

两个割手密(*Saccharum spontaneum* L.)无性系对 UV-B 辐射响应的形态和生理差异

李 元, 何永美, 秦 丽, 祖艳群

(云南农业大学资源与环境学院, 云南 昆明 650201)

摘 要:采用田间试验方法,研究了连续两年大田条件下,增强 UV-B 辐射(UV-B, 280~310 nm, 5.0 kJ·m⁻²)对两个割手密(*Saccharum spontaneum* L.)无性系(I 91-48 和 II 91-81)形态和生理的影响,以及两个割手密无性系对 UV-B 辐射响应的种内差异。结果表明,两年中,在增强 UV-B 辐射下, I 91-48 5 个生育时期的株高(除 2004 年成熟后期外)和分蘖数,以及分蘖期和伸长初期的茎径显著增加,而 II 91-81 株高在伸长初期和伸长后期,分蘖数在伸长初期、伸长后期、成熟初期和成熟后期(除 2004 年伸长后期外),以及茎径在分蘖期、伸长初期和伸长后期显著降低。两年的成熟后期,UV-B 辐射导致 I 91-48 生物量、叶面积指数和节间长显著增加, II 91-81 生物量、叶面积指数和节间长显著降低,而两个无性系节数无显著变化。两年中,UV-B 辐射显著降低两个割手密无性系伸长后期和成熟初期叶展开角度。在 UV-B 辐射下,两年的 5 个生育时期中, I 91-48 的类黄酮含量显著增加,丙二醛含量无显著变化,而 II 91-81 的类黄酮含量显著降低(除 2003 成熟后期外),丙二醛含量显著增加。总体上,UV-B 辐射导致 I 91-48 叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素(a+b)含量在两年的分蘖期、伸长初期和伸长后期显著增加,而 II 91-81 叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素(a+b)含量在两年的分蘖期、伸长初期、伸长后期和成熟初期显著降低。割手密无性系 I 91-48 和 II 91-81 对 UV-B 辐射的响应具有种内差异。

关键词: UV-B 辐射;割手密;形态;生理;种内差异

中图分类号: Q945.78 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2043(2008)05-1956-07

Intraspecific Differences in Morphology and Physiology of Two Wild Sugarcane Clones to Enhanced UV-B Radiation Under Field Conditions

LI Yuan, HE Yong-mei, QIN Li, ZU Yan-qun

(College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: Effects of enhanced UV-B radiation (UV-B, 280~310 nm, 5.0 kJ·m⁻²) on morphology and physiology of two wild sugarcane (*Saccharum spontaneum* L.) clones (I 91-48 and II 91-81) and intraspecific differences of two wild sugarcane clones to enhanced UV-B radiation were investigated under field conditions for two consecutive years. In 2003 and 2004, under UV-B radiation, plant height (except ripening in 2004), tiller number in five development stages and stem diameter in tillering and initial growth of I 91-48 increased significantly, while plant height in initial growth and late growth, tiller number in initial growth, late growth, ripening and later ripening (except late growth in 2004), and stem diameter in tillering, initial growth and late growth of II 91-81 decreased significantly. UV-B radiation increased significantly shoot biomass, LAI and internode length of I 91-48, and decreased significantly that of II 91-81, whilst no effect on node number of two wild sugarcane clones. UV-B radiation decreased significantly leaf expanding angle of two wild sugarcane clones in late growth and ripening in 2003 and 2004. In five development stages of 2003 and 2004, UV-B radiation increased significantly flavonoid contents and no effect on MDA contents of I 91-48, whilst decreased significantly flavonoid contents (except late ripening of 2003) and increased significantly MDA contents of II 91-81. In general, UV-B radiation increased significantly contents of chlorophyll a, chlorophyll b and chlorophyll (a+b) in tillering, initial growth and late growth of I 91-48 in 2003 and 2004, whilst those of II 91-81 decreased significantly in tillering, initial growth, late growth and ripening in two years. Intraspecific differences existed in responses of two wild sugarcane clones to enhanced

收稿日期: 2007-10-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(30260026)

作者简介: 李 元(1963—), 男, 云南大姚人, 博士, 教授, 博导, 主要从事紫外辐射生态学和环境生态学研究。E-mail: Liyuan03@yahoo.com.cn

通讯作者: 祖艳群 E-mail: zuyanqun@yahoo.com.cn

UV-B radiation.

