DOI: 10.20103/j.stxb.202304060691

王国宇,李晶,张娅.无定河流域防风固沙服务流动模拟.生态学报,2024,44(6):2323-2336. Wang G Y, Li J, Zhang Y.Simulation and assessment of sand fixation service in the Wuding River Basin, China. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(6): 2323-2336.

无定河流域防风固沙服务流动模拟

王国宇,李 晶*,张 娅

陕西师范大学地理科学与旅游学院,西安 710119

摘要:无定河流域包括毛乌素沙漠部分区域,土壤风蚀显著,研究防风固沙服务有利于保持土壤、保护生态环境与维持良好的人 地关系。利用 RWEQ(Revised Wind Erosion Equation)模型与 HYSPLIT(Hybrid Single-Particle Langrangian Integrated Trajectory Model)模型模拟无定河流域 2000年、2005年、2010年、2015年以及 2018年的土壤风蚀量以及防风固沙服务流的时空变化,并 分析受益人口与 real GDP。结果表明:(1)2000年至 2018年无定河流域风蚀总量与防风固沙量呈"降低-增加-降低"的波动变 化整体下降的趋势,在空间分布上,无定河流域西部及西北部沙地土壤风蚀较为剧烈,东部及东南部的旱地土壤风蚀较为缓和; (2)2000年至 2018年防风固沙服务流动路径模拟总数分别为 494条、504条、537条、482条与 437条,整体上呈降低的趋势,受 益区主要分布于我国的中部及东部地区以及俄罗斯、韩国等周边国家;(3)2000年至 2018年防风固沙服务全国受益人口与受 益 real GDP 均占据总数一定比例;(4)无定河流域防风固沙服务物质流以陕西北部、山西西部地区为中心呈圈层状递减,影响 范围扩散到了东亚和东南亚等国家和地区。结果模拟了无定河流域土壤风蚀以及防风固沙服务流,为服务供给区和受益区之 间的生态补偿提供科学依据,对植被恢复与防风固沙具有一定的参考作用,可为其他流域的防风固沙服务流动模拟和整个三北 地区的防风固沙生态工程的规划、建设、评估提供重要的科学参考。

关键词:生态系统服务流;防风固沙服务;RWEQ;HYSPLIT;无定河流域

Simulation and assessment of sand fixation service in the Wuding River Basin, China

WANG Guoyu, LI Jing*, ZHANG Ya

School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China

Abstract: Wind erosion has important effects on regional climatic degeneration and desertification. It mainly occurs in arid and semi-arid areas. Windbreak and sand fixation service belongs to the regulation service in ecosystem service and is conducive to protecting environment and maintaining soil. However, in recent research, the harm of wind erosion is lack in the adjacent area. The simulation of dust transmission is applied in wind erosion to analyze influenced adjacent area. The Wuding River Basin includes some areas of the Mu Us Desert, and the wind erosion is significant. Taking the Wuding River Basin as a case, the spatial association of service supply area and benefit area was revealed from the ecosystem service flow of the wind prevention and ecological compensation. Using the RWEQ model (Revised Wind Erosion Equation), we estimated the wind erosion volume in 2000, 2005, 2010, 2015 and 2018, and calculated the quality of windbreak and sand fixation service capacity. The Hybrid Single-Particle Langrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) model was used to simulate the daily dust transmission paths in 2000, 2005, 2010, 2015, and 2018 and obtained a range of the affected regions. Population and real GDP in the service beneficiary areas were simulated. Results are as follows. (1) In 2000, 2005, 2010, 2015 and 2018, the actual wind erosion, potential wind erosion and

基金项目:国家自然科学基金项目(42071285);陕西省重点研发计划项目(2022SF-382);中央高校基本科研业务经费(GK202302002)

收稿日期:2023-04-06; 网络出版日期:2023-12-22

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: lijing@ snnu.edu.cn

#本研究尚缺中国港澳经济统计数据。

wind break and sand fixation showed a "decrease-increase-decrease" fluctuation trend with a downward trend on the whole. The wind erosion in the west and northwest of the Wuding River Basin was more severe while in the east and southeast was more moderate. (2) The total number of the service flow path simulation showed the overall downward trend, mainly through the central and eastern China. The service beneficiary areas included China and neighboring countries. (3) The material flow of wind prevention and sand fixation service from the Wuding River Basin was centered on the northern Shaanxi and western Shanxi, and the influence area has spread to neighboring countries. The decline of wind erosion amount indicated an improved ecological environment and a good living environment locally. The results revealed the protection in the adjacent areas by the windbreak and sand fixation service. The study estimates the windbreak and sand fixation service flow, providing a scientific basis for the ecological compensation between the service supply area and the benefit area, and having a certain reference role for vegetation restoration and windbreak and sand fixation in other river basins.

Key Words: ecosystem service flow; sand fixation service; Revised Wind Erosion Equation; Hybrid Single-Particle Langrangian Integrated Trajectory Model; Wuding River Basin

风蚀是地表沙粒在风力达到临界值时产生的土壤侵蚀,主要发生在干旱区和半干旱区,对区域气候和荒 漠化有重要影响^[1]。风蚀是引起沙尘天气、降低空气质量、增加居民的健康风险、导致农田退化的关键因素。 Prospero等^[2]利用全臭氧成图光谱仪(TOMS)传感器,识别全球最大和最持久的大气尘埃源主要分布在北非 西海岸、中东、中亚、中国和南亚。土壤风蚀主要以大规模的沙尘输送^[3]对人类生活产生影响,如 Baddock 等 人^[4]通过澳大利亚 1969—2010年的官方空中交通事件报告发现了 61 起大规模的沙尘输送对航空危害的事 件。产生土壤风蚀的主导因素是由人类活动如过度放牧、土壤开垦等引起的土地利用强度增加,以及沙尘暴 频发天气等气候因素^[5-7]。

