

引用格式:柯新利,肖邦勇,郑伟伟,等.城镇-农业-生态空间划定的多情景模拟[J].地球信息科学学报,2020,22(3):580-591. [Ke X L, Xiao B Y, Zheng W W, et al. Urban-agricultural-ecological space zoning based on scenario simulation[J]. Journal of Geo-information Science, 2020,22(3):580-591.] DOI:10.12082/dqxxkx.2020.190404

城镇-农业-生态空间划定的多情景模拟

柯新利,肖邦勇,郑伟伟,马艳春,李红艳

华中农业大学公共管理学院,武汉 430070

Urban-agricultural-ecological Space Zoning based on Scenario Simulation

KE Xinli*, XIAO Bangyong, ZHENG Weiwei, MA Yanchun, LI Hongyan

College of Public Administration, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract: The urban-agricultural-ecological space zoning (referred to as the "three zones") is the core content of land space planning. It is important for scientific and rational planning and using of limited land resources. The former researches set up various indicator systems for "three zones", mainly based on the current regional land use and socio-economic development status. But they rarely incorporate future land use changes into the "three-zone" delineation process, making the results less forward-looking in guiding practice. To make up the gap of current research, we propose a new "three zones" delineation method in this paper. It is based on the simulation of land use scenarios and combines the advantages of indicator system and decision tree data mining, which is different from the traditional method of "indicator system - weighted comprehensive value". This paper selected Wuhan as the research area, and used this method to explore the spatial differences of the "three zones" under different land use scenarios in the future. We simulated four land use scenarios of Wuhan in 2035 (Natural development scenario, Farmland protection scenario, Ecological protection scenario and Balance development scenario) based on the land use of Wuhan in 2015. After that, we combined the constructed indicator system and multiple textual references to select typical samples for decision tree training. Then using the classification rule set generated by the decision tree (86.4% average accuracy) to identify the "three zones" spatial categories of the research units. Finally, we obtained the "three zones" distribution under different land use scenarios. Compared with the similar former researches, the method proposed in this article is more reasonable and feasible and can be used in specific research and practice. Besides, we found that: (1) there are obvious differences in the area, spatial distribution and main change types of the "three zones" caused by different land use scenarios. So, it is indeed necessary to incorporate future land-use changes into the "three zones" delineation process. (2) The spatial distribution of "three zones" in different land use scenarios shows similar characteristics. The differences in spatial distribution of "three zones" in different land use scenarios are mainly the border area where the main land use function changes. Therefore, these areas are the key areas that land space planning should focus on.

Key words: land space planning; "urban-agricultural-ecological space" zoning; LANDSCAPE model; LUCC; scenario simulation; the C5.0 decision tree; data mining; Wuhan City

收稿日期:2019-07-28;修回日期:2019-12-14.

项目基金:国家自然科学基金项目(41371113);国家社会科学基金项目(13CGL092)。 [**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China, No.41371113; National Social Science Foundation of China, No.13CGL092.]

作者简介:柯新利(1977—),男,湖北天门人,博士,教授,主要研究方向为土地资源优化配置。E-mail: kexl@mail.hzau.edu.cn

*Corresponding author: KE Xinli, E-mail: kexl@mail.hzau.edu.cn

摘要:城镇-农业-生态空间划定(简称“三区”划定)是国土空间规划的核心内容,对于科学合理地规划、利用有限的国土资源具有重要的意义。已有研究主要根据区域内土地利用与社会经济发展现状构建指标体系进行“三区”划定,较少将未来土地利用变化纳入“三区”划定过程中,使得划定结果在指导实践过程中缺乏前瞻性。针对这一问题,本文提出一种基于土地利用情景模拟,结合指标体系评价与决策树特征挖掘的“三区”划定方法,并以武汉市2015年土地利用现状为基础,在土地利用变化情景模拟的基础上进行“三区”划定。通过对比,验证了本文提出方法的合理性。研究发现:①不同情景下的“三区”空间在规模、空间分布上具有明显差异,将未来土地利用变化纳入“三区”划定过程中确有必要;②不同土地利用情景下“三区”空间的差异主要出现在三类空间的交界区域,这些区域是国土空间规划应该关注的重点区域。

关键词:国土空间规划;三区划定;LANDSCAPE模型;土地利用变化;情景模拟;C5.0决策树;数据挖掘;武汉市

1 引言

随着城镇化的快速推进,由城市盲目扩张造成的耕地流失^[1]、生态恶化^[2]、资源浪费^[3]、国土空间开发混乱^[4]等问题日益突出。构建科学、合理的国土空间开发格局成为区域经济可持续发展的重要基础。自2000年以来,协调产业、空间、人口、资源与环境成为各级规划关注的重点问题。广大学者围绕“三生空间”,对三生功能内涵^[5]、三生功能分类体系^[6]、三生空间识别^[7]与优化^[8]等方面进行了深入研究。2017年1月,《全国国土规划纲要(2016—2030)》提出进一步划定城镇、农业、生态空间的重要性^[9]，“三生空间”进一步深化为“三区空间”。学者们立足于“三生功能”的研究基础,对“三区”展开了新的探索。

“城镇-农业-生态空间”是3种具备土地多功能特性,既在主体功能上有差异,又存在功能上交叉的空间形式^[10],是国土空间规划的核心内容。广大学者立足于不同的理论基础对“三区”概念、主导功能、划定方法进行积极探索^[11-12],部分学者依托前人的研究从不同角度对划定的空间进行优化^[13-14]。由于土地利用变化的情景模拟有助于土地利用环境影响评估或者土地利用规划方案优化^[15],采用土地利用变化模型模拟不同情景下的土地利用状况已被广泛应用于LUCC相关研究^[16-17]。伴随着各种新的理论基础、方法技术的不断融入,运用各种土地利用变化模型探索国土空间的优化配置成为国土空间规划、国土资源优化布局等领域的热点^[18-20]。然而,现有研究以及实际应用^[21-22]中往往立足于研究区土地利用现状,结合当前的自然、社会、经济等特征进行“城镇-农业-生态空间”识别,较少将未来土地利用变化纳入到“三区”划定过程中,在指导国土空间规划方面具有一定的局限性。

本文以经济发展迅速、土地利用矛盾较为突出的武汉市作为研究区域,运用LANDSCAPE模型^[23]以武汉市2015年土地利用现状为起点,对武汉市2035年土地利用变化进行多种情景模拟。在此基础上,结合指标体系评价方法与C5.0决策树算法^[24-25],提出基于未来土地利用变化情景的“城镇-农业-生态空间”划定方法体系,以期为更加科学、合理的国土空间规划提供方法支撑。

2 研究区概况与数据来源

2.1 研究区概况

武汉市是湖北省省会城市,位于江汉平原东部、长江中游(图1)。境内有众多的湖泊资源与丰富的湿地资源。武汉市拥有良好雨热条件以及平坦的地表起伏态势,耕地质量好、连片度高。全境

