

# 施用污泥对小白菜生长及其迁转重金属的影响<sup>\*</sup>

于瑞莲<sup>\*\*</sup> 徐加庆 胡恭任 胡可旺

(华侨大学环境科学与工程系, 福建厦门 361021)

**摘要** 采用盆栽方式,以厦门市筭筭污水处理厂的污泥作为有机肥种植小白菜,探讨污泥施用对小白菜生长和产量的影响及重金属在小白菜-土壤间的迁移转化和积累情况。结果表明:污泥中氮、磷、钾和有机质含量丰富,重金属含量均低于国家农用污泥中污染物控制标准;适宜的污泥施用量可促进小白菜的生长,污泥用量为5%时,小白菜长势最好,生物量最大;污泥用量超过15%,小白菜的生长明显受到抑制;小白菜根系分泌物能固定和积累根际土中的重金属,同时又限制它们向机体内输送,小白菜对所研究的9种重金属元素的富集系数均小于1.0;污泥用量5%盆栽小白菜体内Cd、As、Ni、Pb、Cr、Cu、Zn的含量均未超过国家食品中污染物限量标准;种植小白菜后根际土中Cd、Cr的残渣态向有效态转化,Zn、Cu的可氧化态向弱酸溶态转化,Mn、Pb的可还原态向可氧化态转化,Ni的有效态略向残渣态转化。

**关键词** 城市污泥;小白菜;农用;重金属;生物有效性

**中图分类号** X171.5 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2011)1-0082-05

**Effects of applying sewage sludge on pakchois growth and transfer of heavy metals.** YU Rui-lian<sup>\*\*</sup>, XU Jia-qing, HU Gong-ren, HU Ke-wang (*Department of Environmental Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, Fujian, China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2011, **30**(1): 82-86.

**Abstract:** In a pot experiment, the sewage sludge from Xiamen Yundang Wastewater Treatment Plant was applied as organic fertilizer to study its effects on the growth and yield of pakchois and the transfer and accumulation of heavy metals in pakchois-soil system. The sludge was rich in nitrogen, phosphorus, potassium and organic matter, and its heavy metals contents were lower than the limits of national control standard for the pollutants in sludge for agricultural use. Appropriate application of the sludge could promote the growth and yield of pakchois. When the application rate was 5%, the pakchois had the maximum growth and biomass; but when the application rate was higher than 15%, the pakchois growth was remarkably inhibited. The root exudates of pakchois could fix and enrich the heavy metals in rhizosphere soil, and restrict their transfer into pakchois. The enrichment coefficients of test nine heavy metals in pakchois were all lower than 1.0. When the application rate of the sludge was 5%, the Cd, As, Ni, Pb, Cr, Cu and Zn contents in pakchois were all lower than the limits of national food hygiene standard of China. After planting pakchois, the chemical speciation of the heavy metals in rhizosphere soil transformed to some extent, *e. g.*, the Cd and Cr transformed from residual form to bio-available, Cu and Zn transformed from oxidizable to acid-soluble, Mn and Pb transformed from reducible to oxidizable, while Ni appreciably transformed from bio-available to residual.

**Key words:** municipal sewage sludge; pakchois; agricultural utilization; heavy metal; bioavailability.

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(40673061)、泉州市科技计划重点项目(2008Z9)和华侨大学高层次人才科研启动费项目(10BS120)资助。

<sup>\*\*</sup> 通讯作者 E-mail: rui liany@hqu.edu.cn

收稿日期: 2010-08-17 接受日期: 2010-10-09

城市污泥是城市污水处理过程中产生的副产物,既含有大量有机质、氮、磷等养分,又含有重金属、有机污染物和病原菌等有害物(邹绍文等,2005;杨军等,2009)。农用资源化是城市污泥最有发展前景的处置方法,利于城市和农业的可持续发展(莫测辉等,2000;王新等,2002;Kao *et al.*,2006)。污泥农用将直接和人类的食物链发生关系,而目前国内对污泥农用的风险性研究尚不够深入(秦俊芳,2010)。污泥中的重金属污染问题是限制其农用资源化的主要因素。研究表明,污泥中重金属对环境危害的大小更大程度上取决于其形态分布(陈同斌等,2003;黄游等,2006;张朝升等,2008;Smith,2009)。农用污泥中重金属在作物-土壤系统中的迁移转化及其归宿问题是亟待解决的课题(张玮和傅大放,2007;李琼等,2009)。本文通过盆栽小白菜试验,探讨了城市污泥施用对小白菜生长的影响,并分析了种植前后根际土中重金属的形态变化及在小白菜-土壤间的迁移转化和富集行为,为城市污泥的合理农用提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

