

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.02.009

CSTR:32310.14.stbxb.2025.02.009

吕宏宇,周敏.东北农牧交错带生态盈亏对土地利用变化的响应[J].水土保持学报,2025,39(2):155-166.

LÜ Hongyu, ZHOU Min. Response of ecological profit and loss to land use change in the agro-pastoral ecotone in northeast China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(2): 155-166.

东北农牧交错带生态盈亏对土地利用变化的响应

吕宏宇, 周 敏

(辽宁大学公共管理学院, 沈阳 110136)

摘 要: [目的] 探讨多情景模拟下朝阳市土地利用变化对生态盈亏嬗变的影响, 以为东北农牧交错带的国土空间规划和生态环境保护提供参考依据。[方法] 以朝阳市2000年、2010年和2020年3期土地利用数据为基础, 利用Markov-PLUS模型和生态足迹模型, 分析并预测2000—2030年4种情景下朝阳市土地利用结构和生态盈亏的演化特征, 并在此基础上借助生态弹性模型探究生态盈亏对土地利用变化的响应。[结果] 1) 2000—2020年朝阳市土地利用变化较为剧烈, 耕地和草地是朝阳市最主要的土地利用类型, 二者占土地总面积的80%以上。2) 2000—2020年朝阳市由生态赤字转为生态盈余, 总体增量为 $273.07 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 且在空间上呈现西高东低的分布格局。草地、林地和水域生态承载力的快速增长是朝阳市生态盈余增长的主要原因。3) 2020—2030年4种情景下, 朝阳市生态盈余显著增加, 表现为生态优先情景($99.66 \times 10^4 \text{ hm}^2$) > 耕地保护情景($98.93 \times 10^4 \text{ hm}^2$) > 自然发展情景($98.02 \times 10^4 \text{ hm}^2$) > 城镇发展情景($97.87 \times 10^4 \text{ hm}^2$)。生态盈余高值区自西向东迁移扩张, 低值区集中分布在城镇中心。4) 朝阳市生态盈亏对土地利用变化富有弹性, 且生态弹性系数呈增长态势。[结论] 土地利用变化显著影响生态盈亏, 优化土地利用结构, 可有效改善地区生态环境。

关键词: 土地利用变化; 生态盈亏; 农牧交错带; 多情景预测; 朝阳市

中图分类号: F323.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)02-0155-12

Response of Ecological Profit and Loss to Land Use Change in the Agro-pastoral Ecotone in Northeast China

LÜ Hongyu, ZHOU Min

(School of Public Management, Liaoning University, Shenyang 110136, China)

Abstract: [Objective] The impact of land use change on the evolution of ecological profit and loss under multi-scenario simulation in Chaoyang was explored to provide a reference for the land space planning and ecological environment protection of the agro-pastoral ecotone in Northeast China. [Methods] Based on the land use data of Chaoyang in 2000, 2010 and 2020, the Markov-PLUS model and ecological footprint model were used to analyze and predict the evolution characteristics of land use structure and ecological profit and loss of Chaoyang under four scenarios from 2000 to 2030. On this basis, the response of ecological profit and loss to land use change were explored by using the ecological elasticity model. [Results] 1) The land use change in Chaoyang from 2000 to 2020 was quite drastic. Cultivated land and grassland were the main types of land use, accounting for more than 80% of the total land area. 2) From 2000 to 2020, Chaoyang showed a change from ecological deficit to ecological surplus, with an overall increment of $273.07 \times 10^4 \text{ hm}^2$, showing a spatial distribution pattern of high in the west and low in the east. The rapid increase of ecological carrying capacity of grassland, woodland and water area was the main reason for the increase of ecological surplus in Chaoyang. 3) Under four scenarios from 2020 to 2030, the ecological surplus of Chaoyang increased significantly, with ecological priority scenario ($99.66 \times 10^4 \text{ hm}^2$) >

收稿日期: 2024-08-23

修回日期: 2024-10-23

录用日期: 2024-11-04

网络首发日期(www.cnki.net): 2024-12-16

资助项目: 国家自然科学基金青年项目(42401343)

第一作者: 吕宏宇(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事土地利用与管理研究。E-mail: lnulhy@163.com

通信作者: 周敏(1988—), 女, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事土地利用与城乡发展研究。E-mail: hustzm@163.com

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

cultivated land protection scenario($98.93 \times 10^4 \text{ hm}^2$) > natural development scenario($98.02 \times 10^4 \text{ hm}^2$) > urban development scenario($97.87 \times 10^4 \text{ hm}^2$). The high-value area of ecological surplus migrated and expanded from west to east, while the low value-area concentrated in the urban center. 4) The ecological profit and loss of Chaoyang was elastic to land use change, and the ecological elasticity coefficient showed an increasing trend. [Conclusion] Land use change significantly affects ecological profit and loss. Optimizing land use structure can effectively improve regional ecological environment.

Keywords: land use change; ecological profit and loss; agro-pastoral ecotone; multi-scenario prediction; Chaoyang

Received: 2024-08-23

Revised: 2024-10-23

Accepted: 2024-11-04

Online(www.cnki.net): 2024-12-16

土地是人类空间行为活动的物质载体,土地利用/覆被变化(Land use /land cover change, LUCC)与气候和环境变化、生态演化及人地关系的可持续等密切相关。伴随城镇化的快速推进、人类活动强度的加速提高及自然资源刚性需求的急剧增长,资源约束趋紧、生态系统功能退化和生态服务供给不足等生态环境问题日益凸显^[1]。已有研究^[2]表明,中国的生态需求是生态供给的 1.39 倍。LUCC 是人类活动最直观的反应,科学认识生态盈亏对 LUCC 的响应,对优化土地利用结构和破解人地关系矛盾具有积极意义。

生态盈亏是表征生态环境供需平衡的重要指标,学界多以生态足迹和生态承载力之差或二者比值来衡量。生态足迹于 1992 年由加拿大生态经济学家 REES^[3]率先提出,并由 WACKERNAGEL 等^[4]进一步拓展延伸。生态足迹是指生产一定人口消耗的各种资源和吸纳所产生废物的生物生产性土地面积的总和^[5]。生态足迹量化了人类对资源环境的压力与占用,且生态足迹具有全球可比性、计算相对简便、更具客观性及对自然资源利用情况解释力更强等优点,广泛应用于区域生态环境评价。已有研究多采用净初级生产力^[6]、投入产出分析法^[7]、能值分析法^[8]和三维生态足迹^[9]等改进模型,核算国别^[10]、省域^[11]、市域^[12]、流域^[13]、城市群^[14]等多研究尺度下耕地^[15]、水资源^[16]和能源^[17]等生态足迹。例如,柳宏斌等^[18]基于改进生态足迹账户评估北疆的生态可持续性;官冬杰等^[19]采用“省公顷”生态足迹模型测算长江流域的动态生态补偿;郭慧等^[20]从生态系统服务价值视角进一步丰富生态足迹模型。在此基础上,学界借助地理探测器^[16]、GTWR 模型^[21]等方法分析生态足迹的驱动因素发现,地区经济发展^[22]和人口规模^[23]等经济社会因素与生态足迹存在显著关联。综上可知,关

于生态盈亏的研究已取得丰硕成果,但研究尺度多停留在全国、流域或省域等宏观层面,且研究区以生态保护区或经济发达地区为主,对农牧交错带及带内城市和县域等微观尺度的研究着墨较少,更鲜有文献关注土地利用变化引致的生态盈亏嬗变。

