

不同剂量 UV-B 辐射对冬小麦幼苗形态及生理指标的影响^{*}

刘丽丽¹ 张文会^{1*} 范颖伦² 吕艳伟¹ 苗秀莲¹

(¹ 聊城大学生命科学学院, 山东聊城 252059; ² 聊城大学农学院, 山东聊城 252059)

摘 要 UV-B 辐射增强对植物的影响效果存在差异,即使是同一物种的不同品种之间也存在差异。本研究以对 UV-B 不同耐性的 2 个冬小麦品种“科遗 26”和“泰山 269”为材料,比较了品种间及 UV-B 的剂量间的形态指标、生物量及生理指标的差异。结果表明:高剂量 UV-B 处理抑制了株高、叶色、茎数、鲜质量、光反应系统 II(PS II)最大光化学效率(F_v/F_m)和光合速率,促进了丙二醛、类黄酮含量的增加及相对电导率的提高。2 个品种的趋势基本相同,但泰山 269 的变化幅度大于科遗 26,说明泰山 269 比科遗 26 敏感;低剂量的 UV-B 对株高、叶色、茎数、鲜质量表现出促进的趋势,对类黄酮的促进作用较大,对 F_v/F_m 、丙二醛及相对电导率的影响相对较小。

关键词 UV-B; 冬小麦幼苗; 生理指标

中图分类号 Q948 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2010)2-0314-05

Effects of different dose UV-B radiation on the morphological and physiological indices of winter wheat seedlings. LIU Li-li¹, ZHANG Wen-hui¹, FAN Ying-lun², LÜ Yan-wei¹, MIAO Xiu-lian¹(¹ School of Life Science, Liaocheng University, Liaocheng 252059, Shandong, China; ² School of Agriculture, Liaocheng University, Liaocheng 252059, Shandong, China). *Chinese Journal of Ecology* 2010 29(2) 314-318.

Abstract: Enhanced UV-B radiation has different effects on different plants, and even, on the different varieties of same plant species. Taking two winter wheat varieties (Keyi 26 and Taishan 269) with different UV-B tolerance as test materials, this paper compared their morphological indices, biomass, and physiological indices under effects of different dose UV-B radiation. For the two test varieties, high dose UV-B radiation decreased their plant height, leaf color value, tiller number, fresh weight, F_v/F_m , and photosynthesis rate, but increased their leaf MDA and flavonoid contents and relative electric conductivity. In these aspects, wheat variety Taishan 269 showed more apparent variations than Keyi 26, suggesting that the former was more sensitive to enhanced UV-B radiation. Low dose UV-B radiation promoted the plant height, leaf color value, tiller number, fresh mass, and especially, flavonoid content of test varieties, but had less effects on the F_v/F_m , leaf MDA content, and leaf relative electric conductivity.

Key words: UV-B; winter wheat seedling; physiological indices.

由于大气层的臭氧层变薄导致到达地球表面的紫外线 B(UV-B 280~320 nm)强度增大,给地球上的生态系统带来严重影响。研究 UV-B 对植物的影响以及植物对 UV-B 辐射增强的响应机制,成为生态学的一个研究热点。UV-B 辐射增强会导致植物

有效光合面积减小(张晋豫等,2008),光合速率及光合作用相关指标受到抑制(Feng *et al.* 2003; 罗南书和钟章成,2005),如植株变矮,生物量和产量下降(李元等,2001; Kumagai *et al.* 2001)。在前期实验中,发现在实验室的人工光源下生长的冬小麦幼苗,给予较弱剂量的 UV-B 照射后幼苗生长的更好。为了准确预测未来 UV-B 辐射增强对作物的影响,本研究采用了 2 种 UV-B 剂量处理冬小麦幼苗,通

* 国家自然科学基金项目(30771156)和教育部留学回国科研启动基金资助项目(2005)。

** 通讯作者 E-mail: whzhang@lcu.edu.cn

收稿日期:2009-06-05 接受日期:2009-10-04

过测定幼苗的株高、叶绿素含量、茎数、类黄酮含量、地上部鲜质量等指标,对供试品种的 UV-B 耐性及剂量效应进行了比较,为耐 UV-B 育种提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

