

反射光谱技术在监测大豆叶片光化学效率和水分状况中的应用

薛忠财^{1,2,3}, 高辉远¹

(1. 山东农业大学 生命科学院/作物生物学国家重点实验室, 山东 泰安 271000; 2. 山东农业大学 林学院, 山东 泰安 271000; 3. 清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

摘要: 干旱胁迫在我国大豆主产区频繁发生, 对大豆产量造成了严重影响。因此, 为建立有效的旱情监测指标, 采用反射光谱技术监测了野生大豆和栽培大豆离体叶片在失水过程中相对含水量和叶绿素荧光的变化。结果表明: 在失水过程中, 野生大豆和栽培大豆离体叶片的相对含水量(RWC)、水分指数(WI)、光化学反射指数(PRI)、最大光化学效率(F_v/F_m)和实际光化学效率(Φ_{PSII})都随失水时间的增加而降低, 且WI、PRI、 F_v/F_m 和 Φ_{PSII} 均与RWC呈显著相关, PRI可以很好地反映 F_v/F_m 和 Φ_{PSII} 的变化。同时野生大豆和栽培大豆离体叶片在可见光波段(500~750 nm)的反射率随着失水时间的增加而升高, 在近红外区(750~1 000 nm)的反射率则呈现“升高-降低-升高”的趋势。总之, 利用反射光谱技术可以快速、准确地反映大豆叶片在失水过程中光化学效率和水分状况的变化。

关键词: 大豆; 光化学反射指数; 反射光谱; 水分指数; 失水; 叶绿素荧光

中图分类号: S565.1 文献标识码: A DOI: 10.11861/j.issn.1000-9841.2016.03.0436

Application of Spectral Reflectance Technique on Monitoring the Photochemical Efficiency and Water Condition in Soybean Leaves

XUE Zhong-cai^{1,2,3}, GAO Hui-yuan¹

(1. College of Life Science, Shandong Agricultural University/State Key Laboratory of Crop Biology, Tai'an 271018, China; 2. Forestry School, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China; 3. Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Drought, which occurred frequently in the major soybean producing areas in our country, results in a serious reduction in soybean yield. To establish effectively drought monitoring indicators, we monitored the changes of relative water contents and chlorophyll fluorescence in the detached leaves of wild and cultivated soybean species during dehydration by applying spectral reflectance technique. The results showed that the relative water contents (RWC), the water index (WI), the photochemical reflectance index (PRI), the maximum PSII quantum yield (F_v/F_m) and the actual photochemical efficiency of PSII (Φ_{PSII}) in the detached leaves of both wild and cultivated soybean plants decreased with the increasing of dehydration time. And the RWC was significantly correlated with the WI, PRI, F_v/F_m and Φ_{PSII} . In addition, the PRI was well correlated with F_v/F_m and Φ_{PSII} . The leaf reflectance increased in visual range (500-670 nm) with the increasing of the dehydration time of both wild and cultivated soybean leaves, whereas the changes in near-infrared range (750-1 000 nm) followed an 'increase-decrease-increase' trend. In conclusion, the changes of spectral reflectance were convenient and precise indicator to reflect light use efficiency and water condition in the leaves of soybean during dehydration.

Keywords: Soybean; Photochemical reflectance index; Spectral reflectance; Water index; Dehydration; Chlorophyll fluorescence

干旱作为常见的非生物胁迫之一, 对我国大豆生产造成了严重影响。研究表明, 大豆生长需水较多, 干旱可以导致叶片失水, 引起光合作用的降低, 抑制大豆生长, 降低产量^[1-2]。因此快速、准确地反映干旱胁迫对大豆叶片的伤害, 在预防干旱对大豆生产的影响上具有重要意义。目前, 人们已经建立了一系列干旱指标用来衡量和预测旱情、指导农业生产, 这些指标主要包括气象指标、土壤墒情指标、作物生理生态指标及其它综合监测指标等^[3-4]。然而, 这些指标的获得往往具有实验操作繁琐、耗时、对植物有破坏性或涉及因素多等特点, 致使在实际应用中的便捷性、准确性和实时性上受到了很大的

