

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2026.04.035

CSTR:32310.14.stbxb.2026.04.035

苏鑫森, 祁迷, 滑永春, 等. 科尔沁沙地不同土地利用变化的生态系统服务功能[J]. 水土保持学报, 2026, 40(4): 443-453.

Su Xinsen, Qi Mi, Hua Yongchun, et al. Ecosystem service functions under different land use changes in Horqin Sandy land[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(4): 443-453.

科尔沁沙地不同土地利用变化的生态系统服务功能

苏鑫森¹, 祁迷², 滑永春¹, 海龙³, 杨宏伟³, 刘洋¹

(1. 内蒙古农业大学林学院, 呼和浩特010019; 2. 鄂尔多斯市林业和草原局东胜区分局, 鄂尔多斯017000; 3. 内蒙古自治区林业科学研究院, 呼和浩特010010)

摘要: [目的] 量化科尔沁沙地生态系统服务功能时空演变, 为环境治理与生态修复提供科学依据与理论支撑。[方法] 基于最近3期(2000年、2010年、2020年)土地利用类型数据, 利用InVEST模型量化评估科尔沁沙地年产量、水质净化(磷负荷)、土壤保持、碳储量及生境质量5项关键生态系统服务指标, 并计算生态系统服务指数。[结果] 1) 生态用地(草地、林地)与建设用地逐期增长, 耕地、未利用地与水域持续减少。2) 年产量逐期呈增加趋势, 平均值从131.19 mm上升至266.39 mm, 其中西部较高值区(300.00~400.00 mm)扩张明显, 全区年产量空间分布由低值主导转向高梯度(>200.00 mm)集中。3) 水质净化整体呈下降趋势, 平均值从1.31 kg/km²降至1.22 kg/km², 东部高值区域整体呈收缩趋势, 空间异质性减弱。4) 土壤保持与碳储量受植被分布与高程影响, 呈“高海拔优势、低海拔劣势”格局; 其中, 土壤保持量平均值从27.72 t/km²增至60.38 t/km², 碳储量平均值稳定为143.41~144.86 t/km², 高值区(≥80.00 t/km²)持续扩展。5) 生境质量逐期得到改善, 平均值从0.28升至0.30, 空间异质性保持稳定。6) 生态系统服务指数随生态用地增加呈扩大趋势, 低值区(<0.20)破碎化加剧。[结论] 林草地扩张显著改善科尔沁沙地生态系统服务功能, 实现年产量提升与磷负荷下降, 推动土壤保持与碳储量的协同提升, 为北方干旱半干旱地区实现生态修复提供科学依据。

关键词: 科尔沁沙地; InVEST模型; 生态修复; 土地利用类型; 生态系统服务功能

中图分类号: X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)04-0443-11

Ecosystem Service Functions under Different Land Use Changes in Horqin Sandy Land

Su Xinsen¹, Qi Mi², Hua Yongchun¹, Hai Long³, Yang Hongwei³, Liu Yang¹

(1. College of Forestry, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China; 2. Ordos Forestry and Grassland Bureau Dongsheng District Branch, Ordos, Inner Mongolia 017000, China; 3. Inner Mongolia Academy of Forestry Sciences, Hohhot 010010, China)

Abstract: [Objective] This study aims to quantify the spatiotemporal evolution of ecosystem service functions in the Horqin sandy land, providing a scientific basis and theoretical support for environmental management and ecological restoration. [Methods] Based on land use data from three recent periods (2000, 2010, and 2020), the InVEST model was used to quantitatively evaluate five key ecosystem service indicators in the Horqin sandy land, including annual water yield, water quality purification (phosphorus load), soil conservation, carbon storage, and habitat quality. The ecosystem service index was calculated. [Results] 1) Ecological land (grassland and forest land) and construction land increased over the periods, while cultivated land, unused land, and water areas decreased continuously. 2) Annual water yield increased over the periods, with the mean value rising from 131.19 mm to 266.39 mm. Highvalue areas (300.00~400.00 mm) in the western region expanded significantly, and the spatial distribution across the region shifted from lowvalue dominance to concentration in

收稿日期: 2025-12-17

修回日期: 2026-02-03

录用日期: 2026-04-07

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-05-21

资助项目: 内蒙古自治区科技计划项目(2021GG0370); 内蒙古自治区直属高校基本科研业务项目(BR230105)

第一作者: 苏鑫森(2003—), 男, 硕士研究生, 主要从事土地利用变化对生态系统服务影响研究。E-mail: 3477637706@qq.com

通信作者: 刘洋(1984—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事生态系统服务的协同与权衡机制研究。E-mail: liuyangvip@hotmail.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

highgradient zones (>200.00 mm). 3) The overall water purification capacity showed a declining trend, with the average value decreasing from 1.31 kg/km² to 1.22 kg/km². Highvalue areas in the eastern region contracted generally, accompanied by weakened spatial heterogeneity. 4) Soil conservation and carbon storage were influenced by vegetation distribution and elevation, showing a pattern of high values at high elevations and low values at low elevations. The mean soil conservation increased from 27.72 t/km² to 60.38 t/km², while the mean value of carbon storage remained stable from 143.41 t/km² to 144.86 t/km². Highvalue areas (≥ 80.00 t/km²) continued to expand. 5) Habitat quality improved over the periods, with the mean value increasing from 0.28 to 0.30 , while spatial heterogeneity remained stable. 6) The ecosystem service index increased with the expansion of ecological land, while fragmentation in lowvalue areas (<0.20) intensified. [Conclusion] Expansion of forest-grassland has significantly improved ecosystem service functions in the Horqin sandy land, increasing annual water yield and reducing phosphorus load, while promoting coordinated enhancement of soil conservation and carbon storage. This provides a scientific basis for achieving ecological restoration in the arid and semi-arid regions of northern China.

Keywords: Horqin sandy land; InVEST model; ecological restoration; land use type; ecosystem service functions

Received: 2025-12-17

Revised: 2026-02-03

Accepted: 2026-04-07

Online(www.cnki.net): 2026-05-21

生态系统服务功能是实现干旱半干旱地区生态安全与可持续发展的核心载体,其供给能力直接响应土地利用变化与气候变化,是区域生态治理的关键决策依据^[1]。科尔沁沙地地处温带大陆性季风气候区,是北方农牧交错带的核心区域,更是我国最大的沙地,仍面临沙漠化扩张、水资源短缺、土壤风蚀水蚀及生境破碎化等多重生态压力^[2]。同时,作为京津冀重要生态屏障的科尔沁沙地,也是实现“双碳”目标生态修复的重点区域。该区域生态系统服务功能的时空演变直接关系到西辽河流域水资源安全、土壤保持与生物多样性保护等^[3]。因此,亟须通过定量化评价掌握其演变规律,为山水林田湖草沙的系统治理提供科学支撑。

当前针对科尔沁沙地的研究多集中于单一服务、使用传统方法计算或生态系统与人类社会的耦合分析,如生境质量演变^[4]、碳储量计算^[5]、人地系统可持续性评价^[6],缺乏对年产水量、水质净化、土壤保持、碳储量及生境质量的多种生态服务的协同评价。单一服务的研究忽视半干旱沙地“水-土-碳-生境”的耦合关系,且空间分异规律与服务间的协同优化尚不清楚,不能满足精准生态修复的迫切需求。此外,传统评价方法难以量化土地利用变化对生态系统服务的空间重构效应,无法为土地利用优化提供精准化依据。

InVEST 模型凭借过程机理与空间显式相融合的核心特色,成为生态系统服务综合评价的有效工具,可精准模拟水文循环、土壤与养分迁移、碳储存及生境退化等重要生态过程;同时能够准确输出空

