

融合颜色指数与空间结构的喀斯特山地火龙果单株识别

肖冬娜^{1,2}, 周忠发^{1,2*}, 尹林江^{1,2}, 黄登红^{1,2}, 张扬^{1,2}, 黎前霞^{1,2}

¹贵州师范大学喀斯特研究院/地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550001;

²国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵州 贵阳 550001

摘要 近年来颜色指数与激光雷达(LiDAR)点云数据被广泛应用于农业和林业遥感中,但同时带来了异物同谱与数据冗余的问题。以喀斯特高原峡谷区火龙果植株为例,利用无人机可见光影像和影像匹配点云数据,设置方法实验区和精度验证区。通过融合可见光波段差异颜色指数(VDVI)、红绿蓝颜色指数(RGBVI)、归一化绿蓝差异指数(NGBDI)、归一化绿红差异颜色指数(NGRDI)4种颜色指数计算结果和冠层高度模型(CHM)数据,构建融合颜色指数与点云数据空间结构的火龙果单株识别规则进行分割提取,以真实火龙果植株轮廓为参考数据对植株提取精度进行评价,将4种颜色指数融合提取的精度分别与单一因子颜色指数和CHM分割提取精度进行比较分析,得到最优识别提取方案并验证方法的可行性。实验结果表明:融合颜色指数与空间结构的方法提取精度更高,F测度都超91%,匹配面积值与绘制真实值平均值相差约0.1 m²;VDVI指数融合提取结果精度最高,单株面积值最接近真实值,均方根误差(RMSE)达0.28 m²,且面积值数据整体集中不散;精度验证区F测度达88.12%,RMSE为0.27 m²,火龙果植株整体提取效果较好,低矮灌木在一定程度上会影响火龙果植株的识别精度。所提融合影像光谱特征与点云数据空间结构的方法有效增强了植株识别特征,对喀斯特山地火龙果植株识别具有较好适应性,可为喀斯特山地火龙果单株提取提供一定参考。

关键词 遥感; 空间结构特征; 颜色指数; 冠层高度模型; 影像匹配点云; 喀斯特山地

中图分类号 S127; TP751; S667.9

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1028010

Identification of Single Plant of Karst Mountain Pitaya by Fusion of Color Index and Spatial Structure

Xiao Dongna^{1,2}, Zhou Zhongfa^{1,2*}, Yin Linjiang^{1,2}, Huang Denghong^{1,2}, Zhang Yang^{1,2},
Li Qianxia^{1,2}

¹*School of Karst Science/School of Geography & Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, Guizhou, China;*

²*State Engineering Technology Institute For for Karst Desertification Control, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, Guizhou, China*

Abstract Recently, color index and light detection and ranging (LiDAR) point cloud data have been extensively used in agriculture and forestry remote sensing. However, they bring the characteristics of different objects in the

收稿日期: 2021-06-02; 修回日期: 2021-07-23; 录用日期: 2021-08-30

基金项目: 贵州省高层次创新型人才培养计划“百”层次人才(黔科合平台人才[2016]5674)、贵州省科学技术基金(黔科合基础-ZK[2021]一般194)、2019年度贵州省农业重大产业科学研究攻关项目(黔教合KY字[2019]032)、贵州省研究生教育创新计划(黔教合YJSCXJH[2020]103)

通信作者: *fa6897@163.com

same spectrum and data redundancy. Considering pitaya plants in the Karst Plateau Valley area as an example, the method test area and accuracy verification area were set using UAV visible light images and image matching point cloud data. By fusing the calculation results of four color indexes of visible band difference color index (VDVI), red green blue color index (RGBVI), normalized green blue difference index (NGBDI), normalized green red difference color index (NGRDI) and canopy height model (CHM) data, the identification rules of pitaya single plant that fuse color index and spatial structure of point cloud data were developed for segmentation and extraction. The accuracy evaluation data of real pitaya plant contour was established as a reference. The precision of fusion extraction of four color indexes and point cloud data was compared with a single factor of color index or CHM segmentation. Then, the optimal extraction scheme is selected to confirm the feasibility of the proposed method. The results are as follows. The fusion method of the color index and spatial structure has higher extraction accuracy. The F measures are $>91\%$, and the difference between the matching area and mean values of the real value is $\sim 0.1 \text{ m}^2$. The VDVI index fusion results achieved the highest accuracy. The area value per plant was the closest to the true value; the root mean square error (RMSE) was 0.28 m^2 , and the area value data were concentrated. The F measure in the accuracy verification area was 88.12% , and the RMSE was 0.27 m^2 . The overall extraction effect of pitaya plants was good; however, low shrubs could affect the accuracy of pitaya plants identification to certain extent. The proposed method of fusion image spectral features and spatial structure of point cloud data can effectively enhance plant recognition features. It has good adaptability for identifying pitaya plants in Karst mountains, which can provide a reference for the extraction potential of a single pitaya plant in Karst mountains.

Key words remote sensing; spatial structure characteristic; color index; canopy height model; image matching point cloud; Karst mountain

1 引 言

贵州位于世界三大喀斯特区域之一的中国西南岩溶地区中心腹地,山地和丘陵占全省面积的 92.5% ,生态环境脆弱,气候复杂多样,农业生产环境极其复杂,作物种植结构时空差异显著,直接影响着区域作物种植面积、产量结构及农业发展模式^[1-2]。高原山区农作物主要种植季云雾现象频繁,导致航天光学遥感数据获取困难,极大地降低了数据的准确性和可用性。高原山区地表破碎、作物耕地面积小且耕地类型多样^[3],中低分辨率卫星影像难以满足作物监测需求。无人机遥感技术由于具有受天气影响小、成本低、可操作性强等优势,成为了获取高原山区农业遥感数据的优选方式之一。

遥感影像承载着物体的纹理、光谱和物体间拓扑关系等二维表层信息^[4],是识别地物类型的基础。颜色指数可以敏捷地提取地物信息,并对地表状况进行有效分析^[5]。因此,近年来国内外学者利用颜色指数对遥感影像进行了诸多研究^[6-9]。然而,光学遥感对作物信息的提取存在一些局限性,大多光学遥感影像只提供植被表面的光谱纹理信息,且光谱信号存在饱和现象^[10]。不同颜色指数可以对植被作物进行识别和提取处理,但由于植被作物混杂,很难对目标地物与光谱相近的非目标地物进行区

分,且相关研究较少^[11]。

点云数据作为获取三维视觉、模拟实景和遥感监测等方面信息的主要数据来源,可从激光雷达(LiDAR)和摄影测量中获得。LiDAR通过主动遥感的方式发射并记录返回的激光脉冲信号获取点云数据,故其具有测距穿透能力强和数据密度高的特点,同时也带来了数据结构的高度冗余和高成本的特点^[12-14]。利用轻型无人机摄影测量方法获取影像匹配点云数据的方式成本更低、操作性和灵活性更高,在一定区域范围内可看作是LiDAR点云数据的一种替代^[15-16]。近年来,遥感光谱影像与点云数据的结合多用于森林结构参数的提取^[17]。在加拿大西部沿海森林区域的研究表明,光谱指数与点云数据结合比单独使用点云参数提取林木信息具有更好的性能^[18]。也有学者利用多源遥感数据结合机器学习方法进行树种识别,对于单独利用点云数据或光谱影像对喀斯特地区植株的提取也有学者探索,但结合二者对于作物的单株提取研究在国内还比较少见^[19,20-22]。

由于火龙果植株是喀斯特石漠化地区典型兼具石漠化治理功能与高经济价值作物,其遥感影像具备光谱特征,同时植株具有一定的冠层高度,能够充分发挥点云数据所带来的优势。因此,本文在贵州贞丰-关岭花江石漠化治理示范区的火龙果种

植基地,利用旋翼无人机采集可见光影像和影像匹配点云数据,将颜色指数对植被获取的敏捷性与点云数据具备的植株立体特征相结合,融合光谱特征与空间三维结构特征,寻求最大程度挖掘影像信息,以期弥补单一的光谱特征或空间结构特征提取作物信息的不足,为喀斯特山地经济作物识别提取、作物精细化种植与生长监测提供技术支持。

2 材料与方 法

2.1 研究区概况及作物种植情况

研究区花江石漠化治理示范区位于贵州省西南部关岭县以南、贞丰县以北的北盘江流域内,是喀斯特干热河谷的典型代表,地理坐标为 25°40′38″ N, 105°39′36″ E,区内属亚热带湿润季风气候;年平均气温为 18.4℃,冬春干旱,夏秋湿热;年平均降水量约为 1100 mm,且时空分布随着季节和海拔变化而变化^[23];由于示范区土壤分布不均,石漠化中度和重度范围较大,导致土层稀薄不连续,现存经济作物以耐旱土的花椒、枸杞、砂仁和火龙果树为主。

