

## 人工湿地底泥中特征重金属的空间分布及生态风险评价

马永玲<sup>1</sup>, 王勇<sup>2</sup>, 梁仁君<sup>1\*</sup>, 邱继彩<sup>1</sup> (1. 临沂大学资源环境学院, 山东临沂 276005; 2. 临沂大学校长办公室, 山东临沂 276005)

**摘要** 采集武河湿地沉积物, 采用四酸消解法(HCl-HNO<sub>3</sub>-HF-HClO<sub>4</sub>)对样品进行处理, 测定武河湿地沉积物中6种重金属(As、Cd、Cu、Hg、Pb和Zn)的含量, 分析其空间分布特征, 并采用内梅罗综合污染指数法、潜在生态危害指数法和ERL/ERM评价法评价重金属的环境风险。结果表明, 武河湿地表层沉积物中重金属含量大多高于环境背景值, 空间分布差异性较小。内梅罗综合污染指数按由大到小依次为Hg、Cd、As、Zn、Cu、Pb、Hg的内梅罗综合污染指数最大为3.74, 综合污染程度最为严重。潜在生态风险评价表明, 湿地沉积物中潜在生态危害指数(RI)为743.91, 属V极强生态危害。ERL/ERM评价结果显示, 湿地沉积物中Cu、Hg含量高于ERM值, 对水生生态系统有很强毒性; As、Zn的含量介于ERL和ERM之间, 可能会对水域生物产生一定的毒性。

**关键词** 武河湿地; 沉积物; 重金属; 空间分布; 潜在生态风险评价

**中图分类号** S181.3 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2017)13-0059-04

## The Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Characteristics Heavy Metals in the Artificial Wetland Sediment

MA Yong-ling<sup>1</sup>, WANG Yong<sup>2</sup>, LIANG Ren-jun<sup>1\*</sup> et al (1. College of Resources and Environment, Linyi University, Linyi, Shandong 276005; 2. President Office, Linyi University, Linyi, Shandong 276005)

**Abstract** The study collected Wuhe wetland sediments and used four acid digestion methods (HCl-HNO<sub>3</sub>-HF-HClO<sub>4</sub>) to process samples, content of 6 kinds of heavy metals (As, Cd, Hg, Pb, Zn) and spatial characteristics in the sediments were determined and analyzed. The environment risk of heavy metals further was evaluated by the method of the Nemerow Pollution Index method, Potential Ecological Harm Index and the ERL/ERM. The results showed that the heavy metals in surface sediments of Wuhe Wetland content were mostly higher than those of environment background values, and the spatial distribution difference was smaller. Comprehensive Pollution Index from high to low was Cd, Hg, As, Zn, Cu, Pb. The Pollution Index of Hg element was 3.74, the most serious pollution degree. Potential ecological risk assessment showed that the Potential Ecological Harm Index RI was 734.91, belonging to the very strong ecological harm V. ERL/ERM evaluation results showed that the content of Cu and Hg element in wetland sediments was higher than the value of ERM, which has a strong toxicity to the water ecological system. The content of As and Zn element was between the ERL and ERM, which may produce certain toxicity to water organisms.

**Key words** Wuhe Wetland; Deposit Sediment; Heavy Metal; Spatial distribution; Potential ecological risk assessment

重金属具有难降解性和易累积性, 并且具有显著的生物毒性和持久性, 对生态环境构成潜在威胁, 现已成为沉积物具有潜在危害的重要污染物<sup>[1-3]</sup>。沉积物作为湿地中重金属污染物的汇和源, 重金属可以通过各种途径进入沉积物, 并且在外界条件适宜时, 会重新释放进入水体, 造成二次污染, 因此对湿地沉积物中重金属的研究已引起众多专家学者的重视<sup>[4]</sup>。

