王陈伟,张小啸,薛一波,等.艾比湖流域 2010~2023 年沙尘暴时空变化及驱动因素研究 [J]. 中国环境科学, 2025,45(10):5329-5337.
Wang C W, Zhang X X, Xue Y B, et al. Spatiotemporal variations and driving factors of sand dust storms in the Ebinur Lake Basin from 2010 to 2023 [J]. China Environmental Science, 2025,45(10):5329-5337.

艾比湖流域 2010~2023 年沙尘暴时空变化及驱动因素研究

王陈伟[1,2,3],张小啸[1*],薛一波[1,2],周 杰[1],雷加强[1],李生宇[1] (1.中国科学院新疆生态与地理研究所,国家荒漠-绿洲生态建设工程技术研究中心,干旱区生态安全与可持续发展全国重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830011；2.中国科学院大学,北京 100049；3.新疆精河荒漠生态系统国家定位观测研究站,新疆 博尔塔拉 833300)

摘要：以新疆艾比湖流域为研究区,基于气象站点观测数据、ERA5-Land 再分析数据及 Landsat 遥感影像等多源数据,探究流域内沙尘暴的时空变化特征,并通过广义灰色关联度分析模型定量评估地表风速、土壤湿度和植被覆盖对流域内沙尘暴发生日数的影响.结果显示:2010~2023 年间艾比湖流域沙尘暴日数呈现波动上升趋势(+0.08d/a),其中 2010~2014 年增速显著(+0.60d/a),2014~2017 年短暂下降(-0.70d/a),2018 年后恢复增长态势(+0.31d/a);春季为沙尘暴高发季节,夏秋季次之,冬季无沙尘暴天气记录;空间分布上,精河站为近 14a 沙尘暴高频中心;相较 20 世纪末,各气象站点年均沙尘暴日数标准差下降 88.42%,表明区域差异性显著降低.地表风速是艾比湖流域沙尘暴的首要驱动因素;土壤湿度的影响次之,并呈现季节性时滞效应;相较于地表风速和土壤湿度,植被覆盖对沙尘暴发生日数的影响相对有限.

关键词：沙尘暴；艾比湖流域；驱动因素；广义灰色关联度分析模型
中图分类号：X51 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)10-5329-09

Spatiotemporal variations and driving factors of sand dust storms in the Ebinur Lake Basin from 2010 to 2023.

WANG Chen-wei[1,2,3], ZHANG Xiao-xiao[1*], XUE Yi-bo[1,2], ZHOU Jie[1], LEI Jia-qiang[1], LI Sheng-yu[1] (1.State Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, National Engineering Technology Research Center for Desert-Oasis Ecological Construction, Chinese Academy of Sciences,Urumqi 830011, China；2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China；3.Xinjiang Jinghe Desert Ecosystem Research Station, Bortala 833300, China). *China Environmental Science*, 2025,45(10)：5329~5337

Abstract：Using meteorological station observations, ERA5-L and reanalysis data, and Landsat remote sensing imagery from 2010 to 2023, we analysed the spatiotemporal characteristics of dust storms in the Ebinur Lake Basin of Xinjiang Uygur Autonomeus Region, northwest China. The generalized grey correlation model was applied to quantitatively assess the influence of surface wind speed, soil moisture, and vegetation coverage on the frequency of dust storm occurrences. The results showed an overall upward trend in dust storm days during 2010~2023 (+0.08d/a). In particular, there was a significant increase from 2010 to 2014 (+0.60d/a), followed by a short decline from 2014 to 2017 (−0.70d/a), and a rise after 2018(+0.31d/a). Spring was identified as the peak season for dust storm occurrences, with a lower frequency observed in summer and autumn, and no recorded events in winter. Spatially, the Jinghe meteorological station emerged as the high-frequency centre over the past 14 years. Compared with the late 20th century, the standard deviation of annual dust storm days across the five meteorological stations decreased by 88.42%, indicating a substantial reduction in regional disparities. It revealed that surface wind speed was the most critical driver of dust storms. Soil moisture was the second most influential factor, showing a distinct seasonal lag effect, while vegetation coverage exerted a comparatively minor influence on dust storm occurrence.

Key words：dust storm；Ebinur Lake Basin；driving factors；generalized grey correlation model

沙尘暴是干旱与半干旱地区在强风作用下,大量地表颗粒物被卷起后形成的灾害性天气现象.在短时间内,大量颗粒物的释放对大气环境、区域气候以及人类健康均会造成显著影响[1].相比常规沙尘暴,盐尘暴这一富含盐分的特殊类型危害更为严重:不仅导致设备腐蚀、土壤盐渍化和水体污染,还可能携带毒性更高的重金属元素,对生态环境和人体健康构成严重威胁[2-4].艾比湖流域是我国盐尘的主要来源地之一,该区域干涸的湖床富集的盐分和强劲的风动力条件,使沙尘暴中常夹带高浓度盐分,并能随气流向外传播至数千公里外,进而对包括华北在内的广大地区在农业、畜牧业、居民生产生活和自

收稿日期：2025-02-27
基金项目：新疆维吾尔自治区重点研发项目(2024B03025-1);“天山英才”培养计划项目(2022TSYCCX0012);国家自然科学基金资助项目(42177088)
* 责任作者, 副研究员, zhangxx@ms.xjb.ac.cn

然生态等方面造成潜在不利影响[3-6].因此,深入研究艾比湖流域沙尘暴的时空演变及其驱动机制,对于保障生态安全和促进社会经济可持续发展,具有重要的科学意义和现实价值.

对沙尘暴进行时间与空间尺度上的动态变化与驱动因素分析,有助于深入理解区域气候发展和环境演化.现有研究多选取地表风速、土壤湿度和植被覆盖度作为沙尘研究的重要环境因素[7].地表风速是沙尘起动与输送的首要气象条件;土壤湿度通过影响地表尘源干湿状况,影响沙尘排放强度;植被覆盖度的提升则能有效抑制地表风蚀.综合分析这三大因素,有助于量化气候变化对沙尘活动的影响,评估生态修复措施在减少沙尘活动中的作用,从而使研究更加全面、准确[5-14].作为全球主要尘源地之一,东亚干旱与半干旱区在 1980 年以来沙尘天气总体显著减少[7,10].在我国西北地区,许多学者围绕沙尘源区分布、沙尘暴发生频率、地表风速与土地荒漠化程度等方面开展了大量研究[7-14].戈壁沙漠和塔克拉玛干沙漠是我国两大尘源区.2000~2019 年间,我国北方地区沙尘暴日数以 2013 年为分界呈现先减后增的变化趋势[11].戈壁沙漠与塔克拉玛干沙漠沙尘排放量的整体下降与地表风速减弱密切相关;相比地表风速,植被覆盖的影响相对次要,但在土地利用快速变化地区,植被覆盖仍可产生显著作用[7,12].然而,对于同处干旱区且富含盐分的艾比湖流域,现有研究多关注干涸湖床的演化与生态状况,针对该区域沙尘暴在近 10 余年的时空演变特点及其驱动机制仍有待进一步研究[15-17].

