

基于 Landsat-8 和 Sentinel-2 时间序列合成影像的山区甘蔗种植区提取

康倩文¹, 徐伟恒^{1,2,3*}, 王雷光^{2,3}, 洪泽湖¹, 刘 运¹

1. 西南林业大学大数据与智能工程学院, 云南昆明 650233; 2. 西南林业大学大数据与智能工程研究院, 云南昆明 650233; 3. 西南林业大学林业生态大数据国家林业与草原局重点实验室, 云南昆明 650233

摘要: 山区耕地破碎化现象严重, 种植结构复杂, 加之山区多云雨天气使得遥感影像质量难以保证, 给基于遥感的山区甘蔗种植区提取带来困难。为探究适用于山区甘蔗种植区提取的方法, 本研究以典型山区甘蔗种植区云南省玉溪市新平县为研究区, 以 2019 年 10 月 1 日至 2021 年 7 月 1 日过境新平县的 Landsat-8 和 Sentinel-2 光学影像为数据源, 结合 DEM 数据和野外调查数据, 基于谷歌地球引擎 (google earth engine, GEE) 云计算平台构建高空间、高时间分辨率的时间序列合成影像, 借助甘蔗与常绿植被、水体、不透水层、其他农作物在光谱指数特征、物候特征、地形特征上的差异, 采用上升时间、下降时间、上积分、下积分 4 个物候参数以及海拔、坡度因子确定提取甘蔗的最佳阈值, 对研究区 2020 年甘蔗种植区进行提取并绘制 2020 年新平县甘蔗种植区分布图, 最后对提取结果进行精度验证与甘蔗空间分布规律分析。结果表明: 基于 Landsat-8 和 Sentinel-2 合成的时间序列影像可以增加研究区内像元的良好观测次数并提高影像的空间分辨率, 克服了山区遥感影像质量不高的问题, 可更好地监测植被物候特征与季节变化; 本研究甘蔗种植区提取总体精度为 97.07%, Kappa 系数为 0.83, 其中甘蔗的用户精度为 88.85%, 制图精度为 80.57%; 新平县 2020 年甘蔗种植区面积为 7705 hm², 甘蔗种植区的空间分布随新平县西北高东南低的地势呈现出东南多于西北的现象, 且乡镇间甘蔗种植区面积差异显著, 甘蔗种植面积最大的乡镇为漠沙镇 (2786 hm²), 面积最小的乡镇为古城街道 (0.87 hm²), 与实际调研情况一致。通过对物候参数进行敏感性分析发现, 同时使用上升时间、下降时间、上积分、下积分 4 个物候参数进行甘蔗提取, 可提高用户精度, 减少错分误差。该研究提出的甘蔗种植区提取算法可为山区复杂地形下甘蔗种植区提取提供参考。

关键词: 甘蔗; 物候; 时间序列影像; 影像合成; 谷歌地球引擎

中图分类号: S566.1 文献标识码: A

Extraction of Sugarcane Plantation in Mountainous Areas Based on Landsat-8 and Sentinel-2 Time-series Synthetic Images

KANG Qianwen¹, XU Weiheng^{1,2,3*}, WANG Leiguang^{2,3}, HONG Zehu¹, LIU Yun¹

1. College of Big Data and Intelligent Engineering, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650233, China; 2. Institute of Big Data and Artificial Intelligence, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650233, China; 3. Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Forestry and Ecological Big Data, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650233, China

Abstract: Sugarcane plantations are mainly distributed in mountainous areas with high land fragmentation and complex cropping structure in Yunnan Province. Frequent cloud cover reduces the good observations of the land cover by using optical remote sensing. So it is difficult to extract sugarcane plantations with a high accuracy based on satellite optical

收稿日期 2022-07-06; 修回日期 2022-08-24

基金项目 国家自然科学基金地区基金项目 (No. 32060320); 云南省农业基础研究联合专项面上项目 (No. 202101BD070001-066); 云南省重大科技专项 (No. 202102AE090051-1-02)。

作者简介 康倩文 (1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 遥感大数据智能处理与应用。*通信作者 (Corresponding author): 徐伟恒 (XU Weiheng), E-mail: weihengx@gmail.com。

remote sensing data. Xinping Country, a typical mountainous sugarcane plantation region, was chosen to explore a suitable method for the extraction of sugarcane plantations in mountainous areas. In this study, Landsat-8 and Sentinel-2 optical imagery for Xinping from October 1, 2019 to July 1, 2021 were used as the main data sources, and the DEM data and field survey data were used as the auxiliary data. The synthetic time-series images with high spatial-temporal resolution were constructed on Google Earth Engine (GEE). Firstly, we analyzed the differences among sugarcane and evergreen vegetation, water body, impervious, and other crops in spectral index characteristics, phenological characteristics, and topographic characteristics. Secondly, we determined the optimal thresholds for extracting sugarcane plantations for the four phenological parameters including rise time, fall time, above integral of season and below integral of season, as well as elevation and slope factors based on the training samples. Thirdly, we mapped the sugarcane plantations of 2020 and the mapping accuracy was verified using the validation samples in the study area. Finally, the spatial distribution of sugarcane plantations was analyzed at town scale. The results showed that synthetic time-series images based on the Landsat-8 and Sentinel-2 optical imagery could increase the number of good observations in the study area and improve the spatial resolution of the images, which could solve the problem of low quality of remote sensing images in mountainous areas and could better monitor phenological characteristics and seasonal changes of vegetation. The resultant 2020 sugarcane map had overall, user and producer accuracy of 97.07%, 88.85% and 80.57%, respectively with the Kappa coefficient of 0.83. According to the annual sugarcane map in 2020, there was a total of 7705 hm² sugarcane in Xinping, there were more sugarcane distribution in the southeast than in the northwest, as well as the southeast terrain was lower than that in the northwest. There were significant differences in the area of sugarcane plantations between townships, the township with the largest sugarcane plantation area is Mosha Town (2786 hm²) and the township with the smallest sugarcane plantation area is Gucheng district (0.87 hm²), which is consistent with the actual research. The sensitivity analysis of phenology parameters for sugarcane mapping demonstrated that the four parameters including rise time, fall time, above integral of season, and below integral of season are all important to improve the user accuracy and reduce the commission errors in the sugarcane mapping. The sugarcane plantation mapping algorithm proposed in this study could provide a reference for the extraction of sugarcane plantations in the complex landscapes of mountainous areas in the future.

Keywords: sugarcane; phenology; time series images; image synthesis; Google Earth Engine

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.06.021

甘蔗是全球第一大糖料作物和第二大生物能源作物，中国是世界上最主要的甘蔗种植国家之一^[1]。从甘蔗中提取的蔗糖是中国食品行业中不可替代的重要原料，而云南省作为我国第二大蔗糖生产基地^[2]，蔗糖产业是云南省的高原特色产业，更是扶贫产业^[3]。云南的甘蔗主要种植于丘陵山区旱坡地，准确识别甘蔗种植区分布范围，对有关部门制定相应的土地政策，为甘蔗产量和效益评估提供有效参考，对当地农业可持续发展、保障食糖供给安全都具有重要现实意义。

农作物的遥感识别方法主要包括两大类：单时相遥感影像识别和多时相遥感变化监测^[4]。多时相遥感影像相较单时相影像更能反映植被的季节变化以及物候特征，有效增加农作物的识别精度，目前已经被广泛应用于农作物的识别与监测中^[5]。如边增淦等^[6]利用 2018 年 18 景 GF-1 WFV 影像构建出的归一化植被指数时间序列并采用分层策略逐步提取出黑河流域中游地区的作物种植结构。刘吉凯等^[7]选用多时相 GF_1 WFV 高分辨

