

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2026.05.042

CSTR: 32310.14.stbxb.2026.05.042

赵娟娟, 夏楠, 武伊帆, 等. 基于 RWEQ 模型的南疆地区防风固沙服务时空演变及价值评估[J]. 水土保持学报, 2026, 40(5): 160-172.

Zhao Juanjuan, Xia Nan, Wu Yifan, et al. Spatiotemporal evolution and value assessment of windbreak and sand fixation service in southern Xinjiang using RWEQ model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(5): 160-172.

基于 RWEQ 模型的南疆地区防风固沙 服务时空演变及价值评估

赵娟娟¹, 夏楠^{1,2}, 武伊帆¹, 李安澜¹

(1. 新疆大学地理与遥感科学学院, 乌鲁木齐 830017; 2. 新疆绿洲生态重点实验室, 乌鲁木齐 830017)

摘要: [目的] 为科学评估极端干旱背景下南疆地区防风固沙服务时空演变及其生态经济价值, 精准掌握区域防护成效并优化防沙治沙布局。[方法] 基于 2000—2024 年多源遥感与气象观测数据, 利用本地化修正风蚀方程(RWEQ)定量估算防风固沙量及保有率; 结合替代成本与机会成本法系统核算多维经济价值, 并采用参数最优地理探测器(OPGD)揭示防风固沙空间分异的驱动因素及其协同效应。[结果] 研究期内南疆地区植被覆盖整体呈显著改善趋势, 驱动防风固沙总量与保有率呈先降后升的“V”形演变特征, 空间呈现“边缘绿洲高、腹地沙漠低”的圈层格局。多年平均防风固沙总价值达 1 640.84 亿元, 其中保持土壤肥力价值占绝对主导地位(贡献率达 94.05%)。土地利用类型和 NDVI 是主导防风固沙空间格局的核心因子, 且与气温、降水等气候要素存在强烈的交互增强效应。区域防风固沙峰值集中于 NDVI 为 0.16~0.23 的草地、年降水量 178~329 mm 的山前过渡带及距河流 4.4~10.0 km 的河岸生态廊道。[结论] 持续推进的生态工程有效提升南疆地区防风固沙效能并驱动生态资产稳步增值, 其核心经济意义在于避免表层稀缺养分随风沙大量流失, 保护干旱区脆弱的表层土壤; 复合环境因子的协同作用决定保障绿洲安全的最适生态阈值。研究结果可为极端干旱区生态资产量化评估与关键防线空间配置提供参考。

关键词: RWEQ 模型; 防风固沙服务; 价值评估; 地理探测器

中图分类号: S157.1; X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)05-0160-13

Spatiotemporal Evolution and Value Assessment of Windbreak and Sand Fixation Service in Southern Xinjiang Using RWEQ Model

Zhao Juanjuan¹, Xia Nan^{1,2}, Wu Yifan¹, Li Anlan¹

(1. College of Geography and Remote Sensing Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830017, China;

2. Xinjiang Key Laboratory of Oasis Ecology, Xinjiang University, Urumqi 830017, China)

Abstract: [Objective] This study aims to scientifically assess the spatiotemporal evolution and eco-economic value of windbreak and sand fixation services in southern Xinjiang under the background of extreme drought, and to accurately evaluate the effectiveness of regional protection and optimize the spatial layout of sand prevention and control. [Methods] Based on multi-source remote sensing and meteorological observation data from 2000 to 2024, the localized revised wind erosion equation (RWEQ) model was utilized to quantitatively estimate the amount and retention rate of windbreak and sand fixation. Combining the replacement cost and opportunity cost methods, the multi-dimensional economic values were systematically calculated. Furthermore, the optimal parameters-based geodetector (OPGD) was employed to reveal the driving factors and their synergistic effects on the spatial differentiation of windbreak and sand fixation. [Results] During the study period, the overall vegetation coverage in southern Xinjiang showed a highly significant improvement trend, driving the total amount and retention rate of windbreak and sand fixation to exhibit a "V"-shaped evolution characteristic of an initial decrease

收稿日期: 2026-03-17

修回日期: 2026-06-11

录用日期: 2026-06-18

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-08-25

资助项目: 科技部第三次新疆综合科学考察项目(2022xjkk1103)

第一作者: 赵娟娟(2002—), 女, 硕士研究生, 主要从事干旱区生态系统服务评估研究。E-mail: zhaojuanjuan@stu.xju.edu.cn

通信作者: 夏楠(1991—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事干旱区生态遥感与荒漠生态修复研究。E-mail: xn_gis@xju.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

followed by an increase. Spatially, it presented a concentric pattern of "high in the oasis margins and low in the desert hinterland." The multi-year average total eco-economic value of windbreak and sand fixation reached 164.084 billion yuan, among which the value of soil fertility retention occupied an absolutely dominant position (with a contribution rate of 94.05%). Land use types and NDVI were the core factors dominating the spatial pattern of windbreak and sand fixation, exhibiting strong interactive enhancement effects with climatic elements such as temperature and precipitation. The regional peaks of windbreak and sand fixation were concentrated in grasslands with an NDVI of 0.16–0.23, piedmont transition zones with annual precipitation of 178–329 mm, and riparian ecological corridors located 4.4–10.0 km away from rivers. [Conclusion] The continuously advanced ecological engineering projects have effectively enhanced the windbreak and sand fixation efficiency in southern Xinjiang and driven the steady increase in ecological assets. Its core economic significance lies in preventing the massive loss of scarce surface nutrients caused by wind erosion, thereby protecting the fragile topsoil in arid regions. The synergistic effects of complex environmental factors determine the optimal ecological thresholds for ensuring oasis safety. The research results can provide a scientific reference for the quantitative assessment of ecological assets and the spatial configuration of key ecological defense lines in extremely arid regions.

Keywords: RWEQ model; windbreak and sand fixation service; value assessment; geodetector

Received: 2026-03-17

Revised: 2026-06-11

Accepted: 2026-06-18

Online(www.cnki.net): 2026-08-25

风蚀是驱动干旱半干旱地区土地退化与荒漠化的核心动力过程,严重威胁着绿洲生态系统的稳定性与国家荒漠化防治战略的实施^[1]。防风固沙服务作为生态系统提供的重要调节服务,对抑制地表风蚀、保障交通干线安全及维持土壤养分具有不可替代的作用^[2]。根据最新的全国荒漠化和沙化调查结果,我国防沙治沙工作虽取得显著成效,但局部干旱区的风沙治理形势依然严峻^[3]。南疆地区地处我国西北极端干旱区,生态极度脆弱,不仅是我国典型的风蚀重灾区,也是国家防沙和治沙生态屏障建设的核心地带^[4-5]。近二十年来,在西北地区整体气候暖湿化趋势与“退耕还林还草”等宏观生态工程的双重驱动下,区域植被覆盖率持续改善,土地沙化得到整体遏制^[6-7]。然而,南疆地区极端干旱的本底条件与农牧交错带的脆弱特征并未发生根本改变,区域长期的风蚀潜在风险仍不容忽视^[6,8]。因此,开展南疆地区长时序的防风固沙服务研究与价值评估,对精准掌握区域生态防护成效、保障绿洲安全具有重要现实意义。

目前,针对土壤风蚀的定量评估已从传统的野外物理监测阶段,全面迈入基于数学模型的宏观反演阶段,涌现出多种前沿的测算与监测技术^[9-10]。常见的风蚀评估模型主要有风蚀方程(wind erosion equation, WEQ)^[11]、德克萨斯风蚀模型(Texas erosion analysis model, TEAM)^[12]、修正风蚀方程(revised wind erosion equation, RWEQ)^[13]及风蚀预报系统(wind erosion prediction system, WEPS)^[14]等。其中,RWEQ模型因综合考虑气候、土壤、植被与地形等多维

要素,已被广泛应用于不同尺度的防风固沙相关实证研究。然而必须指出的是,该模型最初是针对单一农田尺度开发的经验模型。在向大尺度区域推广的早期阶段,由于模型内部气候因子高度依赖美国本土数据,且植被与土壤参数缺乏普适性,直接跨区域应用往往容易造成估算偏差。为克服这一尺度与地域局限,近年来国内外学者对RWEQ模型进行大量的本土化改进与区域适配^[15]。一方面,针对土壤结皮、风蚀可蚀性以及植被覆盖等核心关键参数进行本土化修正^[16],并结合¹³⁷Cs等放射性同位素示踪技术对估算结果进行高精度的拟合验证^[17],有效提升修正后RWEQ模型在中国复杂干旱区风蚀模拟中的科学性与可靠性^[18];另一方面,得益于遥感与GIS技术的深度融合,该模型已成功突破最初单一农田尺度的应用壁垒,被广泛且成熟地应用于国内干旱半干旱区、风沙源区及内陆湿地等多种复杂下垫面的防风固沙物质量精细化测算中^[19-21]。

