

增强 UV-B 辐射和接种稻瘟病菌 对 2 个水稻品种幼苗叶片 3 个生理指标的影响

高潇潇, 高召华, 陈建军, 祖艳群, 李 元^①

(云南农业大学资源与环境学院, 云南 昆明 650201)

摘要: 通过盆栽实验研究了单一增强 UV-B 辐射(2.5、5.0 和 7.5 $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)以及增强 UV-B 辐射和稻瘟病菌 (*Magnaporthe grisea*, 菌株 Y98-16T 和 Y99-63C) 侵染复合胁迫对水稻 (*Oryza sativa* L.) 品种‘黄壳糯’ (‘Huangkenuo’) 和‘合系 41’ (‘Hexi-41’) 幼苗叶片相对电导率、MDA 含量和 SOD 活性 3 个生理指标的影响。结果表明: 在低剂量(2.5 和 5.0 $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) 单一 UV-B 辐射条件下, 2 个水稻品种幼苗叶片的 3 个生理指标均较对照(自然光)有所降低; 而在高剂量(7.5 $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) 单一 UV-B 辐射条件下, 2 个水稻品种幼苗叶片的 3 个生理指标均较对照有所增加。与对照(仅接种稻瘟病菌)相比, 经低剂量(2.5 和 5.0 $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) UV-B 辐射后再接种稻瘟病菌, ‘黄壳糯’ 幼苗叶片的 3 个生理指标总体上均降低; 而经高剂量(7.5 $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) UV-B 辐射后再接种稻瘟病菌, ‘黄壳糯’ 幼苗叶片的 3 个生理指标均有所增加。经不同剂量 UV-B 辐射后再接种稻瘟病菌, ‘合系 41’ 幼苗叶片的 3 个生理指标总体上均有所增加, 且 2 个水稻品种幼苗叶片的相对电导率与 SOD 活性均有显著的正相关性($P < 0.05$)。与对照(仅接种稻瘟病菌)相比, 接种稻瘟病菌后再经不同剂量 UV-B 辐射处理, ‘黄壳糯’ 幼苗叶片的 3 个生理指标均有所增加; 而‘合系 41’ 幼苗叶片的 3 个生理指标变化各异。接种稻瘟病菌菌株 Y98-16T 后再用 UV-B 辐射处理, 2 个水稻品种幼苗叶片的 3 个生理指标间均有显著或极显著的正相关性($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$); 而接种稻瘟病菌菌株 Y99-63C 后再用 UV-B 辐射处理, 2 个水稻品种幼苗叶片的 3 个生理指标间无明显的相关性。研究结果显示, 在增强 UV-B 辐射和稻瘟病菌侵染复合胁迫条件下, 因 2 个胁迫因子的作用顺序不同、稻瘟病菌菌株不同、UV-B 辐射量不同以及水稻品种的差异, 水稻幼苗叶片的细胞膜透性、MDA 含量和 SOD 活性呈现出不同的变化趋势。

关键词: 水稻; UV-B 辐射; 稻瘟病菌; 相对电导率; 丙二醛; 超氧化物歧化酶

中图分类号: S435.111.2; S435.111.4⁺1 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2010)01-0056-07

Effects of enhanced UV-B radiation and inoculated *Magnaporthe grisea* on three physiological indexes in seedling leaf of two cultivars of *Oryza sativa* GAO Xiao-xiao, GAO Zhao-hua, CHEN Jian-jun, ZU Yan-qun, LI Yuan^① (College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2010, 19(1): 56-62

Abstract: Effects of single stress of enhanced UV-B radiation (2.5, 5.0 and 7.5 $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) and combined stress of enhanced UV-B radiation and inoculated *Magnaporthe grisea* (strain Y98-16T and Y99-63C) on three physiological indexes (relative conductivity, MDA content and SOD activity) in seedling leaf of two rice (*Oryza sativa* L.) cultivars (‘Huangkenuo’ and ‘Hexi-41’) were studied by pot experiments. The results show that the three physiological indexes of seedling leaf of the two cultivars in low dose (2.5 and 5.0 $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) of single stress of enhanced UV-B radiation all decrease compared with the control (natural light), while those all increase in high dose (7.5 $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) of same UV-B stress. Compared with the control (only inoculated *M. grisea*), the three physiological indexes in seedling leaf of ‘Huangkenuo’ decrease generally in combined stress of first enhanced UV-B

收稿日期: 2009-04-21

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(20060676002)

