第45卷 第1期 华 中 农 业 大 学 学 报 Vol.45 No.1
2026年 1月 Journal of Huazhong Agricultural University Jan. 2026,200~212

张晓瑞,杨欣悦,李杰铭,等.安徽省县域耕地景观破碎化评价与模拟预测研究[J].华中农业大学学报,2026,45(1):200-212.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2026.01.018

安徽省县域耕地景观破碎化评价与模拟预测研究

张晓瑞[1,2],杨欣悦[1],李杰铭[3],王振波[4],王鑫[1],徐图[1]

1.合肥工业大学建筑与艺术学院,合肥 230601; 2.合肥工业大学数字人居环境研究实验室,合肥 230601;
3.合肥工业大学设计院(集团)有限公司,合肥 230009; 4.中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101

摘要 耕地是保障国家粮食安全的根基,评价和预测耕地景观的破碎化程度对于制定耕地保护政策、优化耕地空间布局具有重要的价值和意义。为明确耕地景观破碎化的现状与演变趋势,以2000—2020年安徽省县域单元为研究对象,在多源大数据支持下,综合运用土地利用变化分析模型、景观格局指数、地理探测器和PLUS模型等方法,系统分析安徽省耕地景观的时空演变特征、驱动机制及未来发展预测。结果显示:2000年以来安徽省耕地总面积持续减少,主要转化为建设用地;耕地景观破碎化在多因素交互作用下不断加剧,综合指数平均值持续升高,空间分布呈"北高南低"格局;基于2030年的安徽省耕地变化模拟预测发现,仅在保护情景下,耕地景观破碎化程度有所改善。研究表明,未来安徽省需严格落实耕地保护政策,通过宏观调控土地利用和耕地占补平衡,实现安徽省耕地资源的可持续发展。

关键词 耕地景观; 时空演变; 破碎化; 空间自相关; 地理探测器; PLUS模型; 安徽省

中图分类号 F323.211 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2026)01-0200-13

粮食安全是"国之大者",耕地作为粮食生产的根基,是保障国家粮食安全、维系民族永续发展的核心资源。我国以占世界7%的耕地养活近20%的人口,人多地少的国情没有改变,耕地质量总体偏低、占补不平衡等问题依然突出,耕地保护仍面临数量管控、质量提升、生态修护等多重挑战[1-2]。安徽省作为国家重要粮食主产区之一的产粮大省,在国家粮食安全格局中占据重要地位。《安徽省国土空间规划(2021—2035年)》明确指出,至2035年耕地保有量不低于541万hm^2,永久基本农田保护面积不少于476万hm^2。因此,探究安徽省耕地景观时空演变特征及内在驱动机制,对于安徽省精准制定耕地保护战略、保障国家粮食安全、促进经济社会可持续发展具有重要的现实意义。

耕地景观时空变化研究一直是耕地保护和粮食安全领域的重要课题,相关研究主要有耕地系统动态演变分析、破碎化时空特征、变化影响机制及"非粮化""非农化"预测等方面[3-6]。研究方法上,主要有基于单指标和多指标的耕地变化分析方法,包括常用的土地利用动态度、土地利用转移矩阵、土地利用核密度分析、探索性空间数据分析等[7-10]。研究尺度主要涵盖宏观、中观层面。宏观聚焦国家尺度或长江流域、华北平原等区域,中观以省域、市域为单元[11-12]。已有耕地研究取得了丰富成果,但主要聚焦于土地利用视角下耕地的动态演变与影响机制分析等方面,而从景观格局视角出发,探讨耕地景观破碎化的时空演变、预测耕地景观破碎化未来发展趋势的研究仍需加强。另一方面,从研究尺度看,已有研究主要聚焦于国家、区域等宏观和中观尺度,仍缺乏对县域微观尺度的探讨分析。县域作为国土空间开发和保护政策落地的关键单元,耕地保护需求差异显著,如何通过"县域"尺度研究将"严守耕地红线"战略目标融入国土空间格局构建,并探索区域差异化耕地保护最优路径,从而为精准制定耕地保护策略提供科学依据,仍需深入探索和研究。

近年来,随着安徽省的快速城镇化和工业化,全省建设用地迅速扩张,耕地景观破碎化程度加剧,导致耕地保护难度持续增加。因此,以安徽省为研究区,开展国土空间规划背景下的耕地景观破碎化及其模拟预测研究具有典型性和代表性。本研究以安徽省为研究对象,从"县域"尺度出发,综合应用土地利用变化分析模型、景观格局指数、地理探测器、

收稿日期:2025-05-30
基金项目:国家自然科学基金项目(41771181;421300365);合肥工业大学科研项目(W2022JSFW0959)
张晓瑞,E-mail:rgdhf@126.com

PLUS模型，深入分析2000—2020年安徽省县域耕地景观破碎化的时空动态演变特征、影响因素和驱动机制，多情景预测2030年的耕地变化，并对比分析不同预测情景下的耕地变化差异，旨在为安徽省制定差异化的耕地保护政策提供参考和依据。

1　材料与方法

1.1　研究区域

作为典型的农业大省和全国粮食主产省，安徽省地处中国华东腹地，是长江经济带和“一带一路”的重要节点，粮食播种面积、产量位居全国前列。安徽省地形地貌类型多样，山区、平原、丘陵、圩区、湖泊洼地分别占全省国土面积的29.52%、24.82%、29.01%、8.68%、7.97%，根据地理特征划分为皖北、皖中和皖南3个区域，下辖50个县、9个县级市。农业生产适宜区主要分布在皖北、江淮和沿江平原及部分丘陵地区。

1.2　数据来源

以安徽省土地利用数据为基础，涵盖多时段自然地理和社会经济数据（表1）。鉴于安徽省作为国家级徽州文化生态保护区的地域特性，社会经济数据纳入了与古村落、自然风景保护区和A级景区的距离等因素。所有数据处理均基于ArcMap 10.8平台完成。

1.3　技术路线与研究方法

1）技术路线。以安徽省59个县级行政区为基本单元，通过土地利用变化分析和景观破碎化动态演变来揭示安徽省耕地的数量和质量变化，应用空间自相关、地理探测器等方法深入解析耕地质量的空间分布特征和影响因素。同时设置自然发展、城镇发展、生态保护和耕地保护4种发展情景，应用PLUS模型模拟预测2030年安徽省耕地变化，再经对比分析不同情景下的预测结果，提出安徽省耕地保护和优化策略（图1）。

2）耕地动态度和相对变化率。耕地动态度可直观反映研究时段内耕地面积变化的幅度与速度[13]。相对变化率可反映研究区内特定土地利用类型变化的区域差异，通过局部区域比较分析耕地面积变化的区域差异[14]。

$$K=\frac{|U_b-U_a|}{U_a}\times\frac{1}{T}\times 100\% \tag{1}$$

式（1）中：K为研究时段内耕地动态度；U_a、U_b为研究区耕地初期与末期面积；T为研究时段。

$$R=\frac{|K_b-K_a|\times C_a}{K_a\times|C_b-C_a|} \tag{2}$$

式（2）中：R为研究时段内耕地相对变化率，K_a、K_b为局部区域耕地研究初期与末期面积；C_a、C_b为研究区耕地初期与末期面积。

3）土地利用转移矩阵。土地利用转移矩阵基于马尔科夫模型，可分析地类动态转化和转移速率情况，揭示耕地时空演化过程，具体公式见参考文献[15]。

4）耕地景观破碎化指数。耕地破碎化是阻碍农业规模化、现代化的重要因素，景观格局指数能有效反映耕地景观的破碎化程度。参考既有研究，从耕地的斑块面积、形状和分布特征出发，选取斑块数量（number of plaques，NP）、斑块密度（plaque density，PD）、最大斑块指数（maximum plaque index，LPI）、平均斑块面积（average plaque area，AREA_MN）、景观形状指数（landscape shape index，LSI）、面积加权平均形状指数（area-weighted average shape index，AWMSI）、集聚度（agglomeration，AI）7个景观格局指数来计算耕地破碎化[16]。利用熵权法计算各个景观格局指数的权重，再利用线性加权法得到可客观反映研究区耕地景观破碎化程度的综合指数[17]。