率遥感数据，采用多时相迭代法构建甘蔗提取决策树模型提取出广西江州区的甘蔗种植区，总体精度（overall accuracy, OA）达到 95.26%。大量研究表明，联合多源遥感影像可以增加影像数量，增加对地观测有效像元次数^[8]，有效弥补单源数据源数据量少的局限性^[9]，是实现多云雾地区、大范围农作物种植信息提取的主要手段^[10]。如谭深等^[11]融合 Landsat-8 与 Sentinel-2 光学数据、Sentinel-1 微波 SAR 数据和其他辅助数据，解决了南方地区多云天气导致影像质量不佳的问题，准确、高效地提取了海南省的水稻种植范围，OA 为 93.2%。ZHENG 等^[12]基于 Landsat-7/8、Sentinel-1/2 合成的时间序列影像利用 TWDTW 法评估作物的物候相似性，并识别出中国的甘蔗种植区，SR 数据的 OA 为 93.47%。

不同作物具有不同的物候特征，植被物候能够反映植被生长规律，国内外学者通过提取植被物候特征，进行甘蔗等农作物的识别与分类。ALEXANDRE 等^[13]利用多时相 MODIS-EVI 数据

通过甘蔗与其他作物的增强型植被指数物候特征的差异实现巴西圣保罗州农作物的分类。张东东等^[14]通过选择特定时相的 HJ-1 CCD 影像, 利用甘蔗生长特点, 采用决策树分类模型区分出中国南方地区的甘蔗与其他地物, OA 达到 93.2%, Kappa 系数为 0.81。WANG 等^[15]基于 Sentinel-1、Sentinel-2 和 Landsat 影像构建的时间序列数据, 采用基于像元和物候学的方法绘制了 2018 年广西省甘蔗分布图, 甘蔗的制图精度 (producer accuracy, PA) 和用户精度 (user accuracy, UA) 分别为 88% 和 96%。

综上所述, 目前学者们已经利用多时相、多数据源并结合物候特征的方法对甘蔗种植区进行了提取, 但是缺乏专门针对山区甘蔗提取的研究。由于山区地物类型复杂, 耕地碎片化现象严重, 耕地地块细小狭窄且结构复杂^[16], 导致耕地信息难以快速、精准获取。为明确山区甘蔗种植区分布的情况和规律, 本研究综合利用多源、多时相遥感数据与植被物候的特点, 以云南省玉溪市新平县为研究区, 采用谷歌地球引擎 (Google Earth Engine, GEE) 云计算平台, 基于 Landsat-8 和 Sentinel-2 长时间序列合成影像数据, 依据甘蔗与不同地物之间的物候特征、地形特征, 借助物候参数, 探究适用于山区甘蔗种植区提取的方法。旨在开发一种适合提取山区甘蔗种植区的有效算法, 为当地农业部门制定合理的土地利用政策提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

新平县位于云南省玉溪市西部, 地形复杂, 多山地、丘陵, 耕地空间破碎化, 种植结构复杂, 是云南省甘蔗主要生产县之一, 也是云南元江干热河谷的典型山区农业县^[17]。新平县地处 $23^{\circ}38'15''\sim 24^{\circ}26'05''\text{N}$, $101^{\circ}16'30''\sim 102^{\circ}16'50''\text{E}$, 全县面积约为 4223 km^2 (图 1)。研究区地形以山地为主, 地处哀牢山中段东麓, 县境山区面积达 4139.6 km^2 , 占县域面积的 98%; 地势西北高、东南低, 海拔为 418~3143 m。新平县年均降雨 800 mm 左右, 降雨量少, 蒸发量大, 气候干热, 全年无霜, 有利于蔗糖的积累^[18], 适宜栽种甘蔗。蔗糖产业是新平县的传统产业, 是当地农民增收、企业增效的主要来源之一。

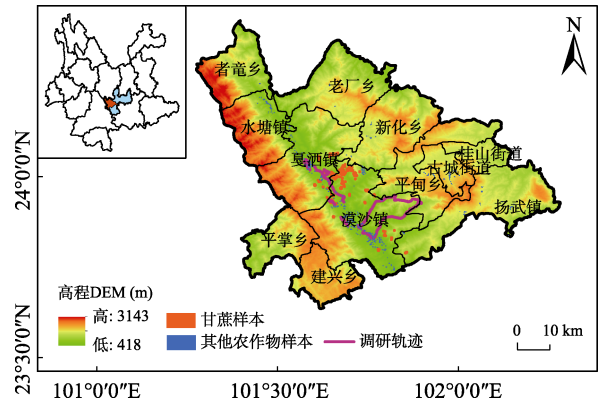


图 1 研究区位置

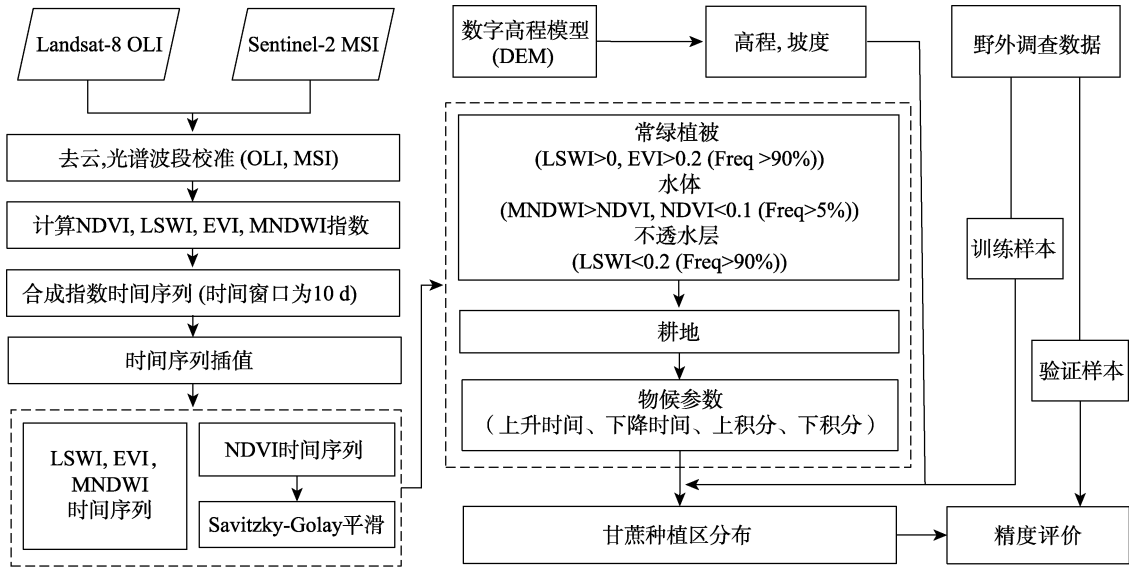
Fig. 1 Diagram of research area

1.2 甘蔗提取技术路线

首先, 将 Landsat-8 OLI 和 Sentinel-2 MSI 影像数据过去云、光谱波段校准后计算遥感指数得到遥感指数时间序列, 并将影像进行合成、插值、平滑, 构建出以 10 d 为间隔的高质量无云、无空洞的时间序列合成影像; 其次, 利用时间序列合成影像提取耕地图层, 并基于耕地图层, 利用甘蔗的物候特征、地形特征提取甘蔗, 并进行精度验证 (图 2)。

