

铬对人工湿地净化生活污水的影响及铬积累规律

李志刚¹, 黄海连¹, 李素丽¹, 蒲琦¹, 陈伟刚², 王振丰³, 崔新晓¹, 陈永¹

(1.广西大学农学院, 南宁 530005; 2.南宁市环境保护局, 南宁 530022; 3.广西建设职业技术学院, 南宁 530005)

摘要:采用沙培法,研究了不同浓度 Cr^{6+} (0、10、20、40 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)对风车草湿地和薏米湿地净化生活污水的影响及铬积累规律。结果表明:(1)COD 的去除率在苗期随铬浓度增大而逐渐升高,其余时期在 20、40 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理下受到显著抑制(除了花期风车草湿地外);随铬处理浓度的增大,风车草湿地对 TN 的去除率变化不明显,薏米湿地对 TN 的去除率则受到抑制作用(除了花期 10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 外);这两种湿地对生活污水中铬的净化效果较好,仅在 40 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理的风车草湿地出水中检测出铬。(2)10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 铬促进风车草和薏米的生物量增大,较高浓度铬(20、40 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)则抑制。(3)基质细沙及植物根系对污水中铬具有较好的吸附及积累作用,铬含量在细沙及植物中均随铬浓度增大而显著升高,其中两种植物对铬的积累量都表现为地下部显著大于地上部,表明风车草和薏米的根部中铬较难转移到其地上部。

关键词:人工湿地; Cr^{6+} ; 净化; 生活污水; 积累

中图分类号:X701.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)07-1362-07

Effects of Chromium on Purification of Domestic Wastewater and Its Accumulation in Constructed Wetlands

LI Zhi-gang¹, HUANG Hai-lian¹, LI Su-li¹, PU Qi¹, CHEN Wei-gang², WANG Zhen-feng³, CUI Xin-xiao¹, CHEN Yong¹

(1.College of Agriculture, Guangxi University, Nanning 530005, China; 2.Environmental Protection Bureau of Nanning, Nanning 530022, China; 3.Guangxi Construction Vocational Technology College, Nanning 530005, China)

Abstract: Sand culture experiments were conducted in order to study the effect of different concentrations of chromium(0, 10, 20, 40 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) on domestic wastewater purification of *Cyperus alternifolius* and *Coix aquatica Roxb* wetlands and chromium accumulation rules. The results were as follow: (1) At the seedling stage, the COD removal rates gradually increased along with the enhancement of chromium concentration, but they were significantly inhibited under the treatments of 20, 40 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ in the other stages (except the flowering stage of *Cyperus alternifolius*); TN removal rate of *Cyperus alternifolius* wetland wasn't significantly affected along with the increase of Cr^{6+} concentrations, but it was inhibited as far as *Coix aquatica Roxb* wetland was concerned(except treatment with Cr^{6+} 10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ at flowering stage); These two wetlands had good purification effects on domestic wastewater which contained chromium. Chromium was only detected in water that flowed out from the constructed *Cyperus alternifolius* wetland under 40 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ treatment. (2) Treatment with Cr^{6+} 10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ induced the enhancement of *Cyperus alternifolius* and *Coix aquatica Roxb* biomass, but higher concentrations(20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and 40 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) showed inhibition effects on the biomass. (3) Fine sand and plant roots had great capabilities of adsorption and accumulation of Cr^{6+} in wastewater. Chromium contents in fine sand and plants significantly increased along with Cr^{6+} concentration enhancement. The accumulations of chromium in roots of the two plants were significantly higher than those in shoots, proving that roots chromium of the two plants were hardly transferred to the shoots.

Keywords: constructed wetland; Cr^{6+} ; purification; domestic wastewater; accumulation

铬是目前我国列入环境优先污染物黑名单的重金属之一。铬在环境中主要以两种稳定的化合态形式

存在:三价铬和六价铬。三价铬是比较良性和稳定的,而六价铬是有毒的且容易移动,六价铬可以通过氧化其周围有机物质而转为三价铬^[1]。因此,六价铬污染的主要处理方法是环境中可溶性六价铬转变成三价铬^[2],如利用化学还原剂、微生物还原作用、溶剂提取、离子交换,这些方法虽然能比较迅速地治理铬污染,但其成本一般较高,同时会对水生生态系统产生不利的影响^[3]。植物修复重金属技术因其经济、有效及不破

