DOI: 10.20103/j.stxb.202307301632

黄俊涵,高阳,沈振.耦合生态系统服务和景观嵌套序列的内蒙古生态源地优先级识别及管控策略.生态学报,2024,44(22):10442-10451. Huang J H, Gao Y, Shen Z.Prioritization identification and control strategy of ecological source areas in Inner Mongolia coupled with nested sequences of ecosystem services and landscapes.Acta Ecologica Sinica,2024,44(22):10442-10451.

耦合生态系统服务和景观嵌套序列的内蒙古生态源地 优先级识别及管控策略

黄俊涵¹,高 阳^{1,2,*},沈 振¹ 1中国农业大学土地科学与技术学院,北京 100193 2国家自然科学基金委员会地球科学部,北京 100085

摘要:科学识别生态源地是构建区域生态安全格局的前提,对保持生态系统服务功能稳定、维护现有景观完整以及保障城市居 民健康等具有重要意义。内蒙古作为构筑我国北方生态安全屏障关键环节的重要地区,在气候平衡、水量调节、维护生物多样 性和保持水土等方面发挥着重要作用。然而,近年来受人类活动影响,内蒙古生态退化问题多有发生,影响区域生态安全与可 持续发展。因此,以内蒙古为例,在对生态固碳、生境质量、产水服务和土壤保持服务功能评估的基础上,通过 Zonation 模型分 析其生态重要性高低的景观嵌套序列,并识别内蒙古的生态源地。评估结果表示四类生态系统服务虽都表现出东高西低的空 间分布特征,但中部的分布差异较大,并且中部地区的产水服务和土壤保持服务较低。模型分析结果表明内蒙古生态源地面积 共 353032.4km²,其中内蒙古一级生态源地面积为 118040.3km²,主要分布在呼伦贝尔高原和大兴安岭南部等区域,二、三级生态 源地依次分布在一、二级生态源地的外围。生态源地与生态红线的叠加分析结果显示,当前有 157444.9km²的生态源地在现有 生态红线内,占生态红线总面积的 44.6%。未来需考虑如何将生态源地保护优先级识别结果与现有生态保护红线相结合,并针 对区域的实际情况,分级分类制定管理规则和策略,促进区域生态安全保障工作的开展更为高效。本研究可为内蒙古及其他干 旱区生态废全格局的合理构建奠定基础,为助力国土空间生态可持续提供对策和建议。 关键词:生态源地;优先级识别;生态系统服务;景观连通性

Prioritization identification and control strategy of ecological source areas in Inner Mongolia coupled with nested sequences of ecosystem services and landscapes

HUANG Junhan¹, GAO Yang^{1,2,*}, SHEN Zhen¹

1 College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China

2 Department of Earth Science, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085, China

Abstract: Scientific identification of ecological source areas is a fundamental step in establishing a regional ecological security pattern, and it holds significant importance in maintaining the stability of ecosystem service functions, protecting the integrity of current landscapes, and ensuring the health of urban residents. Inner Mongolia, as a key area for the construction of important ecological security barriers in the northern part of China, plays a crucial role in climate balance, water regulation, biodiversity maintenance, and soil and water conservation. In recent years, however, due to human activities, there has been a surge in ecological degradation in Inner Mongolia, affecting regional ecological security and sustainable development. Therefore, taking Inner Mongolia as an example, based on the evaluation of ecological carbon

收稿日期:2023-07-30; 网络出版日期:2024-08-22

基金项目:国家自然科学基金项目(42071284)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: hainiu67890@ 163.com

sequestration, habitat quality, water production services, and soil conservation services, a Zonation model is used to analyze the landscape nested sequences of high and low ecological importance, and to identify the ecological source areas of Inner Mongolia. The evaluation results indicated that while all four types of ecosystem services are distributed from high in the east to low in the west, there are notable variations in the central region. Moreover, the water yield and soil conservation services in this region are comparatively lower. The model analysis revealed that the total area of ecological source areas in Inner Mongolia was 353032.4km², with primary ecological source areas covering 118040.3km², mainly distributed in regions such as the Hulunbuir Plateau and the southern part of the Greater Khingan Mountains. Secondary and tertiary ecological source areas are distributed along the periphery of the first and Secondary areas in sequence. The overlay analysis of ecological source areas and ecological redlines showed that there are 157444.9km² of ecological source area within the existing ecological redlines currently, accounting for 44.6% of the total ecological redline area. In the future, it is necessary to consider how to integrate the priority identification results of ecological source area protection with the existing ecological protection redlines. This should be accompanied by a classification system based on the actual situation of the region, and the formulation of management rules and strategies at different levels to promote more efficient implementation of regional ecological security protection. This study can lay the foundation for the rational construction of the ecological security pattern in Inner Mongolia and other arid regions, and provide strategies and suggestions to assist in the sustainable development of national spatial ecology.

