

呼伦贝尔西部草原生态系统服务功能时空演变特征

郭鑫^{1*}, 张惜伟^{1,2#}, 李阳阳¹, 尹佳锐¹, 刘腾远¹, 吴宏洋¹

¹内蒙古师范大学地理科学学院, 内蒙古 呼和浩特

²内蒙古自治区土地利用与整治工程技术研究中心, 内蒙古 呼和浩特

收稿日期: 2026年4月3日; 录用日期: 2026年5月29日; 发布日期: 2026年6月8日

摘要

为探明呼伦贝尔西部草原生态系统服务功能的时空演变特征, 为地区优化生态修复布局、制定差异化管理政策提供科学参考。本文基于2000~2024年多源遥感及气象数据, 集成全球初级生产力模型、水量平衡及修正通用土壤流失方程等模型, 系统评估了固碳、牧草供给、水源涵养、水土保持及生物多样性保育五项关键服务。发现近24年来区域生态服务功能整体显著提升, 实现了由低水平向高水平的系统性跃迁, 高水平区面积占比由8%增至20%, 空间上呈明显的“东高西低”格局。然而, 各项服务表现出非同步性特征: 固碳等四项功能持续增强, 而生物多样性保育指数受超载放牧等因素影响下降了6.98%, 成为生态质量提升的短板。气候暖湿化与生态政策耦合驱动了功能向好, 未来应以生物多样性恢复为突破口, 实施“东优、中联、西突破”的分区精准修复策略, 推动草原生态系统服务功能的整体协调与持续提升。

关键词

生态系统服务功能, 草地碳储量, 生物多样性, 水土保持, 水源涵养, 呼伦贝尔草原

The Spatiotemporal Evolution Characteristics of Ecosystem Service Functions in the Western Grassland of Hulun Buir

Xin Guo^{1*}, Xiwei Zhang^{1,2#}, Yangyang Li¹, Jiarui Yin¹, Tengyuan Liu¹, Hongyang Wu¹

¹College of Geographical Sciences, Inner Mongolia Normal University, Hohhot Inner Mongolia

²Engineering Technology Research Center of Land Use and Renovation, Hohhot Inner Mongolia

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 郭鑫, 张惜伟, 李阳阳, 尹佳锐, 刘腾远, 吴宏洋. 呼伦贝尔西部草原生态系统服务功能时空演变特征[J]. 地理科学研究, 2026, 15(3): 419-436. DOI: 10.12677/gser.2026.153040

Abstract

To clarify the spatio-temporal evolution characteristics of the ecosystem service functions in the western grassland of Hulun Buir, and to provide scientific references for the region to optimize the ecological restoration layout and formulate differentiated management policies. This study integrated the GLO-PEM, water balance, and RUSLE models to systematically evaluate five key services—carbon sequestration, forage supply, water conservation, soil conservation, and biodiversity conservation—based on multi-source remote sensing and meteorological data from 2000 to 2024. Overall ecosystem services in the region improved significantly over the past 24 years, achieving a systemic transition from low to high levels. The proportion of high-level areas increased from 8% to 20%, and a distinct spatial pattern of “high in the east and low in the west” was observed. However, the services exhibited a non-synchronous characteristic of “structural improvement but genetic degradation.” While four functions continued to enhance, the biodiversity conservation index decreased by 6.98% due to factors such as overgrazing, representing a critical weakness in ecological quality improvement. The coupling of climate warming-wetting and ecological policies drove the functional improvement. It is concluded that future ecological management should prioritize biodiversity restoration and implement a differentiated restoration strategy of “optimization in the east, connection in the middle, and breakthrough in the west” to promote the overall, coordinated, and sustainable enhancement of grassland ecosystem service functions.

Keywords

Ecosystem Service Function, Grassland Carbon Storage, Biological Diversity, Soil and Water Conservation, Water Conservation, Hulun Buir Grassland

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

草原作为全球陆地最重要的生态系统之一，在调节气候、维持生物多样性及保障牧草供给等方面发挥着不可替代的作用[1]。而草原生态系统在碳汇功能、牧草供给、水源涵养、水土保持和生物多样性维持等方面具有重要生态价值。随着生态系统服务研究的深入，其已成为衡量区域生态安全与可持续发展的核心指标。在中国北方，草原不仅是重要的生态安全屏障，更是国家“山水林田湖草沙”一体化保护与修复战略的关键环节。然而，尽管国内外学者在生态系统服务评估方法上取得了显著进展，但现有研究多聚焦于单一功能的演变或短时间序列的评估，缺乏对多项关键服务在长周期尺度下“非同步”演变特征的系统刻画。近年来，国内外学者围绕草原生态系统服务功能的评估方法、时空演变特征及其驱动机制开展了大量研究。国外研究多聚焦于生态系统服务价值的定量评估与模型模拟[2][3]。此外，部分研究从全球变化视角出发，探讨气候变化和土地利用变化对草原生态系统服务功能的长期影响[4]。国内学者们主要聚焦于典型草原区的生态系统服务功能评估与区域差异分析[5]-[7]。研究发现，草原生态系统服务功能具有明显的空间异质性，受降水、温度、地形和人类活动等多重因素影响。

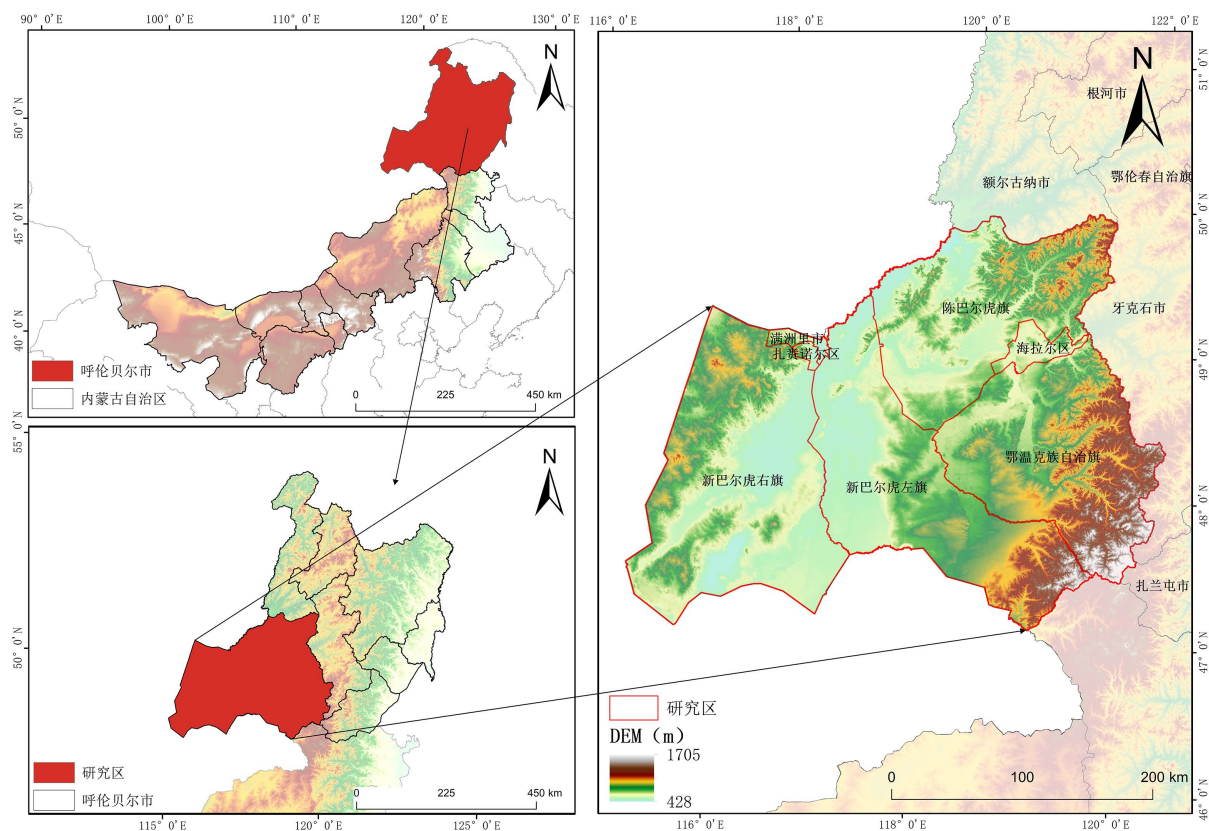
呼伦贝尔草甸草原作为欧亚大陆最具代表性的草原生态类型[8]，具有极高的生态战略地位。近20年来，该区域受暖湿化趋势与高强度畜牧业的交织影响，生态系统表现出显著的敏感性与脆弱性。尽管国

