



农业资源与环境学报

CSCD 核心期刊
中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

基于动态稳定性验证和CA-Markov预测的耕地时空演变特征——以赣榆区为例

周翼虎, 方婷婷, 陈振

引用本文:

周翼虎, 方婷婷, 陈振. 基于动态稳定性验证和CA-Markov预测的耕地时空演变特征——以赣榆区为例[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(2): 253–265.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2023.0110>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于CA-Markov模型和MCE约束的白洋淀流域景观动态研究

张晨星, 徐晶晶, 温静, 杨新兵, 王佳欢, 赵波

农业资源与环境学报. 2021, 38(4): 655–664 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0415>

基于时空角度的广东省耕地占补平衡绩效评价

李敬, 张燊, 胡月明, 吴克宁

农业资源与环境学报. 2021, 38(6): 1064–1073 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0542>

京津冀潮白河区域2001—2017年耕地利用变化时空特征分析

苏锐清, 曹银贵, 王文旭, 邱敏, 宋蕾

农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 574–582 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0266>

新时代广州市耕地多功能评价及时空演变分析

唐春云, 臧俊梅

农业资源与环境学报. 2021, 38(2): 332–343 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0648>

基于力学平衡模型的耕地多功能演变及其协调性分析——以珠江三角洲为例

余富祥, 胡月明, 刘振杰, 李波, 王璐

农业资源与环境学报. 2019, 36(6): 728–737 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0302>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

周翼虎, 方婷婷, 陈振. 基于动态稳定性验证和CA-Markov预测的耕地时空演变特征——以赣榆区为例[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(2): 253–265.

ZHOU Y H, FANG T T, CHEN Z. Spatio-temporal evolution characteristics of cultivated land based on dynamic stability verification and CA-Markov prediction: a case study of Ganyu District[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2024, 41(2): 253–265.



开放科学 OSID

基于动态稳定性验证和CA-Markov预测的耕地时空演变特征——以赣榆区为例

周翼虎¹, 方婷婷^{2*}, 陈振³

(1. 南京农业大学公共管理学院, 南京 210095; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008; 3. 南京邮电大学社会与人口学院, 南京 210023)

摘要:为阐明耕地变化动态稳定性验证的重要性, 预测“十四五”目标年(2025年)与远景目标年(2035年)的耕地变化, 本研究运用耕地面积变异系数、地理集中度、不平衡指数及趋势分析法, 从耕地数量、空间分布与空间发展趋势三个方面, 对江苏省连云港市赣榆区耕地变化的动态稳定性进行验证, 并运用CA-Markov模型对未来不同政策情境下的耕地变化情况进行模拟。结果表明, 2009—2016年赣榆区耕地总量持续下降, 未存在较大反复与波动, 耕地空间分布较为均衡, 耕地占用与补充的空间发展趋势较为连续, 总体上具有较高的动态稳定性, 符合运用CA-Markov模型的前提条件。预测在各种政策情境下, 2025年之前赣榆区将经历快速的耕地非农化过程, 至2035年耕地减少的速率有所放缓, 具有区位优势赣榆北部地区将是未来耕地非农化的重点区域, 耕地将逐渐向南部内陆地区转移。研究表明, 对耕地变化的动态稳定性进行验证可以有效保证CA-Markov模型的模拟精度, 赣榆区未来的耕地保护形势不容乐观, 应合理协调经济发展与耕地保护之间的关系, 保障社会、生态与粮食安全。

关键词:耕地变化; 动态稳定性; CA-Markov模型; 时空格局; 赣榆区

中图分类号: F301.21

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2024)02-0253-13

doi: 10.13254/j.jare.2023.0110

Spatio-temporal evolution characteristics of cultivated land based on dynamic stability verification and CA-Markov prediction: a case study of Ganyu District

ZHOU Yihu¹, FANG Tingting^{2*}, CHEN Zhen³

(1. College of Public Administration, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. School of Sociology and Population Studies, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: This study sought to clarify the importance of verifying the dynamic stability of cultivated land change and, on this basis, to predict cultivated land change in the “14th Five-Year Plan” target (2025) and long-term target years (2035) of Ganyu District. The aim was to provide reference data for relevant academic research and future cultivated land protection projects. The coefficient of variation of cultivated land, geographical concentration index, imbalance index, and trend analysis method were used. The dynamic stability of cultivated land change in Ganyu District was verified in three aspects: cultivated land quantity, spatial distribution, and spatial development trend. The future change in cultivated land under different policy scenarios was simulated by a CA-Markov model. The total amount of cultivated land in the Ganyu District continued to decline without major repetition or fluctuation. The spatial distribution of

收稿日期: 2023-02-28 录用日期: 2023-07-05

作者简介: 周翼虎(1989—), 男, 安徽亳州人, 博士研究生, 从事农村土地利用制度与政策研究。E-mail: zhouyihu86@126.com

*通信作者: 方婷婷 E-mail: ttfang@niglas.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(72004100); 江苏高校哲学社会科学研究项目(2021SJA0088)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (72004100); Philosophy and Social Sciences Foundation of the Higher Education Institutions of Jiangsu Province, China (2021SJA0088)

<http://www.aed.org.cn>

cultivated land was relatively balanced, and the spatial development trends of cultivated land occupation and supplementation were relatively continuous. On the whole, the changing process of cultivated land had high dynamic stability, consistent with the preconditions of the CA-Markov model. Under various policy scenarios, Ganyu District will still experience a rapid process of cultivated land conversion before 2025, and the rate of cultivated land reduction will slow by 2035. With regional advantages, the northern area of Ganyu District will be the key area of cultivated land conversion in the future, and cultivated land will gradually transfer to the southern inland area. Verifying the dynamic stability of cultivated land changes can effectively improve the simulation accuracy of the CA-Markov model. The future situation of cultivated land protection in Ganyu District is not optimistic. The relationship between economic development and cultivated land protection should be reasonably coordinated to ensure social, ecological, and food security.

Keywords: cultivated land change; dynamic stability; CA-Markov model; spatiotemporal pattern; Ganyu District

城镇化是我国当前及未来一段时间内社会经济发展的主要趋势,国家统计局数据显示,2009—2021年中国常住人口城镇化率已由48.34%提升至64.72%。高速的城镇化进程离不开土地的支撑,社会经济快速发展造成建设用地需求量巨大,而耕地则是建设用地扩张的最主要来源^[1]。因此,城镇化往往伴随着耕地非农化的快速转变,大量耕地从农业部门转移至非农业部门。这一方面为国民经济的全面发展提供了土地保障,对经济增长起到了重要作用;但另一方面也造成了生态环境退化、耕地数量减少及大量农民失地,严重威胁了我国粮食安全和社会稳定^[2]。我国是一个耕地资源相对短缺的国家,近年来,政府一直十分重视耕地保护工作,然而现行耕地保护制度取得的绩效有限,耕地减少的速度和规模并没有减缓^[3]。针对这一问题,《乡村振兴战略规划(2018—2022年)》中指出,未来应切实加强耕地保护和建设,严守耕地红线。2023年中央一号文件也指出,应加强耕地保护和用途管控,坚决守牢确保粮食安全。同时,在已经起步的“十四五”规划期间,随着社会经济的新一轮发展,对土地资源的需求必将迎来新的增长,如何协调经济发展与耕地保护之间的关系成为亟需解决的问题。鉴于此,研究耕地资源的时空变化特征对于控制城市建设用地扩张、合理有序开发土地资源、保障粮食安全、促进“十四五”规划和2035年远景目标的实现具有重要意义。

学术界对耕地变化方面的研究兴起于20世纪90年代,学者们从地理学、经济学、生态学等学科的视角出发,对耕地变化的现状^[4-5]、与社会经济发展的耦合关系^[1,6]、生态损益^[7-8]、非农化驱动力及调控^[9-10]等方面进行了深入的研究,取得了较为丰硕的成果。其中,耕地变化的时空演变属于土地利用变化的研究范畴,学者们较多地运用了元胞自动机(CA)^[11-12]、系统动力学模型(SD)^[13]、马尔可夫链(Markov)^[14]、CLUE-S