农牧交错带,也被称为半农半牧区或生态脆弱带,由于受到独特的经济社会发展路径和生态环境特征等因素的影响,其生态环境系统易受扰动且不易恢复。加之耕地过度开垦和城镇快速扩张等人类活动的作用,区域土地利用结构发生剧烈变化,进而引发农牧结构失衡、水土流失、风沙侵蚀等系列生态环境问题。鉴于此,本研究以东北农牧交错带朝阳市为例,基于 2000 年、2010 年和 2020 年 3 期土地利用数据,利用 Markov-PLUS 模型和生态足迹模型分析并预测 2030 年不同情境下朝阳市土地利用变化和生态盈亏时空分异特征,并借助生态弹性模型探究生态盈亏对土地利用变化的响应,以期朝阳市国土空间规划和生态环境保护提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

朝阳市($40^{\circ} \sim 42^{\circ} \text{N}$, $118^{\circ} \sim 121^{\circ} \text{E}$)位于辽宁省西北部,地处北方传统农业和畜牧业过渡地带(图 1),区域内松岭山、努鲁儿虎山两大山脉呈东北-西南走向,其间夹有冲积平原和山间盆地地貌。朝阳市地处半干旱区,气候属北温带大陆性季风气候,自然环境复杂,矿产资源丰富。由于城镇建设用地扩张、矿产资源持续开采等人类活动强度的加剧,区域内水土流失、风沙侵蚀等生态环境问题日益凸显。随着“碧水行动”“蓝天工程”“沃土行动”等工程实施,朝阳市土地利用变化显著且生态环境逐渐改善。

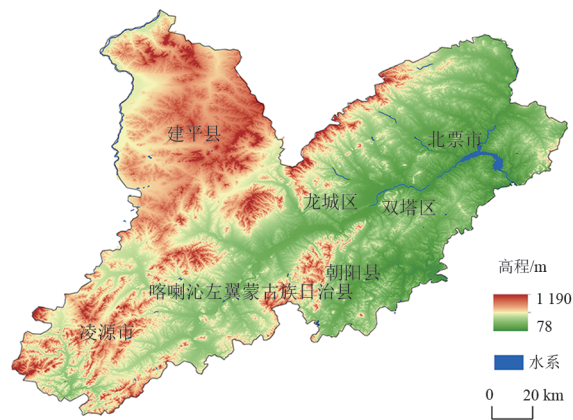


图 1 研究区位置
Fig. 1 Location of the study area

1.2 数据来源与预处理

本文所使用的 3 期土地利用遥感影像(2000 年、2010 年和 2020 年)源于全球土地覆盖数据(<https://data.casearth.cn/>),空间分辨率为 30 m。结合研究实际,将土地利用类型划分为 7 类:耕地、林地、草地、湿地、水域、建设用地和未利用地。土地利用的驱动因素包含气候环境因素、社会经济因素和可达性因素(表 1),由欧式距离测算得到各类距离,坡度和地表起伏度以高程为基底计算而得。粮食作物播种面积及其产量源于朝阳市统计局和国家统计局朝阳调查队,粮食生产净利润与价格源于《全国农产品成本收益资料汇编(2000—2021)》^[24]。

表 1 数据来源
Table 1 Data source

数据类型	数据名称	数据来源	分辨率/m
气候与环境因素	高程	NASA 地球科学数据网站(https://nasadaacs.eos.nasa.gov/)	12.5
	坡度		12.5
	地表起伏度		12.5
	气温	资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn)	1 000
	降水		1 000
	土壤类型		1 000
	土壤侵蚀强度		1 000
	归一化植被指数	国家生态科学数据中心(https://www.nesdc.org.cn)	30
社会经济因素	人口密度	资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn)	1 000
	GDP		1 000
可达性因素	到道路距离 (一级路、二级路、三级路)	全国基础地理数据库(http://www.webmap.cn)	30
	到高速公路距离		30
	到铁路距离		30
	到政府机构距离		30
	到国道距离		30
	到水体距离		30

1.3 研究方法

1.3.1 土地利用动态度 土地利用动态度反映土地利用变化的速率与剧烈程度,计算公式为:

$$K_i = \left(\frac{U_{ib} - U_{ia}}{U_{ia}} \right) \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

$$LC = \left(\frac{\sum_{i=1}^n \Delta LU_{i-j}}{2 \sum_{i=1}^n \Delta LU_i} \right) \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (2)$$

式中: K_i 为土地利用类型*i*的动态度指数,%; U_{ia} 、 U_{ib} 分别为研究初期和末期的土地利用类型*i*的面积, hm^2 。LC为土地利用综合动态度,%; ΔLU_i 为研究初期土地利用类型*i*的面积, hm^2 ; ΔLU_{i-j} 为研究期内土地利用类型*i*转化为类型*j*的面积, hm^2 ; n 为土地利

用类型的个数; T 为研究时段。

1.3.2 土地利用转移矩阵 土地利用转移矩阵用以观测区域内某一时点的土地利用空间构成和不同土地类型的转换情况,计算方法为:

$$Q_{ij} = \begin{Bmatrix} Q_{11} & \cdots & Q_{1n} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ Q_{n1} & \cdots & Q_{nn} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

式中: Q 为土地面积, hm^2 ; n 为土地利用类型的个数; i 、 j 分别为研究初期和末期的土地利用类型。

1.3.3 生态盈亏模型 运用生态足迹模型测算生态盈亏,用以衡量区域的可持续发展情况,模型设定为:

$$EF = N \times ef = N \times \sum_{i=1}^n (a_i \times r_i) \quad (4)$$

$$ECC = N \times \sum_{i=1}^n ecc_i = N \times \sum_{i=1}^n (a_i \times r_i \times y_i) \quad (5)$$

$$ED = ECC - EF \quad (6)$$

式中:EF 为生态足迹, hm^2 ; N 为区域总人口, 人; ef 为人均生态足迹, $(\text{g} \cdot \text{hm}^2)/\text{人}$; a_i 为人均占有 i 类生物生产性土地面积, hm^2 ; r_i 为均衡因子。ECC 为生态承载力, hm^2 ; ecc_i 为人均生态承载力, $(\text{g} \cdot \text{hm}^2)/\text{人}$; y_i 为产量因子。ED 为生态盈亏, 若 $ED \geq 0$, 则为生态盈余, 反之为生态赤字。

由于生物生产性土地兼具属性和地域差异, 需要利用均衡因子和产量因子将不同类型和地区的生物生产性土地面积转换为可比的标准面积。考虑到研究尺度和异质性等因素, 借鉴相关研究^[20], 引入基于生态系统服务价值的核算方法来测算更加精确的产量因子和均衡因子, 公式为:

$$r_j = \frac{P_j}{\overline{P}_{NP}} = \frac{D_t \times F_j}{\sum (D_t \times F_j \times S_j)} \quad (7)$$

$$y_j = \frac{P_j}{E_j} = \frac{D_t \times F_j}{\overline{D}_t \times \overline{F}_j} \quad (8)$$

$$D_t = S_r \times R_r + S_w \times R_w + S_c \times R_c \quad (9)$$

表 2 朝阳市生态系统单项服务功能价值系数

Table 2 Value coefficients of single service functions of the ecosystems in Chaoyang

生态系统服务类型		单位面积生态系统价值服务当量					
一级分类	二级分类	耕地	林地	草地	湿地	水域	未利用地
供给服务	粮食生产	0.853	0.249	0.240	0.510	0.720	0.005
	原料生产	0.398	0.577	0.350	0.500	0.207	0.015
	水资源供给	0.007	0.299	0.195	2.590	7.677	0.010
调节服务	气体调节	0.672	1.895	1.240	1.900	0.711	0.065
	气候调节	0.361	5.664	3.275	3.600	2.115	0.050
	净化环境	0.100	1.657	1.080	3.600	5.011	0.205
	水文调节	0.282	3.655	2.400	24.230	92.729	0.120
支持服务	土壤保持	1.025	2.304	1.510	2.310	0.837	0.075
	维持养分循环	0.120	0.177	0.115	0.180	0.063	0.005
	生物多样性	0.130	2.099	1.370	8.121	2.396	0.070
文化服务	美学景观	0.060	0.919	0.605	4.730	1.710	0.030

