

# 区域绿色空间生态系统服务价值演变特征及多情景模拟研究 ——以南京市为例

Study on the Evolution Characteristics and Multi-scenario Simulation of Ecosystem Service Value of Regional Green Space: A Case Study of Nanjing City

陈晨<sup>1</sup> 施茹韵<sup>2</sup> 严军<sup>1\*</sup>  
CHEN Chen SHI Ruyun YAN Jun\*

(1.南京林业大学风景园林学院, 南京 210037; 2.同济大学建筑与城市规划学院, 上海 200092)  
(1. College of Landscape Architecture, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu, China, 210037; 2. College of Architecture and Urban Planning, Tongji University, Shanghai, China, 200092)

文章编号: 1000-0283(2024)12-0077-10  
DOI: 10. 12193/j.laing. 2024. 12. 0077. 009  
中图分类号: TU986  
文献标志码: A  
收稿日期: 2024-08-20  
修回日期: 2024-10-12

## 摘要

区域绿色空间是维持城市生态功能完整运行与控制建设用地无序扩张的关键载体, 提供了重要的生态系统服务。以南京市为研究对象, 基于大尺度不透水面指数识别分析2005年、2010年、2015年及2020年南京市区域绿色空间分布变化, 以当量因子法计算区域绿色空间生态系统服务价值演变情况, 并基于Markov-FLUS模型结合惯性发展、区域绿色空间保护与生态系统服务保护等情景设置对2030年南京市区域绿色空间分布及生态系统服务价值进行模拟分析。结果表明, 2005–2020年, 南京市区域绿色空间面积从753 km<sup>2</sup>下降至695 km<sup>2</sup>, 共计减少58 km<sup>2</sup>, 生态系统服务价值减少2.62亿元, 呈逐年下降趋势; 区域绿色空间分布不均, 以江宁区、溧水区、浦口区及六合区分布占比较高, 提供了较高的生态系统服务价值贡献度; 相较于惯性发展与区域绿色空间保护情景, 生态系统服务保护情景下区域绿色空间面积增长43 km<sup>2</sup>, 生态系统服务价值增加1.99亿元, 是最有利于可持续发展的区域绿色空间布局方案, 说明在生态管控前提下, 开展实施必要的生态修复工作可以有效促进区域绿色空间生态系统服务价值大幅提高。

## 关键词

区域绿色空间; 生态系统服务价值; Markov-FLUS模型; 南京市

## Abstract

Regional green spaces are crucial for maintaining the integrity of urban ecological functions and controlling the uncontrolled expansion of construction land, providing significant ecosystem services. This study focuses on Nanjing City, analyzing the distribution changes of regional green spaces in 2005, 2010, 2015, and 2020 based on the large-scale impervious surface index. The evolution of ecosystem service value for regional green spaces was calculated using the equivalent factor method. Additionally, simulations of the distribution and ecosystem service value of regional green spaces for 2030 were conducted using the Markov-FLUS model, incorporating scenarios of inertia development, green space protection, and ecosystem service protection. Results indicate that from 2005 to 2020, the area of regional green spaces in Nanjing decreased from 753 km<sup>2</sup> to 695 km<sup>2</sup>, a reduction of 58 km<sup>2</sup>, with a corresponding decrease in ecosystem service value by 262 million yuan, showing a year-by-year decline. The distribution of regional green spaces is uneven, with higher proportions in Jiangning District, Lishui District, Pukou District, and Liuhe District, which contribute significantly to ecosystem service value. Compared to the inertia development and regional green space protection scenarios, the ecosystem service protection scenario results in an increase of 43 km<sup>2</sup> in regional green space area and a 199 million yuan increase in ecosystem service value. This scenario is the most beneficial for sustainable development, indicating that implementing ecological restoration under ecological control can significantly enhance the ecosystem service value of regional green spaces.

## Keywords

regional green space; ecosystem service value; Markov-FLUS model; Nanjing City

## 陈晨

1996年生/男/山东青岛人/硕士/研究方向为风景园林规划与设计

## 施茹韵

2004年生/女/江苏无锡人/在读本科生/研究方向为风景园林规划与设计

## 严军

1969年生/男/江苏南京人/博士/教授/研究方向为风景园林规划与设计

\*通信作者 (Author for correspondence)  
E-mail: csthesis@163.com

## 基金项目:

国家林业和草原局软科学研究项目“基于GIS的城市型森林公园多维度规划与管理模式研究”(编号: 2018-FR20); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(编号: PAPD)

近年来长三角城市群经济迅猛增长,由于快速城市化带来的建设用地扩张使得大量生态空间被蚕食,南京市等高度城市化地区受影响严重,制约了长三角地区高质量发展与一体化进程<sup>[1]</sup>。城市生态系统功能的维持,必然需要一定规模的绿色空间作为载体发挥支撑作用<sup>[2]</sup>。广义上,绿色空间指以绿色植被覆盖为主的三维物质空间<sup>[3]</sup>,既包括城镇建设用地内公园绿地、防护绿地、广场用地及附属绿地等范围内的绿色植被覆盖部分,即城市绿色空间,也包含位于非建设用地内的区域绿色空间。现阶段学界对区域绿色空间的内涵尚未有明确定义,参考其相对于城市绿色空间所呈现出的二元性,与之相近概念有区域绿地、区域生态用地、区域蓝绿空间等。参考相关研究<sup>[4]</sup>中对区域绿色空间及相近概念定义,本研究将城市非建设用地范围内的以生态功能为主导的绿色植被覆盖部分定义为区域绿色空间范畴。已有学者从不同角度针对其概念界定<sup>[5]</sup>、空间识别<sup>[6]</sup>、功能分析<sup>[7]</sup>与规划应用<sup>[8]</sup>等展开讨论,极大丰富了区域绿色空间研究的深度与广度。快速城市化背景下,区域绿色空间在限制城市无序扩张、改善城乡生态环境和促进生态资源统一管理等方面具有重要战略价值<sup>[9]</sup>,探讨区域绿色空间布局演变及价值评估对合理优化国土空间总体规划、城市绿地系统规划等具有重要意义。

生态系统服务是指人类从生态系统中直接或间接获得的产品和服务,其价值评估是生态环境保护、空间规划与价值实现的关键步骤。自1997年Costanza等在Nature上提出生态系统服务价值核算的原理和方法以来,国内外学者在此基础上针对绿色空间的生态系统服务尺度、类型及价值评估方法等方面展开研究并取得丰富成果。现阶段国内外学者在

