

DOI: 10.5846/stxb202012243264

高星, 杨刘婉青, 李晨曦, 宋昭颖, 王杰. 模拟多情景下白洋淀流域土地利用变化及生态系统服务价值的空间响应. 生态学报, 2021, 41(20): 7974-7988.

Gao X, Yang L W Q, Li C X, Song Z Y, Wang J. Land use change and ecosystem service value measurement in Baiyangdian Basin under the simulated multiple scenarios. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(20): 7974-7988.

模拟多情景下白洋淀流域土地利用变化及生态系统服务价值的空间响应

高 星^{1,2}, 杨刘婉青¹, 李晨曦^{3,*}, 宋昭颖¹, 王 杰¹

1 河北经贸大学公共管理学院, 石家庄 050061

2 河北经贸大学河北省社会经济社会发展地理信息大数据平台, 石家庄 050061

3 西安建筑科技大学公共管理学院, 西安 710311

摘要:模拟多情景下白洋淀流域土地利用变化引起的生态系统服务价值改变,对保障流域生态安全和提升区域生态系统服务价值能力具有重要意义。选取白洋淀流域上下游所涉及的河北省相关县级行政区为研究区,以 1990、2000、2010、2020 年 4 期遥感影像及统计年鉴为基础数据,分析和测算 30 年间白洋淀流域的土地利用与生态系统服务价值变化,在此基础上利用 CA-Markov 模型模拟 2035 年趋势延续、均衡发展和统筹发展等 3 种情景下研究区土地利用变化情况,估算各情景下生态系统服务价值,利用网格工具可视化表达 3 种情景下生态系统服务价值的空间分布状况以及集聚程度。研究结果表明:①1990—2020 年白洋淀流域土地利用变化最明显的特征是耕地面积锐减,建设用地迅速扩张,30 年间耕地面积减少了 122776.99hm²,建设用地增加了 167369.74hm²。②1990—2020 年研究区生态系统服务价值分别为 852.59 亿元、788.26 亿元、796.95 亿元和 784.68 亿元,总体呈波动下降的趋势。③在趋势延续、均衡发展和统筹发展等 3 种模拟情景下,生态系统服务价值依次为 785.36 亿元、807.26 亿元、812.46 亿元。研究区生态系统服务价值整体呈现西北高东南低的空间分布特征。④ESV 值的热点和冷点分布范围较大且集聚性较强,热点区域主要集中在西北部山地区域,冷点区域主要分布在研究区东南部平原地区以及研究区西北部的部分区域。模拟白洋淀流域未来土地利用变化趋势,探寻不同情境下生态系统服务价值的响应有利于构建流域国土空间开发保护新格局,为今后全面推进白洋淀流域的可持续发展提供科学基础和决策参考。

关键词:土地利用变化;生态系统服务价值;CA-Markov;白洋淀流域;雄安新区

Land use change and ecosystem service value measurement in Baiyangdian Basin under the simulated multiple scenarios

GAO Xing^{1,2}, YANG Liuwanqing¹, LI Chenxi^{3,*}, SONG Zhaoying¹, WANG Jie¹

1 School of Public Administration, Hebei University of Economics and Business, Shijiazhuang 050061, China

2 Hebei Province Economic and Social Development Geographic Information Big Data Platform, Shijiazhuang 050061, China

3 School of Public Administration, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710311, China

Abstract: Simulating the change of ecosystem service value caused by land use change in Baiyangdian Basin under multi scenario is of great significance to ensure the ecological security of the basin and enhance the ability of regional ecosystem service value. Based on the Remote Sensing Image and Statistics Yearbook of 1990, 2000, 2010, and 2020, choosing county-level administrative districts in the upper and lower reaches of Baiyangdian Basin as the study area, this paper analyzed and calculated the land use and ecosystem service value changes in Baiyangdian Basin over the past 30 years.

基金项目:国家自然科学基金青年项目(41901261);河北省高等学校科学研究计划项目(QN2019023);河北经贸大学科研项目(2017KYQ05)

收稿日期:2020-12-24; **采用日期:**2021-08-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lichexi@xauat.edu.cn

Moreover, the CA-Markov model was used to simulate land use change in the study area under three scenarios, including trend continuation, balanced development, and overall development in 2035. This paper estimated the ecosystem service value for each scenario, and the grid tools were used to visualize the spatial distribution and concentration of ecosystem service value under three scenarios. The results showed that, ①The most obvious feature of land use change in Baiyangdian Basin from 1990 to 2020 was the sharp reduction of cultivated land area and the rapid expansion of construction land. The cultivated land area had decreased by 122776.99hm², while construction land increased by 167369.74hm² in the past 30 years. ②From 1990 to 2020, the value of ecosystem services in the study area was 85.259 billion yuan, 78.826 billion yuan, 79.695 billion yuan and 78.468 billion yuan respectively, presenting a fluctuating downward trend. ③Under the three simulation scenarios of trend continuation, balanced development and overall development, the value of ecosystem services was 78.536 billion yuan, 80.726 billion yuan and 81.246 billion yuan respectively. The ecosystem service value in the study area presented the spatial distribution characteristics of high in Northwest and low in Southeast. ④The hot spots and cold spots of ecosystem service value were distributed in a large range and had strong agglomeration. The hot spots were mainly concentrated in the mountainous area in the northwest, and the cold spots were mainly distributed in the plain area in the southeast of the study area and some areas in the northwest of the study area. Simulating the future land use change trend of Baiyangdian Basin and exploring the response of ecosystem service value under different situations is conducive to building a new pattern of land spatial development and protection of the basin. This paper provides a scientific basis and decision-making reference for comprehensively promoting the sustainable development of Baiyangdian Basin in the future.

Key Words: Land use change; Ecosystem service value; CA-Markov; Baiyangdian basin; Xiongan New Area

生态系统服务指通过生态系统的结构、过程和功能直接或间接得到的生命支持产品和服务^[1-2],其形成、供给和分配受到土地利用的深刻影响。随着人口增长、经济发展和城市的急速扩张,土地利用形式多样和强度加强,自然生态系统逐渐向半自然半人工生态系统和人工生态系统方向转变,由此带来的物质和能量流的改变影响生态系统提供服务的能力。因此,不适宜的土地利用将危及区域生态安全,甚至限制城市的可持续发展^[3]。雄安新区建设作为疏解北京非首都功能和推进京津冀协同发展的重要国家战略,其过程中必然伴随着高强度的人为建设活动,与当地自然生态环境不相适宜的土地利用方式势必威胁区域生态系统服务的供需平衡,甚至导致生态环境问题^[4]。同时,随着雄安新区人口的聚集和城市规模的扩张,对粮食供给、水资源供给、空气净化、水源涵养和文化休闲等生态系统服务的需求将不断提高^[5]。而白洋淀流域作为雄安新区的生态腹地,既是由自然地理和经济社会发展组成的复合性区域,又是实施生态建设和环境政策的整体空间,生态战略地位显著^[6]。在此背景下,模拟白洋淀流域未来土地利用变化趋势,探寻不同情境下生态系统服务价值的响应有利于构建流域国土空间开发保护新格局,为其提供技术支撑和决策参考^[7]。

目前,国内外学者对于土地利用变化对生态系统服务价值的影响已积累了相对丰富的研究成果。Costanza 等^[8]在 1997 年制订了全球生态系统服务当量因子表,为相关研究奠定了基础。国内学者谢高地等^[9]在 Costanza 研究的基础上制订了《中国陆地生态系统单位面积生态服务价值当量表》,被国内学者广泛用于生态系统服务价值评估研究中。随着研究的逐步深入,国内外学者对生态系统服务的研究主要从定义与分类^[8]、价值评估^[10-12]、以及生态系统服务与社会发展之间的关系^[13-15]等三个方面进行了钻研与探索。具体而言,从研究内容上看,主要集中在生态系统服务的理论基础^[16]、驱动力^[17-18]、时空变化^[19]及影响因素^[20]等方面;从研究尺度上看,全国、区域、省域、市域、县域等尺度均有涉及^[21-25]。从研究对象上看,研究区域多集中湖泊^[26]、森林^[27]、湿地^[28]等生态系统服务价值高值区域;研究方法则以统计分析^[29]和空间分析^[30-31]为主,并越来越重视在土地利用规划研究与实践中的作用^[32]。综合来看,上述研究主要是对当前或过去时段因土地利用变化而改变的生态系统服务价值进行测度,随着研究的深入,学者们尝试着对未来土地利用变化对区域生态系统服务价值的影响进行分析,以便于制定可持续的土地利用措施,如 Egoh 等^[33]采用 Marxan 模型

