

引用格式:赵林峰,刘小平,刘鹏华,等.基于地理分区与FLUS模型的城市扩张模拟与预警[J].地球信息科学学报,2020,22(3):517-530. [Zhao L F, Liu X P, Liu P H, et al. Urban expansion simulation and early warning based on geospatial partition and FLUS model[J]. Journal of Geo-information Science, 2020,22(3):517-530.] DOI:10.12082/dqxxkx.2020.190477

基于地理分区与FLUS模型的城市扩张模拟与预警

赵林峰^{1,2}, 刘小平^{1,2*}, 刘鹏华^{1,2}, 陈广照^{1,2}, 何家律^{1,2}

1. 中山大学地理科学与规划学院, 广州 510275; 2. 广东省城市化与地理环境空间模拟重点实验室, 广州 510275

Urban Expansion Simulation and Early Warning based on Geospatial Partition and FLUS Model

ZHAO Linfeng^{1,2}, LIU Xiaoping^{1,2*}, LIU Penghua^{1,2}, CHEN Guangzhao^{1,2}, HE Jialv^{1,2}

1. School of Geography and Planning, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Urbanization and Geo-simulation, Guangzhou 510275, China

Abstract: The rapid urbanization has constantly changed the transformation of land resources. With rapid growth of economic and population, urbanization has also led to many ecological and environmental problems. Simulating the mechanism of urban expansion and providing early warning of the risk of urban land use change in the future can help to regulate and control urban development. In addition, most urban expansion simulation studies select common drivers and uniform transformation rules for simulation and prediction. Insufficient consideration of spatial heterogeneity increases the simulation error. This paper proposed an urban expansion simulation model based on the geospatial partition and Future Land Use Simulation (FLUS) model for simulating and predicting complex land use change. The model used multiple indicator data for spatial clustering in township streets and grid units, and divided Pearl River Delta into 10 sub-regions. Urban expansion simulation was performed under unpartitioned and partitioned scenarios with geospatial partition results. The simulation results of the urban expansion in the Pearl River Delta from 2005 to 2015 show that the simulation accuracy under the partitioned (FoM=0.2329, increase 9%) scenario is significantly higher than that of the unpartitioned scenario. Land use conversion potentials in different districts display spatial differences. Combining geospatial partition with FLUS model can simulate urban land use change more effectively. The Markov chain model was used to predict the number of future land types. The model was further applied to simulate land use changes in the Pearl River Delta in 2025, 2035 and 2045. Based on the impact of urban expansion on urban form, ecology and intensity, this paper constructed an urban expansion early warning indicator evaluation system to assess the alert of urban expansion. Furthermore, this system can predict the level of urban expansion deterioration and provide a scientific reference for urban development planning and monitoring. Based on the simulated results of land use change between 2025 and 2045, an early warning analysis

收稿日期:2019-08-29;修回日期:2019-12-14.

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFA0604404);国家自然科学基金面上项目(41671398);生态环境部生物多样性调查、观测和评估项目(2019—2023年)。[**Foundation items:** National Key R&D Program of China, No.2017YFA0604404; National Natural Science Foundation of China, No.41671398; Project supported by the biodiversity investigation, observation and assessment program (2019-2023) of Ministry of Ecology and Environment of China.]

作者简介:赵林峰(1997—),男,湖北天门人,硕士生,研究方向为城市模拟。E-mail: zhaolf28@mail2.sysu.edu.cn

*通讯作者:刘小平(1978—),男,湖南邵阳人,教授,研究方向为地理模拟、空间智能及优化决策等。

E-mail: liuxp3@mail.sysu.edu.cn

of urban expansion in Pearl River Delta was conducted at the partition and city level. The results show that the urban expansion of most cities in the region will reach above the middle and heavy level in 2045. Dongguan will always maintain heavy level in the future. Urban expansion in Pearl River Delta is not optimistic. The analysis suggests that strengthening macro-control on urban expansion in Pearl River Delta to alleviate alarm of future urban expansion.

Key words: urban expansion; early warning; geospatial partition; FLUS model; cellular automata; land use change; Markov chain; Pearl River Delta

***Corresponding author:** LIU Xiaoping, E-mail: liuxp3@mail.sysu.edu.cn

摘要:城市的快速扩张不断改变着土地资源的转化,带来了诸多生态环境问题。分析和模拟城市扩张的机制,并对城市未来土地利用变化的风险进行预警,利于合理调控城市的发展。本文提出了一种基于地理分区和未来用地模拟(Future Land Use Simulation, FLUS)模型的城市扩张模拟模型,用于模拟和预测复杂的土地利用变化。该模型利用多指标数据进行空间聚类,耦合地理分区结果进行城市扩张模拟。珠江三角洲2005—2015年的城市扩张模拟结果显示,分区下的模拟精度(FoM=0.2329,提高了9%)明显高于未分区,说明不同分区在土地利用转化上存在空间差异,该模型能更有效地模拟城市土地利用变化。另外,本文构建了一种城市扩张预警指标评价体系,用于评估城市扩张的警情。根据在2005—2015基础上预测的2025—2045年土地利用变化结果,对珠江三角洲城市扩张进行多尺度预警分析。综合预警结果显示该区域大部分城市至2045年城市扩张警情将达到中警和重警,其中东莞警情一直维持在重警。由此,未来需要加强对珠三角城市扩张的宏观调控,以此来缓解未来城市扩张的警情。

关键词:城市扩张;预警;地理分区;FLUS模型;元胞自动机;土地利用变化;马尔科夫链;珠江三角洲

1 引言

快速城市化和大量农村人口往城市迁徙现象在全球大多数地区十分普遍,城市化进程的加快必然使越来越多的优质农田、森林和水体等土地资源被侵占^[1],截止到2050年世界上大约有70%的人口将居住在城市,大部分增长将发生在发展中国家^[2]。城市扩张模拟是指城市土地利用变化的定量描述和表达,其模拟结果可为土地规划管理、生态保护、土地政策评估及城市边界划定等提供科学决策依据。自上世纪以来,国内外学者一直在研究一系列土地利用建模方法来描述和预测城市的动态,已经提出了许多土地利用/覆盖变化(Land Use and Land Cover Change, LUCC)模型,如:系统动力学(System Dynamic, SD)模型^[3]、CLUE-S(Conversion of Land Use and its Effects at Small Region Extent)模型^[4-5]、马尔科夫链(Markov Chain, MC)模型^[6-7]、多智能体模型^[8-9]、元胞自动机(Cellular Automata, CA)模型^[10]等。不同的模型有其相应的功能机制,为预测模拟城市空间格局的演化提供了理论基础。在诸多LUCC模型中,CA模型因其具有整合空间和时间维度的能力,受到许多学者的青睐,已被广泛应用于城市扩张模拟研究^[11-12]。

CA模型的核心是元胞的转换规则^[13],众多学

者在CA模型上已有大量的研究。在城市土地利用变化上,目前常用的CA模型有:逻辑回归CA^[14]、'IF-THEN'-CA^[15]、神经网络(Artificial Neural-Network, ANN)CA^[11]、多准则评估(Multi-Criteria Evaluation, MCE)CA^[16]、马尔科夫(Markov)CA^[17]及随机森林(Random Forest, RF)CA^[18-19]等。逻辑回归CA是最为广泛的CA之一,它用一组空间因子的逻辑函数来表示每个元胞城市发展的全局概率,结构简单,但在模拟非线性系统时存在局限。'IF-THEN'-CA使用'IF-THEN'语句来表达转换规则,对于处理城市扩张演化的复杂性更为稳健,decision-tree-CA是典型的'IF-THEN'-CA。ANN-CA是常用的CA模型之一,在模拟城市扩张的复杂性上具有很强的能力,但神经网络训练容易出现过拟合现象。MCE-CA的核心是通过一组空间因子的加权和来估计每个元胞的发生概率,权重主观性强。Markov-CA假设土地利用变化是一个随机过程,建立土地利用转移矩阵以估计每种可能的土地利用类型组合之间的系统转移概率。RF-CA使用随机森林算法提取转换规则,集成学习策略的引入能够有效解决过拟合问题。另外,气候变化对于城市扩张有着重要影响,由刘小平等^[20]提出的未来用地模拟(Future Land Use Simulation, FLUS)模型,考虑了气候变化对城市扩张的影响,耦合SD模型和CA模