1.3.4 Markov—PLUS 模型及多情景设定 Markov—PLUS 耦合模型兼具较强的数据预测和空间模拟能力, 可获得与实际景观相似的高精度仿真图像, 科学预测长期的土地利用变化。

1) 驱动因子选取

土地利用变化是自然-经济-社会等多重因素叠加驱动的结果, 该研究从自然地理、区位条件、经济社会发展层面共选取 18 项驱动因子(图 2)。

2) 模拟精度验证

该研究利用 2000—2010 年土地利用遥感影像和 18 项驱动因子数据, 基于 Markov-Chain-CARS 模型模拟 2020 年土地利用变化, 并以该年的模拟结果验证

式中: r_j 为均衡因子; P_j 为第 j 类生态系统单位面积的生态系统服务价值量, 元/ $(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$; $\overline{P}_{NP}$ 为全部用地类型单位面积的平均生态系统服务价值, 元; D_t 为第 t 年 1 个标准当量因子的生态系统服务价值, 元/ hm^2 ; F_j 为研究范围内第 j 类生态系统服务价值当量因子之和; S_j 为第 j 类生态系统面积, hm^2 ; y_j 为产量因子; $\overline{E}_j$ 为第 j 类土地的全局平均单位面积生态系统服务价值, 元; $\overline{D}_t$ 为全国第 t 年 1 个标准当量因子的生态系统服务价值, 元/ hm^2 。根据研究区实际种植情况和数据可得性, S_r 、 S_w 、 S_c 分别为研究区 t 年稻谷、玉米、大豆的播种面积与 3 种粮食播种总面积之比, %; R_r 、 R_w 、 R_c 分别为研究区 t 年稻谷、玉米、大豆的单位面积平均净利润, 元/ hm^2 。生态系统服务价值参照谢高地等^[24]的当量因子法, 生态服务功能受地理位置、自然环境和生物多样性等因素的影响, 因此, 结合研究区的土地利用重分类情况和 MODIS C6 植被净初级生产潜力数据^[25]修正标准当量系数(表 2)。建设用地的均衡因子和产量因子与耕地的保持一致^[6], 2030 年的预测人口由 Leslie 模型测算得到^[26]。

模型训练的准确性。结果表明, Kappa 系数为 0.829 5, 总体精度为 89.36%, Fom 系数为 0.438 3, 说明模拟精度较高, 结果可信, 该模型可用于土地利用变化预测。

3) 多情景设置

为满足不同发展需求, 基于朝阳市土地资源禀赋与经济社会发展特征, 结合《朝阳市国民经济和社会发展规划第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》《辽宁省国土空间总体规划(2021—2035 年)》《朝阳市国土空间总体规划(2021—2035 年)》^[27]及严守耕地红线、加强水土涵养和生态环境保护等政策内容, 设置 4 种情景, 参考已有文献^[28]并结合研究实际设置情景参数(表 3、表 4)。

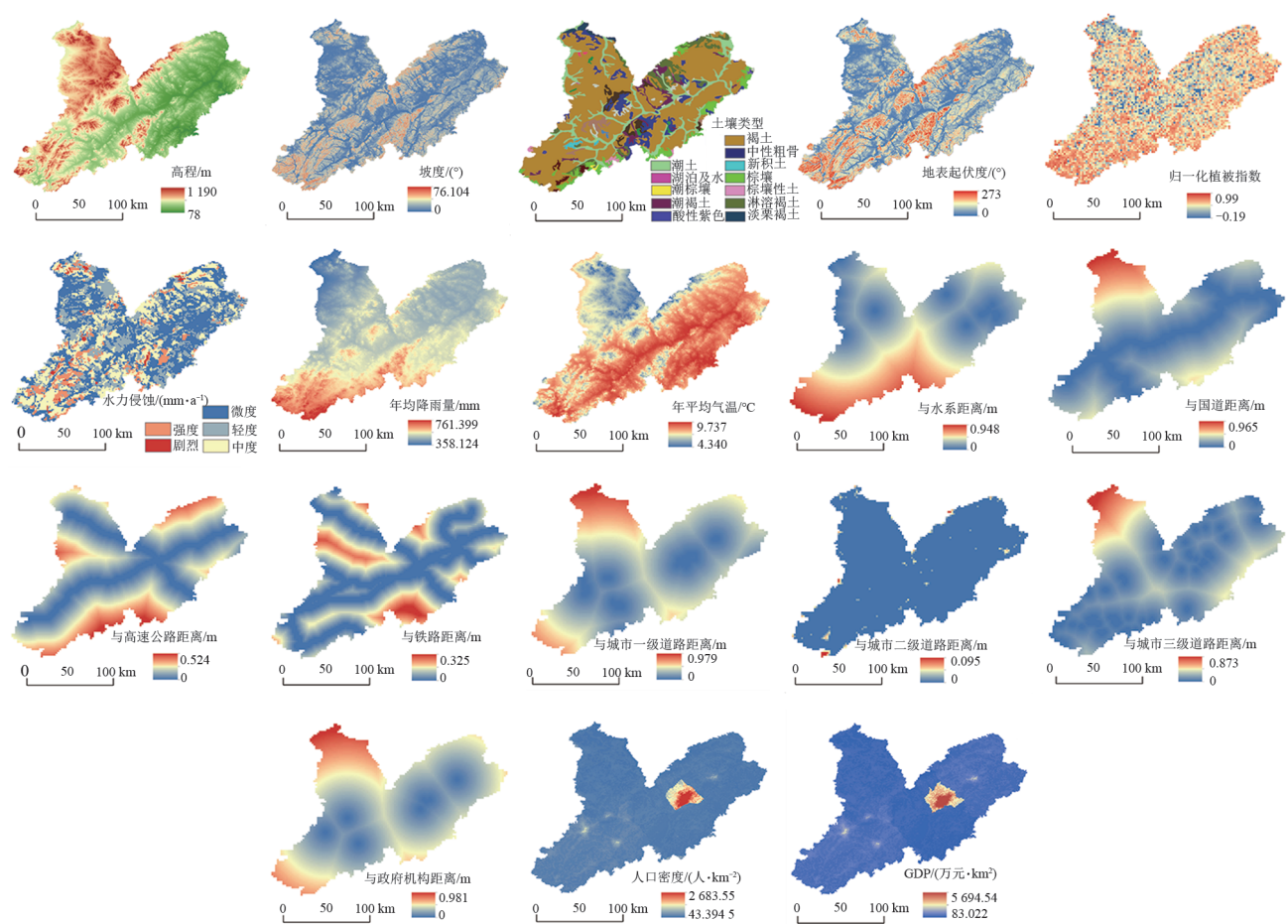


图 2 朝阳市土地利用变化的驱动因子

Fig. 2 Driving factors of land use change in Chaoyang

表 3 多情景模拟土地转移矩阵

Table 3 Land transfer matrix of multi-scenario simulation

情景	土地利用类型	耕地	林地	草地	湿地	水域	建设用地	未利用地	情景	土地利用类型	耕地	林地	草地	湿地	水域	建设用地	未利用地
自然发展	耕地	1	1	1	1	1	1	1	耕地保护	耕地	1	1	1	1	1	1	1
	林地	1	1	1	1	1	1	1		林地	1	1	1	1	1	1	1
	草地	1	1	1	1	1	1	1		草地	1	1	1	1	1	1	1
	湿地	1	1	1	1	1	1	1		湿地	0	0	0	1	1	0	0
	水域	1	1	1	1	1	1	1		水域	0	0	0	1	1	0	0
	建设用地	1	1	1	1	1	1	1		建设用地	0	0	0	0	0	1	0
	未利用地	1	1	1	1	1	1	1		未利用地	1	1	1	1	1	1	1
城镇发展	耕地	1	1	1	1	1	1	1	生态保护	耕地	1	1	1	1	1	1	1
	林地	1	1	1	1	1	1	1		林地	1	1	1	1	1	1	1
	草地	1	1	1	1	1	1	1		草地	1	1	1	1	1	1	1
	湿地	1	1	1	1	1	1	1		湿地	0	0	0	1	0	0	0
	水域	0	0	0	0	1	0	0		水域	0	0	0	0	1	0	0
	建设用地	0	0	0	0	0	1	0		建设用地	1	1	1	1	1	1	1
	未利用地	1	1	1	1	1	1	1		未利用地	1	1	1	1	1	1	1

