

基于 ANN-CA 的杭州城市空间 拓展与增长边界研究

刘荣增^{1, 2} 陈浩然²¹

(1. 河南财经政法大学 城乡协调发展河南省协同创新中心, 河南 郑州 450046;

2. 河南财经政法大学 资源与环境学院, 河南 郑州 450046)

【摘要】: 科学地规划城市未来的空间布局和划定城市增长边界, 是落实自然资源部“三条控制线”与城市高质量发展快速发展的关键, 对于城市空间的优化具有重要的指导意义。以杭州市为例, 运用 Euclidean distance 建立影响因子模型, 对影响城市增长边界的城市空间地形因子、自然环境因子、现状城市土地分类因子、产业与经济环境因子以及现代服务网点布局等各种因素进行分析, 然后运用耦合神经网络识别城市空间发展潜力, 最后运用耦合神经网络与元胞自动机(ANN-CA), 按照不同限制条件(严格限制、基本限制、管制区限制)和可持续发展、核心区规划建设用地优先发展等不同情景约束对杭州市 2030 年城市空间拓展与增长边界进行了多维度模拟。主要得出了以下结论: (1) 2018~2030 年, 萧山区、江干区和余杭区城市面积扩张最多, 增长的面积分别为 83.75、51.96 和 31.32km², 是杭州发展潜力较大的区域。(2) 提出了杭州在坚持“城市东扩、旅游西进、沿江开发、跨江发展”的空间策略的基础上, 未来将以东、西方向为重点进行城市扩展。(3) 以生态保护、集约节约为原则划定了杭州城市未来增长边界。旨在为杭州市国土空间规划及相关实践提供借鉴与参考。

【关键词】: 元胞自动机 神经网络 增长边界预测 杭州市

【中图分类号】: TU984.11 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)06-1298-10

城市空间作为城市进行社会经济活动的载体, 其规模的扩大体现了城市阶段性的发展变化, 城市的发展过程也是其空间的拓展过程。城市空间拓展源自城市发展的内生动力, 城市空间增长边界的确定是对城市空间拓展有效治理的重要手段。1970 年, 美国学者 Salem 第一次提出了“城市增长边界”(Urban Growth Boundary)的理念。Salem 对于“城市增长边界”的初步解释是“以遏制城市蔓延为目的的城市土地使用管理政策工具”, 其在空间层面上被定义为“城市土地和农村土地间的分界线”。自 20 世纪中国引入“城市增长边界”这一概念以来, 伴随着我国城市化进程快速发展带来的一系列问题和城市人口的增加, 城市规模不断扩大, 土地覆盖和土地利用格局发生改变^[1], 以及对限制城市无序扩张与可持续开发理念的社会普遍认识, 城市增长边界的划定已经成为了新时期城市增长管理的重要内容。早在 19 世纪, Howard 在其著作《明日, 一条通向真正改革的和平道路》中最早对城市增长边界的理念进行了系统的研究^[2], 他主张在城市外围布置绿化带以限制城市的无序扩张, 划定城市增长边界。张进等^[3]学者首次将城市增长边界概念引入国内并研究了国内城市发展的的问题, 认为开展城市增长边界研究的前提是对城市的自然资源进行深入分析。冯科等^[4]学者研究了城市无序扩张的相关问题与机制, 认为划定城市增长边界有利于限制城市空间的无序扩

作者简介: 刘荣增(1968~), 男, 教授, 主要研究方向为城市与区域发展。E-mail:rongzengliu@163.com

基金项目: 国家社会科学基金一般项目(17BJL065); 中原千人计划基础研究领军人才(ZYQR201810122); 华贸金融研究院(HYK-2019007)

张,并对城市土地管理与城市化产生积极作用。马强等^[5]学者研究了中国城市空间发展特征和城市增长边界面临的问题,并对中国城市增长边界的发展进行了分析。现有城市增长边界的划定方法,主要包括:土地生态适宜性评价方法,从土地是否适宜建设角度来划定城市的刚性边界和弹性边界^[6~8];或以综合生态安全格局为基础,结合城市中心吸引力、道路吸引力等,利用最小阻力模型,划定城市增长的刚性边界与弹性边界^[9]。城市增长径向距离法,通过选定城市的多个中心点,以距离为度量,建立预测模型,模拟城市边界位置的变化,划定城市增长边界^[10,11]。这些方法均存在一定的不足,如只考虑生态适宜性^[12~15],忽略了研究区现有人口、经济发展状况等城市客观条件,具有一定的主观性,或者只从数量、空间一个方面进行模拟预测,具有一定的局限性。因此,研究将神经系统中耦合用地的影响因子与分散概率与元胞自动机(CA)结合,根据耦合神经网络算法计算出各类影响因子与城市建设用地的关系,利用元胞自动机模拟杭州市区 2030 年城市土地变化与增长边界,既能对区域进行长期预测,也能够对空间变化进行最大程度的研究,加强城市土地变化模拟的科学性、可靠性。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区概况

