

基于时空扫描统计的耕地质量等级变化监测

——以福建省闽侯县为例

邱达勇^{1,2,3}, 范协裕^{1,2}, 蒋雪容^{1,2}, 陈瀚阅^{1,2}, 张黎明^{1,2}, 邢世和^{1,2}, 林鹏⁴

(1.福建农林大学 资源与环境学院, 福建 福州 350002; 2.土壤生态系统健康与调控福建省高校重点实验室, 福建 福州 350002; 3.自然资源部 东南生态脆弱区监测修复工程技术创新中心, 福建 福州 350002; 4.福建师范大学 经济学院, 福建 福州 350002)

摘要: [目的] 分析福建省闽侯县多年耕地质量等级的时空变化及布局,为东南丘陵区复杂地貌地带耕地质量的时空格局演变研究提供新思路与新助力。[方法] 将时空统计扫描法引入多时序耕地质量监测中,结合传统空间分析方法,对县域耕地质量的连续变化趋势及空间分布进行研究。进一步地,将引入时空扫描模型产生的试验结果与运用传统空间自相关分析法中的局部自相关模型的试验结果进行比对。[结果] ①在挖掘高值的聚类特征上,时空扫描模型优于局部自相关模型; ②2018—2019年闽侯县耕地质量等级在变化幅度和空间分布广度上均大于2019—2020年的耕地质量等级变化与分布状况; ③2018—2020年闽侯县整体的耕地质量逐年稳定并呈现上升趋势。④根据闽侯县耕地质量的时空格局变异情况将耕地划分为高级优质提升区、低级优质提升区、首要重点整治区、次要重点整治区、适度改良区5个区。[结论] 补足养分因子、兴建水利和平衡土壤pH值是防止并逆转耕地质量劣化和保持农田高质量、高产出的重要实施方案。此外建立耕地保护区,防范耕地非农化也有助于耕地质量的稳固和提升。

关键词: 耕地质量; 时空扫描; Moran's I; 耕地保护; GIS

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2023)05-0128-13

中图分类号: F323.211

文献参数: 邱达勇, 范协裕, 蒋雪容, 等. 基于时空扫描统计的耕地质量等级变化监测[J]. 水土保持通报, 2023, 43(5): 128-140. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.05.016; Qiu Dayong, Fan Xieyu, Jiang Xuerong, et al. Monitoring of cultivated land quality grade changes based on spatiotemporal scanning statistics [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(5): 128-140.

Monitoring of Cultivated Land Quality Grade Changes Based on Spatiotemporal Scanning Statistics —A Case Study at Minhou County, Fujian Province

Qiu Dayong^{1,2,3}, Fan Xieyu^{1,2}, Jiang Xuerong^{1,2}, Chen Hanyue^{1,2}, Zhang Liming^{1,2}, Xing Shihe^{1,2}, Lin Peng⁴

(1.College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry

University, Fuzhou, Fujian 350002, China; 2.Fujian Provincial Key Laboratory of Soil Ecosystem

Health and Regulation, Fuzhou, Fujian 350002, China; 3.Engineering Technology Innovation Center for

Monitoring and Restoration of Ecologically Vulnerable Areas in the Southeast of the Ministry of Natural Resources,

Fuzhou, Fujian 350002, China; 4.School of Economics, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350002, China)

Abstract: [Objective] The spatiotemporal variation and distribution of cultivated land quality at Minhou County, Fujian Province over many years were analyzed in order to provide new ideas and new help for the study of spatiotemporal pattern evolution of cultivated land quality in complex geomorphic areas in the southeast hilly region. [Methods] The spatiotemporal statistical scanning method was introduced into multi-time series cultivated land quality monitoring, and combined with the traditional spatial analysis method to study the continuous change trend and spatial distribution of county scale cultivated land quality. Furthermore, the experimental results generated by the introduction of the spatiotemporal scanning model were compared with

收稿日期: 2022-12-04

修回日期: 2023-01-14

资助项目: 福建省自然资源科技创新项目“福建省自然资源科技创新项目”(KY-030000-04-2021-006); 福建农林大学科技创新平台建设项目(KFb22121XA); 遥感科学国家重点实验室开放资助项目(OFSLRSS202112); 国家自然科学基金项目(41971050); 福建省科技创新平台建设项目(KJg21008A)

第一作者: 邱达勇(1997—), 男(汉族), 福建省泉州市人, 硕士研究生, 研究方向为农业资源开发与利用。Email: qiudayong@fafu.edu.cn.

通信作者: 范协裕(1985—), 男(汉族), 福建省泉州市人, 博士, 副教授, 主要从事空间信息大数据处理和GIS在自然资源的应用。Email: fanxy@fafu.edu.cn.

the results of a local autocorrelation model in the traditional spatial autocorrelation analysis method. [Results] ① The spatiotemporal scanning model was superior to the local autocorrelation model for mining high-value clustering features. ② The change amplitude and spatial distribution breadth of cultivated land quality grades at Minhou County from 2018 to 2019 were greater than in 2019—2020. ③ From 2018 to 2020, the overall cultivated land quality at Minhou County was stable from year by year, and showed an upward trend. ④ According to the variation of the spatial and temporal patterns of cultivated land quality at Minhou County, cultivated land was divided into five areas: high quality improvement area, low quality improvement area, primary key improvement area, secondary key improvement area, and moderate improvement area. [Conclusion] Replenishing nutrients, increasing water conservation, and balancing soil pH value are important practices to implement to prevent and reverse the deterioration of cultivated land quality and to maintain high quality and high yield of farmland. In addition, establishing cultivated land protection areas to prevent non-agricultural uses of cultivated land is also conducive to stabilizing and improving cultivated land quality.

Keywords: cultivated land quality; space-time scan; Moran's I ; farmland conservation; GIS

耕地作为人类赖以生存和发展的物质基础,直接关联着国家的粮食安全保障^[1-2]。但随着经济飞速发展所带来的工业化与城市化的快速推进,中国的耕地资源呈现出下降的趋势^[3-4]。截至 2015 年末,全国耕地评定为 15 等,但平均等别仅为 9.96 等,同时耕地保护违法情况屡禁不止^[5]。因此,从源头上制止耕地的“非农化”,“非粮化”行为,研究耕地质量等级的变化情况并做出切实可行的分区管理方案,将从根本上提升耕地的数量和质量^[4,6]。对于耕地质量,目前学术界还没有一个明确的定义^[7-8]。付国珍等^[9]认为耕地质量是指在特定气候区域以及地形、地貌、成土母质、土壤理化性状、农田基础设施及培肥水平等要素综合构成的耕地生产能力。沈仁芳等^[10]认为耕地质量是多层次的综合概念,是耕地自然、环境和经济 3 方面的总和。随着耕地质量的概念内涵不断丰富完善,耕地质量评价也由定性评价演变为定量评价,由最初为制定税赋的评价逐步演变为生产潜力、适宜性以及可持续性等多目标的评价^[11-12]。综上所述,耕地质量可以理解为是由不同方位的多维因子所共同决定的一个描述耕地自然、环境和经济的指标。

近年来,随着耕地数量、质量、生态“三位一体”保护工作的提出以及在国土空间规划体系的改革下^[13],耕地质量的空间分布及时空格局与监测优化成为耕地资源该时段下的研究热点^[14-15]。朱福斌等^[16]通过构建随机森林模型对耕地土壤速效钾含量的空间分布进行预测;王海力等^[17]利用 DEA 模型结合全局 Moran's I 分析耕地综合效率的时空演变;为优化耕地质量监测样点的布设,邝珊等^[18]采用协同克里格法使得监测成本减少的同时又提高了精度。国内关于耕地质量与分布的研究尽管在方法的尝试上日渐多样化,体系的评价上日渐成熟,但关于复杂地形的东南低山丘陵区的县域乃至乡镇尺度

上的时空分析相对稀少,而现有的耕地质量等级变化监测方法基本都是基于 GIS 空间分析分别处理不同年份的质量等级分布,最后再结合统计学相关指标与文献分析验证,整理出质量等级变化的大致方向。这类方法无法反映区域等级变化细节,在连续的长时间序列分析中也增加了数据处理与内部挖掘的难度,使得动态监测时间成本倍增,难以保证其时效性和指导意义。此外,国内针对丘陵区与非丘陵区耕地质量差别的相关研究大多局限于两个不同区域上的比较^[19-23],对这种结合了平原与丘陵的地带,在灌溉能力、地形部位、生物多样性以及土壤养分含量上都存在着不同程度的差异,无形中也增加了时空演变的复杂性。因此,为探索一套能适应该地貌并将其时空分布的复杂度可视化的方法,本文将时空扫描统计方法引入到耕地质量的时空变化监测中,将其与传统空间聚类方法相结合,对研究区多年耕地质量等级的时空变化及布局进行研究,以期为东南丘陵区复杂地貌地带耕地质量的时空格局演变研究提供新思路与新助力。

1 研究方法

1.1 技术路线与数据处理方案

(1) 总体技术路线。本研究采用时空扫描统计和局部空间自相关的方法对福建省闽侯县 2018—2020 年的耕地质量等级变化趋势展开研究(见图 1)。

①收集研究区相关的数据(包含地形数据、土壤数据、数据库数据与社会经济数据)组成具有时序特征的数据集并备份后处理成 SaTScan 可以读取的 cas 与 geo 文件;②分别将两类数据导入相对应的软件进行聚类分析,并比较不同处理模式下扫描窗口半径参数对 SaTScan 聚类结果的影响;③依据两者的聚类图叠合对比分析结果,提出可行的分区管理方案。

