

闫欣, 赵梓好, 付炎芳, 等. 基于PLUS模型的粤港澳大湾区土地利用演变的多情景模拟研究[J]. 广东工业大学学报, 2026, 43(4): 47-57. doi: 10.12052/gdutxb.250132.
Yan Xin, Zhao Ziyu, Fu Yanfang, et al. Predicting land use changes in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area under alternative scenarios using the PLUS model[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2026, 43(4): 47-57. doi: 10.12052/gdutxb.250132.

基于PLUS模型的粤港澳大湾区土地利用 演变的多情景模拟研究

闫欣, 赵梓好, 付炎芳, 丁琼, 凌博华, 黄港亚, 吴希文

(广东工业大学 土木与交通工程学院, 广东 广州 510006)

摘要: 在全球气候变化背景下, 研究未来气候变化情景下的土地利用变化可揭示城市发展的多模态路径, 为优化土地资源再分配和可持续发展政策提供科学依据。本文基于粤港澳大湾区2010~2020年土地利用演变分析, 耦合CMIP6提供的共享社会经济路径(Shared Socioeconomic Pathways, SSPs)和代表性浓度路径(Representative Concentration Pathways, RCPs)情景框架, 利用Patch-generating Land Use Simulation (PLUS) 模型对2030~2050年土地利用格局进行预测。结果表明: PLUS模型对2020年土地利用的模拟总体精度为87.76%, Kappa指数为0.816, 满足土地利用变化模拟的要求。2030~2050年间城市建设用地将持续增加, 不同情景下的增长率依次为SSP5.85 > SSP2.45 > SSP1.19; 耕地、林地和水域面积将持续减少, 其中在SSP5.85情景下耕地和林地减缩幅度最大。在SSP1.19情景下耕地-林地-水域系统维持较高稳定性, 空间格局契合“山水林田湖草沙生命共同体”的生态理念, 较好地平衡城市发展与生态保护需求。本文研究可为粤港澳大湾区国土空间优化和韧性发展的土地资源配置提供科学参考。

关键词: 土地利用; SSP-RCP多情景模拟; PLUS模型; 粤港澳大湾区

中图分类号: TP79; P237

文献标志码: A

文章编号: 1007-7162(2026)04-0047-11

Predicting Land Use Changes in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area Under Alternative Scenarios Using the PLUS Model

Yan Xin, Zhao Ziyu, Fu Yanfang, Ding Qiong, Ling Bohua, Huang Gangya, Ng Alex Hay-Man

(School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Investigating land use change under future climate change scenarios is essential for revealing multimodal trajectories of urban development, which provides a scientific foundation for optimizing land resource redistribution and formulating sustainable development policies. This study analyzes the historical land use evolution in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area (GBA) from 2010 to 2020 and couples the shared socioeconomic pathways (SSPs) and representative concentration pathways (RCPs) framework from CMIP6. Using the patch-generating land use simulation (PLUS) model, land use patterns in the GBA for the period 2030~2050 under multiple scenarios are simulated. The simulation results for 2020 achieve an overall accuracy of 87.76% and a Kappa coefficient of 0.816, indicating reliable performance for projecting future changes. The findings reveal a continuous expansion of built-up land between 2030 and 2050 across all scenarios, with the growth rate ranked as SSP5.85 > SSP2.45 > SSP1.19. In contrast, cultivated land, forest land, and water bodies are projected to decline, with the most substantial reductions occurring under the SSP5.85 scenario. Notably, the SSP1.19 scenario maintains relatively high stability in the structure of cultivated land, forest land, and water bodies.

收稿日期: 2025-07-10 录用日期: 2025-09-25 网络首发日期: 2026-01-26

基金项目: 广东省“珠江人才计划”引进创新创业团队项目(2019ZT08L213)

作者简介: 闫欣(2001-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为遥感图像分析方法及其应用, E-mail: 2112309039@mail2.gdut.edu.cn

通信作者: 吴希文(1983-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为遥感图像分析方法及其应用, E-mail: hayman.ng@gdut.edu.cn

Its spatial configuration aligns with the concept of ‘mountains, rivers, forests, farmlands, lakes, grasslands, and deserts as a community of life’ effectively balancing urban development needs with ecological conservation. Therefore, the land resource configuration under SSP1.19 offers a scientific basis for optimizing territorial spatial planning and supporting resilient development strategies in the GBA.

Key words: land use; SSP-RCP scenario simulation; PLUS model; Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

土地利用/土地覆盖变化作为环境变化主要承载形式,直接作用于城市气候变化、水土流失、碳氮循环以及生物多样性^[1-3]。因此,土地利用的监测与预测始终是地理学研究的核心议题之一。土地利用变化长期以来被视为影响局部、区域乃至全球气候与生态演变的关键因素。伴随着城市化进程,城市地表覆盖类型的转变深刻改变了陆-气间的能量与物质交换过程,进而影响区域气候和生态环境^[4-7]。构建科学有效的土地利用变化空间预测模拟方法,对缓解气候变化和促进城市可持续发展具有重大意义。

在土地利用变化预测的相关研究中,对土地变化的预测主要分为2种思路,一种是基于土地结构变化的预测,另一种是基于土地利用空间变化的预测。国内外学者通常采用线性规划、模糊优化、多目标复杂进化算法等方法^[8],来确定最优土地利用结构。而在空间预测方面,主要依托元胞自动机(Cellular Automata, CA)构建系统演变的微观规则,用以模拟复杂的土地利用空间动态。为进一步提升预测与模拟的准确性,学者们在元胞自动机模型框架基础上不断改进,逐步发展出CA-Markov、FLUS(Future Land Use Simulation)、PLUS(Patch-generating Land Use Simulation)等一系列模型。其中,FLUS模型通过结合人工神经网络与轮盘赌竞争机制,有效解决了传统CA模型在转换规则挖掘和多用地类型竞争方面的难题。PLUS模型则是在FLUS的基础上进一步发展而来,它引入了基于随机森林的土地扩张分析策略和一种多类随机斑块种子机制,能在模拟土地扩张机理、识别驱动因子贡献度以及生成更真实土地利用斑块方面表现出更强的能力^[9-10]。该模型不仅显著提升了模拟精度,还增强了对土地利用变化内在机理的可解释性,能够有效表征城市扩张过程中的路径依赖与正反馈机制,因此在国际和国内的土地利用变化研究中得到越来越广泛的应用。

粤港澳大湾区地理区位优势,自然资源禀赋多样,河网、湿地与湖泊分布广泛。作为全球最具经济活力、人口密度最高的城市群之一,该区域展现出典型的快速城市化进程和复杂的土地利用演变特征,成为了研究城市扩张与土地利用变化关系的理想案