收稿日期:2009-12-28

基金项目:重点流域水污染的绿色生态修复技术研究与应用示范(桂科攻 0719005-2-2B); 小城镇简易高效低耗污水处理共性关键技术研究与应用示范(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)

作者简介:李志刚(1969—),男,博士,副教授,主要从事逆境生理、水污染的生态处理研究。E-mail:lizhigangnn@163.com

坏生态环境的优势而得到各国政府和企业的普遍关注^[4]。近些年来,国内外已有较多报道植物在修复重金属铬方面的研究^[5-9],但有关铬对人工湿地净化含铬生活污水的影响,以及薏米(*Coix aquatica Roxb*)在人工湿地处理重金属废水方面的研究尚未见报道。本文从铬对人工湿地净化生活污水的影响以及铬在植物及湿地基质的分布及积累情况两方面进行研究,为人工湿地在处理含铬污水中的研究与应用提供理论依据,同时为植物修复重金属铬方面的研究提供一些实证。

1 试验材料及方法

1.1 材料与湿地处理方法

供试植物是均未受铬污染的莎草科风车草(*Cyperus alternifolius*)和禾本科薏米(*Coix aquatica Roxb*),地点是广西大学农学院教学科研基地(室外)。用塑料桶(上、下口直径分别为71 cm和45 cm,高为61 cm)模拟垂直流人工湿地,在桶内从下至上依次装填约10 cm高的鹅卵石(直径2~5 cm)和约40 cm厚的细沙,距桶底约10 cm处安装水龙头作为出水口(图1)。于2008年9月9日在湿地里分别种植风车草和薏米(每桶6株),采用东校园教职工生活区的生活污水(COD36.50~41.50 mg·L⁻¹, TN6.91~8.81 mg·L⁻¹, TP0.87~1.15 mg·L⁻¹, NH₃-N4.91~7.09 mg·L⁻¹)培养。2009年2月13日对植物进行地上部修剪,只留根部让其重新抽出新芽,继续用生活污水培养。通过预备试验研究0、1、10、20、30、40 mg·L⁻¹和50 mg·L⁻¹ Cr⁶⁺对风车草和薏米的生长影响,结果发现50 mg·L⁻¹严重抑制植物根系生长,而1 mg·L⁻¹处理对植物生长的影响与对照差异不明显,据此设定0、10、20 mg·L⁻¹和40 mg·L⁻¹ Cr⁶⁺为正式试验的铬处理浓度。2009年3月16日,开始用含不同浓度 Cr⁶⁺(用分析纯重铬酸钾配

成含10(Cr10)、20 mg·L⁻¹(Cr20)和40 mg·L⁻¹(Cr40) Cr⁶⁺,设0 Cr⁶⁺为对照CK,每个浓度设3个重复)生活污水处理人工湿地,平均每7 d灌溉1次(每桶35 L)含 Cr⁶⁺生活污水进入湿地,灌溉前先把湿地里污水排干,水力运行方式为静态。

1.2 取样与测定方法

水质指标测定参照文献[10]。试验期内,分别在植物苗期(2月20日至4月20日)、分蘖期(4月21日至5月25日)及花期(5月26日至6月26日)对进水和出水进行以下指标的测定(进水和出水相隔时间为2 d):化学需氧量(COD)采用重铬酸钾法,总氮(TN)采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法,六价铬采用二苯碳酰二肼分光光度法及总铬用火焰原子吸收分光光度法测定(安捷伦3510,安捷伦科技上海分析仪器有限公司)。COD、TN、六价铬及总铬在苗期、分蘖期和花期分别测定3次,最后取平均值。

植物生物量及重金属铬测定:在盛花期(6月16日)取植物样,按根、茎、叶分开,用自来水和去离子水冲洗干净,吹干,放入可控温干燥烘箱进行杀青30 min(100℃),然后在65℃下烘至恒重,粉碎,过60目筛后装入封口袋于干燥器里保存。植物生物量的测定采用称重法。植物全铬采用HNO₃-HClO₄消煮^[11],测定方法与污水总铬相同。

基质采样及全铬测定:在盛花期取植物样的同时,利用不锈钢土钻随机取0~20 cm基质(即细沙),带回实验室除杂、混匀,自然风干后用研钵磨碎,过100目筛后备用。采用HNO₃-H₂O₂消煮(EPA 3050B)^[12],测定方法与污水总铬相同。