生态系统服务价值研究尺度方面较为全面,基本涵盖了从全球<sup>[10]</sup>、国家<sup>[11]</sup>到流域<sup>[12]</sup>、城市群<sup>[13]</sup>等不同尺度;研究对象类型主要包含城市<sup>[14]</sup>、山地<sup>[15]</sup>、林地<sup>[16]</sup>等特定绿色空间,或是结合某一地区各类土地利用类型变化开展量化评估研究<sup>[17]</sup>;研究评估方法可划分为市场价值法、模型评估法和综合评估法三类<sup>[18]</sup>,其中应用最广泛的是综合评估法中的当量因子法,典型代表为谢高地等<sup>[19]</sup>基于700余位学科专家意见制定的中国陆地生态系统服务价值当量因子表法,被广泛应用于各尺度下的生态系统服务功能价值评估中。总结已有研究,国内外学者对省域、市域、中心城区及外部区域等不同尺度的生态系统服务价值评估模拟开展了大量研究并形成了较成熟的方法体系,然而对不同管控情景下的城市生态系统服务价值变化情况模拟,特别是从区域绿色空间动态演变的视角开展评估与模拟研究仍值得进一步讨论。由于存在不同生态系统类型、尺度效应以及“社会—生态”关系,强化独特地区生态系统服务研究仍然是当前学术界的主流趋势<sup>[20]</sup>。在城市化进程背景下,长三角地区部分经济发达城市城镇建设用地规模已趋于饱和,城镇建设用地之外的区域绿色空间未来将承载重要的城市发展建设与生态服务供给功能。开展该研究对于探索区域绿色空间时空演变规律、识别城市扩张与生态保护的关系、优化生态系统服务水平等具有重要意义,可为南京市生态空间规划管控与用地结构合理布局提供多重视角,对全面实施长三角一体化发展战略与深入推进生态文明建设具有时代意义。

鉴于此,本研究以南京市为研究对象,基于大尺度不透水面指数判定区域绿色空间时空变化情况,并根据“千年生态系统评估”构建包含供给服务、调节服务、支持服

务和文化服务在内的生态系统服务价值评价体系,以当量因子法计算2005年、2010年、2015年及2020年南京市区域绿色空间生态系统服务价值变化情况,并基于Markov-FLUS模型模拟并分析南京市2030年在惯性发展、区域绿色空间保护与生态系统服务保护情景下区域绿色空间分布与生态系统服务价值变化情况,以期南京市乃至长三角地区空间规划实践提供决策辅助。

## 1 研究区概况

以南京市作为研究对象,市辖玄武、秦淮、建邺、鼓楼、浦口、栖霞、雨花台、江宁、六合、溧水、高淳11区,地处东经118° 22'—119° 14',北纬31° 14'—32° 37',位于宁镇扬丘陵地区,平均海拔较低,以低山缓岗为主,气候类型为北亚热带湿润气候,四季分明,雨水充沛。根据年鉴统计,截至2020年,南京市域总面积约为6 587 km<sup>2</sup>,全市常住人口931.47万人,地区生产总值为14 817.95亿元,建成区绿地率40.52%,绿化覆盖率44.69%,城市绿地具备良好基础,具有一定典型性与代表性。

## 2 研究方法

### 2.1 数据收集和处理

南京市夜间灯光数据来源于施开放等<sup>[21]</sup>发布的“类DMSP-OLS”夜间灯光遥感数据集,分辨率为1 000 m×1 000 m,该数据实现了长时间序列夜间灯光数据的校准、合成和改进,数据来源可靠;归一化植被指数来源于国家生态科学数据中心(<http://www.nesdc.org.cn/>);土地利用类型与驱动力数据(人口、GDP、DEM、年均气温与降水、交通区位等)来源于中国科学院地理科学与资源研究所(<http://www.resdc.cn/>);其他自然地理与社会

经济数据来源于国家统计局 (<https://www.stats.gov.cn/>)、南京市统计局 (<https://tj.nanjing.gov.cn/>) 等。研究数据时段为2005年、2010年、2015年和2020年,考虑到精度一致性,空间数据均采用1 000 m×1 000 m分辨率。

## 2.2 基于大尺度不透水面指数的区域绿色空间识别

区域绿色空间位于城镇建设用地以外,其识别需首先提取城市非建设用地边界。本研究采用Guo等<sup>[22]</sup>提出的大尺度不透水面指数(Large-scale Impervious Surface Index, LISI),该指数将夜间灯光归一化指数同归一化植被指数进行整合,解决了已有方法的识别精确度问题,在中小尺度下的城镇建设用地识别方面效果较好。其中,夜间灯光归一化指数计算见公式(1)。

$$NTL_{nor} = \frac{NTL - NTL_{min}}{NTL_{max} - NTL_{min}} \quad (1)$$

式中,  $NTL_{nor}$  表示归一化的“类DMSP-

OLS”数据值(范围为0~1);  $NTL$  为该数据集中某一像素的遥感影像像元亮度;  $NTL_{min}$  和  $NTL_{max}$  分别为“类DMSP-OLS”数据值的最小值和最大值。大尺度不透水面指数计算见公式(2)。

$$I_{LISI} = (1 - N)\sqrt{NTL_{nor}} \quad (2)$$

式中,  $I_{LISI}$  为大尺度不透水面指数;  $N$  为归一化植被指数(范围为0~1);  $NTL_{nor}$  表示归一化的“类DMSP-OLS”数据值(范围为0~1)。

本研究将LISI计算结果同城市建设统计年鉴中城镇建设用地面积进行比对,以统计年鉴数据为依据划定研究区域内城镇建设用地,反选后获得城市非建设用地范围。参考相关研究并依据南京市现状土地利用类型数据(含耕地、林地、草地、建设用地、水域、未利用地共6项一级类),本研究将城市非建设用地范围内的林地、草地定义为区域绿色空间范畴,而耕地等以农业功能为主、生态功能为辅的土地暂不纳入区域绿色

空间范畴<sup>[23]</sup>。综上所述,结合土地利用数据与非建设用地范围获取南京市区域绿色空间分布情况。

## 2.3 区域绿色空间生态系统服务价值核算

本研究以谢高地等<sup>[19]</sup>构建的基于单位面积生态系统服务价值当量因子表为基础,结合高扬等<sup>[24]</sup>对长三角地区绿地当量因子表的改进,参照南京市主要农作物的经济价值修正当量因子系数<sup>[25]</sup>。通过查阅统计年鉴计算得出南京市经修正后的平均标准当量价值量为2 337.77元/hm<sup>2</sup>,构建南京市区域绿色空间单位面积生态系统服务价值系数(表1)。