近年来,随着全球陆地表面风速减弱现象扭转,加之艾比湖湖面积持续萎缩,裸露的干涸湖床提供了丰富的尘源颗粒物,导致该地区沙/盐尘暴风险不断增加,亟需结合气候变化与人类活动等多重因素进行系统分析[17,29-33].基于此,本文结合 2010~2023 年艾比湖流域的气象观测数据、ERA5-Land 再分析数据与遥感数据,分析该流域沙尘暴及其多重驱动因素的时空演变规律,并利用广义灰度关联分析模型探讨驱动因素与沙尘暴发生日数之间的关联性,研究艾比湖流域沙尘暴的时空变化特征与主要驱动因素,为西北地区沙尘暴防治及生态安全保护提供科学支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

艾比湖流域位于中国新疆维吾尔自治区西北部、天山山脉西段,紧邻中哈边境,是新亚欧大陆桥中国段的西部通道(图 1).该流域整体呈一向东开口的“簸箕”状地貌,三面环山,中部为湖盆区,东部为准噶尔盆地平原.流域内地势自周边山麓向湖区逐渐降低,形成典型的山–盆–湖地貌格局.气候类型属于典型的温带大陆性气候,降水稀少、蒸发率高,年均降雨量不足 200mm,年均蒸发量则超过 1500mm[19].

在 2004 年以前,受气候变化与人类活动的双重影响,每年有数百万吨沙尘和盐尘从干涸的湖床释放至大气[4].在西北风的推动下,这些尘埃扩散到天山山脉北坡及周边地区,影响范围覆盖整个绿洲经济区,导致严重的环境与经济问题[20].2004 年以后,随着艾比湖注水工程、退耕还林等一系列生态恢复措施的推进,以及全球陆面风速减弱,流域内的尘暴问题得到明显改善[21].

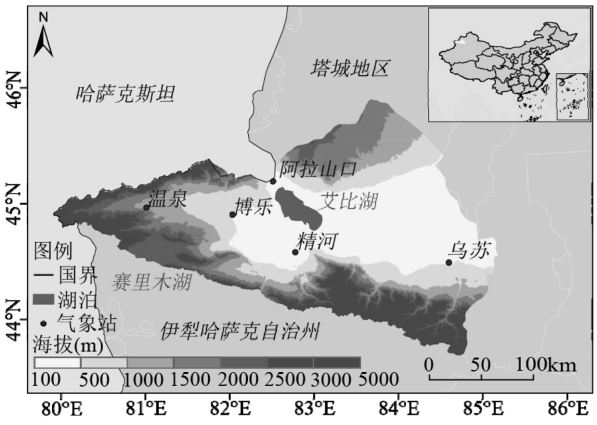


图 1 艾比湖流域地理位置与气象站分布

Fig.1 Location of the Ebinur Lake Basin and distribution of meteorological stations

基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2023)2762 号的标准地图制作,底图无修改,下同

1.2 数据来源

1.2.1 气象数据 本研究采用的气象数据包括:沙尘暴天气发生日数和常规气象要素,主要来源于中国气象局国家气象信息中心以及美国国家海洋和大气管理局.研究时间跨度为 2010~2023 年;选取了艾比湖流域内温泉、博乐、精河、阿拉山口和乌苏

5 个气象站的逐年沙尘暴发生日数,以及地表风速、大气能见度、空气相对湿度等逐日气象要素.鉴于艾比湖流域气象数据的时间分辨率相对较大,为确保数据准确性,本文参照以往研究,将沙尘暴界定为水平能见度小于 1km,相对湿度小于 70%的沙尘天气现象[20].当日若发生沙尘暴,则将该日记为 1 个沙尘暴日.同时,为提高识别结果的可靠性,本文还利用中国天气网和新疆天气网的天气数据对沙尘暴日进行验证.

1.2.2　遥感数据　基于 Google Earth Engine (GEE)平台,选取 2010 年 1 月 1 日~2023 年 12 月 31 日时段内的 Landsat 影像数据(空间分辨率 30m)逐年计算土壤调整植被指数(SAVI)并获取其平均面积值.研究共使用 266 景影像:其中使用 Landsat 5 共 68 景,使用 Landsat 7 共 48 景,Landsat 8 共 150 景.利用 GEE 的简单复合算法对原始影像进行辐射定标、云检测及云掩膜处理,并通过逐像元合成去除云层及其他噪声.最终,利用去云合成的影像计算 SAVI,获取艾比湖流域 2010~2023 年各年度的平均 SAVI 值.为分析研究时段内 SAVI 的变化趋势,本文引入 SAVI 变化趋势作为表征指标,其计算公式如下:

$$\mathrm{SAVI}_{\mathrm{trend}}=\mathrm{SAVI}_{2023}-\mathrm{SAVI}_{2010} \tag{1}$$

式中:$\mathrm{SAVI}_{\mathrm{trend}}$ 为 SAVI 变化趋势;SAVI_{2010} 为 2010 年时 SAVI 值;SAVI_{2023} 为 2023 年时 SAVI 值.

1.2.3　土壤湿度数据　ERA5 是欧洲中期天气预报中心(ECMWF)推出的第 5 代再分析数据,相较于前一代 ERA−Interim,数据质量有明显提升[22].ERA5−Land 则是在 ERA5 再分析模型基础上通过物理法则整合全球观测数据形成的再分析数据集,目前已发布 1981 年至今的逐小时和逐月全球数据,空间分辨率达 0.1°×0.1°(约 9km)[23].本文采用 ERA5 逐月土壤湿度数据,土壤湿度以 0~7cm 深度土壤液态水体积百分比表示,利用 GEE 平台进行数据处理,获得平均面积的逐年土壤湿度数据.为分析研究时段的土壤湿度,本文引入土壤湿度变化趋势作为表征指标,其计算公式如下:

$$\mathrm{SM}_{\mathrm{trend}}=\mathrm{SM}_{2023}-\mathrm{SM}_{2010} \tag{2}$$

式中:$\mathrm{SM}_{\mathrm{trend}}$ 为土壤湿度变化趋势;SM_{2010} 为 2010 年时土壤湿度值;SM_{2023} 为 2023 年时土壤湿度值.

