农业环境科学学报 2011,30(2):358-365
Journal of Agro-Environment Science

美人蕉(*Canna indica Linn*)和芦苇(*Phragmites australis* L)人工湿地对含铬生活污水的净化效果及植物的生理生态变化

李志刚[1],李素丽[1],梅利民[1],万雪芹[1],梁 和[1],陈伟刚[2],陈 竑[3],周宙兴[4]

(1.广西大学农学院,南宁 530005;2.南宁市环境保护局,南宁 530022;3.隆安县人民政府,广西 隆安 532700;4.隆安县环境保护局,广西 隆安 532700)

摘 要:选取美人蕉(*Canna indica Linn*)、芦苇(*Phragmites australis* L)为植物材料,以不同浓度 $K_2Cr_2O_7$(分别含 0、1、20、50 mg·L^{-1} Cr^{6+})的生活污水作为 Cr^{6+}污染源,研究了不同浓度 Cr^{6+}及处理时间下两种湿地对污水净化效果、植物体 Cr^{6+}积累量及根系活力(TTC)、叶片超氧化歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性、净光合速率(Pn)和丙二醛(MDA)等生理指标的影响。结果表明:(1)在试验的初期 30 d 内,随处理时间的延长,两种人工湿地 COD、氨氮去除率均呈逐渐上升的趋势,30 d 后,随着 Cr^{6+}处理时间的延长及 Cr^{6+}浓度的逐渐升高,两种湿地系统对 COD、氨氮去除率均逐渐下降。在 20、50 mg·L^{-1} Cr^{6+}处理条件下,两种湿地对 COD、氨氮的净化效果显著低于对照及 1 mg·L^{-1} Cr^{6+}处理,对照与 1 mg·L^{-1} Cr^{6+}处理条件下差异不显著。(2)在不同 Cr^{6+}浓度处理下,两种人工湿地对 TP 净化效果的能力较为稳定,同时随处理时间的延长,美人蕉、芦苇体内 Cr^{6+}积累量逐渐加大。(3)1 mg·L^{-1} Cr^{6+}处理可提高美人蕉和芦苇的 TTC、叶片的 SOD、POD、Pn,而 20、50 mg·L^{-1} Cr^{6+}处理对以上指标均有不同程度的抑制作用,且抑制效果与处理浓度、时间呈正相关。(4)MDA 含量随处理时间的延长和浓度升高呈逐渐增加趋势。可见,低浓度 Cr^{6+}能有效促进美人蕉、芦苇生长,使之能够维持正常的净化功能,因此,利用它们作为人工湿地植物来修复 Cr^{6+}污染具有一定的实用价值。

关键词:Cr^{6+};人工湿地;污水净化;生理特性
中图分类号:X173 **文献标志码**:A **文章编号**:1672-2043(2011)02-0358-08

Chromium Purification Effects on Domestic Wastewater and Physiological Changes of *Canna indica Linn*. and *Phragmites australis* L. in Constructed Wetlands

LI Zhi-gang[1], LI Su-li[1], MEI Li-min[1], WAN Xue-qin[1], LIANG He[1], CHEN Wei-gang[2], CHEN Hong[3], ZHOU Zhou-xing[4]

(1.College of Agriculture, Guangxi University, Nanning 530005, China; 2.Environmental Protection Bureau of Nanning, Nanning 530022, China; 3.Longan County Government, Longan 532700, China; 4.Environmental Protection Bureau of Longan County, Longan 532700, China)

Abstract: Domestic wastewater with four Cr^{6+} concentrations (0, 1, 20, 50 mg·L^{-1}) was irrigated, to study the chromium purification effects on domestic wastewater and physiological changes of *Canna indica Linn*. and *Phragmites australis* L. in constructed wetlands., The results were as follows: (1) The removal rate of COD and ammonia nitrogen of two wetlands increased with the time during the initial 30 days of the experiment and then decreased gradually with the increase of Cr^{6+} concentration and time in domestic wastewater. Under 20 mg·L^{-1} and 50 mg·L^{-1} Cr^{6+} treatment, the purifying effects of two constructed wetlands were significantly lower than the those of 1 mg·L^{-1} Cr^{6+} treatment and control. (2) Under four Cr^{6+} concentrations, the purification effect of TP was stable, the accumulation of Cr^{6+} increased gradually in plants with the increase of Cr^{6+} concentration and time. (3) TTC, SOD, POD and Pn were enhanced under 1 mg·L^{-1} Cr^{6+} but. inhibited under 20, 50 mg·L^{-1} Cr^{6+}. The inhibition had a positive correlation with the concentrations of Cr^{6+} and treating time; (3) The MDA content increased gradually with treating time and Cr^{6+}concentration. It suggested that low concentration of Cr^{6+} can promote the grow of *Canna indica Linn*. and *Phragmites aus*-

收稿日期:2010-06-23
基金项目:广西科学研究与技术开发计划(桂科攻(0719005-2-2B);桂科攻(0816002-4);环境修复与生态健康教育部重点实验室开放基金项目(050102);广西大学科学基金项目(X071145)
作者简介:李志刚(1969—),男,博士,主要从事逆境生理、水污染的生态处理研究。E-mail:lizhigangnn@163.com

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

tralis L. and the purification function of the plants can be maintained . Therefore, the constructed wetlands with *Canna indica Linn*. and *Phragmites australis* L. can be used to purify low concentration chrome-containing wastewater.

