

doi: 10.6046/zrzyyg.2021343

引用格式: 王宇,周忠发,王玲玉,等. 基于 Sentinel-1 的喀斯特高原山区种植结构空间分异研究[J]. 自然资源遥感,2022,34(4):155-165. (Wang Y,Zhou Z F,Wang L Y,et al. Sentinel-1-based spatial differentiation study of the planting structures in Karst plateau mountainous areas[J]. Remote Sensing for Natural Resources,2022,34(4):155-165.)

基于 Sentinel-1 的喀斯特高原山区 种植结构空间分异研究

王 宇^{1,2,3}, 周忠发^{1,2}, 王玲玉^{1,3}, 骆剑承⁴, 黄登红^{1,3}, 张文辉^{1,2,3}
(1. 贵州师范大学地理与环境科学学院/喀斯特研究院,贵阳 550001; 2. 贵州省喀斯特山地生态环境
国家重点实验室培育基地,贵阳 550001; 3. 国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心,
贵阳 550001; 4. 中国科学院空天信息创新研究院,北京 100101)

摘要:喀斯特山区受多云多雨复杂天气影响,遥感技术应用于种植结构信息提取具有较大难度,基于 Sentinel-1 进行作物识别在精准农业中具有独特优势,可及时、准确地掌握区域主要作物种植信息,对于制定农业政策和指导农业生产具有重要意义。文章以贵州省关岭县作为研究区,采用 2020 年 Google Earth 影像、4—8 月时序 Sentinel-1 数据和无人机遥感数据,利用 D_LinkNet 模型进行地块提取,基于 LightGBM 模块进行种植结构分类,结合地理探测器探究研究区主要作物空间分异特征及种植结构空间分异的影响机理。研究表明:①关岭县作物分布呈“西北多,东南少”格局,空间分布不均衡;②因子交互作用的影响均比单一因子影响程度大,交通区位与排涝能力是影响耕地分布的主要因素,次要因子为高程与交通区位等因子;③作物种植结构提取结果与统计年鉴比例一致,混淆矩阵总体精度为 0.87,Kappa 系数为 0.83。研究结果有利于理解喀斯特山区不同粮食作物种植结构空间分异的形成机理及其差异,为种植结构优化调整、影响因素分析提供科学依据。

关键词:喀斯特;耕地利用;种植结构;Sentinel-1;空间分异

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2022)04-0155-11

0 引言

准确的农业信息是保障区域粮食安全的重要基础,对估算作物产量信息和种植面积具有重要意义,可反映不同耕作制度、社会经济、地理位置条件下人类对耕地资源的差别化利用方式^[1]。喀斯特高原山区具有耕地总量不足、人均占有量少、耕地分布不均的特点,精确掌握作物种植结构信息可提高农户种植效率并为后期种植结构调整提供参考^[2-4]。传统耕地种植结构的监测依赖数理统计和人工调查等方式,有着形式粗放、效率低下等诸多不足。而基于遥感的手段可以快速、高效、精准地获取大范围耕地种植结构信息,是未来农业监测的重点应用方向。

自 20 世纪 70 年代以来,美国和欧洲已有成熟的大面积作物监测技术,可为全球粮食贸易、粮食安

全提供重要参考信息^[5]。农作物种植结构提取基础是基于光谱特征差异即光谱特征,可通过不同数据源包括单一影像提取,利用单波段特征量与背景特征差异进行分类^[6-8],但易受卫星重访周期影响;时序影像提取可通过单一特征量^[9-10]、多特征量参量^[11-12]及建立特征量的统计模型法,建立“光谱-时序”的定量关系函数解决混合像元问题,以提高分类精度。

遥感作物分类可通过光学遥感和雷达遥感获得,然而在中国西南部地区有效的光学遥感图像(云层覆盖率低于 20%)难以获取。Sentinel-1 雷达数据具有不受云雨天气影响、全天时、全天候监测的特点可用于时序监测,该数据被认为是多云多雨地区农业监测的重要信息源之一。基于雷达数据集进行种植结构提取的作物包括水稻、小麦和玉米等^[13-15]。种植结构影响因素分析需考虑劳动力价

收稿日期: 2021-10-18; 修订日期: 2022-03-10

基金项目: 贵州省“高层次创新型人才培养计划‘百’层次人才”项目(编号: 黔科合平台人才[2016]5674)、贵州省“第三次国土调查石漠化耕地与五千亩大坝专题”研究项目(编号: GTGHY2018)、贵州省研究生科研基金项目(编号: 黔教合 YJSCXJH[2020]103)及贵州省科学技术基金资助项目“黔科合基础-ZK[2021]一般 194”共同资助。

第一作者: 王 宇(1995-),女,硕士研究生,主要从事喀斯特资源遥感应用研究。Email: 1346527820@qq.com。

通信作者: 周忠发(1969-),男,教授,博士生导师,主要从事地理信息系统与遥感研究。Email: fa6897@163.com。

格、人口结构、技术进步、政策环境、基础设施和农业区位等社会经济因素^[16-19],以及气候^[20-21]、水资源^[22-24]和地形等自然因素^[25]对种植结构空间分异的影响,探究耕地种植结构空间分异的影响因素是作物时空变化机制及模拟等研究的基础^[26],也是种植结构优化调整及其政策制定的重要依据。

贵州省地处中国西南腹地,生态环境复杂多样,耕地分布不均衡、耕地人均占比较低,准确把握耕地种植结构特征是提高耕地使用效率的重要基础。研究基于 2020 年 Google Earth 影像利用 D_LinkNet 模型提取地块边界信息,以时序 Sentinel-1 数据为基础结合 LightGBM 模块提取耕地地块种植结构信息,分析主要作物种植结构空间分异特征,从地形、土壤、管理及区位条件 4 个方面选取 9 个影响因子,以 500 m×500 m 地理格网进行分区统计并运用地理探测器模型探究单一因子和因子交互作用对耕地种植结构空间分异的影响,探明种植结构形成机理、准确把握种植结构空间分异的影响因素,以期探究农作物空间格局变化的机理机制奠定研究基础和推进种植结构优化调整提供参考。

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区概况

本文以贵州省安顺市关岭布依族苗族自治县(下文简称关岭县)为研究区,地处 E105. 15°~105. 49°,N25. 34°~26. 05°,是喀斯特山区典型县域。以亚热带季风湿润气候为主,年平均气温为 16. 2°,年降水量为 1 205. 1~1 656. 8 mm,土壤类型主要为黏土、壤土及砂土。关岭县国土面积为 1 468 km²,地貌类型多样,其中山地面积为 752. 6 km²,占全县总面积的 51. 27%,海拔在 800~1 500 m 之间^[27-28](图 1)。其属于典型农业大县,农业经济产值占国民经济总产值的 24. 81%,其中,以水稻、蔬菜、玉米和甘蔗等

