

基于无人机可见光图像的夏季玉米植被覆盖度提取方法

赵静^{1,2} 杨焕波^{1,2} 兰玉彬^{1,2} 鲁力群^{2,3} 贾鹏^{1,2} 李志铭^{1,2}

(1. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255049;

2. 山东理工大学国际精准农业航空应用技术研究中心, 淄博 255049;

3. 山东理工大学交通与车辆工程学院, 淄博 255049)

摘要: 为准确快速获取夏季玉米四叶期、拔节期、抽穗期和花粒期的植被覆盖度信息,利用无人机获取玉米田间可见光图像,对图像可见光波段提取的多种植被指数进行分析和比较,选择差异植被指数(Visible-band difference vegetation index, VDVI)、过绿指数(Excess green, EXG)和归一化绿蓝差异指数(Normalized green-blue difference index, NGBDI),结合监督分类提取了玉米4个时期的植被覆盖度信息。通过对试验田4个阶段的单幅图像监督分类处理,将其目标物分为土壤和玉米植被两类;分别统计监督分类后图像中土壤和玉米的VDVI像元直方图,将两者的像元直方图交点作为植被覆盖度提取阈值,同理获得EXG和NGBDI对应的玉米植被覆盖度提取阈值;利用获取的玉米植被3种覆盖度提取阈值,对玉米4个时期的植被覆盖度进行提取,并对提取精度进行了验证。结果表明,VDVI对应4个生长时期的植被覆盖度提取误差分别为1.21%、4.88%、2.31%和3.61%;EXG对应的植被覆盖度提取误差分别为1.38%、1.25%、0.89%和0.33%;NGBDI提取误差为1.61%、3.31%、1.99%和3.25%,EXG在夏季玉米4个生长时期的植被覆盖度提取效果最好。将玉米4个生长时期单幅图像确定的阈值作为固定阈值,对剔除确定阈值的单幅图像的试验田全景图像进行植被覆盖度提取,并对提取效果进行验证。结果表明,采用监督分类与可见光植被指数统计直方图相结合确定阈值的方法提取玉米植被覆盖度效果较好。

关键词: 夏季玉米; 无人机可见光图像; 植被覆盖度; 植被指数; 阈值提取

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)05-0232-09

Extraction Method of Summer Corn Vegetation Coverage Based on Visible Light Image of Unmanned Aerial Vehicle

ZHAO Jing^{1,2} YANG Huanbo^{1,2} LAN Yubin^{1,2} LU Liqun^{2,3} JIA Peng^{1,2} LI Zhiming^{1,2}

(1. School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China

2. International Precision Agriculture Aviation Application Technology Research Center, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China

3. School of Transportation and Vehicle Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: In order to accurately and rapidly obtain the vegetation coverage information of summer corn during the stages of four-leaf, jointing, heading and flowering, unmanned aerial vehicles (UAV) was used to obtain visible light images of corn field, and various vegetation indices extracted from visible light bands were analyzed and compared. Visible-band difference vegetation index (VDVI), excess green (EXG) and normalized green-blue difference index (NGBDI) were used to extract the corn vegetation coverage information of the four stages combined with supervised classification method. In the research process, targets in a single image of the experimental field were divided into soil and corn vegetation in the four stages of the corn. The VDVI pixel histograms of soil and corn classified by supervised classification method were counted respectively, and the intersection points of pixel histogram were used as the threshold of vegetation coverage extraction. Similarly, the threshold of corn vegetation coverage extraction corresponding to EXG and NGBDI was obtained. Finally, the corn vegetation coverage of the four stages was extracted by the three extraction thresholds. The errors of vegetation coverage extraction corresponding to the four growth stages of VDVI were 1.21%, 4.88%, 2.31% and 3.61%,

收稿日期: 2018-11-03 修回日期: 2019-02-20

基金项目: 山东省“引进顶尖人才‘一事一议’专项经费”项目和中央引导地方科技发展专项资金项目

作者简介: 赵静(1971—),女,副教授,主要从事农业遥感技术与智能检测研究,E-mail: zbceozj@163.com

respectively; EXG were 1.38%, 1.25%, 0.89% and 0.33%, respectively; and NGBDI were 1.61%, 3.31%, 1.99% and 3.25%, respectively. It was found that EXG had the best effect on vegetation coverage extraction during the four stages of corn. The value of threshold determined by the single image of the four corn growth stages was used as a fixed threshold, and the vegetation coverage was extracted from the panoramic image of the experimental field that had removed the single image which was used as determining threshold value, and the extraction effect was verified. The results showed that the variation of extraction error was small, indicating that the method using the supervised classification combined with the statistical histogram of visible vegetation index to determine the threshold value was better.

Key words: summer corn; visible light images of UAV; vegetation coverage; vegetation index; threshold extraction

0 引言

植被覆盖度(Fractional vegetation cover, FVC)是反映陆地表面植被生长动态变化的重要指标,通常是指叶、茎、枝在单位面积内的垂直投影面积所占百分比^[1-3],是影响水、碳循环,物质和能量交换过程的关键地学因子,也反映了植物进行光合作用面积以及植被生长的茂盛程度,能够在一定程度上反映植被的生长状态和生长趋势^[4-8]。

