

交通规划背景下福州市土地利用与 碳储量变化模拟及其启示

梁冠敏, 肖 瑶, 刘渺渺, 林 森, 巫志龙, 胡喜生

(福建农林大学交通与土木工程学院, 福州 350002)

摘要: 陆地生态系统碳储量演变过程与土地利用变化息息相关, 而交通规划政策往往对未来土地利用变化格局起到重要的导向作用, 然而当前考虑交通规划情景对土地利用变化及其碳储量影响的研究较少。鉴于此, 以福州市为例, 基于PLUS模型模拟自然发展情景(A1)、交通规划情景(A2)和生态保护情景(A3)下的2030年土地利用空间分布特征, 进一步运用InVEST模型测算碳储量, 分析交通规划对土地利用变化及碳储量的影响。结果表明: (1) 福州市2000—2020年间耕地面积大幅下降(239.25 km^2), 建设用地成倍扩张(423.34 km^2), 林地面积呈现小幅度下降趋势; (2) PLUS模型在福州市具有较高的适用性, Kappa系数为0.928; (3) 交通规划情景下, 总体耕地转出区域得到优化, 相比自然发展情景, 转为建设用地的面积减少(1.90 km^2), 转为林地的面积增加(1.89 km^2), 未利用土地也在交通规划情景得到最优配置; (4) 交通规划情景下, 生态系统的总碳储量比2020年减少了32.84 t, 仍比自然发展情景多储存2.25 t, 但比生态保护情景多流失49.91 t; (5) 空间自相关结果表明三种情景的碳储量均存在较大的空间正相关性, 碳储量高值区域在福州市西北部呈现聚集状态, 低值区域主要聚集在闽江流域和临海地区。PLUS模型和InVEST模型的结合, 实现了对未来碳储量的精准预测, 可为优化区域国土空间规划、提升碳储存能力提供科学参考。

关键词: 土地利用; PLUS模型; InVEST模型; 交通规划; 碳储量; 福州市

土地利用变化影响着生态系统的结构和功能, 改变土壤和植被的碳储存能力, 与陆地生态系统碳储量时空演变息息相关^[1,2], 通过优化土地利用结构可以有效提高区域的碳储量。随着社会经济和城镇化的快速发展, 大量扩张的建设用地不断侵占耕地、林地和草地等生态用地^[3,4], 导致区域土地碳储存能力下降, 加重全球气候变暖和区域生境质量下降等问题^[5]。为此, 中国提出了碳达峰和碳中和目标。福建作为中国首个国家生态文明建设的先行区, 森林覆盖率持续保持全国第一, 具有巨大的林业碳汇潜力。随着建设用地不断扩张和交通系统不断完善, 福州市耕地生态功能下降^[6]且城市内绿色空间不断压缩^[7]。研究未来土地利用变化及对碳储量的影响, 能够科学监测区域内碳储量情况, 对推动绿色低碳生态发展和实现“碳达峰、碳中和”目标具有重要意义。

当前InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs) 模型已经被

收稿日期: 2023-06-26; 修订日期: 2023-09-04

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31971639); 福建省自然科学基金项目 (2019J01406, 2023J01477)

作者简介: 梁冠敏 (1997-), 女, 河南驻马店人, 硕士, 研究方向为道路与交通环境工程。

E-mail: 985330234@qq.com

通讯作者: 胡喜生 (1979-), 男, 福建莆田人, 博士, 教授, 研究方向为道路生态、3S技术及工程应用。

E-mail: xshu@fafu.edu.cn

广泛应用在土地利用变化与生态系统碳储量的研究中,如在流域尺度下,刘洋等^[8]利用InVEST和CA-Markov模型探究了疏勒河流域生态系统碳储量时空变化特征与土地利用方式之间的关系;在城市尺度下,向书江等^[9]运用InVEST模型深入分析了重庆市主城区碳储量对土地利用转移的响应;在经济区尺度下,李姣等^[10]通过碳储量转移矩阵研究发现,建设用地扩张和林地缩减是导致碳储量减少的主要原因。大量研究结果表明,陆地生态系统碳储存能力受到各种土地利用类型之间的转换影响,而单一的未来土地利用变化模拟已不能满足未来多需求发展方式,以往对不同发展情景下土地利用变化的模拟研究,主要集中在限制发展区域^[11]、耕地保护区域^[12]和生态红线区域^[13]等,实现了未来不同情景下土地利用格局的空间可视化,但缺乏考虑未来规划政策引导作用的影响。PLUS (Patch-generating Land Use Simulation Model) 模型基于多类土地利用斑块级生成策略并集成了规划交通更新机制,弥补了以往研究仅考虑规划的约束作用,缺乏规划政策对土地利用的驱动和引导作用的不足^[14]。交通作为城市发展的重要经济命脉和联动骨架,在带来经济效益的同时,对周围土地利用变化的影响不容忽视^[15,16]。已有学者在研究未来土地利用变化中考虑交通规划的影响^[17],作为约束建设用地迅速扩张的一个重要影响因素模拟未来土地利用格局^[18],但仍少有考虑交通规划政策情景模拟未来土地利用变化及其碳储量的影响。鉴于此,对比交通规划情景、自然发展情景和生态保护情景未来碳储量的时空差异性,可为未来交通基础设施建设提供有益的参考。

福州市将在未来构建1-2-3出行交通圈(1小时覆盖福州都市圈,2小时通达省域全部地市及外省周边地级市,3小时通达周边省会城市及周边城镇群核心城市),其交通规划政策和道路建设运营能够长期性地改变城市土地利用类型并加快周围土地利用类型的动态度,进而影响到城市陆地生态系统的碳循环情况。本文基于PLUS模型,结合福州市未来交通规划的需求,模拟分析福州市2030年三种情景下的土地利用空间分布差异,并耦合InVEST模型进一步分析研究区内碳储量的时空变化特征,比较交通规划情景与自然发展情景、生态保护情景下的碳储量差异情况,为优化福州市未来国土空间布局、提升城市生态资源管理和提高区域陆地生态系统碳储存能力提供参考依据。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

福州市(图1)位于福建省东部、闽江下游、东濒台湾海峡,介于 $25^{\circ}15' \sim 26^{\circ}39'N$ 、 $118^{\circ}08' \sim 120^{\circ}31'E$ 之间,下辖13个区县。其地理特点是“依山傍水”,大部分的陆地为山地丘陵,有“八山一水一分田”之称。福州市的地貌是典型的河口盆地,南部大部分为盆地,北部为山地,西部为中低山地,东部丘陵平原相间,山地和丘陵占全区土地总面积的

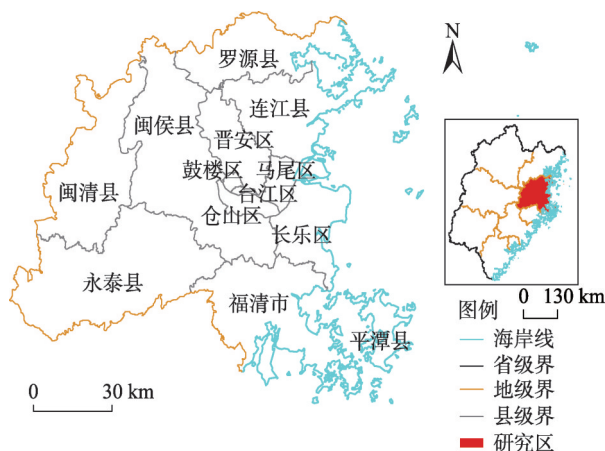


图1 福州市行政区划

Fig. 1 Administrative divisions of Fuzhou city

72.68%。研究区属于暖湿的亚热带季风气候,年平均气温在16~20℃左右,年平均降水量约为900~2100 mm。受多种自然条件的影响,研究区内植被类型繁多,土地利用类型不一,其中林地覆盖面积较广,森林覆盖率达58%左右,居全国省会城市第二位,是中国三大林业基地之一。研究区内国家级生态保护区有两处:闽江河口湿地自然保护区^[19]和雄江黄楮林自然保护区^[20]。研究区内有多处重点保护生态系统、珍稀濒危野生动植物及栖息地、闽江水源涵养林等。

1.2 数据来源及预处理

本文涉及的数据主要包含土地利用数据和各驱动因子数据(表1),具体来源如下:

(1) 土地利用数据。包括福州市2000年、2010年和2020年三期数据,分辨率为30 m×30 m。利用ArcGIS软件将土地利用数据的地理坐标系统一为GCS_krasovsky_1940坐标系,投影坐标系为krasovsky_1940_Albers,并利用重分类工具将土地利用类型重新分为六类:耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地。

