

姜永雷,唐 探,陈嘉裔,等. 镉胁迫对水蕨幼苗叶绿素荧光参数和生理指标的影响[J]. 江苏农业科学,2015,43(9):357-360.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.09.115

镉胁迫对水蕨幼苗叶绿素荧光参数和生理指标的影响

姜永雷,唐 探,陈嘉裔,冯程程,黄晓霞

(西南林业大学园林学院,云南昆明 650224)

摘要:以一年生水蕨幼苗为试验材料,用不同浓度的 CdCl_2 [0(对照组)、20、40、60 mg/L] 溶液进行胁迫处理,研究其叶绿素荧光特性对重金属 Cd^{2+} 胁迫的响应。结果表明:随着 Cd^{2+} 浓度的增加,水蕨幼苗叶片的初始荧光 F_0 和非光化学猝灭系数(q_N)呈显著增加趋势,而 PS II 最大光化学效率(F_v/F_m)、PS II 实际光合效率(Yield)、光化学猝灭系数(q_P)和电子传递 ETR 显著降低,说明 CdCl_2 溶液处理下的水蕨幼苗 PS II 受到损伤,且损伤程度随着处理浓度的增大而加剧。此外, Cd^{2+} 胁迫引起水蕨幼苗叶绿素含量下降;且随着 Cd^{2+} 浓度的增加,细胞内膜脂过氧化产物丙二醛(MDA)和脯氨酸(proline)含量也显著增加。说明水蕨幼苗代谢机制只能抵御较低浓度的 Cd^{2+} 胁迫,而高浓度的 Cd^{2+} 处理将对该植株的叶绿素荧光性状及生长发育造成严重的伤害。

关键词:镉胁迫;水蕨幼苗;叶绿素荧光;PS II;生理指标

中图分类号: Q945.78;S682.350.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-1302(2015)09-0357-04

重金属是一类重要的环境污染物,每年我国的土地由于工业废水的排放、农药的滥用和一些化肥的应用而受到了严重污染,使得大量的重金属离子(如铅、汞和镉等)通过生长在污染的土地上的作物进入到人和动物的体内,严重影响人们的生活质量。大量的重金属离子也通过河道、江河湖泊等严重污染我们的饮用水源,有研究表明,我国的黄河、淮河、松花江、辽河等十大流域的重金属超标断面的污染程度均为超 V 类^[1]。在这些重金属中,镉、铅、汞、砷等都有剧毒,且是植物生长所不需要的重金属元素,一旦进入到植物体内并长期大量积累,对植物的光合作用、水分代谢和营养元素的吸收都会起到显著抑制作用,进而导致植物生长迟缓、叶片发黄和根系弱小等症,最终导致植物不能较好地生长而死亡。在众多的对重金属影响植物的报道中发现,镉是植物生长不需要、毒性很强且容易被植物吸收并积累的一种重金属元素,严重影响植物正常的生长发育和生理品质^[2]。在植物的光合作用方面,镉胁迫能显著降低叶绿素的含量,影响植物正常的光合和呼吸代谢;此外,镉离子(Cd^{2+})处理浓度的增加能够抑制植物的光合电子传递速率(ETR)、光能利用效率、降低 PS II 捕光复合体(LHC II)捕获光能的能力和激发电能的效率^[3-5]。另外,植物在受到这些重金属的胁迫时,体内的一些防御机制也会积极响应来降低其受到的胁迫伤害。有研究表明,植物在受到 Cd^{2+} 胁迫时,体内抗氧化酶系统的活性会提高,一些代谢产物(可溶性蛋白质、可溶性糖和脯氨酸等)含