南京市区域绿色空间生态系统服务价值计算见公式(3)。

$$ESV = \sum_{i=1}^n (U_i \times VC_i) \quad (3)$$

式中,  $ESV$  为生态系统服务价值,元;  $U_i$  为第  $i$  种生态系统(土地利用类型)面积, hm<sup>2</sup>;  $VC_i$  为第  $i$  种生态系统服务单位面积价值

表1 南京市区域绿色空间单位面积生态系统服务价值系数  
Tab. 1 Coefficient of ecosystem service value per unit area of regional green space in Nanjing City

生态系统服务 Ecosystem service		区域绿色空间单位面积生态系统服务价值系数 / (元 / (hm <sup>2</sup> ·a)) Coefficient of ecosystem service value per unit area of regional green space						
		林地				草地		
		有林地	灌木林	疏林地	其他林地	高覆盖度草地	中覆盖度草地	低覆盖度草地
供给服务	食物生产	724.71	444.18	677.96	514.31	888.35	514.31	233.78
	原料生产	1 659.81	1 005.24	1 542.93	1 215.64	1 309.15	771.46	327.29
	水资源供给	864.98	514.31	794.84	631.19	724.71	420.80	187.02
调节服务	气体调节	5 493.76	3 296.26	5 072.96	3 974.21	4 605.41	2 665.06	1 192.26
	气候调节	16 434.52	9 888.77	15 195.51	11 852.49	12 179.78	7 060.06	3 132.61
	净化环境	4 652.16	2 992.34	4 511.90	3 483.28	4 020.97	2 337.77	1 028.62
	水文调节	8 205.57	7 831.53	11 081.03	7 808.15	8 930.28	5 166.47	2 291.02
支持服务	土壤保持	6 686.02	4 020.97	6 195.09	4 815.81	5 610.64	3 249.50	1 449.42
	维持养分循环	514.31	303.91	467.55	374.05	420.80	257.16	116.89
	生物多样性	6 078.21	3 670.30	5 634.03	4 395.01	5 096.34	2 968.96	1 309.15
文化服务	美学景观	2 665.06	1 613.06	2 478.04	1 916.97	2 244.26	1 309.15	584.44
总计		53 979.11	35 580.87	53 651.84	40 981.11	46 030.69	26 720.70	11 852.50

系数, 元/(hm<sup>2</sup>·a)。

## 2.4 基于Markov-FLUS模型的多情景区域绿色空间模拟与生态系统服务价值计算

研究运用由Liu等<sup>[26]</sup>提出的FLUS模型耦合Markov模型模拟2030年三种情景下的南京市区域绿色空间分布情况, 并计算其生态系统服务价值。该模型在传统元胞自动机模型基础上进一步改良而成, 利用人工神经网络算法与自适应惯性竞争机制对目标年份土地利用进行空间模拟, 适用于多情景、多尺度和高精度的复杂土地利用模拟。具体细分为用地数据导入、驱动因子设定、邻域因子与转移成本矩阵设置、情景模拟与生态系统服务价值计算等步骤。

### 2.4.1 用地数据导入

依据表2将南京市现状土地利用7类用地数据转换后导入模型, 并基于Markov模型

模拟南京市2030年土地利用需求量。

### 2.4.2 驱动因子设定

参考前人研究成果<sup>[27]</sup>, 从自然、区位、经济角度选取海拔高度、坡度、年均气温、年均降水、距高速公路距离、距铁路距离、距一级路距离、人口密度、地均GDP共9项驱动因子, 归一化处理后导入FLUS模型获取土地利用转移适宜性概率。

### 2.4.3 邻域因子与转移成本矩阵设置

邻域因子反映不同地类之间以及邻域范围内不同地类单元间的相互作用, 取值在0~1, 其数值与用地扩展能力成正比, 而转移成本是指转移用地类型所要付出的代价, 取值为0或1, 分别代表不可转移与允许转移。本研究经过多次测试和调整, 根据南京市2010年至2020年土地利用转移情况, 计算求取各地类邻域因子与转移成本矩

阵(表3, 表4)。

为保证模拟精度, 研究基于上述设定将南京市2020年土地利用模拟结果同2020年现状对比, 计算Kappa系数为0.799, 说明该模型模拟一致性较好, 结果可信度高, 可用于开展土地利用情况模拟研究。

### 2.4.4 情景模拟与生态系统服务价值计算

本研究设置三种情景来预测南京市2030年区域绿色空间分布情况。

(1) 惯性发展情景: 本情景下不设置任何限制转移区, 仅考虑研究期限内南京市城市扩张趋势, 将2020-2030年土地利用转移概率维持在2010-2020年水平, 在此基础上进行惯性发展情景模拟。

(2) 区域绿色空间保护情景: 本情景旨在保护区域绿色空间不受其他用地侵占, 将所识别的位于非建设用地范围内的林地、草地等区域绿色空间设置为限制转移区, 限制其向其他用地类型进行转移, 并协同调整转移成本矩阵, 其他设置与惯性发展情景保持一致。

(3) 生态系统服务保护情景: 本情景注重在遵循现阶段城市存量发展趋势的前提下实现生态系统服务功能的保护与最大化利用。考虑到南京市现阶段城市发展仍以增量或存量为主, 该情景一是将限制现状城镇建设用地向其他用地类型进行转换; 二是将位于非建设用地范围内的所有林地、草地、水域设置为限制转移区, 并根据各地类生态系统服务价值当量从高到低进行排序<sup>[19]</sup>(依次

表2 南京市土地利用转换对照  
Tab. 2 Comparison of land use conversion in Nanjing City

城镇建设用地范围 Scope of urban construction land	原土地利用类型 (一级类) Original land use type (first class)	原土地利用类型 (二级类) Original land use type (second class)	转换后土地利用类型 Land use type after conversion
城镇建设用地范围外	林地	有林地、灌木林、疏林地、其他林地等	林地
	草地	高覆盖度草地等	草地
	水域	河渠、湖泊、水库坑塘、滩涂等	水域
	耕地	水田、旱地等	耕地
	建设用地	农村居民点等	其他建设用地
	未利用地	沼泽地、裸土地等	未利用地
城镇建设用地范围内	-	-	城镇建设用地

表3 南京市土地利用转移邻域因子  
Tab. 3 Weight of neighborhood of land use conversion in Nanjing City

土地利用类型 Land use type	林地 Woodland	草地 Grassland	城镇建设用地 Urban construction land	耕地 Cultivated land	水域 Water	其他建设用地 Other construction land	未利用地 Unused land
邻域因子	0.5	0.5	1	0.3	0.3	1	0.5