1.3 数据分析

采用SPSS13.0及Excel软件处理试验数据,结果是3个重复的平均值±标准误。

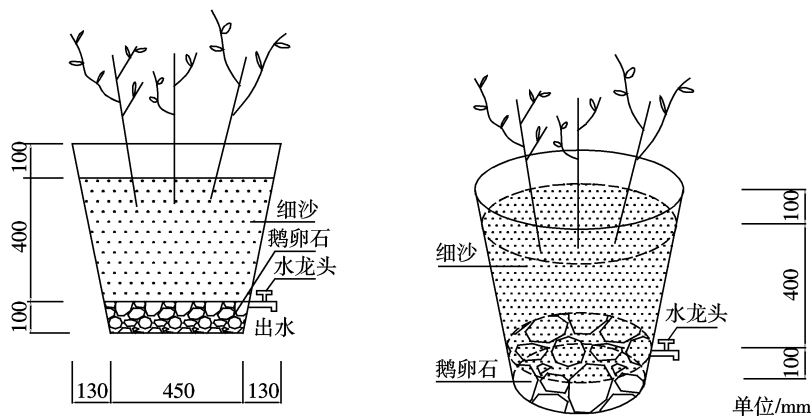


图1 人工湿地示意图

Figure 1 The schematic diagram of constructed wetlands

2 结果与分析

2.1 人工湿地对含铬生活污水的净化效果

2.1.1 人工湿地对化学需氧量(COD)的去除

从图2可看出,随着铬处理浓度的增大,两种湿地对COD的去除率在苗期都是逐渐升高,但苗期风车草湿地仅在 $40\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{ Cr}^{6+}$ (Cr40)处理下与对照差异显著(升高了2.88%),薏米湿地在有铬处理下均显著高于对照,分别高于对照9.15%、10.78%和11.78%。在分蘖期和花期,两种湿地对COD的去除率都是先升高后逐渐下降,表现在分蘖期两种湿地在Cr20及Cr40处理下受到抑制作用,COD去除率均显著低于对照;在花期风车草湿地在Cr10及Cr20处理下显著高于对照15.76%和12.29%,而薏米湿地在Cr20及Cr40处理下分别显著低于对照9.62%和12.63%。

2.1.2 人工湿地对总氮(TN)的去除

从图3可看出,风车草湿地对TN的去除率随铬

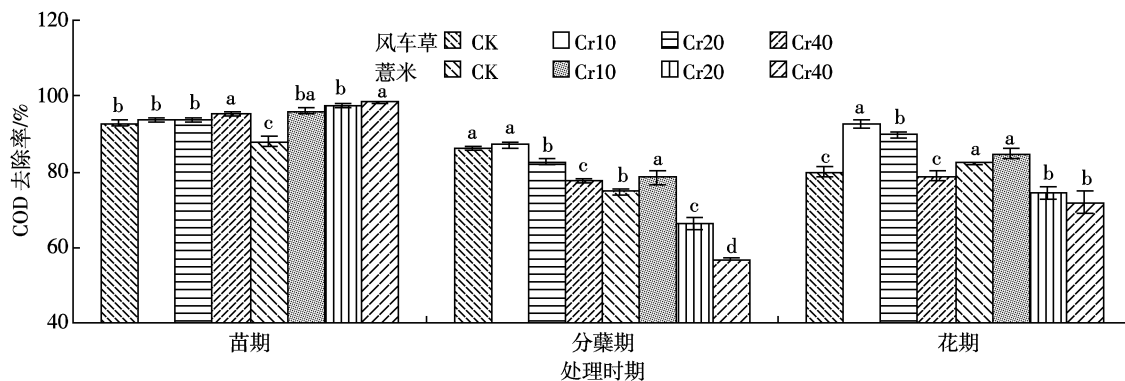
浓度增大的变化不明显,仅在苗期Cr40处理时显著低于对照5.58%,其余与对照差异均不显著。薏米湿地对TN的去除率在Cr20及Cr40处理下均受到一定抑制作用,表现在苗期和分蘖期分别显著低于对照10.89%、14.55%和20.90%、38.95%,在花期Cr40处理时显著低于对照32.60%。由此表明,铬处理对薏米湿地净化污水中TN的影响较大。

