

引用格式: 贺城墙, 王盼成, 曾永年. 长株潭都市圈城市空间演化情景预测及其耕地影响分析[J]. 山地学报, 2023, 41(5): 689-700.

HE Chengqiang, WANG Pancheng, ZENG Yongnian. Scenario prediction of urban spatial evolution and its impact on arable land in Chang-Zhu-Tan metropolitan region, China [J]. Mountain Research, 2023, 41(5): 689-700.

长株潭都市圈城市空间演化情景预测 及其耕地影响分析

贺城墙^{1,2}, 王盼成^{1,2}, 曾永年^{1,2*}

(1. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083; 2. 中南大学 空间信息技术与可持续发展研究中心, 长沙 410083)

摘要: 长江经济带建设是新时期中国经济社会发展的重大战略之一。城市群国土空间的合理规划与科学管理对长江经济带健康、可持续发展具有重要的意义。位居长江中游的长株潭都市圈经历了快速的城镇化过程, 城市扩展对区域资源与环境产生了深刻的影响, 但目前该区域国土空间格局及变化预测的研究不足, 城市空间扩展对耕地保护的影响尚不明确。本文基于极限学习的城市扩展元胞自动机模型, 在自然增长、规划发展、生态优先三种城市发展情景下, 模拟预测了 2030 年长株潭都市圈城市空间格局, 分析了城市空间演化对耕地面积及其空间分布的影响。研究结果表明: (1) 在自然增长、规划发展、生态优先三种城市发展情景下, 2030 年长株潭都市圈建设用地将分别达到 1295.08、1166.44、1104.78 km²。在三种城市发展情境下, 长株潭都市圈建设用地均以边缘增长为主, 向外扩展延伸, 城市一体化趋势显著; (2) 在自然增长、规划发展、生态优先三种情景下, 2030 年长株潭都市圈耕地将分别减少到 2088.30、2134.94、2199.45 km²。城市建设用地的扩展导致区域耕地面积的减少, 从粮食安全与可持续发展的角度, 生态优先的发展模式是未来长株潭都市圈优选的发展模式。研究结论可为长株潭都市圈城市空间规划与管理提供科学依据, 为长江经济带城市生态安全和可持续发展提供参考。

关键词: 城市空间演化; 情景模拟; 耕地变化; 长株潭都市圈

中图分类号: F291.1; F205

文献标志码: A

长江经济带建设是新时期中国经济社会发展的重大战略之一^[1], 其中城市群建设与发展是长江经济带建设的核心。开展城市群时空演化及其环境影响研究, 对于长江经济带城市群国土空间的合理规划与科学管理, 对长江经济带健康、可持续发展具有重要的意义^[1-3]。长株潭都市圈是长江中游城市群的重要组成部分, 地理优势显著、社会经济发展潜力大, 是长江经济带建设的关键节点, 也是中部经济的增长极、国家资源节约型、环境友好型社会建设的试验区^[4]。然而, 随着城市化进程的快速推进, 城市

国土空间的扩展带来一系列的资源与环境问题, 并对粮食安全产生一定的影响^[5-6]。深入探讨长株潭都市圈国土空间未来时空演化及其对耕地变化的影响, 对长株潭都市圈国土空间的科学规划与管理、健康发展、优质耕地的保护与城市可持续发展具有重要的意义。

长江中游城市群的发展存在土地利用效率与环境影响等诸多问题。有学者研究了长江中游城市群建设用地利用效率^[7]、生态福利绩效与驱动机制等^[8], 分析了土地利用时空格局演化与驱动因

收稿日期(Received date): 2023-03-26; 改回日期(Accepted date): 2023-09-20

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(42171364) [National Natural Science Foundation of China (42171364)]

作者简介(Biography): 贺城墙(1996-), 男, 湖南娄底人, 硕士研究生, 主要研究方向: 城市及区域环境模拟与 GIS 应用。[HE Chengqiang (1996-), male, born in Loudi, Hunan province, M. Sc. candidate, research on environmental modeling and GIS application] E-mail: 778978421@qq.com

* 通讯作者(Corresponding author): 曾永年(1959-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 遥感与地理信息系统及其环境变化。[ZENG Yongnian (1959-), male, Ph. D., professor, research on remote sensing and GIS application in environment] E-mail: ynzeng@csu.edu.cn

素^[9],进一步分析了长江中游经济带城镇建设用地扩张、功能转型与协调发展等问题^[10-12],探讨了城市群城镇化与生态环境的耦合关系^[13]。

长株潭都市圈是长江中游城市群的重要组成部分,有学者基于遥感、地学图谱分析,研究了长株潭都市圈土地利用/覆盖变化及驱动因素^[14-15]、城市建设用地扩张时空特征^[16-17]、驱动机制与经济效益^[18-19]等问题,模拟预测了未来长株潭都市圈建设用地需求总量^[20]、生态空间演变^[21]以及城市化导致的农业用地损失^[22]。但已有研究主要分析了长株潭都市圈土地利用变化及其影响因素,对未来建设用地的变化仅是总量预测,对国土空间格局及时空变化的预测研究不足,未来城市空间扩展对耕地保护的影响尚不明确。

城市空间格局变化预测能够为城市土地利用的优化配置、国土空间规划与管理提供决策依据。基于元胞自动机的区域及城市扩展模拟能够显性表达土地利用空间格局动态变化过程^[23-25],在区域土地利用变化、城市扩展研究中得到广泛应用^[25-32]。本文采用具有良好泛化性能的极限学习机城市扩展元胞自动机模型,利用长株潭都市圈历年遥感土地利用分类数据、专题地图数据和社会经济统计数据作为模拟的基础数据,设计城市未来发展的不同情境,模拟预测长株潭都市圈时空变化,分析城市扩张对耕地变化的影响,为长株潭都市圈规划与管理、城市可持续发展提供决策支持。

1 研究区及数据

1.1 研究区概况

长株潭都市圈是长江中游城市群的重要组成部分,是国家资源节约、环境友好型社会建设综合配套改革试验区^[4,14]。地理位置处于湖南的东北部,区域内湘江贯穿全境。本文以长株潭都市圈核心区为研究区域,包括长沙市六区一县(芙蓉区、岳麓区、天心区、开福区、雨花区、望城区、长沙县)、湘潭市和株洲市区及周边部分区域,经纬度范围为 $110^{\circ}53' \sim 114^{\circ}00'E$ 、 $27^{\circ}38' \sim 29^{\circ}00'N$,总面积约为 5900 km^2 (图1)。

1.2 数据来源

城市扩展模型的构建、验证、模拟均基于过去土地利用/覆盖及其变化的数据,为此选用研究区云量符合要求且质量较好的2005、2010、2013、2015年

LandsatTM 遥感影像,采用基于支持向量机的遥感分类方法获得了长株潭都市圈多时相的土地利用/覆盖数据,该数据土地利用/覆盖类型包括建设用地、水田、旱地、水浇地、林地、草地、水体、未利用地、其他用地九类。遥感影像分类精度80%以上,满足城市扩展模拟预测的要求。其中,2005、2010年土地利用/覆盖数据用于的城市扩展模型的建模、模型精度的检验,2015年土地利用/覆盖数据用于城市扩展元胞自动机模型测试与精度分析,以便为2030年城市扩展模拟预测提供符合精度要求的模型。另外,2005、2010、2013、2015年土地利用/覆盖数据用于分析过去土地利用变化,为自然增长情境的土地利用需求预测提供基础。