型,来对不同情景下的土地利用需求预测,其中的自适应惯性机制体现了土地利用转换的不确定性。

大部分基于CA理论构建的城市扩张模拟模型使用统一的转换规则来预测整个研究区域的土地利用变化。研究区选择共同的驱动因子,建立统一的转换规则来进行模拟和预测,未考虑空间上的异质性。考虑到不同地区的景观类型变化存在不同的转换规则,Ke等^[21]通过构建分区异步CA模型有效地模拟了城市空间的特征,杨俊等^[22]对甘井子区进行地理空间分区模拟,有效地提高了土地利用变化模拟的精度。

目前对于城市扩张预警研究相较于城市扩张模拟少。城市扩张预警是对区域城市土地利用未来变化的格局及影响进行预期评价,提前预报未来由于城市扩张而可能出现的问题。在国外,土地适宜性评估(Land Suitability Analysis, LSA)已经广泛用于对特定用途的土地进行区域适宜性的规划评估^[23];Paul Sutton^[24]利用夜间灯光影像对美国不同级别城市土地扩张进行较为全面评价。在国内,叶嘉安等^[25]利用香农熵值去判断城市扩张状况;曹雪等^[26]利用扩展的CA模型对深圳市未来土地利用进行了较为全面的预警分析;黎夏等^[27]将ANN与CA结合对非法违章用地进行预警。

综上所述,本文提出了一种基于地理分区和FLUS模型的城市扩张模拟模型,利用多指标数据进行空间聚类,通过分区模拟了珠江三角洲2005—2015年城市土地利用变化,证明了分区能有效地提高模拟精度。以10年为间断预测了珠江三角洲2025、2035及2045年的土地利用变化。另外,本文还构建了一种城市扩张预警指标评价体系用于评估城市扩张的警情,根据2025—2045年土地利用变化情况,对珠江三角洲城市扩张进行多尺度综合预警分析,评估城市扩张恶化的程度,及时进行宏观调控,为城市发展和规划提供科学参考。

2 研究区概况及数据源

2.1 研究区概况

珠江三角洲地处中国广东省南部,位于22°N—25°N之间,110°E—115°E之间,毗邻港澳,被称为中国的“南大门”。该地区行政区域总面积约为54 000 km²,城市面积约为7523 km²,总人口约为5715万。自改革开放以来,良好的自然条件加上经

济政策的扶持促使珠江三角洲的城市化进程迅速。珠江三角洲已成为中国经济最有活力的地区之一,是中国重要的经济区^[28],包括广州、深圳、珠海、东莞、中山、江门、佛山、惠州和肇庆9个市,如图1所示。珠三角快速的城市化必然促使城市用地的蔓延扩张和土地资源(耕地、林地和草地等)的减少,不合理的扩张对生态环境产生的影响愈发明显。因此,本文选择珠江三角洲进行城市扩张模拟和预警分析研究更具有代表性。

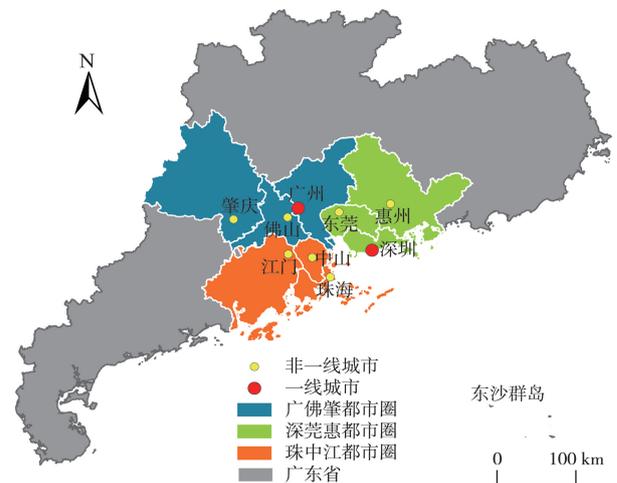


图1 珠江三角洲概况

Fig. 1 The location of Pearl River Delta

2.2 研究数据

本文城市扩张模拟的珠江三角洲2005年、2015年土地利用数据来源于中国科学院资源环境数据云平台^[29],分辨率为30 m。按照我国《城市用地分类与规划建设用地标准(GB50137-2011)》^[30]将土地利用重分类为6个类别,即耕地、林地、草地、城市、水体和未利用地,其中的水体作为限制因素。土地利用变化与自然环境、交通区位、人类活动及政策紧密相关,本文驱动土地利用变化的空间变量主要分为自然因素(DEM和坡度)、交通区位因素(距市中心、城镇中心、机场、港口、火车站、河流、高速公路、铁路及一般道路的距离)和社会经济因素(夜间灯光强度),空间变量都经过归一化,如图2所示。地理分区模型涉及的经济、人口指标有关的空间属性数据来源于广东省统计信息网^[31]及中国科学院资源环境数据云平台^[29],行政区划边界在分区过程中保持不变。生态保护区和永久基本农田数据作为在预警分析中计算指标的数据。在珠江三角洲城市扩张模拟及预警分析中,所有栅格数据的分辨率都统一为30 m,栅格范围保持一致。

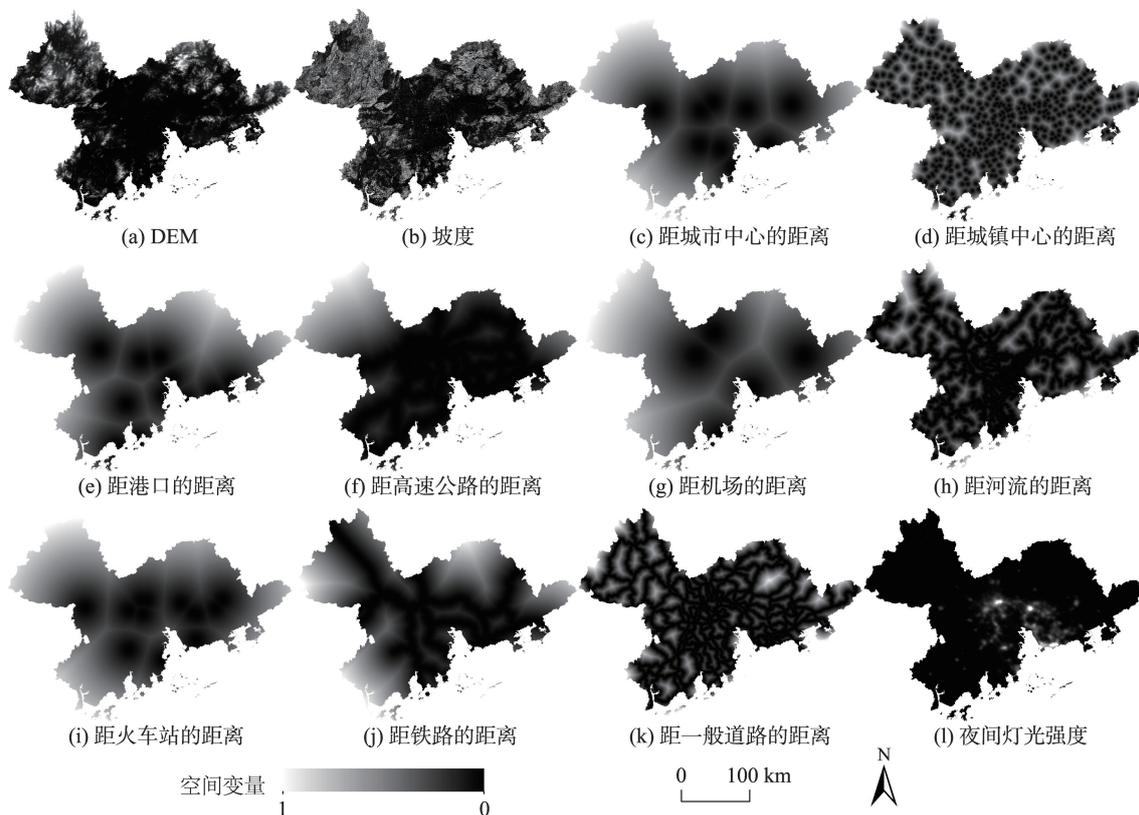


图2 珠江三角洲城市扩张模拟的空间变量

Fig. 2 Spatial variables of urban expansion simulation in Pearl River Delta

3 研究方法

由于不同地区的景观类型变化表现出空间异质性,本文选择一系列经济、人口指标数据,耦合空间坐标数据,使用K-Means聚类方法,构建基于乡镇街道单元和基于网格单元的2种地理分区模型,综合两种模型将研究区域划分为多个子区域,作为城市扩张模拟的分区基础。基于自然、区位、交通、经济等驱动因子和初始土地利用数据,使用FLUS模型进行适应性概率训练,分别得到总体及分区的元胞适应性概率。结合MC模型分别获取各分区的土地转移矩阵,预测2025、2035及2045年各土地利用类型数量,然后利用FLUS模型预测2025、2035及2045年的土地利用。根据珠三角城市土地利用格局及对生态环境影响的特征角度,构建城市扩张预警指标体系,利用层次分析法确定指标权重,分析珠三角2025—2045年城市扩张趋势,对城市扩张进行多尺度综合预警评价分析。

