DOI: 10.5846/stxb202203120604

王晓峰,马嘉豪,冯晓明,贾子续,张欣蓉,延雨,孙泽冲,周继涛.黄河流域生态安全屏障防风固沙时空变化及驱动因素.生态学报,2023,43(2): 660-671.

Wang X F, Ma J H, Feng X M, Jia Z X, Zhang X R, Yan Y, Sun Z C, Zhou J T.Spatio-temporal changes and driving factors of windbreak and sand-fixing services in the ecological security barrier of the Yellow River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(2):660-671.

黄河流域生态安全屏障防风固沙时空变化及驱动因素

王晓峰^{1,2,*},马嘉豪³,冯晓明⁴,贾子续³,张欣蓉³,延 雨³,孙泽冲¹,周继涛³

1长安大学土地工程学院,西安 710054

2 陕西省土地整治重点实验室, 西安 710054

3长安大学地球科学与资源学院,西安 710054

4 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室,北京 100085

摘要:黄河流域是我国重要的生态屏障和经济区,防风固沙服务及其驱动机制的研究对于筑牢黄河流域生态安全屏障具有重要 意义。基于修正土壤风蚀模型(RWEQ)定量评估黄河流域 2000—2018 年防风固沙服务时空变化,采用相关分析和地理加权回 归模型(GWR)从社会、气候、土壤、植被、地形等角度探究各驱动因素对黄河流域防风固沙服务影响的空间异质性。结果表明: (1)2000—2018 年黄河流域土壤风蚀模数与单位面积防风固沙量分别以 0.04 t hm⁻² a⁻¹和 0.14 t hm⁻² a⁻¹的速率下降,而防风固 沙保有率和植被覆盖度则分别以 0.05% · a⁻¹和 0. 26% · a⁻¹的速率上升。(2)黄河流域土壤风蚀以微度(<2 t hm⁻² a⁻¹)和轻度 (2—25 t hm⁻² a⁻¹)为主,共占研究区面积的 96.28%。土壤风蚀在空间分布呈现西北高东南低的特点,而防风固沙服务高值则 主要分布于西北部和下游流域。(3)各驱动因素对黄河流域防风固沙服务的影响具有明显的空间异质性,其中降水、温度、实 际蒸散量、土壤黏粒含量、土壤有机质含量和坡度以负面抑制作用为主,而风速、气压、归一化植被指数和土壤粗砂含量则主要 呈现正向促进作用。本研究结果可为黄河流域荒漠化防治和生态保护修复提供一定参考和依据。

关键词:黄河流域;防风固沙服务;地理加权回归;驱动因素

Spatio-temporal changes and driving factors of windbreak and sand-fixing services in the ecological security barrier of the Yellow River Basin

WANG Xiaofeng^{1,2,*}, MA Jiahao³, FENG Xiaoming⁴, JIA Zixu³, ZHANG Xinrong³, YAN Yu³, SUN Zechong¹, ZHOU Jitao³

1 School of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China

2 The Key Laboratory of Shaanxi Land Consolidation, Xi'an 710054, China

3 School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China

4 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract: The Yellow River Basin is an important ecological barrier and economic zone in China. Study of windbreak and sand-fixing services and their driving mechanisms is of great significance for building a firm ecological security barrier in the Yellow River Basin. This paper quantitatively assessed the spatial and temporal variation of windbreak and sand-fixing service in the Yellow River Basin from 2000 to 2018 based on the revised wind erosion equation (RWEQ). The correlation analysis and geographically weighted regression models (GWR) were used to explore the spatial heterogeneity of the influence of various drivers on windbreak and sand-fixing service in the Yellow River Basin from the perspectives of society,

收稿日期:2022-03-17; 网络出版日期:2022-06-19

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0501603);长安大学中央高校基本科研业务费专项基金(chd300102352201)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: wangxf@ chd.edu.cn

climate, soil, vegetation and topography. The results show that (1) the soil wind erosion modulus and the amount of windbreak and sand-fixing service per unit area in the Yellow River Basin decreased at the rates of 0.04 t $hm^{-2} a^{-1}$ and 0.14 t $hm^{-2} a^{-1}$, respectively, from 2000 to 2018, while the windbreak and sand-fixing service retention rate and vegetation cover increased at the rates of 0.05% $\cdot a^{-1}$ and 0.26% $\cdot a^{-1}$, respectively. (2) Soil wind erosion in the Yellow River basin was predominantly slight (<2 t $hm^{-2} a^{-1}$) and mild (2—25 t $hm^{-2} a^{-1}$), accounting for a total of 96.28% of the study area. Soil wind erosion showed a spatial distribution of high in the northwest and low in the southeast, while high values of windbreak and sand-fixing service were mainly distributed in the northwest and downstream watersheds. (3) There is significant spatial heterogeneity in the effects of the drivers on the windbreak and sand-fixing service in the Yellow River Basin, with precipitation, temperature, actual evapotranspiration, soil clay content, soil organic matter content and slope gradient mainly showing negative inhibition, while wind speed, air pressure, Normalizd Difference Vegetation Index and soil coarse sand content mainly show positive promotion. The results of this study can provide some references and basis for desertification control and ecological protection and restoration in the Yellow River basin.

