

DOI: 10.5846/stxb202005091161

吴文俊, 张雪微, 郭杰, 欧名豪, 欧维新. “多目标”需求下扬州市土地利用布局优化. 生态学报, 2022, 42(19): 7952-7965.

Wu W J, Zhang X W, Guo J, Ou M H, Ou W X. Optimization of land use layout in Yangzhou City for multi-objective demand. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(19): 7952-7965.

“多目标”需求下扬州市土地利用布局优化

吴文俊¹, 张雪微¹, 郭杰^{1,2,3}, 欧名豪^{1,2,3,*}, 欧维新^{1,2,3}

1 南京农业大学土地管理学院, 南京 210095

2 统筹城乡发展与土地管理创新研究基地, 南京 210095

3 农村土地资源利用与整治国家地方联合工程研究中心, 南京 210095

摘要:建模和情景分析是土地利用变化研究的核心内容,面对城市化进程中日益严峻的生态环境以及粮食安全问题,开展不同约束条件下的土地利用模拟研究对于科学规划和政策制定具有重要意义。以国家级生态示范市扬州市为例,构建耦合景观生态安全格局的 CLUE-S 模型,结合地类间转变速率调整,模拟预测规划目标年(2030 年)不同情景下的用地结构和布局。研究发现:①研究区低、中、高安全水平下生态用地面积比例分别为 20.68%、36.50%和 48.81%;②现状发展情景下,城镇及工矿用地量增加明显,用地在原有基础上沿外围呈紧凑连续型扩散,耕地、园林地锐减且分布呈现更加破碎化的状态;③耕地保护情景下耕地和园林地分布趋于连片和集中,城镇及工矿用地和交通运输用地对于耕地和生态用地的侵占速率降低;④生态涵养情景下园林地面积略有增加,城镇及工矿用地在原有基础上扩张速度减缓,粮食安全和生态安全基本实现。

关键词:土地利用;景观安全格局;CLUE-S 模型;情景模拟

Optimization of land use layout in Yangzhou City for multi-objective demand

WU wenjun¹, ZHANG Xuewei¹, GUO Jie^{1,2,3}, OU Minghao^{1,2,3,*}, OU Weixin^{1,2,3}

1 College of Land Management, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

2 Center of Urban-coral Joint Development and Land Management Innovation, Nanjing 210095, China

3 State and Local Joint Engineering Research Center of Rural Land Resources Utilization and Consolidation, Nanjing 210095, China

Abstract: Modeling and scenario analysis are the core contents of land use change research. Facing the increasingly severely ecological environment and food security problems in the process of urbanization, it is of great significance for scientific planning and policy making to carry out land use simulation research under different constraints. In 2018, with the implementation of the pilot program of "ecological restoration and urban repair" in Yangzhou city, urban construction has become another important direction of ecological governance. By the end of 2018, Yangzhou City had completed high-standard basic farmland, accounting for 73.9% of the city's farmland, ranking first in northern Jiangsu Province and third in the province. At present, the provincial eco-circular agriculture pilot village project starts to be constructed, and it is more necessary to speed up the ecological transformation of Yangzhou City agriculture in order to ensure the quantity. In this context, it is particularly important to understand the future change trend of land use pattern under different ecological protection requirements. This paper takes Yangzhou City, a national ecological demonstration city, as an example, to construct a CLUE - S model of the coupled landscape ecological security pattern, so as to predict and simulate the land structure and layout under different scenarios in the planning target year (2030). The results showed that: (1) the proportions of ecological land in the study area under low, medium and high safety levels were 20.68%, 36.50% and

基金项目:国家自然科学基金项目(71303119)

收稿日期:2020-05-09; 网络出版日期:2022-05-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mhoul@njau.edu.cn

48.81%, respectively. (2) Under the current development scenario, the urban and industrial and mineral land increased significantly, the arable land and garden land were sharply reduced, and the distribution was more fragmented. (3) Under the scenario of cultivated land protection, the cultivated land tended to be contiguous and concentrated, and the expansion of urban, industrial, mining land and transportation land on cultivated land and ecological land decreased. (4) Under the scenario of ecological conservation, the garden land area increased slightly, the expansion rate of urban and industrial land slowed down, food security and ecological security were basically realized. From the comparison of the three scenarios, it can be shown that in the "ecological conversation" scenario of this research, the prohibition of high ecological security areas can not only realize the "dual security" of ecology and food, but also appropriately guide the economical and intensive development of construction land and achieve high-quality development of social economy. In China, the government vigorously develops ecological civilization construction, attaches importance to ecological protection and cultivated land protection, not only because ecological protection and cultivated land protection is the bottom line of social and economic development, but also because reasonable and orderly ecological protection and cultivated land protection can promote the more efficient development of social and economic.

Key Words: land use; landscape security pattern; CLUE-S model; simulation

随着耕地安全和生态环境问题的日益突出,国家将生态环境保护工作提高到国家战略层面。习近平总书记多次强调“绿水青山就是金山银山”“要坚持节约资源和保护环境的基本国策”“像保护眼睛一样保护生态环境,像对待生命一样对待生态环境”。《“十三五”生态环境保护规划》将生态文明建设上升为国家战略,强调生态环境保护与土地利用格局优化的耦合研究是保护生态环境、确保国家粮食安全的重点。近年来发展的绿色基础设施理论提出了构建连续生态网络的方法,并在美国马里兰州土地管理中得到了成功应用^[1];俞孔坚等学者于 1995 年提出了生态安全格局(Ecological Security Pattern)理论和方法,通过判别和保护关键的景观格局,维护生态过程的健康和安全,为我国区域土地利用与生态保护研究提供了重要参考^[2]。同时,稳定优质的粮食供给是世界发展中永恒的主题^[3],当前建设用地适度扩张仍是经济发展的内在需求,但其增长需符合国家粮食安全和生态保护战略的要求。因此,满足多目标土地利用需求,研究生态和粮食安全约束下的土地利用布局,可以为未来发展方向提供科学依据^[4]。

自 20 世纪 90 年代以来,土地利用变化研究已成为全球环境变化的关键领域和核心内容,是地理学和土地科学研究的前沿与热点领域之一^[4-7]。情景分析和模型模拟则成为研究土地利用动态变化特征、土地利用格局和土地动态走向的有效手段。目前基于 Logistic 回归分析的空间显示模型(Spatial Explicit Model)^[8]、基于经验统计分析的 CLUE-S 模型^[9]、基于栅格邻域关系分析的元胞自动机模型(Cellular Automata)^[10]、基于多智能主体分析的主体与多主体模型(Agent Based Modeling)^[11]和基于土地系统结构变化及空间格局演替综合分析的 DLSC 模型(Dynamics of Land System)^[12]已广泛应用于土地利用变化时空格局模拟的研究中。

与其他模型相比,CLUE-S 模型整合不同时空尺度、不同层面(社会、经济、政策、生态环境)引起土地利用变化的驱动因素,结合对区域土地利用变化经验与理解,模拟不同情景下各种土地利用类型的时空格局变化,为制定科学的土地利用决策提供依据^[13]。随着生态环境保护与经济社会发展之间的矛盾加剧,有部分学者将区域景观生态安全格局保护与土地利用变化预测研究相结合,将重点生态保护区作为限制条件,对生态约束下的格局优化进行了研究^[14];在粮食供给方面,目前仍以对于耕地面积管控从而保障粮食安全的研究较多^[15]。但在目前城镇空间逐步蔓延,生态空间与农业空间相互制约的情况下,通过土地利用布局预测模拟手段,实现粮食安全与生态安全“多目标”需求下的未来土地利用发展方向的研究显得更为重要,目前将粮食与生态相结合的研究仍较少,这一方面将成为未来的重点。

