

引用格式:黄慧,柯新利.权衡耕地保护与城市扩张的永久基本农田划定——以武汉市为例[J].地球信息科学学报,2020,22(3):592-604. [Huang H, Ke X L. Demarcating of permanent prime farmland for synergy of farmland protection and urban expansion of Wuhan[J]. Journal of Geo-information Science, 2020,22(3):592-604.] DOI:10.12082/dqxxkx.2020.190414

权衡耕地保护与城市扩张的永久基本农田划定 ——以武汉市为例

黄 慧,柯新利*

华中农业大学公共管理学院,武汉 430070

Demarcating of Permanent Prime Farmland for Synergy of Farmland Protection and Urban Expansion: A Case Study of Wuhan

HUANG Hui, KE Xinli*

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

Abstract: Demarcating permanent prime farmland is an effective way to realize farmland protection, intensive land use and food security. With the challenging of rapid urban expansion, the completion between urban expansion and farmland protection is unavoidable. It is urgent to reasonably demarcating permanent prime farmland by synergizing farmland protection and urban expansion. In view of this conflict, taking Wuhan as an example, this paper carries out the demarcation of permanent prime farmland by using LESA (Land Evaluation and Site Assessment) method and LANDSCAPE (LAND System Cellular Automata model for Potential Effects) model, attempting to achieve balanced development of urban expansion and farmland protection, which provides reference for scientific demarcation of permanent prime farmland under the background of multiplanning integration, and provides support for prime farmland protection and optimizing of land allocation. Firstly, comprehensive evaluation and classification of farmland in Wuhan is carried out through LESA, then based on this result, simulation of demarcation of permanent prime farmland and urban expansion is carried out through LANDSCAPE model, at last, the results of the two methods are compared in quantity, quality and spatial patterns. The results show that permanent prime farmlands demarcated in two methods have little difference in quantity and quality. The area of permanent prime farmland demarcated by LESA method is 243 259 hm², 45.63% of which land fertility grade of cultivated land is between grade 1 and grade 3. The area of permanent prime farmland demarcated by LANDSCAPE model is 243 200 hm², 45.77% of which land fertility grade of cultivated land is between grade 1 and grade 3. There are more than 80% of the permanent prime farmland that land fertility grade is between grade 1 and grade 5 in both methods, which shows that the total quality of permanent prime farmland is good in either method. However, the result of LANDSCAPE model is better in

收稿日期:2019-07-31;修回日期:2019-12-10.

基金项目:国家自然科学基金项目(41371113);教育部哲学社会科学研究后期资助项目(18JHQ081);博士后基金面上项目(2015M572173);中央高校基本科研业务费专项(2662017PY063)。[**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China, No.41371113; Science Foundation of Ministry of Education of China, No.18JHQ081; China Postdoctoral Science Foundation, No.2015M572173; Fundamental Research Funds for the Central Universities, No.2662017PY063.]

作者简介:黄 慧(1978—),女,湖北武汉人,博士,讲师,主要从事地理信息科学研究。E-mail: h_hui@mail.hzau.edu.cn

*通讯作者:柯新利(1977—),男,湖北天门人,博士,教授,主要从事土地资源优化配置研究。E-mail: kexl@mail.hzau.edu.cn

spatial patterns, which permanent prime farmland demarcated by LANDSCAPE model distributes concentrated and is regular in shape. It's remarkable that 15.8% of permanent prime farmlands demarcated by LESA are overlapped by urban constructive land in the processing of urban expansion, which has been effectively avoided by LANDSCAPE model. The possible cause of this conflict are as follows: (1) The permanent prime farmland demarcated by LESA method is based on ranking of integrated score, in which the requirements for concentrated fragmentation and shape index of permanent prime farmland are not considered; (2) The conflict of farmland protection and urban expansion is not considered in LESA method.

Key words: demarcation of permanent prime farmland; farmland protection; urban expansion; LESA method; LANDSCAPE model

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

摘要:永久基本农田划定是实现耕地保护、土地集约利用以及保障粮食安全的有效方式。然而城市的快速扩张给永久基本农田划定带来了挑战,如何协调城市扩张与耕地保护两者的关系、科学合理划定永久基本农田亟待解决。本文以武汉市为例,结合LESA(Land Evaluation and Site Assessment)方法及LANDSCAPE模型(LAND System Cellular Automata Model for Potential Effects)综合考虑永久基本农田划定与城市扩张的冲突,进行永久基本农田划定,试图协调耕地保护与城市扩张对土地资源需求的矛盾,为“多规合一”背景下科学划定永久基本农田提供方法借鉴,为优质耕地保护及土地利用优化布局提供决策参考。①运用LESA方法对武汉市的耕地进行综合质量评价及等级划分;②基于LESA综合评价结果,运用LANDSCAPE模型对武汉市永久基本农田划定及城镇建设用地扩张进行模拟;③将LANDSCAPE模型划定的永久基本农田结果与基于LESA方法划定的结果进行数量、质量和空间形态上的对比分析。结果表明:2种方法划定的永久基本农田面积相当,质量差异不大。但在空间形态上,基于LANDSCAPE模型的划定结果明显优于基于LESA方法;划定的永久基本农田集中连片分布,形状较为规则。值得注意的是,LESA方法划定的永久基本农田中有15.8%将被新增城镇建设用地侵占,而LANDSCAPE模型能够有效避免这部分永久基本农田被侵占。

关键词:永久基本农田划定;耕地保护;城市扩张;LESA方法;LANDSCAPE模型

1 引言

永久基本农田为优质、连片、永久、稳定的耕地,是耕地的精华^[1]。永久基本农田的划定是耕地保护、土地集约利用、粮食安全保障的有效方式。政府及社会高度重视永久基本农田的划定工作,截止到2018年6月,全国实际划定15.50亿亩永久基本农田,有划定任务的2887个县级行政区完成划定工作并通过省级验收。在长期的永久基本农田划定工作实践过程中存在以下2方面问题:①永久基本农田的划定重指标落实,但缺乏科学规范的永久基本农田划定评价体系,而且评价侧重于基于自然因素的耕地质量评价,缺少对耕地社会经济等多样性特征的评价^[1-2];②永久基本农田的划定较少考虑与社会经济发展的协调性,造成内容冲突、空间重叠等现象^[1-3],或者最大程度为经济建设预留空间,采用“划远不划近”或“划劣不划优”的原则,造成永久基本农田空间布局“远、边、散”等现象^[4-5]。在国家“多规合一”的战略背景下,需要统筹永久基本农田、生态保育红线及城市增长边界的划定,以实现

耕地保护、城市扩张与生态保育的协调发展。其中,永久基本农田是保障粮食安全的重要基础,需优先划定。因此,建立科学的永久基本农田划定方法体系,是实现永久基本农田划定与社会经济发展协调的重要基础。

永久基本农田划定关键在于评价指标体系的构建,为提高划定方法体系的科学性,我国学者进行了大量研究及实践。早期研究多侧重从自然因素来评价农用地的质量^[6-7],利用农用地分等成果^[8-10]、土地评价^[9]、景观格局^[11]、生态质量^[12-13]等多方面选取评价指标,依据评价结果来划定永久基本农田。此类研究侧重于耕地自然条件的农用地质量评价,对农用地的社会经济价值考虑不多,且缺少完整的理论方法体系来指导永久基本农田的划定,因此,一些学者引入美国的土地评价与立地分析LESA(Land Evaluation and Site Assessment)系统作为评定农用地质量的理论方法体系^[1,14-15]。基于LESA方法体系,学者们不断完善农用地质量评价的指标体系并进行实证,将其应用于城市及城市边缘区^[2,16]、组团式城市^[17]、县域尺度^[18-19]的永久基本农田划定,