目前植被覆盖度的监测方法主要有地表实测法和遥感监测法^[9-12]。地表实测法受人力和物力条件的制约,不适合作为大范围植被覆盖度的提取工具^[13],其逐渐演变成对遥感法监测植被覆盖度结果进行精度验证和分析的重要手段。无人机具有低空飞行的优点,弥补了传统卫星遥感受大气层影响的缺陷,逐渐成为遥感技术的重要组成部分^[12]。无人机遥感技术凭借其灵活性高、作业周期短、图像数据分辨率高等优势得到快速发展,越来越多地应用到各领域遥感监测中^[14-25]。近年来,大量学者利用无人机遥感技术对植被覆盖度提取进行了相关研究。文献[2]通过分析多旋翼无人机获取的多光谱图像,结合监督分类与植被指数阈值法成功提取了越冬期、拔节期、挑旗期、抽穗期冬小麦的植被覆盖度;文献[22]通过分析无人机可见光图像的植被和非植被的光谱差异,提出了用于提取植被覆盖度的植被指数VDVI;文献[23]基于无人机多光谱图像NDVI和SAVI植被指数的时序变化直方图,确定了用于提取冬小麦植被覆盖度的植被指数阈值。

迄今为止,大多数植被指数主要基于红色波段的低反射率和近红外波段强反射率的特性构建^[2,19,21-23]。理想的植被覆盖度获取方法应具备以下几个特征:采用低成本、易于操作的设备,提取结果准确、客观,对采集时间要求较低,以及需要较少的人机交互^[26]。与多光谱相机相比,可见光相机具有分辨率高、成本低、维修简单等优势,因此有关学者对无人机获取的可见光图像提取植被覆盖度方法

进行了研究。文献[22]利用双峰直方图阈值法和直方图熵阈值法提取无人机拍摄的单幅可见光图像的植被覆盖度时,发现EXG植被指数没有明显的波峰和波谷,与直方图熵阈值法相比,双峰直方图阈值法整体提取效果较好。有些遥感图像相关植被指数不存在明显的波峰和波谷,利用双峰直方图阈值法提取植被覆盖度阈值普适性较差,而直方图熵阈值法运算过程较为复杂,往往需要更多的时间和精力获取植被覆盖度提取阈值,且双峰直方图阈值法和直方图熵阈值法确定的阈值,在植被密度较低的区域植被信息提取结果不尽理想^[27]。目前作物生长周期内的植被覆盖度提取大多基于多光谱相机实现,利用无人机可见光图像提取作物多个生长阶段植被覆盖度的研究鲜有报道。本文以四叶期、拔节期、抽穗期和花粒期玉米为研究对象,对多种植被指数提取植被覆盖度进行分析比较,以寻求获得快速有效提取植被覆盖度的方法。

1 材料与方方法

1.1 试验地概况及数据采集

试验田位于山东省淄博市南定镇(36°44'36" N, 118° 3'23" E),地处暖温带,属半湿润半干旱的温带季风气候,年平均降水量650 mm左右,年平均气温为12.5~14.2℃,年平均日照时数为2 209.3~2 523.0 h,玉米播种方式为机播,播种行距为60 cm,株距为20 cm。

无人机可见光图像采集于2018年7—8月(玉米四叶期、拔节期、抽穗期和花粒期)进行。试验采用DJI Phantom4 Advanced型无人机,其有效载荷2 kg,续航时间30 min,为保证数据采集时刻光照条件的一致性,选择晴朗无风天气,在11:00—13:00进行玉米可见光图像采集。无人机采集图像时的飞行高度为40 m,飞行速度为4 m/s,旁向重叠度以及航向重叠度均为80%,在玉米生长四叶期、拔节期、抽穗期和花粒期阶段共进行4次数据采集,每次航拍采用固定航线,单次作业采集180幅JPG格式可

见光图像,图像分辨率为5 472像素×3 648像素,地面分辨率为0.68 cm。对4次无人机采集的数据利用Pix4DMapper软件进行图像拼接,获取玉米四叶期、拔节期、抽穗期和花粒期试验田全景正射图

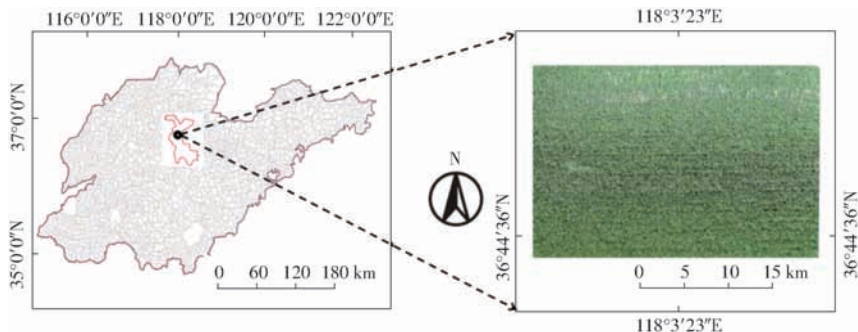


图1 试验地概况

Fig. 1 Experimental site overview

1.2 夏季田间玉米植被覆盖度的提取方法

通过对比分析无人机图像中土壤和玉米冠层在红、绿、蓝可见光波段的反射特性可知,玉米冠层对绿波段反射特性较强,对红波段和蓝波段反射特性较弱;而土壤背景在红波段、绿波段和蓝波段的反射特性依次降低,因此通过波段组合可以增强植被与土壤的波段差异,使植被和土壤更容易区分。常见的可见光植被指数有归一化绿红差异指数NGRDI^[28]、归一化绿蓝差异指数NGBDI^[29]、蓝绿比值指数BGRI^[30]、可见光波段差异植被指数VDVI^[22]和过绿指数EXG^[22],有研究者在利用双峰直方图法和最大熵阈值法提取NGRDI、RGRI、VDVI、EXG和NGBDI植被指数阈值过程中,发现VDVI、EXG和NGBDI的提取植被覆盖度效果较好,因此选用VDVI、EXG和NGBDI作为植被覆盖度提取的植被指数,计算公式分别为