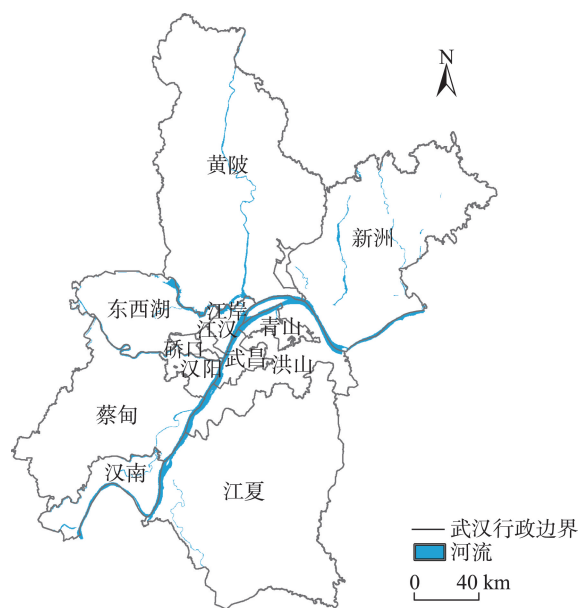


图1 武汉市地理位置

Fig. 1 The location of Wuhan

面积 8494.41 km², 下辖 13 个市辖区, 是我国中部地区经济发展的中心城市, 也是国家“两型社会”改革建设试点区域, 经济发展迅猛。2018 年末, 武汉市常住人口 1108.1 万人, 地区生产总值为 1.48 万亿元。经济的快速发展使得建设用地快速扩张, 导致周边耕地、生态用地的快速流失^[26]。近年来, 武汉市高度重视耕地保护与生态文明建设, 重视“城镇-农业-生态空间”划定, 以提高土地资源可持续利用水平^[27]。

2.2 数据来源及处理

本文所使用数据主要有 7 类: 土地利用数据集^[28]、气象数据集^[28]、耕地生产潜力数据^[29]、土壤数据集^[30]、地形数据集^[31]、交通数据集、统计年鉴和规划等文本数据集^[32-35], 数据来源及相关信息如表 1。

其中, 土地利用数据根据研究需要将二级地类合并为耕地、林地、草地、河流、湿地、城镇建设用地、农村建设用地与未利用地 8 大类, 其中生态用地主要包括林地、草地、河流、湿地 4 大类。为保证数据尺度的一致性, 本研究中涉及的所有数据均在 ArcGIS 10.2 平台中重采样为 100 m×100 m。

3 研究方法

3.1 研究思路

本文研究思路主要分为决策树训练、土地利用变化情景模拟和“三区”划定三大部分(图 2)。在决策树训练阶段, 在小流域划分的基础上, 以二级小流域为研究单元, 从交通区位、生态禀赋、土地利用条件 3 个方面构建指标体系, 根据小流域主导土地

表 1 数据来源与主要特征
Tab. 1 Data sources and descriptions

数据类型	数据内容	数据来源	数据描述
土地利用数据集	武汉市 2010 年土地利用现状 武汉市 2015 年土地利用现状	中国科学院资源环境数据中心 (http://www.resdc.cn/)	空间分辨率为 30 m×30 m, 根据研究需要将二级地类合并 8 大一级地类
气象数据集	武汉市 2015 年年降雨量 武汉市 2015 年年均气温	中国科学院资源环境数据中心 (http://www.resdc.cn/)	数据原始空间分辨率为 1 km×1 km, 年降雨量单位为 0.1 mm, 年均气温单位为 0.1 °C
耕地生产潜力数据集	武汉市 2010 年耕地生产潜力数据	中国科学院资源环境数据中心 (http://www.resdc.cn/)	采用 GAEZ 模型测算所得, 初始分辨率为 1 km×1 km
地形数据集	武汉市高程数据 武汉市坡度数据	美国航空航天局航空雷达测绘数据(SRTM) (https://www.nasa.gov/)	数据原始分辨率为 90 m×90 m
土壤数据集	土壤有机质含量 土壤有效磷含量 土壤耕作层厚度	中国土壤数据库 (http://vdb3.soil.csdb.cn/)	采用克里金插值法获得研究区域不同空间位置的土壤特征
交通数据集	武汉市省道 武汉市高速公路 武汉市国道 武汉市铁路 武汉市市区道路	运用 Python 语言编写 API 接口, 从百度地图获得	初始数据为矢量数据, 采用克里金插值法反映研究区不同空间位置的交通区位特征
规划等文本数据集	《TDT 1024-2010 市(地)级土地利用总体规划编制规程》 《TDT 1024-2010 县级土地利用总体规划编制规程》 《生态文明体制改革总体方案》 《武汉市全域生态框架保护规划》 《武汉市土地利用总体规划(2006—2020 年)》 《武汉市工业发展“十三五”规划》 《2016 年城乡建设统计年鉴》	中华人民共和国自然资源部 (http://www.mnr.gov.cn/) 武汉市自然资源和规划局 (http://gtghj.wuhan.gov.cn/) 武汉市人民政府(http://www.wuhan.gov.cn) 中华人民共和国住房和城乡建设部 (http://www.mohurd.gov.cn/)	用于了解不同国土主体空间类型之间的性质差异与用途管制规则差异 用于了解不同主导功能区域的规划边界及划定原则 用于预测武汉市 2035 年城镇建设用地面积

