基于土地利用和 GeoDetector 的 2005—2023 年松嫩平原生态系统服务价值动态及其驱动力分析

冯 雪[1], 白玉锋[1,2], 杜会石[1], 孙正宏[1], 赵景琳[1]

(1.吉林师范大学 地理科学与旅游学院,
吉林 四平 136000; 2.中国科学院 东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130102)

摘 要: [目的] 分析2005—2023年土地利用变化背景下生态系统服务价值(ESV)的时空演变特征及其驱动机制,为区域土地利用优化、生态保护修复和粮食安全与生态安全协同管理提供科学依据。[方法] 基于2005,2010,2015,2023年4期Landsat遥感影像与同期社会经济统计数据,采用当量因子法,结合土地利用转移矩阵、格网分析、空间自相关、价值流向模型及地理探测器模型,系统评估研究区ESV的数量特征、空间分异规律及其影响机制。[结果] ①2005—2023年旱地和林地是松嫩平原占主导的土地利用类型,二者占总面积65%以上;各地类转换以水田、草地、水域和湿地为主,转换频繁。②近20 a松嫩平原ESV总体呈下降趋势,由5.88×10[11]元降至5.35×10[11]元,降幅8.99%;水田和湿地ESV分别增长41.69%和13.50%,其价值上升有效减缓总ESV下滑速度。湿地是首要的正向贡献因子,水域是首要的负向贡献因子。水文调节和气候调节贡献最大,二者之和占总ESV的56%以上。③ESV空间格局呈现"东北部较高,中部水域分布区域高,西部低"的特征;冷热点分布呈"东热西冷,中无显著"格局,低值聚类整体稳定,高值聚类在东部和中部部分区域有所扩张。④距城镇村距离是ESV空间分异的主导驱动因子,人口密度与NDVI分别在社会经济和自然因子中解释力最强。[结论] 水域、湿地和林地是松嫩平原ESV的主要贡献地类,以水文调节为核心的调节服务价值占比最高。各驱动因素间交互作用表现为增强关系,社会经济因素的解释力高于自然因素。协调粮食生产与生态保护,科学优化土地利用结构,是今后维持并提升松嫩平原生态系统服务价值的关键路径。

关键词: 生态系统服务价值(ESV); 土地利用变化; 地理探测器; 松嫩平原; 遥感

文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)05-0442-16 **中图分类号:** F301.2, X171.1

文献参数: 冯雪, 白玉锋, 杜会石, 等.基于土地利用和GeoDetector的2005—2023年松嫩平原生态系统服务价值动态及其驱动力分析[J].水土保持通报,2026,46(5):442-457. Feng Xue, Bai Yufeng, Du Huishi, et al. Analysis of ecosystem service value dynamics and driving forces in Songnen Plain based on land use and GeoDetector from 2005 to 2023 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(5):442-457.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.05.042 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.05.042**

Analysis of ecosystem service value dynamics and driving forces in Songnen Plain based on land use and GeoDetector from 2005 to 2023

Feng Xue[1], Bai Yufeng[1,2], Du Huishi[1], Sun Zhenghong[1], Zhao Jinglin[1]

(1. *School of Tourism and Geography Science, Jilin Normal University, Siping, Jilin* 136000, *China*;
2. *Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin* 130102, *China*)

Abstract: [Objective] The spatiotemporal evolution characteristics and driving mechanisms of ecosystem service value (ESV) against the backdrop of land use changes from 2005 to 2023 were analyzed in order to provide a scientific basis for regional land use optimization, ecological conservation and restoration, and the coordinated management of food security and ecological security. [Methods] Based on Landsat remote sensing imagery from 2005, 2010, 2015, and 2023, together with corresponding socioeconomic statistical data, this study applied the

收稿日期:2026-05-06 **修回日期:**2026-08-05 **采用日期:**2026-08-17
资助项目:中国科学院科研项目;国家自然科学基金项目"科尔沁沙地西部风沙地貌空间分异及其形成临界条件"(42271005)
第一作者:冯雪(2000—),女(汉族),吉林省松原市人,硕士研究生,主要从事土地利用研究。Email:f06300305@163.com。
通信作者:白玉锋(1988—),男(汉族),甘肃省兰州市人,讲师,博士,硕士研究生导师,主要从事土壤物理与土壤改良研究。Email:byfzy2021@jlnu.edu.cn。

ESV equivalent factor method. By integrating land use transition matrices, grid analysis, spatial autocorrelation analysis, value flow models, and the GeoDetector model, the study systematically assessed the quantitative characteristics, spatial differentiation patterns, and influencing mechanisms of ESV in Songnen Plain. [Results] ① From 2005 to 2023, dryland and forest land were the dominant land use types in Songnen Plain, accounting for more than 65% of the total area. Land use conversions were primarily between paddy fields, grasslands, water bodies, and wetlands, and occurred frequently. ② Over the past 20 years, the total ESV of Songnen Plain showed an overall downward trend, decreasing from 5.88×10^{11} yuan to 5.35×10^{11} yuan, representing a decline of 8.99%. The ESV of paddy fields and wetlands increased by 41.69% and 13.50%, respectively, and this rise in value effectively slowed the rate of decline in total ESV. Wetlands were the primary positive contributor, while water bodies were the primary negative contributor. Hydrological regulation and climate regulation made the largest contributions, together accounting for more than 56% of total ESV. ③ The spatial pattern of ESV was characterized by "higher values in the northeast, higher values in water body distribution areas in the central region, and lower values in the west." The distribution of cold and hot spots followed a pattern of "hot in the east, cold in the west, and no significant pattern in the central region." Low-value clusters remained generally stable, while high-value clusters expanded in some areas of the eastern and central regions. ④ Distance from towns and villages was the dominant driver of ESV spatial differentiation, while population density and NDVI had the strongest explanatory power among socioeconomic and natural factors, respectively. [Conclusion] Water bodies, wetlands, and forest lands are the dominant land use types contributing to ESV in Songnen Plain, and the regulating service value centered on hydrological regulation accounts for the highest proportion. The interaction among various driving factors shows an enhancing relationship, and the explanatory power of socioeconomic factors is higher than that of natural factors. Coordinating grain production with ecological protection and scientifically optimizing the land use structure are the key pathways for maintaining and enhancing the ecosystem service value of Songnen Plain in the future.

Keywords: ecosystem service value (ESV); land use change; GeoDetector; Songnen Plain; remote sensing

生态系统服务是指自然生态系统为人类提供的直接或间接利益与服务,如食物生产、气候调节和美学景观等,是人类生存与社会经济持续发展的重要基础[1]。生态系统服务价值(ecosystem service value, ESV)是将生态系统服务内容通过市场化方式呈现出的具体形态[2],其评估的关键是对生态系统各项服务能力进行定量货币化描述。Costanza等[3]于1997年首次提出当量因子法开展全球生态系统服务价值的系统评估,为后续相关研究奠定了基础。谢高地等[4]借鉴该分类体系,提出基于专家知识的生态系统服务价值评估方法,该方法已在样点、区域及全国等多尺度评估中得到广泛应用。

土地利用/覆被变化(LUCC)作为人类活动作用于环境的最直接载体,其利用方式与变化程度等受制于其附属的自然要素、社会经济活动要素与宏观政策制度等多要素的共同影响[5]。刘纪远等[6]研究表明,21世纪初中国土地利用变化受中国实施的国家宏观政策与区域发展政策、社会经济发展影响强烈。张超正等[7]对长江中游地区的研究表明,其土地利用变化的主导驱动力已从地形约束转为以人均GDP和产业结构为核心的经济社会驱动。通过解析多尺度驱动因素的交互作用,有助于深入揭示土地系统动态变化并评估其当下及未来风险。大量研究表明,剧烈的、不合理的LUCC往往预示着环境恶化。例如,LUCC中的森林面积减少通常伴随水土流失加重与生物多样性锐减;自然湿地萎缩则会导致生态功能退化等累积环境效应;城市扩张加剧热岛效应并导致环境质量逐步退化[8]。反之,以生态建设为导向的土地利用转型,如退耕还林还草及城市绿地与生态廊道建设,则标志区域生态服务功能的提升与环境的改善。同时,LUCC数据能够精确反映地表状况在不同时期的变化特征,在此基础上可实现对未来不同情景下的土地利用的高精度模拟或预测。已有研究多将土地利用模拟模型与ESV核算相结合,以揭示土地利用变化对区域生态功能的影响。例如,罗浩等[9]以极端干旱区新疆吐鲁番市为例,运用PLUS模型模拟2035年自然发展、耕地保护和生态保护3种情景下的ESV变化、时空分异及权衡协同关系,表明情景模拟可为干旱区土地利用优化和生态保护策略制定提供依据。刘文鹏等[10]基于LUCC数据和CA-Markov模型,预测云南自由贸易试验区2025年土地利用类型与景观格局变化,表明

土地利用模拟能够为国土空间格局优化和区域治理决策提供方法支撑。上述研究的价值在于,将土地利用变化从单纯的面积统计推进到空间格局预测和生态效应评估,为认识LUCC对ESV的影响提供了重要方法借鉴。证实了基于LUCC的建模方法在揭示区域土地利用演化趋向方面的有效性。然而,现有研究仍存在一定不足:一方面,相关研究多侧重未来情景模拟或土地利用格局预测,对历史时期土地利用转移所引起的ESV增益与损失路径关注不足;另一方面,对ESV空间分异形成机制的解释多停留在单因子分析层面,尚缺乏对自然环境因子与社会经济因子交互作用的定量识别。尤其近年来,随着经济的快速发展与城市化进程的推进,人地矛盾、人与自然矛盾逐渐加剧,这一变化直接推动土地利用类型发生明显转变,从而改变生态系统的结构与功能,进一步驱动生态系统服务价值发生相应改变。通过探究区域LUCC过程中ESV的时空变化特征及其驱动力,不仅有助于保护区域生态系统的结构与功能,还能为土地资源合理配置及人地关系和谐发展等提供重要参考。

