

内蒙古自治区重点生态功能区生态系统类型 转换对土壤风蚀的影响

卢中秋¹, 窦银银², 王俊枝¹, 郭长庆^{2,3}, 柴玉坤¹, 贺淑娟¹

(1.内蒙古自治区测绘地理信息中心, 内蒙古 呼和浩特 010010; 2.中国科学院
地理科学与资源研究所 陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101; 3.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: [目的] 内蒙古自治区重点生态功能区是中国北方生态安全重要屏障。揭示该区生态系统类型转换及对土壤风蚀的影响, 为促进该区生态环境安全与绿色发展提供科学参考。[方法] 基于土地利用、气象和基础地理信息等数据, 采用修正的土壤风蚀方程模型, 揭示内蒙古地区重点生态功能区生态系统类型与土壤风蚀的时空变化特征, 并剖析生态系统类型转换及其对土壤风蚀的影响。[结果] ①2000—2022年内蒙古地区重点生态功能区内生态系统间转换强烈, 生态系统类型转换总面积6 019.59 km², 以草地与荒漠以及耕地与林草的相互转化为主, 2015年之后生态系统趋向稳定, 各类生态系统动态变化强度降低; ②内蒙古地区重点生态功能区平均土壤风蚀模数为56.39 t/hm², 按土壤风蚀量由大到小为荒漠、草地、农田和森林生态系统, 土壤风蚀程度以微度和轻度侵蚀为主, 主要分布在大小兴安岭森林生态功能区 and 科尔沁草原生态功能区等区域; ③内蒙古地区重点生态功能区各类生态系统类型之间的转换造成土壤风蚀量净减少了1.08×10⁸ t, 生态退耕、耕地开垦、草地质量提升、荒漠化防治和建设用地扩展造成土壤风蚀模数分别减少了0.11, 0.23, 0.66, 0.84, 0.68 t/hm²。[结论] 应加强巩固内蒙古重点生态功能区的生态治理成效, 避免复垦与新开荒事件发生, 促进内蒙古地区荒漠化综合防治及高质量发展。

关键词: 主体功能区; 重点生态功能区; 生态系统类型; 修正的风蚀方程模型; 土壤风蚀

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)04-0247-09

中图分类号: P237

文献参数: 卢中秋, 窦银银, 王俊枝, 等. 内蒙古自治区重点生态功能区生态系统类型转换对土壤风蚀的影响[J]. 水土保持通报, 2024, 44(4): 247-256. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.04.026; Lu Zhongqiu, Dou Yinyin, Wang Junzhi, et al. Impacts of different types of ecosystem conversion on soil wind erosion in key ecological functional zone in Inner Mongolia Autonomous Region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(4): 247-256.

Impacts of Different Types of Ecosystem Conversion on Soil Wind Erosion in Key Ecological Functional Zone in Inner Mongolia Autonomous Region

Lu Zhongqiu¹, Dou Yinyin², Wang Junzhi¹, Guo Changqing^{2,3}, Chai Yukun¹, He Shujuan¹

(1. Inner Mongolia Institute of Surveying, Mapping and Geoinformation,

Hohhot, Inner Mongolia 010051, China; 2. Key Laboratory of Land Surface Pattern and

Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of

Sciences, Beijing 100101, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: [Objective] The key ecological functional zone (KEFZ) of the Inner Mongolia Autonomous Region serves as a critical ecological barrier for the security of Northern China. The ecosystem type conversion and its impact on soil wind erosion was analysed in order to provide scientific reference for promoting ecological environment security and green development in this region. [Methods] The revised wind erosion equation (RWEQ) model based on land use, meteorology, and basic geographical information data was adopted to

收稿日期: 2024-02-05

修回日期: 2024-05-15

资助项目: 内蒙古自治区自然资源厅科技创新项目“内蒙古自治区‘三区三线’国土空间开发利用保护和绿色发展监测评估技术研究”(CHZX-2023-45)

第一作者: 卢中秋(1983—), 男(汉族), 河南省济源市人, 本科, 副高级工程师, 主要从事测绘地理信息与卫星遥感方面的研究。Email: 314484577@qq.com。

通信作者: 窦银银(1986—), 女(汉族), 山东省高唐县人, 博士, 助理研究员, 主要从事地理信息系统技术与应用方面的研究。Email: douyinyin@igsnr.ac.cn。

determine spatiotemporal changes in ecosystem structure and soil wind erosion in the KEFZ. This method revealed the impacts of ecosystem type changes on soil wind erosion. [Results] ① Substantial conversion between ecosystems in the KEFZ was observed, with a total area of change amounting to 6 019.59 km² from 2000 to 2022. The main transformations were between grasslands and deserts, and between cultivated land and forest-grassland ecosystems. The ecosystem tended to stabilise after 2015, with a reduction in the intensity of changes across various ecosystem types. ② The average soil wind erosion modulus in the KEFZ was 56.39 t/hm², with the erosion levels the highest in desert ecosystems, followed by grasslands, farmlands, and forests. Soil wind erosion was predominantly slight and light, mainly occurring in areas such as the Greater and Lesser Khingan Range forest ecological function area and the Horqin Grassland ecological function area. ③ The conversion between different types of ecosystems in the KEFZ resulted in a net reduction in soil wind erosion of 1.08×10^8 t. Ecological restoration, land reclamation, grassland quality improvement, desertification control, and the expansion of construction land decreased soil wind erosion modulus by 0.11, 0.23, 0.66, 0.84 t/hm², and 0.68 t/hm², respectively. [Conclusion] Strengthening the consolidation of the effectiveness of ecological management in the KEFZ and avoiding the occurrence of and new land reclamation will be conducive to the comprehensive prevention and control of desertification and high-quality development in Inner Mongolia Autonomous Region.

Keywords: major function-oriented zone; key ecological functional zone; ecosystem type; revised wind erosion equation (RWEQ) model; soil wind erosion

为全面把握国土空间开发趋势,妥善应对粮食安全、水安全、生态安全、能源资源安全与生物多样性维持的严峻挑战,国务院于 2010 年印发了《全国主体功能区规划》,以构建高效、协调、可持续的国土空间开发格局。其中,重点生态功能区是指生态系统脆弱或生态功能重要,资源环境承载能力较低,在国土空间开发中限制进行大规模高强度工业化城镇化开发,以保持并增强生态产品生产能力作为首要任务的地区^[1]。作为保障中国生态安全的重要区域、人与自然和谐相处的示范区,重点生态功能区旨在保护和修复生态环境、因地制宜地发展适配主体功能定位的适宜产业,并有效提高区域水源涵养、水土保持、防风固沙和生物多样性等重要生态功能^[1]。已有研究针对全国重点生态功能区^[2]与单一生态功能区^[3]的生态系统类型与服务展开了深入研究。同时,重点生态功能区设立成效、生态影响及政策效应研究逐步深入^[4-5]。

