



· 生态环境与气候响应 ·

基于土地利用变化的北方农牧交错带生境质量时空演变及模拟预测

邹亚锋¹, 罗 锋¹, 杜平平¹, 陈 甜¹, 吴聘奇¹, 唐 菲²

1. 福州大学 环境与安全工程学院, 福建 福州 350108; 2. 自然资源部海岛研究中心, 福建 平潭 350400

摘要 明确土地利用变化及其对生境质量影响, 对生态脆弱区生态文明建设与可持续发展具有重要意义。以北方农牧交错带为例, 通过转移矩阵揭示 1980—2020 年土地利用变化特征; 结合 InVEST 模型与热点分析探究生境质量时空演变特征, 并量化土地利用变化对生境质量的影响; 借助 CA-Markov 模型模拟预测 2040 年生境质量状况。结果表明: ① 北方农牧交错带主要地类为草地、耕地、林地, 研究时段内东北部地区为土地利用集中变化区域。耕地与草地相互转化是土地利用变化的主要特征。土地利用变化呈现草地减少、耕地小幅增长、林地波动减少、建设用地显著增加, 而水域与未利用地相对稳定的特点; ② 北方农牧交错带生境质量空间差异显著, 生境质量热点区位于南部边界, 冷点区位于东北部与中部。生境质量整体水平相对较低, 较低水平生境质量占主导地位; ③ 耕地向林地和未利用地转化, 以及未利用地向草地转化, 对生境质量提升起到关键作用, 草地向耕地转化则导致生境质量下降; ④ CA-Markov 模型适用于研究区土地利用模拟, 2040 年北方农牧交错带建设用地与未利用地面积呈增加趋势。区域生境质量则呈下降趋势, 中低水平生境质量面积进一步扩大, 高水平生境质量面积则减少 16 147.30 km², 亟需采取保护措施提升生境质量。研究结果可为北方农牧交错带可持续发展和生态环境保护提供理论参考。

关键词 土地利用变化; 生境质量; InVEST 模型; 模拟预测; 农牧交错带

中图分类号: F301.24 **DOI:** 10.16152/j.cnki.xdxbr.2026-04-014

Spatio-temporal evolution and simulation prediction of habitat quality in the farming-pastoral ecotone of Northern China based on land use change

Zou Yafeng¹, Luo Feng¹, Du Pingping¹, Chen Tian¹, Wu Pinqi¹, Tang Fei²

1. College of Environmental and Safety Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. Island Research Center, Ministry of Natural Resources, Pingtan 350400, China

Abstract Land use change and its impact on habitat quality play a crucial role in the development of ecological civilization and the promotion of sustainable development in ecologically fragile regions. Taking the farming-pastoral ecotone of Northern China as a case, this study analyzes land use change characteristics from 1980

收稿日期: 2025-12-25 修回日期: 2026-01-21

基金项目: 福建省自然科学基金面上项目(2024J01275); 国家社会科学基金后期资助项目(24FGLB058)。

第一作者: 邹亚锋, 男, 教授, 博士生导师, 从事国土空间规划与土地可持续利用研究, T22007@fzu.edu.cn。

通信作者: 罗锋, 男, 从事国土空间规划与土地可持续利用研究, 1870064530@qq.com。

to 2020 using a transition matrix. It also explores the spatio-temporal evolution of habitat quality by combining the InVEST model with hotspot analysis and quantifies the influence of land use change on habitat quality. Furthermore, the CA-Markov model is employed to simulate and predict the habitat quality status in 2040. The research has four results. ① The main land use types in the farming-pastoral ecotone of Northern China are grassland, cultivated land, and forestland. During the study period, significant changes in land use patterns were observed, with the northeastern region being the area of concentrated land use change. The main characteristic of land use change is the mutual conversion between cultivated land and grassland. The changes in land use are marked by a reduction in grassland, a slight increase in cultivated land, a decrease in forestland and a significant increase in built-up land. ② Habitat quality in the study area exhibits notable spatial variation, with hotspots concentrated along the southern boundary and cold spots found in the northeastern and central regions. The overall habitat quality level is relatively low, with areas of low habitat quality being the most prevalent. ③ The conversion of cultivated land to forest and unused land, as well as unused land to grassland, plays a crucial role in improving habitat quality, while the conversion of grassland to cultivated land leads to a decline in habitat quality. ④ The CA-Markov model is suitable for simulating land use in the study area. By 2040, both built-up land and unused land in the study area are expected to increase. Habitat quality in the region is predicted to decline, with low to medium habitats expanding and high quality habitat decreasing by 16, 147.30 km². Urgent protective measures are needed to enhance habitat quality. The findings provide theoretical references for the sustainable development of land resources and ecological environmental protection in the farming-pastoral ecotone of Northern China.

Keywords land use change; habitat quality; InVEST model; simulation and prediction; farming-pastoral ecotone

北方农牧交错带是农业耕作与牧业生产之间的过渡区域,也是生态脆弱带,在中国生态环境保护中具有重要战略地位^[1-2]。作为中东部地区的生态安全屏障,北方农牧交错带各类环境因子均处于过渡临界状态,对外界变化具有极端敏感性^[3]。自21世纪以来,随着气候变化及城市化进程加速,我国北方农牧交错带土地利用格局发生显著变化^[4],过度开垦、放牧及其他不合理的土地利用方式加剧了生态系统结构失衡,进而影响生境要素间的物质能量循环^[5],导致当地生态环境恶化、生物多样性减小,严重制约了该区域的可持续发展,并对区域生态安全构成了重大威胁^[6]。近年来,我国持续推动农业供给侧改革,强调以资源环境承载力为基准,推动农业与生态环境保护的协同发展。党的二十大报告要求全方位、全地域、全过程加强生态环境保护,站在人与自然和谐共生的高度谋划发展^[7]。然而,我国生态环境保护面临的压力依然严峻,北方农牧交错带生态脆弱的状况未得到根本改变。因此,明确北方农牧交错带生境质量演变规律及未来趋势,对维护区域生态安全,保障区域可持续发展具有重要的理论和现实意义。

生境质量是指在一定的时间和空间中,生态系统能够提供个体和种群持续适宜生存条件的能力^[8]。土地利用变化是引起生境质量变化的主要因素^[9],其通过侵占、分割自然生境及改变地表覆被等方式,直接改变景观的结构与功能,进而导致生境退化^[10]。相关学者主要围绕生境质量评估^[11]、时空演变^[12]、多情景预测及驱动因素^[13]等方面,从微观与宏观两个角度探讨土地利用变化对生境质量的影响^[14-15]。微观层面,通过实地调查分析物种的生境要求,明确影响其种群及行为的限制因素或主导因素,并建立相应的适宜性评价指标体系,综合分析评价生境质量^[16-17];此外,相关研究关注特定生态系统或栖息地内的具体物种,如植物群落、昆虫等对生境质量的要求^[18-19],并采用实地观察、地理探测器模型等方法明确其影响物种种群及行为的限制因素或主导因素^[19]。宏观层面,基于土地利用数据,采用 InVEST 模型^[20]、SoLVES 模型^[21]、IDRISI 软件^[22]及 MaxEnt 模型^[23]等分析研究区生境质量。基于实地调查与实验数据,生境质量评价在微观层面准确性较高,但该方法受人力物力影响难度相对较大,评价结果难以推广比较,适用于小尺度下为

特定目标服务的研究,且难以进行长时序分析^[24-25]。InVEST 模型凭借数据获取便捷、评价结果可靠等优势,已成为目前评价生境质量应用最为广泛的模型之一^[26-27]。此外,生境质量模拟已成为量化土地利用变化与生境质量响应的重要手段。相关学者基于 CLUE-S、PLUS 及 CA-Markov 等模型模拟土地利用变化并与 InVEST 模型相结合预测未来生境质量^[10,28],相较于 CLUE-S、PLUS 等模型,CA-Markov 模型对数据依赖性较低,更适合大尺度中长期土地利用演变模拟^[29]。