5）核密度估计。核密度估计作为一种非参数检验的函数方法，可有效测算密度函数，本研究选择高斯核函数进行分析[18]，以2000、2010、2020年耕地景观破碎化综合指数为基础，绘制安徽省耕地破碎化的核密度图，分析安徽省耕地景观破碎化空间格局和集聚强度关系。

6）空间自相关分析。空间自相关可以反映地理现象的空间聚集程度或异质性，通常采用莫兰指数（Moran’s I）进行测度，包括全局莫兰指数（global Moran’s I）和局部莫兰指数（local Moran’s I）[19]。本研究借助Geoda软件“单变量 Moran’s I”探究安徽省耕地景观破碎化的空间集聚特征。

7）地理探测器。地理探测器可探测地理空间现象的异质性，并能挖掘现象的驱动因素，被广泛应用于探究各种现象影响因素的驱动程度及交互作用[20]。

本研究利用地理探测器探讨研究区耕地景观破碎化时空分布格局的影响因素。其中，交互作用探测是识别各驱动因子之间协同作用对研究区耕地破碎化程度的影响，评估方法是计算2个因子协同作用时的q值：$q(x_1\cap x_2)$，与单因子探测得到的2个因子q

表1 自然地理和社会经济数据信息

Table 1 Natural geographical and socio-economic data information

数据类型 Data type	时间 Time	数据名称 Data name	来源 Source	说明 Illustrate
土地利用 Land use	2000、2010、2020年	土地利用 Land use	中国科学院资源环境数据中心(https://www.resdc.cn/Default.aspx)	模型基础输入数据(栅格数据50 m×50 m) Basic input data for the model (raster data 50 m × 50 m)
自然地理因子 Physical geographical factors	2020年	DEM	地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/)	自然要素驱动力因子(栅格数据1 km×1 km) Natural factor driving forces (raster data 1 km × 1 km)
		坡度 Slope	基于DEM提取	
		土壤类型 Soil type	中国科学院资源环境数据中心(https://www.resdc.cn/Default.aspx)	
		年均气温 Average annual temperature	国家地球系统科学数据中心(https://www.geodata.cn/about-us.html)	
		年均降水 Average annual precipitation		
		距水域距离 Distance from the water	OpenStreetMap (https://www.openstreetmap.org/)	
社会经济因子 Socioeconomic factors	2000、2010、2020年	人均GDP GDP per capita	安徽省统计年鉴 (https://tjj.ah.gov.cn/ssah/qwfbjd/tjnj/index.html)	约束条件设置(文本) Constraint settings (text)
		人口密度 Population density		
		夜间灯光指数 Nighttime light index	中国科学院资源环境数据中心(https://www.resdc.cn/Default.aspx)	社会经济驱动力因子(栅格数据1 km×1 km) Socioeconomic driving factors (raster data 1 km × 1 km)
	2020年	距铁路距离 Distance from the railway	OpenStreetMap (https://www.openstreetmap.org/)	交通区位驱动力因子(矢量数据) Traffic location driving factors (vector data)
		距高速公路距离 Distance to the highway		
		距国道距离 Distance from the national highway		
		距省道距离 Distance from the provincial highway		
		距县道距离 Distance from the county road		
		距火车站点距离 Distance from the train station		
		距各县(市)政府距离 Distance from the county (city) government	国家统计局(https://www.stats.gov.cn)	
		距古村落距离 Distance from the ancient village	住房和城乡建设部(https://www.mohurd.gov.cn)	
		距自然风景保护区距离 Distance from the natural scenic area	中国科学院资源环境数据中心(https://www.resdc.cn/Default.aspx)	限制转化区域确定(矢量数据) Define restricted transformation areas (vector data)
		距A级景区距离 Distance to A-level scenic spot	安徽省文化和旅游厅(https://ct.ah.gov.cn)	

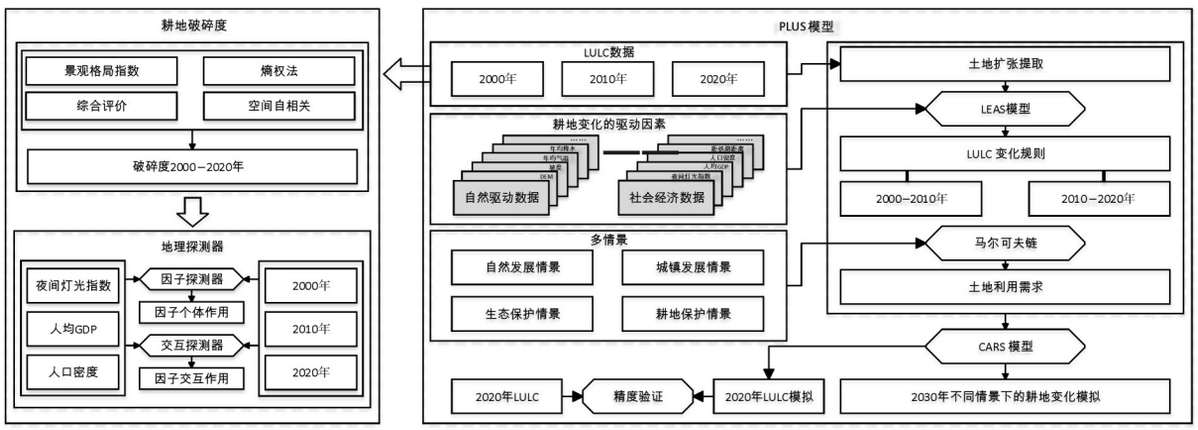


图1　技术路线图

Fig.1　Technology roadmap

值，即 $q(x_1)$ 和 $q(x_2)$ 做比较[21]。具体判断方法见表2。

表 2　交互作用类型

Table 2　Types of interactions

交互作用 Interaction	判断依据 Basis for judgment
非线性减弱 Nonlinear attenuation	$q(x_1\cap x_2)<\min[q(x_1),q(x_2)]$
单因子非线性减弱 Single-factor nonlinear attenuation	$\min[q(x_1),q(x_2)]<q(x_1\cap x_2)<\max[q(x_1),q(x_2)]$
双因子增强 Two-factor enhancement	$q(x_1\cap x_2)>\max[q(x_1),q(x_2)]$
独立 Independence	$q(x_1\cap x_2)=q(x_1)+q(x_2)$
非线性增强 Nonlinear enhancement	$q(x_1\cap x_2)>q(x_1)+q(x_2)$

8）PLUS模型。斑块生成土地利用模拟（patch-generating land use simulation，PLUS）模型是当前最新的空间模拟工具之一，能够模拟预测多情景下的未来发展趋势，该模型结合了土地扩张分析策略（land expansion analysis strategy，LEAS）和基于多类型随机斑块种子的CA模型（CA based on multi type random patch seeds，CARS），相比于其他模型，能更好地利用随机森林算法表达驱动因素与土地利用变化的关联，在发展概率的约束下自动模拟斑块生成[22]。

本研究采用PLUS模型模拟预测研究区耕地资源的未来变化。其中，LEAS模块的具体参数设置为：采样方式为随机采样，决策树的数量为20，采样率为0.01，训练RF的特征个数为19个；运行参数设置为8，得到耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地6类用地的发展概率；随后，利用Markov模型对未来土地利用类型进行需求预测[23]。

①多情景预测。为分析多情景下研究区土地利用变化情况，研究设定了自然发展、城镇发展、生态保护和耕地保护4种情景，并分别预测2030年各个情景下的土地利用结构。

城镇发展情景下，耕地、林地、草地向建设用地转移概率增加20%，建设用地向林地、草地、水域和未利用土地转移概率降低30%。生态保护情景下，林地、草地、水域向建设用地转化概率降低30%，耕地向建设用地的转化概率降低10%，耕地、草地向林地转移概率提高20%。耕地保护情景下，耕地向建设用地转移概率降低60%，向水域、草地转移概率降低30%，未利用地向耕地转化概率增加30%[24]。