自然发展情景(ND):假定 2020—2030 年研究区的土地利用变化趋势与 2010—2020 年保持一致,用地需求、转移矩阵和领域权重等参数设置与 2010—2020 年相同。

耕地保护情景(CP):耕地和水域被设定为限制转换区,同时将耕地向其余用地类型的转移概率降低 40%,未利用地向耕地的转移概率增加 30%。

表 4 多情景模拟各地类领域权重

Table 4 Weights of various land use categories in multi-scenario simulation

情景设置	耕地	林地	草地	湿地	水域	建设用地	未利用地
自然发展	0.297 4	0.109 5	0.387 6	0.012 4	0.018 8	0.173 2	0.001 1
耕地保护	0.348 0	0.109 5	0.367 6	0.012 4	0.018 8	0.143 2	0.000 5
城镇发展	0.297 4	0.100 5	0.367 6	0.012 4	0.018 8	0.203 2	0.000 5
生态优先	0.287 4	0.119 5	0.397 6	0.072 4	0.019 5	0.103 2	0.000 5

城镇发展情景(UD):考虑基础设施建设和城镇化发展的用地需求,结合《辽宁省国土空间总体规划(2021—2035年)》^[27]关于城镇开发边界的限制,将建设用地和水域设定为限制转换区,耕地、林地、草地和未利用地向建设用地的转移概率增加25%,同时建设用地向其余用地类型的转移概率降低30%。

生态优先情景(EP):水域、湿地和生态保护区被设定为限制转换区,同时将林地和草地向建设用地的转移概率降低30%,耕地向建设用地的转移概率降低20%,耕地向林地、草地和水域的转移概率增加10%,建设用地和未利用地向草地和林地的转移概率增加10%。

1.3.5 生态弹性模型 弹性反映变量间的响应程度,基于经济学的弹性模型测度土地利用变化对生态盈亏的影响程度,模型设定为:

$$ET = \left| \frac{\left(\frac{ED_j - ED_i}{ED_i} \right) \times \frac{1}{T} \times 100\%}{LC} \right| \quad (10)$$

式中:ET为生态盈亏对土地利用变化的响应弹性;ED_i、ED_j分别为第*i*年和第*j*年的生态盈亏指数;LC为土地利用综合动态度。

表 5 2000—2020 年朝阳市土地利用面积和土地利用动态度

Table 5 Land use area and single land use dynamics in Chaoyang from 2000 to 2020

土地利用 类型	2000 年		2010 年		2020 年		2000— 2010 年	2010— 2020 年	2000— 2020 年
	面积/ (10 ⁴ hm ²)	占比/%	面积/ (10 ⁴ hm ²)	占比/%	面积/ (10 ⁴ hm ²)	占比/%	土地利用动 态度/%	土地利用动 态度/%	土地利用动 态度/%
耕地	138.91	52.70	131.61	49.93	133.40	50.16	−0.53	0.14	−0.20
林地	27.94	10.60	29.69	11.26	30.59	11.61	0.62	0.30	0.47
草地	85.91	32.59	91.23	34.63	86.93	32.98	0.62	−0.47	0.06
湿地	0.74	0.28	0.58	0.22	0.46	0.17	−2.15	−2.09	−1.89
水域	0.20	0.08	0.67	0.25	1.05	0.40	23.10	5.71	21.25
建设用地	9.61	3.64	9.65	3.66	10.82	4.11	0.05	1.21	0.63
未利用地	0.26	0.10	0.14	0.05	0.32	0.12	−4.43	12.17	1.15

从图3可以看出,朝阳市土地利用变化的显著特征是耕地、草地、林地和建设用地间的相互转化。2000—2010年,耕地向草地和林地的转化面积分别为12.91×10⁴、1.10×10⁴ hm²,表明朝阳市的退耕还林还草工程成效较为显著。同时,草地也向耕地发生转化,转化面积为6.75×10⁴ hm²,可能的原因是城

2 结果与分析

2.1 土地利用变化特征

2000—2020年朝阳市土地利用类型以耕地和草地为主,占土地总面积的80%以上。朝阳市20 a内土地利用变化较为剧烈,且不同地类呈差异化的发展趋势。整体而言,土地利用综合动态度呈下降态势,由2000—2010年的0.57%下降至2010—2020年的0.44%,表明在自然环境和经济社会活动等因素的共同作用下,朝阳市土地利用变化较为活跃,但活跃程度呈下降趋势。具体来看,耕地呈萎缩态势,20 a内面积减少5.51×10⁴ hm²(表5)。草地、林地和水域面积则呈不同程度的增长,20 a内草地和林地的面积分别增加1.02×10⁴、2.65×10⁴ hm²,动态度分别为0.06%和0.47%;水域面积急剧增长,且前期增长速率(23.09%)高于后期(5.71%)。山水林田湖草系统整治、矿山综合治理与修复项目等生态建设工程是3种景观面积显著增长的主要动因。建设用地面积呈扩张趋势,20 a内增加1.21×10⁴ hm²,主要原因是在振兴东北老工业基地的战略导向下,产业结构调整、工业园区建设和基础设施改造等因素导致朝阳市建设用地规模扩张。湿地面积占比极小,但也呈下降趋势。

乡建设用地增减挂钩刚性约束下的耕地总量动态平衡。2010—2020年,朝阳市各类用地转化情况较上一阶段基本一致,但转向建设用地的面积显著增加,可能是因为东北振兴战略、区域经济一体化及突破西辽北战略等多重发展战略助推朝阳市社会经济发展与产业结构调整,导致建设用地规模扩张。

