

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

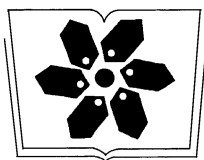
Acta Ecologica Sinica



第31卷 第20期 Vol.31 No.20 **2011**

中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 20 期 2011 年 10 月 (半月刊)

目 次

洋山港潮间带大型底栖动物群落结构及多样性·····	王宝强,薛俊增,庄 骅,等 (5865)
天津近岸海域夏季大型底栖生物群落结构变化特征·····	冯剑丰,王秀明,孟伟庆,等 (5875)
基于景观遗传学的滇金丝猴栖息地连接度分析·····	薛亚东,李 丽,李迪强,等 (5886)
三江平原湿地鸟类丰富度的空间格局及热点地区保护·····	刘吉平,吕宪国 (5894)
江苏沿海地区耕地景观生态安全格局变化与驱动机制 ·····	王 千,金晓斌,周寅康 (5903)
广州市主城区树冠覆盖景观格局梯度·····	朱耀军,王 成,贾宝全,等 (5910)
景观结构动态变化及其土地利用生态安全——以建三江垦区为例 ·····	林 佳,宋 戈,宋思铭 (5918)
基于景观安全格局的香格里拉县生态用地规划·····	李 晖,易 娜,姚文璟,等 (5928)
苏南典型城镇耕地景观动态变化及其影响因素·····	周 锐,胡远满,苏海龙,等 (5937)
放牧干扰下若尔盖高原沼泽湿地植被种类组成及演替模式·····	韩大勇,杨永兴,杨 杨,等 (5946)
放牧胁迫下若尔盖高原沼泽退化特征及其影响因子·····	李 珂,杨永兴,杨 杨,等 (5956)
近 20 年广西钦州湾有机污染状况变化特征及生态影响·····	蓝文陆 (5970)
万仙山油松径向生长与气候因子的关系 ·····	彭剑峰,杨爱荣,田沁花 (5977)
50 年来山东塔山植被与物种多样性的变化 ·····	高 远,陈玉峰,董 恒,等 (5984)
热岛效应对植物生长的影响以及叶片形态构成的适应性·····	王亚婷,范连连 (5992)
遮荫对濒危植物崖柏光合作用和叶绿素荧光参数的影响·····	刘建锋,杨文娟,江泽平,等 (5999)
遮荫对 3 年生东北铁线莲生长特性及品质的影响·····	韩忠明,赵淑杰,刘翠晶,等 (6005)
云雾山铁杆蒿茎叶浸提液对封育草地四种优势植物的化感效应·····	王 辉,谢永生,杨亚利,等 (6013)
杭州湾滨海滩涂盐基阳离子对植物分布及多样性的影响 ·····	吴统贵,吴 明,虞木奎,等 (6022)
藏北高寒草原针茅属植物 AM 真菌的物种多样性·····	蔡晓布,彭岳林,杨敏娜,等 (6029)
成熟马占相思林的蒸腾耗水及年际变化·····	赵 平,邹绿柳,饶兴权,等 (6038)
荆条叶性状对野外不同光环境的表型可塑性·····	杜 宁,张秀茹,王 炜,等 (6049)
短期极端干旱事件干扰后退化沙质草地群落恢复力稳定性的测度与比较·····	张继义,赵哈林 (6060)
滨海盐碱地土壤质量指标对生态改良的响应·····	单奇华,张建锋,阮伟建,等 (6072)
退化草地阿尔泰针茅与狼毒种群的小尺度种间空间关联·····	赵成章,任 珩 (6080)
延河流域植物群落功能性状对环境梯度的响应 ·····	龚时慧,温仲明,施 宇 (6088)
臭氧胁迫使两优培九倒伏风险增加——FACE 研究 ·····	王云霞,王晓莹,杨连新,等 (6098)
甘蔗//大豆间作和减量施氮对甘蔗产量、植株及土壤氮素的影响 ·····	杨文亭,李志贤,舒 磊,等 (6108)
湿润持续时间对生物土壤结皮固氮活性的影响·····	张 鹏,李新荣,胡宜刚,等 (6116)
锌对两个品种茄子果实品质的效应·····	王小晶,王慧敏,王 菲,等 (6125)
Cd ²⁺ 胁迫对银芽柳 PS II 叶绿素荧光光响应曲线的影响 ·····	钱永强,周晓星,韩 蕾,等 (6134)
紫茉莉对铅胁迫生理响应的 FTIR 研究 ·····	薛生国,朱 锋,叶 晟,等 (6143)

结缕草对重金属镉的生理响应	刘俊祥,孙振元,巨关升,等 (6149)
两种大型真菌子实体对 Cd^{2+} 的生物吸附特性	李维焕,孟 凯,李俊飞,等 (6157)
富营养化山仔水库沉积物微囊藻复苏的受控因子	苏玉萍,林 慧,钟厚璋,等 (6167)
一种新型的昆虫诱捕器及其对长足大竹象的诱捕作用	杨瑶君,刘 超,汪淑芳,等 (6174)
光周期对梨小食心虫滞育诱导的影响	何 超,孟泉科,花 蕾,等 (6180)
农林复合生态系统防护林斑块边缘效应对节肢动物的影响	汪 洋,王 刚,杜瑛琪,等 (6186)
中国超大城市土地利用状况及其生态系统服务动态演变	程 琳,李 锋,邓华锋 (6194)
城市综合生态风险评价——以淮北市城区为例	张小飞,王如松,李正国,等 (6204)
唐山市域 1993—2009 年热场变化	贾宝全,邱尔发,蔡春菊 (6215)
基于投影寻踪法的武汉市“两型社会”评价模型与实证研究	王茜茜,周敬宣,李湘梅,等 (6224)
长株潭城市群生态屏障研究	夏本安,王福生,侯方舟 (6231)
基于生态绿当量的城市土地利用结构优化——以宁国市为例	赵 丹,李 锋,王如松 (6242)
基于 ARIMA 模型的生态足迹动态模拟和预测——以甘肃省为例	张 勃,刘秀丽 (6251)
专论与综述	
孤立湿地研究进展	田学智,刘吉平 (6261)
甲藻的异养营养型	孙 军,郭术津 (6270)
生态工程领域微生物菌剂研究进展	文 娅,赵国柱,周传斌,等 (6287)
我国生态文明建设及其评估体系研究进展	白 杨,黄宇驰,王 敏,等 (6295)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 440 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 49 * 2011-10	



封面图说: 壶口瀑布是黄河中游流经秦晋大峡谷时形成的一个天然瀑布。此地两岸夹山,河底石岩上冲刷成一巨沟,宽达 30 米,深约 50 米,最大瀑面 3 万平方米。滚滚黄水奔流至此,倒悬倾注,若奔马直入河沟,波浪翻滚,惊涛怒吼,震声数里可闻。其形其声如巨壶沸腾,故名壶口。300 余米宽的滚滚黄河水至此突然收入壶口,有“千里黄河一壶收”之说。

彩图提供: 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

钱永强,周晓星,韩蕾,孙振元,巨关升. Cd^{2+} 胁迫对银芽柳 PS II 叶绿素荧光光响应曲线的影响. 生态学报, 2011, 31(20): 6134-6142.

Qian Y Q, ZHOU Xiaoxing, Han L, Sun Z Y, Ju G S. Rapid light-response curves of PS II chlorophyll fluorescence parameters in leaves of *Salix leucopithecia* subjected to cadmium-ion stress. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(20): 6134-6142.