(2) 驱动因子数据。选择模拟未来土地利用格局的驱动因子,既要能反映研究区的自然地理特征,又要充分考虑社会经济环境的影响。在王超越^[21]和李传哲等^[22]的研究中提到影响土地利用变化的主要驱动力包含自然环境变化、社会经济发展和人类活动影响,自然环境因素一般采用高程、坡度、坡向、气温和降水等;社会经济因素一般采用GDP、人口、夜间灯光和行政区位等;交通是人类活动干扰较为频繁的影响因子,一般采用公路、高速、主路和河流等因子。参考前人研究并结合研究区数据的可获取性,本文选择高程、坡度和土壤类型作为自然环境因素;人口、GDP和夜间灯光数据作为社会

表1 未来土地利用变化模拟所需数据来源及预处理
Table 1 Sources and pre-processing of data required for future land use change simulation

数据类型	数据名称	数据精度	数据来源及预处理
土地利用数据	土地利用数据	30 m	中国科学院资源环境科学与数据中心 (http://www.resdc.cn/)
	高程	30 m	
自然环境因素	坡度	30 m	ArcGIS中由高程生成
	土壤类型	1 km	
	人口	1 km	
社会经济因素	GDP	1 km	中国科学院资源环境科学与数据中心 (http://www.resdc.cn/)
	夜间灯光数据	30 m	
	到水域距离	30 m	
	到一级道路距离	30 m	
	到二级道路距离	30 m	
人类活动因素	到三级道路距离	30 m	OpenStreetMap (http://www.openstreetmap.org/)
	到高速公路距离	30 m	
	到铁路站点距离	30 m	
	到高速公路距离	30 m	
交通规划因素	到铁路站点距离	30 m	《福州市城市综合交通规划(2020—2035年)》
生态保护区	国家级生态保护区	30 m	北京大学城市与环境学院地理数据平台 (http://geodata.pku.edu.cn)

经济因素；到水域距离、到一级道路距离、到二级道路距离、到三级道路距离、到高速公路距离和到铁路站点距离为人类活动因素；另外考虑未来交通发展对土地利用变化的影响，选择新增的高速公路和到铁路站点作为交通规划因素（图2）。基于《福州市城市综合交通规划（2020—2035年）》，在 ArcGIS 软件中绘制福州市 2030 年规划新增的高速路线和铁路站点，并采用欧氏距离工具生成未来交通规划驱动因子。基于 PLUS 模型的格式要求，所有驱动因子数据需经 ArcGIS 软件预处理，使得所有数据的行列号保持一致。参考王子尧等^[23]和卢奕帆等^[24]对数据预处理的方法，以 2000 年土地利用数据为基底标准，对其他数据进行配准，统一投影坐标系为 krasovsky_1940_Albers，并采用最邻近分配法对土壤类型、人口和 GDP 等数据进行重采样，保证重采样后的数据与源数据保持一致，输出为 30 m 分辨率和 tif 格式的栅格数据。

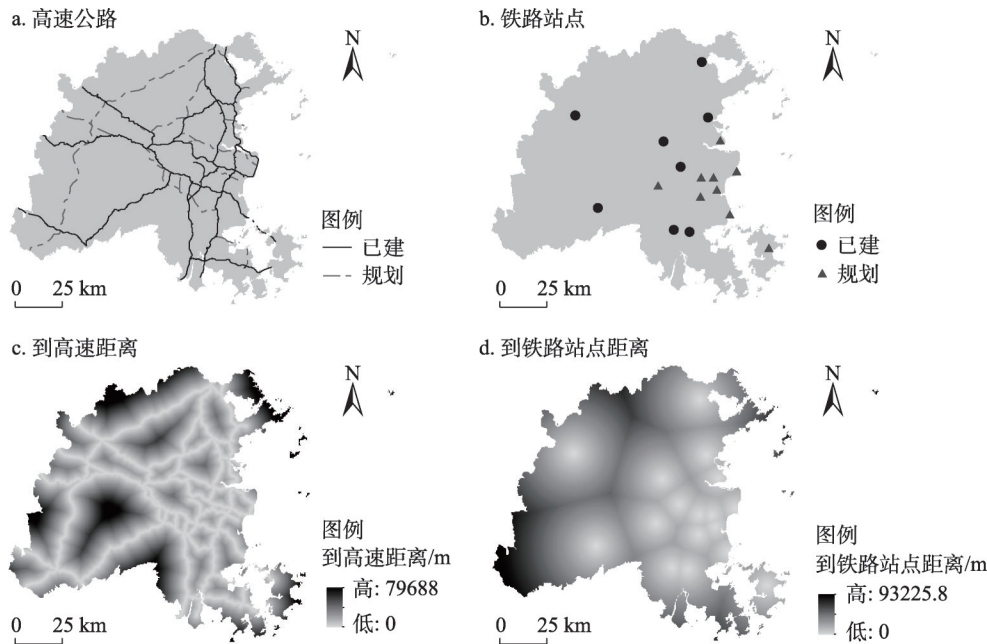


图2 福州市已建及未来2030年交通规划因子

Fig. 2 Existing and future 2030 transportation plan factors for Fuzhou city

（3）生态保护区。研究区内有国家级生态保护区两处：闽江河口湿地自然保护区和雄江黄楮林自然保护区。

1.3 研究方法

1.3.1 PLUS未来土地利用格局预测模型

PLUS模型基于多类斑块生成策略，能更好地挖掘各类土地变化的驱动因素，动态模拟各类土地利用类型斑块级别的演变，被广泛应用在模拟未来土地利用变化模拟研究上^[25,26]。

（1）用地扩张分析策略（Land Expansion Analysis Strategy，LESA）模块

提取两期土地利用数据中地类发生变化区域，通过随机采样的方式提取采样点，并采用随机森林算法挖掘各地类的发展概率和各驱动因子对不同地类的贡献率^[14]。计算公式为：

域、建设用地和未利用地。

(5) 邻域权重

邻域权重表示各种土地利用类型的扩张概率，本文按照各土地利用类型的扩张面积占比来计算邻域权重，取值范围为0~1，值越大表示邻域影响越大。不同发展情景的邻域权重参数设置如表3所示。

表3 不同发展情景的邻域权重设置
Table 3 Setting neighborhood weights for different development scenarios

邻域权重	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
自然发展 (A1)	0.1588	0.5897	0.1346	0.0337	0.0830	0.0002
交通规划 (A2)	0.1588	0.5897	0.1346	0.0337	0.0830	0.0002
生态保护 (A3)	0.1629	0.5980	0.1388	0.0337	0.0664	0.0002

(6) 精度检验

在模拟福州市2030年土地利用格局之前，要先进行精度检验。基于福州市2000—2010年各土地利用类型发展概率，模拟预测福州市2020年的用地格局。用Kappa系数值表示模型在研究区的适用性，当Kappa系数大于0.8时，表示模型模拟效果极好，且模拟精度较高^[31]，适用于研究区的土地利用变化模拟。表达式为：

$$Kappa=(P_o-P_c)/(P_p-P_c)$$
 (4)

式中：Kappa表示模拟系数值，取值范围为0~1； P_o 表示正确模拟的比例； P_c 表示模型随机状态下预测的正确比例； P_p 表示理想状态下预测的正确比例。

1.3.2 多情景设定

综合考虑研究区当前的发展情况和未来城市的交通发展需求，利用PLUS模型设计三种发展情景：自然发展情景、交通规划情景和生态保护情景，预测福州市2030年的土地利用格局。

(1) 自然发展情景 (A1)：自然发展情景是其他情景设置的基础，保持福州市2010—2020年的各类用地发展趋势，限制扩张区域为福州市的水域，该区域禁止土地利用类型发生转变。

(2) 交通规划情景 (A2)：该情景考虑交通规划政策对土地利用变化的驱动和引导作用，参考《福州市城市综合交通规划（2020—2035年）》，在LEAS模块更新两个未来交通驱动因子（高速公路和铁路站点），得到各地类新的发展概率，土地利用转移成本矩阵、邻域权重和限制扩张区域与自然发展情景保持一致。

(3) 生态保护情景 (A3)：该发展情景以生态保护为目的，降低建设用地向耕地、林地、草地和水域的扩张程度，整体向生态友好型发展。各地类延续交通规划情景的发展概率，对邻域权重和土地利用转移成本矩阵进行调整，其他地类向林地转化概率增加10%，向耕地和草地转化的概率增加5%，向建设用地转化的概率减少20%，所有地类均可向林地转化，林地只能向林地转化。限制扩张区域为福州市国家级生态保护区和水域。