1.3　广义灰度关联分析模型

广义灰色关联分析模型是对传统灰色关联分析的一种扩展和综合,可以更全面地度量多个对象之间的关联程度,适用于小样本和不完全数据的情况[24-26].

根据灰色系统理论,选择沙尘暴日数为参考数列 $x_0(t)=\{x_0(1),x_0(2),\ldots,x_0(m)\}$,各影响因子为比较数列 $x_i(t)=\{x_i(1),x_i(2),\ldots,x_i(n)\}$,其中 $t=\{1,2,\ldots,m\}$.

对原数列进行初始零点化分别为:

$$X_i^0=\left(x_i^0(1),x_i^0(2),\ldots,x_i^0(n)\right) \tag{3}$$

$$X_j^0=\left(x_j^0(1),x_j^0(2),\ldots,x_j^0(n)\right) \tag{4}$$

式中:$x_i^0(k)=x_i(k)-x_i(1)$;$x_j^0(k)=x_0(k)-x_0(1)$;$k=1,2,\ldots,n$

绝对关联系数 ϵ 为:

$$\epsilon=\frac{1+|s_i|+|s_j|}{1+|s_i|+|s_j|+|s_i-s_j|} \tag{5}$$

式中:

$$s_i=\int_1^n\left(x_i^0(t)-x_i^0(1)\right)\mathrm{d}t \tag{6}$$

$$s_j=\int_1^n\left(x_j^0(t)-x_j^0(1)\right)\mathrm{d}t \tag{7}$$

相对关联系数 为:

$$\gamma=\frac{1+s_i'+s_j'}{1+s_i'+s_j'+\left|s_i'-s_j'\right|} \tag{8}$$

通过式(7)和(8)结果计算综合关联度 ρ 为:

$$\rho=\theta\cdot\epsilon+(1-\theta)\cdot\gamma \tag{9}$$

式中:$\theta\in[0,1]$ 为权重系数,本文取 $\theta=0.5$ [26].

2　结果与讨论

2.1　艾比湖流域沙尘暴时空变化

2.1.1　沙尘暴年代变化在 1958~2001 年艾比湖流域的沙尘活动非常活跃,多年平均沙尘暴日数约为 15d,但从 20 世纪 90 年代开始,艾比湖流域的沙尘暴日数开始呈现下降态势[29].这一趋势在进入 21 世纪后继续保持,在 2002~2007 年间流域内年沙尘暴日数总体上依然呈下降趋势,但下降速率总体在逐年放缓[4].

由图 2 可见,2010~2023 年艾比湖流域沙尘暴年均日数整体上呈“先上升、后下降、再上升”的波动趋势.2010~2014 年间,沙尘暴日数呈明显上升趋势,速率约为+0.60d/a;2014~2017 年间呈显著下降,斜率约为−0.70d/a;2018~2023 年又呈现上升态势,斜率约

为+0.31d/a.而从 2010~2023 年整体看,综合速率为+0.08d/a,总体保持波动上升趋势.

从季节性变化角度来看,在 2010~2023 年间春季通常是全年沙尘暴最频繁的时段.这与近年来对北疆地区沙尘暴季节变化的研究结论相一致,原因可归结为春季多大风天气、地表植被尚未完全返青、裸地易受大风侵蚀等[30].夏、秋季节的沙尘暴频次相对较低,而冬季则未观测到沙尘暴天气.

总体而言,艾比湖流域近 10 余年沙尘暴年代变化可概括为“总体上升、局部波动”:2010~2014 年持续上升,2014~2017 年有所回落,2018 年之后又在波动中回升;春季仍是沙尘暴多发季节,对年代总天数贡献最大.整体趋势虽未完全达到显著上升(r=0.43<0.7;p=0.13>0.05),但呈现出向上波动的态势.

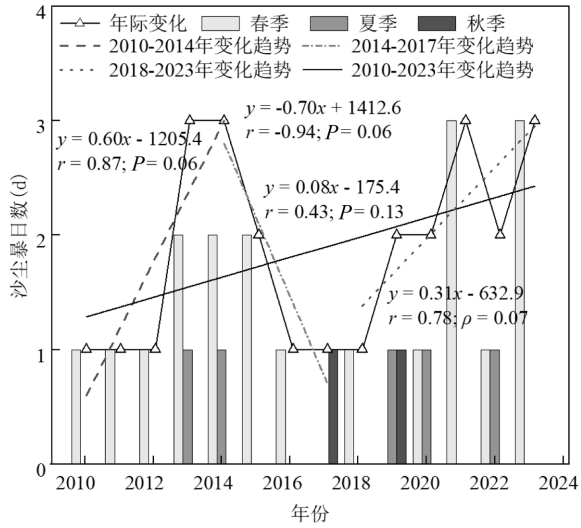


图 2 2010~2023 年艾比湖流域累计沙尘暴日数年代变化

Fig.2 Interannual variation in the accumulated number of sandstorm days in the Ebinur Lake Basin from 2010 to 2023

2.1.2 沙尘暴空间分布在 2001 年以前,艾比湖流域各地的沙尘暴空间分布特点为乌苏最高,精河次之,温泉和博乐居于中间水平,阿拉山口最低.整体呈现出由南向北逐级递减的空间分布格局[29].

2010~2023 年观测结果(图 3)显示,精河累计沙尘暴日数最多,为 9d,其次为乌苏(8d)、温泉(6d)和博乐(5d),阿拉山口未记录到沙尘暴事件.与 1957~2001 年相比(表 1),艾比湖流域各站点的沙尘暴日数普遍下降,最大值从乌苏(5.71d)转移至精河(0.64d). 5 个气象站的年均沙尘暴日数标准差(Standard Deviation)由 1.90 降至 0.22,减少 88.42%,说明艾比湖流域沙尘暴空间差异显著缩小.尽管沙尘暴频次明显下降,2010~2023 年的沙尘暴空间分布格局在整体上仍延续了 20 世纪“南高北低”的基本特征.

