

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.08.028

# 基于量子遗传投影寻踪的长株潭地区耕地系统安全评价

周浩<sup>1</sup> 胡凌<sup>1</sup> 陈竹书<sup>2</sup>

(1. 湖南师范大学地理科学学院, 长沙 410081; 2. 益阳市烟草专卖局, 益阳 413002)

**摘要:** 耕地系统安全评价是改善区域耕地系统安全状态和保障粮食生产安全的重要举措。以长株潭地区为研究区,从耕地数量、质量和生态三者系统性保护的视角,构建耕地系统安全评价指标体系,采用量子遗传算法改进的投影寻踪模型,定量分析耕地系统安全的时空演变特征,识别关键因子。结果表明:研究区各子系统投影值呈“交错递减”状态,耕地系统安全综合投影值波动式降低,由2009年的1.2521减少到2019年的1.2517;2019年,长株潭地区耕地系统安全表现为由中心城区向四周城郊区辐射式提升的空间分异特征;针对不同耕地系统安全等级区,因地制宜提出了调控措施,有利于提升区域耕地系统安全状态;耕地总面积、人均耕地面积、耕地垦殖率、单位耕地面积地膜负荷和污水集中处理率是影响该地区耕地系统安全的关键因子,需积极从保护耕地数量和提高耕地利用管理水平方面维持和改善当地耕地系统安全状态。本研究可为长株潭地区耕地保护及社会经济高质量发展提供理论支撑。

**关键词:** 耕地利用; 系统安全评价; 量子遗传算法; 投影寻踪模型; 长株潭地区

中图分类号: F323.211

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2022)08-0268-07

OSID:



## Evaluation on Cultivated Land System Security in Chang – Zhu – Tan Region Based on Quantum Genetic Projection Pursuit Method

ZHOU Hao<sup>1</sup> HU Ling<sup>1</sup> CHEN Zhushu<sup>2</sup>

(1. College of Geographical Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081, China

2. Yiyang Tobacco Monopoly Administration, Yiyang 413002, China)

**Abstract:** With the development of urbanization, the security of the regional cultivated land system was facing certain threats, and the evaluation of the security of the cultivated land system was critical as an important measure to improve the security status of the regional cultivated land system and ensure the safety of food production. Taking the Changsha – Zhuzhou – Xiangtan (Chang – Zhu – Tan) region as the research area, from the perspective of systematic protection of cultivated land quantity, cultivated land quality and cultivated land ecology, to construct a safety evaluation index system of cultivated land system, and the improved projection pursuit model of quantum genetic algorithm was used to quantitatively analyze spatial and temporal evolution characteristics of cropland system security and identify its key factors. The results showed that the projection value of each subsystem in the study area presented a state of “staggered decrease”, and the comprehensive safety projection value of the cultivated land system presented a fluctuating decreasing trend of “first increase, then gentle and then decrease”, from 1.2521 in 2009 to 1.2517 in 2019. In 2019, the safety spatial pattern of the cultivated land system in the Chang – Zhu – Tan region showed a differential characteristic of radial improvement from the central urban area to the surrounding distant and suburbs. In view of different cultivated land system safety grade areas, regulatory measures were put forward according to local conditions. The total cultivated land area, per capita cultivated land area, cultivated land reclamation rate, mulch load per unit of cultivated land area and sewage treatment rate were the key factors affecting the safety of the cultivated land system in the region, and it was necessary to actively maintain and improve the safety status of the local cultivated land system in terms of protecting the amount of cultivated land and improving the level of utilization and

收稿日期: 2022-04-09 修回日期: 2022-06-13

基金项目: 湖南省教育厅创新平台科研项目(20K080)、湖南省自然科学基金项目(2021JJ40352)和湖南师范大学博士启动基金项目(0531120-4099)

作者简介: 周浩(1990—),男,讲师,博士,主要从事土地资源利用研究,E-mail: zhouhao7404@163.com

management of cultivated land. The results can provide theoretical support for cultivated land protection and high-quality social and economic development in Chang - Zhu - Tan region.

