

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.04.009.

陈振, 郭杰, 张雪微, 等. 耦合景观生态安全格局的南京市“三生”空间多情景模拟[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4): 383-394.

Chen Zhen, Guo Jie, Zhang Xuewei, et al. Multi-scenario Simulation of Production-Life-Ecology Space in Nanjing Coupled with Landscape Ecological Security Pattern[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4): 383-394.

# 耦合景观生态安全格局的南京市“三生”空间多情景模拟

陈振<sup>1</sup>, 郭杰<sup>2</sup>, 张雪微<sup>2</sup>, 何鸿飞<sup>2</sup>, 欧名豪<sup>2</sup>

(1.南京邮电大学 社会与人口学院, 南京 210023; 2.南京农业大学 土地管理学院, 南京 210095)

**摘要:** [目的] 阐明区域景观生态安全格局与“三生”空间多情景模拟的耦合过程, 为维护区域生态安全、优化国土空间发展格局提供参考。 [方法] 将包含防洪、水土保持、生物保护和游憩等重要生态过程的综合景观生态安全格局作为约束条件耦合到 FLUS 模型中, 设置农业空间优先、工业和生活空间优先、生态空间优先和三生空间均衡发展 4 类情景, 预测了规划目标年(2025 年和 2035 年)不同情景下“三生”空间结构与布局状况。 [结果] 南京市低、中、高安全水平生态用地规模分别为 1 537.41, 2 576.85, 2 928.59 km<sup>2</sup>, 占比 23.34%, 39.12%, 44.46%; 相较其他 3 种情景, “三生”空间均衡发展情景下, 维持中等水平的生态安全, 各类空间变化趋势整体较为缓和, 到 2025 年和 2035 年, 生产空间基本维持现有水平, 仅增加 2.09, 2.02 km<sup>2</sup>, 生活空间增幅相对有限, 分别为 28.55, 46.27 km<sup>2</sup>, 生态空间缩减幅度有所放缓, 分别为 30.64, 48.29 km<sup>2</sup>, 该情景在满足经济发展对建设用地需求的同时, 也能兼顾粮食安全和生态保护的要求, 有利于促进经济、社会和生态全面协调可持续发展。 [结论] 以“三生”空间均衡发展为目标优化国土空间发展格局, 有利于实现生产空间集约高效、生活空间宜居适度、生态空间山清水秀。

**关键词:** “三生”空间; 景观生态安全格局; FLUS 模型; 情景模拟

中图分类号: F301.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)04-0383-12

## Multi-scenario Simulation of Production-Life-Ecology Space in Nanjing Coupled with Landscape Ecological Security Pattern

Chen Zhen<sup>1</sup>, Guo Jie<sup>2</sup>, Zhang Xuewei<sup>2</sup>, He Hongfei<sup>2</sup>, Ou Minghao<sup>2</sup>

(1.College of Sociology and Population Sciences, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China; 2.College of Land Management, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to clarify the coupling process between the landscape ecological security pattern and the multi-scenario simulation of the production-life-ecology space, and to provide reference for maintaining regional ecological security and optimizing the spatial development pattern of land. [Methods] As a constraint condition, landscape ecological security pattern was coupled to FLUS model. Four scenarios were set up by adjusting the cost of land conversion under different scenarios to predict the spatial structure and layout of production-life-ecology in target years (2025 and 2035). [Results] The scales of ecological land under low, medium and high security levels in Nanjing are 1 537.41, 2 576.85, 2 928.59 km<sup>2</sup>, respectively, the proportions to the total land area are 23.34%, 39.12% and 44.46%, respectively. Compared to the other scenarios, the balanced development scenario maintains a certain degree of ecological security, various space changes tend to moderate. By 2025 and 2035, production space will only increase in 2.09 km<sup>2</sup> and 2.02 km<sup>2</sup>, living space will increase in 28.55 km<sup>2</sup> and 46.27 km<sup>2</sup>, and ecological space will decrease in 30.64 km<sup>2</sup> and 48.29 km<sup>2</sup>. This scenario meets the demand of economic development for

收稿日期: 2023-08-16

修回日期: 2023-09-02

资助项目: 教育部人文社会科学研究项目(23YJC630019); 国家自然科学基金(72174089); 江苏高校哲学社会科学研究一般项目(2021SJA0088); 南京邮电大学人文社会科学研究资助项目(NYY221037)

第一作者: 陈振(1990—), 男, 安徽宣城人, 博士, 讲师, 主要从事土地利用与管理研究。E-mail: chenchen714@njupt.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

construction land, gives consideration to food security and ecological protection and promotes the comprehensive, coordinated and sustainable development of economy, society and ecology. [Conclusion] Based on production-life-ecological balanced development, optimizing the development pattern of national land space is conducive to realizing intensive and efficient production space, livable and moderate living space, and beautiful ecological space.

**Keywords:** production-life-ecological space; landscape ecological security pattern; FLUS model; scenario simulation

“三生”空间是生产、生活和生态空间的总称,目前学术界虽然未对其概念内涵做出明确界定,但其功能定位基本达成共识:即生产空间指为人类提供物质产品生产、加工和经营活动的特定功能区域;生活空间是满足人类居住和参与日常生活的地域空间;而生态空间主导功能则是为人类提供生态系统服务和各类生态产品,三者共同构成人类社会、经济活动基本载体<sup>[1]</sup>。近年来,随着工业化、城镇化进程的快速推进,城市生产和生活空间急剧扩张,“三生”空间利用失衡导致生态空间日益萎缩、生态格局日趋破碎、生态环境日渐恶化等问题开始凸显。为此,党的十八大以来,习近平总书记以生态文明建设为抓手,将科学布局“三生”空间作为优化国土空间开发格局的核心任务,提出“促进生产空间集约高效、生活空间宜居适度、生态空间山清水秀”的总体要求。党的二十大报告更是进一步强调“优化国土空间发展格局”“站在人与自然和谐共生的高度谋划发展”。由此可见,开展“三生”空间情景模拟,引导“三生”空间结构布局调整,对优化区域国土空间发展格局、促进社会经济与资源环境协调发展具有重要意义。

目前,学术界围绕“三生”空间功能识别<sup>[2]</sup>、演变特征<sup>[3]</sup>、耦合协调<sup>[4]</sup>、格局优化<sup>[5]</sup>和生态效应<sup>[6]</sup>等方面开展了广泛讨论,其中针对“三生”空间格局优化,已有研究主要从评价、建模和算法3个层面试图构建优化方法。在评价方面,综合指标法、景观指数法、比较优势指数法等分析方法常用于“三生”空间功能评价<sup>[7]</sup>;建模方面,基于多智能主体的ABM模型、基于栅格邻域的CA模型、基于神经网络的ANN模型、基于经验统计的CLUE-S模型、基于随机森林算法的PLUS模型、基于CA和ANN开发的FLUS模型被广泛运用于“三生”空间结构与布局优化<sup>[8-9]</sup>,其中FLUS模型在传统CA模型的基础上,融合了ANN模型的适宜性概率计算模块,并加入了一种基于轮盘赌选择的自适应惯性竞争机制,有效化解了多种地类间的竞争关系,提高了模拟精度和计算效率<sup>[10]</sup>,近年来得到较多关注和运用;而在算法方面,蚁群算法(ACO)、人工蜂群算法(ABC)和遗传算法(GA)等智能算法也被初步运用于土地资源优化

配置<sup>[11-12]</sup>。纵观已有研究不难发现:“三生”空间格局优化问题历来是学术界讨论的热点话题,目前已经形成较为系统的方法体系,但相关研究关注的焦点过于集中在优化方法的创新与改进等技术层面,对生态安全的认识尚且不足,导致在“三生”空间格局优化中缺乏对区域景观生态安全格局的考虑,这在一定程度上降低了生态空间的保护力度。与此同时,学术界关于景观生态安全格局构建方法已日趋成熟,大致可分为静态和动态两种,其中静态方法多关注垂直生态过程,通过生态要素叠加和结构分析,开展生态敏感性和适宜性评价,从而设计安全格局<sup>[13]</sup>;而动态方法则兼顾垂直和水平生态过程,借助情景模拟工具识别对区域生态过程具有关键作用的景观元素、所处位置和空间联系,进而构建安全格局<sup>[14]</sup>。相关研究基于上述方法,多从土地利用变化的生态环境效应视角,研究区域生态安全格局时空变化特征<sup>[15]</sup>;又或在构建景观生态安全格局的基础上,识别国土空间生态修复重点区域,为生态修复提出优化建议<sup>[16-17]</sup>。而考虑“三生”空间相互影响关系,将景观生态安全格局设置为限制条件,开展“三生”空间格局优化情景模拟方面的研究还较为缺乏。

