

甘肃敦煌西湖国家级自然保护区 起沙风况及输沙势特征

董建祥^{1,2}, 罗永忠¹, 孙伟刚², 仲怡铭³

(1. 甘肃农业大学 林学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃敦煌西湖国家级自然保护区管护中心, 甘肃 敦煌 736200; 3. 甘肃省林业科学研究院, 甘肃 兰州 730020)

摘要: [目的] 揭示甘肃敦煌西湖国家级自然保护区风沙环境特征, 为保护区科学有效开展防风治沙和生态保护工作提供依据。[方法] 以该区域为研究对象, 通过实地观测, 对监测区自动气象站 2019, 2020, 2023, 2024 年风速、风向数据进行统计处理, 分析了敦煌西湖保护区风况及风沙环境。[结果] ① 敦煌西湖国家级自然保护区 4 a 平均起沙风风速为 6.3~6.4 m/s, 年最大风速为 14.0 m/s, 年平均起沙风频率为 8%; 起沙风多集中在春夏两季, 起沙风占全年的 73.3%, 春夏两季起沙风频率为 11%~12%; 保护区起沙风风向主要集中在 E 和 ENE, 占比最大的单风向为 E, 占比最小单风向为 SE。② 年输沙势 (DP) 均值为 666.39 VU, 属高风险区, 主要风向为 E 和 ENE, 年合成输沙势 (RDP) 均值为 141.09 VU, 年输沙势方向变率指数 (RDP/DP) 均值为 0.24, 属低方向变率, 风况较复杂, 为复合或钝双峰风况。③ 输沙势季节差异较明显, 主要集中在春夏两季, 占全年输沙势的 80.8%, 其中夏季输沙势最大, 冬季输沙势最小。春、夏、秋、冬输沙势的方向变率分别为 0.29, 0.43, 0.34, 0.39, 属于中低变率, 四季风况较为复杂。[结论] 保护区属于高风险区, 全年风向以东西风为主, 起沙风和输沙势主要集中在春夏两季, 全年和四季输沙势方向变率为中低变率, 风况较为复杂。应因地制宜, 有效开展防风治沙和生态修复工作。

关键词: 甘肃敦煌西湖国家级自然保护区; 起沙风风速; 起沙风风向; 起沙风频率; 输沙势

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)06-0149-09

中图分类号: P931.3

文献参数: 董建祥, 罗永忠, 孙伟刚, 等. 甘肃敦煌西湖国家级自然保护区起沙风况及输沙势特征[J]. 水土保持通报, 2025, 45(6): 149-157. Dong Jianxiang, Luo Yongzhong, Sun Weigang, et al. Sand-driving wind conditions and drift potential characteristics in Gansu Dunhuang Xihu National Nature Reserve [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(6): 149-157.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.06.012

CSTR: 32312.14.stbctb.2025.06.012

Sand-driving wind conditions and drift potential characteristics in Gansu Dunhuang Xihu National Nature Reserve

Dong Jianxiang^{1,2}, Luo Yongzhong¹, Sun Weigang², Zhong Yiming³

(1. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Gansu Dunhuang Xihu National Nature Reserve Management Center, Dunhuang, Gansu 736200,

China; 3. Gansu Research Academy of Forestry Science and Technology, Lanzhou, Gansu 730020, China)

Abstract: [Objective] The environmental characteristics of wind and sand in Gansu Dunhuang Xihu National Nature Reserve were analyzed, in order to provide a basis for the scientific and effective implementation of wind and sand control and ecological protection in the reserve. [Methods] Taking this area as the research object, wind speed and direction data from the automatic weather station in the monitoring area in 2019, 2020, 2023, and 2024 were statistically processed through field observation. The wind conditions and wind-sand environment of the Dunhuang Xihu Reserve were analyzed and discussed. [Results] ① The four-year average sand-driving wind

收稿日期: 2025-05-27

修回日期: 2025-07-28

采用日期: 2025-07-28

资助项目: 甘肃省林业和草原计划项目“甘肃省公益林生态效益监测”[2015(622)]

第一作者: 董建祥(1988—), 男(汉族), 甘肃省定西市人, 硕士研究生, 助理工程师, 主要从事自然保护区管理和生态保护修复治理方面的研究工作。Email: 2077424983@qq.com。

通信作者: 罗永忠(1970—), 女(汉族), 甘肃省酒泉市人, 教授, 主要从事植物抗旱性研究、生态建设项目效益监测与评价研究工作。Email: luoyzhong@gsau.edu.cn。

speed in the Dunhuang Xihu National Nature Reserve ranged from 6.28 m/s to 6.43 m/s. The annual maximum wind speed was approximately 14 m/s, and the annual average sand-driving wind frequency was 8.43%. Sand-driving winds were mostly concentrated in spring and summer, accounting for 73.29% of the whole year, with sand-driving wind frequencies ranging from 11% to 12% in these two seasons. The sand-driving wind directions in the reserve were mainly E and ENE. Among these, the single direction with the largest proportion was E, while that with the smallest proportion was SE. ② The annual average drift potential (DP) was 666.39 VU, classifying the area as a high wind-energy zone. Similar to sand-driving winds, DP was mainly concentrated in the E and ENE directions. The annual average resultant drift potential (RDP) was 141.09 VU, and the annual average directional variability index (RDP/DP) was 0.24, indicating low directional variability. The wind conditions were relatively complex, characterized as a compound or blunt bimodal pattern. ③ The seasonal differences in drift potential were significant, mainly concentrated in spring and summer, accounting for 80.8% of the whole year. The drift potential was highest in summer and lowest in winter. The directional variability of the drift potential for the four seasons was 0.29, 0.43, 0.34, and 0.39, respectively, indicating medium to low variability. The wind conditions in all four seasons were relatively complex. [Conclusion] The reserve is a high wind-energy zone, with prevailing east-west winds throughout the year. Sand-driving winds and drift potential are primarily concentrated in spring and summer. The annual and seasonal directional variability of the drift potential is medium to low, and the wind conditions are relatively complex. It is necessary to carry out wind prevention and sand control as well as ecological restoration work in a way that suits local conditions.