冬小麦品种“科遗 26”和“泰山 269”。

1.2 处理方法

将冬小麦种子放在铺有滤纸的培养皿中,置于 25 ℃ 的培养箱中,黑暗条件下浸种、催芽。选取发芽整齐的种子播种于内盛砾石、直径为 20 cm、高 20 cm 的塑料花盆中,每盆播 10 粒种子。上覆薄膜,于 25 ℃ 的培养室内培养,待出苗后移入人工气候室。人工气候室温度设定为 20 ℃/15 ℃,光照强度约为 $600 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,每天照射 12 h。苗高 1 cm 时每盆浇 Hoagland 培养液 200 ml,以后每隔 10 d 加一次营养液,及时补水。加第一次营养液后即进行 UV-B 处理。设 2 个 UV-B 处理强度,即 $15 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ (记为 UVB1), $25 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ (记为 UVB2),UV-B 光源采用北京电光源研究所生产的最大放射波长为 315 nm 的紫外灯管,每天连续照射 8 h;非 UV-B 增强处理区即对照区(光源中 UV-B 的辐射强度约为 $4 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$)只悬挂灯架,不安装灯管。UV-B 辐射强度采用北京师范大学生产的紫外辐照计测定。每品种各处理 5 盆。

1.3 测定项目

处理后第 25 d 取样,测定株高、叶绿素含量、茎数、地上部鲜质量、类黄酮含量、相对电导率、PRI、 F_v/F_m 、丙二醛(MDA)含量。其中,株高、茎数、地上部鲜质量采用常规方法测定,每处理测定 10 株;叶绿素含量采用叶色计 SPAD-502 测定,每片叶片测定 3 次取平均值,测定 10 片叶片;类黄酮含量的测定参照 Caldwell 和 Björn (1998)的方法,以 330 nm 处的吸光值与待测样品鲜质量的比值作为评价指标,重复 5 次;相对电导率采用 Mikal 和 Saltveit (1991)法测定,丙二醛含量采用邹奇(2001)方法测定,重复 5 次; F_v/F_m 采用 OS-30P 叶绿素荧光仪测定,每处理测定 5 片叶;PRI (photochemical reflectance index)是反射光谱的比值,可以用来衡量光合速率的强弱,其计算参照 Gamon (1997)的方法: $PRI = (R_{531} - R_{570}) / (R_{531} + R_{570})$,式中 R 为某波长下的反射光谱值。PRI 采用 UniSpec 光谱仪测定,每处理测定 10 片相同叶位的叶片。将高剂量(UVB2)

处理的各指标与对照值相比得到各个指标的相对值。因为植物对 UV-B 耐性的强弱最终反映到生物量上,因此,本研究将相对株高、相对茎数、相对鲜质量三者平均作为衡量 UV-B 耐性(相对耐性)的指标,即平均值高的品种比低的品种更耐 UV-B。

1.4 数据处理

采用 SPSS 11.5 数据处理系统对所得数据进行显著性分析(t 测验)。

2 结果与分析

2.1 UV-B 处理对冬小麦幼苗株高、茎数及鲜质量的影响

如表 1 所示,2 种剂量的 UV-B 处理均增加了科遗 26 的株高,分别增加 9.4% 与 5.9%;UVB1 处理使泰山 269 的株高增加 1.5%,UVB2 处理明显抑制了泰山 269 的株高,低于对照 19.9%,达极显著水平($P < 0.01$)。说明低剂量的 UV-B 对冬小麦幼苗的株高作用效果不明显,而高剂量的 UV-B 辐射能够明显抑制敏感品种的株高。