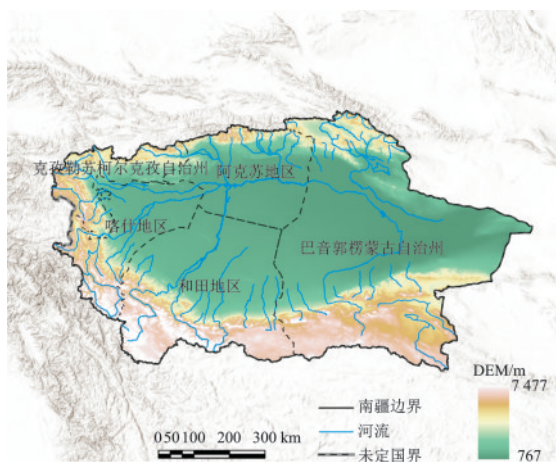
尽管基于改进后的模型取得丰硕成果,但现有防风固沙服务研究仍存在亟待深化的局限。当前评估大多聚焦于单一的物理质量测算,而将其转化为多维度生态经济价值的系统核算体系相对薄弱。事实上,将物理防沙效能转化为直观的经济价值,是科学制定区域生态补偿标准与绿色GDP核算的关键前提。特别是在空间尺度上,价值评估多集中于局部区域或单一时间切片,针对南疆全域且结合当地极端干旱本底特征的长时序价值动态监测尚显不足。在探寻防风固沙空间分异的驱动机制时,以往研究多依赖于Logistic回归、多元线性回归等传统统计模型^[22]。然

而,干旱区的风蚀演变往往是宏观气候变化、地表植被类型与人类活动等多维变量复杂交织的结果,传统的线性统计模型难以有效揭示这些变量间的非线性关联与交互叠加效应^[23]。最新的一项大尺度风沙演变机理研究^[24]指出,引入地理探测器等空间统计分析工具,对于精准识别并剥离自然与人为驱动因子的多重空间交互作用至关重要。

基于此,本研究以南疆地区为研究对象,融合2000—2024年多源长时序遥感与气象栅格数据,利用RWEQ模型反演南疆地区防风固沙物质量的连续动态变化。在此基础上,结合替代成本法和机会成本法等生态经济学方法,系统核算防风固沙功能的多维经济价值。并进一步引入能够精准量化空间分异性、克服连续变量离散化主观性的参数最优地理探测器(optimal parameters-based geographical detector, OPGD)模型,深度剖析自然与社会经济要素的主导驱动力及其非线性耦合机制。本研究旨在为该区域生态环境保护、防沙治沙工程优化及未来生态补偿政策的科学制定提供理论支撑与决策依据。

1 研究区概况

南疆地区位于新疆维吾尔自治区天山以南($34^{\circ}19' \sim 42^{\circ}34'N$, $73^{\circ}34' \sim 84^{\circ}59'E$),涵盖阿克苏地区、喀什地区、和田地区、巴音郭楞蒙古自治州和克孜勒苏柯尔克孜自治州5个地州(简称阿克苏、喀什、和田、巴州、克州),总面积约106万 km^2 (图1)。



注:基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2024)0650号标准地图制作,底图未修改。下同。

图1 研究区概况

Fig.1 Overview of study area

该区域北倚天山,南接昆仑山与阿尔金山,西邻帕米尔高原,中部为塔里木盆地及塔克拉玛干沙漠,呈典型的“三面环山、一盆居中”地貌格局,地势由边缘高山向中心荒漠呈阶梯状递降。该区属温带大陆性极端干旱气候,光热资源丰富,气温年较差

与日较差均较大。降水稀少且时空分布不均,年平均降水量多不足100 mm,而年平均潜在蒸散发量高达2 000~3 000 mm。受地形与热力条件影响,春夏季大风频繁,起沙风日数多,风蚀动力强烈。区域水资源匮乏,地表径流主要依赖高山区冰川积雪融水补给,孕育了以塔里木河为主的内陆河水系,其空间分布直接塑造荒漠与绿洲交错的景观格局。天然植被以胡杨(*Populus euphratica*)、怪柳(*Tamarix chinensis*)、梭梭(*Haloxyylon ammodendron*)等极度耐旱的荒漠物种为主,多沿水系呈斑块状或廊道状分布。土壤类型以棕漠土和风沙土为主,成土作用弱、质地松散,抗风蚀能力极差。

2 材料与方法

2.1 数据来源与预处理

基于数据的科学性、权威性与时空连续性原则,本研究系统收集涵盖遥感地表覆盖、气象水文、地形土壤及社会经济四大维度的多源数据集。自然环境要素数据包括土地利用和归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI);数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据来源于资源环境科学数据平台,空间分辨率为250 m,基于该数据提取坡度特征。气象数据包括逐日风速和逐日积雪深度、逐日降水量、逐月气温和潜在蒸散发,其中逐日风速和降水数据来源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心,其余气象要素均获取自国家青藏高原科学数据中心,空间分辨率均为1 km;土壤数据(包括砂粒、粉粒、黏粒百分比,以及有机碳和碳酸钙含量)均提取自联合国粮食及农业组织发布的世界土壤数据集(HWSD 2.0),分辨率为1 km。在社会经济要素方面,地区生产总值(GDP)与人口密度数据均来源于中国科学院资源环境科学与数据中心,分辨率为1 km,其中2024年的数据是基于2020年公里网格数据,结合南疆各地州统计年报中的增长率及变动参数修正得到。用于防风固沙服务价值核算的生态经济核算数据主要来源于南疆各地州统计年鉴、新疆维吾尔自治区农业农村厅及新疆政务公开平台发布的相关资料。

为确保多源数据在空间参考与分辨率上的高度统一并消除面积计算的几何变形误差,本研究使用ArcGIS Pro 3.15将所有空间数据转换为WGS 1984坐标系,并统一重采样至250 m空间分辨率。在此过程中,针对气温、降水、风速、土壤及社会经济等1 km尺度的连续型变量采用双线性内插法进行降尺度处理,土地利用等离散型类别变量则采用最邻近法重采样。通过统一掩膜裁剪,最终形成与像元尺度相匹配的空间属性数据库,为RWEQ模型的定量评估提供基础数据支撑。

2.2 研究方法

2.2.1 NDVI植被趋势分析 本研究采用 Theil-Sen Median 趋势分析与 Mann-Kendall 显著性检验相结合的方法,对南疆地区 2000—2024 年像元尺度的 NDVI 演变趋势进行评估,其中 Sen 斜率(β)判定植被的改善或退化方向,MK 检验($|Z|$ 值)用于评估统计学显著性,以有效规避长时序异常值的干扰。为精确刻画植被的动态演变特征,本研究以 90%、95% 和 99% 为置信度阈值,将植被演变趋势划分为 7 个等级:极显著改善($\beta > 0, |Z| \geq 2.58$)、显著改善($\beta > 0, 1.96 \leq |Z| < 2.58$)与微显著改善($\beta > 0, 1.65 \leq |Z| < 1.96$)、无显著变化($|Z| < 1.65$)、微显著退化($\beta < 0, 1.65 \leq |Z| < 1.96$)、显著退化($\beta < 0, 1.96 \leq |Z| < 2.58$)及极显著退化($\beta < 0, |Z| \geq 2.58$)。同时,为规避干旱区背景噪声干扰,趋势运算前已掩膜剔除多年平均 NDVI < 0.05 的极低植被覆盖区域。

2.2.2 防风固沙量 本研究依据生态环境部《全国生态状况调查评估技术规范——生态系统服务功能评估》(HJ 1173—2021)^[25] 推荐的修正风蚀方程 RWEQ 模型,计算南疆地区 2000—2024 年的防风固沙量,并根据模型本身特性及研究区实际情况,调整相关参数。计算公式为:

$$SR = SL_{\text{潜}} - SL \quad (1)$$

$$SL_{\text{潜}} = \frac{2Z}{S^2} Q_{\text{max潜}} e^{-(Z/S_m)^2} \quad (2)$$

$$Q_{\text{max潜}} = 109.8(WF \times EF \times SCF \times K') \quad (3)$$

$$S_{\text{潜}} = 150.71(WF \times EF \times SCF \times K')^{-0.3711} \quad (4)$$

$$S_L = \frac{2Z}{S^2} Q_{\text{max}} e^{-(Z/S)^2} \quad (5)$$

$$Q_{\text{max}} = 109.8(WF \times EF \times SCF \times K' \times C) \quad (6)$$

$$S = 150.71(WF \times EF \times SCF \times K' \times C)^{-0.3711} \quad (7)$$

式中:SR 为防风固沙量,kg/m²;SL_潜 为潜在土壤风蚀量,kg/m²;S_L 为实际土壤风蚀量,kg/m²;Q_{max} 为风力最大运转量,kg/m;S 为关键地块长度,m;Z 为下风向的最大风蚀发生距离,m;WF 为气象因子,kg/m;EF 为土壤可蚀性因子;SCF 为土壤结皮因子;K' 为土壤粗糙度因子;C 为植被覆盖因子。

1) 气候因子 气候因子(WF)是表征气候条件

$$EF = \frac{29.09 + 0.31sa + 0.17si + 0.33(sa/cl) - 2.59OM - 0.95C_{CaCO_3}}{100} \quad (13)$$

$$SCF = \frac{1}{1 + 0.0066(cl)^2 + 0.021(OM)^2} \quad (14)$$

式中:sa、si 和 cl 分别为土壤中砂粒、粉粒和黏粒的质量百分比,%;C_{CaCO₃} 为碳酸钙含量,%;OM 为土壤有机质含量,%,通过土壤有机碳含量乘以“Van