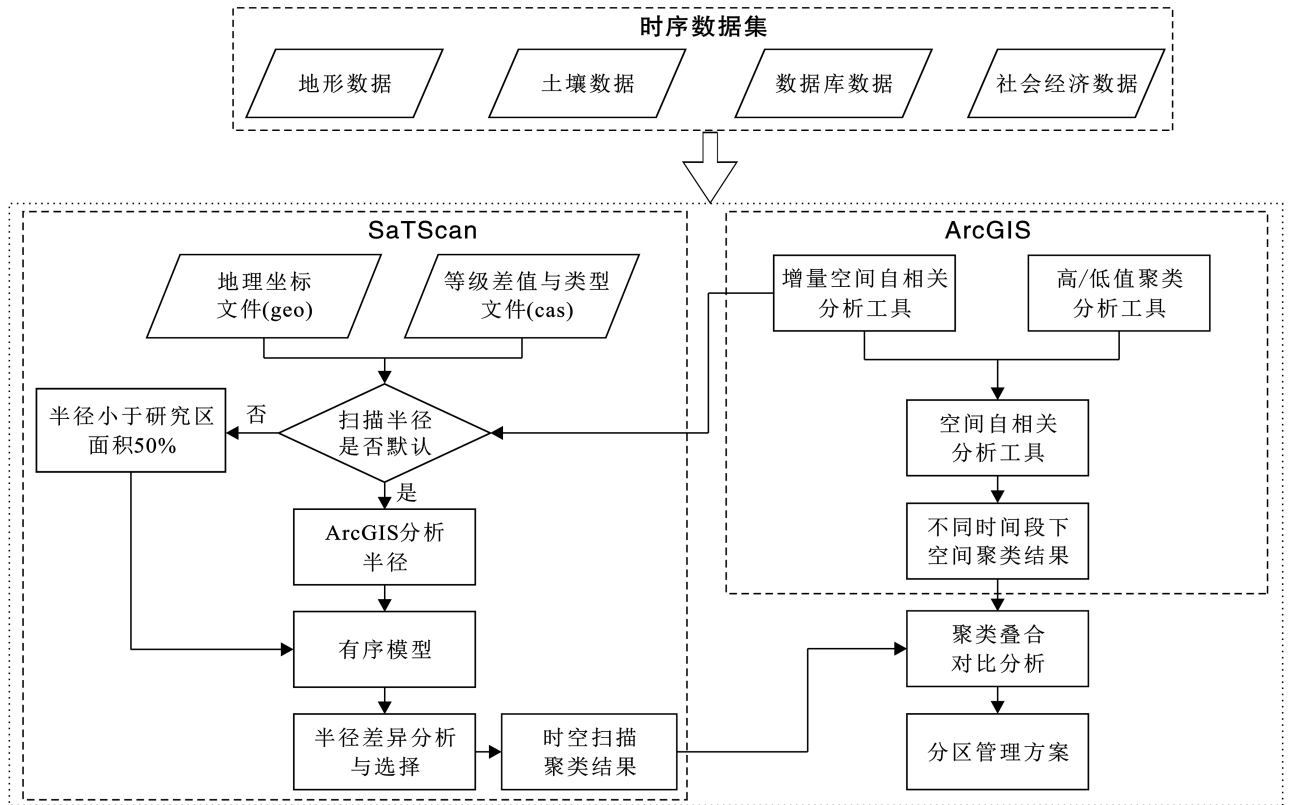


图 1 福建省闽侯县耕地质量研究总体技术流程图

Fig.1 Overall technical flow chart of cultivated land quality research at Minhou County, Fujian Province

(2) 数据处理方案。耕地质量是一个多因素综合评价的结果,由耕地质量多因子集成的耕地质量等级便是代表一块耕地是否“健康”的重要指标,且其等级短期内并不会产生变化,这与人体和病患等级有异曲同工之处。在本研究中,为探究不同年份下耕地质量等级的变化率以及筛选等级变化显著上升与下降的区域,将通过整理研究区的质量等级差值文件(cas)与地理坐标文件(geo),并选用有序模型进行时空扫描分析统计,具体方案见表 1。

表 1 SaTScan 中闽侯县耕地质量等级类比方案

Table 1 Analogy scheme for cultivated land quality level in SaTScan at Minhou County

设置	案例数	类型
标识码	等级差绝对值	上升(1),不变(2),下降(3)

注:①标识码为 ArcGIS 中导出的唯一标识码,与地理坐标文件相对应;②将 SaTScan 中的案例数用等级差绝对值替代;③将质量等级变化类型分为上升型、不变型、下降型 3 类,量化为 1,2,3 类;④上升型指等级评价变优,即向 1 等地方向靠近,下降型指等级评价变劣,即向 10 等地方向靠近;⑤等级差为 18~19 a 耕地质量等级差值及 19~20 a 耕地质量等级差值,计算过程为:高年份-底年份。⑥由于 SaTScan 有序模型要求输入的数据项为有序数据,为此数据集必须通过平行线检验,通过 SPSS 进行验证表明,两个时间段下的时间数据平行线检验 sig 为 1,均通过检验。

由于最大扫描半径很大程度上会影响其聚类结果,为提高其聚类精度,本试验还采用了 ArcGIS 增量空间自相关工具寻找合适的距离阈值或半径,其特点在于能够找出最佳的聚类搜索半径,可有效避免使用 SaTScan 默认的半径限定(不超过整个研究区面积 50%)产生的丢失小型聚类区的相关统计结果(具体比较将于结果分析中讨论)的问题。

1.2 耕地质量等级评价

在 2016 年底,为了解决各省耕地质量评价指标体系、标准的差异与多样化,并为区域耕地质量时空变化方面的研究提供统一标准,农业农村部颁布了《耕地质量调查监测与评价办法》(农业农村部令 2016 年第二号)以及《耕地质量等级》(GB/T33469-2016)国家标准。本文在此之上,依据《耕地质量等级》国家标准所规定的“N+X”指标体系,将指标体系分为概念型指标和数值型指标,结合闽侯县耕地状况,利用德尔菲法^[24](又称专家调查法,本质是一种反馈匿名函询法,通过不断重复“专家对各指标评价—整理归纳统计—匿名反馈给各专家”这一过程,直至得到统一的意见)并基于 GIS 选取农田管理、立地条件、土壤养分、理化性状、剖面性状、健康状况 5 大类评价因子(见表 2),应用层次分析法建立评价指标隶属度函数^[23,25](指基于模糊数学原理对应用层次

分析所确立的各指标权重分别采用不同的隶属度函数进行模糊变换,将其转化为模糊评价价值进而构造完整的质量评价模型的过程),最后结合实地验证、产量验证和专家验证对闽侯县耕地质量进行科学综合性的对比与评价,将耕地质量等级划分为 1—10 等,其中 1 等地最优,10 等地最劣。

表 2 闽侯县耕地质量评价因子权重

Table 2 Weight of cultivated land quality evaluation factors at Minhou County

评价因子分类	评价因子	组合权重
农田管理	排水能力	0.065 0
	灌溉能力	0.112 5
立地条件	地形部位	0.129 7
	农田林网化程度	0.042 8
土壤养分	有机质含量	0.099 9
	速效钾含量	0.069 9
	有效磷含量	0.069 9
理化性状	pH 值	0.060 6
	土壤容重	0.056 0
	耕层质地	0.057 6
剖面性状	障碍因素	0.043 1
	有效土层厚度	0.059 0
健康状况	质地剖面构型	0.060 8
	清洁程度	0.030 8
	生物多样性	0.042 4

1.3 SaTScan 时空扫描法

SaTScan 作为一款通过对时间序列数据^[26]、空间数据^[27]或时空数据^[28]进行时间、空间以及时空上的扫描统计,其被广泛应用于疾病监测领域^[29]。其内置的时空扫描分析原理源于 Kulldorff M 所提出的时空扫描统计量分析方法^[30],此法通过基于大小和位置可变的圆形扫描域作为底面,扫描时间作为高形成扫描窗口,能够探测指定空间下某时间发生数的异常变化,相比于传统的空间自相关分析,时空扫描分析统计的优势在于能够分析不同时间尺度下的空间分异同时避免数据的过度地理聚合,让扫描统计数据通过其连续移动窗口考虑不同的更小或更大的聚合(图 2),并呈现其统计学意义为后续统计分析提供数据上的支持。在 SaTScan 内置的模型中,离散扫描统计数据有 7 种不同的概率模型:计数数据(离散泊松模型、伯努利模型和时空排列模型),分类数据(序数模型和多项式模型),连续数据(正态模型和指数模型,主要是为生存类型数据设计)。根据耕地质量等级变化数据(离散数据)已明确类别数量(3 类)且存在固有顺序的特点,我们很容易将它归类为分类数据。尤其是其中的有序模型,其能通过对有序数据进行时空

分析,从而给出该数据在给定时间尺度下基于类别序号的高低值聚类特征,相较于多项式模型忽略了高低值类别的搜索,类别间没有层次结构,转而搜寻聚类中突出(权重高)的类别的特点,该模型尤其适合挖掘已分级的耕地质量的时空变异状况,并扫描出具体的变异区域,以 shp 的文件形式输出,通过与其他地学分析软件互补,可以弥补后续的其他分析工作,诸如评价因子影响分析等。目前,时空扫描的应用,不只局限于医学,还被应用于灾害学^[31]、犯罪学^[32]和农林业等方面,本文将其与空间聚类相结合应用于耕地质量时空检测,以便对多时序耕地质量等级的时空变化进行全面分析。

