

南京林业大学学报(自然科学版)

Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition)

ISSN 1000-2006,CN 32-1161/S

《南京林业大学学报(自然科学版)》网络首发论文

题目: 快速城镇化地区耕地景观生态安全格局演变特征及其驱动机制
作者: 蔡汉, 朱权, 罗云建, 马坤
收稿日期: 2019-07-31
网络首发日期: 2020-05-15
引用格式: 蔡汉, 朱权, 罗云建, 马坤. 快速城镇化地区耕地景观生态安全格局演变特征及其驱动机制. 南京林业大学学报(自然科学版).
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1161.S.20200515.1555.002.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.3969/j.issn.1000-2006.201907047

快速城镇化地区耕地景观生态安全格局演变 特征及其驱动机制

蔡汉¹，朱权¹，罗云建¹，马坤²

(1.扬州大学园艺与植物保护学院，江苏 扬州 225009；2.南京林业大学

风景园林学院，江苏 南京 210037)

摘要：【目的】探索快速城镇化地区耕地景观生态安全格局演变特征及其驱动机制新方法和新思路，为实施“18 亿亩耕地红线”保护政策提供科学依据。【方法】运用 fragstas4.2 软件和 Arcgis10.2 软件模拟计算扬州耕地景观安全格局时空演变特征；基于统计年鉴数据运用地理探测器筛选出主导影响因素，并结合地理加权回归软件分析出影响因素之间的空间差异。【结果】扬州市耕地景观生态安全以市中心周边地区向西北方向逐年降低；社会经济影响因子解释度明显高于自然影响因子；各个主导社会经济因素对扬州市耕地景观生态安全格局影响，存在显著的空间差异。【结论】通过 GIS 空间模拟、地理探测器筛选和地理加权回归模型分析相结合的方法，可以科学准确地模拟分析出快速城镇化地区耕地景观生态安全格局时空演变特征及其驱动机制和空间差异。

关键词：耕地；景观生态安全；地理探测器；地理加权回归模型；江苏扬州

中图分类号：U412.4

文献标志码：A

Evolution characteristics and driving mechanism of cultivated landscape ecological security pattern in rapid urbanization areas

CAI Han¹, ZHU Quan¹, LUO Yunjian¹, MA Kun²

(1. College of Horticulture and Plant Protection, Yangzhou University, Yangzhou, 225009, China; 2. College of

Landscape Architecture, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: [Objective] To explore new methods and ideas of the evolution characteristics of cultivated land landscape ecological security pattern and its driving mechanism in rapid urbanization areas, and provide scientific basis for the implementation of the "1.8 billion mu red line" protection policy. [Method] We use fragstas4.2 software and Arcgis10.2 software to simulate the spatial and temporal evolution characteristics of cultivated land landscape security pattern in the study area. Based on the statistical yearbook data, we use Geo-detector to screen out the dominant influencing factors, and then combined with gwr4.09 software to analyze the spatial differences between the influencing factors. [Result] Landscape ecological security of cultivated land in Yangzhou City decreases year by year from the surrounding areas of the city center to the northwest. The explanatory degree of socio-economic impact factors is obviously higher than that of natural impact factors. There are significant spatial differences in the impact of various dominant socio-economic factors on the ecological security pattern of cultivated land landscape in Yangzhou. [Conclusion] Through the combination of GIS spatial simulation, Geo-detector screening and GWR model analysis, we can scientifically and accurately simulate and analyze the spatial and temporal evolution characteristics, driving mechanism and spatial differences of cultivated land landscape ecological security pattern in rapid urbanization areas.

Keywords: Cultivated Land; Landscape Ecological Security; Geo-Detector; GWR Model, Yangzhou City

收稿日期：2019-07-31

修回日期：2019-10-25

基金项目：国家自然科学基金项目（31500388）；中国城市与区域生态国家重点实验室开放基金项目（SKLURE 2016-2-3）；中国博士后科学基金（2016M601144）；江苏省研究生科研与实践创新计划项目（KYCX18_0979）。

第一作者：蔡汉（yzdxcaihan@126.com），副教授，ORCID(0000-0002-9094-7438)。

耕地具有生产、生态功能,其生态安全保障了区域的可持续发展^[1]。随着城市发展速度不断加快,耕地数量和面积不断减少,空间格局破碎化日益严重,生态质量保护需求也随之与日俱增^[2]。由于耕地景观格局决定了其资源和环境的分布形式^[3],因此,从其生态安全的角度分析耕地景观格局与过程可以有效解决耕地对外部的抗干扰力、抗风险力和自我恢复力^[4],对协调城镇发展和耕地保护之间的空间矛盾、实现耕地资源集中管控和保护具有重要现实意义。

目前,国内外已有较多学者对耕地景观生态安全进行了研究,其中国外学者的研究主要集中在农业景观生态环境的监测、保护和恢复等应用性方面^[5-8]。而国内学者主要针对空间格局方面进行了大量研究,一般可分为以下3个阶段:第1阶段,基于景观生态学原理,综合考虑自然地理、社会经济、生态保护、生态系统服务等因素,针对景观格局指数的选择研究如何构建耕地景观生态安全格局评价模型^[9-12];第2阶段,通过实地调查分析、基于文献资料的图形叠置法或是基于卫星遥感影像的地理学空间分析,结合前人的景观生态安全评价模型,分析耕地景观生态安全格局时空演变特征^[13-16];第3阶段,在第2类研究结果的基础上,结合文献资料、实地调查,进一步分析耕地景观生态安全格局的驱动因素^[17-20]。根据以上研究成果可以看出,我国耕地景观生态安全格局的研究已经全面进入深层次揭示自然与社会经济对于耕地的影响,希望通过分析各类指标来指导未来对耕地政策的改变。

