

DOI: 10.5846/stxb202110122880

黄孟冬, 肖玉, 秦克玉, 甘爽, 谢高地, 刘婧雅, 王洋洋, 牛樱楠, 刘佳. 1980—2018 年浑善达克地区防风固沙服务时空变化及其驱动因素. 生态学报, 2022, 42(18): 7612-7629.

Huang M D, Xiao Y, Qin K Y, Gan S, Xie G D, Liu J Y, Wang Y Y, Niu Y N, Liu J. Spatiotemporal dynamics and drivers of wind erosion prevention service in Otindag from 1980 to 2018. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(18): 7612-7629.

1980—2018 年浑善达克地区防风固沙服务时空变化及其驱动因素

黄孟冬^{1,2}, 肖玉^{1,2,*}, 秦克玉^{1,2}, 甘爽^{1,2}, 谢高地^{1,2}, 刘婧雅^{1,2}, 王洋洋^{1,2}, 牛樱楠^{1,2}, 刘佳^{1,2}

1 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:防风固沙服务是干旱半干旱地区生态系统提供的最重要的防护型服务,对风蚀地区及周边区域的生态环境安全具有重要意义。基于修正的土壤风蚀方程(RWEQ)模型模拟了 1980—2018 年浑善达克地区防风固沙服务的时空变化,利用地理探测器分析了包括数值和类型变量的自然与社会经济因素对该区防风固沙服务空间格局的影响及交互作用。研究结果显示:(1) 1980—2018 年,单位面积防风固沙量波动下降,2015 年单位面积防风固沙量最小,为 13.01 kg/m²。同时,防风固沙保有率波动增加,2018 年保有率达到最大值,为 94.28%;(2) 土壤类型、年末牲畜数量、年降水量与人工造林面积是影响防风固沙服务空间变化的主要因素,其中,土壤类型对防风固沙服务空间变化的影响最大,q 值为 75.15%;(3) 各驱动因素间的交互作用都会放大单因子对浑善达克地区防风固沙服务空间分布的影响。其中,年均温对防风固沙服务空间分布变化具有较强的间接影响。因此,在土壤类型、年均温的间接作用下,1980—2018 年浑善达克重点生态功能区防风固沙能力整体提高、风蚀程度有所缓解与年均风速、年降水量变化,以及 2000 年之后京津风沙源工程引起的人工造林面积、年末牲畜数量的空间分布格局变化有密切关系。

关键词:防风固沙服务;修正的土壤风蚀方程(RWEQ);时空变化;地理探测器;浑善达克地区

Spatiotemporal dynamics and drivers of wind erosion prevention service in Otindag from 1980 to 2018

HUANG Mengdong^{1,2}, XIAO Yu^{1,2,*}, QIN Keyu^{1,2}, GAN Shuang^{1,2}, XIE Gaodi^{1,2}, LIU Jingya^{1,2}, WANG Yangyang^{1,2}, NIU Yingnan^{1,2}, LIU Jia^{1,2}

1 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

Abstract: Wind erosion prevention service (WEPS) is a kind of protection services provided by ecosystems in arid and semi-arid regions, which is critical for protecting the ecological environment security of the soil erosion area and the surrounding area. Based on the Revised Wind Erosion Equation (RWEQ) model, this study simulated the spatiotemporal dynamics change of the WEPS and the soil retention rate. Then we used the Geodetector to analyze the independent contribution of natural and socio-economic factors including numerical variables and type variables to the spatial distribution of the WEPS. Also including the influence of the interaction between these factors on the spatial pattern of the WEPS in Otindag from 1980 to 2018. The results indicated that (1) from 1980 to 2018, the wind speed decline in the Otindag area,

基金项目:国家自然科学基金项目(41971272)

收稿日期:2021-10-12; 采用日期:2021-12-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiaoy@igsnrr.ac.cn

the implementation of eco-restoration policies such as area rotation grazing and grassland reseeding, combined with climate change suitable for vegetation growth, had improved the overall service capacity of the WEPS. The amount of wind erosion prevention per unit area decreased in fluctuations which was the minimum in 2015, with the number of 13.01 kg/m². At the same time, the average soil retention rate increased in fluctuations and reached a maximum in 2018 which was 94.28%; (2) The soil type, the number of livestock at the end of the year, the annual precipitation and the area of artificial afforestation were the main factors affecting the spatial distribution pattern of WEPS. When the above driving factors were in the Skeletal primitive soils, 52.84—86.86 million heads, 404.21 mm, and 5167 hm² respectively, the corresponding average amount of wind erosion prevention per unit area were the largest. Among them, the soil type played the most important role and its *q* value was 75.15%, while the *q* value of the number of livestock at the end of the year, the annual precipitation and the area of artificial afforestation were 25.20%, 24.16% and 21.11% respectively; (3) The interaction between the driving factors would amplify the impact of a single factor on the spatial distribution of WEPS in the Otindag. Among which, the interaction between soil type and other factors had a greater impact on the spatial changes of the WEPS than any single factor. Thus, the soil type became the most critical factor influencing the spatial distribution of the WEPS. On the other hands, even though the *q* value of average temperature was not as high as the soil type, it still made a significant difference on the WEPS spatial distribution because temperature could change the pattern of other driving factors. that could produce strongly indirect impact on the spatial distribution of WEPS. Therefore, under the effects of soil type and annual average temperature, the improvement of WEPS and the mitigation of the degree in wind erosion is closely related to the changes of annual average wind speed, precipitation and the spatial distribution change of other factors, such as the artificial afforestation area and the livestock at the end of year which are caused by the Ecological Protection and Construction Project on WEPS in Beijing-Tianjin area since 2000.

Key Words: wind erosion prevention service; RWEQ (Revised Wind Erosion Equation); spatiotemporal dynamics change; Geodetector; Otindag

风蚀是土壤颗粒在风力作用下侵蚀、搬运和堆积的过程,也是土地退化和荒漠化的主要原因^[1]。我国北方干旱半干旱地区是受风蚀现象影响较为严重的地区,是沙漠化防治的重点区域^[2]。防风固沙服务作为风蚀地区生态系统提供的一项重要防护型服务,对风蚀发生地与周边地区风沙灾害治理、生态环境恢复具有重要意义。浑善达克地区位于我国内蒙古高原干旱半干旱地区,是我国北方农牧交错带,生态环境脆弱,腹地有浑善达克沙地,是京津地区风沙主要来源地^[2-3]。2000 年以来,随着京津风沙源治理工程、三北防护林工程、退耕还林还草、退牧禁牧政策的实施,浑善达克地区生态系统状况呈现改善趋势,防风固沙服务供给能力也有一定的提升,风蚀现象有所好转^[4-6]。然而,气候变化、人类活动与生态系统之间频繁的相互影响,使得环境敏感区的生态系统结构并不稳定,其提供的生态系统服务也相对有限^[7-8]。因此,开展长时间序列的浑善达克地区防风固沙服务时空变化及驱动因素分析对于区域生态系统恢复以及生态建设、土地管理具有重要意义。

防风固沙服务一般通过潜在风蚀量和实际风蚀量之差计算获得。潜在风蚀量和实际风蚀量可通过实地观测和模型模拟确定^[9-12]。Hu 等^[9]利用¹³⁷Cs 和²¹⁰Pb 示踪法模拟浑善达克南部地区的风蚀状况。然而,这种方法需要花费巨大的人力、物力,且仅能代表风蚀测定样点小范围的结果,难以用于区域风蚀量确定。基于模型的风蚀量估算能显著提高计算效率,且可用于大面积区域的风蚀量计算^[13-14]。修正风蚀方程模型 (Revised Wind Erosion Equation, RWEQ) 因子参数相对全面、模型构成较为简单、数据更易获取^[13-15],是应用最为广泛的防风固沙服务计算方法。目前,已经有较多基于 RWEQ 模型的防风固沙量的模拟研究。这些区域防风固沙服务模拟以多年研究为主^[16-18],以避免单个年份的气象数据带来的随机误差。Li 等^[19]基于 RWEQ 模型分析了 1990—2015 年我国西北干旱地区土地利用变化对防风固沙服务的影响。徐洁等^[20]和张

彪等^[4]利用 RWEQ 分别分析了防风固沙型重点生态功能区的防风固沙服务能力和京津风沙源工程对防风固沙服务产生的效益。王俊枝等^[21]通过 RWEQ 模型模拟了内蒙古自治区境内的浑善达克生态功能区 1990—2015 年防风固沙服务的时空分布特征。长时间序列的防风固沙服务模拟有助于全面分析一个区域防风固沙服务的真实状况及其时空格局变化,但现有的研究主要集中在 1990 年以后的长时间序列,更长时间序列的研究还不多见。

由于风蚀现象受到自然和人为等多种因素综合作用影响,开展防风固沙影响因素分析可以为提高防风固沙服务提供科学依据。目前,大部分研究采用线性相关性模型^[22—24]、结构方程模型^[25]、约束效应^[26—27]等方法分析植被覆盖度、风速、降水、畜牧业发展、土地利用等因素与防风固沙服务之间的关系^[28—29]。关于浑善达克地区防风固沙服务驱动因素的分析相对较少。申陆等^[24]通过主成分分析法探究浑善达克生态功能区单位面积防风固沙量变化的驱动因素。高晓霞等^[23]则通过 Logistic 回归模型探究浑善达克沙地动态变化的驱动因素。虽然上述研究为探讨防风固沙服务时空格局变化机制提供很好的参考,但多数研究为时间序列的研究,而且忽略了多因素之间的共同作用对防风固沙服务的影响。从空间分布格局变化的角度探究防风固沙服务变化驱动机制的研究也相对较少,类型变量对防风固沙服务的影响也难以衡量。

