

水分胁迫条件下柑桔叶片特征光谱响应研究*

张璇^{1,2} 卢志红^{2,3} 何绍兰^{2,3} 易时来^{2,3} 郑永强^{2,3}

王亮¹ 赵旭阳¹ 牛廷香¹ 邓烈^{1,2,3*}

(1 西南大学园艺园林学院 重庆 400715; 2 中国农业科学院柑桔研究所; 3 国家柑桔工程技术研究中心)

摘要:在模拟干旱胁迫环境下分析了福本脐橙 *Citrus sinensis* Osbeck cv. Fukumoto navel orange 叶片失水动态及其光谱反射率变化,筛选出柑桔叶片水分胁迫特征光谱。用归一化技术对柑桔叶片特征光谱吸收峰的深度和面积进行定量描述和计算,采用 SPSS 统计软件线性回归分析方法建立了柑桔叶片相对含水量与 1 400 nm 特征反射光谱吸收峰深度和面积间的线性回归关系。结果表明,波长 1 400 nm 附近的光谱反射率可较好地反映柑桔叶片相对含水量,利用该特征反射光谱吸收峰深度和面积可以更好地检测柑桔叶片相对含水量。

关键词:柑桔叶片; 相对含水量; 反射光谱; 一阶导数; 特征吸收峰

中图分类号:S 666 **文献标志码:**A **文章编号:**1007-1431(2009)03-0001-06

Study on Diagnostic Reflectance Spectrum Response of the Citrus Leaves to Water Stress

ZHANG Xuan^{1,2}, LU Zhì hong^{2,3}, HE Shao-lan^{2,3}, YI Shi-lai^{2,3}, ZHENG Yong-qiang^{2,3}, Wang Li-ang¹, Zhao Xu-yang¹, Niu Ting-xiang¹, Deng Lie^{2,3}

(1 College of Horticulture And Landscape Architecture, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2 Citrus Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences; 3 National Engineering Research Center for Citrus Technology, Chongqing, China)

Abstract: In this study, the dynamic changes in relative water content (RWC) and the reflectance spectrum of Fukumoto navel orange (*Citrus sinensis* (L) cv. Fukumoto navel orange) leaves were analyzed in a simulated drought stress environment to obtain the diagnostic reflectance spectrum. Linear regression model between leaves RWC and the depth and area of the reflectance spectrum absorption peak at 1 400 nm was established through quantitative calculation of the depth and area of the characteristic reflectance spectrum absorption peaks using normalization technique. The results showed that the reflectance spectrum around 1 400 nm was a good indicator of citrus leaves RWC and could be used to assess RWC of citrus leaves.

Keywords: Citrus leaf; Relative water content; Reflectance spectrum; 1st derivative; Diagnostic reflectance spectrum absorption peak

水是植物生命活动中最重要的因素之一。水分亏缺对柑桔产量和品质造成的损失及影响在所有非生物胁迫中占有极重要地位^[1]。大多柑桔产区虽然年降雨量基本能满足柑桔生长发育之需,但降雨时空分布不均,一年四季均有可能出现干旱,尤以 4—5 月和 7—8 月的干旱为重,常导致落果、裂果、日灼和果实偏小等问题^[2-5],给生产带来很大的损失。因此,在柑桔树受到干旱胁迫以前,如何实时、无损地对柑桔植株水分状况和干旱逆境做出判断,从而及时采取相应措施,对防旱减灾既有重要的理论价值,又具有生产指导意义。

衡量植物水分状况的可靠指标只能从作物本身的测定中得到^[6]。关于植物水分诊断的方法有多种^[7],目前常用的诊断指标包括气孔导度^[8]、叶水势^[9]、冠层温度^[10]和蒸腾速率等。但近年来,许多研究者又相继提出了冠层温度变异法^[11]、参考温度法^[12]、冠层气温差

* 科技部支撑计划项目(2007BAD47B04 1); 农业部公益性行业(农业)科研专项(nyhygzx07-23); 重庆市北碚区科委科技攻关项目(2008-17)资助。