防风固沙服务是一种生态系统服务^[8],它具体是指由于植被等地表覆盖物的存在而使得风蚀量减少的 能力,被减少的这部分风蚀量即为防风固沙量^[9]。防风固沙服务流属于生态系统服务流,是防风固沙服务的 空间流动过程,包括流动路径与流量等。生态系统服务流^[10]可以实现生态系统服务从生态系统到人类社会 的传输。生态系统服务流多种多样,而当前学界模型模拟开发有限,能做到的模拟主要是水流、风沙流等。生 态系统服务流动实际上是在服务的供给与需求之间建立时空关联^[11]。无定河流域包括毛乌素沙漠部分区 域,土壤风蚀显著,研究防风固沙服务有利于保持土壤、保护生态环境与维持良好的人地关系。因此,通过研 究防风固沙服务流可以识别防风固沙服务受益区,分析防风固沙服务的域外效应。谢高地、肖玉和徐洁 等^[11-13]对我国防风固沙型重点生态功能区和宁夏回族自治区等区域的防风固沙量与防风固沙服务流的时空 分布进行了深入的研究,对受益区进行识别,并分析了受益区内的人口密度、社会经济与土地覆盖类型。

肖玉等^[13]认为生态系统服务流的重要发展方向是分布式模拟,对于确定生态系统服务的供给者与受益 者之间的利益关系有重要的意义,如对于固碳服务^[14]、土壤保持服务^[15]、水供给服务^[16—20]等生态系统服务 流的研究有利于解释其流动规律,从而建立评估框架以及探究其供需平衡,为生态系统服务的高效利用与安 全格局创造前提条件。Klapper等^[21]根据野生物种的全球贸易确定生态系统服务流,在全球国家和地区内进 行空间分析,有利于针对性的保护行动。Magerl等^[22]根据森林生态系统服务流分析了美国森林碳汇。 Shakya等^[23]分析了多情景下保护区之间的生态系统服务流,以维持保护区的管理效益和生态系统服务。 Zank等^[24]分析了华盛顿州普吉特海湾地区的城市扩张对于生态系统服务流的影响。Kleemann等^[25]以德国 为例,分析了国家之间的生态系统服务流及其依赖关系。国外的研究主要分析了生态系统服务流对于国家等 大范围的研究区域的经济发展与生态保护的影响。因此,需要考虑到产生于研究区内的防风固沙服务流对于 研究区外更广泛区域,如对中国境内的社会经济与生态保护的影响。

模拟防风固沙服务流的路径主要是基于 HYSPLIT(Hybrid Single-Particle Langrangian Integrated Trajectory Model,混合单颗粒拉格朗日整合轨迹模型)模型进行,以得到其时空分布。HYSPLIT 模型可以模拟粉尘运输 途径与风沙轨迹^[26]、模拟 PM₁₀和 PM_{2.5}扩散的时空变化和传播情况^[27]、研究沙尘暴的传播和扩散模式^[28]以

及分析防风固沙的受益区域^[11]。HYSPLIT 模型可以直接使用美国大气实验室的气象数据产品。并且, HYSPLIT 模型的应用范围广,不仅可以模拟基础的气团轨迹,还可以应用在污染物转化和沉积、野火烟雾和 放射性污染物等方面。通过 HYSPLIT 模型可以模拟风沙路径,以得到防风固沙服务流空间流动的具体模式, 但是,还需要结合土壤风蚀模型以估算具体的土壤风蚀量的时空分布并分析其影响因素。基于 RWEQ (Revised Wind Erosion Equation,修正土壤风蚀方程模型)对土壤风蚀量的估算已经产生了广泛的研究,如王 洋洋等^[29]利用 RWEQ 模型对宁夏草地的土壤风蚀量进行了估算;申陆等^[30]利用 RWEQ 模型分析了浑善达 克的土壤风蚀状况以及其主要驱动因素;宋超等^[31]利用像元二分模型结合植被覆盖度分析了宁夏灵武白芨 滩自然保护区的土壤风蚀状况。江凌等^[32]结合 RWEQ 模型与¹³⁷Cs 法研究发现青海省内柴达木盆地土壤风 蚀较为严重。

但是,目前对于土壤风蚀的研究大多以土壤风蚀量的时空分布为主,对于土壤风蚀量与模拟风沙流动路 径两者相结合的研究较少,并且只局限于本研究区域受到土壤风蚀的影响,而缺乏对邻近区域生态环境危害 的研究,并且缺少防风固沙服务供给区与受益区之间的生态、经济与社会联系的研究。无定河流域处于毛乌 素沙漠与黄土高原的过渡区域,沙地面积广同时植被覆盖度较低。并且无定河流域处于风力侵蚀的区域,流 域内分布有能源基地榆林等人口集中的城市,风蚀对当地人口会产生明显的负面影响。因此,本文探究了无 定河流域土壤风蚀量及其防风固沙服务流对区域内与区域外人口与经济的影响方式与影响程度。

本研究利用 RWEQ 模型(Revised Wind Erosion Equation)估算无定河流域内 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年以及 2018 年的土壤风蚀量,并估算防风固沙物质量以衡量防风固沙服务能力。使用混合单颗粒拉格 朗日整合轨迹模型(Hybrid Single-Particle Langrangian Integrated Trajectory Model,HYSPLIT)模拟 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年以及 2018 年内的逐日风沙流动路径,获得中国范围内的受到模拟风沙路径影响的区域范 围。结合 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2018 年的社会经济与人口数据进行分析,在无定河流域与其防 风固沙服务流动路径的影响区域之间建立联系。分析防风固沙服务供给区与受益区之间的生态、经济与社会 联系,可以为无定河流域治沙防风等措施以及生态补偿相关政策等提供一定的参考和依据。

1 研究区及数据源

1.1 研究区概况

无定河流域横跨陕西省北部和内蒙古自治区,流域面积 30216 km²,海拔较高,流域风速整体呈西北向东 南逐渐降低的趋势。流域地处半湿润、半干旱地区。主要流经定边县、靖边县、横山县、榆林市等地区。无定 河流域沙地面积达 5614 km²,如图 1 所示,无定河流域土地覆盖类型主要为东南部的旱地以及西北部的沙地, 沙地植被覆盖度低,易发生土壤风蚀。无定河流域内站点最大风速最高可达 16.45 m/s,并且高于起沙风速的 时间点较多,易发生大规模的风沙扩散。研究无定河流域土壤风蚀对流域内生态环境安全、经济和社会的可 持续发展具有重要意义。

