

# 西宁火烧沟下游表层泥质沉积物中重金属含量及评价

常华进<sup>1,2</sup>, 曹广超<sup>2</sup>, 陈克龙<sup>1,2</sup>

(1. 青海师范大学 生命与地理科学学院, 西宁 810008; 2. 青藏高原环境与资源教育部重点实验室, 西宁 810008)

**摘 要:** 重金属元素是一类重要的污染物, 研究其在表生环境中的含量及污染程度, 对于环境保护和治理具有重要意义。利用 ICP-MS 测试方法对青海省西宁市火烧沟下游城区段表层泥质沉积物中 As, Cd, Pb, Ti, V, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn 共 10 种重金属元素的含量进行了分析测定, 并利用污染系数、地累积指数和潜在生态危害指数等指标评估了其污染程度。结果表明: 火烧沟下游表层泥质沉积物中 Cd, Cr 和 Zn 含量(平均值分别为 0.39  $\mu\text{g/g}$ , 183  $\mu\text{g/g}$  和 135  $\mu\text{g/g}$ )明显高于青海省土壤平均值, As 和 Pb 含量(平均值分别为 16.0  $\mu\text{g/g}$  和 21.9  $\mu\text{g/g}$ )接近或略高于青海省土壤平均值; Cd 污染明显, 达到了中等—较高生态危害风险级别, 其他元素为低生态危害风险级别; 多风险因子指数(119.4)显示已达到中等生态风险级别。火烧沟下游已出现较明显的重金属污染, 应控制 As, Pb, Cr, Zn, 尤其是 Cd 向火烧沟中的排放。

**关键词:** 重金属; 泥质沉积物; 火烧沟; 西宁市

中图分类号: X820.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2013)05-0247-04

## Concentration and Assessment of Heavy Metals in Surface Sediment in the Lower Reaches of Huoshaogou, Xi'ning City

CHANG Hua-jin<sup>1,2</sup>, CAO Guang-chao<sup>2</sup>, CHEN Ke-long<sup>1,2</sup>

(1. School of Life and Geographical Sciences, Qinghai Normal University, Xi'ning 810008, China;

2. Key Laboratory of Tibetan Plateau Environment and Resources, Ministry of Education, Xi'ning 810008, China)

**Abstract:** Heavy metals are the important pollutants in surface environment, and it has great significance to study their concentrations and contamination levels in terms of environmental protection and control. Concentrations of heavy metals including As, Cd, Pb, Ti, V, Cr, Mn, Ni, Cu and Zn in surface sediment in the lower reaches of Huoshaogou in Xi'ning City have been analyzed using ICP-MS, and contamination evaluation has been carried out using multiple parameters including the pollution coefficient, the geoaccumulation index and the potential ecological risk. Results show that concentrations of Cd, Cr and Zn in the sediments are average 0.39  $\mu\text{g/g}$ , 183  $\mu\text{g/g}$  and 135  $\mu\text{g/g}$ , respectively, which are significant higher than the soil average levels of Qinghai Province, and concentrations of As and Pb are average 16.0  $\mu\text{g/g}$  and 21.9  $\mu\text{g/g}$ , respectively, which are near or somewhat higher than the soil average levels of Qinghai Province. The potential ecological risk evaluation indicates that Cd is the most important pollutant and belongs to middle-high ecological risk, and the other elements belong to low ecological risk. The ecological risk index of the ten heavy metals reaches up to 119.4 and belongs to middle ecological risk, which indicates that Huoshaogou lower reaches is suffering from obvious contamination. The results suggest that significant heavy metal pollution exists in the surface sediment in the Huoshaogou lower reaches, and sewage discharge with As, Pb, Cr, Zn, especially Cd into the river should be restricted.