家相继实施了“退牧还草”“草畜平衡”等一系列生态补偿政策，但各项服务功能对政策干预与气候波动的时空响应差异尚不清晰，亟需开展系统性的长时序动态监测。基于此，本文以呼伦贝尔西部草原为研究对象，整合 2000~2024 年多源遥感与气象数据，集成 GLO-PEM、水量平衡及 RUSLE 等模型，系统评估固碳、牧草供给、水源涵养、水土保持及生物多样性保育五项核心服务的演变特征。旨在揭示过去 25 年间区域生态服务的时空分异格局，识别生产力提升与多样性退化间的潜在矛盾，并据此提出分区精准修复策略。研究结果不仅能丰富温带草原对环境响应的理论框架，更可为呼伦贝尔地区优化生态修复布局、制定差异化管理政策提供科学决策参考。

2. 材料和方法

2.1. 研究区概况

呼伦贝尔西部地区(图 1)于 115°31'29"~121°9'29"E, 47°19'56"~50°12'34"N, 地处中国内蒙古自治区东北部, 呼伦贝尔市西部, 北与俄罗斯接壤, 西与蒙古国毗邻, 包括新巴尔虎右旗、新巴尔虎左旗、陈巴尔虎旗、鄂温克族自治旗、满洲里市、扎赉诺尔区及海拉尔区 7 个市县(区、旗), 占地面积约 $8.32 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。研究区属于寒温带大陆性季风气候, 为干旱半干旱区, 雨热同期, 冬季寒冷漫长、夏季温凉短促, 无霜期短, 年均气温为 $-3^\circ\text{C} \sim 10^\circ\text{C}$ 。年均降水量为 240~400 mm, 主要集中在夏季, 占全年降水量的 65%~70%。土壤类型主要以栗钙土和黑钙土为主, 植被以温性典型草原类型为主。土地利用类型以耕地、林地和草地为主, 地形呈中间低两侧高的特征, 平均海拔高度在 453~1702 m 之间, 地形以高平原、河谷平原和山地为主。



注：该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS (2023) 2762 号的标准地图制作，底图无修改。

Figure 1. Geographical location of study area

图 1. 研究区地理位置

2.2. 数据来源

本文的土地利用数据(2000~2024 年)来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>), 空间分辨率为 300 m; 遥感数据均来源于美国航空航天局(<http://landsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>), 主要包括年 NPP 数据集 MYD17A3HGF, 分辨率为 1 km; 高程(DEM)数据集, 分辨率为 300 m; 植被归一化指数(NDVI)数据集, 分辨率为 1 km; 土壤数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>); 内蒙古气象数据均来源于国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/>), 主要包括年均降水、年均气温等数据。

2.3. 研究方法

2.3.1. 固碳量评估

本文采用生态系统净生产力(Net Ecosystem Productivity, *NEP*)来表征草原生态系统的固碳服务功能, 生态系统净生产力是净初级生产力(Net Primary Productivity, *NPP*)减去土壤微生物异养呼吸损耗(Heterotrophic Respiration, R_h)的部分, 其数值大小直接反映碳源/碳汇的大小, 具体公式如下[9] [10]:

$$NEP = NPP - R_h \quad (1)$$

式中: NEP 表示草原生态系统净生产力($\text{g}\cdot\text{C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$); NPP 表示草原生态系统净初级生产力($\text{g}\cdot\text{C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$); R_h 表示草原生态系统土壤微生物呼吸消耗量($\text{g}\cdot\text{C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)。

R_h 主要受到气温和降水的影响, 具体计算公式如下[9]:

$$R_h = 0.22 \times [\exp(0.0912T_i) + \ln(0.3145P_i + 1)] \times 30 \times 46.5\% \quad (2)$$

式中: T_i 表示年均温($^{\circ}\text{C}$); P_i 表示年降水量(mm)。

2.3.2. 牧草供给评估

本文基于植被净初级生产力(*NPP*)计算干草产量来评价草原产草量, 应用 ArcGIS 将 2000~2024 年呼伦贝尔西部草原的 *NPP* 数据与植被类型数据进行分区统计, 估算不同草原类型的 *NPP*, 再通过草原 *NPP* 推算其单位面积干草产量, 具体公式如下:

$$B_g = \frac{NPP}{S_{bn}(1 + S_{ug})} \quad (3)$$

式中: B_g 表示单位面积干草产量($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$); S_{bn} 表示生物量换算为 *NPP* 的转换系数($\text{g}\cdot\text{C}\cdot\text{g}^{-1}$), 数值为 0.45 [11]; S_{ug} 表示地下生物量与地上生物量的比例系数, 不同草地类型取值如下。

Table 1. The ratio coefficients of underground biomass to aboveground biomass in different grassland types

表 1. 不同草地类型地下生物量与地上生物量的比例系数

草地类型	(地上/地下)生物量比例系数
沼泽类	15.68
温性荒漠草原、温性草原化荒漠类、温性荒漠类	7.89
低地草甸类	6.31
山地草甸	6.23
温性草甸草原	5.26
温性草原、高寒草原	4.25

2.3.3. 生物多样性保育评估

本文根据 2015 年国家生态环境部发布的《生态保护红线划定技术指南》(简称《指南》)¹中所提出的生态系统服务功能 NPP 定量评估方法来测定草原生物多样性保育服务功能[12]。本文参考孙灏[13]等人的方法,采用年均 NPP 、气温和降水重新测度生物多样性保育的年度变化,具体公式如下:

$$S = NPP_{mean} \times P_i \times T_i \times (1 - E) \quad (4)$$

式中, S 表示草原生态系统生物多样性保育维护功能指数; NPP_{mean} 表示年均草原生态系统净初级生产力; E 表示海拔因子。

2.3.4. 水源涵养评估

本文采用水量平衡动态模型来测度草原水源涵养服务功能,具体测算公式如下:

$$Q_{WT} = (P_i - R_i - PET_i) \times A \quad (5)$$

式中, Q_{WT} 表示为水源涵养量(mm); R_i 表示为年均地表径流量(mm); PET_i 表示为年均蒸发量(mm); A 表示为草原生态系统面积(m²)。

2.3.5. 水土保持评估

本文采用修正通用土壤流失方程(Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE)来定量估算草原土壤保持功能,在原有通用土壤流失方程的基础上,从降雨、土壤、坡度和植被等侵蚀因子出发,并结合各地的实际情况,对模型内部的参数进行调整,进而准确真实地反映出该地区的土壤侵蚀情况[14][15],具体公式如下:

$$SR = RKLS - USLE = R \cdot K \cdot LS \cdot (1 - C \cdot P) \quad (6)$$

式中, SR 表示年度水土保持量(t·hm⁻²·a⁻¹); $RKLS$ 表示年度潜在水土保持量(t·hm⁻²·a⁻¹); $USLE$ 表示年度实际水土保持量(t·hm⁻²·a⁻¹); R 表示降雨侵蚀因子(MJ·mm·hm⁻²·a⁻¹); K 表示土壤可侵蚀因子(MJ·hm⁻²·mm); LS 表示地形因子(无量纲); P 表示土壤保持因子(无量纲); C 表示植被因子,计算方式如下:

$$C = 0.6508 - 0.3436 \lg Fc, 0 < Fc \leq 0.783 \quad (7)$$

$$Fc = (NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}) \quad (8)$$

式中, Fc 表示植被覆盖度(%); $NDVI$ 表示植被归一化指数; $NDVI_{max}$ 和 $NDVI_{min}$ 分别为植被归一化指数的最大值与最小值。此外,若 Fc 不在以上区间内, C 的表达式为: $\{C = 1 | Fc = 0; C = 0 | Fc > 0.783\}$ 。

其它模型参数计算方法如下:

(1) 降雨侵蚀因子 R :

$$R = \sum_{i=1}^{12} \left\{ 1.735 \times 10^4 \left[1.5 \times \log(P_i^2 / P) - 0.8188 \right] \right\} \quad (9)$$

其中, R 表示年均降雨侵蚀力(MJ·mm·hm⁻²·a⁻¹); P 表示为月均降水(mm)。

(2) 土壤保持因子 P :

土壤保持因子是指采取土壤保持措施后土壤流失量与原顺坡耕作中土壤流失量间的比值。参考已有研究,本文将土壤保持因子 P 赋值为 1 [16]。

(3) 地形因子 LS :

$$LS = L \times S \quad (10)$$

$$L = (\lambda / 22.13)^m \quad (11)$$

¹https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201707/t20170728_418679.htm

式中, L 表示坡长因子(无量纲); S 表示坡度因子(无量纲); λ 表示坡长(m); m 表示坡长指数(无量纲)。此外, S 的表达式为分段函数, $\{S = 10.8\sin\theta + 0.03|\theta < 5^\circ; S = 16.8\sin\theta - 0.5|5^\circ < \theta \leq 10^\circ; S = 21.9\sin\theta - 0.96|\theta \geq 10^\circ\}$; $\{m = 0.2|\theta < 1^\circ; m = 0.3|1^\circ < \theta \leq 3^\circ; m = 0.4|3^\circ < \theta \leq 5^\circ; m = 0.5|\theta \geq 5^\circ\}$ 。