例区。既往研究中,不少学者采用灰色预测、系统动力学和线性规划等方法对大湾区的土地利用结构进行预测。然而,土地利用结构仅反映类型数量上的变化,缺乏空间布局层面的信息。随着空间预测模型的发展,越来越多的研究开始将CA-Markov、FLUS、CFLUS和PLUS等模型应用于大湾区土地利用模拟中。这些研究通常基于历史时期的城镇扩张、耕地转化与湿地退化过程,对未来土地利用格局作出预测,在此基础上对未来格局的情景设计往往分为自然发展、城镇发展、政策保护等方向。然而,预测性土地利用模拟的结果高度依赖于输入数据的质量与情景设置的合理性。仅依据历史趋势与数据进行预测,难以充分反映未来不同情景下土地利用的潜在变化。当前关于大湾区土地利用模拟的研究较少,尤其对社会经济、气候多样化情景的综合考量仍较为薄弱,一定程度上制约了模拟结果的科学性与政策适应性。

为系统评估人类活动与环境变化对土地利用格局的潜在影响,国际上政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)提出并不断完善了一系列情景框架,包括典型浓度路径(Representative Concentration Pathways, RCPs)、共享社会经济路径(Shared Socioeconomic Pathways, SSPs),以及近年来广泛应用的SSP-RCP耦合情景(IPCC, 2021)^[11-12]。在此框架下开展多路径、多情景的土地利用变化模拟,能够在不确定性背景下更全面地揭示未来演变趋势,为粤港澳大湾区的国土空间规划、生态环境保护 and 可持续发展政策提供科学支撑与决策依据。

为此,本文基于PLUS模型,融合第六次国际耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project Phase 6, CMIP6)提供的SSP-RCP耦合情景框架,开展2030~2050年大湾区土地利用格局模拟,旨在揭示不同发展路径下的土地演化趋势与生态环境响应,为区域国土空间优化与发展提供科学依据。

1 研究区域、数据和方法

1.1 研究区域

本文研究区域为粤港澳大湾区,位于21°25'N~

24°30'N和111°12'E~115°35'E之间。大湾区涵盖广东省的广州、深圳、佛山、东莞、惠州、中山、珠海、江门、肇庆九个城市,以及香港和澳门两个特别行政区。全区总面积约56 000 km²,与纽约湾区、旧金山湾区和东京湾区并称为世界四大湾区(见图1)。大湾区内河网密布,水资源丰富;气候类型主要为亚热带季风气候,为大湾区提供了优越的热量和水文条件。地形呈现西北高、东南低的格局,北部以山地丘陵为主,中部及沿海地带则以平原为优势地貌。大湾区地处珠江水系下游,主要支流包括西江、北江和东江。据统计大湾区内有102条重要河流,总长约1 700 km,密集的水系网络赋予了该地区强大的生态调节功能。

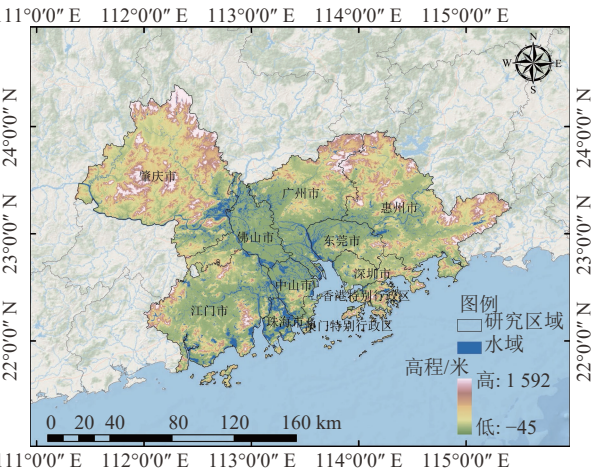


图1 研究区域
Fig.1 Study area

作为全球经济中心之一和中国城市化水平最高的区域,大湾区正面临着严峻的环境问题与可持续发展问题。独特的地理位置、显著的城市化进程、复

杂的地形水文条件以及面临的压力使大湾区成为研究不同发展情景下土地利用变化的理想案例区。

1.2 研究数据

本文采用了中国科学院资源与环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn/DOI/doi.aspx?DOIid=54>)提供的土地利用数据,该数据集将土地利用划分为6种类型:耕地、林地、草地、水域、城市建设用地和裸地。

土地利用类型的变化是多因素相互作用的结果,通常降水、蒸散发等自然因素会影响植被的分布;国内生产总值(Gross Domestic Product, GDP)、人口密度、夜间灯光等社会因素与建成区面积密切相关;城市建设用地的扩张往往受到地形和交通可达性的影响。因此基于自然、社会、可达性和地形因素,本文选择了平均年降水、平均年蒸散发、归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)、夜间灯光、人口密度、GDP、未来GDP、未来人口密度、到高速的距离、到公路的距离、到铁路的距离、高程和坡度为驱动因素数据。其中,所有距离均采用欧氏距离计算,地形因素数据通过GEE(Google Earth Engine)平台计算获取。常年水域被设定为限制开发的区域,以反映土地利用转化的现实约束条件。鉴于各类驱动数据在原始状态下具有不同的空间分辨率,本文采用双线性插值方法将所有数据统一至1 000 m空间分辨率,以保证与关键驱动因子在空间尺度上的一致性。各类数据的来源及所使用年份详见表1。

1.3 研究方法

1.3.1 PLUS模型

PLUS模型结合了基于土地蔓延分析策略的规则挖掘框架和基于多种类型随机斑块种子的元胞自

表 1 土地利用模拟驱动因素
Table 1 Driving data of land use simulation

类型	名称	年份	分辨率/m	数据来源
自然因素	降水	2020~2050	1 000	https://data.tpdac.cn/zh-hans/data/faae7605-a0f2-4d18-b28f-5ccee413766a2
	蒸散发	2020~2050	1 000	https://data.tpdac.cn/zh-hans/data/8b11da09-1a40-4014-bd3d-2b86e6dccc4d/
	NDVI	2020	30	http://www.gisrs.cn/
社会因素	夜间灯光	2020	1 000	https://doi.org/10.11888/Socioeco.tpdac.271202
	人口密度	2020	100	https://www.worldpop.org/
	GDP	2020	1 000	https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/15481603.2016.1276705
	未来人口密度	2030~2050	100	https://doi.org/10.6084/m9.figshare.11634372
	未来GDP	2030~2050	1 000	https://cstr.cn/31253.11.sciencedb.01683
可达性因素	到高速距离	2018		Open Street Map
	到公路距离	2018		
	到铁路距离	2018		
地形因素	高程	2014	30	http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/
	坡度	2014	30	

动机。PLUS模型使用随机森林方法从历史土地利用变化与多维驱动因素的复杂关系中,挖掘土地利用转换的潜在规则,量化每个空间单元上不同土地利用类型的发展适宜性概率^[10,13]。随机森林通过构建多棵决策树进行集成学习,其计算元胞转化为土地利用类型的适宜性概率,具体为

$$P_{i,k}^d = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M I(h_g(\mathbf{x}) = d)$$

其中, $P_{i,k}^d$ 是单元格 i 中土地利用类型 k 的发展适宜性概率; d 为 0 或 1, $d=1$ 表示由其他土地类型转为 k 类型用地, $d=0$ 表示其他土地类型未转为 k 类用地; I 是决策树集的指示函数; $h_g(\mathbf{x})$ 是第 g 棵决策树对特征向量 $\mathbf{x}$ 的预测结果(即预测的土地利用类型); M 是随机森林中决策树的总数。

