

柑橘植株冠层氮素和光合色素含量近地遥感估测

刘雪峰¹, 吕强¹, 何绍兰¹, 易时来¹, 谢让金¹,
郑永强¹, 胡德玉³, 汪志涛¹, 邓烈^{1,2}

1. 西南大学/中国农业科学院柑桔研究所, 重庆 400712;

2. 农业部西南果树观测试验站, 重庆 400712;

3. 西南大学 园艺园林学院, 重庆 400715

摘要: 柑橘植株营养状况的遥感监测是实现果树轻简高效管理和优质丰产的重要手段,但迄今有关基于低空遥感信息的果树营养诊断研究鲜见报道。本文采用具有 490 nm、550 nm、570 nm、671 nm、680 nm、700 nm、720 nm、800 nm、840 nm、900 nm、950 nm 等 11 个波段光谱的八旋翼飞行器(UAV)载多光谱遥感系统,获取距地面 100 m 高度的哈姆林甜橙植株春季冠层近地遥感信息,对比分析基于多元散射校正(MSC)和标准正态变量(SNV)两种预处理光谱和原始光谱(OS)的偏最小二乘(PLS)、多元线性回归(MLR)、主成分回归(PCR)及最小二乘支持向量机(LS-SVM)等 4 种模型对冠层叶片氮素、叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量预测精度的影响。结果显示,距地面 100 m 高度的多光谱信息,通过 SNV 光谱预处理和 MLR 建模对冠层叶片氮素、叶绿素 a 和叶绿素 b 含量的预测效果均较好,预测集相关系数(R_p)值分别达 0.8036、0.8065 和 0.8107,预测均方根误差(RMSEP)值分别为 0.1363、0.0427 和 0.0243;而在 SNV 光谱预处理基础上的 LS-SVM 建模对冠层类胡萝卜素含量预测效果更优, R_p 值达到了 0.8535, RMSEP 值为 0.0117。表明利用机载多光谱图像信息可实现对柑橘植株冠层全氮及叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量的较好估算,为大规模柑橘园植株冠层营养状况的精准和高效监测提供了一条新途径。

关键词: 甜橙, 冠层, 光合色素, 氮, 近地遥感

中图分类号: TP701 文献标志码: A

引用格式: 刘雪峰, 吕强, 何绍兰, 易时来, 谢让金, 郑永强, 胡德玉, 汪志涛, 邓烈. 2015. 柑橘植株冠层氮素和光合色素含量近地遥感估测. 遥感学报, 19(6): 1007-1018

Liu X F, Lyu Q, He S L, Yi S L, Xie R J, Zheng Y Q, Hu D Y, Wang Z T and Deng L. 2015. Estimation of nitrogen and pigments content in citrus canopy by low-altitude remote sensing. Journal of Remote Sensing, 19(6): 1007-1018 [DOI: 10.11834/jrs.20155078]

1 引言

叶片氮素和光合色素是影响果树生长发育、产量与品质形成的重要营养因子(陈磊等 2010; 孙猛等 2009),充足的氮素和光合色素含量对植株营养生长、花芽分化、光合作用均有促进作用(李文庆等 2002),叶绿素含量的多少还是判断植株营养胁迫、光合能力和衰老进程等生理状态的良好指标(Stoeva 等 2003; Li 等 2006)。实时、快捷、准确地

检测果树叶绿素和氮素含量,并依据其营养诊断结果进行科学合理的施肥,是实现轻简高效营养诊断和保障果树优质丰产的一个重要保障(张冬强等, 2012)。果树植株春季至花期的营养水平,既是树体营养状况的实时反映,也是对树体开花结果营养保障能力的判定依据(樊小林和黄彩龙 2004)。因此,研究果树春季萌芽开花期叶片氮素和叶绿素含量的实时高效诊断技术,具有重要的科学价值和行业生产指导意义。

收稿日期: 2015-05-04; 修订日期: 2015-09-01; 优先数字出版日期: 2015-09-08

基金项目: 国家国际科技合作专项项目(编号: 2013DFA11470); 重庆市科技攻关计划项目(编号: cstc2012gg-yyjs80002); 国家科技支撑计划课题(编号: 2014BAD16B0103); 重庆市科技支撑示范工程(编号: cstc2014fzktpt80015); 中央高校基本业务费专项资金(编号: XDJK2013C102)

第一作者简介: 刘雪峰(1990—)男,硕士研究生,主要研究方向为柑橘生理与近地遥感技术。E-mail: zgslxf@163.com

通信作者简介: 邓烈(1957—)男,研究员,主要从事果树生理与信息技术研究。E-mail: denglie@cric.cn

传统的营养诊断需要从果园采集树木叶片样品进行化学分析,其时效性较差,成本高,采样标准性和代表性还可能影响诊断结果的准确性和可靠性产生重要影响。近年来,随着光谱技术的快速发展与不断完善,利用光谱信息对多种植物生长发育状况进行实时、快捷监测已成为可能,并成为农业信息技术领域研究的热点(姚云军等 2008)。已有研究表明,利用光谱技术可以对苹果(房贤一等 2013;潘蓓等 2013;张瑶等 2013)、柑橘(李金梦等 2014;易时来等 2010;田喜等 2014)、梨(柴仲平等 2013)等在单叶尺度上的叶绿素和氮素含量实时监测,但对于大田尺度上的果树营养光谱诊断技术至今缺乏系统研究。采用卫星遥感光谱信息进行大田作物冠层营养诊断的相关技术近年发展较快,大幅度提高了营养诊断作业的效率,但受限于卫星遥感信息获取时所受天气影响,其空间分辨率、预测精度和时效性等都难以满足科学研究和生产应用的需求。随着无人机技术和光谱信息获取与分析技术的发展,近地遥感技术逐渐向农业、探矿、环境等领域辐射应用,并且已显示出对现代农业生产的实用价值。无人机遥感技术能够灵活、实时、针对性地获取多尺度、多时相的地面多光谱数据,具有高时效、高分辨率、低成本、低风险及可重复使用等优势(李冰等 2012),同时可相对降低气候因子的制约性影响,近年来已在植物分类(田振坤等 2013)、病害识别(Li等 2012)和产量估测(叶旭君等 2010)等农业领域取得较好的研究进展。但迄今为止,基于低空遥感信息的果树营养诊断技术研究鲜见报道。为此,本文采用机载多光谱技术对盛花期甜橙果园进行冠层叶绿素组分和氮素含量的监测研究,以期为基于无人机低空遥感信息的果树营养诊断技术的研发提供理论依据和技术支持。