Key Words: Yellow River Basin; windbreak and sand-fixing service; geographically weighted regression; driving factors

防风固沙服务指植被生态系统对风沙起到的抑制和固定作用^[1],是干旱地区荒漠生态系统提供的最为 重要的服务^[2]。中国是世界上荒漠化最严重的国家之一,约有 660 万 km²旱地面临荒漠化的风险^[3]。第五次 全国荒漠化和沙化状况公报显示,截至 2014 年,我国荒漠化土地面积 261.16 万 km²,其中沙化土地面积达 172.12 万 km²。风蚀是造成干旱、半干旱及半湿润地区土地荒漠化的主要因素^[4],严重的风蚀荒漠化不仅造 成流沙堆积、地表风蚀粗化、土壤水分散失、土地生产力下降和沙尘暴灾害频发等生态环境问题^[5],同时对人 民的生命健康和财产安全产生了严重威胁^[6-7]。荒漠化地区生态脆弱,为治理土壤侵蚀、遏制土地退化,中国 实施了多样化的治理措施和管理政策^[8],先后开展了一系列生态恢复工程措施,如三北防护林、退耕还林还 草、天然林保护工程、京津冀风沙源治理工程等,有效改善区域生态环境,提高了生态系统服务功能^[9-11]。然 而全球气候变化和人口的快速增长将会增加荒漠化的风险^[12],科学定量评估区域防风固沙功能、开展长时间 序列防风固沙服务研究可为应对荒漠化、促进生态修复和可持续发展提供理论依据和参考。

目前,涉及植被生态系统防风固沙服务的研究主要包括物质量与价值量的评估和变化^[2]、空间流动^[1,13] 以及防风固沙服务与其他服务间权衡协同关系^[14-15]等三个方面,其中防风固沙服务空间流动、服务间权衡协 同关系的研究较多,主要侧重于分析区域生态系统所提供的服务功能效益,而物质量评估和变化方面的研究 作为基础性工作较多集中于区域土壤风蚀和防风固沙服务时空演变,对于驱动机制的研究尚不完善,近年来 已受到诸多学者广泛关注。Teng 等^[16]从气候变化和人类活动两方面研究得出气候变化对青藏高原风蚀的影 响具有大尺度和空间连续性,而人类活动对风蚀的影响只发生在局部地区并呈斑块分布;Li等^[17]基于气候和 社会经济因子采用多元线性回归方法分析得出温度和造林工程是内蒙古防风固沙服务功能提高的最重要因 素;彭婉月等^[18]定量评估了 2000—2017 年黑河中下游防风固沙服务变化并基于灰色关联法分析得出风力因 子是影响防风固沙功能变化的最主要因子;张玥等^[19]应用地理探测器模型分析了自然和人为因素对锡林郭 勒盟防风固沙功能的贡献及交互作用。以上研究集中于各类因子对防风固沙服务的影响程度和交互作用,虽 进一步加深了对于防风固沙服务的理解,但这些研究方法多从全局性角度出发,侧重各因子的整体性影响,掩 盖了变量间关系的局部特性,忽略了各驱动因子作用的区域差异和空间异质性^[20-21]。地理加权回归模型 (Geographically weighted regression,GWR)^[22]是一种局域空间分析方法,可用于检验回归结果的空间变异性, 揭示自变量与因变量之间的空间非平稳性,有助于更加全面了解防风固沙服务的驱动机制。

黄河流域是我国重要的生态屏障和经济区,其生态环境脆弱,沙漠化土地广泛分布于该区域^[23]。黄河流 域生态保护和高质量发展已被确定为国家战略,然而生态保护与发展矛盾突出,荒漠化问题一直是黄河流域 生态保护修复的突出问题^[24]。因此,本文以黄河流域为研究区,基于修正土壤风蚀模型(Revised wind erosion equation, RWEQ)计算 2000—2018 年黄河流域防风固沙服务, 探究其时空变化特征, 结合相关分析和 GWR 模型揭示研究区防风固沙服务驱动因素影响的区域差异和空间异质性, 以期为黄河流域荒漠化防治、生态保护修复和可持续发展提供一定的科学依据和理论参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

黄河是我国的第二长河,发源于青藏高原巴彦喀拉山北麓,自西向东流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东9省区,最后注入渤海。黄河流域位于我国中北部(32°10′—41°50′N、95°53′—119°05′E),总面积约79.5万km²,地势西高东低,地形差异较大,自西向东横跨青藏高原、内蒙古高原、黄土高原以及黄淮海平原4个地貌单元(图1)。流域气候复杂多样,多年平均气温约9.5℃,多年平均降雨量约466.5mm^[25],自北向南横跨干旱、半干旱、半湿润3个气候分区。黄河流域生态环境脆弱,沙漠化土地广泛分布于该区域,流域内存在库布奇沙漠和毛乌素沙漠。



1.2 数据来源及处理

本研究采用多源数据集,包括气象数据集、土壤数据集、社会数据集以及土地利用、DEM、NDVI等相关辅助数据集,具体数据来源见表1。

其中温度、降水、风速等气象数据首先利用 Matlab 检验去除缺失严重的站点,对部分站点进行插补后以 DEM 为协变量,利用 ANUSPLIN 专业气象插值软件进行插值,空间分辨率为 1km;粗砂、粉砂、黏粒和有机质 等土壤属性数据来自面向陆面模拟的中国土壤数据集,在 Aremap10.2 中栅格计算相应土壤因子,空间分辨率 为 1km;2000—2018 年雪深数据采用 Arepy 进行批量格式转换后,用 Matlab 计算雪盖因子,空间分辨率为 1km;归一化植被指数数据集已经过最大值合成处理,有效去除大气云层、建筑阴影和太阳高度角的影响,本 研究以像元二分法计算植被覆盖度应用于植被因子计算,空间分辨率为 1km;SRTM V4.1 DEM 数据经过镶嵌 裁剪后用来提取地表粗糙度因子,空间分辨率为 1km;土地利用数据经裁剪后将二级分类合并为一级类,空间 分辨率为 1km;各因子空间参考设置为 WGS_1984_Albers,以此进行研究区防风固沙服务研究。

2 研究方法

2.1 RWEQ 模型

参考《生态红线划定指南》和相关学者研究^[16-19,32],本文采用修正土壤风蚀模型(RWEQ)计算黄河流域 土壤风蚀模数和防风固沙服务物质量。RWEQ模型在考虑气候、植被、地形和土壤等因素的基础上,以裸土