杭州作为浙江省省会、副省级市、杭州都市圈核心城市,浙江省经济、文化、科教中心、长江三角洲中心城市,对杭州未来城市发展因素权重的厘清以及对城市空间增长的预判,不仅是杭州进一步发展“大都市、大花园、大通道”的现实需要,也将对长三角一体化发展与规划提供重要支撑作用。

1.2 数据来源

本文数据源为 2010、2015、2018 年 3 个时期的杭州市土地利用现状图。空间分辨率为 100m×100m,经空间配准、重分类等处理后得到土地利用分类现状图。土地利用分为五类,分别为耕地、林地、水域、城乡建设用地、未利用地。由于在模拟预测城市扩张时,应综合考虑乡村发展与影响,且杭州市区内乡村存在数量少,面积小,基础设施与公共设施水平高,与市区距离小,易转换为城市建设用地等特点,因此,在不同情景的模拟预测过程中研究均采用城乡建设用地作为建设用地数据来源,并在最后划定城市开发边界时采用“腐蚀”等方法消除零散未转换为城市建设用地的乡村建设用地。研究采用田野调查和随机验证法验证用地分类指标准确度,准确度均高于 85%。利用地理空间数据云下载杭州市地形地貌数据,并利用 Ecognition 软件处理出杭州市市区范围数据,最后利用 ArcGIS 软件提取高程数据(坡度、坡向)。采用全国地理信息资源服务获取杭州市城市现状道路数据。此外,耦合神经网络所需要的影响因子数据提取自百度开源 POI 大数据,使用 Python 等软件可以有效获取各类影响因子数据,并将其作为矢量数据信息导入至 ArcGIS 内的土地利用现状图,统一坐标系后进行相应的空间校正。

2 城市空间拓展影响因子与潜力识别

2.1 ANN-CA 模拟

在城市空间演变的模拟和预测过程中需要使用很多空间层面上的影响因子,但城市空间模型的构成很难确定^[15]。研究表明,将神经系统中耦合用地的影响因子与分散概率与元胞自动机(CA)结合可以有效提升 CA 在城市空间演变预测中的模拟质量^[17]。因此,使用城市土地利用图像训练相应的耦合神经网络系统,并将人工神经网络系统(ANN)与元胞自动机(CA)结合形成的人工神经网络元胞自动机(ANN-CA)应用于城市空间拓展与演变的模拟预测,有效避免了传统预测手段带来的负面影响^[18],并能够准确地确定城市空间模型的构成与城市的空间模拟结果。

传统的预测方法通常无法有效甄别研究区域内微观的空间变量^[19~21],因而无法在城市空间的模拟过程中表现城市空间系统在微观层面上的发展方向与演变特点,而 CA 在城市空间的模拟中消除了这一弊端,并能够在演化系统中识别空间单位领域的发展情况与开发强度^[22~26]。作为一种自下而上的模拟过程^[27],CA 的预测模型基于研究区域内部空间单位之间的相互影响及作用,每

一个空间单位的发展可能与演变方向都取决于周围空间单位的发展特征与自身空间影响因子的结合。因此，CA 可以在一定程度上解释城市空间系统发展的复杂情况，但在城市经济社会等因素影响下的城市空间演变中难以获取逻辑支撑^[28~31]，还需要引入现实的城市空间约束因子与 CA 相结合，控制城市在现实因素下土地变化的过程，增加模拟结果的可靠性^[23]。由于城市空间变化的综合性，利用现实城市约束因子与 ANN-CA 相结合对城市空间增长进行演化，可以有效预测杭州市在不同现实情境下的空间增长情况与土地分布动态，为杭州市城市边界开发与划定提供更科学、有效的理论支撑。

2.2 基于 Euclidean distance 建立影响因子模型

影响因子的选取除了城市空间地形因子、自然环境因子、现状城市土地分类因子、产业与经济环境因子等传统城市影响因子外，还利用了大数据对现代城市影响因子进行提取，能更有效地对城市居民的活动和经济社会要素在城市空间内的分布情况与特征进行更准确地研判，增加城市发展潜力预测的可靠性。利用大数据提取的城市影响因子主要包括工业分布点、商业与公共服务设施分布点、科教文娱设施分布点、行政机构设施分布点、旅游与生活服务设施分布点、公共交通站分布点、物流设施分布点与居民点。利用 Euclidean distance (欧氏距离) 对各类影响因子进行处理，其公式为：

