

DOI: 10.5846/stxb202206141690

赵霁雨, 崔柳, 王佳, 陈思. 基于土地利用模拟预测模型分析的城市绿色空间发展多情景模拟及建设时序研究——以湛江市中心城区为例. 生态学报, 2023, 43(15): 6307-6320.

Zhao J Y, Cui L, Wang J, Chen S. Multi-scenario simulation of urban green space development and construction Timeline based on PLUS model analysis: A case study of the central Zhanjiang City. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(15): 6307-6320.

# 基于土地利用模拟预测模型分析的城市绿色空间发展多情景模拟及建设时序研究 ——以湛江市中心城区为例

赵霁雨<sup>1</sup>, 崔柳<sup>1,\*</sup>, 王佳<sup>2</sup>, 陈思<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 北京林业大学园林学院, 北京 100083

<sup>2</sup> 北京林业大学林学院, 北京 100083

<sup>3</sup> 德克萨斯农工大学地理系, 德克萨斯州 77843

**摘要:**城市绿色空间是未来中国城镇战略发展的重要生态空间载体。城市中心城区的绿色空间生态系统服务价值可作为未来城市生态空间规划的重要依据。生态服务系统之间的权衡或协同关系可通过不同土地利用方式和利用强度表征显现。通过对湛江市中心城区绿色空间应用土地利用模拟预测(PLUS)模型进行自然发展情景与国土空间规划情景双情景下 2035 年土地利用变化模拟,采用当量因子法及热点分析对生态系统服务价值及其高低值在空间上的聚集程度进行分析,与人类活动强度空间分布进行叠置,得出国土空间规划政策下湛江市中心城区城市绿色空间发展优先级分区,优先化解建设用地与绿色空间发展矛盾,为规划政策提供空间政策的量化数据基础,为其可行性实施、时序安排及预期结果提供数据支撑与建议。结果表明:(1)规划政策情景与自然发展情景未来土地利用模拟结果相比,耕地、林地增多,整体水域得到有效保护,建设用地蔓延受到抑制。(2)生态系统服务价值在 2035 年规划政策情景>2020 年实际情景>2035 年自然发展情景,分别约为 12.22 亿元、11.89 亿元、10.53 亿元,规划政策情境下生态系统服务价值总量较自然发展情景下提升约 1.69 亿元,生态环境效益得到显著提升,调节服务、支持服务、供给服务、文化服务分别提升约 1.38、0.13、0.12、0.06 亿元,但文化服务与 2020 年现状相比降低约 0.31 亿元,在未来建设过程中切勿忽视景观美学的营造。(3)通过生态系统服务及人类活动强度的空间分布分析对绿色空间发展进行优先级分区,建议以赤坎区中部、沿海域建设用地及水域范围、其他区域顺序进行分区建设。

**关键词:**土地利用变化;生态系统服务价值;国土空间规划;土地利用模拟预测(PLUS)模型;热点分析;人类活动强度

## Multi-scenario simulation of urban green space development and construction Timeline based on PLUS model analysis: A case study of the central Zhanjiang City

ZHAO Jiyu<sup>1</sup>, CUI Liu<sup>1,\*</sup>, WANG Jia<sup>2</sup>, CHEN Si<sup>3</sup>

<sup>1</sup> School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

<sup>2</sup> School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

<sup>3</sup> School of Department of Geography, Texas A&M University, TX 77843, America

**Abstract:** Urban green space is an essentially ecological spatial vehicle for the long-term strategic development of the Chinese cities. It is expected that future urban ecologically spatial design will heavily rely on the ecosystem service value

基金项目:国家自然科学基金项目(42171329)

收稿日期:2022-06-14; 采用日期:2023-01-03

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: cuiuonly@126.com

(ESV) of green space in core urban zones. Trade-offs or synergistic relationships among ecosystems can be characterized by different land use patterns and intensity of use. In this study, the PLUS model was applied to the green space in the center of Zhanjiang City to simulate the land use changes by 2035 under the two scenarios of the natural development and territorially spatial planning. The equivalent factor method and hotspot analysis were used to analyze the spatial aggregation of ESVs as well as their high and low values. The spatial distribution of human activity intensity in the study area was overlaid to establish the priority zoning of urban green space development in the central urban area of Zhanjiang City under territorial spatial planning policy, to prioritize the resolution of conflicts between construction land and green space development, to provide a quantitative data base for the planning policy, and to provide data support and suggestions for its feasibility implementation, timing arrangement and expected results. The analysis results showed that (1) compared with future land use simulation results of the natural development scenario, there could be an increase of arable land and forest land, the overall water area could be effectively protected, and the spread of construction land could be suppressed. (2) The value of ecosystem services in the 2035 planning policy scenario > 2020 actual scenario > 2035 natural development scenario is approximately \$ 1.222 billion, \$ 1.189 billion, and \$ 1.053 billion, respectively. The total ecosystem service value under the planning policy scenario could be about \$ 169 million higher than under the natural development scenario. As a result, there could be significant improvement in ecological and environmental benefits. Meanwhile, the regulation service, support service, supply service and cultural service could improve by about 138, 13, 12, 6 million yuan, respectively. However, cultural service could reduce by about 31 million yuan compared with the status quo in 2020. Thus the creation of landscape aesthetics must not be neglected in the future planning and construction initiatives. (3) By analyzing the spatial distribution of ecosystem services and the intensity of human activities, and then zoning the priority of green space development, it is recommended that the central area of Chikan District, the construction land along the sea and water areas, and other areas should be zoned.

**Key Words:** land use change; ecosystem service value; territorial spatial planning; Patch-Generating Land Use Simulation (PLUS) model; hot spot analysis; human activity intensity

国土空间是由自然地理环境和人类社会活动两个子系统相互作用构成的人地耦合系统,是自然地理演化过程和经济社会发展过程的综合体<sup>[1]</sup>。建立国土空间规划体系,实现“多规合一”是党中央和国务院在新时代作出的重大部署,其核心思想是生态文明建设和空间治理现代化<sup>[2]</sup>。明确了资源空间“三区三线”的区域划定及城市未来空间发展的三类基本型:城镇空间、农业空间、生态空间,而国土空间规划即对该三类空间进行资源体系管理与城市机制体系整合的重要举措<sup>[3-4]</sup>。三生空间格局优化有利于提升生态环境及社会经济效益,有助于明确区域发展重点与方向,三生空间合理布局是城市空间规划的发展目标<sup>[5]</sup>。

城市绿色空间 (urban green spaces, UGS) 是新时代背景下国土空间总体格局优化战略中的重要项目,对“三区”空间内容均有涉略,是城市社会-经济-自然复合生态系统中的重要组成<sup>[6-7]</sup>。近年来,城市绿色空间发展潜力备受研究者青睐,相关学者从城市绿色空间功能<sup>[8-9]</sup>、城市绿色空间结构与指标<sup>[10-11]</sup>、城市绿色空间优化策略<sup>[12-13]</sup>等方面入手开展了大量研究。表明城市绿色空间在提高城市环境质量、增强地域性绿色空间弹性、促进可持续生活方式等方面具有潜力、在稳定城市生态与环境、建构城市形态与秩序、供给高密度城区游憩服务等方面具有不可替代的价值<sup>[14]</sup>。这些价值可概括为城市生态系统服务 (ecosystem services, ES), 包括供应服务、调节服务和支持服务、文化服务。城市绿色空间结构及发展模式与城市生态系统服务价值体现休戚相关<sup>[15]</sup>。生态系统服务研究的最终目标是辅助决策者优化生态保护规划与管理措施,以促进人类社会与自然环境的可持续发展<sup>[16]</sup>。湛江市中心城区城市绿色空间在发展前一阶段中与建设用地冲突明显,被挤占严重,支持服务价值和供给服务价值较低,同时《湛江市国土空间总体规划 (2020—2035 年)》对中心城区绿色空间保护及建设目标较其他地区更为严格,故本文选取湛江市中心城区绿色空间为研究区域。