模型^[15-16]、空间Logistic模型^[17-18]等研究方法。而近年来,将元胞自动机与马尔可夫链相结合的CA-Markov模型更是得到了广泛应用和探索。CA-Markov模型结合了Markov链的时间维度分析优势和元胞自动机模型的空间维度分析能力,将空间邻域单元以及可能的空间分布转变融入到了Markov链中,使Markov链具有了空间预测能力^[19],既提高了对各类土地总量变化的预测精度,又可以有效地模拟土地利用格局的空间变化,在相关研究中取得了良好的效果^[20-21]。

然而,Markov过程是一个随机过程,其认为系统在 t 时点的状态仅与 $t-1$ 时点的状态有关,并以 $t-1$ 至 t 时段的状态变化规律为基础,对 $t+1$ 时点的系统状态进行预测。因此,这其中包含了一个十分重要的前提条件,即在 $t-1$ 至 t 的时间段内,系统的内部变化过程应是连续与稳定的,即在数量变化上持续增长或下降,在空间变化上持续集中于某一方向,各要素的转化在方向与幅度上不应存在较大的反复与波动。否则选取不同的时段作为参考,将可能得出完全不同的预测结果,为研究过程的准确性与科学性带来风险。陈会广等^[14]、汪佳莉等^[20]、龚文峰等^[22]均对这一观点进行了阐述,但并未进行实际验证;王友生等^[23]、赵冬玲等^[24]、李志明等^[25]则利用动态度模型对土地变化的剧烈程度进行了测算,在一定程度上起到了验证系统稳定性的作用,但该模型仅能揭示地类之间的变化数量与转换速度,不能反映空间分布上的变化情况与发展趋势,在验证系统稳定性方面仍有所欠缺;而其他多数学者在运用CA-Markov模型前则完全忽略了该问题。由于耕地变化与社会经济发展密切相关,在当前城镇化和社会经济高速发展的时期,产业结构调整、城市发展定位改变及人口流动等因素均可能导致某一地区的耕地规模在短时期内出现较大波动^[26-27]。在模型运用前,单纯默认研究期内土地变化过程较为稳定的想法过于简单。因此,在运用CA-Markov模型

前,对研究期内耕地变化的动态稳定性进行验证应是一个必不可少的过程,然而这在以往的研究中往往未被重视。

基于以上背景,本研究运用耕地面积变异系数、地理集中指数、不平衡指数及趋势分析法,从耕地数量、空间分布与空间发展趋势三个维度对案例地——江苏省连云港市赣榆区耕地变化的动态稳定性进行验证。并在该前提下,运用CA-Markov模型对案例地2025年(“十四五”目标年)及2035年(远景目标年)的耕地变化进行预测。本研究的主要目的包括两方面:一是强调验证动态稳定性的重要性,并为相关学术研究提供可借鉴的思路与方法;二是通过预测不同政策情境下的耕地变化结果为案例地未来的耕地保护工作提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与数据来源

赣榆区于2014年撤县建区,目前是江苏省连云港市三个主城区之一,位于苏鲁两省交界,江苏省东北部(34°50'N, 119°07'E),东濒黄海,北邻山东省日照市,西靠山东省临沂市,南接东海县与海州区,有新亚欧大陆桥“东方桥头堡”之称。境内属暖温带海洋性季风气候,地形西北高、东南低,地貌由西向东呈低山、丘陵、平原、滩涂式分布。境内矿产资源丰富,以石材、黄砂等品种居多。近年来,赣榆区社会经济发展迅速,截至2021年底,地区生产总值已达707.50亿元,较2020年增长8.30%。产业结构持续调整,第二、三产业占比较2020年分别提高1.30%、0.90%。全年完成粮食生产5.26×10⁵t,较2020年略有减少,与工业发展形成鲜明对比。可见,在地区城镇化、工业化发展过程中,资源、政策向二、三产业倾斜明显,具备耕地非农化典型地区的特征。

本研究所用数据来自江苏省自然资源厅提供的赣榆区2009、2012年及2016年土地利用变更调查数据,数据包含与赣榆区行政区划、土地利用现状等内容相关的SHP格式矢量图层,数据精度较高。

1.2 研究方法

根据赣榆区土地利用变更调查数据,将研究期分为2009—2012年与2012—2016年两个阶段,运用GIS手段提取各年份耕地图层进行叠加分析,并将两个阶段的耕地总量变化、空间分布情况及空间增减趋势进行对比,从而对整个研究期内赣榆区耕地变化的动态稳定性进行检验。

1.2.1 变异系数、地理集中指数与不平衡指数

研究表明,变异系数、地理集中指数与不平衡指数在分析某要素的空间分布方面具有良好的应用效果^[28-30]。本研究借鉴该方法,以赣榆区472个行政村为基本空间单元,对耕地的空间分布变化情况进行分析。变异系数又称“离散系数”,是概率分布离散程度的一个归一化量度,其计算公式为:

$$CV = \frac{\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (S_i - \mu)^2}}{\mu} \quad (1)$$

式中:CV为耕地面积变异系数;N为赣榆区行政村数量; S_i 为第*i*个行政村的耕地面积, hm²; μ 为所有行政村耕地面积的平均值, hm²。耕地面积变异系数越大,说明赣榆区各行政村之间的耕地面积差异越大,分布越不均衡。

地理集中指数是研究某要素在地域上集中程度的指标,其计算公式为:

$$G = 100 \times \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{S_i}{T} \right)^2} \quad (2)$$

式中:G为赣榆区耕地分布的地理集中指数;N为赣榆区行政村数量; S_i 为第*i*个行政村的耕地面积, hm²; T为整个赣榆区耕地面积总和, hm²。耕地地理集中指数越大,表明耕地越向个别行政村集中,在空间层面上分布越不均匀。

不平衡指数用来反映研究对象在不同层次或不同区域内分布的均衡程度,其计算公式为:

$$UI = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \frac{\sqrt{2}}{2} (Y_i - X_i)^2}{N}} \quad (3)$$

式中:UI为耕地分布不平衡指数;N为赣榆区行政村数量; Y_i 为第*i*个行政村的耕地面积与赣榆区耕地总面积的比值; X_i 为第*i*个行政村的面积与赣榆区总面积的比值。若不平衡指数较大,则表明两组数据之间欠均衡,耕地在行政村层面上的分布差异较大。

1.2.2 趋势分析法

趋势分析是利用数学曲面模拟地理要素在空间上变化趋势的一种数学方法,它能够集中地反映空间数据在大范围内的发展趋势,确定要素在空间上的分布规律及未来走向,是揭示面状区域上空间要素变化情况的理想工具,并在以往的研究中得到了广泛的应用^[31]。本研究运用该方法对赣榆区两个时间段内的耕地空间变化趋势进行对比分析,以验证不同时期的耕地变化在空间发展方向上是否具有连续性。

1.2.3 CA-Markov 模型

Markov 链预测土地利用类型变化的过程可用如下公式表示:

$$S_{t+1} = P \times S_t \quad (4)$$

式中: S_{t+1} 与 S_t 分别是 $t+1$ 和 t 时点的土地利用状态向量; P 是 t 至 $t+1$ 时间段内的土地利用类型转移概率矩阵, 该矩阵由各种土地利用类型互相转移的概率 p_{ij} 组成, 其计算公式为:

$$p_{ij} = \frac{A_{ij}}{\sum_{j=1}^N A_{ij}} \times 100\% \quad (5)$$

式中: p_{ij} 为土地利用类型由 i 转变为 j 的概率; N 为土地类型数量; A_{ij} 是 i 类土地转变为 j 类土地的面积, hm^2 。

元胞自动机的基本组成要素包括元胞空间、元胞单元尺寸、状态集合、状态转移规则、邻域范围等, 可用如下公式表示:

$$S_{t+1} = f(S_t, N_s) \quad (6)$$

式中: S_{t+1} 、 S_t 分别是 $t+1$ 和 t 时点的系统元胞状态结果; N_s 是元胞的邻域范围; f 是邻域范围内元胞单元相互作用的状态转移规则函数。