Keywords: Cr^{6+}; constructed wetland; wastewater purification; physiological property

人工湿地是通过模拟自然生态系统中各生物之间相互作用,而达到净化污水效果的目的[1]。人工湿地具有高效率、低投资、低运转费用等优点,较广泛地应用于处理生活、工业等多种类型污水,是近年来发展较快的生态污水处理技术。化工行业排放的废弃物中含有大量重金属铬,对土壤、水体以及其他生物造成不同程度的影响,已成为污染环境的五毒之一[2]。铬对生物的危害主要指 Cr^{6+},而 Cr^{3+}极易被土壤胶体吸附或形成沉淀,毒性相对较小[3-4]。研究发现重金属对植物的致毒效应主要表现在:抑制光和作用、改变细胞膜透性、减弱保护酶系统的活性等[5-6]。有人将美人蕉用于处理含重金属的废水,发现它的综合耐性最强,同时也有人采用芦苇来模拟人工湿地处理生活污水[7-8]。目前,随着东部产业升级步伐的加快,传统的高污染产业大量向西部转移,由于西部地区经济比较落后,对东部转移的产业管理上比较宽松,工业行业排放的废水少量混合到生活污水中的现象时有发生。广西是广东落后产业转移的重要地区,存在着企业污染物管理不善而排放到环境中的风险,而人工湿地处理污水技术也非常适用于经济不发达的西部地区,因此,有必要研究一旦重金属排放进入生活污水管道,对人工湿地处理污水可能的影响。采用人工湿地净化重金属废水方面研究也在起步阶段,重金属铬对人工湿地处理生活污水的能力有何影响?湿地植物在铬胁迫下会有怎样的生理反应?这方面的研究尚不多见。本文以美人蕉、芦苇为人工湿地植物,初步研究了不同浓度 Cr^{6+}处理条件下,两种湿地对生活污水净化效果及湿地植物生理特性变化,为人工湿地在重金属铬污染水体修复中的应用,降低环境中铬的风险提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　供试材料

试验在广西大学农学院试验大棚进行,美人蕉长至 5 叶期后,高度在 60 cm 左右,芦苇高度在 80 cm 左右,挖取植物洗净,每桶 9 株,移栽至模拟的人工湿地内进行污水培养生长,60 d 后进行 Cr 胁迫试验,试验时间从 4 月 25 日到 8 月 8 日,模拟的人工湿地内砂石以 3∶1 比例填充,砂子直径 1~5 mm,鹅卵石直径 2~6 cm。单池高 75 cm,长宽均为 60 cm,在离底部 20 cm 处外壁安装水龙头。

1.2　试验处理

根据前期研究的结果,发现当湿地中 Cr 浓度在 0~40 $mg\cdot L^{-1}$ 范围内均能正常生长,当浓度达到 50 $mg\cdot L^{-1}$ 时则表现为中毒症状,因此,本次试验浓度设置为 0、1、20、50 $mg\cdot L^{-1}$ Cr^{6+}生活污水(用分析纯 $K_2Cr_2O_7$ 配置),供试污水来自广西大学校园生活污水。每个浓度处理设置 4 个重复,水力停留时间为 2 d,每隔 5 d 更换含有铬的生活污水。

1.3　测定项目及取样方法

取样时间:分别于处理当日、处理后每隔 15 d 分别取水样及植物样进行分析。

污水指标:进出水的 COD、TP、氨氮含量,测量方法参照文献[9],并计算去除率。

生理指标:在污水停留第 2 d,采集美人蕉、芦苇正 2 叶测定各项生理指标。TTC、MDA 含量、SOD、POD 活性测定采用李合生、袁晓华的方法[10-11];铬含量测定采用火焰原子分光光度法[12];光合速率测定于晴朗的天气 9:00—10:00 进行,采用 LI-6400(美国产)便携式光合作用系统测定。

1.4　数据处理方法

数据采用 Excel 和 DPS 数据处理软件处理。

2　结果

2.1　Cr^{6+}胁迫对两种湿地污水 COD 去除率的影响

由图 1 可知,不同浓度相比较,在 1、20 $mg\cdot L^{-1}$ Cr^{6+}浓度处理下,两种湿地对 COD 仍有较好的处理效果,与对照相比差异显著。随 Cr^{6+}浓度的提高,两种湿地对 COD 的去除率均呈先上升后下降的趋势。在 CK、1 $mg\cdot L^{-1}$ 的 Cr^{6+}处理后,美人蕉湿地对 COD 去除率比芦苇分别高出 14.09%、28.14%;50 $mg\cdot L^{-1}$ Cr^{6+}条件下,两种湿地对 COD 净化效果差异不显著,经该浓度处理后,美人蕉湿地对 COD 去除率只有 CK 的 39.61%,芦苇湿地净化效果仅是 CK 的 46.84%(7 月 25 日)。

2.2　Cr^{6+}胁迫对两种湿地污水氨氮去除率的影响

不同浓度铬胁迫下,在试验初期美人蕉、芦苇湿地对氨氮去除率并没有受到 Cr^{6+}的抑制(图 2)。随处理时间的延长,两湿地对氨氮去除率均受到不同程度

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

的影响。CK 条件下,美人蕉湿地对氨氮平均去除率要高于芦苇(提高 18.68%),经 1 mg·L^{-1} Cr^{6+}处理后前者仅比后者高 2.87%;在 1、20 mg·L^{-1}Cr^{6+}浓度下,两种湿地对氨氮净化效果并不随处理时间的延长而下降。其中在 20 mg·L^{-1} 浓度条件下,美人蕉、芦苇湿地对氨氮去除率均保持在 17%左右,对 Cr^{6+}有较好的耐受能力;50 mg·L^{-1}Cr^{6+}处理下美人蕉、芦苇湿地对氨氮去除率均显著低于 CK。