$$Dist(X, Y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (1)$$

处理后分别进行归一化处理，其公式为：

$$X'_i(k, t) = (x_i(k, t) - \min) / (\max - \min) \quad (2)$$

分别得到它们在杭州市区范围内的影响热力图(图 1)。

2.3 基于耦合神经网络识别城市空间发展潜力

城市空间增长的概率基于该空间单位的发展潜力，即分布概率。利用神经网络系统，可以获取城市建设用地与各类城市影响因子互相影响作用的关联系统。首先，将城市影响因子与城市用地类型输入神经网络系统，利用神经网络系统持续随机抽取数据样本并不断解析城市影响因子与城市土地类型之间的相互作用关系，生成用于解释用地类型与影响因子之间的关联系统，最后基于这套关联系统生成能够用于研判不同城市空间发展潜力与城市影响因子对土地演变贡献权重的分类器。整个分类器由三层组成，第一层是输入层，第二层是隐藏层，最后一层用来计算发展的可能性。分类器作用的第一步是确定城市土地单元与影响因子的输入。每一个模拟单元包含会影响土地利用变化的 n 个变量，并与数据输入层的 n 个神经元相对应，这些变量决定了土地的转换概率，可表示为式(3)：

$$X(k, t) = [x_1(k, t), x_2(k, t) \cdots x_i(k, t)]^T \quad (3)$$

将城市影响因子与城市用地类型输入神经网络系统，利用神经网络系统持续随机抽取数据样本并不断解析城市影响因子与城市土地类型之间的相互作用关系，最后生成各类影响因子的贡献权重(表 1)。

如表 1 所示，从大到小排列各因素的重要程度，可以发现公交站点、城市主干道、地铁、铁路、GDP 和行政管理点对建设用地的影响较大。贡献权重前三位的影响因子贡献权重均大于 0.12，说明市区主干道、公交站点、地铁布局这些交通要素在杭州市

建设用地的布局中拥有较高地位。而国内生产总值、人口、高速公路、行政机关、商业服务设施的贡献权重均大于 0.050, 权重比较接近。综合上述分析, 交通影响因子与城市经济发展相关因子在杭州市城市发展与建设用地分布中占有较高地位。同时, 作为重要的国际电商中心和旅游城市, 物流和旅游点的贡献权重均在 0.045 以上, 说明物流资源与旅游资源的影响因素在杭州市城市发展与建设用地分布中同样具有重要的地位和意义。

综合对比分析控制性规划图与城市空间用地转换概率图, 结果显示, 色调越暖, 该单位土地转换为城市建设用地的可能性就越大(图 2)。

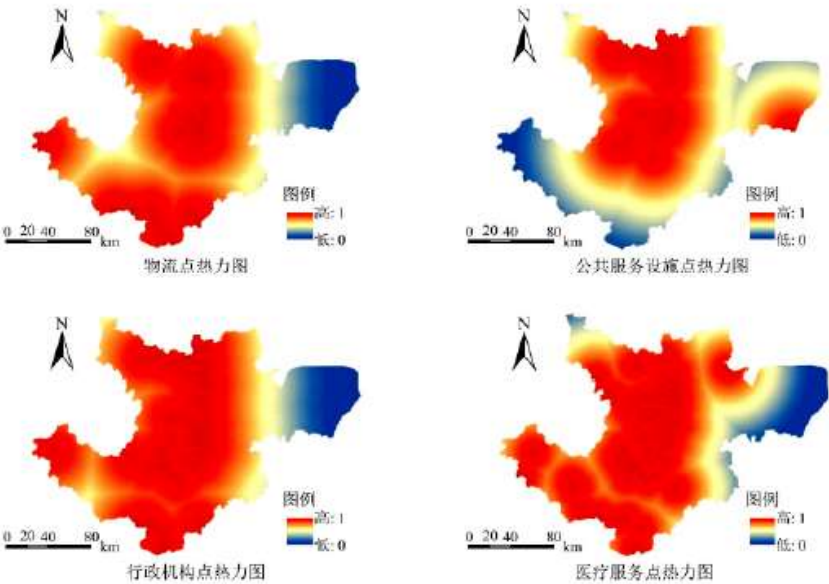
3 基于 ANN-CA 的杭州增长边界划定与空间拓展预测

3.1 不同限制条件下的用地模拟

鉴于城市空间增长的综合性, 为了有效预测杭州市在不同现实情境下的空间增长情况与土地分布动态, 需要利用现实城市约束条件与 ANN-CA 相结合对城市空间增长进行模拟。研究基于 2018 年现状杭州市土地分类用地, 转换规则基于分类器训练的城市空间发展潜力与城市影响因子对土地演变贡献权重, 模拟了 3 种不同限制条件下 2030 年杭州城市用地的分布情况。模拟的 3 种限制条件如下。

3.1.1 严格限制

一、二级管制区内的土地无法转换为城市建设用地; 基本农田保护范围内的土地无法转换为城市建设用地。在这种转换条件与限制情况下, 城市发展的空间极为有限。由于一二级管制区与基本农田保护范围线的限制, 城市只能局限于范围线之间狭窄的空间发展, 因此模拟的城市用地大多呈现絮状形态(图 3)。