Keywords: UV-B radiation; wild sugarcane (*Saccharum spontaneum* L.); morphology; physiology; intraspecific difference

臭氧层衰减已成为全球三大环境问题之一,并受到了极大的关注。臭氧层衰减导致地表紫外辐射增加,对地球生态系统有着广泛、显著的影响。国内外已在紫外辐射对作物形态结构、生长发育、生理代谢、膜系统、类黄酮含量和 DNA 损伤的影响等方面作了大量的研究^[1,12,16]。夏威夷沿不同海拔(0~3 000 m)分布的多种植物对 UV-B 辐射响应的生长和生理差异^[10];副极地石楠灌丛植物,温室中野燕麦和狗尾草对 UV-B 辐射响应的差异^[20]的研究已有报道。在生理等方面,研究了 UV-B 辐射对高山植物麻花苜光合作用及暗呼吸^[1],高寒草甸植物光合速率和抗氧化系统^[3]。暖温带落叶阔叶林土庄绣线菊形态特性^[7]的影响。关于 UV-B 辐射对甘蔗的野生近缘种割手密的影响研究较少。割手密无性系对 UV-B 响应的类黄酮含量差异和分蘖数差异已报道^[8,13]。在我们的前期研究中,初步观察到 I 91-48 和 II 91-81 对 UV-B 响应具有差异。本文进一步确定这两个无性系对 UV-B 响应敏感性的差异,并初步探讨这种差异的机理。

1 材料与方法

1.1 植物材料

根据前期的 23 个割手密无性系对 UV-B 辐射响应敏感性研究,用响应指数(株高、叶面积指数、分蘖数、生物量和锤度的百分比之和)初步判定 I91-48 为耐性无性系,II 91-81 为敏感无性系(另文发表)。I91-48 采集于四川阆中,海拔 350 m,旱生;II 91-81 采集于福建韶安,海拔 60 m,旱生。实验在云南农业大学甘蔗研究所实验地进行,土壤理化性质:土壤碱解氮 150 mg·kg⁻¹、全氮 1.36 g·kg⁻¹、速效磷 36.58 mg·kg⁻¹、全磷 8.3 g·kg⁻¹、速效钾 185.89 mg·kg⁻¹、全钾 5.43 g·kg⁻¹、有机质 4.56%、pH7.28。割手密无性系用种苗繁殖,2003 年 3 月 3 日催芽,3 月 14 日栽苗,并覆土,每小区 10~15 个芽,每个小区面积为 1.96 m²,3 个重复,设处理和对照,共 12 个小区。设保护行(每个设两行保护行)。幼苗期间苗,每小区保留 10 株。5 月 1 日开始 UV-B 辐射,2003 年成熟收获地上部分。2004 年生长宿根植株,重复 2003 年的农艺措施和 UV-B 辐射处理。

1.2 紫外辐射模拟

模拟 UV-B 辐射使用 30W UV-B 灯管(光谱为

280~310 nm,上海),灯管悬于植株上方 40 cm 处,用紫外辐射仪(北京师范大学光电仪器厂)测 297 nm 波长辐射强度(以植株顶部计),每日 10:00~17:00 辐射 7 h(阴雨天除外)。割手密顶部的辐射强度为 5.0 kJ·m⁻²。相当于昆明地区(北纬 25°、海拔 1 950 m) 20% 臭氧衰减(夏至日 UV-B 辐射背景值为 10.0 kJ·m⁻²)。

1.3 测定方法

割手密的株高、分蘖数、叶展开角度、茎径、类黄酮、丙二醛和叶绿素在分蘖期(5 月 20 日)、伸长初期(7 月 2 日)、伸长后期(8 月 26 日)、成熟初期(10 月 2 日)、成熟后期(12 月 10 日)测定。叶面积、节间长、节数和总生物量在成熟后期测定。

每小区取 15 株,株高、节间长、节数和分蘖数用常规法测定。每小区取 15 片叶,用激光叶面积仪测各叶片面积,并测各叶片重量,求回归方程,根据各小区叶片重量求总叶面积。叶面积与土地面积之比为叶面积指数。每小区取 15 株,在田间用量角器测佳 2 叶(最高可见肥厚带下第二片叶)与茎之间的夹角,为叶展开角度。茎径用游标卡尺测,割手密茎秆中部直径。收集植株,称鲜重,每小区选取 15 株样品在 105 ℃下杀青 1 h,在 68 ℃下烘 68 h,测含水量,计算总生物量。

取新鲜的功能叶,去中脉,测定叶绿素含量、类黄酮含量和丙二醛含量。叶绿素含量按李合生^[9]的方法,用 721 型分光光度计在 663 nm 与 645 nm 读取 OD 值。类黄酮含量用 Mireck 等的方法,用紫外分光光度计(UV-721 型)测在 305 nm 处吸收值。MDA 含量的测定采用叶尚红^[2]的 MDA-TBA 法,用 721 型分光光度计测在 534 nm 和 600 nm 处的 OD 值。

1.4 统计分析

UV-B 辐射和对照间的参数差异显著性用 *t*-检验分析,形态指标 *n*=15,生理指标 *n*=6, *P*<0.05 或 *P*<0.01 水平。

2 结果

2.1 UV-B 辐射对株高的影响

在两年的 5 个生育时期(表 1),在 UV-B 辐射下,I91-48 株高显著增加(*P*<0.05 或 *P*<0.01)(除 2004 年成熟后期外)。UV-B 辐射导致 II91-81 株高在伸长初期和伸长后期显著降低(*P*<0.05 或 *P*<0.01)。总体