内蒙古自治区作为我国北方重要的生态安全屏障,其生态环境状况直接关系到国家的生态安全和可持续发展。内蒙古地区生态系统复杂,受气候变化及过度放牧等人类活动因素影响,土壤风蚀导致地表呈现不同程度的土地肥力下降、土地沙化与荒漠化等退化现象^[6-8]。已有研究^[7,9]表明,“三北”防护林、京津冀风沙源治理、退耕还林还草、围封禁牧等生态保护工程的实施,有效改善了内蒙古地区土地沙漠化。在生态系统类型转换上,土地利用/覆盖变化数据被广泛应用,并利用样带研究方法^[10]、土地利用转移矩

阵^[11]、土地利用动态度等^[12]方法研究内蒙古地区生态系统类型转换特征。基于修正的风蚀方程(Revised wind erosion equation, RWEQ)模型,已有学者针对内蒙古高原^[13]、内蒙古自治区^[14]、锡林郭勒盟^[15]、浑善达克沙漠等^[16]地区开展了多尺度土壤风蚀与防风固沙功能的时空差异特征研究,并探讨了土壤风蚀变化的影响因素。另外,内蒙古地区土地利用覆盖变化及其对生态系统服务影响逐渐成为热点问题^[7,17],但针对区域重点生态功能区的研究相对较少,再者内蒙古重点生态功能区作为生态安全屏障及可持续发展战略的重要组成部分,深入研究其生态系统类型转换及其对土壤风蚀的影响对改善区域生态环境治理及支撑地区高质量发展具有重要意义。为此,本文以生态环境脆弱、土壤风蚀较为严重的内蒙古地区重点生态功能区为研究对象,基于土地利用、气象和基础地理信息等数据资料,利用 RWEQ 模型,监测 2000—2022 年内蒙古地区重点生态功能区的土壤风蚀量,分析内蒙古地区重点生态功能区生态系统类型及土壤风蚀变化的时空特征,并揭示其生态系统类型转换对土壤风蚀的影响,以期为内蒙古地区生态保护与建设、土壤风蚀防治及区域可持续发展规划及管理提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

内蒙古自治区位于中国北部边疆,地处 37°24′—53°23′N, 97°12′—126°04′E,全区土地总面积约为

$1.18 \times 10^6 \text{ km}^2$, 呈狭长型由东北向西南方向延伸^[18]。气候以温带大陆性季风气候为主, 冬冷夏热, 昼夜温差较大, 年平均气温 $0 \sim 18 \text{ }^\circ\text{C}$, 降水量少而不均, 由东北向西北递减, 年总降水量 $30 \sim 450 \text{ mm}$ ^[18]。地形复杂多样, 以高原为主, 大部分地区海拔在 $1\ 000 \text{ m}$ 以上, 土壤类型以栗钙土、棕钙土、风沙土等为主^[19]。全区草原、森林和湿地等自然生态用地占比 70% 以上, 是阻挡西北风沙的重要生态屏障。内蒙古自治区重点生态功能区分为国家级和自治区级 2 个层面^[1], 涉及旗县市区 43 个, 国土面积 $8.43 \times 10^5 \text{ km}^2$, 占全区国土面积的 71.29% 。为明确不同区域的生态保护和建设重点, 内蒙古自治区重点生态功能区细分为大小兴安岭森林区、呼伦贝尔草原草甸区、科尔沁草原区、阴山北麓草原区、黄土高原丘陵沟壑水土保持区、浑善达克沙漠化防治区和阿拉善沙漠化防治区 7 个区域。

1.2 数据来源

本文使用的数据包括土地利用/覆盖数据、气候数据、土壤和植被数据、主体功能区区划数据、基础地

理信息数据等。其中, 2000, 2005, 2010, 2015, 2020, 2022 年内蒙古自治区 30 m 空间分辨率土地利用/覆盖数据来源于中国科学院地理科学与资源研究所区域环境与生态信息研究室, 数据综合精度为 90% 以上^[20]。根据内蒙古自治区土地利用状况和生态系统特征, 将内蒙古自治区重点生态功能区内的生态系统分为农田、森林、草地、水体与湿地、聚落和荒漠生态系统(表 1)。气候数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>), 包括逐日平均气温、降水量、平均风速、风向、沙尘暴、日照时数等要素数据, 其中气温、降水、风速等数据基于 ANUSPLIN 软件进行空间化处理; 另外, 多年积雪覆盖、土壤类型和植被覆盖来源于国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn>), 土壤碳酸钙含量分布数据来源于地球系统科学数据共享服务网(<http://www.geodata.cn>)。主体功能区区划数据来源于国务院发布的《国土空间规划》白皮书。数字高程、地貌等基础地理信息数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn>)。

表 1 内蒙古自治区重点生态功能区生态系统类型分类

Table 1 Classification of ecosystem types in key ecological functional zone in Inner Mongolia Autonomous Region

编码	生态系统类型	土地利用类型
10	农田生态系统	水田和旱地
20	森林生态系统	有林地、灌木林地、疏林地和其他林地
30	草地生态系统	高覆盖度草地(覆盖度 $> 50\%$)、中覆盖度草地(覆盖度 $20\% \sim 50\%$)和低覆盖度草地(覆盖度 $5\% \sim 20\%$)
40	水体与湿地生态系统	河渠、湖泊、水库坑塘、滩地和沼泽地
50	聚落生态系统	城镇用地、农村居民点和其他建设用地
60	荒漠生态系统	沙地、戈壁、盐碱地、裸土地、裸岩石砾地和其他未利用地

1.3 研究方法

1.3.1 土壤风蚀模型 本文利用美国农业部的修正土壤风蚀方程(Revised wind erosion equation, RWEQ)模型定量评估土壤风蚀量^[21]。RWEQ 模型在结构上可分为土壤可蚀性因子、土壤结皮因子、植被因子、地表粗糙度因子和气候因子 5 个部分, 模型基本形式为^[13, 21]:

$$Q_x = Q_{\max} [1 - e^{-(\frac{x}{s})^2}] \quad (1)$$

$$Q_{\max} = 109.8 (WF \cdot EF \cdot SCF \cdot K' \cdot COG) \quad (2)$$

$$s = 150.71 (WF \cdot EF \cdot SCF \cdot K' \cdot COG)^{-0.3711} \quad (3)$$

式中: Q_x 为地块长度 x 处的沙通量(kg/m); Q_{\max} 为

$$EF = \frac{29.09 + 0.31S_a + 0.17S_i + 0.33S_a/C_l - 2.59OM - 0.95CaCO_3}{100} \quad (5)$$

$$SCF = \frac{1}{1 + 0.0066(CI)^2 + 0.021(OM)^2} \quad (6)$$

式中: S_a 为土壤砂粒含量($\%$); S_i 为土壤粉砂含量

风力的最大输沙能力(kg/m); s 为关键地块长度(m); WF 为气象因子; EF 为土壤可蚀性因子; SCF 为土壤结皮因子; K' 为土壤糙度因子; COG 为植被因子。

$$WF = \frac{\sum_{i=1}^N WS_2 (WS_2 - WS_i)^2 \times N_d \rho}{N \times g} \times SW \times SD \quad (4)$$

