2017-10-25 DOI: 10.3724/SP.J.1145.2017.03030 http://www.cibj.com/
应用与环境生物学报 Chin J Appl Environ Biol 2017, 23 (5): 0837-0844

土壤镉、铅及其复合污染胁迫对丁香蓼(*Ludwigia prostrata*)生长和光合荧光特性的影响*

简敏菲[1**] 张乖乖[1] 史雅甜[1] 余厚平[2] 陈奕奇[3]

[1]江西师范大学生命科学学院/江西省亚热带植物资源保护与利用重点实验室 南昌 330022
[2]江西师范大学基建处 南昌 330022
[3]诺丁汉大学地理学院 英国诺丁汉 NG7 2RD

摘 要 通过室内盆栽土培试验,研究铅(Pb)、镉(Cd)单因素及其复合污染对田间杂草丁香蓼(*Ludwigia prostrata* Roxb.)生长及光合荧光等生理特性的影响. 结果表明:(1)随着Cd、Pb单因素及其复合污染浓度升高,丁香蓼的茎长、根长和鲜重等指标均显著下降($P < 0.05$). (2)叶绿素a、b含量或叶绿素a/b值随胁迫浓度的增加而显著降低. (3)单因素Pb污染对丁香蓼的PSII反应中心(光系统II反应中心)的影响不显著;在单因素Cd的最高浓度T_{50}(80 mg/kg)污染胁迫下,丁香蓼的PSII最大量子产率(QY_{max})、稳态下的有效量子产率(F_v'/F_m'_Lss)和稳态下的非光化学猝灭(NPQ_Lss)值仅为对照组(CK)的37%、51%、14%;且与对照组相比,Cd胁迫下丁香蓼的F_o、F_m、F_v、F_v/F_o的降幅也均显著高于单因素Pb胁迫下或Pb、Cd复合污染胁迫下的降幅;综合分析表明单因素Cd对PSII反应中心的影响最强,双因素Pb、Cd复合污染影响次之,单因素Pb胁迫下的影响最小. (4)丁香蓼各部位的重金属含量随胁迫浓度增加而上升,且在Pb、Cd复合污染胁迫下,Cd能促进丁香蓼对Pb的吸收. 综上表明,丁香蓼对Pb、Cd及其复合污染物均具有较强的耐受性及富集能力,可尝试用于Pb、Cd重金属污染土壤的生态修复. (图3 表4 参35)

关键词 丁香蓼;重金属;铅;镉;复合胁迫;生理生化特性
CLC X173 : X53

Effects of single and combined pollution stress of cadmium and lead in soil on the growth and photosynthetic fluorescence characteristics of *Ludwigia prostrata**

JIAN Minfei[1**], ZHANG Guaiguai[1], SHI Yatian[1], YU Houping[2] & CHEN Yiqi[3]

[1] *College of Life Science, Jiangxi Provincial Key Laboratory of Protection and Utilization of Subtropical Plant Resources, Jiangxi Normal University*, Nanchang 330022, China
[2] *Infrastructure Department, Jiangxi Normal University*, Nanchang 330022, China
[3] *School of Geography, University of Nottingham*, Nottingham, NG7 2RD, United Kingdom

Abstract *Ludwigia prostrata* Roxb. is a field weed, which is widely distributed in the southern part of China. In this study, we investigated how the growth and photosynthetic fluorescence characteristics of *L. prostrata* are affected by single-factor pollution stress of lead or cadmium and their combined pollution stress using pot experimental methods in the laboratory. The results indicate that the stem length, root length, total weight, and chlorophyll a, b, and a/b content of *L. prostrata* under different heavy metal pollution stresses all decreased ($P < 0.05$) with increasing concentrations of single-factor or two-factor lead and cadmium. The pollution stress of single-factor or two-factor lead and cadmium at lower concentrations caused some damage to the physiological systems of *L. prostrata* and two-factor pollution stress of lead and cadmium at higher concentrations had a role in promoting growth. The contents of chlorophyll a or b and the chlorophyll a/b ratio reduced significantly with increase in stress concentration but increased under single-factor or two-factor pollution stress of lead and cadmium at higher concentrations. The single-factor cadmium, but not lead, pollution stress had no significant effects on PSⅡ reaction centers. The maximum quantum yield (QY_{max}), effective photochemical efficiency (F_v'/F_m'_Lss), and non-photochemical quenching (NPQ_Lss) under the pollution stress of single-factor cadmium at the highest concentration (T_{50})

收稿日期 Received: 2017-03-20 接受日期 Accepted: 2017-04-19
*国家自然科学基金项目(41461042)和江西省科技支撑计划项目(20161BBG70004)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (41461042) and the Science and Technology Support Plan Project of Jiangxi Province (20161BBG70004)
**通信作者 Corresponding author (E-mail: jianminfei0914@163.com)

were only 37%, 51%, 14% of those of the control group, respectively. Furthermore, the decline in F_o, F_m, F_v, and F_v/F_o under single-factor cadmium pollution stress at different concentration was larger than those of both single-factor lead and two-factor lead and cadmium at the corresponding concentration. The comprehensive analysis showed that the single-factor cadmium pollution stress had the strongest effects on the PSII reaction center, followed by those of double-factor lead and cadmium, and the effects of single-factor lead pollution stress were the weakest. The above results show that *L. prostrata* has strong tolerance and enrichment ability for cadmium, lead, and their combination, which indicates that *L. prostrata* can be used in the ecological restoration of soil polluted by the heavy metals lead and cadmium.

Keywords *Ludwigia prostrata*; heavy metal; lead; cadmium; combined pollution; physiological and biochemical characteristics

目前，重金属污染在世界范围内已成为一个突出的环境问题. 在不同重金属污染中，存在严重生物毒性的重金属离子有Pb^{2+}、Cd^{2+}、Hg^{2+}、Cu^{2+}、Zn^{2+}、Ni^{2+}以及As^{3+}等，其中Pb是环境污染物中的首要元素之一，Cd是继汞、铅之后污染人类环境、威胁人类健康的第3种重金属元素[1]. Pb、Cd在日常生活中普遍存在，因此Pb、Cd的污染问题不容忽视. 大量研究证实，Pb^{2+}能影响植物的抗氧化酶系统[2-3]，受Cd^{2+}污染的水稻根尖呈深褐色坏死[4]，Cd^{2+}能抑制玉米[5]、小麦[6]、黄瓜[7]、番茄[8]等的生长，且均出现叶片失绿、发黄等症状而影响作物的产量. 目前，Pb、Cd单因素及其复合污染对植物光合生理的研究主要集中在食用作物方面.

丁香蓼（*Ludwigia prostrata* Roxb.）为柳叶菜科丁香蓼属植物，一年生直立草本，是一种常见的田间杂草，广泛分布于我国南部地区. 杂草是人为与自然选择压力下产生的高度进化的植物类群，具有生物量大、抗逆性强、生长迅速等特性，在水土保持、土壤改良和农业生物多样性的维持等方面起着重要作用[9]. 因此，从杂草中筛选重金属富集植物，并对其耐受重金属胁迫的相关机制等方面进行研究，对于利用杂草修复土壤重金属的污染具有一定的理论意义和实践价值. 有研究表明，丁香蓼对Cu、Zn等的胁迫表现出较强的耐性和富集性[10]，而关于Pb、Cd单因素或其复合胁迫影响丁香蓼的光合或叶绿素荧光特性等方面的研究尚较少报道. 我们研究丁香蓼在Pb、Cd单因素胁迫及其复合胁迫的不同浓度梯度条件下叶片叶绿素含量及其光合荧光特性的变化特征，探讨丁香蓼对Pb、Cd的耐受机理，以期为土壤中Pb、Cd重金属污染的植物生态修复提供一定的基础数据.