茎数与对照相比,低剂量(UVB1)的 UV-B 处理使科遗 26、泰山 269 的茎数呈增加的趋势(表 1),分别增加 13.2% 和 8.1%。高剂量(UVB2)的 UV-B 处理均抑制了科遗 26、泰山 269 的茎数。科遗 26 茎数减少不显著,仅为对照的 3.1%,泰山 269 的茎数减少了 43.3%,与对照的差异达极显著水平($P < 0.01$)。说明高剂量的 UV-B 辐射对敏感品种的分蘖有抑制作用。

低剂量 UV-B(UVB1)处理促进了单株鲜质量的增加,科遗 26、泰山 269 分别增加 36.0% 和 2.4%,科遗 26 的鲜质量增加明显(表 1),与对照的差异达显著水平($P < 0.05$)。高剂量(UVB2)的 UV-B 处理明显抑制了泰山 269 的鲜质量,比对照降低 54.3%,与对照的差异达极显著水平($P < 0.01$);科遗 26 的鲜质量增加 9.0%,与株高、茎数的趋势一致。

2.2 UV-B 处理对冬小麦幼苗叶色值及类黄酮含量的影响

2 种剂量的 UV-B 处理对 2 个供试品种的叶色值影响结果不同(表 1)。UVB1 处理对科遗 26 的叶色值略有促进作用,对泰山 269 没有影响;UVB2 处理导致泰山 269 的叶色值低于对照 8.7%,达显著水平($P < 0.05$)。对科遗 26 的叶色值影响较小。

类黄酮能够吸收紫外线,减轻 UV-B 对核酸等

生物大分子的伤害。因此 ,UV-B 照射后类黄酮含量的变化是衡量植物对 UV-B 耐受能力强弱的指标之一。UVB1 及 UVB2 处理均促进了供试品种的类黄酮含量(表 1) ,科遗 26 的类黄酮含量在低剂量 (UVB1) UV-B 辐射下增幅为 69.1% ,高剂量 (UVB2) UV-B 照射下增幅为 14.2%。2 种 UV-B 剂量处理下泰山 269 的类黄酮含量增幅较大 ,分别增加 134.8%、140.8%。2 个品种均与对照之间差异达极显著水平($P < 0.01$)。

2.3 UV-B 处理对冬小麦幼苗叶片 MDA 及相对电导率的影响

2 种剂量的 UV-B 处理对科遗 26 及泰山 269 的丙二醛(MDA)含量存在差异(表 1)。与对照相比 ,UVB1 处理使科遗 26 的 MDA 含量减少 9.2% ,UVB2 处理使 MDA 含量增加 1.0% ;UVB1 处理使泰山 269 的 MDA 含量减少 0.4% ,而 UVB2 处理使 MDA 含量增加 59.2% ,与对照间的差异达极显著水平($P < 0.01$)。说明低剂量的 UV-B 处理对 2 个供

试品种的 MDA 含量的增加影响不明显 ,高剂量的 UV-B 处理导致 MDA 含量增加 ,敏感品种比耐性品种的增幅大。说明泰山 269 较科遗 26 的生物膜系统受到的损伤更为严重。

UVB1 处理对科遗 26 及泰山 269 的相对电导率影响不明显 ,分别为 3.7% 与 - 2.7%(表 1)。UVB2 处理导致科遗 26 及泰山 269 的相对电导率升高 ,分别升高 20.2% 与 50.2% ,与对照间的差异达显著水平($P < 0.05$)。UV-B 对原生质膜系统的损伤具剂量效应 ,高剂量的 UV-B 辐射对膜系统的影响较大。其中 ,泰山 269 的增幅明显高于科遗 26 ,说明在高剂量 UV-B 处理下 ,泰山 269 的原生质膜系统受到的损伤较科遗 26 严重。

2.4 UV-B 处理对冬小麦幼苗叶片 F_v/F_m 及 PRI 的影响

荧光参数 F_v/F_m 反映的是光反应系统 II(PS II)传递电子的能力 ,影响到光合速率。 F_v/F_m 的大小及变化与 PS II 的原初反应过程 ,特别是与 PS II 的