模拟不同情境下南非草地生态系统服务状况;Estoque 等^[34]研究 Baguio 市未来森林保护情景和自然发展情景下土地利用变化对生态系统服务价值的影响;Kubiszewski 等^[35]估算了全球尺度下市场导向情景、政策改良情景等 4 种情景下生态系统服务价值,结果显示到 2050 年 4 种情景生态系统服务价值每年可能相差 81 万亿美元;杜勇等^[36]通过 Logistic-CA-Markov 模型模拟福建省泉州市在 2030 年自然情景、规划情景、保护情境下,定量评估了保水服务、固碳服务、保土服务和食物供给服务;欧阳晓等^[37]以快速城镇化下的长株潭城市群为例,模拟了 3 种情景下 LUCC 对 ESV 的影响。目前已有的多情景下生态系统服务价值的模拟测度,大部分是基于现有发展趋势根据侧重点设定不同情景进行分析,缺乏对由国家战略引发的土地利用类型剧烈变化区域生态系统服务价值空间差异性的关注。

雄安新区地处白洋淀流域范围内,面临着人口增长、社会经济发展和生态保护的多重压力,同时新区的开发建设势必对白洋淀流域生态系统服务价值产生一定的影响。鉴于生态系统服务价值计算的便利性,本文以白洋淀流域为研究区,采用当量因子法估算其 1990、2000、2010 和 2020 等 4 期生态系统服务价值,并借助 CA-Markov 模型,模拟不同情境土地利用格局,并测算生态系统服务价值变化情况。在此基础上利用网格工具可视化表达不同偏好下生态系统服务价值的空间分布状况以及集聚程度,以期对白洋淀流域的生态系统服务功能变化分析以及对研究区未来土地生态安全建设提供理论参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

本研究中的白洋淀流域是指白洋淀上下游涉及的河北省相关县级行政区域,涉及石家庄市、保定市、张家口市、沧州市、廊坊市以及衡水市的 46 个县区;白洋淀流域上下游包括入淀出淀的潞龙河、孝义河、唐河、府河、漕河、瀑河、萍河、白沟引河(含南拒马河与白沟河)、赵王新河等干支流流经的区域。白洋淀流域位于大清河流域范围以内,总面积约 3.4 万 km²。该地区地貌类型多样,以耕地、林地和建设用地为主,地势西高东低,相对高度达 2815m(图 1),流域处于温带季风区,多年平均降水量 600mm,年平均气温在 10—20℃之间,降水量年际变化大、年内分配不均,降水多以暴雨形式集中于 7—8 月,故经常出现连年干旱或先旱后涝、旱涝交替等情况。近年来,白洋淀流域各城市无序扩张、产业布局各自为政、大尺度生态空间管理理念缺乏,导致生态用地流失、水生态失衡等问题,由此带来生态系统服务下降、生态风险加剧、生态安全受到威胁,严重影响了流域的可持续发展,与高质量发展要求存在一定差距。

1.2 数据来源及预处理

本研究所使用的数据包括遥感影像数据、土地利用数据、粮食数据、DEM 高程数据、坡度数据、社会经济数据、道路数据和气象数据。其中:(1)遥感影像从地理空间数据云平台 Landsat4-5/TM 和 Landsat-8/OLI 卫星下载;(2)研究区 1990 年、2000 年、2010 年、2020 年等 4 期土地利用均解译自遥感影像,根据影像精度并结合研究区实际情况,并参照前人分类标准^[38],将土地利用类型划分为林地、草地、耕地、建设用地、水域和未利用地六类,分辨率为 30m。使用 ENVI 5.3.1 软件,对遥感图像进行监督分类和人工目视解译,经检验三期图像精度均达到 85%以上,可用于研究使用(图 2);(3)粮食数据主要为小麦、玉米、大豆等粮食作物产值、播种面积、产量主要来源为石家庄市、张家口市、保定市、沧州市和衡水市统计年鉴以及河北农村统计年鉴;(4)白洋淀流域年平均降水量和平均气温等气象数据收集自中国气象数据网;(5)研究区 DEM 数据来源于地理空间数据云,坡度数据由 DEM 高程数据提取得到;(6)社会经济数据来自相关县域统计年鉴;(7)公路、铁路数据来源于资源环境数据云平台。

2 研究方法

2.1 生态系统服务价值估算

本文基于谢高地等^[1]建立的“中国陆地生态系统单位面积服务价值当量表”(表 1)(根据研究区实际地

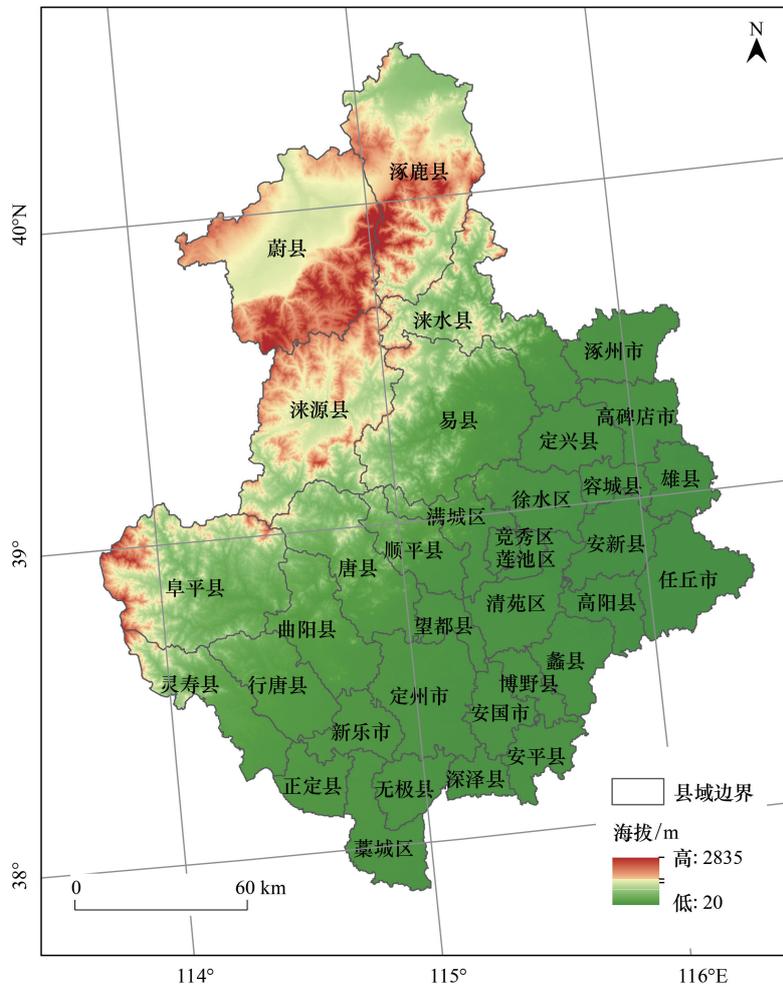


图1 研究区地理位置

Fig.1 Location of Baiyangdian basin

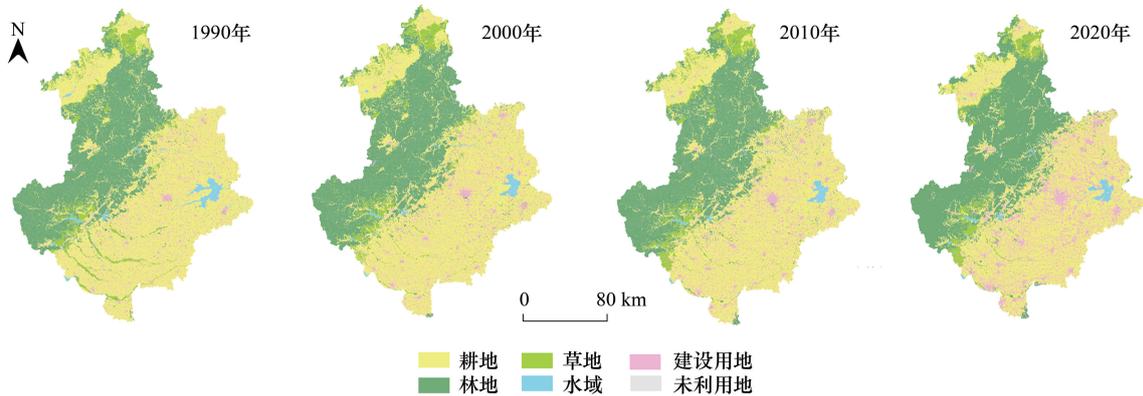


图2 白洋淀流域 1990、2000、2010、2020 年 4 期土地利用数据

Fig.2 Land use data of Baiyangdian basin in the four phases of 1990, 2000, 2010 and 2020