然而,对于耕地景观生态安全格局影响因素的研究主要是针对中观或者宏观尺度的耕地内部自然与外部社会经济干扰的综合分析。但从微观层面来看,由于在城市化快速发展地区,社会经济因素是导致耕地格局变化的内部主导因素^[21-25],且不同地区的主导因素空间差异较大^[26]。因此,为了更有针对性的分析快速城镇化地区的耕地景观生态安全问题及其主导影响因素,本研究从乡镇角度,以江苏扬州为研究区,基于耕地景观生态安全评价进行地理空间模拟,再运用地理探测器筛选重要影响因素,然后结合地理加权回归分析这些因素作用在空间上的差异性,以期协调城镇发展与耕地保护关系提供参考,为实施“18 亿亩耕地红线”保护政策提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

扬州市位于江苏省中部(119°01'~119°54'E, 32°15'~33°25'N),地处江淮平原南端,长江下游平原北端,平原广阔,湖泊众多,水网密布。全市属湿润副热带季风气候,年平均气温15.5℃,年无霜期平均220 d,年平均日照2 140 h,年平均降水量1 020 mm,综合自然地理条件为扬州市农业发展提供了优越条件。

近20年来,扬州城镇化建设与工业化进程不断加快,人口数量激增,交通方面大量增设高铁、高速公路和城市立体交通公路,水运也完成以县港口为枢纽的四方辐射,严重影响了耕地空间格局^[27-28]。因此,扬州市作为快速城镇化发展城市之一,各类社会经济因素主导的耕地景观生态安全已成为亟待解决的问题。

1.2 数据来源与处理

1.2.1 数据来源

扬州市各年份遥感影像数据、数字高程模型数据(digital elevation model, DEM)从地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)下载;扬州市行政区划、道路(铁路、高速公路、国道、省道和乡镇道路)矢量数据从中国科学院资源环境数据云平台(<http://www.resdc.cn>)下载;河流、农村居民点矢量数据从国家地球系统科学共享服务平台“湖泊—流域科学数据中心”(<http://lake.geodata.cn>)下载;农户人口数、农民收支水平、农机力等数据均来自《江苏省统计年鉴》、《扬州市统计年鉴》等区县年鉴,以及各个乡镇统计年鉴。

1.2.2 数据处理与精度验证

根据《土地利用分类》国家标准定义分类模板,运用 ArcGIS10.2 软件,采用最大似然分类法对研究区 1998 年、2008 年、2018 年 3 期遥感影像进行土地利用类型分类,共分为耕地、林地、水体、道路用地、建设用地和未利用地 6 类(图 1)。然后根据 Google earth 历史地图资料,运用 Kappa 系数法对 3 期土地类型分类结果进行验证,结果表明 1998 年、2008 年、2018 年遥感分类 Kappa 系数分别为 0.77、0.80、0.86,精度分别为 80.06%、80.91、82.47%,满足研究需求。

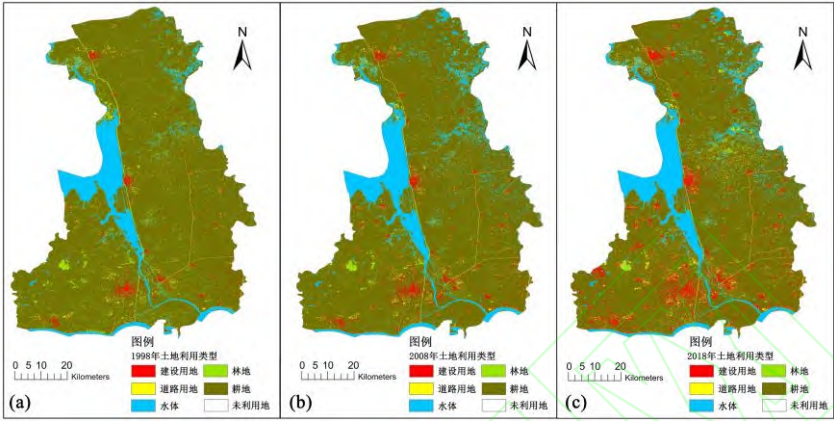


图 1 扬州市 1998 年、2008 年、2018 年 3 期土地利用分类 (审图号: 苏 S(2019)002 号)

Fig.1 Land use classification of Yangzhou in 1998, 2008 and 2018

1.3 研究方法

1.3.1 耕地景观生态安全评价

基于前人评价方法,结合快速城镇化地区的土地斑块复杂特性以及自然地理特征,引入生态质量指数构建扬州市耕地景观生态安全评价模型^[29-30]。表达式为:

$$I_{LSES}=1-[(I_{PD}+I_{ED})\times 2.5I_{LFI}] \quad (1)$$

式中: I_{LSES} (landscape ecological security index)为景观生态安全指数; I_{PD} (patch density)为斑块密度; I_{ED} (edge density)为边界密度。以上指数主要可以反应耕地破碎情况和形状复杂程度,均为斑块类型指数。 I_{LFI} (landscape fragile index)为景观脆弱度指数,可以综合反映耕地景观的稳定性、抗风险力和恢复力^[31],其表达式如下:

$$I_{LFI}=aI_{AWMSI}+bI_{MPFD}+cI_{DIVISION} \quad (2)$$

式中: I_{AWMSI} (area weighed mean shape index)为面积加权平均形状指数; I_{MPFD} (mean patch fractal dimension index)为平均斑块分维数; $I_{DIVISION}$ (landscape division index)为景观分离度指数^[32]。其中, a 、 b 、 c 为因子权重,基于层次分析法,根据专家意见得出 a 、 b 、 c 分别为 0.54、0.27、0.19。

运用 ArcGIS10.2 软件中“Spatial Analyst”工具,结合景观格局分析软件 Fragstats4.0 对各指数进行计算,根据 Nature Break 法进行分级,将结果划分为 4 个级别: I 级,危险 ($0 \leq I_{LSES} \leq 0.2$); II 级,较危险 ($0.2 < I_{LSES} \leq 0.55$); III 级,较安全 ($0.55 < I_{LSES} \leq 0.7$); IV 级,安全 ($0.7 < I_{LSES} \leq 1$)。