因此,本研究以江苏省南京市为案例,在构建区域景观生态安全格局的基础上,将其作为约束文件耦合到FLUS模型中开展“三生”空间多情景模拟,预测研究区规划目标年(2025年和2035年)不同情景下“三生”空间结构与布局状况,以期为维护区域生态安全、优化国土空间发展格局提供参考。

## 1 研究区域与数据来源

### 1.1 研究区域

南京市是江苏省省会,位于 $31^{\circ}14'—32^{\circ}37'N$ , $118^{\circ}22'—119^{\circ}14'E$ ,地处江苏省西南部,长江下游,濒江近海,是东部沿海经济带与长江经济带战略交汇的重要节点城市。全市土地总面积 $6\,587.03\text{ km}^2$ ,2020年地区生产总值1.48万亿元,常住人口为931.47万人,城镇化率86.8%,建设用地总规模为 $1\,851.32\text{ km}^2$ ,人均建设用地约为 $198.75\text{ m}^2/\text{人}$ 。近年来,随着“长三角一体化

发展”上升为国家战略以及南京都市圈建设的深入推进,全市经济社会发展迅速,同时建设空间外延式扩张导致农业和生态空间被过度挤压,国土调查数据显示,2009—2018 年建设用地扩张占用耕地、林地和水域的面积分别为 195.47,51.93,86.26 km<sup>2</sup>,优质耕地数量急剧减少,林地、水域等生态空间迅速萎缩,“三生”空间利用矛盾较为突出。因此,构建耦合景观生态安全格局的“三生”空间优化模型,模拟不同情景下“三生”空间结构与布局状况,对区域生态安全维护及国土空间发展格局优化具有重要意义。

1.2 数据来源及处理

本研究涉及的数据类型主要包括土地利用现状数据、地理空间数据以及各类专题统计数据。数据来源如下:(1) 土地利用现状数据。采用南京市 2010 年、2015 年、2020 年度国土变更调查数据成果,来源于当地自然资源主管部门;(2) 地理空间数据。包括高程、坡度、坡向和水文等,其中高程来源于地理空间数据云平台获取的 GDEM V2 30 m 分辨率数字高程数据,坡度、坡向和水文等由高程数据通过 ArcGIS 软件处理生成;(3) 专题统计数据。包括社会经济、旅游文化和人口资源等方面,主要来源于南京市历年统计年鉴及各类自然资源统计报告,其中人口密度数据通过 WorldPop([www.worldpop.org](http://www.worldpop.org))网站获取。

数据处理过程:(1) 土地利用现状数据。首先按照《土地利用现状分类》(GB/T21010—2017)将研究区土地利用类型划分为耕地、园地、林地、草地、城镇村用地、工矿用地、交通运输用地、湿地及水域 9 大

类;然后运用 ArcGIS 软件 Feature to Raster 工具将研究区 2010 年、2015 年、2020 年 3 期土地利用数据转换为 100 m×100 m 栅格单元;最后参考相关研究<sup>[2-4,10]</sup>,基于主导用途原则,结合研究区实际情况,明确“三生”空间与土地利用现状分类的对应关系;与其他分类相比,本研究将生产空间进一步区分为农业和工业生产空间两种类型,以便后续开展情景设置,其中农业生产空间为耕地,而工业生产空间为工矿用地;生活空间主要为城镇村用地和交通运输用地;生态空间包括湿地、林地、园地、草地和水域。(2) 地理空间数据。首先运用 ArcGIS 软件 Raster by Mask 工具将高程数据按照行政区划进行掩膜提取,获取研究区高程数据;然后基于高程数据运用 ArcGIS 空间分析工具(Spatial Analyst Tools),生成坡度、坡向地表径流及水文等相关数据;最后通过 ArcGIS 软件欧式距离工具(Euclidean Distance)计算得到研究区各像元中心到河流、湖泊、城市、建制镇、村庄、铁路、公路、农村道路等图斑的距离数据。(3) 专题统计数据。主要为多时段的社会经济、旅游文化和人口资源等统计资料,个别缺失数据采用多年平均增长率进行补值处理。

研究区位于长江下游,河流众多,水系密布,生态环境较为复杂,经济发展受交通区位和人口密度的影响较大。综合考虑上述因素,参考相关研究<sup>[10,18-19]</sup>,基于数据可得性、可量化等原则,从自然和社会两个维度,综合选取地形地貌、区位条件和人口密度等 12 项对土地利用变化影响较大的驱动因子(表 1),并借助 ArcGIS 软件统一对其进行栅格化、归一化处理。

表 1 土地利用变化驱动因子  
Table 1 Driving factors of land use change

因子类型	因子名称	年份	因子描述
自然因素	高程	2015,2020	地理空间云平台获取的 GDEM V2 30 m 分辨率 DEM
	坡度	2015,2020	DEM 衍生数据,由 ArcGIS 坡度分析工具获得
	坡向	2015,2020	DEM 衍生数据,由 ArcGIS 坡向分析工具获得
	距河流距离	2015,2020	各像元中心到河流的距离,由 ArcGIS 欧式距离分析工具获得
	距湖泊距离	2015,2020	各像元中心到湖泊的距离,由 ArcGIS 欧式距离分析工具获得
	距城市距离	2015,2020	各像元中心到城市的距离,由 ArcGIS 欧式距离分析工具获得
	距建制镇距离	2015,2020	各像元中心到建制镇的距离,由 ArcGIS 欧式距离分析工具获得
社会因素	距村庄距离	2015,2020	各像元中心到村庄的距离,由 ArcGIS 欧式距离分析工具获得
	距铁路距离	2015,2020	各像元中心到铁路的距离,由 ArcGIS 欧式距离分析工具获得
	距公路距离	2015,2020	各像元中心到公路的距离,由 ArcGIS 欧式距离分析工具获得
	距农村道路距离	2015,2020	各像元中心到农村道路的距离,由 ArcGIS 欧式距离分析工具获得
	人口密度	2015,2020	单位土地上的常住人口数,由 WorldPop 网站获取

2 研究方法

2.1 景观生态安全格局构建

景观生态安全格局是基于景观生态学理论和方

法,分析与模拟区域景观过程、格局与趋势,判别对区域生态过程具有关键作用的景观元素、所处位置 and 空间联系形成的综合格局,对维系地块生态过程具有重要意义,目前作为预测区域生态用地需求的重要方法



和依据<sup>[20]</sup>,在生态空间布局优化方面得到广泛运用。本文参考已有研究<sup>[21-22]</sup>,结合区域生态要素现状,构建包含防洪、水土保持、生物保护和游憩等重要生态过程的综合生态安全格局。

(1) 防洪安全格局。南京地势低洼,是典型的洪水走廊,同时也是全国31座重点防洪城市之一。本文基于南京市历年洪水资料和DEM数据,采用“无源淹没分析法”,构建3种不同风险频率的洪水淹没格局,分别为高安全格局(50年一遇,对应洪水位10.22 m,缓冲区宽度80~150 m)、中安全格局(20年一遇,对应洪水位8.31 m,缓冲区宽度50~80 m)和低安全格局(10年一遇,对应洪水位6.48 m,缓冲区宽度0~50 m);然后提取河流、湖泊、水库、坑塘和内陆滩涂等具有洪水调蓄作用的地类作为防洪源,根据不同风险等级洪水对缓冲区宽度的要求,构建3种不同风险等级的蓄洪格局;最后将洪水淹没格局和蓄洪格局叠加,综合构建不同等级的防洪安全格局。

(2) 水土保持安全格局。南京地形地貌以低山缓岗为主,平原、洼地及河流湖泊所占面积不足40%,受气候、降雨、地形地貌的影响,全市水土保持面临较大压力。本文基于南京市历年水文资料和DEM数据,首先设置3种不同安全等级下土地覆盖类型、坡度和地表径流缓冲区等水土保持影响因素对应参数,分别为高安全格局(土地覆盖类型为乔木林地、灌木林地、其他林地、竹林地、园地,对应坡度0~15°,地表径流缓冲区400~500 m)、中安全格局(土地覆盖类型为乔木林地、灌木林地、其他林地,对应坡度15°~25°,地表径流缓冲区150~400 m)和低安全格局(土地覆盖类型为乔木林地,对应坡度25°~90°,地表径流缓冲区0~150 m);然后采用ArcGIS空间叠置分析工具,将土地覆盖类型和坡度参数确定的生态用地格局相交取交集,再与地表径流缓冲区参数决定的生态用地格局合并取并集,从而构建不同等级的水土保持安全格局。

