

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3142.2013.02.022

黄建祥, 李素丽, 吕钊彦, 等. 六价铬对薹米人工湿地微生物群落数量的影响[J]. 广西植物 2013, 33(2): 253-257

Huang JX, Li SL, Lü ZY, et al. Effects of Cr⁶⁺ on microorganism population in *Coix aquatica* constructed wetlands[J]. *Guihaia* 2013, 33(2): 253-257

六价铬对薹米人工湿地微生物群落数量的影响

黄建祥, 李素丽*, 吕钊彦, 李志刚, 康亮, 何冰

(广西大学农学院, 南宁 530005)

摘要: 通过桶栽构筑微型模拟垂直流薹米人工湿地(CAW), 以1/2 Hoaglands 营养液为营养源, 在营养液中添加不同浓度的 Cr⁶⁺ (0, 5, 20, 40, 60 mg/L, 以 K₂Cr₂O₇ 配置), 各浓度处理均以不种植薹米湿地(NPW) 为对照, 以研究铬(Cr⁶⁺) 对薹米人工湿地基质真菌、细菌及放线菌群落结构数量的影响。结果表明: (1) 真菌、细菌、放线菌的数量在薹米人工湿地(CAW) 中明显多于无植物对照处理(NPW); (2) 中低浓度(5、20 mg/L) Cr⁶⁺ 对 CAW 真菌, 对 NPW 细菌、放线菌数量有促进作用, 薹米人工湿地微生物对低中浓度的 Cr⁶⁺ 胁迫有一定的耐受能力。

关键词: 六价铬; 人工湿地; 真菌; 细菌; 放线菌

中图分类号: X172.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2012)02-0253-05

* Effects of Cr⁶⁺ on microorganism population in *Coix aquatica* constructed wetlands

HUANG Jian-Xiang, LI Su-Li*, LÜ Zhao-Yan,
LI Zhi-Gang, KANG Liang, HE Bing

(College of Agriculture, Guangxi University, Nanning 530005, China)

Abstract: The effects of hexavalent chromium on fungi, bacteria and actinomycetes communities were studied by constructed a minitype tubs-vertical flow *Coix aquatica* wetland(CAW) adding 1/2 Hoaglands nutrient solution plus 0, 5, 20, 40, 60 mg/L K₂Cr₂O₇ respectively, and constructing a no plant wetland(NPW) which corresponding nutrient and hexavalent chromium concentrations as control experiment. The results as follows: (1) The populations of fungi, bacteria and actinomycetes in CAW were bigger than that in NPW; (2) Low or middle level hexavalent chromium concentrations (5, 20 mg/L) had stimulative effect on fungi in CAW and bacteria, actinomycetes in NPW. Microorganism population in *C. aquatica* constructed wetlands had the tolerant ability under the low or middle(5, 20 mg/L) Cr⁶⁺ stress.

Key words: hexavalent chromium; constructed wetland; fungi; bacteria; actinomycetes

铬(Cr)是重金属元素,在自然界中主要的存在形态是 Cr⁶⁺ 和 Cr³⁺ 的化合物;其中水溶性 Cr⁶⁺ 已被列为对人体危害最大的 8 种化学物质之一,国际公认的 3 种致癌金属物之一, Cr⁶⁺ 的毒性比 Cr³⁺ 大 100 倍(朱建华等,1997)。六价铬污染的治理一直

是环保领域的重大课题,同时也是西部欠发达地区经济发展过程中所面临的现实威胁之一(赵堃等,2006)。对于水体中 Cr⁶⁺ 的净化一般是采取传统的化学物理方法,而这些方法存在着成本高、二次污染和不易操作等问题,近年来周海兰(2007)和陈明利

* 收稿日期: 2012-09-20 修回日期: 2012-11-25

基金项目: 国家自然科学基金(8070302, 21167002); 广西科技攻关项目(桂科攻 0816002-4, 桂科攻 0719005-2-2B)