松嫩平原作为中国东北黑土区的核心区和重要的商品粮生产基地,其土地利用变化研究具有国家战略与区域生态安全的双重重要性。从农业可持续发展角度看,松嫩平原以不到全国3%的耕地面积,贡献了超过10%的商品粮,是国家粮食安全的"压舱石"[11]。但长期高强度和单一的农业开发模式引发黑土层变薄、有机质下降及土壤变硬等土地退化问题,直接威胁粮食产能的可持续性。从区域生态安全看,松嫩平原西部地处中国北方农牧交错带东端,由于区域地质构造形成的大尺度闭流区、气候的干湿交替、农牧业的嵌套耦合[12]以及长期以来各种人类不合理的开发利用,导致其生态尤为脆弱。例如,平原中西部广泛分布着大面积的苏打盐碱地,其生态系统恢复力较弱,不合理利用易致盐碱化程度加剧及次生和潜在盐碱化[13];水域、湿地与盐碱地交错分布,局部水资源的不合理调配会加剧区域生态系统的整体不稳定性与退化风险。同时,平原西部与科尔沁沙地接壤,属于典型的生态交错带,其气候、降水、土地利用方式直接影响地表覆被,进而影响区域风沙活动与土地沙漠化进程。松嫩平原正面临保障国家粮食安全的刚性生产需求与维持区域生态安全的脆弱环境本底之间的突出矛盾;高强度农业活动引发的黑土退化,水盐失衡与风沙威胁以及由此带来的生态系统服务功能衰退,构成了一个相互关联,相互激化的系统性风险综合体。此外,目前已有松嫩平原ESV研究多侧重于土地利用变化对ESV总量的影响,而缺乏对驱动因子体系及其交互机制的系统性考察。为此,科学诊断土地利用变化过程,并定量评估各驱动因素对生态系统服务价值的综合影响,以期为揭示区域人地系统耦合机理及预判可持续发展阈值提供重要途径。

鉴于此,本文以松嫩平原为研究对象,基于近20 a多期土地利用遥感监测数据集,系统解析研究区LUCC及ESV时空演变规律,进而应用地理探测器模型,揭示ESV变化的驱动力,以精准把握区域生态系统现状,为推动区域重大国家战略实施、保障区域生态安全及合理规划自然资源及其利用等提供科学依据。

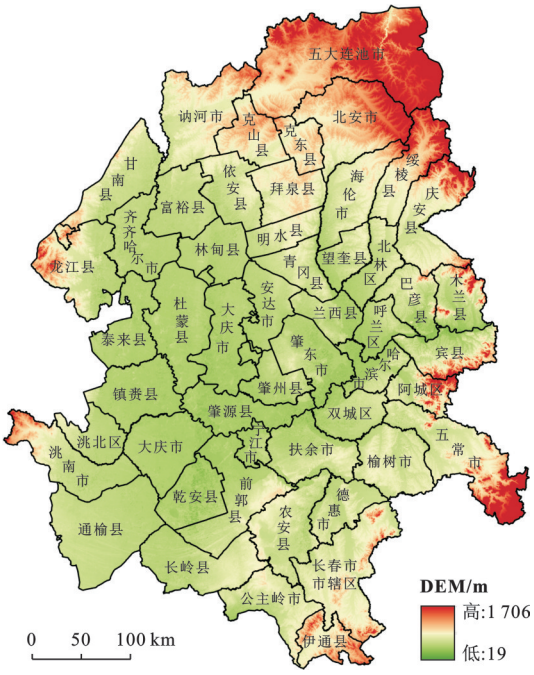
1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

松嫩平原(42°50′—47°20′N,121°40′—129°30′E,图1),是中国东北平原的重要组成部分,与三江平原、辽河平原并称东北三大平原。研究区总面积2.23×10^5 km^2,位于黑龙江省西南部和吉林省西北部,由松花江及其支流嫩江冲积而成。该区域属于温带大陆性半湿润、半干旱季风气候,冬季寒冷干燥,夏季温暖多雨;年平均气温在1.6~5.0 ℃之间,1月气温最低,平均-26~-16 ℃,7月温度最高;年平均降水量为360~450 mm,自东向西逐渐减少。区域内土壤类型丰富,土质肥沃,黑土、黑钙土占全区面积的近2/3,是中国重要的粮食产区。受气候、水文、地形及土壤盐碱化等因素共同影响,区域植被类型具有明显的地带性与非地带性分异特征。其中,地带性植被以草甸草原为主,常见优势种包括羊草(*Leymus chinensis*)、贝加尔针茅(*Stipa baicalensis*)等;在河湖洼地、低湿地和盐碱化区域,则发育有受局部水文和土壤条件控制的非地带性植被类型,主要包括草甸植被、沼泽植被和盐生植被等。草甸植被中羊草(*L.chinensis*)较为常见,沼泽湿地中芦苇(*Phragmites communis*)分布较广,盐生生境中常见碱蓬(*Suaeda glauca*)、碱蒿(*Artemisia anethifolia*)等耐盐植物。

松嫩平原区域覆盖54个区(县),其中包括黑龙江省辖区内的37个市(县)及分布在吉林省内的17个市(县)。区内土地利用类型包括耕地、林地、草地、水域、湿地、建设用地、盐碱地及其他未利用地。区内经济作物以大豆、甜菜和亚麻为主,研究区有50%以上的土地被用于农业生产。草场较集中,畜牧业较为发达。原油和煤炭产量皆居中国能源产量的前列。近年来,松嫩平原地区的经济呈现稳步增长态势,在农业、能源、工业等领域拉动下,经济结构持续

优化。到2023年,松嫩平原地区生产总值(GDP)突破2.07×10⁴亿元,其中汽车制造和轨道交通装备制造已成为长春市重要的支柱产业,并推动区域经济优质发展。



注:基础地理地图基于审图号为[GS(2019)1822号]的标准地图制作。底图边界无修改。下同。

图1　松嫩平原地形图

Fig.1　Topographic map of Songnen Plain

1.2　数据来源

(1)土地利用数据来自于中国多时期土地利用遥感监测数据集(CNLUCC)(http://www.resd.cn),空间分辨率为30 m。根据松嫩平原自然状态下的土地利用情况,参照目前土地覆被/利用中采用的分类方法,并结合《土地利用现状分类》(GB/T 21010—2017)标准在ArcGIS 10.7中将4期土地利用数据重分类为水田、旱地、林地、草地、水域、建设用地、湿地、未利用地8类。本研究中多时期土地利用遥感监测数据集时间节点选取为2005,2010,2015和2023年。选取依据为基于2009年国务院常务会议审议通过的《全国新增1 000亿斤粮食生产能力规划(2009—2020年)》提出的时间节点选取2005年为基础对比年份,2010年数据依据国家千亿斤(5.00×10¹⁰ kg)粮食规划启动节点确定;2015年数据根据政策实施过程中地方政策:如2008年《吉林省增产百亿斤商品粮能力建设总体规划实施意见》中2008—2012年大安灌区及11个大型灌区改造,2008—2014年引嫩入白等工程,以及2009年批复的《黑龙江省千亿斤粮食产能工程建设规划》(目标2015年全省粮食产能超5.00×10¹⁰ kg)实施节点选取;2023年数据根据2022年吉林省大安市盐碱地综合利用项目(新增耕地1 730 hm²,在建3 341 hm²)及吉林省西部河湖连通工程(2015年开工,2023年验收)选取。

(2)松嫩平原范围县域的社会经济统计数据,如农作物产量、播种面积等数据来自黑龙江省和吉林省2005,2010,2015和2023年统计年鉴。粮食作物价格数据来自2005—2023年的《全国农产品成本收益资料汇编》(表1)。

(3)基于松嫩平原自然地理环境和社会经济特征,本文选取两类八项指标:自然地理环境要素(5项)和社会经济要素(3项)作为生态系统服务驱动因子(表1),自然地理环境要素包括高程、坡度、年平均降雨量、年平均气温、归一化植被指数(NDVI);社会经济要素包括距城镇村的距离、人口密度、地均GDP。以上指标在ArcGIS中采用自然断点法进行离散化处理,采用地理探测器进行驱动力分析。

表1　数据来源

Table 1　Data sources

项 目	指标类型	数据来源
社会经济统计数据	农作物产量	《吉林省统计年鉴》(https://tjj.jl.gov./cn·tjs)
	播种面积	《黑龙江省统计年鉴》(https://tjj.hlj.gov.cn)
	粮食作物价格	《全国农产品成本收益资料汇编》(http://www.ndrc.gov.cn)
自然地理环境要素	高程	地理空间数据云(http://www.gscloud.cn)
	坡度	
	年平均降水量	
	年平均气温	
	归一化植被指数/NDVI	国家地球系统科学数据中心共享服务平台(https://www.Geodata.cn)
社会经济要素	人口密度	中国科学院地理科学与资源研究所资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn)
	地均GDP	
	距城镇村距离	由ArcGIS中欧氏距离计算生成

1.3 研究方法

1.3.1 土地利用变化分析方法

土地利用单一动态度能够定量分析某一时期研究区各地类变化的速率和幅度[14]。计算公式为

$$K=\frac{1}{T}\times\left(\frac{U_b-U_a}{U_a}\right)\times 100\% \tag{1}$$

式中：K为研究期内某一种地类的动态度，动态度值越大表明研究时段内该地类变化程度越大，正值则表示该地类面积呈增加趋势，负值反之；U_a和U_b分别为研究初期、末期某一种地类面积；T为研究时长。

采用刘纪远等[15]提出的土地利用综合动态度指标(L_u)，用于定量描述研究期间研究区所有土地利用类型整体变化速度。该值越大，说明研究区内土地利用动态变化越剧烈。计算公式为

$$L_u=\frac{\sum_{i=1}^{n}\Delta \mathrm{LU}_{ij}}{2\sum_{i=1}^{n}\mathrm{LU}_i}\times\frac{1}{T}\times 100\% \tag{2}$$