1.3.2 地理探测器分析

地理探测器是中国科学院地理科学与资源研究所王劲峰等开发的一款探测空间分异性,以及揭示其背后驱动因子的一种新的统计学方法^[33]。该模型不仅解决了解释变量对被解释变量的空间效应,且有助于揭示两种变量之间的相互作用^[34],其具体公式见文献^[35]。地理探测器的 Q 统计量会被归一化到 0~1 之间, Q 值越大表示自变量对因变量的解释力越强,反之则越弱。

根据前人研究成果^[20-24],选择人口密度、距道路最近距离、农业人口占比、农民收支水

平等 13 项自然和社会经济要素，基于 1998 年、2008 年、2108 年统计年鉴等数据，利用地理探测器软件对耕地景观生态安全指数进行相关性分析。

1.3.3 地理加权回归分析

地理加权回归 (geographically weighted regression, GWR) 是近年来提出的一种新的空间分析方法^[36]。在考虑空间异质性的前提下，它通过将空间结构嵌入线性回归模型中，引入空间权重概念，以此来探测空间关系的非平稳性，可以较好地描述定量关系随空间变化的特征^[37]。GWR 模型的一般形式为：

$$y_k = \beta_0(u_k, v_k) + \sum_{i=1}^n \beta_i(u_k, v_k)x_{ki} + C_k \quad (3)$$

式中： y_k 为样点 k 的加权回归值； (u_k, v_k) 为回归样点 K 的空间坐标； $\beta_i(u_k, v_k)$ 表示点 K 处模型第 i 个揭示变量 x_{ki} 的回归参数； $\beta_i(u_k, v_k), C_k$ 分别为点 k 处的常数项与随机误差项。

将地理探测器计算分析得到的主要影响因素作为该模型的自变量，通过分析空间非平稳性以揭示不同区域各因素对耕地景观生态安全影响的差异性。

2 结果与分析

2.1 耕地景观生态安全指数及空间格局

通过 Fragstats4.3 软件分别计算了研究区 1998 年、2008 年、2018 年 3 期 82 个乡镇行政区耕地各个景观指数以及景观生态安全指数，结果如表 1 所示。然后运用 ArcGIS10.2 Nature Break 法对研究区耕地景观生态安全分为 4 个等级，结果如图 2 所示。

表 1 扬州市耕地景观安全指数计算结果

Table 1 Calculation results of cultivated land landscape security index in the study area

景观格局指数 landscape pattern index	平均值 average value			最大差值及其乡镇名称	
	1998	2008	2018	最大差值 (max difference)	乡镇名称 township name
斑块密度	0.11	0.14	0.16	0.33	新盛街道
边界密度	0.13	0.16	0.18	0.14	杨庙镇、甘泉街道
面积加权平均形状指数	0.48	0.56	0.59	0.34	甘泉街道
平均斑块分维数	1.04	1.04	1.04	0.03	扬子津街道
景观分离度	0.6	0.6	0.69	0.53	大仪镇、高邮街道
景观脆弱度	0.55	0.6	0.63	0.30	刘集镇、甘泉街道
景观生态安全指数	0.63	0.53	0.41	0.64	高邮街道

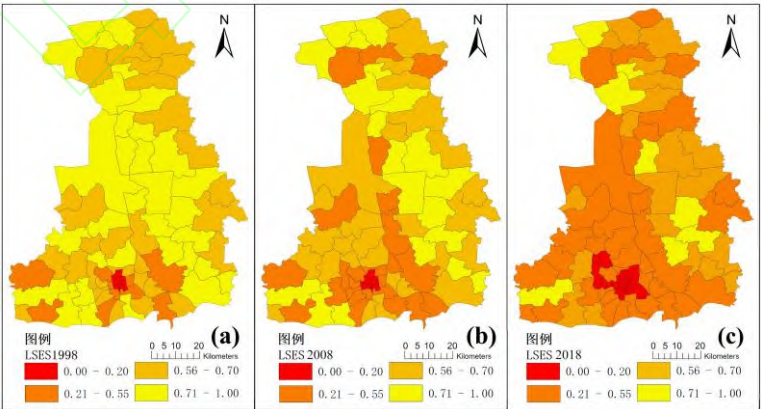


图 2 扬州市 1998 年、2008 年、2018 年 3 期耕地景观生态安全格局（审图号：苏 S(2019)002 号）

Fig.2 Cultivated landscape ecological security pattern in Yangzhou in 1998, 2008 and 2018

数值方面，研究区耕地景观生态安全不断降低，平均指数从 1998 年的 0.63 降至 2008 年 0.53，2018 年持续降低至 0.41（表 1），安全等级从Ⅲ级（较安全）降至Ⅱ级（较危险）。

其中，处于IV级安全等级的乡镇个数从1998年的33个降至2018年的9个，而II级较危险等级的乡镇个数从1998年的10个增至2018年的38个（图3）。在各项景观指数中，耕地斑块密度平均指数与边界密度指数分别从1998年的0.11、0.13增至0.16和0.18，耕地破碎度显著增加。耕地斑块形状也变的不规则，面积加权平均分维数从1998年的0.48增至2018年的0.59，导致耕地管理难度变高，整体脆弱度增加。

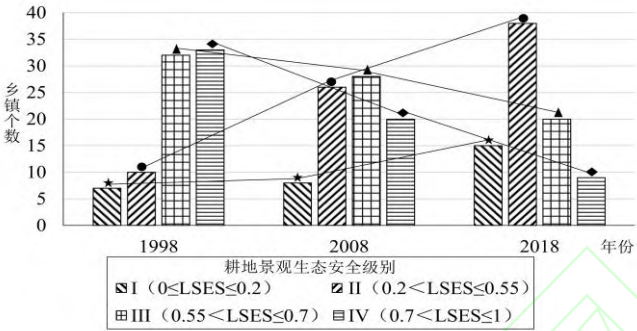


图3 扬州市耕地景观生态安全各等级乡镇数量

Fig.3 The number of towns at different levels of cultivated land landscape ecological security in the study area.