Keywords: Gansu Dunhuang Xihu National Nature Reserve; sand-driving wind speed; sand-driving wind direction; sand-driving wind frequency; drift potential

风是近地层土壤风蚀和沙尘运移的主要动力基础^[1],是风沙地貌形成与演化的主要营力,是造成风沙危害的关键因素^[2]。起沙风向的分布形式与组合特征控制着区域沙物质的输移方向,起沙风速则控制着沙物质的输移通量。开展区域风况与风能环境分析能为理解区内风沙地貌形成过程和区域风沙灾害防治提供科学参考^[3]。

目前,对某一区域风沙环境评价应用最广泛的是由 Fryberger 等^[4]提出的输沙势。国外对于输沙势的研究主要集中在沙漠和河流地区,对全球范围内的典型沙漠地区进行了广泛的输沙势评估和研究,如依据风能评价标准对尼罗河河谷和三角洲、科威特沙漠以及埃及 El-Khanka 等区域风沙环境进行评价分析^[5],通过分析这些地区的风况和沙物质输移特征,揭示了不同沙漠环境下的风沙活动规律及其对生态环境和人类活动的影响。国内学者主要通过气象站观测数据,结合遥感影像、地理信息系统等技术手段,对多个沙漠和沙地的起沙风况及输沙势特征进行了深入研究,如塔克拉玛干沙漠^[6]、柴达木盆地^[7]、巴丹吉林沙漠^[8]、毛乌素沙地^[1]、乌兰布和沙漠^[5]、科尔沁沙地^[9]、若尔盖盆地^[10]、古尔班通古特沙漠等^[11],郭西元等^[12]对库姆塔格沙漠的环境风况进行全面分析,王永胜等^[13]对库姆塔格沙漠东缘荒漠绿洲过渡带环境风况及输沙势特征进行深入探讨。这些研究积累了丰富的数据和成果,对研究其他区

域具有重要的借鉴价值。

关于敦煌境内的风沙环境虽有研究^[14-19],但多集中于敦煌绿洲或景区附近,距离沙源库姆塔格沙漠较远。甘肃敦煌西湖国家级自然保护区毗邻库姆塔格沙漠,四周被沙漠和戈壁所隔绝,气候条件恶劣,常年干旱少雨,风沙肆虐,蒸发量极大,植被覆盖率低,部分区域生态状况恶化,沙漠侵蚀严重。由于其特殊的地理位置,保护区是阻挡库姆塔格沙漠东侵甘肃河西走廊的最后一道天然生态屏障,对保护敦煌及中国西部生态安全,改善区域生态气候,保障敦煌工农业的生产和旅游业的持续健康发展,保护世界文化遗产莫高窟都具有重要的意义^[20]。虽然近些年对敦煌西湖湿地及野生动植物生境研究较多^[20-23],但关于保护区风沙环境的深入探讨未见报道。

本文通过对甘肃省公益林生态效益监测敦煌西湖自动气象站近 4 a 的风速、风向数据统计处理,分析和讨论了敦煌西湖国家级自然保护区内的风况与输沙势特征,进一步揭示了保护区风沙环境特征,有利于保护区科学有效开展防风治沙和生态修复工作^[24]。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

敦煌西湖自然保护区位于甘肃省河西走廊最西端,距离敦煌市区 120 km,西邻库姆塔格沙漠,地理坐标为 92°45'—93°50'E, 39°45'—40°36'N,总面

积 $6.60 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 约占敦煌总土地面积的 21%。保护区深居内陆, 地势低洼平坦, 气候干燥, 降水稀少, 蒸发强烈, 年均气温 $9.3 \text{ }^\circ\text{C}$, 年降水量 39.9 mm , 年蒸发量 $2\,486.0 \text{ mm}$, 蒸发量是降水量的 60 多倍, 年均风速 2.2 m/s , 属典型的暖温带极干旱荒漠气候^[20]。

1.2 研究方法

1.2.1 数据来源

风况数据来源于甘肃省公益林效益项目敦煌西湖气象站。气象站地理坐标为 $93^\circ 45' \text{ E}$, $40^\circ 17' \text{ N}$, 自动气象监测设备型号为 RR-9 100, 由北京雨根科技有限公司生产。监测高度为 2 m , 数据采集频率为 $1/600 \text{ Hz}$, 风速传感器量程为 $0 \sim 60 \text{ m/s}$, 精度为 $\pm 0.5 \text{ m/s}$, 分辨率为 0.1 m/s , 风向传感器量程为 $0^\circ \sim 360^\circ$, 精度为 $\pm 5^\circ$, 分辨率为 1° 。采集数据时间为 2019, 2020, 2023, 2024 年, 共 4 a。

1.2.2 数据处理与统计方法

由于敦煌西湖气象站监测高度为 2 m , 根据中国气象局标准气象站规定, 风速的测定高度为 10 m , 故需将高度 2 m 的风速换算成 10 m 风速。 2 m 和 10 m 高度风速换算公式为^[25]:

$$U_{10} = \frac{U_2 (\ln 10 - \ln z_0)}{\ln 2 - \ln z_0} \quad (1)$$

式中: U_{10} 为高度 10 m 处的风速, U_2 为高度 2 m 处风速, z_0 为粗糙度, 根据植被盖度与粗糙度的关系^[26], 自动气象站周边植被盖度约为 20% (图 1), 故 z_0 近似取 0.02 m 。



图 1 自动气象站周边植被覆盖情况

Fig.1 Vegetation cover around automatic weather station

根据对监测区域下垫面调查及以往文献资料^[16, 18, 25, 27], 本研究将临界起沙风速定为 5 m/s (高度 2 m), 借助 WPS 表格计算功能, 通过公式 (1) 将高度 2 m 处风速换算成 10 m 处风速, 并根据风速风向数据, 分别按照年、月、季统计最大起沙风风速、平均起沙风风速、起沙风频率, 以及起沙风在 N, NNE,

NE, ENE, E, ESE, SE, SSE, S, SSW, SW, WSW, W, WNW, NW 和 NNW 16 个方位的分布情况, 借助 Origin 2021 软件进行绘图。本研究四季划分中, 以 3—5 月为春季, 6—8 月为夏季, 9—11 月为秋季, 12 月至翌年 2 月为冬季^[28]。