式中：LU_i为监测时段初期第i类土地类型面积；$\Delta\mathrm{LU}_{ij}$为研究期内第i类土地转换为第j类($j\neq i$)土地类型面积的绝对值。

土地利用转移矩阵能够直观反映研究区两个不同时期各地类的转移方向和数量情况[16]。计算公式为

$$\boldsymbol{S}=\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{S}$为土地转换面积矩阵；S_{ij}为研究期内第i种地类转化为第j种地类的面积；n为地类数量。

1.3.2 生态系统服务价值核算

参照谢高地等[4]ESV当量表，1个标准ESV当量为单位面积粮食产生经济价值的1/7，对研究区单位面积粮食产量创造的经济价值进行修正。同时为降低研究区不同年份主要的粮食作物(玉米、大豆、水稻)价格不同对当量因子造成的影响，本文对研究时段内不同年份的粮食单价取平均值，并结合各时期的播种面积、单位面积主要农作物产量，计算出松嫩平原标准ESV当量因子，进一步计算出适合于松嫩平原各土地利用类型的生态系统服务价值系数(表2)。

表2 研究区单位面积生态系统服务价值ESV系数

Table 2 ESV coefficients per unit area in study area

单位：元/(hm^2·a)

功能类型	生态系统服务价值(ESV)							
	旱地	水田	林地	草地	湿地	水域	建设用地	未利用地
食物生产	1 490.05	2 384.08	442.63	409.03	894.03	140.24	0.00	8.77
原料生产	701.20	157.77	1 016.74	601.86	876.50	403.19	0.00	26.30
水资源供给	35.06	−4 610.39	525.90	333.07	4 540.27	14 532.37	0.00	17.53
气体调节	1 174.51	1 945.83	3 343.85	2 115.29	3 330.70	1 349.81	0.00	113.95
气候调节	631.08	999.21	10 005.25	5 592.07	6 310.80	4 014.37	0.00	87.65
净化环境	175.30	298.01	2 931.89	1 846.49	6 310.80	9 729.15	0.00	359.37
水文调节	473.31	4 768.16	6 547.46	4 096.18	42 475.19	179 226.72	0.00	210.36
土壤保持	1 805.59	17.53	4 071.34	2 576.91	4 049.43	1 630.29	0.00	131.48
维持养分循环	210.36	333.07	311.16	198.67	315.54	122.71	0.00	8.77
生物多样性	227.89	368.13	3 707.60	2 343.18	13 796.11	4 470.15	0.00	122.71
美学景观	105.18	157.77	1 625.91	1 034.27	8 291.69	3 313.17	0.00	52.59
总计	7 029.53	6 819.17	34 529.72	21 147.02	91 191.06	218 932.17	0.00	1 139.45

1.3.3 基于格网的ESV时空变化

格网是微观尺度下量化土地利用时空演变的有效评估单元。为凸显松嫩平原ESV的空间差异性，采用网格法对区域ESV进行空间描述，借助ArcGIS 10.7中的渔网工具，构建5 km×5 km的格网尺度，并运用自然断点法将ESV分为5个等级(高值区、较高值区、中值区、较低值区、低值区)，绘制出研究区的ESV空间分布图。

1.3.4 空间统计分析

全局空间自相关分析用全局Moran's I指数衡量，旨在量化空间数据的集聚或离散分布趋势，并进一步揭示该分布趋势的强度及其统计显著性[17]。计算公式为

$$I=\frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}w_{ij}(x_i-\bar{x})(x_j-\bar{x})}{\left(\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}w_{\mathrm{ij}}\right)\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2} \tag{4}$$

式中：n为研究区网格数量；x_i和x_j分别为网格i和j的ESV；$\bar{x}$为ESV的平均值；w_{ij}为空间权重矩阵。Moran's I指数取值范围为[−1,1]，当Moran's I指

数>0时,表示空间呈正相关,指数越高,说明ESV的空间集聚越明显;当Moran's I指数<0时,表示空间呈负相关,指数越低,说明ESV的空间差异性越大。

冷热点分析(Getis-Ord)进一步揭示ESV局部空间集聚的具体位置,即哪些区域形成高值集聚(热点)或低值集聚(冷点)[18]。其计算公式为

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^{n} w_{ij}x_j - \bar{x}\sum_{j=1}^{n} w_{ij}}{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} x_j^2 - (\bar{x})^2}\cdot\sqrt{\frac{n\sum_{j=1}^{n} w_{ij}^2 - \left(\sum_{j=1}^{n} w_{ij}\right)^2}{n-1}}} \quad (5)$$

式中:n为研究区网格数量;x_i和x_j分别为网格i和j的ESV;$\bar{x}$为ESV的平均值;w_{ij}为空间权重矩阵。计算得到的G_i^*值为Z得分,当$Z>1.96$($p<0.05$)时,表示该单元为显著热点(高值集聚区);当$Z<-1.96$时,为显著冷点(低值集聚区)。

1.3.5　生态系统服务价值流向

基于土地利用转换数据来计算不同地类之间相互转换所引起的ESV的损益,分析人类活动对ESV变化的影响[19]。计算公式为

$$P_{ab} = (VC_a - VC_b) \times A_{ab} \quad (6)$$

式中:P_{ab}为a地类转换为b地类时的ESV损益(亿元);VC_a,VC_b分别为a地类、b地类的ESV系数;A_{ab}为a地类转换为b地类的面积(km^2),为避免双向转换带来的重复计量问题,本文对原始土地利用转移矩阵进行了净流量对冲处理。对于任意两种地类a和b,若$A_{a\to b}>A_{b\to a}$,则保留净流向$a\to b$,净面积$A_{ab}=A_{a\to b}$;反之,则保留$b\to a$,并将$a\to b$置零。经此处理,每对地类之间仅保留单一方向的净转移面积,用于后续ESV损益计算。若$P_{ab}>0$,则说明a地类转换为b地类时ESV是损失的;若$P_{ab}<0$,则说明a地类转换为b地类时ESV是增益的。

1.3.6　生态贡献率

生态贡献率是指研究期内某地类ESV变化对整个区域ESV变化的影响程度,用来解释影响研究区ESV变化的关键贡献因子和敏感因子[20]。计算公式如下:

$$S_i = \frac{|\Delta ESV_i|}{\sum_{i=1}^{n}|\Delta ESV_i|} \times 100\% \quad (7)$$

式中:S_i为第i种地类在研究期内的生态服务贡献率(%);i为地类;ΔESV_i为第i地类在研究期内的ESV变化量(亿元)。

1.3.7　敏感性分析模型

本研究使用敏感性模型,通过上下调整已确定的每个土地利用类型ESV系数的50%大小,计算ESV对价值系数VC变化的响应,最终确定生态系统服务价值随着时间的变化情况和对价值系数的依赖程度[21]。计算公式为

$$CS = \frac{(ESV_j - ESV_i)/ESV_i}{(VC_{jx} - VC_{ix})/VC_{ix}} \quad (8)$$

式中:ESV为估算的生态系统服务价值,VC为价值系数(元/hm^2),i和j分别代表初始值和调整后的值(上下调整50%),CS为敏感性指数。当CS≥1时,表明ESV相对于VC是富有弹性的,即ESV对VC的变化反应敏感;CS<1,表明ESV对VC缺乏弹性。CS值越大,表明ESV指数的准确性越关键,即它对结果准确性的决定作用越强。

1.3.8　基于地理探测器分析驱动力

地理探测器是用于探测空间分异性,以及揭示其驱动因子的一种统计学方法,包含因子探测、交互作用探测、风险区探测及生态探测4个模块[22]。本研究采用因子探测器探究各单一因素对松嫩平原ESV空间分异的影响强度;利用交互探测器揭示多因子间对区域ESV空间分异的驱动机制。计算公式为

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2}\sum_{n=1}^{L} N_h\sigma_h^2 \quad (9)$$

式中:q为某因子对ESV空间分异的解释力,取值为[0,1],q越大,说明该因子对ESV空间分异的解释力越强,反之则弱;L为分级区域;N_h为分级区域样本数;σ_h^2为分级区域离散方差;σ^2为全区离散方差;N为样本数。

2　结果与分析

2.1　土地利用变化

2.1.1　土地利用/土地覆盖

2005—2023年松嫩平原土地利用结构总体以旱地和林地为主,面积比例分别为50.72%~51.90%和13.86%~14.33%,且总体呈下降趋势。2005—2010年草地、湿地和水田面积表现为:草地>湿地>水田;2015年水田面积超过湿地,至2023年三者面积关系转变为:草地<湿地<水田,表明研究期内水田扩张和草地缩减较为明显。从各土地利用类型变化看,近20 a水田、建设用地和湿地显著增加,土地利用动态度分别是2.35%,1.43%,0.76%;其余地类动态度均有所减少,其中水域、草地、未利用地、林地和旱地动态度分别为-1.44%,-1.18%,-0.51%,-0.17%,-0.05%。草地变化具有明显阶段性,2005—2010年增加613.82 km^2,2010—2023年减少4,575.43 km^2,

总体呈减少趋势。各土地利用类型单一动态度与面积变化趋势基本一致(表3)。

表3 2005—2023年松嫩平原不同土地利用类型动态度
Table 3 Dynamic degrees of different land use types in Songnen Plain (2005—2023)

动态度类型		时期			
		2005—2010年	2010—2015年	2015—2023年	2005—2023年
单一动态度/%	旱地	0.26	−0.09	−0.37	−0.05
	林地	−0.31	−0.06	−0.26	−0.17
	草地	0.66	−0.11	−4.68	−1.18
	湿地	−0.30	−0.31	3.44	0.76
	水田	−0.89	1.40	7.83	2.35
	水域	−3.27	−0.23	−2.09	−1.44
	建设用地	1.29	0.40	3.17	1.43
	未利用地	0.50	−0.33	−1.98	−0.51
综合动态度/%		1.79	0.39	1.26	1.23