2 结果与分析

2.1 耕地变化的动态稳定性验证

2.1.1 耕地总量变化

2009—2016 年赣榆区耕地总量呈现不断下降的趋势。其中, 2009—2012 年赣榆区共占用耕地 469.35 hm^2 , 补充耕地 114.31 hm^2 , 耕地总量由 $71\,498.38 \text{ hm}^2$ 减少至 $71\,143.35 \text{ hm}^2$; 2012—2016 年赣榆区占用耕地 842.96 hm^2 , 补充耕地 762.52 hm^2 , 耕地总量进一步下降至 $71\,062.91 \text{ hm}^2$ 。整个研究期内耕地合计被占用 $1\,312.31 \text{ hm}^2$, 主要为耕地转为各类建设用地, 共导致耕地非农化 981.99 hm^2 , 占耕地占用总量的 74.84% 。其中, 以建制镇、村庄等为主体的城镇和住宅用地, 以及以公路用地为主体的交通运输用地是耕地非农化的主要流向, 两种地类分别占用耕地 644.00 、 252.48 hm^2 , 占耕地占用总量的 49.08% 、 19.24% 。而耕地转为其他农用地也是耕地减少的主要途径之一, 新增设施农用地占用耕地 304.58 hm^2 , 占耕地占用总量的 23.21% 。同时, 整个研究期内赣榆区共补充耕地 876.83 hm^2 。其中, 内陆滩涂与坑塘水面等水域是补充耕地的主要来源, 两类土地分别补充耕地 432.81 、 275.90 hm^2 , 占耕地补充总量的 49.37% 、 31.47% 。仅

有 70.12 hm^2 的建设用地复垦为耕地, 占耕地补充总量的 8.00% , 其中多数为工矿仓储用地。总体来看, 研究期内赣榆区耕地总量持续减少, 但由于耕地占补平衡及土地整治等方面工作的开展, 占用的耕地得到了一定的补充, 耕地减少的速率尚属稳定。

2.1.2 耕地变化的空间分布

将赣榆区总面积、各行政村面积及耕地面积等数据代入公式(1)~公式(3)进行测算, 结果如表 1 所示。

表 1 耕地面积变异系数、地理集中指数与不平衡指数

Table 1 Coefficient of variation, geographical concentration index and imbalance index of cultivated land

时点 Point of time	耕地面积变异系数 Coefficient of variation	耕地地理集中指数 Geographical concentration index	耕地不平衡指数 Imbalance index
2009	0.796 7	5.980 9	0.270 4
2012	0.800 1	5.990 8	0.270 7
2016	0.808 3	6.014 6	0.269 9

由表 1 可知, 2009—2016 年赣榆区耕地面积变异系数逐年升高, 但增幅不明显, 即各行政村间的耕地数量差异呈逐渐增大趋势, 但这种变动较为缓和。同时, 地理集中指数同样逐年升高, 即在耕地变化过程中, 耕地在空间分布上逐渐向个别行政村集中, 各村耕地面积差异逐渐变大, 与耕地面积变异系数所反映的情况相吻合, 但变化幅度同样较小。耕地不平衡指数则反映在将各行政村面积因素纳入考虑之后, 2009—2012 年赣榆区耕地分布的不平衡性略微增加, 但至研究期末年时, 这种不平衡局面得到了扭转, 不平衡指数降至基期年以下, 即研究期内的耕地增减变化使得面积较大的行政村拥有了更大面积的耕地, 但这种变化同样较为缓和。总体来看, 在以行政村为单元的空间层面上, 2009—2016 年赣榆区耕地面积变异系数、地理集中指数与不平衡指数的变化幅度均较小, 耕地分布没有出现较大的反复与波动, 可以认为耕地系统在空间分布上具有较强的动态稳定性。

2.1.3 耕地变化的空间趋势

在耕地占用趋势方面, 由空间趋势分析结果(图 1a 和图 1b)可以看出, 2009—2012 年赣榆区耕地占用趋势在东西向上表现为东高西低, 东部地区耕地占用量高于中、西部地区, 向东发展是耕地非农化的主要方向; 南北向上的占用趋势为南、北部地区略高于中部地区。2012—2016 年, 东西向上的耕地占用趋势基本不变, 东部地区的耕地占用量仍然高于中、西部地区; 同时, 南北向上南部地区的耕地占用量也依然

略高于中部地区,但北部地区在这一时段内的耕地占用量迅速增加,出现了北高南低的现象,向北发展是这一时期耕地非农化的主要方向。在耕地补充趋势方面,由图1c和图1d可以看出,2009—2012年赣榆区新补充耕地在东西向上表现为中间高、两端低,中部地区的耕地补充量显著高于东、西部地区;而南北向上的耕地补充趋势较为平缓,南、北部地区的耕地补充量略高于中部地区。2012—2016年赣榆区在东西向上的耕地补充趋势基本不变;在南北向上北部地区的耕地补充量也依然略高于中部地区,但南部地区耕地补充量却陡然提升,显著高于中、北部地区,向南发展成为这一时期补充耕地的主要方向。

通过趋势分析可以看出,赣榆区的耕地占用过程在两个时期内均呈现出由西南部向东北部逐渐增强的趋势,而耕地补充过程在两个时间段内的趋势也较为统一,仅在南部地区存在一些差异,整体变化趋势较为连续。结合耕地总量变化与空间分布变化结果可认为,2009—2016年赣榆区的耕地变化过程具有较高的动态稳定性,达到运用CA-Markov模型的前提

条件。

2.2 CA-Markov模型测算精度检验

赣榆区土地利用变更调查数据共包含29种用地类型,为进行CA-Markov测算,需将各种用地类型进行归纳,以提高预测准确性,以往研究通常将用地类型归纳为6~8种类别^[32]。根据GIS叠加分析结果,2009—2016年赣榆区耕地转出主要指向10类土地,耕地补充主要来源于14类土地。因此,根据国家《土地利用现状分类》(GB/T 21010—2017)标准,在前期数据处理过程中,将29种用地类型归纳为8种类别。其中,将耕地变化涉及的地类单独归纳分类,而将未涉及耕地变化的地类统一纳入其他建设用地、其他农用地与其他未利用地3个类别之中。重新分类的土地类别如表2所示。

以2009年为第一期、2012年为第二期,运用CA-Markov模型模拟赣榆区2016年土地利用情况,并与2016年实际土地利用数据进行对比,以验证研究方法和研究精度的可行性。为保证预测精度,排除人为主观因素的干扰,除设定坡度25°以上的地区禁止转