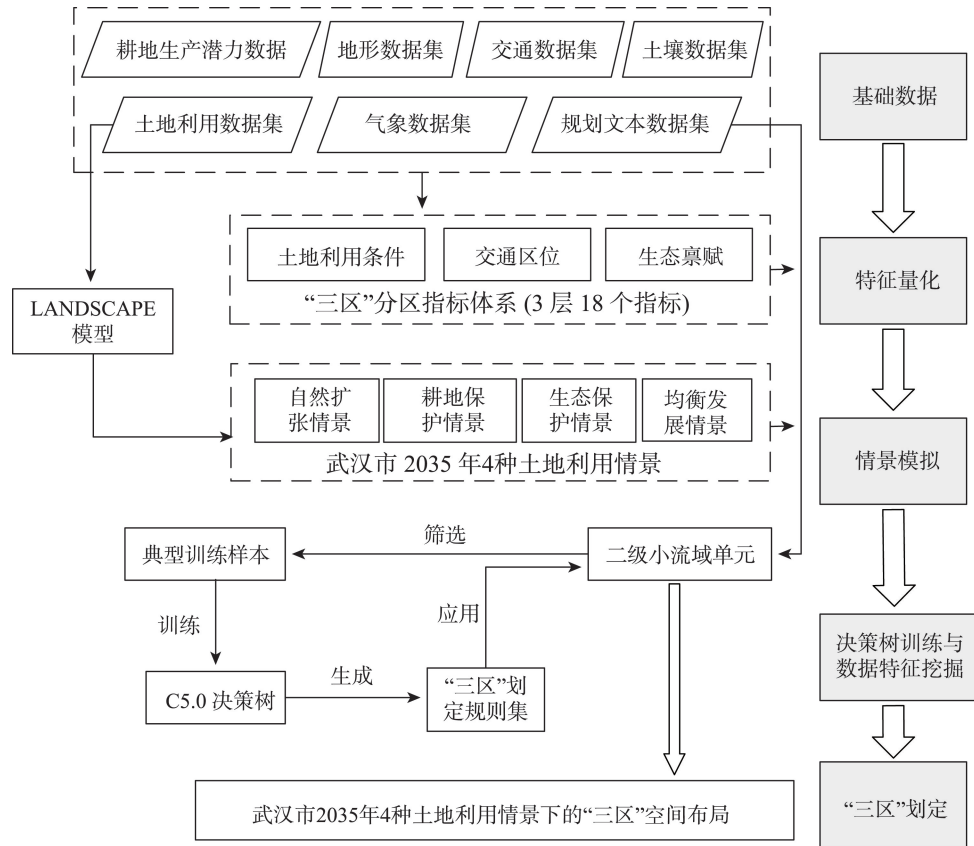


图2 武汉市土地利用情景空间布局技术路线

Fig. 2 Research scheme of Wuhan city under different scenarios

利用功能选取“城镇-农业-生态空间”的典型样本,将各典型样本的指标数据与主导土地利用功能输入C5.0决策树模型,完成“三区”划定决策树的训练。在土地利用变化情景模拟阶段,首先利用历史土地利用数据对LANDSCAPE模型进行校正,在此基础上,根据区域社会经济发展和生态环境保护的需要,设定不同的情景,采用校正的LANDSCAPE模型模拟不同情景下武汉市土地利用空间分布。在“三区”划定阶段,采用训练好的“三区”划定决策树根据土地利用变化情景模拟结果和各指标数据,划定不同土地利用情景下武汉市“城镇-农业-生态空间”。

3.2 C5.0决策树训练

3.2.1 城镇-农业-生态空间分区指标体系

立足于社会发展、生活承载、生态维护等多个角度,选取不同指标构建指标体系,进行国土空间分区是应用十分广泛的方法^[36-37]。本文基于前人对“三区”内涵以及“三区”功能的研究成果,从交通区位、生态禀赋、土地利用条件3方面选取了18个指标构建“城镇-农业-生态空间”划分的指标体系(表2)。考虑到社会经济数据对预测方法要求较高,在未来

发展过程中易受到多方因素的影响而难以保证预测数据的准确性,本文未将社会经济数据纳入到“城镇-农业-生态空间”分区指标体系中。

3.2.2 研究单元

目前在研究“城镇-农业-生态空间”的识别与优化过程中,主要以行政单元或用地类型区为研究单元^[38],较少考虑行政单元内部的自然基底特征。然而保证研究单元内的生态系统完整性或者单元内的自然空间特征稳定性,对于划定“城镇-农业-生态空间”具有重要意义。小流域单元是相对独立、完整的自然集水区,也是水土保持和生态文明建设目标的重要落实区域^[39],能够有效保证单元内部的生态系统完整性。因此,本文选用小流域单元作为研究单元,利用ArcGIS 10.2平台的水文分析工具对武汉市的DEM数据进行提取,总计获得研究区域内866个二级小流域单元,其中最小单元面积0.51 km²,最大单元面积54.79 km²。

3.2.3 训练样本选取

与传统的“指标评价体系+权重综合分值”的划定方法不同,本文采取“土地利用情景模拟+指标评

表2 城镇-农业-生态空间分区指标体系

Tab. 2 The indicator system of urban-agricultural-ecological space zoning

因素层	指标层	指标计算方法	指标描述
交通区位	到省道的距离/m	运用 ArcGIS 10.2 平台的欧氏距离工具进行提取	反映城镇发展条件
	到高速公路的距离/m		
	到市区道路的距离/m		
	到国道的距离/m		
生态禀赋	城镇建设用地比重/%	城镇建设用地面积/研究单元面积	反映生态资源基底特征
	农村建设用地比重/%	农村建设用地面积/研究单元面积	
	年均降雨量/mm	研究单元内年均降雨量均值	
	年均气温/°C	研究单元内年均气温均值	
	水系比重/%	(河流面积+湿地面积)/研究单元面积	
	森林比重/%	林地面积/研究单元面积	
	草地比重/%	草地面积/研究单元面积	
土地利用条件	到最近水系的距离/m	运用 ArcGIS 10.2 平台的欧氏距离工具进行计算得到	反映土地生产条件
	高程/m	源自美国航空航天局航空雷达测绘数据(SRTM)	
	坡度/°	运用 ArcGIS 10.2 平台的坡度提取工具,由 DEM 获得	
	土壤有机质含量/(g/kg)	源自中国土壤数据库	
	土壤有效磷含量/(mg/kg)		
	土壤耕作层厚度/(cm)		
	耕地比重/%	耕地面积/研究单元面积	

价体系+数据特征挖掘”的思路进行“三区”识别,即在土地利用情景模拟与指标评价体系构建完成基础上,通过空间类别明确的典型样本单元获取“三区”特征集,再利用包含“三区”特征集的成熟决策树数据识别研究区域的全域“三区”空间分布,因此训练样本空间类型的典型性对研究结果的质量具有直接影响。为确保选取的城镇-农业-生态空间样本的典型性,本文立足于武汉市土地利用现状,结合《TDT 1024-2010 市(地)级土地利用总体规划编制规程》^[33]、《TDT 1024-2010 县级土地利用总体规划编制规程》^[33]、《生态文明体制改革总体方案》^[34]等多种已公布规划文本进行典型训练样本的选取,其中能够选取的生态空间的典型样本数量最少,为40个,为保证样本数量的一致,本文分别选取了40个城镇空间、农业空间、生态空间的典型样本单元作为训练集,输入C5.0决策树算法进行特征学习与挖掘,经过10折交叉验证,最终获得了分类精度为86.4%的成熟决策树。

3.3 土地利用情景模拟方法

3.3.1 LANDSCAPE 模型

LANDSCAPE 模型是一款基于元胞自动机开发的土地系统模拟与优化模型,除了具有传统 CA 模型模拟复杂的地理时空过程的功能外^[40],还能够解释和模拟土地利用变化连锁反应和土地利用之

间的竞争,可用于模拟不同政策下的土地利用情景变化^[41-42]。该模型模拟过程中每个元胞由当前地类转变为其他地类的概率大小由其适宜性和阻抗共同决定^[23]:

$$TP_{iu} = \frac{P_{iu}}{R_{iu}} \quad (1)$$

式中: TP_{iu} 表示元胞 l 由期初地类转变为期末地类 u 的概率大小; P_{iu} 表示元胞 l 转变为地类 u 的适宜性,即每个元胞由当前地类转变为其他某种地类的适宜程度,通过对历史土地利用变化规律进行学习与特征挖掘获得; R_{iu} 表示元胞 l 转变为地类 u 的阻抗,每个元胞的阻抗由 2 部分共同组成:初始阻抗值和调整阻抗值,其中初始阻抗值,由模型根据各种数据从历史规律中得到,而调整阻抗值,则由不同情景的模拟需求确定。

3.3.2 土地利用情景设置

近年来,武汉市在社会经济快速发展的过程中,对粮食安全与生态安全也日益重视。从武汉市实际出发,本文设置了4种土地利用情景:自然扩张情景、耕地保护情景、生态保护情景和均衡发展情景,每种情景以建设用地的需求量作为模型终止条件。本文采用《2016年中国城市建设统计年鉴》^[35]中统计的历年建成区面积数据预测武汉市2035年建设用地规模,选用灰色预测模型、人口间接测算

