



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

从作物轮作角度评价华南典型赤红壤农区耕地质量空间差异

刘园, 蔡泽江, 余强毅, 吴文斌, 周清波

引用本文:

刘园, 蔡泽江, 余强毅, 等. 从作物轮作角度评价华南典型赤红壤农区耕地质量空间差异[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(6): 1051–1063.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0526>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

天空地一体耕地质量监测移动实验室集成设计

张飞扬, 胡月明, 谢英凯, 谢健文, 萧嘉明, 封宁, 周炼清, 史舟

农业资源与环境学报. 2021, 38(6): 1029–1038 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0577>

耕地质量和产能评价指标体系研究——以广西宾阳县为例

张英, 冯雪珂, 任少宝, 游小敏, 余晨

农业资源与环境学报. 2021, 38(6): 1039–1050 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0540>

县域耕地质量等别监测分区布点研究

谢英凯, 杨颢, 胡月明, 刘振华, 赵理

农业资源与环境学报. 2020, 37(6): 845–855 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0468>

华南地区县域耕地质量和产能评价研究——以广东吴川为例

戴文举, 王东杰, 卢瑛, 缙武龙, 文泰斌, 王璐, 陈飞香

农业资源与环境学报. 2019, 36(4): 419–430 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0221>

华北小麦玉米轮作区耕地地力等级划分及特征

薛彦东, 辛景树, 任意, 万广华, 张桂兰, 杨瑞让

农业资源与环境学报. 2015(6): 530–536 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0146>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘园, 蔡泽江, 余强毅, 等. 从作物轮作角度评价华南典型赤红壤农区耕地质量空间差异[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(6): 1051–1063.

LIU Y, CAI Z J, YU Q Y, et al. Spatial variation evaluation of cultivated land quality from the perspective of crop rotation for a typical lateritic red soil farming area in south China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(6): 1051–1063.



开放科学 OSID

从作物轮作角度评价华南典型赤红壤农区耕地质量空间差异

刘园¹, 蔡泽江², 余强毅^{1*}, 吴文斌¹, 周清波³

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/农业农村部农业遥感重点实验室, 北京 100081; 2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/湖南祁阳农田生态系统国家野外科学观测研究站, 湖南 祁阳 426182; 3. 中国农业科学院农业信息研究所, 北京 100081)

摘要:为从作物轮作角度分析华南典型赤红壤农区耕地质量空间差异, 针对华南典型赤红壤农区构建作物轮作系统遥感分类体系, 基于空间分析、文献支持、野外实地调查、农户访谈与专家知识, 建立不同作物轮作系统与耕地质量等级之间的关联关系; 基于 Sentinel-1 与 Sentinel-2 时间序列遥感数据、利用决策树制图方法, 开展作物轮作系统遥感制图, 并在不同空间尺度分析耕地质量空间差异与规律。结果表明, 作物轮作系统与耕地质量之间存在关联关系, 总体而言, 水田轮作系统由于化肥投入较低、对土壤干扰较小、长时间被水面覆盖, 不易引起土壤酸化等耕地质量问题, 耕地质量等级较高; 蔬菜、果园系统由于化肥投入较高, 耕地质量一般较低, 具体表现为土壤酸化、土壤重金属污染等问题。研究区蔬菜轮作系统比例最高, 其次为果园系统。研究区耕地质量总体一般, 主要为三等地, 呈现出明显的空间分异。本研究初步探明作物轮作与耕地质量的关联关系, 并将作物轮作遥感制图结果应用于耕地质量空间差异研究, 由于耕地质量特征较难直接通过遥感反演获取, 通过监测地表作物种植情况进而反演耕地质量具有理论可行性, 未来有必要深入解析作物轮作、地形地貌、气象水文等要素与耕地质量的关联关系, 构建大数据驱动的耕地质量时空差异评估技术体系, 支撑跨尺度耕地质量监测与评价研究。

关键词:赤红壤; 遥感; 谷歌地球引擎; 哨兵数据; 作物轮作; 耕地质量

中图分类号: TP79; S127; F301.21 文献标志码: A 文章编号: 2095-6819(2021)06-1051-13 doi: 10.13254/j.jare.2021.0526

Spatial variation evaluation of cultivated land quality from the perspective of crop rotation for a typical lateritic red soil farming area in south China

LIU Yuan¹, CAI Zejiang², YU Qiangyi^{1*}, WU Wenbin¹, ZHOU Qingbo³

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences / Key Laboratory of Agri-Informatics, Ministry of Agriculture Rural Affairs, Beijing 100081, China; 2. National Field Observation and Research Station of Farmland Ecosystem in Qiyang, Hunan Province / Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Qiyang 426182, China; 3. Agricultural Information Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Characterizing the spatial variation of cultivated land quality based on crop rotation pattern could provide a basis for improving regional cultivated land quality through optimizing crop rotation management. To this end, we constructed a crop rotation system classification for the typical lateritic red soil farming area in south China, and established the correlation between crop rotation systems and the cultivated land quality based on spatial analysis, literature review, field survey, farmer interview and expert knowledge. Then crop rotation systems were mapped with Sentinel-1 and Sentinel-2 time series remote sensing data and the decision tree algorithm, based on

收稿日期: 2021-08-16 录用日期: 2021-10-18

作者简介: 刘园(1993—), 男, 河北石家庄人, 博士研究生, 从事农业土地系统研究。E-mail: liuyuan05@caas.cn

*通信作者: 余强毅 E-mail: yuqiangyi@caas.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1901601); 中国农业科学院国际农业科学计划项目(CAAS-ZDRW202107)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(U1901601); International Science & Technology Innovation Program of Chinese Academy of Agricultural Sciences(CAAS-ZDRW202107)

<http://www.aed.org.cn>

which the spatial variation and pattern of cultivated land quality were analyzed at different scales. The results showed that there was a qualitative correlation between crop rotation systems and cultivated land quality. In general, the quality is generally higher in paddy rotation systems due to lower fertilizer input, less soil disturbance, and long-term water surface, while the quality was generally lower in vegetable and orchard systems due to higher fertilizer input, which caused soil acidification and soil heavy metal pollution. The highest proportion of vegetable rotation systems in the study area was followed by orchard systems. Therefore, the overall cultivated land quality is general, mainly characterized by the third class. Spatially, the cultivated land quality was higher in the north and lower in the south. Our study initially explored the correlation between crop rotation and cultivated land quality, and applied the remote sensing-based crop rotation pattern to the analysis of spatial variation in cultivated land quality. In the future, it is necessary to deeply analyze the correlation between crop rotation, topography, meteorology and hydrology and cultivated land quality, and further build a big data-driven technical system for assessing the spatial and temporal variations of cultivated land quality to support the cross-scale cultivated land quality monitoring and evaluation.

Keywords: lateritic red soil; remote sensing; Google Earth Engine; Sentinel data; crop rotation; cultivated land quality

耕地是人类赖以生存和发展的物质基础,对保障粮食与生态安全及可持续发展具有重要作用^[1]。耕地质量的优劣对粮食产能与生态系统健康的影响很大,我国耕地长时间高强度利用,耕地质量正在向着非健康、非生态的方向发展^[2]。例如,我国东北黑土地出现变薄、变瘦、变硬趋势,北方干旱半干旱耕地土壤肥力低、水土流失严重,南方红黄壤耕地土壤酸瘦、耕层浅薄^[3],这些问题给农业可持续发展和生态环境带来潜在风险。为此,维持与提升耕地质量成为我国新发展阶段耕地管理的紧要任务。科学掌握耕地质量情况是推进耕地质量提升的前提,耕地质量评价有助于探明耕地质量空间分布,然而耕地质量评价大多依靠土壤样本点数据空间插值,这种方法一般费时费力,且采样与空间插值过程易产生扰动。因此迫切需要探索新的耕地质量数据获取技术,满足实时、准确、大范围开展耕地质量评价的需求。