限制, 因此快速获取准确的干旱指标可为实现长期、大范围的动态干旱监测提供理论和应用基础。

近年来, 随着遥感技术的快速发展, 光谱分析技术在植物生理生态研究中得到广泛的应用。通过对植物叶片水平、冠层水平以及生态系统等多个层面的反射光谱进行分析, 能够实时、快速、无损伤地测定植物各种条件下的水分含量、色素含量、营养状况及植被覆盖度等^[5-6]。很多研究人员已经在干旱的诊断和监测上取得了一定的进展。谷艳芳等^[7]研究了干旱胁迫下冬小麦高光谱特征和生理生态参数的变化, 提出可以用冬小麦高光谱特征及红边参数来判断冬小麦生育后期长势和农田水分

收稿日期: 2015-12-22

基金项目: 国家自然科学基金(31370276)。

第一作者简介: 薛忠财(1985-), 男, 博士, 主要从事环境生态学研究。E-mail: zhongcaix2008@163.com。

通讯作者: 高辉远(1958-), 男, 博士, 教授, 主要从事生理生态学研究。E-mail: gaohy@sdau.edu.cn。

胁迫程度。吉海彦等^[8]在 1 400 ~ 1 800 nm 的光谱范围内建立了冬小麦水分含量与反射光谱的模型,水分的预测值与真实值的相关系数达到 0.999。王纪华等^[9]研究表明,小麦叶片含水量与 1 650 ~ 1 850 nm 处的光谱吸收呈显著负相关。Suplick-Ploense 等^[10]根据草坪草在红光区和近红外区的特征光谱的反射率来监测草坪草的水分状况,用来指导草坪的灌溉和管理。虽然大量研究已经证明反射光谱与植物含水量具有很好的关系^[11],但是关于利用反射光谱分析技术监测和评价失水对大豆叶片光化学效率和叶片水分状况的研究仍鲜有报道,因此本文重点研究两种抗旱性不同的大豆叶片在失水过程中反射光谱和叶绿素荧光的变化,探讨利用反射光谱技术监测干旱对大豆叶片光化学效率和水分状况的可行性,以期应用反射光谱分析技术在农业生产中快速、无损伤、大面积地监测旱情提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验设计

供试材料为生长于东营盐碱地区的东营野生大豆 ZYD 03262 和山东广泛种植的栽培大豆品种山宁 11。种子经过精选后,将野生大豆种子在浓硫酸中浸泡 1 ~ 3 min 破坏种皮,然后将两种大豆种子播种于山东农业大学试验地(自然光强为 0 ~ 1 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,温度 20 ~ 28 $^{\circ}\text{C}$) ,在生长期分别选取长势一致的叶片进行试验处理。

将长势一致的两种大豆叶片取下后,将叶柄浸泡在水中 3 h,使离体叶片的水分含量达到饱和。随后将叶片放在相同条件下(光强为 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,温度为 25 $^{\circ}\text{C}$)进行失水处理,分别在 0, 1, 2, 3 h 进行相关的无损测定,各重复 5 次。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 相对含水量 用称重法测定叶片的相对含水量。分别称取测定前叶片的饱和鲜重、失水某一时刻的叶片鲜重,最后将叶片在 80 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中烘至恒重,测定叶片的干重,计算不同时间叶片的相对含水量。 $\text{RWC}(\%) = [(\text{鲜重} - \text{干重}) / (\text{饱和鲜重} - \text{干重})] \times 100$ 。

1.2.2 叶片反射光谱 使用 Unispec-SC 光谱分析仪(PP Systems,美国)测定叶片的反射光谱。Unispec-SC 光谱分析仪内置一个卤素灯,测定叶片光谱反射时,将一个分支光纤(直径为 2.3 mm)的一端连接到卤素灯的输出端口,另一端连接到检测器的输入端口,光纤的探头端固定在一个标准叶夹中,与叶片呈 60 $^{\circ}$ 角,测定时使用仪器配备的白色标准板进行仪器的校正和参比扫描,校正后测定叶片反

射光谱,每个失水处理重复 5 次,每个叶片重复测定 10 个不同部位,以最终平均值作为该处理的结果。根据反射光谱选择计算了两个广泛应用的植被指数来作为衡量生理变化的指标:(1) 光化学反射指数(photochemical reflectance index, PRI): $\text{PRI} = (R_{531} - R_{570}) / (R_{531} + R_{570})$ ^[12]; (2) 水分指数(water index, WI): $\text{WI} = R_{900} / R_{970}$ ^[13]。