2.1.3 人工湿地对铬的去除

试验期内,含铬生活污水经过人工湿地处理后,只有Cr40处理的风车草湿地出水中能检测出铬(本试验采用火焰原子吸收法检测铬,最低检测限是 $0.03\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。从图4可看出,污水中六价铬去除率高于总铬,表明加入生活污水中的六价铬有部分被转变成其他化合价的铬;不同处理时期六价铬的去除率变化不大,总铬去除率则是苗期>分蘖期>花期。

2.2 铬对风车草和薏米生物量的影响

从表1可看出,随 Cr^{6+} 处理浓度的增大,风车草



注:误差线代表±标准误, $n=3$,不同小写字母表示处理间在 $P=0.05$ 水平上差异显著,下同。

Note: vertical error bars represent $\pm\text{SE}$, $n=3$; different small letters meant significant difference among different treatments at 5% level, the same below.

图2 人工湿地对生活污水中COD的去除

Figure 2 The removal of constructed wetlands on COD in domestic wastewater

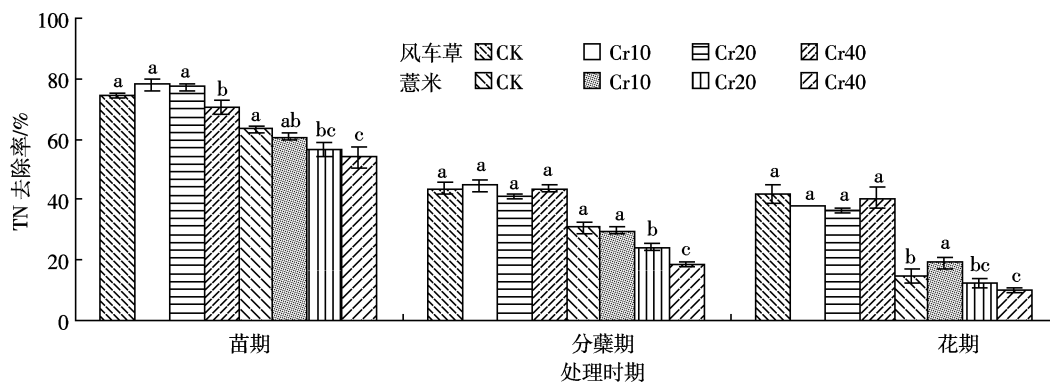


图3 人工湿地对生活污水中TN的去除

Figure 3 The removal of constructed wetlands on TN in domestic wastewater

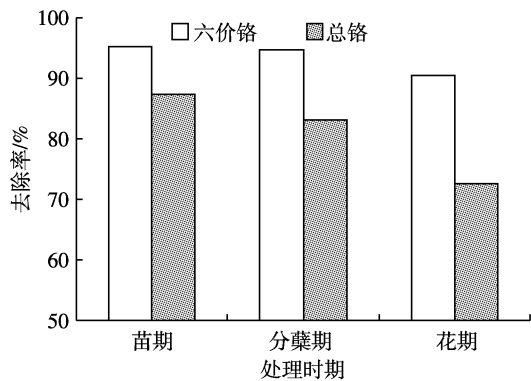


图 4 风车草湿地(Cr40)对生活污水中铬的去除
Figure 4 The removal of chromium in domestic wastewater from constructed wetland with *Cyperus alternifolius* (Cr40)

和薏米的各部位生物量都是先升高后逐渐下降。在 Cr10 处理时, 风车草茎和薏米根的生物量显著高于对照, 分别高于对照 20.29%和 46.76%;在 Cr20 处理时, 只有薏米根生物量显著低于对照 28.57%, 其余与对照差异不显著;在 Cr40 处理, 风车草根、茎、叶及薏米根的生物量皆显著低于对照, 分别降低 26.91%、

22.20%、28.72% 和 48.29%。由此可见, 试验期内, 低浓度 Cr⁶⁺(Cr10) 促进植物生长, 较高浓度 (Cr20 及 Cr40)则抑制;薏米的总生物量显著大于风车草。