2 实验材料与方法

2.1 实验材料

本实验于 2014 年 4 月在重庆市忠县新立镇国家现代农业(柑橘)示范园核心区果园进行。该园区为浅丘山地果园,试材为 13 年生卡里佐枳橙(*Citrus sinensis* × *Poncirus trifoliata* (L.) Raf. cv. Carrizo Citrange) 砧哈姆林甜橙(*Citrus sinensis* (L.) CV. Hamlin Sweet Orange)。于 2014 年 4 月 27 日,从实验果园随机选择生长势不一致的植株 88 株,每

株为一个实验样本。利用八旋翼无人机搭载的多光谱系统,采集实验植株所在区域的植株冠层光谱信息,而后采集每一供试植株四周中上部的上一年春梢营养枝叶片各 20 片,放入装有冰块的冷藏箱,立即带回实验室。

2.2 冠层多光谱遥感图像获取

用美国 Tetracam 公司的 mini-MCA12 Equipped with Incident Light Sensor 多光谱阵列相机采集植株冠层多光谱信息。该多光谱相机具有的 490 nm、550 nm、570 nm、671 nm、680 nm、700 nm、720 nm、800 nm、840 nm、900 nm、950 nm 等 11 个波段光谱采集通道,系根据国内外植物营养光谱诊断技术研究成果分析基础上提出,并在每个通道配备一个 1.3 M 像素 CMOS 传感器,分辨率为 1280 × 1024,每个通道使用直径为 25 mm 的滤光片,焦距为 9.6 mm 定焦,采用 RAW 格式存储图像。除此之外,该相机还另有一个通道,配备一个用于感应光强,进行图像校正的光强传感器,12 个通道呈 3 × 4 矩形排列。多光谱相机搭载于北京天途航空技术发展有限公司生产的 M8 多旋翼无人机,于 2014 年 4 月 27 日(晴天) 12:00 时进行植株冠层光谱信息的采集,作业时无人机巡航高度 100 m,巡航速度 3.6 m/s。

2.3 叶片光合色素及全氮含量的测定

2.3.1 光合色素含量测定

将清洗干净、擦干的新鲜叶片剪成细丝,混匀后称取样品 0.20 g 于 25 mL 容量瓶中,加入 96% 乙醇 25 mL,于室温下遮光静置至叶肉组织完全变白。用 PerkinElmer Lambda45 型分光光度计测定提取液在波长 665 nm、649 nm 和 470 nm 下的光密度值(D)。按以下公式计算样品中色素含量(赵世杰等 2002)。

提取液叶绿素 a 浓度

$$C_a = 13.95D_{665} - 6.88D_{649} \quad (1)$$

提取液叶绿素 b 浓度

$$C_b = 24.96D_{649} - 7.32D_{665} \quad (2)$$

提取液类胡萝卜素浓度

$$C_{xc} = (1000D_{470} - 2.05C_a - 114.8C_b) / 245 \quad (3)$$

$$\text{色素含量} = (C \cdot V \cdot N) / W \quad (4)$$

式中,C 为色素浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$);V 为提取液体积(L);N 为稀释倍数;W 为叶片鲜重(g)。

2.3.2 叶片全氮含量测定

采用凯氏定氮法(王学奎, 2006)测定叶片氮素含量: 将洗净的新鲜叶片置于烘箱中, 先在 105 °C 条件下杀酶 30 min, 然后在 75 °C 条件下烘干至恒重。将烘干的叶片研磨成粉末, 充分混匀后称取 0.4 g, 用 $H_2SO_4 - H_2O_2$ 消煮、定容至 100 mL, 吸取 10 mL 于蒸馏管中, 用上海纤检仪器有限公司 KDN-103F 自动定氮仪测定叶片全氮含量。

2.4 多光谱图像处理及冠层光谱信息提取

使用 Tetracam 公司的 PixlWrench 2 软件将多光谱图像导出并预处理。再用 Kolor Autopano Giga 软件拼接出整个实验果园的完整 RGB(R: 671 nm, G: 550 nm, B: 490 nm) 图像, 从中找出每株实验树的具体位置。图 1 为获取的实验区域 RGB 图像截取的一部分及用于本文分析的部分样本植株, 红线内植株为所选实验树。



图 1 实验果园部分 RGB 图像(红色线条内的植株为所选实验树)

Fig. 1 Part of experimental orchard RGB image (the selected test tree are inside of red lines)

将实验区完整光谱图导入 ENVI 4.7 软件, 以供试样本植株作为研究对象, 首先以多边形工具识别并选定图像中每个样本植株的冠层为感兴趣区域, 然后提取该感兴趣区域的平均反射光谱值作为该样本植株的冠层光谱反射率, 以此类推逐一提取出 88 棵样本植株的冠层光谱反射率。

2.5 光谱预处理与建模分析

为了消除和降低光照等环境背景因素和随机误差等仪器因素带来的影响(王凤花等, 2011), 使提取的光谱信息更加准确并增加其有效信息, 需要对提取的原始光谱数据进行预处理。本文分别采用 Unscrambler 软件多元散射校正(MSC)和标准正态变量(SNV)等两种算法对原始光谱(OS)进行预

处理, 比对不同方法预处理后的光谱建模预测效果, 以筛选适宜的光谱预处理技术。

对经不同方法预处理后的冠层光谱信息, 借助 Unscrambler 和 Matlab 软件分别建立偏最小二乘法(PLS)、多元线性回归法(MLR)、主成分回归法(PCR)和最小二乘支持向量机法(least LS-SVM)等 4 种预测模型(王凤花等, 2011), 比对不同光谱预处理和建模方法对柑橘叶片色素组分和全氮含量的预测精度。以校正集相关系数(R_c)、交叉验证均方根误差(RMSECV)、预测集相关系数(R_p)和预测均方根误差(RMSEP)等为评价指标, 并以预测能力较好的模型应同时具有较大的 R_c 和 R_p , 较小的 RMSECV 和 RMSEP 为标准, 评价所建模型的预测效果。

3 结果与分析

3.1 柑橘植株叶片氮素和色素组分含量水平的冠层光谱响应特征

在一定强度光辐射下,植物叶片中化学物质(如水、蛋白质、叶绿素等)的化学键(C—H、N—H、C=O等)会发生不同振动(高荣强等2002)。植株营养元素的丰缺可直接影响其生理代谢过程,使得叶片内的物质种类及其含量产生差异,引起化学键的振动情况不同,表现为不同波段上光谱反射率的差异。光谱反射率的形态和特征表现了该植物表面粒子结构、粒子尺度、粒子光学性质、入射光波长等参数信息(冯放2007)。实验中将不同单株按叶片样本中氮素、叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素