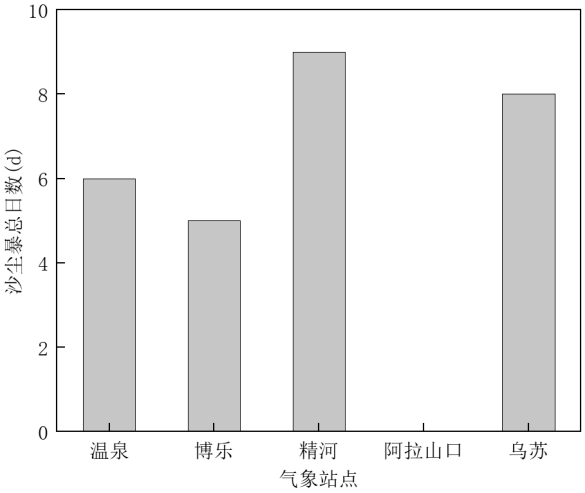


图 3 2010~2023 年艾比湖流域各气象站沙尘暴累计日数

Fig.3 Accumulated number of sandstorm days at meteorological stations in the Ebinur Lake Basin from 2010 to 2023

表 1 艾比湖流域不同时期各气象站年均沙尘暴日数

Table 1 Spatial distribution of annual average sandstorm days in different periods in the Ebinur Lake Basin

时期	年均沙尘暴日数(d)				
	温泉	博乐	精河	阿拉山口	乌苏
1957~2001*	2.93	2.09	4.21	0.09	5.71
2010~2023	0.43	0.36	0.64	0	0.57

注:* 该数据来源于文献[29]数据的再分析.

然而,沙尘暴高值中心由乌苏向精河转移,空间分布差异趋于减弱,反映出艾比湖流域沙尘暴起沙发展的环境条件发生改变.其可能的原因包括:风速下降对乌苏沙尘暴的影响大于精河,且乌苏周边的大风条件因城市扩张与绿化等因素被一定程度缓冲[27];艾比湖水域萎缩导致湖底干涸区面积扩大,为沙尘暴提供更多尘源颗粒物[29,34];同时,乌苏西部和西北部区域因植被覆盖度提升,抑制了沙尘活动;城镇化及土地利用变化在局部削减沙尘的同时,也可能改变输沙通道,使沙尘暴的空间分布格局进一步变化[28].

2.2 驱动因素分析

气象因素与下垫面条件在沙尘暴的发生与发展过程中起到决定性作用[7-13].地表风速直接决定沙尘的起动与输送能力,而土壤湿度和植被覆盖度

共同影响地表颗粒物的易蚀性与风蚀阻力,选择这 3 个因素能够较全面地反映气象条件与下垫面特征对沙尘暴发生与发展的影响[5-14].

2.2.1　地表风速地表风速被视为影响沙尘暴发生的首要因素[29].Wu 等[7]在对 2001~2017 年东亚沙尘活动的研究中发现,地表风速下降是东亚沙尘暴减弱的主要原因.在沙尘活动研究中,研究人员通常以平均风速和大风天数作为衡量研究区域风速特征的指标[9,30].根据蒲福风级标准,风速大于 5.5m/s (即 4 级风及以上)可将尘土卷起至空中,因此本研究将该风速发生日定义为“大风日数”[32].艾比湖流域的沙尘暴策源地主要分布在艾比湖周边干涸的湖底及其中东部的荒地[4,29-32].为更准确地反映地表风速对流域沙尘暴的影响,本文选取位于主要沙尘暴策源地的精河站地表风速观测数据,作为指示流域内风速状况的代表数据.

由图 4 可见,2010~2023 年间,艾比湖流域主要沙尘暴策源地的平均地表风速和大风日数总体呈波动上升趋势:都在 2014 年达到峰值(年均地表风速超过 3.0m/s;大风日数达 79d),而 2020 年则出现明显低谷.这在一定程度上印证了 Yang 等[31]关于中国的全球陆地表面风速减弱现象于 2014 年前后结束的研究结论.从季节尺度看,春季地表风速和大风天数整体略高于夏季,但差距较小.春夏两季地表风速和大风日数均高于全年平均水平,这与沙尘暴高发时段相吻合.

2.2.2　土壤湿度土壤湿度同样是影响沙尘暴变化的重要因素,对沙尘的临界摩擦速度和传输过程具有显著影响[36].由于在湖泊等地表开放水域区域,土壤湿度数据可能存在一定误差,为确保数据的准确性,需要对这些区域的数据进行剔除[36,38].自 2010 年以来,流域内艾比湖湖泊面积呈萎缩趋势,而赛里木湖的湖泊面积则缓慢上升[34-35].鉴于此,本文以 2010 年时两湖的面积范围为界,对土壤湿度数据中的异常值进行了剔除.

由图 5 可见,2010~2023 年间,艾比湖流域单位面积土壤湿度年均值整体呈下降趋势:2016 年达到峰值(全年平均湿度为 15.76%),2022 年降至最低点(全年平均湿度为 11.67%),表明湿度水平显著下降.2015~2016 年间,土壤湿度出现短暂回升,可能与降水增多或治理措施的实施有关.从季节角度来看,除 2013 年外,春季湿度普遍高于夏季,但下降趋势同样明显.

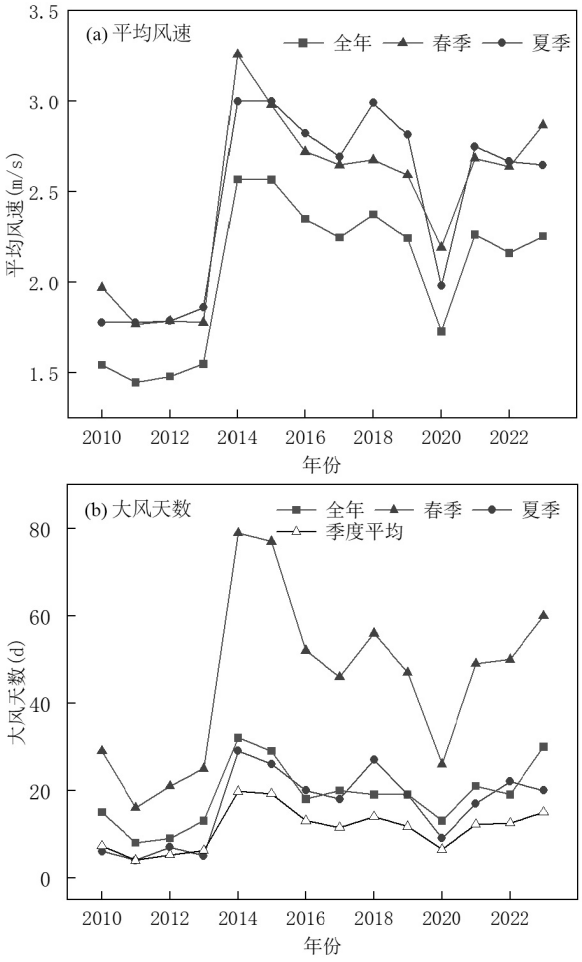


图 4　2010~2023 年艾比湖流域代表站点平均风速和大风天数年代变化

Fig.4　Interannual variation in average wind speed and numbers of gale days at representative stations in the Ebinur Lake Basin from 2010 to 2023

如图 6 所示,2023 年艾比湖流域整体土壤湿度分布存在显著的空间差异:流域西部及其周边山地湿度相对较高,而中部和东部大部分区域则相对干燥.西部及周边山地湿度较高,可能是由于积雪融水补充土壤水分[37].相较之下,中部与东部区域植被覆盖不足、地表径流较少,导致其相对干旱.湖区周边湿度也相对较高,这主要归因于地表径流、地下水补给及湖面蒸发等多重因素的共同作用[38].