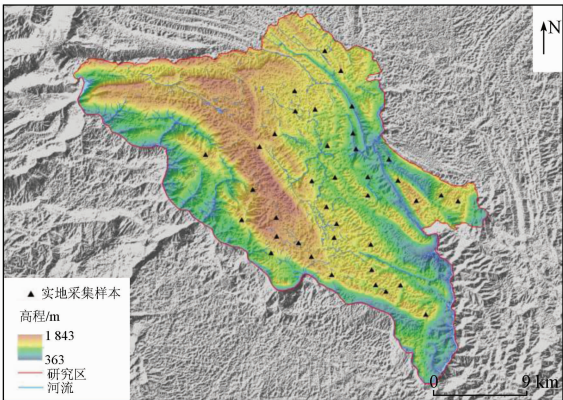


图 1 研究区概况
Fig. 1 Overview of the study area

作物占农业种植总产量的 99. 41%。

1.2 数据源及其处理

光学遥感影像数据来自于 Google Earth,是卫星影像与航拍数据的整合,年份为 2020 年,层级为 20 级,空间分辨率为 0. 27 m,具有 RGB 共 3 个可见光波段,可用于作物地块种植结构分类信息核准;DEM 来源于 [http://www. gscloud. cn](http://www.gscloud.cn),空间分辨率为 30 m;坡度数据通过 ArcGIS10. 2 软件空间分析工具处理 DEM 计算得到;耕地土壤、管理条件、区位条件和石漠化等级数据来源于国家遥感中心贵州分部,石漠化分级数据空间分辨率为 2. 5 m。

Sentinel-1 数据来源于 [https://search. asf. alaska. edu](https://search.asf.alaska.edu),研究选取作物生长期 2020 年 4—8 月 5 期哨兵数据(表 1),VV 极化方式,时间分辨率 12 d,利用 SNAP4. 0 软件进行轨道校正、辐射定标、多视、地形校正、TOPS Split 操作和镶嵌等预处理,得到农作物种植结构信息分类的时序数据集^[29]。

表 1 哨兵一号卫星影像信息

Tab. 1 Sentinel-1 satellite image information

序号	数据级别	成像卫星	成像日期	成像模式	轨道号
1	SLC	Sentinel-1 A	20200423	IW	32261
2	SLC	Sentinel-1 A	20200517	IW	32611
3	SLC	Sentinel-1 A	20200623	IW	33136
4	SLC	Sentinel-1 A	20200728	IW	33661
5	SLC	Sentinel-1 A	20200822	IW	34186

野外观测数据来源于 2020 年 4—8 月 5 次前往关岭县进行无人机数据采集和实地验证。因研究区海拔高差较大,实地观测数据为无人机影像,使用 Altizure 软件规划航线,设置航高设计 90 m,航向重叠度为 80%,旁向重叠度为 70%,正射影像拼接使用 Pix4D Mapper4. 1 软件,预处理为航片筛选、空三加密和数字产品生产,获取 122 景无人机影像^[30]。

2 研究方法

利用 D_LinkNet 模型进行地块提取,基于 LightGBM 模块进行种植结构分类,以 500 m×500 m 为间隔建立地理格网,进行分区统计与地理探测器模型分析,揭示水稻、蔬菜、玉米和甘蔗 4 种主要作物种植结构的时空分异特征。

2.1 D_LinkNet 模块提取耕地

提取耕地为边界明显的地块,具体技术流程见图 2,利用 2020 年 Google Earth 影像将基本的耕地形态分类为平缓耕地、狭长形耕地及边缘模糊型,选取平缓耕地、狭长形耕地及边缘模糊型各样本 50 个,形状为正方形,边长 500 m,结合不同耕地形态特征建立深度学习边缘模型以及基于 D_LinkNet^[31]

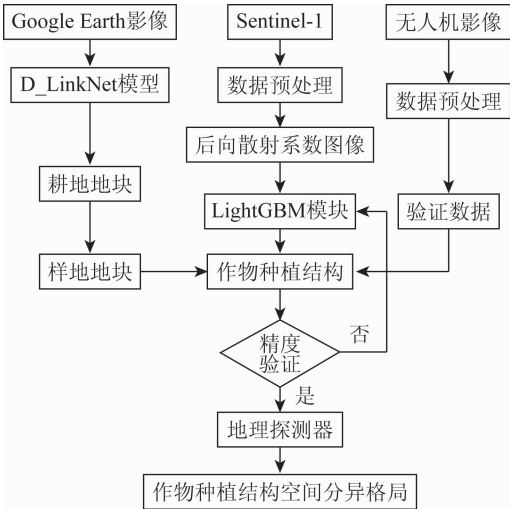


图2 作物种植结构信息提取技术流程
Fig.2 Extraction technology flow of crop planting structure information

模型进行语义分割,并增加 ResNet34,更符合于高精度遥感影像的像素要求,与西南高原山区地类分布不均相适应^[32-35]。并在 2020 年关岭县无人机影像和 30 m 分辨率 DEM 数据的辅助下校验和实地验证,提取到 277 009 个耕地地块数据,并以此为耕地基准,提取作物种植结构信息。部分农业用地的精确边界见图 3,红色为边界线。

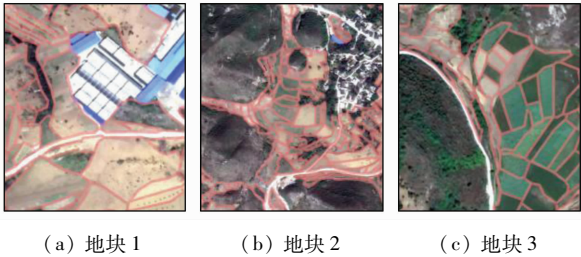


图3 农业用地的精确边界
Fig.3 Precise boundaries of agricultural land

2.2 Sentinel - 1 提取种植结构与验证

Sentinel - 1 数据具有不受云雨天气影响的特点,下载 2020 年 4—8 月影像,通过 SNAP 软件进行预处理后所得到后向散射系数。利用 LightGBM 模块进行分类,该模块属于机器学习,是基于决策树算法的梯度提升框架,多用于排序、分类、回归以及其他的机器学习任务中,具有高效、分布式的优点^[36-39]。田间采集样本 9 050 个农作物种植结构信息。研究区主要作物为水稻、蔬菜、玉米和甘蔗,以此为样本利用 LightGBM 模块进行作物分类。因地块种植结构较为单一,不考虑多个作物混种地块,并根据野外采集的样本数据(图 1),利用混淆矩阵对分类结果进行精度验证。

2.3 地理探测器法

地理探测器是探测空间分异性,揭示驱动因子

的统计学方法,其能够探测单一因子以及 2 个因子交互作用对因变量的影响,并检验其统计显著性^[40-43]。运用地理探测器的分异功能及因子探测功能和交互作用,分析各类单一因子和因子交互作用对耕地作物空间分布的影响,根据研究区实际情况构建评价指标体系。由于研究区地域跨度小,研究范围内气候差别不大,区域内相关农业政策基本一致,且农业种植技术相差不大,因此不考虑政策等因素影响。研究区为典型的喀斯特高原山区着重分析作物生长的必要条件、区位条件影响和空间数据的可获取性,本文从地形条件、土壤条件、区位条件及管理条件 4 个方面选取 9 个因子,如表 2 所示。