1.3 数据源及预处理

1.3.1 遥感影像及预处理 本研究基于 GEE 平台调用了 2019 年 10 月 1 日到 2021 年 7 月 1 日的覆盖研究区所有的 Landsat-8 OLI 与 Sentinel-2 MSI 影像共计 1022 张。所用 Landsat-8 OLI 影像、Sentinel-2 MSI 影像分别来自美国地质调查局提供的 Landsat-8 一级表面反射率数据集和 Sentinel-2 的 Level-2A 级地球表面反射率数据集 (表 1), 2 种数据集均已经过几何校正、辐射定标、大气校正, 同时利用 Landsat-8 OLI 的 QA_PIXEL 波段和 Sentinel-2 MSI 的 QA 波段分别对数据集进行云和云阴影的掩膜。研究区内像元的总观测次数的空间分布见图 3A, 研究区内像元的良好观测次数即掩膜云和云阴影后的像元的有效观测次数的空间分布见图 3B, 统计结果显示, 所有像元在 2019 年 10 月 1 日到 2021 年 7 月 1 日期间至少有 35 次良好的观测, 图 3A 与图 3B 中右下角观测次数较高的原因是该区域恰好位于 Landsat-8 OLI 行列号为 129/43、129/44、130/43 的影像的重叠区域以及 Sentinel-2 MSI 行列号为 N0208_R104、N0209_R104、N0300_R104、N0208_R061、N0209_R061、N0300_R061 的影像的重叠区域。



NDVI: 归一化植被指数; LSWI: 陆表水分指数; EVI: 增强型植被指数; MNDWI: 修正后归一化差异水体指数。
 NDVI: Normalized difference vegetation index; LSWI: Land surface water index; EVI: Enhanced vegetation index;
 MNDWI: Modified normalized difference water index.

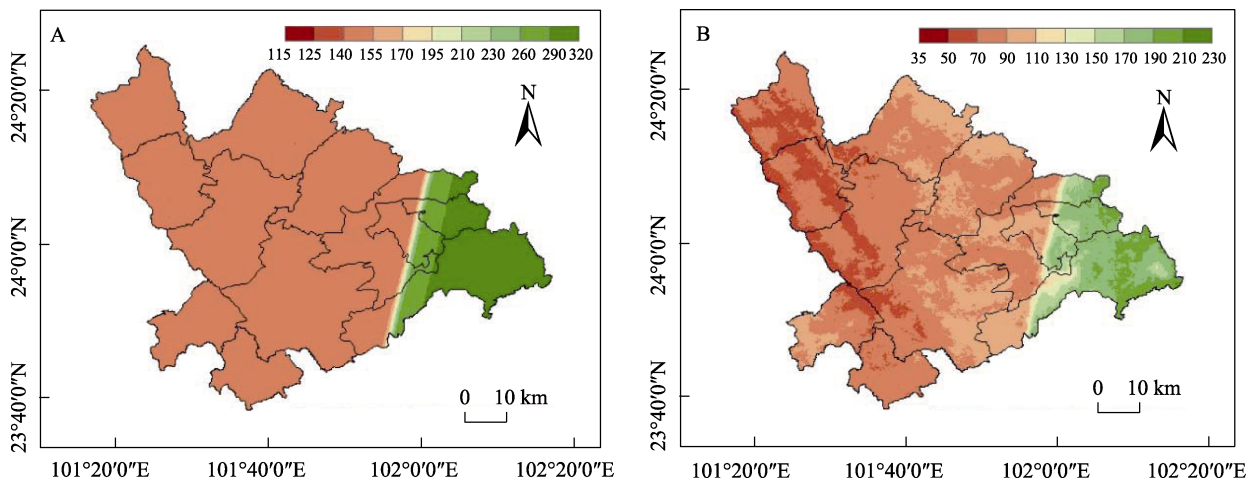
图 2 甘蔗提取技术路线

Fig. 2 Workflow of sugarcane plantations extraction

表 1 数据源介绍

Tab. 1 Introduction of data sources

数据集 ID Data set ID	开始时间 Start date	结束时间 End date	行列号 Path/row No.	空间分辨率 Spatial resolution/m	时间分辨率 Time resolution/d
LANDSAT/LC08 /C02/T1_L2	2019-10-01	2021-07-01	129/043, 129/044, 130/043, 130/044	30	16
COPERNICUS/S2_SR	2019-10-01	2021-07-01	N0208_R104, N0209_R104, N0300_R104, N0208_R061, N0209_R061, N0300_R061	10/20	5



A: 总观测次数; B: 良好观测次数。

A: Total number of observations; B: Number of good observations.

图 3 研究区总观测次数与良好观测次数统计

Fig. 3 Statistics of the total number of observations and the number of good observations in the study area

本研究采用 ZHANG 等^[19]提供的校正系数对 Landsat-8 和 Sentinel-2 影像进行光谱波段校准, 以消除不同卫星传感器之间的差异。计算每张影像的光谱指数: 归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI)^[20]、陆表水分指数 (land surface water index, LSWI)^[21]、增强型植被指数 (enhanced vegetation index, EVI)^[22] 和修正后归一化差异水体指数 (modified normalized difference water index, MNDWI)^[23], 计算公式如式 (1)~(4) 所示。

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}} \quad (1)$$

$$LSWI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{swir}}{\rho_{nir} + \rho_{swir}} \quad (2)$$

$$EVI = 2.5 \times \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + 6 \times \rho_{red} - 7.5 \times \rho_{blue} + 1} \quad (3)$$

$$MNDWI = \frac{\rho_{green} - \rho_{swir}}{\rho_{green} + \rho_{swir}} \quad (4)$$

式中, ρ_{nir} 、 ρ_{red} 、 ρ_{green} 、 ρ_{blue} 、 ρ_{swir} 为影像的近红外波段、红波段、绿波段、蓝波段、短波红外波段的反射率值。

1.3.2 数字高程模型 数字高程模型 (digital elevation model, DEM) 可生成坡度、坡向、剖面图等, 辅助地形地貌分析。本研究所采用的 DEM 开源数据来源于美国国家航空航天局提供的第三级产品, 空间分辨率为 30 m, 产品 ID 为 “USGS/SRTMGL1_003”。由于新平县多山地的地形地貌, 因此本研究考虑引入地形因子来辅助分析甘蔗的地形特征。

1.3.3 野外调查数据 为确定新平县甘蔗的物候特征, 本团队于 2022 年 4 月进行实地调研。样本集由实地调查定位出在 2020 年作物的种植类型未发生改变的样本和谷歌地球结合目视解译的解译样本组成, 包括常绿植被、水体、不透水层、甘蔗与其他农作物。甘蔗与其他农作物的样本组成如表 2 所示。

表 2 甘蔗与其他农作物的样本组成

Tab. 2 Sample composition of sugarcane and other crops

样本类型	土地覆被类型	样本	像元个数
Sample type	Land cover types	Polygons	Number of Pixels
训练样本	甘蔗	180	2 724
	其他农作物	109	24 192
验证样本	甘蔗	274	5 462
	其他农作物	470	50 695

1.4 时间序列影像合成

影像合成压缩了数据的时间维度, 减少了数据冗余, 合成后的时间序列影像十分规则有序^[24], 有利于研究地物的物候特征。最大值合成法可避免云雨天气对遥感影像计算的 NDVI 值存在低值噪声的影响^[25], 因此, 本研究以 10 d 为影像合成的时间窗口, 以最大值合成法生成 NDVI 时间序列, 以均值合成法生成 LSWI、EVI、MNDWI 时间序列, 并将合成后的影像全部重采样为 10 m。采用线性插值法^[25]填补影像由于去云和去云影造成的空洞, 利用移动窗口大小为 9, 滤波器阶数为 2 的 Savitzky-Golay 滤波器来平滑 NDVI 时间序列, 以消除数据噪声影响^[26]。基于此, 本研究构建了新平县 2019 年 10 月 1 日至 2021 年 7 月 1 日的时间序列合成影像数据集。