作者简介: 黄建祥(1986-) 男, 硕士研究生, 主要从事作物栽培与农业生态环境 (E-mail) hjx23301512@163.com。

通讯作者(Author for correspondence, E-mail: lisuli88@163.com)

等(2008)的研究也表明人工湿地对于水体中重金属的净化有很好的效果;Srinath *et al.* (2002)的研究认为人工湿地对六价铬的净化主要是通过植物吸收、人工湿地中有机物的吸附、基质的吸附等途径而达到。微生物对铬的去除有重要的作用,微生物可以通过对 $\text{Cr}^{3+}/\text{Cr}^{6+}$ 起到氧化还原作用而使其化学形态发生改变,使之沉淀,从而达到净化目的。韦必帽等(2009)和张超兰等(2010)的研究表明,重金属胁迫对微生物的活动有密切的关系,铬胁迫人工湿地微生物有抑制作用。但前人的研究大多围绕着矿山废水和皮革厂废水,且持续周期较短、处理浓度较低、未能真正反映人工湿地在长时间重金属胁迫下的变化动态,我们的前期结果表明长期运行的薏米人工湿地对生活污水中的 Cr^{6+} 有很好的净化能力,也发现 Cr^{6+} 对薏米人工湿地净化生活污水的能力表现为低浓度促进、高浓度抑制的效果(李志刚等,2010;黄海连,2010),我们推测 Cr^{6+} 可能对薏米人工湿地微生物群落结构及相关数量有显著的影响,从而影响到人工湿地净化污水的效果。为进一步明确 Cr^{6+} 对薏米人工湿地净化含铬生活污水影响的原因,本试验拟采用模拟人工湿地,以 1/2 Hoaglands 完全营养液为营养源,以不种植物为对照,研究在不同浓度 Cr^{6+} 胁迫下,薏米人工湿地微生物群落的变化规律,从而进一步弄清薏米人工湿地净化含铬污水的机理。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料来自广西本地种薏米(*Coix aquatica*),取薏米幼苗种植在人工模拟的桶栽湿地里,模拟垂直流人工湿地的运作。人工湿地设计参考李志刚等(2008):上端直径 32.0 cm,下端直径 26.0 cm,桶高 28.0 cm,出水口的开关位于桶下端距桶底部高 6.0 cm 处;鹅卵石(直径 3~5 cm)铺在桶底,厚度 10.0 cm,然后放入沙,厚度 13.5 cm,移种上 4~5 片叶薏米幼苗。

1.2 试验方法

本研究在广西大学农学院农科实验实习基地进行,通过采用重铬酸钾($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$)配置成含 Cr^{6+} 浓度分别为 0、5、20、40、60 mg/L 的霍格兰氏营养液,从 2011 年 4 月 18 日移栽薏米幼苗移入模拟人工湿地并加入 1/2 Hoaglands 完全营养液进行适应性培

养,薏米种植密度为 5 株/桶,重复 5 次,同时设置不种植物的模拟人工湿地重复 5 次。5 月 14 日加入含不同浓度 Cr^{6+} 的营养液,人工湿地的运行采取间歇性处理,水力停留 4 d,排出水后间歇 3 d,共 7 d 为一个周期,直至当年 9 月份桶栽试验,模拟人工湿地处理含铬污水共运行 140 d。

1.3 测定方法

分别于 5 月 18 日、6 月 16 日、7 月 20 日、8 月 25 日取样,由于 60 mg/L Cr^{6+} 处理的薏米人工湿地上部于 8 月 25 日基本死亡,此后不再对该人工湿地基质取样。取样时用干净小铲先铲去表层土,再采用五点取样法取土下 5 cm 至鹅卵石间沙样,充分混匀后,立即装入样品袋带回实验室,低温(4℃)保存待测微生物。微生物分析具体方法参考唐丽杰等(2005)的方法,真菌、细菌、放线菌数量测定采用稀释平板分离法,细菌用牛肉膏蛋白胨琼脂培养基培养,真菌用马丁氏培养基培养,放线菌用淀粉铵盐培养基培养。