量会显著提高以降低其受到伤害的程度和提高其抗性^[6]。

蕨类植物是古老的维管植物,也是植物界系统演化中一个独特的自然类群,蕨类植物具有药用及观赏等多方面的功用。在抑菌、抗癌等方面多种蕨类均具有较高的开发利用价值,同时蕨类优美的叶形、精致的叶脉以及奇特的孢子囊群使得它具有古朴、典雅、清纯等特点和独一无二的观赏价值。水蕨(*Ceratopteris thalictroides*)为水蕨科(Parkeriaceae)水蕨属(*Ceratopteris*)一年生水生或湿生植物,国家二级重点保护野生植物。叶簇生,两型,常生于池沼、水田或水沟的淤泥中,产于云南、广东、福建、江西、浙江等地^[7]。从目前研究结果看,对蕨类植物的研究主要集中在其食用性、药用性和观赏性方面。另外,蕨类植物更是研究植物性别决定、配子体的形态建成等的模型植物之一。但是近年来,国内湿地(主要是湖泊、河流和滨海湿地)重金属污染的情况已经十分严重。长期以来,特别是近几十年来,由于人类活动的影响,重金属通过工业废水排放到河流洪坡中,导致水蕨生长环境恶化,致使水蕨在我国的分布范围和种群数量正日趋减少,濒临灭绝。大部分现存种群个体数偏少,且绝迹种群所在地的原生境已遭到严重的重金属污染,但是对其响应重金属胁迫的机制方面的研究较少。本试验以我国濒危的水蕨为研究对象,模拟不同梯度的重金属 Cd^{2+} 污染程度,通过测定不同条件下水蕨的叶绿素荧光特性、叶绿素含量、脯氨酸(proline)含量、丙二醛(MDA)含量等一系列生理特性指标的变化,从而反映出水体中不同浓度重金属镉对水蕨植物体的影响,可为水蕨响应重金属的胁迫机制提供一定的理论依据和数据参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试验处理

1.1.1 试验材料与试验设计 本试验所用材料为西南林业大学园林学院后山上长势一致的水蕨成株,使用珍珠岩:蛭石=2:1的无机基质,并配以 1/2 Hoagland 营养液进行培养。

收稿日期:2015-09-05

基金项目:“省部级重点学科、省高校重点实验室及校实验室共享平台”资助项目;西南林业大学大学生科技创新基金资助(编号:1366)。

作者简介:姜永雷(1988—),男,河南周口人,硕士研究生,研究方向为园林植物。E-mail:10-29jyl@163.com。

通信作者:黄晓霞,博士,副教授,主要从事植物生理生态研究。E-mail:huangxx@swfu.edu.cn。

经 20 d 适应性培养后,分别改用加入不同梯度 CdCl_2 (0、20、40、60 mg/L)溶液的营养液培养,每处理组 10 盆,每盆 1 株,每隔 3 d 更换处理组相对应 CdCl_2 浓度的营养液,试验培养时间 1 个月。本试验共设 4 个组:对照 0 mg/L, Cd^{2+} (20、40、60 mg/L)处理组。试验大棚内白天温度范围为 20 ~ 30 ℃,夜间温度范围为 9 ~ 18 ℃,相对湿度为 35% ~ 80%。处理时间从 2013 年 9 月中旬到 10 月中旬,共 1 个月时间。所有指标测定在处理结束时进行,每株选取从上到下的第 3 片至第 5 片完全展开的叶作为荧光参数及脯氨酸(proline)和丙二醛(MDA)含量的测定样品,每处理至少 5 株重复。

1.1.2 叶绿素荧光参数的测定 用 Imaging - PAM M - series 调制叶绿素荧光成像系统(德国 WALZ 公司)测定叶绿素荧光参数。植物材料经充分暗适应后,先用测量光 $[0.5 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ 测定初始荧光 F_0 , 饱和光脉冲 $2700 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ (脉冲时间 0.8 s) 诱导 F_m , 作用光强度为 $186 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。将待测叶片置于样品台上,选定多个直径 1 cm 的 AOI 后,在软件的 Kinetics 窗口检测各叶绿素荧光参数的动力学变化曲线,相应数据直接从 Report 窗口导出。每处理至少 5 个重复。叶片初始荧光 (F_0)、反应中心 PS II 潜在最大光合效率 (F_v/F_m)、PS II 实际光合效率 (Yield)、荧光淬灭系数 (q_p)、非光化学淬灭系数 (q_n)、电子传递速率 (ETR) 等参数的计算,由仪器自动给出。