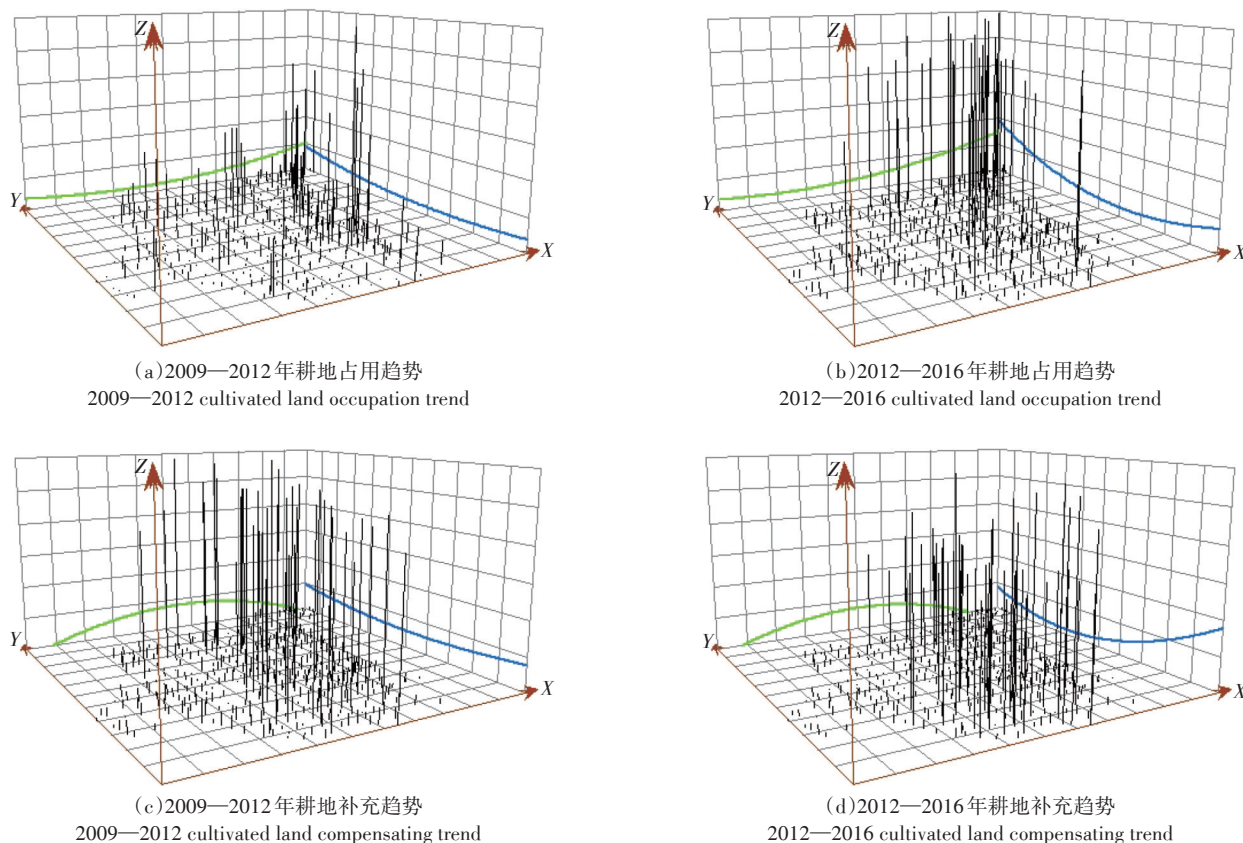


图1 2009—2016年研究区耕地占补趋势

Figure 1 Cultivated land occupation and compensation trend from 2009 to 2016

表2 土地类别归纳
Table 2 Summary of land types

地类编号 Land type number	归纳后地类 Land type after summarizing	来源地类 Source land type
C1	耕地	旱地、水田、水浇地
C2	工矿仓储用地	采矿用地
C3	城镇及住宅用地	城市、建制镇、村庄
C4	交通运输用地	公路用地、铁路用地、农村道路、港口码头用地
C5	水域及水利设施用地	内陆滩涂、坑塘水面、水工建筑用地、水库水面、沟渠、河流水面、沿海滩涂、湖泊水面
C6	其他建设用地	风景名胜及特殊用地
C7	其他农用地	茶园、果园、其他园地、设施农用地、田坎、有林地
C8	其他未利用地	其他草地、盐碱地、裸地

化为耕地外,本研究以 2009—2012 年赣榆区实际土地变化规律作为地类转化规则^[23]。模拟结果与实际情况的对比见图 2。

如表 3 所示,从地类面积上看,除工矿仓储用地与其他农用地外,2016 年赣榆区其余土地利用类型的模拟准确率均在 80% 以上。其中,2016 年赣榆区耕地实际面积 71 062.91 hm²,耕地模拟面积 61 625.72 hm²,耕地面积模拟准确率 86.72%,达到较高水平。而从空间分布上看,利用空间匹配分析求得赣榆区土地利用模拟图像与实际图像之间的 Kappa 值为 0.886 6。在空间匹配分析中,当 Kappa 值大于 0.75 时,表明两幅图像的一致性较高,空间分布误差较小;

而当 Kappa 值小于 0.40 时,表明两幅图片一致性较差,误差较大^[21]。因此,从数量和空间分布的角度判断,模拟过程具有较高的精确度与可信度,可用于对赣榆区 2025 年与 2035 年耕地变化情况的模拟预测。

2.3 不同政策情境下 2025 年与 2035 年耕地变化模拟

我国实行严格的土地用途管制制度,因此,土地利用类型的转变与宏观政策环境之间具有密不可分的联系。为凸显政策变化对土地利用的影响,本研究借鉴前人的政策情境划分方式与研究方法^[15-16,33-34],在模拟耕地变化的过程中分别设置自然发展、经济优先与耕地保护 3 种政策情境,并利用 IDRISI 平台中的 MCE 模块设定相应的地类转换规则,明确未来不同

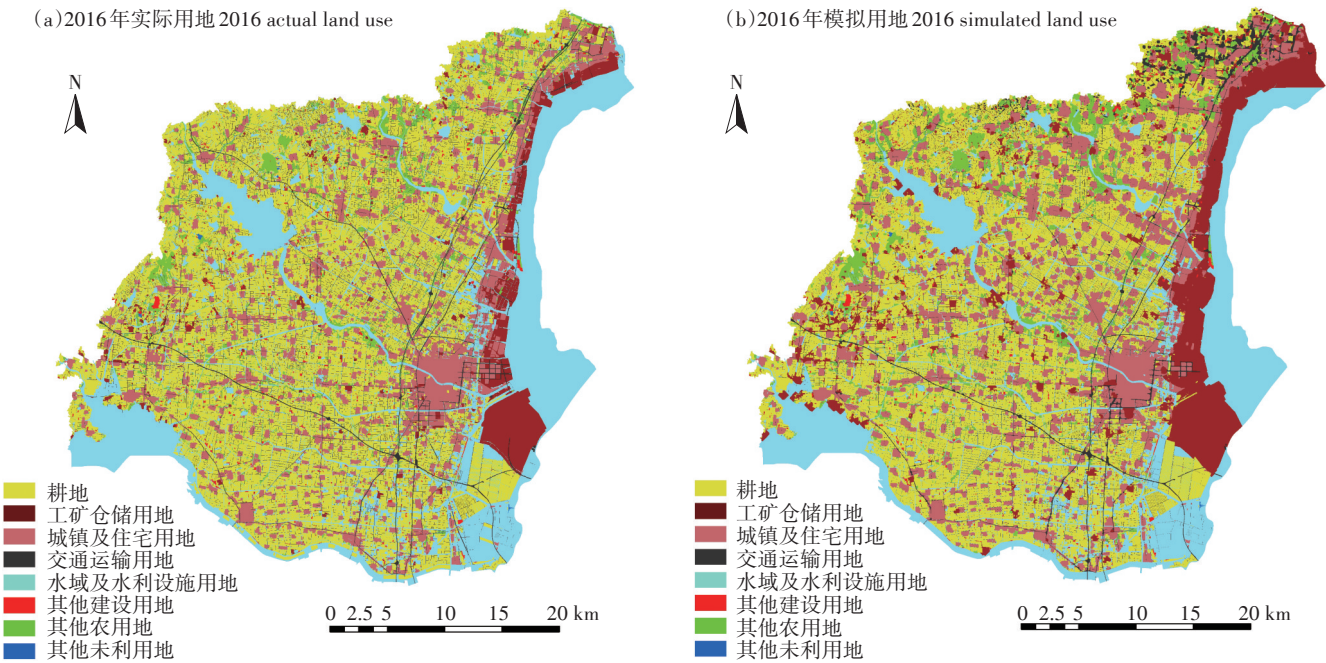


图2 赣榆区实际与模拟用地情况
Figure 2 Actual and simulated land use in Ganyu District

表3 2016年赣榆区各类土地实际面积与模拟面积

Table 3 Actual area and simulated area of various types of land use in Ganyu District in 2016

地类 Land use	实际面积 Actual area/hm ²	模拟面积 Simulated area/hm ²	面积匹配率 Area matching rate/%	空间匹配率(Kappa) Spatial matching rate
耕地	71 062.91	61 625.72	86.72	0.828 8
工矿仓储用地	6 563.27	14 320.73	45.83	0.402 5
城镇及住宅用地	22 309.90	27 068.36	82.42	0.808 5
交通运输用地	6 670.88	6 725.35	99.19	0.959 2
水域及水利设施用地	37 191.41	31 665.47	85.14	0.836 7
其他建设用地	1 560.33	1 390.60	89.12	0.853 6
其他农用地	6 024.87	8 590.47	70.13	0.686 7
其他未利用地	53.85	48.57	90.20	0.883 8

政策情境下耕地变化的发展趋势,从而为赣榆区的土地管理工作提供参考。

其中,自然发展情境遵循研究期内赣榆区土地利用变化的现有趋势,其模拟结果主要体现了在保持当前土地利用政策不变的情况下,赣榆区的耕地格局在2025年与2035年的变化结果。经济优先情境在自然发展趋势的基础上调整产生,在地类转换规则方面放松了耕地向工矿仓储用地、交通运输用地、城镇及住宅用地的转化限制,提升了耕地转出的概率,并相应地降低了上述各类建设用地向耕地转化的可能性。其模拟结果主要体现了在将城镇化与经济建设作为首要发展目标的情况下,赣榆区未来的耕地变化趋势。耕地保护情境同样以自然发展趋势为基础,但在地类转换规则上严格限制了工矿仓储用地、交通运输用地、城镇及住宅用地侵占耕地,并适当提升了各类建设用地向耕地转入的概率。该政策情境下的模拟结果可以体现在保障粮食安全、重视耕地保护的发展