高标准基本农田建设分区及建设时序研究^[18,20]。在评价指标体系的构建上趋于多因素综合评价^[16-21],在划分方法上注重耕地综合质量评价与其他分析方法的结合,如利用数理统计^[21-22]、GIS^[6,23]、空间聚类^[11,24-25]等方法对评价结果进行修正,以提高永久基本农田划定的科学性。目前,在“多规合一”背景下,以综合协调耕地保护、城市发展和生态保护空间为目标的永久基本农田划定研究备受关注^[5,26-28]。

“多规合一”视角下的永久基本农田划定的思路是首先将综合得分高于研究区平均水平的耕地优先划入永久基本农田,再在协调各规划关系的基础上,根据多因素综合评价结果对现有永久基本农田进行调入和调出。相对于传统的永久基本农田划定方法,该方法在耕地质量综合评价之前,对各规划的主要冲突区域——城市周边的潜在永久基本农田评价单元进行冲突识别及协调。但冲突识别及协调是基于已有的各项规划,各规划数据、标准的不统一导致难以实现冲突的识别及协调。本文以武汉市为研究区,利用土地系统模拟与优化模型 LANDSCAPE (Land System Cellular Automata Model for Potential Efforts)^[29]模拟永久基本农田划定中的基本农田保护与城市扩张的冲突及协调过程,对永久基本农田的划定进行优化,以期“多规合一”背景下科学划定永久基本农田提供方法借鉴,为优质耕地保护及土地利用优化布局提供决策参考。

2 研究区概况、数据源与研究方法

2.1 研究区概况

武汉市地处长江中游江汉平原,地形以平原为主,耕地资源丰富,利用方式多样(图1)。截至2017年末,武汉市耕地面积为1905.5 km²,其中水田面积为1143.8 km²,旱地面积为755.0 km²^[30]。在我国城镇化快速发展和中部崛起战略背景下,武汉社会和经济高速发展,城市扩张迅速。武汉市市区面积由2007年的255.4 km²飞速增长至2017年的955.2 km²^[30],但耕地面积由2007年的2103.5 km²减少为2017年的1905.5 km²。2017年武汉市人均耕地面积为170 m²^[30],远低于全国平均水平的900 m²。面对经济高速发展和人口增长,武汉市耕地保护压力不断增加。2016年武汉市完成了475 km²的城市周边永久基本农田的划定工作,构筑了城市开发建设的边界^[31]。

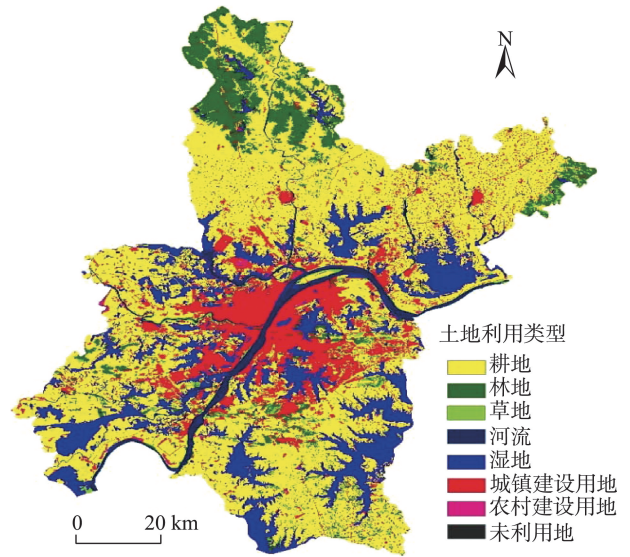


图1 武汉市2015年土地利用现状

Fig. 1 Land-use map of Wuhan in 2015

2.2 模型与方法

2.2.1 总体研究框架

本文基本思路为:

(1)永久基本农田划定的过程模拟。永久基本农田的划定过程可以理解为首先对耕地质量进行综合评价,将综合分值较高的耕地首先划入永久基本农田,然后从耕地的集中连片性角度出发,将综合分值相对较高的耕地逐步划入永久基本农田,直至达到永久基本农田的需求量。因此,永久基本农田的划定是将耕地转换为永久基本农田的过程,耕地的综合分值越高,转换为永久基本农田的概率越大。

(2)永久基本农田划定与城市扩张之间的协调。LANDSCAPE模型具有分层分配策略、阻抗设置及调整等优点,能够模拟土地利用变化过程中各地类的转换和联动^[29],已用于城市扩张模拟^[32]、土地利用布局优化^[33]、城市增长边界划定^[34]的研究中。本文通过阻抗及约束条件的设置,实现综合分值越高的耕地越难被城镇建设用地侵占,从而协调永久基本农田保护与城市扩张之间的冲突。

具体实现包括3个步骤(图2):①以武汉市2005年土地利用图为基础,用LANDSCAPE模型模拟2015年的土地利用情况,将模拟结果与武汉市2015年实际土地利用数据对比,对模型进行校准,以提高模拟准确度;②基于LESA体系构建永久基本农田综合评价指标体系,对武汉市耕地质量进行综合评分,根据综合评分划定永久基本农田,并计算耕地转化为永久基本农田的适宜性及拟划定

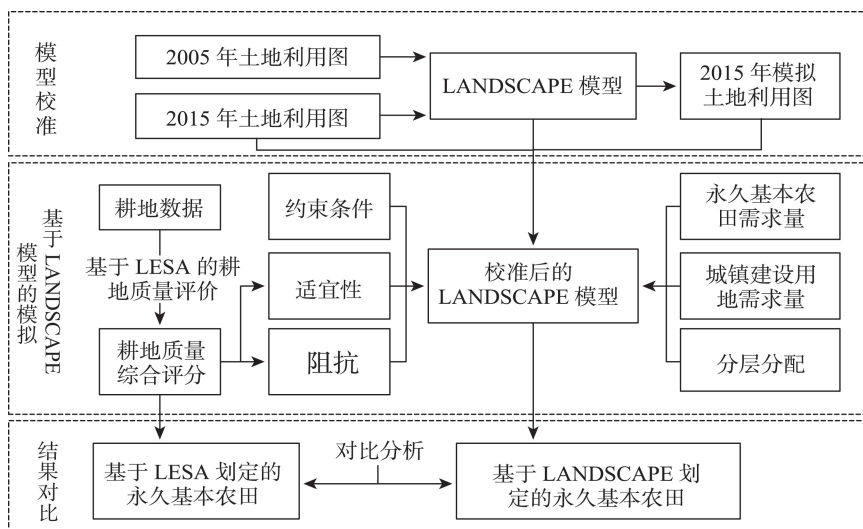


图2 永久基本农田划定的总体框架

Fig. 2 Framework of the permanent prime farmland demarcation

的永久基本农田转换为其它地类的阻抗;③以武汉市2015年土地利用现状数据为基础,设置LANDSCAPE模型相关参数,如永久基本农田需求量、城镇建设用地需求量、分层分配策略、适宜性、阻抗以及约束条件等,采用校准后的LANDSCAPE模型模拟永久基本农田划定及与城市扩张的协调过程,并将基于LANDSCAPE模型划定的永久基本农田与基于LESA方法划定的永久基本农田进行对比分析。

2.2.2 LESA方法

美国LESA系统评价包括土地质量评价(Land Evaluation, LE)和立地分析(Site Assessment, SA)评

价子系统^[35],采用的是德尔菲法(Delphi Method)。为增强耕地质量评价的客观性,本文借鉴国内学者构建的永久基本农田划定指标体系^[2-3,16-20],结合武汉市耕地特征,选取反映自然土壤、地形条件、基础设施条件的7个LE指标,反映区位条件和空间形态的5个SA指标,构建永久基本农田划定指标体系(表1)。为能够对各类指标数据进行对比,对指标数据进行无量纲化处理,并进行标准化,在0~100间取值。

(1) 指标选取与赋值标准

根据武汉的土壤、地形及基础设施等方面的特征,本文选取的LE指标包括土壤条件、地形条件和基础设施条件3个方面。反映土壤主体特征的指标

表1 武汉市耕地划入永久基本农田的指标、赋值方法及权重

Tab. 1 Indexes, assessment methods and weights of permanent prime farmland demarcation in Wuhan City