传统耕地质量评价一般根据指标体系,结合空间采样方法,将耕地质量评价结果空间插值至区域尺度^[4-5]。评价指标对评价结果至关重要,大量研究围绕指标选取进行了探索,丰富了耕地质量评价指标体系^[6-8]。较早的耕地质量评价研究侧重于耕地质量的自然属性,1976年,联合国粮农组织(FAO)公布的《土地评价纲要》,重点关注自然环境对土地适宜性的影响,如气候、地貌、土壤等。在耕地质量观演变与再认识中,耕地质量内涵不断扩充,评价指标体系日趋完善,由单一的自然条件指标发展到自然、社会经济和生态环境等综合指标。例如,ZHAO等^[7]为评价湖北山区耕地质量空间特征,选取土壤理化性质、养分状况、管理状况、健康状况和生态环境状况5个一级指标,以及相应的有机质、pH、总氮等28个二级指标。

我国《第三次全国国土调查耕地资源质量分类工作方案》建立了多层次的耕地资源质量分类指标体系,包括自然地理格局、地形条件、土壤条件、生态环境条件、作物熟制及耕地利用现状等。而马瑞明等^[8]以作物熟制为重心,构建了多层级指标的耕地质量评价体系,能够更客观地反映在特定资源禀赋条件下的耕地质量。随着遥感技术的迅速发展^[9],将卫星、无人机遥感影像数据应用于耕地质量评价,使得快速、准确开展大尺度耕地质量评价成为可能。基于遥感技术的耕地质量评价主要包括两大类,一种是直接利用遥感获取地学、土壤、环境等方面的评价指标^[10-11],进而计算耕地质量综合指数。例如,LIU等^[10]从Landsat、SPOT影像中提取农业土地利用、坡度等5个指标,并将指标纳入“压力-状态-响应”评价框架,实现县域耕地质量评价。这种方法虽然较为直观,但是由于耕地在裸土状态的时间窗口比较有限,直接利用遥感影像反演耕地质量存在一定局限。另一种是利用遥感影像获取植被特征,通过建立植被特征与耕地质量之间的关系,间接反演耕地质量^[12]。例如,马佳妮等^[12]识别水稻和玉米后,结合MODIS影像与气象站点数据,计算水稻和玉米净初级生产力的多年均值,以代表区域耕地质量情况。这种方法考虑了耕地植被特征,但已有研究大多根据植被生物量情况,建立其与耕地质量的关系,忽视实际作物类型与耕地利用方式的影响^[13],有可能造成研究结果无法科学解释。例如,大量施用化肥可能提高作物生物量与产量,然而这一过程在南方地区容易加快土壤酸化,反而导致耕地质量下降。

作物轮作是作物类型与耕地利用方式的综合,不同作物轮作系统对单季作物产量、土壤的理化与生物

性质等具有影响^[14-15],通过作物轮作认知耕地质量,为耕地质量评价提供了全新的视角与方法^[16]。然而,目前关于作物轮作的研究大多集中在地块尺度,反映作物轮作系统时空特征的研究较少,尤其是通过监测作物轮作情况以表征耕地质量的研究暂未见报道。本研究以作物轮作复杂、土壤酸化明显的华南典型赤红壤农区为研究对象,提出了以耕作制度为核心的耕地质量评价指标体系,并通过遥感监测方法实现耕作制图,结合土壤pH、阳离子交换能力(Cation exchange capacity, CEC)、有机碳含量(Soil organic carbon content, SOC)、全氮(N)等土壤属性,开展耕地质量综合评价,进而分析耕地质量空间差异与规律。本研究耕地质量评价侧重土壤质量层面,这也正是耕地质量评价的基础和核心。评估结果仅相对性地反映出耕地质量空间差异,而非呈现出耕地质量的绝对大小。研究旨在结合传统评价指标,以遥感数据与技术方法为基础,阐明作物轮作信息在耕地质量评价中的作用,为优化作物轮作管理、提升区域耕地质量提供依据。研究结果也可大数据驱动的耕地质量时空差异评估提供科学参考,对实时、准确、大范围开展耕地质量评价及耕地质量提升机制探索具有重要意义。

1 研究区域

增城区位于广东省中东部、广州市东部(23°04′~23°37′N, 113°29′E~113°59′E),面积约1 616.47 km²(图1)。研究区地处丘陵山地与珠江三角洲平原过渡地带,北部较高,南部较低,耕地地块破碎。增城位于我国典型赤红壤区,属亚热带海洋性季风气候,日照充足,雨量充沛,年平均气温和降水量分别为22.2℃和1 869 mm。气候条件优越,作物可全年生长,是一年三熟区。增城为粤港澳大湾区“菜篮子”工程的重要生产基地,也是国家供港蔬菜质量安全示范区、全国蔬菜生产先进县,因此蔬菜种植十分广泛。除蔬菜外,主要作物为水稻和果树,其中水稻为国家地理标志产品——“增城丝苗米”,是具有明显地方特色的籼稻优质稻米;果树则主要为荔枝、香蕉等,增城是全国著名的荔枝之乡。增城作物轮作情况较为复杂,为追求更高的经济效益,通常一年轮换种植3~6次蔬菜,蔬菜和水稻轮作也是常见的种植方式。增城耕地利用强度总体较高,土壤酸化、土壤重金属污染的风险较高^[17],从而导致耕地质量退化,威胁农产品安全。因此,探讨研究区作物轮作与耕地质量空间差异之间的关联关系,有助于从作物格局优化的角度科

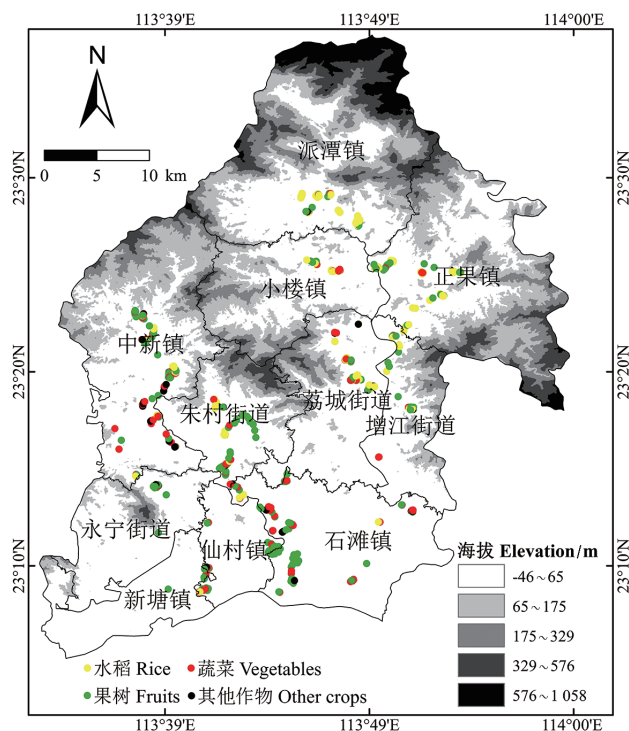


图1 增城区概况及样点分布

Figure 1 Location of the study area and samples distribution

学提出耕地质量调控策略,支撑服务粤港澳大湾区农业高质量发展目标。

2 数据与方法

2.1 数据来源

研究过程涉及的数据(表1)来源:

(1)2020年耕地数据来源于中国科学院空天信息创新研究院制作的全球30 m地表覆盖精细分类产品(GLC_FCS30—2020),该产品基于Landsat影像和全球地物图像波谱库得到,相比其他地表覆盖产品,分类体系更精细,总体分类精度更高^[18]。

(2)遥感影像数据来自欧洲航天局生产的Sentinel-1合成孔径雷达(Synthetic aperture radar, SAR)与Sentinel-2多光谱(MultiSpectral instrument, MSI)影像,空间分辨率均为10 m,时间分辨率则分别为12 d和5 d。在Google Earth Engine(GEE)平台^[19]中获取2019年12月—2020年12月的所有影像,对雷达影像进行黑边掩膜,利用改进的Lee滤波算法作降噪处理;对多光谱影像则进行云掩膜、缺失值填补,利用加权Whittaker函数拟合方法重构时序曲线^[20],随后计算增强型植被指数(Enhanced vegetation index, EVI)与