(3) 生物保护安全格局。生物多样性是衡量区域生态安全的重要标志,构建生物保护安全格局对优化区域生境网络,提高生物多样性水平具有重要作用。本文选取白鹭(候鸟)和灰喜鹊(留鸟)作为生物多样性指示物种,白鹭生境安全格局构建过程如下:从土地覆盖类型、坡度等方面设置生境适宜性评价指标,并通过专家打分和自然断点法,得到不同等级生境安全格局;灰喜鹊生境安全格局构建过程如下:将面积大于1 hm<sup>2</sup>的乔木林地作为栖息源地,对周围不同地类设置阻力值构建生境阻力面,同时参考灰喜

鹊活动半径(2 km),提取源地2 km范围内最小阻力面,构建最小阻力模型,再通过自然断点法,得到不同等级生境安全格局;最后将二者叠加,构建不同等级的生物保护安全格局。

(4) 游憩安全格局。南京自然景观优越、人文底蕴深厚,是全国著名旅游城市,具有较高的游憩价值。鉴于游憩体验便捷性主要受土地覆盖类型影响,因此本文选择研究区河流、湖泊、郁闭度较高的林地以及各类风景名胜用地作为景观源,结合专家打分明确各类农用地(旱地、水田、水浇地等)和建设用地(城市、建制镇、村庄、采矿用地等)不同土地覆盖类型阻力值,再通过构建最小阻力模型,运用自然断点法,得到不同等级的游憩安全格局。

上述4类生态安全格局共同构筑了研究区生态安全屏障,本文采用“等权叠加”的方法,将上述4类生态安全格局进行空间叠加,同时借鉴“木桶原理”,采用“综合取低”的算法,将叠加后的最低安全水平界定为该评价单元的安全水平,从而构建综合景观生态安全格局,据此明确不同安全等级的生态用地格局。

## 2.2 情景设置与需求预测

情景设置是根据不同经济社会发展形势和目标需求,对未来“三生”空间结构和布局的综合判断和预测,有限的土地资源需要在不同空间合理配置,才能满足多目标需求,从而保障经济、社会和生态协调发展。考虑到未来经济社会发展的不确定性,本研究基于南京市资源禀赋特征,参考《南京市国民经济和社会发展十四五规划和二〇三五年远景目标纲要》《江苏省国土空间规划(2021—2035年)》和《南京市国土空间总体规划(2021—2035年)》等相关规划的社会经济发展目标设定情况,将基于景观生态安全格局构建的不同安全等级生态用地作为约束条件,设置以下4种情景,并依据历史土地利用转换概率,采用Markov模型预测规划目标年不同情景下土地利用需求量;在此基础上,结合土地利用变化驱动因子(表1),采用FLUS模型开展土地利用变化模拟;最后,参照“三生”空间与土地利用分类的对应关系,实现规划目标年不同情景下“三生”空间变化模拟(图1)。

(1) 情景1。优先满足农业生产空间。该情景以最大限度减少耕地占用为目标,适当增加耕地向工矿用地、城镇村用地及交通运输用地转换成本,降低工矿用地和城镇村用地向耕地转换成本;同时,维持中等水平的生态安全,限制景观生态安全格局中安全格局生态用地向其他用地类型转换。

(2) 情景 2。优先满足工业生产空间和生活空间。鉴于工业生产空间和生活空间密切相连,功能也存在一定程度交叉,将两者统一考虑,设置相关情景较为合理。该情景以建设用地足量供给为目标,优先满足经济发展对建设用地的需求,适当增加耕地和生态空间向工矿用地、城镇村用地及交通运输用地转换成本;同时,仅维持较低水平的生态安全,限制景观生态安全格局低安全格局生态用地向其他用地类型转换。

(3) 情景 3。优先满足生态空间。该情景以生态保护为首要目标,维持较高水平的生态安全,将景观生态安全格局高安全格局生态用地设置为限制区,适当增加

生态空间向工矿用地、城镇村用地及交通运输用地转换成本;同时,考虑到耕地作为农田生态系统的重要组成部分,也能提供一定的生态系统服务,因此,将耕地向工矿用地、城镇村用地及交通运输用地转换成本适当调高。

(4) 情景 4。“三生”空间均衡发展。该情景以“三生”空间均衡协调为目标,“三生”空间转换速率基本维持现有水平,鉴于国家对耕地和生态保护愈发重视,适当增加耕地和生态空间向工矿用地、城镇村用地及交通运输用地转换成本;同时,维持一定程度的生态安全水平,限制景观生态安全格局中安全格局生态用地向其他用地类型转换。

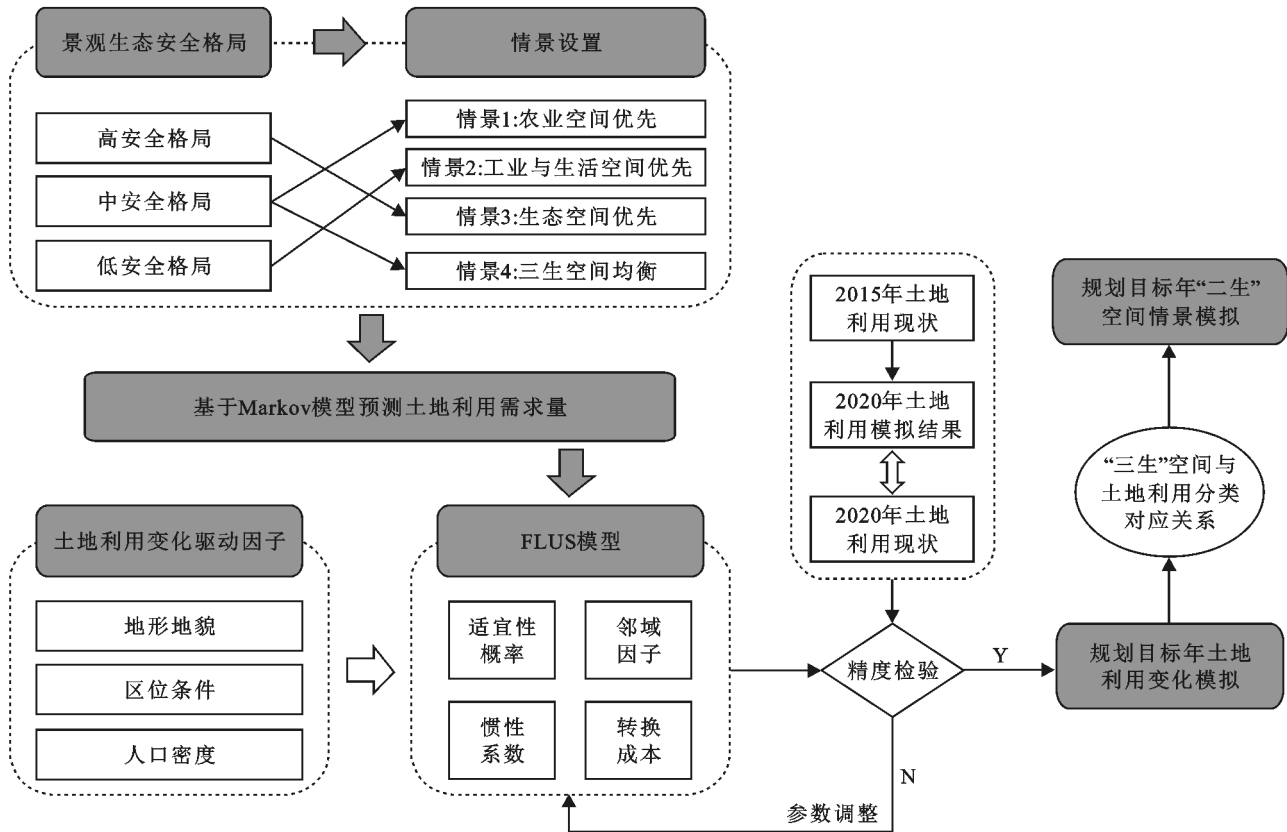


图 1 技术路线

Fig. 1 Technical route

2.3 基于 FLUS 模型的“三生”空间情景模拟

FLUS 模型以传统 CA 模型为基础,融合了 ANN 模型的适宜性概率计算模块和自适应惯性竞争机制,实现了对传统 CA 模型的改进,提高了模拟精度和计算效率<sup>[10]</sup>,近年来在土地利用变化领域得到较多关注和运用。该方法主要依据历史土地利用变化数据,结合自然和社会经济等驱动因子,首先计算土地利用变化适宜性概率;然后再通过基于轮盘赌选择的自适应惯性竞争机制,依次确定邻域因子、惯性系数和转换成本等相关参数,测算每个栅格单元综合适宜性概率;最后以迭代的方式实现地类分配,得