1.1.3 其他生理指标测定 丙二醛 MDA 含量测定参照

Hodges 等的方法^[8]。游离脯氨酸含量测定参照 Bates 等的方法^[9]。叶绿素含量测定参照 Inskeep 等的方法^[10],称取 0.1 g 植物叶片,用冷的二甲基酰胺黑暗中 4 ℃ 下浸提 48 h,于 663.8 nm 和 646.8 nm 下比色。计算单位叶鲜质量的叶绿素 a 和叶绿素 b 含量。

1.2 统计分析

所有的数据分析都利用 SPSS 19.0 统计分析软件进行一元方差分析(one - way ANOVA),平均数间的多重比较采用 Duncan's 检验方法, $P < 0.05$ 时差异显著。

2 结果与分析

2.1 Cd^{2+} 处理对水蕨幼苗 PS II 叶绿素荧光参数 F_v/F_m 、Yield、 q_n 和 q_p 的影响

Cd^{2+} 处理对水蕨幼苗 PS II 叶绿素荧光参数的影响如表 1 所示,各处理组与对照组(0 mg/L)相比差异显著。PS II 最大光化学效率(F_v/F_m)、PS II 实际光合效率 (Yield) 和光化学淬灭系数(q_p) 都显著下降 ($P < 0.001$),且随着 Cd^{2+} 浓度的增加,其值下降的幅度增大,且远远低于对照组。在 Cd^{2+} 浓度为 60 mg/L 时, F_v/F_m 、Yield 和 q_p 下降最大,与对照相比分别下降 11.07%、62.37% 和 51.38%。非光化学淬灭系数(q_n) 的值随着 Cd^{2+} 浓度的增加呈现出极显著增加的趋势,在 Cd^{2+} 浓度为 60 mg/L 时达到最大值,与对照相比,增加了 108.98%,且各处理组之间差异显著 ($P < 0.001$) (表 1)。

表 1 Cd^{2+} 处理对叶绿素荧光参数的影响

镉浓度(mg/L)	PS II 最大光化学效率 F_v/F_m	PS II 实际光合效率 Yield	非光化学淬灭系数 q_n	光化学淬灭系数 q_p
0	0.721 8 ± 0.020 11c	0.506 3 ± 0.036 48c	0.285 0 ± 0.009 45a	0.752 0 ± 0.030 50d
20	0.685 3 ± 0.032 02b	0.379 5 ± 0.102 11b	0.376 5 ± 0.103 27b	0.612 1 ± 0.133 24c
40	0.646 1 ± 0.023 21a	0.254 6 ± 0.034 31a	0.507 3 ± 0.057 45c	0.470 1 ± 0.046 50b
60	0.641 9 ± 0.018 01a	0.190 5 ± 0.042 30a	0.595 6 ± 0.064 50d	0.365 6 ± 0.070 74a
P 值	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***

注:同一列中不同字母表示差异显著(邓肯式新复极差法), $P < 0.05$ 。每个值代表 5 个重复的平均值 ± 标准误;ns,差异不显著;* 表示在 0.05 水平上差异显著 ($P < 0.05$);** 表示在 0.01 水平上差异显著 ($P < 0.01$);*** 表示在 0.001 水平上差异显著 ($P < 0.001$)。下表同。

2.2 Cd^{2+} 处理对水蕨幼苗 PS II 叶绿素荧光参数 F_0 和 ETR 的影响

图 1 结果表明,随着 Cd^{2+} 浓度增大,水蕨幼苗叶片的初始荧光参数 F_0 和 PS II 叶绿素荧光参数 ETR 的变化趋势相反。在 Cd^{2+} 处理下,叶片初始荧光 F_0 显著增加,各处理组之间差异显著,且在 60 mg/L 处理下达到最大值,与对照相比升高了 91.76%。ETR 是 PS II 植物电子传递速率的一个重要参数,在 Cd^{2+} 浓度增大时,其值下降且与对照差异极显著,在 Cd^{2+} 浓度为 60 mg/L 处理下,下降幅度最大(达到 62.61%)。

2.3 Cd^{2+} 处理对叶绿素含量的影响

当 Cd^{2+} 处理浓度增大时,水蕨幼苗叶片中叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素 (a + b) 与对照相比显著下降(表 2)。在 Cd^{2+} 浓度为 60 mg/L 时,其下降幅度达到最大,下降率分别为 46.97%、47.48% 和 49.93%。而叶绿素 a/b 比值的变化趋势与其相反,呈上升趋势但是变化不显著。