目前, 对于沉积物重金属污染的研究主要集中于重金属的总量特征、空间分布特征及规律、形态组成、来源分析及生物有效性方面, 但对于湿地沉积物重金属的动态变化过程研究较少, 且主要是实验室研究, 野外相关研究较少<sup>[5-6]</sup>。未来对于湿地沉积物重金属的研究, 尤其是在大时间尺度下湿地沉积物重金属的历史变化和湿地土壤形成环境变迁等方面, 具有很大的研究和探索空间; 同时, 可以充分利用GIS和遥感的时效性和动态性特征, 丰富沉积物中金属污染研究<sup>[7]</sup>。笔者测定了武河湿地沉积物中6种重金属(As、Cd、Cu、Hg、Pb、Zn)的含量, 分析其空间分布特征, 并采用内梅罗综合污染指数法、潜在生态危害指数法和ERL/ERM评价法评价重金属的环境风险, 旨在为湿地保护和重金属治理提供理论依据。

## 1 研究区概况与研究方法

**1.1 研究区概况** 武河湿地位于山东省临沂市罗庄区黄山镇, 地处罗庄、郯城、苍山3县交界处, 东临沂河, 北接蒋史汪橡胶坝, 南至廖家屯闸, 南北长15 km, 占地面积866.67 hm<sup>2</sup>, 是全国最大的人工湿地。临沂市的城市污水经过陷泥河上游的兰山区污水处理厂和南涑河上游的罗庄区污水处理厂处理后, 进入武河湿地, 是湿地的全部水源<sup>[8]</sup>。湿地的主要功能是对沂河流域陷泥河和南涑河2条城市河道污水进行深度净化, 以确保淮河流域和南水北调东线输水的安全。武河湿地是典型的纳污湿地, 湿地设计建造了8个滞留塘, 使沉积物充分沉降, 因此沉积物能够大量富集重金属元素。

## 1.2 研究方法

**1.2.1 样品采集与预处理。** 2015年7月18日在武河湿地不同河段采用GPS定位选择合适水域采集底泥, 沿湿地入口至出口选取6个采样点。采用装有有机玻璃管的柱状采泥器采集沉积物柱芯样品, 柱长35 cm, 柱芯样品按0~5、5~10、10~15、15~20、20~25、25~30、30~35 cm进行切样, 分别装入聚四氟乙烯袋中, 24 h内运回实验室, 风干研磨后过100目筛备用<sup>[9]</sup>。

**1.2.2 样品消解与测定。** 底泥采用四酸消解法(HCl-HNO<sub>3</sub>-HF-HClO<sub>4</sub>)进行消解处理, 冷藏备测。采用电感耦合等离子体发射光谱仪(美国瓦力安公司)测定As、Cd、Cu、Hg、Pb、Zn含量。

## 1.2.3 评价方法。

(1) 采用内梅罗综合污染指数法<sup>[10]</sup>评价武河湿地沉积物中重金属的污染程度。内梅罗指数法是一种兼顾极值或

**基金项目** 山东省科技发展计划项目(2013GSF11701); 山东省重点研发计划项目(2015GSF117004); 大学生创新创业训练计划项目(201510452001)。

**作者简介** 马永玲(1993—), 女, 山东日照人, 本科生, 专业: 地理科学。  
\* 通讯作者, 教授, 博士, 硕士生导师, 从事湿地生态学

**收稿日期** 2017-04-19

突出最大值的计权型多因子环境质量指数,特别考虑了污染最严重的因子,并且在加权过程中避免了权系数中主观因素的影响,是当前国内外进行综合污染指数计算的最常用方法之一<sup>[11]</sup>。其计算公式为

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{\bar{P} + P_{\text{imax}}^2}{2}} \quad (1)$$

式中, $P_{\text{综}}$ 是采样点的综合污染指数; $P_{\text{imax}}$ 为*i*采样点重金属污染物单项污染指数中的最大值; $\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i$ 为单因子指数平均值。

(2)采用潜在生态危害指数法进行湿地沉积物中重金属的生态危害评价。潜在生态危害指数法由瑞典科学家 Hakanson 提出,是目前国内外沉积物质量评价应用最为广泛的方法<sup>[12-13]</sup>。评价公式如下:

$$RI = \sum_i E_r^i = \sum_i T_r^i \times C_f^i = \sum_i T_r^i \times \frac{C_i^i}{C_n^i} \quad (2)$$