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采自江西师范大学校园内绿化带土壤，经风干，剔除碎石后，与河沙按土壤:沙子=2:1的质量比例混合均匀后待用，装入供试花盆中. 供试沙土的主要理化指标经测定，分别为pH 6.6，Cd含量为0.497 mg/kg，Pb含量为54.862 mg/kg.

供试植物采自江西省德兴市乐安河流域受铜矿开采影响较严重区域的河岸带优势物种丁香蓼（*L. prostrata*）.

1.2 试验设计

准确称量5 kg混匀后的供试土壤装入花盆中，分别添加$CdCl_2·2.5H_2O$或$Pb(CH_3COO)_2·3H_2O$配置成不同浓度重金属溶液，并按土壤干重设置计算各组花盆土壤中的Cd^{2+}、Pb^{2+}含量（mg/kg），根据正交实验设计方法，共设置16个供试组，对照组花盆土壤中不添加Cd^{2+}或Pb^{2+}，各组重金属浓度及各组代码如表1所示. 参照乐安河德兴段重金属污染区湿地土壤的实际情况[11]及其他相关文献[12]，设计Cd添加浓度分别为5 mg/kg、10 mg/kg、20 mg/kg、40 mg/kg、80 mg/kg等5个梯度，分别以T_{10}、T_{20}、T_{30}、T_{40}、T_{50}等表示；Pb添加浓度分别为100 mg/kg、200 mg/kg、400 mg/kg、800 mg/kg、1 000 mg/kg等5个梯度，以T_{01}、T_{02}、T_{03}、T_{04}、T_{05}等表示；Cd + Pb双因素混合处理浓度则分别为(5 + 100) mg/kg、(10 + 200) mg/kg、(20 + 400) mg/kg、(40 + 800) mg/kg、(80 + 1 000) mg/kg等5个梯度，分别以T_{11}、T_{22}、T_{33}、T_{44}、T_{55}等表示，T_{00}表示对照组（CK），以上各处理组均5个重复. 土壤与重金属溶液试剂充分混合均匀，土壤培养平衡15 d后进行植物移栽，每盆移栽个体大小一致的丁香蓼植株各5株，自移栽处理后，根据每盘土壤水分状况，每隔1-2 d等量浇入自来水一次，实验周期历时50 d.

表1 土壤中重金属Pb、Cd溶液处理浓度的设置及其代码
Table 1 The codes of treatment concentrations of Pb and Cd in the soil

Pb (w/mg kg^{-1})	Cd (w/mg kg^{-1})					
	0	5	10	20	40	80
0	T_{00}(CK)	T_{10}	T_{20}	T_{30}	T_{40}	T_{50}
100	T_{01}	T_{11}	—	—	—	—
200	T_{02}	—	T_{22}	—	—	—
400	T_{03}	—	—	T_{33}	—	—
800	T_{04}	—	—	—	T_{44}	—
1000	T_{05}	—	—	—	—	T_{55}

1.3 测定方法

1.3.1 **株高、根长和生物量测定** 用直尺（精确到0.1 cm）测量每株丁香蓼样品的根茎交接处到枝条最高点的株高，每株测3次算其平均值；用直尺（精确到0.1 cm）测量每株样品的根茎交接处到主根最长处的根长，每株测3次算其平均值；将丁香蓼用去离子水冲洗干净，吸干植株表面水分，测定植株鲜重，再将样品分为地上部分和地下部分测定各部分的鲜重.

1.3.2 **植物叶绿素含量测定** 随机选取培养盆中丁香蓼植株样品进行测量，并获得3个以上平行数据. 自上至下取丁香蓼植株上第2、3完全展开叶，准确称取0.1 g叶片于研钵中磨碎，加入100%二甲基亚砜（DMSO）萃取后采用分光光度法测定[13]，根据所得溶液在645 nm和663 nm的吸光值，参照Arnon（1949）[14]方法计算叶绿素总量（Total chlorophyll, Ct, mg/L）、叶绿素a(Chlorophyll a, Ca, mg/L)、叶绿素b（Chlorophyll b, Cb, mg/L）以及叶绿素a/b值（Ratio of chlorophyll a and chlorophyll b, Ca/Cb），各叶绿素含量计算公式如下:

$$Ca = 12.7A_{663} - 2.69A_{645} \quad (1)$$

$$Cb = 22.9A_{645} - 4.68A_{663} \quad (2)$$

$$Ct = Ca + Cb = 8.02A_{663} + 20.21A_{645} \quad (3)$$

式中, A_{663}和A_{645}分别为叶绿素二甲基亚砜提取液在紫外分光光度计在波长663 nm和645 nm处的吸光度值.

1.3.3 **植株活体光合荧光参数的测定及成像方法** 运用FluraCam便携式叶绿素荧光成像仪于晴天上午9:00-11:00进行测定, 自上至下选择丁香蓼植株的第2或3片完全展开叶, 测定其荧光参数和活体荧光成像, 至少3个以上平行样测试. 测定时, 植株充分暗适应120 min, 设定快门Shutter = 0, 敏感度Sensitivity = 20, 光照AChlt2 = 100, AChltl = 100, Super = 70测定叶片叶绿素荧光参数[15], 分别测定初始荧光(F_o)、最大荧光(F_m)、可变荧光(F_v)、潜在活性(F_v/F_o)、最大量子产率(QY_{max})、稳态下的有效量子产率(F_v/F_m_Lss)、稳态下的非光化学猝灭系数(NPQ_Lss)等7个叶绿素荧光参数.

1.3.4 **数据统计分析方法** 实验结果均为3次以上平行数据的平均值和标准差, 实验数据采用统计软件SPSS进行单因素方差分析(One-way, ANOVA)和最小显著差异法(LSD), Pearson相关关系分析, 采用多重方差法分析显著性[16], 对丁香蓼在不同镉、铅胁迫下反应数据进行差异性比较; 采用Origin 8.0进行作图.

2 结果与分析

2.1 Pb、Cd不同胁迫对丁香蓼生长的影响

不同浓度重金属污染胁迫处理后, 丁香蓼的生长表现出明显差异. 由表2可见, 与对照组相比, 不同浓度单因素Pb污染胁迫后的丁香蓼各项生长指标均随Pb浓度的增加呈极显著下降趋势($P < 0.05$), 且茎长、根长及总鲜重与Pb浓度的相关系数r分别为−0.862**、−0.799**、−0.924**(**呈极显著差异, *呈显著差异), 均呈极显著负相关. 当胁迫组Pb浓度为T_{05}时, 株高、根长和总鲜重均呈最低值, 比对照组显著下降44%、74%、78%($P < 0.05$), 表明Pb胁迫能明显抑制丁香蓼的生长.

单因素Cd胁迫各处理组与对照相比, 丁香蓼的各项生长指标随Cd浓度的增加呈总体下降趋势($P < 0.05$). 茎长、根长及总鲜重均与Cd浓度呈负相关, 且相关性系数r分别为−0.748**、 −0.917**、−0.546*, 不同浓度胁迫后, 丁香蓼的茎长及总鲜重与对照组的差异均达到显著性水平($P < 0.05$), 当 Cd浓度为T_{50}时, 达到最低值, 比对照显著下降了37%、72%、75%($P < 0.05$), 说明Cd胁迫能明显抑制丁香蓼的生长.