**Key words:** cultivated land use; system security evaluation; quantum genetic algorithm; projection pursuit model; Chang - Zhu - Tan region

## 0 引言

耕地系统是粮食生产的基本载体和环境条件,其特性和功能是由耕地自身属性(耕地数量和质量)、自然生态要素及社会经济发展等因素综合作用的结果<sup>[1]</sup>。随着城市化、工业化的快速发展,经济生产与建设占用等人类活动改变了耕地生态环境,并进一步引起耕地质量下降,耕地系统安全面临严重威胁,而强化耕地系统保护是保障国家粮食安全和社会经济可持续发展的重要任务<sup>[2-3]</sup>。因此,针对高强度人类活动区开展耕地系统安全评价,识别耕地系统所面临的安全问题,是提升耕地安全状态、促进粮食安全生产的重要举措。

当前,国外关于耕地利用安全研究,主要侧重于耕地生态风险、土壤健康监测与耕地可持续利用等研究内容,如使用生态风险评估(ERA)和多阶段快速分类初步评估(Triad)程序,研究累积化合物污染对土壤生态系统的威胁<sup>[4]</sup>;国内学者围绕耕地利用安全问题也做了大量工作,研究尺度上,主要从大流域<sup>[5]</sup>、省<sup>[6]</sup>、市域尺度<sup>[7]</sup>进行,而对城市化发展水平较高地区的耕地系统安全及其关键影响因子识别研究较少;在研究方法上,多通过构建PSR-EES指标体系<sup>[8-9]</sup>、DPSIR理论体系<sup>[10]</sup>等,采用TOPSIS法<sup>[11]</sup>、正态云模型<sup>[12]</sup>等方法对耕地安全进行定量评估。但上述方法难以消除样本差异对指标权重的影响,评价结果的准确性有待提高。近年来,国内部分学者将量子遗传算法及其改进算法优化的投影寻踪模型应用到调亏灌溉评价<sup>[13]</sup>、输电网规划<sup>[14]</sup>等领域,具有抗干扰性强、准确度高等优势,能够有效提高模型的全局搜索能力与优化效率。

长株潭地区位于湖南省中东部,是我国区域一体化发展、创新驱动发展和都市圈高质量发展的重点试验区域。近年来,该地区在城市化发展过程中,出现不同程度的耕地灭失、耕地质量下降、区域生态环境恶化等问题,改变了当地耕地系统安全状态<sup>[8,15]</sup>。基于此,本文以长株潭地区为研究区,从数量、质量和生态系统性保护的角度构建耕地系统安全评价指标体系,拟采用量子遗传算法改进的投影寻踪模型,对耕地系统安全状态进行定量研究,以期为该地区耕地利用保护及经济高质量发展提供理论支持。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

长株潭地区地处湘江中下游,地理位置为东经111°53'~114°15',北纬26°03'~28°41'。该地区属亚热带季风性湿润气候,热量充足、降水丰沛,地貌类型多样,以山地、丘陵为主。现辖3个地级市(长沙市、株洲市和湘潭市),14个市辖区,5个县级市,5个县。长株潭地区是我国城市群建设的典型示范区域<sup>[15]</sup>。近年来,该地区经济发展迅速、城镇化水平不断提高,但耕地利用程度过高、耕地非农化和供需矛盾加剧等耕地安全问题也日益突出<sup>[2]</sup>。

### 1.2 数据来源

耕地系统安全的基础数据主要来源于统计年鉴及公报,包括:《湖南统计年鉴》(2010—2020年)、《长沙统计年鉴》(2010—2020年)、《株洲统计年鉴》(2010—2020年)、《湘潭统计年鉴》(2010—2020年)、《湖南农村统计年鉴》(2010—2020年)以及《长株潭三市国民经济和社会发展统计公报》(2009—2019年),2019年长株潭地区及各区县的耕地面积数据来源于第三次国土调查主要数据公报,对各类型数据进行统一量纲及汇总处理。长株潭地区行政区划数据来源于国家基础地理信息中心(<https://www.webmap.cn/>)。

## 2 研究方法

### 2.1 耕地系统安全评价指标体系构建

耕地系统安全可定义为在一定时空尺度范围内,为实现耕地数量、质量、生态“三位一体”保护,而动态平衡耕地数量,确保耕地质量,改善耕地生态环境状态,促进耕地资源持续有效供给,使耕地系统处于不受威胁的安全状态以满足社会经济的高质量发展<sup>[16]</sup>。耕地系统安全由耕地数量安全、质量安全和生态安全3个子系统构成,其中,耕地数量安全指的是考虑耕地自然资源禀赋与社会经济发展因素的综合作用对耕地数量的影响,以动态平衡耕地数量,满足粮食生产对耕地面积的需求;耕地质量安全指的是改善耕地自然条件、提高耕地投入与利用管理水平,保障和提升粮食生产安全状态;而耕地生态安全则为减少耕地生态压力和威胁,改善耕地生态环