含量高低排序,同时将88个样本植株平均分成4组,即含量最低的C1组、含量中等偏下的C2组、含量中等偏上的C3组、含量最高的C4组,每组22株。对每组样本的色素组分含量、氮素含量和光谱数据进行平均处理,建立不同氮素和色素组分含量水平与冠层光谱反射率的相关关系(图2)。从图2中可见,柑橘冠层光谱反射率与典型植物相似,由于叶绿素的存在导致在可见光区域有强烈的辐射能量吸收和较低的反射率,而在近红外区域有相对高的反射率是由于叶片内部结构多次散射的结果(Knipling, 1970)。在550 nm和570 nm波段下,光谱反射率存在明显的差异:氮素、色素含量越高,光谱反射率越低,表明植株冠层叶片化学组分及含量的差异对光谱响应存在不同影响。因此,可以利用化学计量学方法对柑橘植株冠层氮素和色素组分的含量进行预测。

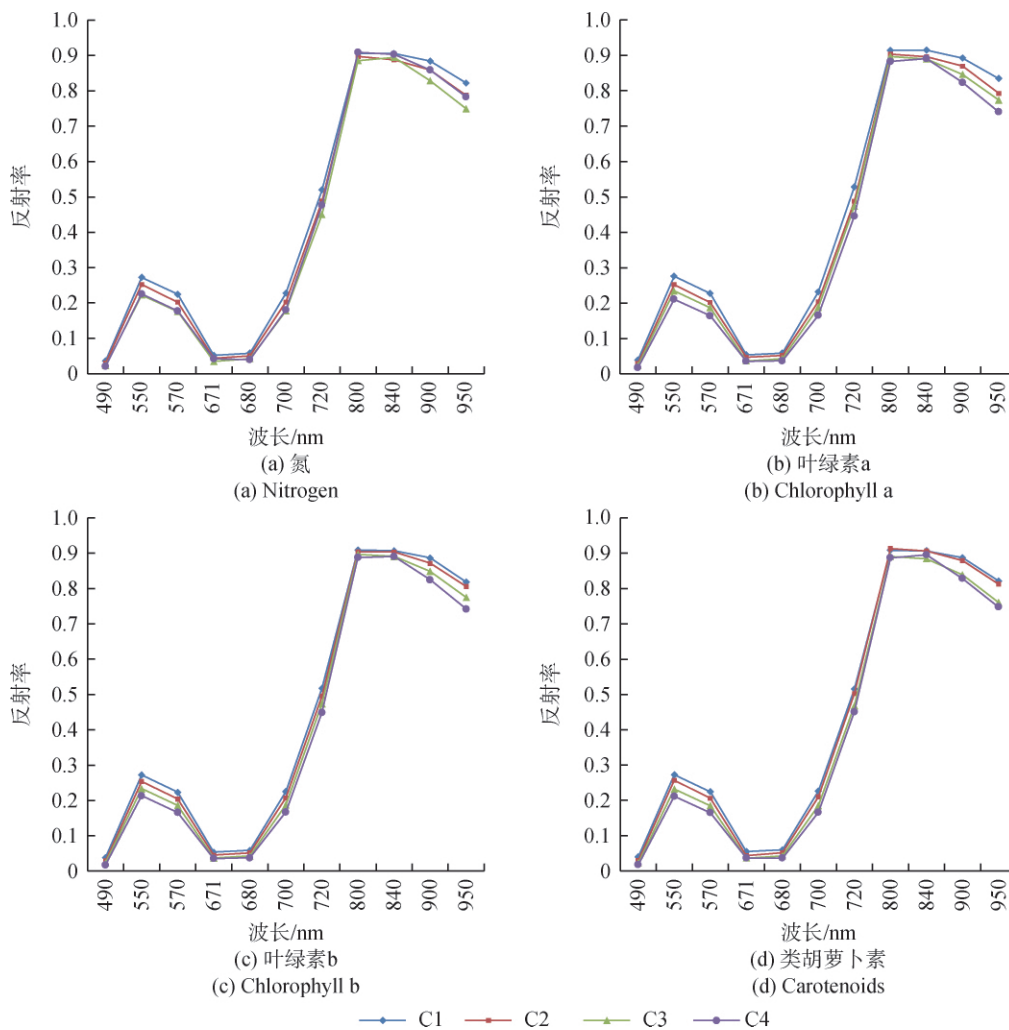


图2 不同氮素和光合色素含量的柑橘植株冠层多光谱特征

Fig. 2 Multi-spectral characteristics of citrus canopy with different nitrogen and photosynthetic pigments content

通过对柑橘近地遥感光谱信息进行分析,发现柑橘植株冠层原始光谱反射率分别与氮素、叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量具有一定相关性(图 3),在 490 nm、550 nm、570 nm、680 nm 和 700 nm 波长下,柑橘植株冠层原始光谱反射率与氮素含量呈极显著负相关($P < 0.01$),前述波段为氮素敏感波段;而光合色素含量与 490 nm、

550 nm、570 nm、671 nm、680 nm、700 nm、720 nm、900 nm 和 950 nm 波长下的冠层原始光谱反射率呈极显著负相关($P < 0.01$),这些波段则为光合色素敏感波段。本实验所获取的 11 个波长下的柑橘冠层光谱反射率与光合色素含量的相关性高于与氮素的相关性,尤以类胡萝卜素含量与光谱反射率的相关性最高。

