· 土地保障与生态安全 ·

基于 MGWR 模型的江苏省耕地细碎度空间格局与驱动因素分析

张睿思[1,2]，叶思菁[1※]，任书义[1]

（1. 北京师范大学地理科学学部，北京 100875；2. 华东师范大学地理科学学院，上海 200241）

摘 要：耕地细碎化通常被认为会降低农业生产效率，进而威胁粮食安全。认知耕地细碎度格局及驱动因素是科学治理耕地细碎化的重要前提。该研究以江苏省为研究区，从斑块密度指数、面积加权平均形状指数、面积多样性指数、斑块结合度指数 4 个维度评估县级耕地细碎度，并基于 K-means 方法分析不同维度耕地细碎度的聚类特征。在此基础上，该文应用多尺度地理加权回归模型（multiscale geographically weighted regression，MGWR），从地形部位、土壤性状、城市化水平、利用强度、耕地保护力度 5 个维度探究了江苏省各县区细碎度的驱动因素。研究结果表明：江苏省耕地呈现南北差异，具体表现为斑块密度与形状指数北低南高，面积多样性指数北高南低，结合度指数西高东低。4 个维度的县级耕地细碎度指标表现出 3 类聚类特征：A 类（高连片-小田块类型）和 B 类（低连片-小田块类型）县区位于省南部，均表现出斑块密度大、形状不规则，面积多样性较高的特征，其中 A 类县区比 B 类县区具有更高的耕地连片性；C 类（高连片-大田块类型）县区的斑块密度较低，形状规则，面积多样性低且耕地连片度高，主要分布在中部和北部地区。此外，不同类型区域耕地细碎度的驱动因素表现出空间异质性特征，面向不同地区应采取差异化的细碎化治理策略。南部县区（A 类和 B 类）的耕地细碎度主要受自然因素驱动，而中部和北部县区（C 类）的耕地细碎度则受到更为复杂的综合因素影响，包括耕地分配制度、经济发展情况等。该研究的结果可为江苏省优化耕地细碎度治理模式，进而发展耕地可持续利用提供参考。

关键词：土地利用；耕地资源；耕地细碎化；K-means；地理加权回归

doi：10.11975/j.issn.1002-6819.202405037

中图分类号：F323.21 **文献标志码：**A **文章编号：**1002-6819(2024)-16-0229-11

张睿思，叶思菁，任书义. 基于 MGWR 模型的江苏省耕地细碎度空间格局与驱动因素分析[J]. 农业工程学报，2024，40(16)：229-239. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202405037 http://www.tcsae.org

ZHANG Ruisi, YE Sijing, REN Shuyi. Spatial pattern and driving factors of cultivated land fragmentation in Jiangsu Province using MGWR model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(16): 229-239. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202405037 http://www.tcsae.org

0 引 言

地块面积小、形状不规则、权属较为分散等制约集约化生产的耕地利用现象，即为耕地细碎化[1]。耕地细碎化作为世界耕地利用存在的普遍现象，在中欧、东欧、印度以及中国尤为严重[2-3]。一方面，中国人均耕地面积不足世界平均水平的 40%，并受到地形部位、耕作条件、土壤性状、城市化等诸多因素限制[4-6]。资源禀赋的不足限制耕地连片分布与规模化经营。另一方面，20 世纪 70 年代末开始实行的家庭联产承包责任制在一定程度上提高了农民生产积极性，但该政策实施过程中基于农村人口数量、耕地质量等因素平均分配耕地的方式进一步加剧中国耕地细碎化[7-9]。在此背景下，研究耕地细碎度空间格局与驱动因素，对提高农业生产效率、促进耕地资源优化配置、维护国家粮食安全具有重要意义[10-11]。

近年来，学界围绕耕地细碎化的概念、评估方法、影响、成因等方面开展了众多研究。在概念方面，BINNS 等[12-13] 强调耕地空间上的不相邻性，认为耕地细碎化是在一个空间区域内单独耕作的且空间上互不相临的耕地板块结构。KING 等[14-15] 提出耕地细碎化为耕地被分割为面积过小的多个地块且不能进行合理开发。吕晓等[16] 从权属角度，认为耕地细碎化是指一个农户经营一块以上的农田且农田互不连接，难以进行成片集中的规模经营的现象。综上，耕地细碎化是指在人为因素或自然因素共同作用下，耕地被分割为多个面积较小的地块，呈现出大面积插花、分散、无序的状态，难以进行大规模生产经营的现象[14-21]。在评估方法方面，耕地细碎度评估一般应用景观格局指数方法，围绕耕地的数量、面积、形状、分布等维度设计细碎度评估指标体系，并基于耕地利用栅格数据计算耕地细碎度指标数值[18,22-23]；部分学者进一步定义耕地细碎度指数，通过对多维景观格局指标进行综合运算，量化表征耕地细碎度综合状况[19,24]；亦有部分研究基于经济学理论方法，通过考虑单块耕地是否存在规模经济来评估耕地细碎度[25-26]。例如，陈帷胜等[27] 运用景观格局指数法和熵权法，选取平

收稿日期：2024-05-07 修订日期：2024-06-11
基金项目：国家自然科学基金项目（42171250, 42230106）；地表过程与资源生态国家重点实验室自主课题项目（2022-ZD-04）
作者简介：张睿思，研究方向为耕地资源质量与可持续利用。
Email：201911051208@mail.bnu.edu.cn
※通信作者：叶思菁，副教授，硕士生导师，研究方向为耕地资源保护与可持续利用。Email：yesj@bnu.edu.cn

均斑块面积 MPS、斑块密度 PD、面积加权形状指数 AWMSI 等指数，评估浙江省宁波市 1992 年、2003 年和 2014 年耕地细碎度及其变化情况，得出宁波市 1992—2014 年耕地细碎度不断增加，地形复杂、经济发达地区耕地破碎度偏大的结论。在耕地细碎度的影响方面，部分研究提出，在少数特殊场景下（如劳动力过剩），耕地细碎化在多样化作物种植和抵御农业生产风险等方面具有积极影响[28-29]。但越来越多的实证研究强调其负面影响，包括增加资金和组织管理成本，降低规模经济效益，阻碍农业机械化推广，减少作物产量和家庭收入，加剧了栖息地丧失和农田边际化，甚至可能加剧抛荒撂荒现象的产生，阻碍农村发展并威胁国家粮食安全[3,30-32]。在成因方面，已有研究表明，耕地细碎化的成因大致包括自然因素、制度因素、经济因素、社会文化因素 4 个方面[15,20,33-34]。自然因素是耕地细碎化的重要因素，包括区域地形地貌特征、耕地质量、自然灾害等。例如 YUCER 等[35] 针对土耳其耕地细碎化的研究中提出山丘或丘陵地区的耕地由于地形限制，相比平原地区细碎度更高；制度因素主要指分配制度、交易制度、各种土地调整和流转制度等[36-40]，例如 KAWASAKI 等[40] 在研究日本稻田耕地细碎度的成本与效益时发现，耕地持有者通常会将大块耕地划分并逐步流转给他人，从而导致耕地细碎化；经济因素包括农户间的收入异质性、城市扩张、产业结构变革等，例如 QIU 等[41-43] 研究发现，农户在通过农业生产累计一定财富后常转向收益更高的非农业生产，将原本的耕地流转给多个农户，从而导致耕地细碎化；社会文化因素指各种文化习俗和观念的影响，包括继承、赠与等，从而导致耕地细碎化[36,44]。