地理探测器是一种基于空间分异性,揭示某一变量驱动机制的空间统计学方法^[30],它能够在探测类型与数值两种不同属性的变量对因变量空间分布影响的同时,分析自变量两两之间的交互作用及具体作用类型。目前,在资源环境、社会经济等多领域的空间格局变化过程分析中得到了广泛的应用^[31—34],但用于分析防风固沙驱动因素的研究还较少。应用地理探测器分析防风固沙服务空间格局变化的驱动因素,能够兼顾类型变量与数值变量对服务变化的影响,分析各因素之间的相互作用,弥补防风固沙服务空间分布驱动因素分析方面的不足。

因此,本研究以浑善达克重点生态功能区为例,通过 RWEQ 模型模拟 1980—2018 年防风固沙服务的时空变化趋势,利用地理探测器开展防风固沙服务空间变化的驱动因素分析,为浑善达克地区生态建设与恢复以及土地管理提供科学依据。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

浑善达克地区(40.7°N—45.5°N, 111.1°E—118.5°E)地处我国内蒙古高原中段,总面积 16.39 万 km²,跨越内蒙古自治区与河北省。该区空间范围依据国家重点功能区中的浑善达克沙漠化防治生态功能区范围划定,包括内蒙古 8 旗 1 县(克什克腾旗、阿巴嘎旗、苏尼特左旗、苏尼特右旗、太仆寺旗、镶黄旗、正镶白旗、正蓝旗、多伦县)与河北省 6 县(丰宁满族自治县、围场满族蒙古族自治县、张北县、康保县、沽源县、尚义县)(图 1)。浑善达克地区地势西南高、东北低,平均海拔 1300 m。该地区属于中纬度干旱、半干旱大陆性季风气候,年平均气温 0—3℃,大部分地区年降水量在 250—400 mm,年平均相对湿度为 60%。春秋季风沙多,年均风速为 4—5 m/s,最大风速普遍在 24—28 m/s,年大风日数(>8 级)大约 60—80 d。草地为主要的土地覆被类型,自东向西依次为草甸、草原、荒漠草原;土壤类型为栗钙土、棕钙土,非地带性土壤为风沙土。浑善达克地区整体生态环境脆弱,是我国北方重要生态屏障之一,同时也是京津地区主要沙源地,沙漠化是该地区主要的生态问题。针对土地退化、沙漠化等问题,2000 年以来,开始在浑善达克地区实施京津风沙源治理工程,2010 年浑善达克地区被列为国家沙漠化防治生态功能区。在各类生态工程支持下,浑善达克地区通过围栏封育、划区轮牧、草地补播等措施实施草地恢复与治理,沙漠化趋势逐渐减缓^[35]。

1.2 数据来源

本研究使用的数据年份为 1980 年、1990 年、1995 年、2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2018 年。20—20 时日累计降水量、日均温、10 m 处日均风速等气象日值数据来自中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn/>)。土壤质地数据来自第二次全国土地调查,中国科学院南京土壤研究所提供的 1:100 万土壤数据。

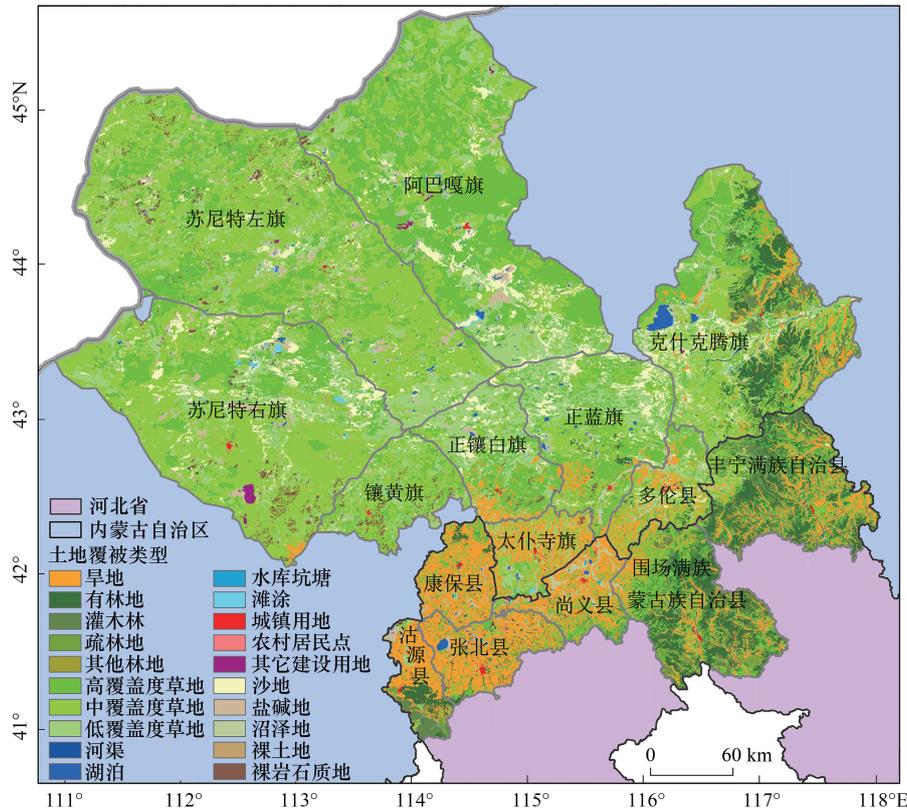


图1 研究区地理位置

Fig.1 Location of study area

雪盖数据来源于寒区旱区科学数据中心 (<http://bdc.casnw.net>) 的“中国雪深长时间序列数据集(1979—2018年)”,空间分辨率为 0.25°。2000 年之前的归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)数据来源于 GIMMS NDVIg3 数据集,在 Google Earth Engine 上进行图像计算和提取等处理;2000 年之后的 NDVI 数据(分辨率为 1 km)、全国土地利用/覆被数据(空间分辨率为 30 m)、GDP 空间分布数据(分辨率为 1 km)、1:100 万地貌类型、1:100 万土壤类型、1:100 万植被类型数据,以及 30 m 高程数据均在中国科学院资源环境科学数据中心 (<https://www.resdc.cn>) 下载。路网数据来源于 OpenStreetMap (<https://www.openstreetmap.org>)。本研究所使用的年粮食播种面积、年粮食产量、年肉类产量、年末牲畜数量均来自各旗县及其所属盟、市的相关年份的统计年鉴并求得多年平均值,人工造林面积数据从《中国林业统计年鉴》中获取。在模型运算过程中,本研究所用栅格数据均采用 Krasovsky_1940_Albers 投影,并统一重采样为 30 m 分辨率。

2 研究方法

2.1 防风固沙服务物质质量模拟

在充分考虑气候、地形、土壤理化性质以及植被覆盖等因素后,本研究采用修正风蚀方程 RWEQ(Revised Wind Equation)模型,定量模拟浑善达克地区风蚀量的时空动态变化。根据 RWEQ 模型以及国内实际情况进行参数的调整^[13, 36—38],计算公式如下:

$$SL = \frac{2z}{s^2} Q_{\max} \times e^{-\left(\frac{z}{s}\right)^2} \tag{1}$$

$$Q_{\max} = 109.8(WF \times EF \times SCF \times K' \times C) \tag{2}$$

$$s = 150.71(WF \times EF \times SCF \times K' \times C)^{-0.3711} \tag{3}$$

$$SR = \frac{2z}{s_r^2} Q_{rmax} \times e^{-\left(\frac{z}{s_r}\right)^2} \quad (4)$$

$$Q_{rmax} = 109.8(WF \times EF \times SCF \times K') \quad (5)$$

$$s_r = 150.71 (WF \times EF \times SCF \times K')^{-0.3711} \quad (6)$$

$$G = SR - SL \quad (7)$$

式中, SL 为实际风蚀量 ($\text{kg m}^{-2} \text{a}^{-1}$); Q_{rmax} 为实际风力的最大输沙能力 (kg/m); s 表示实际关键地块长度 (m); SR 表示潜在风蚀量 ($\text{kg m}^{-2} \text{a}^{-1}$); Q_{rmax} 表示潜在风力的最大输沙能力 (kg/m); s_r 表示潜在关键地块长度 (m); G 为防风固沙的物质质量 ($\text{kg m}^{-2} \text{a}^{-1}$); z 为所计算的下风向距离 (m), 本次计算取 50 m ; WF 表示气候因子 (kg/m); EF 为土壤可蚀性成分 (无量纲); SCF 表示土壤结皮因子 (无量纲); K' 表示地表糙度因子 (无量纲); C 表示植被因子 (无量纲)。