1.2.3 荧光参数 利用 FMS-2 型脉冲调制式荧光仪(Hansatech,英国)测定 F_0 、 F_m 、 F_m' 及 F_s 等荧光参数。测定暗适应下叶片的初始荧光 F_0 和最大荧光 F_m 时,需要把叶片夹入暗适应夹中暗适应 20 min。每次测定 F_s 和 F_m' 时,使用 FMS-2 的作用光源,在 800 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 作用光下,将材料充分进行光化学启动达到稳态,测得稳态荧光 F_s ,然后启动饱和和脉冲光测得 F_m' 。按照如下公式分别计算:(1) PSII 最大光化学效率(the maximum PSII quantum yield, F_v/F_m): $F_v/F_m = (F_m - F_0) / F_m$ ^[14]; (2) PSII 的实际光化学效率(the actual photochemical efficiency of PSII, Φ_{PSII}): $\Phi_{PSII} = (F_m' - F_s) / F_m'$ ^[15]。

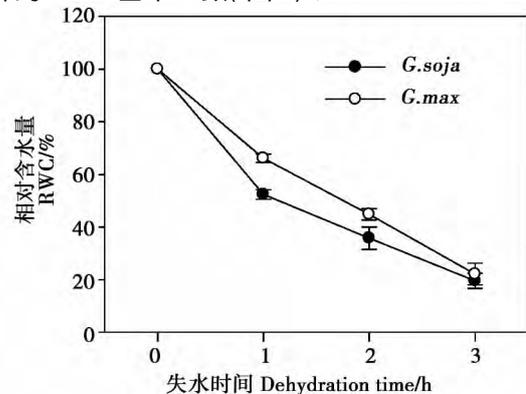
1.3 数据分析

用 Excel 2007 对数据进行统计分析,用 Sigma-plot 12.0 作图。

2 结果与分析

2.1 相对含水量的变化

在失水过程中,野生大豆和栽培大豆离体叶片的相对含水量(RWC)都随处理时间的增加而逐渐降低,在处理 1 和 2 h 后野生大豆 RWC 的下降程度要比栽培大豆严重,但在处理 3 h 后两种大豆离体叶片的 RWC 基本一致(图 1)。



每个数据为 5 个叶片测定的平均值。下同。

Data are means \pm SE of five independent measurements. The same below.

图 1 野生大豆和栽培大豆离体叶片在失水过程中 RWC 的变化

Fig. 1 Changes of RWC in the detached leaves of *G. soja* and *G. max* during dehydration

2.2 反射光谱的变化

在失水过程中,两种大豆离体叶片在可见光波段(500~750 nm)的反射率随着处理时间的延长而升高,但是在近红外区(750~1000 nm)的反射率则表现为“升高-降低-升高”的趋势。为了清楚表示各处理反射光谱的区别,分析了不同处理时间和处理前反射光谱的差值(图2C、D),从中可以明显地看出两种大豆离体叶片的反射光谱变化。根据反射光谱计算出的WI(图3A)和PRI(图4A)都随着失水时间的延长而降低,而野生大豆的降低更为明显,并且它们的下降均与叶片RWC的变化具有