作者简介: 高潇潇(1983—), 女, 湖南长沙人, 硕士研究生, 主要从事紫外辐射生态学方面的研究。

^①通信作者 E-mail: liyuan03@yahoo.com.cn

radiation with low dose (2.5 and $5.0 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) and then inoculated *M. grisea*, while those all increase in the same stress but treated with high dose ($7.5 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$). The three physiological indexes of 'Hexi-41' seedling increase generally in combined stress of first enhanced UV-B radiation with different doses and then inoculated *M. grisea*, and there are significant positive correlations between relative conductivity and SOD activity of the two cultivars ($P < 0.05$). In combined stress of first inoculated *M. grisea* and then enhanced UV-B radiation with different doses, the three physiological indexes in seedling leaf of 'Huangkenuo' all increase compared with the control (only inoculated *M. grisea*), while those of 'Hexi-41' seedling appear various changing trends. There are significant and extremely significant positive correlations among the three physiological indexes in seedling leaf of the two cultivars ($P < 0.05$ or $P < 0.01$) in combined stress of first inoculated *M. grisea* strain Y98-16T and then enhanced UV-B radiation, while there is no obvious correlation among those indexes in the same stress with *M. grisea* strain Y99-63C. It is suggested that because of different treating orders of the two stress factors, different strains of *M. grisea*, different radiation doses of UV-B and different rice cultivars, the relative conductivity, MDA content and SOD activity in leaf of rice seedling could appear various changing trends under the combined stress of inoculated *M. grisea* and enhanced UV-B radiation.

Key words: *Oryza sativa* L.; UV-B radiation; *Magnaporthe grisea*; relative conductivity; MDA; SOD

自 20 世纪 70 年代以来,臭氧层的衰减和 UV-B 辐射的增加已成为人类面临的十分突出的环境问题之一。目前,研究人员发现,UV-B 辐射对植物的生长、产量和抗氧化系统的影响较大^[1-5],且植物的抗逆性与生物膜结构功能关系密切,UV-B 辐射使植物细胞质膜的透性发生变化^[2],其中的主要原因之一是 UV-B 辐射改变了植物细胞质膜的酶系统^[3],而超氧化物歧化酶(SOD)则是植物清除自由基和过氧化氢的抗氧化酶系统中的重要组成部分^[4]。郭秀林等^[6]和 Dai 等^[7]对水稻(*Oryza sativa* L.)抗 UV-B 辐射的研究结果表明,在 UV-B 胁迫条件下,SOD 的活性和丙二醛(MDA)含量发生了变化,从而导致水稻体内的 O_2^- 含量增加和膜质过氧化程度加剧,进而影响水稻的膜系统。

稻瘟病(*Magnaporthe grisea*)是广泛发生于全球各稻区的重要水稻病害之一,受稻瘟病菌侵染后,水稻体内的抗氧化酶以及膜质过氧化产物,包括 MDA 含量均会发生相应的变化,以抵御病害的发生^[8]。目前,对 UV-B 辐射和稻瘟病菌复合胁迫条件下水稻抗氧化酶系统变化的研究国内鲜有报道。

作者以糯稻品种‘黄壳糯’(‘Huangkenuo’)和粳稻品种‘合系 41’(‘Hexi-41’)为实验材料,研究了增强 UV-B 辐射与稻瘟病菌双重胁迫对水稻幼苗叶片细胞膜透性、SOD 活性及 MDA 含量的影响,并探讨了在 UV-B 辐射增强的条件下,感染稻瘟病菌的水稻幼苗生理特征的变化状况,为开展增强 UV-B 辐射和稻瘟病菌对水稻影响的评估提供实验依据。

1 材料和方法

1.1 材料

实验使用的糯稻品种‘黄壳糯’(*Oryza sativa* ‘Huangkenuo’)和粳稻品种‘合系 41’(*Oryza sativa* ‘Hexi-41’)的种子均购自市场;供试稻瘟病菌菌株 Y98-16T 和 Y99-63C 由云南省植物病理重点实验室提供,这 2 个菌株的致病基因明确、致病性稳定。实验用 40 W UV-B 灯管(波长 280 ~ 320 nm)由上海顾村仪器厂生产,UV-B 辐射测定仪由北京师范大学光电仪器厂生产。

1.2 方法

1.2.1 水稻幼苗的培养 将供试水稻种子用稀释 1 000 倍的多菌灵溶液浸泡消毒 20 min 后,置于托盘中,覆盖 2 层用无菌水浸湿的纱布,置于 26 °C 培养箱中暗培养 4 ~ 6 d,待种子露白后,将 25 粒种子播种在装有 5 kg 栽培土的栽培盆(直径 25 cm,高 10 cm)中。待幼苗长至 3 叶龄时进行间苗,每盆留下长势一致的 10 株苗,待用。

1.2.2 稻瘟病菌的培养 将稻瘟病菌菌株 Y98-16T 和 Y99-63C 分别用酵母培养基于 26 °C 条件下纯化培养 7 d;用打孔器切取直径为 2 mm 的菌丝块,移至产孢培养基(含 $30 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 燕麦片、体积分数 15% 的鲜番茄榨汁和 $20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 琼脂)中,置于 26 °C、光照时间 $10 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$ 条件下培养 8 ~ 10 d,于显微镜下观察稻瘟病菌产孢情况,并用血球计数板将孢子悬浮液密