已有研究成果为本研究提供了重要理论与方法指导，但尚存部分问题：一方面，中高分辨率土地利用类型数据为耕地细碎度评估研究提供了重要的数据支持，但基于栅格模型组织的耕地利用数据往往低估权属分割、多样化作物种植及地形高差等因素引起的耕地细碎现象[45-50]；另一方面，关于耕地景观细碎与权属细碎的研究往往从区域尺度与微观尺度分别开展，较少案例从区域尺度分析自然因素与政策因素综合作用下的耕地细碎度空间格局及其驱动因素的空间分异特征[8,51-52]；第三，已有部分研究发现耕地细碎度的主导驱动因素及驱动特征存在空间分异特征，但较少实证研究探索这一空间分异特征的空间格局与成因[53]。针对上述问题，本文以江苏省为案例开展实证研究，基于第二次全国土地调查（2007—2009 年）耕地图斑矢量数据集，应用斑块密度指数、面积加权平均形状指数、面积多样性指数、斑块结合度指数，从人为分割、利用方便、整治潜力三个维度评估江苏省县级单元耕地细碎度空间格局；并应用 K-means 方法分析县级单元不同维度耕地细碎化特征的空间聚类模式。在此基础上，应用多尺度地理加权回归模型（multiscale geographically weighted regression，MGWR）分析自然—社会—经济因素对江苏省耕地细碎特征的局部驱动作用及其空间分异特征。本研究可以为探索江苏省区域适宜的耕地细碎化管控策略提供信息支持，并且本文研究方法可以为其他地区细碎度格局与驱动研究提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

江苏省地处中国大陆东部沿海地区，地形以平原为主，地势平坦，东临黄海，地跨长江、淮河两大水系（图 1）。江苏地貌包含平原、山地和丘陵 3 种类型。其中平原面积占比 86.9%，丘陵面积占比 11.54%，山地面积占比 1.56%。全省 93.89% 的陆地面积处于 0°～2°的平坡地中。江苏气候是典型的季风气候，以淮河、苏北灌溉总渠为界，以南地区为亚热带季风气候，以北地区为暖温带季风气候。气候特征为四季分明、季风气候显著、雨热同期、降水集中等。江苏省全省土地面积 107 218 km^2，2019 年总人口 8 470 万人，其中乡村从业人员 2 567.05 万人，人口密度 753 人/ km^2，是中国 13 个粮食主产区之一，以种植小麦和水稻为主，为保障国家粮食安全做出重要贡献。根据 2014 年土地利用变更调查数据，江苏省耕地总面积 4.583×10^6 hm^2，占全省土地总面积的 42.75%；人均耕地面积 567 m^2，接近联合国粮农组织（FAO）确定的 533 m^2 警戒线。而 2019 年江苏省第三次国土调查结果显示，江苏省耕地面积降为 4.099×10^6 hm^2，人均耕地面积仅 480 m^2。综上，江苏省耕地资源保护形势严峻，人地矛盾突出，部分地区耕地细碎化严重，并与非农化、非粮化共同威胁区域粮食安全。

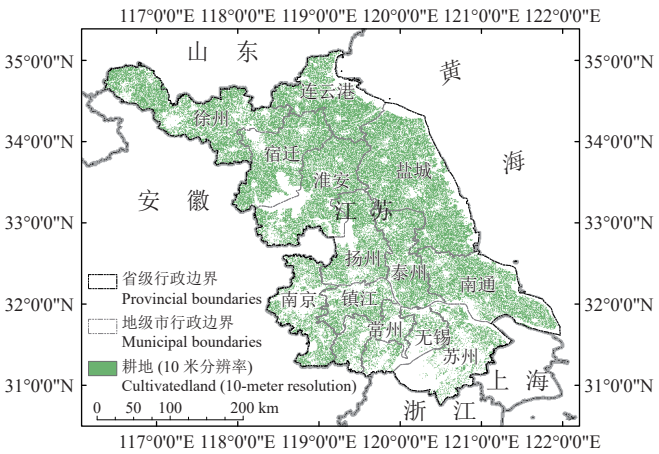


图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

1.2 数据来源

本研究应用数据主要来源第二次全国土地调查（2007—2009 年）耕地矢量数据集、SRTMDEM 90M 数据（http://www.gscloud.cn）、中国高分辨率国家土壤信息格网基本属性数据集（2010—2018）（http://soil.geodata.cn）、《江苏省农村统计年鉴-2010》等，如表 1 所示。

表 1　数据来源说明

Table 1　Description of data sources

指标 Indicator	指标含义 Definition	数据源 Data source
耕地矢量数据集	耕地地块边界矢量图斑集合	第二次全国土地调查
高程/m	海拔	SRTMDEM 90M
坡度/(°)	地表单元陡缓程度	SRTMDEM 90M
土壤有机碳/(g·kg^{-1})	0～30 cm 深度土壤有机碳含量	中国高分辨率国家土壤信息格网基本属性数据集（2010—2018）
土壤容重/(g·cm^{-3})	0～30 cm 深度单位容积土壤中固体颗粒的重量	中国高分辨率国家土壤信息格网基本属性数据集（2010—2018）
种植农业人口/万人	用于计算县级人均耕地面积与人均农业 GDP	《江苏省农村统计年鉴-2010》
耕地总面积/hm^2	—	《江苏省农村统计年鉴-2010》
农业总产值/万元	—	《江苏省农村统计年鉴-2010》
作物单产/(kg·hm^{-2})	—	《江苏省农村统计年鉴-2010》
城镇化率	一个地区城镇常住人口占常住总人口的比例	江苏省统计局

1.3　景观格局指数

本研究利用景观格局指数法，以耕地地块为景观构成的基本单元，并利用景观格局指数表征耕地的景观格局信息，反映一定区域内耕地结构组成和空间配置等具体特征。根据已有研究[18,22,54]和江苏省耕地利用变化特征，选取 4 种景观格局指数。

度量地块分布密度的斑块密度指数（patch density, PD），用于指示人为划分及多样化作物种植引起的耕地细碎特征，PD 越高表示耕地被人为分割的越细碎。其计算式如式（1）所示。

$$\mathrm{PD}=\frac{N}{A} \tag{1}$$

度量地块形状规则程度的面积加权平均形状指数（area-weighted mean shape index, AWMSI），用于指示机械化耕作的便利性，AWMSI 越高表示耕地形状越不规则。其计算式如式（2）所示。

$$\mathrm{AWMSI}=\sum_{i=1}^{N}\left[\left(\frac{0.25S_i}{\sqrt{a_i}}\right)\left(\frac{a_i}{A}\right)\right] \tag{2}$$

度量面积多样性程度的香农多样性指数（Shannon's diversity index of square, SHDI-S），用于指示耕地面积的多样程度，可用于衡量耕地利用结构的多样性和均衡性，如计算式（3）所示。SHDI-S 越高表示耕地地块面积越多样。需要说明的是，SHDI-S 不能直接用于判断耕地细碎度，但可作为有用的辅助指标。

$$\mathrm{SHDI-S}=-\sum_{k=1}^{m}(P_k\cdot\ln P_k) \tag{3}$$

度量耕地空间连片分布程度的斑块结合度指数（patch cohesion index, COHESION），用于指示整治耕地细碎度的自然潜力，如计算式（4）所示。较高的 COHESION 表示耕地地块之间更紧密连接，形成了较大的连片区域，这有助于通过农地流转形成农业规模化经营，即耕地细碎度的治理潜力越大。

$$\mathrm{COHESION}=\left[1-\frac{\sum_{i=1}^{N}S_i}{\sum_{i=1}^{N}S_i\sqrt{a_i}}\right]\cdot\left[1-\frac{1}{\sqrt{N}}\right]^{-1}\cdot 100 \tag{4}$$

其中 N 为耕地地块数量（个），A 为耕地总面积（m^2），S_i 为耕地地块 i 的周长（m），a_i 为耕地地块 i 的面积（m^2），m 是斑块类型的数量（个），P_k 为斑块类型 k 在景观中出现的概率。实际计算中，PD、AWMSI、SHDI-S 通过编写 Python 程序对江苏省耕地矢量数据集计算得出；COHESION 则应用软件 Fragstats 4.2 对江苏省耕地 10 m 栅格数据集计算得出。需要补充说明的是，南京市浦口区 AWMSI 计算结果（55.09）与其余数据平均值的偏差超过 3 倍标准差，远高于其他县区数据（1.14～2.85），故视为异常值排除。

1.4　Pearson 相关系数

Pearson 相关系数 r 是一种线性相关系数，用于反映两个正态分布变量的线性相关程度，其计算式如式（5）所示。

$$r=\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{X_i-\bar{X}}{s_X}\right)\left(\frac{Y_i-\bar{Y}}{s_Y}\right) \tag{5}$$