类情况以及计算的便利性,除建设用地外五种地类分别采用了当量表中的旱地、阔叶、灌草丛、湿地、裸地和水系的单位面积服务价值当量),估算白洋淀流域各县域 1990—2020 年 4 期生态系统服务价值量,初步分析多

年间各项生态系统服务价值量的变化。通过公式(1)和公式(2)计算研究区的生态系统服务价值。

$$ESV = \sum_{i=1}^n A_i \times VC_i \quad (1)$$

$$VC_i = \sum_{j=1}^k EC_j \times E_a \quad (2)$$

式中,ESV 为生态系统服务价值,单位为元/年; i 为土地利用类型; j 为生态系统服务类型; A_i 为第 i 类土地利用类型的面积,单位为 hm^2 ; VC_i 为第 i 类土地利用类型单位面积生态系统服务价值,单位为元 $\text{hm}^{-2}\text{a}^{-1}$; EC_j 为某类土地利用类型第 j 项生态系统服务价值当量; k 为生态系统服务类型数量; E_a 为 1 单位生态系统服务的经济价值,单位为元 $\text{hm}^{-2}\text{a}^{-1}$ 。

根据“现有单位农田提供的生产服务经济价值,是无人力投入的自然生态系统的经济价值的七倍”的规则^[10],计算出白洋淀流域单位农田自然粮食产量的年均经济价值。为更加精确的确定研究区单位生态系统服务的经济价值,结合研究区实地情况,运用公式(3)对该数值进行修正^[39]。鉴于统计数据的可获取性,不考虑价格波动因素统一选取 2018 年研究区各县区粮食作物(小麦、玉米、大豆)的经济价值进行修正,并计算其平均值,结果表明研究区每单位生态系统服务的经济价值为 1801.48 元 $\text{hm}^{-2}\text{a}^{-1}$ 。

$$E_a = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^n \frac{m_i p_i q_i}{M} \quad (3)$$

式中, E_a 为 1 单位生态系统服务的经济价值,单位为元 $\text{hm}^{-2}\text{a}^{-1}$; i 为粮食作物种类; m_i 为第 i 种粮食作物在研究区内的平均价格,单位为元/kg; p_i 为第 i 种粮食作物的单产,单位为 kg/hm^2 ; q_i 为第 i 种粮食作物的种植面积,单位为 hm^2 ; M 为粮食作物的总种植面积,单位为 hm^2 。

表 1 单位面积生态系统服务价值当量

Table 1 Ecosystem service equivalent value per unit area

一级类型 First category	二级类型 Second category	耕地 Arable land	林地 Forestland	草地 Grassland	建设用地 Built-up land	水域 Water land	未利用地 Unused land
供给服务 Provisioning services	粮食生产	0.85	0.29	0.38	0	0.8	0
	原料生产	0.4	0.66	0.56	0	0.23	0
	水资源供应	0.02	0.34	0.31	0	8.29	0
调节服务 Regulating services	气体调节	0.67	2.17	1.97	0	0.77	0.02
	气候调节	0.36	6.5	5.21	0	2.29	0
	净化环境	0.1	1.93	1.72	0	5.55	0.01
	水文调节	0.27	4.74	3.82	0	102.24	0.03
支持服务 Supporting services	土壤保持	1.03	2.65	2.4	0	0.93	0.02
	维持养分循环	0.12	0.2	0.18	0	0.07	0
	生物多样性	0.13	2.41	2.18	0	2.55	0.02
文化服务 Cultural services	美学景观	0.06	1.06	0.96	0	1.89	0.01

2.2 土地利用格局情境模拟

2.2.1 CA-Markov

马尔科夫(Markov)模型^[40-41]利用概率论的相关知识研究事物由一状态转换为另一状态的概率,根据研究得出的规律,对未来事物的状态进行预测,其重点强调的是对未来数量上的预测。其公式为:

$$S_{(t+1)} = S_t \times P_{ij} \quad (4)$$

式中, S_t 为 t 时刻土地利用系统的状态; $S_{(t+1)}$ 为 $t+1$ 时刻土地利用系统的状态; P_{ij} 为土地利用转移矩阵。

元胞自动机(CA)模型是一种时间、空间、状态均离散,通过不同时空特征元胞的相互作用,模拟复杂系统时空演变的动力学模型^[42-43]。

$$S_{t+1} = f(S_t, N) \quad (5)$$

式中, S 为元胞有限、离散的状态集合; N 为元胞的邻域; t 和 $t+1$ 表示不同时刻; f 为局部空间元胞转换规则。

传统的马尔科夫 (Markov) 模型很难预测土地利用在空间格局上的变化, 而元胞自动机 (CA) 模型则可以有效的模拟这种变化, 然而 CA 模型着眼于元胞的局部相互作用, 存在很大的局限性, 从这一角度来说, CA-Markov 模型将 Markov 模型和 CA 模型结合在一起, 弥补各自模型存在的缺陷, 实现对土地利用类型数量和空间位置的双重预测^[44-45]。

2.2.2 土地利用格局情景模拟标准设定与过程

通过 IDRISI 软件中的 Markov 模块和 CA-Markov 模块对土地利用类型的数量及空间变化进行预测, 基本步骤如下:

(1) 创建 Markov 转移概率矩阵。将时间周期设置为 10a, 比例误差设置为 0.15, 利用 Markov 模型得到研究区 2010—2020 年的年土地利用转移面积矩阵和转移概率矩阵。

(2) 制作适宜性图集。利用 IDRISI 软件中的“Decision Wizard”模块制作适宜性图集。借鉴前人的研究结果^[39-44], 考虑到数据的可获得性以及具体模拟效果, 本文选取 DEM 高程、坡度、年平均降水、年平均气温、距公路距离和距铁路距离等 6 个对土地利用变化较大的驱动影响因子来制作适宜性图集。

(3) 模拟 2020 年研究区土地利用图像。以 2010 年为基期图像, 选择步骤 (1) 建立的研究区 2010—2020 年的年土地利用转移面积矩阵, 以及步骤 (2) 中创建的适宜性图集, 确定迭代次数为 10, 构造 CA 滤波器 (采用标准 5×5 的滤波器)。模拟运行出预测的 2020 年研究区土地利用图像 (图 3)。

(4) 精度验证。利用 IDRISI 软件中的 crosstab 模块, 将 2020 年的预测图与 2020 年实际土地利用类型进行对比, 计算 Kappa 值。

(5) 多情景模拟预测。以 2020 年为基期图像, 分别模拟出 3 种情景下 2035 年研究区土地利用图像。

2.2.3 情景设置

情景分析旨在描述和分析事物发展的各种可能性, 对比不同发展路径下的状态, 从而为决策提供依据。白洋淀流域社会经济、自然环境均存在不确定性。基于流域的不同发展目标和可能出现的干扰情景, 本研究设定了 3 种土地利用变化模拟的情景:

(1) 趋势延续情景 (情景 1)。趋势延续情景是流域基于 2010—2020 年土地利用变化规律, 按照目前的城市化发展模式和现有的土地利用转移速率, 在转换规则中不对任何地类转换进行限制的一种情景设定, 是流域土地利用变化模拟考虑其他发展情景分析的基础。

(2) 均衡发展情景 (情景 2)。该情景充分考虑流域中各城市的发展需求, 实现流域空间均衡发展。其中, 雄安新区的土地利用结构按照《河北雄安新区规划纲要》、《河北雄安新区起步区控制性规划》等规划文本及图集中对未来各地类在不同规划方向上的数量要求进行确定, 流域其他地区的土地利用结构则与情景 1 一致。