式中: WS_2 为 2 m 处风速(m/s); WS_i 为 2 m 处临界风速(m/s), 假定为 $5 \text{ m}/\text{s}$; N 为风速的观测次数; N_d 为试验的天数; ρ 为空气密度(kg/m^3); g 为重力加速度(m/s^2); SW 为土壤湿度因子; SD 为雪覆盖因子。

($\%$); C_l 为土壤黏粒含量($\%$); OM 为有机质含量($\%$); $CaCO_3$ 为碳酸钙含量($\%$)。

$$K' = e^{(1.86K_r - 2.41K_{p,934} - 0.124C_{rr})} \quad (7)$$

式中: K_r 为地形粗糙度因子(cm); C_{rr} 为随机粗糙度因子(cm)。

$$\text{COG} = \text{SLR}_f \cdot \text{SLR}_s \cdot \text{SLR}_c \quad (8)$$

式中: SLR_f 为倒伏残茬土壤流失比率; SLR_s 为直立残茬土壤流失比率; SLR_c 为植被覆盖土壤流失比率。

基于 RWEQ 模型反演了 2000—2022 年内蒙古自治区 250 m 空间分辨率逐年土壤风蚀模数数据, 并利用已有 ^{137}Cs 样点采样监测进行验证, 结果显示模型反演与野外监测结果具有较好的拟合性^[13]。

1.3.2 划分土壤侵蚀等级 本文参考中华人民共和国水利部颁布的《土壤侵蚀分类分级标准(SL190—2007)》^[22], 根据土壤风蚀模数的不同, 土壤风蚀程度被划分为微度($< 5 \text{ t/hm}^2$)、轻度($5 \sim 25 \text{ t/hm}^2$)、中度($25 \sim 50 \text{ t/hm}^2$)、强烈($50 \sim 80 \text{ t/hm}^2$)、极强烈($80 \sim 150 \text{ t/hm}^2$)和剧烈($> 150 \text{ t/hm}^2$)这 6 个等级。

1.3.3 分析土壤风蚀的年际变化趋势 为探测内蒙古自治区重点生态功能区土壤风蚀年际变化的方向与幅度, 利用最小二乘法线性回归模型计算各像元土壤风蚀的变化趋势。计算公式为:

$$\text{Slope} = \frac{n \sum_{i=1}^n i \cdot v_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n v_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (9)$$

式中: Slope 为线性回归斜率, 即土壤侵蚀模数年际变化量; i 为年变量的年份序号; n 为累计年数; v_i 为第 i 年土壤风蚀模数。一般而言, $\text{Slope} > 0$ 表示该像元土壤风蚀年际变化呈现增加趋势, $\text{Slope} < 0$ 表示土壤风蚀年际变化呈现减少趋势, $\text{Slope} = 0$ 表示土壤风蚀年际之间无明显变化。

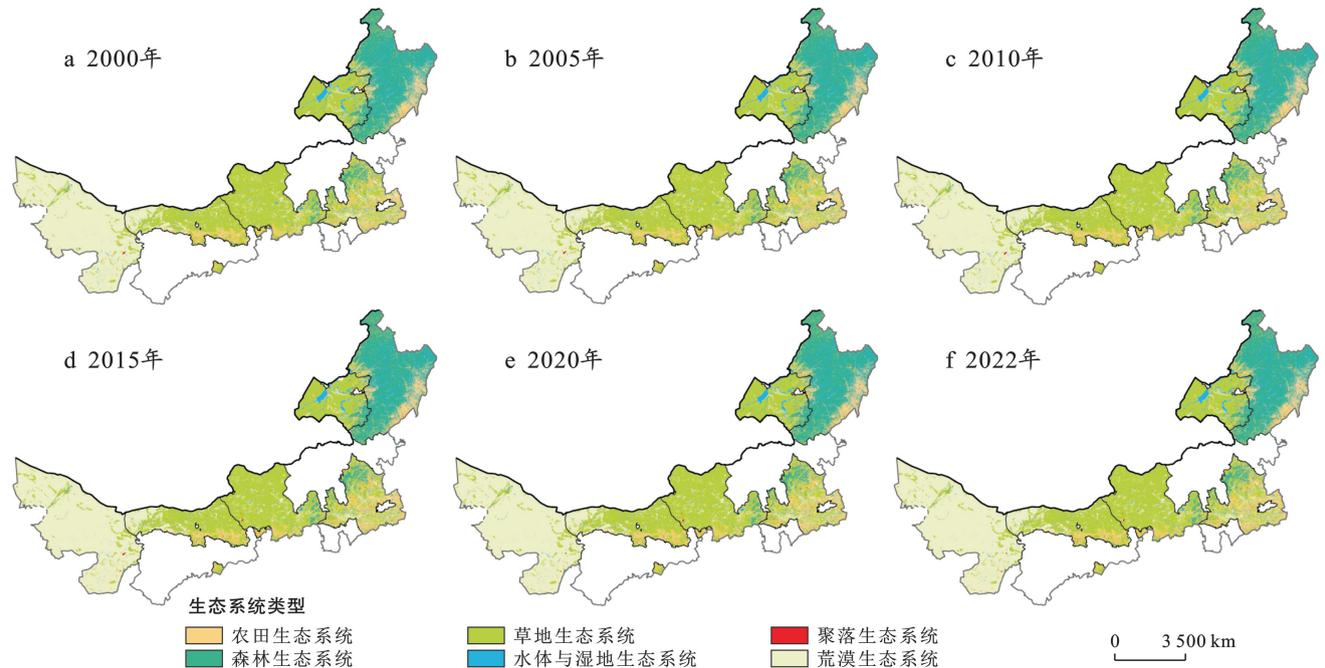
1.3.4 生态系统类型转换及其土壤风蚀影响分析

基于生态系统类型、土壤风蚀模数及其年际变化量数据, 结合内蒙古自治区重点生态功能区分区和生态系统类型转换, 采用空间分析方法, 计算各生态功能区的平均土壤风蚀模数、风蚀量和年际变化量及不同侵蚀程度的分级面积比例, 并统计分析不同生态系统与生态系统变化过程中土壤风蚀模数及年际变化量的变化特征, 以此揭示内蒙古自治区重点生态功能区生态系统类型转换对土壤风蚀的影响。

2 结果与分析

2.1 内蒙古地区重点生态功能区的生态系统类型转换特征

2022 年内蒙古自治区重点生态功能区多种生态系统并存, 以草地和荒漠生态系统面积较大, 分别为 $2.98 \times 10^5 \text{ km}^2$, $2.73 \times 10^5 \text{ km}^2$, 分别占区域面积的 35.38% 和 32.40% (图 1)。



注: 审图号为蒙 S(2023) 025 号, 底图边界无修改。下同。

图 1 2000—2022 年内蒙古自治区重点生态功能区不同生态系统类型空间分布

Fig.1 Spatial distribution of different ecosystem types in key ecological functional zone in Inner Mongolia Autonomous Region during 2000—2022