陆地水分指数(Land surface water index, LSWI)。

(3)地面样本来自于2020年9月开展的野外实地调查,共有738个样本,涉及水稻、蔬菜、果树的样本数量分别为223、212、189个。所有样本均经过目视检查,有明显误差的样本已被移除。

(4)主要作物的物候信息同样来自于田间实地调查,通过对农民进行访谈获得水稻及主要蔬菜与果树品种的大致种植和收获日期。

(5)土壤数据集为国际土壤参考信息中心制作的SoilGrids250m(SG)产品(<https://www.isric.org/explore/soilgrids>)^[21],该产品是利用机器学习方法,通过建立全球土壤剖面观测与土壤相关协变量之间关系的数字土壤制图方法所得,包含土壤pH、CEC、SOC、N等土壤理化性质指标,分辨率250 m。

2.2 研究方法

首先构建作物轮作系统遥感分类体系,基于空间分析、文献支持、野外实地调查、农户访谈与专家知识,建立不同作物轮作系统与耕地质量等级之间的关联关系;随后基于Sentinel-1/2时序遥感数据与决策树,开展作物轮作系统制图,以此为基础分析耕地质量空间差异与规律。

2.2.1 作物轮作系统

为实现基于作物轮作的耕地质量空间差异分析,结合实地和问卷调查的知识,提出一套科学、精细的作物轮作系统分类体系(表2)。将耕地定义为一种特定的土地,耕地是人类活动的产物,是人类开垦之后用于种植农作物(包括一年生作物和永久作物)的土地。因此,荔枝、香蕉等果树作为永久作物纳入耕地范围,参与作物轮作系统分类体系构建。在研究区内,果树的种植面积较大,且果树与水稻、蔬菜等作物的田间管理方式一般不同,对耕地质量的影响也会有明显差异,将果树纳入耕地范围对于体现耕地质量空间差异有重要意义。该体系由3个主系统和9个子系统构成,能够充分表征复杂的作物轮作现状,可高度概括作物轮作的特征。首先根据作物类型确定三个主系统:水田、蔬菜和果园系统,分别描述水稻、蔬菜与果树的轮作情况。进一步将水田系统划分为四个子系统:双季稻、单季稻、单季稻-蔬菜轮作和双季稻-蔬菜轮作。在蔬菜系统中,根据种植次数定义高强度和低强度蔬菜,随后按照作物多样性将高强度蔬菜划分为高多样性及低多样性蔬菜。对于果树系统,考虑到不同轮作周期果树的田间管理方式一般不同,

表1 主要数据来源及处理过程

Table 1 Main data sources and processing procedure

数据类型 Data types	时间范围 Time range	数据来源 Data sources	处理步骤 Processing procedure
耕地数据	2020	GLC_FCS30—2020 产品 ^[18]	在 ArcGIS 10.2 中进行栅格重分类,重采样为 10 m
Sentinel-1 SAR	2019 年 11 月 1 日— 2020 年 12 月 1 日	GEE 平台中的 Sentinel-1 GRD SAR 数据集	在 GEE 中完成黑边掩膜、斑噪去除
Sentinel-2 MSI		GEE 平台中的 Sentinel-2 MSI TOA 数据集	在 GEE 中完成云掩膜、缺失值填补、时间时序曲线重构,并计算 EVI、LSWI 等
地面样本	2020 年 9 月	田间实地调查	目视检查、人工修改
作物物候信息	2020 年		信息整理
土壤数据集		SoilGrids250m 产品 ^[21]	在 ArcGIS 10.2 中重采样为 10 m

表2 增城区作物轮作系统分类体系

Table 2 Crop rotation system classification in Zengcheng District

主系统 Planting system	作物轮作系统 Crop rotation system		系统描述 Description
水田系统	双季稻	双季稻	早稻和晚稻
		双季稻-蔬菜轮作	早稻、晚稻和冬季蔬菜(迟菜心、萝卜等)
	单季稻	单季稻	一年只种一季中稻
		单季稻-蔬菜轮作	单季中稻和蔬菜(除种水稻的时间外都可能种蔬菜)
蔬菜系统	高强度蔬菜	高多样性蔬菜	高强度蔬菜是指一年种两次以上蔬菜的菜地,而高多样性蔬菜是指种植蔬菜的多样性较高,比如叶菜类和瓜果类轮作
		低多样性蔬菜	高强度蔬菜下,种植蔬菜的多样性较低,比如叶菜类之间的轮作
	低强度蔬菜		低强度蔬菜是指一年只种一次蔬菜的菜地,不再区分高/低多样性蔬菜
果园系统	短周期果园		轮作周期较短的果树,如香蕉
	长周期果园		轮作周期较长的果树,如荔枝

对耕地质量的影响也会有明显差异,故根据轮作周期将其划分为长周期和短周期果园。

2.2.2 作物轮作系统遥感制图

基于决策树的流程框架,在GEE中结合Sentinel-1A与Sentinel-2A/B时间序列遥感影像、地面样本数据、作物物候信息等获得增城区2020年作物轮作系统分布图(图2)。首先进行耕地类型遥感制图,在此基础上识别作物轮作系统。为排除非耕地像元对制图精度的影响,利用GLC_FCS30—2020产品中的耕地图层对遥感影像进行掩膜。

(1)耕地类型识别

相比菜地和果园,水田的遥感识别特征较为明显,因此本研究首先识别水田分布,再区分菜地和果园。其中,水稻独有的灌水移栽期信息是其区别于其他作物类型的关键特征^[22-23]。研究区多云多雨,光学遥感影像信息提取受到一定影响,因此,本研究结合雷达影像^[24],参考比较成熟的方法体系^[25],分别利用Sentinel-1A与Sentinel-2A/B时间序列遥感影像提取

灌水移栽信号以表征水田分布,并将两者的结果合并。水田识别后,利用随机森林分类器,结合由Sentinel-2A/B序列影像提取的多作物特征,包括光谱、时相、物候和纹理特征,实现菜地和果园遥感制图。

(2)作物轮作系统识别

在耕地类型识别的基础上,识别作物轮作系统。对于水田,提取的灌水移栽信号频数即代表水稻种植次数,由此可分辨单季稻和双季稻。随后引入复种指数^[26],通过其与水稻种植次数的数量关系确定水田系统。当复种指数大于水稻种植次数时,认为有蔬菜参与水稻轮作,反之没有。对于蔬菜,结合复种指数和复种多样性指数识别子系统。复种指数为1的菜地为低强度蔬菜,大于1则为高强度蔬菜。高强度蔬菜中,利用复种多样性指数进一步区分高多样性和低多样性蔬菜。在此,提出复种多样性指数以在时间维度上衡量耕地的作物多样性。考虑到不同作物的差异可以由植被指数曲线的形态反映,对于每个作物,基于EVI提取三个典型的物候指数——振幅、最大值、生长