663

条件下的潜在土壤风蚀量与植被覆盖条件下实际土壤风蚀量的差值定量评估黄河流域防风固沙服务功能量 的变化,计算公式如下:

$$Q_{\max P} = 109.8 \times (WF \times EF \times SCF \times K')$$
(1)

$$S_P = 150.71 \times (WF \times EF \times SCF \times K')^{-0.3711}$$
⁽²⁾

$$S_{LP} = \frac{2Z}{S_P^2} Q_{\max P} \times e^{-(Z/S_P)^2}$$
(3)

$$Q_{\max} = 109.8 \times (WF \times EF \times SCF \times K' \times C)$$
(4)

$$S = 150.71 \times (WF \times EF \times SCF \times K' \times C)^{-0.3711}$$
(5)

$$S_{L} = \frac{2Z}{S^{2}} Q_{\max} \times e^{-(Z/S)^{2}}$$
(6)

$$SP = S_{IP} - S_I \tag{7}$$

式中,*SP*为单位面积固沙量(kg/m²);*Z*表示下风向距离(m),取 50m^[1,32-33];*S*_{LP}为潜在风蚀量(kg/m²);*S*_L为 实际风蚀量(kg/m²);*Q*_{maxP}为潜在风沙最大转运量;*Q*_{max}为实际风沙最大转运量;*S*为关键地块长度(m);*S*_P为 潜在关键地块长度(m);*WF*为气候因子(kg/m);*EF*为土壤可蚀性因子(无量纲);SCF为土壤结皮因子(无 量纲);*C*为植被覆盖因子(无量纲);*K*′为地表粗糙度因子(无量纲)。

		Table 1 Mult	iple source dat	tasets
数据名称 Data name	数据类型 Date type	时间分辨率 Time resolution	空间分辨率 Spatial resolution	数据来源 Data sources
气象数据 Meteorological data	TXT	日		中国气象数据共享网 (http://data.cma.cn)
土地利用 Land use	TIFF	年	1km	中科院资源环境科学与数据中心 (https://www.resdc.cn/Datalist1.aspx? FieldTyepID=1,3)
归—化植被指数 NDVI	TIFF	月	1km	中科院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/data. aspx? DATAID=254)
SRTM V4.1 DEM	TIFF		90m	中科院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/data. aspx? DATAID=284)
实际蒸散量 Actual evapotranspiration	TIFF	年	1km	https://doi.org/10.6084/m9.figshare.12278684.v5, 见参考 文献 ^[26]
人口密度数据 Population density	TIFF	年	1km	Worldpop(https://www.worldpop.org/)
夜间灯光数据 Night light	TIFF	年	500m	https://doi.org/10.7910/DVN/JRM2XE,见参考文献 ^[27]
中国长时间序列雪深数据集 Long-term series of daily snow depth dataset in China	TXT	日	25km	国家青藏高原科学数据中心(http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/ data/df40346a-0202-4ed2-bb07-b65dfcda9368/?q=中国长时间 序列雪深数据集),见参考文献 ^[28-30]
面向陆面模拟的中国土壤数据集 A China dataset of soil properties for land surface modeling	NetCDF		30"	国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/ data/11573187-fd64-47b1-81a6-0c7c224112a0/?q=面向陆面模 拟的中国土壤数据集),见参考文献 ^[31]

表1 多源数据集

RWEQ 模型中各因子计算公式如下:

(1) 气候因子 WF 综合考虑风力、降雪、温度、降雨、太阳辐射等多种气候条件对土壤风蚀产生的影响, 计算公式如下:

$$WF = Wf \times \frac{\rho}{g} \times SW \times SD \tag{8}$$

$$Wf = \frac{\sum_{i=1}^{i} u_2 (u_2 - u_1) \times N_d}{N}$$
(9)

http://www.ecologica.cn

$$o = 348 \times \left(\frac{1.013 - 0.1183H + 0.0048H^2}{T}\right)$$
(10)

式中, Wf 为风力因子(m^3/s^3);g 为重力加速度(取 9.8m/s²); ρ 为空气密度(kg/m³),由海拔高度 H(km)和绝 对温度 T(开尔文)计算得到;SW 为土壤湿度因子;SD 为雪盖因子; u_1 为距地面 2m 处的临界起沙风速(m/s); u_2 为距地面 2m 处风速(m/s); N_d 为测定风速的时间周期;N 为测定周期内风速次数。

(2)土壤可蚀性因子 EF 表示一定理化条件下土壤受风蚀影响的程度^[1],计算公式如下:

$$EF = \frac{29.09 + 0.31sa + 0.17si + 0.33(sa/cl) - 2.590M - 0.95 \text{ CaCO}_3}{100}$$
(11)

式中,*sa*为土壤粗砂含量(%);*si*为土壤粉砂含量(%);*cl*为土壤黏粒含量(%);*OM*为土壤有机质含量(%); CaCO₃为碳酸钙含量(%),本文不考虑。

(3) 土壤结皮因子 SCF 指一定理化条件下土壤结皮抵抗风蚀能力的大小^[1], 计算公式如下:

SCF =
$$\frac{1}{1 + 0.0066 (cl)^2 + 0.021 (OM)^2}$$
 (12)

式中, cl为土壤黏粒含量(%); OM为土壤有机质含量(%)。

(4)在 RWEQ 模型中,地表粗糙度因子 K'主要指农田耕作使地表条件发生变化,从而对土壤风蚀产生影响,分为随机糙度 C_n和土垄糙度 K_c。由于研究区空间跨度较大,土地覆被类型多样,计算地表粗糙度的随机 糙度因子和土垄糙度因子获取困难,因此本文参考江凌等^[32]的研究,采用土垄造成的地表糙度因子 K_c以地形 起伏产生的地表粗糙度予以替代,计算公式如下:

$$K' = e^{(1.86k_r - 2.41k_r^{0.934} - 0.127C_{\rm rr})}$$
(13)

$$K_r = 0.2 \times \frac{(\Delta H)^2}{L} \tag{14}$$

式中, K_r 为地形糙度因子(cm); C_r 为随机糙度因子(cm),本次研究取0;L为地势起伏参数(m); ΔH 为距离L范围内的海拔高程差(m)。

(5) 植被覆盖因子 C 是影响土壤风蚀过程的重要因子,一定程度的植被覆盖可以降低有效风速,削弱风力搬运土壤颗粒的能力^[1,18,32],计算公式如下:

$$C = e^{-a_i \times SC} \tag{15}$$

式中,*SC*为植被覆盖度(%);*a*_{*i*}为不同植被类型的系数,分别为林地 0.1535、草地 0.1151、灌丛 0.0921、裸地 0.0768、沙地 0.0658、农田 0.0438。