另外, 森林、农田和水体与湿地生态系统面积较大, 分别占区域面积的 17.58%, 8.01% 和 5.88%, 而

聚落生态系统面积相对较小, 仅占区域面积的 0.75%。从不同生态系统空间分布来看, 草地生态系

统主要分布在浑善达克沙漠化防治区、阴山北麓草原区、呼伦贝尔草原草甸区和科尔沁草原区,合计占区域草地面积的90%以上;荒漠生态系统主要分布在阿拉善沙漠化防治区,占区域荒漠面积的81.04%;森林和水体与湿地生态系统则主要分布在大小兴安岭森林区,分别占区域森林和水体与湿地面积的78.67%和58.42%;而农田和聚落生态系统类型分布较为分散,呈现局部聚集的特点,主要分布在科尔沁草原区、大小兴安岭森林区和阴山北麓草原区,合计面积占比均在70%以上。

2000—2022年内蒙古自治区重点生态功能区生态系统类型转换总面积6 019.59 km²,占区域面积的0.36%(图1)。期间农田、聚落和森林生态系统面积分别净增加了1 502.70,1 202.52和299.97 km²,草地、水体与湿地和荒漠生态系统面积分别净减少了1 597.69,1 320.82和95.89 km²。总体上,受地方发展政策、退耕还林还草及沙漠化防治等生态保护生态工程建设因素的影响,内蒙古自治区重点生态功能区生态系统类型转换主要表现为草地与荒漠以及耕地与林草的相互转化。其中,草地与荒漠生态系统的相互转换主要发生在浑善达克沙漠化防治区、科尔沁草原区和阴山北麓草原区,浑善达克沙漠化防治区和阴山北麓草原区沙漠化防治效果较为显著,草原生态系统面积分别净增长了192.61和45.83 km²。耕地与林草生态系统的相互转换主要发生在科尔沁草原区和阴山北麓草原区,但从净变化面积来看,科尔沁草原区表现为耕地开垦(1 356.49 km²),而阴山北麓草原区表现为退耕还林还草(306.43 km²)。

在不同时间阶段上,内蒙古自治区重点生态功能区生态系统类型转换具有显著差异(图2)。农田生态系统面积呈现稳定增长的变化趋势,但近年来增长速度有所放缓,尤其是2015—2020年农田生态系统面积增长速度仅为2010—2015年的27.47%。森林生态系统面积呈现波动增长的变化趋势,尤其是2002年全面启动退耕还林工程以来,2000—2005年森林生态系统面积增长最大为357.19 km²,近年来,随着生态保护工程建设的逐步深入,森林生态系统基本稳定,2020—2022年变化面积仅为2015—2020年的10.54%。而草地、水体与湿地和荒漠生态系统面积呈现波动减少的变化趋势,但减少的时间阶段各不相同。草地生态系统面积已经由持续减少(2010—2020年)转变为缓慢增加(2020—2022年);水体与湿地生态系统受气候变化和人类活动的综合影响仍呈现年际动态变化;荒漠生态系统面积在2000—2005年

增长最多,70%以上来源于草地退化,2005年之后,随着内蒙古自治区不断加大沙漠化防治力度,2005—2015年荒漠生态系统面积减少了1 469.88 km²,近年来趋于稳定,2020—2022年减少面积仅为3.38 km²。另外,聚落生态系统面积持续增长,2010—2015年是增长速度最快的阶段,为173.60 km²/a,而2020—2022年增长速度放缓,仅为5.42 km²/a。

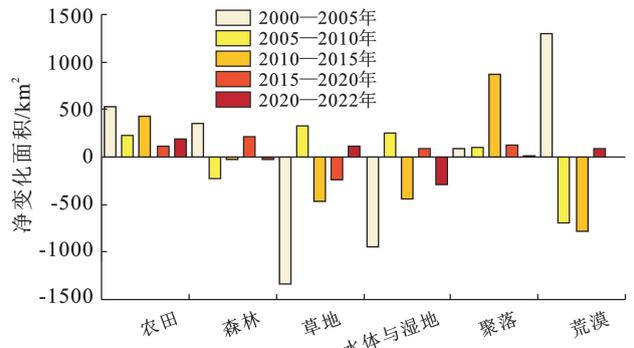


图2 2000—2022年内蒙古自治区重点生态功能区生态系统类型面积变化

Fig.2 Area changes in ecosystem types in key ecological functional zone in Inner Mongolia Autonomous Region during 2000—2022

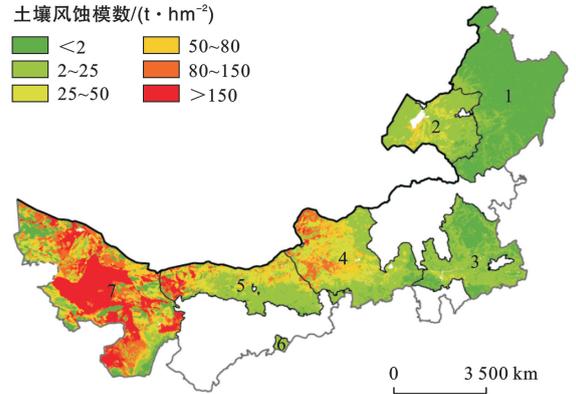
2.2 内蒙古地区重点生态功能区土壤风蚀时空分布特征

从内蒙古重点生态功能区平均土壤风蚀状况来看,2000—2022年平均土壤风蚀模数为56.39 t/hm²,多年平均年土壤风蚀量为 4.71×10^9 t。按土壤风蚀量由大到小为荒漠、草地、农田和森林生态系统,其中荒漠生态系统贡献了75%以上的土壤风蚀量。土壤风蚀程度以微度和轻度侵蚀为主,面积分别为 2.62×10^5 km², 2.64×10^5 km²,主要分布在大小兴安岭森林生态功能区 and 科尔沁草原生态功能区等区域,合计占重点生态功能区总面积的63.01%(图3)。另外,中度侵蚀面积为 8.94×10^4 km²,所占比例为10.70%;强烈及以上面积为 2.20×10^5 km²,所占比例为26.29%,多分布于内蒙古中西部地区。从各生态功能区来看,阿拉善沙漠化防治区、阴山北麓草原区和浑善达克沙漠化防治区土壤风蚀较为严重,多年平均风蚀模数分别为149.86,45.39和36.57 t/hm²,呼伦贝尔草原草甸区、黄土高原丘陵沟壑水土保持区、科尔沁草原区和大小兴安岭森林区多年平均风蚀模数相对较小,分别为13.68,13.34,4.97和0.86 t/hm²。