$$I_{VDVI} = \frac{2G - R - B}{2G + R + B} \quad (1)$$

$$I_{EXG} = 2G - R - B \quad (2)$$

$$I_{NGBDI} = \frac{g - b}{g + b} \quad (3)$$

其中 $g = \frac{G}{G + R + B}$ $b = \frac{B}{G + R + B}$

式中 G ——地物绿色波段像素值

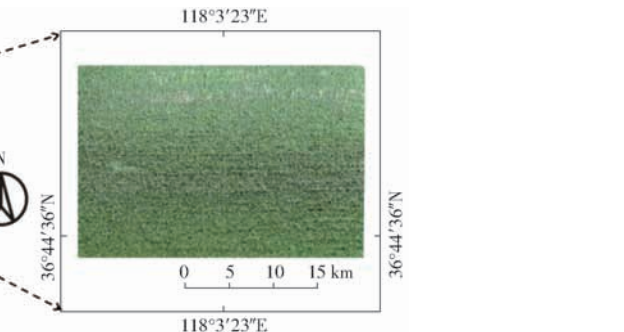
B ——地物蓝色波段像素值

R ——地物红色波段像素值

g 、 b ——归一化处理后绿、蓝波段像素值

目前常用植被覆盖度提取方法主要有植被指数时序图交点法^[23]和样本统计法^[24]。植被指数时序图交点法认为试验田由土壤像元和玉米像元两部分组成,随着作物生长,研究区域内植被像元增加量来源于区域内裸土像元的减少量,文献^[23]选择将小

麦较低植被覆盖度的拔节期和较高植被覆盖度挑旗期的植被指数分布直方图交点,作为区分土壤及植被像元的植被指数阈值,并取得了较好的提取效果;样本统计法在目视解译的基础上进行统计分析,获取了区分土壤及植被像元的阈值。利用时序图交点法和样本统计法的思想,本文采用监督分类将无人机拍摄的试验田单幅图像目标物分为土壤和玉米两类,以土壤和玉米植被的VDVI值作为横坐标,像元统计个数作为纵坐标,绘制土壤和玉米各自VDVI的统计直方图。将坐标系下的土壤和玉米植被VDVI直方图的交点作为玉米植被和土壤分类阈值,同理获得EXG和NGBDI的分类阈值。为了验证各分类阈值的适用性,本文将监督分类结果结合植被指数统计直方图提取的玉米四叶期、拔节期、抽穗期和花粒期无人机拍摄的单幅图像的分类阈值作为对应4个时期的固定阈值,对试验田全景正射图像进行植被覆盖度提取,其主要流程如图2所示。



麦较低植被覆盖度的拔节期和较高植被覆盖度挑旗期的植被指数分布直方图交点,作为区分土壤及植被像元的植被指数阈值,并取得了较好的提取效果;样本统计法在目视解译的基础上进行统计分析,获取了区分土壤及植被像元的阈值。利用时序图交点法和样本统计法的思想,本文采用监督分类将无人机拍摄的试验田单幅图像目标物分为土壤和玉米两类,以土壤和玉米植被的VDVI值作为横坐标,像元统计个数作为纵坐标,绘制土壤和玉米各自VDVI的统计直方图。将坐标系下的土壤和玉米植被VDVI直方图的交点作为玉米植被和土壤分类阈值,同理获得EXG和NGBDI的分类阈值。为了验证各分类阈值的适用性,本文将监督分类结果结合植被指数统计直方图提取的玉米四叶期、拔节期、抽穗期和花粒期无人机拍摄的单幅图像的分类阈值作为对应4个时期的固定阈值,对试验田全景正射图像进行植被覆盖度提取,其主要流程如图2所示。

将统计得到的VDVI、EXG和NGBDI的土壤像元和玉米像元的交点作为植被覆盖度提取的阈值,大于分类阈值的部分为植被像元,小于阈值的部分为土壤像元,根据植被指数阈值法提取的植被覆盖度计算公式为

$$M_{FVC} = \frac{N_{corn}}{N_{corn} + N_{soil}} \times 100\% \quad (4)$$

式中 N_{corn} ——玉米像元统计个数

N_{soil} ——土壤像元统计个数

1.3 植被覆盖度提取精度评价方法

目前植被覆盖度提取精度评价的方法主要是将实地照相法采集的图像当作真值,通过目视判读对植被覆盖度提取结果进行评价,由于实地照相法受人力、物力条件的限制,不适合大范围植被覆盖度的提取精度评价。随着遥感技术和机器学习的发展,

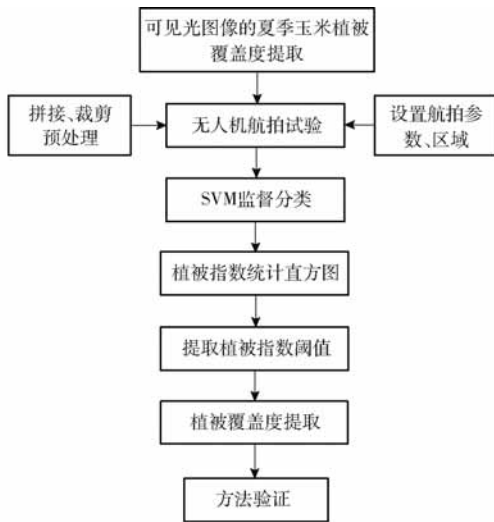


图2 夏季玉米植被覆盖度提取流程图
Fig.2 Flow chart of summer maize vegetation coverage extraction