城市空间模拟模型中,用于模拟城市扩展的驱动因子来自研究区专题地图数据及社会经济统计数据,详见表1。

1.3 数据处理

自然与社会经济因素是构建城市扩展模型的基础,已有研究^[24-26]表明,影响城市扩展的自然与社会因素有地形、交通以及各社会经济因素。参考长株潭都市圈土地利用/覆盖变化驱动因素研究^[14]以及城市扩展模拟相关研究^[24-25,33,35],选择城市建设用地距各级道路(铁路、高速、国道、省道、市区干道、城市支路、大车路、县乡道)、桥梁、水域的距离,城市化率、城市绿地、坡度、房价、休闲娱乐、工作便利、固定资产投资、生活服务等自然与社会经济要素,作为模拟城市空间扩展的驱动因素。

距各级道路、水域的距离是利用道路、水域等矢量数据,采用 ArcGIS 10.2 空间分析模块中的欧几里得距离计算工具获得;城市化率、人均收入、人口密度等社会经济数据,以区(县)行政区为单位将社会经济数据作为属性数据添加到各县区的矢量数据属性表中,然后利用 ARCGIS 10.2 中的数据处理模块将其转换为栅格数据。

本研究中的自然地理数据、社会统计数据(城市化率、固定资产投资、房价等)和交通数据的性质、量纲各不相同,不具有可比性。因此,对计算获得的驱动因子数据进行了归一化处理,作为模型的输入数据集。

2 研究方法

2.1 城市扩展情景设计

城市未来发展情境是基于现状与合理假设,设

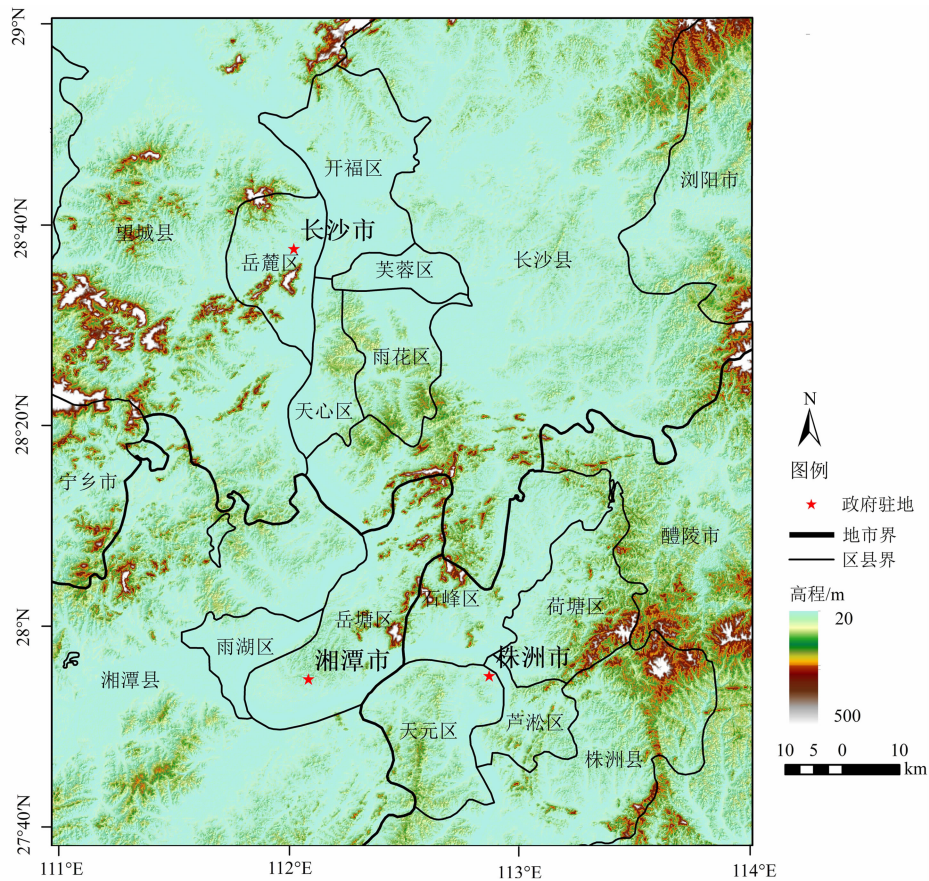


图1 长株潭都市圈核心区

Fig. 1 Core area of the Chang-Zhu-Tan metropolitan region of China

表1 数据及其来源

Tab. 1 Data and its sources

| 数据类型 | 数据名称 | 数据来源 |
|--------|-------------------------|---|
| 格数据 | 高程数据 | 中国地理空间数据云、中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站 |
| 矢量数据 | 交通道路信息 | 湖南省城市电子地图、国家基础地理信息中心 |
| 社会经济数据 | 人口密度、城市化率、人均 GDP、社会固定资产 | 湖南省统计年鉴、长沙市统计年鉴、湘潭市统计年鉴、株洲市统计年鉴,《长株潭城市群区域规划规划(2008—2020)》《长株潭城市群生态绿心地区总体规划(2010—2030)》《长株潭城市群国土空间规划(2020—2035)》 |

注:栅格数据分辨率为 30 m × 30 m。

计未来城市发展的状况,为城市空间发展预测、以及在此基础上的城市发展规划制定、城市空间的科学管理提供科学的参考。基于不同的假设,可设计若干发展情境。在考虑不受政府影响、规划干预、生态保护的三种假设前提下,设计了城市发展情境,并确定不同发展情境下 2030 年研究区城市发展的用地规模。

(1)自然增长情景:遵循自然发展规律的前提

下,不加入任何干预与引导措施,不改变城市建设用地历史转移概率的城市自然增长过程。也就是在不受政府决策等因素影响下,按现有土地利用及其变化规律的城市用地发展模式,是其他发展情境的比较基准。基于 2005—2015 年土地利用数据,以及城市建设用地历史增加趋势,基于灰色 - 马尔可夫模型预测出自然增长情景下 2030 年研究区城市建设用地的总体需求量。

(2) 规划发展情景: 突出政策与规划的影响, 体现政府行为对城市空间扩展的影响情境。为考虑政府行为对未来城市发展的影响, 在参考长株潭都市圈各类规划(如:《长株潭城市群区域规划(2008—2020)》《长株潭城市群生态绿心地区总体规划(2010—2030)》《长株潭城市群国土空间规划(2020—2035)》)的基础上, 综合分析各类规划的建设用地需求量, 确定规划发展情景下 2030 年研究区城市建设用地的总体需求量。

(3) 生态优先情景: 依据可持续发展理念和长株潭“两型社会”建设发展目标, 以生态保护优先的城市发展情境。该发展情境符合绿色发展和可持续发展战略, 基于未来土地利用自然增长情境下的用地需求量, 通过限制草地、林地、耕地等生态用地向建设用地的转换, 控制城市用地的转化量, 预测生态优先情景下 2030 年研究区城市建设用地的总体需求量。

