DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2015.02.2014052804

王德鹏, 臧飞, 武文飞, 等. 干旱区绿洲城郊排污渠沉积物重金属污染与释放特征[J]. 环境化学, 2015, 34(2): 262-269 WANG Depeng, ZANG Fei, WU Wenfei, et al. Heavy metal contamination and release characteristics of sediments in oasis of arid area and suburban drainage ditch[J]. Environmental Chemistry, 2015, 34(2): 262-269

干旱区绿洲城郊排污渠沉积物重金属污染与释放特征*

王德鹏 臧 飞 武文飞 王胜利** 南忠仁 任业萌

(兰州大学资源环境学院,兰州,730000)

摘 要 在白银市城郊东大沟沿程采集了 8 个沉积物样品,采用 Tessier 五步连续提取法和静态释放试验研 究了沉积物中重金属的污染特征及在不同离子强度条件下沉积物中重金属的释放规律.结果表明:(1)东大 沟沉积物中 Cd、Cu、Pb、Zn 的含量均超过了甘肃省土壤元素背景值,其平均值分别为背景值的 128.83、12.71、26.90、17.99 倍.(2)沉积物中 Cd 和 Cu 主要以残渣态和有机结合态存在,Zn 主要以有机结合态和铁锰氧化物 结合化态存在,Pb 主要以铁锰氧化物结合态存在;沉积物中重金属的活性顺序为 Zn>Pb>Cd>Cu.(3)随着离 子强度的增大,沉积物中 Cu、Pb、Zn 的释放量随之增加,沉积物中 Cd 的释放量则是先增加后减少. 关键词 沉积物,重金属,离子强度,释放量.

Heavy metal contamination and release characteristics of sediments in oasis of arid area and suburban drainage ditch

 WANG Depeng
 ZANG Fei
 WU Wenfei
 WANG Shengli**
 NAN Zhongren
 REN Yemeng

 (College of Earth and Environment Science, Lanzhou University, Lanzhou, 730000, China)
 Ren Yemeng
 Ren Yemeng

Abstract: Eight representative sediment samples were collected from Dongdagou, Baiyin. Tessier five-step sequential extraction and static release test method were conducted to study the pollution characteristics of heavy metals, and the release of heavy metals in different ionic strength conditions was also studied. The results showed that: (1) concentrations of Cd, Cu, Pb and Zn in the sediments were higher than the soil elements background values in Gansu province, and the average concentrations of Cd, Cu, Pb and Zn were 128.83, 12.71, 26.90 and 17.99 times higher. (2) The main forms of Cd and Cu were residual form(RES) and organic form (OM); the main forms of Zn were organic form (OM) and Fe-Mn oxides bonded form(FMO); and the main form of Pb was oxides bonded form(FMO). The activities of heavy metals in descending order were Zn>Pb>Cd>Cu. (3) With the increase of ionic strength, the release quantities of Cu,Zn and Pb increased, and the release quantities of Cd increased first and decreased later.

Keywords: sediments, heavy metals, ionic strength, release amount.

甘肃省白银市是一个以铅、锌、铜矿的采掘、冶炼为主体支撑的老工业城市,属于典型的工矿型绿洲. 白银市东大沟是白银市郊的一条排污渠,长期以来,东大沟沿途分布的 20 多家工业企业在生产过程 中直接通过东大沟把大量含有铜、铅、锌、镉、砷等重金属的废水排入黄河,不仅造成东大沟流域土壤重 金属污染,而且对黄河水质构成了威胁^[1].

吸附于沉积物上的重金属一般不能借助于天然水体过程从水生生态系统中除去,这些重金属趋向 于累积在底部沉积物中,并能够通过各种方式从底部沉积物中重新释放出来.重金属从沉积物向水体的

²⁰¹⁴年5月28日收稿.

^{*}高等学校博士学科点专项科研基金(20120211110018);国家自然科学基金(NSFC 51178209, NSFC 91025015);兰州大学中央高校 基本科研业务费专项资金项目(lzujbky-2012-141)资助.