1.4 数据处理

用软件 Excel 2003 作图表、DPS7.05 软件分析数据。

2 结果与分析

2.1 不同浓度 Cr^{6+} 对真菌数量的影响

由表 1 可知,人工湿地的基质真菌数量 CAW > NPW,随处理时间的延长,CAW 基质真菌数量呈不断增多的趋势,依次表现为 8 月 > 6 月 > 7 月 > 5 月,中低浓度 Cr^{6+} 处理提高 CAW 真菌数量,高浓度 Cr^{6+} 则抑制,表现为 20 mg/L > 5 mg/L > 0 > 40 mg/L > 60 mg/L;在 5 月 18 日 CAW 真菌数量随 Cr^{6+} 浓度的增大而减少,之后时期低中浓度 Cr^{6+} 处理对真菌数量均有不同程度的促进作用,高浓度 Cr^{6+} 有抑制作用。NPW 真菌数量在 Cr^{6+} 处理下先增加后降低,表现为 7 月 > 8 月 > 6 月 > 5 月,不同浓度 Cr^{6+} 处理下对 NPW 真菌数量有不同程度的提高效果,但无明显的影响规律, Cr^{6+} 处理 NPW 的真菌数量表现为 60 mg/L > 5 mg/L、20 mg/L > 40 mg/L > 0。实验表明,NPW 真菌数量远远少于 CAW 中真菌数量。

2.2 不同浓度 Cr^{6+} 对细菌数量的影响

细菌的数量基本达到了 10^4 的数量级(表 2),细菌群落数量 CAW > NPW,CAW 细菌数量随处

表 1 人工湿地的真菌数量 (个/g)
Table 1 Fungi population in constructed wetlands (CFU/g)

处理 Treatment	浓度 (mg/L) Concentration	5 月 18 日	6 月 16 日	7 月 20 日	8 月 25 日
CAW	0	852 ± 34 a	1073 ± 37 c	1165 ± 139 b	2487 ± 85 b
	5	491 ± 62 b	1751 ± 77 b	1724 ± 124 a	3057 ± 233 b
	20	399 ± 23 b	2346 ± 22 a	1607 ± 69 a	8481 ± 534 a
	40	368 ± 30 b	2238 ± 68 a	1049 ± 62 bc	1000 ± 87 c
	60	121 ± 1 c	1324 ± 169 c	334 ± 22 c	
NPW	0	65 ± 6 b	564 ± 27 a	64 ± 3 c	768 ± 76 b
	5	60 ± 5 b	378 ± 24 c	1023 ± 128 b	597 ± 42 b
	20	60 ± 1 b	463 ± 40 b	254 ± 22 c	1234 ± 141 a
	40	59 ± 5 b	124 ± 3 d	1145 ± 88 b	288 ± 24 c
	60	232 ± 7 a	493 ± 24 ab	4248 ± 139 a	

注: 同列不同小写字母表示有薏米或无薏米处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Note: different small letters mean significant differences among different treatments between *Coix aquatica* and no *C. aquatica* at 5% level ($P < 0.05$). The same below.

表 2 人工湿地的细菌数量 (万个/g)
Table 2 Bacteria population in constructed wetlands (CFU 10^4 /g)

处理 Treatment	浓度 (mg/L) Concentration	5 月 18 日	6 月 16 日	7 月 20 日	8 月 25 日
CAW	0	18.83 ± 4.98d	130.78 ± 11.37c	84.36 ± 3.82d	228.78 ± 10.45b
	5	141.39 ± 9.00b	196.93 ± 1.70b	173.88 ± 2.90c	216.17 ± 9.51b
	20	111.93 ± 8.09c	123.24 ± 5.69c	264.15 ± 2.98a	312.67 ± 8.74a
	40	123.39 ± 8.44bc	135.54 ± 6.24c	208.57 ± 3.82b	35.40 ± 0.24c
	60	271.60 ± 9.81a	318.84 ± 9.60a	184.03 ± 10.36c	
NPW	0	30.04 ± 3.08e	65.48 ± 2.40d	25.71 ± 1.69d	115.81 ± 1.10b
	5	140.07 ± 0.63d	89.15 ± 5.55c	162.99 ± 7.03b	67.46 ± 0.24c
	20	212.14 ± 2.34c	106.99 ± 6.28c	181.88 ± 5.7a	41.25 ± 0.17d
	40	339.75 ± 3.22a	15.88 ± 5.51b	88.63 ± 5.59c	236.02 ± 1.12a
	60	242.01 ± 3.43b	222.40 ± 7.19a	76.02 ± 2.56c	