PLUS模型通过随机森林算法获取土地利用类型的发展适宜性概率,并结合情景设定的土地利用需求量对土地利用的数量结构产生自上而下的限制。这不同于传统CA模型依赖邻域规则和局部竞争形成的自下而上约束。PLUS模型在此基础上保留了自适应惯性的优势竞争和未来土地利用模拟模型的前提下进行空间竞争。此外,它还增加了一种创新的基于阈值下降的多类型随机补丁播种机制^[9]。

$$\text{OP}_{i,k}^{d=1} = \begin{cases} P_{i,k}^{d=1} \times (r \times \mu_k) \times D_k^i, & \text{if } Q_{i,k}^i = 0, \quad r < P_{i,k}^{d=1} \\ P_{i,k}^{d=1} \times Q_{i,k}^i \times D_k^i, & \text{all others} \end{cases}$$

其中, $\text{OP}_{i,k}^{d=1}$ 是土地利用类型的总体生长概率面, $P_{i,k}^{d=1}$ 是土地利用类型的生长概率, r 是 0~1 的随机值, μ_k 是由用户确定的土地利用类型 r 生成新的土地利用斑块的阈值, D_k^i 是 k 类土地利用对未来需求的影响, $Q_{i,k}^i$ 是 k 类土地利用中 i 像元的领域效应。

PLUS模型更有利于从复杂机制的角度理解生态系统受土地利用变化影响的内部机制。

1.3.2 马尔科夫链

在模拟土地利用变化前,本文基于PLUS模型中的需求预测函数,利用马尔可夫链对整个研究区各类土地的数量需求进行估算。具体计算公式为

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_{t+1} &= \mathbf{P} \times \mathbf{S}_t \\ \mathbf{P} &= \begin{bmatrix} P_{11} & \cdots & P_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ P_{m1} & \cdots & P_{mm} \end{bmatrix} \\ P_{ij} &\in [0,1), \quad \sum_{j=1}^m P_{ij} = 1, \quad i, j = 1, 2, 3, \dots, m \end{aligned}$$

其中, $\mathbf{S}_t$ 为初期 t 的土地利用面积列矩阵; $\mathbf{S}_{t+1}$ 为目标时期 $t+1$ 的土地利用面积列矩阵; P_{ij} 为土地利用类型转移矩阵 $\mathbf{P}$ 中的元素,表示模型在土地演变过程中从初期 t 到目标时期 $t+1$ 的第 i 种地类到第 j 种地类的转换概率; n 为土地利用类型的总数。

1.3.3 PLUS模型验证

为了确定模拟数据的准确性,基于2010年土地分类影像的发展概率,本文模拟了2020年粤港澳大湾区的土地分类,并利用PLUS模型中的验证函数,将模拟的2020年土地利用数据与真实土地利用数据进行了比较,选择采样率为0.05的混淆矩阵计算方法。然后计算总体精度和Kappa系数^[14]。Kappa系数的值越接近1,表明模型精度越高,如果数据大于0.8,则表明模型精度在统计上具有较高可靠性。

$$\text{Kappa} = \frac{n \sum_{i=1}^k n_{ii} - \sum_{i=1}^k (n_{i+} n_{+i})}{n^2 - \sum_{i=1}^k (n_{i+} n_{+i})}$$

其中, n 为总验证像素数, n_{ii} 为第 i 类正确分类的像素数, n_{i+} 为分类像素数中第 i 类的总个数, n_{+i} 为参考像素数中第 i 类的总个数, k 为类数。

1.3.4 不同场景的模拟

本文根据预测情景将未来发展分为3大类:

(1) SSP1.19情景:该情景强调绿色低碳发展,将经济增长的重心转向可持续发展方向,与中国的碳中和目标高度一致。在该情景下,对建设用地扩张设置了严格限制,降低了建设用地的领域权重,以控制城市建设用地规模,从而保留更多林地、耕地等自然用地。(2) SSP2.45情景:该情景代表维持当前碳排放水平的中间发展路径。在该情景下,建设用地的限制有所放宽,并沿用了历史自然情景下的领域权重,体现了经济发展与环境保护之间的折中。(3) SSP5.85情景:该情景假设在高温温室气体排放条件下,国家将经济增长作为核心目标,大规模开发化石燃料资源,并采取能源和资源密集型的发展方式。在该情景下,建设用地扩张不受限制,并提高了建设用地的领域权重。

在模拟过程中,PLUS模型基于2010~2020年六类土地利用的历史演变规律,根据不同的情景设定,对各土地利用类型赋予差异化的转移成本矩阵和领域权重(见表2~3)^[15-16]。同时,引入未来GDP、人口密度、蒸散发及降水等情景驱动数据,对土地利用在各发展路径下的演变进行控制与约束。基于模拟生成的未来土地利用数据,本文进一步分析了在相同背景下的土地利用变化特征,以及土地利用情况在不同情景下的差异,以更全面地揭示研究区未来土地利用的空间格局演变趋势。

表2 不同情景的转移成本矩阵¹⁾
Table 2 Conversion cost matrix for different scenarios

编码	SSP1.19情景						SSP2.45情景						SSP5.85情景					
	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f
a	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0
b	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
c	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
d	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
e	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0
f	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1

1) a、b、c、d、e、f 分别表示耕地、林地、草地、水域、建设用地、裸地;0表示不能转化,1表示允许转化;行表示转出,列表示转入。

表3 不同情景下土地利用类型的邻域权重
Table 3 The neighborhood weights for land use type under the different scenarios

SSP-RCPs情景	耕地	林地	草地	水域	建设用地	裸地
SSP1.19	0.8	0.9	0.3	0.3	0.1	0.1
SSP2.45	0.5	0.6	0.2	0.5	0.3	0.1
SSP5.85	0.6	0.3	0.3	0.6	0.7	0.1

2 实验结果

2.1 PLUS模型精度验证

本文基于粤港澳大湾区2010年和2020年的历史土地利用数据,对PLUS模型的模拟能力进行验证,并进一步预测了该区域2030年、2040年及2050年的土地利用格局演变。

图2展示了2020年土地利用现状与模拟结果的对比,总体精度达到87.76%,Kappa系数为0.816。考虑到局部区域变化的程度存在差异,本文对大湾区内各市分别进行了独立验证。结果显示,9个城市的总体精度均在85%~91%,Kappa系数在0.80~0.86,均

达到较高水平。这充分证实了本文采用的PLUS模型具备可靠的预测能力,可用于大湾区未来土地利用格局的模拟预测。

2.2 历史土地利用时空动态特征

粤港澳大湾区土地利用格局以林地和耕地为主导类型,建设用地与水域次之,草地和裸地占比最低(其中裸地比例不足1%)。图3揭示了2010~2020年该地区土地利用的显著演变特征:建设用地与草地面积增加,而耕地、林地及水域面积缩减。其中,建设用地扩张最为剧烈,其占区域总面积的比例由2010年的13.09%显著提升至2020年的15.01%。该扩张主要源于耕地向建设用地的转化,且空间转化热点高度集中于广州、深圳等核心城市区域。