盆栽土壤取自华侨大学厦门校区裸露土,为酸性红壤;供试污泥为厦门市筭筭污水处理厂板框压滤车间的泥饼,脱水前加 FeCl<sub>3</sub> 和石灰以起到凝聚和杀菌双重效果。土壤和污泥风干后,研磨,过 2 mm 筛,装袋密封备用。试验植物选取抗病上海青小白菜(*Brassica chinensis* L.)。

1.2 试验方法

污泥按 0.5%、10%、15%、20%、25% 和 30% 的体积比充分混合于土壤中,各装于直径为 20 cm 的

花盆中(每盆混合基质约 3 kg)。每个处理重复 3 次。先对小白菜种子进行育苗,出苗 15 d 左右,选择长势均匀、良好的幼苗,每盆 4 棵移栽于上述各花盆中,摆放在温室中,温度控制在 20 ℃ ~ 35 ℃。每天早晚各浇等量蒸馏水(约 100 ml),观察并记录植株的长势、叶片颜色、叶长、叶宽和株高等。

1.3 分析方法

土壤/污泥中有机质采用焙烧失重法测定(Tam & Wong,2000);总氮用元素分析仪测定;总磷和速效磷分别采用高氯酸-硫酸消化和碳酸氢钠提取,钼蓝比色法测定(鲁如坤,2000);Ca 用全量消解法,速效钾用醋酸铵提取(中国科学院南京土壤研究所,1978),AAS 法测定。土壤/污泥中重金属总量采用混酸消解法提取(Adamo *et al.*,2005);重金属形态采用 BCR 顺序提取法提取(Yu *et al.*,2010);植物中重金属采用浓硝酸消解法提取(胡恭任等,2009);以上提取液均用 ICP-AES 法分析。

1.4 数据处理

用 Microsoft Excel 2010 和 Origin 8.0 统计软件进行数据处理及作图。

2 结果与分析

2.1 供试土壤和污泥的理化性质

不同地区的污泥及土壤性质存在一定差异,了解城市污泥及其预施用土壤的理化性质是污泥科学农用的前提(陶俊杰等,2006)。本试验供试土壤和污泥的基本理化性质见表 1,重金属含量见表 2。

由表 1,供试土壤中的氮、磷、钾、有机质等营养物质含量较低,而污泥中这些营养物质含量丰富,通过合理施用污泥,可提高土壤肥力,有效地提高作物产量(赵晓莉和朱伟,2008)。

表 1 供试土壤及污泥的理化性质

Table 1 Physico-chemical characteristics of tested soil and sludge

	pH	有机质 (g · kg <sup>-1</sup> )	总氮 (g · kg <sup>-1</sup> )	总磷 (g · kg <sup>-1</sup> )	总钙 (g · kg <sup>-1</sup> )	速效钾 (g · kg <sup>-1</sup> )	速效磷 (mg · kg <sup>-1</sup> )
土壤	5.77	125	0.79	0.13	0.25	2.2	6.76
污泥	9.64	442	14.40	9.07	134	20.5	2000

表 2 供试土壤和污泥的重金属含量 (mg · kg<sup>-1</sup>)

Table 2 Heavy metal contents of tested soil and sludge

	Cd	As	Ni	Pb	Cr	Cu	Zn	Mn	Co
土壤	1.15	1.05	1.65	85.6	3.80	17.3	22.9	577	1.45
GB 15618-1995	0.3	40	40	250	150	50	200	—	—
污泥	2.75	3.33	84.0	36.7	73.3	164	397	513	3.95
GB 4284-84	5	75	100	300	600	250	500	—	—

由表2,供试土壤重金属含量除 Cd 外均符合我国土壤环境质量标准 (GB 15618-1995) 二级限值 (pH<6.5,旱田);污泥中重金属含量均低于农用污泥中污染物控制标准 (GB 4284-84) 限值 (pH < 6.5)。