3.1 基于地理分区和FLUS的城市扩张模拟模型

3.1.1 地理分区模型

城市的经济水平、人口密度及自然生态环境等众多因素,使得城市景观的空间分布存在显著差

异^[22]。另外,城乡差异大、城镇化的驱动因素不同,使得对于不用地区的城市扩张法则也不一致^[21]。因此,在进行研究区城市扩张模拟时,需要考虑城市间的差异,使用不同的法则,从而改善模拟的精度。本文选择K-Means聚类方法,耦合空间数据和属性数据,分别以乡镇街道、网格为单元对珠江三角洲进行地理分区,综合2种地理分区结果,叠加行政区划边界,将研究区域划分为多个子区域。

基于乡镇街道单元的地理分区是建立在城市空间尺度下的,选择乡镇街道政府中心的坐标值作为空间数据,各乡镇街道的经济、人口等相关指标作为属性数据,具体流程如图3所示。然而,基于乡镇街道单元的地理分区中的属性数据大多来自于面状数据,对单元空间差异、空间分布及其之间的依赖关系等空间要素考虑不全面^[33]。同时,面状数据内的单元的特征信息一样,受到了行政区域的限制。以网格单元为尺度的地理分区克服了面状数据的不足,对地理空间要素的相关性、差异性 & 依赖性考虑充分,打破行政区划的限制。基于网格单元的地理分区是以栅格像元为尺度,网格中心坐标值作为空间数据,经济、人口等相关指标的栅格数据作为属性数据,具体流程如图4所示。

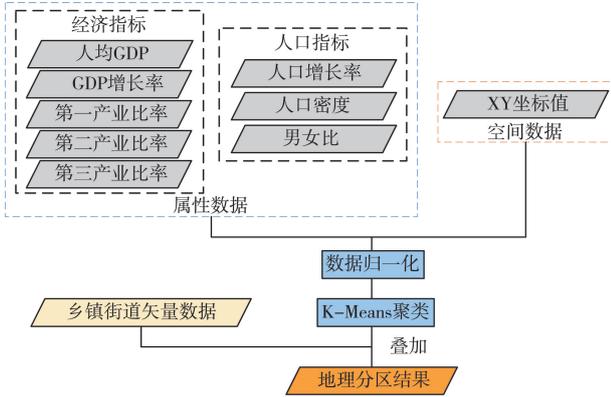


图3 基于乡镇街道单元的地理分区流程

Fig. 3 Geospatial partition based on township streets

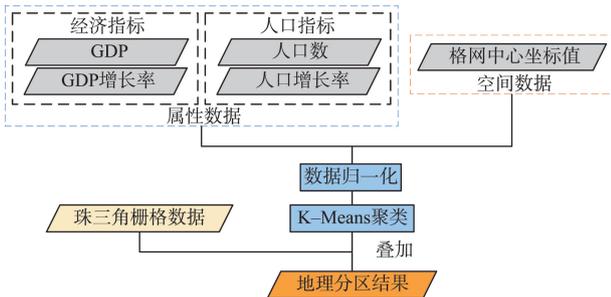


图4 基于网格单元的地理分区流程

Fig. 4 Geospatial partition based on grid

3.1.2 FLUS 模型

FLUS模型是一种基于系统动力学与元胞自动机的集成模型,由刘小平等于2017年提出,已经被广泛应用于城市土地利用变化模拟^[20]、城市增长开发边界划定^[34-35]、生态红线划定^[36]、基于全球和中国尺度的土地利用模拟^[37]、多情景下土地利用模拟等^[20,38]。

FLUS模型包含2部分:“自上而下”的SD模型和“自下而上”的CA模型^[20],其框架如图5所示。SD模型用于在研究区预测多种社会经济和自然环境等驱动因素下的未来土地需求;CA模型分为两部分:①人工神经网络耦合不同类型的驱动因子计算元胞的土地适应性概率;②FLUS模型中的自适应惯性和竞争机制解决不同土地利用类型转换时的复杂性和不确定性,其中的轮盘赌机制用于确定元胞在下一时刻是否发生用地类型的转换。CA模型结构如图6所示。

3.1.3 MC 模型

MC模型是描述一系列可能事件的随机模型,其中每个事件的概率仅取决于前一事件中获得的

状态,利于对土地利用变化中数量关系的预测。Webster最先提出将MC与CA耦合应用于城市扩张模拟,来分析探索城市扩张的时空动态变化^[7,39]。MC模型在数量预测上具有很强的能力,但是在反映空间变化上能力弱;而CA模型在空间预测上能

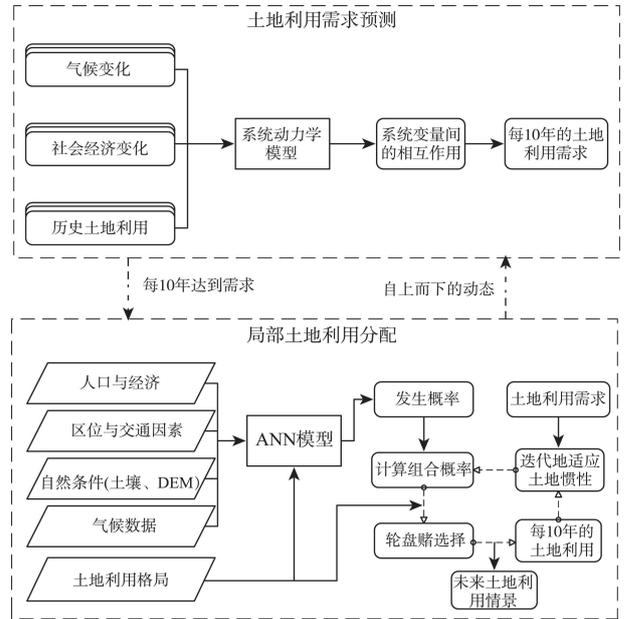


图5 FLUS模型的框架

Fig. 5 The framework of FLUS model

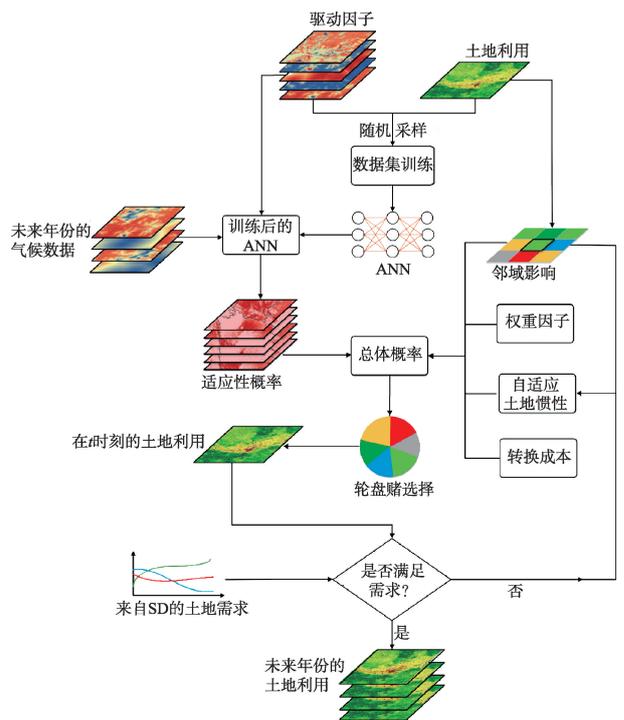


图6 FLUS模型中CA模块的结构

Fig. 6 The structure of CA model in FLUS model

力强,却在城市时空变化预测上能力弱。综合MC模型和CA模型,能充分发挥各个模型的优点,更好地进行土地利用变化模拟。

在预测土地利用变化上,先假定土地利用变化是随机的,土地利用变化的类别是马尔科夫链的状态。链在时刻 $t+1$ 的状态 N_{t+1} 仅取决于它在时刻 t 的状态 N_t ,用公式可表示为:

$$N_{t+1} = N_t \times P(i, j) \quad (1)$$

式中: $P(i, j)$ 表示在某一时间段内从状态 i 到 j 的转移概率。转移概率 $P\{N_{t+1}=j|N_t=i\}$ 可以从 k 步骤下 P_{ij}^m 期间发生的土地利用变化转移概率导出:

$$P_{ij}^m = L(i, j) / \sum_{i=1}^n n_{ij} \quad (2)$$

$$(i, j) = \sum_{k=1}^k \frac{P_{ij}^m}{kn_m} \quad (3)$$

式中: $L(i, j)$ 是从状态 i 到 j 过渡期间所观测到的土地利用变化数据; n_{ij} 是从状态 i 到 j 时间步长的年数; m 是总年数; $P(i, j)$ 是从多年的归一化转移概率导出的年转移概率。

3.1.4 精度评估指标

对城市扩张模拟的精度评价,先前的研究大多是采用总体精度(Overall Accuracy, OA)和Kappa系数来验证模拟的准确性^[11,40]。然而,许多研究认为,混淆矩阵在评估土地利用变化模拟上具有局限性,尤其是在进行大尺度土地模拟时土地利用的变化量占研究区总面积较小的情况下,难以准确评估模拟的精度。由此, Pontius 等^[41]提出使用品质因素(Figure of Merit, FoM)来评估模拟的准确性, FoM 仅取决于模拟过程变化元胞的数量,能够更好地标识模拟的精度, FoM 精度值一般较小。另外,与变化相关的生产者精度(Product's Accuracy, PA)和用户精度(User's Accuracy, UA)也被用来评价模拟的精度。

$$FoM = B / (A + B + C + D) \quad (4)$$

$$PA = B / (A + B + C) \quad (5)$$

$$UA = B / (B + C + D) \quad (6)$$

式中: A 表示观测为变化而预测为不变的误差区域; B 表示观测为变化且预测也为变化的正确区域; C 表示观测变化与预测变化不一致的误差区域; D 表示观测为不变而预测为变化的误差区域。

3.2 城市扩张预警指标体系

城市扩张预警是在城市发展过程中,对由城市

用地空间扩张而产生城市形态、强度及生态环境等方面的影响进行综合评估,需要根据区域的土地利用变化、景观格局及生态环境等进行城市扩张预警分析,及时预报城市扩张恶化或危害变化的警戒程度,并提出相应的调控政策措施^[26]。本文结合珠江三角洲的土地利用变化格局及生态保护的要求,借鉴已有文献研究^[26,42-45]的基础上,从城市用地扩张形态、生态和强度影响3个方面选取了22项指标,并分成了3个影响层和22个指标层(表1),构建了珠江三角洲城市扩张预警评价指标体系,珠江三角洲城市扩张的综合影响程度可表达为:

$$D = W_s S + W_e E + W_i I \quad (7)$$

式中: D 为城市扩张的综合影响程度; S 为城市扩张的形态影响程度; E 为城市扩张的生态影响程度; I 为城市扩张的强度影响程度; W_s, W_e, W_i 分别为形态影响、生态影响和强度影响的权重。

预警指标的权重确定是城市扩张预警分析评

表1 珠江三角洲城市扩张预警指标

Tab. 1 Early warning indicators for urban expansion in Pearl River Delta

影响层	指标层
城市扩张的形态影响	C(紧凑度)
	SHAPE_MN(城市斑块平均形状指数)
	FRAC_MN(城市斑块平均分维数)
	ENN_MN(城市斑块平均最近邻距离)
	PD(平均斑块密度)
城市扩张的生态影响	AI(聚集指数)
	SHDI(香农多样性指数)
	F_AREA_MN(林地斑块平均面积指数)
	W_AREA_MN(水体斑块平均面积指数)
	C_MNN(耕地斑块平均最近邻距离指数)
	F_MNN(林地斑块平均最近邻距离指数)
	FGW_AR(林地、草地及水体面积占比率)
	U_FGW_AR(侵占林地、草地及水体的总面积占新增城市用地的面积比率)
FGW_CR(林地、草地及水体面积变化率)	
城市扩张的强度影响	U_C_AR(侵占耕地面积占新增城市用地面积的比率)
	U_EPZ_AR(侵占生态保护区面积占新增城市用地面积的比率)
	U_PCF_AR(侵占永久基本农田占新增城市用地面积的比率)
	AREA_MN(城市斑块平均面积指数)
	PERIMETER_MN(城市斑块平均周长指数)
	UEI(城市用地扩张速率指数)
	UH_MN(城市扩张用地平均高程)
	US_MN(城市扩张用地平均坡度)

价的关键环节,权重设定的合理性直接影响着评价结果的合理性和可靠性。而层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)^[46]是由美国运筹学家 T. L. Saaty 教授于 20 世纪 70 年代提出的一种简单实用的多准则决策方法,在确定评价体系中应用十分广泛。本文对影响层和指标层中的元素进行两两比较来构建判断矩阵,选择几何平均法、算术平均法、特征向量法和最小二乘法等来对 AHP 中的权重计算,取所有计算方法的平均值作为最终权重。表 2 显示 AHP 确定的各预警指标的权重。

表 2 珠江三角洲城市扩张预警指标权重

Tab. 2 Weights of early warning indicators for urban expansion in Pearl River Delta

影响层	权重	指标层	权重		
城市扩张的形态影响	0.3	C	0.06		
		SHAPE_MN	0.15		
		FRAC_MN	0.10		
		ENN_MN	0.34		
		PD	0.28		
		AI	0.07		
城市扩张的生态影响	0.5	SHDI	0.04		
		F_AREA_MN	0.05		
		W_AREA_MN	0.04		
		C_MNN	0.10		
		F_MNN	0.09		
		FGW_AR	0.02		
		U_FGW_AR	0.13		
		FGW_CR	0.08		
		U_C_AR	0.07		
		U_EPZ_AR	0.24		
		U_PCF_AR	0.14		
		城市扩张的强度影响	0.2	AREA_MN	0.12
				PERIMETER_MN	0.21
				UEI	0.48
UH_MN	0.07				
US_MN	0.12				

预警程度的划分是对城市扩张警情情况的分级,来表征城市扩张恶化或危害变化的警戒程度。预警警度的划分方法有多种,而系统化方法是比较常用的方法之一,对于系统内部的特征考虑全面。由此,本文选择系统化方法进行预警警度划分。系统化方法的划分原则主要包括多数原则、半数原则、均数原则和众数原则。本文指标层、影响层及综合预警中有警和无警的分界值为多数原则、半数原则和均数原则分界值的平均值,确定无警区间

后,对有警区间按照自然间断法依次划分为轻警、中警和重警,并使用 1、2、3 和 4 分别代表无警、轻警、中警和重警。

4 结果与分析

4.1 珠江三角洲地理分区

本文的地理分区模型通过 Python 实现,利用 Scikit 库中的 K-Means 算法用于对珠江三角洲进行地理分区,将基于乡镇街道和网格单元的地理分区结果与行政区划边界叠加,综合得到最终的分区结果,如图 7 所示。珠江三角洲被划分为 10 个分区,其中广州城区和佛山城区在同一分区中,东莞和深圳东部被划在同一分区中,而肇庆的西北区域划分成一个分区,惠州的东南区域也划分成一个分区。