1.2.3 输沙势计算方法

为了有效分析风沙地貌形成演化与风况之间的关系, 用 Fryberger^[4] 输沙势 (D_p) 表示潜在的最大输沙量。输沙势计算公式为:

$$D_p = V_2 * (V - V_l) * t \quad (2)$$

式中: D_p 为输沙势, 用矢量单位 (VU) 表示; V 为大于临界起沙值的风速; V_l 为临界起沙风速, 二者单位均为节 ($1 \text{ 节} \approx 0.5 \text{ m/s}$); t 为起沙风累计作用时间, 用观测时段内所观测的起沙风时间数和总观测时间数的百分比表示。风速是矢量, 根据矢量合成法则, 将 16 个方位输沙势进行合成, 借助 WPS 表格计算工具, 得到输沙势 (D_p)、合成输沙势 (R_{DP})、合成输沙势方向 (R_{DD}) 及方向变率指数 (R_{DP}/D_p), 通过 Origin 2021 软件进行输沙势绘图。参照 Fryberger 的研究结果划分沙漠环境, D_p 在 200 VU 以下, 属于低风能环境; D_p 为 200~399 VU, 属于中风能环境; D_p 为 400 VU 及以上, 属于高风能环境。方向变率指数 (R_{DP}/D_p) $0 \sim 0.3$, 为小比率, 属于复合风况或钝双峰风况; $0.3 \sim 0.8$ 为中比率, 属于钝双峰风况或锐双峰风况; 大于 0.8 为大比率, 属于宽单峰风况或窄单峰风况^[4]。

2 结果与分析

2.1 起沙风特征

2.1.1 起沙风风速及频率特征

保护区 2019, 2020, 2023, 2024 年 4 a 平均起沙风风速比较稳定, 平均风速 $6.3 \sim 6.4 \text{ m/s}$ 。年最大风速为 14.0 m/s 左右, 2020—2024 年有增大的趋势, 2024 年最大风速比 2020 年增加 34.0%, 2024 年最大风速达到 16.2 m/s 。平均年起沙风频率为 8%, 2019 年最大, 起沙风频率为 10%, 其中 2020, 2023, 2024 年有逐年增大的趋势, 起沙风频率从 7% 增至 9%, 年平均增幅为 16.3% (图 2)。

保护区月平均起沙风风速为 $5.8 \sim 7.2 \text{ m/s}$, 平均为 6.3 m/s 。其中, 7 月平均起沙风风速最大, 10 月最小, 大部分月份月平均起沙风风速在 $6.0 \sim 7.0 \text{ m/s}$ 之间; 月最大风速中, 最大值出现在 7 月, 达 13.5 m/s , 12 月最小, 最大风速为 7.6 m/s , 变化幅度较大, 波动幅度为 76.6%。月起沙风频率变化较显著, 2 月最小, 起沙风频率为 1%, 4 月最大, 为 19%, 其中 1—3 月和 5—

8月变化较小,其他月份波动较大,3—4月波动幅度最大(图3)。

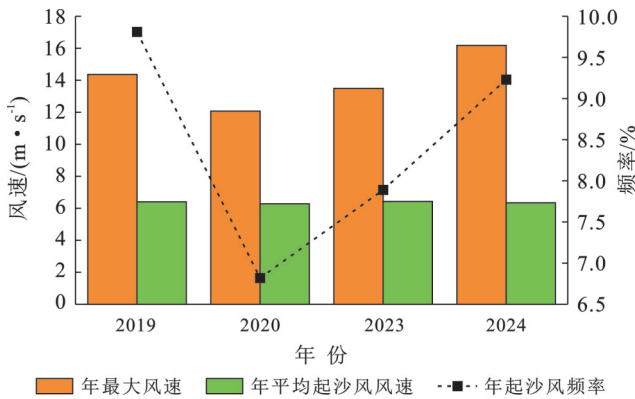


图2 自然保护区年最大风速、年平均起沙风风速、年起沙风频率

Fig.2 Annual maximum wind speed, annual average sand-driving wind speed and annual sand-driving wind frequency in nature reserve

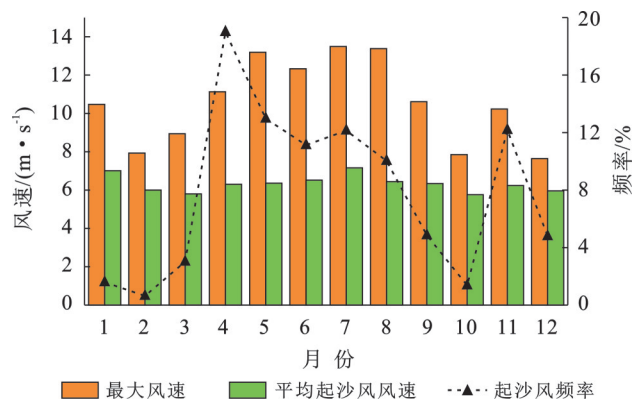


图3 自然保护区月最大风速、月平均起沙风风速和月起沙风频率

Fig.3 Monthly maximum wind speed, monthly average sand-driving wind speed and monthly sand-driving wind frequency in nature reserve

研究表明,保护区起沙风频率春夏两季明显偏高,起沙风频率为11%~12%;秋冬两季起沙风明显偏少,冬季起沙风频率最低,为2%。季节最大风速也是春夏两季较大,季节平均起沙风风速变化不大,为6.1~6.7 m/s(图4)。

2.1.2 起沙风风向特征

从全年来看,保护区起沙风风向主要集中在E和ENE,风向占比为45.3%,其中占比最大的单风向为E,占比为23.3%,其次是NW, NE, WSW, WNW, W 5个风向,占比为42.1%,起沙风速5.0~7.0 m/s;起沙风分布偏少的方向集中在SE, SSE, S, N, SS 5个风向,风向占比为2.8%,风向占比最小单风向是SE(图5)。

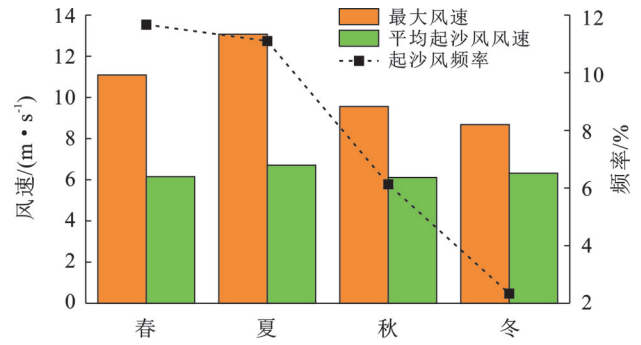


图4 自然保护区季节最大风速、季节平均起沙风风速和季节起沙风频率

Fig.4 Seasonal maximum wind speed, seasonal average sand-driving wind speed and seasonal sand-driving wind frequency in nature reserve