^{**}通讯联系人, E-mail: wangshenl@lzu.edu.cn

重新释放,会对水生生态系统和饮用水的供给产生不同程度的危害.重金属的释放主要是由水体盐度升高、氧化还原条件的变化、pH的下降、天然或合成的络合剂使用量的增加以及微生物活动等因素引起的^[2].李鱼^[3]等在城市河流淤泥中重金属释放规律的研究中发现,pH对重金属的释放影响最大,而温度、盐度、泥水比的影响相对较小,且随着温度、盐度、泥水比的升高,淤泥中重金属的释放量呈增加趋势.陈桂荣^[4]在滇池底泥重金属释放机理分析及影响因素研究中发现,随着腐殖酸浓度的增大,重金属释放量随之增加.蔡金娟^[5]在东平湖底泥重金属污染评价及释放机理的研究中指出,室内模拟试验条件下,随着 pH 值的升高,底泥中重金属的释放率明显下降;随着水体温度的升高,底泥中重金属的释放率增大;添加外源富里酸可明显促进底泥中重金属的释放.

目前,尽管沉积物重金属释放的相关研究得到了一定的发展,其内容涉及沉积物重金属释放的影响 因素、释放动力学的研究等^[6-12],但是由于水体环境的复杂性,区域不同,沉积物的理化性质差异显著, 水体环境变化条件下沉积物中重金属释放机制的研究仍相当薄弱,且十分零散,关于工矿型绿洲城郊排 污渠沉积物重金属污染与释放特征的研究未见报道.本研究采用静态释放实验^[13]模拟水环境离子强度 变化条件,利用不同离子强度条件下沉积物中重金属的释放量和沉积物中重金属的形态分析来研究水 体离子强度变化条件下白银市城郊排污渠沉积物中重金属的释放特征,对白银市城郊东大沟水体及沉 积物重金属污染控制与治理具有一定的借鉴意义,亦可为干旱区排污渠沉积物中重金属污染的修复与 环境管理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

白银市地处东经103°—105°,北纬35°—37°,位于黄河上游甘肃省中部地带.白银市是河西走廊绿洲里典型的工矿型绿洲,也是中国重要的有色金属冶炼加工与化工工业基地之一,城区工厂多且分布集中,废水废气排放量大.

东大沟起源于白银露天矿,自北向南穿过白银市东部市区,是白银市东部的一条排污沟,全长约 38 km.沿途主要接纳了白银公司第三冶炼厂、西北铅锌厂、银光公司以及铜业公司等工业企业排放的工 业废水和东市区部分居民生活污水.白银公司是东大沟流域最主要的工业污染源^[14].已有研究结果表 明^[15]:白银市东大沟水体和沉积物中都存在不同程度的 Cd、Cu、Pb、Zn 污染.

1.2 供试材料

沿白银市东大沟自上游向下游用沉积物采样器以间距约4 km 共采集8个0—10 cm 的表层沉积物样品,其编号依次为E1—E8,采样点分布见图1. 沉积物采回后铺在塑料薄膜上自然风干,压碎,剔除异物,用玛瑙研钵磨细,过0.149 mm 尼龙筛备用.



Fig.1 Distribution of sediments sampling sites

1.3 重金属释放实验

准确称取 2.5 g 沉积物样品(干样),分别置入 50 mL 塑料离心管中,依次加入 0、0.0001、0.001、0.01、0.01、0.1、0.5、1.0 mol・L⁻¹的 NaCl、KCl、MgCl₂混合液(3种盐的物质的量浓度比为 1:1:1)25 mL,在 HZQ—X100A 型震荡培养箱中震荡 24 h(25 ℃,200 r・min⁻¹),再在 LD5—2A 离心机上离心 10 min (4000 r・min⁻¹),过滤,测定上清液 Cd、Cu、Pb 和 Zn 的浓度.

1.4 分析测试

沉积物理化指标的分析采用土壤农化常规分析方法^[16]. 沉积物中 Cd、Cu、Pb 和 Zn 的化学形态分析采用 Tessier 五步连续提取法^[17],全量分析采用 HNO₃-HF-HClO₄三酸消解法^[16],并用原子吸收光谱仪 (Thermo Fishier, SOLAAR M6)测定.

实验中均采用 20% 平行样和 GSS-1 标准土样进行质量监控,误差控制在 5% 以内. 实验试剂均为优级纯,实验器皿在使用前均用 10% 硝酸浸泡 24h 以上^[18].