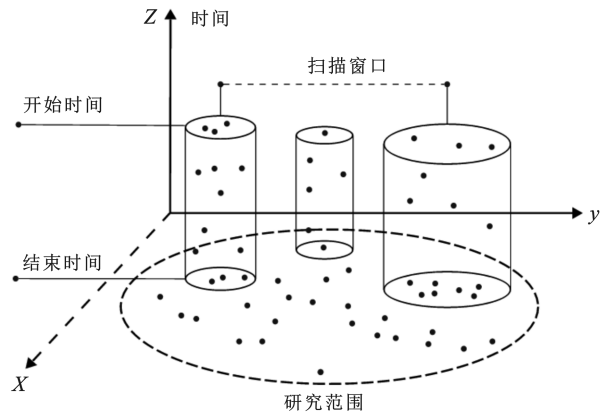


图 2 时空扫描模型示意图

Fig.2 Dirgram of spatiotemporal scanning model

在 SaTScan 中,本研究首先需要构造基于无效假设下的扫描窗口(S)中的预期等级变化程度 $\mu(Z)$ 和整个研究区下预期等级变化程度 $\mu(G)$:

$$\mu(S) = \frac{S}{T} \times T_s \quad (1)$$

$$\mu(G) = \sum \mu(E) \quad (2)$$

注:S 为整个研究区的总等级差变化量; T 为整个研究区面积(m²); T_s 是扫描窗口的地理面积(m²)

之后通过计算其区域概率密度函数,进一步建立某一扫描窗口下的似然函数值[L(S)]与基于无效假设得到的似然函数值(L₀):

$$L(S) = \frac{e^{-S}}{S!} \times \left[\frac{n_s}{\mu(E)} \right]^{n_s} \left[\frac{S - n_s}{S - \mu(E)} \right]^{s - n_s} \prod_{x_i \in S} \mu(x_i) \quad (3)$$

$$L_0 = \frac{e^{-S}}{S!} \times \left[\frac{S}{\mu(G)} \right]^S \prod_{x_i \in S} \mu(x_i) \quad (4)$$

注:n_s 表示扫描窗口 S 中实际的区域总等级差变化量。

将 L(S)与 L₀相除最后取对数即可得到对数似然率 LLR。LLR 值最大的扫描窗口将成为耕地质量等级变化最明显的区域;

$$LLR = n_s \lg \left[\frac{n_s}{\mu(E)} \right] + (S - n_s) \lg \left[\frac{S - n_s}{\mu(G) - \mu(E)} \right] - S \lg \left[\frac{S}{\mu(G)} \right] \quad (5)$$

$$\max_{LLR} = \frac{\max[L(S)]}{L_0} = \max \left[\frac{L(S)}{L_0} \right] = \max \left\{ \begin{array}{l} n_s \lg \left[\frac{n_s}{\mu(E)} \right] + (S - n_s) \lg \left[\frac{S - n_s}{\mu(G) - \mu(E)} \right] \\ - S \lg \left[\frac{S}{\mu(G)} \right] \end{array} \right. \quad (6)$$

最后,软件为这些扫描窗口进行蒙特卡洛假设性检验法(monte carlo hypothesis testing)评价各窗口的统计学意义,从而锚定最大似然聚集区(most likely cluster)作为高值类型聚类区与低值类型聚类区。根据 p 值及聚集程度的不同,还将划分出第二聚集区等。本研究蒙特卡洛模拟次数设置为 999,显著性检验水平为 $p < 0.05$ 。

1.4 Moran's I 空间自相关

空间自相关是指一些变量在同一分布区下观测数据间潜在的相互依赖性,其相关度划分为正相关及负相关。莫兰指数(Moran's I)作为空间自相关系数的一种,是计算空间自相关最经典的一种方法。根据实际的需求,分为全局莫兰指数和局部莫兰指数:

(1) 全局莫兰指数(Global Moran's I)。通过方差归一化之后,其值范围将介于 $[-1, 1]$,当取值大于 0 则表示为空间正相关,并且越接近于 1 其空间相关性越明显,具体表现为空间要素的区域聚合;当取值小于 0 则表示为空间负相关,并且越接近于 -1 其空间差异性越明显,具体表现为空间要素的离散;当全局莫兰指数为 0 时,要素在空间上的分布则呈现为随机性。

(2) 局部莫兰指数(Local Moran's I)。与全局莫兰指数仅给出空间要素是否在空间上呈现聚集性或异常值不同,局部莫兰指数可以进一步描述要素属性值的空间聚类区或孤立区以及异常点的位置情况和空间分布状态。因其特性,本次研究便是采用局部莫兰指数进行对照分析,其计算公式为:

$$I_i = \frac{Z_i \sum_{j \neq i} W_{ij} Z_j}{S^2} \quad (7)$$

式中: $Z_x = y_x - \bar{y}$ (x 为 i, j); $S^2 = \frac{1}{n} \sum (y_i - \bar{y})^2$ 为空间权重系数矩阵, n 为需要计算的研究分区总数,指的是第 i 个分区的局部莫兰指数。

2 研究区概况与数据来源

2.1 研究区概况

福州市闽侯县,地处福建省东部及省会福州市的西南侧,位于 $118^{\circ}52' - 119^{\circ}25' E, 25^{\circ}47' - 26^{\circ}36' N$,地势西北高东南低,为福州平原的一部分,是一个结合了低山丘陵与平原地形的山区县(图 3)。其县域内因从属于中亚热带气候区,闽江沿岸的低海拔地

区,故具有南亚热带的气候特征。境内气候温和,四季如春,年平均气温为 $14.8 \sim 19.5^{\circ} C$,年平均降水量为 $1\ 673.9\ mm$ 。

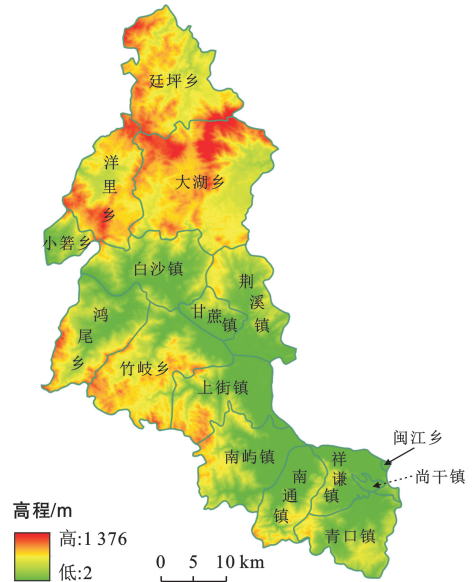


图 3 闽侯县高程图

Fig.3 Elevation map of Minhou County

截至 2020 年,闽侯县行政区划面积 $2.14 \times 10^5\ km^2$,下辖 1 个街道,8 个镇,6 个乡以及 329 个行政村,水田、水浇地、旱地占耕地总面积的比例分别为 88.50%,3.65%,7.85%。同时,第二次土壤普查显示,闽侯县土壤类型分为 5 大土类,8 个亚类,18 个土属及 35 个土种。

2.2 数据来源

本研究以福建省闽侯县为例,时间节点为 2018—2020 年,涉及的数据主要包括了:①地形数据(福建省 30 m 分辨率 DEM);②数据库数据(行政区划数据库、2018—2020 年耕地质量评价数据库)其中质量评价数据库包含了 2018—2020 年内耕地质量等级评价采样点的理化性质信息,诸如样点地理坐标、土壤容重、有机质、pH 值、全氮、全磷、全钾等相关土壤养分与理化数据,除此之外还有其他共计 5 大类评价因子数据,用以参与耕地质量等级评级的计算。在此基础之上,2018—2020 各耕地图斑具体土壤属性及质量评价数据均来源于对应年份样点数据基于地理加权的克里金插值法插值得来。本研究所有样

点数据共计 180 个,均来源于农村农业部福建省耕地质量监测项目;③社会经济数据(2018—2020 年闽侯县统计年鉴数据:包含全县年均温、年均降水量)。

3 结果与分析

3.1 SaTScan 聚类半径差异分析

3.1.1 基于增量空间自相关的聚类搜索半径的确定为选取 SaTScan 有序模型下的最佳扫描半径,本研究选用 ArcGIS 工具箱下的增量空间自相关工具

进行分析。增量空间自相关通过计算不同距离下的空间自相关程度来衡量其聚类程度,聚类程度的高低由其返回的 z 值决定,本文以 z 的峰值所对应的距离作为最佳聚类半径(图 4)。图 4a 显示了闽侯县 2018—2019 年质量等级差值在增量空间自相关模型下,以 2 400 m 为初始距离(2 400 m 前未达到最大值),共提取了 20 个窗口增量距离进行距离迭代计算,最终 z 得分于 3 500 m 之前达到最大值。表 3 提示该最佳距离为 3 432.40 m。

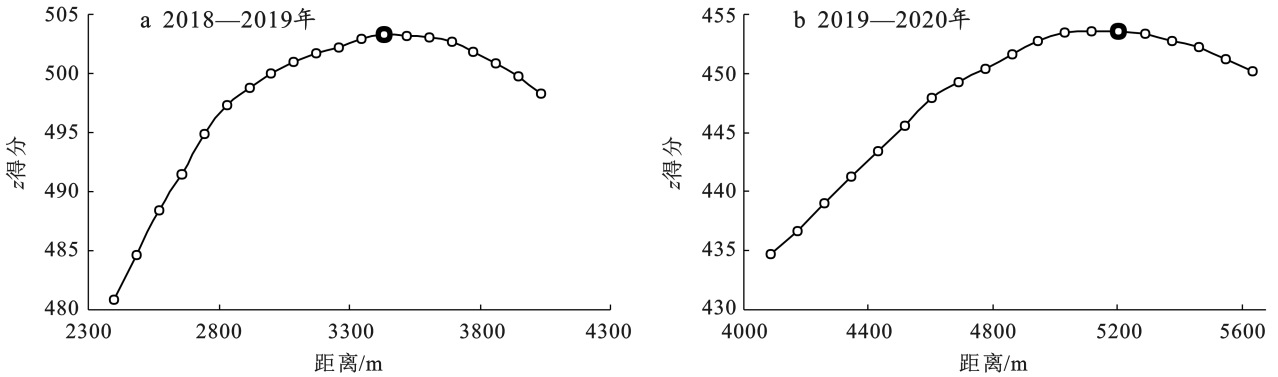


图 4 2018—2019,2019—2020 年基于距离的闽侯县耕地质量等级差值聚类得分

Fig.4 Differential clustering scores of cultivated land quality grade based on distance in Minhou County during 2018—2019 and 2019—2020