式中 n 为样本总数，X_i 和 Y_i 分别为两类变量的观测值，$\bar{X}$和$\bar{Y}$为两类变量的均值，s_X 和 s_Y 为两类变量的标准差。r 描述的是两个变量间线性相关强弱的程度，r 的绝对值越大表明相关性越强。在本研究中，Pearson 相关系数被用来分析江苏省县级单元耕地空间分布连片性、地块密度、地块面积多样性与地块规则程度之间是否存在显著的相互影响。

1.5　K-means 聚类算法

K-means 聚类算法由 MACQUEEN 提出，是一种迭代求解的聚类分析算法[55]。其算法思想为：给定n个数据点$\{x_1,x_2,\cdots,x_n\}$，找到K个聚类中心$\{a_1,a_2,\cdots,a_K\}$，使得每个数据点与它最近的聚类中心的距离平方和最小，并将这个距离平方和称为目标函数，记为W_n，如计算式（6）所示。在本研究中，K-means 聚类算法被用来分析县级单元 4 维耕地细碎度特征的空间聚集模式。

$$W_n=\sum_{i=1}^{n}\min_{1\le j\le K}\left|x_i-a_j\right|^2 \tag{6}$$

1.6　多尺度地理加权回归（MGWR）

MGWR 模型是地理加权回归（geographically weighted regression, GWR）模型的改进，由 FOTHERINGHAM 等[56]提出。基础 GWR 模型如计算式（7）所示。

$$y_i=\beta_0(u_i,v_i)+\sum_{k=1}^{m}\beta_k(u_i,v_i)x_{ik}+\epsilon_i \tag{7}$$

式中 y_i 为在位置 i 处的因变量值；$x_{ik}(k=1,2,\cdots m)$为位置 i 处的自变量（观测值）；(u_i,v_i)为回归分析点 i 的坐标；$\beta_0(u_i,v_i)$为截距项；β_k 为回归系数；ϵ_i 为误差项 。

相比于 GWR 模型变量均为特定带宽，MGWR 模型的每个变量都有其不同的带宽，模型的自适应带宽进一步地考虑了空间异质性的不同水平。在本研究中，MGWR 模型被用来分析驱动变量（即县级单元耕地平均高程、坡度、土壤有机碳、土壤容重、人均耕地面积、人均农业产值、作物单产、2000—2010 年均耕地面积变化量和城镇化率）对耕地细碎度指标（即 PD，AWMSI 和 COHESION）的区域性影响特征。在模型参数设置方面，选择高斯核函数作为 MGWR 模型的核函数，选择 AICc 准则作为带宽选择的基本准则。

2 结果与分析

2.1 耕地细碎度空间格局

江苏省县级单元耕地细碎度空间格局在斑块密度（PD）指数、平均形状指数（AWMSI）、香农多样性指数（SHDI-S）和斑块结合度（COHESION）指数 4 个维度均表现出明显的区域差异，具体概括为南部地区斑块密度更高、耕地形状更不规则、耕地面积多样性较低，同时不同地区耕地连片性存在差异。

首先，江苏省县级耕地 PD 指数呈由南向北递减特征（如图 2a）。江苏省南部城市，如南京市和苏州市，斑块密度较高；而江苏省北部，如徐州市、连云港市和宿迁市等苏北城市，斑块密度较低。其次，江苏省县级耕地 AWMSI 在南部和东部相对较高，而在西北部和中部较低（图 2b）。再次，县级耕地 SHDI-S 表现出由北向南递减趋势，即县级单元内部耕地斑块面积的差异性减小（图 2c）。江苏省北部地区，如徐州、连云港等，县级耕地 SHDI-S 较高，表明耕地地块面积在这些区域差异较大。与之相反，南京市及苏州市等地的 SHDI-S 较低，结合 PD 指数表明这些地区内耕地地块的面积普遍较低。最后，县级耕地 COHESION 指数的空间分布表现出西高东低特征，在东南部最低（图 2 d）。综上，江苏省南部地区耕地同时面临高度细碎的人为分割、不规则的形状和低连片性三方面细碎化问题，且县级单元内耕地地块面积普遍较低，阻碍了大型农机的推广应用，限制耕地资源高效利用并可能加剧耕地生态退化。而西北部和中部的耕地斑块密度较低、形状更规则且连片性更高，更易实现规模化经营。

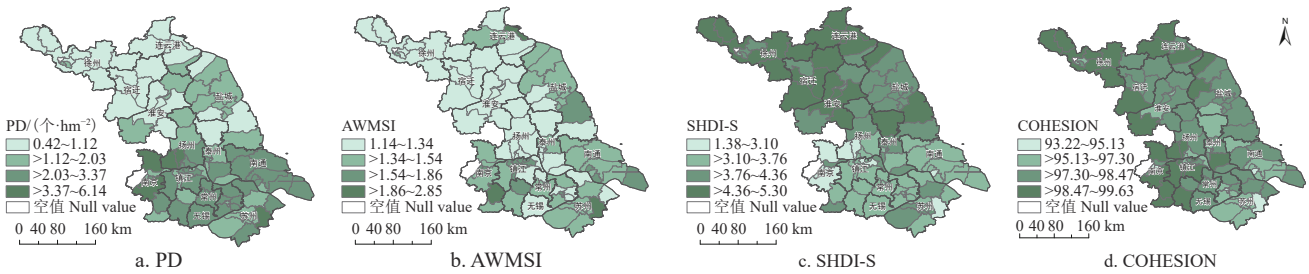


图 2 江苏省耕地细碎度空间格局

Fig.2 Spatial patterns of cultivated land fragmentation in Jiangsu Province

2.2 耕地细碎度的空间聚类特征

对江苏省县级单元耕地 PD、AWMSI、SHDI-S、COHESION 之间进行 Pearson 相关分析，结果表明 SHDI-S 与 PD（r=-0.82，P<0.01）、SHDI-S 与 AWMSI（r=-0.29，P<0.01）之间均表现出显著负相关性，而 SHDI-S 与 COHESION（r=0.40，P<0.01）之间则表现出显著正相关性（表 2）。

表 2 Pearson 相关分析结果

Table 2 The results of Pearson correlation coefficient

景观格局指数 Landscape pattern index	项目 Item	PD	AWMSI	SHDI-S	COHESION
PD	皮尔逊相关性		0.18	-0.82**	-0.10
	P 值		0.08	<0.01	0.31
AWMSI	皮尔逊相关性	0.18		-0.29**	-0.12
	P 值	0.08		<0.01	0.24
SHDI-S	皮尔逊相关性	-0.82**	-0.29**		0.40**
	P 值	<0.01	<0.01		<0.01
COHESION	皮尔逊相关性	-0.10	-0.12	0.40**	
	P 值	0.31	0.24	<0.01	

注：“**” 在 0.01 级别（双尾），相关性显著；样本数均为 102 个。

Note: "**" Correlations are significant at the 0.01 level (two-tailed); the number of samples is 102.

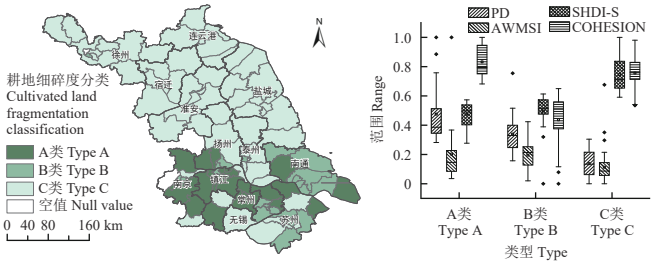
PD、AWMSI 与 COHESION 3 类细碎度指标之间无显著相关性，这表明研究区耕地空间分布连片性、地块密度与地块规则程度之间没有显著的相互影响。地块密度增加伴随着耕地面积多样性降低，这是由于人为权属分配和多样化种植导致面积较大的耕地地块被分割成更细碎的子地块。地块形状规则性和空间分布连片性降低均伴随着耕地面积多样性降低，这是由于自然地理因素导致耕地地块面积普遍较小且离散分布。

应用 K-means 方法分析县级单元 4 维耕地细碎度指标的聚类模式。研究表明，江苏省县级单元多维耕地细碎度特征在南北地区具有明显的空间差异，综合表现出 3 种聚类模式。其中，A 类（高连片-小田块类型）县区 21 个，B 类（低连片-小田块类型）县区 26 个，C 类（高连片-大田块类型）县区 55 个。不同类别的统计特征和空间分布特征如图 3 所示。其中，A 类和 B 类县区，主要分布在江苏南部地区，共同呈现较高的耕地细碎度特征。这两类县区的耕地通常表现出斑块密度大、形状不规则，面积多样性较高。其中 A 类县区较 B 类县区具有更高的耕地连片性，即具备更高规模化经营潜力。这