度调至约 $3 \times 10^5 \text{ mL}^{-1}$, 作为苗期喷雾接种体。

1.2.3 胁迫处理方法 实验设3组胁迫处理, 每处理均设3次重复。

1) 单一增强 UV-B 辐射: 采用 40 W UV-B 灯管 (波长 280 ~ 320 nm) 对水稻幼苗进行增强 UV-B 辐射处理, 并用 UV-B 辐射测定仪测定辐射强度; 辐射量为 2.5、5.0 和 7.5 $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 每天辐照 7 h (上午 10:00 至下午 17:00), 连续辐照至第 14 天取样测定各项指标, 对照则为自然光下同期培养的水稻幼苗。

2) 增强 UV-B 辐射后接种稻瘟病菌: 按前述方法和辐射量对水稻幼苗进行增强 UV-B 辐射, 每天辐照 7 h (上午 10:00 至下午 17:00), 连续辐照 7 d, 第 8 天时分别在 2 个水稻品种幼苗的叶片上接种稻瘟病菌菌株 Y98-16T 和 Y99-63C, 接种时每 25 株幼苗喷洒孢子悬浮液 100 mL, 接种后的水稻幼苗于自然光下在潮湿恒温 (约 26 $^{\circ}\text{C}$) 的温室中培养至第 14 天取样测定各项指标, 对照为按同剂量接种稻瘟病菌菌株 Y98-16T 或 Y99-63C 并于相同条件下培养 14 d 的水稻幼苗。

3) 接种稻瘟病菌后再增强 UV-B 辐射: 按前述剂量分别在水稻幼苗叶片上接种稻瘟病菌菌株 Y98-16T 和 Y99-63C, 然后置于自然光下在潮湿恒温 (约 26 $^{\circ}\text{C}$) 的温室中培养, 第 8 天时再按前述方法和辐射量进行增强 UV-B 辐射处理, 每天辐照 7 h (上午 10:00 至下午 17:00), 连续辐照至第 14 天时取样测定各项指标, 对照为按同剂量接种稻瘟病菌菌株 Y98-16T 或 Y99-63C 并于自然光下培养 14 d 的水稻幼苗。

1.2.4 生理指标测定方法 分别在上述各处理的第 14 天在各处理组的水稻幼苗上取同向的第 2 位叶

片, 去除中部叶脉, 参照文献 [9] 的方法测定水稻幼苗叶片的相对电导率、超氧化物歧化酶 (SOD) 活性和丙二醛 (MDA) 含量。

1.3 数据统计分析

采用 LSD 方法对实验数据进行差异显著性分析, 并采用 SPSS 统计分析软件对实验数据进行相关性分析。

2 结果和分析

2.1 单一增强 UV-B 辐射后水稻幼苗叶片相对电导率、MDA 含量和 SOD 活性的变化

采用单一增强 UV-B 辐射后, 糯稻品种 ‘黄壳糯’ 和粳稻品种 ‘合系 41’ 幼苗叶片的相对电导率、MDA 含量和 SOD 活性见表 1。

由表 1 可见, 用 2.5 和 5.0 $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ UV-B 辐射 14 d 后, 水稻品种 ‘黄壳糯’ 和 ‘合系 41’ 幼苗叶片的 3 个生理指标均降低, 且都显著低于对照 ($P < 0.05$)。其中, 用 2.5 $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ UV-B 辐射后, ‘黄壳糯’ 幼苗叶片的相对电导率、MDA 含量和 SOD 活性降幅均最大, 分别较对照降低了 17.5%、20.6% 和 33.8%; 用 5.0 $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ UV-B 辐射后, ‘合系 41’ 幼苗叶片的相对电导率、MDA 含量和 SOD 活性降幅均最大, 分别较对照降低了 54.2%、26.2% 和 46.6%。用 7.5 $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ UV-B 辐射后, 除 ‘合系 41’ 幼苗叶片的相对电导率与对照无显著差异外, 2 个水稻品种幼苗叶片的相对电导率、MDA 含量和 SOD 活性均显著提高 ($P < 0.05$), 其中, ‘黄壳糯’ 幼苗叶片的相对电导率、MDA 含量和 SOD 活性分别较对照增加了 57.6%、50.1% 和 55.0%; ‘合系 41’ 幼苗叶片的 MDA 含量和 SOD 活性分别较对照增加了

表 1 不同 UV-B 辐射量对 2 个水稻品种幼苗叶片相对电导率、MDA 含量和 SOD 活性的影响¹⁾

Table 1 Effects of different radiation doses of UV-B on relative conductivity, MDA content and SOD activity in seedling leaf of two cultivars of *Oryza sativa* L.¹⁾