②模型参数设置。转移成本矩阵：转移成本矩阵用于描述不同土地利用类型间的转换情况（表3），允许转换赋值为1，不允许转换则赋值为0[25]。

邻域权重：邻域因子权重取值范围为0～1，值越大，表明扩张能力越强，越不易转化为其他用地类型[26]。经不断调试与验证，得到模拟精度较高时耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地的邻域权重值，分别为0.20、0.06、0.02、0.24、0.50、0.01。

③精度验证。使用Kappa系数评估模型的模拟准确性，研究显示，当Kappa系数大于0.75时，模型模拟精度较高[27]。本研究基于研究区2000、2010年土地利用数据对2020年进行模拟，结果显示Kappa系数为0.93，总体精度为0.96，表示模型模拟精度较高，可用于研究区耕地资源变化的模拟预测。

表3 各情景土地利用转移成本矩阵

Table 3 Matrix of land use transfer costs for each scenario

土地利用类型 Land use type	自然发展情景 Natural development scenario						城镇发展情景 Urban development scenario						生态保护情景 Ecological protection scenario						耕地保护情景 Cultivated land protection scenario					
	A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F
A	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0
B	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
C	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1
D	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
E	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1
F	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1

注：A～F分别表示耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地。Note：A-F represent cultivated land, forest land, grassland, water, construction land, and unused land, respectively.

2 结果与分析

2.1 耕地数量结构变化分析

2000、2010和2020年，研究区耕地总面积分别为62 149.747、61 188.481和60 496.606 km^2，总体呈现下降趋势，各县域单元耕地面积也存在普遍减少态势（图2）。耕地资源的空间分布呈现显著的区域异质性，主要集中于皖北、皖中，皖南较少。具体而言，研究期间各县域单元耕地面积均超过2 000 km^2的仅3个，占比5.08%；耕地面积均超过1 000 km^2的有29个，占比49.15%，多分布于皖北、皖中。

耕地动态度和相对变化率定量揭示了研究区耕地利用的综合现状[10]。2000—2010年，耕地资源比较稳定，研究区总体耕地动态度为0.15%，各县域单元动态度均普遍较低，其中，绩溪县最高为0.52%，局部区域耕地利用存在小幅波动。2010—2020年，研究区总体耕地动态度降至0.11%，但20个县域单元的耕地动态度有所上升，耕地利用区域差异进一步凸显。2000—2020年全时段内，各县域单元耕地相对变化率差异显著，皖南普遍高于皖北、皖中，表明皖北和皖中耕地资源相对更加稳定。相对变化率超过2.0的共有6个县域单元，其中，肥西县最高为2.80，表明该区域耕地资源变化速度明显快于其他地区。

2.2 耕地转移矩阵分析

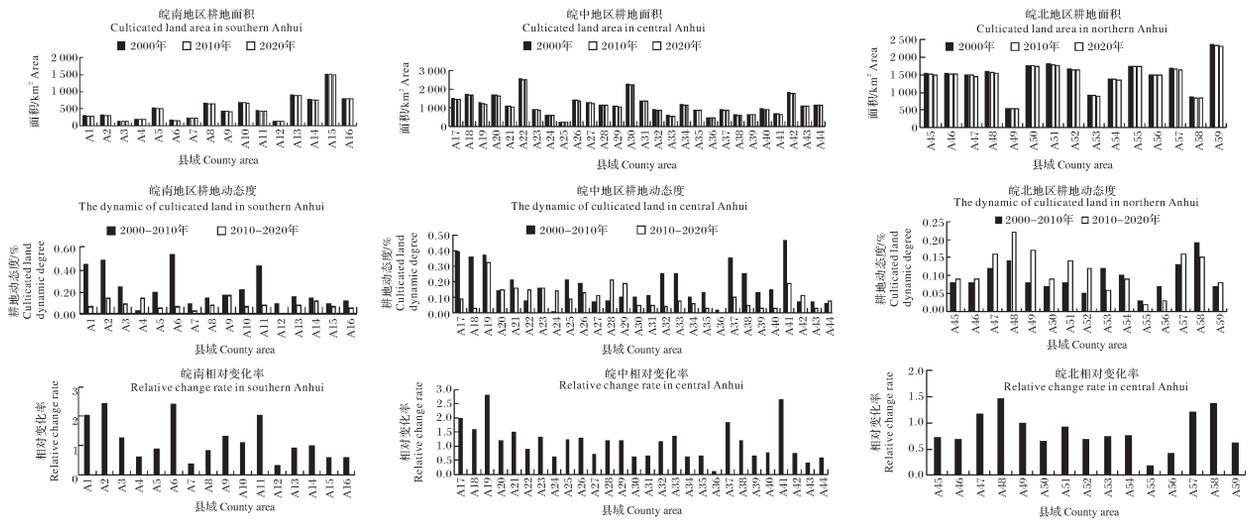
基于土地利用数据，利用ArcMap软件，分析得到研究区2000—2010年和2010—2020年土地利用转移矩阵，并据此绘制土地利用转移桑基图（图3）。

2000—2020年研究区大量耕地转移成为建设用地和林地。2000—2010年，研究区耕地转出总面积2 177.771 km^2，主要转移方向为建设用地、林地和水域，分别占比68.62%、18.76%和9.76%。耕地转入总面积1 215.488 km^2，主要源自建设用地、林地和水域，分别占比48.89%、33.11%和13.21%。2010—2020年，研究区耕地转出面积增至2 252.592 km^2，主要转移方向不变但比例略有变化，建设用地降至65.29%，林地升至22.10%，水域微降至9.21%。耕地转入面积扩大至1 559.739 km^2，主要来源构成中，建设用地升至53.96%，林地和水域分别降至31.88%和9.24%。总体上，研究区土地利用转移的核心特征是耕地与建设用地、林地、水域的双向转化，其中，2010—2020年因经济发展和生态保护的持续影响，耕地转出与转入规模均呈现扩大态势。

2.3 耕地破碎化动态演变分析

利用Fragstats软件计算2000—2020年研究区各项景观格局指数，结合熵权法综合评价安徽省县域耕地景观破碎化程度，并根据破碎化综合指数将研究单元划分为5个等级（图4）。2000、2010和2020年，研究区耕地景观破碎化综合指数平均值分别为0.463、0.464和0.481，呈现持续上升趋势，2020年增幅尤为显著。具体而言，2000—2010年，耕地破碎化综合指数上升的县域单元占比66.10%，2010—2020年这一比例升至83.05%，耕地破碎化加剧区域进一步扩大。

根据图4可知，研究区耕地破碎化在研究期内始终呈现“北高南低”的空间格局，皖北最高，皖中次之，皖南相对较低。2000年，核密度曲线基本呈单峰分布，破碎化综合指数超过0.6的高值区县域单元有16个，占比27.12%，长丰县最高为0.953。2010年，核密度曲线转为双峰分布，整体右移，耕地破碎化程度加剧且空间分异性增强。破碎化综合指数超过0.6的高值区县域单元数量上升至19个，占比32.20%，临泉县最高为0.864。2020年，核密度曲线双峰分布