1.5 甘蔗种植区提取算法

实地调研显示, 新平县的主要土地类型大致分为 4 类: 常绿植被、水体、不透水层和耕地。借鉴前人的理论基础通过遥感指数时间序列对 4 类地物进行提取, 识别算法如表 3 所示。其中, 常绿植被在时间序列中被定义为全年存在超过 90% 的观测值的 LSWI 大于 0 且 EVI 大于 0.2; 水体在时间序列中被定义为全年存在至少 5% 的观测值的 MNDWI 大于 NDVI 且 NDVI 小于 0.1; 不透水层在时间序列中被定义为全年超过 90% 的观测值的 LSWI 小于 0.2。耕地图层通过掩膜常绿植被、水体、不透水层的图层范围得到, 并通过在耕地图层中研究甘蔗与其他作物的物候差异来实现对甘蔗种植区的提取。

表 3 主要非耕地土地覆被类型识别算法

Tab. 3 Algorithm for identification of main non-cropland land cover types

土地覆被类型	算法	参考文献
Land cover types	Algorithm	References
常绿植被	$LSWI > 0, EVI > 0.2$ (Freq > 90%)	[27]
水体	$MNDWI > NDVI, NDVI < 0.1$ (Freq > 5%)	[28]
不透水层	$LSWI < 0.2$ (Freq > 90%)	[29]

植物物候现象是环境条件季节和年际变化最直观、最敏感的生物指示器^[30]。植被指数时间序列能够较好地反映植被的代谢强度及其季节性变化及年际变化。通过研究分析甘蔗与研究区内主要农作物 (水稻、玉米、香蕉) 的 NDVI 时间序

列曲线 (图 4), 发现新平县甘蔗大多在 3 月末至 4 月初播种, 此时甘蔗的 *NDVI* 值最低, 9 月甘蔗的 *NDVI* 值上升到 0.7 以上, 11—12 月甘蔗成熟, 12 月至次年 4 月为甘蔗收割期, 甘蔗的 *NDVI* 值开始下降; 研究区内水稻大多为双季稻, 在 1 年内有 2 个生长周期, 与甘蔗明显不同; 玉米比甘蔗的种植时间晚而收获时间早; 香蕉与甘蔗的 *NDVI* 曲线类似, 但是甘蔗收割后表现出与裸土相似的 *NDVI* 值, 与香蕉明显不同。甘蔗的生长周期较长, 一般在 8 个月至 1 年以上^[31], 并且甘蔗是一种高生物量作物, 因此甘蔗有较长一段时间的 *NDVI* 值处于较高水平。

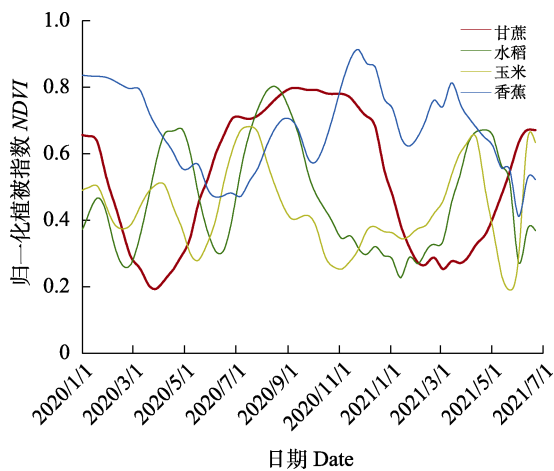


图 4 新平县主要农作物归一化植被指数时间序列曲线
Fig. 4 NDVI time series curve of main crops in Xinping

为了定量研究甘蔗与其他农作物的物候特征差异, 我们引入物候参数来说明。植被指数时间序列被广泛应用于植被物候参数提取^[32]。利用物候参数可以较好地进行农作物分类研究^[33]。本研究根据 *NDVI* 时间序列曲线提取的物候参数如图 5 所示, 物候参数的说明如表 4 所示, 其中基值 (base of season, BOS) 为生长季阶段 *NDVI* 曲线左边最小值 (a 点) 与右边最小值 (f 点) 的均值, 振幅 (amplitude, AMP) 为生长季阶段 *NDVI* 曲线最大值与基值的差值, 上升时间 (rise time, T_r) 表示生长季阶段 *NDVI* 从振幅的 10% (b 点) 上升到振幅的 90% (c 点) 所用的时间, 下降时间 (fall time, T_f) 表示生长季阶段 *NDVI* 从振幅的 90% (d 点) 下降到振幅的 10% (e 点) 所用的时间, 上积分 (above integral of season, AIOS) 表示生长季阶段 *NDVI* 曲线与基值之间的积分, 下积分 (below integral of season, BIOS) 表示生长季阶

段基值与坐标 0 轴之间的积分^[34]。本研究选择物候参数上升时间、下降时间、上积分、下积分作为甘蔗提取的物候特征, 并绘制甘蔗与其他农作物的训练样本在物候参数上升时间、下降时间、上积分、下积分上的直方图分布 (图 6)。本研究基于 90% 的置信区间获取甘蔗训练样本的物候参数范围, 并依据此范围进行研究区内甘蔗种植区的提取。物候参数阈值分布范围为: 上升时间大于 30 d 且小于 190 d, 下降时间大于 70 d 且小于 200 d, 上积分大于 90 且小于 164, 下积分大于 26 且小于 82。

由于新平县地形以山地为主, 因此本研究考虑引入海拔、坡度因子作为山区甘蔗提取的辅助特征。据研究报道, 云南省甘蔗海拔分布范围为 422~1300 m^[35-37], 坡度达到 25° 以上。实地调研显示, 新平县甘蔗种植区大致分布在海拔 480~1330 m, 坡度 30° 以下。因此综合考虑研究报道以及实地调研结果调整研究区内提取甘蔗种植区的海拔及坡度因子范围为海拔为 400~1400 m, 坡度在 30° 以下。

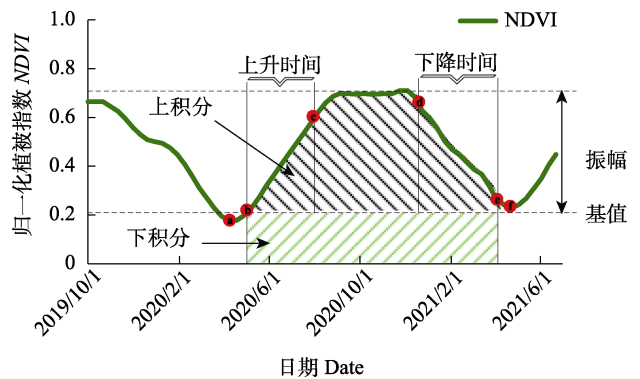


图 5 甘蔗归一化植被指数时间序列曲线
Fig. 5 NDVI temporal profile for sugarcane crop

表 4 物候参数说明

Tab. 4 Description of phenological parameters

物候参数 Phenological parameters	参数含义 Meaning of phenological parameters
基值	生长季阶段 <i>NDVI</i> 曲线左右两侧最低值的平均值
振幅	生长季阶段 <i>NDVI</i> 曲线最大值与基值的差值
上升时间	生长季阶段 <i>NDVI</i> 从振幅的 10% 上升到振幅的 90% 所用的时间
下降时间	生长季阶段 <i>NDVI</i> 从振幅的 90% 下降到振幅的 10% 所用的时间
上积分	生长季阶段 <i>NDVI</i> 曲线与基值之间的积分
下积分	生长季阶段基值与坐标 0 轴之间的积分