到土地利用变化模拟结果。其中,邻域因子表征各地类扩张能力,参数设置范围在 0~1,值越大表示扩张能力越强,本文参考相关研究<sup>[23-25]</sup>,并通过反复调试提高模拟精度,最终确定研究区各地类邻域因子参数(城镇村用地和林地 为 1,工矿用地、交通运输用地和水域 为 0.9,耕地 为 0.5,草地 为 0.4,园地 为 0.3,湿地 为 0.1);惯性系数由不同情景下土地利用需求与实际数量之间的差异决定,并通过迭代过程自适应调整,使各地类数量达到预期目标;转换成本则表示地类转换的难易程度,参数设置范围在 0~1,值越大表示转

换难度越低,本文基于上述 4 类情景设置的地类转换原则,并参考相关研究<sup>[10,23-25]</sup>,综合确定不同情景下各地类转换成本参数(表 2)。模型表达式<sup>[23]</sup>如下:

$$Z_{a,b}^c = A_{a,b} \times B_{a,b}^c \times C_b^c \times D_{d \rightarrow b} \quad (1)$$

式中: $Z_{a,b}^c$  为  $c$  时刻元胞  $a$  从原地类转换为  $b$  地类的综合概率; $A_{a,b}$  为元胞  $a$  转换为  $b$  地类的适宜性概率; $B_{a,b}^c$  为邻域因子; $C_b^c$  为惯性系数; $D_{d \rightarrow b}$  为  $d$  地类转换为  $b$  地类的转换成本。

表 2 地类转换成本参数

Table 2 Parameters of land class conversion cost

情景	地类	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
情景 1	(1)	1.0	0.2	0.3	0.2	0.6	0.7	0.7	0.8	0.2
	(2)	0.8	1.0	0.8	0.6	0.1	0.2	0.2	0.3	0.2
	(3)	0.8	0.8	1.0	0.6	0.1	0.3	0.2	0.2	0.1
	(4)	0.7	0.8	0.6	1.0	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2
	(5)	0.5	0.2	0.2	0.2	1.0	0.7	0.8	0.7	0.4
	(6)	0.7	0.2	0.2	0.2	0.3	1.0	0.8	0.7	0.3
	(7)	0.8	0.3	0.2	0.2	0.3	0.7	1.0	0.8	0.3
	(8)	0.8	0.2	0.3	0.3	0.2	0.8	0.8	1.0	0.3
	(9)	0.4	0.2	0.3	0.2	0.1	0.2	0.2	0.1	1.0
情景 2	(1)	1.0	0.8	0.8	0.7	0.6	0.7	0.7	0.8	0.2
	(2)	0.2	1.0	0.8	0.6	0.1	0.2	0.2	0.3	0.2
	(3)	0.3	0.8	1.0	0.6	0.1	0.3	0.2	0.2	0.1
	(4)	0.3	0.8	0.6	1.0	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2
	(5)	0.5	0.3	0.4	0.4	1.0	0.7	0.8	0.7	0.4
	(6)	0.7	0.6	0.7	0.6	0.3	1.0	0.8	0.7	0.3
	(7)	0.8	0.5	0.5	0.6	0.3	0.7	1.0	0.8	0.3
	(8)	0.8	0.6	0.6	0.7	0.2	0.8	0.8	1.0	0.3
	(9)	0.4	0.5	0.4	0.4	0.1	0.2	0.2	0.1	1.0
情景 3	(1)	1.0	0.4	0.4	0.4	0.6	0.7	0.7	0.8	0.2
	(2)	0.5	1.0	0.8	0.6	0.5	0.5	0.6	0.6	0.2
	(3)	0.5	0.8	1.0	0.6	0.4	0.6	0.5	0.6	0.1
	(4)	0.5	0.8	0.6	1.0	0.3	0.5	0.5	0.5	0.2
	(5)	0.5	0.2	0.2	0.2	1.0	0.7	0.8	0.7	0.4
	(6)	0.7	0.2	0.2	0.2	0.3	1.0	0.8	0.7	0.3
	(7)	0.8	0.3	0.2	0.2	0.3	0.7	1.0	0.8	0.3
	(8)	0.8	0.2	0.3	0.3	0.2	0.8	0.8	1.0	0.3
	(9)	0.4	0.2	0.3	0.2	0.1	0.2	0.2	0.1	1.0
情景 4	(1)	1.0	0.5	0.5	0.5	0.6	0.7	0.7	0.8	0.2
	(2)	0.5	1.0	0.8	0.6	0.4	0.4	0.3	0.4	0.2
	(3)	0.5	0.8	1.0	0.6	0.3	0.4	0.4	0.4	0.1
	(4)	0.5	0.8	0.6	1.0	0.3	0.3	0.4	0.5	0.2
	(5)	0.5	0.2	0.2	0.2	1.0	0.7	0.8	0.7	0.4
	(6)	0.7	0.2	0.2	0.2	0.3	1.0	0.8	0.7	0.3
	(7)	0.8	0.3	0.2	0.2	0.3	0.7	1.0	0.8	0.3
	(8)	0.8	0.2	0.3	0.3	0.2	0.8	0.8	1.0	0.3
	(9)	0.4	0.2	0.3	0.2	0.1	0.2	0.2	0.1	1.0

注:(1),(2),(3),(4),(5),(6),(7),(8),(9)分别代表耕地、工矿用地、城镇村用地、交通运输用地、湿地、林地、园地、草地和水域。

### 3 结果与分析

#### 3.1 南京市景观生态安全格局分析

基于前文构建的防洪、水土保持、生物保护和游憩 4 类单一景观生态安全格局,通过“等权叠加”的方法,得到不同等级的综合景观生态安全格局。

单一景观生态安全格局结果显示:南京市洪水风险区主要集中在长江沿岸、石臼湖南侧以及固城湖沿岸,防洪安全等级以防洪源为中心,向外逐步提高,其中高、中、低安全格局面积占比分别为 15.21%, 12.24%, 10.98%(图 2A);水土流失风险区主要位于长江沿岸、河湖和地表径流缓冲带,以及各类森林公园、林场和生态公益林周边植被覆盖率较高的区域,其中高、中、低安全格局面积占比分别为 11.72%, 10.03%, 8.49%(图 2B);生物多样性风险区在除主城 4 区外各郊区均匀分布,主城 4 区建成区面积较大,分布较少,其中高、中、低安全格局面积占比分别为 34.29%, 26.78%, 20.39%(图 2C);游憩风险区主要位于景观源地缓冲区及其周边的生态廊道内,生态廊道对各景观源地之间的连接作用明显,能够有效提升游客游憩体验,其中高、中、低安全格局面积占比分别为 37.76%, 30.84%, 24.53%(图 2D)。

综合景观生态安全格局结果显示:南京市低安全水平生态用地规模为 1 537.41 km<sup>2</sup>,占比 23.34%,该范围内生态用地主要位于长江、石臼湖和固城湖等重要水系周边,以及各类生态公益林核心区域,对保障生态系统服务功能具有重要作用,是维护区域生态安全的底线,应最大限度维持现有景观结构,减少人类活动干扰;中安全水平生态用地规模为 2 576.85 km<sup>2</sup>,占比 39.12%,除低安全水平外该范围内生态用地主要位于核心区外围缓冲地带,作为生态过渡区将原本独立、分散的生态系统连接,实现生态系统内外的交流互动,应保持相对稳定,尽量限制建设占用;高安全水平生态用地规模为 2 928.59 km<sup>2</sup>,占比 44.46%,除中安全水平外该范围内生态用地大体位于城市近郊,主要起到生态隔离带的作用,生态系统连通性和稳定性整体较高,可适当进行开发建设,但需控制开发强度(图 3)。

#### 3.2 南京市“三生”空间需求预测

为减少长时间尺度预测误差,本文参考相关研究<sup>[10,23]</sup>,以 5 a 为时间间隔,基于南京市 2010 年、2015 年土地利用现状数据,采用 Markov 模型预测 2020 年土地利用需求量,并与 2020 年土地利用现状



