

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.03.041.

施釉超, 金晓斌, 罗秀丽, 等. 快速城市化地区耕地功能性流失测度评价与实证分析[J]. 水土保持研究, 2024, 31(3): 443-453.

Shi Youchao, Jin Xiaobin, Luo Xiuli, et al. Assessment and Case Study of Functional Loss of Cultivated Land in Rapidly Urbanizing Areas[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(3): 443-453.

# 快速城市化地区耕地功能性流失测度评价与实证分析

施釉超<sup>1</sup>, 金晓斌<sup>1,2</sup>, 罗秀丽<sup>1</sup>, 梁坤宇<sup>1</sup>, 周寅康<sup>1,2</sup>

(1. 南京大学 地理与海洋科学学院, 南京 210023; 2. 自然资源部海岸带开发与保护重点实验室, 南京 210023)

**摘要:** [目的] 揭示快速城市化发展下耕地功能性流失现象的阶段性特征, 探讨流失类型和流失等级的时空格局与管控策略, 为优化区域耕地保护、保障粮食安全提供思路借鉴。 [方法] 基于快速城市化地区耕地功能性流失的类型特征解析, 从“用途—产能—储量”三维视角构建其综合测度体系, 监测耕地功能的流失程度并预测流失风险, 进一步针对各级流失区域提出管控策略, 以江苏省江阴市为研究区开展了实证研究。 [结果] (1) 统筹考虑耕地功能流失的阶段性特征, 以此划分耕地功能性流失的主要类型, 探索定量表征快速城市化进程下耕地功能性流失程度和风险的方法, 对缓解耕地保护与经济发展冲突具有重要理论支撑。(2) 江阴市用途流失维中种植非粮食作物面积占比最大, 共涉及 267 个村; 产能流失维涉及的村域较少, 仅 59 个村; 储量流失中, 中低风险类型区涉及的村域较多且数量相当, 分别为 104 个村和 115 个村。(3) 基于综合评价体系, 江阴市村域中二级流失占比最大(71.17%), 在未来发展中需对不同流失程度实施完善农业建设、优化农业空间布局、加强流失风险监测等差异化治理策略。 [结论] 耕地功能性流失现象在发生时间、受干扰因素和表现形式等方面存在阶段性特征, 其时空格局在分维和综合维度上各具差异, 因地施策可为促进区域耕地保护与利用, 完善耕地功能风险监测与预警, 进而优化国土空间合理布局等提供理论支撑。

**关键词:** 耕地; 功能性流失; 多维测度; 城市化; 江阴市

中图分类号: F323.211

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)03-0443-11

## Assessment and Case Study of Functional Loss of Cultivated Land in Rapidly Urbanizing Areas

Shi Youchao<sup>1</sup>, Jin Xiaobin<sup>1,2</sup>, Luo Xiuli<sup>1</sup>, Liang Kunyu<sup>1</sup>, Zhou Yinkang<sup>1,2</sup>

(1. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

2. Key Laboratory of Coastal Zone Exploitation and Protection, Ministry of Natural Resources, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** [Objective] The aim of this study is to investigate the spatiotemporal dynamics, mitigation strategies and the evolving characteristics of the cultivated land function loss under rapid urbanization, which is pivotal for enhancing regional farmland conservation and guaranteeing food security. [Methods] This study developed a comprehensive evaluation framework from the tri-dimensional perspective of ‘use-capacity-reserve’. This was built upon a functional loss typology analysis for cultivated lands in swiftly urbanizing areas. This framework gauged the extent of functional loss and anticipates associated risks. Specific control measures tailored to each loss level were also suggested. Jiangyin, a county-level city in Jiangsu Province, was used as a case study. [Results] (1) Recognizing the evolving nature of cultivated land’s functional loss, we classified its primary types and derived quantitative tools for measuring its extent and associated risks during rapid urbanization, offering vital theoretical underpinnings to harmonize farmland conservation with economic progress. (2) In Jiangyin City, a significant portion of non-food crops is cultivated on lands that

收稿日期: 2023-08-15

修回日期: 2023-09-16

资助项目: 国家自然科学基金项目(41971234; 41971235)

第一作者: 施釉超(2000—), 女, 山西阳泉人, 硕士研究生, 主要研究方向为耕地保护与粮食安全。E-mail: youchao\_shi@163.com

通信作者: 金晓斌(1974—), 男, 甘肃兰州人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为土地利用与国土整治。E-mail: jinxb@nju.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

have lost their original function, spanning 267 villages. Production capacity loss is limited to 59 villages. With respect to reserve loss, medium and low-risk categories impact 104 and 115 villages, respectively. (3) According to our evaluation framework, Jiangyin experienced a predominant secondary level function loss, affecting 71.17% of its villages. Forward-looking strategies, including agricultural infrastructure enhancement, agricultural spatial layout optimization, and risk monitoring augmentation, must be tailored to varying loss degrees. [Conclusion] The phenomenon of functional loss in arable land exhibits stage-specific characteristics in terms of occurrence time, influencing factors, and manifestations. Its spatiotemporal patterns vary in both separate and integrated dimensions. The tailored strategies can provide decision-making support for promoting regional cultivated land protection and utilization, improving monitoring and early warning systems for functional risks, and optimizing space layout of national territory.

**Keywords:** cultivated land; functional loss; multidimensional measure; urbanization; Jiangyin City

中国高度重视粮食安全,通过自上而下的制度引导、农业机械化水平的提升和作物品种的改良,我国粮食总产量和人均粮食产量均实现大幅增长<sup>[1-2]</sup>,但为满足生育政策调整、人口老龄化、膳食结构不断改善背景下庞大人口的粮食供应仍面临巨大挑战<sup>[3-4]</sup>。为保障粮食安全的可持续性需不断优化耕地利用策略,才能进一步提升耕地资源效率<sup>[5-6]</sup>,而不合理的利用方式将造成耕地数量减少、质量下降和生态退化等问题<sup>[7]</sup>,由此带来的耕地功能性流失现象严重威胁着耕地的资源安全。在快速城市化背景下,农村劳动力务农成本的提高和土地利用经济效益的驱动使耕地撂荒、边际化、非粮化引发的耕地功能性流失现象日益凸显<sup>[8-9]</sup>。因此,科学认知并合理划分耕地功能性流失的主要类型,测度流失程度和时空格局特征,是我国应对耕地保护与经济发展冲突的迫切需要和推进可持续耕地利用需直面的现实问题,对促社会经济发展与保障粮食安全具有重要意义。

耕地功能性流失是指耕地的生产、生态和景观文化等基本功能以及就业保障等耕地衍生功能全部或部分退化甚至丧失的现象<sup>[10]</sup>。造成该现象的原因已经受到学界的广泛关注,主要涉及耕地细碎化<sup>[11-12]</sup>、土壤侵蚀<sup>[13]</sup>、不合理的农业生产方式<sup>[14]</sup>、城市扩张<sup>[15-17]</sup>和自然灾害<sup>[18]</sup>等方面。而耕地功能性流失具有动态性、复杂性、多样性等特征<sup>[10]</sup>,耕地的非农化<sup>[19]</sup>、非粮化<sup>[20]</sup>、过度利用化与边际化等<sup>[21]</sup>对耕地功能的干扰不容忽视。已有学者发现耕地转换为建设用地或农村宅基地后质量与生态受到严重破坏,其不再是生产系统、生态系统的基本要素、景观文化载体,耕地的粮食生产功能、生态服务及其他衍生功能完全丧失<sup>[22]</sup>。亦有研究人员发现非粮化耕地相较于种植粮食作物的耕地,化肥、农药等施用量明显增加,将不利于粮食安全与生态安全<sup>[23]</sup>。此外,通过大量施肥提升粮食产量的新型农业经营主体行为将造成