1.3.3 InVEST模型

InVEST模型可以模拟不同土地利用情景下生态服务系统物质量和价值量的变化，是

一种生态系统服务和权衡的综合评估模型^[32], 采用该模型中的碳储存 (Carbon Storage and Sequestration) 模块估算研究区内的碳储量。基于土地利用数据, 每种土地利用类型对应不同的碳库 (InVEST模型将陆地上生态系统中的碳库分为四类, 分别是地上碳库、地下碳库、土壤碳库和死亡有机物碳库)。计算公式为:

$$C_{i,a} = C_{i,above} + C_{i,below} + C_{i,soil} + C_{i,dead} \quad (5)$$

$$C_{total} = \sum_{i=1}^N C_{i,a} \times A_i \quad (6)$$

式中: i 表示土地利用类型; $C_{i,a}$ 表示第 i 种土地利用类型的总碳密度 (t/hm^2); $C_{i,above}$ 表示地上碳库碳密度 (t/hm^2); $C_{i,below}$ 表示地下碳库碳密度 (t/hm^2); $C_{i,soil}$ 表示土壤碳库碳密度 (t/hm^2); $C_{i,dead}$ 表示死亡有机物碳库碳密度 (t/hm^2); C_{total} 表示总碳储量 (t); A_i 表示第 i 种土地利用类型的面积 (hm^2)。

陆地生态系统中各地类的碳密度要经过漫长的时间才会发生变化^[33], 本文的碳密度通过查阅文献并参考现有研究成果^[34-37], 输入不同地类的碳密度值如表4所示。

表4 不同土地利用类型的碳密度

Table 4 Carbon density of different land use types

(t/hm^2)

土地利用类型	地上碳密度	地下碳密度	土壤碳密度	死亡有机物碳密度
耕地	4.43	5.98	114.82	0.51
林地	58.86	11.18	105.46	7.73
草地	1.27	9.00	111.82	8.45
水域	0	0	94.65	0
建设用地	0	0	80.59	0
未利用地	0	0	0	0

1.3.4 空间自相关

空间自相关用于衡量研究区内某变量单元与周围单元之间的依赖程度, 将研究区划分为 $1000 \text{ m} \times 1000 \text{ m}$ 的网格^[38], 用 Moran's I 指数来表示碳储量全局空间变量之间的聚集和离散程度^[39]。表达式为:

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \quad (7)$$

式中: n 表示区域空间单元数量 (个); x_i 和 x_j 表示随机变量 x 在位置 i 和 j 上的碳储量值 (t); \bar{x} 表示所有单元碳储量平均值 (t); W_{ij} 为地理单元之间的权重矩阵; I 取值范围是 $-1 \sim 1$, 正值表示具有相似的属性聚集在一起, 为正相关; 负值表示具有相异的属性聚集在一起, 为负相关; 0 值表示不存在空间自相关性, 为随机分布。

局部空间自相关能够进一步反映每个单元与相邻单元在空间上某一属性上的相关性^[40], 用 LISA 表示碳储量的局部空间自相关性^[41], 表达式为:

$$I_i = \frac{n(x_i - \bar{x}) \sum_{i \neq j}^n W_{ij} (x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (8)$$

式中： I_i 值范围在-1~1之间，正值表示该区域单元周围相似值的空间聚集，负值表示该区域单元周围相异值的空间聚集，0值表示该区域与邻近区域在空间上没有关联性。

2 结果分析

2.1 模型精度验证

在PLUS模型的混淆矩阵（Confusion Matrix）和性能系数（FOM）模块输入福州市2020年模拟与现状的土地利用数据，得到总体精度95.74%，Kappa系数为0.928，模型的置信度在合理区间^[28]，模型在研究区的适用性较高，可用于模拟福州市2030年土地利用状况。

2.2 福州市土地利用时空演变格局分析

2.2.1 2000—2020年土地利用时空变化分析

福州市2000—2020年的土地利用格局以林地为主（图3），建设用地主要集中在福州市区和福清市区，耕地主要分布在东南区域。近二十年来，林地一直是福州市的主要土地利用类型（59.43%），其次是耕地（16.49%）、草地（13.56%），水域和未利用地的面积占比较少，均不超过5%（表5）。从土地利用转移类型分析，耕地、林地和草地的面积均有所下降，其中耕地面积减少量最多（239.25 km²），占2000年耕地总面积的11.03%，

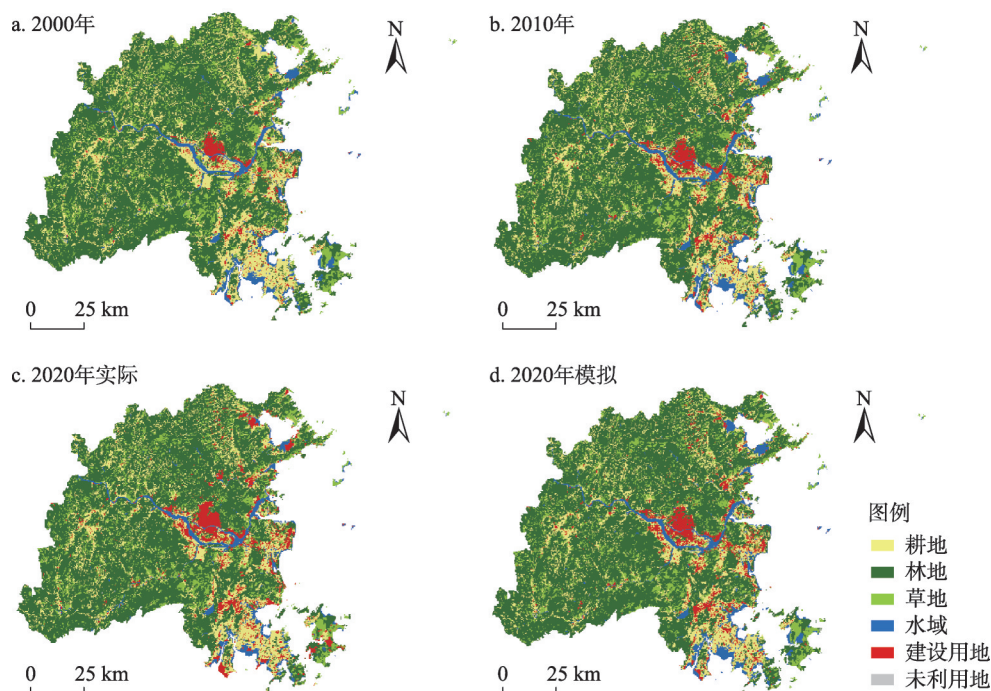


图3 福州市2000—2020年实际与模拟土地利用类型时空格局分布

Fig. 3 Spatial and temporal patterns of actual and simulated land use types in Fuzhou city from 2000 to 2020

表5 福州市2000—2020年土地利用类型面积及占比变化
Table 5 Changes of land use type area and proportion in Fuzhou city from 2000 to 2020

土地利用类型		2000年	2010年	2020年	2000—2020年变化量/km ²
耕地	面积/km ²	2168.27	2002.09	1929.03	-239.25
	比例/%	18.53	17.11	16.49	
林地	面积/km ²	7009.92	7006.55	6950.93	-58.99
	比例/%	59.89	59.87	59.43	
草地	面积/km ²	1667.23	1598.16	1586.16	-81.07
	比例/%	14.25	13.66	13.56	
水域	面积/km ²	524.63	573.39	472.13	-52.50
	比例/%	4.48	4.90	4.04	
建设用地	面积/km ²	331.72	521.52	755.06	423.34
	比例/%	2.83	4.46	6.46	
未利用地	面积/km ²	1.95	1.93	2.01	0.06
	比例/%	0.02	0.02	0.02	

林地和草地的下降面积均不超过各自在2000年面积的5%，只有建设用地面积在不断地扩张且增幅最大（127.62%），2020年建设用地面积为755.06 km²。

利用Origin软件绘制发生转移部分的土地利用桑基图（图4）。近二十年来，研究区有608.09 km²的土地发生交流，按照转移面积大小依此为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地。耕地和林地主要转出为建设用地，转出量为224.8 km²和99.83 km²，占耕地总转出量的86.21%和林地总转出量的69.74%。草地主要转出为林地和建设用地，其中转为林地的面积为70.19 km²，占草地总转出面积的60.75%。水域主要转出为耕地、草地和建设用地，其中转为建设用地的面积为61.00 km²，占水域总转出面积的71.73%。建设用地面积相比2000年扩张了一倍多，且转出量极少，这与福州市近二十年工业化和城镇化快速发展有关，建设用地不断以人类活动为中心的城市区域向周围扩大。由于福州市特殊的山丘地貌，且森林生态保护较好，而耕地面积丧失严重，在设置未来生态保护发展情景时应该增加向耕地发展的概率。