目标下,赣榆区在“十四五”目标年与远景目标年的耕地变化情况。各政策情境下赣榆区耕地转入与转出概率如表4所示。

CA-Markov模型模拟结果显示,各情境下赣榆区耕地总量均有所下降(表5)。自然发展情境下耕地总量合计减少5 464.43 hm²,年平均增速为-0.40%。其中,2025年赣榆区耕地面积为66 217.29 hm²,较基期年减少4 845.62 hm²,占耕地总量的6.82%;至2035年,耕地面积进一步减少618.81 hm²,总量降至65 598.48 hm²,仅为基期年耕地总量的92.31%。经济优先情境下耕地总量下降趋势更为明显,2025年与2035年的耕地面积分别为63 344.07、62 354.55 hm²,分别较基期年减少7 718.84、8 708.36 hm²,分别占耕地总量的10.86%、12.25%,年平均增速为-0.64%。耕地保护情境下赣榆区耕地非农化速度有所放缓,但总体仍保持下降趋势,年平均增速为-0.28%。其中,2025年耕地面积为67 449.68 hm²,较基期年减少

表4 2025年与2035年赣榆区耕地转移概率

Table 4 Probability of farmland transfer in Ganyu District in 2025 and 2035

地类 Land use	耕地转入概率Probability of farmland transfer in						耕地转出概率Probability of farmland transfer out					
	2025			2035			2025			2035		
	自然发展 Natural evolution	经济优先 Economic priority	耕地保护 Farmland protection	自然发展 Natural evolution	经济优先 Economic priority	耕地保护 Farmland protection	自然发展 Natural evolution	经济优先 Economic priority	耕地保护 Farmland protection	自然发展 Natural evolution	经济优先 Economic priority	耕地保护 Farmland protection
耕地	0.878 7	0.851 9	0.905 5	0.855 7	0.824 0	0.887 4	0.878 7	0.851 9	0.905 5	0.855 7	0.824 0	0.887 4
工矿仓储用地	0.019 5	0.013 7	0.025 4	0.029 9	0.020 9	0.038 9	0.009 3	0.012 1	0.006 5	0.010 6	0.013 8	0.007 4
城镇及住宅用地	0.011 2	0.007 8	0.014 6	0.012 4	0.008 7	0.016 1	0.059 5	0.077 4	0.041 7	0.071 2	0.092 6	0.049 8
交通运输用地	0.017 4	0.012 2	0.022 6	0.019 7	0.013 8	0.025 6	0.023 5	0.030 6	0.016 5	0.028 1	0.036 5	0.019 7
水域及水利设施用地	0.059 3	0.059 3	0.059 3	0.082 3	0.082 3	0.082 3	0.000 9	0.000 9	0.000 9	0.001 3	0.001 3	0.001 3
其他建设用地	0.054 8	0.054 8	0.054 8	0.061 4	0.061 4	0.061 4	0.000 1	0.000 1	0.000 1	0.000 1	0.000 1	0.000 1
其他农用地	0.028 2	0.028 2	0.028 2	0.033 7	0.033 7	0.033 7	0.028 1	0.027 2	0.029 0	0.032 9	0.031 7	0.034 1
其他未利用地	0.115 4	0.115 4	0.115 4	0.164 6	0.164 6	0.164 6	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1

表5 不同政策情境下各类土地面积模拟结果(hm²)Table 5 Simulation results of areas of various land use types under different policy scenarios(hm²)

地类 Land use	2025			2035		
	自然发展 Natural evolution	经济优先 Economic priority	耕地保护 Farmland protection	自然发展 Natural evolution	经济优先 Economic priority	耕地保护 Farmland protection
耕地	66 217.29	63 344.07	67 449.68	65 598.48	62 354.55	67 222.36
工矿仓储用地	9 900.63	10 255.91	9 785.85	10 341.85	10 663.40	10 112.51
城镇及住宅用地	26 040.97	27 322.58	24 638.84	27 530.24	29 063.85	25 856.33
交通运输用地	8 629.71	9 924.09	8 851.73	9 175.07	10 617.58	9 339.38
水域及水利设施用地	31 754.99	31 685.34	31 714.34	29 648.60	29 607.01	29 633.02
其他建设用地	1 371.04	1 405.89	1 376.31	1 349.29	1 385.95	1 356.46
其他农用地	7 480.97	7 455.32	7 576.95	7 757.43	7 705.14	7 875.82
其他未利用地	43.66	44.22	43.72	40.04	39.94	41.53

3 613.23 hm²,占耕地总量的5.08%;至2035年,耕地面积进一步减少227.32 hm²,总量降为67 222.36 hm²,为基期年的94.60%。总体来看,2025年前赣榆区仍将经历一段耕地快速下降的阶段,而2025—2035年间耕地下降趋势将逐渐缓和。

耕地变化的空间特征如图3与图4所示。在不同时期、不同政策情境之下,耕地减少的重点区域均集中于赣榆北部地区。经GIS叠加分析后发现,该地区也是赣榆区耕地非农化的重点地区,大量耕地向工矿仓储用地、城镇及住宅用地、交通运输用地等各类建设用地转化。CA-Markov模拟结果显示,2035年上述3类建设用地面积在自然发展情境下将分别达到10 341.85、27 530.24 hm²和9 175.07 hm²,较基期年分别增长57.57%、23.40%和37.54%。其中,城镇及住宅用地与交通运输用地是耕地非农化的主要方向,两者分别占用耕地4 759.39 hm²和2 980.24 hm²,分别占耕地占用总量(10 676.00 hm²)的44.58%和27.92%。经济优先情境下耕地非农化的程度更为严重,至2035年耕地合计被占用12 499.93 hm²,其中52.62%的被占耕地转为城镇及住宅用地,25.57%转为交通运输用地,两者分别占用耕地6 577.58、3 195.93 hm²。耕地保护情境下耕地非农化程度有所下降,但仍有7 994.69 hm²耕地被占用。其中城镇及住宅用地占用耕地3 541.78 hm²,交通运输用地占用耕地1 997.81 hm²,分别占耕地占用总量的44.30%、24.99%。

与之相反的是,赣榆区新增耕地主要分布于中、南部地区。至2035年自然发展、经济优先与耕地保护情境下分别新增耕地5 211.58、4 391.57 hm²和5 766.28 hm²。其中,对沟渠、坑塘水面及河流水面等内陆水域的开发,以及对田间道路的复垦是新增耕地的主要来源。前者在3种政策情境下均补充耕地约3 100 hm²;后者

则在自然发展、经济优先与耕地保护情境下分别补充耕地1 783.62、1 012.72 hm²和2 201.03 hm²。

3 讨论

CA-Markov模型是研究土地利用变化的一种优良工具,但在研究时应充分考虑其运用的前提条件。研究期内土地系统的变化过程是否稳定对选择CA-Markov模型的科学性和合理性以及模拟结果的准确性等具有十分重要的影响,对地类变化的动态稳定性进行验证应是模拟前不可缺少的过程。本研究强调了这一观点,并利用变异系数、地理集中指数、不平衡指数与趋势分析等方法对案例地耕地变化过程的稳定程度进行了实际检验。在数量变化方面,本研究利用GIS叠加分析的验证过程与赵冬玲等^[24]、李志明等^[25]使用的动态度模型具有相似的效果,均可以对各自案例地的耕地总量变化速度进行有效检验,从速率的角度验证了土地系统演化的动态稳定程度。王友生等^[23]通过对比动态度模型和GIS叠加分析的测算结果,也认为两者具有相似的检验效果。同时,由于耕地变化过程存在数量与空间的双重维度,某一地区即使通过占补平衡、土地整治等手段在数量上维持了耕地变化的相对稳定,但其在空间分布上也可能出现较大差异,应在研究前纳入考虑范围。因此,本研究创新性地运用了空间分析方法对耕地的空间变化过程进行了分析,得出了研究期内耕地的空间分布变化与空间发展方向具有较高连续性的结论,符合运用CA-Markov模型的条件,对以往的研究体系形成了一定程度的补充。当然,在方法选择和验证效果方面,本研究仍存在一定的提升空间。如变异系数、地理集中指数与不平衡指数等方法需要以案例地的各个独立空间单元为基础进行测算,当空间单元的数量较少

