



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860,CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目： 基于时序 Sentinel-2 影像物候特征的江汉平原耕地非粮化监测
作者： 陶建斌，赵睿一，王松，张洪艳
DOI： 10.13203/j.whugis20230020
收稿日期： 2023-01-13
网络首发日期： 2023-05-09
引用格式： 陶建斌，赵睿一，王松，张洪艳. 基于时序 Sentinel-2 影像物候特征的江汉平原耕地非粮化监测[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版).
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20230020>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20230020

引用格式：陶建斌，赵睿一，王松，等. 基于时序 Sentinel-2 影像物候特征的江汉平原耕地非粮化监测[J]. 武汉大学学报（信息科学版），2023, DOI:10.13203/J.whugis20230020

Citation: TAO Jianbin, ZHAO Ruiyi, WANG Song, et al. Monitoring Non-grain Use of Croplands on the Jiangnan Plain Based on Sentinel-2 Vegetation Phenology [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, DOI:10.13203/J.whugis20230020

基于时序 Sentinel-2 影像物候特征的江汉平原耕地非粮化监测*

陶建斌¹ 赵睿一¹ 王松¹ 张洪艳^{2*}

1 地理过程分析与模拟湖北省重点实验室/华中师范大学城市与环境科学学院，湖北 武汉，430079

2 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室 武汉，湖北 武汉，430079

摘要：利用遥感技术对耕地“非粮化”现象进行监测对于维护国家粮食安全、助力乡村振兴具有重要的现实意义。利用时间序列 Sentinel-2 遥感影像，在分析不同种植类型物候特征的基础上，选择若干个关键物候期来概括各生长阶段的物候特征，得到同种植类型的相似性物候特征及不同种植类型的差异性物候特征。基于“由简及繁、分层分类”的思路，构建耕地“非粮化”提取模型。在此基础上提取江汉平原潜在“非粮化”（含“非食物化”）区域，包括蔬菜、苗木或撂荒、坑塘养殖等。提取结果总体精度达到 92.69%，Kappa 系数为 0.89。实验表明基于物候特征挖掘和分层分类的方法可以进行区域尺度的非粮化监测。该方法在一定程度上可为耕地“非粮化”监测提供有效的技术手段，为进行农田利用方式监测、制定农业政策提供基础数据和科学依据。

关键词：Sentinel-2 遥感影像；物候特征；非粮化；江汉平原

中图分类号：P237

文献标志码：A

Monitoring Non-grain Use of Croplands on the Jiangnan Plain Based on Sentinel-2 Vegetation Phenology

TAO Jianbin¹ ZHAO Ruiyi¹ WANG Song¹ ZHANG Hongyan²

1 Key Laboratory for Geographical Process Analysis and Simulation / School of Urban and Environmental Sciences, Central China Normal University, Wuhan 430079, China

2 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Objectives: Monitoring the "non-grain" use of cropland using remote sensing technology is of great significance for national food security and rural revitalization. **Methods:** Through analyzing the phenology of different crop patterns by using time series Sentinel-2 remote sensing images, several key phenological stages were selected to summarize the phenological characteristics of each stage, and the phenology similarity of the same crop pattern and the phenology difference of different crop pattern were obtained. A model was built to extract the non-grain use of cropland on the Jiangnan Plain, including vegetables planting, abandoned land or trees planting and aquaculture pond, etc. **Results:** The method realized the mapping of non-grain use of cropland on the Jiangnan Plain successfully by using hierarchical classification method according to the rule of "from simple to complex". The overall accuracy of the results is 92.69%, and the Kappa coefficient is 0.89. **Conclusions:** The experiments

收稿日期：2023-01-13

项目资助：国家自然科学基金面上项目(41971371)；国家重点研发计划(2022YFB3903504)；大学生创新创业训练计划项目“融合时序 Landsat-8 和 Sentinel-2 影像的江汉平原耕地非粮化监测”。

第一作者：陶建斌，博士，副教授，主要从事农业遥感、遥感影像的地学应用方面的研究。

taojb@mail.ccnu.edu.cn

通讯作者：张洪艳，博士，教授。zhanghongyan@whu.edu.cn

demonstrated that the method based on time-series Sentinel-2 remote sensing images and crop phenology can be used to monitor non-grain use of cropland at regional scale. The proposed method can provide effective technology for monitoring the non-grain use of cropland, and provide basic data for agricultural departments to formulate agricultural policies.

Keywords: Sentinel-2 remote sensing images; crop phenology; non-grain use of croplands; the Jiangnan Plain

耕地资源是保障国家粮食安全的基础性资源,耕地资源的合理利用是事关国家粮食安全的重大战略问题。近年来,我国通过优化农业结构、合理规划农业生产布局等措施,有力保障了国家粮食安全。但由于地方政府发展经济和农户谋求收益两方面因素的影响,部分地区出现了耕地“非粮化”和“非食物化”的现象。据调查,截止2020年,华中地区耕地“非粮化”率已达到34%^[1]。若任由耕地向此方向发展,必将严重威胁到我国粮食安全。2020年《国务院办公厅关于防止耕地“非粮化”稳定粮食生产的意见》明确指出应当防止耕地“非粮化”。2021年中央一号文件《中共中央国务院关于全面推进乡村振兴加快农业农村现代化的意见》再次强调了要坚决防止耕地“非粮化”。因此,实现耕地非粮化的高效、精准监测,可为制定科学的农业政策提供依据,同时对于防止“非粮化”过度无序扩张、守住国家粮食安全的底线具有重要的现实意义。

目前,耕地“非粮化”研究主要集中在“非粮化”现象的时空分布、影响因素和形成机制等方面^[2-10]。在耕地“非粮化”的测算上,大多通过统计数据、调研数据等汇总得到。耕地非粮化时空分布的分析都是在行政区尺度上进行,缺乏非粮化分布的空间细节。遥感技术是发展数字农业、全面推进乡村振兴战略的突破口。遥感技术与农业深度融合,可对永久基本农田实行动态监测。然而,目前这种监测主要是对作物类型和复种、轮作等利用方式进行监测。利用遥感技术进行耕地“非粮化”监测的研究还处于起步阶段,现阶段存在遥感技术支撑不够的问题^[11]。在研究方法上,已有研究主要利用目视解译方法^[10,12]、基于光谱特征的机器学习方法^[12-13]等进行提取,未能有效利用各种种植类型的物候特征的差异,并抽取作物关键物候期的物候特征进行建模。机器学习方法高度依赖样本,训练样本的数量和质量对提取精度影响很大。在“非粮化”类型上,现有研究多关注耕地的利用方式变为苗木、草坪、坑塘等类型,而忽略了蔬菜种植。在研究尺度上,已有研究多局限为县级(或以下)单元,未能充分发挥遥感技术在大尺度上的观测优势,无法满足大范围监测的应用需求。

利用卫星遥感影像进行耕地“非粮化”监测存在几个方面的挑战:一是耕地系统的复杂性,如各种形式的复种、轮作、套种等,使得遥感影像上“异物同谱”现象更为突出;二是耕地上的部分非粮化现象(如种植苗木等)与天然植被的相似性较高而难以区分。耕地非粮化监测需要新的思路、新的方法,对各种种植类型的物候特征进行挖掘。作物物候特征目前较多地用于进行作物制图^[14-16],用于非粮化监测是否可行,尚待验证。