对土壤风蚀影响程度的综合指标,主要受风速、降水、气温及积雪等自然要素的共同影响。计算公式为:

$$WF = \frac{\sum_i U_2(U_2 - U_i)^2 \times N_d \times \rho}{N \times g} \times SW \times SD \quad (8)$$

式中:U₂ 为地面 2 m 处风速,m/s;U_i 为地面 2 m 处临界风速,取 5 m/s;N_d 为试验天数,通常为 15 d;ρ 为空气密度,kg/m³;N 为风速的观测次数,本次计算采用逐日风速数据计算月尺度气候因子,因此 N 取 15;g 为重力加速度,取值 9.8 m/s²。SW 为土壤湿度因子;SD 为雪盖因子。本研究使用数据为距地面 10 m 高度风速数据,需要转化为 2 m 处风速,转换方法为:

$$U_2 = U_{10} \left(\frac{z_2}{z_{10}} \right)^{\frac{1}{7}} \quad (9)$$

式中:U₁₀ 为地面 10 m 处风速;z₂、z₁₀ 为距离地面高度 2 m 和 10 m。空气密度(ρ)的计算方法为:

$$\rho = 348.0 \left(\frac{1.013 - 0.1183EL + 0.0048EL^2}{T} \right) \quad (10)$$

式中:EL 为海拔高度,km;T 为绝对温度(开尔文);土壤湿度因子 SW 的计算公式为:

$$SW = 1 - \frac{(R + I) \times \frac{R_d}{N_d}}{ET_p} \quad (11)$$

式中:R 为研究时段内的降雨量,mm;I 为研究时段内的灌溉量,mm;R_d 为研究时段内的降雨次数;N_d 为研究时段,本研究取 15。ET_p 为潜在蒸散发量,mm。由于南疆地区范围较大,获取详细的灌溉数据非常困难。故此根据以往研究经验将灌溉量设定为 0。雪盖因子(SD)的计算公式为:

$$SD = 1 - P \quad (12)$$

式中:P 为研究时间内积雪覆盖深度 > 25.4 mm 的概率,在 ArcGIS Pro 3.15 平台处理逐日积雪深度数据得到。

2) 土壤理化因子 土壤可蚀性因子(EF)与土壤结皮因子(SCF)综合反映土壤自身理化属性对风力侵蚀的抵抗能力;EF 表征土壤受风蚀的易蚀程度;SCF 由土壤颗粒经过胶结固结形成,能够降低土壤对风蚀易蚀性;其数值主要取决于土壤类型及有机质含量。计算公式为:

$$\text{Bemmelen 因数}'' (\text{取 } 1.724) \text{ 计算获得}^{[26]}。$$

3) 地表粗糙度因子 地表粗糙度因子(K')指地形起伏特征对近地表风速的动力衰减作用,是衡量土壤抗风蚀能力的关键参数之一。其计算公式为:

$$K' = e^{1.86K_r - 2.41K_r^{0.934} - 0.127C_r} \quad (15)$$

式中: K_r 为土垄粗糙度, cm; C_r 为随机粗糙度因子, cm, 取 0。本研究根据生态环境部《全国生态状况调查评估技术规范——生态系统服务功能评估》(HJ 1173—2021)^[25] 使用 Smith Carson 方程计算地形粗糙度替代土垄粗糙度, 计算公式为:

$$K_r = 0.2 \frac{(\Delta H)^2}{L} \quad (16)$$

式中: L 为地势起伏参数; ΔH 为距离 L 范围内的海拔高程差。

4) 植被覆盖因子 植被覆盖因子 (C) 反映植被冠层对风沙动能消耗及根系固持表层土壤的综合效应。具体计算方法为:

$$C = e^{a_i(SC)} \quad (17)$$

$$SC = \frac{(NDVI - NDVI_{soil})}{(NDVI_{veg} - NDVI_{soil})} \quad (18)$$

式中: a_i 为不同植被类型的系数^[27], 林地为一 0.153 5, 草地为一 0.115 1, 灌丛为一 0.092 1, 裸地为一 0.076 8, 沙地为一 0.065 8, 农田为一 0.043 8。SC 为植被覆盖度; $NDVI_{soil}$ 为完全是裸土或无植被覆盖区域的 NDVI 值; $NDVI_{veg}$ 为完全被植被所覆盖像元的 NDVI 值。本研究农田固沙系数设定较低, 主要受南疆特定农事活动制约。在冬春风沙频发季, 南疆农田普遍实施机械清茬与深翻, 该高强度人为扰动不仅清除地表残茬, 更彻底破坏土壤天然结皮, 翻耕后表土质地极度松散, 其抗风蚀能力客观弱于发育天然结皮的裸地^[28]。

2.2.3 防风固沙服务保有率 为客观衡量真实下垫面在潜在风蚀背景下的生态防护效率, 引入防风固沙服务保有率来反映生态系统防风固沙的相对效能^[29]。计算公式为:

$$F = \frac{SR}{SL_{潜}} \times 100\% \quad (19)$$

式中: F 为防风固沙保有率, %; SR 为防风固沙量, kg/m^2 ; $SL_{潜}$ 为潜在风蚀量, kg/m^2 。

2.2.4 防风固沙价值 防风固沙服务在维持土地资源、保护土壤养分及保障基础设施等方面发挥着显著的经济效益。风力侵蚀既造成原地土壤基质损毁与核心养分流失, 其沙尘运移与沉积又对交通等设施产生破坏。为系统评估植被抑制风蚀所挽回的经济损失, 本研究基于现有的防风固沙价值定量评价体系^[30-31], 采用替代成本法与机会成本法^[32], 将防风固沙总价值细分为 4 个维度进行综合定量核算。计算公式为:

$$V_{sr} = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 \quad (20)$$

式中: V_{sr} 为生态系统防风固沙总价值, 元/a; V_1 为减少土地损失价值, 元/a; V_2 为保持土壤肥力价值, 元/a;

V_3 为保持土壤有机质价值, 元/a; V_4 为减少交通运输经济损失价值, 元/a。

1) 减少土地损失价值 (V_1)

风力侵蚀导致表土剥离并造成土地资源的直接损失。

$$V_1 = A \times P_L \quad (21)$$

$$A = \frac{Q_c}{hb} \quad (22)$$

式中: A 为保持表土面积, km^2 ; P_L 为单位面积土地的机会成本, 本文以 2024 年研究区单位面积 GDP 作为土地的机会成本, 取值 57.96×10^4 元/ km^2 ; Q_c 为防风固沙总量, kg; h 为土壤层厚度, cm, 取值 20 cm; b 为土壤体积质量, g/cm^3 , 经土壤数据集反演结果, 取近似值 $1.40 g/cm^3$ 。

2) 保持土壤肥力价值 (V_2)

防风固沙有效截留土壤中富含的 N、P、K 等关键营养元素。鉴于化肥的速效养分补充功能与有机肥的土壤结构改良功能在农业修复中不可相互替代, 本研究将保持土壤肥力与有机质价值作为两个独立维度分别核算, 以全面评估防风固沙在保障土壤农业生产潜能方面的综合经济效益。为规避传统核算中复合肥造成的元素重复计算误差, 本研究将土壤肥力与有机质价值独立核算, 并分别采用尿素、磷酸二铵和硫酸钾作为 N、P、K 的折算基准。计算公式为:

$$V_2 = Q_c \times \sum_{i=1}^3 \frac{S_i \times P_i}{K_i} \quad (23)$$

式中: $i=1, 2, 3$ 分别代表氮、磷、钾元素; S_i 为土壤中 i 类元素质量分数, 氮、磷、钾质量分数分别为 0.09%、0.07% 和 1.60%^[33-34]; K_i 为对应化肥中 i 类元素的质量分数, N、P、K 质量分数分别为 46.00%、14.91% 和 42.63%; P_i 为化肥市场价格, 元/t, 以 2024 年新疆地区化肥平均零售价格为计算依据, 3 种化肥价格分别取 2 179、4 297、3 884 元/t。

3) 保持土壤有机质价值 (V_3)

$$V_3 = Q_c \times S_c \times P_c \quad (24)$$

式中: S_c 为土壤有机质质量分数, 取值 0.30%^[35]; P_c 为有机质价格, 取值 600 元/t。

4) 减少交通运输经济损失价值 (V_4)

防风固沙服务有效削减风沙对公路、铁路等交通干线的掩埋破坏, 从而避免相应的清理工程费用及交通中断带来的经济损失。计算公式为:

$$V_4 = \frac{Q_c}{r} w \quad (25)$$

式中: r 为沙物质体积质量, 取值 $1.45 g/cm^3$ ^[36]; w 为单位清理流沙成本, 元/ m^3 。根据水利部《水利工程施工机械台时费定额》(2024 版)^[37] 核心数据, 单位清理流沙成本为 10 元/ m^3 。