Cd^{2+} 胁迫对银芽柳 PS II 叶绿素荧光光响应曲线的影响

钱永强,周晓星,韩蕾*,孙振元*,巨关升

(中国林业科学研究院林业研究所/林木遗传育种国家重点实验室/国家林业局林木培育重点实验室,北京 100091)

摘要:以盆栽银芽柳为材料,利用 MINI-IMAGING-PAM 荧光成像测定系统,研究了 Cd^{2+} 胁迫下叶片叶绿素荧光参数的变化及其光响应曲线。结果表明,初始荧光 F_o 与最大荧光 F_m 随着 Cd^{2+} 浓度的增大而呈现先升后降的趋势, F_o 与 F_m 在 200 mg/L Cd^{2+} 处理 4 周时达到最高值,400 mg/L Cd^{2+} 处理则显著下降;PS II 最大光化学效率 (F_v/F_m) 与 PS II 潜在光化学效率 (F_v/F_o) 显著受 Cd^{2+} 胁迫抑制,但随 Cd^{2+} 浓度的增加呈先降后升的变化趋势。 Cd^{2+} 胁迫下各叶绿素荧光参数的光响应结果表明,PS II 实际光量子效率 $Y(II)$ 、荧光淬灭系数 (qP) 随光化光强度的增加呈下降趋势,而同光强下高浓度 Cd^{2+} 使 $Y(II)$ 与 (qP) 显著降低;PS II 调节性能量耗散的量子产额 $Y(NPQ)$ 、非光化学淬灭系数 (qN) 与表观电子传递速率 (ETR) 则随着光强增加呈上升趋势,同光强下高浓度 Cd^{2+} 处理显著提高 $Y(NPQ)$ 、 qN 与 ETR 。 Cd^{2+} 胁迫下,PS II 非调节性能量耗散的量子产额 $Y(NO)$ 稳定在较低水平,同光强下 $Y(NO)$ 随 Cd^{2+} 浓度增加略有提高。说明,银芽柳通过调节 PS II 反应中心开放程度与活性,对 Cd^{2+} 胁迫表现出较强的耐性,高浓度 Cd^{2+} 胁迫导致 PS II 反应中心关闭或不可逆失活,表现出光抑制。

关键词:银芽柳;叶绿素荧光;镉离子胁迫;快速光响应曲线

Rapid light-response curves of PS II chlorophyll fluorescence parameters in leaves of *Salix leucopithecia* subjected to cadmium-ion stress

QIAN Yongqiang, ZHOU Xiaoxing, HAN Lei*, SUN Zhenyuan*, JU Guansheng

Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry / State Key Laboratory of Forest Genetics and Tree Breeding / Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, Beijing 100091, China

Abstract: Heavy metals in soil affect the growth, development, and multiplication of plants. Meanwhile, the plants which survive in environment contaminated by heavy metals have mechanisms to tolerate heavy metals. Fluorescence-based photosynthetic activity of leaves plays an important role in adaptation to heavy metal conditions, such as Cd^{2+} . In this paper, the effects of Cd^{2+} on rapid light-response curves of photochemical and non-photochemical chlorophyll fluorescence quenching parameters including dark fluorescence yield (F_o), maximal fluorescence yield (F_m), maximal PS II quantum yield (F_v/F_m), and latent PS II quantum yield (F_v/F_o) of *Salix leucopithecia* were investigated under different concentrations of Cd^{2+} solutions (0, 50, 100, 200, 400 mg/L) by MINI-IMAGING-PAM Chlorophyll Fluorometer.

The results showed that F_o and F_m present trend of first increased and then decreased, and the two parameters reached the maximum when *Salix leucopithecia* were subjected to 200 mg/L Cd^{2+} solution after four weeks. The F_v/F_m declined significantly under cadmium-bearing solution, but it was higher in the same Cd^{2+} solution after four weeks than after two weeks. The F_v/F_m rebounded slightly in 200 mg/L Cd^{2+} condition after two weeks and then dropped to the minimum in the same condition after four weeks. F_v/F_o was also inhibited significantly by Cd^{2+} stress, and showed the similar trend with the changes of F_v/F_m .

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(ZD200916, RIF2010-07)

收稿日期:2011-07-06; **修订日期:**2011-07-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hdd@caf.ac.cn, sunzy@caf.ac.cn

The rapid light-response curves of chlorophyll fluorescence parameters were also measured at various light intensities (0, 20, 60, 100, 300, 500, 600, 800, 1000, and 1200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$). The effective PS II quantum yield ($Y(\text{II})$) and coefficient of photochemical quenching (qP) decreased with the increase of light intensity. The $Y(\text{II})$ and qP declined significantly subjected to high concentration of Cd²⁺ solution compared with low concentration under the same light intensity. The parameters of quantum yield of regulated energy dissipation ($Y(\text{NPQ})$), coefficient of nonphotochemical quenching (qN), and electron transport rate (ETR) increased with elevation of light intensity. The $Y(\text{NPQ})$, qN , and ETR increased sharply subjected to high concentration of Cd²⁺ solution compared with low concentration under the same light condition. Quantum yield of non-regulated energy dissipation ($Y(\text{NO})$) kept a lower level, although $Y(\text{NO})$ increased slightly with the aggrandizement of light intensity. The results indicate that *Salix leucopithecia* has strong tolerance to Cd²⁺ stress by irreversible inactivation of PS II reaction centers. However, under high concentration of Cd²⁺ solution for prolonged stress, PS II reaction centers were closed or irreversible inactivated with showing the phenomenon of photoinhibition.

Key Words: Cd²⁺ stress; chlorophyll fluorescence; rapid light-response curve; *Salix leucopithecia*

重金属作为最常见的不可降解的污染物,对生物的危害日益受到全世界的关注^[1]。镉(Cd²⁺)是一种常见的、毒性极强的重金属,且易被植物吸收与积累,并通过抑制光合作用等生理过程而直接影响植物的正常生长发育,导致植物生物量的下降^[2-3],甚至死亡^[4]。植物光合作用是在叶绿体的类囊体中通过叶绿素等光合色素分子吸收光能,并将光能转化为化学能,形成 ATP 和 NADPH 的过程。捕光复合体(light-harvesting complex, LHC)是植物吸收光能的重要的色素蛋白复合体。研究表明, Cd²⁺胁迫下可引发 LHC II 构象改变,从而抑制 PS II 光能捕获和电能激发的效率^[5]。也有研究认为 Cd²⁺抑制植物光合作用的途径还包括降低光合色素含量^[6],或降低 PS II 的活性^[7-8],或阻碍 Calvin 循环^[9-10],或抑制环式和非环式光合磷酸化等^[11-12]。这说明, Cd²⁺影响着植物光能吸收、电子传递、CO₂固定等光合作用各过程。

柳树(*Salix* spp.)是 Cd²⁺高积累型植物,在欧美等国家和地区已经运用速生柳树等木本植物修复 Cd²⁺引起的环境污染,把生物量转化为生物质能源,使生物质生产和植物修复有效结合起来,取得了显著的生态效益和经济效益^[13-16]。目前国内外对柳树耐重金属胁迫机制的研究主要集中在植物体对重金属的吸收、转运、分布、解毒等方面^[17-19]。从光合及叶绿素荧光特性等方面研究柳树耐重金属的机制较少报道^[20]。叶绿素荧光动力学参数包含着光合作用过程的重要信息,如光能的吸收和转化、能量的传递与分配、反应中心的活性、过剩能量的耗散以及光合作用的光抑制和光破坏状态等,与净光合速率、胞间 CO₂ 浓度等一些“表观性”的气体交换指标相比,叶绿素荧光参数在探测逆境对光合作用影响方面具有独特的作用,能够反映光合系统“内在性”特点^[21-22],被视为研究植物光合作用与环境关系的内在探针。在植物的抗逆生理^[23]、作物育种栽培^[24]、植物生态^[25]等方面得到了较为广泛的应用。

银芽柳(*Salix leucopithecia*)为杨柳科柳属多年生落叶灌木,其分布范围广,生态适应性强,且生长速度快,当年生新枝形成大量硕大的花芽,芽外紫红色苞片脱落后可见银白色绢毛,具有很高的观赏价值,是重要的观芽植物^[26]。近年来银芽柳也开始应用于园林造景及道路边坡绿化等,是极具应用开发前景的重要多用途树种。本研究以银芽柳为对象,分析了 Cd²⁺胁迫下银芽柳叶片 PS II 功能、光能利用与能量分配以及光化学淬灭及非光化学淬灭等参数的变化,为揭示柳树叶片光合机构对 Cd²⁺的生理代谢响应机制提供参考,也为重金属污染土壤修复提供实践指导。

1 材料与方法

1.1 材料培养与处理

剪取银芽柳(*Salix leucopithecia*)当年生枝条(基部直径为(1.2±0.3) cm),保留近基部的 1/3 长度,剪成 8 cm 长插穗,扦插在深 20 cm 直径 5 cm 的营养钵中,基质为草炭:园土:蛭石(1:1:1)混合物,每天充分浇 Hoagland 营养液(pH=5.8)。培养 1 周后,在插穗上部形成 2—3 个萌枝,下部也形成 3—5 根不定根。保留一