旱地、草地和未利用地在2005—2010年动态度为正,此后转为负值;湿地在2015年前减少,2015—2023年明显增加;水田在2010年前减少,此后持续增加;水域和林地各时段动态度均为负值,建设用地则始终为正值。综合动态度显示,2005—2010年和2015—2023年土地利用变化较2010—2015年活跃。总体上,水田和湿地动态度由负转正,而旱地、草地和未利用地由正转负,表明研究区土地利用变化具有明显的阶段性特征。

2.1.2 土地利用转移

2005—2023年松嫩平原土地利用转换较为显著,主要表现为旱地、水田、草地、湿地和水域之间的相互转换(图2,表4)。从整个研究期看,水田、湿地和建设用地总体扩张,水域、草地、林地、旱地和未利用地不同程度减少。其中,水田增幅最大,新增面积主要来源于旱地和湿地;建设用地扩张以占用旱地为主。水域和草地减少较为明显,水域主要转为湿地、旱地和水田,草地主要转为旱地和湿地;湿地新增部分则主要来源于草地和水域。总体上,研究区土地利用转换呈现出旱地向水田和建设用地转化、水域向湿地和耕地转化、草地与湿地双向转换等主要路径。

不同阶段土地利用转移具有明显差异(图2)。2005—2010年整体转换相对平缓,旱地和草地分别净增1 495.08和613.82 km^2,水田减少579.46 km^2;2010年以后土地利用转换明显增强,旱地持续向水田和建设用地转出,推动2010—2023年水田增加6 216.26 km^2,并使旱地减少2 619.18 km^2。草地在2010—2023年大幅度减少4 575.43 km^2,主要转为旱地和湿地;湿地则由2005—2015年的小幅减少转为2015—2023年的明显增加,后期增量主要来源于草地和水域。与此同时,水域持续向湿地、旱地和水田转出,研究期内净减少2 750 km^2;建设用地则主要通过旱地转入而净增长2 448.69 km^2。由此表明,松嫩平原近20 a土地利用演变具有明显的阶段性,其核心转移关系由早期相对分散的地类转换逐渐转向以旱田—水田、水域—湿地和草地—湿地等转换为主。

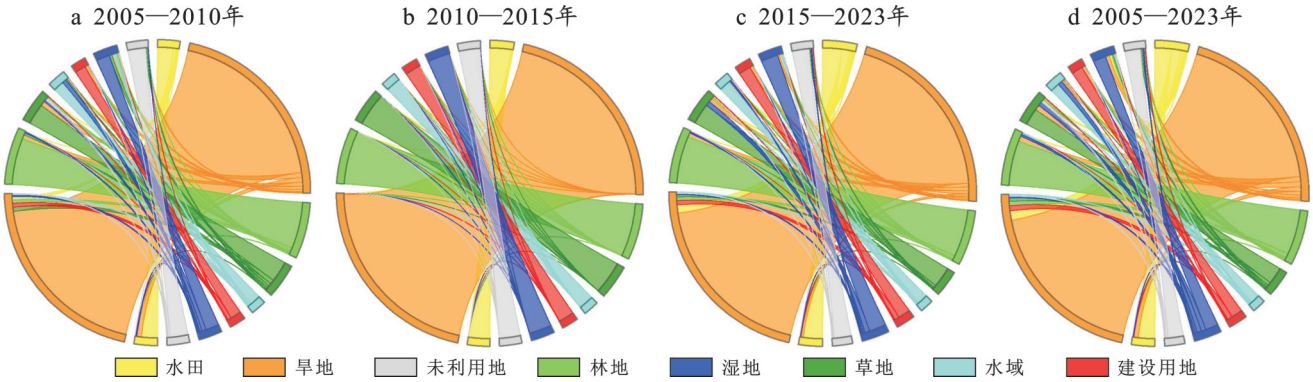


图2 2005—2023年松嫩平原不同时期土地利用转移特征
Fig.2 Land use transition characteristics in Songnen Plain during different periods (2005—2023)

2.2 生态系统服务价值时空变化

2.2.1 ESV总量变化

从表5可知,2005—2023年生态系统服务价值(ESV)总体呈下降态势,起伏波动变化较大,20 a间降幅为8.99%,共亏损生态价值529.03亿元。近20 a间,研究区总ESV组成始终以水域、湿地、林地比例较大,其中水域、林地ESV随着时间的推移呈降低趋势,湿地ESV呈增加趋势。从不同土地利用类型ESV来看,水田ESV(+41.69%)与湿地ESV(+13.50%)呈增加趋势;水域ESV(−26.41%)与草地ESV(−21.63%)呈降低趋势,其余土地利用类型的ESV皆呈降低趋势,但降低幅度相对较小。其

中水田ESV、草地ESV与湿地ESV呈现剧烈变化:水田ESV在2005—2010年为降低阶段,5 a间亏损3.95亿元,而在2010—2023年呈急速增长阶段,13 a间净增长42.39亿元,这是由于水田面积的大幅增长,反映出水田农业供给服务的提升;草地ESV在2005—2010年呈增长阶段,价值增长12.98亿元,而从2010—2023年进入急剧降低阶段,13 a间亏损96.76亿元,体现其对环境变化的高敏感性;而湿地ESV在2005—2015年为降低阶段,10 a间亏损36.75亿元,而在2015—2023年进入急速增长阶段,湿地面积虽仅增长2 200 km^2,但由其较高的单位面积生态系统服务价值,导致2015—2023年ESV净增长199.70亿元。未利用地、建设用地对整体ESV影响相对有限。

表4　2005—2023年松嫩平原土地利用转移矩阵

Table 4　Land use transition matrix of Songnen Plain from 2005 to 2023　　单位:km^2

土地类型		2023年面积								
		水田	旱地	林地	草地	水域	建设用地	湿地	未利用地	转出面积合计
2005年面积	水田	9 874.45	2 714.97	85.09	89.94	146.92	411.44	190.02	5.94	3 644.32
	旱地	5 343.08	98 709.87	2 501.02	1 904.55	570.85	3 705.10	891.30	417.59	15 333.49
	林地	215.41	3 005.49	26 458.78	673.62	244.04	125.06	1 106.57	58.20	5 428.39
	草地	859.75	2 915.85	824.86	9 730.21	202.45	234.47	2 570.01	978.78	8 586.17
	水域	728.95	1 074.16	159.79	274.91	5 469.83	72.90	2 463.20	169.17	4 943.08
	建设用地	246.34	1 863.33	66.52	88.30	38.95	6 870.31	37.46	38.63	2 379.53
	湿地	1 532.80	2 096.42	712.60	654.43	636.72	69.21	7 340.20	195.74	5 897.92
	未利用地	355.09	541.75	55.52	939.17	353.38	210.23	426.45	9 069.50	2 881.59
	转入面积合计	9 281.42	14 211.97	4 405.40	4 624.92	2 193.31	4 828.41	7 685.01	1 864.05	49 094.49

表5　2005—2023年松嫩平原各类生态系统服务价值及变化

Table 5　Values and changes of ecosystem services by land use type in Songnen Plain from 2005 to 2023

土地利用类型	生态系统服务价值(10^8元·a^{-1})				生态系统服务价值变化率(ESV)/%			
	2005年	2010年	2015年	2023年	2005—2010年	2010—2015年	2015—2023年	2005—2023年
旱地	801.70	803.93	808.58	793.80	0.28	0.58	−1.83	−0.99
水田	92.19	88.24	93.83	130.63	−4.29	6.33	39.22	41.69
林地	1 101.31	1 084.06	1 082.85	1 065.79	−1.57	−0.11	−1.57	−3.22
草地	387.35	400.33	396.74	303.58	3.35	−0.90	−23.48	−21.63
湿地	1 207.31	1 185.16	1 170.56	1 370.26	−1.83	−1.23	17.06	13.50
水域	2 279.98	1 898.23	1 895.70	1 677.91	−16.74	−0.13	−11.49	−26.41
建设用地	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
未利用地	13.62	13.98	13.84	12.46	2.68	−1.05	−9.96	−8.52
总计	5 883.46	5 473.93	5 462.10	5 354.43	−6.96	−0.22	−1.97	−8.99

2.2.2　ESV类型间的变化

近20年间松嫩平原各项生态系统服务价值变化程度差异明显(表6)。整体来看,近20 a间,11项服务项目中食物生产(+4.59%)、维持养分循环(+1.58%)、美学景观(+0.28%)、生物多样性(+0.23%)4项的ESV呈增长趋势,其他单项ESV均呈降低趋势,特别是水资源供给(−33.91%)和水文调节(−14.60%)ESV降低幅度最大,这与林地面积、水域面积持续减少有着直接联系。从单项利用类型来看,2005—2010年仅食物生产ESV(+0.23%)呈增长趋势,其余单项ESV均为降低趋势,特别是水资源供给ESV(−13.52%)和水文调节ESV(−11.51%)降幅最大。2010—2015年所有单项ESV皆为微量调整,各项ESV变化幅度差异不大。2015—2023年水资源供给ESV(−21.14%)急剧降低,其中美学景观(+4.57%)、食物生产(+3.99%)、生物多样性(+3.66%)增幅较大,其余单项ESV呈少量变化。

从研究区单项ESV来看,各单项ESV所占比例大小顺序为:水文调节>气候调节>土壤保持>生物多样性>气体调节>净化环境>食物生产>美学景观>水资源供给>原料生产>维持养分循环,其中水文调节与气候调节是核心功能,二者价值之和占总ESV的56%以上,这与区域湿地、林地等生态系统广泛分布的地域特征高度契合。维持养分循环ESV最低,仅占总ESV的0.8%左右。

表 6 2005—2023 年松嫩平原各类型 ESV 变化

Table 6 Changes in ESV by service type in Songnen Plain (2005—2023)