研究区海拔高差达 107 m,对其坡度进行分级,依次为[0°,2°)、[2°,6°)、[6°,15°)、[15°,25°)、[25°,90°),不同坡度等级耕地面积依次为 7298.68 m²、

27729.52 m²、46569.08 m²、33703.6 m²、49339.8 m²,崎岖的地形导致自坡上至坡下的方向出现植株图像信息衰减现象。且研究区中地物有火龙果植株、灌丛、乔木、甘蔗、花椒、蓄水池、水泥路、建筑物、碎石梯埂等,对识别火龙果植株的干扰较强。考虑到太阳高度角与太阳辐射量等影响因子,影像采集时间选取正午时间,以最大程度减少地面阴影和光反射所带来的误差,采集时间为 2020 年 12 月 8 日 14:00。研究区位置概况如图 1 所示,图中较小边框为方法实验区(method test area),较大边框为精度验证区(accuracy verification area),DEM 是数字高程模型的缩写。方法实验区为 50 m×60 m 的整体呈西低东高地势长方形区域,精度验证区为 150 m×160 m 的整体呈现出南低北高的长方形区域,方法实验区东西高程数值相差 18.55 m,精度验证区南北高程数值相差 30.32 m。从方法实验区中随机抽取 30 棵植株测量其冠高、冠幅及植株间平均间隔值,分别为 143.03,128.36,226.33 cm。火龙果数据采集区域为生长 4~5 年的壮年期火龙果,果实平均每年采摘 6~8 期,当时正值冬季,火龙果刚采集完毕处于收获期,且火龙果植株长势良好,无病虫害,叶片四周扩散茂盛。

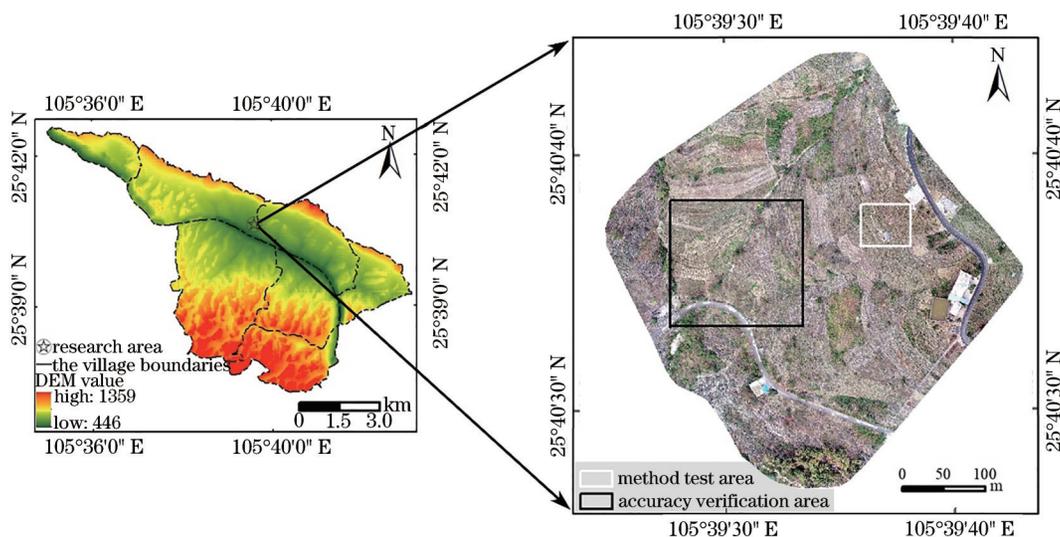


图 1 研究区域位置示意图。(a)花江示范区 DEM;(b)研究区可见光遥感影像

Fig 1 Location diagram of study area. (a) DEM of Huajiang demonstration area; (b) visible remote sensing image of study area

2.2 无人机数据获取与处理

使用大疆 Phantom 4 Pro V2.0 四旋翼无人机采集可见光影像,搭载有效像素为 2000 万的 FC300SE-CMOS 镜头,运用 DJI GS Pro 软件对无人机航线进行规划。考虑地形的复杂性和火龙果植株特点,设置飞行高度为 70 m、航向重叠率为 70%、

旁向重叠率为 70%,采用悬停的方式进行拍照。

利用无人机获取的可见光图像包含目标物的坐标位置和高程信息,由于无人机对地物的拍摄是分块进行的,采用 Pix4Dmapper 软件对原始可见光图像进行拼接、特征点匹配加密、相片畸变校正等预处理,可以得到无人机正射可见光遥感影像(空

间分辨率为 3 cm)和影像匹配点云数据(总点数为 21031325)。图 2 右侧上部分为方法实验区点云数

据,下部分为实验区中部分点云数据剖面图。从图中可看出,研究区坡度大、地面粗糙。

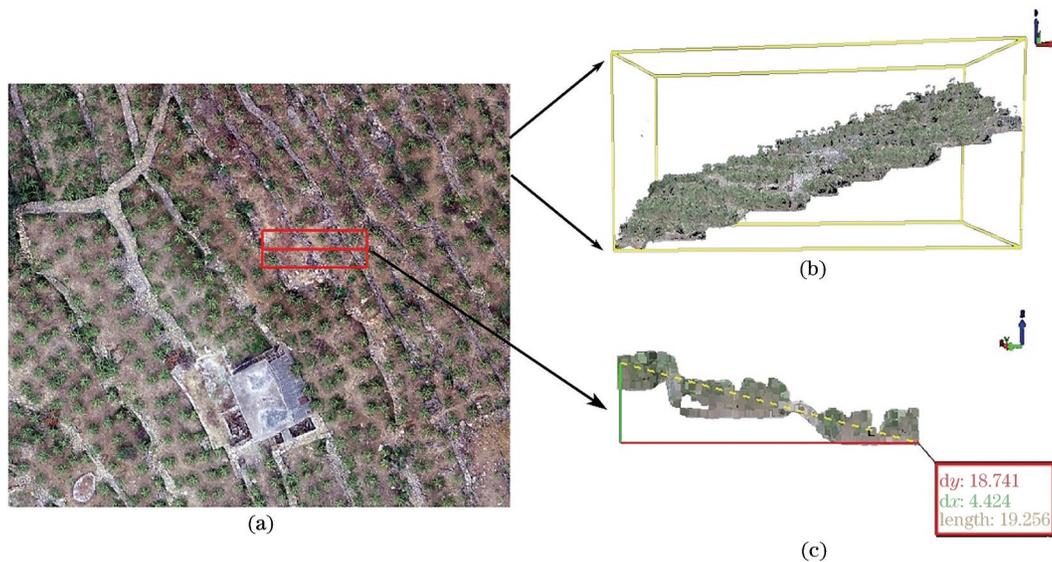


图 2 方法实验区及其点云数据剖面图。(a)可见光遥感影像;(b)影像匹配点云数据;(c)点云数据剖面

Fig. 2 Method test area and profile of its point cloud data. (a) Visible remote sensing image; (b) image matching point cloud data; (c) point cloud data profile

2.3 研究方法

2.3.1 颜色指数提取方法

2.3.1.1 颜色指数选取

颜色指数^[5]是结合植被的特性将波段进行组合以达到识别地物目的的一种波段计算方法。结合实验区中每种地物所占面积比例与典型性,对实验区中火龙果区域、杂草区域、裸地、碎石梯埂和建筑物分别选取训练样区,以便为研究区中火龙果植株颜色指数阈值范围的确定提供参考。同时,为比较植被区与非植被区典型地物对可见光红绿蓝三波段反射值的具体差异,以更好地选取适合本研究区的颜色指数,分别计算每种地物训练样区红绿蓝波段像元数均值 μ 、标准差 δ 。由于每种训练样区数据所占的面积比例不同及不同地物对红绿蓝波段吸收反射值的不同,采用变异系数(cv)来衡量训练样区各地物反射值在红绿蓝三个波段的差异性。

$$C_{cv} = \delta/\mu. \quad (1)$$

表 1 为变异系数的计算结果。从表 1 可以看出,植被区域(火龙果区域和杂草区域)在绿光波段变异系数最小,裸地和碎石梯埂在红光波段变异系数最小,建筑物在蓝光波段变异系数最小,说明植被区域在绿光波段反射值更加平稳,提取时具备更明显的优势。因此,在提取火龙果区域时,主要突出绿光波段,降低红蓝波段影响进而达到分离样本