基于此,本文以国家级生态示范扬州市为例,重点关注广陵区和邗江区,构建耦合景观生态安全格局的 CLUE-S 模型,模拟目标年(2030 年)区域不同情景下综合现状发展、粮食安全、生态涵养多目标需求的用地布

局;通过不同情景下用地模拟方案与研究区土地利用现状对比,研究区域差别化的土地利用管制策略,为土地可持续利用管理与调控提供依据。

1 研究区概况

扬州市地处江苏省中部,位于长江与京杭大运河的交汇处。随着经济的快速发展,扬州市建设用地外延式增长导致城市内部空间结构失衡和土地利用效率低下,建设用地过度扩张导致优质耕地数量急剧减少、生态空间日益侵占。广陵区和邗江区作为扬州市的核心区域,土地供需矛盾尤为突出,伴随经济的迅速增长以及建设用地快速扩张,造成了对农业、生态空间的过度挤压。2016 年扬州市区 GDP 为 2900.30 亿元,常住总人口为 132.47 万人,建设用地规模为 35342.76hm²,人均建设用地约为 208m²/人;2005—2016 年建设用地扩张占用耕地 6235.47hm²,水域、滩涂等生态空间消减迅速,人地矛盾日益突出。未来随着扬州市区城镇化与工业化进程的推进,农地非农化、生态空间破坏等现象将会继续,造成土地利用布局的深刻变化,因此通过构建景观生态安全格局,将其作为土地利用变化的限制条件,对扬州市土地资源的合理配置、优化利用及区域生态安全的维护具有重大意义。

2 研究方法

2.1 区域景观生态安全格局的构建

景观生态安全格局强调分析景观过程和格局的关系,通过景观过程的分析,判别由关键性的景观元素、位置和空间关系组成的景观格局,是判定区域生态用地需求的重要依据^[16-17]。参照已有研究^[18-21],基于区域生态现状调查,识别关键的生态过程,选取防洪安全、水土保持、生物保护和游憩安全等生态过程构建区域综合生态安全格局。构建方法如下:

防洪安全格局。研究区地处江淮交汇,境内地势低洼,70%以上的地面位于历史洪水位之下,因此构建洪水安全格局意义重大。首先,查阅研究区相关历史资料,运用 ArcGIS 建立 50 年一遇、20 年一遇和 10 年一遇不同洪水风险级别下的淹没格局;其次,将河流湖泊、水库水面、内陆滩涂及低洼地等具有蓄洪功能的土地作为防洪源地,以满足洪水自然宣泄的要求,根据不同蓄洪安全级别要求建立缓冲区,从而构建蓄洪格局;最后综合上述两种格局建立高、中、低三级洪水安全格局^[22]。

水土保持安全格局。水土流失会造成土壤肥力下降,严重时会导致洪水、泥石流等灾害,给人类的生命和财产造成严重威胁,因此需要结合潜在的水土流失区域识别水土安全格局。由于地表径流、坡度、植被覆盖度等是水土流失的主要影响因素,本文选取地表径流缓冲区、坡度和土地覆盖类型作为水土保持影响因子,结合研究区历年水文资料,设置不同安全级别下水土保持影响因子的参数,据此构建区域高、中、低三级水土保持安全格局^[23]。

生物保护安全格局。生物多样性的提升是区域生态安全和粮食安全的重要保证,目前研究区面临湿地减少、生物多样性遭到破坏等问题,因此需要构建生物保护安全格局,通过生境网络优化促使区域生物多样性提升。根据《扬州市生物多样性保护战略和行动计划编制大纲》,研究区共有 187 种鸟类,本文选取白鹭和灰喜鹊作为区域生物的指示性物种,通过生活习性分析,分别采用生境适宜性评价法和阻力面分析法^[19]确定其生境安全格局,并运用自然断裂法,综合构建高、中、低三级生物保护安全格局。

游憩安全格局。研究区生态环境优越,区域内自然景观与人文景观交相辉映,具有较高的游憩价值。本文选择水体、滩涂、风景名胜以及乡土文化遗产作为源,通过构建最小阻力模型和自然断裂法,构建高、中、低三级游憩安全格局。

由于上述景观生态安全格局对研究区生态保护同等重要,即各类生态安全同时对区域整体生态安全具有决定性作用,任何单一生态格局的弱势区域均会使该区域的综合生态安全处于较为危险的状态,因此本文采取等权叠加;在叠加判别时,结合木桶效应而采用“综合取低”的方法^[19],评价单元格的安全水平取决于其上

各类安全格局中的最低安全水平;据此,可得到区域高、中、低三级安全级别下生态用地的规模。

2.2 土地利用核心情景构建及需求预测

(1)土地利用核心情景构建:土地利用情景即未来区域土地利用形势的综合判断,是对多目标土地利用协调的考量。考虑未来社会经济发展的不确定性,从土地利用满足经济增长、粮食安全和生态安全等多目标需求的角度,本研究拟构建现状发展、耕地保护和生态涵养三类土地利用情景。

(2)土地需求量预测:在一定时期的土地利用变化中,不同土地利用类型间存在相关转化,且这一转化过程规律可用马尔科夫模型来定量描述。该模型是景观生态学家用来模拟土地利用/覆被格局变化最普遍的模型,其应用的关键在于确定不同状态下各土地利用类型间的转移概率,基于基期土地利用数据通过调整转换概率实现未来用地需求的预测。

(3)耕地与生态用地控制:中国实施严格的耕地保护制度,通过保有一定数量、质量的耕地是保障国家粮食安全的基础^[20]。因此,减少耕地被其他用地,尤其是建设用地侵占的可能性,是实现粮食安全的首要任务,在情景设置中通过地类转移概率设置,模拟预测未来不同情景中耕地面积。对于生态用地而言,除了需要进行面积控制外,空间位置属性更是保证生态安全的重要因素^[14],在本研究中,通过构建生态安全格局,运用生态安全分级分区限制,实现对生态用地的保护,结合地类变化速率调整预测未来土地利用变化。

2.3 CLUE-S 模型法

CLUE-S 模型的假设条件是,一个地区的土地利用变化是受该地区的土地利用需求驱动的,并且一个地区的土地利用分布格局总是和土地需求以及该地区的自然环境和社会经济状况处于动态的平衡之中^[21-24]。在此假设的基础上,CLUE-S 模型运用了系统论的方法处理不同土地利用类型之间的竞争关系,实现了对不同土地利用变化的同步模拟^[21]。

其具体操作步骤如下:

(1)数据收集与输入:模型需要的数据包括地图(如土壤、气候、海拔等)和统计数据两类,所有数据需要被转化成一致的栅格格式;运行 CLUE-S 模型需要输入的参数文件为 main1 文件、编辑回归方程文件(alloc.reg)、区域约束文件(region*.fil)、需求情景假设文件(demand.in*)、最初土地利用配置文件(Cov_all.*)、驱动因子文件(Sclgr*)、转化矩阵文件(allow.txt)。

(2)空间分析:在 CLUE-S 模型中,根据一组引起土地利用变化的驱动因子,运用 Logistic 回归对每一栅格单元可能出现某一种土地利用类型的概率进行诊断。在转移概率计算公式中, X 为各驱动因子, β 为驱动因子系数。使用 Pontius R.G. 提出的 ROC (Relative operating Characteristics) 方法对 Logistic 回归结果进行检验,ROC 曲线下面积越大,表明回归效果越好^[25]。

$$\text{Log}(P_i/(1 - P_i)) = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_n X_{ni}$$