境状况,在健康生态环境中保障耕地数量和质量,维持耕地可持续利用状态<sup>[16-19]</sup>。因此,健康的耕地系统在促进粮食安全与社会经济发展过程中,其足量的耕地数量和优质的耕地质量发挥着基础性作用,而良好耕地生态环境发挥着保障性作用,三者相辅相成,维系整个耕地系统的安全运行。本文在耕地系统安全运行的基础上,基于耕地系统安全的内涵,

从耕地数量、耕地质量和耕地生态三者系统性保护视角出发,构建耕地系统安全评价指标体系,其中一级准则层耕地数量安全由二级准则层的耕地资源禀赋和社会经济发展构成,共7个指标因子;耕地质量安全由耕地自然质量和利用质量构成,共8个指标因子;耕地生态安全由耕地生态压力和生态支持组成,共9个指标因子(表1)。

表1 长株潭地区耕地系统安全评价指标体系

Tab.1 Cultivated land system security evaluation index system in Chang-Zhu-Tan region

目标层 A	一级准则层 B1	二级准则层 B2	指标层 C	性质
耕地系统安全	耕地数量安全	耕地资源禀赋	C1 人均耕地面积(hm <sup>2</sup> /人)	正
			C2 人均耕地减少率(%)	负
			C3 耕地总面积(hm <sup>2</sup> )	正
		C4 单位耕地面积农业产出效益(万元/hm <sup>2</sup> )	正	
		社会经济发展	C5 城市化水平(%)	负
			C6 人均粮食占有量(kg/人)	正
			C7 农业结构调整(%)	正
	C8 旱地占耕地面积比重(%)		负	
	耕地质量安全	耕地自然质量	C9 灌溉保证率(%)	正
			C10 水田占耕地面积比重(%)	正
		耕地利用质量	C11 粮食单产(kg/hm <sup>2</sup> )	正
			C12 耕地复种指数	正
			C13 耕地垦殖率(%)	正
			C14 农电集约度(kW·h/hm <sup>2</sup> )	正
			C15 单位耕地面积农业机械化水平(kW/hm <sup>2</sup> )	负
			C16 单位耕地面积化肥负荷(kg/hm <sup>2</sup> )	负
	耕地生态安全	耕地生态压力	C17 单位耕地面积农药负荷(kg/hm <sup>2</sup> )	负
			C18 单位耕地面积地膜负荷(kg/hm <sup>2</sup> )	负
			C19 人口密度(人/hm <sup>2</sup> )	负
		耕地生态支持	C20 森林覆盖率(%)	正
			C21 污水集中处理率(%)	正
			C22 水土流失治理面积(hm <sup>2</sup> )	正
			C23 农民人均纯收入(万元/人)	正
			C24 单位耕地面积农业从业人数(人/hm <sup>2</sup> )	正

注:耕地总面积是指区域内年末耕地总数量;农业结构调整是指农业总产值占农林渔牧业总产值的比重。正指标数值越大,耕地系统越安全;负指标数值越大,耕地系统越危险。

## 2.2 基于量子遗传算法的投影寻踪模型构建

### 2.2.1 量子遗传算法

由于传统遗传算法存在收敛速度慢、全局优化能力弱、早熟收敛等问题,可将量子遗传算法(Quantum genetic algorithm, QGA)及其改进算法与投影寻踪法结合,来处理高维、复杂非线性函数组合优化问题,相比传统的遗传算法具有更优越的多样性<sup>[13]</sup>。量子遗传算法是基于量子计算原理的概率优化算法,该算法采用量子比特编码方式,通过量子旋转门更新种群,计算适应度,获取最优解<sup>[20]</sup>。

### 2.2.2 耕地系统安全评价的投影寻踪模型

投影寻踪模型的基本原理是将高维数据投影到低维空间上,通过优化投影目标函数,寻找能反映出

高维数据结构特征的最佳投影方向向量。该理论和方法经过不断地改进和发展,同时与计算机科学算法相结合,在高维、非线性数据统计分析方面具有明确的优势。该模型在对样本评价指标集的标准化处理基础上(采用极差法进行),构造投影目标函数并实现优化,最终进行样本的优劣排序并识别关键影响因子<sup>[21]</sup>。模型构建的主要步骤为:

#### (1) 构造投影目标函数

设  $\mathbf{a} = (a_1, a_2, \dots, a_p)$  为投影方向向量,样本  $i$

在该方向上的一维投影值为  $Z_i = \sum_{j=1}^m a_j y_{ij}$ 。其中,  $\mathbf{a}_j$  为最佳投影方向向量,  $y_{ij}$  为指标归一化值。优化投影值时,要求一维投影值  $Z_i$  散布特征为:局部投影