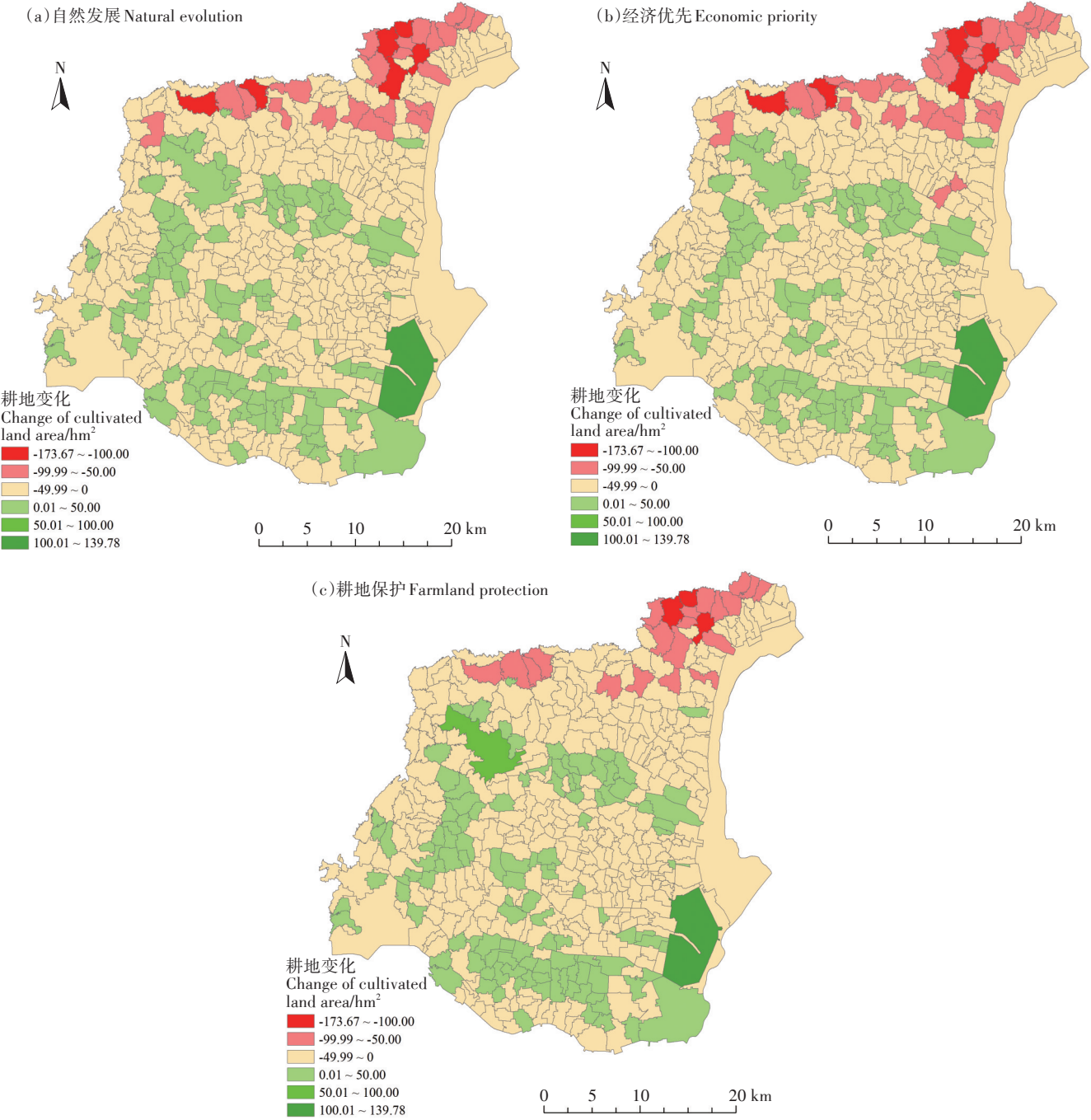


图3 不同政策情景下2025年赣榆区耕地变化空间特征

Figure 3 Spatial characteristics of cultivated land change in Ganyu District in 2025 under different policy scenarios

时,这些方法可能并不适用,测算结果也可能存在偏差;而趋势分析法虽然可以反映要素在空间上的变化方向与趋势,但其分析结果难以量化,导致在捕捉细微变化方面略显不足。因此,在验证土地变化动态稳定性方面,未来的研究可以针对这些不足在方法选择与创新上进行更深入的探讨。

同时,由CA-Markov模型分析结果可知,在不同

政策情境下,未来一段时间内赣榆区耕地下降的总体趋势均不会改变,这与许小娟等^[33]、权瑞松^[34]、张剑等^[35]的研究结果相似。虽然各学者选取的案例地区不同,但均证明了在工业化、城镇化的背景下,社会经济的高速发展是以侵占耕地为代价的现实。土地作为一种重要的生产要素,在各个生产部门中均具有举足轻重的地位,是各部门间竞争的主要对象。但由于

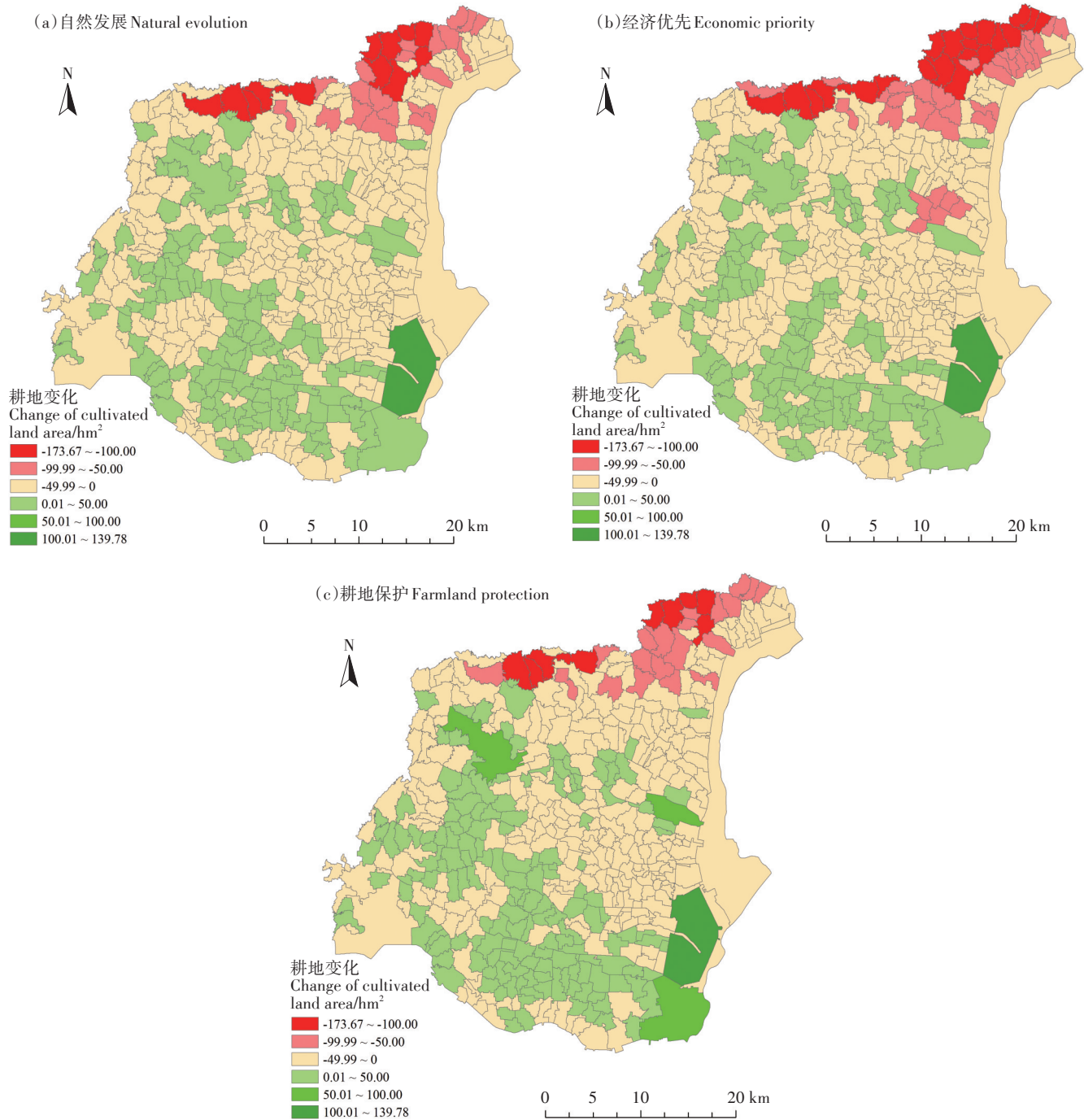


图4 不同政策情景下2035年赣榆区耕地变化空间特征

Figure 4 Spatial characteristics of cultivated land change in Ganyu District in 2035 under different policy scenarios