与对照相比, Pb + Cd双因素复合胁迫处理后, 丁香蓼的各项生长指标总体随胁迫浓度的增加呈显著下降趋势($P < 0.05$). 茎长、根长及总鲜重与土壤中的Pb + Cd相关性系数r分别为−0.748、−0.917**、−0.748**, 各处理与对照的差异均达到显著性水平($P < 0.05$), 茎长、根长和总鲜重在T_{44}有所上升, 茎长和总鲜重在T_{25}各指标降至最低, 比对照显著下降了43%和66%($P < 0.05$).

2.2 Pb、Cd胁迫对丁香蓼叶绿素含量的影响

由表3可见, 与对照相比, 单因素Pb胁迫处理下, 随着胁迫处理的Pb浓度增加, 丁香蓼叶片各叶绿素含量均呈显著下降趋势($P < 0.05$). 经回归分析, 叶绿素a(Ca)、叶绿素b(Cb)、叶绿素a/b(Ca/Cb)和总叶绿素含量(Ct)与不同Pb浓度间的相关性系数r分别为−0.605*、−0.737**、−0.038、−0.647**, 均呈负相关, 且各胁迫组间差异性显著.

表2 不同Pb、Cd浓度污染胁迫对丁香蓼生长的影响
Table 2 Effects of single and combined pollution stress of Pb and Cd on the growth of *L. prostrata*

重金属处理组代码 Heavy metal treatment code		茎长 Stem length (l/cm)	根长 Root length (l/cm)	总鲜重 Total fresh weight (m/mg)
CK	T_{00}	20.33 ± 1.52^{De}	7.82 ± 0.18^{Da}	1.86 ± 0.14^{De}
Pb	T_{01}	19.57 ± 0.52^{D}	5.84 ± 0.24^{E}	$1.08 \pm 0.09B^{E}$
	T_{02}	17.36 ± 1.15^{AE}	5.26 ± 0.28^{FC}	1.14 ± 0.06^{E}
	T_{03}	14.66 ± 0.57^{BF}	4.16 ± 0.76^{GAC}	0.85 ± 0.08^{FBC}
	T_{04}	12.16 ± 0.76^{BG}	3.51 ± 0.65^{GC}	0.58 ± 0.06^{GC}
	T_{05}	11.33 ± 0.437^{BG}	2.00 ± 0.50^{HB}	0.39 ± 0.04^{H}
Cd	T_{10}	15.83 ± 0.29^{a}	6.00 ± 0.00^{a}	0.71 ± 0.01^{a}
	T_{20}	15.16 ± 0.17^{f}	4.50 ± 0.50^{af}	1.15 ± 0.05^{f}
	T_{04}	12.16 ± 0.76^{BG}	3.51 ± 0.65^{GC}	0.58 ± 0.06^{GC}
	T_{30}	13.83 ± 0.76^{4f}	3.66 ± 0.28^{dg}	0.63 ± 0.08^{ag}
	T_{40}	12.43 ± 0.48^{cg}	3.50 ± 0.50^{dg}	0.47 ± 0.51^{h}
	T_{50}	12.11 ± 0.74^{gcf}	2.66 ± 0.51^{hc}	0.46 ± 0.05^{agh}
Pb + Cd	T_{11}	18.66 ± 1.15^{Ab}	3.27 ± 0.73^{Abg}	1.63 ± 0.10^{Ab}
	T_{22}	17.32 ± 0.45^{Ab}	3.50 ± 0.50^{Abg}	0.97 ± 0.10^{Bc}
	T_{33}	12.66 ± 0.76^{Bc}	2.00 ± 0.00^{Bc}	0.73 ± 0.05^{Ca}
	T_{44}	13.64 ± 0.56^{Bc}	4.16 ± 0.74^{ACdb}	0.82 ± 0.01^{Ca}
	T_{55}	11.00 ± 0.28^{CGd}	4.00 ± 0.00^{ACdb}	0.62 ± 0.08^{Ca}

每列不同大写字母表示不同Pb浓度污染处理组(单因素Pb与复合Pb、Cd)之间差异显著; 每列不同小写字母表示不同Cd浓度污染处理组(单因素Cd与复合Pb、Cd)之间差异显著($P < 0.05$).
Different capital letters indicate significant difference at $P < 0.05$ among various Pb treatments (single Pb and combined Pb/Cd pollution), while different lowercase letters indicate significant difference at $P < 0.05$ among various Cd treatments (single Cd and combined Pb/Cd pollution).

与对照组相比, 单因素Cd胁迫处理下, 丁香蓼叶片的叶绿素含量均随Cd浓度的增加而呈下降趋势($P < 0.05$). Ca、Cb、Ca/Cb和Ct均与Cd浓度呈极显著负相关, 且相关性系数r分别为−0.902**、−0.774**、−0.716**、−0.891**. 植株的各指标均在T_{50}组降至最低, 分别比对照组显著下降49%、32%、19%和44%.

与对照组相比, Pb + Cd的复合污染胁迫下, 随着Pb + Cd浓度的增加, 丁香蓼叶片的各叶绿素含量总体呈下降趋势($P < 0.05$), 但在T_{55}处理组有所上升, 在T_{44}处理组下降为最低, 分别比对照组显著下降38%、8%、6%和34%. 叶绿素含量的降幅小于Pb或Cd单因素污染的, 表明Pb + Cd复合污染对丁香蓼叶绿素含量的影响分别小于Pb或Cd单因素污染的影响.

2.3 Pb、Cd胁迫对丁香蓼叶片叶绿素荧光参数及其成像的影响

如表1所示, 经回归分析, 单因素Pb污染下, 丁香蓼叶片叶绿素荧光参数F_o、F_m、F_v、F_v/F_o等与不同浓度Pb胁迫组间的相关性系数r分别为−0.399, −0.619*, −0.958**, −0.566*, 均成负相关. F_o、F_m随土壤中Pb浓度的增加, 呈现先下降后在T_{04}组上升, 并在T_{04}组达到峰值, 分别高出对照组12%, 0.15%($P > 0.05$), 与对照没有显著性差异, 均在T_{05}组达最低值.

如图1所示，QY_{max}、F_v/F_m_Lss和NPQ_Lss等指标与Pb浓度的相关性均不显著，QY_{max}和NPQ_Lss总体呈下降趋势，F_v/F_m_Lss与对照组并不呈单因素的上升或下降趋势.

与对照组相比，单因素Cd污染下丁香蓼叶片叶绿素荧光参数F_o、F_m、F_v、F_v/F_o均随土壤中Cd镉浓度的增加呈总体下降趋势（$P < 0.05$）. 如图1所示，经回归分析，F_o、F_m、F_v、F_v/F_o与不同Cd浓度的相关性系数r分别为–0.969**, –0.960**, –0.947**, –0.729**, 均成极显著负相关. F_o、F_m、F_v、F_v/F_o均在T_{50}胁迫组降至最低，分别为对照组的58%, 43%, 18%, 32%（$P < 0.05$），降幅十分显著，大于单因素Pb和Pb + Cd复合污染的降幅. QY_{max}、F_v/F_m_Lss和NPQ_Lss与Cd浓度的相关性r分别为–0.921**, –0.880**, –0.970**, 均呈极显著负相关（$P < 0.05$）. QY_{max}、F_v/F_m_Lss和NPQ_Lss均在T_{50}降至最低，与F_o、F_m、F_v、F_v/F_o变化相同，降幅都大于单因素Pb及Pb + Cd复合污染的降幅，说明高浓度的Cd污染胁迫能严重破坏丁香蓼的PSII反应中心.

与对照组相比，Pb + Cd复合污染下叶绿素荧光参数F_o、F_m、F_v、F_v/F_o均随Pb + Cd浓度增加呈下降趋势. 如表4所示，经回归分析后，F_o、F_m、F_v、F_v/F_o与不同Pb + Cd浓度间均成负相关，图1中QY_{max}和F_v/F_m_Lss与Pb + Cd双因素胁迫的相关性不显著，均随Pb + Cd浓度的增加呈下降的趋势（$P < 0.05$），其余各处理间差异不显著，NPQ_Lss与Pb + Cd浓度呈显著负相关，相关系数r为–0.526*（$P < 0.05$）.