受自然环境脆弱性与人类活动双重作用,北方农牧交错带土地利用与生态保护问题日益凸显,逐渐成为学界关注的研究热点^[30]。相关学者重点关注区域土地利用演变格局,并基于遥感监测数据结合转移矩阵、空间自相关分析等揭示不同地类分异特征及驱动因素^[31-32]。此外,部分学者基于草地与耕地的变化特征并结合降水、灌溉条件识别北方农牧交错带地理范围,为北方农牧交错带研究提供了数据基础^[33-35]。近年来,学者们的研究重点逐渐从土地利用格局演变转向其对生态环境的影响,主要集中在生态系统服务价值^[36]、耕地保护^[1]、气候响应^[37]等方面。相关研究为理解北方农牧交错带土地利用与生态保护提供了重要参考,但缺少对北方农牧交错带全域生境质量动态演变过程的长时间序列刻画。此外,结合土地利用变化模拟与生境质量评估,探讨区域生境质量优化的研究较少,难以为区域生态保护政策制定提供参考。

在气候变化、超载放牧、过度开垦等多重因素的共同影响下,北方农牧交错带土地利用格局在过去几十年间频繁演变,导致该地区逐渐成为我国生态问题最严重的区域之一^[38]。本研究基于 InVEST 模型与 CA-Markov 模型,分析 1980—2020 年北方农牧交错带生境质量时空演变特征,并对 2040 年土地利用与生境质量进行模拟预测。在量化土地利用变化对生境质量的影响的基础上,明确区域生态保护与优化策略,以期为北方农牧交错带可持续发展与空间治理提供参考。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

北方农牧交错带位于我国中北部地区,是我国空间分布最广泛、自然环境最复杂、生态问题最

严重的农牧交错带。我国学者对北方农牧交错带的划分标准各异,其具体地理范围尚未有统一结论。本文参考史文娇等^[34]研究划定的北方农牧交错带范围,主要涵盖内蒙古、甘肃、宁夏等 11 个省区,总面积 $6.67 \times 10^5 \text{ km}^2$ (见图 1)。该地区地形主要由山地与高原构成,地势呈现自西南向东北的倾斜趋势,地貌种类复杂,草原、沙地、山地、河流交织。北方农牧交错带属于典型的温带大陆性气候,年均温在 $0^\circ\text{C} \sim 8^\circ\text{C}$,降水年际变化大,一般在 $300 \sim 450 \text{ mm}$ 。农业以小麦、玉米、马铃薯等作物为主,畜牧业则以绵羊、牛、马等家畜养殖为主。近年来,该地区过度放牧和草地退化等问题对生态环境造成严重威胁,国家已出台生态退耕、水源涵养、生态保护等相关政策,推动北方农牧交错带的可持续发展已成为当前迫切需求。

1.2 数据来源

本研究主要包含土地利用数据、边界数据及地形数据等,具体来源如下:①土地利用数据来源于中国多时期土地利用遥感监测数据集 (CNLUCC) (<https://www.resdc.cn/>),选取 1980—2020 年 5 期数据,数据总体精度大于 80% 满足研究需要,源数据采用二级分类系统,共 25 个地类;根据《土地利用现状分类》将土地利用数据重分类为草地、耕地、建设用地、林地、水域和未利用地 6 类,重采样至 1 km 空间分辨率;InVEST 模型威胁源数据根据同期土地利用数据重分类获取,提取城镇建设用地、旱地、水浇地、农村居民点、其他建设用地及沙地作为威胁源数据;②研究区边界数据来源于全球变化科学研究数据出版系统 (<https://geodoi.ac.cn/>),获取北方农牧交错带 2010 年矢量边界数据;③DEM 数据来源于地理空间数据云 (<https://www.gscloud.cn/>),空间分辨率 30 m。

1.3 研究方法

农牧交错带是农业耕作与牧业生产之间的过渡区域,极易受到气候变化与人类活动的双重扰动,生态环境相对脆弱^[39-40]。本研究基于土地利用转移矩阵揭示研究区 1980—2020 年土地利用变化特征;借助 InVEST 模型与 GIS 空间分析探讨生境质量时空演化特征;通过测算土地利用变化生境贡献率,评估不同土地利用变化对生境质量的影响程度;借助 CA-Markov 模型预测 2040 年研究区生境质量,进而制定针对性优化策略。



注:基于自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2024)0650 号的标准地图制作,底图无修改。

图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of study area

1.3.1 土地利用转移矩阵

土地利用转移矩阵是描述分析一段时期内不同土地利用类型变化的有利工具,其能表现时期始末各类土地利用类型面积变化、转化面积及转化方向^[41]。计算公式如下

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: S 为土地利用转移矩阵; S_{ij} 为地类 i 转移到地类 j 的面积; n 为土地利用类型总数量。

1.3.2 InVEST 模型生境质量评估

基于 InVEST 模型生境质量模块,评估研究区栅格尺度生境质量指数。输入研究区土地利用类型和威胁源等数据,计算生境质量指数^[42],生境质量取值范围 $[0,1]$ 。计算公式如下

$$Q_{xj} = H_j \left[1 - \left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + K^2} \right) \right] \quad (2)$$

式中: Q_{xj} 为土地利用类型 j 的栅格 x 的生境质量; H_j 为土地利用类型 j 的生境适宜度; D_{xj} 为土地利用类型 j 栅格 x 的生境退化度, z 为归一化常数,常

取 2.5, K 为半饱和常数。

$$D_{xy} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} \left(\frac{W_r}{\sum_{r=1}^R W_r} \right) r_y i_{rxy} \beta_x S_{jr} \quad (3)$$

式中: D_{xj} 为土地利用类型 j 中栅格 x 的总体威胁水平; R 为威胁源数量; Y_r 为 r 威胁源的栅格单元数; W_r 为归一化威胁源权重; r_y 为威胁源的强度; β_x 为法律保护程度,本文不考虑此因子,取值为 1; S_{jr} 为土地利用类型 j 对威胁因子 r 的敏感程度; i_{rxy} 为威胁源 r 在栅格 x 的生境对栅格 y 的影响。

1.3.3 生境质量模块参数设置

不同类型生境对各威胁因子的敏感度存在差异,自然保持程度越高的生境对外部威胁源的响应越敏感^[43]。北方农牧交错带居民点分布散乱、旱地分布广泛,为准确反映不同威胁源的影响,将原有一级地类进行细分(见表 1)。参照 InVEST 模型的用户指南与前人研究成果^[44-45] 确定威胁因子,并对威胁因子的影响与生境对威胁因子的敏感度赋值(见表 2)。

1.3.4 热点分析

在热点分析中, G_i^* 统计量可以揭示和解释地理空间数据的集聚特征^[46]。本文采用 Getis-

Ord G_i^* 分析北方农牧交错带不同时期生境质量的空间集聚特征。参考相关研究^[45]对 G_i^* 分析的 Z 值典型置信区间划分标准如表 3 所示, Z 值大于上限为热点区域, Z 值小于下限则是冷点区域,其余为不显著。Getis-Ord G_i^* 分析在 ArcGIS 软件空间统计中实现。

表 1 威胁源权重及其最大影响距离参数

Tab. 1 Threat source weights and their maximum impact distance parameters

威胁源	最大影响距离	权重	衰减类型
城镇建设用地	1.0	1.0	指数
旱地	1.0	0.4	线性
水浇地	0.8	0.2	线性
农村居民点	3.0	0.7	指数
其他建设用地	1.0	0.5	指数
沙地	2.0	0.5	线性

表 2 不同地类对各威胁源敏感度

Tab. 2 Sensitivity of different land use types to various threat sources

土地利用类型	生境适宜度	敏感系数		
		耕地	建设用地	未利用地
耕地	0.5	0.3	0.5	1.0
林地	1.0	0.4	0.7	1.0
草地	0.7	0.5	0.6	1.0
水域	0.8	0.7	0.7	1
建设用地	0.0	0.0	0.0	0.0
未利用地	0.3	0.1	0.2	1.0