辐射 量/ $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ Radiation dose	‘黄壳糯’ ‘Huangkenuo’			‘合系 41’ ‘Hexi-41’		
	相对电导率/% Relative conductivity	MDA 含 量/ $\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1}$ MDA content	SOD 活 性/ $\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ SOD activity	相对电导率/% Relative conductivity	MDA 含 量/ $\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1}$ MDA content	SOD 活 性/ $\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ SOD activity
0.0 (CK)	12.66b	2.633b	725.67b	14.40a	2.456b	703.67b
2.5	10.44c	2.090d	480.00d	8.81b	2.069c	554.00c
5.0	10.90bc	2.333c	633.67c	6.59c	1.812d	376.00d
7.5	19.95a	3.952a	1124.67a	13.64a	2.855a	762.33a

¹⁾ 表中数据均为 3 次重复的平均值 All datums in the table are the average of three replications; 同列中不同的小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) The different small letters in same column indicate the significant difference ($P < 0.05$).

16.2% 和 8.4%。

2.2 增强 UV-B 辐射后接种稻瘟病菌水稻幼苗叶片相对电导率、MDA 含量和 SOD 活性的变化

增强 UV-B 辐射后再分别接种稻瘟病菌菌株 Y98-16T 和 Y99-63C, 2 个水稻品种幼苗叶片的相对电导率、MDA 含量和 SOD 活性变化见表 2。

由表 2 数据可见, 与对照(仅接种稻瘟病菌菌株 Y98-16T)相比, 经不同剂量 UV-B 辐射后再接种稻瘟病菌菌株 Y98-16T 的 2 个水稻品种幼苗叶片的相对电导率、MDA 含量和 SOD 活性的变化趋势各不相同。用 $7.5 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ UV-B 辐射后再接种稻瘟病菌 Y98-16T 的‘黄壳糯’幼苗叶片的相对电导率显著增加 ($P < 0.05$), 且较对照增加了 56.0%; 而其他处理组‘黄壳糯’幼苗叶片的相对电导率、MDA 含量和 SOD 活性均较对照有所降低。用 $2.5 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ UV-B 辐射后再接种稻瘟病菌菌株 Y98-16T 的‘合系 41’幼苗叶片的 MDA 含量较对照降低了 7.6%, 其他处理组‘合系 41’幼苗叶片的 3 个生理指标均较对照有所增加, 且用 5.0 和 $7.5 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ UV-B 辐射后再接种稻瘟病菌菌株 Y98-16T 的‘合系 41’幼苗叶片的相对电导率、MDA 含量和 SOD 活性均与对照差异显著 ($P < 0.05$)。

由表 2 结果还可见, 与对照(仅接种稻瘟病菌菌株 Y99-63C)相比, 用 2.5 和 $5.0 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ UV-B 辐射后再接种稻瘟病菌菌株 Y99-63C 的‘黄壳糯’幼苗叶片的 3 个生理指标基本上显著降低 ($P < 0.05$), 其中用 $2.5 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ UV-B 辐射后再接种稻瘟病

菌菌株 Y99-63C 的‘黄壳糯’幼苗叶片的相对电导率和 MDA 含量分别较对照降低了 74.0% 和 42.7%, 用 $5.0 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ UV-B 辐射后再接种稻瘟病菌菌株 Y99-63C 的‘黄壳糯’幼苗叶片的 SOD 活性则较对照降低了 48.5%; 而用 $7.5 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ UV-B 辐射后再接种稻瘟病菌菌株 Y99-63C 的‘黄壳糯’幼苗叶片的相对电导率、MDA 含量和 SOD 活性分别较对照增加了 22.9%、57.7% 和 8.5%。与对照(仅接种稻瘟病菌菌株 Y99-63C)相比, 除用 5.0 或 $7.5 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ UV-B 辐射后再接种稻瘟病菌菌株 Y99-63C 的‘合系 41’幼苗叶片的相对电导率较对照有所增加外, 其他处理组‘合系 41’幼苗叶片的相对电导率以及各处理组的 MDA 含量和 SOD 活性均较对照有所降低, 其中用 $2.5 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ UV-B 辐射后再接种稻瘟病菌菌株 Y98-16T 的‘合系 41’幼苗叶片的相对电导率、MDA 含量和 SOD 活性均较对照显著下降 ($P < 0.05$), 最大降幅分别为 30.0%、54.7% 和 46.7%。

总体上看, 经 UV-B 辐射后再接种稻瘟病菌, ‘黄壳糯’幼苗叶片的相对电导率、MDA 含量和 SOD 活性随 UV-B 辐射量的增加呈现先降低后升高的趋势。而‘合系 41’幼苗叶片的这 3 个生理指标的变化趋势则因接种菌株的不同而有一定的差异, 其中, 用 UV-B 辐射后再接种稻瘟病菌菌株 Y98-16T 的各处理组‘合系 41’幼苗叶片 3 个生理指标随 UV-B 辐射量的增加呈现逐渐升高的趋势, 用 UV-B 辐射后再接种稻瘟病菌菌株 Y99-63C 的各处理组‘合系 41’幼苗叶片 3 个生理指标随辐射量的增加呈现降低—升高—降低