城市生态服务系统之间的权衡或协同关系可通过不同土地利用方式和利用强度表征显现<sup>[17-18]</sup>。探究如何保持合理高效的土地利用结构并发挥其效益最大化<sup>[19]</sup>,分析主观政策指导下发展得到的土地利用结构是否可以达到预期,对后续建设重点区域及时序问题提供理论支持具有重要意义<sup>[20]</sup>。目前,我国针对土地利用变化的研究多样化,研究集中于土地利用变化过程、驱动因素分析<sup>[21-22]</sup>、土地利用模拟预测<sup>[23-24]</sup>、耦合模型评估生态特征<sup>[25]</sup>等方面。土地利用变化研究常用的模型主要有 Markov 模型、CA 模型、系统动力学模型、GeoSOS 模型、CLUE-S 模型等,现有研究表明,Markov 模型可以进行长期预测但不能描述空间尺度上的变化;系统动力学模型可以反映复杂系统之间的相互作用但很难处理空间信息;传统 CA 模型没有限制元胞状态变化的模块,只能模拟一种土地利用类型的变化<sup>[26]</sup>;CLUE-S 模型的非空间模块需要借助独立的数学模型进行计算,忽略了非优势地类转化的可能性<sup>[27]</sup>;GeoSOS 模型在识别非线性转换规则的空间变异性方面存在局限性<sup>[28]</sup>。

本研究使用高性能空间计算智能实验室 (HPSCIL)<sup>[29]</sup> 开发的 PLUS 模型 (Patch-Generating Land Use Simulation Model),其耦合土地利用扩张分析策略 (LEAS) 和多类型随机斑块种子的 CA 模型 (CARS),对土地利用变化机制的理解力提升,对模拟自然土地利用类型及其与建设用地冲突边界的土地利用动态变化模拟具有优势<sup>[30-31]</sup>,且随机森林算法具有时间属性,同时集成了规划交通更新机制和规划开发区内的随机种子机制,填补了已有研究只能考虑规划的约束作用 (保护区、禁建区)、无法考虑规划政策的驱动和引导作用的问题<sup>[32]</sup>。以湛江市中心城区两期 (2010 年和 2020 年) 土地利用数据为基础数据,模拟研究 2035 年自然发展情景与国土空间规划政策情景下研究区土地利用动态变化,对比各情景生态系统服务价值 (ESV),并针对研究区域 ESV 冷热点分空间聚集度分析,合理评估实际效益,以此为依据进行城市绿色空间核心区域有效识别及空间层级规划,为湛江中心城区绿色空间开发时序提出建议,以希为规划政策管理及资源配置提供数据支持与策略依据。

## 1 研究区域概况与数据来源

### 1.1 研究区域

湛江市位于中国大陆南端、广东省西南部,介于东经 109°40'—110°58',北纬 20°13'—21°57'之间,位于粤、桂、琼三省 (区) 邻接处,又处于东亚、东南亚、我国大西南等三大地区的交汇地带,是大小双三角区位的核心<sup>[33]</sup>。湛江市三面环海,是全国少有的内海湾型城市,陆地大部分由半岛和岛屿组成,地势多为平原和台地,呈现南北高而中间低,中轴高而东西低的整体趋势。

《湛江市国土空间总体规划 (2020—2035 年)》包括市域和中心城区两个规划层次,中心城区包括霞山区、赤坎区、开发区乐华街道和泉庄街道、麻章区麻章镇和湖光镇,以及坡头区部分地区,陆域国土空间 628.39 km<sup>2</sup>。以促进一体化生态格局为目标,国土空间规划对中心城区绿色空间保护及建设目标较其他地区更为严格,《湛江市碧道建设总体规划 (2020—2035 年)》对空间总体格局规划如图 1 所示,空间类型面积排序为城镇空间>生态空间>农业空间。本研究关注湛江市中心城区范围内的绿色空间发展潜力,通过生态系统服务价值评估及人类活动强度计算,耦合研究区域空间热点分析,为城市绿色空间建设的空间落位及时序安排提出建议,以期通过空间优化最大限度提升城市空间生态系统服务价值。

### 1.2 数据来源

本研究所采用的数据中,2010 年及 2020 年土地利用数据来源于遥感信息处理研究所<sup>[34]</sup>,土地利用依据《土地利用现状分类》(GB/T 21010—2017)分为 6 类:耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地。空间分辨率为 30m×30m;DEM 高程数据来源于地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn>),空间分辨率为 30m×30m;平均温度数据来源于 WorldClim 数据网站<sup>[35]</sup>,降水量数据来源于国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据中心 (<http://www.geodata.cn>),空间分辨率为 1km×1km;现状道路、铁路、河流水域等矢量数据来源于 OpenStreetMap;人口数据来源于美国宇航局地球观测系统数据和信息系统 (EOSDIS) 中的社会经济数据

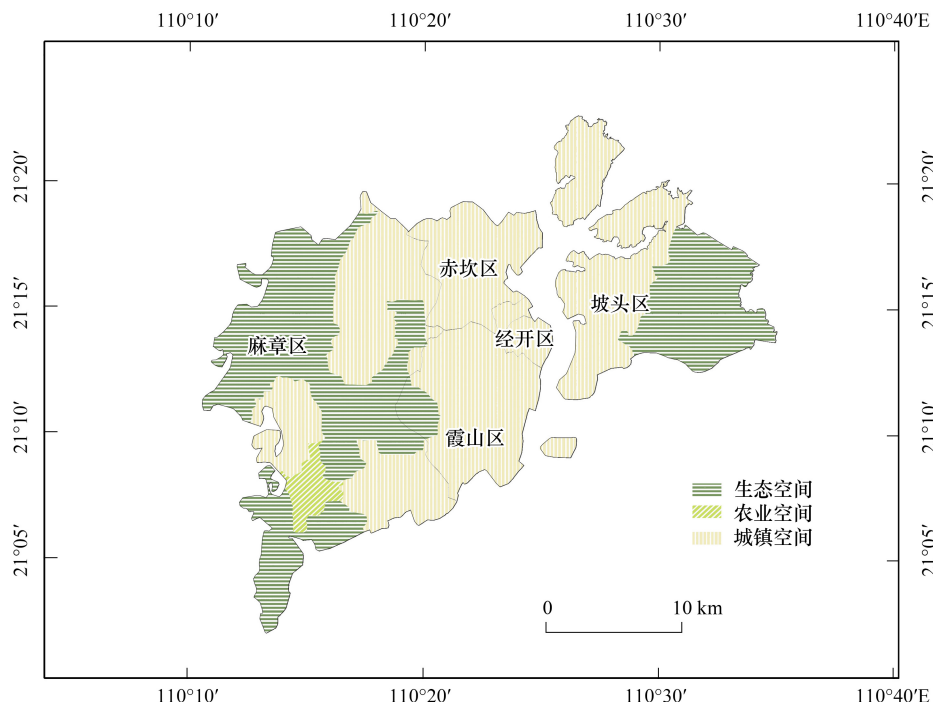


图1 研究区域国土空间总体格局

Fig.1 Study of the overall regional territorial space pattern

应用中心 (SEDAC) (<https://sedac.ciesin.columbia.edu>) ; 经济数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心<sup>[36]</sup>, 空间分辨率为 1km; 其他社会经济数据来自《湛江统计年鉴 2020》、《2020 全国农产品成本收益资料汇编》。以上数据运用 ArcGIS 进行投影变换、裁剪、重采样等工具进行数据预处理转化为 30m×30m 的栅格数据。

## 2 研究方法

研究过程如图 2, 提取规划政策条件, 分析规划政策情景下城市绿色空间的发展趋势及结果, 进行生态系统服务价值量化及空间落位与评估, 计算研究区内人类活动强度在空间上的聚集程度, 进而对生态系统服务价值空间分布及人类活动强度空间分布叠置分析, 得出规划政策下湛江市中心城区绿色空间发展建设优先级分区, 为规划政策提供空间政策的量化数据基础, 为其可行性实施、时序安排及预期结果提供数据支撑与建议。

### 2.1 生态系统服务价值量化

当量因子法是目前最常用的生态系统服务量化方法, 最早由 Costanza 等<sup>[37]</sup>提出。本文以谢高地等建立的“单位面积生态系统服务价值当量表”<sup>[38]</sup>为基础, 建立研究区的原始生态系统服务价值当量表 (表 1), 具体方法为: 耕地取用旱地和水田的平均值; 林地取 83.9%阔叶、16.1%针叶<sup>[39]</sup>、针阔混交及灌木的平均值; 草地取草原、灌草丛、草甸的平均值; 水域取湿地和水系的平均值; 未利用地用荒漠代表; 建设用地计为 0。通过公式 (1) 和公式 (2) 估算 2020 年实际情景、2035 年自然发展情景、2035 年规划政策情景 3 期生态系统服务价值。

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

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

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;  $A_i$  为第  $i$  类土地利用类型的面积, 单位为