2.3 Cr^{6+}胁迫对两种湿地污水总磷(TP)去除率的影响

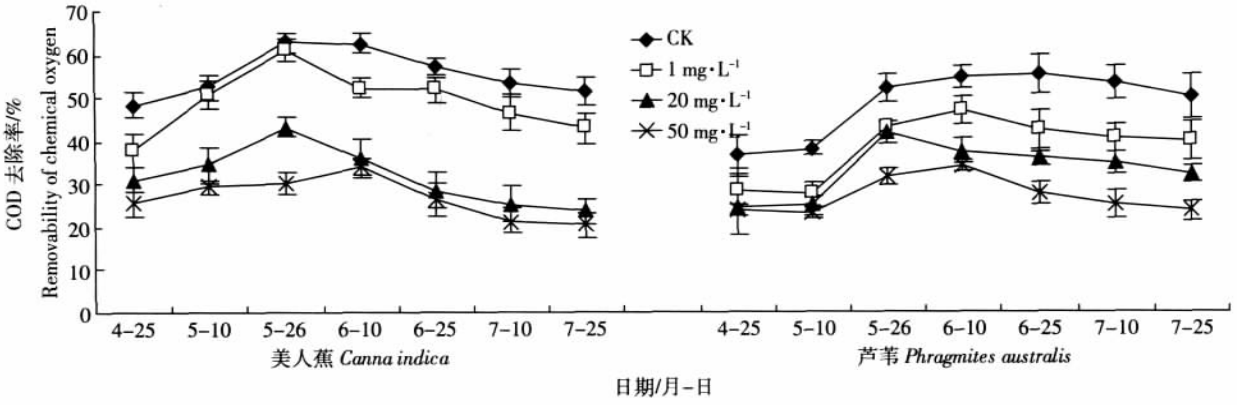
由图 3 可知,在 CK、1、20 mg·L^{-1} Cr^{6+}处理下,芦苇湿地对 TP 去除率并没有受到抑制,但对美人蕉湿地受抑制程度较为明显。对照美人蕉及芦苇湿地对 TP 去除率分别保持在 10%、12%左右;随处理时间的延长,经 1、20 mg·L^{-1} 处理后,两种湿地吸收 TP 能力变化不大,芦苇湿地对 TP 去除率显著高于美人蕉湿地,在 20 mg·L^{-1} Cr^{6+}处理下,芦苇湿地对 TP 去除率保持在 11%~12.75%,而美人蕉湿地只有 7.27%~9.03%;50 mg·L^{-1}Cr^{6+}条件下,两湿地系统对 TP 去除效果均较低。总体而言,在 Cr^{6+}胁迫下,芦苇湿地对总磷的净化效果优于美人蕉湿地。

2.4 Cr^{6+}胁迫对两种湿地植物体内铬积累量的影响

由图 4 可见,随处理时间的延长,在 1、20 mg·L^{-1} Cr^{6+}条件下,植物体内铬的积累量在逐渐增加。20 mg·L^{-1} 处理,美人蕉对铬的吸收能力要大于芦苇,两种植物体内铬的积累量均随 Cr^{6+}处理浓度的提高而提高;在 50 mg·L^{-1} Cr^{6+}处理下,在 6 月 23 日之前,两种植物体内铬积累量均随铬处理时间的延长而提高,但 6 月 23 日(即处理 44 d 后)以后,美人蕉体内 Cr^{6+}的吸收能力则开始下降,而芦苇体内铬含量依然呈上升趋势。植物体内重金属铬的不断积累,势必会造成自身生理代谢混乱,从而进一步影响湿地对铬污染的净化效果(注:对照组植物体内不含 Cr^{6+}),也表明芦苇具有更强的耐 Cr^{6+}胁迫能力。

2.5 Cr^{6+}处理对湿地植物叶片丙二醛(MDA)含量的影响

Cr^{6+}胁迫条件下,美人蕉、芦苇叶片 MDA 含量均增加(图 5),对于同种植物而言,Cr^{6+}浓度越高,MDA



注:误差线代表±"标准误",n=3,下同。Note: vertical error bars represent ±SE, n=3; the same below

图 1 Cr^{6+}胁迫对两种湿地 COD 去除率的影响

Figure 1 Influence of Cr^{6+} on the purification effect of chemical oxygen demand two wetlands

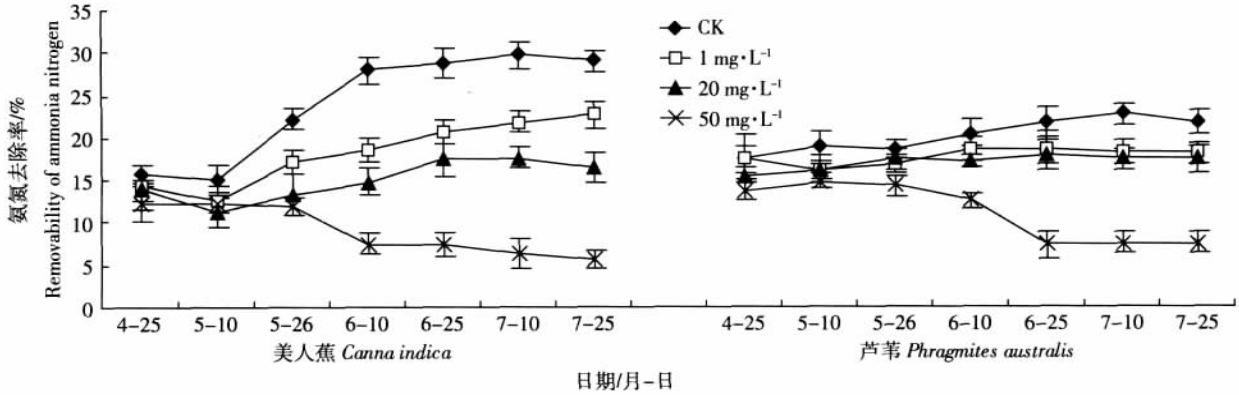


图 2 Cr^{6+}胁迫对两种湿地氨氮去除率的影响

Figure 2 Influence of Cr^{6+} on the purification effect of ammonia nitrogen in two wetlands

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

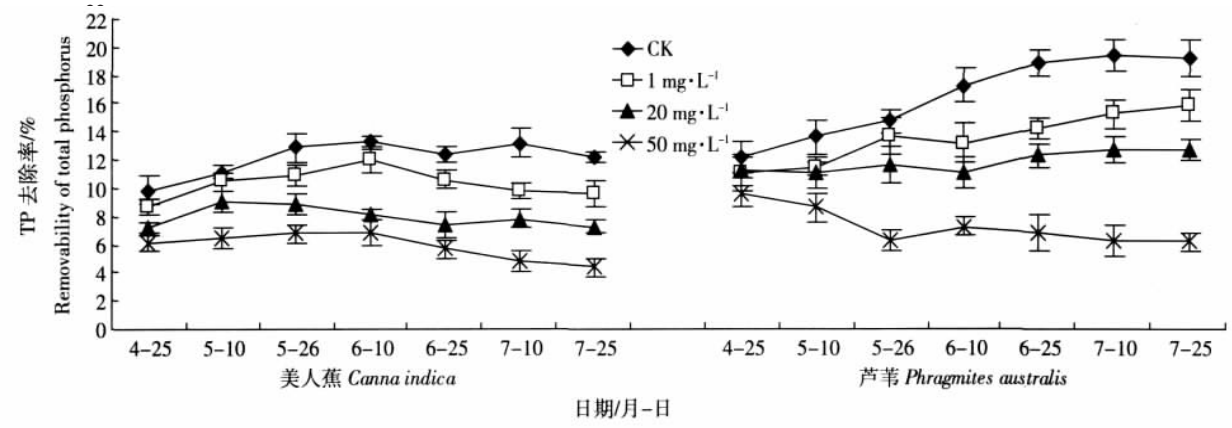


图 3 Cr^{6+}胁迫对两种湿地 TP 去除率的影响

Figure 3 Influence of Cr^{6+} on the purification effect of total phosphorus in two wetlands

