# 耦合 GMMOP-PLUS 模型的蓝绿空间多情景模拟预测*

卢俊涵 任 维 曹睿祺 黄乐妍

福建农林大学风景园林与艺术学院/海峡美丽乡村人居环境研究中心 福州 350100

**摘要**:【目的】针对既有蓝绿空间研究侧重绿色或蓝色单一类型空间时空变化及其影响因素分析,且 PLUS 模型缺乏土地利用格局多目标最优求解等问题,耦合 GMMOP-PLUS 模型以开展蓝绿空间多情景模拟预测研究,为科学合理管控蓝绿空间及其格局,实现最优土地利用与可持续发展模式提供参考。【方法】以浙闽地区典型沿海中等城市福建漳州为对象,基于 2000、2010、2020 年 3 期土地利用数据,借助 PLUS 模型、ArcGIS10.6、Lingo18.0 等软件,设定自然发展(ND)、经济发展(ED)、生态保护(EP)和可持续发展(SD)4 个情景,耦合 GMMOP-PLUS 模型实现漳州市 2030 年蓝绿空间多情景模拟预测,并对比其经济价值、生态价值和综合价值。【结果】1)土地利用类型以蓝绿空间为主,水域和林地是主要地类,耕地和草地是次要地类。2)2000—2020 年,蓝绿空间持续减少,主要转为建设用地;蓝色空间变化的主要驱动因子为年均温度和 DEM,绿色空间变化的主要驱动因子为 NDVI。3)以经济价值、生态价值和综合价值衡量 2030 年的多情景模拟预测情况显示,SD 情景为相对最优,兼顾经济效益与生态保护。【结论】漳州市土地利用类型以蓝绿空间为主,SD 情景可为蓝绿空间优化与可持续发展提供理论与实践参考。未来应考虑在 GMMOP 模型中加入自然因素指标,构建更为全面的价值量化与权衡体系。

**关键词**:土地利用;GMMOP 模型;PLUS 模型;蓝绿空间;多情景模拟预测;浙闽地区

DOI:10.12169/zgcsly.2025.02.22.0001

## Multi-Scenario Simulation and Prediction of Blue-Green Space Based on Coupled GMMOP-PLUS Model

Lu Junhan Ren Wei Cao Ruiqi Huang Leyan

(College of Landscape Architecture and Art/Research Center for Cross-Strait Beautiful Rural Human Settlements, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350100, China)

**Abstract**:【Objective】With a view to addressing the problems that the existing research on blue-green space focuses on the analysis of spatial and temporal changes of a single type of green or blue space and its influencing factors, and that the PLUS model lacks the optimal multi-objective solution to the land use pattern, we couple the GMMOP-PLUS model for multiple-scenarios simulation and prediction of blue-green space. It will provide a reference for the scientific and reasonable management of blue-green space and its pattern to realize the optimal land use and sustainable development mode.【Method】We take Zhangzhou, a typical coastal medium-sized city in Zhejiang-Fujian region, as the object, to set up four scenarios of

收稿日期:2025-02-22

*基金项目:教育部人文社会科学研究青年基金项目(20YJC760079);2024 年福建省本科高校教育教学研究重大项目(FBJY20240176);2024 年度福建省教育科学规划常规课题(FJJKBK24-088);福建农林大学科技创新专项基金项目(社科类)(CXZX2022057,CXZX2023005)

第一作者:卢俊涵(1999- ),男,硕士生,研究方向为风景园林规划设计。E-mail:480059523@qq.com

通信作者:任维(1988- ),男,副教授,硕士生导师,福建农林大学风景园林与艺术学院风景园林系主任,海峡美丽乡村人居环境研究中心副主任。研究方向为国土景观保护与生态系统服务、景观感知与评价。E-mail:Ren-wei@fafu.edu.cn

natural development（ND），economic development（ED），ecological protection（EP）and sustainable development（SD）using PLUS model，ArcGIS 10.6，Lingo 18.0 and other software and based on the land use data in 2000，2010 and 2020. Then GMMOP-PLUS model is coupled to realize the multi-scenario simulation and prediction of blue-green space in Zhangzhou City in 2030. We compare economic value，ecological value and comprehensive value of the four scenarios.【Result】1）Land uses are dominated by blue-green space，with watershed and forest land as the main land uses，and cropland and grassland as the secondary land uses；2）From 2000 to 2020，the blue-green space continues to decrease as a result of its conversion to construction land. The main drivers of blue space change are annual mean temperature and DEM，and the main driver of green space change is NDVI；and 3）As the measurement of multi-scenario simulation and prediction for the year of 2030 in terms of economic value，ecological value and comprehensive value shows，SD scenario is relatively the optimal，which takes into account the economic benefits and ecological protection.【Conclusion】Land use in Zhangzhou City is dominated by blue-green space. The SD scenario can provide theoretical and practical references for the optimization and sustainable development of blue-green space. In the future，consideration should be given to adding natural factor indicators to the GMMOP model to construct a more comprehensive value quantification and trade-off system.

**Keywords**：land use；GMMOP model；PLUS model；blue-green space；multi-scenario simulation and prediction；Zhejiang-Fujian region

快速城镇化引发的生态系统服务退化已威胁城市生态安全及可持续发展，并可能进一步制约新时期“人地和谐、高效低碳、生态环保”的城镇化高质量发展[1]。坚持生态优先与绿色发展，构建蓝绿交织、水城共融的生态城市是美丽中国建设背景下城市化发展的重要内容[2]。蓝绿空间是构建可持续发展城市生态系统的关键[3]，对于减少城市碳排放量[4-5]、改善城市热岛效应与空气质量[6-7]等具有积极作用。蓝绿空间减少和不良土地利用变化引起的景观空间格局改变，不仅会对城市生态环境产生负面影响，还会改变城市生态系统格局[8-10]。因此，如何科学合理地管控蓝绿空间及其格局，实现最优土地利用与可持续发展模式，是亟需解决的现实问题。

鉴于此，学界聚焦蓝绿空间进行了诸多有益探索。景观格局优化方面，多采用遥感影像解译、实地调研分析、景观格局指数、动态变化模型、景观转移矩阵等方法分析景观空间格局动态演变、特征及影响因素等，并提出相应的空间干预与管理策略[11-14]。研究区域尺度方面，通过运用 CA-Markov、FLUS、PLUS 等模型，面向都市圈、流域等开展多尺度研究[15-17]。然而，既有研究存在两方面不足：一是多侧重于绿色或蓝色单一类型空间时空变化及其影响因素研究，综合蓝绿空间且以通过模拟预测寻求景观格局优化最优解为目标的研究仍不多见；二是研究区域多以都市圈、流域、大城市等为主，对中小城市的关注相对不足。此外，PLUS 模型是近年来土地利用、蓝绿空间等模拟预测的重要模型[18]，但其多依靠自身的转换规则，缺乏土地利用格局的优化[19]。灰色多目标决策模型（Gray Multi-Objective Optimization，GMMOP）可以充分考虑目标条件和约束条件，从而寻求目标的最优解，实现未来土地利用格局的整体优化[20]，并能解决目标函数和约束条件的不确定性及预测中的多目标冲突[21]。