LESA体系	一级指标	二级指标	指标赋值标准					权重
			100	80	60	40	20	
耕地质量 (LE)	土壤 条件	有机质含量	27.10~30.79	24.90~27.1	23.00~24.90	20.90~23.00	16.70~20.90	0.19
		表层质地	壤土	粘壤土	粘土	砂土		0.15
		pH值	6.5~7.5	5.5~6.5	5.0~5.5	4.5~5.0		0.11
	地形条 件	坡度	<2	2~10	10~25	≥25		0.12
		高程	<31.19	31.19~47.69	47.69~76.57	76.57~161.15	>161.15	0.08
	基础设 施条件	灌溉条件	充分满足	基本满足		不满足		0.20
		排水条件	充分满足	基本满足		不满足		0.15
立地条件 (SA)	区位 条件	到主干道距离/km	≤0.5	0.5~1.0	1.0~1.5	1.5~2.0	>2.0	0.19
		到水源距离/km	≤0.5	0.5~1.0	1.0~1.5	1.5~2.0	>2.0	0.18
		到居民点距离/km	≤0.2	0.2~0.5	0.5~0.8	0.8~1.2	>1.2	0.23
	空间 形态	连片度			$P=100(S_i-S_{min})/(S_{max}-S_{min})$			0.16
		形状指数			$E=100(E_i-E_{min})/(E_{max}-E_{min})$			0.24

选取有机质含量、表层质地、pH值等,由于武汉市气候条件、水文条件及土壤耕层厚度的区域差异性小,未将其作为评价指标。反映地形条件的指标选取了坡度与高程,虽然武汉地形以平原为主,但兼有少量低山丘陵及岗地,地面高程范围为18~150 m左右,有较大差异,所以选取高程及坡度为评价指标。反映耕地基础设施条件的指标选取了灌溉条件和排水条件。其中,有机质含量和高程指标均为定量化指标,采用自然间段点分级方法划分为5个等级,分别赋值为100、80、60、40、20^[4]。pH值和坡度参考农用地分等规程,进行直接赋值,如表1所示。灌溉能力和排水能力取值为“充分满足、基本满足、不满足”3个等级,分别赋值为100、80、40^[17]。表层质地取值为“壤土、粘壤土、粘土、砂土”4个等级,分别赋值为100、80、60、40^[17]。

LESA体系中的SA指标注重耕地的稳定性^[3],本文选取区位条件和空间形态作为评价指标,有利于提高耕地质量和生产能力。区位条件指标的包括耕地到主干道距离、耕地到水源距离、耕地到居民点距离等,距离计算基于交通数据集,通过ArcGIS10.2的缓冲区功能生成主干道、水源和居民点的多环缓冲区,将耕地数据与缓冲区进行叠加分析,并进行标识,得到耕地图斑到主干道、水源和居民点的距离。区位条件指标参照文献[4]的区位条件评价方法进行赋值,并根据武汉市的交通、水源和经济条件对分级标准进行调整。空间形态为永久基本农田集中连片性的需求,选取连片性和形状指数两个指标。连片性指地块在一定阈值范围内的相邻程度。参考第二次土地调查技术规程,选取阈值范围为10 m,通过ArcGIS10.2对耕地图斑生成10 m缓冲区,耕地的连片程度通过耕地缓冲区的面积来衡量,指标赋值采用表1中所示公式。形状指数反映耕地耕作的便利程度,形状相对规则的耕地更有利于实施机械化及其他形式耕作,间接提高耕地生产能力。耕地形状指数通过图斑面积和周长来衡量,计算公式如下:

$$E_i = 4\sqrt{S_i}/L_i \quad (1)$$

式中: E_i 为耕地形状指数; S_i 为耕地图斑面积; L_i 为耕地图斑周长。指标赋值采用表1所示。

(2)LESA综合分值计算

耕地质量(LE)和立地条件(SA)的权重可以根据应用目的的不同而灵活分配^[15],通常按照1:2的权重比值来确定综合分值。计算公式为:

$$LESA = LE \times a + SA \times b \quad (2)$$

式中:LESA为耕地综合分值;LE为耕地质量分值;SA为立地条件分值; a 、 b 为权重, $a+b=1$ 。武汉市整体耕地自然质量较好,区域差异不大,但立地条件差异较大,因此在LESA综合分值中,将LE的权重设置为0.3,SA权重设置为0.7。LE的分值和SA的分值由表1中各指标的分值与对应权重的乘积得到。

2.2.3 LANDSCAPE模型

地理元胞自动机(Cellular Automata, CA)模型通过智能算法得到各个元胞间的转换概率,进而可以模拟复杂的地理时空演化过程^[36-37]。本文选取基于CA的土地系统模拟与优化模型LANDSCAPE,来实现永久基本农田划定过程的模拟。LANDSCAPE模型的优点是基于分层分配策略和阻抗模拟土地利用各地类间的相互转换和交互联动实现土地利用的布局优化^[32]。在模拟永久基本农田划定过程中,可以协调永久基本农田保护与城市扩张的冲突。

(1)分层分配策略

在LANDSCAPE模型中,为进行分层分配策略,土地利用类型根据人类需求分为主动型和被动型两大类。主动型地类的变化由人类需求驱动,例如耕地和城市建设用地。被动型地类的变化是由主动型地类的变化驱动的,如城市扩张和耕地补充会侵占草地或湿地等。主动型地类根据其侵略性强弱分层次分配,本文中城镇建设用地和永久基本农田有扩张需求,为主动型地类,且城镇建设用地的活跃等级高于永久基本农田,而湿地、草地和林地等为被动型地类。

(2)转换概率

主动型地类的分配取决于2个因素:适宜性和阻抗^[32]。适宜性表示某一空间位置成为目标地类的适宜程度,阻抗表示目标地类转换为其它地类的困难程度。当主动型地类扩张时,被动型地类根据其适宜性和阻抗被主动型地类占用。为提高LANDSCAPE模型的灵活性,阻抗的设定有两种:固定阻抗和调整阻抗。固定阻抗对于同一地类的栅格再土地利用变化中阻抗相同,调整阻抗意味着同一地类的不同栅格具有不同的阻抗,同时被其它地类占用时,不同栅格的转换难度不同。转换概率由适宜性和阻抗2个指标计算得到:

$$TTP_{i,u} = P_{i,u}/R_{i,u} \quad (3)$$

式中: $TTP_{i,u}$ 是位置*i*的地类转换为目标地类*u*的概

率; $P_{i,u}$ 为位置 i 的地类转换为目标地类 u 的适宜性; $R_{i,u}$ 为位置 i 的地类 u 转换为其他地类的阻抗。其中, $P_{i,u}$ 适宜性的计算公式为:

$$P_{i,u} = (1 + (\ln \gamma)^\alpha) \times PG_{i,u} \times \text{Con}(C_{i,u}) \times \Omega_{i,u} \quad (4)$$

式中: γ 为 0~1 范围内的随机数, 为控制随机变量影响大小的参数, 取值为 1~10 范围内的整数; $PG_{i,u}$ 为表示位置 i 的生物物理、社会经济特征(如高程、坡度和距道路的距离)。本文采用支持向量机(SVM)方法得到, $\text{Con}(C_{i,u})$ 是每个元胞的约束值, 1 表示该元胞可以发生转换, 0 表示该元胞不可发生转换, $\Omega_{i,u}$ 为邻域转化概率^[32]。永久基本农田的适宜性计算不同于其它土地利用类型, 无法通过机器学习的方法由模型估计, 本文根据耕地的 LESA 综合分值计算得到。位置 i 的 LESA 综合分值越高, 其转换为永久基本农田的适宜性越高。

调整阻抗的计算公式如下:

$$R'_{i,u} = R_{i,u} \times (1 + (LESA_i - LESA_{\min}) / (LESA_{\max} - LESA_{\min})) \quad (5)$$