理时间的延长总体趋势是不断增加,表现为 8 月 > 7 月、6 月 > 5 月; Cr^{6+} 处理对 CAW 细菌数量影响无明显规律,但 Cr^{6+} 不同程度上均有促进作用,表现为 60 mg/L > 20 mg/L > 5 mg/L > 40 mg/L > 0; 5、6 月份高浓度 60 mg/L Cr^{6+} 对 CAW 细菌数量显著增加,之后时期 20 mg/L Cr^{6+} 增加有显著增加作用。NPW 细菌数量不断降低的趋势,变化为 5 月 > 6 月 > 7、8 月,7、8 月份高浓度 Cr^{6+} 处理对 CAW 细菌数量有抑制作用,表现为 20 mg/L > 40 mg/L > 60 mg/L > 5 mg/L > 0; 5、6 月份高浓度 Cr^{6+} 的表现为促进作用,7 月份低中浓度的 Cr^{6+} 促进作用显著,之后时期低中浓度的 Cr^{6+} 有抑制作用,但 20 mg/L 显著促进细菌数量增加。

2.3 不同浓度 Cr^{6+} 对放线菌数量的影响

放线菌的数量比较庞大,基本上达到了 10^5 数量级(表 3),人工湿地放线菌的群落数量 CAW > NPW。CAW 放线菌数量 6、7 月 > 5、8 月,不同浓度 Cr^{6+} 对 CAW 放线菌数量影响为 60 mg/L > 40 mg/L

> 20 mg/L > 5 mg/L > 0,低中浓度 Cr^{6+} 显著促进薏米人工湿地放线菌数量的增多,高浓度 Cr^{6+} 促进作用降低甚至随 Cr^{6+} 增加而产生抑制作用。NPW 细菌数量随处理时间的延长先上升后降低,表现为 6 月 > 7 月、8 月 > 5 月; Cr^{6+} 均有不同程度的促进作用,表现为 NPW 放线菌数量 60 mg/L > 5 mg/L > 20 mg/L > 40 mg/L > 0。

3 结论与讨论

3.1 讨论

植物-微生物联合修复重金属污染是未来发展的重要方向(牛荣成等,2010),微生物具有处理低浓度重金属效果好,吸附容量大,易操作,快速等优势使之逐渐成为重金属污染的研究热点和发展方向。有研究表明(凌薇薇,2011;王俊丽,2011;曹小红,2008)从重金属污染区土壤中可筛选出具有一定耐受能力和吸附重金属的菌类,在重金属污染土

壤的修复和含重金属废水处理中有良好应用前景。但重金属对微生物的毒性的效应与其浓度有很大的关系,高浓度的重金属抑制土壤微生物的生长与繁殖(陈英旭,2006;周启星等,2011),矿山区与非矿山区对比发现重金属均能降低真菌、细菌、放线菌的数量(王秀丽,2003)。本试验研究发现低中浓度 Cr^{6+} 对 CAW 真菌数量、NPW 细菌数量和 CAW 放线菌数量有促进,高浓度 Cr^{6+} 均有抑制的作用,与王静等(2010)研究低浓度铜污染对微生物生长具有一定的刺激作用、高浓度铜污染表现出毒害,微生物多样性有所降低的试验结果类似;但也有研究表明(吴建军,2008)随着有效态铜、锌、铅、镉含量的增