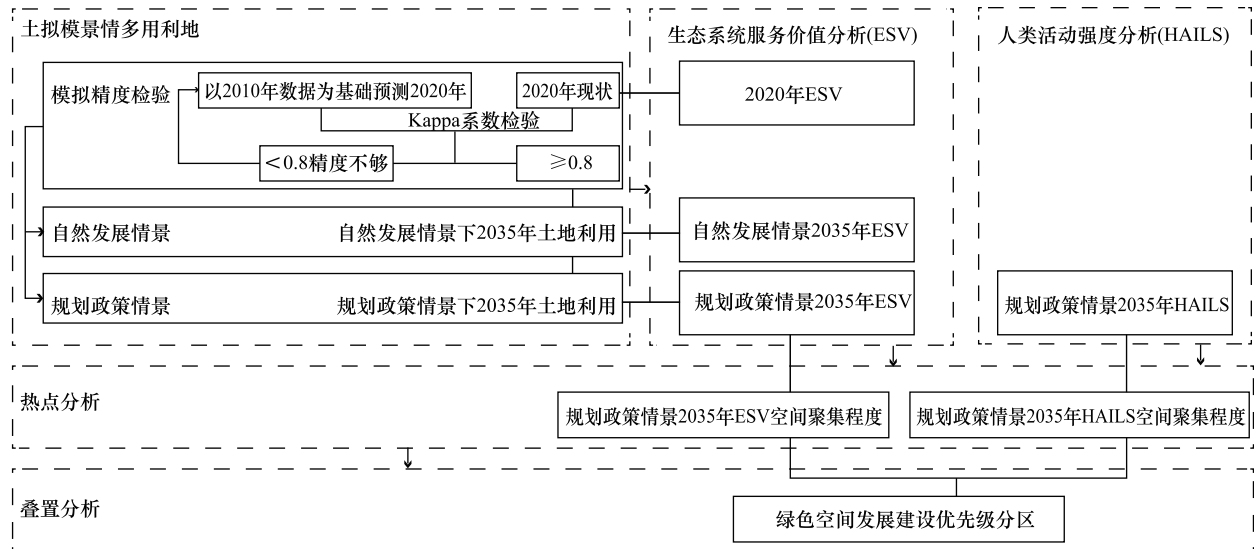


图2 技术路线

Fig.2 Technology route

$\text{hm}^2$ ;  $VC_i$  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  $\text{hm}^{-2}\text{a}^{-1}$ ;  $j$  为生态系统服务类型;  $EC_j$  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 单位生态系统服务价值的经济价值,单位为元  $\text{hm}^{-2}\text{a}^{-1}$ 。

表1 研究区原始单位面积生态系统服务价值当量

Table 1 Original ecosystem service value equivalent per unit area in the study area

| 生态系统服务类型<br>Types of ecosystem services |        | 耕地<br>Arable land | 林地<br>Forest land | 草地<br>Grass land | 水域<br>Water land | 未利用地<br>Unused land | 建设用地<br>Built-up land |
|-----------------------------------------|--------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|---------------------|-----------------------|
| 供给服务<br>Provisioning services           | 食物生产   | 1.11              | 0.26              | 0.23             | 0.66             | 0.01                | 0.00                  |
|                                         | 原料生产   | 0.25              | 0.59              | 0.34             | 0.37             | 0.03                | 0.00                  |
|                                         | 水资源供给  | -1.31             | 0.31              | 0.19             | 5.44             | 0.02                | 0.00                  |
| 调节服务<br>Regulating services             | 气体调节   | 0.89              | 1.95              | 1.21             | 1.34             | 0.11                | 0.00                  |
|                                         | 气候调节   | 0.47              | 5.84              | 3.19             | 2.95             | 0.10                | 0.00                  |
|                                         | 净化环境   | 0.14              | 1.71              | 1.05             | 4.58             | 0.31                | 0.00                  |
|                                         | 水文调节   | 1.50              | 3.79              | 2.34             | 63.24            | 0.21                | 0.00                  |
| 支持服务<br>Supporting services             | 土壤保持   | 0.52              | 2.38              | 1.47             | 1.62             | 0.13                | 0.00                  |
|                                         | 维持养分循环 | 0.16              | 0.18              | 0.11             | 0.13             | 0.01                | 0.00                  |
|                                         | 生物多样性  | 0.17              | 2.16              | 1.34             | 5.21             | 0.12                | 0.00                  |
| 文化服务<br>Cultural services               | 美学景观   | 0.08              | 0.95              | 0.59             | 3.31             | 0.05                | 0.00                  |

结合实地情况,运用公式(3)修正单位生态系统服务的经济价值<sup>[40]</sup>,计算出湛江市地均生态系统服务价值及修正后的粮食产量的经济价值约为  $1884.53 \text{ 元 } \text{hm}^{-2}\text{a}^{-1}$ ,

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

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;  $m$  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  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ;  $q_i$  为第  $i$  种粮食作物的种植面积,单位为  $\text{hm}^2$ ;  $M$  为粮食作物的总种植面积,单位为  $\text{hm}^2$ 。

2.2 土地利用格局情景模拟

2.2.1 PLUS 模型

由高性能空间计算智能实验室 (HPSCIL) 开发的斑块生成土地利用变化模拟模型 PLUS (Patch-generating Land Use Simulation Model) 包括用地扩张分析策略 (LEAS) 和基于多类随机斑块种子的 CA 模型 (CARS) 两部分,描述通过经济、生态和社会系统之间空间动态的相互作用而产生的土地利用变化状态,可以更好地支持规划政策以实现可持续发展<sup>[29]</sup>。

LEAS 自两期土地利用变化中提取各类用地扩张部分,并从中采样,采用随机森林算法逐一挖掘各类土地利用扩张和驱动力的因素,获取各土地利用类型发展概率以及各驱动因子对该时段各土地利用类型扩张的贡献。CARS 模块是基于多类随机斑块种子元胞自动机 (CA) 模型,并对其基于随机种子生成和阈值递减机制进行了改进<sup>[41—42]</sup>。

2.2.2 驱动因子的选取

本研究以 2 期 (2010 年与 2020 年) 土地利用数据为基础,综合已有研究成果<sup>[43—44]</sup>,从研究区实际情况、数据可获取性、驱动因子可量化性三方面进行考虑,选取驱动土地利用变化的因素共计 15 项 (图 3) 作驱动因子输入 LEAS 模块,过程计算各驱动因素对每种土地利用类型扩张的贡献程度,得到各土地利用类型在各像元上的发展概率 (图 4),经精度检验验证其可作为后续载入 CARS 模块的前期计算结果。

2.2.3 土地利用模拟情景预设

研究通过多情景分析探究不同可能、对比不同路径的发展状态,为决策提供依据。模型预测通过输入不同驱动因素、空间政策的限制、设置土地利用需求、转移矩阵和邻域权重等训练参数来设置两种发展情景,模拟未来土地利用变化。一是延续 2010 年至 2020 年发展规律的自然发展情景;二是将国土空间规划、地区政策作为情景原则与限制条件输入模拟之中的规划政策情景 (表 2)。

表 2 湛江市中心城区未来土地利用发展情景模式及原则

Table 2 Development scenario and explanation of driving factors of land use change in the central urban area of Zhanjiang

| 情景模式<br>Scene mode                     | 原则及限制因素<br>Principles and restricted development areas                                                                               |
|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 自然发展情景<br>Natural development scenario | 不考虑任何规划政策对土地利用变化的约束性影响,基于 2010—2020 年湛江市中心城区土地利用转换规律进行未来情景模拟                                                                         |
| 规划政策情景<br>Planning policy scenario     | 参考《湛江市国土空间总体规划 (2020—2035 年)》要求,划定生态保护红线,生态保护红线内自然保护区核心保护区禁止人为活动,严格禁止开发性建设活动;划定永久基本农田;严格控制耕地转换园林地;严控建设占林地面积;水域保护;基于 LEAS 模块加入规划交通的影响 |

2.3 人类活动强度计算

人类活动强度 (HAILS, Human Activity Intensity of Land Surface) 从土地利用与人类活动关系角度客观反映人类活动对陆地表层影响和作用程度<sup>[45—46]</sup>。湛江市中心城区人类活动强度计算采用徐勇<sup>[47]</sup>等提出的人类活动强度计算模型,区域内建设用地当量面积占区域土地总面积的百分比即为该区域的人类活动强度。

$$HAILS = \frac{S_{CLE}}{S} \times 100\% \tag{4}$$

$$S_{CLE} = \sum_{i=1}^n (SL_i \times CI_i) \tag{5}$$

式中, HAILS 为陆地表层人类活动强度;  $S_{CLE}$  为建设用地当量面积;  $S$  为区域总面积;  $SL_i$  为第  $i$  种土地利用面积;  $CI_i$  为第  $i$  种土地利用/覆被类型的建设用地当量折算系数;  $n$  为区域内土地利用数量。