有鉴于此,本文提出了利用时间序列遥感数据进行江汉平原非粮化监测的方法。在分析不同作物物候特征的基础上,根据不同种植类型的时间序列曲线的差异,构建耕地“非粮化”监测的信息提取模型,采用“由简及繁、分层分类”的思路获取主要“非粮化”类型如蔬菜种植、挖塘养殖、苗木或撂荒等的空间分布信息,并分析其空间分布特征。本文的研究将为耕地“非粮化”监测提供有效的技术手段,并为农业部门进行耕地利用方式监测、制定农业政策提供基础数据支撑。

1 研究区及数据

江汉平原位于湖北省中南部,西起宜昌枝江,东迄武汉,北自钟祥,南与洞庭湖平原相连,面积约4.6万km²。江汉平原是长江中游平原的重要组成部分,平均海拔27m,地形平

缓，耕地资源集中，水热条件良好。区域总耕地面积 2 400 余万亩，约占湖北省耕地面积的 30%；2019 年区域粮食总产量 950 余万吨，占湖北省粮食总产量的 35%，是我国重要的粮食基地之一。

江汉平原的主要种植类型有六种。第一种是冬油菜或冬小麦与水稻轮作，或者冬小麦与黄豆轮作，前后茬作物在 5 月下旬进行轮作，本研究简称之为春夏双季。第二种在夏季种植一季水稻，简称为单季。第三种种植类型是玉米与黄豆轮作，或种植双季稻，前后茬作物在 7 月下旬进行轮作，本研究简称之为夏秋双季。第四种类型在春夏季种植黄豆等粮食作物，秋冬种植各类蔬菜，本研究称为作物+蔬菜。第五种在耕地范围内挖塘养殖鱼虾等水产品，简称为坑塘养殖。第六种植植苗木、药材、草坪等，或耕地撂荒，简称为苗木或撂荒。

本研究使用欧洲航天局提供的 Sentinel-2 Level L2A 产品数据。Sentinel-2 卫星数据较好地兼顾了空间分辨率（10 m）、光谱分辨率（13 个波段）以及时间分辨率（5 天），在作物制图方面得到了广泛的应用^[17-20]，在农情监测中具有较大的潜力。经过影像去云、波段运算等数据预处理，得到研究区 2019—2021 年的时间序列归一化植被指数（Normalized Difference Vegetation Index，NDVI）栅格数据集。使用 2020 年 GlobalLand30 土地利用数据 (www.globallandcover.com) 进行掩膜得到耕地分布。本研究基于谷歌地球引擎（Google Earth Engine，GEE）平台完成上述数据预处理工作。GEE 是由谷歌云计算驱动的提供全球尺度地理空间信息数据及数据处理服务的平台，具有存档数据时间跨度长、运行稳定、计算效率高、使用成本低等优点^[21-22]。

地面样本数据采集时间为 2021 年 4 月 13—15 日和 7 月 13—15 日，调查内容包括江汉平原范围内仙桃、荆州、钟祥、汉川、天门等县市的耕地非粮化现象及其种植类型。其中，汉川市杨林沟镇、天门市张港镇等地大片种植黄豆；荆州市方家弓附近及钟祥市陈营村、檀木昌附近存在耕地大面积种植蔬菜的现象；荆州市长湖和仙桃市汉江两岸存在挖塘养殖现象。调研过程中采集的样本点的地理位置如图 1 所示。本文采用的县级行政区划数据来源于国家基础地理信息中心 (<https://www.webmap.cn/main.do?method=index>)，土地覆盖类型数据来源于 2020 年 GLC30 全球地表覆盖数据，样本数据来源于实地调研采样。基于调研样本，利用谷歌平台提供的高清卫星影像进行目视解译，进行样本的增扩，得到六种主要种植类型（各类样本数量如表 1 所示），用于后续物候期的确定及提取结果的精度评价。

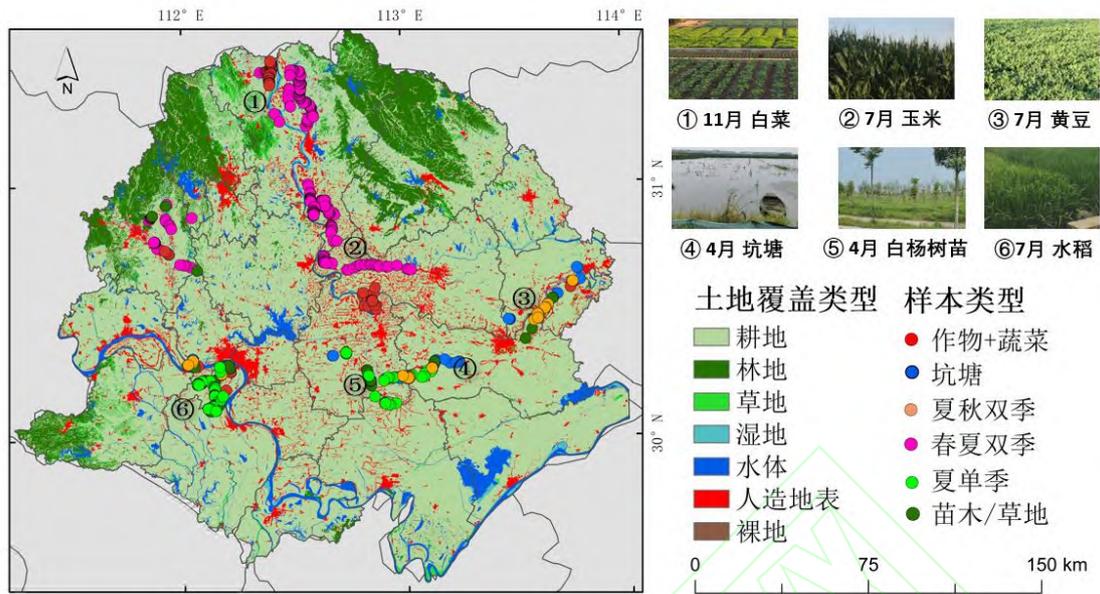


图 1 研究区主要土地覆盖类型和调研样点分布

Fig.1 Major land-cover types and sample points in the study area

表 1 各类种植类型样本数量

Tab.1 The samples for different crop patterns

样本类别	春夏双季	单季	夏秋双季	作物+蔬菜	苗木或撂荒	坑塘养殖
样本数量	7 783	7 141	7 130	7 972	7 210	6 423

2 研究方法

本文根据不同种植类型的物候差异,抽取能扩大不同种植类型可分性的关键物候期特征,构建分层分类的“非粮化”提取模型。

2.1 主要种植类型的物候期

江汉平原主要种植类型都具有其相对稳定的物候期(表 2)。其中春夏双季种植模式在十月底播种小麦或油菜,越冬后在来年 3 月返青,进入快速生长期,至 5 月下旬成熟收获;5 月底 6 月初开始种植第二季作物水稻或黄豆,第二季生长期为 3 个月左右,在 9 月完成收获。单季种植模式以单季稻为主,在 5 月上旬播种育秧,7 月底八月初孕穗、抽穗,9 月底 10 月初完成收获。夏秋双季种植模式中,玉米与黄豆轮作模式中,春季种植玉米,7 月底完成玉米的收获,之后播种黄豆,10 月完成黄豆的收割。双季稻包括早稻和晚稻两季,早稻 4 月中下旬插秧,7 月中下旬收割早稻,然后立即种植晚稻秧苗,农历立秋前插种完毕,10 月收割晚稻。作物+蔬菜种植模式在春夏季种植粮食作物,粮食作物收获后,第二季种植蔬菜,蔬菜大致在 10 月至 12 月成熟并采摘。坑塘养殖基本全年呈现水体特征,部分坑塘在冬季晒塘时会有杂草生长而呈现出阶段性的植被特征。苗木或撂荒类型体现出明显的天然植被特征。