耕地质量和生态的进一步退化<sup>[24]</sup>。虽有观点认为在生态脆弱地区的边际耕地,抛荒能缓解其土地和生态压力,但面对人均耕地资源少、坡耕地比重大的基本国情,大量耕地长期抛荒将严重威胁粮食安全,同时伴随乡村旅游产业的发展,耕地撂荒造成农业景观的退化和村庄的衰败,也会引发传统农耕文化和美学价值的流失<sup>[25]</sup>。总体上,现有研究对耕地功能性流失的原因进行了深入分析,并对各种耕地功能性流失现象进行了探讨,但较多基于单一年份截面数据的静态解析,对耕地功能性流失的程度仍缺少长时段的定量测量,难以有效识别和监测各区域耕地功能性流失的状况,对区域风险的预警仍待加强。而在当前快速城市化和粮食需求日益增大的背景下,测度耕地功能性流失程度有助于因地制宜地制定耕地保护策略,从而保障粮食安全和生态安全。

耕地作为农业生产的基本物质资料,受人类影响最为广泛和深刻,耕地呈现出的流失特征是人类直接或间接干扰的产物,且流失类型存在一定的阶段性。这种阶段性不仅体现在人类对耕地利用方式的历史干扰(非粮化、撂荒等)造成的耕地用途流失,亦体现在人类对耕地利用强度的过程干扰(播种季度减少、农药化肥过度使用等)造成的耕地产能流失,还体现在人类对耕地未来利用选择的干扰(耕地地类转换等)造成的耕地储量流失。因此,立足耕地功能性流失的主要类型,从“用途—产能—储量”三维视角测度耕地已经发生、正在发生和即将发生功能性流失的程度,并依据综合流失等级提出针对性的管控策略,可为识别区域耕地资源状况,监测和预警耕地功能性流失风险提供科学依据,也为进一步优化耕地利用方向提供思路借鉴。

新世纪以来,我国城市化率以每年超过一个百分点的速率快速推进,全国城市建设用地面积由2000年的22 113.7 km<sup>2</sup>激增至2021年的62 420.5 km<sup>2</sup>。

这一特征在经济发达区表现得更为突出,近20年江苏省城市建设用地增长近3倍。面向区域高质量发展的目标,快速城市化发展带来的耕地用途转变、产能降低和储量减少等问题,对耕地保护提出更高的要求。江苏省江阴市作为中国乡镇企业的发源地、苏南模式的典型代表,一直蝉联全国百强县前三位,2021年城镇化率达到74.90%。近20年来粮食作物总播种面积减少415.5 km<sup>2</sup>,粮食作物总产量由2000年38.94万t减少至2021年13.05万t,如何在推进城市化发展的同时,保证粮食产量的稳定补给至关重要。鉴于此,本研究基于对快速城市化地区耕地功能性流失类型和特征的解析,以江阴市为研究区,从“用途—产能—储量”多维视角定量测度各村域耕地功能性流失的程度和风险等级并提出分级管控策略,以期评估区域耕地功能特征状况、优化国土空间合理布局等方面提供理论支撑。

## 1 耕地功能性流失

### 1.1 内涵解析

耕地是在自然资源要素和人为活动的共同作用下,以农业生产为核心,兼具生活、生态、文化等多重功能的复杂综合体。受资源本底条件、个体选择偏好、利用管理方式等影响,对耕地功能造成的干扰程度和效果不同。本研究从耕地已经发生、正在发生和即将发生功能性流失的阶段性特征入手,划分耕地功能性流失(Functional loss of cultivated land, FLCL)的主要表现类型,具体包括由于过去自然或人为因素影响造成耕地用途发生改变造成的流失、耕地利用过程中因减少劳动力投入或增加化肥施用的非可持续利用方式造成的耕地产能流失,以及耕地资源未来面临被其他土地类型占用的储量流失。

(1) 耕地用途流失,即耕地利用类型发生转变。伴随着农户生计分化和经济利益驱动,从事粮食生产的新型农业经营主体不愿投资改善地力,加之劳动力务农机会成本的提高使部分耕地被抛荒、撂荒。此外,一些经营主体违规在耕地种树、挖塘,工商资本流转耕地改种非粮食作物等,导致粮食播种面积降低,耕地的粮食生产能力受到直接影响。

(2) 耕地产能流失,即种粮耕地的产能发生下降。城乡经济差距带来农村劳动力外迁,导致乡村年轻劳动力缺乏。受劳动能力和投入意愿的影响,即便维持了“耕地农作”,部分地区也出现双季改为单季种植或选择田间管理难度小、投入强度低的作物类型,耕地利用强度逐渐弱化,造成耕地产能降低。此外,由于依靠化肥提升粮食产量的边际技术替代率递减,为维持高产而

过量施用化肥的方式造成病虫害滋生,加之高强度的投入产出使得耕地土壤养分失衡、板结、酸化,造成耕地质量不断下降,严重影响耕地产能。

(3) 耕地储量流失,即耕地储量潜在的流失风险。在快速城市化进程中,城市建设用地需求仍较高,而优质耕地大多位于城乡周边、交通要道附近,伴随着经济增长与耕地保护的矛盾日益加剧,耕地被占用的风险不断增强。

耕地基础要素涉及自然资源和人文因素两个方面,相关因素与耕地生产功能、生态功能、经济社会功能和景观文化功能等多功能发挥存在着复杂的联系,若缺乏积极引导和有效管控,将造成用途流失、产能流失、储量流失等类型的耕地功能性流失,相关作用关系见图1。

### 1.2 测度方法

立足“数量—质量—生态”三位一体的耕地保护内涵,以及生产、生态、经济社会、景观文化等耕地多功能的理念,从耕地功能性流失的内涵出发,结合相关类型特征,可构建“用途—产能—储量”综合评价体系,对区域耕地功能性流失程度进行定量测量。

1.2.1 用途流失提取 耕地利用类型的变化间接反映社会发展需求的变化,在居民膳食结构调整、种粮效益较低、农村劳动力短缺等多重要素的叠加影响下,耕地用途流失现象显著,实践中表现出耕地撂荒、边际化、非粮化等。

第三次全国国土调查中增加了耕地、种植园用地、草地等地类的细化调查标注,不再新认定可调整地类,对实地现状为非耕地且经所在县级相关部门评估认为仍可恢复为耕地的,继续保留可调整地类属性,为深化区域耕地资源认知提供了基数数据。

本研究基于三调成果,通过提取以下两类数据定量指示耕地显性功能流失类型:(1) 地类名称为耕地(01),种植属性为“未耕种(WG)<sub>x<sub>1</sub></sub>”“种植非粮食作物(FLS)<sub>x<sub>2</sub></sub>”的地类图斑,用以指示“撂荒和边际化”“非粮化”的现状。(2) 地类名称为园地(02)、林地(03)或其他农用地,种植属性标注为“工程恢复(GCHF)<sub>x<sub>3</sub></sub>”“即可恢复(JKHF)<sub>x<sub>4</sub></sub>”等的可调整地类图斑,用以指示“非耕地地类待恢复”的现状。

1.2.2 产能流失测算 耕地产能是耕地生产功能的直接体现,其能力高低和状态稳定是判断耕地功能发挥的基础。通过建立基于植被指数的遥感估产模型,利用遥感影像光谱信息反演植被指数,可建立植被指数与产量的关系模型。