Key Words: ecological source area; prioritization identification; ecosystem services; landscape connectivity

随着经济的迅速增长和城市化的快速推进,人类对自然资源的需求急剧增加。然伴随着高强度的土地开发及利用方式的快速转变,生态环境问题愈演愈烈^[1],进而影响区域生态安全格局与可持续发展^[2-3]。合理 开发利用生态资源、保护国土空间安全,科学高效地转化土地利用方式,已成为区域可持续发展的首要任 务^[4-6]。生态安全格局作为指导城市有序扩张和土地结构优化的重要依据,对确保生态系统结构完整、维护 生态系统健康^[7-9]、以及持续提供生态系统资源与服务等都具有深刻意义^[10]。当前,"源地-阻力面-生态廊 道"已成为生态安全格局研究的基本框架模式^[3,11],而生态源地的科学识别作为生态安全格局构建的基础环 节,是保障区域生态安全的重要前提。

自生态安全格局研究以来,国内外学者对生态源地的功能、意义等进行了深入探索,并提出了众多的生态 源地识别方法[5]。依据对生物多样性丰富度以及生态系统服务重要性的不同考量角度,生态源地识别大致 可以分为直接识别法、综合评价指标体系识别法以及基于生态系统服务识别法三种途径。其中,直接识别法 通常将风景名胜区、自然保护区或生态保护红线内区域等生态关键区域定义为生态源地[12]:综合评价指标体 系识别法主要从生态重要性、生态敏感性以及可持续性等多指标出发,综合评估划分生态源地[13-14];基于生 态系统服务识别法主要依据区域内关键生态系统服务供给能力越强,其生态重要性越高的原理[15-16],将提供 优质生态系统服务的生境斑块作为生态源地。相较于前两种识别方法,基于生态系统服务识别的方法更关注 自然生态系统提供给人类的惠益,强调直接或间接促进人与自然的可持续发展[17],并且能为生态环境保护及 修复提供依据和基础[18-19],因而成为当前生态源地识别研究最为常用的划分方法[16]。然而,基于生态系统 服务识别的方法在对生态系统服务重要性排序时,缺乏景观连通性对生态过程和生态功能的关注,对源地保 护优先级的判识相对缺失[20-22]。因此,通过该方法获得的生态源地缺少保护优先级划分,无法较好地发挥对 生态安全建设的指导作用。Zonation 模型是为解决保护资源配置方面各种问题而开发的一个优化空间布局 的模型,可用于空间保护优先次序(Spatial Conservation Prioritization,简称 SCP)的确定^[23]。近年来,Zonation 模型多与物种分布模型结合,广泛地应用于生物多样性保护规划^[24-25]。考虑到模型在景观优先级识别过程 中能够保证景观连通性的优点^[26]。因此,将基于生态系统服务识别源地的方法与 Zonation 模型相结合,可有 效地弥补基于生态系统服务的识别源地法对源地保护优先级判识的缺失,以进一步提高生态源地保护资源的 优化配置。

内蒙古位于我国北部边疆,东西跨度较大,自然景观类型复杂多样^[27]。内蒙古降水稀少,为典型的干旱 与半干旱气候区^[28],生态系统本底脆弱^[29],对气候环境的变化十分敏感。随着经济的发展和城镇化进程加 速,内蒙古地区面临着更为严峻的生态环境挑战^[30–32]。党的十八大以来,习近平总书记三次前往内蒙古考察 调研,强调内蒙古生态环境安全对我国北方重要生态安全屏障建设的重要性^[33]。为改善当地脆弱生态环境、 促使其生态系统服务的可持续发展,本文综合考虑内蒙古生态环境本底特征及研究区各类资源对生态环境的 影响,对固碳服务、土壤保持、产水服务以及生境质量 4 种生态系统服务能力进行评估,并利用 Zonation 模型 得到内蒙古生态源地的空间保护优先级排序结果,为区域生态环境保护资源的优化配置提供策略分析。

1 研究区概况

内蒙古自治区(37°24′—53°23′N,97°12′—126°04′E)位于我国北部边疆,总面积118.3 万 km²,东部为温带季风气候,中西部以温带大陆性气候为主,区域内四季分明,春季干燥多风,夏季炎热少雨,秋季降温迅速,冬季严寒少雪,全年降水量少且时空分布不均^[27]。内蒙古跨越我国东北、华北、西北三大地区,既是我国北方防沙带建设的核心区,东北森林带建设的重点区,也是黄河重点生态区的核心组成部分。内蒙古地貌类型众多,且以高原为主,东部的大兴安岭是我国最大的原始森林覆盖区,北部为呼伦贝尔和锡林郭勒两大草原,西部地区则以荒漠为主。生境的异质性造就其丰富的物种多样性,全区陆生野生脊椎动物 613 种,维管束植物(种子植物、蕨类植物)共计 2619 种。随着生态文明建设的推进,内蒙古的土地利用政策已从建国初期为满足经济发展需求开垦大面积的林地和草地,逐渐演变成为当前"生态优先"的发展路径,土地利用方式和生态系统格局均产生较大改变^[34]。