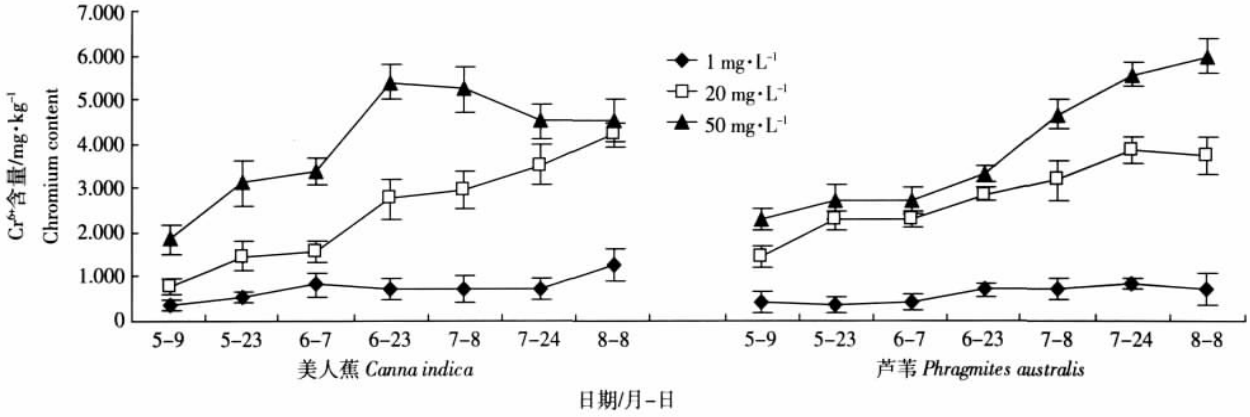


图 4 Cr^{6+}胁迫对湿地植物体内铬积累量的影响

Figure 4 Influence of Cr^{6+} on the chromium content in plants

含量越高，表明随着 Cr^{6+}浓度的升高，细胞膜受伤程度越大。在处理前期（4 月 27 日至 5 月 12 日），美人蕉和芦苇叶片 MDA 含量与 CK 差异不显著。随着处理时间的延长，不同浓度处理间叶片 MDA 含量差异显著，两植物叶片 MDA 含量大小依次为 50 mg·L^{-1} 处理>20 mg·L^{-1} 处理>1 mg·L^{-1} 处理>CK。在 7 月 12 日，50 mg·L^{-1} Cr^{6+}处理下，美人蕉叶片MDA 含量分别高于 CK、1、20 mg·L^{-1} 处理的 376.86%、179.20%、70.79%；而芦苇则依次高出 199.80%、106.33%、60.52%。

2.6 Cr^{6+}胁迫对两种湿地植物叶片超氧化物歧化酶（SOD）活性的影响

图 6 显示，在试验初期，Cr^{6+}对植物叶片 SOD 影响不显著。随处理时间的延长，1 mg·$L^{-1}$$Cr^{6+}$可显著提高美人蕉、芦苇叶片 SOD 活性；在试验后期（7 月 12 日），分别比 CK 高出 47.11%、31.75%；而经 20、50 mg·$L^{-1}$$Cr^{6+}$处理后，两植物叶片 SOD 活性显著低于 CK，且美人蕉叶片 SOD 活性受抑制程度高于芦苇。

2.7 Cr^{6+}胁迫对两种湿地植物叶片过氧化物酶（POD）活性的影响

由图 7 可知，1 mg·$L^{-1}$$Cr^{6+}$可较长时间提高美人蕉、芦苇植株叶片 POD 活性；20、50 mg·$L^{-1}$$Cr^{6+}$则抑制其活性，其中 50 mg·$L^{-1}$ 处理（7 月 12 日）美人蕉、芦苇叶片 POD 活性分别比试验初期下降 105.56%、20.69%。张治安等[20]研究表明，POD 是植物体内常见保护酶，该酶可以催化有毒物质的氧化分解。高浓度 Cr^{6+}胁迫条件下，两种植物叶片内 POD 活性大幅度下降，从而降低了自身抵御铬毒害作用。

2.8 Cr^{6+}胁迫对两种湿地植物叶片植物光合速率（Pn）的影响

由图 8 可知，不同浓度 Cr^{6+}对美人蕉、芦苇 Pn 造成一定的影响，随着 Cr^{6+}浓度升高这种抑制效果更为明显。1 mg·L^{-1} Cr^{6+}能有效地提高美人蕉、芦苇Pn，使二者 Pn 分别比 CK 高 125.37%、52.82%（6 月 12 日）；20、50 mg·L^{-1} Cr^{6+}表现出较为严重的抑制效果，在湿地运行后期（7 月 12 日），20 mg·L^{-1} Cr^{6+}处理的美人蕉、