2.2 城市扩展模拟方法

极限学习机是一种简单有效的单隐层前馈神经网络学习算法, 能逼近复杂的非线性函数, 具有泛化性能好、学习速度快等特点。由于城市建设用地变化属于不规则、非线性的过程^[34-35], 所以采用极限学习机能更为科学、合理地挖掘城市建设用地变化的潜力。本文采用基于极限学习机的城市扩展元胞自动机模型^[35]进行城市扩展模拟。

极限学习机城市扩展元胞自动机模型获取非城市用地转换为城市用地元胞的转换概率 P 由元胞潜在的城市转换概率、元胞邻域以及随机因素的影响。因此, 城市用地元胞的转换概率 P 表示为:

$$P = P_E \times P_N \times P_R \quad (1)$$

式中, P_E 为各类非城市用地元胞转化为城市用地的潜力; P_N 为邻域元胞对中心元胞的城市转化的影响; P_R 为实际元胞转化过程中随机因素对转换结果的影响, 这里 P_R 取 0 ~ 1 范围内的随机值。

采用极限学习机城市扩展元胞自动机模型模拟城市扩展的具体流程为: (1) 基于 T_1 和 T_2 两个不同时相的土地利用遥感分类图所获得的研究区建设用地变化图, 以及土地利用变化驱动因子图层, 采集构建模型的训练数据集; (2) 模型训练与验证; (3) 基于训练好的模型逐元胞计算建设用地转换概率, 确定扩展为建设用地的元胞; (4) 基于目标年建设用地总量判断预测的建设用地量是否达到预测用地

量, 反复迭代直至满足要求, 最后输出目标年建设用地空间分布与格局。

为测试模型的精度, 以 2005 年建设用地数据为基期数据, 模拟 2015 年建设用地空间格局。然后, 以 2015 年建设用地数据为基期数据, 预测 2030 年长株潭城市建设用地空间格局。

2.3 模型验证

(1) 模型泛化性能分析

利用验证样本预测的城市转换概率绘制的预测模型的 ROC (Receive Operating Characteristic) 曲线能综合体现模型的泛化性能。由 ROC 曲线得到的 AUC (Area Under Curve) 指标能够衡量模型的泛化能力。本研究中利用验证样本数据得到 ROC 曲线如图 2 所示, 对应的 AUC 值为 0.9097, 说明构建的极限学习机城市扩展元胞自动机模型具有良好的泛化性能。

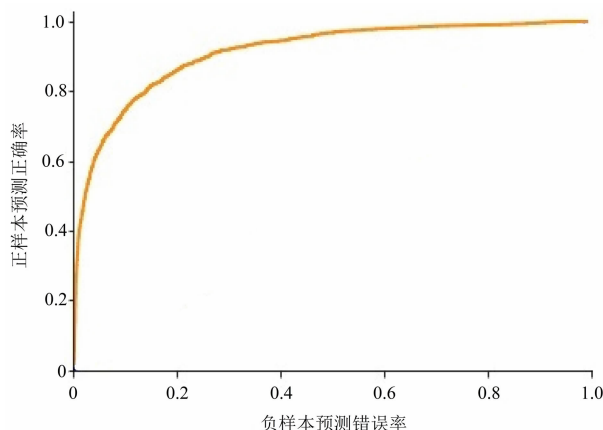


图 2 预测模型的 ROC 曲线

Fig. 2 ROC curve of prediction model

(2) 模型精度验证

以 2010 年长株潭都市圈建设用地数据为基期数据, 利用极限学习机城市扩展元胞自动机模型模拟 2015 年长株潭城市建设用地空间格局。对比模拟结果与实际的建设用地验证模型的预测精度与效果。根据模拟结果与实际像元的差异, 采用总体精度、Kappa 系数、FoM 系数定量的评价预测模型的精度与可靠性。

2015 长株潭都市圈建设用地的模拟结果与实际情况匹配性较高 (图 3), 模拟结果与长株潭都市圈外围轮廓基本吻合, 城区内部结构也基本一致。以 2015 年城市建设用地模拟结果与实际建设用地

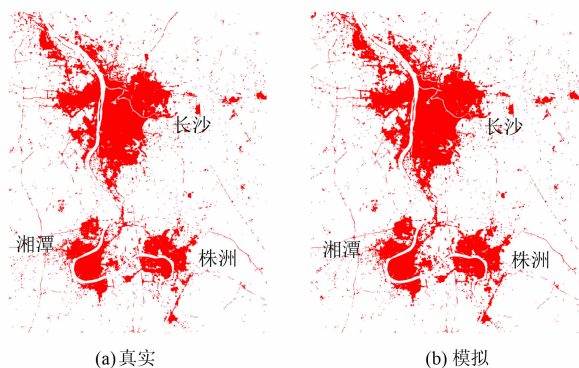


图3 2015年城市建设用地空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of urban construction land in 2015

的混淆矩阵进行了模拟精度的评价,模拟的总体精度、查准率、查全率分别为 0.923、0.750、0.751, Kappa 系数和FoM 系数分别为 0.722 和 0.578,模拟精度评价表明,构建的城市扩展元胞自动机模型的可靠性较高。

3 结果和分析

3.1 多情景城市群扩展预测

(1)自然增长情景下,2030 年长株潭都市圈建设用地增加到 1295.08 km²。其中,长沙市、湘潭市、株洲市建设用地分别增加到 821.75、267.49、205.88 km²。长株潭都市圈城市扩展的主要区域位于长沙市区,建设用地扩展呈现显著的空间差异性(图 4、5,表 2、3、4)。

2010—2030 年城市扩展导致建设用地增加 597.54 km²。其中,2015—2030 年城市扩展导致建设用地增加 413.07 km²,2020—2030 年城市扩展导致建设用地增加 276.95 km²。长株潭都市圈建设用地的扩展整体上沿 2010 年建成区以边缘增长为主的模式向外扩展,各城市扩展程度及空间格局存在差异,长沙、株洲、湘潭三市呈现相向发展的融城

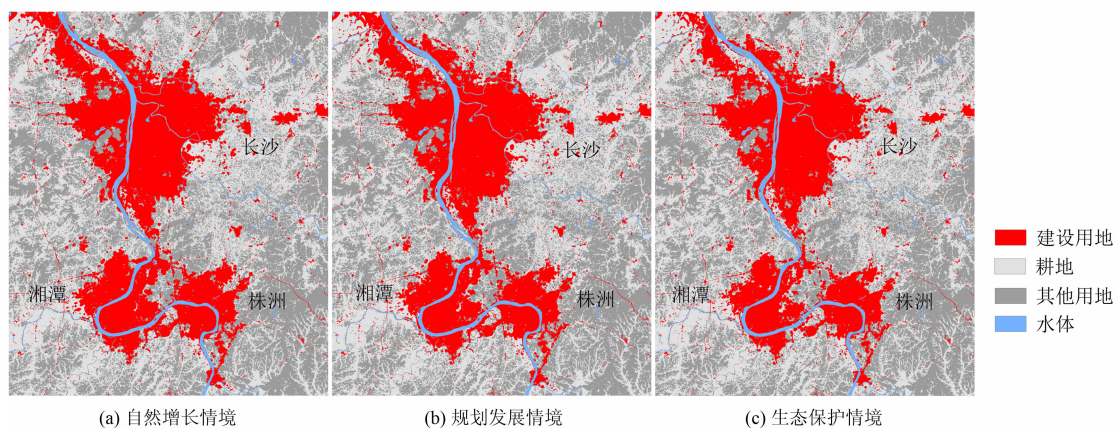


图4 2030 长株潭都市圈城市建设用地预测结果

Fig. 4 Prediction of urban construction land in the Chang-Zhu-Tan metropolitan region in 2030

