

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

李晓健, 马林兵

(中山大学 地理科学与规划学院, 广东 广州 510006)

摘要: [目的] 探究粤东北丘陵山区耕地非农化格局及影响机制, 为该地区防治耕地非农化提供理论指导。[方法] 以粤东北为例, 基于该地区 1990, 2000, 2010 和 2020 年 4 期土地利用影像提取非农化信息, 运用空间自相关分析和参数最优地理探测器等方法探究耕地非农化时空分布特征与影响因素。[结果] ① 1990—2020 年, 粤东北耕地非农化呈“平稳发展到骤降”的变化趋势, 累计非农化面积 $2.29 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 非农化率 25.31%, 林地和建设用地是主要的非农化类型。② 垂直方向上, 海拔 1 000 m 以上和坡度 $25^\circ \sim 35^\circ$ 的耕地更容易非农化; 水平方向上, 与建设用地距离 50 m 以内和与河流距离 1 000~1 500 m 的耕地更容易非农化。③ 粤东北耕地非农化存在显著的正向集聚, 全局莫兰指数由 0.371 逐渐下降至 0.255, “高一高”聚类 and “低—低”聚类的变化主导着耕地非农化率空间自相关格局的演变。④ 农业人口和耕地破碎度始终对耕地非农化空间分布具有较强的解释力, 近 10 a 来社会经济因素对非农化的解释力有所减弱。多因素特别是农业因素和社会经济因素的交互能够进一步增加对耕地非农化的解释力。[结论] 近 30 a 来, 粤东北耕地非农化面积和空间集聚呈下降趋势, 但农业人口和耕地破碎度对非农化的影响进一步增强。应合理控制城镇扩张速度, 整合破碎耕地、引入小型农机改善生产条件, 同时通过普及农村电子商务等方式鼓励农民种植, 以应对耕地非农化问题。

关键词: 耕地非农化; 参数最优地理探测器; 空间自相关; 时空演变; 粤东北

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)05-0100-13

中图分类号: F301.2

文献参数: 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. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.05.012; Li Xiaojian, Ma Linbing. 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.

Characteristics and Influencing Factors of Farmland Conversion to Non-agricultural Uses in Northeast Guangdong Province Based on Optimal Parameter Geographic Detector

Li Xiaojian, Ma Linbing

(School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510006, China)

Abstract: [Objective] The patterns and mechanisms of farmland conversion to non-agricultural were explored in the hilly regions of Northeast Guangdong Province (NGP) to provide theoretical guidance for preventing Farmland Conversion to Non-agricultural. [Methods] Using NGP as an example, information on farmland conversion was extracted land-use images for the years 1990, 2000, 2010, and 2020. Spatial autocorrelation analysis and optimal parameter geographic detector methods were employed to investigate the spatiotemporal distribution characteristics and factors influencing farmland conversion. [Results] ① From 1990 to 2020, farmland conversion to non-agricultural in NGP exhibited a trend of “steady development followed by a sharp decline”, with a cumulative non-agriculturalized area spanning $2.29 \times 10^5 \text{ hm}^2$ at a rate of 25.31%. Forestland

收稿日期: 2024-06-07

修回日期: 2024-08-23

资助项目: 国家自然科学基金项目“面向城乡融合的珠三角地区都市农业地域系统功能演化、空间重组及环境效应研究”(42171193); 教育部哲学社会科学重大课题攻关项目“中国式乡村现代化理论研究”(23JZD008)

第一作者: 李晓健(1999—), 男(壮族), 广西壮族自治区灵山县人, 硕士研究生, 研究方向为撂荒地与土地利用变化。Email: lixj298@mail2.sysu.edu.cn.

通信作者: 马林兵(1968—), 男(汉族), 湖北省武汉市人, 博士, 副教授, 主要从事 GIS 与土地利用等方面的研究。Email: malb@mail.sysu.edu.cn.

and constructed land were identified as the primary types of non-agricultural land. ② Vertically, croplands above 1 000 m in elevation and with a slope of 25° — 35° were more prone to non-agriculturalization; horizontally, croplands within 50 m of construction land and 1 000—1 500 m from rivers were more likely to undergo non-agriculturalization. ③ Cropland non-agriculturalization in NGP exhibited significant positive clustering, with Global Moran's I gradually decreasing from 0.371 to 0.255. The changes in “high-high” and “low-low” clustering dominated the evolution of the spatial autocorrelation pattern of cropland non-agriculturalization rates. ④ Agricultural population and cropland fragmentation consistently had strong explanatory power for the spatial distribution of cropland non-agriculturalization. In contrast, the explanatory power of socioeconomic factors for non-agriculturalization has weakened over the past decade. The interaction of multiple factors, especially agricultural and socioeconomic factors, can further enhance the explanatory power of cropland non-agriculturalization. [Conclusion] From 1990 to 2020, the area and spatial clustering of farmland conversion to non-agricultural in NGP decreased. However, the impact of the agricultural population and farmland fragmentation on farmland conversion to non-agricultural has intensified. It is suggested to reasonably control the speed of urban expansion, consolidate fragmented farmland, introduce small-scale agricultural machinery to improve farming conditions, and encourage farmers to cultivate by promoting rural e-commerce to address the issue of farmland conversion to non-agricultural.

Keywords: farmland conversion to non-agricultural uses; optimal parameter geographical detector; spatial autocorrelation; spatiotemporal evolution; Northeast Guangdong Province

自进入“人类世”以来,伴随着工业化进程的不断加快和城镇用地的增加,耕地资源被侵占的现象也日益严重^[1]。根据自然资源部发布的2022年度全国国土变更调查初步结果显示,全国人均耕地面积仅 0.09 hm^2 ,远低于世界人均耕地面积水平^[2]。耕地非农化是指原本用于农业生产的耕地发生用途改变的现象,是城镇化和人口增长的必然结果^[3]。有研究表明,耕地的低经济效益迫使其难以避免地向建设用地、园林地等高效益土地转变^[4]。耕地非农化使原本稀缺的耕地资源变得更为紧张,不仅严重威胁“ $(1.20 \times 10^8\text{ hm}^2)$ 耕地红线”安全,还会导致生态系统恶化^[5]、农业生态服务价值损失^[6]以及农村劳动力就业向非农领域转移^[7]等一系列问题。因此研究耕地非农化具有重大意义,可为粮食安全、农村发展、环境治理和社会稳定提供有效的政策和措施。

当前,研究人员主要围绕时空格局、影响因素及应对策略对耕地非农化展开研究,研究区域包括三大粮食主体功能区^[8]、黑龙江省^[9]和西南丘陵区^[10]等,研究方法主要有空间自相关分析^[11]、重心迁移模型^[12]和地理探测器^[13]等。在有关非农化驱动因素的研究中,张婕等^[14]使用地理探测器探究了全国县域耕地动态演变的驱动机制,发现农业劳动力显著影响耕地非农化;崔许锋等^[15]使用模型集成法,发现产业结构对中国耕地非农化的总体作用强度最大;杨玉钱等^[16]使用主成分分析法,得出农业人口数量、固定资产投资和城镇化率是滇中城市群耕地非农化的主要驱动因素的结论。针对耕地非农化调控所开展的

研究中,包括科技创新和农业结构调整^[17]、重视土地利用空间效率的差距^[18]、建设高标准农田^[19]、鼓励土地流转和提供农业补贴^[20]等在内的以应对耕地非农化的措施意见被广泛采纳。在国外,研究人员更多地以土地利润、耕作意识和生态环境为切入点,探究其与耕地非农化的关系。从土地利润来看,不同用地方式的产出利润差异是造成耕地非农化的一个重要原因^[21];从耕作意识来看,对生产性农田的丧失缺乏认知和关注可能会导致大量优质耕地被非农化^[22];从生态环境来看,耕地非农化会削弱土地的水土保持、气候调节等生态服务功能。总体来看,耕地非农化研究成果较为丰富,但存在以下不足:首先,目前研究大多聚焦于高速城市化地区或粮食主产区^[23],对丘陵山区的非农化研究较为欠缺,而丘陵山区由于耕地管理模式和地形条件的限制,更容易发生耕地非农化现象^[24],有必要深入探究丘陵山区耕地非农化特征及影响因素;其次,已有研究^[25]在使用地理探测器进行驱动力分析时,大多依赖先验知识对自变量进行离散化,存在主观性和随机性,从而对分析结果产生影响。参数最优地理探测器通过自变量类别数自动寻优得到影响因素的最佳解释力,可以更准确地识别和解释空间异质性,从而为耕地非农化治理提供科学依据^[26]。

粤东北是中国南方较为典型的丘陵区,同时也是广东省内高、中等质量耕地的集中区域,耕地呈现“大部分散,小部聚集”的分布特点。近年来在广东省高速城镇化影响下,该地区城市快速扩张,大城市的