数据进行对比,结果显示:模型预测结果平均精度达到 97.8%,能够较为准确地预测未来土地利用需求量。基于此,通过调整 Markov 模型转移概率矩阵,

结合“三生”空间与土地利用分类的对应关系,实现规划目标年(2025 年和 2035 年)不同情景下“三生”空间需求预测(表 3)。

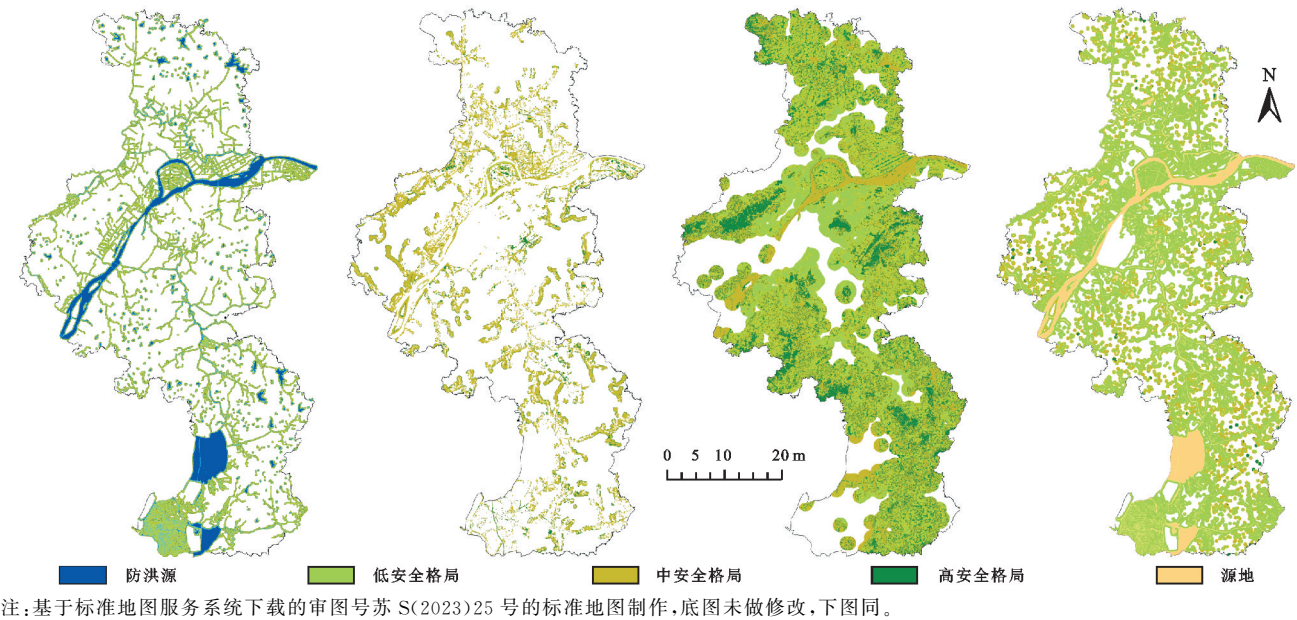


图 2 防洪、水土保持、生物保护、游憩安全格局

Fig. 2 Flood control, water and soil conservation, biological protection, recreation security pattern

(图 4B)进行对比。结果显示:FOM 指数为 0.05, Kappa 系数为 93.2%,总体精度达到 94.7%,模型精度较高,达到模拟要求。可在此基础上,结合自然和社会经济等驱动因子,开展“三生”空间情景模拟。

3.3.2 情景分析 依据上述情景设置中的地类转换规则和相应参数设定,模拟得到南京市规划目标年(2025 年和 2035 年)不同情景下“三生”空间布局图(图 5—6)，“三生”空间数量变化情况见表 4。

模拟结果显示:研究区生产空间主要集中在北部的六合和南部的溧水、高淳等远郊地区,主城区较少,穿插分布于生活和生态空间之间;生活空间主要分布在长江两岸南北主城以及远郊地区建成区范围内;生态空间分布较为分散,大体位于长江以北老山国家森林公园周边、长江以南石臼湖和固城湖沿岸以及各类生态公益林、湿地公园,主城区主要集中在紫金山国家森林公园周边。总体来看,2020—2025 年和 2025—2035 年,南京市“三生”空间变化趋势基本相似,2025—2035 年较 2020—2025 年变化速率有所减缓,变化区域主要位于生活空间边缘,与生产和生态空间交接区域,同一情景下地类转换趋于一致。工业生产空间和生活空间在 4 种情景下均有所增加;而除情景 1 外,农业生产空间(耕地)在其他 3 种情景下均有所减少;除情景 3 外,生态空间在其他 3 种情景下均有所减少。究其原因是无论何种情景下经济发展

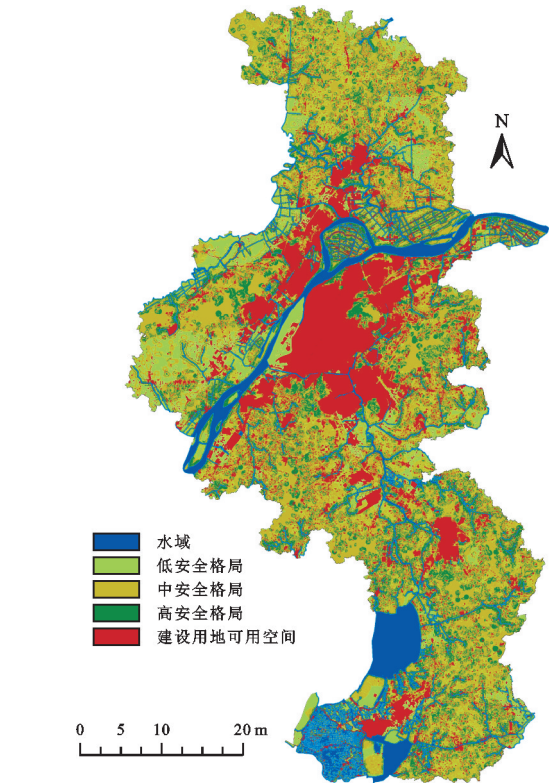


Fig. 3 Landscape ecological security pattern in Nanjing City

3.3 南京市“三生”空间情景模拟

3.3.1 精度检验 将 Markov 模型预测的 2020 年土地利用栅格数据导入 FLUS 模型,得到 2020 年土地利用模拟结果(图 4A),并与 2020 年土地利用现状图

均需要一定的建设用地投入,这就必然导致工业生产空间和生活空间挤占一定的耕地和生态空间,而情景 1 和情景 3 分别以耕地和生态保护为首要目标,耕地和生态空间向其他地类的转换成本有所增加,所以在上述情景下分别呈现扩增态势。不同情景下“三生”空间模拟结果如下:

表 3 南京市规划目标年不同情景下“三生”空间需求预测

Table 3 Multi-Scenario demand prediction of ‘Production-Life-Ecological’ Space in Nanjing planning target yearkm<sup>2</sup>

年份	情景	生产空间			生活空间			生态空间					
		农业	工业	合计	城镇村	交通运输	合计	湿地	林地	园地	草地	水域	合计
		耕地	工矿用地		用地	用地							
2020	现状	1498.98	32.52	1531.50	1366.04	264.70	1630.74	15.57	1638.60	147.39	132.43	1490.79	3424.78
	情景 1	1539.87	36.59	1576.46	1382.74	272.65	1655.39	15.06	1601.17	143.15	125.85	1469.94	3355.17
	情景 2	1468.50	42.86	1511.36	1411.65	283.35	1695.00	14.38	1609.22	148.03	127.22	1481.81	3380.66
2025	情景 3	1479.43	32.95	1512.38	1370.61	265.85	1636.46	16.44	1645.83	148.36	133.55	1494.00	3438.18
	情景 4	1493.69	39.90	1533.59	1386.02	273.27	1659.29	15.00	1621.67	145.94	129.99	1481.54	3394.14
	情景 1	1604.90	42.81	1647.71	1408.58	285.37	1693.95	14.18	1542.96	135.82	115.40	1437.00	3245.36
2035	情景 2	1416.92	58.55	1475.47	1487.45	313.03	1800.48	12.41	1561.63	149.04	118.75	1469.24	3311.07
	情景 3	1447.76	33.57	1481.33	1378.13	267.83	1645.96	17.88	1657.61	149.95	135.46	1498.83	3459.73
	情景 4	1485.00	50.61	1535.61	1419.27	286.29	1705.56	14.12	1594.75	143.93	126.78	1466.27	3345.85