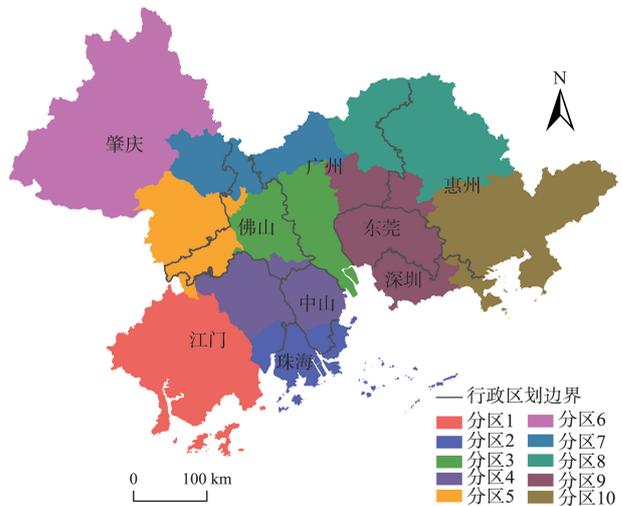


图 7 珠江三角洲地理分区结果

Fig. 7 The geospatial partition result in Pearl River Delta

4.2 城市扩张模拟结果及对比分析

根据 FLUS 模型中 ANN 模型训练得到的土地适应性概率,对邻域影响、迭代因子、土地利用类型权重值、转换矩阵及限制因素等进行设置。以 2005 年的土地利用数据作为初始年份数据,2015 年土地利用类型的元胞数量作为 FLUS 模型—自适应惯性机制模块的迭代终止条件,对珠江三角洲进行分区与不分区的城市土地利用变化模拟。然后对在分区与未分区下的城市扩张模拟精度进行对比分析,分为以分区作为参考和以未分区作为参考两种情况。以分区作为参考的对比分析是指未分区模拟结果按照分区范围进行掩膜裁剪提取,分别与珠江三角洲分区模拟结果进行精度对比。而以未分区

作为参考的对比分析则是分区模拟结果按照珠江三角洲整个区域范围进行融合镶嵌,再与珠江三角洲未分区模拟结果进行对比。图8显示分区与分区下模拟的土地利用与真实土地利用的对比效果,放大3处局部区域,发现分区下模拟的土地利用格局更近于真实的土地利用格局,未分区模拟的土地利用格局更偏离真实的土地利用格局。

2种对比分析中的模拟精度如表3所示,结果表明珠江三角洲大多分区的FoM精度均有提高,尤其是分区5和分区7的FoM精度有十分明显的提高。虽然分区6和分区9的FoM精度有下降,但其变化幅度微小。各分区的OA和Kappa系数对比变化不明显,也应证了OA和Kappa系数在评估土地模拟上存在局限。另外,珠江三角洲的FoM精度在分区下为0.2329,在未分区下为0.2127,精度提高了9%左右。因此,珠江三角洲进行地理分区下的城市扩张模拟能提高模拟精度,模拟效果

优于未分区下的城市扩张模拟。

4.3 珠江三角洲2025—2045年土地利用预测

结合珠江三角洲各分区的2005年和2015年土地利用数据,利用MC模型来计算土地转移概率矩阵。由于使用的两期土地利用的时间跨度为10年,则预测的时间跨度也为10年。各分区通过计算的转移概率矩阵来预测区域2025、2035和2045年的各土地利用类型面积(表4—表6),各分区的土地利用总量始终保持不变。

各分区按照预测的土地利用类型面积作为模拟终止迭代条件,采用FLUS模型模拟未来年份的城市土地利用变化,将各分区未来年份的土地利用进行镶嵌叠加,得到珠江三角洲未来年份的土地利用分布,图9显示了珠江三角洲2025、2035及2045年的城市土地利用。结果发现,城市用地扩张速率最快,增长的土地面积最多,而耕地、林地及水体等

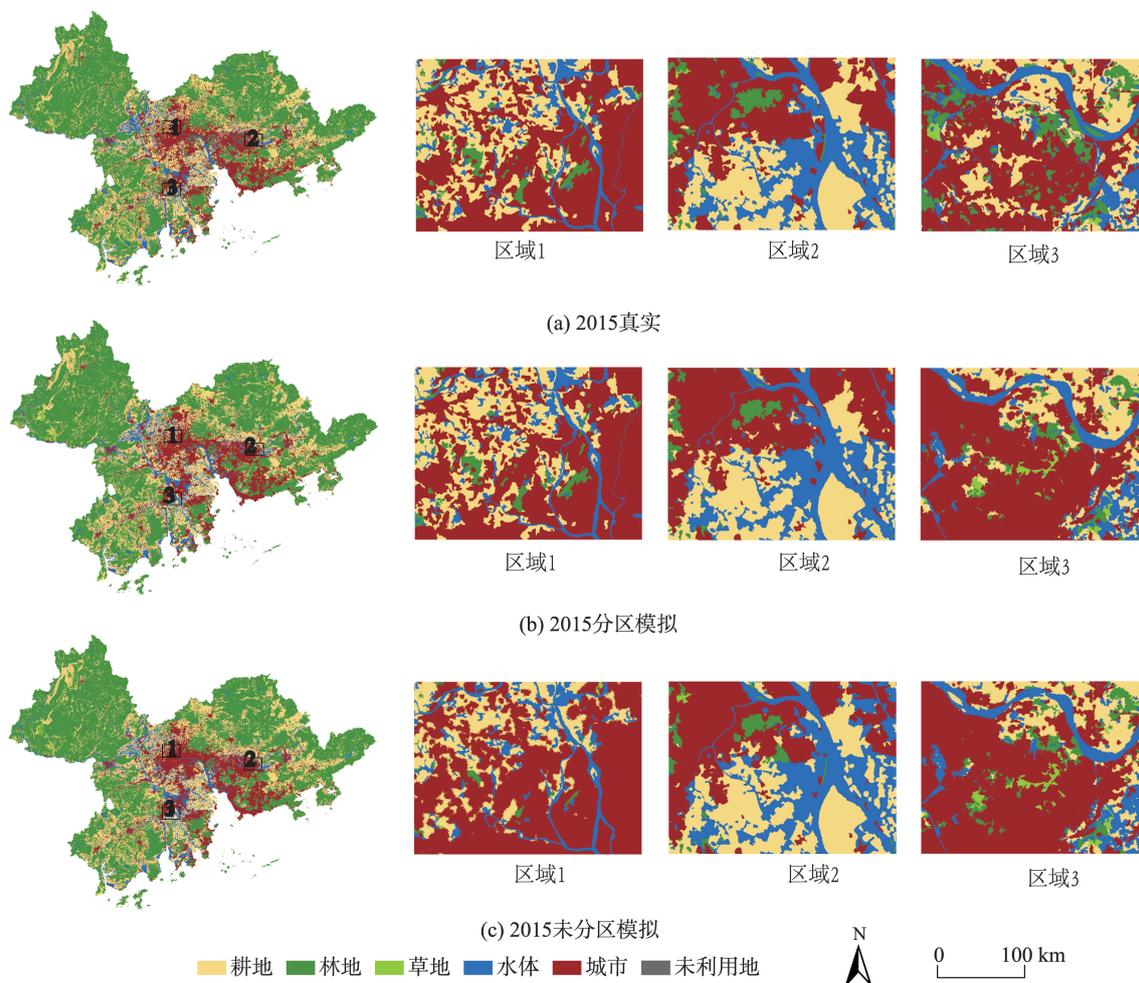


图8 珠江三角洲2015年模拟结果对比

Fig. 8 Comparison of simulation results in Pearl River Delta in 2015

表3 珠江三角洲分区和未分区下的模拟结果精度对比

Tab. 3 Accuracy comparison of simulation results under partitioned and unpartitioned scenarios in Pearl River Delta

区域	分区			未分区		
	OA/%	Kappa	FoM	OA/%	Kappa	FoM
分区1	92.81	0.8826	0.1617	93.37	0.8915	0.1466
分区2	89.68	0.8570	0.3289	88.47	0.8407	0.2625
分区3	83.17	0.7532	0.3824	79.97	0.7044	0.3466
分区4	87.82	0.8351	0.3621	88.24	0.8410	0.3231
分区5	91.76	0.8619	0.1280	90.55	0.8416	0.0899
分区6	94.43	0.8262	0.0722	95.05	0.8412	0.0735
分区7	87.40	0.8166	0.1411	88.11	0.8262	0.0858
分区8	93.65	0.8520	0.1141	94.36	0.8674	0.1011
分区9	82.37	0.7443	0.2414	82.80	0.7493	0.2505
分区10	91.07	0.8409	0.1697	91.50	0.8477	0.1430
珠江三角洲	90.04	0.8418	0.2329	90.32	0.8463	0.2127