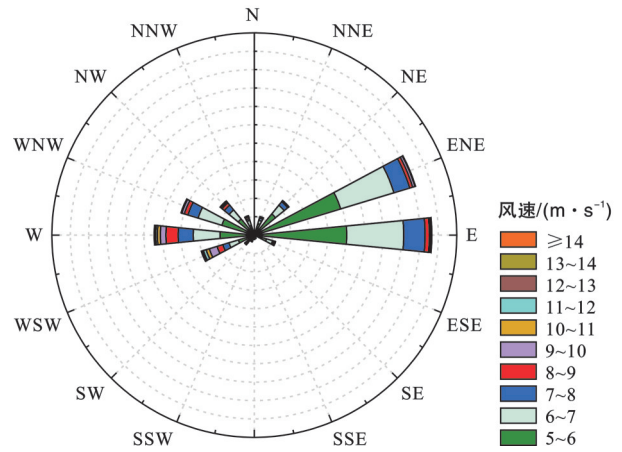


图5 自然保护区年风向玫瑰图

Fig.5 Annual wind rose diagram in nature reserve

保护区起沙风风向分布具有明显的季节性。起沙风主要集中在春夏两季,占全年的73.3%。全年高风速(≥ 10 m/s)中,春夏两季占92.9%,其中夏季占比达78.8%。春季主风向呈对称分布,主风向为WNW, W, E, ENE,主风向占比为74.0%,4个主风向占比均为17%~20%;夏季主风向为ENE和E,主风向占比为39.5%,其中,占比最大的单风向为E,占比为20.8%。秋冬季起沙风主风向与夏季一致,主要集中在ENE和E 2个方向上,两个季节主风向分别占比为57.8%和58.8%。起沙风风速大部分分布于5.0 m/s到8.0 m/s之间,该区间的风速占比达93.6%(图6)。

2.2 输沙势特征

输沙势作为描述区域风沙活动特征及风能环境的重要指标,是衡量区域风沙活动强度以及风沙地貌演变的重要因子,在风沙活动研究中被广泛采用^[5,24]。对保护区4 a输沙势的统计分析(图7)表明,年均输沙势(D_p)为666.39 VU,主要集中在E和

ENE 2 个方向上,依据 Fryberger 的风能环境划分方法,保护区总体属于高风险区,年均合成输沙势(R_{DP})为 141.09 VU,年均方向变率为 0.233 5,属于小变率,风况较复杂。其中,2019 年 D_p 最大,达 710.45 VU,2020 年最小,为 573 VU; R_{DP} 最大值出现在 2020 年,

为 269.64 VU,2024 年最小, R_{DP} 仅为 36.56 VU,变化幅度较大;2019 年和 2020 年 R_{DD} 分别为 90° 和 120° ,而 2023 年和 2024 年 R_{DD} 在 270° 左右;从风向变率看,2020 年最大,为中变率,风况为钝双峰或锐双峰,其他年份均是小变率,属于复合风或钝双峰风况。