式中,RI 为沉积物中多种重金属潜在生态危害指数; $E_r^i$ 为潜在生态危害系数; $T_r^i$ 为单个污染物*i*的毒性系数,反映其毒性水平和生物对其污染的敏感程度。 $C_f^i$ 为重金属富集系数( $C_f^i = \frac{C_i^i}{C_n^i}$ ); $C_i^i$ 为沉积物中重金属*i*的实测值; $C_n^i$ 为沉积物背景参考值。该研究采用现代工业化前沉积物中重金属的正常最高背景值(表1),重金属的毒性系数及潜在生态风险程度级别划分见表2。

表1 重金属含量背景值和毒性系数

Table 1 The background content of heavy metal content and the toxicity coefficient

重金属 Heavy metal	含量背景值 Background content//mg/kg	毒性系数 Toxicity coefficient
As	15.0	10
Cd	0.5	30
Cu	30.0	5
Hg	0.2	40
Pb	80.0	5
Zn	25.0	1

表2 重金属潜在生态危害系数( $E_r^i$ )和潜在生态危害指数(RI)与污染程度的关系

Table 2 The relationship of heavy metal potential ecological harm coefficient and potential ecological harm index (RI) to pollution degree

潜在生态危害系数 Potential Ecological harm Coefficient ( $E_r^i$ )	单因子污染物生态危害程度 Single factor pollution degree	潜在生态危害指数 Potential Ecological Risk Index (RI)	综合潜在生态危害程度 Integrated potential ecological hazard
$E_r^i < 40$	低	$RI < 150$	低
$40 \leq E_r^i < 80$	中	$150 \leq RI < 300$	中
$80 \leq E_r^i < 160$	较重	$300 \leq RI < 600$	重
$160 \leq E_r^i < 320$	重	$RI \geq 600$	严重
$E_r^i \geq 320$	严重	—	—

(3)采用 ERL/ERM 评价法预测沉积物中重金属的潜在

生物毒性。ERL/ERM 评价方法又称沉积物质量基准法,ERL 和 ERM 为基准值,取值均来自沉积物生物效应数据库,其中,ERL 是效应范围低值(Effects Range Low),ERM 是效应范围中值(Effects Range Median)<sup>[14]</sup>。当污染物中的目标污染物浓度小于 ERL 时,表示不利生物毒性效应很少发生,反之则不利生物毒性效应将频繁发生;当污染物浓度介于 ERL 和 ERM 之间,则表示不利生物毒性效应有可能发生<sup>[15]</sup>。沉积物重金属基准值见表3。

表3 沉积物中重金属基准值

Table 3 The reference value of heavy metal in sediments mg/kg

重金属 Heavy metal	ERL	ERM
As	8.20	70.00
Cd	1.20	9.60
Cu	34.00	270.00
Hg	0.15	0.71
Pb	46.70	218.00
Zn	150.00	410.00

## 2 结果与分析

**2.1 沉积物中重金属含量空间分布特征** 武河湿地沉积物中重金属含量统计结果见表4。水平方向上,由表4可知,研究区表层沉积物中 As、Cd、Cu、Hg、Pb、Zn 的含量之和为 322.37~536.76 mg/kg。就单一元素而言,含量最高的分别为 Zn 和 Cu,平均值分别为 301.27 和 36.26 mg/kg,占6种重金属总含量的 86.10%,其中,以国家《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)二级土壤环境质量标准值 300.00 mg/kg 为参比,Zn 的平均含量超出标准值 0.42%;其次是 Pb 和 As,平均值分别是 27.05 和 23.16 mg/kg,占6种重金属总含量的 12.80%,其中 As 的平均含量超出二级标准值 15.81%,属严重污染;含量最低的是 Cd 和 Hg,平均值分别是 1.05 和 3.23 mg/kg,其中 Cd 的平均含量超出二级标准值 75.00%,属严重污染,Hg 含量平均值超出二级标准值 223.00%,属严重污染。从含量特征来看,Hg、As 和 Cd 污染较为严重。沉积物中6种重金属的变异系数均较小(14.50%~25.85%),说明武河湿地沉积物中重金属空间分布差异性较小,在湿地各区域分布较均匀。