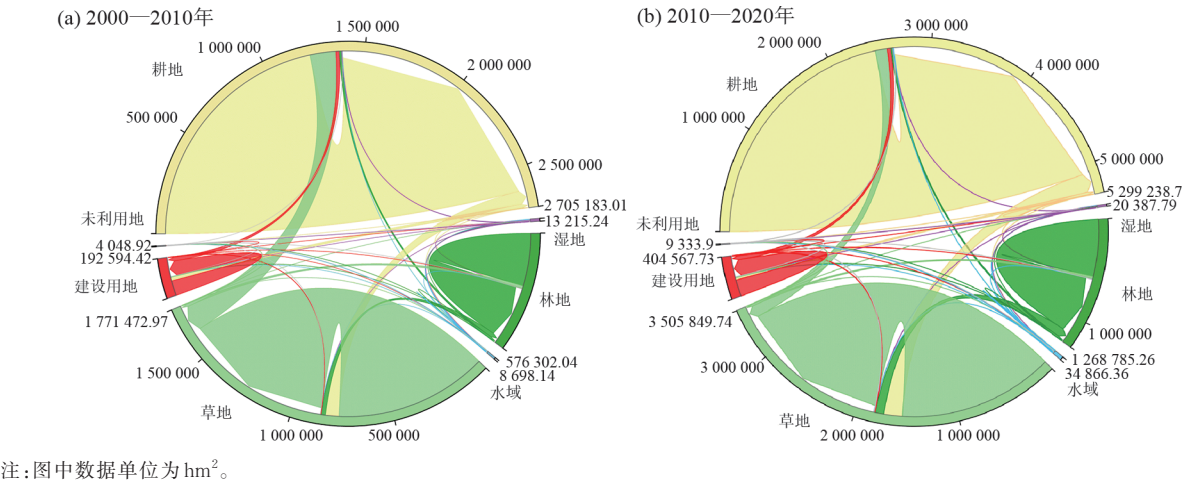


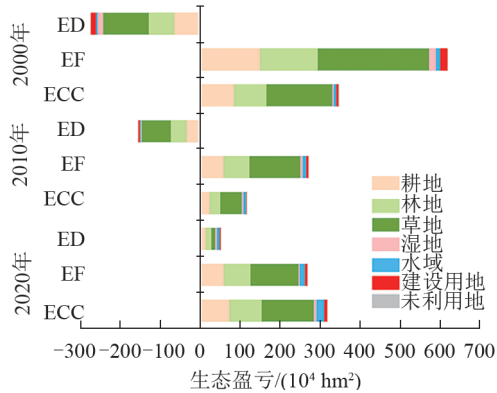
图 3 2000—2020 年朝阳市土地利用转移动态

Fig. 3 Land use transfer dynamics in Chaoyang from 2000 to 2020

2.2 生态盈亏时空分布格局

2000—2020 年,朝阳市生态盈亏整体呈由生态赤字 ($-222.65 \times 10^4 \text{ hm}^2$) 向生态盈余 ($50.42 \times 10^4 \text{ hm}^2$) 转变(图 4)。具体而言,耕地、林地和草地的生态足迹呈下降趋势,生态盈余显著提高,分别占总增长的 23.88%、23.68% 和 45.85%。一方面,朝阳市低人口增长率和大规模人口流出缓释了人类对粮食、牧草和林产品等资源的侵占;另一方面,朝阳市持续实施“蓝天、碧水、青山、净土、农村人居环境整治”工程和系列环保活动,有效改善地区生态环境,降低人均生态足迹。湿地和水域的生态承载力均呈上升趋势,生态盈余显著增加。究其原因,一方面,朝阳市通过湿地涵养建设、河道综合整治等生态修复工程显著提升湿地生态能力,增加水域面积,进而改善水生态环境质量,提升人均生态承载力;另一方面,基于生态系统服务价值的生态足迹模型重视资源提供生态系统服务能力^[20],而水域和湿地的生态系统服务较高,对人类生活环境具有重要的调节作用,因此二者的生态承载力有所提升。建设用地的生态承载力和生态足迹呈先下降后上升趋势,未利用地的变化幅度较小。

图 5 为 20 a 内朝阳市生态盈亏的空间分布格局。2000—2010 年,建平县和凌源市的生态赤字明显下降,主要得益于地区防风固沙和植树造林等生态修复工程的实施。而朝阳市中北部始终保持严重的生态赤字,该地区人口较为密集,且土地利用类型以建设用地为主,影响生态足迹和生态承载力。2010—2020 年,朝阳市生态盈亏由生态赤字转为生态盈余,并呈西高东低的分布格局,低值区集中在城镇中心(龙城区、双塔区)和产粮大县(北票市、朝阳县),高值区集中在努鲁儿虎山脉和低山丘陵地带(建平县、凌源市和喀左县)。



注:ECC为生态承载力;EF为生态足迹;ED为生态盈亏。

图 4 2000—2020 年朝阳市各用地类型生态承载力和生态足迹

Fig. 4 Ecological carrying capacity and ecological footprint of each land type in Chaoyang from 2000 to 2020

2.3 朝阳市 2030 年多情景下土地利用与生态盈亏时空变化特征

2.3.1 多情境下土地利用时空变化 不同情境下朝阳市土地利用结构均发生明显变化(图 6、表 6)。自然发展情境下,2030 年的土地利用格局与 2020 年较为相似,主要差别在于草地的缩减与林地、水域和建设用地的扩张。耕地保护情境下,耕地和水域面积均呈增长态势,分别增长 4.97×10^4 、 $0.22 \times 10^4 \text{ hm}^2$;草地和未利用地明显萎缩,分别减少 6.72% 和 15.63%。城镇发展情境下,草地面积减少 3.98%,其主要转化为建设用地,城镇持续向周围辐射扩张,扩张比例为 18.76%,符合增长控制在 1.3 倍以内的约束条件;耕地和林地的面积略微增长。生态优先情境下,湿地、林地等生态用地面积显著增加,其中湿地面积增幅最大,为 43.48%;耕地面积增加的同时草地略微萎缩,与朝阳市农牧结合的生产方式有关。

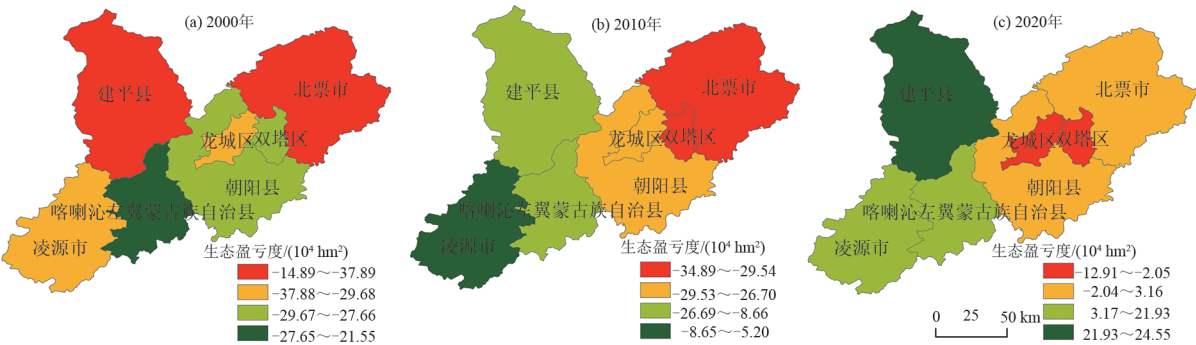


图 5 2000—2020 年朝阳市生态盈亏空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of ecological profit and loss in Chaoyang from 2000 to 2020

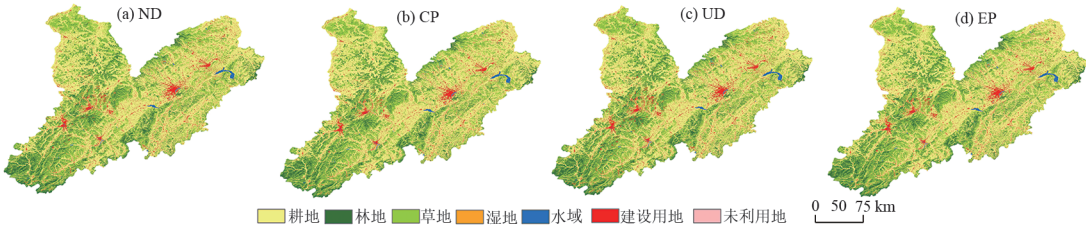


图 6 2030 年多情景模拟土地利用分布格局

Fig. 6 Multi-scenario simulation of land use distribution pattern in 2030

表 6 多情景模拟朝阳市土地利用面积与占比

Table 6 Multi-scenario simulation of land use area and proportion in Chaoyang

土地利用类型	自然发展		耕地保护		城镇发展		生态优先	
	面积/ 10 ⁴ hm ²	占比/%	面积/ 10 ⁴ hm ²	占比/%	面积/ 10 ⁴ hm ²	占比/%	面积/ 10 ⁴ hm ²	占比/%
耕地	134.99	51.22	138.37	52.50	133.98	50.83	135.24	51.31
林地	31.38	11.91	31.18	11.83	31.37	11.90	31.40	11.91
草地	83.44	31.66	81.09	30.77	83.47	31.67	83.52	31.69
湿地	0.43	0.16	0.37	0.14	0.41	0.16	0.56	0.25
水域	1.19	0.45	1.27	0.48	1.19	0.45	1.19	0.45
建设用地	11.84	4.49	11.02	4.18	12.85	4.87	11.26	4.27
未利用地	0.30	0.11	0.27	0.10	0.29	0.11	0.29	0.11