表 1 不同剂量的 UV-B 处理对冬小麦幼苗各指标的影响
Tab.1 Effects of different doses of UV-B radiation on the measured indices of winter wheat seedling

指标	处理	科遗 26	%	泰山 269	%
株高(cm)	CK	17.8 ± 1.4		23.1 ± 2.0	
	UVB1	19.5 ± 2.7	9.4	23.5 ± 1.4	1.5
	UVB2	18.9 ± 1.6	5.9	18.5 ± 1.6	-19.9**
茎数(条)	CK	3.8 ± 0.4		3.7 ± 0.7	
	UVB1	4.3 ± 0.5	13.2	4.0 ± 0.0	8.1
	UVB2	3.7 ± 0.8	-3.1	2.1 ± 0.3	-43.3**
叶色 (mg · g ⁻¹)	CK	53.6 ± 2.9		46.2 ± 2.0	
	UVB1	57.3 ± 2.8	6.9	45.7 ± 1.3	-1.1
	UVB2	53.8 ± 1.3	0.3	42.2 ± 1.9	-8.7*
鲜质量 (g)	CK	0.962 ± 0.14		1.55 ± 0.23	
	UVB1	1.304 ± 0.33	36.0*	1.59 ± 0.18	2.4
	UVB2	1.04 ± 0.12	9.0*	0.71 ± 0.10	-54.3**
类黄酮 (A330 · g ⁻¹)	CK	0.32 ± 0.02		0.28 ± 0.06	
	UVB1	0.54 ± 0.01	69.1**	0.66 ± 0.05	134.8**
	UVB2	0.37 ± 0.04	14.2**	0.68 ± 0.01	140.8**
相对电导率 (%)	CK	3.6 ± 0.4		3.3 ± 0.5	
	UVB1	3.7 ± 0.6	3.7	3.2 ± 0.5	-2.7
	UVB2	4.3 ± 0.6	20.2*	5.0 ± 0.7	50.2**
丙二醛 (μmol · g ⁻¹)	CK	9.0 ± 0.3		4.0 ± 0.2	
	UVB1	8.5 ± 1.5	-9.2	4.0 ± 0.2	-0.4
	UVB2	9.2 ± 0.3	1.0	6.4 ± 0.2	59.2**
F_v/F_m	CK	0.811 ± 0.003		0.809 ± 0.005	
	UVB1	0.809 ± 0.004	-0.3	0.802 ± 0.006	-0.9
	UVB2	0.806 ± 0.002	-0.6	0.766 ± 0.002	-5.4*
PRI	CK	-0.255 ± 0.003		-0.248 ± 0.005	
	UVB1	-0.244 ± 0.004	-4.5	-0.241 ± 0.006	-2.8
	UVB2	-0.259 ± 0.002	1.6	-0.262 ± 0.002	5.6*

% 为 UVB 处理相对于对照的增减百分率 ;* $P < 0.05$,** $P < 0.01$ 。

原初电子受体 QA 的氧化还原电位的高低密切相关。因此 ,可作为衡量 PS II 活性大小的尺度。2 种剂量的 UV-B 处理导致科遗 26 及泰山 269 的 F_v/F_m 呈降低的趋势。UVB1 处理对科遗 26 及泰山 269 的 F_v/F_m 影响较小(表 1);UVB2 处理对科遗 26 影响较小 ,对泰山 269 影响较大 ,其中泰山 269 与对照的差异达显著水平($P < 0.05$)。说明 UV-B 对 PS II 功能的损伤具剂量效应 ,受高剂量的影响显著。在高剂量 UV-B 处理下 ,泰山 269 的 PS II 的功能较科遗 26 受到的损伤严重。