2.2 污泥施用对小白菜生长的影响

盆栽约5 d,花盆内小白菜幼苗逐渐返青并开始生长。盆栽10 d,污泥含量5%与10%盆内小白菜长势较快,其次为15%盆,空白对照长势一般,而20%、25%和30%盆中小白菜叶片逐渐变深,长势也比空白对照略差些。盆栽20 d,20%、25%和30%盆中白菜逐渐出现萎焉现象,且部分叶片开始长黄色斑点。盆栽30 d,20%、25%和30%盆中白菜出现严重滞长,并于40 d后少量出现死亡;而5%与10%盆内白菜一直长势良好,其次为15%盆,空白对照长势仍一般。盆栽50 d后,收获各盆内小白菜,测定生物量及重金属含量。

污泥含量对盆栽期间小白菜叶长、叶宽、株高的影响以及收获后小白菜鲜重和干重情况见图1。可见,在土壤中施加适量的污泥可促进小白菜的生长,增加其生物量。本次盆栽试验污泥含量为5%时,小白菜长势最好;污泥用量超过5%后,生物量逐渐下降;尤其是污泥含量高于15%时反而会抑制其生长,这与污泥中的有害物质有关。收获后不同污泥含量盆栽小白菜生物量大小顺序为5% > 10% > 15% > 0 > 20% > 25% > 30%,其中20% ~ 25%盆中小白菜生物量相差不大,但均已远低于空白对照。

2.3 重金属在土壤-小白菜间的迁移与积累

对于小白菜长势最好的污泥含量为5%的盆栽试验,重金属元素在小白菜-土壤间的迁移和积累情况见表3。与种植前相比,盆栽小白菜后根际土中Cd、As、Ni、Pb、Cr、Cu、Zn、Mn、Co的含量均有不同程度的增加,说明小白菜根系分泌的多种有机物对根际土中重金属起到螯合固定和积累作用,但又限制它们向植物体内输送(小白菜对各元素的富集系数

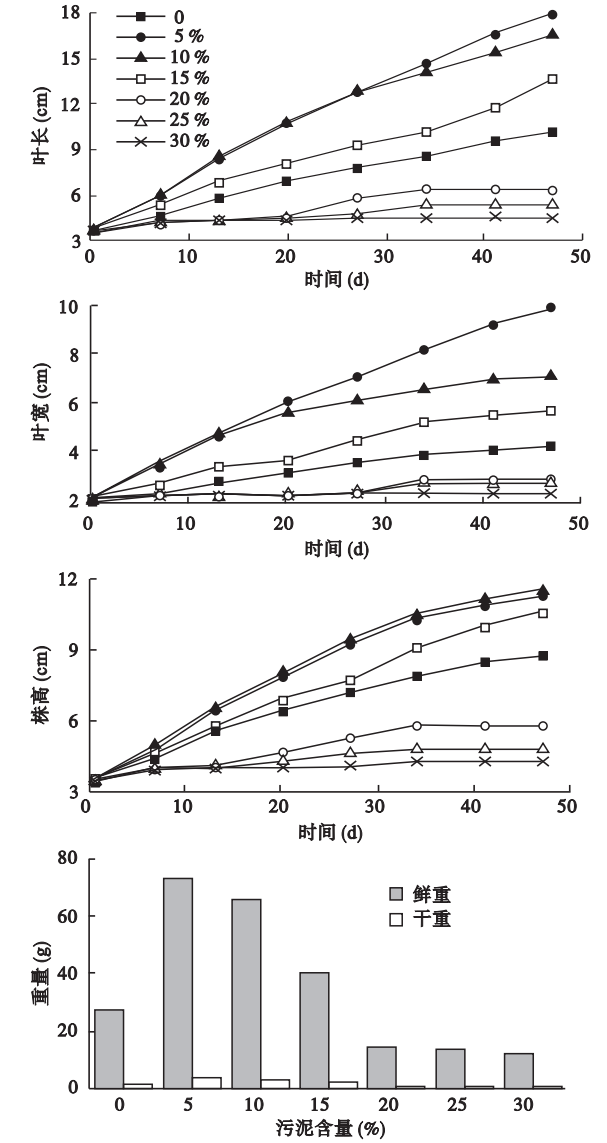


图1 污泥含量对小白菜生长的影响  
Fig.1 Effect of sludge content on the growth of pakchois

均<1.0),这与其他重金属耐性植物的吸收转运特征相似(王江等,2010)。各重金属元素在小白菜-土壤间的富集能力大小顺序为Zn>Cu>Co>Cd>Mn>As=Cr>Ni>Pb,其中对生命必需元素Zn和Cu的富集远大于其他元素。