空间方面，研究区1998年、2008年、2018年耕地景观生态安全等级均以扬州市中心向外增加的空间分布格局（图2）。其中，景观生态风险区域（ $I_{LSES} \leq 0.55$ ）重心先由市中心向四周转移，再由甘泉街道向南扩张至车逻镇和高邮街道，呈现由市区向乡镇方向转移的趋势（图4）。根据研究表明^[38-39]，这主要是因为目前我国城市化发展已经全面进入城乡一体化阶段，建设用地向乡镇方向扩张占用了大量的耕地，从而导致其风险转移的现象。

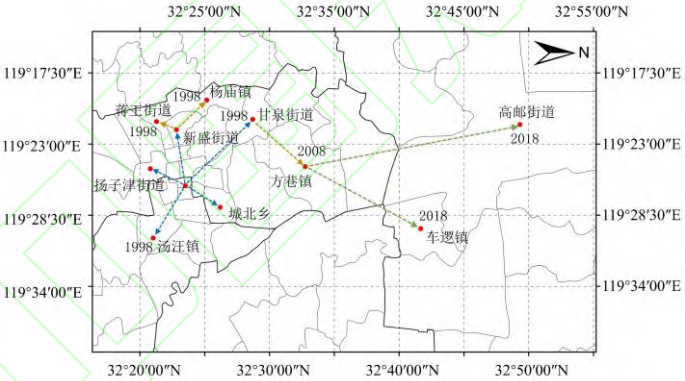


图4 扬州市耕地景观生态安全等级降低重心转移（审图号：苏S(2019)002号）

Fig.4 The shift of gravity center in the reduction of cultivated landscape eco-security grade

2.2 耕地景观生态安全格局影响因素

根据上述分析结果可知，扬州市耕地景观生态安全空间差异性显著、分布趋势复杂多样。为了进一步深入探究其具体影响因素，本研究运用地理探测器，依据扬州82个乡镇单元1998年、2008年、2018年3期各项统计数据，尝试分析影响耕地景观生态安全指数的自然与社会经济因素，结果如表2所示。

根据地理探测器计算结果可知，自然地理影响因素的因子解释度平均值为0.109，明显低于社会经济影响因子解释度的平均值0.492。因此，从整体上可以得出，研究区耕地景观生态安全很大程度上是由社会经济因素决定，其中主要影响因素为距道路最近距离（X9）、农民收支水平（X4）、农机力水平（X5）、第一产业GDP占比（X3）和工业企业数（X1）。

在自然地理影响因素中，各个自然地理影响因子解释度都较低，且差值很小，最大插值

也只有 0.007。这主要是由于研究区的农业发展历史悠久，在 1998 年之前很久就已经形成了适应自然地理各方面因素的农业发展模式^[39]。

表 2 扬州市耕地景观生态安全影响因子解释度

Table 2 Interpretation degree of influencing factors of cultivated landscape eco-security in Yangzhou				
类型 type	因子 factor	因子解释度 factor interpretation degree		
		1998	2008	2018
社会经济因子	工业企业数量(X1)	0.544	0.568	0.582
	人口密度(X2)	0.177	0.179	0.214
	第一产业 GDP 占比(X3)	0.594	0.608	0.633
	农民收支水平(X4)	0.711	0.745	0.772
	农机力水平(X5)	0.653	0.672	0.689
	单位面积耕地产量(X6)	0.426	0.431	0.457
	距居民点最近距离(X7)	0.373	0.386	0.405
	单位面积耕地农药负荷(X8)	0.152	0.164	0.178
	距道路最近距离(X9)	0.816	0.852	0.917
	第一产业从业人员(X10)	0.267	0.284	0.309
自然地理因子	距河流最近距离(X11)	0.374	0.378	0.379
	年降雨量(X12)	0.125	0.129	0.132
	地形位指数(X13)	0.076	0.078	0.079

注：地形位指数是由高程和坡度组合形成的反应地形条件的指数^[37]。The terrain potential index is an index formed by the combination of elevation and slope to reflect the terrain conditions.

随着城镇化不断快速发展，社会经济因子对研究区耕地景观的影响越来越大。从计算结果可以看出，所有社会经济因子解释度均呈明显上升趋势（图 5）。其中，距离道路最近距离因子解释度最大，其数值从 1998 年的 0.816 上升到 2018 年的 0.917，提高了 0.101。这主要是由于道路作为城市发展的象征，近年来研究区不仅城市道路建设飞速发展，对外交通建设也不断加快，极大程度对城市中心区周边耕地造成严重影响^[27]。因此，如何根据不可逆的道路建设格局对耕地景观格局进行优化是未来研究区面临的主要问题之一。农民收支水平、农机力水平和第一产业 GDP 占比 3 项影响因子解释度均较高。这主要是由于随着农村经济迅速发展，农业产业结构不断调整，从而导致耕地数量不断减少^[40-41]。扬州市工业发展十分迅速，工业企业作为城镇化水平体现之一，数量显著增加，较多企业选址在乡镇，打破了原有耕地的整体性，对耕地格局造成了一定影响。而第一产业从业人员、人口密度和单位面积耕地农药负荷 3 项影响因子解释度较小，可以说明在人口和农药方面对耕地景观生态安全的直接影响较小。

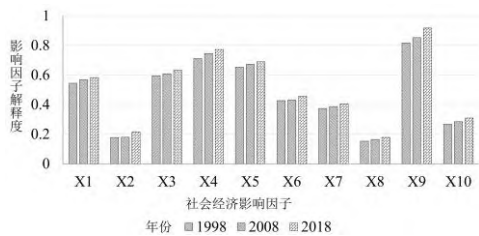


图 5 扬州市耕地景观生态安全社会经济影响因子解释度

Fig.5 Interpretation degree of socio-economic impact factors of cultivated landscape eco-security