2.3 土地利用变化驱动因子分析

粤港澳大湾区2010年~2020年土地利用空间格局变化如图3所示。为揭示土地利用扩张的驱动机制,本文量化了扩张区域内各驱动因子的贡献度(见图4),并将主导因子与扩张区域进行空间叠加分析(见图5)。

基于PLUS模型得出不同驱动因素对不同土地利用类型的贡献度存在差异。耕地转变主要受坡度、降水、NDVI和蒸散发影响,坡度贡献最显著,缓坡区耕地转化概率更高;林地变化受到坡度、高程、夜间灯光和降水等影响,在低坡度丘陵区更易发生林地转移;草地变化受到了蒸散发、高程、降水和坡度的影响,草地扩张与蒸散发、高程、降水及坡度等因素相关;水域变化主要受到高程、坡度、人口密度和降水的影响。建设用地扩张的主要驱动力是其到公路的距离,其次是夜间灯光、人口密度等因素。在距离

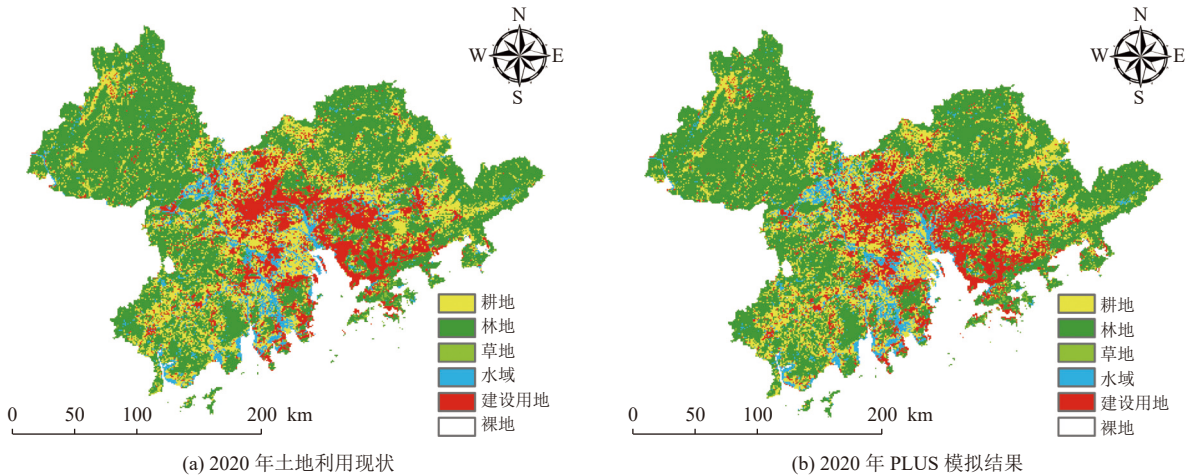


图2 粤港澳大湾区2020年土地利用现状及模拟结果

Fig.2 2020 land use status and simulation results of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

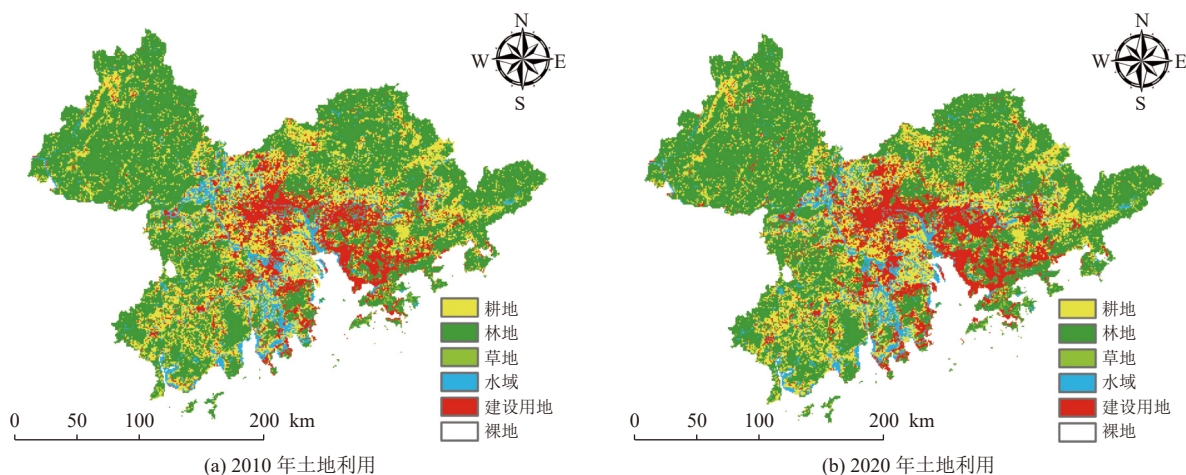


图3 2010与2020土地利用空间格局变化

Fig.3 Changes in land use spatial patterns from 2010 and 2020

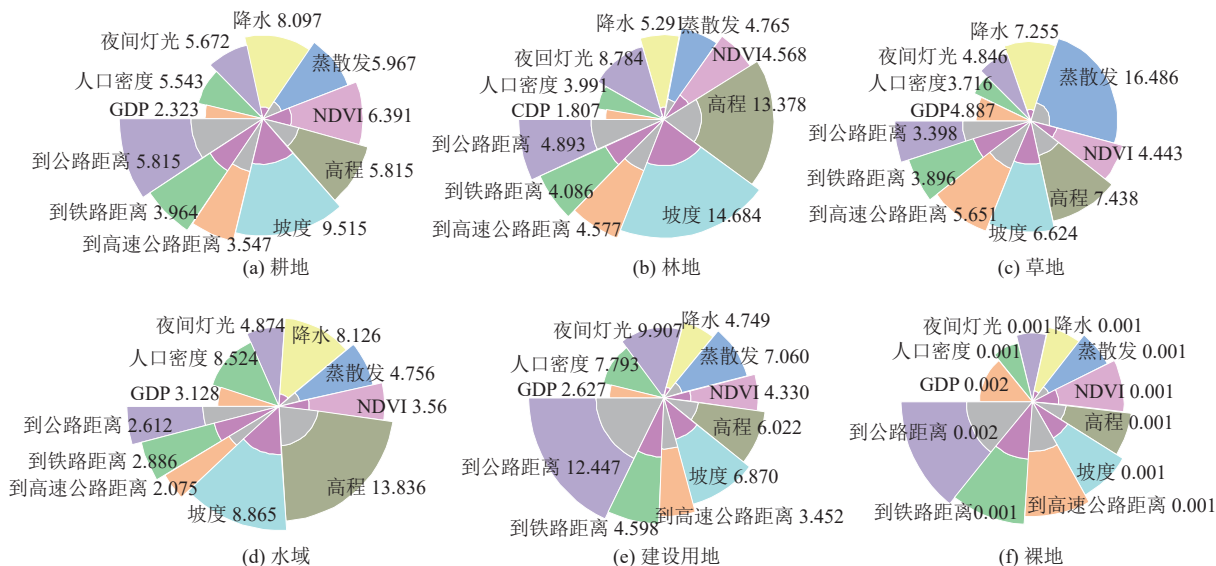


图4 驱动因素对土地利用变化的贡献度

Fig.4 Contribution of driving factors to land use changes

公路较近的区域,建设用地扩张更为显著。裸地因占比微小($<1\%$),各因子贡献未达统计显著水平。

通过PLUS模型对驱动因子的深度挖掘可以看出,在2010年~2020年间粤港澳大湾区城市化进程中,人口增长和经济扩张使得建设用地向交通干线周边缓坡带蔓延,耕地、林地向建设用地转换。同时,降水、蒸散发等自然因素通过调节水热条件也对草地、林地、耕地和水域等产生重要作用。