2.4 热点分析

热点分析 (Getis-Ord  $G_i^*$ ) 用于识别具有显著性的高值 (热点) 和低值 (冷点) 的空间聚类<sup>[48]</sup>,热点分析可以直观反映湛江市中心城区生态系统服务价值是否存在高值集聚和低值集聚<sup>[49]</sup>,以及确定热点区、次热点区、过渡

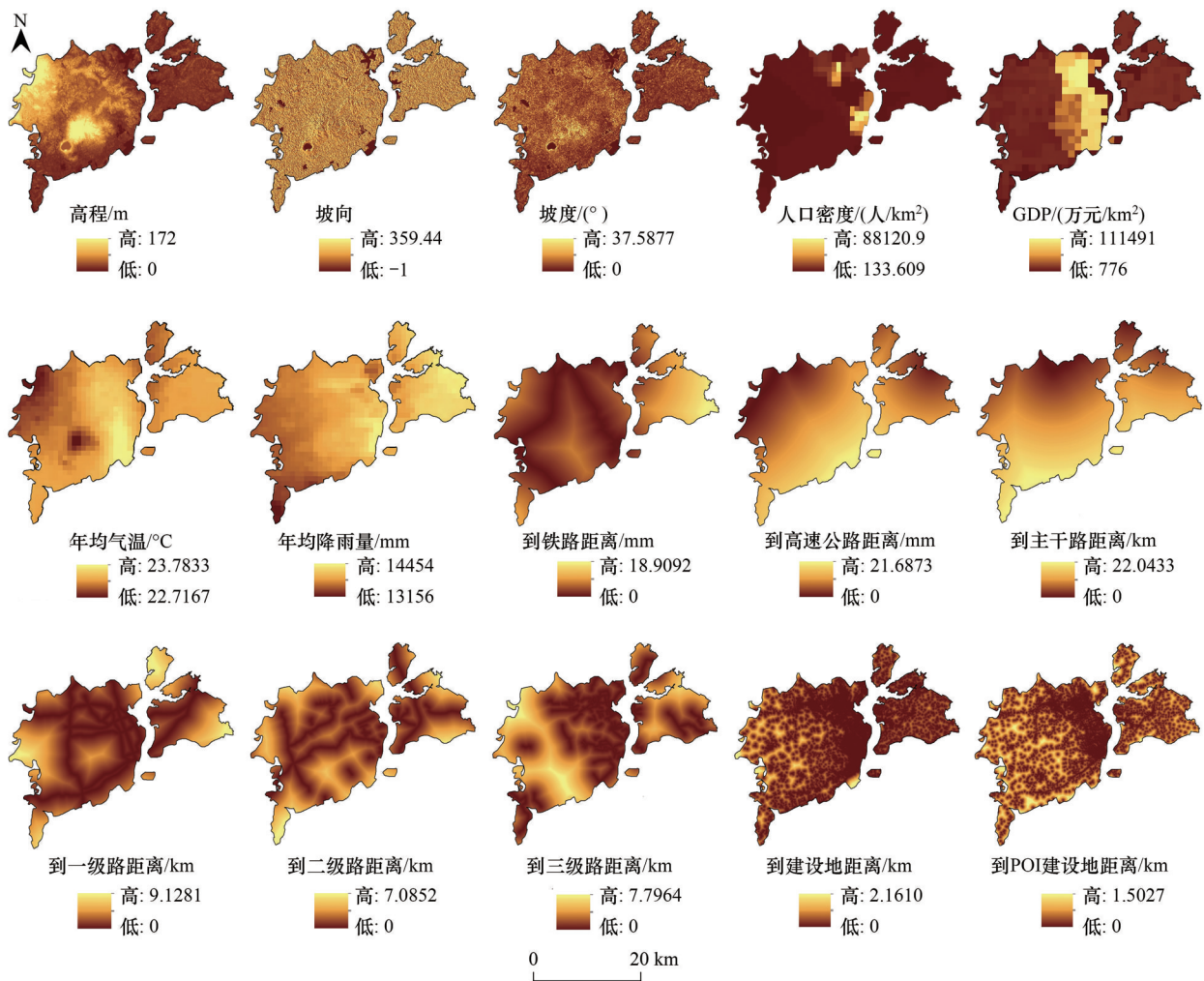


图3 土地利用变化驱动因素

Fig.3 Driving factors of land use change

区、次冷点区、冷点区在空间上发生聚类的位置<sup>[50]</sup>,为后续判断城市绿色空间建设开发时序提出建议。

### 3 结果与分析

#### 3.1 湛江市中心城区未来土地利用变化模拟结果

##### 3.1.1 模型模拟精度检验

模型验证是判断模型参数设置是否合理以及在研究区是否适用的标准,Kappa 系数是一种衡量精度的指标,它可以定量反应模拟效果,也可以用来评价两幅图的一致性<sup>[51]</sup>。计算公式为:

$$Kappa = \frac{P_0 - P_e}{1 - P_e} \quad (6)$$

式中:  $P_0$  表示模拟结果与实际之间的相对一致性;  $P_e$  表示偶然一致性的假设概率。通常 Kappa 系数取值范围为  $[0, 1]$ , 数值越大表示模拟的精度越高,模拟结果与实际的土地利用分布越接近。

以 2010 年土地利用数据为基础进行 2020 年土地利用变化模拟,将模拟结果与实际土地利用状况进行精度检验,Kappa 系数为 0.815,模拟预测结果与实际土地利用类型分布较为吻合,说明可用 PLUS 模型及相关参数设置预测未来湛江市中心城区土地利用变化。

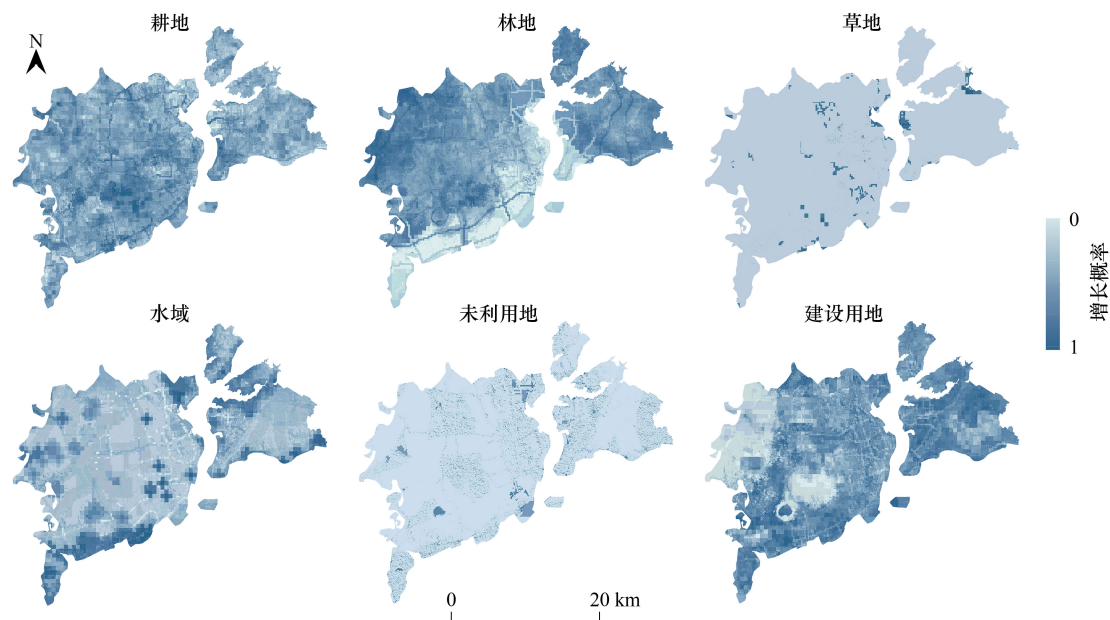


图4 各土地利用类型的发展概率

Fig.4 Growth probability for each land use type

### 3.1.2 多情景下湛江市中心城区未来土地利用变化模拟结果分析

以2020年土地利用数据为基础,进行自然发展情景和规划政策情景下2035年土地利用变化模拟(图5)。从空间分布来看,自然发展情景下2035年研究区内建设用地范围延续此前发展规律向周边扩张,面积为122.00km<sup>2</sup>,与2020年相比增加了11.78km<sup>2</sup>,相应地侵占了耕地及水域面积,耕地面积小幅减少,相比2020年减少了2.71%。西南部局部水域减少明显,相比2020年减少了23.72%;而在规划政策情景下2035年研究区建设用地多围绕海域建设,面积小幅减少为106.16 km<sup>2</sup>。中心城区中部范围内耕地、林地增多,整体水域得到有效保护,面积减少甚微。