(1) 气候因子 WF

气候因子主要考虑了降水、气温、风速、雪盖等自然因素影响下风力对土壤的搬运能力, 其中, 风力因子为气候因子中风速数据的相关计算, 主要计算公式如下:

$$WF = Wf \times (\rho/g) \times SW \times SD \quad (8)$$

$$Wf = u_2 (u_2 - u_1)^2 \times Nd \quad (9)$$

式中, WF 为气候因子 (kg/m); Wf 为风力因子 (m/s^3); g 为重力加速度 (m/s^2); ρ 为空气密度 (kg/m^3); SW 为土壤湿度因子; SD 为雪盖因子 (无积雪覆盖天数/研究总天数), 定义雪盖深度 $< 25.4 \text{ mm}$ 时为无积雪覆盖; u_1 为 2 m 处起沙风速, 取 5 m/s ; u_2 为由 10 m 转换为 2 m 处的月均风速值 (m/s); Nd 为各月风速大于 5 m/s 的天数。

(2) 土壤可蚀性因子 EF 、土壤结皮因子 SCF

土壤可蚀性因子与土壤结皮因子分别表示在一定理化条件下土壤受风蚀影响的程度与土壤结皮抵抗风蚀能力的大小, 二者的表达式分别为:

$$EF = \frac{29.09 + 0.31sa + 0.17si + 0.33(sa/cl) - 2.59OM - 0.95 \text{CaCO}_3}{100} \quad (10)$$

$$SCF = \frac{1}{1 + 0.0066 (cl)^2 + 0.021 (OM)^2} \quad (11)$$

土壤质地数据为国际标准, 采用对数正态分布模型将土壤粒径转换为 RWEQ 模型需要的美国标准。其中, sa 为土壤粗砂含量 (%); si 为土壤粉砂含量 (%); cl 为土壤粘粒含量 (%); OM 为土壤有机质含量 (%); CaCO_3 为碳酸钙含量 (%), 本研究中取 0 。

(3) 植被因子 C

植被因子表示一定的植被条件对风蚀的抑制程度。

$$C = e^{-0.0483(SC \times 100)} \quad (12)$$

$$SC = (NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}) \quad (13)$$

式中, SC 为植被覆盖度 (%), $NDVI$ 、 $NDVI_{max}$ 、 $NDVI_{min}$ 分别为 $NDVI$ 的实际值、最大值和最小值。

(4) 地表粗糙度因子 K'

地表糙度因子用于模拟地表粗糙程度对风蚀的影响因子。

$$K' = \cos \alpha \quad (14)$$

式中, α 为坡度, 由 30 m 的 DEM 数据经过 ArcGIS 的 slope 模块计算得到。

2.2 防风固沙服务保有率模拟

RWEQ 模型计算的防风固沙量受降水、风场强度等气候变化的影响较大, 不能准确地评估生态系统自身防风固沙的效果。通过计算防风固沙服务保有率能够避免气候因素对服务功能的影响, 进一步分析防风固沙

服务能力。防风固沙服务功能保有率计算公式为:

$$F = \frac{G}{SR} \quad (15)$$

式中, F 表示防风固沙服务功能保有率; G 为防风固沙量 ($\text{kg m}^{-2} \text{a}^{-1}$); SR 为潜在风蚀量 ($\text{kg m}^{-2} \text{a}^{-1}$)。

2.3 防风固沙服务变化趋势分析

本研究采用最小二乘法线性拟合函数分析浑善达克地区防风固沙服务物质质量 1980—2018 年的变化趋势及其空间分布变化。据 1980—2018 年重大生态工程与生态建设实施的年份为关键节点,在栅格尺度上分析 1980—2018 年、1980—2000 年、2000—2010 年以及 2010—2018 年四个时间段浑善达克地区防风固沙服务物质质量变化趋势及空间分布特征。

$$\text{Trend} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times v_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n v_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left[\sum_{i=1}^n i \right]^2} \quad (16)$$

式中, Trend 为防风固沙服务物质质量或保有率的变化趋势; n 为研究总年数; v_i 为第 i 年防风固沙服务物质质量年均值。Trend > 0, 表明防风固沙能力呈增加趋势; Trend < 0, 表明防风固沙能力呈下降趋势。

2.4 防风固沙服务驱动因素分析

2.4.1 地理探测器

地理探测器主要包括 4 个探测工具:因子探测、风险区探测、生态探测、交互作用探测^[30]。

(1) 因子探测器通过层内方差之和 (Within Sum of Squares, SSW) 与全区总方差 (Total Sum of Squares, SST) 计算各探测因子对防风固沙服务物质质量空间分异的解释力,用 q 值度量,计算公式如下:

$$q = 1 - \frac{\text{SSW}}{\text{SST}} = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (17)$$

式中, $h = 1, 2, \dots, L$ 为防风固沙服务物质质量或影响因子的分层; N_h 和 N 分别为各层和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别为各层和全区的防风固沙服务物质质量的方差。 q 值越大,相应的影响因子对防风固沙服务物质质量空间分异的解释力越大。

(2) 风险区探测用于判断两个影响因子的子区域间的防风固沙物质质量均值是否有显著差别,并通过 t 统计量来检验:

$$t = \frac{\bar{Y}_{h=1} - \bar{Y}_{h=2}}{\left[\frac{\text{Var}(\bar{Y}_{h=1})}{n_{h=1}} + \frac{\text{Var}(\bar{Y}_{h=2})}{n_{h=2}} \right]^{1/2}} \quad (18)$$

式中, \bar{Y}_h 为子区域 h 内防风固沙物质质量均值; n_h 为子区域 h 内的样本数量; Var 表示方差。

(3) 生态探测通过统计量 F 评估两个影响因子 X_1 与 X_2 对防风固沙物质质量空间分异的影响是否显著:

$$F = \frac{N_{X_1}(N_{X_2} - 1) \text{SSW}_{X_1}}{N_{X_2}(N_{X_1} - 1) \text{SSW}_{X_2}} = \frac{N_{X_1}(N_{X_2} - 1) \sum_{h=1}^{L_1} N_h \sigma_h^2}{N_{X_2}(N_{X_1} - 1) \sum_{h=1}^{L_2} N_h \sigma_h^2} \quad (19)$$

式中, N_{X_1} 与 N_{X_2} 分别为影响因子 X_1 与 X_2 的样本数目, SSW_{X_1} 和 SSW_{X_2} 分别表示对应影响因子分层的层内方差之和; L_1 与 L_2 表示影响因子 X_1 与 X_2 的分层数目。

(4) 交互探测能够判断不同影响因子的共同作用对防风固沙服务物质质量的解释力的整体影响(增加、减弱或相互独立)。通过比较影响因子 X_1 与 X_2 对防风固沙物质质量各自作用与交互作用的 q 值 ($q(X_1)$ 、 $q(X_2)$ 、 $q(X_1 \cap X_2)$) 大小,将交互作用分为 5 类(表 1)。

2.4.2 基于地理探测器的驱动因素分析

防风固沙服务物质量的变化同时受到气候、土壤、植被类型等自然因素和退牧、禁牧等人类活动的影响。基于 RWEQ 模型以及防风固沙服务或其他服务驱动因素研究中所涉及的驱动因素的出现频率和研究结果^[23, 26, 29, 39],本研究选取地貌类型、年降水量、土壤类型等 11 类自然因素和单位面积国内生产总值(Gross Domestic Product, GDP)、人口密度等 9 类社会经济因素作为探测因子,分析浑善达克地区 2000、2005、2010、2015、2018 年和 1980—2018 年年均防风固沙服务物质量变化的驱动因素(表 2)。基于浑善达克当地的实际情况以及数据的不同类型,本研究将浑善达克的地貌类型、土壤类型、植被类型分别分为 4 类(平原、台地、丘陵、山地)、7 类(针叶林、阔叶林、灌丛、荒漠、草原、草丛和草甸、栽培植被)、7 类(淋溶土、半淋溶土、钙层土、干旱土、初育土、半水成土、水成土、盐碱土),数值类变量利用 ArcGIS 中的自然间断法,将人口密度、单位面积 GDP 分为 4 类,其余变量分为 10 类,分析 2000—2018 年浑善达克地区单位面积防风固沙量时空变化的驱动因素。

表 1 地理探测器交互作用类型

Table 1 Geographical detector interaction types

交互作用 Interaction types	依据 Foundation
非线性减弱 Weaken, nonlinear	$q(X1 \cap X2) < \min(q(X1), q(X2))$
单因子非线性减弱 Weaken, uni-	$\min(q(X1), q(X2)) < q(X1 \cap X2) < \max(q(X1), q(X2))$
双因子增强 Enhance, bi-	$q(X1 \cap X2) > \max(q(X1), q(X2))$
非线性增强 Enhance, nonlinear	$q(X1 \cap X2) > q(X1) + q(X2)$
独立 Independent	$q(X1 \cap X2) = q(X1) + q(X2)$

表 2 探测因子指标

Table 2 Detecting factor indicators

类型 Type	探测因子 Detecting factor	指标 Indicator	单位 Unit	类型 Type	探测因子 Detecting factor	指标 Indicator	单位 Unit
自然因素 Natural factor	X1	高程	m	社会经济因素 Socioeconomic factor	X12	单位面积 GDP	万元/km ²
	X2	地貌类型	-		X13	人口密度	人/hm ²
	X3	坡度	°		X14	人工造林面积	hm ²
	X4	起伏度	°		X15	与道路的距离	-
	X5	年降水量	mm		X16	与城镇的距离	-
	X6	年均温	°C		X17	年粮食播种面积	hm ²
	X7	平均风速	m/s		X18	年粮食产量	t(吨)
	X8	植被类型	-		X19	年肉类产量	t(吨)
	X9	土壤类型	-		X20	年末牲畜数量	万头
	X10	NDVI	-				
	X11	植被覆盖度	-				