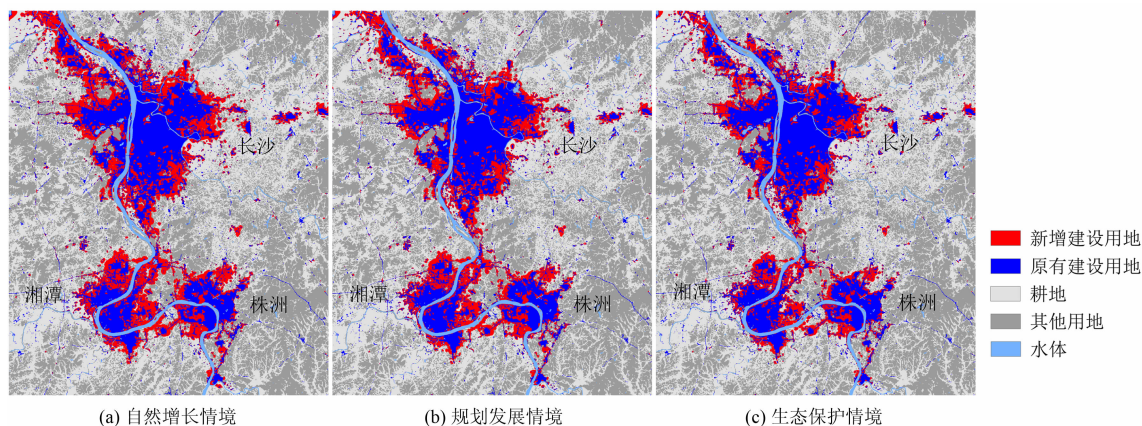


图5 2010—2030 长株潭都市圈城市扩展

Fig. 5 Prediction of urban expansion in Chang-Zhu-Tan metropolitan region from 2010 to 2030

表 2 2030 年长沙市各区县建设用地、耕地量预测结果

Tab. 2 Prediction of construction and arable land in counties of Changsha city in 2030

| 区县名称 | 建设用地面积/km ² | | | 耕地面积/km ² | | |
|------|------------------------|--------|--------|----------------------|--------|--------|
| | 自然增长 | 规划发展 | 生态优先 | 自然增长 | 规划发展 | 生态优先 |
| 芙蓉区 | 45.67 | 45.62 | 45.57 | 0.41 | 0.46 | 0.50 |
| 岳麓区 | 90.46 | 89.45 | 87.06 | 1.47 | 1.74 | 2.38 |
| 天心区 | 59.97 | 57.71 | 54.82 | 2.69 | 4.11 | 6.19 |
| 开福区 | 98.15 | 95.34 | 91.60 | 34.17 | 36.38 | 39.48 |
| 雨花区 | 102.06 | 100.79 | 98.85 | 5.63 | 6.29 | 7.28 |
| 望城区 | 224.51 | 180.93 | 168.25 | 364.90 | 377.29 | 394.30 |
| 长沙县 | 200.93 | 163.02 | 155.06 | 593.86 | 605.03 | 618.71 |

表 3 2030 年株洲市各区县建设用地、耕地量预测结果

Tab. 3 Prediction of construction and arable land in counties of Zhuzhou city in 2030

| 区县名称 | 建设用地面积/km ² | | | 耕地面积/km ² | | |
|------|------------------------|-------|-------|----------------------|--------|--------|
| | 自然增长 | 规划发展 | 生态优先 | 自然增长 | 规划发展 | 生态优先 |
| 天元区 | 54.15 | 51.78 | 47.53 | 49.85 | 51.65 | 54.95 |
| 芦淞区 | 21.71 | 21.20 | 19.65 | 12.92 | 13.35 | 15.18 |
| 荷塘区 | 39.18 | 37.54 | 35.14 | 39.39 | 41.13 | 43.20 |
| 石峰区 | 76.28 | 72.51 | 68.24 | 43.30 | 45.51 | 48.52 |
| 株洲县 | 14.56 | 13.70 | 12.67 | 107.20 | 108.46 | 109.35 |

表 4 2030 年湘潭市各区县建设用地、耕地量预测结果

Tab. 4 Prediction of construction and arable land in counties of Zhuzhou city in 2030

| 区县名称 | 建设用地面积/km ² | | | 耕地面积/km ² | | |
|------|------------------------|--------|--------|----------------------|--------|--------|
| | 自然增长 | 规划发展 | 生态优先 | 自然增长 | 规划发展 | 生态优先 |
| 岳塘区 | 127.04 | 105.16 | 100.81 | 23.51 | 25.65 | 32.21 |
| 雨湖区 | 45.27 | 43.33 | 40.44 | 14.46 | 16.93 | 19.49 |
| 湘潭县 | 95.18 | 88.36 | 79.07 | 451.87 | 458.29 | 466.06 |

态势。到 2030 长沙市城市扩展重点区域位于城市东部的空港经济区,城市北部望城区沿湘江区域,西部高新技术产业园;湘潭市城市扩展重点区域位于东部和北部区域;株洲市城市扩展重点区域位于西部和北部区域(图 5)。

(2) 规划发展情景下,2030 年长株潭都市圈建设用地增加到 1166.44 km²。其中,长沙市、湘潭市、株洲市建设用地分别增加到 732.86、236.85、196.73 km²。2030 年长株潭都市圈城市扩展的主要区域位于长沙市区,建设用地扩展的空间差异性显著(图 4、5,表 2、3、4)。在规划发展情境下,长株潭都市圈城市扩展总体规模与程度小于自然增长情景(图 4)。

2010—2030 年城市扩展导致建设用地增加

535.25 km²。其中,2015—2030 年城市扩展导致建设用地增加 350.81 km²,2020—2030 年城市扩展导致建设用地增加 246.63 km²。空间格局上,长株潭都市圈建设用地 2010—2030 年变化总体上以边缘增长为主的模式向外扩展,长沙、株洲、湘潭三市相向发展的融城趋势较为明显。到 2030 年长沙市城市扩展的重点区域是位于东部的空港经济区和西部高新技术产业园;湘潭市城市扩展重点区域集中在西北部 and 湘江沿岸区域和东部与株洲市的结合部;株洲市城市扩展重点区域集中在西南部和北部区域(图 5)。