2 研究方法及数据来源

2.1 生态系统服务评估

内蒙古独特的地理位置和地形地貌,造就其复杂多样的生态系统,是我国自然生态系统类型最完整的地 区之一^[35]。选择和评价适宜的生态系统服务类型,对于科学识别生态源地,保障城市居民健康至关重要。草 原作为内蒙古主要的自然生态系统类型,草地面积占研究区 45%以上,不仅是畜牧业赖以生存和发展的物质 基础,同时可以固定地表土壤、提高土壤抗蚀能力、拦蓄降水和调节径流,具有土壤保持、水源涵养等生态功 能^[36—37]。生境质量是用来表征区域景观斑块生态适宜性的重要指标,通过对生境质量服务的评价,可为区域 生物多样性保护提供参考依据;而生态固碳是有效协调生态系统功能和降低二氧化碳浓度的重要途径,生态 固碳服务的量化对气候平衡至关重要^[38—39]。因此,本文综合考虑内蒙古生态环境本底特征及研究区各类资 源对生态环境的影响,选择土壤保持、产水服务、生境质量以及生态固碳 4 种典型的生态系统服务作为识别生 态源地的依据。

土壤保持采用修订后的通用土壤流失方程 RUSLE 测量研究区的实际土壤侵蚀和潜在土壤侵蚀,进而评估土壤保持力;生态固碳、产水服务、生境质量这三类服务分别通过 InVEST 模型的 Carbon 模块、Annual Water Yield 模块与 Habitat Quality 模块进行估算。InVEST 模型是由美国斯坦福大学、大自然保护协会(The Nature Conservancy, TNC)与世界自然基金会(World Wide Fund for Nature, WWF)联合开发的用于定量分析评估生态系统服务功能的工具,旨在为决策者权衡人类活动的效益和影响提供科学依据^[40],该模型具有数据参数需求少、运行速度快,数据结果可视化的特点^[41]。关于本文这四种生态系统服务计算的原理和公式如表1所示。

2.2 生态源地保护优先级识别

2.2.1 模型基本算法

Zonation 模型通常可用于确定优先级区域,以支持保护规划、土地使用规划、避免生态影响和其他类似任务。其基本算法是依据生物多样性特征如物种、栖息地、生态系统服务等的空间分布数据,识别保持景观连通

性的关键区域,进而提出一种科学识别生态源地并进行保护优先级排序的定量方法^[26]。本文首先利用 Zonation 模型(version5)创建一个初始的完整优先级排序(初始化),然后采用迭代重新排序景观网格单元(迭 代)的方式寻找一个排序顺序。在迭代寻找的过程中单元特定的边际损失将会收敛为一个持续增加的序列 (检查收敛性)。模型具体迭代排序步骤如下^[26]:

	Table 1Evaluation m	nethods for ecosystem service
生态系统服务	原理	公式
Ecosystem services	Principle	Formula
生态固碳 Carbon sequestration	4 类碳库碳储量的汇总	$C = C_{above}S_{above} + C_{below}S_{below} + C_{soil}S_{soil} + C_{dead}S_{dead}$ 式中, C 为总碳储量, C_{above} 为单位面积地上碳密度, C_{below} 为单位面积地 下碳密度, C_{soil} 为单位面积土壤碳密度, C_{dead} 为死亡有机质碳密度, S_{above} 、 S_{below} 、 S_{soil} 和 S_{dead} 为各地类的面积 ^[42] 。
产水服务 Water yield	Budyko 水热耦合平衡假设	$Y_x = (1 - \frac{\text{AET}_x}{P_x}) P_x$ 式中, Y_x 为栅格 x 的年产水量, AET _x 是栅格 x 的年实际蒸散量, P_x 是 栅格 x 的年度降水量。模型中所用到的植物有效含水量 PAWC 是基 于周文佐等 ^[43] 提出的经验估算模型计算。
生境质量 Habitat quality	基于威胁的生境质量计算	$Q_{xj} = H_j(1 - \left(\frac{D_{xj}^2}{D_{xj}^2 + K^2}\right))$ 式中, Q_{xj} 表示土地利用类型 <i>j</i> 中的栅格 <i>x</i> 的生境质量, H_j 表示土地利 用类型 <i>j</i> 的生境适宜性, D_{xj} 表示土地利用类型 <i>j</i> 中的栅格 <i>x</i> 所受胁迫 水平, <i>Z</i> 表示归一化常量, <i>K</i> 是缩放系数。
土壤保持 Soil conservation	修订后的通用土壤流失方程	$A = A_e - A_r = R \times K \times LS \times (1 - C \times P)$ 式中, A 为年均土壤保持量, A_e 为年均潜在土壤侵蚀量, A_r 为年均实际 土壤侵蚀量, R 为降水侵蚀力因子, K 为土壤可蚀性因子, LS 为地形因 子(其中 L 为坡长因子, S 为坡度因子), C 为植被覆盖因子, P 为水土 保持措施因子。

表1 生态系统服务评估;

(1)初始化:

①首先设置迭代次数 t = 0,通过加权范围大小稀有度这一无条件评估方法,计算所有栅格的边际损失 M_i 。

②根据 $M_i(0)$ 为每个栅格分配初始顺序来创建优先级排序的起点(即第一个排序向量 S(0)), 令 t = t + 1, 迭代排序从此开始。

(2)迭代:

①接下来进行条件排序操作,即根据向量 S(t)提出的特定顺序,从最低到最高排序栅格移动,重新计算 栅格的边际损失 M_i,根据更新的条件边际损失将单元格重新排序为 S(t+1)。

②其中核心区移除规则下的边际损失可以通过下面公式来计算:

$$M_{i} = \left[\sum_{j=1}^{n} \left(\left| w_{j} \right| r_{ij} \right)^{p} \right]^{1/\mu}$$

式中, r_{ij} 代表栅格 i 中特征 j(j 在此处指不同生态系统服务类型)的剩余量占特征原始分布的比例, w_j 代表特征 j 的权重, p 取[1,+∞), 当 p=1 时强调较高的平均覆盖率, 而 p=∞ 时,强调所有特征的核心区域,即对最差的特征也保留了更好的覆盖率。

(3)检查收敛性:

当从最低到最高排序栅格移动时,条件边际损失稳步增加,则排序顺序是收敛的,迭代排序可以停止,最 后一轮栅格的顺序表示最终的优先级排序。

2.2.2 生态源地划定

将四类生态系统服务的计算结果导入模型,并对每类服务设置适宜的权重^[26],选择核心区移除规则作为

模型运行的边际损失规则,该方法在保证具有高连通性和高生境质量的核心区保留的前提下,使栅格移除的 边际损失降到最低。因为得到的景观嵌套序列连通性较高,可以依据其优先顺序提取生态源地。

2.3 数据来源

基于 Zonation 模型的基本算法及四类生态系统服务计算的需要,本文主要采用的分析数据及来源如下: (1)2020年内蒙古土地利用与土地覆盖数据(分辨率为1000m)来源于中国科学院资源环境科学与数据中心的中国多时期土地利用遥感监测数据集^[44](CNLUCC,https://www.resdc.cn/);(2)内蒙古地形数据(数字高程模型分辨率为90m),从地理空间数据云平台下载(https://www.gscloud.cn/),并基于 ArcGIS 进行融合裁剪等处理;(3)中国行政区划数据,从地理监测云平台(http://www.dsac.cn/)下载;(4)土壤属性数据来源于世界统一土壤数据库(HWSD),中国境内数据为南京土壤所发布的1:100万土壤数据,主要包括土壤类型、土壤质地等数据;(5)NDVI数据(1000m)来源于中国科学院资源环境科学与数据中心,该数据是采用最大值合成法生成的植被指数数据集。(6)气候气象数据来源于中国气象网(http://data.cma.cn/);(7)内蒙古生态保护红线数据,从内蒙古自治区生态环境厅(https://sthjt.nmg.gov.cn/)下载。为满足分析与数据计算的需要,研究利用 ArcGIS 软件将所有数据的分辨率统一为 1000m×1000m。

3 结果与分析

3.1 生态系统服务空间分布特征

研究采用自然断点法将四类生态系统服务的评估结果划分为五个等级,分析结果可知,2020年四类生态系统服务虽都表现出东高西低的态势,但在研究区中部表现出明显的差异性特征(图1)。其中,固碳服务的



图 1 2020 年四类内蒙古生态系统服务功能空间分布特征图

Fig.1 Spatial distribution characteristics of ecosystem service functions in Inner Mongolia in 2020

高值区域(4678.82—6950.00g/m²)和较高值区域(2198.53—4678.82g/m²)占比较少,高值区域约占研究区面 积的 14.7%,区域内大部分土地利用类型为林地,森林覆盖率高,碳密度高,固碳能力较强;而较高值区域约占 研究区面积的 10.0%,其土地利用类型多为耕地,主要是由于耕地的土壤有机质影响土壤碳库,进而提升耕地 的固碳能力。内蒙古土壤保持服务均值约为 2797.70t/hm²,其中服务低值区域(0.00—57.54t/hm²)占比较大, 且多分布在研究区西部,反映该区域土壤保持能力较小,其主要原因为该区域内多为荒漠景观,水土流失较严 重^[45],且降水量少,植被覆盖率低。内蒙古产水服务高值区域(192.70—745.23mm)分布在呼伦贝尔高原和大 兴安岭南部。生境质量服务高值区域(0.64—0.90)面积约占研究区面积的 28.9%,而大于 0.49 的区域约占研 究区面积的 54.4%,其土地利用类型主要为人类活动强度较小且生态环境良好的森林和水域。

3.2 生态源地空间分布特征

3.2.1 内蒙古生态源地的保护优先级次序空间分布特征

基于 Zonation 模型运行得到一个包含生态功能重要性高低的景观嵌套序列。一般而言,景观的生态功能 重要性越高,其为物种提供良好生境的能力就越强^[46]。为提高保护效率、降低保护成本,本文依据景观生态 功能重要性越高,其保护优先级别就越高的原则,得到生态源地保护优先级次序的空间分布特征(图 2)。分 析结果显示,内蒙古源地保护优先次序的空间分布大体呈"东高西低"特征,其中优先级次序较高的地区主要 沿大兴安岭山脉和阴山山脉分布,中等优先级次序的地区主要围绕高生境质量地区分布,优先级次序较低的 地区主要分布在内蒙古的西部。