2000—2022年,内蒙古自治区重点生态功能区土壤风蚀状况总体呈现减缓趋势,土壤风蚀模数平均每年减少0.94 t/hm²(图4)。呼伦贝尔草原草甸区土

壤风蚀表现为上升趋势,土壤风蚀模数每年增加 0.35 t/hm^2 ;其他生态功能区风蚀均表现为下降趋势,其中阿拉善沙漠化防治区土壤风蚀模数每年减少 2.48 t/hm^2 ,远高于其他生态功能区。从不同时间阶段来看,2000—2005年、2010—2015年和2015—2020年内蒙古自治区重点生态功能区土壤风蚀年际变化表现为减少趋势(图4)。自2012年生态文明建设以来,内蒙古自治区重点生态功能区土壤风蚀2015—2020年减少幅度最大,土壤风蚀模数每年减少 4.52 t/hm^2 ,主要分布在阿拉善沙漠化防治区、呼伦贝尔草原草甸区和阴山北麓草原区。2005—2010年和2020—2022年内蒙古自治区重点生态功能区土壤风蚀年际变化表现为增长趋势,其中2020—2022年增长较为明显,土壤风蚀模数每年增加 5.20 t/hm^2 ,主要分布在阿拉善沙漠化防治区,呼伦贝尔草原草甸区和阴山北麓生态区从2015—2020年的减少趋势转为轻微增长趋势。另外,科尔沁草原区土壤风蚀年际变化从2015—2020年的增长趋势转为2020—2022年

的减少趋势,浑善达克沙漠化防治区在所有时段上均表现为减少趋势。



注:1 大小兴安岭森林区;2 呼伦贝尔草原草甸区;3 科尔沁草原区;4 浑善达克沙漠化防治区;5 阴山北麓草原区;6 黄土高原丘陵沟壑水土保持区;7 阿拉善沙漠化防治区。

图3 2000—2022年内蒙古自治区重点生态功能区平均土壤风蚀量空间分布

Fig.3 Spatial distribution of average soil wind erosion in key ecological functional zone in Inner Mongolia Autonomous Region during 2000—2022

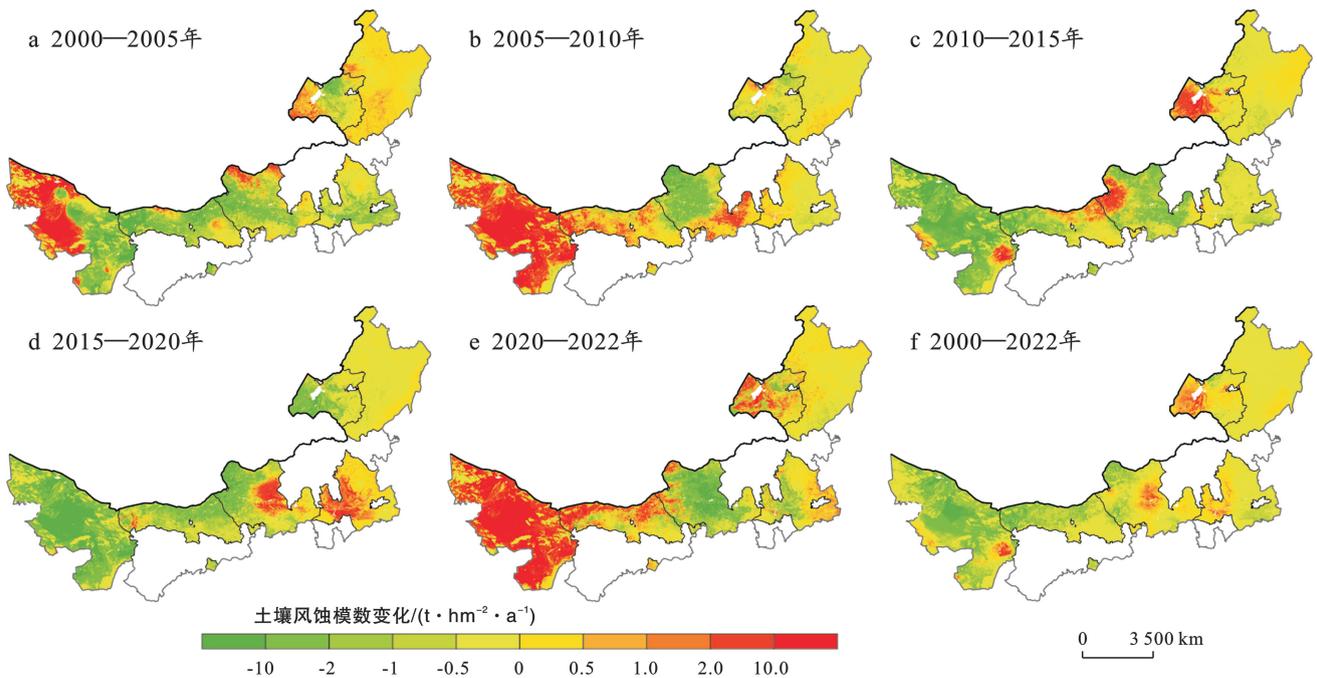


图4 内蒙古自治区重点生态功能区不同时段土壤风蚀量变化空间分布

Fig.4 Spatial distribution of changes in soil wind erosion in key ecological functional zone in Inner Mongolia Autonomous Region at different periods

2.3 生态系统类型转换对土壤风蚀的影响分析

按照生态系统分类,本文假设水体与湿地和聚落生态系统不发生任何形式的风蚀^[16]。根据内蒙古自治区重点生态功能区生态系统和土壤风蚀年际变化特征,以2000—2010年、2010—2020年和2020—2022年为时间阶段分析生态系统类型转换对土壤风蚀的影响。在人类活动和气候变化的影响下,2000—

2022年内蒙古自治区重点生态功能区生态系统类型相互转换剧烈,主要包括生态退耕(农田转为林地、草地、水体与湿地)、耕地开垦(林地、草地、水体与湿地和荒漠转为农田)、草地质量提升(低覆盖转中、高覆盖及中覆盖转高覆盖)、草地质量退化(高覆盖转中、低覆盖及中覆盖转低覆盖)、荒漠化防治(荒漠转为林地、草地、水体与湿地)以及建设用地扩展(其他转为

聚落)等。2000—2022年,内蒙古自治区重点生态功能区各类生态系统类型之间的转换造成土壤风蚀量净减少了 1.08×10^8 t。其中,生态退耕、耕地开垦、草地质量提升、荒漠化防治和建设用地扩展造成土壤风蚀模数分别减少了0.11, 0.23, 0.66, 0.84和0.68 t/hm²,相应地土壤风蚀量每年分别减少了 2.12×10^4 , 9.21×10^4 , 3.41×10^5 , 2.21×10^5 , 9.14×10^4 t

(表2)。2000—2022年,内蒙古自治区重点生态功能区草地质量退化并未导致土壤风蚀量增加,相反土壤风蚀量每年减少了 2.05×10^5 t,主要原因是区域内土壤风蚀状况总体呈现减缓趋势,草地生态系统土壤风蚀模数平均每年减少0.46 t/hm²,尤其是低覆盖草地生态系统土壤风蚀模数平均每年减少1.23 t/hm²(表2,图4)。

表2 2000—2022年内蒙古自治区重点生态功能区主要生态系统变化与土壤风蚀年际变化量统计
Table 2 Statistics on conversion of major ecosystems and interannual variation of soil wind erosion in key ecological functional zone in Inner Mongolia Autonomous Region during 2000—2022