为刻画因复种指数减低、单季种粮弱化和双季粮食产量降低为主的半显性耕地功能性流失状况,本研究借



鉴已有研究<sup>[26]</sup>,利用 MODIS 反射率数据,形成耕地区 EVI 数据集,建立作物 EVI 生长曲线,结合二次差分法

和阈值法求取耕地复种指数(Multiple Crop Index, MCI)及作物最优生长时长(Most Active Days, MAD)。

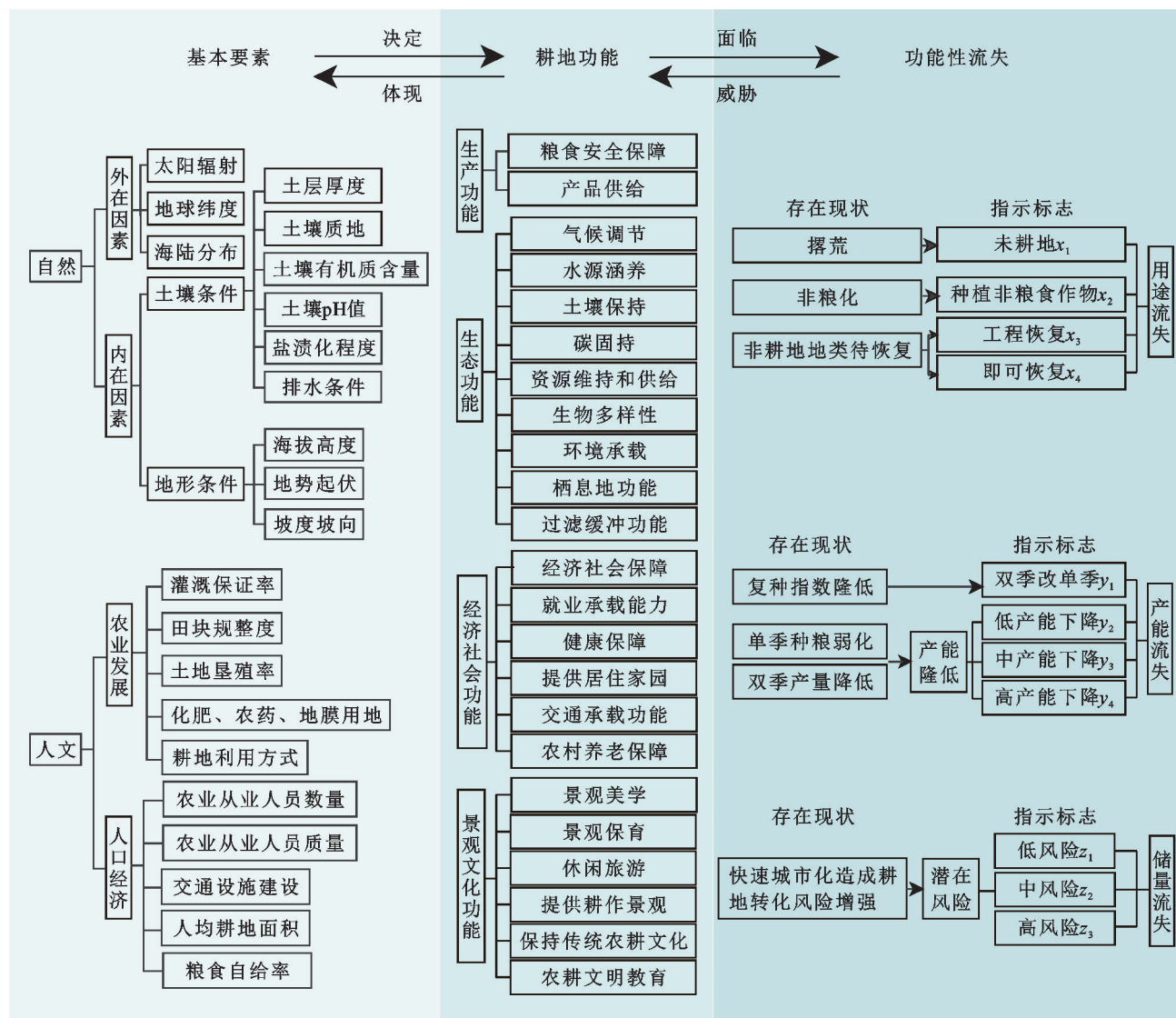


图 1 耕地资源“要素—功能”解析与耕地功能性流失认知

Fig. 1 Analysis on 'element-function' of cultivated land resources and functional loss of cultivated land's cognition

基于作物 MCI,将研究期末期单季作物覆盖面积与研究期初期双季作物覆盖面积进行迭置处理,获得双季改单季种植的范围  $y_1$ 。基于作物 MAD 采用差值法和回归分析求取耕地单季和双季作物产能变化过程 and 变化趋势,用以指示耕地产能流失状况,计算公式如下:

$$MAD = \sum_{j=1}^n 1 \{y(x, j) > M\} \quad (1)$$

式中:  $y$  表示 EVI 值;  $x$  表示研究期数,即  $T_1 - T_N$ ;  $j$  表示天数(d);  $n$  为一年的天数即 365;  $M$  为阈值。

$$\text{Slope} = \frac{n \sum_{i=1}^n (i \times MAD_i) - \sum_{i=1}^n i \times \sum_{i=1}^n MAD_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (2)$$

式中: Slope 为像元回归方程的斜率;  $MAD_i$  为第  $i$  年

的 MAD 的平均值;  $n$  为研究的时间长度,即  $N$  期。

同时,利用 MAD 序列与时间序列的 Pearson 相关关系( $p$  值)显著性表示产能变化趋势,即变化趋势可置信度的高低。结合线性拟合方程斜率和变化趋势的显著性检验,将产能变化分为 3 类,即显著上升( $\text{Slope} > 0, p < 0.05$ )、产能稳定( $p > 0.05$ )和显著下降( $\text{Slope} < 0, p < 0.05$ )。进一步对产能显著下降区的  $T_N$  和  $T_1$  作物的 MAD 值进行差值计算,通过自然断点法将结果分为 3 级,即低产能下降区  $y_2$ 、中产能下降区  $y_3$  和高产能下降区  $y_4$ 。

1.2.3 储量流失预测 耕地储量的稳定是耕地生产能力有效发挥的支撑,这一能力受到土地利用类型转换压力的影响较大,城市扩张将加剧未来耕地潜在流失的风险。

GeoSOS-FLUS 模型适用于未来土地利用变化情景模拟,是进行地理空间模拟、空间优化和辅助决策制定的有效模型。借鉴已有研究<sup>[27]</sup>,遵循土地利用结构演变规则,在初始土地利用数据的基础上,利用 GeoSOS-FLUS 模型中神经网络计算各地类转换的概率,采用基于自适应惯性机制的元胞自动机进行土地利用变化预测,提取耕地转化为城市建设用地和其他地类的区域,以所计算的各地类出现概率代表耕地未来被占用的风险程度,计算公式如下:

$$\text{TProb}_{p,k}^t = sp(p,k,t) \times \frac{\sum_{N \times N} \text{con}(c_p^{t-1} = k)}{N \times N - 1} \times \omega_k \times \text{Intertia}_k^t \times (1 - sc_{c \rightarrow k}) \quad (3)$$

式中:TProb<sub>p,k</sub><sup>t</sup>为在 t 时刻,栅格 p 转化为 k 用地类型的概率;∑<sub>N×N</sub> con(c<sub>p</sub><sup>t-1</sup>=k)表示在 N×N 的 Moore 领域窗口,上一次迭代结束后第 k 种地类的栅格总数;ω<sub>k</sub>为各类用地的领域作用权重 sc<sub>c→k</sub>为 c 用地类型改变为 k 用地类型的成本;Intertia<sub>k</sub><sup>t</sup>为第 k 种地类在 t 时刻的自适应惯性系数;1-sc<sub>c→k</sub>为转换发生的困难程度。将各地类出现概率值按自然断点法分为 3 级,数值越大风险等级越高,分别为低风险 z<sub>1</sub>、中风险 z<sub>2</sub> 和高风险 z<sub>3</sub>。

1.2.4 综合测度 考虑到耕地在 3 种流失情况下存在协同,因此在各流失分类分级的基础上,从“用途流失—产能流失—储量流失”3 个维度构建耕地功能性流失 FLCL 多维分类模型框架(图 2),并通过赋分叠加分析综合流失程度,计算公式如下:

$$\text{FLCL} = X + Y + Z \quad (4)$$

表 1 各耕地功能性流失维度赋分规则

Table 1 The scoring rules of each dimension

赋分	用途流失 X	产能流失 Y	储量流失 Z
1	即可恢复 x <sub>4</sub>	低产能下降 y <sub>2</sub>	低风险 z <sub>1</sub>
2	未耕种 x <sub>1</sub> 、种植非粮食作物 x <sub>2</sub>	双季改单季 y <sub>1</sub> 、中产能下降 y <sub>3</sub>	中风险 z <sub>2</sub>
3	工程恢复 x <sub>3</sub>	高产能下降 y <sub>4</sub>	高风险 z <sub>3</sub>