2.2.5 驱动因素分析 南疆防风固沙功能的空间分异受自然与社会经济要素共同驱动。为系统揭示其内在作用机制,基于风蚀动力学机制与干旱区生态特征,本研究从地形、气候、土壤、植被及人类活动 5 个维度,选取数字高程模型(DEM)、GDP、土地利用类型、归一化植被指数(NDVI)、潜在蒸散发、降水、土壤砂粒含量、坡度、气温、人口密度、风速、距河流距离共 12 项潜在因子(X1~X12)作为解释变量。为规避连续型变量主观离散化偏差与多重共线性干扰,本研究引入基于空间方差分析的 OPGD 模型开展参数寻优。在 R 语言平台设定 3~8 类离散区间,综合比选等距分段、自然断点等 5 种算法的因子解释力(q 值),以确定各变量的最优分类组合。在此基础上,通过因子探测器量化单因子的独立解释力以识别主导因素;利用交互探测器判别双因子耦合的协同增强或独立效应,最终依托风险探测器划定各驱

动因子的适宜阈值区间,为南疆防风固沙生态屏障的空间布局提供科学参考。

3 结果与分析

3.1 植被覆盖时空演变特征

2000—2024 年,南疆有效植被区植被覆盖整体呈极显著改善趋势(图 2)。在时间尺度上,有效植被区年际 NDVI 平均值以 0.000 49/a 的速率波动递增($p<0.01$),由 2000 年的 0.099 9 上升至 2024 年的 0.107 7;其中 2014 年以后,植被长势进入快速而稳定的恢复期。在空间分布上,植被演变呈现高度依赖水系与地形的“环盆地绿洲带”集聚特征,以天山南麓的阿克苏地区、昆仑山北麓的喀什与和田地区,以及塔里木河干流沿岸植被改善最为明显,主要得益于流域生态输水与防护林建设。相比之下,植被发生显著或极显著退化的区域仅占有效植被区的 2.03%,零星散布于绿洲内部城镇扩张边缘及局部水资源胁迫的荒漠过渡带。

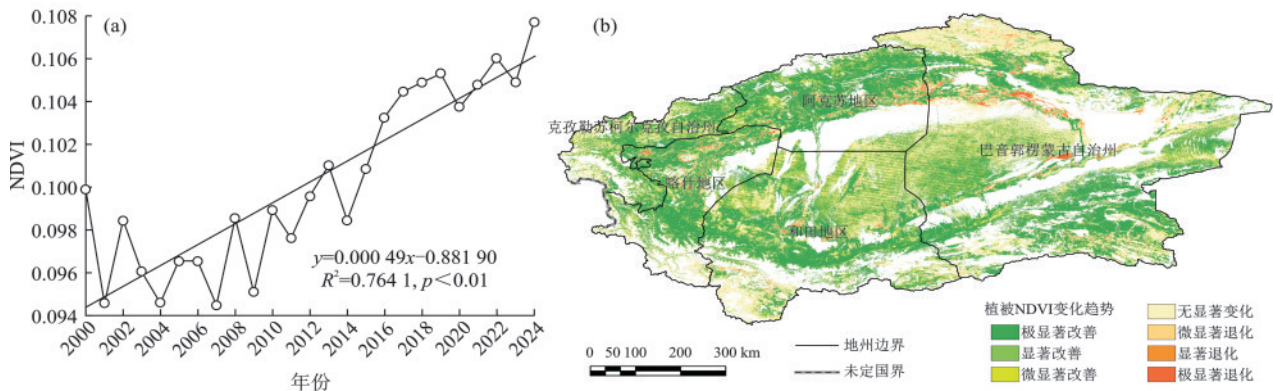


图 2 2000—2024 年南疆地区植被 NDVI 时空演变特征

Fig.2 Spatiotemporal evolution characteristics of vegetation NDVI in southern Xinjiang from 2000 to 2024

3.2 防风固沙服务时空变化

由图 3 可知,2000—2024 年南疆地区防风固沙量与保有率在时间序列上呈高度一致的同步演变特征。防风固沙量由 2000 年的 9.05×10^8 t 波动变化至 2024 年的 9.25×10^8 t,2005 年降至波谷 (7.59×10^8 t) 后快速回升,至 2010 年达到研究期最高峰 (10.34×10^8 t)。

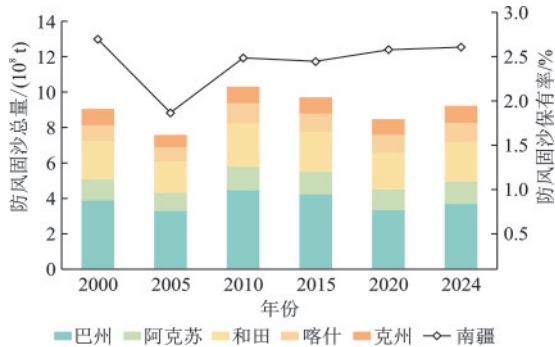


图 3 2000—2024 年南疆各地州防风固沙服务变化

Fig.3 Changes in windbreak and sand fixation service of prefectures in southern Xinjiang (2000—2024)

同期,防风固沙保有率呈现明显的“V”形特征,自 2000 年的 2.70% 降至 2005 年的最低值 1.87% 后,逐步震荡回升至 2024 年的 2.61%。这种时序波动不仅受潜在风蚀动能的直接影响,更与区域地表植被的动态演替密切相关。2005 年前后,受区域干旱事件影响,植被退化导致地表缺乏物理遮挡,防风效能削弱;而 2014 年以后植被长势的恢复,有效减缓地表风速并直接拦截风沙输移。

在空间分布上,南疆防风固沙服务呈典型的“边缘高、腹地低”的圈层格局,并表现出向外围沙区扩展的动态特征(图 4、图 5)。受塔克拉玛干大沙漠流动沙丘本底与极端干旱气候制约,巴州中南部与和田地区中北部的实际防风固沙量趋近于 0,但依托广袤的绿洲外围基数,巴州固沙总量常年介于 $3.32\times10^8\sim4.48\times10^8$ t,居全区首位(图 3)。南疆固沙效率总体表现出西高、南低的空间特征。其中,克州受高山冰雪融水补给及较高林草植被覆盖的综合

作用,单位面积防风固沙量达到 $10.18 \times 10^2 \text{ t/km}^2$,且多年平均保有率达到 3.25%,防风固沙效能最高;喀什与阿克苏地区依托河谷绿洲的保育作用次之。相比之下,和田地区面临严峻的风蚀胁迫,生态系统抗风蚀韧性最弱,整体保有率仅为 2.15%。从局部动态演化来看,阿克苏南部、喀什东部及和田北部的绿洲-

荒漠交错带防风固沙效能提升最为显著,至 2024 年喀什与阿克苏的保有率已分别升至 2.89% 与 2.61%。这一向腹地外扩的空间演变,与近年来塔里木河流域生态输水及人工阻沙林带建设驱动下的外围植被转绿相契合,证实植被覆盖的改善有效拦截近地表风沙,从而拓展核心绿洲的生态缓冲区。

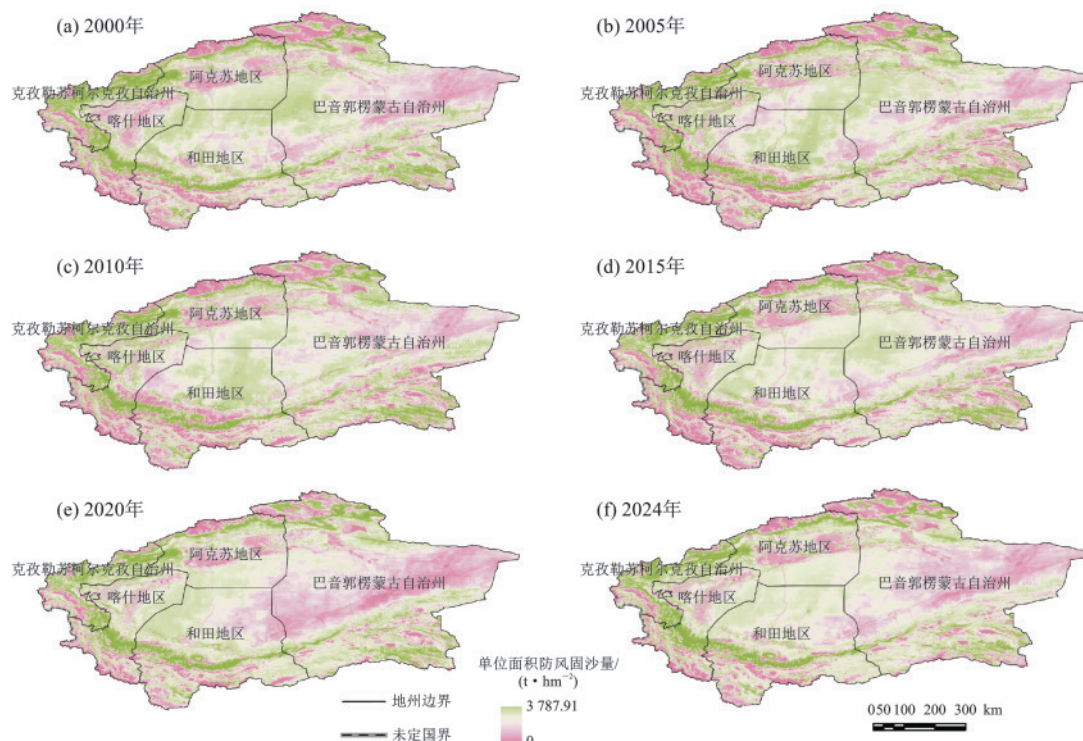


图 4 2000—2024 年南疆地区防风固沙量空间分布格局

Fig.4 Spatial distribution patterns of windbreak and sand fixation amount in southern Xinjiang (2000—2024)

