

# 内蒙古大兴安岭土地利用格局和生态系统服务功能的时空演变特征

庞萬隆<sup>1</sup>, 冀鹏浩<sup>2</sup>, 庞立东<sup>3</sup>, 高润红<sup>1</sup>

(1.内蒙古农业大学 林学院, 内蒙古 呼和浩特 010019; 2.内蒙古农业大学 理学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 3.内蒙古财经大学 资源与环境经济学院, 内蒙古 呼和浩特 010010)

**摘要:** [目的] 内蒙古大兴安岭作为独特山地生态热点地区, 研究其土地流转和强度对生态系统服务功能的响应关系, 为推进该地区科学配置土地利用格局、促进生态可持续发展提供理论依据。[方法] 基于1990—2022年5期遥感影像, 在县域尺度上综合运用InVEST-CASA模型和四象限模型法, 评估5种典型的生态服务功能(生境质量、碳储量、水源涵养量、土壤保持量和植被净初级生产力)变化, 并研究土地利用强度(LUI)时空演变与生态系统服务功能相关性。[结果] ①1990—2022年, 研究区土地利用格局稳定, 农田、草地和林地(天然林、人工林)是内蒙古大兴安岭主要组成地类。②生态系统服务功能呈北高南低缓慢退化态势, 生境质量和土壤保持量逐年下降, 产水量和植被净初级生产力波动式衰减, 碳储量增速减缓。③由于土地利用格局变化和利用强度增加, 生态系统服务功能综合值与土地利用强度之间呈现负相关, 受其影响较为显著的县域主要分布在该研究区的东南侧。[结论] 内蒙古大兴安岭生态系统服务功能存在明显时空异质性特征, 合理优化土地利用格局可以有效提升内蒙古大兴安岭地区生态系统服务功能。

**关键词:** 土地利用格局; 生态系统服务功能; InVEST-CASA模型; 生态四象限模型; 内蒙古大兴安岭

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)04-0340-12

中图分类号: X821, X171.1

**文献参数:** 庞萬隆, 冀鹏浩, 庞立东, 等. 内蒙古大兴安岭土地利用格局和生态系统服务功能的时空演变特征[J]. 水土保持通报, 2024, 44(4): 340-351. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.04.035; Pang Wanlong, Ji Penghao, Pang Lidong, et al. Spatial and temporal evolution of land use pattern and ecosystem service function in Daxinganling Mountains of Inner Mongolia [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(4): 340-351.

## Spatial and Temporal Evolution of Land Use Pattern and Ecosystem Service Function in Daxinganling Mountains of Inner Mongolia

Pang Wanlong<sup>1</sup>, Ji Penghao<sup>2</sup>, Pang Lidong<sup>3</sup>, Gao Runhong<sup>1</sup>

(1.College of Forestry, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot,

Inner Mongolia 010010, China; 2.College of Science, Inner Mongolia Agricultural

University, Hohhot, Inner Mongolia 010010, China; 3.School of Resource and Environmental

Economics, Inner Mongolia University of Finance and Economics, Hohhot, Inner Mongolia 010010, China)

**Abstract:** [Objective] As a unique mountainous ecological hot spot in Inner Mongolia Autonomous Region, the response relationship of land circulation and intensity to ecosystem service function was studied to provide theoretical basis for scientific allocation of land use pattern and ecological sustainable development in Daxinganling. [Methods] Based on five remote sensing images captured from 1990 to 2022, this study comprehensively applied the InVEST-CASA and four-quadrangle models to assess changes in five typical ecological service functions (habitat quality, carbon storage, water conservation, soil conservation, and the

收稿日期: 2024-03-22

修回日期: 2024-05-22

资助项目: 内蒙古自治区科技计划“大兴安岭南段杨桦次生林退化生态系统诊断与修复技术研发示范”(2023YFDZ0017); 国家自然科学基金项目“基于树种水分耗补节律适配性的内蒙古人工林生态适宜性研究”(32360249); 内蒙古自治区科技攻关计划项目(2021GG0009); 内蒙古经济数据分析与挖掘重点实验室课题(SY23009); 内蒙古财经大学院士工作站重点课题(NCDYSZJGZZ-05)

第一作者: 庞萬隆(2000—), 男(汉族), 内蒙古自治区兴安盟人, 硕士研究生, 研究方向为森林生态学。Email: 1415547321@qq.com。

通信作者: 冀鹏浩(1982—), 男(汉族), 内蒙古自治区呼和浩特市人, 硕士, 讲师, 主要从事数学生态学模型方面的研究。Email: pjhi@imau.edu.cn。

net primary productivity of vegetation) at the county scale. The correlation between the temporal and spatial evolution of land use intensity and ecosystem service function was studied. [Results] ① From 1990 to 2022, the land use pattern of the study area was stable, and farmland, grassland, and woodland (natural forest and plantation forest) were the main land types in the Daxinganling Mountains of Inner Mongolia. ② Ecosystem service function showed a trend of slower degradation in the north and lower degradation in the south, the habitat quality and soil conservation decreased annually, the water production and the net primary productivity of vegetation declined in a fluctuating manner, and the growth rate of carbon storage slowed down. ③ Owing to the change in the land use pattern and the increase in land use intensity, there was a negative correlation between the comprehensive value of ecosystem service function and land use intensity, and counties affected by this change were mainly distributed in the southeastern region of the study area. [Conclusion] There was evident spatial and temporal heterogeneity in ecosystem services in the Greater Khingan Mountains of Inner Mongolia, and rational optimization of land use patterns can effectively improve ecosystem services in this area.

**Keywords:** land use pattern; ecosystem service function; InVEST-CASA model; ecological four-quadrant model; Daxinganling Mountains of Inner Mongolia

作为可持续发展和绿色 GDP 关键衡量指标,生态系统服务与土地利用变化关系备受学术界关注<sup>[1]</sup>。一方面土地利用格局变化影响生态系统的组分和作用,进而影响生态价值和功能;另一面生态系统服务功能反作用于土地利用效率,指导人类对土地资源的可持续管理<sup>[2-3]</sup>。土地流转、强度及变化格局成为生态系统服务变化的最大驱动力,因此量化生态系统服务与探测土地利用变化,基于二者时空格局进行可视化分析,对生态保护及优化土地利用方式具有重要意义<sup>[4]</sup>。迄今,国内外学者研究尺度多集中于经济发达的省市行政区域研究,较少探讨提供生态效益的流域或区划<sup>[5]</sup>,并且着眼点多在从数量关系方面评价土地利用变化对生态系统的影响,量化方式多为土地利用转移矩阵<sup>[6-7]</sup>、土地利用动态度<sup>[8]</sup>、交叉敏感型指数<sup>[9]</sup>或空间相关性分析<sup>[10]</sup>,但对强度和格局变化关注不足,缺乏对土地利用格局与生态系统服务关系深入分析<sup>[11]</sup>。内蒙古大兴安岭位于大陆性气候和温带季风气候区分界线与我国地势二、三级阶梯分界线<sup>[12]</sup>,是中国北方重要生态安全屏障,更是国家“双碳”目标重要储备基地,其独特的山地地域单元造成地势的起伏变化,能够放大生态系统服务功能的变化特征<sup>[13]</sup>。随着全球增温,次生林退化,生境破碎和人地矛盾等问题干扰,生态保护矛盾和生境脆弱化日趋凸显。因此评估研究大兴安岭地区生态系统服务功能与土地利用格局,将会对该地区乃至内蒙古生态和经济建设产生重要现实意义和深远影响,然而目前相关研究未见报道。为此,本文以内蒙古大兴安岭这一山地特殊单元为研究对象,运用生态系统服务与权衡综合评价模型(InVEST)、光能利用效率模型(CASA)、四象限模型等方法,以跨行政区划的角度切入,基于县域尺

度分析研究区 1990—2022 年土地利用时空格局,对研究区土地利用格局和生态系统服务功能的时空演变规律进行量化研究,评估 5 种典型的生态服务功能(生境质量、碳储量、水源涵养量、土壤保持量和净初级生产力)变化,厘清二者空间相关性,分析其合理性,以期为内蒙古大兴安岭生态保护地土地资源可持续利用和生态系统服务功能提升提供理论支撑。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

内蒙古大兴安岭地处内蒙古高原东北部(42°18′—56°23′N, 112°25′—126°20′E),东临黑龙江省,西北部为呼伦贝尔草原,南与河北省承德市接壤,跨越 5 盟市共 29 旗县。山脉自西南向东北呈阶梯状倾斜,多为中低山和丘陵地形。研究区属寒温带大陆性季风气候,年平均温度 -3℃,降雨量 300~450 mm。区域内生境复杂植被类型丰富,独特的生态系统及地理格局使其成为北方生态安全屏障的重要一环。