表4 南京市土地利用转移成本矩阵  
Tab. 4 Land use conversion cost matrix in Nanjing City

原土地利用类型 Original land use type	转移后土地利用类型 Land use type after conversion						
	林地	草地	城镇建设用地	耕地	水域	其他建设用地	未利用地
林地	1	1	1	0	0	1	0
草地	1	1	1	0	0	1	0
城镇建设用地	0	0	1	1	1	1	0
耕地	0	0	1	1	0	1	0
水域	0	0	1	0	1	1	0
其他建设用地	0	0	1	1	1	1	0
未利用地	0	0	1	0	0	1	1

为水域、林地、草地、耕地、未利用地、城镇建设用地与其他建设用地), 限制高当量型用地向低当量型用地转移; 三是将水域、林地、草地三类用地向其他用地扩张概率增加30%。

基于以上三种情景模拟结果, 研究参照前文中区域绿色空间生态系统服务价值核算方法进行计算, 具体步骤参考表1和公式(3), 针对计算结果进行比对分析以探索最优发展模式。

### 3 结果与分析

#### 3.1 南京市区域绿色空间分布与演变特征分析

南京市区域绿色空间分布如图1所示, 研究表明, 南京市区域绿色空间面积呈缓慢减少趋势, 由2005年753 km<sup>2</sup>下降至2020年695 km<sup>2</sup>。市辖区分布上多位于江宁区、溧水区、六合区及浦口区等主城区外围辖区内, 四区内区域绿色空间总面积占比约85%。研究时段内林地类区域绿色空间占总面积比例均在90%以上, 呈逐年上升趋势。此外, 2005–2010年区域绿色空间总量减少33 km<sup>2</sup>, 其中仅江宁区范围内减少22 km<sup>2</sup>, 与其他市辖区呈现较大差异, “十一五”期间以江宁经济技术开发区、滨江新城为主体的城区建设项目一定程度上影响了这种变化趋势, 说明外围市辖区开展城镇建设行为会对区域绿色空间产生较大负面影响, 从而导致减量明显。

#### 3.2 南京市区域绿色空间生态系统服务价值时空特征分析

南京市2005年、2010年、2015年及2020年区域绿色空间生态系统服务价值分别为39.34亿元、37.99亿元、37.36亿元、36.72亿元, 共减少2.62亿元, 与区域绿色空间面积呈正相关, 表现为逐年下降趋势(表5)。从生态

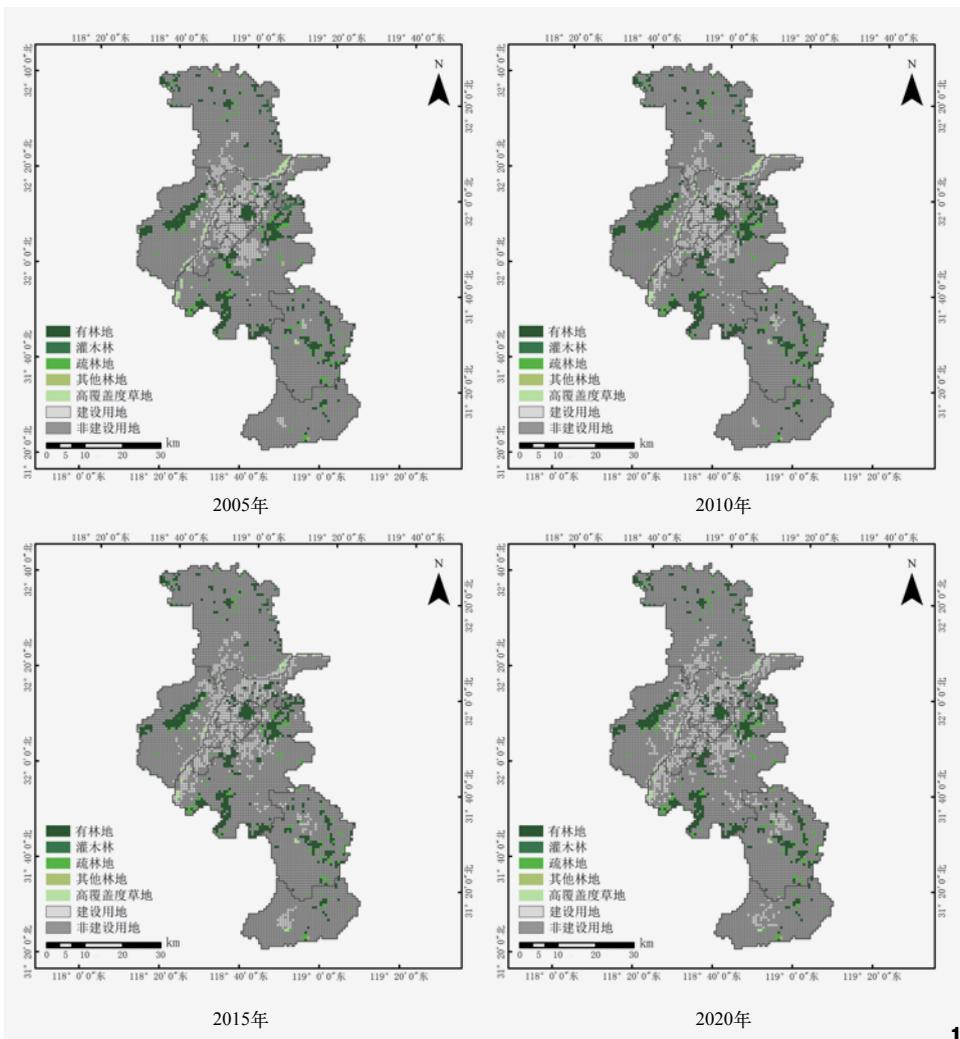


图1 2005–2020年南京市区域绿色空间识别结果  
Fig. 1 Identification results of regional green space in Nanjing City from 2005 to 2020

表5 2005–2020年南京市区域绿色空间生态系统服务价值统计结果  
Tab. 5 Statistical results of ecosystem service value of regional green space in Nanjing City from 2005 to 2020