NDVI:归一化植被指数 Normalized Difference Vegetation Index;GDP:国内生产总值 Gross Domestic Product

3 结果分析

3.1 防风固沙服务时空动态变化

3.1.1 防风固沙量时空变化

根据浑善达克地区各年单位面积防风固沙量平均值(表 3),可以发现,1980—2018 年,浑善达克地区单位面积防风固沙量的变化范围为 13.01—22.90 kg m⁻² a⁻¹,防风固沙总量为 2.18×10¹²—3.81×10¹² kg/a。1980 年,浑善达克全区单位面积防风固沙量和总量均为最高,随后二者在一定范围内上下波动,其中,单位面积防风固沙量在 13.01—19.47 kg m⁻² a⁻¹之间变化,在 2018 年小幅度回升。相比于防风固沙总量,浑善达克地区潜在风蚀量和实际风蚀量有较大幅度的变化。1980 年潜在风蚀量最高,1990 年有较大幅度的下降,在

1995 年保持稳定,而在 2000 年又有较大幅度下降,之后一直保持稳定;1980—1995 年实际风蚀量基本保持稳定,在 2000 年有显著下降,之后保持稳定。

表 3 1980—2018 年浑善达克防风固沙服务及保有率年均值

Table 3 Average annual wind erosion prevention service and soil retention rate in Otindag from 1980 to 2018

年份 Year	单位面积潜在风蚀量 Potential wind erosion per unit area/ ($\text{kg m}^{-2} \text{a}^{-1}$)	单位面积实际风蚀量 Actual wind erosion per unit area/ ($\text{kg m}^{-2} \text{a}^{-1}$)	单位面积防风固沙量 Wind erosion prevented per unit area/ ($\text{kg m}^{-2} \text{a}^{-1}$)	防风固沙总量 Total wind erosion prevented/ (10^{12} kg/a)	年均保有率 Annual soil retention rate/%
1980	36.85	14.06	22.90	3.81	70.79
1990	23.97	9.23	14.74	2.47	72.48
1995	26.19	10.46	15.22	2.63	71.32
2000	18.00	2.49	16.04	2.68	89.11
2005	18.57	4.45	14.12	2.36	83.31
2010	19.28	3.36	15.93	2.67	89.49
2015	16.47	3.46	13.01	2.18	88.61
2018	21.58	2.12	19.47	3.26	94.28

空间上,浑善达克地区防风固沙服务总体表现为西北部荒漠、中部沙地以及南部林地普遍高于其他地区的空间分布格局(图 2)。其中,正蓝旗、正镶白旗、苏尼特左旗的单位面积防风固沙量较高,数值均在 $20 \text{ kg m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 以上;张北县、沽源县、康保县、尚义县单位防风固沙量较低,主要在 $4\text{—}10 \text{ kg m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 。此外,单位面积防风固沙量的高值区逐渐从中部偏东地区向西北地区移动。1980—2018 年,浑善达克地区防风固沙服务高值分布面积整体呈现波动减小的趋势。1980 年,高值区域($\geq 30 \text{ kg/m}^2$)面积最大,为 $4.63 \times 10^4 \text{ km}^2$;2005 年,面积缩减到最小,为 $2.14 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。此外,2015 年单位面积防风固沙量的极高值区域($\geq 40 \text{ kg/m}^2$)面积缩减到最小,仅为 $0.63 \times 10^4 \text{ km}^2$;而 2018 年区域面积又有所回弹,高值区域面积增长至 4.41 km^2 ,其中,极高值区域面积为 $1.85 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

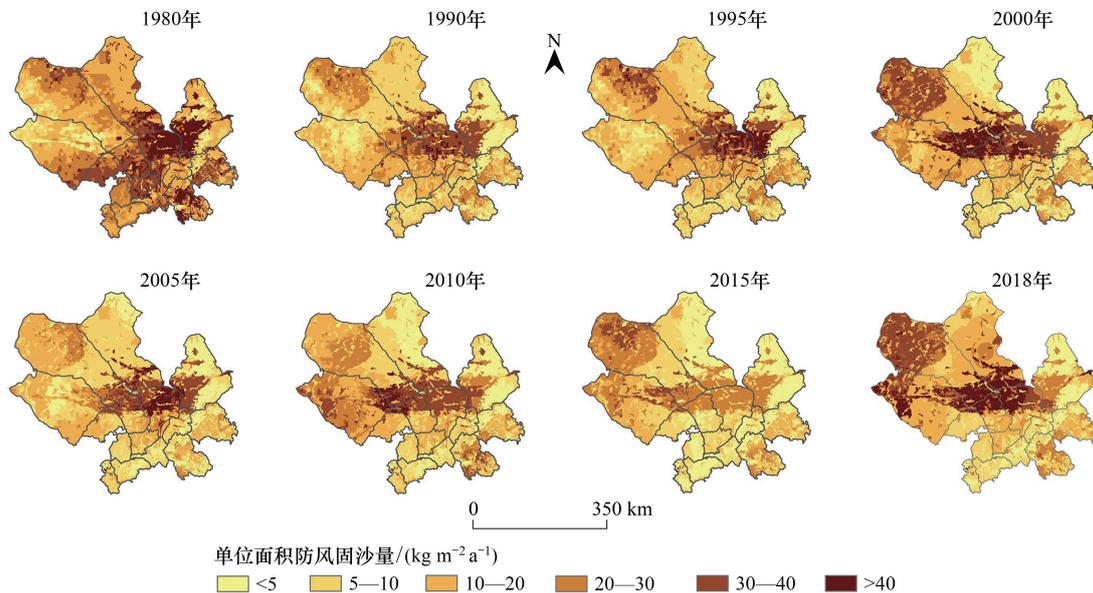


图 2 1980—2018 年浑善达克防风固沙量空间分布格局

Fig.2 The spatial pattern of wind erosion prevented amount of the Otindag during 1980—2018

综合 1980—2018 年浑善达克地区单位面积防风固沙量的结果,可以发现,38 年来浑善达克地区的风蚀程度有所好转,潜在风蚀与实际风蚀情况均有不同程度的下降,防风固沙总量也有小幅下降(表 3)。这可能与内蒙古地区风蚀发生的原动力(即风速)的变化,以及影响植被固沙作用的气候条件的不稳定有关,全球气

候变暖和内蒙古地区近 30 年来风速的减小缓解了浑善达克地区风蚀情况^[6, 19, 26]。本研究结果还显示,2000 年以来潜在风蚀量、实际风蚀量相比以前有显著下降并保持稳定,这与 2000 年以来退耕还林还草和京津风沙源治理工程的实施有较大关系^[35]。

3.1.2 防风固沙保有率时空变化

1980—2018 年,浑善达克地区防风固沙服务保有率自 1980 年的最低值 70.79%波动上升,至 2018 年达到最大值 94.28%(表 3)。其中,1980—1995 年,保有率变化幅度较小,保持在 70%左右,2000 年达到 89.11%后,出现一定程度的下降,2005—2018 年,防风固沙保有率以 83.31%为起点,大致呈现较为稳定的上升态势。

空间上,浑善达克地区防风固沙服务保有率整体呈现出自东南向西北递减的空间分布特征。东南部的丰宁满族自治县、围场满族蒙古族自治县和克什克腾旗保有率始终高于其他地区,西北部苏尼特左旗、苏尼特右旗的荒漠及中覆盖度草地地区的保有率则相对较低(图 3)。1980—2018 年,防风固沙服务保有率低值区(保有率<60%)逐渐向苏尼特右旗北部与中西部沙地边缘地区集中,且面积显著减小,其中,极低值区域(保有率<40%)面积自 1995 年开始显著减少。1980 年,低值区面积最大,以极低值区域为主,低值区面积为 $4.83 \times 10^4 \text{ km}^2$,包括极低值面积 $3.07 \times 10^4 \text{ km}^2$;2000 年,防风固沙服务保有率低值面积显著减小,而 2005 年,面积又扩大至 $3.06 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。值得注意的是,极低值的面积没有出现大幅度回升,且 2005 年之后的极低值面积变化都不大。2018 年,全区保有率低值区域面积最小,为 $0.19 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中,极低值区域面积仅为 $0.02 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