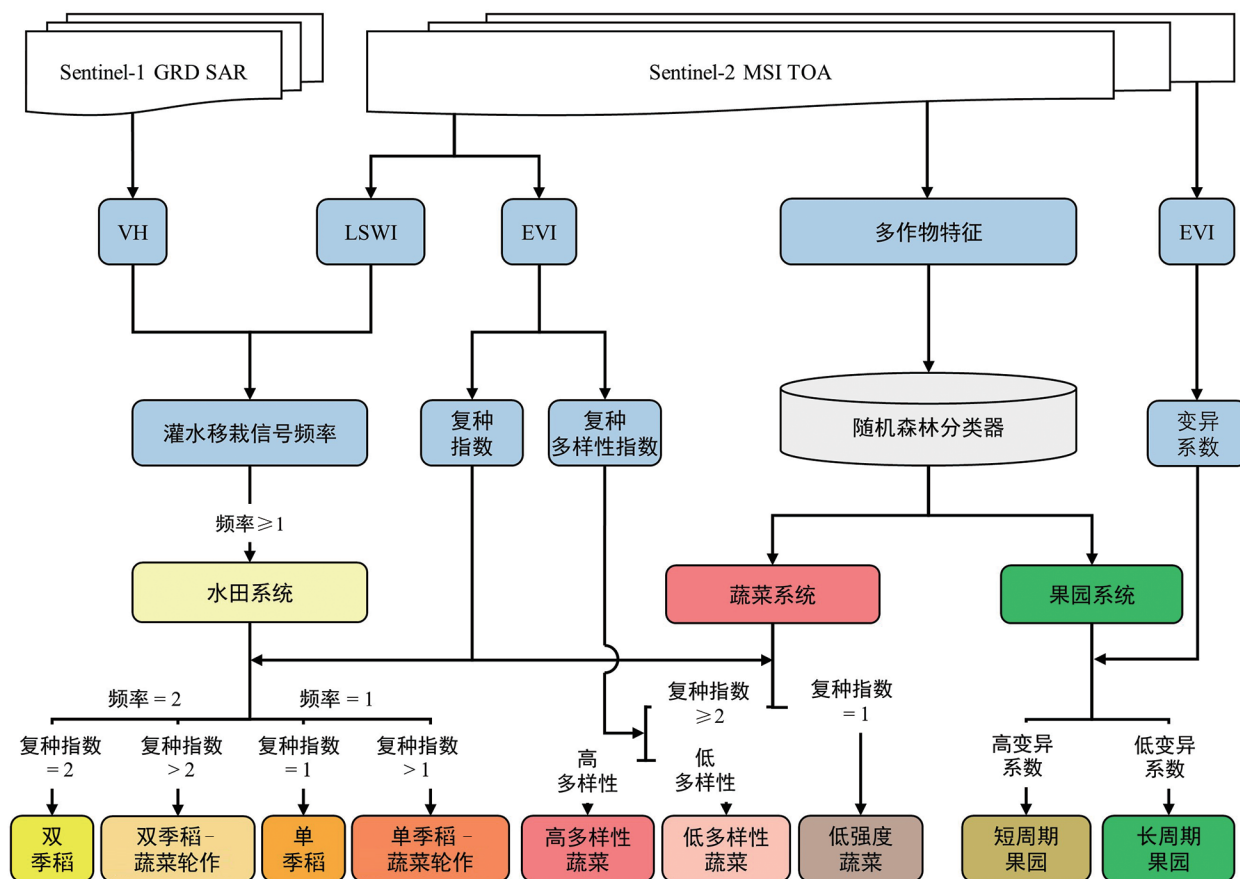


图2 作物轮作系统遥感制图流程框架

Figure 2 Flowchart of crop rotation system classification based on remote sensing

期长度代表其主要物候特征,分别对三个指数求变异系数,其平均值代表复种多样性指数,数值越大,多样性水平越高。对于果园,生长期长度不同的果树,EVI的波动程度明显不同,因此计算EVI的变异系数(Coefficient of variation, CV)以区分短周期果园和长周期果园,CV值较高表明果树生长期较短。

$$\text{复种多样性指数} = \left[\frac{S(\text{振幅}_i)}{M(\text{振幅}_i)} + \frac{S(\text{最大值}_i)}{M(\text{最大值}_i)} + \frac{S(\text{生长季长度}_i)}{M(\text{生长季长度}_i)} \right] / 3 \quad (1)$$

式中: i 代表不同生长季的作物; S 代表标准差; M 代表平均值;振幅代表EVI峰值与谷值的差值;最大值代表EVI峰值;生长季长度代表作物的生长期。

2.2.3 耕地质量空间差异分析

基于作物轮作系统分析耕地质量空间差异,需建立作物轮作系统与耕地质量等级之间的关联关系。为使关联结果更加科学,本研究结合定性与定量方法建立关联,总共分为三个层面。首先,设计专家打分表,写明不同作物轮作系统的定义及主要特征,并附上2020年增城区作物轮作系统分布图。请10位土壤学领域的专家学者对各个作物轮作系统的耕地质量进行评分,并给出明确的评分依据,分值标准为1~10分,分值越高代表相应系统下耕地质量越高,取所有专家评分的众数作为各个作物轮作系统的专家评分结果。考虑到研究区轮作系统的特殊性与复杂性,专家需要对研究区有一定的熟悉度,因此本次邀请的专家主要来自中国农业科学院、广东省农业科学院、华南农业大学。其次,基于Web of Science数据库,按照“作物轮作(Crop rotation)”“土壤(Soil)”“耕地(Farmland/cropland/cultivated land)”“环境(Environment)”等关键词搜索文献,梳理与本研究作物轮作系统相关的研究结论。由于区域和作物轮作的差异,此部分结果作为关联作物轮作系统与耕地质量等级的依据。最后,在ArcGIS 10.2平台中将作物轮作系统与土壤数据集作叠加分析,探索不同系统下土壤属性的差异,以定量反映耕地质量优劣。土壤数据集为精度与空间分辨率更高、空间更连续的SG产品,土壤属性则选用对土壤质量解释性较强的pH、CEC、SOC、N四个属性,深度为0~5 cm。由于作物轮作系统动态性较强,研究结果只反映近几年的作物情况,而土壤属性变化较慢,影响因素复杂多样。以某一年轮作分布与土壤属性叠加并不能直接代表作物轮作系统的耕地

质量,因此本部分结果同样仅作为调整专家评分结果依据。此外,在野外调查采样时进行了农户访谈,了解了作物轮作系统的总体特征及其对耕地质量的影响,这些内容也将纳入考虑。

以专家评分结果为基准,综合叠加分析、文献支持及野外调查与农户访谈内容,为作物轮作系统赋予分值,建立作物轮作系统与耕地质量等级之间的关联关系。在此基础之上,利用作物轮作系统分布图和空间分析方法,探索耕地质量的空间差异性。为更好地体现耕地质量空间差异,将增城区耕地质量等级由高至低依次划分为一至五等,并且分别在10 m像素,以0.5、1、1.5 km及2 km网格尺度分析耕地质量空间分布差异。研究本质上是对作物轮作系统的重分类,因此耕地质量分布与作物轮作分布基本一致。基于网格的耕地质量分布,可以体现网格单元内作物轮作系统组成的差别,对于理解耕地质量空间差异更有意义。不同网格尺度会导致不同的结果,为展现这种尺度效应,依据增城区耕地的破碎度及研究区的地域范围,分别选择0.5、1、1.5 km及2 km作为网格大小开展研究。当网格内耕地覆盖范围不足10%时,不再评估耕地质量等级,赋值为0。

3 结果与分析

3.1 作物轮作系统遥感制图结果

基于样本点及记录的作物轮作信息,评估作物轮作系统的总体分类精度(0.82),较高精度表明所提出的遥感制图方法可以在耕地破碎、云雨繁密区识别作物轮作系统。相比水田,蔬菜和果园系统具有较高精度。水田系统较低的精度主要源于复种指数误差,而当复种指数被低估时,有蔬菜参与轮作的容易被错分为没有蔬菜的水稻系统。在数量上,蔬菜系统种植面积最大,占比为43%,其次为蔬菜、水田系统,分别占37%、20%。水田系统以单季稻-蔬菜轮作为主,说明当地农民倾向于蔬菜-水稻轮作以追求更高的经济效益。蔬菜系统中,低强度蔬菜面积较小,而高强度蔬菜中低多样性蔬菜分布较广,反映出蔬菜生产强度高、多样性低的区域特点。在果园系统内,短周期果园的种植面积明显大于长周期果园。在空间上(图3),增城北部区域主要为水田和果园系统,南部则大面积分布着果园和蔬菜系统。其中,蔬菜系统分布呈现聚集性,主要分布在中部偏西南与东北方向以及研究区的东南部。