2.3.6. 草原生态服务功能估算

根据本文对于草原生态服务功能的定义, 在原有各类功能估算结果的基础上, 采用统计学方法对各指标进行赋权, 并选择恰当的评价方法来获得草原生态系统综合生态服务功能评价结果。在评价过程中, 需要对各类生态服务功能指标进行无量纲化处理。具体计算公式如下:

$$x'_{ij} = (x_{ij} - \min x_{ij}) / (\max x_{ij} - \min x_{ij}) \quad (12)$$

式中, x_{ij} 表示第 i 个评价对象第 j 类生态服务功能的原始值; $\max x_{ij}$ 和 $\min x_{ij}$ 分别表示为该生态服务功能的最大值和最小值。

其次, 需要确定各指标的权重分配, 本文选择最常用的熵值法来确定各类生态服务功能的权重, 并最终计算出综合生态服务功能, 具体步骤如下:

(1) 计算贡献度矩阵

$$p_{ij} = (x'_{ij} / \sum_{i=1}^m x'_{ij}) (j = 1, 2, \dots, n) \quad (13)$$

式中, p_{ij} 表示第 i 个评价对象第 j 类功能 x 所占比重, 贡献度矩阵 $P = (p_{ij})_{m \times n}$ 。

(2) 计算熵值与差异性系数

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m (p_{ij} \times \ln p_{ij}) (i = 1, 2, \dots, m) \quad (14)$$

式中, $k = \ln m - 1$, $d_j = 1 - e_j$ ($j = 1, 2, \dots, n$), m 表示评价对象的个数。

(3) 计算权重

$$w_j = d_j / \sum_{j=1}^n d_j (j = 1, 2, \dots, n) \quad (15)$$

式中, d_j 表示第 j 个指标的差异性系数, 计算公式为 $d_j = 1 - e_j$; n 表示评价对象的个数。

(4) 计算草原生态服务功能指数

$$F_i = \sum_{j=1}^n w_j \times x'_{ij} \quad (16)$$

式中, w_j 表示第 j 个指标的权重; x'_{ij} 表示第 i 个评价对象、第 j 个评价指标的标准化值; n 表示评价指标的数量。

3. 结果与分析

3.1. 草原固碳功能特征

基于呼伦贝尔西部 2000~2024 年各草原生态系统服务功能的计算结果, 利用 ArcGIS 的自然断点法, 将各生态系统服务功能结果划分为五个等级。从整体特征来看, 研究区固碳功能呈现明显的“东高西低”空间分异特征, 其余四项生态系统服务功能亦是如此, 归因于降水自东向西递减的宏观格局。其中, 高水平区集中分布在鄂温克族自治旗东南部, 中等水平区主要分布在中部及中西部地区, 而低水平区则主要位于新巴尔虎右旗和新巴尔虎左旗的西部地区。从时间演化看, 2000~2024 年间, 固碳功能高水平区域的空间分布范围逐渐扩大, 尤其是鄂温克族自治旗及其周边地区的高水平区域面积显著增加, 显示出该区域固碳能力的持续提升(图 2)。

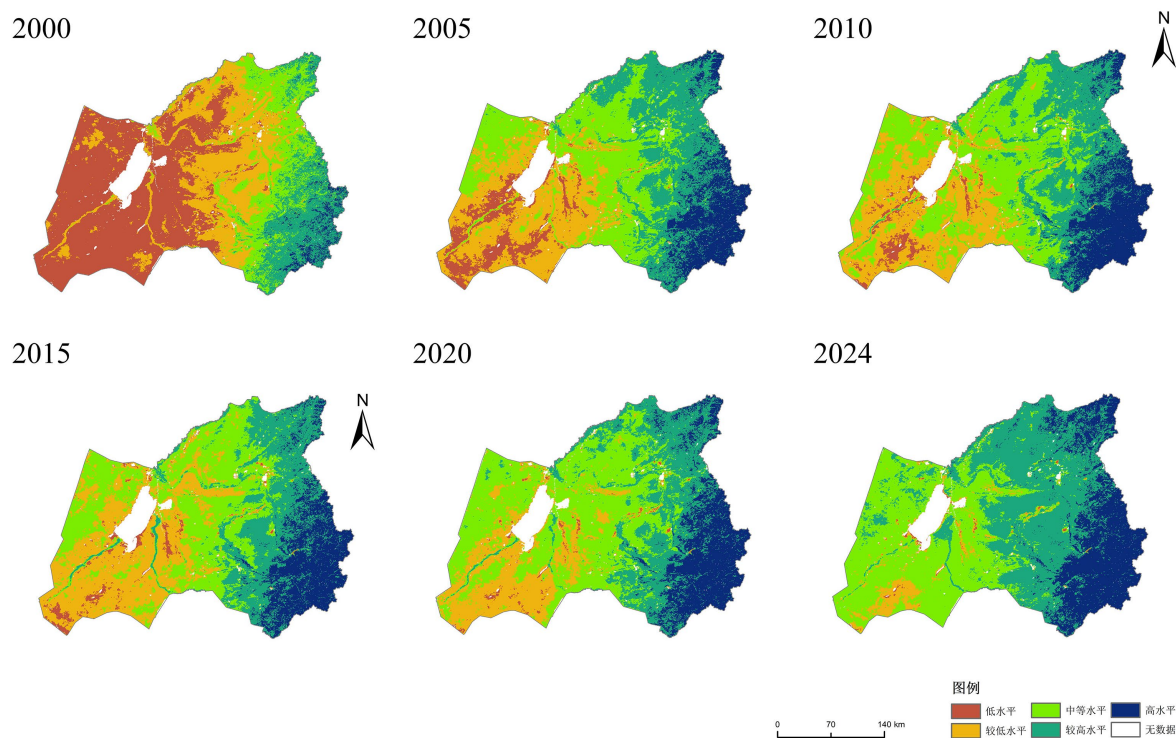


Figure 2. Spatial distribution of carbon sequestration in the western grassland of Hulun Buir from 2000 to 2024
图 2. 2000~2024 年呼伦贝尔西部草原固碳空间分布

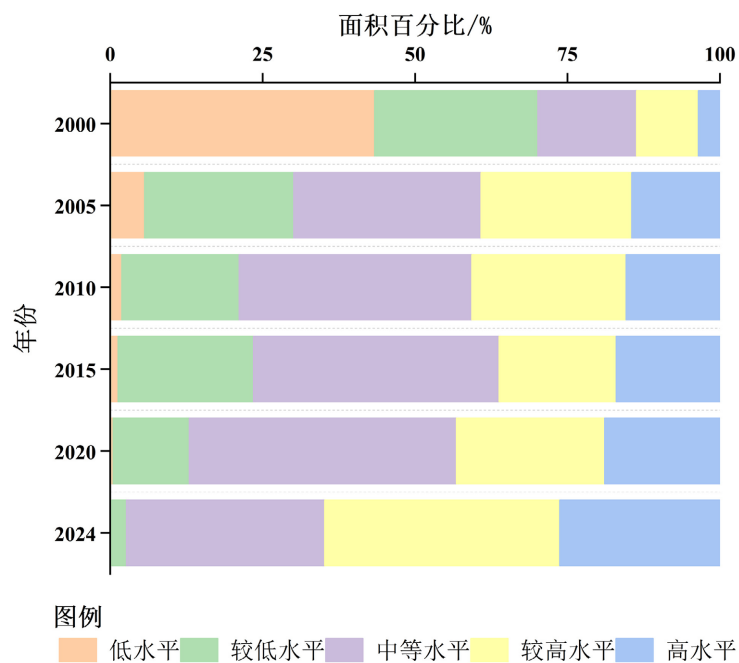


Figure 3. The proportion of areas with carbon sequestration on each grade in the western grassland of Hulun Buir
图 3. 呼伦贝尔西部草原固碳等级面积占比

2000 年, 低水平和较低水平区域面积合计占比近总面积的三分之二, 而至 2024 年, 两者合计占比降低至不足 5%。与此同时, 较高水平与高水平区域面积均有显著提升, 其中, 高水平区域由 2% 提升至 20%