虹吸效应使农村外出务工人员增加,导致大量耕地无人耕作从而被抛荒。与此同时,农村地区光伏发电设施的建设和非粮经济作物的种植,进一步加深了耕地非农化风险。粤东北作为广东省内主要的产粮地之一,其粮食供给能力对于维系全省粮食安全至关重要。基于此,本文选取粤东北作为研究区,使用空间自相关分析和参数最优地理探测器等方法,分析该地区耕地非农化特征及影响因素,以期进一步完善丘陵区耕地非农化的研究空白,对保障粮食安全、加快农村经济转型和保护生态环境具有重要意义。

1 研究区概况与数据准备

1.1 研究区概况

粤东北位于中国南部,广东省东北部,范围约为北纬 23°10′—25°30′,东经 112°50′—116°56′,包括河源、韶关和梅州 3 个地级市以及 24 个县级行政区,总面积约 6.00×10⁴ km²,是广东省第二大民系—客家民系的主要聚居地^[27]。地形上,粤东北海拔 8~1 822 m,地势西北部高,中南部低,属于典型的丘陵地带。气候上,粤东北属于典型亚热带季风气候区,夏季炎热多雨,常伴有潮湿的气候条件;冬季则温和干燥,相对凉爽,降雨较少,具备优良的农业发展气候条件^[28]。产业上,粤东北以资源产业或小农业为主要经济支柱,2020 年该地区实现生产总值 3 664.21 亿元,其中农业生产总值 950.84 亿元,所占比例为 26%。

1.2 数据来源与处理

本研究数据主要包括土地利用数据、DEM 数据、气象数据、水系数据和统计年鉴数据等。①土地利用数据来源于武汉大学黄昕教授发布的中国年度土地覆盖数据集(CLCD),空间分辨率为 30 m,该数据集基于 GEE 上所有可获得的 Landsat 数据,通过构建时空特征,结合随机森林分类器得到分类结果,总体精度达 80%^[29],在 ArcGIS 10.8 将土地利用数据重分类为耕地、林地、草地、水体、建设用地和未利用地 6 类。②DEM 数据来源于 GEE (Google Earth Engine)平台(<https://code.earthengine.google.com>)的 ASTER GDEM 数据集,空间分辨率为 30 m。③气象数据来源于 CRU v4.05 (<https://www.uea.ac.uk>),采用 Delta 方法将原始数据降尺度到 1 000 m 空间分辨率获得^[30]。④水系数据来源于 OpenStreet-Map(<https://www.openstreetmap.org>)的中国区水系线状数据,并按粤东北行政边界裁剪获得。⑤统计年鉴数据来源于梅州市、河源市和韶关市统计年鉴,主要统计数据为各区县常住人口数量、GDP、人均可支配收入、农业生产总值和农业人口数量等,数据类型

型为 2000,2010,2020 年的截面数据,部分缺失数据采用相邻年份的数据替代。

2 研究方法

2.1 耕地非农化率

耕地非农化率反映了研究区耕地非农化程度的强弱,其为一段时期内由耕地转出为其他类型土地面积与初期耕地面积的比值。本研究将耕地定义为至少边长 30 m(0.09 hm²)的土地,当用地类型由耕地转变为其他用地类型时,则视为耕地发生了非农化现象。耕地非农化率的计算公式为:

$$C_i = \frac{F_i}{S_i} \times 100\% \tag{1}$$

式中: C_i 表示第 i 时期的耕地非农化率; F_i 表示第 i 时期末期的非农化耕地面积; S_i 表示第 i 时期初期的耕地面积。

2.2 区位指数分析

区位条件会对非农化的空间分布产生较大影响。为了探究非农化的空间分布特征,本研究从垂直方向选取海拔、坡度两个指标,从水平方向选取与建设用地距离、与河流距离两个指标。根据研究区特点,将这些指标重分类为 15 个类别,使用叠置分析和缓冲区分析等方法,探究这些要素对耕地非农化的影响。区位指数的划分结果详见表 1。

表 1 区位指数等级划分结果
Table 1 Classification results of location index levels

级别	海拔/m	坡度/(°)	与建设用地 距离/m	与河流 距离/m
1	6~25	0~2	0~50	0~50
2	25~50	2~4	50~100	50~100
3	50~75	4~6	100~150	100~150
4	75~100	6~8	150~200	150~200
5	100~150	8~10	200~250	200~250
6	150~200	10~12	250~300	250~300
7	200~250	12~15	300~350	300~350
8	250~300	15~20	350~400	350~400
9	300~350	20~25	400~450	400~450
10	350~400	25~30	450~500	450~500
11	400~500	30~35	500~600	500~600
12	500~600	35~40	600~700	600~700
13	600~800	40~50	700~800	700~800
14	800~1 000	50~60	800~1 000	800~1 000
15	>1 000	>60	1 000~1 500	1 000~1 500

2.3 空间自相关分析

空间自相关是指地理空间中的现象或变量在空间上的相似性或相关性,反映了地理现象在空间上的

聚集趋势或者是空间上的异质性^[31],本研究使用莫兰指数探究耕地非农化的空间集聚特征。莫兰指数(Moran's I)是空间统计学中常用的一种测度,主要用于评估空间数据的自相关性,包含全局莫兰指数(Global Moran's I)和局部莫兰指数(Local Moran's I)两个指标。全局莫兰指数的计算公式为:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}}$$

(2)

式中: I 为全局莫兰指数; x_i, x_j 分别为研究单元 i 和 j 的耕地非农化率; \bar{x} 为所有研究单元非农化率的均值; S^2 为样本方差; W_{ij} 为空间权重矩阵。 I 的值域为 $[-1,1]$,当 I 为正值时(接近 1),表示耕地非农化率存在空间正相关性; I 为负值时(接近 -1),表示耕地非农化率存在空间负相关性; I 接近 0 时,表示耕地非农化率的分布是随机的。

全局莫兰指数一般用于评估整个研究区域内的空间自相关性,即对整个地理数据集进行分析,而较难对局部的空间自相关性进行可视化,故本研究继续采用局部莫兰指数对每个地理特征进行分析。局部莫兰指数的计算公式为:

$$I_i = \frac{y_i - \bar{y}}{\frac{1}{n} \sum (y_i - \bar{y})^2} \sum_{j \neq i} W_{ij} (y_j - \bar{y})$$

(3)

式中: I_i 为局部莫兰指数; W_{ij} 为空间权重值; n 为研究单元总数; y_i 为每个研究单元的耕地非农化率; \bar{y} 为所有研究单元非农化率的均值。

空间自相关显著性采用标准化统计量进行判断,计算公式为^[32]:

$$Z(I) = \frac{I - E(I)}{\sqrt{V(I)}}$$

(4)

式中: $E(I)$ 为 I 的期望值; $V(I)$ 为 I 的方差,在 0.01 的显著性水平下 $|Z(I)| \geq 2.58$ 表示空间自相关是显著的。

根据局部莫兰指数和显著性的结果,可将耕地非农化率分布划为 5 种空间关联模式,分别为“高一高”促进区域、“高一低”辐射区域、“低一高”过渡区域、

“低一低”低水平区域、“不显著”区域。

2.4 参数最优地理探测器

地理探测器(GeoDetector)是一种基于统计学的工具,主要用于探索和分析地理数据中的空间异质性,并识别可能影响这些变化的因素,由中科院地理所的王劲峰等^[33]提出。传统地理探测器需要人为对变量类别进行划分,存在主观性强、计算精度差等问题^[34],参数最优地理探测器^[35](optimal parameters geographical detector, OPGD)通过多种统计方式(等间距、自然间距、分位数间距、几何间距和标准偏差间距)来实现连续变量的离散化方式寻优,以获得最佳 q 值,故本研究采用 OPGD 分析耕地非农化的影响因素。基于 OPGD 的分析包括 6 个部分,分别为空间尺度效应分析、空间离散化优化、因子探测器、交互作用探测器、风险区探测器和生态探测器。

(1) 因子探测器。探测因变量 Y (耕地非农化率)的空间分异性及自变量 X (影响因素)对 Y 的空间分异的解释程度,计算公式为:

$$q = 1 - \frac{SSW}{SST}$$

(5)

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, \quad SST = N \sigma^2$$

(6)

式中: q 值度量影响因子对 Y 的解释力,值域为 $[0,1]$, q 值越大表示各影响因子的解释力越强,即对耕地非农化率空间分布的影响越显著。 $h=1,2,\dots; L$ 为 Y 或 X 的分层; N_h, N 分别为层 h 和全区的单元数; σ_h^2, σ^2 分别为层 h 和全区的 Y 值的方差; SSW, SST 分别为层内方差之和与全区总方差。