2.3.2 多情境下生态盈亏时空变化 利用生态盈亏模型和 Leslie 模型测算 2030 年不同情境下朝阳市的生态盈亏(图 7)。首先,生态优先情景下的生态盈余总量最高,较 2020 年增长 $49.23\times 10^4\text{ hm}^2$,表明通过开展退耕还林还草和湿地治理等生态修复工程及城镇集约发展可有效提升区域生态承载力;其次,为耕地保护情景和自然发展情景,生态盈余总量接近,分别为 98.93×10^4 、 $98.02\times 10^4\text{ hm}^2$;最后,城镇发展的生态盈余总量最低,说明过度重视经济增长和城镇化发展存在降低区域生态盈余的风险。空间分布上(图 8),相较于 2020 年,不同情景的生态盈余低值区始终分布在城镇中心(龙城区和双塔区),高值区自西向东迁移扩张。自然发展情景和耕地保护情景的生态盈亏空间分布基本一致,城镇发展情景下城区的生态盈亏度略有上升,生态优先情景下凌源市和

北票市的生态盈余明显提升,原因在于生态优先情景下的林地和湿地等生态用地面积显著增加。

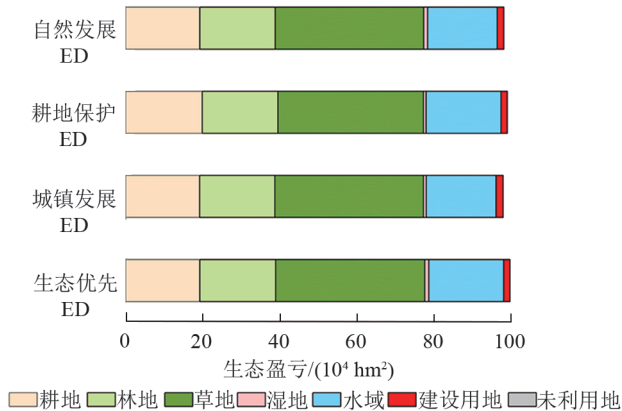


图 7 2030 年多情景模拟各用地类型的生态盈亏

Fig. 7 Multi-scenario simulation of ecological profit and loss of each land use type in 2030

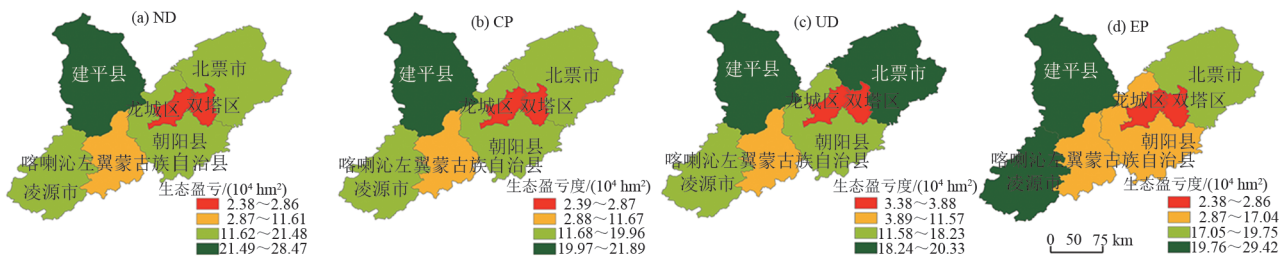


图 8 2030 年多情景模拟生态盈亏分布格局

Fig. 8 Multi-scenario simulation of the distribution pattern of ecological profit and loss in 2030

2.4 生态盈亏对土地利用变化的弹性分析

生态盈亏对土地利用变化的生态弹性反映土地利用活动对生态盈亏的影响程度。2000—2010 年、2010—2020 年生态盈亏对土地利用变化的弹性系数分别为 6.35% 和 30.89%(图 9),生态盈亏对土地利用变化的敏感性呈增强趋势。2030 年不同情景下生态盈亏对土地利用变化的弹性系数排序为生态优先情景(24.11%)>耕地保护情景(23.41%)>自然发展情景(22.16%)>城镇发展情景(20.37%),虽较上一阶段有所下降,但仍富有弹性。综上可知,朝阳市生态盈亏对土地利用变化富有弹性,且弹性系数呈波动上升态势,土地利用变化显著影响生态盈亏的损益。

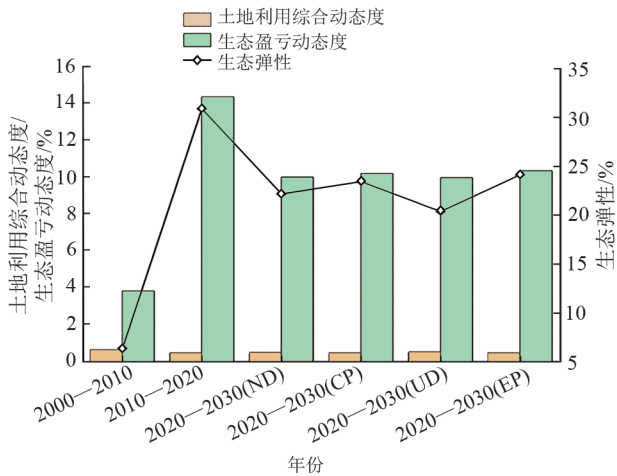


图 9 2000—2030 年朝阳市生态弹性

Fig. 9 Ecological elasticity of Chaoyang from 2000 to 2030

3 讨论

3.1 基于生态系统服务的生态足迹模型

受资源禀赋、生态环境、人口规模和经济社会等因素的影响,地区间生态盈亏存在显著差异。相较于以往利用国际通用的因子核算的生态足迹方法^[29],基于生态系统服务测算的生态足迹模型,能弥补模型侧重土地供给能力而忽略生态系统调节能力、维持能力和美学景观等其他服务功能的不足^[30],可在综合考量多种生态系统的生态价值基础上,因地制宜地衡量不同生态系统获取生物生产性产品的

能力,对于区县等小尺度研究具有较高的精确性与适用性。

3.2 土地利用变化对生态盈亏的影响

本研究发现,朝阳市生态盈亏对土地利用变化富有弹性,土地利用变化是造成生态盈亏损益的重要原因,相似规律在粤港澳大湾区也有呈现^[31]。2000—2010 年朝阳市处于严重生态赤字,该阶段朝阳市经济社会发展对资源的需求远高于该地区生态系统的承载力,与曲哲等^[32]的研究结论一致。耕地向草地、林地的转化及水域面积的快速扩张是该阶段生态赤字降低的主要原因。2010—2020 年朝阳市由生态赤字转为生态盈余,盈余增长 $192.68 \times 10^4 \text{ hm}^2$,地区生态系统承载力高于生态足迹,生态环境质量明显提升,与徐凯等^[33]的研究结论相似。该阶段朝阳市通过“大规模荒山绿化工程”“千万亩经济林建设工程”和水污染防治工程与区域协同治理等生态修复政策优化土地利用结构与规模,驱动耕地和未利用地向林地、草地转变,显著改善区域生态环境。林地、草地和水域快速增长的生态承载力是生态赤字向生态盈余转变的关键,即优化土地利用结构对提高地区生态承载力具有重要作用^[34]。