和指数模型分别进行预测,取平均值 1460.22 km²作为 2035 年武汉市城镇建设用地规模。

(1)自然扩张情景。自然扩张情景是指武汉市土地利用变化按历史规律向前演进。

(2)耕地保护情景。耕地保护情景是指武汉市未来的土地利用变化以优质耕地的优先保护为目标。在采用 LANDSCAPE 模型进行情景模拟时,将耕地生产潜力数据按照从低到高,采用自然断点法分为 1~5 等,分别设置其调整阻抗值,结果如表 3 与图 3(a),以实现优质耕地的优先保护。

(3)生态保护情景。生态保护情景是指武汉市未来土地利用变化以高质量生态用地优先保护为目标。在采用 LANDSCAPE 模型进行情景模拟时,参照国内学者对于生态重要性评价^[43-44]等方面的研究,结合武汉市的实际情况,综合选取道路交通距离、水系距离、高程、坡度、土壤有机质含量、生态资源禀赋做叠加分析,对叠加结果从低到高采用自然

断点法分为 1~5 等,分别设置其调整阻抗值,结果如表 3 与图 3(b)所示。

(4)均衡发展情景。均衡发展情景是指在保证城市发展的基础上,均衡考虑耕地质量和生态重要性的土地利用情景。本文将耕地保情景与生态保护情景的调整阻抗值进行叠加,获得均衡发展情景下的调整阻抗值,设定在均衡发展情景下耕地保护与生态保护处于同等重要的地位,因此按照各自权重 50%进行叠加,结果如表 3 与图 3(c)。

3.3.3 LANDSCAPE 模型模拟精度校验

在使用 LANDSCAPE 模型模拟武汉市 2035 年 4 种情景下的土地利用之前,需要对 LANDSCAPE 模型的模拟精度进行校验,以保证本文所获得的最终模拟结果具备较高的可信度。因此,本文以武汉市 2010 年的土地利用现状为基础,模拟得到 2015 年土地利用空间布局,借助 Map Comparison Kit 软件平台,采用 Kappa Simulation^[45]这一指标,对不同地

表 3 4 种土地利用情景下的阻抗参数

Tab. 3 Resistance values of different land use types under four land use scenarios

情景类别	阻抗类型	耕地	林地	草地	河流	湿地	城镇建设用地	农村建设用地
	初始阻抗	1.35	1.40	1.20	1.50	1.45	1.50	1.30
自然扩张	调整阻抗	—	—	—	—	—	—	—
耕地保护	调整阻抗	图 3(a)	—	—	—	—	—	—
生态保护	调整阻抗	—	图 3(b)	图 3(b)	图 3(b)	图 3(b)	—	—
均衡发展	调整阻抗	图 3(c)	图 3(c)	图 3(c)	图 3(c)	图 3(c)	—	—

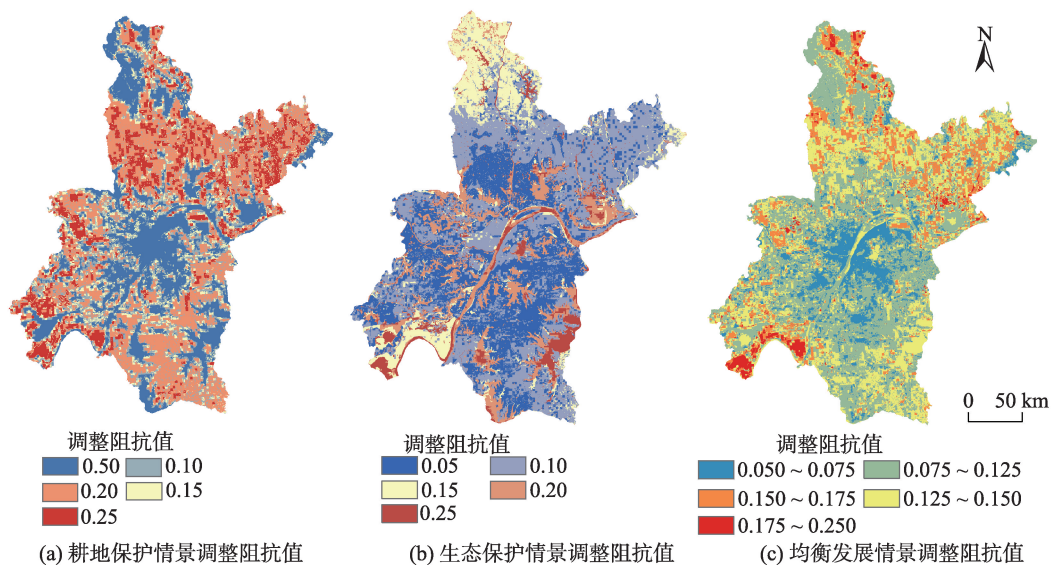


图 3 不同土地利用情景下调整阻抗值空间分布

Fig.3 Spatial distribution of adjusted resistance values under different scenarios

类的模拟精度进行验证,通过该软件平台对2010年实际土地利用数据与2015年实际土地利用数据、2010年实际土地利用数据与2015年模拟结果,2种土地利用变化过程中各个地类的数量精度与空间位置精度进行对比分析,进而获取模拟结果中每种地类总的模拟精度,以此验证LANDSCAPE模型模拟精度。与常用的Kappa系数不同,Kappa Simulation在精度评估时可以区分已变化和未变化的栅格,能够很好地避免过高估计,其分值范围为[-1, 1],其中1表示模拟结果的地类与实际地类之间完全匹配,0表示模拟结果的地类分布存在随机分布现象,-1表示模拟结果的地类与实际的地类之间完全不匹配。 $K_{Transition}$ 反映2种土地利用变化过程对比下的各个地类的数量精度, $K_{TransLoc}$ 反映2种土地利用变化过程对比下的各个地类的空间位置精度。精度验证结果如表4所示,从中可以看出各个地类的Kappa Simulation值均大于0,这表明无需对模型进行调参即可获得足够精度的模拟结果。

4 结果及分析

4.1 土地利用情景模拟结果

以自然扩张情景为基础,对比分析其他情景相比于自然扩张情景的地类差异(表5)可以看出,4种情景的城镇建设用地均达到前文所测算的规模:1460.22 km²。与自然扩张情景相比,耕地保护情景

多保留111.49 km²的耕地,且耕地保护情景下的耕地保有量高于生态保护情景和均衡发展情景,在4种情景中对耕地保护力度最大;生态保护情景下,比自然扩张情景多保留了41.07 km²的湿地,生态用地保有总量最高,在4种情景中对生态用地的保护力度最大;而均衡发展情景与自然扩张情景相比,生态用地的损失量比只注重保护耕地的耕地保护情景低很多,具备较高生态系统服务价值的湿地仅在自然扩张情景基础上损失了0.6 km²,林地、草地也表现出同样的状况,同时,此情景下的耕地保有量仅在自然扩张基础上增加了5.6 km²。总体而言,均衡发展情景对于耕地的保护力度低于耕地保护情景,而对生态用地的保护力度也低于生态保护情景。因此,均衡发展情景实现了城市扩张过程中均衡考虑保护耕地及重要生态用地的目的,此情景下表现出建设用地扩张、耕地保护和生态保护3种目标协调发展的特征。