(2) 交互作用探测器。交互作用探析是用于识别不同风险因子 X_i 之间的交互作用,即评估因子 X_1 和 X_2 共同作用时是否会增加或减弱对因变量 Y 的解释力,或这些因子对 Y 的影响是相互独立的。评估的方法是首先分别计算两种因子 X_1 和 X_2 对 Y 的 q 值: $q(X_1)$ 和 $q(X_2)$,并且计算它们交互(叠加变量 X_1 和 X_2 两个图层相切)所形成的新的多边形分布时的 q 值: $q(X_1 \cap X_2)$,并对 $q(X_1), q(X_2)$ 与 $q(X_1 \cap X_2)$ 进行比较。两个因子之间的关系分类情况详见表 2。

表 2 两因子交互作用结果
Table 2 Results of two-factor interaction

交互作用	判断依据
单因子非线性减弱	$\text{Min}[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \text{Max}[q(X_1), q(X_2)]$
非线性减弱	$q(X_1 \cap X_2) < \text{Min}[q(X_1), q(X_2)]$
双因子增强	$q(X_1 \cap X_2) > \text{Max}[q(X_1), q(X_2)]$
非线性增强	$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$
独立	$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$

3 结果与分析

3.1 耕地非农化规模演变特征

3.1.1 耕地非农化面积变化特征 1990—2020 年粤东北耕地面积与耕地非农化率时间演变特征详见表 3。由表 3 可知,1990—2020 年粤东北耕地面积由 $9.03\times 10^5\text{ hm}^2$ 持续下降至 $8.02\times 10^5\text{ hm}^2$, 累计耕地非农化面积达到 $2.29\times 10^5\text{ hm}^2$, 非农化率 25.31%。从时间变化来看,第 1 时期耕地非农化面积为 $1.55\times 10^5\text{ hm}^2$, 非农化率 17.19%;第 2 时期耕地非农化面积略有减少,为 $1.45\times 10^5\text{ hm}^2$, 但由于同时期耕地面积也出现了下降,导致该时期耕地非农化率略微增加至 17.38%;第 3 时期耕地非农化面积大幅降低至 $9.67\times 10^4\text{ hm}^2$, 非农化率 12.05%。总的来说,粤东北耕地非农化呈“平稳发展到骤降”的变化趋势,这得益于 2010 年以后“耕地保护红线”政策的实施以及政府对粮食安全的重视,有效遏制了耕地非农化的速度。

3.1.2 耕地非农化类型变化特征 为探究粤东北不同非农化类型面积变化情况,使用 ArcGIS 统计不同时期由耕地转出为其他用地类型的面积,得到不同时期耕地非农化类型面积及比例详见表 4。整体来看,粤东

北耕地非农化类型以林地和建设用地为主,前者占据主导地位但面积呈下降趋势,其中 2000—2010 年非农化为林地的面积比例最大,为 84.30%,这与 2000 年以后启动的绿色增益工程以及山区耕地撂荒有关,后者则随着经济发展和城市化进程的加快波动上升,其中 2010—2020 年非农化为建设用地的面积比例最大,为 19.39%,表明近 10 年来城市扩张对耕地非农化产生了重要影响;非农化为草地的面积比例呈先增加后下降的趋势,但整体比例在 1%以下;非农化为水体的主要是早期由于水库建设被淹没的低海拔耕地,面积比例从 4.96%逐渐下降至 2.56%;非农化为未利用地的面积比例最小,但在 2000 年以后有略微增加的趋势。

表 3 1990—2020 年粤东北耕地面积与耕地非农化率变化
Table 3 Changes in cultivated land area and rate of cultivated land non-agriculturalization in Northeastern Guangdong Province from 1990 to 2020

年 份	耕地面积/ hm ²	耕地非农化 面积/hm ²	耕地非 农化率/%
1990—2000	9.03×10^5	1.55×10^5	17.19
2000—2010	8.37×10^5	1.45×10^5	17.38
2010—2020	8.02×10^5	9.67×10^4	12.05
1990—2020	9.03×10^5	2.29×10^5	25.31

表 4 1990—2020 年粤东北耕地非农化类型面积及比例
Table 4 Area and proportion of cultivated land non-agriculturalization types in Northeastern Guangdong Province from 1990 to 2020

耕地非农化 类 型	1990—2000 年		2000—2010 年		2010—2020 年		1990—2020 年	
	面积/hm ²	比例/%	面积/hm ²	比例/%	面积/hm ²	比例/%	面积/hm ²	比例/%
林 地	126 818.46	81.71	122 571.18	84.30	74 825.82	77.41	163 706.76	71.63
草 地	1 051.56	0.68	1 372.14	0.94	594.27	0.61	485.73	0.21
水 体	7 704.63	4.96	4 387.77	3.02	2 479.23	2.56	10 336.05	4.52
建设用地	19 639.00	12.65	17 046.90	11.72	18 737.55	19.39	53 980.11	23.62
未利用地	0.27	0.00	27.18	0.02	20.88	0.02	28.98	0.01

3.2 耕地非农化时空分布特征

为进一步探究县域耕地非农化空间分布格局,借助 ArcGIS 统计不同县区的耕地非农化率,并使用自然断点法将粤东北 1990—2020 年各县区各个时期耕地非农化率划分为 4 个等级,最后对发生非农化的耕地进行可视化,结果如图 1 所示。由图 1 可知,粤东北耕地非农化分布具有较强的空间异质性。整体来看,1990—2020 年研究区东部的梅江区、梅县区、大埔县和丰顺县耕地非农化现象较为严重,尤其是大埔县和丰顺县,有两个时期非农化率位于第一等级。通过 Google 高清历史影像判读发现,梅江区和梅县区存在大量转为建设用地的耕地,而大埔县和丰顺县出现了大量的梯田撂荒现象。梅江区和梅县区是梅州市政治、经济和文化中心,是“粤赣闽”门户城市的重要组成部分,地形条件优越,尤其是近些年“梅县新城”的发

展,城市沿梅江两岸快速扩张,导致大量耕地被建设用地侵占而发生“非农化”现象;丰顺县和大埔县为人口老龄化较为严峻的地区,近年来该地区年轻劳动力大量外流至珠三角等经济发达地区,农业生产活力下降,出现了较严重的耕地撂荒现象。源城区耕地非农化率由第三等级逐渐上升为第一等级,原因在于源城区充分发挥毗邻大湾区的地缘优势,积极主动承接“双区”产业转移,不断推进基础设施建设,进一步加深了非农化风险。仁化县、始兴县、南雄市和翁源县有两个时期均位于低值区,表明这些地区非农化风险较低。仁化县和始兴县大部分地区位于自然保护区,城镇化进程缓慢,人为的耕地改造活动不强,不具备发生非农化的条件;南雄市和翁源县地理条件优越,具有大面积连片耕地资源,并且产业结构以农业为主,导致该地区耕地利用效率较高,一定程度上降低了非农化风险。

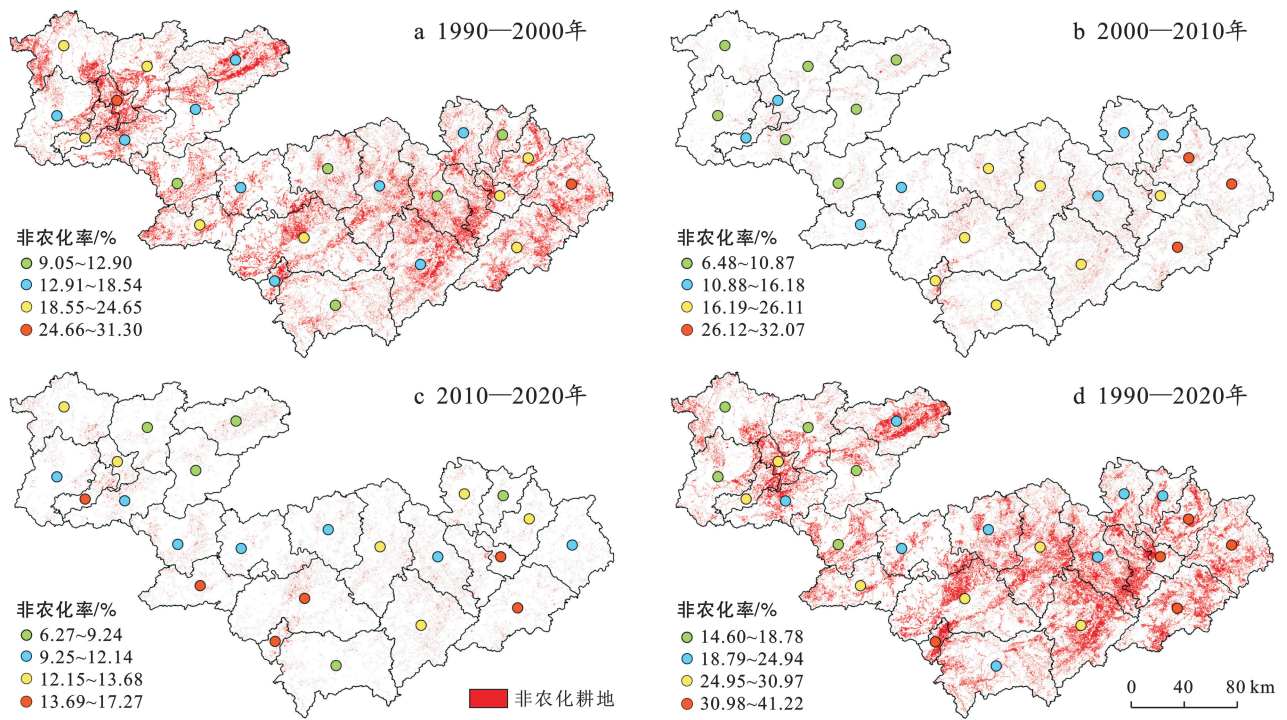


图1 粤东北耕地非农化时空分布图

Fig.1 Spatiotemporal distribution map of cultivated land non-agriculturalization in Northeastern Guangdong Province