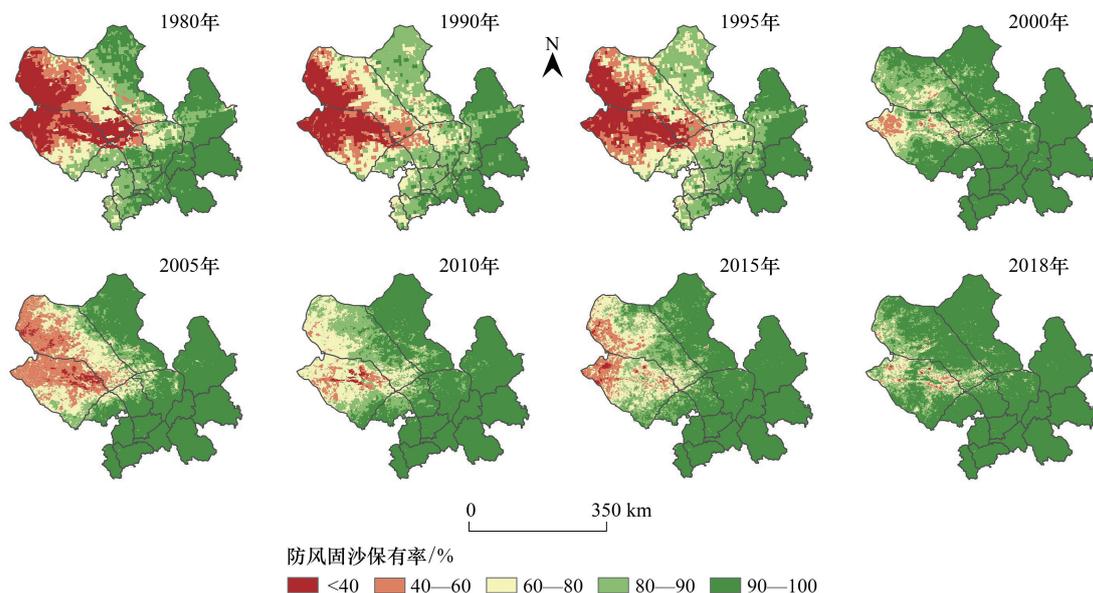


图 3 1980—2018 年浑善达克防风固沙保有率空间分布格局

Fig.3 The spatial pattern of soil retention rate of the Otindag during 1980—2018

整体来看,浑善达克地区防风固沙服务保有率整体显著提高,年平均保有率为 82.42%。尤其是 2000 年之后极低值区域面积的显著减少可能与 2000 年之后实行的京津风沙源治理工程、退耕还林还草等生态恢复工程相关,说明植被对风沙的抑制作用逐渐显著,生态恢复取得了初步的效果;而 2005 年,保有率的短暂性降低,可能与当年气候相对干旱,阻碍了植被的生长,削弱了防风固沙服务功能有关^[24, 40]。

3.2 防风固沙服务趋势变化

3.2.1 单位面积防风固沙服务变化趋势

总体而言,1980—2018 年浑善达克地区单位面积防风固沙量以 $0.43 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 的速度减少。其中,1980—2000 年、2000—2010 年,单位面积防风固沙量分别以 $1.38 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $1.04 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 的速度减少,2010—2018 年,单位面积防风固沙量则以 $1.77 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 的速度增加(表 4)。

表 4 不同时段浑善达克防风固沙量以及保有率年均变化趋势

Table 4 Change trend of average annual wind erosion prevented amount and soil retention rate of the Otindag in different period

时间 Time	单位面积防风固沙量 Wind erosion prevented per unit area/ (kg m ⁻² a ⁻¹)	防风固沙总量 Total of wind erosion prevented/ (10 ⁸ kg/a)	保有率 Soil retention rate/ (%/a)
1980—2018	-0.43	-721.91	3.46
1980—2000	-1.38	-2308.73	6.29
2000—2010	-1.04	-1511.18	-1.34
2010—2018	1.77	2965.82	2.39

空间格局的变化趋势上来看,1980—2018 年,浑善达克大部分地区单位面积防风固沙量表现为下降趋势,增加与显著增加区域集中在苏尼特左旗、苏尼特右旗,以及正镶白旗、正蓝旗和阿巴嘎旗的部分区域(图 4)。

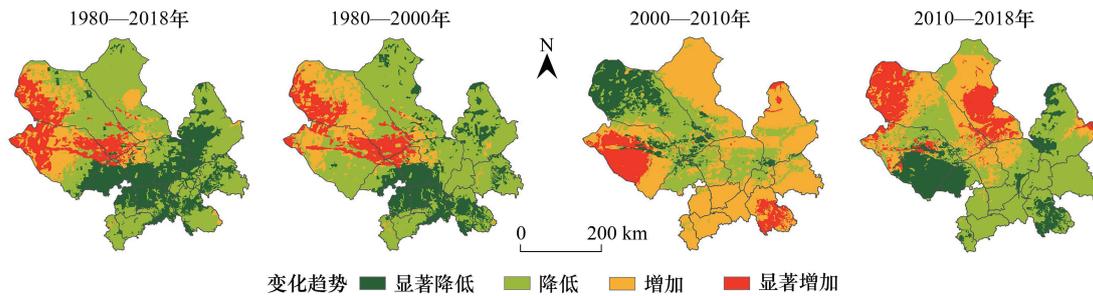


图 4 1980—2018 年各时段浑善达克单位面积防风固沙量年均空间变化趋势

Fig.4 Spatial change trend of average annual wind erosion prevented amount of the Otindag in different period between 1980 and 2018

1980—2000 年单位面积防风固沙量变化的整体空间格局与 1980—2018 年的整体格局大致相同(图 4),说明 2000 年以来浑善达克地区单位面积防风固沙量相对稳定。2000—2010 年除苏尼特左旗、浑善达克沙地及周边地区为降低或显著降低趋势外,大部分地区单位面积防风固沙量为增加或显著增加趋势(图 4)。2010—2018 年单位面积防风固沙量整体恢复下降的趋势,增加趋势集中区转移至苏尼特左旗北部、阿巴嘎旗以及浑善达克沙地地区(图 4)。在所有时段内,苏尼特右旗、苏尼特左旗以及浑善达克沙地地区单位面积防风固沙量均出现明显的增加趋势,防风固沙能力得到了稳定且连续的提高。

结合表 3 可以看出,1980—2000 年潜在风蚀与实际风蚀均呈波动减小趋势,2000—2010 年二者则基本保持稳定。两个时间段单位面积防风固沙量变化趋势呈现明显差异(图 4),可能由于 1980—2000 年风速显著下降,降水年际变化幅度大,风蚀动力减弱使得大部分地区单位面积防风固沙量为下降趋势;2000 年以后,风速基本保持稳定,降水增多促进了植被的自然恢复,使得大部分地区在 2000—2010 年单位面积防风固沙量为增加趋势(图 5)。

3.2.2 防风固沙保有率变化趋势

1980—2018 年浑善达克地区防风固沙保有率以 3.46%/a 的速度增加(表 4)。其中,1980—2000 年增速较快,为 6.29%/a;2000—2010 年转变为减小趋势且速度相对较慢,为 -1.34%/a;2010—2018 年保有率恢复增加趋势,为 2.39%/a。

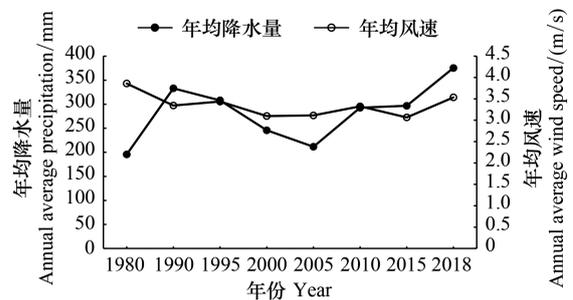


图 5 1980—2018 年年均降水量与年均风速变化

Fig.5 Changes in annual average precipitation and wind speed from 1980 to 2018

1980—2018 年浑善达克地区防风固沙服务保有率总体呈现增加趋势,其中,西北荒漠地区及其与中部沙地过渡地区增加趋势显著(图 6)。以 2000 年、2010 年为时间节点,发现不同时段内,防风固沙保有率变化趋势明显不同:1980—2000 年浑善达克绝大部分地区保有率为增加趋势,其中,苏尼特右旗、苏尼特左旗以及正镶白旗为显著增加趋势;2000—2010 年以苏尼特右旗、苏尼特左旗、镶黄旗、正镶白旗为主的北部、中部地区呈现降低趋势,说明该时段内植被对防风固沙服务的影响减弱;2010—2018 年浑善达克防风固沙服务保有率又整体恢复增加趋势,但显著增加区域仅出现在苏尼特右旗中北部的小部分地区(图 6)。

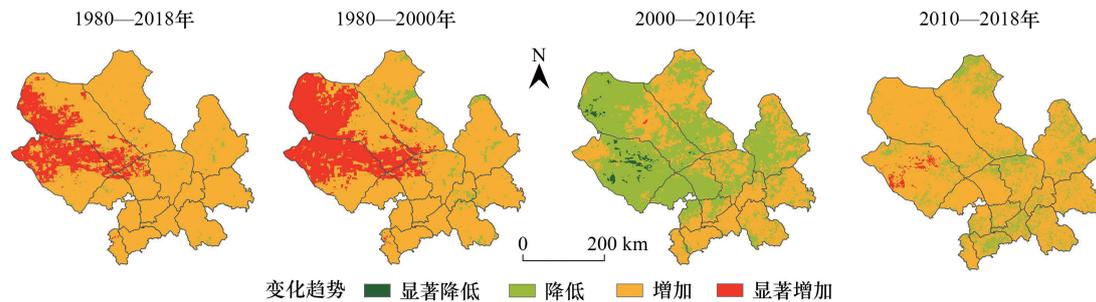


图 6 1980—2018 年各时段浑善达克防风固沙服务保有率年均空间变化趋势

Fig.6 Spatial change trend of average annual soil retention rate of the Otindag in different period between 1980 and 2018

由此可见,1980—2018 年浑善达克地区生态系统防风固沙服务能力有了较为显著的提高,在 2010 年之后,显著增加区域的大幅减少说明浑善达克地区生态系统防风固沙能力已经维持在一个相对稳定的状态。而 2000—2010 年,由于风速持续增加导致潜在风蚀量增加,在单位面积防风固沙量相对稳定的情况下,该时段内防风固沙服务保有率出现短暂下降。