表 3 Z 值典型置信区间划分标准

Tab. 3 Typical confidence interval classification standards for Z -values

置信水平	Z 值下限	Z 值上限
90%	$Z < -1.65$	$Z > 1.65$
95%	$Z < -1.96$	$Z > 1.96$
$Z > 2.58$	99%	$Z < -2.58$

1.3.5 土地利用变化生态贡献率

土地利用变化生态贡献率通常用于评估地类转化对区域生境质量的影响。参考相关研究^[47-48],其计算公式为

$$L_e = \frac{(H_{t+1} - H_t) \cdot A_c}{A_t}$$

(4)

式中: L_e 表示土地利用变化生态贡献率; H_{t+1} 为某种地类变化初期的生境质量指数; H_t 为该地类变化末期的生境质量指数; A_c 为该地类的变化面积; A_t 为区域总面积。

1.3.6 CA-Markov 模型

元胞自动机-马尔科夫(CA-Markov)模型可用于捕捉空间与时间维度的变迁^[48],该模型具有

空间格局模拟能力强,预测精度高等特点,尤其适用于长时序大尺度的土地利用动态变化模拟与预测研究^[41,45]。Markov 模型通过构建土地利用转移概率矩阵,实现地类数量变化的时间序列预测。本研究基于 Markov 模型刻画各类土地利用类型在时间维度上的转移趋势。计算公式为

$$S_{(t+1)} = S_t \cdot P$$

(5)

式中: $S_{(t+1)}$ 是 $(t + 1)$ 时刻的土地利用状态,即 Markov 模型预测所得到的结果; S_t 为 t 时刻的土地利用状态; P 是土地利用转移概率矩阵,表示不同地类间转换的概率。

CA 模型具有强大的空间计算模拟功能,本研究基于 CA 模型模拟土地利用变化的空间演变过

程,其计算公式为

$$X_{(t,t+1)} = f[X_t, N]$$
 (6)

式中: X 为元胞有限、离散的状态集合; f 为转换规则; N 为元胞的邻域。通过引入邻域效应,CA 模型能够在模拟过程中更好地反映空间格局的动态演变。

2 结果与分析

2.1 土地利用变化特征分析

2.1.1 土地利用面积变化分析

研究时段内北方农牧交错带的主要地类为草地与耕地,区域土地利用格局变化显著(见图 2)。

草地面积呈减少趋势,从 1980 年的 41.28% 下降至 2000 年的 40.13%,2020 年降至 39.42%,面积共减少 12 283.16 km²;耕地面积则呈现波动变化特征,1980 年占比 35.60%,2000 年上升至 37.35%,2020 年略微下降至 36.17%;林地面积先增加后下降,1980 年占比 12.15%,到 2010 年达到 14.21%,2020 年略微回落至 12.92%,40 年内共增加 5 117.07 km²;建设用地面积在 40 年间显著增加,从 1980 年的 1.90% 上升至 2020 年的 3.04%,面积共增加 7 630.39 km²;水域面积相对稳定,但呈波动减少趋势,总体维持在 2% 左右,减少 1 752.69 km²;未利用地面积也保持相对稳定,面积占比约 7%,期间减少 2 443.96 km²。

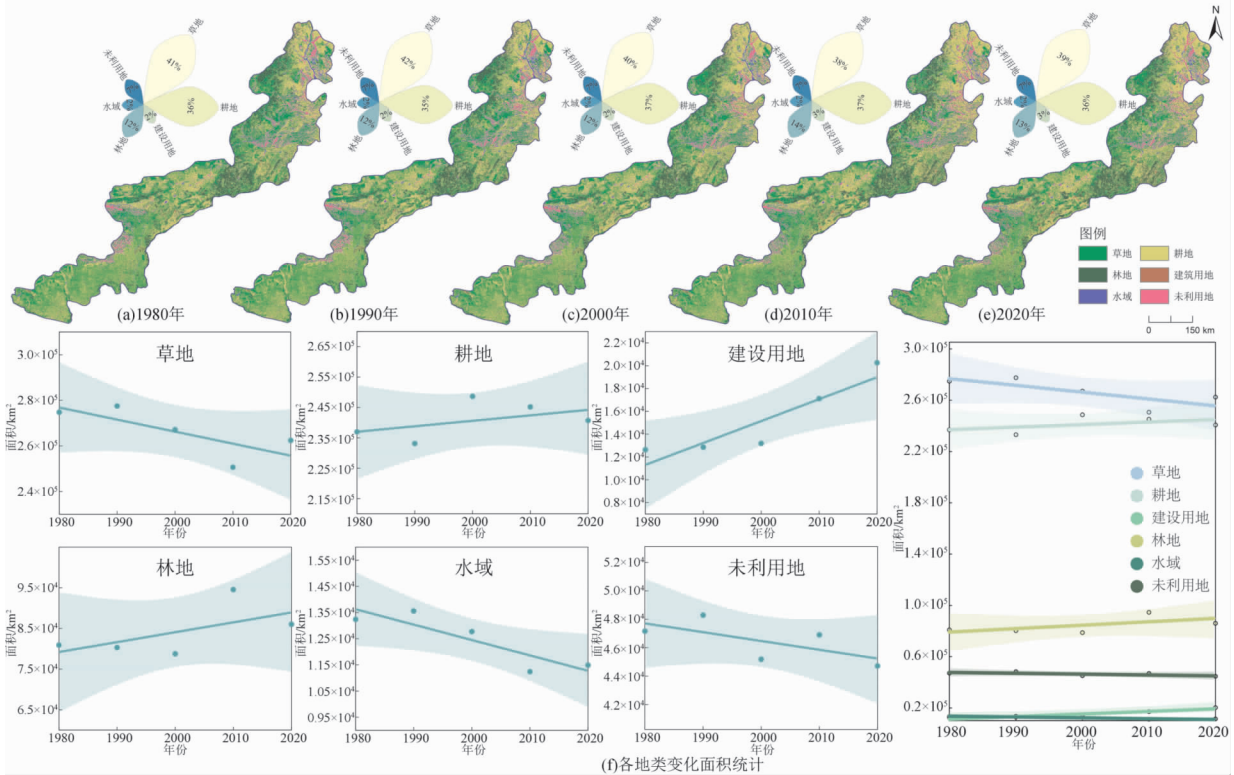


图 2 研究区 1980—2020 年土地利用面积变化结果

Fig. 2 The results of land use area changes in the study area from 1980 to 2020

2.1.2 土地利用转移矩阵分析

基于土地利用转移矩阵分析,揭示不同时期土地利用类型间的转化规律。1980—1990 年间,土地利用变化主要集中在北方农牧交错区东北部,草地与耕地转化活跃,分别是最大的转出地类和转入地类[见图 3(a)]。草地与耕地的转化最为活跃,草地大部分转化为耕地,面积为 9 304.60 km²,部分草地还转化为建设用地、林地和水域;耕地主要转化为建设用地和草地,其面积分别为 563.10 km²与 12 310.74 km²。建设用地主要转化为耕地、草

地和未利用地,少量建设用地转化为林地和水域。1990—2000 年间,东北部仍为土地利用变化集中区[见图 3(b)]。耕地和草地的互相转化是该时段的典型特征,其分别是最大转出地类和转入地类。耕地主要转化为草地、林地和建设用地,分别为 3 060.01 km²、1 338.99 km²和 461.52 km²;草地则大量转为耕地,面积为 10 220.94 km²;林地主要转化为耕地与草地,面积分别为 1 935.69 km²、3 132.81 km²;建设用地的转入主要来源为未利用地,其余地类转化相对较少。2000—2010 年

间,土地利用变化范围显著扩大,东北部变化剧烈,耕地、草地、林地的转化较为显著〔见图 3(c)〕。耕地大量转出为草地、林地和建设用地,分别为 10 922.95 km²、8 446.22 km² 和 4 274.62 km²;草地则转出给耕地、林地和未利用地,分别为 16 156.2 km²、1 898.72 km² 和 973.72 km²;林地也大范围转化为草地、耕地和未利用地;建设用地少量转为未利用地、耕地与林地。2010—2020 年