年份 Year	土地利用类型 Land use type	区域绿色空间生态系统服务价值 / 亿元 Ecosystem service value of regional green space											合计	
		供给服务			调节服务				支持服务		文化服务			
		食物生产	原料生产	水资源供给	气体调节	气候调节	净化环境	水文调节	土壤保持	维持养分循环	生物多样性	美学景观		
2005年	有林地	0.36	0.83	0.43	2.76	8.25	2.34	4.12	3.36	0.26	3.05	1.34	27.10	39.34
	灌木林	0.02	0.04	0.02	0.13	0.39	0.12	0.31	0.16	0.01	0.14	0.06	1.40	
	疏林地	0.10	0.22	0.11	0.73	2.19	0.65	1.60	0.89	0.07	0.81	0.36	7.73	
	其他林地	0.00	0.00	0.00	0.02	0.05	0.01	0.03	0.02	0.00	0.02	0.01	0.16	
	高覆盖度草地	0.06	0.08	0.05	0.29	0.78	0.26	0.57	0.36	0.03	0.33	0.14	2.95	
2010年	有林地	0.37	0.86	0.45	2.84	8.50	2.41	4.24	3.46	0.27	3.14	1.38	27.92	37.99
	灌木林	0.01	0.02	0.01	0.07	0.21	0.06	0.16	0.08	0.01	0.08	0.03	0.74	
	疏林地	0.09	0.19	0.10	0.64	1.91	0.57	1.40	0.78	0.06	0.71	0.31	6.76	
	其他林地	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00	0.08	
	高覆盖度草地	0.05	0.07	0.04	0.25	0.66	0.22	0.48	0.30	0.02	0.28	0.12	2.49	
2015年	有林地	0.37	0.86	0.45	2.84	8.50	2.41	4.24	3.46	0.27	3.14	1.38	27.92	37.36
	灌木林	0.01	0.02	0.01	0.07	0.21	0.06	0.16	0.08	0.01	0.08	0.03	0.74	
	疏林地	0.08	0.19	0.10	0.62	1.87	0.56	1.36	0.76	0.06	0.69	0.30	6.59	
	其他林地	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00	0.08	
	高覆盖度草地	0.04	0.06	0.03	0.20	0.54	0.18	0.39	0.25	0.02	0.22	0.10	2.03	
2020年	有林地	0.37	0.84	0.44	2.79	8.33	2.36	4.16	3.39	0.26	3.08	1.35	27.37	36.72
	灌木林	0.01	0.02	0.01	0.07	0.21	0.06	0.16	0.08	0.01	0.08	0.03	0.74	
	疏林地	0.08	0.19	0.10	0.62	1.85	0.55	1.35	0.76	0.06	0.69	0.30	6.55	
	其他林地	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00	0.08	
	高覆盖度草地	0.04	0.06	0.03	0.20	0.52	0.17	0.38	0.24	0.02	0.22	0.10	1.98	

系统服务功能一级分类来看，调节服务与支持服务占主导地位，始终维持在占比65%与24%左右；细分到二级分类中，调节服务中的气候调节与水文调节两者占比较高，分别处于30%与16%左右水平。从土地利用类型来看，研究时段内有林地所提供的生态系统服务价值占比保持在70%~75%，疏林地次之，占比在17%~20%，草地类整体占比偏低，且受南京市地形地貌及植被生长分布等因素影响，土地利用类型仅有高覆盖度草地一类，占比保持在5%~7%。

江宁区区域绿色空间生态系统服务价值始终高于其他市辖区，约占南京市总量35%

左右，维持在较高水平（表6），其中以青龙山、云台山等“六山”为代表的山体林地贡献度较大，是江宁区重要的生态源地与安全屏障，但由于近年来江宁区作为南京市外发展的重点地区，其区域绿色空间生态系统服务价值受影响显著，2005–2020年共减少1.15亿元，占全市减幅总量43.89%。溧水区、浦口区与六合区区域绿色空间生态系统服务价值占比分别在18%、16%与14%左右，三区以无想山、老山、平山等协同江宁区共同构成环绕南京市主城区外围的环带式区域绿隔体系（图2），在控制城镇建设用地规模、防止城市组群粘连发展及优化生态空间等方面

发挥重要功能，对南京市等“高度集聚的中心城区+外围新城组群”格局的特大城市而言，是一种较为有效的生态空间布局方式<sup>[20]</sup>。

### 3.3 南京市区域绿色空间多情景模拟与生态系统服务价值分析

惯性发展情景下南京市城镇建设用地快速扩张，由2020年的841 km<sup>2</sup>增长至978 km<sup>2</sup>，新增137 km<sup>2</sup>，增幅达16.29%，主要分布于江宁区、浦口区滨江地区，侵占土地利用类型多为耕地与水域；区域绿色空间减量明显，林地、草地总量相较于2020年同期分别减少10 km<sup>2</sup>和8 km<sup>2</sup>（图3-a）。该情景下南京市2030

表6 2005–2020年南京市辖区绿色空间生态系统服务价值统计结果  
Tab. 6 Statistical results of ecosystem service value of regional green space in Nanjing municipal district from 2005 to 2020

南京市辖区 Nanjing municipal district	区域绿色空间生态系统服务价值 / 亿元 Ecosystem service value of regional green space			
	2005年	2010年	2015年	2020年
高淳区	1.55	1.60	1.70	1.70
鼓楼区	0.05	0.16	0.16	0.16
建邺区	0.05	0.05	0.05	0.05
江宁区	14.23	13.33	13.29	13.08
溧水区	7.02	6.91	6.80	6.80
六合区	5.83	5.60	5.32	5.23
浦口区	6.25	6.17	5.76	5.76
栖霞区	1.99	1.96	2.01	1.74
秦淮区	0.00	0.00	0.00	0.00
玄武区	1.46	1.40	1.46	1.40
雨花台区	0.91	0.81	0.81	0.80
合计	39.34	37.99	37.36	36.72

年区域绿色空间生态系统服务价值总量为35.90亿元，相较于2020年同期降低0.82亿元，减幅为2.23%，六合区与浦口区减幅较为明显，占全市减幅的41.46%和21.95% (表7, 图4-a)，未来需重点加强该地区的绿色空间管控措施并控制城镇建设用地增量。

区域绿色空间保护情景下，南京市城镇建设用地新增共计136 km<sup>2</sup>，与惯性发展情景基本持平，受限制转移区影响，区域绿色空间得到了有效保护，侵占区域绿色空间情况受到明显限制，但增量部分仍来自于滨江地区部分耕地，说明建设用地扩张方向未发生转移，这与地区耕地占比较高且多分布城区周边有关；区域绿色空间中林地、草地面积总量基本维持2020年同期水平 (图3-b)。该情景下区域绿色空间生态系统服务价值总量未发生变化，为36.72亿元 (图4-b)。以上说明构建生态限制区并实施严格的生态管控措施将有助于生态系统服务水平的维持，但仍需注意耕地等其他土地利用类型生态系统服务价值的变化情况。