(3) 生态优先情景下,2030 年长株潭都市圈建设用地增加到 1104.78 km²。其中,长沙市、湘潭市、株洲市建设用地分别增加到 701.23、220.32、

183.23 km²。城市扩展的主要区域位于长沙市区(图4、5),2030年长株潭都市圈各区县建设用地如表2、3、4所示,建设用地扩展的空间差异性显著。与前两种情景相比,生态优先情景下长株潭都市圈建设用地空间扩展总量明显下降(图4)。

2010—2030年城市扩展导致建设用地增加448.16 km²。其中,2015—2030年城市扩展导致建设用地增加263.72 km²,2020—2030年城市扩展导致建设用地增加191.69 km²。空间格局上,2010—2030年城市群扩展空间格局变化预测结果如图5所示,城市建设用地扩展强度较其他情景有所减弱,城市群扩展以边缘增长与填充式扩展为主。到2030年,长沙市城市扩展重点区域明显集中于东部和西北部,西部高新技术产业园区以填充式扩展为主。湘潭市城市扩展在东部和北部区域较为明显。株洲市城市扩展的重点区域在南部和北部。

对比分析表明,生态优先情景有效制衡了城市空间的无序扩张,同时也提高了城市内部结构的紧凑度,有效解决城市空间扩展与生态环境保护的

矛盾。

3.2 城市群建设用地扩展对耕地的影响

耕地资源是区域粮食安全与农业可持续发展的基本保障。近年来随着工业化、城市化进程的不断加快,耕地资源日益受到来自工业及城市扩张用地的竞争,加之自然灾害、农业结构调整、生态退耕、环境污染、资源不合理的利用等因素的影响,使得耕地的数量和质量逐年下降。因此,全面落实科学的发展观,系统、科学地进行耕地资源保护、管理及高效利用,已成为当前国土空间规划工作的重要内容。长株潭都市圈比邻洞庭湖粮食主产区,承担着国家商品粮输出的重任。因此,分析未来城市扩展造成的耕地变化对基本农田的保护,国土空间的科学管理与规划具有重要意义。在三种不同情景下,由于城市扩展导致的未来耕地的时空变化如图6、7所示。

(1)自然增长情景下,2030年长株潭都市圈耕地减少到2088.30 km²。其中,长沙市、湘潭市、株洲市耕地分别减少到1003.13、489.84、252.66 km²,

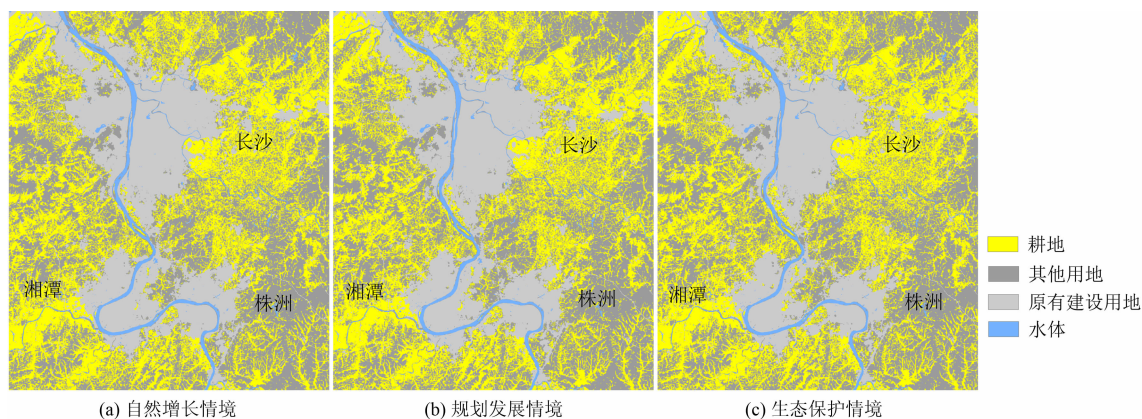


图6 2030年长株潭都市圈耕地分布预测结果

Fig. 6 Prediction of arable land in the Chang-Zhu-Tan metropolitan region in 2030

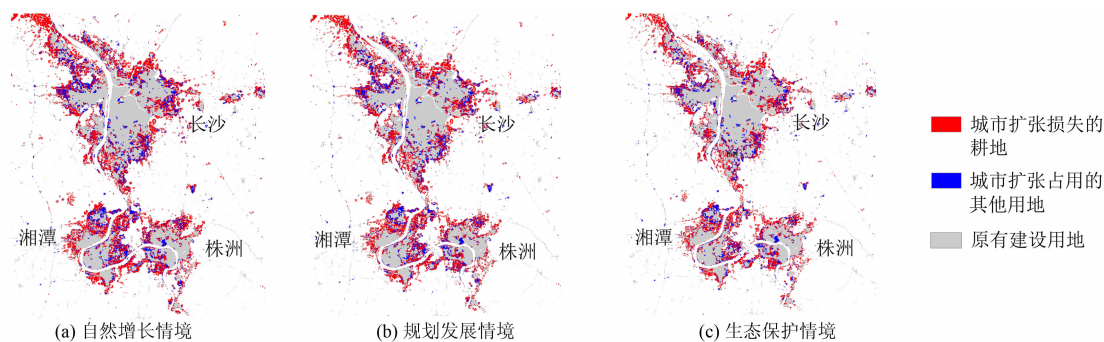


图7 2010—2030年长株潭都市圈耕地变化

Fig. 7 Arable land changes in the Chang-Zhu-Tan metropolitan region from 2010 to 2030

分别占长株潭都市圈耕地面积的 48.06%、23.46%、12.10%，长沙市耕地面积位于长株潭都市圈之首(图 6)。自然增长情景下，2030 年长株潭都市圈各区县耕地呈现显著空间差异性(表 2、3、4)。长沙市耕地主要分布于老城区周边的望城区和长沙县，湘潭市、株洲市耕地主要分布于湘潭县、株洲县。

2010—2030 年，在自然增长情景下城市扩展导致耕地减少 423.30 km²，耕地减少面积占城市扩展面积的 70.84%。说明在自然增长情境下，城市扩展是导致耕地减少的主要因素。2015—2030 年城市扩展导致耕地减少 308.99 km²，占城市扩展面积的 70.80%；2020—2030 年城市扩展导致耕地减少 206.12 km²，占城市扩展面积的 74.42%，不同时期城市扩展均是导致耕地减少的主要因素。耕地变化显著的区域位于长株潭都市圈未来城市发展的重点区域，如：长沙市区北部沿湘江区域、西部高新技术产业园、东部空港经济区域，湘潭市区东南部区域、西部的九华工业区，以及株洲市区西部区域(图 7)。

(2) 规划发展情景下，2030 年长株潭都市圈耕地减少到 2134.94 km²。其中，长沙市、湘潭市、株洲市耕地分别减少到 1031.30、500.87、260.10 km²，分别占长株潭都市圈耕地面积的 48.31%、23.46%、12.18%，长沙市耕地面积位于长株潭都市圈之首(图 6)。规划发展情景下，2030 年长株潭都市圈各区县耕地呈现显著空间差异性(表 2、3、4)，长沙市耕地主要分布于老城区周边的望城区和长沙县，湘潭市、株洲市耕地主要分布于湘潭县、株洲县。