表 2 种植结构影响因素的变量选取及分类
Tab.2 Variable selection and classification of influencing factors of cultivated land planting structure

类型	变量	指标说明与计算方法	分类
地形条件 <i>T</i>	高程 T_1	统计各网格内高程平均值	自然断点法分为 5 类
	坡度 T_2	统计各网格内坡度平均值	自然断点法分为 5 类
	石漠化等级 T_3	统计各网格中心石漠化等级	5 类: 非喀斯特耕地、无石漠化、轻度石漠化、中度石漠化、重度石漠化
土壤条件 <i>S</i>	土壤质地 S_1	统计各网格中心点土壤质地类型	3 类: 黏土、壤土、砂土
区位条件 <i>L</i>	市场区位 L_1	统计各网格城镇欧氏距离平均值	自然断点法分为 5 类
	交通区位 L_2	统计各网格距公路欧氏距离平均值	自然断点法分为 5 类
管理条件 <i>M</i>	灌溉潜力 M_1	统计各网格距河流欧氏距离平均值	自然断点法分为 5 类
	排涝能力 M_2	统计各网格距沟渠欧氏距离平均值	自然断点法分为 8 类
	耕作便利度 M_3	统计各网格距居民点欧氏距离平均值	自然断点法分为 5 类

其中,可采取手动分类和自然断点法进行差别化的变量分类,区位条件计算时需将道路空间数据转换为栅格并进行欧氏距离计算后,再与网格所对应计算平均值。河流和沟渠为第三次土地调查数据库中的线状及面状河流、沟渠数据,公路包括公路用地和农村道路。

3 结果与分析

3.1 种植结构信息与精度验证结果

按照每类作物 7:3 的比例划分训练数据集与测试集,利用 LightGBM 模块分类后得到地块种植结构预测精度为 80.38%,获得 27 万个地块的属性信

息,其中各类作物占比如图 4 所示。

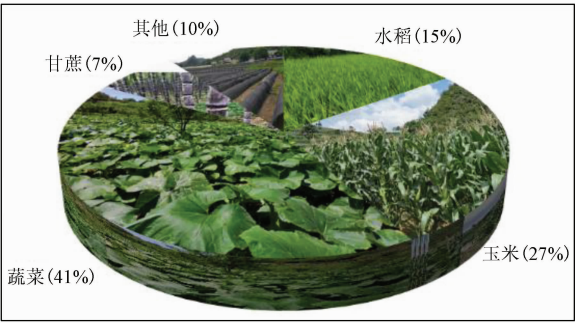


图 4 耕地种植结构类型统计
Fig. 4 Statistical chart of cultivated land planting structure type

训练精度存在误差可能受地块内作物多样、玉米与甘蔗在幼苗期与生长期纹理区别不明显及山区对后向散射系数的干扰,利用混淆矩阵模型得到生产精度为0.88,用户精度为0.85,总体精度为0.87,Kappa 系数为0.83(图 5)。

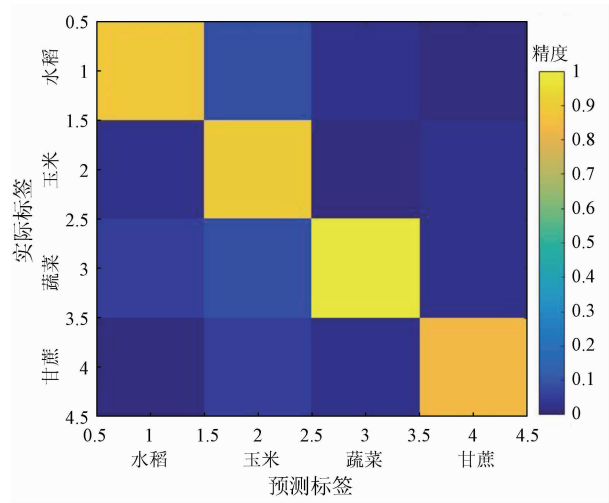


图 5 混淆矩阵验证
Fig. 5 Confusion matrix verification diagram

3.2 耕地种植结构的时空分异特征分析

基于水稻、玉米、蔬菜和甘蔗 4 种作物种植地块空间分布矢量数据,叠加地形、土壤类型、管理及区位条件空间栅格数据,进行欧氏距离计算、自然断点法处理后,以 500 m×500 m 的地理格网进行栅格信息提取,最终获得 20 000 个有效网格数据点。

3.2.1 耕地种植结构的空间分布特征

甘蔗种植地块数量相对最低,种植甘蔗的地块比例为 7.34%,甘蔗种植地块密度高值区主要集中在关索街道南部、八德乡西南部及花江镇西北部,零星分布于沙营镇南部、普利乡东部。水稻和玉米种植地块数量相对较少,种植水稻、玉米的地块比例分别为 14.66% 和 26.86%,水稻种植地块密度高值区主要集中在花江镇中部、新铺镇东北部、八德乡东南部,零星分布于坡贡镇东部、普利乡中部、永宁镇东

南部,玉米种植地块密度高值区主要集中于永宁镇东南部、顶云街道南部、八德乡西北部、新铺镇东北部,零星分布于沙营镇东南部。板贵镇中部蔬菜地块数量相对较多,种植蔬菜的地块比例为 40.83%,蔬菜种植地块密度高值区主要集中于顶云街道南部、新铺镇西南部及花江镇中部和西南部,零星分布于沙营镇中部、白水镇东北部和八德乡西北部,研究区种植结构信息与《关岭自治县 2018 年国民经济和社会发展统计公报》^[44]中种植结构比例相吻合。种植结构分布见图 6。