1.2 数据来源

本研究中使用的数据来源如下表 1 所示。其中, 栅格数据最终统一进行重采样为 1 km, 地理坐标系设置为 GCS_WGS_1984。风速数据的插值是采用 ANUSPLIN 插值软件, 选择了无定河流域周围的 78 个气象站点进行插值后, 再裁取无定河流域的风速栅格进行分析。NCEP 再分析数据是经由美国国家海洋与大气局大气资源实验室下载后直接使用。土地利用的分类属于中国多时期土地利用遥感监测数据集(CNLUCC)的分类系统。中国多时期土地利用遥感监测数据集(CNLUCC)数据^[33]来源于资源环境科学数据注册与出版系统。采用二级分类系统:一级分为 6 类, 主要根据土地资源及其利用属性, 分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地; 二级主要根据土地资源的自然属性, 分为 23 个类型。在该分类下, 旱地(12)属于一级分类耕地(1), 草地(3)为一级分类, 沙地(61)为二级分类。





图1 研究区概况

Fig.1 Study area

表1 数据来源

Table 1 Data source					
数据类型	数据来源	数据内容	数据说明		
Data type	Source	Content	Description		
风速数据 Windspeed data	中国气象数据网(http://data.cma.cn/)	风速数据为 2000 年、2005 年、 2010 年、2015 年、2018 年全年	表格数据;无定河流域内及邻域的 78个气象站的风速数据		
NCEP 再分析数据 NCEP reanalysis data	美国国家海洋与大气局大气资源实验室 (https://www.ready.noaa.gov/archives. php)	2000年、2005年、2010年、2015年、2018年全年与2019年1月1 日至2019年1月31日	气象数据资料		
社会经济数据 Social and economic data	Real GDP 数据(https://doi.org/10. 6084/m9. figshare. 17004523. v1); Landscan 人口数据(https://landscan. ornl.gov/);国家统计局(http://www. stats.gov.cn/)	2000年、2005年、2010年、2015 年以及2018年1km人口和real GDP栅格数据、人口和GDP统 计数据	栅格数据以及表格数据		
雪盖数据 Snow depth data	旱区寒区科学数据中心(http://westdc.westgis.ac.cn)	2000年、2005年、2010年、2015 年以及2018年的25km的中国 雪深长时间序列数据集	栅格数据		
气象数据 Meteorological data	CMFD 数据集	2000年、2005年、2010年、2015 年以及2018年太阳辐射、降水、 温度数据	NetCDF		
高程数据 Elevation data	中国科学院资源环境科学数据中心 (http://www.resdc.cn)	30 m DEM 数据	栅格数据		
植被数据 Vegetation data	中国科学院资源环境科学数据中心 (http://www.resdc.cn)	2000年、2005年、2010年、2015 年以及 2018年1 km 的 NDVI 数据	栅格数据		
土壤数据 Soil data	联合国粮食及农业组织(https://www. fao.org)	HWSD (1 km) (Harmonized World Soil Database v 1.2)土壤数据集	栅格数据		
土地利用类型 Land use type	中国科学院资源环境科学数据中心 (http://www.resdc.cn)	中国多时期土地利用遥感监测 数据集(CNLUCC)	栅格数据		

NCEP:美国国家环境预报中心 National Centers for Environmental Prediction;GDP:国内生产总值 Gross Domestic Product;CMFD:中国区域地面 气象要素驱动数据集 China Meteorological Forcing Dataset;NetCDF:网络通用数据格式 Network Common Data Form;DEM:数字高程模型 Digital Elevation Model;NDVI: 植被覆盖指数 Normalized Difference Vegetation Index

2 研究方法

本研究通过结合 RWEQ 模型(Revised Wind Erosion Equation)与混合单颗粒拉格朗日整合轨迹模型 (Hybrid Single-Particle Langrangian Integrated Trajectory Model, HYSPLIT)对无定河流域防风固沙服务流进行 模拟。(1)基于 RWEQ 模型计算得到潜在土壤风蚀量,实际土壤风蚀量与防风固沙量,从而量化无定河流域 产生的防风固沙服务。(2)基于 HYSPLIT 模型,模拟无定河流域内以榆林站、绥德站、靖边站以及横山站四个 气象站为起点的风沙流动路径,从而模拟得到无定河流域的防风固沙服务的流动轨迹。(3)由于防风固沙服 务的作用,模拟风沙流动路径所承载的土壤风蚀量会减少,减少的这部分即为防风固沙量。因此,通过结合 RWEQ 模型与 HYSPLIT 模型,分别量化与模拟防风固沙量与风沙流动路径,完成对无定河流域防风固沙服务 流的模拟。研究方法框架如图 2 所示。



RWEQ:修正土壤风蚀方程模型 Revised Wind Erosion Equation; HYSPLIT: 混合单颗粒拉格朗日整合轨迹模型 Hybrid Single-Particle Langrangian Integrated Trajectory Model; NDVI: 植被覆盖指数 Normalized Difference Vegetation Index; DEM: 数字高程模型 Digital Elevation Model; NCEP:美国国家环境预报中心 National Centers for Environmental Prediction

2.1 RWEQ 模型

RWEQ 模型^[34-36]充分考虑气候、土壤、植被等因素,定量评估研究区土壤风蚀量的动态变化,具体公式如下:

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

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

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

$$SR = \frac{2z}{sr^2} Q_{rmax} \times e^{-(z/sr)^2}$$
(4)

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

http://www.ecologica.cn

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

$$G = SR - SL \tag{7}$$

式中,*SL*表示风蚀量(kg/m²);*Q*_{max}表示风力的最大输沙能力(kg/m);*s*表示关键地块长度(m);*SR*表示潜在风蚀量(kg/m²);*Q*_{max}表示潜在风力最大输沙能力(kg/m);*sr*表示潜在关键地块长度(m);*G*表示防风固沙物质量(kg/m²);*z*表示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*表示土壤可蚀性因子(无量纲);*SCF*表示土壤结皮因子(无量纲);*K*′表示土壤糙度因子(无量纲);*C*表示植被因子(无量纲)。

(1) 气候因子(WF)

$$WF = wsf \times (\rho/g) \times soilw \times snowd$$
 (8)

$$wsf = v_2 \times (v_2 - v_1)^2 \times dpm$$
(9)

式中,WF 表示气候因子,wsf 表示风力因子, ρ 表示空气密度,g 表示重力加速度,soilw 表示土壤湿度因子, snowd 表示雪盖因子(无积雪覆盖天数/研究总天数),雪盖深度小于 2.54 cm 为无积雪覆盖。v₂ 为月均风速 值,v₁为起沙风速,取 5 m/s。dpm 为每月风速超过起沙风速的天数。对于 RWEQ 模型中所使用的风速数据, 采用的方法是结合气象站点风速数据与插值软件 ANUSPLIN 得到风速的栅格数据。