表 2 复合胁迫(增强 UV-B 辐射后再接种稻瘟病菌)对 2 个水稻品种幼苗叶片相对电导率、MDA 含量和 SOD 活性的影响¹⁾

Table 2 Effects of combined stress (first enhanced UV-B radiation and then inoculated *Magnaporthe grisea*) on relative conductivity, MDA content and SOD activity in seedling leaf of two cultivars of *Oryza sativa* L.¹⁾

辐射 量/ $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ Radiation dose	菌株 Strain	‘黄壳糯’ ‘Huangkenuo’			‘合系 41’ ‘Hexi-41’		
		相对电导率/% Relative conductivity	MDA 含 量/ $\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1}$ MDA content	SOD 活 性/ $\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ SOD activity	相对电导率/% Relative conductivity	MDA 含 量/ $\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1}$ MDA content	SOD 活 性/ $\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ SOD activity
0.0 (CK)	Y98-16T	28.73b	4.834a	721.33a	17.19b	2.755b	723.00b
2.5	Y98-16T	14.21c	2.905c	460.67c	18.55b	2.546b	750.33b
5.0	Y98-16T	11.72c	2.465d	578.67b	26.56a	3.028a	800.33a
7.5	Y98-16T	44.83a	4.540b	697.00a	30.90a	3.081a	808.00a
0.0 (CK)	Y99-63C	38.89b	3.271b	768.67b	17.96b	2.809a	768.00a
2.5	Y99-63C	10.10c	1.874c	410.67c	12.58c	1.273c	409.00c
5.0	Y99-63C	13.22c	3.026b	395.67c	34.50a	2.709a	548.33b
7.5	Y99-63C	47.81a	5.158a	834.33a	18.96b	2.042b	521.00b

¹⁾ 表中数据均为 3 次重复的平均值 All datums in the table are the average of three replications; 同列中不同的小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) The different small letters in same column indicate the significant difference ($P < 0.05$).

的趋势。

2.3 接种稻瘟病菌后再增强 UV-B 辐射水稻幼苗叶片相对电导率、MDA 含量和 SOD 活性的变化

分别接种稻瘟病菌菌株 Y98-16T 和 Y99-63C 后再进行增强 UV-B 辐射处理,2 个水稻品种幼苗叶片的相对电导率、MDA 含量和 SOD 活性变化见表 3。

由表 3 数据可见,与对照(仅接种稻瘟病菌菌株 Y98-16T 或 Y99-63C)相比,各处理组‘黄壳糯’幼苗叶片的 3 个生理指标均高于对照组,但幅度各异。在接种稻瘟病菌菌株 Y98-16T 的各处理组中,仅接种 Y98-16T 后再用 $5.0 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ UV-B 辐射处理的‘黄壳糯’幼苗叶片的相对电导率、MDA 含量和 SOD 活性显著高于对照($P < 0.05$);在接种稻瘟病菌菌株 Y99-63C 的各处理组中,接种 Y99-63C 后再用 2.5 或 $7.5 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ UV-B 辐射处理的‘黄壳糯’幼苗叶片的相对电导率、MDA 含量和 SOD 活性显著高于对照($P < 0.05$),且以后一处理组的增幅最大。

由表 3 还可看出,与对照(仅接种稻瘟病菌菌株 Y98-16T 或 Y99-63C)相比,各处理组‘合系 41’幼苗叶片的相对电导率、MDA 含量和 SOD 活性变化各异。其中,在接种稻瘟病菌菌株 Y98-16T 的各处理组中,仅接种 Y98-16T 后再用 $2.5 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ UV-B 辐射处理的‘合系 41’幼苗叶片的相对电导率、MDA 含量和 SOD 活性均低于对照,且分别较对照降低了 5.7% 、 2.3% 和 5.6% ,其他 2 个处理组‘合系 41’幼苗叶片的 3 个生理指标均较对照显著提高($P < 0.05$),以接种 Y98-16T 后再用 $5.0 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ UV-B 辐射处理组的 3 个指标最高。在接种稻瘟病菌菌株 Y99-63C 的各处理组中,仅接种 Y99-63C 后再用 5.0 或 $7.5 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ UV-B 辐射处理的‘合系 41’幼苗叶片的相对电导率分别较对照有所增加,增加幅度分别为 1.3% 和 38.9% ,其他处理组‘合系 41’幼苗叶片的相对电导率以及各处理组的 MDA 含量和 SOD 活性均显著低于对照($P < 0.05$)。