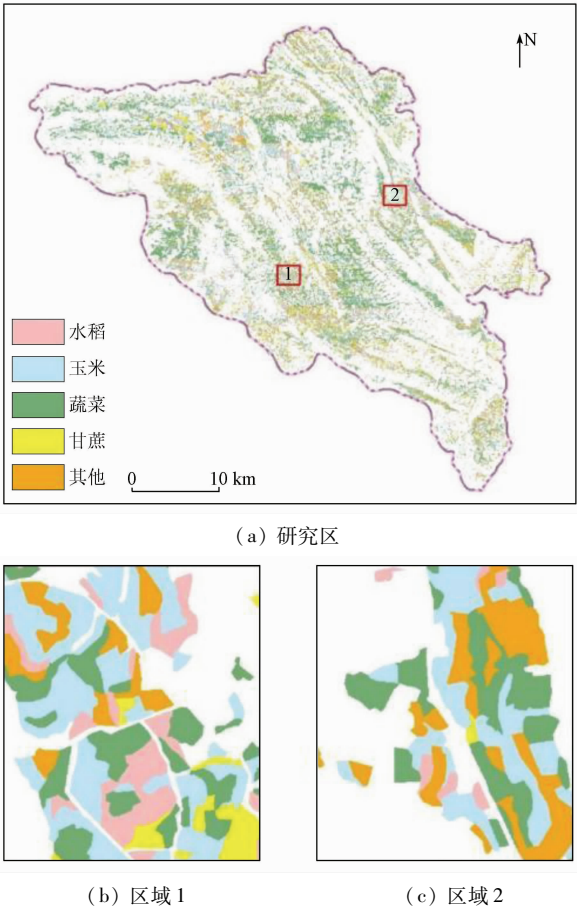


图 6 种植结构分布
Fig. 6 Distribution of planting structure

3.2.2 耕地种植结构空间分异的影响因素分析

3.2.2.1 单一因子对耕地种植结构的影响

各单因子对水稻、玉米、蔬菜和甘蔗 4 种作物种植结构空间分异的影响具有较大差异,结果均通过了显著性检验(图 7)。水稻种植结构的时空分异主导影响因子较多为高程(T_1)、坡度(T_2)、交通区位(L_2)、耕作便利度(M_3)与其他因子的交互作用影响显著。说明水稻种植结构空间分异与地形条件、交通区位及管理条件密切相关,区位条件交互作用影响高于土壤质地。单因子石漠化等级(T_3)、市场区位(L_1)和排涝能力(M_2)单因子影响不显著,高程(T_1)、坡度(T_2)和土壤质地(S_1)单因子影响相

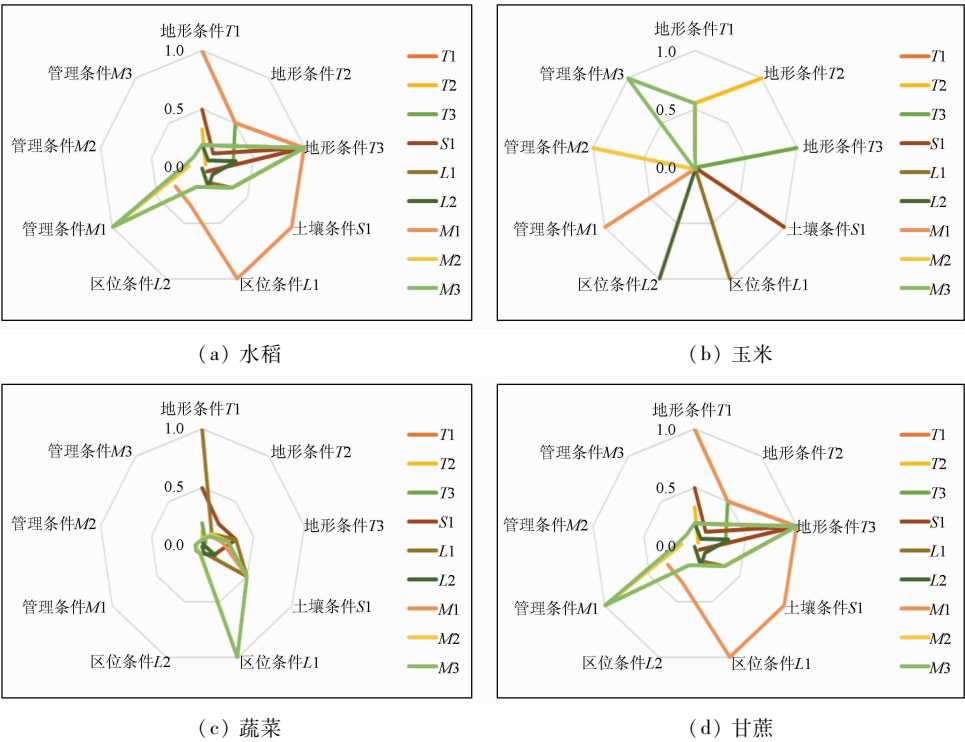


图 7 单因子对种植结构影响雷达图

Fig. 7 Radar diagram of single factor influence on planting structure

对显著。影响玉米种植结构空间分异的影响作物种植结构空间分异的主导因子为高程 ($T1$)、坡度 ($T2$) 和土壤质地 ($S1$) 等。此外,高程 ($T1$) 和坡度 ($T2$) 单因子对玉米种植结构空间分布影响程度高。由此看出玉米种植结构空间分异影响因素与水稻不尽相同。蔬菜种植结构空间分异受地形条件影响最大,区位条件也是重要的影响因素,但土壤条件与管理条件的影响程度相对较小。影响甘蔗种植结构空间分异的各主要影响因子影响程度由大到小一次为:耕作便利度 ($M3$)、排涝能力 ($M2$)、市场区位 ($L1$) 及灌溉能力 ($M1$),其他因子对甘蔗种植结构空间分异的影响程度都很小。管理条件和区位条件是影响甘蔗种植结构空间分异的关键性因素,地形因素和土壤质地也对其产生一定影响。

3.2.2.2 因子交互作用对耕地种植结构的影响

在单因子探测的基础上,分别对水稻、玉米、蔬菜和甘蔗种植结构空间分异的因子交互作用进行探测。

1) 对水稻种植结构的影响。水稻种植结构空间分异的因子交互作用探测结果(表 3)表明,坡度 ($T2$)、市场区位 ($L1$)、交通区位 ($L2$) 和灌溉潜力 ($M1$) 对因子交互作用的影响相对较强,其中坡度与交通区位 ($T2 \cap L2$) 因子交互作用的 q 值最高, q 值为 0.091 4,交互作用最强。其次是交通区位 ($L2$) 与灌溉潜力 ($M1$) 因子交互影响, q 为 0.090 2,石漠化等级 ($T3$) 和土壤质地 ($S1$) 影响力最小。土壤质地、区位条件及部分管理条件,交互作用影响不明显。部分地形因子、土壤质地和区位条件交互作用

表 3 研究区水稻种植结构空间分异的因子交互作用探测结果									
Tab.3 Detection results of factor interaction on spatial differentiation of rice planting structure in the study area									
因子	地形条件			土壤条件	区位条件		管理条件		
	T1	T2	T3	S1	L1	L2	M1	M2	M3
T1	0.004 033								
T2	0.016 962	0.004 081							
T3	0.008 429	0.007 411	0.000 502						
S1	0.007 304	0.006 166	0.001 678	0.000 432					
L1	0.041 717	0.009 812	0.004 105	0.004 063	0.002 004				
L2	0.088 243	0.091 404	0.012 567	0.011 400	0.029 229	0.007 132			
M1	0.005 254	0.018 111	0.008 057	0.006 923	0.037 400	0.090 287	0.003 847		
M2	0.005 476	0.018 063	0.006 681	0.006 242	0.033 295	0.048 414	0.005 150	0.002 984	
M3	0.004 914	0.017 787	0.007 538	0.006 601	0.039 840	0.087 272	0.005 002	0.005 008	0.003 504