(2)土壤可蚀性因子(EF)与土壤结皮因子(SCF)

$$EF = \frac{29.09 + 0.31Sa + 0.17Si + 0.33Sa/Cl - 2.59OM - 0.95CaCO_3}{100}$$
(10)

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

其中, Sa 表示土壤砂粒含量;Si 为土壤粉砂含量;Cl 为粘土含量;OM 为有机质含量;CaCO₃为碳酸钙含量;根 HWSD 土壤数据计算。

(3) 植被因子(C)

$$C = e^{-0.0483\left(\frac{\text{NDVI-NDVI}_{\min}}{\text{NDVI}_{\max}-\text{NDVI}_{\min}}\right)}$$
(12)

式中,NDVI、NDVI_{min}、NDVI_{max}分别表示 NDVI 的实际值、最小值和最大值。在 RWEQ 模型中,对于植被因子中的参数有区分,对于倒放残茬,是通过大量田间和风洞实验得出的,由于无定河流域的东部及东南部区域主要 土地利用类型为旱地,属于耕地的二级分类,因此采用该参数-0.0483。一般使用 FVC 计算因子,本文根据参 考文献^[36]使用公式(12)。

(4) 土壤糙度因子(K')

$$K' = \cos\alpha \tag{13}$$

式中, α 表示坡度, 根据 DEM 数据计算得到。

2.2 风沙流动路径模拟

本研究采用 HYSPLIT 模型模拟无定河流域内以榆林站、绥德站、靖边站以及横山站四个气象站为起点的 风沙流动路径。首先通过风速数据查找出大于起沙风速^[37-38]的时间作为沙尘天气的发生时间,再通过 HYSPLIT 模型模拟每年从1月1日开始模拟到每年的12月31日的每日风沙轨迹;之后通过 HYSPLIT 模型 与 ArcGIS 软件生成轨迹频率,从而得到轨迹影响范围,该范围即为防风固沙服务受益区。在本研究中,假设 研究区没有植被覆盖;同时在风速超过起沙风速的阈值时^[11],具备起沙条件,那么在此刻模拟的气团轨迹将 会携带沙尘,从而可以看做为风沙流动路径并使得流动路径范围内产生沙尘天气^[12,39]。HYSPLIT 模型不考 虑沙尘质量,对于不同粒径的沙尘轨迹的传递范围仅靠传播时间进行区分。在本文中的模拟基于不考虑沙尘 质量的假设。

本研究将榆林站、绥德站、靖边站以及横山站四个气象站作为 HYSPLIT 模型模拟的起始点。利用美国国

家海洋与大气局大气资源实验室提供的资料,模拟研究区满足起沙条件时的沙尘五日后向轨迹。根据参考文 献^[36],选择模拟轨迹时长为五日。靖边站、横山站和榆林站位于无定河中部,毛乌素沙漠边缘,主要为沙地, 地表为沙覆盖,储备了易被裹挟的沙粒;并且此三个站点附近植被覆盖度低,极其稀少,同时附近均为低覆盖 度草地,水分缺乏,草被稀疏,易形成沙尘天气。绥德站位于无定河东南部,主要土地利用类型为耕地,以及较 为稀疏的林地和中覆盖度草地,草被较为稀疏;该区域主要为耕作区,易受到沙尘天气的对粮食产量的负面影 响。横山站、榆林站和绥德站附近的地形起伏变化较为剧烈。四个站点附近区域常年干旱少雨。因此,选择 靖边站、横山站、榆林站和绥德站对于无定河流域整体的沙尘路径具备一定的科学性。

2.3 防风固沙受益区范围模拟与防风固沙服务物质流

本研究中,无定河流域风沙流动路径的受益区通过 HYSPLIT 的频率分布模块与 AreGIS 获得。流经栅格 中沙尘传输路径的分布频率可以看作是该范围内受益人群的防风固沙服务受益多少的指示性指标,风沙轨迹 分布频率越高表明经过该区域的风沙流动路径越多,则生态系统服务效益越大。风沙轨迹分布频率计算公式 如下^[36]:

$$p_{i=\frac{r_i}{r}} \tag{14}$$

式中,*p_i*表示栅格*i*的风沙轨迹分布频率,*r_i*表示通过栅格*i*的风沙轨迹数,*r*表示风沙轨迹总数。通过对沙尘 传输路径的空间插值得到防风固沙服务受益区的空间分布,即假设在裸地条件下不存在防风固沙服务,那么 此时实际上沙尘传输路径经过的区域都可以看作是防风固沙服务流动的受益区范围。

防风固沙服务物质流是指在植被覆盖的情况下所产生的防风固沙量,这部分沙尘在防风固沙服务的作用 下被固定在沙尘源地,从而避免了沙尘传输对防风固沙服务受益区的损害,产生了防风固沙服务。因此,风沙 轨迹越多,已经被植被减少的风沙量越多,从而通过轨迹数量计算出栅格尺度的轨迹频率并根据轨迹频率进 行防风固沙量的分配。防风固沙服务流动路径频率越高,物质流相应越大。根据相关文献^[36],物质流计算方 式如下:

$$PL_i = G \times p_i \tag{15}$$

式中, PL_i 表示防风固沙服务受益区内栅格单元 i 上的物质流流量(kg/m²),G 表示防风固沙物质量(kg/m²), p_i 表示栅格 i 的风沙路径的分布频率(%)。栅格尺度根据参考文献^[36]使用了 1°×1°大小的栅格。

3 结果与分析

3.1 潜在风蚀量、实际风蚀量与防风固沙量时空格局

2000—2018年间无定河流域潜在风蚀总量在14.915×10°kg至115.981×10°kg之间,如表2所示,与2000年相比2018年潜在风蚀量减少了74.693×10°kg,呈"减-增-减"的波动变化趋势。而单位面积潜在风蚀量平均值呈现与潜在风蚀总量相同的变化趋势,单位面积潜在风蚀量平均值范围是0.613 kg/m²至3.890 kg/m²。与2000年相比,2018年单位面积潜在风蚀量平均值减少了2.572 kg/m²。2000—2018年间无定河流域实际风蚀总量在14.711×10°kg至111.054×10°kg之间,2000年实际风蚀量最高,2005年的实际风蚀量最低。相比2000年实际风蚀量,2018年减少了74.674×10°kg。整体上实际风蚀量呈现先下降,再上升,再下降的变化趋势。单位面积实际风蚀量平均值呈现与实际风蚀总量相同的变化趋势,平均值范围是0.605 kg/m²至3.858 kg/m²。与2000年相比,2018年单位面积实际风蚀量平均值减少了2.572 kg/m²。