(图3)。研究区绝大部分区域的固碳功能在研究时段内呈增加趋势,仅东南部及中部零星区域出现固碳功能不变或轻微下降的现象,整体变化趋势向好(图4)。

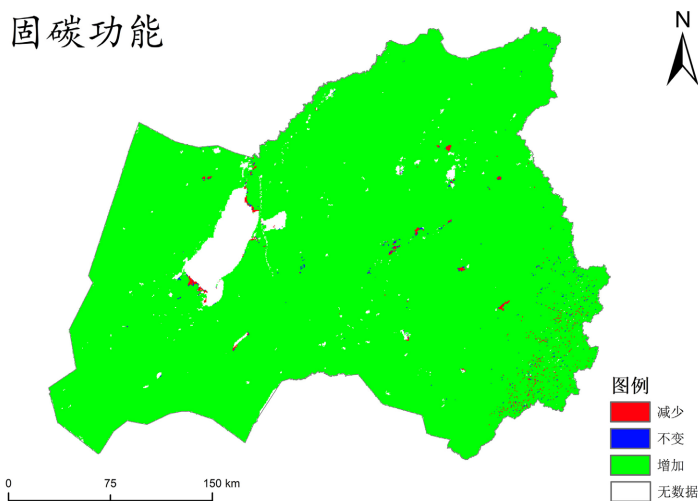


Figure 4. The changes in carbon sequestration of the western grassland in Hulun Buir
图4. 呼伦贝尔西部草原固碳变化

3.2. 牧草供给功能特征

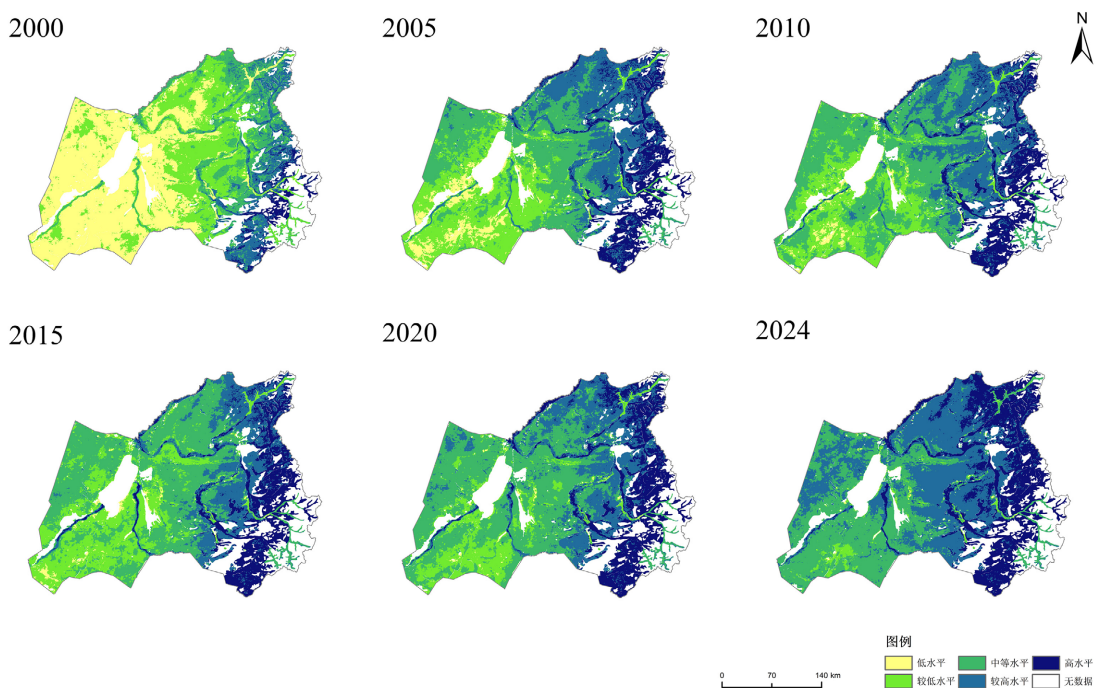


Figure 5. Spatial distribution of forage supply in the western grassland of Hulun Buir from 2000 to 2024
图5. 2000~2024年呼伦贝尔西部草原牧草供给空间分布

牧草供给高水平区主要分布在鄂温克族自治旗东部及陈巴尔虎旗东部地区,中等水平区集中在中部及中西部地区,而低水平区则主要分布在新巴尔虎右旗和新巴尔虎左旗西部地区。随着时间推移,牧草

供给高水平区域的空间范围逐渐扩大，尤其是陈巴尔虎旗东部地区的牧草供给水平在 2010 年后显著提升，逐步由中等水平跃升为高水平，而低水平区域空间范围从 2005 年开始出现明显缩减(图 5)。

2000 年，低水平和较低水平区域面积占比超过总面积的 70%，而至 2024 年，低水平区域面积占比下降至接近 0，较低水平区域降至 2%。与此同时，较高水平区域面积占比提升至 39%，高水平区域面积占比提升至 26% (图 6)。研究区绝大部分区域的牧草供给在研究时段内呈增加趋势，仅东南部沼泽草原出现牧草供给不变，减少区几乎为零，整体变化趋势向好(图 7)。

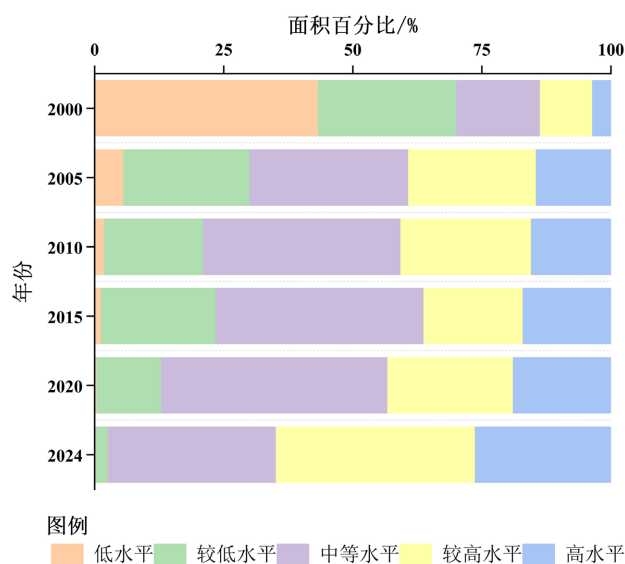


Figure 6. The proportion on each grade of forage supply in the western grassland of Hulun Buir
图 6. 呼伦贝尔西部草原牧草供给各等级面积占比

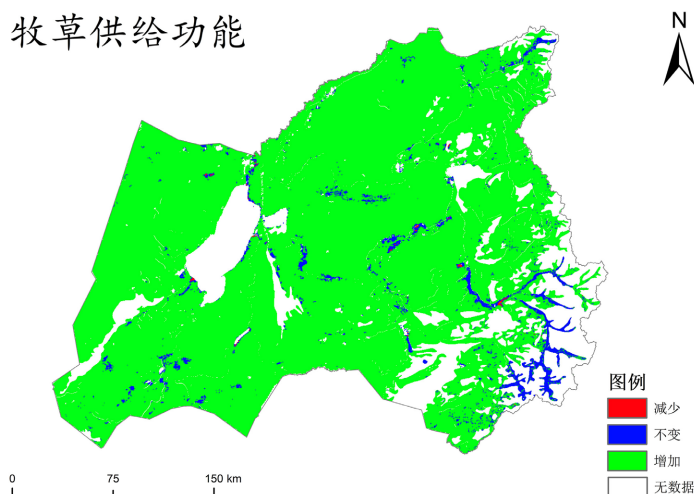


Figure 7. The changes in the forage supply of the western grassland in Hulun Buir
图 7. 呼伦贝尔西部草原牧草供给变化

3.3. 生物多样性保育功能特征

生物多样性保育高水平区零星分布在鄂温克族自治旗和新巴尔虎左旗东南部，中等水平区集中在中部偏北地区，而低水平区则主要分布在新巴尔虎右旗。从时间演化看，2000~2024 年间，高水平区域的空

间分布范围略有扩大，但整体变化幅度较小(图 8)。

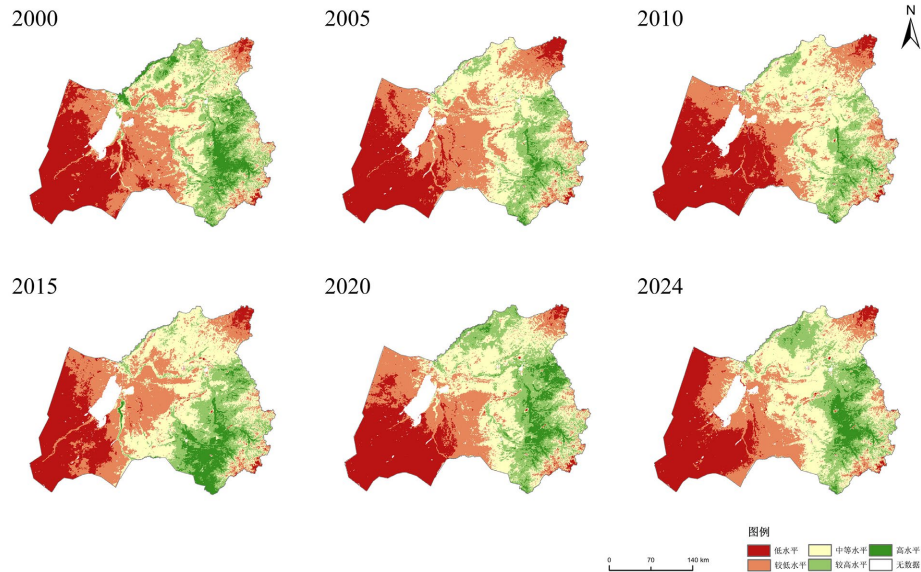


Figure 8. Spatial distribution of biodiversity conservation in the western grassland of Hulun Buir from 2000 to 2024
图 8. 2000~2024 年呼伦贝尔西部草原生物多样性保育空间分布