4.2 “城镇—农业—生态”空间识别

根据前文所述思路中获得的成熟决策树对4种土地利用情景下的研究单元进行“城镇—农业—生态空间”的识别,结果如图4所示。总体而言,4种情景下的城镇空间分布差异较小,主要表现在主城区边缘以及黄陂区、新洲区的一些主要农村居民点聚集地存在与其他空间之间的相互转化。对比表6中的“三区”空间面积构成可以看出,4种情景下城

表4 LANDSCAPE模型模拟精度验证

Tab. 4 The accuracy verification of LANDSCAPE model

地类	耕地	林地	草地	河流	湿地	城镇建设用地	农村建设用地	未利用地
<i>Kappa simulation</i>	0.176	0.110	0.008	1.000	0.094	0.274	0.072	0.070
$K_{TransLoc}$	0.328	0.228	0.249	1.000	0.178	0.321	0.169	0.242
$K_{Transition}$	0.537	0.483	0.322	1.000	0.531	0.853	0.428	0.287

表5 4种情景下的武汉市土地利用结构及分别与自然扩张情景的对比

Tab. 5 Land use structure and comparative analysis between each scenario and the Natural development scenario of Wuhan

土地利用情景	耕地	林地	草地	河流	湖泊	城镇建设用地	农村建设用地	未利用地
耕地保护	4518.45	692.12	55.23	299.10	1160.20	1460.22	252.81	62.53
变化量	111.49	-43.35	-13.50	0	-62.16	0	6.54	0.98
生态保护	4341.11	748.80	72.46	299.10	1263.50	1460.22	251.16	64.38
变化量	-65.85	13.33	3.73	0	41.07	0	4.89	2.83
均衡发展	4412.56	726.03	64.67	299.10	1221.80	1460.22	251.69	64.63
变化量	5.60	-9.44	-4.06	0	-0.60	0	5.42	3.08
自然扩张	4406.96	735.47	68.73	299.10	1222.4	1460.22	246.27	61.55

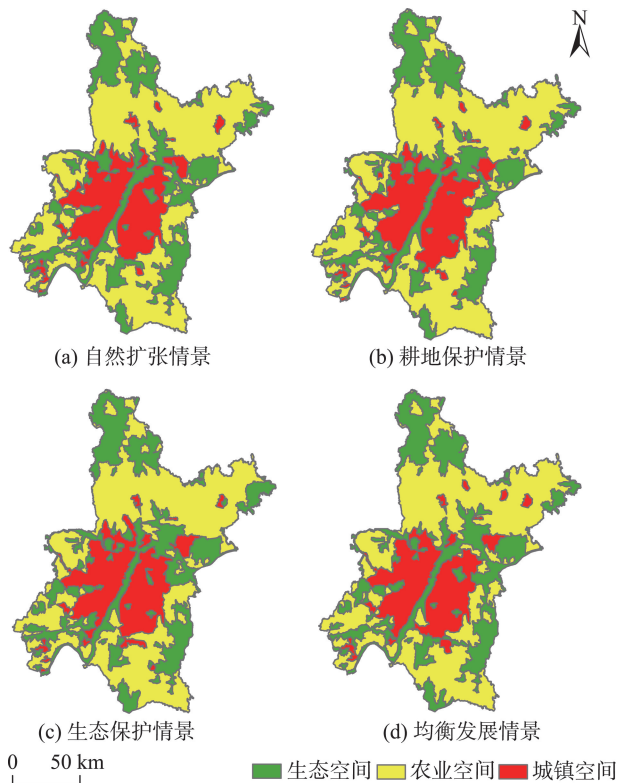


图4 4种情景下的武汉市城镇-农业-生态空间分布

Fig. 4 The spatial distribution of the urban-agricultural-ecological space under four scenarios of Wuhan

镇空间规模相近,处于1723~1725 km²之间,约占全市面积的20.10%;而农业空间与生态空间的规模则在不同的土地利用情景下表现出明显差异,其中农业空间在耕地保护情景下规模最大,在生态保护情景下规模最小,在均衡发展情景下低于自然扩张情景、高于生态保护情景;生态空间在生态保护情景下规模最大,在耕地保护情景下规模最小,在均衡发展情景下表现出与农业空间类似的中间态势。这也反映出,不同土地利用情景的保护目的及保护力度差异会对“三区”空间规模产生较为直接的影响。

此外,武汉市2035年4种土地利用情景下“城镇-农业-生态空间”的空间分布中城镇空间的主体仍位于武汉市主城区,而4种土地利用情景下的城镇空间差异主要位于主城区边缘,如江岸区与黄陂区交接处、洪山区与江夏区交接处以及黄陂区、新洲区界内一些较为集中的居民点。4种土地利用情景下的农业空间则主要分布在武汉市6个远城区,在空间上与耕地的实际空间分布较为一致,不同情景下农业空间分布的差异区域主要位于主城区与远城区之间的交界处,以及林草地与耕地交界处、湿地与耕地的交界处。而生态空间则主要分布在武汉市境内的主要山区、河流水系以及湖泊湿地集中

表6 4种情景下的武汉市“城镇-农业-生态空间”面积与占比

Tab. 6 The area and proportion of the urban-agricultural-ecological space under four scenarios of Wuhan

情景类型	生态空间	农业空间	城镇空间
耕地保护/km ²	4273.24	1725.39	2575.56
空间占比/%	49.84	20.12	30.04
生态保护/km ²	4395.90	1723.09	2455.20
空间占比/%	51.27	20.10	28.63
均衡发展/km ²	4162.15	1725.22	2686.82
空间占比/%	48.54	20.12	31.34
自然扩张/km ²	4213.35	1723.55	2637.28
空间占比/%	49.14	20.10	30.76

区,其空间边界在不同土地利用情景下有所不同。

为了进一步分析4种土地利用情景下的“城镇-农业-生态空间”在空间上的相互差异及变化情况,本文将4种土地利用情景下的三区空间布局进行两两对比,结果如图5。

从图5可以看出,4种土地利用情景下“三区”空间相互转变的区域分布较为相似,武汉市北部、西部及南部区域以农业空间与生态空间的相互转变为主,主城区周边以城镇空间与农业空间、生态空间的相互转变为主。这表明所得结果的“三区空间”在各类空间边界易发生空间类型的变动,在图5所示的这些区域会因为土地利用的目的差异而导致“三区空间”类型的变动。图5所示6种两两对比的空间差异结果中,农业空间相互转化的最大规模为368.87 km²,发生于耕地保护与生态保护2种情景的对比中,其空间分布如图4(d);生态空间相互转化的最大规模为350.18 km²,发生于生态保护与自然扩张2种情景的对比中,其空间分布如图4(b);城镇空间相互转化的最大规模为187.61 km²,发生于耕地保护与自然扩张2种情景的对比中,其空间分布如图4(a),即不同土地利用情景间的变动所导致的主要空间类型的变化不同。

5 结论与讨论

5.1 结论

本文针对当前国土空间规划“三区”划定研究对未来土地利用变化考虑较少这一问题,提出一种土地利用情景模拟、指标体系评价与决策树特征挖掘相结合的“三区”划定方法,将未来土地利用变化纳入到“三区”划定过程中,并以武汉市为研究区