2.2 防风固沙功能保有率

单位面积防风固沙量可以表示生态系统中植被作用引起的风蚀减少量,但由于实际风蚀量与潜在风蚀量均与风蚀力有关,并不能有效表征生态系统本身对固沙的贡献率,因此,将单位面积防风固沙量 *SP* 与潜在土壤风蚀量 *S*_L的比值作为防风固沙服务保有率 *F*^[34]来表征黄河流域植被防风固沙功能。公式如下:

$$F = \frac{SP}{S_{LP}} \times 100 \tag{16}$$

2.3 地理加权回归模型

地理加权回归(GWR)是一种局域空间分析方法,是对普通线性回归的拓展,通过获取局部参数评估自变量与因变量关系在空间尺度上的变异^[35]。本文引入 GWR 模型探究黄河流域防风固沙生态系统服务的驱动机制,并分析其空间异质性分布成因。公式如下:

$$y_{i} = \alpha_{0}(u_{i}, v_{i}) + \sum_{i=1}^{k} \alpha_{k}(u_{i}, v_{i}) x_{ik} + \varepsilon_{i}$$
(17)

式中, y_i 为样点 i 的因变量, (u_i, v_i) 为样点的中心位置坐标, $\alpha_0(u_i, v_i)$ 为截距, $\alpha_k(u_i, v_i)$ 为第 i 个点的回归系数, x_{ik} 为第 i 个点上第 k 个变量的观测值, ε_i 为误差项。

3 结果分析

3.1 土壤风蚀及防风固沙服务时空变化特征

2000—2018年黄河流域土壤风蚀模数以及防风固沙量呈明显下降趋势,而植被覆盖度和防风固沙保有率呈现上升趋势(图2)。土壤风蚀模数呈先上升后下降的趋势,由2000年的4.93thm⁻²a⁻¹下降到2012年的2.55thm⁻²a⁻¹,后上升至2018年的4.19thm⁻²a⁻¹,19年来平均以0.04thm⁻²a⁻¹的速率下降;而黄河流域防风固沙物质量从2000年的28.05thm⁻²a⁻¹下降到2018年的25.37thm⁻²a⁻¹,最低值为2011年的18.41thm⁻²a⁻¹,多年来平均以0.14thm⁻²a⁻¹的速率下降。土壤风蚀模数与单位面积防风固沙物质量的数值差距较大,说明黄河流域荒漠化治理成效显著。防风固沙物质量的变化受到风速、植被覆盖等气候和人为因素的双重影响,物质量的下降并不能说明黄河流域防风固沙能力减弱。防风固沙保有率与植被覆盖度的时间变化均处于上升趋势,两者分别以0.05%·a⁻¹和0.26%·a⁻¹的速率增加,说明2000—2018年黄河流域植被防风固沙功能增强。



图 2 2000—2018 年黄河流域防风固沙服务、植被覆盖度以及保有率时间变化

Fig.2 Temporal changes of windbreak and sand fixation services, vegetation coverage and retention rate in the Yellow River Basin from 2000 to 2018

通过对 2000—2018 年 19 年数据计算平均值得到黄河流域土壤风蚀模数和防风固沙服务空间分布 (图 3),土壤风蚀模数多年平均值为 3.56 t hm⁻² a⁻¹,而防风固沙物质量 19 年平均值达 23.08 t hm⁻² a⁻¹,黄河 流域土壤风蚀和防风固沙服务分布表现出明显的空间异质性。整体上看,黄河流域土壤风蚀以微度 (<2 t hm⁻² a⁻¹)和轻度(2—25 t hm⁻² a⁻¹)为主占研究区面积的 96.28%,侵蚀强度为中度以上(>25 t hm⁻² a⁻¹) 的土壤风蚀区域占比较少,主要集中于黄河流域西北部,侵蚀面积随侵蚀强度的增加而减小。而防风固沙服 务高值区则主要分布于黄河流域西北部的内蒙和宁夏地区、以及黄河下游的河南地区。

从 2000—2018 年黄河流域土壤风蚀模数和防风固沙变化趋势空间分布来看,黄河流域土壤风蚀模数增加区域多于减少区域,增加区域占研究区面积的 22.22%,零星分布于流域各处,主要包括甘肃、青海、宁夏西



图 3 2000—2018 年黄河流域防风固沙服务空间分布及变化趋势

Fig.3 Spatial distribution and change trend of windbreak and sand fixation services in the Yellow River Basin from 2000 to 2018

部、阴山山脉、太原盆地以及河南部分区域;而风蚀模数减少区域占研究区面积的 12.91%,主要分布于流域西 北部以及东部部分区域,包括内蒙古中南部、宁夏东部、陕西北部、山西北部以及山东济南、东营等地。研究区 单位面积防风固沙量增加区域多于减少区域,增加区域占黄河流域面积的 17.12%,分布于流域西部、南部以 及东部部分区域,包括甘肃、宁夏南部、陕西榆林南部、关中平原、山西南部以及河南部分区域;单位面积防风 固沙量减少区域占研究区面积的 15.06%,主要分布于流域西北部和黄河下游,包括内蒙古、山西中北部以及 山东济南、东营等地。

3.2 黄河流域防风固沙服务驱动机制

土壤风蚀受到人类活动、气候、植被、土壤、地形等多种因素综合影响^[17,36]。参考相关学者的研究^[16-19,32-33,37-38],基于防风固沙服务相关影响因子以及数据的可获取性,本文从社会、气候、土壤、植被、地形等角度选取人口密度(Pop)、夜间灯光(NTL)、降水(Prec)、温度(Temp)、风速(Wind)、气压(Pres)、实际蒸散量(*ET*)、太阳辐射总量(*SR*)、归一化植被指数(NDVI)、土壤粗砂含量(*SA*)、土壤粉砂含量(*SI*)、土壤黏粒含量(*CL*)、土壤有机质含量(*OM*)、坡度(Slope)、高程(DEM)等15种因素作为自变量,以防风固沙物质量为因变量来探究黄河流域防风固沙生态系统服务的驱动机制。