间分布图谱,并与 ArcGIS Pro 空间分析技术深度耦合,定量分析数据特征,可量化年产水量、水质净化等与沙地核心生态问题直接关联的服务指标^[7]。基于多期土地利用数据,该模型还可同步解析生态系统服务时空演变规律并判断影响生态系统服务功能变化的影响因素,为沙地生态系统多服务协同改善提供科学的定量化支撑。

基于此,本文以科尔沁沙地为研究对象,耦合 InVEST 模型与 ArcGIS Pro 技术,旨在解决三大科学问题:1) 量化年产水量、水质净化(磷负荷)、土壤保持、碳储量及生境质量 5 项生态系统服务;2) 阐明不同土地利用类型下生态系统服务功能的分异规律;3) 揭示“产水提升与磷负荷削减的双向改善”“土壤保持与碳储量协同提升”2 个现象,为科尔沁沙地生态保护修复、土地利用结构优化提供科学依据,同时为其他生态脆弱区的多服务综合评价提供方法参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

科尔沁沙地($42^{\circ}14'32''\sim 46^{\circ}12'43''N$, $117^{\circ}37'17''\sim 123^{\circ}42'26''E$)位于内蒙古自治区东南部,与吉林省西北部及辽宁省西北部接壤,是生态敏感、人地关系复杂且沙地生态问题最为典型的区域之一。区域面积达到 5.60 万 km²^[8],地形呈西高东低,海拔高差 $1\ 800$ m(图 1)。该区域属温带大陆性季风气候,春季干旱多风,沙尘频发,升温快;夏季短促炎热,降水集中(占全年 60% 以上),偶有暴雨;秋季降温迅速,降水骤减,天气晴朗;冬季漫长寒冷,干燥少

雪, 风力较强。年平均气温 4~7℃, 年降水量 300.00~450.00 mm, 空间分布呈东多西少、南多北少趋势, 降水年际变率较大, 高达 30%~40%, 丰水年与枯水年降水量可相差 2~3 倍。原生植被属森林草原过渡类型, 以樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongholica* Litv.)、羊草 [*Leymus chinensis* (Trin. ex Bunge) Tzvelev]、针茅(*Stipa capillata* L.) 和沙蒿(*Artemisia desertorum* Spreng.) 等沙生植物为主。

1.2 数据源与处理

本文使用 2000 年、2010 年、2020 年 3 个最近时期的土地利用类型数据, 分析科尔沁沙地生态系统服务功能。土地利用类型采用中国科学院资源环境科学与数据平台(表 1)分组方法。2 级地类重分类为 1 级地类; 水田、旱地归为耕地; 有林地、灌木林、疏林地、其他林地归为林地; 高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地归为草地; 河渠、湖泊、水库坑塘、永久性冰川、滩涂、滩地归为水域; 沙地、戈壁、盐碱地、沼泽地、裸土地、裸岩石质地、其他归为未利用地; 城镇用

地、乡村居民点、其他建设用地归为建设用地。
全文包括 30、100、500 m 分辨率的数据, 对不同分辨率数据进行“重采样”, 均处理为 1 km 分辨率, 并利用“投影”工具进行统一坐标系, 使用“按掩膜提取”工具, 加载研究区范围, 并保证研究区边界的完整性。

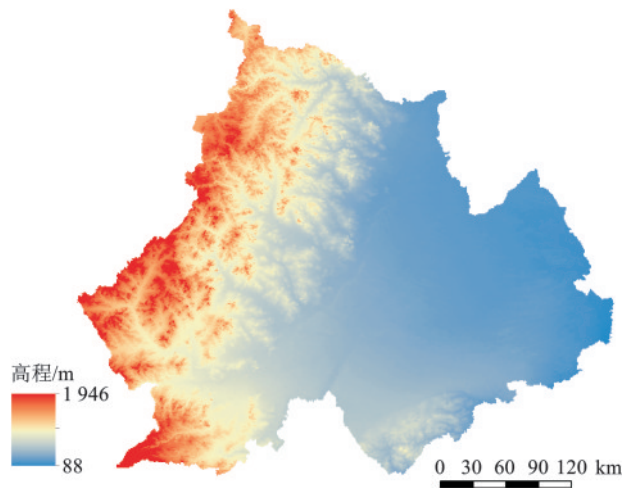


图1 科尔沁沙地高程
Fig.1 Elevation of Horqin sandy land

表 1 数据类型及来源
Table 1 Data types and sources

模块	数据名称	来源
基础数据	土地利用类型(30 m)	资源环境科学与数据平台(https://www.resdc.cn/DOI/DOI.aspx?DOIID=54)
	DEM 数据(500 m)	资源环境科学与数据平台(https://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=123)
年产水量	降水数据(1 km)	青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/faae7605-a0f2~4d18-b28f-5cee413766a2)
	潜在蒸散发数据(1 km)	青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/8b11da09~1a40~4014-bd3d-2b86e6dccad4)
	根系限制层深度数据(100 m)	https://doi.org/10.1038/s41597~019~0345~6
	植物可用水分含量数据(1 km)	世界土壤数据库(https://gaez.fao.org/pages/hwsd)和经验公式 ^[9]
水质净化	养分物质径流代理(1 km)	利用年总降水量数据代替, 青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/faae7605-a0f2~4d18-b28f-5cee413766a2)
土壤保持	降水侵蚀性因子 R(1 km)	文献[10]
	土壤可蚀性因子 K(1 km)	文献[11]
	生物物理属性表	文献[12]
碳储量	碳库(表 2)	文献[12]
生境质量	威胁源表格	文献[12-13]
	敏感性表格	

1.3 研究方法

本文分别使用 InVEST 模型中的年产水量模块、养分输送比模块、泥沙输移比模块、碳储存和封存模块与生境质量模块评价科尔沁沙地的年产水量、水质净化(磷负荷量)、土壤保持、碳储量与生境质量功

能。在此基础上, 计算科尔沁沙地内蒙古自治区综合生态系统服务功能。

1.3.1 年产水量 将降水量、蒸发散、根系限制层深度、植物可用水分含量、土地利用类型的栅格数据导入模型, 基于 Budyko 曲线和年平均降水量计算流域

内栅格的产水量,采用自然断点法^[14]并结合研究区域情况综合对结果进行分级。计算栅格单元内,降水扣除植被蒸散后的剩余水量,即地表可利用的年产水量。计算公式^[15]为:

$$Y(x)=P(x)-AET(x) \quad (1)$$

$$\frac{AET(x)}{P(x)}=1+\frac{PET(x)}{P(x)}-\left[1+\left(\frac{PET(x)}{P(x)}\right)^w\right]^{\frac{1}{w}} \quad (2)$$

$$PET(x)=K_c(x)\times ET_0(x) \quad (3)$$

式中: $Y(x)$ 为年产水量, mm; $P(x)$ 为年降水量, mm; $AET(x)$ 为年实际蒸散量, mm; $K_c(x)$ 为每个 LULC 的蒸发因子; $ET_0(x)$ 为参考植被蒸发散, mm。

表 2 科尔沁沙地 4 大碳库碳密度数据

Table 2 Carbon density data of four major carbon pools in Horqin sandy land

土地利用类型	地上生物量/ (t·km ⁻²)	地下生物量/ (t·km ⁻²)	土壤有机碳/ (t·km ⁻²)	死亡有机质/ (t·km ⁻²)
耕地	3.02	42.74	98.13	0
林地	22.46	61.38	75.86	0
草地	18.70	45.81	90.43	0
水域	1.59	0	0	0
未利用地	0.69	9.37	28.24	0
建设用地	1.32	0	70.61	0