2000~2024 年间,中等及以下水平区域面积占比始终占据主导地位,合计占比在 73%~86%之间波动。较高及高水平区域面积占比在 2015 年后出现增长趋势,在 2020 年达到最大,占比为 27% (图 9)。这一变化趋势表明,呼伦贝尔西部草原生物多样性保育功能整体处于“稳中略升”的状态,但恢复速度相对缓慢。鄂温克族自治旗及陈巴尔虎旗东部地区、新巴尔虎右旗东南及西部地区属于生物多样性保育服务功能减少区,其余中部地区为增加区,整体变化趋势呈现“中间升、四周降”的空间格局(图 10)。

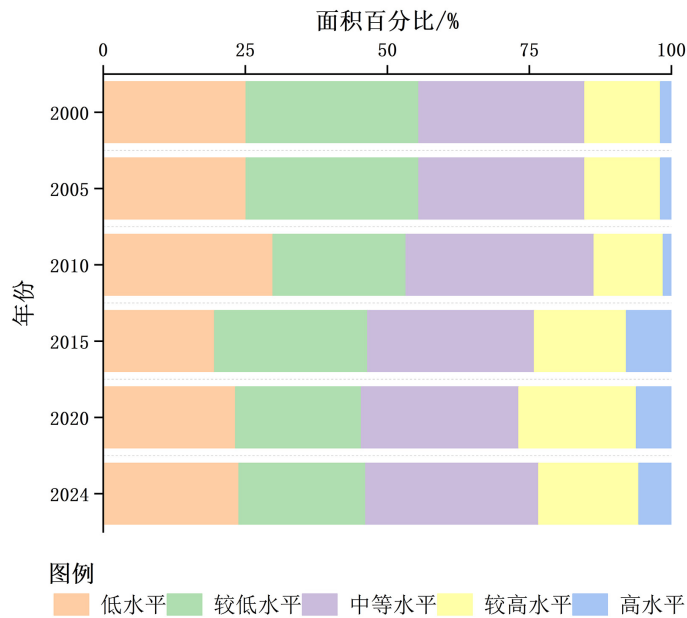


Figure 9. The proportion of the area on each grade of biodiversity conservation in the western grassland of Hulun Buir
图 9. 呼伦贝尔西部草原生物多样性保育各等级面积占比

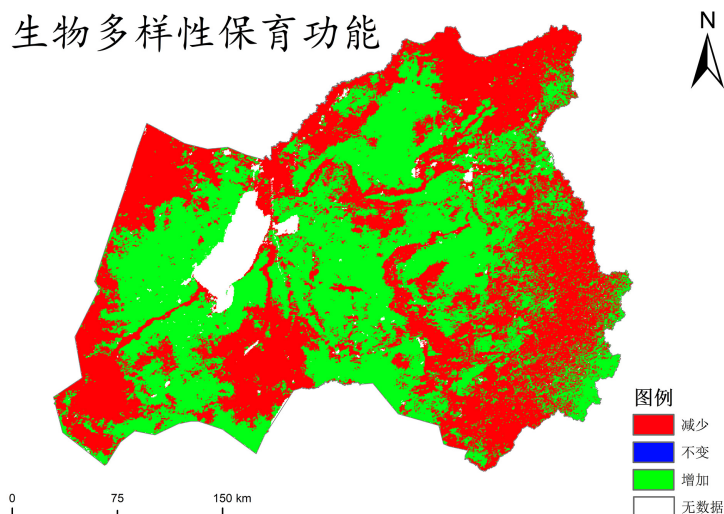


Figure 10. The changes in the biodiversity conservation of the western grassland in Hulun Buir
图 10. 呼伦贝尔西部草原生物多样性保育变化

3.4. 水源涵养功能特征

水源涵养高水平区主要分布在鄂温克族自治旗东南部及河流沿岸湿地地区，中等水平区集中在中部偏东地区，而低水平区则主要分布在新巴尔虎右旗西南地区。从时间演化看，2000~2024 年间，水源涵养功能高水平区域的空间分布范围逐渐扩大，尤其是河流沿岸及湿地周边地区的水源涵养能力显著提升(图 11)。

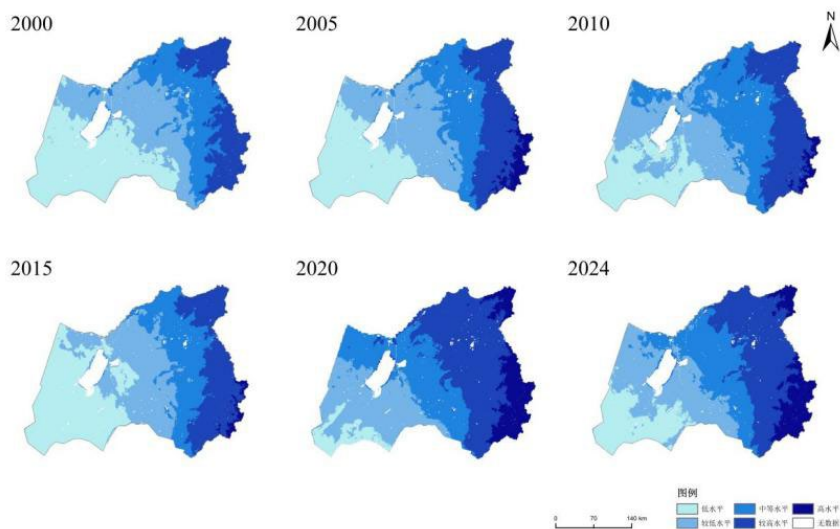


Figure 11. Spatial distribution of water conservation in the western grassland of Hulun Buir from 2000 to 2024
图 11. 2000~2024 年呼伦贝尔西部草原水源涵养空间分布

2000 年，低水平区域面积占比为 33%，而至 2024 年下降至 14%；高水平区域面积占比由不足 1% 增长至 10%，其余等级区域面积占比在研究年份范围内变化不大(图 12)。新巴尔虎右旗北部及西南地区、陈巴尔虎旗东北地区、鄂温克族自治旗部分中部地区属于水源涵养服务功能不变区，其余绝大部分地区均为增加区，整体变化趋势向好(图 13)。

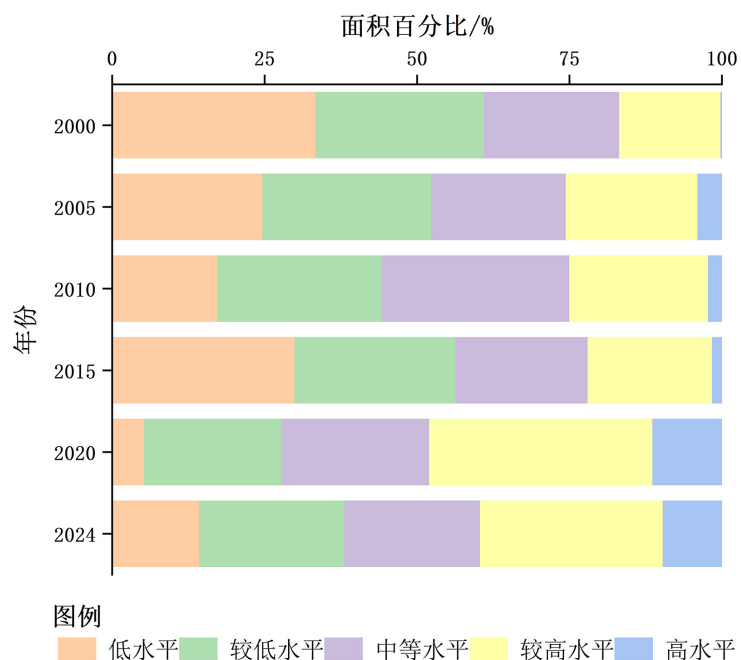


Figure 12. The proportion of area of water conservation on each grade in the western grassland of Hulun Buir
图 12. 呼伦贝尔西部草原水源涵养各等级面积占比

