[J].地下水,2010,32(2):20-22.
- [2] 安志山,张克存,屈建军,等.金字塔沙丘近地表流场及其对月牙泉影响研究[J].中国沙漠,2014,34(1):9-15.
- [3] 安志山,张克存,王晓雷,等.敦煌月牙泉风沙环境及沙山动态监测[J].干旱区资源与环境,2013,27(3):115-120.
- [4] 张克存,屈建军,牛清河,等.敦煌鸣沙山-月牙泉近地表风沙输移路径及强度[J].中国沙漠,2015,35(3):521-525.
- [5] 刘轶莹,金秉福.敦煌鸣沙山砂质组成与结构[J].鲁东大学学报(自然科学版),2015,31(1):84-91.
- [6] 张号,张克存,安志山,等.敦煌月牙泉景区沙丘粒度特征[J].中国沙漠,2014,34(3):645-649.
- [7] 屈建军,凌裕泉,张伟民,等.金字塔沙丘形成机制的初步观测与研究[J].中国沙漠,1992,12(4):23-31.
- [8] 王胜,张强,卫国安.敦煌绿洲-戈壁过渡带地表辐射与能量特征分析[J].高原气象,2005,24(4):556-562.
- [9] 张强,周毅.敦煌绿洲夏季典型晴天地表辐射和能量平衡及小气候特征[J].植物生态学报,2002,26(6):717-723.
- [10] 周焕,田禾,屈建军,等.气象要素对敦煌鸣沙山月牙泉风景区风沙输移的影响[J].干旱区研究,2015,32(5):1007-1016.
- [11] 胡世雄,吴正.敦煌鸣沙山金字塔沙丘的形成模式研究[J].地理研究,1997(1):60-67.
- [12] Zhang W N, Qu J J, Tan L H, et al. Environmental dynamics of a star dune[J]. *Geomorphology*, 2016, 273: 28-38.
- [13] An Z S, Zhang K C, Tan L H, et al. Morphologic changes of simple star dunes during the growth process in Dunhuang, China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2022, 19: 1095-1106.
- [14] 张伟民,谭立海,边凯,等.地形在高大金字塔沙山形成发育过程中的作用:以敦煌鸣沙山-月牙泉地区为例[J].中国沙漠,2016,36(5):1207-1215.
- [15] 安志山,张克存,牛清河,等.敦煌鸣沙山月牙泉景区高大沙丘短期动态变化特征[J].干旱区研究,2016,33(5):981-987.
- [16] Pang Y J, Qu J J, Zhang K C, et al. Quantitative analysis on the dynamic characteristics of megadunes around the Crescent Moon Spring, China[J]. *Journal of Arid Land*, 2014, 6(3): 255-263.
- [17] 庞营军,屈建军,牛清河,等.敦煌月牙泉景区沙丘表面沙物质的粒度特征[J].干旱区研究,2017,34(3):701-706.
- [18] 丁宏伟,龚开诚.敦煌月牙泉湖水位持续下降原因及对策分析[J].水文地质工程地质,2004,(6):74-77.
- [19] 黎涛,杨俊仓,苏春丽,等.敦煌月牙泉域沉积环境及泉湖水化学成因分析[J].干旱区地理,2013,36(5):812-817.
- [20] Jiao J J. Crescent Moon Spring: a disappearing natural wonder in the Gobi Desert, China. *Ground Water* [J]. 2010, 48(1): 159-6.
- [21] 张克存,牛清河,屈建军,等.敦煌鸣沙山月牙泉景区风沙环境分析[J].中国沙漠,2012,32(4):896-900.
- [22] Liu B L, Qu J J, Niu Q H, et al. Computational fluid dynamics evaluation of the effect of different city designs on the wind environment of a downwind natural heritage site[J]. *Journal of Arid Land*, 2014, 6(1): 69-79.
- [23] 张伟,刘德玉,喻生波,等.极端干旱区敦煌西湖湿地土壤水分特征及空间变异性研究[J].甘肃地质,2020,29(Z1):79-84.
- [24] 张余,张克存,安志山,等.敦煌沙漠绿洲过渡带地表沉积物粒度特征及沉积环境[J].水土保持通报,2017,37(4):69-73.
- [25] 潘加朋,张克存,安志山,等.风沙治理工程综合效益分析:以敦煌黑山嘴风沙口为例[J].中国沙漠,2023,43(2):233-242.
- [26] Bagnold R A. *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes* [M]. London, UK: Methuen, 1941, 10: 265.
- [27] 黄翠华,张伟民,王涛,等.莫高窟顶输沙势研究[J].干旱区资源与环境,2007,21(5):116-120.
- [28] 吴正,等.风沙地貌与治沙工程学[M].北京:科学出版社,2003.
- [29] Fryberger S G, Dean G. *Dune Forms and Wind Regime*// Mckee E D. *A study of Global Sand Seas*. Washington, USA: US Geological Survey, 1979.
- [30] McVicar T R, Roderick M L, Donohue R J, et al. Less bluster ahead? Ecohydrological implications of global trends of terrestrial near-surface wind speeds[J]. *Ecohydrology*, 2012, 5(4): 381-388.
- [31] Zeng Z Z, Ziegler A D, Searchinger T, et al. A reversal in global terrestrial stilling and its implications for wind energy production[J]. *Nature Climate Change*, 2019, 9(12): 979-985.