2010—2030 年，由于城市扩展导致耕地减少 376.66 km²，占城市扩展面积的 70.37%。相对于自然增长情境，在规划发展情境下城市扩展导致的耕地减少规模与占城市扩展面积的比例均有所下降，但城市扩展仍然是导致长株潭都市圈耕地减少的主要因素。其中，2015—2030 年城市扩展导致耕地减少 262.35 km²，占城市扩展面积的 74.78%；2020—2030 年城市扩展导致耕地减少 183.85 km²，占城市扩展面积的 74.55%，不同时期长株潭都市圈城市扩展是导致耕地减少的主要因素。受土地利用规划的控制，耕地变化相对于自然增长情境有一定的减缓。耕地变化主要区域位于长株潭都市圈未来城市发展的重点区域，如：长沙市区东部的空港经济区、西北部沿湘江地带，株洲市区南部的工业园区，湘潭市东部和北部由于长株潭融城导致耕地占用区

域(图 7)。

(3) 生态优先情景下，2030 年长株潭都市圈耕地减少到 2199.45 km²。其中，长沙市、湘潭市、株洲市耕地分别减少到 1068.84、517.76、270.20 km²，分别占长株潭都市圈耕地面积的 48.60%、23.54%、12.28%，长沙市耕地面积位于长株潭都市圈之首(图 6)。生态优先情景下，2030 年长株潭都市圈各区县耕地呈现显著空间差异性(表 2、3、4)，长沙市耕地主要分布于老城区周边的望城区和长沙县，湘潭市、株洲市耕地主要分布于湘潭县、株洲县。

2010—2030 年，由于城市扩展导致耕地减少 312.13 km²，占城市扩展面积的 69.65%。相对于自然增长情境、规划发展情境，在生态优先情景下城市扩展导致的耕地减少规模与比例均有所下降，然而城市扩展仍然是导致未来长株潭都市圈耕地减少的主要因素。2015—2030 年城市扩展导致耕地减少 197.82 km²，占城市扩展面积的 75.01%，2020—2030 年城市扩展导致耕地减少 143.38 km²，占城市扩展面积的 74.80%，不同时期长株潭都市圈城市扩展是导致耕地减少的主要因素。在生态优先情景下，耕地总量减少的幅度小于自然增长与规划发展情景，耕地得到有效保护。耕地损失较大的区域主要位于长沙市区的西部和北部，以及西部高新产业园区。湘潭市区东部和株洲市西北部(图 7)。

4 结论与讨论

4.1 结论

利用基于极限学习机的城市扩展元胞自动机模型，在自然增长、规划发展、生态优先三种城市发展情景下，模拟预测了 2030 年长株潭都市圈城市空间扩展，分析了城市空间扩展及对耕地的影响。研究表明：

(1) 在自然增长、规划发展、生态优先发展情景下，到 2030 年长株潭都市圈建设用地分别达到 1295.08、1166.44、1104.78 km²。在三种城市发展情景下，长株潭都市圈建设用地均以边缘增长为主向外延伸，长沙、株洲、湘潭三市呈现相向发展的融城态势，长株潭城市一体化趋势明显。

(2) 在自然增长、规划发展、生态优先发展情景下，到 2030 年长株潭都市圈耕地分别减少到 2088.30、2134.94、2199.45 km²。2010—2030 年，

在自然增长、规划发展、生态优先发展情景下,长株潭都市圈耕地减少量分别为 423.30、376.60、312.13 km²,耕地减少的区域与城市建设用地的扩展区域相吻合。相对于自然发展与土地利用发展规划情景耕地占用少。从粮食安全与生态保护的角度,生态保护情景模式是未来长株潭都市圈发展的优选途径。

4.2 讨论

长株潭都市圈城市空间扩展模拟预测及耕地影响分析结果对城市空间规划与管理,城市生态安全和可持续发展战略对策的制定具有重要的参考价值。

受数据的限制,本文预测过程中对城市时空演化的时间依赖性考虑不足。尽管基于极限学习机的城市扩展元胞自动机模型具有良好泛化性能和模拟效果,由于对城市扩展驱动因子深层次空间及语义信息的利用不够,影响到模拟精度的进一步提升。为此,后续研究将采用更为完整的土地利用时间序列数据,并基于深度学习理论与方法发展更为完善的顾及时间依赖性、多尺度邻域效应的新型城市扩展元胞自动机模型,有效预测长株潭都市圈未来城市扩展空间格局及其变化,深入分析城市扩展导致的生态环境影响。

本文仅针对城市扩展开展了模拟预测分析,随着国家碳达峰、碳中和战略的实施,长株潭都市圈土地利用多类型变化模拟预测及其对区域碳汇影响分析值得进一步研究,可结合碳达峰、碳中和时间表,深入研究土地利用多类型变化模拟预测及其对区域碳汇的影响。

参考文献 (References)