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

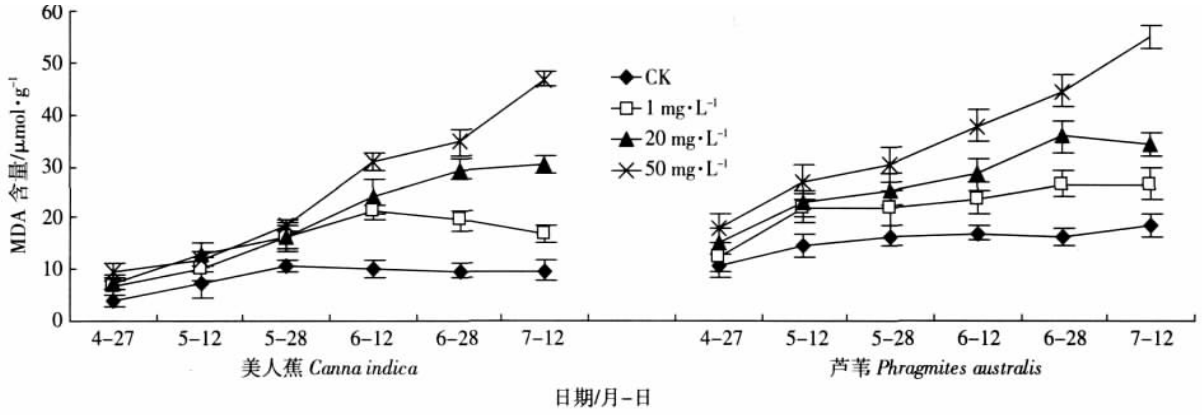


图 5 Cr^{6+}胁迫处理对叶片 MDA 含量的影响

Figure 5 Influence of Cr^{6+} on contents of malonaldehyde in leaves

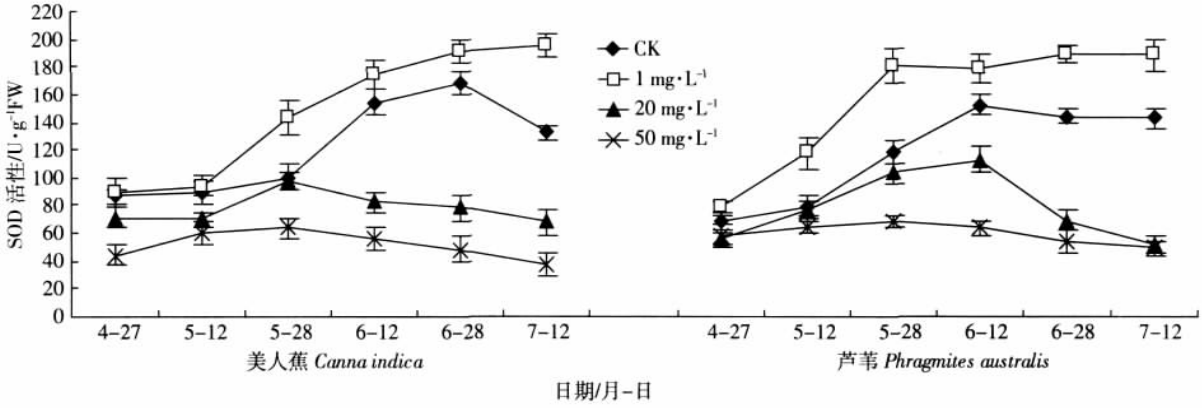


图 6 Cr^{6+}胁迫对叶片 SOD 活性的影响

Figure 6 Influence of Cr^{6+} on the SOD activities of leaves

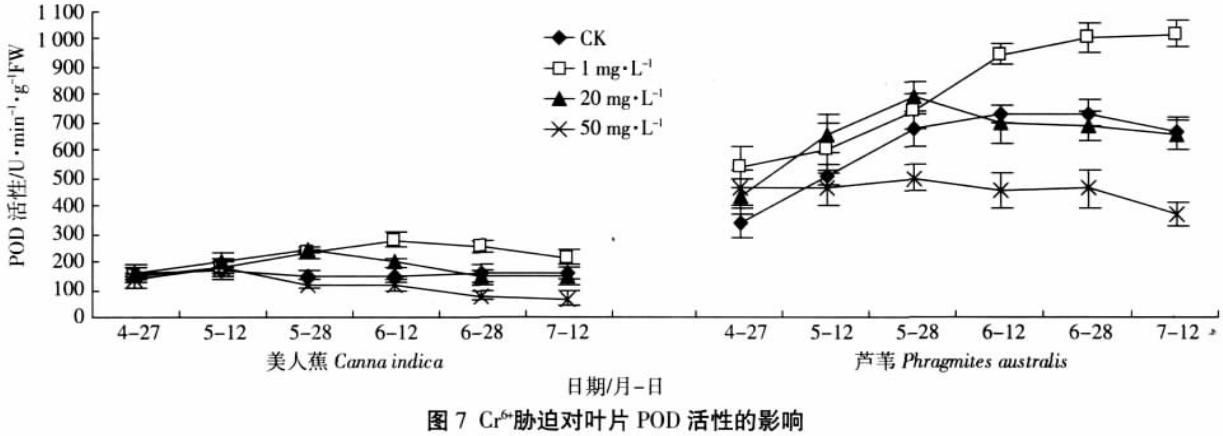


图 7 Cr^{6+}胁迫对叶片 POD 活性的影响

Figure 7 Influence of Cr^{6+} on the POD activities of leaves

芦苇P_n低于 CK（分别为 CK 的 41.64%，46.48%），50 mg·L^{-1} 处理后二者 Pn 分别为 CK 的 43.97%、28.09%。

2.9 Cr^{6+}胁迫对两种湿地植物根系活力（TTC）的影响

从图 9 可知，随着处理时间的延长，Cr^{6+}对两植物 TTC 影响较为明显。在不同浓度 Cr^{6+}条件下，美人蕉、芦苇 TTC 均呈先升高后降低的趋势。1 mg·L^{-1} Cr^{6+}可显著提高两种植物 TTC；20、50 mg·L^{-1} 浓度处理后（7 月 12 日），两植物 TTC 大大降低，其中美人蕉根系活力分别比 CK 低 49.04%、62.76%，而芦苇则比 CK 低 50.84%、89.19%。