表 3 2018—2019 年闽侯县耕地质量等级差值增量空间自相关模型指数

Table 3 Incremental spatial autocorrelation model index of cultivated land quality grade difference in Minhou County from 2018 to 2019

空间距离/m	全局莫兰指数	z 得分	p 值
2 400.00	0.179 070	480.855 286	0.000 000
2 486.03	0.174 434	484.614 444	0.000 000
2 572.07	0.170 129	488.422 723	0.000 000
2 658.10	0.165 908	491.475 019	0.000 000
2 744.13	0.162 129	494.928 818	0.000 000
2 830.17	0.158 206	497.289 209	0.000 000
2 916.20	0.154 263	498.802 784	0.000 000
3 002.23	0.150 501	499.976 956	0.000 000
3 088.26	0.146 868	500.933 074	0.000 000
3 174.30	0.143 394	501.680 515	0.000 000
3 260.33	0.140 017	502.223 016	0.000 000
3 346.36	0.136 855	502.896 415	0.000 000
3 432.40	0.133 795	503.305 444	0.000 000
3 518.43	0.130 727	503.152 887	0.000 000
3 604.46	0.127 817	503.029 791	0.000 000
3 690.50	0.124 991	502.701 798	0.000 000
3 776.53	0.122 155	501.807 516	0.000 000
3 862.56	0.119 414	500.818 521	0.000 000
3 948.59	0.116 751	499.706 223	0.000 000
4 034.63	0.114 117	498.261 469	0.000 000

由表 3 可知,全局莫兰指数 I 大于 0 小于 1,并随着距离的增加而减小,表明闽侯县 18~19 a 的耕

地地块间的耕地质量等级变化呈正相关态势,且相关性随着空间距离的增加而逐渐减弱; z 得分均大于 1.96 且存在峰值, p 值均为 0,表明数据的聚集效果显著。综上分析所述,闽侯县 2018—2019 年质量等级差值属性存在显著的空间正相关性,且当距离达到 3 432.40 m 时,其相关度最为明显。图 4b 显示了闽侯县 2019—2020 年质量等级差值在增量空间自相关模型下,以 4 000 m 为初始距(4 000 m 前未达到最大值),共提取了 20 个窗口增量距离进行距离迭代计算,最终 z 得分于区间[5 000,5 500] m 内达到最大值。表 4 提示该最佳距离为 5 204.46 m。

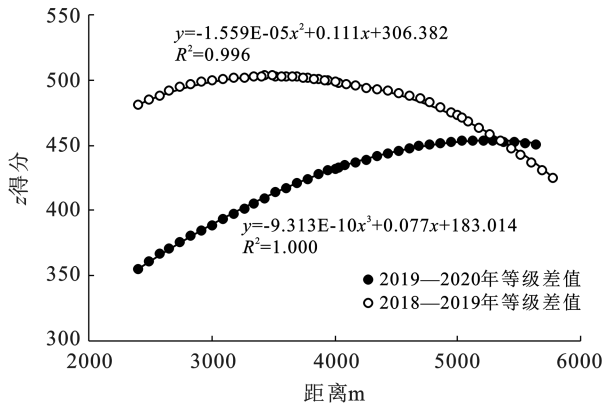
表 3 与表 4 结论类似,可见闽侯县 2019—2020 年质量等级差值属性也存在显著的空间正相关性,且当距离达到 5 204.46 m 时,其相关度最为明显。

通过 SPSS 曲线拟合发现 2018—2019 年等级差值增量自相关模型最优拟合曲线为二次方程,具体参数为 $R^2=0.996, F=5\ 834.92, sig.<0.001$; 2019—2020 年等级差值增量自相关模型最优拟合曲线为三次方程,具体参数为 $R^2=1.000, F=54\ 555.96, sig.<0.001$ 。图 5 表明,由于二者拟合函数趋势变化平缓且存在交点,闽侯县 2018—2019 年质量等级差值与 2019—2020 年质量等级差值在增量空间自相关模型下存在能平衡并最大限度搜索与聚集二者的高/低值聚类区的扫描域半径,通过计算,该半径为 4 311.31 m。

表 4 2019—2020 年闽侯县耕地质量等级差值增量空间自相关模型指数

Table 4 Incremental spatial autocorrelation model index of cultivated land quality grade difference in Minhou County from 2019 to 2020

空间距离/m	全局莫兰指数	z 得分	p 值
4 000.00	0.099 745	432.086 454	0.000 000
4 086.03	0.098 406	434.745 323	0.000 000
4 172.07	0.096 968	436.710 605	0.000 000
4 258.10	0.095 668	439.016 887	0.000 000
4 344.13	0.094 404	441.314 000	0.000 000
4 430.17	0.093 145	443.435 915	0.000 000
4 516.20	0.091 934	445.618 769	0.000 000
4 602.23	0.090 799	447.937 335	0.000 000
4 688.26	0.089 498	449.219 671	0.000 000
4 774.30	0.088 211	450.382 537	0.000 000
4 860.33	0.086 976	451.587 860	0.000 000
4 946.36	0.085 757	452.698 033	0.000 000
5 032.40	0.084 501	453.413 822	0.000 000
5 118.43	0.083 174	453.528 390	0.000 000
5 204.46	0.081 868	453.544 199	0.000 000
5 290.50	0.080 562	453.354 629	0.000 000
5 376.53	0.079 228	452.789 297	0.000 000
5 462.56	0.077 937	452.245 556	0.000 000
5 548.59	0.076 592	451.166 816	0.000 000
5 634.63	0.075 304	450.176 618	0.000 000



注:对上述两个增量自相关模型指数运用 SPSS 进行曲线估算建立回归方程 y_1 与 y_2 后,令 $Y = y_1 + y_2$,此时通过计算函数 Y 的峰值便可以得到二者最大的总 z 得分,本研究依据此项数值做对应的距离,作为 SaTScan 扫描窗口最大半径的输入项。

图 5 闽侯县耕地质量等级差值增量空间自相关线性回归分析
Fig.5 Incremental spatial autocorrelation linear regression analysis of cultivated land quality grade difference in Minhou County

3.1.2 半径差异分析 为进一步展现不同扫描窗口半径下聚类区的差异,在仅改变半径参数的条件下,由图 6 和图 7 的对比可以发现,设置“最佳半径”的闽侯中北部的聚类区比“默认半径”下囊括整个闽侯中北部(包含延平、洋里、大湖、小箬、鸿尾乡和白沙、荆溪镇在内的 7 个乡镇)的单个聚类区具有更细致的划

分,同时挖掘出了在巨大的等级上升区影响下较小的等级下降聚类区;在闽侯中南部,二者除了都聚类出竹岐乡东部以及青口镇东部具有明显等级下降趋势的区域外,“最佳半径”更是填补了“默认半径”下无聚类特征的情况。

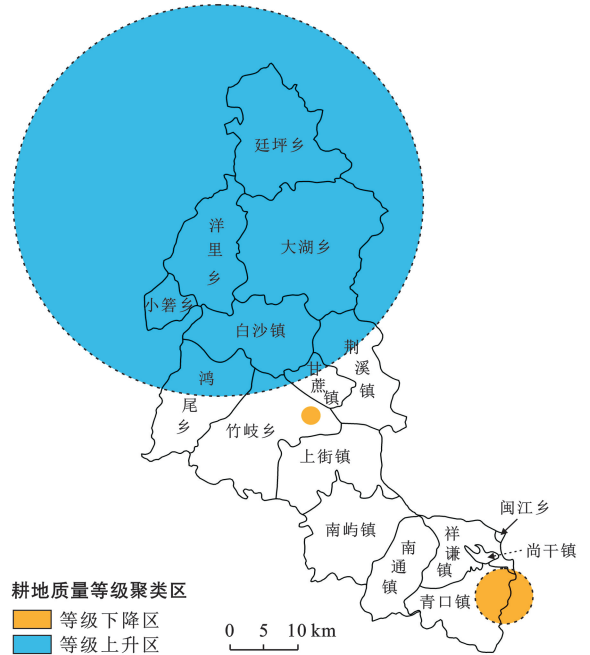


图 6 闽侯县耕地质量等级差值半径默认限制下的聚类区
Fig.6 Cluster area under default limit of difference radius of cultivated land quality grade in Minhou County