式中: $R'_{i,u}$ 为某一位置 i 上地类 u 转换其它地类的调整阻抗; $R_{i,u}$ 为某一位置 i 上地类 u 转换其它地类的固定阻抗; $LESA_i$ 为某一位置 i 的 LESA 综合评价分值; $LESA_{\max}$ 为 LESA 综合评价分值最大值; $LESA_{\min}$ 为 LESA 综合评价分值最小值。

(3) 模型参数设定

① 土地利用分类

武汉市土地利用现状数据包括 8 种地类: 耕地、林地、草地、河流、湿地、城镇建设用地、农村建设用地和未利用地, 分别编码为 1~8。本文需要划定永久基本农田, 因此, 将其作为新的地类, 编码为 9, 原来的耕地含义发生变化, 表示未被划入永久基本农田的一般耕地。用 LANDSCAPE 模型模拟永久基本农田划定, 需要有一定数量的永久基本农田作为基础数据, 以它为内核逐步发展演化, 这部分数据为永久基本农田的演化内核。本文将 LESA 综合评价结果中等级最优的耕地作为永久基本农田划定演化内核。

② 地类需求量

本文在模拟永久基本农田划定过程中, 要考虑城市扩张对耕地的侵占, 并通过模型迭代来协调永久基本农田保护与城市扩张的冲突。因此, 城镇建设用地有用地需求, 设为主动型地类, 其需求量设定为武汉市 2030 年建设用地的需求总量 160 000 hm²。永久基

本农田也为主动型地类, 其需求量参照武汉市土地利用总体规划(2006—2020)^[38]及武汉市规划研究院提供的 2017 年武汉市永久基本农田数据, 设定为 243 200 hm²。其他地类无用地需求, 设为被动地类。

③ 阻抗设定

参考已有文献^[32-33], 结合本文中永久基本农田保护与城市扩张的冲突, 设定河流、城镇建设用地和农村建设用地的固定阻抗为最高值 1.5, 永久基本农田由耕地转换而来, 但其转换为其它地类的难度大, 因此设定其固定阻抗为 1.35, 而耕地主要为被动侵占, 固定阻抗值设为最低值 1, 林地、草地和湿地的固定阻抗设定为相对较高的 1.25, 实现在土地利用变化中对这些地类的保护。为保障永久基本农田的稳定性, 质量越高的永久基本农田越难转换为其它地类, 本文将基于 LESA 的耕地质量综合评价结果标准化到 [1, 2], 并将结果转化为与武汉市土地利用数据匹配的栅格数据, 作为永久基本农田的调整阻抗。

④ 约束条件

由于河流相对稳定, 不易转换为其它地类, 永久基本农田演化内核为优先划定的永久基本农田, 不能被其它地类侵占, 因此在 LANDSCAPE 模型中, 设定约束条件, 禁止河流及永久基本农田演化内核被其他地类占用。永久基本农田只能由耕地转换, 不能侵占其他地类, 因此将永久基本农田演化区域限定在耕地范围内。

2.2.4 景观指数

划定永久基本农田, 要求耕地集中连片, 形状相对规整, 适合耕作, 本文结合相关研究^[11, 24, 39], 选用破碎度(P_D), 平均斑块分维数(MPFD)和面积加权平均形状因子(AWMIS)等景观指数, 对永久基本农田的划定结果进行分析。破碎度反映景观被分割的破碎程度, 破碎度越小, 景观的整体性越好。分维数是用来度量斑块形状复杂程度的指标。面积加权平均形状因子是衡量景观格局复杂性的重要指标之一, 反映耕地的利用效率, AWMIS 为大于等于 1 的数, 其值越接近 1, 耕地利用效率越高。计算公式如下:

$$P_D = N/A \quad (6)$$

$$MPFD = \sum_{i=1}^n 2 \ln(l_i/4) / \ln a_i / N \quad (7)$$

$$AWMIS = \sum_{i=1}^n (l_i/a_i)(a_i/A) \quad (8)$$

式中： P_D 为破碎度； N 为斑块数量； A 为斑块总面积； $MFPD$ 为平均斑块分维数； l_i 为斑块周长； a_i 为斑块面积； $AWMIS$ 为面积加权平均形状因子。

2.3 数据来源

2.3.1 基于LESA方法的耕地质量综合评价所需数据

基于LESA方法的耕地质量综合评价所需数据包括：耕地质量数据^[40]、地形数据^[41]、交通^[42]、水系和农村居民点数据^[43]。

(1)代表耕地自然质量的数据，如土壤类型、地类名称、pH值、有机质含量、有效磷含量、降雨量、大于等于10℃积温、耕层质地、耕层厚度、灌溉能力、排水能力、县域耕地地力等级等，用于计算耕地质量(LE)评价中土壤条件指标及基础设施条件指标的分值。这些数据来源于中国土壤数据集，原始数据为1:10万的矢量数据。首先，对原始数据按武汉行政区划边界进行裁剪，并进行投影和坐标变换，与武汉市2015年土地利用数据^[43]匹配，然后以武汉市2015年土地利用数据中的耕地数据为掩膜，与土壤数据集进行叠加，以得到武汉市2015年耕地的自然质量数据。

(2)地形数据。主要包括常用的高程和坡度数据。用于计算耕地质量(LE)评价中地形条件指标的分值。其中高程数据来源于SRTM的DEM数据，空间分辨率为90 m，需将原始数据重采样为100 m分辨率，与土地利用数据的空间分辨率保持一致。坡度数据以高程数据为基础，采用ArcGIS 10.2的空间分析工具SLOPE生成。

(3)交通、水系及农村居民点数据。用于计算立地条件(SA)评价中区位条件指标的分值。交通数据主要包括武汉市辖区内的铁路、高速公路、国道、省道、市区道路、市区杂道以及其它道路等矢量数据。原始数据由应用程序编程接口(API)从百度地图获得。水系及农村居民点数据来源于武汉市2015年土地利用数据。

2.3.2 基于LANDSCAPE模型模拟永久基本农田划定所需数据

基于LANDSCAPE模型模拟永久基本农田划定所需数据包括：土地利用数据集^[43-44]、地形数据、交通数据和耕地质量数据。

(1)土地利用数据集。包括武汉市2005年和2015年的土地利用数据。2005年土地利用数据^[44]

来源于中国科学院资源环境数据中心，原始数据分辨率为30 m，土地利用类型分为6大类、25小类，需将数据重采样为100 m分辨率，土地利用类型重分类为耕地、林地、草地、河流、湿地、城镇建设用地、农村建设用地和未利用地8大类。2015年土地利用数据^[43]采用Landsat OLI遥感数据解译，按武汉行政区划边界进行裁剪，参照2005年土地利用数据处理方法进行重采样及土地利用类型重分类。

(2)地形数据。主要包括高程和坡度数据，数据来源同基于LESA方法的耕地质量综合评价所需的地形数据。

(3)交通数据。数据来源同基于LESA方法的耕地质量综合评价所需的交通数据，运用ArcGIS 10.2“Euclidean Distance”工具生成各土地利用单元距不同等级交通网线的栅格距离数据。

(4)耕地质量数据。包括土壤有机质含量、有效磷含量、降雨量和积温数据，数据来源同基于LESA方法的耕地自然质量数据，需将原始的矢量数据转化为100 m分辨率的栅格数据。

3 结果及分析

3.1 基于LESA的武汉市永久基本农田划定结果

3.1.1 LE SA综合评价

根据表1的指标赋值标准，分别计算武汉市耕地的LE分值和SA分值。LE的分值介于59.40~98.90分之间，SA的分值介于20.30~87.20分之间，LE的分值显著高于SA的分值，说明武汉市耕地的自然质量相对于立地条件较优，耕地自然质量整体质量较高，但立地条件区域差别较大。根据式(2)计算耕地综合质量评价的LESA分值，最高分值为87.64分，最低分值为33.31分。采用等间距法，以10分为间距将武汉市耕地质量LESA综合分值划分为5个等级，对应耕地I—IV等，I等最优，V等最差，从各等级的耕地数量来看，武汉市大部分耕地为II等和III等，而V等的耕地占比很小，说明武汉市耕地综合质量整体较高。耕地质量LESA综合分值统计结果如表2和图3所示。