表3 重金属在5%盆栽土壤-小白菜体系中的迁移与积累

Table 3 Transfer and concentration of heavy metals in tested soil-pakchois systems

项目	Cd	As	Ni	Pb	Cr	Cu	Zn	Mn	Co
种前混合土中 (mg · kg <sup>-1</sup> )	1.26	1.16	5.77	83.10	7.27	24.60	51.70	574	1.63
种后根际土中 (mg · kg <sup>-1</sup> )	1.40	2.00	53.70	97.80	64.20	25.90	84.70	1130	6.30
干植株中 (mg · kg <sup>-1</sup> )	0.22	0.22	3.70	4.62	6.88	16.30	68.90	153	3.25
富集系数	0.16	0.11	0.07	0.05	0.11	0.63	0.81	0.14	0.52
鲜植株中 (mg · kg <sup>-1</sup> )	0.01	0.01	0.10	0.13	0.26	0.44	1.87	4.15	0.09
蔬菜标准* (mg · kg <sup>-1</sup> )	0.20	0.05	0.30	0.20	0.50	10.00	20.00	—	—

\* Cd、As、Pb、Cr按GB 2762-2005;Cu和Zn分别按GB 15199-1994和GB 13106-1994;Ni按内控标准-1994。

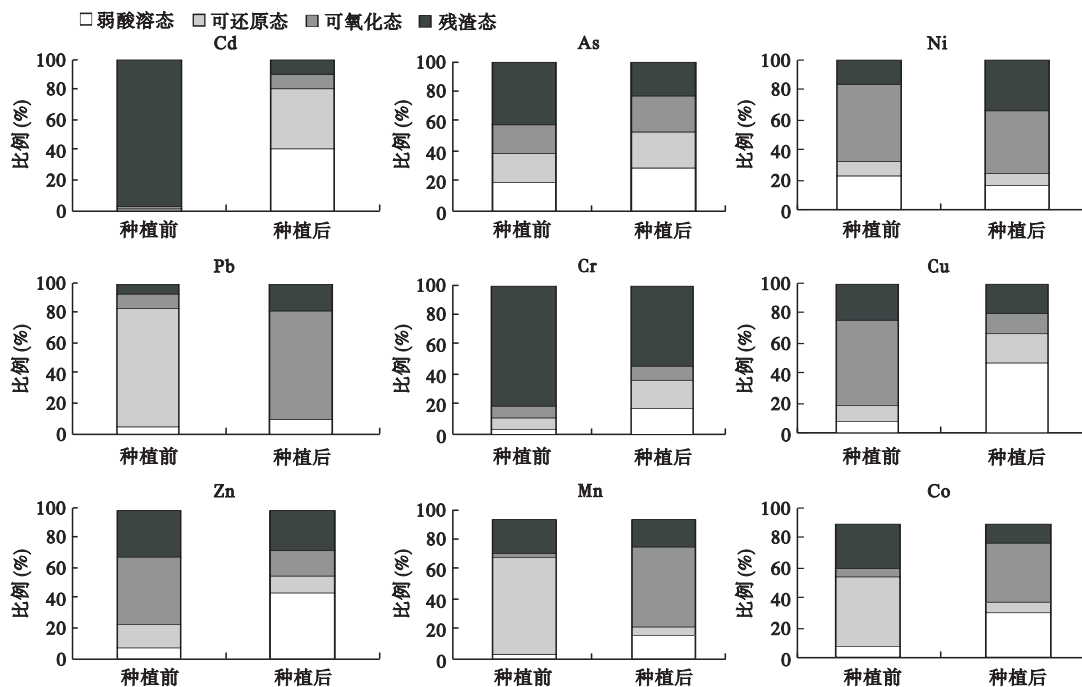


图2 种植试验后根际土壤中重金属的形态变化

Fig. 2 Chemical speciation transformation of heavy metals in the rhizosphere soil after planting experiment