将监督分类结果作为植被覆盖度真实值,对植被覆盖度提取精度评价取得了很好的效果。将无人机获取的试验田玉米可见光图像的监督分类结果当作地表植被覆盖度的真实值,对植被指数阈值法提取的夏季玉米植被覆盖度提取精度进行验证。植被覆盖度提取误差的计算式为

$$E_F = \frac{|F_{sup} - F_{VI}|}{F_{sup}} \times 100\% \quad (5)$$

式中 E_F ——植被覆盖度提取误差
 F_{sup} ——通过监督分类法获得的夏季玉米植被覆盖度
 F_{VI} ——通过阈值法获取的夏季玉米植被覆盖度

2 结果与分析

2.1 阈值提取结果与分析

以2018年7月20日(玉米四叶期)无人机拍摄的试验田单幅图像为例,结合野外调查结果对图像进行判读,根据野外判读结果在图像上选定70个典型的玉米植株和70个相对独立的裸土区域,进行支持向量机监督分类。目前对监督分类结果进行精度验证常用的方法为混淆矩阵法。混淆矩阵法是通过将每个实测像元的所在位置和类别与分类图像中的相应位置和分类结果进行比较计算,从而判断图像分类精度。单幅图像经混淆矩阵法判断后,总体分类精度为99.6481%,Kappa系数为0.92,混淆矩阵精度验证结果如表1所示。

由表1可知,支持向量机对玉米和土壤分类效果较好,在监督分类结果的基础上,对玉米4个生长时期的可见光波段差异植被指数VDVI、过绿植被指

表1 夏季玉米监督分类评价
Tab.1 Supervision classification evaluation of summer corn

地物种类	土壤/像素	玉米/像素	样本总数/像素	用户精度/%
土壤/像素	111 374	659	112 033	99.41
玉米/像素	50	89 397	89 447	99.94
样本总数/像素	111 424	90 056	201 480	
生产者精度/%	99.96	99.27		

数EXG和归一化绿蓝差异指数NGBDI进行统计分析,统计结果如图3所示。由统计结果可知,VDVI土壤像元和玉米植被像元在四叶期、拔节期、抽穗期和花粒期统计直方图的交点分别为0.025、0.090、0.044和0.027;EXG土壤像元和玉米植被像元在4个时期的统计直方图的交点分别为15、56.620、34和23.960,NGBDI对应土壤像元和玉米像元的交点为0.018、0.062、-0.006和-0.013。

VDVI、EXG和NGBDI植被指数提取玉米4个生长时期的植被覆盖度时,提取阈值在玉米四叶期、拔节期、抽穗期和花粒期生长阶段变化较大。整个生长时期的土壤VDVI和EXG数值的变化范围较小。主要原因为玉米由四叶期阶段生长到拔节期时,玉米叶片持续生长,叶绿素不断积累,绿色波段的像素值不断增大,基于叶片绿色波段的强反射和红色波段、蓝色波段的吸收原理构建的EXG和VDVI数值变大。抽穗期生长阶段的玉米在其冠层玉米穗的影响下,EXG和VDVI值变小,玉米在花粒期生长阶段由于玉米的衰败现象,造成了EXG和VDVI值与抽穗期相比持续减小;NGBDI对应玉米生长抽穗期和花粒期提取阈值减小的主要原因为反光叶片的增多和玉米穗的出现使得蓝色波段像素值增大,基于蓝绿波段差异构造的NGBDI值减小。EXG、VDVI和NGBDI对应玉米植被四叶期、拔节期、抽穗期和花粒期的统计变化结果如图4所示。

2.2 夏季玉米植被覆盖度提取结果与分析

利用上述阈值提取的夏季玉米植被覆盖度的结果如图5~8所示,其中白色部分代表土壤,绿色部分代表玉米植被,玉米植被覆盖度从四叶期到抽穗期明显增多,玉米在花粒期生长阶段出现衰败现象,导致植被覆盖度下降,基本符合玉米4个时期的生长特征。基于SVM监督分类得到玉米四叶期(2018-07-20)、玉米拔节期(2018-07-30)、玉米抽穗期(2018-08-10)和玉米花粒期(2018-08-22)的植被覆盖度分别为57.72%、93.60%、97.03%和95.06%。