由图 7 可见,总体而言,2010~2023 年研究区土壤湿度普遍呈下降趋势,尤以西南部降幅最为显著,其湿度损失区域(超过 0.06%以上)分布较广,表明该区域可能面临更突出的干旱压力.与之相对,东部和中

部的部分区域在此期间湿度出现回升,说明这些局部区域的土壤含水量有所改善.

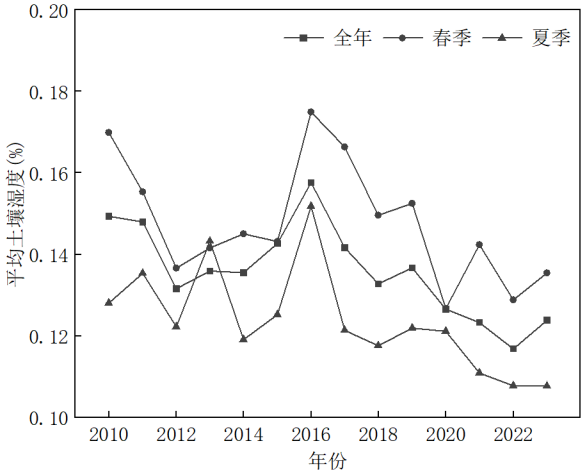


图 5 2010~2023 年艾比湖流域平均土壤湿度年代变化

Fig.5 Interannual variation in average soil moisture in the Ebinur Lake Basin from 2010 to 2023

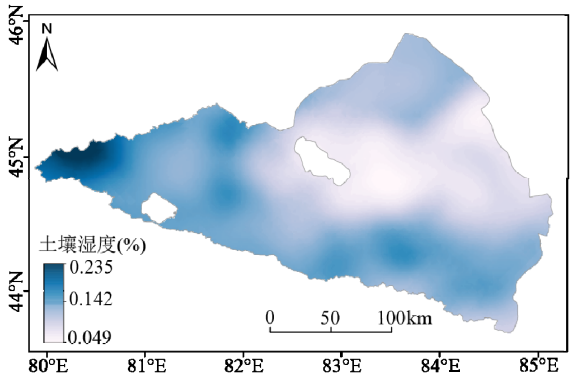


图 6 2023 年艾比湖流域年均土壤湿度空间分布

Fig.6 Spatial distribution of annual average soil moisture in the Ebinur Lake Basin in 2023

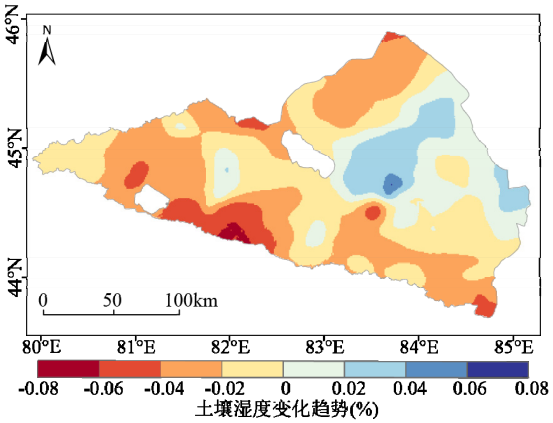


图 7 2010~2023 年艾比湖流域年均土壤湿度变化趋势

Fig.7 Trend of annual average soil moisture in the Ebinur Lake Basin from 2010 to 2023

2.2.3 植被覆盖度植被覆盖度是调控沙尘暴发生频率与强度的关键因素之一[39].通过固定土壤、降低地表风速以及调节微环境,植被能够有效抑制沙尘暴的形成,其覆盖率与沙尘输送强度呈显著负相关[40].在干旱区由于植被覆盖程度较低,SAVI 比归一化植被指数(NDVI)在植被监测方面精度更高[40].

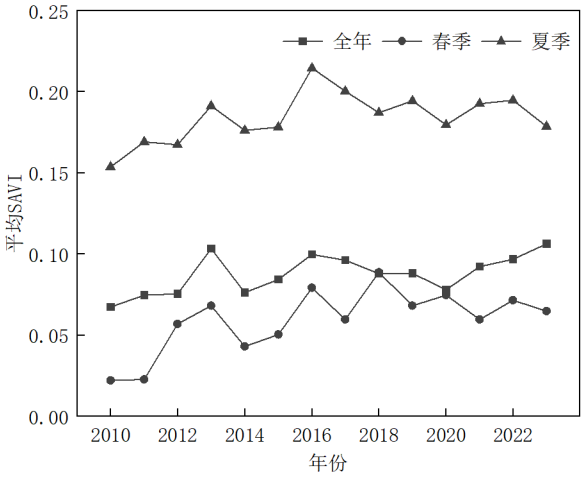


图 8 2010~2023 年艾比湖流域平均 SAVI 年代变化

Fig.8 Interannual variation in average SAVI per unit area in the Ebinur Lake Basin from 2010 to 2023

由图 8 可以看出,2010~2023 年艾比湖流域年均单位面积 SAVI 整体呈现波动上升趋势,夏季 SAVI 显著高于春季和全年平均,符合植被生长的一般规律,而春季因为降水不足等原因,植被覆盖程度较低.年均单位面积 SAVI 在 2013 年和 2016 年出现明显下降,2020 年后春季和全年平均植被覆盖水平有所恢复.