上, 两年中, 2 个割手密无性系最大的株高增加出现在伸长初期和伸长后期。

2.2 UV-B 辐射对分蘖数的影响

两年的 5 个生育时期, UV-B 辐射导致 I91-48 分蘖数显著增加($P<0.05$ 或 $P<0.01$)。UV-B 辐射导致 II 91-81 分蘖数在伸长初期、伸长后期、成熟初期和成熟后期显著降低($P<0.05$ 或 $P<0.01$)。两年中, I91-

48 的最大分蘖数出现在伸长初期和伸长后期。

2.3 UV-B 辐射对茎径的影响

在 UV-B 辐射下, I91-48 茎径在 2003 年分蘖期、伸长初期、伸长后期和 2004 年分蘖期和伸长初期显著增加($P<0.05$ 或 $P<0.01$)。II 91-81 茎径在 2003 年和 2004 年分蘖期、伸长初期和伸长后期均显著降低($P<0.05$ 或 $P<0.01$)。

表 1 连续两年 UV-B 辐射增强对 2 个割手密无性系株高、分蘖数和茎径的影响
Table1 Effects of enhanced UV-B radiation on plant height, tiller number and stem diameter of two wild sugarcane clones in two consecutive years

年份 Year	无性系 Clones	形态 Morphology character		分蘖期 Tillering	伸长初期 Initial growth	伸长后期 Late growth	成熟初期 Ripening	成熟后期 Later ripening
2003	I91-48	株高/cmPlant height	对照 Control	30.90±2.57	38.67±4.16	51.67±9.52	62.67±6.51	88.16±2.02
			处理 UV-B	44.06±2.53	77.34±6.11	109.80±8.33	113.31±8.69	120.00±10.54
			变化率(%)%change	42.58**	100.00**	112.50**	80.80**	36.12**
		分蘖数 Tillering number	对照 Control	15.00±4.04	14.00±3.5	30.00±3.00	42.00±2.89	54.00±6.00
			处理 UV-B	25.00±3.61	35.00±4.58	79.00±11.02	88.00±7.55	94.00±11.24
			变化率(%)%change	66.70*	150.00**	163.00**	109.50**	74.07*
		茎径/cmStem diameter	对照 Control	0.09±0.02	0.29±0.07	0.50±0.04	0.66±0.08	0.71±0.11
			处理 UV-B	0.19±0.01	0.47±0.07	0.62±0.07	0.73±0.09	0.77±0.02
			变化率(%)%change	111.11**	62.07*	24.00*	10.61	8.07
	II 91-81	株高/cmPlant height	对照 Control	5.52±0.45	12.17±1.04	21.26±1.80	29.01±4.32	56.00±3.79
			处理 UV-B	4.74±0.49	9.84±0.50	15.94±0.95	29.33±2.08	31.50±5.85
			变化率(%)%change	-14.10	-19.10*	-25.00**	1.11	-43.66**
		分蘖数 Tillering number	对照 Control	23.00±3.06	28.00±4.23	42.00±4.85	61.00±2.00	61.00±2.65
			处理 UV-B	22.00±2.31	17.00±2.00	25.00±3.21	34.00±2.52	46.00±8.50
			变化率(%)%change	-4.30	-39.30*	-40.50**	-44.30**	-24.59*
		茎径/cm Stem diameter	对照 Control	0.18±0.02	0.58±0.04	0.70±0.09	0.97±0.02	1.13±0.13
			处理 UV-B	0.13±0.01	0.43±0.07	0.55±0.04	0.90±0.04	0.97±0.05
			变化率(%)%change	-27.78**	-25.86*	-21.43*	-7.22	-14.16
2004	I91-48	株高/cmPlant height	对照 Control	7.45±0.45	30.40±3.11	39.20±6.84	68.80±6.04	133.58±14.57
			处理 UV-B	11.89±1.60	64.87±7.60	77.73±9.94	83.27±6.70	100.88±11.55
			变化率(%)%change	59.60**	113.38**	98.30**	21.05*	-24.48
		分蘖数 Tillering number	对照 Control	67.00±11.53	86.00±8.54	68.00±9.02	83.00±19.76	106.00±15.89
			处理 UV-B	101.00±15.01	186.00±13.58	160.00±11.72	156.00±20.65	198.00±29.94
			变化率(%)%change	50.75*	116.25**	135.29**	87.95*	86.79*
		茎径/cmStem diameter	对照 Control	0.35±0.02	0.46±0.04	0.60±0.06	0.65±0.06	0.82±0.04
			处理 UV-B	0.39±0.03	0.56±0.05	0.62±0.02	0.69±0.04	0.87±0.04
			变化率(%)%change	12.20**	17.85*	3.33	6.32	6.66
	II 91-81	株高/cmPlant height	对照 Control	15.41±1.40	63.87±2.56	83.73±3.77	129.87±5.06	133.26±7.29
			处理 UV-B	8.37±0.15	36.07±2.42	41.00±3.94	72.67±4.74	83.53±6.54
			变化率(%)%change	-45.65**	-59.15**	-51.04**	-40.05**	-37.32**
		分蘖数 Tillering number	对照 Control	71.00±9.45	89.00±9.29	99.00±11.53	118.00±11.15	117.00±20.03
			处理 UV-B	53.00±6.08	62.00±5.86	71.00±13.32	68.00±5.13	70.00±12.34
			变化率(%)%change	-25.35	-30.34*	-28.47	-42.37**	-40.17*
		茎径/cm Stem diameter	对照 Control	0.52±0.05	0.72±0.09	0.86±0.05	0.89±0.04	0.91±0.07
			处理 UV-B	0.41±0.05	0.57±0.04	0.62±0.10	0.72±0.03	0.81±0.05
			变化率(%)%change	-21.15*	-20.64*	-28.10**	-19.10**	-10.40

注: * 和 ** 指对照与 UV-B 辐射间在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平差异显著。
Note: *and** denote significant difference between the treatment of UV-B and the control at 0.05 and 0.01 level, respectively.