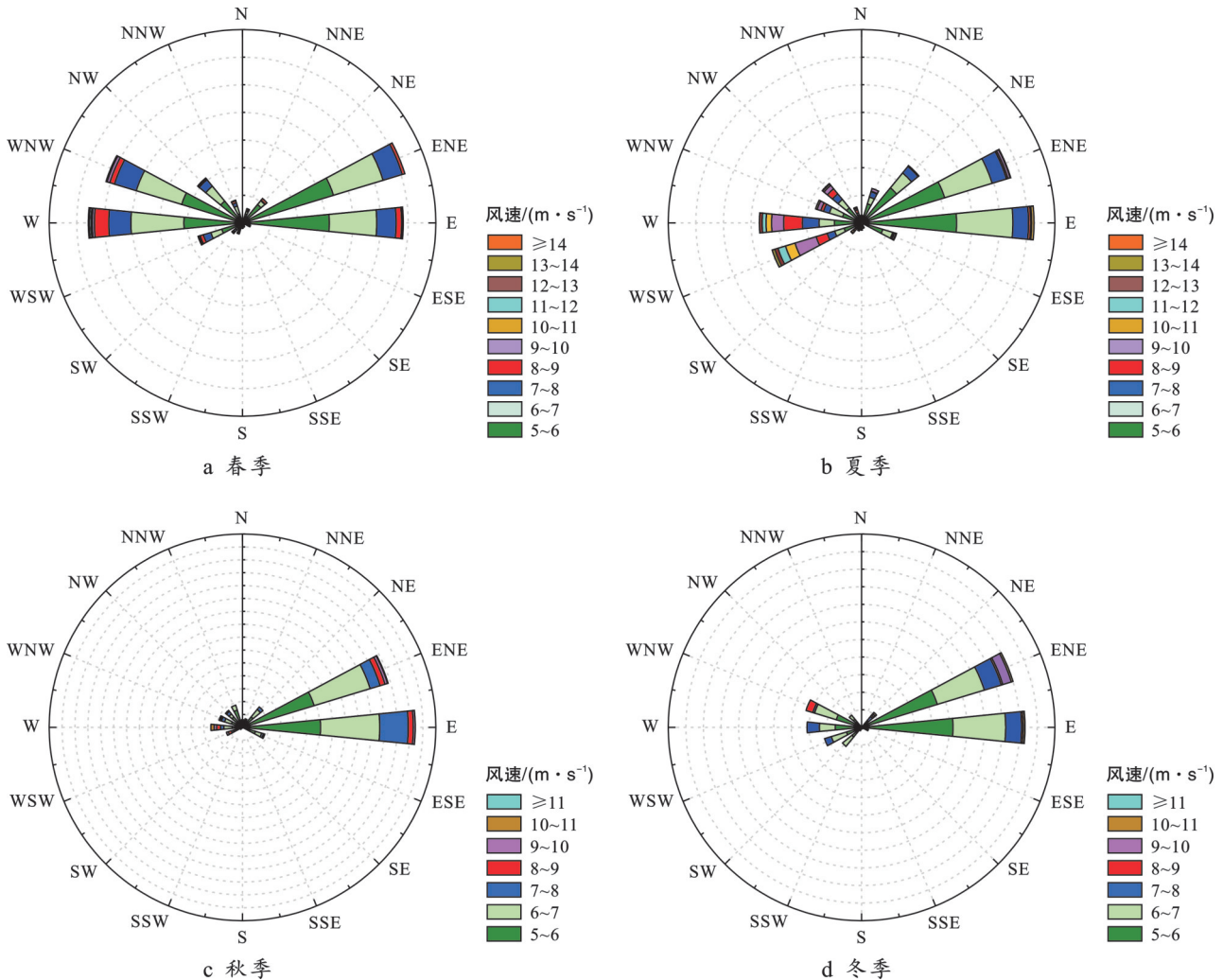


图 6 自然保护区季节风向玫瑰图

Fig.6 Seasonal wind rose diagrams in nature reserve

由于受起沙风风速、风向的季节差异影响,输沙势出现随季节变化的特征。保护区季节输沙势分布与起沙风分布相似。春夏季 D_p 较大,占全年 D_p 的 80.8%,其中夏季最大,占比为 52.1%;冬季 D_p 最小,为 37.1 VU; R_{DP} 最大值出现在夏季,为 161.1 VU,与其他季节 R_{DP} 相差较大,冬季最小,仅有 14.7 VU;从 R_{DD} 来看,春夏季在 W, WNW 方向,而秋冬季集中在 E 方向;春季风向变率为低变率,属于复合风况,夏、秋、冬季为中变率,属于钝双峰或锐双峰风况(图 8)。

3 讨论

甘肃敦煌西湖国家级自然保护区起沙风频率及

最大风速从 2020—2024 年有逐步增大的趋势,平均增幅为 17.0% 左右,增幅比较明显。这种情况可能与保护区地处西北腹地,受西风带影响较大,而西风带强度增强及全球气候变暖改变大气环流导致大风天气增多,加之近年来,随着敦煌市旅游业的发展,城市规模扩建,形成“热岛效应”,对局部气流造成影响,导致风速增大。

保护区位于库姆塔格沙漠东沿,月最大风速在 7 月达到最大。1—3 月和 5—7 月起沙风频率变化较为平缓,其他月份波动幅度较大,月平均起沙风风速变化幅度较小,起沙风主要集中在春夏两季,占比达到 74%,春夏两季大风天气频繁,这些与王永胜

等^[13]、鱼燕萍等^[18]和胡菲等^[19]研究基本一致。主要原因是保护区地处内陆腹地,地貌多为平坦的荒漠、戈壁,植被稀疏,属典型的大陆性荒漠气候^[20],冬春季地表温度变化显著,长期受蒙古冷高压影响^[19],蒙

古高压和南疆热低压交汇,形成较大的气压梯度,加之保护区位于河西走廊西段,两侧分布有山脉,地形狭窄,气流通过时受挤压形成“狭管效应”,导致该区春夏两季容易形成频繁且强劲的大风天气。