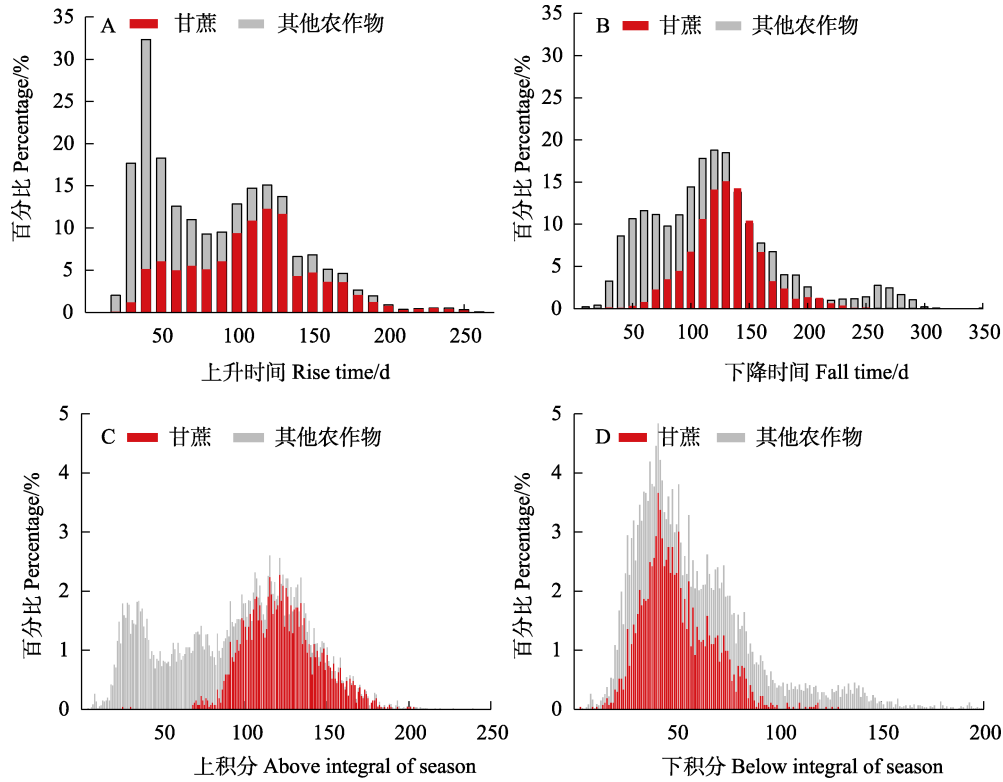


图 6 甘蔗与其他农作物在物候参数上的分布

Fig. 6 Distribution of sugarcane and non-sugarcane crops on phenological parameters

综上,本研究提出的甘蔗种植区提取算法为: $30 < Tr < 190$ 、 $70 < Tf < 200$ 、 $90 < AIOS < 164$ 、 $26 < BIOS < 82$ 、 $400 < elevation < 1400$ 、 $slope < 30$ 。

2 结果与分析

2.1 主要土地类型提取结果

本研究提取的新平县常绿植被、水体、不透水层和耕地如图 7A 所示。图 7B 为图 7A 中标记为 1 区域的细节放大图,绿色区域为新平县常绿植被提取结果的局部示意图;图 7C 为图 7A 中标记为 2 区域的细节放大图,蓝色区域为新平县水体提取结果的局部示意图;图 7D 为图 7A 中标记为 3 区域的细节放大图,粉色区域为新平县不透水层提取结果的局部示意图;图 7E 为图 7A 中标记为 4 区域的细节放大图,黄色区域为新平县耕地提取结果的局部示意图。由图 7A 可知,新平县耕地主要集中在新平县中部及北部。

2.2 甘蔗提取结果及精度评价

为了验证本研究算法对研究区甘蔗的提取精度,依据实地调研情况在 Google Earth 中随机选取 274 个甘蔗样本与 470 个其他农作物样本作为验证样本,基于混淆矩阵构建 OA、Kappa 系数、

PA 和 UA 进行山区甘蔗提取精度评估。新平县甘蔗提取的 OA 达 97.07%, Kappa 系数为 0.83,从分类精度评价指标来看,提取 OA 较高,整体分类精度满足空间分析与实际应用需求。甘蔗提取的 PA 与 UA 分别达到 88.86%和 80.57%,其他农作物 PA 与 UA 分别达到 97.88%和 98.89%,提取面积为 7705 hm^2 ,提取结果较好。

本研究提取的 2020 年新平县的甘蔗种植区分布图见图 8A,其中图 8B 和图 8C 分别为图 8A 中标记为 1、2 区域的细节放大图(透明度 60%的浅绿色区域为识别的甘蔗)。由图 8A 可知,2020 年新平县甘蔗种植区大多分布于新平县中南部及北部,集中于漠沙镇、戛洒镇、老厂乡,其他地区甘蔗种植区零星分布。从甘蔗种植区分布地形地貌来看,2020 年新平县甘蔗种植区多分布于新平县北部及中部偏南,分布于地势较平坦、海拔相对较低的地带,由于新平县地势西北高、东南低,甘蔗种植区也呈现东南多于西北的现象。进一步分析研究区内甘蔗种植区的空间分布情况可知,新平县甘蔗地块分散且不规则,地块边界模糊。该分布图可以作为开展甘蔗种植区长势、灾害等遥感监测的基础数据。从乡镇尺度来看,新

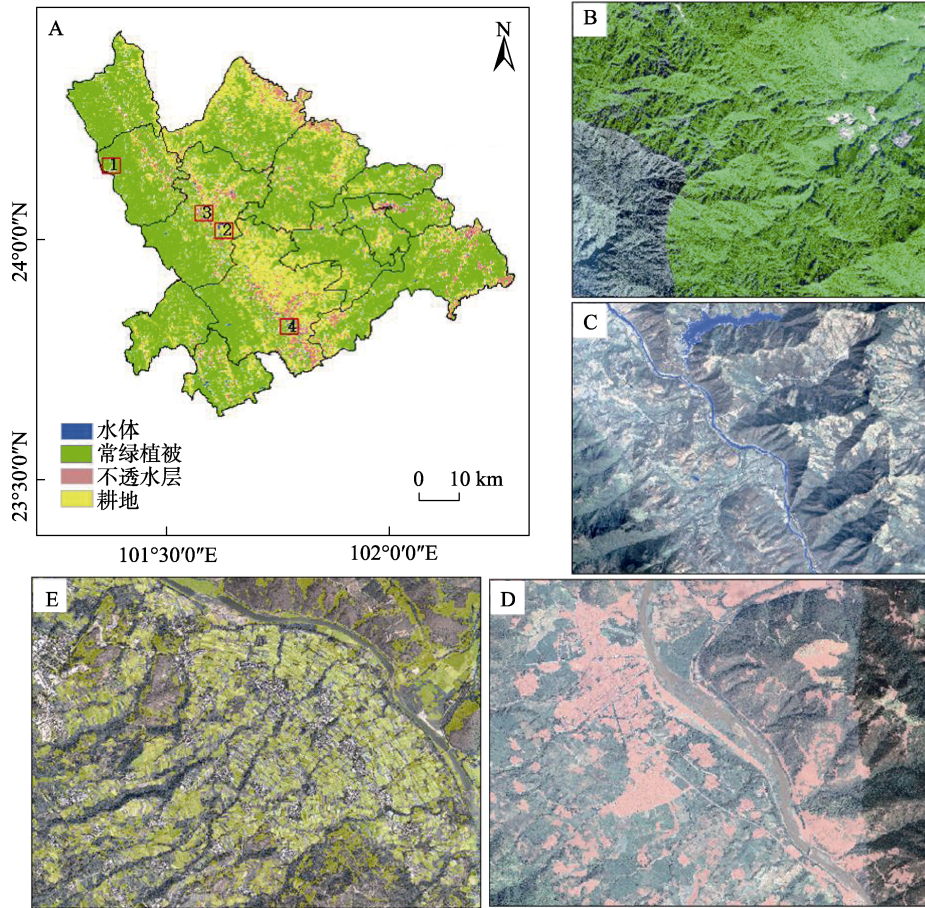


图 7 新平县常绿植被、水体、不透水层、耕地的分布及局部提取效果

Fig. 7 Distribution of evergreen vegetation, water body, impervious, and potential croplands in Xiping