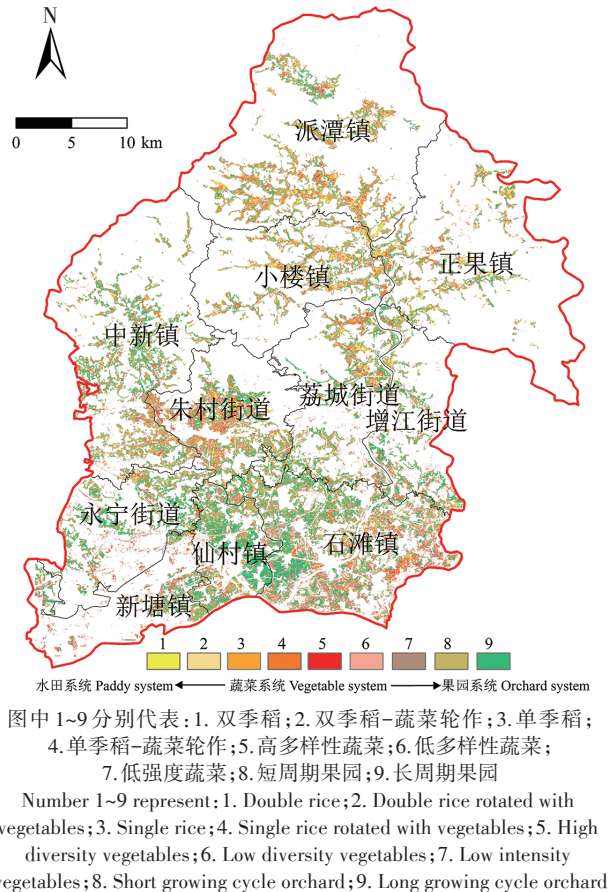


图3 2020年增城作物轮作系统空间分布
Figure 3 Spatial distribution of crop rotation system in Zengcheng District in 2020

3.2 耕地质量空间差异

表3为作物轮作与耕地质量相关文献搜索的主要结果,可以发现轮作系统对作物产量、土壤质量、农业环境等有重要影响。轮作系统与生物和非生物因素有关,如土壤微生物、管理措施,短周期轮作或单作作物的产量通常比长周期轮作低;更多样化的轮作系统可以帮助维持土壤微生物功能,对土壤有机质和土壤肥力产生积极影响;有蔬菜参与轮作的水田系统构成水旱轮作,则有助于提升土壤有机质含量。将增城区作物轮作系统与SG土壤数据集作叠加分析,结果表明不同作物轮作系统的土壤属性值有明显差异(表4)。对于pH、SOC、CEC三个土壤属性,均表现为水田>果园>蔬菜的规律,如水田、果园与蔬菜系统的SOC均值分别为35.0、34.3、32.5 g·kg⁻¹。对于N,水田系统的水平最低,果园最高,蔬菜则介于两者之间。水田系统中,单季稻系统的N含量远高于双季稻系统;蔬菜系统的组内差异不显著;果园系统内长周期果园的所有土壤属性值均大于短周期果园。

以专家评分结果为基准,综合叠加分析、文献支持及野外调查与农户访谈内容,为作物轮作系统赋予分值,建立作物轮作系统与耕地质量等级之间的关联关系。最终的耕地质量评价结果(表5)表明,水田系统下耕地质量最优,蔬菜系统最差,果园系统介于两者之间。水田、蔬菜与果园系统,作物结构及所需求

表3 作物轮作与耕地质量相关文献搜索的主要结果

Table 3 Main results of literature search on crop rotation and cultivated land quality

文献Reference	作物轮作Crop rotation	区域Region	年份Year	主要结论Main conclusions
BENNETT等 ^[27]	—	—	—	与长周期轮作或首次轮作的作物相比,短周期轮作或单作作物的产量通常会下降。替代种植和管理方式,如双季、间作、耕作,对于克服短周期轮作产生的一些负面影响可能会有价值
WRIGHT等 ^[28]	连作土豆、连作洋葱、土豆-土豆-洋葱-洋葱-土豆-土豆-洋葱-洋葱-土豆(传统土豆)、洋葱-洋葱-土豆-土豆-洋葱-洋葱-土豆-土豆-洋葱(传统洋葱)、土豆-洋葱-燕麦-卷心菜-土豆-洋葱-南瓜-洋葱-土豆(可持续土豆)、洋葱-土豆-燕麦-卷心菜-洋葱-土豆-卷心菜-土豆-洋葱(可持续洋葱)	新西兰	2004—2013	“可持续”轮作对产量和土壤质量具有积极效应,即每四个生长季种植一次土豆或洋葱,中间年份种植不同的作物(燕麦、花椰菜、卷心菜、南瓜)
HOU等 ^[29]	甜玉米-田菁-蔬菜 水稻-水稻-蔬菜	中国台湾	2014	轮作制度对土壤微生物群落有显著影响,而非施肥。无论施用有机肥、化肥还是复合肥,水旱轮作比旱地轮作更显著地提升了微生物多样性,对实现可持续农业有突出作用
TAVEIRA等 ^[30]	玉米-玉米-大豆-大豆-大豆-玉米-玉米、玉米-玉米-大豆-小麦/红苜蓿、大豆-冬小麦/红苜蓿-玉米-玉米	加拿大 安大略	2016—2019	与简单轮作相比,多样化轮作作物产量更高;为提高氮利用率,多样化轮作应减少氮肥施用,并考虑地下残留氮库及豆类作物的氮输入
LI等 ^[31]	水稻-油菜、水稻-小麦、水稻-蔬菜、水稻-休耕	中国湖北	2015—2018	相比施肥,轮作历史更好地解释了土壤多功能性、细菌物种丰富度和群落组成的变化,其中水稻-油菜轮作中的细菌多样性为土壤系统提供更多功能
LING等 ^[32]	水稻-休耕、水稻-油菜、水稻-小麦、双季稻、稻虾共作	中国湖北	2016—2017	双季稻表现出最高的碳足迹强度,轮作和共作系统可实现高净产出和低碳排放

表4 增城区作物轮作系统与土壤数据集叠加结果

Table 4 Overlaying results of crop rotation system and soil data in Zengcheng District

作物轮作系统 Crop rotation system	pH	土壤有机质 SOC/(g·kg ⁻¹)	阳离子交换能力 CEC/(cmol·kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen/(g·kg ⁻¹)
双季稻	5.54	35.26	16.55	3.50
双季稻-蔬菜轮作	5.46	35.02	16.24	3.47
单季稻	5.60	34.62	16.76	3.83
单季稻-蔬菜轮作	5.42	35.01	16.04	3.67
高多样性蔬菜	5.28	32.34	15.74	3.81
低多样性蔬菜	5.29	32.68	15.88	3.84
低强度蔬菜	5.21	32.37	15.52	3.78
短周期果园	5.32	34.10	15.57	3.81
长周期果园	5.36	34.45	15.87	3.97

表5 增城区作物轮作系统耕地质量评分结果

Table 5 Scores of cultivated land quality with reference to crop rotation system in Zengcheng District

作物轮作系统 Crop rotation system	评分 Score	主要评分依据 Scoring basis
单季稻-蔬菜轮作	9	双季稻系统的化肥投入较单季稻大,而单季稻下土壤受到的干扰低,对土壤负面影响较低,有助于地力恢复;与蔬菜轮作的系统可以构成水旱轮作,可能有助于提升土壤有机质含量
单季稻	8	
双季稻-蔬菜轮作	7	
双季稻	6	
长周期果园	6	低强度蔬菜下土壤受到的干扰低,化肥等投入少,对土壤负面影响较低
低强度蔬菜	5	
短周期果园	5	果园化肥需求量较大,长时间种植下会导致土壤酸化
高多样性蔬菜	3	高多样性可以帮助维持土壤微生物功能,对土壤有机质和肥力有积极影响
低多样性蔬菜	2	