3 讨论

植物的生长状况与人工湿地的净化能力有密切的关系，植物生长良好，人工湿地的净化能力就较强，

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

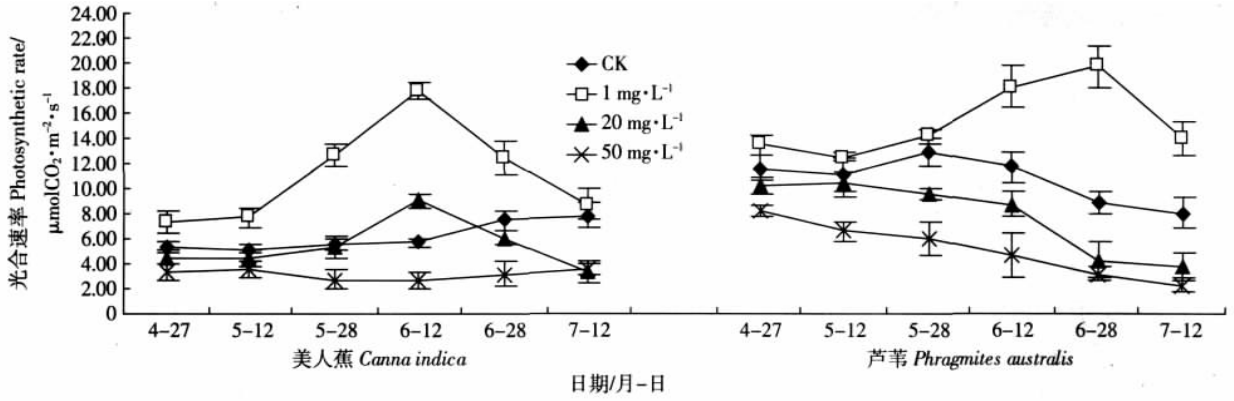


图 8 Cr^{6+}胁迫处理对植物 Pn 的影响

Figure 8 Influence of Cr^{6+} on the net photosynthetic rate of plants

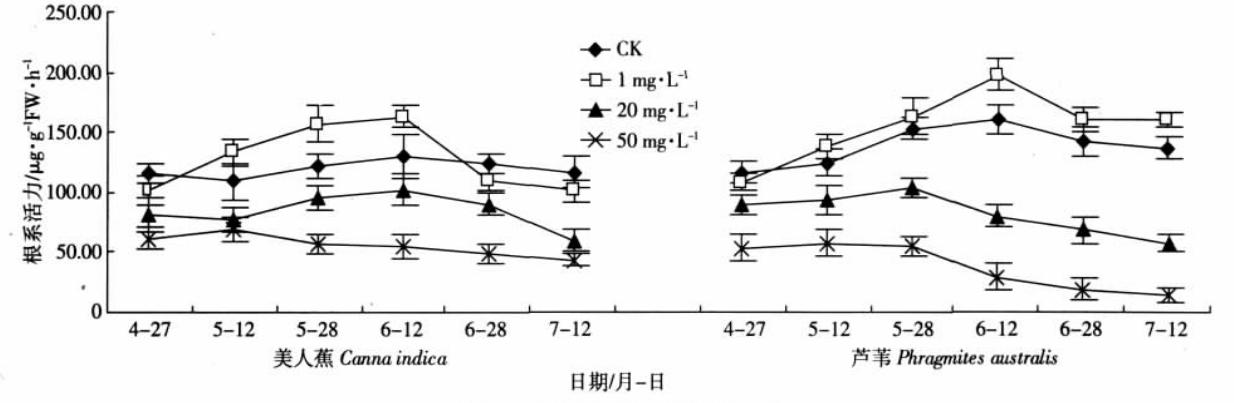


图 9 Cr^{6+}胁迫对植物 TTC 的影响

Figure 9 Influence of Cr^{6+} on the root activities of two plants

植物长势不佳，对污水的净化能力就下降[13-14]。在本研究中，较低浓度的铬（1 mg·L^{-1}）对美人蕉、芦苇的生长都有促进作用，而在较高浓度（20、50 mg·L^{-1}）下，则有抑制作用 在净化生活污水的能力方面，也都表现为低浓度的铬对两种人工湿地净化污水能力有促进作用，随着铬处理浓度的提高，两种植物人工湿地的净化能力呈下降的趋势。此外，铬对美人蕉及芦苇湿地的影响也表现出时间效应，在铬处理的初期，人工湿地净化污水的能力均没有受到抑制，相反略有提高，但随着处理时间的延长而逐渐表现出促进或是抑制作用，尤其在较高浓度下表现尤为明显。可以推测铬可能是通过调控植物的生理活动，进而影响到植物的生长，继而影响到人工湿地净化污水的能力。在铬胁迫的初期，植物体内积累的铬尚未达到对植物产生伤害的程度，但随着处理时间的延长，植物体内积累的铬已经超过植物所能忍受的能力，因而表现出抑制植物生长，进而影响人工湿地处理污水效果。在较低浓度铬胁迫下，美人蕉湿地的整体处理效果要好于芦苇湿地，但在较高浓度处理下，芦苇湿地的处理效果则优于美人蕉湿地，说明不同的植物湿地对铬胁迫的耐受能力是不同的。

丙二醛（MDA）是细胞内膜脂过氧化或脱脂产物，它会严重地损伤细胞的生物膜，使膜的流动性降低。MDA 含量高低直接反映植物细胞膜受伤害的程度[15]，干燥、低温、涝渍等胁迫条件与植物 MDA 含量的增加存在明显的相关性[16-17]。本研究表明，随着处理时间的延长，美人蕉、芦苇叶片 MDA 含量呈增加趋势，而 MDA 含量的提高与处理浓度成正比。不同浓度相比较，在较低浓度的铬处理下，MDA 含量随处理时间的延长而略有提高，但到后期却表现为略有下降的趋势。而在高浓度的铬处理下，MDA 含量随处理时间的延长不断升高，与江行玉等[18]的研究结果相似。推测在铬处理下，植物体内活性氧有不同程度的升高，体内的抗氧化系统随之启动。而高浓度的铬处理抑制了清除 MDA 相关系统活性，导致植物体代谢失调并对植物产生伤害。低浓度的铬处理反而促进相关酶系统活性，MDA 得到较好的清除，植物生长正常，人工湿地系统正常。

超氧化物歧化酶（SOD）是各种高等植物防御系

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

统中重要的保护酶之一，当在环境中受到胁迫后，植物体内活性氧代谢会失去平衡，从而造成体内活性氧含量增加，将直接诱导 SOD 活性增加，以清除体内过量的氧自由基[19]。低浓度 Cr^{6+} (1 mg·L^{-1}) 可以激活美人蕉、芦苇叶片的 SOD 活性，而高浓度 Cr^{6+} (20、50 mg·L^{-1}) 处理后，叶片 SOD 活性受到抑制。推测低浓度 Cr^{6+}下，美人蕉、芦苇的 SOD 酶活性有所提高，从而提高植物体对由于铬胁迫而产生的自由氧的清除能力，使得体内 MDA 含量降低，但当 Cr^{6+}浓度超过一定范围后，SOD 活性受到抑制，植物体清除氧自由基的能力下降，细胞受伤，MDA 含量增加，最终表现为植物的生长受到抑制，导致人工湿地净化能力下降。