表 2 主要种植类型的物候期

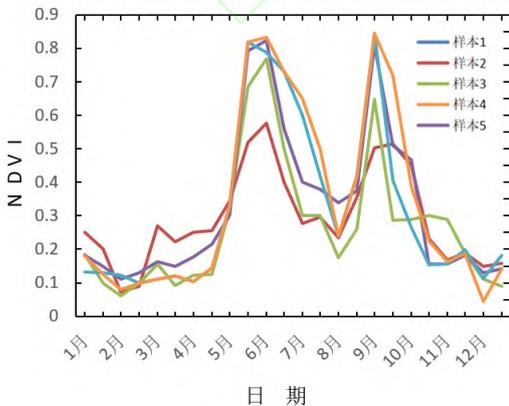
Tab.2 Phenological stages of the major crop patterns

主要作物	12月		1月		2月		3月		4月		5月		6月		7月		8月		9月		10月		11月	
	上	下	上	下	上	下	上	下	上	下	上	下	上	下	上	下	上	下	上	下	上	下	上	下
小麦+黄豆	出苗期		越冬		分蘖期		拔节期	抽穗期	收获期				苗期	花芽期	结荚期	鼓粒期	成熟期	收获期	播种期			出苗期		
春夏双季 小麦+水稻	出苗期		越冬		分蘖期		拔节期	抽穗期	收获期	幼苗期	分蘖期	孕穗期	抽穗期	成熟期								播种期		出苗期
油菜+水稻	现蕾期	抽薹期	开花期		成熟期		播种期	幼苗期	分蘖期	孕穗期	抽穗期	成熟期										出苗期	现蕾期	
单季 单季稻							苗期	幼苗期	分蘖期	拔节期	孕穗期	抽穗期	扬花期	灌浆期	成熟期	收获期								
双季稻								移栽期	拔节期	抽穗期	乳熟期	收获期	苗期	移栽期	拔节期	抽穗期	乳熟期	收获期						
夏秋双季 玉米+晚稻								苗期	抽雄期	乳熟期	成熟期	移栽期	齐穗期	乳熟期	成熟期									
玉米+黄豆								苗期	抽雄期	乳熟期	成熟期	花芽期	结荚期	鼓粒期	成熟期	收获期								
作物+蔬菜 黄豆+花菜							苗期	花芽期	结荚期	鼓粒期	成熟期	收获期	苗期	生长期	采摘期									

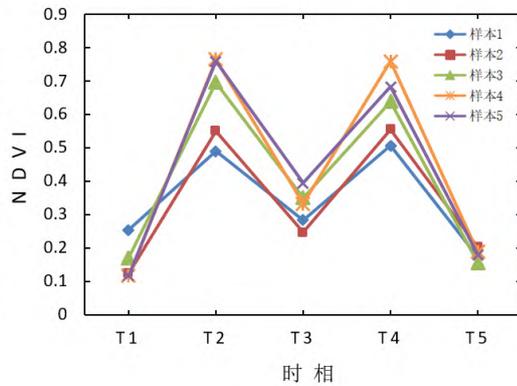
小麦 油菜 轮作水稻 单季水稻 玉米 黄豆 蔬菜

2.2 作物物候特征分析

各种种植类型的物候特征可以用 NDVI 时间序列谱曲线来表达^[23-24]。同一类型的 NDVI 曲线特征存在差异性，其峰值、谷值及拐点等所对应的日期并不完全相同（图 2(a)，以夏秋双季为例）。通过选择若干个关键物候期来概括各生长阶段的物候特征，得到同种植类型的相似性物候特征及不同种植类型的差异性物候特征，并以此作为识别和提取的依据。本文选取 3 月上旬至 4 月中旬（T1）、5 月中旬至 6 月中旬（T2）、7 月中旬至 8 月中旬（T3）、9 月上旬至 9 月下旬（T4）和 10 月中旬至 12 月上旬（T5）5 个特征时相。T1 对应于春夏双季的第一个生长峰；T2 为春夏双季第一季向第二季过渡的时段，同时是作物+蔬菜和夏秋双季的第一个生长峰；T3 对应单季作物的生长峰、春夏双季第二个生长峰，同时是作物+蔬菜及夏秋双季的两个生长季的过渡期；T4 是夏秋双季第二季的生长峰；T5 时段除作物+蔬菜种植类型 NDVI 值较高外，其余所有类型的 NDVI 均比较低。通过对上述 5 个关键物候期的概括，曲线特征得以化简，物候规律得以体现。如夏秋双季的 NDVI 曲线均呈现一致的 M 型曲线规律（图 2(b)）。



(a) 全时间序列（样本点 NDVI 时间序列值按照自然月上下旬中值合成）



(b) 关键物候期（样本点 NDVI 时间序列值按照关键物候期时段中值合成）

图 2 夏秋双季部分样本 NDVI 曲线

Fig.2 NDVI profiles for the summer-and-autumn-double-cropping samples

分别计算上述 5 个关键物候期的时间序列 NDVI 中值，发现各种种植类型的曲线特征存在明显差异（图 3）。单季种植类型呈单峰型曲线；春夏双季种植在 T1、T3 呈现双峰，总体为 W 型曲线；夏秋双季在 T2、T4 呈现双峰，总体 M 型曲线；作物+蔬菜类型的双峰在 T2 和 T5 时相；苗木或撂荒在夏秋季节 T2 至 T4 期间保持稳定的 NDVI 高值；而坑塘养殖在五个时相上均呈现水体特征。