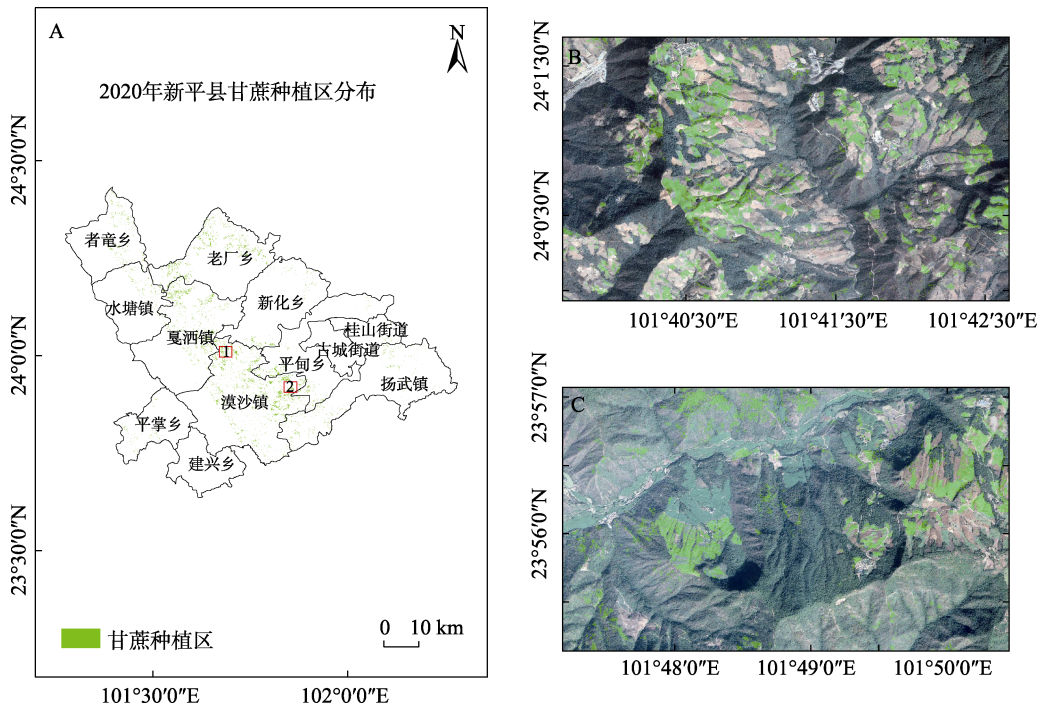


图 8 2020 年新平县甘蔗种植区分布图

Fig. 8 Sugarcane plantations distribution map in 2020 for Xiping

平县甘蔗分布面积较多的区域是漠沙镇、戛洒镇、老厂乡，其中漠沙镇甘蔗分布最多（图 9）。漠沙镇、戛洒镇、老厂乡的甘蔗种植面积分别为 2786、1458、1332 hm^2 ，分别占新平县甘蔗种植面积的 36.16%、18.92%、17.29%。新平县甘蔗分布面积较少的区域分别是古城街道、桂山街道、建兴乡，古城街道甘蔗分布最少，古城街道、桂山街道、建兴乡的甘蔗种植面积分别为 0.87、54.00、13.70 hm^2 ，分别占新平县甘蔗种植面积的 0.01%、0.70%、0.18%。分析发现新平县各乡镇甘蔗提取分布趋势情况与实地调研结果一致。

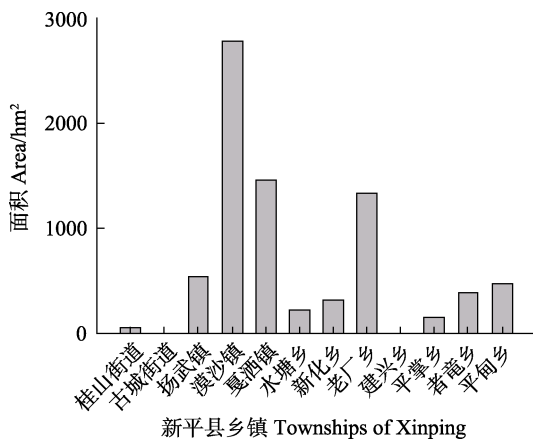


图 9 新平县各乡镇的甘蔗种植区提取面积

Fig. 9 Sugarcane plantations estimates by townships in 2020

2.3 物候参数敏感性分析

对本研究中用到的上升时间、下降时间、上积分、下积分 4 个物候参数进行敏感性分析（图 10）。可以发现，选取上升时间、下降时间、上积分、下积分这 4 个物候参数作为提取山区甘蔗种植区的物候特征时，甘蔗提取算法中甘蔗的 UA 为 88.85% 达到最高，PA 为 80.57%，此时甘蔗的错分误差最小，漏分误差最大。当甘蔗提取算法中物候参数分别设为下降时间、上积分、下积分（Tf+AIOS+BIOS），上升时间、上积分、下积分（Tr+AIOS+BIOS），上升时间、下降时间、上积分（Tr+Tf+AIOS），上升时间、下降时间、下积分（Tr+Tf+BIOS）这 4 种情况时，甘蔗提取算法中甘蔗的 UA 分别下降为 88.50%、79.37%、75.35%、67.20%，PA 分别上升为 82.42%、84.40%、83.52%、85.00%。物候参数敏感性分析表明，选取上升时间、下降时间、上积分、下积分 4 个物候参数参与甘蔗提取算法时甘蔗提取效果最好，4

个物候参数在提取甘蔗时都是重要的物候参数，都是甘蔗制图算法的重要组成部分。本研究甘蔗制图算法中所用物候参数对于耕地中甘蔗种植区的提取有较好的提取能力，有助于甘蔗与其他农作物的物候特征分析。

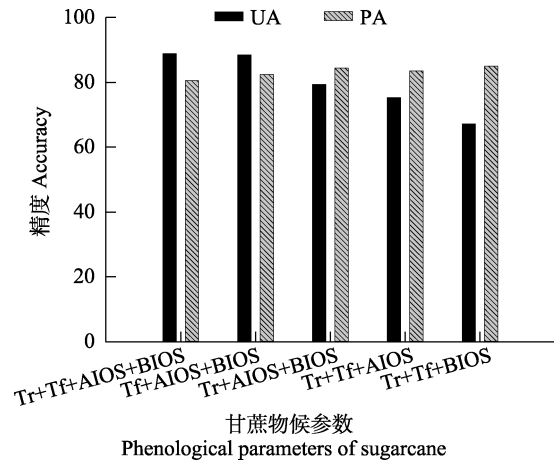


图 10 物候参数敏感性

Fig. 10 Sensitivity of phenological parameters

3 讨论

本研究提出了适用于山区复杂地形，基于 Landsat-8 OLI 与 Sentinel-2 MSI 合成的时间序列遥感影像数据的甘蔗种植区的提取方法。以典型山区甘蔗种植区新平县为研究区，生成一幅 10 m 空间分辨率的 2020 年新平县甘蔗种植区分布图。本研究中甘蔗种植区提取的 OA 为 97.07%，Kappa 系数为 0.83，提取精度较为良好，表明基于 Landsat-8 OLI 与 Sentinel-2 MSI 合成的时间序列遥感影像数据结合光谱指数特征、物候特征与地形特征可以实现山区甘蔗种植区的提取并绘制出甘蔗分布图，精度满足基本需求。提取的新平县甘蔗种植区面积为 7705 hm^2 ，其中漠沙镇、戛洒镇、老厂乡的甘蔗种植最多，总共占新平县甘蔗种植区的 72.37%，古城街道、桂山街道和建兴乡的甘蔗种植最少，总共占新平县甘蔗种植区的 0.89%，可见乡镇间甘蔗种植区分布差异显著。本研究提出的甘蔗种植区提取算法的 UA 和 PA 不是很高，其原因是新平县耕地种植结构复杂，地块破碎，中等空间分辨率的影像像元内可能包含多种地类；本研究选择可免费获取的 Landsat-8 和 Sentinel-2 影像在多云天气的新平县很难保证每个像元在 10 d 内有一幅高质量的卫星影像，经过