生态系统变化	面积/km ²				土壤风蚀年际变化量/(10 ⁴ t · a ⁻¹)			
	2000—2010年	2010—2020年	2020—2022年	2000—2022年	2000—2010年	2010—2020年	2020—2022年	2000—2022年
生态退耕	1 295.73	552.24	248.19	1 987.45	-4.33	-0.20	-1.04	-2.12
耕地开垦	2 166.25	1 477.54	451.06	3 981.47	-13.16	-3.16	-1.14	-9.21
草地质量提升	3 029.29	2 221.52	83.16	5 199.23	-44.21	-11.60	0.77	-34.09
草地质量退化	2 114.89	1 747.64	0.32	3 752.30	-41.93	11.34	0.00	-20.51
荒漠化防治	1 638.83	760.36	300.16	2 621.03	-27.73	-6.52	2.03	-22.13
建设用地扩展	201.06	1 123.16	14.78	1 335.09	-0.76	-10.56	-0.04	-9.14

在不同时间阶段上,内蒙古自治区重点生态功能区生态系统变化程度不同,对土壤风蚀的影响程度也具有明显差异(表2)。2000—2010年,内蒙古自治区重点生态功能区生态系统变化最为剧烈,荒漠化防治面积为1 638.83 km²,土壤风蚀量每年减少了 2.77×10^5 t,荒漠化防治成效显著;草地质量提升面积最大为3 029.29 km²,土壤风蚀量明显减少,年均减少了 4.42×10^5 t;耕地开垦面积为2 166.25 km²,土壤风蚀量明显减少,年均减少了 1.32×10^5 t;另外,生态退耕和建设用地扩展同样造成土壤风蚀减少,土壤风蚀量每年分别减少了 4.33×10^4 t和7 600 t。2010—2020年,在生态系统类型转换上以草地质量提升、草地质量退化、耕地开垦和建设用地扩展为主。其中,土壤风蚀年际减少量以草地质量提升最多(1.16×10^5 t/a),建设用地扩展次之(1.06×10^5 t/a),荒漠化防治为 6.52×10^4 t/a;而草地质量退化导致土壤风蚀量年均增加了 1.13×10^5 t(表2)。与其他时间段相比,2020—2022年,草地质量退化显著减少、建设用地扩展速度明显减缓,相应的土壤风蚀年际变化量较小;而荒漠化防治造成的土壤风蚀年际变化量呈现增长趋势,主要原因为荒漠生态系统土壤风蚀模数由2020年的86.36 t/(hm² · a)增加到2022年的120.32 t/(hm² · a)。这表明生态退耕、耕地开垦、草地质量提升、荒漠化防治和建设用地扩展对于缓解土壤风蚀具有促进作用,但同时又受到风速、植被条件等自然因素的影响。

3 结果讨论

全球气候变化、区域生态保护与修复,以及生态工程和政策规划,共同影响着陆地生态系统类型转换^[23]。已有研究^[23]表明,不同生态系统在气温、降水等自然因素的作用下会发生转变。其中,气候条件是导致植被覆盖空间分异的主要因素。此外,即使气温和降水等气候条件未发生明显变化,人为因素和政策规划对生态系统类型转换的影响也不可忽视^[23-24]。例如,从“十一五”规划纲要提出“推进主体功能区形成”至今,主体功能区建设及其配套政策完善已成为中国生态环境保护的重大战略^[25]。

土壤风蚀作为干旱与半干旱地区严重的生态环境问题之一,是区域气候、植被、土壤及土地利用/覆盖等多因素共同作用的结果^[26]。气象因子是影响土壤风蚀强度的重要因素之一,其中风速在土壤风蚀形成过程中起主导作用^[13]。已有研究表明当风速超过一定阈值时,侵蚀沉积物中的土壤粗粒比例随风速升高而增加^[27]。另外,降水和温度对土壤可蚀性也有重要影响,总体上气象因子对土壤风蚀的相对贡献度随着植被覆盖的增加而降低,但其绝对贡献始终大于植被覆盖^[28]。

生态系统类型转换通过改变植被覆盖、下垫面粗糙度、降低风速等影响地表侵蚀作用的方式成为影响土壤风蚀的重要因素^[13]。生态系统类型转换过程中草地与林地面积显著增加,对减缓土壤风蚀具有明显作用^[16,26]。草地与林地生态系统的植被生长增加了

地表粗糙度,有效隔绝了风沙流与地表的直接接触,有助于提升生态系统抵御土壤风蚀能力^[29]。此外,已有研究^[30]表明林地的树木根系比禾本科更深,有效提高了土壤结构稳定性,降低了土壤可蚀性,植树造林对风蚀的平均缓解效应为 57.05%。因此,高植被覆盖可以有效缓解风力侵蚀作用,降低土壤风蚀速率,内蒙古地区植被覆盖达到 75% 以上能有效抑制土壤风蚀^[8]。在农田生态系统中,与流动沙丘土壤相比,含有粉砂粒较多的农田土壤的风蚀量更小,土壤含水量的增加可增强土壤颗粒之间的结合力,从而增强土壤的抗风蚀能力^[31]。中国北方地区生态环境工程实施后,大部分地区春季植被盖度的提高与防风固沙服务保有率的提升呈显著正相关,不同生态系统的生态系统服务功能增量不同,草地生态系统、森林生态系统、农田生态系统和沙漠生态系统的防风固沙服务功能增量分别为 2.02%,1.15%,0.99% 和 0.86%^[32]。可见,不同生态系统类型及其转换对土壤风蚀的影响不尽相同。

土壤风蚀减少了土壤养分和有机物的储存,从而降低了土壤肥力和土壤功能,对生态系统产生深远影响,可能造成草地退化和农田土壤贫瘠与荒漠化^[28]。风蚀也被认为是植物生产力的主要限制因素之一,风蚀过程直接损失的土壤有机碳甚至超过净初级生产力,并且土壤风蚀会降低土壤肥力和保水能力,间接影响植物对二氧化碳的吸收^[33]。已有研究^[34]表明,在干旱和半干旱生态系统中,因受土壤风蚀导致的有机碳和黏土含量分别下降 67.4% 和 64.5%,总磷和平均水分分别下降了 31.4% 和 51.8%。2001—2014 年中国北方地区由风蚀所引起的荒漠生态系统养分流失占华北地区损失总量的比重最大,土壤有机碳、总氮、总磷的流失比例均超过 50%,草原生态系统养分损失比例也相对较高,而受人类活动影响的农田生态系统养分损失占比不足 10%^[35]。