## The impact of wind corridor dredging project on the regional aeolian dynamics in the Mingsha Mountain Crescent Spring Scenic Area

Wang Wei<sup>1,2</sup>, Qu Jianjun<sup>1,3</sup>, Niu Qinghe<sup>1</sup>, Xin Xiaolei<sup>4</sup>, Huang Wenming<sup>5</sup>, Cui Quanbin<sup>5</sup>,  
Chen Xicheng<sup>5</sup>, Li Haijiang<sup>5</sup>, An Zhishan<sup>1</sup>, Zhang Kecun<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Ecological Security and Sustainable Development in Arid Regions/ Dunhuang Gobi Desert Ecology and Environment Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Urban and Environmental sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China; 4. Gansu Northern Technical School, Lanzhou 730000, China; 5. Mingsha Mountain-Crescent Spring Scenic Area Service Center, Dunhuang 736200, Gansu, China)

**Abstract:** In response to the threat to the survival of Crescent Lake posed by the convergent movement of the southern and northern sand dunes in the Mingsha Mountain-Crescent Spring Scenic Area, the scenic area service center implemented a wind corridor dredging project in 2012. However, the impact of this project on the regional wind dynamic environment has not been evaluated to date. In view of this, based on meteorological data collected from 2009 to 2025 by the automatic meteorological observation instruments deployed within the scenic area, this study analyzes average wind speeds, wind frequency, and drift potential to evaluate how the local aeolian dynamics have responded to the wind corridor project. The results show that: 1) The annual average wind speed at observation sites exhibits a fluctuating upward trend, while the annual average sand-driving wind speed for sand entrainment shows a declining trend; 2) The wind direction heat maps indicate that the near-surface wind speed is significantly affected by the dredging project in terms of spatial distribution, with the annual average sand-moving wind speed in the corresponding wind direction increasing by approximately 10% after the implementation of the wind tunnel dredging; 3) The proportion of wind speed ranging from 0 to 5 m·s<sup>-1</sup> accounts for more than 90% of all recorded wind observations annually, and the proportion decreases as wind speed increases; 4) The wind corridor dredging project has an impact on the drift potential in the corresponding direction, with the drift potential in the corresponding wind direction increasing during the project implementation period from 2013 to 2017. Overall, the findings demonstrate that the wind corridor dredging project has positively contributed to restoring near-surface airflow patterns in the scenic area.

**Key words:** aeolian dynamics; wind-blown sand hazards; engineering effectiveness; Mingsha Mountain-Crescent Spring Scenic Area; drift potential