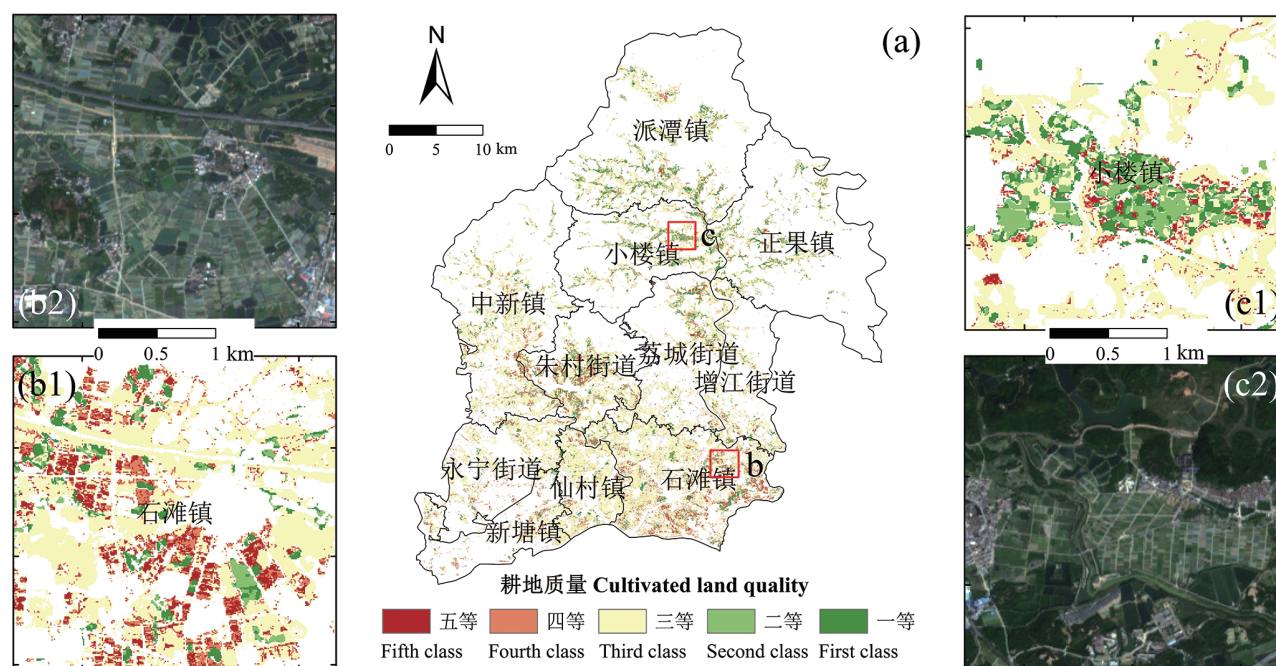
注:耕地质量评价标准:很好9~10分;较好7~8分;一般5~6分;较差3~4分;很差1~2分。

Notes: Cultivated land quality scoring criteria: Excellent 9~10 points; Good 7~8 points; Average 5~6 points; Poor 3~4 points; Very poor 1~2 points.

的生长环境有明显差异,如水稻要求一定时间的泡水,蔬菜生长需要特定次数的灌溉,因而不同作物轮作系统的土肥水管理方式截然不同。土壤物理结构、水分和氧化还原环境也随耕作管理发生变化,改变土壤微生物特性,以及相应的碳、氮等元素转化过程,影响土壤pH、SOC等土壤属性,进而影响耕地质量。相比水稻和果树,蔬菜生产的化肥投入量最高。为保证蔬菜快速生长,农民施用过量化学氮肥,而蔬菜的根系结构易造成养分流失,其中铵态氮硝化释放氢离子和硝态氮淋溶损失会引起土壤酸化,进而威胁耕地质量安全。果园的养分投入量也较大,易对土壤质量产生负面影响。而水田系统的化肥需求量低,长时间被水面覆盖,土壤硝化微生物数量和活性降低,因此水田较早地在很大程度上抑制土壤氢离子净释放,不易引起土壤酸化等耕地质量问题。双季稻系统的化肥投入较单季稻大,而单季稻下土壤受到的干扰低,对土壤负面影响较低,有助于地力恢复;水稻和蔬菜轮

作的系统可以构成水旱轮作,可能有助于提升土壤有机质含量。相比高强度蔬菜,低强度蔬菜下土壤受到的干扰低,化肥等投入量少,对土壤负面影响较低;高强度蔬菜中,高多样性蔬菜对土壤健康有积极影响。果园系统则依据叠加分析的结果,将长周期果园列于短周期果园之前。

根据增城区耕地质量评分结果(表5),分别将评分为9、7~8、5~6、3~4、2分的耕地归为一至五等。由图4可知,基于作物轮作系统的耕地质量评价,较好地体现出耕地质量的空间差异。耕地质量与作物轮作系统的空间分布直接相关,增城北部的耕地质量较高,南部较低,中部有明显的过渡带。而在蔬菜系统主要分布的区域,耕地质量也呈现为低值聚集区。相比传统耕地质量评价,该结果空间分辨率更高,而且对于通过优化轮作系统布局提升耕地质量具有现实意义。网格尺度更概括性地刻画出耕地质量的空间差异性,可视化效果明显(图5),有助于定位耕地质



b1、c1为典型区域b、c的耕地质量空间差异分布图,b2、c2为10 m空间分辨率的Sentinel-2 RGB遥感影像
The zoom-in views in Figure a for the two regions b and c are shown in Figure b1,c1 and the RGB image of Sentinel-2 annual composite with 10 m resolution are shown in Figures b2 and c2

图4 2020年增城区耕地质量空间差异

Figure 4 Distribution of cultivated land quality in Zengcheng District in 2020

量“热点”与“冷点”区,推动针对性政策实施。不同网格尺度下的耕地质量空间分布有明显不同,其中0.5 km网格尺度更适合该研究区,突出了耕地质量空间差异,并且较好地保持地物真实性和原始数据的精度。基于10 m像素结果对耕地质量等级进行统计(表6),发现研究区耕地质量整体一般,三等耕地面积占比超过75%,而等级为一等和二等的耕地面积仅占12.97%,与四等和五等耕地面积占比接近。乡镇的作物轮作系统构成存在差异,其耕地质量等级的分布情况截然不同。一等耕地面积占比超过10%的只有4个乡镇,其中北部的正果镇、派潭镇与小楼镇的水田与果园系统分布广泛,平均耕地质量较高,分值达到6分,且一等耕地覆盖面积远大于其他镇(街道),占比均为16%以上。而南部的新塘镇主要分布蔬菜系统,故耕地质量最差,一等耕地面积占比最低,仅为5.23%。

4 讨论

4.1 作物轮作系统分类体系及遥感制图

作物轮作系统是耕地质量评价的关键,本研究参

考野外实地调查、农户访谈以及专家知识提出华南典型赤红壤农区的作物轮作系统分类体系。该分类体系结合作物类型、作物次序、复种信息,将作物轮作分为3个主系统与9个子系统,充分体现作物轮作的区域特点。同时,为更好地使其支撑耕地质量评价,在建立分类体系时考虑不同轮作系统对耕地质量作用的差异性,选择复种指数、多样性等对耕地质量有显著影响的指标作为主要划分依据。考虑到果园田间管理方式独特,对耕地质量的影响明显不同于水田和蔬菜系统,因此尽管果树属于年际间轮作,仍将其纳入作物轮作系统。其他作物,如花生和玉米,由于种植面积较小(占比不足5%),没有直接体现在作物轮作系统分类体系中。

研究区云雨繁密、地块破碎,故选择时空分辨率均较高的Sentinel系列卫星作为遥感数据源。Sentinel-1雷达影像的加入,可进一步降低云雨对水田识别的影响。依据上述分类体系,基于决策树制图法,引用不同的遥感指标或特征有次序地实现轮作系统制图。其中,创新性地提出复种多样性指数,以表征作物轮作多样性。关于制图误差,水田与蔬菜系统取