如图 3 所示,在空间分布上,潜在风蚀与实际风蚀较低的区域主要集中在风场强度较低的中部以及东南 部;而较高的区域主要集中在西北部。在 2000—2018 年间,潜在风蚀量与实际风蚀量变化最为明显的区域是 无定河流域的中部及东南部,呈现先减少再增加再减少的波动变化趋势。与 2000 年相比,2018 年的潜在风 蚀量与实际风蚀量有了显著的降低。总体来看,潜在风蚀与实际风蚀有了较为明显的改善,其影响区域在不 断减少,其风蚀强度也在不断降低。

Table 2 Quality statistics of windbreak and sand fixation materials from 2000 to 2018						
项目 Item	项目/单位 Item/unit	2000	2005	2010	2015	2018
潜在风蚀	单位面积潜在风蚀最大值/(kg/m ²)	15.217	7.292	15.255	14.030	8.524
Potential wind erosion	单位面积潜在风蚀最小值/(kg/m ²)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	单位面积潜在风蚀平均值/(kg/m ²)	3.890	0.613	2.317	1.849	1.318
	潜在风蚀总量×10 ⁹ /(kg/m ²)	111.981	14.915	59.396	50.898	37.288
实际风蚀	单位面积实际风蚀最大值/(kg/m ²)	15.142	7.178	15.162	13.912	8.338
Actual wind erosion	单位面积实际风蚀最小值/(kg/m ²)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	单位面积实际风蚀平均值/(kg/m ²)	3.858	0.605	2.287	1.808	1.286
	实际风蚀总量×10 ⁹ /(kg/m ²)	111.054	14.711	58.626	49.770	36.380
防风固沙量	防风固沙总量 ×10 ⁹ /(kg/m ²)	0.927	0.204	0.77	1.128	0.908
Wind prevention and sand fixation amount	单位面积防风固沙量平均值/(kg/m ²)	0.032	0.008	0.030	0.04	0.032

表 2	2000-2018	在防风周 沙	风钟量统计
1X 4	2000 2010	千仞へ回び	小山主儿り

2000-2018年间无定河流域防风固沙总量在 0.204×10° kg 至 1.128×10° kg 之间,总体呈现"减-增-减"的 波动变化趋势。与 2000 年相比, 2005 年防风固沙总量减少了 0.723×10° kg, 2018 年防风固沙总量减少了 0.019×10° kg。2000—2018年的单位面积平均防风固沙量是波动变化,为0.008 kg/m²至0.032 kg/m²。从空 间分布上看,防风固沙量较高的区域主要集中在西北部以及北部,这部分区域的土地覆盖类型主要为沙地,同 时是干旱并且风力因子较高的区域。2000年,2005年与2015年无定河流域西北部以及北部都为较高的防风 固沙量区域,直到2018年这些区域的防风固沙量才有了明显的降低。而无定河流域的中部、东部以及南部, 在 2018 年防风固沙量也有了明显的降低。这些区域风力因子的降低对于防风固沙量的降低产生了重要的 影响。



图 3 2000—2018 年无定河实际风蚀量、潜在风蚀量与防风固沙量时空分布格局 Fig.3 Spatial and temporal distribution patterns of SL, SR and G in Wuding River Basin in 2000,2005,2010,2015,2018

3.2 防风固沙服务流动路径模拟

根据 HYSPLIT 模型模拟结果(图4),2000 年榆林站、绥德站、靖边站以及横山站的沙尘传输路径分别有 80、162、73、179条,总计有494条沙尘传输路径;2005年榆林站、绥德站、靖边站以及横山站的沙尘传输路径

http://www.ecologica.cn

分别有 130、151、62、164条,总计有 507条沙尘传输路径;2010年榆林站、绥德站、靖边站以及横山站的沙尘传输路径分别有 139、157、82、159条,总计有 537条沙尘传输路径;2015年榆林站、绥德站、靖边站以及横山站的沙尘传输路径分别有 137、155、26、164条,总计有 482条沙尘传输路径;2018年榆林站、绥德站、靖边站以及横山站的沙尘传输路径分别有 120、145、16、156条,总计有 437条沙尘传输路径。2000年至 2018年靖边站沙尘 传输路径数目最少并且呈显著降低趋势,表明靖边站风沙天气有明显的改善。同时,绥德站与横山站的沙尘 传输路径数目始终维持在较高的水平,表明当地的风沙天气依旧会对当地生态产生负面影响。2010年至 2018年四个站点的沙尘传输路径总数呈现"先上升再下降"的波动变化趋势,2018年沙尘传输路径总数达到 最低值,表明整体上风沙天气在经历了恶化后得到较为明显的改善,对当地生态环境的危害得到缓解。



图 4 2000—2018 年防风固沙服务流动路径

Fig.4 Flow trajectories of the wind prevention and sand fixation service in 2000,2005,2010,2015,2018

基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS2020(4632)号的标准地图制作,底图无修改

模拟的沙尘传输路径主要通过中国的北方,还经我国周边的俄罗斯、韩国和蒙古等国家,表明防风固沙服务流动路径影响范围远远超出中国。如表3所示,防风固沙服务流动路径不仅影响到北方诸多易发生风沙天 气的城市,还会对南方部分城市气候产生一定或较少的影响。

3.3 防风固沙受益区范围

将路径分布频率分为六个区间,分别为0—1%、1%—5%、5%—10%、10%—20%、20%—30%、30%—1,受 益区主要位于中部以及东部的大部分省份(图5)。轨迹经过频率较高(>30%)的区域主要位于陕西北部。 而轨迹经过频率影响区域范围最大的区间是<1%,主要影响的区域有内蒙古、宁夏、甘肃中部以及东部、四川 东北部、重庆、湖北、湖南、贵州、江西、江苏、辽宁、吉林等省份。无定河流域的防风固沙服务使得受益区内城 市与居民的生活环境得到进一步的改善,其中路径分布频率最大的几个省份如陕西、山西和内蒙古等,所获得 的防风固沙服务对当地居民生活也有更大的受益。