A1：歙县 Shexian County；A2：休宁县 Xiuning County；A3：黟县 Yixian County；A4：祁门县 Qimen County；A5：泾县 Jing County；A6：绩溪县 Jixi County；A7：旌德县 Jingde County；A8：郎溪县 Langxi County；A9：宁国市 Ningguo City；A10：广德市 Guangde City；A11：青阳县 Qingyang County；A12：石台县 Shitai County；A13：东至县 Dongzhi County；A14：南陵县 Nanling County；A15：无为市 Wuwei City；A16：枞阳县 Zongyang County；A17：长丰县 Changfeng County；A18：肥东县 Feidong County；A19：肥西县 Feixi County；A20：庐江县 Lujiang County；A21：巢湖市 Chaohu City；A22：霍邱县 Huoqiu County；A23：舒城县 Shucheng County；A24：金寨县 Jinzhai County；A25：霍山县 Huoshan County；A26：天长市 Tianchang City；A27：明光市 Mingguang City；A28：全椒县 Quanjiao County；A29：来安县 Laian County；A30：定远县 Dingyuan County；A31：凤阳县 Fengyang County；A32：怀宁县 Huaining County；A33：太湖县 Taihu County；A34：宿松县 Susong County；A35：望江县 Wangjiang County；A36：岳西县 Yuexi County；A37：桐城市 Tongcheng City；A38：潜山市 Qianshan City；A39：含山县 Hanshan County；A40：和县 Hexian County；A41：当涂县 Dangtu County；A42：怀远县 Huaiyuan County；A43：五河县 Wuhe County；A44：固镇县 Guzhen County；A45：临泉县 Linquan County；A46：太和县 Taihe County；A47：阜南县 Funan County；A48：颍上县 Yingshang County；A49：界首市 Jieshou City；A50：涡阳县 Guoyang County；A51：蒙城县 Mengcheng County；A52：利辛县 Lixin County；A53：砀山县 Dangshan County；A54：萧县 Xiao County；A55：灵璧县 Lingbi County；A56：泗县 Si County；A57：濉溪县 Suixi County；A58：凤台县 Fengtai County；A59：寿县 Shou County.

图 2　2000—2020 年安徽省县域耕地资源变化

Fig.2　Changes in cultivated land resources in county areas of Anhui Province from 2000 to 2020

特征更加显著，并持续右移，耕地破碎化程度进一步加剧，空间分布更趋离散。综合指数超过 0.6 的高值区县域单元增至 21 个，占比 35.59%，固镇县最高为 0.861。综上，研究区耕地破碎化程度在时间和空间 2 个维度上均呈现加剧态势。

2.4　耕地破碎化的空间自相关分析

基于上述耕地破碎化综合评价结果，借助 Geoda 软件计算研究区 2000—2020 年县域单元耕地破碎化的全局空间自相关（图 5）。2000、2010、2020 年耕地景观全局 Moran's I 分别为 0.690、0.719、0.721，Z 值均大于 1.96，$P<0.01$，表明研究期间耕地景观破碎化空间分布呈显著正相关，集聚特征明显。进一步分析局部空间自相关结果可知，2000—2020 年研究区耕地景观破碎化集聚类型以“高—高”“低—低”聚类为主，空间分异显著，破碎化高值区集聚重心向皖北集中并趋于稳定，呈现“北高南低的集聚格局”。其中，“低—低”聚类单元主要分布于皖南，数量和空间分布格局始终保持稳定。“高—高”聚类单元在 2000 年主要分布于皖北、皖中；2010 年该类型聚类单元数量减少，且向皖北集中；2020 年，该类型聚类单元的数量和空间格局存在一定波动，但基本稳定在皖北。

2.5　耕地破碎化影响因素分析

本研究综合研究区特点和数据可获得性[28]，选取夜间灯光指数、人均 GDP 和人口密度 3 个指标作为影响因素，以 2000—2020 年县域耕地破碎化综合指数作为因变量，利用地理探测器分析挖掘安徽省耕地破碎化的影响因素。

基于 2000、2010、2020 年因子探测结果（表 4），耕地破碎化因子影响力由强到弱分别是人口密度＞夜间灯光指数＞人均 GDP。以 2000—2020 年人口密度解释力最强，居于首位；夜间灯光指数解释力在 2010—2020 年明显增强，接近人口密度；人均 GDP 解释力较弱且逐年下降。因子交互探测分析表明，

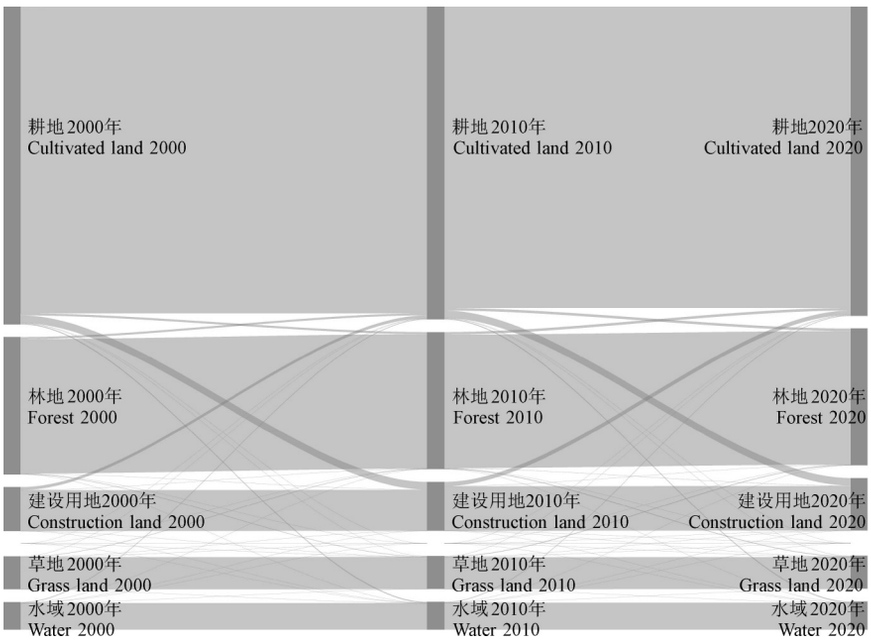
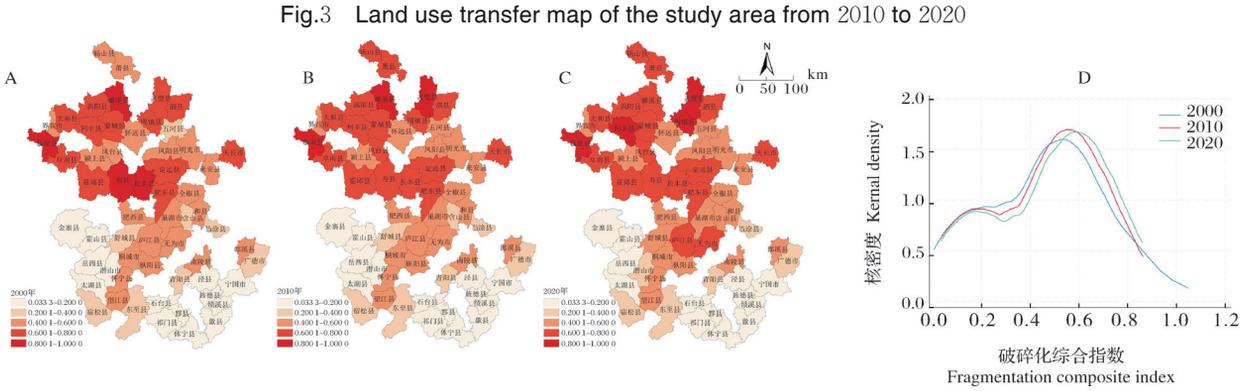


图3 2010—2020年研究区土地利用转移桑基图

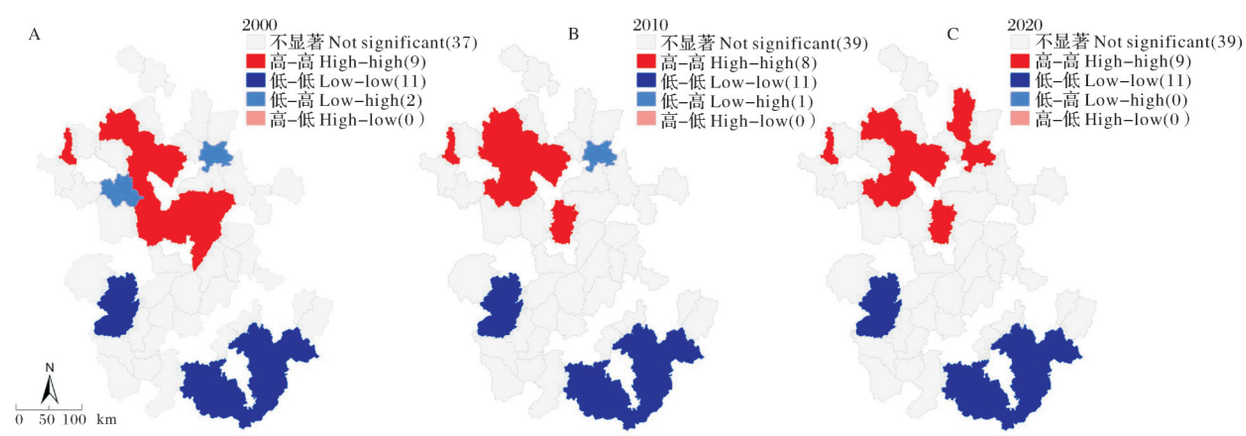
Fig.3 Land use transfer map of the study area from 2010 to 2020



A～C：耕地景观破碎化趋势 Fragmentation degree of cultivated land；A：2000年 In 2000；B：2010年 In 2010；C：2020年 In 2020；D：县域耕地景观破碎化趋势 Fragmentation trend of farmland landscape.