### 1.2 数据来源

本研究所用 1990—2022 年数据主要包括土地利用数据、地理基础数据和气候土壤数据共 5 期。其中,土地利用数据源于武汉大学 Yang Jie 等<sup>[14]</sup>CLCD 30 m 土地利用分类数据,并通过重分类划分为 7 类。气候土壤数据(源于中国气象科学数据中心 <http://www.data.cma.cn> 和国家地球系统科学数据中心 <http://www.geodata.cn>);数字高程模型数据(源于地理空间数据云 <http://www.gscloud.cn>)。将数据统一投影坐标系(WGS\_1984\_UTM\_Zone\_50 N)重采样至 90 m 空间分辨率,具体信息详见表 1。

表 1 研究区主要数据来源

Table 1 Main data sources in study area

数据类型	数据描述	数据来源
地理基础数据	行政区划及河流数据	国家基础地理信息中心 <a href="http://www.ngcc.cn/ngcc/">http://www.ngcc.cn/ngcc/</a>
土壤数据	土壤厚度和土壤质地数据	国家地球系统科学数据中心 <a href="http://www.geodata.cn">http://www.geodata.cn</a>
高程数据	30 m 分辨率	地理空间数据云 <a href="http://www.gscloud.cn">http://www.gscloud.cn</a>
气象数据	逐年降水和蒸散发数据	中国气象科学数据中心 <a href="http://www.data.cma.cn">http://www.data.cma.cn</a>
土地利用数据	武汉大学 CLCD 30 m 土地利用数据	武汉大学 CLCD 土地利用数据集 <a href="https://zenodo.org.cn">https://zenodo.org.cn</a>

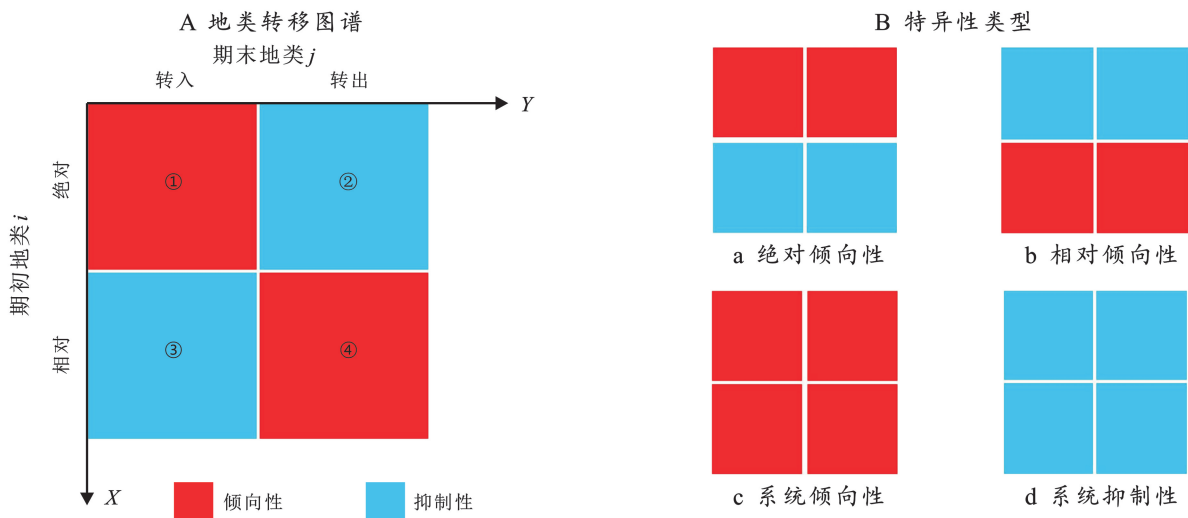
### 1.3 土地利用强度评估

本研究参照《GB/T21010—2017》土地利用分类标准<sup>[15]</sup>,在 7 类土地利用类型划分(农田、天然林、人工林、草地、水域、建设用地、未利用地)基础上核算内蒙古大兴安岭地区 1990—2022 年土地利用强度(Land use intensity, LUI),后根据数据分布特点借助 ArcGIS 软件自然断点法对栅格图层分级显示,分级标准划分为低强度(199.62~201.96)、中低强度(201.97~206.03)、中强度(206.4~210.04)、中高强度(210.05~234.12)和高强度(234.13~250.71)共 5 个等级。由于地块内可能存在多种土地利用类型,因而运用土地利用强度综合指数描述土地利用强度大小,用以反映研究区各县域单元土地强度格局变化。

结合土地利用强度转移矩阵构建 IM(intensity map)分析框架<sup>[16]</sup>,从绝对和相对强度视角分析地类转化过程中产生的影响,以可视化框架直观体现土地利用生态综合体对人类社会系统历史演变响应(图 1)。其中各行政单元土地强度计算公式为:

$$LUI = 100 \times \left[ \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \times D_i \right] \quad (1)$$

式中:LUI 代表土地利用强度; $n$  为土地利用类型数量; $S$  为研究单元总面积( $\text{km}^2$ ); $S_i$  为第  $i$  类土地利用方式的面积; $D_i$  为第  $i$  类土地利用强度赋值,综合以往研究成果<sup>[17]</sup>,将不同地类分为 4 类并赋予不同权重。 $D_i$  分别为农田 3,林地(天然林和人工林)2,草地 2,水域 2,建设用地 4 和未利用地 1。



注: X 轴及 Y 轴分别代表期初及期末地类,以红色和蓝色方格显示倾向和抑制;规定绝对转入①,绝对转出②,相对转入③,相对转出④;颜色组合代表区域不同特异性。

图 1 土地利用/覆被变化强度图谱单元

Fig.1 Map unit of land use/cover change intensity

### 1.4 生态系统功能量化评估

针对研究区生态屏障功能,选取关键指标量化生态系统服务功能。内蒙古大兴安岭地区作为国家重要生境保护地,动植物资源丰富,因此基于威胁源影响和生境适宜性,采用 InVEST 模型 Habitat Quality 模块核算生境质量<sup>[18]</sup>;定量估算内蒙古大兴安岭地

区土地利用覆被变化格局与碳储量的响应关系,是揭示大兴安岭生态系统变化及减排增汇的关键,因此纳入评估<sup>[19]</sup>;由于气候变暖,大兴安岭地区水热条件受到影响,因此研究流域产水服务对区域内生态平衡作用巨大,因此应用 InVEST 模型 Annual Water Yield 模块,根据降水和实际蒸发差值的复杂物理过程模拟

量化水源涵养量;水土保持是衡量区域生态屏障功能指标,因此以土壤保持量作为生态服务水平的重要表征<sup>[20]</sup>。在修正通用土壤流失方程情况下,利用 InVEST 模型 SDR 模块综合考虑流域对土壤侵蚀沉积物拦截能力核算水土保持量<sup>[21]</sup>;NPP 是评估陆地生态系统质量与固碳能力的关键指标,应纳入评估<sup>[22]</sup>,因此结合前人研究,利用光能利用效率模型 CASA 估算植被 NPP<sup>[23]</sup>。具体生态服务量化结果详

见表 2。此外,通过标准化生态系统服务功能评估值,可消除不同维度间的影响,体现研究区多重服务综合效益。本文引入 Shen Jiashu 等<sup>[24]</sup>提出的方法,不同指标采用最小—最大值归一化方法标准化,消除不同量纲间影响,避免极端值错误转化,增加可靠性。将 95% 和 5% 分位数的值替代范围以外数值,归一化后将标准化服务指标求和,并以此为基础研究内蒙古大兴安岭地区生态系统服务功能空间格局。

表 2 生态服务量化方法

Table 2 Quantitative methods of ecological services

量化类型	量化方法	参数含义
生境质量(HQ)	$Q_{xj} = H_j [1 - (\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + K^z})]$	式中: $Q_{xj}$ 为土地利用类型 $j$ 中像元 $x$ 的生境质量; $H_j$ 为土地利用类型 $j$ 的生境适宜性; $z$ 为常数 2.5; $D_{xj}$ 为土地利用类型 $j$ 中像元 $x$ 的威胁源加权平均值; $K$ 为半饱和系数 0.5
碳储量(CS)	$C_{total} = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead}$	式中: $C_{total}$ 为碳总量; $C_{above}$ , $C_{below}$ , $C_{soil}$ , $C_{dead}$ 分别为地上、地下、土壤和死亡生物碳储量
水源涵养量(WY)	$Y_{xj} = (1 - \frac{AET_{xj}}{P_x}) \times P_x$	式中: $Y_{xj}$ 为年水源涵养量; $P_x$ 为栅格单元 $x$ 的平均降雨量; $AET_{xj}$ 为土地利用类型 $j$ 上栅格单元 $x$ 的实际年平均蒸发量
土壤保持量(SC)	$SC = R \times K \times L \times S(1 - C \times P)$	式中: $SC$ 为土壤保持量; $R$ 为降水侵蚀力因子; $K$ 为土壤侵蚀性因子; $L$ 为坡长因子; $C$ 为作物与覆盖因子; $P$ 为水土保持措施因子
净初级生产力(NPP)	$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \epsilon(x, t)$	式中: $APAR(x, t)$ 为像元 $x$ 在 $t$ 月吸收的光合有效辐射; $\epsilon(x, t)$ 为像元 $x$ 在 $t$ 月的实际光能利用率