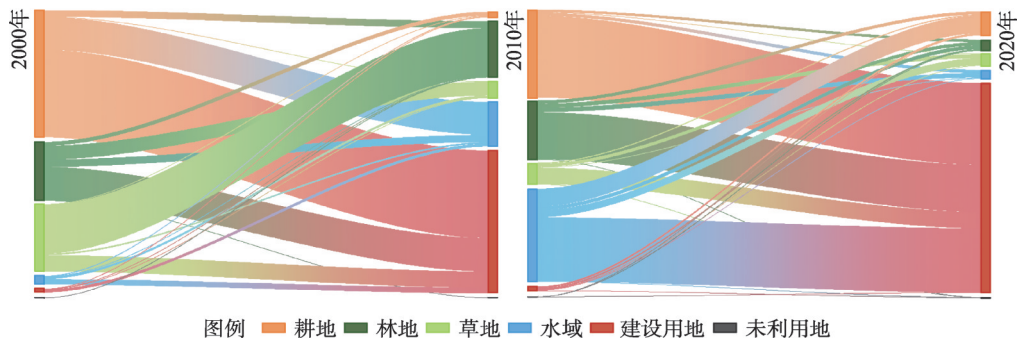


图4 福州市2000—2020年土地利用转移桑基图
Fig. 4 Sankey diagram of land use conversion in Fuzhou city from 2000 to 2020

2.2.2 2020—2030年不同发展情景下的土地利用时空变化分析

预测福州市2030年不同发展情景下的土地利用格局如图5所示。与2020年相比,耕地和草地面积仍呈现下降趋势,特别是耕地面积流失比较严重。相比自然发展情景,交通规划发展情景下,耕地向建设用地转化的面积减少(1.90 km^2),向林地转化的面积增加(1.89 km^2),但总体比生态保护情景多流失 48.52 km^2 。说明在城市交通的规划和管理下,会减少对林地的破坏,使得部分耕地流向生态价值更高的地类。

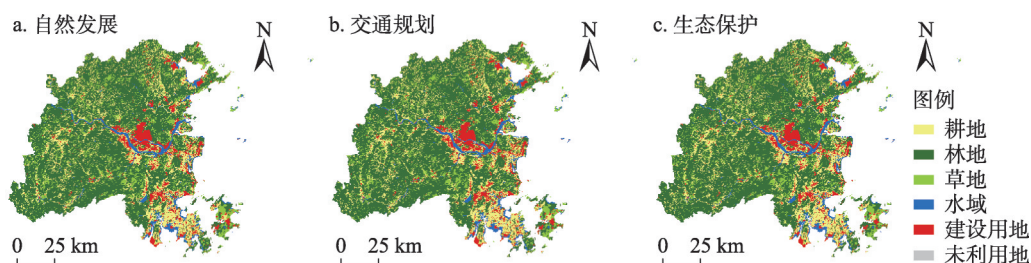


图5 福州市2030年不同发展情景下土地利用空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of land use under different development scenarios in Fuzhou city in 2030

研究区内的林地历史变化是平稳减少的,但在2020年之后,林地使用面积发生转折,呈现小幅度上升趋势。林地面积在交通规划发展下比自然发展多 2.05 km^2 ,但比生态保护情景少 38.11 km^2 (图6)。建设用地仍呈现扩张趋势,但扩张速率有所减缓,三种情景下的扩张速率分别为10.71%、10.47%和1.90%(表6),说明在交通规划的基础上采取生态保护措施,得以让东南城市区域的部分建设用地开发为林地和草地,有效减少耕地流失。未利用地在交通规划情景下得到最大的开发利用,且在罗源县与永泰县开发为林地的面积增加。

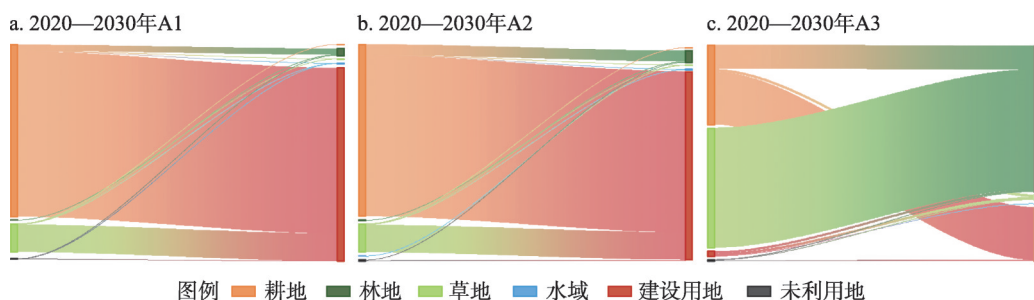


图6 福州市2020—2030年三种情景土地利用转移桑基图

Fig. 6 Sankey diagram for the land use transition in three scenarios in Fuzhou city from 2020 to 2030

2.3 福州市碳储量时空演变分析

2.3.1 2000—2020年碳储量时空变化分析

利用InVEST模型估算福州市2000年、2010年和2020年的总碳储量分别为18510.96 t、18404.77 t和18287.68 t,碳储量呈现逐年下降趋势(图7)。

二十年来,研究区内碳流失总量为564.45 t,由耕地和林地面积缩减造成碳流失量为300.83 t和108.09 t。其中由于耕地丧失造成的碳流失量最多,占碳流失总量的53.30%。2000—2020年福州市林地总转出面积的69.74%转化为建设用地,原本植被覆盖率较高的

表6 福州市2030年不同发展情景下土地利用类型面积及占比

Table 6 The area and proportion of land use types under different development scenarios in Fuzhou city in 2030 (km ²)							
年份	情景	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
2020		1929.03	6950.93	1586.16	472.13	755.06	2.01
2030	自然发展（A1）	1857.12	6953.81	1574.42	472.31	835.95	1.69
	交通规划（A2）	1857.12	6955.86	1574.42	472.29	834.13	1.49
	生态保护（A3）	1905.64	6993.97	1552.39	472.26	769.40	1.64
变化率/%	自然发展（A1）	-3.73	0.04	-0.74	0.04	10.71	-15.57
	交通规划（A2）	-3.73	0.07	-0.74	0.03	10.47	-25.45
	生态保护（A3）	-1.21	0.62	-2.13	0.03	1.90	-18.36

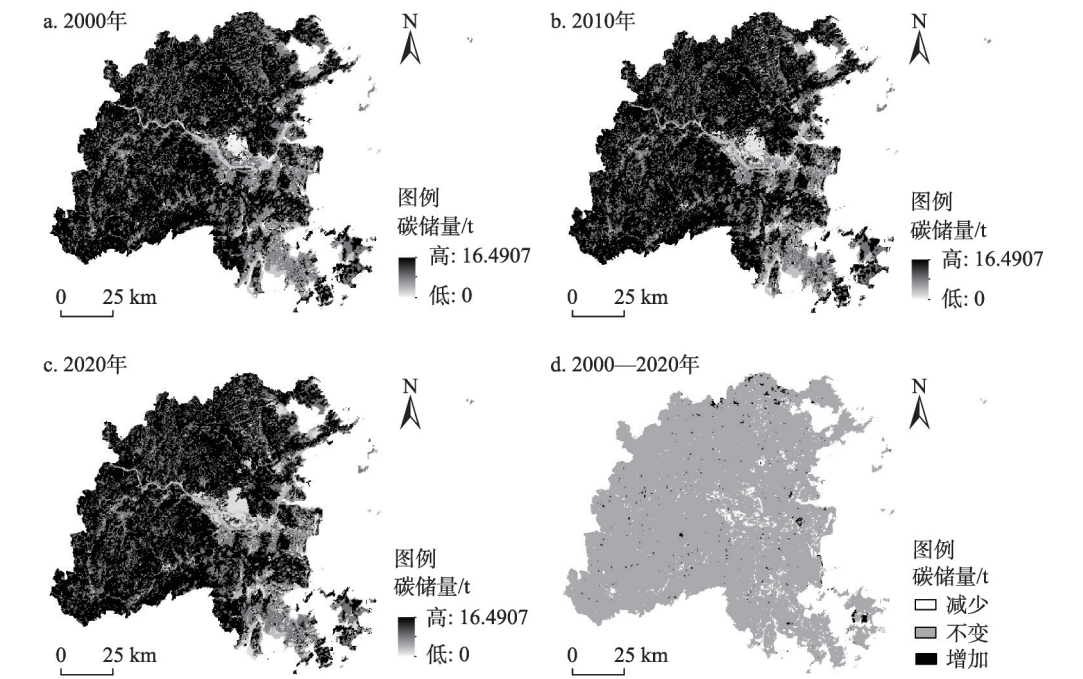


图7 福州市2000—2020年碳储量及空间变化分布格局
Fig. 7 Patterns and spatial changes in carbon storage in Fuzhou city from 2000 to 2020