光合速率是指示植物生理生化特性的重要指标。PRI 与 F_v'/F_m' (光适应下 PS II 最大光化学效率 ,它反映有热耗散存在时 ,开放的 PS II 反应中心的光化学效率)及与光合速率呈高度正相关(Penuelas *et al.* ,1995 ;Gamon *et al.* ,2001) ,与光合作用的饱和速率、光合作用的量子产量呈极显著正相关(Richardson & Berlyn 2002) 。用 PRI 指标能够评价叶片的光合速率强弱。低剂量的 UV-B 处理提高了 2 个供试品种的 PRI(表 1) ,高剂量的 UV-B 处理抑制了 2 个供试品种的 PRI ,其中 ,泰山 269 与对照之间差异达显著水平 ,影响趋势同 F_v/F_m 。说明较强的 UV-B 辐射对光合速率具有抑制效应 ,泰山 269 比科遗 26 更敏感。

2.5 相关分析

由表 2 可见 ,相对耐性除与株高、茎数及鲜质量的相对值具有极显著的相关外 ,与叶绿素含量及 F_v/F_m 呈正相关 ,但相关关系不显著 ;与类黄酮含量、相对电导率、MDA 及 PRI 呈负相关 ,其中 ,与电导率和 MDA 间均达到极显著相关。说明叶绿素含量高、PS II 电子传递效率及光合速率大(与 PRI 负相关表示与光合速率正相关)对植株的生长具有促进作用 ,而 UV-B 辐射导致的生物膜损伤对冬小麦幼苗生长的抑制作用较大 ;类黄酮的合成需要消耗大量的物质和能量 ,因此 ,在一定程度上会影响幼苗

的生长和物质积累 ,这可能也是与相对耐性呈负相关的原因。

3 讨 论

3.1 UV-B 辐射增强对形态指标的影响

UV-B 辐射增强对植物的影响结果多数报道是抑制作用(杜英君等 ,2004 ;田向军等 ,2007) ,但也有相反的报道 (Ioannidis *et al.* ,2002 ;张文会等 ,2003 ;Teklemariam & Blake ,2003) 。Bassman 等 (2002)在温室中采用 2 个 UV-B 强度(16 和 21.8 $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)处理花旗松的结果表明 ,在 UV-B 处理下 ,花旗松第 1 年的生长受到一些抑制 ,而第 2 年、第 3 年的生长却得到了恢复 ,甚至于超过对照 (UV-B 强度为 7.5 $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)下生长的植株。在本研究中 ,UV-B 辐射对冬小麦幼苗生长的作用效果比较复杂 ,综合表现为低剂量的 UV-B 辐射促进了冬小麦幼苗的生长 ,高剂量的 UV-B 对敏感品种的抑制作用较大 ,对耐性品种的抑制作用较小或没有抑制作用。

3.2 UV-B 辐射增强对色素含量的影响

叶色值的高低反映叶绿素含量的多寡 ,二者存在高度正相关。叶绿素含量是影响光合作用的重要因素 ,是评价叶片光合作用强度的指标之一。有报道认为 ,UV-B 辐射对叶绿素有抑制作用主要是由于 UV-B 抑制了叶绿素的合成 ,并加速了叶绿素的降解速度。在本研究中 ,低剂量的 UV-B 辐射对 2 个供试冬小麦品种没有影响 ,高剂量的 UV-B 辐射抑制了敏感品种泰山 269 的叶绿素含量 ,对耐性品种科遗 26 影响不显著。说明植物对 UV-B 耐性的差异也表现在对叶绿素的影响上 ,最终影响到光合作用。

类黄酮化合物作为 UV 防护色素 ,比较一致的报道均是受到 UV-B 的诱导(任健和李春阳 ,2005 ; Kim *et al.* ,2008 ;Peng *et al.* ,2009) 。在本研究中 2 种剂量的 UV-B 处理均使 2 个供试品种 的类黄酮含量明显增加 ,与前人的研究结果相同。

3.3 UV-B 辐射增强对光合速率的影响

UV-B 处理导致叶片的光合速率降低(Feng *et al.* ,2003 ;张文会等 ,2009) 。在本研究中 ,UV-B 对光合作用相关指标的影响因 UV-B 照射剂量及品种而异。低剂量的 UV-B 处理对光合速率(PRI)及 PS II 的电子传递能力影响效果不显著 ,高剂量的 UV-B 辐射显著抑制了敏感品种泰山 269 的光合速率 (PRI)及 PS II 的功能 ,对耐性品种科遗 26 没有影