比较各处理组的QY_{max}荧光成像，结果如图2所示，图中橘黄色部位面积越大，植物的潜在光能转化率QY_{max}越高，反之越低. 从图中可看出，除对照组，Pb处理下的T_{02}组橘黄

表3 Pb、Cd单因素及Pb与Cd复合污染对丁香蓼叶片叶绿素的影响
Table 3 Effect of single and combined pollution of Pb and Cd on the chlorophyll content of *L. prostrata*

重金属处理组代码 Heavy metal treatment code		叶绿素a含量 Ca (ρ/mg L^{-1}, DW)	叶绿素b含量 Cb (ρ/mg L^{-1}, DW)	叶绿素a/b Ca/Cb	叶绿素总量 Ct (ρ/mg L^{-1}, DW)
CK	T_{00}	1.83 ± 0.01^{Ef}	0.62 ± 0.02^{De}	2.92 ± 0.08^{Db}	2.46 ± 0.03^{Ef}
Pb	T_{01}	1.47 ± 0.05^{FI}	0.54 ± 0.05^{AE}	2.76 ± 0.13^{DEG}	2.00 ± 0.13^{FI}
	T_{02}	1.34 ± 0.02^{BG}	0.52 ± 0.05^{AE}	2.53 ± 0.05^{ACF}	1.87 ± 0.03^{BG}
	T_{03}	1.14 ± 0.04^{H}	0.46 ± 0.01^{F}	2.45 ± 0.03^{F}	1.61 ± 0.04^{H}
	T_{04}	1.50 ± 0.02^{I}	0.55 ± 0.01^{EG}	2.71 ± 0.11^{ADG}	2.05 ± 0.01^{AI}
	T_{05}	1.01 ± 0.08^{J}	0.38 ± 0.01^{H}	2.59 ± 0.14^{AFG}	1.39 ± 0.10^{J}
Cd	T_{10}	1.74 ± 0.07^{a}	0.61 ± 0.03^{ae}	2.89 ± 0.08^{e}	2.37 ± 0.08^{a}
	T_{20}	1.60 ± 0.10^{g}	0.55 ± 0.06^{bfh}	2.87 ± 0.56^{b}	2.16 ± 0.08^{g}
	T_{30}	1.30 ± 0.05^{h}	0.49 ± 0.00^{cg}	2.64 ± 0.14^{be}	1.79 ± 0.04^{h}
	T_{40}	1.42 ± 0.07^{ei}	0.55 ± 0.03^{bh}	2.60 ± 0.20^{a}	1.97 ± 0.11^{i}
	T_{50}	0.93 ± 0.07^{j}	0.42 ± 0.07^{i}	2.35 ± 0.28^{ae}	1.36 ± 0.21^{j}
Pb + Cd	T_{11}	1.45 ± 0.02^{AIbi}	0.54 ± 0.02^{ACGb}	2.66 ± 0.22^{AEce}	1.99 ± 0.03^{AFbi}
	T_{22}	1.38 ± 0.00^{Bci}	0.50 ± 0.03^{ACGbg}	2.68 ± 0.03^{AEae}	1.91 ± 0.01^{Bci}
	T_{33}	1.33 ± 0.02^{Bch}	0.49 ± 0.01^{Abg}	2.58 ± 0.19^{AFCcd}	1.85 ± 0.05^{Bch}
	T_{44}	1.13 ± 0.04^{CHd}	0.47 ± 0.02^{BFc}	2.37 ± 0.20^{BFd}	1.60 ± 0.06^{CHd}
	T_{55}	1.49 ± 0.05^{DIbe}	0.55 ± 0.09^{CEbd}	2.67 ± 0.28^{CEbc}	2.04 ± 0.13^{DFIei}

每列不同大写字母表示不同Pb浓度污染处理组（单因素Pb与复合Pb、Cd）之间差异显著；每列不同小写字母表示不同Cd浓度污染处理组（单因素Cd与复合Pb、Cd）之间差异显著（$P < 0.05$）.
Different capital letters indicate significant difference at $P < 0.05$ among various Pb treatments (single Pb and combined Pb/Cd pollution), while different lowercase letters indicate significant difference at $P < 0.05$ among various Cd treatments (single Cd and combined Pb/Cd pollution).

表4 Pb、Cd单因素及双因素复合污染对丁香蓼叶片荧光参数（F_o、F_m、F_v、F_v/F_o）的影响
Table 4 Effect of single and combined pollution of Pb and Cd on the chlorophyll fluorescence parameters (F_o, F_m, F_v, F_v/F_o) of *L. prostrata*

处理 Treatment		初始荧光 Initial fluorescence (F_o)	最大荧光 Maximum fluorescence (F_m)	可变荧光 Variable fluorescence (F_v)	潜在活性 Potential activity (F_v/F_o)
CK	T_{00}	1179.83 ± 39.59^{Dd}	1955.75 ± 31.20^{AEe}	809.22 ± 15.12^{Ef}	0.68 ± 0.03^{BECb}
Pb	T_{01}	1158.35 ± 46.43^{CE}	1938.08 ± 37.90^{AED}	807.00 ± 13.85^{E}	0.67 ± 0.01^{C}
	T_{02}	110.79 ± 15.02^{E}	1911.24 ± 47.39^{AE}	770.91 ± 43.38^{BEF}	0.65 ± 0.03^{AC}
	T_{03}	1040.32 ± 34.67^{F}	1826.55 ± 21.98^{DF}	665.40 ± 23.53^{BF}	0.65 ± 0.01^{AC}
	T_{04}	1223.98 ± 7.79^{DG}	1958.31 ± 50.70^{BEG}	641.93 ± 29.09^{G}	0.48 ± 0.02^{D}
	T_{05}	931.44 ± 44.96^{BH}	1755.09 ± 36.48^{H}	549.88 ± 36.02^{CH}	0.59 ± 0.03^{E}
Cd	T_{10}	1246.55 ± 9.47^{ad}	1889.45 ± 9.47^{ad}	842.85 ± 27.27^{af}	0.53 ± 0.03^{e}
	T_{20}	1125.917 ± 19.66^{e}	1797.70 ± 26.37^{f}	805.11 ± 49.76^{bf}	0.71 ± 0.032^{d}
	T_{30}	1104.02 ± 87.58^{e}	1799.21 ± 7.25^{f}	740.21 ± 39.21^{g}	0.67 ± 0.08^{db}
	T_{40}	1007.78 ± 21.09^{f}	1665.46 ± 23.61^{g}	726.40 ± 2.90^{g}	0.72 ± 0.01^{d}
	T_{50}	693.04 ± 5.95^{g}	858.033 ± 15.83^{h}	153.56 ± 5.10^{h}	0.22 ± 0.01^{e}
Pb + Cd	T_{11}	$1228.45 \pm 13.74^{ADacd}$	1925.20 ± 53.69^{AGae}	830.08 ± 24.17^{AEaf}	0.73 ± 0.03^{Aad}
	T_{22}	$1200.12 \pm 41.01^{AECac}$	1990.50 ± 4.91^{BEbe}	757.05 ± 19.01^{Bbg}	0.61 ± 0.05^{BEb}
	T_{33}	$1182.08 \pm 4.51^{AECaec}$	$1959.29 \pm 19.91^{ABEaeb}$	767.21 ± 19.47^{BEcgf}	0.64 ± 0.02^{BCb}
	T_{44}	937.80 ± 7.68^{Bb}	1500.04 ± 29.24^{Cc}	562.23 ± 36.92^{Cd}	0.60 ± 0.04^{BEabc}
	T_{55}	1165.94 ± 22.30^{Cec}	1864.87 ± 29.22^{ADEd}	698.92 ± 47.40^{Deg}	0.60 ± 0.05^{BEabc}

每列不同大写字母表示不同Pb浓度污染处理组（单因素Pb与复合Pb、Cd）之间差异显著；每列不同小写字母表示不同Cd浓度污染处理组（单因素Cd与复合Pb、Cd）之间差异显著（$P < 0.05$）.
Different capital letters indicate significant difference at $P < 0.05$ among various Pb treatments (single Pb and combined Pb/Cd pollution), while different lowercase letters indicate significant difference at $P < 0.05$ among various Cd treatments (single Cd and combined Pb/Cd pollution).