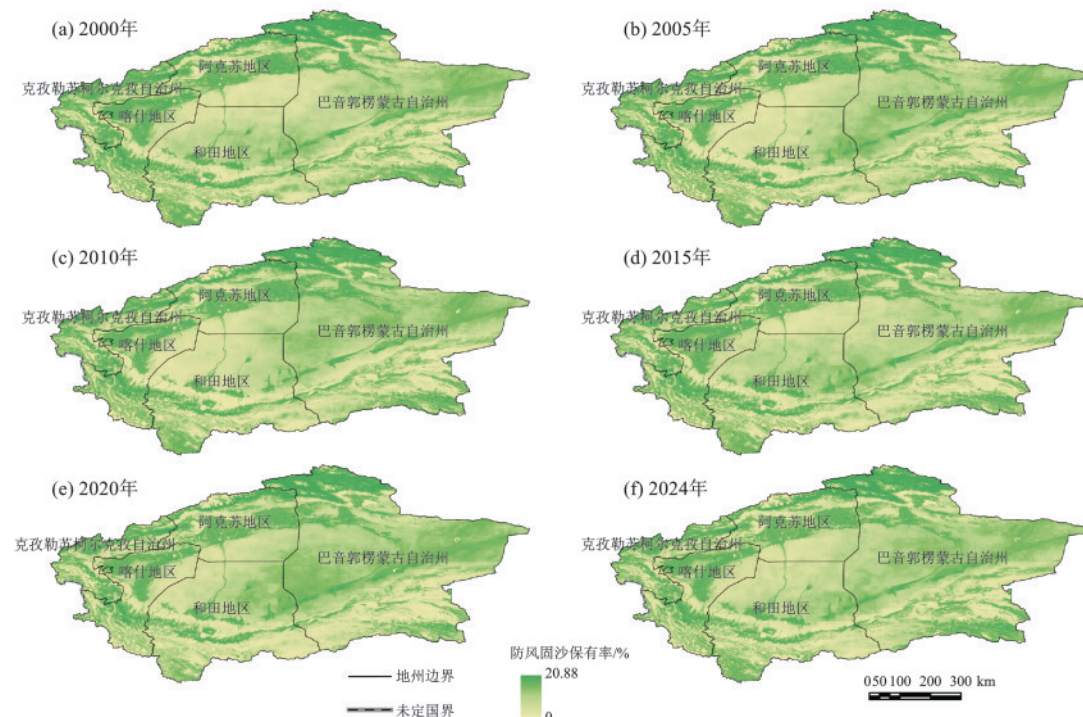


图 5 2000—2024 年南疆地区防风固沙保有率空间分布格局

Fig.5 Spatial distribution patterns of retention rate of windbreak and sand fixation in southern Xinjiang (2000—2024)

3.3 防风固沙功能价值

2000—2024 年南疆地区多年平均防风固沙总价值为 1 640.84 亿元。由表 1 可知,总价值从 2000 年的 1 637.89 亿元降至 2005 年的 1 372.23 亿元,为多年内最低值,2010 年快速上升至 1 870.53 亿元,达到峰值;随后波动下降至 2020 年的 1 533.93 亿元,至 2024 年再度稳步上升。价值构成上,保持土壤肥力价值占主导地位,多年平均贡献率达 94.05%;减少交通运输经济损失价值贡献率为 3.81%,减少土地损失价值与保持土壤有机质价值贡献率分别为 1.10% 和 0.96%。该结构反映出南疆地区土壤发育程度低,风蚀造成富含养分的表层细颗粒物流失。而植被对氮磷钾等营养元素的截留保护,形成区域防风固沙服务的主要经济效益。若失去植被屏障,则会引发营养元素大量流失,推高潜在化肥补偿成本。

表 1 2000—2024 年南疆地区防风固沙价值构成
Table 1 Composition of windbreak and sand fixation value in southern Xinjiang (2000—2024) 10^8 元

年份	V_1	V_2	V_3	V_4	V_{sr}
2000	18.73	1 540.45	16.29	62.41	1 637.89
2005	15.70	1 290.59	13.65	52.29	1 372.23
2010	21.39	1 759.26	18.60	71.28	1 870.53
2015	20.08	1 651.42	17.46	66.91	1 755.88
2020	17.54	1 442.67	15.26	58.45	1 533.93
2024	19.15	1 574.96	16.66	63.81	1 674.58

南疆各地州防风固沙价值存在显著的差异(图 6)。巴州始终是区域防风固沙价值的核心供给区,多年平均价值达 693.81 亿元,远高于其他地州;和田地区次之,年平均价值为 392.34 亿元;阿克苏、喀什、克州年均价值依次递减,分别为 217.17、177.41、160.11 亿元。

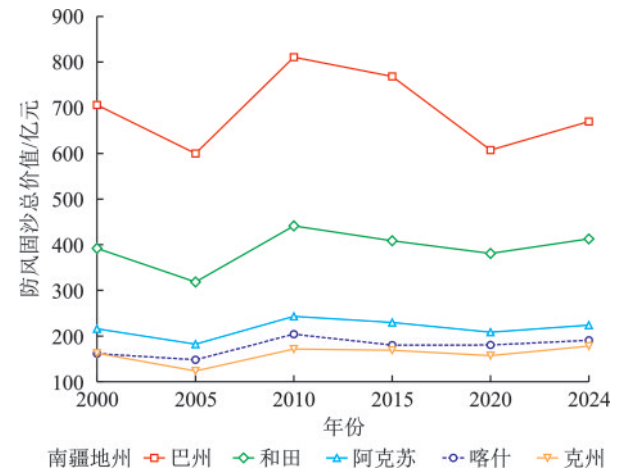


图 6 2000—2024 年南疆各地州防风固沙总价值变化
Fig.6 Changes in total value of windbreak and sand fixation services in prefectures of southern Xinjiang (2000—2024)

各地州价值构成变化呈现一致特征,其中巴州 2010 年峰值突破 800 亿元,和田同期也达到研究期最高值;2024 年各地州防风固沙价值较 2020 年均不同程度回升,反映出南疆持续推进的防沙治沙生态工程已在重点区域显现成效,推动生态经济资产稳步增值。

3.4 防风固沙服务驱动因素分析

3.4.1 防风固沙单因子驱动力分析 基于 OPGD 的因子探测(图 7)表明,南疆防风固沙空间格局主要受地表覆被与水热条件协同调控。其中,土地利用类型与 NDVI(q 值分别为 0.47 和 0.36)的解释力最高,二者通过改变地表空气动力学粗糙度直接决定区域的阻沙效能;气温与潜在蒸散发(q 值接近 0.30)次之,主要通过影响土壤水分耗散间接制约植被的固沙潜力;而降水、地形等自然要素因在盆地内部空间差异较小,人口与 GDP 等社会经济要素因属于间接驱动因素,其独立解释力均相对偏弱。NDVI 的解释力长期稳定在 0.33~0.37,而土地利用类型的解释力则由 0.39 上升至 0.52。此演变轨迹表明,在区域气候干旱常态下,以生态修复工程与绿洲农业开发为代表的人类活动,通过对地表覆被的直接改造,已逐步成为驱动南疆防风固沙效能提升的核心动力。

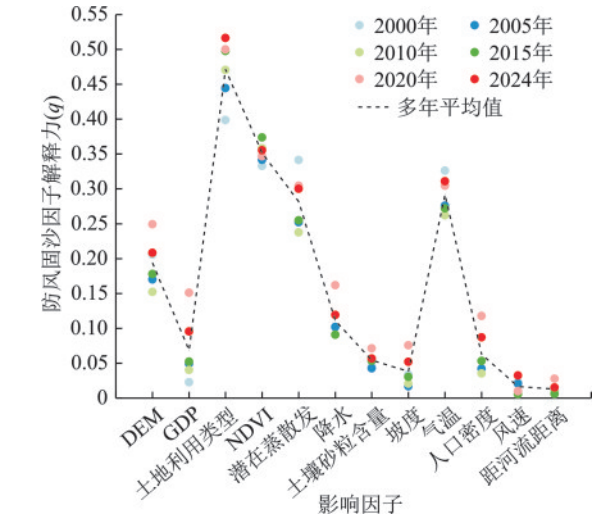


图 7 2000—2024 年南疆地区防风固沙量因子解释力
Fig.7 Factor explanatory power for windbreak and sand fixation amount in southern Xinjiang (2000—2024)

3.4.2 防风固沙交互作用分析 南疆防风固沙格局的演变并非单一要素独立作用,而是自然与人为多因子协同作用的结果(图 8)。各驱动因子的交互作用均呈双因子增强或非线性增强特征,其中解释力位居前 3 的交互组合分别为潜在蒸散发 $\cap$ 土地利用类型、气温 $\cap$ 土地利用类型和降水 $\cap$ 土地利用类型。气温 $\cap$ NDVI、潜在蒸散发 $\cap$ NDVI 的交互组合同样具备较高解释力。该结果表明,气候水热条件与地表覆被类型存在高强度耦合作用。气温、降水及潜在蒸