POD 是植物体内常见保护酶，也是对环境较为敏感的酶，该酶可以催化有毒物质的氧化分解[20]。此外，黄辉等[21]的研究发现，在含铬矿渣污染源周围的芦苇生长正常，其体内的 POD 活性有明显升高等现象。本研究表明，1 mg·L^{-1} Cr^{6+}能很好地刺激美人蕉、芦苇叶片 POD 活性；而高浓度的铬处理则抑制 POD 活性，说明此时植物体内有毒物质的降解过程受阻，植物不能正常生长。

光合作用是植物生理过程中合成有机物和获得能量的来源。大量研究结果表明，重金属对植物光合作用产生抑制作用，这种抑制效果与重金属胁迫的程度、时间、试验方法以及植物的种类、组织等均有密切关系[22-25]。本研究表明，低浓度 (1 mg·L^{-1} Cr) 处理能够提高美人蕉、芦苇的光合速率，但高浓度处理则抑制光合速率。可能是因为铬胁迫后，抗氧化系统的 SOD、POD 受到抑制，体内过量的氧自由基不能及时清除，导致细胞受损，最终导致光合能力下降，进而影响植物的正常生长，对人工湿地的净化能力产生影响。

植物根系的活动是人工湿地净化污水极其关键的因素，根系活动能力强，生理代谢旺盛则表明向环境中吸收养分及泌氧的能力较强。根系微生物的活动比较活跃，对污水中 N、P 的吸收和降解能力就强，根系泌氧量的增加则大大有利于降低水体的 COD，可以用根系活力 (TTC，是指根系的吸收、合成、还原等方面能力统称) 衡量植物根系的生长状况。李建政[26]认为，铬对植物的毒害效应主要是发生在根部，通过对根系正常生理代谢的影响从而实现对整个植株的影响。本研究表明，铬对植物根系活力的影响较为明显，低浓度 (1 mg·L^{-1}) 的铬可以显著提高美人蕉、芦苇根系活力，而高浓度的铬 (20、50 mg·L^{-1}) 则对两种植物的根系活力有抑制作用。研究结果亦表明，根系活力提高，两种植物人工湿地对污水的净化能力也相应提高，根系活力低，则净化能力下降。

4 结论

生活污水中的铬对人工湿地的净化能力有一定的影响，表现为在受到低浓度 (即生活污水中的 Cr^{6+}浓度低于 1 mg·L^{-1}) 促进而高浓度 (Cr^{6+}浓度大于 20 mg·L^{-1}) 则抑制人工湿地的净化能力，在较低浓度铬处理下，植物体内的抗氧化系统活性提高，增强了植物清除氧自由基的能力，使得光合能力有所提高，根系活力增强，植物生长良好，因而保持了对生活污水的净化能力。在较高浓度的铬处理下，情况正好相反，植物光合系统受损，根系活力下降，最终导致植物生长不良，对污水的净化能力下降。

在生活污水中混入 1~50 mg·L^{-1} Cr^{6+}的 30 d 内，植物维持较高的抗氧化系统活性，使得植株免受伤害，并保持较高的光合能力和根系活力，植物生长正常，因而两个人工湿地系统都维持较高的净化能力。但随着处理时间的延长，在较高浓度铬处理下，人工湿地系统的植物生长严重受损，净化能力下降。芦苇及美人蕉湿地能够承受较短时间的铬胁迫而不致受损，维持较为正常的功能。

可见，芦苇及美人蕉人工湿地可以用来处理含有较低浓度铬的生活污水，短期处理含较高浓度铬的生活污水。但 Cr^{6+}在人工湿地中的转化、赋存状态以及与生活污水中的不同组分存在什么样的关系等都有待进一步深入研究，以为用人工湿地处理含 Cr^{6+}的生活污水提供理论支持。

参考文献：

[1] 沈耀良, 王宝贞. 废水生物处理新技术理论与应用[M]. 北京：中国环境科学出版社, 1999：57-122.
SHEN Yao-liang, WANG Bao-zhen. New theory and application on biological sewage treatment[M]. Beijing: China Environment Science Press, 1999: 57-122.

[2] 顾公望, 张宏伟. 微量元素与恶性肿瘤[M]. 北京：科学技术出版社, 1993：199-205.
GU Gong-wang, ZHANG HONG-wei. Trace element and malignancy[M]. Beijing: Science and Technology Press, 1993: 199-205.

[3] 张义贤. 三价铬和六价铬对大麦毒害效应的比较[J]. 中国环境科学, 1997, 17 (6)：565-567.
ZHANG Yi-xian. A comparative study of the toxic effects of the trivalent and hexavalent chromium in hordeum vulgare[J]. *China Environmental Science*, 1997, 17 (6): 565-567.

[4] 李晶晶, 彭恩泽. 综述铬在土壤和植物中的赋存形式及迁移规律[J]. 工业安全与环保, 2005, 31 (3)：31-34.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

LI Jing-jing, PENG En-ze. Summarization on the existing form and transferring rules of chromium in soil[J]. *Industrial Safety and Dust Control*, 2005, 31(3): 31-34.

[5] 顾龚平, 吴国荣, 陆长梅, 等. 杏菜对镉污水的净化作用及其机制探讨[J]. 农村生态环境, 2000, 16(3): 9-14.
GU Gong-ping, WU Guo-rong, LU Chang-mei, et al. Purifying effect of *Nymphoides peltatum* (Gmel) O. Kuntze on Cd^{2+} containing sewage and its mechanism[J]. *Rural Eco-Environment*, 2000, 16(3): 9-14.

[6] 徐勤松,施国新,杜开和. 镉胁迫对水车前叶片抗氧化酶系统和亚显微结构的影响[J]. 农村生态环境,2001,17(2): 30-34.
XU Qin-song, SHI Guo-xin, DU Kai-he. Effect of Cd2+ on antioxidase system and ultrastructure of Ottelia alismoides (L.) Pers. Leaves[J]. *Rural Eco-environment*, 2001, 17(2): 30-34.