区域的目的。结合植被自身特点及已有典型颜色指数,本实验组利用可见光波段差异颜色指数(VDVI)^[24]、红绿蓝颜色指数(RGBVI)^[25]、归一化绿蓝差异指数(NGBDI)^[26]、归一化绿红差异颜色指数(NGRDI)^[27]来对可见光影像进行计算处理,计算公式如表 2 所示,其中 R 为红色波段计算像素值, G 为绿色波段计算像素值, B 为蓝色波段计算像素值。

表 1 训练样区在可见光波段反射值变异系数

Table 1 Variation coefficient of reflection value in visible light band of training sample area

Training sample region	Red light band	Green light band	Blue light band
Pitaya area	0.235	0.213	0.251
Weeds	0.191	0.154	0.189
Bare land	0.100	0.122	0.138
Gravel ladder insuperior	0.180	0.196	0.189
Constructions	0.126	0.122	0.107

表 2 颜色指数计算公式

Table 2 Calculation formula of vegetation indexes

Vegetation index	Equation
VDVI	$(2 \times G - R - B)/(2 \times G + R + B)$
NGBDI	$(G - B)/(G + B)$
NGRDI	$(G - R)/(G + R)$
RGBVI	$(G \times R - R \times B)/(G \times G + R \times B)$

2.3.1.2 颜色指数阈值的确定

利用颜色指数提取植株多采用阈值分割法,本实验组采用时序图交点法对多种地物训练样区建立的直方图进行处理^[28]。运用上述 4 种颜色指数对每种训练样区像元值进行统计,将每种地物像元值统计结果直方图展示在同一坐标系中,并将其交点作为阈值分类参考点。同时依照 4 种颜色指数公式对研究区可见光图像进行波段计算,对比直方图各类地物曲线的交点,参考每种颜色指数样本的像元直方图,结合双峰阈值法与时序图交点判断出火龙果植株分割的阈值点。

2.3.2 点云数据提取方法

2.3.2.1 地面点分类

对预处理之后的影像匹配点云数据进行去噪、地面点分类等处理。去噪是为了将数据采集过程中因干扰物产生的反射信号利用距离评定去除。地面点分类是指经过迭代处理将种子点逐层加密,利用距离测定将所有的点判定分类。设置地面点分类参数,测得“最大建筑尺寸”为 10 m,由于研究区地形起伏较大,故调小所测数值,设为“8 m”。“最大地形坡度”是通过坡度计算来确定已知种子点的邻近点地物分类的,通常设置为默认值“88°”。“迭代角度”和“迭代距离”是待分类点所对应三角形设置的阈值,根据实际情况多次测定调整数值使地面点数值达到最大,最终分别为“3°”和“1 m”。保证地面点密集,后期进行数字高程模型(DEM)与数字表面模型(DSM)的生成时才能够保证最大精度。DEM^[29]是对地球地貌描述的另一种数字表达形式,DSM是对地表形态带有表层信息的模拟。

2.3.2.2 冠层高度模型构建

首先,利用反距离权重(IDW)插值法对分离的

地面点进行DEM与DSM的生成,IDW插值法依据目标点与控制点的距离来控制权重的影响。其次,使用不规则三角网(TIN)插值法将DEM和DSM栅格数据插值生成冠层高度模型(CHM),TIN插值法是利用不规则三角网来表征DEM的特征信息以局部平面代替曲面的方式。CHM是DSM与DEM的差值模型,地物表层与底层属性值作差用以表示地面上物体的高度、位置和表层大小等信息。

2.3.2.3 CHM分割

利用CHM分割进行单木提取是将点位定在局部亮度最大值并沿着边缘方向逐渐减弱的过程^[30]。根据火龙果植株的实际高度,结合研究区域中喀斯特峡谷地区火龙果植株特征及火龙果冠层数据,设定阈值范围为0.8~1.8 m,建立植株CHM分割模型。最终,可得到基于CHM分割的火龙果冠层表面矢量图层和含有每个矢量单元坐标位置、高度、冠幅、表层面积信息的属性表。

2.3.3 融合颜色指数与点云数据的CHM

分割数据提取

融合思路:矢量化经颜色指数计算可见光影像提取结果,进行碎图斑处理去除不合理值,在ArcGIS中将其与点云数据经CHM分割得到的矢量数据进行相交融合交集处理。以VDVI颜色指数为例,融合方式如图3所示,VDVI提取结果明显增加了杂草区域,而CHM分割方法扩大了地面的提取范围,两者提取结果的相交融合将火龙果植株轮廓以最贴近真实轮廓的方式呈现出来。相较于单一颜色指数提取方法或点云目标物提取方法,融合火龙果植株颜色指数和空间结构数据的方法增加了提取阈值参数属性,缩小了提取植株的整体阈值范围,并使得非目标区域得到最大化去除。

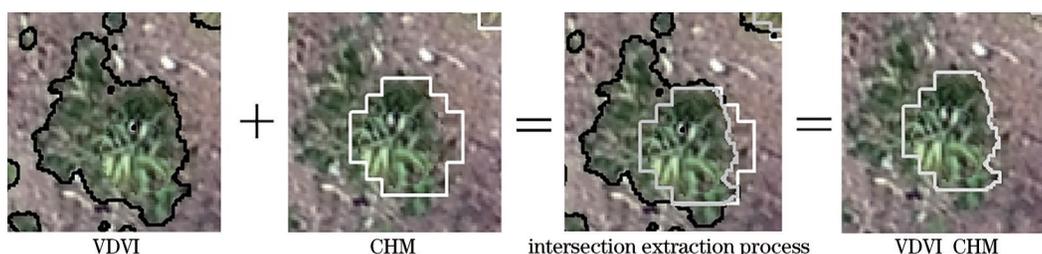


图3 颜色指数与CHM分割相交融合提取方法示意图

Fig. 3 Schematic of extraction method of color index and CHM segmentation intersection fusion

2.3.4 技术路线

技术思路包括利用颜色指数对可见光遥感影像中植株的提取、利用CHM分割对点云数据中植株提取和对融合数据进行植株提取3部分,如图4

所示。最后,对各方法火龙果植株提取结果进行精度验证对比分析,从而筛选出适合喀斯特地区火龙果植株的快速准确提取方案。

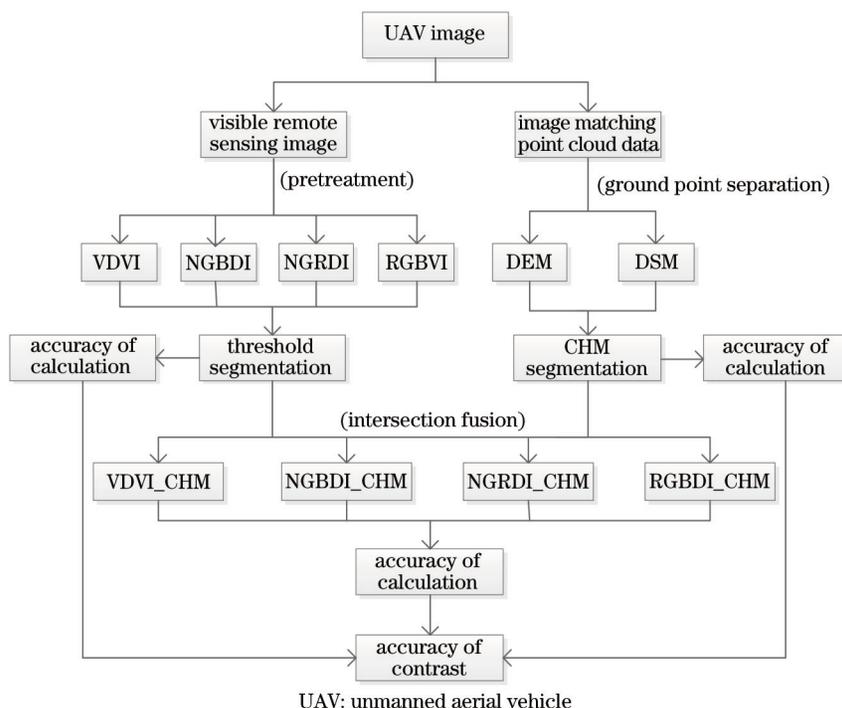


图 4 技术路线图

Fig. 4 Technology roadmap

3 结果分析

3.1 精度评价指标

为方便对颜色指数处理结果、CHM 分割结果和二者融合提取结果进行精度比较,本实验组采用同一种精度评价标准对各方法提取结果进行比较分析。参考已有的单木提取技术思路^[31],将提取的植株轮廓边界与真实绘制植株轮廓进行对比,提取结果可分为