**Key words:** heavy metals; surface sediment; Huoshaogou; Xi'ning City

随着全球人口不断增长和社会持续发展, 人类活动对环境影响日益深刻。重金属元素由于具有不可降解、隐蔽性强、毒性大、化学行为和生态效应复杂等特点<sup>[1]</sup>, 人类活动将大量的重金属元素带入环境中,

造成重金属在土壤、泥质沉积物等表生环境中的积累, 并通过大气、水体或食物链直接或间接地威胁着人类及其它生物的健康<sup>[2-5]</sup>, 近年来备受关注。研究表生环境中重金属元素含量并对其进行评价, 对于重

金属污染修复治理具有重要意义。

西宁是青藏高原东北缘的一座缺水城市,水资源对这座城市更显宝贵。火烧沟下游流经西宁市海湖新区中心地带,经过近几年的治理和建设,该河段已经成为一处具有丰富文化内涵和地域特征的湿地公园,是居民休闲纳凉的好去处,给这座城市增添了不少生机。由于城市发展伴随的工业、农业和生活污水排放等问题的存在,火烧沟湿地公园的水环境健康状况可能成为影响甚至威胁该区域居民身体健康和生态安全的重要方面。鉴于此,本文在火烧沟湿地公园水体中采集到表层泥质沉积物样品,测定生物毒性显著的 As,Cd,Pb,Ti,V,Cr,Mn,Ni,Cu,Zn 共 10 种重金属元素的含量,并对其污染状况进行评价,为促进该湿地公园的建设和保护提供依据。

### 1 研究区概况

火烧沟位于西宁市城西区湟水河南岸,属湟水河一级支流,黄河二级支流。火烧沟流域总面积 131 km<sup>2</sup>,分布范围为 36°28′30″—36°39′01″N,101°33′20″—101°43′55″E,海拔 2 261~2 808 m,年平均气温 5.8℃,年平均降水量约 380 mm,为高原温凉半干旱气候。该流域行政隶属西宁市城西区彭家寨镇、湟中县西堡镇、鲁沙尔镇和总寨镇,共涉及 12 个行政村。火烧沟流域发育第四纪黄土沟谷和高山地貌,沟壑纵横,坡陡沟深,共有大小沟道 36 条,水土流失曾经十分严重。通过近几年的水土保持生态工程建设<sup>[6]</sup>,火烧沟流域内水土流失得到有效控制,土壤侵蚀强度得到一定程度的下降,植被覆盖率明显提高,涵养了水

源,减轻了地表径流和冲刷,促进了流域内生态系统的良性循环。同时通过沟道工程的实施,减轻了洪水、泥石流的危害,保障了下游人民群众的生命财产以及道路、厂矿、企事业单位的安全,为西宁市的生产生活提供了生态屏障和环境基础。火烧沟湿地公园位于火烧沟流域的下游段,是以香蒲(*Typha orientalis* Presl.)+菹草(*Potamogeton crispus* Linn.)+角果藻(*Zannichellia palustris* Linn.)群落为主的人工湿地。整个湿地公园被城市干道分割成高原印象、山田印象、湖泊印象、河川印象 4 个景观河段,在景区与城市干道的交会处形成 5 处主要的活动广场。

### 2 样品采集与分析

于 2012 年 8 月 23 日在火烧沟下游流经市区段对其表层泥质沉积物进行取样,采样深度为 1 cm 以内,共获得 6 件样品:HSG-01(36°38′19.8″N,101°43′29.7″E;海拔 2 273 m)、HSG-02(36°38′19.7″N,101°43′35.4″E;海拔 2 273 m)、HSG-03(36°38′20.0″N,101°43′46.4″E;海拔 2 271 m)、HSG-04(36°38′25.9″N,101°43′50.1″E;海拔 2 269 m)、HSG-05(36°38′37.1″N,101°43′50.7″E;海拔 2 267 m)、HSG-06(36°38′43.7″N,101°43′43.5″E;海拔 2 265 m)。

样品用塑料自封袋密封,带回实验室置于洁净处将其自然风干。挑拣出样品中的异物,用碳化钨振动磨将样品研磨至 200 目备用。粉末样品的重金属元素分析由澳实分析检测(广州)有限公司采用 ICP-MS 方法<sup>[7]</sup>完成。样品中不同重金属元素的含量详见表 1。