地区向低密度区转化，该部分土地的碳储存能力下降，直接导致净碳储量减少102.47 t。水域的总碳储量呈现先上升后下降的趋势，且碳流失率比碳储存率大，建设用地面积虽呈现倍数扩张，但其碳储存能力远低于其他几种地类的碳储存能力，总体上研究区生态系统的总碳储存能力下降。

从碳储量的空间分布可知，近二十年碳储量的减少区域在空间分布上的特征较为明显，福州市东南沿海区域的碳储量下降量比西北部明显且聚集。仓山区、福清市、鼓楼区、马尾区、闽侯县和长乐区的碳流失率呈现先增后减趋势，晋安区、连江县、平潭县、台江区的碳流失率呈现先减后增趋势，罗源县的总碳储量在2000—2010年间表现为净碳储量增加，而在2010—2020年间呈现净碳储量下降（图8）。总体上看，呈现以福州市区和福清市区为中心向四周发散的碳储量空间减少特征，碳储量增加区域在空间上呈

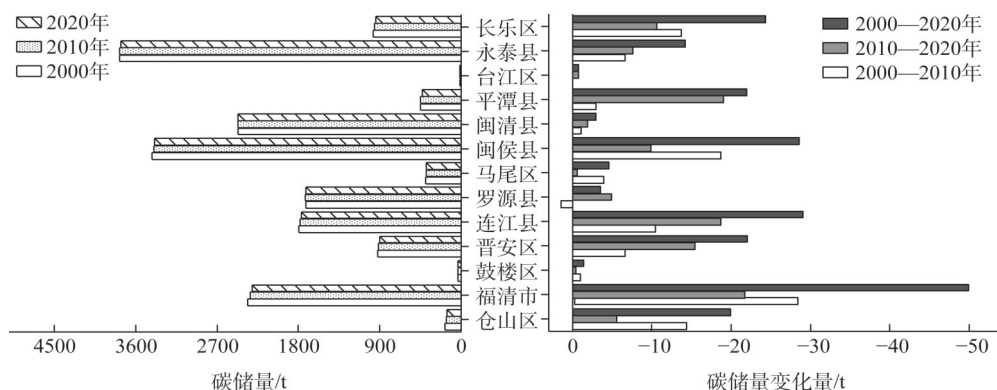


图8 福州市2000—2020年碳储量统计

Fig. 8 Carbon storage statistics of Fuzhou city from 2000 to 2020

现点星状分布格局，罗源县、长乐区和平潭县局部碳储量增加量较多，其他区域增加不明显。

2.3.2 2020—2030年不同发展情景下的碳储量时空变化分析

福州市在2030年不同发展情景下碳储量呈现不同的空间分布（图9）。自然发展情景、交通规划情景和生态保护情景的碳储量分别为18252.59 t、18254.84 t和18304.75 t。

研究区碳流失区域在空间上沿闽江流域和临海区域分布。在交通规划发展情景下，由于交通规划实施和政策的引导，耕地转出部分得到优化配置，生态系统的碳储存能力得到提升，相比自然发展情景，多储存2.25 t的碳，但比生态保护情景多流失49.91 t的碳。

交通规划发展情景下，林地碳储量增加量（9.04 t）约是自然发展情景（5.30 t）的1.7倍。仓山区、鼓楼区、晋安区、连江县、罗源县、闽侯县、平潭县、永泰县和长乐区的碳流失情况得到缓解，但仍属于碳流失区域，只有永泰县在交通规划情景下呈现净碳储量增加（图10）。该情景下虽没有改变由耕地损失造成的碳流失情况，但在交通规划的引导下，永泰县和罗源县内的草地向植被覆盖率高的林地转化，使这两个区县的碳储量增加量在空间分布上较为明显，福州市区和福清市区内的部分耕地转出减少，一定程度上缓解了城市建设用地扩张，并增强了对未利用地的合理开发利用，提升了区域内的碳储存能力。

相比交通规划情景，晋安区、连江县、罗源县、闽侯县、闽清县和永泰县在生态保护情景下，表现为净碳储量增加。农耕用地在生态保护情景下得到了有效保护，碳流失量比自然发展情景减少61.00 t，福州市区和福清市等区域的建设用地扩张区域明显减少，耕地和草地向植被覆盖率高的林地转化，使其碳储量增加区域在空间分布上比较明显，碳流失情况得到改善，但总体仍呈现碳流失趋势。

总而言之，在交通规划基础上采取一定的生态保护措施获得了较为明显的生态效益。城市用地在规划政策的引导之下，空间布局更加合理，土地资源利用更加充分，使得本来流向建设用地的耕地和草地向碳储存能力较高的林地发展，成为更多的生态福祉用地。以地上生物碳库为例，林地的植被覆盖率较高，能够吸收空气中大量的碳，从而

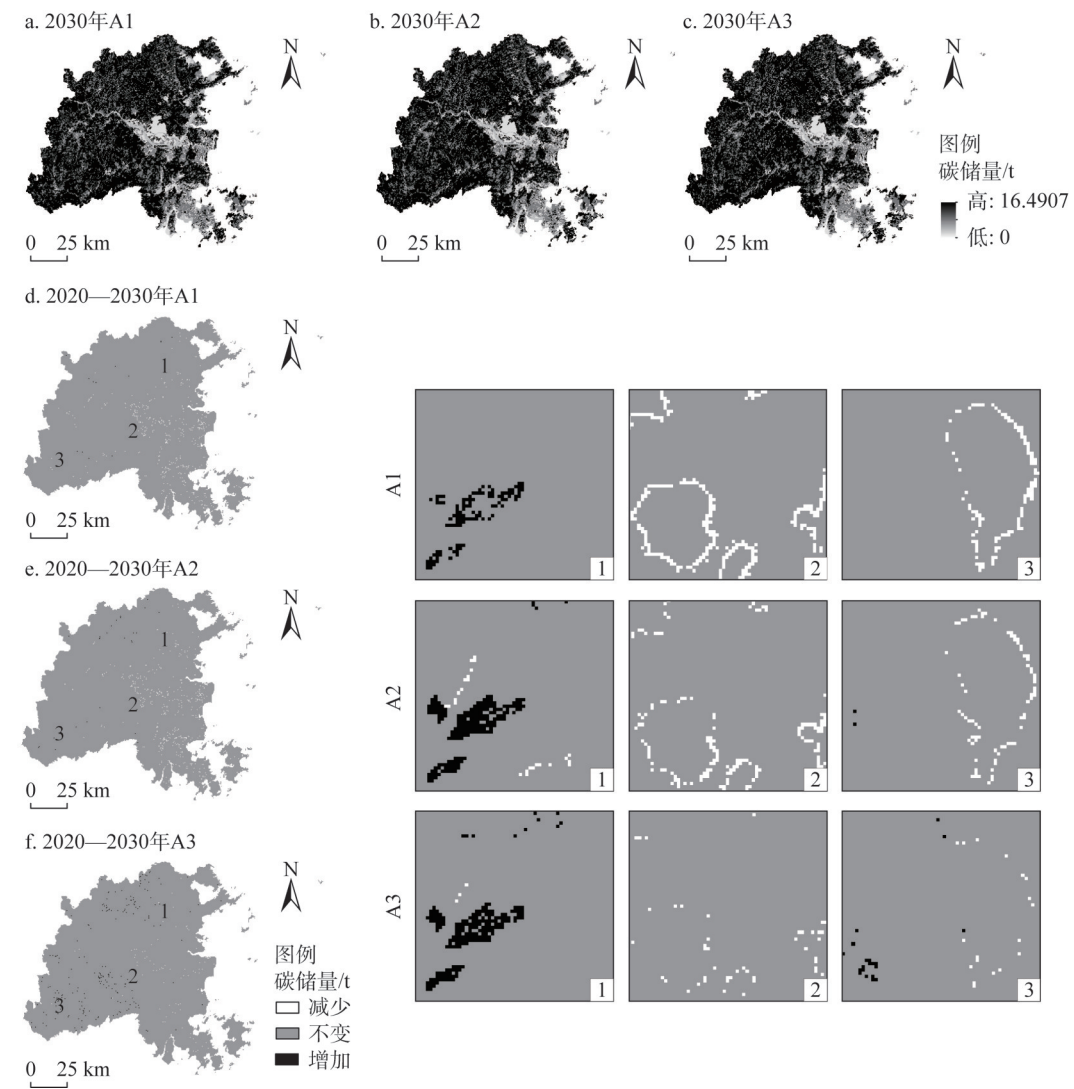


图9 福州市2030年不同发展情景下碳储量空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of carbon storage under different development scenarios in Fuzhou city in 2030