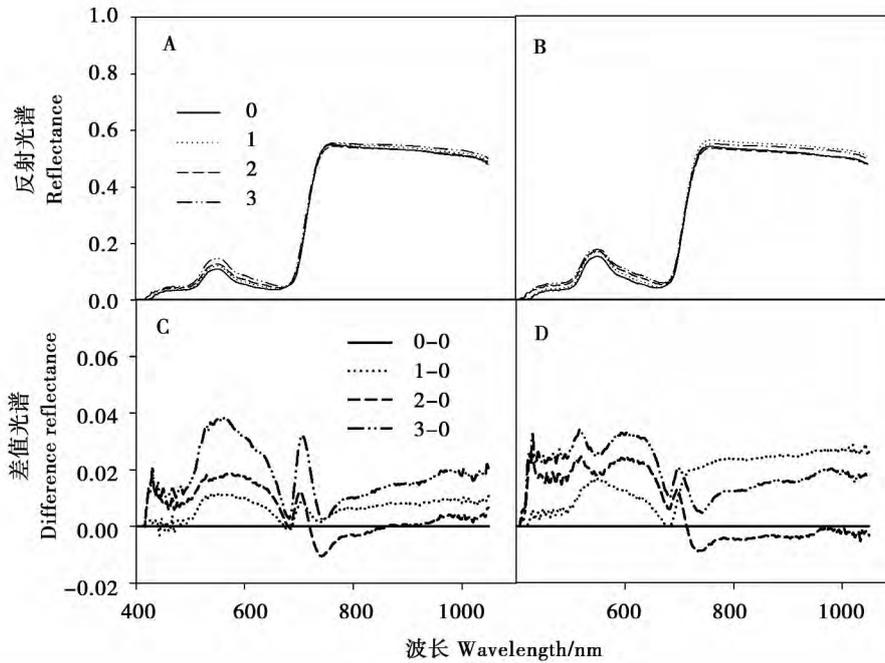
很好的相关性(图3B,图4B)。

2.3 PSII 光化学效率的变化

经过3 h的失水处理后,两种大豆离体叶片的 F_v/F_w (图5A)、 Φ_{PSII} (图5C)都随着失水时间的延长而降低,两种大豆表现出来的趋势一致,均与RWC的降低具有显著的相关性(图5B、D)。

2.4 PRI 与 Φ_{PSII} 和 F_v/F_m 的关系

为了说明在失水过程中PRI与光化学效率之间的关系,分析了PRI与 Φ_{PSII} 和 F_v/F_m 的相关性,结果显示,PRI与 Φ_{PSII} (图6A)和 F_v/F_m (图6B)呈显著相关。



A、C和B、D分别是野生大豆和栽培大豆叶片的反射光谱和反射光谱差值。

A, C and B, D were the spectral reflectance and difference reflectance in the detached leaves of *G. soja* and *G. max*, respectively.

图2 野生大豆和栽培大豆离体叶片在失水过程中反射光谱和反射光谱差值的变化

Fig. 2 Changes in spectral reflectance and difference reflectance in the detached leaves of *G. soja* and *G. max* during dehydration

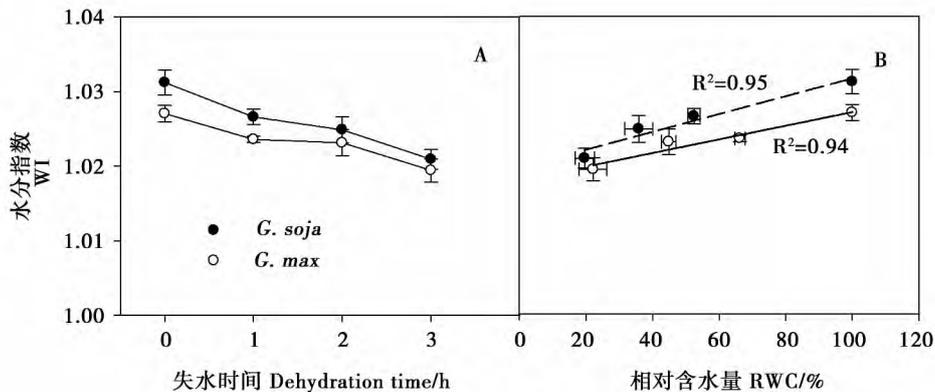


图3 野生大豆和栽培大豆离体叶片在失水过程中WI的变化(A)及其与RWC的相关分析(B)

Fig. 3 Changes in WI in the detached leaves of *G. soja* and *G. max* during dehydration(A) and the correlations between WI and RWC (B) (n=4)