3.4 防风固沙服务物质流

防风固沙服务流动路径在服务供给区(无定河流域)与服务受益区之间建立了联系,流动路径频率较高 地区的沙尘流量较多,所产生的防风固沙服务也更多。2000年、2005年、2010年、2015年和 2018年物质流最 高值分别为 630.51 kg/m²、119.5 kg/m²、524.8 kg/m²、692.71 kg/m²、652.43 kg/m²,物质流最低值分别为 到较低程度的影响。

1.87 kg/m²、0.4 kg/m²、1.43 kg/m²、2.34 kg/m²、2.07 kg/m²,物质流平均值分别为 17.55 kg/m²、4.21 kg/m²、16 kg/m²、27.87 kg/m²、18.64 kg/m²。总的来看,从 2000 年至 2018 年,物质流是波动变化的。受益区内防风固 沙服务物质流的空间分布(图 6)与防风固沙服务流动路径分布频率经过地区一致,物质流流量以无定河流域

Table 3 Flow trajectories by Provincial administrative region from 2000 to 2018 年份 Year 年份 Year 省级行政区 级行政区 Provincial administrative Provincial administrative region region 安徽省 辽宁省 澳门 内蒙古自治区 北京市 宁夏自治区 福建省 青海省 甘肃省 山东省 广东省 山西省 广西自治区 陕西省 贵州省 上海市 海南省 四川省 河北省 台湾省 河南省 天津市 黑龙江省 西藏自治区 湖北省 香港 湖南省 新疆自治区 吉林省 云南省 江苏省 浙江省 重庆市 江西省



的陕西北部、山西西部地区为中心呈圈层状递减,高值主要集中在中部的省份,同时我国东南沿海省份也会受



图 5 2000-2018 年防风固沙受益区范围

Fig.5 Service beneficiary areas of wind prevention and sand fixation service in 2000,2005,2010,2015,2018



图 6 2000-2018 年防风固沙服务物质流

Fig.6 The material flow of wind prevention and sand fixation service in 2000,2005,2010,2015,2018

4 讨论

4.1 土壤风蚀量变化因素

无定河流域内风蚀量的变化主要受到气候条件以及植被覆盖因素的影响。根据风沙运动的机制,其中气候因素中的风速因子对于风蚀量有促进作用^[40-41]。1958—2018年以来,中国近地面风速呈降低的趋势^[42],2000—2018年中无定河流域内风速变化趋势也相一致,在2000年风速达到了这五年中的峰值,并在2005年、2010年、2015年以及2018年内波动变化,使得气候因子也呈波动变化的趋势。风速整体上呈降低的趋势,对于风蚀量整体上的降低具有重要的解释作用。

无定河流域的风速降低和植被覆盖度增加的一个重要因素是二十世纪末的"三北"防护林工程。在 2000—2018年间的土壤实际风蚀量与潜在风蚀量中,2000年的值最大,可能是由于2000年以来的"三北"防 护林工程的不断完善,使得2000年之后的风蚀量呈整体降低的趋势。同时,在"三北"防护林的进程中,2000 年以来还有对于天然林保护、生态公益林保护和退耕还林还草等政策,加强了对林木的保护,使得林地面积不 断扩大^[43],对无定河流域内的植被有保护的作用。三北防护林工程区的土地退化程度在各项生态及环境保 护政策下不断减轻,同时其植被覆盖整体上是在缓慢增加的^[44-45]。除过林地之外,草地和沙地植被的恢复对 于风蚀量的降低也能够发挥重要的作用^[46],因此,对于无定河流域内以及其他区域的植被恢复应该从林地、 草地和沙地植被几个角度入手,"适林种林,适草种草"科学建立因地制宜的植被恢复机制,并系统综合地分 析恢复活动对经济和货币方面的成本和效益^[47]。

4.2 防风固沙服务受益区内的人口与 GDP 分布

完善无定河流域的防风固沙服务优化管理,不仅需要恢复沙地植被等区域内的治理对策,还需要根据防风固沙服务受益区内的人口与 GDP 分布状况,相应的施行区域间的横向生态补偿政策,由受益区向无定河流域支付一定比例的经济补偿,以弥补无定河流域因防风治沙所造成的经济损失。

通过防风固沙服务流可以实现受益区的识别,进一步综合分析受益区内的人口分布与社会经济状况。

2000—2018年人口与 real GDP 在无定河流域防风固沙服务受益区内的分布如下表(表 4) 所示。表 4 根据每个年份的模拟风沙流动路径频率,计算得到每个频率区间内受益人口与受益 real GDP 的分布及其百分比,

Table 4	Population and real GDP	Population and real GDP benefit from the wind erosion prevention at the Wuding River Basin in 2000, 2005, 2010, 2015, and 2018					
年份 Year	防风固沙服务 流动路径通过频率 Frequency of wind prevention and sand fixation service flow path	受益人口 Population in the service beneficiary areas/亿人	占全国人口比例 Percentage of the country's population/%	受益 real GDP Real GDP in the service beneficiary areas/万亿元	占全国 real GDP 比例 Percentage of the country's real GDP/%		
2000	≥30%	0.056	0.43	0.303	0.73		
	20%—30%	0.258	1.99	1.046	2.52		
	10%—20%	1.164	8.99	3.063	7.38		
	5%—10%	2.12	16.37	6.091	14.67		
	1%—5%	4.527	34.95	11.087	26.70		
	≤1%	2.872	22.17	7.701	18.55		
	合计	10.997	84.90	29.291	70.55		
	全国	12.953	100.00	41.521	100.00		
	≥30%	0.043	0.33	0.255	0.42		
	20%—30%	0.166	1.27	1.349	2.24		
2005	10%—20%	1.383	10.58	5.107	8.48		
	5%—10%	2.084	15.94	8.658	14.39		
	1%—5%	4.155	31.78	14.652	24.35		
	≤1%	3.794	29.02	16.786	27.89		
	合计	11.625	88.91	46.807	77.77		
	全国	13.075	100.00	60.186	100.00		
	≥30%	0.045	0.34	0.447	0.51		
	20%—30%	0.145	1.08	1.514	1.73		
2010	10%—20%	1.543	11.51	0.929	1.06		
	5%—10%	2.252	16.79	1.315	1.50		
	1%—5%	4.515	33.67	25.348	28.88		
	≤1%	3.237	24.14	17.784	20.27		
	合计	11.737	87.52	47.337	53.94		
	全国	13.41	100.00	87.756	100.00		
	≥30%	0.036	0.26	0.475	0.43		
	20%—30%	0.133	0.97	2.113	1.91		
2015	10%—20%	1.636	11.90	11.321	10.24		
	5%—10%	1.845	13.42	13.352	12.07		
	1%—5%	4.117	29.95	33.785	30.55		
	≤1%	2.16	15.71	13.613	12.31		
	合计	9.927	72.22	74.659	67.51		
	全国	13.746	100.00	110.585	100.00		
	≥30%	0.06	0.43	0.922	0.79		
	20%—30%	0.17	1.21	1.693	1.45		
	10%—20%	1.057	7.52	8.713	7.44		
2018	5%—10%	2.034	14.47	15.788	13.48		
	1%—5%	4.321	30.75	33.992	29.03		
	≤1%	3.484	24.79	22.526	19.24		
	合计	11.126	79.17	83.634	71.43		
	全国	14.054	100.00	117.082	100.00		