间,土地利用变化范围进一步扩大,耕地与建设用地变化剧烈〔见图 3(d)〕。耕地主要转为林地、建设用地和草地,面积分别为 4 667.99 km²、3 511.30 km² 和 10 387.41 km²;建设用地则主要转化给耕地、未利用地和林地,但数量相对较小,耕地与草地转为建设用地数量较大;林地主要转化为草地,少量转化为耕地。

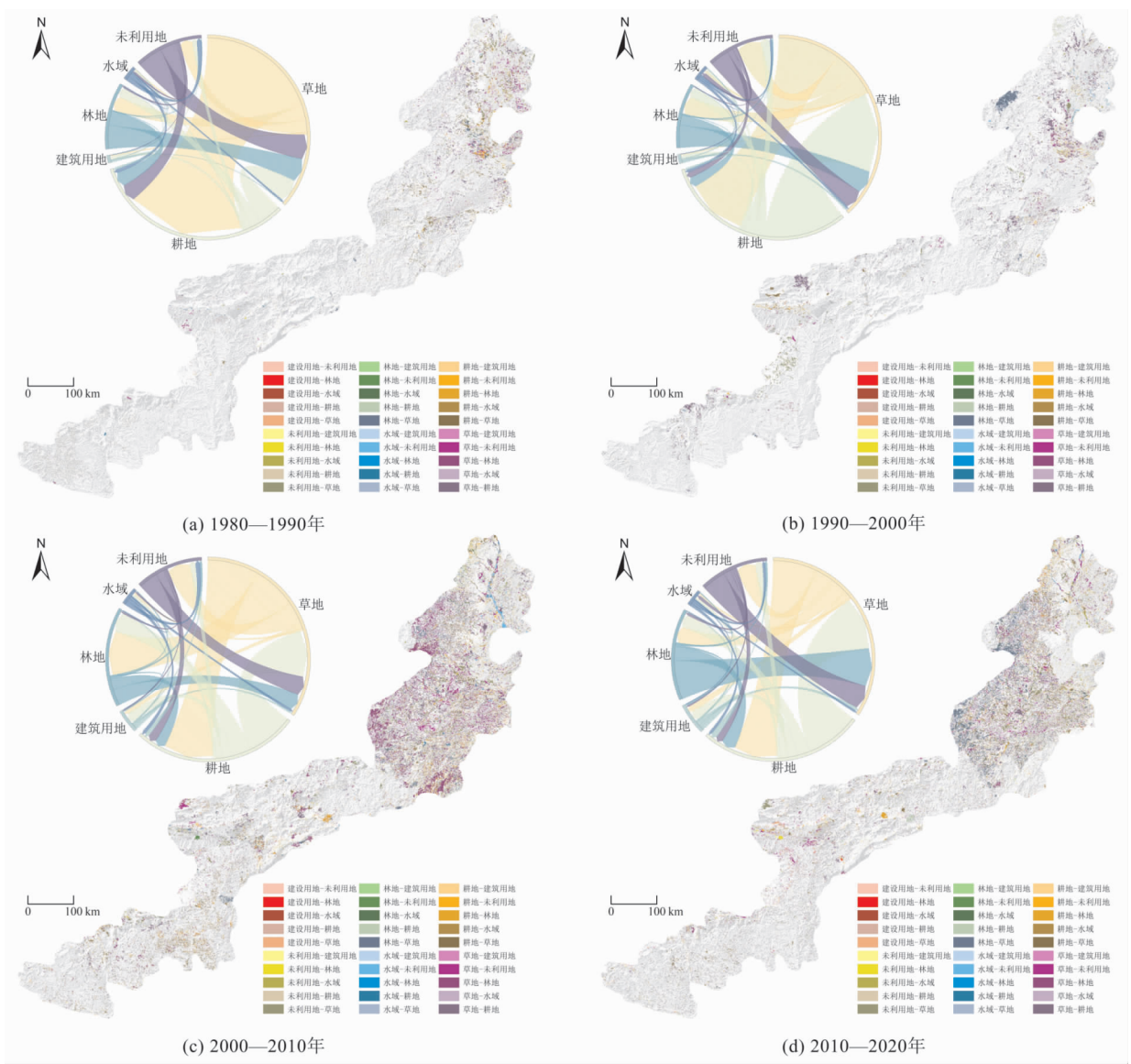


图 3 研究区 1980—2020 年土地利用转移分析结果

Fig. 3 The results of the land use transfer analysis for the study area from 1980 to 2020

2.2 生境质量时空演变特征分析

为更准确地描述北方农牧交错带生境质量的时空演变规律,本研究采用自然断点法,将生境质量划分为低(0~0.2)、较低(0.2~0.5)、中(0.5~0.65)、较高(0.65~0.75)和高(0.75~0.91)5个类型。北方农牧交错带生境质量空间

分异明显,高生境质量区集中在北部西侧与中部,低生境质量区呈东西连续分布态势(见图 4)。区域生境质量在 1980—2020 年间波动变化,总体水平较低,生境质量中等与较高的区域面临生境退化的风险,生境质量低和较低的区域相对稳定,而高生境质量区域呈增加趋势,但面积占比较小。

低水平生境质量在 1980 年占据 9.24% 的面积,而在 2020 年增加到 10.22% 的面积,这表示北方农牧交错带在该时段内生态退化范围扩大;较低水平生境质量占主导地位,但其变化保持相对稳定,在 1980 年占据了 34.99% 的面积,在 2020 年升至 35.95% 的面积;中等水平生境质量呈下降趋势,在 1980 年占据了 27.47% 的面积,在 2020

年下降到 25.85% 的面积;较高水平生境质量也呈现下降趋势,在 1980 年占据了 21.55% 的面积,在 2020 年下降到 20.65% 的面积;高水平生境质量在这段时间内有轻微的增加,在 1980 年占据了 6.76% 的面积,然后在 2020 年上升到 7.33% 的面积。

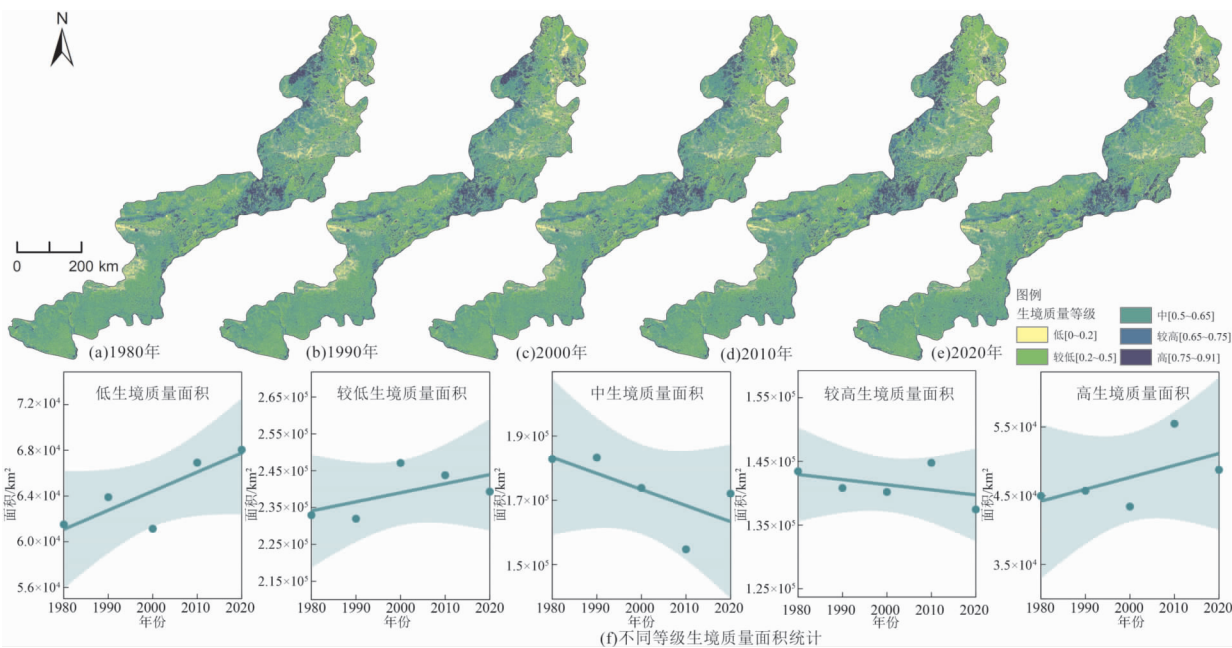


图 4 研究区 1980—2020 年生境质量评估结果

Fig. 4 The results of the habitat quality assessment for the study area from 1980 to 2020