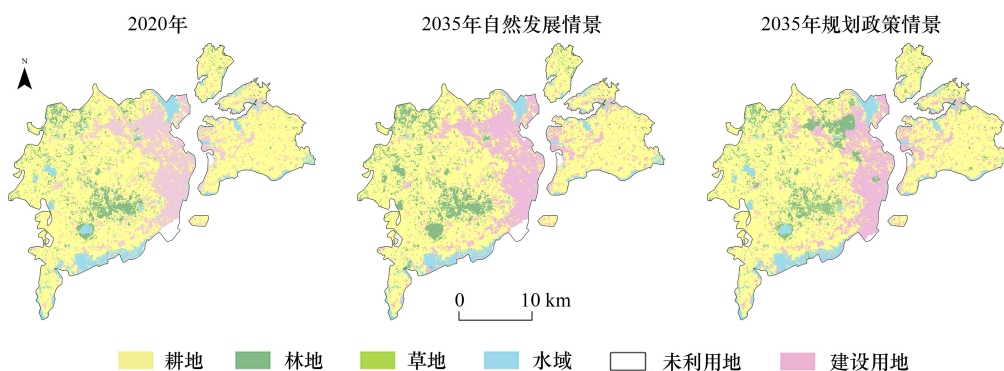


图5 不同情景下2035年湛江市中心城区土地利用变化模拟

Fig.5 Simulation of land use change in the central urban area of Zhanjiang in 2035 under different scenarios

对模拟结果分别进行转移矩阵分析(表3、4),发现其中耕地、林地、水域及建设用地转移面积差异较大。自然发展情景延续前一阶段土地利用变化规律和发展模式,在2020—2035阶段,建设用地面积大幅增加,多为耕地及水域向建设用地转换,导致耕地及水域面积减少较多;规划政策情景下,因加入了划定生态保护红线及水域保护、保护耕地等规划限制条件,模拟结果建设用地呈减少趋势,耕地、林地增多,整体水域得到有效保

护。由于规划交通发展,建设用地向东南方向转移。

表 3 自然发展情景下 2020—2035 年湛江市中心城区土地利用类型转移矩阵/km<sup>2</sup>

Table 3 Transfer matrix of land use types in the central urban area of Zhanjiang from 2020 to 2035 under the natural development scenario

| 年份<br>Year | 土地利用类型<br>Land use types | 2035             |                   |                       |                   |                  |                     | 总计<br>Total |
|------------|--------------------------|------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|------------------|---------------------|-------------|
|            |                          | 草地<br>Grass land | 耕地<br>Arable land | 建设用地<br>Built-up land | 林地<br>Forest land | 水域<br>Water land | 未利用地<br>Unused land |             |
| 2020       | 草地                       | 0.59             | 0.00              | 0.11                  | 0.00              | 0.00             | 0.00                | 0.71        |
|            | 耕地                       | 0.00             | 424.93            | 8.36                  | 3.47              | 0.00             | 0.00                | 436.76      |
|            | 建设用地                     | 0.00             | 0.00              | 109.90                | 0.21              | 0.11             | 0.00                | 110.22      |
|            | 林地                       | 0.00             | 0.00              | 0.38                  | 40.06             | 0.13             | 0.00                | 40.57       |
|            | 水域                       | 0.00             | 0.00              | 2.78                  | 7.72              | 31.76            | 0.01                | 42.27       |
|            | 未利用地                     | 0.00             | 0.00              | 0.48                  | 0.00              | 0.24             | 5.25                | 5.96        |
|            | 总计                       | 0.59             | 424.93            | 122.00                | 51.46             | 32.25            | 5.26                | 636.49      |

表 4 规划政策情景下 2020—2035 年湛江市中心城区土地利用类型转移矩阵/km<sup>2</sup>

Table 4 Transfer matrix of land use types in the central urban area of Zhanjiang from 2020 to 2035 under the planning policy scenario

| 年份<br>Year | 土地利用类型<br>Land use types | 2035             |                   |                       |                   |                  |                     | 总计<br>Total |
|------------|--------------------------|------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|------------------|---------------------|-------------|
|            |                          | 草地<br>Grass land | 耕地<br>Arable land | 建设用地<br>Built-up land | 林地<br>Forest land | 水域<br>Water land | 未利用地<br>Unused land |             |
| 2020       | 草地                       | 0.59             | 0.07              | 0.04                  | 0.00              | 0.00             | 0.00                | 0.71        |
|            | 耕地                       | 0.00             | 420.76            | 14.34                 | 1.65              | 0.00             | 0.00                | 436.76      |
|            | 建设用地                     | 0.00             | 7.73              | 86.93                 | 15.49             | 0.00             | 0.07                | 110.22      |
|            | 林地                       | 0.00             | 7.96              | 0.03                  | 32.57             | 0.00             | 0.00                | 40.57       |
|            | 水域                       | 0.00             | 0.02              | 0.00                  | 0.08              | 42.18            | 0.00                | 42.27       |
|            | 未利用地                     | 0.00             | 0.14              | 4.81                  | 0.00              | 0.00             | 1.01                | 5.96        |
|            | 总计                       | 0.59             | 436.68            | 106.16                | 49.79             | 42.18            | 1.09                | 636.49      |

### 3.2 湛江市中心城区生态系统服务价值特征分析

#### 3.2.1 多情景下湛江市中心城区生态系统服务价值变化特征分析

由表 5 可知,湛江市中心城区的生态系统服务价值主要来自水域,贡献率达 55% 以上,其次是耕地及林地,分别占比 30% 左右和 15% 左右,草地和未利用地贡献率较小。自然发展情景下除林地外,ESV 整体呈大幅下降趋势,从 11.88 亿元降低至 10.53 亿元,总体生态系统服务价值明显下降,降低率为 11.41%,主要原因是生态系统服务价值贡献率较高的水域、耕地与林地的减少以及不利于生态系统服务价值增加的建设用地的扩张;规划政策情景下 2035 年湛江市中心城区生态系统服务价值呈上升趋势,从 11.88 亿元升至 12.22 亿元。相对于自然发展情景,水域和耕地生态系统服务价值高了 1.75 亿元,总量增加了 1.69 亿元,这主要与《湛江市国土空间总体规划(2020—2035 年)》中规划政策协调了各类用地面积,划定生态保护红线、水域保护等约束条件有关,保护了研究区的生态安全。但由于林地面积减少,林地生态系统服务价值降低了 0.06 亿元,故还应对林地予以进一步约束,控制林地向耕地转换。

表 5 模拟 2035 年多情景下各类土地生态系统服务价值/万元

Table 5 Simulate the service value of various land ecosystems under the multi scenario in 2035

| 土地利用类型<br>Land use type      |      | 耕地<br>Arable land | 林地<br>Forest land | 草地<br>Grass land | 水域<br>Water land | 未利用地<br>Unused land | 建设用地<br>Built-up land | 总计<br>Total |
|------------------------------|------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|---------------------|-----------------------|-------------|
| 2020 年现状                     | ESV  | 32511.96          | 15388.88          | 160.41           | 70758.90         | 5.97                | 0.00                  | 118826.12   |
| Current situation in 2020    | 比例/% | 27.36%            | 12.95%            | 0.13%            | 59.55%           | 0.01%               | 0.00%                 | 100.00%     |
| 自然发展情景下 2035 年               | ESV  | 31631.30          | 19522.29          | 135.04           | 53971.87         | 3.06                | 0.00                  | 105263.56   |
| Natural development scenario | 比例/% | 30.05%            | 18.55%            | 0.13%            | 51.27%           | 0.00%               | 0.00%                 | 100.00%     |
| 规划政策情景下 2035 年               | ESV  | 32506.13          | 18888.64          | 135.04           | 70597.72         | 22.52               | 0.00                  | 122150.04   |
| Planning policy scenario     | 比例/% | 26.61%            | 15.46%            | 0.11%            | 57.80%           | 0.02%               | 0.00%                 | 100.00%     |