综上,秉持生态优先、绿色发展的原则,积极推进退耕还林还草工程,坚决遏制生态系统退化趋势,提升重点生态功能区的区域生态服务功能、完整性和稳定性,是不可动摇的环境政策。一系列政策的推动实施使得地方政府更加重视重点功能区内的生态环境保护与治理工作,进而对功能区生态系统类型的保护与恢复起到积极作用^[24]。内蒙古地区在 20 世纪 80 年代至 2000 年间主要表现为耕地开垦大面积占用林草地,粗放式的开发模式导致草地破坏,土地沙化与荒漠化加剧等^[6,8]。为减少水土流失并提高生态系统服务,自 2000 年以来,内蒙古地区实施了“三北”防护林工程、退耕还林还草、天然林保护工程和京津风沙

源治理工程等一系列重大生态工程项目,有效减缓了土壤风蚀等生态环境问题^[28]。近年来,内蒙古地区步入生态保护与工程建设的巩固期。因此,在持续加强荒漠化综合防治、积极推进“三北”等重点生态工程建设攻坚战的同时,应注重加强重点生态功能区的工程监管与保障措施,着力巩固生态治理成效,避免毁林造田等复垦与新开荒事件发生,为内蒙古地区高质量发展提供坚实保障。

4 结论

(1) 2000—2022 年,内蒙古自治区重点生态功能区生态系统类型转换总面积为 6 019.59 km²,占区域面积的 0.36%,受地方发展政策、退耕还林还草及荒漠化防治等生态保护生态工程建设因素的影响,生态系统类型转换主要表现为草地与荒漠以及耕地与林草的相互转化。草地与荒漠生态系统的相互转化主要发生在浑善达克沙漠化防治区、科尔沁草原区和阴山北麓草原区,浑善达克沙漠化防治区和阴山北麓草原区沙漠化防治效果较为显著,耕地与林草生态系统的相互转化主要发生在科尔沁草原区和阴山北麓草原区。

(2) 2000—2022 年,内蒙古地区重点生态功能区按土壤风蚀量由大到小为荒漠、草地、农田和森林生态系统,平均土壤风蚀模数为 56.39 t/hm²,多年平均年土壤风蚀量为 4.71×10^9 t,土壤风蚀程度以微度和轻度侵蚀为主,主要分布在大小兴安岭森林生态功能区 and 科尔沁草原生态功能区等区域。从各生态功能区来看,阿拉善沙漠化防治区、阴山北麓草原区和浑善达克沙漠化防治区土壤风蚀较为严重。

(3) 2000—2022 年,内蒙古自治区重点生态功能区各类生态系统类型之间的转换造成土壤风蚀量净减少了 1.08×10^8 t。生态退耕、耕地开垦、草地质量提升、荒漠化防治和建设用地扩展造成土壤风蚀量每年分别减少了 2.12×10^4 , 9.21×10^4 , 34.09×10^5 , 2.21×10^5 , 9.14×10^4 t。在不同时间阶段上,2000—2010 年,内蒙古自治区重点生态功能区生态系统变化最为剧烈,荒漠化防治面积为 1 638.83 km²,土壤风蚀量每年减少了 2.77×10^5 t,荒漠化防治成效显著。

参考文献 (References)

- [1] 国家发展和改革委员会.全国及各地区主体功能区规划:下[M].北京:人民出版社,2015.
National Development and Reform Commission. National and Regional Main Functional Area Planning: Part 2 [M]. Beijing: People's Publishing House, 2015.
- [2] 陈瑜琦,张智杰,郭旭东,等.中国重点生态功能区生态用地时空格局变化研究[J].中国土地科学,2018,32(2):

- 19-26.
- Chen Yuqi, Zhang Zhijie, Guo Xudong, et al. Spatial-temporal analysis on ecological land changes in the key ecological functional areas in China [J]. *China Land Science*, 2018,32(2):19-26.
- [3] Yu Fuqin, Lu Chunxia, Xiao Yu, et al. Ecosystem service value assessment for national key eco-function zones for water and soil conservation [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2017,8(4):369-377.
- [4] 丁斐,庄贵阳.国家重点生态功能区设立是否促进了经济发展:基于双重差分法的政策效果评估[J].*中国人口·资源与环境*,2021,31(10):19-28.
- Ding Fei, Zhuang Guiyang. Has the establishment of National Key Ecological Function Areas promoted economic development?: Evaluation of the policy effects based on a DID study [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2021,31(10):19-28.
- [5] Gong Changan, Zhang Jianhua, Liu Hao. Do industrial pollution activities in China respond to ecological fiscal transfers? Evidence from payments to national key ecological function zones [J]. *Journal of Environmental Planning and Management*, 2021,64(7):1184-1203.
- [6] 陈海燕,邵全琴,安如.1980s—2005年内蒙古地区土地利用/覆被变化分析[J].*地球信息科学学报*,2013,15(2):225-232.
- Chen Haiyan, Shao Quanqin, An Ru. Study on land use/cover changes in the Inner Mongolia autonomous region from 1980s to 2005 [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2013,15(2):225-232.
- [7] 丁雪,雷国平,许端阳,等.1981—2010年内蒙古沙漠化演变对区域生态系统服务价值的影响[J].*水土保持研究*,2018,25(1):298-303.
- Ding Xue, Lei Guoping, Xu Duanyang, et al. Impact of desertification dynamics on regional ecosystem service values in Inner Mongolia from 1981 to 2010 [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018,25(1):298-303.
- [8] 吴晓光,姚云峰,迟文峰,等.1990—2015年内蒙古高原土壤风蚀时空差异特征[J].*中国农业大学学报*,2020,25(3):117-127.
- Wu Xiaoguang, Yao Yunfeng, Chi Wenfeng, et al. Spatio-temporal characteristics of soil wind erosion in Inner Mongolia Plateau from 1990 to 2015 [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020,25(3):117-127.
- [9] 纪平,邵全琴,王敏,等.中国三北防护林工程第二阶段生态效益综合评价[J].*林业科学*,2022,58(11):31-48.
- Ji Ping, Shao Quanqin, Wang Min, et al. Monitoring and assessment of ecological benefits of the shelter forest program in the three-north region during 2001-2020 [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2022,58(11):31-48.
- [10] 刘丹,李琳娜.1995—2015年中国北方边境样带土地利用时空格局演变及驱动因素[J].*资源科学*,2021,43(6):1208-1221.
- Liu Dan, Li Linna. Spatiotemporal change and driving factors of land use in the northern border transect of China, 1995—2015 [J]. *Resources Science*, 2021,43(6):1208-1221.
- [11] 高利峰,张磊,赵先贵.基于RS和GIS的内蒙自治区土地利用及景观格局变化[J].*山西农业科学*,2016,44(2):255-259.
- Gao Lifeng, Zhang Lei, Zhao Xiangui. Changes of land use and landscape pattern in Inner Mongolia Region based on RS and GIS [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2016,44(2):255-259.
- [12] 王俊枝,窦银银,薛志忠,等.基于主体功能区划的内蒙自治区近30年国土空间演化遥感监测与分析[J].*测绘通报*,2023(4):54-58.
- Wang Junzhi, Dou Yinyin, Xue Zhizhong, et al. Remote sensing monitoring and analysis of territorial space changes in Inner Mongolia in the past 30 years based on the major function-oriented zoning [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2023(4):54-58.
- [13] 迟文峰,白文科,刘正佳,等.基于RWEQ模型的内蒙古高原土壤风蚀研究[J].*生态环境学报*,2018,27(6):1024-1033.
- Chi Wenfeng, Bai Wenke, Liu Zhengjia, et al. Wind erosion in Inner Mongolia Plateau using the revised wind erosion equation [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018,27(6):1024-1033.
- [14] Wang Yangyang, Yu Xiao, Jie Xu, et al. Evaluation of Inner Mongolia wind erosion prevention service based on land use and the RWEQ model [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2022,13:763-774.
- [15] 张玥,许端阳,王子玉,等.2000—2015年锡林郭勒盟防风固沙服务功能变化驱动因素分析[J].*生态学报*,2021,41(2):603-614.
- Zhang Yue, Xu Duanyang, Wang Ziyu, et al. The interaction of driving factors for the change of windbreak and sand-fixing service function in Xilingol League between 2000 and 2015 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021,41(2):603-614.
- [16] 王俊枝,常屹冉,匡文慧,等.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[J].*北京师范大学学报(自然科学版)*,2018,54(3):348-356.
- Wang Junzhi, Chang Yiran, Kuang Wenhui, et al. Dynamic characteristics of ecosystem service function in key ecological function desertification areas in Otingdag [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2018,54(3):348-356.
- [17] 常虹,翟琇,石磊,等.基于土地利用的内蒙古牧区生态系统服务时空变化(2000—2015)[J].*草地学报*,2021,