(3) 统筹发展情景 (情景 3)。该情景下, 将整个流域城市发展纳入统筹考虑, 以雄安新区建设、生态保护作为目标。因此, 参考了有关修改 Markov 转移矩阵的相关研究成果^[46], 其中, 雄安新区土地利用结构与均衡发展情景一致, 流域除雄安新区部分为整体实现生态用地保护目标, 严格限制生态用地相关的林地、草地和水域向建设用地转换, 以保障整个流域的土地利用结构总体稳定。具体参数设置为将林地转化为建设用地的速率减缓 63%, 转移速率由原来的 4.45% 调整为 2.80%; 将草地转化为建设用地的速率减缓 50%, 转移速率由原来的 10.92% 调整为 5.47%; 水域由于基数过小, 未进行限制; 耕地、未利用地变化速率未进行限制。

2.3 ESV 热点分析

热点分析 (Getis-Ord G_i^*) 是用来识别冷点区和热点区空间分布的常用工具, 在本文中热点分析可以用来反映白洋淀流域生态系统服务价值是否具有高值集聚 (热点) 和低值集聚 (冷点) 的现象, 以及确定高值区和低值区在空间上发生聚类的位置。其公式为:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{i,j} x_j - X \sum_{j=1}^n w_{i,j}}{\sqrt{\frac{[n \sum_{j=1}^n w_{i,j}^2 - (\sum_{j=1}^n w_{i,j})^2]}{(n-1)}}} \quad (6)$$

$$X = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \quad (7)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j^2 - (X)^2} \quad (8)$$

式中, n 是空间网格单元数量; x_i 和 x_j 分别为单元 i 和单元 j 的观测值; w_{ij} 是基于空间 k 邻接关系建立的空间权重矩阵。若一定范围内 ESV 较高时, 则成为具有显著统计学意义的热点, 称为 ESV 热点区, 表示生态系统服务价值在该区较大; 若一定范围内 ESV 较低时, 则成为具有显著统计学意义的冷点, 称为 ESV 冷点区, 表示生态系统服务价值在该区较小。

3 结果分析

3.1 生态系统服务价值估算结果及变化特征

3.1.1 1990—2020 年研究区土地利用变化总体特征

1990—2020 年研究区土地利用变化总体特征呈现耕地面积大幅度减少, 建设用地面积急速增加的趋势。30 年间耕地在研究区范围内土地利用结构中占比最大, 平均占比 48.12%, 总体来看耕地面积锐减, 减少 122776.99hm², 耕地面积减少率为 7.21%; 林地在研究区范围内土地利用结构中面积占比仅次于耕地, 且 1990—2020 年间林地面积变化不大, 呈波动增长趋势, 从 1193822.47hm² 增加到 1207925.59hm², 增加率为 1.18%; 与之相比, 草地面积在 30 年间呈波动下降的趋势, 2010 年达到峰值 212026.37hm², 面积减少率为 15.9%; 随着改革开放和京津冀协同发展等政策的推进, 建设用地扩张速度也在不断加快。1990—2020 年建设用地面积从 253926.75hm² 增加到 421296.49hm², 共增加了 167369.74hm², 面积增长率高达 65.91%; 1990—2020 年研究区水域面积呈现了先急速下降后小幅度回升的变化趋势, 总体来说, 水域面积明显减少, 减少率为 35.76%; 未利用地占比较小, 从研究区整体来看, 面积变化不明显(表 2)。

表 2 1990—2020 年白洋淀流域各类用地面积及占比/hm²

Table 2 Changes of different land use types in Baiyangdian basin from 1990 to 2020

土地利用类型 Land use type	耕地 Arable land	林地 Forestland	草地 Grassland	建设用地 Built-up land	水域 Water land	未利用地 Unused land
1990 年 面积/hm ²	1703270.05	1193822.47	218429.92	253926.75	63492.79	1436.63
比例/%	49.59	34.76	6.36	7.39	1.85	0.04
2000 年 面积/hm ²	1692773.36	1193203.06	199781.51	307912.93	38925.82	1781.91
比例/%	49.29	34.74	5.82	8.97	1.13	0.05
2010 年 面积/hm ²	1634058.10	1212641.10	212026.37	334749.03	39105.88	1798.24
比例/%	47.58	35.31	6.17	9.75	1.14	0.05
2020 年 面积/hm ²	1580493.06	1207925.59	183707.66	421296.49	40785.98	1098.35
比例/%	46.01	35.16	5.35	12.26	1.19	0.03
1990—2020 年面积变化量 Area change	-122776.99	14103.12	-34722.26	167369.74	-22706.81	-338.28
1990—2020 年面积变化率 Rate of area change/%	-7.21	1.18	-15.90	65.91	-35.76	-23.55

研究区在空间上土地利用总体特征为, 西部以林地、草地为主, 东部多为耕地和建设用地交错分布, 小部

分为水域。这主要由于研究区地势西高东低,西部以山地为主,东部为华北平原以及白洋淀流域。从 4 期研究区土地类型图可以看出,城市的扩张是造成土地利用类型发生变化的关键因素。在快速的城镇化过程中,耕地被大量侵占,为坚持生态文明建设和可持续发展,山林区域的耕地还林还草现象明显,导致耕地面积进一步锐减,白洋淀流域也在城市的发展下逐步缩小,生态安全情况不容乐观(图 2)。

3.1.2 1990—2020 年研究区生态系统服务价值变化特征

土地利用变化会引起生态系统服务价值的变化。1990—2020 年研究区生态系统服务价值分别为 852.59 亿元、788.26 亿元、796.95 亿元和 784.68 亿元,总体呈波动下降的趋势(表 3)。其中,耕地的生态系统服务价值变化较多,30 年间减少 9.03 亿元,变化率为 7.21%;林地对研究区的生态系统服务价值贡献最大,四个时段分别为 502.30 亿元、502.04 亿元、510.22 亿元和 508.23 亿元,可以看出 1990—2000 年变化不明显,2000—2020 年价值量总体呈波动上升的趋势,这是由于 2000 年以后林地面积小幅度增加;草地生态系统服务价值变化趋势与其面积变化趋势相同,1990—2020 年波动下降,30 年间 ESV 减少 12.53 亿元;建设用地的生态系统服务价值为 0;水域的生态系统服务价值仅次于林地,联系表 2 可知,它凭借 1% 左右的面积占比提供了整个研究区 12% 左右的生态系统服务价值,然而由于城市快速发展的需要,建设用地的急速扩张使得一部分水域被侵占,导致水域的 ESV 下降为 93.92 亿元,下降率为 36.76%;未利用地由于其面积基数小,以及单位生态系统服务价值不高,对整个研究区的生态系统服务价值的影响几乎可以忽略不计。总体来说,由于草地、水域等生态系统服务价值中贡献较高的土地都在不同程度的减少,而不利于生态系统服务价值增加的建设用地急速扩张,导致 30 年间研究区整体生态系统服务价值下降明显,减少率为 81.25%。林地、水域和草地是生态系统服务价值的主要来源,严格保护林地、水域和草地等生态用地,对保护研究区的生态安全具有重要作用。

表 3 1990—2020 白洋淀流域各类用地生态系统服务价值量变化/ 10^8 元

Table 3 Ecosystem service value changes of each land use type of Baiyangdian basin from 1990 to 2020

土地利用类型 Land use type		耕地 Arable land	林地 Forestland	草地 Grassland	水域 Water land	未利用地 Unused land	总计 Total
1990 年	ESV	125.22	502.30	78.85	146.22	0.0029	852.59
	比例/%	14.69	58.91	9.25	17.15	0.0003	100.00
2000 年	ESV	124.45	502.04	72.12	89.64	0.0036	788.26
	比例/%	15.79	63.69	9.15	11.37	0.0005	100.00
2010 年	ESV	120.13	510.22	76.54	90.06	0.0036	796.95
	比例/%	15.07	64.02	9.60	11.30	0.0005	100.00
2020 年	ESV	116.19	508.24	66.32	93.92	0.0022	784.68
	比例/%	14.81	64.77	8.45	11.97	0.0003	100.00
1990—2020 年 EVS 变化量 EVS change		-9.03	5.93	-12.53	-52.29	-0.0007	-67.92
1990—2020 年 EVS 变化率 Rate of EVS change/%		-7.21	1.18	-15.90	-35.76	-23.55	-81.23