1.5 数据处理

实验所得数据全部采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 18.0 进行分析、作图等. 同时,重金属的释放量和释放率采用如下公式^[19-20]计算:

Q = CV/m

式中,Q为沉积物重金属释放量($mg \cdot kg^{-1}$);C为溶液中重金属离子的浓度($mg \cdot L^{-1}$);V为溶液体积 (mL);m 为沉积物样品的质量(g).

$$W = Q/T$$

式中,W为沉积物中重金属的释放率,无量纲;Q为沉积物种重金属的释放量($mg \cdot kg^{-1}$);T为沉积物重金属全量($mg \cdot kg^{-1}$).

2 结果与讨论

2.1 沉积物中重金属的含量与污染评价 沉积物中 Cd、Cu、Pb 和 Zn 的含量见表 1.

编号	重金属/(mg·kg ⁻¹)					EC/	有机质/
	Cd	Cu	Pb	Zn	рн	$(\mu S \boldsymbol{\cdot} \mathrm{cm}^{-1})$	$(g\boldsymbol{\cdot} kg^{-1})$
E1	20. 82	444.70	838.89	2231.55	7.40	1628	13.09
E2	12.02	388.80	391.03	1551.17	7.35	1725	22.76
E3	7.21	275.34	471.62	811.21	6.78	1904	20.48
E4	18.74	336.21	521.61	1294.54	6.79	1649	23.89
E5	19.41	484.78	1062.28	2120.84	7.94	3537	29.01
E6	13.79	152.16	162.17	433.44	8.00	1533	15.36
E7	14.86	187.24	245.60	641.04	7.63	2148	13.09
E8	16.83	181.52	353.19	773.01	8.13	1870	15.93
平均值	15.46	306.34	505.80	1232.10	—	1999.25	19.20
变异系数	28.93%	41.51%	59.98%	55.47%			
土壤环境质量标准 (GB15168—1995)二级	0.60	100.00	350.00	300.00			
甘肃省土壤背景值	0.12	24.10	18.80	68.50			

表1 沉积物的理化性质及重金属含量

Table 1 The physical-chemical properties and heavy metal contents of sediments

表1表明, 沉积物样品中 Cd、Cu、Pb、Zn 的含量分别为7.21—20.82、152.16—484.78、162.17—1062.28、433.44—2231.55 mg·kg⁻¹, 其平均含量分别为15.46、306.34、505.80、1232.10 mg·kg⁻¹, 可见, 白银市东大沟沉积物中 Cu、Zn、Cd 和 Pb 出现了不同程度的累积现象. 沉积物样品中 Cd、Cu、Pb、Zn 的 变异系数分别为28.93%、41.51%、59.98%、55.47%, Cu、Pb、Zn 在沉积物采样点之间较大的变异系数反

映了不同采样点的这些重金属元素含量有较大差异,Cd 相对较小的变异系数反映了各采样点这一元素 含量比较集中^[21]. 沉积物的 pH 值变化范围为 6.78—8.13,除 E3 和 E4 样品呈弱酸性外,其余样品均呈 弱碱性. 沉积物的 EC 变化范围为 1533—3537 μS·cm⁻¹,其平均值为 1999.25 μS·cm⁻¹. 而沉积物中有 机质含量相对较低,其变化范围为 13.09—29.01 g·kg⁻¹,其平均值为 19.20 g·kg⁻¹,对沉积物中重金属 离子的迁移转化影响相对较小^[22].

目前,国内尚没有针对水渠沉积物重金属含量的评价标准,本文对沉积物重金属的含量评价采用土壤环境质量二级标准^[23].可见,8个沉积物样品中除 E6、E7 的 Pb 含量未超标外,Cd、Cu、Zn 含量均超标. 沉积物样品中 Cd、Cu、Pb、Zn 的平均含量分别为标准值的 25.77、3.06、1.45、4.11 倍.8 个沉积物样品中 Cd、Cu、Pb、Zn 的含量均超过了甘肃省土壤背景值^[24],其平均值分别为背景值的 128.83、12.71、26.90、17.99 倍,沉积物中 Cd 污染最为严重.由于东大沟沿途分布的 20 多家工业企业将生产过程中产生的工业废水直接排入东大沟,从而导致东大沟沉积物产生严重的重金属污染.