3.3 耕地非农化区位分布特征

使用区位指数分析,探究高程、坡度、与建设用地的距离、与河流距离对耕地非农化的影响,分析结果如图2所示。由图2可知,垂直方向上,海拔区位指数在第5—6级(100~200 m)时,非农化面积最大,在第15级(>1 000 m)时,非农化率最高;坡度区位指数在第2—3级($2^{\circ}\sim 6^{\circ}$)时,非农化面积最大,在第10—11级($25^{\circ}\sim 35^{\circ}$)时,非农化率最高。海拔和坡度较低的地区,人类活动频繁,尤其是城镇扩张导致了大量优质农田被转为建设用地,耕地被人为改造的风险较高;而高海拔、地势险峻的地区,农业机械作业难度增加,耕作成本上升,农业收益下降,面临被人为抛荒的威胁,在退耕还林还草等政策的驱动下,更容易发生非农化现象;水平方向上,与建设用地距离区位指数在第15级(1 000~1 500 m)时,非农化面积最大,在第1级(0~50 m)时,非农化率最高;与河流距离在第15级(1 000~1 500 m)时,非农化面积和非农化率均最高。耕地非农化率随着与建设用地距离的增加呈波动下降趋势,随着与水源距离的增加呈波动上升趋势。1990年距离建设用地50 m以内的耕地非农化率达32.06%,说明这段时期粗放式城市扩张导致的耕地被建设用地侵占的现象非常严重。建设用地周围的耕地,由于地形条件好,单位土地价值高,更容易被侵吞,加之早期城市化导致城镇人口数量迅速增加,对建设用地的需求激增,进一步提高了这些区域

耕地非农化的可能性,而近些年随着“高质量发展”、“严控城镇无序蔓延”等战略的提出,这一无序扩张的模式得到缓解。农业灌溉成本和灌溉距离密切相关,随着灌溉距离的增加,农业生产的边际效益递减,农户更倾向于将耕地抛荒或者用于其他用途。此外,在远离水源的区域,生态条件更为脆弱,长期缺乏水源浸润的土地容易发生土壤盐碱化,从而降低耕地的生产能力,这种不可持续性的农业生产也是潜在的非农化风险。

3.4 耕地非农化空间自相关分析

使用空间自相关分析探究粤东北耕地非农化率空间集聚特征,综合考虑研究区大小、计算效率及可视化效果,确定渔网单元大小为 $5\text{ km}\times 5\text{ km}$,计算得到各时期结果均通过 $Z>2.58$ 的显著性检验,空间自相关分析结果如图3所示。由图3可知,在5 km格网尺度下,4个时期耕地非农化率全局莫兰指数分别为0.371,0.305,0.255和0.299,表明粤东北耕地非农化率分布存在显著的正向集聚。从局部空间自相关结果来看,耕地非农化率集聚类型以“高一高”聚类 and “低—低”聚类为主,“高一低”聚类和“低—高”聚类在研究期间均呈零星分布,数量变化不明显。1990—2000年,“高一高”聚类主要分布于乳源县中部和东源县西南部,“低—低”聚类主要分布于和平县东南部和紫金县,两种聚类总体均位于研究区中部,空间集聚明显。2000—2010年,空间自相关格局发

生较大改变,“高一高”聚类数量下降且朝东部移动,在梅州市东南部出现聚集;“低—低”聚类数量略微增加,朝西北方向移动,在韶关市多个县区出现聚集。2010—2020 年,“高一高”聚类和“低—低”聚类数量均有所下降,东源县西部出现较多的“高一高”聚类,“低—低”聚类转移至紫金县南部。1990—2020 年,

研究区西南部和东南部形成两大“高一高”聚类组团,“低—低”聚类呈线状分布于北部。总体来看,1990—2020 年,粤东北耕地非农化率全局莫兰指数呈下降趋势,表明耕地非农化率在空间集聚程度上进一步减弱,并且其空间格局主要受“高一高”和“低—低”两种聚类变化的影响。

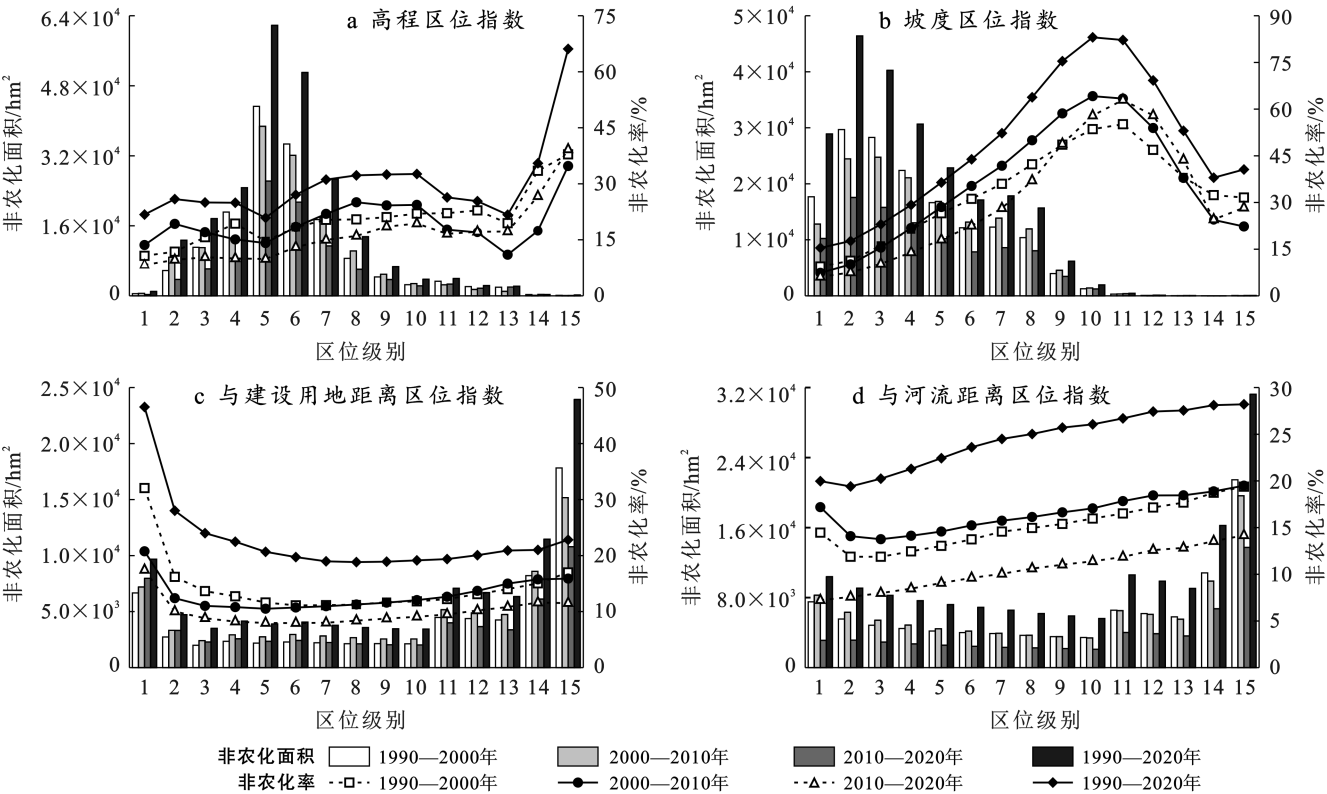


图 2 1990—2020 年耕地非农化区位指数分布

Fig.2 Distribution of cultivated land non-agriculturalization location index from 1990 to 2020