2.4 Cd^{2+} 处理对水蕨幼苗叶片 MDA 含量的影响

丙二醛(MDA)含量的变化是植物在受到外界环境胁迫时,反映植物细胞膜脂过氧化强弱的一个重要的生理指标。膜脂过氧化程度越严重,MDA 含量越高。由图 2 可以看出,

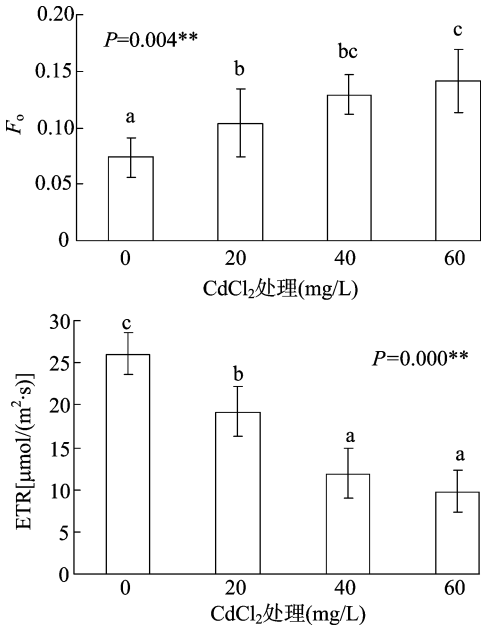


图 1 Cd^{2+} 处理对 F_0 和 ETR 的影响

表 2 Cd²⁺ 处理对对叶绿素含量的影响

镉浓度 (mg/L)	叶绿素 a (μg/g)	叶绿素 b (μg/g)	叶绿素 a/叶绿素 b	叶绿素 a + b (μg/g)
0	524.129 3 ± 34.173 01c	238.632 3 ± 30.407 47c	2.221 4 ± 0.336 62a	762.763 3 ± 41.634 43c
20	405.195 3 ± 80.500 4b	173.115 3 ± 173.115 3ab	2.350 7 ± 0.520 80ab	578.313 3 ± 75.939 86b
40	356.932 7 ± 106.884 92c	121.646 3 ± 7.9960 5c	2.947 2 ± 0.950 94a	478.583 3 ± 106.110 19ab
60	277.921 3 ± 33.300 41b	103.956 3 ± 7.9467 9bc	2.691 3 ± 0.466 59ab	381.883 3 ± 30.621 24a
p	0.017 *	0.000 ***	0.498ns	0.001 **

随着 Cd²⁺ 处理浓度的增加,水蕨幼苗叶片中的丙二醛(MDA)含量与对照相比都显著增加(图 2),且在 60 mg/L 时 MDA 含量达到最大值,与对照相比增加了 84.97%。

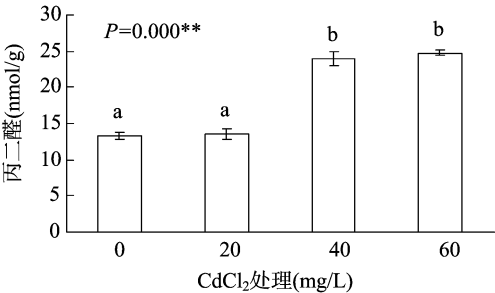


图2 Cd²⁺处理对丙二醛(MDA)含量的影响

2.5 Cd²⁺ 处理对水蕨幼苗叶片脯氨酸含量的影响

脯氨酸(proline)含量与MDA的变化趋势一致(图3)。植物在受到逆境胁迫时,植物细胞内的脯氨酸作为一种重要的渗透调节物质,在调节细胞膜内物质含量的平衡中有很重要的作用。图3结果显示,与对照组相比,Cd²⁺处理组的水蕨幼苗叶片内脯氨酸(proline)含量显著增加,在60 mg/L 的Cd²⁺浓度处理下增加了74.35%;但在不同浓度Cd²⁺处理组之间并无显著差异。