些地区耕地细碎化整治的潜力较大，其中 A 类县区具备更高规模化经营潜力，更适合实施农地流转。C 类县区主要分布在江苏中部和北部地区，并在省南部有零星分布。这类县区呈现出较低的耕地细碎度特征，即耕地形状规则，斑块密度较低，连片度高，且地块面积差异较小。这类县区应以预防为主，着重监督耕地增减挂钩、占补平衡、进出平衡等政策实施过程对区域耕地细碎度的影响。

2.3　耕地细碎度驱动因素研究

本研究从地形部位、土壤性状、城市化水平、利用强度、耕地保护力度 5 个维度，选取归一化的县级单元耕地平均高程、坡度、土壤有机碳、土壤容重、城镇化率、人均农业产值、作物单产、人均耕地面积以及 2000—2010 年均耕地面积变化量作为驱动变量。VIF 检验结果表明，选取的自变量指标不存在多重共线性[57]（表 3）。在此基础上，应用多尺度地理加权回归（MGWR）方法分析这些驱动变量对耕地细碎度指标（即 PD，AWMSI 和 COHESION）的区域性影响特征，结果分别如图 4、图 5 和图 6 所示。需要说明的是，计算结果中土壤有机碳对 PD、AWMSI 和 COHESION 的驱动特征在江苏省全域均不显著，限于图文篇幅而省略该结果。



a. 耕地细碎度分类　a.Cultivated land fragmentation classification

b. K-means聚类分析结果　b.The results of K-means clustering algorithm

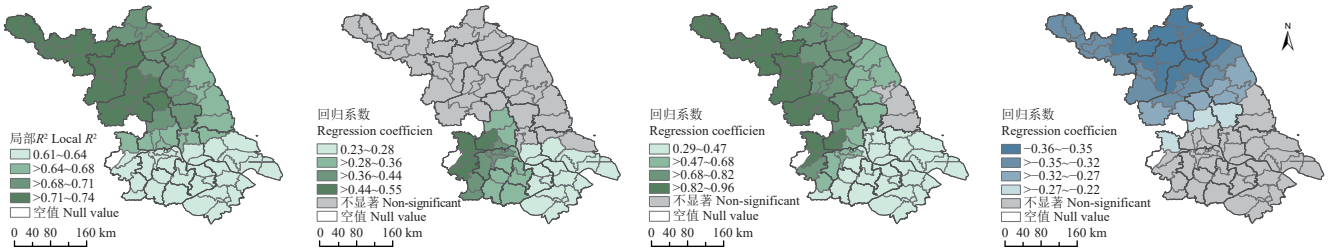
图 3　江苏省耕地细碎度的空间聚类特征及 K-means 聚类分析结果

Fig.3　Spatial clustering characteristics of cultivated land fragmentation in Jiangsu Province and the results of K-means clustering algorithm

表 3　VIF 检验结果

Table 3　The results of variance inflation factor (VIF)

项目 Item	地形部位 Topography		土壤性状 Soil properties		城市化 Urbanization	利用强度 Utilization intensity		保护力度 Protection efforts	
	高程 Altitude	坡度 Gradient	土壤有机碳 Soil organic carbon	土壤容重 Bulk density	城镇化率 Urbanization rate	人均农业产值 Agricultural production per capita	作物单产 Crop yield per unit area	人均耕地面积 Cultivated land area per capita	2000—2010 年均耕地面积变化量 Average annual change in cropland area (2000-2010)
容差 Tolerance	0.394	0.354	0.475	0.567	0.657	0.413	0.759	0.347	0.614
VIF	2.536	2.824	2.105	1.762	1.523	2.423	1.317	2.880	1.628



a. PD 局部R^2　a. local R^2 of PD

b. 土壤容重　b. Bulk density

c. 人均耕地面积　c. Cultivated land area per capita

d. 2000—2010年均耕地面积变化量　d. Average annual change in cropland area (2000—2010)

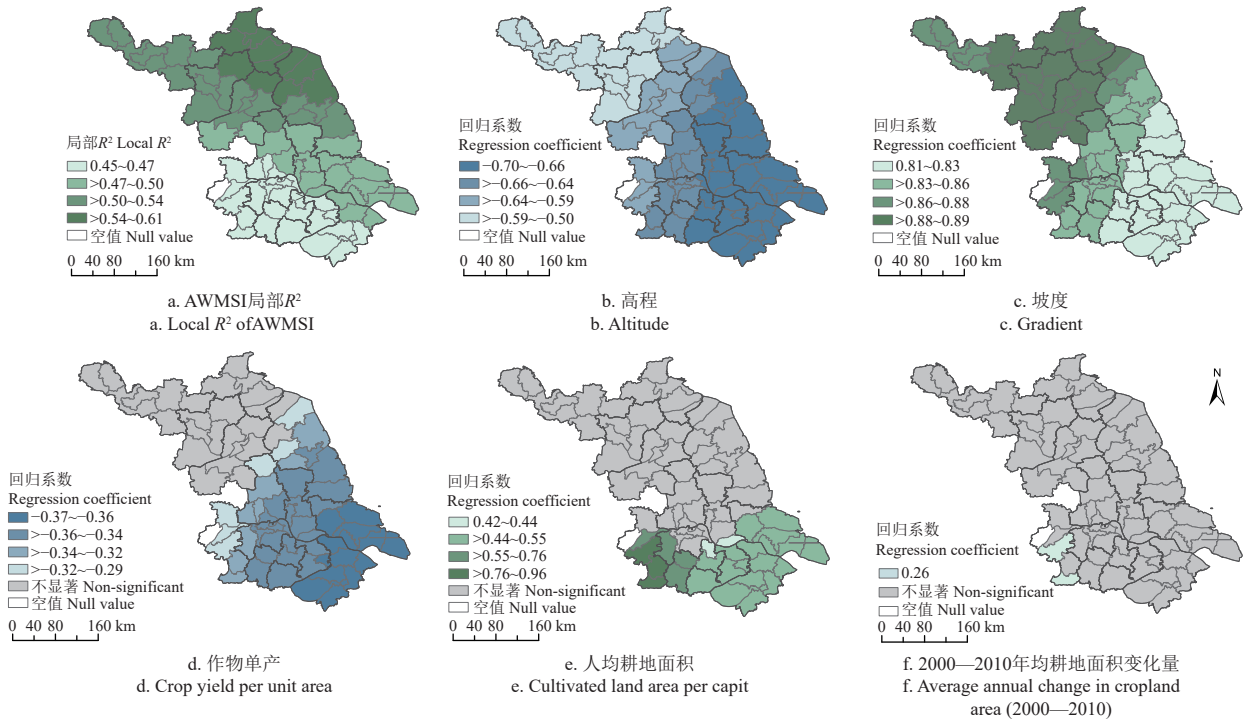
注：驱动因素显著性检验 R^2=0.731，P<0.05。

Note: Significance test, R^2=0.731, P<0.05.