由表3还可看出,5%盆栽小白菜中Cd、As、Ni、Pb、Cr、Cu、Zn含量均未超过国家食品中污染物限量标准,可以安全食用。

## 2.4 盆栽前后根际土中重金属形态分布变化

研究表明,土壤中重金属的迁移性和生物毒性主要取决于重金属的形态分布,而不仅仅是其总量(李非里等,2005)。因此研究重金属形态分布可提供更多的重金属迁移性和生物毒性信息。Rauret (1998)详细综述了元素形态研究常用的各种方法,并详细介绍了欧共体标准署(European Community Bureau of Reference,简称BCR)的连续提取法,该法把重金属赋存形态分成4种:可交换态及碳酸盐结合态(弱酸溶态)、Fe/Mn氧化物结合态(可还原态)、有机物及硫化物结合态(可氧化态)、残渣态,其可迁移性和生物可利用性依次降低。其中,弱酸溶态和可还原态为生物有效态,可氧化态为潜在生物有效态,而残渣态一般不容易释放而被视为无生物有效性(Rauret *et al.*, 1999)。近年来,该连续提取法已被广泛应用于土壤、沉积物及污泥中重金属元素的形态研究(Albores *et al.*, 2000; Qiao *et al.*, 2003; Jeffery *et al.*, 2005; Cuong & Obbard, 2006)。

污泥含量5%盆栽试验前后根际土中重金属形态分布变化情况见图2。种植前混合土中Cd与Cr的残渣态比例较高,种植小白菜后,残渣态明显向有

效态(前三态)转化,说明小白菜的种植对根际土中Cd和Cr有激活作用,使其生物可利用性程度增加;As也有同样转化趋势,但变化程度比Cd和Cr弱些。种植小白菜后,根际土中Zn和Cu的可氧化态有向弱酸溶态转化的趋势,说明小白菜的生长过程对根际土中Zn和Cu的生物可利用性也有激活作用;Pb、Mn、Co的可还原态有向弱酸溶态和可氧化态双向转化的趋势,向弱酸溶态转化使其直接生物可利用性增加,而向可氧化态转化可使其直接生物可利用性减弱,对Pb、Mn而言,向可氧化态转化的趋势更大些,说明小白菜的生长过程一定程度上钝化了根际土中的Pb、Mn,使它们的生物可利用性程度稍有减弱;Ni的有效态稍有向残渣态转化的趋势,说明小白菜的生长过程对根际土中的Ni也有一定的钝化作用,也可能是小白菜生长对Ni的吸收作用减小了其他3种形态的比例,具体原因有待进一步研究探讨。

## 3 结论

厦门筭筭污水处理厂污泥中氮、磷、钾和有机质含量丰富,污泥中重金属含量均符合国家农用污泥控制标准。土壤中施加适量污泥可促进小白菜生长,增加生物量。盆栽试验污泥含量为5%时,小白菜长势最好;污泥用量超5%后,生物量逐渐下降;



污泥含量高于15%时会抑制其生长,这与污泥中的有害物质有关。小白菜生长过程中根系分泌的多种有机物对根际土中重金属元素起到螯合固定和积累作用,但又限制向植物体内输送,这对植物固定修复重金属污染及蔬菜安全食用意义重大。污泥含量5%盆栽小白菜体内重金属Cd、As、Ni、Pb、Cr、Cu、Zn的含量均未超过国家食品中污染物限量标准,可安全食用。种植小白菜后,根际土中Cd、Cr、As的残渣态向有效态转化,Zn、Cu的可氧化态向弱酸溶态转化,生物活性被激活;Mn、Pb的可还原态向可氧化态转化,Ni的有效态略有向残渣态转化的趋势,生物活性一定程度上被钝化。