3.2.1 相关性分析

相关性是筛选模型解释变量的初步条件,在进行地理加权回归分析之前先对自变量和因变量进行相关分 析,初步筛选出降水、温度、风速、气压、实际蒸散量、太阳辐射总量、归一化植被指数、土壤粗砂含量、土壤粉砂 含量、土壤黏粒含量、土壤有机质含量、坡度、高程等 13 个与防风固沙物质量在 0.001 级别置信水平显著相关 的因子作为地理加权回归模型的解释变量(图4)。因子间多重共线性会导致地理加权回归模型结果出现偏 差,应选用共线性较低,即方差膨胀因子(Variance inflation factor, VIF)<7.5 的因子进行地理加权回归分析,因 此本文基于 R 语言 car 包进行冗余因子的剔除最终选择降水、温度、风速、气压、实际蒸散量、归一化植被指 数、土壤粗砂含量、土壤黏粒含量、土壤有机质含量、坡度等 10 个因子作为驱动因素进一步分析影响黄河流域 防风固沙物质量空间异质性分布的因素。

根据皮尔逊相关分析结果可知,与防风固沙物质量正相关的驱动因素为:土壤粗砂含量(SA)、温度(Temp)、风速(Wind)、气压(Pres),与防风固沙物质量呈负相关的驱动因素为:土壤黏粒含量(CL)、归一化植被指数(NDVI)、实际蒸散量(ET)、坡度(Slope)、土壤有机质含量(OM)、降水(Prec)。



Fig.4 Correlation Analysis of driving factors

*表示相关性在 0.05 水平上显著, * *表示相关性在 0.01 水平上显著, * * *表示相关性在 0.001 水平上显著

3.2.2 地理加权回归分析

地理加权回归分析之前需要诊断模型拟合效果,对筛选出的驱动因子分别利用全局最小二乘法(OLS)模型与 GWR 模型构建回归模型。由表 2 可知, GWR 模型拟合结果中 AICc 值低于 OLS 模型拟合结果, 且差值 大于 3, 这表明 GWR 模型模拟结果优于 OLS 模型。GWR 模型校正后的局部决定系数 *R*²达 0.6070, 相较传统的 OLS 模型提高了 48.45%, 并且 GWR 模型残差平方和低于 OLS, 这说明 GWR 模型相较于 OLS 模型能更好 地解释各驱动因素对黄河流域防风固沙服务空间分布异质性的影响。

	Table 2 Comparison of fitting	ng results between OLS mo	del and GWR Model	
模型诊断信息 Model diagnosis information	赤池信息准则 Akaike Information Criterion, corrected(AICc)	残差平方和 Residual sum of squares(RSS)	R^2	校正后 R ² Adjusted R ²
OLS	-6045.4652	27.9621	0.4109	0.4089
GWR	-7084.8565	16.1494	0.6598	0.6070

图 5 为各驱动因子地理加权回归系数拟合结果,回归系数可以反映各因子驱动作用强度的空间差异性。 局部决定系数 *R*²在-0.14—0.72 间,高值主要集中于黄河流域中北部,说明 GWR 模型在黄河流域中部和北部 的拟合精度更高。各因子回归系数空间分布具有非均匀性和局部性,表明各因子对黄河流域不同区域防风固 沙服务作用强度呈明显异质性。

降水量对防风固沙服务的影响以负面效应为主,回归系数小于0的区域占研究区面积的67.22%,主要分 布于黄河流域西部和中游区域,而在黄河中游流域西北部和下游流域则主要表现为正向促进。温度对防风固 沙服务的影响以负面效应为主,研究区77.59%区域的防风固沙服务受到温度的负面抑制作用,集中分布于黄 河流域上游和中游。风速对防风固沙服务的影响以正面效应为主,占研究区总面积的60.53%,风速越高,防 风固沙量也越高。气压对防风固沙服务的影响与风速类似,以正向促进作用为主。实际蒸散量对防风固沙服务的变化产生正负两面效应,呈多中心分散分布,回归系数范围为-2.27—1.51。归一化植被指数对研究区防风固沙服务的分布产生正负两面效应,在黄河流域南部 NDVI 对防风固沙服务的影响主要表现为微弱的促进作用,而在黄河流域北部和东部则表现为抑制作用。土壤黏粒含量对防风固沙服务的影响以负面效应为主,约占研究区总面积的 82.50%。土壤粗砂含量对防风固沙服务的影响以正面效应为主,约占研究区总面积的 81.57%,仅在黄河流域中下游部分区域表现为微弱的抑制作用。85.68%区域土壤有机质含量对防风固沙服务为负面影响,仅在黄河流域中北部零散表现为促进作用。坡度对防风固沙服务的影响表现出明显的负面效应,回归系数范围为-2.66—0.12,小于 0 的区域占研究区面积的 94.18%,仅在黄河流域中游部分区域零星表现为正面效应。



Fig.5 Distribution chart of regression coefficients of driving factors

4 讨论

本文采用 RWEQ 模型定量评估了 2000—2018 年黄河流域土壤风蚀模数以及防风固沙服务的时空变化 并基于相关分析和 GWR 模型探究了防风固沙物质量空间分布异质性驱动因素。黄河流域土壤风蚀模数与 单位面积防风固沙量均呈下降趋势,主要与风蚀力的减弱有关,在研究时段内研究区风蚀力从 19.36 m³/s³下 降至 18.89 m³/s³(图 6),风蚀力减弱导致潜在土壤风蚀量与实际土壤风蚀量均下降,防风固沙量也呈现下降 趋势,但这并不能说明生态系统防风固沙功能在降低, 从防风固沙保有率以及植被覆盖度的的变化趋势来看, 生态系统植被对固沙的贡献率整体是上升,这与前人的 研究相一致^[9,39]。相关分析结果表明研究区防风固沙 服务主要受到气候、植被、地形、土壤等自然因素的 作用。