表 4 反应出了单项生态系统服务价值的变化规律。依据每项服务 ESV 的贡献程度大小依次为水文调节、气候调节、土壤保持、气体调节、生物多样性、净化环境、粮食生产、美学景观、原料生产、水资源供应和维持养分循环。其中,水文调节和气候调节的 ESV 在生态系统服务价值中所占比重较大,两者占总价值的 50% 以上,以 2020 年为例水文调节的 ESV 为 202.11 亿元;气候调节的 ESV 为 173.64 亿元。粮食生产主要受耕地面积变化影响,呈逐年下降趋势;原料生产和维持养分循环受各类用地综合影响,呈逐年下降的变化趋势;除此之外水资源供应、气体调节、气候调节、净化环境、水文调节、生物多样性以及美学景观等服务项目整体为波动下降的变化趋势,这主要是林地、草地、水域等生态系统服务价值较高地类的面积波动造成的。

表 4 1990—2020 白洋淀流域不同生态系统服务类型的生态系统服务价值变化/ 10^8 元

Table 4 Ecosystem service value changes of each Ecosystem service type of Baiyangdian basin from 1990 to 2020

生态系统服务 Ecosystem Services		生态系统服务价值 ESV			
		1990	2000	2010	2020
供给服务 Provisioning services	粮食生产	35.34	34.69	33.96	32.93
	原料生产	29.45	29.07	29.00	28.26
	水资源供应	18.96	15.11	15.31	15.35
调节服务 Regulating services	气体调节	77.20	76.03	76.53	74.68
	气候调节	177.04	174.08	177.19	173.63
	净化环境	58.71	55.58	56.57	55.58
	水文调节	246.49	199.03	201.62	202.11
支持服务 Supporting services	土壤保持	100.86	99.39	99.77	97.31
	维持养分循环	8.93	8.81	8.79	8.56
	生物多样性	68.51	66.56	67.78	66.39
文化服务 Cultural services	美学景观	31.12	29.92	30.45	29.86
总计 Total	852.59	788.26	796.95	784.66	

3.2 多情境下研究区土地利用变化及生态系统服务价值分析

3.2.1 多情景下土地利用变化模拟

(1)精度检验。将 2020 年的预测图与 2020 年实际土地利用类型进行对比,计算得到 Kappa 值为 0.8674,通过精度检验(图 3)。如图 3 所示,2020 年模拟图与 2020 年实际图各地类面积差别较小,耕地、林地面积误差为 5%左右,建设用地面积误差约为 3%,草地面积误差相对较大,但由于草地总面积相对较小,且图上草地集中位置基本一致,所以也符合模拟要求,水域与未利用地基数较小且误差微小。

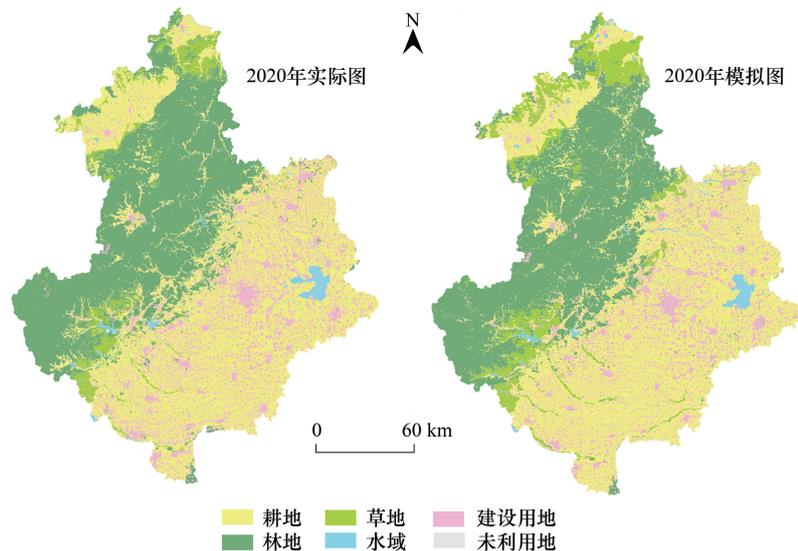


图 3 2020 年白洋淀流域土地利用实际图和模拟图

Fig.3 Land use status map and forecast map of Baiyangdian basin in 2020

(2)多情景模拟预测。以 2020 年为基期图像,分别模拟出 3 种情景下 2035 年研究区土地利用图像(图 4)。根据研究区 2010 和 2020 年两期土地利用变化情况,在趋势延续情景模拟的基础上加入雄安新区规划建设这一变化条件,建立了 3 种土地利用变化模拟情景(图 4,表 5)。在趋势延续情景下 2035 年研究区建设用地面积为 510582hm^2 ,与 2020 年相比增加了 89285.51hm^2 ,林地面积小幅度增加,相比 2020 年增加了 3.3%。耕地变化较大,下降为 2020 年的 94.97%。相比之下草地、未利用地面积都有不同程度的减少,水域面积小幅

度增加(图 4 情景 1)。均衡发展情景下,由雄安 2035 年发展规划可知,建设用地、林地、水域等地类面积都有所增加,整体来看,建设用地面积为 513125.73hm²,林地比照趋势延续情景相应增加,为 1233968.7hm²,部分耕地被建设用地侵占。鉴于 2035 年雄安蓝绿空间规划,水域面积相应增加为 52756.07hm²,由于雄安新区草地较少,所以两种情景对比下,草地面积变化不明显(图 4 情景 2)。统筹发展情景下,研究区建设用地面积减少为 500750.35 hm²,林地、草地面积相应增加,分别为 1243886.14hm²、164611.76 hm²,耕地、水域和未利用地面积几乎不变(图 4 情景 3)。

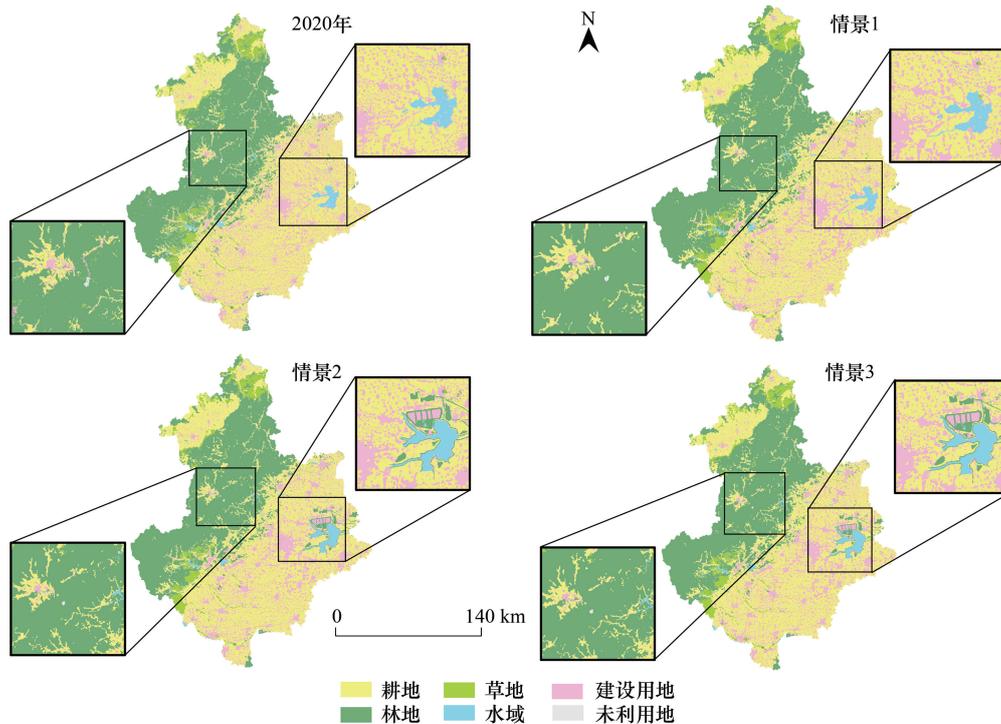


图 4 不同情景下白洋淀流域 2035 年各土地利用变化模拟

Fig.4 Land use change simulation of Baiyangdian basin in 2035 under different scenarios

表 5 模拟 3 种发展情景下各土地利用类型面积/hm²

Table 5 The area of each land use type under three development scenarios is simulated