影响水稻种植结构空间分异程度低,石漠化等级与其他因子交互影响最低 q 为0.000 5。可以看出,因子的交互作用对水稻种植结构空间分异的影响与单一因子影响相比均大幅度增强,地形条件与交通区位和灌溉潜力交互作用的影响增幅相对较大,说明交通区位、灌溉潜力仍是影响水稻种植结构的决定性因素,良好的交通区位优势 and 灌溉潜力可在一定程度上提升水稻种植优势,有助于增加水稻的种植比例。

2)对玉米种植结构的影响。玉米种植结构空间分异的因子交互作用探测结果(表4)表明,高程因子($T1$)、坡度($T2$)、土壤质地($S1$)和耕作便利度($M3$)对因子交互作用的影响最强,其中,高程因子与土壤质地、耕作便利度($T1 \cap S1, T1 \cap M3$),耕作便利度与坡度和灌溉潜力($S1 \cap T2, S1 \cap M1$)因子

交互作用的 q 增长幅度大, q 值为0.984 6。石漠化等级($T3$)和耕作便利度($M3$)2个因素对玉米种植结构空间分异的单一因子作用最强,但其他因子的交互作用以双因子增强为主。部分地形因子、区位条件及管理条件交互作用影响玉米种植结构空间分异程度低。部分地形因素的交互作用对玉米种植结构空间分异影响最大,石漠化等级、土壤质地和区位条件中各因子与其他因子的交互作用对玉米种植结构空间分异影响的解释力不明显。而管理条件和部分区位条件中各因子与其他因子交互作用的影响增幅相对较小,说明管理和区位条件中各因子与其他因子的交互对玉米种植结构空间分异的影响的解释力明显增强,良好的区位因素与管理条件的综合作用可在一定程度上提升玉米种植优势,有助于提高玉米种植比例。

表 4 研究区玉米种植结构空间分异的因子交互作用探测结果

Tab. 4 Detection results of factor interaction on spatial differentiation of maize planting structure in the study area									
因子	地形条件			土壤条件	区位条件		管理条件		
	$T1$	$T2$	$T3$	$S1$	$L1$	$L2$	$M1$	$M2$	$M3$
$T1$	0.040 830								
$T2$	0.041 058	0.040 814							
$T3$	0.052 371	0.051 900	0.000 202						
$S1$	0.984 690	0.984 639	0.001 472	0.000 435					
$L1$	0.041 024	0.041 027	0.002 324	0.004 109	0.001 010				
$L2$	0.140 668	0.140 636	0.002 541	0.004 039	0.008 257	0.001 061			
$M1$	0.054 685	0.054 736	0.047 543	0.196 965	0.030 768	0.164 113	0.029 639		
$M2$	0.044 739	0.044 789	0.021 952	0.051 857	0.023 443	0.070 335	0.044 740	0.014 718	
$M3$	0.984 641	0.984 693	0.002 291	0.002 524	0.057 919	0.006 701	0.984 642	0.051 806	0.000 631

3)对蔬菜种植结构的影响。蔬菜种植结构空间分异的因子交互作用探测结果(表5)与水稻和玉米的差异较大,其灌溉潜力($M1$)和排涝能力($M2$)对因子交互作用的影响最强,与其他因子的交互作用均表现为非线性增强。管理条件和区位条件中的大部分因子与其他因子的交互作用也以非线性增强为主。高程因子与灌溉潜力、排涝能力($T1 \cap M1, T1 \cap M2$)的交互作用在众多交互作用中对蔬菜的种植结构空间分异影响最大, q 值分别为0.072 6和0.075 2。地形条件各因子与管理条件、区位条件

各因子的交互作用以双因子增强为主。其中,高程与土壤质地、石漠化等级及耕作便利度($T1 \cap M1, T1 \cap M2, T1 \cap M2$)因子交互作用影响仅次于管理条件。以上可知,地形条件、管理因素的交互作用对蔬菜种植结构空间分异的影响最大,地形条件与管理条件部分因子与其他因子的交互作用对蔬菜种植结构空间分异影响的解释力明显增强。说明土壤质地与区位因素的综合作用可大幅度提高对蔬菜空间分异的影响程度,良好的管理和区位条件可在一定程度上提升蔬菜优势,保证蔬菜的新鲜,提高其品质。

表 5 研究区蔬菜种植结构空间分异的因子交互作用探测结果

Tab. 5 Detection results of factor interaction on spatial differentiation of vegetable planting structure in the study area									
因子	地形条件			土壤条件	区位条件		管理条件		
	$T1$	$T2$	$T3$	$S1$	$L1$	$L2$	$M1$	$M2$	$M3$
$T1$	0.002 609								
$T2$	0.003 882	0.002 337							
$T3$	0.004 615	0.003 920	0.000 204						
$S1$	0.003 755	0.003 153	0.000 590	0.000 173					
$L1$	0.009 419	0.004 228	0.002 063	0.002 039	0.000 939				
$L2$	0.013 027	0.012 356	0.000 518	0.000 462	0.001 596	0.000 000			
$M1$	0.072 612	0.061 499	0.002 317	0.002 061	0.021 771	0.002 132	0.000 871		
$M2$	0.075 283	0.061 623	0.002 438	0.002 157	0.026 500	0.002 224	0.001 197	0.000 909	
$M3$	0.002 980	0.004 030	0.003 738	0.003 597	0.009 049	0.009 653	0.032 625	0.034 493	0.002 309

4)对甘蔗种植结构的影响。甘蔗种植结构空间分异的因子作用探测结果(表 6)表明,高程($T1$)、市场区位($L1$)及耕作便利度($M3$)因素对因子交互作用的影响最强,与其他因子的交互作用表现为非线性增强。坡度($T2$)、石漠化等级($T3$)及土壤质地($S1$)对因子交互作用的影响仅低于高程因子($T1$)和市场区位($L1$)。以上可知,高程与耕作便利度($T1 \cap M3$)和市场区位与耕作便利度($L1 \cap M3$)的 q 值均为 0.066 6,在众多因子交互作用中对甘蔗种植结构空间分异的影响最大。石漠化等级因素对甘蔗种植结构空间分异的单一因子作用最强,其他

因子的交互作用以双因子增强为主,其中,灌溉潜力与耕作便利度($M1 \cap M3$), q 为 0.062 5,交互作用影响也相对较高。地形条件各因子与管理条件各因子的交互作用以双因子增强为主。市场区位($L1$)和耕作便利度($M3$)因素对甘蔗种植结构空间分异的单一因子作用最强,灌溉潜力与其他因子交互作用影响程度大,说明地形条件、区位条件和管理条件的综合作用大大增加了甘蔗种植结构空间分异的影响程度,良好的土壤质地可在一定程度上提升甘蔗种植优势。

表 6 研究区甘蔗种植结构空间分异的因子交互作用探测结果

Tab.6 Detection results of factor interaction on spatial differentiation of sugarcane planting structure in the study area