图 4　PD 多尺度地理加权回归结果

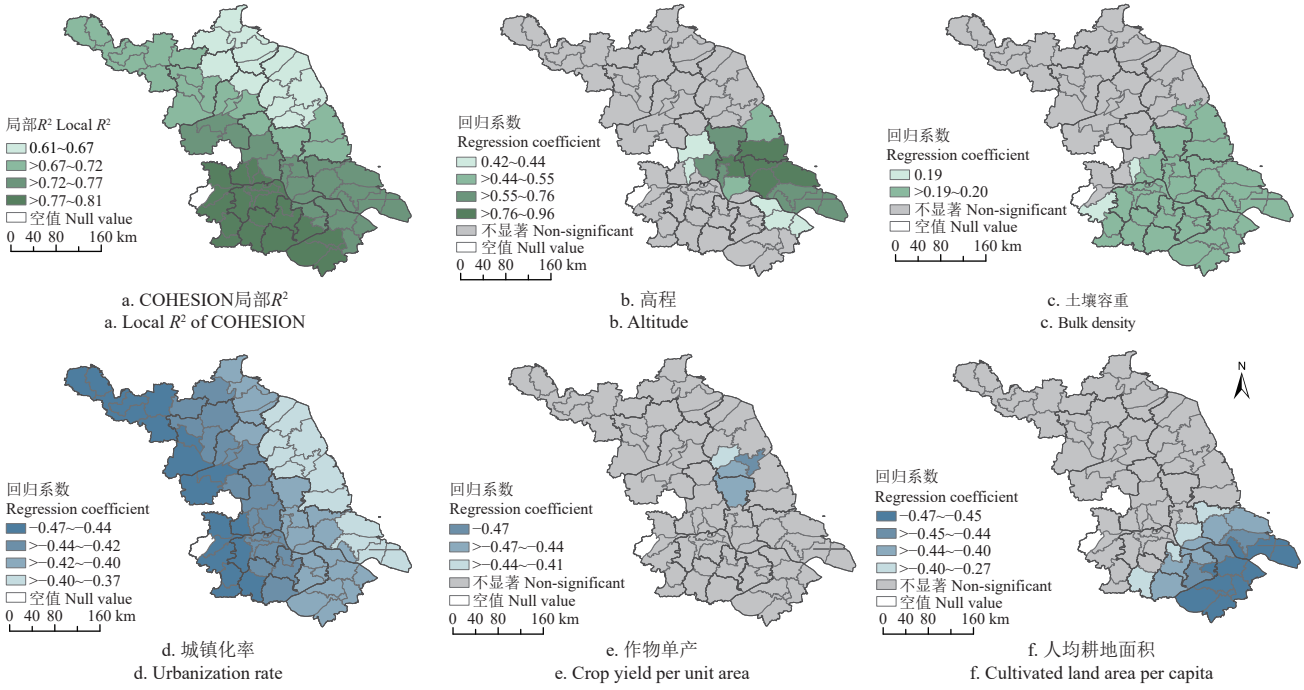
Fig.4　MGWR (multiscale geography weightedregression) results for PD

如图 4 所示，MGWR 模型 61%～74% 解释了各驱动变量对县级单元耕地 PD 指数的局部驱动作用。在江苏省西北部，模型 R^2 最高，驱动变量对 PD 指数的变化的解释力超过 70%；而在南部，驱动变量对 PD 指数的解释力低于 64%。这表明南部地区 PD 指数的驱动机制比西北部更复杂，未知驱动变量的作用更大。从驱动变量视角，高程、坡度、土壤有机碳、城镇化率、人均农业产值和作物单产对 PD 指数的驱动作用均不显著，限于图文篇幅而省略。更好的耕作条件并未显著降低人为分割驱动的耕地细碎化。在江苏省南部地区，土壤容重显著加剧县级 PD 指数。南京、扬州、镇江地区坡度的影响最为显著，回归系数的绝对值可达 0.37 以上。耕地保护力度因素显著影响 PD 指数。在以耕地面积增加为主要特征的江苏省北部（特别是宿迁市和淮安市），2000—2010 年均耕地面积变化对 PD 指数具有显著负向作用，即耕地面积扩张显著提升耕地利用规模。但与一般认识冲突，人均耕地面积在江苏省大部分县区对 PD 指数产生显著正向影响，即人均耕地面积增加却驱动耕地利用细碎度增加。这种影响自西部向东南部逐渐减弱，在徐州市、宿迁市、淮安市、扬州市和南京市等北部地区，回归系数绝对值高于 0.83；而在南通市、苏州市、无锡市等东南部地区，回归系数绝对值普遍低于 0.47。



注：驱动因素显著性检验 R^2=0.511，P<0.05。
Note: Significance test, R^2=0.511, P<0.05.

图 5 AWMSI 多尺度地理加权回归结果
Fig.5 MGWR results for AWMSI



注：驱动因素显著性检验 R^2=0.761，P<0.05。
Note: Significance test, R^2=0.761, P<0.05.

图 6 COHESION 多尺度地理加权回归结果
Fig.6 MGWR results for COHESION

如图 5 所示，MGWR 模型 45%～61% 解释江苏省县级耕地 AWMSI 空间分异特征，在东北部地区相较西南部地区表现出更优的解释力。土壤有机碳、土壤容重、城镇化率和人均农业产值对 AWMSI 未表现出显著影响，限于图文篇幅省略，而其他因素在局部地区表现出显著影响。具体来看，高程对江苏省县级耕地 AWMSI 呈显著负向影响，东部地区回归系数的绝对值可达 0.66 以上，即平均高程较高的县通常耕地地块形状更规则。坡度是

显著驱动 AWMSI 的全局普适因素，坡度的增加加剧耕地地块形状的不规则程度；其驱动力在省东部平原区最低，在省西北部最高。在江苏省南部县区，作物单产水平和人均耕地面积分别对 AWMSI 产生显著负向和正向影响。这说明农业产出水平更高的县区趋于具备更规整的耕地地块形状；而人均耕地面积增加可能是由于耕地不规范扩张或务农劳动力流出两方面原因驱动：前者直接导致 AWMSI 增加；后者与耕作条件相关，指示较高 AWMSI 提升了农业经营成本。年均耕地面积变化仅对江苏省南部的 2 个县区 AWMSI 产生正向影响。

如图 6 所示，MGWR 模型 61%～81% 解释江苏省县级耕地 COHESION 空间分异特征，在南部地区相较北部地区表现出更优的解释力。坡度、土壤有机碳、人均农业产值与年均耕地面积变化对 COHESION 的影响在全局都是不显著的，限于图文篇幅而省略。高程在东部地区对 COHESION 表现出显著正向作用，这表明平均高程较高的县区耕地连片度较高，耕地细碎度相对较低。土壤容重在东南部地区对 COHESION 表现出显著正向影响。城镇化率对江苏省所有县区 COHESION 均有显著负向影响，西部较东部影响更为显著，这表明城市化的发展会对耕地的连片分布产生破坏。作物单产水平仅在盐城和泰州市的少量县区对 COHESION 具有显著的正向影响。在江苏省东南部地区，人均耕地面积对 COHESION 表现出显著负向影响。结合 PD 指数与 AWMSI 可见，该地区人均耕地面积增加的同时，耕地地块在密度、形状、连片性方面均表现出加剧的细碎化特征。人均农业产值增长并未驱动更连片的耕地利用，而是对 COHESION 产生显著的负向作用，这可能是由于细碎的地块更趋于被非粮化利用而产生更高的经济效益。

3　讨论

本研究基于江苏省耕地矢量图斑数据计算耕地细碎度指标 PD、AWMSI、SHDI-S 时，相比于已有基于栅格数据集的计算结果，该方案提高了对耕地数量、位置、形状等特征识别的准确度，能够更好的表现耕地权属分割与多样化种植引起的细碎化问题。计算结果表明，已有基于栅格数据的江苏省耕地细碎度评估结果低估了权属分割、多样化作物种植等因素引起的细碎现象（即斑块密度指数）。在驱动因素分析部分，本研究应用多尺度地理加权回归方法，揭示了 9 种因素对江苏省多维度耕地细碎度特征主导因素及驱动过程的区域性差异。城市化发展是威胁耕地细碎化整治潜力（即 COHESION 指数）的主导因素，但对人为分割引起的耕地细碎化（即 PD 指数）及耕地地块形状规则程度（即 AWMSI 指数）无显著影响。加强耕地面积保护的举措在江苏省北部显著降低了 PD 指数，但在南部地区无显著影响。人均耕地面积更高的县区反而表现出更高的 PD 指数，这表明在研究区加强农地流转政策实施的过程中，亟需注意加强对流转农地利用方式的制约，严格限制“非粮化”利用。综上，基于多尺度地理加权回归方法，可以为探究耕地细碎度的区域性主导驱动因素及驱动特征提供方法支持。