2.2 沉积物重金属化学形态分布特征

Tessier 五步连续形态提取法^[17]将土壤中重金属的形态划分为可交换态(EXC)、碳酸盐结合态(CAB)、铁锰氧物结合化态(FMO)、有机结合态(OM)和残渣态(RES).EXC活性最大,易迁移转化^[25-26].CAB在pH降低时易释放出来被生物利用^[25].FMO具有较强的离子键而不易释放^[27],OM以有机质活性基团为配位体结合或硫离子与重金属的沉淀存在而不易释放^[28],但强氧化条件下这两种形态可能被分解释放,引起生物毒性^[29].RES正常条件能长期稳定在土壤中,可通过化学反应将其转化成可溶态^[30].重金属元素在沉积物中的形态分布常用形态分配系数表示,即以某一形态含量占其各形态含量总和的百分比表示.本研究中实验测得各形态重金属含量之和略大于全量,但是误差在5%以内.沉积物中 Cu、Zn、Cd、Pb 的形态分布特征见图 2.





图 2 表明,沉积物中 Cd、Cu、Pb、Zn 的形态分布差异较大,Cd、Cu 主要以 RES 和 OM 存在,Pb 主要 以 FMO 存在,Zn 主要以 OM 和 FMO 存在.沉积物中 Cd 的主要赋存形态为 RES,达到 52%;OM 次之,为 25%;EXC、CAB 和 FMO 均在 7%左右.Cu 主要以 OM(46%)存在;其次为 RES 和 FMO;EXC 和 CAB 的

分配系数相对较低. Pb 以 FMO 为主,达到 55%;EXC 最低,为 5%;其余形态的分配系数均在 12%左右. Zn 主要以 OM(40%)和 FMO(25%)存在,EXC、CAB 和 RES 的分配系数较低,分别为 11%、10%和 14%. 尽管沉积物中 Cu、Zn、Cd、Pb 的 EXC 和 CAB 分配系数均较低,潜在释放能力较强的 EXC 和 CAB^[31]只 占较小比例,但是在某种环境条件下,OM、FMO 可能会转化为活性较强的 EXC 和 CAB 并释放到水体 中,从而对水体造成二次污染^[32].

重金属 5 种形态的活性顺序是:EXC>CAB>FMO>OM>RES^[33-34]. RES 一般存在于硅酸盐、原生和次 生矿物晶格中,性质稳定,在自然界正常条件下不易释放,生物可利用性和危害性相对较小^[15],除 RES 以外,其余形态均具有一定程度的生物有效性^[35]. 若以 EXC 和 CAB 的分配系数之和来表征沉积物中重 金属的活性,则 Cd、Cu、Pb、Zn 的活性顺序为 Zn>Pb>Cd>Cu.

图 3 表明,沉积物中重金属含量沿程变化的规律比较一致,均为"W"型,即:沉积物中重金属含量从 上游的样点 E1—E3 以及中游的样点 E5—E6 呈下降趋势,分别在样点 E3、E6 处达到极小值(Pb 的第一 个极小值在样点 E2 出达到);而沉积物中重金属含量从中游的样点 E3—E5 以及下游的样点 E6—E8 呈 上升趋势,分别在样点 E5、E8 处达到极大值. 沉积物中重金属的含量沿程变化的总趋势是轻度下降. 沉 积物中重金属的含量沿程变化产生上述规律与沿途工业企业排放的工业废水水质及其沉积物与水界面 间重金属的迁移转化有一定关系.





2.3 不同离子强度对沉积物重金属释放的影响

从图 4 可以看出,沉积物中重金属的释放量在离子强度从 0—1.0 mol·L⁻¹范围内变化时,除 Cd 在离子强度为0.1 mol·L⁻¹时出现一个峰值外,其余 3 种重金属离子的释放量都随着离子强度的增大而增加.

沉积物中 Cd 的释放量在离子强度从 0—1.0 mol·L⁻¹范围内变化时增加幅度相对较小(增幅只有 4.5 mg·kg⁻¹).离子强度在 0—0.001 mol·L⁻¹时,Cd 的释放量缓慢增加;离子强度在 0.001—0.1 mol·L⁻¹时,Cd 的释放量迅速减少;Cd 的释放量在离子强 度为 0—1.0 mol·L⁻¹范围内的总体变化趋势是随着离子强度的增大先增加后减少.离子强度为 0.1 mol·L⁻¹处出现一个拐点,在该点处,沉积物中 Cd 的释放量达到最大值 5.1 mg·kg⁻¹.