### 1.5 生态四象限模型分区建设

四象限模型能够定性定量核算市场变化,学科融合发展背景下,将其应用于生态学分析<sup>[25]</sup>。依照量化指标栅格以各旗县域为单元,利用 ArcGIS 分区统计工具核算,在进行  $z$ -score 标准化后,构建四象限分析模型。其中  $X$  轴为生态系统服务功能综合值,  $Y$  轴分别为土地利用强度,按照土地利用强度—生态系统服务功能的高—高、低—高、低—低、高—低顺序分为 I 至 IV 象限,具体计算公式为:

$$x = \frac{x_j - \bar{x}}{S} \quad (2)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{a} \sum_j x_j \quad (3)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{a} \sum_j (x_j - \bar{x})^2} \quad (4)$$

式中:  $x$  为县域单元标准化后的生态系统服务功能和土地利用强度量化指数;  $x_j$  为第  $j$  个研究单元的生态系统服务功能、土地利用强度;  $\bar{x}$  为区域整体平均值;  $s$  为区域整体标准差;  $a$  为县域单元总数(个)。

## 2 结果与分析

### 2.1 内蒙古大兴安岭土地格局演变

通过遥感影像栅格化,得到内蒙古大兴安岭地区

土地利用数据,如图 2 所示。作为北方生态安全屏障,内蒙古大兴安岭地区土地格局稳定。其中西部草地对整体景观贡献明显,北部原始森林茂密,是中国重要的林业基地;农田和建设用地区集中分布于东南部肥沃的松辽平原,水域多为东北—西南流向。其中农田、草地和林地(天然林、人工林)是内蒙古大兴安岭主要组成地类,据表 3 可知,总地类占比在 92% 以上。1990—2022 年,研究区用地类型变化较少,组成稳定。期间农田、林地和建设用地区面积增加,其中增幅最大是林地(1.6%),天然林(0.8%)、人工林(0.8%),其次是农田(1.2%)和建设用地区(0.4%);草地、水域和未利用地呈现减少态势,其中草地减幅最大(3%),水域和未利用地变化面积较少,所占比例分别是未利用地(0.2%)和水域(0.1%)。

数据表明,1990—2022 年,草地在地区类变化转移中转出面积最大,占总流转面积的 49.6%,农田面积转入主要由草地贡献,贡献面积为 14 563.92 km<sup>2</sup>。农田在地区类变化转移中转入面积最大,占总流转面积的 30.6%。此外林地(天然林、人工林)和建设用地区面积也在缓慢增长。综合来看,内蒙古大兴安岭地区 1990—2022 年期间地类变化转移主要发生在农田、林地、草地、建设用地区之间相互转换,随着城市化进程的加快,表现出草地侵占,人地矛盾扩张态势。

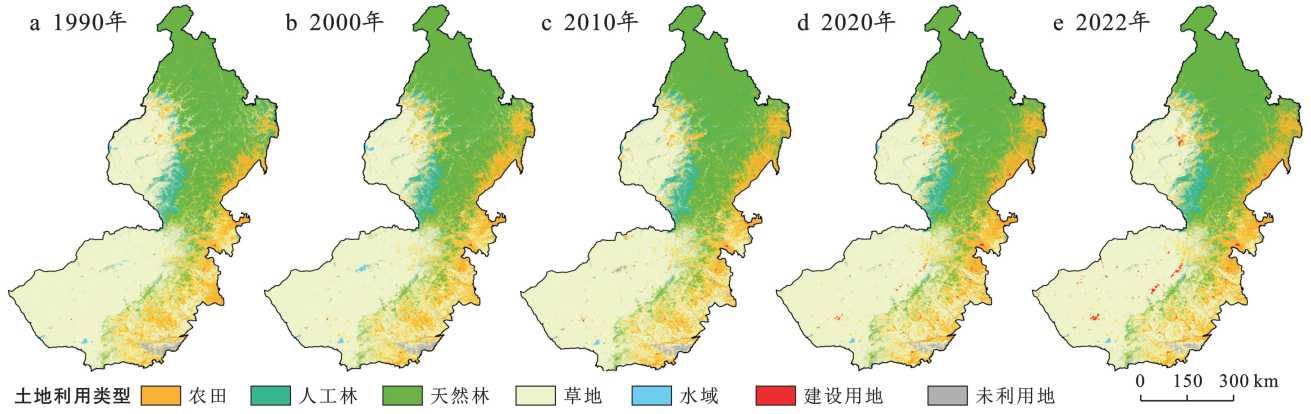


图 2 内蒙古大兴安岭土地利用的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of land use in Daxinganling Mountains of Inner Mongolia

表 3 内蒙古大兴安岭地区 1990—2022 年土地利用转移矩阵

Table 3 Land use transfer matrix in Daxinganling Mountains of Inner Mongolia from 1990 to 2022

km<sup>2</sup>

土地利用类型	2022 年							总和
	农田	人工林	天然林	草地	水域	建设用地	未利用地	
1990 年								
农田	48 220.10	762.46	180.13	7 367.36	52.03	261.65	11.48	56 855.22
人工林	1 016.76	37 132.80	0.00	189.36	1.39	21.77	0.00	38 362.08
天然林	184.87	0.00	118 297.20	21.96	0.03	3.66	0.00	118 507.71
草地	8 900.99	1 475.65	443.18	222 090.30	110.49	595.11	805.58	234 421.30
水域	40.75	4.97	0.96	91.59	1 300.88	46.97	39.90	1 526.04
建设用地	1.43	0.02	0.00	4.34	46.34	2 005.31	2.28	2 059.72
未利用地	88.88	0.01	0.01	1 322.75	67.34	42.10	2 894.26	4 415.35
总和/km <sup>2</sup>	58 453.79	39 375.91	118 921.48	231 087.67	1 578.50	2 976.58	3 753.49	456 147.43

随着近年来城市化进程提速,生态用地向农用地和建设用地流转规模扩大,人地矛盾导致土地利用强度增加。根据图 3 可知,内蒙古大兴安岭地区全域平均土地利用强度呈现逐年递增趋势,其中 2022 年平均土地利用强度最高(222.49),最低为 1990 年平均土地利用强度(217.84)。内蒙古大兴安岭东南部地

处松辽平原过渡带,平坦辽阔人口众多,土地利用在中强度到高强度区间,北部原始林区土地利用多在中低至低强度区间,西部县域内土地利用强度逐年提升。城市化进程下内蒙古大兴安岭地区土地利用强度整体上呈现增长趋势,空间上呈东南—西北递减分布,且分布格局基本保持稳定。

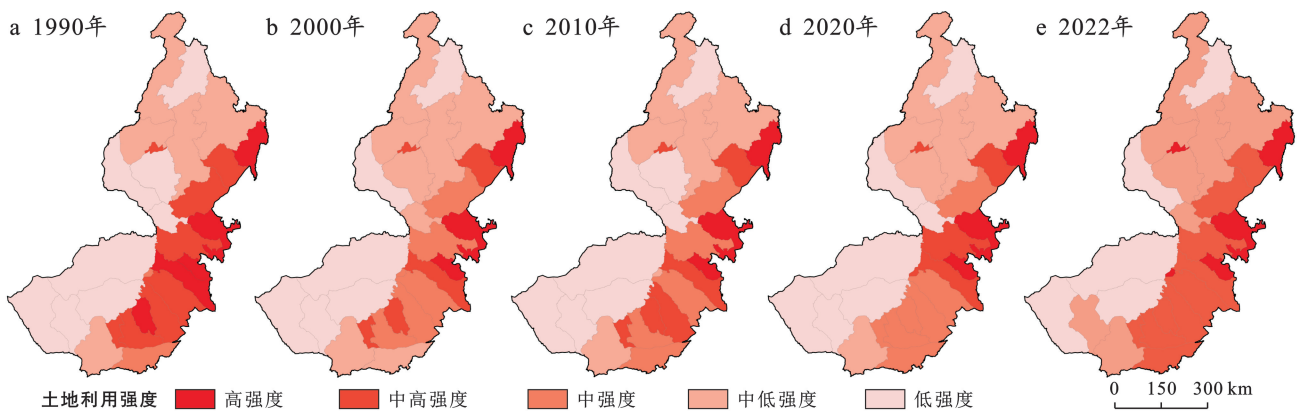


图 3 内蒙古大兴安岭地区 1990—2022 年土地利用强度的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of land use intensity in Daxinganling Mountains of Inner Mongolia from 1990 to 2022

1990—2000 年期间人工林转化为草地具有绝对倾向性;农田转化为水域和建设用地,草地转化为未

利用地,水域向农田、人工林、建设用地和未利用地转化,建设用地转化为未利用地,未利用地向草地、水域

和建设用地转化等表现出相对倾向性;系统倾向性主要体现在农田、草地和人工林之间的相互转化过程;此外,林地(天然林和人工林)的转入转出过程和建设用地的转出都存在强系统抑制性。2000—2010 年期间不存在绝对倾向性。人工林转化为农田、建设用地转化为水域为新增相对倾向性变化,水域转向未利用地为系统倾向性变化,农田转化为未利用地为系统抑制性变化,其余与 1990—2000 年变化相同。2010—2022 年期间仍无绝对倾向性,相对倾向性体现在农田转化为水域和建设用地,人工林转化为农