3.3 防风固沙服务驱动因素分析

3.3.1 单因素作用分析

2000—2018 年多年平均的单因素作用结果显示,对防风固沙量空间变化的影响程度(即解释力 q 值)较大的探测因子,其影响程度由大到小依次为:土壤类型(75.15%)、年末牲畜数量(25.20%)、年降水量(24.16%)、人工造林面积(21.11%)、年粮食产量(18.96%)、年粮食播种面积(18.04%)、NDVI(16.80%)、植被覆盖度(16.74%)、年肉类产量(16.12%)、年均温(13.98%)、平均风速(11.10%)、高程(10.41%)(图 7)。综合 2000、2005、2010、2015、2018 年的探测结果,可以发现,土壤类型始终是防风固沙服务空间变化的主要驱动因素,且影响程度稳定在 70% 左右。同样影响较强且持续时间较长的因子还包括年降水量和平均风速,解释力分别在 24.16% 和 11.10% 左右。

由于自然环境与社会经济条件不同,各年份防风固沙量的主要影响因子也存在差异:2000 年退耕还林还草、京津风沙源治理等生态工程的实施,年粮食播种面积、年末牲畜数量以及人工造林面积对防风固沙服务空间变化的影响较强。相比于 2000 年,2005—2015 年年降水量与平均风速对防风固沙服务空间格局变化的影响程度有较为明显的增加,年降水量的影响相对稳定,解释力保持在 25% 左右;平均风速的影响程度则逐年增强。这可能与该时间段内年降水量相对稳定,风速的持续增强有关。2000—2018 年,由于退牧还草、划区轮牧、草地补播等生态工程的实施,浑善达克地区年末牲畜数量明显减少并在 2010 年后保持稳定,生态系统植被也有所恢复。因此,年末牲畜数量对防风固沙服务空间变化的影响程度逐年减弱,而 NDVI 和植被覆盖度的影响程度则有所增加。

如图 8 所示,单位面积防风固沙量均值随不同探测因子的分类数值的增加而发生不同的变化(探测因子分类间断值见表 5):单位面积防风固沙量均值随 NDVI、植被覆盖度、坡度、起伏度、人口密度、单位面积 GDP 的增加而波动下降。其中,植被覆盖度、NDVI 在第 3 分类处对应的单位面积防风固沙量均值最大,随后为明显的波动下降;而人口密度与单位面积 GDP 的持续增加,使单位面积防风固沙量均值呈现不同幅度的持续下降。

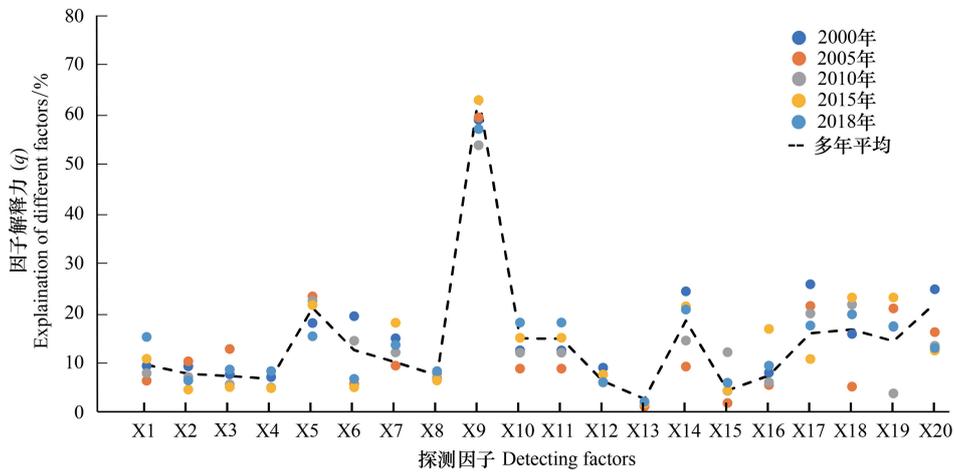


图 7 各年探测因子 q 值变化

Fig.7 q value of detecting factors in different year

X1: 高程 Digital Elevation Model (DEM); X2: 地貌类型 Geomorphic type; X3: 坡度 Slope; X4: 起伏度 Prominence; X5: 年降水量 Annual precipitation; X6: 年均温 Average annual temperature; X7: 平均风速 Average annual wind speed; X8: 植被类型 Vegetation type; X9: 土壤类型 Soil type; X10: 归一化植被指数 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI); X11: 植被覆盖度 Fractional Vegetation Cover (FVC); X12: 单位面积国内生产总值 Gross Domestic Product (GDP) per unit area; X13: 人口密度 Population density; X14: 人工造林面积 Artificial afforestation area; X15: 与道路的距离 Distance from the road; X16: 与城镇的距离 Distance from the town; X17: 年粮食播种面积 Annual total grain sown area; X18: 年粮食产量 Annual total grain production; X19: 年肉类产量 Annual total meat production; X20: 年末牲畜数量 Number of livestock at the end of the year

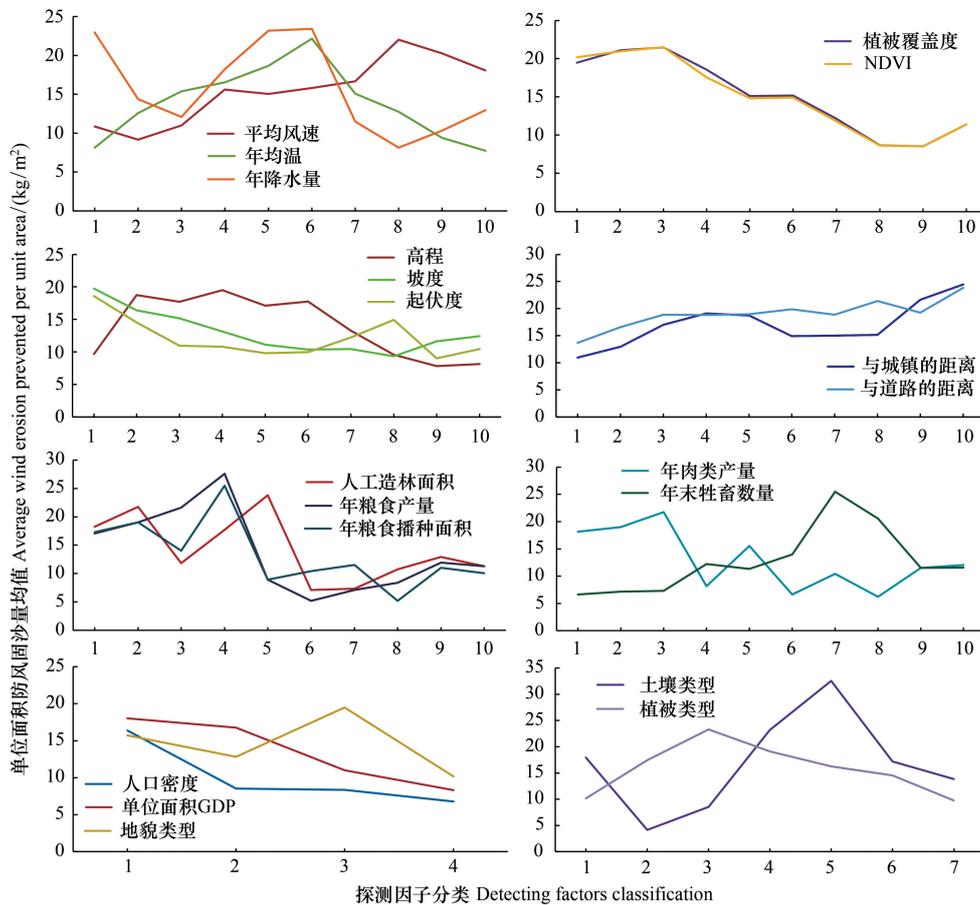


图 8 各探测因子单位面积防风固沙量均值变化

Fig.8 Change of average wind erosion prevented of different detecting factors

各探测因子分类具体间断值见表 5

<http://www.ecologica.cn>

表 5 各探测因子的分类间断值

探测因子	分类间断值 Classes break value									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
高程 DEM /m	814	988	1073	1154	1239	1323	1408	1508	1654	2215
地貌类型 Geomorphie type	平原	台地	丘陵	山地	—	—	—	—	—	—
坡度 Slope/°	1.91	3.52	5.47	7.90	10.89	14.40	18.45	23.32	29.97	72.60
起伏度 Prominence /°	4	10	17	24	31	38	46	56	72	264
年降水量 Annual precipitation /mm	177.71	203.18	230.55	263.00	300.42	333.52	366.43	404.21	454.19	557.22
年均温 Average annual temperature /°C	2.58	3.18	3.73	4.20	4.61	5.00	5.39	5.96	7.03	8.98
平均风速 Average annual wind speed / (m/s)	2.52	2.75	2.90	3.02	3.17	3.35	3.52	3.67	3.82	4.02
植被类型 Vegetation type	针叶林	阔叶林	灌丛	荒漠	草原	草丛、草甸	栽培植被	—	—	—
土壤类型 Soil type	淋溶土	半淋溶土	钙层土	干旱土	初育土	水成土	盐碱土	—	—	—
归一化植被指数 NDVI	0.21	0.27	0.33	0.39	0.46	0.54	0.62	0.69	0.77	0.88
植被覆盖度 Fractional Vegetation Cover	0.21	0.27	0.34	0.42	0.50	0.59	0.67	0.77	0.86	0.98
单位面积国内生产总值 GDP per unit area / (万元/km ²)	10	50	100	2718	—	—	—	—	—	—
人口密度 Population density / (人/hm ²)	0.3	0.5	3	85	—	—	—	—	—	—
人工造林面积 Artificial afforestation area / hm ²	1669	2074	3008	3831	5167	6408	8406	10855	11948	13339
与道路的距离 Distance from the road	0.02	0.06	0.10	0.13	0.15	0.19	0.22	0.25	0.29	0.36
与城镇的距离 Distance from the town	30550.83	50261.04	69971.26	89681.47	109391.68	131072.92	154725.17	180348.45	208928.26	251305.22
年粮食播种面积 Annual total grain sown area / hm ²	106	411	537	10944	35736	46923	54624	55335	56790	67519
年粮食产量 Annual total grain production / t	224	595	3424	16725	37433	97083	98962	115915	139364	197981
年肉类产量 Annual total meat production / t	7505	12571	14919	17783	22069	32743	41861	47258	51955	78726
年末牲畜数量 Number of livestock at the end of the year / 万头	7.57	9.88	22.83	23.64	28.68	33.78	39.88	72.00	96.46	108.28