2.3 耕地景观生态安全格局影响因素空间差异性

通过地理探测器的计算，可知研究区耕地景观生态安全影响因素主要有距道路最近距离、

农民收支水平、农机力水平、第一产业 GDP 占比和工业企业数量 5 个指标。因此，本研究针对这 5 项指标，运用地理加权回归 GWR4.0 软件进行计算，结果显示，1998 年、2008 年和 2018 年 3 期地理加权回归调整 R^2 值分别为 0.759、0.769、0.7772，AICc 值为-206.162、-267.559 和-294.337，分别比传统全局最小二乘法(OLS)回归模型调整 R^2 提高了 0.015、0.017、0.021 个单位，AICc 值分别降低了 7.965、10.276、13.388 个单位，可以表明 3 期地理加权回归模型均可以较好地解释各因素对研究区耕地景观生态安全的局部规律，具体计算结果如表 3 所示，空间格局分布结果如图 6 所示。

表 3 扬州耕地景观生态安全影响因素地理加权回归计算结果

Table 3 Geographically weighted regression results of influencing factors of cultivated landscape eco-security in Yangzhou

年份 year	回归系数平均值 mean value of regression coefficient				
	X1	X3	X4	X5	X9
1998	-0.067	-0.082	0.162	0.129	-0.189
2008	-0.082	-0.099	0.172	0.145	-0.209
2018	-0.096	-0.107	0.182	0.15	-0.226

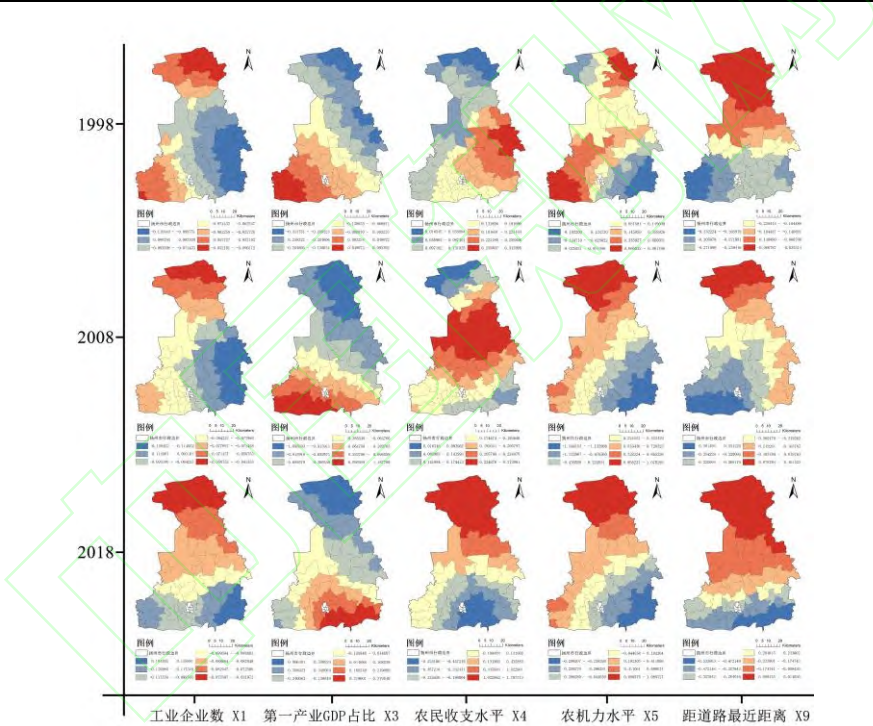


图 6 研究区耕地景观生态安全格局影响因素时空差异 (审图号: 苏 S(2019)002 号)

Fig.6 Spatial differences of influencing factors of cultivated landscape eco-security pattern

根据地理加权回归分析结果可知，工业企业数量 (X1)、距道路最近距离 (X9) 对研究区耕地景观生态安全为负向影响，3 期回归系数平均值分别为-0.082、-0.208，均具有地域差异。其中工业企业数量的负向影响呈现由西向东逐渐增加的趋势，东部工业企业数量较多，空间分布较乱，对耕地景观生态安全的影响较大。距道路最近距离的负向影响由北向南逐渐增加，南部道路发展速度较快，路网密集，对耕地景观生态安全的影响较大。农民收支水平 (X4) 3 期回归系数平均值为 0.172，对研究区耕地景观生态安全为正向影响，且中东部地区影响最大，表明农民收支水平程度越高，耕地景观生态安全越高。第一产业 GDP 占比(X3)、农机力水平 (X5) 对研究区耕地景观生态安全既有正向影响也有负向影响，3 期回归系数平均值分别为-0.096、0.142，均有地域差异。其中，第一产业 GDP 占比的负向影响由南向北

逐渐增加，正向影响由北向南增加，但大部分地区为负向影响。表明第一产业 GDP 占比因素应当处于合适的比例才能对耕地景观生态有益。而农机力水平的负向影响由西北向东南增加，正向影响相反，大部分地区为正向影响，即农机力应当保持合适的水平可以给耕地景观生态带来有益影响。

根据地理加权回归分析结果，将 5 个因素对研究区耕地景观生态安全起到主导影响的区域进行叠加分析（图 7）。由图可知，工业企业数负向影响主要分布在以吴桥镇和宜陵镇为核心的江都区和广陵区；第一产业 GDP 占比负影响主要分布在以鲁垛镇为核心宝应县东部地区；农民收支水平正影响主要分布在以汤庄镇为核心的高邮市东部地区；农机力水平正向影响主要分布在以高邮街道为核心的宝应县西部和高邮市西部；距道路最近距离负向影响主要分布在仪征市和邗江区。