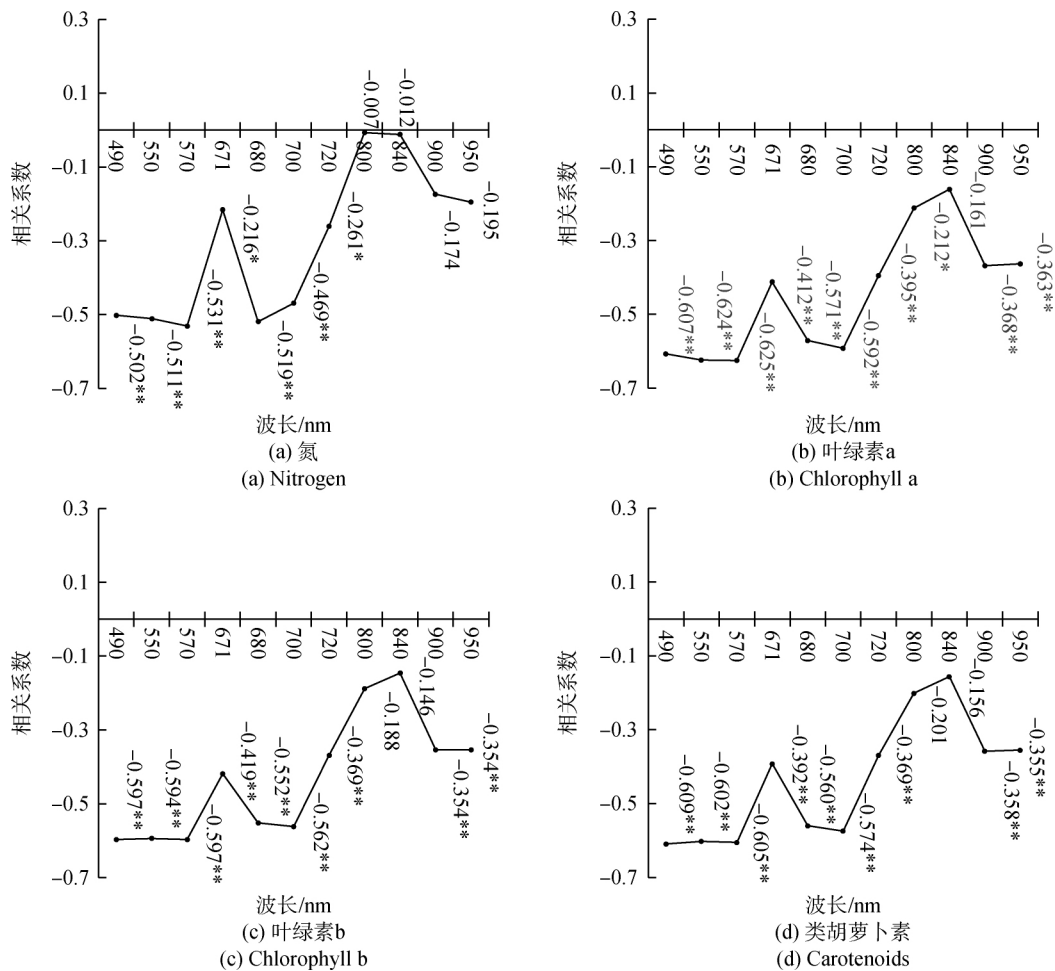


图 3 柑橘植株冠层光谱反射率与氮素和光合色素含量的相关性

Fig. 3 Correlation of citrus plant canopy spectral reflectance with nitrogen and photosynthetic pigments content

3.2 光谱预处理方法与预测模型筛选

3.2.1 样本分集

对供试的 88 株柑橘树,随机选取 66 株作为校正集,其余 22 株作为预测集,分别用于预测模型的建立和验证。从表 1 可见,预测集植株叶片的叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素和氮素含量均在校正集植株叶片含量范围之内,表明校正集样本所建预测模型可以用于预测集样本分析。

3.2.2 基于不同预处理光谱的偏最小二乘法预测模型的预测效果

采用 MSC、SNV 对冠层近地光谱信息进行预处理后,建立冠层色素和氮素含量 PLS 预测模型。从表 2 可见,光谱预处理后建立 PLS 预测模型,对植株冠层色素和氮素含量的预测精度均较好, R_p 值均达到 0.75 以上,且 RMSEP 均较小。采用 OS 建立 PLS 预测模型,对植株冠层氮素和叶绿素 b 的预测效果均较好, R_p 、RMSEP 分别为 0.7690、0.1240 和

0.7769、0.0258; 而采用 SNV 预处理光谱建立 PLS 预测模型, 对叶绿素 a 的预测效果则更好, R_p 、RMSEP 为 0.7925 和 0.0481; 所有预处理方法对类胡萝卜素

的建模效果均较好, R_p 均达到 0.8 以上, RMSEP 均在 0.0188 以下, 但以 MSC 预处理光谱所建 PLS 模型对冠层叶片类胡萝卜素含量的预测效果最好。

表 1 实验植株氮素和光合色素含量

Table 1 Nitrogen and photosynthetic pigment content of test plants

指标	类型	样本数/个	最大值	最小值	平均值	标准差
全氮	校正集	66	3.9904%	2.6006%	3.1151%	0.2895%
	预测集	22	3.6285%	2.6226%	3.1009%	0.2773%
叶绿素 a	校正集	66	1.1129‰	0.4799‰	0.6680‰	0.1122‰
	预测集	22	0.8594‰	0.4959‰	0.6627‰	0.0986‰
叶绿素 b	校正集	66	0.5050‰	0.2038‰	0.2863‰	0.0514‰
	预测集	22	0.4802‰	0.2041‰	0.2833‰	0.0453‰
类胡萝卜素	校正集	66	0.3015‰	0.1426‰	0.1927‰	0.0266‰
	预测集	22	0.2319‰	0.1524‰	0.1903‰	0.0222‰

表 2 基于不同光谱预处理方法的 PLS 预测模型结果

Table 2 The results of PLS prediction models based on different spectral pre-processing methods

指标	预处理方法	主成分数	R_c	RMSECV	R_p	RMSEP
全氮	OS	5	0.7860	0.1776	0.7690	0.1240
	MSC	3	0.7849	0.1780	0.7572	0.1304
	SNV	3	0.785	0.1779	0.7574	0.1304
叶绿素 a	OS	5	0.7814	0.0694	0.7459	0.0531
	MSC	4	0.7956	0.0672	0.7913	0.0483
	SNV	4	0.7967	0.0671	0.7925	0.0481
叶绿素 b	OS	6	0.7876	0.0314	0.7769	0.0258
	MSC	3	0.7651	0.0329	0.7421	0.0275
	SNV	3	0.7644	0.0329	0.7471	0.0277
类胡萝卜素	OS	7	0.8238	0.0150	0.8075	0.0186
	MSC	5	0.8438	0.0142	0.8229	0.0188
	SNV	5	0.8451	0.0141	0.8222	0.0188

3.2.3 基于不同预处理光谱的多元线性回归预测模型的预测效果

采用不同方法预处理冠层近地光谱数据, 建立全氮、叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量多元线性回归(MLR)预测模型, 结果显示(表 3) 基于几种预处理

光谱的 MLR 建模, 对全氮、叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量的预测效果都较好, 总体上优于 PLS 预测模型。而不同光谱预处理方法比较, 则以 SNV 预处理光谱所建 MLR 预测模型对冠层全氮和色素含量的预测效果更优, R_p 均达到 0.80 以上, RMSEP 也相对较小。

表3 基于不同光谱预处理方法的 MLR 预测模型结果

Table 3 Results of MLR prediction models based on different spectral pre-processing methods