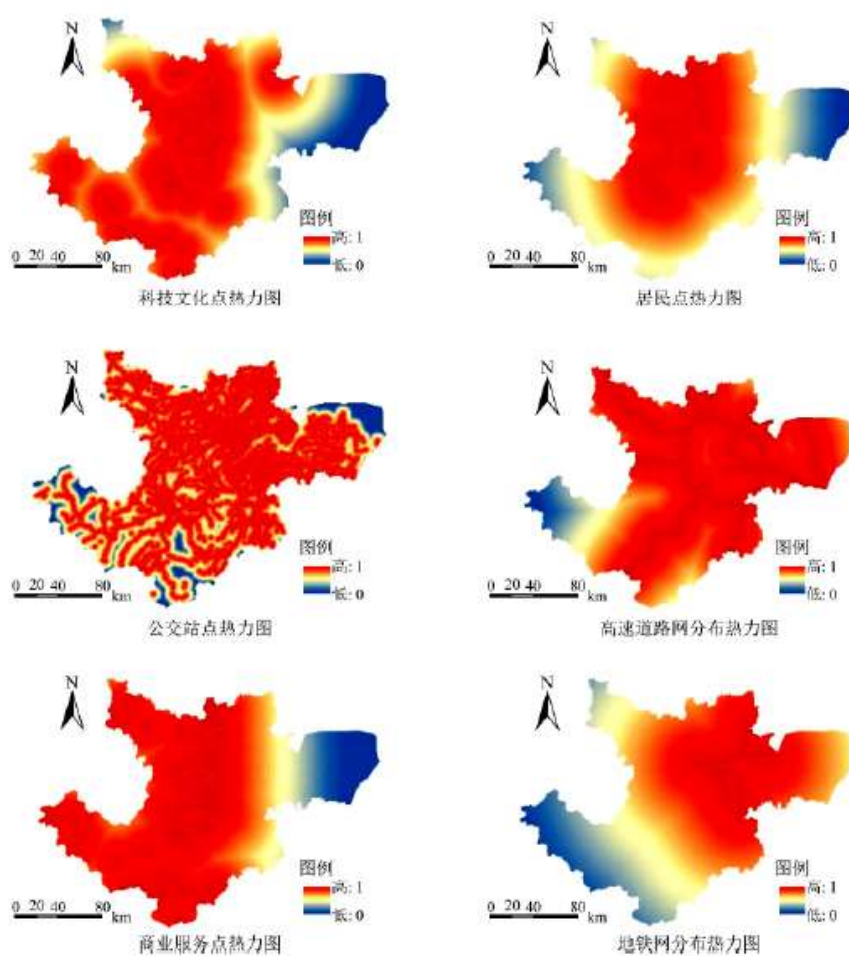


图 1 城市影响因子热力图

表 1 影响因子贡献权重

影响因子	贡献权重
坡度	0.0195823
GDP	0.07811232
公交站点	0.132458
国道	0.035448
地铁	0.15244866
铁路	0.07587
人口	0.059632
物流点	0.04583

商业服务设施点	0.0529
基础设施点	0.03672
科教文娱点	0.03328
行政机构点	0.05972
居民点	0.02269
高速道路	0.05965
医疗服务点	0.0354692
市区主干道	0.12673
旅游点	0.04562

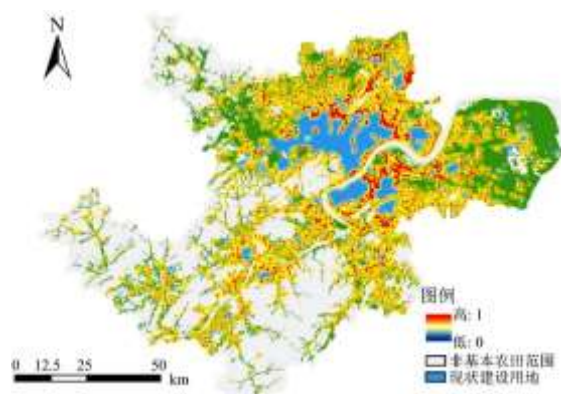


图 2 基本农田与城市发展概率叠加

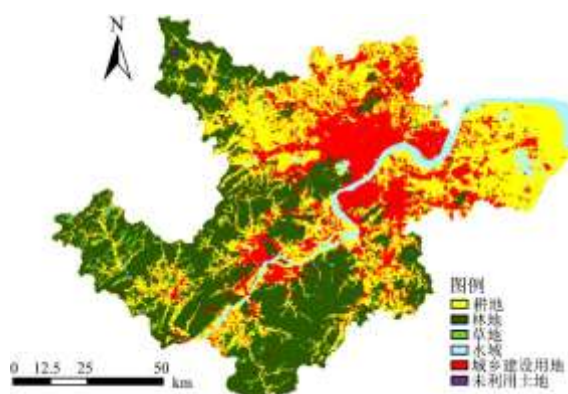


图 3 严格限制条件下模拟结果

3.1.2 基本限制

一级管制区内的土地无法转换为城市建设用地；基本农田保护范围内的土地无法转换为城市建设用地；二级管制区内的土地在降低转换系数的前提下可以转换为城市建设用地；相较于严格限制条件下的城市用地模拟，基本限制条件下的城市形态更显完整与规则(图 4)。