田,草地转化为建设用地和未利用地,水域转化为农田、建设用地和未利用地,以及未利用地转化为草地、水域和建设用地;农田和草地的相互转化以及建设用地转向水域存在系统倾向性;系统抑制性仍体现在林地(天然林和人工林)的转入转出过程和农田、建设用地的转出。综合来看,内蒙古大兴安岭地区土地利用格局基本稳定,土地利用强度图谱不仅在整体上体现出研究区土地利用的时空变化,并且区域内地类面积的转变特征与图谱倾向和抑制性显示高度吻合(图 4)。

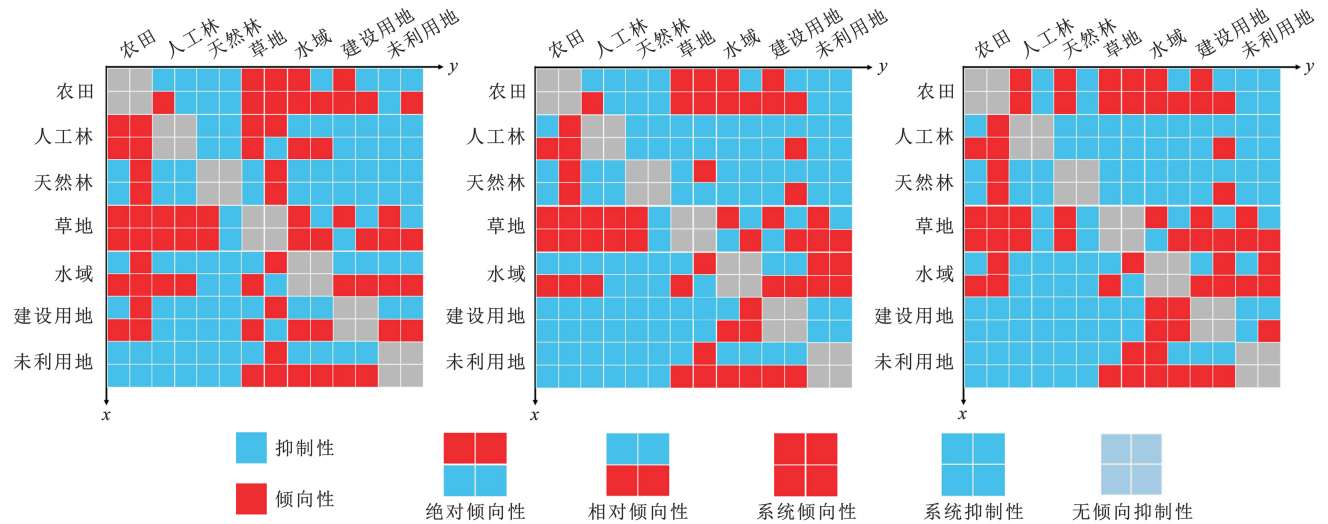


图 4 内蒙古大兴安岭地区土地利用/覆被变化强度图谱

Fig.4 Intensity map of land use/cover change in Daxinganling Mountains of Inner Mongolia

## 2.2 内蒙古大兴安岭地区生态系统服务功能时空变化

### 2.2.1 生境质量模拟结果

由图 5 可以看出,1990—2022 年期间,内蒙古大兴安岭生境质量呈现缓慢下降态势,1990 年生境质量平均值最高为 0.382,而 2022 年则将平均值下降至 0.245,生境质量逐步从中

等水平向低水平过渡,研究期间生境质量水平空间格局变化不明显,主要表现为北部原始林区和西南部草原生境质量高,东部及东南部地区的松辽平原过渡带生境质量低,以农田和建设用地为主,土地利用强度高,所以生境质量普遍低于林地和草地。

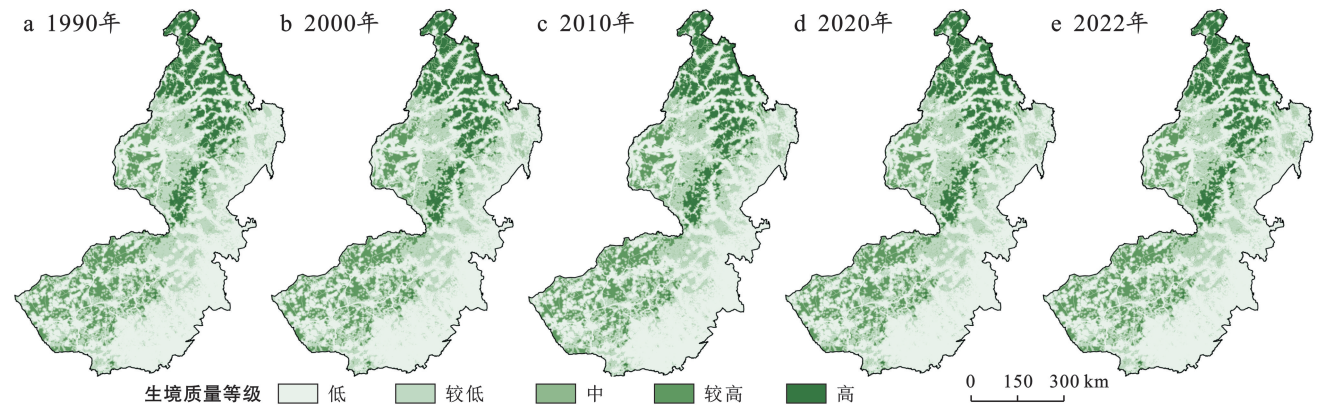


图 5 内蒙古大兴安岭地区 1990—2022 年生境质量空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of habitat quality in Daxinganling Mountains of Inner Mongolia from 1990 to 2022

### 2.2.2 碳储量模拟结果

由图 6 可知,1990—2022 年研究区碳储量整体呈现增加趋势,但增速先增后减

趋于平稳。总体碳储量从 1990 年  $5.62 \times 10^9$  t 增加到 2022 年的  $5.66 \times 10^9$  t,其中碳储量高和低的区域

有所减少,较高较低区域面积增加,研究期间内蒙古大兴安岭地区碳储量保持稳定,5个等级的面积变化平缓,碳储量处于高等级占绝对面积(89.6%),主要

由于境内农田、林地(天然林、人工林)和草地占比较大,低值区主要出现在区域城镇化和工业化水平较高的区域,碳储流失严重。

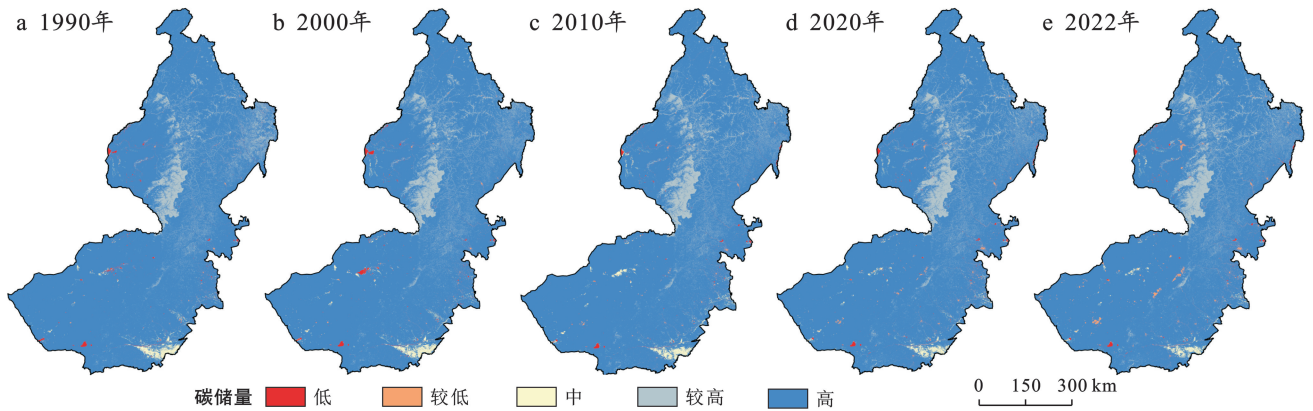


图6 内蒙古大兴安岭地区1990—2022年碳储量空间分布

Fig.6 Spatial distribution of carbon storage in Daxinganling Mountains of Inner Mongolia from 1990 to 2022

2.2.3 水源涵养量模拟结果 水源涵养量在1990—2020年的40 a间呈先显著下降后缓慢上升的V形趋势(图7),最高点为1990年的440.42 mm,最低点出现在2010年,为334.17 mm;且2020年后水源涵养呈现新一轮下降趋势。

空间上呈现北部及东南部高,西南部低的特征。

其中,1990—2010年水源涵养量持续降低,低值面积增加15.5%,产水量中等面积减少15.89%。水源涵养量高值区多分布在植被覆盖率高降水量多的北部原始林区,水源涵养量低值区则分布在西南方向,该范围内草地不断减少,建设用地扩张,城市化工业化水平提升,水源涵养量偏低。