匹配、过度匹配、过度分割、错误分割和漏检 5 种类型,如图 5 所示。以真实火龙果植株手绘轮廓向内外 0.1 m 作为缓冲区,在缓冲范围内,并能被独立分割成单独一株,即为匹配;多棵植株被划分成一株或者超出真实轮廓之外过多,即过度匹配;单一植株被分成多棵,即为过度分割;将非植株区域划分为植株,即错误分割;已存在植株而未被提取,即漏检。图 5 中黑色轮廓为植株绘制轮廓,白色区域为分割提取结果。

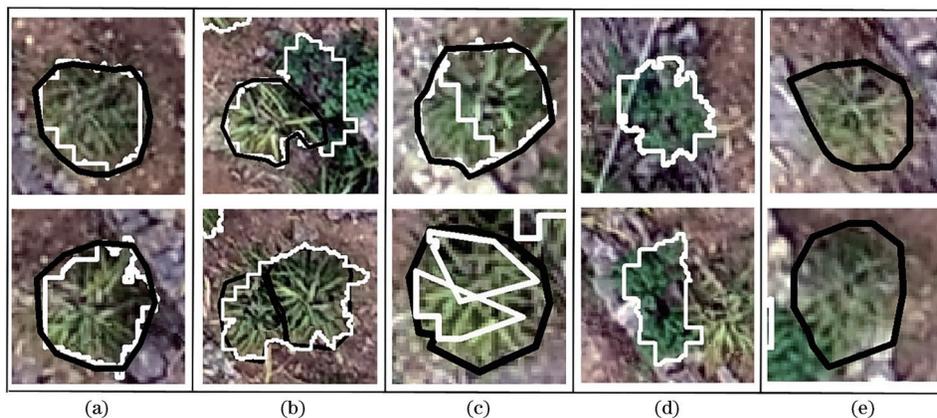


图 5 分割精度检验标准。(a)匹配;(b)过度匹配;(c)过度分割;(d)错误分割;(e)漏检

Fig 5 Precision test standard of segmentation. (a) Match; (b) over matching; (c) over segmentation; (d) wrong segmentation; (e) missed inspection

除计算分割类型株数占比之外,为准确衡量提取精度整体变化,进一步计算了提取结果的检出率

(R)和召回率(P),并计算 F 测度作为整体精度的调和值,表达式分别为

$$\text{匹配率: } P_P = N_M / N_G, \quad (2)$$

$$\text{过度匹配率: } P_C = N_m / N_G, \quad (3)$$

$$\text{过度分割率: } S_E = N_O / N_G, \quad (4)$$

$$\text{错误分割率: } S_C = N_F / N_G, \quad (5)$$

$$\text{漏检率: } L = N_L / N_T, \quad (6)$$

$$\text{检出率: } P = N_M / N_G, \quad (7)$$

$$\text{召回率: } R = N_M / N_T, \quad (8)$$

$$F \text{ 测度: } F = 2 \times R \times P / R + P, \quad (9)$$

式中: N_M 为匹配数; N_m 为过度匹配数; N_O 为过度分割数; N_F 为错误分割数; N_L 为漏检个数; N_T 为真实火龙果棵数; N_G 为分割总数。

3.2 基于颜色指数的火龙果植株提取

图 6 中, 左侧单线图为可见光影像经颜色指数计算得到的像元数量直方图, 右侧多线图 of 各训练样区经颜色指数计算得到的像元数量直方图, 将其放在同一坐标系中, 为结合两个图像提取阈值作为参考。本实验组利用左侧单线图双峰阈值法辅助右侧图像时序图交点法判断阈值分割交点进行分割。

将颜色指数阈值分割结果矢量化后叠加在颜色指数上的结果如图 7 所示, 图中白色高亮区域为颜色指数提取部分, 灰黑色区域为非目标区域。从图 7 可以看出, 植株与非植株之间并无明显区分界

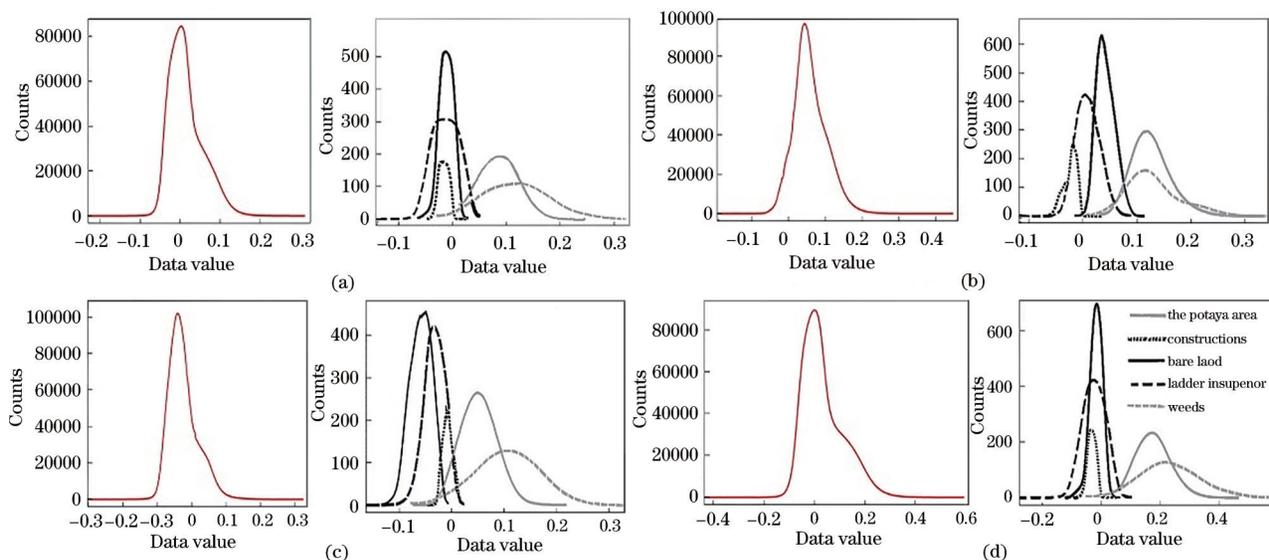


图 6 不同颜色指数像元数量直方图。(a) VDVI; (b) NGBDI; (c) NGRDI; (d) RGBVI

Fig. 6 Histograms of number of pixels with different color indices. (a) VDVI; (b) NGBDI; (c) NGRDI; (d) RGBVI

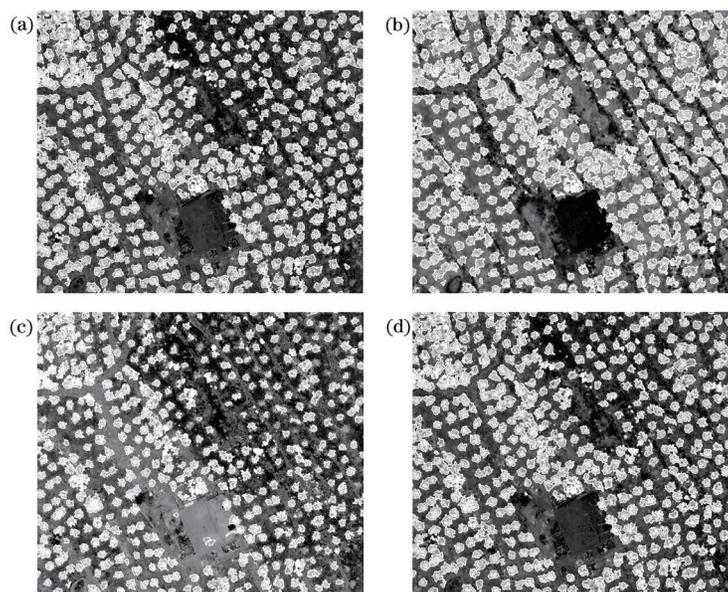


图 7 颜色指数提取结果。(a) VDVI; (b) NGBDI; (c) NGRDI; (d) RGBVI

Fig. 7 Extraction results of vegetation index. (a) VDVI; (b) NGBDI; (c) NGRDI; (d) RGBVI

线,杂草与植株区分不明显,且提取的植株存在大片黏结连片现象。

各颜色指数提取精度如表 3 所示。NGRDI 的提取匹配率最高,为 69.72%,但其漏检率较大,为 4.19%。通过遥感影像目视解译和田间调查发现,漏检主要是由于植株冠幅面积较小、枝条分散,提取的图斑过于破碎,在去除小图斑时,被误分为杂草碎斑

区域。不同颜色指数提取时都易受到杂草和非植被区域一定程度的影响,导致火龙果植株之间提取存在成片的现象,进而导致过度匹配率过高。RGBVI 的过度匹配率最高,为 39.02%。颜色指数提取不存在对单株过度分割成几株的情况,故过度分割率都为 0.00%。 F 测度结果表明,各颜色指数的提取精度由高到低分别为 NGRDI、VDVI、NGBDI、RGBVI。