灵活性地图可以在不影响排序质量的前提下,显示每个网格单元生态功能重要性次序值在排序中向上或 向下移动的程度。景观的灵活性值越高,意味其在生态功能重要性排序中可以移动的范围越大,可以替代该



图 2 内蒙古生态源地保护优先级排序及灵活性特征图

Fig.2 Priority ranking map and flexibility map for ecological source protection in Inner Mongolia

44 卷

景观的区域也越多。因此,当景观的灵活性值为0时,其在生态功能重要性排序中的次序值不可变动,且没有 可以替代该景观的区域。结合图2结果可知,大兴安岭山脉灵活性值较低、是优先级次序值最高的地区,说明 该区域在一定阈值限定下即在没有损失的情况下,无论优先次序如何调整,都无法有可以替代该区域的位置。 因此,大兴安岭生态价值较高,需要采取较为严格的保护措施。锡林郭勒草原优先级次序值和灵活性值都处 于中上等水平,分析结果表明该区域的向上灵活性值较大,向下灵活性值较小,即在不影响排序质量的前提 下,其次序值可能更高。所以,该区域实际的重要性可能高于模型分析的结果。因此,锡林郭勒草原区域在优 先级保护时应给予相较模型运行次序值更高的关注度,使生态功能重要性较高的区域均得以高效、全面的保 护。总的来说,灵活性地图可用于识别最有可能存在替代优先级次序的高度灵活区域以及相对不灵活的区 域,提高保护方案在实际应用中的灵活性和应变能力。

3.2.2 内蒙古生态源地的分类及空间分布特征

内蒙古的生态源地总面积为 353032.4km²,整体而言,东部生态源地的分布较集中,中部和西部的生态源 地分布则较为分散(图 3)。内蒙古东部地区的生态源地主要沿大兴安岭山脉分布、呼伦贝尔草原、锡林郭勒 草原和科尔沁草原的交界处。内蒙古西部地区的生态源地主要分布在鄂尔多斯草原。这些分布区域内森林、 草原覆盖较广,自然资源较为丰富,生境价值较高,生境质量较好。





依据生态功能重要性评估和生态环境敏感性评估结果,内蒙古自治区自然资源厅将内蒙古划分了四个生态红线类型,分别为水源涵养、水土保持、防风固沙和生物多样性维护。其中,水土保持、水源涵养以及生物多样性维护三类生态保护红线占研究区总面积的 29.2%(防风固沙生态保护红线部分多分布在荒漠地区,生境质量较差,故不计算在内)。结合内蒙古的生态红线分布情况和相关研究结果^[47],本文将保护优先级次序最高的 30%的景观作为生态源地,其中将优先级次序最高的 10%的景观划为一级生态源地,10%—20%的景观划为二级生态源地,20%—30%的景观划为三级生态源地(图 3)。划分结果显示一级生态源地的面积为 118040.3km²,主要分布在呼伦贝尔高原和大兴安岭南部;二级生态源地的面积为 117466.4km²,主要分布在一级生态源地的外围,锡林郭勒高原东南部也有分布;三级生态源地的面积为 117525.7km²,主要分布在二级生态源地的外围,如河套平原、鄂尔多斯高原及阴山山脉。

3.3 识别效果评价

将 Zonation 模型识别得到的生态源地与现有生态红线进行叠加对比。比对结果显示共有 157444.9km²

的生态源地分布在在现有生态红线内,占生态红线总面积的 44.6%。在生态红线内部的一级生态源地、二级 生态源地和三级生态源地的面积分别为 51224.5km²、51678.0km² 和 54542.4km²,分别占相应级别生态源地的 总面积的 43.4%、44.0%和 46.4%。

大兴安岭水源涵养和生物多样性维护区域和呼伦贝尔草原生物多样性维护和防风固沙生态保护区域是 一级、二级生态源地分布的主要区域,区域内森林、草甸草原分布较广,碳储量高、生境质量好。与前人研究相 比^[35,48],基于生态系统服务的识别方法在空间上更考虑生态系统的完整性,能够最大程度揭示自然生态系统 带给人类的惠益。在以往识别生态源地的研究中,多采取直接定义法或构建指标体系综合评估识别的方法, 这些方法在保证生态源地连通性方面或多或少受到一些限制^[21-22]。而在景观管理及规划中,连通性十分重 要,生境数量及空间格局共同决定着物种丰富度及可持续性,景观连通性较低可能导致生境隔离,并进一步阻 碍传粉、种子传播、野生动物迁移和繁殖等其他生态过程^[23]。二、三级生态源地依次分布在一、二级生态源地 外围的分布特征表明 Zonation 模型能够保证识别的各级生态源地间联系较紧密,具有较好的连通性。并且, 该模型在运行过程中还遵循互补性,即保护的目标区域的生态重要性相互补充,并未重复彼此的生物多样性 价值,而确定互补区域的优先次序是确定共同覆盖尽可能多生物多样性的地区的最有效战略。