图4 县域单元耕地破碎化程度及演变趋势

Fig.4 Degree of cultivated land fragmentation and evolution trends in county units



A：2000年 In 2000；B：2010年 In 2010；C：2020年 In 2020.

图5 耕地破碎化空间自相关

Fig.5 Spatial autocorrelation of cultivated land fragmentation

表 4　耕地破碎化因子探测及交互作用探测结果

Table 4　Detection results of cultivated land fragmentation factors and interactions

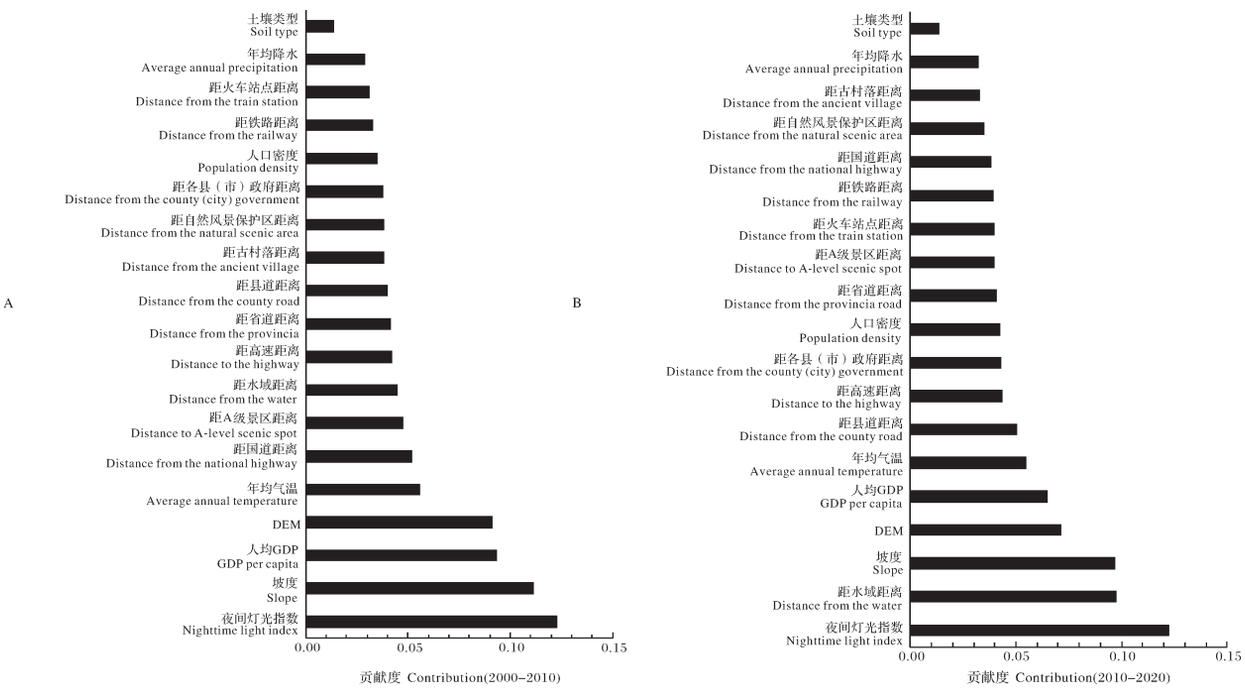
因子 Factor	q(2000年)	q(2010年)	q(2020年)
x_1	0.246 4	0.211 7	0.210 2
x_2	0.639 2	0.696 0	0.687 5
x_3	0.470 1	0.448 2	0.631 8
$x_1 \cap x_2$	0.752 4	0.758 5	0.812 0
$x_1 \cap x_3$	0.741 8	0.636 0	0.796 2
$x_2 \cap x_3$	0.741 7	0.696 0	0.687 5

注：x_1、x_2、x_3 分别表示人均GDP、人口密度、夜间灯光指数。Note: x_1, x_2, x_3 represent GDP per capita, population density, nighttime light index, respectively.

因子间交互作用类型主要为双因子增强和非线性增强 2 种。2000—2020 年，人均 GDP 和人口密度因子之间的交互作用解释力最强，交互作用值分别为 0.752 4、0.758 5 和 0.812 0；而人口密度和夜间灯光指数因子之间的交互作用解释力逐年下降。人均GDP因子单独作用解释力较弱，但与人口密度或夜间灯光指数因子结合后，解释力明显增强。

2.6　耕地面积变化驱动力

在ArcMap软件中，对2000—2020年土地利用和驱动因子数据进行预处理，以2010年为时间分割点，将研究期划分为2000—2010年和2010—2020年2个连续时段，并利用PLUS模型分别对比分析这2个时期耕地资源变化的主导驱动因素（图6）。



A：2000—2010年 From 2000 to 2010；B：2010—2020年 From 2010 to 2020.

图 6　2000—2020 年研究区耕地面积变化驱动因子贡献图

Fig.6　Contribution of the driving factors of cultivated land area change in the study area from 2000 to 2020