表 1 西宁市火烧沟下游表层泥质沉积物重金属分析数据

项 目	As	Cd	Pb	Ti	V	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn
HSG-01	17.0	0.72	19.3	0.13	33	69	342	14.2	14.0	95
HSG-02	13.9	0.32	20.3	0.26	52	72	491	22.3	19.5	80
HSG-03	11.5	0.19	18.1	0.30	67	660	617	23.5	19.3	74
HSG-04	20.0	0.52	26.4	0.26	59	80	506	24.0	20.9	120
HSG-05	18.0	0.28	24.2	0.24	55	120	594	20.3	19.9	308
HSG-06	15.4	0.29	22.9	0.29	58	96	539	23.1	25.1	131
最小值	11.5	0.19	18.1	0.13	33	69	342	14.2	14.0	74
最大值	20.0	0.72	26.4	0.30	67	660	617	23.5	25.1	308
平均值	16.0	0.39	21.9	0.25	54	183	515	21.2	19.8	135
兰州城区河流平均值 <sup>[8]</sup>	22.6	—	58.2	—	76	190	—	41.8	102.5	315
全国平均值 <sup>[9]</sup>	11.2	0.10	26.0	0.38	82	61	583	26.9	22.6	74
青海平均值 <sup>[9]</sup>	14.0	0.14	20.9	0.32	72	70	580	29.6	22.2	80
毒性系数 <sup>[10]</sup>	10	30	5	1	2	2	1	5	5	1
污染系数 C <sub>i</sub> (平均)	1.14	2.82	1.05	0.77	0.75	2.61	0.89	0.72	0.89	1.68
地累积指数 I <sub>geo</sub> (平均)	-0.42	0.77	-0.53	-1.01	-1.03	0.19	-0.78	-1.09	-0.77	-0.03
潜在生态风险因子 E <sub>i</sub> (平均)	11.40	84.67	5.23	0.77	1.50	5.22	0.89	3.59	4.46	1.68
潜在生态危害指数 RI(平均)	119.4									

注:元素含量及平均值有量纲,除 T<sub>i</sub> 量纲为%外,其余为 μg/g。

### 3 结果与分析

#### 3.1 重金属元素含量

沉积物中重金属元素含量最为直观反映研究区的重金属污染程度。为了反映火烧沟下游表层沉积物中重金属元素的富集与否, 可与青海省土壤平均值<sup>[9]</sup> (作为元素的背景值) 进行比较; 也可采用重金属元素的污染系数( $C_i$ ), 即沉积物中重金属元素  $i$  的实测值与该元素的背景值的比值来表示, 大于 1 表示重金属元素发生富集, 否则表示亏损。火烧沟下游表层泥质沉积物中 Cd, Cr, Zn 含量明显高于青海省土壤平均值, As 和 Pb 含量接近或略高于青海省土壤平均值, 其余 5 种元素 (Ti, V, Mn, Ni, Cu) 含量均低于青海省土壤平均值 (图 1)。