研究时段内北方农牧交错带生境质量的 Moran's I 指数统计值均大于 0.5,且 p 值在 0.001 水平上显著,表明区域生境质量存在显著的空间自相关。因此,基于生境质量评估结果,借助热点分析揭示生境质量演变的空间特征(见图 5)。1980—2020 年,生境质量冷点区主要集聚在北方

农牧交错带东北部及中部区域,冷点区处于生态脆弱区,由于气候变化、土地不合理利用等因素的影响,生境质量持续下降;生境质量热点区呈现条带状分布,并呈现扩张的趋势,主要集中于南部边界。热点区具备较好的自然条件与生态稳定性,在未来制定保护政策中应予以重点关注。

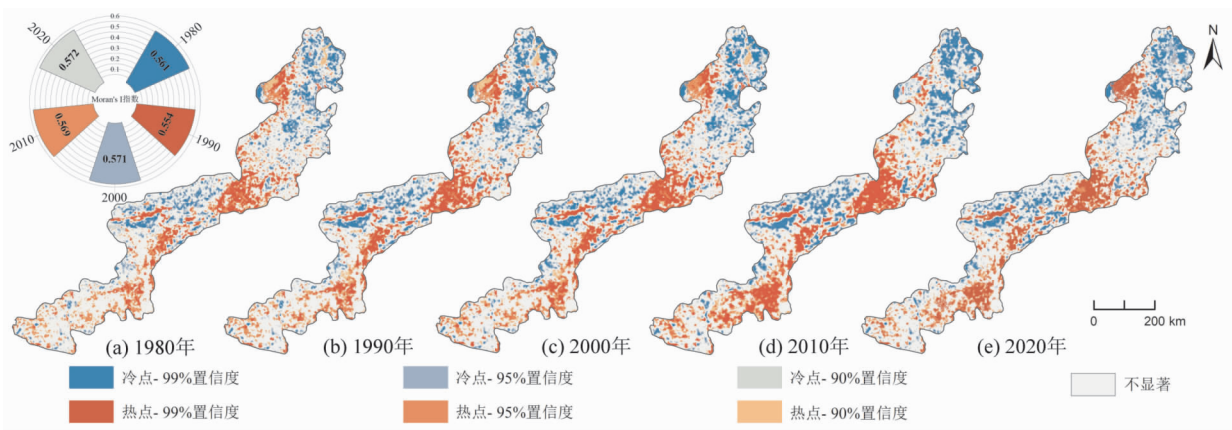


图 5 研究区 1980—2020 年生境质量热点分析结果

Fig. 5 Analysis of habitat quality hotspots in the study area from 1980 to 2020

2.3 土地利用变化对生境质量的影响

土地利用变化是区域生境质量变化的重要原因之一,根据土地利用变化生态贡献率计算公式获得各地类对于生境质量变化的贡献率(见表 4)。1980—1990 年,耕地转化为林地以及未利用地转化为草地是生境质量提升的主要原因,而草地转为耕地是生境质量下降的主要原因;1990—2000 年,建设用地、未利用地与耕地转化为草地是区域生境质量提升的主要原因,而林地、草地向建设用地与未利用转化导致生境质量下降;

表 4 研究区土地利用变化地生态贡献率统计

Tab. 4 Statistics on the ecological contribution of land use change in the study area

类型	1980—1990 年		1990—2000 年		2000—2010 年		2010—2020 年	
	变化类型	贡献	变化类型	贡献	变化类型	贡献	变化类型	贡献
		率/%		率/%		率/%		率/%
生境质量提升	建设用地—林地	8.37	草地—林地	5.98	未利用地—草地	6.25	草地—林地	5.31
	草地—林地	9.78	未利用地—林地	10.87	草地—林地	9.36	未利用地—草地	10.74
	未利用地—林地	13.14	建设用地—林地	13.21	建设用地—草地	12.41	耕地—草地	11.74
	建设用地—水域	10.47	建设用地—草地	20.14	建设用地—林地	16.47	耕地—林地	20.87
	耕地—林地	17.68	未利用地—草地	21.29	耕地—草地	20.86	建设用地—林地	21.54
	未利用地—草地	32.75	耕地—草地	25.69	耕地—林地	30.14	未利用地—林地	26.71
	林地—水域	10.32	水域—未利用地	10.41	林地—建筑用地	10.23	林地—耕地	12.17
生境质量退化	草地—未利用地	14.58	未利用地—建筑用地	14.15	林地—耕地	18.47	林地—未利用地	15.35
	水域—耕地	16.42	林地—耕地	16.82	草地—建筑用地	20.63	草地—耕地	20.11
	林地—草地	20.31	草地—耕地	24.58	草地—耕地	23.84	未利用地—建筑用地	20.30
	草地—耕地	33.94	草地—建筑用地	25.62	草地—未利用地	24.31	林地—建筑用地	27.68

2.4 未来生境质量模拟

基于 2000、2010 年土地利用数据通过 CA-Markov 模型模拟 2020 年研究区土地利用现状,并于 2020 年真实数据进行对比,计算卡帕系数(kappa)为 0.893,表明模型模拟精度较高,符合研究要求。在此基础上,基于 2000 年与 2020 年土地利用类型转移概率矩阵,模拟 2040 年研究区土地利用状况,并结合 InVEST 模型评估其生境质量。模拟结果显示,2040 年北方农牧交错带:草地与耕地仍为主要地类,草地与耕地分别减少 18 732 km² 和 17 576 km²[见图 6(a)];水域面积变化相对稳定;建设用地面积增加 9 112 km²,未利用地面积增加 5 947 km²;林地面积显著增加,预计到 2040 年面积将增加 18 591 km²。生境质量评估结果显示,2040 年北方农牧交错带生境质量呈整体下降趋势,中低水平生境质量面积扩大 13 143.04 km²,较高水平生境质量面积增加 3 004.26 km²,高水平生境质量面积减少 16 147.30 km²[见图 6(b)]。这反映出在现有保

2000—2010 年,建设用地、耕地等转化为草地、林地有效地提高区域生境质量,而草地转为建设用地、耕地、未利用地则造成部分地区生境质量下降;2010—2020 年,未利用地、草地、耕地转为林地累计贡献度为 69.12%,未利用地、林地转化建设用地对生境质量下降具有重要影响。草地、林地、建设用地、耕地互相转换是造成北方农牧交错带生境质量变化的主要原因,未来生态环境治理应重点关注草地与林地的转化。

护措施下北方农牧交错带生境质量将呈现恶化趋势,亟需制定更加严格的生态保护措施,以应对土地利用变化带来的负面影响。

2.5 生境质量优化对策

基于前述分析,结合农牧交错带生境质量演变特征及未来趋势,提出以下优化对策。①优化土地利用结构。研究时段内,草地面积呈逐年减少趋势,且草地转化为其他地类是导致生境质量下降的主要原因。为此,应加强草地保护,进一步推动草地轮牧和退耕还林还草政策,减少草地的过度开垦和放牧压力,推动退化草地生态功能的恢复。此外,随着建设用地在过去 40 年内显著扩张,北方农牧交错带东北部及东部的生态脆弱区生境质量明显下降。因此,优化生境质量应加强建设用地合理规划,在生境质量冷点区应严格限制大规模建设,防止建设用地侵占生态空间。②完善生态修复机制。北方农牧交错带生境质量冷点区主要集中在东北部及中部,未利用地转化向林地和草地转化对提升生境质量作用明显。针对