插值后的像元值在反映作物生长的真实情况时存在一定的不确定性, 因此未来可利用不受天气影响的 Sentinel-1 A/B 影像来辅助进行甘蔗种植区的提取。

新平县是典型的山区甘蔗种植区, 在利用物候特征提取山区甘蔗时, 多源、多时相遥感数据的融合可极大提高遥感影像的空间与时间分辨率, 尽可能避免山区多云雨、复杂的地形地貌因素导致山区遥感影像质量不高^[38]的问题, 为山区甘蔗提取与精细化制图提供一种有效参考。本研究基于 NDVI 时间序列数据, 借助甘蔗与常绿植被、水体、不透水层、其他农作物在光谱指数特征、物候特征、地形特征上的差异, 采用上升时间、下降时间、上积分、下积分 4 个物候参数以及海拔、坡度因子确定提取甘蔗的最佳阈值, 相较张东东等^[14]学者选择用多时相影像, 单一光谱特征, 利用纯净甘蔗训练样本进行决策树分类的方法来进行甘蔗种植区的提取, 本研究不仅增加了研究区内像元良好观测次数, 克服了山区等多云雨地区影像质量不高的问题, 并且可以更充分地利用甘蔗的生长特征及物候特征, 对甘蔗样本长势情况的依赖相对较小。本研究利用 4 个物候参数确定了甘蔗提取的最佳物候参数阈值, 上升时间、下降时间、上积分、下积分 4 个物候参数在提取甘蔗时都是重要的物候参数, 为未来其他地区的山区甘蔗种植区提取提供重要的物候特征参考。

研究区内地貌复杂, 耕地破碎度较高, 由于研究区海拔及气候等因素的影响, 耕地在休耕期会出现杂草丛生, 作物收割残留枝叶等现象, 在影像上导致光谱混淆, 容易出现“异物同谱”现象。因此, 使得在甘蔗种植区提取过程中难免出现错提或漏提现象。今后考虑将使用更高分辨率的遥感数据或运用更小的时间分辨率组成的时间序列数据来进一步提高提取的精度, 建立普适性更高的山区甘蔗种植区提取算法。本研究的提取精度虽然满足县域的山区甘蔗提取精度, 适用于作为当地农业部门的决策建议, 但是甘蔗提取的用户精度和制图精度还是有待提高。希望之后考虑通过引入甘蔗的纹理特征等, 提高山区甘蔗的提取精度, 实现山区甘蔗的精细化提取。

参考文献

[1] 胡朝晖, 潘永保, PONRAGDEE W. 蔗糖主产国甘蔗单产

及产糖率改良进展[J]. 中国糖料, 2021, 43(4): 75-80.

HU Z H, PAN Y B, PONRAGDEE W. Improvement of cane yield and cane sugar recovery in main cane sugar producing countries[J]. Sugar Crops of China, 2021, 43(4): 75-80. (in Chinese)

[2] 谭宗琨, 何燕, 黄中艳, 欧钊荣, 丁美花. 云南气候对甘蔗产量和蔗糖分的影响分析[J]. 甘蔗糖业, 2008(1): 15-21, 14.

TAN Z K, HE Y, HUANG Z Y, OU Z R, DING M H. Analysis on the influence of Yunnan climate on sugarcane yield and sucrose content[J]. Sugarcane and Canesugar, 2008(1): 15-21, 14. (in Chinese)

[3] 全怡吉, 武晋宇, 李如丹, 樊仙, 刀静梅, 杨绍林, 邓军. 云南省蔗糖产业发展现状分析[J]. 中国糖料, 2019, 41(4): 76-80.

QUAN Y J, WU J Y, LI R D, FAN X, DAO J M, YANG S L, DENG J. Analysis on the current situation of cane sugar industry in Yunnan Province[J]. Sugar Crops of China, 2019, 41(4): 76-80. (in Chinese)

[4] 石娴, 明艳芳, 刘春秀, 瞿渝, 隋淞蔓. 时序影像在冬小麦种植区提取中的应用分析[J]. 无线电工程, 2021, 51(12): 1567-1576.

SHI X, MING Y F, LIU C X, QU Y, SUI S M. Analysis on the application of time series image in extraction of winter wheat planting area[J]. Radio Engineering, 2021, 51(12): 1567-1576. (in Chinese)

[5] GOMEZ C, WHITE J C, WULDER M A. Optical remotely sensed time series data for land cover classification: a review[J]. Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2016, 116: 55-72.

[6] 边增滢, 王文, 江渊. 黑河流域中游地区作物种植结构的遥感提取[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(10): 1629-1641.

BIAN Z G, WANG W, JIANG Y. Remote sensing of cropping structure in the middle reaches of the Heihe River Basin[J]. Journal of Geo-information Science, 2019, 21(10): 1629-1641. (in Chinese)

[7] 刘吉凯, 钟仕全, 徐雅, 陈燕丽. 基于多时相 GF-1WV 数据的南方丘陵地区甘蔗种植面积提取[J]. 广东农业科学, 2014, 41(18): 149-154.

LIU J K, ZHONG S Q, XU Y, CHEN Y L. Sugarcane extraction in the southern hills using multi-temporal GF-1 WV data[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2014, 41(18): 149-154. (in Chinese)

[8] 陈帮乾, 云挺, 安锋, 寇卫利, 李海亮, 罗红霞, 杨川, 王琴飞, 孙瑞, 吴志祥. 基于 Landsat 和 Sentinel-2 时间序列影像的海南西部橡胶林龙卷风灾情评估[J]. 遥感学报, 2021, 25(3): 816-829.