2.4 UV-B 辐射对生物量和叶面积指数的影响

表 2 表明,在两年的成熟后期,UV-B 辐射导致 I91-48 生物量和叶面积指数显著增加($P<0.05$ 或 $P<0.01$),而 II 91-81 生物量和叶面积指数显著降低($P<0.05$ 或 $P<0.01$)。

2.5 UV-B 辐射对节间长和节数的影响

在增强 UV-B 辐射下,两年的成熟后期,I91-48 节间长显著增加($P<0.05$ 或 $P<0.01$),II 91-81 节间长显著降低($P<0.05$ 或 $P<0.01$)。而 I91-48 和 II 91-81 的节数均无显著变化($P>0.05$)(表 2)。

2.6 UV-B 辐射对叶展开角度的影响

UV-B 辐射显著降低 I91-48 伸长后期和成熟初期,以及 II 91-81 伸长初期、伸长后期和成熟初期的叶展开角度($P<0.05$ 或 $P<0.01$)。

2.7 UV-B 辐射对类黄酮含量的影响

UV-B 辐射后,两年的 5 个生育时期中,I91-48 的类黄酮含量显著增加($P<0.05$ 或 $P<0.01$),II 91-81 的类黄酮含量显著降低(除 2003 成熟后期外)($P<$

0.05 或 $P<0.01$)(表 3)。

2.8 UV-B 辐射对丙二醛含量的影响

在 UV-B 辐射下,在两年 5 个生育时期 I91-48 丙二醛含量均无显著变化($P>0.05$),而 II 91-81 丙二醛含量均显著增加($P<0.05$ 或 $P<0.01$)(表 3)。

2.9 UV-B 辐射对叶绿素含量的影响

表 3 表明,总体上,UV-B 辐射导致 I91-48 叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素(a+b)含量在 2003 年分蘖期、伸长初期和伸长后期,以及 2004 年分蘖期、伸长初期、伸长后期和成熟初期显著增加($P<0.05$ 或 $P<0.01$),而 II 91-81 叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素(a+b)含量在两年的分蘖期、伸长初期、伸长后期和成熟初期显著降低($P<0.05$ 或 $P<0.01$)。

3 讨论

通过两年大田条件下的研究表明,总体上,两个无性系对 UV-B 辐射响应存在明显的种内差异。这种差异是植物生长、形态和生理对 UV-B 辐射响应的综

表 2 连续两年紫外辐射增强对两个割手密无性系成熟后期生物量、叶面积指数、节间长和节数的影响
Table 2 Effects of enhanced UV-B radiation on shoot biomass, LAI, internode length and node number of two wild sugarcane clones in later ripening in two consecutive years

无性系 Clones	形态 Morphology character	2003			2004		
		对照 Control	处理 UV-B	变化率/%	对照 Control	处理 UV-B	变化率/%
I91-48	生物量/kg·pot ⁻¹ Shoot biomass	0.057±0.008	0.305±0.014	435.09**	0.682±0.099	3.537±0.285	418.18**
	叶面积指数 LAI	0.34±0.02	0.95±0.04	179.71**	2.52±0.37	12.07±2.00	378.78**
	节间长/cm Internode length	4.65±0.24	5.79±0.29	24.31**	11.59±0.26	13.49±0.36	16.40**
	节数/节 Node number	6.00±1.15	6.67±0.58	11.17	7.00±1.00	8.00±1.00	14.29
II91-81	生物量/kg·pot ⁻¹ Shoot biomass	0.850±0.016	0.109±0.007	-87.18**	5.927±1.683	1.706±0.393	-71.20*
	叶面积指数 LAI	2.22±0.08	0.53±0.03	-76.13**	10.19±3.92	1.76±0.86	-82.76*
	节间长/cm Internode length	5.92±0.16	4.19±0.10	-29.11**	13.71±0.09	9.84±0.07	-29.70**
	节数/节 Node number	3.33±0.58	2.67±0.58	-20.00	11.00±1.00	10.70±0.58	-3.03

注:* 和 ** 指对照与 UV-B 辐射间在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平差异显著。
Note: *and** denote significant difference between the treatment of UV-B and the control at 0.05 and 0.01 level, respectively.