第I等级：LESA综合分值大于75分。位于这一等级的耕地数量较少，总面积为278.4 km²，占武汉市耕地面积的5.45%。LE平均分为86.37分，土壤主要为壤土，有机质含量高，地势平坦，灌溉和排水条件大部分为充分满足。SA平均分为71.43分，立地条件较好，大部分位于交通主干道、水源及居

表2 武汉市耕地LESA综合分值统计及分级
Tab. 2 LESA comprehensive score statistics and classification of farmland in Wuhan

耕地等级	LESA综合分值/分	耕地面积/km ²	比例/%
I	>75	278.40	5.45
II	65~75	1699.32	33.29
III	55~65	2161.47	42.35
IV	45~55	874.77	17.14
V	<45	90.16	1.77

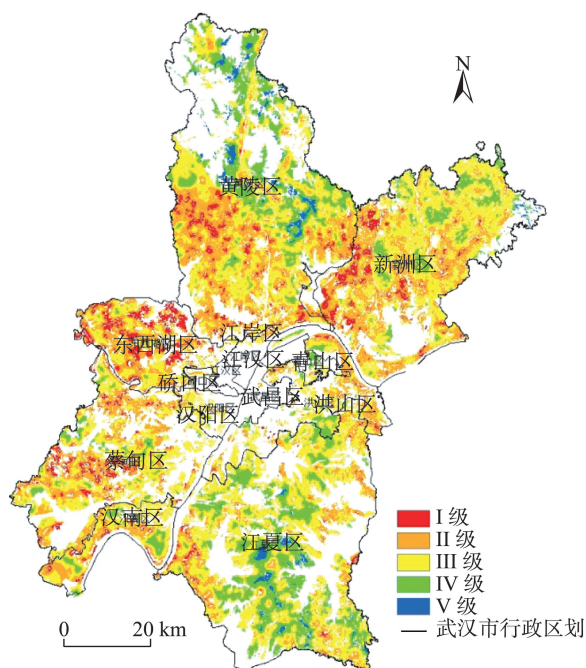


图3 武汉市耕地综合质量分级分布

Fig. 3 Comprehensive quality classification of farmland in Wuhan

民点1 km²范围内。从地理分布上看,I等耕地主要分布于武汉市北部、东北、西部和西南地区的黄陂、新洲、东西湖和蔡甸区,且在新洲和东西湖区相对集中连片分布。

第II等级:LESA综合分值介于65~75分之间,该等级耕地面积为1699.32 km²,占武汉市耕地面积的33.29%。LE平均分为76.57分,但最高分与最低分间差值较大,说明这部分耕地的自然质量区域差异较大。SA平均分为68.14分,立地条件相对较好,且区域差异较小。从地理分布上看,II等耕地较均匀地分布于武汉市北部、东北、西部和西南的黄陂、新洲、东西湖、蔡甸、汉南区,其中位于黄陂、新洲和东西湖区的面积较大,且相对集中连片。

第III等级:LESA综合分值介于55~65分之间,该等级耕地数量最多,总面积为2161.47 km²,占武

汉市耕地面积的42.35%。LE平均分为70.51分,耕地质地有壤土、粘壤土和粘土,有机质含量差异较大,灌溉和排水条件大部分为基本满足,说明这部分耕地的自然质量区域差异较大。SA平均分为56.32分,立地条件区域差异较大,斑块形状较不规整,破碎度较高。从地理分布上看,III等耕地较均匀地分布于武汉市北部、东北、西部、西南和南部的黄陂、新洲、东西湖、蔡甸、汉南和江夏区,但集中连片程度不高,分布较为分散。

第IV等级:LESA综合分值介于45~55分之间,该等级耕地面积为874.77 km²,占武汉市耕地面积的17.14%。LE平均分为67.25分,耕地的自然质量相对较差,但区域差异较小。SA平均分为38.43分,耕地距离交通主干道和居民点较远,斑块形状不规整,破碎度较高。从地理分布上看,IV等耕地较均匀地分布于武汉市北部、东北和南部的黄陂、新洲和江夏区,分布较为分散。

第V等级:LESA综合分值<45分,该等级耕地数量最少,总面积仅为90.16 km²,占武汉市耕地面积的1.77%。从地理分布上看,V等耕地零星分布于武汉市北部和南部的黄陂和江夏区,且都远离武汉市主城区。

3.1.2 基于LESA的永久基本农田划定

根据LESA综合评价分值,以2017年武汉市永久基本农田划定面积243 200 hm²为目标,确定LESA综合分值63.06分为阈值,划定永久基本农田。受图斑面积限制,最终划定武汉市永久基本农田面积为243 259 hm²,占武汉市耕地总面积的47.66%。武汉市永久基本农田分布图如图4所示,主要分布在北部、东北和西南的黄陂、新洲、东西湖区和蔡甸区,其中黄陂和东西湖区的永久基本农田集中连片程度较高,且邻近武汉主城区,耕地自然质量和立地条件均较优。少数永久基本农田位于武汉市边缘区及城镇建设用地周边,可以在一定程度上限制城市建设用地的连续扩张。

3.2 基于LANDSCAPE的武汉市永久基本农田划定结果

将LESA综合评分等级为I等的耕地作为永久基本农田演化内核,面积为27 840hm²,对武汉市2015年土地利用现状图进行处理,得到永久基本农田划定基础图,如图5所示。利用校准后的LANDSCAPE模型,对武汉市永久基本农田划定过程进行模拟,结果如图6所示。对模型结果进行分析,如表3所示。

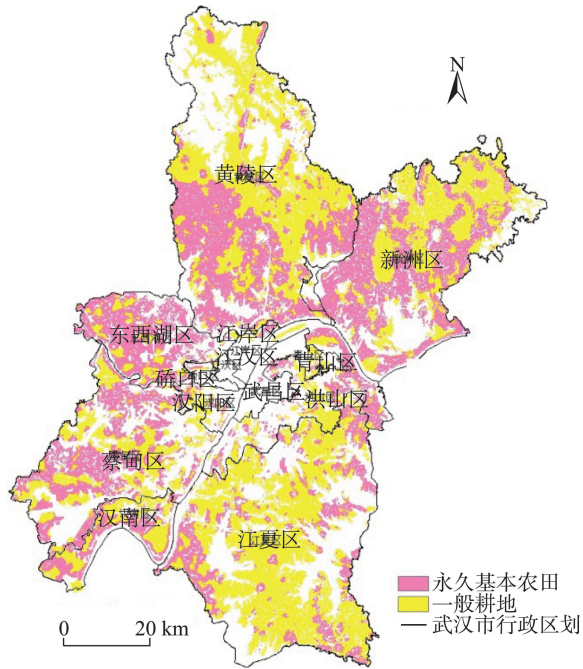


图4 基于LESA的武汉永久基本农田分布
Fig. 4 Permanent prime farmland demarcation based on LESA system in Wuhan