3.5 耕地非农化影响因素分析

3.5.1 影响因素指标 参数最优地理探测器能够揭示耕地非农化空间分布格局的影响因素。本研究综

合前人经验和研究区特点,构建自然因素、社会经济因素和农业因素 3 大类别共计 13 个指标作为自变量,影响因素指标的选择详见表 5。

表 5 耕地非农化影响因素指标

Table 5 Indicators of factors affecting cultivated land non-agriculturalization		
影响因素	指标	指标说明
自然因素	高程(X_1)	根据 30 m×30 m DEM 栅格数据计算研究单元平均高程
	坡度(X_2)	根据 30 m×30 m 坡度栅格数据计算研究单元平均坡度
	年降水量(X_3)	根据 1 000 m×1 000 m 年均降水栅格数据计算研究单元平均年降水量
	年均气温(X_4)	根据 1 000 m×1 000 m 年均气温栅格数据计算研究单元平均年气温
社会经济因素	人均 GDP(X_5)	GDP 与常住人口数量的比值
	城镇用地比例(X_6)	研究单元内研究期初期建设用地面积与研究单元面积的比值
	常住人口数量(X_7)	来源于各市统计年鉴的常住人口数量截面数据
	人均可支配收入(X_8)	来源于各市统计年鉴的人均可支配收入截面数据
	农业产值比重(X_9)	农业生产总值与 GDP 的比值
农业因素	农业人口(X_{10})	来源于各市统计年鉴的农业人口数量截面数据
	灌溉资源禀赋(X_{11})	研究单元内河流总长度与研究单元面积的比值
	人均耕地面积(X_{12})	研究单元内耕地面积与农业人口数量的比值
	耕地破碎度(X_{13})	研究单元内 10 hm ² 以下耕地面积与耕地总面积的比值

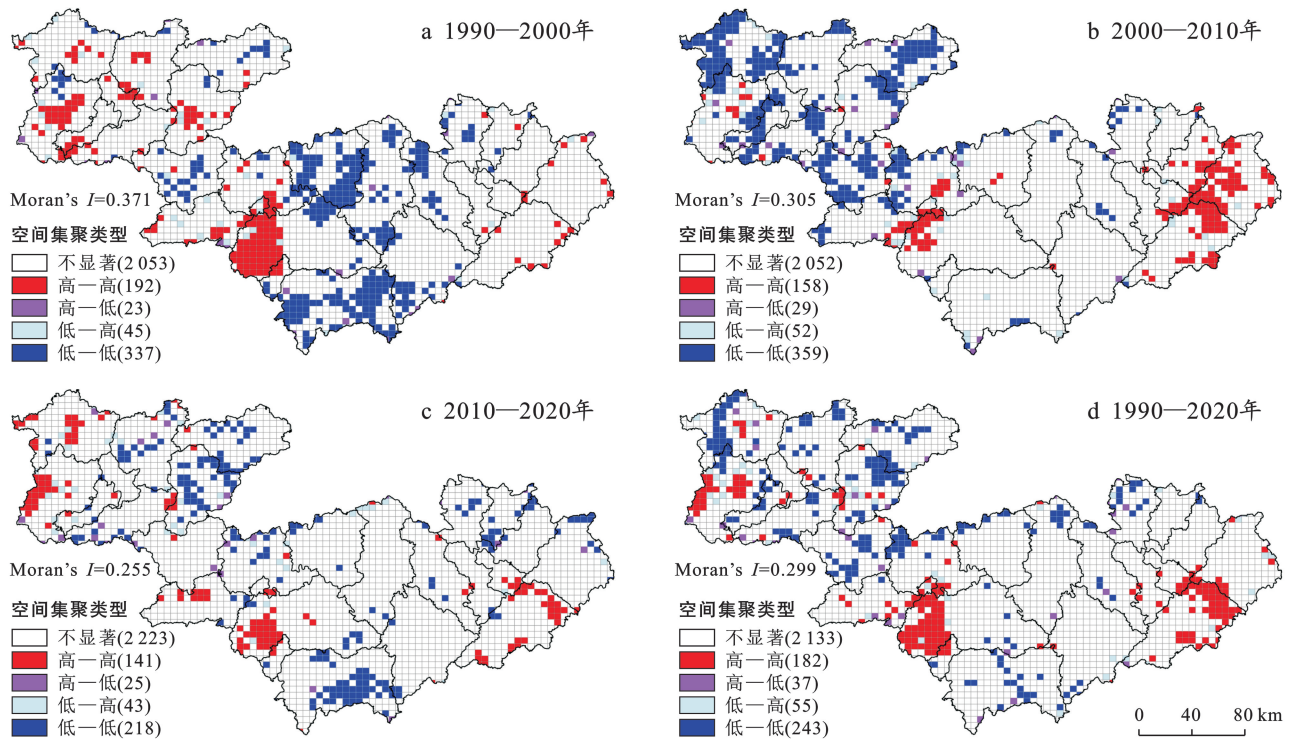


图3 粤东北耕地非农化率空间集聚特征

Fig.3 Spatial clustering characteristic of cultivated land non-agriculturalization rates in Northeastern Guangdong Province

3.5.2 最优参数选择 本研究以2000,2010和2020年耕地非农化率作为因变量,13个影响因素指标作为自变量,利用覆盖研究区的 $5\text{ km}\times 5\text{ km}$ 渔网作为研究单元进行采样。在数据分析前,使用R语言进行数据清洗,去除异常值后导入GD包进行参数最优地理探测器分析,参考张若婧等^[34]研究经验和数据特点,将自变量离散类别数量范围设置为3~9类,通过在5种离散化方法中选出最优 q 值。

以2000—2010年的自变量离散类别数优选过程为例(图4),由图4可知,不同离散方法和离散类别数量会造成 q 值的较大波动,说明在实现地理探测器前进行参数优选是非常有必要的。例如在人均可支配收入(X_8)中,分位数分类法的 q 值明显优于其他4种方法,并且在离散类别数为8时达到最大 q 值0.367,则选择该分类方法和对应的离散类别数量可以实现最大 q 值。其余因子的参数优选过程与该因子类似,在离散类别数量范围内对所有分类方法进行遍历后,以获得影响因子的最优 q 值。

3.5.3 因子探测器结果 因子探测器结果如图5所示。除1990—2000年的常住人口数量(X_7)和2010—2020年的年降水量(X_3)、年均气温(X_4)、常住人口数量(X_7)外,其余因子均通过 $p<0.05$ 的显著性检验,3个时期各因子对耕地非农化的解释力均值分别为0.125,0.200,0.108。

由因子探测器结果可知,1990—2000年,耕地非农化的主要影响因素为:人均可支配收入(X_8)>耕地破碎度(X_{13})>农业人口(X_{10})>农业产值比重(X_9)>年降水量(X_3);2000—2010年,耕地非农化的主要影响因素为:农业产值比重(X_9)>人均可支配收入(X_8)>耕地破碎度(X_{13})>农业人口(X_{10})>人均GDP(X_5);2010—2020年,耕地非农化的主要影响因素为:耕地破碎度(X_{13})>城镇用地比例(X_6)>农业人口(X_{10})>人均耕地面积(X_{12})>高程(X_1)。在整个研究期间,农业人口和耕地破碎度始终是耕地非农化的主要影响因素,社会经济因素早期对耕地非农化有一定的解释力,但在近10a解释力有所减弱,表明粤东北耕地非农化空间格局的形成受自然、经济和农业因素共同影响,并且农业因素的主导作用更强。高破碎度的耕地意味着难以使用大型农业机械进行作业,增加了耕作、运输和管理的成本,并且还会降低土地边界地带的利用率;此外,高破碎度的耕地往往涉及多个土地所有者或使用者,由于这些耕地难以进行集中管理,导致长期得不到有效利用,更容易导致耕地被抛荒。人均可支配收入的增加改变了居民的消费结构,对高附加值产品和服务的需求增加,推动土地利用从农业向非农产业转变,例如在梅州市部分乡镇,当地农民会选择在农田种植金柚等经济作物以提高土地的经济收益。农业产值比重

在一定程度上反映了地区经济结构,农业产值比重较高的地区一般以农业生产作为主要经济来源,而农业产值比重较低的地区一般城镇化程度较高,耕地面临被建设用地挤占的风险。农业人口是实现农田耕作

不可或缺的因素,随着经济发展不平衡性进一步加剧,大量农业人口选择前往城市从事非农行业,导致农田无人可耕,被抛荒的耕地随着时间推移逐渐演替为草地和林地,进而发生了耕地非农化。