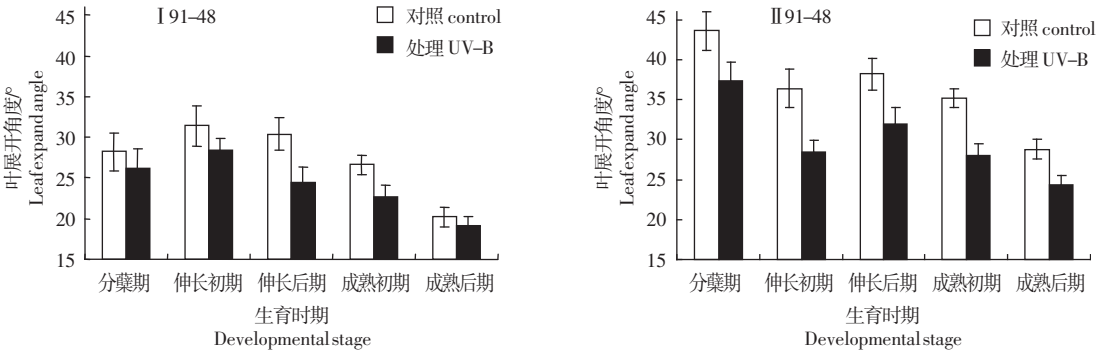


图 1 UV-B 辐射增强对 2 个割手密无性系叶展开角度的影响(2004 年)
Figure 1 Effects of enhanced UV-B radiation on leaf expanding angle of two wild sugarcane clones in 2004

表 3 连续两年 UV-B 辐射增强对 2 个割手密无性系类黄酮(305 nm)、丙二醛(μmol·L⁻¹·g⁻¹FW)和叶绿素含量(μg·mL⁻¹)的影响

Table 3 Effects of enhanced UV-B radiation on the contents of flavonoid(305 nm), MDA(μmol·L⁻¹·g⁻¹FW) and chlorophyll(μg·mL⁻¹)of two wild sugarcane clones in two consecutive years

年份 Year	无性系 Clones	生理 Physiological character		分蘖期 Tillering	伸长初期 Initial growth	伸长后期 Late growth	成熟初期 Ripening	成熟后期 Later ripening
2003	I91-48	类黄酮 Flavonoid	对照 Control	0.38±0.01	0.26±0.01	0.18±0.01	0.24±0.01	0.22±0.01
			处理 UV-B	0.45±0.02	0.34±0.01	0.22±0.02	0.31±0.02	0.28±0.01
			变化率(%)%change	18.42*	31.01**	22.47*	29.16**	27.27**
		丙二醛 MDA	对照 Control	15.15±1.12	16.81±1.31	13.56±1.20	10.95±1.51	8.45±1.06
			处理 UV-B	13.47±0.58	15.26±1.05	13.31±0.70	10.66±0.85	8.35±0.69
			变化率(%)%change	-11.09	-9.22	-1.84	-2.65	-1.18
		叶绿素 a Chla	对照 Control	3.71±0.02	3.95±0.14	3.02±0.06	3.83±0.04	3.51±0.01
			处理 UV-B	4.52±0.35	4.55±0.22	3.71±0.17	3.89±0.58	3.61±0.63
			变化率(%)%change	21.83*	15.1*	22.85**	1.57	2.85
		叶绿素 b Chl b	对照 Control	1.38±0.03	3.41±0.12	3.13±0.04	1.42±0.11	1.35±0.06
			处理 UV-B	1.72±0.17	4.09±0.36	4.56±0.47	1.62±0.23	1.59±0.32
			变化率(%)%change	24.63*	19.94*	45.69**	14.09	17.78
		叶绿素(a+b) Chl(a+b)	对照 Control	5.09±0.26	7.36±0.29	6.15±0.06	5.25±0.04	4.86±0.07
			处理 UV-B	6.24±0.38	8.64±0.43	8.27±0.43	5.51±0.43	5.2±0.84
			变化率(%)%change	22.59*	17.39*	34.47**	4.95	7.00
	II 91-81	类黄酮 Flavonoid	对照 Control	0.19±0.01	0.29±0.02	0.12±0.01	0.21±0.02	0.21±0.02
			处理 UV-B	0.15±0.01	0.23±0.01	0.09±0.01	0.17±0.01	0.19±0.01
			变化率(%)%change	-21.05*	-20.69**	-25.00**	-19.05*	-9.52
		丙二醛 MDA	对照 Control	10.64±.60	11.53±0.56	11.13±0.11	6.95±0.12	7.65±0.36
			处理 UV-B	12.27±0.38	14.14±1.08	14.14±0.17	8.46±0.18	8.96±0.23
			变化率(%)%change	15.32*	22.64*	27.04**	21.73**	17.12**
		叶绿素 a Chl a	对照 Control	2.58±0.26	2.73±0.12	2.58±.06	2.72±0.05	2.35±0.07
			处理 UV-B	2.13±0.07	2.12±0.23	1.67±0.09	1.88±0.04	1.78±0.03
			变化率(%)%change	-17.44*	-22.34*	-35.27**	-30.88**	-24.25**
		叶绿素 b Chl b	对照 Control	1.24±0.07	2.29±0.06	2.22±0.12	1.18±0.11	1.05±0.07
			处理 UV-B	1.01±0.06	1.86±0.17	1.83±0.09	0.84±0.03	0.94±0.06
			变化率(%)%change	-18.55*	-18.78*	-17.57*	-28.81**	-10.47
		叶绿素(a+b) Chl(a+b)	对照 Control	3.82±0.36	5.02±0.47	4.80±0.52	3.90±0.14	3.40±0.39
			处理 UV-B	3.14±0.05	3.98±0.51	3.50±0.31	2.72±0.22	2.92±0.18
			变化率(%)%change	-17.80*	-20.72	-27.08*	-30.26**	-14.11
2004	I91-48	类黄酮 Flavonoid	对照 Control	1.08±0.12	2.73±0.20	3.39±0.26	2.01±0.08	1.30±0.12
			处理 UV-B	1.64±0.04	4.25±0.43	4.45±0.27	2.74±0.13	1.77±0.07
			变化率(%)%change	51.85**	55.67**	31.06**	36.31**	36.15**
		丙二醛 MDA	对照 Control	5.4±0.34	6.27±0.48	4.86±0.39	5.16±0.49	5.62±0.34
			处理 UV-B	4.62±0.37	5.74±0.35	4.45±0.36	4.63±0.32	5.44±0.45
			变化率(%)%change	-14.44	-8.45	-8.44	-10.27	-3.2
		叶绿素 a Chla	对照 Control	2.55±0.21	2.60±0.18	3.21±0.08	3.01±0.18	3.22±0.41
			处理 UV-B	3.40±0.09	3.31±0.33	3.73±0.26	3.95±0.41	3.63±0.37
			变化率(%)%change	33.33**	27.31*	16.20*	31.23**	12.73
		叶绿素 b Chl b	对照 Control	0.84±0.08	1.17±0.13	1.37±0.05	1.53±0.09	1.77±0.09
			处理 UV-B	1.00±0.02	1.45±0.05	1.81±0.09	2.06±0.11	1.88±0.24
			变化率(%)%change	19.05*	23.93*	32.12**	34.64**	6.21
		叶绿素(a+b) Chl(a+b)	对照 Control	3.39±0.27	3.77±0.09	4.58±0.05	4.54±0.15	4.99±0.50
			处理 UV-B	4.40±0.11	4.76±0.37	5.54±0.23	6.01±0.52	5.51±0.60
			变化率(%)%change	29.79**	26.26*	20.96**	32.38**	10.42