表 2 UVB2 处理的各个指标相对值与相对耐性值间的相关系数

Tab.2 Correlation coefficients between relative tolerance and relative value of the measured indices under UVB2 treatment

指标	相关系数	指标	相关系数	指标	相关系数
株高	0.995 **	叶色	0.55	相对电导率	-0.949 **
茎数	0.902 **	类黄酮	-0.592	丙二醛	-0.988 **
鲜质量	0.942 **	PRI	-0.579	F_v/F_m	0.358

相对值为处理与对照的百分比 ;* $P < 0.05$,* * $P < 0.01$ 。

响。说明较高剂量的 UV-B 辐射对植物的光合作用会产生抑制作用,特别是敏感品种更明显,最终影响生物量。

3.4 UV-B 辐射增强对膜系统的影响

当生物受到环境胁迫时,生物膜系统通常是作为受害部位首当其冲,导致膜的结构及功能受到影响。膜系统遭到活性氧自由基的攻击导致膜脂过氧化,丙二醛是膜脂过氧化作用的主要产物之一,较多的丙二醛积累意味着脂质过氧化加重,膜的选择透过性下降,电解质外渗,导致相对电导率增加。在本研究中,低剂量的 UV-B 处理对 2 个供试品种的丙二醛含量的影响不明显,对相对电导率的影响也较小,高剂量的 UV-B 处理对科遗 26 的丙二醛含量影响不明显,对泰山 269 的丙二醛含量增加的促进作用显著,相对电导率也呈相同的趋势,说明较高剂量的 UV-B 辐射会导致生物膜的损伤,敏感植物的生物膜系统受到的损伤尤为严重。

综上所述,本实验采用 2 种剂量的 UV-B 辐射对 UV-B 耐性不同的 2 个冬小麦品种的幼苗进行室内胁迫处理,结果表明,低剂量的 UV-B 辐射对敏感品种泰山 269 作用效果不明显,对科遗 26 有促进作用,主要表现在生物量(鲜质量)上;而高剂量的 UV-B 辐射对 2 个品种均有抑制作用,其中敏感品种泰山 269 受到的抑制比耐性品种科遗 26 严重。高剂量的 UV-B 辐射是通过破坏生物膜系统,抑制 PS II 的功能,以及抑制光合速率从而抑制冬小麦幼苗的生长发育。

植物对 UV-B 辐射增强的响应存在差异,即使是同一物种在抗氧化能力(Gao & Zhang, 2008)、DNA 损伤的修复能力(钟楚等, 2009)等方面也存在差异,导致对 UV-B 的耐性不一致。这可能也是造成植物对 UV-B 应答产生差异的主要原因。一定剂量的 UV-B 辐射对某些植物产生促进作用的机理尚不清楚,今后应加强这方面的研究。

参考文献

杜英君,史奕,刘振伟. 2004. UV-B 辐射和 Hg^{2+} 复合处理对黑小麦生理代谢和生长的影响. 生态学杂志, 23(5): 111-115.

李元,王勋陵,胡之德. 2001. 增强的 UV-B 辐射对麦田生态系统 Mg 和 Zn 累积和循环的影响. 生态学杂志, 20(1): 26-29.

罗南书,钟章成. 2005. 田间增加 UV-B 辐射对玉米光合生理的影响. 生态学杂志, 25(4): 369-373.

任健,李春阳. 2005. 种子植物对中波紫外辐射胁迫的响应研究进展. 生态学杂志, 24(3): 315-320.

田向军,林玥,邱宗波,等. 2007. 温室条件下增强 UV-B 辐射对小麦、谷子大小等级性和异速生长的影响. 生态学报, 27(12): 2-8.