本文以浙闽地区沿海中等城市福建漳州为对象，基于 2000—2020 年的 3 期土地利用数据，探究驱动因子对蓝绿空间不同地类的贡献度。耦合 GMMOP-PLUS 模型，模拟预测 2030 年漳州市蓝绿空间在 ND、ED、EP 和 SD 等情景下的土地利用情况，并对比其经济价值、生态价值和综合价值，以期为未来漳州市蓝绿空间格局优化与可持续发展提供参考。

## 1　研究区概况

漳州市（23° 32′—25° 13′ N，116° 53′—118°09′E）地处闽南金三角南端的低纬度、低海拔地区，东濒台湾海峡，自然资源丰富，生态屏

障作用明显，漳州市作为全国沿海经济开放区之一，是浙闽滨海地区典型的中等城市。漳州市兼具海洋、森林复合生态特征，是浙闽地区山海型蓝绿空间格局的典型样本，拥有 715 km 的海岸线，形成以海湾、海岛、滩涂为核心的海洋生态系统；森林覆盖率高达 64.65%，拥有“国家森林 城市”“国家园林城市”称号。《漳州国土空间总体规划（2020—2035 年）》中指出，优化国土空间格局，夯实蓝绿空间的生态韧性支撑是未来发展重点。

## 2 研究方法

### 2.1 数据来源

2000、2010、2020 年 3 期数据来源如下：1）30 m×30 m 土地利用数据、数字高程模型（DEM）数据，1 km×1 km 归一化植被指数（NDVI）、土壤侵蚀和土壤类型数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心（https://www.resdc.cn）；土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地。2）1 km×1 km 的人口、GDP、年平均气温和年平均降水数据来源于国家地球系统科学数据中心（https://www.geodata.cn）。3）1 km×1 km 的行政边界及驻地、道路、铁路、水系等矢量数据来源于全国地理信息资源目录服务系统（https://www.webmap.cn）。4）农业、林业、牧业、渔业、第二产业、第三产业产值来源于《漳州市统计年鉴》（2011、2023 年）、《全国农产品成本收益资料汇编》（2001、2011、2021 年）。

运用 ArcGIS 软件的投影栅格、重分类、欧氏距离等工具完成数据预处理。统一转化为 30 m×30 m 的栅格数据，坐标系统一为 WGS_1984_UTM_Zone_50N。

### 2.2 研究框架

基于 2000、2010、2020 年漳州市土地利用数据和驱动因子数据，探究 2000—2020 年蓝绿空间变化规律。运用 PLUS 模型模拟 2030 年漳州市土地利用数据，并将其与 2020 年漳州市实际土地利用数据对比。通过马尔可夫链（Markov chain）和 GMMOP 模型得出 ND、ED、EP 和 SD4 个情景的用地需求，并利用 PLUS 模型模拟预测各情景下漳州市蓝绿空间的土地利用状况，对比各情景价值和空间分布情况。

### 2.3 土地利用转移矩阵、PLUS 模型

选取 PLUS 模型为土地利用模拟预测模型，以斑块为研究区域进行土地利用模拟[22-24]：1）以2000、2010、2020 年土地利用数据为基础，提取土地扩张；再通过土地扩张分析策略（land expansion analysis strategy，LEAS）分析所有驱动因子的土地利用扩张，得到各驱动因子对土地利用变化的贡献度和各地类的发展概率[18,25]。2）邻域权重为基于多类型随机斑块种子的 CA 模型（CA-based on multiple random patch seeds，CARS）进行土地利用模拟的重要指标[26]。结合研究区现状和发展趋势，设定土地利用成本矩阵，计算各情景邻域权重[27-28]。以 2000、2010 年漳州市土地利用数据为基础，模拟 2020 年的土地利用数据，并将其与 2020 年实际土地利用数据进行对比，Kappa 系数为 0.899。表明 PLUS 模型精度高，总体模拟情况较好，可用于漳州市 2030 年蓝绿空间的土地利用模拟。

### 2.4 多情景设置

基于漳州市发展现状和相关政策，模拟 ND、ED、EP、SD 4 种发展情景。ND 情景为基准线情景，基于以往的土地利用变化趋势模拟 2030 年各地类面积；ED 情景限制耕地向除建设用地外的地类转移，将建设用地作为限制转化区，耕地、林地和草地向建设用地的转移概率增加 20%，建设用地向其他用地的转移概率减少 30%；EP 情景限制耕地、林地、草地的转出，并允许建设用地向耕地、林地、草地转化。将水域作为限制转化区，耕地、草地向林地的转移概率增加 20%，耕地、林地、草地向建设用地的转移概率减少 30%；SD 情景兼顾经济发展与生态保护，实现综合价值的最大化与可持续发展。

### 2.5 灰色多目标决策模型

GMMOP 模型由灰色模型（GM）和多目标规划模型（MOP）相结合[29]。GM 模型可通过往年经济价值系数预测未来年份的经济系数以设定目标函数。MOP 模型通过设置目标函数和约束条件，求解各情景下的多目标规划问题，得到不同情景下的各地类面积。

#### 2.5.1 土地利用价值

土地利用价值包括经济价值、生态价值和综

合价值。以漳州市 2000、2010、2020 年各产业经济价值系数为基础，通过 GM 模型预测得到 2030 年各产业经济价值系数。将农业、林业、牧业、渔业、第二产业和第三产业的单位面积产值分别作为耕地、林地、草地、水域、建设用地的经济价值系数[30]；未利用地的经济价值系数为 0。

生态价值系数以谢高地等[31]修正后的“单位面积生态系统服务价值当量表”为基础，结合漳州市经济发展情况对其单位面积粮食产量的经济价值进行修正。

由于 1 个生态系统服务价值当量因子的生态价值为全国平均粮食单位面积产量的 1/7[32]，参考《漳州市统计年鉴》《全国农产品成本收益资料汇编》等，计算得到各年份漳州市 1 个生态系统服务价值当量因子的经济价值及各地类生态价值系数，并通过 GM 模型预测得到 2030 年生态系统服务价值系数。综合价值为经济价值和生态价值之和，得到漳州市 2030 年土地利用价值系数（表 1）。

**表 1　2030 年漳州市土地利用价值系数**　　万元/$km^2$

| 价值系数 | 耕地 | 林地 | 草地 | 水域 | 建设用地 | 未利用地 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 经济价值系数 | 2 421. 93 | 107. 90 | 1 545. 76 | 590. 91 | 76 832. 89 | 0. 00 |
| 生态价值系数 | 268. 77 | 2 680. 55 | 1 231. 23 | 6 043. 21 | 0. 00 | 44. 22 |