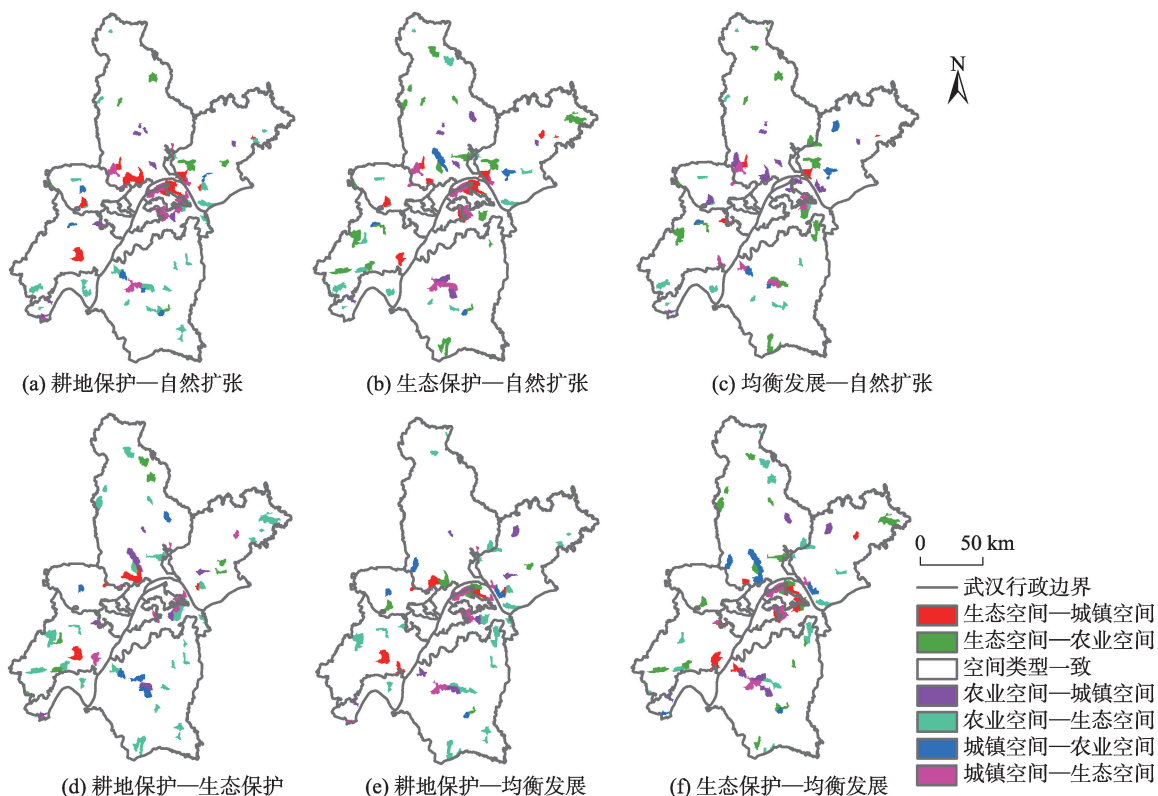


图5 不同情景下的武汉市城镇-农业-生态空间分布差异

Fig. 5 Comparisons of urban-agricultural-ecological spatial distribution under each two scenarios in Wuhan City

域,采用此方法划定不同土地利用情景下的“三区”空间,研究发现:

(1)相比于“指标评价体系+权重综合分”的思路,本文提出的“情景模拟+指标评价体系+数据特征挖掘”思路,一方面将未来土地利用变化纳入“三区”划定过程中,另一方面能够减少划定过程中因权重计算方式等对结果造成的主观影响。对比本文的研究成果与前人所做的武汉市“三生空间”方面的研究^[46],前人所得出的“武汉市6个主城区应以生活功能为主,洪山区大部分以生态功能为主,应当在未来规划中提升生活功能;江夏区、新洲区、汉南区应以生产功能为主;东西湖区、蔡甸区、黄陂区应以生态功能为主”的结论,与本文将未来土地利用变化纳入“三区”划定所得出的城镇空间、农业空间、生态空间的主要分布区域较为一致,故本文所提出的方法是合理的,可以用于具体的研究与实际应用中。

(2)不同土地利用情景下所得出的“三区”划定成果在空间规模上差异较为明显。其中城镇空间在不同土地利用情景下的空间规模较为一致,约1723 km²,而农业空间与生态空间规模受到土地利

用情景的显著影响而存在不同土地利用情景间的较大差异。此外,土地利用情景的转变所导致的3种空间类型之间发生的主要变化有所差异,将未来不同土地利用情景纳入“城镇-农业-生态”空间划定过程中是必要的。

(3)不同土地利用情景下的“三区”空间在空间分布上表现出相似的特征,即城镇空间主要分布于武汉市主城区及远城区中农村建设用地较为集中的区域;农业空间主要分布于6个远城区中,与实际耕地资源的空间分布状况一致;生态空间主要分布于武汉市北部山区、长江等主要河流水系以及武汉市主要湖泊等湿地资源集中区域。总体而言,不同土地利用情景下的“三区”空间分布的差别主要表现为农业空间与生态空间的差异。“三区”空间在不同土地利用情景下的空间差异主要集中于城镇空间、农业空间、生态空间相互之间的交界处,这些区域应该作为“三区”划定过程中重点关注的区域。

5.2 讨论

本文针对当前国土空间规划研究领域对“城镇-农业-生态空间”划定考虑的不足,提出了一种基于土地利用情景模拟的新方法,并以武汉市为研

究区域,探讨未来不同土地利用情景下的“三区”划定结果,对比前人所做的类似研究结论,验证了本文所提出的方法的科学性、必要性和可行性,并揭示出不同土地利用情景所带来的“三区空间”在规模、空间分布的差异。但土地利用变化是一个非线性的复合变化过程^[47],受到自然、社会、政策等诸多因素的影响,运用土地利用变化模型对未来土地利用状况进行情景模拟的方式对模型参数有较高的要求,且随着政策偏向、城市化加速推进等因素的不断变动,经济水平、人口数量等很多因子的未来状况越来越难被有效预测,这使得用模型模拟未来情景时需要结合更多的参数,以减少不确定性。本文在土地利用变化模拟中对社会经济因素的考虑不够,虽然能较好地反映区域土地利用变化的总体趋势,但有可能导致土地利用变化模拟结果的不确定性,在后续的研究中需要加强,以减少土地利用变化模拟结果的不确定性。

参考文献(References):