由图 6 可得,自然发展情景下 2035 年生态系统服务价值提升区域较少,分布分散,下降区域较多,相对集中于麻章区内部、赤坎区与霞山区中城市建设用地范围内;规划政策情景下 2035 年生态系统服务价值总量提升且提升区域面积相较于自然发展情景显著增加,赤坎区出现集中成片提升区域。

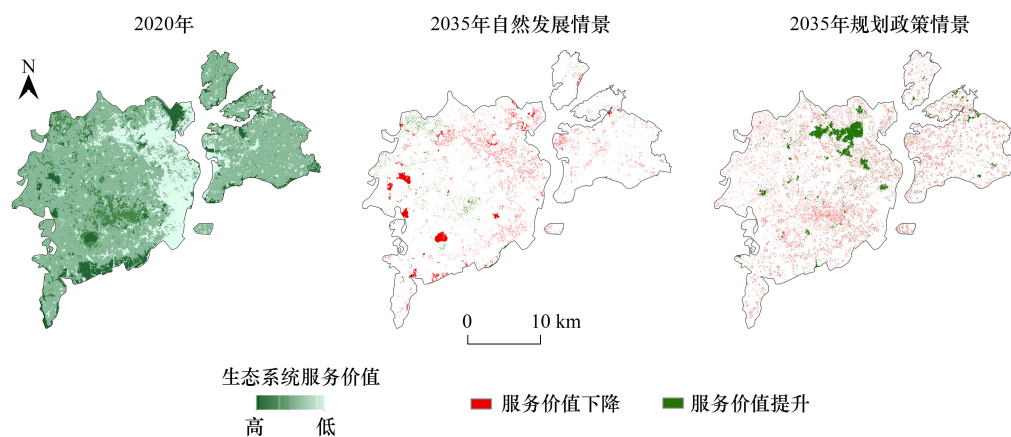


图 6 不同情景下 2035 年与 2020 年生态系统服务价值变化图

Fig.6 Change in the value of ecosystem services in 2035 and 2020 under different scenarios

### 3.2.2 多情景下湛江市中心城区生态系统服务价值冷热点分析

创建 1km×1km 渔网单元,利用 ArcGIS 软件中热点分析工具分析得出 2020 年和多情景下 2035 年研究区的生态系统服务价值的冷热点区域分布图,采用自然断点法将研究区生态系统服务价值空间聚集程度从低到高划分为 5 个等级:冷点区、次冷点区、过渡区、次热点区及热点区。(图 7)

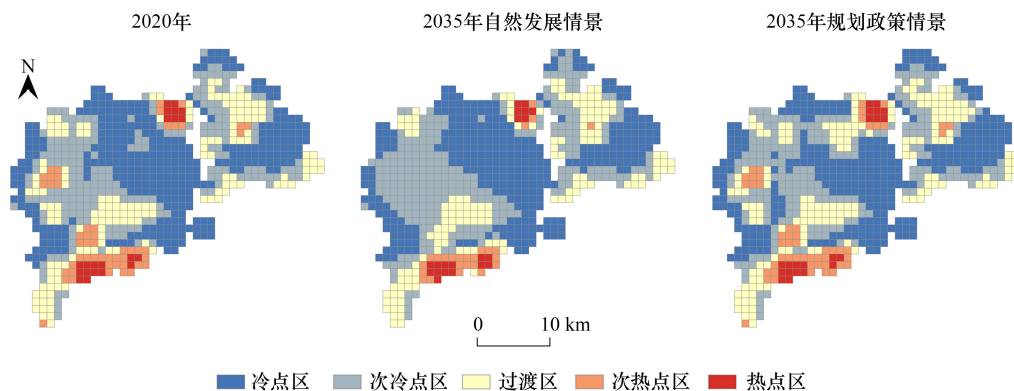


图 7 不同情景下 2035 年湛江市中心城区 ESV 冷热点分布

Fig.7 Distribution of ESV cold and hot spots in the central urban area of Zhanjiang in 2035 under different scenarios

研究区 ESV 值的冷点区域分布较广且集中成片,热点区域分布较为分散。各情景下的热点及次热点空间分布范围:2035 年规划政策情景>2020 年实际情景>2035 年自然发展情景。自然发展情景下 2035 年研究区生态系统服务价值高值在空间上的聚集情况有所减弱,西部、南部及东北部冷点区域范围扩大;规划政策情景下 2035 年研究区南侧热点区域连片聚集,中部自然保护地生态系统服务价值得以延续,北部建设用地范围内大量冷点区域向过渡区及热点区转换,东北部近海域过渡区向原冷点区扩张。这是由于相应规划政策要求,新增热点区的形成是由于水域保护、自然保护地保护等措施的实施。

### 3.3 城市绿色空间发展优先级分区分析

#### 3.3.1 人类活动强度冷热点分析

通过公式(4,5)计算得出规划政策情景下 2035 年人类活动强度指数,将人类活动强度数据连接至前文所建立 1km×1km 的渔网单元中,应用 ArcGIS 中热点分析工具,利用自然断点法将人类活动强度指数从低到高分冷点区、次冷点区、过渡区、次热点区、热点区五个等级,得到规划政策情景下 2035 年人类活动强度冷热点分布图(图 8)。湛江市中心城区人类活动强度空间分布呈现东西低,中部高的特征,以建设用地为中心发散减弱,近海域区域人类活动强度最弱。

#### 3.3.2 城市绿色空间发展优先级分区结果

统筹考虑自然与人文,以平衡生态系统服务价值及发展建设间的关系为出发点,对湛江市中心城区城市绿色空间发展优先级进行分区规划。通过对生态系统服务价值与人类活动强度的空间分布进行叠置分析,将 ESV 及 HAILS 空间聚集程度由冷点区至热点区分别赋值为 0、1、2、3、4,根据矩阵(表 6)可得到计算分值为 0—8 的 25 类特征空间,将 25 类空间根据 0—2、3—5、6—8 进行三级分区,分为先序发展区、中序发展区和后序发展区,得到发展优先级分区结果(图 9)。其中先序发展区指生态系统服务价值高且人类活动强度较大的区域,但现状研究区内并没有分值为 8 的网格单元;中序发展区指生态系统服务价值及人类活动强度综合处于过渡阶段的区域;后序发展区指生态系统服务价值及人类活动强度均较弱的区域,在研究区中面积占比最大。

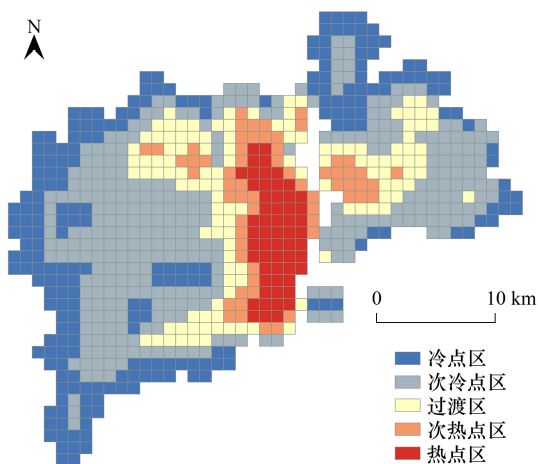


图 8 规划政策情景下 2035 年人类活动强度冷热点分布

Fig.8 Distribution of cold hotspots of human activity intensity in 2035 under planning policy scenarios

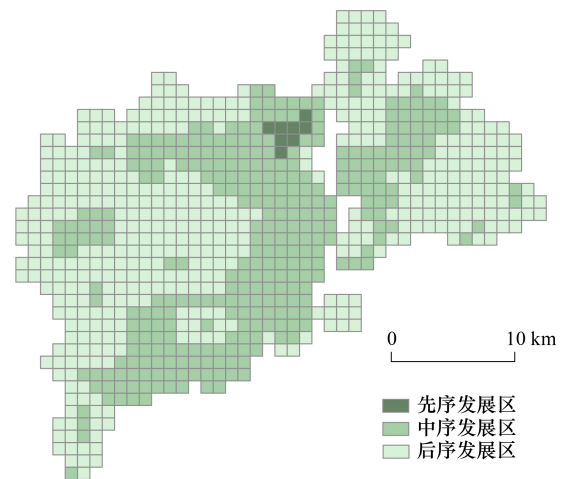


图 9 城市绿色空间发展优先级分区结果

Fig.9 Results of urban green space development priority zoning

表 6 各网格单元 ESV 及 HAILS 空间分布矩阵分析

Table 6 Spatial distribution matrix analysis of ESV and HAILS for each grid cell

| 分区<br>Zone                   | ESV 冷点区<br>ESV cold spot | ESV 次冷点区<br>ESV sub-cold spot | ESV 次过渡区<br>ESV sub-transition | ESV 次热点区<br>ESV sub-hotspot | ESV 次热点区<br>ESV hot zone |
|------------------------------|--------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| HAILS 冷点区 ESV Cold Spot Zone | 0                        | 1                             | 2                              | 3                           | 4                        |
| HAILS 次冷点区 ESV sub-cold spot | 1                        | 2                             | 3                              | 4                           | 5                        |
| HAILS 过渡区 ESV sub-transition | 2                        | 3                             | 4                              | 5                           | 6                        |
| HAILS 次热点区 ESV sub-hotspot   | 3                        | 4                             | 5                              | 6                           | 7                        |
| HAILS 热点区 ESV Hot Zone       | 4                        | 5                             | 6                              | 7                           | 8                        |