利用式(5)的植被覆盖度提取精度验证方法,

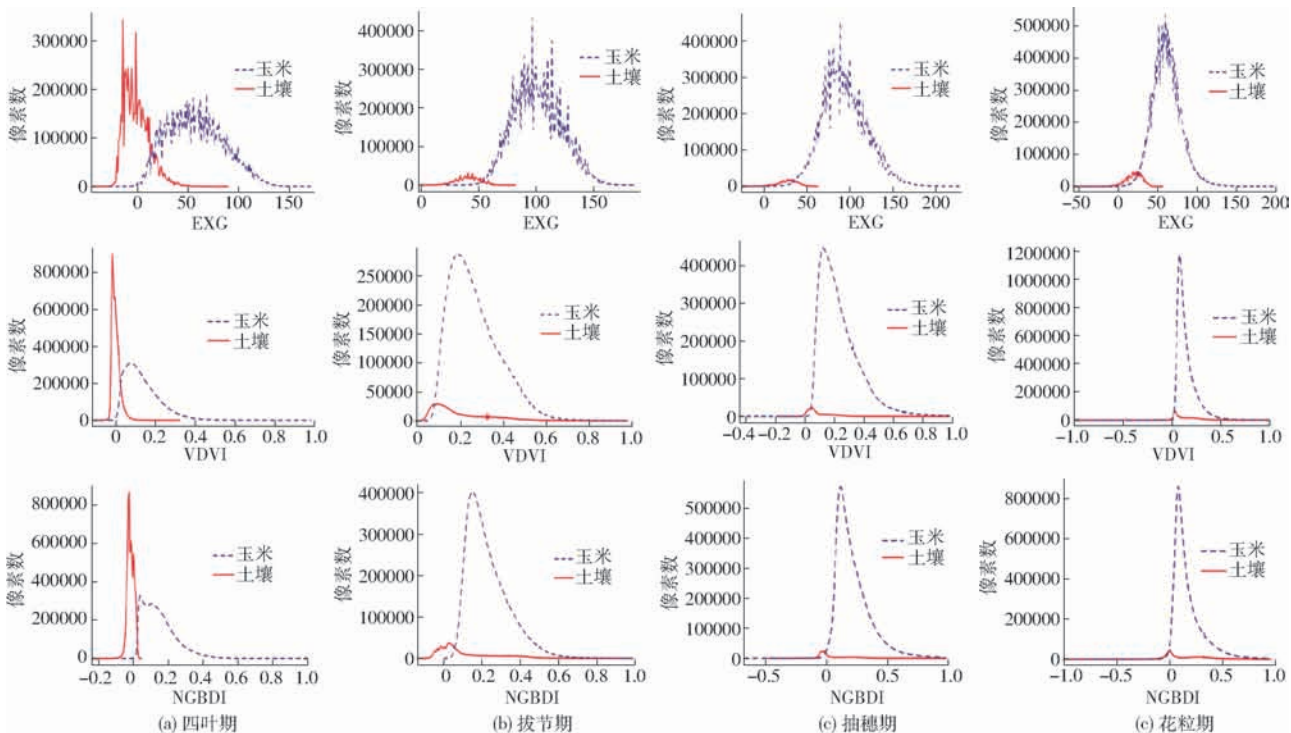


图3 玉米4个时期植被指数统计结果

Fig. 3 Statistical result of vegetation index in various periods of corn

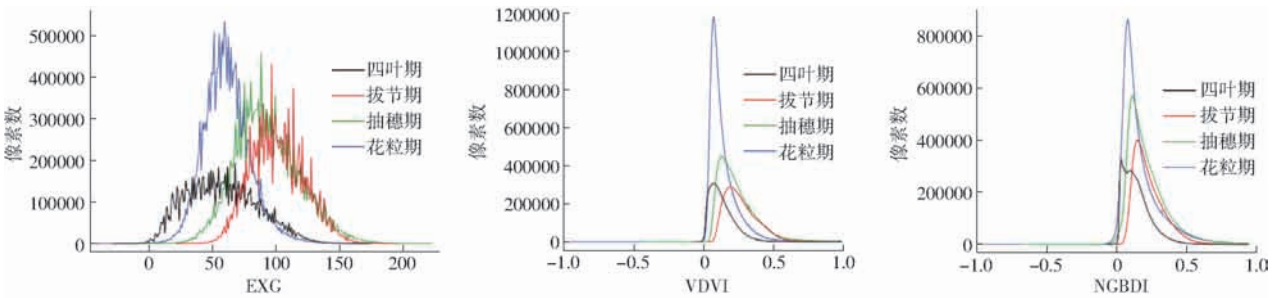


图4 玉米植被 EXG、VDMI 和 NGBDI 变化统计结果

Fig. 4 Statistical result of EXG, VDMI and NGBDI changes in corn vegetation

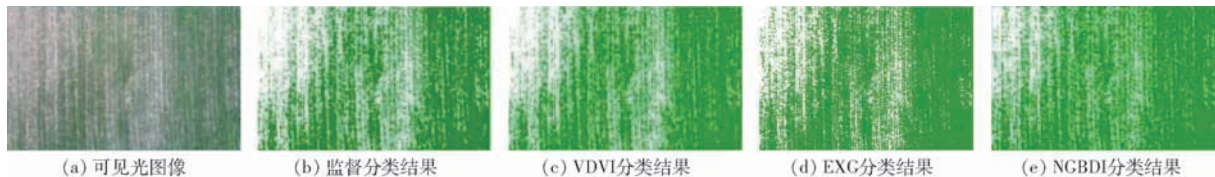


图5 2018年7月20日分类图像

Fig. 5 Classified images on July 20, 2018



图6 2018年7月30日分类图像

Fig. 6 Classified images on July 30, 2018

以监督分类结果为真值,对阈值法提取的夏季玉米植被覆盖度进行精度评价,并绘制了阈值法提取植被覆盖度与监督分类获得植被覆盖度的折线图(图9),数值如表2所示。

由统计结果可知,监督分类结合植被指数阈值法提取夏季玉米4个生长时期的植被覆盖度效果较好,EXG对应夏季玉米4个时期的提取误差均小于2%,VDMI和NGBDI在夏季玉米四叶期提取精度较



图 7 2018 年 8 月 10 日分类图像

Fig. 7 Classified images on August 10, 2018



图 8 2018 年 8 月 22 日分类图像

Fig. 8 Classified images on August 22, 2018

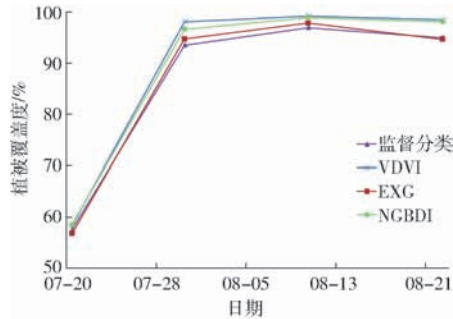


图 9 植被覆盖度提取结果比较

Fig. 9 Comparison of vegetation coverage extraction results

表 2 植被覆盖度提取精度
Tab. 2 Extraction accuracy of FVC %

可见光波段 植被指数	夏季玉米 生长期	植被指数阈 值法 (FVC)	监督分 类结果	提取误 差	绝对 误差
VDVI	四叶期	58.42	57.72	1.21	0.70
	拔节期	98.17	93.60	4.88	4.57
	抽穗期	99.27	97.03	2.31	2.24
	花粒期	98.49	95.06	3.61	3.43
EXG	四叶期	56.92	57.72	1.38	0.80
	拔节期	94.77	93.60	1.25	1.17
	抽穗期	97.89	97.03	0.89	0.86
	花粒期	94.74	95.06	0.33	0.32
NGBDI	四叶期	58.65	57.72	1.61	0.93
	拔节期	96.70	93.60	3.31	3.10
	抽穗期	98.96	97.03	1.99	1.93
	花粒期	98.15	95.06	3.25	3.09