个枝条,继续培养至4周后,枝条长度达60cm以上。选取长势一致的植株用于镉胁迫处理。通过向 Hoagland 营养液加入不同浓度的 Cd^{2+} (以 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 形态加入) 进行胁迫设置, Cd^{2+} 浓度分别为 0、50、100、200、400 mg/L。

试验采用完全随机区组设计,将植株随机放置于3个区组。每处理设3个重复,每个重复3株。每2d更换一次营养液。分别在胁迫至第0周、第2周以及第4周测定各处理植株叶片叶绿素荧光参数。材料培养在中国林科院科研温室内进行,白天/夜晚温度为 $25^\circ\text{C}/18^\circ\text{C}$,相对湿度 70%—75%,光强 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,光照 14 h,黑暗 10 h。

1.2 叶绿素荧光参数的测定

每个植株选取1—2片完全展开的叶子,采用德国 Walz 公司的 Mini-Imaging-PAM 叶绿素荧光仪进行叶绿素荧光诱导动力学曲线和快速光响应曲线的测定。测定叶绿素荧光诱导动力学曲线时,先用弱光照射测定初始荧光(F_0),随后进行饱和脉冲光($2800 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)处理,一个脉冲后关闭,得到黑暗中的最大荧光(F_m)。充分暗适应后,PS II 的最大光化学效率(F_v/F_m)、表观电子传递速率(ETR)、PS II 光化学能量转化的有效量子产量 [$Y(\text{II})$]、光化学淬灭系数(qP)、非光化学淬灭系数(NPQ)等各参数数值均由选定模式下系统自动计算生成。利用 Mini-Imaging-PAM 测定样品的快速光响应曲线,将经过光适应 5 min 的样品,暴露在连续光量子能量密度梯度(0、20、60、100、300、500、600、800、1000、1200 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)下,每步 20 s,测定相对电子传递速率 ETR 及其他荧光参数。

1.3 数据分析

使用 Excel 2003 进行数据处理和图表制作,所有结果为3次重复数据的均值。使用 SPSS(V15.0) 统计软件包对不同 Cd^{2+} 浓度间及不同胁迫时间之间植株叶绿素荧光参数进行单因素方差分析,并采用 LSD (Least Significance difference, 最小显著差异法) 进行多重比较分析,显著性水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 Cd^{2+} 对银芽柳叶片 F_0 、 F_m 、 F_v/F_m 与 F_v/F_0 的影响

充分暗适应下叶片初始荧光 F_0 随着 Cd^{2+} 浓度的增大而升高($P < 0.05$),当 Cd^{2+} 浓度为 200 mg/L 时达到

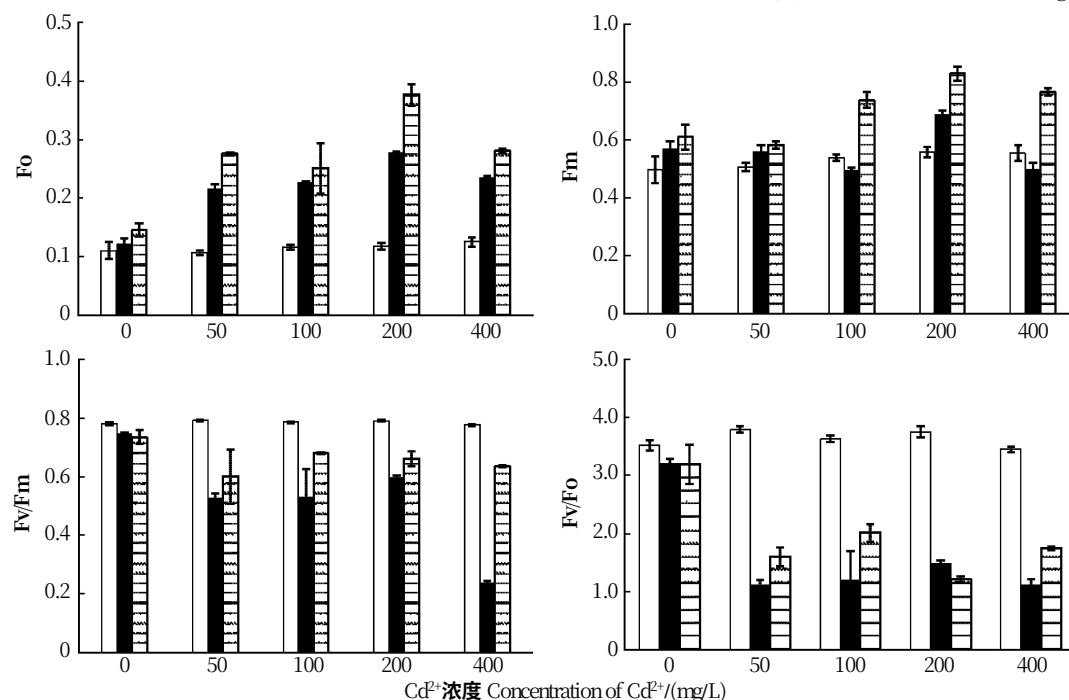


图1 Cd^{2+} 胁迫对银芽柳 F_0 、 F_m 、 F_v/F_m 以及 F_v/F_0 的影响

Fig. 1 Responses of F_0 , F_m , F_v/F_m , and F_v/F_0 of *salix leucopithecia* to Cd^{2+} stress

最高值(图1)。相同 Cd²⁺ 浓度条件下, F_o 随着胁迫时间的延长, 也呈显著升高趋势, 处理前各植株叶片 F_o 均保持在较低值, 胁迫至第2周时, Cd²⁺ 胁迫下的植株叶片 F_o 不同程度地显著增大 ($P < 0.05$), 当培养至第4周时, F_o 继续升高, 其中 200 mg/L Cd 胁迫处理变化最大(图1)。

在较低浓度 Cd²⁺ (0—100 mg/L) 和高浓度 Cd²⁺ (400 mg/L) 胁迫 2 周内, 最大荧光 F_m 无明显差异, 而 Cd²⁺ 浓度为 200 mg/L 时, F_m 显著升高 ($P < 0.05$)。随着胁迫时间延长至每 4 周时, F_m 随着 Cd²⁺ 浓度的增加而升高, Cd²⁺ 浓度为 200 mg/L 时 F_m 也达到最高值(图1)。

与对照相比, PS II 大光化学量子效率 (F_v/F_m) 随着 Cd²⁺ 浓度的增加显著降低。而相同 Cd²⁺ 浓度处理下, 随着胁迫时间的延长, F_v/F_m 呈先降低后升高的变化趋势, 不同浓度 Cd²⁺ 胁迫至第2周时, F_v/F_m 均降至谷值(图1)。 F_v/F_m 反映 PS II 反应中心利用所捕获激发能的情况, 这表明银芽柳在经过短时间 Cd²⁺ 胁迫适应性调节后, PS II 开放的反应中心比例未受到 Cd²⁺ 的影响而显著减少, 随着胁迫时间的延长, 光合电子链的传递速率得到一定程度的恢复, 从而维持正常的暗反应。

F_v/F_o 呈现与 F_v/F_m 相似的变化趋势(图1)。 F_v/F_o 反映 PS II 潜在活性, Cd²⁺ 胁迫显著降低了 PS II 潜在活性 ($P < 0.05$)。而相比于 Cd²⁺ 胁迫 2 周的 F_v/F_o , 除 200 mg/L 的 Cd²⁺ 处理, 其它不同浓度的 Cd²⁺ 胁迫至第4周时, F_v/F_o 均显著升高 ($P < 0.05$) (图1—图4), 这说明植株经过对短时间的胁迫适应性调节后, 叶片 PS II 潜在活性也开始有限恢复。

2.2 Cd²⁺胁迫下银芽柳叶片 $Y(II)$ 、 $Y(NPQ)$ 与 $Y(NO)$ 的光响应

Cd²⁺ 胁迫前, PS II 实际光量子效率 $Y(II)$ 随着光强的增加而迅速降低, 当光强为 $100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, $Y(II)$ 下降速率趋缓, 增至 $1200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, $Y(II)$ 降至最低(图2); PS II 调节性能量耗散的量子产额 $Y(NPQ)$ 呈现与其相反的变化, 在 $100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内, $Y(NPQ)$ 随着光强的增加而迅速上升, 当光强进一步增加, $Y(NPQ)$ 增加速率减缓(图3); 而 PS II 非调节性能量耗散的量子产额 $Y(NO)$ 一直稳定在较低水平(图4)。