生态系统服务保护情景下，南京市城镇建设用地增量控制在54 km<sup>2</sup>，区域绿色空间扩张迅速，林地、草地面积分别增长39 km<sup>2</sup>和4 km<sup>2</sup>，主要来源于耕地、其他建设用地 (图3-c)。考虑到新增区域绿色空间二级地类尚未明确，因此新增部分分别采用林地类平均值 (46 048.23元 / (hm<sup>2</sup> · a)) 与草地类高覆盖草地值 (46 030.69元 / (hm<sup>2</sup> · a)) 计算，该情景下南京市区域绿色空间生态系统服务价值总量为38.71亿元，相较于2020年同期增长1.99亿元，增幅为5.42%，江宁区与溧水区增量显著，增量分别为0.69亿元和0.60亿元 (图4-c)。这表明相较于以上情景，生态系统服务保护情景是最有利于可持续发展的空间布局方案。具体到实施路径上：(1) 针对重点地区及高价值区域应通过划定生态控制线与缓冲区等形式严格控制范围内的开发建设活动，并针对生态系统功能薄弱地区应推进如林地修复与退耕还林等专项工作；(2) 考虑到城镇建设用地增长趋势仍在持续，针对此区域应在兼顾区域经济发展的前提下，推进建设用地的高效集约利用，并通过限制建设用地增量、调控建设用地布局等措施

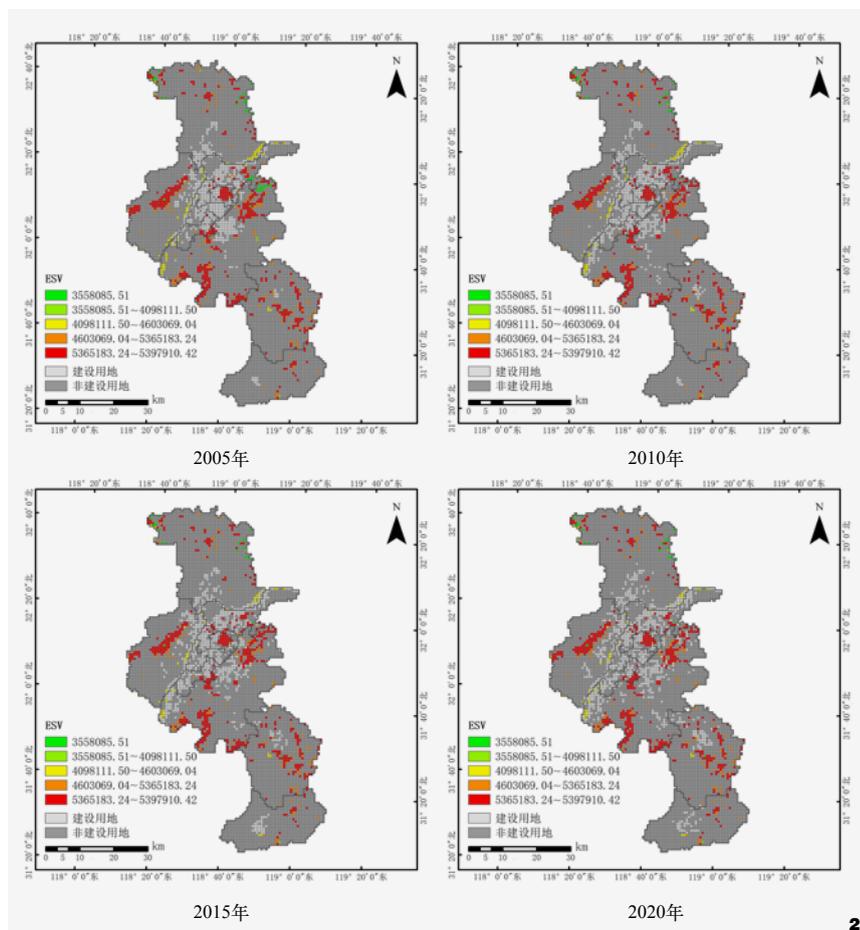


图2 2005–2020年南京市区域绿色空间生态系统服务价值分布情况  
Fig. 2 Distributions on the ecosystem service value of regional green space in Nanjing City from 2005 to 2020

表7 2030年南京市市辖区多情景区域绿色空间生态系统服务价值模拟统计结果  
Tab. 7 Statistical results of multi-scenario simulation of ecosystem service value of regional green space in Nanjing municipal district in 2030

南京市市辖区 Nanjing municipal district	区域绿色空间生态系统服务价值 / 亿元 Ecosystem service value of regional green space		
	惯性发展情景	区域绿色空间保护情景	生态系统服务保护情景
高淳区	1.65	1.70	1.93
鼓楼区	0.11	0.16	0.16
建邺区	0.05	0.05	0.05
江宁区	13.08	13.08	13.77
溧水区	6.80	6.80	7.40
六合区	4.89	5.23	5.37
浦口区	5.58	5.76	6.09
栖霞区	1.58	1.74	1.74
秦淮区	0.00	0.00	0.00
玄武区	1.40	1.40	1.40
雨花台区	0.76	0.80	0.80
合计	35.90	36.72	38.71

控制城市化发展进程，规避城乡建设用地矛盾所带来的区域绿色空间侵占问题；(3) 建议在保证生态系统稳定性的前提下，针对存量区域绿色空间的浅山区或边缘地带，以低影响开发理念适度利用已有风景资源为市民提供接触、感知自然的生态开放空间，推进

城乡区域绿色空间体系服务功能不断优化。

#### 4 结论与讨论

本研究识别并分析了2005年、2010年、2015年及2020年南京市区域绿色空间时空变化特征与生态系统服务价值变化情况，并利

用Markov-FLUS模型模拟2030年三种不同情景下的数据变化。结果表明：

(1) 南京市区域绿色空间自2005年753 km<sup>2</sup>下降至2020年695 km<sup>2</sup>，整体呈缓慢减少趋势且空间分布不均，以江宁区、溧水区、浦口区与六合区等主城区外围市辖区占比较高，类型上则以有林地、疏林地等林地类区域绿色空间占主导地位。

(2) 南京市区域绿色空间生态系统服务价值自2005年39.34亿元下降至2020年36.72亿元，呈逐年下降趋势；分类功能方面以调节服务与支持服务为主导，尤以调节服务中的气候调节与水文调节占比较高；江宁区提供了较高的区域绿色空间生态系统服务价值，其中以青龙山、云台山等山体林地贡献度较高，与溧水区、浦口区和六合区外围山体林地共同构成南京市外围的环带式区域绿隔体系。