本文的不足之处主要有以下三方面：首先，本研究选取的驱动因素主要源自于地形部位、土壤性状、城市化水平、利用强度、保护力度 5 个维度，其中保护力度这一维度主要通过人均耕地面积和 2000—2010 年均耕地面积变化量侧面反映。但这两个驱动变量在受到当地耕地保护政策影响的同时，还受到其他因素如人口变化、荒地开垦等的影响，在表达当地的耕地保护力度方面存在一定不确定性。但考虑到当前暂未发现更适合量化耕地保护力度的驱动变量，故选择这两项变量参与 MGWR 分析，为耕地保护力度对江苏省县级耕地细碎度的驱动情况提供参考。其次，本研究的 MGWR 分析中，选取的 9 个驱动变量对县级单元耕地 PD 指数的解释力为 61%～74%，对 AWMSI 指数的解释力为 45%～61%，对 COHESION 指数的解释力为 61%～81%。所选取的驱动变量对江苏省县级单元耕地 AWMSI 指数的解释力仍有较大的提升空间，对南部县区耕地 PD 指数和北部县区耕地 COHESION 指数的解释力也有待进一步提高。这说明，除本研究已选取的 9 个驱动变量外，仍存在其他因素对江苏省县级单元耕地细碎度存在驱动作用，有待后续进一步探究。第三，本研究方法可以为其他时空尺度耕地细碎度研究提供参考，但本文数据较为陈旧。鉴于近 10 年研究区耕地空间变化较为剧烈，导致本文结论的现势性不足，对管理支撑作用存在局限性。

针对江苏省不同地区耕地细碎度的不同特征及不同驱动因素，本文提出以下治理建议：1）A 类县区耕地斑块密度大、形状不规则但连片程度高，有较大的治理潜力。针对其耕地细碎度特征及其受当地耕地保护力度维度的突出影响，可以考虑在高程、坡度等地形条件允许且土壤性状相近的情况下推动毗邻细碎耕地合并，进行规模化生产。2）B 类县区耕地连片程度低且驱动因素较为复杂，土壤性状、利用强度和保护力度三个维度均存在变量对该类县区耕地细碎度有突出影响，治理难度较大。在未来的城市化建设过程中应更注重对现存耕地的保护力度，杜绝对耕地的不合理占用以及不同质量耕地间的置换行为，保护当地耕地与粮食安全。3）C 类耕地斑块密度较小、形状相对规则，有大面积耕地且连片分布，受到地形坡度及保护力度的影响最为突出。江苏中部和北部地区以平原为主，地势平坦，且受到较好的耕地保护，细碎化治理潜力较低，但也仍应注意对耕地利用的监管。同时，大量江苏中部、北部农村人口由于经济发展差异进城或南下务工，这可能导致耕地撂荒等问题，在未来该地区的耕地保护中也应得到更多重视。

4　结论

本研究基于第二次全国土地调查耕地矢量数据，应用斑块密度、面积加权平均形状指数、面积香农多样性指数、斑块结合度指数四个指标对江苏省耕地细碎度进行评估，从人为分割、利用方便、整治潜力 3 个维度评

估江苏省县级单元耕地细碎度空间格局，分析县级单元不同维度耕地细碎化特征的空间聚类模式，并分析自然、社会、经济因素对江苏省耕地细碎度的驱动作用与空间分异特征。最终得出以下结论：

1）江苏省耕地细碎度呈现南北分异特征。南部的部分县区耕地同时面临人为分割、形状不规则和连片性低三方面问题，阻碍大型农机的推广应用；省西北部和中部的耕地斑块密度较低，形状更规则，连片性较好，更易推广规模化经营。

2）江苏省县级单元多维耕地细碎度特征综合表现出 3 种聚类模式：A 类和 B 类主要位于江苏省南部地区，呈现出较高的耕地细碎度特征，其中 A 类耕地比 B 类耕地分布更连片，更易通过农地流转推动规模化经营；C 类位于江苏省中部和北部地区，耕地地块面积相对较大且更为规则，应以预防为主，着重监督耕地增减挂钩、占补平衡、进出平衡等政策实施过程对区域耕地细碎度的影响。

3）江苏省耕地细碎化的驱动机制存在显著空间分异特征。集中分布于江苏省西南部的 A 类县区耕地的斑块密度主要受到土壤容重和人均耕地面积的正向影响；耕地形状规则程度受坡度和人均耕地面积正向影响以及高程和作物单产的负向影响；耕地连片性则主要受到土壤容重的正向影响以及城镇化率的负向影响。集中分布于江苏省东南部的 B 类县区耕地与 A 类县区相比，其耕地分布连片性还受高程的正向影响和人均耕地面积的负向影响。高程、土壤容重、人均耕地面积对 B 类县区的耕地细碎度驱动最为突出。集中分布于江苏省中部和北部的 C 类县区其耕地细碎度与当地土壤有机碳、土壤容重、人均农业产值无显著关系，其斑块密度受到人均耕地面积的正向影响以及年均耕地面积变化量的负向影响显著，耕地形状规则程度受坡度的正向影响和高程的负向影响，耕地连片性则主要受到城镇化率的负向影响。

[参 考 文 献]

[1] 孙瑞，金晓斌，项晓敏，等. 土地整治对耕地细碎化影响评价指标适用性分析[J]. 农业工程学报，2018，34(13)：279-287.
SUN Rui, JIN Xiaobin, XIANG Xiaomin, et al. Applicability analysis of indices in assessment on effect of land consolidation on cultivated land fragmentation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(13): 279-287. (in Chinese with English abstract)

[2] LU H, XIE H, HE Y, et al. Assessing the impacts of land fragmentation and plot size on yields and costs: A translog production model and cost function approach[J]. Agricultural Systems, 2018, 161: 81-88.

[3] SKLENICKA P. Classification of farmland ownership fragmentation as a cause of land degradation: A review on typology, consequences, and remedies[J]. Land Use Policy, 2016, 57: 694-701.

[4] 叶思菁，宋长青，程锋，等. 中国耕地健康产能综合评价与试点评估研究[J]. 农业工程学报，2019，35(22)：66-78.
YE Sijing, SONG Changqing, CHENG Feng, et al. Cultivated land health-productivity comprehensive evaluation and its pilot evaluation in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(22): 66-78. (in Chinese with English abstract)

[5] 叶思菁，宋长青，高培超，等. 地理空间视角下耕地资源新认知体系构建[J]. 农业工程学报，2023，39(9)：225-240.
YE Sijing, SONG Changqing, GAO Peichao, et al. Construction of the new cognitive system for arable land resources from geospatial perspective[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(9): 225-240. (in Chinese with English abstract)

[6] YE S, REN S, SONG C, et al. Spatial patterns of county-level arable land productive-capacity and its coordination with land-use intensity in mainland China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2022, 326: 107757.

[7] LV X, ZHANG Y, RAO S, et al. Association between rs10118757(A/G) in methylthioadenosine phosphorylase gene and coronary artery disease in Chinese Hans[J]. Gene, 2013, 526(2): 344-346.

[8] XU W, JIN X, LIU J, et al. Analysis of influencing factors of cultivated land fragmentation based on hierarchical linear model: A case study of Jiangsu Province, China[J]. Land Use Policy, 2021, 101: 105119.

[9] 魏鹏，余敦，胡宜之，等. 规划管控约束下耕地细碎化评价与整治分区[J]. 农业工程学报，2024，40(3)：283-293.
WEI Peng, YU Dun, HU Yizhi, et al. Evaluating cultivated land fragmentation and remediation zoning under planning management[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(3): 283-293. (in Chinese with English abstract)

[10] WAN C, YAKOV K, CHENG C, et al. A soil sampling design for arable land quality observation by using SPCOSA–CLHS hybrid approach[J]. Land Degradation & Development, 2021, 32(17): 4889-4906.

[11] 蒋嘉益，宋长青，叶思菁，等. 面向青藏高原地区耕地资源质量评估的空间抽样方法对比与应用[J]. 农业工程学报，2023，39(21)：246-257.
JIANG Jiayi, SONG Changqing, YE Sijing, et al. Comparison and application of the spatial sampling methods for assessing the quality of arable land resources in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(21): 246-257. (in Chinese with English abstract)

[12] BINNS B. The Consolidation of Fragmented Agricultural holdings[M]. Washington: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1950: 11.