注: 由于死亡有机物中碳密度较难得到, 比重也较小, 故将其赋值为 0。

1.3.2 水质净化 将科尔沁沙地高程、土地利用类型、营养物质径流代理的栅格数据和流域矢量数据、生物物理表导入养分输送比模块, 此模型只考虑水体中磷养分的非点源污染, 忽略其他污染源, 采用自然断点法并结合研究区域情况综合对结果分级, 磷负荷量越高, 水质净化能力越低。计算公式^[16]为:

$$X_{\text{exptot}}=\sum_i X_{\text{exp},i} \quad (4)$$

$$X_{\text{exp},i}=l_{\text{surf},i}\times\text{NDR}_{\text{surf},i}+l_{\text{subs},i}\times\text{NDR}_{\text{subs},i} \quad (5)$$

式中: X_{exptot} 为子流域营养物输出量, kg/km²; $X_{\text{exp},i}$ 为流域栅格图中各栅格 i 的营养物输出量, kg/km²; $l_{\text{surf},i}$ 为地表营养物负荷量, kg/km²; $\text{NDR}_{\text{surf},i}$ 为地表营养物传输率; $l_{\text{subs},i}$ 为地下营养物负荷量, kg/km²; $\text{NDR}_{\text{subs},i}$ 为地下营养物传输率。

1.3.3 土壤保持 将科尔沁沙地高程、降水侵蚀性因子(R)、土壤可蚀性因子(K)、土地利用类型的栅格数据和生物物理表、流域矢量数据导入泥沙输移比模块, 在通用土壤流失方程(USLE)的基础上, 考虑特定气候和地形在实际情况下拦截上游沉积物的能力, 采用自然断点法并结合研究区域情况综合对结果进行分级。计算公式^[17]为:

$$SD=A_p-USLE \quad (6)$$

$$A_p=R\times K\times LS \quad (7)$$

$$USLE=R\times K\times LS\times C\times P \quad (8)$$

式中: SD 为土壤保持量, t/km²; A_p 为潜在土壤侵蚀量, t/km²; $USLE$ 为实际土壤侵蚀量, t/km²; R 为降雨侵蚀力因子, (MJ·mm)/(km²·h·a); K 为土壤可蚀性因子, (t·km²·h)/(MJ·mm·km²); LS 为坡长因子和坡度因子; C 为植被覆盖/管理因子; P 为水土保持工程因子。

1.3.4 碳储量 基于生态系统的碳库划分(表 2), 通过量化不同土地利用类型下各碳库的碳密度, 计算区域当前总碳储量, 采用自然断点法并结合研究区域情况综合对结果分级。计算公式^[17]为:

$$C_c=C_a+C_b+C_s+C_d \quad (9)$$

$$C_t=\sum_{i=1}^n(C_{c,i}\times\text{Area}_i) \quad (10)$$

式中: C_c 为单位面积上的碳储量, t/km²; C_a 为地上生物量碳密度, t/km²; C_b 为地下生物量碳密度, t/km²; C_s 为土壤有机碳密度, t/km²; C_d 为死亡有机质碳密度, t/km²; C_t 为研究区总碳储量, t; $C_{c,i}$ 为第 i 类土地碳储量, t/km²; Area_i 为第 i 类土地的总面积, km²。

1.3.5 生境质量 以土地利用类型数据为基础, 加载威胁源的敏感程度及胁迫力度(表 3、表 4)评估生境质量的优劣, 结果为 0~1。采用自然断点法并结合研究区域情况综合对结果分级, 数值越大表示研究区域生物适生性越好, 生物多样性状况越佳。计算公式^[18]为:

$$D_{xi}=\sum_{r=1}^R\sum_{y=1}^{Y_r}\left\{\frac{\omega_r}{\sum_{r=1}^R\omega_r}\right\}r_yI_{ryx}\beta_xS_{jr} \quad (11)$$

$$Q_{xi}=H_i-\frac{H_iD_{xi}^z}{D_{xi}^z+k^z} \quad (12)$$

式中: D_{xi} 为生境质量退化指数; R 为胁迫因子; y 为胁迫因子 r 图层的栅格数量; Y_r 为胁迫因子所占栅格数量; ω_r 为胁迫因子权重; r_y 为栅格 y 胁迫因子值; β_x 为栅格 x 可达性水平; S_{jr} 为生境类型 j 对胁迫因子 r 的敏感程度; I_{ryx} 为栅格 y 的胁迫因子值 r_y 对生境栅格 x 的胁迫水平; Q_{xi} 为生境质量指数; H_i 为土地利用类型 i 的生境适宜度, 值域为 (0, 1.00); z 为归一化常量, 通常设为 0.50; k 为半饱和常数, 取 D_{xi} 最大值的 1/2。

表 3 生态胁迫因子^[12]

Table 3 Ecological stress factors

胁迫因子	权重	最大影响因子	距离衰减方式
耕地	0.70	3.00	线性
未利用地	0.60	5.00	线性
建设用地	1.00	10.00	指数

表 4 不同土地利用类型生境适宜度及威胁因子敏感度^[12]
Table 4 Habitat suitability and sensitivity to threat factors under different land use types

土地利用类型	生境适宜度	威胁因子		
		耕地	未利用地	建设用地
耕地	0	0	0	0
林地	0.50	0.10	0.45	0.40
草地	0.50	0.20	0.50	0.30
水域	0.75	0.10	0.50	0.55
未利用地	0	0	0	0
建设用地	0	0	0	0

1.3.6 综合生态系统服务功能 对年产水量、水质净化、土壤保持、碳储量、生境质量 5 项指标进行归一化处理,对综合生态系统服务功能进行计算,采用自然断点法并结合研究区域情况综合对结果分级,生态系统服务指数(ecosystem service index, ESI)越大,生态系统服务功能越强。计算公式^[19]为:

$$x_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \tag{13}$$

$$e_i = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \ln x_i)}{\ln n} \tag{14}$$

$$\omega_i = \frac{1 - e_i}{\sum_{i=1}^n 1 - e_i} \tag{15}$$

$$ESI_i = \sum_{i=1}^n \omega_i \times x_i \tag{16}$$

式中: x_i 为第*i*个指标的规范化值; $x_{\min}$ 为样本数据最小值; $x_{\max}$ 为样本数据最大值; n 为生态系统服务类型; e_i 为第*i*个指标的熵值; ω_i 为生态系统服务类型的权重;ESI_{*i*}为标准化后生态系统服务。

2 结果与分析

2.1 土地利用类型变化

2000—2020 年科尔沁沙地土地利用类型呈现的变化趋势为:草地占比与其他类型相比,始终最高且持续增加(从 50.05% 增加至 53.07%),是区域主导用地类型(图 2、表 5)。林地占比由 5.75% 增至 6.22%,建设用地占比从 1.66% 提升至 2.64%,皆呈增长态势。相反,耕地、未利用地与水域均出现下降,其中耕地占比从 37.30% 降至 34.37%,未利用地占比从 4.70% 降至 3.46%,水域占比由 0.54% 降至 0.23%。

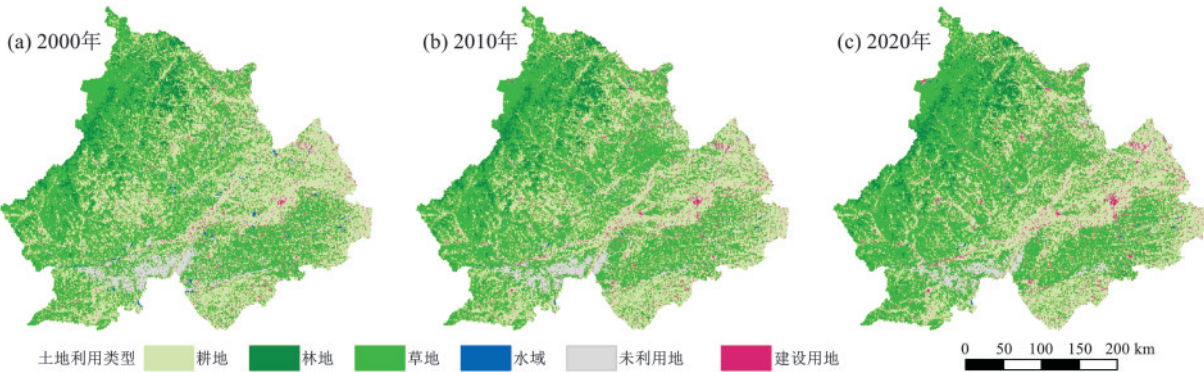


图 2 科尔沁沙地 3 个时期土地利用类型

Fig.2 Land use types in Horqin sandy land during three periods

表 5 科尔沁沙地 3 个时期土地利用类型占比与面积变化
Table 5 Changes in proportion and area of land use types in Horqin sandy land during three periods