- [1] 黄滢冰,南卓铜,徐启恒,等.珠三角典型地区耕地流失特征及机制分析——以1988年—2013年快速城市化的东莞市为例[J].世界地理研究,2017,26(5):44-55. [Huang Y B, Nan Z T, Xu Q H, et al. Characteristics and driving forces of the arable land loss in Dongguan[J]. World Regional Studies, 2017,26(5):44-45.]
- [2] 孙东琪,张京祥,朱传耿,等.中国生态环境质量变化态势及其空间分异分析[J].地理学报,2012,67(12):1599-1610. [Sun D Q, Zhang J X, Zhu CF, et al. An assessment of China's ecological environment quality change and its spatial variation[J]. Acta Geographica Sinica, 2012,67(12):1599-1610.]
- [3] 梁流涛,赵庆良,陈聪.中国城市土地利用效率空间分异特征及优化路径分析——基于287个地级以上城市的实证研究[J].中国土地科学,2013,27(7):48-54. [Liang L T, Zhao Q L, Chen C. Analysis on the characters of spatial disparity of urban land use efficiency and its optimization in China[J]. Chinese Land Sciences, 2013,27(7):48-54.]
- [4] 严金明.有序有度开发国土空间[J].国土资源,2013(7):18-19. [Yan J M. Developing land space orderly and moderately [J]. Land & Resources, 2013(7):18-19.]
- [5] 李广东,方创琳.城市生态—生产—生活空间功能定量识别与分析[J].地理学报,2016,71(1):49-65. [Li G D, Fang C L. Quantitative function identification and analysis of urban ecological-production-living spaces[J]. Acta Geographica Sinica, 2016,71(1):49-65.]
- [6] 刘继来,刘彦随,李裕瑞.中国“三生空间”分类评价与时空格局分析[J].地理学报,2017,72(7):1290-1304. [Liu J L, Liu Y S, Li Y R. Classification evaluation and spatial-temporal analysis of "production-living-ecological" spaces in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2017,72(7):1290-1304.]
- [7] 于莉,宋安安,郑宇,等.三生用地”分类及其空间格局分析——以昌黎县为例[J].中国农业资源与区划,2017,38(02):89-96. [Yu L, Song An'an, Zheng Y, et al. The ecological-living-industrial land classification system and the analysis of spatial distribution: case of Changli County [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2017,38(2):89-96.]
- [8] 朱媛媛,余斌,曾菊新,等.国家限制开发区“生产—生活—生态”空间的优化——以湖北省五峰县为例[J].经济地理,2015,35(4):26-32. [Zhu Y Y, Yu B, Zeng J X, et al. Spatial optimization from Three spaces of production, living and ecology in national restricted zones: A case study of Wufeng County in Hubei province[J]. Economic Geography, 2015,35(4):26-32.]
- [9] 黄金川,林浩曦,漆潇潇.面向国土空间优化的三生空间研究进展 [J]. 地理科学进展,2017,36(3):378-391. [Huang J C, Lin H X, Qi X X. A literature review on optimization of spatial development pattern based on ecological-production-living space[J]. Progress in Geography, 2017,36(3):378-391.]
- [10] 刘彦随,刘玉,陈玉福.中国地域多功能性评价及其决策机制[J].地理学报,2011,66(10):1379-1389. [Liu Y S, Liu Y, Chen Y F. Territorial, multi-functionality evaluation and decision-making mechanism at county scale in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2011,66(10):1379-1389.]
- [11] 马利邦,牛叔文,石培基,等.天水市国土空间功能区划与未来空间发展格局——基于主体功能区划框架[J].经济地理,2015,35(6):68-77. [Ma L B, Niu S W, Shi P J, et al. The functional zoning of territorial space and the developmental pattern of future space: Based on the framework of the major function oriented zoning[J]. Economic Geography, 2015,35(6):68-77.]
- [12] Fan J, Li P. The scientific foundation of Major Function Oriented Zoning in China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2009,19(5):515-531.
- [13] 林锦耀,黎夏.基于空间自相关的东莞市主体功能区划分[J].地理研究,2014,33(2):349-357. [Lin J Y, Li X. MFOZ planning of Dongguan based on spatial autocorrelation by using genetic algorithms[J]. Geographical Research, 2014, 33(2):349-357.]
- [14] 刘耀林,郝弘睿,谢婉婷,等.基于生态系统服务价值的土地利用空间优化[J].地理与地理信息科学,2019,35(1):69-74, 1. [Liu Y L, Hao H R, Xie W T, et al. Optimiza-

- tion of land use space based on the value of ecosystem services[J]. *Geography and Geo-information Science*, 2019,35(1):69-74,1.]
- [15] 许小娟,刘会玉,林振山,等.基于CA-MARKOV模型的江苏沿海土地利用变化情景分析[J].*水土保持研究*,2017,24(1):213-218,225. [Xu X J, Liu H Y, Lin Z S, et al. Scenario analysis of land use change in Jiangsu coast based on CA-Markov Model[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017,24(1):213-218,225.]
- [16] Verburg P H, Overmars K P, 2007. Dynamic Simulation of Land-Use Change Trajectories with the CLUE-S Model. *Land-Use Chang.* 1996, 321-337. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5648-2_18.
- [17] 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.]
- [18] 段非,王钧,蔡爱玲,等.重庆两江新区空间结构演变驱动机制分析与过程模拟[J].*地球信息科学*,2019,21(8):1254-1264. [Duan F, Wang J, Cai AiL, et al. Analyzing and modeling the driving mechanisms and processes of the spatial structure changes in Liangjiang New District, Chongqing[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2019, 21(8):1254-1264.]
- [19] 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.
- [20] Arnold J G, Williams J R, Maidment D R. Continuous-time water and sediment-routing model for large basins[J]. *Journal of Hydraulic engineering*, 1995,121(2):171-183.
- [21] 李宏志.县域空间规划三类空间划定技术路径与实践 [A].中国城市规划学会、东莞市人民政府.持续发展 理性规划——2017中国城市规划年会论文集(11城市总体规划)[C].中国城市规划学会、东莞市人民政府:中国城市规划学会,2017:15. [Li H Z. Technical path and practice of three zones delimitation in County spatial planning[A]. China Association of City Planning, Dongguan Municipal People's government: Rational planning for sustainable development--2017 China urban planning annual conference proceedings (11 city master planning) [C]. China Association of City Planning, Dongguan Municipal People's Government: China Association of City Planning, 2017:15.]
- [22] 闰记影.服务城乡总规的三类空间划分技术路线研究 [A].中国城市规划学会、东莞市人民政府.持续发展 理性规划——规划——中国城市规划年会论文集(11城市总体规划)[C].中国城市规划学会、东莞市人民政府:中国城市规划学会,2017:12. [Yan JY. Research on the technical route of three zones delimitation for serving urban-rural master planning[A]. CHINA ASSOCIATION OF CITY PLANING, Dongguan Municipal People's government: Rational planning for sustainable development—Planning-- Proceedings of China City Planning annual Conference (11 city master planning)[C]. China Association of City Planing, Dongguan Municipal People's Government: China Association of City Planing, 2017:12.]
- [23] 柯新利,郑伟伟,杨柏寒.权衡城市扩张、耕地保护与生态保育的土地利用布局优化——以武汉市为例[J].*地理与地理信息科学*,2016,32(5):9-13,51,2. [Ke X L, Zheng W W, Yang B H. Optimizing of land allocation for synergy of urban expansion, cultivated land protection and ecosystem conservation: A case study of Wuhan[J]. *Geography and Geo-information Science* 2016,32(5):9-13,51,2.]
- [24] Homer C, Huang C, Yang L, et al. Development of a 2001 National Land-Cover Database for the United States[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2004, 70(7):829-840.
- [25] Rogan J, Franklin J, Stow D, et al. Mapping land-cover modifications over large areas: A comparison of machine learning algorithms[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008,112(5):2272-2283.
- [26] 蔡银莺,张安录.武汉耕地资源流失的经济损失估算[J].*环境保护*,2006(17):61-67. [Cai Y Y, Zhang An'l. Economic loss estimation of cultivated land resource loss in Wuhan[J]. *Environmental Protection*, 2006(17):61-67.]
- [27] 詹翹.武汉市土地资源可持续管理问题研究[D].武汉:华中师范大学,2018. [Zhan C. Study on the sustainable management of land resources in Wuhan city[D]. Wuhan: Central China Normal University, 2018.]
- [28] 中国科学院资源环境科学数据中心.2010年和2015年中国土地利用现状遥感监测数据;2015年中国年均降雨量数据;2015年中国年均气温数据[DB/OL]. [Resource and Environment Data Cloud Platform. Remote sensing monitoring data of land use in China, 2010 and 2015; Average rainfall data in China, 2015; Average temperature data in China, 2015.[DB/OL].] URL: <http://www.resdc.cn/>.
- [29] 徐新良,刘洛,蔡红艳.中国农田生产潜力数据集.中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统(<http://www.resdc.cn/DOI>), 2017.DOI:10.12078/2017122301. [Xu X L, Liu L, Cai HY. Potential productivity for crops in China, 2010. Data Registration and Publishing System of Resource and Environment Data Cloud Platform.] DOI: 10.12078/2017122301. URL: <http://www.resdc.cn/DOI>.
- [30] 中国土壤数据库.湖北省土壤资源数据集[DB/OL]. [Soil Science Database. Soil resource data set of Hubei Province.[DB/OL].] URL: <http://vdb3.soil.csdb.cn/>
- [31] 美国航空航天局.航空雷达测绘数据 (STRM1 DEM)