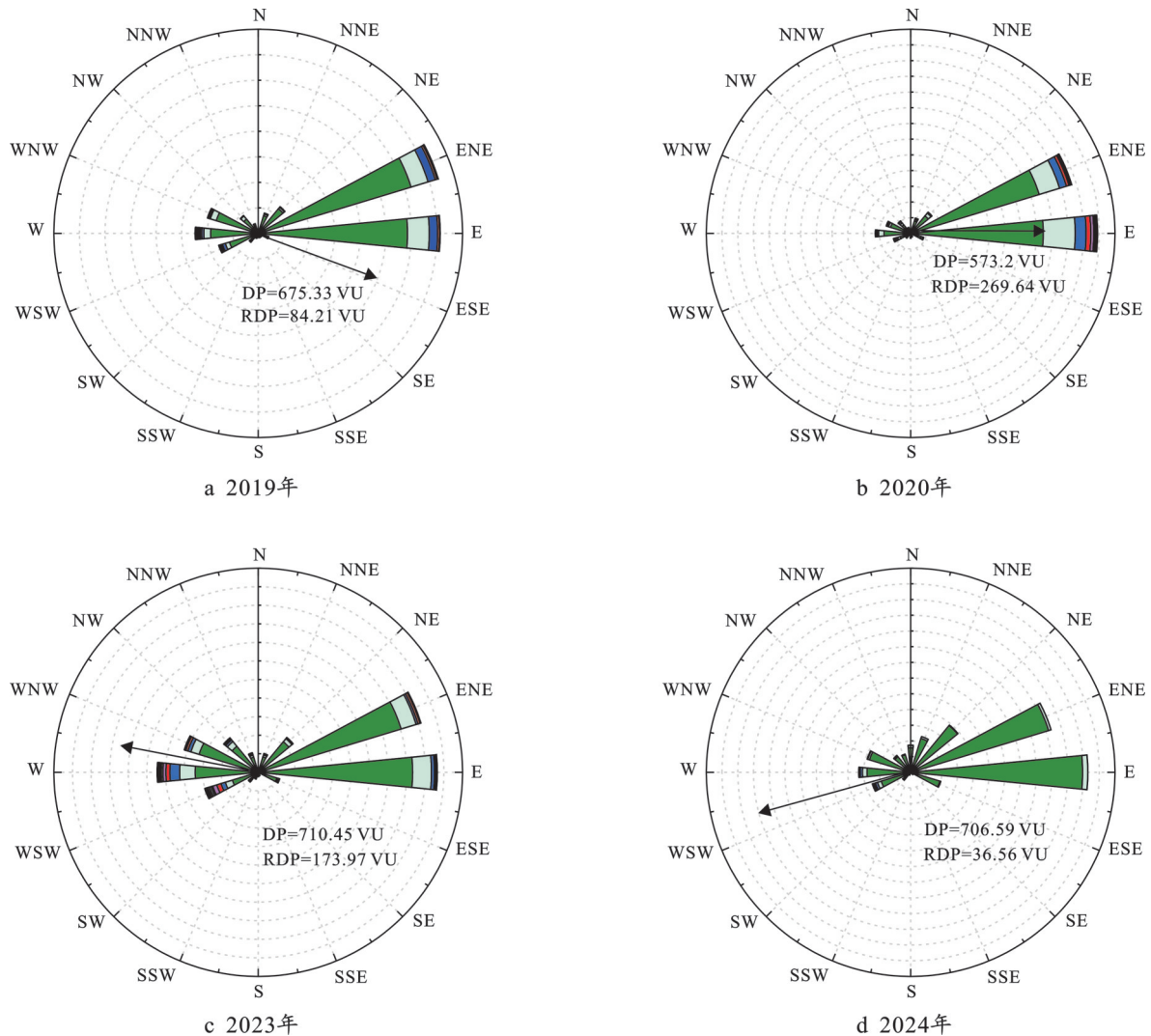


图7 自然保护区年输沙势玫瑰图

Fig.7 Annual drift potential rose diagrams for nature reserve

保护区全年和四季起沙风风向主要为东风组和西风组,全年主风向为东风组,占比57%左右,次风向为西风组,占比40%左右,该结果与王永胜等^[13]关于库姆塔格沙漠东沿以及鱼燕萍等^[18]关于敦煌戈壁、沙漠的风向研究基本一致。该区域主导风向为东西风,主要原因与其独特的地理位置、地形条件及气候密切相关,敦煌地处河西走廊西端,北靠马鬃山,南依祁连山,东西向的走廊地形形成天然风道,该区域又位于东亚季风区与西风带的过渡地带,这种过渡性特征使得东风和西风成为主导,迫使气流沿东西方向流动。

从输沙势来看,保护区起沙风与输沙势分布趋势

基本相同。年输沙势为666.4 VU,属于高能区,春夏季输沙势占比在80%以上,全年和四季输沙势主要集中在ENE和E 2个方向,2023年和2024年合成输沙势方向位于偏西方向,与胡菲等^[29]关于敦煌戈壁输沙势特征基本一致。保护区位于敦煌市绿洲以西,毗邻库姆塔格沙漠,沙源丰富,春夏两季合成输沙势方向在偏西方向,而全年输沙势主要集中在春夏两季,导致当地春夏季沙尘暴频发。据观测,毗邻敦煌绿洲西缘的库姆塔格沙漠每年向绿洲推进3~4 m^[17],给当地社会经济发展造成严重威胁。由于合成输沙势在东西方向,所以在实施相关防风固沙工程时,如通过沙障、草方格、防护林带等措施固沙,建议与输沙