沉积物中 Cu 和 Pb 的释放量在离子强度从 0—1.0 mol·L⁻¹范围内变化时增加幅度较小(增幅分别 为 17 mg·kg⁻¹和 10 mg·kg⁻¹). 沉积物中 Cu 和 Pb 的释放特征基本一致,释放量随着离子强度的增大而 增大.离子强度在 0—0.1 mol·L⁻¹时,Cu 和 Pb 的释放量缓慢增加;离子强度在 0.1—1 mol·L⁻¹时,Cu 和 Pb 的释放量迅速增加.

沉积物中 Zn 的释放量在离子强度从 0—1.0 mol·L⁻¹范围内变化时增加幅度很大(增幅为 740 mg·kg⁻¹),这与沉积物中 Zn 的含量最高、活性最大相对应.离子强度在 0—0.001 mol·L⁻¹时,Zn 的释放量缓慢增加;离子强度在 0.001—1 mol·L⁻¹时,Zn 的释放量迅速增加.

本实验中随着离子强度的不断增大,沉积物中 Cu、Pb、Zn 的释放量随之增加,这可能是由于所添加的盐离子与重金属离子之间发生竞争吸附引起的,即体系中吸附位一定的条件下,其他盐离子的大量存

在 (Na^+, K^+, Mg^{2+}) 必然会降低重金属离子在沉积物中的吸附量^[36].

随着离子强度的不断增大,沉积物中 Cd 的释放量先增加后减少,Cd 的释放量在离子强度为 0.1 mol·L⁻¹时出现最大值. 根据黄廷林^[37]等的研究,重金属释放过程中峰值点的存在主要是因为重金 属释放过程中同时伴随着重金属离子的再络合、凝聚、吸附或再沉积等作用,当该过程进行到一定程度 时,释放于水相中的重金属离子就会与溶出物质发生包括络合、吸附凝聚、共沉淀等物理化学变化,从而 使水溶态重金属浓度又开始降低直至建立平衡,重金属浓度不再发生变化. 据此,可以推测,随着离子强 度的继续增大,沉积物中 Cu、Pb、Zn 的释放特征曲线也会出现相应的拐点,如果离子强度继续增大,则 会出现沉积物中重金属离子释放量随着离子强度的增大而减少的现象.



图 4 不同离子强度条件下沉积物重金属释放量特征曲线



为了更直观的表征离子强度条件的变化对于沉积物中重金属释放的影响,用释放到水体中的重金属的量除以沉积物中重金属的全量,得到沉积物重金属的释放率(%),从而用释放率来分析不同离子强度条件对沉积物中重金属释放的影响.释放率可作为吸附强度指标,通常用来说明胶体表面活性吸附位与金属离子结合的牢固程度.

不同离子强度条件下沉积物重金属释放率见图 5,结果表明:离子强度在 0—1.0 mol·L⁻¹范围内变 化时,沉积物中 Cd 的释放率先增大后减小,离子强度为 0 mol·L⁻¹时,Cd 的最小释放率为 0;离子强度为 0.1 mol·L⁻¹时,Cd 的释放率出现最大值为 48.93%,离子强度为 1 mol·L⁻¹时,Cd 的释放率又降低到 7.32%.

离子强度在 0—1.0 mol·L⁻¹范围内变化时,沉积物中 Cu 和 Pb 的释放率变化幅度都不是很大(分别 为 0.08%—10.08%、0.03%—2.87%),离子强度为 0 mol·L⁻¹时,Cu 和 Pb 的释放率出现最小值,分别为 0.08%、0.03%,这与沉积物中 Cu 和 Pb 可交换态含量相对较低相对应;离子强度为 1 mol·L⁻¹时,Cu 和 Pb 的最大释放率分别为 10.08%和 2.87%.