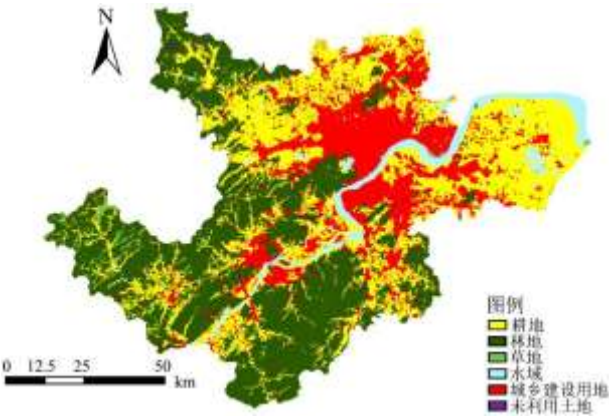


图 4 二级管制区不限制条件下的模拟结果

3. 1. 3 管制区限制

一、二级管制区内的土地无法转换为城市建设用地；基本农田保护范围内的土地降低转换系数的前提下可以转换为城市建设用地。在这种转换条件与限制情况下，模拟的城市形态完整且平滑，城市建设用地明显增加(图 5)。

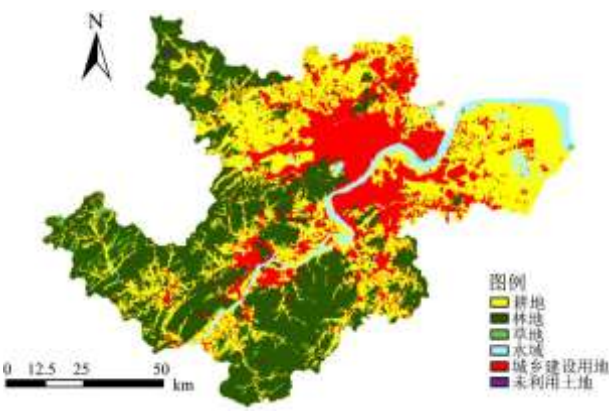


图 5 基本农田不限制条件下的模拟结果

3. 2 不同现实情景下的用地模拟

在现实情况下，城市建设的发展方向不仅会受到不同要素的影响作用，还会因由国家或者地区的各类政治策略的改变、城市发展规划策略以及其他各种概率成分而受到影响，因而在一定程度上，城市的生长规模一般不会完全遵从于规划的固定方向。传统的城市模拟方式很难消除这些随机概率因子在城市发展层面上的影响，而元胞自动机凭借其自身的随机性可以较好地处理这些概率因子所带来的随机作用。限制条件完全由刚性地土地控制线组成并不能有效地演变城市土地的动态变化，还需要在预测过程中综合考虑城市发展的柔性限制因子。研究模拟了 3 种不同现实情景下的杭州市土地利用的发展情况。

3.2.1 可持续发展情景下的城市增长边界

在可持续发展的现实情景下，在基本限制的刚性约束条件下建立了生态控制与保护的柔性限制因素，并建立了综合考虑城市发展因子与基础设施走廊的城市土地演变模型。该模型综合考虑了社会经济、地形地貌、交通运输等发展因子，能够有效模拟可持续发展的现实情境下城市空间发展的动态变化，并为城市发展的科学决策提供依据。在该模型中，一级管制区内的土地无法转换为城市建设用地；基本农田保护范围内的土地无法转换为城市建设用地；二级管制区内的土地在降低转换系数的前提下可以转换为城市建设用地；基础设施控制走廊内的土地无法转换为城市建设用地。综合以上转换概率生成的城市发展空间提取相关限制因素对土地转换的影响，并基于 2018 年现状杭州市土地分类用地进行迭代模拟，绘制了杭州市 2030 年建设用地分布模拟图(图 6)。