散发等单项气候因子的独立解释力相对偏低, q 值为 0.11~0.29。但当气候要素作为能量与水分的基础输入, 与土地覆被叠加耦合时, 其交互解释力达到 0.60 以上, 表明区域气候波动对防风固沙过程的驱动效应高度依附于土地利用的空间配置。长期来看, 核心交互组合的解释力呈现明显的阶段性增强特征。2000—2010 年气候与土地利用的交互驱动力相对平

稳, 而 2015—2024 年该协同效应持续强化, 至 2024 年潜在蒸散发、气温与土地利用的交互驱动力 q 值均上升至峰值 0.66。交互强度的持续走高进一步印证, 随着南疆荒漠绿洲交错带防沙治沙工程的深入推进, 人类活动重塑的土地覆被结构显著放大了气温、降水等气候要素的生态驱动效应, 优化土地利用空间配置已成为缓解区域风沙风险的核心途径。

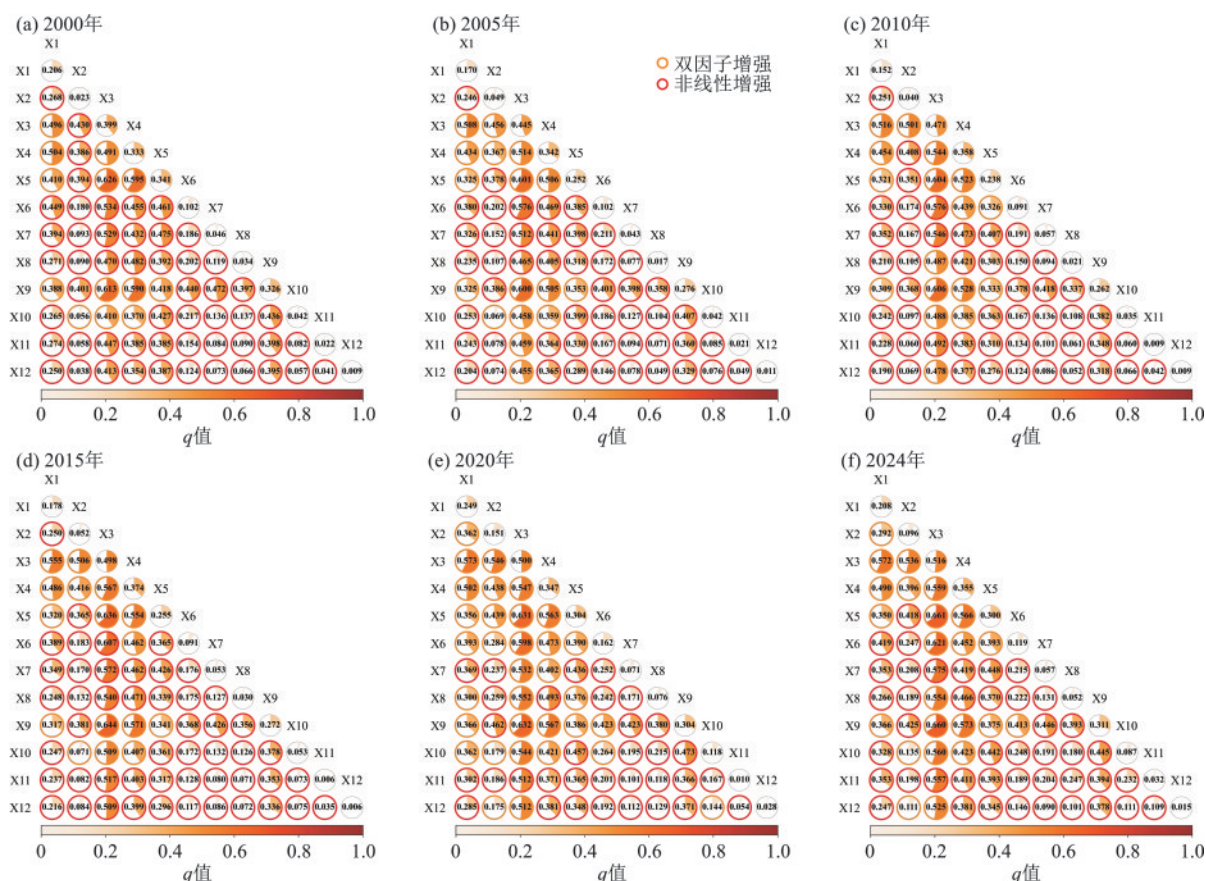


图 8 2000—2024 年南疆地区防风固沙量交互探测结果

Fig.8 Interaction detection results of windbreak and sand fixation amount in southern Xinjiang (2000—2024)

3.4.3 驱动因子适宜区间与风险区探测分析 因子探测结果表明, 以土地利用类型和归一化植被指数为代表的地表物理屏障, 以及受降水量与距河流距离主导的水文约束条件, 共同决定区域防风固沙效应。在此基础上, 风险区探测则进一步揭示这些核心驱动要素作用于防沙效能的最适区间与非线性特征。由图 9 可知, 不同土地利用类型的防风固沙量差异显著, 草地固沙量平均值达到 1.35 kg/m^2 , 是区域防沙的主要地类。相反, 农田因冬春风沙频发期频繁遭受人为翻耕与残茬清理, 地表结皮受到破坏, 导致其固沙量仅为 0.36 kg/m^2 , 甚至低于裸地 0.60 kg/m^2 的固沙水平。同时, 植被覆盖度对防沙量的调控呈现单峰变化规律。固沙峰值并未出现在高覆盖区, 而是集中于归一化植被指数为 0.16~0.23 的中低覆盖区间, 表明高植被覆盖的绿洲内部受林网保护, 起沙风动力较

弱; 而广泛分布于荒漠-绿洲交错带的草地, 因直接暴露于近地表风沙流路径且具备适宜的物理粗糙度, 成为区域风沙动能耗散与物理截留的核心作用区。

水分条件与水系分布是限制干旱区生态系统防沙效能的另一关键维度。防风固沙高值区主要集中的年降水量为 178~329 mm, 超过该范围后固沙效能迅速下降。此区间主要对应南疆盆地边缘山前冲积扇的干旱半干旱过渡带, 表明适度的水分输入能有效支撑荒漠植被存活, 实现最佳固沙效益。距河流距离的探测结果体现内陆河的生态廊道效应。防风固沙量在距河流 4.4~10.0 km 内达到最高值 0.75 kg/m^2 , 距离超出 56.6 km 后, 防风固沙量逐渐减小。这种空间梯度递减规律, 反映出塔里木河、阿克苏河等水系沿岸发育的天然胡杨林及怪柳等潜水依赖型植被带, 在截断近地表风沙输移路径、保护绿洲生态安全中发挥重要的屏障作用。

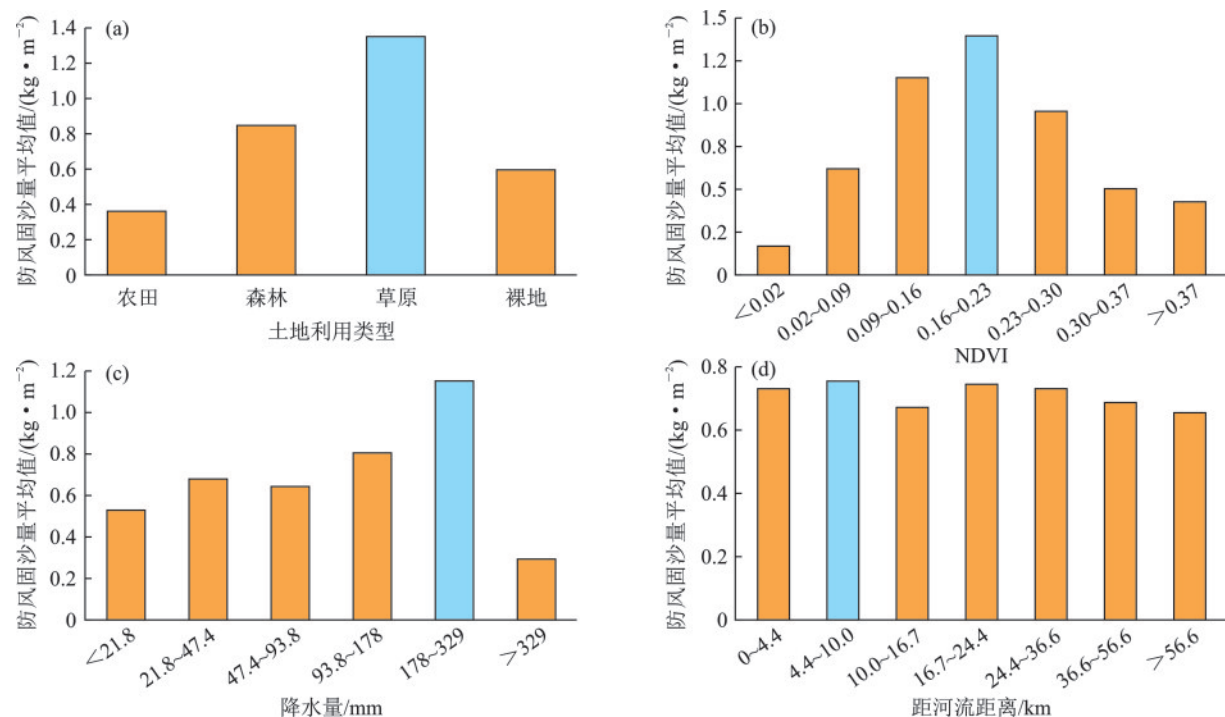


图 9 2000—2024 年南疆地区防风固沙量风险探测结果

Fig.9 Risk detection results of windbreak and sand fixation amount in southern Xinjiang (2000—2024)