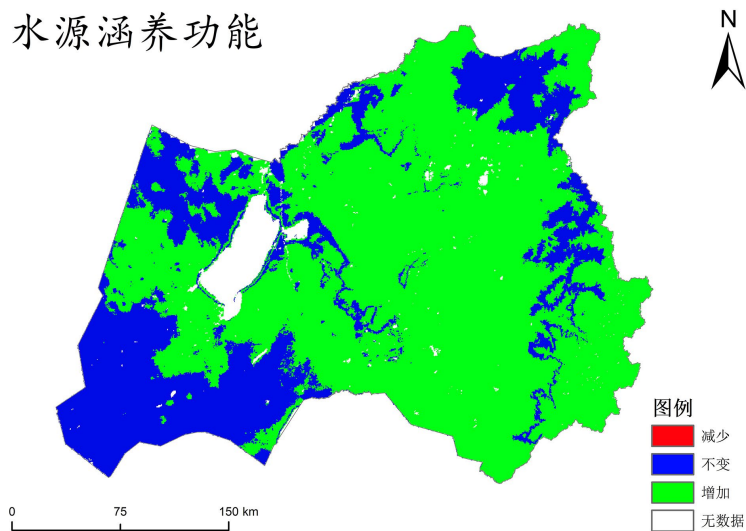


Figure 13. The changes in water conservation of the western grassland in Hulun Buir
图 13. 呼伦贝尔西部草原水源涵养变化

3.5. 水土保持功能特征

水土保持高水平区主要分布在鄂温克族自治旗东南部，中等水平区围绕高水平区分布，而低水平区则广泛分布在新巴尔虎右旗、新巴尔虎左旗绝大部分地区、陈巴尔虎旗及鄂温克族自治旗西部地区。从时间演化看，2000~2024 年间，水土保持功能高水平区域的空间分布范围略有扩大，但整体变化幅度较小，区域差异依然显著(图 14)。

2000~2024 年间，低水平区域始终占据主导地位，占比在 63%~83%之间波动，高水平及较高水平区

域面积合计占比不足 3%(图 15)。这一变化趋势表明,呼伦贝尔西部草原水土保持功能整体处于“基本稳定、略有提升”的状态,区域间差异依然显著,尤其是高水平区的扩展表现出一定的空间集聚性。尽管低水平区仍占据主导地位,但其增长幅度较小,说明区域整体水土保持能力的提升尚处于缓慢推进阶段。研究区东南部及东北角部分地区属于水土保持服务功能增加区,新巴尔虎右旗西北部地区零星分布有减少区,其余地区均属于不变区,整体变化趋势相对稳定(图 16)。

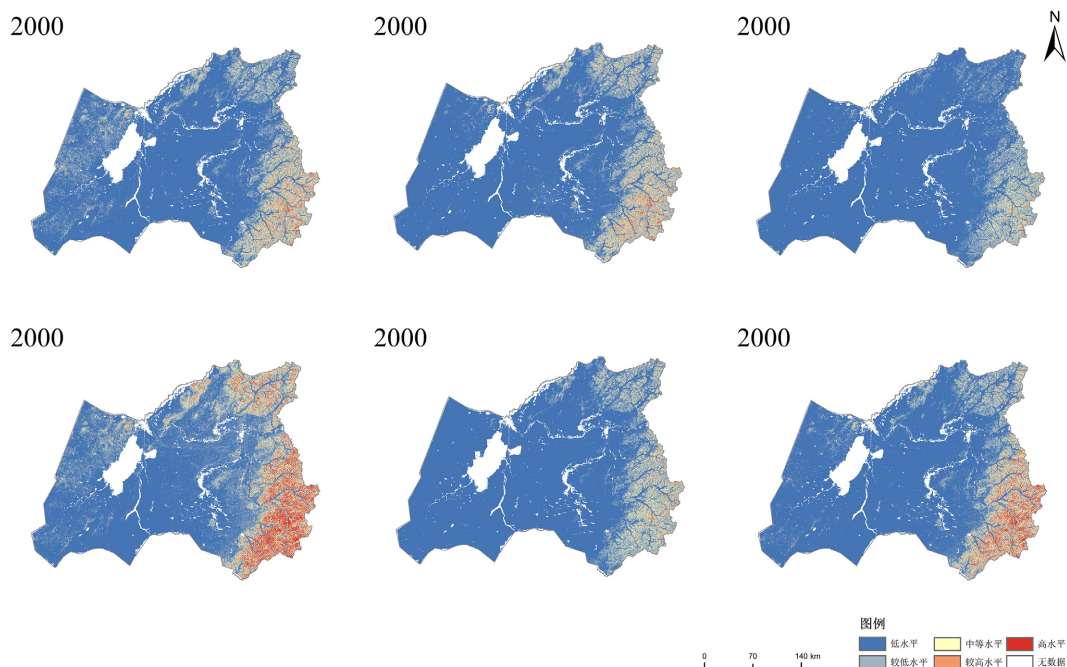


Figure 14. Spatial distribution of soil and water conservation in the western grassland of Hulun Buir from 2000 to 2024
图 14. 2000~2024 年呼伦贝尔西部草原水土保持空间分布

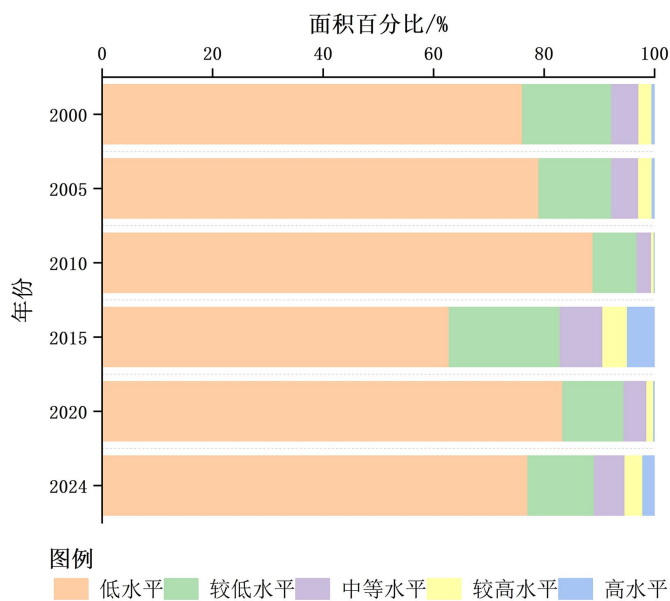


Figure 15. The proportion of the area on each grade of soil and water conservation in the western grassland of Hulun Buir
图 15. 呼伦贝尔西部草原水土保持各等级面积占比

水土保持功能

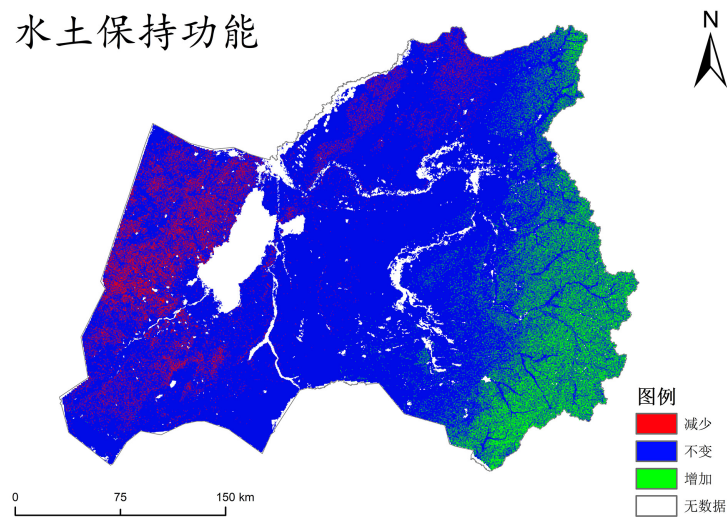


Figure 16. The changes of soil and water conservation in the western grassland of Hulun Buir
图 16. 呼伦贝尔西部草原水土保持变化

3.6. 草原生态系统服务功能特征

整体上来看，草原生态系统服务功能同样呈现出明显的“东高西低”空间分异特征。高水平区主要集中在鄂温克族自治旗东南部，中等水平区集中在中部地区，而低水平区主要分布在西部的巴尔虎右旗及巴尔虎左旗地区。从时间演化看，2000~2024 年间，生态服务功能高水平区域的空间分布范围逐渐扩大，尤其是鄂温克族自治旗及其周边地区的高水平区域面积显著增加，显示出该区域生态系统综合服务功能的持续提升(图 17)。