服务项目	生态系统服务价值 ESV/(10^8元·a^{-1})				生态系统服务价值变化率/%			
	2005 年	2010 年	2015 年	2023 年	2005—2010 年	2010—2015 年	2015—2023 年	2005—2023 年
食物生产	237.18	237.60	238.55	248.07	0.18	0.40	3.99	4.59
原料生产	141.67	140.54	141.07	138.78	−0.80	0.38	−1.62	−2.05
水资源供给	176.20	152.38	147.66	116.45	−13.52	−3.10	−21.14	−33.91
气体调节	365.17	360.54	362.25	365.12	−1.27	0.47	0.79	−0.01
气候调节	633.43	622.78	621.85	606.06	−1.68	−0.15	−2.54	−4.32
净化环境	340.52	321.63	320.47	315.83	−5.55	−0.36	−1.45	−7.25
水文调节	2 833.64	2 507.35	2 501.91	2 419.83	−11.51	−0.22	−3.28	−14.60
土壤保持	455.38	451.13	451.65	441.67	−0.93	0.11	−2.21	−3.01
维持养分循环	47.62	47.10	47.48	48.37	−1.08	0.81	1.86	1.58
生物多样性	422.81	411.08	408.80	423.77	−2.78	−0.55	3.66	0.23
美学景观	229.84	221.80	220.42	230.49	−3.50	−0.62	4.57	0.28
总 计	5 883.46	5 473.93	5 462.10	5 354.43	−6.96	−0.22	−1.97	−8.99

2.2.3 生态系统服务价值空间变化

近 20 a,松嫩平原地区 ESV 总体大致呈现“东北部较高,中部水域分布区域高,西部低”的空间分布格局。

从图 3 可以看出,研究区 ESV 高值区集中分布在中部的大型水域,如松花江、嫩江等,这主要归因于该区水域面积大,价值系数高;ESV 较高值区集中分布在五大连池市、北安市、绥棱县、以及庆安县,该区地类以林地为主,受人类活动干扰少,植被覆盖率高,区域生态环境较好;ESV 中值区、低值区、较低值区交错分布,集中分布在研究区中部、西部地区,该区地势平坦,人口集中,且以旱地和建设用地为主,ESV 值相对较低。2005—2023 年低值区面积持续增加,较低值区、中值区、高值区面积总体呈减少趋势。研究区 ESV 集中在中值区,其面积始终占研究区总面积的 44% 以上,说明松嫩平原生态系统服务价值总体偏低。其中,2015—2023 年高值区面积由 2.51% 增长至 3.27%,分布在杜蒙县、林甸县、富裕县,是由于该区域土地利用类型部分转换为生态系统服务价值系数较高的湿地与水田所致。

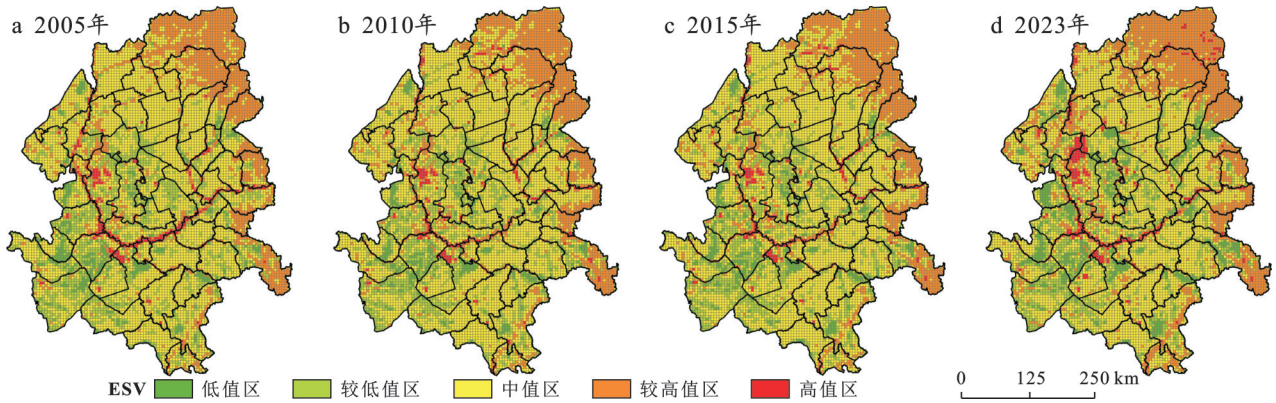


图 3 2005—2023 年松嫩平原生态系统服务价值空间分布

Fig.3 Spatial distribution of ESV in Songnen Plain (2005—2023)

2.2.4 生态系统服务价值自相关及冷热点分布

2005—2023 年松嫩平原 ESV 的全局 Moran's I 值均大于 0,p 值均小于 0.001,表明研究区 ESV 在各研究年份均具有显著的正向空间自相关特征,即高 ESV 格网与高 ESV 格网、低 ESV 格网与低 ESV 格网在空间上呈集聚分布。具体来看,Moran's I 值由 2005 年的 0.582 2 下降至 2010 年的 0.556 3,2015 年基本保持稳定,为 0.556 4,至 2023 年升高至 0.607 3,表现出先减弱后增强的变化特征。总体来看,松嫩平原 ESV 空间集聚性在研究期内始终较强,且 2023 年集聚程度最高,说明近 20 a 研究区 ESV 高值区和低值区的空间分异更加明显(见表 7)。

表 7　2005—2023 年松嫩平原 ESV 空间自相关性分析结果
Table 7　Results of spatial autocorrelation analysis of ESV in Songnen Plain (2005—2023)

指数	2005年	2010年	2015年	2023年
Moran's *I*	0.582 2	0.556 3	0.556 4	0.607 3
*Z*得分	77.059 4	73.743 2	73.746 2	77.469 1
*p*值	＜0.001	＜0.001	＜0.001	＜0.001

从局部冷热点分布来看,2005—2023年松嫩平原ESV空间格局总体呈现“东部热点集聚、西部冷点集聚、中部多为不显著区”的特征(见图4)。由图4可以看出,热点区主要分布在东部五大连池市、北安市、绥棱县、庆安县、木兰县、五常市等林地分布较集中的区域,以及中部松花江、嫩江等河流和湖沼湿地周边地区,包括齐齐哈尔市、大庆市、白城市、松原市、哈尔滨市部分区域。这些区域水域、湿地和林地分布相对集中,单位面积ESV较高,因而形成较明显的高值集聚特征。冷点区主要分布在西部及西南部部分地区,如泰来县、镇赉县、白城市、大安市、前郭县等区域。该类区域旱地、建设用地和未利用地占比较高,水域、湿地和林地等高价值生态用地相对较少,导致ESV整体偏低,并形成低值集聚格局。中部大部分区域冷热点特征不显著,说明其ESV与周边格网之间的局部空间差异相对较弱。

从时间变化看,研究期内低值冷点区总体较为稳定,而高值热点区在东部林地集中区和中部部分河湖湿地区域有所扩展。该变化表明,松嫩平原ESV空间格局并未发生根本性逆转,但高值生态空间的局部集聚程度有所增强。结合土地利用变化结果可知,热点区扩展与林地、湿地、水域等高价值生态用地的空间分布密切相关,而冷点区稳定存在则反映出西部部分地区生态系统服务功能仍处于相对低值状态。

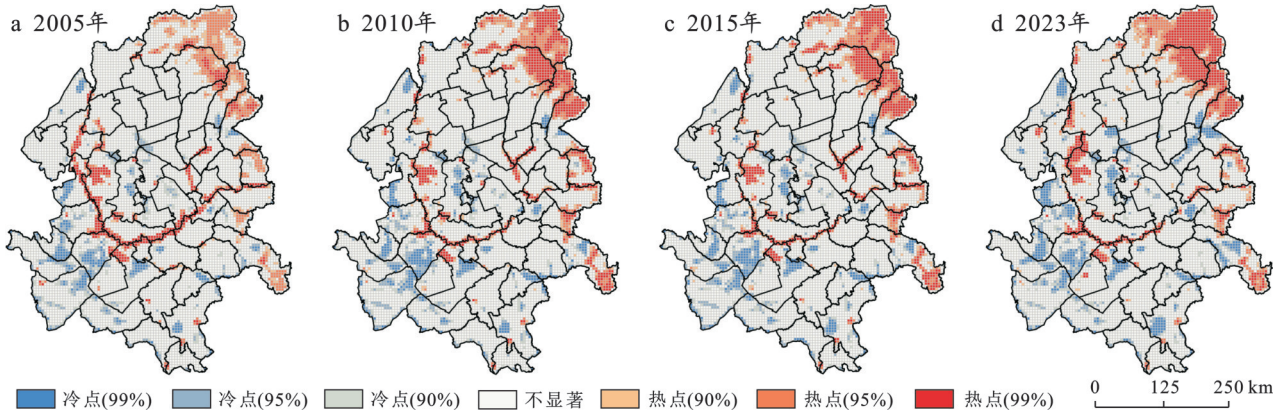


图 4　2005—2023 年松嫩平原 ESV 冷热点空间分布
Fig.4　Spatial distribution of ESV cold and hot spots in Songnen Plain (2005—2023)

2.2.5　生态系统服务价值流向

2005—2023年松嫩平原各地类间的相互转换导致ESV总体损益528.74亿元。如表8所示,草地向湿地的转移、未利用地向水域的转移是首要的生态服务增值类型,分别使ESV增高134.17亿元和40.12亿元,林地和未利用地向湿地的转移也对ESV的增长贡献了43.10亿元;水域向湿地的转移是最首要的生态服务减值类型,导致生态价值亏损233.32亿元。水域、湿地转向水田也是首要且大众关注的生态服务减值类型,分别导致生态价值亏损123.46亿元和113.29亿元。深入分析可以看出,除水域转向湿地外,其他土地利用类型转向水域、湿地是使得ESV价值升高的首要原因,对生态系统服务功能改善起着重要作用,而水域转向湿地和其他土地利用类型向水田和旱地的转移是导致研究区生态价值亏损的关键原因。

为验证上述价值流向模型计算的准确性与一致性,本文对流向损益表的核算结果与两期ESV总量的直接计算结果进行了交叉验证。验证结果表明(表8),基于各地类净流量面积汇总的ESV损益值为528.74亿元,而由研究区2005和2023年两期土地利用类型ESV总量直接相减得到的ESV净变化为529.03亿元,两者之间的绝对误差约为0.29亿元。该误差占区域ESV总净变化量的比例小于0.1%,属计算舍入误差范畴,远低于可接受的误差范围,不影响研究结论的可靠性。