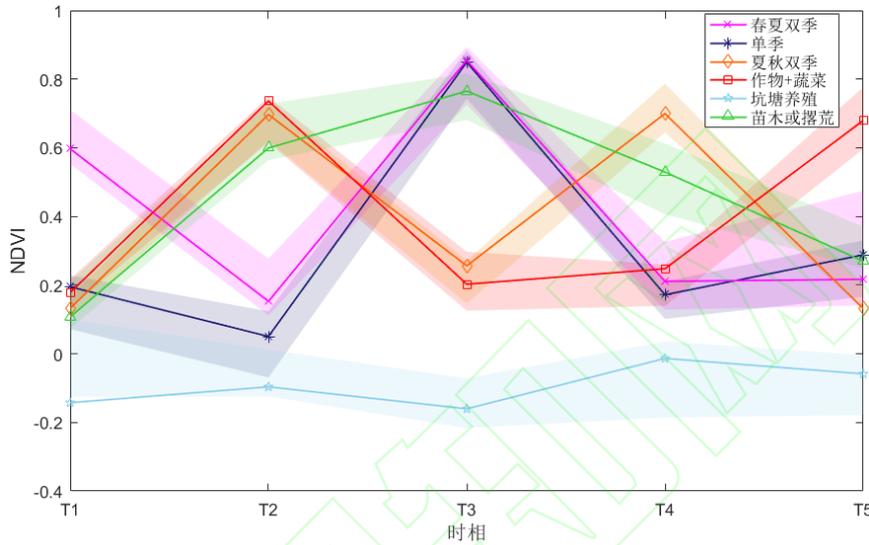


图 3 主要种植类型的物候特征

Fig.3 The phenological characteristics of the major crop patterns

2.3 基于物候特征差异的非粮化提取模型

在分析不同种植类型物候特征的基础上，基于关键物候期 NDVI 特征，采用“由简及繁、分层分类”的思路实现非粮化类型的提取，具体包括如下两个步骤。

1) 利用不同类型在关键物候期的植被指数状态组合的差异实现第一层分类，将苗木或撂荒、坑塘养殖与作物区分开来。在 T2 时相，春夏双季处于两季的换茬期，单季耕地处于耕作准备期，这两种类型的植被指数都很低；而夏秋双季和作物+蔬菜处于第一节的生长旺季，植被指数很高。在 T3 时相，春夏双季和单季都处于生长旺季，植被指数很高；而夏秋双季和作物+蔬菜处于两季的换茬期，植被指数很低。在 T2、T3 两个时相上，作物必然在其中一个时相处于生长旺季（植被指数高值），在另一个时相处于耕作准备期或成熟收获期（植被指数低值），NDVI 曲线呈现出剪刀状；苗木或撂荒的物候特征与自然植被非常接近，具有持续的植被指数高值且 NDVI 变化不大；坑塘处于持续的植被指数低值（图 3）。

使用定量方法进行各类型在 T2、T3 时相上植被指数的状态划分。观察各类别在 T2、T3 时相上植被指数的直方图发现，在 T2 时相，春夏双季和单季的植被指数低于 0.3；而夏秋双季和作物+蔬菜植被指数高于 0.5。在 T3 时相，春夏双季和单季的植被指数高于 0.6；而夏秋双季和作物+蔬菜植被指数大体上低于 0.4（图 4）。设置阈值 0.45 可以进行各类型在 T2、T3 时相上植被指数的状态划分（表 3）。

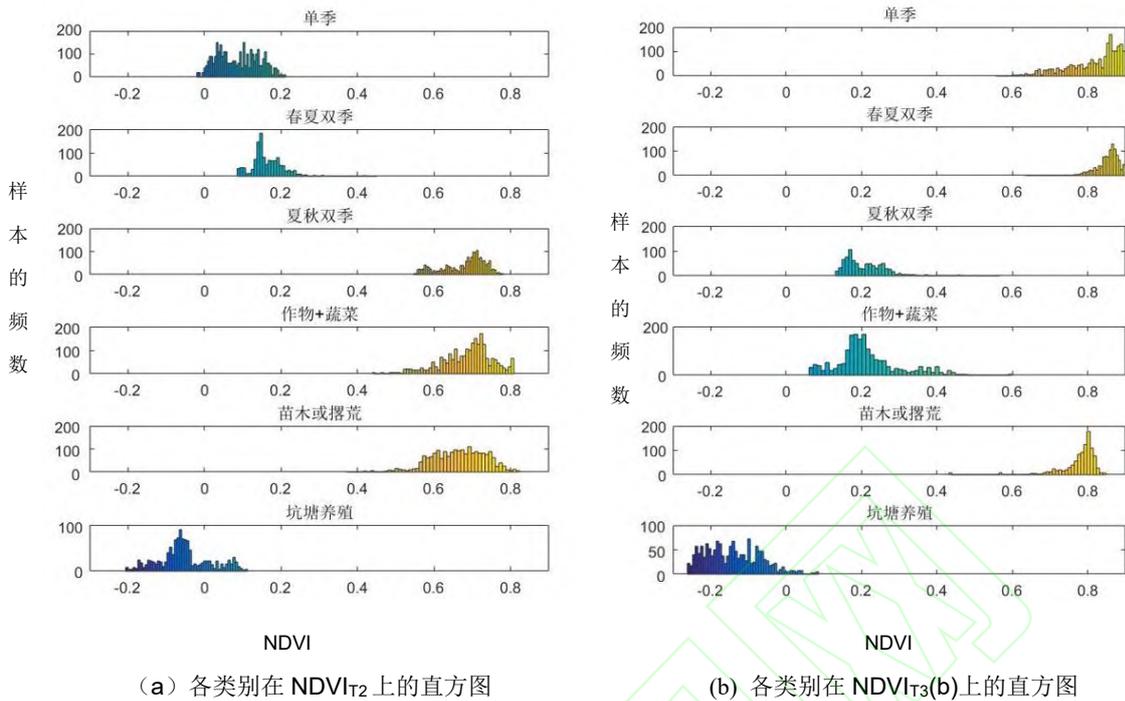


图 4 各类别在 $NDVI_{T2}$ 、 $NDVI_{T3}$ 上的直方图
 Fig.4 Histograms of different types on $NDVI_{T2}$ and $NDVI_{T3}$

表 3 不同类型在 T2、T3 时相的植被指数状态组合

Tab.3 Vegetation index state combination of different types on T2 and T3

类 型	春夏双季 和单季	夏秋双季和 作物+蔬菜	苗木或撂 荒	坑塘养殖
植被指数状 态组合	低-高	高-低	高-高	低-低

依据这些不同的状态组合，用决策树方法实现第一层分类，将主要地物类型分为四个大类：(a) 单季，春夏双季；(b) 夏秋双季，作物+蔬菜；(c) 苗木或撂荒；(d) 坑塘养殖。

2) 利用关键物候期特征实现进行第二层分类，实现作物+蔬菜的提取。前面的规则已经实现了作物+蔬菜和夏秋双季与其他类型的区分。作物+蔬菜区别于夏秋双季的最显著特征在于 T4、T5 两个时相。在此区间内，夏秋双季为作物收获阶段，NDVI 呈现下降趋势；而作物+蔬菜类型对应蔬菜增绿阶段，NDVI 值上升（图 3）。利用此阶段 NDVI 的趋势，建立规则 $NDVI_{T5} > NDVI_{T4}$ 即可实现夏秋双季和作物+蔬菜类型的区分。