不同地类间经济产出的差异,在经济快速发展的阶段,土地资源将不可避免地由农业部门向非农部门转移。赣榆区作为近年来江苏省经济发展较快的地区之一,在经济建设过程中占用耕地在所难免。并且由耕地变化的空间特征分析可知,赣榆区未来耕地减少的重点区域将主要集中于行政区北部,该区域与山东省莒南县及日照市岚山区接壤,是苏鲁边界协同发展

的重点地区。在此背景下,为支持经济发展,该地区耕地向交通运输用地、城镇及住宅用地等地类的转化趋势明显,势必成为未来一段时间内耕地非农化的重点区域。而新增耕地的重点区域主要位于赣榆区中部与南部。中部地区以武强山村、前进村、八里场村及双雄村等行政村为主,通过田间道路、沟渠及坑塘水面复垦的方式补充耕地;南部地区则以青口盐场为

主,通过工矿用地复垦对耕地进行补充。总体来看,在赣榆区未来的发展过程中,耕地将逐渐从更具有区位优势北部地区向南部内陆地区转移。

综上所述,以耕地非农化为表象的经济增长过程往往伴随着耕地数量与分布的快速变化,与耕地保护之间产生矛盾。同时,快速的耕地非农化进程也会导致大量失地农民的产生,对乡村振兴与社会稳定造成影响。而过度开垦耕地则会对自然环境与生态系统造成破坏,严重威胁生态安全。因此,在未来的发展过程中,赣榆区应合理制定耕地非农化指标,实现各类用地在空间上的优化配置。在耕地非农化的重点地区,优先考虑失地农民的安置补偿工作,维护社会稳定;在补充耕地的重点地区,坚守耕地数量与质量并行的原则,利用土壤质量评价等方法严格把控新增耕地质量,避免耕地“占优补劣”现象的发生。同时,在生态保护方面利用立地指数等指标密切监控林地等生态用地的环境质量,尽量降低土地利用变化对生态环境造成的影响,从而达到经济发展、耕地保护与生态安全的共赢,保障“十四五”规划与2035远景目标的实现。

4 结论

本研究分析了赣榆区耕地变化的动态稳定性,并利用CA-Markov模型对不同政策情境下“十四五”目标年(2025年)与远景目标年(2035年)的耕地变化情况进行了模拟。主要结论如下:

(1)2009—2016年赣榆区耕地面积持续下降,未存在较大的反复与波动。耕地变异系数与地理集中度呈逐渐增大的趋势,耕地在空间分布上逐渐向个别行政村集中。不平衡指数先升后降,耕地变化使得面积较大的行政村拥有了更大面积的耕地,整体平衡性得到改善。不同时期内耕地占用与耕地补充的空间发展趋势均具有较高的趋同性,由西南向东北逐渐增强是耕地非农化的主要趋势,而由北向南则是耕地补充的主要发展方向。总体来看,赣榆区耕地的动态变化过程具有较高的稳定性,满足运用CA-Markov模型的前提条件。

(2)在不同政策情境下,未来赣榆区耕地总量均保持不断下降的趋势。其中,“十四五”期间耕地减少速度较快,“十四五”目标年至远景目标年间耕地减少速度放缓。向各类建设用地转化是耕地变化的主要方向,赣榆区工矿仓储用地、城镇及住宅用地与交通运输用地面积均有较大幅度的增长,耕地非农化倾向

明显,而新增耕地主要依赖于对内陆水域的开发和对田间道路的复垦。总体来看耕地后备资源有限,并可能存在生态安全风险。

(3)在耕地变化的空间分布方面,未来赣榆区耕地减少的重点区域主要集中于行政区北部,该区域具有与邻市协同发展的区位优势,耕地将逐渐向城镇及住宅用地与交通运输用地转化。而新增耕地的重点区域主要位于赣榆区中部与南部地区。总体来看,在未来的发展过程中,耕地将逐渐从更具有区位优势北部地区向南部内陆地区转移。

参考文献:

- [1] 张佰发,苗长虹.黄河流域土地利用时空格局演变及驱动力[J].资源科学,2020,42(3):460-473. ZHANG B F, MIAO C H. Spatiotemporal changes and driving forces of land use in the Yellow River Basin[J]. *Resources Science*, 2020, 42(3):460-473.
- [2] 张基凯,吴群,黄秀欣.耕地非农化对经济增长贡献的区域差异研究:基于山东省17个地级市面板数据的分析[J].资源科学,2010,32(5):959-969. ZHANG J K, WU Q, HUANG X X. A study on regional differences in contribution of cultivated land conversion to economic growth based on panel data analysis of 17 cities in Shandong Province[J]. *Resources Science*, 2010, 32(5):959-969.
- [3] 范辉,刘卫东,吴泽斌.河南省县域耕地非农化的时空演变:基于水系流域的视角[J].水土保持通报,2014,34(1):207-213. FAN H, LIU W D, WU Z B. Spatial-temporal changes of arable land non-agriculture at county scale in Henan Province: from the perspective of hydrologic basin[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, 34(1):207-213.
- [4] 马才学,赵利利,柯新利.湖北省耕地非农化压力的时空演变格局[J].长江流域资源与环境,2016,25(1):71-78. MA C X, ZHAO L L, KE X L. Temporal spatial variation of the pressure of cropland non-agriculturalization in Hubei Province[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(1):71-78.
- [5] 任平,吴涛,周介铭.耕地非农化的空间过程与扩散路径研究:以成都市龙泉驿区为例[J].中国土地科学,2015(12):68-73. REN P, WU T, ZHOU J M. Study on the spatial pattern and diffusion path of cultivated land conversion: a case study in Chengdu Longquanyi District[J]. *China Land Science*, 2015(12):68-73.
- [6] 许恒周,金晶.耕地非农化与区域经济增长的因果关系和耦合协调性分析:基于中国省际面板数据的实证研究[J].公共管理学报,2011(3):69-77. XU H Z, JIN J. Analysis on coupling degree and causality between farmlands conversion and regional economic growth: based on China provincial panel data[J]. *Journal of Public Management*, 2011(3):69-77.
- [7] 杨文杰,刘丹,巩前文.2001—2016年耕地非农化过程中农业生态服务价值损失估算及其省域差异[J].经济地理,2019(3):201-209. YANG W J, LIU D, GONG Q W. Estimation loss of agroecosystem service value in farmland conversion and its provincial difference in 2001—2016[J]. *Economic Geography*, 2019(3):201-209.