(3)转化规则:不同土地利用类型的稳定性可由模型参数 ELAS 定义以下三种情况:对于一般不会转变为其它土地利用类型的地类,ELAS 设为 1;对于极易变化的地类,ELAS 设为 0;对于发生转化的难易程度介于以上两种极端情况之间的地类,ELAS 设为大于 0 小于 1 的某一值。参数设置主要依靠研究者对研究区域土地利用变化的理解,可以在模型检验的过程中进行调试。

(4)动态模拟:综合分析土地利用的空间分布概率适宜图、土地利用变化规则和研究初期土地利用分布现状图的基础上,根据总概率 TPROP 大小对土地利用需求进行空间分配的过程。这种分配是通过多次迭代实现的。计算公式中 ITER_u 是土地利用类型 u 的迭代变量, ELAS_u 是根据上述土地利用转变规则设置的参数。

$$\text{TPROP}_{(i,u)} = P_{(i,u)} + \text{ELAS}_u + \text{ITER}_u$$

3 数据来源及处理

3.1 数据来源

本研究涉及的数据主要包括地理空间数据(土地利用、地形、水文、坡度等)、统计数据(社会经济、人口、

资源等)和专题数据。

(1)土地利用数据:采用2010年及2015年的土地利用现状数据,来源于扬州市2010年及2015年Landsat TM遥感影像数据解译,空间分辨率为30m。

(2)地形及水文数据:将地理空间云数据平台下载的GDEMDEM 30M分辨率数字高程数据进行掩膜提取处理,获得研究区的高程数据;运用ArcGIS的Spatial Analyst Tools生成坡度图,并进行水文分析和径流模拟等数据处理。

(3)统计及专题数据:包括统计年鉴、地方志和各类专题数据。其中,社会经济数据来源于《扬州市统计年鉴》;历年建设用地规模来源于土地利用变更调查,部分缺失数据运用多年平均增长率进行插值计算。

3.2 数据处理

(1)土地利用数据:首先,将收集到的地形图进行扫描和投影处理,以地形图作为主控数据源,利用ENVI 4.7软件,结合第二次全国土地调查土地利用现状数据,对2010年及2015年TM影像数据进行配准及纠正,平均位置误差控制在1个像元以内;然后,基于ArcGIS 10.2平台,根据不同土地覆被类型的影像色调、纹理等特征,建立相应的遥感解译标志,以“二调”数据为基础,进行人机交互式目视判读,提取相邻两个时段内土地利用类型发生变化的动态图斑,分别获得2010年及2015年土地利用现状数据。参考《土地利用现状分类》(GB/T 21010—2017),将研究区域土地利用类型划分为耕地、园林地、城镇及工矿用地、交通运输用地、水域及水利设施用地五大类。

(2)基础地理数据的处理:以土地利用现状图数据为基础,借助ArcGIS软件,提取研究区的河流、湖泊、公路、铁路、农村道路、城市、村庄的图斑;镇中心距离文件的获取,则以研究区现状行政区划图为准,运用空间分析模块中的重心提取工具,获得镇中心的点文件;最后利用空间分析模块中的Spatial Analyst Tool工具栏下的欧式距离工具(Euclidean Distance)生成相应点状和面状数据的空间距离文件。数据结果均为栅格格式,网格大小为30m×30m。

(3)社会经济数据的处理:人口密度数据是本研究社会经济的唯一驱动力指标,它的处理过程首先以现状行政区划图为基础数据,运用ArcGIS工具中的Data Management Tools模块下的Feature to point工具生成各镇中心的点文件,并将各点赋予人口密度属性数据,最终运用克里金插值法求取整个研究区范围以30m×30m为网格单元的人口密度数据。

4 研究结果与分析

4.1 不同生态安全情景下的生态用地格局

4.1.1 防洪安全格局

通过查阅扬州市区水文资料和洪水资料,将洪水淹没区高、中、低风险级别分别定为五十年一遇、二十年一遇和十年一遇,对应洪水位分别为8.85、6.36、5.69m;蓄洪低、中、高安全格局分别设定蓄洪区的缓冲区(50、80、150m),二者相叠加从而得到区域防洪安全格局。

由图1可以看出,研究区洪水易发区主要集中在长江及邵伯湖沿岸,防洪安全格局的级别随着防洪源距离的扩大而提高。其中,低安全格局面积约为197.76km²,占研究区防洪安全格局的50.45%,在此区域内应该严禁建设占用,鼓励保留自然湿地以最大程度发挥蓄洪调洪功能;中安全格局面积约为62.71km²,占研究区防洪安全格局的16.00%,在此区域内,应实行有条件建设开发并且推进生态退耕还湿工程,恢复自然河道;高安全格局面积约为131.53km²,占研究区防洪安全格局的33.55%,可用于建设开发,但仍需严格控制建筑标高和设施的防洪安全标准。

4.1.2 水土保持安全格局

建立水土保持不同安全级别与水土流失保持影响因子(地表径流缓冲区、土地覆盖类型、坡度)的对应关系(表1),通过空间叠置分析,将土地覆盖类型与坡度因子影响下生态用地格局取交集,然后再与地表径流缓

冲区因子决定的生态用地格局取并集,从而建立区域水土保持的安全格局。

由图 2 所示,水土保持安全格局主要集中在河流、湖泊、地表径流及林地等极易遭受水土流失威胁地区周围的缓冲地带。其中,低安全格局面积约为 68.96km²,占研究区水土保持安全格局的 31.03%,应将此区域纳入重点保护区并以恢复为主,实施坡面整治和小流域整治以促进自然环境的恢复;中安全格局面积约为 104.61km²,占研究区水土保持安全格局的 47.06%,该区域坡度较缓,但植被覆盖度仍较欠缺,应逐步加大退耕还林、封山育林等力度,提高整体生态环境质量;高安全格局面积约为 48.70km²,占研究区水土保持安全格局的 21.91%,该区域以保护预防为主为目的,建立健全动态监测与监督管理机制,合理规划以避免人为干扰。



图 1 防洪安全格局

Fig.1 Flood control security pattern

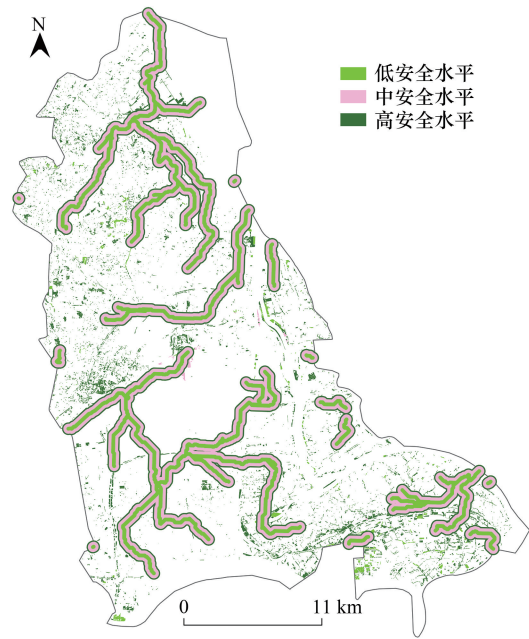


图 2 水土保持安全格局

Fig.2 Soil-water conservation pattern

表 1 水土流失保持影响因子

Table 1 Influence factors of soil-water conservation

安全级别 Security level	地表径流缓冲区/m Surface runoff buffer	土地覆盖类型 Land cover types	坡度/(°) Slope
低安全水平 Low safety levels	150	有林地	≥25
中安全水平 Medium safety levels	400	有林地、其它林地	≥15
高安全水平 High safety levels	500	有林地、其它林地、园地	≥0