4 讨论

4.1 RWEQ 模型结果验证

本研究采用修正风蚀方程(RWEQ)定量估算南疆土壤风蚀量。为验证模拟精度,选取经实地观测或多模型交叉验证的已有研究成果与本研究结果对比(表 2)。本文模拟结果与前人研究结果均处于同一数量级,证明本研究评估结果的可靠性。

表 2 本文与前人计算结果对比

Table 2 Comparison between calculated results in this study and previous studies

研究时段	区域	土壤风蚀量/ (kg·m ⁻² ·a ⁻¹)	本研究对应区域 土壤风蚀量/ (kg·m ⁻² ·a ⁻¹)	参考文献
2001— 2020 年	塔里木盆 地边缘	<25.00	22.37	[38]
2000— 2023 年	且末县、 若羌县	>5.00	8.74	[39]
2000— 2020 年	塔里木河 干流	2.97	2.76	[40]
2020 年	南疆地区	3.10	2.65	[41]
2000— 2018 年	新疆阿克 苏地区	6.43	7.68	[42]

本研究使用日平均风速数据计算模型中的风速因子,相比于逐小时风速数据,日平均风速数据更适合长时间、大范围的风蚀模拟,空间稳定性更好。南疆荒漠地带气象站点稀少,利用逐小时风速做全区

插值容易产生系统性误差。本研究对 1 km 分辨率风速数据做降尺度重采样,该处理虽略微压低极端大风的风速峰值,但可以避免个别站点观测异常影响整片区域的测算结果,保障空间数据整体稳定。

4.2 防风固沙价值构成与生态经济机理

南疆地区 2000—2024 年多年平均防风固沙总价值为 1 640.84 亿元,其中保持土壤肥力价值的平均贡献率高达 94.05%。此高度集中的价值构成反映风沙侵蚀导致地表细颗粒养分流失的实际物理过程,而植被的拦截有效保全了干旱区相对贫瘠的土壤基础。相比之下,减少土地损失等其他价值的占比极低。尽管本文以单位面积 GDP 作为机会成本,可能在一定程度上高估荒漠土地的直接经济价值,但其微弱的占比说明,南疆风沙危害的主要经济代价并非单纯的物理土地面积缩减,而是稀缺且恢复缓慢的表层养分流失。近年来全区防风固沙价值的稳步回升,印证持续推进的防沙治沙工程不仅改善自然环境,更将生态服务有效转化为长期的经济效益。

4.3 研究局限性与未来展望

受限于大尺度遥感数据与经验模型,本研究在防风固沙服务的定量评估中仍存在一定局限。考虑到 RWEQ 模型最初主要针对农田土壤风蚀过程开发,将其拓展至南疆大尺度且复杂的荒漠绿洲交错带时,部分经验参数的区域适用性仍需野外实测数据的持续验证。在植被覆盖因子的提取方面,本文主要依赖于植被指数年度极值和静态土地利用分

类。这种处理方式的时间分辨率相对有限,难以精细表征农田在秋季残茬覆盖与冬春翻耕裸露交替时的动态特征,可能在一定程度上平滑掉人为农事活动引发的短期风蚀波动。在经济价值核算方面,以单位面积 GDP 作为所有土地流失的机会成本带有较强的假设性质,易高估荒漠等未利用土地的经济损失。针对上述不足,未来研究考虑引入高频次的多源遥感数据,结合本地化农事历开展分时段动态校准,以进一步提升模型在复杂下垫面的模拟精度。同时在评估框架中探索建立基于土地生态质量梯度的差异化核算权重系统,以便更客观地量化极端干旱区的真实生态资产底数。

5 结 论

1) 植被恢复带动防风固沙效能阶段性回升,防风固沙量呈现“边缘高、腹地低”的环状圈层格局。研究期内南疆植被覆盖的显著改善,驱动防风固沙总量与保有率呈先降后升的“V”形演变。巴州固沙总量居全区首位,克州的防风固沙效能最高。依托生态工程,防风固沙的高效能区正由绿洲边缘向荒漠腹地有效扩展。

2) 防风固沙核心经济价值体现在保持土壤肥力,维系了干旱区脆弱的土壤基础。南疆多年平均防风固沙总价值达 1 640.84 亿元,其中保持土壤肥力价值占比高达 94.05%。表明区域防风固沙的根本经济效益在于避免表层稀缺养分随风沙大量流失,而非单纯减少物理面积损耗。巴州与和田依托水系与植被交错带,构成全区生态价值的核心供给区。

3) 防风固沙格局受地表覆被与水热条件的高强度协同驱动,且存在显著的最适驱动区间。土地利用与植被是防风固沙的核心要素,且与气温、降水等气候因子表现出强烈的交互增强效应。区域防沙峰值并未出现在高覆盖绿洲内,而是集中于中低覆盖度草地 (NDVI 为 0.16~0.23)、山前降水过渡带 (178~329 mm) 及潜水依赖型生态廊道 (距河流 4.4~10.0 km), 这些特定环境区间构成保障南疆绿洲安全最关键的生态防线。

参考文献:

- [1] 崔桂鹏,肖春蕾,雷加强,等. 大国治理:中国荒漠化防治的战略选择与未来愿景[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(7): 943-955.
Cui Guipeng, Xiao Chunlei, Lei Jiaqiang, et al. China's governance: Strategy choice and future vision for combating desertification[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(7): 943-955.
- [2] Jiang Chong, Liu Junguo, Zhang Haiyan, et al.

China's progress towards sustainable land degradation control: Insights from the northwest arid regions[J]. Ecological Engineering, 2019, 127: 75-87.

- [3] 咎国盛,王翠萍,李锋,等. 第六次全国荒漠化和沙化调查主要结果及分析[J]. 林业资源管理, 2023(1): 1-7.
Zan Guosheng, Wang Cuiping, Li Feng, et al. Key data results and trend analysis of the sixth national survey on desertification and sandification [J]. Forest Resources Management, 2023(1): 1-7.
- [4] 邓铭江,樊自立,徐海量,等. 塔里木河流域生态功能区划研究[J]. 干旱区地理, 2017, 40(4): 705-717.
Deng Mingjiang, Fan Zili, Xu Hailiang, et al. Ecological function regionalization of Tarim River basin [J]. Arid Land Geography, 2017, 40(4): 705-717.
- [5] 史娜娜,韩煜,王琦,等. 新疆南部地区风沙扩散风险评估及景观格局优化[J]. 地理学报, 2021, 76(1): 73-86.
Shi Nana, Han Yu, Wang Qi, et al. Risk assessment of sandstorm diffusion and landscape pattern optimization in southern Xinjiang[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(1): 73-86.
- [6] 张强,杨金虎,王朋岭,等. 西北地区气候暖湿化的研究进展与展望[J]. 科学通报, 2023, 68(14): 1814-1828.
Zhang Qiang, Yang Jinhu, Wang Pengling, et al. Progress and prospect on climate warming and humidification in Northwest China[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(14): 1814-1828.
- [7] 李金梦,祝宏辉,胡芳榕,等. “退耕还林还草”工程对干旱区生态系统服务的影响[J]. 水土保持研究, 2025, 32(5): 298-307.
Li Jinmeng, Zhu Honghui, Hu Fangrong, et al. Impact of "Returning Farmland to Forest and Grassland" project on ecosystem services in arid regions[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(5): 298-307.
- [8] 赵哈林,赵学勇,张铜会,等. 北方农牧交错带的地理界定及其生态问题[J]. 地球科学进展, 2002, 17(5): 739-747.
Zhao Halin, Zhao Xueyong, Zhang Tonghui, et al. Boundary line on agro-pasture zigzag zone in North China and its problems on eco-environment [J]. Advance in Earth Sciences, 2002, 17(5): 739-747.
- [9] 张春来,宋长青,王振亭,等. 土壤风蚀过程研究回顾与展望[J]. 地球科学进展, 2018, 33(1): 27-41.
Zhang Chunlai, Song Changqing, Wang Zhengting, et al. Review and prospect of the study on soil wind erosion process[J]. Advances in Earth Science, 2018, 33(1): 27-41.
- [10] Lackóová L, Lieskovský J, Nikšeršht F, et al. Unlocking the potential of remote sensing in wind erosion studies: A review and outlook for future directions [J].