指标	预处理方法	R_c	RMSECV	R_p	RMSEP
全氮	OS	0.7941	0.1746	0.7830	0.1263
	MSC	0.8038	0.1710	0.7440	0.1416
	SNV	0.8040	0.1710	0.8036	0.1363
叶绿素 a	OS	0.8072	0.0655	0.7558	0.0519
	MSC	0.8205	0.0639	0.7297	0.0596
	SNV	0.8430	0.0595	0.8065	0.0427
叶绿素 b	OS	0.7922	0.0311	0.7366	0.0285
	MSC	0.8104	0.0299	0.7505	0.0282
	SNV	0.8241	0.0289	0.8107	0.0243
类胡萝卜素	OS	0.8519	0.0138	0.8044	0.0203
	MSC	0.8562	0.0136	0.7982	0.0205
	SNV	0.8658	0.0132	0.8067	0.0173

3.2.4 基于不同预处理光谱的主成分回归预测模型预测效果比较

表4显示 植株冠层光谱数据经 MSC、SNV 等不同方法预处理后建立的主成分回归(PCR)模型 对全氮、叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素等组分含量的预测

R_p 值均高于 0.75。其中 以 MSC 预处理后的光谱所建 PCR 预测模型对叶绿素 a 和类胡萝卜素含量的预测精度较高 其 R_p 值分别为 0.7870 和 0.8126; 而对全氮和叶绿素 b 含量的预测 则分别以 OS 和 SNV 预处理光谱所建 PCR 预测模型的预测效果更优。

表4 基于不同光谱预处理方法的 PCR 预测模型结果

Table 4 Results of PCR prediction models based on different spectral pre-processing methods

指标	预处理方法	主成分数	R_c	RMSECV	R_p	RMSEP
全氮	OS	7	0.7813	0.1793	0.7690	0.1231
	MSC	5	0.7857	0.1777	0.7669	0.1301
	SNV	5	0.7857	0.1777	0.7667	0.1300
叶绿素 a	OS	10	0.8055	0.0658	0.7734	0.0512
	MSC	8	0.8154	0.0643	0.7870	0.0496
	SNV	6	0.7926	0.0677	0.7594	0.0529
叶绿素 b	OS	10	0.7877	0.0314	0.7789	0.0261
	MSC	8	0.8001	0.0306	0.7851	0.0258
	SNV	10	0.8226	0.0290	0.8092	0.0249
类胡萝卜素	OS	10	0.8516	0.0138	0.8043	0.0203
	MSC	8	0.8535	0.0138	0.8126	0.0194
	SNV	8	0.8537	0.0138	0.8121	0.0195

3.2.5 基于不同预处理光谱的最小二乘支持向量机预测模型预测效果比较

采用最小二乘支持向量机(LS-SVM) 模型构

建方法进行数据分析时 ,不同的核函数可以构造不同的支持向量机。本实验采用径向基(RBF) 核函数 ,由于 RBF 核函数具有较强的泛化能力(王强

和田学民, 2012), 因此确定核函数后需要对核函数的参数进行优化。以 RBF 作为核函数的 LS-SVM 模型主要有两个参数: 超参数 γ 和 RBF 核函数参数 σ^2 (彭彦昆等 2011)。本文采用基于交叉验证的网格搜索选择 γ 和 σ^2 的最优组合, 即在 γ 和 σ^2 组成的空间内, 逐一分析空间中各点以寻求最优参数组合。表 5 为所构建 LS-SVM 模型的预

测结果, 从表中可知, 以 SNV 预处理光谱所建 LS-SVM 模型对全氮和类胡萝卜素含量的预测效果较好, R_p 值分别为 0.7809 和 0.8535, RMSEP 值为 0.1875 和 0.0117; 而采用原始光谱所建 LS-SVM 模型对叶绿素 a 和叶绿素 b 含量的预测效果相对较好, R_p 值分别为 0.7765 和 0.7607, RMSEP 值也均较小。

表 5 基于不同光谱预处理方法的 LS-SVM 预测模型结果

Table 5 Results of LS-SVM prediction models based on different spectral pre-processing methods

指标	预处理方法	主成分数	R_c	RMSECV	R_p	RMSEP
全氮	OS	7	0.8375	0.1619	0.7806	0.1853
	MSC	6	0.8170	0.1724	0.7698	0.1890
	SNV	7	0.8369	0.1636	0.7809	0.1875
叶绿素 a	OS	6	0.8413	0.0620	0.7765	0.0621
	MSC	4	0.7585	0.0734	0.7530	0.0661
	SNV	5	0.9357	0.0403	0.7806	0.0642
叶绿素 b	OS	6	0.7671	0.0332	0.7607	0.0300
	MSC	6	0.8948	0.0241	0.7917	0.0281
	SNV	6	0.8386	0.0286	0.7687	0.0293
类胡萝卜素	OS	5	0.8078	0.0158	0.7086	0.0155
	MSC	6	0.8758	0.0133	0.8481	0.0117
	SNV	6	0.8746	0.0131	0.8535	0.0117

3.2.6 基于近地遥感信息的植株冠层氮素和色素含量最佳预测模型

从表 2—表 5 的分析结果可见, 采用 SNV 进行光谱预处理和 MLR 建模, 对植株冠层氮素、叶绿素 a 和叶绿素 b 含量的预测效果较好, 其 R_p 值分别为 0.8036、0.8065 和 0.8107, RMSEP 值分别为 0.1363、0.0427 和 0.0243; 与其他预处理和建模算法相比, 采用 SNV 进行光谱预处理, 并以所建的

LS-SVM 模型对类胡萝卜素含量预测效果更优, R_p 值为 0.8535, RMSEP 仅为 0.0117。最佳预测模型的比对和验证结果如表 6 和图 4 所示, 可以看出, 基于机载多光谱遥感信息建立柑橘冠层氮素和光合色素含量预测模型时, SNV 可能是一种较好的光谱预处理方法, 而 MLR 线性建模方法更适用于氮素和叶绿素含量预测模型的建立, LS-SVM 非线性建模方法建立的预测模型则更适用于类胡萝卜素含量的预测。

表 6 柑橘植株氮素和光合色素含量的最佳预测模型

Table 6 Best prediction models for nitrogen and photosynthetic pigments content of citrus plants

不同组分	建模方法	光谱预处理方法	R_c	RMSECV	R_p	RMSEP
全氮	MLR	SNV	0.8040	0.1710	0.8036	0.1363
叶绿素 a	MLR	SNV	0.8430	0.0595	0.8065	0.0427
叶绿素 b	MLR	SNV	0.8241	0.0289	0.8107	0.0243
类胡萝卜素	LS-SVM	SNV	0.8746	0.0131	0.8535	0.0117