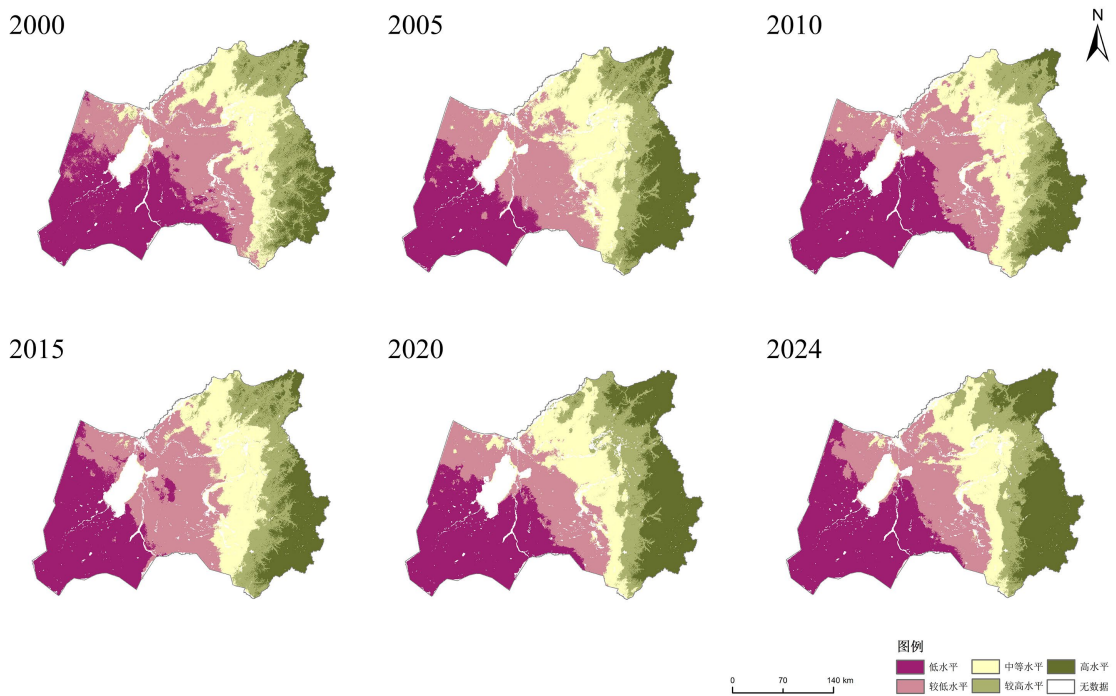


Figure 17. Spatial distribution of grassland ecosystem service in western Hulun Buir from 2000 to 2024
图 17. 2000~2024 年呼伦贝尔西部草原生态系统服务空间分布

不同等级生态服务功能区面积占比的动态变化趋势(图 18)表明, 高水平区域面积占比由 8%上升至 20%, 在 2020 年和 2024 年显著增加。中等水平及较高水平区域面积占比波动不大。这一变化趋势表明, 呼伦贝尔西部草原综合生态服务功能整体实现了由低水平向高水平的结构性转变, 区域生态系统服务能力显著增强。陈巴尔虎旗东部、鄂温克族自治旗西部及新巴尔虎左旗南部属于生态服务功能增加区, 新巴尔虎右旗西北部地区零星分布有减少区, 其余地区均属于不变区, 整体变化趋势向好(图 19)。这一空间变化格局表明, 呼伦贝尔西部草原生态系统服务功能在区域尺度上呈现出“整体提升、局部优化”的演进特征, 生态安全屏障功能在关键区域得到进一步增强。

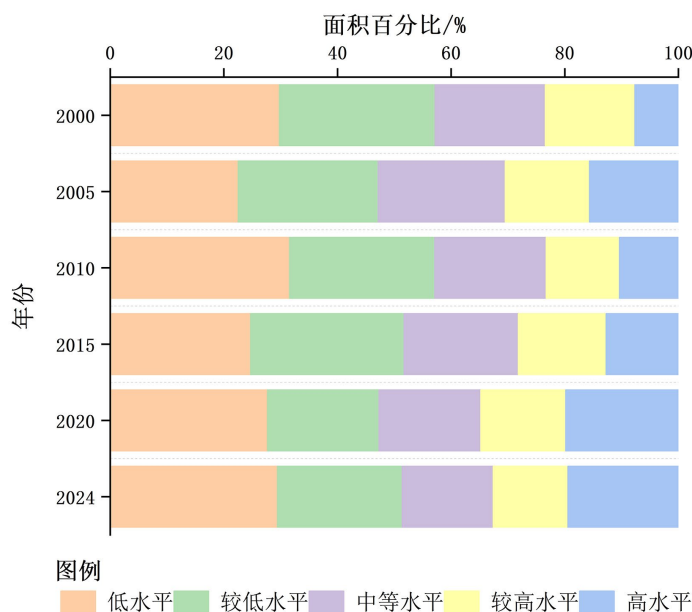


Figure 18. The changes in the area of grassland ecosystem service function grades in western Hulun Buir
图 18. 呼伦贝尔西部草原生态系统服务功能等级面积变化

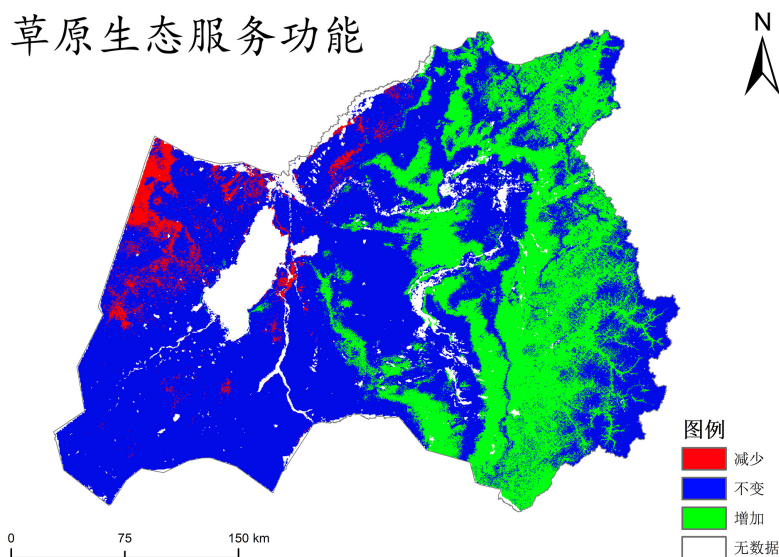


Figure 19. The changes of grassland ecosystem service functions in western Hulun Buir
图 19. 呼伦贝尔西部草原生态系统服务功能变化

4. 讨论

4.1. 呼伦贝尔西部草原生态系统服务整体提升的驱动机制

本研究显示, 2000~2024 年间呼伦贝尔西部草原固碳、牧草供给、水源涵养及水土保持等关键服务功能均呈显著上升趋势, 这与 Liu 等对全国尺度生态系统服务动态的研究结论基本一致。这种整体性的提升是气候暖湿化与生态工程政策耦合驱动的结果。对于半干旱草原来说, 水分是生产力的第一限制因子, 研究区降水量在过去 20 年间增加了 5%~7%, 导致本文测算的水源涵养量增幅值 24.75% 与郑婷婷等同期研究结果相比略高。暖湿化的气候趋势直接促进了植被净初级生产力(NPP)的提高, 从而带动了固碳和牧草供给能力的增强。同时, 生态政策的累积效应也不容忽视。2000 年以来, 内蒙古自治区通过集中实施“退牧还草”“草畜平衡”及“京津风沙源治理”等重大生态工程, 以及减少人为放牧压力等, 为植被恢复提供了关键的窗口期, 这也是导致研究区牧草供给年均增长率(1.25%)略高于全国水平的可能原因。值得注意的是, 本研究观测到 2010 年后服务功能等级实现了由低向高的“系统性跃迁”, 这反映出生态修复效益具有明显的滞后性, 即前期政策投入的生态红利在气候适宜期得到了集中释放。

4.2. 空间分异格局的成因分析

研究区各项生态服务功能总体呈现“东高西低”的空间格局, 这与降水梯度自东向西递减的宏观背景高度契合, 印证了姜世忠等关于内蒙古草原生态系统服务沿降水梯度演变的规律。具体而言, 固碳与牧草供给的高值区集中于鄂温克族自治旗东南部, 与杨文仙等在呼伦贝尔典型草原区基于 InVEST 模型的模拟结果一致, 该区域地处大兴安岭向呼伦贝尔高原的过渡带, 地形起伏度较高, 复杂的微地形为物种提供了多样化的生境, 且人为干扰相对较少。水源涵养的高值区则紧密围绕河流沿岸及湿地分布, 与张昌顺等“湿地-河流生态系统对草原水源涵养贡献率可达 42%”的结论一致, 验证了湿地系统对草原水源调节的巨大贡献。相比之下, 水土保持功能在 77% 的区域仍处于低水平, 与陈朝良等在湟水流域的结论相似, 且低值区广泛分布于地势平坦的新巴尔虎右旗。这可能与西部地区长期存在的矿产开发(如露天煤矿)导致的地下水位下降及地表植被破碎化有关, 暗示了在平坦草原区, 即使植被总量有所恢复, 其固土保水等结构性功能仍需更长周期的演化。而生物多样性保育高值区呈斑块状散布, 可能与局部地形异质性高和人为扰动少有关。