表4 2025年珠江三角洲各土地利用类型的面积

Tab. 4 Area of land use type in Pearl River Delta in 2025

(km²)

区域	耕地	林地	草地	水体	城市	未利用地
分区1	1830.90	3387.38	282.44	455.70	441.32	0.20
分区2	584.14	792.71	17.38	301.18	500.54	0.48
分区3	1301.88	470.40	6.45	473.43	1921.88	0.95
分区4	1216.81	1142.58	45.45	556.39	992.84	0.28
分区5	856.72	2166.74	52.45	380.71	335.75	0.00
分区6	1401.23	8739.94	306.72	172.99	208.79	0.32
分区7	1054.23	1528.16	63.32	414.65	547.31	1.44
分区8	1366.78	4665.10	142.02	126.71	189.26	0.67
分区9	863.18	1678.80	74.20	407.43	2593.18	0.47
分区10	1448.89	4059.79	177.35	235.21	818.44	0.94
珠江三角洲	11 924.76	28 631.60	1167.79	3524.40	8549.33	5.74

表5 2035年珠江三角洲各土地利用类型的面积

Tab. 5 Area of land use type in Pearl River Delta in 2035

(km²)

区域	耕地	林地	草地	水体	城市	未利用地
分区1	1810.13	3318.92	304.97	483.88	479.93	0.11
分区2	552.09	770.63	19.61	297.85	555.94	0.31
分区3	1229.49	450.24	6.08	436.91	2051.36	0.91
分区4	1184.11	1116.49	44.41	526.61	1082.45	0.28
分区5	843.89	2143.37	56.27	374.93	373.90	0.00
分区6	1397.98	8679.47	347.34	173.19	231.68	0.33
分区7	988.42	1505.87	62.17	421.24	630.28	1.13
分区8	1352.80	4634.83	156.18	133.51	212.58	0.63
分区9	757.94	1623.29	67.79	402.38	2765.34	0.52
分区10	1384.17	3996.43	176.81	244.53	937.76	0.93
珠江三角洲	11 501.03	28 239.53	1241.64	3495.03	9321.22	5.15

表6 2045年珠江三角洲各土地利用类型的面积

Tab. 6 Area of land use type in Pearl River Delta in 2045

(km²)

区域	耕地	林地	草地	水体	城市	未利用地
分区1	1794.87	3256.80	323.86	510.33	511.99	0.10
分区2	527.24	751.38	21.45	293.51	602.62	0.23
分区3	1171.35	434.01	5.79	409.46	2153.51	0.87
分区4	1156.35	1093.35	43.51	503.71	1157.15	0.28
分区5	834.13	2121.45	59.40	370.11	407.29	0.00
分区6	1398.02	8626.52	381.33	173.46	250.33	0.34
分区7	939.43	1484.33	61.14	424.71	698.48	1.02
分区8	1343.34	4607.75	168.14	139.59	231.10	0.61
分区9	690.54	1580.65	63.09	397.12	2885.30	0.56
分区10	1334.29	3938.84	176.26	253.11	1037.20	0.92
珠江三角洲	11 189.56	27 895.08	1303.97	3475.12	9934.97	4.92

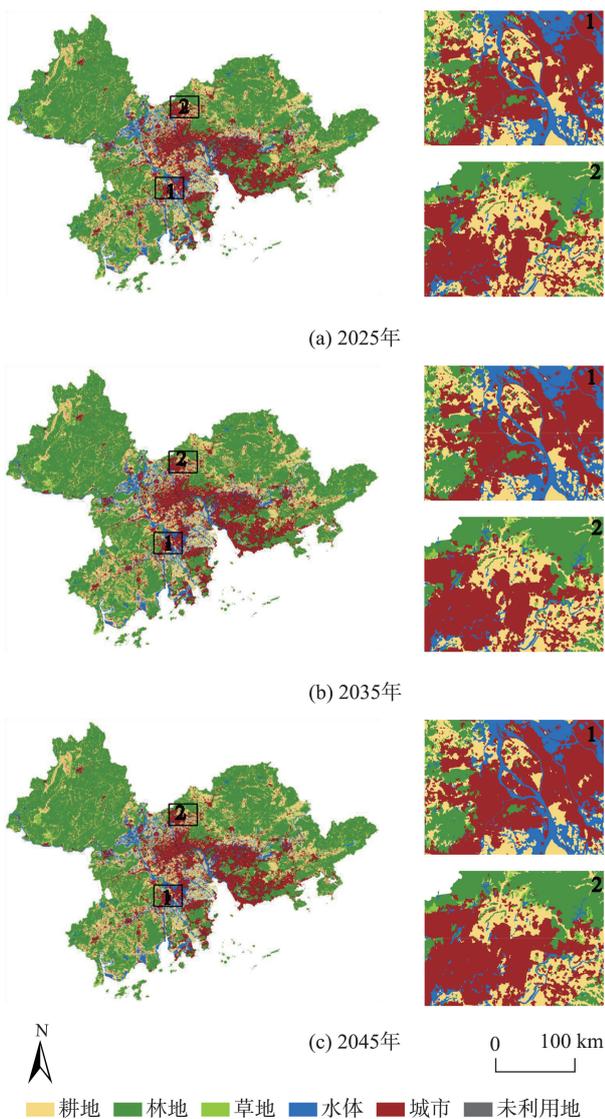


图9 2025、2035及2045年的城市扩张模拟

Fig. 9 Simulation of urban expansion for the years 2025, 2035 and 2045

土地类型的面积逐渐减少,尤其是耕地面积减少幅度最大。说明珠江三角洲城市的扩张主要以侵占耕地、林地及水体等土地资源,尤其是耕地。因此,为保证城市发展的可持续性,需要提前对城市扩张进行预警,并及时引导调控。

4.4 珠江三角洲城市扩张预警

4.4.1 基于分区尺度的城市扩张预警

以珠三角地理分区为尺度对珠江三角洲未来城市扩张进行预警分析。不同分区在2025、2035及2045年城市扩张的警情级别如表7所示。结果表明各分区从2025—2045城市扩张警级大都在增加,至2045年时所有分区的城市扩张比较严重,分区1、分区8和分区9将达到重警。

4.4.2 基于市级尺度的城市扩张预警

以珠三角各城市为尺度进行城市扩张预警,能

表7 各分区的城市扩张警级

Tab. 7 Early warning level of urban expansion in each sub-region

区域	2025年	2035年	2045年
分区1	中警	中警	重警
分区2	轻警	中警	中警
分区3	轻警	轻警	中警
分区4	轻警	轻警	中警
分区5	轻警	无警	中警
分区6	轻警	轻警	中警
分区7	轻警	中警	中警
分区8	中警	中警	重警
分区9	中警	中警	重警
分区10	无警	轻警	中警

够揭示不同城市的警情,并与分区尺度的预警结果作对比。各城市在2025、2035及2045年城市扩张的警情级别如表8所示。结果表明,珠江三角洲大部分城市未来的警级都在增加,惠州和东莞的城市扩张警级一直保持不变,惠州一直处于无警,而东莞一直处于重警。

表8 各城市的城市扩张警级

城市	2025年	2035年	2045年
广州	轻警	轻警	中警
佛山	无警	轻警	中警
肇庆	无警	无警	中警
深圳	轻警	轻警	中警
东莞	重警	重警	重警
惠州	无警	无警	无警
珠海	轻警	轻警	中警
中山	轻警	中警	中警
江门	轻警	轻警	中警

4.4.3 珠江三角洲城市扩张综合预警

对比分区尺度下的预警结果和市级尺度下的预警结果,发现不同尺度的预警结果存在差异。比如惠州在分区尺度时部分区域为中警和重警,而在市级尺度一直处于无警状态。然而,本文构建的城市扩张预警指标体系中更考虑城市扩张对生态的影响,与生态重要性高的土地资源被侵占的指标权重高。分区8由广州东北部和惠州北部区域构成,城市用地比例占比不高,但城市用地分散,破碎化程度高。从模拟的土地利用分布中发现,该区域侵占生态重要性高的土地资源比例高,U_FGW_AR、U_EPZ_AR及U_PCF_AR等指标值明显高于其他区域。另外,该区域地势高,导致UH_MN和US_MN指标值也高。由此,预警分析得到的警级值高。惠州南部区域城市用地比例较北部区域高,