生境退化区域,需采取退耕还林、退牧还草、盐碱地生态修复等生态修复措施。此外,应加大生态补偿力度,通过经济激励措施促进当地居民的生态保护参与。通过发展生态产业,如生态旅游、生态农业等,提高生态恢复区的经济价值。③推动生态环境监测体系建设。2040 年生境质量模拟

结果显示,未来生境质量整体呈现下降趋势,中低水平生境质量面积的扩大,表明现有的保护措施尚不足以应对未来土地利用变化导致的生境质量下降。因此,未来的生态治理需要进一步建立完善的生态监测系统,以提前识别生境质量变化的风险,及时调整管理策略。

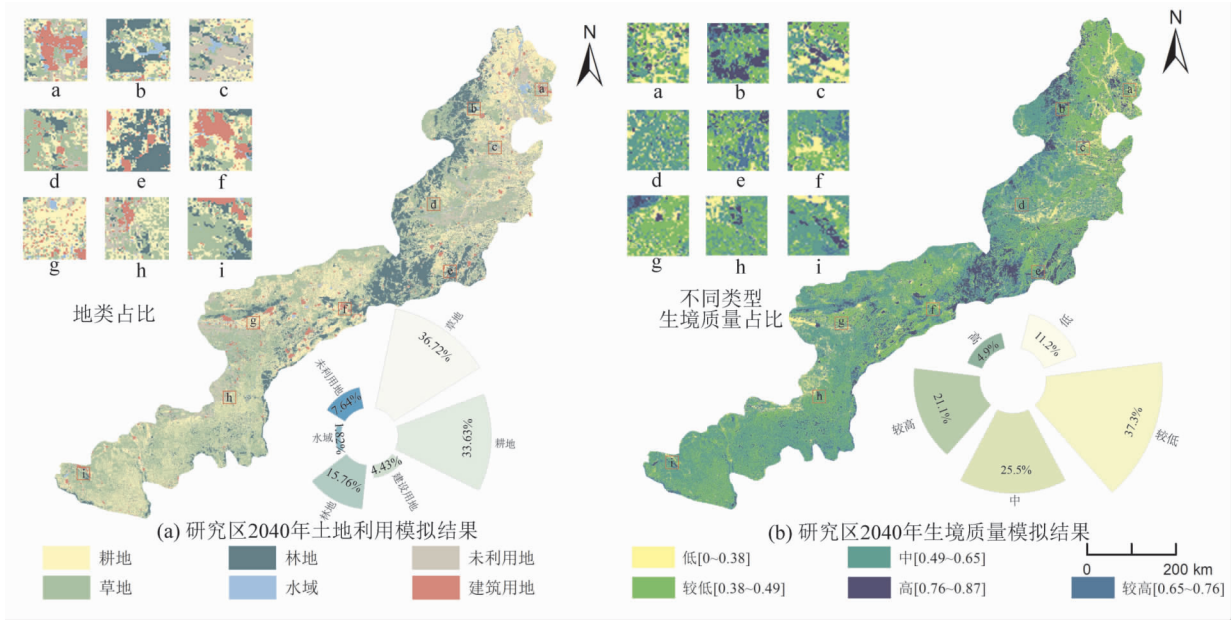


图 6 研究区 2040 年土地利用及生境质量模拟结果

Fig. 6 Simulation results of land use and habitat quality in the study area by 2040

3 结论与讨论

3.1 结论

本研究基于北方农牧交错带 1980—2020 年土地利用数据,结合 InVEST 模型与 GIS 空间分析探究了研究区生境质量的时空演变特征,量化了土地利用变化对生境质量影响。借助 CA-Markov 模型对研究区 2040 年生境质量状况进行模拟预测,进而提出优化对策。主要结论如下。

1) 1980—2020 年北方农牧交错带土地利用格局变化明显,东北部地区为土地利用变化集中区域。研究时段内,耕地与草地的相互转化是土地利用变化的主要特征,而建设用地增加的主要来源为未利用地。具体而言:草地面积占比从 1980 年的 41.28% 下降到 2020 年的 39.42%,面积减少 12 283.16 km²;耕地占比波动,但总体上呈小幅增长,面积增加 3 774.77 km²;林地面积在 1980 年至 2010 年间有所增加,从 12.15% 增至 14.21%,但至 2020 年略有回落,降至 12.92%;建设用地面积显著增加,从 1980 年的 1.90% 上

升至 2020 年的 3.04%,反映出城市化和基础设施建设对土地资源的需求;水域与未利用地变化相对稳定,分别维持在 2% 与 7% 左右。

2) 北方农牧交错带生境质量空间差异显著且存在显著的空间自相关性,生境质量热点区位于南部边界,冷点区集中于东北部与中部生态脆弱区。区域生境质量整体水平相对较低,生境退化问题较为严峻,低水平生境质量面积占比在 10% 左右呈扩张趋势,较低水平生境质量面积占主导地位,变化较小,维持在 35% 左右,中等与较高水平生境质量面积呈减少趋势,分别占比 26%、21% 左右,高水平生境质量面积略有增加,从 6.76% 上升至 7.33%。

3) 不同研究时段内,耕地向林地和未利用地的转化,以及未利用地向草地的变化,对生境质量的提升起到了关键作用。然而,草地向耕地的转化则导致了生境质量的下降。未来的生态环境治理应重点关注草地与林地之间的相互转化,优化土地利用结构。

4) CA-Markov 模型适用于研究区土地利用模拟,并具有较高模拟精度。预测结果显示,2040

年北方农牧交错带的主要的地类仍为草地和耕地,其面积分别减少 18 732 km² 和 17 576 km²,建设用地与未利用地面积呈增加趋势,水域面积变化相对稳定。2040 年研究区生境质量整体呈现下降趋势,中低水平生境质量面积进一步扩大,高水平生境质量面积则减少 16 147.30 km²,亟需通过优化土地利用结构、完善生态修复机制及推动生态环境监测体系建设提升生境质量。

3.2 讨论

生境质量反映了生态系统为生物提供适宜生存条件的能力,是衡量生态环境质量的重要指标。揭示土地利用变化对生境质量的长期影响,有助于为区域生态保护和可持续发展提供科学依据。北方农牧交错带近年来由于气候变化、过度开垦与放牧,引发土地生态功能丧失与生态退化等问题,进而严重威胁我国生态安全与农牧业可持续发展。因此,开展该区域长时序生境质量评估,了解生境质量时空演化规律可为未来土地利用规划与生态保护策略制定提供一定的参考。农牧交错带生境质量的演化,受到人类活动与自然环境变化的双重影响。耕地和建设用地的不断扩展,显著加剧了原有生境的破碎化,导致区域生境质量普遍下降。同时,气候波动和农牧业政策变化,也在不同程度上影响着生境质量的演变。草地退化成为导致区域生境质量下降的主要因素。本研究基于 1 km 分辨率的土地利用数据,对区域生境质量进行评估,并强调了优化土地利用结构与推进生态修复对提升生境质量的关键作用。然而,受限于硬件条件和数据分辨率,生境质量评估存在明显的尺度效应,研究结果一定程度上受到数据重采样过程的影响。未来研究可以着重于以下方面:①采用更高分辨率的土地利用数据,开展多尺度的生境质量评估;②揭示土地利用结构优化和生态修复措施影响生境质量的驱动机制,明确其背后的作用路径;③针对不同区域的特定需求,探索并制定符合地方自然条件、发展定位与社会经济背景的生境质量提升策略。