加,水稻土壤中微生物群落向着真菌相对含量增加,放线菌减少,细菌变化不大。 Cr^{6+} 对 NPW 真菌数量、CAW 细菌数量和 NPW 放线菌数量有不同程度的促进作用,但随 Cr^{6+} 浓度递增而变化的规律不明显,这些不规律的变化差异,可能因露天试验受外界环境影响造成的。试验研究也发现真菌、细菌、放线菌这 3 种微生物 CAW 可培养菌落数量明显多于 NPW 表明薏米在人工湿地基质中对微生物的群落数量有很重要的促进作用,可能原因是薏米根系的代谢活动导致了基质环境的差异而引起的,石汝杰等(2007)研究铅对不同种植植物的根系微生物数量的影响发现,三种菌数的趋势也因植物根系环境的

表 3 人工湿地的放线菌数量 (万个/g)

Table 3 Actinomycetes population in constructed wetlands (CFU 10^4 /g)

处理 Treatment	浓度 (mg/L) Concentration	5月18日	6月16日	7月20日	8月25日
CAW	0	75.24 ± 4.53c	95.21 ± 4.35c	135.37 ± 11.91b	102.39 ± 5.31 a
	5	101.39 ± 2.41b	110.24 ± 1.14bc	118.53 ± 6.30b	112.62 ± 9.03 a
	20	121.78 ± 8.27a	135.37 ± 11.91a	96.56 ± 2.33c	101.42 ± 3.73 a
	40	117.39 ± 7.39ab	118.53 ± 6.30ab	128.99 ± 1.87b	102.80 ± 5.50 a
	60	103.21 ± 3.36b	96.56 ± 2.33c	159.27 ± 2.25a	
NPW	0	100.89 ± 10.15a	135.37 ± 11.91b	12.45 ± 0.76c	83.54 ± 4.63 a
	5	77.85 ± 8.452b	118.53 ± 6.30b	89.61 ± 3.60b	95.56 ± 8.13 a
	20	84.12 ± 2.43ab	96.56 ± 2.33c	102.72 ± 10.70b	88.40 ± 7.65 a
	40	12.46 ± 0.76c	128.99 ± 1.87b	142.15 ± 4.59a	75.44 ± 6.02 a
	60	89.61 ± 3.60ab	159.27 ± 2.25a	90.55 ± 1.60b	

不同而有所区别。

3.2 结论

人工湿地基质中真菌、细菌、放线菌的群落数量表现为 CAW > NPW,薏米对人工湿地微生物群落数量的影响发挥了重要作用,可能是因为:基质中的根际区在 Cr^{6+} 对微生物造成的危害起到了一个缓冲作用;植物根系分泌物和根系腐败分解后排放到系统中的物质,增加了基质的营养水平,改变了基质环境,更加有利于微生物的生长。低中浓度 Cr^{6+} (5、20 mg/L) 对 CAW 真菌数量、NPW 细菌数量和 CAW 放线菌数量有促进,而高浓度 Cr^{6+} 则抑制。 Cr^{6+} 对 NPW 真菌数量、CAW 细菌数量和 NPW 放线菌数量有不同程度的促进作用,但随 Cr^{6+} 浓度递增而变化无明显规律;表明薏米人工湿地微生物对低中浓度的 Cr^{6+} (5、20 mg/L) 胁迫具有一定的耐受能力。

参考文献:

王世和. 2007. 人工湿地污水处理理论与技术 [M]. 北京: 科学出版社: 44 - 48
 陈英旭. 2006. 农业环境保护 [M]. 北京: 化学工业出版社: 144 - 145