- [1] 周成虎. “长江经济带”专辑序言[J]. 地理科学进展, 2015, **34**(11): 1335. [ZHOU Chenghu. The preface to the special edition of “Yangtze River Economic Belt” [J]. Progress in Geography, 2015, **34**(11): 1335]
- [2] 贺大为, 金贵, 王新生, 等. 长江经济带国土空间开发与保护路径优化[J]. 生态学报, 2023, **43**(14): 5776 – 5787. [HE Dawei, JIN Gui, WANG Xinsheng, et al. Optimization of development and protection pattern of territorial space in the Yangtze River Economic Belt [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, **43**(14): 5776 – 5787] DOI: 10.5846/stxb202206141698
- [3] 习明明. 长江中游城市群: 中国经济增长的第四级[J]. 区域经济评论, 2013(4): 131 – 133. [XI Mingming. City clusters in the middle reaches of the Yangtze River: The fourth level of China's economic growth [J]. Regional Economic Review, 2013(4): 131 – 133] DOI: 10.14017/j.cnki.2095-5766.2013.04.023
- [4] 周国华, 陈炉, 唐承丽, 等. 长株潭城市群研究进展与展望[J]. 经济地理, 2018, **38**(6): 52 – 61. [ZHOU Guohua, CHEN Lu, TANG Chengli, et al. Research progress and prospects on Changsha-Zhuzhou-Xiangtanurban agglomeration [J]. Economic Geography, 2018, **38**(6): 52 – 61] DOI: 10.15957/j.cnki.jjdl.2018.06.007
- [5] 李仙, 潘玉龙. 习近平总书记关于粮食安全重要论述探析[J]. 农村·农业·农民(A版), 2023(5): 19 – 23. [LI Xian, PAN Yulong. Analysis of important discussions on food security by General Secretary XI Jinping [J]. Rural Agriculture Farmers (Version A), 2023(5): 19 – 23]
- [6] 杨尚钊, 张宏胜, 李超芹, 等. 我国粮食安全的现状、问题及对策[J]. 粮食问题研究, 2023(1): 14 – 17. [YANG Shangzhao, ZHANG Hongsheng, LI Chaoqin, et al. The current situation, problems and countermeasures of food security in China [J]. Research on Food Issues, 2023(1): 14 – 17]
- [7] 张雅杰, 金海. 长江中游地区城市建设用地利用效率及驱动机理研究[J]. 资源科学, 2015, **37**(7): 1384 – 1393. [ZHANG Yajie, JIN Hai. Research on efficiency of urban construction land and the drive mechanism in the Mid-Yangtze River [J]. Resources Science, 2015, **37**(7): 1384 – 1393]
- [8] 朱媛媛, 张瑞, 顾江, 等. “双碳”目标下长江中游城市群生态福利绩效演变及驱动机制研究[J]. 地理科学进展, 2022, **41**(12): 2231 – 2243. [ZHU Yuanyuan, ZHANG Rui, GU Jiang, et al. Spatiotemporal evolution and driving mechanism of ecological well-being performance in the urban agglomeration of the middle reaches of the Yangtze River under the carbon peaking and carbon neutrality goals [J]. Progress in Geography, 2022, **41**(12): 2231 – 2243] DOI: 10.18306/dlkxjz.2022.12.004
- [9] 胡昕利, 易扬, 康宏樟, 等. 近 25 年长江中游地区土地利用时空变化格局与驱动因素[J]. 生态学报, 2019, **39**(6): 1877 – 1886. [HU Xili, YI Yang, KANG Hongzhang, et al. Temporal and spatial variation of land use and the driving factors in the middle reaches of the Yangtze River in the past 25 years [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, **39**(6): 1877 – 1886] DOI: 10.5846/stxb201809302138
- [10] 王海军, 任经纬, 张彬, 等. 利用广义加性模型解析长江中游城市群城镇用地扩展驱动力[J]. 长江流域资源与环境, 2021, **30**(1): 32 – 43. [WANG Haijun, REN Jingwei, ZHANG Bin, et al. Analysis of driving forces of urban land expansion in urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River based on general additive [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, **30**(1): 32 – 43] DOI: 10.11870/cjlyzyyhj202101004
- [11] 瞿诗进, 胡守庚, 童陆亿, 等. 长江中游经济带城镇建设用地的时空特征[J]. 资源科学, 2017, **39**(2): 240 – 251. [QU Shijin, HU Shougeng, TONG Luyi, et al. Temporal and

- spatial characteristics of urban construction land transformation in the middle Yangtze River Economic Belt [J]. *Resources Science*, 2017, **39**(2): 240–251 DOI: 10.18402/resci.2017.02.07
- [12] 徐磊, 董捷, 陈恩. 基于“三生”功能的长江中游城市群国土空间利用协调特征[J]. *水土保持研究*, 2018, **25**(2): 254–263. [XU Lei, DONG Jie, CHEN En. Coordination features of geographical space utilization in urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River based on ‘production-living-ecological’ function [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, **25**(2): 254–263 DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2018.02.037]
- [13] 朱翔, 王晖, 吴宜进, 等. 基于 Google Earth Engine 的长江中游城市群城镇化与生态环境耦合协调研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2022, **31**(12): 2707–2717. [ZHU Xiang, WANG Hui, WU Yijin, et al. Research on the coupling coordination degree of urbanization and eco-environment of the urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River based on Google Earth Engine [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, **31**(12): 2707–2717 DOI: 10.11870/cjlyzyyhj202212014]
- [14] 马振玲, 曾永年, 闫利. 长株潭城市群核心区域土地利用/覆盖变化驱动机制定量研究[J]. *测绘通报*, 2012(10): 41–44. [MA Zhenling, ZENG Yongnian, YAN Li. Quantitative study on driving mechanism of land use and land cover change in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomerations [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2012(10): 41–44]
- [15] 唐常春, 李亚平. 多中心城市群土地利用/覆被变化地学信息图谱研究——以长株潭城市群为例[J]. *地理研究*, 2020, **39**(11): 2626–2641. [TANG Changchun, LI Yaping. Geo-information map process of land use/cover change in polycentric urban agglomeration: A case study of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration [J]. *Geographical Research*, 2020, **39**(11): 2626–2641 DOI: 10.11821/dlyj020200207]
- [16] 易凤佳, 李仁东, 常变蓉, 等. 长株潭地区建设用地扩张遥感时空特征分析[J]. *国土资源遥感*, 2015, **27**(2): 160–166. [YI Fengjia, LI Rendong, CHANG Bianrong, et al. Spatial-temporal features of construction land expansion in Changzhutan (Changsha-Zhuzhou-Xiangtan) area based on remote sensing [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2015, **27**(2): 160–166 DOI: 10.6046/gtzyyg.2015.02.25]
- [17] 欧阳晓, 朱翔, 贺清云. 城市群城市用地扩张时空特征及驱动机制研究——以长株潭城市群为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2020, **29**(6): 1298–1309. [OUYANG Xiao, ZHU Xiang, HE Qingyun. Study of spatio-temporal pattern and driving mechanism of urban land expansion in urban agglomeration: A case study of the Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, **29**(6): 1298–1309 DOI: 10.11870/cjlyzyyhj202006005]
- [18] 彭海泉, 邹艳红. 基于 STIRPAT 模型的长株潭城市建设用地扩展驱动因素分析[J]. *测绘与空间地理信息*, 2018, **41**(6): 159–162. [PENG Haiquan, ZOU Yanhong. Analysis of driving forces of construction land expansion for Changsha-Zhuzhou-Xiangtan based on STIRPAT model [J]. *Geomatics and Spatial Information Technology*, 2018, **41**(6): 159–162]
- [19] 王乐, 朱红梅, 李沅澍. 基于 DEA 的长株潭城市群用地扩展的经济效益研究[J]. *国土与自然资源研究*, 2013(2): 14–16. [WANG Le, ZHU Hongmei, LI Yuanshu. Research on the economic benefits of land expansion of Changzhutan Urban Agglomeration based on DEA [J]. *Territory and Natural Resources Study*, 2013(2): 14–16 DOI: 10.16202/j.cnki.tnrs.2013.02.028]
- [20] 熊鹰, 陈云, 李静芝, 等. 基于土地集约利用的长株潭城市群建设用地供需仿真模拟[J]. *地理学报*, 2018, **73**(3): 562–577. [XIONG Ying, CHEN Yun, LI Jingzhi, et al. Analog simulation of urban construction land supply and demand based on land intensive use [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, **73**(3): 562–577 DOI: 10.11821/dlxb201803013]
- [21] 陈永林, 谢炳庚, 钟典, 等. 基于微粒群-马尔科夫复合模型的生态空间预测模拟——以长株潭城市群为例[J]. *生态学报*, 2018, **38**(1): 55–64. [CHEN Yonglin, XIE Binggen, ZHONG Dian, et al. Predictive simulation of ecological space based on a particle swarm optimization-Markov composite model: A case study for Chang-Zhu-Tan urban agglomerations [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(1): 55–64 DOI: 10.5846/stxb201612082530]
- [22] 朱政, 朱翔. 长株潭城市群农业用地损失的动态模拟研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, **28**(5): 1142–1153. [ZHU Zheng, ZHU Xiang. Dynamic simulation analysis on the loss of agricultural land of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, **28**(5): 1142–1153 DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201905014]
- [23] 周成虎, 孙战利, 谢一春. 地理元胞自动机研究[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 134–135. [ZHOU Chenghu, SUN Zhanli, XIE Yichun. Research on geographic cellular automata [M]. Beijing: Science Press, 1999: 134–135]
- [24] 黎夏, 叶嘉安, 刘小平. 地理模拟系统: 元胞自动机与多智能体[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 273–274. [LI Xia, YE Jiaan, LIU Xiaoping. Geographic simulation system: Cellular automata and multiagent [M]. Beijing: Science Press, 2007: 273–274]
- [25] 黎夏, 刘小平, 李少英. 智能式 GIS 与空间优化[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 123–126, 186–187. [LI Xia, LIU Xiaoping, LI Shaoying. Intelligent GIS and spatial optimization [M]. Beijing: Science Press, 2010: 123–126, 186–187]
- [26] 刘耀林, 仝照民, 刘岁, 等. 土地利用优化配置建模研究进展与展望[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2022, **47**(10): 1598–1614. [LIU Yaolin, TONG Zhaomin, LIU Sui, et al. Progress and prospects of research on optimal land-use allocation modeling [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan*