非粮化提取的流程图如图 5 所示。

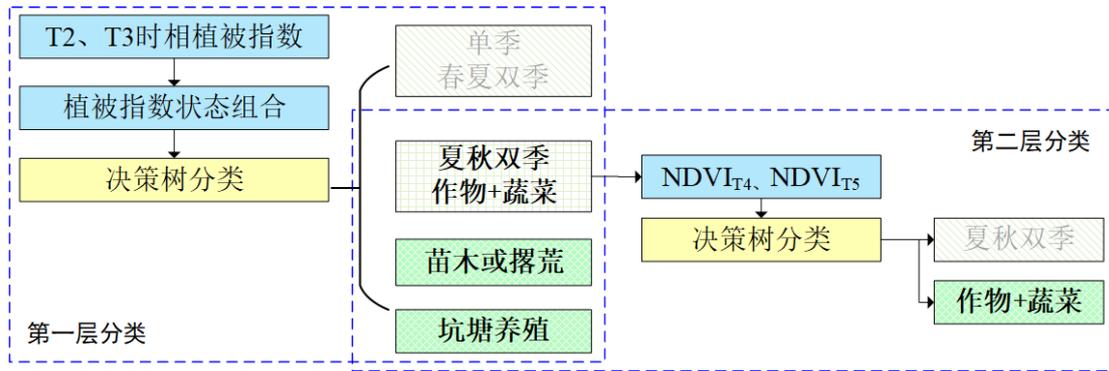


图 5 非粮化提取的流程图

Fig.5 Flowchart of mapping non-grain use croplands

3 结果与分析

3.1 非粮化空间分布

本文得到江汉平原 2019 年非粮化现象分布结果 (图 6)。其中, 作物+蔬菜种植类型主要集中分布于天门市张港镇、荆州市方家弓、钟祥市转斗镇等区域。苗木或撂荒主要分布在江汉平原的北部、西部山区。临近河流两岸耕地有挖塘养殖现象, 但总体而言较少。将模型提取结果与关键物候期的 NDVI 假彩色合成影像进行目视比较 (图 7), 从空间分布细节上观察非粮化现象的典型区域。其中天门市张港镇有集中连片的黄豆+花菜 (图 7(a)和(b)), 汉川市天鹅镇汉北河两岸为坑塘养殖集中区 (图 7(c)和(d)), 汉川市马口镇白石湖周围存在苗木或撂荒的现象 (图 7(e)和(f))。模型提取结果和假彩色合成影像具有较好的空间一致性。

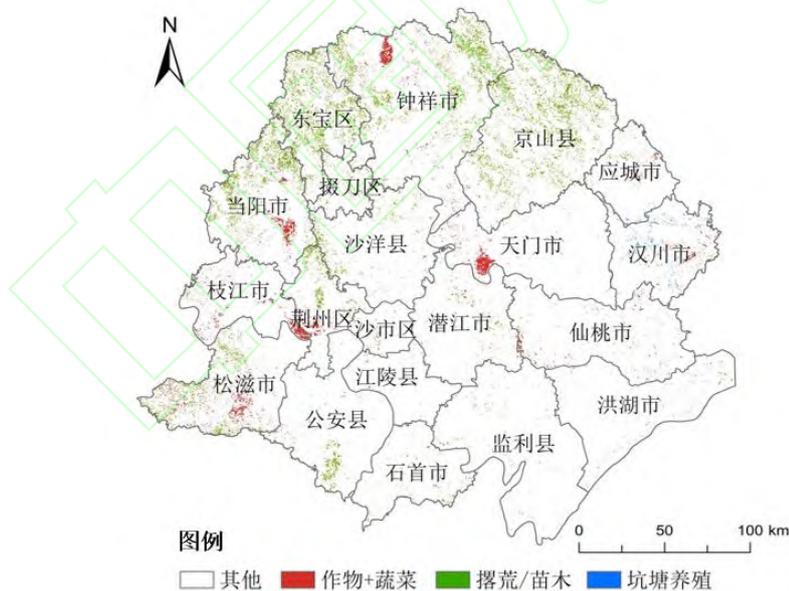


图 6 2019 年江汉平原非粮化现象分布图

Fig.6 The map of non-grain use of croplands on the Jianghan Plain in 2019

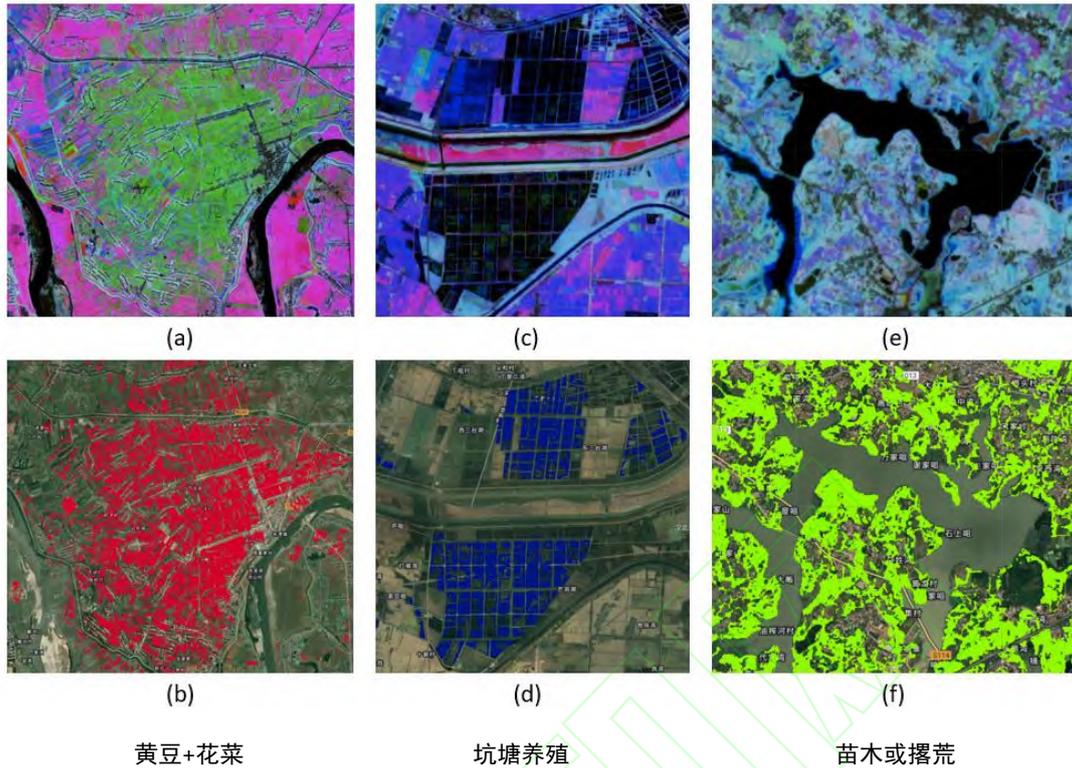


图 7 非粮化现象假彩色合成影像 (NDVIT1、NDVIT2、NDVIT3) 及提取结果比较, (a)(b) 黄豆+花菜, (c)(d)坑塘养殖, (e)(f)苗木或撂荒

Fig.7 Comparing the false-color composite images (NDVIT1, NDVIT2, NDVIT3) and the results of non-grain use croplands mapping

3.2 精度检验

以调研过程中采集的样本点为基准, 结合 Google Earth 高清影像目视解译方式勾绘的各类样本总数的 30%作为验证样本, 对提取结果进行精度检验。表 4 给出了由验证样本得到的混淆矩阵。非粮化提取的总体精度为 92.69%, Kappa 系数为 0.895 8, 提取效果较好。