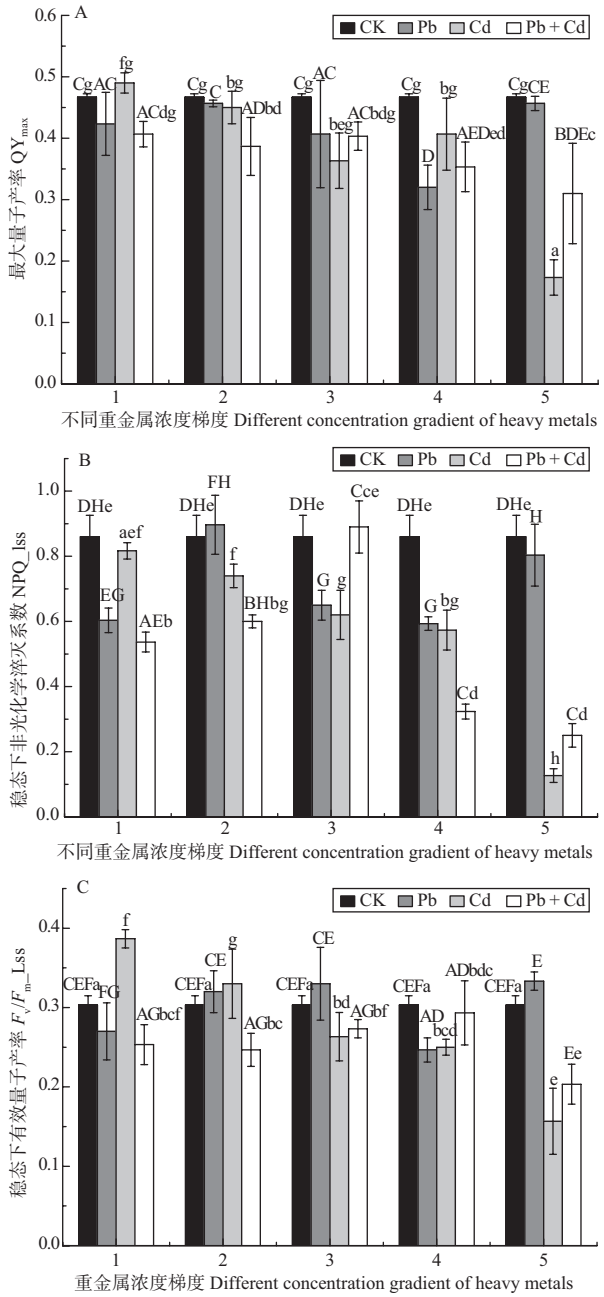


图1 重金属胁迫对丁香蓼叶片各荧光参数（QY_{max}、NPQ_Lss和F_v/F_m_Lss）的影响. 相同柱状图上方不同大写字母表示不同Pb浓度胁迫组（单因素Pb与Pb、Cd复合污染）之间差异显著；相同柱状图上方不同小写字母表示不同Cd浓度污染处理组（单因素Cd与Pb、Cd复合污染）之间差异显著（$P < 0.05$）. 横坐标1、2、3、4、5分别表示重金属Pb、Cd或Pb、Cd复合污染胁迫浓度的5个梯度等级.

Fig 1 Changes of chlorophyll fluorescence parameters (QY_{max}, F_v/F_m_Lss和NPQ_Lss) in *L. prostrata* leaves under different stresses of heavy metals. Different capital letters indicate significant difference at $P < 0.05$ among various Pb treatments (single Pb and combined Pb/Cd pollution), while different lowercase letters indicate significant difference at $P < 0.05$ among various Cd treatments (single Cd and combined Pb/Cd pollution). The number 1, 2, 3, 4, 5 in the abscissa indicate the first, second, third, forth, fifth treatment group under single and combined Pb and Cd pollution.

色部位面积最大，此浓度下潜在光能转化率QY_{max}值也最大，T_{03}组处理组橘黄色部位面积最小，此浓度下潜在光能转化率QY_{max}值也最小，与此浓度的Ca/Cb呈正向一致性，Cd处理组也符合这个规律. 而在Pb + Cd胁迫处理下，QY_{max}成像图与*Ca*/*Cb*值趋势不同.

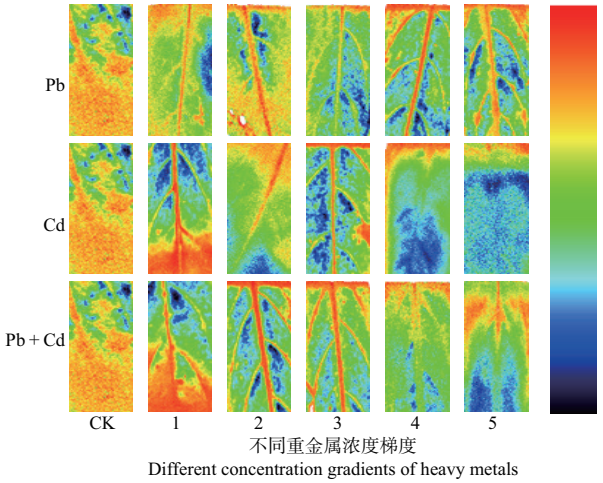


图2 Pb、Cd单因素及复合污染对丁香蓼叶绿素荧光参数QY_{max}的成像. 横坐标1、2、3、4、5分别表示重金属Pb、Cd或Pb、Cd复合污染胁迫浓度的5个梯度等级.

Fig. 2 Imaging of single and combined pollution of Pb and Cd on the chlorophyll fluorescence parameter QY_{max} of *L. prostrata*. The number 1, 2, 3, 4, 5 in the abscissa indicate the first, second, third, forth, fifth treatment group under single and combined Pb and Cd pollution.

2.4 Pb、Cd胁迫下丁香蓼植株体内重金属的积累量

Pb、Cd单因素及其复合污染下，丁香蓼地上部和地下部的重金属含量均随胁迫浓度增加呈增加趋势，且地下部>地上部（图3）. 低浓度胁迫下丁香蓼各器官中所含Cd或Pb含量，相对于对照组较高浓度胁迫上升幅度更大. 当胁迫浓度从T_{44}增加到T_{55}时，地上部的Pb含量仅上升了0.7%，其它部位的Cd或Pb含量的变化相似.