4.1.3 生物保护安全格局

选取面积大于 1000m²的林地作为灰喜鹊栖息源地,对不同土地类型设置相应阻力值,构建土地类型阻力面;灰喜鹊活动范围约为 2km^[26],因此提取源地 2km 范围内的阻力数据,构建最小阻力模型,并运用自然断裂法构建留鸟低、中、高三级生境安全格局。选取土地覆盖类型、坡度、距城镇和居民点距离以及距水体距离作为白鹭生境适宜性的评价因子^[15-19],结合专家打分因子评分和赋权,运用自然断裂法构建候鸟低、中、高三级生境安全格局。二者叠加构建区域生物保护安全格局。

从图 3 可知,低安全格局面积约为 136.23km²,占研究区生物保护安全格局的 18.17%,该区域作为生物多样性保护核心区,应禁止建设开发,严格保护生物的栖息地;中安全格局面积约为 179.13km²,占研究区生物保护安全格局的 23.89%,该区域作为生态过渡区,可适当有条件建设,但须避开生态敏感区;高安全格局面积

约为 434.35km^2 , 占研究区生物保护安全格局的 57.94%, 该区域作为生态隔离带, 允许建设占用, 但需通过合理评估及规划以避免生境的进一步破碎化和退化。

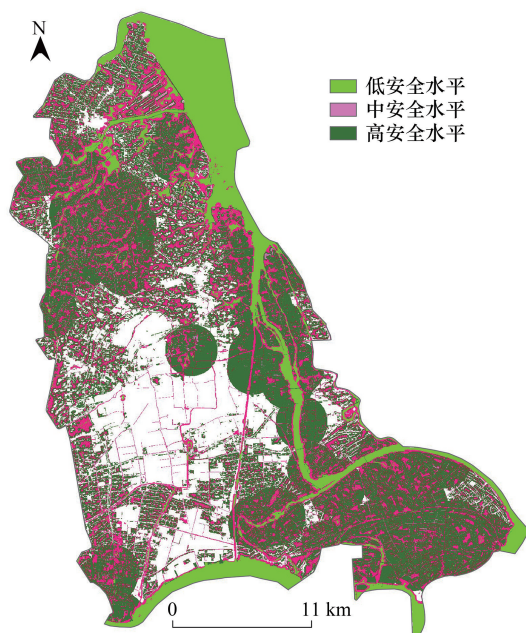


图3 生物保护安全格局

Fig.3 Biological protection security pattern

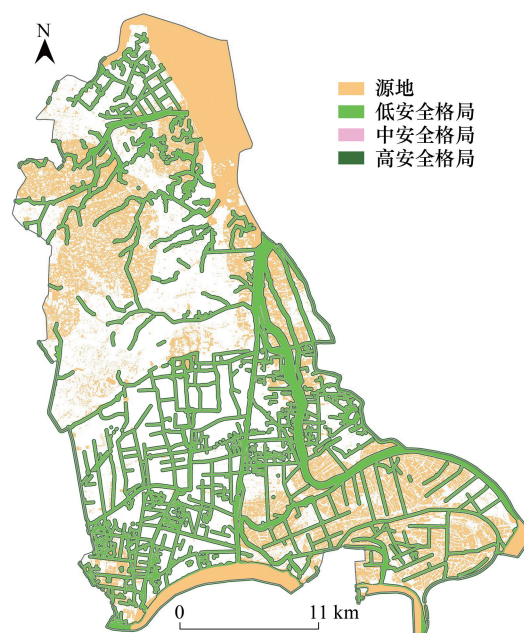


图4 游憩安全格局

Fig.4 Recreational Security Pattern

4.1.4 游憩安全格局

水体、滩涂、风景名胜区以及乡土文化遗产作为源,选取土地覆盖类型和线状要素相结合的方式构建游憩阻力面^[15-19],结合专家打分,确定各因子阻力系数,通过构建最小阻力模型和自然断裂法,构建区域低、中、高三级游憩安全格局。

由图4所示,源地及其周围的廊道和缓冲区共同构成了区域的游憩安全格局,其中廊道对各景点间的联通起到至关重要的作用,有助于提升区域生态景观的文化和休闲娱乐功能。其中,低安全格局面积约为 271.31km^2 ,占研究区游憩安全格局的 44.23%,该区域是保障游憩安全的核心区域,区内应积极严格保护良好的生态空间,维持各游憩景观之间的连通性;中安全格局面积约为 148.20km^2 ,占研究区游憩安全格局的 24.16%,本区域为有条件允许建设区,但应尽量保持自然要素的原貌,建立相应的配套措施和绿色廊带,维持其文化传递功能;高安全格局面积约为 193.89km^2 ,占研究区游憩安全格局的 31.61%,该区域是对游憩安全影响较小的区域,可依据周边景观要素而定,建设与地方文化相符合的建筑和设施。

4.1.5 区域综合景观安全格局

通常认为不同子安全格局对于区域生态安全维系具有同等重要的地位,因此,通过子安全格局的空间叠加,并采用综合取低的方法^[19],最终构建区域低、中、高三级综合景观安全格局。

结果表明(图5),研究区低安全水平的生态用地的面积为 201.81km^2 ,占研究区三类安全格局中的 20.68%;中安全水平生态用地面积为 356.18km^2 ,占研究区三类安全格局中的 36.50%;高安全水平生态用地的面积为 476.31km^2 ,占研究区三类安全格局中的 48.81%。其中,低安全水平下的生态用地是保障区域生态系统功能的最小单元,原则上应维持现有景观结构和安全,避免遭受人类活动的干扰也是人类开发建设不能逾越的红线;中安全水平下的生态用地主要起着廊道缓冲的作用,实现核心区与外界的信息传送与交流,因此,该安全级别下的土地以自然型土地利用为主、限制建设;高安全水平下的生态用地是城市生态系统与自然生态系统的缓冲区和隔离带,该水平下各类生态用地间的连通性较好、生态系统相对稳定,因此,可根据实际

情况对生态用地进行适当的开发建设活动,但应控制开发建设对生态用地的干扰。

4.2 土地利用情景构建及土地需求量预测

4.2.1 土地利用核心情景方案

参照国内外 CLUE-S 土地利用变化情景构建的研究成果,在实际操作中,不同情景方案的实现主要通过调整 CLUE-S 模型不同限定区域的空间布局及其相关参数^[27-28]。CLUE-S 中的限定因素包括绝对限制因素(限制区域内的土地利用类型向其他地类转变)和相对限制因素(限制区域部分土地利用类型的转变);本研究将景观生态安全格局法构建不同安全级别的生态用地分布格局作为相对限制因素参数,据此构建不同研究区土地利用核心情景。

结合《江苏省土地利用总体规划(2006—2020 年)》、《扬州市土地利用总体规划(2006—2020 年)》等相关规划的社会经济发展目标设定,综合确定研究区土地利用情景。

现状发展情景:以 2010—2015 年土地利用变化规律为参考,不存在对于建设用地、耕地及生态用地间转

化速率的人为干涉,经济增长、粮食安全、生态安全均维持现状水平,土地利用需求基本不受较大规模政策调整的影响;将景观生态安全格局法确定的低安全格局用地范围作为限制区域,限制该区域内的各地类间转化。