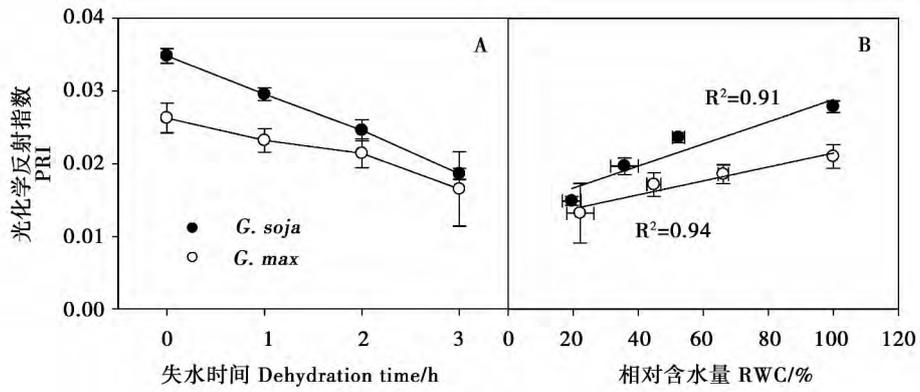


图 4 野生大豆和栽培大豆离体叶片在失水过程中 PRI 的变化 (A) 及其与 RWC 的相关分析 (B)

Fig. 4 Changes in PRI in the detached leaves of *G. soja* and *G. max* during dehydration (A) and the correlations between PRI and RWC (B) (n = 4)

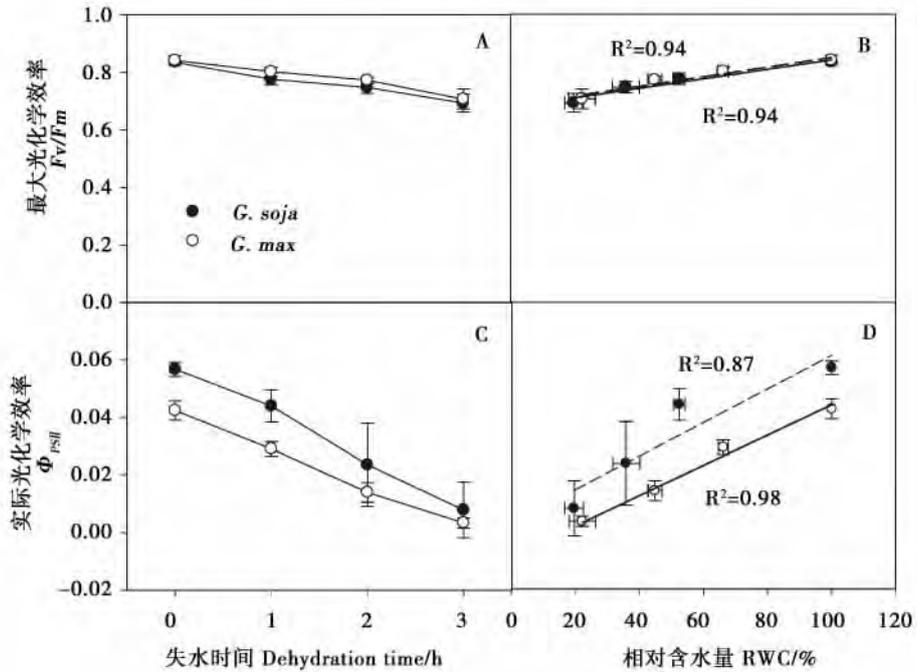


图 5 野生大豆和栽培大豆离体叶片在失水过程中 F_v/F_w 、 Φ_{PSII} 的变化 (A, C) 及其分别与 RWC 的相关分析 (B, D)

Fig. 5 Changes in the F_v/F_w (A), and Φ_{PSII} (C) in the detached leaves of *G. soja* and *G. max* during dehydration and the correlations between RWC and F_v/F_m (B), and Φ_{PSII} (D) (n = 4)

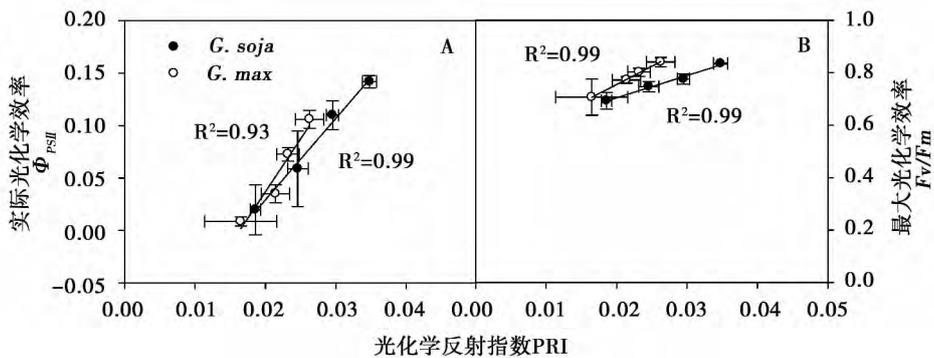


图 6 野生大豆和栽培大豆离体叶片在失水过程中 PRI 与 Φ_{PSII} (A) 和 F_v/F_m (B) 的关系

Fig. 6 Correlations between PRI and Φ_{PSII} (A), F_v/F_m (B) in the detached leaves of *G. soja* and *G. max* during dehydration (n = 4)