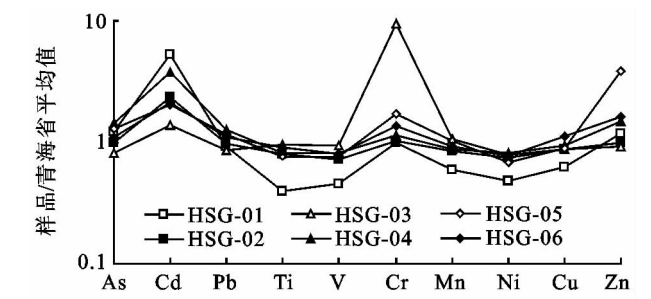


图 1 火烧沟下游表层泥质沉积物重金属污染系数特征

#### 3.2 重金属污染评价

通过与相应元素的背景值比较, 利用地累积指数 ( $I_{geo}$ )<sup>[11]</sup> 可以判别沉积物中重金属富集程度<sup>[12-13]</sup>。Müller<sup>[11]</sup> 提出的地累积指数表达式为  $I_{geo} = \log_2 [C_{i\text{实测}} / (1.5 \times C_{i\text{背景}})]$ ,  $C_{i\text{实测}}$  为沉积物中元素  $i$  的实测值,  $C_{i\text{背景}}$  为元素  $i$  的背景值。一般认为,  $I_{geo} \leq 0$  为无污染,  $0 < I_{geo} \leq 1$  为轻度污染,  $1 < I_{geo} \leq 2$  为中度污染,  $2 < I_{geo} \leq 3$  为中度至重度污染,  $3 < I_{geo} \leq 4$  为重度污染,  $4 < I_{geo} \leq 5$  为重度至极严重污染,  $I_{geo} > 5$  为极严重污染<sup>[14]</sup>。

火烧沟下游表层泥质沉积物中 10 种重金属元素的地累积指数特征见图 2。对于元素 Cd, 除样品 HSG-03 的  $I_{geo}$  为 -0.11 外, 其余样品均大于 1, 表现出轻度—中度污染特征; 对于元素 Cr, HSG-03 为 2.65, HSG-05 为 0.19, 其余样品小于 0, 出现污染迹象; 对于元素 Zn, HSG-05 为 1.35, HSG-06 为 0.12, 其余样品小于 0, 出现污染迹象; 样品中其他元素的  $I_{geo}$  均小于 0。

Hakanson<sup>[15]</sup> 提出潜在生态危害指数 (RI) 可以直观反映沉积物重金属危害程度, 表达式为  $RI = \sum E_i = \sum (T_i \times C_i) = \sum (T_i \times C_{i\text{实测}} / C_{i\text{背景}})$ , 其中  $E_i$  为重金属元素  $i$  的潜在生态风险因子,  $T_i$  为重金属元素  $i$  的毒性系数,  $C_i$  为重金属元素  $i$  的污染系数,  $C_{i\text{实测}}$  为重

金属元素  $i$  的实测值,  $C_i$  为背景元素  $i$  的背景值。一般认为,  $E_i < 40$  为低生态风险,  $40 \leq E_i < 80$  为中等生态风险,  $80 \leq E_i < 160$  为较高生态风险,  $160 \leq E_i < 320$  为高生态风险,  $320 \leq E_i$  为极高生态风险;  $RI < 65$  为低生态风险,  $65 \leq RI < 130$  为中等生态风险,  $130 \leq RI < 260$  为较高生态风险,  $260 \leq RI$  为极高生态风险<sup>[14]</sup>。

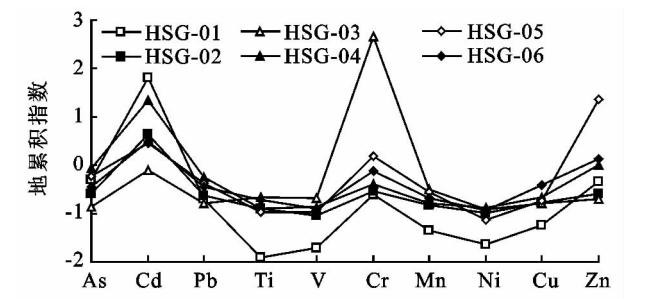


图 2 火烧沟下游表层泥质沉积物重金属污染地累积指数特征

火烧沟下游表层泥质沉积物中 10 种重金属元素的潜在生态风险因子特征见图 3。元素 Cd 的潜在生态风险因子为 40~160, 达到了中等—较高生态风险级别; 其它元素的潜在生态风险因子均低于 40, 而 As 和 Pb 的相对偏高, 具有低生态风险。潜在生态危害指数 (多风险因子指数) 为 98~185, 平均 119.4, 已达到中等—较高生态风险级别。