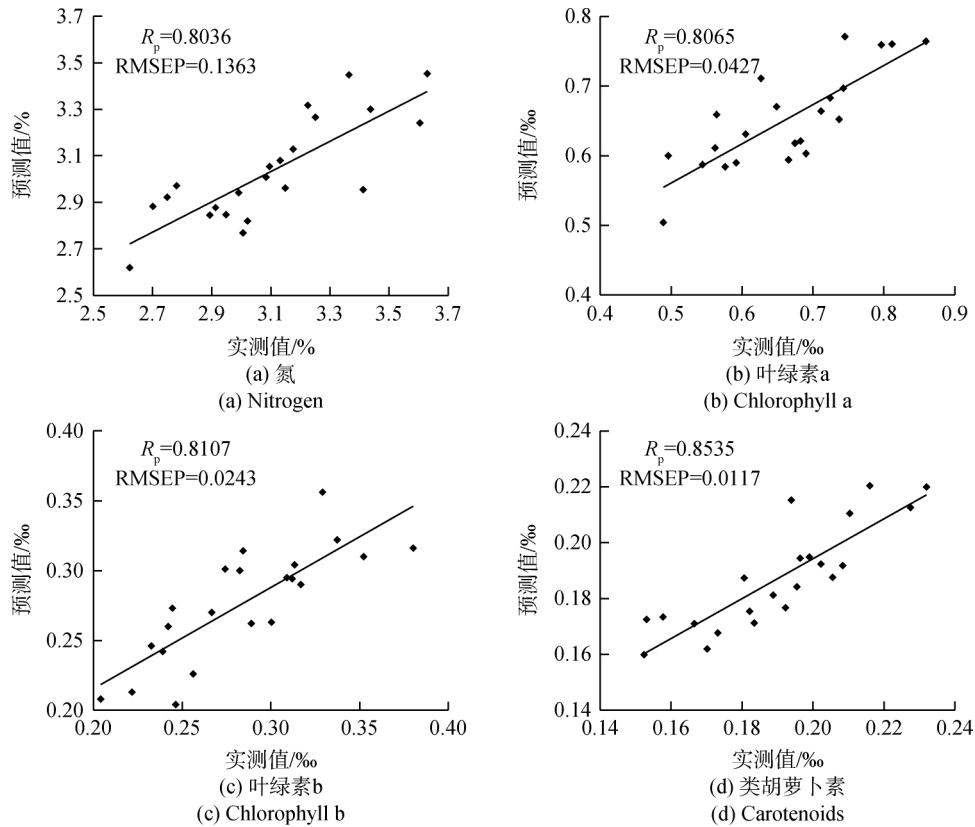


图4 柑橘植株氮素和光合色素含量的最佳预测结果

Fig. 4 Best prediction results of nitrogen and photosynthetic pigment content in citrus plants

4 结论与讨论

利用近地遥感技术获取柑橘生长重要物候期——春季的冠层多光谱信息,对比分析了基于SNV、MSC等预处理光谱和原始光谱(OS)的PLS、MLR、PCR和LS-SVM等模型对柑橘植株冠层叶片全氮和不同色素组分含量的快速预测精度,结果显示,采用SNV预处理光谱,并以MLR建立模型,对于冠层全氮、叶绿素a和叶绿素b含量的预测均获得了较好的预测精度;而对于类胡萝卜素含量的预测,则以SNV预处理光谱和LS-SVM建模的预测效果更优。本实验结果表明,利用无人机多光谱系统获取的柑橘植株冠层近地多光谱信息,通过适当的光谱预处理和建模分析,可实现对柑橘植株冠层叶片全氮、叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素等含量的实时、高效预测,同时为规模化柑橘园营养状况的快速预测和果园养分精准管理提供科学依据。

采用无人机平台进行光谱信息获取,与地面平台相比,可以更高效、全面地获取较大区域的植株冠层光谱遥感信息,还可减少采样分析中的采样代

表性限制;而与卫星平台相比,近地光谱遥感信息获取具有时间灵活、作业成本更低,且获取的遥感影像分辨率更高等优点,容易获得基于单株尺度的精确遥感信息,从而提高预测的精度和时效性。本实验所使用的多光谱相机,能获取11个针对目标因子最有效波段下的光谱信息,相比于目前常用的具有几百个波段的光谱相机,在保留大部分有效光谱信息情况下,可大幅度减少冗余信息和数据处理工作量。因此,该低空遥感系统在病虫害监测、作物估产和农业生产的区域灾害评估等方面将具有更好的实用性和广阔的应用前景。但由于农业低空遥感技术是一个复杂的系统工程,且在我国仍处于起步阶段,在针对不同目标性状的特征波长配置、光谱信息获取、信息分析和信息应用等方面尚存在诸多需要改进的地方,有关无人机的机身稳定性、续航能力和相机分辨率的提高,遥感影像的几何校正和大气校正等也还需要开展系统深入的研究。

相比在实验室条件下进行的柑橘单叶尺度光谱营养诊断研究结果(李金梦等2014;易时来等,2010;田喜等2014),本实验所建模型对柑橘植株冠层氮素和光合色素的预测精度略低,这可能系室

外环境条件(光照、温湿度等)多变对光谱信息采集的干扰所致,另外,冠层叶片表面沉积物(尘埃、苔藓等)也会对其光谱反射率产生影响。本实验利用植株冠层的光谱反射率来估测植株的营养状况,冠层空隙和冠层叶片间光照条件的差异也会对预测效果产生不利影响(冠层空隙和阴影会减小整个冠层光谱反射率)。如何减弱这些不利因素的影响,有效提高近地遥感精度,仍需进一步研究。

另外,一次采集的光谱信息中包含着目标植物丰富的信息,如果能将这些信息进行更加充分有效的挖掘利用,例如通过光谱信息进行更多的营养要素诊断、各种地物或植物的自动识别分类、植株冠层结构特性分析、叶面积指数监测、产量和品质估测等,将会大幅度提高近地遥感的产业服务功能,降低相对成本,促进近地遥感技术在果树产业中的发展和应用。

参考文献(References)