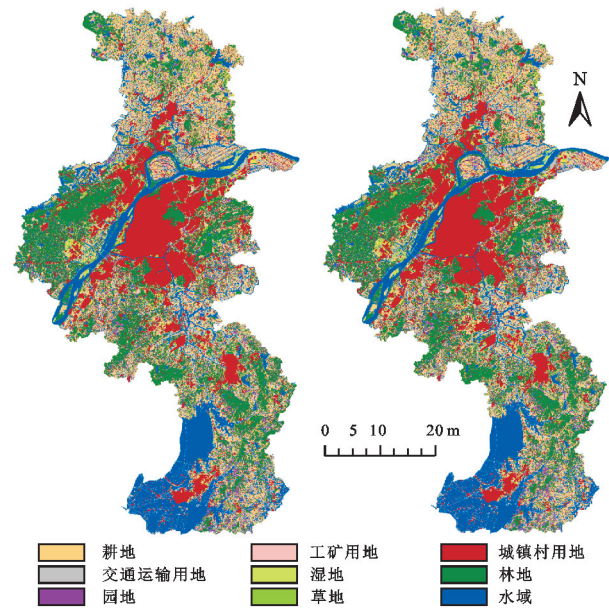


图 4 2020 年土地利用模拟结果与 2020 年土地利用现状

Fig. 4 Results of land use simulation in 2020 and land use status in 2020

(1) 情景 1。生产空间和生态空间变化较大,生产空间扩增明显,到 2025 年和 2035 年分别增加 44.96, 71.25 km<sup>2</sup>,其中农业生产空间(耕地)占据主要部分,扩增区域主要位于远郊农村周边,该区域生态空间与耕地紧密相连,开垦难度较小;生态空间缩减较多,到 2025 年和 2035 年分别减少 69.61,109.81 km<sup>2</sup>,林地和水域为主要地类转出源,其中林地以郁闭度较低的其他林地为主,水域主要为坑塘水面和沟渠;而生活空间变化幅度相对较小,到 2025 年和 2035 年分别增加 24.65,38.56 km<sup>2</sup>,主要在原有建成区基础上向外缓慢扩增。整体而言,该情景以耕地保护为目标,同

时维持中等水平的生态安全,将中安全格局生态用地作为约束区域,一定程度上限制了生活空间和工业生产空间的扩张;与此同时,虽然农业生产空间(耕地)增幅明显,并呈现集中连片的趋势,但以牺牲部分生态环境为代价,生态空间缩减显著,不利于经济、社会和生态可持续发展。

(2) 情景 2。“三生”空间均变化显著,生产空间整体呈缩减趋势,到 2025 年和 2035 年分别减少 20.14, 35.89 km<sup>2</sup>,但农业与工业生产空间变化趋势相反,耕地减少较多,约 70%流向城镇村用地,少量受农业结构调整流向其他农用地;而工业生产空间(工矿用地)和生活空间扩增明显,耕地和林地是主要流入来源,其中工矿用地扩增区域主要位于交通便利的城市近郊开发区,生活空间在原有建成区基础上集中成片向外扩张,到 2025 年和 2035 年分别增加 64.26,105.48 km<sup>2</sup>;生态空间缩减较多,到 2025 年和 2035 年分别减少 44.12, 69.59 km<sup>2</sup>,其中林地和水域为主要地类转出源。该情景优先满足经济发展对建设用地的需求,仅维持景观生态安全格局低安全水平,工业生产空间(工矿用地)和生活空间扩张严重挤占了耕地和生态空间,建设用地供给以牺牲粮食和生态安全为代价,这明显有违国家粮食安全战略和生态文明建设。

(3) 情景 3。除农业生产空间(耕地)处于缩减趋势外,其他空间均呈现小幅扩增态势,2025 年和 2035 年耕地分别减少 19.55,31.67 km<sup>2</sup>,受生活和生态空间的双重挤压,耕地部分流向生态空间的林地、水域等用地类型,部分向城镇村用地和交通运输用地转换;生活空间在原有基础上稍有扩张,到 2025 年和



2035 年分别增加 5.72,9.50 km<sup>2</sup>;生态空间主要以现状生态用地为基础向外围缓冲地带逐步扩增,对提高生态系统连通性和稳定性具有一定作用,到 2025 年和 2035 年分别增加 13.40,21.55 km<sup>2</sup>。该情景以生态保护为首要目标,将高安全格局生态用地作为限制区域,维持较高水平的生态安全,极大程度上限制了生活空间和工业生产空间的扩张,但同时也导致农业生产空间(耕地)缩减明显,对区域耕地保护和粮食安全造成一定威胁。

(4) 情景 4。“三生”空间变化趋势整体较为缓和,生产空间基本维持现有水平,到 2025 年和 2035 年仅增加 2.09,2.02 km<sup>2</sup>,其中农业生产空间(耕地)和工业生产空间(工矿用地)增减基本持平,没有出现

耕地大幅减少现象;为满足经济发展需求,生活空间保持一定程度扩增态势,但增幅相对有限,主要集中在建设用地供需矛盾较为突出的城郊融合区域,2025 年和 2035 年分别增加 28.55,46.27 km<sup>2</sup>;受城市扩张影响,生态空间受到一定程度挤占,到 2025 年和 2035 年分别减少 30.64,48.29 km<sup>2</sup>,但缩减幅度较其他情景均有所放缓,主要为城市近郊生态缓冲地带,对生态系统连通性和稳定性影响不大。综合来看,该情景以“三生”空间均衡协调为目标,将中安全格局生态用地作为限制区域,维持一定程度的生态安全水平,在满足经济发展对建设用地需求的同时,也能兼顾粮食安全和生态保护的要求,有利于促进经济、社会和生态全面协调可持续发展。

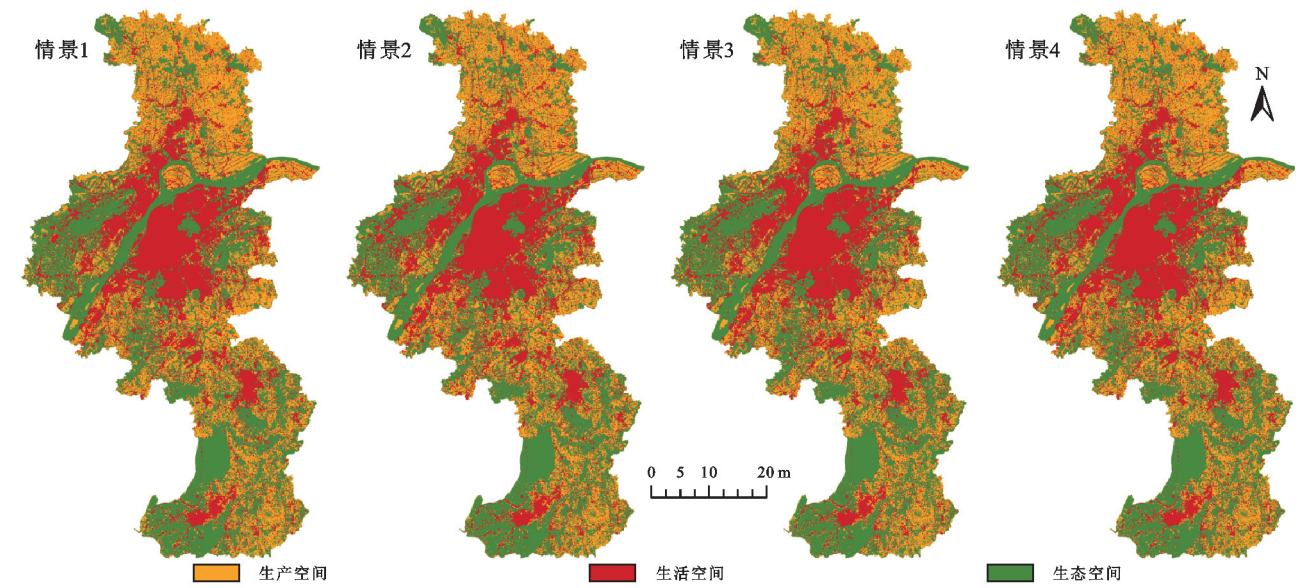


图 5 2025 年南京市不同情景下“三生”空间模拟

Fig. 5 Multi-Scenario Simulation of ‘Production-Life-Ecological’ Space in Nanjing in 2025