2.5.2　约束条件设置与 GMMOP 模型求解

ED 情景以经济效益为目标，使经济效益最大化，公式为：

$$F_1(x) = Max \sum_{k=1}^{6} a_k x_k \quad (1)$$

EP 情景以生态保护为目标，使生态价值最大化，公式为：

$$F_2(x) = Max \sum_{k=1}^{6} b_k x_k \quad (2)$$

SD 情景兼顾经济发展与生态保护，使综合价值最大化，公式为：

$$Max\,[F_1(x),\ F_2(x)] = \alpha F_1(x) + \beta F_2(x) \quad (3)$$

式（1）~（3）中：$a_k$ 和 $b_k$ 分别为各地类的经济价值系数和生态价值系数（万元/$km^2$）；$x_k$ 为地类 $k$ 的面积（$km^2$）[33]；$\alpha$ 和 $\beta$ 为权重系数。

针对漳州市未来十年兼顾经济效益和生态价值的发展定位，也为提高模型精确度和可实现性[34]，经反复调整约束条件后，最终确定权重系数 $\alpha = 0.45$，$\beta = 0.55$。根据相关政策规定和前人研究[35]，对土地利用模拟预测设置以下约束条件（表 2）。运用 Lingo 10.8 软件对函数进行求解，得到 ED、EP、SD 情景下各地类用地需求。

**表 2　漳州市土地利用变化约束条件**

| 约束类型 | 约束条件 | 约束含义 |
|---|---|---|
| 土地面积 | $x_1+x_2+x_3+x_4+x_5+x_6 = 19\,779.77$ | 土地利用总面积不变 |
| 经济价值 | $2\,421.93x_1+107.90x_2+1\,545.76x_3+590.91x_4+76\,832.89x_5 \geq 97\,927\,747.36$ | 优化情景下经济价值≥ND 情景 |
| 生态价值 | $268.77x_1+2\,680.55x_2+1\,231.23x_3+6\,043.21x_4+44.22x_6 \geq 66\,070\,755.32$ | 优化情景下生态价值≥ND 情景 |
| 耕地面积约束 | $0.9\times2\,496.48 \leq x_2 \leq 1.1\times2\,496.48$ | 依据耕地保护政策及经济发展对耕地的影响，以 2030 年 ND 情景的 110%、90%作为上下限 |
| 林地面积约束 | $0.9\times6\,482.56 \leq x_2 \leq 1.1\times6\,482.56$ | 依据退耕还林政策及经济发展对林地的影响，以 2030 年 ND 情景的 110%、90%作为上下限 |
| 草地面积约束 | $0.9\times2\,208.00 \leq x_3 \leq 1.1\times2\,208.00$ | 依据退耕还草政策及经济发展对草地的影响，以 2030 年 ND 情景的 110%、90%作为上下限 |
| 水域面积约束 | $7\,496.66 \leq x_4 \leq 1.1\times7\,496.66$ | 依据《漳州市国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》，以 2030 年 ND 情景的 110%、100%作为上下限 |
| 建设用地面积约束 | $0.8\times1\,004.88 \leq x_5 \leq 1.3\times1\,004.88$ | 依据《福建省国土空间规划（2021—2035 年）》《漳州市国土空间总体规划（2021—2035 年）》，以 2020 年面积的 130%、80%作为上下限 |
| 未利用地面积约束 | $0.8\times11.39 \leq x_6 \leq 11.39$ | 逐步被充分利用。以 2030 年 ND 情景的 100%、80%作为上下限 |
| 生物多样性约束 | $x_3+x_6 \geq 19\,779.77\times0.025$ | 为保持生物多样性，设定草地和未利用地的总面积占比不低于 2.5% |

注：$x_1$~$x_6$ 分别为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地的面积。

## 3 结果与分析

### 3.1 蓝绿空间时空变化及驱动力

由图 1、表 3 可知：1）2000—2020 年，研究区以蓝绿空间（水域、林地、草地和耕地）为主，用地总平均占比 95.95%。此外，建设用地、未利用地平均占比 3.99%、0.07%。2）2000—2020 年，在蓝绿空间中，蓝色空间平均占比 39.35%，绿色空间平均占比 60.65%；水域和林地是主要地类，平均占比 39.35%和 34.69%；耕地和草地是次要地类，平均占比 14.12%和 11.84%；耕地主要分布在东北部和西南部，林地主要分布在中部、西南部及西北部。

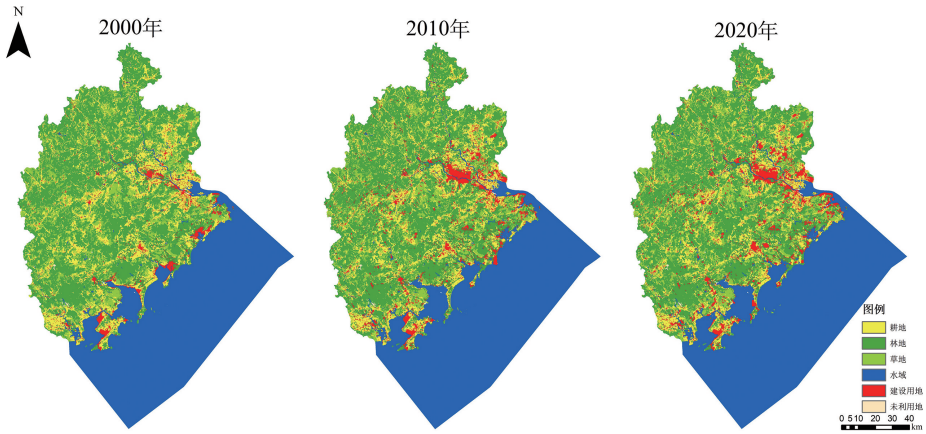



图 1 2000—2020 年漳州市土地利用类型

表 3 2000—2020 年漳州市各地类面积及占比

| 用地类型 | 2000 年 | | 2010 年 | | 2020 年 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 面积/km² | 占比/% | 面积/km² | 占比/% | 面积/km² | 占比/% |
| 耕地 | 2 875.42 | 14.54 | 2 616.23 | 13.22 | 2 551.33 | 12.89 |
| 林地 | 6 733.58 | 34.03 | 6 517.26 | 32.95 | 6 498.87 | 32.86 |
| 草地 | 2 298.66 | 11.62 | 2 226.83 | 11.26 | 2 216.99 | 11.21 |
| 水域 | 7 391.14 | 37.37 | 7 515.21 | 37.99 | 7 495.57 | 37.90 |
| 建设用地 | 467.84 | 2.37 | 891.21 | 4.51 | 1 004.88 | 5.08 |
| 未利用地 | 13.13 | 0.07 | 13.03 | 0.07 | 12.13 | 0.06 |
| 总计 | 19 779.77 | 100.00 | 19 779.77 | 100.00 | 19 779.77 | 100.00 |

#### 3.1.1 蓝绿空间时空变化

图 1 和表 3～4 表明：1）2000—2020 年，蓝绿空间总面积持续减少，达 536.04 km²（2.78%）。2）2000—2020 年，蓝色空间（水域）面积增长，但呈先增后减趋势，共增加 104.43 km²（1.41%），主要源于建设用地、耕地和林地的转入。3）2000—2020 年，绿色空间（林地、草地和耕地）面积显著减少，且呈持续减少趋势，共减少 640.47 km²（5.38%）；区域集中在九龙江西溪北岸的芗城区、龙文区和中部的平和县。其中，耕地面积减少最多，达 324.09 km²（11.27%），主要转为建设用地与林地；林地面积减少 234.71 km²（3.49%），主要转为建设用地、草地和耕地；草地面积减少 81.67 km²（3.55%），主要转为林地、建设用地和耕地。