表4 武河湿地沉积物中重金属含量统计结果

Table 4 The statistical results of heavy metals content in Wuhe Wetland sediment

重金属 Heavy metal	平均值 Average mg/kg	最大值 Maximum mg/kg	最小值 Minimum mg/kg	变异系数 Variation coefficient %	国家土壤 二级标准 National soil two grade standard//mg/kg
As	23.16	27.32	18.95	14.50	20.00
Cd	1.05	1.47	0.70	25.84	0.60
Cu	36.26	52.78	25.37	25.85	100.00
Hg	3.23	4.18	2.33	22.88	1.00
Pb	27.05	34.17	18.31	20.83	350.00
Zn	301.27	416.83	256.71	20.49	300.00
合计 Total	392.02	536.76	322.37	17.90	

在垂直方向上,对深度 0~30 cm 的沉积物进行分层并测定其中的重金属含量,重金属垂直分布规律见图1。由图

1 可知,As 含量曲线随土层深度的变化呈现锯齿多峰状,As 含量总体变化趋势为随着沉积物深度的增加呈先下降后增加,并在 15 cm 处出现 1 个波谷,在 25 cm 处出现 1 个高峰,底层沉积物中含量较大,并且含量变化波动也相对较大。Cd 含量除采样点 1、5 外,其余采样点含量变化相对平缓,采样点 1 的含量变化在深度 15 cm 处出现 1 个最高值,随后随土层深度的增加而降低,其他各采样点含量总体是随土层深度的增加而降低;采样点 5 的 Cd 含量在 5~25 cm 土层变化不大,在 30 cm 土层增大,超过 2.0 mg/kg。Cu 含量除个别采样点外,含量变化最平缓,波动较小,在 13 和 23 cm 处出现 1 个不明显的波谷和 1 个不明显的高峰值,总体变化呈现随深度

增加而降低的趋势。Hg 含量在各采样点变化都比较明显,采样点 1、5 均在 10 cm 处达到 1 个高峰,在 25 cm 处,采样点 1 出现 1 个低峰,采样点 5 出现波谷,其他各采样点变化趋势相对一致。Pb 含量在采样点 5 波动较大,在 10 cm 处达到最小值,30 cm 处含量最高,其他各点变化相对平稳,在 25 cm 处有 1 个高峰,含量总体变化大致随深度的增加而降低。Zn 含量在采样点 1、5、6 波动较明显,均在 10 cm 处出现波谷,随深度的增加,以 15 cm 为界,采样点 1 随深度的增加呈先增加后降低趋势,在 23 cm 处达到高峰;5 号点 Zn 含量在 15 cm 处达到低峰,在 20 cm 处为最低值;采样点 6 含量变化相对平缓,波动较小,总体呈下降趋势,其他 3 点含量变化较平缓。