- [8] 李国敏, 卢珂, 黄烈佳. 主体权益下耕地非农化价值损失补偿的反思与重构[J]. 中国人口·资源与环境, 2017(12): 140-148. LI G M, LU K, HUANG L J. Reflection and reconstruction of cultivated land conversion value loss compensation under the subject rights[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2017(12): 140-148.
- [9] 苑韶峰, 杨丽霞, 杨桂山. 耕地非农化的社会经济驱动因素异质性研究: 基于STIRPAT和GWR模型的实证分析[J]. 经济地理, 2013, 33(5): 137-143. YUAN S F, YANG L X, YANG G S. The spatial heterogeneity of socio-economic driving factors of cultivated land conversion: a case based on STIRPAT and GWR models[J]. *Economic Geography*, 2013, 33(5): 137-143.
- [10] 张孝宇, 赖宗裕, 张安录. 基于地块尺度的耕地非农化驱动力空间异质性研究: 以武汉市为例[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(6): 994-1002. ZHANG X Y, LAI Z Y, ZHANG A L. Spatial heterogeneity in driving forces of farmland conversion based on patch scale: a case study of Wuhan City[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(6): 994-1002.
- [11] WICKRAMASURIYA R C, BREGT A K, DELDEN H V, et al. The dynamics of shifting cultivation captured in an extended constrained cellular automata land use model[J]. *Ecological Modelling*, 2009, 220(18): 2302-2309.
- [12] 杨俊, 解鹏, 席建超. 基于元胞自动机模型的土地利用变化模拟: 以大连经济技术开发区为例[J]. 地理学报, 2015, 70(3): 461-475. YANG J, XIE P, XI J C. LUCC simulation based on the cellular automata simulation: a case study of Dalian economic and technological development zone[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(3): 461-475.
- [13] 徐春堂. 生态城市土地利用系统的系统动力学分析[J]. 中国土地科学, 2008(8): 20-25. XU C T. Analysis on systematic dynamics of land use system in eco-cities[J]. *China Land Science*, 2008(8): 20-25.
- [14] 陈会广, 吕悦. 基于机会成本与Markov链的耕地保护补偿基金测算: 以江苏省徐州市为例[J]. 资源科学, 2015, 37(1): 17-27. CHEN H G, LÜ Y. Preservation compensation accounting for farmland based on opportunity costs and Markov chains: a case study on Xuzhou City[J]. *Resources Science*, 2015, 37(1): 17-27.
- [15] 郭延凤, 于秀波, 姜鲁光, 等. 基于CLUE模型的2030年江西省土地利用变化情景分析[J]. 地理研究, 2012, 31(6): 1016-1028. GUO Y F, YU X B, JIANG L G, et al. Scenarios analysis of land use change based on CLUE model in Jiangxi Province by 2030[J]. *Geographical Research*, 2012, 31(6): 1016-1028.
- [16] 许小亮, 李鑫, 肖长江, 等. 基于CLUE-S模型的不同情景下区域土地利用布局优化[J]. 生态学报, 2016, 36(17): 5401-5410. XU X L, LI X, XIAO C J, et al. Land use layout optimization under different scenarios by using the CLUE-S model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(17): 5401-5410.
- [17] 邵一希, 李满春, 陈振杰, 等. 地理加权回归在区域土地利用格局模拟中的应用: 以常州市孟河镇为例[J]. 地理科学, 2010, 30(1): 92-97. SHAO Y X, LI M C, CHEN Z J, et al. Simulation on regional spatial land use patterns using geographically weighted regression: a case study of Menghe Town, Changzhou[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2010, 30(1): 92-97.
- [18] 吴桂平, 曾永年, 邹滨, 等. Auto-Logistic方法在土地利用格局模拟中的应用: 以张家界市永定区为例[J]. 地理学报, 2008(2): 156-164. WU G P, ZENG Y N, ZOU B, et al. Simulation on spatial land use patterns using auto-logistic method: a case study of Yongding County, Zhangjiajie[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2008(2): 156-164.
- [19] MEMARIAN H, BALASUNDRAM S K, TALIB J B, et al. Validation of CA-Markov for simulation of land use and cover change in the Langkat Basin, Malaysia[J]. *Journal of Geographic Information System*, 2012, 4(6): 542-554.
- [20] 汪佳莉, 吴国平, 范庆亚, 等. 基于CA-Markov模型的山东省临沂市土地利用格局变化研究及预测[J]. 水土保持研究, 2015, 22(1): 212-216. WANG J L, WU G P, FAN Q Y, et al. Change and prediction of the land use in Linyi City, Shandong Province, based on CA-Markov model[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(1): 212-216.
- [21] 胡碧松, 张涵玥. 基于CA-Markov模型的鄱阳湖区土地利用变化模拟研究[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(6): 32-44. HU B S, ZHANG H Y. Simulation of land-use change in Poyang Lake region based on CA-Markov model[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(6): 32-44.
- [22] 龚文峰, 袁力, 范文义. 基于CA-Markov的哈尔滨市土地利用变化及预测[J]. 农业工程学报, 2012, 28(14): 216-222. GONG W F, YUAN L, FAN W Y. Dynamic change and prediction of land use in Harbin City based on CA-Markov model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(14): 216-222.
- [23] 王友生, 余新晓, 贺康宁, 等. 基于CA-Markov模型的藉河流域土地利用变化动态模拟[J]. 农业工程学报, 2011, 27(12): 330-336, 442. WANG Y S, YU X X, HE K N, et al. Dynamic simulation of land use change in Jihe watershed based on CA-Markov model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(12): 330-336, 442.
- [24] 赵冬玲, 杜萌, 杨建宇, 等. 基于CA-Markov模型的土地利用演化模拟预测研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 278-285. ZHAO D L, DU M, YANG J Y, et al. Simulation and forecast study of land use change based on CA-Markov model[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(3): 278-285.
- [25] 李志明, 宋戈, 鲁帅, 等. 基于CA-Markov模型的哈尔滨市土地利用变化预测研究[J]. 中国农业资源与区划, 2017, 38(12): 41-48. LI Z M, SONG G, LU S, et al. Change and prediction of the land use in Harbin City based on CA-Markov model[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2017, 38(12): 41-48.
- [26] 袁晓妮, 鲁春阳, 吕开云, 等. 我国耕地非农化研究进展及展望[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(1): 128-133. YUAN X N, LU C Y, LÜ K Y, et al. Research progress and prospect of non-agriculturalization of arable land in China[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2019, 40(1): 128-133.
- [27] 叶宇航. 我国耕地非农化的驱动因素研究[J]. 科学决策, 2015(9): 33-50. YE Y H. The analysis of drivers of our country's cultivated land conversion[J]. *Scientific Decision Making*, 2015(9): 33-50.
- [28] 宋成舜, 谈兵, 韩冰华, 等. 基于变异系数TOPSIS法的土地利用效益测度研究: 以武汉城市圈为例[J]. 水土保持研究, 2015, 22(1):

- 286-291. SONG C S, TAN B, HAN B H, et al. Comprehensive evaluation of land use benefits based on the variance coefficient: TOPSIS model in Wuhan metropolitan area[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(1):286-291.
- [29] 张定, 曹卫东, 范娇娇, 等. 长三角城市物流发展效率的时空格局演化特征与机制[J]. *经济地理*, 2014, 34(8):103-110. ZHANG D, CAO W D, FAN J J, et al. The spatio-temporal evolution characteristics and mechanism of Yangtze River Delta city logistics development efficiency[J]. *Economic Geography*, 2014, 34(8):103-110.
- [30] 熊鹰, 孙维筠, 汪敏, 等. 长株潭城市群水资源与经济发展要素的时空匹配[J]. *经济地理*, 2019, 39(1):88-95. XIONG Y, SUN W J, WANG M, et al. Spatio-temporal matching between water resource and economic development elements in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration[J]. *Economic Geography*, 2019, 39(1):88-95.
- [31] 狄乾斌, 韩帅帅, 韩增林. 中国地级以上城市经济承载力的空间格局[J]. *地理研究*, 2016, 35(2):337-352. DI Q B, HAN S S, HAN Z L. Spatial pattern of economic carrying capacity of cities at prefecture level and above in China[J]. *Geographical Research*, 2016, 35(2):337-352.
- [32] 张晓娟, 周启刚, 王兆林. 基于MCE-CA-Markov的三峡库区土地利用演变模拟及预测[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(19):268-277.
- ZHANG X J, ZHOU Q G, WANG Z L. Simulation and prediction of land use change in Three Gorges Reservoir area based on MCE-CA-Markov[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(19):268-277.
- [33] 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. 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.
- [34] 权瑞松. 基于情景模拟的上海土地利用变化预测及其水文效应[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(9):1552-1562. QUAN R S. Prediction of land use change and its hydrological effect in Shanghai based on scenario simulation[J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(9):1552-1562.
- [35] 张剑, 许鑫, 隋艳晖. 海洋经济驱动下的海岸带土地利用景观格局演变研究: 基于CA-Markov模型的模拟预测[J]. *经济问题*, 2020(3):100-104. ZHANG J, XU X, SUI Y H. Evolution of land-use landscape pattern in coastal zone driven by marine economy: simulation and prediction based on CA-Markov model[J]. *On Economic Problems*, 2020(3):100-104.