2.2.6　土地利用类型对ESV变化的生态贡献率分析

2005—2023年土地利用类型对松嫩平原ESV变化呈动态影响。由表9可知,20年间,生态贡献率高低表现为:水域＞湿地＞草地＞水田＞林地＞旱地＞未利用地＞建设用地,其中湿地在2010—2015年贡献率最高,为45.19%;而在2005—2010年、2015—2023年水域的生态贡献率最高,分别是86.63%和

37.51%,其次是湿地。水域和湿地在调节服务和支持服务上表现出较高价值,使其面积变化会显著影响ESV的贡献率,湿地和水田在20 a间面积总体增长1 800 km^2和5 700 km^2,是导致ESV增益的首要土地利用类型,其中湿地因较高的服务价值而成为首要的正向贡献因子。而水域和草地在20 a间面积呈持续减少趋势,是导致ESV损失的主要土地利用类型,其中水域是首要的负向贡献因子。

表8 2005—2023年松嫩平原ESV流向损益及模型验证结果

Table 8 Gains and losses of ESV flow in Songnen Plain (2005—2023) and model verification results

转换类型	净面积/hm^2	ESV变化量/10^8元	损益	转换类型	净面积/hm^2	ESV变化量/10^8元	损益
草地→湿地	191 558	−134.17	增益	草地→旱地	101 130	14.28	损失
未利用地→水域	18 421	−40.12	增益	林地→旱地	50 447	13.87	损失
林地→湿地	39 397	−22.32	增益	旱地→建设用地	184 177	12.95	损失
未利用地→湿地	23 071	−20.78	增益	草地→水田	76 981	11.03	损失
林地→水域	8 425	−15.54	增益	水域→建设用地	3 395	7.43	损失
草地→林地	15 124	−2.02	增益	林地→水田	13 032	3.61	损失
未利用地→水田	34 915	−1.98	增益	草地→建设用地	14 614	3.09	损失
未利用地→旱地	12 416	−0.73	增益	湿地→建设用地	3 175	2.90	损失
水域→湿地	182 648	233.32	损失	林地→建设用地	5 854	2.02	损失
水域→水田	58 203	123.46	损失	水田→建设用地	16 510	1.13	损失
湿地→水田	134 278	113.29	损失	草地→未利用地	3 961	0.79	损失
水域→旱地	50 331	106.65	损失	旱地→水田	262 811	0.55	损失
湿地→旱地	120 512	101.42	损失	未利用地→建设用地	17 160	0.20	损失
水域→草地	7 246	14.33	损失	林地→未利用地	268	0.09	损失
ESV变化总量/亿元		−528.74					
相对误差/%		<0.1					

表9 2005—2023年松嫩平原各土地利用类型的生态贡献率

Table9 Ecological contribution rates of each land use type in Songnen Plain (2005—2023)

时间区间	生态贡献率/%							
	旱地	水田	林地	草地	湿地	水域	建设用地	未利用地
2005—2010年	0.51	0.90	3.91	2.95	5.03	86.63	0.00	0.08
2010—2015年	14.39	17.30	3.74	11.11	45.19	7.83	0.00	0.43
2015—2023年	2.55	6.34	2.94	16.04	34.39	37.51	0.00	0.24
2005—2023年	0.85	4.13	3.81	8.99	17.49	64.61	0.00	0.12

2.3 生态系统服务价值对价值系数的敏感性分析

通过计算敏感性指数(CS)对松嫩平原ESV进行合理性验证(见表10)。不同土地利用类型的CS值差别较大,但同一地类差别较小,其中水域的CS值最大,约为0.349,即当水域价值系数增加或减少1%时,生态系统服务总价值变化0.349%;其次是湿地,约为0.229。调整建设用地的价值系数不影响ESV,敏感性系数为0。松嫩平原各土地利用类型价值系数的敏感性系数范围都小于1,表明ESV对价值系数(VC)缺乏弹性,即价值系数的调整对生态系统服务价值影响不大。因此,研究结果具有可靠性。

表10 2005—2023年松嫩平原ESV敏感性指数

Table 10 ESV sensitivity index of Songnen Plain (2005—2023)

年份	ESV敏感性指数							
	旱地	水田	林地	草地	湿地	水域	建设用地	未利用地
2005	0.134	0.015	0.186	0.067	0.210	0.386	0.000	0.002
2010	0.144	0.163	0.196	0.075	0.221	0.346	0.000	0.003
2015	0.148	0.017	0.200	0.058	0.223	0.352	0.000	0.003
2023	0.146	0.024	0.197	0.057	0.262	0.311	0.000	0.002

2.4 生态系统服务价值变化的驱动因子分析

2.4.1 因子探测结果

由表11可以看出,松嫩平原地区ESV空间分布

差异受自然环境和社会经济因素共同影响,且各因子对ESV的影响程度具有较大差异。各因子对ESV空间分布的解释力排序为:距城镇村距离(X_7,0.375 6)>人口密度(X_6,0.157 9)>NDVI(X_8,0.152 3)>年平均气温(X_3,0.056 0)>地均GDP(X_5,0.027 4)>坡度(X_2,0.017 1)>年平均降水量(X_4,0.012 6)>高程(X_1,0.008 1)。相较于自然环境因子,社会经济因子对松嫩平原ESV空间分异性影响程度更大。q统计量显示,社会经济因素中,距城镇村距离(X_7)对ESV影响最为显著,超过了37%,这源于松嫩平原近几十年来剧烈的土地利用变化,城镇用地持续扩张,距城镇越近的区域受城镇化影响越深,ESV损失越严重。同时精准反映出人类活动对ESV空间分异的主导作用。其次人口密度(X_6)和NDVI(X_8)对ESV影响也较为显著,说明人口分布的不均衡直接导致土地利用方式和强度的空间分异,进而塑造了ESV的空间差异格局。而NDVI(X_8)由于农田与周边景观之间普遍存在明显的NDVI差异,致使其能够从植被覆盖维度较好地解释松嫩平原ESV的空间异质性。而地均GDP(X_5)解释力有限,并非经济发展对ESV无实质性影响,而是其分布于城镇节点,空间配置与ESV分异格局不相匹配所致。自然因子解释力偏低,根本原因在于松嫩平原地势平坦,海拔多在300 m以下,高程(X_1)与坡度(X_2)的空间变异极小;年平均降水量(X_4)与年平均气温(X_3)作为大尺度气候背景场,在平原内部呈缓变甚至均质化分布。致使其对ESV格局的解释力受到制约。

2.4.2　交互因子探测结果

从交互探测结果来看(图5),任意两个因子的交互作用大于单一因子对ESV空间分布的解释力度,这说明导致松嫩平原ESV空间分异的结果是由不同影响因素共同作用而成。其中,距城镇村距离(X_7)∩坡度(X_2)交互结果最强,达0.59。其次是城镇村距离(X_7)∩年平均降水量(X_4)、城镇村距离(X_7)∩人口密度(X_6),达到40%以上,进一步表明距城镇村距离(X_7)在ESV空间分异中有最强的贡献。人口密度(X_6)与NDVI(X_8)在与其他因子交互后皆有大幅度的显著提高,说明其单独分布与ESV并不直接重合,必须与其依赖的自然因子和社会经济因子组合后,才能捕捉到ESV的空间异质关系,完整揭示其对应的生态效应。而高程(X_1)、坡度(X_2)、年平均气温(X_3)、年平均降水量(X_4)等自然因子在与其他因子交互后皆有增强趋势,但幅度有限。整体来看,社会经济因子内部的交互作用明显强于自然环境因子内部的交互作用,表明社会经济对ESV空间分异性存在更强的约束性。自然因子的解释力受限于区域平坦均质的地貌与气候背景,增益有限,而距城镇距离、人口密度所表征的人类活动空间配置,不仅自身贡献突出,更通过与地形、植被因子的交互作用,主导了ESV空间格局的形成。

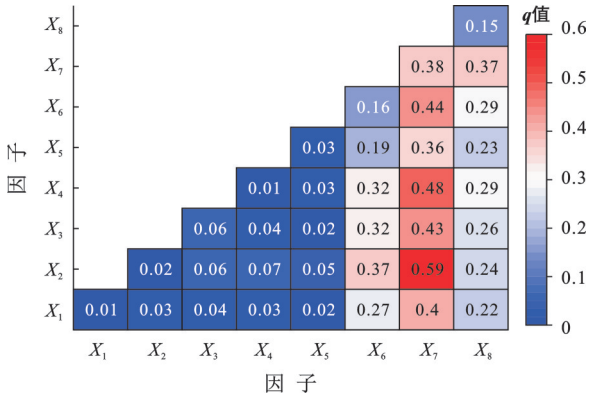


图5　松嫩平原ESV空间分异的因子交互探测结果

Fig.5　Factor interaction detection results of ESV spatial differentiation in Songnen Plain

3　讨　论

3.1　土地利用变化对ESV总量下降的影响机制

土地利用变化通过改变不同地类面积及其生态功能,直接影响区域ESV及其结构[22-23]。2005—2023年松嫩平原ESV由5 883.46亿元下降至5 354.43亿元,总体下降8.99%,是水域、林地、草地等生态用地价值损失与水田、湿地价值增长相互抵消后的综合结果。其中,水田和湿地ESV分别增长41.69%和13.50%,对总ESV下降具有一定缓冲作用;而水域和草地ESV分别下降26.41%和21.63%,是区域ESV损失的重要来源,表明研究区生态系统服务功能总体仍处于承压状态。