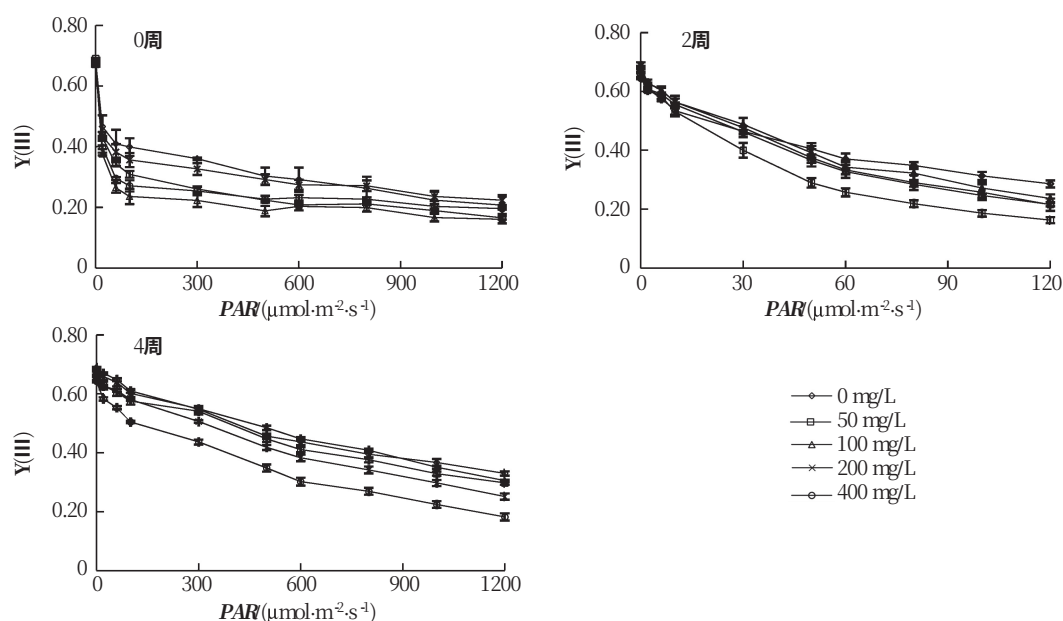


图2 Cd²⁺胁迫0周、2周、4周对 $Y(II)$ 快速光响应影响

Fig. 2 Rapid light-response curve of $Y(II)$ under Cd²⁺ stress for 0 week, 2 weeks and 4 weeks

Cd²⁺ 胁迫 2 周, 当光强增至 $300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上时, 50 mg/L Cd²⁺ 条件下叶片 $Y(II)$ 显著低于其它 Cd²⁺ 浓度处理 ($P < 0.05$) (图2); 而随着胁迫时间的延长, 400 mg/L Cd²⁺ 条件下 $Y(II)$ 在各光强作用下显著降低, 其它各处理间无显著差异(图2)。 $Y(NPQ)$ 呈现与 $Y(II)$ 光响应相反的变化规律, 胁迫至 4 周时, 400 mg/L Cd

条件下 $Y(NPQ)$ 则显著升高(图3)。Cd²⁺胁迫下各处理的 $Y(NO)$ 随光强的增加无明显变化,但同一光强作用下,各处理间也存在显著差异($P<0.05$)(图4),较对照(图4) $Y(NO)$ 均明显升高。说明Cd²⁺胁迫对PS II已造成一定程度的伤害,导致叶片吸收的部分光量子以非调节性能量耗散。

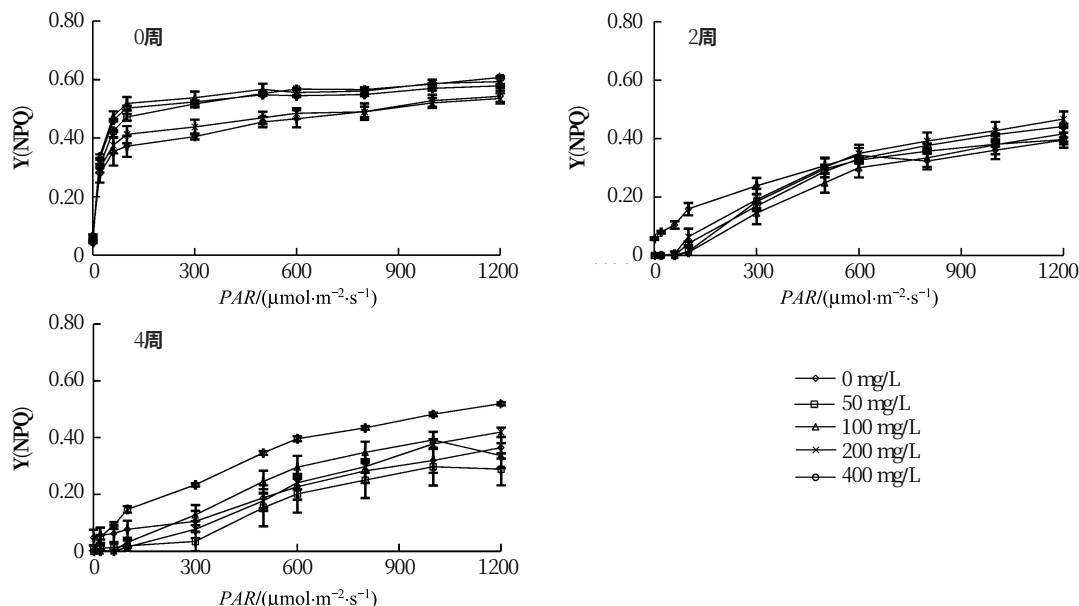


图3 Cd²⁺胁迫0周、2周、4周对 $Y(NPQ)$ 快速光响应影响

Fig. 3 Rapid light-response curve of $Y(NPQ)$ under Cd²⁺ stress for 0 week, 2 weeks and 4 weeks

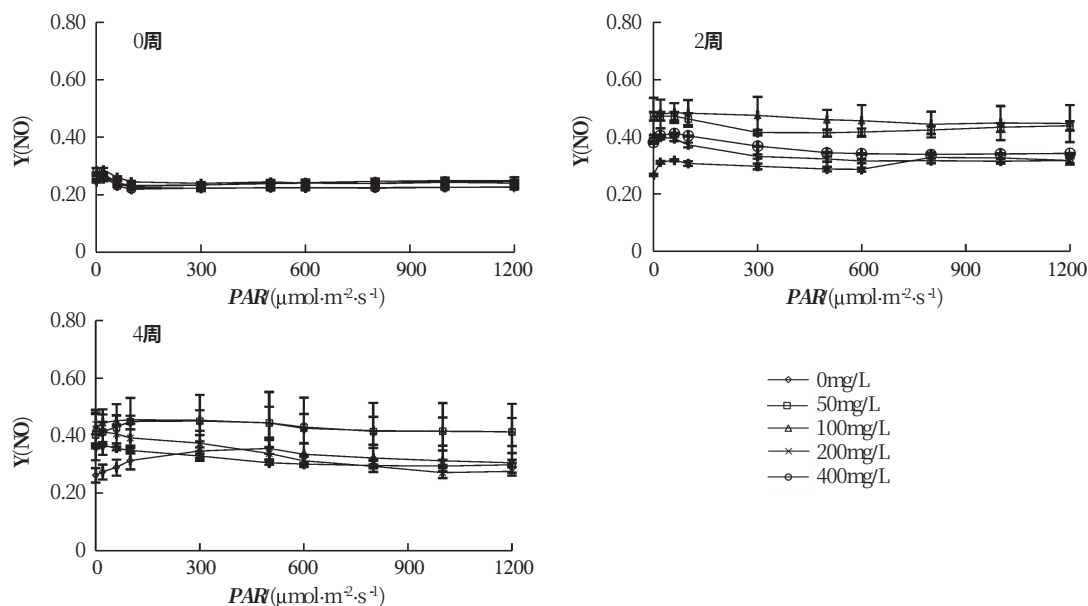


图4 Cd²⁺胁迫0周、2周、4周对 $Y(NO)$ 快速光响应影响

Fig. 4 Rapid light-response curve of $Y(NO)$ under Cd²⁺ stress for 0 week, 2 weeks and 4 weeks