** 通信作者。电话:(023) 68349706, E-mail: liedeng@163.com

(SDD)^[13] 和作物缺水指标法(CWSI)^[14] 等。但这些诊断方法都受到环境状况的强烈影响,时效性不强,测定和分析过程复杂。随着光谱技术的发展,有研究提出植物在波长 1 400 nm 附近的光谱反射率反映着植物的水分状况^[15-17],但基于光谱技术的柑桔叶片水分含量探测,进而诊断柑桔树水分亏缺状况的方法鲜见报道。光谱技术以其简便、实时、精准和无损等特点,成为获取农田生物信息和环境信息的重要手段,在精准农业发展中发挥着重要作用^[18-20]。本试验重点对失水逆境下柑桔叶片水分含量变化及其光谱响应特征进行研究,以期为基于光谱技术的柑桔树水分亏缺的无损实时检测奠定基础。

1 材料与方法

1.1 试材

在重庆北碚中国农业科学院柑桔研究所盆栽场,选取 8 年生露地栽培的枳橙 Carrizo citrange hybrid 砧福本脐橙 *Citrus sinensis* Osbeck cv. Fukumoto navel orange 健康植株 6 株,实施常规肥水管理。10 月下旬在供试植株树冠外围中上部随机采集生长发育正常、粗度和长度基本一致以及具有 8~10 片叶的春梢营养枝共 100 枝,枝条取下后立即对叶片表面进行清洗、擦干。将枝条随机分成 2 组,其中 1 组用于失水处理,另一组为对照(CK)。

1.2 试验方法

1.2.1 叶片失水处理 在模拟干旱胁迫处理前,从处理组和对照组随机剪取叶片 20 片,分别测定叶片相对含水量和叶片反射光谱,作为叶片含水量和光谱反射率初始值。随后将失水处理组枝条置于带鼓风的 34 °C 恒温光照培养箱中,进行不同时间的失水处理。将对照组的枝条插入放置在阴凉处的水杯中,以防止和减少枝叶的水分散失。

1.2.2 叶片各项指标的测定 在对处理组枝条进行失水处理后的第 30、70、110、160、200、240 分钟,随机取处理组和对照组枝条叶片各 20 片,分别测定每叶的反射光谱后,立即进行相对含水量的测定。

叶片光谱反射率测定:在暗室内用 3 000 W 钨卤灯作光源,用美国 ASD 公司生产 Field Space Pro FR 地物光谱辐射仪(350~2 500 nm)测叶片正、反两面的反射光谱值,测定时使光纤探头与叶片垂直,测定视场均全部落在叶片上。光谱采样间隔为 1 nm。每片叶测 4 个点后取平均值。

叶片相对含水量测定:完成光谱测定以后,立即将叶片放入密封塑料袋密封,并立即精确称取叶片鲜重(FW),然后用烘箱 105 °C 杀青 30 分钟,80 °C 下烘至恒重后,精确测定叶片干重(DW)。叶片相对水分含量(RWC)计算公式为 $RWC(\%) = (FW - DW) \times 100 / FW$ 。

1.3 数据整理分析

对测得的光谱反射率进行平均、噪声去除等预处理,获得各处理叶片的 350~2 500 nm 可见-近红外波段反射光谱谱图。采用偏最小二乘法、交互验证法和归一化技术等进行数据处理,比对不同处理叶片的光谱反射率变化,筛选对水分变化敏感的波段,采用 SPSS 统计软件线性回归分析方法建立叶片相对水分含量与光谱反射率以及叶片相对含水量与 1 400 nm 光谱吸收峰深度和面积的回归模型。

2 结果与分析

2.1 水分逆境处理过程中叶片水分散失动态

进行处理前,对失水处理组与对照组叶片进行的相对含水量(RWC)分析,结果显示,失

水处理组与对照组叶片初始 RWC 值分别为 68.610% 和 68.702%。经检验, 处理组和对照组叶片含水量之间差异不显著。叶片在水分胁迫处理 4 小时以后, 形态特征上表现出较为明显的卷曲症状, 而测得处理组叶片的 RWC 已下降到 57.766%, 较试验开始时的叶片含水量下降了 15.805%, 较对照组叶片含水量下降了 13.224% (见表 1), 表明水分胁迫使柑桔叶片含水量大幅度降低。按 Hsiao 提出的作物干旱评价标准^[21], 此时处理组叶片的干旱状况已达到中度缺水的量值指标。