高,随着植被的增加,玉米植被覆盖度提取精度有所下降。其主要原因为夏季玉米在太阳光的照射下,叶片存在反光现象,并且随着植被覆盖度的增加,阴影部分面积增大,通过 VDVI 和 NGBDI 阈值法提取玉米覆盖度时易将玉米叶片的光反部分识别为土壤,阴影部分识别为植被。所以 VDVI 和 NGBDI 阈值法进行夏季玉米拔节期、抽穗期和花粒期植被覆盖度提取误差相对于四叶期提取误差有所增大,具体原因还需要后续研究进一步分析。

通过对比发现 VDVI 在玉米四叶期阶段的植被覆盖度提取精度最高,与其他学者利用双峰直方图法和最大熵阈值法提取覆盖度时,VDVI 提取植被覆盖度效果最好的结果一致。随着玉米不断生长,玉米冠层光谱特征发生变化,田间叶片的反光部分和阴影部分面积不断增大,导致 VDVI 植被覆盖度的提取精度下降,EXG 在玉米生长的 4 个阶段不受叶片反光和阴影的影响,故提取精度在玉米的 4 个生长时期较为稳定。

2.3 植被覆盖度提取方法验证

为了进一步验证利用监督分类与可见光植被指数统计直方图相结合确定的阈值提取玉米 4 个生长期植被覆盖度方法的实用性,将玉米生长 4 个时期的单幅可见光图像提取的植被覆盖度阈值作为固定阈值,对 Pix4Dmapper 软件拼接的同时期试验田正射图像进行植被覆盖度提取。为了保证验证数据的独立性,根据上述单幅图像在全景图像拼接时的航点位置以及图像的目标物特点,利用掩模处理剔除了试验田全景图像中用于建模的单幅图像数据,并将处理后的试验田全景正射图像进行植被覆盖度提取,图 10~13 分别对应玉米四叶期、拔节期、抽穗期和花粒期植被覆盖度提取图像。植被指数阈值法与监督分类得到植被覆盖度的散点图如图 14 所示,具体数值如表 3 所示。

由表 3 可知,在试验田大尺度田块面积上基于上述单幅图像获取的 EXG 阈值提取的玉米 4 个生长时期的覆盖度提取误差均小于 2%,其提取结果与植被覆盖度监督分类真实值最为接近。VDVI 和 NGBDI 在玉米生长四叶期阶段植被覆盖度提取精度较高,四叶期之后的提取误差有所降低,与单幅图像提取植被覆盖度时所得结果吻合。由此可见,基于监督分类与可见光植被指数统计直方图相结合确定的阈值对夏季玉米 4 个时期植被覆盖度的提取均

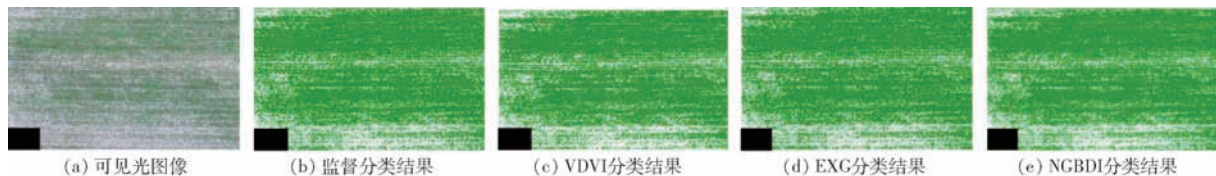


图 10 2018 年 7 月 20 日验证结果图像

Fig. 10 Images of verification results on July 20, 2018



图 11 2018 年 7 月 30 日验证结果图像

Fig. 11 Images of verification results on July 30, 2018

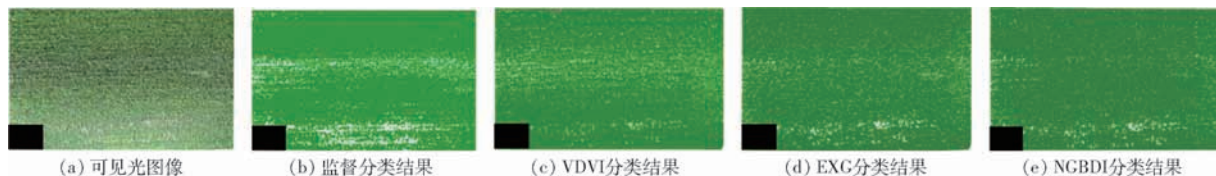


图 12 2018 年 8 月 10 日验证结果图像

Fig. 12 Images of verification results on August 10, 2018



图 13 2018 年 8 月 22 日验证结果图像

Fig. 13 Images of verification results on August 22, 2018

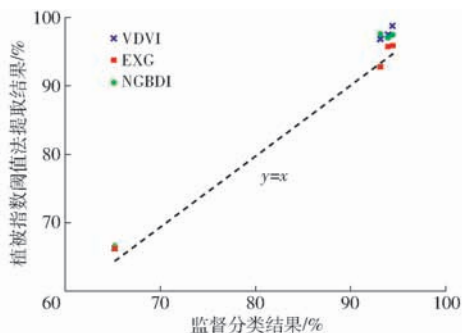


图 14 植被覆盖度提取效果测试比较

Fig. 14 Comparison of test results of vegetation coverage extraction effects

有较好的效果,测试结果与前述 4 个时期的基于单幅图像玉米植被覆盖度提取精度相近,未出现较大变化,由此可见基于可见光图像与植被指数阈值的夏季玉米植被覆盖度提取方法可行,可以用于夏季玉米 4 个时期的植被覆盖度提取。