2.3 铬在风车草和薏米体内分布及积累

从表 2 和表 3 可看出, 随着铬处理浓度的增大, 除了薏米根的铬积累量变化是先升高后逐渐降低的趋势外, 风车草和薏米体内铬含量及铬积累量均是极显著递增的变化趋势。风车草和薏米的不同器官的铬含量及积累量也不同, 表现在地下部均显著大于地上部; 铬含量及铬积累量在风车草都是茎大于叶, 而薏米则不同, 表现在铬含量是薏米叶大于茎, 铬积累量是薏米茎大于叶。由此表明, 铬积累量不仅与铬含量有关, 还与生物量大小有关。

2.4 人工湿地基质细砂对铬的积累

由表 4 可看出, 风车草和薏米湿地基质细砂的铬含量都是随 Cr⁶⁺处理浓度的增大而升高, 且不同浓度 Cr⁶⁺处理间差异极显著。表明人工湿地基质细砂在短时间内对生活污水中重金属铬的吸附能力较强, 随着铬处理浓度的增大, 其对铬的吸附量也在增多, 但细

表 1 铬对植物生物量的影响(g 干重·桶⁻¹)
Table 1 The effects of chromium on plant biomass(g DW·pot⁻¹)

处理 Treatment	风车草(<i>Cyperus alternifolius</i>)			薏米(<i>Coix aquatica</i> Roxb)		
	根(roots)	茎(stems)	叶(leaves)	根(roots)	茎(stems)	叶(leaves)
CK	37.68±2.64a	159.07±7.58b	105.50±9.88a	140.24±8.12b	380.70±13.49ab	130.93±4.94a
Cr10	40.99±2.58a	191.34±9.67a	115.73±7.51a	205.82±18.06a	418.26±25.88a	143.23±7.57a
Cr20	35.99±2.71a	153.09±10.71b	92.59±2.65ab	100.18±8.82c	355.98±25.72ab	120.21±9.89a
Cr40	27.54±1.38b	123.75±5.77c	75.20±5.20b	72.52±3.39c	326.53±19.47b	115.91±12.62a

注: 同列不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。
Note: Different small letters in the same column meant significant difference among treatments at 5% level.

表 2 不同浓度 Cr⁶⁺处理下植物体内铬含量变化
Table 2 The changes of Cr contents in plants under different Cr⁶⁺ concentrations treatment

植物种类 Plant species	处理 Treatment	铬含量(chromium content)/mg·kg ⁻¹		
		根(roots)	茎(stems)	叶(leaves)
风车草 (<i>Cyperus alternifolius</i>)	CK	40.16±5.01D	3.88±1.25D	2.63±0.00D
	Cr10	1 636.84±16.28C	50.18±3.32C	70.23±6.51C
	Cr20	3 353.38±28.13B	197.95±2.15B	152.82±3.73B
	Cr40	7 339.69±24.92A	445.37±4.49A	284.12±2.32A
薏米 (<i>Coix aquatica</i> Roxb)	CK	47.73±6.63D	18.89±3.30D	17.64±2.16D
	Cr10	1 640.48±14.47C	63.91±2.45C	58.94±3.81C
	Cr20	1 895.45±12.12B	92.73±2.09B	138.92±5.04B
	Cr40	2 325.82±25.56A	139.17±5.52A	260.54±6.76A

注: 同列不同大写字母表示处理间差异极显著(P<0.01), 下同。
Note: Different big letters in the same column meant significant difference among treatments at 1% level, the same below.

表 3 不同浓度 Cr⁶⁺处理下植物体内铬积累量变化

Table 3 The changes of Cr accumulation in plants under different Cr⁶⁺ concentrations treatment

植物种类 Plant species	处理 Treatment	铬积累量(chromium accumulation)/mg·m ⁻²		
		根(roots)	茎(stems)	叶(leaves)
风车草(<i>Cyperus alternifolius</i>)	CK	3.82±0.48D	1.56±0.50D	0.70±0.00D
	Cr10	169.55±1.69C	24.27±1.61C	20.54±1.90C
	Cr20	304.98±2.56B	76.58±0.83B	35.76±0.87B
	Cr40	510.80±1.73A	139.28±1.40A	53.99±0.44A
薏米(<i>Coix aquatica</i> Roxb)	CK	16.91±2.35D	18.18±3.18D	5.84±0.71D
	Cr10	853.24±7.53A	67.55±2.59C	21.33±1.38C
	Cr20	479.85±3.07B	83.42±1.88B	42.20±1.53B
	Cr40	426.23±4.68C	114.84±4.56A	76.31±1.98A