表 1 水分逆境过程中 8 年生枳橙砧福本脐橙叶片相对含水量(RWC)的变化

Table 1 The changes of the leaves relative water content(RWC) of 8-year old Fukumoto navel orange on Carrizo citrange in simulated drought stress environment

水分胁迫时间 Time of drought stress/ min	叶片相对含水量(RWC)/%		水分散失率 Rate of water loss/ %
	失水处理 Water loss treatment	对照 CK	
0	68.610	68.702	0.134
30	67.356	67.552	0.290
70	66.930	67.538	0.900
110	65.711	66.716	1.506
160	63.238	66.441	4.821
200	61.046	67.645	9.755
240	57.766	66.569	13.224
降低 Reduce/ %	15.805	2.261	

由表 1 可看出, 在试验过程中, 处理组和对照组叶片相对含水量均呈下降趋势, 但经水分逆境处理的枝条, 叶片 RWC 的下降速率和下降幅度均远远大于对照。在枝条进行失水处理后的 30 分钟内, 处理组和对照组叶片含水量下降缓慢且基本同步, 在试验进行的 70 分钟内, 两组叶片含水量下降仍较慢, 无明显差异。而在 110 分钟后, 处理组叶片 RWC 下降明显加速, 对照组叶片 RWC 基本保持稳定。从干旱逆境对叶片失水率的角度分析, 在水分逆境处理进行的 110 分钟内, 叶片水分损失率较低, 在 2% 以下; 而在处理超过 110 分钟以后, 叶片水分损失率大幅增加; 到 240 分钟时, 叶片水分损失率已达 13.224%。

2.2 叶片水分逆境特征光谱筛选

对测得的 350~2500 nm 波长范围的光谱反射率与叶片相对水分含量进行相关性分析后可看出, 在此波段范围的光谱反射率与叶片含水量的决定系数为 0.384853, 未达显著水平。但就一些特征光谱区段而言, 反射光谱与叶片含水量的相关性达到了较高水平; 通过交互验证获得相关性最好的光谱波段为 1195~1442 nm, 以此波段建立预测模型的决定系数 R^2 为 0.999994 (见表 2)。

表 2 8 年生枳橙砧福本脐橙叶片含水量与光谱反射率的相关性

Table 2 Relationship between the leaves RWC and reflectance spectra (350-2500 nm) of 8-year old Fukumoto navel orange on Carrizo citrange

光谱 Spectra	波长 Wavelength/ nm	决定系数 R^2	预测均方根误 RMSEP	预测标准误 SEP
原始光谱 Raw Reflectance Spectra	350~2500	0.384853	3.043455	3.187028
	373~395	0.998171	1.638595	1.716630
	504~523	0.973911	1.942869	1.891443
	1195~1442	0.999994	0.109342	0.109421
	1573~1729	0.998968	0.338305	0.354814
	1862~2297	0.999172	0.271506	0.284173
	2312~2320	0.895265	2.549643	2.643703

续表 2 Continue table 2

光谱 Spectra	波长 Wavelength/ nm	决定系数 R ²	预测均方根误 RMSEP	预测标准误 SEP
一阶导数	350~ 2 500	0.660822	3.012456	3.155293
1 st derivative spectra	1 176~ 1 198	0.295905	2.907862	3.049693
	1 411~ 1 510	0.996667	2.736730	2.872661
	1 540~ 1 561	0.381014	2.873673	3.013719
	1 567~ 1 589	0.999896	2.779037	2.903125
	1 705~ 1 739	0.999963	2.945274	3.088692
	1 779~ 1 802	0.207281	3.033209	3.180239

对叶片光谱反射率进行一阶导数分析,通过交互验证筛选出的最大相关波段为 1 411~1 510 nm、1 567~ 1 589 nm 和 1 705~ 1 739 nm。进一步对光谱反射率进行二阶导数分析,无法筛选出相关性较大的波段,难以用于预测模型的建立。