3 结论

(1) 根据监督分类结果与可见光植被指数统计直方图相结合确定阈值的方法,发现 VDVI、EXG 和

表 3 植被覆盖度提取方法精度验证

Tab. 3 Extraction method accuracy verification of FVC

可见光波段	夏季玉米	植被指数阈	监督分	提取	绝对
植被指数	生长期	值法 (FVC)	类结果	误差	误差
VDVI	四叶期	66.27	65.17	1.69	1.10
	拔节期	97.57	93.95	3.85	3.62
	抽穗期	98.81	94.41	4.66	4.40
	花粒期	96.86	93.17	3.96	3.69
EXG	四叶期	66.42	65.17	1.92	1.25
	拔节期	95.79	93.95	1.96	1.84
	抽穗期	95.87	94.41	1.55	1.46
	花粒期	92.77	93.17	0.42	0.40
NGBDI	四叶期	66.70	65.17	2.35	1.53
	拔节期	97.06	93.95	3.31	3.11
	抽穗期	97.48	94.41	3.25	3.07
	花粒期	97.66	93.17	4.82	4.49

NGBDI 在夏季玉米 4 个生长时期的植被覆盖度提取精度较高,可以有效地解决双峰直方图阈值法和最大熵阈值法在低植被覆盖度提取时效果不理想的问题,能够满足夏季玉米的植被覆盖度测量要求。

(2) 玉米叶片的反光和阴影部分面积的增加影

响了 VDVI 和 NGBDI 的识别精度, 导致在玉米生长后期 VDVI 和 NGBDI 阈值法提取的植被覆盖度精度有所下降。

(3) 与 VDVI 和 NGBDI 指数相比, EXG 指数分类阈值得到的植被覆盖度与真实值最为接近。

(4) 对无人机拍摄的单幅图像采用监督分类结果与可见光植被指数统计直方图相结合确定阈值的方法, 阈值稳定性较高。利用单幅图像确定的阈值进行试验田大范围的植被覆盖度提取时, 覆盖度提取效果较好。

参 考 文 献

- [1] PUREVDORJ T, TATEISHIR, ISHIYAMAT, et al. Relationships between percent vegetation cover and vegetation indices [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(18): 3519 - 3535.
- [2] 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/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(4): 212 - 221.
NIU Yaxiao, ZHANG Liyuan, HAN Wenting, et al. Winter wheat coverage extraction method based on UAV remote sensing and vegetation index [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(4): 212 - 221. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180424&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.024. (in Chinese)
- [3] GITELSON A A, KAUFMAN Y J, STARK R, et al. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 80(1): 76 - 87.
- [4] 祁燕, 王秀兰, 冯仲科, 等. 基于 RS 与 GIS 的北京市植被覆盖度变化研究[J]. *林业调查规划*, 2009, 34(2): 1 - 4.
QI Yan, WANG Xiulan, FENG Zhongke, et al. Study on coverage changes of the vegetation in Beijing City based on RS and GIS [J]. *Forest Inventory and Planning*, 2009, 34(2): 1 - 4. (in Chinese)
- [5] 陈云浩, 李晓兵, 史培军. 中国西北地区蒸发散量计算的遥感研究[J]. *地理学报*, 2001, 56(3): 261 - 268.
CHEN Yunhao, LI Xiaobing, SHI Peijun. Regional evapotranspiration estimation over northwest China using remote sensing [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(3): 261 - 268. (in Chinese)
- [6] OWEN T W, CARLSON T N, GILLIES R R. An assessment of satellite remotely sensed land cover parameters in quantitatively describing the climatic effect of urbanization [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(9): 1663 - 1681.
- [7] GILLIES R R. A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover [J]. *Remote Sensing Reviews*, 1994, 9(1): 161 - 173.
- [8] 李存军, 赵春江, 刘良云, 等. 红外光谱指数反演大田冬小麦覆盖度及敏感性分析[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(5): 159 - 164.
LI Cunjun, ZHAO Chunjiang, LIU Liangyun, et al. Retrieval winter wheat ground cover by short-wave infrared spectral indices in field and sensitivity analysis [J]. *Transactions of the CSAE*, 2004, 20(5): 159 - 164. (in Chinese)
- [9] SONG W, MU X, RUAN G, et al. Estimating fractional vegetation cover and the vegetation index of bare soil and highly dense vegetation with a physically based method [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, 58: 168 - 176.
- [10] 李登科, 范建忠, 王娟. 陕西省植被覆盖度变化特征及其成因[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(11): 2896 - 2903.
LI Dengke, FAN Jianzhong, WANG Juan. Change characteristics and their causes of fractional vegetation coverage (FVC) in Shaanxi Province [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(11): 2896 - 2903. (in Chinese)
- [11] RUNDQUIST B C. The influence of canopy green vegetation fraction on spectral measurements over native tallgrass prairie [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81(1): 129 - 135.
- [12] 刘占宇, 黄敬峰, 吴新宏, 等. 天然草地植被覆盖度的高光谱遥感估算模型[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(6): 997 - 1002.
LIU Zhanyu, HUANG Jingfeng, WU Xinhong, et al. Hyperspectral remote sensing estimation models on vegetation coverage of natural grassland [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(6): 997 - 1002. (in Chinese)
- [13] 许美君, 郭蕾, 李黎. 宽带砂光机磨削正压力及橡胶带的优化配置[J]. *木材加工机械*, 2014, 25(4): 13 - 16.
XU Meijun, GUO Lei, LI Li. Optimal selection of sanding pressure and feeding belt in abrasive belt sanding machine [J]. *Wood Processing Machinery*, 2014, 25(4): 13 - 16. (in Chinese)
- [14] 周洁萍, 龚建华, 王涛, 等. 汶川地震灾区无人机遥感影像获取与可视化管理系统研究[J]. *遥感学报*, 2008, 12(6): 877 - 884.
ZHOU Jieping, GONG Jianhua, WANG Tao, et al. Study on UAV remote sensing image acquiring and visualization management system for the area affected by 5·12 Wenchuan earthquake [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2008, 12(6): 877 - 884. (in Chinese)
- [15] 汪沛, 罗锡文, 周志艳, 等. 基于微小型无人机的遥感信息获取关键技术综述[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(18): 1 - 12.
WANG Pei, LUO Xiwen, ZHOU Zhiyan, et al. Key technology for remote sensing information acquisition based on micro UAV [J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(18): 1 - 12. (in Chinese)