表 4 2000、2005、2010、2015、2018 年无定河流域防风固沙服务全国受益人口和 real GDP

从而可以分析频率最高即受益最大的区域的人口与 real GDP 及其所处的频率区间。频率最高的区域位于陕西北部以及山西西部,其受益人口与 real GDP 均较低,占全国的比例也均不足 1%。而受益人口与受益 real GDP 最高的值基本上处于频率区间 1%—5%,这部分区域主要为经济发达的东部地区。对于 2000—2015 年防风固沙服务受益区内人口与 real GDP 分布的探究,得到了受益人口和 real GDP 的频率分布区间,建立了防风固沙服务流的时空联系。

根据受益人口与 real GDP 的空间分布,探究了防风固沙服务供给区与受益区之间的社会与经济联系,从 而对于防风固沙服务的生态补偿提供了一定的科学依据。防风固沙服务流作为一种生态系统服务流,以流量 的方式量化了无定河流域所产生的防风固沙服务,对防风固沙服务流的空间流动、供需平衡与安全格局的研 究具有一定的意义。

4.3 局限性

在本文中还存在以下不足与局限性,有待今后做更加深入的探讨:(1)对于 RWEQ 模型中所使用的风速 数据,采用的方法是结合气象站点风速数据与插值软件 ANUSPLIN 得到风速的栅格数据采用的算法是局部薄 盘光滑样条法,采用的独立协变量是高程,样条次数为 2 次,根据 DEM 数据得到插值结果。因此,在风速插值 的结果中会存在不确定性。(2)HYSPLIT 模型不考虑沙尘质量,对于不同粒径的沙尘轨迹的传递范围仅靠传 播时间进行区分。在本文中的模拟基于不考虑沙尘质量的假设,也会存在不确定性。由于本文未考虑沙尘本 身重量,分析结果可能会高估影响范围,低估物质浓度。(3)在进行防风固沙服务受益区识别时,根据相关文 献^[36]选取的栅格大小为 1°×1°。不同的栅格大小会对分析结果造成影响,存在局限性。

5 结论

本研究发现:(1)2000—2018 年无定河流域潜在风蚀总量、实际风蚀总量与防风固沙量呈"降低-增加-降低"的波动变化趋势。西部及西北部土壤风蚀较为剧烈而东部及东南部较为缓和。(2)2000—2018 年防风固沙服务流动路径模拟总数分别为 494 条、504 条、537 条、482 条和 437 条,主要通过中国的中部及东部地区以及邻国和海域,路径分布频率会随着路径传输距离增加而降低。(3)2000—2018 年无定河流域防风固沙服务全国受益人口与受益 real GDP 均占据总数的一定比例,产生明显的影响。(4)无定河流域防风固沙服务物质流以陕西北部为中心呈圈层状递减,影响范围扩散到了东亚和东南亚的国家和地区。本研究通过分析无定河流域的防风固沙服务流为防风固沙服务供给区和受益区之间的生态补偿提供科学依据,促进更加公平合理的生态补偿与支付的相关政策。

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] Prospero J, Ginoux P, Torres O, Nicholson S, Gill T. Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the nimbus 7 total ozone mapping spectrometer (toms) absorbing aerosol product. Reviews of Geophysics. 2002,40(1):1002.
- [3] Ravi S, D'Odorico P, Breshears D, Field J, Goudie A, Huxman T, Li J R, Okin G, Swap R, Thomas A, Van Pelt S, Whicker J, Zobeck T. Aeolian processes and the biosphere. Reviews of Geophysics, 2011, 49(3): 1 45.
- [4] Baddock M C, Strong C L, Murray P S, McTainsh G H. Aeolian dust as a transport hazard. Atmospheric Environment, 2013, 71: 7-14.
- [5] Hoffmann C, Funk R, Reiche M, Li Y. Assessment of extreme wind erosion and its impacts in Inner Mongolia, China. Aeolian Research, 2011, 3 (3): 343-351.
- [6] Sharratt B S, Lauer D. Particulate matter concentration and air quality affected by windblown dust in the Columbia Plateau. Journal of Environmental Quality, 2006, 35(6): 2011-2016.
- [7] 王涛, 吴薇, 赵哈林, 胡孟春, 赵爱国. 科尔沁地区现代沙漠化过程的驱动因素分析. 中国沙漠, 2004, 24(5): 519-528.
- [8] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Ecological Economics, 1998, 25(1): 3-15.
- [9] 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. 地理科学进展, 2014, 33(6): 825-834.
- [10] Bagstad K J, Johnson G W, Voigt B, Villa F. Spatial dynamics of ecosystem service flows: a comprehensive approach to quantifying actual services. Ecosystem Services, 2013, 4: 117-125.
- [11] 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.