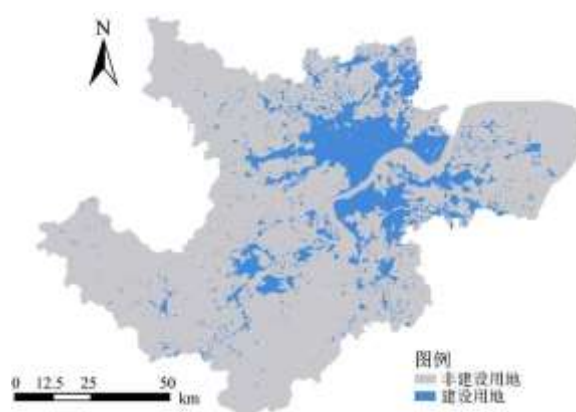


图 6 可持续发展情景下 2030 年杭州市建设用地分布情况

在基于可持续发展的现实情景控制下，有少量二级管制区保护范围线内的土地转换成为城市用地。同时在刚性控制条件与柔性控制条件的综合控制与保护下，重要的生态保护区、禁建区与基本农田无法转换为城市建设用地。在生态保护用地得到有效控制的要求下，该现实情景也综合考虑了社会经济的发展，城市在约束范围线中发展略有破碎，但是总体发展良好，城市形态较为完整。

3.2.2 核心区规划建设用地优先发展情景下的城市增长边界

在该现实情景下，综合考虑杭州市未来发展方向与发展前景，并对元胞自动机的预测模型进行改进，即让其在识别建设用地时研判该用地是否属于核心建设用地。根据杭州市未来发展规划与相关政策，提取杭州市城市建设核心区域用地并导入改进后的元胞自动机的模型。设定该现实情景下元胞自动机模型如果识别出核心建设用地，则调节相应的土地转换系数，模拟该情景下杭州市城市增长边界。

在这一现实情景下，二级控制区内的土地与城市核心规划用地重合部分，土地转换系数明显增高。相较于重合的用地，未与核心区建设用地重合的二级控制区内的土地，土地转换系数明显降低。以西湖区为例，在核心区用地为首的现实情境下，西湖区土地转换为建设用地的概率大幅度增加。

在这一现实情景下，二级控制区内的土地与城市核心规划用地出现少部分重合现象。此时少部分二级控制区内土地转换为城市建设用地，转换的建设用地较为完整连贯(图 7)，社会经济发展预测良好。这种发展的特点在杭州的中部和西北部最为明显。同时在这一现实情景下，基本农田保护区与控制区、禁建区范围内的土地没有转换为城市建设用地，保护效果良好。

3.3 不同情景下的模拟整合结果与分析

ANN-CA 在不同现实情景与不同限制条件下对城市土地发展的模拟代表了未来城市不同现实与理论可能下的发展情况。这两种不同的发展条件与发展情景综合考虑的城市空间增长的复杂性与现实性，并分别探讨与模拟了杭州市在可持续发展与核心建设用地发展两种现实约束条件下杭州市土地模拟的整合结果与特征。基于可持续发展的现实情景约束下，可以看出在基本农田与一级保护区控制线内土地禁止转换为城市建设用地的条件下杭州城市发展的空间上的分布特征与增长情况。而相较于可持续发展的现实情景，核心区建设的城市形态更加完整，城市在空间层面上的连续性与发展性较强。而在实际的城市发展中，需要综合考虑各种现实情景的约束与刚性约束条件的控制。因此，整合上述两种不同现实情景下 ANN-CA 对杭州市城市发展的模拟预测，综合考虑两种预测结果的增长边界与控制范围，利用“扩展”和“腐蚀”的方法处理模拟过程中过于分散和零碎的建设用地，并消除未转换为城市用地的零散乡村建设用地，最后得到具有现实参考价值与意义的杭州市城市增长边界(图 8)。

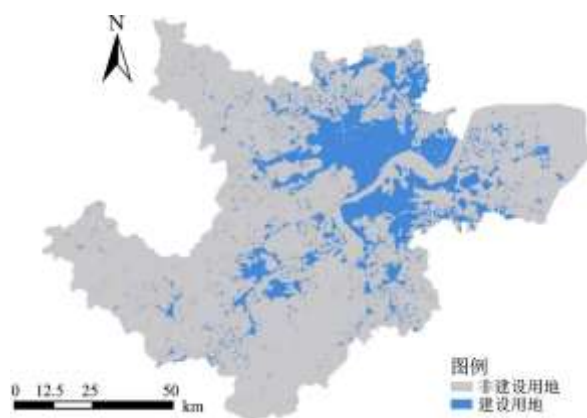


图 7 核心区规划建设用地优先发展情景下 2030 年杭州市建设用地分布情况

由不同情景下模拟边界的整合后的面积统计结果(表 2)可知，2018~2030 年，萧山区、江干区和余杭区城市面积扩张最多，增长面积分别为 83.75、51.96 和 31.32km²。从总体上看，杭州市在东、西方向发展前景较为良好，潜力巨大。首先是杭州东部方向的江干区与萧山区，空间上已与杭州市中部城区形成建成区连片，地势良好，其他类型用地转化为城市建设用地的概率极高。2019 年，杭州市确定江东新区产业聚集区与下沙经济技术开发区即将完成合并。下沙作为杭州市的高校园区与国家级高新技术开发区，坐拥大学城，拥有优质的高新技术人才资源，然而土地资源匮乏。而大江东地广人稀，拥有良好土地资源与开发条件，人才却较为匮乏。大江东作为杭州市大湾区的核心发展区域与重点开发新区，这次与下沙经济技术开发区的合并无疑是大江东飞速发展的契机。与此同时，还提出，将江干区的钱塘江金融港湾作为新的金融中心，未来将拥有上千家相关金融产业与金融服务机构，形成全国性的金融要素中心。第三产业的高速发展势必会带来大量人口与资源的流动，因此，杭州城市的东部方向将是未来的重点发展方向，城市建设用地扩展潜力巨大。