2.3 Cd²⁺胁迫下银芽柳叶片 qN 、 qP 与 ETR 的光响应

非光化学淬灭系数(qN)反映PS II反应中心对天线色素吸收过量光能后的以热能形式耗散掉的光能部分,其值的大小表示光合机构的损伤程度。Cd²⁺胁迫前, qN 随着光强的增加而迅速升高,当光强增至 $100\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, qN 升高速率显著减缓(图5);Cd²⁺胁迫至2周时, qN 随光强增加而升高的速率明显降低,

当光强增至 $600 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, qN 升高速率呈现显著减缓(图 5), 100mg/L Cd^{2+} 胁迫下在不同光强作用下植株 qN 均保持最低值, 至光强增至 $1200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 低浓度 Cd^{2+} 胁迫 ($0-100 \text{mg/L}$) 下 qN 低于高浓度 Cd^{2+} 胁迫的 qN ($P > 0.05$); Cd^{2+} 胁迫 4 周后的 qN 与 Cd^{2+} 胁迫 2 周 qN 变化趋势相似(图 5)。

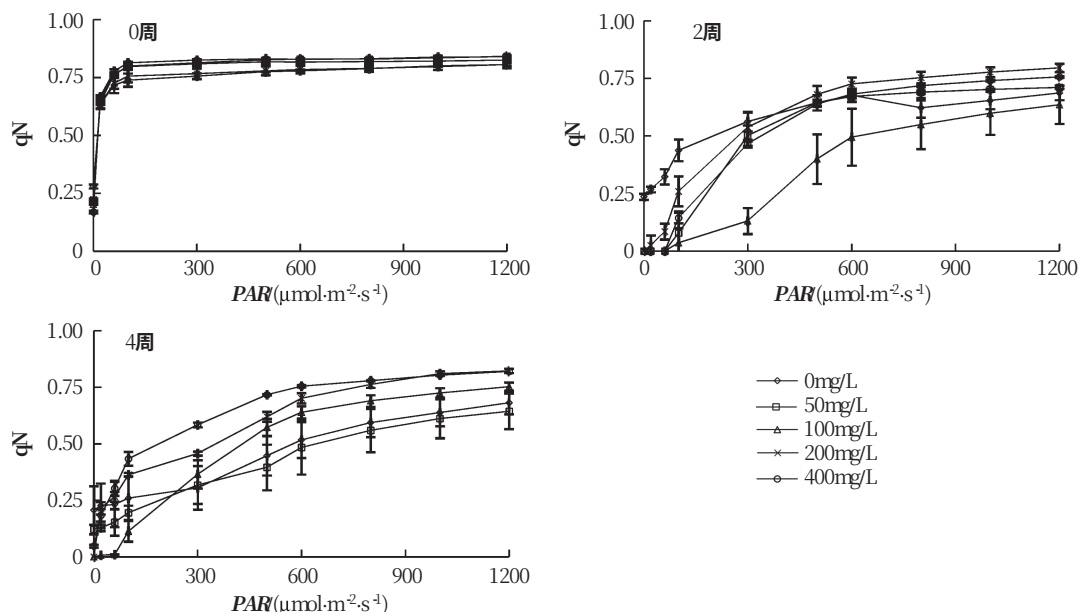


图 5 Cd^{2+} 胁迫 0 周、2 周、4 周对 qN 快速光响应影响

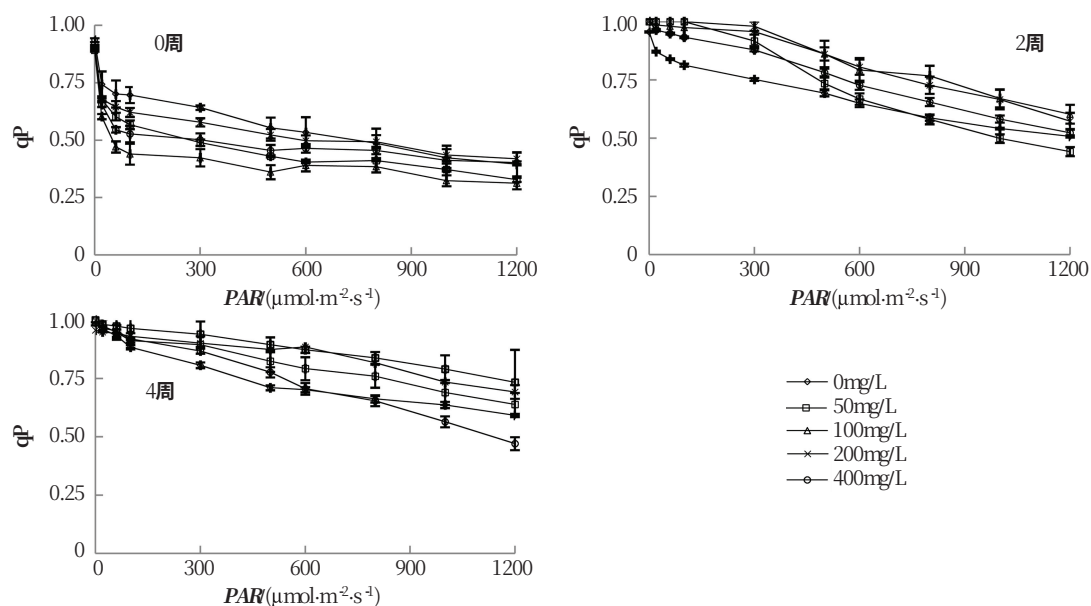
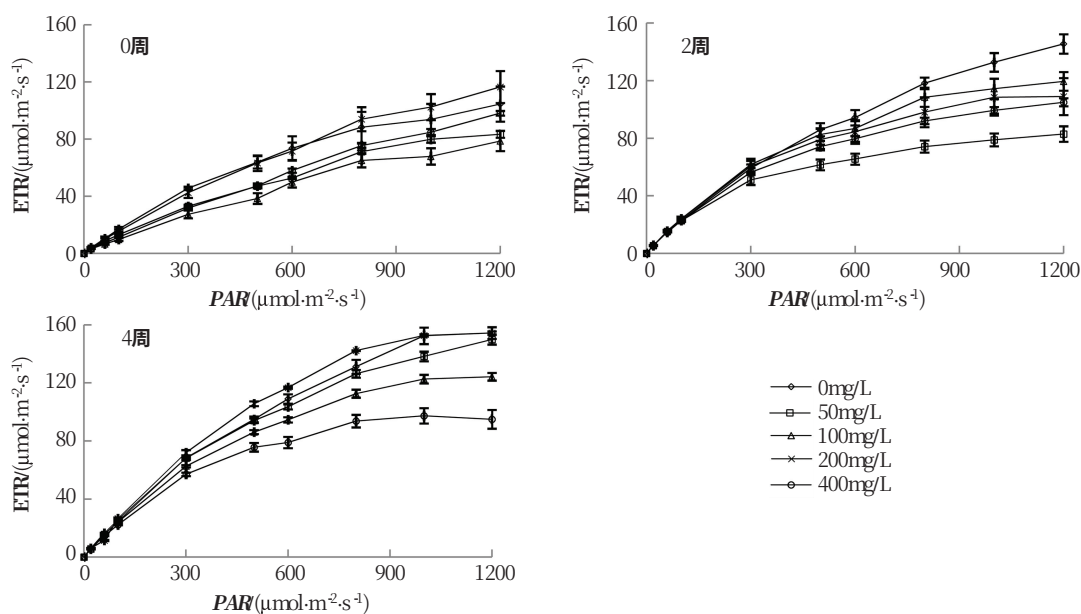
Fig. 5 Rapid light-response curve of qN under Cd^{2+} stress for 0 week, 2 weeks and 4 weeks

荧光光化学淬灭系数 qP 指 PS II 天线色素吸收光能后, 用于光合作用电子传递的份额, 反映 PS II 反应中心的开放程度。 qP 随光强的变化规律与 qN 相反, Cd^{2+} 胁迫前, 低光强条件下 qP 迅速降低, 随着光强的继续增加, qP 降低速率显著减缓(图 6)。胁迫 2 周时, 除对照仍表现出“快-慢”的变化规律外, 各胁迫条件下的植株 qP 均保持相对稳定的降低速率(图 6)。持续 Cd^{2+} 胁迫至第 4 周时, qP 随光强的增加稳定下降(图 6)。