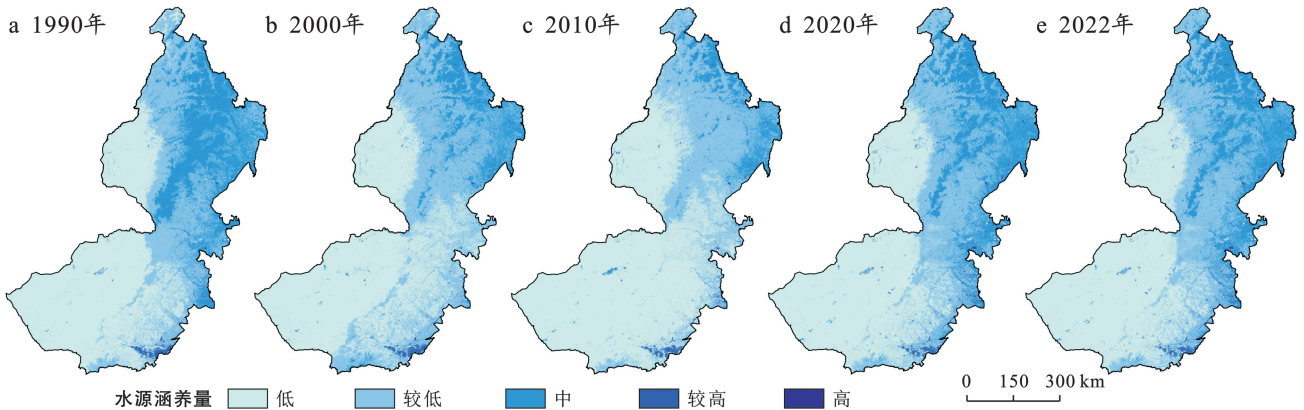


图7 内蒙古大兴安岭地区1990—2022年研究区水源涵养空间分布

Fig.7 Spatial distribution of water conservation in Daxinganling Mountains of Inner Mongolia from 1990 to 2022

2.2.4 土壤保持量模拟结果 由图8可知,1990—2022年研究区土壤保持量呈现缓慢下降状态,从1990年 $1\ 161.26\ \text{t}/\text{hm}^2$ 降低到2022年 $890.73\ \text{t}/\text{hm}^2$ ,降幅为22.9%,其中土壤保持高值区面积减少,其他值区变化较为缓慢。土壤保持量空间分布与土地利用格局存在高度一致性,土壤保持量高值空间主要分布在林区(人工林和天然林),而农田、草地和建设用地服务价值低。

2.2.5 植被净初级生产力(NPP)模拟结果 植被净初级生产力(NPP)在年际变化中呈现波动,整体呈先

减少后增加的波动式变化趋势(图9)。其中较低和低值区在2010年时达到最大,所占比例达56.12%,在2020年比例减少至50.24%,2022年较低和低值区略有增加。其他等级区域在2010年后均有所增加。在空间上呈现北高南低的格局,高值区主要在北部林区,植被覆盖率较高,光合能力强,并且一直延续至中部;低值区主要是东西两侧呈片状分布,出现低值区主要由于区域范围植被覆盖度较低,且随着城市化进程加快,受草地垦荒,不合理规划建设影响,植被覆盖度逐年下降,植被净初级生产力服务面积成缩减态势。

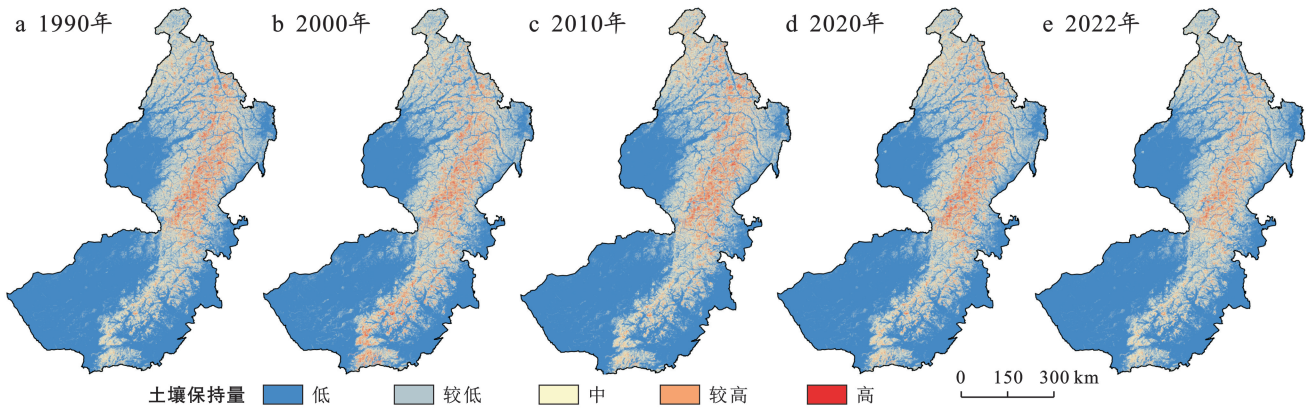


图 8 内蒙古大兴安岭地区 1990—2022 年土壤保持空间分布

Fig.8 Spatial distribution of soil conservation in Daxinganling Mountains of Inner Mongolia from 1990 to 2022

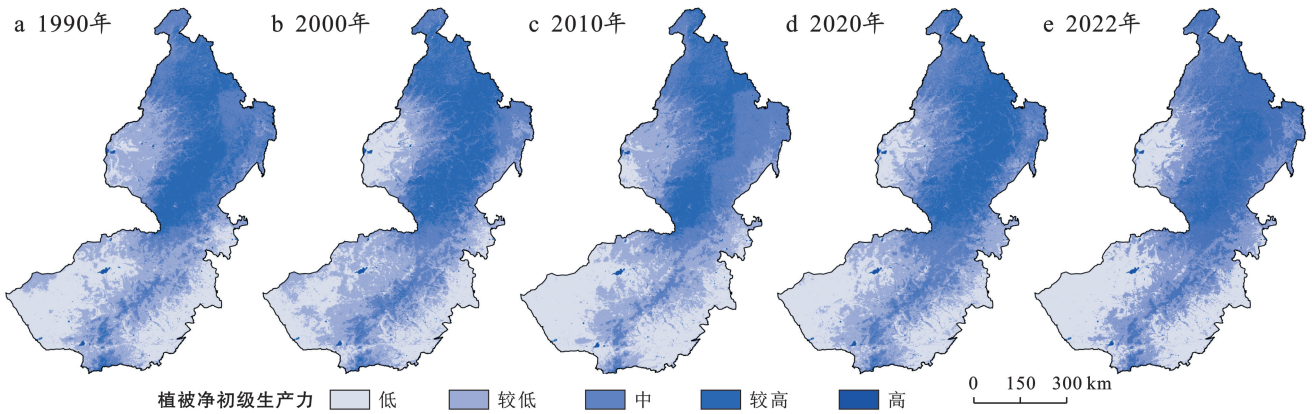


图 9 内蒙古大兴安岭地区 1990—2022 年植被净初级生产力空间分布

Fig.9 Spatial distribution of net primary productivity of vegetation in Daxinganling Mountains of Inner Mongolia from 1990 to 2022

2.2.6 多生态系统服务功能量化 将生态系统服务功能量化后得到多生态系统服务功能综合值,根据图 10 可知,1990—2022 年,生态系统服务功能整体呈现北高南低逐年下降态势,生态系统服务功能综合值呈退化的面积较大(5.92%),虽然局部也存在服务功能增强倾向,

但退化情况在研究区东南部更明显。其中区域内兴安盟、通辽市和赤峰市境内生态系统服务功能综合值皆呈下降态势,仅呼伦贝尔市和锡林郭勒盟生态系统服务功能综合值变化为正。其中扎鲁特旗、乌兰浩特市和阿鲁科尔沁旗生态系统服务功能下降较为明显。