因子	地形条件			土壤条件	区位条件		管理条件		
	$T1$	$T2$	$T3$	$S1$	$L1$	$L2$	$M1$	$M2$	$M3$
$T1$	0.003 118								
$T2$	0.007 874	0.000 759							
$T3$	0.009 174	0.003 663	0.000 877						
$S1$	0.008 547	0.003 322	0.002 618	0.000 739					
$L1$	0.023 256	0.007 752	0.006 098	0.005 618	0.002 274				
$L2$	0.020 000	0.012 987	0.009 174	0.008 475	0.023 810	0.004 471			
$M1$	0.004 444	0.008 197	0.008 850	0.008 547	0.025 641	0.020 408	0.003 162		
$M2$	0.047 619	0.007 143	0.010 989	0.008 475	0.055 556	0.028 571	0.058 824	0.003 033	
$M3$	0.066 667	0.007 299	0.011 236	0.008 547	0.066 667	0.031 250	0.062 500	0.004 386	0.003 222

研究区作物种植结构空间分异的因子交互作用探测结果(表 7)表明,双因子交互作用的影响均比单因子影响程度大,不存在独立起作用的因子。作物种植结构空间分异受地形因素影响程度大,与土壤、区位及部分管理因素的因子交互作用表现为非线性增强关系,交互作用影响程度较大的分别为高程与交通区位($T1 \cap L2$)、石漠化与排涝能力($T3 \cap M2$)、交通区位与排涝能力($L2 \cap M2$), q 值分别为 0.005 2,0.005 6 和 0.005 7,说明地形因子与管理条件、区位条件交互作用对作物种植结构空间分异

影响程度大。单因子影响均低于双因子交互影响,其中单因子影响程度最大的是排涝能力与坡度 q 值分别仅为 0.002 7 和 0.002 8。石漠化等级($T3$)交互因子作用仅低于土壤质地交互作用。地形条件和管理条件中各因子与其他因子的交互作用对作物种植结构空间分异影响的解释力增强。说明土壤质地与区位条件的综合作用大大增加了对作物种植结构空间分异的影响程度,良好的管理和区位条件可以在一定程度上提升作物种植优势,有助于增加作物种植比例。

表 7 研究区主要作物种植结构空间分异的因子交互作用探测结果

Tab.7 Detection results of factor interaction on spatial differentiation of main crop planting structures in the study area

因子	地形条件			土壤条件	区位条件		管理条件		
	$T1$	$T2$	$T3$	$S1$	$L1$	$L2$	$M1$	$M2$	$M3$
$T1$	0.002 177								
$T2$	0.003 548	0.000 289							
$T3$	0.006 186	0.001 564	0.000 303						
$S1$	0.005 096	0.001 643	0.001 889	0.000 447					
$L1$	0.005 040	0.004 283	0.004 341	0.005 138	0.002 137				
$L2$	0.005 296	0.001 042	0.001 219	0.001 099	0.004 450	0.000 167			
$M1$	0.003 960	0.004 271	0.005 064	0.004 937	0.004 846	0.005 397	0.002 177		
$M2$	0.005 215	0.005 537	0.005 653	0.005 196	0.004 689	0.005 738	0.005 360	0.002 735	
$M3$	0.004 816	0.004 555	0.004 899	0.005 385	0.005 554	0.005 346	0.004 755	0.004 885	0.002 341

4 结论与讨论

针对当前研究受喀斯特山区多云多雨天气和耕地形状不规则的限制较少关注微观地理尺度下多因素交互作用对耕地种植结构空间分异的影响,以耕地地块作为研究的空间尺度,基于 500 m × 500 m 地理格网进行栅格信息提取,揭示多种耕地利用空间要素交互作用下种植结构的空間分异特征及影响机理,主要研究结论如下:

1)耕地作物分布在空间上呈现出“西北多,东南少”的特征,种植结构类型以单一水稻型、单一玉米型、单一蔬菜型和单一甘蔗型,水稻和甘蔗种植比例较小。其中,水稻主要分布在花江镇中部、新铺镇东北部和八德乡东南部;玉米种植密度高的区域为永宁镇东南部、顶云街道南部和八德乡西北部;蔬菜主要分布于顶云街道南部、新铺镇西南部及花江镇中部和西南部;甘蔗主要分布在关索街道南部和八德乡西南部。

2)各单一因子对不同作物种植结构空间分异的影响存在一定差异。影响水稻和玉米种植结构空间分异的主导因子为高程和坡度;影响蔬菜种植结构空间分异的主导因子为灌溉潜力和排涝能力;甘蔗种植结构空间分异主要受高程和交通区位影响;水稻和玉米受地形条件影响最大,自然条件仍是耕地种植结构空间分异过程中重要影响因素。影响耕地种植结构空间分异的主要交互因子为交通区位与排涝能力,次要因子为高程与交通区位、石漠化与排涝能力,发展优质农业需全面考虑相关因素。

3)作物种植结构提取研究验证多基于往年统计年鉴、地理国情监测影像解译和土地确权数据等,该类数据难以获取,且时效性较低。基于野外实测数据利用混淆矩阵进行验证,总体精度为 0.87, Kappa 系数为 0.83,具有高效和可视的优点。本文提取结果与统计年鉴比例一致,因山区作物分布破碎,针对混合作物种植地块需更高分辨率的数据提供支撑。

关岭县属喀斯特典型山区,耕地种植结构空间分异还需考虑农村外出务工人员数据及作物产量与产值等的相互作用及影响,在后续研究中将农户流动数据、不同作物的产量和产值与不同作物空间分异特征相结合,并对耕地信息进行持续监测,挖掘更多喀斯特山区耕地种植结构空间分异特征与作物产值的潜在关系,为喀斯特山区种植结构优化调整提供有效理论支撑。

参考文献 (References):

[1] 唐惠燕,包平. 基于 GIS 江苏水稻种植面积与产量的空间重心变迁研究[J]. 南京农业大学学报(社会科学版),2014,14(1):118-124.
Tang H Y, Bao P. Change of spatial gravity center of rice planting area and yield in Jiangsu Province based on GIS[J]. Journal of Nanjing Agricultural University (Social Science Edition), 2014, 14(1):118-124.

[2] 杨彩云,杨广斌,戴丽. 贵州省耕地利用效益时空分异特征研究[J/OL]. 湖南师范大学自然科学学报:1-10 [2022-03-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1542.N.20210114.1321.002.html>.
Yang C Y, Yang G B, Dai L. Guizhou Province cultivated land utilization benefit of time and space differentiation characteristics research[J/OL]. Hunan Normal University Journal of Natural Science:1-10 [2021-12-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1542.N.20210114.1321.002.html>.

[3] 苟志宏,胥桂凤,樊佳俐. 贵州省耕地资源利用效率评价及障碍因子识别[J]. 国土与自然资源研究,2021(5):24-29.
Gou Z H, Xu G F, Fan J L. Cultivated land resource use efficiency evaluation in Guizhou and obstacle factor recognition[J]. Journal of Land and Natural Resources Research, 2021(5):24-29.