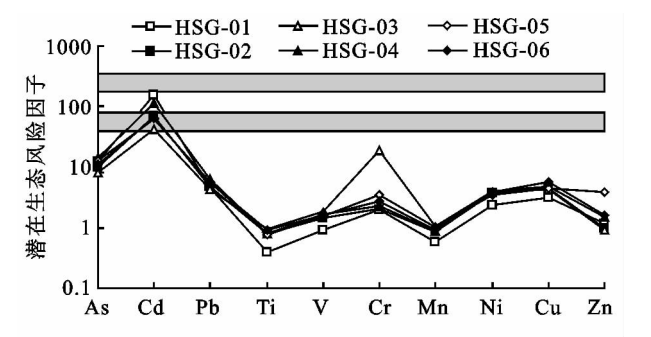


图 3 火烧沟下游表层泥质沉积物重金属潜在生态风险因子特征

#### 3.3 讨论

重金属元素的绝对含量和污染系数 ( $C_i$ ) 显示, 火烧沟下游表层泥质沉积物中 Cd, Cr, Zn 含量明显高于青海省土壤平均值, As 和 Pb 含量接近或略高于青海省土壤平均值; 地累积指数 ( $I_{geo}$ ) 显示火烧沟下游表层泥质沉积物中 Cd, Cr, Zn 有污染迹象, 其中 Cd 最为严重, 达到轻度—中度污染程度; 重金属元素的潜在生态风险因子 ( $E_i$ ) 显示火烧沟下游表层泥质沉积物中 Cd 达到了中等—较高生态风险级别, As 和 Pb 虽具有低生态风险, 但相对其它元素来说风险较高。由于污染系数 ( $C_i$ ) 和地累积指数 ( $I_{geo}$ ) 公式表达具有相似性, 因此对重金属元素评价的结果具有相似性, 即 Cd, Cr, Zn 含量富集, 有污染迹象, 且 Cd 最为

严重;由于不同重金属元素的毒性系数可能不同(表1),Cd,Cr,Zn,As,Pb分别为30,2,1,10,5,必然改变污染系数( $C_i$ )呈现的特征,使得Cd,As,Pb污染指数或级别变大,而Cr,Zn变小。

表1列出了文中所涉及10种重金属元素的土壤含量全国平均值<sup>[8]</sup>和青海省平均值<sup>[9]</sup>。对比发现,青海省部分重金属元素(As,Cd,Cr,Ni,Zn)的平均值高于全国平均值,所以在利用青海省平均值作为背景值评价重金属污染时会人为降低其污染程度或级别。

总的来说,火烧沟下游表层泥质沉积物中Cd污染是毋庸置疑的,已经达到中等一较高生态风险级别;Cr,Zn,As,Pb也出现不同程度的富集,具有一定的生态危害风险;火烧沟下游表层泥质沉积物中重金属已达到中等一较高生态风险级别。

重金属元素的地球化学性质决定它们在空气、水介质中含量特别低,而在固体介质中由于积累效应含量高。例如河流沉积物作为环境物质输送的主要宿体之一,汇集了流域侵蚀、大气沉降以及人为释放等多种来源的环境物质,通过各种途径进入河流的重金属元素最后绝大部分都会转移至沉积物中<sup>[12,16-18]</sup>。因此,河流沉积物中重金属污染程度亦是河流水体重金属污染的反映。火烧沟下游表层泥质沉积物中Cd,Cr,Zn,As,Pb出现不同程度的富集,已达到中等一较高生态风险级别,表明火烧沟下游水体已经出现较明显的重金属污染。与同处西北干旱区的兰州市城区河流表层沉积物中已经研究的7种重金属含量<sup>[8]</sup>(表1)相比,火烧沟下游表层泥质沉积物中的As,Pb,V,Ni,Cu,Zn平均值要低很多,Cr略低,表明火烧沟下游河流重金属污染程度还是较轻的。