驱动因子间存在相互作用,并不是单独对防风固沙服务产生影响,并且各驱动因素对防风固沙服务影响具 有明显的空间差异,驱动因素的作用导致防风固沙服务 呈现出空间异质性。从回归系数整体上看,降水、温度、 风速、实际蒸散量、气压等气候因素对研究区防风固沙 服务的影响普遍较强,气候变化是影响区域土壤风蚀的 主导因素^[40-41]。降水量与温度不仅直接影响土壤湿 度、土壤颗粒粘力,同时影响植被生长状况,达到调节风 蚀的作用^[42]。降水具有抑制风蚀的能力,雨水增加了



Fig.6 Time variation of wind erosion force in the Yellow River Basin from 2000 to 2018

土壤湿度并允许土壤颗粒间形成毛细作用力增强土壤凝聚力^[43],更多的降水可以促进植被生长,有利于土壤 表面结皮从而增强地表对风蚀的抵抗力^[44],黄河流域东南部降水量高于西北部,具有更好的植被覆盖与土壤 湿度,可以有效抵抗风蚀,促使东南部的实际风蚀与潜在风蚀明显低于西北部,因而降水对防风固沙量影响在 西北部和东南部呈现明显差异。温度对防风固沙服务的影响与降水相似,体现在温度升高一定程度上促进植 被生长抑制风蚀发生,从而提高防风固沙服务功能,但同样会导致蒸散量升高土壤湿度降低,使得地表更加干 燥,容易遭受风蚀^[17]。风是产生风蚀的重要气候驱动力^[45],而风蚀的产生需要达到临界风速,在风速较大的 一些区域如内蒙古南部和榆林市北部,风蚀模数与防风固沙服务均较高,而风速大小与水平气压梯度力成正 比,气压场的变化会引起地面风速的改变^[46],对防风固沙量的影响呈现出相似性。

除气候因素外,植被覆盖和土壤性质对防风固沙服务也具有较大影响。植被覆盖可增强土壤抗侵蚀能力 同时会影响区域环境如温度、土壤湿度、蒸散发等^[47-48],在研究区南部较高的植被覆盖减少蒸发增加了含水 量,同时增加了土壤有机质含量,这可能是植被覆盖对防风固沙量的影响在南北区域空间分异的原因。土壤 性质对风蚀有显著影响,相关研究表明有机质含量较低的土壤在自然条件下更容易遭受侵蚀^[49],黏粒含量和 有机质含量较高时土壤颗粒间的黏着力较强^[50]。研究区土壤性质存在明显的空间差异,中南部土壤黏粒和 有机质含量明显高于北部,因而在中南部的促进作用强于北部。有学者认为地形起伏度与土壤风蚀存在一定 关系,地势平坦地区土壤风蚀较为强烈,而在坡度较大的区域,地表粗糙度增大,增强了土壤抗风蚀能力^[51], 也有研究表明随着坡度上升沙化土地面积呈快速下降趋势^[52],坡度较低区域防风固沙能力要弱于较高区域, 坡度的负面效应在西北区域表现最为明显。

本文针对黄河流域土壤风蚀及防风固沙服务的研究进行了有益探索和尝试。从模型角度看,进行研究时 多参考相关学者^[1,18,32–33]的成果对其中一些参数和因子进行处理,如下风向距离 Z 因缺乏实测数据而参考相 关研究^[1,32–33]取值 50m,但相较于 1km×1km 的栅格研究单元而言这样的取值是否合适仍然需要进一步研究; 植被因子 C 处理时受限于数据,以土地利用为基础考虑了不同植被类型防风固沙能力不同进行相应计算^[18], 但这与 RWEQ 模型中植被因子的原始计算方式有所差别。RWEQ 模型最初主要是为了估算美国农田的土壤 流失状况而创建的^[53],综合目前研究来看,该模型在其他土地类型的计算结果与实际情况间存在的不确定性 即可能高估或者低估土壤风蚀的问题还需进一步根据实测数据量化研究。从数据角度来讲,本文所使用的多 源数据集中各种数据格式分辨率均不一致,考虑到研究区范围较大,最终将数据统一为 1km 分辨率进行计 算,与高分辨率数据相比存在一定的误差。防风固沙服务受多种因素共同作用,本研究从多角度选择了 10 种 因子探究黄河流域防风固沙服务驱动机制,但由于 GWR 模型不适用于分析土地利用、土壤类型、植被类型等 类型量数据,未将这些数据纳入驱动因素中进行分析。受限于数据的可获取性,在人类活动方面本次研究仅 选取了人口密度和夜间灯光进行相应分析并没有全面考虑例如经济、造林面积、牲畜等等,这对研究结果会造 成一定影响,同时植被对防风固沙服务的影响并不能简单地归结为自然因素,大规模生态工程的实施是植被 恢复的有力措施,应当结合自然以及人为影响两方面考虑,对于自然因素和人为因素耦合影响下防风固沙服 务变化将是下一步研究的重点,如预测未来气候情景下土壤风蚀和防风固沙服务的变化、未来土地利用情景 下各土地利用类型防风固沙能力变化。

5 结论

(1)2000—2018 年黄河流域土壤风蚀模数与单位面积防风固沙量均呈下降趋势,防风固沙保有率和植被覆盖度则呈上升趋势。土壤风蚀模数和单位面积防风固沙量分别以0.04 t hm⁻² a⁻¹和0.14 t hm⁻² a⁻¹的速率下降,而防风固沙保有率与植被覆盖度分别以0.05% · a⁻¹和0.26% · a⁻¹的速率上升,说明黄河流域风蚀状况减轻,植被防风固沙功能增强。

(2)黄河流域多年土壤风蚀模数与单位面积防风固沙量平均值分别为 3.56 t hm⁻² a⁻¹和 23.08 t hm⁻² a⁻¹。 黄河流域土壤风蚀以微度(<2 t · hm⁻² · a⁻¹)和轻度(2—25 t hm⁻² a⁻¹)为主占研究区面积的 96.28%,侵蚀强 度为中度以上(>25 t hm⁻² a⁻¹)的土壤风蚀区域占比较少,空间分布呈现西北高东南低的特点,而防风固沙服 务高值主要分布于西北部和下游流域。