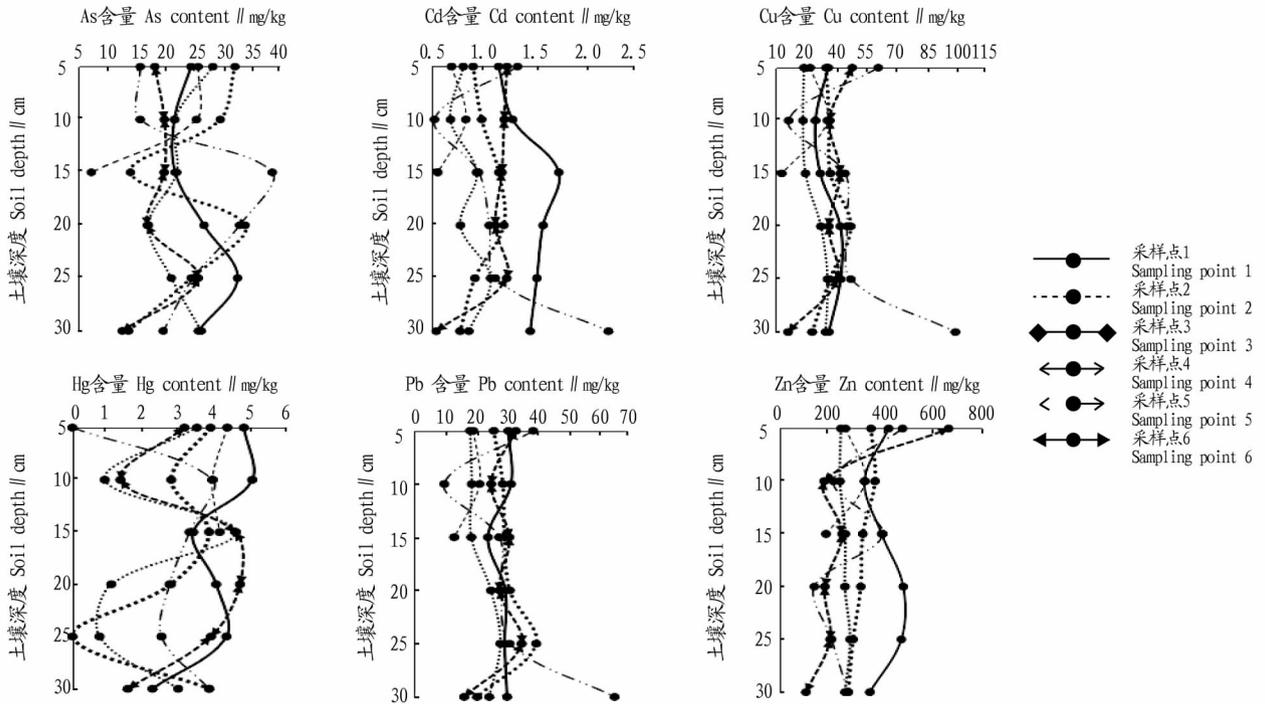


图1 武河湿地沉积物中重金属含量垂直分布规律

Fig.1 The vertical distribution of heavy metal in Wuhe Wetland sediments

## 2.2 沉积物中重金属污染特征及潜在生态风险评价

**2.2.1 内梅罗综合污染评价。**由式(1)得出武河湿地沉积物中重金属污染物内梅罗污染指数评价结果,沉积物重金属内梅罗污染指数见表5。由表5可知,Hg、Cd、As、Zn的内梅罗综合污染指数均大于1.00,表明这4种元素均处于污染状态,其中Hg的内梅罗污染综合指数最大,为3.74,处于重度污染状态;Cd为2.13,属于中度污染,As、Zn分别为1.27、1.21,属于中度污染;Cu、Pb均小于1.00,综合污染属于

安全等级。该评价结果同时也符合单因子指数法评价所得结果。

以上评价结果表明,武河湿地沉积物重金属污染状况不容乐观。经该试验实地采样得知,武河湿地污染物主要来源于工业、生活污水及农业生产中的化肥农药残留,对于湿地内重金属的治理建议以污染源头治理为主;同时,植物作为湿地的重要组成部分,对底泥中的重金属具有一定的吸收和富集作用,在整治过程中应通过收割从系统中除去<sup>[16]</sup>。

表5 武河湿地沉积物重金属内梅罗污染评价指数

Table 5 The Nemerow Pollution Index of heavy metal in Wuhe Wetland sediments

重金属 Heavy metal	平均值 Average//mg/kg	最大值 Maximum//mg/kg	最小值 Minimum//mg/kg	内梅罗综合污染指数 Nemerow Pollution Index	综合污染分级 Comprehensive pollution classification
As	23.16	27.32	18.95	1.27	Ⅲ轻度污染
Cd	1.05	1.47	0.70	2.13	Ⅳ中度污染
Cu	36.26	52.78	25.37	0.45	I安全
Hg	3.23	4.18	2.33	3.74	V重度污染
Pb	27.05	34.17	18.31	0.09	I安全
Zn	301.27	416.83	256.71	1.21	Ⅲ轻度污染