土地利用类型	2000 年		2010 年		2020 年	
	占比/ %	面积/ km ²	占比/ %	面积/ km ²	占比/ %	面积/ km ²
耕地	37.30	20 728.55	35.29	19 611.27	34.37	19 099.96
林地	5.75	3 194.70	6.05	3 361.93	6.22	3 458.04
草地	50.05	27 812.83	52.21	29 013.72	53.07	29 491.87
水域	0.54	298.90	0.26	141.76	0.23	125.90
未利用地	4.70	2 609.39	4.10	2 278.29	3.46	1 923.16
建设用地	1.66	923.14	2.09	1 160.53	2.64	1 468.56

2.2 年产量

2000—2020 年科尔沁沙地年产量呈增加趋势(图 3、图 4)。2000 年,科尔沁沙地年产量较低(100.00~200.00 mm),平均值为 131.19 mm,产水量分布集中(标准差 $\sigma=46.45$)。空间分布存在差异,其中西南与东部区域产水量达到中值(200.00~300.00 mm),较高(300.00~400.00 mm)区域仅零星分布、全域无高值(≥ 400.00 mm)。2010 年,产水量较 2000 年增加,平均值为 213.42 mm,分布离散度增大($\sigma=81.86$,图 4)。产水量达到中值及以上的区域与 2000 年相比明显扩大(图 3),特别是在东部出现高产水量区域。2020 年,产水量较 2000 年与 2010 年均有所增加,平均值达到 266.39 mm,分布也较 2010 年更集中($\sigma=66.43$);与 2010 年相比,产水量为中、较高区域增加,尤其是西部区域,但东部高值区减少。

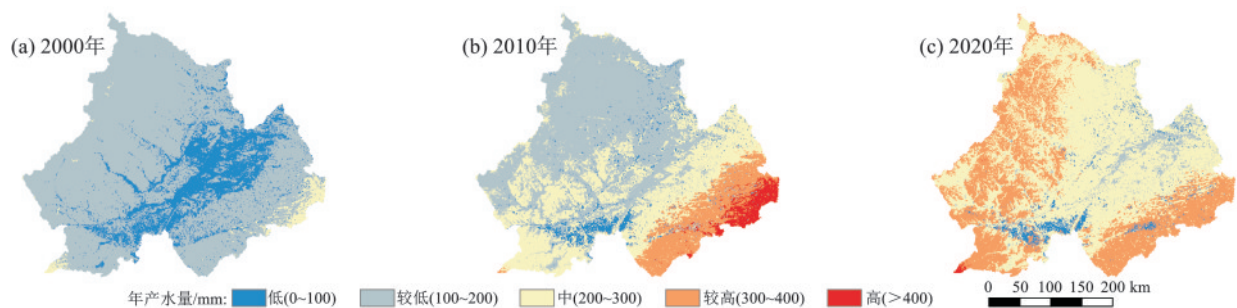


图3 科尔沁沙地3个时期年产水量

Fig.3 Annual water yields in Horqin sandy land during three periods

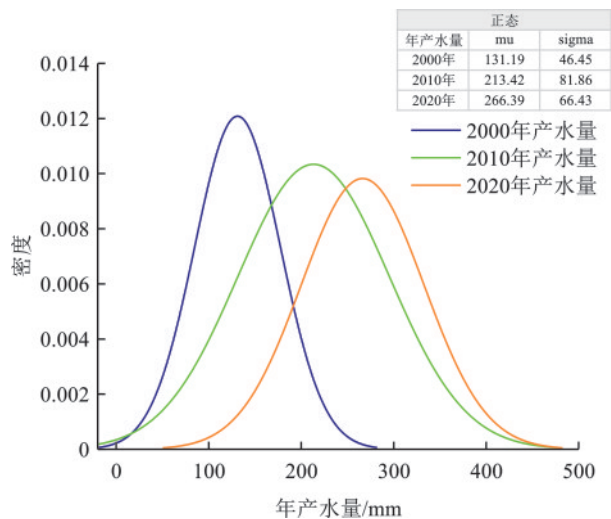


图4 科尔沁沙地3个时期年产量正态分布

Fig.4 Normal distribution of annual water yield in Horqin Sandy Land during three periods

2.3 水质净化

2000—2020年科尔沁沙地水质净化(磷负荷量)时空差异明显(图5),高值区(>4.00 kg/km²)始终集中于东部地区,3个时期均以低值(0~1.00 kg/km²)为主。2000年,科尔沁沙地磷负荷量平均值为1.31 kg/km²,分布相对集中(标准差σ=1.33,图6),较高值区(3.00~4.00 kg/km²)分布于东部地区,有少量高值区零星分布。2010年,平均值仍为1.31 kg/km²,分布离散度增大(σ=1.47),区域差异加剧,较高值及以上(≥3.00 kg/km²)区域显著扩张,东部、南部高值聚集区更集中,中部低值区缩减且东部地区出现大量高值区。2020年,磷负荷量均值较2000年和2010年降至1.22 kg/km²,离散度回落(σ=1.30),空间异质性降低,较高值区占比明显减少,整体向低-较低值区(0~2.00 kg/km²)回移,高值区消失,整体磷负荷量呈下降趋势。

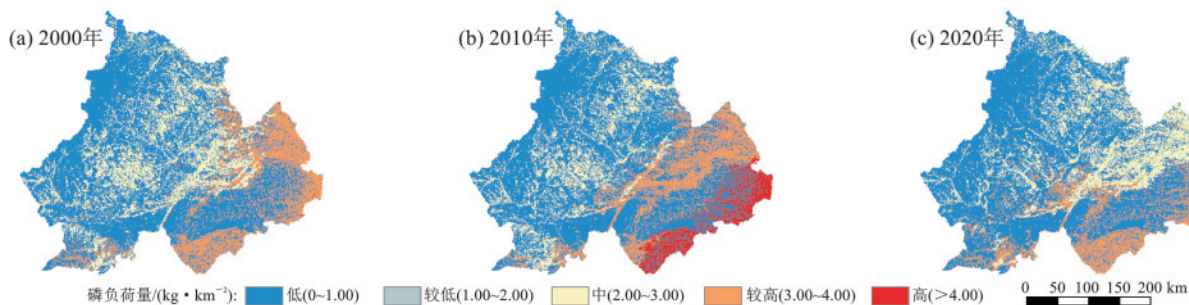


图5 科尔沁沙地3个时期水质净化(磷负荷)

Fig.5 Water quality purification (phosphorus load) in Horqin sandy land during three periods

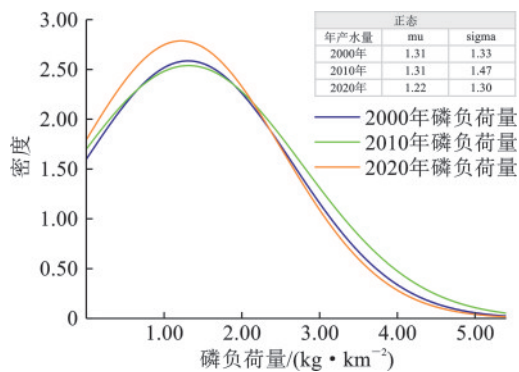


图6 科尔沁沙地3个时期水质净化正态分布

Fig.6 Normal distribution of water quality purification in Horqin sandy land during three periods