点尽可能密集,而在整体上投影点团之间尽可能散开,则投影目标函数  $Q(a)$  为

$$Q(a) = S_z D_z \quad (1)$$

其中

$$S_z = \left[ \sum_{i=1}^m (Z_i - \bar{Z})^2 / (n - 1) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$D_z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (R - r_{ij}) u(R - r_{ij}) \quad (3)$$

$$r_{ij} = |z(i) - z(j)| \quad (4)$$

式中  $\bar{Z}$ —— $Z_i$  的平均值

$R$ ——局部密度的窗口半径

$r_{ij}$ ——样本间的距离

$u(R - r_{ij})$ ——单位阶跃函数,当  $R \geq r_{ij}$  时取 1, 否则取 0

$S_z$ ——投影值  $Z_i$  的标准差

$D_z$ ——投影值  $Z_i$  的局部密度

### (2) 优化投影目标函数

耕地系统安全评价样本集确定后,投影目标函数  $Q(a)$  的变化由投影方向向量  $a$  的变化来决定,通过求解投影目标函数最大化问题来估计最佳投影方向。其中,目标函数最大化公式和约束条件分别为

$$\text{Max} Q(a) = S_z D_z \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^p a^2(j) = 1 \quad (6)$$

考虑到采用传统的遗传算法在处理以  $\{a_j = |j = 1 \sim p\}$  为优化变量的复杂非线性优化问题时效果不佳,本文拟采用基于量子比特编码的量子遗传算法,来实现高维全局寻优。

## 3 结果与分析

### 3.1 长株潭地区耕地系统安全时序变化趋势

以 2009—2019 年数据为样本,采用量子遗传算法优化的投影寻踪模型分析长株潭地区耕地系统安全的时序变化特征。设定样本维数为 11,指标数为 24,对指标数据进行标准化处理,然后应用 Matlab 2016b 编程进行优化计算(参数设置原则见文献[20]),其中设定种群规模大小为 40、最大遗传代数为 600,最终得到耕地系统安全时序变化最佳投影方向向量(即各评价指标的权重)  $a = [0.4197, 0.01015, 0.41543, 0.14038, 0.03995, 0.1618, 0.11837, 0.00033, 0.00011, 0.00033, 0.03524, 0.00039, 0.39434, 0.00782, 0.05026, 0.23929, 0.27869, 0.30271, 0.04669, 0.24094, 0.34056, 0.00113, 0.16603, 0.00106]$ ,并获得每个样本对应的系统安全投影值(图 1)。

#### 3.1.1 长株潭地区耕地子系统安全投影值变化特征

从耕地子系统安全投影值变化特征来看,研究



图 1 2009—2019 年长株潭地区耕地系统安全投影值时序动态演变

Fig. 1 Time series dynamic changes of security projection value of cultivated land system in Chang - Zhu - Tan region

区各子系统投影值呈现“交错递减”状态,其中耕地生态安全投影值变化趋势表现为先增后缓再减,如图 1 所示。2009 年至 2015 年,生态安全投影值从 0.4767 增长到 1.2934,这与 2008 年《湖南省长株潭城市群区域规划条例》和 2013 年《湖南省长株潭城市群生态绿心地区保护条例》的实施有很大的关系,至 2015 年,长株潭地区生态环境持续改善,污染治理有序推进,森林覆盖率已提升至 56.07%,污水处理率达到 96.07%,耕地生态保护效果显著。2015—2018 年,投影值增速放缓但仍稳定增长,归因于 2015 年以来开展的“三年造绿大行动”,强化了长株潭生态绿心保护,进一步提升绿心生态服务功能,推行绿色生态农业模式,提供绿色健康农产品,有助于提高农民收入并美化乡村环境。但在 2019 年生态安全状态急剧恶化,主要原因为 2019 年该地区单位耕地面积地膜负荷异常增大至研究期间最大值 15.7689 kg/hm<sup>2</sup>,对生态安全产生极大的负面影响,表明该地区耕地生态压力将持续增大。