耕地保护情景:在此情景下,将粮食安全作为首要目标,仅考虑对于耕地的保护,因此适当减少耕地向其他地类转移的转化速率,生态用地维持现有变化趋势;同时维持一定程度的生态安全等级,将景观生态安全格局法确定的中安全格局用地范围作为限制区域,限制各地类间的转化。

生态涵养情景:生态环境处于高安全水平,极大减缓生态用地向其他地类转化速率。同时耕地作为农田生态系统的主体,耕地变化也在现有水平上稍作调整。该情景下生态保护成为政府土地利用管制的主要目标,环境污染得到有效控制、生态环境日益改善,居民的生产、生活和健康等福祉日益提升,维持高水平的生态安全等级,将景观生态安全格局法确定的高安全格局用地范围作为限制区域,限制各地类间的转化。

4.2.2 不同情景下土地需求量预测

由于 2010—2015 年间,城镇化进程持续推进,经济处于平稳增长状态,将此矩阵视为现状发展情景下的各用地转移概率矩阵。参考相关文献^[29-30],在耕地保护情景下,依据已设定的情景内涵,最大程度实现保证耕地不减少的目标,耕地向城镇及工矿用地转化的概率降低 50%、耕地向交通运输用地转化的概率降低 50%,随着国家一再出台相应的整治文件以强化监督长期以来农村违规占用耕地的乱象,农村土地整治力度将持续加强,因此在参数设定中,城镇及工矿用地向耕地转化概率提升 10%;在生态涵养情景下,根据已设定的情景内涵,为保证农田生态系统稳定以及维持一定程度的粮食安全,在参数设定中将耕地向城镇及工矿用地转化的概率降低 30%、城镇及工矿用地向耕地转化概率提升 10%,园林地作为最为关键的生态用地,应极大程度减少建设发展对其的占用,设定园林地向城镇及工矿用地转移的概率降低 90%、园林地向交通运输用地转化的概率降低 30%,同时为提升国家水安全保障能力,减少水源地占用也尤为重要,因此设定水域及水利设施用地向耕地和城镇及工矿用地转化的概率降低 30%;据此,得到耕地保护和生态涵养情景下各地类间的转移概率(表 2),并推算得到不同情景下不同土地利用类型的需求量(表 3)。

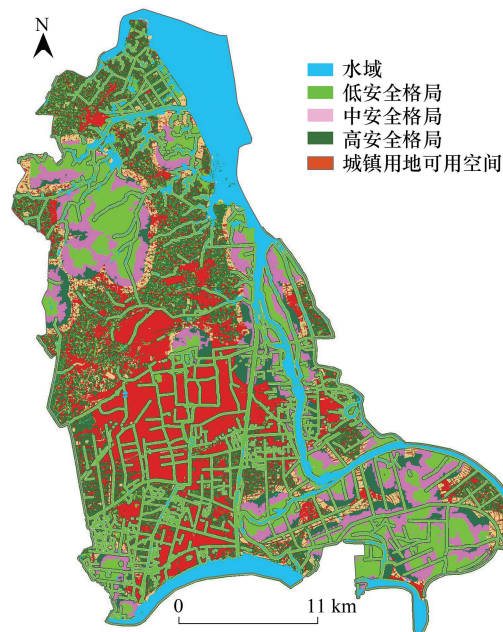


图 5 扬州市区综合景观安全格局

Fig.5 Comprehensive landscape security pattern in Yangzhou city

表 2 不同情景下各土地利用类型转移概率/%

Table 2 Transfer probability of land use types under different scenarios

情景方案设定 Scenarios of Simulation	基期年土地利用 Land use in base year	预测年土地利用 Land use in forecast year				
		耕地	园林地	城镇及 工矿用地	交通运 输用地	水域及水利 设施用地
现状发展情景 Current development scenario	耕地	95.03	0.01	3.94	0.75	0.27
	园林地	0.65	94.29	3.66	0.84	0.56
	城镇及工矿用地	1.20	0.02	98.30	0.37	0.11
	交通运输用地	0.28	0.03	1.60	98.03	0.06
	水域及水利设施用地	0.72	0.02	1.18	0.29	97.79
耕地保护情景 Farmland protection scenario	耕地	97.38	0.01	1.97	0.37	0.27
	园林地	0.65	94.29	3.66	0.84	0.56
	城镇及工矿用地	1.32	0.02	98.18	0.37	0.11
	交通运输用地	0.28	0.03	1.60	98.03	0.06
	水域及水利设施用地	0.72	0.02	1.18	0.29	97.79
生态涵养情景 Ecological conservation scenarios	耕地	96.21	0.01	2.76	0.75	0.27
	园林地	0.65	97.80	0.40	0.59	0.56
	城镇及工矿用地	1.32	0.02	98.18	0.37	0.11
	交通运输用地	0.28	0.03	1.60	98.03	0.06
	水域及水利设施用地	0.72	0.02	0.83	0.29	98.14

表 3 不同情景下 2030 年各土地利用类型需求量/km²

Table 3 Demand for land use under different scenarios in 2030

情景方案设定 Scenarios of simulations	预测年土地利用 Land use in forecast year				
	耕地	园林地	城镇及工 矿用地	交通运 输用地	水域及水利 设施用地
现状发展情景 Current development scenario	280.88	37.94	339.64	56.75	260.52
耕地保护情景 Farmland protection scenario	309.12	37.94	315.77	52.31	260.59
生态涵养情景 Ecological conservation scenarios	295.37	43.85	315.79	56.43	264.29

4.3 基于 CLUE-S 模型的土地利用布局模拟

4.3.1 Logistic 回归分析结果及 ROC 曲线验证

土地利用类型都有相对稳定的趋势,直接或间接的土地利用变化驱动因子都有可能成为土地类型变化不稳定的根源,尤其是对生态环境复杂的长江流域地区。影响扬州市土地利用时空变化的因素是非常多的,在分析评价驱动因子时,要以重要性、数据可获得性、可量化性为原则,综合考虑扬州市河网密布的特殊区位以及高速发展对于便利交通的依赖,同时本文参考多位学者已有研究^[31—33],结合自然、区位及社会因素 3 个方面选取 12 个驱动因子进行分析研究(表 4)。

运用 SPSS 17.0 统计分析软件,将研究区各类型土地作为因变量、各驱动因子作为自变量进行二元 Logistic 回归分析,以确定各类型土地与其驱动因素间的定量关系。为了保证大型数据的运行,将逐步回归的进入概率设为 0.01,移除概率设为 0.02,通过软件分析,得到各地类与驱动因子间的系数 β ;根据 Logistic 回归的结果,运用 ROC 曲线的方法对各驱动因子对相应地类的解释能力进行验证(表 5)。

依据表 5 可知,扬州市区 2010 年城镇工矿用地、水域及水利设施用地的 ROC 值均大于 0.8,拟合精度较好;耕地、交通运输用地、其他土地的 ROC 曲线值均大于 0.7,拟合精度也较高;然而园林地的 ROC 曲线值较低、仅为 0.646,这主要是因为扬州市区境内地势较为平坦、地貌类型以平原为主,耕地、河流等分布密而广,园林地用地类型面积较小且分布零散,因此,相关驱动因素对其解释力度较差。综合而言,各土地利用类型的 ROC 值均大于 0.6,说明各驱动因子对扬州市区土地利用具有一定的解释能力,可以用来模拟扬州市区的土地利用变化。