单位面积防风固沙量均值随平均风速、与城镇的距离、与道路的距离的增加表现为波动上升的趋势。随着人工造林面积、年粮食产量、年粮食播种面积以及年肉类产量增加,单位面积防风固沙量均值变化较为一致,均为先波动增加,在某一分类处达到最大之后,出现显著下降,随后保持相对稳定的上下波动。

因此,在 17 类数值型驱动因素中,单位面积防风固沙量均值与平均风速、与城镇的距离、与道路的距离整体表现为正相关关系;与坡度、起伏度、人口密度、单位面积 GDP 大致表现为负相关关系;与植被覆盖度和 NDVI 表面为先缓慢增加,随后显著降低的关系。

在 2000—2018 年多年平均生态探测的结果中,年降水量、土壤类型、人口密度与其他所有影响因子之间均存在显著差异,年均温、NDVI、植被覆盖度、人工造林面积和肉类产量也与其他大部分影响因子之间存在显著性差异,(表 6)。结合因子探测的结果,可以判断土壤类型、年降水量、人工造林面积是影响浑善达克地区单位面积防风固沙量空间变化的两个最主要因素。

表 6 探测因子之间统计显著性

Table 6 Statistical significance between detecting factors

探测因子 Detecting factor	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14	X15	X16	X17	X18	X19	X20
X1																				
X2	N																			
X3	N	N																		
X4	Y	N	N																	
X5	Y	Y	Y	Y																
X6	Y	Y	Y	Y	Y															
X7	N	N	Y	Y	Y	N														
X8	N	N	N	N	Y	Y	N													
X9	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y												
X10	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y											
X11	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N										
X12	Y	N	N	N	Y	N	Y	N	Y	Y	Y									
X13	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y								
X14	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y							
X15	Y	Y	Y	N	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	Y	Y						
X16	N	N	N	N	Y	Y	N	N	Y	Y	Y	N	Y	Y	Y					
X17	Y	Y	Y	Y	Y	N	Y	Y	Y	N	N	Y	Y	Y	N	Y				
X18	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	N	Y	Y	N	N	Y	N			
X19	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	N	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y		
X20	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y

Y 表示两个因子之间具有统计学显著性差异(置信度为 95%);N 表示无显著性差异;X1, X2, ..., X20 表示探测因子,具体见表 1

3.3.2 多因素交互作用分析

根据多年平均交互探测器结果(表 7),发现各因子之间对浑善达克地区防风固沙服务的影响均存在增强型交互作用。除地貌类型、年均温、植被类型、与城镇的距离与其他大部分因子之间为非线性增强关系外,大部分因子与其他因子之间普遍存在双因子增强关系。土壤类型、年降水量、人工造林面积、牲畜数量与其他因子之间的双因子增强作用对防风固沙服务空间变化的影响程度较大。尤其是土壤类型与人工造林面积、粮食产量、粮食播种面积之间的双因子增强作用最强,对防风固沙量变化的影响程度(q 值)均达到最大值 82%。这说明土壤类型也加强了其他因素对防风固沙服务空间分布的影响程度。

而年均温与除地貌与土壤类型外的其他因子之间的非线性增强关系,在所有因子之间的非线性增强作用中对防风固沙服务空间变化的影响程度最高,在 30%左右。可以看出,尽管年均温对防风固沙服务空间变化的单因素作用的影响较弱,但通过改变区域自然环境状态或人类活动,使得两因子间的交互作用对防风固沙的影响水平高于二者单独作用之和,从而间接影响了防风固沙服务的空间变化。因此,年均温对防风固沙量的变化也存在较为重要的间接影响。

表 7 各因子之间交互作用类型与 q 值
 Table 7 Interaction type and q value between different detecting factors

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14	X15	X16	X17	X18	X19	X20
X1	0.10																			
X2	0.21*	0.08																		
X3	0.16	0.16*	0.08																	
X4	0.15	0.16*	0.08	0.07																
X5	0.34	0.34*	0.31	0.30	0.24															
X6	0.31*	0.22	0.22*	0.22*	0.44*	0.14*														
X7	0.21	0.24*	0.19*	0.19*	0.41*	0.38*	0.11*													
X8	0.19*	0.21*	0.19*	0.19*	0.33*	0.27*	0.21*	0.08*												
X9	0.78	0.77	0.76	0.76	0.80	0.79	0.80	0.77	0.75											
X10	0.22	0.26*	0.21	0.20	0.36	0.35*	0.25	0.29*	0.80	0.17										
X11	0.22	0.26*	0.21	0.20	0.36	0.35*	0.24	0.29*	0.80	0.17	0.17									
X12	0.15	0.18*	0.14*	0.14*	0.28	0.30*	0.19*	0.14	0.77	0.25*	0.25*	0.06								
X13	0.12	0.10	0.10	0.09	0.25	0.16*	0.12	0.09	0.76	0.17	0.17	0.07	0.02							
X14	0.31	0.29*	0.27	0.27	0.43	0.37*	0.31	0.33*	0.82	0.32	0.32	0.28*	0.22	0.21						
X15	0.14	0.14*	0.12	0.11	0.29*	0.23*	0.15*	0.12	0.77	0.19	0.32	0.09	0.05	0.24	0.04					
X16	0.21*	0.24*	0.17*	0.16*	0.39*	0.35*	0.24*	0.21*	0.79	0.26*	0.26*	0.23*	0.10	0.35*	0.13*	0.08				
X17	0.26	0.27*	0.24	0.23	0.36	0.38*	0.26	0.27*	0.82	0.31	0.31	0.19	0.18	0.27	0.20	0.34*	0.18			
X18	0.27	0.25	0.24	0.23	0.37	0.35*	0.26	0.26	0.82	0.32	0.32	0.20	0.19	0.27	0.21	0.34*	0.19	0.19		
X19	0.24	0.28*	0.22	0.22	0.40	0.39*	0.24	0.30*	0.81	0.23	0.23	0.25*	0.16	0.27	0.18	0.28*	0.27	0.27	0.16	
X20	0.30	0.34*	0.31	0.30	0.38	0.40*	0.30	0.34*	0.81	0.32	0.32	0.28	0.26	0.27	0.27	0.38*	0.26	0.27	0.27	0.25

* 为非线性增强 Enhance, nonlinear; 除 * 以外的为双因子增强 Enhance, bi-

4 结论

本研究采用修正风蚀模型模拟了浑善达克地区 1980—2018 年防风固沙服务及保有率的时空变化,以重大生态建设实施等年份为时间节点,分析不同时段内二者的变化趋势,并通过地理探测器探究年降水量、人口密度等 20 项自然与人为因子及因子之间的交互作用对该地区防风固沙服务空间格局变化的影响。结果表明:

(1)1980—2018 年,浑善达克地区风速的下降,划区轮牧、草地补播等生态恢复政策的实施,加之适宜植被生长的气候变化,使得防风固沙服务能力整体得到一定的提高,单位面积防风固沙量波动减少,防风固沙服务空间分布差距逐渐缩小;

(2)土壤类型、年末牲畜数量、年降水量、人工造林面积是造成浑善达克生态功能区防风固沙服务空间差异及分布变化的主要影响因素。分别在初育土、52.84—86.86 万头、404.21 mm、5167 hm²时,各自对应的单位面积防风固沙量均值最大。

(3)各驱动因素间的交互作用都会放大单因子对浑善达克地区防风固沙服务空间分布的影响。其中,土壤类型与其他因子的交互作用对防风固沙服务空间变化的影响,均大于单因子分别对防风固沙服务空间变化的影响,整体对防风固沙服务空间变化影响程度最大。

(4)年均温虽然对单位面积防风固沙量空间分布的影响较小,但当它与除地貌类型与土壤类型的其他因子共同作用时,对防风固沙服务空间变化影响均高于两个驱动因素各自对防风固沙服务的影响之和,对单位面积防风固沙量空间分布具有较强的间接影响作用。