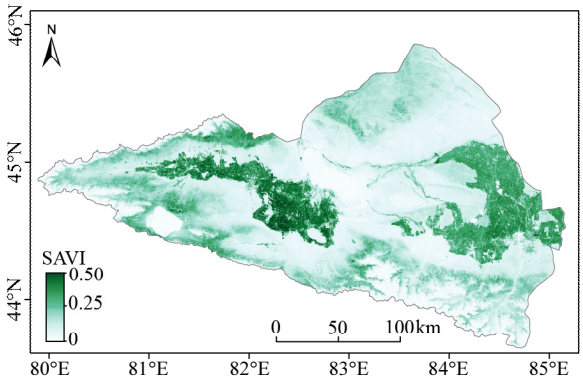


图 9 2023 年艾比湖流域年均 SAVI 空间分布

Fig.9 Spatial distribution of annual average SAVI in the Ebinur Lake Basin in 2023

2023 年的艾比湖流域年均 SAVI(图 9)显示,植被覆盖度在空间上分布不均,SAVI 值整体处于低位水平,符合该流域属于干旱区的生态环境.图中可见部分山区及绿洲农业区的 SAVI 值较高,说明这些区域降水或灌溉条件较好,植被覆盖度相对更高;而湖盆周边及干旱平原区的 SAVI 值相对较低.

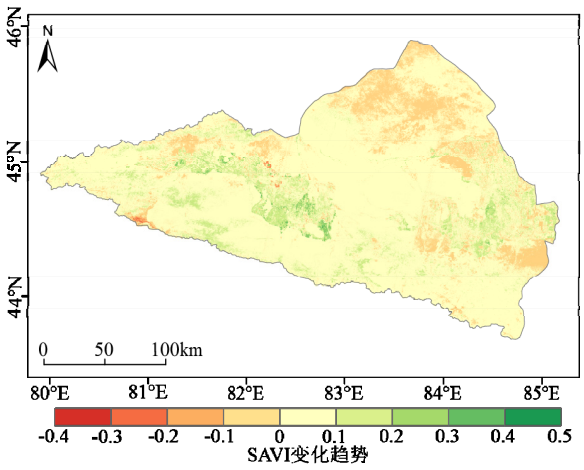


图 10　2010~2023 年艾比湖流域年均 SAVI 变化趋势

Fig.10　Trend of Annual average SAVI in the Ebinur Lake Basin from 2010 to 2023

从 2010~2023 年间的 SAVI 变化趋势(图 10)可以发现,艾比湖流域的植被覆盖整体呈上升趋势.尤其是流域内农业地区增长较为明显.局部地区植被退化较为明显,集中于城镇周围等人类活动干扰较强烈的区域和北部山区.

总体来看,艾比湖流域虽然面临整体干旱环境与人类活动加剧所带来的植被退化风险,但通过人工干预已在植被恢复方面取得一定成效.

2.3　关联度分析

为量化各驱动因素对沙尘暴的影响,本研究分别选取全年、春季和夏季 3 个时间尺度,以沙尘暴日数为参考数列,地表风速、土壤湿度以及 SAVI 为比较数列,采用广义灰度关联分析模型来测算各驱动因素与沙尘暴日数变化的关联程度.综合关联度的取值范围为 0~1,数值越大表示该驱动因素与沙尘暴日数的关联性越强.

通过比较不同驱动因素的综合关联度,可以在一定程度上反映其对2010~2023年艾比湖流域沙尘暴发生日数变化的影响大小.时滞效应是指一个因素的变化对系统产生影响时存在时间延迟,即输入与输出之间不是同步发生[41].为进一步探索不同驱动因素的时滞效应,研究还从同期(同一时间尺度,如春季沙尘暴日数与春季地表风速)与跨期(不同时间尺度,如春季沙尘暴日数与夏季土壤湿度)两个角度展开分析.

分析结果(图 11)显示,在同期角度下,地表风速和土壤湿度是影响沙尘暴日数的主要驱动因素.其中,夏季地表风速对沙尘暴日数的影响最为显著,综合关联度达 0.832;而在全年尺度上,土壤湿度与沙尘暴日数的关联度最高(0.763),在夏季则最低(仅 0.558).SAVI 在全年、春季和夏季 3 个时间尺度上的综合关联度均较低(约 0.51~0.52).总体来看,2010~2023 年间,在同期条件下,艾比湖流域对沙尘暴产生影响的主要因素依次为:地表风速>土壤湿度>植被覆盖.

在跨期角度下,地表风速和土壤湿度同样是主要驱动因素,但影响方式有所不同.首先,春季地表风速与全年、春季和夏季沙尘暴日数的关联度均较为接近(分别为 0.732、0.734 和 0.715),这可能与春季作为艾比湖流域沙尘暴高发时段,对全年沙尘暴日数贡献较大,以及春季与夏季地表风速在数值和变化趋势上相对接近有关.其次,夏季地表风速与全年沙尘暴日数的相关性极高,达到 0.832,结合夏季地表风速与夏季沙尘暴日数的高相关性和夏季沙尘暴日数的年际规律,说明夏季沙尘暴日数与全年风速对该时段艾比湖流域沙尘暴发生发展具有重要作用.

全年土壤湿度与春季沙尘暴日数的关联度高达 0.763,这可能体现了冬季土壤湿度的时滞效应.春季平均土壤湿度与全年、夏季沙尘暴日数的相关性均高于春季(均为 0.742),这进一步说明春季土壤湿度存在对后续时段沙尘暴发生的滞后影响.这一结果与 Liu 等[42]关于土壤湿度具有持续性并对沙尘暴产生滞后影响的研究结论相一致.

此外,由于本文以 2010 年湖面积为界剔除异常数据,导致研究未涉及湖泊干涸对土壤湿度的影响.考虑到干涸湖底对艾比湖流域沙尘暴的重要贡献,实际的土壤湿度与沙尘暴的关联性会高于研究所得.

植被覆盖无论在同期还是跨期角度下,与沙尘暴日数的相关性都相对较低(约在 0.511~0.524).结合既往研究推断,这与流域主体为干旱区、植被覆盖度普遍偏低以及沙尘暴主要源区之一是艾比湖湖底干涸区等因素有关[4,29].