表 4 土地利用变化驱动因子及其参数命名

Table 4 Driving factors of land use change and their parameter naming			
因子类型 Factor type	驱动因子 Driving factors	因子命名 Factor naming	因子说明 Factor description
自然因素 Natural factor	坡度	sc1gr0	DEM 衍生数据,由 ArcGIS 坡度分析功能提取
	高程	sc1gr1	DEM 数据
	坡向	sc1gr2	DEM 衍生数据,由 ArcGIS 坡向分析功能提取,分为平坡、东坡、西坡、南坡、北坡、东北坡、西北坡、西南坡和西北坡
区位因素 Locational factor	离河流距离	sc1gr3	ArcGIS 欧氏距离功能提取,量算每一个像元中心到河流的距离
	离公路距离	sc1gr4	ArcGIS 欧氏距离功能提取,量算每一个像元中心到公路的距离
	离镇中心距离	sc1gr5	ArcGIS 欧氏距离功能提取,量算每一个像元中心到镇中心的距离
	离铁路距离	sc1gr6	ArcGIS 欧氏距离功能提取,量算每一个像元中心到铁路的距离
	离湖泊距离	sc1gr7	ArcGIS 欧氏距离功能提取,量算每一个像元中心到湖泊的距离
	离村庄距离	sc1gr8	ArcGIS 欧氏距离功能提取,量算每一个像元中心到村庄的距离
	离农村道路距离	sc1gr9	ArcGIS 欧氏距离功能提取,量算每一个像元中心到农村道路的距离
	离城市距离	sc1gr10	ArcGIS 欧氏距离功能提取,量算每一个像元中心到城市的距离
社会因素 Social factor	人口密度	sc1gr11	单位面积土地上居住的人口数,人/km ²

表 5 不同土地利用类型二元逻辑斯蒂回归 Beta 系数

Table 5 The binary logistic regression Beta coefficient of different land use type					
驱动因子 Driving factors	土地利用类型 Land use types				
	耕地	园林地	城镇及 工矿用地	交通运 输用地	水域及水利 设施用地
离河流距离 Distance from river	0.000338	0.000146	0.000139	0.000158	-0.000967
人口密度 Population density	-0.000087	—	0.000128	—	-0.000081
离公路距离 Distance from road	-0.000110	-0.000063	-0.000309	-0.000923	0.000474
离镇中心距离 Distance from town	0.000006	-0.000107	-0.000086	-0.000197	0.000243
坡度 Slope	-0.000106	—	0.000227	—	-0.000129
坡向 Aspect	-0.012546	-0.018275	0.008430	—	0.016623
高程 Elevation	-0.014490	0.021360	-0.001114	-0.010330	—
离铁路距离 Distance from railway	-0.000025	0.000007	0.000021	0.000027	-0.000022
离湖泊距离 Distance from lake	0.000016	0.000023	-0.000006	-0.000035	0.000004
离村庄距离 Distance from village	-0.001141	-0.000157	-0.000106	0.000420	-0.000196
离城镇距离 Distance from city	0.000269	0.000189	-0.000745	0.000060	0.000135
离农村道路距离 Distance from rural road	-0.003708	-0.001218	0.000933	-0.001657	0.001149
常数项 Constant term	0.598391	-2.988350	-1.034514	-1.642827	-1.735497
ROC 值 Relative operating characteristics	0.780	0.656	0.802	0.782	0.890

4.3.2 CLUE-S 精度验证结果

完成各模块和相应参数文件设定后,运行 CLUE-S 模型,以 2010 年土地利用现状图作为基础数据模拟 2015 年土地利用现状图。参考相关研究,主要采用 Kappa 指数定量检验 2015 年模拟结果与土地利用现状的拟合程度,计算公式如下:

$$Kappa = (P_0 - P_c) / (P_p - P_c)$$

式中, P_0 表示正确模拟的比例; P_c 表示随机情况下期望的正确模拟比例; P_p 表示理想分类情况下的正确模拟比例。

将 2015 年土地利用模拟情景(图 6)和 2015 年土地利用现状情景(图 7)进行相减运算,借助 ArcGIS 中的 Raster Calculator 工具,提取 0 值栅格单元;结果表明 0 值栅格单元个数为 940132 个,占栅格总数 1084225 的 86.71%,即 $P_0=0.8671$ 。本研究中土地利用类型共分为五大类,因此,每个栅格单元在随机模拟情况下的正确

率即 $P_e = 1/4$ 。 P_p 的取值为 1 即理想状态下栅格单元的模拟正确率为 1。将上述各参数代入公式中可得模拟年份的 Kappa 指数为 82.28%。计算结果表明,本研究所选取的各类驱动因子对于各地类变化具有较强的解释能力;运用 CLUE-S 模型可以较好地模拟扬州市区的土地利用空间变化。

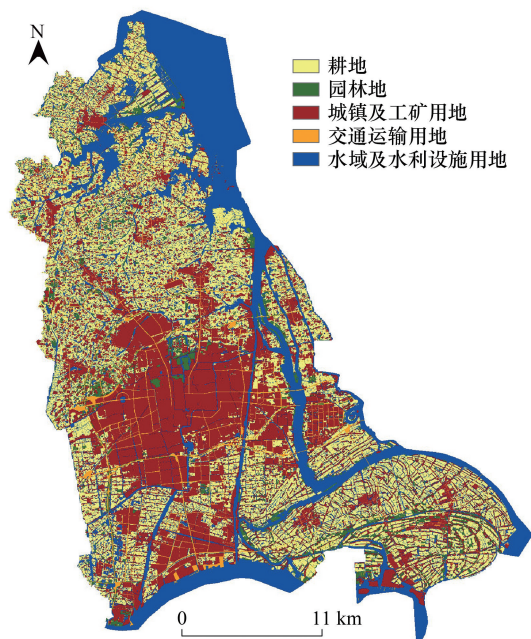


图 6 2015 年土地利用现状图
Fig.6 Land use status map in 2015

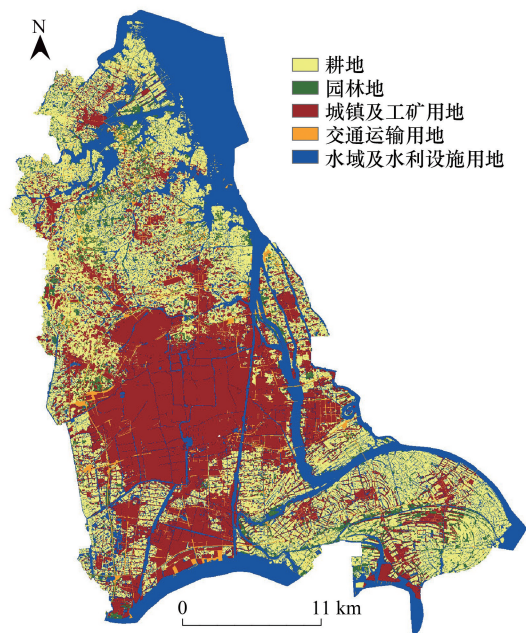


图 7 2015 年土地利用模拟图
Fig.7 Land use simulations map in 2015

4.3.3 不同情景下土地利用布局模拟结果

以 2015 年土地利用现状图作为模拟年份的基础数据,依据上述情景构建的参数设置和相应情景下所测算的各类用地需求量输入 CLUE-S 模型中,模拟研究区未来 15 年不同情景下的土地利用/覆被的变化情况,最终得到 3 种情景下各类用地的分布格局图(图 8)。