参考文献

[1] 阎佳妮,赵华甫,杨霞,等. 内蒙古农牧交错区耕地韧性评价及管控[J]. 水土保持通报, 2025, 45(3): 374-384.
Yan J N, Zhao H F, Yang X, et al. Evaluation on resilience of cultivated land and management in agro-

pastoral ecotone of Inner Mongolia Autonomous Region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(3): 374-384.
[2] Bai Y, Liu Y S, Yuan X F. Tracing the agro-pastoral ecotone transition in Northern China from the human-Earth system perspective[J]. Journal of Geographical Sciences, 2025, 35(4): 783-799.
[3] Zhang G L, Chen X, Zhou Y, et al. Land use/cover changes and subsequent water budget imbalance exacerbate soil aridification in the farming-pastoral ecotone of Northern China[J]. Journal of Hydrology, 2023, 624: 129939.
[4] 陈海,梁小英,李立新. 近 40 年中国北方农牧交错带气候时空分异特征[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2007, 37(4): 653-656.
Chen H, Liang X Y, Li L X. Analysis on the spatial differentiation pattern of climate in the farming-pastoral zone in North China in the recent 40 years[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2007, 37(4): 653-656.
[5] 欧阳志云,郑华. 生态系统服务的生态学机制研究进展[J]. 生态学报, 2009, 29(11): 6183-6188.
Ouyang Z Y, Zheng H. Ecological mechanisms of ecosystem services[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(11): 6183-6188.
[6] 黄越,程静,王鹏. 中国北方农牧交错区生态脆弱性时空演变格局与驱动因素:以盐池县为例[J]. 干旱区地理, 2021, 44(4): 1175-1185.
Huang Y, Cheng J, Wang P. Spatiotemporal evolution pattern and driving factors of ecological vulnerability in agro-pastoral region in Northern China: A case of Yanchi County in Ningxia [J]. Arid Land Geography, 2021, 44(4): 1175-1185.
[7] 桑旭,王晓霞,杨晋,等. 典型石漠化治理区域土地利用格局与生境质量的时空演变特征及响应关系[J]. 中南林业科技大学学报, 2026, 46(1): 134-146.
Sang X, Wang X X, Yang J, et al. Spatio-temporal evolution and response relationship between land use pattern and habitat quality in typical rocky desertification control area[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2026, 46(1): 134-146.
[8] 郑云有,刘艳婷,姚鹏,等. 湖南省重点生态功能区生境质量时空变化及其预测[J]. 水土保持通报, 2022, 42(4): 347-356.
Zheng Y Y, Liu Y T, Yao P, et al. Spatial and temporal changes and prediction of habitat quality in key ecological function area of Hunan Province[J]. Bulle-

- tin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(4): 347-356.
- [9] Liu Y S. Introduction to land use and rural sustainability in China[J]. Land Use Policy, 2018, 74: 1-4.
- [10] Qin X H, Yang Q K, Wang L. The evolution of habitat quality and its response to land use change in the coastal China, 1985—2020[J]. Science of The Total Environment, 2024, 952: 175930.
- [11] Yang K, Cui D G, Wang C R, et al. Intelligent assessment of habitat quality based on multiple machine learning fusion methods[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2025, 162: 112395.
- [12] 孙方飞, 葛小三, 金满库. 基于 CA-Markov 和 InVEST 模型的昆明市土地利用与生境质量时空变化及预测[J]. 地域研究与开发, 2024, 43(3): 159-165.
- Sun F F, Ge X S, Jin M K. Temporal and spatial variation and prediction of land use and habitat quality based on CA-Markov and InVEST models in Kunming City[J]. Areal Research and Development, 2024, 43(3): 159-165.
- [13] Munkhtur P, Oostdijk M, Cook D. Habitat degradation and quality assessment of Khyargas Lake, Western Mongolia and adjacent terrestrial and freshwater areas[J]. Journal of Environmental Management, 2025, 394: 127325.
- [14] 吴聘奇, 沈越, 余茵茵, 等. 闽江流域生境质量演变驱动机制及多情景模拟优化[J]. 环境科学, 2025, 46(11): 7156-7171.
- Wu P Q, Shen Y, She Y Y, et al. Driving mechanisms of habitat quality evolution and multi-scenario simulation optimization of habitat quality in Minjiang River Basin[J]. Environmental Science, 2025, 46(11): 7156-7171.
- [15] 张歌, 叶长盛. 不同生境破碎化过程对环鄱阳湖城市群生态系统服务影响[J]. 水土保持研究, 2025, 32(5): 329-340.
- Zhang G, Ye C S. Effects of different habitat fragmentation processes on ecosystem services in Poyang Lake urban agglomeration[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(5): 329-340.
- [16] 王成, 王彬, 董斌, 等. 沿海围垦开发强度对水鸟种群和生境适宜性的影响: 以盐城湿地为例[J]. 地理研究, 2025, 44(10): 2664-2684.
- Wang C, Wang B, Dong B, et al. Impacts of coastal reclamation and development intensity on waterbird population and habitat suitability: A case study for Yancheng wetlands[J]. Geographical Research, 2025, 44(10): 2664-2684.
- [17] 杨建强, 朱永贵, 宋文鹏, 等. 基于生境质量和生态响应的莱州湾生态环境质量评价[J]. 生态学报, 2014, 34(1): 105-114.
- Yang J Q, Zhu Y G, Song W P, et al. The eco-environmental evaluation based on habitat quality and ecological response of Laizhou Bay[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(1): 105-114.
- [18] Brambilla M, Ilahiane L, Assandri G, et al. Combining habitat requirements of endemic bird species and other ecosystem services may synergistically enhance conservation efforts[J]. Science of The Total Environment, 2017, 586: 206-214.
- [19] Courtney Jones S K, O'Loughlin L S, Starrs D, et al. Quantifying taxon-specific habitat connectivity requirements of urban wildlife using structured expert judgement[J]. Biological Conservation, 2025, 305: 110991.
- [20] Mohamed N, Mremi R, Jiang C, et al. Spatial and temporal variations in habitat quality across the distribution range of the critically endangered East African Chelonian, pancake tortoise (Malacochersus tornieri)[J]. Global Ecology and Conservation, 2025, 62: e03773.
- [21] 李嘉宁, 姚磊, 刘凌宙, 等. 基于 SolVES 模型的长株潭城市群绿心地区生态系统服务社会价值评估[J]. 生态与农村环境学报, 2025, 41(8): 987-1001.
- Li J N, Yao L, Liu L Z, et al. Evaluating the social value of ecosystem services for the green heart area of the Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration using the SolVES mode[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2025, 41(8): 987-1001.
- [22] Shanthala Devi B S, Murthy M S R, Bijan D, et al. Identification of potential habitat patches for connectivity using Weighted Linear Combination (WLC) and Integral Index of Connectivity (IIC) at East Godavari District, Andhra Pradesh, India[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2016, 44(3): 385-394.
- [23] 曾欣怡, 宋钰红. 基于关键物种与生境质量评估的昆明市中心城区绿色空间生物多样性分布格局研究[J]. 中国园林, 2023, 39(9): 126-132.
- Zeng X Y, Song Y H. Study on the biodiversity distribution pattern of the green space in the central city of Kunming based on the key species and habitat quality assessment[J]. Chinese Landscape Architecture,