2 研究区概况与数据处理

江阴市地处江苏省东南部,属无锡市代管的县级市,介于北纬 31°40′34″—31°57′36″,东经 119°59′—120°34′30″,现辖 10 个镇 7 个街道,共设 193 个村民委员会和 81 个社区居民委员会。江阴市域国土面积 986.97 km<sup>2</sup>,其中耕地面积 252.77 km<sup>2</sup>,占总面积的 25.61%,建设用地面积 412.14 km<sup>2</sup>,占比 41.77%(图 3)。在农业区划上属于江苏省太湖农业区,是长江下游小麦、水稻等粮食作物的重要产地之一。江阴农业耕作利用悠久,区域特色显著,拥有优质水稻、特色水果、特种水产等农业特色主导产业和绿色蔬菜、生态

式中:FLCL 为耕地功能性流失程度;X,Y,Z 分别为用途流失、产能流失、储量流失。

以此建立的三维坐标体系(4×4×3)共包涵 48 种分类结果,其中:用途流失分为未耕种 x<sub>1</sub>、种植非粮食作物 x<sub>2</sub>、工程恢复 x<sub>3</sub> 和即可恢复 x<sub>4</sub> 共 4 类;产能流失分为双季改单季 y<sub>1</sub>、低产能下降 y<sub>2</sub>、中产能下降 y<sub>3</sub> 和高产能下降 y<sub>4</sub> 共 4 类;储量流失分为低风险 z<sub>1</sub>、中风险 z<sub>2</sub> 和高风险 z<sub>3</sub> 共 3 级。

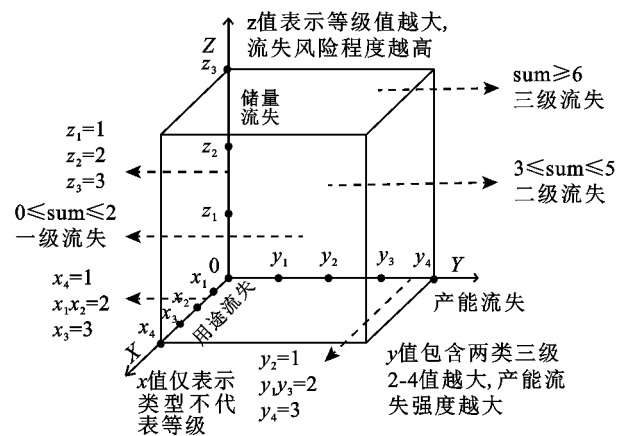


图 2 耕地功能性流失多维分类模型框架

Fig. 2 Multidimensional classification model framework based on functional loss of cultivated land

对每一维度各类型赋分,“用途流失维”(X 轴)依据土地可恢复利用为耕地进行粮食生产的难易程度;“产能流失维”(Y 轴)依据粮食产能流失程度(复种指数降低或产能变化特征趋势);“储量流失维”(Z 轴)依据耕地储量潜在流失风险强度,赋分规则见表 1,三维魔方评价体系见表 2。

畜禽两大菜篮子保供产业,创新打造“民富村强”的江阴样本,6 个村庄获评江苏省特色田园乡村。但江阴市耕地与村镇建设用地的空间分布存在交错现象,宜耕后备资源严重不足,耕地保护压力不断增大,耕地破碎化、综合效益低,土地利用矛盾和冲突加剧问题日益突出。

本研究数据包括土地利用数据、空间规划数据、统计数据、遥感数据和其他数据,相关数据说明见表 3。为便于计算,将所有数据进行配准并转换为 30 m×30 m 的栅格数据,使用 project raster 将坐标系转为 WGS\_1984\_Albers。2009 年和 2018 年的土地利用变更数据由 30 个二级地类构成<sup>[28]</sup>,利用 ArcGIS

将其重分类为耕地、园地、林地、其他农用地、城镇工矿用地、农村居民点、其他建设用地、交通水利建设用  
地、水域、滩涂沼泽和自然保留地 11 类;MOD09A1  
数据每月 4 期影像,数据格式为 EOS-HDF,行列号  
为 h27 v05 和 h28 v05,使用 GDAL 将数据批量转为

tif 格式便于后续分析,该数据已经过辐射定标、云检  
测、辐射校正、大气校正等处理;人类足迹数据使用 8  
个变量测量人类压力,用于指示人类对环境的累计压  
力,包括建成环境、人口密度、电力基础设施、农田、牧  
场、道路、铁路和通航水道<sup>[29-30]</sup>。

表 2 耕地用途—产能—储量流失三维魔方综合评价体系

Table 2 Three-dimensional magic comprehensive evaluation system of use-potential-reserve loss of cultivated land	
综合评价分级/分值	魔方图单元坐标(用途流失—产能流失—储量流失)(X,Y,Z)
一级流失(0~2)	0 (0,0,0)
	1 ( $x_4,0,0$ )
	2 ( $x_2,0,0$ )( $x_4,0,z_1$ )( $x_1,0,0$ )
	3 ( $x_4,0,z_2$ )( $x_2,0,z_1$ )( $x_1,0,z_1$ )( $x_3,0,0$ )( $x_4,y_2,z_1$ )
	4 ( $x_1,0,z_2$ )( $x_1,y_2,z_1$ )( $x_2,y_2,z_1$ )( $x_2,0,z_2$ )( $x_3,0,z_1$ )( $x_4,0,z_3$ )( $x_4,y_1,z_1$ )( $x_4,y_2,z_2$ )( $x_4,y_3,z_1$ )
二级流失(3~5)	( $x_1,0,z_3$ )( $x_1,y_1,z_1$ )( $x_1,y_2,z_2$ )( $x_1,y_3,z_1$ )( $x_1,y_4,z_3$ )( $x_2,0,z_3$ )( $x_2,y_1,z_1$ )( $x_2,y_2,z_2$ )( $x_2,y_3,z_1$ )
	5 ( $x_2,y_4,z_3$ )( $x_3,0,z_2$ )( $x_3,y_1,z_3$ )( $x_3,y_2,z_1$ )( $x_3,y_3,z_3$ )( $x_3,y_4,z_2$ )( $x_3,y_4,z_3$ )( $x_4,y_1,z_2$ )( $x_4,y_2,z_3$ )
	( $x_4,y_3,z_2$ )( $x_4,y_4,z_1$ )
	( $x_1,y_1,z_2$ )( $x_1,y_2,z_3$ )( $x_1,y_3,z_2$ )( $x_1,y_4,z_1$ )( $x_2,y_1,z_2$ )( $x_2,y_2,z_3$ )( $x_2,y_3,z_2$ )( $x_2,y_4,z_1$ )
	6 ( $x_3,0,z_3$ )( $x_3,y_1,z_1$ )( $x_3,y_2,z_2$ )( $x_3,y_3,z_1$ )( $x_4,y_1,z_3$ )( $x_4,y_3,z_3$ )( $x_4,y_4,z_2$ )
三级流失(6~9)	( $x_1,y_1,z_3$ )( $x_1,y_3,z_3$ )( $x_1,y_4,z_2$ )( $x_2,y_1,z_3$ )( $x_2,y_3,z_3$ )( $x_2,y_4,z_2$ )( $x_3,y_1,z_2$ )
	7 ( $x_3,y_2,z_3$ )( $x_3,y_3,z_2$ )( $x_3,y_4,z_1$ )( $x_4,y_4,z_3$ )
	8 ( $x_1,y_4,z_3$ )( $x_2,y_4,z_3$ )( $x_3,y_1,z_3$ )( $x_3,y_3,z_3$ )( $x_3,y_4,z_2$ )
	9 ( $x_3,y_4,z_3$ )