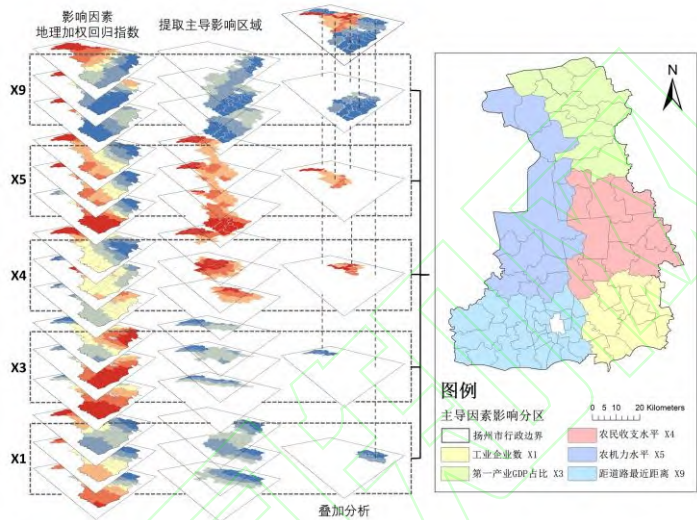


图 7 扬州市耕地景观生态安全格局影响因素叠加分析

Fig.7 Overlying analysis of influencing factors of cultivated landscape eco-security pattern in Yangzhou

3 结论

基于遥感影像和地理空间分析法分析了扬州 82 个乡镇的 1998 年、2008 年、2018 年 3 期耕地景观生态安全格局，并结合统计年鉴数据运用地理探测器软件和地理加权回归软件进一步探究了研究区自然和社会经济因素对耕地景观生态安全格局的影响，得出以下结论：

1) 扬州市耕地景观生态安全格局时空演变特征明显。从时间上来看，扬州市耕地景观生态安全等级整体上逐年降低；从空间上来看，扬州市耕地景观生态安全等级以市中区向外提升；综合时间与空间，扬州市耕地景观生态安全等级逐年降低并由市中心周边地区向西北方向地区延伸，重心转移点主要在新盛街道、甘泉街道、方巷镇和高邮街道境内。

2) 社会经济影响因子解释度明显高于自然影响因子。其中，主要影响因素有：距道路最近距离>农民收支水平>农机力水平>第一产业 GDP 占比>工业企业数量。

3) 各类主导影响因素影响区域差异明显。其中，工业企业数负向影响主要分布在江都区和广陵区；第一产业 GDP 占比负影响主要分布在宝应县东部；农民收支水平正影响主要分布在高邮市东部；农机力水平正向影响主要分布在宝应县西部和高邮市西部；距道路最近距离负向影响主要分布在仪征市和邗江区。

以遥感影像和统计数据为基础，结合地理空间分析软件、地理探测器软件和地理加权回归软件分析耕地景观生态安全时空演变特征及其影响因素差异性，不仅可以从微观层面深层次分析社会经济因素对耕地造成的影响，而且还可以实现在不同时间和空间层次上表现出各自的差异性。这为快速城镇化发展地区的耕地研究提供了更科学的方法，同时，也为在空间

上实施耕地管理政策提供更有效的理论依据。

参考文献 (reference) :

- [1] 宋小青, 欧阳竹. 中国耕地多功能管理的实践路径探讨[J]. 自然资源学报, 2012, 27(4): 540-551. SONG X Q, OUYANG Z. Route of multifunctional cultivated land management in China[J]. J Nat Resour, 2012, 27(4): 540-551. DOI:10.11849/zrzyxb.2012.04.002.
- [2] 赵晓丽, 张增祥, 汪潇, 等. 中国近 30a 耕地变化时空特征及其主要原因分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(3): 1-11. ZHAO X L, ZHANG Z X, WANG X, et al. Analysis of Chinese cultivated Land's spatial-temporal changes and causes in recent 30 years[J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 2014, 30(3): 1-11. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2014.03.001.
- [3] 王让会. 景观尺度、过程及格局(LSP)研究的内涵及特点[J]. 热带地理, 2018, 38(4): 458-464. WANG R H. Connotation and characteristics of landscape scale, process and pattern(LSP) research[J]. Trop Geogr, 2018, 38(4): 458-464. DOI:10.13284/j.cnki.rddl.003061.
- [4] YUSHANJIANG A, ZHANG F, YU H Y, et al. Quantifying the spatial correlations between landscape pattern and ecosystem service value: a case study in Ebinur Lake Basin, Xinjiang, China[J]. Ecol Eng, 2018, 113: 94-104. DOI:10.1016/j.ecoleng.2018.02.005.
- [5] FJELLSTAD W, DRAMSTAD W. Landscape monitoring as a tool in improving environmental security[M]//Use of Landscape Sciences for the Assessment of Environmental Security. Dordrecht:Springer Netherlands,2007:131-141. DOI:10.1007/978-1-4020-6594-1_9
- [6] GARTAULA H, PATEL K, JOHNSON D, et al. From food security to food wellbeing: examining food security through the Lens of food wellbeing in Nepal's rapidly changing agrarian landscape[J]. Agric Hum Values, 2017, 34(3): 573-589. DOI:10.1007/s10460-016-9740-1.
- [7] JEFFERY L R. Ecological restoration in a cultural landscape: conservationist and Chagossian approaches to controlling the 'coconut Chaos' on the Chagos Archipelago[J]. Hum Ecol, 2014, 42(6): 999-1006. DOI:10.1007/s10745-014-9696-y.
- [8] TURNER M G, GARDNER R H. Quantitative methods in landscape ecology: an introduction[M]//Ecological Studies. New York, NY: Springer New York, 1991: 3-14. DOI:10.1007/978-1-4757-4244-2_1
- [9] 裴欢, 魏勇, 王晓妍, 等. 耕地景观生态安全评价方法及其应用[J]. 农业工程学报, 2014, 30(9): 212-219. PEI H, WEI Y, WANG X Y, et al. Method of cultivated land landscape ecological security evaluation and its application[J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 2014, 30(9): 212-219. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.09.026.
- [10] 孙丽娜, 杨光, 闫文义. 基于乡镇尺度的耕地利用景观生态安全测定研究[J]. 环境工程, 2018, 36(11): 162-165, 178. SUN L N, YANG G, YAN W Y. Research on measurement of ecological security of arable landscape based on the township scale[J]. Environ Eng, 2018, 36(11): 162-165, 178. DOI:10.13205/j.hjgc.201811032.
- [11] 海文静. 基于景观格局的耕地整治优先度评价[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018.
- HAI W J. Evaluation on priority of cultivated land consolidation based on landscape pattern[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2018.
- [12] 宋晓媚, 周忠学, 王明. 城市化过程中都市农业景观变化及其生态安全评价: 以西安市为例[J]. 冰川冻土, 2015, 37(3): 835-844. SONG X M, ZHOU Z X, WANG M. Evaluation of the change of urban agricultural landscape and its ecological security under urbanization: a case study in Xi'an City[J]. J Glaciol Geocryol, 2015, 37(3): 835-844. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2015.0093.
- [13] 韩逸, 郭熙, 江叶枫, 等. 南方丘陵区耕地景观生态安全影响因素及其空间差异[J]. 生态学报, 2019, 39(17): 6522-6533. HAN Y, GUO X, JIANG Y F, et al. Cultivated land landscape ecological security: Influencing factors and spatial differences in the hilly region of South China[J]. Acta Ecol Sin, 2019, 39(17): 6522-6533. DOI:10.5846/stx6201804210908.
- [14] 李晓雅, 郭青霞, 杜轶. 不同特点村庄撂荒耕地景观格局特征对比分析: 以太行山区为例[J]. 山西农业科学, 2019, 47(5): 916-921. LI X Y, GUO Q X, DU Y. Comparative analysis of landscape pattern characteristics of abandoned farmland in different characteristics of villages: taking Taihang mountain area as an example[J]. J Shanxi Agric Sci, 2019, 47(5): 916-921. DOI:10.3969/j.issn.1002-2481.2019.05.47.
- [15] 谈丹, 李萍, 朱红梅. 基于地形起伏度的耕地景观格局研究: 以醴陵市为例[J]. 国土与自然资源研究, 2018(3): 33-38. TAN D, LI P, ZHU H M. Study on landscape pattern of cultivated land based on relief amplitude: taking Liling City as an example[J]. Territ