不同地类对ESV变化的作用机制存在差异。水田ESV增长主要源于面积扩张,体现农业生产空间增加和食物生产服务提升;湿地则因单位面积价值较高,对ESV具有较强正向贡献。相比之下,研究期内水域面积净减少2 750 km^2,主要向湿地、旱地和水田转出,使其成为ESV下降的主要负向因素。由于水文调节和气候调节合计占总ESV的56%以上,水域、湿地和林地的变化对区域ESV影响尤为明显。水田扩张虽可提升食物生产服务,但难以完全补偿水域缩减造成的水文调节、环境净化和生物多样性维持等服务损失。因此,松嫩平原ESV变化实质上是土地利用转换引起不同生态服务功能重新配置的结果,其总量降幅相对有限主要源于不同地类ESV增减的部分抵消,并不能据此判定区域生态系统服务功能得到改善。

3.2 土地利用转换中的ESV损益与生态权衡

松嫩平原ESV损益主要取决于不同地类之间转换引起的生态系统服务替代与权衡，即一种服务功能增强可能伴随另一种服务功能减弱[24]。本研究价值流向结果显示，草地转湿地、未利用地转水域、林地和未利用地转湿地可增加ESV，说明低价值地类或退化地类向湿地、水域等高价值生态地类转化，有利于提升区域生态系统服务功能。相反，水域转湿地、水田或旱地以及湿地转水田则造成较大ESV损失，说明高价值生态用地向农业用地或较低价值地类转换是研究区ESV下降的重要路径。

值得注意的是，湿地和水田面积增加并不意味着生态系统服务整体改善。水域单位面积ESV较高，尤其在水文调节和水资源供给方面具有不可替代性。水域转湿地或水田虽然可增强部分生态或农业供给功能，但同时会损失原有的水文调节、环境净化和生境维持等服务，体现出松嫩平原粮食生产与生态保护之间的现实权衡。作为重要商品粮生产基地，水田扩张有助于提高农业供给能力，但若其扩张来源于水域、湿地等高价值生态用地，则会造成较大的调节服务损失。已有研究指出，生态系统服务研究应由单项服务变化转向多服务协同管理和空间优化[25]。因此，松嫩平原土地利用调控应重点控制水域、湿地等高价值生态用地向耕地转换，综合考虑盐碱地、未利用地的农业适宜性、生态恢复潜力及水资源承载能力，并将ESV损益作为土地利用转换合理性的重要依据，避免以单纯补充耕地为目标的粗放开发。

3.3 ESV空间分异格局及其驱动机制

松嫩平原ESV空间分异格局是自然生态本底与人类活动强度共同作用的结果。研究区ESV总体呈现“东北部较高，中部水域分布区域高，西部低”的空间格局。高值区主要分布在松花江、嫩江等大型水域以及林地、湿地相对集中区；低值区则多与旱地、建设用地和未利用地集中分布有关，与已有研究关于土地利用、自然条件和社会经济活动共同塑造ESV空间格局的认识一致[26-27]。

空间自相关与冷热点分析表明，2005—2023年松嫩平原ESV具有显著正向空间集聚特征（Moran's $I>0$，$p<0.001$），总体呈“东热西冷，中部多不显著”的格局。东部林地及中部河湖湿地构成高值集聚区，而西部旱地、未利用地和建设用地比例较高的区域形成低值集聚区，进一步说明水域、湿地和林地是维持区域高ESV及其空间集聚的重要生态基础。

地理探测器结果显示，距城镇村距离、人口密度和NDVI是松嫩平原ESV空间分异的重要影响因子，其中距城镇村距离解释力最高。已有研究表明，NDVI、人口密度、道路距离和居民点距离等可从植被状况、人类活动强度和空间可达性等方面解释ESV空间差异[28]。松嫩平原地势较平坦，自然地形和气候因子空间差异相对有限，而城镇扩张、人口集聚和农业开发等社会经济活动具有更强的空间不均衡性，能够更直接地改变土地利用强度及生态用地格局，因而社会经济因素表现出较强解释力。本研究进一步明确了距城镇村距离和人口密度是松嫩平原ESV空间分异的主导因子，而NDVI则从植被覆盖和生态质量状态角度反映了区域ESV高低值分布。交互探测进一步表明，两因子交互解释力均高于单因子，说明松嫩平原ESV空间分异具有多因素耦合特征[28-29]。因此，区域生态治理不能只针对单一因素开展，而应将城镇扩张控制，农业空间优化和水域湿地、林地保护等统筹考虑。对于东部和中部ESV热点区，应重点维持水域、湿地和林地等高价值生态空间的连续性；对于西部冷点区，应加强盐碱地治理、草地恢复、湿地补水和生态廊道建设，提高低值区生态系统服务功能。

3.4 ESV核算结果的不确定性与管理启示

本研究基于当量因子法和GeoDetector模型揭示了松嫩平原ESV时空变化及其驱动机制，能够较准确反映ESV变化趋势和空间差异，但仍存在一定不确定性。当量因子法可反映不同土地利用类型对生态系统服务价值的相对贡献[4]，且本研究各地类敏感性系数均小于1，表明ESV对价值系数调整缺乏弹性，核算结果总体稳定；但水域和湿地敏感性相对较高，其价值系数设定对总ESV核算结果影响较大。同时，该方法难以充分刻画植被质量、水资源丰枯、土地管理强度及生态过程的动态变化，且价值系数的区域适用性和空间异质性仍存在局限[3]。因此，本文结果更适用于识别松嫩平原ESV变化趋势、主要损益路径和驱动因子贡献，而不宜直接作为生态资产绝对价值核算。

GeoDetector模型能够有效识别ESV空间分异的主要因子及其交互作用，但结果受因子选择、空间尺度和数据离散化影响。本研究虽选取自然环境和社会经济因子分析并揭示松嫩平原ESV空间分异的主要驱动机制，但尚未纳入政策落实、灌区建设、水资源调度和生态工程等变量，因此相关政策和工程仅可作为土地利用变化的背景解释，不宜作为直接驱动结论。后续研究应结合多源遥感、情景模拟和政策变量变化，提高ESV核算及驱动机制识别精度。

综合来看,松嫩平原土地利用管理应兼顾粮食安全与生态安全。①重点保护水域、湿地和林地等高价值生态空间,控制其向耕地和建设用地转化,维持水文调节、气候调节和生物多样性保护功能;②优化农业生产空间布局,推动水田和旱地向水资源承载力较高、生态损失较小的区域集中,避免以牺牲水域和湿地为代价扩大耕地;③针对西部低值区和冷点区推进盐碱地治理、草地恢复、湿地补水和生态廊道建设,提高低值区生态系统服务功能。最终,推动松嫩平原土地利用管理由单纯“面积管控”向“面积-功能-价值”协同管控转变,将ESV损益作为国土空间优化和生态修复决策的重要参考。

4　结 论

(1)松嫩平原2005—2023年土地利用结构总体稳定,土地利用类型始终以旱地和林地为主,占总面积的65%以上,水田和湿地面积先减后增,建设用地面积在此期间持续扩张,水域面积降低幅度较大,各地类转换以水田、草地、水域和湿地为主,转换较为频繁。

(2)价值总量方面,2005—2023年松嫩平原ESV总体呈下降趋势,但降幅相对较小,仅为8.99%。其中,水田和湿地ESV上升是抑制总ESV下滑的核心驱动力。其中湿地是首要的正向贡献因子,水域是首要的负向贡献因子。研究区最为突出的生态系统服务价值是水文调节和气候调节(二者占总ESV的56%以上),其次是土壤保持、生物多样性,这四项生态系统服务价值占总服务价值的72%以上,生态系统服务价值最低的是维持养分循环,仅为0.8%。

(3)松嫩平原地区ESV空间格局大致呈现“东北部较高,中部水域分布区域高,西部低”的分布特征,ESV高值区总体分布在大型水域的周围,较高值区集中分布在林地广泛分布区域;ESV中值区、较低值区以及低值区分布在区域的中西部。同时松嫩平原ESV冷热点分布大致呈“东热西冷,中无显著”的特征,低值聚类整体不变,而高值聚类在东部地区和中部部分地区有所增加。

(4)社会经济因素中,距城镇村距离是ESV空间分异的主要驱动因子,人口密度对ESV解释力也较为显著;在自然因素中,NDVI是ESV空间分异中解释力最强的因子,但社会经济对ESV空间分异的解释力高于自然因素的解释力。同时因子间的交互作用比单因子能更好地解释ESV空间分异性,其中社会经济因子内部的交互作用明显强于自然环境因子内部的交互作用。

参考文献(References)

[1] 李理,赵芳,朱连奇,等.淇河流域生态系统服务权衡及空间分异机制的地理探测[J].生态学报,2021,41(19):7568-7578.
Li Li, Zhao Fang, Zhu Lianqi, et al. Geographical detection of ecosystem services trade-offs and their spatial variation mechanism in Qihe River basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(19):7568-7578.

[2] 蒋伟峰,许艳,李冬花,等.流域生态系统服务价值、生态风险过程及其关联性:以淮河流域安徽段为例[J].水土保持通报,2022,42(3):120-130.
Jiang Weifeng, Xu Yan, Li Donghua, et al. Process and correlation between ecosystem services value and ecological risk in river basin: A case study at Huaihe River basin in Anhui Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(3):120-130.

[3] 张舟,吴次芳,谭荣.生态系统服务价值在土地利用变化研究中的应用:瓶颈和展望[J].应用生态学报,2013,24(2):556-562.
Zhang Zhou, Wu Cifang, Tan Rong. Application of ecosystem service value in land use change research: Bottlenecks and prospects [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013,24(2):556-562.

[4] 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 Gaodi, Zhang Caixia, Zhang Leiming, 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.

[5] 肖建设,乔斌,陈国茜,等.黄河源区玛多县土地利用和生态系统服务价值的演变[J].生态学报,2020,40(2):510-521.
Xiao Jianshe, Qiao Bin, Chen Guoqian, et al. Land use change and evolution of ecosystem service value in Maduo County of source region of the Yellow River [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(2):510-521.

[6] 刘纪远,张增祥,徐新良,等.21世纪初中国土地利用变化的空间格局与驱动力分析[J].地理学报,2009,64(12):1411-1420.
Liu Jiyuan, Zhang Zengxiang, Xu Xinliang, et al. Spatial pattern and driving forces of land use change in China in the early 21st century [J]. Acta Geographica Sinica, 2009,64(12):1411-1420.