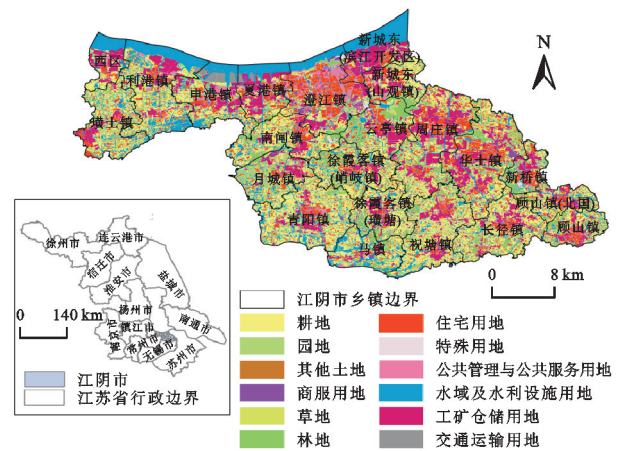


图 3 江阴市区位与土地利用现状(2020 年)

Fig. 3 Location and land use status in Jiangyin

3 结果与分析

3.1 分维度评价

3.1.1 用途流失结果与分析 为明晰村域单元耕地  
已经发生功能性流失的空间分布特征,对用途流失维  
结果进行可视化表达,如图 4 所示。江阴市现状耕地  
中的未耕种面积达 18.58 km<sup>2</sup>,占耕地总面积的  
7.35%,共涉及 240 个村,以其为主要流失类型的有  
15 个村,空间上呈现零星嵌入的分布特征;种植非粮  
食作物面积为 93.42 km<sup>2</sup>,占耕地总面积的 36.96%,  
共涉及 267 个村,以其为主要流失类型的有 147 个

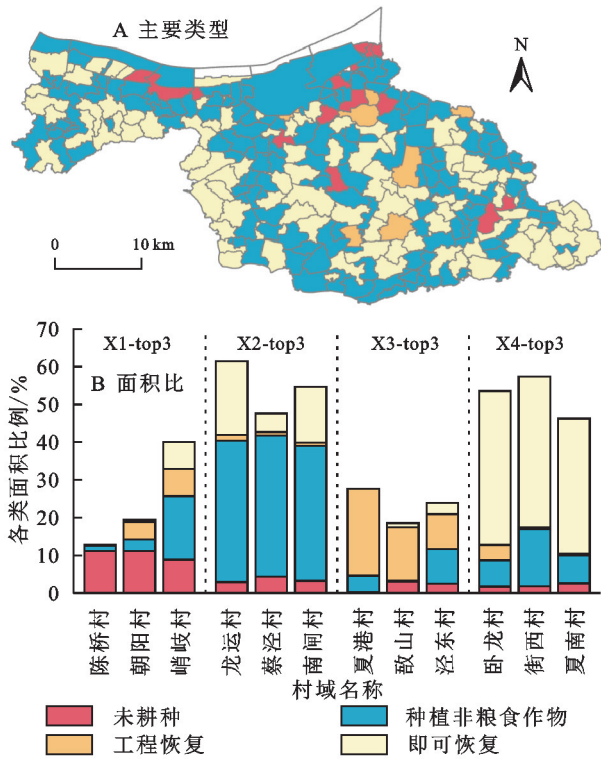
村,空间上呈现出北部沿江、中部条带分布、南部沿行政  
边界横向分布的特征;工程恢复面积达 19.13  
km<sup>2</sup>,占耕地总面积的 7.57%,共涉及 235 个村域,以  
其为主要流失类型的有 9 个村,呈现出中部零星分布  
的特征;即可恢复面积达 105.39 km<sup>2</sup>,占耕地总面积  
的 41.69%,共涉及 244 个村域,以其为主要流失类型  
的有 98 个村,空间上呈现出西北局部集中、中部条带  
分布,并与非粮化类型交错分布的特征。

造成该现象可能的原因包括:(1) 以未耕种为主  
要流失类型的村内,受耕地规模、分布格局、土壤质  
量、地形地貌等自身条件的限制,不能使用大范围农  
业机械,伴随着劳动力务农机会成本的不断升高,生  
产成本较高的耕地常被撂荒、抛荒。(2) 居民消费需  
求结构的变化加之粮食作物与非粮食作物的净利润  
存在巨大差距,为获得更高的经济效益,常选择经济  
或绿化作物替代粮食作物,造成非粮化现象日益凸  
显。(3) 即可恢复的耕地地类比需要进行工程恢复  
的耕地地类占比大,尤以卧龙村(41%)、街西村  
(40%)和夏南村(36%)等为主,由于受到土地使用变  
更、农业生产成本和经济效益的影响,原为耕地的土  
地变为园地、林地、草地或坑塘水面等其他农用地,  
破坏了土地的耕作条件,需要去除地表物或土地培肥、  
重建灌溉系统才可进行恢复。



表 3 数据来源及说明  
Table 3 Data source and description

数据类型	数据产品	分辨率	时间	来源	数据用途	使用维度
土地利用数据	第三次国土调查数据	矢量	2020 年	江阴市土地资源调查数据库	土地利用现状提取	显性半显性
	土地变更调查数据	矢量	2009 年、2018 年	江阴市土地变更调查成果数据库	模型基础输入数据	半显性隐性
	永久基本农田	矢量	2018 年、2022 年	江阴市土地资源调查数据库	限制转化区域确定	隐性
空间规划数据	城市开发边界	矢量	2018 年、2022 年		限制转化区域确定	隐性
	生态保护红线	矢量	2018 年、2022 年		限制转化区域确定	隐性
	《无锡市统计年鉴》	乡镇级	2001—2020 年	无锡市统计局	相关统计数据获取	
统计数据	《江苏统计年鉴》	县级	2001—2020 年	江苏统计局	相关统计数据获取	隐性
	《中国城市建设统计年鉴》	县级	2001—2020 年	国家统计局	相关统计数据获取	
遥感数据	MOD09A1	8 d	2001—2020 年	美国国家航空与航天局(NASA)	耕地地区 EVI 数据获取	半显性
其他数据	人类足迹	1 km	2009 年、2018 年	美国国家航空航天局(NASA)	土地利用变化驱动力数据	隐性
	夜间灯光	600 m	2009 年、2018 年	HARVARD Dataverse	土地利用变化驱动力数据	隐性



注:图 A 以未耕种、种植非粮食作物、工程恢复和即可恢复 4 种类型面积占比最大的类型为底图。图 B 中 X1-top3 表示未耕种面积占村域总面积百分比前三位的村域;X2-top3 表示种植非粮食作物面积占村域总面积百分比前三位的村域;X3-top3 表示工程恢复面积占村域总面积百分比前三位的村域;X4-top3 表示即可恢复面积占村域总面积百分比前三位的村域。

图 4 江阴市用途流失维耕地功能性流失数据分析  
Fig. 4 The data analysis on functional loss of cultivated land in usage loss dimension in Jiangyin

3.1.2 产能流失结果与分析 从产能流失维结果看,江阴市在研究期内复种指数波动明显,呈现 2001—2004 年、2005—2010 年和 2011—2017 年 3 个波动周期,对第 3 个波动周期内最大峰值(2015 年)和最低值(2017 年)进行叠置分析,涉及耕地由双季改为单季的区域如图 5 所示。

整体看,复种指数降低区面积为 109.65 km<sup>2</sup>,占粮食种植面积的 11.11%,共涉及 15 个村。空间上多远离中心城区,呈现沿江西北部和东南部局部集中的特征。江阴市粮食产能总体稳定,高产能降低区比例较低,中产和低产能降低区零星分布于中心和边缘区域。高产能降低区面积为 9.10 km<sup>2</sup>,占耕地总面积的 3.60%,共涉及 4 个村,分布于沿江的澄江城区和花果村和花山村。中产能降低区面积为 57.61 km<sup>2</sup>,占耕地总面积的 22.79%,涉及 22 个村域,空间上呈现出沿西北东南—东北西南交叉间隔分布的特征,尤以中部村域居多。低产能降低区面积为 16.22 km<sup>2</sup>,占耕地总面积的 6.42%,共涉及 18 个村,空间上多紧邻中产能降低区,西北和东南零星分布,中低产能降低区的村域多为永久基本农田。生态红线内的耕地存在低、中、高三级产能降低区,但以中低产能降低区为主,如观西村、富顺村和湖塘村等。