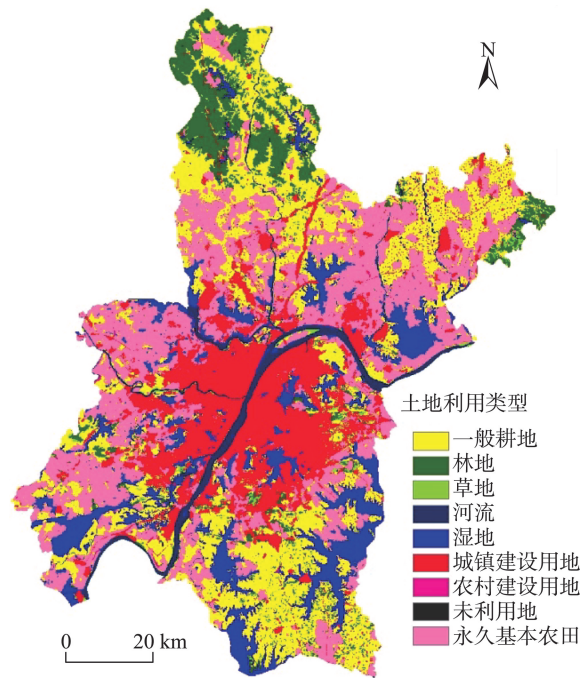


图6 基于LANDSCAPE的武汉市永久基本农田
Fig. 6 Permanent prime farmland demarcation in Wuhan based on LANDSCAPE model

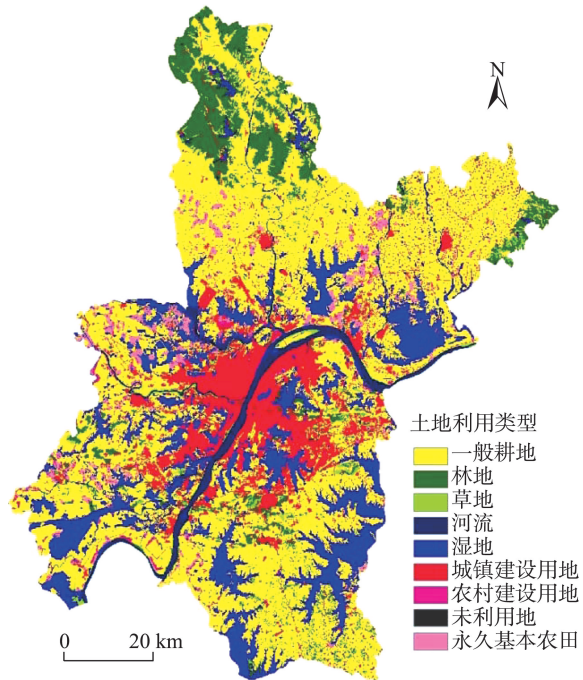


图5 武汉市永久基本农田划定基础
Fig. 5 Basic map for permanent prime farmland demarcation in Wuhan

从表3的模拟结果分析来看,永久基本农田和城镇建设用地面积均达到了预定需求量。新划入的215 360 hm²永久基本农田全部来源于耕地,加上27 840 hm²的永久基本农田演化内核,达到了永久

基本农田的需求量243 200 hm²,而城镇建设用地扩张主要占用了湿地、耕地和林地,一方面是因为耕地、湿地和林地面积相对于其它地类面积较大;另一方面从武汉市土地利用图中可看出城镇建设用地周边分布了较多的耕地、湿地和林地,容易被城市扩张占用。但城镇建设用地对湿地的占用面积最多,与常规的土地利用变化模拟中城市扩张主要占用耕地的结果不同,这可能是因为本文的模拟过程主动性地类有城镇建设用地和永久基本农田2类,永久基本农田的需求总量大于城镇建设用地,且由于永久基本农田只能占用耕地来达到需求总量,所以在模拟结果中,大部分耕地转化为永久基本农田。

从划定的武汉市永久基本农田区域分布来看,永久基本农田主要位于武汉东北、北部、西部和西南的新洲、黄陂、东西湖和蔡甸区。其中在新洲、东西湖和蔡甸区分布面积较大,且集中连片程度较高。划定的永久基本农田紧密围绕在模拟后的城镇建设用地边缘,耕地的立地条件优越,一方面保障了永久基本农田的稳定性,另一方面合理限制了城市建设用地的无限扩张。

3.3 LESA与LANDSCAPE方法划定永久基本农田结果对比分析

本文采用LESA及LANDSCAPE方法对武汉市

表3 武汉市永久基本农田划定模拟结果

地类	一般耕地	林地	草地	河流	湿地	城镇建设用地	农村建设用地	未利用地	永久基本农田
面积	197 509	70 359	4995	28 472	129 843	160 000	21 252	256	243 200
城市扩张 占用面积	19 372	6873	2928	0	26 373	-	4 181	344	0
新划入的永久 基本农田面积	215 360	0	0	0	0	0	0	0	-

永久基本农田进行了划定,面积分别为243 259 hm²和243 200 hm²。LESA方法是根据耕地综合评价分值来划定永久基本农田,保障综合质量较优的耕地划入永久基本农田,并未考虑城市将来的发展会与划定的永久基本农田产生冲突,将LESA方法划定的永久基本农田数据与LANDSCAPE的模拟结果进行叠加分析,发现LESA方法划定的永久基本农田中有15.8%被新增的城镇建设用地侵占;LANDSCAPE方法依据武汉城市扩张的历史规律,在永久基本农田保护及城镇建设用地扩张的共同需求下,模拟永久基本农田的划定过程,实现永久基本农田保护与城市增长的协调。此外,将2种方法划定永久基本农田的结果从耕地地力等级、景观指数两个方面来进行对比。将LANDSCAPE模型划定的永久基本农田区域提取出来,转化为矢量数据,与LESA方法划定的永久基本农田数据进行对比分析,结果见表4及表5。

(1)耕地地力等级对比

将本文用2种方法划定的永久基本农田数据与

表4 2种方法划定的永久基本农田耕地地力等级对比

Tab. 4 Comparison of quality grade of permanent prime farmland demarcated based on two methods

县域耕地地 力等级	LESA方法划定		LANDSCAPE方法划定	
	农田面积/hm ²	比例/%	农田面积/hm ²	比例/%
1	46 515	22.67	45 157	22.58
2	21 464	10.46	21 189	10.59
3	25 622	12.49	25 194	12.60
4	40 367	19.68	36 453	18.22
5	35 544	17.33	34 483	17.24

表5 2种方法划定的永久基本农田景观指数对比

Tab. 5 Comparison of landscape index of permanent prime farmland demarcated based on two methods

永久基本农田 划分方法	斑块 数量/ 个	平均斑块 面积/hm ²	破碎度	平均斑块 分维数	面积加权 平均形状 因子
LESA	3072	156.12	1.2566E-06	1.2845	1.2180
LANDSCAPE	1457	317.66	5.9885E-07	1.2473	1.1540

县域耕地地力等级数据对比分析可知,2种方法划定的永久基本农田均有80%以上为县域耕地地力等级的1—5级,耕地综合质量较好。2种方法在县域耕地地力等级为1—5级的永久基本农田面积及比例分布如表4所示,位于各等级的LESA方法及LANDSCAPE方法划定面积差异不大,其中1—3等的永久基本农田面积总和在LESA方法划定的永久基本农田中为45.63%,在LANDSCAPE方法划定的永久基本农田中为45.77%。因此,从划定的永久基本农田的耕地地力等级来看,2种方法得到的结果差异不大,划定的永久基本农田质量较高。

(2)基于景观指数的对比

将2种方法划定的永久基本农田图斑数量、平均斑块面积进行对比,LANDSCAPE方法划定的永久基本农田图斑数量为LESA方法的1/2,平均斑块面积为LESA方法的2倍。可能的原因如下:①LANDSCAPE方法划定的永久基本农田集中连片性程度较高;②LANDSCAPE方法划定结果从栅格转为矢量,没有考虑耕地的属性分类,仅依据空间形态转换为图斑,使图斑总数量较少。因此,进一步通过景观指数来对比2种方法划定的永久基本农田结果。根据式(6)—(8)分别计算2种方法划定的永久基本农田的破碎度,平均斑块分维数和面积加权平均形状因子,结果如表5所示。

上述结果表明,LANDSCAPE方法划定的永久基本农田基于CA模拟地类的演变,得到的永久基本农田破碎度和斑块不规则程度都较小,反映其集中连片程度较高,形状较规则,更有利于机械耕作,提高生产效率。基于LESA方法划定的永久基本农田根据LESA综合分值排序,直接从中选优,容易忽视永久基本农田的集中连片及斑块形状要求,使划定结果的景观布局较劣于LANDSCAPE模型。