- [12] 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.
- [13] 肖玉,谢高地,鲁春霞,徐洁.基于供需关系的生态系统服务空间流动研究进展.生态学报,2016,36(10):3096-3102.
- [14] 李婷,李晶,王彦泽,曾莉.关中-天水经济区生态系统固碳服务空间流动及格局优化.中国农业科学,2017,50(20):3953-3969.
- [15] 王玉丹,李晶,周自翔,王一达.无定河流域土壤保持服务供需关系及服务流模拟.水土保持学报,2022,36(3):138-145.
- [16] 陈登帅,李晶,张渝萌,张城,周自翔. 延河流域水供给服务供需平衡与服务流研究. 生态学报, 2020, 40(1): 112-122.
- [17] Chen D S, Li J, Yang X N, Zhou Z X, Pan Y Q, Li M C. Quantifying water provision service supply, demand and spatial flow for land use optimization: a case study in the YanHe watershed. Ecosystem Services, 2020, 43: 101117.
- [18] 张城,李晶,周自翔.基于水供给服务空间流动模型的渭河流域水资源安全格局.地理科学,2021,41(2):350-359.
- [19] Zhang C, Li J, Zhou Z X, Sun Y J. Application of ecosystem service flows model in water security assessment: a case study in Weihe River Basin, China. Ecological Indicators, 2021, 120: 106974.
- [20] 王一达,李晶,周自翔,王玉丹.基于 SWAT 模型的无定河流域水供给服务空间流动模拟.陕西师范大学学报:自然科学版,2022,50 (4):81-91.
- [21] Klapper J, Schröter M. Interregional flows of multiple ecosystem services through global trade in wild species. Ecosystem Services, 2021, 50: 101316.
- [22] Magerl A, Matej S, Kaufmann L, Le Noë J, Erb K, Gingrich S. Forest carbon sink in the U.S. (1870-2012) driven by substitution of forest ecosystem service flows. Resources, Conservation and Recycling, 2022, 176; 105927.
- [23] Shakya B, Uddin K, Yi S L, Bhatta L D, Lodhi M S, Htun N Z, Yang Y P. Mapping of the ecosystem services flow from three protected areas in the far-eastern Himalayan Landscape: an impetus to regional cooperation. Ecosystem Services, 2021, 47: 101222.
- [24] Zank B, Bagstad K J, Voigt B, Villa F. Modeling the effects of urban expansion on natural capital stocks and ecosystem service flows: a case study in the Puget Sound, Washington, USA. Landscape and Urban Planning, 2016, 149: 31-42.
- [25] Kleemann J, Schröter M, Bagstad K J, Kuhlicke C, Kastner T, Fridman D, Schulp C J E, Wolff S, Martínez-López J, Koellner T, Arnhold S, Martín-López B, Marques A, Lopez-Hoffman L, Liu J G, Kissinger M, Guerra C A, Bonn A. Quantifying interregional flows of multiple ecosystem services - A case study for Germany. Global Environmental Change, 2020, 61: 102051.
- [26] McGowan H, Clark A. Identification of dust transport pathways from Lake Eyre, Australia using Hysplit. Atmospheric Environment, 2008, 42 (29): 6915-6925.
- [27] Bera B, Bhattacharjee S, Sengupta N, Saha S. Variation and dispersal of PM10 and PM2.5 during COVID-19 lockdown over Kolkata metropolitan city, India investigated through HYSPLIT model. Geoscience Frontiers, 2022, 13(1): 101291.
- [28] Iraji F, Memarian M H, Joghataei M, Ghafarian Malamiri H R. Determining the source of dust storms with use of coupling WRF and HYSPLIT models: a case study of Yazd Province in central desert of Iran. Dynamics of Atmospheres and Oceans, 2021, 93: 101197.
- [29] 王洋洋,肖玉,谢高地,徐洁.基于 RWEQ 的宁夏草地防风固沙服务评估.资源科学,2019,41(5):980-991.
- [30] 申陆,田美荣,高吉喜.基于 RWEQ 模型的浑善达克沙漠化防治生态功能区土壤风蚀与主要影响因子分析.水土保持研究,2016,23 (6):90-97.
- [31] 宋超,余琦殷,王瑞霞,王萍,王俊,马瑞,崔国发.基于植被覆盖度的宁夏灵武白芨滩自然保护区防风固沙功能时空变化研究.生态学报,2021,41(8):3131-3143.
- [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):21-25,32,2.
- [33] 徐新良,刘纪远,张树文,李仁东,颜长珍,吴世新.中国多时期土地利用遥感监测数据集(CNLUCC).资源环境科学数据注册与出版系统 (http://www.resdc.cn/DOI),2018.
- [34] Fryrear D W, Saleh A, Bilbro J D. Revised Wind Erosion Equation. USDA, ARS. Technical BulletinNo.1, June 1998.
- [35] Zhang G F, Azorin-Molina C, Shi P J, Lin D G, Guijarro J A, Kong F, Chen D L. Impact of near-surface wind speed variability on wind erosion in the eastern agro-pastoral transitional zone of Northern China, 1982-2016. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 271: 102-115.
- [36] 徐洁. 生态系统服务空间流动研究——以宁夏回族自治区为例[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
- [37] 伊力哈木·伊马木,李菊艳,玉米提·吾提库尔,刘金苗.起沙风速的观测方式及其影响因素研究综述.中国水土保持,2021(5):42-44,9.
- [38] 张正偲,董治宝,赵爱国,韩兰英,钱广强,罗万银.沙漠地区风沙活动特征——以中国科学院风沙观测场为例.干旱区研究,2007,24 (4):550-555.
- [39] 苏凯, 王计平, 王茵然, 郭红琼, 李松, 龙芊芊. 基于 HYSPLIT 和 PSCF 的防风固沙生态服务功能空间模拟. 农业机械学报, 2020, 51 (10): 232-242.
- [40] 郑晓静. 风沙运动的力学机理研究. 科技导报, 2007, 25(14): 22-27.
- [41] 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.
- [42] Zhang R H, Zhang S Y, Luo J L, Han Y Y, Zhang J X. Analysis of near-surface wind speed change in China during 1958-2015. Theoretical and Applied Climatology, 2019, 137(3): 2785-2801.
- [43] 谢舒笛,莫兴国,胡实,陈学娟. 三北防护林工程区植被绿度对温度和降水的响应. 地理研究, 2020, 39(1): 152-165.
- [44] 王强, 张勃, 戴声佩, 张芳芳, 赵一飞, 尹海霞, 何旭强. 三北防护林工程区植被覆盖变化与影响因子分析. 中国环境科学, 2012, 32 (7): 1302-1308.
- [45] 黄森旺,李晓松,吴炳方,裴亮.近 25 年三北防护林工程区土地退化及驱动力分析.地理学报,2012,67(5):589-598.
- [46] 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.
- [47] de Groot R, Moolenaar S, de Vente J, De Leijster V, Ramos M E, Robles A B, Schoonhoven Y, Verweij P. Framework for integrated Ecosystem Services assessment of the costs and benefits of large scale landscape restoration illustrated with a case study in Mediterranean Spain. Ecosystem Services, 2022, 53: 101383.