表 3 各颜色指数提取火龙果棵数精度表

Table 3 Accuracy table of pitaya tree number extracted by each vegetation index

unit: %

Segmentation type	P_p	P_c	S_e	S_c	L	P	R	F
VDVI	59.38	34.06	0.00	6.56	0.00	59.38	39.83	47.68
NGBDI	61.00	37.67	0.00	1.33	0.63	61.00	38.36	47.10
NGRDI	69.72	21.88	0.00	8.40	4.19	69.72	57.44	62.99
RGBVI	58.69	39.02	0.00	2.30	0.63	58.69	37.53	45.78

3.3 基于 CHM 分割火龙果植株提取

影像匹配点云数据经处理得到 DEM 和 DSM 后,经冠层高度模型处理得到的带有地物高度信息的 CHM 数据如图 8 所示,图中高亮部分为屋顶和火龙果冠层,较暗部分为地面地物。从图 8 可以看出,火龙果冠层相对于屋顶和地面地物具有较高的区分度。

表 4 为利用 CHM 方法提取火龙果植株时的精度,匹配率仅有 36.21%,总体精度为 40.07%,过度匹配高达 39.42%。从图 8 可清晰看出,单株分割面积过大,且存在较多错误分割情况,在分割过程中会将一些局部过高的碎石梯埂纳入分割范围之内。主要原因有两点:1) 火龙果与梯埂距离靠近,高度相近而被分割在一起;2) 火龙果植株之间距离过

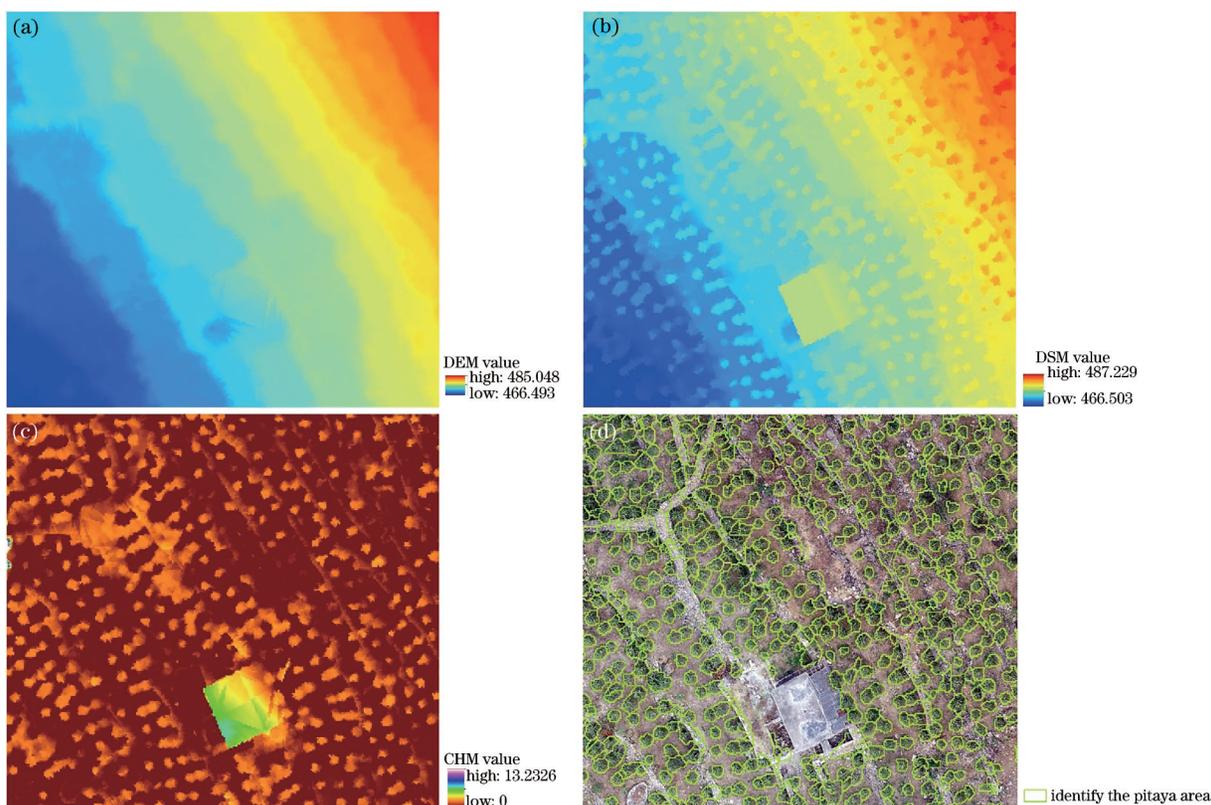


图 8 点云数据预处理结果。(a) DEM; (b) DSM; (c) CHM; (d) CHM segmentation

Fig. 8 Preprocessing results of point cloud data. (a) DEM; (b) DSM; (c) CHM; (d) CHM segmentation

表 4 CHM 分割精度表

Table 4 Precision table of CHM segmentation

unit: %

Parameter	P_p	P_c	S_e	S_c	L	P	R	F
Value	36.21	39.42	2.37	22.00	1.05	36.21	44.86	40.07

近,同时上方枝条有连结,导致高度相同,进而被分为一株,但其占比较少。过度分割是由于地面坡度大,同一植株上方冠高相差过大而被过度分割。错误分割占比为 22.00%,主要是由于梯埂过高,部分被错分为火龙果冠层。漏检是由于植株靠近梯埂,同时植株与梯埂高度相近,结合 DEM 与 DSM 图层相应属性可发现,在地面点分类时将其分成地面点,进而无法形成高度差,导致 CHM 构建时无法正确判断植株高度而漏检。

3.4 融合颜色指数与空间结构的提取结果

运用颜色指数方法提取时,无法避免杂草和一些颜色指数相近非植被区域的影响,而应用 CHM 分割点云数据时,无法避免因局部过高梯埂而带来的误差。故本实验组将光谱特征和点云数据的三维空间特点相结合,以期最大化避免杂草和梯埂所带来的影响。对二者的融合结果进行相交分割,结果如图 9 所示,分割精度如表 5 所示,其中 VDVI 指数融合中框出来的区域为图 10 中精度对比区。

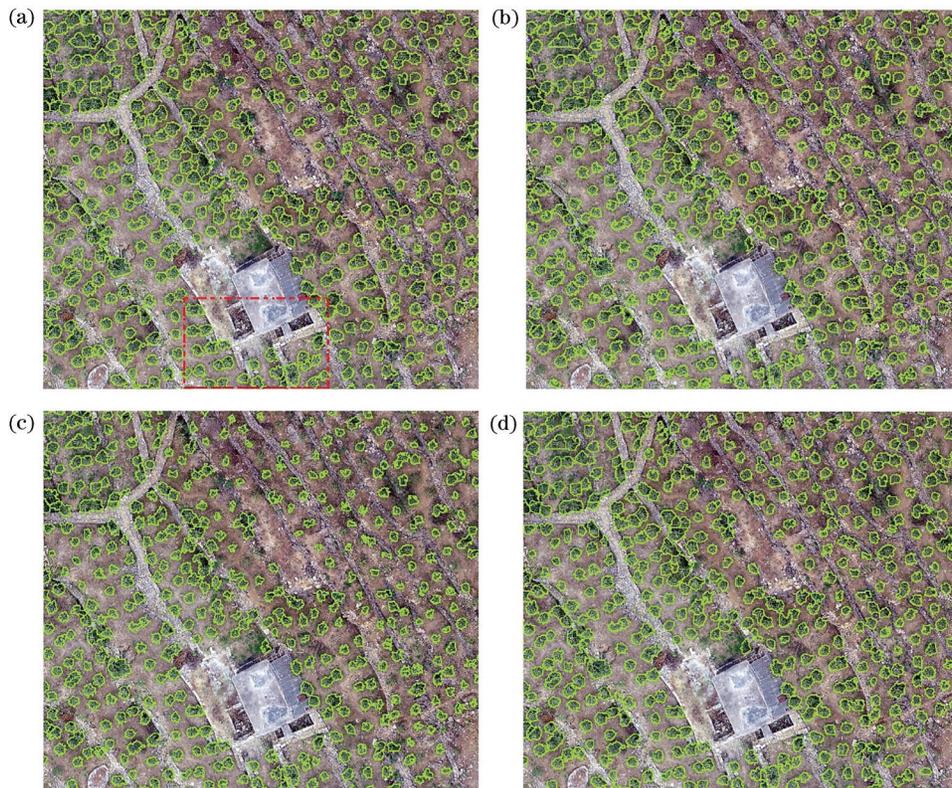


图 9 各颜色指数与 CHM 分割融合分割结果。(a) VDVI_CHM; (b) NGBDI_CHM; (c) NGRDI_CHM; (d) RGBVI_CHM