选择 1 400 nm 反射光谱吸收峰,对光谱反射率与叶片 RWC 的相关性进行拟合,结果为叶片 RWC 与 1 400 nm 光谱反射率呈极显著负相关(图 1),这一结果与 Curran^[22] 研究结果十分吻合。叶片相对含水量(Y)与 1 400 nm 光谱反射率(X)的回归模型为: $y = -0.5965x + 82.3833$ ($R^2 = 0.842^{**}$)。

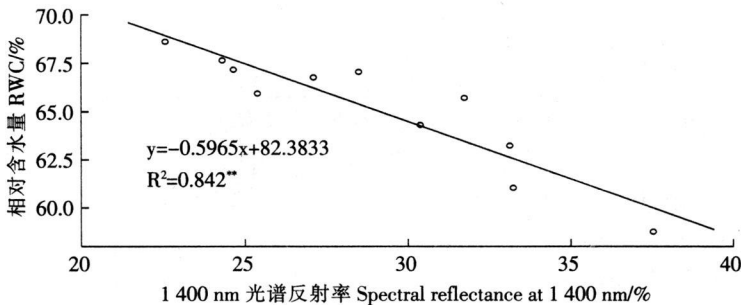


图 1 8 年生枳橙砧福本脐橙叶片含水量与 1 400nm 光谱反射率的关系

Fig. 1 Relationship between the leaves spectral reflectance at 1 400 nm and the RWC of 8-year old Fukumoto navel orange on Carrizo citrange

2.3 叶片水分逆境特征光谱的归一化分析

在试验起始时、水分胁迫处理进行 160 分钟时和 240 分钟时等 3 个时段,波长 350~2 500 nm 可见-近红外波段反射光谱图表征十分相似,均出现 4 个反射峰和 3 个吸收峰(见图 2);呈现出光谱反射率随水分胁迫处理时间的延长和叶片含水量的降低而增强的趋势,在波长 1 400 nm 和 1 700 nm 附近,光谱反射率和叶片含水量密切相关。

对光谱反射率进行平均和噪声去除等预处理后,对 2.2 中筛选的特征光谱,即波长 1 400 nm 附近的光谱特征吸收峰,用归一化技术进行计算并定量表达其吸收峰深度和面积等光谱特征参量。采用 SPSS 统计软件线性回归分析方法,将叶片 RWC 与相应的 1 400 nm 特征光谱吸收峰深度和面积建立线性回归模型,发现叶片 RWC 与 1 400 nm 反射光谱吸收峰深度(见图 3A)和面积(见图 3B)均呈极显著线性相关,与深度的决定系数为 0.894^{**} ,回归模型为 $RWC = 0.3879x - 53.2324$,其中 x 表示 1 400 nm 吸收峰深度;与面积的决定系数达 0.902^{**} , $RWC = 0.0026x + 54.2000$,其中 x 表示 1 400 nm 吸收峰面积。

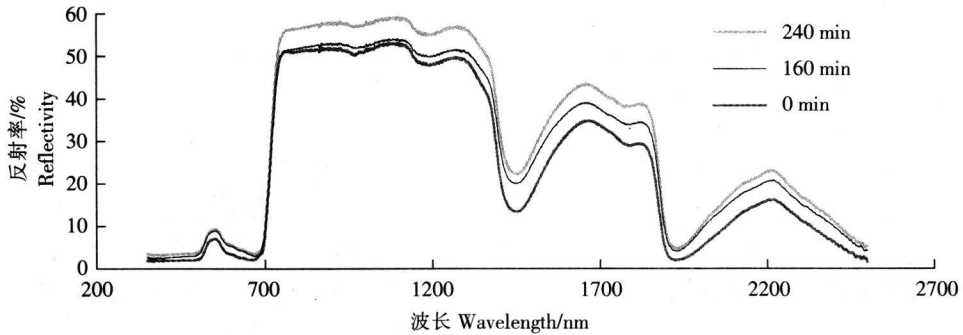


图2 水分胁迫处理过程中8年生枳橙砧福本脐橙叶片反射光谱表征的变化

Fig. 2 Typical leaves reflectance spectra (350-2500 nm) of 8-year old Fukumoto navel orange on Carrizo citrange in simulated drought stress environment