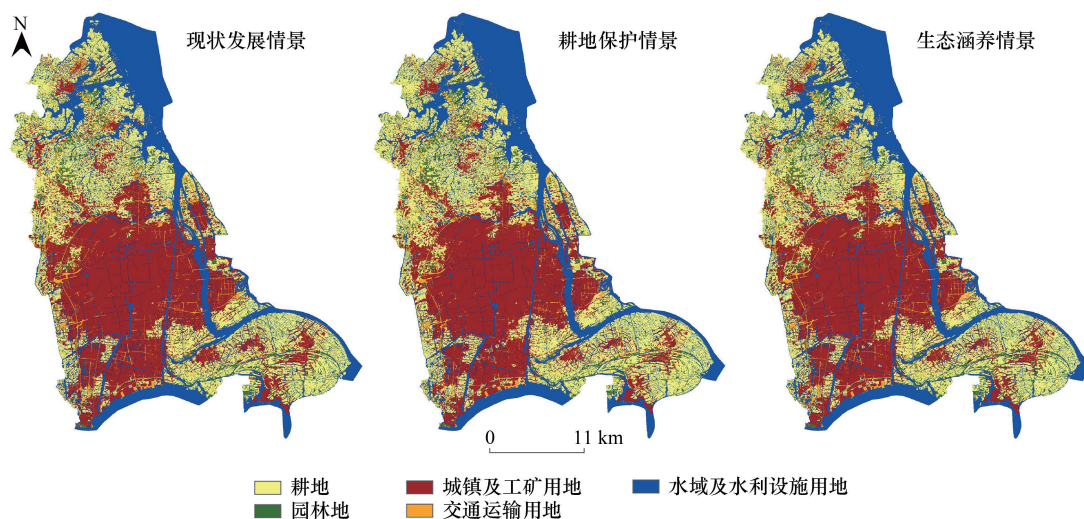


图 8 2030 年不同情景方案土地利用模拟图
Fig.8 The land use simulation map under different scenarios in 2030

综合分析不同情景下 2030 年土地利用布局模拟图可以看出:

现状发展情景下各地类需求量按照 2010—2015 年土地利用变化转移概率计算而来,地类转化间受约束程度较小,较大程度的保留了原有地类间转化的趋势。从图 8 可以看出城镇及工矿用地量增加明显,且用地分布在原有建成区的基础上向外围呈紧凑连续型扩散,增加城镇及工矿用地的面积主要来源于耕地和园林地;耕地和园林地的面积呈减少趋势,且二者分布呈现破碎化,说明在现状发展情景下,不仅会带来耕地和园林地数量上的减少,而且会造成耕地和园林地分布上的不连续性;交通运输用地也呈现出扩张的趋势,但总体而言其扩张幅度较城镇及工矿用地的幅度较小。

耕地保护情景下,加强了对耕地数量的保护,降低了耕地转变为城镇及工矿用地和交通运输用地的概率,并提升了通过土地整治工程推进城镇及工矿用地复垦为耕地的可能性。从图 8 可以看出城镇及工矿用地在原有建成区的基础上继续扩张,但其扩张幅度远小于现状发展情景;由于将景观生态安全格局法构建下的中安全格局用地范围作为研究区的限制区域,城镇及工矿用地和交通运输用地的扩张在一定程度上受到阻碍,同时维持现有耕地供给条件下,耕地分布格局开始向集中连片的形式转变,但一定程度上损失了对生态的保护。

生态涵养情景下,要求加强对园林地、耕地等具有生态安全维护作用的地类进行保护。从图 8 可以看出,研究区园林地的面积明显增加,增加的部分主要集中在西北及东南丘陵地区。此外,由于设置了对水域及水利设施的保护条件,零星水域的破碎化现象得到缓解,水安全保障得到提升。在此情景下,交通运输用地相比其他情景略有增加,交通路网的通达程度提升对保障生态游憩安全及农作物运输安全提供了有利条件,一定程度上促进了区域生态安全及粮食安全。同时,城镇及工矿用地在原有基础上增加较少,该情景下将景观生态安全格局法构建下的高安全格局用地范围作为研究区的限制区域,最大程度上限制了研究区内建设用地对于生态用地的扩张占用,同时对耕地速率的调整也保证了 2030 年耕地面积的稳定,实现粮食安全。

5 讨论

本文通过将景观生态安全格局作为区域约束性文件耦合到 CLUE-S 模型中,通过调整地类转化速度与生态保护力度,实现“多目标”需求下的土地利用模拟。综合考虑生态安全、耕地保护、经济发展的土地利用目标,对于区域土地利用的合理利用具有重要意义。

2018 年,随着《扬州市城市“双修”试点工作实施方案》的印发,扬州市成为江苏省城市“双修”工作的试点城市,要求大力推进生态修复与城市修补建设,与一贯的生态保护不同,城市建设也成为了生态治理外的另一大重点方向;截至 2018 年底,扬州市已建成高标准基本农田占全市耕地 73.9%,成为苏北第一,全省第三大高标准基本农田建设市;目前,省级生态循环农业试点村项目启动建设,在保证数量的要求上更加需要加快扬州市农业的生态化转型。在这样的背景之下,了解不同生态保护要求下未来土地利用格局的变化趋势显得尤为重要。从本研究结果中可以看到,以生态安全格局构建结果为基础,对高、中、低三种不同安全水平的生态空间分别进行约束后可知,在本文的“生态涵养”情景下,通过对高生态安全区域的转入禁止,以及对建设用地向耕地及生态用地的占用限制,在实现生态及粮食的“双安全”外,同时引导建设用地向节约集约发展。生态保护和耕地保护不仅是社会经济发展不可逾越的底线界限,正确合适的约束更能促使城镇的有序高效发展。

这也正体现了当下“反规划”理论重点:生态格局是城市建设的基础。在此基础上,粮食安全更是人类生存的基础,在生态格局的要求下结合耕地流转的制约,是推进城市精明增长和精明保护的有效途径^[34],对比设定的 3 种情景,在提高生态保护限制时发现,交通用地随着生态用地的增加而明显减少,而城镇用地随着耕地的增加而减少,可见避免道路对于生态用地的机械分割,导致生态用地的破碎化甚至退化可能是未来生态保护的重点方向;而随着目前增减挂钩政策和基本农田建设的稳步实施,耕地被建设用地侵占的速率将会得到有效控制,建设用地占用耕地资源的现象将得到缓和。从研究结果中看出生态涵养情景将是保障生态安全

和粮食安全的一致选择,在未来发展中,土地的稀缺性决定了三类空间之间相互竞争制约现象可能会持续存在,因此,了解生态安全和粮食安全下未来土地利用布局方向,针对城镇及工矿用地和交通用地对于生态用地和耕地的不同影响,明确未来规划管控重点,对研究区土地利用管理和宏观调控具有一定的借鉴意义,可为当地土地利用总体规划提供科学的决策参考。

6 结论

本研究以扬州市区为例,模拟其在现状发展、粮食安全、生态涵养三种情景下的土地利用格局分布,并将各情景结果对比分析表明:

(1)研究区低安全水平的生态用地的面积为 201.81km^2 ,占研究区土地总面积的 20.68%;中安全水平生态用地面积为 356.18km^2 ,占研究区土地总面积的 36.50%;高安全水平生态用地的面积为 476.31km^2 ,占研究区土地总面积的 48.81%。

(2)通过模拟 2030 年研究区现状发展、耕地保护、生态涵养情景下的土地利用分布格局,结果表明不同情景下的土地利用/覆被格局存在显著的差异:现状发展情景下,城镇及工矿用地量增加明显,用地在原有基础上沿外围呈紧凑连续型扩散,耕地、园林地分布呈现破碎化;耕地保护情景下耕地分布趋于连片和集中,城镇及工矿用地和交通运输用地的扩张受到耕地分布的制约影响较为明显,对生态空间的侵占也略有改善;生态涵养情景下园林地面积明显增加,城镇及工矿用地和交通运输用地虽然仍在持续扩张,但同时受到耕地保护约束限制,建设用地侵占耕地速率降低,也保障了部分粮食安全。