Fig. 9 Segmentation results of fusion of each color index and CHM segmentation. (a) VDVI_CHM; (b) NGBDI_CHM; (c) NGRDI_CHM; (d) RGBVI_CHM

表 5 基于 CHM 分割与 4 种颜色指数融合提取精度表

Table 5 Accuracy table of extraction based on CHM segmentation and fusion of four color indices

unit: %

Segmentation type	P_p	P_c	S_e	S_c	L	P	R	F
VDVI_CHM	94.06	1.70	3.18	1.06	1.05	94.06	92.87	93.46
NGBDI_CHM	93.05	2.95	2.74	1.26	1.05	93.05	92.66	92.86
NGRDI_CHM	93.60	1.77	2.21	2.43	6.92	93.60	88.89	91.18
RGBVI_CHM	92.26	3.35	1.26	3.14	1.68	92.26	92.45	92.36



图 10 局部融合方法提取与单一因子提取结果对比图

Fig. 10 Comparison of extraction results between local fusion method and single factor extraction

由图 9 和表 5 可知,各融合方式分割结果都与真实植株轮廓贴近。VDVI_CHM 融合的 F 测度最高,且过度匹配、错误分割和漏检棵数相较于其他方式少。除 NGRDI_CHM 融合召回率为 88.89% 外,4 种指数融合结果的检出率、召回率和 F 测度均大于 91%。结合提取过程中颜色指数提取结果和提取精度可知,原因在于 NGRDI_CHM 提取的植株区域过小,加上植株本身枝条分散导致图斑破碎,在处理时被当作碎小图斑剔除了。

为更加清晰地比较融合提取结果相较于单一方法提取结果的优势,在方法实验区南部选取梯埂较多且植株连片的区域作为典型样地,用 VDVI 颜色指数提取结果、CHM 分割和二者融合提取结果进行直观对比(图 10)。VDVI 颜色指数提取结果存在大片粘连现象,且存在碎小杂草图斑;CHM 分割点云匹配数据存在分割面普遍比真实面过大情况,且会将梯埂局部过高的误提取。融合颜色指数与影像匹配点云数据的方法能够很好地解决二者各自存在的缺陷。

分割融合结果与单一因子提取精度比较如表 6 所示,对比单一颜色指数提取结果,除 NGRDI 融合结果外,其他 3 种结合方式 F 测度都提升超过 45%。相较于颜色指数提取方式,检出率同比提升范围在 23.88%~34.68% 之间,召回率同比增加在 31.45%~54.30% 之间, F 测度同比增加在 28.19%~46.58% 之间。相较于 CHM 分割结果整体精度都有大幅度提升且差异性不大,检出率同比增加在 56.05%~57.85% 之间,召回率同比增加在 44.03%~48.01% 之间, F 测度同比增加在 51.11%~53.39% 之间。融合结果对比单一因素提取结果都有大幅度提升,这主要是由于颜色指数提取与点云数据相结合在一定程度上,既可以减少颜色指数所带来杂草的影响,同时又可以去除点云数据在局部过高梯埂处所带来提取的误差,故可最大程度上减少单一因子提取“过度匹配”和“错误分割”所带来的误差。

表 6 分割融合结果与单一因子提取精度对照表

Segmentation type	Increase in relative vegetation index			Increase relative to CHM segmentation		
	P	R	F	P	R	F
	VDVI	34.68	53.04	45.78	57.85	48.01
NGBDI	32.05	54.30	45.75	56.84	47.80	52.78
NGRDI	23.88	31.45	28.19	57.39	44.03	51.11
RGBVI	33.57	54.93	46.58	56.05	47.59	52.28

3.5 各融合方法提取植株面积与真实面积值误差

上述精度计算方法从数量上对火龙果植株提取精度进行了评价,但由于匹配是在一个范围内进行规定的,未能定量评价每种方法在植株提取面积上与真实值的误差。因此,赋予 477 株火龙果真实手绘 ID,使其具有唯一性,并计算相应面积作为真实值,为减少系统误差,选用的面积单位为 dm^2 ,将 4 种融合提取结果按提取位置与其 ID 相对应,对匹配植株进行统计,结果如表 7 所示,其中 mean value 表示均值,standard deviation 表示标准差,variance 表示方差,skewness 表示偏度,peakedness 偏度表示峭度,True_AREA 表示真实火龙果手绘表面面积,NGRDI_AREA 表示 NGRDI 颜色指数与 CHM 分割融合提取的植株面积,NGBDI_AREA 表示 NGBDI 颜色指数与 CHM 分割融合提取的植株面积,RGBVI_AREA 表示 RGBVI 颜色指数与 CHM 分割融合提取的植株面积,VDVI_AREA 表示 VDVI 颜色指数与 CHM 分割融合提取的植株面积。

由表 7 可知,除 NGRDI_CHM 融合提取结果比真实面积均值小外,其他融合方法提取面积平均值均比真实值大约 10 dm^2 ,且 NGRDI_CHM 融合结果方差和标准差均较其他方法差值大,数据偏移量大且过于离散。而其他 3 种融合方法提取面积值在均值和标准差方面差异不大,VDVI 融合提取结果正态分布偏移量少且离散度小,数据整体提取效果

表 7 真实值与融合提取结果面积值的基础数据描述分析

Table 7 Description and analysis of basic data of real value and area value extracted by fusion unit: dm²

Parameter	Mean value	Standard deviation	Variance	Skewness	Peakedness
True_AREA	133.800	37.496	1405.931	0.645	0.893
VDVI_AREA	144.293	48.244	2327.446	0.617	0.520
RGBVI_AREA	143.472	49.844	2484.471	0.862	1.874
NGBDI_AREA	143.571	51.018	2602.808	1.006	1.909
NGRDI_AREA	110.841	55.569	3087.924	1.502	3.984

最好。

进一步分析 4 种融合提取结果与真实面积值之间的关系,利用提取值与真实值之间的相关程度判断差异的大小,结果如图 11 所示,图中非对角线区域显示出真实值与 4 种提取面积相关程度及 4 种提取结果之间相关程度大小,方格中每一点分别代表一个植株,纵横坐标分别代表提取面积值与真实植

株面积值,虚线椭圆轮廓大小代表所用的方法与真实值之间的相关大小,倾斜直线为拟合直线,右下角为相关指数。从图 11 可以看出,VDVI_CHM 融合提取结果面积数值最稳定且趋于真实值,真实值与提取值之间呈现正相关,拟合度相对较大,离散点相对较少。相关系数为 0.84,在 4 种融合提取中与真实值 True_AREA 最契合。