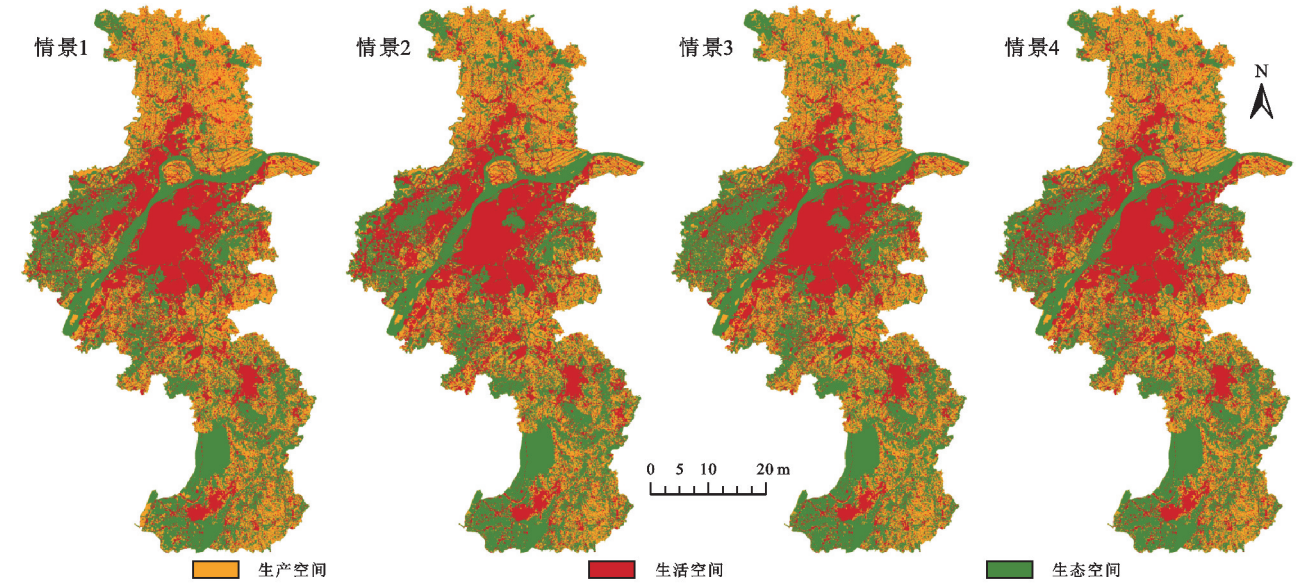


图 6 2035 年南京市不同情景下“三生”空间模拟

Fig. 6 Multi-Scenario Simulation of ‘Production-Life-Ecological’ Space in Nanjing in 2035

表 4 南京市规划目标年不同情景下“三生”空间变化情况

Table 4 Multi-Scenario variation of 'Production-Life-Ecological' Space in Nanjing planning target year km<sup>2</sup>

年份	情景	生产空间				生活空间				生态空间						
		农业	工业	合计	年约	城镇村 用地	交通运输 用地	合计	年约	湿地	林地	园地	草地	水域	合计	年约
		耕地	工矿用地													
2025	情景 1	40.89	4.07	44.96	8.99	16.70	7.95	24.65	4.93	-0.51	-37.43	-4.24	-6.58	-20.85	-69.61	-13.92
	情景 2	-30.48	10.34	-20.14	-4.03	45.61	18.65	64.26	12.85	-1.19	-29.38	0.64	-5.21	-8.98	-44.12	-8.82
	情景 3	-19.55	0.43	-19.12	-3.82	4.57	1.15	5.72	1.14	0.87	7.23	0.97	1.12	3.21	13.40	2.68
	情景 4	-5.29	7.38	2.09	0.42	19.98	8.57	28.55	5.71	-0.57	-16.93	-1.45	-2.44	-9.25	-30.64	-6.13
2035	情景 1	65.03	6.22	71.25	7.13	25.84	12.72	38.56	3.86	-0.88	-58.21	-7.33	-10.45	-32.94	-109.81	-10.98
	情景 2	-51.58	15.69	-35.89	-3.59	75.80	29.68	105.48	10.55	-1.97	-47.59	1.01	-8.47	-12.57	-69.59	-6.96
	情景 3	-31.67	0.62	-31.05	-3.11	7.52	1.98	9.50	0.95	1.44	11.78	1.59	1.91	4.83	21.55	2.16
	情景 4	-8.69	10.71	2.02	0.20	33.25	13.02	46.27	4.63	-0.88	-26.92	-2.01	-3.21	-15.27	-48.29	-4.83

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

“三生”空间是人类社会、经济活动的基本载体,站在人与自然和谐共生的高度优化国土空间发展格局,是当前国土空间规划和自然资源管理工作的重心所在。为此,本文以“三生”空间利用矛盾较为突出的江苏省南京市为例,将区域景观生态安全格局作为约束条件耦合到 FLUS 模型中,开展规划目标年(2025 年和 2035 年)“三生”空间多情景模拟,强化生态保护对“三生”空间时空格局演变的限制作用,平衡“三生”空间利用矛盾,对协调区域经济发展、耕地保护和生态安全具有重要意义。研究结果表明,优先满足农业生产空间情景下,维持中等水平生态安全,耕地增加以牺牲部分生态环境为代价,不利于经济、社会和生态可持续发展;优先满足工业生产空间和生活空间情景下,维持较低水平生态安全,建设用地供给以牺牲粮食和生态安全为代价,有违国家粮食安全战略和生态文明建设;优先满足生态空间情景下,维持较高水平生态安全,农业生产空间缩减明显,对区域耕地保护和粮食安全造成一定威胁;“三生”空间均衡发展情景下,维持一定程度生态安全,满足经济发展对建设用地需求的同时,也能兼顾粮食安全和生态保护,有利于促进经济、社会和生态全面协调可持续发展。

受基础资料限制,本文在部分指标的选取和参数设置方面有待进一步完善:(1) 土地利用变化驱动因子一定程度上影响了 FLUS 模型模拟的精确度,本文按照数据可得性、可量化等原则,综合选取地形地貌、区位条件和人口密度等 12 项驱动因子,但土地利用变化受政策影响较大,由于政策环境的多变性和不确定性,在未来的研究中,应充分考虑国土空间管制政策对“三生”空间变化的调控作用,完善驱动因子选择,进一步提高模拟精度;(2) FLUS 模型中邻域因子、转

换成本等参数设置主要依靠相关研究和经验判断,并在模型调试中不断修正,最终确定合适的参数,存在一定的主观性,因此在今后的研究中,应更加全面系统地分析研究区土地利用历史数据,掌握土地利用变化客观规律,减少主观判断,提高参数设置的科学性。

### 4.2 结论

(1) 依据研究区生态要素现状,通过不同景观过程的模拟,构建防洪、水土保持、生物保护和游憩 4 类单一生态安全格局,再以“等权叠加”的方式,得到不同等级的综合景观生态安全格局,作为“三生”空间情景模拟约束条件。结果显示,研究区低安全水平生态用地规模为 1 537.41 km<sup>2</sup>,占比 23.34%,是维护生态安全的核心区域;中安全水平生态用地规模为 2 576.85 km<sup>2</sup>,占比 39.12%,为核心区外围生态过渡区;高安全水平生态用地规模为 2 928.59 km<sup>2</sup>,占比 44.46%,为城市近郊生态隔离带。

(2) 将基于景观生态安全格局构建的不同安全等级生态用地作为约束条件耦合到 FLUS 模型中,设置并对比“农业空间优先”“工业和生活空间优先”“生态空间优先”和“三生空间均衡发展”4 类情景下“三生”空间结构与布局状况。结果发现,相较其他 3 种情景,情景 4 以“三生”空间均衡协调为目标,维持中等水平的生态安全,“三生”空间变化趋势整体较为缓和,到 2025 年和 2035 年,生产空间基本维持现有水平,仅增加 2.09,2.02 km<sup>2</sup>,生活空间增幅相对有限,分别为 28.55,46.27 km<sup>2</sup>,生态空间缩减幅度有所放缓,分别为 30.64,48.29 km<sup>2</sup>,该情景在满足经济发展对建设用地需求的同时,也能兼顾粮食安全和生态保护的要求,有利于促进经济、社会和生态全面协调可持续发展。

### 参考文献(References):

- [1] 杨帆,熊素文,雷婷,等.城镇化进程中洞庭湖区“三生空间”格局演变与驱动机制[J].生态学报,2022,42(17): 7043-7055.