3 讨论

叶绿素荧光技术作为研究光合作用的探针,已被广泛应用于光合作用机理研究,用来分析植物对环境胁迫的响应机理^[15]。大量的研究表明^[16-18],叶绿素荧光可以作为评价植物抗旱性的主要生理指标之一。本研究的结果表明,在失水过程中,野生大豆和栽培大豆离体叶片的 Fv/Fm 和 Φ_{psII} 都随着失水时间的延长而降低,并与 RWC 具有很好的相关性,这说明 Fv/Fm 和 Φ_{psII} 可以很好地反映叶片在失水过程中的光合机构的光能利用效率的变化,可以作为反映干旱对植物影响的评价指标。但是由于 Fv/Fm 的测定需要对叶片进行暗适应,并且只能测定叶片水平的变化,因此并不能反映植物群体或冠层水平光能利用效率和水分状况的变化。

近年来,光谱分析技术在植物生理生态研究中得到愈来愈广泛的应用,可以实时、快速、无损伤地从叶片水平、群体水平以及生态系统等多个层面反应植物在各种环境条件下的生理生态变化。在不同环境条件下,不同植物或者同一植物的不同生育阶段,叶片中各种色素含量、水分含量以及生理生化状态都会发生相应的变化,从而引起植物反射光谱的变化。因此通过分析反射光谱可以对植物的生理生态状况进行无损伤监测。本试验重点以 RWC、 Fv/Fm 和 Φ_{psII} 为指标分析了反射光谱植被指数与其相关性,探讨了利用反射光谱技术监测旱情的可行性。现已知,叶片的反射光谱在可见光波段的低谷(450 和 680 nm 处的蓝、红光)主要由叶绿素强烈吸收引起,而 550 nm 附近则是由叶绿素反射形成的反射峰;近红外波段(700~1100 nm)的反射主要是由植物叶片内部组织结构决定,其中水分子和其它分子中的 O-H 键的伸缩和弯曲振动是引起植物在近红外区域吸收电磁辐射的决定性因素,主要吸收峰值分别位于 970, 1145, 1400 和 1940 nm^[19]。因此在失水过程中,两种大豆离体叶片在可见光波段的反射率随着处理时间的延长而升高,但是在近红外区的反射率则表现为“升高-降低-升高”的趋势。然而,对于复杂的反射光谱数据,仅用个别波段或多个单波段数据分析对比来提取植被信息是相当局限的,不能很好地反映植被的生理状态,因而在处理光谱数据时往往采用植被指数来反映相关指标。其中,Peñuelas 等^[13]提出可用 WI 监测小麦的水分状况,更多的研究证明 WI 可以灵敏地反映叶片水势、气孔导度和细胞壁弹性等^[13, 20-22]。在本试验中, WI 与 RWC 也具有很好的相关性,这与前人的研究结果一致。另外,由于 PRI 与植物叶片中叶黄素循环过程相关的色素含量具有很好的相关性^[12],所以可以很好地反映植物的光

合速率和光能利用效率。在失水过程中,两种大豆离体叶片的 PRI 与 Fv/Fm 和 Φ_{psII} 具有很好的相关性($R^2 \geq 0.93$)。这说明 PRI 可以很好地反映失水对大豆叶片的光能利用效率的影响。Peñuelas 等^[23]通过田间和室内试验证明植物 PRI 和 Φ_{psII} 的变化趋势一样。Gamon 等^[24]的研究表明 PRI 可以很好地反映不同植物在不同营养水平和生育期条件下的光能利用效率。彭涛等^[25]研究表明,无论在叶片水平还是冠层水平上 PRI 均能非常好地反映植物叶片光合机构对光能的利用效率。谭昌伟等^[26]研究表明利用高光谱植被指数监测紧凑型玉米叶绿素荧光参数 Fv/Fm 的变化。也有研究证明 PRI 可以作为反应植物水分胁迫的指标^[27],这与本试验结果一致, PRI 与 RWC 具有显著相关,这可能是由于在水分胁迫下光能利用效率的变化与胁迫程度具有很大关系。