注:铬积累量是指单位面积上植物对铬元素的吸收量。
Note: chromium accumulation is Cr uptake of plants per unit area

表 4 不同浓度 Cr⁶⁺处理下细砂对铬的积累变化

Table 4 The changes of Cr accumulation in fine sand under different Cr⁶⁺ concentrations treatment

处理 Treatment	细砂铬含量(chromium content in fine sand)/mg·kg ⁻¹	
	风车草湿地 (<i>Cyperus alternifolius</i> wetland)	薏米湿地 (<i>Coix aquatica</i> Roxb wetland)
Cr0	5.13±1.25D	6.38±2.17D
Cr10	151.61±2.46C	210.26±6.96C
Cr20	363.16±5.73B	431.41±5.42B
Cr40	606.00±9.28A	647.32±10.53A

砂对铬的这种吸附作用会达到一个饱和状态。

3 讨论

P E Lim 等^[13]研究发现,湿地中化学需氧量(COD)的去除与污水中单一重金属(Zn、Pb、Cd)含量及混合重金属(Zn、Pb、Cd、Cu)含量都无关,氨氮的去除率则随着污水中重金属含量的增加而下降;陈娟研究发现,重金属(Cu、Zn、Pb、Cd)抑制 COD 去除而促进TN 去除^[14]。本研究结果表明,在苗期铬促进 COD 去除,在分蘖期及花期低浓度铬促进,高浓度铬则抑制,与上述研究结论不一致。原因可能是湿地基质、微生物及植物在不同的铬处理时间及铬处理浓度下受到的影响不同。有研究表明,随重金属胁迫浓度增大,植物生长状况^[15]、基质酶活性^[16]及微生物数量^[17]均受到抑制作用。由此推测,苗期 COD 去除率升高的原因可能是铬处理时间较短,湿地中铬累积量较少,对植物、微生物及基质酶活性未产生毒害效应,反而起到促进作用;随着处理时间延长,湿地中铬积累量增多,对植物、微生物及基质酶活性产生抑制效应,相应表

现为高浓度铬抑制了 COD 的去除。

污水中总氮的去除主要靠微生物转化(即氨化、硝化/反硝化)作用。有研究^[18]报道土壤氨化作用受低浓度铬促进,受高浓度铬抑制,土壤反硝化作用与铬浓度呈显著负相关。本文研究表明,随着铬处理浓度的增大,总体上看风车草湿地对 TN 的去除率变化不明显,薏米湿地对 TN 去除率在 Cr20 及 Cr40 处理下受到显著抑制,这可能是与植物不同、微生物影响不同等有关。有研究表明微生物数量与 TN 去除率呈显著相关性^[19]。因此推测,较高浓度铬处理下薏米湿地中微生物受到的抑制效应可能大于风车草湿地,导致薏米湿地对 TN 的去除率降低。

有研究表明,湿地植物的蒸腾作用及其根系分泌物有助于湿地中六价铬的去除^[9],有机物质的存在和微生物作用也可以促进六价铬的去除^[1]。本文研究结果表明,试验期内两种湿地对污水中六价铬及总铬的去除效果很好,除了 Cr40 处理风车草湿地出水中检测出铬,其余处理及薏米湿地都检测不出。主要原因是铬处理时间较短,基质及湿地植物对铬的吸附作用,还有薏米生物量较大和根系生长较旺盛,其蒸腾作用和根系分泌物有可能强于风车草,从而较强地促进污水中六价铬及总铬的去除。

植物生物量的大小关系到它在人工湿地中的应用价值。王启明等^[20]通过水培法研究发现大豆幼苗生物量随铬处理浓度的增大而逐渐下降的趋势。本研究结果是低浓度铬(Cr10)促进植物生物量增大,高浓度铬则抑制,与以上研究结论不完全一致。主要原因是人工湿地基质对大部分铬的吸附,从而减少铬对植物的伤害,而少量的铬可促进植物的生长^[21],但过量的