(3)各驱动因素对黄河流域防风固沙服务的影响具有明显的空间异质性。降水、温度、实际蒸散量、土壤 黏粒含量、土壤有机质含量和坡度对防风固沙服务的影响均呈现负面效应强于正面效应,而风速、气压、归一 化植被指数、土壤粗砂含量对防风固沙服务的影响则表现出正面效应强于负面效应。

参考文献(References):

- [1] 徐洁,肖玉,谢高地,王洋洋,江源,陈文辉.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.生态学报,2019,39 (16):5857-5873.
- [2] 程磊磊,却晓娥,杨柳,姚雪玲,卢琦.中国荒漠生态系统:功能提升、服务增效.中国科学院院刊,2020,35(6):690-698.
- [3] Li C J, Fu B J, Wang S, Stringer L C, Wang Y P, Li Z D, Liu Y X, Zhou W X. Drivers and impacts of changes in China's drylands. Nature Reviews Earth & Environment, 2021, 2(12): 858-873.
- [4] 景国臣,李英杰,刘艳辉,刘丙友.黑龙江省土壤风蚀研究现状与方向.中国水土保持,2014(9):37-40.
- [5] 王涛,朱震达.中国北方沙漠化的若干问题.第四纪研究,2001,21(1):56-65.
- [6] Zhou C W, Fu B J, Wang X F, Yin L C, Feng X M. The regional impact of ecological restoration in the arid steppe on dust reduction over the Metropolitan Area in northeastern China. Environmental Science & Technology, 2020, 54(13): 7775-7786.
- [7] Lyu Y L, Shi P J, Han G Y, Liu L Y, Guo L L, Hu X, Zhang G M. Desertification control practices in China. Sustainability, 2020, 12 (8): 3258.
- [8] You Y, Zhou N, Wang Y D. Comparative study of desertification control policies and regulations in representative countries of the Belt and Road Initiative. Global Ecology and Conservation, 2021, 27: e01577.
- [9] 黄麟, 祝萍, 肖桐, 曹巍, 巩国丽. 近 35 年三北防护林体系建设工程的防风固沙效应. 地理科学, 2018, 38(4): 600-609.
- [10] 徐省超,赵雪雁,宋晓谕.退耕还林(草)工程对渭河流域生态系统服务的影响.应用生态学报, 2021, 32(11): 3893-3904.
- [11] 郑树峰, 王丽萍, 臧淑英. 大兴安岭天保工程区生态系统服务变化研究. 地理科学, 2021, 41(7): 1295-1302.
- [12] Huang J P, Yu H P, Guan X D, Wang G Y, Guo R X. Accelerated dryland expansion under climate change. Nature Climate Change, 2016, 6 (2): 166-171.
- [13] 肖玉,谢高地,甄霖,鲁春霞,徐洁.阴山北麓草原生态功能区防风固沙服务受益范围识别.自然资源学报,2018,33(10):1742-1754.
- [14] 牛丽楠, 邵全琴, 宁佳, 黄海波. 西部地区生态状况变化及生态系统服务权衡与协同. 地理学报, 2022, 77(1): 182-195.
- [15] 祝萍,刘鑫,郑瑜晗,王世豪,黄麟.北方重点生态功能区生态系统服务权衡与协同.生态学报,2020,40(23):8694-8706.
- [16] Teng Y M, Zhan J Y, Liu W, Sun Y X, Agyemang F B, Liang L, Li Z H. Spatiotemporal dynamics and drivers of wind erosion on the Qinghai-Tibet Plateau, China. Ecological Indicators, 2021, 123: 107340.
- [17] Li D J, Xu D Y, Wang Z Y, You X G, Zhang X Y, Song A L. The dynamics of sand-stabilization services in Inner Mongolia, China from 1981 to 2010 and its relationship with climate change and human activities. Ecological Indicators, 2018, 88: 351-360.
- [18] 彭婉月, 王兆云, 李海东, 柳本立. 黑河中下游防风固沙功能时空变化及影响因子分析. 环境科学研究, 2020, 33(12): 2734-2744.
- [19] 张玥, 许端阳, 王子玉, 张晓宇. 2000—2015 年锡林郭勒盟防风固沙服务功能变化驱动因素分析. 生态学报, 2021, 41(2): 603-614.
- [20] 王晓峰,符鑫鑫,楚冰洋,李月皓,延雨,冯晓明.秦岭生态屏障产水服务时空演变特征及驱动要素.自然资源学报,2021,36(10): 2507-2521.