#### 3.1.2 蓝绿空间时空变化驱动力

由图 2 可知：蓝色空间（水域）的扩张主要受年均温度和 DEM 的影响；绿色空间（林地、草地和耕地）的扩张主要受 NDVI 的影响。其中，林地、草地和耕地贡献度前 3 的驱动因子分别为 NDVI、距二级路距离、距高速路距离；NDVI、DEM、距高速路距离；年降水量、NDVI、距三级路距离。

表 4　2000—2020 年漳州市土地利用类型转移矩阵　　$km^2$

| 时间 | 用地类型 | 耕地 | 林地 | 草地 | 水域 | 建设用地 | 未利用地 | 总计 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2000—2010 年 | 耕地 | 2 490. 41 | 81. 94 | 30. 40 | 37. 26 | 235. 30 | 0. 11 | 2 875. 42 |
| | 林地 | 77. 38 | 6 323. 17 | 106. 24 | 15. 54 | 210. 19 | 1. 06 | 6 733. 58 |
| | 草地 | 31. 85 | 98. 09 | 2 084. 90 | 5. 61 | 77. 77 | 0. 44 | 2 298. 66 |
| | 水域 | 4. 62 | 4. 59 | 1. 36 | 7 374. 99 | 5. 44 | 0. 14 | 7 391. 14 |
| | 建设用地 | 11. 91 | 8. 64 | 3. 20 | 81. 60 | 362. 48 | 0. 01 | 467. 84 |
| | 未利用地 | 0. 06 | 0. 83 | 0. 73 | 0. 21 | 0. 03 | 11. 27 | 13. 13 |
| | 总计 | 2 616. 23 | 6 517. 26 | 2 226. 83 | 7 515. 21 | 891. 21 | 13. 03 | 19 779. 77 |
| 2010—2020 年 | 耕地 | 2 365. 35 | 100. 36 | 42. 65 | 8. 03 | 99. 76 | 0. 08 | 2 616. 23 |
| | 林地 | 103. 96 | 6 246. 96 | 106. 55 | 6. 84 | 52. 05 | 0. 90 | 6 517. 26 |
| | 草地 | 38. 85 | 109. 03 | 2 051. 31 | 2. 30 | 25. 11 | 0. 23 | 2 226. 83 |
| | 水域 | 9. 04 | 7. 62 | 4. 58 | 7 463. 58 | 30. 38 | 0. 01 | 7 515. 21 |
| | 建设用地 | 33. 98 | 34. 13 | 11. 61 | 14. 53 | 796. 95 | 0. 01 | 891. 21 |
| | 未利用地 | 0. 15 | 0. 77 | 0. 29 | 0. 29 | 0. 63 | 10. 90 | 13. 03 |
| | 总计 | 2 551. 33 | 6 498. 87 | 2 216. 99 | 7 495. 57 | 1 004. 88 | 12. 13 | 19 779. 77 |
| 2000—2020 年 | 耕地 | 2 428. 83 | 82. 63 | 29. 80 | 36. 60 | 297. 46 | 0. 10 | 2 875. 42 |
| | 林地 | 78. 27 | 6 306. 22 | 99. 91 | 14. 34 | 233. 97 | 0. 87 | 6 733. 58 |
| | 草地 | 27. 22 | 94. 74 | 2 078. 65 | 4. 82 | 92. 88 | 0. 35 | 2 298. 66 |
| | 水域 | 5. 65 | 5. 15 | 3. 16 | 7 347. 64 | 29. 52 | 0. 02 | 7 391. 14 |
| | 建设用地 | 11. 23 | 9. 63 | 4. 78 | 91. 83 | 350. 37 | 0. 00 | 467. 84 |
| | 未利用地 | 0. 13 | 0. 50 | 0. 69 | 0. 34 | 0. 68 | 10. 79 | 13. 13 |
| | 总计 | 2 551. 33 | 6 498. 87 | 2 216. 99 | 7 495. 57 | 1 004. 88 | 12. 13 | 19 779. 77 |