土地利用类型 Land use type	耕地 Arable land	林地 Forestland	草地 Grassland	建设用地 Built-up land	水域 Water land	未利用地 Unused land
2020 年	1580493.06	1207925.59	183707.66	421296.49	40785.98	1098.35
趋势延续情景 Trend continue scenario	1500993.00	1211894.00	162605.00	510582.00	46203.00	617.00
均衡发展情景 Balanced development scenario	1470811.18	1233968.70	161885.97	513125.73	52756.07	617.00
统筹发展情景 Coordinated development scenario	1470514.82	1243886.14	164611.76	500750.35	52784.58	617.00

从空间分布来看,与 2020 年相比,趋势延续情景下白洋淀西面保定市中心城市范围急速扩张,建设用地范围激增,相应的侵占了大部分耕地;除此之外,研究区东北、正东、西南以及平原腹地等方向上的县市区中心均相应扩张;西部山区县域范围中地势相对平缓地区以及大清河河流直线周围区域零碎耕地大部分转化为林地,研究区西北部坝上平原地区以及研究区西南山地平原交界区域草地、耕地明显减少;而在均衡发展情景下,由于雄安新区建设起步区位于白洋淀以西,容城县与安新县交汇处,所以该地建设用地和林地面积有所上升,白洋淀水域也相应扩张,雄安新区范围内林带增多,且多围绕水域和起步区建设;在统筹发展情景下,为维

护白洋淀流域生态格局的平衡与安全,在建设用地指标有限的前提下优先发展雄安新区,上游部分的县区建设用地有所减少,城市扩张程度相应收缩。

研究区 2035 年趋势延续情景为参照 2010 年、2020 年两期土地利用变化规律,没有外部干预的基础上模拟得到的,所以趋势延续情景符合白洋淀流域城镇化快速发展的变化趋势。但是雄安新区的规划建设使得部分地区的发展进程减速,尤其是白洋淀上游部分县域,为维护整个流域的土地利用格局的平衡,限制了林地、草地向建设用地的转换,为整个流域的可持续发展做出了贡献。

3.2.2 多情境下研究区生态系统服务价值变化特征

土地生态系统服务价值主要与各土地利用类型面积有关。与 2020 年各类用地的生态系统服务价值相比,2035 年研究区趋势延续情境下,林地、未利用地变化不明显;耕地、草地生态系统服务价值下降幅度小于林地和水域增加的生态系统服务价值,使得趋势延续情景下生态系统服务总价值与 2020 年相比有微量增加。与趋势延续情景相比,其他两个情景的生态系统服务价值变化有所不同。由表 6 可知,均衡发展情景下,林地和水域生态系统服务价值相对于趋势延续情景高 24.38 亿元,这主要与雄安新区规划建设中蓝绿空间增加的约束条件有关。统筹发展情景下,林地、草地和水域的生态系统服务价值均高于均衡发展情景下的生态系统服务价值,总计增加了 5.2 亿元,该情景下协调了各类用地面积,林地、草地、水域都得到了相应的保护,从而使得生态系统服务价值有所增长。

表 6 模拟 2035 年 3 种发展情境下各类土地生态系统服务价值/10⁸元

Table 6 The service value of each land ecosystem under three development scenarios will be simulated in 2035

土地利用类型 Land use type		耕地 Arable land	林地 Forestland	草地 Grassland	建设用地 Built-up land	水域 Water land	未利用地 Unused land	总计 Total
2020 年	ESV	116.19	508.24	66.32	0.00	93.92	0.0022	784.68
	比例/%	14.81	64.77	8.45	0.00	11.97	0.0003	100.00
趋势延续情景	ESV	110.35	509.91	58.70	0.00	106.40	0.0012	785.36
Trend continue scenario	比例/%	14.05	64.93	7.47	0.00	13.55	0.0002	100.00
均衡发展情景	ESV	108.13	519.20	58.44	0.00	121.49	0.0012	807.26
Balanced development scenario	比例/%	13.39	64.32	7.24	0.00	15.05	0.0002	100.00
统筹发展情景	ESV	108.11	523.37	59.42	0.00	121.56	0.0012	812.46
Coordinated development scenario	比例/%	13.31	64.42	7.31	0.00	14.96	0.0002	100.00

为进一步分析多情景下研究区生态系统服务价值及其空间变化,利用 ArcGIS 软件中的渔网工具,创建一个 5km×5km 正方形网格,计算每个网格的生态系统服务价值,制作 2020 年和三种模拟情景下 2035 年研究区的生态系统服务价值空间分布图,采用自然断点法将研究区生态系统服务价值从低到高划分为 6 个等级, I 级最低, VI 级最高(图 5)。

从 2020 年研究区生态系统服务价值空间分布来看,生态系统服务价值较高区域主要分布在西北部山区县域。从整体上看,研究区生态系统服务价值整体呈西北高、东南低的分布特征,与研究区的海拔和地形地貌分布特征在空间上较为契合。主要原因在于,研究区西北部海拔较高,多为山地,地类主要以林地、草地为主,所以 ESV 较高;而东南部为华北平原,海拔较低,主要以耕地、建设用地为主,所以 ESV 较低。

与 2020 年相比,趋势延续情景下,ESV 高值区域总体来看小幅度减少,低值区域明显增多,白洋淀上游区域,研究区东南方向县域 I 级区域明显扩张,原 I 级区域都有不同程度的扩张,这主要是由于城市的快速发展造成耕地向建设用地转变。而在研究区西北部的县区中部分地区由 V 级向 VI 级转变,这是由于县中心建设用地面积相对增加,导致林地、草地面积相对减少,ESV 下降。

对 2035 年研究区 3 种情境下 ESV 空间分布进行对比分析发现,均衡发展情景和统筹发展情景总体 ESV 明显好于趋势延续情景。东部雄安新区范围由于新增许多林带,并且水域范围得到扩大,ESV 高值区域增多,

白洋淀区域由 I、II 级向 III、IV、V 级转变;统筹发展情景与均衡发展情景相比,统筹发展情景总体 ESV 优于均衡发展情景,由图 5 可知,西北部山地区域 VI 级范围增多、华北平原 I 级区域减少,这是由于部分建设用地减少,林地面积明显增加。

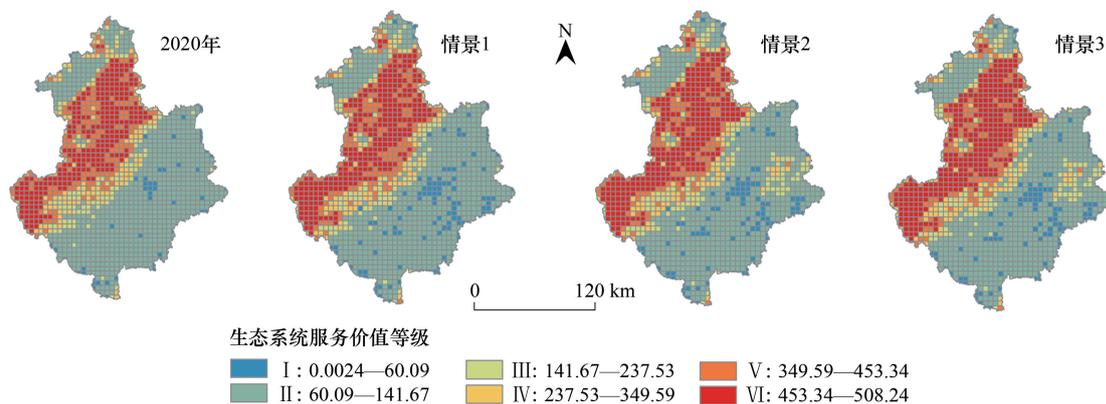


图 5 不同情境下 2030 年白洋淀流域 ESV 空间分布

Fig.5 Spatial distribution of ESV in Baiyangdian basin in 2035 under different circumstances

3.3 多种情境下白洋淀流域生态系统服务价值的热点分析

为了反映了生态系统服务高值和低值在空间上的集聚情况,在多次尝试后选择 2km×2km 网格单元,基于 ArcGIS 软件,利用空间统计工具中的热点分析(Getis-Ord G_i^*),得到白洋淀流域生态系统服务价值的热点和冷点区域(图 6)。