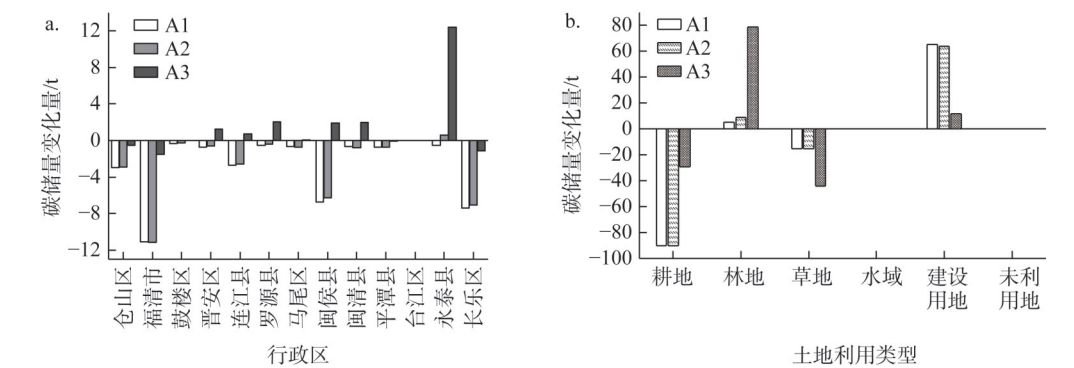


图10 福州市2020—2030年不同情景碳储量时空变化量

Fig. 10 Temporal and spatial changes in carbon storage under different scenarios in Fuzhou city from 2020 to 2030

提升区域生态系统碳储存能力和生态价值。

2.3.3 2030年不同发展情景下的碳储量空间自相关分析

利用Geoda软件对福州市2030年三种情景下的碳储量进行全局空间自相关分析，三种情景下Moran's *I* 的值分别为0.399、0.400和0.398，显著性水平为0.001，表现出空间正相关。说明这些区域在空间上存在较大的正相关性，也就是研究区内碳储量的空间分布并非是完全随机性，而是表现出空间相似值之间的空间聚类。

对三种情景下福州市碳储量进行局部空间自相关分析（图11），福州市碳储量在空间分布上显出相似性，其中碳储量高值区域（热点区域）主要在福州市西北部的闽侯县、闽清县和永泰县表现出聚集，这些区域的森林覆盖率较高，且受人类社会活动影响较小。碳储量低值区域（冷点区域）主要在闽江流域和临海的城市区域表现出聚集，主要是城市发展侵占耕地比较严重，且人类活动围绕着江河流域，故这些区域的生态系统碳储存能力被不断减弱。研究区内的碳储量高值区域在交通规划情景下占比最少（14.76%），闽侯县、闽清县和永泰县的碳储量高值区域在交通规划情景下减少最多，主要原因可能是受区域内路网建设的影响。

3 结论与讨论

3.1 结论

（1）福州市2000—2020年间耕地、林地、草地和水域的面积均有不同程度的减少，建设用地面积增加了423.34 km²，其中224.81 km²是由耕地转入。

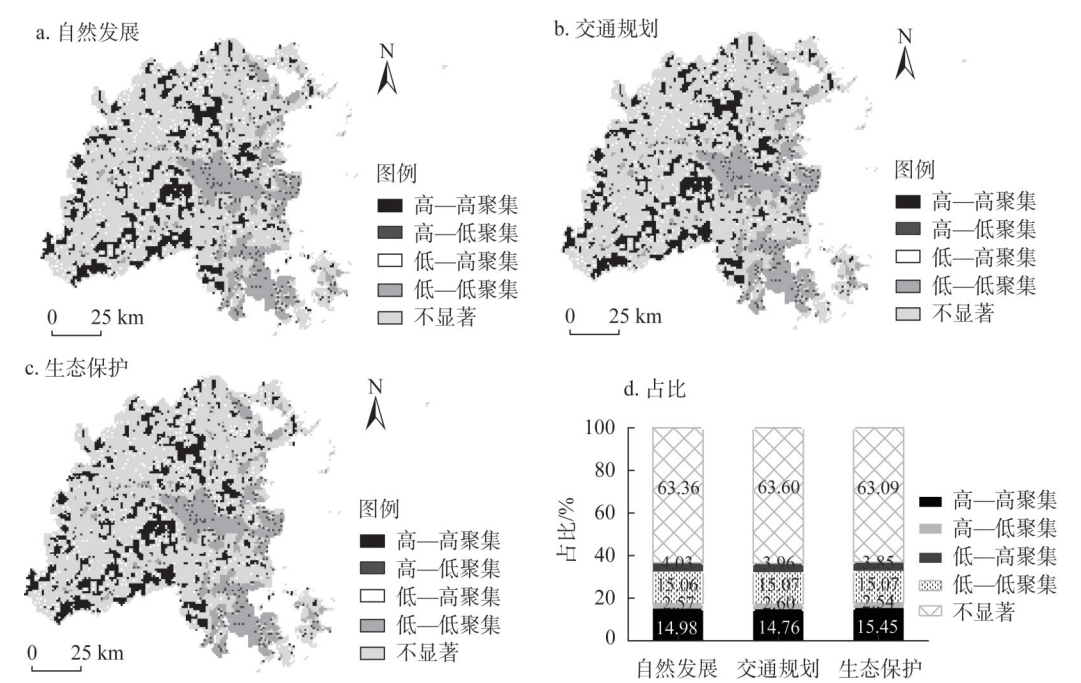


图 11 福州市 2030 年不同发展情景碳储量局部空间自相关及占比

Fig. 11 Local spatial autocorrelation and proportion of carbon storage under different development scenarios in Fuzhou city in 2030

(2) PLUS模型的Kappa系数为0.928,在福州市土地利用变化中有较高的模拟精度。模拟福州市2030年土地利用格局的结果显示,在交通规划情景下,总体耕地转出区域得到优化,相比自然发展情景,向建设用地转化的面积减少1.90 km²,向林地转化的耕地面积增加1.89 km²,但比生态保护情景多损失48.52 km²的耕地。相比自然发展情景,林地在交通规划情景增加2.05 km²,但比生态保护情景多损失38.11 km²,未利用地也在交通规划情景得到最合理的开发利用。

(3) 由交通规划产生的土地利用变化对生态系统碳储量有较大的影响,交通规划情景下,生态系统的总碳储量比2020年下降32.84 t,比自然发展情景多储存2.25 t,但比生态保护情景多流失49.91 t。交通规划情景下只有永泰县呈现净碳储量增加,而生态保护情景下有六个区县呈现净碳储量增加,说明适当的交通政策引导结合生态保护措施不仅能减缓碳流失情况,还能提升生态系统碳储存能力。

(4) 空间自相关结果表明三种情景的碳储量存在较大的空间正相关性,碳储量高值区域在福州市西北部呈现聚集,低值区域在闽江流域和临海地区呈现聚集。

3.2 讨论

福州市在自然发展情景下,虽然森林覆盖率保持稳定,但建设用地向耕地扩张较为严重。闽侯县和永泰县是路网建设的重点区域,在未来交通规划引导之下,建设用地扩张得到限制,总体耕地转出类型得到优化,减轻了碳流失情况;然而,在闽清县和闽侯县的北部地区仍然存在毁林造田的现象,建议对该地区加强监管和保护,必要时实施退耕还林和生态修复工程。在福州市区和福清市区,建议在交通规划建设的同时,实施“山水林田湖草沙”一体化系统治理,推进优先保护类耕地划为永久基本农田并严格保护,推动行业转型升级,优化用地结构,实施最严格的生态保护,才能享受优厚的生态红利。