表 4 非粮化提取的精度评价

Tab.4 Accuracy evaluation of non-grain use of cropland

类型	坑塘	作物+蔬菜	苗木/撂荒	其他	行总数	用户精度
坑塘	1 069	0	0	0	1 069	1
作物+蔬菜	0	1 086	31	41	1 158	0.93
苗木/撂荒	0	6	1 292	165	1 463	0.88
其他	105	122	14	2 697	2 938	0.91
列总数	1 174	1 214	1 337	2 903	6 628	
制图精度	0.91	0.89	0.96	0.92		
总体精度/%	92.69					
Kappa 系数	0.895 8					

3.3 县级非粮化时空分布

非食物化是非粮化的一种特殊形态。将发生在江汉平原耕地范围内的坑塘、苗木或撂荒及作物+蔬菜视为耕地“非粮化”现象 (作物+蔬菜视为部分非粮化现象), 将其中的撂荒/苗木种植视为“非食物化”现象。

以“非粮化”面积与江汉平原耕地面积的比值作为非粮化率, “非食物化”面积与江汉

平原耕地面积的比值作为非食物化率，江汉平原 2019 年和 2021 年各县市的统计结果如图 8、图 9 及表 5 所示。2019 年非粮化率和非食物化率最高的县市均为东宝区，分别为 11.84% 和 10.75%。2021 年当阳市非粮化率增长到 18.13%，成为江汉平原非粮化率最高的县市。2021 年非食物化率最高的是京山市，达到 13.37%。

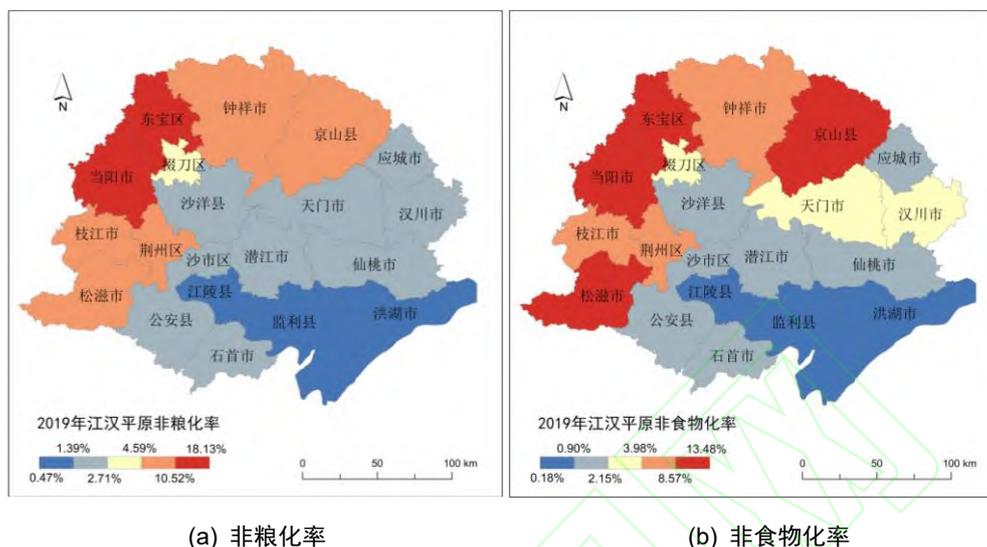


图 8 2019 年江汉平原各县非粮化率和非食物化率

Fig.8 Non-grain rate and non-food rate of counties on the Jianghan Plain in 2019

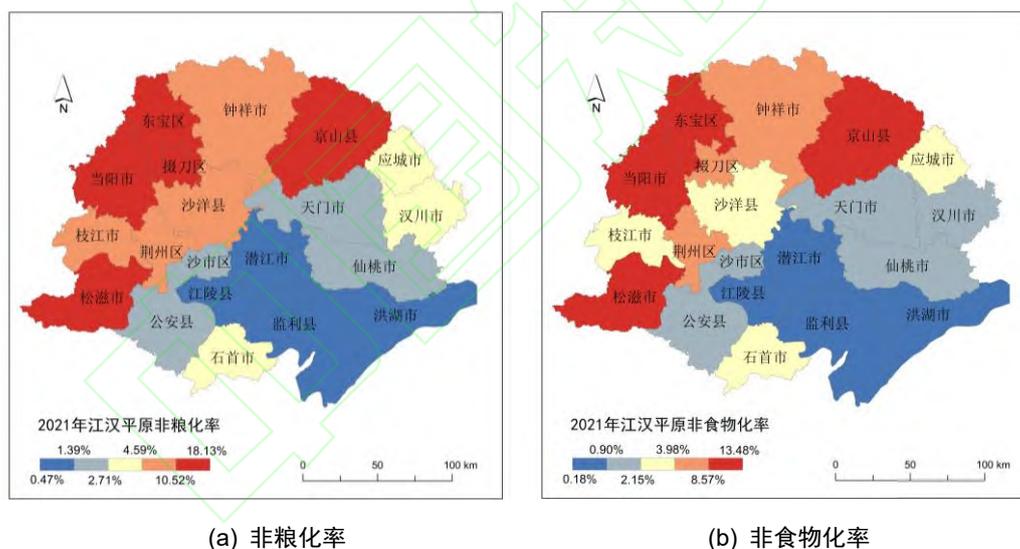


图 9 2021 年江汉平原各县非粮化率和非食物化率

Fig.9 Non-grain rate and non-food rate of counties on the Jianghan Plain in 2021

江汉平原 2021 年总体非粮化率为 7.24%，非食物化率为 5.32%，相比 2019 年 4.43% 的非粮化率和 2.71% 的非食物化率均有所上升（表 5）。其中除天门和潜江市外，其余县市耕地非粮化面积均有增加。增长比率最多的是掇刀区（增长率 10.89%），其次为松滋市、当阳市、沙洋县和荆州区，增长率均在 5% 以上。2019—2021 年非食物化率除潜江市略有下降外，其余县市均呈上升态势；以松滋市涨幅最为明显（增长率 11.37%）；其次为当阳市、京山市、掇刀区、荆州区（增长率都在 4% 以上）。综上所述，江汉平原非粮化现象在近年来有逐渐增多的趋势。