[4] 易其国,高妍,陈慧婷. 喀斯特贫困山区耕地资源生态安全分析——以贵州省为例[J]. 农村经济与科技,2021,32(1):19-20.
Yi Q G, Gao Y, Chen H T. Ecological security analysis of cultivated land resources in Karst poor mountainous areas: A case study of Guizhou Province[J]. Rural Economy and Science and Technology, 2021, 32(1):19-20.

[5] Moran M S, Inoue Y, Barnes E M. Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management[J]. Remote Sensing of Environment, 1997, 61(3):319-346.

[6] 郑长春,王秀珍,黄敬峰. 基于特征波段的 SPOT-5 卫星影像水稻面积信息自动提取的方法研究[J]. 遥感技术与应用, 2008, 23(3):294-299.
Zheng C C, Wang X Z, Huang J F. Automatic extraction of rice area information from SPOT-5 satellite imagery based on feature bands[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2008, 23(3):294-299.

[7] Mathur A, Foody G M. Crop classification by support vector machine with intelligently selected training data for an operational application[J]. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(8):2227-2240.

[8] Jia K, Wu B, Li Q. Crop classification using HJ satellite multispectral data in the North China Plain[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2013, 7(1):073576.

[9] 张健康,程彦培,张发旺. 基于多时相遥感影像的作物种植信息提取[J]. 农业工程学报,2012,28(2):134-141.
Zhang J K, Cheng Y P, Zheng F W. Extraction of crop planting information based on multi-temporal remote sensing image[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(2):134-141.

[10] Foerster S, Kaden K, Foerster M, et al. Crop type mapping using spectral-temporal profiles and phenological information[J]. Com-

puters and Electronics in Agriculture,2012,89:30-40.

[11] 李鑫川,徐新刚,王纪华,等. 基于时间序列环境卫星影像的作物分类识别[J]. 农业工程学报,2013,29(2):169-176.

Li X C,Xu X G,Wang J H,et al. Crop classification and recognition based on time series environmental satellite image[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2013,29(2):169-176.

[12] Claire B. Monitoring US agriculture;The US department of agriculture,national agricultural statistics service,cropland data layer program[J]. Geocarto International,2011,26(5):341-358.

[13] Fiorillo E,Di Giuseppe E,Fontanelli G,et al. Lowland rice mapping in Sédhiou Region(Senegal) using Sentinel 1 and Sentinel 2 data and random forest[J]. Remote Sensing,2020,12(20):3403.

[14] Jiao X,Kovacs J M,Shang J,et al. Object-oriented crop mapping and monitoring using multi-temporal polarimetric RADARSAT-2 data[J]. ISPRS Journal Photogrammetry Remote Sensing,2014,96:38-46.

[15] Waske B,Schiefer S,Braun M. Random feature selection for decision tree classification of multi-temporal SAR data[C]//Proceedings of the 2006 IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing,Denver,CO,USA,2006:168-171.

[16] 李 露,徐维祥. 农村人口老龄化效应下农业生态效率的变化[J]. 华南农业大学学报(社会科学版),2021,20(2):14-29.

Li L,Xu W X. Changes of agricultural eco-efficiency under the effect of rural population aging[J]. Journal of South China Agricultural University(Social Science Edition),2021,20(2):14-29.

[17] 郭 萍,赵 敏,张 妍,等. 基于水足迹的河套灌区多目标种植结构优化调整与评价[J]. 农业机械学报,2021,52(12):346-357.

Guo P,Zhao M,Zhang Y,et al. Optimization adjustment and evaluation of multi-objective planting structure in Hetao irrigation area based on water footprint[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(12):346-357.

[18] 叶初升,马玉婷. 人力资本及其与技术进步的适配性何以影响了农业种植结构[J]. 中国农村经济,2020(4):34-55.

Ye C S,Ma Y T. How human capital and its adaptation to technological progress affect agricultural planting structure[J]. Chinese Rural Economy,2020(4):34-55.

[19] 刘 琼,肖海峰. 农地经营规模与财政支农政策对农业碳排放的影响[J]. 资源科学,2020,42(6):1063-1073.

Liu Q,Xiao H F. Effects of agricultural land management scale and financial policies on agricultural carbon emissions[J]. Resources Science,2020,42(6):1063-1073.

[20] 陈源源. 气候变化对中国粮食生产的影响[J]. 中国农学通报,2021,37(12):51-57.

Chen Y Y. Effects of climate change on grain production in China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2021,37(12):51-57.

[21] 邓振镛,王 强,张 强,等. 中国北方气候暖干化对粮食作物的影响及应对措施[J]. 生态学报,2010,30(22):6278-6288.

Deng Z Y,Wang Q,Zhang Q,et al. Effects of climate warming and drying on grain crops in northern China and countermeasures[J]. Acta Ecologica Sinica,2010,30(22):6278-6288.

[22] 周惠成,彭 慧. 基于水资源合理利用的多目标农作物种植结构调整与评价[J]. 农业工程学报,2007(9):45-49.

Zhou H C,Peng H. Multi-objective crop planting structure adjustment and evaluation based on rational utilization of water resources[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2007(9):45-49.

[23] 武雪萍,蔡典雄,梅旭荣. 黄河流域农业水资源与水环境问题及技术对策[J]. 生态环境,2007(1):248-252.

Wu X P,Cai D X,Mei X R. Problems and technical countermeasures of agricultural water resources and water environment in The Yellow River Basin[J]. Ecological Environment,2007(1):248-252.

[24] 郭晓佳,周 荣,李京忠. 黄河流域农业资源环境效率时空演化特征及影响因素[J]. 生态与农村环境学报,2021,37(3):332-340.

Guo X J,Zhou R,Li J Z. Problems and technical countermeasures of agricultural water resources and water environment in the Yellow River Basin[J]. Ecological Environment,2021,37(3):332-340.

[25] 张 伟,陈洪松,王克林. 喀斯特峰丛洼地土壤养分空间分异特征及影响因素分析[J]. 中国农业科学,2006(9):1828-1835.

Zhang W,Chen H S,Wang K L. Spatial differentiation characteristics and influencing factors of soil nutrients in Karst peak-depression[J]. Scientia Agricultura Sinica,2006(9):1828-1835.

[26] 彭 建. 喀斯特生态脆弱区土地利用/覆被变化研究[D]. 北京:北京大学,2006.

Peng J. Study on land use/cover change in Karst ecologically fragile region[D]. Beijing:Peking University,2006.

[27] 张惠远,赵昕奕,蔡运龙,等. 喀斯特山区土地利用变化的人类驱动机制研究——以贵州省为例[J]. 地理研究,1999(2):25-31.

Zhang H Y,Zhao X Y,Cai Y L,et al. Human driving mechanism of land use change in Karst mountainous areas: A case study of Guizhou Province[J]. Geographical Research,1999(2):25-31.