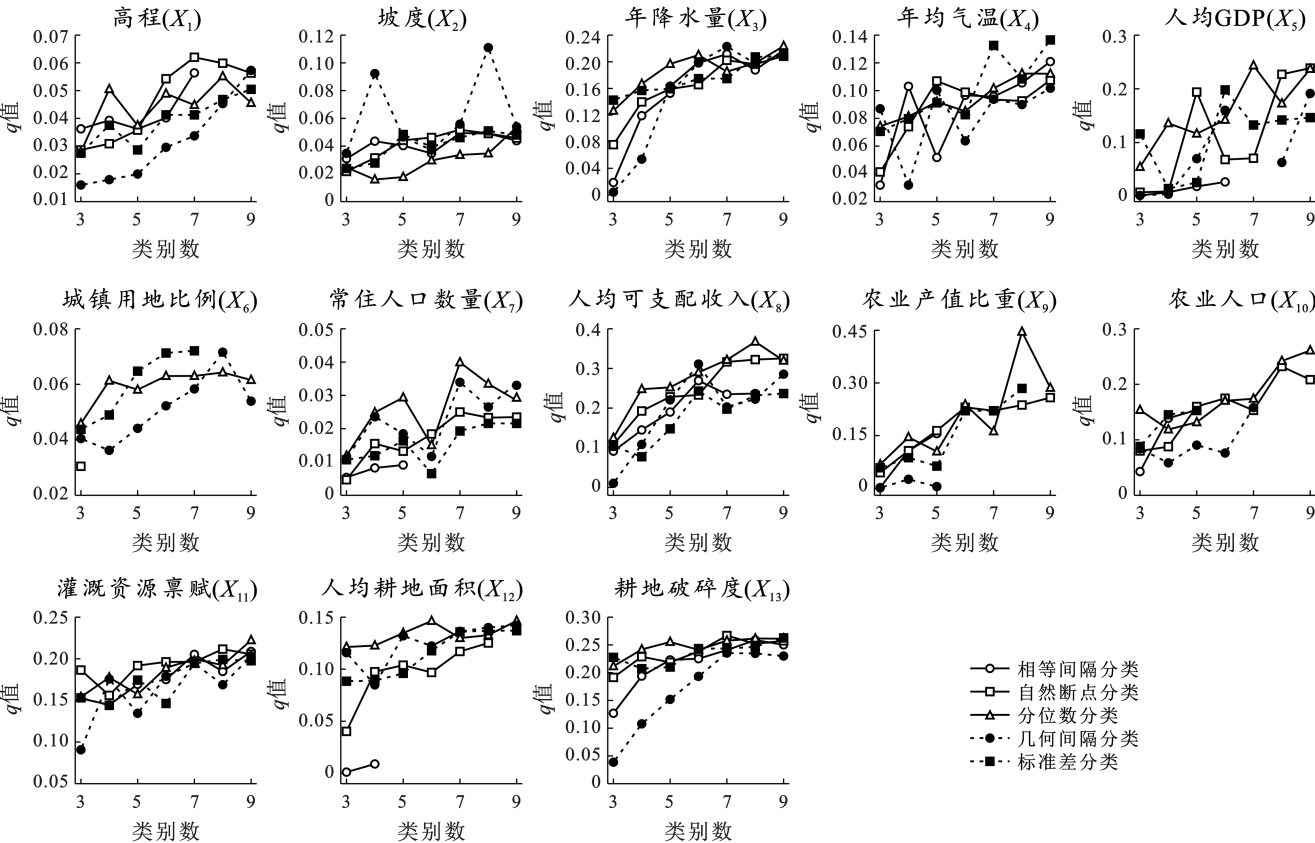
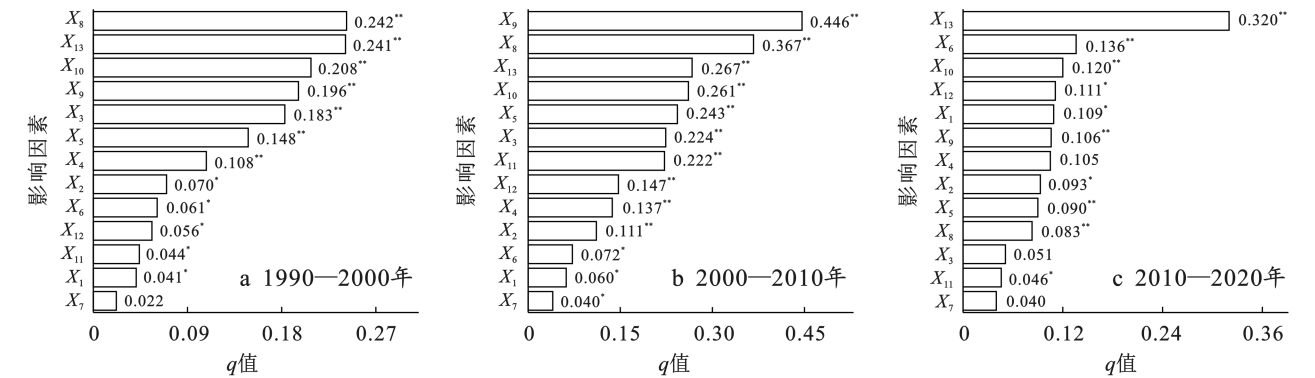


图 4 不同离散方法及类别数 q 值统计结果 (以 2000—2010 年为例)

Fig.4 Statistical results of q -values for different discretization methods and number of categories (using 2000—2010 as an example)



注: * 表示通过 $p < 0.05$ 的显著性检验, * * 表示通过 $p < 0.01$ 的显著性检验。

图 5 耕地非农化因子探测器结果

Fig.5 Results of cultivated land non-agriculturalization factor detector

3.5.4 交互作用探测器结果 交互作用探测器用于识别不同因子之间的交互,可以检测多个因素共同作用是否增加或减少对因变量的解释力,图 6 展示了交互作用探测器结果。结果表明,每次交互检测均显示

两因子共同作用为双因子增强或非线性增强,说明粤东北耕地非农化是多种因素综合作用的结果,并且多因子交互可以进一步增加对耕地非农化的解释力。由图 6 可知,1990—2000 年,农业人口与耕地破碎度

($X_{10} \cap X_{13}$) 两因子交互作用对耕地非农化的解释力最高, q 值为 0.661。

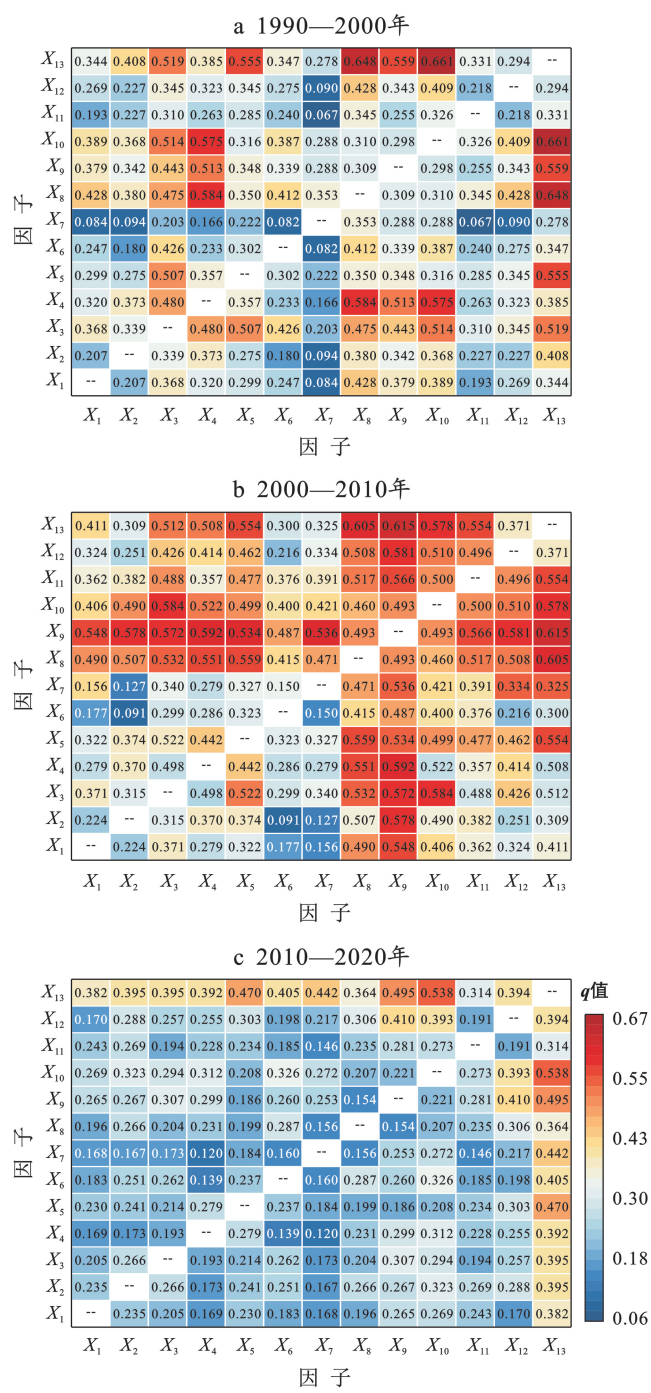


图 6 耕地非农化交互作用探测器结果
Fig.6 Results of cultivated land non-agriculturalization interaction detector