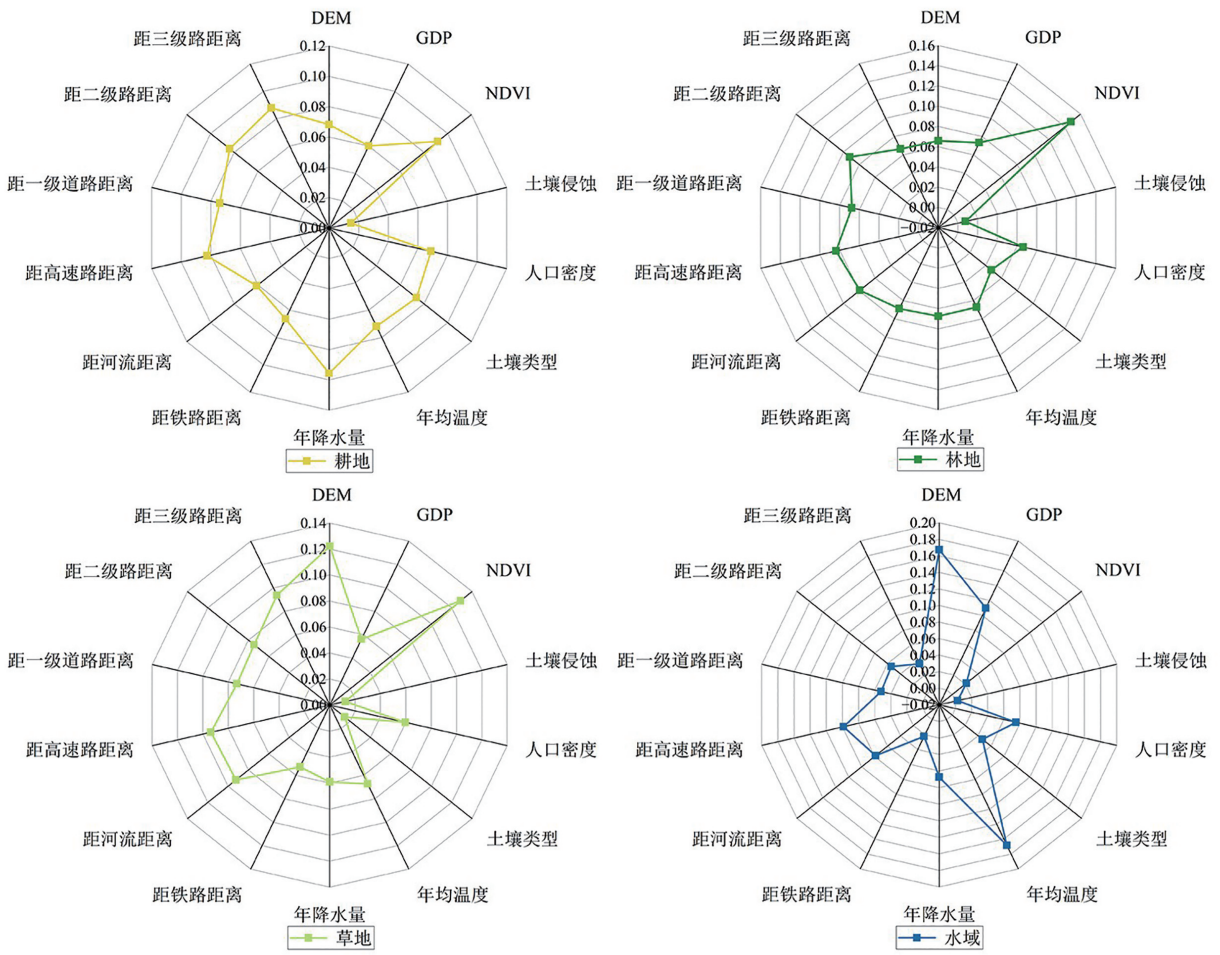



图 2　2000—2020 年漳州市蓝绿空间各地类扩张驱动因子贡献度

### 3.2 2030 年漳州市蓝绿空间多情景模拟预测

耦合 GMMOP-PLUS 模型进行 2030 年 4 种情景土地利用模拟预测（图 3、表 5），并与 2020 年相比较，结果表明：1）蓝绿空间在各情景中增减不一，仅在 EP 情景下增长，达 14.46 $km^2$（0.08%）；在其余情景下均减少，且减少量为 SD 情景>ED 情景>ND 情景。2）蓝色空间在各情景中均增长。增长量为 EP 情景>SD 情景>ND 情景=ED 情景，且前 2 种情景较为显著，分别为 206.68 $km^2$（2.76%）与 99.73 $km^2$（1.33%）。3）绿色空间在各情景中均减少，减少量为 SD 情景>ED 情景>EP 情景>ND 情景，且前 3 种情景较为显著，分别为 528.16 $km^2$（4.69%）、429.51 $km^2$（3.81%）与 192.22 $km^2$（1.71%）。但在各情景中，绿色空间各地类的增减情况不一：仅 ND 情景下，耕地、林地和草地同时减少，分别为 2.15%、0.25%、0.41%。ED 情景下，耕地和草地增长，分别为 7.64% 和 1.82%；林地减少 10.23%。EP 情景下，耕地和林地减少，分别为 11.94%、0.19%；草地增加 5.63%。耕地与林地的转出大量集中至水域，林地面积变化最小，说明生态用地得到了有效保护。SD 情景下，耕地增长 5.53%；林地和草地减少，分别为 10.23% 和 0.21%。在提高经济效益的同时，兼顾较高生态价值的保护。