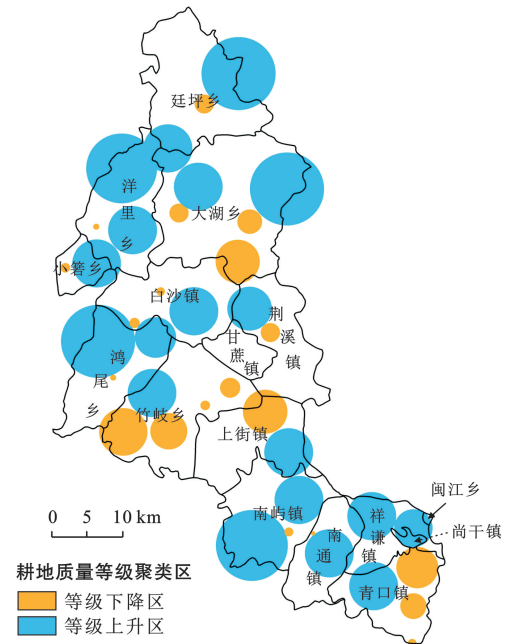


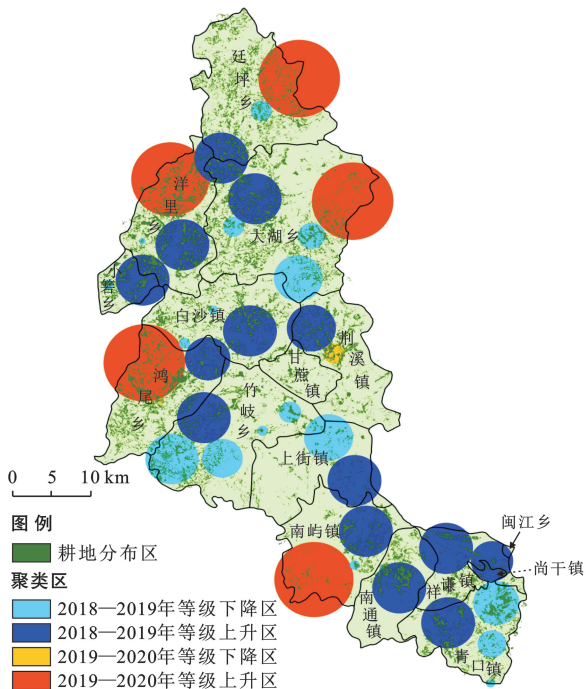
图 7 闽侯县耕地质量等级差值增量自相关分析半径下的聚类区
Fig.7 Cluster area under radius of incremental autocorrelation analysis of difference of cultivated land quality grade in Minhou County

从聚类区的数量来看,“默认半径”下的 SaTScan 聚类结果拥有 1 个等级上升区与 2 个等级下降区,

“最佳半径”则拥有 19 个等级上升区和 17 个等级下降区,其数量特征的分布广度与细分程度都具有很强的可挖掘性。关于“最佳半径”下的聚类质量,将于下文中详细比对。

3.2 耕地质量等级时空差异性分析

为深层次探究闽侯县耕地质量等级变化的时空差异特征与分布情况,本研究基于 SaTScan 有序模型的回溯性时空扫描,分别对 2018—2019 年与 2019—2020 年的耕地质量等级差值进行时空扫描统计,扫描结果经由 ArcGIS 可视化,具体如图 8 与表 5 所示。



注:此图仅展示 $p < 0.05$ 的最大似然聚集区,并不展示第二聚集区。

图 8 闽侯县 2018—2020 年耕地质量等级变化的时空集聚特征

Fig.8 Spatial and temporal agglomeration characteristics of cultivated land quality grade changes at Minhou County from 2018 to 2020

由图 8 可知,闽侯县 2018—2019 年等级变化的区域与分布是远多于 2019—2020 年的等级变化集聚区,其中 2018—2019 年的等级下降区有 18 个,等级上升区有 14 个;2019—2020 年的等级下降区有 1 个,等级上升区有 5 个。可见闽侯县 2018—2019 年耕地等级存在大范围的变动。通过表 4 可发现 2018—2019 年等级下降区的聚类区半径范围在 $[0.3, 3.9]$ km,均值为 1.52 km,等级上升区半径范围在 $[2.69, 3.43]$ km,均值为 3.31 km。可见该变动中等级上升区域大于等级下降的区域。将统计表中趋势比通过聚类区 ID 与之对应发现,2018—2019 年等级评价下降趋势明显的区域主要发生在青口镇的东北部 (180.61)、竹岐乡的东部 (177.46)、大湖乡的西部

(71.64)、南屿镇的东南部 (71.43),等级下降区域主要分布地区为大湖乡、竹岐乡、上街镇及青口镇,显然大湖乡、竹岐乡和青口镇为 2018—2019 年闽侯县等级下降的主要分布区及明显变化区,其在空间分布上并没有直接关联。与之相对的,2018—2019 年等级评价上升趋势明显的区域主要发生在南屿镇东部 (344.02)、青口镇西部 (217.78)、洋里乡中南部 (151.02)、祥谦镇北部 (134.69)、白沙镇东南部 (128.28)。结合目视解译图 (图 9) 中 2018—2019 年等级上升区可以发现,2018—2019 年闽侯县等级上升的主要上升和明显变化区位于闽侯南部的南屿镇、祥谦镇及青口镇。可见 2018—2019 年闽侯县南部部分地区的耕地质量有了显著的提升与优化。此外,在空间分布上,2018—2019 年等级上升区可大致划分为闽侯北部、中部及南部 3 个大区,其在空间分布上均具有较为紧密的关联,尤其是南部地区。相比较上升区,下降区的分布则较为离散与零碎,不难看出,闽侯县在 2019 年在优化耕地质量上实施了相对全面的方案并有了明显的进步。

与此相对的,2018—2019 年闽侯县出现等级变化的集聚区域有 6 个。表 5 表明,其中仅有的两个等级变化下降区实际下降总等级差仅为 15.56,趋势比为 35.71,41.18,半径为 0.42 km 和 1.36 km,由于其数值相对较小,并不具备代表性,因此与 2018—2019 年的等级变化趋势不同的是,2018—2019 年闽侯县耕地质量变化基本上呈现上升趋势。图表显示 2018—2019 年等级上升区的聚类半径范围在 $[4.97, 5.20]$ km,均值为 5.12 km,为所有时空聚类分类区下的最大均值半径。对其趋势比进行降序排列显示,闽侯县 2019—2020 年等级上升趋势按其显著性从大到小依次分布为:大湖乡东部、延平乡东部、鸿尾乡西北部、洋里乡北部、南屿镇西南部。空间分布上,聚类区均位于闽侯县县域的边界上,分别毗邻罗源县、鼓楼区、闽清县、永泰县四县区,闽侯县域内部并未出现新的等级显著上升的区域。结合 2018—2019 年的聚类区分布,闽侯县于 2020 年加强了对县域部分边界耕地的整治,使得闽侯县西部与南部的耕地质量有了更进一步的提升,此外在 2018—2019 年毫无明显变化甚至出现下降趋势的闽侯东北部得到了新的关注,该区域也出现了等级明显上升的耕地。

应用层面上,2018—2020 年闽侯县存在的等级明显上升的耕地区域共计 19 个,闽侯县可以以具体的耕地质量为参照在其中挑选高标准农田;而对于等级明显下降的区域,则应予以关注,并根据实地情况及土壤理化数据做出相应的调整。另外的,未出现在聚

类区内的耕地地块并不是没有等级上的变化,而是其属性变化特征呈现出离散或者随机分布的态势,其内

部变化相对复杂,可通过统计其等级数据做出新的分区与措施。

表 5 闽侯县耕地质量评价时空扫描统计结果

Table 5 Spatiotemporal scanning statistics of cultivated land quality evaluation in Minhou County

时间段	集聚类型	实际上升总等级差	预期上升总等级差	实际下降总等级差	预期下降总等级差	半径/km	对数似然比	p 值	趋势比	
2018—2019年	下降 (高值)	0	44.63	49	4.37	1.35	119.03	0.001	36.30	
		0	87.44	96	8.56	1.34	234.31	0.001	71.64	
		1	69.22	75	6.78	1.74	177.43	0.001	43.10	
		0	12.75	14	1.25	0.42	33.29	0.001	33.33	
		0	33.70	37	3.30	0.68	89.77	0.001	54.41	
		0	6.38	7	0.62	0.60	16.93	0.002	11.67	
		1	24.59	26	2.41	3.10	58.83	0.001	8.39	
		1	12.75	13	1.25	0.72	27.96	0.001	18.06	
		227	355.23	163	34.77	3.39	155.09	0.001	48.08	
		39	70.13	38	6.87	2.59	42.42	0.001	14.67	
	0	7.29	8	0.71	0.68	19.35	0.001	11.76		
	0	229.53	252	22.47	1.42	625.12	0.001	177.46		
	65	165.77	117	16.23	3.12	173.27	0.001	37.50		
	0	40.99	45	4.01	0.63	109.27	0.001	71.43		
	0	10.02	11	0.98	0.30	26.62	0.001	36.67		
	204	669.47	531	65.53	2.94	938.81	0.001	180.61		
	15	43.72	33	4.28	1.83	51.60	0.001	18.03		
	0	10.02	11	0.98	0.59	26.62	0.001	18.64		
	2019—2020年	上升 (低值)	363	331.51	1	32.49	3.43	29.75	0.001	105.83
			341	310.56	0	30.44	3.42	32.15	0.001	99.71
518			471.77	0	46.23	3.43	49.05	0.001	151.02	
180			163.93	0	16.07	3.42	16.90	0.001	52.63	
440			400.73	0	39.27	3.43	41.59	0.001	128.28	
211			192.17	0	18.83	3.12	19.83	0.001	67.63	
193			175.77	0	17.23	2.89	18.13	0.001	66.78	
363			330.60	0	32.40	3.42	34.24	0.001	106.14	
195			177.60	0	17.40	3.43	18.32	0.001	56.85	
1 180			1 074.68	0	105.32	3.43	113.64	0.001	344.02	
462			420.76	0	41.24	3.43	43.69	0.001	134.69	
338			307.83	0	30.17	3.43	31.87	0.001	98.54	
160			145.72	0	14.28	2.69	15.02	0.001	59.48	
747			680.33	0	66.67	3.43	71.15	0.001	217.78	
2019—2020年	下降 (高值)	0	13.66	15	1.34	0.42	36.31	0.001	35.71	
		0	51.01	56	4.99	1.36	136.13	0.001	41.18	
	上升 (低值)	442	402.55	0	39.45	5.20	41.78	0.001	85.00	
		330	300.55	0	29.45	4.97	31.10	0.001	66.40	
		696	633.88	0	62.12	5.20	66.21	0.001	133.85	
		415	377.96	0	37.04	5.20	39.20	0.001	79.81	
150	136.61	0	13.39	5.05	14.08	0.041	29.70			