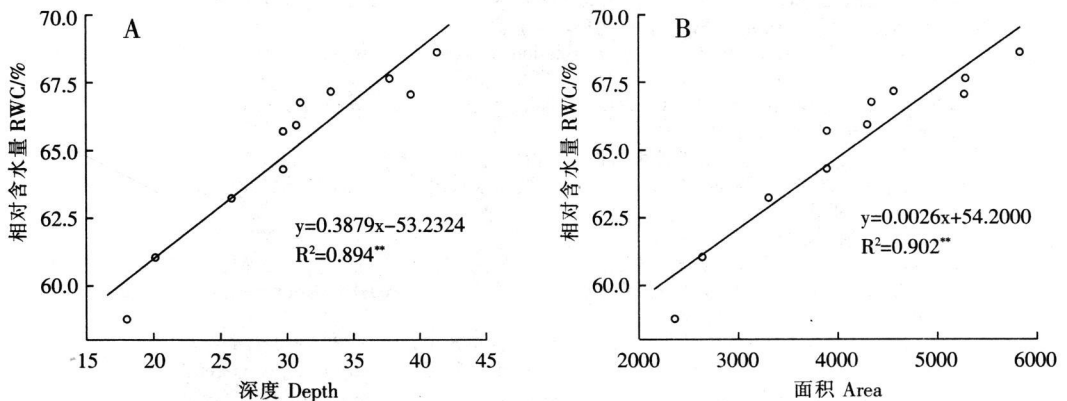


图3 8年生枳橙砧福本脐橙叶片与1400 nm光谱吸收峰深度(A)和面积(B)的关系

Fig. 3 Relationship between the leaves RWC and spectral absorption peak depth (A) and area (B) at 1400 nm of 8-years old Fukumoto navel orange on Carrizo citrange

3 结果与讨论

本试验中,对照组枝条叶片相对含水量相对稳定,表明该组样品可代表未受缺水逆境胁迫的状态。处理组枝条随着失水时间(240分钟)的延长,叶片含水量下降。与试验起始时相比较,试验结束时叶片相对含水量大幅度下降(15.805%),且叶片已出现萎蔫卷曲现象。而按 Hsiao^[21]提出的标准(叶片相对含水量减少10%~20%为中度缺水,减少20%以上为重度缺水),此时叶片已处于中度干旱胁迫状态,其生理活动可能已受到明显影响。因此,本试验所获得的干旱胁迫光谱参数具有代表性,可以代表柑桔叶片在受到干旱胁迫以后的光谱特征反应。

在水分胁迫条件下,叶片的生理响应主要是更有利于其保水和提高水分利用率^[23-24]。本试验结果显示,在处于水分胁迫的短时间里,叶片失水率较低;而随着失水处理时间的延长,叶片失水率显著提高,推测叶片组织对刚出现的干旱逆境胁迫具有一定的抵御或适应能力;但随着逆境胁迫时间的延长,其抗逆能力可能逐渐下降,导致叶片水分散失速度大大加快,并对生长发育产生不可逆损伤。

植物叶片的各种色素、细胞结构及含水量决定了其电磁波特征,并显著影响着叶片反射

光谱特征。试验结果显示,柑桔叶片相对含水量的下降会导致叶片光谱反射率升高,在1 411~1 510 nm、1 567~1 589 nm和1 705~1 739 nm波段,反射光谱一阶导数与叶片相对含水量显著相关,特别是在1 400 nm波段处的光谱反射率与叶片含水量呈极显著负相关关系。对1 400nm反射光谱进行一阶导数拟合,以及对光谱吸收峰进行归一化定量表达,可建立与叶片相对含水量极显著的线性回归关系。表明通过光谱探测可进行柑桔树水分状况的实时监测,并为进一步研究基于光谱技术的柑桔园土壤水分亏缺实时检测技术奠定基础。