- Yang F, Xiong S W, Lei T, et al. Evolution of the “production-living-ecological space” pattern and driving mechanisms in the Dongting Lake area during the urbanization process[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(17):7043-7055.
- [2] 冀正欣,刘超,许月卿,等.基于土地利用功能测度的“三生”空间识别与优化调控[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(18):222-231, 315.
- Ji Z X, Liu C, Xu Y Q, et al. Identification and optimal regulation of the production-living-ecological space based on quantitative land use functions[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(18):222-231, 315.
- [3] 张广海,刘二恋,董跃蕾.我国“三生空间”演变特征及其旅游效应研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2023, 39(3):130-136.
- Zhang G H, Liu E L, Dong Y L. Evolution characteristics and tourism effect of production-living-ecological space in China [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2023, 39(3):130-136.
- [4] 倪维秋,夏源,赵宁宁.乡村地域“三生空间”功能演化与耦合协调度研究:以黑龙江省为例[J]. *中国土地科学*, 2022, 36(9):111-119.
- Ni W Q, Xia Y, Zhao N N. Functional evolution and coupling coordination measurement of production-living-ecological space in rural areas: Taking Heilongjiang Province as an example[J]. *China Land Science*, 2022, 36(9):111-119.
- [5] 金贵,郭柏枢,成金华,等.基于资源效率的国土空间布局及支撑体系框架[J]. *地理学报*, 2022, 77(3):534-546.
- Jin G, Guo B S, Cheng J H, et al. Layout optimization and support system of territorial space: An analysis framework based on resource efficiency [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(3):534-546.
- [6] 刘金花,丛中笑,王治军.基于三生空间转型的生态环境效应多尺度研究:以黄河流域山东段为例[J]. *中国环境科学*, 2023, 43(5):2519-2530.
- Liu J H, Cong Z X, Wang Z J. Ecological effects of production-living-ecological space transformation at multi-scales: A case study on the Shandong Section of the Yellow River Basin[J]. *China Environmental Science*, 2023, 43(5):2519-2530.
- [7] 张振龙,侯琰珍,孙鸿鹄,等.乡镇街道尺度国土“三生”空间功能评价及协调关系[J]. *自然资源学报*, 2022, 37(11):2898-2914.
- Zhang Z L, Hou Y Z, Sun H H, et al. Study on the evaluation of the spatial function and coordination relationship of the territorial “production-living-ecological” spaces at the township-street scale [J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(11):2898-2914.
- [8] 吴文俊,张雪微,郭杰,等.“多目标”需求下扬州市土地利用布局优化[J]. *生态学报*, 2022, 42(19):7952-7965.
- Wu W J, Zhang X W, Guo J, et al. Optimization of land use layout in Yangzhou City for multi-objective demand[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(19):7952-7965.
- [9] Liang X, Guan Q F, Clarke K C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2021, 85:101569.
- [10] 袁雪松,周俊,胡蓓蓓,等.基于 FLUS 模型粤港澳大湾区“三生空间”多情景模拟预测[J]. *地理科学*, 2023, 43(3):564-574.
- Yuan X S, Zhou J, Hu B B, et al. Multi-scenario simulation and prediction of ecological-productive-living spaces in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area based on FLUS model[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2023, 43(3):564-574.
- [11] Peng J, Zhao S Q, Dong J Q, et al. Applying ant colony algorithm to identify ecological security patterns in megacities[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2019, 117:214-222.
- [12] 章欣欣,栾海军,花利忠.基于蜂群算法的城市土地利用变化建模[J]. *地理科学*, 2016, 36(3):359-366.
- Zhang X X, Luan H J, Hua L Z. Urban land use change modelling based on artificial bee colony algorithm[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(3):359-366.
- [13] 彭建,李慧蕾,刘焱序,等.雄安新区生态安全格局识别与优化策略[J]. *地理学报*, 2018, 73(4):701-710.
- Peng J, Li H L, Liu Y X, et al. Identification and optimization of ecological security pattern in Xiongan New Area [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(4):701-710.
- [14] Peng J, Pan Y J, Liu Y X, et al. Linking ecological degradation risk to identify ecological security patterns in a rapidly urbanizing landscape[J]. *Habitat International*, 2018, 71:110-124.
- [15] 梁保平,雷艳,覃业努,等.快速城市化背景下广西典型城市景观空间格局动态比较研究[J]. *生态学报*, 2018, 38(12):4526-4536.
- Liang B P, Lei Y, Qin Y N, et al. Comparison of changing landscape patterns in the rapidly urbanizing cities of Guangxi[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(12):4526-4536.
- [16] 闫玉玉,孙彦伟,刘敏.基于生态安全格局的上海国土空间生态修复关键区域识别与修复策略[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(12):3369-3378.
- Yan Y Y, Sun Y W, Liu M. Identification and restoration



- tion strategy of key areas for territorial space ecological restoration in Shanghai, China based on ecological security pattern[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(12): 3369-3378.
- [17] Zhou D, Song W. Identifying ecological corridors and networks in mountainous areas[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(9): 4797.
- [18] 刘纪远, 张增祥, 徐新良, 等. 21 世纪初中国土地利用变化的空间格局与驱动力分析[J]. 地理学报, 2009, 64(12): 1411-1420.
- Liu J Y, Zhang Z X, Xu X L, et al. Spatial patterns and driving forces of land use change in China in the early 21st century[J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(12): 1411-1420.
- [19] 韩会然, 杨成凤, 宋金平. 北京市土地利用变化特征及驱动机制[J]. 经济地理, 2015, 35(5): 148-154, 197.
- Han H R, Yang C F, Song J P. The spatial-temporal characteristic of land use change in Beijing and its driving mechanism [J]. Economic Geography, 2015, 35(5): 148-154, 197.
- [20] 彭建, 赵会娟, 刘焱序, 等. 区域生态安全格局构建研究进展与展望[J]. 地理研究, 2017, 36(3): 407-419.
- Peng J, Zhao H J, Liu Y X, et al. Research progress and prospect on regional ecological security pattern construction[J]. Geographical Research, 2017, 36(3): 407-419.
- [21] 王思易, 欧名豪. 基于景观安全格局的建设用地管制分区[J]. 生态学报, 2013, 33(14): 4425-4435.
- Wang S Y, Ou M H. Zoning for regulating of construction land based on landscape security pattern[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(14): 4425-4435.
- [22] 杨清可, 王磊, 李永乐, 等. 基于景观生态安全格局构建的城镇空间扩展模式研究: 以江苏沿海地区为例[J]. 地理科学, 2021, 41(5): 737-746.
- Yang Q K, Wang L, Li Y L, et al. Urban spatial expansion mode based on the construction of landscape ecological security pattern: A case of the coastal area of Jiangsu[J]. Scientia Geographica Sinica, 2021, 41(5): 737-746.
- [23] 王旭, 马博文, 李丹, 等. 基于 FLUS 模型的湖北省生态空间多情景模拟预测[J]. 自然资源学报, 2020, 35(1): 230-242.
- Wang X, Ma B W, Li D, et al. Multi-scenario simulation and prediction of ecological space in Hubei Province based on FLUS model [J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(1): 230-242.
- [24] Liu X P, Liang X, Li X, et al. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects[J]. Landscape and Urban Planning, 2017, 168: 94-116.
- [25] 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.

(上接第 382 页)

- [25] 周浩, 金平, 夏卫生. 省级国土空间“三生”功能评价及其分区研究: 以河南省为例[J]. 中国土地科学, 2020, 34(8): 10-17.
- Zhou H, Jin P, Xia W S. Functional zoning of territorial space in provincial level based on the production-living-ecological functions: A case of Henan Province [J]. China Land Science, 2020, 34(8): 10-17.
- [26] 周浩, 雷国平, 杨雪昕, 等. RCPs 气候情景下挠力河流域耕地水土资源平衡效应模拟[J]. 应用生态学报, 2018, 29(4): 1302-1312.
- Zhou H, Lei G P, Yang X X, et al. Simulation for balanced effect of soil and water resources on cultivated land in Naoli River Basin, Northeast China under the RCPs climate scene [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(4): 1302-1312.
- [27] 单薇, 金晓斌, 冉娜, 等. 江苏省土地利用“生产-生活-生态”功能变化与耦合特征分析[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(7): 1541-1551.
- Shan W, Jin X B, Ran N, et al. “production-living-ecological” function evaluation and coupling coordination analysis of land use in Jiangsu Province [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(7): 1541-1551.
- [28] 路昌, 周浩, 张凤, 等. 基于地学信息图谱的山东省国土空间转型分析[J]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 222-230.
- Lu C, Zhou H, Zhang F, et al. Land spatial transformation analysis in Shandong Province based on geo information map [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 222-230.