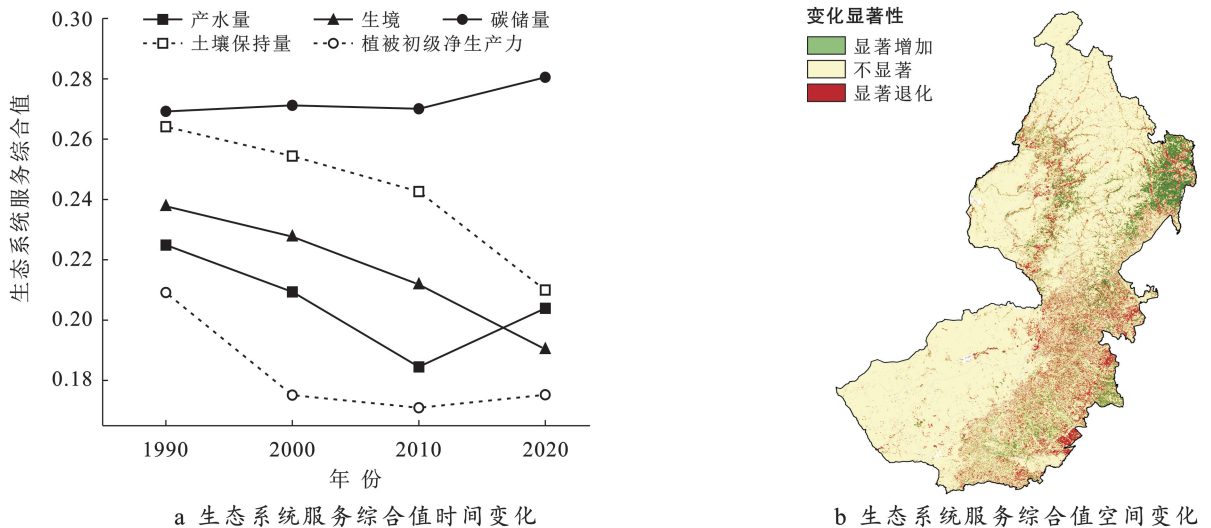


图 10 内蒙古大兴安岭 1990—2022 年综合值变化的时空变化

Fig.10 Space distribution of comprehensive value in Daxinganling Mountains in Inner Mongolia from 1990 to 2022

### 2.3 土地利用与生态系统服务功能相关性研究

通过对比内蒙古大兴安岭土地利用格局与多生态系统服务功能综合值空间分布,可以看出内蒙古大兴安岭区域土地利用对生态系统服务功能有明显的驱动性。从利用类型能看出,生态系统服务功能整体呈现北高南低的格局,土地利用类型从林地向草地和农用地、建设用地过渡。其中生态系统服务功能高值区主要分布在北部林地,中值区与西部草地区域重合,而由于人地矛盾加剧,草场地类流转和草质退化导致生态系统服务功能逐年降低。低值区主要是东南部的农田、建设用地及未利用地。在研究期间,发现区域内仅碳储量呈现提升趋势,但生境质量、水源涵养能力、土壤保持量及植被净初级生产力都出现不同程度波动下降,其中生境质量和土壤保持能力逐年降低,产水量及植被净初级生产力呈先减少后增加的现象,低值区均在 2010 年。上述变化趋势在一定程度上反映城市化发展进程,区域内城市建设用地及农田扩张,草地面积减少导致生态系统服务功能出现波动,对生态系统服务功能的保持存在负效益。此外 2020 年期间产水量及植被净初级生产力在土地利用类型流转稳定情况下,仍出现小幅上升趋势,且 2022 年又呈现下降趋势。说明生态系统服务功能除受到土地格局影响外,也与气候变暖及季风年际波动等有关。由图 11 可以看出,内蒙古大兴安岭地区土地利

用强度与生态系统服务功能呈现显著空间特异性规律。研究区分布面积比例最大的是高生态系统服务价值—低土地利用强度(Ⅳ)区,说明该区域生态系统服务受到的人类活动干扰影响少。主要分布于呼伦贝尔市北部根河市、牙克石市、额尔古纳市等 5 个旗县和锡林郭勒盟东部的阿巴嘎旗、东乌珠穆沁旗和西乌珠穆沁旗等地区,但是随着社会的发展,分布地区呈逐年减少的趋势。低生态系统服务价值—高土地利用强度(Ⅱ)区涉及旗县最多,说明该象限县域土地利用强度与生态系统服务功能具有明显负相关性。主要分布于研究区北部区域内呼伦贝尔市海拉尔区等 3 旗县,兴安盟乌兰浩特市等 4 旗县,赤峰市阿鲁科尔沁旗等 4 旗县和通辽市扎鲁特旗。随着土地利用强度加深,生态系统服务功能逐渐变差,说明该象限县域土地利用强度加深对生态系统服务功能存在负面影响。低生态系统服务价值—低土地利用强度(Ⅲ)区两者存在着正相关关系,说明此象限县域生态系统服务退化较大可能由非人为影响引起,县域主要分布在西部锡林郭勒盟和赤峰市的草原区,且变化较为稳定。高生态系统服务价值—高土地利用强度(Ⅰ)区县域及占比最小,土地利用强度与生态系统服务功能呈现正相关,说明该区域土地利用强度加深未对该地区生态系统服务造成明显的负面影响,研究期间仅有扎兰屯市存在这样的生态特征。

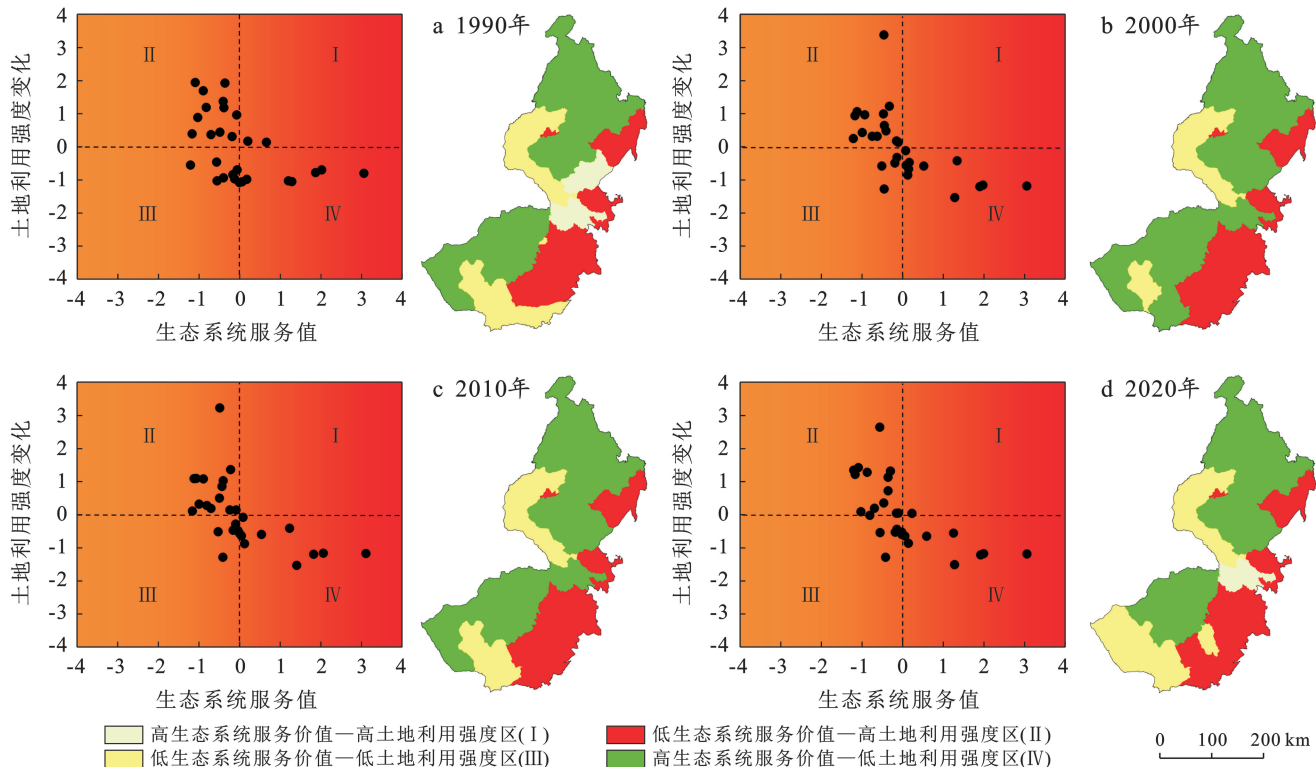


图 11 土地利用强度与生态系统综合值相关性的四象限图

Fig.11 Four-quadrant map of correlation between land use intensity and ecosystem comprehensive value

### 3 讨论

(1) 以往研究多侧重于土地流转和简单相关系数统计分析量化二者动态度<sup>[8,26]</sup>。本研究从时空视角分析土地利用格局及强度对生态系统服务功能的影响,研究期间内蒙古大兴安岭土地利用格局稳定,区域内地类流转与图谱倾向和抑制性高度吻合。生态用地向农用地和建设用地流转导致土地利用强度升高,生态系统服务功能随土地利用强度表现出时空异质性规律。但研究中缺乏对土地利用强度的隐性形态(产权、土壤质量、产出能力)的探讨,缺乏对社会经济因素的考量,因此未来研究工作应综合地理及社会经济因素分析。