主要原因是:改革开放初期,城市资源高度集中,引发了大规模的农民工“进城潮”,同时由于高破碎度的耕地生产效率低下,农业收入难以为继,农民被迫离开农村进城务工,形成了“耕地破碎度高→农业生产效率低下→农民收入下降→农民放弃耕作→耕地抛荒和进一步破碎”的恶性循环。2000—2010 年,坡

度与农业产值比重($X_2 \cap X_9$)交互的解释力较强, q 值为 0.578,这是由于地形条件和经济收益之间的平衡在土地利用决策中起着重要作用。坡度增加了农业生产的难度和成本,尽管农业产值比重高,但由于生产条件的限制,农民可能会寻求更高效的土地利用方式,导致耕地非农化的发生。城镇用地比例(X_6)和常住人口数量(X_7)作为单因子分析时其解释力不高,但在 2000—2010 年,两因子交互作用对耕地非农化的解释力上升至 0.150,比单因子解释力之和更高。2000—2010 年,中国经历了快速的城镇化进程,大量人口流入城市,人口增长会增加对住房、基础设施和服务的需求,从而推动城镇用地的扩张,二者协同作用进一步促进了耕地的非农化。总之,粤东北耕地非农化空间格局的形成是自然因素、社会经济因素和农业因素共同作用的结果。

4 讨论与结论

4.1 讨论

近期,广东省印发《关于进一步加强和改进耕地保护工作的若干措施》,提出加强规划管控和用途管制,以遏制耕地“非农化”。研究发现,粤东北耕地非农化在近 30 a 来呈“平稳发展到骤降”的变化趋势,在空间集聚上进一步减弱,说明当地政府在应对耕地非农化方面取得一定成效。尽管在城市发展过程中耕地存在被建设用地侵占的现象,但耕地非粮化和农田撂荒等问题对耕地非农化空间格局具有更大的主导作用。继早期城镇化发展与人口数量激增为主导的城市扩张导致的耕地严重非农化后,耕地破碎度等农业因素对于非农化的影响进一步增强。政府应当更加重视对农业经济结构的调整,加强对耕地资源的保护。研究发现以 5 km 网格尺度探析非农化空间集聚特征和影响因素,更能反映非农化的空间异质性,从而为相关政策的制定提供更加精细化的指导;研究使用参数最优地理探测器对自变量进行离散化,能够更科学地揭示以粤东北为代表的丘陵山区耕地非农化空间格局的影响因素,为区域土地管理和政策制定提供有力支持。但研究尚存在以下不足:首先,研究使用 30 m 分辨率土地利用数据探究耕地非农化,难以捕获小尺度的耕地变化;其次,研究使用截面数据探析耕地非农化的空间异质性,尚未涉及时间尺度的驱动力研究。未来可以考虑整合高分辨率影像、农户问卷数据和人工智能技术等手段,进一步完善耕地非农化特征及驱动机制研究。总而言之,本研究为粤东北制定可持续土地利用政策提供了更准确、更全面的科学依据。

4.2 结论

(1) 1990—2020年粤东北耕地非农化呈“平稳发展到骤降”的变化趋势,累计非农化面积 $2.29 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 非农化率 25.31%,林地和建设用地是主要的非农化类型。垂直方向上,海拔 1 000 m 以上和坡度 $25^\circ \sim 35^\circ$ 的耕地更容易非农化;水平方向上,与建设用地距离 50 m 以内和与河流距离 1 000~1 500 m 的耕地更容易非农化。

(2) 粤东北耕地非农化率存在显著的正向集聚,全局莫兰指数由 0.371 逐渐下降至 0.255,集聚优势呈下降趋势。研究期间,“高一高”聚类和“低—低”聚类是耕地非农化率的主要集聚方式,两种聚类的空间变化主导着耕地非农化率空间自相关格局的演变。

(3) 粤东北耕地非农化空间格局的形成是自然因素、社会经济因素和农业因素共同作用的结果。农业人口和耕地破碎度始终对耕地非农化空间分布具有较强的解释力,自然因素对非农化的解释力有限,社会经济因素对非农化的解释力先增加后降低。多因素特别是社会经济因素和农业因素的交互进一步增加了对耕地非农化的解释力。

4.3 对策建议

近年来,粤东北立足资源禀赋,大力发展现代特色农业,筑牢广东省粮食供给屏障。然而受限于山地多平原少的丘陵地形特点和粗放的耕地管理模式,其耕地的有效种粮率不高,粮食保障能力仍有待加强。为进一步遏制非农化现象,基于研究成果,提出了以下建议:

(1) 在城市用地扩张及耕地用地类型转化过程中,执行更为严格的用地审批制度。对于梅州、河源和韶关市区等人类改造活动频繁的地区,应合理控制城市扩张的速度与方向,降低耕地非农化风险;在自然条件差、不适宜耕作的山区,例如乐昌市、乳源县和连平县,应加大退耕还林还草力度,筑牢生态安全绿色屏障,同时通过土地调查和评估,确定适合开发的新耕地资源,做到耕地资源的“进出平衡”。

(2) 对于高破碎度耕地引发的耕地撂荒现象,可以通过引入小型农机等先进农业技术和设备,提高粮食生产机械化程度,降低耕作成本。对条件较好的地块,引导农民加快土地流转,促进耕地耕作模式由粗放型向规模型、集约型转变。扎实推进“田长制”,基于耕地的保护与利用情况,建立奖惩制度,对于积极保护利用耕地的农民给予奖励,而对于滥用、荒废耕地的农户则进行相应的处罚。

(3) 通过农村教育改革政策,鼓励年轻人留在农村或者吸引外来人口进入农村地区就业和生活,缓解

农村人口空心化现象,同时通过普及农村电子商务吸回收流劳动力、刺激土地流转市场、振兴农村产业。对于耕地被用于种植经济作物的“非粮化”现象,政府可以适当布局集约化林果业种植区,在提高农民生产效益的同时,将耕地与其他作物种植区域划分开来,实现粮食与经济作物“双丰收”。

参考文献 (References)

- [1] 马才学,温槿荧,郑伟伟,等.中国耕地非农化压力时空格局的演变分析[J].长江流域资源与环境,2017,26(12): 2065-2072.
Ma Caixue, Wen Binying, Zheng Weiwei, et al. Spatio-temporal pattern of Chinese farmland conversion pressure [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26(12): 2065-2072.
- [2] 万胜超,王良健,刘敏.基于空间的省际农地非农化驱动因素研究[J].经济地理,2012,32(7):123-128.
Wan Shengchao, Wang Liangjian, Liu Min. An analysis for the driving factors of agricultural land conversion in China based on spatial econometric [J]. Economic Geography, 2012, 32(7): 123-128.
- [3] 曲福田,陈江龙,陈雯.农地非农化经济驱动机制的理论分析与实证研究[J].自然资源学报,2005,20(2):231-241.
Qu Futian, Chen Jianglong, Chen Wen. Theoretical and empirical study on the land conversion economic driving forces [J]. Journal of Natural Resources, 2005, 20(2): 231-241.
- [4] 张基凯,吴群,黄秀欣.耕地非农化对经济增长贡献的区域差异研究:基于山东省 17 个地级市面板数据的分析[J].资源科学,2010,32(5):959-969.
Zhang Jikai, Wu Qun, Huang Xiuxin. A study on regional differences in contribution of cultivated land conversion to economic growth based on panel data analysis of 17 cities in Shandong Province [J]. Resources Science, 2010, 32(5): 959-969.
- [5] 许恒周.市场失灵与耕地非农化过程中耕地生态价值损失研究:以江苏省为例[J].中国生态农业学报,2010,18(6):1366-1371.
Xu Hengzhou. Market failure and loss of ecosystem service value of farmland in the process of farmland conversion: A case study of Jiangsu Province [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(6): 1366-1371.
- [6] 杨文杰,刘丹,巩前文.2001—2016 年耕地非农化过程中农业生态服务价值损失估算及其省域差异[J].经济地理,2019,39(3):201-209.
Yang Wenjie, Liu Dan, Gong Qianwen. Estimation loss of agroecosystem service value in farmland conversion and its provincial difference in 2001—2016 [J]. Economic Geography, 2019, 39(3): 201-209.