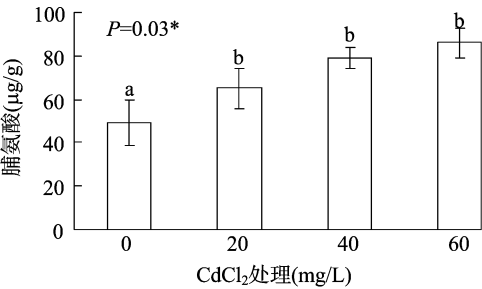


图3 Cd²⁺处理对脯氨酸(proline)含量的影响

3 结论与讨论

本试验结果表明,水蕨幼苗的叶绿素荧光特性受到了重金属镉胁迫的显著影响。在受到Cd²⁺胁迫时,水蕨幼苗的光合系统及脯氨酸(proline)和丙二醛(MDA)含量都受到了显著的影响,且随着镉离子处理浓度的增加其损伤程度加深。

植物在受到逆境胁迫时,其光合作用内部的各个反应过程都会受到抑制。此时,植物表现出复杂和细微的内部变化来应对逆境胁迫。有研究表明,叶绿素荧光与光合作用各个反应过程紧密相关,通过叶绿素荧光诱导动力学参数的变化能够准确方便地反映植物受生物或非生物胁迫的程度^[11]。

本试验中,水蕨幼苗在受Cd²⁺胁迫处理后,其叶绿素荧光参数F_v/F_m、Yield、q_p和ETR均显著降低。而叶片初始荧光F_o和非光化学淬灭系数q_N却显著上升。在叶绿素荧光中F_v/F_m是植物PSⅡ反应中心捕获光能激发能力和效率的重要指标,能反映植物PSⅡ受伤害的程度。在一般情况下其值的变化范围很小,不受物种和生长条件的影响^[12]。在本试验中,水蕨幼苗的叶片F_v/F_m随着Cd²⁺处理浓度的增大而显著下降;说明水蕨幼苗叶片PSⅡ反应中心活性受到了Cd²⁺胁迫的损害或抑制,进而导致其捕获光激发能的效率降低;与Baszynski等对番茄幼苗的研究结果^[3]一致。另外,相似的结果在钱永强等对3种柳树叶片的PSⅡ叶绿素荧光参数对Cd²⁺胁迫的光响应的研究中^[11]也有过报道。而Yield是植物实际光合效率参数,其值的变化反映了植物PSⅡ反应中心在部分关闭情况下的实际原初光能捕获效率。大量的研究表明,在植物受到逆境胁迫后,PSⅡ反应中心会受到抑制而在很大程度上关闭,从而降低Yield的转化比例^[13-14],相似的结果在本试验中也有证明,Cd²⁺浓度处理下的水蕨幼苗叶片Yield值显著降低,最大下降了62.37%。本试验结果与万雪琴等对杨树在响应镉胁迫的研究结果^[10]一致,说明PSⅡ反应中心受到了较大程度的伤害,而非光化学淬灭系数(q_N)及光化学淬灭系数(q_p)与对照相比分别最大增加了108.98%和最大下降了51.38%,q_N参数变化反映了植物PSⅡ天线色素吸收过量的不能用于光合电子传递的光能,而以热的形式散失掉的份额^[15]。而q_p则是植物PSⅡ吸收的用于光化学电子传递的比例^[15]。该试验结果表明,水蕨幼苗在受到Cd²⁺胁迫时,q_p值的降低在一定程度上降低了水蕨幼苗叶片PSⅡ反应中心的开放程度;q_N的升高使水蕨幼苗叶片PSⅡ反应中心吸收的过量的光能能及时地以热耗散的形式散失出去。钱永强等认为植物的初始荧光F_o的变化与PSⅡ反应中心活性有关,是评价植物逆境伤害的一个重要指标^[11]。而本试验中植物初始荧光F_o显著上升,说明水蕨幼苗在受到Cd²⁺胁迫时通过PSⅡ反应中心的活性提高来积极响应其受伤害的程度。植物在受到Cd²⁺胁迫时不仅光合机构受到了损伤,同时ETR也受到了影响。本试验中,与对照相比,水蕨幼苗叶片ETR显著受到抑制。这可能是水蕨在受到Cd²⁺胁迫时,通过增加q_N来耗散掉过剩的光能,保护PSⅡ反应中心的活性^[16],在一定程度上提高对Cd²⁺胁迫的耐性。