2.4 不同情景下的土地利用预测结果

图6(SSP1.19)、图7(SSP2.45)和图8(SSP5.85)分别为3种情景下2030~2050年的模拟结果中,粤港澳大湾区土地利用空间格局呈现如下特征:林地集中分布于大湾区西北部及东部山地丘陵区;建设用地高度集聚于区域核心地带及珠江入海口沿岸;耕地主

要布局在建设用地外围过渡带;草地呈零星散布于耕地-林地交错带;水域主体为珠江干支流、湖泊与水库,湿地则集中于水域周边低洼湿润区;裸地占比不足0.1%,空间分布高度破碎化。

SSP1.19情景下的粤港澳大湾区土地利用变化模拟结果(见图6、表4)的统计分析表明:在2020~2050年间,变化较为剧烈的区域位于佛山地区,主要表现为耕地向城市建设用地转换。大湾区范围内,草地增速最快,面积增加约156 km²,平均每10年增长4.59%;建设用地的面积亦呈增加趋势,增加约799 km²,平均每10年增加3.24%。耕地、林地、水域面积则呈减少趋势,平均每10年分别减少2.18%、0.01%和1.24%,其中耕地面积减少最为显著,30年间缩减约794 km²。

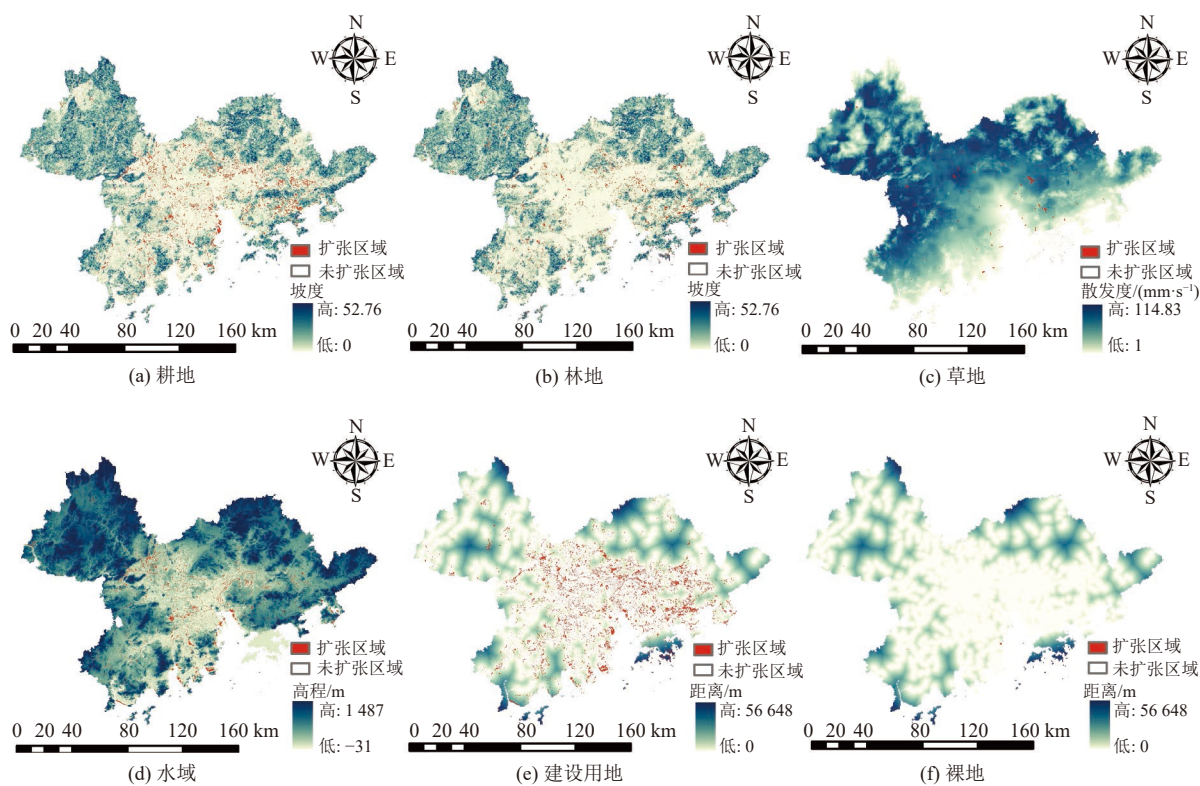


图5 土地类型扩张区域与其最大驱动因子叠加

Fig.5 Overlay of land type expansion areas and their maximum driving factors

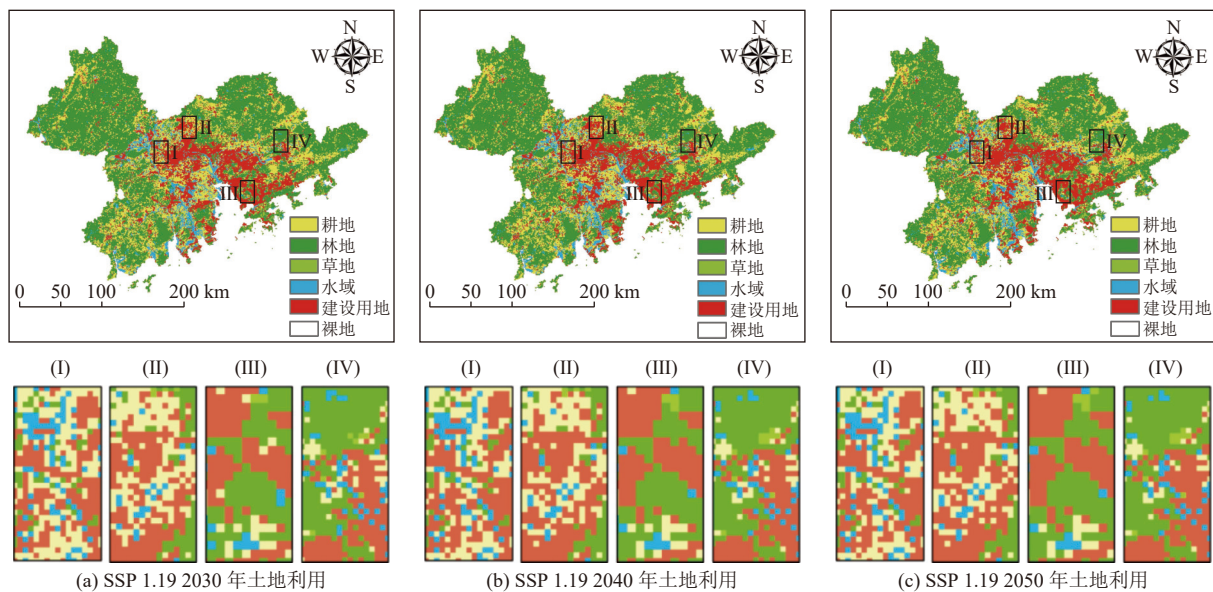


图6 SSP1.19情景的粤港澳大湾区土地利用模拟结果

Fig.6 Simulation results of land use in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area for scenario SSP1.19