- [7] Xiao Yao, Wu Xiaozhong, Wang Li, et al. Optimal farmland conversion in China under double restraints of economic growth and resource protection [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017,142:524-537.
- [8] Zhao Suxia, Xiao Dongyang, Yin Mengmeng. Spatio-temporal patterns and driving factors of non-grain cultivated land in China's three main functional grain areas [J]. *Sustainability*, 2023,15(18):13720.
- [9] 李丹,王帅,周嘉,等.黑龙江省耕地非农化的空间格局演变特征研究[J].*湖南师范大学自然科学学报*,2022,45(6):81-89.
- Li Dan, Wang Shuai, Zhou Jia, et al. Spatial pattern evolution characteristics of cultivated land conversion in Heilongjiang Province [J]. *Journal of Natural Science of Hunan Normal University*, 2022,45(6):81-89.
- [10] Chen Yan, Wang Shiyuan, Wang Yahui. Spatiotemporal evolution of cultivated land non-agriculturalization and its drivers in typical areas of Southwest China from 2000 to 2020 [J]. *Remote Sensing*, 2022,14(13):3211.
- [11] 施琪,王文烂.1980—2020年福建省耕地非农化的时空演变特征[J].*水土保持通报*,2024,44(1):293-302.
- Shi Qi, Wang Wenlan. Spatiotemporal evolution characteristics of cultivated land non-agriculturalization in Fujian Province from 1980 to 2020 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024,44(1):293-302.
- [12] 吴海中,田晓四,张乐勤.近40年安徽省耕地非农化时空分布特征及扩散路径[J].*中国农业资源与区划*, 2023,44(6):110-118.
- Wu Haizhong, Tian Xiaosi, Zhang Leqin. Spatiotemporal dynamics characteristic and diffusion trend of cultivated land conversion in Anhui Province in recent 40 years [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2023,44(6):110-118.
- [13] 丁书培,李蒙蒙,汪小钦,等.基于时序遥感数据的福州市耕地非农化特征及驱动因子分析[J].*遥感技术与应用*,2022,37(3):550-563.
- Ding Shupe, Li Mengmeng, Wang Xiaoqin, et al. The use of time series remote sensing data to analyze the characteristics of non-agriculture farmland and their driving factors in Fuzhou [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2022,37(3):550-563.
- [14] 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 Jie, Liu Yujie, Zhang Ermei, et al. Dynamics and driving mechanisms of cultivated land at county level in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2023,78(9):2105-2127.
- [15] 崔许锋,马云梦,张光宏.基于模型集成的中国耕地非农化影响因素及其时空特征研究[J].*中国农业科学*, 2018,51(22):4316-4327.
- Cui Xufeng, Ma Yunmeng, Zhang Guanghong. The factors of farmland conversion and its temporal and spatial characteristics: An integrated model [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018,51(22):4316-4327.
- [16] 杨玉钱,彭双云,吕铭皓,等.1990—2020年滇中城市群耕地非农化时空变化特征及驱动机制[J].*水土保持学报*,2024,38(3):239-251.
- Yang Yuqian, Peng Shuangyun, Lü Minghao, et al. Spatial and temporal changes and driving mechanism of cultivated land conversion in central Yunnan urban agglomeration from 1990 to 2020 [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024,38(3):239-251.
- [17] 张素勤.基于食品安全的农业资源与环境要素的效用分析[J].*中国农业资源与区划*,2016,37(6):95-98.
- Zhang Suqin. The utility analysis of the agricultural resources and environmental factors based on the food safety [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2016,37(6):95-98.
- [18] 陈江龙,曲福田,陈雯.农地非农化效率的空间差异及其对土地利用政策调整的启示[J].*管理世界*,2004,20(8):37-42.
- Chen Jianglong, Qu Futian, Chen Wen. The dissimilarity in space of the non-agricultural efficiency of farmland, and its inspiration to the policy adjustment of use of land [J]. *Management World*, 2004,20(8):37-42.
- [19] 孙学涛.高标准农田建设对农业全要素生产率的影响研究[J].*安徽师范大学学报(人文社会科学版)*,2023,51(6):114-124.
- Sun Xuetao. Influence of high standard farmland construction on agricultural TFP [J]. *Journal of Anhui Normal University (Hum & Soc Sci)*, 2023,51(6):114-124.
- [20] Ze Han, Wei Song. Spatiotemporal variations in cropland abandonment in the Guizhou-Guangxi karst mountain area, China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019,238:117888.
- [21] Nguyen T H T, Bui Q T, Man Q H, et al. Socio-economic effects of agricultural land conversion for urban development: Case study of Hanoi, Vietnam [J]. *Land use policy*, 2016,54:583-592.
- [22] Francis C A, Hansen T E, Fox A A, et al. Farmland conversion to non-agricultural uses in the US and Canada: Current impacts and concerns for the future [J]. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 2012,10(1):8-24.
- [23] 吴大放,吴钊骏,李升发,等.粤北山区耕地非粮化演变特征及其影响因素[J].*经济地理*,2023,43(8) 144-153.
- Wu Dafang, Wu Zhaojun, Li Shengfa, et al. Spatio-

- temporal evolution and influencing factors of non-grain cultivated land in northern mountainous areas of Guangdong Province [J]. *Economic Geography*, 2023, 43(8):144-153.
- [24] 李升发, 李秀彬. 中国山区耕地利用边际化表现及其机理[J]. *地理学报*, 2018, 73(5):803-817.
- Li Shengfa, Li Xiubin. Economic characteristics and the mechanism of farmland marginalization in mountainous areas of China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(5):803-817.
- [25] 施智勇, 谢慧黎, 王圳峰, 等. 基于参数最优地理探测器的福州市生境质量时空格局与驱动力分析[J]. *环境工程技术学报*, 2023, 13(5):1921-1930.
- Shi Zhiyong, Xie Huili, Wang Zhenfeng, et al. Analysis of spatiotemporal heterogeneity of habitat quality and their driving factors based on optimal parameters-based geographic detector for Fuzhou City, China [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023, 13(5):1921-1930.
- [26] 高文晶, 程诺, 张露月, 等. 基于参数最优地理探测器的福建省植被 NPP 时空分异及驱动力探究[J]. *西北林学院学报*, 2024, 39(4):120-130.
- Gao Wenjing, Cheng Nuo, Zhang Luyue, et al. Spatiotemporal differentiation and driving force of vegetation NPP in Fujian Province based on optimal parameter geographical detector [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2024, 39(4):120-130.
- [27] 何郑莹, 徐建刚. 基于空间可达性分析的客家民系迁移路径模拟[J]. *地理研究*, 2012, 31(5):863-872.
- He Zhengying, Xu Jiangang. Simulation of the migration routes of Hakka based on spatial accessibility [J]. *Geographical Research*, 2012, 31(5):863-872.
- [28] 王华, 陈新光, 胡飞, 等. 气候变化背景下广东晚稻播期的适应性调整[J]. *生态学报*, 2011, 31(15):4261-4269.
- Wang Hua, Chen Xinguang, Hu Fei, et al. Adaptive adjustments of the sowing date of late season rice under climate change in Guangdong Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(15):4261-4269.
- [29] Yang Jie, Huang Xin. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019 [J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8):3907-3925.
- [30] Liu Xi, Du Guoming, Bi Haoting, et al. Normal difference vegetation index simulation and driving analysis of the Tibetan Plateau based on deep learning algorithms [J]. *Forests*, 2024, 15(1):137.
- [31] 陈斐, 杜道生. 空间统计分析与 GIS 在区域经济分析中的应用[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2002, 27(4):391-396.
- Chen Fei, Du Daosheng. Application of the integration of spatial statistical analysis with GIS to the analysis of regional economy [J]. *Editorial Board of Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2002, 27(4):391-396.
- [32] 张晨钰, 王伟, 黄莉, 等. 高度城镇化背景下深圳市易涝点驱动因子分析[J]. *水资源保护*, 2024, 40(2):35-45.
- Zhang Chenyu, Wang Wei, Huang Li, et al. Analysis of driving factors for waterlogging points in Shenzhen City under high urbanization background [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(2):35-45.
- [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 Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1):116-134.
- [34] 张若婧, 陈跃红, 张晓祥, 等. 基于参数最优地理探测器的江西省山洪灾害时空格局与驱动力研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2021, 37(4):72-80.
- Zhang Ruojing, Chen Yuehong, Zhang Xiaoxiang, et al. Spatial-temporal pattern and driving factors of flash flood disasters in Jiangxi Province analyzed by optimal parameters-based geographical detector [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2021, 37(4):72-80.
- [35] Song Yongze, Wang Jinfeng, Ge Yong, et al. An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: Cases with different types of spatial data [J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2020, 57(5):593-610.