林先贵. 2010. 土壤微生物研究原理与方法 [M]. 北京: 高等教育出版社: 243 - 251
 周启星, 罗义. 2011. 污染生态化学 [M]. 北京: 科技出版社: 111 - 114
 唐雨杰, 马波, 刘玉芬. 2005. 微生物学实验 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社: 67 - 69
 黄海连. 2010. 人工湿地对含 Cr^{6+} 生活污水的净化效果及机理研究 [D]. 南宁: 广西大学: 15 - 20, 50 - 52
 Cao XH(曹小红), Yang YJ(杨亚静), Lu MF(鲁梅芳), et al. 2008. Study on screening of tolerant-lead & copper strains and its adsorption capability(耐铅、铜微生物的筛选及吸附性能研究) [J]. *Environ Cons Sci(环境保护科学)* 34(5): 15 - 18
 Chen ML(陈明利), Zhang YL(张艳丽), Wu XF(吴晓芙), et al. 2008. Characteristics of selected wetland plant species for removal of Zn^{2+} / Cd^{2+} from wastewater(人工湿地植物处理含重金属生活废水的实验研究) [J]. *Environ Sci Technol(环境科学与技术)* 31(12): 164 - 168
 Li ZG(李志刚), Huang HL(黄海连), Li SL(李素丽), et al. 2010. Effects of chromium on purification of domestic wastewater and its accumulation in constructed wetlands(铬对人工湿地净化生活污水的影响及铬积累规律) [J]. *J Agro-Environ Sci(农业环境科学学报)* 29(7): 1362 - 1368
 Li ZG(李志刚), Li SL(李素丽), Huang HL(黄海连), et al. 2010. Effects of chromium on the removal of nitrogen and phosphorus in domestic wastewater and the content of nitrogen and