SSP2.45情景下的粤港澳大湾区土地利用变化模拟结果(见图7、表4)的统计分析显示:2020~2050年间,变化剧烈区域集中于广佛地区,主要表现为耕地转化为建设用地。其次为惠州东部地区,主要表现为林地转化为建设用地。大湾区草地和建设用地面积持续增加,平均每10年增幅分别为4.89%和

8.26%;耕地、林地和水域的面积持续减少,平均每10年减幅分别为2.86%、1.06%和1.8%。从面积变化量看,建设用地增加最多,30年间增长约2 037 km²,耕地的减少最多,30年间缩减约1 038 km²。

SSP5.85情景下的粤港澳大湾区土地利用变化模拟结果(见图8,表4)的统计分析表明:2020~2050

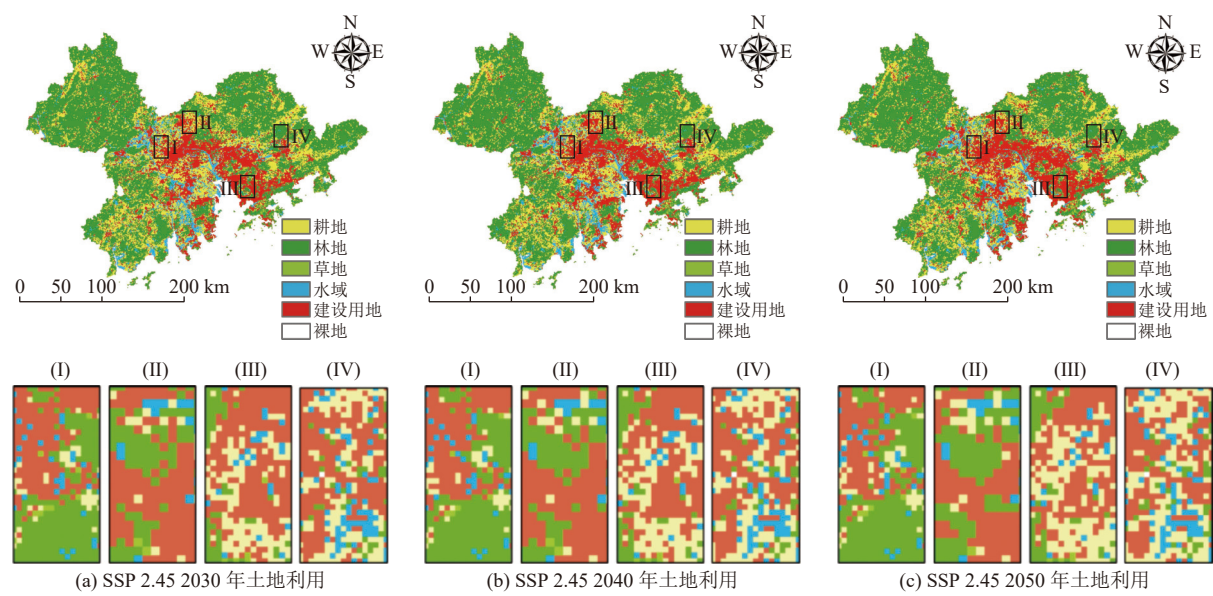


图 7 SSP2.45情景的粤港澳大湾区土地利用模拟结果

Fig.7 Simulation results of land use in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area for scenario SSP2.45

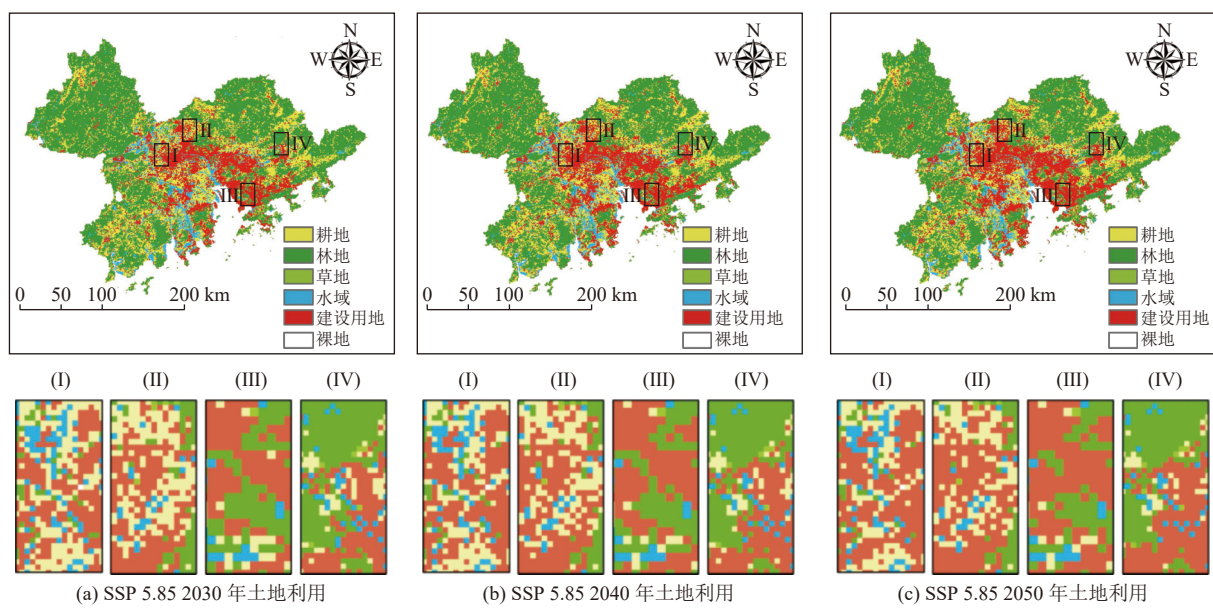


图 8 SSP5.85情景的粤港澳大湾区土地利用模拟结果

Fig.8 Simulation results of land use in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area for scenario SSP5.85