季走向垂直^[25],提高防风固沙的效果。

本研究仅从风速、风向方面分析研究区的风沙状况,而影响沙丘的形成和运移的因素除了风况外还有地形、沙源和植被状况等,需对该区风沙活动强

度进行研究,如在野外建立观测点,长期监测风沙流,分析地表沉积物搬运特征和动态变化规律,以期为该风沙灾害防治与生态系统的恢复和保护提供科学依据^[13,29]。

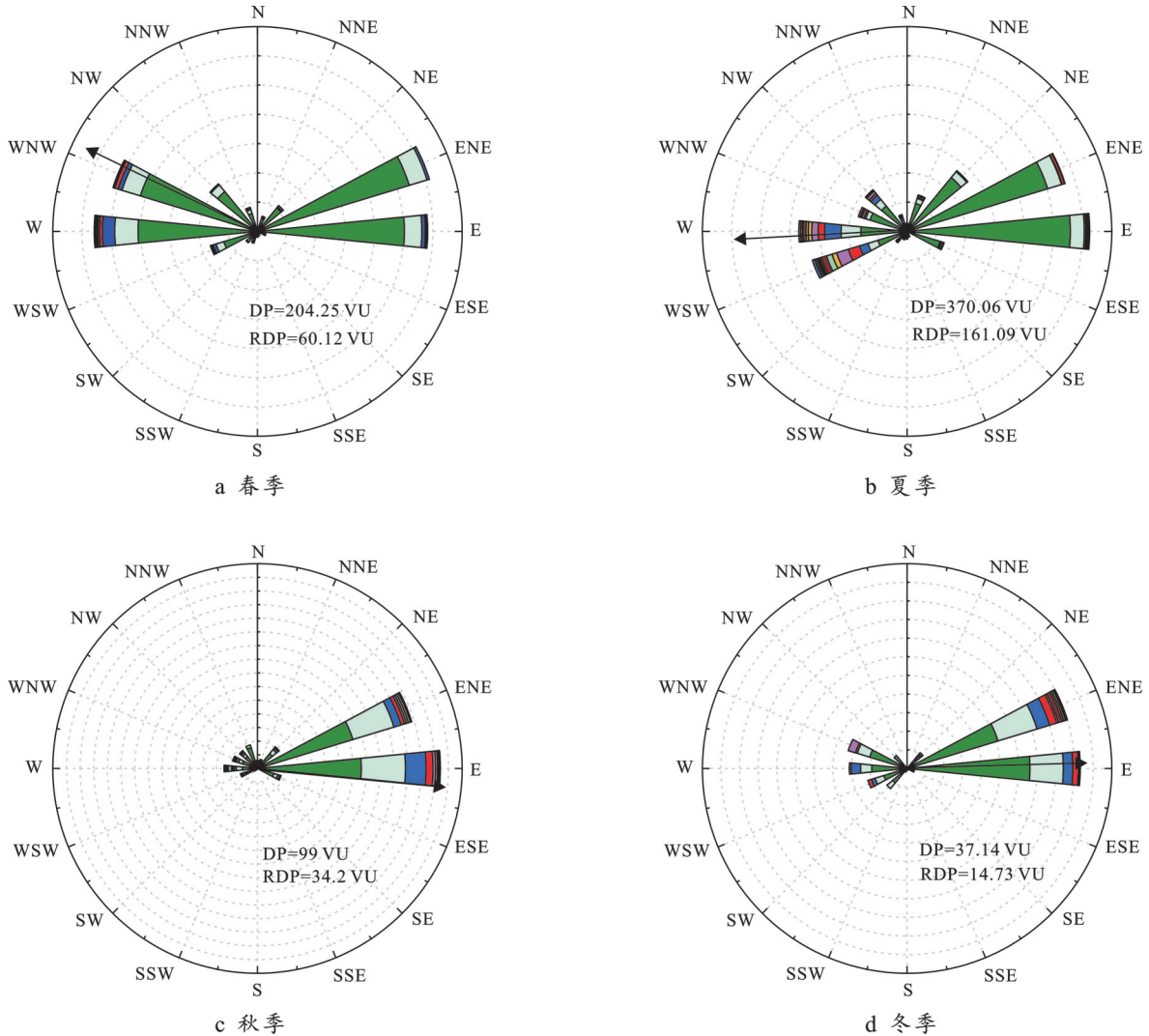


图 8 自然保护区季节输沙势玫瑰图

Fig.8 Seasonal drift potential rose diagrams for nature reserve

4 结论

敦煌西湖保护区年平均起沙风风速为 6.3~6.4 m/s,平均年起沙风频率 8.4%,年最大风速为 16.2 m/s。月平均起沙风风速为 6.3 m/s,其中 7 月最大,为 7.2 m/s,10 月最小,为 5.8 m/s;月起沙风频率差异显著,4 月起沙风频率最大,达 19%,2 月最小,起沙风频率为 1%;起沙风主要集中在春夏两季,起沙风占全年的 74.0%,平均起沙风频率为 11%~13%,秋冬季起沙风频率较低且大风天气较少。

起沙风和输沙势主要集中在 E 和 ENE 方向上,季节间输沙势差异较为显著。春夏季输沙势占比较

大,占全年输沙势的 80.8%,其中夏季最大,占比为 52.1%,冬季最小,仅为 37.1 VU。4 a 的输沙势均在 500.0 VU 以上,属于高能区,年均合成输沙势为 141.1 VU,年输沙势方向变率指数均值为 0.24,低风向变率,属于复合风况。

保护区起沙风风速近年来有增大的趋势,且大风天气频繁,全年风向以东西风为主。起沙风主要集中在春夏两季,占全年的 73.3%。全年高风速(≥ 10 m/s)春夏两季占 92.9%,四季起沙风风向以 ENE 和 E 为主。

保护区年输沙势为 666.39 VU,属于高能区,年合成输沙势方向为东西走向;春夏两季合成输沙

势方向在W和WNW,而秋冬两季集中在E,全年和四季输沙势方向变率为中低变率,风况较为复杂。

参考文献(References)

- [1] 庞营军,吴波,贾晓红,等.毛乌素沙地风况及输沙势特征[J].中国沙漠,2019,39(1):62-67.
Pang Yingjun, Wu Bo, Jia Xiaohong, et al. Characteristics of wind regime and drift potential in mu us sandy land [J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(1): 62-67.
- [2] 张乐春,张登山,汪海娇,等.青海湖湖东沙区风季起沙风况及输沙势特征[J].干旱区资源与环境,2023,37(3):91-97.
Zhang Lechun, Zhang Dengshan, Wang Haijiao, et al. Characteristics of sand-driving wind regime and sand drift potential in windy season in the east sandy area of Qinghai Lake [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023, 37(3): 91-97.
- [3] 曲书锋,张国明,董苗,等.阿尔金山国家级自然保护区东北部风况及输沙势特征[J].中国沙漠,2023,43(2):114-120.
Qu Shufeng, Zhang Guoming, Dong Miao, et al. Characteristics of wind regime and sediment transport potential in the northeast of Altun Mountain National Nature Reserve [J]. Journal of Desert Research, 2023, 43(2): 114-120.
- [4] Fryberger S G, Dean G. Dune forms and wind regime [A] //Mckee E D. A study of global sand seas [C]. Washington DC: U.S. Geological Survey, 1979.
- [5] 罗凤敏,高君亮,辛智鸣,等.乌兰布和沙漠东北缘起沙风况及输沙特征[J].农业工程学报,2019,35(4):145-152.
Luo Fengmin, Gao Junliang, Xin Zhiming, et al. Characteristics of sand-driving wind regime and sediment transport in northeast edge of Ulan Buh Desert [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(4): 145-152.
- [6] 俎瑞平,张克存,屈建军,等.塔克拉玛干沙漠地面风场特征及周边地区沙丘排列关系分析[J].应用气象学报,2005,16(4):468-475.
Zu Ruiping, Zhang Kecun, Qu Jianjun, et al. Characteristics of surface winds in Takla-Makan deserts and their relationship to the orientation of dunes in neighboring regions [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 2005, 16(4): 468-475.
- [7] 鲍锋,董治宝,张正偲.柴达木盆地风沙地貌区风况特征[J].中国沙漠,2015,35(3):549-554.
Bao Feng, Dong Zhibao, Zhang Zhengcai. Wind regime in the Qaidam Basin desert [J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(3): 549-554.
- [8] Zhang Zhengcai, Dong Zhibao, Li Chunxiao. Wind regime and sand transport in China's Badain Jaran Desert [J]. Aeolian Research, 2015, 17: 1-13.
- [9] 张华,李锋瑞,李玉霖,等.科尔沁沙地奈曼旗近5年来风况及合成输沙势[J].中国沙漠,2004,24(5):623-627.
Zhang Hua, Li Fengrui, Li Yulin, et al. Wind regime and resultant sand-transporting potential of Naiman Banner in Horqin sandy land during past five years [J]. Journal of Desert Research, 2004, 24(5): 623-627.
- [10] 胡光印,董治宝,张正偲,等.若尔盖盆地起沙风况及输沙势特征[J].中国沙漠,2020,40(5):20-24.
Hu Guangyin, Dong Zhibao, Zhang Zhengcai, et al. The regime of sand driving wind and sand drift potential in Zoige Basin [J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(5): 20-24.
- [11] 郭洪旭,王雪芹,蒋进,等.古尔班通古特沙漠腹地输沙风能及地貌学意义[J].干旱区研究,2011,28(4):580-585.
Guo Hongxu, Wang Xueqin, Jiang Jin, et al. Wind regime and its geomorphologic significance in the hinterland of Gurbantonggut Desert [J]. Arid Zone Research, 2011, 28(4): 580-585.
- [12] 郭西元,钱广强,杨转玲,等.库姆塔格沙漠三垄沙地区砾波纹形态、粒度及环境风况[J].中国沙漠,2024,44(4):37-45.
Guo Youyuan, Qian Guangqiang, Yang Zhuanling, et al. Morphology, grain size and environmental wind regime of granule ripples in the Sanlongsha area of the Kumtagh Desert [J]. Journal of Desert Research, 2024, 44(4): 37-45.
- [13] 王永胜,杨文斌,李永华,等.库姆塔格沙漠东缘荒漠绿洲过渡带风况及输沙势[J].干旱区资源与环境,2015,29(1):140-144.
Wang Yongsheng, Yang Wenbin, Li Yonghua, et al. Wind regime and resultant sand-transporting potential in the desert-oasis ecotone in the eastern marginal zone of the Kumtag Desert [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(1): 140-144.
- [14] 安志山,张克存,谭立海.沙漠-绿洲过渡带风沙活动特征:以敦煌黑山嘴地区为例[J].中国沙漠,2016,36(6):1653-1658.
An Zhishan, Zhang Kecun, Tan Lihai. Characteristics of the sand transportation intensity in the desert-oasis ecotone: A case study in Heishanzui area of Dunhuang [J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(6): 1653-1658.
- [15] 张克存,安志山,蔡迪文,等.典型天气背景下沙漠绿洲过渡带近地表风动力空间变化特征[J].干旱区地理,2016,39(5):1004-1010.