[13] 巫伟华. 1985-2016 年赣南地区耕地破碎化时空分异特征[D]. 南昌：江西师范大学，2019.
WU Weihua. Spatial and Temporal Characteristics of

Cultivated Land Fragmentation in Southern Jiangxi from 1985 to 2016[D]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2019. (in Chinese with English abstract)

[14] KING R. Land fragmentation: Notes on a fundamental rural spatial problem[J]. Progress in Human Geography, 1982, 6: 475-494.

[15] 臧良震，苏毅清. 耕地细碎化问题研究述评及启示[J]. 生态经济，2019，35(1)：79-83.
ZANG Liangzhen, SU Yiqing. A literature review and its enlightenment of farmland fragmentation issue[J]. Ecological Economy, 2019, 35(1): 79-83. (in Chinese with English abstract)

[16] 吕晓，黄贤金，钟太洋，等. 中国农地细碎化问题研究进展[J]. 自然资源学报，2011，26(3)：530-540.
LYU Xiao, HUANG Xianjin, ZHONG Taiyang, et al. Review on the research of farmland fragmentation in China[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(3): 530-540. (in Chinese with English abstract)

[17] 吕振宇. 耕地细碎化的评价、效应及整治研究——基于曲周县的实证分析[D]. 北京：中国农业大学，2015.
LYU Zhenyu. Study on the Evaluation, Effects, and Consolidation of Cultivated Land Fragmentation— An Empirical Analysis Based on Quzhou County[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese with English abstract)

[18] 王弘超. 公安县耕地细碎化及其对粮食生产能力影响研究[D]. 武汉：华中师范大学，2015.
WANG Hongchao. The Farming Land Fragmentation and the Impact on the Grain Production Capacity in the County of Gong'an[D]. Wuhan: Central China Normal University, 2015. (in Chinese with English abstract)

[19] 刘晶，金晓斌，徐伟义，等. 江苏省耕地细碎化评价与土地整治分区研究[J]. 地理科学，2019，39(5)：817-826.
LIU Jing, JIN Xiaobin, XU Weiyi, et al. Evaluation of cultivated land fragmentation and guidance of land consolidation at provincial level[J]. Scientia Geographica Sinica, 2019, 39(5): 817-826. (in Chinese with English abstract)

[20] 臧良震，苏毅清. 耕地细碎化的影响：国外研究综述与启示[J]. 农业经济，2018(12)：74-76.

[21] 李黎，王会豪，任平. 基于核密度估算的都江堰耕地破碎化趋势及特征分析[J]. 信阳师范学院学报（自然科学版），2017，30(1)：72-76.
LI Li, WANG Huihao, REN Ping. Analysis of trends and characteristics of cultivated landFragmentati on based on kernel density estimation for Dujiangyan City[J]. Journal of Xinyang Normal University(Natural Science Edition), 2017, 30(1): 72-76. (in Chinese with English abstract)

[22] 王云，周忠学，郭钟哲. 都市农业景观破碎化过程对生态系统服务价值的影响——以西安市为例[J]. 地理研究，2014，33(6)：1097-1105.
WANG Yun, ZHOU Zhongxue, GUO Zhongzhe. Impact of the urban agricultural landscape fragmentation on ecosystem services: A case study of Xi'an City[J]. Geographical Research, 2014, 33(6): 1097-1105. (in Chinese with English abstract)

[23] YE S, REN S, SONG C, et al. Spatial pattern of cultivated land fragmentation in mainland China: Characteristics, dominant factors, and countermeasures[J]. Land Use Policy, 2024, 139: 107070.

[24] 张显源，蔡忠亮，李桂娥，等. 耕地景观破碎化成因及对农村收入影响分析[J]. 测绘科学，2020，45(4)：134-141.
ZHANG Xianyuan, CAI Zhongliang, LI Gui'e, et al. Assessment of determinants of cultivated land fragmentation and its impacts on rural income[J]. Science of Surveying and Mapping, 2020, 45(4): 134-141. (in Chinese with English abstract)

[25] MANJUNATHA A, ANIK A, SPEELMAN S, et al. Impact of land fragmentation, farm size, land ownership and crop diversity on profit and efficiency of irrigated farms in India[J]. Land Use Policy, 2013, 31: 397-405.

[26] RAHMAN S, RAHMAN M. Impact of land fragmentation and resource ownership on productivity and efficiency: The case of rice producers in Bangladesh[J]. Land Use Policy, 2009, 26(1): 95-103.

[27] 陈帷胜，冯秀丽，马仁锋，等. 耕地破碎度评价方法与实证研究——以浙江省宁波市为例[J]. 中国土地科学，2016，30(5)：80-87.
CHEN Weisheng, FENG Xiuli, MA Renfeng, et al. Method of cultivated land fragmentation evaluation and empirical research: A case of Ningbo City in Zhejiang Province[J]. China Land Science, 2016, 30(5): 80-87. (in Chinese with English abstract)

[28] NTIHINYURWA P, DE Vries W. Farmland fragmentation and defragmentation nexus: Scoping the causes, impacts, and the conditions determining its management decisions[J]. Ecological Indicators, 2020, 119: 106828.

[29] FARLEY K, OJEDA-REVAH L, ATKINSON E, et al. Changes in land use, land tenure, and landscape fragmentation in the Tijuana River Watershed following reform of the ejido sector[J]. Land Use Policy, 2012, 29(1): 187-197.

[30] 郭贯成，丁晨曦. 土地细碎化对粮食生产规模报酬影响的量化研究——基于江苏省盐城市、徐州市的实证数据[J]. 自然资源学报，2016，31(2)：202-214.
GUO Guancheng, DING Chenxi. Quantitative research of the impact of land fragmentation on scale returns of grain production--Based on empirical data of Yancheng City and Xuzhou City in Jiangsu Province[J]. Journal of Natural Resources, 2016: 31(2): 202-214. (in Chinese with English abstract)

[31] KJELLAND M, KREUTER U, CLENDENIN G, et al. Factors related to spatial patterns of rural land fragmentation in Texas[J]. Environmental Management, 2007, 40: 231-244.

[32] SKLENICKA P, ZOUHAR J, TRPÁKOVÁ I, et al. Trends in land ownership fragmentation during the last 230 years in Czechia, and a projection of future developments[J]. Land Use Policy, 2017, 67: 640-651.

[33] 李希明，黄秋昊，吕剑成，等. 基于功能分区与多聚类算

法集成的耕地细碎化评价及整治[J]. 农业工程学报，2022，38(6)：274-282.
LI Ximing, HUANG Qiuhao, LYU Jiancheng, et al. Evaluation and consolidation of cultivated land fragmentation based on integration of function zoning and multi-cluster algorithms[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(6): 274-282. (in Chinese with English abstract)

[34] 龙明顺，赵宇鸾，张东丽. 山区耕地细碎化对农户耕地撂荒的影响[J]. 农业工程学报，2022，38(21)：231-239.
LONG Mingshun, ZHAO Yuluan, ZHANG Dongli. Impacts of mountainous land fragmentation on cultivated land abandonment of farmers[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(21): 231-239. (in Chinese with English abstract)

[35] YUCER A, KAN M, DEMIRTAS M, et al. The importance of creating new inheritance policies and laws that reduce agricultural land fragmentation and its negative impacts in Turkey[J]. Land Use Policy, 2016, 56: 1-7.

[36] 李黎. 耕地破碎化演变趋势及驱动机制研究——以都江堰市为例[D]. 成都：四川师范大学，2017.
LI Li. Study on the Trend and Driving Mechanism of Cultivated Land Fragmentation—A Case Study of Dujiangyan City[D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2017. (in Chinese with English abstract)

[37] 于杰. 三江平原东北部耕地变化及其对农业经济的影响[D]. 哈尔滨：东北农业大学，2018.
YU Jie. The Change of Cultivated Land and Its Influence on the Agricultural Economy in the Northeast of Sanjiang Plain[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018. (in Chinese with English abstract)

[38] 梁珍玮，李淑杰，马晓葳，等. 延边朝鲜族自治州耕地破碎度变化研究[J]. 江西农业学报，2017，29(7)：126-130.
LIANG Zhenwei, LI Shujie, MA Xiaowei, et al. Research on change in fragmentation degree of cultivated land in Yanbian Korean Autonomous Prefecture[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2017, 29(7): 126-130. (in Chinese with English abstract)

[39] 李建林，陈瑜琦，江清霞，等. 中国耕地破碎化的原因及其对策研究[J]. 农业经济，2006(6)：21-23.