耕地数量安全与质量安全子系统投影值先呈稳步上升趋势,而后持续下降,均以 2015 年为转折点,分别由 2009 年的 0.6003 与 0.1751 减少至 2019 年的 0.2536 与 0.0442。其中前 7 年耕地数量安全的提升得益于 2007 年长株潭城市群“两型”社会建设综合配套改革试验区的设立,2009 年将耕地保护纳入市州政府绩效评估体系,随着政府对耕地保护工作的愈加重视,区域耕地总面积、人均耕地面积和耕地垦殖率总体上均有所增加,尤其 2015 年耕地总面积达到 6.382 × 10<sup>5</sup> hm<sup>2</sup>,为研究期间峰值,强有力的耕地保护措施促使区域耕地数量和质量安全状态提升。而从 2015 年开始,由于城镇化的快速发展而侵占耕地甚至优质农田、生态退耕以满足生态文明建设而退出部分耕地以及城市化效应导致人口聚集,致使耕地总面积和人均耕地面积逐年减少,耕地垦殖率持续降低,尤其 2019 年耕地总面积降到最低值

5.  $167 \times 10^5 \text{ hm}^2$ , 耕地数量安全问题严峻, 并且2015—2018年粮食单产也出现一定程度的下降, 反映出长株潭地区耕地非农化、非粮化趋势明显, 耕地质量安全水平不断降低。

### 3.1.2 长株潭地区耕地系统安全综合投影值变化特征

从综合投影值变化特征来看, 研究区耕地系统安全综合投影值呈“先增后缓再减”波动式降低态势, 由2009年的1.2521减少到2019年的1.2517, 表征了研究期内耕地系统安全状况出现恶化(图1)。进一步分析可知, 近11年来, 研究区耕地系统安全投影值的波动变化特征以2015年和2018年为分界点, 2009—2015年为综合投影值“加速递增”阶段, 综合投影值从1.2521增长到2.8732, 表明该阶段耕地系统安全状态显著提升; 2015—2018年综合投影值保持平稳变化, 耕地系统处于稳定的健康状态; 而2018—2019年, 综合投影值急剧下滑。此阶段城镇化发展、耕地类型转换使耕地占补失衡且“非农化”、“非粮化”趋势明显, 耕地集约节约利用水平低, 亟需深入识别其关键影响因子, 制定针对性调控措施。

### 3.2 长株潭地区各区县耕地系统安全空间格局分异

结合长株潭地区耕地系统安全时序变化特征分析结果可知, 2019年长株潭地区耕地系统及子系统安全状态变化尤为显著, 需深入探究各县域耕地系统演变特征, 识别关键影响因子, 因地制宜制定调控策略。因此, 以2019年长株潭地区各区县(其中将长沙市辖6区、株洲市辖5区以及湘潭市辖2区分别作为1个样本, 与其他县(市)共13个样本)为研究单元, 沿用上述方法, 探究研究区2019年耕地系统安全空间格局分异特征。优化计算得到耕地系统安全空间分异各评价指标的最佳投影方向向量( $a = (0.2921, 0.1855, 0.3287, 0.0021, 0.3345, 0.3331, 0.0602, 0.2618, 0.1832, 0.1777, 0.2396, 0.0589, 0.0226, 0.0130, 0.1436, 0.00017, 0.1884, 0.10008, 0.3520, 0.0892, 0.0189, 0.3139, 0.23155, 0.00466)$ )和各样本综合及二级准则层投影评价价值, 如表2所示。

#### 3.2.1 耕地系统安全等级阈值

以最佳投影方向向量作为权重, 计算得到各样本点的投影值, 从而进行样本优劣排序, 并探究各评价指标对耕地系统安全的影响程度, 以确定关键影响因子。参照文献[6], 并结合研究区实际状况, 根据耕地系统安全投影值及其聚集与离散程度, 借助DPS 7.05软件, 采用系统聚类分析法<sup>[3]</sup>, 确定其等级阈值(表3)。

表2 2019年长株潭地区各区县耕地系统安全二级准则层指标投影值

Tab.2 Projected value of indicators of the second-level criterion layer of cultivated land system security in all districts and counties in Chang - Zhu - Tan region in 2019