- University, 2022, **47** (10): 1598 – 1614] DOI: 10.13203/j.whugis20220603
- [27] 李媛洁, 叶长盛, 黄小兰. 基于 CLUE-S 模型的南昌市“三生”空间时空演变及情景模拟研究[J]. 水土保持研究, 2021, **28** (5): 325 – 332. [LI Yuanjie, YE Changsheng, HUANG Xiaolan. Temporal-spatial evolution and scenario simulation of production-living-ecological space in Nanchang based on CLUE-S model [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, **28** (5): 325 – 332] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2021.05.037
- [28] 吴桂平, 曾永年, 冯学智, 等. CLUE-S 模型的改进与土地利用变化动态模拟: 以张家界市永定区为例[J]. 地理研究, 2010, **29** (3): 460 – 470. [WU Guiping, ZENG Yongnian, FENG Xuezhi, et al. Dynamic simulation of land use change based on the improved CLUE-S model: A case study of Yongding county, Zhangjiajie [J]. Geographical Research, 2010, **29** (3): 460 – 470]
- [29] GANTUMUR B, WU Falin, VANDANSAMBUU B, et al. Spatiotemporal dynamics of urban expansion and its simulation using CA-ANN model in Ulaanbaatar, Mongolia [J]. Geocarto International, 2022, **37** (2): 494 – 509. DOI: 10.1080/10106049.2020.1723714
- [30] WU Fulong. Calibration of stochastic cellular automata: The application to rural-urban land conversions [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2002, **16** (8): 795 – 818. DOI: 10.1080/13658810210157769
- [31] 杨青生, 黎夏. 基于支持向量机的元胞自动机及土地利用变化模拟[J]. 遥感学报, 2006, **10** (6): 836 – 846. [YANG Qingsheng, LI Xia. Cellular automata for simulating land use changes based on Support Vector Machine [J]. Journal of Remote Sensing, 2006, **10** (6): 836 – 846]
- [32] 陈逸敏, 黎夏. 机器学习在城市空间演化模拟中的应用与新趋势[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, **45** (12): 1884 – 1889. [CHEN Yimin, LI Xia. Applications and new trends of machine learning in urban simulation research [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, **45** (12): 1884 – 1889] DOI: 10.13203/j.whugis20200423
- [33] 张亦汉, 刘小平, 陈广亮, 等. 基于最大熵的 CA 模型及其城市扩张模拟[J]. 中国科学: 地球科学, 2020, **50** (3): 339 – 352. [ZHANG Yihan, LIU Xiaoping, CHEN Guangliang, et al. Simulation of urban expansion based on cellular automata and maximum entropy model [J]. Science China Earth Sciences, 2020, **50** (3): 339 – 352] DOI: 10.1360/SSTe-2019-0110
- [34] 卞子金. 基于极限学习机的高分辨率遥感图像分类算法研究[D]. 沈阳: 辽宁师范大学, 2015: 6 – 8. [BIAN Zijin. The study of high resolution remote sensing image classification based on extreme learning machine [D]. Shenyang: Liaoning Normal University, 2015: 6 – 8.
- [35] 王鹤, 曾永年. 城市扩展极限学习机模型[J]. 测绘学报, 2018, **47** (12): 1680 – 1690. [WANG He, ZENG Yongnian. Urban expansion model based on extreme learning machine [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018, **47** (12): 1680 – 1690] DOI: 10.11947/j.agcs.2018.20170586

Scenario Prediction of Urban Spatial Evolution and Its Impact on Arable Land in Chang-Zhu-Tan Metropolitan Region, China

HE Chengqiang^{1, 2}, WANG Pancheng^{1, 2}, ZENG Yongnian^{1, 2}

(1. School of Geoscience and Info-physics, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Central for Geomatics and Sustainable Development Research, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The construction of the Yangtze River Economic Belt is one of the major strategies for China's economic and social development in the new period. The rational planning and scientific management of land space of urban agglomerations are of great significance to a healthy and sustainable development in the Yangtze River Economic Belt.

Located in the middle reaches of the Yangtze River, the Chang-Zhu-Tan metropolitan region has experienced rapid urbanization, and urban expansion has had a profound impact on regional resources and the environment; however, there was insufficient knowledge of the spatial pattern of land-use in the region, nor any prediction of urban spatial pattern changes, and the impact of urban spatial expansion on the protection of arable land was yet unclear.

In this study, it predicted the urban spatial pattern of the Chang-Zhu-Tan metropolitan region in 2030 using a cellular automata model of urban expansion evolved from extreme learning machine model. It analyzed the impacts of urban spatial evolution on the arable land area and its spatial distribution under three scenarios of urban expansion, namely, natural growth, planned development, and ecological priority.

It found that (1) under the three scenarios of natural growth, planned development, and ecological priority, the urban construction land in the Chang-Zhu-Tan metropolitan region would reach 1295.08 km², 1166.44 km², 1104.78 km² respectively in 2030, respectively. Specifically, from 2010 to 2030, land occupied by urban construction would go to a corresponding increase by 597.54 km², 2134.94 km² and 448.16 km² in the three scenarios. The construction land in the region would be dominated by marginal growth, extending outward, with a significant trend of urban integration. (2) Under the three scenarios of natural growth, planned development, and ecological priority, the arable land in the region would be 2088.30 km², 2134.94 km² and 2199.45 km² respectively in 2030. The expansion of urban construction land leads to the reduction in regional arable land. From the perspective of food security and sustainable development, the ecological priority development mode is the preferred development scenario for the region in future.

The research conclusions can provide a scientific basis for urban spatial planning and management of the Chang-Zhu-Tan metropolitan region, and provide a reference for the ecological safety and sustainable development of the cities in the Yangtze River Economic Belt.

Key words: urban space expansion; scenario simulation; arable land change; the Chang-Zhu-Tan metropolitan region

(责任编辑 钟雨倩)