[7] 张超正,陈丹玲,靳亚亚,等.基于经济社会发展阶段转型的土地利用变化驱动因素识别:以长江中游地区为例[J].长江流域资源与环境,2023,32(12):2528-2541.
Zhang Chaozheng, Chen Danling, Jin Yaya, et al. Identification of driving forces of land use change based on transition of economic-social development stage: Evidence

from middle reaches of Yangtze River [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023,32(12):2528-2541.

[8] 季杨,蒋金豹.长三角城市群城市扩张区环境质量变化遥感评价[J].遥感技术与应用,2021,36(5):1131-1146.
Ji Yang,Jiang Jinbao. Remote sensing analysis of environmental change in urban expansion area of Yangtze River delta urban agglomeration[J].Remote Sensing Technology and Application, 2021,36(5):1131-1146.

[9] 罗浩,菅政博,孙廷廷,等.多情景土地利用变化下极端干旱区系统生态系统服务权衡协同分析[J].新疆农业科学,2024,61(9):2245-2256.
Luo Hao, Jian Zhengbo, Sun Tingting, et al. Study on the trade-off and synergy of ecosystem services in extreme arid areas under multi scenario land use changes [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2024,61(9):2245-2256.

[10] 刘文鹏,李博,宋志宏,等.基于CA-Markov模型的云南自由贸易试验区土地利用和景观格局时空演变分析及模拟预测[J].国土与自然资源研究,2024(1):22-28.
Liu Wenpeng, Li Bo, Song Zhihong, et al. Analysis and simulation prediction of spatial and temporal evolution of land use and landscape pattern in Yunnan pilot free trade zone based on CA-Markov mode l[J]. Territory & Natural Resources Study, 2024(1):22-28.

[11] 魏丹,匡恩俊,迟凤琴,等.东北黑土资源现状与保护策略[J].黑龙江农业科学,2016(1):158-161.
Wei Dan, Kuang Enjun, Chi Fengqin, et al. Status and protection strategy of black soil resources in northeast of China [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2016(1):158-161.

[12] 殷厚民,胡建,王青青,等.松嫩平原西部盐碱土旱作改良研究进展与展望[J].土壤通报,2017,48(1):236-242.
Yin Houmin, Hu Jian, Wang Qingqing, et al. Advance and prospect of the research on improvement by dry farming measures of saline-alkali soils in western Songnen Plain of China [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017,48(1):236-242.

[13] 陈雪萍,赵学勇,王瑞雄,等.气候变化与土地利用/覆被变化对中国北方农牧交错带水资源影响研究进展[J].中国沙漠,2022,42(3):170-177.
Chen Xueping, Zhao Xueyong, Wang Ruixiong, et al. Research advances on the impact of climate change and LUCC for water resources in the northern agro-pastoral zone in China [J]. Journal of Desert Research, 2022,42(3):170-177.

[14] 刘斌寅,赵明松,卢宏亮,等.1985—2015年淮北市土地利用变化特征及其预测研究[J].土壤通报,2019,50(4):807-814.
Liu Binyin, Zhao Mingsong, Lu Hongliang, et al. Research on the characteristics and prediction of land use change in Huaibei from 1985 to 2015 [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019,50(4):807-814.

[15] 刘纪远,布和敖斯尔.中国土地利用变化现代过程时空特征的研究:基于卫星遥感数据[J].第四纪研究,2000,20(3):229-239.
Liu Jiyuan, Buheaosier. Study on spatial-temporal feature of modern land-use change in China: Using remote sensing techniques [J]. Quaternary Sciences, 2000,20(3):229-239.

[16] 闫志远,王怡璇,李瑞平,等.2000—2020年锡林郭勒草原土地利用/土地覆被时空演变特征及驱动力分析[J].农业工程学报,2022,38(14):275-284.
Yan Zhiyuan, Wang Yixuan, Li Ruiping, et al. Spatio-temporal and evolutional characteristics and driving forces of land use/land cover in Xilingol steppe during 2000-2020 [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022,38(14):275-284.

[17] 姜常宜,岳慧丽,张蕙杰.中国黑土区粮食生产效率时空格局演化及收敛性分析:以黑龙江省和吉林省为例[J].华中农业大学学报(社会科学版),2025(6):24-34.
Jiang Changyi, Yue Huili, Zhang Huijie. Spatio-temporal evolution and convergence analysis of grain production efficiency in China's black soil region: A case study of Heilongjiang and Jilin Provinces [J]. Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition), 2025(6):24-34.

[18] 文高辉,张紫怡,田雨萌,等.长江中下游粮食主产区耕地面源污染时空分异特征[J].农业环境科学学报,2024,43(1):133-142.
Wen Gaohui, Zhang Ziyi, Tian Yumeng, et al. Temporal and spatial characteristics of cultivated land non-point source pollution in the main grain-producing areas of the middle and lower Yangtze region [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2024,43(1):133-142.

[19] 李松林,王萍.黄河流域山东段土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J].生态科学,2023,42(6):144-155.
Li Songlin, Wang Ping. The impact of land use change on the value of ecosystem services in the Shandong section of the Yellow River basin [J]. Ecological Science, 2023,42(6): 144-155.

[20] 约日古丽卡斯木,杨胜天,孜比布拉·司马义.新疆艾比湖流域土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J].农业工程学报,2019,35(2):260-269.
Yueriguli Kasimu, Yang Shengtian, Zibibula Simayi, et al. Impact of land use change on ecosystem service value in Ebinur Lake basin, Xinjiang [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,

2019,35(2):260-269.

[21] 张剑飞,阳文锐,李晶晶,等.北京市生态系统服务价值时空变化及其驱动力[J].生态学报,2025,45(1):306-318.
Zhang Jianfei, Yang Wenrui, Li Jingjing, et al. Spatio-temporal variation and driving factors of ecosystem services value in Beijing [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(1):306-318.

[22] 戚丽萍,栾兆擎,魏勉,等.基于土地利用的江苏省各市生态系统服务价值时空变化研究[J].南京林业大学学报(自然科学版),2023,47(4):200-208.
Qi Liping, Luan Zhaoqing, Wei Mian, et al. Spatial and temporal variations of ecosystem service values in Jiangsu Province based on land-use change [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2023,47(4):200-208.

[23] 王军,顿耀龙.土地利用变化对生态系统服务的影响研究综述[J].长江流域资源与环境,2015,24(5):798-808.
Wang Jun, Dun Yaolong. A review on the effects of land use change on ecosystem services [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(5): 798-808.

[24] 苏伯儒,刘某承.基于生态系统服务权衡的生态系统管理策略研究进展[J].自然资源学报,2023,38(7):1848-1862.
Su Bingru, Liu Moucheng. Research progress in ecosystem management strategies based on ecosystem services trade-offs [J]. Journal of Natural Resources, 2023,38(7):1848-1862.

[25] 彭建,胡晓旭,赵明月,等.生态系统服务权衡研究进展:从认知到决策[J].地理学报,2017,72(6):960-973.
Peng Jian, Hu Xiaoxu, Zhao Mingyue, et al. Research progress on ecosystem service trade-offs: From cognition to decision-making[J]. Acta Geographica Sinica, 2017,72(6):960-973.

[26] 李月,刘静兰,白晓永,等.长江上游水源涵养区生态系统服务价值多尺度空间分异:格局、过程与驱动力[J].生态学报,2025,45(7):3062-3078.
Li Yue, Liu Jinglan, Bai Xiaoyong, et al. Multi-scale spatial differentiation of ecosystem service values of the important water conservation area in the upper reaches of the Yangtze River: Patterns, processes and driving forces [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025,45(7):3062-3078.

[27] 周宇,张余,王琴,等.东北地区生态系统服务价值特征及其驱动因子研究[J].环境污染与防治,2024,46(3):435-442.
Zhou Yu, Zhang Yu, Wang Qin, et al. Research on the characteristics and driving factors of ecosystem service value in northeast China [J]. Environmental Pollution & Control, 2024,46(3):435-442.

[28] Zhou Jianwei, Feng Bin, Wu Hua, et al. Spatio-temporal evolution and topographic gradient effect of land use and ecosystem service value in the Lhasa River basin [J]. Journal of Mountain Science, 2024,21(6):2059-2074.

[29] Quan Liao, Jin Shuanggen, Chen Junyun, et al. Evolution and driving forces of ecological service value in Anhui based on Landsat land use and land cover change [J]. Remote Sensing, 2024,16(2):269.

(上接第441页)

[27] 朱婧瑄,齐述华,刘贵花,等.2000—2013年鄱阳湖流域蒸散量时空变化[J].长江流域资源与环境,2016,25(1):9-16.
Zhu Jingxuan, Qi Shuhua, Liu Guihua, et al. Spatio-temporal variation of terrestrial evapotranspiration in Poyang Lake watershed from 2001 to 2013 [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016,25(1):9-16.

[28] 刘明霞,刘友存,陈明,等.2000—2018年赣江上游植被覆盖度时空演化及其对气候变化的响应[J].水土保持通报,2020,40(5):284-290.
Liu Mingxia, Liu Youcun, Chen Ming, et al. Spatio-temporal evolution of vegetation coverage and its response to climate change in upper reaches of Ganjiang River basin during 2000—2018 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020,40(5):284-290.

[29] 刘鑫,吴向东,鄢笑宇,等.鄱阳湖流域水资源开发利用的时空特征[J].水资源与水工程学报,2022,33(4):72-78.
Liu Xin, Wu Xiangdong, Yan Xiaoyu, et al. Spatio-temporal characteristics of water resources development and utilization in the Poyang Lake basin [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2022,33(4):72-78.

[30] Zhou Yongqiang, Ma Jianrong, Zhang Yunlin, et al. Influence of the three Gorges Reservoir on the shrinkage of China's two largest freshwater lakes [J]. Global and Planetary Change, 2019,177:45-55.