区域	耕地数量安全		耕地质量安全		耕地生态安全	
	耕地资源禀赋	社会经济发展	耕地自然质量	耕地利用质量	耕地生态压力	耕地生态支持
长沙市区	0.1535	0.0619	0.5228	0.0934	0.1133	0.0878
长沙县	0.2758	0.4000	0.6058	0.1668	0.4193	0.3390
浏阳市	0.4697	0.3745	0.4623	0.2993	0.4778	0.6146
宁乡市	0.6240	0.4778	0.4008	0.2417	0.4309	0.5230
株洲市区	0.3291	0.1689	0.2582	0.3317	0.4241	0.1879
醴陵市	0.4798	0.4125	0.3067	0.3131	0.3599	0.3352
攸县	0.6619	0.5426	0.2060	0.3174	0.5766	0.3938
茶陵县	0.5644	0.5241	0.0000	0.2716	0.6066	0.2401
炎陵县	0.3388	0.5318	0.1339	0.2322	0.6248	0.1990
湘潭市区	0.1132	0.0142	0.4365	0.3479	0.3574	0.2502
湘乡市	0.5559	0.5773	0.4263	0.3243	0.5234	0.2911
韶山市	0.3015	0.3679	0.4165	0.3493	0.5433	0.2284
湘潭县	0.6573	0.6667	0.5319	0.3075	0.4947	0.2718

表3 耕地系统安全等级标准

Tab.3 Cultivated land system security level standards

综合投影值	安全级别	安全状态
[2.2072, 2.9298]	非常安全	耕地系统基本未受损害, 处于不受威胁的健康状态
[1.7451, 2.2072)	比较安全	耕地系统受到较小损害, 处于良好状态
[1.2522, 1.7451)	临界安全	耕地系统受到一定损害, 处于敏感状态
[1.2517, 1.2522)	较不安全	耕地系统受到较大损害, 处于受到损害后难以恢复状态
[1.0327, 1.2517)	极不安全	耕地系统受到极大损害, 处于危险状态

#### 3.2.2 长株潭地区各区县耕地系统安全空间格局分异特征

从耕地系统安全二级准则层角度分析其分异特征。分析表2和图2可知, 2019年, 长株潭地区耕地系统安全表现为由中心城区向城市四周郊区辐射式提升的空间分异特征。其中, 处于非常安全等级的区域有浏阳市、宁乡市、攸县、湘乡市和湘潭县。该类区域耕地资源禀赋最高且社会经济发展对耕地数量安全的负面影响较少, 得益于国土整治工程, 特别是农田整治实施效果较好, 使耕地数量、人均耕地面积和人均粮食占有量增多, 但单位耕地面积农业产出效益偏低是耕地系统安全提升的主要障碍; 处于比较安全等级的区域有长沙县、醴陵市、茶陵县、炎陵县和韶山市, 此类区域主要为城市近郊区, 耕地系统安全综合投影值较大, 耕地资源禀赋较高, 耕地

生态支持力度较大,人均耕地面积和耕地总面积是提升耕地安全的主要驱动因素。但除长沙县外,耕地自然质量相对较低(特别是茶陵县灌溉保证率极低,仅为66.95%)以及高耕地生态压力(单位耕地面积农药负荷普遍较大)成为阻碍耕地生态安全状态改善的关键因子;处于临界安全等级的区域有株洲市区和湘潭市区,这类区域位于中心城区,耕地系统安全综合投影值介于1.252 2~1.745 1之间,耕地系统受到一定损害,处于敏感状态,表现为耕地数量安全、质量安全以及生态安全都处于中等临界水平,以社会经济发展占用耕地数量多和耕地生态支持力度小为主要特点,需加以防范并制定调控策略改善安全状态;处于极不安全等级的区域是长沙市区,其投影值最低,耕地系统脆弱,归因于近年来长沙市区加速城镇化持续挤压农业生产空间,导致人均耕地面积减少、人均粮食占有量逐年下降,至2019年分别仅为 $0.0114\text{ hm}^2/\text{人}$ 、 $86.7294\text{ kg}/\text{人}$ ,耕地资源禀赋趋于降低,粮食安全面临严重危机。且耕地利用质量与生态支持力度不高,表现为粮食单产和农民人均纯收入均明显低于其他区域,同时高人口密度产生较大的生态压力,降低了长沙市区耕地系统安全,亟待加大耕地保护力度。

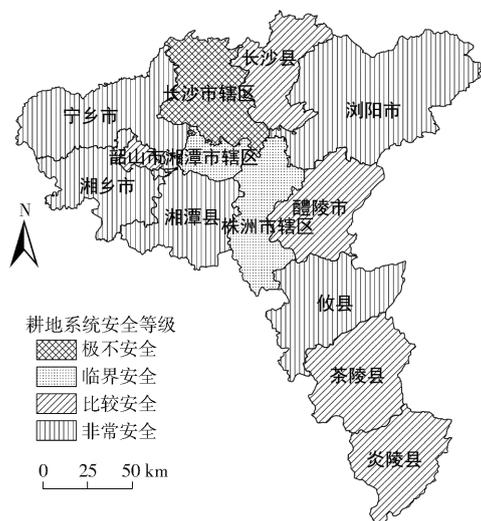


图2 2019年长株潭地区耕地系统安全状态空间分异格局

Fig. 2 Spatial differentiation pattern of security status of cultivated land system in Chang-Zhu-Tan region in 2019