破碎化程度相对低,且对生态重要性高的土地资源侵占不多,其U_FGW_AR、U_EPZ_AR、U_PCF_AR等指标值较低。南部区域的地势低于北部区域,其UH_MN和US_MN指标值低于北部区域。在市级尺度预警分析时,惠州各指标值是由整个区域计算得到,局部区域并不能反映整体区域。因此,在市级尺度下惠州处于无警是有可能的。东莞未来的城市扩张警级一直处于重警,这与东莞城市用地所占比例高密切相关,其预警指标值明显高于其他区域。

为了解决分区尺度和市级尺度预警结果的差异,本文将分区和市级预警结果进行叠加分析。新区域的预警结果由分区尺度和市级尺度下的预警值平均得到。重新进行预警级别划分后得到各区域的预警警级。图10显示了珠江三角洲叠加分析后的综合预警结果。

综合预警结果显示,珠江三角洲从2025—2045年城市扩张警情不断提高,至2045年大部分区域的警级将达到中警,部分区域甚至为重警,反映出未来珠三角城市扩张的警情程度高,对生态环境产生的威胁更大。东莞在2025—2045年城市扩张警级一直处于重警,未来东莞城市扩张的恶化程度非常严重,必须要对城市扩张进行调控。改革开放之后,经济高速发展使得东莞的土地利用发生了巨大的变化,城市建设用地比例不断升高,进而导致生态环境逐渐恶化。近些年来,东莞在调控城市扩张上已采取了相应的政策,划定生态控制线来抑制城市的盲目扩张,但未来应该更加重视对城市扩张的预警调控。除东莞外,江门大部区域、深圳大部区域及广州东部区域在2045年将达到重警,而在2025年及2035年只处于中警,提前做出预防措施能避免未来警情的加重。珠江三角洲作为快速城市化进程区域的代表,其城市的扩张会威胁着该地

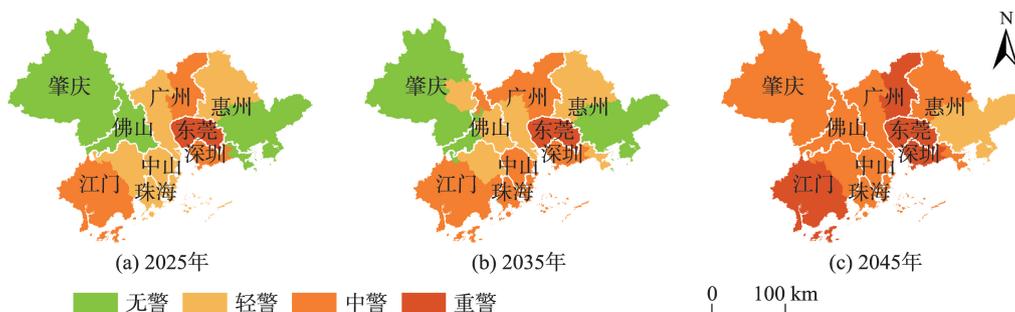


图10 2025—2045年珠江三角洲城市扩张综合预警结果

Fig. 10 Integrated early warning results of urban expansion in Pearl River Delta from 2025 to 2045

区的生态环境。为此,采取相应的预防措施是当务之急。

5 结论与讨论

本文基于地理分区模型对珠江三角洲进行分区,结合2005年和2015年土地利用,使用FLUS模型模拟预测了2025、2035及2045年土地利用,构建的城市扩张预警指标体系对该地区未来城市扩张进行了预警分析。耦合不同单元构建的地理分区模型对分区的时间和属性特征考虑完善,与传统未分区模拟相比,达到了更好的城市土地利用变化模拟效果。考虑城市扩张多方面的影响,以此构建的预警指标体系较为完善,并对珠江三角洲进行多尺度综合预警,其结果有效地反映出珠江三角洲城市扩张的警情。

珠江三角洲整体区域与分区区域的土地利用转换规则存在差异,空间异质性强。基于地理分区的土地利用变化模拟与未分区情况比较,研究区总体的FoM精度从0.2127提高到0.2329,提高了9%左右。研究表明进行地理分区能够有效提高土地利用变化的模拟精度。由于不同区域的城市运行机制差异很大,很难构建统一标准的体系结构。本文依据珠江三角洲未来年份模拟的城市土地空间格局及其城市实际发展情况,从城市扩张对城市形态、生态及强度3方面的影响构建的包含22个指标的城市预警指标体系,对珠江三角洲2025—2045年城市扩张以分区和市级尺度进行预警分析,叠加综合2种尺度的预警结果。综合预警结果显示珠江三角洲大部分区域至2045年城市扩张警情将达到中警和重警,其中东莞警情一直保持在重警。由此,在未来需要加强对珠江三角洲城市扩张的宏观调控,来缓解未来城市扩张的警情状况。

然而,本文依然存在不足。K-Means聚类方法主观性较强^[22],分区数需事先确定。基于网格单元的地理分区由于数据原因,所选择的指标较少。增加更多的指标特征去分析不同分区数下的成本函数曲线利于确定最优分区数。模拟选择的驱动因子对POI及气候环境因素考虑不足,一定程度上影响模拟精度的提高。地理分区和未分区比较的CA模型不足,本文只比较了地理分区对FLUS模型模拟精度的影响,而逻辑回归CA、RF-CA等CA模型也应考虑。虽然本文设计的预警指标比较符合实

际状况,但对于指标体系的合理性评估不足。层次分析法适合缺乏样本数据下的目标评价,但是确定指标权重时主观性较强。若设置不合理的权重会产生偏离实际的预警结果。后续可对不同区域进行更多尺度的预警分析和对比,解决样本数据缺乏的问题,寻找更为合理的城市扩张预警指标评价体系。通过指标数据进行定量分析来确定权重的客观赋权法也值得考虑。

参考文献(References):

- [1] Wei Y D, Ye X. Urbanization, urban land expansion and environmental change in China[J]. *Stochastic Environmental Research & Risk Assessment*, 2014,28(4):757-765.
- [2] Bloom D E. 7 Billion and counting[J]. *Science*, 2011,333(6042):562-569.
- [3] Han J, Hayashi Y, Cao X, et al. Application of an integrated system dynamics and cellular automata model for urban growth assessment: A case study of Shanghai, China [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2009,91(3):133-141.
- [4] Verburg P H, Soepboer W, Veldkamp A, et al. Modeling the spatial dynamics of regional land use: The CLUE-S model[J]. *Environmental Management*, 2002,30(3):391-405.
- [5] 段增强,P.H.Verburg,张凤荣,等.土地利用动态模拟模型的构建及其应用——以北京市海淀区为例[J].*地理学报*,2004,59(6):1037-1047. [Duan Z Q, P. H. Verburg, Zhang F R, et al. Construction of a land-use change simulation model and its application in Haidian district, Beijing[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004,59(6):1037-1047.]
- [6] Arsanjani J J, Helbich M, Kainz W, et al. Integration of logistic regression, Markov chain and cellular automata models to simulate urban expansion[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013,21:265-275.
- [7] 陈逸敏,李少英,黎夏,等.基于MCE-CA的东莞市紧凑城市形态模拟[J].*中山大学学报(自然科学版)*,2010,49(6):110-114. [Chen Y M, Li S Y, Li X, et al. Simulating compact urban form using cellular automata(CA) and multi-criteria evaluation: A case study in Dongguan[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2010,49(6):110-114.]
- [8] Parker D C, Manson S M, Janssen M A, et al. Multi-agent systems for the simulation of land-use and land-cover change: A review[J]. *Annals of the American Association of Geographers*, 2003,93(2):314-337.
- [9] 刘小平,黎夏,叶嘉安.基于多智能体系统的空间决策行为及土地利用格局演变的模拟[J].*中国科学(D辑:地球*