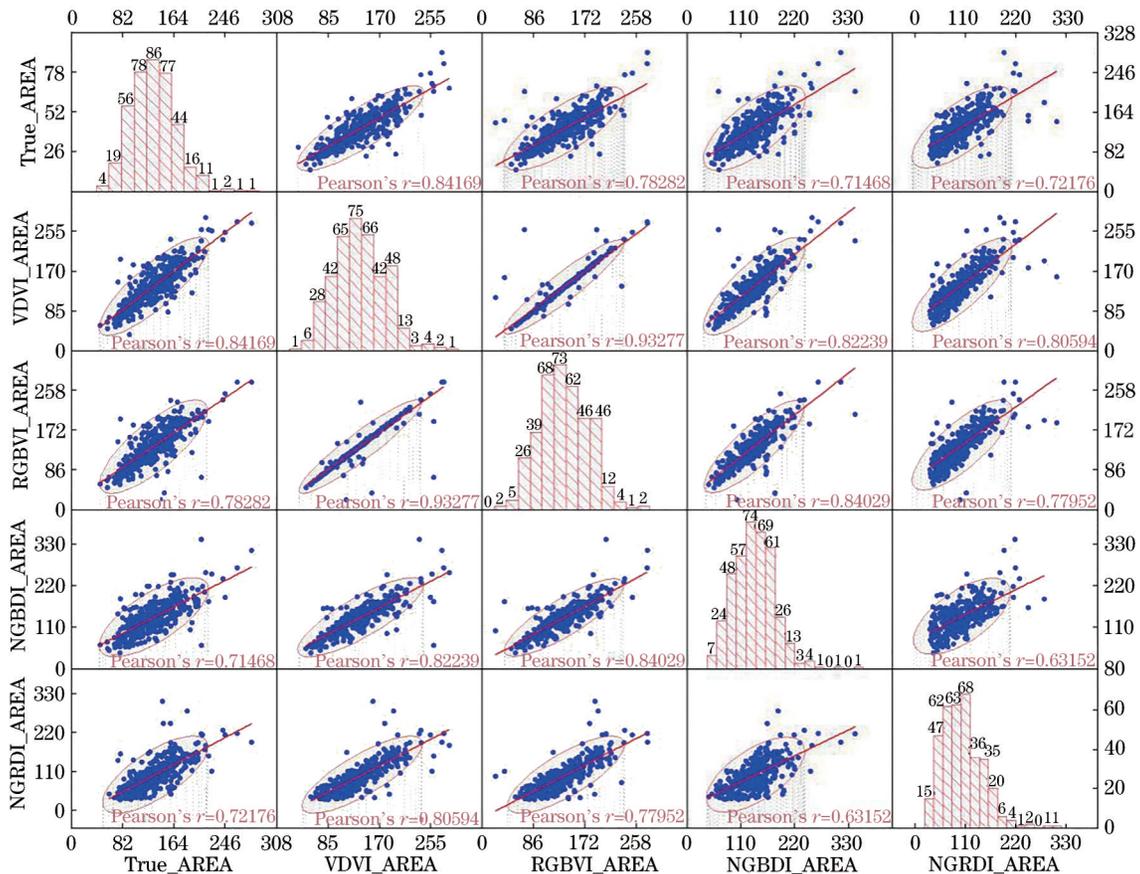


图 11 4 种融合结果提取与真实值拟合程度箱线散点图

Fig. 11 Box scatter diagram of four fusion results extraction and true value fitting degree

综上所述,VDVI_CHM 的融合提取效果最好。均方根误差(RMSE)是用来衡量观测值同真实值之间偏差的参数,本实验组利用手绘勾勒植株面积来代替真实值进行计算,结果表明,VDVI_CHM 融合提取面积值与真实值之间 RESM 为 0.282 m²,验证

了 VDVI_CHM 的提取结果精度较高。

3.6 精度验证

在实验区域中选取火龙果生长状况类似的大小为 160 m × 150 m 的区域作为精度验证区。由于在方法实验区中 VDVI_CHM 融合提取棵数精

度最高,提取的面积参数值稳定且最接近真实值,故采用该融合方法进行精度验证,结果如图 12 所示。

匹配率降低主要是由于错误分割占比较多,检出率和召回率结果相差较大。在精度验证区中,错误分割的除了长在梯埂上的杂草外,更多是由于错

误提取高度与火龙果植株相近的灌木,造成“错误分割”与分割总数都增多,进而降低检出率,增加了召回率。提取匹配结果面积与真实值之间的 RMSE 达 0.27 m^2 , 差值较小,且提取面积与真实值之间数值相关大小为 0.85,说明提取结果接近真实值,提取单株面积结果较好。

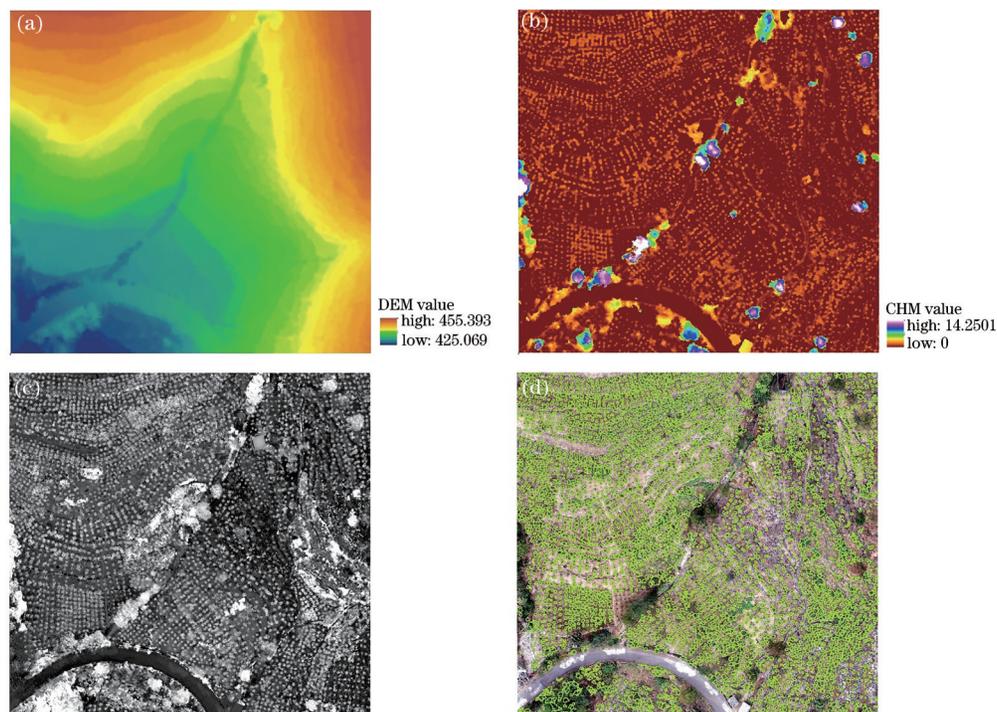


图 12 精度验证区分割提取过程图与分割结果。(a) DEM; (b) CHM; (c) VDVI; (d) VDVI_CHM

Fig. 12 Extraction process diagram and segmentation results of accuracy verification area. (a) DEM; (b) CHM; (c) VDVI; (d) VDVI_CHM

4 结 论

4 种颜色指数 VDVI、NGBDI、NGRDI、RGBVI 的提取结果表明,颜色指数提取存在两个缺点: 1) 杂草色调与火龙果植株类似,使得植株提取区域存在连片的情况,导致“过度匹配”情况增多; 2) 部分颜色指数存在对绿色波段的放大效果不够明显的问题,同时火龙果植株枝条分散、图斑破碎,导致火龙果面积提取存在区域过小而被剔除进而造成漏检。

点云数据是基于 CHM 设置阈值对火龙果植株进行提取的,利用冠层高度阈值来对植株进行提取,由图像结合精度验证分析发现,基于点云数据提取主要存在两个主要问题: 1) 会将部分梯埂和建筑物误认为火龙果植株,主要是由于喀斯特地貌中“坡改梯”这种特殊地理环境,梯埂与火龙果植株具有相似高度,导致点云数据地面点的分类存在误

差; 2) 火龙果植株靠近梯埂,且冠层高度与梯埂相近,导致火龙果植株被归类为地面点而造成漏检。

将颜色指数提取结果与 CHM 分割结果相交融合在一定程度上可以实现优势互补,颜色指数可以利用颜色反差去除高地所带来的干扰,点云数据可以利用高差去除杂草的干扰。结合地表信息颜色光谱差异和空间上冠层高度差异对植株进行提取,能够充分发挥二者的优势,对在喀斯特复杂地貌中进行一定高度植株的提取具有独特的优势。

融合颜色指数与点云数据空间结构的提取方式,相较于单一因子提取的方式,提取精度提升效果明显。对比颜色指数方法,除 NGRDI_CHM 融合方式之外, F 测度提升都超过 45%; 对比 CHM 分割方法, F 测度提升都超过 50%; 匹配率都超过 92%, 最高可达 94.06%; F 测度都超过 91%, 最高可达 93.46%。将提取面积与真实手绘面积进行对比可发现,整体提取面积值相差不大且数据集中不偏

移。VDVI_CHM 融合提取精度最高,提取面积整体最接近真实值,匹配植株面积与真实值的 RESM 为 0.28 m^2 。对于精度验证区,匹配率为 82.05%,这主要是受幼年树木和小片甘蔗的影响,其高度与火龙果植株相近,符合颜色指数与 CHM 分割提取标准进而被错误分割。但整体精度 F 测度较高,且匹配植株提取面积值与真实值之间 RMSE 达 0.27 m^2 ,整体提取效果较好。

所提融合可见光颜色指数与点云数据空间结构的方法可以快速提取火龙果植株,但对于非目标地物中类似高度的不同植株之间的区分并不明显,后续将加深颜色指数选取,同时结合植株的纹理特征、生境特征对提取方式进行改进与优化。针对不同生长类型火龙果植株,后续将考虑选用不同颜色指数与点云数据的融合方法提取火龙果植株,结合植株的生长类型对精准识别进一步开展研究。