注:当集聚类型为下降时趋势比=实际下降总等级差/半径,为上升时趋势比=实际上升总等级差/半径。

3.3 SaTScan 聚类与 ArcGIS 局部自相关聚类 LISA 图比较与验证

3.3.1 全局自相关验证 为进一步证实 2018—2020 年耕地质量等级变化是否有显著的聚类趋势,采用经

典方法即 ArcGIS 的空间自相关工具进行验证。由表 6 可知,2018—2019 年与 2019—2020 年两个时段下的闽侯县质量等级差值在全局自相关上均呈聚类趋势,表现出显著的空间正相关性($Moran's I > 0, z >$

2.58),且 2018—2019 年的等级变化相关性大于 2019—2020 年的等级变化,这也佐证了图 8 中

2018—2019 年聚类区比例多于 2019—2020 年聚类区的现象。

表 6 2018—2020 年闽侯县耕地等级变化的空间自相关情况

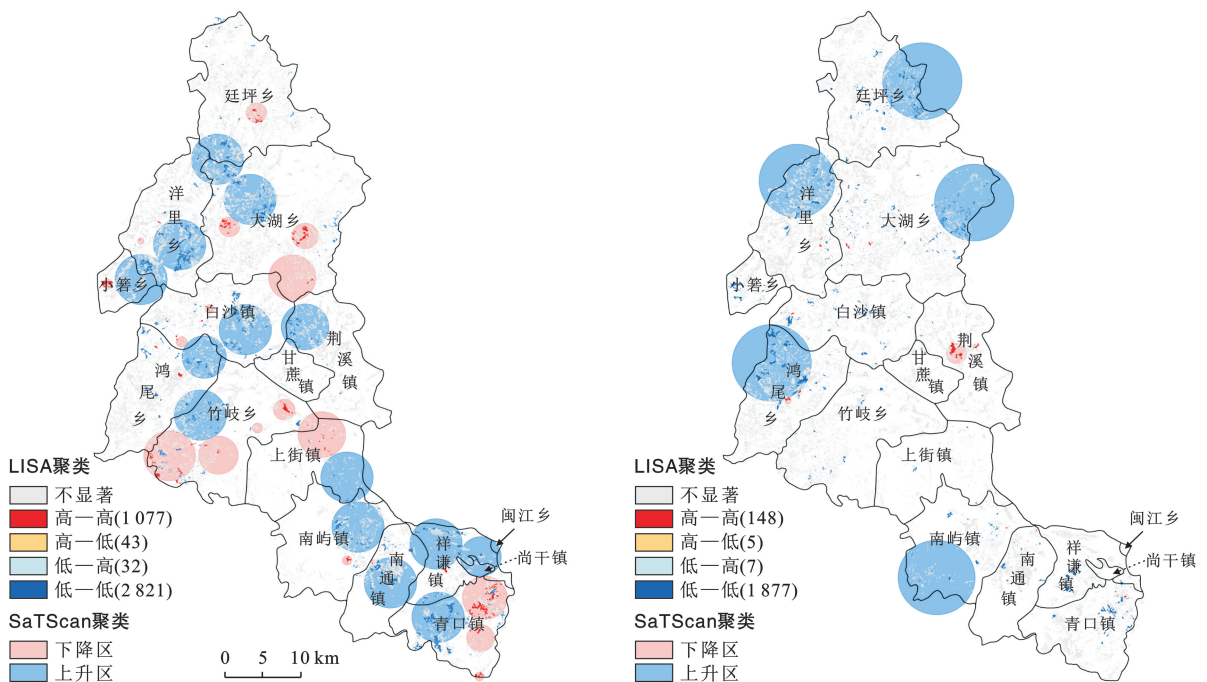
Table 6 Spatial autocorrelation of cultivated land grade changes at Minhou County from 2018 to 2020

研究时段	Moran's I	Z 得分	全局趋势	全局自相关类型
2018—2019 年	0.701 322	133.528 625	聚类	显著空间正相关
2019—2020 年	0.442 709	84.294 977	聚类	显著空间正相关

3.3.2 局部自相关 LISA 聚类与 SaTScan 聚类叠合比较分析 为分别比较 2018—2019,2019—2020 年两个时段下的两个不同聚类方法的异同点,本研究将 SaTScan 聚类区按其研究时段进行拆分,与同时段 LISA 聚类图对应,得到图 9。为提高局部自相关的聚类精度,本研究根据研究区耕地的空间分布关系采用“共享边和角”的空间关系概念,并结合章节 3.1.1 所示的两个最佳距离作为局部自相关的距离阈值。根据图 9 a 所示,SaTScan 聚类区基本上囊括了 LISA 聚类图下大部分聚合型(高一高型和低—低型)的区域(此处离散型(高一低型和低—高型)数量占比小且不在聚类讨论范围内)具体统计结果为,高一高型总计耕地地块 1 077 个,总面积达 737.03 hm²,其中落入 SaTScan 聚类区内部的有 1 029 个,总面积为 660.22 hm²,占高一高型耕地总面积的 89.58%;低—低型总计耕地地块 2 821 个,总面积达 2 683.33 hm²,包含于 SaTScan 聚类区的有 1 894 个,总面积为 1 789.76 hm²,占低—低型耕地总面积的 66.70%。

由此可见,在 2018—2019 年时段下,两种方法对等级具有下降趋势(高一高型)的耕地聚类的重合度高于等级具有上升趋势(低—低型)的耕地聚类区,且大致上呈现 SaTScan 聚类区包含 LISA 聚类结果的关系。

结合图 9b 与其统计数据可知,2019—2020 年等级变化的高一高型耕地地块总计 148 个,总面积为 181.56 hm² 与对应的下降聚类区相交的有 55 个,总面积为 91.16 hm²,面积比例为 50.02%;低—低型地块共计 1 877 个,总面积为 1 899.20 hm²,而落入上升聚类区内的地块为 465 个,总面积为 655.44 hm²,占低—低型地块总面积的 34.51%。与图 9a 所得结论对比,可发现,SaTScan 与 ArcGIS 在高值聚类上的重合度要高于低值聚类,除去算法上的差异性,二者的聚类差异应与搜索半径的差异也有关。另外的,根据图 9 所示的 SaTScan 聚类区范围表明了 SaTScan 具备搜索小范围的等级异常变化区域,故可以将 SaTScan 聚类范围作为进一步筛选与划定的依据。



注:括号内数字代表耕地地块数量。

图 9 2018—2019, 2019—2020 年闽侯县耕地质量变化聚类对比

Fig.9 Cluster comparison of cultivated land quality changes of Minhou County during 2018—2019 and 2019—2020

3.4 耕地质量分区管理方案

极化,本是指社会经济学的“经济—社会系统”中中间态相对缩短减弱而两极态相对扩张加强的演化过程^[33-34]。

空间极化在地理学上则体现为要素集群基于自

然、社会经济因素在地理距离衰减规律下的扩张^[35]。

为更科学合理地改良分区方案,创造更大化的收益,本研究结合了上述两种方法的结果,在空间极化理论^[36]的基础上,对闽侯县耕地提出划分为 5 类的分区管理方案。具体内容见表 7 和表 8。

表 7 闽侯县耕地质量分区管理方案

Table 7 Zoning management Plan of cultivated land quality at Minhou County

分区依据	分区方案	管理建议
高一高型 & 下降区	首要重点整治区	根据土配数据寻找限制土壤低质量的养分因子,补足养分因子的同时兴建水利、平衡土壤 pH 值
低—低型 & 上升区	高级优质提升区	建立耕地一级保护区,同时防范耕地非农化,保持土壤养分与排水灌溉的供应
高一高型! 下降区	次要重点整治区	与首要重点整治区的管理方案类似,但优先级落后
低—低型! 上升区	低级优质提升区	建立耕地二级保护区,防范耕地非农化,保持土壤养分与排水灌溉的供应
高一低型 低—高型 不显著区	整体改良区	实地调查土壤养分等影响因子,通过学习高级优质提升区各因子的配比来使该区的等级变化“趋同化”并稳步上升

注:①表中“&”表示与;“!”表示非即不包含;“|”表示或。②为突出本分区方案其优势,以下将不对整体改良区进行讨论。

表 8 闽侯县主要耕地保护分区分布范围及面积统计

Table 8 Distribution range and area statistics of main cultivated land protection zones at Minhou County

时间段	主要保护分区	主要分布乡镇	面积/hm ²	比例/%
2018—2019 年	首要重点整治区	竹岐乡、青口镇、大湖乡、上街镇、廷坪乡等	556.15	15.89
	高级优质提升区	祥谦镇、青口镇、洋里乡、白沙镇、南通镇、南屿镇、大湖乡、竹岐乡等	1 632.84	46.64
	次要重点整治区	鸿尾乡、竹岐乡、祥谦镇	180.88	5.17
	低级优质提升区	青口镇、鸿尾乡、南通镇、白沙镇、廷坪乡等	1 050.49	30.01
2019—2020 年	首要重点整治区	荆溪镇、鸿尾乡	80.45	3.87
	高级优质提升区	鸿尾乡、大湖乡、廷坪乡、洋里乡、南屿镇	599.78	28.82
	次要重点整治区	大湖乡、鸿尾乡、荆溪镇、洋里乡、青口镇等	101.11	4.86
	低级优质提升区	青口镇、白沙镇、祥谦镇、廷坪乡、小箬乡、大湖乡、南屿镇等	1 299.42	62.45