3 讨论与结论

重金属胁迫对植物的生长有强烈的抑制效应，超过一定浓度会抑制植物生长，一般表现为植株矮小，生长缓慢，生物量减小，甚至生殖也会受到影响，导致生育期延迟，严重时会使生殖生长完全停止，出现不开花，不结果等现象[17]. 本研究表明，Pb、Cd单因素及其复合污染都对丁香蓼的生长有明显的抑制作用，有可能是因为Pb、Cd作为植物生长的非必需元素，不参与植物的结构合成和代谢活动，但过量积累会对植物具有明显的毒害作用[18]. 在单因素Pb、Cd及其复合胁迫下，随着胁迫浓度的升高，其茎长、根长、总鲜重呈显著下降（$P < 0.05$），低浓度下单因素Pb、Cd及复合污染对丁香蓼的生长没有促进作用，这与王林对辣椒的研究[19]一致，可能是由于丁香蓼对Pb、Cd污染更敏感，低浓度下丁香蓼的生理系统便会造成破坏，不仅影响植物的生长，也影响植物的光合作用，破坏光感受器，特别是光捕获器II及光合系统II和I，对PSII电子传递有抑制作用[20]，使植物的叶绿素含量和荧光参数在低浓度下就出现下降，这与本文结果相吻合. 在Pb + Cd复合污染下，其茎长、根长、总鲜重在T_{44}下有所上升，这

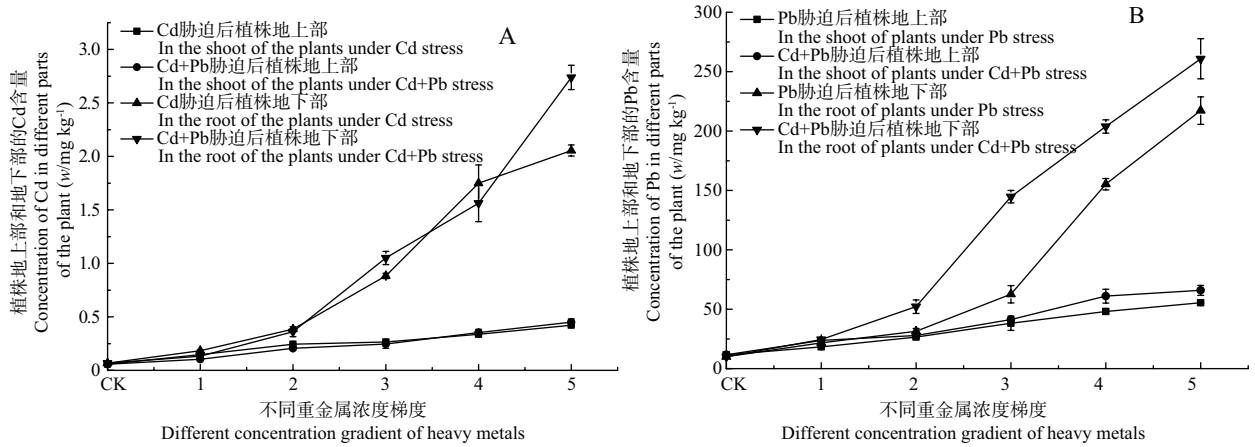


图3 Pb、Cd单因素及复合污染下丁香蓼植株体内重金属的积累量. 横坐标1、2、3、4、5分别表示重金属Pb、Cd或Pb、Cd复合污染胁迫浓度的5个梯度等级.

Fig. 3 Pb and Cd concentrations in *L. prostrata* under different stress of heavy metals. The number 1, 2, 3, 4, 5 in the abscissa indicate the first, second, third, forth, fifth treatment group under single and combined Pb and Cd pollution.

可能是由于Pb、Cd在较高浓度时发生拮抗作用，减轻了对丁香蓼的毒害作用，在T_{55}又有所下降，这是因为丁香蓼的自我调控能力是有一定范围的，胁迫浓度过高会给植物带来不可逆的伤害.

光合作用是植物体内重要的代谢过程，众多研究表明，重金属胁迫能抑制植物的光合作用，且与胁迫浓度显著相关[21-22]，主要表现在破坏叶绿素结构、降低光合色素含量等方面，光合色素含量在一定程度上影响光合作用的能力[23]. 重金属元素能引起植物的黄化症已被诸多研究[24]所证实，本研究中随着Pb、Cd单因素及复合胁迫浓度的增加，丁香蓼叶绿素含量显著降低且叶绿素组成变化显著. 随着Pb或Cd单因素胁迫浓度的加大，更多的重金属离子进入植物体细胞内，重金属离子可能与叶绿体蛋白上的巯基结合或取代其中的Fe^{2+}、Zn^{2+}、Mg^{2+}，破坏叶绿体的结构和功能[25]，重金属的存在提高了叶绿素酶的活性，使叶绿素分解[26]，叶绿素含量减少. 关于重金属Pb、Cd胁迫对叶绿素组成的影响，结果显示，低浓度胁迫下叶绿素a/b的值减少，这与冯世静对杨树的研究结果[27]不尽相同，与惠俊爱等对玉米的研究结果[20]相同. Ca/Cb的比值代表着类囊体的垛叠程度，类囊体的垛叠程度越小，光抑制越强. Ca/Cb值随着叶片衰老而下降，可以作为叶片衰老的标志[28]. 在T_{55}处理时，Ca/Cb值上升明显，而此浓度下的QY_{max}最小，与植物的生长指标变化一致，说明叶片的衰老程度不仅受到光合系统的影响，还与植物的生长状况有关，根长随着处理浓度的升高而减少，影响植物对营养物质的吸收，也会导致植物衰老. 丁香蓼的叶绿素a、b含量在高浓度T_{04}和T_{40}下都有所上升，这可能是由于丁香蓼自身具有一定的保护措施，具体原因还有待进一步研究.

叶绿素荧光参数是反映外界环境因子变化响应特征的又一重要指标. 叶绿素荧光与光合作用中的各种反应过程密切相关[29]，任何环境因子对光合作用的影响都可以通过叶片叶绿素荧光动力学反应出来[30]. 本研究结果显示，单因素Pb污染下的F_o在T_{04}高出对照组12%，而F_v、F_v/F_o则随着Pb处理浓度的升高而降低，这可能是因为丁香蓼在T_{04}时PSII反应中心的破坏或者可逆失活引起F_o水平的增加. QY_{max}、F_v/F_m_Lss和NPQ_Lss与Pb处理浓度的相关性不明显，说明Pb污染对丁香蓼的PSII反应中心的影响不大. Pb、Cd复合污染下，NPQ_Lss与Pb、Cd复合浓度呈显著负相关，在T_{33}高出对照组4%，非光化学猝灭系数NPQ_Lss值大小反应PSII反应中心对天然色素吸收后的热耗散能力，是一种自我保护机制[31]，说明此时丁香蓼非光化学猝灭机制发挥效果，以耗散光能形成保护机制，在Pb + Cd双因素复合污染最高浓度时，QY_{max}、F_v/F_m_Lss和NPQ_Lss都降至最低，NPQ_Lss值仅为对照组的29%，说明此浓度下PSII反应中心被严重破坏. 单因素Cd胁迫下，荧光各参数均随着Cd浓度的增加显著下降，在T_{55}时QY_{max}、F_v/F_m_Lss和NPQ_Lss值仅为对照组的37%，51%，14%，显著低于单因素Pb和Pb + Cd复合污染，且F_o与Cd胁迫浓度呈极显著负相关，这可能是因为Cd对PSII活性有较强的毒害，可降低PSII的原初光能捕捉能力和电子传输能力，对此可认为是Cd影响了PSII水裂解程度（F_o/F_v）[32]. 由此可得出，单因素Cd的毒性对丁香蓼的PSII潜在活性中心损伤最强，双因素Pb + Cd的复合污染次之，单因素Pb的影响最小.