表 4 2030~2050年粤港澳大湾区土地利用类型面积预测结果													
Table 4 Simulation results of land use area in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area													
土地 利用 类型	2020年土地 利用类型 面积/km ²	SSP1.19土地利用类型面积				SSP2.45土地利用类型面积				SSP5.85土地类型面积			
		2030年 面积/km ²	2040年 面积/km ²	2050年 面积/km ²	10年平均 变化率/%	2030年 面积/km ²	2040年 面积/km ²	2050年 面积/km ²	10年平均 变化率/%	2030年 面积/km ²	2040年 面积/km ²	2050年 面积/km ²	10年平均 变化率/%
耕地	12 089	11 720	11 467	11 295	-2.18	11 720	11 363	11 051	-2.86	11 674	11 273	10 920	-3.22
林地	29 728	29 743	29 730	29 714	-0.01	29 403	29 081	28 783	-1.06	29 303	28 884	28 508	-1.37
草地	1 132	1 193	1 246	1 288	4.59	1 193	1 252	1 298	4.89	1 193	1 253	1 298	4.89
水域	3 816	3 740	3 700	3 674	-1.24	3 740	3 666	3 599	-1.8	3 740	3 666	3 601	-1.88
建设用地	8 218	8 592	8 845	9 017	3.24	8 928	9 623	10 255	8.26	9 074	9 909	10 658	9.90
裸地	11	10	10	10	-3.03	10	9	8	-9.09	10	9	8	-9.09

年间,建设用地扩张主要集中在广州、佛山、中山等区域。肇庆、惠州丘陵区域的林地亦发生显著变化,表现为林地转化为草地。总体而言,大湾区内草地和建设用地面积仍持续增加,平均每10年分别增加4.89%和9.90%;耕地、林地和水域面积持续减少,平均每10年分别减少3.22%、1.37%和1.88%。其中,林地面积减少最多,30年间减少约1 220 km²;建设用地增加最多,30年间增加约2 440 km²。

2.5 粤港澳大湾区土地利用情景模拟结果的解析

利用PLUS模型对粤港澳大湾区2020~2050年土地利用的模拟结果显示,3种共享社会经济路径(SSP)情景下区域土地利用变化呈现显著差异。SSP1.19作为可持续发展情景,建设用地有序扩张,耕地与林地转化速率最低,2040年森林覆盖率达54.06%,符合《广东省国土空间规划(2021—2035年)》设定的2035年森林覆盖率大于53.70%目标。在该情景下“耕地-林地-水域”稳定性较高,体现了“山水林田湖草沙生命共同体”理念,最契合大湾区城市发展与生态保护的双重需求。在SSP1.19情景下建设用地得到了有效控制,生态红线内的林地和水域保持相对稳定,与广东省“三区三线”规划相统一。SSP2.45情景作为历史发展形式的延续,在土地利用变化过程中,对生态保护以及可持续发展方面的考虑要低于SSP1.19。在该情景下建设用地扩张加速,耕地年均减少量较SSP1.19增加,林地退化范围向惠州东部蔓延。建成区边缘基本农田受到挤压,城镇开发边界外仍存在零散建设用地扩张,生态保护红线的刚性约束减弱,区域生态安全承受较大压力。SSP5.85情景一般被视作以经济快速发展为核心而轻视生态可持续的发展路径,建设用地激增2 440 km²,林地面积锐减1 220 km²,大湾区生态压力增加。在该情景下,大量建设活动突破城镇开发边界,挤占周边农田,部分生态保护红线区域受到侵蚀,导致生态系统完整性和稳定性下降,难以支撑区域长期的生态安全与可持续发展目标。

2.6 粤港澳大湾区土地利用情景模拟结果的启示

粤港澳大湾区作为国家战略的重要引擎,随着大湾区的经济快速发展,城市边界进一步扩张使得耕地资源和林地资源被建设用地侵占,城市空间格局发生了巨大变化,这对生态环境产生巨大影响。城市化的进程加快加剧城市热岛效应^[17]。因此,在大湾区城市发展的过程中,需要分析大湾区城市群与生态环境的交互影响,以满足大湾区可持续发

展需求。《粤港澳大湾区发展规划纲要》和《广东省国土空间规划(2021—2035年)》均强调在推进国际一流城市群建设的同时要注重生态文明建设,强化空间开发,保护总体格局^[18]。

根据模拟结果显示,在粤港澳大湾区城市发展的过程中建议从下面3个方面控制土地资源的开发利用,实现大湾区社会经济发展与生态环境保护的平衡。首先,在大湾区建设过程中要严格落实耕地保护任务,应在全区范围内明确永久基本农田红线,严控其被占用,并通过差别化建设用地准入制度,将新增建设用地向存量低效建设用地再开发和内部优化布局倾斜,从而遏制耕地的过度减少^[19-20];其次要坚持山水林田湖草沙一体化保护,在西北及东部山地森林区,应划定生态保护红线,禁止新增建设用地侵入^[21]。同时建立基于“生态价值核算”的横向生态补偿制度,鼓励地方政府在保护林地、水源涵养区的同时,发展生态旅游和绿色产业,实现保护与利用的有机结合。大湾区珠江入海口湿地面积广阔,这些湿地不仅承载着调节生态环境、涵养水源的重要使命,同时也是全球候鸟迁徙路线的重要节点。应在珠江口及重要河口湿地划定生态管控分区,明确“硬约束”边界,严格限制建设区的边界。同时开展湿地修复与生境廊道建设,以提升候鸟迁徙栖息地的连通性,保障区域水源涵养和生物多样性^[22]。

总之,在粤港澳大湾区发展过程中,应综合大湾区的经济、社会、生态要素,统筹协调规划,以实现对粤港澳大湾区国土资源的科学合理开发利用,以促进大湾区可持续发展。

3 结论与展望

本文研究基于PLUS模型,结合CMIP6框架下不同共享社会经济路径(SSPs)与典型浓度路径(RCPs)的组合情景,对粤港澳大湾区未来土地利用格局演变进行了多情景模拟与分析。结果表明,粤港澳大湾区土地利用变化主要表现为建设用地持续扩张,耕地、林地和水域等区域进一步减少。大湾区内土地利用变化剧烈的区域主要集中在广州、佛山、中山等,主要表现在耕地向建设用地转换。从驱动机制来看,不同土地类型对自然与社会经济因子的响应存在明显差异。耕地和林地的空间分布主要受坡度等地形因子约束;草地变化对蒸散发等气候要素较为敏感;水域分布与高程条件密切相关;而建设用地扩张则显著受到交通可达性影响,尤其是距公路距离的作用最为突出。

通过PLUS模型得出不同情景下土地利用变化格局也有不同的差异。在SSP1.19情景下耕地、林地和水域的减缓幅度最低,在SSP5.85情景下的耕地、林地和水域减缓趋势最显著。在SSP5.85情景下建设用地的快速扩张将会极大程度地导致耕地和林地缩减。SSP2.45情景下的变化幅度介于SSP1.19和SSP5.85情景之间。通过不同情景下土地利用格局的比较得出在SSP1.19情景下的粤港澳大湾区土地利用格局更加接近城市发展和生态保护政策的共同作用结果。