ESV:生态系统服务价值 Ecosystem Services Value;HAILS:人类活动强度 Human Activity Intensity of Land Surface

先序发展区聚集于赤坎区中部,此区域生态系统服务价值提升潜力最大,并处于城市建设用地范围内,人

类活动强度大,城市绿色空间承载压力较大,应重点修复原有绿色空间基底,控制建设用地在此区域内的扩张程度,强调其综合效益;中序发展区为原有绿色基底较好同时人类活动强度较低的区域与人类活动强度较高但生态服务价值较弱的区域,主要包含赤坎区、霞山区及坡头区的建设用地范围及水域范围,较集中于湛江市中心城区中部,应强调水域保护,城区中部耕地保护,围绕先序发展区周边逐步展开建设,强化先序发展区生态效益的同时向周边扩散至后序发展区,形成发展区过渡;后序发展区面积最大,人类活动强度相对较小,用地类型以耕地为主,主要分布于湛江市中心城区的边缘范围内。通过城市绿色空间发展优先级分区,将规划政策进行空间响应,基于地理单元考虑生态系统的完整性、资源环境的综合承载能力、人地关系耦合的整体性,逐步形成环境友好,自然人文统筹发展的城市绿色空间。

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

本文通过城市绿色空间的分布变化和利用强度表征显现城市生态系统之间的权衡或协同关系,对推进中国城市绿色空间发展与生态文明建设具有借鉴意义。在模型选择方面优化于此前研究常用的 Markov 模型、CLUE-S 模型<sup>[21-22,52]</sup>等,应用 PLUS 模型对各情景下土地利用状况中城市绿色空间的地理分布及价值量化进行了分析,综合考虑自然条件变化与人类活动的影响,生成了真实性更高的土地利用格局。耦合人类活动强度及生态系统服务价值进行综合分析及空间响应,更直观地反映了规划政策情景下发展结果的实际效益。进而研究得到基于生态系统服务价值的城市发展模式建议:自然发展情景下 2035 年研究结果表明在经济快速发展情景下,生态平衡遭到了破坏,而湛江市中心城区建设用地面积较大,且位于陆地与海域过渡段,对市域生态结构具有重要意义,属于湛江市中部的生态安全屏障,因此湛江市中心城区发展要避免蔓延扩张形式,注意林地保护,限制建设用地扩张;规划政策情景下 2035 年生态系统的调节服务价值升高显著,主要原因在于赤坎区林地显著增多、建设用地面积小幅减少至 106.16km<sup>2</sup>,耕地增多,水域得到有效保护,通过成片建设用地局部转换至未利用地、建设用地与耕地、林地统筹发展来促进经济、生态共赢的合理化模式。为有效优化城市绿色空间结构,为空间规划决策和可持续的城市发展与生态平衡提供重要的指导意义。

本文主要有以下局限性:(1)采用当量因子法进行 ESV 评估,虽然对 ESV 系数进行了基于粮食价格的修订,但研究以假设 2020 年价值量不变进行预测,存在高估或低估未来 ESV 变化的可能。(2)为表征人类活动强度及 ESV 空间聚集程度,选择 1km 网格的方式进行研究,尺度较为单一,未来可采用多尺度对比分析,探索尺度效应对 ESV 聚集程度演变的影响。(3)现状城市绿色空间发展滞后于建设空间,成为了制约城市可持续发展的主要障碍<sup>[53-54]</sup>,研究分析虽得出了城市绿色空间发展时序建议,但对其质量及数量是否可以满足人类生活需求这一方面没有落实到指标上。湛江市中心城区作为湛江市本轮国土空间规划发展的重中之重,有必要继续探讨在高质量发展背景下如何将国土空间格局优化措施精细化,统筹考虑以人文及生态服务两方面的可持续联系<sup>[55]</sup>。

### 4.2 结论

(1)PLUS 模型适用于湛江市中心城区,对未来城市土地利用变化模拟预测结果精度较高,Kappa 系数为 0.815,表明未来与本区域相关研究可继续考虑应用该模型。在对湛江市中心城区进行不同情景模拟后发现,自然发展情景下 2035 年研究区建设用地面积为 122km<sup>2</sup>,相比 2020 年增加了 11.78km<sup>2</sup>,向周边扩张明显,水域及耕地面积减少;规划政策情景下建设用地面积小幅减少至 106.16km<sup>2</sup>,耕地、林地增多,水域得到有效保护。规划政策限制林地转换建设用地,未限制林地向耕地转换导致林地面积减少,应对林地予以进一步约束。

(2)2035 年规划政策情景 ESV>2020 年实际情景 ESV>2035 年自然发展情景 ESV,分别约为 12.22 亿元、11.89 亿元、10.53 亿元,规划政策情景下生态系统服务价值总量较自然发展情景下提升约 1.69 亿元。证明国土空间规划的实施将作为一种精细化治理服务的领域化手段,引导湛江市中心城区生态系统得到有效保护。赤坎区、霞山区 ESV 升高较显著,而麻章区东南部、经开区及坡头区沿海域部分有所下降,两极变化趋势需要

加以重视。规划政策情景下 2035 年 ESV 总体提升,其中支持服务和调节服务提升最为显著,文化服务略有下降,在未来建设过程中,切勿忽视景观美学的营造。

(3)从 ESV 热点分析结果来看其在空间上的聚集程度,热点区域沿海域聚集性较强;对生态系统服务及人类活动强度的空间分布进行叠置分析,进行绿色空间发展优先级分区,建议以赤坎区中部、沿海域建设用地及水域范围、其他区域顺序进行分区建设。