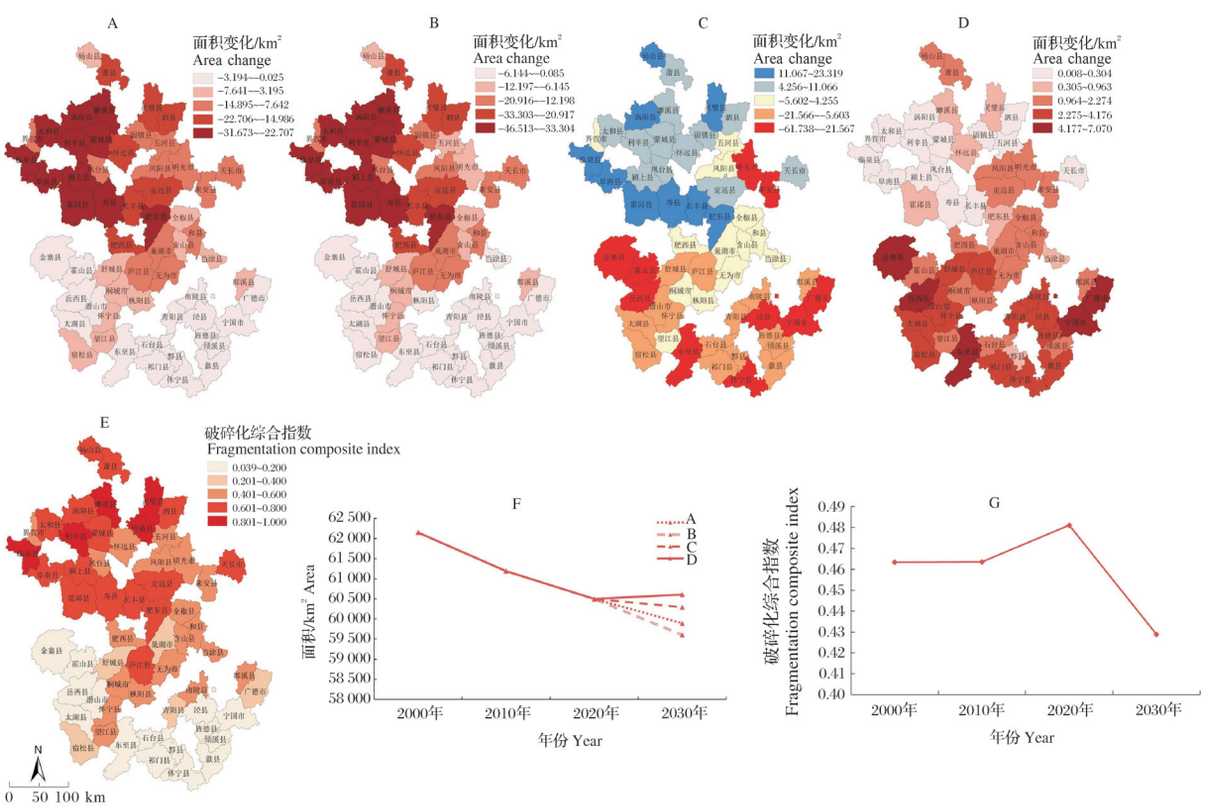
研究区不同时期耕地资源变化的内在驱动力存在差异，通过分别叠加2个时段耕地变化区域和驱动因子栅格数据分析表明，缩减耕地集中于夜间灯光指数高、坡度低的区域，增加耕地集中于夜间灯光指数低、距离水域近的区域。夜间灯光指数是研究期间的核心驱动因子，2000—2010、2010—2020年贡献率分别为12.31%、12.28%，反映了经济发展和城镇化建设持续对耕地变化产生显著影响。此外，地形条件、气温、经济发展等因素对耕地变化产生的影响也较为显著并持续存在，如坡度、人均GDP、DEM和年均气温等都是重要驱动因子。2000—2010年期间坡度、人均GDP、DEM和年均气温贡献率分别为11.12%、9.35%、9.14%和5.60%；2010—2020年期间贡献率虽有所下降，但仍排在前列，分别为9.71%、6.50%、7.12%和5.49%。距水域距离的影响在2010—2020年这一时期显著提升，贡献率从4.47%升至9.77%。同时，因交通基础设施不断完善、人口增长集聚对耕地变化的影响在增强，致使距县道距离、距高速距离和人口密度等驱动因子的贡献率也有所上升，而距自然风景保护区距离和距古村落距离等驱动因子的贡献率则有所下降。

2.7 耕地变化多情景预测

基于2020年研究区土地利用数据，利用PLUS模型预测2030年自然发展、城镇发展、生态保护和耕地保护4种情景下的耕地变化(图7)。

自然发展情景下，研究区耕地资源变化遵循历史发展趋势，面积持续减少，与2020年相比，共减少605.593 km^2，且各县域单元耕地面积均在减少。其中，13个县域单元面积减少超20 km^2，利辛县和寿县变化最为显著，分别减少31.673、30.464 km^2。城镇发展情景下，建设用地大量占用耕地，致使耕地减少在4种情景中最严重，与2020年相比，研究区耕地面积共减少891.668 km^2。其中，4个县域单元耕地面积减少超40 km^2，18个县域单元耕地面积减少超20 km^2，利辛县减少46.513 km^2，依旧居于首位。生态保护情景下，耕地被侵占态势得到明显控制，与2020年相比，研究区耕地总面积减少202.831 km^2，且各县域单元耕地面积变化存在明显差异。其中，29个县域单元耕地面积增加，寿县增幅最大为23.319 km^2；其余县域单元耕地面积仍呈减少趋势，10个县域单元减少超20 km^2，金寨县减少最多(61.738 km^2)。耕地保护情景下，与2020年相比，研究区耕地面积共增加110.925 km^2，各县域单元耕地面积均有增长，但增幅均低于10 km^2，东至县增长最多为7.070 km^2。

综合上述预测结果，对耕地保护情景下的耕地景观格局进行深入分析。2030年，研究区耕地破碎化程度得到明显改善，破碎化综合指数平均值从2020年0.481降至0.429，降幅为10.87%。其中，49个县域单元耕地景观破碎化程度降低，占比83.05%；破碎化综合指数超0.6的高值区县域数量从2020年的19个减少至14个；13个县域单元破碎化综合指数降幅超0.1，占比22.03%，定远县降幅最大为0.161，仅临泉县破碎化综合指数增幅超0.1，为0.152。空间分布上，耕地破碎化明显改善区域主要集中于皖南，持续加剧区域主要分布在皖北。



A~D：不同情景耕地面积变化 Changes in cultivated land area under different scenarios；A：自然发展情景 Natural development scenario；B：城镇发展情景 Urban development scenario；C：生态保护情景 Ecological protection scenario；D：耕地保护情景 Cultivated land protection scenario；E：耕地保护情景下破碎化综合指数 Comprehensive farmland index under the context of farmland protection；F：多情景耕地面积演变趋势 Multi-scenario farmland area evolution trends；G：耕地保护情景下破碎化预测 Fragmentation prediction under the farmland protection scenario.

图7 多情景下耕地发展预测

Fig.7 Prediction of agricultural development in carious scenarios

3　讨　论

3.1　耕地资源变化原因分析

本研究基于2000—2020年土地利用数据，对安徽省县域单元耕地面积和破碎化程度的动态变化进行了评价，利用地理探测器和PLUS模型揭示了变化的影响因素和内在驱动机制，同时对2030年的未来发展进行了多情景模拟预测。结果表明，2000—2020年，安徽省耕地资源持续减少，但下降趋势有所缓解，耕地主要转为建设用地、林地和水域。在空间分布上，耕地主要集中于皖北、皖中，皖南耕地较少且稳定性较差。耕地变化的内在驱动机制表明，其主要受夜间灯光指数、坡度、人均GDP、DEM和年均气温等驱动因素的影响。2000年以来，安徽省经济迅速发展，推动建设用地需求增长，同时因退耕还林还草、水资源保护等相关政策影响，大量耕地资源转出成为建设用地、林地和水域。但在“坚守18亿亩耕地红线”战略目标的约束下，耕地面积减少速度有所减缓。

2000—2020年，研究区耕地破碎化综合指数平均值分别为0.463、0.464和0.481，呈持续上升趋势，且破碎化程度加剧的县域单元占比也呈增长趋势。耕地景观破碎化呈现“北高南低”的空间格局和显著的空间正相关特点。这一空间格局与演变特征的形成，主要源于两方面因素，一是自然地理条件差异，皖南以山地、丘陵地貌为主，人类活动强度相对较低，而皖北以平原地貌为主，土地开发利用强度更高，导致耕地破碎化程度更为突出；二是政策实施与城镇化进程的综合影响，当前研究区土地流转、土地管理等相关政策仍有待完善，大量耕地在城镇化推进过程中遭到侵占与分割，进一步加剧了破碎化程度，同时不同时期耕地占补平衡政策的侧重点与实施方式存在差异，也使得各县域耕地破碎化演变趋势呈现异质性。地理探测器分析进一步揭示，人口密度和夜间灯光指数对破碎化空间分布具有较强解释力，且多因素交互作用影响显著，表明经济发展、人口集聚与城镇化的协同效应日益增强。因此，未来耕地保护与空间优化需重点关注各驱动因素的协同机制，以促进耕地资源可持续利用。