2.4 土壤保持

2000—2020年科尔沁沙地土壤保持能力(图7、图8)呈持续提升趋势,以低值区(0~50.00 t/km²)为主。2000年,科尔沁沙地土壤保持量平均值为27.72 t/km²,分布相对集中(标准差σ=51.67,图8),较高值区(>500.00 t/km²)仅在西部高海拔区零星分布(图7),土壤保持能力弱。2010年,土壤保持量平均值增加至37.12 t/km²,离散度增大(σ=64.86),区域空间差异加剧,较低值区(50.00~200.00 t/km²)范围扩展,中高值以上区域分布密度增加。2020年,土壤保持量平均值进一步提升至60.38 t/km²,离散度持续增加(σ=114.17),

空间异质性较2010年进一步增强,中值以上区域覆盖明显扩大,低值区占比大幅缩减,高保持能力区更加集中。

2.5 碳储量

从科尔沁沙地 3 个时期碳储量对比可知,2000—2020 年科尔沁沙地碳储量整体较为均衡,单元栅格值为 1.59~159.70 t/km²(图 9、图 10)。2000 年,碳储量平均值为 143.41 t/km²,分布离散度相对较大(标准差 $\sigma=28.17$),仍有低-较低值区(0~40.00 t/km²)。

2010 年,碳储量平均值微升至 144.42 t/km²,离散度缩小($\sigma=26.37$,图 10),中部高值(>150 t/km²)区略有增加,低-较低值区占比缩减。2020 年,碳储量平均值达 144.86 t/km²,离散度持续降低($\sigma=25.46$),高值区覆盖范围增加、低-较低值区持续减少。整体来看,碳储量以较高值以上区(≥ 80.00 t/km²)为主,中低值区(<80.00 t/km²)集中分布于水域、未利用地及建设用地区域。

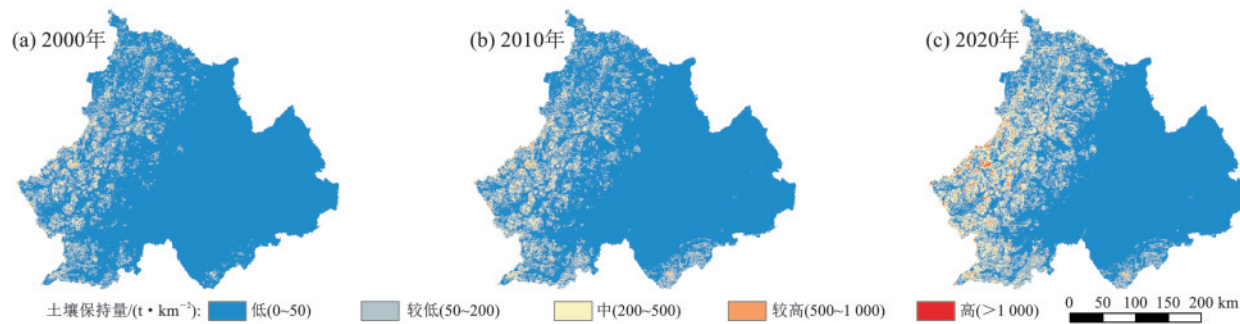


图 7 科尔沁沙地 3 个时期土壤保持量
Fig.7 Soil conservation in Horqin sandy land during three periods

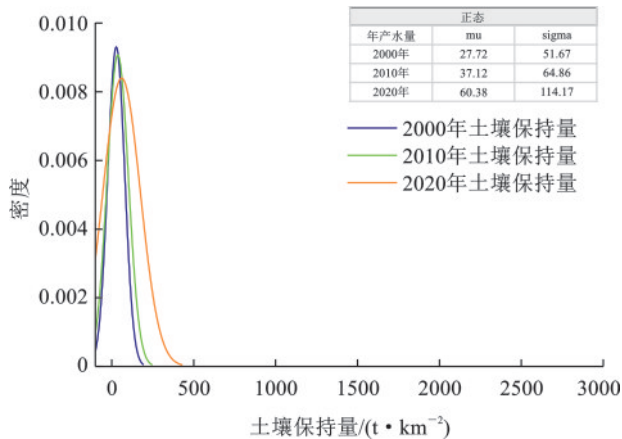


图 8 科尔沁沙地 3 个时期土壤保持量正态分布
Fig.8 Normal distribution of soil conservation in Horqin sandy land during three periods

2.6 生境质量

从 3 个时期的生境质量(图 11、图 12)来看,2000—2020 年科尔沁沙地生境质量指数为 0~0.75。整体以低中值区(0~0.60)为主体,中值区(0.30~0.60)占比超半数,高值区(≥ 0.60)零星分布于河道水域。2000 年,生境质量平均值为 0.28,标准差 0.25,高值区零散且稀少,整体处于低值(0~0.30),区域离散度相对稳定。2010 年,平均值微升至 0.29,标准差维持 0.25,整体水平略有提升,低值区占比缩减,中部中值区小幅扩展,水域高值区分布频次略减。2020 年,中值区进一步扩张(尤其西南区域),平均值增加至 0.30,低、高值区占比进一步减少。研究区内生境质量呈逐步改善趋势,区域空间异质性未明显扩大。

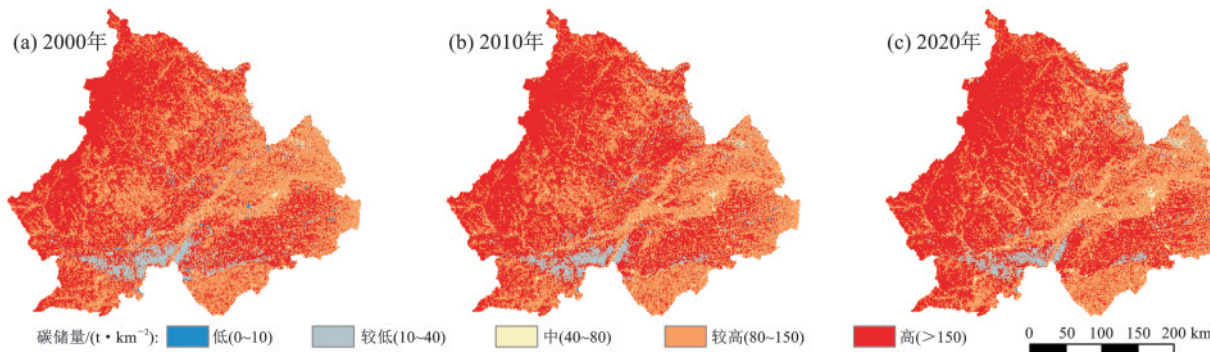


图 9 科尔沁沙地 3 个时期碳储量
Fig.9 Carbon storage in Horqin sandy land during three periods

2.7 综合生态系统服务功能指数

由图 13 可知,2000—2020 年科尔沁沙地综合生态系统服务功能指数的时空特征变化。3 个时期整体

上以中-较高(0.20~0.60)区为主。2000 年,低值(0~0.20)区多分布于未利用地区域,高值区零星分布于西部高海拔林区。2010 年,中部、南部耕地转为草地

区域的指数由中值区升至较高值(0.40~0.60)区,但中值(0.20~0.40)区占比仍较大。2020年,西部山地河谷耕地转草地,较高值区覆盖范围进一步扩大且分布更集中。研究期内科尔沁沙地南部、东部未利用地占比持续缩小,低值区面积减少且更趋破碎化。