尽管PLUS模型对粤港澳大湾区土地利用模拟具有良好适用性,但本文研究仍存在以下局限。首先,现有模拟尚未确切建立生态保护区和耕地保护区等,在一定程度上不能很好地体现政策对国土空间格局开发的约束性。若条件允许,未来研究可将国土空间规划规则纳入模型,以提升模拟结的现实可操作性。其次,考虑到本文研究采用1 000 m分辨率对大湾区进行模拟和分析,其空间分辨率较低,无法对香港、澳门等区域进行细致分析,同时也无法提出细致化的分区管控策略。因此在未来的研究中需要采用更高分辨率的数据。再次,尽管PLUS模型在捕捉历史演变规律方面具有较高精度,但土地利用变化同时受到政策突变、极端气候事件和社会经济不确定性等非线性因素的影响,这些突发性空间变迁可能超出模型的预测能力。最后,从跨学科的角度来看,土地利用变化不仅影响城市空间格局,还与区域水资源调控、碳排放格局及生态系统服务供给密切相关。未来研究可进一步探索其与水文模型、碳排放模型及生态系统服务评估模型的集成,以实现土地利用-生态-社会系统的协同模拟,为区域可持续发展提供更系统的决策支撑。

参考文献:

- [1] HONG C, BURNEY J A, PONGRATZ J, *et al.* Global and regional drivers of land-use emissions in 1961–2017[J]. *Nature*, 2021, 589(7843): 554–561.
- [2] MARQUES A, MARTINS I S, KASTNER T, *et al.* Increasing impacts of land use on biodiversity and carbon sequestration driven by population and economic growth[J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2019, 3(4): 628–637.
- [3] NEWBOLD T, HUDSON L N, HILL S L, *et al.* Global effects of land use on local terrestrial biodiversity[J]. *Nature*, 2015, 520(7545): 45–50.
- [4] LIAO W, LIU X, LI D, *et al.* Stronger contributions of urbanization to heat wave trends in wet climates[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(20): 11–310.
- [5] BONAN G B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests[J]. *Science*, 2008, 320(5882): 1444–1449.
- [6] 陈品昊, 钟凯文. 城市土地利用变化对热岛效应的影响研究——以南京市为例[J]. *测绘科学*, 2024, 49(7): 173–183.
- CHEN P H, ZHONG K W. The impact of urban land use changes on the urban heat island effect: a case study of Nanjing[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2024, 49(7): 173–183.
- [7] FINDELL K L, SHEVLIAKOVA E, MILLY P C, *et al.* Modeled impact of anthropogenic land cover change on climate[J]. *Journal of Climate*, 2007, 20(14): 3621–3634.
- [8] 许秀圆, 周浩. 基于灰色预测和线性规划的珠三角地区土地利用优化研究[J]. *国土资源导刊*, 2024, 21(2): 79–85.
- XU X Y, ZHOU H. Research on land use optimization based on grey prediction and linear programming in the Pearl River Delta of China[J]. *Land & Resources Herald*, 2024, 21(2): 79–85.
- [9] LIANG X, LIU X, LI X, *et al.* Delineating multi-scenario urban growth boundaries with a CA-based FLUS model and morphological method[J]. *Landscape and urban planning*, 2018, 177: 47–63.
- [10] 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[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2021, 85: 101569.
- [11] AI X, ZHENG X, ZHANG Y, *et al.* Climate and land use changes impact the trajectories of ecosystem service bundles in an urban agglomeration: intricate interaction trends and driver identification under SSP-RCP scenarios[J]. *Science of The Total Environment*, 2024, 944: 173828.
- [12] HURTT G C, CHINI L, SAHAJPAL R, *et al.* Harmonization of global land-use change and management for the period 850–2100 (LUH2) for CMIP6[J]. *Geoscientific Model Development Discussions*, 2020, 13(11): 5425–5464.
- [13] CHEN X, WANG Z, YANG H, *et al.* Enhanced urban growth modelling: incorporating regional development heterogeneity and noise reduction in a cellular automata model—a case study of Zhengzhou, China[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 99: 104959.
- [14] LIN W, SUN Y, NIJHUIS S, *et al.* Scenario-based flood risk assessment for urbanizing deltas using future land-use simulation (FLUS): Guangzhou Metropolitan Area as a case study[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 739: 139899.
- [15] FU Q, HOU Y, WANG B, *et al.* Scenario analysis of ecosystem service changes and interactions in a mountain-oasis-desert system: a case study in Altay Prefecture, China[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 12939.

- [16] ZHANG S, YANG P, XIA J, *et al.* Land use/land cover prediction and analysis of the middle reaches of the Yangtze River under different scenarios[J]. *Science of The Total Environment*, 2022, 833: 155238.
- [17] 杨智威, 陈颖彪, 吴志峰, 等. 粤港澳大湾区建设用地扩张与城市热岛扩张耦合态势研究[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(11): 1592-1603.
- YANG Z W, CHEN Y B, WU Z F, *et al.* The coupling between construction land expansion and urban heat island expansion in Guangdong- Hong Kong- Macao Greater Bay[J]. *Journal of Geoinformation Science*, 2018, 20(11): 1592-1603.
- [18] 陈智勇, 吴耀炜, 林港特, 等. 基于遥感生态指数的粤港澳大湾区生态环境质量与土地利用变化空间关系[J]. *环境科学*, 2024, 45(11): 6433-6447.
- CHEN Z Y, WU Y W, LIN G T, *et al.* Spatial relationship between eco-environment quality and land use change in Guangdong Province-Hong Kong-Macao, China Based on remote sensing-based ecological index[J]. *Environmental Science*, 2024, 45(11): 6433-6447.
- [19] 曾梓瑶, 吴卓, 朱玲珑, 等. 快速城镇化对粤港澳大湾区生境质量的影响及其因素研究[J]. *生态科学*, 2025, 44(1): 40-50.
- ZENG Z Y, WU Z, ZHU L L, *et al.* Impact of rapid urbanization on habitat quality and its factors in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. *Ecological Science*, 2025, 44(1): 40-50.
- [20] 黄世鑫, 蔡云楠, 梁芳婷. 新时期自然生态空间综合管控研究——以粤港澳大湾区为例[J]. *生态学报*, 2021, 41(23): 9196-9206.
- HUANG S X, CAI Y N, LIANG F T. Comprehensive control of natural ecological space in the new era: a case study of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(23): 9196-9206.
- [21] 赵良杰, 王莹, 栾崧, 等. 近40年粤港澳大湾区水资源演变与生态环境格局变化[J]. *中国地质*, 2025, 52(1): 215-231.
- ZHAO L J, WANG Y, LUAN S, *et al.* Evolution of water resources and changes of ecological environment pattern in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area in the past 40 years[J]. *China Geology*, 2025, 52(1): 215-231.
- [22] 赵玲玲, 夏军, 杨芳, 等. 粤港澳大湾区水生态修复及展望[J]. *生态学报*, 2021, 41(12): 5054-5065.
- ZHAO L L, XIA J, YANG F, *et al.* Current situation, framework, problems and prospect of water ecological restoration in Guangdong-Hong Kong Macao Greater Bay Area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(12): 5054-5065.
- (责任编辑: 张玮欣 英文审核: 熊荣斌)