5 讨论

在长时间序列下,浑善达克防风固沙重点生态功能区的防风固沙能力得到了一定程度的提高,风蚀程度有所缓解,单位面积防风固沙量高值区从中部、东部沙地向西北荒漠地区转移。特别是在 2000 年之后,防风固沙能力与单位面积防风固沙量均稳定在相对较低的区间范围内。结合地理探测器的分析结果,可以得出,1980—2018 年浑善达克生态功能区的上述变化,主要与该段时间内土壤类型,年均风速、年降水量、人工造林面积以及牲畜数量的时空格局变化有关。1980—2000 年,年均风速、年降水量等因素年际变化不稳定,京津风沙源治理工程尚未开始,是导致浑善达克地区防风固沙服务能力整体较弱,风蚀程度较高的主要原因。2000 年之后,围栏丰育、划区轮牧、草地补播等生态保护政策的实施,使得人工造林面积、牲畜数量在时空分布上较为稳定,加之年均风速、年降水量等气候条件促进植被恢复,使得浑善达克生态功能区防风固沙服务能力整体提高,区域间防风固沙服务能力的差异也逐渐缩小。此外,在各驱动因素的交互作用中,土壤类型的时空分布决定了区域内地理条件的差异,从而放大其他因子对防风固沙服务空间分布的影响,使二者对防风固沙服务分布的影响大于单因子影响但小于二者各自的影响之和。年均温能够影响除地貌类型和土壤类型外其他因子的时空分布,当年均温与其他因子共同作用于防风固沙服务空间分布时,其影响程度高于两个单因子独立的影响程度之和,具有较强的间接作用。

但是,两种以上因子之间的交互作用对防风固沙服务能力及时空变化的影响如何,周边地区对浑善达克生态功能区防风固沙服务是否产生影响,还需要进一步地深入研究,为浑善达克地区生态建设与生态恢复提供科学依据。

参考文献(References):

- [1] Ravi S, Zobeck T M, Over T M, Okin G S, D'odorico P. On the effect of moisture bonding forces in air-dry soils on threshold friction velocity of wind erosion. *Sedimentology*, 2006, 53(3): 597-609.
- [2] 赵哈林, 赵学勇, 张铜会, 周瑞莲. 北方农牧交错带的地理界定及其生态问题. *地球科学进展*, 2002, 17(5): 739-747.
- [3] 京津风沙源治理工程二期规划思路研究项目组. 京津风沙源治理工程二期规划思路研究. 北京: 中国林业出版社, 2013.

- [4] 张彪, 李庆旭, 王爽, 谢高地. 京津风沙源区防风固沙功能的时空变化及其区域差异. 自然资源学报, 2019, 34(5): 1041-1053.
- [5] 巩国丽, 要玲, 任丽霞, 段菲菲. 京津风沙源区生态保护与建设工程对防风固沙服务功能的影响. 水土保持通报, 2020, 40(5): 181-188, 2-2.
- [6] 黄麟, 吴丹, 孙朝阳. 基于规划目标的京津风沙源治理区生态保护与修复效应. 生态学报, 2020, 40(6): 1923-1932.
- [7] Hua T, Zhao W W, Cherubini F, Hu X P, Pereira P. Sensitivity and future exposure of ecosystem services to climate change on the Tibetan Plateau of China. *Landscape Ecology*, 2021, 36(12): 3451-3471.
- [8] You N S, Meng J J, Zhu L K. Sensitivity and resilience of ecosystems to climate variability in the semi-arid to hyper-arid areas of Northern China: a case study in the Heihe River Basin. *Ecological Research*, 2018, 33(1): 161-174.
- [9] Hu Y F, Zhang Y Z. Using ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ to investigate the soil erosion and accumulation moduli on the southern margin of the Hunshandake Sandy Land in Inner Mongolia. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(10): 1655-1669.
- [10] Fukuyama T, Onda Y, Takenaka C, Walling D E. Investigating erosion rates within a Japanese cypress plantation using Cs-137 and Pb-210_{ex} measurements. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2008, 113(F2): F02007.
- [11] 张扬, 田美荣, 陈艳梅, 冯朝阳, 吕田田. 基于 RWEQ 模型的磴口县沙地与耕地风蚀评价及验证. 干旱区资源与环境, 2021, 35(9): 95-102.
- [12] 郭树江, 杨自辉, 王多泽, 王强强, 张剑挥, 张大彪, 詹科杰, 李易珺. 石羊河流域下游青土湖近地层风尘分布特征. 干旱区地理, 2016, 39(6): 1255-1262.
- [13] Fryrear D W, Bilbre J D, Saleh A, Schomberg H, Stout J E, Zobeck T M. RWEQ: improved wind erosion technology. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 55(2): 183-189.
- [14] Wagner L E. A history of wind erosion prediction models in the United States department of agriculture: the wind erosion prediction system (WEPS). *Aeolian Research*, 2013, 10: 9-24.
- [15] Coulibaly L K, Guan Q F, Assoma T V, Fan X, Coulibaly N. Coupling linear spectral unmixing and RUSLE2 to model soil erosion in the Boubo coastal watershed, Côte d'Ivoire. *Ecological Indicators*, 2021, 130: 108092.
- [16] 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.
- [17] Zhang H B, Gao Y, Sun D F, Liu L L, Cui Y Z, Zhu W J. Wind Erosion changes in a semi-arid sandy area, Inner Mongolia, China. *Sustainability*, 2019, 11(1): 188.
- [18] Zhang H B, Peng J, Zhao C N, Xu Z H, Dong J Q, Gao Y. Wind speed in spring dominated the decrease in wind erosion across the Horqin Sandy Land in northern China. *Ecological Indicators*, 2021, 127: 107599.
- [19] Li D J, Xu E Q, Zhang H Q. Influence of ecological land change on wind erosion prevention service in arid area of Northwest China from 1990 to 2015. *Ecological Indicators*, 2020, 117: 106686.
- [20] 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.
- [21] 王俊枝, 常屹冉, 匡文慧, 迟文峰, 张润科, 付粉娥, 嘎毕日. 浑善达克沙漠化防治重点生态系统功能区防风固沙功能动态特征分析. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2018, 54(3): 348-356.
- [22] 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.
- [23] 高晓霞, 温璐, 刘华民, 梁存柱, 刘东伟, 卓义, 清华, 李智勇, 王立新. 基于 Logistic 回归模型的浑善达克沙地动态及其驱动力分析. 内蒙古大学学报: 自然科学版, 2016, 47(6): 625-634.
- [24] 申陆, 田美荣, 高吉喜, 钱金平. 浑善达克沙漠化防治生态功能区防风固沙功能的时空变化及驱动力. 应用生态学报, 2016, 27(1): 73-82.
- [25] Jiang C, Yang Z Y, Wang X C, Dong X L, Li Z Y, Li C Y. Examining the reversal of soil erosion decline in the hotspots of sandstorms: a non-linear ecosystem dynamic perspective. *Journal of Arid Environments*, 2021, 186: 104421.
- [26] Jiang C, Liu J G, Zhang H Y, Zhang Z D, Wang D W. China's progress towards sustainable land degradation control: insights from the northwest arid regions. *Ecological Engineering*, 2019, 127: 75-87.
- [27] Lyu X, Li X B, Wang H, Gong J R, Li S K, Dou H S, Dang D L. Soil wind erosion evaluation and sustainable management of typical steppe in Inner Mongolia, China. *Journal of Environmental Management*, 2021, 277: 111488.

- [28] Aubault H, Webb N P, Strong C L, McTainsh G H, Leys J F, Scanlan J C. Grazing impacts on the susceptibility of rangelands to wind erosion: the effects of stocking rate, stocking strategy and land condition. *Aeolian Research*, 2015, 17: 89-99.
- [29] 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.
- [30] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.
- [31] Polykretis C, Alexakis D D. Spatial stratified heterogeneity of fertility and its association with socio-economic determinants using geographical detector: the case study of Crete Island, Greece. *Applied Geography*, 2021, 127: 102384.
- [32] Shi T Z, Hu X J, Guo L, Su F Z, Tu W, Hu Z W, Liu H Z, Yang C, Wang J Z, Zhang J, Wu G F. Digital mapping of zinc in urban topsoil using multisource geospatial data and random forest. *Science of the Total Environment*, 2021, 792: 148455.
- [33] Tian F, Liu L Z, Yang J H, Wu J J. Vegetation greening in more than 94% of the Yellow River Basin (YRB) region in China during the 21st century caused jointly by warming and anthropogenic activities. *Ecological Indicators*, 2021, 125: 107479.
- [34] 陈宽, 杨晨晨, 白力嘎, 陈瑜, 刘锐, 潮洛濛. 基于地理探测器的内蒙古自然和人为因素对植被 NDVI 变化的影响. *生态学报*, 2021, 41(12): 4963-4975.
- [35] 同丽嘎, 宁小莉, 张靖, 张雪峰. 近 30a 浑善达克沙地沙漠化时空演变特征及驱动机制研究. *干旱区地理*, 2021, 44(4): 992-1002.
- [36] 郭中领. RWEQ 模型参数修订及其在中国北方应用研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2012.
- [37] 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. *水土保持通报*, 2018, 38(2): 271-274, 280-280.
- [38] 巩国丽. 中国北方土壤风蚀时空变化特征及影响因素分析[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- [39] 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.
- [40] Gong G L, Liu J Y, Shao Q Q, Zhai J. Sand-fixing function under the change of vegetation coverage in a wind erosion area in Northern China. *Journal of Resources and Ecology*, 2014, 5(2): 105-114.