PLUS模型模拟预测结果表明，自然发展和城镇发展情景下，研究区和各县域单元耕地面积均呈现持续减少趋势。生态保护情景下，虽有部分县域单元耕地面积增加，但研究区耕地总面积仍呈现减少趋势；仅在耕地保护情景下，研究区及各县域耕地总面积实现稳步增长。自然发展与城镇发展情景下，耕地减少区域主要集中于皖北地区；而生态保护情景与耕地保护情景下，耕地增加区域则以皖南为主。这一空间差异的形成与区域发展导向、自然条件及政策实施重点密切相关，生态保护情景下，皖北地区更注重生态功能修复，严格落实退耕还林还草等生态保护政策，导致耕地面积减少；城镇发展情景中，皖北地势平坦、人口密度较高，经济快速发展催生了大量建设用地需求，使得耕地被大量占用转化为建设用地。相比之下，皖南耕地资源禀赋远不及皖北，区域发展以旅游业和生态农业为主导，耕地占用需求较低，且对耕地保护的重视程度更高，因此耕地资源得以更好保留甚至出现一定程度增长。综上分析表明，在缺乏政策干预的情景下，耕地资源因人类活动等原因持续减少的趋势不可避免，未来发展应侧重于耕地保护。基于此，本研究选取耕地保护情境下的模拟预测结果，对耕地景观格局进行深入分析，结果表明耕地景观破碎化程度有所改善，这也表明在政策的支持下，耕地将能得到有效保护。

3.2　安徽省耕地保护建议

安徽省作为长江中下游的主要粮食产区，其耕地资源时空变化与区域粮食安全问题密切相关。2000—2020年，因自然因素变化和人类活动的双重影响，耕地总面积减少1 653.141 km^2，且破碎化程度持续加剧，对粮食产能稳定和农业可持续发展构成威胁。《安徽省高标准农田建设规划（2021—2030年）》明确指出，至2030年全省需建成约450万hm^2高标准农田，占耕地总面积的81%，而截至2020年底，仅建成高标准农田约330万hm^2，仍有约120万hm^2建设缺口。从未来发展趋势看，唯有耕地保护情景下，耕地资源状况才得以改善。因此，未来仍需以“耕地保护”为核心，筑牢粮食安全根基。

首先，要牢守耕地保护红线，构建耕地数量、质量、生态“三位一体”保护新格局，推进耕地数量稳中有增、质量逐步提升、布局更加合理。利用遥感、无人机监测等技术，建立覆盖全域的大数据平台，实现对合肥都市圈、江淮流域等地区的耕地变化动态监测和智能预警，并以国土空间规划“一张图”为依托，将监测数据与国土空间规划、用途管制等政策深度衔接，确保监测结果直接服务于规划实施。其次，要进一步完善耕地占补平衡制度，将侵占耕地用于非农建设、造林种树、种果种茶等行为统一纳入耕地占补平衡管理。同时，统筹盐碱地等未利用地、低效闲

置建设用地以及具有优质耕地恢复潜力的园地、林地、草地等其他农用地，将其均作为补充耕地来源。建立跨区域耕地保护和协调机制，推动皖北、皖中和皖南地区之间的区域协作，以此保障耕地数量稳于目标红线之上，且质量不下降。最后，以县域为单元强化土地利用统筹与管控。立足县域资源禀赋和发展定位，实施差异化保护策略，确保耕地保护与区域发展、民生需求深度契合。具体来看，皖北应重点加强耕地集中连片整治，完善农田水利设施，提升农业现代化水平；皖中应聚焦“用养结合”推进耕地的永续利用，通过秸秆还田等技术保持和提升耕地地力，进而推动优质农田向高标准农田转化，构筑高质量农业空间；皖南则需平衡耕地利用和生态保护，严格限定耕地向生态用地转化，实现耕地保护与生态保护的有机统一。

本研究在一些方面仍需深讨，如景观格局指数可以进一步筛选，由此更加科学地评价耕地景观的破碎化；在耕地景观破碎化影响因素和耕地面积变化驱动机制方面，影响因素和驱动因子容易受主观影响，未来可以挖掘更有解释力的影响因素和驱动因子；模拟预测方面，目前仅预测到2030年，未考虑目前国土空间总体规划的期限（即2035年），未来研究可以进一步预测2035年的耕地变化，为国土空间规划编制和调整提供参考和依据。

参考文献 References

[1] 尚海洋，胡玥，王尧，等.土地政策研究的国内进展及趋势：基于1992—2024年发表的8537篇文献的分析[J].地球科学与环境学报，2024，46(4)：454-469. SHANG H Y，HU Y，WANG Y，et al.Domestic research progress and trend of land policy：based on 8537 literatures published from 1992 to 2024[J].Journal of earth sciences and environment，2024，46(4)：454-469(in Chinese with English abstract).

[2] 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(in Chinese with English abstract).

[3] 周小平，梁颖，李小天，等.耕地系统健康的时空演变及其驱动因素研究：以长江中下游地区为例[J].自然资源学报，2024，39(5)：1174-1192.ZHOU X P，LIANG Y，LI X T，et al. The spatiotemporal evolution and driving factors of farmland system health：taking the middle and lower reaches of the Yangtze River as an example[J].Journal of natural resources，2024，39(5)：1174-1192(in Chinese with English abstract).

[4] 周德，戚佳玲，袁承程.近40年来中国农地细碎化研究进展与展望[J].中国土地科学，2021，35(1)：107-116. ZHOU D，QI J L，YUAN C C.Progress review and prospects for farmland fragmentation in China in the past 40 years[J].China land science，2021，35(1)：107-116(in Chinese with English abstract).

[5] 张扬，周忠发，黄登红，等.喀斯特山区耕地时空演变与影响因子分析[J].农业工程学报，2020，36(22)：266-275. ZHANG Y，ZHOU Z F，HUANG D H，et al.Spatio-temporal evolution of cultivated land and analysis of influence factors in karst mountainous areas[J].Transactions of the CSAE，2020，36(22)：266-275(in Chinese with English abstract).

[6] 夏炜祁，张明辉，张安录.绿色低碳视域下长江经济带耕地生态外溢价值评估及时空变化分析[J].华中农业大学学报，2024，43(3)：51-64.XIA W Q，ZHANG M H，ZHANG A L，et al. Assessment of ecological spillover value of cultivated land and its temporal and spatial changes in Yangtze River Economic Belt from a green and low-carbon perspective[J].Journal of Huazhong Agricultural University，2024，43(3)：51-64(in Chinese with English abstract).

[7] YUAN Z F，ZHOU L，SUN D Q，et al. Impacts of urban expansion on the loss and fragmentation of cropland in the major grain production areas of China[J/OL].Land，2022，11(1)：130[2025-05-30].https://doi.org/10.3390/land11010130.

[8] WANG Q，LI Y B，LUO G J. Spatiotemporal change characteristics and driving mechanism of slope cultivated land transition in karst trough valley area of Guizhou Province，China[J/OL].Environmental earth sciences，2020，79(12)：284[2025-05-30].https://doi.org/10.1007/s12665-020-09033-z.

[9] 赵育恒，谭永忠.中国第二次土地调查以来省域耕地利用时空变化[J].水土保持通报，2020，40(1)：204-212.ZHAO Y H，TAN Y Z.Spatial-temporal changes of cultivated land use at provincial level since second national land survey in China[J].Bulletin of soil and water conservation，2020，40(1)：204-212(in Chinese with English abstract).

[10] 张婕，刘玉洁，张二梅，等.中国县域耕地动态演变及其驱动机制[J].地理学报，2023，78(9)：2105-2127.ZHANG J，LIU Y J，ZHANG E M，et al.Dynamics and driving mechanisms of cultivated land at county level in China[J].Acta geographica sinica，2023，78(9)：2105-2127(in Chinese with English abstract).

[11] 杜辉，张学儒，张世国，等.耕地转变为建设用地的碳排放效应：基于中国224个地级市的经验与证据[J].华中农业大学学报，2024，43(6)：65-74.DU H，ZHANG X R，ZHANG S G，et al.Effects of transforming farmland into construction land on carbon emission：based on experience and evidence of 224 prefecture-level cities in China[J].Journal of Huazhong Agricultural University，2024，43(6)：65-74(in Chinese with English abstract).

[12] WANG H J，QI Z G，YAN H M，et al.Variation characteris-

tics of land use change within the Beijing-Tianjin-Hebei Region during 1985—2022[J/OL]. Land, 2024, 13(12): 1997 [2025-05-30].https://doi.org/10.3390/land13121997.