参 考 文 献

- [1] 王万发,何腾兵,秦松.借鉴国外喀斯特地貌地区农业发展模式研究[J].世界农业,2016(6):145-148.
Wang W F, He T B, Qin S. Study on agricultural development model in Karst landform area from abroad[J]. World Agriculture, 2016(6): 145-148.
- [2] 张明阳,王克林,陈洪松,等.喀斯特生态系统服务功能遥感定量评估与分析[J].生态学报,2009,29(11):5891-5901.
Zhang M Y, Wang K L, Chen H S, et al. Quantified evaluation and analysis of ecosystem services in Karst areas based on remote sensing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(11): 5891-5901.
- [3] 任红玉,赵宇鸾,葛玉娟.喀斯特山区耕地细碎化与地貌类型的空间关联性:以贵州修文县为例[J].贵州师范大学学报(自然科学版),2020,38(4):1-9.
Ren H Y, Zhao Y L, Ge Y J. The correlation research between cultivated land fragmentation and landform in Karst mountainous areas: a case of Xiuwen County, Guizhou Province[J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2020, 38(4): 1-9.
- [4] 牛亚晓,张立元,韩文霆,等.基于无人机遥感与植被指数的冬小麦覆盖度提取方法[J].农业机械学报,2018,49(4):212-221.
Niu Y X, Zhang L Y, Han W T, et al. Fractional vegetation cover extraction method of winter wheat based on UAV remote sensing and vegetation index [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 212-221.
- [5] 田庆久,闵祥军.植被指数研究进展[J].地球科学进展,1998,13(4):327-333.
Tian Q J, Min X J. Advances in study on vegetation indices[J]. Advance in Earth Sciences, 1998, 13(4): 327-333.
- [6] Xue J R, Su B F. Significant remote sensing vegetation indices: a review of developments and applications[J]. Journal of Sensors, 2017, 2017: 1353691.
- [7] Jay S, Baret F, Dutartre D, et al. Exploiting the centimeter resolution of UAV multispectral imagery to improve remote-sensing estimates of canopy structure and biochemistry in sugar beet crops[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 231: 110898.
- [8] 张盼盼,胡远满,李秀珍,等.基于GIS的喀斯特高原山区石漠化景观格局变化分析[J].农业工程学报,2009,25(12):306-311,404-405.
Zhang P P, Hu Y M, Li X Z, et al. Analysis of rocky desertification landscape pattern change in Karst plateau area based on GIS[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(12): 306-311, 404-405.
- [9] Erasmi S, Klinge M, Dulamsuren C, et al. Modelling the productivity of Siberian larch forests from Landsat NDVI time series in fragmented forest stands of the Mongolian forest-steppe[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2021, 193(4): 1-18.
- [10] Fu X Y, Zhang Z N, Cao L, et al. Assessment of approaches for monitoring forest structure dynamics using bi-temporal digital aerial photogrammetry point clouds[J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 255: 112300.
- [11] Shen X, Cao L, Yang B S, et al. Estimation of forest structural attributes using spectral indices and point clouds from UAS-based multispectral and RGB imageries[J]. Remote Sensing, 2019, 11(7): 800.
- [12] 张继贤,林祥国,梁欣廉.点云信息提取研究进展和展望[J].测绘学报,2017,46(10):1460-1469.
Zhang J X, Lin X G, Liang X L. Advances and prospects of information extraction from point clouds [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1460-1469.
- [13] 刘斌,张军,鲁敏,等.激光雷达应用技术研究进展[J].激光与红外,2015,45(2):117-122.
Liu B, Zhang J, Lu M, et al. Research progress of laser radar applications[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(2): 117-122.

- [14] 杨必胜, 梁福逊, 黄荣刚. 三维激光扫描点云数据处理研究进展、挑战与趋势[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1509-1516.
Yang B S, Liang F X, Huang R G. Progress, challenges and perspectives of 3D LiDAR point cloud processing[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1509-1516.
- [15] 李加慧, 谭奋利, 曾晨欣, 等. 无人机载超低空宽覆盖遥感相机光学系统设计[J]. 光学学报, 2021, 41(14): 1422001.
Li J H, Tan F L, Zeng C X, et al. Design of optical system for UAV-borne ultralow-altitude wide-coverage remote sensing camera[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(14): 1422001.
- [16] Stepper C, Straub C, Pretzsch H. Using semi-global matching point clouds to estimate growing stock at the plot and stand levels: application for a broadleaf-dominated forest in central Europe[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2015, 45(1): 111-123.
- [17] 由珈齐, 李明泽, 范文义, 等. 基于高光谱和激光雷达数据的林分类型识别[J]. 林业科学, 2021, 57(5): 119-129.
You J Q, Li M Z, Fan W Y, et al. Forest type identification based on hyperspectral and LiDAR data [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2021, 57(5): 119-129.
- [18] White J C, Coops N C, Wulder M A, et al. Remote sensing technologies for enhancing forest inventories: a review[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2016, 42(5): 619-641.
- [19] 栗旭升, 陈冬花, 刘赛赛, 等. 基于改进 3D-CNN 的多源遥感数据树种识别[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(24): 242804.
Li X S, Chen D H, Liu S S, et al. Tree-species identification of multisource remote-sensing data using improved 3D-CNN[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(24): 242804.
- [20] 尹林江, 周忠发, 黄登红, 等. 基于无人机影像匹配点云数据的喀斯特峡谷区火龙果单株提取研究[J]. 浙江农业学报, 2020, 32(6): 1092-1102.
Yin L J, Zhou Z F, Huang D H, et al. Extraction of individual plant of pitaya in Karst Canyon Area based on point cloud data of UAV image matching[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2020, 32(6): 1092-1102.
- [21] 黄登红, 周忠发, 吴跃, 等. 基于无人机可见光影像的高原丘陵盆地区山药植株识别[J]. 热带地理, 2019, 39(4): 571-582.
Huang D H, Zhou Z F, Wu Y, et al. Identification of yam plants in Karst plateau hill basin based on visible light images of an unmanned aerial vehicle[J]. Tropical Geography, 2019, 39(4): 571-582.
- [22] 朱孟, 周忠发, 蒋翼, 等. 基于可见光波段无人机遥感的火龙果精准识别方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(14): 142801.
Zhu M, Zhou Z F, Jiang Y, et al. An accurate recognition method of pitaya plants based on visible light band UAV remote sensing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(14): 142801.
- [23] 李安定, 贾申, 喻理飞. 贵州花江喀斯特峡谷区不同小生境的小气候环境[J]. 浙江林学院学报, 2010, 27(3): 374-378.
Li A D, Jia S, Yu L F. Microclimates of different microhabitats in Huajiang Karst area[J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2010, 27(3): 374-378.
- [24] 汪小钦, 王苗苗, 王绍强, 等. 基于可见光波段无人机遥感的植被信息提取[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 152-159.
Wang X Q, Wang M M, Wang S Q, et al. Vegetation information extraction based on UAV remote sensing in visible waveband[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(5): 152-159.
- [25] 李长春, 牛庆林, 杨贵军, 等. 基于无人机数码影像的大豆育种材料叶面积指数估测[J]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 147-158.
Li C C, Niu Q L, Yang G J, et al. Estimation of leaf area index of soybean breeding materials based on UAV digital images[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 147-158.
- [26] 赵静, 杨焕波, 兰玉彬, 等. 基于无人机可见光图像的夏季玉米植被覆盖度提取方法[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 232-240.
Zhao J, Yang H B, Lan Y B, et al. Extraction method of summer corn vegetation coverage based on visible light image of unmanned aerial vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 232-240.
- [27] 张正健, 李爱农, 边金虎, 等. 基于无人机影像可见光植被指数的若尔盖草地上生物量估算研究[J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(1): 51-62.
Zhang Z J, Li A N, Bian J H, et al. Estimating aboveground biomass of grassland in Zoige by visible vegetation index derived from unmanned aerial vehicle image[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2016, 31(1): 51-62.
- [28] 李冰, 刘镛源, 刘素红, 等. 基于低空无人机遥感的冬小麦覆盖度变化监测[J]. 农业工程学报, 2012, 28

- (13): 160-165.
- Li B, Liu R Y, Liu S H, et al. Monitoring vegetation coverage variation of winter wheat by low-altitude UAV remote sensing system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(13): 160-165.
- [29] 汤国安. 我国数字高程模型与数字地形分析研究进展[J]. 地理学报, 2014, 69(9): 1305-1325.
- Tang G A. Progress of DEM and digital terrain analysis in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(9): 1305-1325.
- [30] 孙志. 基于冠层高度模型(CHM)多种算法单木分割技术在森林资源调查的应用[J]. 科学技术创新, 2020(17): 87-88.
- Sun Z. Application of single tree segmentation technology based on canopy height model (CHM) algorithm in forest resource investigation[J]. Scientific and Technological Innovation, 2020(17): 87-88.
- [31] 陈崇成, 李旭, 黄洪宇. 基于无人机影像匹配点云的苗圃单木冠层三维分割[J]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 149-155, 206.
- Chen C C, Li X, Huang H Y. 3D segmentation of individual tree canopy in forest nursery based on drone image-matching point cloud[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 149-155, 206.