[40] KAWASAKI K. The costs and benefits of land fragmentation of rice farms in Japan[J]. Australian Journal of Agricultural and Resource Economics, 2010, 54(4): 509-526.

[41] QIU F, LALIBERTÉ L, SWALLOW B, et al. Impacts of fragmentation and neighbor influences on farmland conversion: A case study of the Edmonton-Calgary Corridor, Canada[J]. Land Use Policy, 2015, 48: 482-494.

[42] 史芳宁，刘世梁，安毅，等. 城市化背景下景观破碎化及连接度动态变化研究——以昆明市为例[J]. 生态学报，2020，40(10)：3303-3314.
SHI Fangning, LIU Shiliang, AN Yi, et al. Changes of landscape fragmentation and connectivity with urbanization: a case study of Kunming City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(10): 3303-3314. (in Chinese with English abstract)

[43] 陈玥，陆汝成，卢嘉慧，等. 基于 RS 和 GIS 的边境县域耕地景观时空变化研究——以广西宁明县为例[J]. 农村经济与科技，2018，29(23)：9-12.

[44] ABDOLLAHZADEH G, KALANTARI K, SHARIFZADEH M, et al. Farmland fragmentation and consolidation issues in Iran; an investigation from landholder's viewpoint[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2012, 14: 1441-1452.

[45] 叶思菁. 大数据环境下遥感图谱应用方法研究——以作物干旱监测为例[J]. 测绘学报，2018，47(6)：892.
YE Sijing. Research on application of remote sensing tupu-take monitoring of meteorological disaster for example[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018, 47(6): 892. (in Chinese with English abstract)

[46] 叶思菁，张超，王媛，等. GF-1 遥感大数据自动化正射校正系统设计与实现[J]. 农业工程学报，2017，33(增刊 1)：266-273.
YE Sijing, ZHANG Chao, WANG Yuan, et al. Design and implementation of automatic orthorectification system based on GF-1 big data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(Supp.1): 266-273. (in Chinese with English abstract)

[47] 叶思菁，朱德海，姚晓闯，等. 基于移动 GIS 的作物种植环境数据采集技术[J]. 农业机械学报，2015，46(9)：325-334.
YE Sijing, ZHU Dehai, YAO Xiaochuang, et al. Mobile GIS based approach for collection of crop planting environment data[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 325-334. (in Chinese with English abstract)

[48] YE S, ZHU D, YAO X, et al. Development of a highly flexible mobile GIS-based system for collecting arable land quality data[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2014, 7(11): 4432-4441.

[49] YU Q, HU Q, VAN VLIET J, et al. GlobeLand30 shows little cropland area loss but greater fragmentation in China[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2018, 66: 37-45.

[50] YE S, SONG C, SHEN S, et al. Spatial pattern of arable land-use intensity in China[J]. Land Use Policy, 2020, 99: 104845.

[51] YE S, SONG C, GAO P, et al. Visualizing clustering characteristics of multidimensional arable land quality indexes at the county level in mainland China[J]. Environment and Planning A: Economy and Space, 2021, 54(2): 222-225.

[52] LIU C, SONG C, YE S, et al. Estimate provincial-level effectiveness of the arable land requisition-compensation balance policy in mainland China in the last 20 years[J]. Land Use Policy, 2023, 131: 106733.

[53] 刘晶，金晓斌，徐伟义，等. 1990—2020 年中国耕地景观细碎化演变特征与趋势预判[J]. 地理学报，2023，78(9)：2163-2185.
LIU Jing, JIN Xiaobin, XU Weiyi, et al. Characteristic evolution and trend prediction of cultivated land landscape fragmentation in China from 1990 to 2020[J]. Acta Geographica Sinica, 2023, 78(9): 2163-2185. (in Chinese with

English abstract)

[54] 王学，徐晓凡. 中国耕地景观细碎度时空变化特征及其影响因素[J]. 农业工程学报，2022，38(16)：11-20.
WANG Xue, XU Xiaofan. Spatiotemporal characteristics and influencing factors of landscape fragmentation of cultivated land in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(16): 11-20. (in Chinese with English abstract)

[55] 吴夙慧，成颖，郑彦宁，等. K-means 算法研究综述[J]. 现代图书情报技术，2011(5)：28-35.
WU Suhui, CHENG Ying, ZHENG Yanning, et al. Survey on K-means algorithm[J]. Data Analysis and Knowledge Discovery, 2011(5): 28-35. (in Chinese with English abstract)

[56] FOTHERINGHAM A, YANG W, KANG W. Multiscale Geographically Weighted Regression (MGWR)[J]. Annals of the American Association of Geographers, 2017, 107(6): 1247-1265.

[57] 周志凌，程先富. 基于 MGWR 模型的中国城市 PM_（2.5）影响因素空间异质性[J]. 中国环境科学，2021，41(6)：2552-2561.
ZHOU Zhiling, CHENG Xianfu. Spatial heterogeneity of influencing factors of PM2. 5 in Chinese cities based on MGWR model[J]. China Environmental Science, 2021, 41(6): 2552-2561. (in Chinese with English abstract)

Spatial pattern and driving factors of cultivated land fragmentation in Jiangsu Province using MGWR model

ZHANG Ruisi[1,2] , YE Sijing[1※] , REN Shuyi[1]

(1. *Faculty of Geographical Science*, *Beijing Normal University*, *Beijing* 100875, *China*;　2. *School of Geographic Science*, *East China Normal University*, *Shanghai* 200241, *China*)

Abstract: Cultivated land fragmentation is often considered to reduce agricultural productivity, leading to threatening food security. The pattern and drivers of cultivated land fragmentation can be expected to serve as an important prerequisite for scientific management. Taking Jiangsu Province as the study area, this study aims to assess the cultivated land fragmentation at the county level from four dimensions, including PD (patch density), AWMSI (area-weighted mean shape index), SHDI-S (Shannon's diversity index of area), and COHESION (patch cohesion index). A systematic analysis was made on the clustering features of cultivated land fragmentation in different dimensions using the K-means. MGWR (multiscale geography weighted regression) model was applied to explore the driving factors of cultivated land fragmentation in each county from five dimensions: topographic site, soil properties, urbanization, utilization intensity, and protection strength. The results showed that there were north-south differences in the cultivated land, where the PD and AWMSI were higher in the south than those in the north, the SHDI-S was higher in the north than in the south, and the COHESION was higher in the west. The four dimensions of the county-level cropland fineness index showed three types of clustering: Type A and Type B counties were located in the southern part of the province, both of which shared high patch density, irregular shape, and high area diversity. Among them, the Type A counties were higher connectivity of cultivated land than Type B; Type C counties shared lower patch density, regular shape, low area diversity, and high cropland connectivity, which were distributed mainly in the central and northern parts of the province. In addition, spatial heterogeneity was observed in the driving factors of cultivated land fragmentation in different types of regions. Differentiated fragmentation management should be adopted for the different regions. Among them, cultivated land fragmentation in the southern counties and districts (Type A and Type B) was mainly driven by natural factors (elevation, slope, and soil capacity). There were the more complex factors in the central and northern counties (Type C), including cropland allocation and urbanization. Cultivated land in the Type A counties exhibited a high density and irregular shape of patches, but a high degree of connectivity, which was a greater potential for management. Some considerations were given to promote the merging of adjacent cultivated land for large-scale production when the soil properties were similar in the topographic conditions. A low degree of contiguous cultivated land was observed in Type B counties, indicating the more complex driving factors are more difficult to manage. More attention should be paid to protecting the existing cultivated land for future urbanization. Cultivated land in Type C counties shared a low density and regular shape of patches, with the large cultivated land and continuous distribution. Cultivated land in Type C counties was the most affected by the topographic slope and protection. The central and northern regions were mainly plains with flat terrain and arable land, indicating the low potential for management. However, some attention should still be paid to regulating the use of cultivated land. The finding can provide a strong reference to managing the cultivated land fragmentation in Jiangsu Province. The cropland fine fragmentation model can also be optimized to develop the sustainable use of cropland.

Keywords: land use; cultivated land resources; cultivated land fragmentation; K-means; MGWR