其次，杭州市西部城区余杭区增加的空间拓展面积较大，具备良好的空间拓展潜力与土地发展潜力，仅次于杭州的东部城区。2016 年，杭州市提出了建立新的省级产业集聚区——城西科创大走廊的目标。这一概念的落实表明未来将会有大量的产业经济要素与高新技术人才要素在西部城区进行高质量、高密度、大范围的聚集。为了提高这一新产业集聚区内要素的流动效率，杭州市政府未来还将在西部城区配建大型综合交通枢纽——杭州西站。大量交通、科技、人才要素的流动使得城西方向未来空间发展潜力十分巨大。

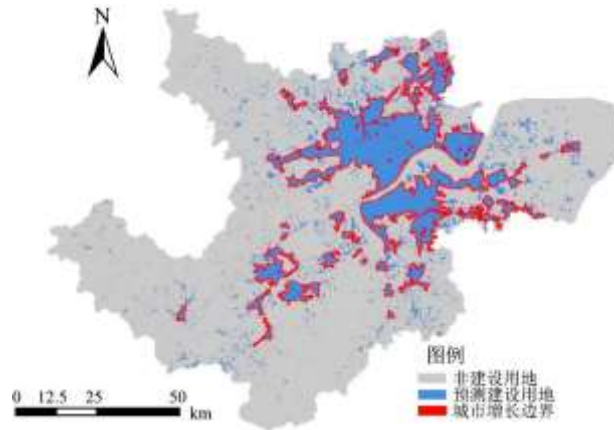


图 8 2030 年杭州市城市增长边界划定与空间拓展预测

表 2 各城区建设用地面积变化

	2018 (km ²)	2030 (km ²)
上城区	16.30	19.45
下城区	28.06	32.56
江干区	120.40	172.36
拱墅区	49.58	51.24
西湖区	83.56	91.24
滨江区	45.12	52.65
萧山区	270.64	354.39
余杭区	230.81	262.13
富阳区	140.43	159.72

4 结语

将神经网络系统与元胞自动机结合形成的神经网络元胞自动机(ANN-CA)应用于城市空间拓展与演变预测,能够有效甄别研究区域内微观的空间变量,并在城市空间拓展的模拟过程中表现城市空间系统在微观层面上的发展方向与演变特点,避免了传统预测手段带来的负面影响,能够相对准确地确定城市空间拓展的方向和边界范围。本文基于 ANN-CA 模型,综合考虑城市发展影响因子与现实情景下的刚性控制线与现实情景约束,以 2018 年为基期,对杭州市区 2030 年城市空间拓展与增长边界进行较为完整的模拟,并得到以下结论:2018~2030 年,萧山区、江干区和余杭区城市面积扩张最多,增长的面积分别为 83.75、51.96 和 31.32km²。是杭州市发展潜力较大的区域,杭州未来主要发展方向为东、西方向,总体上与杭州“城市东扩、旅游西进,沿江开发、跨江发展”的空间策略相吻合。然而,在一定时期内,城市发展受多种因素影响,城市空间的拓展方向和边界也是动态变化的。本文所确定的杭州市 2030 年城市空间拓展方向与增长边界可能是杭州市国土空间拓展到 2030 年后城市各类建设用

地的最大范围,并且在时间空间上可以满足杭州市的总体发展要求,但如果在特殊的情况下,需要对杭州市空间拓展范围实行调节的时候,可统筹考虑国家和区域宏观发展政策、市政府、城市市场主体以及城市居民的意见,经过科学合理论证,按照以人民为中心的发展理念,对城市空间拓展方向和边界范围进行具体调控和优化。当然神经网络元胞自动机(ANN-CA)也只是对城市空间拓展与演变进行研究的一种方法,与城市这个复杂的巨系统相比,依然存在着许多不足之处,对城市空间拓展和增长边界的划分的精准仿真模拟还需要多学科共同努力。

参考文献:

- [1]万广华.2030年:中国城镇化率达到80%[J].国际经济评论,2011(6):99-111.
- [2]黄明华,田晓晴.关于新版《城市规划编制办法》中城市增长边界的思考[J].规划师,2008(6):13-15.
- [3]张进.美国的城市增长管理[J].国际城市规划,2002(2):37-40.
- [4]冯科,金晓云,郑娟尔,等.浙江省城镇空间扩展的理性选择:以精明增长的视角[C]//北京:中国城市发展与土地政策国际会议,2007.
- [5]马强,徐循初.“精明增长”策略与我国的城市空间扩展[J].城市规划学刊,2004(3):16-22.
- [6]祝仲文,莫滨,谢芙蓉.基于土地生态适宜性评价的城市空间增长边界划定——以防城港市为例[J].规划师,2009,25(11):40-44.
- [7]谭荣辉,刘耀林,刘艳芳,等.城市增长边界研究进展——理论模型、划定方法与实效评价[J].地理科学进展,2020,39(2):327-338.
- [8]王玉国,尹小玲,李贵才.基于土地生态适宜性评价的城市空间增长边界划定:以深汕特别合作区为例[J].城市发展研究,2012,19(11):76-82.
- [9]周锐,王新军,苏海龙,等.基于生态安全格局的城市增长边界划定:以平顶山新区为例[J].城市规划学刊,2014(4):57-63.
- [10]苏伟忠,杨桂山,陈爽,等.城市增长边界分析方法研究:以长江三角洲常州市为例[J].自然资源学报,2012,27(2):322-331.
- [11]徐康,吴绍华,陈东湘,等.基于水文效应的城市增长边界的确定:以镇江新民洲为例[J].地理科学,2013,33(8):979-985.
- [12]NAHID FALAH,ALIREZA KARIMI,ALI TAVAKOLI HARANDI.Urban growth modeling using cellular automata model and AHP (case study:Qazvin city) [J].Modeling Earth Systems and Environment,2020,6(2):59-66.
- [13]LUIS A, GUZMAN, FRANCISCO ESCOBAR, JAVIER PENA, et al A cellular automata-based land-use model as an integrated spatial decision support system for urban planning in developing cities:The case of the Bogota region[J].Land Use Policy,2020,92.

-
- [14]HE L Y,B J X, ANDRE DACCACHE,et al.Optimize the spatial distribution of crop water consumption based on a cellular automata model:A case study of the middle Heihe River basin,China[J].Science of the Total Environment, 2020,720:178-195.
- [15]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.
- [16]刘佳,曹恺宁.城市轨道交通沿线区域空间规划策略——以西安市地铁4、5、6号线及临潼市域线为例[J].规划师,2019,35(24):70-77.
- [17]刘荣增,陆文涛,杜力卿.基于ANN-CA模型的郑州城市空间拓展研究[J].城市发展研究,2019,26(12):77-85,49.
- [18]蒋宇超,金晓斌,覃丽君,等.近六百年来城市建成区扩展过程与特征分析——以苏沪地区为例[J].城市规划,2019,43(12):55-68..
- [19]耿甜伟,毛雅倩,李九全,等.西安城市扩展时空特征及驱动机制[J].经济地理,2019,39(10):62-70.
- [20]焦利民,杨璐迪,刘稼丰,等.顾及城市空间结构信息的元胞自动机模型构建及其应用[J].地理科学,2019,39(8):1276-1283.
- [21]马世发,黎夏.地理模拟优化系统(GeoSOS)在城市群开发边界识别中的应用[J].城市与区域规划研究,2019,11(1):79-93.
- [22]马晶,徐月,冯云飞,等.GeoSOS在城市扩展中的应用[J].测绘通报,2018(7):116-120.
- [23]汤燕良,詹龙圣.基于耦合神经网络与元胞自动机的城镇开发边界划定——以惠州市为例[J].规划师,2018,34(4):101-106.
- [24]黎夏,李丹,刘小平.地理模拟优化系统(GeoSOS)及其在地理国情分析中的应用[J].测绘学报,2017,46(10):1598-1608.
- [25]李少英,刘小平,黎夏,等.土地利用变化模拟模型及应用研究进展[J].遥感学报,2017,21(3):329-340.
- [26]张美美,张荣群,郝晋珉,等.基于ANN-CA的银川平原湿地景观演化影响情景模拟分析[J].地球信息科学学报,2014,16(3):418-425.
- [27]张亦汉,黎夏,刘小平,等.耦合遥感观测和元胞自动机的城市扩张模拟[J].遥感学报,2013,17(4):872-886.
- [28]陈德权,兰泽英.基于POI数据的城市中心体系识别与边界提取——以长沙市中心六区为例[J].现代城市研究,2020,(4):82-89.
- [29]李沁,沈明,高永年,等.基于改进粒子群算法和元胞自动机的城市扩张模拟——以南京为例[J].长江流域资源与环境,2017,26(2):190-197.
- [30]胡飞,柯新利,柴明,等.权衡城市扩张与永久基本农田保护的城市增长边界划定——以武汉市为例[J].地理与地理信

息科学, 2019, 35 (3) :72-77.

[31] 胡碧松, 张涵玥. 基于 CA-Markov 模型的鄱阳湖区土地利用变化模拟研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27 (6) : 1207-1219.