(1) 首要重点整治区与次要重点整治区。

①首要重点整治区:此区分布的耕地为同时满足高一高集聚类型和下降聚类区,图 8 与表 8 显示,2018—2019,2019—2020 年两个时间段下主要分布区域并无交集,而面积也由 2018—2019 年的 556.15 hm² 下降为 80.45 hm²。主要分布乡镇也由 5 个乡镇减少为 2 个乡镇,结合该区 2018—2019 年在下一个时间段中被划分为整体改良区,不难发现该区由一开始主要分布于山地丘陵区域转向平原地区。在重点整治、发掘 2019—2020 年该区具有发展潜力的耕地的同时,更应保证与提升其上一时间段的区域耕地质量的稳定性,防止其耕地质量进一步劣化。根据其农田管理与养分理化数据显示,具体整治措施可以从补足养分因子、兴建水利和平衡土壤 pH 值 3 方面入手。

②次要重点整治区:此类型耕地是指落于下降聚类区之外的高一高集聚类型区域,耕地面积由 2018—2019 年的 180.88 hm² 下降为 101.11 hm²,在其空间分布上呈现零碎化分布且往往分布于首要重点整治

区域周边,故可以设置其优先整治级别进行统一治理。表 8 表明,鸿尾乡为该区在 2018—2019,2019—2020 年的主要分布乡镇,因将鸿尾乡相应耕地区域建设成重点整治田,并以此辐射带动周边耕地质量长效稳定的提升。

(2) 高级优质提升区与低级优质提升区。

①高级优质提升区:针对局部自相关呈现为低—低集聚类型和时空扫描表现为上升区的区域,2018—2019 年主要分布在祥谦镇、青口镇、洋里乡、白沙镇、南通镇、南屿镇、大湖乡、竹岐乡,2019—2020 年转为鸿尾乡、大湖乡、廷坪乡、洋里乡、南屿镇。该分区耕地面积在两个时段下分别为 1 632.84,599.78 hm²,考虑地形因素(图 1),2018—2019 年耕地质量等级上升显著的该区主要旨意在提升延平、洋里、大湖、竹岐四乡丘陵地区的农业发展,并优化加强闽侯县中南部平原地区农田的建设;2019—2020 年则将其重点放在开发与利用具有复合地形(丘陵与平原交界)的地区,鸿尾乡、大湖乡、廷坪乡、洋里乡和南屿镇均是此类地形

的典型代表。结合闽侯县政府当时进行的“闽侯县 2018 年耕地地力保护补贴实施方案”,可以发现除了荆溪镇,该区分布乡镇与其政府补贴力度地区(按金额从高到低)高度吻合,一方面体现了这些地区可用一般耕地面积广度大,另一方面也从侧面印证了补贴政策得到了良好的反馈,也为闽侯县农业发展打开了新局面。建议这些地区继续保持或增加现有的投入,建立研究田,探索一套高标准农田建设体系,保障其耕地利用水平,防范非农业用途化,总结经验模型广泛应用于其他耕地,最终实现该区的“全覆盖”累计形态。

②低级优质提升区:分区依据为落于上升区之外的低—低集聚型区域,主要包括 2018—2019 年的青口镇、鸿尾乡、南通镇、白沙镇、廷坪乡及 2019—2020 年的青口镇、白沙镇、祥谦镇、廷坪乡、小箬乡、大湖乡和南屿镇。其分布广泛且无依附倾向,两个时间段下的面积分别为 $1\ 050.49\ \text{hm}^2$, $1\ 299.42\ \text{hm}^2$,在分区区划中占据相当的比重。由图 9 可知,该区同时具有“小集群分布”的特征,为方便管理与节约成本,故建议先从该区小集群相对明显的区域着手,将其逐步管理培养成高级优质提升区的“增长点”,以此实现耕地质量更快更稳的可持续增长。农田管理与养分理化相关数据提示,该区与高级优质提升区水利设施相对发达,保持土壤养分与排水灌溉的供应可以有效稳定该区的农业建设成果及其产出,往后的工作应侧重于提升农业机械化与信息化的水平,与高级优质提升区的研究成果接轨并将其应用。

4 讨论与结论

4.1 讨论

耕地质量保护与农业可持续发展长期以来一直作为中国农业资源利用与保护的两大重要推进方向,基于此也发展了众多的耕地质量监测、管理方法与技术手段,诸如基于遥感的田块尺度高空间分辨率监测^[37-39]、耕地质量格网系统的搭建与布控^[40-41]和基于 ArcGIS 的分区管理划分^[42-43]等。这些方法各有优势但也有所缺陷,小尺度的遥感高精度监测无法广泛应用并进行宏观调控、格网监测系统在丘陵地区下的动态监测成本将大大增加、分区管理划分缺少时间尺度上的考虑,时效性差,无法提供更为准确的预测方向及相应的指导方案。而基于 SaTScan 时空扫描的分区管理划分则可以在保持大空间尺度下监测耕地不同质量的变化情况的同时提供一定的预测功能与做出相应的预防措施。如果能建立起长时间序列的变化研究,在同一划分标准的基础上,能加大预测精度

并依据不同需求划分出具有同一“时间发展特性”的区域,为耕地质量时空变化更深层次的研究提供一定的理论基础。

此方案的划分优势在于:①能够根据每两年的等级变化对闽侯县耕地质量的管理方案进行相对应的调整,具备灵活性,依据此方案构架更容易对需要关照的耕地区域进行监测与管理。②划分主次关系的分区能够使得政府的资源分配更加合理,同时最大程度地保证耕地质量的稳定性与提升空间。③整体改良区的成分复杂,视其内部分类占比可以通过分区依据对该区采取进一步细致的划分。如高一低型可将重点放于保护质量提升程度较好的区域,改良周围的质量下降区次之;低—高型则与之相反。不显著区按默认管理建议即可。

值得注意的是,在缺少长时间序列数据积累的情况下,本研究时空分析的步长较短,设置为 1 a,由此得出的质量等级变化情况大致上变化并不明显,但仍敏锐地捕捉出小时间尺度下等级变化的集聚特征。

4.2 结论

(1) 通过严谨的科学分析与判断,基于 SaTScan 聚类耕地质量等级变化趋势具有可实施性与合理性。对比经典的 ArcGIS 局部自相关分析,其在高值聚类上的灵敏度要高于局部自相关模型,依此特性可专门应用于多年份变化下挖掘质量评价等级变化严重下降的区域,同时赋予其时间区间的属性。

(2) 2018—2019 年闽侯县耕地质量等级的变化趋势的空间分布复杂度大于 2019—2020 年耕地质量等级的变化趋势,表明了闽侯县 2018—2019 年等级变化波动范围更大,变化方向更复杂。2019—2020 年闽侯县耕地质量变化趋势大体上呈上升趋势,且与 2018—2019 年的变化区域重合度低,表明闽侯县 2018—2020 年来耕地质量明显下降的地区越来越少,县域内耕地整体的质量逐步稳定并呈现上升趋势。

(3) 基于 SaTScan 与 ArcGIS 聚类工具的闽侯县耕地质量分区管理方案因其时间敏感性,将为政府在耕地政策上的决策与调整提供依据与手段。

(4) 补足养分因子、兴建水利和平衡土壤 pH 值是防止并逆转耕地质量劣化和保持农田高质量、高产出的重要实施方案,此外建立耕地保护区,防范耕地非农化也有助于耕地质量的稳固和提升。

[参 考 文 献]

- [1] 高浩然,周勇,刘甲康,等.基于 EBK 插值预测和 GDM 模型的襄州区耕地土壤重金属时空分布及来源变化分析[J].环境科学,2022,43(11):5180-5191.
- [2] Liao Yubo, Zhang Bangbang, Kong Xiangbin, et al. A