3 讨论

3.1 年产水量与水质净化

土地利用类型优化在一定程度上推动生态用地改善,并促进年产水量增加与磷负荷削减的协同改善(图3、图5)。该变化的潜在原因包括耕地、未利用地向生态用地的转变,通过提高植被覆盖度,减少无效蒸散、增强水源涵养能力,为年产水量提高提供重要支撑,该变化与杨阳等^[20]关于植被恢复过程中产水量随植被面积增加而增加的研究结论相符;另一方面,植被根系吸附与枯落物截留的协同作用,强化对磷元素的拦截能力,同时地表裸露度的降低也有

助于从源头削减磷元素流失潜力,从而使磷负荷量有所下降(图5),与孔维波等^[21]提出的植被恢复有利于磷负荷量减少的结论一致,对拦截农业面源磷污染具有积极作用,进而降低流域富营养化风险。

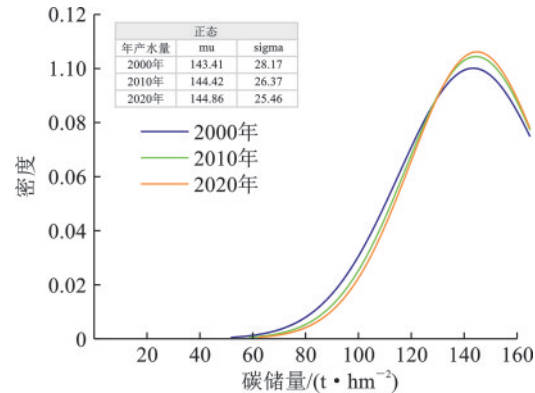


图 10 科尔沁沙地 3 个时期碳储量正态分布
Fig.10 Normal distribution of carbon storage in Horqin sandy land during three periods

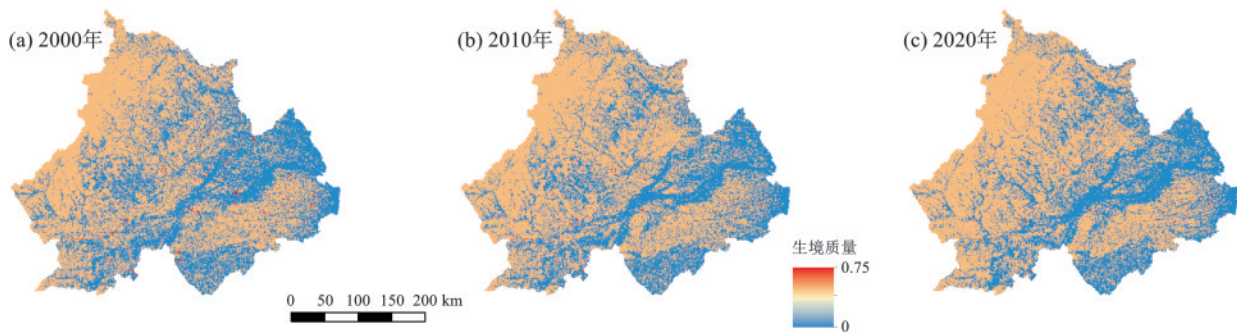


图 11 科尔沁沙地 3 个时期生境质量指数
Fig.11 Habitat quality index in Horqin sandy land during three periods

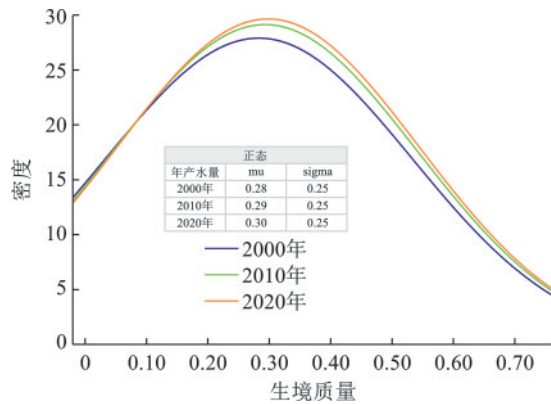


图 12 科尔沁沙地 3 个时期生境质量指数正态分布
Fig.12 Normal distribution of habitat quality index in Horqin sandy land during three periods

东部低海拔区 2010 年磷负荷高值区有所扩张(图5),可能与当年降水偏多且区域地形平缓、降雨侵蚀潜力较大有关,使得磷元素随径流流失的敏感性有所提升,此规律与王祥等^[22]研究的降水增多增加磷元素流失的结论相符。在研究区“东南降水多、西北少”的降水格局下,西部山地以林、草地为主,生

态用地的水源涵养功能得到一定发挥,区域产水能力稳步提升(图3)。此现象表明,生态修复可在一定程度上缓解降水空间分异带来的限制,反映出林、草地对于产水过程的调控作用,与刘美娟等^[23]的研究结论一致。林、草生态用地的增加在改善年产水量的同时,依托林草地的截流下渗作用降低地表径流系数,削弱径流对磷素的冲刷迁移动力^[24],进而在一定程度上实现产水提升与磷负荷下降的协同改善。

3.2 土壤保持与碳储量

生态修复通过植被恢复强化土壤抗蚀固碳能力,推动土壤保持与碳储量协同提升(图7、图9)。西部高海拔区域,林草植被逐年扩张(图2)形成枯落物覆盖层是二者协同提升的主要因素。枯落物一方面通过拦截雨滴击溅、减缓地表径流,削弱土壤侵蚀动力以增强土壤保持能力;另一方面,作为有机碳的直接输入源,经微生物分解后固定于土壤,有助于提升碳汇水平并促进碳储量增加(图9),进一步提升土壤抗蚀性,为土壤保持与碳储量的协同提升提供潜在基础^[25]。

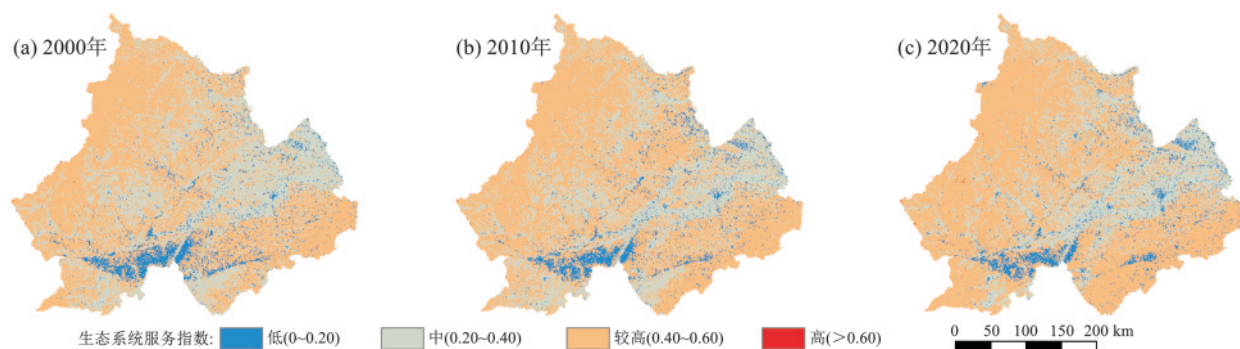


图13 科尔沁沙地3个时期综合生态系统服务指数

Fig.13 Comprehensive ecosystem service index in Horqin sandy land during three periods

东部低海拔区域长期耕作活动破坏土壤团聚体结构,使土壤抗蚀能力下降,降水冲刷容易引发表层土壤流失,而表层土壤是有机碳的主要储存库^[26],土壤侵蚀过程通常伴随有机碳的流失,进而可能形成高侵蚀、低固碳的恶性循环,导致该区域土壤保持能力较弱(图7)。部分地区耕地向草地转换(图2)后,林草植被的根系可提升土壤抗蚀性以减少侵蚀,有助于提升土壤保持量(图7)。同时生态用地的增加促进碳储量提升(图9),与张新新等^[27]的研究结果相符。高程导致水热条件及降雨侵蚀分异,造成植被生长空间差异,使东部土壤保持对土地利用变化更敏感,凸显生态用地对土壤保持与碳汇的主导作用,印证生态修复可提升土壤保持能力和碳储量,与闫语等^[28]的研究结论相符。