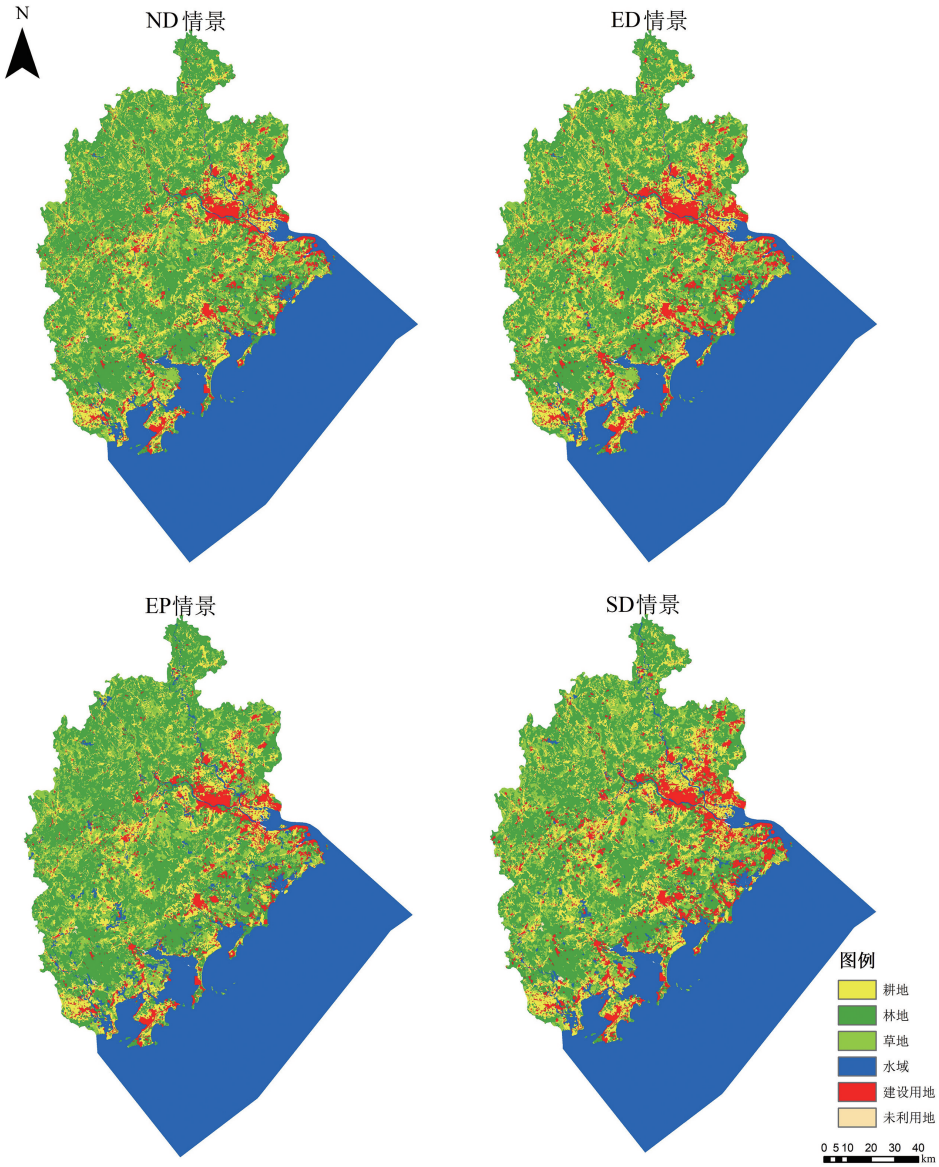



图 3 2030 年漳州市各情景土地利用模拟预测

表 5　2030 年漳州市各情景模拟预测较 2020 年的变化面积　　$km^2$

| 土地利用类型 | 2030 年模拟预测面积 | | | | 较 2020 年的变化面积 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ND 情景 | ED 情景 | EP 情景 | SD 情景 | ND 情景 | ED 情景 | EP 情景 | SD 情景 |
| 耕地 | 2 496. 48 | 2 746. 13 | 2 246. 83 | 2 692. 33 | -54. 85 | 194. 80 | -304. 50 | 141. 00 |
| 林地 | 6 482. 56 | 5 834. 31 | 6 486. 41 | 5 834. 30 | -16. 31 | -664. 56 | -12. 46 | -664. 57 |
| 草地 | 2 208. 00 | 2 257. 24 | 2 341. 73 | 2 212. 40 | -8. 99 | 40. 25 | 124. 74 | -4. 59 |
| 水域 | 7 496. 66 | 7 496. 66 | 7 702. 25 | 7 595. 30 | 1. 09 | 1. 09 | 206. 68 | 99. 73 |
| 建设用地 | 1 084. 68 | 1 431. 09 | 993. 47 | 1 436. 34 | 79. 80 | 426. 21 | -11. 41 | 431. 46 |
| 未利用地 | 11. 39 | 14. 36 | 9. 10 | 9. 10 | -0. 74 | 2. 23 | -3. 03 | -3. 03 |
| 蓝色空间 | 7 496. 66 | 7 496. 66 | 7 702. 25 | 7 595. 30 | 1. 09 | 1. 09 | 206. 68 | 99. 73 |
| 绿色空间 | 11 187. 04 | 10 837. 68 | 11 074. 97 | 10 739. 03 | -80. 15 | -429. 51 | -192. 22 | -528. 16 |
| 蓝绿空间 | 18 683. 70 | 18 334. 34 | 18 777. 22 | 18 334. 33 | -79. 06 | -428. 42 | 14. 46 | -428. 43 |

### 3. 3　2030 年漳州市多情景模拟预测价值比较

以 2020 年的经济价值（49 302 513. 06 万元）、生态价值（51 724 167. 22 万元）和综合价值（101 026 680. 28 万元）为参照，比较 2030 年各情景的价值变化，结果（表 6）表明：SD 情景下，经济价值在各情景中最高，较 2020 年增长 154. 67%。EP 情景下，生态价值在各情景中最高，较 2020 年增长 30. 35%。SD 情景下，综合价值在各情景中最高，较 2020 年增长 88. 61%。

表 6　2030 年漳州市各情景价值变化

| 项目 | | 2030 年模拟预测 | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | ND 情景 | ED 情景 | EP 情景 | SD 情景 |
| 经济价值 | 价值量/万元 | 97 927 747. 36 | 125154 224. 02 | 90 643 803. 65 | 125557 600. 94 |
| | 变化量/万元 | 48 625 234. 30 | 75 851 710. 96 | 41 341 290. 60 | 76 255 087. 88 |
| | 变化率/% | 98. 63 | 153. 85 | 83. 85 | 154. 67 |
| 生态价值 | 价值量/万元 | 66 070 755. 32 | 64 460 941. 31 | 67 420 957. 40 | 64 987 150. 07 |
| | 变化量/万元 | 14 346 588. 10 | 12 736 774. 09 | 15 696 790. 17 | 13 262 982. 85 |
| | 变化率/% | 27. 74 | 24. 62 | 30. 35 | 25. 64 |
| 综合价值 | 价值量/万元 | 163 998 502. 68 | 189 615 165. 33 | 158 064 761. 05 | 190 544 751. 01 |
| | 变化量/万元 | 62 971 822. 40 | 88 588 485. 05 | 57 038 080. 77 | 89 518 070. 73 |
| | 变化率/% | 62. 33 | 87. 69 | 56. 46 | 88. 61 |

构建 1 500 m×1 500 m 的网格单元，采用 5 级分类的几何间隔法可视化分析经济、生态和综合价值的空间分异，并与 2020 年相比较，结果（表 7、图 4~6）表明：1）经济价值对比。各情景经济价值均显著增长，增长量为 SD 情景>ED 情景>ND 情景>EP 情景。SD 情景的经济价值最高，其中高、较高价值区集中在东北部芗城区、龙文区、龙海区以及南部沿海的漳浦县、东山县；较低、低价值区散布在中部和西南部林地面积较大的区域。ED 情景下，高、较高价值区随城市扩张而向外扩散。EP 情景下，水域扩张导致其周边的经济价值降低。2）生态价值对比。各情景生态价值均增长，增长量为 EP 情景>ND 情景>SD 情景>ED 情景。EP 情景生态价值最高，东北部和北部的九龙江区域水域面积扩张，使中心城区和北部华安县九龙江沿岸的生态价值变高。SD 情景下，北部和西南部水域扩张，生态价值提高。ED 情景下；西部和北部的部分林地向耕地转化，部分较高价值区降为中价值区。3）综合价值对比。各情景综合价值均显著增长，增长量为 SD 情景>ED 情景>ND 情景>EP 情景。SD 情景综合价值最高。各情景的高、较高价值区主要分布在东部和南部沿海的建设用地区域；较低、低价值区散布在西北部、中部与西南部等林地、草地面积较大的区域。

表 7 各价值分类区间 亿元

| 价值类型 | 低价值区 | 较低价值区 | 中价值区 | 较高价值区 | 高价值区 |
|---|---|---|---|---|---|
| 经济价值 | (0，0.52] | (0.52，0.57] | (0.57，1.10] | (1.10，6.53] | (6.53，69.11) |
| 生态价值 | (0，0.72] | (0.72，1.12] | (1.12，1.84] | (1.84，3.13] | (3.13，5.44) |
| 综合价值 | (0，2.60] | (2.60，3.21] | (3.21，5.81] | (5.81，16.76] | (16.76，62.92) |