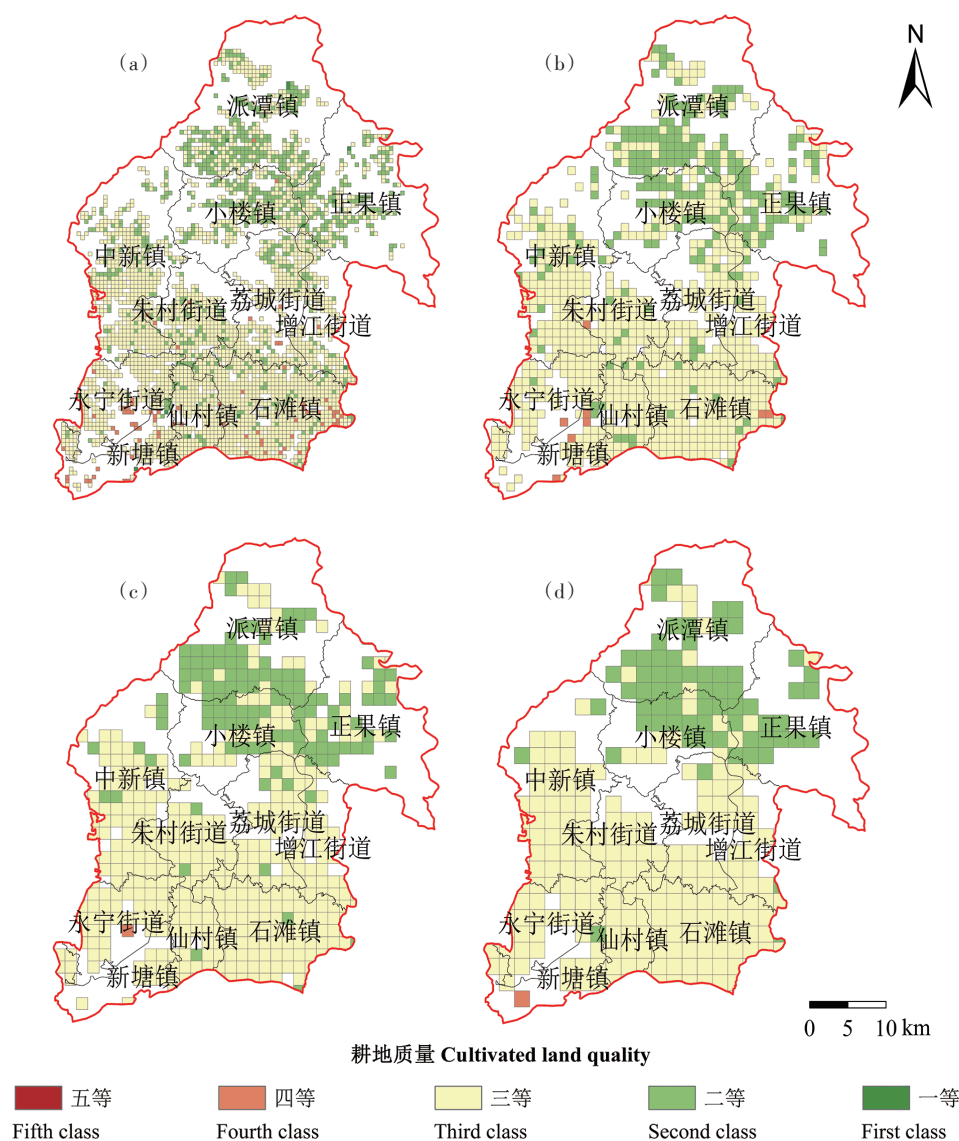


图 a、b、c、d 分别为基于 0.5、1、1.5、2 km 网格分布图
Distribution of cultivated land quality based on the grids of 0.5、1、1.5、2 km

图 5 基于网格的 2020 年增城区耕地质量空间差异

Figure 5 Spatial distribution of cultivated land quality in Zengcheng District in 2020 based on the grids

决于复种指数的准确性,复种多样性指数算法的合理性也显著影响蔬菜系统精度,果园系统误差则主要来自监督分类过程。为有效提升作物轮作系统制图精度,如何在云雨繁密、地块破碎区更精确地获取复种指数将是重点。光学与雷达的深度协同及多分辨率光学影像的融合具有理论可行性,更科学、完善的识别算法也是一种选择。对于复种多样性指数,未来需要探索不同物候指数与作物多样性的关联,进而完善指数算法。

4.2 基于作物轮作的耕地质量空间差异分析

本研究表明,通过监测地表作物轮作情况,进而

反演耕地质量具备可行性,评价结果较好地体现出耕地质量的空间差异。在建立作物轮作与耕地质量的关联时,不仅结合野外实地调查、农户访谈以及专家知识,还纳入文献知识与定量分析,结果可信度较高。为进一步降低主观性,需要更多熟悉区域实际的专家学者参与评分,以及融合田间试验实证数据或模型模拟定量数据。耕地质量是自然、社会、经济与技术进步综合影响的结果,其内涵包含多个层面,如土壤质量、管理质量、空间质量等。作物轮作系统的区别在于轮作作物的根系结构及相应的田间管理方式,通过改变土壤物理、化学和生物性质,对土壤质量产生不

表6 增城区作物轮作系统耕地质量统计

Table 6 Statistics of cultivated land quality with reference to crop rotation system in Zengcheng District

区域 Region	平均分 Average score	面积占比 Area proportion/%				
		一等 First class	二等 Second class	三等 Third class	四等 Fourth class	五等 Fifth class
派潭镇	6.18	18.67	4.39	70.20	3.28	3.46
正果镇	6.14	19.76	6.66	66.17	3.47	3.94
小楼镇	6.07	16.73	7.27	67.83	3.87	4.31
荔城街道	5.57	8.69	3.53	76.66	5.06	6.06
中新镇	5.54	7.10	1.69	81.03	4.43	5.75
朱村街道	5.52	10.99	3.80	68.61	6.99	9.60
增江街道	5.49	7.34	2.30	80.64	4.06	5.65
仙村镇	5.32	4.04	0.69	86.96	3.52	4.79
永宁街道	5.28	4.27	0.68	83.94	5.56	5.55
石滩镇	5.21	6.84	2.11	73.90	6.43	10.72
新塘镇	5.11	5.23	0.99	75.37	8.67	9.74
增城区	5.58	9.94	3.03	75.23	5.05	6.74

同的影响,驱动耕地质量分异。因此,本研究的耕地质量评价侧重土壤质量,这也正是耕地质量评价的基础和核心。而且需要说明的是,研究结果仅相对性地反映出耕地质量空间差异,而非呈现出耕地质量的绝对优劣。

2014年起,农业农村部定期发布《全国耕地质量等级情况公报》,依据《耕地质量等级》(GB/T 33469—2016)标准,评估并公布全国及不同区域耕地质量现状,并针对耕地土壤障碍因素,提出耕地质量建设的对策建议,指导各地因地制宜加强耕地质量建设。此外,《农用地质量分等规程》(GB/T 28407—2012)也对耕地等别划分提出详细的技术流程,在全国范围内进行农用地质量综合评定,以促进土地整理、耕地占补平衡等工作更好地服务于耕地质量建设和产能提升目标。本研究的目的是与耕地质量等级调查和农用地质量分等不同,因此所提及的耕地等级的含义也不同。其中,在全国耕地质量等级评价中,依据构成土地质量稳定的自然条件和经济条件选取了立地条件、剖面性状、耕层土壤理化性状、养分状况、土壤健康状况和土壤管理等方面指标对耕地质量进行综合评价,完成耕地质量等级划分;农用地质量分等则侧重于以农用地生产能力高低来衡量农用地质量的好坏,确定农用地自然等、经济等与利用等,进而划分质量等别。它们都是对耕地质量的直接描述,而本研究通过关注耕地利用方式,建立其与耕地质量之间的关联关系,与前两者不具备直接可比性。然而,大量研究表明,土壤理化性状存在特定的时空差异规律,且受耕地利用类型与利用方式的影响较大。未来有必要进一步

深入研究耕地类型、作物类型、种植强度、轮作方式、地形地貌、气象水文等要素与耕地质量的关联关系,同时参考全国耕地质量等级评价的指标体系,构建大数据驱动的耕地质量时空差异评估技术体系,支撑跨尺度耕地质量监测、评价与提升机制研究。