(2) 揭示人类活动对生态系统的影响对于人地关系协调发展意义重大,通过合理模型构建量化生态系统服务功能时空规律可以促进生态环境可持续管理发展<sup>[27]</sup>。李晶等<sup>[28]</sup>、陈安等<sup>[29]</sup>研究表明降水量减少往往伴随着水源涵养与土壤保持的同步衰减,而水源涵养与NPP呈协同关系的主要原因为草场面积萎缩。研究发现内蒙古大兴安岭生态系统服务功能整体呈现北高南低,且服务功能逐渐下降趋势;大兴安岭南段林地退化死亡导致区域蒸腾增强且NPP下降<sup>[30]</sup>,故该地区的水源涵养量减少,碳存储服务功能增速减缓<sup>[31]</sup>。其中水源涵养与植被净初级生产力(NPP)波动性递减,与上述研究结论基本一致。此外研究发现InVEST模型只考虑不同地类对生态系统服务功能的影响,缺乏对生境胁迫性、植被根系深度及含水量、土壤微生物作用、植被种类碳密度等多重因素的考量,其模糊精度存在不确定性,可能造成估算结果与实际存在差异性,而针对内蒙古大兴安岭山地—平原复杂生态环境,缺乏相应野外考察和试验分析进行本土化修订,因此提升模拟精度和对比验证结果仍有一定难度<sup>[32]</sup>。

(3) 土地利用与生态系统服务功能呈现高度相关性,因此合理优化土地利用格局有利于减缓生态系统服务功能下降。模型模拟为二者时空演变规律分析提供便利,生态四象限分区建设能够将人为干扰的土地利用强度升高导致的生态系统服务功能综合值退化以象限形式表达,不仅有利于从县域尺度精准分析内蒙古大兴安岭土地利用强度与生态系统服务功能的相关性,更能从区域整体把握两者存在的空间异质性<sup>[33-34]</sup>。因此内蒙古大兴安岭生态保护修复应以象限分布情况为基准,首先要加强研究区北部Ⅳ象限的生态保护工作,通过生态过程保护其屏障作用,并积极开展林草修复工作;其次要对东南部县域开展生

态规划管理,缓和人地矛盾,修复重点区域生态用地,避免人类对于该县域生态系统进一步破坏。

### 4 结论

1990—2022年期间,内蒙古大兴安岭土地利用格局基本稳定,农田、草地和林地(天然林、人工林)面积占比最大,发生转移的土地利用面积为7 990.97 km<sup>2</sup>,农田增量为1 598.57 km<sup>2</sup>,林地面积增加1 427.6 km<sup>2</sup>,建设用地面积增加916.86 km<sup>2</sup>,草地、未利用地和水域面积缩减,分别减少3 333.63、661.86和52.46 km<sup>2</sup>。城市化进程下内蒙古大兴安岭地区土地利用强度整体上呈现增长趋势,空间上呈东南—西北递减分布,且分布格局基本保持稳定。

研究期间,内蒙古大兴安岭5种生态系统服务功能符合时空异质性规律,生境质量和土壤保持量皆呈下降趋势,产水量与植被净初级生产力(NPP)均呈现先减少后增加的波动式变化,但整体衰减无法回升至1990年同期水平,研究区仅碳储量呈提升状态,但增速逐年降低。通过生态系统服务功能综合值量化运算,凸显服务功能的主导关系格局,图层上呈现北高南低,逐年下降的态势。其中林地面积增大对区域生态系统服务功能提升贡献度大,草地向农田流转及建设用地扩张会阻碍生态系统服务功能提升。

土地利用格局及强度对生态系统服务功能的相关性影响通过四象限模型表达,其中土地利用强度对研究区的生态系统服务功能综合值呈现显著负相关,其中生境质量、碳储量和土壤保持量有明显影响,但对于产水量和植被净初级生产力(NPP)影响有限,可能说明气候因素是其变化主导。

### 参考文献(References)

- [1] 张侠,葛向东,濮励杰,等.土地利用的经济生态位分析和耕地保护机制研究[J].自然资源学报,2002,17(6):677-683. Zhang Xia, Ge Xiangdong, Pu Lijie, et al. A study on the economic niche of land use theory and mechanisms of cropland conservation [J]. Journal of Natural Resources, 2002,17(6):677-683.
- [2] Xu Yuqing, Xiao Fengjin, Liao Yaoming. Assessment of grassland ecosystem service value in response to climate change in China [J]. Diversity, 2022,14(3):160.
- [3] 朱治州,钟业喜.长江三角洲城市群土地利用及其生态系统服务价值时空演变研究[J].长江流域资源与环境,2019,28(7):1520-1530. Zhu Zhizhou, Zhong Yexi. Spatio-temporal evolution of land use and ecosystem service value in Yangtze River Delta urban agglomeration [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019,28(7):1520-1530.

- [4] 欧阳晓,贺清云,朱翔.多情景下模拟城市群土地利用变化对生态系统服务价值的影响:以长株潭城市群为例[J].经济地理,2020,40(1):93-102.  
Ouyang Xiao, He Qingyun, Zhu Xiang. Simulation of impacts of urban agglomeration land use change on ecosystem services value under multi-scenarios: Case study in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration [J]. Economic Geography, 2020,40(1):93-102.
- [5] 谢丽霞,白永平,车磊,等.基于价值—风险的黄河上游生态功能区生态分区建设[J].自然资源学报,2021,36(1):196-207.  
Xie Lixia, Bai Yongping, Che Lei, et al. Construction of ecological zone based on value-risk ecological function area in the Upper Yellow River [J]. Journal of Natural Resources, 2021,36(1):196-207.
- [6] 赵锐锋,姜朋辉,陈亚宁,等.塔里木河干流区土地利用/覆被变化及其生态环境效应[J].地理科学,2012,32(2):244-250.  
Zhao Ruifeng, Jiang Penghui, Chen Yaning, et al. Land use/cover change and its eco-environment effect in the main stream of Tarim River [J]. Scientia Geographica Sinica, 2012,32(2):244-250.
- [7] 孟琦琦.近 30 年辽东湾北部区土地利用强度与生态系统服务价值时空关系及可持续性情景模拟[D].辽宁 大连:辽宁师范大学,2020.  
Meng Qiqi. Spatio-temporal relationship between land use intensity and ecosystem service value and scenario simulation of sustainability in northern Liaodong Bay in recent 30 years [D]. Dalian, Liaoning: Liaoning Normal University, 2020.
- [8] 熊秀海,代侦勇.奉化市生态服务与土地利用强度的相关性分析[J].地理空间信息,2017,15(4):102-104.  
Xiong Xiuhai, Dai Zhenyong. Correlation analysis of eco-service and land use intensity in Fenghua city [J]. Geospatial Information, 2017,15(4):102-104.
- [9] 董会忠,姚孟超.成渝经济区土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J].水土保持通报,2020,40(1):213-220.  
Dong Huizhong, Yao Mengchao. Impacts of land use change on value of ecosystem services in Chengdu-Chongqing economic zone [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020,40(1):213-220.
- [10] 肖景峰,刘白杨,于德,等.长沙市城区土地利用变化过程与生态格局研究[J].湖南农业科学,2016(1):47-52.  
Xiao Jingfeng, Liu Baiyang, Yu De, et al. Land use change process and ecological pattern of Changsha urban area [J]. Hunan Agricultural Sciences, 2016(1):47-52.
- [11] 许诺瑾,丁兵兵,余新晓,等.基于土地利用变化的黄河上游四川段生态系统服务价值评价[J].水土保持学报,2024,38(2):178-189.  
Xu Nuojin, Ding Bingbing, Yu Xinxiao, et al. Ecosystem service functions in the upper reaches of the Yellow River in Sichuan based on land use change value evaluation [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(2):178-189.
- [12] 史恭发,徐诺,牛钊倩,等.内蒙古大兴安岭东部林下植物生物多样性海拔差异[J].生态学报,2024,44(7):3004-3015.  
Shi Gongfa, Xu Nuo, Niu Zhaoqian, et al. Altitudinal differences of understory plant biodiversity in eastern Greater Xing'an Mountains, Inner Mongolia [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(7):3004-3015.
- [13] 任涵,张静静,朱文博,等.太行山淇河流域土地利用变化对生境的影响[J].地理科学进展,2018,37(12):1693-1704.  
Ren Han, Zhang Jingjing, Zhu Wenbo, et al. Impact of land use change on habitat in the Qihe River Basin of Taihang Mountains [J]. Progress in Geography, 2018,37(12):1693-1704.
- [14] Yang Jie, Huang Xin. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019 [J]. Earth System Science Data, 2021,13(8):3907-3925.
- [15] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.土地利用现状分类:GB/T21010—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Current land use classification: GB/T 21010-2017 [S]. Beijing: Standard Press of China, 2017.
- [16] 李帅呈,龚健,杨建新,等.兰西城市群土地利用/覆被变化模式特征:基于强度分析框架[J].资源科学,2023,45(3):480-493.  
Li Shuaicheng, Gong Jian, Yang Jianxin, et al. Characteristics of LUCC patterns of the Lanzhou-Xining urban agglomeration: Based on an intensity analysis framework [J]. Resources Science, 2023,45(3):480-493.
- [17] 赵晓阔,王建,苏军德,等.基于 InVEST 模型和莫兰指数的甘肃省生境质量与退化度评估[J].农业工程学报,2020,36(18):301-308.  
Zhao Xiaokuo, Wang Jian, Su Junde, et al. Assessment of habitat quality and degradation degree based on InVEST model and Moran index in Gansu Province, China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020,36(18):301-308.
- [18] 周晓艳,何依依,黄欣,等.三峡库区生境质量的地形梯度效应及对土地利用变化的响应[J].农业工程学报,2021,37(11):259-267.