顺河流流向(HSG-01→HSG-06),火烧沟表层泥质沉积物中各重金属元素的含量未呈现出逐渐降低的趋势特征(表1),表明水体中植物对重金属元素的吸收不显著或所吸收的量仅占很小的部分。火烧沟水体携带的重金属一部分沉积到泥质沉积物中,一部分随水流进入湟水河乃至黄河中,造成更为广泛的影响。为了减轻火烧沟下游乃至湟水河重金属污染,降低重金属生态风险,保障流域居民健康,应查明重金属污染的原因,调查研究重金属污染的来源,控制As,Pb,Cr,Zn,尤其是Cd向火烧沟中的排放,加强重金属污染治理和环境修复。

## 4 结论

(1) 西宁市火烧沟下游城区段表层泥质沉积物中Cd,Cr,Zn含量明显高于青海省土壤平均值,As和Pb含量接近或略高于青海省土壤平均值。火烧沟下

游城区段表层泥质沉积物中重金属污染已达到中等生态风险级别,其中Cd污染明显,达到了中等一较高生态危害风险,其它元素为低生态危害风险。与同处西北干旱环境下的兰州城区河流相比,火烧沟下游表层泥质沉积物中重金属含量要低很多,重金属污染程度较轻。

(2) 火烧沟下游表层泥质沉积物中各重金属元素的含量未呈现出向下游逐渐降低的趋势,河流植物对重金属的吸收比例小,河流水体携带的重金属一部分沉积到泥质沉积物中,一部分随水流汇入湟水河。

(3) 火烧沟下游已出现较明显的重金属污染,应调查研究重金属污染的来源,控制Cd,As,Pb,Cr,Zn向火烧沟中的排放。

### 参考文献:

- [1] Alloway B J. Heavy Metals in Soils [M]. London: Blackie Academic and Professional, 1995.
- [2] Nriagu J O, Pacyna J M. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals[J]. Nature,1988,333(6169):134-139.
- [3] Qian J, Shan X, Wang Z, et al. Distribution and plant availability of heavy metals in different particle-size fractions of soil[J]. Science of the Total Environment, 1996,187(2):131-141.
- [4] Wenzel W W, Jockwer F. Accumulation of heavy metals in plants grown on mineralised soils of the Austrian Alps[J]. Environmental Pollution,1999,104(1):145-155.
- [5] Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. Evaluation of certain food additives and contaminants [M]. Geneva: WHO Press, 2007.
- [6] 李润杰,王文卿,刘得俊. 西宁周边沟道水土流失综合治理[J]. 水土保持研究,2006,13(4):158-161.
- [7] Pehlivan R. The effect of weathering in the Buyukmelen River basin on the geochemistry of suspended and bed sediments and the hydrogeochemical characteristics of river water, Duzce, Turkey [J]. Journal of Asian Earth Sciences,2010,39(1):62-75.
- [8] 王博,赵爽,夏敦胜,等. 兰州市城区河道表层沉积物重金属污染及磁学参数相关关系研究[J]. 环境科学,2011,32(5):1430-1440.
- [9] 中国国家环境保护局. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社,1990.
- [10] 徐争启,倪师军,庾先国,等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术,2008,31(2):112-116.
- [11] Müller G. Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins-Veränderungen seit 1971 [J]. Umschau,1979,79(24): 778-783.

来越大。

土地资源是经济社会发展的重要基础,也是市场经济条件下政府掌握的主要资源,经济社会发展离不开土地资源的保障。新时期、新阶段,有必要研究扶贫攻坚的新模式,加强新疆土地利用变化与城市化和工业化的耦合关系研究,针对处于不同城市化和工业化发展阶段的地市州采取有差别的土地政策,特别是应当根据边疆民族区域集中连片贫困地区的劳动力等资源禀赋,探索放宽、放活建设用地政策,借助对口援疆省(市)的推动力,加快当地城市化和工业化建设,激活民族地区经济发展的内生动力,增强就近、就地吸纳农村劳动力转移就业的能力,不断开辟就业门路、拓宽增收渠道,大力提高贫困农牧民收入水平,力争早日摆脱贫困,与全国同步建成小康社会。