4 结论

通过对野生大豆和栽培大豆离体叶片在失水过程中反射光谱与相对含水量和叶绿素荧光的分析得出,反射光谱可以快速、准确地反映水分亏缺所引起的大豆离体叶片水分状况和 PSII 光化学效率的变化,并与传统的生理方法的测定结果显著相关。因此,反射光谱分析技术作为一种快速、准确的研究手段,可以有效监测植物的光化学效率和水分状况,在大田作物的旱情监测上具有广阔的应用前景,但是对群体、冠层及生态水平上的应用还需要进行深入研究和验证。

参考文献

- [1] 徐晨,张鹏,徐克章,等. 干旱胁迫对不同大豆品种叶片光合及生理特性的影响[J]. 中国油料作物学报, 2013, 35(6): 674-679. (Xu C, Zhang P, Xu K Z, et al. Effects of drought stress on leaf photosynthesis and some physiological traits in different soybean cultivars [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2013, 35(6): 674-679.)
- [2] 王磊,王鹏程,张彤,等. 结荚期短期干旱和复水对大豆 (*Glycine max*) 叶片光合和产量的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(6): 3328-3334. (Wang L, Wang P C, Zhang T, et al. Effect of short-term drought and rewatering during the pod-setting stage on leaf photosynthesis and yield of the soybean [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(6): 3328-3334.)
- [3] 李柏贞,周广胜. 干旱指标研究进展[J]. 生态学报, 2014, 34(5): 1043-1052. (Li B Z, Zhou G S. Advance in the study on drought index [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(5): 1043-1052.)
- [4] 王伟,姜伟,张金龙,等. 大豆种质的耐旱性鉴定及耐旱指标筛选[J]. 大豆科学, 2015, 34(5): 808-818. (Wang W, Jiang W, Zhang J L, et al. Selection of drought-tolerant soybean and evaluation of the drought-tolerance indices [J]. Soybean Science, 2015, 34(5): 808-818.)