耕地产能受到气候变化、自然灾害等自然因素和资金、技术投入水平等社会经济因素的共同影响。研究区内部分优质耕地在流转中产权不稳定,农业经营主体大多不愿投资改善耕地地力,而过度依赖化肥提升粮食产量的边际技术使耕地土壤养分失衡、板结、酸化,耕地承载能力下降造成产能降低,如江阴市澄江城区、花山村和三房巷村等耕地的高产能降低区和部分中产能降低区。此外,永久基本农田面积占比较低的地区,受劳动力外迁的影响,耕地虽保留农用但多选择易耕作的作物类型,产量难以保障,如江阴市花港苑村、普照村和金庄村等耕地复种指数降低的村域。同时,激烈的市场竞争使农业经营主体尽可能压低生产成本,提高单位面积产量,忽视了耕地生产和生态功能的可持续发挥。

3.1.3 储量流失结果与分析 考虑到数据的有效性和可获得性,对土地利用二调变更数据进行重分类,以 2009 年土地利用现状图为基础,选择人类足迹、地

均 GDP 和夜间灯光作为驱动因子,在 GeoSOS-FLUS 模型中叠加永久基本农田、城市开发边界和生态保护红线限制转换地类图层,根据土地利用历史变

化趋势,结合发展情景设定基础系数,确定地类转换矩阵,以作为地类扩张水平确定的依据,进行神经网络计算,逐栅格分析各土地类型的出现概率。

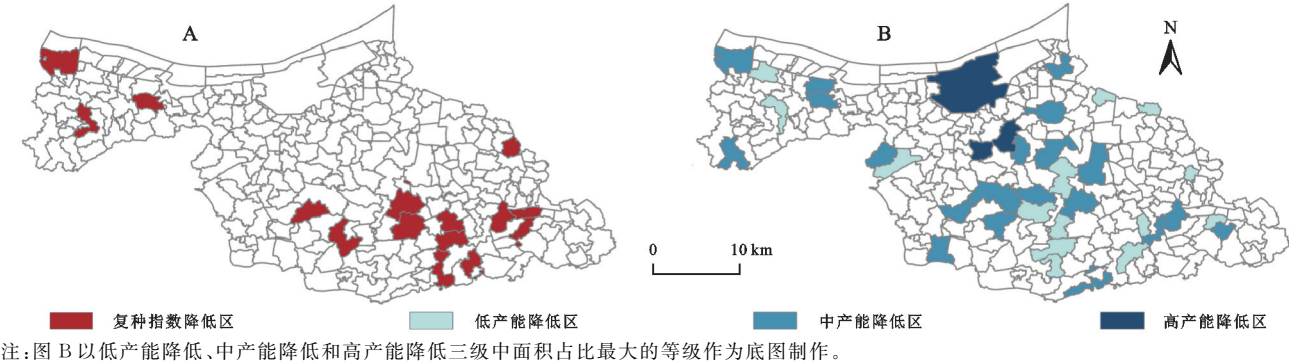


Fig. 5 The data analysis on functional loss of cultivated land in capacity loss dimension in Jiangyin

在自然演变情景下对研究区 2018 年的土地利用布局进行模拟,经与实际情况对比,FoM 系数为 0.050 6,Kappa 指数为 0.859 2,模型精度满足要求。以 2009 年土地利用现状图为基础,基于江阴市国土空间规划(过程稿)和《江阴市国土空间规划近期实施方案》,对 2035 年研究区各地类进行数量和规则限定(表 4),对土地利用布局进行模拟,提取出由耕地转为其他地类的图斑范围,将转换面积最大的地类作为各村的主要转换类型(图 6A)。

表 4 江阴市 2035 年土地利用类型面积及栅格数量设定  
Table 4 Prediction of land use type area and setting of grid quantity in Jiangyin by 2035

土地利用类型	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	栅格数
耕地	316.13	32.03	351253
园地	42.12	4.27	46826
林地	15.65	1.59	17437
其他农用地	99.57	10.09	110651
城镇工矿用地	108.93	11.04	121069
农村居民点	244.30	24.75	271418
其他建设用地	4.91	0.50	5483
交通水利建设用地	52.79	5.35	58670
水域	98.48	9.98	109445
滩涂沼泽	2.15	0.21	2353
自然保留地	1.94	0.19	2159
合计	986.97	100.00	1096639

根据各村的主要转换类型,叠加各地类的转换概率,并借助自然断点法分为低风险、中风险和高风险三级(图 6B)。整体来看,耕地利用转换以西北东南一线为界,主要分为南北两种类型,在人口数量增加的背景下,北部村较大范围将主要转为农村居民点,面积为 420.18 km<sup>2</sup>,占比 42.57%。经济效益带动南部耕地较多将转为其他农用地,面积为 313.01 km<sup>2</sup>,占比 31.71%。而城市工矿用地多分布于农村居民点之间,面积为 62.83 km<sup>2</sup>,占比 6.37%。此外为便于粮食作物的灌溉,部分村域在

规划指引下按具体要求可能会扩大水域的面积达 77.78 km<sup>2</sup>,其他的地类转换类型则零散镶嵌其中。

从流失风险等级看,大部分区域都存在潜在流失风险,整体流失风险等级较低。高风险区主要涉及 23 个村,呈现出中部和北部点状分布、西南角小范围聚集的特征。中风险区主要涉及 104 个村,低风险区主要涉及 115 个村,两个等级的风险区表现为集中连片、交错分布的特征,中东部及偏北范围多为中风险区,中西及偏南范围多为低风险区。

3.2 综合结果分析及管控策略

流失等级是三维流失类型及程度的综合表征,可用于指示不同地域耕地保护的迫切程度,并为制定治理政策提供理论依据。按照“用途流失—产能流失—储量流失”三维魔方综合评价体系,基于 ArcGIS 软件进行空间叠置分析,江阴市耕地功能流失划分为 3 个等级,一级流失共有 69 个村,二级流失共有 195 个村,三级流失共有 10 个村,如图 7 所示,据此探究其主要特征及影响因素,并针对性提出管控策略。

(1) 一级流失空间特征呈现出西北角小范围面状集聚、中部三条平行带状嵌入二级流失区内,如普照村、茂龙村等。这些村域为永久基本农田大面积覆盖区,其耕地功能性流失强度较低。该类区域未来应重点完善农业建设,为扩大农业生产的集中连片规模创造基础条件,进一步提高建设用地的集聚度,构建城市发展缓冲带,削减生产生活空间之间的冲突。

(2) 全市以二级流失为主,部分村位于城市开发边界以内,这些区域地势平坦,有西横河、虎塘江和界河等水系线穿过,各等级公路交织交通便利,在优势地理条件和经济效益的驱动下,耕地功能性流失的概率明显提高。该类区域未来可适当优化农业空间布局,打造耕地半自然生境,降低生产和生态空间交错