本文仍存在一些不足之处,如各地类的碳密度值对InVEST模型估算碳储量的精确度有较大影响,现有研究采用的碳密度数值各不相同,且不同地类的碳密度值还受到植物年龄和地理环境的影响,使得碳储量估算存在一定误差。因此,在之后的工作中通过田野实验获取更加精准的碳密度参数,对准确估算碳储量具有重要的意义。

考虑交通规划对未来土地利用和碳储量变化进行模拟,有利于推动交通规划与土地利用规划相互配合,确保两者的协调发展,减少城市扩张对农田和自然资源的占用,对中国生态文明建设具有重要的参考价值。同时,呼吁相关部门在交通规划中考虑绿色基础设施的布局,如绿道、生态廊道等,以促进生态保护和生物多样性,这对构建人与自然生命共同体具有积极的意义。

参考文献(References):

- [1] 张先琪,杨轶晨,唐茂刚. 提高土地利用质量能否降低碳排放?. 系统工程, 2022, 40(5): 44-53. [ZHANG X Q, YANG Y C, TANG M G. Can improving land use quality reduce carbon emissions?. Systems Engineering, 2022, 40(5): 44-53.]
- [2] 马远,刘真真. 黄河流域土地利用碳排放的时空演变及影响因素研究. 生态经济, 2021, 37(7): 35-43. [MA Y, LIU Z Z. Study on the spatial-temporal evolution and influencing factors of land use carbon emissions in the Yellow River Basin. Ecological Economy, 2021, 37(7): 35-43.]
- [3] 郑贱成,谢炳庚,游细斌. 基于土地利用变化的广东省生境质量时空演变特征. 生态学报, 2022, 42(17): 6997-7010.

- [ZHENG J C, XIE B G, YOU X B. Spatio-temporal characteristics of habitat quality based on land-use changes in Guangdong province. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(17): 6997-7010.]
- [4] 王天福, 龚直文, 邓元杰. 基于土地利用变化的陕西省植被碳汇提质增效优先区识别. *自然资源学报*, 2022, 37(5): 1214-1232. [WANG T F, GONG Z W, DENG Y J. Identification of priority areas for improving quality and efficiency of vegetation carbon sinks in Shaanxi province based on land use change. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(5): 1214-1232.]
- [5] 乔治, 贺瞳, 卢应爽, 等. 全球气候变化背景下基于土地利用的人类活动对城市热环境变化归因分析: 以京津冀城市群为例. *地理研究*, 2022, 41(7): 1932-1947. [QIAO Z, HE T, LU Y S, et al. Quantifying the contribution of land use change based on the effects of global climate change and human activities on urban thermal environment in the Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration. *Geographical Research*, 2022, 41(7): 1932-1947.]
- [6] 刘艳芳, 安睿, 曲胜秋, 等. 福建省耕地生态安全评价及障碍因子分析. *中国农业资源与区划*, 2022, 43(11): 121-132. [LIU Y F, AN R, QU S Q, et al. Ecological security evaluation and obstacle factor diagnosis of the cultivated land in Fujian province. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2022, 43(11): 121-132.]
- [7] 张阳涛, 杨柯莹. 新型城镇化进程中绿色城市与智慧城市协同建设研究: 以国家生态文明试验区福建省为例. *经济师*, 2022, (11): 18-19. [ZHANG Y T, YANG K Y. Collaborative construction of green city and smart city in new urbanization. *China Economist*, 2022, (11): 18-19.]
- [8] 刘洋, 张军, 周冬梅, 等. 基于InVEST模型的疏勒河流域碳储量时空变化研究. *生态学报*, 2021, 41(10): 4052-4065. [LIU Y, ZHANG J, ZHOU D M, et al. Temporal and spatial variation of carbon storage in the Shule River Basin based on InVEST model. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(10): 4052-4065.]
- [9] 向书江, 张骞, 王丹, 等. 近20年重庆市主城区碳储量对土地利用/覆被变化的响应及脆弱性分析. *自然资源学报*, 2022, 37(5): 1198-1213. [XIANG S J, ZHANG Q, WANG D, et al. Response and vulnerability analysis of carbon storage to LUCC in the main urban area of Chongqing during 2000-2020. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(5): 1198-1213.]
- [10] 李姣, 汪杰, 李朗, 等. 洞庭湖生态经济区土地利用变化对碳储量的影响. *生态学杂志*, 2022, 41(6): 1156-1165. [LI J, WANG J, LI L, et al. Impact of land use change on carbon storage in the Dongting Lake Eco-economic Zone. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, 41(6): 1156-1165.]
- [11] 叶高斌, 苏伟忠, 孙小祥. 基于Dyna-CLUE模型的太湖流域建设用地空间扩张模拟. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(4): 725-734. [YE G B, SU W Z, SUN X X. Simulation of the construction land expansion based on the Dyna-CLUE Model in Taihu Basin. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(4): 725-734.]
- [12] 陈理庭, 蔡海生, 张婷, 等. 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. [CHEN L T, CAI H S, ZHANG T, et al. Land use multi-scenario simulation analysis of Rao River Basin based on Markov-FLUS model. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(10): 3947-3958.]
- [13] 林沛锋, 郑荣宝, 洪晓, 等. 基于FLUS模型的土地利用空间布局多情景模拟研究: 以广州市花都区为例. *国土与自然资源研究*, 2019, (2): 7-13. [LIN P F, ZHENG R B, HONG X, et al. Simulation of land use spatial layout based on FLUS model: A case study of Huadu district, Guangzhou. *Territory & Natural Resources Study*, 2019, (2): 7-13.]
- [14] LIANG X, GUAN Q, CLARKE K C, et al. 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, Doi:10.1016/j.compenvurbsys.2020.101569.
- [15] 何尹杰, 吴大放, 刘艳艳, 等. 城市轨道交通对土地利用变化的影响: 以广州市3、7号线为例. *经济地理*, 2021, 41(6): 171-179. [HE Y J, WU D F, LIU Y Y, et al. The influence of urban public rail transport on land use change: A case study of the metro line 3 and line 7 in Guangzhou. *Economic Geography*, 2021, 41(6): 171-179.]
- [16] 于涛, 包安明, 刘铁, 等. 不同等级道路对玛纳斯河流域土地利用与景观格局的影响. *自然资源学报*, 2019, 34(11): 2427-2439. [YU T, BAO A M, LIU T, et al. Effects of different level roads on land use and landscape pattern of Manas River Basin. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(11): 2427-2439.]
- [17] 林素丽, 王枫. 基于PLUS模型并顾及交通规划的广州市土地利用情景模拟与分析. *农业资源与环境学报*, 2023, 40