## 参考文献

- 陈同斌,黄启飞,高定,等. 2003. 中国城市污泥的重金属含量及其变化趋势. 环境科学学报, **23**(5): 561-569.
- 胡恭任,于瑞莲,吕斌. 2009. 桐花树对水体中铬、镍、铜污染的修复实验研究. 中国矿业, **18**(1): 68-72.
- 黄游,陈玲,李宇庆,等. 2006. 模拟酸雨对污泥堆肥中重金属形态转化及其环境行为的影响. 生态学杂志, **25**(11): 1352-1357.
- 李琼,徐兴华,左余宝,等. 2009. 污泥农用对痕量元素在小麦-玉米轮作体系中的积累及转运的影响. 农业环境科学学报, **28**(10): 2042-2049.
- 李非里,刘丛强,宋照亮. 2005. 土壤中重金属形态的化学分析综述. 中国环境监测, **21**(4): 21-27.
- 鲁如坤. 2000. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社.
- 莫测辉,吴启堂,蔡全英,等. 2000. 论城市污泥农用资源化与可持续发展. 应用生态学报, **11**(1): 157-160.
- 秦俊芳. 2010. 污水处理厂污泥安全处置方式的比较筛选. 中国资源综合利用, **28**(4): 52-55.
- 陶俊杰,王海涛,王晓霞,等. 2006. 城市污水处理厂污泥农用的可行性分析. 市政技术, **24**(2): 73-74.
- 王江,张崇邦,苛世省,等. 2010. 添加污泥对尾矿砂理化性质及香樟生理特性的影响. 生态学报, **30**(10): 2593-2602.
- 王新,陈涛,梁仁禄,等. 2002. 污泥土地利用对农作物及土壤的影响研究. 应用生态学报, **13**(2): 163-166.
- 杨军,郭广慧,陈同斌,等. 2009. 中国城市污泥的重金属含量及其变化趋势. 中国给水排水, **25**(13): 122-124.
- 张玮,傅大放. 2007. 不同污泥处置方法中重金属的迁移规律. 中国给水排水, **23**(12): 22-25.
- 张朝升,陈秋丽,张可方,等. 2008. 大坦沙污水厂污泥重金属形态及其生物有效性的研究. 农业环境科学学报, **27**(3): 1259-1264.
- 赵晓莉,朱伟. 2008. 城市污泥农用对生菜理化指标和品质的影响. 生态环境, **17**(1): 99-104.
- 中国科学院南京土壤研究所. 1978. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社.
- 邹绍文,张树清,王玉军,等. 2005. 中国城市污泥的性质和处置方式及土地利用前景. 中国农学通报, **21**(1): 198-201.
- Adamo P, Arienzo M, Imperato M, et al. 2005. Distribution and partition of heavy metals in surface and sub-surface sediments of Naples city port. *Chemosphere*, **61**: 800-809.
- Albores AF, Cid BP, Lopez EF, et al. 2000. Comparison between sequential extraction procedures and single extractions for metal partitioning in sewage sludge samples. *Analyt*, **125**: 1353-1357.
- Cuong DT, Obbard JP. 2006. Metal speciation in coastal marine sediments from Singapore using a modified BCR-sequential extraction procedure. *Applied Geochemistry*, **21**: 1335-1346.
- Jeffery RB, Irene JH, Patricia C. 2005. Reproducibility of the BCR sequential extraction procedure in a long-term study of the association of heavy metals with soil components in an upland catchment in Scotland. *Science of the Total Environment*, **337**: 191-205.
- Kao PH, Huang CC, Hseu ZY. 2006. Response of microbial activities to heavy metals in a neutral loamy soil treated with biosolid. *Chemosphere*, **64**: 63-70.
- Qiao XL, Luo YM, Christie P, et al. 2003. Chemical speciation and extractability of Zn, Cu and Cd in two contrasting bio-solids-amended clay soils. *Chemosphere*, **50**: 823-829.
- Rauret G. 1998. Extraction procedures for the determination of heavy metals in contaminated soil and sediment. *Talanta*, **46**: 440-455.
- Rauret G, Lopez-Sanchez JF, Sahuquillo A, et al. 1999. Improvement of the BCR three-step sequential extraction procedure prior to the certification of new sediment and soil reference materials. *Journal of Environmental Monitoring*, **1**: 57-61.
- Smith SR. 2009. A critical review of the bioavailability and impacts of heavy metals in municipal solid waste composts compared to sewage sludge. *Environment International*, **35**: 142-156.
- Tam NY, Wong YS. 2000. Spatial variation of heavy metals in surface sediments of Hong Kong mangrove swamps. *Environmental Pollution*, **110**: 195-205.
- Yu RL, Hu GR, Wang LJ. 2010. Speciation and ecological risk of heavy metals in intertidal sediments of Quanzhou Bay, China. *Environmental monitoring and Assessment*, **163**: 241-252.

作者简介 于瑞莲,女,1970年12月生,博士,副教授。主要从事环境污染化学研究。E-mail: ruiliany@hqu.edu.cn  
责任编辑 李凤芹