- [DB/OL]. [National Aeronautics and Space Administration. Shuttle Radar Topography Mission (STRM1 DEM). [DB/OL]. URL: <https://www.nasa.gov/>.
- [32] 中华人民共和国自然资源部.《TDT 1024-2010 市(地)级土地利用总体规划编制规程》;《TDT 1024-2010 县级土地利用总体规划编制规程》.[DB/OL]. [Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China.《Preparation rules of land use general planning of city (TDT 1024-2010)》;《Preparation rules of land use general planning of county (TDT 1024-2010)》].[DB/OL].] URL: <http://www.mnr.gov.cn/>.
- [33] 武汉市自然资源和规划局.《生态文明体制改革总体方案》;《武汉市全域生态框架保护规划》;《武汉市土地利用总体规划(2006~2020年)》.[DB/OL]. [Wuhan Natural Resources and Planning Bureau.《Overall plan for the reform of the ecological civilization system》;《The ecological framework protection plan of Wuhan》;《The land use general planning of Wuhan (2006 ~ 2020)》].[DB/OL].] URL: <http://gtghj.wuhan.gov.cn/>.
- [34] 武汉市人民政府.《武汉市工业发展“十三五”规划》.[DB/OL]. [Wuhan Government.《13th Five-Year Plan for industrial development in Wuhan》].[DB/OL].] URL: <http://www.wuhan.gov.cn/>.
- [35] 中华人民共和国住房和城乡建设部.《2016年城乡建设统计年鉴》.[DB/OL]. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China (MOHURD).《Urban and rural construction statistical yearbook in 2016》].[DB/OL].] URL: <http://www.mohurd.gov.cn/>.
- [36] 李涛,廖和平,潘卓,等.主体功能区国土空间开发利用效率评估——以重庆市为例[J].经济地理,2015,35(9):157-164. [Li T, Liao H P, Pan Z, et al. Evaluation of efficiency differentiation in land spatial development and utilization of major functional areas based on DEA Model: A case study of Chongqing City[J]. Economic Geography, 2015,35(9):157-164.]
- [37] 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):257-263. [Xu L, Dong J, Chen En. Coordination features of geographical space utilization in urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River base on 'Production-Living-Ecological' function[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018,25(2):257-263.]
- [38] 赵中华.基于主体功能区战略的勐海县国土空间三生功能分区及管治研究[D].昆明:云南大学,2016. [Zhao Z H. Research on function zoning of production, life and ecology and spatial governance of Menghai based on major functional zone[D]. Yunnan: Yunnan University, 2016.]
- [39] 党小虎,刘国彬,李小利,等.黄土丘陵区小流域系统生态经济要素分析——以宁夏隆德县李太平小流域为例[J].生态学报,2006,22(10):3516-3525. [Dang X H, Liu G B, Li X L, et al. Analysis on small watershed eco-economic system in Loess Hilly Area: a case studies in Litaiping Small Watershed of Longde County[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006,22(10):3516-3525.]
- [40] 柯新利,边馥苓.基于C5.0决策树算法的元胞自动机土地利用变化模拟模型[J].长江流域资源与环境,2010,19(4):403-408. [Ke X L, Bian F L. Land-use change CA model based on C5.0 decision tree[J]. Resources and Environment in The Yangtze Basin, 2010,19(4):403-408.]
- [41] 柯新利,邓祥征,刘成武.基于分区异步元胞自动机模型的耕地利用布局优化——以武汉城市圈为例[J].地理科学进展,2010,29(11):1442-1450. [Ke X L, Deng X Z, Liu C W. Interregional farmland layout optimization model based on the partition asynchronous cellular automata: a case study of the Wuhan city circle[J]. Progress in Geography, 2010,29(11):1442-1450.]
- [42] 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.
- [43] 谢花林,李秀彬.基于GIS的农村住区生态重要性空间评价及其分区管制——以兴国县长冈乡为例[J].生态学报,2011,31(1):230-238. [Xie H L, Li X B. Spatial assessment and zoning regulations of ecological importance based on GIS for rural habitation in Changgang Town, Xinguo county[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011,31(1):230-238.]
- [44] 李健飞,李林,郭砾,等.基于最小累积阻力模型的珠海市生态适宜性评价[J].应用生态学报,2016,27(1):225-232. [Li J F, Li L, Guo L, et al. Assessment on the ecological suitability in Zhuhai City, Guangdong, China, based on minimum cumulative resistance model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016,27(1):225-232.]
- [45] Vliet J V, Bregt A K, Hagen-Zanker A. Revisiting Kappa to account for change in the accuracy assessment of land-use change models[J]. Ecological Modelling, 2011, 222(8):1367-1375.
- [46] 程婷,赵荣,梁勇.国土“三生空间”分类及其功能评价[J].遥感信息,2018,33(2):114-121. [Cheng T, Zhao R, Liang Y. Production-living-ecological space classification and its functional evaluation[J]. Remote Sensing Information, 2018,33(2):114-121.]
- [47] 王保盛,廖江福,祝薇,等.基于历史情景的FLUS模型邻域权重设置——以闽三角城市群2030年土地利用模拟为例[J].生态学报,2019,39(12):4284-4298. [Wang B S, Liao J F, Zhu W, et al. The weight of neighborhood setting of the FLUS model based on a historical scenario: A case study of land use simulation of urban agglomeration of the Golden Triangle of Southern Fujian in 2030[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(12):4284-4298.]