[7] 王忠全, 温琰茂, 黄兆霆, 等. 几种植物处理含重金属废水的适应性研究[J]. 生态环境, 2005, 14(4): 540-544.
WANG Zhong-quan, WEN Yan-mao, HUANG Zhao-ting, et al. Adaptability of several plant to heavy metal wastewater treatment[J]. *Ecology and Environment*, 2005, 14(4): 540-544.

[8] 李科德, 胡正嘉. 人工模拟芦苇床系统处理污水的效能[J]. 华中农业大学学报, 1994, 13(5): 511-517.
LI Ke-de, HU Zheng-jia. Performance of sewage treatment by reed bed system[J]. *Journal Huazhong (Central China) Agricultural University*, 1994, 13(5): 511-517.

[9] 王心芳. 水和废水监测分析方法[M]. 北京 :中国环境出版社, 2002: 210-281.
WANG Xin-fang. Monitoring and analysis method of water and waster water[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 210-281.

[10] 袁晓华, 杨中汉. 植物生理生化实验[M]. 北京 :高等教育出版社, 1983 :128-133.
YUAN Xiao-hua, YANG Zhong-han. The experimental of plant physiology and biochemistry[M]. Beijing: Higher Education Press, 1983: 128-133.

[11] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京 :高等教育出版社, 2000 :164-167.
LI He-sheng. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 164-167.

[12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京 :中国农业出版社, 2007 :263-278, 394-398.
BAO Shi-dan. Agricultural chemistry analysis of soil[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2007: 263-278, 394-398.

[13] 徐伟伟, 章北平, 肖　波, 等. 植物在人工湿地净化污水过程中的作用[J]. 安全与环境工程, 2005, 12(4): 41-44.
XU Wei-wei, ZHANG Bei-ping, XIAO Bo, et al. The functions of plant in constructed wetland for wastewater treatment[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2005, 12(4): 41-44.

[14] 黄　娟, 王世和, 钟　秋, 等. 植物生理生态特性对人工湿地脱氮效果的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(2): 471-475.
HUANG Juan, WANG Shi-he, ZHONG Qiu, et al. Influence of plant ecophysiology characteristics on nitrogen removal effect in constructed wetlands[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(2): 471-475.

[15] 张宪政. 作物生理研究法[M]. 北京 :农业出版社, 1992 :40-99.
ZHANG Xian-zheng. Research methods of crop physiology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1992: 40-99.

[16] 陈少裕, 刘　杰. 水分胁迫对甘蔗叶片线粒体膜流动性的影响及其与膜脂过氧化的关系[J]. 植物生理学报, 1991, 17(3): 285-289.
CHEN Shao-Yu, LIU Jie. The effect of water stress on membrane fluidity of leaf mitochondria of sugarcane and its relation to membrane lipid peroxidation[J]. *Acta Photophysiologica Sinica*, 1991, 17(3): 285-289.

[17] 戴秋杰, 汪宗立. 水稻耐盐性的生理研究III. 盐渍对体内核酸和核糖核酸酶活力的影响[J]. 江苏农业学报, 1988, 4(1): 31-36.
DAI Qiu-jie, WANG Zong-li. Physiological studies on salt tolerance in rice III. Effect of salt stress on the nucleic acids and activity of RNase [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 1988, 4(1): 31-36.

[18] 江行玉, 赵可夫. 植物重金属伤害及其抗性机理[J]. 应用与环境生物学报, 2001, 7(1): 92- 99.
JIANG Xing-yu, ZHAO Ke-fu. Mechanism of heavy metal injury and resistance of plants[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2001, 7(1): 92- 99.

[19] 杨和连, 董新红, 张百俊, 等. 外源铬对豇豆幼苗生长及生理生化特性的影响[J]. 土壤通报, 2009, 40(6): 1446-1449.
YANG He-lian, DONG Xin-hong, ZHANG Bai-jun, et al. Effect of exogenous Cr on seedling growth and physiological and biochemical characters of asparagus bean seedling[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(6): 1446-1449.

[20] 张治安, 王振民, 徐克章. Cd 胁迫对萌发大豆种子中活性氧代谢的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(6): 670- 673.
ZHANG Zhi-an, WANG Zhen-min, XU Ke-zhang. Effect of cadmium stress on active oxygen metabolism in germinated soybean seeds[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2005, 24(6): 670-673.

[21] 黄　辉, 童　雷, 苗　芃. 铬污染地区芦苇 (*Phragmites australis* L.) 生理特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(4): 1273-1276.
HUANG Hui, TONG Lei, MIAO Peng. Physiological characteristics of *Phragmites australis* L. growing in chromium polluted area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4): 1273-1276.

[22] 张　磊, 于燕玲. 外源镉胁迫对玉米幼苗光合特性的影响[J]. 华北农学报, 2008, 23(1): 101-104.
ZHANG Lei, YU Yan-ling, ZHANG Lei. Influence of added cadmium stress on photosynthetic characteristics of maize in seedling stage[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2008, 23(1): 101-104.

[23] 朱建玲, 徐志防, 曹洪麟, 等. 镉对南美蟛蜞菊光合特性的影响[J]. 生态环境, 2008, 17(2): 657-660.
ZHU Jian-ling, XU Zhi-fang, CAO Hong-lin, et al. Effect of cadmium on photosynthetic traits in *Wedelia trilobata*[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(2): 657-660.

[24] 李德明, 朱祝军, 刘永华, 等. 镉对小白菜光合作用特性影响的研究[J]. 浙江大学学报, 2005, 31(4): 459-464.
LI De-ming, ZHU Zhu-jun, LIU Yong-hua, et al. Influence of cadmium on photosynthesis of *Brassica campestris ssp. chinensis* L.[J]. *Journal of Zhejiang University (Agric. & Life Sci)*, 2005, 31(4): 459-464.

[25] Sharkey T D, Loreto F, Vassey T L. Effects of stress on photosynthesis[C]//Baltscheffsky M (ed). current research in photosynthesis, Vol IV. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990: 549-556.

[26] 李建政. 环境毒理学[M]. 北京 :化学工业出版社, 2006 :134-146.
LI Jian-zheng. Environmental toxicology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 134-146.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net