分布带来的破碎化现象,提高非连片化耕地农业设施,化解被侵占的风险。

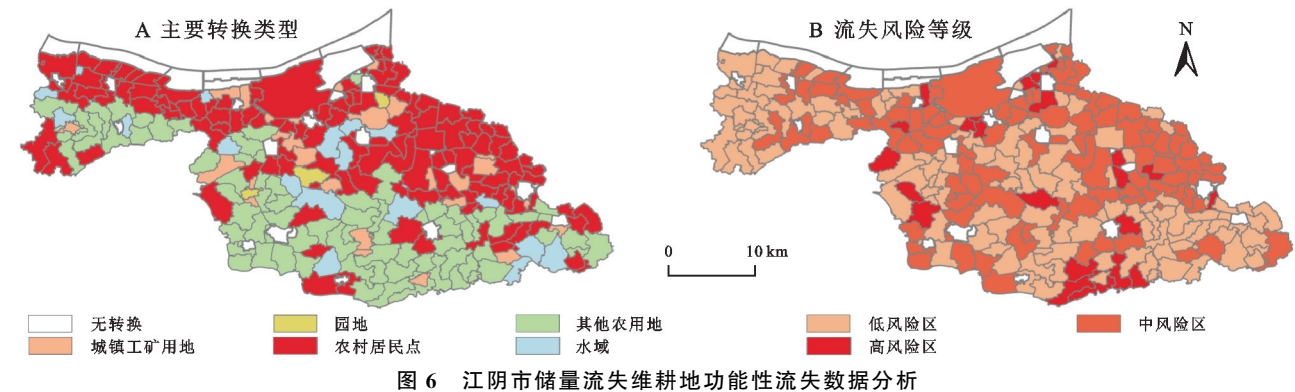


图 6 江阴市储量流失维耕地功能性流失数据分析

Fig. 6 The data analysis on functional loss of cultivated land in reserve loss dimension in Jiangyin

(3) 三级流失区域主要分布于沿江的澄江城区、创新村和山源村 3 个单元,以及零散分布于中部环形五村、南部沿边一村,如文林村和皋岸村等,这些村有 >10% 的耕地用于种植非粮食作物,且种粮耕地产能下降程度较高,加之潜在转换为其他农用地的风险程度较大,将对耕地持续利用带来一定冲击。该类区域应重点稳定耕地生产生态功能的可持续利用价值,加强风险预警,提高土壤质量监测和管护强度,治理和修复污染土质。同时,应严格清退违规侵占耕地的建设用地,防止建设用地分割耕地斑块,通过整治修复工程项目提高耕地的连片度和规整性。

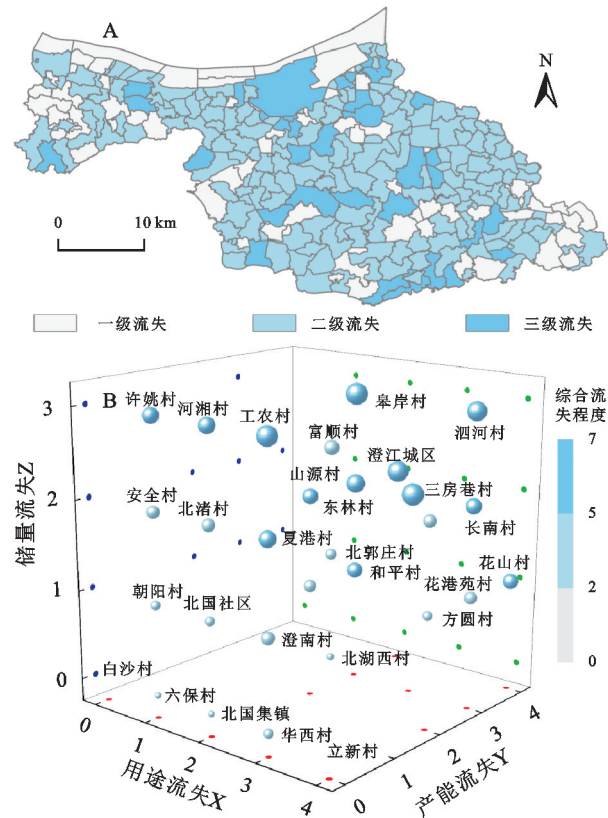
4 讨论与结论

耕地资源是乡村空间最基础、最重要的土地类型,伴随着快速城市化带来的农村劳动力缺失、农用地效益降低和耕地侵占等现象日益凸显,为加快推动耕地保护逐步向资源综合、区域统筹、功能协调系统保护的方向转变,继续发挥耕地数量保护与质量建设传统优势、促进耕地利用激活、改善耕地环境,对耕地功能性流失进行综合测度具有重要的现实意义。本研究从耕地资源的要素和功能角度入手,划分耕地功能性流失的类型,构建“用途流失—产能流失—储量流失”三维综合分析框架,以江阴市为例的实证分析证实了理论框架和测度体系的可行性和科学性,取得以下主要研究结果:

(1) 根据耕地功能性流失存在长时段累积的作用效果,按耕地功能受干扰的过去、现在和未来 3 个阶段,将耕地功能性流失的类型划分为用途流失、产能流失和储量流失 3 种,对耕地已经发生、正在发生、即将发生功能性流失的状态进行了综合测度,可进一步拓展耕地保护与利用的研究视角。

(2) 江阴市耕地功能性流失不同维度空间分布差异显著。用途流失维中种植非粮食作物较其他 3 种类型面积占比较大,占该维度总流失面积的

36.96%,主要位于江阴市北部和南部边界。产能流失维中复种指数和产能降低村域较少,占江阴市全村的 21.53%,主要受农业经营主体的行为和激烈的市场竞争影响较大。储量流失维结果显示,南北耕地易转换的土地类型方向不同,北部主要转为农村居民点,占总转换地类面积的 42.57%,南部主要转为其他农用地,占比 31.71%,此外,中低风险覆盖面较大呈交错分布的空间格局。



注:图 B 按综合流失类型每一类选择一个代表区进行标签标注。

图 7 江阴市综合耕地功能性流失等级分布及 3 D 散点图

Fig. 7 The grade distribution on functional loss of comprehensive cultivated land and 3 D scatter diagram

(3) 综合流失等级不同,管控策略也应有所差异。江阴市耕地功能性流失等级以二级流失为主,总

占比 71.17%，一级流失主要在西北角小范围面状集聚，总占比 25.18%，三级流失则多沿江分布，总占比 3.65%。在未来发展中，一级耕地功能性流失区域应加强完善农业建设，打造集中连片的耕地空间格局，保障耕地的高产稳产；二级流失区域应着重优化农业空间布局，通过建立耕地半自然生境化解耕地被建设用地侵占的风险；三级流失区域应加强风险预警，严格清退违规侵占耕地的建设用地，通过整治修复项目提高耕地的规整性。

耕地功能性流失相关议题可在后续研究中进一步深化：（1）耕地功能性流失的深层驱动机理。立足耕地的自身属性，通过探究耕地面积、形状、分布和结构等空间格局特征的变化情况，在掌握耕地本底条件变化的基础上，叠加城市化扩张、经济发展、政策引导等多因素的综合分析，深入探究耕地功能性流失的驱动机理。（2）将耕地功能性流失作为一项评价耕地属性的负向指标，从侧面补充耕地的基础发展条件、可持续利用能力和未来发展潜力，丰富耕地多功能研究的理论视角。（3）进一步丰富耕地功能性流失的表征要素。居民膳食结构的改变对耕地利用提出了更多元的需求，耕地功能性流失的表征要素在后续工作中可进一步加以拓展与丰富。（4）如何对耕地功能性流失状况进行恢复与再利用。完善耕地基础设施水平、扩大耕地连片面积、修复整治促进耕地规整、增强相邻耕地间的网络连通性等举措的实施，是否能缓解耕地功能性流失的紧迫性，是否能够产生经济效益及影响程度的大小均值得进一步探究。