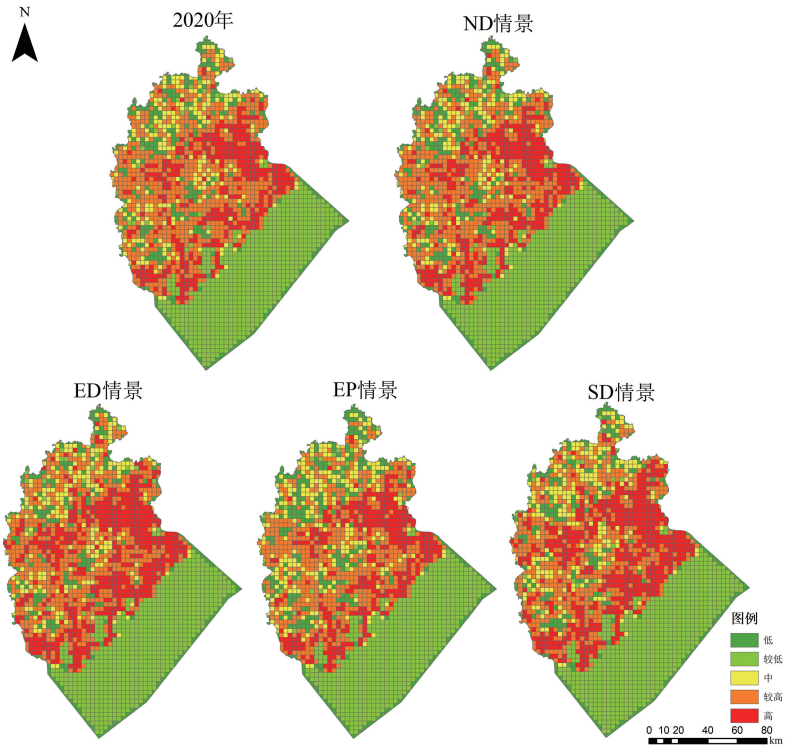



图 4 2020、2030 年漳州市各情景经济价值空间分布

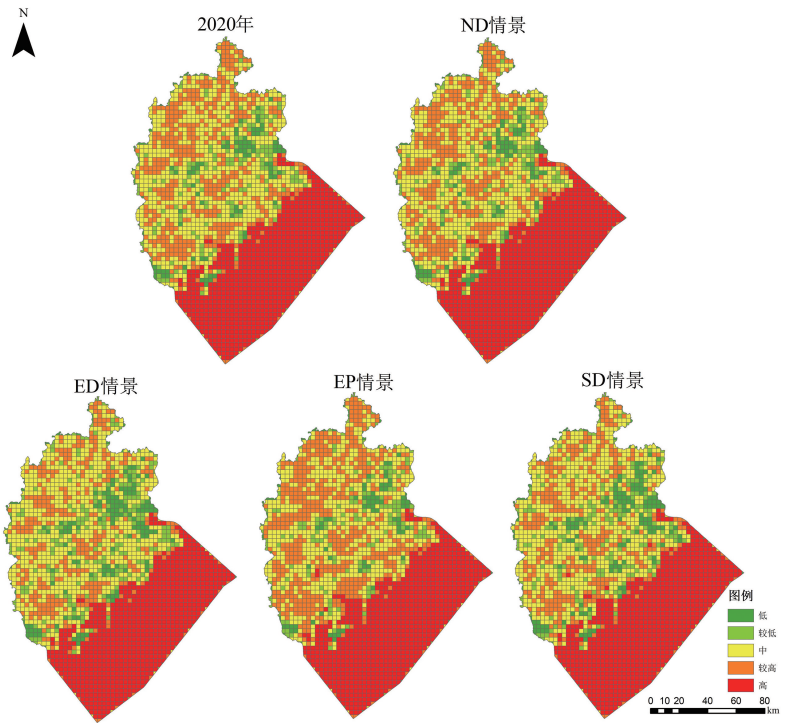



图 5 2020、2030 年漳州市各情景生态价值空间分布

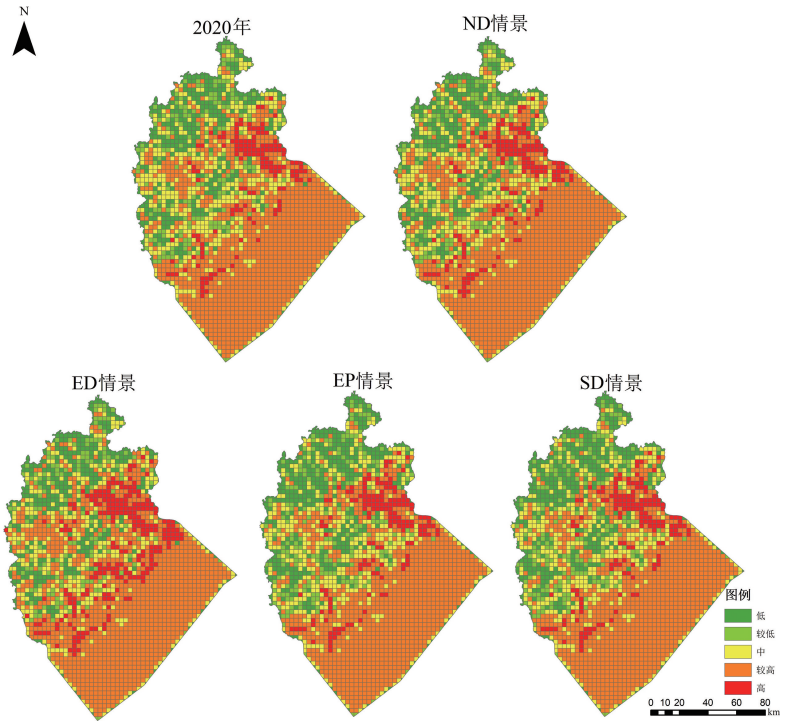



图 6　2020、2030 年漳州市各情景综合价值空间分布

## 4　讨论

### 4.1　时空分布

2000—2010 年，蓝色空间小幅增长，绿色空间大幅减少，建设用地显著增长。其主要原因在于《福建省建设海峡西岸经济区纲要》等政策发布及快速城镇化过程，城镇周边的耕地、林地、草地快速转为建设用地，对蓝绿空间及生态系统造成冲击[36-37]。2010—2020 年，各地类波动较小，蓝绿空间稳中有降。这是因为建设 21 世纪海上丝绸之路、厦漳泉都市圈发展规划等的提出，引领了漳州市的精细化与高质量发展，建设用地稳步增长，蓝绿空间基本稳定。

### 4.2　驱动因子

耕地受年降水量的影响较大，主要原因可能是年降水量等气候因素是耕地变化的主要影响因素[38]。林地和草地主要受 NDVI 影响，集中在 NDVI 较高的区域。一方面，由于 2000—2020 年建设用地的扩张侵占了大量绿色空间，导致植被覆盖率降低，进而影响林地和草地的扩张；另一方面，说明二者往往向更高植被覆盖率的区域扩张[39]。水域主要受 DEM 影响，这是由于地形限制水域扩张，通常往地势平坦、海拔较低的区域扩张所致。建设用地主要受 NDVI 影响，主要由林地和草地等绿色空间转化而来，侵占了部分生态用地。

### 4.3　模拟预测

ED 情景面向城市扩张和经济发展，中心城区、厦门湾南岸城镇群和东山湾城镇群的建设用地扩张，响应了高质量“海丝”核心区建设。耕地作为高经济价值用地，在该情景下也有所增长，但城镇发展侵占了大量林地，增加了生态风险[40]。EP 情景下，蓝绿空间得到有效保护，灵通山国家级风景名胜区和虎伯寮国家级自然保护区周边的林地增长，生态系统服务质量显著提升。SD 情景有效综合了其他情景的蓝绿空间构成结构，且兼顾经济发展与生态保护，可为未来城市发展规划提供重要参照[41]。

### 4.4　展望

本研究采用的 GMMOP 模型仍缺乏考虑气温、降水等自然因素对各地类发展的约束。此外，仅将生态价值与经济价值纳入考量，不够全面，且量化计算精度仍待提升。未来应考虑在 GMMOP 模型中加入自然因素指标，以提高准确性；同时应构建更为全面的价值量化与权衡体系。

## 5 结论

漳州市土地利用类型以蓝绿空间为主。2000—2020 年，蓝绿空间持续减少，但减少趋势趋缓且蓝色空间仍有增长；蓝绿空间主要转为建设用地，区域集中在九龙江西溪北岸的芗城区、龙文区和中部的平和县。蓝色空间变化的主要驱动因子为年均温度和 DEM，绿色空间变化的主要驱动因子为 NDVI。

多种价值衡量 2030 年漳州市多情景模拟预测情况表明，相较于 ND 基准线情景，SD、ED 情景的综合价值均有大幅提升，但 SD 情景的经济价值、生态价值和综合价值均高于 ED 情景，最符合《漳州市国土空间总体规划（2021—2035 年）》的总体目标，可为其蓝绿空间优化与可持续发展提供重要参考。未来应考虑在 GMMOP 模型中加入自然因素指标，构建更为全面的价值量化与权衡体系。

**参考文献**


[1]方创琳.中国新型城镇化高质量发展的规律性与重点方向[J].地理研究,2019,38(1):13-22.