[28] 杨颖频,吴志峰,骆剑承. 时空协同的地块尺度作物分布遥感提取[J]. 农业工程学报,2021,37(7):166-174.

Yang Y P,Wu Z F,Luo J C. Remote sensing extraction of spatio-temporal synergistic crop distribution at plot scale[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2021,37(7):166-174.

[29] 吴志峰,骆剑承,孙营伟. 时空协同的精准农业遥感研究[J]. 地球信息科学学报,2020,22(4):731-742.

Wu Z F,Luo J C,Sun Y W. Remote sensing research of precision agriculture based on spatio-temporal coordination[J]. Journal of Geo-Information Science,2020,22(4):731-742.

[30] Zhu M,Zhou Z F,Huang D H,et al. Extraction method for single Zanthoxylum bungeanum in Karst mountain area based on UAV visible light images[J]. Journal of Applied Remote Sensing,2021,15(2):026501.

[31] Xia L,Zhang X,Zhang J,et al. Building extraction from very-high-resolution remote sensing images using semi-supervised semantic edge detection[J]. Remote Sensing,2021,13(11):2187.

[32] 黄登红,周忠发,彭睿文,等. 西南高原山区作物低空遥感挑战与研究进展——以贵州省为例[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版),2021,39(5):53-61.

Huang D H,Zhou Z F,Peng R W,et al. Low altitude remote sensing challenge and research progress of crops in mountainous areas

of southwest Plateau; A case study of Guizhou Province[J]. Journal of Guizhou Normal University(Natural Science), 2021, 39(5): 53 – 61.

[33] 赵 馨,周忠发,王玲玉. 喀斯特山区石漠化耕地遥感精准提取与分析——以贵州省北盘江镇与花江镇为例[J]. 热带地理, 2020, 40(2): 289 – 302.

Zhao X, Zhou Z F, Wang L Y. Remote sensing precision extraction and analysis of rocky desertification cultivated land in Karst mountainous areas: A case study of Beipanjiang and Huajiang towns in Guizhou Province [J]. Tropical Geography, 2020, 40 (2): 289 – 302.

[34] Lu H, Fu X, Liu C, et al. Cultivated land information extraction in UAV imagery based on deep convolutional neural network and transfer learning[J]. Journal of Mountain Science, 2017, 14 (4): 731 – 741.

[35] Hu X, Li X. Information extraction of subsided cultivated land in high – groundwater – level coal mines based on unmanned aerial vehicle visible bands [J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 78 (14): 1 – 11.

[36] 崔鸿雁,徐 帅,张利锋. 机器学习中的特征选择方法研究及展望[J]. 北京邮电大学学报, 2018, 41 (1): 1 – 12.

Cui H Y, Xu S, Zhang L F. Research and prospect of feature selection method in machine learning [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018, 41 (1): 1 – 12.

[37] Xu Y, Pei J, Lai L. Deep learning based regression and multiclass models for acute oral toxicity prediction with automatic chemical feature extraction [J]. Journal of Chemical Information and Modeling, 2017, 57 (11): 2672 – 2685.

[38] Chen C, Zhang Q, Ma Q, et al. LightGBM – PPI: Predicting protein – protein interactions through LightGBM with multi – information fusion [J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2019, 191: 54 – 64.

[39] 马晓君,沙靖岚,牛雪琪. 基于 LightGBM 算法的 P2P 项目信用评级模型的设计及应用[J]. 数量经济技术经济研究, 2018, 35 (5): 144 – 160.

Ma X J, Sha J L, Niu X Q. Design and application of P2P credit rating model based on LightGBM algorithm [J]. Journal of Quantitative and Technical Economics, 2018, 35 (5): 144 – 160.

[40] 王劲峰,徐成东. 地理探测器: 原理与展望 [J]. 地理学报, 2017, 72 (1): 116 – 134.

Wang J F, Xu C D. Geographical detectors: Principles and prospects [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72 (1): 116 – 134.

[41] Wang J F, Li X H, Christakos G, et al. Geographical detectors – based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24 (1): 107 – 127.

[42] Liang J, Pan S, Chen W, et al. Cultivated land fragmentation and its influencing factors detection: A case study in Huaihe River Basin, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 19 (1): 138.

[43] Wang Z, Liang L, Sun Z, et al. Spatiotemporal differentiation and the factors influencing urbanization and ecological environment synergistic effects within the Beijing – Tianjin – Hebei urban agglomeration [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 243: 227 – 239.

[44] 关岭自治县统计局. 关岭自治县 2018 年国民经济和社会发展统计公报[R]. 关岭: 关岭自治县统计局, 2018.

Guanling Autonomous County Statistics Bureau. Statistical bulletin of national economic and social development in Guanling Autonomous County in 2018 [R]. Guanling: Guanling Autonomous County Statistics Bureau, 2018.

Sentinel – 1 – based spatial differentiation study of the planting structures in Karst plateau mountainous areas

WANG Yu^{1,2,3}, ZHOU Zhongfa^{1,2}, WANG Lingyu^{1,3}, LUO Jiancheng⁴, HUANG Denghong^{1,3}, ZHANG Wenhui^{1,2,3}
(1. School of Geography and Environmental Science/School of Karst Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China;
2. The State Key Laboratory Incubation Base for Karst Mountain Ecology Environment of Guizhou Province, Guiyang 550001, China;
3. State Engineering Technology Institute for Karst Desertification Control, Guiyang 550001, China;
4. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Karst mountainous areas are influenced by complex cloudy and rainy weather. This brings great difficulties to the extraction of planting structure information using the remote sensing technology. Sentinel – 1 – based crop identification has unique advantages in precision agriculture. It can obtain the information on regional main crops in time and accurately, thus playing a significant role in formulating agricultural policies and guiding agricultural production. This study investigated Guanling County based on Google images in 2020, Sentinel – 1 time series data from April to August, and UAV remote sensing data. First, the plots were extracted using the D_LinkNet model. Then, the planting structures were classified based on the LightGBM module. Finally, the spatial differentiation characteristics of main crops and the influencing mechanism of planting structures in the study area were explored combined with geographic detectors. The results are as follows. ① The crops in Guanling County

showed an uneven spatial distribution pattern of more crops in the northwest and less crops in the southeast. ② The influence of factor interaction was greater than that of single factors. The distribution of cultivated land was mainly influenced by traffic location and drainage capacity, followed by factors such as elevation and traffic location. ③ The extraction results of crop planting structures are consistent with the proportions shown in the statistical yearbook, with confusion - matrix overall precision of 0. 87 and Kappa coefficient of 0. 83. The results can help understand the formation mechanisms and differences in the spatial differentiation of different crop planting structures in Karst mountainous areas. Therefore, this study can provide a scientific basis for the optimization and adjustment of planting structures and the analysis of influencing factors.

Keywords: Karst; cultivated land utilization; planting structure; Sentinel - 1; space differentiation

(责任编辑: 李 瑜)