尚需进一步研究导致柑桔叶片重度失水的干旱逆境条件,以获取更多关于水分逆境下柑桔叶片相对含水量与光谱响应的有效信息,更全面认识干旱逆境下柑桔的生理响应规律。

参 考 文 献

- [1] 陈学森. 抗逆育种. 胡延吉等编著. 植物育种学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 228-25
- [2] 金志凤, 陈先清, 张昌记. 夏季高温干旱对温州蜜柑果实生长的影响[J]. 中国农业气象, 2005, 26(3): 184-186
- [3] 刘慧敏, 周政华, 李增援, 等. 夏秋特大干旱对温州蜜柑产量及品质的影响[J]. 中国南方果树, 2002, 31(3): 12-13
- [4] 李金强. 环境条件对脐橙产量品质的影响[J]. 浙江柑桔, 1999, 16(3): 1-15
- [5] 邓伯勋, 王士才. 提高脐橙产量和品质的研究[J]. 浙江柑橘, 2000, 17(2): 2-4
- [6] Kramer P J. Water relations of plants [M]. Academic Press. New York: New York Press, 1983
- [7] 王 宏. 作物水分亏缺诊断研究综述. 农业作物环境实验研究[M]. 北京: 气象出版社, 1990
- [8] Margan J A, Willis W Q. Gas exchange of water relations of 'Olaf' spring wheat [J]. Crop Sci, 1983, 23(4): 541-546
- [9] Grimes D W, Yamada H, Hughe S W. Climate normalized cotton leaf water potentials for irrigation scheduling [J]. Agric. Water Manage, 1987, 12: 293-304
- [10] 蔡焕杰, 康绍忠, 熊运章. 用冠层温度计算作物缺水指标的一种简化模式[J]. 水利学报, 1996(6): 44-48
- [11] 张仁华. 利用作物冠层表面温度的空间变率推算作物的供水状况 [M]. 中国科学院禹城综合试验站年报(1988-1990). 北京: 气象出版社, 1991
- [12] 张仁华. 以红外辐射为基础的估算作物缺水状况的新模式 [J]. 中国科学(B) 辑, 1987(7): 776-784
- [13] 蔡焕杰, 熊运章, 刘海军. 用冠层温度-气温差方法诊断作物水分状况[J]. 干旱地区农业研究, 1993(3): 49-54
- [14] Idso S B, Jackson R D, Pinter P J, *et al.* Normalizing the stress-degree day parameter for environmental variability [J]. Agric Meteorol, 1981, 24: 45-55
- [15] Curran P J. Remote Sensing of foliar chemistry [J]. Remote Sens, 1989, 30: 271-278
- [16] Raymond F K, Roger N C. Spectroscopic determination of leaf Biochemistry using band-depth analysis of absorption features and stepwise multiple linear regression [J]. Remote Sens, 1999, 67: 267-287
- [17] Bei-Cai G, Goetz A F H. Extractions FO dry leaf spectral features from reflectance spectra of green vegetation [J]. Remote Sens, 1994, 47: 369-374
- [18] 彭玉魁, 李菊英, 祁振英. 近红外光谱分析技术在小麦营养成分鉴定上的应用[J]. 麦类作物, 1997, 17(2): 33-35
- [19] 万 钧. 近红外品质分析技术在油脂工业中的应用[J]. 四川粮油科技, 2000, (3): 13-16
- [20] 何东健, 杨 青, 薛少平, 等. 农产品分光反射特性及近红外图像处理在农业中的应用 [J]. 农业工程学报, 1996, 12(4): 80-84
- [21] Hsiao T C. Plant responses to water stress [J]. Ann Rev Plant Physiol, 1973, 24: 519-670
- [22] Curran P J. Remote sensing of foliar chemistry [J]. Remote Sens, 1989, 30: 271-278
- [23] Almansa M S, Hernandez J A, Jimenez A, *et al.* Effect of salt stress on the superoxide dismutase activity in leaves of citrus limonum in different rootstock scion combinations [J]. Biologia plantarum, 2002, 45(4): 545-5491
- [24] 聂 磊, 刘鸿先, 彭少麟. 水分胁迫对长期 UV-B 辐射下柚树苗生理特性的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2001, 10(3): 19-241

收稿日期: 2009-05-14

作者简介: 张璇(1982), 女, 硕士研究生, 研究方向为柑桔水分生理与信息技术。

(责任编辑: 吴 涛)