表 3 连续两年 UV-B 辐射增强对 2 个割手密无性系类黄酮(305 nm)、丙二醛(μmol·L⁻¹·g⁻¹FW)和叶绿素含量(μg·mL⁻¹)的影响(续)

表)								
年份 Year	无性系 Clones	生理 Physiological character		分蘖期 Tillering	伸长初期 Initial growth	伸长后期 Late growth	成熟初期 Ripening	成熟后期 Later ripening
	Ⅱ 91-81	类黄酮 Flavonoid	对照 Control	3.02±0.09	1.49±0.05	2.37±0.06	1.34±0.10	2.65±0.05
			处理 UV-B	2.15±0.11	1.12±0.11	1.78±0.10	1.08±0.06	1.71±0.17
			变化率(%)%change	-28.81**	-24.83**	-24.89**	-19.43*	-35.47**
	丙二醛 MDA		对照 Control	4.31±0.36	4.25±0.03	2.67±0.19	3.03±0.07	4.14±0.22
			处理 UV-B	5.29±0.21	5.10±0.10	3.11±0.11	3.64±0.04	4.81±0.20
			变化率(%)%change	22.73*	20.00**	16.48*	20.13**	16.18*
	叶绿素 a Chl a		对照 Control	3.70±0.05	3.31±0.20	3.93±0.33	3.95±0.07	3.63±0.49
			处理 UV-B	2.55±0.07	2.60±0.20	3.20±0.20	3.01±0.16	3.22±0.11
			变化率(%)%change	-31.08**	-21.45*	-18.57*	-23.80*	-11.29
	叶绿素 bChl b		对照 Control	1.30±0.02	1.45±0.02	1.81±0.04	2.06±0.02	1.88±0.03
			处理 UV-B	0.84±0.04	1.17±0.09	1.37±0.10	1.53±0.10	1.77±0.05
			变化率(%)%change	-35.38**	-19.31*	-24.31*	-25.73**	-5.60
	叶绿素(a+b) Chl(a+b)		对照 Control	5.00±0.06	4.76±0.24	5.74±0.36	6.01±0.55	5.51±0.48
			处理 UV-B	3.39±0.12	3.77±0.48	4.57±0.35	4.54±0.29	4.99±0.13
			变化率(%)%change	-32.20**	-20.80*	-20.38*	-24.46*	-9.44

合结果。在水稻^[18]、小麦^[15]、大豆^[14]和黄瓜^[9]中也已观察到种内差异。增强 UV-B 辐射影响割手密无性系的节间长,导致株高的差异;影响分蘖数和叶面积指数,引起生物量差异^[8,15]。I91-48 的叶展开角度较Ⅱ 91-81 的小,可能单位面积上接受较少的 UV-B 辐射剂量,受伤害较轻,也是耐性较强的原因之一。