4 结论与讨论

本文将LESA方法及LANDSCAPE模型结合

来划定武汉市永久基本农田,能达到永久基本农田的数量需求,并且划定的永久基本农田的综合质量较高,同时划定过程中实现了永久基本农田划定与城市扩张两者的协调,使划定的永久基本农田稳定性更高。

(1)运用LESA方法,选取反映耕地质量(LE)的土壤条件、地形条件和基础设施条件等指标、反映立地条件(SA)的区位条件和空间形态指标,构建永久基本农田综合评价体系,根据LESA综合分值划定武汉市永久基本农田。将综合分值>63.06分的I级、II级及部分III级耕地划入永久基本农田,划定面积为243 259 hm²,占武汉市耕地总面积的47.66%,主要分布在武汉的黄陂、新洲、东西湖和蔡甸区,其中黄陂和东西湖区的永久基本农田集中连片程度较高。

(2)利用LANDSCAPE模型模拟武汉市永久基本农田的划定及与城镇建设用地扩张的协调过程,武汉市划定永久基本农田数量为243 200 hm²,主要分布在武汉的新洲区、黄陂区、东西湖区和蔡甸区,其中在新洲区、东西湖区和蔡甸区分布面积较大,且集中连片程度较高。模拟结果的镇建设用地面积达到了预定需求量,城镇建设用地在扩张过程中主要占用湿地、耕地和林地,而划定永久基本农田分布在城镇建设用地扩张的边缘,能够有效限制城市建设用地的无限扩张。

(3)2种方法划定的永久基本农田在耕地质量上差异不大,LESA方法划定的永久基本农田县域耕地地力等级在5级以上的占82.63%,LANDSCAPE模型得到的结果中有81.23%县域耕地地力等级在5级以上,整体质量均较高。但在空间布局上,基于LANDSCAPE模型的划定结果明显优于基于LESA的方法,耕地分布相对集中,连片程度高,形状较为规则。这与LESA方法直接根据耕地质量选优,而忽视永久基本农田的集中连片性有关。更重要的是基于LESA方法的永久基本农田划定过程中无法协调永久基本农田划定与城市扩张之间的冲突,本模拟结果显示LESA方法划定的永久基本农田中有15.8%将被新增城镇建设用地侵占。

根据本文的研究结果,提出如下建议:①永久基本农田的划定,在保护优质耕地的基础上,要优化永久基本农田的空间布局,一方面提高永久基本农田的集中连片程度,另一方面协调与城市扩张过程产生的用地冲突,以保障永久基本农田的稳定性;②永久基本农田的划定可以基于“多规合一”的视角,既要保护耕地,保障粮食安全,又要为未来城

市发展预留空间,以满足城市发展的用地需求。相关部门应同步划定永久基本农田及城市增长边界,以协调耕地保护与城市扩张之间的用地冲突。

参考文献(References):

- [1] 钱凤魁,王秋兵,边振兴,等.永久基本农田划定和保护理论探讨[J].中国农业资源与区划,2013,34(3):22-27. [Qian F K, Wang Q B, Bian Z X, et al. Discussion about the permanent basic farmland planning and protection[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2013,34(3):22-27.]
- [2] 邵一希.基于LESA体系的永久基本农田划定方法研究——以上海为例[J].上海国土资源,2017,38(2):87-90. [Shao Y X. Study on delineation of permanent prime farmland based on the LESAs system[J]. Shanghai Land & Resources, 2017,38(2):87-90.]
- [3] 钱凤魁,王秋兵.基于农用地分等和LESA方法的基本农田划定[J].水土保持研究,2011,18(3):251-255. [Qian F K, Wang Q B. Planning method of the prime farmland based on farmland classification and LESAs method[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011,18(3): 251-255.]
- [4] 董秀茹,尤明英,王秋兵.基于土地评价的基本农田划定方法[J].农业工程学报,2011,27(4):336-339. [Dong X R, You M Y, Wang Q B. Demarcating method of prime farmland based on land evaluation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011,27(4):336-339.]
- [5] 杨绪红,金晓斌,贾培宏,等.多规合一视角下县域永久基本农田划定方法与实证研究[J].农业工程学报,2019,35(2):250-259. [Yang X H, Jin X B, Jia P H, et al. Designation method and demonstration of permanent basic farmland in county level on view of multi-planning integration [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019,35(2):250-259.]
- [6] 钱鑫,樊宏,高燕,等.基于GIS技术的基本农田保护研究——以成都市龙泉驿区为例[J].国土资源科技,2006(6): 81-82. [Qian X, Fan H, Gao Y. A research into basic farmland protection based on GIS technology- with longquanyi district as an example[J]. Scientific and Technological Management of Land and Resources, 2006(6): 81-82.]
- [7] 李赓,吴次芳,曹顺爱.划定基本农田指标体系的研究[J].农机化研究,2006,8:46-48. [Li G, Wu C F, Cao S A. Study on defining index system of basic farmland[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006,8: 46-48.]
- [8] 郑文聚.农用地分等及其应用研究[D].北京:中国农业大学,2005. [Yun W J. Research on agricultural land classification and its application[D]. Beijing: China Agricultural University, 2005.]