- [21] Wang X F, Chu B Y, Feng X M, Li Y H, Fu B J, Liu S R, Jin J M. Spatiotemporal variation and driving factors of water yield services on the Qingzang Plateau. Geography and Sustainability, 2021, 2(1): 31-39.
- [22] Fotheringham A S, Charlton M E, Brunsdon C. Geographically weighted regression: a natural evolution of the expansion method for spatial data analysis. Environment and Planning A: Economy and Space, 1998, 30(11): 1905-1927.
- [23] 胡光印, 董治宝, 逯军峰, 杨林海, 南维鸽, 肖锋军. 黄河流域沙漠化空间格局与成因. 中国沙漠, 2021, 41(4): 213-224.
- [24] 董锁成, 厉静文, 李宇, 李富佳, 刘倩, 李泽红, 卢琦, 程吴. 黄河流域荒漠化协同防治与上、中、下游绿色发展. 环境与可持续发展, 2021, 46(2): 44-49.
- [25] 肖风劲,徐雨晴,黄大鹏,廖要明,於利.气候变化对黄河流域生态安全影响及适应对策.人民黄河,2021,43(1):10-14,52-52.
- [26] Yin L C, Tao F L, Chen Y, Liu F S, Hu J. Improving terrestrial evapotranspiration estimation across China during 2000-2018 with machine learning methods. Journal of Hydrology, 2021, 600: 126538.
- [27] Chen Z Q, Yu B L, Yang C S, Zhou Y Y, Yao S J, Qian X J, Wang C X, Wu B, Wu J P. An extended time series (2000-2018) of global NPP-VIIRS-like nightime light data from a cross-sensor calibration. Earth System Science Data, 2021, 13(3): 889-906.
- [28] Che T, Li X, Jin R, Armstrong R, Zhang T J. Snow depth derived from passive microwave remote-sensing data in China. Annals of Glaciology, 2008, 49: 145-154.
- [29] Dai L Y, Che T, Ding Y J. Inter-calibrating SMMR, SSM/I and SSMI/S data to improve the consistency of snow-depth products in China. Remote Sensing, 2015, 7(6): 7212-7230.
- [30] Dai L Y, Che T, Ding Y J, Hao X H. Evaluation of snow cover and snow depth on the Qinghai-Tibetan Plateau derived from passive microwave remote sensing. The Cryosphere, 2017, 11(4): 1933-1948.
- [31] Shangguan W, Dai Y J, Liu B Y, Zhu A X, Duan Q Y, Wu L Z, Ji D Y, Ye A Z, Yuan H, Zhang Q, Chen D D, Chen M, Chu J T, Dou Y J, Guo J X, Li H Q, Li J J, Liang L, Liang X, Liu H P, Liu S Y, Miao C Y, Zhang Y Z. A China data set of soil properties for land surface modeling. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2013, 5(2): 212-224.
- [32] 江凌,肖燚,欧阳志云,徐卫华,郑华.基于 RWEQ 模型的青海省土壤风蚀模数估算.水土保持研究,2015,22(1):21-25,32-32.
- [33] 邢丽珠,张方敏,邢开成,李云鹏,卢琦,鲁飞飞. 基于 RWEQ 模型的内蒙古巴彦淖尔市土壤风蚀变化特征及归因分析.中国沙漠, 2021,41(5):111-119.
- [34] 巩国丽, 刘纪远, 邵全琴. 草地覆盖度变化对生态系统防风固沙服务的影响分析——以内蒙古典型草原区为例. 地球信息科学学报, 2014, 16(3): 426-434.
- [35] 高江波, 焦珂伟, 吴绍洪. 1982-2013年中国植被 NDVI 空间异质性的气候影响分析. 地理学报, 2019, 74(3): 534-543.
- [36] Xiao L G, Li G Q, Zhao R Q, Zhang L. Effects of soil conservation measures on wind erosion control in China: a synthesis. Science of the Total Environment, 2021, 778: 146308.
- [37] 朱趁趁, 龚吉蕊, 杨波, 张子荷, 王彪, 矢佳昱, 岳可欣, 张魏圆. 内蒙古荒漠草原防风固沙服务变化及其驱动力. 生态学报, 2021, 41 (11): 4606-4617.
- [38] Li D J, Xu D Y. Sand fixation function response to climate change and land use in northern China from 1981 to 2015. Aeolian Research, 2019, 40: 23-33.
- [39] 黄麟,曹巍,巩国丽,赵国松. 2000-2010年中国三北地区生态系统时空变化特征. 生态学报, 2016, 36(1): 107-117.
- [40] Li J Y, Ma X F, Zhang C. Predicting the spatiotemporal variation in soil wind erosion across Central Asia in response to climate change in the 21st century. Science of the Total Environment, 2020, 709: 136060.
- [41] Zhang H Y, Fan J W, Cao W, Harris W, Li Y Z, Chi W F, Wang S Z. Response of wind erosion dynamics to climate change and human activity in Inner Mongolia, China during 1990 to 2015. Science of the Total Environment, 2018, 639: 1038-1050.
- [42] Mckenna Neuman C. Effects of temperature and humidity upon the entrainment of sedimentary particles by wind. Boundary-Layer Meteorology, 2003, 108(1): 61-89.
- [43] Bergametti G, Rajot J L, Pierre C, Bouet C, Marticorena B. How long does precipitation inhibit wind erosion in the Sahel? Geophysical Research Letters, 2016, 43(12): 6643-6649.
- [44] Wu X G, Fan J Q, Sun L, Zhang H F, Xu Y, Yao Y F, Yan X D, Zhou J, Jia Y S, Chi W F. Wind erosion and its ecological effects on soil in the northern piedmont of the Yinshan Mountains. Ecological Indicators, 2021, 128: 107825.
- [45] 巩国丽, 刘鑫, 要玲, 任丽霞, 王敏. RWEQ 模型中风因子的改进及应用. 中国水土保持科学, 2021, 19(4): 143-148.
- [46] 王小玲, 翟盘茂. 中国春季沙尘天气频数的时空变化及其与地面风压场的关系. 气象学报, 2004, 62(1): 96-103.
- [47] Řehúček D, Khel T, Kučera J, Vopravil J, Petera M. Effect of windbreaks on wind speed reduction and soil protection against wind erosion. Soil & Water Research, 2017, 12(2): 128-135.
- [48] Vigiak O, Sterk G, Warren A, Hagen L J. Spatial modeling of wind speed around windbreaks. Catena, 2003, 52(3/4): 273-288.
- [49] Yan Y C, Wu L H, Xin X P, Wang X, Yang G X. How rain-formed soil crust affects wind erosion in a semi-arid steppe in northern China. Geoderma, 2015, 249-250; 79-86.
- [50] 左小锋,郑粉莉,张加琼,王一菲,桑琦明,张勋昌.典型薄层黑土区前期坡面水蚀对土壤风蚀的影响.农业工程学报,2021,37(12): 45-53.
- [51] 吴芳芳,曹月娥,卢刚,杨建军,张婷婷.准东地区土壤风蚀影响因子分析与风蚀量估算.水土保持学报,2016,30(6):56-60,66-66.
- [52] Wang X F, Yin L C, Xiao F Y, Zhang M M, Liu L L, Zhou Z X, Ao Y. The desertification process in the silk road economic belt in the past 15 years: a study using MODIS data and GIS analysis. Geological Journal, 2018, 53(S1): 322-331.
- [53] Youssef F, Visser S, Karssenberg D, Bruggeman A, Erpul G. Calibration of RWEQ in a patchy landscape: a first step towards a regional scale wind erosion model. Aeolian Research, 2012, 3(4): 467-476.