- 29(3):583-592.
- Chang Hong, Zhai Xiu, Shi Lei, et al. Temporal and spatial changes of ecosystem services based on land use in pastoral areas of Inner Mongolia(2000—2015) [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021,29(3):583-592.
- [18] 王宁,杨光,韩雪莹,等.内蒙古 1990—2018 年土地利用变化及生态系统服务价值[J].*水土保持学报*,2020,34(5):244-250.
- Wang Ning, Yang Guang, Han Xueying, et al. Land use change and ecosystem service value in Inner Mongolia from 1990 to 2018 [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020,34(5):244-250.
- [19] 刘杜娟,刘芳苹,牛文浩,等.1985—2018 年内蒙古自治区耕地集约利用时空变化及其驱动因素[J].*水土保持通报*,2022,42(4):365-372.
- Liu Dujuan, Liu Fangping, Niu Wenhao, et al. Spatial-temporal changes and driving factors of cultivated land intensive use in Inner Mongolia autonomous region from 1985 to 2018 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022,42(4):365-372.
- [20] 匡文慧,张树文,杜国明,等.2015—2020 年中国土地利用变化遥感制图及时空特征分析[J].*地理学报*,2022,77(5):1056-1071.
- Kuang Wenhui, Zhang Shuwen, Du Guoming, et al. Remotely sensed mapping and analysis of spatio-temporal patterns of land use change across China in 2015-2020 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022,77(5):1056-1071.
- [21] 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.
- [22] 中华人民共和国水利部. SL190-2007 土壤侵蚀分类分级标准[S].北京:中国水利水电出版社,2008.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. SL190-2007 Classification and Grading Standards for Soil Erosion [S]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2008.
- [23] 潘方杰,王宏志,冯兵,等.国家重点生态功能区植被覆盖度变化及其对地形因子的响应:以湖北省长阳县为例[J].*华中师范大学学报(自然科学版)*,2021,55(3):442-452.
- Pan Fangjie, Wang Hongzhi, Feng Bing, et al. Changes of vegetation coverage and their response to topographical factors in national key ecological function regions: A case study of Changyang County in Hubei Province, China [J]. *Journal of Central China Normal University (Natural Sciences)*, 2021,55(3):442-452.
- [24] 胡玲,孙聪,范闻捷,等.近 20 年防风固沙重点生态功能区植被动态分析[J].*生态学报*,2021,41(21):8341-8351.
- Hu Ling, Sun Cong, Fan Wenjie, et al. Spatio-temporal dynamics of vegetation in key ecological function zone of wind-break and sand-fixation over the last 20 years [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021,41(21):8341-8351.
- [25] 靳利飞,南锡康,聂宾汗,等.适应主体功能区要求的自然资源政策研究[J].*中国国土资源经济*,2020,33(12):30-36.
- Jin Lifei, Nan Xikang, Nie Binhan, et al. Research on natural resources policy adapted to the requirements of main functional areas [J]. *Natural Resource Economics of China*, 2020,33(12):30-36.
- [26] Chi Wenfeng, Zhao Yuanyuan, Kuang Wenhui, et al. Impacts of anthropogenic land use/cover changes on soil wind erosion in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019,668:204-215.
- [27] Nan Ling, Dong Zhibao, Xiao Weiqiang, et al. A field investigation of wind erosion in the farming-pastoral ecotone of Northern China using a portable wind tunnel: A case study in Yanchi County [J]. *Journal of Arid Land*, 2018,10(1):27-38.
- [28] Zhao Yuanyuan, Wu Jianguo, He Chunyang, et al. Linking wind erosion to ecosystem services in drylands: A landscape ecological approach [J]. *Landscape Ecology*, 2017,32(12):2399-2417.
- [29] 吴汪洋,张登山,田丽慧,等.青海湖克土沙地沙棘林的防风固沙机制与效益[J].*干旱区地理*,2014,37(4):777-785.
- Wu Wangyang, Zhang Dengshan, Tian Lihui, et al. Mechanism and benefit of wind-prevention and sand-fixation of Hippophae rhamnoides forestation in Ketu Sandy Land around Qinghai Lake [J]. *Arid Land Geography*, 2014,37(4):777-785.
- [30] Han Yi, Zhao Wenwu, Zhou Ao, et al. Water and wind erosion response to ecological restoration measures in China's drylands [J]. *Geoderma*, 2023,435:116514.
- [31] 移小勇,赵哈林,赵学勇,等.不同风沙土含水量因子的抗风蚀性[J].*土壤学报*,2006,43(4):684-687.
- Yi Xiaoyong, Zhao Halin, Zhao Xueyong, et al. Erodibility of aeolian soils in moisture content [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006,43(4):684-687.
- [32] Gong Guoli, Liu Jiyuan, Shao Quanqin, et al. Sand-fixing function under the change of vegetation coverage in a wind erosion area in Northern China [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2014,5(2):105-114.
- [33] Berhe A A, Harte J, Harden J W, et al. The significance of the erosion-induced terrestrial carbon sink [J]. *BioScience*, 2007,57(4):337-346.
- [34] Zhao Halin, Yi Xiaoyong, Zhou Ruilian, et al. Wind erosion and sand accumulation effects on soil properties in Horqin Sandy Farmland, Inner Mongolia [J]. *Catena*, 2006,65(1):71-79.
- [35] Du Heqiang, Wang Tao, Xue X, et al. Estimation of soil organic carbon, nitrogen, and phosphorus losses induced by wind erosion in Northern China [J]. *Land Degradation & Development*, 2019,30:1006-1022.