3.3 生境质量

土地利用类型经生态修复后,主导生境质量的演变。水域为生物提供稳定生存环境,形成局部稳定生态空间(图2);耕地、建设用地及未利用地因植被稀疏、生态结构简单,生境质量指数相对较低^[29],反映出科尔沁沙地生态系统对自然条件和人类活动的敏感性。东部低海拔区受人类活动干扰,土地利用破碎化,生境质量基础薄弱;西部高海拔区虽受降水限制,但林草地集中分布形成稳定生态基底,为后期生境改善提供支撑。土地利用类型通过生态修复工程推动林草地占比上升、耕地及未利用地占比下降(图2),植被覆盖度提升改善生物适生性,使生境质量指数整体呈改善趋势(图11),与窦文骏等^[30]的研究结论相符。

3.4 生态系统服务功能

科尔沁沙地 ESI 的时空演变受土地利用类型的影响。林、草地覆盖度提高,增强防风固沙、水源涵养等核心服务功能,优化生态系统稳定性,与聂艳等^[31]研究的生态修复改善生态系统服务功能结论相符。低海拔地区生态用地占比提升(图2),缓解区域

植被稀疏、风蚀强烈的生态短板,增强防风固沙、土壤保持等服务能力,推动 ESI 较高值区范围扩张(图13),印证干旱半干旱区可通过针对性土地利用类型优化提升生态系统服务功能。区域“东南降水多、西北少”的格局导致 ESI 东西分异,而高海拔通过水热资源再分配,为林草地生长提供适宜水分条件,弥补西部、北部高海拔区降水不足的劣势,使林草植被生长状况良好^[32],进而使区域 ESI 相对较高,因此形成西北-东南高,中部低的分布格局。

4 结论

1) 生态用地(林草地)扩张通过增强水源涵养、截留磷素等方式,实现年产水量提升与磷负荷下降的双向改善。林草植被恢复形成的枯落物覆盖层与根系作用,构建土壤保持强化与碳储量提升的良性循环,二者协同改善。

2) 生态修复提高科尔沁沙地林草地覆盖度,可直接增强防风固沙、水源涵养等核心生态服务功能,改善生物适生性,优化生态系统稳定性,能够有效改善生态系统服务功能

总体而言,土地利用变化是影响科尔沁沙地生态系统服务空间分异的主导因素,量化多种生态系统服务的协同演变规律。未来应进一步加强生态系统服务间的协同与权衡研究,构建长期动态监测与多情景模拟体系,为区域生态修复与可持续发展提供科学支撑。

参考文献:

- [1] 段如梦,李晓宇,张清. 吉林西部生态系统服务功能权衡/协同关系及生态服务簇时空演变[J]. 环境科学, 2025,46(11):7222-7233.
Duan Rumeng, Li Xiaoyu, Zhang Qing. Spatio-temporal variation of ecosystem service trade-offs/synergies and ecosystem service bundles in western Jilin[J]. Environmental Science, 2025,46(11):7222-7233.
- [2] 丁青坡,靳文娟,孙天琪. 基于 InVEST 模型农牧交错带生态系统价值研究:以科尔沁右翼中旗为例[J]. 安徽农

- 业科学,2024,52(23):53-58.
- Ding Qingpo, Jin Wenjuan, Sun Tianqi. Research on the ecosystem value of the agriculture-pastoral ecotone based on the InVEST model: Taking Horqin right middle banner as an example[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2024, 52(23): 53-58.
- [3] 阿茹娜. 西辽河平原区生态系统服务权衡与协同及可持续管理[D]. 西安: 西北大学, 2020.
- A Runa. Trade-off and synergy analyses and sustainable management of ecosystem services in west Liao River Plain[D]. Xian: Northwest University, 2020.
- [4] 周得龙, 王永芳, 郭恩亮, 等. 科尔沁沙地生境质量演变与预测[J]. 中国沙漠, 2025, 45(4): 211-226.
- Zhou Delong, Wang Yongfang, Guo Enliang, et al. Evolution and prediction of habitat quality in the Horqin Sandy Land[J]. Journal of Desert Research, 2025, 45(4): 211-226.
- [5] 张钰清, 陈银萍, 程红元, 等. 科尔沁沙地土壤碳储量插值计算对比及其影响因素分析[J]. 草业科学, 2024, 41(9): 1979-1990.
- Zhang Yuqing, Chen Yinping, Cheng Hongyuan, et al. Comparison of interpolation calculation of soil carbon storage and its influencing factors in Horqin Sandy Land[J]. Pratacultural Science, 2024, 41(9): 1979-1990.
- [6] 张建鹏, 雷鹿鸣, 李玉强, 等. 生态系统服务供需视角下科尔沁沙地人地系统可持续性评价[J]. 中国沙漠, 2025, 45(4): 176-189.
- Zhang Jianpeng, Lei Luming, Li Yuqiang, et al. Sustainability assessment of human-earth systems from ecosystem service supply-demand perspectives: Evidence from Horqin Sandy Land, China [J]. Journal of Desert Research, 2025, 45(4): 176-189.
- [7] Goldstein J H, Caldarone G, Duarte T K, et al. Integrating ecosystem-service tradeoffs into land-use decisions [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012, 109(19): 7565-7570.
- [8] 郭艳荣, 王懿祥, 海龙, 等. 基于ChatGPT的科尔沁沙地杨树人工林健康评价[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(7): 117-128.
- Guo Yanrong, Wang Yixiang, Hai Long, et al. Health assessment of poplar plantations in the Horqin Sandy Land, Inner Mongolia of northern China based on Chat-GPT[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(7): 117-128.
- [9] 严宇翔, 刘晓煌, 雒新萍, 等. 黑河流域上游 2000—2020 年产水量时空演变及气候与人为因素分析[J]. 地质通报, 2026, 45(1): 162-172.
- Yan Yuxiang, Liu Xiaohuang, Luo Xinping, et al. Spatial and temporal evolution and drivers of water production in the upper reaches of the Heihe River[J]. Geological Bulletin of China, 2026, 45(1): 162-172.
- [10] 贾天朝, 张宁, 胡西武. “三北”工程区土壤保持服务的时空格局变化及其植被响应机制[J]. 西北林学院学报, 2026, 41(1): 1-10.
- Jia Tianchao, Zhang Ning, Hu Xiwu. Spatio-temporal variations of soil conservation services and the vegetation response in the three-north shelter forest program area[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2026, 41(1): 1-10.
- [11] 慕全飞, 王永芳, 郭恩亮, 等. 科尔沁沙地生态系统服务权衡协同及驱动因子[J/OL]. 生态学杂志, 2025: 1-14. <https://link.cnki.net/urlid/21.1148.Q20251230.1939.006>.
- Mu Quanfei, Wang Yongfang, Guo Enliang, et al. Trade-offs and synergies of ecosystem services and driving factors in Horqin Sandy Land [J/OL]. Chinese Journal of Ecology, 2025: 1-14. <https://link.cnki.net/urlid/21.1148.Q20251230.1939.006>.
- [12] 祁迷. 基于 PLUS-InVEST 模型的内蒙古自治区生态系统服务功能研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2024.
- Qi Mi. Study on the ecosystem service function of Inner Mongolia autonomous region based on PLIS-InVEST model[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2024.
- [13] 赵心悦, 高阳, 刘悦忻, 等. 半干旱城市多情景土地利用的生态系统服务权衡协同模拟[J]. 资源科学, 2025, 47(11): 2365-2379.
- Zhao Xinyue, Gao Yang, Liu Yuexin, et al. Modeling trade-offs and synergies among ecosystem services in response to multi-scenario land use in a semi-arid city[J]. Resources Science, 2025, 47(11): 2365-2379.
- [14] 陈瑶, 张长春, 胡丰, 等. 基于 MSPA-InVEST 模型分析太行山生态网络演变[J]. 环境科学, 2025, 46(10): 6443-6454.
- Chen Yao, Zhang Changchun, Hu Feng, et al. Analysis of ecological network evolution in Taihang Mountains based on MSPA-InVEST model[J]. Environmental Science, 2025, 46(10): 6443-6454.
- [15] Ma Xiaoyu, Liu Shasha, Guo Lin, et al. Evolution and analysis of water yield under the change of land use and climate change based on the PLUS-InVEST model: A case study of the Yellow River basin in Henan Province [J]. Water, 2024, 16(17): e2551.
- [16] 刘金环, 李威, 吕思思. 基于 PLUS-InVEST 模型的“两湖一库”流域水质净化时空演变[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(24): 10184-10193.
- Liu Jinhuan, Li Wei, Lü Sisi. Spatial-temporal evolution of water quality purification in "two lakes and one reservoir" basin based on PLUS-InVEST model[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(24): 10184-10193.
- [17] 田文涛, 都沁军. 河北省生态系统服务权衡协同关系评估与预测[J]. 环境科学, 2025, 46(10): 6378-6392.
- Tian Wentao, Du Qinjun. Assessment and prediction of trade-offs and synergies of ecosystem services in Hebei Province[J]. Environmental Science, 2025, 46(10): 6378-6392.
- [18] 张锦鑫, 付航, 傅宇钟, 等. 基于 InVEST 模型和西柳沟流域