CLUE-S 模型模拟土地利用/覆被变化的精确度,在一定程度上取决于驱动因子的合理性和代表性。由于部分社会经济数据的缺失,必然会带来模拟精度的降低。同时,土地利用变化也受到政策因素的调控,而政策因素本身存在主观作用大、不确定性强等特点,如何准确的量化将是未来研究的重点。因此,在未来的研究中,应充分考虑土地开发、管理和保护等政策对土地利用变化的调控作用,完善土地利用变化驱动机制,改进情景构建和模拟方法,以提高模拟的精度。同时,在当前及未来我国发展进程中,立足于生态文明建设,在长江沿岸腾退政策、生态产品价值实现机制探索、生态补偿政策等可持续发展政策的持续推进引领下,“生态涵养”情景的内涵必将得到极大的发展,不仅仅再针对于现有生态空间的保护,建设用地的退出及生态用地的恢复将成为发展主旋律,因此在今后的研究中,情景设置会偏向多类生态保护要求设置,如“腾江拓海”情景、“退耕还林”情景、“农村建设用地整理”情景等将成为重点研究方向。

参考文献 (References):

- [1] Weber T, Sloan A, Wolf J. Maryland's green infrastructure assessment: development of a comprehensive approach to land conservation. *Landscape and Urban Planning*, 2006, 77(1/2): 94-110.
- [2] 俞孔坚, 李海龙, 李迪华, 乔青, 奚雪松. 国土尺度生态安全格局. *生态学报*, 2009, 29(10): 5163-5175.
- [3] 郭珍, 吴宇哲. 基于食物安全层次性的耕地保护: 政府与市场的合理边界. *浙江大学学报: 人文社会科学版*, 2017, 47(5): 30-41.
- [4] 谢高地, 成升魁, 肖玉, 鲁春霞, 刘晓洁, 徐洁. 新时期中国粮食供需平衡态势及粮食安全观的重构. *自然资源学报*, 2017, 32(6): 895-903.
- [5] Rayfield B, Fortin M J, Fall A. The sensitivity of least-cost habitat graphs to relative cost surface values. *Landscape Ecology*, 2010, 25(4): 519-532.
- [6] Walker R T. Land use transition and deforestation in developing countries. *Geographical Analysis*, 1997, 19(1): 18-30.
- [7] 陈佑启, 杨鹏. 国际上土地利用/土地覆盖变化研究的新进展. *经济地理*, 2001, 21(1): 95-100.
- [8] 何春阳, 史培军, 李景刚, 潘耀忠, 陈晋. 中国北方未来土地利用变化情景模拟. *地理学报*, 2004, 59(4): 599-607.
- [9] 梁友嘉, 徐中民, 钟方雷. 基于 SD 和 CLUE-S 模型的张掖市甘州区土地利用情景分析. *地理研究*, 2011, 30(3): 564-576.
- [10] Li X, Yeh A G O. Modelling sustainable urban development by the integration of constrained cellular automata and GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 2000, 14(2): 131-152.
- [11] An L, Linderman M, Qi J G, Shortridge A, Liu J G. Exploring complexity in a human - environment system: an agent-based spatial model for multidisciplinary and multiscale Integration. *Annals of the Association of American Geographers*, 2005, 95(1): 54-79.

- [12] 李亦秋, 邓欧, 张冬有, 韩德梁, 冯仲科. 丹江口库区土地利用及其生态系统服务价值情景模拟. 农业工程学报, 2011, 27(5): 329-335.
- [13] 王祺, 蒙古军, 毛熙彦. 基于邻域相关的漓江流域土地利用多情景模拟与景观格局变化. 地理研究, 2014, 33(6): 1073-1084.
- [14] 吴文俊. 基于生态安全的土地利用格局优化研究——以长春市为例[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- [15] Yu K J. Security patterns and surface model in landscape ecological planning. Landscape and Urban Planning, 2013, 36(1): 1-17.
- [16] 储金龙, 王佩, 顾康康, 汪勇政. 山水型城市生态安全格局构建与建设用地开发策略. 生态学报, 2016, 36(23): 7804-7813.
- [17] 赵军, 魏伟, 冯翠芹. 天祝草原景观格局分析及景观利用格局优化. 资源科学, 2008, 30(2): 281-287.
- [18] 王思易, 欧名豪. 基于景观安全格局的建设用地管制分区. 生态学报, 2013, 33(14): 4425-4435.
- [19] 俞孔坚, 王思思, 李迪华, 李春波. 北京市生态安全格局及城市增长远景. 生态学报, 2009, 29(3): 1189-1204.
- [20] 张义博. 新时期中国粮食安全形势与政策建议. 宏观经济研究, 2020, (3): 57-66, 81-81.
- [21] Liu S H, Wang D Y, Li H, Li W B, Wu W J, Zhu Y L. The ecological security pattern and its constraint on urban expansion of a black soil farming area in Northeast China. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2017, 6(9): 263.
- [22] 张慧. 基于生态服务功能的南京市生态安全格局研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2016.
- [23] 孙枫, 章锦河, 王培家, 魏国恩, 储光, 曹禹. 城市生态安全格局构建与评价研究: 以苏州市区为例. 地理研究, 2021, 40(9): 2476-2493.
- [24] 陆禹, 余济云, 陈彩虹, 余宇晨, 罗改改. 基于粒度反推法的景观生态安全格局优化——以海口市秀英区为例. 生态学报, 2015, 35(19): 6384-6393.
- [25] 文雅, 龚建周, 胡银根, 胡志仁. 基于生态安全导向的城市空间扩展模拟与分析. 地理研究, 2017, 36(3): 518-528.
- [26] 张天印, 宋全夫, 张守林. 灰喜鹊的生态观察. 动物学杂志, 1979, 14(4): 27-30.
- [27] 吴桂平. CLUE-S 模型的改进与区域土地利用变化模拟[D]. 长沙: 中南大学, 2008.
- [28] 黄秋昊, 蔡运龙. 国内几种土地利用变化模型述评. 中国土地科学, 2005, 19(5): 25-30.
- [29] 马利邦, 牛叔文, 杨丽娜. 基于 Markov 和 CLUE-S 模型的敦煌市土地利用/覆盖格局情景模拟. 生态学杂志, 2012, 31(7): 1823-1831.
- [30] 周锐, 苏海龙, 王新军, 李月辉, 胡远满, 许博涵. 基于 CLUE-S 模型和 Markov 模型的城镇土地利用变化模拟预测——以江苏省常熟市辛庄镇为例. 资源科学, 2011, 33(12): 2262-2270.
- [31] 魏伟. 基于 CLUE-S 和 MCR 模型的石羊河流域土地利用空间优化配置研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
- [32] 谢莹. 基于 CLUE-S 模型和景观安全格局的重庆市渝北区土地利用情景模拟和优化配置研究[D]. 重庆: 西南大学, 2017.
- [33] 张晓瑞, 张飞舟. 快速城市化影响下超大型城市景观生态格局演变特征分析. 中国农业大学学报, 2019, 24(4): 157-166.
- [34] 俞孔坚, 王思思, 李迪华, 乔青. 北京城市扩张的生态底线——基本生态系统服务及其安全格局. 城市规划, 2010, 34(2): 19-24.