增城区为粤港澳大湾区“菜篮子”工程的重要生产基地,也是国家供港蔬菜质量安全示范区、全国蔬菜生产先进县,同时也是“增城丝苗米”的产地、“荔枝之乡”,保障区域农产品质量安全极为关键。随着社会经济发展和种植结构调整,蔬菜、果树等化学品投入量较高的经济作物种植区域逐渐扩张,水稻种植面积明显缩减,作物轮作系统相应地发生变化。在这种变化下,增城区耕地利用强度不断增强,土壤养分下降、土壤酸化、土壤重金属污染等问题日益突出,导致耕地质量退化,危害农产品质量安全。探讨研究区作物轮作与耕地质量空间差异之间的关联关系,有助于从作物轮作格局优化的角度科学提出耕地质量调控策略,支撑服务粤港澳大湾区农业高质量发展目标。作物轮作空间格局调整与优化也有助于构建具有中国特色的绿色种植制度,推进《“十四五”全国农业绿色发展规划》的实施。研究结果也可为大数据驱动的耕地质量时空差异评估提供科学参考,对实时、准确、大范围开展耕地质量评价及耕地质量提升机制探索具有重要意义。

5 结论

(1)提出了基于决策树的作物轮作系统遥感制图

方法,较好地识别出耕地破碎、云雨繁密区的作物轮作系统,为遥感技术应用于复杂耕作制度空间识别提供参考依据。

(2)区域耕地质量呈现出明显的空间分异,表明从作物轮作视角评价耕地质量空间差异具备理论可行性与技术合理性,对于传统耕地质量评价的进一步发展具有显著意义。

(3)耕地质量不仅受作物轮作影响,还取决于地形地貌、气象水文、田间管理等因素,未来有必要构建大数据驱动的耕地质量时空差异评估技术体系,支撑跨尺度耕地质量监测与评价研究。

参考文献:

- [1] YU Q Y, YOU L Z, WOOD-SICHTA U, et al. A cultivated planet in 2010 - Part 2: The global gridded agricultural-production maps[J]. *Earth System Science Data*, 2020, 12, 3545-3572.
- [2] 赵其国,周生路,吴绍华,等. 中国耕地资源变化及其可持续利用与保护对策[J]. *土壤学报*, 2006, 43(4):662-672. ZHAO Q G, ZHOU S L, WU S H, et al. Cultivated land resources and strategies for its sustainable utilization and protection in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(4):662-672.
- [3] 鲁艳红,廖育林,聂军. 我国南方红壤酸化问题及改良修复技术研究进展[J]. *湖南农业科学*, 2015(3):148-151. LU Y H, LIAO Y L, NIE J, et al. Status of red soil acidification and its amelioration technologies in south China[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2015(3):148-151.
- [4] 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. SHEN R F, CHEN M J, KONG X B, et al. Concept and evaluation of quality of arable land and strategies for its management[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(6):1210-1217.
- [5] 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. FU G Z, BAI W Q. Advances and prospects of evaluating cultivated land quality[J]. *Resources Science*, 2015, 37(2):226-236.
- [6] 杜国明,刘彦随,于凤荣,等. 耕地质量观的演变与再认识[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(14):243-249. DU G M, LIU Y S, YU F R, et al. Evolution of concepts of cultivated land quality and recognition[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(14):243-249.
- [7] ZHAO C, ZHOU Y, JIANG J H, et al. Spatial characteristics of cultivated land quality accounting for ecological environmental condition: A case study in hilly area of northern Hubei Province, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 774:145765.
- [8] 马瑞明,马仁会,韩冬梅,等. 基于多层次指标的省域耕地质量评价体系构建[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(16):249-257. MA R M, MA R H, HAN D M, et al. Construction of cultivated land quality evaluation system in provincial level based on multilevel indicators[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(16):249-257.
- [9] BEGUE A, DAMIEN A, BEATRIZ B, et al. Remote sensing and cropping practices: A review[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(1):99.
- [10] LIU Y S, ZHANG Y Y, GUO L Y. Towards realistic assessment of cultivated land quality in an ecologically fragile environment: A satellite imagery-based approach[J]. *Applied Geography*, 2010, 30(2):271-281.
- [11] 欧阳玲,王宗明,贾明明,等. 基于遥感的吉林省中西部耕地数量和质量空间格局变化分析[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(13):234-242. OUYANG L, WANG Z M, JIA M M, et al. Spatial pattern analysis on quantity and quality of cultivated land in mid-west Jilin Province based on remote sensing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(13):234-242.
- [12] 马佳妮,张超,吕雅慧,等. 基于长时间序列遥感数据反演NPP的耕地质量评价[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(1):202-208. MA J N, ZHANG C, LÜ Y H, et al. Land quality evaluation based on inversion of NPP based on long term sequence remote sensing data[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(1):202-208.
- [13] SMITH P, HOUSE J I, BUSTAMANTE M, et al. Global change pressures on soils from land use and management[J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(3):1008-1028.
- [14] BULLOCK D G. Crop rotation: Critical reviews in plant sciences, 1992, 11:309-326.
- [15] MAN M, WAGNER-RIDDLE C, DUNFIELD K E, et al. Long-term crop rotation and different tillage practices alter soil organic matter composition and degradation[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 209:104960.
- [16] YANG L, SONG M, ZHU A X, et al. Predicting soil organic carbon content in croplands using crop rotation and Fourier transform decomposed variables[J]. *Geoderma*, 2019, 340:289-302.
- [17] 杨萍如,刘腾辉. 广东赤红壤的特征及其开发利用[J]. *自然资源学报*, 1994, 9(2):112-122. YANG P R, LIU T H. Characteristics of lateritic red earth in Guangdong Province and its exploitation and utilization[J]. *Journal of Natural Resources*, 1994, 9(2):112-122.
- [18] ZHANG X, LIU L Y, CHEN X D, et al. GLC_FCS30: Global land-cover product with fine classification system at 30 m using time-series Landsat imagery[J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13:2753-2776.
- [19] GORELICK N, HANCHER M, DIXON M, et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 202:18-27.
- [20] KONG D D, ZHANG Y Q, GU X H, et al. A robust method for reconstructing global MODIS EVI time series on the Google Earth Engine [J]. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019, 155:13-24.
- [21] HENGL T, MENDES J J, HEUVELINK G B M, et al. SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning[J]. *PLoS ONE*, 2017, 12(2):e0169748.
- [22] DONG J W, XIAO X M. Evolution of regional to global paddy rice mapping methods: A review[J]. *Journal of Photogrammetry and Re-*

- remote Sensing*, 2016, 119:214–227.
- [23] ZHANG P F, LI S H, HE Z, et al. Collaborative mapping rice planting areas using multisource remote sensing data[C]. 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, 2021, 5969–5972.
- [24] ZHAN P, ZHU W Q, LI N. An automated rice mapping method based on flooding signals in synthetic aperture radar time series[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 252:112112.
- [25] XIAO X M, BOLES S, FROLKING S, et al. Observation of flooding and rice transplanting of paddy rice fields at the site to landscape scales in China using VEGETATION sensor data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23, 15:3009–3022.
- [26] XIANG M T, YU Q Y, WU W B. From multiple cropping index to multiple cropping frequency: Observing cropland use intensity at a finer scale[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 101:892–903.
- [27] BENNETT A J, BENDING G D, CHANDLER D, et al. Meeting the demand for crop production: The challenge of yield decline in crops grown in short rotations[J]. *Biological Reviews*, 2012, 87(1):52–71.
- [28] WRIGHT P J, FALLOON R E, HEDDERLEY D. A long-term vegetable crop rotation study to determine effects on soil microbial communities and soilborne diseases of potato and onion[J]. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 2017, 45, 1:29–54.
- [29] HOU P F, CHIEN C H, CHIANG-HSIEH Y F, et al. Paddy-upland rotation for sustainable agriculture with regards to diverse soil microbial community[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8:7966.
- [30] TAVEIRA C J, FARRELL R E, WAGNER-RIDDLE C, et al. Tracing crop residue N into subsequent crops: Insight from long-term crop rotations that vary in diversity[J]. *Field Crops Research*, 2020, 255:107904.
- [31] LI M H, GUO J J, REN T, et al. Crop rotation history constrains soil biodiversity and multifunctionality relationships[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2021, 319:107550.
- [32] LING L, SHUAI Y, XU Y, et al. Comparing rice production systems in China: Economic output and carbon footprint[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 791:147890.