表 3 复合胁迫(接种稻瘟病菌后再增强 UV-B 辐射)对 2 个水稻品种幼苗叶片相对电导率、MDA 含量和 SOD 活性的影响¹⁾
Table 3 Effects of combined stress (first inoculated *Magnaporthe grisea* and then enhanced UV-B radiation) on relative conductivity, MDA content and SOD activity in seedling leaf of two cultivars of *Oryza sativa* L.¹⁾

菌株 Strain	辐射 量/ $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ Radiation amount	‘黄壳糯’ ‘Huangkenuo’			‘合系 41’ ‘Hexi-41’		
		相对电导率/% Relative conductivity	MDA 含 量/ $\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1}$ MDA content	SOD 活 性/ $\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ SOD activity	相对电导率/% Relative conductivity	MDA 含 量/ $\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1}$ MDA content	SOD 活 性/ $\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ SOD activity
Y98-16T	0.0(CK)	28.73b	4.834c	661.67d	17.19c	2.755c	732.00c
	2.5	70.55b	6.372b	1065.00b	16.21c	2.692c	691.00d
	5.0	284.85a	10.866a	1653.33a	69.74a	5.173a	944.33a
	7.5	31.66b	4.962c	732.00c	28.32b	3.245b	813.33b
Y99-63C	0.0(CK)	38.89c	3.271d	768.67c	17.96b	2.809a	768.00a
	2.5	91.27b	7.907b	1453.67b	12.95c	1.993b	492.00c
	5.0	53.79c	4.418c	786.67c	18.19b	2.201b	500.67c
	7.5	343.45a	12.724a	1760.67a	24.95a	2.637a	602.33b

¹⁾表中数据均为 3 次重复的平均值 All datums in the table are the average of three replications; 同列中不同的小写字母表示差异显著($P < 0.05$)
The different small letters in same column indicate the significant difference($P < 0.05$).

总体上看,接种稻瘟病菌菌株 Y98-16T 后再经 UV-B 辐射处理,‘黄壳糯’幼苗叶片的相对电导率、MDA 含量和 SOD 活性随 UV-B 辐射剂量的增加呈现先升高后下降的变化趋势;而‘合系 41’幼苗叶片的 3 个生理指标随 UV-B 辐射剂量的增加呈现降低—升高—降低的变化趋势。接种稻瘟病菌菌株 Y99-63C 后再经 UV-B 辐射处理,‘黄壳糯’幼苗叶片的相对电导率、MDA 含量和 SOD 活性随 UV-B 辐射剂量的增加呈现降低—升高—降低的变化趋势,而‘合系 41’幼苗叶片 3 个生理指标随 UV-B 辐射剂量的增加呈

现先下降后升高的变化趋势。

3 讨 论

3.1 增强 UV-B 辐射对水稻幼苗叶片的生理影响

用低剂量(2.5 和 $5.0 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)的 UV-B 辐射后,2 个水稻品种幼苗叶片的细胞膜透性(相对电导率)、丙二醛(MDA)含量和超氧化物歧化酶(SOD)活性均有不同程度的降低,这可能是由于用辐射量较低的 UV-B 照射对水稻幼苗的生长并不构成危害,水

稻幼苗对低剂量的 UV-B 辐射并未有相应的生理响应,但随着 UV-B 辐射量的累积,水稻叶片抗氧化酶类的活性下降,导致 MDA 相对含量也随之降低^[10]。用较高剂量($7.5 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)的 UV-B 辐射处理后,2 个水稻品种幼苗叶片的相对电导率、MDA 含量和 SOD 活性均较对照有不同程度的增加,表明水稻叶片的细胞膜透性增加,与“质膜是维持植物细胞区域性和正常代谢的重要器官,同时也是抵御 UV-B 辐射伤害的主要作用靶”^[11]有关;也与“UV-B 辐射胁迫导致水稻叶片抗氧化酶类活性升高,叶片中活性氧(H_2O_2)累积,膜脂过氧化加剧,MDA 相对含量增加”^[12-13]有关。

对水稻品种‘黄壳糯’幼苗而言,随着 UV-B 辐射剂量的增加,叶片相对电导率、MDA 含量和 SOD 活性 3 个生理指标之间均呈显著或极显著的正相关性($r_{\text{电-M}}=0.997$, $r_{\text{电-S}}=0.979$, $r_{\text{M-S}}=0.992$; $n=3$; $P<0.05$ 或 $P<0.01$)。对于水稻品种‘合系 41’幼苗而言,随 UV-B 辐射量的增加,仅有叶片的相对电导率与 MDA 含量之间呈显著的正相关性($r_{\text{电-M}}=0.958$, $n=3$, $P<0.05$)。造成这种差异的原因与品种间的差异有关,一般来说,植物的抗逆性与生物膜结构功能关系密切,因此,水稻品种‘黄壳糯’和‘合系 41’幼苗叶片的 MDA 含量的变化与其抗逆性有着密切关系。