此外,通过对比分析长株潭地区耕地系统安全时序变化与空间格局分异评价指标的最佳投影方向向量,发现其指标优劣排序大致相同,表明以量子遗传算法优化的投影寻踪模型适用于耕地系统安全评价。其中,人均耕地面积、耕地总面积、耕地垦殖率、单位耕地面积地膜负荷和污水集中处理率是影响长株潭地区耕地系统安全的关键因子。

## 4 讨论

要改善耕地系统安全状态,需从耕地安全关键影响因子入手,因地制宜采取针对性措施,实现耕地的有效利用与管理。因此,对耕地系统非常安全区而言,应愈加重视全域土地综合整治,特别是永久基本农田保护和高标准农田建设,维系耕地数量安全,调整农业种植结构、推进农业供给侧结构性改革、提升农业生产效益、促进农民增收、加快实现乡村振兴;对比较安全区而言,城市近郊区耕地资源禀赋较高,但灌溉保证率偏低和农药负荷增大等问题突出,政府应加大农业科技和资金投入,重点推进农田节水灌溉基础设施建设,加快建立与区域水资源承载能力相适应的节水型农业结构,并开展测土配方,科学施肥用药,积极向绿色生态农业转型,以实现农业农村现代化;对临界安全区和极不安全区而言,中心城区城市化进程快,人口密度大,需注重耕地资源开发利用与生态环境保护相协调,促进新型城镇化发展,同时优化区域农业生产结构,优先发展先进农业生产技术,提高粮食单产,保障粮食安全,实现“藏粮于地,藏粮于技”战略。

耕地系统安全评价对于有效保护耕地和促进耕地的可持续利用具有重要的积极意义。但评价指标体系的选取和构建主观性较强、严谨性欠缺,并且耕地系统是一个复合系统,不同区域耕地数量、耕地质量和耕地生态安全子系统的差异较大,指标体系的准确性有待进一步考究;此外,投影寻踪模型建模时,最佳投影方向向量的约束条件和取值范围影响着评价结果的准确性,有待深化研究;量子遗传算法在优化投影目标函数时,其收敛速度、全局搜索能力仍具有一定的局限性,在将来研究中可加入量子突变、量子交叉和改进量子旋转门转角策略等操作来提升算法性能,同时可尝试结合最新的智能优化算法(如群智能最优化算法<sup>[22]</sup>)来解决局部极值问题,并深入探究其在耕地资源评价等领域中的应用效果。

## 5 结论

(1)长株潭地区各耕地系统安全子系统投影值呈现“交错递减”状态,耕地系统安全综合投影值呈“先增后缓再减”波动式降低态势,由2009年的1.252 1减少到2019年的1.251 7。

(2)从县域耕地系统安全空间格局演变特征来看,2019年,长株潭地区耕地系统安全空间格局表现为由中心城区向城市四周远近郊区辐射式提升的分异特征。

(3) 针对不同耕地系统安全等级区,从优化农业生产结构、发展绿色生态农业和推进新型城镇化等方面因地制宜提出了调控措施,对提升耕地系统安全状态具有一定的参考价值。

(4) 应用量子遗传算法改进投影寻踪模型,相比于传统遗传算法,其在收敛速度、全局寻优能力及计算精度等方面均有所提升,其评价结果也具有现

势性特征,表明基于 QGA 的投影寻踪法适用于耕地系统安全定量评价。且根据最佳投影方向向量,可知耕地总面积、人均耕地面积、耕地垦殖率、单位耕地面积地膜负荷和污水集中处理率是影响该地区耕地系统安全的关键因子,需积极从保护耕地数量和提高耕地利用管理水平方面维持和改善当地耕地系统安全状态。