- Chen L, Wu T, Zhang S L, Yao G F, Tao S T, Jian B, Miao Y C and Cao H L. 2010. Effects of nitrogen fertilizer on fruit quality and leaf physiological metabolism of Hosui pear. *Journal of Fruit Science*, 27(6): 871–876 (陈磊, 伍涛, 张绍铃, 姚改芳, 陶书田, 贾兵, 苗永春, 曹慧莲. 2010. 丰水梨不同施氮量对果实品质形成及叶片生理特性的影响. *果树学报*, 27(6): 871–876) [DOI: 10.13925/j.cnki.gsx.2010.06.023]
- Chai Z P, Wang X M, Sheng J D, Li P, Liu M and Meng Y B. 2013. Prediction of the total nitrogen content in leaves of Kuerle fragrant pear by spectral analysis. *Journal of Fruit Science*, 30(3): 421–426 (柴仲平, 王雪梅, 盛建东, 李萍, 刘茂, 孟亚宾. 2013. 基于光谱分析的库尔勒香梨叶片全氮含量估测研究. *果树学报*, 30(3): 421–426) [DOI: 10.13925/j.cnki.gsx.2013.03.017].
- Feng F. 2007. Modern Near Infrared Spectroscopy Technology and Its Applications. *Life Science Instruments*, 5(10): 9–13 (冯放. 2007. 现代近红外光谱分析技术及其应用. *生命科学仪器*, 5(10): 9–13)
- Fan X L, Huang C L, Juhani U, and Danny D. 2004. N, P, K Nutrition Dynamics of Litchi During the Annual Growth Cycle. *Journal of Fruit Science*, 21(6): 548–551 (樊小林, 黄彩龙. 2004. 荔枝年生长周期内 N, P, K 营养动态规律与施肥管理体系. *果树学报*, 21(6): 548–551)
- Fang X Y, Zhu X C, Wang L and Zhao G Z. 2013. Hyperspectral Monitoring of the Canopy Chlorophyll Content at Apple Tree Prosperous Fruit Stage. *Scientia Agricultura Sinica*, 46(16): 3504–3513 (房贤一, 朱西存, 王凌, 赵庚星. 2013. 基于高光谱的苹果盛果期冠层叶绿素含量监测研究. *中国农业科学*, 46(16): 3504–3513) [DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2013.16.022]
- Gao R Q, Fan S F. 2002. Principles and applications of modern near infrared spectroscopic techniques. *Analytical Instruments*, (3): 9–12 (高荣强, 范世福. 2002. 现代近红外光谱分析技术的原理及应用. *分析仪器*, (3): 9–12)
- Knipling E B. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 1970, 1: 155–159. [DOI: 10.1016/S0034-4257(70)80021-9]
- Li R H, Guo P G, Michael B, Stefania G, Salvatore C. 2006. Evaluation of chlorophyll content and fluorescence parameters as indicators of drought tolerance in barley. *Agricultural Sciences in China*, 5(10): 751–757
- Li W Q, Zhang M and Shu H R. 2002. The physiological effects of nitrogen on fruit trees. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science)*. 33(1): 96–100 (李文庆, 张明, 束怀瑞. 2002. 氮素在果树上的生理作用. *山东农业大学学报: 自然科学版*, 33(1): 96–100)
- Li M J, Ye X J, Wang Q N, Zhang C and He Y. 2014. Development of Prediction Models for Determining N Content in Citrus Leaves Based on Hyperspectral Imaging Technology. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 34(1): 212–216 (李金梦, 叶旭君, 王巧男, 张初, 何勇. 2014. 高光谱成像技术的柑橘植株叶片含氮量预测模型. *光谱学与光谱分析*, 34(1): 212–216) [DOI: 3964/j.issn.1000-0593(2014)01-0212-05]
- Li B, Liu R Y, Liu S H, Liu Q, Liu F and Zhou G Q. 2012. Monitoring vegetation coverage variation of winter wheat by low-altitude UAV remote sensing system. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 28(13): 160–165 (李冰, 刘镭源, 刘素红, 刘强, 刘峰, 周公器. 2012. 基于低空无人机遥感的冬小麦覆盖度变化监测. *农业工程学报*, 28(13): 160–165) [DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.13.026]
- Li X, Lee W S, Li M, Ehsani R, Mishra A R, Yang C, Mangan R L. 2012. Spectral difference analysis and airborne imaging classification for citrus greening infected trees. *Computers and Electronics in Agriculture*, 83: 32–46 [DOI: 10.1016/j.compag.2012.01.010]
- Pan B, Zhao G X, Zhu X C, Liu H T, Liang S and Tian D D. 2013. Estimation of Chlorophyll Content in Apple Tree Canopy Based on Hyperspectral Parameters. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 33(8): 2203–2206 (潘蓓, 赵庚星, 朱西存, 刘海腾, 梁爽, 田大德. 2013. 利用高光谱植被指数估测苹果树冠层叶绿素含量. *光谱学与光谱分析*, 33(8): 2203–2206) [DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2013)08-2203-04]
- Peng Y K, Huang H, Wang W, Wu J H and Yang X. 2011. Rapid detection of chlorophyll content in corn leaves by using least squares-support vector machines and hyperspectral images. *Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition*, 32(2): 125–128 (彭彦昆, 黄慧, 王伟, 吴建虎, 王秀. 2011. 基于 LS-SVM 和高光谱技术的玉米叶片叶绿素含量检测. *江苏大学学报: 自然科学版*, 32(2): 125–128) [DOI: 10.3969/j.issn.1671-7775.2011.02.001]
- Sun M, Lu D G and Liu W S. 2009. Advances in research on photosynthesis of apricot. *Journal of Fruit Science*, (6): 878–885 (孙猛,