- Nat Resour Study, 2018(3): 33-38. DOI:10.16202/j.cnki.tnrs.2018.03.011.
- [16] 韩逸, 郭熙, 江叶枫, 等. 南方丘陵区耕地质量与景观格局指数相关性分析[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(5): 1057-1065. HAN Y, GUO X, JIANG Y F, et al. Correlation analysis between cultivated land quality and landscape pattern index in south hilly areas[J]. Jiangsu J Agric Sci, 2018, 34(5): 1057-1065. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4440.2018.05.013.
- [17] 张巧英. 基于耕地景观生态安全评价模型的山区耕地安全格局变化驱动因素研究: 以甘肃省陇南市武都区为例[J]. 矿山测量, 2018, 46(3): 122-126. ZHANG Q Y. Study on the driving factors of the change of the safety pattern of the cultivated land in mountain area based on the cultivated land landscape ecological security evaluation model: Taking Wudu District of Longnan City as the example[J]. Mine Surv, 2018, 46(3): 122-126. DOI: 10.3969/j.issn.1001-358X.2018.03.030.
- [18] 彭文君, 舒英格. 喀斯特山区县域耕地景观生态安全及演变过程[J]. 生态学报, 2018, 38(3): 852-865. PENG W J, SHU Y G. Analysis of landscape ecological security and cultivated land evolution in the Karst mountain area[J]. Acta Ecol Sin, 2018, 38(3): 852-865. DOI:10.5846/stxb201612062513.
- [19] 杨斌, 王金生. 基于 GIS 的丘陵区耕地景观格局时空演变特征分析[J]. 测绘工程, 2014, 23(9): 1-4, 8. YANG B, WANG J S. The spatial-temporal evolution of landscape pattern for farmland in the hilly area based on GIS[J]. Eng Surv Mapp, 2014, 23(9): 1-4, 8. DOI:10.19349/j.cnki.issn1006-7949.2014.09.001. DOI: 10.19349/j.cnki.issn1006-7949.2014.09.001.
- [20] 潘涛. 水田扩张中三江平原北部耕地景观演化规律及驱动因素分析[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015. PAN T. The process of regional paddy farmland landscape evolution and driving factor analysis[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2015.
- [21] MÜLLER D, MUNROE D K. Changing rural landscapes in Albania: cropland abandonment and forest clearing in the postsocialist transition[J]. Ann Assoc Am Geogr, 2008, 98(4): 855-876. DOI:10.1080/00045600802262323.
- [22] VERBURG P H, OVERMARS K P. Combining top-down and bottom-up dynamics in land use modeling: exploring the future of abandoned farmlands in Europe with the Dyna-CLUE model[J]. Landscape Ecol, 2009, 24(9): 1167-1181. DOI:10.1007/s10980-009-9355-7.
- [23] DAN Y, GEEL B V. Abandonment of farmland and vegetation succession following the Eurasian plague pandemic of ad 1347-52[J]. Journal of Biogeography, 2010, 34, 575-582. DOI:10.1111/j.1365-2699.2006.01674.x.
- [24] YELOFF D, VAN GEEL B. Abandonment of farmland and vegetation succession following the Eurasian plague pandemic of ad 1347-52[J]. J Biogeography, 2007, 34(4): 575-582. DOI:10.1111/j.1365-2699.2006.01674.x.
- [25] 辛良杰, 李秀彬, 谈明洪, 等. 近年来我国普通劳动者工资变化及其对农地利用的影响[J]. 地理研究, 2011, 30(8): 1391-1400. XIN L J, LI X B, TAN M H, et al. The rise of ordinary labor wage and its effect on agricultural land use in present China[J]. Geogr Res, 2011, 30(8): 1391-1400. DOI: 10.11821/yj2011080005.
- [26] VAN DOORN A M, BAKKER M M. The destination of arable land in a marginal agricultural landscape in South Portugal: an exploration of land use change determinants[J]. Landscape Ecol, 2007, 22(7): 1073-1087. DOI:10.1007/s10980-007-9093-7.
- [27] 李鑫, 欧名豪, 马贤磊. 基于景观指数的细碎化对耕地利用效率影响研究: 以扬州市里下河区域为例[J]. 自然资源学报, 2011, 26(10): 1758-1767. LI X, OU M H, MA X L. Analysis on impact of fragmentation based on landscape index to cultivated land use efficiency: a case on Lixiahe district in Yangzhou City[J]. J Nat Resour, 2011, 26(10): 1758-1767. DOI: 10.11849/zrzyxb.2011.10.012.
- [28] 徐斌.“扬州行动”争创现代交通示范城[N]. 中国交通报, 2019-05-07(8).
- [29] 李秀芝. 北戴河新区耕地景观生态安全时空变化研究[J]. 中国农业资源与区划, 2017, 38(3): 59-64. LI X Z. The temporal and spatial changes of cultivated land landscape ecological security in Beidaihe new district[J]. Chin J Agric Resour Reg Plan, 2017, 38(3): 59-64. DOI: 10.7621/cjarrp.1005-9121.20170310.
- [30] 郭冻, 薛达元, 余世孝, 等. 泰山景观生态安全动态分析与评价[J]. 山地学报, 2008, 26(3): 331-338. GUO L, XUE D Y, YU S X, et al. Assessment and dynamic analysis of landscape ecological security of Taishan mountain[J]. J Mt Sci, 2008, 26(3): 331-338. DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.2008.03.001.
- [31] 王娟, 崔保山, 姚华荣, 等. 纵向岭谷区澜沧江流域景观生态安全时空分异特征[J]. 生态学报, 2008, 28(4): 1681-1690. WANG J, CUI B S, YAO H R, et al. The temporal and spatial characteristic of landscape ecological security at Lancang River Watershed of longitudinal range gorge region in Southwest China[J]. Acta Ecol Sin, 2008, 28(4): 1681-1690. DOI: 10.3321/j.issn:1000-