- cooperative-dominated model of conservation tillage to mitigate soil degradation on cultivated land and its effectiveness evaluation [J]. *Land*, 2022, 11(8):1223.
- [3] 赵丹丹,周宏,高富雄.农户分化、技术约束与耕地保护技术选择差异:基于不同约束条件下的农户技术采纳理论分析框架[J].*自然资源学报*,2020,35(12):2956-2967.
- [4] 汤怀志,桑玲玲,鄢文聚.我国耕地占补平衡政策实施困境及科技创新方向[J].*中国科学院院刊*,2020,35(5):637-644.
- [5] 杨瑞珍,陈印军.耕地违法占用现状、成因及预防对策[J].*中国农业资源与区划*,2013,34(1):35-38.
- [6] 李志芳,王锐,沈新磊.基于质量指数和空间自相关分析的耕地保护分区研究[J].*土壤通报*,2021,52(4):785-792.
- [7] 王军,李萍,詹韵秋,等.中国耕地质量保护与提升问题研究[J].*中国人口·资源与环境*,2019,29(4):87-93.
- [8] 孙晓兵,孔祥斌,温良友.基于耕地要素的耕地质量评价指标体系研究及其发展趋势[J].*土壤通报*,2019,50(3):739-747.
- [9] 付国珍,摆万奇.耕地质量评价研究进展及发展趋势[J].*资源科学*,2015,37(2):226-236.
- [10] 沈仁芳,陈美军,孔祥斌,等.耕地质量的概念和评价与管理对策[J].*土壤学报*,2012,49(6):1210-1217.
- [11] 杨淇钧,吴克宁,冯喆,等.大空间尺度土壤质量评价研究进展与启示[J].*土壤学报*,2020,57(3):565-578.
- [12] Dumanski J, Pieri C. Land quality indicators: research plan [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2000, 81(2):93-102.
- [13] Zhang Junfeng, Zhang Anlu, Song Min. Ecological benefit spillover and ecological financial transfer of cultivated land protection in river basins: a case study of the Yangtze River Economic Belt, China [J]. *Sustainability*, 2020, 12:7085.
- [14] Li Jing, Jiang Zhai, Miao Hui, et al. Identification of cultivated land change trajectory and analysis of its process characteristics using time-series Landsat images: a study in the overlapping areas of crop and mineral production in Yanzhou City, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 806:150318.
- [15] 赵明松,李德成,王世航.近 30 年安徽省耕地土壤有机碳变化及影响因素[J].*土壤学报*,2018,55(3):595-605.
- [16] 朱福斌,丁世伟,甘晓玉,等.基于三种空间预测方法的安庆市耕地土壤速效钾空间分布预测[J].*中国土壤与肥料*,2021(1):1-8.
- [17] 王海力,韩光中,谢贤健.基于 DEA 模型的西南地区耕地利用效率时空格局演变及影响因素分析[J].*长江流域资源与环境*,2018,27(12):2784-2795.
- [18] 邝珊,胡月明,刘振华,等.基于协同克里格的县域耕地质量监测点优化布设[J].*农业资源与环境学报*,2021,38(6):1020-1028.
- [19] 毛雪,孟源思,张东红,等.基于 GIS 的皖江流域耕地地力评价研究[J].*中国农业资源与区划*,2019,40(7):110-118.
- [20] 熊想想,杨朝现,信桂新,等.山地丘陵区村级尺度耕地质量评价及保护分区[J].*水土保持研究*,2019,26(1):308-315.
- [21] 张贞,魏朝富,尚慧.丘陵山区耕地质量的空间格局分析[J].*长江流域资源与环境*,2010,19(8):901-907.
- [22] 钱凤魁,于洋,孙福军,等.不同地貌区县域耕地质量与耕地景观格局关联性特征分析[J].*土壤通报*,2020,51(6):1282-1289.
- [23] 张英,冯雪珂,任少宝,等.耕地质量和产能评价指标体系研究:以广西宾阳县为例[J].*农业资源与环境学报*,2021,38(6):1039-1050.
- [24] 孙亚芳,王祖伟.农村宅基地复垦耕地适宜性评价:以天津市西青区为例[J].*农业资源与环境学报*,2018,35(1):24-31.
- [25] 江文娟,汤萌萌,汪甜甜,等.宣城市耕地质量等级及土壤养分空间分布特征[J].*土壤通报*,2022,53(1):36-44.
- [26] Ullah S, Daud H, Dass S C, et al. Space-time clustering characteristics of tuberculosis in Khyber Pakhtunkhwa Province, Pakistan, 2015—2019 [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(4):1413.
- [27] Takahashi K, Shimadzu H. Detecting multiple spatial disease clusters: information criterion and scan statistic approach [J]. *International Journal of Health Geographics*, 2020, 19(1):1-11.
- [28] Magnusson A, Ahle M, Swolin-Eide D, et al. Population-based study showed that necrotising enterocolitis occurred in space-time clusters with a decreasing secular trend in Sweden [J]. *Acta Paediatrica*, 2017, 106(7):1097-1102.
- [29] 黄澳迪,唐林,王晓琪,等.中国 2011—2021 年戊型肝炎病毒性肝炎发病趋势和时空聚集性[J].*中国疫苗和免疫*,2022,28(4):417-421.
- [30] 张婷,程昌秀,杨山力,等.时空聚集性探测方法在极端高温事件聚集分析中的应用研究[J].*地理与地理信息科学*,2019,35(3):51-57.
- [31] 王峥,程昌秀,李畅.时空 Moran 散点图及其在中国干旱时空聚集区识别中的应用[J].*地球信息科学学报*,2022,24(7):1301-1311.
- [32] Mondal S, Singh D, Kumar R. Crime hotspot detection using statistical and geospatial methods: a case study of Pune City, Maharashtra, India [J]. *GeoJournal*, 2022, 87(6):5287-5303.
- [33] 吕承超,崔悦.乡村振兴发展:指标评价体系、地区差距与空间极化[J].*农业经济问题*,2021,42(5):20-32.

- 术策略[J].煤炭学报,2019,44(12):3662-3669.
- [2] 徐启胜,王金满,时文婷.大型露天煤矿区景观格局变化对水土流失的影响:以山西平朔矿区为例[J].中国土地科学,2022,36(4):96-106.
- [3] Palmer M A, Filoso S. Restoration of ecosystem services for environmental markets [J]. Science, 2009, 325(5940):575-576.
- [4] 荣颖,胡振琪,付艳华,等.中美草原区露天煤矿土地复垦技术对比案例研究[J].中国矿业,2017,26(1):55-59.
- [5] Hancock G R, Loch R J, Willgoose G R. The design of post-mining landscapes using geomorphic principles [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2003,28(10):1097-1110.
- [6] 张成梁,B.Larry Li.美国煤矿废弃地的生态修复[J].生态学报,2011,31(1):276-285.
- [7] Sears A E, Bise C J, Quaranta J D, et al. Field and modeling study for stream mitigation on surface mine sites in West Virginia [J]. Mining Engineering, 2014,66(5):48-53.
- [8] 李晶,马天跃,闫萧萧,等.中美土地复垦质量控制标准对比研究:以草原露天矿区为例[J].矿业科学学报,2022,7(4):446-455.
- [9] 刘新华,张晓萍,杨勤科,等.不同尺度下影响水土流失地形因子指标的分析与选取[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2004,32(6):107-111.
- [10] Davis W M. The geographical cycle [J]. The Geographical Journal, 1899,14(5):481.
- [11] Strahler A N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography [J]. Geological Society of America Bulletin, 1952,63(11):1117.
- [12] 艾南山,岳天祥.再论流域系统的信息熵[J].水土保持学报,1988,2(4):1-9.
- [13] 杨翠霞,赵廷宁,谢宝元,等.基于小流域自然形态的废弃矿区地形重塑模拟[J].农业工程学报,2014,30(1):236-244.
- [14] 吕春娟,白中科,赵景逵.矿区土壤侵蚀与水土保持研究进展[J].水土保持学报,2003,17(6):85-88.
- [15] Magesh N S, Chandrasekar N, Soundranayagam J P. Morphometric evaluation of Papanasam and Manimuthar watersheds, parts of Western Ghats, Tirunelveli district, Tamil Nadu, India: a GIS approach [J]. Environmental Earth Sciences, 2011,64(2):373-381.
- [16] 白中科,周伟,王金满,等.再论矿区生态系统恢复重建[J].中国土地科学,2018,32(11):1-9.
- [17] 殷宗敏,刘万青.基于地形剖面线的陕北黄土高原地貌信息熵差分析[J].水土保持通报,2017,37(1):166-172.
- [18] 杨令杰,沈伟,王家栋.贺斯格乌拉露天煤矿采区划分及开采方案研究[J].露天采矿技术,2016,31(4):49-52.
- [19] 夏嘉南,李根生,卞正富,等.露天矿内排土场近自然地貌重塑研究:以新疆黑山露天矿为例[J].煤炭科学技术,2022,50(11):213-221.
- [20] 张莉,王金满,刘涛.露天煤矿区受损土地景观重塑与再造的研究进展[J].地球科学进展,2016,31(12):1235-1246.
- [21] 阎仲康,曹银贵,李志涛,等.内蒙古东部草原区矿山生态修复研究:关键技术与减碳路径[J].农业资源与环境学报,2023,40(3):570-582.

(上接第 140 页)

- [34] Zhu Yiheng, Yang Shan, Lin Jinping, et al. Spatial and temporal evolutionary characteristics and its influencing factors of economic spatial polarization in the Yangtze River Delta region [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(12):6997.
- [35] Nefedova T G, Starikova A V. Migrations as a way of population adaptation to polarization of space at the center of Russia [J]. Sotsiologicheskie Issledovaniya, 2020:24-38.
- [36] 赵磊,方成,丁焯.浙江省县域经济发展差异与空间极化研究[J].经济地理,2014,34(7):36-43.
- [37] Lin Chenjie, Hu Yueming, Liu Zhenhua, et al. Estimation of cultivated land quality based on soil hyperspectral data [J]. Agriculture, 2022,12(1):93.
- [38] 张新乐,钱蕾,鲍依临,等.黑土区田块尺度耕地质量遥感监测与评价[J].土壤通报,2020,51(6):1303-1312.
- [39] Li Yinshuai, Chang Chunyan, Wang Zhuoran, et al. Upscaling remote sensing inversion model of wheat field cultivated land quality in the Huang-Huai-Hai agricultural region, China [J]. Remote Sensing, 2021,13(24):5095.
- [40] 李奕志,李立强,孔祥斌,等.美国国家资源清单及其对中国耕地质量动态监测的启示[J].中国土地科学,2014,28(7):82-89.
- [41] 田惠文,张欣欣,毕如田,等.非均匀网格环境下基于耕地质量与集中连片度的基本农田划定[J].农业工程学报,2020,36(3):254-262.
- [42] 李子杰,高沪宁,丁琪珣,等.基于 Moran's I 的安徽省太湖县耕地质量时空格局分析[J].水土保持通报,2021,41(3):350-356.
- [43] 高建岗,黄锐.基于耕地质量指数和空间自相关的苏南地区耕地保护分区[J].水土保持研究,2019,26(3):213-218.