研究表明,植物在逆境胁迫下,不仅会引起光合机构的损伤,同时也影响植物用于光合作用的色素。光合色素在植物的光能吸收、传递和转化中起着不可或缺的作用,其含量的多少对光合速率有直接的影响^[17]。本试验中,无论是叶绿素a、叶绿素b或者叶绿素(a+b)在Cd²⁺胁迫时,与对照相比都极

显著下降($P < 0.001$),且随着 Cd^{2+} 浓度的增大下降幅度增大。说明水蕨幼苗叶片在 Cd^{2+} 胁迫下叶绿素被破坏或直接导致植物合作用下降。该试验结果与王春梅等对茶树的研究结果^[22]一致。叶绿素 a/b 值的变化是植物光合器官生理状况的重要指标^[18]。在本试验中,叶绿素 a/b 的值呈上升趋势。有研究表明,叶绿素 a/b 值的变化反映了植物细胞叶绿体类囊体的垛叠程度,在严重的逆境胁迫下,叶绿素 a/b 值上升导致其叶绿体内类囊体的垛叠程度升高^[19],在一定程度上降低逆境胁迫下光抑制的发生。本试验结果说明在 Cd^{2+} 胁迫下水蕨幼苗叶片类囊体的垛叠程度增大,降低光抑制的发生。

植物受到生物或非生物胁迫也能通过生理指标含量的变化来表现出来。其中,反映植物遭受逆境胁迫伤害的一个重要的生理指标就是植物细胞的脂质过氧化产物 MDA。植物细胞内 MDA 的含量越高说明其受到的伤害程度越大^[20]。本试验研究结果表明,随着 Cd^{2+} 浓度的增加 MDA 含量呈显著增加趋势。这与廖克波等^[21]和覃勇荣^[22]等的研究结果一致,说明水蕨幼苗的细胞在受到 Cd^{2+} 胁迫时发生了严重的膜脂过氧化,严重影响了幼苗正常的生理代谢。此外,作为植物细胞内最重要的渗透性调节物质脯氨酸(proline)含量的变化也是反映植物响应逆境胁迫的一个重要指标。Csonk 等^[23]和 Pang 等^[24]研究发现,脯氨酸(proline)含量积累能有效调节细胞渗透平衡、增强细胞结构稳定性、阻止超氧自由基的产生和降低细胞膜脂过氧化的作用。本试验中,在 Cd^{2+} 胁迫下脯氨酸(proline)的含量亦显著增加,说明水蕨幼苗可通过提高脯氨酸含量来提高细胞的渗透势,维持细胞正常代谢,提高抗逆性;但随着 Cd^{2+} 处理浓度的增加,脯氨酸含量并无进一步的增加趋势,说明水蕨幼苗应对 Cd^{2+} 胁迫的渗透调节只能在一定范围内发挥其作用。

综上所述,随着 Cd^{2+} 浓度的增加,水蕨幼苗叶片的叶绿素荧光参数 F_v/F_m 、Yield、 q_p 和 ETR 显著下降,而非光化学猝灭系数(q_n)却显著上升。另外,与光合作用密切相关的叶绿素 a 和叶绿素 b,以及总的叶绿素含量都显著降低,而丙二醛(MDA)和脯氨酸(proline)含量显著增加;说明水蕨幼苗的光合作用和生理代谢在 Cd^{2+} 胁迫下受到了严重的损伤。另外,综合各项指标可以看出,水蕨幼苗通过自身的光保护机制和生理代谢机制只能抵御较低浓度的 Cd^{2+} 胁迫,而 40~60 mg/L 的高浓度 Cd^{2+} 处理将对植株的生理生化性状及生长发育造成严重的伤害。

参考文献:

- [1]董元火,王青锋. 中国濒危水生蕨类植物研究进展[J]. 武汉大学学报:理学版,2011,57(4):335-342.
- [2]李兆君,马国瑞,徐建民,等. 植物适应重金属 Cd 胁迫的生理及分子生物学机理[J]. 土壤通报,2004,35(2):234-238.
- [3]Baszynski T, Wajda L, Krol M, et al. Photosynthetic activities of cadmium-treated tomato plants[J]. Physiologia Plantarum, 1980, 48(3):365-370.
- [4]Bernier M, Popovic R, Carpentier R. Mercury inhibition at the donor side of photosystem II is reversed by chloride[J]. FEBS Letters, 1993, 321(1):19-23.
- [5]姚广,高辉远,王未未,等. 铅胁迫对玉米幼苗叶片光系统功能及光合作用的影响[J]. 生态学报,2009,29(3):1162-1169.
- [6]李梦梅,龙明华. 植物抗镉胁迫的研究综述[J]. 广西农业科学, 2005,36(4):319-322.
- [7]吴翠. 水蕨濒危机制的生态学研究[D]. 武汉:武汉大学, 2005:1-54.
- [8]Hodges D M, Delong J M, Forney C F, et al. Improving the thiobarbituric acid-reactive-substances assay for estimating lipid peroxidation in plant tissues containing anthocyanin and other interfering compounds[J]. Planta, 1999, 207(4):604-611.
- [9]Bates C J, Waldren R P, Teare I D. Rapid determination of free proline for water-stress studies[J]. Plant Soil, 1973, 39:205-207.
- [10]Inskeep W P, Bloom P R. Extinction coefficients of chlorophyll a and b in *N,N*-dimethylformamide and 80% acetone[J]. Plant Physiology, 1985, 77(2):483-485.
- [11]钱永强,周晓星,韩蕾,等. Cd^{2+} 胁迫对银芽柳 PS II 叶绿素荧光光响应曲线的影响[J]. 生态学报,2011,20(20):6134-6142.
- [12]Kramer D M, Johnson G, Kiirats O, et al. New fluorescence parameters for the determination of $q(a)$ redox state and excitation energy fluxes[J]. Photosynthesis Research, 2004, 79(2):209-218.
- [13]Qin T C, Wu Y S, Wang H X, et al. Effect of cadmium, lead and their interaction on the physiological and ecological characteristics of root system of *Brassica chinensis*[J]. Acta Ecologica Sinica, 1998, 18(3):320-325.
- [14]李卜,吴好,李奕松. 镉胁迫对枣树幼苗叶片生理特性的影响[J]. 北京农学院学报,2012,27(1):22-25.
- [15]李晓,冯伟,曾晓春. 叶绿素荧光分析技术及应用进展[J]. 西北植物学报,2006,26(10):2186-2196.
- [16]王利,杨洪强,范伟国,等. 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[J]. 中国农业科学,2010,43(15):3176-3183.
- [17]姜永雷,鲁红鼎,邓莉兰,等. 镉胁迫对滇润楠幼苗生理特性的影响[J]. 江西农业大学学报,2013,35(4):769-774.
- [18]夏建国,兰海霞,吴德勇. 铅胁迫对茶树生长及叶片生理指标的影响[J]. 农业环境科学学报,2010,29(1):43-48.
- [19]王飞翔,王妙媛,李达,等. 土壤铅和镉胁迫对红花檵木叶片光合特性及色素含量的影响[J]. 湖南农业科学,2012(15):103-105,112.
- [20]陈会,任艳芳,陈秀兰,等. 镉胁迫下不同耐性水稻植株幼苗生长和抗氧化酶的变化[J]. 江西农业大学学报,2012,34(6):1099-1104.
- [21]廖克波,刘昆成,谢安德,等. 镉胁迫对观光木幼苗生理特性的影响[J]. 广东农业科学,2012,39(5):47-49.
- [22]覃勇荣,冯济梅,梁文忠,等. 镉胁迫下的桑树幼苗叶片丙二醛含量动态分析[J]. 河池学院学报,2012,32(2):17-21,59.
- [23]Csonka I N. Physiological and genetic response of bacteria to osmotic stress[J]. Microbial Rev, 1989, 53:121-147.
- [24]Pang J, Chan G S, Zhang J, et al. Physiological aspects of vetiver grass for rehabilitation in abandoned metalliferous mine wastes[J]. Chemosphere, 2003, 52(9):1559-1570.