综上所述,Zonation 模型和生态红线的设立均重视生物多样性、水土保持与水源涵养等,但生态保护红线 着重强调保护生态用地的生态功能,而生态源地则充分考虑人类生存和发展的需要,强调生态系统可以为人 类提供的各类服务^[25]。因此,基于 Zonation 模型识别的生态源地与现有生态红线部分区域分布大致吻合。 但由于两者概念界定和识别方法的不同,所以两类界定结果空间上存在一定差异。

4 讨论

4.1 内蒙古生态系统服务空间格局特征

内蒙古四类生态系统服务整体均呈东高西低的空间分布特征(图1),与研究区气候分异导致的自然植被 东西向呈明显地带性的空间分布相吻合,表明气候是控制内蒙古生态系统服务质量的主控因素。东部地区气 候相对湿润、森林覆盖率高、固碳能力强、人类活动强度小、生境质量较高,因此是四类生态系统服务高值区与 次高值区的主要分布区域。西部地区分布着巴丹吉林沙漠、乌兰布和沙漠、腾格里沙漠和库布齐沙漠,整体上 呈现降水量少、蒸发强烈、气候干燥和风沙活动剧烈的特点,因此是四类生态系统服务低值区的主要分布区 域。中部地区有黄河流域流经,入黄输沙量大、水土流失严重。所以,区域内产水服务和土壤保持服务能力较 低。内蒙古的"呼包鄂"城市群位于中部地区河套平原地区,是内蒙古人口、城市最为集中的区域^[49]。近年 来,区域内城市扩张迅速,极大的制约着区域生态系统的可持续发展^[50]。因此,分析结果显示中部地区的四 类生态系统服务尤其是产水服务和土壤保持服务能力较低。

4.2 内蒙古生态系统服务保护策略分析

面向未来,从生态源地分布状况来看,内蒙古中部和西部的生态源地分布则较为分散,后期还需与生态廊 道和生态网络进行结合,增强生态源地之间的联系,使物质、信息、能量等生态流高效流动。尤其作为我国重 要的农业生产基地的中部河套地区而言。今后应积极贯彻落实"黄河流域生态保护与高质量发展"重大战 略,加大退化植被修复,推进沿黄生态廊道建设,科学建设"呼包鄂乌"城市群,促进城市发展与生态保护处于 良性循环。

其次,虽然生态保护红线内覆盖了相当一部分的生态系统功能重要性较高的生态源地,但生态保护红线 外部仍存在较多重要的、尚未被纳入其中的关键区域,主要分布在呼伦贝尔市及兴安盟东部即呼伦贝尔草原 东部。该部分未重叠的直接原因主要为两者概念界定和识别方法的不同,导致生态红线只覆盖了呼伦贝尔草 原的部分区域,但其根本原因在于生态保护红线只是生态环境安全不可逾越的底线。另外,生境质量模型尚 不能考虑具体物种和濒危物种的保护,可能会对研究区生境质量的评估精度产生一定的影响,但整体变化趋 势不受影响,后续可利用研究区物种分布点数据进一步深入探索。因此,未来需综合考虑多种因素,加大生态 环境的保护范围、提高生态保护的原则底线,促使城市发展与生态保护真正处于良性循环。

最后,从国土空间生态修复的角度来看,生态保护红线通常被视作一个相对均质的区域来对待,控制管理 手段较为宏观单调,未来如果将生态源地保护优先级识别结果与现有生态保护红线相辅相成,分级分类制定 管理规则、标准和策略,可促进区域生态安全保障工作的开展更为高效。

5 结论

生态源地的科学识别作为生态安全格局构建的关键环节,对协调区域经济发展和保障区域生态安全具有 重要意义。本文以内蒙古为例,在生态固碳、生境质量、产水服务和土壤保持服务功能评估的基础上,通过 Zonation 模型分析其生态重要性高低的景观嵌套序列,识别出内蒙古的生态源地,可有效地弥补基于生态系 统服务的识别源地法对源地保护优先级判识的缺失,以进一步提高生态源地保护资源的优化配置。识别结果 显示:1)内蒙古生态系统服务虽都表现出东高西低的态势,但在研究区中部表现出明显的差异性特征,中部 地区的产水服务和土壤保持服务较低。另外,固碳服务和生境质量服务的高值区域多分布在生态环境良好的 森林和水域;2)内蒙古生态源地总面积为 353032.4km²,其中内蒙古东部地区的生态源地分布较集中,中部和 西部的生态源地分布则较为分散;3)与生态红线的叠加分析结果表明,当前有 157444.9km² 的生态源地在现 有生态红线内,占生态红线总面积的 44.6%。其中,在生态红线内部的一级生态源地、二级生态源地和三级生 态源地的面积分别为 51224.5km²、51678.0km² 和 54542.4km²,分别占相应级别生态源地的总面积的 43.4%、 44.0%和 46.4%。面向未来,考虑到生态保护红线外部仍存在较多重要的、尚未被纳入其中的关键区域,后续 应将生态源地保护优先级识别结果与现有生态保护红线结合起来,更加全面、科学地解决生态环境问题。另 外,在进行生态环境保护的同时,应针对不同区域的实际情况采取相应措施,分级分类制定管理规则、标准和 策略,可促进区域生态安全保障工作的开展更为高效。