- (3): 557-569. [LIN S L, WANG F. Simulation and analysis of land use scenarios in Guangzhou based on the PLUS model and traffic planning scenario. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(3): 557-569.]
- [18] 雒舒琪, 胡晓萌, 孙媛, 等. 耦合 PLUS-InVEST 模型的多情景土地利用变化及其对碳储量影响. *中国生态农业学报: 中英文*, 2023, 31(2): 300-314. [LUO S Q, HU X M, SUN Y, et al. Multi-scenario land use change and its impact on carbon storage based on coupled PLUS-InVEST model. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(2): 300-314.]
- [19] 侯雨峰, 陈传明, 胡国建. 福建闽江河口湿地国家级自然保护区社区居民可持续生计评价与分析. *湿地科学*, 2018, 16(4): 530-536. [HOU Y F, CHEN C M, HU G J. Evaluation and analysis of sustainable livelihood of community residents in Minjiang River Estuary Wetland National Nature Reserve in Fujian province. *Wetland Science*, 2018, 16(4): 530-536.]
- [20] 叶博玮. 福建雄江黄楮林国家级自然保护区生态系统服务功能价值评估. 福建: 福州大学, 2016. [YE B W. The ecosystem service valuation of Huangchulin nature reserve in Fujian. Fujian: Fuzhou University, 2016.]
- [21] 王超越. 基于 PLUS-InVEST 成渝城市群国土空间及其碳储量时空变化模拟研究. 重庆: 重庆三峡学院, 2023. [WANG C Y. Spatial-temporal change simulation of land space and carbon storage in Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration based on PLUS-InVEST. Chongqing: Chongqing Sanxia Institute, 2023.]
- [22] 李传哲, 于福亮, 刘佳, 等. 近 20 年来黑河干流中游地区土地利用/覆被变化及驱动力定量研究. *自然资源学报*, 2011, 26(3): 353-363. [LI C Z, YU F L, LIU J, et al. Research on land use/cover change and its driving force in midstream of the Heihe Mainstream Basin during the past 20 Years. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(3): 353-363.]
- [23] 王子尧, 孟露, 李惊, 等. 低碳发展背景下北京市土地利用与生态系统服务多情景模拟研究. *生态学报*, 2023, 43(9): 3571-3581. [WANG Z Y, MENG L, LI L, et al. Multi-scenario simulation of land use and ecosystem services in Beijing under the background of low-carbon development. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(9): 3571-3581.]
- [24] 卢奕帆, 林锦耀. 城市协同发展对粮食生产区域的影响预测: 以珠三角城市群为例. *自然资源学报*, 2023, 38(6): 1532-1549. [LU Y F, LIN J Y. Predicting the impact of urban agglomeration development on grain production regions: A case study of Pearl River Delta. *Journal of Natural Resources*, 2023, 38(6): 1532-1549.]
- [25] 杨激威, 赵娟, 朱家田, 等. 基于 PLUS 和 InVEST 模型的西安市生态系统碳储量时空变化与预测. *自然资源遥感*, 2022, 34(4): 175-182. [YANG L W, ZHAO J, ZHU J T, et al. Spatial-temporal change and prediction of carbon stock in the ecosystem of Xi'an based on PLUS and InVEST models. *Remote Sensing of Natural Resources*, 2022, 34(4): 175-182.]
- [26] 李俊, 杨德宏, 吴锋振, 等. 基于 PLUS 与 InVEST 模型的昆明市土地利用变化动态模拟与碳储量评估. *水土保持通报*, 2023, 43(1): 378-387. [LI J, YANG D H, WU F Z, et al. Dynamic simulation of land use changes and assessment of carbon storage in Kunming city based on PLUS and InVEST models. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(1): 378-387.]
- [27] 王小伦, 刘雁, 张玉, 等. 基于 CA-Markov 模型的吉林省西部土地利用/覆被变化研究及预测. *科学技术与工程*, 2021, 21(19): 7942-7948. [WANG X L, LIU Y, ZHANG Y, et al. Exploration and prediction of land use/cover change in Western Jilin province based on CA-Markov model. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(19): 7942-7948.]
- [28] 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. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 168: 94-116.
- [29] 王佳楠, 张志. 基于 Markov-PLUS 模型的柴北缘土地利用变化及模拟分析. *西北林学院学报*, 2022, 37(3): 139-148, 179. [WANG J N, ZHANG Z. Land use change and simulation analysis in the northern margin of the Qaidam Basin based on Markov-PLUS model. *Journal of Northwest Forestry University*, 2022, 37(3): 139-148, 179.]
- [30] 林彤, 杨木壮, 吴大放, 等. 基于 InVEST-PLUS 模型的碳储量空间关联性及预测: 以广东省为例. *中国环境科学*, 2022, 42(10): 4827-4839. [LIN T, YANG M Z, WU D F, et al. Spatial correlation and prediction of land use carbon storage based on the InVEST-PLUS model: A case study of Guangdong province. *China Environmental Science*, 2022, 42(10): 4827-4839.]

- [31] 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. 生态学报, 2019, 39(12): 4284-4298. [WANG B S, LIAO J F, ZHU W, et al. The weight of neighborhood setting of the FLUS model based on a historical scenario: A case study of land use simulation of urban agglomeration of the Golden Triangle of Southern Fujian in 2030. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(12): 4284-4298.]
- [32] SHARP R, CHAPLIN-KRAMER R, WOOD S, et al. InVEST User's Guide. Collaborative publication by the Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, the Nature Conservancy, and World Wildlife Fund, 2018, Doi: 10.13140/rg.2.2.32693.78567.
- [33] CHUAI X W, HUANG X J, WANG W J, et al. Land use structure optimization based on carbon storage in several regional terrestrial ecosystems across China. *Environmental Science & Policy*, 2013, 25: 50-61.
- [34] 徐丽, 何念鹏, 于贵瑞. 2010s中国陆地生态系统碳密度数据集. 中国科学数据(中英文网络版), 2019, 4(1): 90-96. [XU L, HE N P, YU G R. A dataset of carbon density in Chinese terrestrial ecosystems (2010s). *China Scientific Data*, 2019, 4(1): 90-96.]
- [35] 罗怀良. 中国农田作物植被碳储量研究进展. 生态环境学报, 2014, 23(4): 692-697. [LUO H L. Advances on carbon storage in crops of China. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(4): 692-697.]
- [36] 王文俊. 福建省土壤有机碳储量估算、时空分布特征及其影响因素. 现代地质, 2019, 33(6): 1295-1305. [WANG W J. Reserve estimation, spatiotemporal distribution and its influencing factors of soil organic carbon in Fujian province. *Geoscience*, 2019, 33(6): 1295-1305.]
- [37] 肖微. 基于InVEST模型的闽东南地区生态系统服务功能评估. 福建: 福建师范大学, 2019. [XIAO W. Evaluation of ecosystem service in Southeastern Fujian based on InVEST model. Fujian: Fujian Normal University, 2019.]
- [38] 陈国平, 林伊琳, 赵俊三, 等. 滇中城市群空间多尺度耕地模型对比研究. 西南农业学报, 2022, 35(10): 2361-2371. [CHEN G P, LIN Y L, ZHAO J S, et al. Comparative study of spatial multi-scale cultivated land models of Yunnan Central Urban Agglomeration Area. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 35(10): 2361-2371.]
- [39] 孙俊, 潘玉君, 和瑞芳, 等. 地理学第一定律之争及其对地理学理论建设的启示. 地理研究, 2012, 31(10): 1749-1763. [SUN J, PAN Y J, HE R F, et al. The enlightenment of geographical theories construction from the First Law of Geography and its debates. *Geographical Research*, 2012, 31(10): 1749-1763.]
- [40] 刘洋, 余建新, 向冬蕾, 等. 基于局部空间自相关的思茅区耕地利用保护综合分区. 水土保持研究, 2020, 27(1): 183-188, 196. [LIU Y, YU J X, XIANG D L, et al. Integrated zoning of cultivated land use protection in Simao district based on local spatial autocorrelation. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(1): 183-188, 196.]
- [41] 林彤, 高建岗, 王亚华. 基于国家耕地质量等别指数和空间自相关的苏北地区耕地保护分区. 农业资源与环境学报, 2023, 40(3): 525-533. [LIN T, GAO J G, WANG Y H. Protection zoning of cultivated land based on the national cultivated land quality index and spatial autocorrelation on Northern Jiangsu. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(3): 525-533.]

Simulation and elicitation of land use and carbon storage changes in Fuzhou under the background of traffic planning

LIANG Guan-min, XIAO Yao, LIU Miao-miao, LIN Sen, WU Zhi-long, HU Xi-sheng

(School of Transportation and Civil Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University,
Fuzhou 350002, China)

Abstract: The evolution of carbon storage in terrestrial ecosystems is closely related to land use change, while transportation planning policies often play a crucial role in guiding future land use change patterns. However, limited research has been conducted on the effects of considering transportation planning scenarios on land use change and carbon storage. In this study, we took Fuzhou city as an example and used the PLUS model to simulate the spatial distribution characteristics of land use in 2030 under three scenarios: natural development (A1), transportation planning (A2), and ecological conservation (A3). We further utilized the InVEST model to estimate carbon storage and analyze the impact of transportation planning on land use change and carbon storage. The results indicate that: (1) From 2000 to 2020, the area of cultivated land in Fuzhou city decreased significantly (239.25 km^2), while the area of construction expanded exponentially (423.34 km^2), and the area of forest land showed a slight decrease. (2) The PLUS model demonstrated high applicability in Fuzhou, with a Kappa coefficient of 0.928. (3) Under the transportation planning scenario, the overall transfer of cultivated land area is optimized. Compared with the natural development scenario, the area converted to construction decreased (1.90 km^2), and the area converted to forest land increased (1.89 km^2), and the unused land also obtained the optimal allocation in the transportation planning scenario. (4) Under the transportation planning scenario, the total carbon storage of the ecosystem decreased by 32.84 t compared to 2020. It still stored an additional 2.25 t compared to the natural development scenario, but lost 49.91 t compared to the ecological conservation scenario. (5) Spatial autocorrelation analysis indicated a significant positive spatial correlation in carbon storage for all the three scenarios. The areas with high carbon storage value were clustered in the northwest of Fuzhou, while the areas with low carbon storage value were mainly clustered in the Minjiang River Basin and coastal areas of the city. The combination of the PLUS model and InVEST model achieved accurate prediction of future carbon storage, providing scientific reference for optimizing regional land use planning and enhancing carbon storage capacity.

Keywords: land use; PLUS model; InVEST model; transportation planning; carbon storage; Fuzhou city