表观电子传递速率(ETR)随光照强度的增加均呈上升趋势(图 7)。 Cd^{2+} 胁迫前, 各处理组植株 ETR 表现出一定的异质性, 当光强达到 $1200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 各处理组植株 ETR 均未达到最高值(图 7)。 Cd^{2+} 胁迫至第 2 周时, 与胁迫前(图 7)相比, 相同光强作用下各处理植株 ETR 显著上升, $300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的低光强下, ETR 随光强的提高直线上升, 当光强继续提高时, 除对照外, 随 Cd^{2+} 处理浓度的增加, 植株 ETR 上升显著减缓时的光强依次提高。 50mg/L Cd^{2+} 处理的植株在光强为 $300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, ETR 上升速率显著减缓; 400mg/L Cd^{2+} 处理的植株 ETR 上升速率明显减缓时的光强为 $1200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 但同光强作用下对照植株 ETR 均高于 Cd^{2+} 处理植株(图 7)。当 Cd^{2+} 胁迫至第 4 周时, 200mg/L Cd^{2+} 处理的植株 ETR 在不同光强下均高于其它处理。比较其它 Cd 处理, 光强大于 $500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 同光强作用下, ETR 随着 Cd^{2+} 处理浓度的增加而降低。当光强达 $1200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 200mg/L Cd 处理植株 ETR 与对照无显著差异 ($P > 0.05$), 400mg/L Cd^{2+} 处理的植株 ETR 降至最低, 为 $(95.00 \pm 6.46) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 7)。

3 讨论

叶绿素荧光与光合作用中各个反应过程紧密相关, 任何逆境对光合作用各过程产生的影响都可通过体内叶绿素荧光诱导动力学参数的变化反映出来^[27-28]。初始荧光 F_0 与 PS II 反应中心活性有关^[22]。本研究中 F_0 的增加可能是植物叶片 PS II 反应中心出现不可逆破坏或可逆失活造成的^[29-30]。 F_v/F_m 是指开放的 PS II 反应中心捕获激发能的效率, 即内禀光化学效率。该参数可反映植物 PS II 受伤害的程度。在非胁迫条件下, 植物叶片的 F_v/F_m 比较恒定, 一般在 $0.80-0.85$ 之间, 不受物种和生长条件的影响^[31]。在本试验中, 银芽柳叶片的 F_v/F_m 在 Cd^{2+} 胁迫下呈先降后升的变化, 说明 Cd^{2+} 胁迫影响 PS II 反应中心活性, 但其通过适应性调

图6 Cd^{2+} 胁迫0周、2周、4周对 qP 快速光响应影响Fig. 6 Rapid light-response curve of qP under Cd^{2+} stress for 0 week, 2 weeks and 4 weeks图7 Cd^{2+} 胁迫0周、2周、4周对 ETR 快速光响应影响Fig. 7 Rapid light-response curve of ETR under Cd^{2+} stress for 0 week, 2 weeks and 4 weeks

节,一定程度上可恢复维持基本生理功能的光合电子传递速率。

PS II 的反应中心吸收的光量子主要通过三个途径进行转化与耗散。即光化学途径转化为能量($Y(\text{II})$)、PS II 调节性能量耗散 $Y(\text{NPQ})$ 和非调节性的能量耗散 $Y(\text{NO})$ ^[32], 所有的光量子产额始终接近于1, 即 $Y(\text{II}) + Y(\text{NPQ}) + Y(\text{NO}) = 1$ 。已有研究证明, 过量的 Cd^{2+} 会直接抑制光合电子传递, 从而降低光化学途径转化能量的比例^[5]。本研究结果中, 在短时间低浓度以及长时间高浓度 Cd^{2+} 胁迫下, 不同光强下的叶片 $Y(\text{II})$ 在均显著降低(图2)。 $Y(\text{NPQ})$ 则表现出完全相反的变化趋势。而同浓度 Cd^{2+} 胁迫下, $Y(\text{NO})$ 对不同光强的响应无明显差异。这说明, 银芽柳有能力通过自身的调节机制耗散掉过剩的光能而使 PS II 反应中心受伤害的程

度降至最低,实现植株的自我保护。

光化学淬灭系数(qP)是 PS II 天线色素吸收的光能用于光化学电子传递的份额,反映了 PS II 天线色素吸收的光能用于光化学电子传递的比例^[33]。本研究结果表明,高光强下,短时间低浓度或长时间高浓度的 Cd²⁺可显著抑制银芽柳叶片 PS II 反应中心的开放比例和参与光化学反应的能量。

非光化学淬灭系数 qN 对叶绿体能量状态的改变是非常敏感的,而这种变化受多种因素影响,如环境胁迫因子导致的气孔关闭,阻断了 CO₂到 O₂的电子流而引起 PS II 能量转化速率下降。因此, qN 已经被证明为检测早期胁迫最敏感的参数。本试验结果显示,不同 Cd²⁺胁迫下 qN 的光响应变化趋势与 qP 相反,即随光强的增加而上升但上升幅度减少(图 5)。说明 Cd²⁺胁迫下银芽柳通过增加热耗散来避免强光对光合系统的伤害,从而减轻植物在 Cd²⁺胁迫条件下的光抑制。

胁迫对植物光合作用的影响是多方面的,不仅直接引发光合机构损伤,同时也影响光合电子传递速率(ETR)^[16]。本研究中,不同 Cd²⁺处理的银芽柳叶片 ETR 随光强的增加而上升。但短时间低浓度 Cd²⁺处理的植株在光强超过 300 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,叶片 ETR 趋近饱和(图 7),当高浓度 Cd²⁺长时间处理时,叶片 ETR 在 1000 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时达到饱和(图 7)。这意味着 PS II 反应中心部分关闭或失活,过剩的能量只能通过非光化学淬灭形式耗散^[34]。

综上所述, Cd²⁺胁迫导致 Fv/Fm 、 Fv/Fo 降低,并影响各荧光参数对光的响应。随着光强的增加, $Y(II)$ 、 qN 与 ETR 上升, $Y(NPQ)$ 、 qP 等荧光参数显著下降, $Y(NO)$ 保持稳定。低浓度短时间 Cd²⁺处理导致 PS II 反应中心部分关闭或失活,而随胁迫时间的延长,低浓度 Cd²⁺胁迫植株经适应性调节 PS II 光合机构活性有所恢复;高浓度长时间 Cd²⁺胁迫引发光合电子传递受阻,随光强的增加,过剩能量以非光化学淬灭形式耗散,导致 PS II 反应中心受损,表现出光抑制现象。

References:

- [1] Mallick N, Rai L C. Physiological responses of non-vascular plants to heavy metals//Prasad M N V, Strzalka K, eds. Physiology and Biochemistry of Metal Toxicity and Tolerance in Plants. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001: 111-147.
- [2] Foy C D, Chaney R L, White M C. The physiology of metal toxicity in plants. Annual Review of Plant Physiology, 1978, 29(1): 511-566.
- [3] Kastori R, Petrović M, Petrović N. Effect of excess lead, cadmium, copper, and zinc on water relations in sunflower. Journal of Plant Nutrition, 1992, 15(11): 2427-2439.
- [4] Wu F B, Zhang G P, Dominy P. Four barley genotypes respond differently to cadmium; lipid peroxidation and activities of antioxidant capacity. Environmental and Experimental Botany, 2003, 50(1): 67-78.
- [5] Qin T C, Wu Y S, Wang H X, Li Q R. Effect of cadmium, lead and their interactions on the physiological and ecological characteristics of root system of *Brassica chinensis*. Acta Ecologica Sinica, 1998, 18(3): 320-325.
- [6] Baszyński T, Wajda L, Król M, Wolińska D, Krupa Z, Tukendorf A. Photosynthetic activities of cadmium-treated tomato plants. Physiologia Plantarum, 1980, 48(3): 365-370.
- [7] Bernier M, Popovic R, Carpentier R. Mercury inhibition at the donor side of photosystem II is reversed by chloride. FEBS Letters, 1993, 321(1): 19-23.
- [8] Yao G, Gao H Y, Wang W W, Zhang L T, Bu J W. The effects of Pb-stress on functions of photosystems and photosynthetic rate in maize seedling leaves. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1162-1169.
- [9] Weigel H J. Inhibition of photosynthetic reactions of isolated intact chloroplasts by cadmium. Journal of Plant Physiology, 1985, 119: 179-189.
- [10] Krupa Z, Öquist G, Huner N P A. The effects of cadmium on photosynthesis of *Phaseolus vulgaris* — a fluorescence analysis. Physiologia Plantarum, 1993, 88(4): 626-630.
- [11] Jannssen L H J, Warm H W, van Hasselt P R. Temperature dependence of chlorophyll fluorescence induction and photosynthesis in tomato as affected by temperature and light conditions during growth. Journal of Plant Physiology, 1992, 139: 549-554.
- [12] Zhang J P, Chen J, Hu Y H, Mo Y W. Effects of cadmium stress on photosynthetic function of leaves of *Lemna minor* L. Journal of Agro-Environment Science, 2007, 26(6): 2027-2032.
- [13] Pulford I D, Watson C. Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by trees—a review. Environment International, 2003, 29(4): 529-540.
- [14] Jensen J K, Holm P E, Nejrup J, Larsen M B, Borggaard O K. The potential of willow for remediation of heavy metal polluted calcareous urban soils. Environmental Pollution, 2009, 157(3): 931-937.
- [15] Aronsson P, Perttu K. Willow vegetation filters for wastewater treatment and soil remediation combined with biomass production. The Forestry Chronicle, 2001, 77(2): 293-299.
- [16] Klang-westin E, Eriksson J. Potential of *Salix* as phytoextractor for Cd on moderately contaminated soils. Plant and Soil, 2003, 249(1): 127-137.