离子强度在 0—1.0 mol·L⁻¹范围内变化时,沉积物中 Zn 的释放率变化幅度最大,离子强度为 0 mol·L⁻¹时,Zn 的最小释放率为 0.16%;离子强度为 1 mol·L⁻¹时,Zn 的释放率出现最大值为 89.05%. 从图 2 可以初步判断,8 个样品中 Zn 的前 4 种结合态最大含量为 90%左右,而 Zn 的最大释放率达到了 89.05%,导致 Zn 的释放率与 Zn 的前 4 种形态最大含量相近的原因有两方面:其一,释放率的计算是用

释放量除以三酸消解法测得的全量得到,而 Tessier 五步提取法测得的重金属含量略大于全量;其二,可能是由于部分 OM 和 FMO 形态的 Zn 转变为 EXC 和 CAB 参与释放所致,沉积物中 Zn 的活性最大且 Zn 的含量最高与其释放率最大相对应.



图 5 不同离子强度条件下沉积物金属释放率特征曲线

Fig.5 The characteristic curve of release rates of heavy metals in sediment in different ionic strength conditions

总体而言,随着离子强度的增大,沉积物中重金属离子的释放量和释放率随之增大,并伴随着先增大后减小的情况出现.通过图 5 可知 Cd、Cu、Pb、Zn 的最大释放率分别为 48.93%、10.08%、2.87%、89.05%,平均释放率分别为 13.02%、1.65%、0.68%、20.58%.由此可以得出沉积物中重金属离子的释放率活性顺序为:Zn>Cd>Cu>Pb.影响沉积物中重金属离子释放率的因素包括释放试验进行的时间、PH、离子强度、紊动强度等^[36].

3 结论

(1)由于东大沟沿线的 20 多家工业企业将未经处理的工业废水直接排入东大沟,导致东大沟沉积 物出现不同程度的重金属污染. Cd、Cu、Pb、Zn 含量均超过了甘肃省土壤背景值和土壤环境质量二级 标准.

(2) 沉积物中 Cd 和 Cu 主要以 RES 和 OM 存在, Pb 主要以 FMO 存在, Zn 主要以 OM 和 FMO 存在. 沉积物中重金属的活性顺序为 Zn>Pb>Cd>Cu.

(3)随着离子强度的增大,沉积物中 Cu、Pb、Zn 的释放量和释放率随之增大,沉积物中 Cd 的释放量 和释放率则是先增大后减小.

(4)在今后的研究中,探究沉积物中重金属释放量最大时对应的离子强度,通过调节水体离子强度 条件,进而控制沉积物中重金属离子的释放,对于防止吸附于沉积物上的重金属离子重新释放到水体而 造成"二次污染"有一定作用.

参考文献

- [1] 南忠仁.干旱区绿洲土壤作物系统重金属化学行为与生态风险评估研究[M].北京:中国环境科学出版社,2011,12
- [2] U.弗斯特纳,G.T.W 卫特曼.王忠玉,姚重华译.水环境的重金属污染[M].北京:海洋出版社,1988
- [3] 李鱼,刘亮,董德明,等.城市河流淤泥中重金属释放规律的研究[J].水土保持学报,2003,17(1):125-127
- [4] 陈桂荣.滇池底泥重金属释放机理分析及影响因素研究[D].昆明:昆明理工大学硕士学位论文,2008
- [5] 蔡金娟.东平湖底泥重金属污染评价及释放机理的研究[D].山东:山东农业大学硕士学位论文,2006
- [6] 王继纲,马启敏,刘茜,等.渤海湾北部海域沉积物重金属Cu、Zn释放及动力学研究[J].海洋湖沼通报,2007,69-73
- [7] 李鹏.霞湾港底泥中锌和铅释放的研究[D].长沙:湖南大学硕士学位论文,2010
- [8] 宋宪强, 雷恒毅, 余光伟, 等. 重污染感潮河道底泥重金属污染评价及释放规律研究[J]. 环境科学学报, 2008, 28(11): 2259-2268
- [9] 张伟,宫喜君,王秀花,等.水库底泥重金属污染物静态释放规律[J].科技导报,2013,31(16):26-29
- [10] 张岚,倪晋仁,孙卫玲,等.高含沙水体中黄土吸持和释放铜的机理[J].环境科学,2003,24(3):80-84
- [11] 李功振.京杭大运河(苏北段)底泥重金属污染与释放规律研究[D].北京:中国矿业大学博士学位论文,2009