Pb、Cd单一及其复合胁迫下丁香蓼各部位的重金属含量随胁迫浓度增加而上升，与胁迫浓度呈显著的正线性关系，可见丁香蓼对土壤中的污染重金属Pb、Cd有一定的富集作用. 在较高胁迫浓度时，丁香蓼地下部和地上部的重金属含量极显著差异，根部是丁香蓼沉积重金属的主要部位，这和孟桂元结论[33]相同. 这是因为根系中重金属离子和根内的核酸类、蛋白质、多糖类等反应形成大分子或者不溶性有机分子而沉积，向地上部分的运输过程受阻，这在一定程度上缓解了重金属Pb、Cd对丁香蓼的毒害，丁香蓼的耐性得到的一定提升. 在较低胁迫浓度下，丁香蓼各部位之间的重金属含量的差别不大，随着胁迫浓度的增加，地下部和地上部的重金属含量的增幅减慢，这是因为随着胁迫浓度的增加，丁香蓼各部位的生物量减少，根系受到重金属的破坏，造成根吸收重金属的能力减弱，Pb、Cd加强了对丁香蓼的毒害作用，Pb、Cd向地上部的转运过程受阻. 两种或两种以上重金属复合污染时，植物对重金属的吸收富集受到这几种重金属元素之间的相互作用. 本研究结果显示，Pb、Cd复合胁迫时，Cd

会促使丁香蓼各部位吸收更多的Pb. 这可能是因为Cd很容易与含—SH的酶类结合, 影响这些酶类的活性, 导致它们活性降低或丧失, 从而影响植物的生命活动. Pb的加入可以降低Cd对这些酶的毒害作用, 而间接促进植物对Pb的吸收和转运[34], Cd能促进丁香蓼对Pb的吸收, 这与王学峰对烟草的研究结果[35]不同.

丁香蓼对重金属Pb、Cd具有一定吸附积累的能力, 重金属对羊蹄的影响也表现在丁香蓼生长发育的各个阶段, 同时影响各种代谢过程. 本研究结果显示, 丁香蓼地上部和地下部中的Pb、Cd含量随着Pb、Cd处理浓度的增加而增加, Pb、Cd含量的增加抑制了植物的光合作用, 破坏PSII反应中心, 造成丁香蓼叶绿素含量降低, 并影响其组成, 抑制了丁香蓼根系生长及鲜重. 本文研究了杂草丁香蓼在Cd、Pb胁迫下的生长适应特征、光合特性、重金属积累量等, 但重金属可破坏蛋白质的合成机制和抑制核酸的生物合成, 甚至抑制或损伤的修复系统, 因此有必要从基因、分子、细胞、蛋白组学等微观水平研究重金属对丁香蓼的毒害.

参考文献 [References]

1 曾咏梅, 毛昆明, 李永梅. 土壤中镉污染的危害及其防治对策[J]. 云南农业大学学报, 2005, **20** (3): 360-365 [Zeng YM, Mao KM, Li YM. Damage of the cadmium (Cd) pollution in soil and its control [J]. *J Yunnan Agric Univ,* 2005, **20** (3): 360-365]

2 孙守琴, 何明, 曹同, 程颂, 宋洪涛. Pb, Ni胁迫对大羽藓抗氧化酶系统的影响[J]. 应用生态学报, 2009, **20** (4): 937-942 [Sun SQ, He M, Cao T, Cheng S, Song HT. Effects of Pb and Ni stress on antioxidant enzyme system of *Thuidium cymbifolium* [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2009, **20** (4): 937-942]

3 杨刚, 伍钧, 唐亚. 铅胁迫下植物抗性机制的研究进展[J]. 生态学杂志, 2005, **24** (12): 1507-1512 [Yang G, Wu J, Tang Y. Research advances in plant resistance mechanisms under lead stress [J]. *Chin J Ecol* [J]. 2005, **24** (12): 1507-1512]

4 何俊瑜, 任艳芳, 严玉萍, 朱诚, 蒋德安. 镉胁迫对水稻幼苗生长和根尖细胞分裂的影响[J]. 土壤学报, 2010, **47** (1): 138-144 [He JY, Ren YF, Yan YP, Zhu C, Jiang DA. Effects of Cadmium stress on seed germination, seedling growth, and amylase activities in rice [J]. *Acta Pedol Sin*, 2010, **47** (1): 138-144

5 王意锟, 方升佐, 王玉军, 郝秀珍, 周东美. 改良剂对重金属复合污染土壤中菜用大豆品质及生理特性的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2011, **27** (3): 87-92 [Wang YK, Fang SY, Wang YJ, Hao XZ, Zhou XZ. Effects of amendments on quality and physiological characteristics of young soybean grown in soil contaminated by heavy metals in combination [J]. *J Ecol Rural Environ*, 2011, **27** (3): 87-92]

6 朱志勇, 李友军, 郝玉芬, 蒋瑞婕, 刘晓红. 镉对小麦(*Triticum aestivum*)干物质积累、转移及籽粒产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, **31** (2): 252-258 [Zhu ZY, Li YJ, Hao YF, Jiang RJ, Liu XH. Effects of Cd on accumulations and translocation of biomasses and yield of different wheat (*Triticum aestivum*) cultivars[J]. *J Agro-Environ Sci*, 2012, **31** (2): 252-258]

7 冯建鹏, 史庆华, 王秀峰, 冯艳艳. 镉对黄瓜幼苗光合作用、抗氧化酶和氮代谢的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, **15** (4): 970-974 [Feng JP, Shi QH, Wang XF, Feng YY. Effects of cadmium on photosynthesis, antioxidant enzyme and nitrogen metabolism of cucumber seedlings [J]. *Plant Nutr Fertil Sci*, 2009, **15** (4): 970-974]

8 Jiang XJ, Luo YM, Liu Q, Liu SL, Zhao QG. Effects of cadmium on nutrient uptake and translocation by Indian mustard [J]. *Environ Geochem Health*, 2004, **26** (2-3): 319-324

9 王丽萍, 张健, 胡红玲, 张如意, 蒋晓梅, 何书惠, 宋君祥, 张学才. 巨菌草对镉污染土壤的修复特性[J]. 应用与环境生物学报, 2015, **21** (4): 725-732 [Wang LP, Zhang J, Hu HL, Zhang RY, Jiang XM, He SH, Song JX, Zhang XC. The remediation characteristics of the remediation characteristics of *Pennisetum* spp. on Cd contaminated soil Cd contaminated soil [J]. *Chin J Appl Envrion Biol*, 2015, **21** (4): 725-732]

10 简敏菲, 史雅甜, 陈涛, 何琦瑜, 崔妍, 杜恺翔. 重金属镉、铅胁迫下湿地植物丁香蓼的生理生化特征研究[J]. 江西师范大学学报(自然科学版), 2017, **41** (1): 93-98 [Jian MF, Shi YT, Chen T, He QY, Cui Y, Du KX. The physiological and biochemical characteristics of the wetland plant *Ludwigia prostrata* Roxb. under the heavy metal pollution stress of cadmium and lead [J]. *J Jiangxi Norm Univ (Nat Sci)*, 2017, **41** (1): 93-98]

11 简敏菲, 徐鹏飞, 余厚平, 熊小英, 李林. 乐安河-鄱阳湖湿地植物群落分布及其环境影响因子[J]. 环境科学研究, 2015, **28** (3): 408-417 [Jian MF, Xu PF, Xu HP, Xiong XY, Li L. Distribution of the aquatic plant communities and its environmental impacted factors in the wetland between Le'an River and Poyang Lake [J]. *Res Environ Sci*, 2015, **28** (3): 408-417]

12 谌金吾. 三叶鬼针草(*Bidens pilosa* L.)对重金属Cd、Pb胁迫的响应与修复潜能研究[D]. 重庆: 西南大学, 2013 [Chen JW. Study on response and potential phytoremediation of *Bidens pilosa* L. in cadmium and lead stress [D]. Chongqing: Southwestern University, 2013]