3.2 增强 UV-B 辐射和稻瘟病菌侵染双重作用对水稻幼苗叶片的生理影响

实验结果显示,与对照(只接种稻瘟病菌)相比,用 UV-B 辐射后再接种稻瘟病菌,在 UV-B 辐射量较低(2.5 和 $5.0 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)的条件下,‘黄壳糯’幼苗叶片的相对电导率、MDA 含量和 SOD 活性总体上均有不同程度的降低;而在 UV-B 辐射量较高($7.5 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)的条件下,‘黄壳糯’幼苗叶片的 3 个生理指标均不同程度的增加,这与蒋霞敏等^[14]的研究结果相似。而经过相同处理的水稻品种‘合系 41’幼苗叶片的相对电导率、MDA 含量和 SOD 活性变化规律各异,但总体上表现为不同程度的增加,这种品种间的生理变化差异与品种的遗传特性有一定的关系。随着 UV-B 辐射强度的增加,在 2 个水稻品种幼苗叶片的 3 个生理指标中,只有相对电导率与 SOD 活性之间有显著的正相关性($r_{\text{黄}}=0.992$, $r_{\text{合}}=0.978$; $n=3$; $P<0.05$),这可能是由于经过 UV-B 辐射和稻瘟病菌联合作用后,水稻幼苗叶片的抗氧化系统和膜系统之间的变化并不协调一致,在双重胁迫条件下各指标

的变化幅度不但明显大于单一因子胁迫^[15],而且这种变化幅度受 UV-B 辐射量和稻瘟病菌 2 个因素的单一和复合影响。经过 UV-B 增强辐射后再接种稻瘟病菌菌株 Y98-16T 后,‘黄壳糯’幼苗叶片的 SOD 活性与病情指数^[16]呈显著正相关($r=0.962$, $n=3$, $P<0.05$),这可能是由于‘黄壳糯’幼苗对该处理反应较敏感,UV-B 胁迫可导致水稻体内的 SOD 活性增强,使得活性氧(H_2O_2)降低,从而维持了较高的酶活性,稻瘟病菌侵染后,导致染病组织活性氧的累积和膜脂过氧化程度加剧,进而加速稻瘟病的病症表现,加剧病情^[17]。增强 UV-B 辐射后再接种稻瘟病菌菌株 Y98-16T 的‘黄壳糯’幼苗叶片的相对电导率、MDA 含量和 SOD 活性的变化幅度明显大于接种稻瘟病菌菌株 Y99-63C 的幼苗叶片,这可能与不同稻瘟病菌的生理小种侵染和致病能力存在差异有关。

接种稻瘟病菌菌株 Y98-16T 后再进行增强 UV-B 辐射,随辐射量的增加,2 个水稻品种幼苗叶片的相对电导率、MDA 含量和 SOD 活性 3 个生理指标间均呈显著或极显著的正相关性,其中‘黄壳糯’幼苗叶片 3 个生理指标间的相关系数分别为 $r_{\text{电-M}}=0.996$, $r_{\text{电-S}}=0.970$, $r_{\text{M-S}}=0.988$ ($n=3$, $P<0.05$ 或 $P<0.01$); ‘合系 41’幼苗叶片 3 个生理指标间的相关系数分别为 $r_{\text{电-M}}=1.000$, $r_{\text{电-S}}=0.965$, $r_{\text{M-S}}=0.964$ ($n=3$, $P<0.05$ 或 $P<0.01$)。这一结果说明,在稻瘟病菌菌株 Y98-16T 的影响下,随 UV-B 辐射量增加,‘黄壳糯’和‘合系 41’幼苗叶片的抗氧化酶类和膜系统有显著变化。由于稻瘟病菌侵染后水稻叶片的抗氧化酶类以及膜质过氧化产物(包括 MDA 含量和 SOD 活性)均会发生相应变化,以抵御病害的发生^[8],在这种胁迫条件下再进行 UV-B 辐射,水稻叶片的这种生理响应就更加明显。接种稻瘟病菌菌株 Y99-63C 后再进行 UV-B 辐射处理,2 个水稻品种幼苗叶片的相对电导率、MDA 含量和 SOD 活性 3 个生理指标之间的关系不显著,且随 UV-B 辐射量的增加,仅‘合系 41’幼苗叶片的 MDA 含量和病情指数之间呈极显著的负相关($r=-0.994$, $n=3$, $P<0.01$),这可能是由于 MDA 能降低细胞膜系统的电阻和膜流动性,直接影响细胞膜的透性^[18-19],稻瘟病菌侵染后,水稻幼苗的 MDA 含量增加,膜脂过氧化加剧,从而增强了植物的抗逆性,使水稻叶片对之后的 UV-B 辐射也具有了一定的抵御作用;也可能是 UV-B 辐射对稻瘟病的病菌孢子具有一定的致死作用,最终导致病情指数的降低,缓解