#### 参考文献:

- [1] 宇振荣,欧阳进良.集约化农区县域种植业土地利用变化驱动力研究[J].中国土地科学,2001,15(4):35-38.
- [2] 郭雅雯,赵敏娟.基于STIRPAT模型的陕西省耕地面积变化社会经济驱动力分析[J].水土保持研究,2012,19(6):197-201.
- [3] 位欣,刘耀林,姚鹏.基于模拟退火遗传算法的土地利用变化驱动力研究[J].中国土地科学,2008,23(7):34-37.
- [4] 刘纪远,张增祥,徐新良,等.21世纪初中国土地利用变化的空间格局与驱动力分析[J].地理学报,2009,64(12):1411-1420.
- [5] 郭程轩,徐颂军,巫细波.基于地统计学的佛山市土地利用变化驱动力时空分异[J].经济地理,2009,29(9):1524-1529.
- [6] 朱会义,李秀彬,何书金.环渤海地区土地利用的时空变

化分析[J].地理学报,2001,56(3):253-260.

- [7] 曹雪,罗平,李满春,等.基于扩展CA模型的土地利用变化时空模拟研究:以深圳市为例[J].资源科学,2011,33(1):127-133.
- [8] 余惠容,蒲春玲,刘志有,等.基于TM/ETM+绿洲城市土地利用时空演变分析:以新疆奎屯市为例[J].水土保持研究,2012,19(6):147-151.
- [9] 王华伟,高鹏,吕圣桥,等.辽宁西部北票市生态修复区生态退化驱动力分析[J].水土保持研究,2011,18(1):121-124.
- [10] 董爽,王让会,宁虎森,等.人工绿洲生态系统中土壤和植被对土地利用变化的响应:以北屯绿洲为例[J].干旱区地理,2009,32(4):578-584.
- [11] 张文忠,王传胜,吕昕,等.珠江三角洲土地利用变化与工业化和城市化的耦合关系[J].地理学报,2003,58(5):667-685.
- [12] 汤青,徐勇,刘毅.广东省土地利用变化时空分异及其与城市化和工业化的耦合关系[J].中国土地科学,2010,24(10):46-51.
- [13] 王汉花,刘艳芳,樊敏.武汉城市圈土地利用变化与工业化和城市化的耦合关系[J].国土资源科技管理,2008,25(5):84-89.
- [14] 王秀兰,包玉海.土地利用动态变化研究方法探讨[J].地理科学进展,1999,18(1):81-87.
- [15] 陈述彭,童庆禧,郭华东.遥感信息机理研究[M].北京:科学出版社,1998.
- [16] 蔡建明.中国城市化发展动力及发展战略研究[J].地理科学进展,1997,16(2):9-14.
- [17] Zhang Wenzhong, Liu Yansui. Study on land resource problems and countermeasures in the process of urbanization in China[J]. Regional Views,2001,14:1-8.

(上接第250页)

- [12] 史小丽,秦伯强.长江中游网湖沉积物重金属元素变化特征分析[J].第四纪研究,2009,29(1):135-143.
- [13] Huang H, Yuan X, Zeng G, et al. Quantitative evaluation of heavy metals' pollution hazards in liquefaction residues of sewage sludge[J]. Bioresource Technology, 2011,102(22):10346-10351.
- [14] Müller G. Die Schwermetallbelastung der sedimente des Neckars und seiner Nebenflüsse; eine Bestandsaufnahme[J]. Chemical Zeitung, 1981,105(2):157-164.
- [15] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollu-

tion control: a sedimentological approach[J]. Water Research,1980,14(8):975-1001.

- [16] Peng J, Song Y, Yuan P, et al. The remediation of heavy metals contaminated sediment[J]. Journal of hazardous materials,2009,161(2/3):633-640.
- [17] Yin X, Liu X, Sun L, et al. A 1500-year record of lead, copper, arsenic, cadmium, zinc level in Antarctic seal hairs and sediments[J]. Science of the Total Environment,2006,371(1/3):252-257.
- [18] 姚书春,薛滨.长江下游青弋江,水阳江水系湖泊沉积物中重金属变化特征研究[J].第四纪研究,2010,30(6):1177-1185.