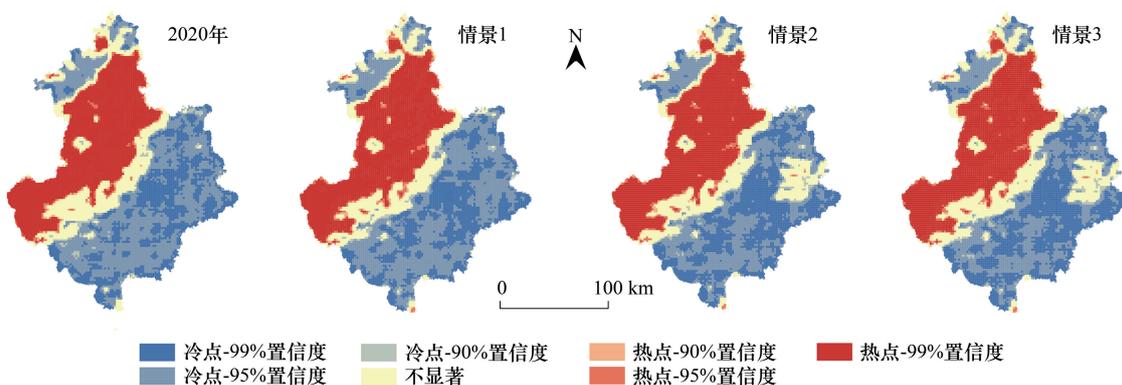


图 6 不同情境下 2030 年白洋淀流域 ESV 冷热点分布

Fig.6 Distribution of ESV hot spots in Baiyangdian basin in 2035 under different conditions

2020 年研究区 ESV 值的热点和冷点分布范围较大,且集聚性较强。热点区域主要集中在西北部山地区域,且几乎为 99%置信度。冷点区域集中连片,主要分布在研究区东南部平原地区、研究区北部蔚县、涿鹿县部分区域,其中 99%置信度的冷点区域多为各县区的中心建设区。与 2020 年相比,2035 年三种模拟情景总体特征为:热点区域分布范围小幅度扩大,冷点区域中 99%置信度冷点区范围扩大,95%置信度和 90%置信度冷点区范围缩小,不显著区域范围增多。具体到各个情景,在趋势延续情景下,研究区南部不显著区域小部分转换为热点区域,西北部山区热点区域向外围扩张,这是由于该区域林地、草地增多,ESV 上升所致。研究区东南部平原地区各县区中心建设区与 99%置信度冷点区域的空间分布特征相契合,且由于城市的扩张与建设需要,大量耕地转换为建设用地,导致其在空间上的集聚程度提升,99%置信度冷点区域扩张,冷点区域整体呈集中连片的空间分布特征。在均衡发展情境下,除雄安以外其他区域冷热点分布情况与趋势延续情景相

似,不同之处在于,雄安新区三县的边界交汇处出现了集聚性较高的热点区,且雄安新区大部分冷点区域转变为不显著区域,这是由于响应雄安建设中蓝绿空间达到 70%的规划纲要和白洋淀生态环境治理与保护的条例,新增热点区域为起步区规划建设林带、水域集聚,导致 ESV 上升而形成的。在统筹发展情景下,研究区西北部白洋淀上游县区热点区域小范围扩张;研究区西部涞源县中心区域冷点区域缩小,集聚程度降低。对比分析三种模拟情景下的冷热点空间分布规律,冷点区范围:趋势延续>均衡发展>统筹发展;热点区范围:统筹发展>均衡发展>趋势延续。

4 结论与讨论

4.1 讨论

本研究在探讨雄安新区建设引起的流域土地利用变化背景下,利用 CA-Markov 模型模拟趋势延续、均衡发展和统筹发展等 3 种发展情景下 2035 年白洋淀流域的土地利用变化状况,并评估白洋淀流域的 ESV,在此基础上分析 ESV 空间分布特征和集聚特征。不同发展情景下的流域生态系统服务价值差异较为明显。趋势延续情景延续了白洋淀流域在未设立雄安新区的背景下的用地需求,生态系统服务价值略有上升,基本实现流域生态文明建设与可持续发展。均衡发展情景兼顾了雄安新区与流域内其他县市的建设用地需求,以适应于城镇化的推进与增强社会经济的发展的主要目标,生态系统服务价值略有上升,一定程度上有利于生态保护;统筹发展情景凸显了国家战略与生态约束高水平融合,满足雄安新区土地利用急剧转型的同时保障生态空间的面积。三种发展情景为未来流域生态建设与用地扩张提供了重要的参考,结合雄安新区发展战略与流域实际发展需求选择相应的情景以期为区域提供适用于未来用地空间发展模式的科学依据及理论支撑。白洋淀流域内市、县的城镇化水平在未来一段时间还将继续上升,建设用地的快速扩张时期尚未完全结束,且又地处于资源环境承载能力较弱、水资源超载、景观破碎、空气质量治理任重道远的华北地区,提升白洋淀流域的生态系统服务功能需求十分迫切^[5,47]。因此,雄安新区作为生态城市建设的标杆,有必要探讨在高质量发展背景下制定精细化、差异化的国土空间格局优化调控措施,协调与流域其他区域的发展目标。

4.2 结论

白洋淀流域由于独特的地理位置,人类活动对流域内的土地利用结构变化有着显著影响,本研究以土地利用变化为基础,采用当量因子法估算 4 期生态系统服务价值,并借助 CA-Markov 模型,模拟不同情境土地利用格局,进而测算生态系统服务价值变化情况。主要结论如下:

(1) 1990—2020 年白洋淀流域土地利用变化最明显的特征是耕地面积锐减,建设用地迅速扩张,30 年间耕地面积减少了 122776.99hm²,建设用地增加了 167369.74hm²。

(2) 1990—2020 年研究区生态系统服务价值分别为 852.59 亿元、788.26 亿元、796.95 亿元和 784.68 亿元,总体呈波动下降的趋势。30 年间白洋淀流域快速城市化过程导致城市建设用地扩张侵占大量耕地、草地和水域等生态用地,使人地关系的矛盾加剧,破坏城市生态环境,甚至威胁城市生态安全。

(3) 在对白洋淀流域 2035 年 3 种情景模拟后发现,趋势延续情景、均衡发展情景、统筹发展情景的生态系统服务价值依次为 785.36 亿元、807.26 亿元、812.46 亿元,均高于 2020 年研究区生态系统服务价值。趋势延续情景下,由于城市的快速扩张,平原地区耕地、水域受到影响,山地地区耕地、草地少部分转化为林地和建设用地;均衡发展情景下,由于雄安建设规划和白洋淀生态环境保护的要求,雄安新区范围内林地、水域增加,其他地区保持不变;在统筹发展的情景下,白洋淀流域上游县域城市建设放缓,生态用地增多,为整个流域的生态安全做出了贡献。

(4) 从生态系统服务价值空间分布来看,白洋淀流域生态系统服务价值整体呈现西北高东南低的特点。不同情境下 ESV 热点分布情况。总体来说,研究区 ESV 值的热点和冷点分布范围较大且集聚性较强。

参考文献 (References):

[1] 谢高地,张彩霞,张雷明,陈文辉,李士美. 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. 自然资源学报, 2015, 30(8):

1243-1254.