#### 参考文献(References):

- [1] 郝庆,彭建,魏冶,王丰龙,姚华松,李祚,王伟,张书海,邓玲,赵雲泰,马学广,戈大专,戴俊骋,朱鹤,张茂鑫.“国土空间”内涵辨析与国土空间规划编制建议. 自然资源学报, 2021, 36(9): 2219-2247.
- [2] 杨峥屏,黄千杜. 国土空间生态修复专项规划关键技术. 规划师, 2021, 37(23): 17-22.
- [3] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and human well-being: volume 2 scenarios. Washington DC: Island Press, 2005.
- [4] 岳文泽,王田雨,甄延临.“三区三线”为核心的统一国土空间用途管制分区. 中国土地科学, 2020, 34(5): 52-59, 68.
- [5] 赵寿露,李石华,许新惠,李应鑫,杨文仙,邱利丹. 耦合 MOP-FLUS 模型的滇中城市群“三生”空间格局优化. 水土保持研究, 2022, 29(4): 322-328.
- [6] 王如松. 转型期城市生态学前沿研究进展. 生态学报, 2000, 20(5): 830-840.
- [7] 李锋,王如松. 城市绿地系统的生态服务功能评价、规划与预测研究——以扬州市为例. 生态学报, 2003, 23(9): 1929-1936.
- [8] 陈泓宇,李雄. 基于 MSPA-InVEST 模型的北京中心城区绿色空间生境网络优化. 风景园林, 2021, 28(2): 16-21.
- [9] Liu L H, Qu H Y, Ma Y M, Wang K, Qu H X. Restorative benefits of urban green space: physiological, psychological restoration and eye movement analysis. Journal of Environmental Management, 2022, 301: 113930.
- [10] 杜嵘,陈洁萍. 基于社会网络分析方法的南京主城边缘带绿色空间景观系统评估. 中国园林, 2022, 38(4): 68-73.
- [11] 赵海霞,王淑芬,孟菲,牛铭杰,骆新燎. 绿色空间格局变化及其驱动机理——以南京都市区为例. 生态学报, 2020, 40(21): 7861-7872.
- [12] 汪勇政,李久林,顾康康,陆林. 基于形态学空间格局分析法的城市绿色基础设施网络格局优化——以合肥市为例. 生态学报, 2022, 42(5): 2022-2032.
- [13] Li X, Li X S, Ma X D. Spatial optimization for urban green space (UGS) planning support using a heuristic approach. Applied Geography, 2022, 138: 102622.
- [14] 闫水玉,唐俊. 城市绿色空间生态系统服务供需匹配评估方法:研究进展与启示. 城市规划学刊, 2022(2): 62-68.
- [15] 王兆峰,许静. 土地利用演变对国家公园生态系统服务价值的影响——以三江源国家公园为例. 生态学报, 2022, 42(17): 6948-6958.
- [16] 王颖,刘学良,魏旭红,郁海文. 区域空间规划的方法和实践初探——从“三生空间”到“三区三线”. 城市规划学刊, 2018(4): 65-74.
- [17] 彭建,胡晓旭,赵明月,刘焱序,田璐. 生态系统服务权衡研究进展:从认知到决策. 地理学报, 2017, 72(6): 960-973.
- [18] 刘彦随,陈百明. 中国可持续发展问题与土地利用/覆被变化研究. 地理研究, 2002, 21(3): 324-330.
- [19] Kong F H, Yin H W, Nakagoshi N, Zong Y G. Urban green space network development for biodiversity conservation: identification based on graph theory and gravity modeling. Landscape and Urban Planning, 2010, 95(1/2): 16-27.
- [20] Zhou Y, Shi T M, Hu Y M, Gao C, Liu M, Fu S L, Wang S Z. Urban green space planning based on computational fluid dynamics model and landscape ecology principle: a case study of Liaoyang City, Northeast China. Chinese Geographical Science, 2011, 21(4): 465.
- [21] 王思远,刘纪远,张增祥,周全斌,赵晓丽. 中国土地利用时空特征分析. 地理学报, 2001, 56(6): 631-639.
- [22] 摆万奇,赵士洞. 土地利用变化驱动力系统分析. 资源科学, 2001, 23(3): 39-41.
- [23] 王旭东,姚尧,任书良,史绪国. 耦合 FLUS 和 Markov 的快速发展城市土地利用空间格局模拟方法. 地球信息科学学报, 2022, 24(1): 100-113.
- [24] 陈理庭,蔡海生,张婷,张学玲,曾珩. 基于 Markov-FLUS 模型的饶河流域土地利用多情景模拟分析. 生态学报, 2022, 42(10): 3947-3958.
- [25] 吴榛,张凯云,王浩. 城市扩张情景模拟下绿地生态网络构建与优化研究——以南京市部分区域为例. 中国园林, 2022, 38(4): 56-61.
- [26] 张经度,梅志雄,吕佳慧,陈进钊. 纳入空间自相关的 FLUS 模型在土地利用变化多情景模拟中的应用. 地球信息科学学报, 2020, 22(3): 531-542.
- [27] 严冬,李爱农,南希,雷光斌,曹小敏. 基于 Dyna-CLUE 改进模型和 SD 模型耦合的山区城镇用地情景模拟研究——以岷江上游地区为例. 地球信息科学学报, 2016, 18(4): 514-525.
- [28] 乔治,蒋玉颖,贺瞳,卢应爽,徐新良,杨俊. 土地利用变化模拟研究进展. 生态学报, 2022, 42(13): 5165-5176.

- [29] Liang X, Guan Q F, Clarke K C, Liu S S, Wang B Y, Yao Y. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: a case study in Wuhan, China. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2021, 85: 101569.
- [30] 李琛, 高彬斌, 吴映梅, 郑可君, 武燕. 基于 PLUS 模型的山区城镇景观生态风险动态模拟. *浙江农林大学学报*, 2022, 39(1): 84-94.
- [31] Zhang J B, Zhu H R, Zhang P Y, Song Y P, Zhang Y, Li Y Y, Rong T Q, Liu Z Y, Yang D, Lou Y Y. Construction of GI network based on MSPA and PLUS model in the main urban area of Zhengzhou: a case study. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10: 878656.
- [32] Liang X, Liu X P, Li D, Zhao H, Chen G Z. Urban growth simulation by incorporating planning policies into a CA-based future land-use simulation model. *International Journal of Geographical Information Science*, 2018, 32: 2294-2316.
- [33] 黄忠, 张加恭. 湛江区位优势与开发问题. *湛江师范学院学报*, 1994, 15(1): 18-21.
- [34] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019. *Earth Syst. Sci. Data*, 13, 3907-3925
- [35] Fick S E, Hijmans R J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 2017, 37(12): 4302-4315.
- [36] 徐新良. 中国 GDP 空间分布公里网格数据集. 资源环境科学数据注册与出版系统. [2022-04-16]. (<http://www.resdc.cn/DOI>), 2017. DOI: 10.12078/2017121102
- [37] Robert Costanza, Ralph d'Arge, Rudolf de Groot, Stephen Farber, Monica Grasso, Bruce Hannon, Karin Limburg, Shahid Naeem, Robert V. O'Neill, Jose Paruelo, Robert G. Raskin, Paul Sutton, Marjan van den Belt. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature: International weekly journal of science*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [38] 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.
- [39] 武丽琼, 李士荣. 湛江市乔木绿化树种调查及综合评价. *广东园林*, 2010, 32(5): 49-55.
- [40] 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.
- [41] Chen Y H, Wang J, Xiong N N, Sun L, Xu J Q. Impacts of land use changes on net primary productivity in urban agglomerations under multi-scenarios simulation. *Remote Sensing*, 2022, 14(7): 1755.
- [42] Hamad R, Balzter H, Kolo K. Predicting land use/land cover changes using a CA-Markov model under two different scenarios. *Sustainability*, 2018, 10(10): 3421.
- [43] 王子尧, 黄楚梨, 李惊, 林箐. 耦合 InVEST-HFI-PLUS 模型的生态分区规划与动态评估——以博尔塔拉蒙古自治州为例. *生态学报*, 2022, 42(14): 5789-5798.
- [44] 朱寿红, 孙玉杰, 舒帮荣, 王胜利, 梁迅. 规划政策影响下区域生态用地演变模拟研究——以南京市溧水区为例. *地理与地理信息科学*, 2019, 35(4): 83-90.
- [45] Xu Y, Xu X R, Tang Q. Human activity intensity of land surface: concept, methods and application in China. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(9): 1349-1361.
- [46] 魏建兵, 肖笃宁, 解伏菊. 人类活动对生态环境的影响评价与调控原则. *地理科学进展*, 2006, 25(2): 36-45.
- [47] 徐勇, 孙晓一, 汤青. 陆地表层人类活动强度: 概念、方法及应用. *地理学报*, 2015, 70(7): 1068-1079.
- [48] 宋洁, 温璐, 王凤歌, 李宽, 吴程, 张宏伟, 张雪峰. 乌兰布和沙漠生态系统服务价值时空动态. *生态学报*, 2021, 41(6): 2201-2211.
- [49] 涂小松, 龙花楼. 2000—2010 年鄱阳湖地区生态系统服务价值空间格局及其动态演化. *资源科学*, 2015, 37(12): 2451-2460.
- [50] 舒波, 李雨哲, 王玲, 何洲历, 王蜜. 乐山市土地利用与生态系统服务价值时空动态变化分析. *生态科学*, 2022, 41(1): 159-168.
- [51] 陈仙春. 基于 CLUE-S 模型的滇中城市群土地利用变化模拟[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2020.
- [52] 邹天娇, 倪畅, 郑曦. 基于 CA-Markov 和 InVEST 模型的土地利用格局变化对生境的影响研究——以北京浅山区为例. *中国园林*, 2020, 36(5): 139-144.
- [53] 李玉婷, 郑巧依, 雷春梅, 钱云. “公园城市”视角下环城绿色空间的发展回顾与优化探索——以成都锦城公园为例. *中国风景园林学会 2020 年会论文集(上册)*. 成都, 2020: 78-88.
- [54] 李志明, 邱利. 英国绿色空间规划的实践经验及其对中国的启示. *现代城市研究*, 2018, 33(11): 26-32.
- [55] 成超男, 胡杨, 赵鸣. 城市绿色空间格局时空演变及其生态系统服务评价的研究进展与展望. *地理科学进展*, 2020, 39(10): 1770-1782.