病情^[16]。由于不同稻瘟病菌菌株之间存在一定的遗传差异,使得水稻幼苗叶片接种不同的稻瘟病菌菌株后的生理变化也各不相同,进而使水稻幼苗对 UV-B 辐射的生理响应也有所不同。

不论先进行 UV-B 辐射还是先接种稻瘟病菌,水稻品种‘黄壳糯’幼苗叶片的相对电导率、MDA 含量和 SOD 活性的变化都较显著,相对而言,水稻品种‘合系 41’幼苗叶片这 3 个生理指标的变化幅度较小,这可能与不同水稻品种对 UV-B 的敏感程度和对稻瘟病菌抗病能力存在一定的差异有关。先接种稻瘟病菌后再进行 UV-B 辐射处理,‘黄壳糯’幼苗叶片的相对电导率、MDA 含量和 SOD 活性变化明显比先进行 UV-B 辐射后再接种稻瘟病菌的处理组显著,这种现象一方面与水稻叶片对不同胁迫的响应方式和抵御能力存在一定的差异有关,另一方面也与这 2 种胁迫处理中双重胁迫因子对水稻叶片的作用顺序不同有关,2 个胁迫因子之间因胁迫顺序的不同产生拮抗或协同作用,对水稻叶片的影响程度也必然存在一定的差异。

参考文献:

- [1] 陈 岚, 吴 震, 蒋芳玲, 等. 紫外线-B 照射对小白菜生长、产量及品质的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2008, 17(1): 43-47.
- [2] 李 元, 何永美, 祖艳群. 增强 UV-B 辐射对作物生理代谢、DNA 和蛋白质的影响研究进展[J]. 应用生态学报, 2006, 17(1): 123-126.
- [3] Zu Y Q, Li Y, Chen H Y, et al. Intraspecific differences in physiological response of 20 soybean cultivars to enhanced ultraviolet-B radiation under field conditions[J]. Environmental and Experimental Botany, 2003, 50(1): 87-97.
- [4] 林文雄, 梁义元, 金吉雄. 水稻对 UV-B 辐射增强的抗性遗传及其生理生化特性研究[J]. 应用生态学报, 1999, 10(1): 31-34.
- [5] 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): 19-24.
- [6] 郭秀林, 王睿文. 紫外辐射增加对植物生长及某些生理代谢的影响[J]. 生物学杂志, 2001, 18(1): 12-14.
- [7] Dai Q J, Yan B, Huang S B, et al. Response of oxidative stress defense systems in rice (*Oryza sativa* L.) leaves with supplemental UV-B radiation[J]. Physiologia Plantarum, 1997, 101(2): 301-308.
- [8] 宋海超, 史学群. 稻瘟菌侵染后水稻抗氧化酶类的变化与抗病性的关系[J]. 海南大学学报: 自然科学版, 2006, 24(4): 378-382.
- [9] 叶尚红. 植物生理生化实验教程[M]. 昆明: 云南科学技术出版社, 2004.
- [10] 吴杏春, 林文雄, 郭玉春, 等. UV-B 辐射增强对水稻叶片抗氧化系统的影响[J]. 福建农业学报, 2001, 16(3): 51-55.
- [11] Murphy T M. Membranes as targets of ultraviolet radiation[J]. Physiologia Plantarum, 1983, 58(3): 381-388.
- [12] Li Y, Zu Y Q, Chen J J. Intraspecific differences in physiological response of 20 wheat cultivars to enhanced ultraviolet-B radiation under field conditions [J]. Environmental and Experimental Botany, 2000, 44(2): 95-103.
- [13] 姚银安, 祖艳群, 李 元. 紫外线-B 辐射与植物体内酚类次生代谢的关系[J]. 植物生理学通讯, 2003, 39(2): 179-184.
- [14] 蒋霞敏, 翟兴文, 王 丽, 等. 水生红球藻对紫外辐射的生理适应及超微结构变化[J]. 水产学报, 2003, 27(2): 105-112.
- [15] 赵晓莉, 胡正华, 徐建强, 等. UV-B 辐射与酸雨胁迫对生菜生理特性及品质的影响[J]. 生态环境, 2006, 15(6): 1170-1175.
- [16] 范静华, 周惠萍, 陈建斌, 等. 稻瘟病诱导抗性研究初报[J]. 云南农业大学学报, 2002, 17(4): 325-327.
- [17] 高潇潇, 高召华, 陈海燕, 等. UV-B 辐射对 2 个水稻品种幼苗稻瘟病的影响及机理初探[J]. 生态环境学报, 2009, 18(3): 1026-1030.
- [18] 何丽莲, 祖艳群, 李 元, 等. 不同小麦品种对 UV-B 辐射增强响应的生理特性差异[J]. 应用生态学报, 2006, 17(1): 163-165.
- [19] 葛秀春, 宋凤鸣, 郑 重. 膜脂过氧化与水稻对稻瘟病抗性的关系[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2000, 26(3): 254-258.