UV-B 辐射对植物形态的影响是多方面的,即光形态建成,包括分蘖(分枝)、株高、叶面积和叶面积指数、叶展开角度等参数。已有大量实验表明,紫外辐射增强导致植株矮化、株型缩小、叶片变短变厚、叶面积(指数)减少、根冠比改变,影响程度因品种和植物类型不同而异。UV-B 辐射后,割手密 I91-48 的株高、分蘖数、叶面积、生物量等呈上升的趋势,而割手密Ⅱ 91-81 株高、分蘖数、叶面积、生物量等呈下降的趋势。Ⅱ 91-81 株高降低主要是节间缩短而不是节数减少,说明 UV-B 辐射并不是简单地延缓植物生长速度,株高的变化与某些内在生长特性有关,诸如植物激素代谢改变和细胞分裂减慢。UV-B 辐射增强强烈影响植物群体结构,缩小单株叶面积,降低群体叶面积指数,叶面积垂直分布发生变化中群体叶面积指数降低是 UV-B 辐射增强抑制叶片扩大。分蘖数的增减是通过改变植物体内源激素含量及其平衡,进而引发生理上的效应来实现的。过量的紫外辐射使大多数植物分蘖数减少。增强 UV-B 辐射影响割手密无性系的叶面积指数和分蘖数,继而影响生物量。UV-B 辐射对不同品种的叶面积和分蘖数的影响不同。UV-B 辐射对分蘖数的刺激作用认为是植物对 UV-B 辐射的

普遍反应。增强的 UV-B 还可能使植物体内产生自由基,伤害植物光系统Ⅱ,使净光合速率降低,引起植株光合能力下降,从而降低总生物量和产量。

植物叶片表面类黄酮的积累,是植物对 UV-B 辐射的适应和保护措施^[9],防止 UV-B 辐射进入植物叶肉内产生伤害^[17]。割手密无性系类黄酮积累与其对 UV-B 敏感性有关^[13]。在 57 种野生植物叶片中,阳性植物比阴性植物富含较多的类黄酮,是植物对较强 UV-B 的适应^[4]。长期的 UV-B 辐射下,Ⅱ 91-81 的类黄酮含量增加降低,这可能是 UV-B 对植物细胞造成的不可逆伤害有关,这种伤害可以导致细胞类黄酮降解加速而合成困难。在董新纯等^[6]的 UV-B 条件下,类黄酮与苦荞抗氧化酶的关系的研究中也得到了相似的结果。MDA 是膜脂过氧化的重要产物之一,其浓度表示膜的过氧化程度和膜系统伤害程度,常被作为逆境生理指标。I91-48 的丙二醛(MDA)含量下降,可能是由于其他抗氧化物质的作用减轻了膜脂过氧化程度,降低了 UV-B 的伤害。Ⅱ 91-81 的丙二醛(MDA)含量增加,是由于长期的 UV-B 辐射下,抗氧化酶活性降低,直接影响细胞内活性氧分子的清除速度,从而破坏了活性氧产生和清除的平衡,造成了一定的氧化伤害。UV-B 辐射对两个割手密无性系叶绿素含量的不同影响,可能与种的特异性有关。在 3 种植物中叶绿素含量对长期增加 UV-B 辐射的响应差异也已被报道^[3]。

在 UV-B 辐射下,I91-48 和Ⅱ 91-81 的形态和生理对 UV-B 的响应具有种内差异,I91-48 采集地的

海拔高于Ⅱ91-81,高 UV-B 辐射背景可能使其产生了某种对 UV-B 的适应机制,高海拔的植物本身具有吸收相对较高含量紫外吸收物质的能力,从而能很好地抵御 UV-B 辐射进入叶肉组织,表现出更具耐性。种内差异与植物的遗传特性有关,可通过对耐性无性系和敏感无性系的分子机理研究,从分子水平上探讨引起种内差异的原因(另文发表),为抗 UV-B 辐射甘蔗品种的培育奠定理论和技术基础。

参考文献:

[1] 岳向国,韩发,师生波,等.不同强度的 UV-B 辐射对高山植物麻花苣光合作用及暗呼吸的影响[J].西北植物学报,2005,25(2):231-235.
YUE Xiang-guo, HAN Fa, SHI Sheng-bo. Effects of UV-B radiation of different intensity on the photosynthesis and the dark respiration of alpine plant gentiana straminea[J]. *Acta Bot Boreal-occident Sin*, 2005, 25(2):231-235.

[2] 叶尚红.植物生理生化实验教程[M].昆明:云南科技出版社,2004.150-152.
YE Shang-hong. Plant physiology and biochemistry experimental course[M]. Kunming:Yunnan Science and Technology Press, 2004. 150-152.

[3] 吴兵,韩发,岳向国.长期增强 UV-B 辐射对高寒草甸植物光合速率和抗氧化系统的影响[J].西北植物学报,2005,25(10):2010-2016.
WU Bing, HAN Fa, YUE Xiang-guo. Effects of long-term intensified UV-B radiation on the photosynthetic rates and antioxidative systems of three plants in alpine meadows[J]. *Acta Bot Borela-occident Sin*, 2005, 25(10):2010-2016.