参考文献(References):

- [1] 蒋艳灵,刘春腊,周长青,陈明星.中国生态城市理论研究现状与实践问题思考.地理研究,2015,34(12):2222-2237.
- [2] Su S L, Li D, Yu X, Zhang Z H, Zhang Q, Xiao R, Zhi J J, Wu J P. Assessing land ecological security in Shanghai (China) based on catastrophe theory. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2011, 25(6): 737-746.
- [3] 彭建,赵会娟,刘焱序,吴健生.区域生态安全格局构建研究进展与展望.地理研究,2017,36(3);407-419.
- [4] 王文静, 逯非, 欧阳志云. 国土空间生态修复与保护空间识别——以北京市为例. 生态学报, 2022, 42(6): 2074-2085.
- [5] 马克明,傅伯杰,黎晓亚,关文彬.区域生态安全格局:概念与理论基础.生态学报,2004,24(4):761-768.
- [6] 彭保发,郑俞,刘宇.耦合生态服务的区域生态安全格局研究框架.地理科学,2018,38(3):361-367.
- [7] 俞孔坚, 王思思, 李迪华, 李春波. 北京市生态安全格局及城市增长预景. 生态学报, 2009, 29(3): 1189-1204.
- [8] 肖笃宁,陈文波,郭福良.论生态安全的基本概念和研究内容.应用生态学报,2002,13(3):354-358.
- [9] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局. 生态学报, 1999, 19(1): 10-17
- [10] 陈星,周成虎. 生态安全: 国内外研究综述. 地理科学进展, 2005, 24(6): 8-20.
- [11] Klar N, Herrmann M, Henning-Hahn M, Pott-Dörfer B, Hofer H, Kramer-Schadt S. Between ecological theory and planning practice: (Re-) Connecting forest patches for the wildcat in Lower Saxony, Germany. Landscape and Urban Planning, 2012, 105(4): 376-384.
- [12] 刘壮壮,吴未,刘文锋,申立冰.基于"源地-廊道"生态安全格局构建逻辑范式的建设用地减量化研究.生态学报,2020,40(22): 8230-8238.
- [13] 汤峰, 张蓬涛, 张贵军, 赵丽, 郑宇, 魏明欢, 简卿. 基于生态敏感性和生态系统服务价值的昌黎县生态廊道构建. 应用生态学报, 2018, 29(8): 2675-2684.
- [14] 陈昕, 彭建, 刘焱序, 杨旸, 李贵才. 基于"重要性—敏感性—连通性"框架的云浮市生态安全格局构建. 地理研究, 2017, 36(3): 471-484.
- [15] 彭建, 汪安, 刘焱序, 马晶, 吴健生. 城市生态用地需求测算研究进展与展望. 地理学报, 2015, 70(2): 333-346.
- [16] 毛诚瑞,代力民,齐麟,王炎,周旺明,周莉,于大炮,赵福强.基于生态系统服务的流域生态安全格局构建——以辽宁省辽河流域为例.生态学报,2020,40(18):6486-6494.
- [17] Xia H, Yuan S F, Prishchepov A V. Spatial-temporal heterogeneity of ecosystem service interactions and their social-ecological drivers: implications for spatial planning and management. Resources, Conservation and Recycling, 2023, 189: 106767.