- [17] Granel T, Robinson B, Mills T, Clothier B, Green S, Fung L. Cadmium accumulation by willow clones used for soil conservation, stock fodder, and phytoremediation. *Australian Journal of Soil Research*, 2002, 40(8): 1331-1337.
- [18] Yang W D, Chen Y T. Differences in uptake and tolerance to cadmium in varieties of *Salix integra*. *Forest Research*, 2008, 21(6): 857-861.
- [19] Xu A C, Chen Y T, Wang S F, Wu T L. Preliminary research on cadmium uptake, accumulation and tolerance in *Salix*. *Research of Environmental Sciences*, 2006, 19(5): 96-100.
- [20] Yang W D, Chen Y T, Wang S F. Influences of cadmium stress on photosynthesis and endopeptidase activities in *Salix matsudana*. *Bulletin of Botanical Research*, 2009, 29(4): 428-432.
- [21] Lin S Q, Xu C H, Zhang Q D, Xu L, Mao D Z, Kuang T Y. Some application of chlorophyll fluorescence kinetics to plant stress physiology, phytoecology and agricultural modernization. *Chinese Bulletin of Botany*, 1992, 9(1): 1-16.
- [22] Li P M, Gao H Y, Strasser R J. Application of the fast chlorophyll fluorescence induction dynamics analysis in photosynthesis study. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 2005, 31(6): 559-566.
- [23] Wan X Q, Zhang F, Xia X L, Yin W L. Effects of cadmium on photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters of solution-cultured poplar plants. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(6): 73-78.
- [24] Bai ZY, Li CD, Zhao JF, Wu YT, Zheng J F, Bi C R. Effect and preliminary analysis of chromosomal control on the chlorophyll fluorescence parameters of wheat substitution lines between synthetic hexaploid wheat and Chinese spring under drought stress. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(1): 47-57.
- [25] Yi Y J, Li F B, Li J Y. Physiological response of chlorophyll fluorescence in moss *Plagiomnium cuspidatum* to mixture heavy metal solution. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(11): 5437-5444.
- [26] Tu Z Y, Pan M J, Guo Q, Wang B S. The selection of *Salix xagyrobractealis*. *Journal of Jiangsu Forestry Science and Technology*, 2000, 27(2): 1-11.
- [27] Maxwell K, Johnson G N. Chlorophyll fluorescence — a practical guide. *Journal of Experimental Botany*, 2000, 51(345): 659-668.
- [28] Jiang C D, Gao H Y, Zou Q. Changes of donor and acceptor side in photosystem II complex induced by iron deficiency in attached soybean and maize leaves. *Photosynthetica*, 2003, 41(2): 267-271.
- [29] Demmig B, Björkman O. Comparison of the effect of excessive light on chlorophyll fluorescence (77K) and photon yield of O₂ evolution in leaves of higher plants. *Planta*, 1987, 171(2): 171-184.
- [30] Teng Z H, Zhi L, Zong X F, Wang S G, He G H. Effects of high temperature on chlorophyll fluorescence, active oxygen resistance activity, and grain quality in grain-filling periods in rice plants. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(9): 1662-1666.
- [31] Genty B, Briantais J M, Baker N R. The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA): General Subjects*, 1989, 990(1): 87-92.
- [32] Kramer D M, Johnson G, Kiirats O, Edwards G E. New fluorescence parameters for the determination of Q_A redox state and excitation energy fluxes. *Photosynthesis Research*, 2004, 79(2): 209-218.
- [33] Wang K B, Xu C H, Zhao F H, Tang C Q, Dai Y L. The effects of water stress on some in vivo chlorophyll a fluorescence parameters of wheat flag leaves. *Acta Biophysica Sinica*, 1997, 13(2): 273-278.
- [34] Wang L, Yang H Q, Fan W G, Zhang Z. Effect of CdCl₂ treatment on photosynthetic rate and chlorophyll fluorescence parameters in *Malus hupehensis* leaves. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(15): 3176-3183.

参考文献:

- [8] 姚广, 高辉远, 王未未, 张立涛, 部建雯. 铅胁迫对玉米幼苗叶片光系统功能及光合作用的影响. *生态学报*, 2009, 29(3): 1162-1169.
- [18] 杨卫东, 陈益泰. 不同杞柳品种对镉 (Cd) 吸收与忍耐的差异. *林业科学研究*, 2008, 21(6): 857-861.
- [19] 徐爱春, 陈益泰, 王树凤, 吴天林. 柳树对 Cd 吸收、积累和耐性的初步研究. *环境科学研究*, 2006, 19(5): 96-100.
- [20] 杨卫东, 陈益泰, 王树凤. 镉胁迫对旱柳光合作用和内肽酶变化的影响. *植物研究*, 2009, 29(4): 428-432.
- [21] 林世青, 许春辉, 张其德, 徐黎, 毛大章, 匡廷云. 叶绿素荧光动力学在植物抗性生理学、生态学和农业现代化中的应用. *植物学通报*, 1992, 9(1): 1-16.
- [22] 李鹏民, 高辉远, Strasser R J. 快速叶绿素荧光诱导动力学分析在光合作用研究中的应用. *植物生理与分子生物学学报*, 2005, 31(6): 559-566.
- [23] 万雪琴, 张帆, 夏新莉, 尹伟伦. 镉处理对杨树光合作用及叶绿素荧光参数的影响. *林业科学*, 2008, 44(6): 73-78.
- [24] 白志英, 李存东, 赵金锋, 吴同彦, 郑金凤, 毕常锐. 干旱胁迫对小麦代换系叶绿素荧光参数的影响及染色体效应初步分析. *中国农业科学*, 2011, 44(1): 47-57.
- [25] 衣艳君, 李芳柏, 刘家尧. 尖叶走灯藓 (*Plagiomnium cuspidatum*) 叶绿素荧光对复合重金属胁迫的响应. *生态学报*, 2008, 28(11): 5437-5444.
- [26] 涂忠虞, 潘明健, 郭群, 王宝松. 银芽柳的选育. *江苏林业科技*, 2000, 27(2): 1-11.
- [30] 滕中华, 智丽, 宗学风, 王三根, 何光华. 高温胁迫对水稻灌浆结实期叶绿素荧光、抗活性氧活力和稻米品质的影响. *作物学报*, 2008, 34(9): 1662-1666.
- [33] 王可玢, 许春辉, 赵福洪, 唐崇钦, 戴云玲. 水分胁迫对小麦旗叶某些体内叶绿素 a 荧光参数的影响. *生物物理学报*, 1997, 13(2): 273-278.
- [34] 王利, 杨洪强, 范伟国, 张召. 平邑甜茶叶片光合速率及叶绿素荧光参数对氯化镉处理的响应. *中国农业科学*, 2010, 43(15): 3176-3183.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 20 October, 2011 (Semimonthly)