- 2023, 39(9): 126-132.
- [24] 李胜鹏, 柳建玲, 林津, 等. 基于 1980—2018 年土地利用变化的福建省生境质量时空演变[J]. 应用生态学报, 2020, 31(12): 4080-4090.
- Li S P, Liu J L, Lin J, et al. Spatial and temporal evolution of habitat quality in Fujian Province, China based on the land use change from 1980 to 2018[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(12): 4080-4090.
- [25] Tian C, Zhong J, You Q H, et al. Land use modeling and habitat quality assessment under climate scenarios: A case study of the Poyang Lake basin[J]. Ecological Indicators, 2025, 172: 113292.
- [26] 魏文飞, 包玉, 王志泰, 等. 喀斯特多山城市生境质量对土地利用变化的时空响应: 以贵阳市为例[J]. 生态学报, 2023, 43(10): 3920-3935.
- Wei W F, Bao Y, Wang Z T, et al. Spatio-temporal responses of urban environment quality to land use change in mountainous cities of karst areas[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(10): 3920-3935.
- [27] 高庆彦, 潘玉君, 吴仕海, 等. 珠江源区多情景土地利用模拟与生境质量评估[J]. 浙江农林大学学报, 2025, 42(4): 825-834.
- Gao Q Y, Pan Y J, Wu S H, et al. Multi-scenarios simulation of land use and habitat quality change in the source area of Pearl River[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2025, 42(4): 825-834.
- [28] Lai J L, Qi S, Chen J D, et al. Changes in habitat quality and their driving forces in the coastal zone of Hainan Island: Insights from 20 years of research and future projections[J]. Ecological Frontiers, 2025, 45(3): 621-633.
- [29] 周熙, 马智民, 尹芳, 等. 基于 CA-Markov 模型的“丝绸之路经济带”沿线地区土地利用变化分析与预测: 以西北五省为例[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2018, 48(2): 291-298.
- Zhou X, Ma Z M, Yin F, et al. Analysis and prediction about land use change in area along the Silk Road Economic Belt based on CA-Markov model: A case study of five provinces in Northwest China[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2018, 48(2): 291-298.
- [30] 李旭亮, 杨礼箫, 田伟, 等. 中国北方农牧交错带土地利用/覆盖变化研究综述[J]. 应用生态学报, 2018, 29(10): 3487-3495.
- Li X L, Yang L X, Tian W, et al. Land use and land cover change in agro-pastoral ecotone in Northern China: A review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(10): 3487-3495.
- [31] 孙丕苓, 曲琳, 刘庆果, 等. 中国北方农牧交错带生态退耕时空分异及驱动因素[J]. 资源科学, 2022, 44(5): 943-954.
- Sun P L, Qu L, Liu Q G, et al. Spatiotemporal differentiation characteristics and driving factors of ecological restoration in the agro-pastoral ecotone of Northern China[J]. Resources Science, 2022, 44(5): 943-954.
- [32] 薛晓玉, 段含明, 魏宝成, 等. 中国北方农牧交错带 NDVI 时空变化及影响因素分析[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2020, 56(4): 435-443.
- Xue X Y, Duan H M, Wei B H, et al. Temporal and spatial variation in vegetation NDVI and its relationship with climatic factors in the agricultural pastoral ecotone of Northern China[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2020, 56(4): 435-443.
- [33] 高惠君, 刘金铜. 灌溉因素订正的北方农牧交错带界定[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(4): 613-624.
- Gao H J, Liu J T. Definition of agro-pastoral ecotone in North China based on irrigation corrections[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(4): 613-624.
- [34] 史文娇, 刘奕婷, 石晓丽. 四个历史时期中国北方农牧交错带界线数据集(1970—2010)[J]. 全球变化数据学报(中英文), 2018, 2(4): 419-425.
- Shi W J, Liu Y T, Shi X L. Dataset of farming-pastoral ecotone boundaries in Northern China during four decades (1970s, 1980s, 1990s and 2000s)[J]. Journal of Global Change Data & Discovery, 2018, 2(4): 419-425.
- [35] 李佳仪, 马小花, 乔丽娜, 等. 中国北方农牧交错区生态系统服务价值时空变化特征及驱动力分析[J]. 草地学报, 2024, 32(7): 2263-2272.
- Li J Y, Ma X H, Qiao L N, et al. Analysis of the spatiotemporal variation characteristics and driving forces of ecosystem service value in the agro-pastoral ecotone of Northern China[J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(7): 2263-2272.
- [36] Huang Z X, Li S, Peng J J, et al. Assessing ecosystem service dynamics and drivers for sustainable management in the Agro-pastoral ecotone of Northern China: A spatiotemporal analysis[J]. Ecological Indicators, 2024, 165: 112213.
- [37] 孙景妍, 罗佳琪, 杜国红, 等. 北方农牧交错区碳排放时空演变及减排路径[J]. 环境科学, 2025, 46(1): 41-52.

- Sun J Y, Luo J Q, Du G H, et al. Spatio-temporal evolution of carbon emissions and emission reduction paths in the Northern farming-pastoral ecotone[J]. *Environmental Science*, 2025, 46(1): 41-52.
- [38] 石智宇, 蒲万平, 董霁红. 中国北方农牧交错带土地利用变化及其对生态系统服务价值的影响[J]. *环境科学*, 2025, 46(4): 2373-2384.
- Shi Z Y, Pu W P, Dong J H. Spatiotemporal changes of land use and their impacts on ecosystem service value in the agro-pastoral ecotone of Northern China[J]. *Environmental Science*, 2025, 46(4): 2373-2384.
- [39] 邹亚锋, 罗锋, 饶钰飞, 等. 要素配置与流动视角下农牧交错带农村居民点空间布局优化[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(11): 245-255.
- Zou Y F, Luo F, Rao Y F, et al. Optimizing the spatial layout of rural settlements in Farming-pastoral Zone under factor endowment and mobility[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(11): 245-255.
- [40] 张建国, 李晶晶, 殷宝库, 等. 基于转移矩阵的准格尔旗土地利用变化分析[J]. *水土保持通报*, 2018, 38(1): 131-134.
- Zhang J G, Li J J, Yin B K, et al. Evaluation of land use change of Jungar Banner based on land use transfer matrix[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38(1): 131-134.
- [41] Zhang X R, Song W, Lang Y Q, et al. Land use changes in the coastal zone of China's Hebei Province and the corresponding impacts on habitat quality[J]. *Land Use Policy*, 2020, 99: 104957.
- [42] 李亚楠, 多玲花, 张明. 基于CA-Markov和InVEST模型的土地利用格局与生境质量时空演变及预测: 以江西省南昌市为例[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(2): 345-354.
- Li Y N, Duo L H, Zhang M. Evolution and prediction of land use pattern and habitat quality based on CA-Markov and InVEST model: A case study of Nanchang City in Jiangxi Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(2): 345-354.
- [43] 赵武生, 石培基. 基于InVEST模型的复合生态系统耦合协调关系研究: 以兰西城市群为例[J]. *中国环境科学*, 2023, 43(4): 1883-1894.
- Zhao W H, Shi P J. The coupling and coordination of complex ecosystem based on the InVEST model- A case study in the Lanzhou-Xining urban agglomeration [J]. *China Environmental Science*, 2023, 43(4): 1883-1894.
- [44] 齐松, 董春, 卫东, 等. 基于InVEST模型黄河干流沿岸生境质量时空变化研究[J]. *测绘科学*, 2022, 47(8): 114-122.
- Qi S, Dong C, Wei D, et al. Temporal and spatial variation of habitat quality along the main stream of the Yellow River based on InVEST model[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2022, 47(8): 114-122.
- [45] 傅春, 李帆, 刘业忠, 等. 基于InVEST与CA-Markov模型的鄱阳湖流域水源涵养模拟预测分析[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2024, 57(11): 1513-1521.
- Fu C, Li F, Liu Y Z, et al. Simulation and prediction analysis of water conservation in Poyang Lake Basin based on InVEST and CA-Markov models[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2024, 57(11): 1513-1521.
- [46] 王建鹏, 彭叶林, 郑亮, 等. 长江黄河流域生态系统服务时空特征及驱动因素[J]. *水土保持研究*, 2025, 32(5): 341-351.
- Wang J P, Peng Y L, Zheng L, et al. Spatiotemporal characteristics and driving factors of ecosystem services in Yangtze River and Yellow River Basins[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(5): 341-351.
- [47] 杨清可, 段学军, 王磊, 等. 基于“三生空间”的土地利用转型与生态环境效应: 以长江三角洲核心区为例[J]. *地理科学*, 2018, 38(1): 97-106.
- Yang Q K, Duan X J, Wang L, et al. Land use transformation based on ecological-production-living spaces and associated eco-environment effects: A case study in the Yangtze River Delta[J]. *Geographical Science*, 2018, 38(1): 97-106.
- [48] 马益婷, 石云, 李聪, 等. 基于InVEST与CA-Markov模型的宁东能源化工基地碳储量估测及经济价值估算[J]. *环境科学*, 2025, 46(7): 4416-4427.
- Ma Y T, Shi Y, Li C, et al. Estimation of carbon storage and economic value of Ningdong Energy and Chemical Base based on InVEST and CA-Markov Model [J]. *Environmental Science*, 2025, 46(7): 4416-4427.

(编辑 邵煜)