- [9] 郑新奇,杨树佳,象伟宁,等.基于农用地分等的基本农田保护空间规划方法研究[J].农业工程学报,2007,23(1):66-71. [Zheng X Q, Yang S J, Xiang W N, et al. Spatial planning method for the basic farmland protection based on the farmland classification[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007,23(1):66-71.]
- [10] 闫宁,郑宏刚.农用地分等在基本农田划分中的应用研究[J].国土与自然资源研究,2009(3):28-30. [Yan N, Zheng H G. Research on applications of agricultural land classification in division of prime farmland[J]. Territory and Natural Resources Study, 2009(3):28-30.]
- [11] 姜广辉,张瑞娟,张翠玉,等.基于空间集聚格局和边界修正的基本农田保护区划定方法[J].农业工程学报,2015,31(23):222-229. [Jiang G H, Zhang R J, Zhang C Y, et al. Approach of land use zone for capital farmland protection based on spatial agglomeration pattern and boundaries modification[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015,31(23):222-229.]
- [12] 任艳敏,唐秀美,刘玉,等.考虑耕地生态质量的基本农田划定方法[J].农业工程学报,2014,30(24):298-307. [Ren Y M, Tang X M, Liu Y, et al. Demarcating method of prime farmland considering ecological quality of cultivated land[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014,30(24):298-307.]
- [13] 赵素霞,牛海鹏,张捍卫,等.基于生态位模型的高标准基本农田建设适宜性评价[J].农业工程学报,2016,32(12):220-228. [Zhao S X, Niu H P, Zhang H W, et al. Suitability evaluation on high quality capital farmland consolidation based on niche-fitness model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016,32(12):220-228.]
- [14] 王森,李丽.有关美国土地与基础设施评估方法的研究[J].水土保持科技情报,2004(1):11-13. [Wang S, Li L. A Study on the Assessment Method of Land and Infrastructure in the United States[J]. Scientific and Technical Information of Soil and Water Conservation, 2004(1):11-13.]
- [15] 秦志锋,秦明周,秦玉霞.美国土地评价与立地分析(LESA)系统研究[J].三门峡职业技术学院学报,2007,6(4):96-98. [Qin Z F, Qin M Z, Qin Y X. Study of the American LESA system[J]. Journal of Sanmenxia Polytechnic, 2007,6(4):96-98.]
- [16] 边振兴,刘琳琳,王秋兵,等.基于LESA的城市边缘区永久基本农田划定研究[J].资源科学,2015,37(11):2172-2178. [Bian Z X, Liu L L, Wang Q B, et al. Permanent prime farmland demarcation in urban fringes based on the LESA system[J]. Resources Science, 2015,37(11):2172-2178.]
- [17] 陈茜.组团式城市永久基本农田的全域规划及其功能研究——以重庆市北碚区为例[D].重庆:西南大学,2017. [Chen X. Study on the Macro-planning and functions of permanent prime farmland in clustered urban: A case study in Beibei district[D]. Chongqing: Southwest University, 2017.]
- [18] 宋具兰.贵州县域尺度高标准基本农田建设时序与模式研究[D].贵阳:贵州大学,2017. [Song J L. Study on time series and model of high standard basic farmland construction at county scale in Guizhou province[D]. Guiyang: Guizhou University, 2017.]
- [19] 白佳宜,张裕凤.县域永久基本农田划定研究——以内蒙古自治区土默特左旗为例[J].内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版),2019,48(1):63-68. [Bai J Y, Zhang Y F. Study on delimitation of permanent basic farmland in counties: A case of inner Mongolia Tumotezu banner[J]. Journal of Inner Mongolia Normal University (Natural Science Edition), 2019,48(1):63-68.]
- [20] 边振兴,杨子娇,钱凤魁,等.基于LESA体系的高标准基本农田建设时序研究[J].自然资源学报,2016,31(3):436-446. [Bian Z X, Yang Z J, Qian F K, et al. Study on time sequence of high-standard prime farmland based on LESA[J]. Journal of Natural Resources, 2016,31(3):436-446.]
- [21] 吴飞,濮励杰,许艳,等.耕地入选基本农田评价与决策[J].农业工程学报,2009,25(12):270-277. [Wu F, Pu L J, Xu Y, et al. Evaluation and decision-making for selecting cultivated land into prime farmland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009,25(12):270-277.]
- [22] 钱凤魁.基于耕地质量及其立地条件评价体系的基本农田划定研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2011. [Qian F K. Study on basic farmland delimitation based on the evaluation system of cultivated land quality and site conditions [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2011.]
- [23] 程雄,吴争研,刘艳芳.GIS技术在基本农田保护工作中的应用[J].国土资源信息化,2002(4):37-39. [Cheng X, Wu Z Y, Liu Y F. Application of GIS technology in the protection of basic farmland[J]. Land and Resources Information, 2002(4):37-39.]
- [24] 罗志军,赵越,赵杰,等.基于景观格局与空间自相关的永久基本农田划定研究[J].农业机械学报,2018,49(10):195-204. [Luo Z J, Zhao Y, Zhao J, et al. Defining of permanent basic farmland based on landscape pattern and spatial autocorrelation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(10):195-204.]
- [25] 聂艳,吴西子,于婧,等.基于土地评价和空间聚类的基本农田划定方法研究——以湖北省鹤峰县为例[J].中国土地科学,2013,27(12):39-45. [Nie Y, Wu X Z, Yu J, et al. Primary farmland zoning based on land evaluation and spatial clustering: A case of Hefeng County[J]. China Land Science, 2013,27(12):39-45.]
- [26] 朱美青,黄宏胜,史文娇,等.基于多规合一的基本农田划

- 定研究——以江西省余江县为例[J].自然资源学报, 2016,31(12):2111-2121. [Zhu M Q, Huang H S, Shi W J, et al. The research of prime farmland demarcation based on multi-planning-in-one: A case study of Yujiang County, Jiangxi Province[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(12):2111-2121.]
- [27] 叶英聪,孙凯,匡丽花,等.基于空间决策的城镇空间与农业生产空间协调布局优化[J].农业工程学报,2017,33(16):256-266. [Ye Y C, Sun K, Kuang L H, et al. Spatial layout optimization of urban space and agricultural space based on spatial decision-making[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017,33(16):256-266.]
- [28] 冉娜,金晓斌,范业婷,等.基于土地利用冲突识别与协调的“三线”划定方法研究:以常州市金坛区为例[J].资源科学,2018,40(2):284-98. [Ran N, Jin X B, Fan Y T, et al. "Three Lines" delineation based on land use conflict identification and coordination in Jintan District,Changzhou [J]. Resources Science, 2018,40(2):284-298.]
- [29] Ke X L, Zheng W W, Zhou T, et al. A CA-based land system change model: Landscape[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2017,31(9):1798-1817.
- [30] 武汉市统计局. 2018 武汉统计年鉴[M].武汉:武汉统计年鉴,2018. [Wuhan Statistical Bureau. Wuhan Statistical Yearbook 2018[M]. Wuhan: Wuhan Statistical Yearbook, 2018.]
- [31]湖北省人民政府.武汉市城市周边永久基本农田划定工作圆满完成[DB/OL]. http://www.hubei.gov.cn/zwgk/zdlyxxgk/ggzy/zdhfwzs/zsdt/201608/t20160811_880675.shtml.2016-08-11. [Hubei Provincial People's Government. The delimitation of permanent basic farmland around Wuhan City has been successfully completed[DB/OL]. http://www.hubei.gov.cn/zwgk/zdlyxxgk/ggzy/zdhfwzs/zsdt/201608/t20160811_880675.shtml.2016-08-11.]
- [32] Ke X L, Qi L Y, 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.
- [33] 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.]
- [34] 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. [Hu F, Ke X L, Chai M, et al. Determining the urban growth boundary by balancing urban expansion and permanent basic farmland protection: A case study of Wuhan[J]. Geography and Geo-Information Science, 2019,35(3):72-77.]
- [35] Dunford R W, Roe R D, Steiner F R, et al. Implementing LESA in Whitman County, Washington (land evaluation). [J]. Journal of Soil & Water Conservation, 1983(2):87-89.
- [36] 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.]
- [37] 胡业翠,付玲,李琦.北京城市增长边界预测[J].地球信息科学学报,2017,19(4):486-492. [Hu Y C, Fu L, Li Q. The prediction of Beijing urban growth boundary. Journal of Geo-information Science, 2017,19(4):486-492.]
- [38]武汉市国土资源与规划局.武汉市土地利用总体规划(2006- 2020) [DB/OL]. <http://www.wpl.gov.cn/pc-871-78165.html>.2015-12-30. [Wuhan Bureau of Land and Resources and Planning. General Planning of Land Use in Wuhan(2006- 2020) [DB/OL]. <http://www.wpl.gov.cn/pc-871-78165.html>.2015-12-30.]
- [39] 傅伯杰,陈利顶,马克明,等.景观生态学原理及应用[M].北京:科学出版社,2001. [Fu B J, Chen L D, Ma K M, et al. Principle and application of landscape ecology[M]. Beijing: Science Press, 2001.]
- [40] 中国土壤数据库. 湖北省土壤资源数据集[DB/OL]. URL: <http://vdb3.soil.csdb.cn/>. [Soil Science Database. Soil resource data set of Hubei Province[DB/OL]. URL: <http://vdb3.soil.csdb.cn/>.]
- [41] 美国航空航天局.航空雷达测绘数据 (STRM1 DEM) [DB/OL]. URL: <https://www.nasa.gov/>. [National Aeronautics and Space Administration. Shuttle Radar Topography Mission (STRM1 DEM).[DB/OL].] URL: <https://www.nasa.gov/>.]
- [42] 贾振,韩印.基于百度地图 API 的智能交通信息展示[J].物流工程与管理,2016,38(7):211-213. [Jia Z, Han Y. Intelligent Transportation Information Display Based on Baidu Map API[J]. Logistics Engineering and Management, 2016,38(7):211-213.]
- [43] 美国地质勘探局. Landsat 8 OLI_TIRS 影像数据[DB/OL].URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. [United States Geological Survey. Image data from Landsat 8 OLI_TIRS [DB/OL].] URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/>.]
- [44] 中国科学院资源环境科学数据中心.2005年中国土地利用现状遥感监测数据[DB/OL]. URL: <http://www.resdc.cn/>. [Resource and Environment Data Cloud Platform. Remote sensing monitoring data of land use in China, 2005[DB/OL].] URL: <http://www.resdc.cn/>.]