- [18] Wainger L, King D, Mack R N, Price E W, Maslin T. Can the concept of ecosystem services be practically applied to improve natural resource management decisions. Ecological Economics, 2010, 69(5): 978-987.
- [19] 宋婷,李岱青,张林波,王光镇,高艳妮,杨春艳,冯朝阳,马欢.秦巴山脉区域生态系统服务重要性评价及生态安全格局构建.中国工 程科学,2020,22(1):64-72.
- [20] 吴茂全, 胡蒙蒙, 汪涛, 凡宸, 夏北成. 基于生态安全格局与多尺度景观连通性的城市生态源地识别. 生态学报, 2019, 39(13): 4720-4731.
- [21] Chan K M A, Hoshizaki L, Klinkenberg B. Ecosystem services in conservation planning: targeted benefits vs. co-benefits or costs? PLoS One, 2011, 6(9): e24378.
- [22] Schröter M, Remme R P. Spatial prioritisation for conserving ecosystem services: comparing hotspots with heuristic optimisation. Landscape Ecology, 2016, 31(2): 431-450.
- [23] Kukkala A S, Moilanen A. Ecosystem services and connectivity in spatial conservation prioritization. Landscape Ecology, 2017, 32(1): 5-14.
- [24] Lehtomäki J, Moilanen A. Methods and workflow for spatial conservation prioritization using Zonation. Environmental Modelling & Software, 2013, 47(C): 128-137.
- [25] 肖静, 崔莉, 李俊清. 基于 ZONATION 的岷山山系多物种保护规划. 生态学报, 2016, 36(2): 420-429.
- [26] Moilanen A, Lehtinen P, Kohonen I, Jalkanen J, Virtanen E, Kujala H. Novel methods for spatial prioritization with applications in conservation, land use planning and ecological impact avoidance. Methods in Ecology and Evolution, 2022, 13(5): 1062-1072.
- [27] Cui L H, Shen Z, Liu Y X, Yu C Y, Lu Q L, Zhang Z H, Gao Y, Nie T T. Identification of driving forces for windbreak and sand fixation services in semiarid and arid areas: a case of Inner Mongolia, China. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 2023, 47(1): 32-49.
- [28] 姚俊强,杨青,刘志辉,李诚志.中国西北干旱区降水时空分布特征.生态学报,2015,35(17):5846-5855.
- [29] Batunacun, Wieland R, Lakes T, Hu Y F, Nendel C. Identifying drivers of land degradation in Xilingol, China, between 1975 and 2015. Land Use Policy, 2019, 83: 17.
- [30] 曾淑玲,程一帆,王式功,巩崇水,尚可政.我国西北和内蒙古地区春季沙尘暴的年代际变化及原因探析.中国沙漠,2010,30(5): 1200-1206.
- [31] 王静爱,徐霞,刘培芳.中国北方农牧交错带土地利用与人口负荷研究.资源科学,1999,21(5):21-26.
- [32] 景艳宾, 孙旭, 刘军, 孙冬杰. 基于 MCR 模型的内蒙古鄂托克旗生态廊道构建. 水土保持通报, 2021, 41(2): 170-177.
- [33] 陈沸宇,张枨.内蒙古坚持走生态优先绿色发展之路人民日报,2022-08-23(2).
- [34] 陈仙林. 对内蒙古生态治理及生态功能的思考. 北方经济, 2002(S1): 347-349.

22 期

- [35] 冯琰玮, 甄江红, 马晨阳. 内蒙古生态承载力评价及生态安全格局优化. 地理研究, 2021, 40(4): 1096-1110.
- [36] 黄青,辛晓平,张宏斌. 基于生态系统服务功能的中国北方草地及农牧交错带区划. 生态学报, 2010, 30(2): 350-356.
- [37] 脱登峰,卢琦,却晓娥,程磊磊,杨岩岩,高攀,崔桂鹏.中国北方草地生态系统服务评估.生态学报,2024,44(2):455-462.
- [38] 魏亚伟,周旺明,于大炮,周莉,方向民,赵伟,包也,孟莹莹,代力民.我国东北天然林保护工程区森林植被的碳储量.生态学报, 2014,34(20):5696-5705.
- [39] 高冠龙,张小由.内蒙古碳排放现状及森林碳汇的重要性分析.中国人口·资源与环境,2014,24(S2):24-27.
- [40] 唐尧, 祝炜平, 张慧, 宋瑜. InVEST 模型原理及其应用研究进展. 生态科学, 2015, 34(3): 204-208.
- [41] 黄从红,杨军,张文娟. 生态系统服务功能评估模型研究进展. 生态学杂志, 2013, 32(12): 3360-3367.
- [42] Tappeiner U, Tasser E, Leitinger G, Cernusca A, Tappeiner G. Effects of historical and likely future scenarios of land use on above- and belowground vegetation carbon stocks of an alpine valley. Ecosystems, 2008, 11(8): 1383-1400.
- [43] 周文佐,刘高焕,潘剑君.土壤有效含水量的经验估算研究——以东北黑土为例.干旱区资源与环境,2003,17(4):88-95.
- [44] 徐新良,刘纪远,张树文,李仁东,颜长珍.中国多时期土地利用土地覆被遥感监测数据集(CNLUCC).中国科学院资源环境科学数据中 心数据注册与出版系统,2018.
- [45] 李彬. 推进水土流失治理筑牢生态安全屏障——内蒙古自治区落实黄河流域生态保护和高质量发展重大国家战略水土保持工作进展. 中国水土保持, 2022, No.486(09): 8-10.
- [46] 吴健生,张理卿,彭建,冯喆,刘洪萌,赫胜彬.深圳市景观生态安全格局源地综合识别.生态学报,2013,33(13):4125-4133.
- [47] 李丽鹤, 刘会玉, 林振山, 贾俊鹤, 刘翔. 基于 MAXENT 和 ZONATION 的加拿大一枝黄花入侵重点监控区确定. 生态学报, 2017, 37 (9): 3124-3132.
- [48] 冯琰玮, 甄江红. 黄河流域内蒙古段生态安全格局优化研究. 中国农业资源与区划, 2022, 43(10): 129-138.
- [49] 王依军, 伊志慧. 关于"十四五"时期推进呼包鄂及乌兰察布协同发展的对策建议. 北方经济, 2021(1): 51-54.
- [50] 王莉雁,肖燚,江凌,饶恩明,欧阳志云,郑华.城镇化发展对呼包鄂地区生态系统服务功能的影响. 生态学报, 2016, 36(19): 6031-6039.