[2]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.

[3]张蔚晶,王雨萌,李鹏宇.南京市浦口区蓝绿空间格局演变及土地利用变化分析[J].建筑与文化,2023(1):227-229.

[4]吴岩,贺旭生,杨玲.国土空间规划体系背景下市县级蓝绿空间系统专项规划的编制构想[J].风景园林,2020,27(1):30-34.

[5]王晶懋,高洁,孙婷,等.双碳目标导向下的绿色生态空间碳汇能力优化设计[J].中国城市林业,2023,21(4):33-42.

[6]徐可西,詹冰倩,姜春,等.碳排放约束下的城市空间格局优化:理论框架、指标体系与实践路径[J].自然资源学报,2024,39(3):682-696.

[7]宋菊芳,江雪妮,郭贞妮,等.城市蓝绿空间特征参数与地表温度的关联量化分析[J].中国城市林业,2023,21(1):20-26.

[8]PAN H Z,PAGE J,ZHANG L,et al.Understanding interactions between urban development policies and GHG emissions:a case study in Stockholm Region[J].Ambio,2020,49(7):1313-1327.

[9]赵烨,邹婷婷,莫晓晴,等.面向蓝绿空间网络的青岛市南区绿地布局及绿道选线[J].中国城市林业,2023,21(1):109-118.

[10]阿娜尔,黄甘霖.城市绿色空间的雨洪调蓄效益研究进展[J].中国城市林业,2024,22(1):70-76.

[11]王芳,谢小平,陈芝聪.太湖流域景观空间格局动态演变[J].应用生态学报,2017,28(11):3720-3730.

[12]李诗尧,李翅.南太行城镇群绿色空间时空演变与驱动因素分析[J].中国城市林业,2024,22(6):108-115.

[13]李方正,解爽,李雄.基于多源数据分析的北京市中心城绿色空间时空演变研究(1992—2016)[J].风景园林,2018(8):46-51.

[14]ZHAO C L,QIAN S,MENG C Z,et al.Blue-green space changes of Baiyangdian wetland in Xiong'an New Area,China[J].Advances in Meteorology,2022,2022:4873393.

[15]丁金华,孙琦.苏南水网地区蓝绿空间格局多情景模拟预测[J].浙江农林大学学报,2024,41(1):202-210.

[16]楼婷婷.国土空间规划背景下南昌市蓝绿空间演变特征与优化策略[D].抚州:东华理工大学,2023.

[17]熊瑶,陈亚娟,杨云峰.豫中地区蓝绿空间演化及其驱动因素研究:以河南省许昌市为例[J].西北林学院学报,2024,39(6):197-206.

[18]赵霁雨,崔柳,王佳,等.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[J].生态学报,2023,43(15):6307-6320.

[19]张波,潘佩佩,王新云.基于 GMOP-PLUS 耦合模型的京津冀土地利用变化多情景模拟及功能关系分析[J].地理与地理信息科学,2023,39(5):8-16.

[20]LI C,WU Y M,GAO B P,et al.Multi-scenario simulation of ecosystem service value for optimization of land use in the Sichuan-Yunnan ecological barrier,China[J].Ecological Indicators,2021,132:108328.

[21]YUAN L,XU J,FENG B R.Evaluation and prediction of carbon storage in the Qinghai-Tibet Plateau by coupling the GMMOP and PLUS models[J].Sustainability,2024,16(13):5776.

[22]王亚欣.2003—2015 年哈尔滨市道里区土地利用变化分析[J].哈尔滨师范大学自然科学学报,2021,37(1):75-80.

[23]杜洲,牛健植,樊登星,等.基于 PLUS 模型的黄河中游多沙粗沙区土地利用变化模拟及驱动力分析[J].水土保持研究,2024,31(6):309-318.

[24]顾彤,张青峰,游政,等.基于"双评价"约束和 PLUS 模型的三重城镇开发边界划定[J].农业工程学报,2024,40(14):210-220,281.

[25]ZHAO B X,LI S J,LIU Z S.Multi-scenario simulation and prediction of regional habitat quality based on a system dynamic and patch-generating land-use simulation coupling model:a case study of Jilin Province[J].Sustainability,2022,14(9):5303.

[26]LIU X P,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]王保盛,廖江福,祝薇,等.基于历史情景的 FLUS 模型邻域权重设置:以闽三角城市群 2030 年土地利用模拟为例[J].生态学报,2019,39(12):4284-4298.

[28]任维,张嘉林,卢俊涵,等.浙闽山地丘陵地区地域景观时空演变与多情景模拟预测:基于 PLUS-ESV 模型分析[J].中国城市林业,2024,22(3):71-80.

[29]ZHANG H B,ZHANG X H.Land use structural optimization of lilin based on GMOP-ESV[J].Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2011,21:s738-s742.

[30]WANG Y,LI X M,ZHANG Q,et al.Projections of future land use changes: multiple scenarios-based impacts analysis on ecosystem services for Wuhan city, China [J]. Ecological Indicators,2018,94:430-445.

[31]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.

[32]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,2003,18(2):189-196.

[33]许静,刘慧.甘肃省生态系统服务权衡协同关系评估与预测[J].中国环境科学,2024,44(4):1863-1874.

[34]陈影,张利,何玲,等.基于多模型结合的土地利用结构多情景优化模拟[J].生态学报,2016,36(17):5391-5400.

[35]马瑞,范燕敏,武红旗,等.耦合 GMOP 与 PLUS 模型的干旱区土地利用格局模拟[J].农业资源与环境学报,2023,40(1):143-153.

[36]张师赫,李宝银,林玉英,等.基于生态系统服务的景观生态风险评价及其驱动因素研究:以福建省为例[J].水土保持研究,2022,29(6):174-182.

[37]陈菁,林忠弼,江越,等.基于快速城市化的生态风险分析:以福建省为例[J].湖南师范大学自然科学学报,2011,34(1):80-85.

[38]陈孟耀,刘啸歌,黄达沧,等.基于地理探测器模型的福建省耕地土壤有机碳影响因素研究[J].福建农业学报,2024,39(6):738-751.

[39]罗梦萍.气候与土地利用变化下中国丹霞梧桐潜在适生区研究[D].长沙:中南林业科技大学,2024.

[40]卓健,翟端强,毛衍云.闽三角城市群景观生态风险时空演变分析[J].风景园林,2024,31(9):111-119.

[41]任维,张雪葳,李房英,等.基于景观破碎度分析的温州三垟湿地乡土景观保护研究[J].浙江农业学报,2019,31(11):1841-1854.