#### 参 考 文 献

- [1] 苏浩,吴次芳.东北黑土区耕地系统变化机理[J].农业工程学报,2021,37(6):243-251.  
SU Hao, WU Cifang. Mechanism of cultivated land system change in black soil areas of Northeast China[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(6):243-251. (in Chinese)
- [2] 李春华,李宁,石岳,等.两型社会建设背景下长株潭城市群耕地安全性评价[J].中国农学通报,2010,26(16):301-308.  
LI Chunhua, LI Ning, SHI Yue, et al. An analysis on the security of cultivated land resources in Chang-Zhu-Tan City Cluster based on two-oriented society[J]. China Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(16):301-308. (in Chinese)
- [3] 陈藜藜,宋戈,邹朝晖.基于免疫机理的黑龙省耕地系统安全预警研究[J].中国土地科学,2017,31(5):79-88.  
CHEN Lili, SONG Ge, ZOU Zhaohui. Study on early-warning of cultivated land system security in Heilongjiang Province based on the immune mechanism[J]. China Land Sciences, 2017, 31(5):79-88. (in Chinese)
- [4] GWOREK B, BACZEWSKA-DABROWSSKA A H, KALINOWSKI R, et al. Ecological risk assessment for land contaminated by petrochemical industry[J]. PloS One, 2018, 13(10):e0204852.
- [5] 任平,洪步庭,周介铭.长江上游农业主产区耕地生态安全评价与空间特征研究[J].中国人口·资源与环境,2013,23(12):65-69.  
REN Ping, HONG Buting, ZHOU Jieming. Study on ecological security evaluation and spatial characteristics of cultivated land of agriculture production area in the upper Yangtze River[J]. China Population, Resources and Environment, 2013, 23(12):65-69. (in Chinese)
- [6] 李明薇,陈伟强,郎雨早,等.基于投影寻踪模型的河南省耕地生态安全评价[J].水土保持研究,2018,25(4):257-263,269.  
LI Mingwei, CHEN Weiqiang, YUN Yuhan, et al. Evaluation on cultivated land ecological security in Henan Province based on projection pursuit model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(4):257-263,269. (in Chinese)
- [7] 刘慧芳,毕如田,郭永龙,等.晋中市耕地质量空间分异格局与影响因素研究[J].农业机械学报,2021,52(12):216-224,289.  
LIU Hui Fang, BI Rutian, GUO Yonglong, et al. Spatial differentiation pattern and influencing factors of cultivated land quality in Jinzhong City[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12):216-224,289. (in Chinese)
- [8] 郭荣中,杨敏华,申海建.长株潭地区耕地生态安全评价研究[J].农业机械学报,2016,47(10):193-201.  
GUO Rongzhong, YANG Minhua, SHEN Haijian. Evaluation for ecological security of cultivated land in Chang-Zhu-Tan region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10):193-201. (in Chinese)
- [9] 李丹,田沛佩,罗红英,等.西藏“一江两河”耕地生态安全时空格局与障碍诊断[J].农业机械学报,2020,51(10):213-222.  
LI Dan, TIAN Peipei, LUO Hongying, et al. Spatio-temporal characteristics and obstacle diagnosis of cultivated land ecological security in “one river and two tributaries” region in Tibet[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10):213-222. (in Chinese)
- [10] 文高辉,袁泉,赵懿,等.2007—2017年洞庭湖平原耕地生态安全评价及障碍因子诊断[J].水土保持通报,2021,41(2):178-187.  
WEN Gaohui, YUAN Quan, ZHAO Yi, et al. Ecological security evaluation and obstacle factor diagnosis of cultivated land in Dongting Lake Plain from 2007 to 2017[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(2):178-187. (in Chinese)
- [11] 李政,何伟,潘洪义,等.基于熵权 TOPSIS 法与 ARIMA 模型的四川省耕地生态安全动态预测预警[J].水土保持研究,2018,25(3):217-223.  
LI Zheng, HE Wei, PAN Hongyi, et al. Dynamic prediction and early warning of farmland ecological security in Sichuan Province based on improved TOPSIS method and ARIMA model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(3):217-223. (in Chinese)
- [12] 刘宝涛,王鑫淼,刘帅,等.基于正态云模型的吉林省耕地生态安全诊断[J].地域研究与开发,2019,38(3):119-124,129.  
LIU Baotao, WANG Xinmiao, LIU Shuai, et al. Diagnosis on cultivated land ecological security in Jilin Province based on normal cloud model[J]. Areal Research and Development, 2019, 38(3):119-124,129. (in Chinese)
- [13] 王柏,张忠学,李芳花,等.基于改进双链量子遗传算法的投影寻踪调亏灌溉综合评价[J].农业工程学报,2012,28(2):84-89.  
WANG Bo, ZHANG Zhongxue, LI Fanghua, et al. Comprehensive evaluation of regulated deficit irrigation using projection pursuit model based on improved double chains quantum genetic algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(2):84-89. (in Chinese)