表 5 江汉平原各县市非粮化率占比统计/%

Tab.5 Proportion of non-grain rates at county level on the Jianghan Plain/%

县市	非粮化率			非食物化率		
	2019 年	2021 年	增长率	2019 年	2021 年	增长率
公安县	1.80	2.71	0.91	1.37	2.15	0.78
江陵县	0.48	1.28	0.81	0.19	0.61	0.42
沙市区	1.83	2.62	0.78	0.31	1.11	0.80
仙桃市	1.49	2.10	0.61	0.37	1.25	0.88
潜江市	1.46	1.39	-0.07	1.01	0.90	-0.11
荆州区	6.65	12.04	5.39	3.80	7.82	4.02
钟祥市	7.19	10.05	2.86	5.01	8.58	3.56
石首市	1.71	3.35	1.64	0.79	2.74	1.95
监利县	0.47	0.86	0.40	0.31	0.59	0.27
天门市	2.58	2.14	-0.44	0.20	1.04	0.84
沙阳县	1.99	8.44	6.45	1.38	3.98	2.60
应城市	2.04	4.59	2.54	0.50	3.77	3.27
当阳市	10.59	18.13	7.54	6.36	11.90	5.54
京山市	8.80	13.49	4.69	8.63	13.37	4.73
东宝区	11.84	14.86	3.03	10.75	11.94	1.19
松滋市	9.03	16.61	7.58	2.10	13.48	11.38
汉川市	2.53	3.92	1.39	0.33	1.21	0.88
枝江市	5.44	10.49	5.06	0.28	3.67	3.40
洪湖市	0.59	0.69	0.10	0.18	0.20	0.02
江汉平原	4.43	7.24	2.81	2.71	5.32	2.61

3.4 非食物化的空间分布特征

江汉平原的苗木或撂荒类型的分布在平原区和山区具有明显差异。平原区此类型多分布于田块的田埂或边坡上，而整块田地属于这种类型的极少。在江汉平原西部和北部的山区中，苗木或撂荒类型发生在山谷中的整块田地上的情况较多。这说明，人们对于地势平坦地区整块耕地的粮化利用程度大于山区的耕地。随着地势的升高，耕地破碎化程度上升，用于粮食生产的比率下降。单独提取出上述“非食物化”现象（即苗木或撂荒类型），聚合到 1 km 空间分辨率，得到“非食物化”现象占比的分布图（如图 10(a)）。结合研究区高程的分布情况（图 10(b)）可以发现，耕地非食物化现象分布与高程具有一定的相关性。

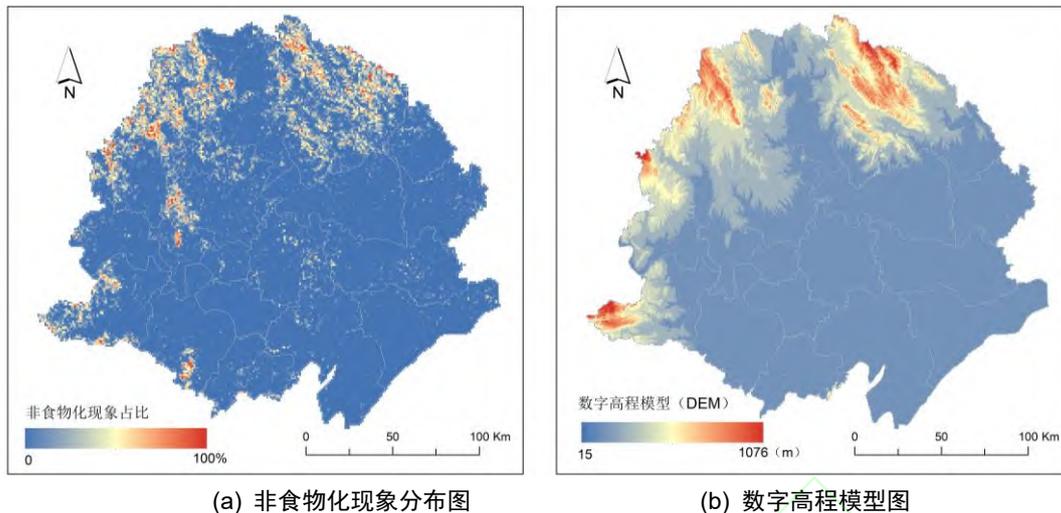


图 10 江汉平原非食物化现象分布图和数字高程模型图

Fig.10 Map of non-food use of cropland and Digital Elevation Model on the Jiangnan Plain

4 讨论与结论

本文提出了一种利用时间序列遥感数据进行江汉平原耕地非粮化监测的方法。主要工作有如下几个方面：(1) 各种种植类型的物候特征挖掘。通过选择若干个关键物候期来概括各生长阶段的物候特征，得到同种植类型的相似性物候特征及不同种植类型的差异性物候特征，物候规律得以凸显，并以此作为种植类型识别和提取的依据。(2) 耕地非粮化提取模型的构建。在上述物候特征挖掘的基础上，构建耕地非粮化提取的模型，包括构建关键时相植被指数状态组合将苗木或撂荒、坑塘养殖与作物区分开来，及建立规则实现夏秋双季和作物+蔬菜类型的区分。(3) 江汉平原非粮化分布时空特征的分析。以江汉平原为研究区域，以多时相 Sentinel-2 影像为数据源，得到江汉平原 2019 年和 2021 年主要非粮化类型的时空分布。

本文基于时序 Sentinel-2 遥感影像物候特征挖掘的方法，可为耕地“非粮化”监测提供有效的技术手段。该技术方法的特色之处在于：(1) 基于时序 Sentinel-2 遥感影像物候特征挖掘的方法抓住了非粮化现象与作物种植的物候特征差异。(2) 耕地非粮化提取模型依据“由简及繁”的原则，采用分层分类的思路依次实现了非粮化现象的提取。

本文的研究有如下发现：(1) 该方法适用于双季区或者单季/双季混作区，能在区域尺度上对所有主要非粮化类型进行监测。只需要根据当地物候调整几个关键物候期的影像合成时段，即可推广到类似地区如洞庭湖平原或者鄱阳湖平原。(2) 江汉平原耕地“非粮化”率比率虽不高但呈增长趋势，应当引起重视。非粮化分布在江汉平原内部也存在区域差异，在西北部低山丘陵区更突出。

该方法仅适用于双季种植区或者单季/双季混作区，在种植模式单一的地区如东北地区，不具有可推广性。同时该方法高度依赖时序 Sentinel-2 影像，在多云多雨的南方地区，其适用性如何，有待于进一步研究。

本文方法的误差可能来源于以下三个方面：一是 10 m 的空间分辨率在部分耕地上仍然会出现混合像元的情况；二是耕地掩膜数据可能存在不准确的地方；三是由于耕地系统的复杂性，部分非粮食类作物特别是蔬菜的物候期存在较大的差异，提取规则不能够兼顾所有蔬菜类型。