CHEN B Q, YUN T, AN F, KOU W L, LI H L, LUO H X,

- YANG C, WANG Q F, SUN R, WU Z X. Assessment of tornado disaster in rubber plantation in western Hainan using Landsat and Sentinel-2 time series images[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(3): 816-829. (in Chinese)
- [9] 古晓威, 陈帮乾, 云挺, 李广洋, 吴志祥, 寇卫利. 基于多源遥感数据的海南岛 2007—2018 年森林时空变化研究[J]. *热带作物学报*, 2022, 43(2): 418-429.
- GU X W, CHEN B Q, YUN T, LI G Y, WU Z X, KOU W L. Spatio-temporal changes of forest in Hainan Island from 2007 to 2018 based on multi-source remote sensing data[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2022, 43(2): 418-429. (in Chinese)
- [10] 冯实磊. 基于多源卫星遥感数据的多云雨雾地区水稻种植面积提取方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- FENG S L. Study on extraction method of rice planting area in cloudy rain and fog area based on multi-source satellite remote sensing data[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020. (in Chinese)
- [11] 谭深, 吴炳方, 张鑫. 基于 Google Earth Engine 与多源遥感数据的海南水稻分类研究[J]. *地球信息科学学报*, 2019, 21(6): 937-947.
- TAN S, WU B F, ZHANG X. Mapping paddy rice in the Hainan Province using both Google Earth Engine and remote sensing images[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2019, 21(6): 937-947. (in Chinese)
- [12] ZHENG Y, LI Z, PAN B, LIN S, DONG J, LI X, YUAN W. Development of a phenology-based method for identifying sugarcane plantation areas in China using high-resolution satellite datasets[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(5): 1274.
- [13] ALEXANDRE C X, BERNARDO F T R, YOSIO E S, LUCIANA M S B, MAURICIO A M. Multi-temporal analysis of MODIS data to classify sugarcane crop[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(4): 755-768.
- [14] 张东东, 周振, 宋晓东. 基于 HJ 卫星的中国南方地区甘蔗面积提取研究[J]. *中国农学通报*, 2019, 35(16): 141-147.
- ZHANG D D, ZHOU Z, SONG X D. Study on sugarcane crop classification in southern China based on HJ-1 CCD images[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35(16): 141-147. (in Chinese)
- [15] WANG J, XIAO X, LIU L, WU X, QIN Y, STEINER J L, DONG J. Mapping sugarcane plantation dynamics in Guangxi, China, by time series Sentinel-1, Sentinel-2 and Landsat images[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 247: 111951.
- [16] 周楠, 杨鹏, 魏春山, 沈占锋, 余娟娟, 马晓宇, 骆剑承. 地块尺度的山区耕地精准提取方法[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(19): 260-266.
- ZHOU N, YANG P, WEI C S, SHEN Z F, YU J J, MA X Y, LUO J C. Accurate extraction method for cropland in mountainous areas based on field parcel[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(19): 260-266. (in Chinese)
- [17] 潘钰涵, 段兴武, 赵文娟. 新平县干热河谷地区农业规模化对农户生计多样化的影响研究[J]. *云南地理环境研究*, 2021, 33(5): 41-48.
- PAN Y H, DUAN X W, ZHAO W J. The impact of agricultural scale development on farmers'livelihood diversification in dry-hot valley of Xiping County[J]. *Yunnan Geographic Environment Research*, 2021, 33(5): 41-48. (in Chinese)
- [18] 胡冬梅, 夏怡, 杨云光, 陶奕林, 吕丽, 普家荣. 玉溪蔗糖产业发展的现状与思考[J]. *中国热带农业*, 2021(3): 19-24.
- HU D M, XIA Y, YANG Y G, TAO Y L, LYU L, PU J R. Present situation and thoughts on the sucrose industry development in Yuxi[J]. *China Tropical Agriculture*, 2021(3): 19-24. (in Chinese)
- [19] ZHANG H K, ROY D P, YAN L, LI Z B, HUANG H Y, VERMOTE E, SKAKUN S, ROGER J C. Characterization of Sentinel-2A and Landsat-8 top of atmosphere, surface, and nadir BRDF adjusted reflectance and NDVI differences[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 215: 482-494.
- [20] TUCKER C J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1979, 8(2): 127-150.
- [21] XIAO X, BLOLES S, LIU J, ZHUANG D F, FROLKING S, LI C S, SALAS W, MOORE B. Mapping paddy rice agriculture in southern China using multi-temporal MODIS images[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 95(4): 480-492.
- [22] HUETE A, DIDAN K, MIURA T, RODRIGUEZ E P, GAO X, FERREIRA L G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1-2): 195-213.
- [23] XU H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(14): 3025-3033.
- [24] 田海峰. 基于 Sentinel-1&2 卫星影像的中国主产区冬小麦遥感识别研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
- TIAN H F. Study on mapping for winter wheat distribution in China based on Sentinel-1&2 images[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese)
- [25] LIU L, XIAO X, QIN Y, WANG J, XU X, HU Y, QIAO Z. Mapping cropping intensity in China using time series Landsat and Sentinel-2 images and Google Earth Engine[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 239: 111624.

- [26] CHEN Y, LU D, MORAN E, BATISTELLA M, DUTRA L V, SANCHES I D, SILVA R F B D, HUANG J F, LUIZ A J B, OLIVEIRA M A F D. Mapping croplands, cropping patterns, and crop types using MODIS time-series data[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, 69: 133-147.
- [27] DONG J, XIAO X, KOU W, QIN Y, ZHANG G, LI L, JIN C, ZHOU Y, WANG J, BIRADAR C, LIU J, MOORE B. Tracking the dynamics of paddy rice planting area in 1986–2010 through time series Landsat images and phenology-based algorithms[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 160: 99-113.
- [28] ZOU Z, XIAO X, DONG J, WANG J. Divergent trends of open-surface water body area in the contiguous United States from 1984 to 2016[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115(15): 3810-3815.
- [29] QIN Y, XIAO X, DONG J, CHEN B, LIU F, ZHANG G, ZHANG Y, WANG J, WU X. Quantifying annual changes in built-up area in complex urban-rural landscapes from analyses of PALSAR and Landsat images[J]. *Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2017, 124: 89-105.
- [30] 陈效述, 王林海. 遥感物候学研究进展[J]. *地理科学进展*, 2009, 28(1): 33-40.
CHEN X Q, WANG L H. Progress in remote sensing phenological research[J]. *Progress in Geography*, 2009, 28(1): 33-40. (in Chinese)
- [31] 谭宗琨, 吴良林, 丁美花, 杨鑫, 欧钊荣, 何燕, 匡昭敏. EOS/MODIS 数据在广西甘蔗种植信息提取及面积估算的应用[J]. *气象*, 2007, 33(11): 76-81.
TAN Z K, WU L L, DING M H, YANG X, OU Z R, HE Y, KUANG Z M. Study on the extraction of sugar-cane planting areas from EOS/MODIS data[J]. *Meteorological Monthly*, 2007, 33(11): 76-81. (in Chinese)
- [32] 刘良云. 植被定量遥感原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
LIU L Y. The principle and application of vegetation quantitative remote sensing[M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese)
- [33] 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.
MA C, YANG F, WANG X C. Extracting tea plantations in southern hilly and mountainous region based on mesoscale spectrum and temporal phenological features[J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2019, 31(1): 141-148. (in Chinese)
- [34] JONSSON P, EKLUNDH L. TIMESAT—a program for analyzing time-series of satellite sensor data[J]. *Computers & Geosciences*, 2004, 30(8): 833-845.
- [35] 李有良. 新平县甘蔗生产浅析[J]. *甘蔗*, 2003, 10(4): 49-55.
LI Y L. A discussion on sugarcane production in Xinpian[J]. *Sugarcane*, 2003, 10(4): 49-55. (in Chinese)
- [36] 张翠英, 普金安, 杨兆贵, 普家荣. 新平县蔗糖产业发展现状及对策探讨[J]. *南方农业*, 2019, 13(12): 123-124.
ZHANG C Y, PU J A, YANG Z G, PU J R. The development status and countermeasures of cane sugar industry in Xinpian County[J]. *South China Agriculture*, 2019, 13(12): 123-124. (in Chinese)
- [37] 李如丹, 张跃彬, 杨丹彤, 区颖刚, 郭家文. 云南蔗区多样性地形发展甘蔗全程机械化潜力研究[J]. *中国农机化*, 2012, 33(4): 71-74, 51.
LI R D, ZHANG Y B, YANG D T, OU Y G, GUO J W. Study on development potential of full mechanization in diversity terrain of Yunnan sugarcane region[J]. *Chinese Agricultural Mechanization*, 2012, 33(4): 71-74, 51. (in Chinese)
- [38] 雷光斌, 李爱农, 边金虎, 张正健, 张伟, 吴炳方. 基于阈值法的山区森林常绿、落叶特征遥感自动识别方法: 以贡嘎山地区为例[J]. *生态学报*, 2014, 34(24): 7210-7221.
LEI G B, LI A N, BIAN J H, ZHANG Z J, ZHANG W, WU B F. A practical method for automatically identifying the evergreen and deciduous characteristic of forests at mountainous areas: a case study in Mt. Gongga Region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(24): 7210-7221. (in Chinese)