0933.2008.04.039.

- [32] 杨青生, 乔纪纲, 艾彬. 快速城市化地区景观生态安全时空演化过程分析: 以东莞市为例[J]. 生态学报, 2013, 33(4): 1230-1239. YANG Q S, QIAO J G, AI B. Landscape ecological security dynamics in a fast growing urban district: the case of Dongguan City[J]. Acta Ecol Sin, 2013, 33(4): 1230-1239. DOI: 10.5846/stxb201203010274.
- [33] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134. WANG J F, XU C D. Geodetector: principle and prospective[J]. Acta Geogr Sin, 2017, 72(1): 116-134. DOI: 10.11821/dlxb201701010.
- [34] LI X W, XIE Y F, WANG J F, et al. Influence of planting patterns on fluoroquinolone residues in the soil of an intensive vegetable cultivation area in Northern China[J]. Sci Total Environ, 2013, 458/459/460: 63-69. DOI:10.1016/j.scitotenv.2013.04.002.
- [35] 龙奋杰, 郑思齐, 王轶军, 等. 基于空间计量经济学模型的城市公共服务价值估计[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009, 49(12): 2028-2031. LONG F J, ZHENG S Q, WANG Y J, et al. Value estimates of local public services using a spatial econometric model[J]. J Tsinghua Univ Sci Technol, 2009, 49(12): 2028-2031. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2009.12.028.
- [36] 覃文忠. 地理加权回归基本理论与应用研究[D]. 上海: 同济大学, 2007. QIN W Z. The basic theoretics and application research on geographically weighted regression[D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [37] 隋雪艳, 吴巍, 周生路, 等. 都市新区住宅地价空间异质性驱动因素研究: 基于空间扩展模型和 GWR 模型的对比[J]. 地理科学, 2015, 35(6): 683-689. SUI X Y, WU W, ZHOU S L, et al. Drive pattern on the spatial heterogeneity of residential land price in urban district: a comparison of spatial expansion method and GWR model[J]. Sci Geogr Sin, 2015, 35(6): 683-689. DOI:10.13249/j.cnki.sgs.2015.06.003.
- [38] 喻红, 曾辉, 江子瀛. 快速城市化地区景观组分在地形梯度上的分布特征研究[J]. 地理科学, 2001, 21(1): 64-69. YU H, ZENG H, JIANG Z Y. Study on distribution characteristics of landscape elements along the Terra in Gradient[J]. Sci Geogr Sin, 2001, 21(1): 64-69. DOI:10.13249/j.cnki.sgs.2001.01.012.
- [39] 李晓斐. 城乡一体化: 小城镇理论的反思与扩展[J]. 华南农业大学学报(社会科学版), 2019, 18(3): 131-140. LI X F. Urban-rural integration and rethinking of small towns theory[J]. J South China Agric Univ Soc Sci Ed, 2019, 18(3): 131-140. DOI:10.7671/j.issn.1672-0202.2019.03.012.
- [40] 周应堂. 20 世纪苏中农业与农村变迁研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2007. ZHOU Y T. Transition of agriculture and countryside in mid-Jiangsu Province in the 20th century[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2007.
- [41] 周冕. 土地征收对农民生计影响的研究[J]. 湖南社会科学, 2011(6): 106-110. ZHOU M. Study on the impact of land expropriation on farmers' livelihoods [J]. Hunan Soc Sci, 2011(6): 106-110.