- 生境质量现状[J].水土保持学报,2025,39(4):331-341.
- Zhang Jinxin, Fu Hang, Fu Yuzhong, et al. Current status of habitat quality in Xiliugou basin based on InVEST model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(4): 331-341.
- [19] 孙云堃. 基于三峡水库消落区生态系统健康及服务功能的综合评价研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2025.
- Sun Yunkun. A comprehensive evaluation study of ecosystem health and service functions based on the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2025.
- [20] 杨阳, 窦艳星, 王云强, 等. 黄土丘陵沟壑区典型小流域生态系统服务权衡与协同关系研究[J]. 生态学报, 2022, 42(20): 8152-8168.
- Yang Yang, Dou Yanxing, Wang Yunqiang, et al. Ecosystem service tradeoffs and synergies in typical small watersheds of the hilly and gully region of the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(20): 8152-8168.
- [21] 孔维波, 余思, 封欣宜, 等. 水蚀风蚀交错区植被恢复对土壤生态功能的影响[J]. 科学通报, 2025, 70(增刊2): 4843-4856.
- Kong Weibo, Yu Si, Feng Xinyi, et al. Effects of vegetation restoration on soil ecological functions in water-wind erosion crisscross region[J]. Chinese Science Bulletin, 2025, 70(S2): 4843-4856.
- [22] 王祥, 陈炜, 童思陈, 等. 降雨强度对紫色土坡耕地径流氮磷流失的影响研究[J]. 环境工程技术学报, 2025, 15(3): 1045-1054.
- Wang Xiang, Chen Wei, Tong Sichen, et al. Effect of rainfall intensity on nitrogen and phosphorus loss in runoff from purple soil sloping farmland[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2025, 15(3): 1045-1054.
- [23] 刘美娟, 仲俊涛, 王蓓, 等. 基于 InVEST 模型的青海湖流域产水功能时空变化及驱动因素分析[J]. 地理科学, 2023, 43(3): 411-422.
- Liu Meijuan, Zhong Juntao, Wang Bei, et al. Spatiotemporal change and driving factor analysis of the Qinghai Lake basin based on in VEST model[J]. Scientia Geographica Sinica, 2023, 43(3): 411-422.
- [24] 周豪, 陈方鑫, 罗义峰, 等. 降雨径流过程中土地利用优化配置对磷流失的影响[J]. 环境科学, 2022, 43(7): 3597-3607.
- Zhou Hao, Chen Fangxin, Luo Yifeng, et al. Influence of optimal land use allocation on phosphorus loss in the process of rainfall and runoff[J]. Environmental Science, 2022, 43(7): 3597-3607.
- [25] 梁海斌, 安泉旭, 王佩将, 等. 黄土高原植被恢复对土壤有机碳的影响 Meta 分析[J]. 生态学报, 2025, 45(24): 12148-12159.
- Liang Haibin, An Xiaoxu, Wang Peijiang, et al. Effects of vegetation restoration on soil organic carbon in the Loess Plateau, China: A meta-analysis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(24): 12148-12159.
- [26] 闫蒙, 王旭洋, 周立业, 等. 科尔沁沙地沙漠化过程中土壤有机碳含量变化特征及影响因素[J]. 中国沙漠, 2022, 42(5): 221-231.
- Yan Meng, Wang Xuyang, Zhou Liye, et al. Characteristics and influencing factors of soil organic carbon in the process of desertification in Horqin Sandy Land[J]. Journal of Desert Research, 2022, 42(5): 221-231.
- [27] 张新新, 李子君, 林锦阔, 等. 沂河流域多情景土地利用变化与碳储量模拟[J]. 环境科学, 2025: 1-21.
- Zhang Xinxin, Li Zijun, Lin Jinkuo, et al. Simulation of multi-scenario land use change and carbon storage in the Yihe River basin[J]. Environmental Science, 2025: 1-21.
- [28] 闫语, 秦耀伟, 东嘉琪, 等. 京津冀地区生态系统服务权衡与协同关系及驱动因素分析[J]. 环境科学学报, 2025, 45(3): 493-506.
- Yan Yu, Qin Yaowei, Dong Jiaqi, et al. Analysis on ecosystem service trade-offs/synergies and drivers in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2025, 45(3): 493-506.
- [29] 刘小明, 郑世妍, 乔占明. 基于 PLUS-InVEST 模型的三江源土地利用变化动态模拟与生境质量[J]. 干旱区研究, 2025, 42(6): 1080-1092.
- Liu Xiaoming, Zheng Shiyan, Qiao Zhanming. Dynamic simulation of land use change and habitat quality in the Three River Source Region based on the PLUS-InVEST models[J]. Arid Zone Research, 2025, 42(6): 1080-1092.
- [30] 窦文骏, 王小天, 孟雪, 等. 黄河口国家公园建设区陆域生境质量时空演变[J]. 生态学报, 2025, 45(11): 5164-5177.
- Dou Wenjun, Wang Xiaotian, Meng Xue, et al. Temporal and spatial evolution of terrestrial habitat quality in the construction area of Yellow River Estuary National Park[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(11): 5164-5177.
- [31] 聂艳, 王锦鹏, 王俊凯, 等. 耦合生态服务功能和景观形态结构的湖北省生态安全格局构建[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2026, 60(3): 362-374.
- Nie Yan, Wang Jinpeng, Wang Junkai, et al. Construction of ecological security pattern based on coupling ecosystem services and landscape morphology in Hubei Province[J]. Journal of Central China Normal University (Natural Sciences), 2026, 60(3): 362-374.
- [32] 戴路炜, 唐海萍, 张钦, 等. 北方农牧交错带多伦县生态系统服务权衡与协同关系研究[J]. 生态学报, 2020, 40(9): 2863-2876.
- Dai Luwei, Tang Haiping, Zhang Qin, et al. The trade-off and synergistic relationship among ecosystem services: A case study in Duolun County, the agro-pastoral ecotone of northern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(9): 2863-2876.