张晋豫,邱宗波,王勋陵,等. 2008. 增强 UV-B 对矮牵牛花瓣中生理生化物质变化的影响. 西北植物学报, 28(8): 37-42.

张文会,刘立科,苗秀莲,等. 2009. CO_2 倍增及 UV-B 增强对大豆植株生长和根际微生物的影响. 西北植物学报, 29(4): 724-732.

张文会,孙传清,佐藤雅志,等. 2003. 紫外线(UV-B)照射对水稻产量及稻米蛋白质含量的影响. 作物学报, 29(6): 908-912.

钟楚,陈宗瑜,王毅,等. 2009. UV-B 辐射对植物影响的分子水平研究进展. 生态学杂志, 28(1): 129-137.

邹奇. 2001. 植物生理学实验指导. 北京: 中国农业出版社.

Bassman JH, Edwards GE, Robberecht R. 2002. Long term exposure to enhanced UV-B radiation is not detrimental to growth and photosynthesis in Douglas-fir. *New Phytologist*, 154: 107-120.

Caldwell MM, Björn LO, Bornman JF, et al. 1998. Effects of increased solar ultraviolet on terrestrial ecosystem. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 46: 40-52.

Feng HY, An LZ, Chen T, et al. 2003. The effect of enhanced ultraviolet-B radiation on growth, photosynthesis and stable carbon isotope composition ($\delta^{13}C$) of two soybean cultivars (*Glycine max*) under field conditions. *Environmental and Experimental Botany*, 49: 1-8.

Gamon JA, Field CB, Fredeen AL, et al. 2001. Assessing photosynthetic downregulation in sunflower stands with an optically-based model. *Photosynthesis Research*, 67: 113-125.

Gamon JA, Serrano L, Surfus JS. 1997. The photochemical reflectance index: An optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types and nutrient levels. *Oecologia*, 112: 492-501.

Gao Q, Zhang LX. 2008. Ultraviolet-B-induced oxidative stress and antioxidant defense system responses in ascorbate-deficient *vtc1* mutants of *Arabidopsis thaliana*. *Journal of Plant Physiology*, 165: 138-148.

Ioannidis D, Bonner L, Johnson CB. 2002. UV-B is required for normal development of oil glands in *Ocimum basilicum* L. (sweet basil). *Annals of Botany*, 90: 453-460.

Kim BG, Kim JH, Kim J, et al. 2008. Accumulation of flavonols in response to ultraviolet-B irradiation in soybean is related to induction of flavanone 3- β -hydroxylase and flavonol synthase. *Molecules Cells*, 25: 247-252.

Kumagai T, Hidema J, Kang HS, et al. 2001. Effects of supplemental UV-B radiation on the growth and yield of two cultivars of Japanese lowland rice (*Oryza sativa* L.) under the field in a cool rice-growing region of Japan. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 83: 201-208.

Mikal E, Saltveit Jr. 1991. Determining tomato fruit maturity with nondestructive in vivo nuclear magnetic resonance imaging. *Postharvest Biology and Technology*, 1: 153-159.

Peng Q, Zhou Q. 2009. Antioxidant capacity of flavonoid in soybean seedlings under the joint actions of rare earth element La(III) and ultraviolet-B stress. *Biological Trace Element Research*, 127: 69-80.

Penuelas J, Filella I, Gamon JA. 1995. Assessment of photosynthetic radiation-use efficiency with spectral reflectance. *New Phytologist*, 131: 291-296.

Richardson AD, Berlyn GP. 2002. Spectral reflectance and photosynthetic properties of *Betula papyrifera* (Betulaceae) leaves along an elevational gradient on MT. Mansfield, Vermont, USA. *American Journal of Botany*, 89: 88-94.

Teklemariam T, Blake TJ. 2003. Effects of UVB preconditioning on heat tolerance of cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Environmental and Experimental Botany*, 50: 169-182.

作者简介 刘丽丽,女,1983年生,硕士研究生。主要从事植物生理生态学研究。E-mail: liulililgood@163.com
责任编辑 李凤芹