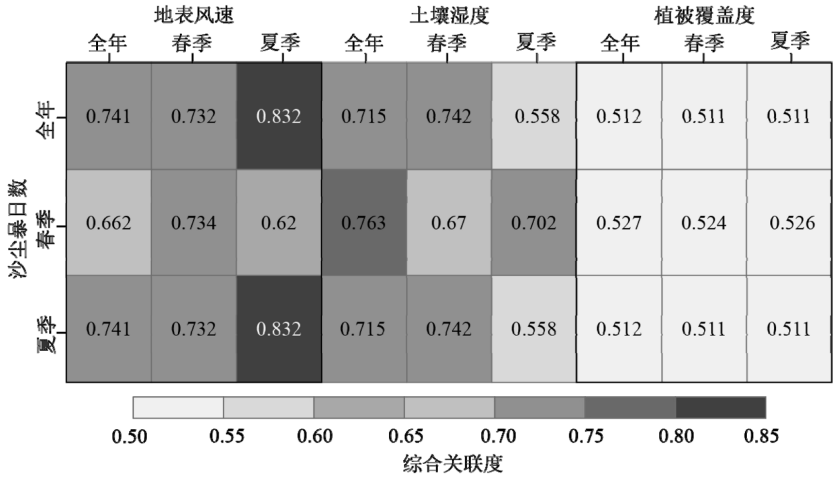


图 11 2010~2023 年艾比湖流域沙尘暴日数与各驱动因素综合关联度

Fig.11 Comprehensive correlation between sandstorm days and various driving factors in the Ebinur Lake Basin from 2010 to 2023

尽管结果显示植被覆盖对于艾比湖流域沙尘暴的直接抑制效应相对较弱,但局部区域(如山地、绿洲农业区)的植被改善在一定程度上证明了生态

治理的积极作用.对于沙尘源区及其周围,若能因地制宜地推广适宜的防风固沙植被及农牧业管理措施,可能逐步提升区域内植被覆盖度和土壤保持能力,降低沙尘输送风险[38-40].

然而,植被建设需面对流域水资源紧张、气候干旱加剧以及人类活动强度上升等多重挑战,需从流域尺度统一规划水土利用、加强生态修复的科学布局,并与城市扩张、工业项目建设等政策进行有效协调[32-34,39].

3 结论

3.1 艾比湖流域沙尘暴活动呈现波动上升趋势(+0.08d/a),具体表现为 2010~2014 年快速增加(+0.60d/a),2014~2017 年短暂下降(−0.70d/a),2018 年后恢复增长态势(+0.31d/a).季节特征表现为春季高发,夏秋季次之,冬季无沙尘暴记录.空间分布格局在整体上仍延续了 20 世纪“南高北低”的基本特征,但各站点沙尘暴日数标准差下降 88.42%,区域差异性明显减弱,精河站逐渐取代乌苏成为流域沙尘暴高频中心.

3.2 2010~2023 年间,艾比湖流域主要沙尘暴策源地地表风速整体呈波动上升,2014 年达到峰值,2020 年出现低谷;土壤湿度于 2016 年达到高值后整体下降,流域西南部干旱压力最为突出,而东部土壤湿度明显回升;植被覆盖总体虽呈波动上升趋势,夏季显著高于春季,但仍存在植被退化集中分布区.

3.3 地表风速是艾比湖流域沙尘暴发生的首要驱动因素,夏季地表风速与夏季沙尘暴日数关联度最高;土壤湿度对沙尘暴的影响次之,并存在一定时滞效应.冬、春两季的水分盈亏状况可延续至后续时段.由于研究中剔除了 2010 年以后干涸湖区范围内的异常数据,土壤湿度与沙尘暴的关联度在实际情形中可能更高.相较于前两者,植被覆盖对沙尘暴的直接抑制作用相对有限,主要原因在于艾比湖周边干涸湖床等主要沙尘源区植被覆盖度极低,以及流域整体气候干旱,植被覆盖水平不高.但在局部地区(如绿洲农业区),植被改善与恢复一定程度上体现了生态治理措施的积极成效.

参考文献:

[1] Goudie A. Desert dust and human health disorders [J]. Environment International, 2014,63:101−113.

[2] Abuduwaili J, Liu D W, Wu G Y. Saline dust storms and their ecological impacts in arid regions [J]. Journal of Arid Land, 2010, 2(2):144−150.

[3] Semenov O. Dust storms and sandstorms and aerosol long−distance transport [C]//Berlin, Heidelberg: Springer, 2012:73−82.

[4] Liu D W, Abuduwaili J, Wang L X. Salt dust storm in the Ebinur Lake region: its 50−year dynamic changes and response to climate changes and human activities [J]. Natural Hazards, 2015,77(2):1069−1080.

[5] Abuduwaili J, Zhang Z Y, Jiang F Q, et al. The disastrous effects of salt dust deposition on cotton leaf photosynthesis and the cell physiological properties in the Ebinur Basin in Northwest China [J]. PLoS ONE, 2015,10(4):e0124546.

[6] Ge Y X, Abuduwaili J, Ma L. Lakes in arid land and saline dust storms [C]//E3S Web of Conferences, 2019,99:01007.

[7] Wu C L, Lin Z H, Shao Y P, et al. Drivers of recent decline in dust activity over East Asia [J]. Nature Communications, 2022,13:34823.

[8] Tan S C, Chen B, Wang H, et al. Variations in aerosol optical

properties over East Asian dust storm source regions and their climatic factors during 2000~2021 [J]. Atmosphere, 2022,13(6):992.

[9] Chen S Q, Liu J B, Ma S, et al. Holocene dust storm variations across northern monsoonal Asia and arid central Asia: Contrasting impacts of climate change [J]. Global and Planetary Change, 2024,240:104171.

[10] Shao Y, Dong C H. A review on East Asian dust storm climate, modelling and monitoring [J]. Global and Planetary Change, 2006, 52(1–4):1−22.

[11] 杨　婕,赵天良,程叙耕,等.2000~2019 年中国北方地区沙尘暴时空变化及其相关影响因素 [J]. 环境科学学报, 2021,41(8):2966−2975.
Yang J, Zhao T L, Cheng X G, et al. Spatiotemporal variation and influencing factors of dust storms in northern China during 2000~2019 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021,41(8):2966–2975.

[12] 江　鑫,冯巧梅,周俐宏,等.风速加强可能是近年中国沙尘日数增加的主要因素 [J]. 科学通报, 2024,69(3):356−361.
Jiang X, Feng Q M, Zhou L H, et al. Strengthening wind speed may be the main factor for recent increases in dust days in China [J]. Chinese Science Bulletin, 2024,69(3):356−361.

[13] Zhang X X, Claiborn C, Lei J Q, et al. Aeolian dust in Central Asia: Spatial distribution and temporal variability [J]. Atmospheric Environment, 2020,222:117098.

[14] Mousavi H, Panahi D M, Kalantari Z. Dust and climate interactions in the Middle East: Spatio−temporal analysis of aerosol optical depth and climatic variables [J]. Science of the Total Environment, 2024,927:165569.