- 2015, 34(5): 808-818.)
- [5] 薛忠财, 高辉远, 彭涛, 等. 光谱分析在植物生理生态研究中的应用[J]. 植物生理学报, 2011, 47(4): 313-320. (Xue Z C, Gao H Y, Peng T, et al. Application of spectral reflectance on research of plant eco-physiology [J]. Plant Physiology Journal, 2011, 47(4): 313-320.)
- [6] 薛忠财, 高辉远, 柳洁, 等. 利用光谱反射技术监测不同地力和施肥条件下小麦生长和产量的变化[J]. 麦类作物学报, 2011, 31(2): 324-330. (Xue Z C, Gao H Y, Liu J, et al. Monitoring growth and grain yield of wheat in fields with different soil fertility levels and different fertilizer application using spectral reflectance technique [J]. Journal of Triticeae Crops, 2011, 31(2): 324-330.)
- [7] 谷艳芳, 丁圣彦, 陈海生, 等. 干旱胁迫下冬小麦(*Triticum aestivum*) 高光谱特征和生理生态响应[J]. 生态学报, 2008, 28(6): 2690-2697. (Gu Y F, Ding S Y, Chen H S, et al. Eco-physiological responses and hyperspectral characteristics of winter wheat(*Triticum aestivum*) under drought stress [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(6): 2690-2697.)
- [8] 吉海彦, 王鹏新, 严泰来. 冬小麦活体叶片叶绿素和水分含量与反射光谱的模型建立[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(3): 514-516. (Ji H Y, Wang P X, Yan T L. Estimations of chlorophyll and water contents in live leaf of winter wheat with reflectance spectroscopy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2007, 27(3): 514-516.)
- [9] 王纪华, 赵春江, 郭晓维, 等. 利用遥感方法诊断小麦叶片含水量的研究[J]. 华北农学报, 2000, 14(4): 68-72. (Wang J H, Zhao C J, Guo X W, et al. Study on the water content of wheat leaves by the remote sensing [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2000, 14(4): 68-72.)
- [10] Suplick-Ploense M R, Alshammary S F, Qian Y L. Spectral reflectance response of three turfgrasses to leaf dehydration [J]. Asian Journal of Plant Sciences, 2011, 10(1): 67-73.
- [11] 王宏博, 冯锐, 纪瑞鹏, 等. 干旱胁迫下春玉米拔节-吐丝期高光谱特征[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(12): 3358-3362. (Wang H B, Feng R, Ji R P, et al. Hyperspectral characteristics of spring maize from jointing to silking stage under drought stress [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(12): 3358-3362.)
- [12] Gamon J A, Field C B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency [J]. Remote Sensing of Environment, 1992, 41(1): 35-44.
- [13] Penuelas J, Pinol J, Ogaya R. Estimation of plant water concentration by the reflectance Water Index WI (R900/R970) [J]. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18: 2869-2875.
- [14] Genty B, Briantais J M, Baker N R. The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence [J]. Biochimica et Biophysica Acta-general Subjects, 1989, 990(1): 87-92.
- [15] Baker N R. Chlorophyll fluorescence: A probe of photosynthesis *in vivo* [J]. Annual Review of Plant Biology, 2008, 59: 89-113.
- [16] Ögren E. Evaluation of chlorophyll fluorescence as a probe for drought stress in willow leaves [J]. Plant Physiology, 1990, 93(4): 1280-1285.
- [17] Faraloni C, Cutino I, Petrucci R, et al. Chlorophyll fluorescence technique as a rapid tool for *in vitro* screening of olive cultivars (*Olea europaea* L.) tolerant to drought stress [J]. Environmental and Experimental Botany, 2011, 73(0): 49-56.
- [18] Li R H, Guo P G, Michael B, et al. Evaluation of chlorophyll content and fluorescence parameters as indicators of drought tolerance in barley [J]. Agricultural Sciences in China, 2006, 5(10): 751-757.
- [19] Curran P J. Remote sensing of foliar chemistry [J]. Remote Sensing of Environment, 1989, 30(3): 271-278.
- [20] Dziki S, Verreyne J S, Stuckens J, et al. Determining the water status of Satsuma mandarin trees [*Citrus Unshiu* Marcovitch] using spectral indices and by combining hyperspectral and physiological data [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(3): 369-379.
- [21] Peñuelas J, Filella I, Serrano L, et al. Cell wall elasticity and water index (R970 nm/R900 nm) in wheat under different nitrogen availabilities [J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17: 373-382.
- [22] Gaalen K E V, Flanagan L B, Peddle D R. Photosynthesis, chlorophyll fluorescence and spectral reflectance in *Sphagnum moss* at varying water contents [J]. Oecologia, 2007, 153(1): 19-28.
- [23] Penuelas J, Filella I, Gamon J A. Assessment of photosynthetic radiation-use efficiency with spectral reflectance [J]. New Phytologist, 1995, 131(3): 291-296.
- [24] Gamon J A, Serrano L, Surfus J S. The photochemical reflectance index: An optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels [J]. Oecologia, 1997, 112(4): 492-501.
- [25] 彭涛, 姚广, 李鹏民, 等. 植物叶片和冠层光化学反射指数与叶黄素循环的关系[J]. 生态学报, 2009, 29(4): 1987-1993. (Peng T, Yao G, Li P M, et al. Relationship between xanthophyll cycle and photochemical reflectance index measured at leaf or canopy level in two field-grown plant species [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(4): 1987-1993.)
- [26] 谭昌伟, 黄文江, 金秀良, 等. 利用高光谱植被指数监测紧凑型玉米叶绿素荧光参数 F_v/F_m [J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(5): 1287-1291. (Tan C W, Huang W J, Jin X L, et al. Monitoring the chlorophyll fluorescence parameter F_v/F_m in compact corn based on different hyperspectral vegetation indices [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(5): 1287-1291.)
- [27] Sarlikioti V, Driever S M, Marcelis L F M. Photochemical reflectance index as a mean of monitoring early water stress [J]. Annals of Applied Biology, 2010, 157(1): 81-89.