(3) 基于Markov-FLUS模型对南京市区域绿色空间进行多情景模拟，惯性发展情景下，城镇建设用地呈快速扩张趋势，区域

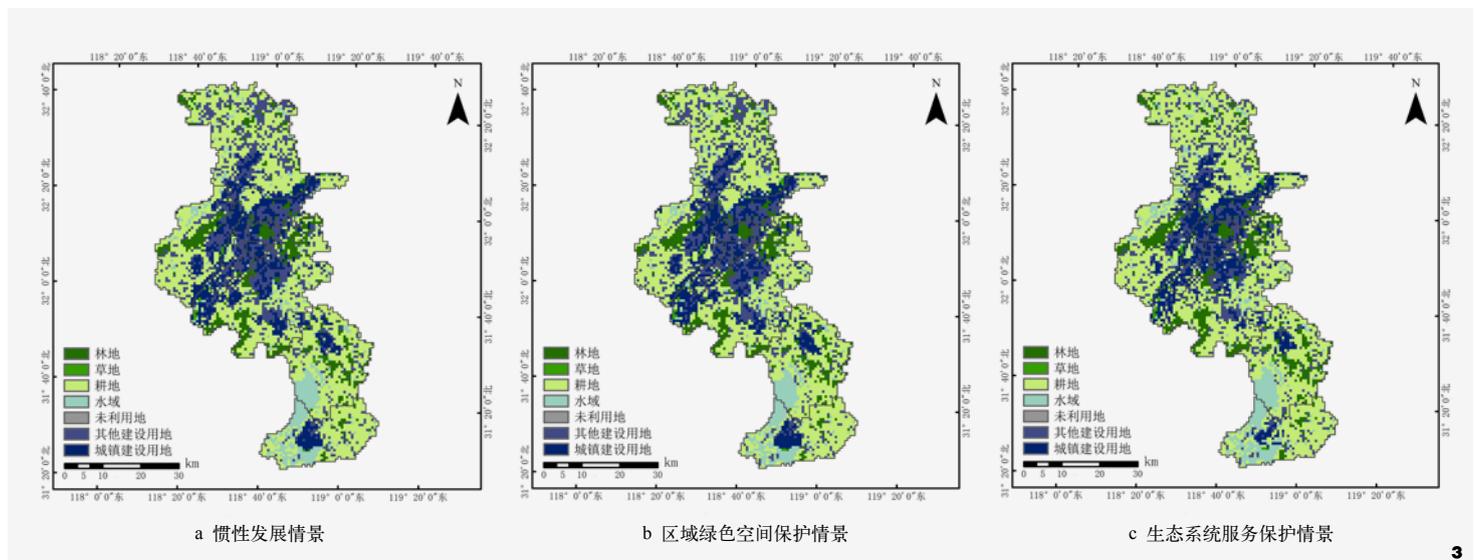


图3 2030年南京市多情景区域绿色空间模拟分布结果  
Fig. 3 Multi-scenario simulation results of regional green space distribution in Nanjing City in 2030

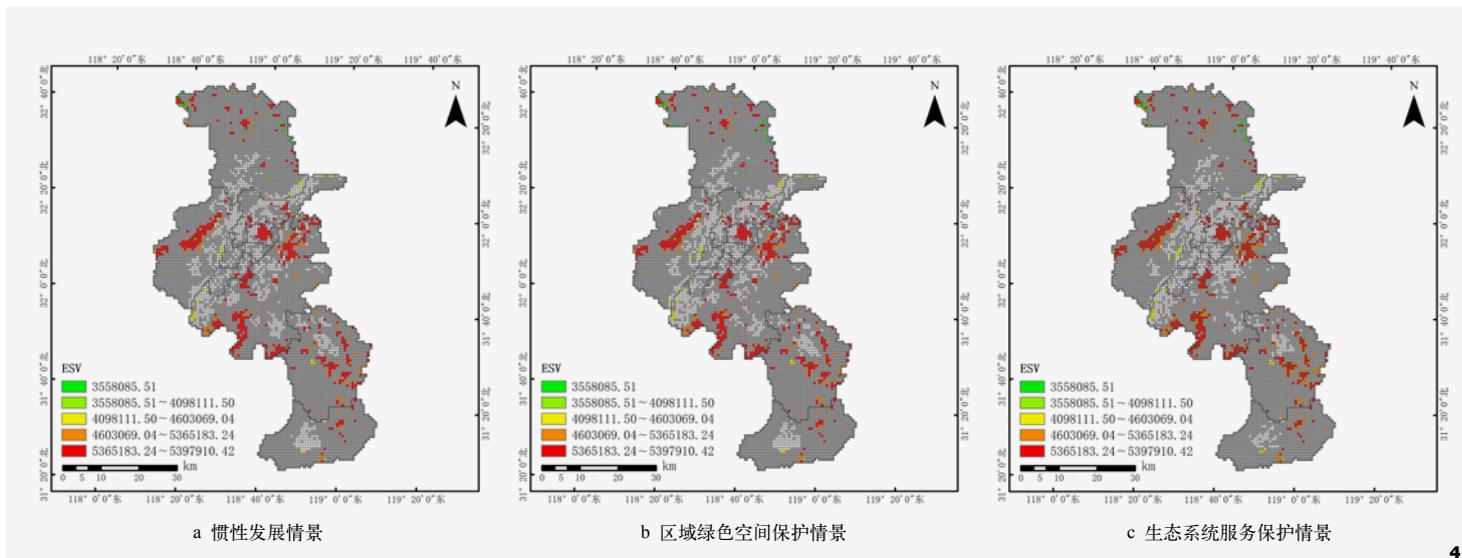


图4 2030年南京市多情景区域绿色空间模拟生态系统服务价值结果  
Fig. 4 Multi-scenario simulation results of regional green space ecosystem service value in Nanjing City in 2030

绿色空间减量明显，生态系统服务价值较2020年同期减少0.82亿元；区域绿色空间保护情境下，城镇建设用地扩张量与惯性发展情景基本持平，但侵占区域绿色空间情况被明显限制，生态系统服务价值维持在2020年同期水平；生态系统服务保护情景下，城镇建设用地增量54 km<sup>2</sup>，区域绿色空间面积增长43 km<sup>2</sup>，生态系统服务价值增长1.99亿元，被认为是最有利于可持续发展的空间布局方案。