3.3 生态盈亏多情景模拟结果的启示

不同发展导向下的土地利用方式与结构对生态盈亏的影响差异显著,精准模拟土地利用模式对预测未来生态盈亏至关重要。自然发展情景延续 2010—2020 年的发展趋势,生态盈亏提升较为明显。耕地保护情景下,虽然大量草地转化为耕地,但耕地用水需求也催生水域面积的增长,生态盈亏较自然发展情景略有提升。生态优先情景的生态盈余最多,说明继续重视生态环境保护可有效提升地区生态承载力,而城镇发展情景的生态盈余最低,建设用地规模扩张侵占草地明显增加地区的生态足迹。情景模拟结果可为朝阳市环境保护和国土空间规划提供科学参考。受地形、气候和人类活动等因素影响,朝阳市区县间生态盈亏分布存在异质性特征。因此,应统筹地区自然资源禀赋、生态盈亏状况和经济社

会发展基础等因素,因地制宜、精准施策以促进区域经济-社会-生态多要素耦合协同发展。如在建平县、凌源市等坡度较高地区,继续深入开展退耕还林、水土综合治理等生态修复工程,建立林区生态保护长效机制;在双塔区、龙城区等城镇中心,应重视人类活动对生态环境的影响,通过存量建设用地的盘活以防城市过度扩张和侵占耕地现象,推动城镇空间内涵式集约化发展;在喀左县、朝阳县和北票县等农牧交错区,以资源环境承载力为基准,实施农牧耦合的发展策略,积极探索现代农牧业种养循环协同的产业集群发展模式,促进区域生态保护与农牧业可持续发展。

3.4 研究的局限性与今后研究方向

该研究扩展了关于土地利用变化与生态盈亏间作用关系的认识,但部分内容仍存在一定局限性和不确定性。首先,时间尺度上,选取 20 a 宏观时间跨度为研究期,但生态盈亏对土地利用变化的响应具有动态性与非均衡性特征,未来将进一步在最优时空尺度下讨论土地利用变化与生态盈亏间作用关系的阶段性特征;其次,PLUS 模型构建上,土地利用变化驱动因子虽已覆盖自然资源、经济社会等 18 项驱动因子,但考虑到 LUCC 的复杂性和数据可得性,未考虑自然气象灾害、农牧业产业结构等潜在因素,这也是模拟精度存在局限的主要原因。同时,由于政策制定与实施的难以预测性,以当前政策目标预测未来朝阳市的土地利用变化可能使生态盈亏模拟存在一定偏差,在后续的研究中将对驱动因子、预测方法做进一步补充和完善。

4 结 论

1) 朝阳市土地利用类型以耕地和草地为主,二者占总土地面积的 80% 以上。2000—2020 年朝阳市土地利用变化较为剧烈,耕地和草地呈交替增长/下降趋势,林地、水域和建设用地面积不断增加,湿地面积持续减少。

2) 2000—2020 年朝阳市生态盈亏由生态赤字 ($-222.65 \times 10^4 \text{ hm}^2$) 转为生态盈余 ($50.42 \times 10^4 \text{ hm}^2$), 总体增量为 $273.07 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 在空间上呈西高东低的分布格局。林地、草地和水域快速增长的生态承载力是生态赤字向生态盈余转变的关键,优化土地利用结构对提高地区生态承载力具有重要作用。

3) 2020—2030 年不同情景下,朝阳市土地利用结构变化显著。自然发展情景下,水域面积增长最明显,增幅为 13.33%;耕地保护情景下,耕地和水域面积增长最显著,分别增长 3.73% 和 20.95%;城镇发展情境下,建设用地面积增长最突出,增幅为 18.76%;生态保

护情境下,湿地面积增长最明显,增幅为 43.48%。

4) 2020—2030 年不同情景下,朝阳市生态盈余显著增加,由高到低分别为生态优先情景 ($99.66 \times 10^4 \text{ hm}^2$) > 耕地保护情景 ($98.93 \times 10^4 \text{ hm}^2$) > 自然发展情景 ($98.02 \times 10^4 \text{ hm}^2$) > 城镇发展情景 ($97.87 \times 10^4 \text{ hm}^2$)。生态盈余高值区自西向东迁移扩张,低值区集中分布在城镇中心。

5) 朝阳市生态盈亏对土地利用变化富有弹性,且生态弹性系数呈增长态势,土地利用变化显著影响生态盈亏。

参考文献:

- [1] 袁建勋,方斌,阚红云,等.基于自然-经济综合视角的碳排放强度与生态盈亏多情景模拟研究:以淮海经济区为例[J].生态学报,2024,44(6):2199-2215.
YUAN J X, FANG B, KAN H Y, et al. Multi-scenario simulation of carbon emission intensity and ecological profit and loss from the perspective of nature and economy in Huaihai Economic Zone [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(6): 2199-2215.
- [2] 洪顺发,郭青海,李达维.基于生态足迹理论的中国生态供需平衡时空动态[J].资源科学,2020,42(5):980-990.
HONG S F, GUO Q H, LI D W. Spatiotemporal dynamics of ecological supply and demand based on ecological footprint theory [J]. Resources Science, 2020, 42(5): 980-990.
- [3] REES W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: What urban economics leaves out [J]. Environment and Urbanization, 1992, 4(2): 121-130.
- [4] WACKERNAGEL M, WHITE S, DAN M R. Using ecological footprint accounts: From analysis to applications [J]. International Journal of Environment and Sustainable Development, 2004, 3(3/4): e293.
- [5] WACKERNAGEL M, ONISTO L, BELLO P, et al. National natural capital accounting with the ecological footprint concept [J]. Ecological Economics, 1999, 29(3): 375-390.
- [6] 奥勇,张梦娜,赵永华,等.基于生态足迹-净初级生产力的珠三角城市群经济与生态的关系[J].应用生态学报,2022,33(7):2001-2008.
AO Y, ZHANG M N, ZHAO Y H, et al. Relationship between economy and ecology of Pearl River Delta Urban Agglomeration based on ecological footprint of net primary productivity [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(7): 2001-2008.
- [7] 苑清敏,张泉,李健.基于投入产出表京津冀虚拟足迹生