[4] 林植芳,林桂珠,彭长连,等.亚热带植物叶片 UV-B 吸收化合物的积累[J].生态学报,1998,18(1):90-95.
LIN Zhi-fang, LIN Gui-zhu, PENG Chan-glian. The accumulation of UV-B absorbing compounds in leaves of subtropical plants[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, 18(1):90-95.

[5] 李合生.植物生理学实验[M].北京:高等教育出版,2003.
LI He-sheng. Plant physiology experiments[M]. Beijing:Higher Education Press, 2003.

[6] 董新纯,赵世杰,郭珊珊.增强 UV-B 条件下类黄酮与苦荞逆境伤害和抗氧化酶的关系术[J].山东农业大学学报,2006,37(2):157-162.
DONG Xin-chun, ZHAO Shi-jie, GUO Shan-shan. Role of flavonoids on stress injury and antioxydative enzymes in fagopyrum tataricum seedlings under enhanced UV-B radiation[J]. *Journal of Shandong Agricultural University(Natural Science)*, 2006, 37(2):157-162.

[7] 陈兰,张守仁.增强 UV-B 辐射对暖温带落叶阔叶林土庄绣线菊水分利用效率、气孔导度、叶绿素含量及形态特性的影响[J].植物生态学报,2006,30(1):47-56.
CHEN Lan, ZHANG Shou-ren. Effects of enhanced UV-B radiation

on water use efficiency, stomatal conductance, leaf nitrogen content and morphological characteristics of spiraea pubescens in a warm-temperate deciduous broad forest[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(1):47-56.

[8] Zu Y Q, Qin L, Li Y. Intraspecific responses in tillering numbers of 30 sugarcane(*Saccharum spontaneum* L.)clones to enhanced ultraviolet-B radiation under field conditions[C]. Bioresource and Biotechnology, Proceedings of International Symposium, Kunming, China, 2004. 208-216.

[9] Yao Y A, Li Y, Yang Y Q. Effect of seed pretreatment by magnetic field on the sensitivity of cucumber(*Cucumis sativus*) seedlings to ultraviolet B radiation[J]. *Environ Exp Bot*, 2005, 54:286-294.

[10] Sullivan J H, Teramura A H, Ziska L H. Variation in UV-B sensitivity in plants from a 3000 m elevational gradient in Hawaii[J]. *American Journal of Botany*,1992, 79:737-743.

[11] Schmitz R, Weissenböck G. Contribution of phenolic compounds to the UV-B screening capacity of developing barley primary leaves in relation to DNA damage and repair under elevated UV-B levels [J]. *Phytochem*, 2003, 64:243-255.

[12] Murakami T, Matsuba S, Funatsuki H. Over-expression of a small heat shock protein, sHSP17.7, confers both heat tolerance and UV-B resistance to rice plants[J]. *Molecular Breeding*, 2004, 13:165-175.

[13] Li Y, Zu Y Q, He Y M, et al. Intraspecific responses in flavonoid contents of 28 wild sugarcane(*Saccharum spontaneum* L.)clones to enhanced ultraviolet-B radiation under field conditions for two consecutive years[J]. *American J Plant Physiology*, 2006, 1:151-159.

[14] Li Y, Zu Y Q, Chen J J. Intraspecific differences in crop growth and yield of 20 soybean cultivars to enhanced ultraviolet-B radiation under field conditions[J]. *Field Crops Research*, 2002, 78:1-8.

[15] Li Y, Zu Y Q, Chen H Y. Intraspecific responses in crop growth and yield of 20 wheat cultivars to enhanced ultraviolet-B radiation under field conditions[J]. *Field Crops Research*, 2000, 67:25-33.

[16] Kumagai T, Hidema J, Kang H S. Effects of supplemental UV-B radiation on the growth and yield of two cultivars of Japanese lowland rice (*Oryzasativa* L.) under the field in a cool rice-growing region of Japan[J]. *Agri Ecosyst Environ*, 2001, 83:201-208.

[17] Kakani V G, Reddy K R, Zhao D. Field crop response to ultraviolet-B radiation: a review[J]. *Agri Forest Meteorology*, 2003, 120:191-218.

[18] Dai Q J, Peng S B. Intraspecific responses of 188 rice cultivars to enhanced UV-B radiation[J]. *Environ Exp Bot*, 1994, 34:433-442.

[19] Brenda W S. Biosynthesis of flavonoids and effects of stress [J]. *Cuttent Opinion in Plant Biology*, 2002, 5:218-22.

[20] Barns P W, Beyschlag W, Ryel R. Plant competition for light analyzed with a multispecies canopy model Ⅲ. Influence of canopy structure in mixtures and monocultures of wheat and wild oat [J]. *Oecologia*, 1990, 82:560-556.

鸣谢:陈建军,陈海燕,李富生,何丽莲,杨清辉在实验过程中给予大力的支持和帮助,特此致谢!