- [16] 史光平, 刘瑀. 无人机遥感系统的海事应用[J]. 中国海事, 2011(4): 29-32.
SHI Guangping, LIU Yu. The application of UAV remote sensing system in maritime control activities [J]. Chinese Maritime, 2011(4): 29-32. (in Chinese)
- [17] 韩文霆, 邵国敏, 马代健, 等. 大田玉米作物系数无人机多光谱遥感估算方法[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(7): 134-143.
HAN Wenting, SHAO Guomin, MA Daijian, et al. Estimating method of crop coefficient of maize based on UAV multispectral remote sensing[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 134-143. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180717&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.017. (in Chinese)
- [18] 牛亚晓, 张立元, 韩文霆. 基于 Lab 颜色空间的棉花覆盖度提取方法研究[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 240-249.
NIU Yaxiao, ZHANG Liyuan, HAN Wenting. Extraction methods of cotton coverage based on Lab color space [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 240-249. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20181027&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.027. (in Chinese)
- [19] 韩文霆, 张立元, 张海鑫, 等. 基于无人机遥感与面向对象的田间渠系分布信息提取[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 205-214.
HAN Wenting, ZHANG Liyuan, ZHANG Haixin, et al. Extraction method of sub-lateral canal distribution information based on UAV remote sensing[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 205-214. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170326&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.026. (in Chinese)
- [20] 虞连玉, 蔡焕杰, 姚付启, 等. 植被指数反演冬小麦植被覆盖度的适用性研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(1): 231-239.
YU Lianyu, CAI Huanjie, YAO Fuqi, et al. Applicability of vegetation indices to estimate fractional vegetation coverage [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 231-239. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150133&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.033. (in Chinese)
- [21] 孙刚, 黄文江, 陈鹏飞, 等. 轻小型无人机多光谱遥感技术应用进展[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 1-17.
SUN Gang, HUANG Wenjiang, CHEN Pengfei, et al. Advances in UAV based multispectral remote sensing applications [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 1-17. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180301&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.001. (in Chinese)
- [22] 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): 152-158.
WANG Xiaoqin, WANG Miaomiao, WANG Shaoqiang, et al. Extraction of vegetation information from visible unmanned aerial vehicle images[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(5): 152-158. (in Chinese)
- [23] 李冰, 刘榕源, 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 Bing, LIU Rongyuan, LIU Suhong, et al. Monitoring vegetation coverage variation of winter wheat by low-altitude UAV remote sensing system [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(13): 160-165. (in Chinese)
- [24] 田振坤, 傅莺莺, 刘素红, 等. 基于无人机低空遥感的农作物快速分类方法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(7): 109-116.
TIAN Zhenkun, FU Yingying, LIU Suhong, et al. Rapid crops classification based on UAV low-altitude remote sensing [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(7): 109-116. (in Chinese)
- [25] 刘峰, 刘素红, 向阳. 园地植被覆盖度的无人机遥感监测研究[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(11): 250-257.
LIU Feng, LIU Suhong, XIANG Yang. Study on monitoring fractional vegetation cover of garden plots by unmanned aerial vehicles [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 250-257. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20141139&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.11.039. (in Chinese)
- [26] ZHOU Q, ROBSON M. Automated rangeland vegetation cover and density estimation using ground digital images and a spectral contextual classifier [J]. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22(17): 3457-3470.
- [27] 卞雪, 马群宇, 刘楚焯. 基于低空可见光谱的植被覆盖率计算[J]. 水土保持通报, 2017, 37(5): 270-275.
BIAN Xue, MA Qunyu, LIU Chuyue. Vegetation coverage calculation based on low altitude visible spectrum [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(5): 270-275. (in Chinese)
- [28] MEYER G E, NETO J C. Verification of color vegetation indices of automated crop image application[J]. Computer and Electronics in Agriculture, 2008(63): 282-293.
- [29] HUNT J E R, CAVIGELLI M, DAUGHTRY C S T, et al. Evaluation of digital photography from model aircraft for remote sensing of crop biomass and nitrogen status [J]. Precision Agriculture, 2005, 6(4): 359-378.
- [30] SELLARO R, CREPY M, TRUPKIN S A, et al. Cryptochrom as a sensor of the blue/green ratio of natural radiation in arabidopsis[J]. Plant Physiology, 2010, 154(1): 401-409.