- 态补偿机制研究[J].统计与决策,2018,34(18):107-110.
- YUAN Q M, ZHANG X, LI J. Study on ecological compensation mechanism of Beijing-Tianjin-Hebei virtual footprint based on input-output table [J]. Statistics and Decision, 2018, 34(18): 107-110.
- [8] 李晓格,张颖,单永娟.基于能值生态足迹模型的榆林市水资源可持续利用研究[J].干旱区研究,2022,39(4):1066-1075.
- LI X G, ZHANG Y, SHAN Y J. Sustainable utilization of water resources in Yulin City based on an emergy ecological footprint model [J]. Arid Zone Research, 2022, 39(4): 1066-1075.
- [9] 徐秋怡,颜凤芹,丁智,等.基于三维生态足迹的长江经济带生态安全动态评价[J].地理科学进展,2024,43(6):1184-1202.
- XU Q Y, YAN F Q, DING Z, et al. Dynamic assessment of ecological security in the Yangtze River Economic Belt based on three-dimensional ecological footprint [J]. Progress in Geography, 2024, 43(6): 1184-1202.
- [10] SAQIB N, DURAN I A, OZTURK I. Unraveling the interrelationship of digitalization, renewable energy, and ecological footprints within the EKC framework: Empirical insights from the United States [J]. Sustainability, 2023, 15(13): e10663.
- [11] 王业宁,周强,王豪伟.中国34个省级行政区三维生态足迹动态研究[J].生态学报,2020,40(18):6434-6444.
- WANG Y N, ZHOU Q, WANG H W. Assessing three-dimensional ecological footprint of 34 provinces in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(18): 6434-6444.
- [12] 洪琼,章锦河,胡雯洁,等.黄山市三维生态足迹变化及旅游影响研究[J].生态科学,2023,42(4):29-38.
- HONG Q, ZHANG J H, HU W J, et al. Study on changes of three-dimensional ecological footprint and tourism impact in Huangshan City [J]. Ecological Science, 2023, 42(4): 29-38.
- [13] 岳东霞,杨超,江宝骅,等.基于CA-Markov模型的石羊河流域生态承载力时空格局预测[J].生态学报,2019,39(6):1993-2003.
- YUE D X, YANG C, JIANG B H, et al. Spatio-temporal pattern prediction of the biocapacity in the Shiyang River basin on the basis of the CA-Markov model [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(6): 1993-2003.
- [14] 魏黎灵,李岚彬,林月,等.基于生态足迹法的闽三角城市群生态安全评价[J].生态学报,2018,38(12):4317-4326.
- WEI L L, LI L B, LIN Y, et al. Evaluation of the ecological security of Urban Agglomeration on Min Delta based on ecological footprint [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(12): 4317-4326.
- [15] 王艳,张安录.基于“消费-产出”生态足迹的长江经济带耕地生态可持续性判别[J].长江流域资源与环境,2022,31(5):1029-1038.
- WANG Y, ZHANG A L. Identification of cultivated land ecological sustainability based on “consumption-output” ecological footprint in Yangtze River economic belt [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(5): 1029-1038.
- [16] 张婉玲,邹磊,夏军,等.长江中游城市群水资源生态足迹时空演变及其驱动因素分析[J].长江流域资源与环境,2023,32(1):83-92.
- ZHANG W L, ZOU L, XIA J, et al. Spatial-temporal evolution and driving factors analysis of water resources ecological footprint of urban agglomeration in middle reaches of Yangtze River [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023, 32(1): 83-92.
- [17] 于楠,孙仁金,石红玲,等.中国能源生态足迹空间差异及收敛趋势[J].环境科学与技术,2024,47(3):37-47.
- YU N, SUN R J, SHI H L, et al. Energy ecological footprint of China: Trend of spatial differences and convergence [J]. Environmental Science and Technology, 2024, 47(3): 37-47.
- [18] 柳宏斌,夏国柱,林涛,等.基于改进生态足迹模型的可持续发展评价:以北疆为例[J].生态学报,2023,43(1):234-248.
- LIU H B, XIA G Z, LIN T, et al. Sustainable development evaluation based on an improved ecological footprint model: A case study of northern Xinjiang [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(1): 234-248.
- [19] 官冬杰,姜亚楠,严聆云,等.基于生态足迹视角的长江流域生态补偿额度测算[J].生态学报,2022,42(20):8169-8183.
- GUAN D J, JIANG Y N, YAN L Y, et al. Calculation of ecological compensation amount in Yangtze River basin based on ecological footprint [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(20): 8169-8183.
- [20] 郭慧,董士伟,吴迪,等.基于生态系统服务价值的生态足迹模型均衡因子及产量因子测算[J].生态学报,2020,40(4):1405-1412.
- GUO H, DONG S W, WU D, et al. Calculation and analysis of equivalence factor and yield factor of ecological footprint based on ecosystem services value [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(4): 1405-1412.

- [21] 田鹏,李加林,王丽佳,等.基于GTWR模型的浙江省海岸带三维生态足迹动态变化及其影响因素[J].应用生态学报,2020,31(9):3173-3186.
- TIAN P, LI J L, WANG L J, et al. Dynamics of three-dimensional ecological footprint of Zhejiang coastal zone and its influencing factors based on GTWR model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(9): 3173-3186.
- [22] 杨屹,樊明东,张景乾.陕西省区域生态足迹动态变化及驱动因素差异研究[J].生态科学,2018,37(3):67-76.
- YANG Y, FAN M D, ZHANG J Q. Study of dynamic changes and driving factors of regional ecological footprint of Shaanxi Province[J]. Ecological Science, 2018, 37(3): 67-76.
- [23] 马晓蕾,乔雅琦,王婕,等.陕西省水生态足迹深度与广度时空格局及影响因素[J].干旱区研究,2023,40(3):469-480.
- MA X L, QIAO Y Q, WANG J, et al. The spatiotemporal patterns of water ecological footprints, depth, size, and influencing factors in Shaanxi Province[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(3): 469-480.
- [24] 谢高地,张彩霞,张雷明,等.基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J].自然资源学报,2015,30(8):1243-1254.
- XIE G D, ZHANG C X, ZHANG L M, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area [J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(8): 1243-1254.
- [25] 王强,张廷斌,易桂花,等.横断山区2004—2014年植被NPP时空变化及其驱动因子[J].生态学报,2017,37(9):3084-3095.
- WANG Q, ZHANG T B, YI G H, et al. Tempo-spatial variations and driving factors analysis of net primary productivity in the Hengduan mountain area from 2004 to 2014[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(9): 3084-3095.
- [26] 陈友华,张子彧.延迟退休对老年人口福利水平的影响研究[J].现代经济探讨,2020(12):24-32.
- CHEN Y H, ZHANG Z Y. Research on the impact of delayed retirement on the welfare level of the elderly population[J]. Modern Economic Research, 2020(12): 24-32.
- [27] 黄栋,刘跃宗,刘建宁,等.辽宁省“三生”功能时空演变及其碳排放效应[J].水土保持通报,2024,44(1):421-431.
- HUANG D, LIU Y Z, LIU J N, et al. Spatial-temporal evolution of productional-living-ecological functions and their carbon emission effects in Liaoning Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(1): 421-431.
- [28] 赵恒谦,刘胥,杨姿涵,等.2000—2020年辽宁省生态系统服务评估与多情景预测[J].环境科学,2024,45(7):4137-4151.
- ZHAO H Q, LIU G, YANG Z H, et al. Ecosystem services assessment and multi-scenario prediction in Liaoning Province from 2000 to 2020 [J]. Environmental Science, 2024, 45(7): 4137-4151.
- [29] REES M W A W E, TESTEMALE I B P. Our ecological footprint: Reducing human impact on the earth[M]. Gabriola Island, B C: New Society Publishers, 1996.
- [30] LI P H, ZHANG R Q, XU L P. Three-dimensional ecological footprint based on ecosystem service value and their drivers: A case study of Urumqi[J]. Ecological Indicators, 2021, 131: e108117.
- [31] 张杰,李清泉,吴祥茵,等.基于土地利用的粤港澳大湾区生态系统服务价值及承载力演变分析[J].生态学报,2021,41(21):8375-8386.
- ZHANG J, LI Q Q, WU X Y, et al. Evolution of the ecosystem services value and carrying capacity in the Guangdong-Hongkong-Macao Greater Bay Area based on land use changes [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(21): 8375-8386.
- [32] 曲哲,任家强,李红丹.基于生态足迹的朝阳市土地生态安全研究[J].中国人口·资源与环境,2011,21(增刊1):459-461.
- QU Z, REN J Q, LI H D. Land ecological safety based on ecological footprint in Chaoyang City [J]. China Population, Resources and Environment, 2011, 21(S1): 459-461.
- [33] 徐凯,房艳刚.辽宁省乡村多功能评价和演变特征分析[J].经济地理,2021,41(1):147-157.
- XU K, FANG Y G. Rural multi-function evaluation and evolution characteristics in Liaoning Province [J]. Economic Geography, 2021, 41(1): 147-157.
- [34] 彭资,谷成燕,刘智勇,等.东江流域1989—2009年土地利用变化对生态承载力的影响[J].植物生态学报,2014,38(7):675-686.
- PENG Z, GU C Y, LIU Z Y, et al. Impact of land use change during 1989—2009 on eco-capacity in Dongjiang watershed [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014, 38(7): 675-686.