- Remote Sensing, 2023, 15(13):e3316.
- [11] Woodruff N P, Siddoway F H. A wind erosion equation [J]. Soil Science Society of America Journal, 1965, 29(5):602-608.
- [12] Gregory J M, Wilson G R, Singh U B, et al. TEAM: Integrated, process-based wind-erosion model[J]. Environmental Modelling and Software, 2004, 19(2):205-215.
- [13] Fryrear D W, Bilbro J D, Saleh A, et al. RWEQ: Improved wind erosion technology[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 55(2):183-189.
- [14] Visser S M, Sterk G, Karssenbergh D. Wind erosion modelling in a Sahelian environment [J]. Environmental Modelling and Software, 2005, 20(1):69-84.
- [15] Youssef F, Visser S, Karssenbergh D, et al. Calibration of RWEQ in a patchy landscape: A first step towards a regional scale wind erosion model[J]. Aeolian Research, 2012, 3(4):467-476.
- [16] 巩国丽, 黄麟. RWEQ模型中土壤结皮和可蚀性因子的改进和应用[J]. 水土保持通报, 2018, 38(2):271-274.
Gong Guoli, Huang Lin. Improvement and application of soil crust and erodibility factors in RWEQ model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(2):271-274.
- [17] 江凌, 肖懿, 欧阳志云, 等. 基于RWEQ模型的青海省土壤风蚀模数估算[J]. 水土保持研究, 2015, 22(1):21-25.
Jiang Ling, Xiao Yi, Ouyang Zhiyun, et al. Estimate of the wind erosion modules in Qinghai Province based on RWEQ model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(1):21-25.
- [18] Yang Guocheng, Sun Ranhao, Jing Yongcai, et al. Global assessment of wind erosion based on a spatially distributed RWEQ model[J]. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 2022, 46(1):28-42.
- [19] 李鑫, 武志涛, 杜自强, 等. 基于不同风蚀模型的区域土壤风蚀变化及影响因素研究: 以内蒙古自治区为例[J]. 水土保持学报, 2021, 35(6):69-75.
Li Xin, Wu Zhitao, Du Ziqiang, et al. Study on regional soil wind erosion and its influencing factors based on different wind erosion models: Take Inner Mongolia autonomous region as an example[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(6):69-75.
- [20] 李琪, 武志涛, 杜自强, 等. 基于多源数据的京津风沙源区防风固沙功能变化[J]. 水土保持学报, 2021, 35(3):156-162.
Li Qi, Wu Zhitao, Du Ziqiang, et al. Evaluation of sand-fixing service based on multi-resources data in Beijing-Tianjin sandstorm source region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(3):156-162.
- [21] 莫丰瑞, 楚新正, 马晓飞, 等. 景观格局变化下艾比湖湿地防风固沙功能及其价值评估[J]. 生态科学, 2017, 36(6):195-206.
- Mo Fengrui, Chu Xinzheng, Ma Xiaofei, et al. The windbreak and sand fixation function and its value assessment of landscape patterns change of Ebinur Lake wetland [J]. Ecological Science, 2017, 36(6):195-206.
- [22] Djeddaoui F, Chadli M, Gloaguen R. Desertification susceptibility mapping using logistic regression analysis in the Djelfa area, Algeria [J]. Remote Sensing, 2017, 9(10):e1031.
- [23] Borrelli P, Alewell C, Alvarez P, et al. Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis [J]. Science of the Total Environment, 2021, 780:e146494.
- [24] Mei Yong, Batunacun, Hai Chunxing, et al. Spatio-temporal dynamics and driving factors of soil wind erosion in Inner Mongolia, China [J]. Remote Sensing, 2025, 17(14):e2365.
- [25] 生态环境部. 全国生态状况调查评估技术规范: 生态系统服务功能评估: HJ 1173—2021[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2021.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Technical specification for investigation and assessment of national ecological status: Ecosystem services assessment: HJ 1173—2021 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2021.
- [26] 李慧融, 王甜甜, 郑琳, 等. 基于RWEQ模型的生态恢复治理工程驱动下内蒙古多伦县防风固沙服务功能评估[J]. 环境监控与预警, 2025, 17(4):37-45.
Li Huirong, Wang Tiantian, Zheng Lin, et al. Assessment of windbreak and sand fixation function in Duolun County, Inner Mongolia driven by ecological restoration projects based on RWEQ model[J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2025, 17(4):37-45.
- [27] 巩国丽, 刘纪远, 邵全琴. 基于RWEQ的20世纪90年代以来内蒙古锡林郭勒盟土壤风蚀研究[J]. 地理科学进展, 2014, 33(6):825-834.
Gong Guoli, Liu Jiyan, Shao Quanqin. Wind erosion in xilingol league, Inner Mongolia since the 1990s using the revised wind erosion equation [J]. Progress in Geography, 2014, 33(6):825-834.
- [28] 刘瑞娟, 李继峰, 冯哲, 等. 风蚀过程中翻耕农田土壤抗剪强度变化[J]. 水土保持学报, 2022, 36(4):112-120.
Liu Ruijuan, Li Jifeng, Feng Zhe, et al. Changes in shear strength of ploughed farmland soil during wind erosion [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(4):112-120.
- [29] Li Dajing, Xu Duanyang. Sand fixation function response to climate change and land use in northern

- China from 1981 to 2015[J]. *Aeolian Research*, 2019, 40:23-33.
- [30] 徐洁,肖玉,谢高地,等.防风固沙型重点生态功能区防风固沙服务的评估与受益区识别[J]. *生态学报*, 2019, 39(16):5857-5873.
- Xu Jie, Xiao Yu, Xie Gaodi, et al. Assessment of wind erosion prevention service and its beneficiary areas identification of national key ecological function zone of wind-break and sand fixation type in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(16):5857-5873.
- [31] 蔺阿荣,周冬梅,马静,等.基于RWEQ模型的疏勒河流域防风固沙功能价值评估[J]. *干旱区地理*, 2024, 47(1):58-67.
- Lin Arong, Zhou Dongmei, Ma Jing, et al. Evaluation of wind prevention and sand fixation function in Shule River basin based on RWEQ model[J]. *Arid Land Geography*, 2024, 47(1):58-67.
- [32] 韩永伟,拓学森,高吉喜,等.黑河下游重要生态功能区植被防风固沙功能及其价值初步评估[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(1):58-65.
- Han Yongwei, Tuo Xuesen, Gao Jixi, et al. Assessment on the sand-fixing function and its value of the vegetation in eco-function protection areas of the lower reaches of the Heihe River [J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(1):58-65.
- [33] 易秀,李侠.西北地区土壤资源特征及其开发利用与保护[J]. *地球科学与环境学报*, 2004, 26(4):85-89.
- Yi Xiu, Li Xia. Characteristics of soil resources and development and protection in the Northwest region[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2004, 26(4):85-89.
- [34] 田立文,祁永春,戴路,等.新疆南疆耕地土壤养分含量及其分布特征评价:以阿克苏地区为例[J]. *核农学报*, 2020, 34(1):214-223.
- Tian Liwen, Qi Yongchun, Dai Lu, et al. Evaluation of soil nutrient content and its distribution of cultivated land in south of Xinjiang: Taking Aksu prefecture as an example [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2020, 34(1):214-223.
- [35] Bai Zijin, Xie Modong, Hu Bifeng, et al. Estimation of soil organic carbon using vis-NIR spectral data and spectral feature bands selection in southern Xinjiang, China [J]. *Sensors*, 2022, 22(16):e6124.
- [36] Guo Jia, Fan Yanmin, Li Yunhao, et al. Topography dominates the spatial and temporal variability of soil bulk density in typical arid zones [J]. *Sustainability*, 2024, 16(22):e9670.
- [37] 水利部.水利工程施工机械台时费定额(2024版)[S].郑州:黄河水利出版社,2025.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Construction machine hourly cost quota for water conservancy projects (2024 edition) [S]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2025.
- [38] 王世宇,王雪松.2001—2020年中国北方干旱半干旱区土壤风蚀的时空变化及驱动因素[J]. *中国沙漠*, 2026, 46(2):164-176.
- Wang Shiyu, Wang Xuesong. Spatiotemporal variation and driving factors of soil wind erosion in the arid and semi-arid areas of northern China in 2001—2020[J]. *Journal of Desert Research*, 2026, 46(2):164-176.
- [39] 邢瑜,柳本立,马涛,等.2000—2023年河西走廊-塔克拉玛干沙漠边缘阻击战核心区风蚀起尘量变化[J]. *中国沙漠*, 2024, 44(6):330-341.
- Xing Yu, Liu Benli, Ma Tao, et al. Wind erosion and dust emission in the core area of Hexi Corridor-Taklimakan Desert edge in 2000—2023[J]. *Journal of Desert Research*, 2024, 44(6):330-341.
- [40] 钟文静,钟瑞森,常存,等.2000—2020年塔里木河干流土壤风蚀时空异质性及影响因素分析[J]. *水土保持研究*, 2026, 33(4):294-305.
- Zhong Wenjing, Zhong Ruisen, Chang Cun, et al. Analysis of spatiotemporal heterogeneity and influencing factors of soil wind erosion in Tarim River mainstream from 2000 to 2020[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2026, 33(4):294-305.
- [41] 张家伟.基于RWEQ模型的新疆土壤风蚀量估算及评价[D].北京:北京林业大学,2023.
- Zhang Jiawei. Estimation and evaluation of soil wind erosion in Xinjiang based on RWEQ model[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2023.
- [42] 潘婷婷,张永福.2000—2018年新疆阿克苏地区防风固沙服务功能时空变化特征[J]. *中南农业科技*, 2024, 45(1):108-115.
- Pan Tingting, Zhang Yongfu. Spatiotemporal variation characteristics of windbreak and sand fixation service function in Aksu Prefecture, Xinjiang from 2000 to 2018 [J]. *Central South Agricultural Science and Technology*, 2024, 45(1):108-115.