铬对植物造成毒害作用^[22]。

有相关研究证实,植物地下部分对铬的吸收远远大于地上部分^[5,7-8],且植物体内铬含量随铬处理浓度增大而升高^[5]。本研究结果表明,植物体内铬含量随铬处理浓度的增大而极显著升高,都表现为地下部显著大于地上部,与前人研究结论一致。植物根部吸收铬比较多,原因是它直接与铬接触,使它更容易对铬吸附与富集,但铬较难转移到地上部。植物对铬的积累量除了与铬处理浓度及体内铬含量有关外,还与生物量有关。本试验中,总体上薏米体内铬含量小于风车草,但它的生物量比较大,致使它对铬的积累量大于风车草。

E Lesage 等^[23]研究发现较高浓度金属(Al、Cr、Fe、Mn、Ni)在人工湿地沉积物里积累,并认为沉积物是人工湿地积累金属的主要途径。本文研究结果表明,风车草和薏米湿地基质细砂对铬的积累量都比较高,并随 Cr^{6+} 处理浓度的增大而明显升高。说明垂直流人工湿地基质细砂对铬具有较强的吸附及积累作用,但这种吸附及积累作用随着时间的延长会达到饱和状态,从而限制湿地基质的净化功能,甚至造成二次污染。

4 结论

(1)风车草湿地和薏米湿地对生活污水中 COD 的去除率在苗期随铬浓度增大而逐渐升高,而在分蘖期和花期则表现为较高浓度铬抑制了 COD 的去除。铬处理对风车草湿地去除 TN 的影响不明显,对薏米湿地的 TN 去除则产生抑制作用。两种湿地对生活污水中铬的净化效果较好,仅在 $\text{Cr}40$ 处理的风车草湿地出水中检测出铬。

(2)随着铬处理浓度的增大,风车草和薏米的生物量变化是先升高后逐渐降低的趋势,表现在低浓度铬($\text{Cr}10$)促进,较高浓度铬($\text{Cr}20$ 及 $\text{Cr}40$)抑制。

(3)随着铬处理浓度的增大,除了薏米根的铬积累量变化是先升高后降低外,风车草和薏米体内的铬含量及积累量均是极显著升高的变化趋势,都表现为地下部显著大于地上部。两种湿地的基质细砂对铬的吸附量也是极显著升高。

(4)本文研究结果表明,湿地中铬的去除主要是基质细砂及植物根系的吸附作用,植物地上部的吸附量很少,这不利于通过植物的收割途径去除重金属铬,且随着时间延长导致二次污染。因此,选择重金属超富集植物修复重金属污染是一种比较可行的途径。

参考文献:

- [1] S E Fendorf. Surface reactions of chromium in soils and waters[J]. *Geo-derma*, 1995, 67:55-71.
- [2] B R James. Remediation-by-reduction strategies for chromate-contaminated soils[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2001, 23:175-179.
- [3] Rai P K. Heavy-metal pollution in aquatic ecosystems and its phytoremediation using wetland plants: An eco-sustainable approach[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2008, 10(2):133-160.
- [4] 孙约兵,周启星,郭关林. 植物修复重金属污染土壤的强化措施[J]. 环境工程学报, 2007, 1(3):103-109.
SUN Yue-bing, ZHOU Qi-xing, GUO Guan-lin. Phytoremediation and strengthening measures for soil contaminated by heavy metals[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2007, 1(3):103-109.
- [5] 陈俊,王敦球,张学洪,等. 李氏禾修复重金属(Cr Cu Ni)污染水体的潜力研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4):1514-1518.
CHEN Jun, WANG Dun-qiu, ZHANG Xue-hong, et al. The ability of *Leersia hexandra* Swartz to remediate heavy metals (Cr, Cu, Ni) contaminated waters[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4):1514-1518.
- [6] 张学洪,罗亚平,黄海涛,等. 一种新发现的湿生铬超积累植物——李氏禾(*Leersia hexandra* Swartz)[J]. 生态学报, 2006, 26(3):950-953.
ZHANG Xue-hong, LUO Ya-ping, HUANG Hai-tao, et al. *Leersia hexandra* Swartz: a newly discovered hygrophyte with chromium hyper-accumulator properties[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(3):950-953.
- [7] S P Xu, P R Jaffe. Effects of plants on the removal of hexavalent chromium in wetland sediments[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2006, 35(1):334-341.
- [8] M A Maine, N L Sune, S C Lager. Chromium bioaccumulation: Comparison of the capacity of two floating aquatic macrophytes[J]. *Water Research*, 2004, 38:1494-1501.
- [9] J A Zazo, J S Paull, P R Jaffe. Influence of plants on the reduction of hexavalent chromium in wetland sediments[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 156:29-35.
- [10] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. 第四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002:210-350.
Editorial committee of State Environmental Protection Administration. Standard methods for the examination of water and wastewater [M]. DSM-IV. Beijing: China Environmental Science Press, 2002:210-350.
- [11] 宋波,高定,陈同斌,等. 北京市菜地土壤和蔬菜铬含量及其健康风险评估[J]. 环境科学学报, 2006, 26(10):1707-1715.
SONG Bo, GAO Ding, CHEN Tong-bin, et al. A survey of chromium concentrations in vegetables and soils in Beijing and the potential risks to human health[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(10):1707-1715.
- [12] United States Environmental Protection Agency (USEPA). Method 3050B: Acid digestion of sediments, sludges and soils (revision 2) [M]. U. S. A. Government, 1996:1-12.
- [13] P E Lim, M G Tay, K Y Mak. The effect of heavy metals on nitrogen