- [12] 汤红亮.里运河底泥重金属释放实验研究[D].南京:河海大学硕士学位论文,2006
- [13] 魏俊峰,吴大清,彭金莲,等.污染沉积物中重金属的释放及其动力学[J].生态环境,2003,12(2):127-130
- [14] 薛粟尹,李萍,王胜利,等.工矿型绿洲农田土壤中氟和镉的剖面行为研究[J].中国环境科学,2014,01:195-200
- [15] 李小虎,汤中立,初凤友.白银矿山水体和沉积物中重金属及其化学形态分布特征[J].地球与环境,2008,03;218-224
- [16] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科学出版社,1999
- [17] A.Tessier, P.G.C.Campbell, and M.Bisson. Sequential Extraction Procedure for the Speciation of Particulate Trace Metal [J]. Analytical Chemistry, 1979, 51(7):844-851
- [18] 武文飞,南忠仁,王胜利,等.干旱区绿洲土壤 Cd-Zn 复合污染下重金属形态及其生物有效性的研究[J].干旱区资源与环境,2012, 09:81-87
- [19] 林文杰,周晚春,刘岱纯,等.彩塘电镀区底泥重金属污染与释放特征[J].环境化学,2012,31(12):1979-1984
- [20] 何江,李朝生,王新伟,等.黄河沉积物中重金属离子的形态转化及释放研究[J].南京大学学报(自然科学版),2003,06:739-744
- [21] 王亮,符建伟,崔洁,等.郑州郊区土壤重金属含量分布及成因初探[J].微量元素与健康研究,2010,04:34-36
- [22] 孙花,谭长银,黄道友,等.土壤有机质对土壤重金属积累、有效性及形态的影响[J].湖南师范大学自然科学学报,2011,04:82-87
- [23] 国家环境保护总局,GB15618—1995,中华人民共和国土壤环境质量标准[S].北京;中国环境科学出版社,1995
- [24] 中国环境监测总站.中国土壤元素背景值[M].北京:中国环境科学出版社,1990
- [25] A K Singh, S I Hasnain, D K Banerjee. Grain size and geochemical partitioning of heavy metals in sediments of the Damodar River A tributary of the lower Ganga, India [J]. Environmental Geology, 1999, 39(1): 90-98
- [26] 李宇庆,陈玲,仇雁翎,等.上海化学工业区土壤重金属元素形态分析[J].生态环境,2004,02:154-155
- [27] 杨宏伟,王明仕,徐爱菊,等.黄河(清水河段)沉积物中锰、钴、镍的化学形态研究[J].环境科学研究,2001,05:20-22
- [28] 崔妍,丁永生,公维民,等.土壤中重金属化学形态与植物吸收的关系[J].大连海事大学学报,2005,02:59-63
- [29] 隆茜,张经.陆架区沉积物中重金属研究的基本方法及其应用[J].海洋湖沼通报,2002,03:25-35
- [30] Presley B J, Trefry J H, Shokes R F. Heavy metal inputs to Mississippi delta sediments, a historical view [J]. Water, Air&Soil Pollution, 1980,13(4): 481-494
- [31] 李晓晨.城市污水处理过程中重金属形态分布及潜在迁移性研究[D].河海大学博士学位论文,2006
- [32] 梁文俊,李坚,赵春禄,等.汾河太原段沉积物中重金属 Ni 和 Zn 的释放规律[J].北京工业大学学报,2005,02:174-178
- [33] Xian X. Effect of chemical forms of cadmium, zinc, and lead in polluted soils on their uptake by cabbage plants [J]. Plant and soil, 1989, 113(2): 257-264
- [34] Ma L Q, Rao G N. Chemical fractionation of cadmium, copper, nickel, and zinc in contaminated soils [J]. Journal of Environmental, Quality, 1997, 26(1): 259-264
- [35] Manno E, Varrica D, Dongarra G. Metal distribution in road dust samples collected in an urban area close to a petrochemical plant at Gela, Sicily [J]. Atmospheric Environment, 2006, 40: 5929-5941
- [36] 何江,李朝生,王新伟,等.黄河沉积物对 Cd²⁺的吸附及其形态转化影响的实验研究[J].农业环境科学学报,2003,02:134-137
- [37] 黄廷林.水体沉积物中重金属释放动力学及试验研究[J].环境科学学报,1995,15(4):440-446