在快速城镇化进程中，如何促进城乡建设与生态系统服务维持的关系从对立转向协同发展是实现城市可持续发展的关键问题。本研究通过分析南京市区域绿色空间生态系统服务价值变化情况并预测不同情景下的发展趋势，发现最有利于可持续发展的城市建设模式应是在生态管控的前提下进一步采取适当的生态修复措施，推进如林地修复与退耕还林等专项工作，有效提高生态系统服务水平与稳定性。然而，本研究也发现江宁区

等外围市辖区在提供了较高的生态系统服务价值贡献度的同时，也面临着较大的区域绿色空间保护压力。随着城市化进程进入“下半场”，江宁区等外围市辖区的部分区域绿色空间在未来城市化进程中仍将成为承载建设行为的主体，因此如何因地制宜地采取区域绿色空间管控与优化策略也将是未来研究的重要议题。应针对重点区域建立健全从资源梳理、评价分析到实施落地的全流程内容的区域绿色空间规划体系，结合国土空间总体规划、国土空间生态修复规划等刚性管控进一步落实规划布局并提出布局要求及建设指引，对南京市乃至长三角地区的生态系统服务功能维持具有重要意义。

此外，本研究受限于现阶段长时序夜间灯光数据最大精度仅为1 000 m×1 000 m，尚未针对南京市区域绿色空间进行斑块层级精度的细化研究，另外在研究对象选择上未能从更宏观角度入手对多个城市样本进行横纵向比对研究。未来，将结合高精度

遥感数据与野外生态学调研对更多样本范围内区域绿色空间进行更广范围、更细粒度的生态系统服务价值动态分析，并将分析结果反馈至模型中以进一步提升精度并指导相关规划落实。[1]

注：文中图表均由作者绘制。

## 参考文献

- [1] 马力, 罗志刚, 范凌云, 等. 长三角一体化背景下苏州吴江区空间发展策略研究[J]. 城乡规划, 2020(4): 80-87.
- [2] 钟乐, 龚紫怡, 陈钧泽, 等. 基于系统地图法的城市生态系统负面服务研究进展述评[J]. 中国园林, 2023, 39(1): 72-78.
- [3] 许浩, 金婷, 刘伟. 苏锡常都市圈蓝绿空间规模与格局演变特征[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2022, 46(1): 219-226.
- [4] 许浩, 李欢欣, 刘伟. 近15年南京都市圈区域绿地变化研究[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(5): 215-222.
- [5] 季益文, 张浪, 张青萍, 等. 区域绿地概念形成脉络与深层发展研究[J]. 中国环境管理, 2021, 13(1): 88-95.

- [6] 聂文彬, 裴辉, 庞利伟, 等. 区域蓝绿空间时空演变及驱动力[J]. 浙江大学学报(工学版), 2023, 57(11): 2266-2276.
- [7] 丁宇, 张雷. 区域绿地主要生态功能研究进展[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(6): 279-286.
- [8] 木皓可, 张云路, 马嘉, 等. 从“其他绿地”到“区域绿地”: 城市非建设用地的绿地规划转型与优化[J]. 中国园林, 2019, 35(9): 42-47.
- [9] 栾博, 柴民伟, 王鑫. 绿色基础设施研究进展[J]. 生态学报, 2017, 37(15): 5246-5261.
- [10] COSTANZA R, D'ARGE R, DE GROOT R, et al. The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital[J]. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.
- [11] CARREÑO L, FRANK F C, VIGLIZZO E F. Trade-offs Between Economic and Ecosystem Services in Argentina During 50 years of Land-use Change[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2012, 154: 68-77.
- [12] 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.
- [13] 汪东川, 孙志超, 孙然好, 等. 京津冀城市群生态系统服务价值的时空动态演变[J]. 生态环境学报, 2019, 28(7): 1285-1296.
- [14] 张超, 吴群, 彭建超, 等. 城市绿地生态系统服务价值估算及功能评价——以南京市为例[J]. 生态科学, 2019, 38(4): 142-149.
- [15] 李慧杰, 牛香, 王兵, 等. 生态系统服务功能与景观格局耦合协调度研究——以武陵山区退耕还林工程为例[J]. 生态学报, 2020, 40(13): 4316-4326.
- [16] 杨青, 刘耕源. 森林生态系统服务价值非货币量核算: 以京津冀城市群为例[J]. 应用生态学报, 2018, 29(11): 3747-3759.
- [17] 王若思, 潘洪义, 刘翊涵, 等. 基于动态当量的乐山市生态系统服务价值时空演变及驱动力研究[J]. 生态学报, 2022, 42(1): 76-90.
- [18] 邵明, 李雄, 刘志成, 等. 基于LUCC的承德市域生态系统服务价值演变分析与优化研究[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(3): 106-116.
- [19] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. 自然资源学报, 2008(5): 911-919.
- [20] 王培家, 章锦河, 杨良健, 等. 典型旅游城市生态系统服务时空演变及其影响因素——黄山市案例[J]. 生态学报, 2024(9): 1-14.
- [21] WU Y, SHI K, CHEN Z, et al. Developing Improved Time-Series DMSP-OLS-Like Data (1992-2019) in China by Integrating DMSP-OLS and SNPP-VIIRS[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 1-14.
- [22] GUO W, LU D, WU Y, et al. Mapping Impervious Surface Distribution with Integration of SNNP-VIIRS-DNB and MODIS NDVI Data[J]. Remote Sensing, 2015, 7(9): 12459-12477.
- [23] 赵海霞, 顾斌杰, 王俊洪, 等. 绿色基础设施供需适配关系演进特征及其规律——以南京市为例[J]. 生态学报, 2024, 44(2): 463-475.
- [24] 高扬, 李加林, 刘瑞清, 等. 长江三角洲核心区绿地系统时空演变特征及生态服务价值评估[J]. 生态学杂志, 2020, 39(3): 956-968.
- [25] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. 自然资源学报, 2003(2): 189-196.
- [26] LIU X, LIANG X, LI X, et al. A Future Land Use Simulation Model (FLUS) for Simulating Multiple Land Use Scenarios by Coupling Human and Natural Effects[J]. Landscape and Urban Planning, 2017, 168: 94-116.
- [27] 尹海伟, 朱捷, 方云杰, 等. 基于多情景模拟的生态网络保护格局有效性评估——以桂林市为例[J]. 园林, 2024, 41(1): 11-19.
- [28] 王智勇, 冯京昕, 黄亚平, 等. 特大城市都市区生态空间识别评价、网络构建与优化模型研究[J/OL]. 中国园林, 1-7. (2024-6-20)[2024-08-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2165.TU.20240618.1311.002.html>