- and oxygen demand removal in constructed wetlands[J]. *The Science of the Total Environment*, 2003, 301:13–21.
- [14] 陈娟. 潜流人工湿地种植美人蕉对污水重金属的去除效果及机理研究[D]. 扬州:扬州大学, 2006:52.
- CHEN Juan. Study on the effect and mechanism of removing heavy metals of sewage of SFCW planting *Canna*[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2006:52.
- [15] Z Horcsik, V Olah, A Balogh, et al. Effect of chromium(VI) on growth, element and photosynthetic pigment composition of *Chlorella pyrenoidosa*[J]. *Acta Biologica Szegediensis*, 2006, 50(1–2):19–23.
- [16] 秦建桥, 夏北成, 周绪, 等. 粤北大宝山矿区尾矿场周围土壤重金属含量对土壤酶活性影响[J]. 生态环境, 2008, 17(4):1503–1508.
- QIN Jian-qiao, XIA Bei-cheng, ZHOU Xu, et al. Soil enzymatic activities in heavy metals contaminated soils around Dabaoshan mine tailings, northern Guangdong[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(4):1503–1508.
- [17] 王秀丽, 徐建民, 姚槐应, 等. 重金属铜、锌、镉、铅复合污染对土壤环境微生物群落的影响[J]. 环境科学学报, 2003, 23(1):22–27.
- WANG Xiu-li, XU Jian-min, YAO Huai-ying, et al. Effects of Cu, Zn, Cd and Pb compound contamination on soil microbial community[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, 23(1):22–27.
- [18] 胡健, 康贻军, 杨连新, 等. 水稻不同生育期土壤微生物生物量及生物活性对模拟 Cr(VI) 污水灌溉的响应[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(6):2308–2314.
- HU Jian, KANG Yi-jun, YANG Lian-xin, et al. Response of soil microbial biomass and bioactivities to stimulated irrigation of Cr(VI) sewage in different growth stages of rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(26):2308–2314.
- [19] 付融冰, 杨海真, 顾国维, 等. 人工湿地基质微生物状况与净化效果相关分析[J]. 环境科学研究, 2005, 18(6):44–49.
- FU Rong-bing, YANG Hai-zhen, GU Guo-wei, et al. Analysis of substrate microorganisms status in constructed wetlands and their correlation with pollutants removal for wastewater treatment[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2005, 18(6):44–49.
- [20] 王启明, 陈庆华. 铬胁迫对大豆幼苗生理生化特性的影响[J]. 河南农业科学, 2008, 5:42–44.
- WANG Qi-ming, CHEN Qing-hua. Effects of Cr⁶⁺ stress on physiological and biochemical properties of Soybean seedlings[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2008, 5:42–44.
- [21] Bonet A, Poschenrieder C, Barcelo J. Chromium III – iron interaction in Fedeficient and Fe-sufficient bean plants:I. Growth and nutrient content[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1991, 14:403–414.
- [22] Shanker A K, Cervantes C, Loza avara H, et al. Chromium toxicity in plants[J]. *Environment International*, 2005, 31:739–753.
- [23] E Lesage, D P L Rousseau, E Meers, et al. Accumulation of metals in the sediment and reed biomass of a combined constructed wetland treating domestic wastewater[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2007, 183:253–264.