- phosphorus in plants(铬对生活污水中氮磷的植物净化效果及体内氮磷含量的影响) [J]. *Ecol Environ Sci*(生态环境学报) **19**(2): 286-290
- Li ZG(李志刚), Jiang YH(蒋越华), Li SL(李素丽), et al. 2008. Effect of waste-water treatment on leaf photosynthesis and chlorophyll fluorescence properties of three plant species in constructed wetland(人工湿地污水处理对三种植物光合作用及叶绿素荧光特性的影响) [J]. *Ecol Environ*(生态环境), **17**(6): 2187-2191
- Ling WW(凌薇薇), Wu XF(吴晓芙), Chen YH(陈永华), et al. 2011. Screening of manganese resistant microorganism and their Characteristics on Mn^{2+} ion removal (除锰微生物的筛选及其除锰特性研究) [J]. *J Centr S Univ For & Technol*(中南林业科技大学学报) **31**(6): 152-156
- Matin CD, Moshiri GA. 1994. Nutrient reduction in an in-series constructed wetland system treating landfill leachate [J]. *Wat Sci & Tech* **29**(4): 267-272
- Niu RC(牛荣成), Wei SH(魏树和), Zhou QX(周启星), et al. 2010. Process of plant-microbe remediation of contaminated soil with heavy metal(植物-微生物联合修复重金属污染土壤研究进展) [J]. *World Sci-Tech R & D*(世界科技研究与发展) **32**(5): 663-666
- Srinath T, Verma T, Ramteke PW, et al. 2002. Chromium (VI) biosorption and bioaccumulation by chromate resistant bacteria [J]. *Chemosphere* **48**: 427-435
- Shi RJ(石汝杰), Lu YG(陆引罡). 2007. Effect of the rhizosphere on the microorganism and the enzyme activity in polluted soil with lead(植物根际微生物和酶活性对铅污染的响应) [J]. *J Anhui Agric Sci*(安徽农业科学) **35**(30): 9634-9636
- Teng Y(滕应), Huang CY(黄昌勇), Luo YM(骆永明), et al. 2004. Microbial Activities and Functional diversity of Community Soils Polluted with Pb-Zn-Ag mine tailings(铅锌银尾矿区土壤微生物活性及其群落功能多样性研究) [J]. *Acta Pedol Sin*(土壤学报) **41**(1): 113-119
- Wei BM(韦必帽), Zhang CL(张超兰), Li QF(李勤峰), et al. 2009. Dynamic changes of microbial population and enzyme activity in artificial wetland with Cd wastewater(人工湿地处理含镉废水基质微生物和酶的动态变化研究) [J]. *Guangxi Agric Sci*(广西农业科学) **40**(5): 533-537
- Wang J(王静), Tian R(田然), Zhou H(周辉), et al. 2010. Response of soil enzymes and microbial communities to elevated concentration of atmospheric CO_2 under stress of Cu pollution(铜污染胁迫条件下农田土壤酶活性及微生物多样性对大气 CO_2 浓度升高的响应) [J]. *J Agro-Environ Sci*(农业环境科学学报) **29**(9): 1706-1711
- Wang JL(王俊丽), Ren JG(任建国). 2011. Screening of cadmium resistant microbes and analysis of their adsorption capability (耐镉微生物的筛选及其吸附能力研究) [J]. *Hubei Agric Sci*(湖北农业科学) **50**(3): 499-502
- Wang XL(王秀丽), Xu JM(徐建民), Yao HY(姚槐应), et al. 2003. Effects of Cu, Zn, Cd and Pb compound contamination on soil microbial community(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]. *Acta Sci Circum*(环境科学学报) **23**(1): 22-27
- Wu JJ(吴建军), Jiang YM(蒋艳梅), Wu YP(吴愉萍), et al. 2008. Effects of complex heavy metal pollution on biomass and community structure of soil microbes in paddy soil(重金属复合污染对水稻土微生物量和群落结构的影响) [J]. *Acta Pedol Sin*(土壤学报) **45**(6): 1102-1109
- Zhao K(赵堃), Chai LY(柴立元), Wang YY(王云燕), et al. 2006. The existing form, migration and transformation laws of Cr in water environment(水环境中铬的存在形态及迁移转化规律) [J]. *Industr Safety & Environ Protect*(工业安全与环保) **8**(32): 1-3
- Zhang CL(张超兰), Wei BM(韦必帽), Liu M(刘敏), et al. 2010. Microorganism population and enzyme activity in substrate of vertical-flow constructed wetland treating Cd wastewater(含镉废水人工湿地处理系统中基质微生物数量和酶活性研究) [J]. *Water Res Protect*(水资源保护) **26**(4): 57-61
- Zhang W(张巍), Zhao J(赵军), Lang CM(郎成明), et al. 2010. Progress in studies on pollutant removal by microorganisms in constructed wetlands(人工湿地系统微生物去除污染物的研究进展) [J]. *Chin J Environ Eng*(环境工程学报) **4**(4): 711-718
- Zhou HL(周海兰). 2007. The application of constructed wetland for heavy metal wastewater treatment(人工湿地在重金属废水处理中的应用) [J]. *Environ Sci Manag*(环境科学与管理) **9**(32): 89-91
- Zhu JH(朱建华), Wang LL(王莉莉). 1997. The toxicity of different valence chromium and effect on human body(不同价态铬的毒性及其对人体影响) [J]. *Environ Expl*(环境与开发) **12**(3): 46-48

(上接第 194 页 Continue from page 194)

- El-Hassan A, El-Sayed M, Hamed AI, et al. 2003. Bioactive constituents of *Leptadenia arborea* [J]. *Fitoterapia* **74**: 184-187
- Lee DY, Song MC, Yoo KH, et al. 2007. Lignans from the fruits of *Cornus kousa* Burg. and their cytotoxic effects on human cancer cell lines [J]. *Arch Pharm Res* **30**(4): 402-407
- Mossman T. 1983. Rapid colorimetric assay for cellular growth and survival: application to proliferation and cytotoxicity assay [J]. *J Immunol Meth* **65**: 55-63
- Ohashi K, Watanabe H, Okumura Y, et al. 1994. Indonesian medicinal plants. XII. Four isomeric lignan-glucoside from the bark of *Aegle marmelos* (Rutaceae) [J]. *Chem Pharm Bull* **42**(9): 1924-1926
- Ray AB, Chattopadhyay SK, Kumar S. 1985. Structures of cleomiscosins coumarino-lignoids of *Cleome viscosa* seeds [J]. *Tetrahedron* **41**(1): 209-214