- 吕德国, 刘威生. 2009. 杏属植物光合作用研究进展. 果树学报, (6): 878 - 885 [DOI: 10.13925/j.cnki.gsx.2009.06.028]
- Stoeva N, Berova M, Zlatev Z. 2003. Effect of arsenic on some physiological indices in maize (*Zea mays* L.). Journal Environmental Protection and Ecology, (4): 796 - 801
- Tian X, He S L, Lu Q, Yi S L, Xie R J, Zheng Y Q, Liao Q H and Deng L. 2014. Determination of Photosynthetic Pigments in Citrus Leaves Based on Hyperspectral Images Datas. Spectroscopy and Spectral Analysis, 34(9): 2506 - 2512 (田喜, 何绍兰, 吕强, 易时来, 谢让金, 郑永强, 廖秋红, 邓烈. 2014. 高光谱图像信息的柑橘叶片光合色素含量分析技术研究. 光谱学与光谱分析, 34(9): 2506 - 2512 [DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2014)09-2506-07]
- Tian Z K, Fu Y Y, Liu S H and Liu F. 2013. Rapid crops classification based on UAV low-altitude remote sensing. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 29(7): 109 - 116 (田振坤, 傅莺莺, 刘素红, 刘峰. 2013. 基于无人机低空遥感的农作物快速分类方法. 农业工程学报, 29(7): 109 - 116 [DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.07.014]
- Wang X K. 2006. Plant physiological and biochemical principles and techniques (2nd Edition), Beijing: Higher Education Press: 202 - 206 (王学奎. 2006. 植物生理生化实验原理和技术(第2版), 北京: 高等教育出版社: 202 - 206)
- Wang F H, Zhu H L and Ge Z Y. 2011. Progress of Near-infrared Spectral Data Modeling Method. Agricultural Engineering, 1(1): 56 - 61 (王凤花, 朱海龙, 戈振扬. 2011. 近红外光谱数据建模方法的研究进展. 农业工程, 1(1): 56 - 61)
- Wang Q, Tian X M. 2012. Soft Sensing Based on Improved GA-SSVM. Transactions of Beijing Institute of Technology, 32(10): 1031 - 1035 (王强, 田学民. 2012. 基于改进的 GA-SSVM 的软测量建模方法. 北京理工大学学报, 32(10): 1031 - 1035 [DOI: 10.15918/j.tbti1001-0645.2012.10.010]
- Yao Y J, Qin Q M, Zhang Z L and Li B S. Research progress of hyper-spectral technology applied in agricultural remote sensing. Transactions of the CSAE, 24(7): 301 - 306 (姚云军, 秦其明, 张自力, 李百寿. 2008. 高光谱技术在农业遥感中的应用研究进展. 农业工程学报, 24(7): 301 - 306)
- Yi S L, Deng L, He S L, Zheng Y Q and Zang X. 2010. Research on nitrogen content of leaf of Jincheng orange cultivar using visible near infrared spectroscopy model. Journal of Fruit Science, 27(1): 13 - 17 (易时来, 邓烈, 何绍兰, 郑永强, 张璇. 2010. 锦橙叶片氮含量可见近红外光谱模型研究. 果树学报, 27(1): 13 - 17 [DOI: 10.13925/j.cnki.gsx.2010.01.007]
- Ye X J, Kenshi Sakaiz and He Y. 2010. Development of Citrus Yield Prediction Model Based on Airborne Hyperspectral Imaging. Spectroscopy and Spectral Analysis, 30(5): 1295 - 1300 (叶旭君, Kenshi Sakai, 何勇. 2010. 基于机载高光谱成像的柑橘产量预测模型研究. 光谱学与光谱分析, 30(5): 1295 - 1300 [DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2010)05-1295-06]
- Zhang D Q, Tang Z L, Yang Y, Li S and Hu C G. 2012. Model for Citrus Leaves Chlorophyll Content Based on Spectral Signature. Journal of Afro-Environment Science, 31(10): 1891 - 1896. (张冬强, 唐子立, 杨勇, 李硕, 胡春根. 2012. 用于监测柑橘叶片冻害的叶绿素含量光谱反射模型研究. 农业环境科学学报, 31(10): 1891 - 1896)
- Zhang Y, Zheng L H, Li M Z, Deng X L, Wang S C, Zhang F and Yi R H. 2013. Construction of apple tree leaves nutrients prediction model based on spectral analysis. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 29(8): 171 - 178 (张瑶, 郑立华, 李民赞, 邓小蕾, 王诗丛, 张锋, 冀荣华. 2013. 基于光谱特征分析的苹果树叶片营养素预测模型构建. 农业工程学报, 29(8): 171 - 178 [DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.08.020]
- Zhao S J, Shi G A, Dong X C. 2002. Plant physiology test technical guidance. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press: 34 - 36 (赵世杰, 史国安, 董新纯. 2002. 植物生理学试验技术指导. 北京: 中国农业科技出版社: 34 - 36)

Estimation of nitrogen and pigments content in citrus canopy by low-altitude remote sensing

LIU Xuefeng¹, LYU Qiang¹, HE Shaolan¹, YI Shilai¹, XIE Rangjin¹,
ZHENG Yongqiang¹, HU Deyu³, WANG Zhitao¹, DENG Lie^{1,2}

1. Citrus Research Institute, Southwest University-Chinese Academy of Agricultural Sciences, Chongqing 400712, China;

2. Southwest Fruit Experiment Station, Chinese Ministry of Agriculture, Chongqing 400712, China;

3. College of Horticulture and Landscape, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: Remote measurement and diagnosis of the plants nutritional status is an important means for efficient easily and simple management system, and high-yield and high quality cultivation. So far, there is not yet much research on the nutrition diagnostic of fruit trees through low-altitude remote sensing data. We carried out the following experiments in order to provide a theoretical basis and technical support for the research and development of nutritional diagnosis technology of fruit trees based on low-altitude remote sensing data. In this work, the multi-spectral image information of 'Hamlin' orange plant canopies were obtained by a multi-spectral camera array mounted on the eight rotor Unmanned Aerial Vehicle (UAV) at an altitude of 100 m above the canopy

at 11:00—13:00 on a sunny day in spring. Then, the multi-spectral images were pre-processed by PixelWrench 2 of tetracam, average spectral reflectance of the whole canopy were individually extracted based on ENVI 4.7. Twenty leaves from the mature spring shoots were collected from around crown of every tree. Total nitrogen, chlorophyll a, chlorophyll b and carotenoids contents of each plant were measured in the laboratory. The characteristic wavelengths were extracted by means of the correlation analysis of the average spectra of the plants with the nutrition content. A total amount of 88 citrus trees were collected and randomly grouped into two sets of samples: 66 plants for the calibration set and 22 plants for the prediction set. The two kinds of spectral pre-processing methods (Multiplicative Scatter Correction (MSC) and Standard Normal Variable (SNV)) were adopted and four kinds of modeling methods (Partial Least Squares (PLS) , Multiple Linear Regression (MLR) , Principal Component Regression (PCR) and Least Squares Support Vector Machine (LS-SVM)) were employed to estimate total nitrogen, chlorophyll a, chlorophyll b, and carotenoids content in canopy leaves. The results showed that the prediction accuracy of the MLR model based on SNV spectral pre-processing methods was the best for the prediction of total nitrogen, chlorophyll a and chlorophyll b content, correlation coefficients of prediction (R_p) were 0.8036, 0.8065, 0.8107, and Root Mean Square Error of Prediction (RMSEP) were 0.1363, 0.0427 and 0.0243, respectively. The LS-SVM model based on SNV spectral pre-processing methods for the carotenoids content of crown was the best, which is with $R_p = 0.8535$, $RMSEP = 0.0117$. The results demonstrated that the airborne multi-spectral image information of citrus plants canopy could be used to estimate total nitrogen, chlorophyll a, chlorophyll b and carotenoids content in canopy leaves. This research results would provide a new way for accurate, efficient prediction of plants nutrition status of large-scale citrus orchards.

Key words: sweet orange, canopy, photosynthetic pigments, nitrogen, low-altitude remote sensing

Supported by International Science and Technology Cooperation Program of China (No.2013DFA11470)