#### 参考文献 (References):

- [1] 黄云鑫,刘彦随,刘正佳.黄土丘陵沟壑区现代沟道农业及其可持续发展[J].地理科学,2023,43(1):130-141.  
Huang Y X, Liu Y S, Liu Z J. Modern gully agriculture and its sustainable development in the loess hilly and gully region[J]. Scientia Geographica Sinica, 2023, 43(1):130-141.
- [2] 许恒周,曹旭欣.土地经营权抵押贷款试点政策对农业机械化的影响研究:来自中国试点县准自然试验的证据[J].中国土地科学,2023,37(5):57-66.  
Xu H Z, Cao X X. Impact of the pilot policy of land operational right mortgage on agricultural mechanization evidence from quasi-natural experiment in pilot counties in China[J]. China Land Science, 2023, 37(5):57-66.
- [3] 刘业轩,甄霖,胡云锋.北方农牧交错带农村居民食物消费特征[J].生态学报,2023,43(15):6117-6130.  
Liu Y X, Zhen L, Hu Y F. Food consumption characteristics of rural residents in the farming-pastoral ecotone in northern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(15):6117-6130.
- [4] Jiang P, Cheng Q, Zhuang Z, et al. The dynamic mechanism of landscape structure change of arable landscape system in China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 251:26-36.
- [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] 梁鑫源,金晓斌,孙瑞,等.多情景粮食安全底线约束下的中国耕地保护弹性空间[J].地理学报,2022,77(3):697-713.  
Liang X Y, Jin X B, Sun R, et al. China's resilience-space for cultivated land protection under the restraint of multi-scenario food security bottom line[J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(3):697-713.
- [7] Huang L, Feng Y, Zhang B, et al. Spatio-temporal characteristics and obstacle factors of cultivated land resources security[J]. Sustainability, 2021, 13(15):8498.
- [8] 赵雯歆,罗小锋,唐林.劳动力转移对农户粮食绿色生产效率的影响:兼论技术推广的作用[J].资源科学,2023, 45(7):1440-1454.  
Zhao W X, Luo X F, Tang L. The influence of labor transfer on farmers' green grain production efficiency. Also discussing the role of technology extension[J]. Resources Science, 2023, 45(7):1440-1454.
- [9] Liao L, Long H, Gao X, et al. Effects of land use transitions and rural aging on agricultural production in China's farming area: A perspective from changing labor employing quantity in the planting industry[J]. Land Use Policy, 2019, 88:104152.
- [10] 郭珍.耕地功能性流失的表现、驱动机制及其治理[J].吉首大学学报:社会科学版,2020,41(5):56-63.  
Guo Z. The representation, driving mechanism and governance of functional loss of cultivated land[J]. Journal of Jishou University: Social Sciences, 2020, 41(5):56-63.
- [11] Liu J, Jin X, Xu W, et al. Influential factors and classification of cultivated land fragmentation, and implications for future land consolidation: A case study of Jiangsu Province in eastern China [J]. Land Use Policy, 2019, 88:104185.
- [12] 盖兆雪,陈旭菲,杜国明.黑土区拜泉县耕地破碎化时空变化分析[J].水土保持研究,2022,29(2):355-361.  
Gai Z X, Chen X F, Du G M. Spatiotemporal pattern of cultivated land fragmentation in Baiquan County of black soil region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(2):355-361.
- [13] Chen J, Tan M Z, Chen J Z, et al. Soil degradation: A global problem endangering sustainable development [J]. Journal of Geographical Sciences, 2002, 12(2):

- 243-252.
- [14] Ye S J, Song C Q, Shen S, et al. Spatial pattern of arable land-use intensity in China[J]. *Land Use Policy*, 2020, 99:104845.
- [15] Liu X, XU Y Y, Engel B A, et al. The impact of urbanization and aging on food security in developing countries: The view from Northwest China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 292:126067.
- [16] 黄娟,李阳兵,徐倩,等.岩溶槽谷区农村人口与耕地变化的时空耦合关系[J].*水土保持研究*, 2021, 28(3): 281-290.
- Huang J, Li Y B, Xu Q, et al. Spatiotemporal coupling relationship between rural population and farmland change in karst trough valley area[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(3): 281-290.
- [17] 杨州,陈万旭,朱丽君.河南省城镇化对耕地利用效率影响的空间计量分析[J].*水土保持研究*, 2018, 25(2): 274-280, 287.
- Yang Z, Chen W X, Zhu L J. Spatial econometric analysis on the effect of urbanization on the cultivated land use efficiency in He'nan Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(2): 274-280, 287.
- [18] 杨柳,阎建忠,王盼,等.青藏高原气候变化对农牧民开垦的影响[J].*生态学报*, 2019, 39(10): 3655-3669.
- Yang L, Yan J Z, Wang P, et al. Impacts of climate change on the reclamation of farmers and herdsmen in the Tibetan Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(10): 3655-3669.
- [19] 金晓斌,梁鑫源,韩博,等.面向中国式现代化的耕地保护学理解析与地理学支撑框架[J].*经济地理*, 2022, 42(11): 142-150.
- Jin X B, Liang X Y, Han B, et al. Theoretical analysis and geographical support framework of cultivated land protection for Chinese-style Modernization[J]. *Economic Geography*, 2022, 42(11): 142-150.
- [20] 王成,梁鑫,豆浩健,等.乡村多元价值实现视角下的耕地“非粮化”演变及其驱动机制:以重庆市为例[J].*经济地理*, 2023, 43(4): 144-153.
- Wang C, Liang X, Dou H J, et al. Spatio-temporal evolution and driving mechanism of non-grain cultivated land for rural multi-value realization: A case study of Chongqing[J]. *Economic Geography*, 2023, 43(4): 144-153.
- [21] 井睿,张蚌蚌,赵敏娟,等.近35年中国耕地集约度时空变化特征分析[J].*水土保持研究*, 2019, 26(5): 353-358, 365.
- Jing R, Zhang B B, Zhao M J, et al. Spatiotemporal characteristics of intensive cultivated land use in China in recent 35 years[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(5): 353-358, 365.
- [22] 范泽孟,李赛博.1990年来中国城镇建设占用耕地的效率和驱动机理时空分析[J].*生态学报*, 2021, 41(1): 374-387.
- Fan Z M, Li S B. Spatio-temporal analysis of the economic benefit and driving mechanism of urban build-up land occupying the cultivated land in China since 1990[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(1): 374-387.
- [23] 吴娜琳,卫怡珂,李立,等.县域非粮作物空间格局及其形成机制:来自河南省宁陵县的实证分析[J].*地理科学进展*, 2023, 42(7): 1298-1310.
- Wu N L, Wei Y K, Li L, et al. Spatial distribution of non-grain crops and formation mechanism: Empirical analysis of Ningling County, Henan Province[J]. *Progress in Geography*, 2023, 42(7): 1298-1310.
- [24] 伍骏骞,阎宇,蒋玉.时间偏好对农户采纳生物农药意愿的影响:基于农业技术推广方式的调节作用[J].*资源科学*, 2023, 45(6): 1268-1283.
- Wu J Q, Yan Y, Jiang Y. Impact of farmers' time preference on their adoption intention of bio-pesticides: Based on the moderating effect of agricultural technology extension mode[J]. *Resources Science*, 2023, 45(6): 1268-1283.
- [25] 项骁野,王佑汉,李谦,等.基于CiteSpace软件国内外撂荒地研究进展与述评[J].*地理科学*, 2022, 42(4): 670-681.
- Xiang X Y, Wang Y H, Li Q, et al. Research progress and review of abandoned land based on CiteSpace[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2022, 42(4): 670-681.
- [26] 吴心怡,金晓斌,韩博,等.2001—2017年四川省耕地产能变化与潜力特征分析[J].*农业工程学报*, 2021, 37(3): 238-249.
- Wu X Y, Jin X B, Han B, et al. Characteristics of cultivated land productivity change and potential during 2001-2017 in Sichuan Province, China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(3): 238-249.
- [27] 曹帅,金晓斌,杨绪红,等.耦合MOP与GeoSOS-FLUS模型的县级土地利用结构与布局复合优化[J].*自然资源学报*, 2019, 34(6): 1171-1185.
- Cao S, Jin X B, Yang X H, et al. Coupled MOP and GeoSOS-FLUs models research on optimization of land use structure and layout in Jintan district[J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(6): 1171-1185.
- [28] TD/T 1014-2007.第二次全国土地调查技术规程[S]. 2007.
- TD/T1014—2007. Technical Regulations of the Second National Land Survey[S]. 2007.
- [29] Venter O, Sanderson E W, Magrath A, et al. Sixteen years of change in the global terrestrial human footprint and implications for biodiversity conservation[J]. *Nature Communications*, 2016, 7(1): 12558.