参考文献

- [1] Kong Xiangbin. The problems, causes and countermeasures of non-grain use of croplands [J]. *China Land*, 2020,4(11):17-1(孔祥斌. 耕地“非粮化”问题、成因及对策[J].*中国土地*, 2020,4(11):17-1)
- [2] Wang J, Dai C. Identifying the Spatial-Temporal Pattern of Cropland's Non-Grain Production and Its Effects on Food Security in China. *Foods (Basel, Switzerland)*. 2022, 11(21):3494.
- [3] Sun, Y.; Chang, Y.; Liu, J.; Ge, X.; Liu, G.-J.; Chen, F. Spatial Differentiation of Non-Grain Production on Cultivated Land and Its Driving Factors in Coastal China. *Sustainability* 2021, 13: 13064.
- [4] Chen Fu, Liu Junna, Chang Yuanyuan, et al. Spatial Pattern Differentiation of Non-grain Cultivated Land and Its Driving Factors in China[J]. *China Land Science*, 2021,35(9):33-43.(陈浮,刘俊娜,常媛媛,张琦,于昊辰,张绍良,等.中国耕地非粮化空间格局分异及驱动机制[J].*中国土地科学*,2021,35(9):33-43.)
- [5] Feng, Y.; Ke, M.; Zhou, T. Spatio-Temporal Dynamics of Non-Grain Production of Cultivated Land in China. *Sustainability* 2022, 14: 14286.
- [6] Wang Pengcheng, Zhang Ligu, Lu Yulan, et al. Study On The Spatial-Temporal Evolution and Influencing Factors of Non-grain Cultivated Land in Guangxi. [J/OL]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 1-11[2022-09-30](王鹏程,张利国,卢玉兰,等.广西耕地“非粮化”时空演变及影响因素研究[J/OL].*中国农业资源与区划*:1-11[2022-09-30])
- [7] Zhang Huizhong, Song Wen, Zhang Wenxin, et al. Analysis of Spatial Differentiation Characteristics and Influencing Factors of Non-grain Cultivated Land in Shandong Province[J]. *China Land Science*, 2021,35(10):94-103(张惠中,宋文,张文信,等.山东省耕地“非粮化”空间分异特征及其影响因素分析[J].*中国土地科学*,2021,35(10):94-103.)
- [8] Chang Yuanyuan, Liu Junna, Zhang Qi, et al. Spatial pattern differentiation of cultivated land non-grain conversion in major grain-producing area[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022,39(4):817-826.(常媛媛,刘俊娜,张琦,等.粮食主产区耕地非粮化空间格局分异及其成因[J].*农业资源与环境学报*,2022,39(4):817-826.)
- [9] Yue Su, Kui Qian, Lin Lin, Ke Wang, Tao Guan, Muye Gan, Identifying the driving forces of non-grain production expansion in rural China and its implications for policies on cultivated land protection, *Land Use Policy*, Volume 92, 2020: 104435
- [10] Yue Su, Chenlu Li, Ke Wang, Jinsong Deng, Amir Reza Shahtahmassebi, Leping Zhang, Weijiu Ao, Tao Guan, Yi Pan, Muye Gan, Quantifying the spatiotemporal dynamics and multi-aspect performance of non-grain production during 2000–2015 at a fine scale, *Ecological Indicators*, 2019, 101: 410-419
- [11] Li Chao, Wang Wei, Li Weicheng. The impact of non-grain use on the quality of croplands [J]. *China Land*, 2021(3):17-19.(李超,王巍,李伟成.“非粮化”利用对耕地质量的影响[J].*中国土地*,2021(3):17-19.)
- [12] Ao Weijiu, Chen Yifan, Guan Tao, et al. Application of GF-1 Satellite Data on Monitoring Non-grain Phenomenon in Permanent Basic Farmland[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2016,44(18):250-255.(敖为赳,陈一帆,关涛,等.GF-1 卫星数据在永久基本农田非粮化监测中的应用[J].*安徽农业科学*,2016,44(18):250-255.)
- [13] Lei Yu, Zheng Dan, Zeng Fanru, et al. Intelligent monitoring method of farmland "non-grain" monitoring in Sichuan Province[J]. *Resources and Habitant Environment*, 2021(12):47-51.雷瑜,郑丹,曾繁如,等.四川耕地“非粮化”监测中的智能监测方法[J].*资源与人居环境*,2021(12):47-51.
- [14] Qiu B, Li W, Tang Z, et al. Mapping paddy rice areas based on vegetation phenology and surface moisture conditions[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 56: 79-86.
- [15] Song Y, Wang J. Mapping winter wheat planting area and monitoring its phenology using Sentinel-1

backscatter time series[J]. Remote Sensing, 2019, 11(4): 449.

[16] d'Andrimont R, Taymans M, Lemoine G, et al. Detecting flowering phenology in oil seed rape parcels with Sentinel-1 and-2 time series[J]. Remote sensing of environment, 2020, 239: 111660.

[17] Cai Wenting, Zhao Shuhe, Wang Yamei, et al. Estimation of winter wheat residue cover using spectral and textural information from Sentinel-2 data[J]. Journal of Remote Sensing, 2020,24(9):1108-1119(蔡文婷,赵书河,王亚梅,等.结合 Sentinel-2 光谱与纹理信息的冬小麦作物茬覆盖度估算[J].遥感学报,2020,24(9):1108-1119)

[18] Li Zhongyuan, Wu Bingfang, Zhang Miao, et al. Identifying Rapeseed Planting Area Using an Object-oriented Method and Crop Phenology[J]. Journal of Geo-Information Science, 2019,21(5):720-730(李中元,吴炳方,张淼,等.利用物候差异与面向对象决策树提取油菜种植面积[J].地球信息科学学报,2019,21(5):720-730)

[19] Chen Yansi, Huang Chunlin, Hou Jinliang, et al. Extraction of Maize Planting Area based on Multi-temporal Sentinel-2 Imagery in the Middle Reaches of Heihe River [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021,36(2):324-331(陈彦四,黄春林,侯金亮,等.基于多时相 Sentinel-2 影像的黑河中游玉米种植面积提取研究[J].遥感技术与应用,2021,36(2):324-331)

[20] Mao Lijun, Li Mingshi. Integrating Sentinel Active and Passive Data to Map Land Cover in a National Park from GEE Platform[J/OL]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,1-19[2023-02-08] (毛丽君,李明诗.GEE 环境下联合 Sentinel 主被动遥感数据的国家公园土地覆盖分类[J/OL].武汉大学学报(信息科学版):1-19[2023-02-08]).

[21] Mou Xiaoli, Li He, Huang Chong, et al. Application progress of Google Earth Engine in land use and land cover remote sensing information extraction[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2021,33(2):1-10(牟晓莉,李贺,黄翀,等.Google Earth Engine 在土地覆被遥感信息提取中的研究进展[J].国土资源遥感,2021,33(2):1-10)

[22] Jiang Yilan, Chen Baowang, Huang Yufang, et al. Crop Planting Area Extraction based on Google Earth Engine and NDVI Time Series Difference Index[J]. Journal of Geo-information Science, 2021,23(5):938-947(姜伊兰,陈保旺,黄玉芳,等.基于 Google Earth Engine 和 NDVI 时序差异指数的作物种植区提取[J].地球信息科学学报,2021,23(5):938-947)

[23] Ma Chao, Yang Fei, Wang Xuecheng. Extracting tea plantations in southern hilly and mountainous region based on mesoscale spectrum and temporal phenological features[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2019,31(1):141-148(马超,杨飞,王学成.基于中尺度光谱和时序物候特征提取南方丘陵山区茶园[J].国土资源遥感,2019,31(1):141-148)

[24] Li Yating, Gong Yan, Duan Bo, et al. Combining Multi-temporal NDVI and Abundance from UAV Remote Sensing Data for Oilseed Rape Growth Monitoring[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020,45(2):265-272 (刘雅婷,龚龔,段博,等.多时相 NDVI 与丰度综合分析的油菜无人机遥感长势监测[J].武汉大学学报(信息科学版),2020,45(2):265-272)