- [2] 黄定轩, 吴永娇, 余升翔. 服务生态系统价值共创单元共生演化分析. 生态经济, 2017, 33(7): 121-126, 139-139.
- [3] Huang R J, Nie Y J, Duo L H, Zhang X P, Wu Z H, Xiong J C. Construction land suitability assessment in rapid urbanizing cities for promoting the implementation of United Nations sustainable development goals: a case study of Nanchang, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(20): 25650-25663.
- [4] 高星, 刘泽伟, 李晨曦, 查理思, 宋昭颖, 张学儒. 基于"三生空间"的雄安新区土地利用功能转型与生态环境效应研究. 生态学报, 2020, 40(20): 7113-7122.
- [5] 徐志涛, 陈鹏飞, 周世健, 诸云强, 石雅娇. 白洋淀流域土地覆被变化及其生态服务价值评价. 生态科学, 2018, 37(6): 83-90.
- [6] 李双成, 赵志强, 王仰麟. 中国城市化过程及其资源与生态环境效应机制. 地理科学进展, 2009, 28(1): 63-70.
- [7] 匡文慧, 杨天荣, 颜凤芹. 河北雄安新区建设的区域地表本底特征与生态管控. 地理学报, 2017, 72(6): 947-959.
- [8] Costanza R, d'Arge R, De Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, Van Den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [9] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 肖玉, 陈操. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法. 自然资源学报, 2008, 23(5): 911-919.
- [10] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 郑度, 李双成. 青藏高原生态资产的价值评估. 自然资源学报, 2003, 18(2): 189-196.
- [11] 郭亚红, 阿布都热合曼·哈力克, 魏天宝, 木卡达斯·阿不都热合曼. 基于土地利用变化的和田地区生态系统服务价值分析. 生态学报, 2021(16): 1-10[2021-08-07].
- [12] 邬紫荆, 曾辉. 基于 meta 分析的中国森林生态系统服务价值评估. 生态学报, 2021, 41(14): 5533-5545.
- [13] Wang X L, Nuppenau E A. Modelling payments for ecosystem services for solving future water conflicts at spatial scales: the Okavango river basin example. *Ecological Economics*, 2021, 184: 106982.
- [14] Pelenc J, Etxano I. Capabilities, ecosystem services, and strong sustainability through SMCE: the case of haren (Belgium). *Ecological Economics*, 2021, 182: 106876.
- [15] Clements H S, De Vos A, Bezerra J C, Coetzer K, Maciejewski K, Mograbi P J, Shackleton C. The relevance of ecosystem services to land reform policies: insights from South Africa. *Land Use Policy*, 2021, 100: 104939.
- [16] Costanza R, De Groot R, Sutton P, Van Der Ploeg S, Anderson S J, Kubiszewski I, Farber S, Turner R K. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 2014, 26: 152-158.
- [17] 车通, 李成, 罗云建. 城市扩张过程中建设用地景观格局演变特征及其驱动力. 生态学报, 2020, 40(10): 3283-3294.
- [18] 李晨曦, 吴克宁, 查理思. 京津冀地区土地利用变化特征及其驱动力分析. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(S1): 252-255.
- [19] Yang G F, Ge Y, Xue H, Yang W, Shi Y, Peng C H, Du Y Y, Fan X, Ren Y, Chang J. Using ecosystem service bundles to detect trade-offs and synergies across urban-rural complexes. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 136: 110-121.
- [20] 金声甜, 肖文海, 杨胜苏, 赵丹丹. 长江经济带土地利用变化及其生态系统响应. 经济地理, 2020, 40(7): 166-173.
- [21] 黄麟, 祝萍, 曹巍. 中国退耕还林还草对生态系统服务权衡与协同的影响. 生态学报, 2021, 41(3): 1178-1188.
- [22] 胡其玉, 陈松林. 基于生态系统服务供需的厦漳泉地区生态网络空间优化. 自然资源学报, 2021, 36(2): 342-355.
- [23] 杨文杰, 刘丹, 巩前文. 2001—2016 年耕地非农化过程中农业生态服务价值损失估算及其省域差异. 经济地理, 2019, 39(3): 201-209.
- [24] 李龙, 吴大放, 王芳, 刘艳艳, 刘毅华, 钱乐祥. 中国快速城市化区域生态系统服务价值预测及权衡研究——以佛山市为例. 生态学报, 2020, 40(24): 9023-9036.
- [25] 刘晶晶, 王静, 戴建旺, 翟天林, 李泽慧. 黄河流域县域尺度生态系统服务供给和需求核算及时空变异. 自然资源学报, 2021, 36(1): 148-161.
- [26] 冉凤维, 罗志军, 吴佳平, 齐松, 曹丽萍, 蔡正妹, 陈瑶瑶. 鄱阳湖地区生态系统服务权衡与协同关系的时空格局. 应用生态学报, 2019, 30(3): 995-1004.
- [27] 王兵, 牛香, 宋庆丰. 中国森林生态系统服务评估及其价值化实现路径设计. 环境保护, 2020, 48(14): 28-36.
- [28] 韩增林, 孟琦琦, 闫晓露, 赵文祯. 近 30 年辽东湾北部区土地利用强度与生态系统服务价值的时空关系. 生态学报, 2020, 40(8): 2555-2566.
- [29] Eigenbrod F, Bell V A, Davies H N, Heinemeyer A, Armsworth P R, Gaston K J. The impact of projected increases in urbanization on ecosystem services. *Proceedings of the Royal Society: Biological Sciences*, 2011, 278(1722): 3201-3208.
- [30] 乔斌, 祝存兄, 曹晓云, 肖建设, 扎西拉旦, 颜玉倩, 陈国茜, 史飞飞. 格网尺度下青海玛多县土地利用及生态系统服务价值空间自相关分析. 应用生态学报, 2020, 31(5): 1660-1672.
- [31] 张娟, 陈凡, 角媛梅, 刘澄静, 赵冬梅, 刘志林, 徐秋娥, 邱应美. 哈尼梯田区不同旅游模式村寨土地利用变化对生态系统服务与人类福利的影响. 生态学报, 2020, 40(15): 5179-5189.
- [32] 刘紫玟, 尹丹, 黄庆旭, 何春阳, 薛飞. 生态系统服务在土地利用规划研究和应用中的进展——基于文献计量和文本分析法. 地理科学

- 进展, 2019, 38(2): 236-247.
- [33] Egoh B N, Reyers B, Rouget M, Richardson D M. Identifying priority areas for ecosystem service management in South African grasslands. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(6): 1642-1650.
- [34] Estoque R C, Murayama Y. Examining the potential impact of land use/cover changes on the ecosystem services of Baguio city, the Philippines: a scenario-based analysis. *Applied Geography*, 2012, 35(1/2): 316-326.
- [35] Kubiszewski I, Costanza R, Anderson S, Sutton P. The future value of ecosystem services: Global scenarios and national implications. *Ecosystem Services*, 2017, 26: 289-301.
- [36] 杜勇, 税伟, 孙晓瑞, 杨海峰, 郑佳瑜. 海湾型城市生态系统服务权衡的情景模拟——以福建省泉州市为例. *应用生态学报*, 2019, 30(12): 4293-4302.
- [37] 欧阳晓, 贺青云, 朱翔. 多情景下模拟城市群土地利用变化对生态系统服务价值的影响——以长株潭城市群为例. *经济地理*, 2020, 40(1): 93-102.
- [38] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 徐新良, 秦元伟, 宁佳, 周万村, 张树文, 李仁东, 颜长珍, 吴世新, 史学正, 江南, 于东升, 潘贤章, 迟文峰. 20世纪80年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局. *地理学报*, 2014, 69(1): 3-14.
- [39] 雷军成, 王莎, 汪金梅, 吴松钦, 游细斌, 吴军, 崔鹏, 丁晖. 土地利用变化对寻乌县生态系统服务价值的影响. *生态学报*, 2019, 39(9): 3089-3099.
- [40] 罗紫薇, 胡希军, 韦宝婧, 曹盼, 曹诗怡, 杜心宇. 基于多准则 CA-Markov 模型的城市景观格局演变与预测——以上杭县城区为例. *经济地理*. 2020, 40(10): 58-66.
- [41] 张学儒, 周杰, 李梦梅. 基于土地利用格局重建的区域生境质量时空变化分析. *地理学报*, 2020, 75(1): 160-178.
- [42] 岳东霞, 杨超, 江宝骅, 郭建军, 徐晓锋. 基于 CA-Markov 模型的石羊河流域生态承载力时空格局预测. *生态学报*, 2019, 39(6): 1993-2003.
- [43] 汪佳莉, 吴国平, 范庆亚, 崔敬涛. 基于 CA-Markov 模型的山东省临沂市土地利用格局变化研究及预测. *水土保持研究*, 2015, 22(1): 212-216.
- [44] 王友生, 余新晓, 贺康宁, 李庆云, 张由松, 宋思铭. 基于 CA-Markov 模型的藉河流域土地利用变化动态模拟. *农业工程学报*, 2011, 27(12): 330-336.
- [45] Sannigrahi S, Zhang Q, Joshi P K, Sutton P C, Keesstra S, Roy P S, Pilla F, Basu B, Wang Y, Jha S, Paul S K, Sen S. Examining effects of climate change and land use dynamic on biophysical and economic values of ecosystem services of a natural reserve region. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 257: 120424.
- [46] 曾辉, 高凌云, 夏洁. 基于修正的转移概率方法进行城市景观动态研究——以南昌市区为例. *生态学报*, 2003, 23(11): 2201-2209.
- [47] 陈利顶, 周伟奇, 韩立建, 孙然好. 京津冀城市群地区生态安全格局构建与保障对策. *生态学报*, 2016, 36(22): 7125-7129.