- 科学),2006,36(11):1027-1036. [Liu X P, Li X, Yeh A G. Simulation of spatial decision-making behavior and land use pattern evolution based on multi-agent system[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2006,36(11): 1027-1036.]
- [10] Li X, Chen Y, Liu X, et al. Experiences and issues of using cellular automata for assisting urban and regional planning in China[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2017,31(8):1606-1629.
- [11] Li X, Yeh A G. Neural-network-based cellular automata for simulating multiple land use changes using GIS[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2002,16(4):323-343.
- [12] 裴凤松,黎夏,刘小平,等.城市扩张驱动下植被净第一性生产力动态模拟研究——以广东省为例[J].地球信息科学学报,2015,17(4):469-477. [Pei F S, Li X, Liu X P, et al. Dynamic simulation of urban expansion and their effects on net primary productivity: Ascenario analysis of Guangdong Province in China[J]. Journal of Geo-Information Science,2015,17(4):469-477.]
- [13] Li X, Yeh A G. Knowledge discovery for geographical cellular automata[J]. Science in China Series D: Earth Sciences,2005,48(10):1758-1767.
- [14] Li X, Yang Q, Liu X. Discovering and evaluating urban signatures for simulating compact development using cellular automata[J]. Landscape and Urban Planning, 2008, 86(2):177-186.
- [15] Li X, Yeh A G. Data mining of cellular automata's transition rules[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2004,18(8):723-744.
- [16] Wu. A linguistic cellular automata simulation approach for sustainable land development in a fast growing region [J]. Computers Environment & Urban Systems, 1996,20 (6):367-387.
- [17] Fan F, Wang Y, Wang Z. Temporal and spatial change detecting (1998-2003) and predicting of land use and land cover in core corridor of Pearl River Delta (China) by using TM and ETM+ images[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2008,137(1-3):127-147.
- [18] 张大川,刘小平,姚尧,等.基于随机森林CA的东莞市多类土地利用变化模拟[J].地理与地理信息科学,2016,32 (5):29-36. [Zhang D C, Liu X P, Yao Y, et al. Simulating spatiotemporal chang of multiple land use types in Dongguan by using random forest based on cellular automata [J]. Geography and Geo-Information Science, 2016,32(5): 29-36.]
- [19] 刘鹏华,刘小平,姚尧,等.耦合约束动态地块分裂和矢量元胞自动机的城市扩张模拟[J].地理与地理信息科学, 2018,34(4):74-82. [Liu P H, Liu X P, Yao Y, et al. Urban expansion simulation by integrating constrained dynamic land parcel subdivision and vector-based cellular automata [J]. Geography and Geo-Information Science, 2018,34(4): 74-82.]
- [20] 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.
- [21] Ke X, Qi L, Zeng C. A partitioned and asynchronous cellular automata model for urban growth simulation[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2016,30(4):637-659.
- [22] Yang J, Guo A D, Li Y H, et al. Simulation of landscape spatial layout evolution in rural-urban fringe areas: A case study of Ganjingzi District[J]. Giscience & Remote Sensing, 2019,56(3):388-405.
- [23] Steiner F, Mcsherry L, Cohen J. Land suitability analysis for the upper Gila River watershed[J]. Landscape and Urban Planning, 2000,50(4):199-214.
- [24] Sutton P C. A scale-adjusted measure of "urban sprawl" using nighttime satellite imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 2003,86(3):353-369.
- [25] Yeh A G, Li X. Measurement and monitoring of urban sprawl in a rapidly growing region using entropy[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2001,67 (1):83-90.
- [26] 曹雪.基于CA的深圳市城市土地利用变化模拟及预警研究[D].南京:南京大学,2010. [Cao X. Study of simulation and early warning for urban land use change based on cellular automata in Shenzhen city[D]. Nanjing: Nanjing University, 2010.]
- [27] Li X, Lao C, Liu Y, et al. Early warning of illegal development for protected areas by integrating cellular automata with neural networks[J]. Journal of Environmental Management, 2013,130:106-116.
- [28] Yao Y, Li X, Liu X P, et al. Sensing spatial distribution of urban land use by integrating points-of-interest and Google Word2Vec model[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2017,31(4):825-848.
- [29] 中国科学院资源环境数据云平台.广东省30 m土地利用数据 [DB/OL]. <http://www.resdc.cn>,2019-04-13. [Resource and Environment Data Cloud Platform, Chinese Academy of Science. Land use data of Guangdong Province in 30m[DB/OL]. <http://www.resdc.cn>, 2019-04-13.]
- [30] 中华人民共和国住房和城乡建设部.城市用地分类与规划建设用地标准[S].2011. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of Chi-

- na. Code for classification of urban and rural land use and planning standards of development land[S].2011.]
- [31] 广东统计信息网.广东省统计年鉴(2014,2015)[DB/OL]. <http://stats.gd.gov.cn,2019-04-13>. [Guangdong Statistical Information Network.Guangdong Statistical Yearbook (2014,2015)[DB/OL]. <http://stats.gd.gov.cn,2019-04-13>.]
- [32] 黄金川,林浩曦.京津冀城市群多情景空间演化模拟[J]. 地理研究,2017,36(3):506-517. [Huang J C, Lin H X. Spatial evolution analysis and multi-scenarios simulation of Beijing- Tianjin- Hebei urban agglomeration[J]. Geographical Research, 2017,36(3):506-517.]
- [33] 杨帆,米红.一种基于网格的空间聚类方法在区域划分中的应用[J].测绘科学,2007,32(z1):66-69. [Yang F, Mi H. Application of a grid-based spatial clustering method on regional division[J]. Science of Surveying and Mapping, 2007,32(z1):66-69.]
- [34] 吴欣昕,刘小平,梁迅,等.FLUS-UGB多情景模拟的珠江三角洲城市增长边界划定[J].地球信息科学学报,2018, 20(4):532-542. [Wu X X, Liu X P, Liang X, et al. Multi-scenarios simulation of urban growth boundaries in Pearl River Delta based on FLUS-UGB[J]. Journal of Geo-Information Science, 2018,20(4):532-542.]
- [35] Liang X, Liu X P, Li D, et al. Urban growth simulation by incorporating planning policies into a CA-based future land-use simulation model[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2018,32(11):2294-2316.
- [36] Lin J Y, Li X. Large-scale ecological red line planning in urban agglomerations using a semi-automatic intelligent zoning method[J]. Sustainable Cities and Society, 2019,46(9).
- [37] Li X, Chen G Z, Liu X P, et al. A new global land-use and land-cover change product at a 1-km resolution for 2010 to 2100 based on human-environment interactions[J]. Annals of the American Association of Geographers, 2017, 107(5):1040-1059.
- [38] 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.
- [39] Wu F, Webster C J. Simulation of land development through the integration of cellular automata and multicriteria evaluation[J]. Environment and Planning B: Planning and design, 1998,25(1):103-126.
- [40] 黎夏,叶嘉安.基于神经网络的元胞自动机及模拟复杂土地利用系统[J].地理研究,2005,24(1):19-27. [Li X, Yeh A G. Cellular automata for simulating complex land use systems using neural networks[J]. Geographical Research, 2005,24(1):19-27.]
- [41] Pontius R G, Walker R, Yao-Kumah R, et al. Accuracy assessment for a simulation model of Amazonian deforestation[J]. Annals of the American Association of Geographers, 2007,97(4):677-695.
- [42] 王璇子.武汉城市圈城市土地利用安全预警机制研究[D].武汉:华中科技大学,2010. [Wang X Z. Study on the early warning mechanism of urban land use security in wuhan urban agglomeration[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010.]
- [43] 李灿,张凤荣,王枫,等.快速城镇化过程中建设用地空间安全预警分析[J].中国土地科学,2015,(6):49-56,2,97. [Li C, Zhang F R, Wang F, et al. Early warning analysis on the spatial orderliness of construction land use in the rapid urbanization process[J]. China Land Sciences, 2015, (6):49-56,2,97.]
- [44] 郑荣宝,陈美招.广州市建设用地集约利用评价与预警研究[J].土壤通报,2012,43(1):107-113. [Zheng R B, Chen M Z. Evaluation and precaution of urban land intensive use in guangzhou[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012,43(1):107-113.]
- [45] 张利,陈影,王树涛,等.滨海快速城市化地区土地生态安全评价与预警——以曹妃甸新区为例[J].应用生态学报,2015,26(8):2445-2454. [Zhang L, Chen Y, Wang S T, et al. Assessment and early warning of land ecological security in rapidly urbanizing coastal area: A case study of Caofeidian new district, Hebei, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015,26(8):2445-2454.]
- [46] 邓雪,李家铭,曾浩健,等.层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J].数学的实践与认识,2012(7):93-100. [Deng X, Li J M, Zeng H J, et al. Research on computation methods of AHP wight vector and its applications[J]. Journal of Mathematics in Practice and Theory, 2012(7): 93-100.]