13 陈元, 赵洋甬, 潘双叶, 徐运, 蒋蕾蕾. Phyto-PAM对浮游植物中叶绿素的分类测定[J]. 现代科学仪器, 2009 (4): 100-103 [Chen Y, Zhao YY, Pang SY, Yu Y, Jiang LL. Classifying diffient kinds of algae determining their chlorophyll by Phyto-PAM [J]. *Mod Sci Instr*, 2009 (4): 100-103]

14 叶济宇. 关于叶绿素含量测定中的Arnon计算公式[J]. 植物生理学通讯, 1985 (6): 69-69 [Ye JY. The Arnon formula for the determination of chlorophyll content [J]. *Plant Physiol Commun*, 1985 (6): 69-69]

15 Ralph PJ, Schreiber U, Gademann R, Kühl M, Larkum AWD. Coral photobiology studied with a new imaging pulse amplitude modulated fluorometer [J]. *J Physiol*, 2005, **41** (2): 335-342

16 简敏菲, 汪斯琛, 余厚平, 李玲玉, 简美锋, 余冠军. Cd^{2+}、Cu^{2+}胁迫对黑藻(*Hydrilla verticillata*)的生长及光合荧光特性的影响[J]. 生态学报, 2016, **36** (6): 1719-1727 [Jian MF, Wang SC, Yu HP, Li LY, Jian MF, Yu GJ Influence of Cd^{2+}or Cu^{2+}stress on the growth and photosynthetic fluorescence characteristics of *Hydrilla verticillata* [J]. *Acta Ecol Sin*, 2016, **36** (6): 1719-1727]

17 周启星, 宋玉芳. 污染土壤修复原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2004 [Zhou QX, Song YF. The principles and methods of contaminated soil remediation [M]. Beijing: Science Press, 2004

18 杨雪艳, 蒋代华, 史进纳, 黄位权, 黄成涛, 李伟. “双耐”细菌-香根草对铅镉复合污染土壤的修复机理[J]. 应用与环境生物学报, 2016, **22** (5): 884-890 [Yang XY, Jiang DH, Shi JN, Huang WQ, Huang CT, Li W. Remediation mechanism of “double-resistant” bacteria–Vetiveria zizanioides on Cd and Pb contaminated soil [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2016, **22** (5): 884-890]

19 王林, 史衍玺. 镉、铅及其复合污染对辣椒生理生化特性的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2005, **36** (1): 107-112 [Wang L,

Shi YX. Effects of cadmium, lead and their combined pollution on the physiological and biochemical characteristics of *Capsicum annuum* [J]. *J Shandong Agric Univ (Nat Sci)*, 2005, **36** (1): 107-112

20 惠俊爱, 党志, 叶庆生. 镉胁迫对玉米光合特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, **29** (2): 205-210 [Hui JA, Dang Z, Ye QS. Influence of cadmium stress on photosynthetic characteristics of maize [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2010, **29** (2): 205-210]

21 Kupper H, Kupper H, Spoller M. Environmental relevance of heavy metal substituted chlorophylls using the example of water plants [J]. *J Exp Bot*, 1996, **47**: 259-266

22 Kalaji HM, Loboda T. Photosystem II of barley seedlings under cadmium and lead stress [J]. *Plant Soil Environ*, 2007, **53** (12): 511-516

23 Chatzistathis TA, Papadakis IE, Therios IN, Giannakoula A, Dimassi K.. Is chlorophyll fluorescence technique a useful tool to assess manganese deficiency and toxicity stress in Olive plants? [J]. *J Plant Nutr*, 2011, **34** (1): 98-114

24 Baryla A, Carrier P, Franck F, Coulomb C, Sahut C, Havaux, M. Leaf chlorosis in oilseed rape plants (*Brassica napus*) grown on cadmium-polluted soil: causes and consequences for photosynthesis and growth [J]. *Planta*, 2001, **212** (5): 696-709

25 张金彪, 黄维南. 镉胁迫对草莓光合的影响. 应用生态学报, 2007, **18** (7): 1673-1676 [Zhang JB, Huang WN. Effects of cadmium stress on photosynthetic functions of strawberry [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2007, **18** (7): 1673-1676]

26 Kaznina NM, Laidinen GF, Titov AF, Talanov AV. Effect of lead on the photosynthetic apparatus of annual grasses [J]. *Biol Bull*, 2005, **32** (2): 147-150

27 冯世静, 杨途熙, 张艳军, 吕小军, 刘振山, 魏安智. 镉胁迫对杨树光合特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32** (3): 539-547 [Feng SJ, Yang TX, Zhang YJ, Lǔ XJ, Liu ZS, Wei AZ. Effects of cadmium on photosynthetic gas exchange and chlorophyll fluorescence of two species of poplar [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2013, **32** (3): 539-547]

28 罗学刚, 陶宗娅. 病源性叶早衰生理指标与小麦条锈病的马尔柯夫链预测[J]. 应用与环境生物学报, 2001, **7** (2): 151-154 [Luo XG, Tao ZY. Physiological indices of early aging of wheat leaves from rust and wheat rust forecast through markov chain [J]. *Chin J Appl Envrion Biol,* 2001, **7** (2): 151-154]

29 江行玉, 赵可夫. 植物重金属伤害及其抗性机理响[J]. 应用与环境生物学报, 2001, **7** (1): 92-99 [Jiang HY, Zhao KF. Mechanism of heavy metal injury and resistance of plants [J]. *Chin J Appl Envrion Biol*, 2001, **7** (1): 92-99]

30 Liu LY, Zhang YJ, Jiao QJ, Peng DL. Assessing photosynthetic light-use efficiency using a solar-induced chlorophyll fluorescence and photochemical reflectance index [J]. *Int J Remote Sensing*, 2013, **34** (12): 4264-4280

31 Badger MR, Caemmerer SV, Ruuska S, Nakano, H. Electron flow to oxygen in higher plants and algae: rates and control of direct photo reduction (Mehler reaction) and rubisco oxygenase [J]. *Phil Trans R Soc Lond*, 2000, **355** (1402): 1433-1446.

32 李伶, 袁琳, 宋丽娜, 顾詠洁. 镉对浮萍叶绿素荧光参数的影响[J]. 环境科学学报, 2010, **30** (5): 1062-1068 [Li L, Yuan L, Song LN, Gu YJ. Effects of cadmium stress on chlorophyll fluorescence parameters of *Lemna Minor* L. [J]. *Acta Sci Circum*, 2010, **30** (5): 1062-1068]

33 孟桂元, 蒋瑞生, 柏连阳, 刘杰, 邬腊梅, 周静. Cd/Sb/Pb复合污染对苎麻生长及吸收富集特征的影响[J]. 环境科学与技术, 2012, **35** (5): 36-41 [Meng GY, Jiang DS, Bai LY, Liu J, Wu LM, Zhou J. Growth and absorption enrichment responses of ramie to Cd/Pb/Sb stress [J]. *Environ Sci Tech,* 2012, **35** (5): 36- 41]

34 Vallee BL, Ulmer DD. Biochemical effect of mercury, cadmium and lead [J]. *Annu Rev Biochem*, 1972, **41**: 91-128

35 王学锋, 师东阳, 刘淑萍, 皮运清, 朱桂芬. Cd-Pb复合污染在土壤-烟草系统中生态效应的研究[J]. 土壤通报, 2007, **38** (4): 737-740 [Wang XF, Shi DY, Liu SP, Pi YQ, Zhu GF. Ecological effect of combined Cd-Pb pollution on soil-tobacco system [J]. *Chin J Soil Sci*, 2007, **38** (4): 737-740]