CONTENTS

Community structure and diversity of macrobenthos in the intertidal zones of Yangshan Port	
.....	WANG Baoqiang, XUE Junzeng, ZHUANG Hua, et al (5865)
Variation characteristics of macrobenthic communities structure in tianjin coastal region in summer	
.....	FENG Jianfeng, WANG Xiuming, MENG Weiqing, et al (5875)
Analysis of habitat connectivity of the Yunnan snub-nosed monkeys (<i>Rhinopithecus bieti</i>) using landscape genetics	
.....	XUE Yadong, LI Li, LI Diqiang, WU Gongsheng, et al (5886)
Study on the spatial pattern of wetland bird richness and hotspots in Sanjiang Plain	LIU Jiping, LÜ Xianguo (5894)
Dynamic analysis of coastal region cultivated land landscape ecological security and its driving factors in Jiangsu	
.....	WANG Qian, JIN Xiaobin, ZHOU Yinkang (5903)
Landscape pattern gradient on tree canopy in the central city of Guangzhou, China	
.....	ZHU Yaojun, WANG Cheng, JIA Baoquan, et al (5910)
Research on dynamic changes of landscape structure and land use eco-security: a case study of Jiansanjiang land reclamation area ...	
.....	LIN Jia, SONG Ge, SONG Siming (5918)
Shangri-La county ecological land use planning based on landscape security pattern	
.....	LI Hui, YI Na, YAO Wenjing, WANG Siqi, et al (5928)
Changes of paddy field landscape and its influence factors in a typical town of south Jiangsu Province	
.....	ZHOU Rui, HU Yuanman, SU Hailong, et al (5937)
Species composition and succession of swamp vegetation along grazing gradients in the Zoige Plateau, China	
.....	HAN Dayong, YANG Yongxing, YANG Yang, et al (5946)
Characteristics and influence factors of the swamp degradation under the stress of grazing in the Zoige Plateau	
.....	LI Ke, YANG Yongxing, YANG Yang, et al (5956)
Variation of organic pollution in the last twenty years in the Qinzhou bay and its potential ecological impacts	LAN Wenlu (5970)
Response of radial growth Chinese pine (<i>Pinus tabulaeformis</i>) to climate factors in Wanxian Mountain of He'nan Province	
.....	PENG Jianfeng, YANG Airong, TIAN Qinhua (5977)
Vegetation and species diversity change analysis in 50 years in Tashan Mountain, Shandong Province, China	
.....	GAO Yuan, CHEN Yufeng, DONG Heng, et al (5984)
Effect of urban heat island on plant growth and adaptability of leaf morphology constitute	WANG Yating, FAN Lianlian (5992)
Effects of shading on photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters in leaves of the endangered plant	
<i>Thuja sutchuenensis</i>	LIU Jianfeng, YANG Wenjuan, JIANG Zeping, et al (5999)
Effects of shading on growth and quality of triennial <i>Clematis manshurica</i> Rupr.	
.....	HAN Zhongming, ZHAO Shujie, LIU Cuijing, et al (6005)
Allelopathic effect of extracts from <i>Artemisia sacrorum</i> leaf and stem on four dominant plants of enclosed grassland on Yunwu	
Mountain	WANG Hui, XIE Yongsheng, YANG Yali, et al (6013)
Effects of soil base cation composition on plant distribution and diversity in coastal wetlands of Hangzhou Bay, East China	
.....	WU Tonggui, WU Ming, YU Mukui, et al (6022)
Species diversity of arbuscular mycorrhizal fungi of <i>Stipa</i> L. in alpine grassland in northern Tibet in China	
.....	CAI Xiaobu, PENG Yuelin, YANG Minna, et al (6029)
Water consumption and annual variation of transpiration in mature <i>Acacia mangium</i> Plantation	
.....	ZHAO Ping, ZOU Lvliu, RAO Xingquan, et al (6038)
Foliar phenotypic plasticity of a warm-temperate shrub, <i>Vitex negundo</i> var. <i>heterophylla</i> , to different light environments in the	
field	DU Ning, ZHANG Xiuru, WANG Wei, et al (6049)

An case study on vegetation stability in sandy desertification land: determination and comparison of the resilience among communities after a short period of extremely aridity disturbanc	ZHANG Jiyi, ZHAO Halin (6060)
Response of soil quality indicators to comprehensive amelioration measures in coastal salt-affected land	SHAN Qihua, ZHANG Jianfeng, RUAN Weijian, et al (6072)
Fine-scale spatial associations of <i>Stipa krylovii</i> and <i>Stellera chamaejasme</i> population in alpine degraded grassland	ZHAO Chengzhang, REN Heng (6080)
The response of community-weighted mean plant functional traits to environmental gradients in Yanhe river catchment	GONG Shihui, WEN Zhongming, SHI Yu (6088)
Ozone stress increases lodging risk of rice cultivar Liangyoupeijiu: a FACE study	WANG Yunxia, WANG Xiaoying, YANG Lianxin, et al (6098)
Effect of sugarcane//soybean intercropping and reduced nitrogen rates on sugarcane yield, plant and soil nitrogen	YANG Wenting, LI Zhixian, SHU Lei, et al (6108)
Effect of wetting duration on nitrogen fixation of biological soil crusts in Shapotou, Northern China	ZHANG Peng, LI Xinrong, HU Yigang, et al (6116)
Effects of zinc on the fruits' quality of two eggplant varieties	WANG Xiaojing, WANG Huimin, WANG Fei, et al (6125)
Rapid light-response curves of PS II chlorophyll fluorescence parameters in leaves of <i>Salix leucopithecia</i> subjected to cadmium-ion stress	QIAN Yongqiang, ZHOU Xiaoxing, HAN Lei, et al (6134)
Physiological Response of <i>Mirabilis jalapa</i> Linn. to Lead Stress by FTIR Spectroscopy	XUE Shengguo, ZHU Feng, YE Sheng, et al (6143)
Physiological response of <i>Zoysia japonica</i> to Cd ²⁺	LIU Junxiang, SUN Zhenyuan, JU Guansheng, et al (6149)
Biosorption of Cd ²⁺ using the fruiting bodies of two macrofungi	LI Weihuan, MENG Kai, LI Junfei, et al (6157)
Factors regulating recruitment of <i>Microcystis</i> from the sediments of the eutrophic Shanzai Reservoir	SU Yuping, LIN Hui, ZHONG Houzhang, et al (6167)
A new type of insect trap and its trapping effect on <i>Cyrtotrachelus buqueti</i>	YANG Yaojun, LIU Chao, WANG Shufang, et al (6174)
Photoperiod influences diapause induction of Oriental Fruit Moth (Lepidoptera: Tortricidae)	HE Chao, MENG Quanke, HUA Lei, et al (6180)
Influence of edge effects on arthropods communities in agroforestry ecological systems	WANG Yang, WANG Gang, DU Yingqi, et al (6186)
Dynamics of land use and its ecosystem services in China's megacities	CHENG Lin, LI Feng, DENG Huafeng (6194)
Comprehensive assessment of urban ecological risks: the case of Huaibei City	CHANG Hsiaofoei, WANG Rusong, LI Zhengguo, et al (6204)
The dynamics of surface heat status of Tangshan City in 1993—2009	JIA Baoquan, QIU Erfa, CAI Chunju (6215)
A projection-pursuit based model for evaluating the resource-saving and environment-friendly society and its application to a case in Wuhan	WANG Qianqian, ZHOU Jingxuan, LI Xiangmei, et al (6224)
Research on ecological barrier to Chang-Zhu-Tan metropolitan area	XIA Benan, WANG Fusheng, HOU Fangzhou (6231)
Optimization of urban land structure based on ecological green equivalent: a case study in Ningguo City, China	ZHAO Dan, LI Feng, WANG Rusong (6242)
Dynamic ecological footprint simulation and prediction based on ARIMA Model: a case study of Gansu Province, China	ZHANG Bo, LIU Xiuli (6251)
Review and Monograph	
A prospect for study on isolated wetland	TIAN Xuezhi, LIU Jiping (6261)
Dinoflagellate heterotrophy	SUN Jun, GUO Shujin (6270)
Research progress of microbial agents in ecological engineering	WEN Ya, ZHAO Guozhu, ZHOU Chuanbin, et al (6287)
The progress of ecological civilization construction and its indicator system in China	BAI Yang, HUANG Yuchi, WANG Min, et al (6295)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 31 卷 第 20 期 (2011 年 10 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 20 2011

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元