- Zhang Kecun, An Zhishan, Cai Diwen, et al. Spatial variation of wind dynamical characteristics in the desert-oasis transitional zone under typical weather conditions [J]. *Arid Land Geography*, 2016, 39(5):1004-1010.
- [16] 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.
- Zhang Kecun, Niu Qinghe, Qu Jianjun, et al. Analysis of wind-blown sand environment in the Singing Sand Mountain & Crescent Moon Spring Scenic Spot in Dunhuang, China [J]. *Journal of Desert Research*, 2012, 32(4):896-900.
- [17] 张克存,牛清河,安志山,等.敦煌沙漠-绿洲过渡带近地表风沙动力环境[J].水土保持通报,2015,35(4):8-11.
- Zhang Kecun, Niu Qinghe, An Zhishan, et al. Aeolian dynamics environments near earth surface in desert-oasis transitional zone of Dunhuang area [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(4):8-11.
- [18] 鱼燕萍,张克存,安志山,等.敦煌-格尔木铁路沿线风动力环境特征[J].中国沙漠,2020,40(1):41-48.
- Yu Yanping, Zhang Kecun, An Zhishan, et al. Dynamic environment of wind along the Dunhuang-Golmud railway [J]. *Journal of Desert Research*, 2020, 40(1):41-48.
- [19] 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.
- Hu Fei, Zhang Kecun, An Zhishan, et al. Comparison of wind dynamic environment among desert, oasis and Gobi [J]. *Journal of Desert Research*, 2020, 40(4):113-119.
- [20] 吴三雄,袁海峰.甘肃敦煌西湖国家级自然保护区科学考察报告[M].北京:中国林业出版社,2010.
- Wu Sanxiong, Yuan Haifeng. Report on scientific investigation of west lake national nature reserve in Dunhuang, Gansu Province [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2010.
- [21] 戚登臣,陈文业,张继强,等.敦煌西湖湿地生态系统现状、退化原因及综合修复对策[J].草业学报,2010,19(4):194-203.
- Qi Dengchen, Chen Wenye, Zhang Jiqiang, et al. Status, degraded causes and comprehensive treatment of Dunhuang Xihu wetland ecosystem [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2010, 19(4):194-203.
- [22] 张继强,陈文业,康建军,等.敦煌西湖盐化草甸芦苇群落特征及多样性沿水分梯度的分布格局[J].水土保持通报,2013,33(2):173-176.
- Zhang Jiqiang, Chen Wenye, Kang Jianjun, et al. Dunhuang west lake salt meadow reed plant community structure and diversity distribution pattern along altitudi-
- nal gradient [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2013, 33(2):173-176.
- [23] 陈文业,张继强,赵明,等.甘肃敦煌西湖荒漠-湿地植物群落物种多样性特征研究[J].中国沙漠,2012,32(6):1639-1646.
- Chen Wenye, Zhang Jiqiang, Zhao Ming, et al. Species diversity characteristics of plant community in Xihu Desert wetland of Dunhuang, Gansu Province [J]. *Journal of Desert Research*, 2012, 32(6):1639-1646.
- [24] 刘茜雅,王海兵,左合君,等.巴音温都尔沙漠风况及输沙势特征[J].中国沙漠,2023,43(5):41-48.
- Liu Xiya, Wang Haibing, Zuo Hejun, et al. Wind conditions and drift potential in Bayinwenduer Desert, China [J]. *Journal of Desert Research*, 2023, 43(5):41-48.
- [25] 梁晓磊,牛清河,安志山,等.甘肃瓜州锁阳城南雅丹地貌区起沙风况与输沙势特征[J].中国沙漠,2019,39(3):48-55.
- Liang Xiaolei, Niu Qinghe, An Zhishan, et al. Sand-driving wind regime and sand drift potential in the yardang landform areas of southern Suoyang Town, Guazhou, Gansu, China [J]. *Journal of Desert Research*, 2019, 39(3):48-55.
- [26] 王翔宇.不同配置格局沙蒿灌丛防风阻沙效果研究[D].北京:北京林业大学,2010.
- Wang Xiangyu. Study on wind and sand prevention effect of *Artemisia sphaerocephala* shrub with different configuration patterns [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2010.
- [27] 吴正.风沙地貌与治沙工程学[M].北京:科学出版社,2011.
- Wu Zheng. Geomorphology of Wind-Drifts Sand and their Controlled Engineering [M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [28] 苗恒录,王健,张瑞强,等.内蒙古阴山北麓荒漠草原风况与输沙势研究:以希拉穆仁草原为例[J].干旱区资源与环境,2022,36(4):102-110.
- Miao Henglu, Wang Jian, Zhang Ruiqiang, et al. Characteristics of wind regime and drift potential of the desert steppe in northern slope of Yinshan Mountains, Inner Mongolia [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2022, 36(4):102-110.
- [29] 周丹丹,董建林,高永,等.巴音温都尔沙漠表层土壤粒度特征及风蚀量估算[J].干旱区地理,2008,31(6):933-939.
- Zhou Dandan, Dong Jianlin, Gao Yong, et al. Grain sizes analysis and soil loss of surface soil during desertification process on Bayinwenduer Desert [J]. *Arid Land Geography*, 2008, 31(6):933-939.