[13] 刘超,霍永伟,许月卿,等.生态退耕前后张家口市耕地变化及影响因素识别[J].自然资源学报,2018,33(10):1806-1820.LIU C,HUO Y W,XU Y Q,et al.Changes in cultivated land and influencing factors before and after the implementation of grain for green project in Zhangjiakou City[J].Journal of natural resources, 2018, 33(10): 1806-1820(in Chinese with English abstract).

[14] 吕晶,金日,王镜植,等.基于PLUS的耕地驱动因素分析与未来预测:以图们江流域为例[J].水土保持通报,2023,43(3):203-212.LÜ J,JIN R,WANG J Z,et al.Analysis of driving factors and predictions of arable land area based on PLUS model:a case study of Tumen River Basin[J].Bulletin of soil and water conservation, 2023, 43(3): 203-212(in Chinese with English abstract).

[15] 李文灏,沈俊.水网平原地区耕地破碎化时空变化研究[J].浙江农林大学学报,2021,38(4):723-729.LI W H,SHEN J.Spatio-temporal variation of farmland fragmentation in water net plain area[J].Journal of Zhejiang A & F University,2021,38(4):723-729(in Chinese with English abstract).

[16] 赵思劼,赵晨羽,姜妮,等.基于AHP-熵权法的滇池环湖湿地效益评估研究[J].环境科学学报,2024,44(4):411-420.ZHAO S J,ZHAO C Y,JIANG N,et al.Benefit evaluation and optimization strategy of wetland around Dianchi Lake based on AHP-entropy weight method[J].Acta scientiae circumstantiae, 2024, 44(4): 411-420(in Chinese with English abstract).

[17] 唐放,蔡广鹏.典型喀斯特地区土地利用转型的时空特征及其景观格局演变:以仁怀市为例[J].科学技术与工程,2020,20(12):4860-4870.TANG F,CAI G P.Temporal and spatial characteristics of land use transformation and its the evolution of landscape patterns in typical karst regions:a case study of Renhuai City[J].Science technology and engineering,2020,20(12):4860-4870(in Chinese with English abstract).

[18] 李晓健,马林兵.基于参数最优地理探测器的粤东北耕地非农化特征与影响因素研究[J].水土保持通报,2024,44(5):100-112.LI X J,MA L B.Characteristics and influencing factors of farmland conversion to non-agricultural uses in northeast Guangdong Province based on optimal parameter geographic detector[J].Bulletin of soil and water conservation,2024,44(5):100-112(in Chinese with English abstract).

[19] ZHOU Y,LI X H,LIU Y S. Land use change and driving factors in rural China during the period 1995—2015[J/OL]. Land use policy,2020,99: 105048[2025-05-30].https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.105048.

[20] 王帝盟,尹小君,王娇娇,等.玛纳斯河流域生态系统健康时空演变及归因分析[J].地理研究,2025,44(2):515-537.WANG D M,YIN X J,WANG J J,et al.Spatiotemporal evolution and driving forces of ecosystem health in the Manas River Basin[J].Geographical research,2025,44(2):515-537(in Chinese with English abstract).

[21] 于目良,刘悦俊,张燕杰.青藏高原未来土地利用变化与景观生态风险多情景预测[J].长江流域资源与环境,2024,33(10):2204-2218.YU M L,LIU Y J,ZHANG Y J.Multi-scenario prediction of future land use change and landscape ecological risk on the qingzang plateau[J].Resources and environment in the Yangtze Basin,2024,33(10):2204-2218(in Chinese with English abstract).

[22] 杨子韬,田莉.基于PLUS模拟未来土地利用变化的可持续发展评估[J].地理科学,2024,44(10):1826-1836.YANG Z T,TIAN L.Sustainability assessment based on PLUS simulation of future land use change:a case study of Jiangxi Province[J].Scientia geographica sinica,2024,44(10):1826-1836(in Chinese with English abstract).

[23] 文少强,胡宝清,谢薇薇,等.基于PLUS-InVEST模型的平陆运河经济带土地利用情景模拟及生境质量变化[J].环境科学,2025,46(8):5122-5133.WEN S Q,HU B Q,XIE W W, et al. Land use scenario simulation and habitat quality change in Pinglu River Economic Belt based on PLUS-InVEST model[J].Environmental science,2025,46(8):5122-5133(in Chinese with English abstract).

[24] 王芳,李婧,王建,等.成渝经济区多情景模拟土地利用变化及其对碳储量的影响[J].环境科学,2025,46(9):5718-5728.WANG F,LI J,WANG J,et al.Multi-scenario simulation of land use change in Chengyu Economic Zone and its influence on carbon reserves[J].Environmental science,2025,46(9):5718-5728(in Chinese with English abstract).

[25] 刘志勇,方朝阳,蔡振饶,等.多情景下鄱阳湖滨湖区生态系统服务价值预测[J].环境科学与技术,2022,45(7):218-227.LIU Z Y,FANG C Y,CAI Z R,et al.Multi-scenario simulation and prediction of ESV for Poyang Lake lakeside area[J].Environmental science & technology,2022,45(7):218-227(in Chinese with English abstract).

[26] 毕帆帆,武志涛,梁寒雪,等.基于PLUS-InVEST-GeoDetector模型的黄河中游碳储量时空变化及驱动因素[J].环境科学,2025,46(8):4742-4753.BI F F,WU Z T,LIANG H X,et al.Spatio-temporal changes and driving factors of carbon storage in the middle reaches of the Yellow River based on PLUS-InVEST-GeoDetector model[J]. Environmental science, 2025, 46(8): 4742-4753(in Chinese with English abstract).

[27] TANRVERMIŞ Y, TANRVERMIŞ H, UISSO A M. Assessment of farmland fragmentation and the role of the legal regulations for the prevention of farmland fragmentation in Türkïye[J/OL].Land use policy,2024,145: 107289[2025-05-30].https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2024.107289.

[28] YE S J,REN S Y,SONG C Q,et al.Spatial pattern of culti-

vated land fragmentation in mainland China: characteristics, dominant factors, and countermeasures[J/OL]. Land use policy, 2024, 139: 107070 [2025-05-30]. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2024.107070.

Evaluation and simulation prediction of fragmentation in farmland landscape in county-level regions of Anhui Province

ZHANG Xiaorui[1,2], YANG Xinyue[1], LI Jieming[3], WANG Zhenbo[4], WANG Xin[1], XU Tu[1]

1.*College of Architecture and Art, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China*;
2.*Laboratory of Digital Human Settlements Research, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China*;
3.*Institute (Group) of Design Co., Ltd., Hefei University of Technology, Hefei 230009, China*;
4.*Institute of Geographical Sciences and Natural Resources, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*

Abstract Farmland is the foundation for ensuring national food security. Evaluating and predicting the degree of fragmentation in farmland landscapes has significant value and importance for formulating policies of protecting farmland and optimizing the spatial layout of farmland. The county-level units in Anhui Province from 2000 to 2020 were used to study the situation and evolution trends of fragmentation in farmland landscapes. The characteristics of spatiotemporal evolution, driving mechanisms, and predictions of development in the future of farmland landscapes in Anhui Province were systematically analyzed based on big multi-source data with methods including land use change analysis models, landscape pattern indices, geographic detectors, and the PLUS model. The results showed that the total area of farmland in Anhui Province has continuously decreased since 2000, mainly being transformed into construction land. The fragmentation in farmland landscapes has continuously intensified under the interaction of multiple factors, with the average comprehensive index steadily increasing, and a spatial distribution pattern of high in the north and low in the south. The results of the simulation prediction of changes in farmland in Anhui Province in 2030 showed that the degree of fragmentation in farmland landscapes will be improved only under the scenario of protection. It is indicated that Anhui Province needs to strictly implement the policy of protecting farmland in the future, achieve sustainable development of farmland resources in Anhui Province through macro-level regulation of balance between the land use and the occupation/compensation of farmland.

Keywords landscape of cultivated land; spatiotemporal evolution; fragmentation; spatial autocorrelation; geographic detector; PLUS model; Anhui Province

(责任编辑:陆文昌)