[15] Hamzeh N H, Karami S, Opp C, et al. Spatial and temporal variability in dust storms in the Middle East, 2002~2018: Three case studies in July 2009 [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021,14:1182.

[16] Bao T N, Xi G L, Deng B L, et al. Long−term variations in spatiotemporal clustering characteristics of dust events in potential dust sources in East Asia [J]. Catena, 2023,223:106683.

[17] Zhang F, Tiyip T, Johnson V C, et al. The influence of natural and human factors in the shrinking of the Ebinur Lake, Xinjiang, China, during the 1972~2013 period [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2015,187(8):1−16.

[18] Zeng Z Z, Ziegler A, 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.

[19] Abuduwaili J, Zhang Z Y, Jiang F Q. Evaluation of the pollution and human health risks posed by heavy metals in the atmospheric dust in Ebinur Basin in Northwest China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015,22(14):10739−10752.

[20] Cao H, Liu J, Wang G Z, et al. Identification of sand and dust storm source areas in Iran [J]. Journal of Arid Land, 2015,(5):567−578.

[21] Qian Y B, Wu Z N, Yang Q, et al. Ground−surface conditions of sand−dust event occurrences in the southern Junggar Basin of Xinjiang, China [J]. Journal of Arid Environments, 2007,70:49−62.

[22] Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. The ERA5 global reanalysis [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2020,146 (730):1999−2049.

[23] Muñoz−Sabater J, Dutra E, Agustí−Panareda A, et al. ERA5−Land: A state−of−the−art global reanalysis dataset for land applications [J]. Earth System Science Data, 2021,13(9):4349−4383.

[24] Hu Y J, Wu L Z, Shi C, et al. Research on optimal decision−making of cloud manufacturing service provider based on grey correlation analysis and TOPSIS [J]. International Journal of Production Research, 2020,58(15):4349−4365.

[25] Wang C C, Wang B. Analysis of the influencing factors of the zero drift of capacitive acceleration sensor based on grey correlation degree [J]. International Core Journal of Engineering, 2021,7(8):191−202.

[26] 刘思峰,蔡　华,杨英杰,等.灰色关联分析模型研究进展 [J]. 系统工程理论与实践, 2013,33(8):2041−2046.
Liu S F, Cai H, Yang Y J, et al. Research progress of grey relational analysis models [J]. Systems Engineering Theory and Practice, 2013, 33(8):2041−2046.

[27] Wang X M, Chen F, Wu Z Y, et al. Impacts of weather conditions modified by urban expansion on surface ozone: Comparison between the Pearl River Delta and Yangtze River Delta regions [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2009,26(6):962−972.

[28] Salah Z, Dashti H, Zakey A, et al. How land use change can improve air quality status over Kuwait [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2022,(19):747−762.

[29] 杨　青,何　清,李红军,等.艾比湖流域沙尘气候变化趋势及其突变研究 [J]. 中国沙漠, 2003,(5):27−32.
Yang Q, He Q, Li H J, et al. Trends and abrupt changes of dust climate in the Ebinur Lake Basin [J]. Journal of Desert Research, 2003,(5):27−32.

[30] Zhang Y L, Li Q J, Qian H, et al. Spatiotemporal variations and driving factors of dust storm events in northern China (1960~2007) [J]. Atmospheric Research, 2019,212:144−155.

[31] Yang Q, Li M X, Zu Z Q, et al. Has the stilling of the surface wind speed ended in China? [J]. Science China Earth Sciences, 2021,64(7): 1036−1049.

[32] 李智宽,谭成好,杨　婕,等.21 世纪以来新疆地区沙尘暴时空变化及其关键气象影响因子 [J]. 环境科学学报, 2024,44(10):1−9.
Li Z K, Tan C H, Yang J, et al. Spatiotemporal variation and key meteorological drivers of dust storms in Xinjiang since the 21st century [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2024,44(10):1−9.

[33] Yang X H, He Q, Matimin A, et al. Threshold velocity for saltation activity in the Taklimakan Desert [J]. Pure and Applied Geophysics, 2017,174(12):4459−4470.

[34] 邓浩鑫,汤秋鸿,张志栋,等.人类活动对西北地区艾比湖长期及季节变化的影响 [J]. 中国科学:地球科学, 2025,55(2):485−499.
Deng H X, Tang Q H, Zhang Z D, et al. Impacts of human activities on long−term and seasonal changes in Ebinur Lake, Northwest China [J]. Science China: Earth Sciences, 2025,55(2):485−499.

[35] 李旭冰.西天山北麓湖泊时空动态变化及影响因素研究 [D]. 南京:南京信息工程大学, 2022.
Li X B. Spatiotemporal dynamics and influencing factors of lakes on the northern slope of the western Tianshan Mountains [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2022.

[36] Zhang J, Guan Q Y, Du Q Q, et al. Spatial and temporal dynamics of desertification and its driving mechanism in Hexi region [J]. Land Degradation & Development, 2022,33(4):741−756.

[37] Brandt A C, Zhang Q, Lopez Caceres M L, Murayama H. Soil temperature and soil moisture dynamics in winter and spring under heavy snowfall conditions in North−Eastern Japan [J]. Hydrological Processes, 2020,34:3235−3251.

[38] Wang Y J, Gu X C, Yang G, et al. Impacts of climate change and human activities on water resources in the Ebinur Lake Basin, Northwest China [J]. Journal of Arid Land, 2021,13:581−598.

[39] Nouri H, Faramarzi M, Sadeghi S H. Effects of regional vegetation cover degradation and climate change on dusty weather types [J]. Environmental Earth Sciences, 2019,78(6):180.

[40] Bakhtiari M, Boloorani A D, Kakroodi A A. Land degradation modeling of dust storm sources using MODIS and meteorological time series data [J]. Journal of Arid Environments, 2021,186:104433.

[41] Pourdehi S, Karimipour D, Karimaghaee P. Output−feedback lag−synchronization of time−delayed chaotic systems in the presence of external disturbances subjected to input nonlinearity [J]. Chaos, 2011,21(4):043128.

[42] Liu X D, Yin Z Y, Zhang X Y, et al. Analyses of the spring dust storm frequency of northern China in relation to antecedent and concurrent wind, precipitation, vegetation, and soil moisture conditions [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2004,109(D16):D16210.

作者简介:：王陈伟(2002−),男,陕西榆林人,中国科学院大学硕士研究生,主要从事干旱区大气环境研究.wangchenwei24@mails.ucas.ac.cn.