- Zhou Xiaoyan, He Yiyi, Huang Xin, et al. Topographic gradient effects of habitat quality and its response to land use change in Hubei Section of the Three Gorges Reservoir [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(11): 259-267.
- [19] 王想,王春雨,吕飞南,等.基于 PLUS-InVEST 模型的区县碳储量时空格局变化与碳汇提升策略:以延庆区为例[J].*应用生态学报*, 2023, 34(12): 3373-3384.  
Wang Xiang, Wang Chunyu, Lyu Feinan, et al. Temporal and spatial variations of carbon storage and carbon sink improvement strategy at the district and county level based on PLUS-InVEST model: Taking Yanqing District as an example [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(12): 3373-3384.
- [20] 韩念龙,张亦清,张伟璇.海南岛土地利用及产水量时空变化模拟[J].*水资源保护*, 2022, 38(2): 119-127.  
Han Nianlong, Zhang Yiqing, Zhang Weixuan. Simulation of temporal and spatial changes of land use and water yield in Hainan Island [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(2): 119-127.
- [21] Zhang Liwei, Fu Bojie, Lü Yihe, et al. Balancing multiple ecosystem services in conservation priority setting [J]. *Landscape Ecology*, 2015, 30(3): 535-546.
- [22] 徐勇,黄雯婷,郑志威,等.基于空间尺度效应的西南地区植被 NPP 影响因子探测[J].*环境科学*, 2023, 44(2): 900-911.  
Xu Yong, Huang Wenting, Zheng Zhiwei, et al. Detecting influencing factor of vegetation NPP in southwest China based on spatial scale effect [J]. *Environmental Science*, 2023, 44(2): 900-911.
- [23] 施亚林,曹艳萍,苗书玲.黄河流域草地净初级生产力时空动态及其驱动机制[J].*生态学报*, 2023, 43(2): 731-743.  
Shi Yalin, Cao Yanping, Miao Shuling. Spatiotemporal dynamics of grassland net primary productivity and its driving mechanisms in the Yellow River Basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(2): 731-743.
- [24] Shen Jiashu, Li Shuangcheng, Liang Ze, et al. Exploring the heterogeneity and nonlinearity of trade-offs and synergies among ecosystem services bundles in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. *Ecosystem Services*, 2020, 43: 101103.
- [25] 马守臣,谢放放,丁翠,等.基于四象限模型煤粮复合区景观生态质量时空变化及影响因素[J].*农业工程学报*, 2020, 36(4): 259-268.  
Ma Shouchen, Xie Fangfang, Ding Cui, et al. Spatiotemporal change of landscape ecological quality and influencing factors based on four-quadrant model in overlapped area of cropland and coal production [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(4): 259-268.
- [26] 刘纪远,宁佳,匡文慧,等.2010—2015 年中国土地利用变化的时空格局与新特征[J].*地理学报*, 2018, 73(5): 789-802.  
Liu Jiuyan, Ning Jia, Kuang Wenhui, et al. Spatiotemporal patterns and characteristics of land-use change in China during 2010—2015 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(5): 789-802.
- [27] Li Yue, Geng Huacai, Wu Luhua, et al. Ecosystem service functions of a typical Karst urban basin based on land use change [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2024, 15(1): 1-14.
- [28] 李晶,李红艳,张良.关中—天水经济区生态系统服务权衡与协同关系[J].*生态学报*, 2016, 36(10): 3053-3062.  
Li Jing, Li Hongyan, Zhang Liang. Ecosystem service trade-offs in the Guanzhong-Tianshui economic region of China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(10): 3053-3062.
- [29] 陈安,李景吉,王茂生,等.西藏“一江两河”流域生态系统服务变化及权衡与协同关系研究[J].*水土保持研究*, 2022, 29(2): 313-319.  
Chen An, Li Jingji, Wang Maosheng, et al. Research for change of ecosystem service and the tradeoff-synergy relation of the YLN basin in the Tibet Autonomous Region [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(2): 313-319.
- [30] 贺敏,魏江生,石亮,等.大兴安岭南段山杨径向生长和死亡对区域气候变化的响应[J].*生态学杂志*, 2018, 37(11): 3237-3244.  
He Min, Wei Jiangsheng, Shi Liang, et al. The response of radial growth and death of *Populus davidiana* to regional climate change in Southern Greater Xing'an Mountains [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(11): 3237-3244.
- [31] 郝嘉元,智烈慧,李晓文,等.青藏高原土地利用格局和生态系统服务的时空演变特征及关系[J].*应用生态学报*, 2023, 34(11): 3053-3063.  
Hao Jiayuan, Zhi Liehui, Li Xiaowen, et al. Temporal and spatial variations and the relationships of land use pattern and ecosystem services in Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(11): 3053-3063.
- [32] 武燕,吴映梅,李琛,等.基于风险-质量的高原湖泊流域生态分区构建:以滇池流域为例[J].*生态学报*, 2024, 44(3): 1052-1066.  
Wu Yan, Wu Yingmei, Li Chen, et al. Construction of ecological zoning of plateau lake basin based on spatial conflict and eco-environmental quality: A case of Dianchi Lake Basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(3): 1052-1066.

- and temporal distribution and source variation of heavy metals in cultivated land soil of Xiangzhou district based on EBK interpolation prediction and GDM model [J]. *Environmental Science*, 2022,43(11):5180-5191.
- [25] 张军,高煜,王国兰,等.典型河谷城市土壤重金属含量空间分异及其影响因素[J].*生态环境学报*,2021,30(6):1276-1285.
- Zhang Jun, Gao Yu, Wang Guolan, et al. Spatial differentiation and influencing factors of heavy metal content in soils of typical river valley city [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021,30(6):1276-1285.
- [26] 周怡,吴秋梅,樊亚男,等.江苏省典型高速公路沿线土壤重金属分布特征及影响因素研究[J].*土壤通报*,2023,54(1):161-170.
- Zhou Yi, Wu Qiumei, Fan Yanan, et al. Spatial distribution and influencing factors of heavy metals in soils around typical highways in Jiangsu Provinces [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2023,54(1):161-170.
- [27] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].*地理学报*,2017,72(1):116-134.
- Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017,72(1):116-134.
- [28] 戴倩倩,徐梦洁,庄舜尧,等.基于地理探测器的封丘县农田土壤重金属分布影响因素研究[J].*土壤*,2022,54(3):564-571.
- Dai Qianqian, Xu Mengjie, Zhuang Shun Yao, et al. Study on factors influencing heavy metal of farmland soils based on geographical detector in Fengqiu County [J]. *Soils*, 2022,54(3):564-571.
- [29] 盛奇,王恒旭,胡永华,等.黄河流域河南段土壤背景值与基准值研究[J].*安徽农业科学*,2009,37(18):8647-8650.
- Sheng Qi, Wang Hengxu, Hu Yonghua, et al. Study on soil background value and reference value in Henan section of Yellow River [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009,37(18):8647-8650.
- [30] 张驭航,李玲,王秀丽,等.河南省土壤 pH 值时空变化特征分析[J].*土壤通报*,2019,50(5):1091-1100.
- Zhang Yuhang, Li Ling, Wang Xiuli, et al. Temporal and spatial variation of soil pH in Henan [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019,50(5):1091-1100.
- [31] 窦韦强,安毅,秦莉,等.土壤 pH 对汞迁移转化的影响研究进展[J].*农业资源与环境学报*,2019,36(1):1-8.
- Dou Weiqiang, An Yi, Qin Li, et al. Research progress on effects of soil pH on migration and transformation of mercury [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019,36(1):1-8.
- [32] 张海琳,张雨,王顶,等.西南不同类型紫色土 pH 变化、重金属累积与潜在生态风险评估[J].*环境科学*,2024,45(4):2440-2449.
- Zhang Hailin, Zhang Yu, Wang Ding, et al. Heavy metal accumulation and assessment of potential ecological risk caused by soil pH changes in different types of purple soils in Southwest China [J]. *Environmental Science*, 2024,45(4):2440-2449.
- ~~~~~
- (上接第 351 页)
- [33] 刘永婷,杨钊,徐光来,等.基于四象限模型的生态系统服务与人类活动强度关联性分析:以皖南国际旅游文化示范区为例[J].*生态学报*,2022,42(13):5200-5210.
- Liu Yongting, Yang Zhao, Xu Guanglai, et al. Correlation between ecosystem services value and human activity intensity based on the four-quadrant model: A case study in the International Tourism and Culture Demonstration Area, the South Anhui Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022,42(13):5200-5210.
- [34] 韩增林,孟琦琦,闫晓露,等.近 30 年辽东湾北部区土地利用强度与生态系统服务价值的时空关系[J].*生态学报*,2020,40(8):2555-2566.
- Han Zenglin, Meng Qiqi, Yan Xiaolu, et al. Spatial and temporal relationships between land use intensity and the value of ecosystem services in Northern Liaodong bay over the past 30 years [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020,40(8):2555-2566.