4.3. 生物多样性保育功能“稳中略降”的警示因素分析

与固碳、牧草供给等供给与调节服务的持续增长不同, 呼伦贝尔西部草原的生物多样性保育指数在近 20 年间下降了 6.98%。这一现象可从“生产力-多样性悖论”得到解释。当环境条件改善导致生产力快速提高时, 竞争能力强的少数优势物种会迅速扩张并占据空间资源, 从而排挤伴生种, 导致群落结构趋向单一化。风蚀-水蚀复合作用削弱了土壤生境的异质性。尽管研究区水土保持功能整体稳定, 但在西部低值区, 持续的、以风蚀为主的土壤侵蚀过程, 破坏了地表结皮、改变了微地形, 使得依赖稳定微生境的苔藓、地衣及部分浅根系植物难以定植, 从而降低了局域尺度的多样性。同时, 土壤种子库的流失也限制了植被自然恢复的潜力。此外, 孙灏等的研究也指出, 优势种单一化和外来物种入侵是内蒙古草原多样性下降的主因。本研究发现, 尽管高值区面积略有增加, 但低-中值区仍占主导(76%以上), 且 2020 年后增速放缓。这警示我们, 当前的生态恢复仍处于“量增质滞”的初级阶段, 长期超载放牧导致的植物功能群简化尚未得到根本扭转。未来应在推行草畜平衡的基础上, 引入乡土优良牧草补播和轮封轮牧措施, 以扭转多样性下滑趋势。

4.4. 区域精准修复策略与政策启示

基于各项服务功能的时空演变特征, 本研究提出了“东优、中联、西突破”的分区精准修复策略。在

东部鄂温克旗等“碳-水-草”多功能协同增益核心区,生态系统本底好,是严格的禁牧区和生态保护红线核心区。未来需严防旅游基础设施无序扩张、道路网络加密导致的生境破碎化,并利用近自然林草抚育手段,进一步提升森林-草原交错带的群落结构与稳定性,筑牢碳汇和水源涵养核心功能区。在中部陈巴尔虎旗等区域,是草畜平衡和季节性休牧政策的主要实施区域。未来应实施“修复性联通”策略。重点沿伊敏河-辉河等主要水系构建和修复生态廊道,为物种扩散和基因交流提供通道。在政策上,可在控制总载畜量的基础上,根据草地恢复状态实行更灵活的“轮区休牧”。在西部新巴尔虎左、右旗等低水平区,必须采取最严格、最持久的禁牧封育措施,为极度退化的生态系统提供充分的自然恢复“时间窗口”。同时,需结合主动的人工干预措施,采用“草方格+乡土耐旱牧草混播”进行功能群复配与土壤固定。这种由“全面保护”向“分区施策”的转变,是实现呼伦贝尔草原生态系统服务整体、协调与持续提升的关键。

5. 结论

(1) 生态系统服务功能总体显著提升,生物多样性恢复滞后。2000~2024年间,呼伦贝尔西部草原五大生态服务功能呈“四升一降”格局:固碳、牧草供给、水源涵养和水土保持量均有不同程度提升,仅生物多样性保育指数呈下降趋势,成为区域生态质量提升的短板。

(2) 功能等级结构实现由低向高的系统性跃迁。除生物多样性保育服务功能下降不明显以外,固碳、牧草供给、水源涵养及水土保持各服务功能的低、较低水平区面积合计占比由2000年的69%、70%、56%和92%降至2024年的5%、2%、38%和89%,中等及以上等级区面积同步扩张,表明草原生态安全屏障功能整体增强,空间结构趋于优化。

(3) 呼伦贝尔西部地区各草原生态系统服务功能空间分布特征明显。不同草原生态系统服务功能在空间上呈现出一定的集聚性。具体而言,固碳功能高水平区域主要集中在研究区的东南部,牧草供给功能高水平区域则主要分布在中部及东部地区,生物多样性保育功能高水平区域零散分布在全区,水源涵养功能高水平区域多位于河流附近及湿地周边,水土保持功能高水平区域则主要分布在东南部及东北角地区。

(4) 未来应以生物多样性恢复为突破口,实施分区精准修复策略。在鄂温克族自治旗-陈巴尔虎旗东部多功能协同增益核心区,继续采取相关措施,确保碳汇、产草与水源涵养功能持续领先;沿伊敏河-辉河中游构建生态廊道,提升湿地周边生境异质性,带动中部地区生物多样性指数回升;针对新巴尔虎右旗、新巴尔虎左旗西部干旱低值区,以“轮封轮牧+本地优良牧草混播+功能群复配”为核心,优先恢复退化指示种和伴生种,控制载畜量,力争2030年前使生物多样性保育指数止跌回升,形成“东优、中联、西突破”的生态保护格局,推动草原生态系统服务功能整体、协调与持续提升。

基金项目

内蒙古自然科学基金(2024LHMS04002);内蒙古师范大学研究生科研创新基金资助项目(CXJJS25036)。

参考文献

- [1] 白永飞, 黄建辉, 郑淑霞, 潘庆民, 张丽霞, 周华坤, 徐海量, 李玉霖, 马健. 草地和荒漠生态系统服务功能的形成与调控机制[J]. 植物生态学报, 2014, 38(2): 93-102.
- [2] Kareiva, P., Tallis, H., Ricketts, T., *et al.* (2011) Natural and Human Systems: Ecosystem Services. In: Kareiva, P., *et al.*, Eds., *Natural Capital: Theory and Practice of Mapping Ecosystem Services*, Oxford University Press, 23-44.
- [3] Running, S.W., Nemani, R.R., Heinsch, F.A., Zhao, M., Reeves, M. and Hashimoto, H. (2004) A Continuous Satellite-

- Derived Measure of Global Terrestrial Primary Production. *BioScience*, **54**, 547-560.
[https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2004\)054\[0547:acsmog\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2004)054[0547:acsmog]2.0.co;2)
- [4] Piao, S., Fang, J., Ciais, P., Peylin, P., Huang, Y., Sitch, S., *et al.* (2009) The Carbon Balance of Terrestrial Ecosystems in China. *Nature*, **458**, 1009-1013. <https://doi.org/10.1038/nature07944>
- [5] 刘洋洋, 任涵玉, 周荣磊, 巴桑参木决, 张伟, 章钊颖, 温仲明. 中国草地生态系统服务价值估算及其动态分析[J]. 草地学报, 2021, 29(7): 1522-1532.
- [6] 李建东, 方精云. 中国草原的生态功能研究[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 5-6.
- [7] 裴志永, 周才平, 欧阳华, 等. 青藏高原高寒草原区域碳估测[J]. 地理研究, 2010, 29(1): 102-110.
- [8] 邓明月, 乃国栋, 戎郁萍, 等. 氮磷添加对呼伦贝尔草甸草原打草场土壤碳组分及碳转化酶活性的影响[J/OL]. 草原与草坪, 1-12. <https://link.cnki.net/urlid/62.1156.S.20250320.1041.008>, 2026-03-22.
- [9] 孟天乐, 杨洁, 周杰. 1990-2020年甘南州碳储量及驱动因子探究[J/OL]. 草原与草坪, 1-14. <https://link.cnki.net/urlid/62.1156.s.20251112.1106.004>, 2026-03-22.
- [10] 王菲, 曹永强, 周姝含, 等. 黄河流域生态功能区植被碳汇估算及其气候影响要素[J]. 生态学报, 2023, 43(6): 2501-2514.
- [11] 方精云, 刘国华, 刘嵩龄. 中国陆地生态系统的碳循环及其全球意义[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996: 156-158.
- [12] 环境保护部办公厅, 国家发展和改革委员会办公厅. 关于印发《生态保护红线划定指南》的通知[EB/OL]. 2017. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201707/t20170728_418679.htm, 2026-05-01.
- [13] 孙灏, 胡佳琪, 崔雅静, 等. 基于多源遥感数据的生态系统服务功能时空演变趋势分析[J]. 测绘通报, 2021(4): 1-7.
- [14] 陈朝良, 赵广举, 穆兴民, 等. 基于RUSLE模型的湟水流域土壤侵蚀时空变化[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 73-79.
- [15] 朱楚馨, 樊翔, 白中科, 等. 基于RUSLE模型的中国生产建设工程扰动区潜在侵蚀时空分异规律研究[J]. 中国土地科学, 2021, 35(9): 105-115.
- [16] 脱登峰, 卢琦, 却晓娥, 等. 中国北方草地生态系统服务评估[J]. 生态学报, 2024, 44(2): 455-462.