2.2.2 潜在生态污染评价。该研究以我国《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)二级土壤环境质量标准值为参比,

由式(2)对武河湿地进行潜在生态风险评价,评价结果见表6和图2。

表6 武河湿地沉积物中重金属元素潜在生态风险评价

Table 6 The potential ecological risk assessment of heavy metal in Wuhe Wetland sediments

项目 Items	$E_p^i$						RI	生态风险分级 Ecological risk classification
	As	Cd	Cu	Hg	Pb	Zn		
平均值 Average	15.44	63.23	6.04	645.45	1.69	12.05	743.91	V极强生态危害
最大值 Maximum	18.21	88.36	8.80	836.54	2.14	16.67	970.72	V极强生态危害
最小值 Minimum	12.64	41.97	4.23	465.30	1.14	10.27	535.55	III较强生态危害

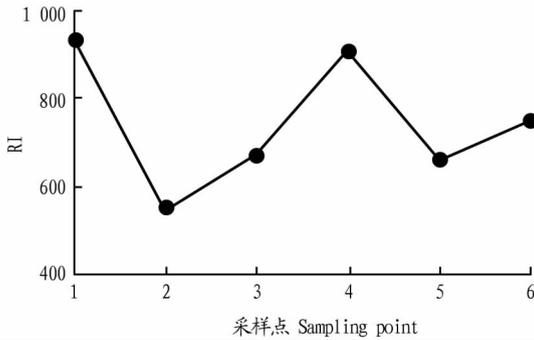


图2 武河湿地各采样点特征重金属潜在生态危害指数

Fig.2 Potential Ecological Risk Index of features heavy metals of each sampling point in Wuhe Wetland

由表6可知,以各采样点重金属含量的平均值来看,湿地潜在生态风险等级呈V极强生态危害,6种重金属元素的RI从大到小依次为Hg、Cd、As、Zn、Cu、Pb,因此Hg综合潜在生态危害程度最为严重,是武河湿地最主要的潜在生态风险因子,并且其 $E_p^i$ 值为645.45,单因子污染物生态危害程度极为严重。由图2可知,采样点1位于滞留塘内,潜在生态危害最强,表现为V极强生态危害,推测是因为陷泥河流域来水在采样点1处水流减缓,重金属富集;在南淶河流域的采样点4、6、5次之,但均表现为III较强生态危害以上;采样点3位于南淶河与陷泥河交汇处,潜在生态危害程度较低,也表现为III较强生态危害以上;采样点2潜在生态危害程度最低,也表现为III较强生态危害。

由以上分析可知,湿地内不同区域重金属污染程度存在一定差异,推测是由于流域内受多股不同来源的处理后的废水汇流以及湿地内植物因素的影响所导致。

2.2.3 ERL/ERM评价。为了研究武河湿地沉积物对水生生态系统的影响,笔者将该湿地各采样点表层0~35 cm沉积物中重金属含量与底泥质量标准(SQGs)进行比较,结果表明,武河湿地沉积物中Cu和Hg含量远高于ERM值;As和Zn的含量介于ERL和ERM之间;Cd和Pb的含量低于ERL值。

上述结果表明,武河湿地沉积物中,Cu和Hg处于较为严重的污染水平,不利生物毒性效应将会频繁发生,对河流有较大的生态危害性,需引起一定重视;As和Zn有可能发生不利生物毒性效应,对水体有一定污染,可能会对水生生态系统产生负面效应;Cd和Pb处于较轻污染水平,对生态环境影响较小。

Cd元素表层含量较高,远远超过我国《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)二级土壤环境质量标准值,但ERL/ERM评价结果表明Cd的潜在生物毒性并不强,原因可能是武河湿地生态系统与制定效应范围法所采用的生物效应数据库有所差异,生物效应数据库中生物对Cd的耐受性可能比较高。

### 3 结论

(1)湿地表层沉积物中,除Cu和Pb含量符合国家《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)二级标准要求以外,Hg、As、Cd和Zn的含量均高于环境背景值,且6种重金属的变异系数均在14.50%~25.85%,重金属空间分布差异性较小。

(2)垂直方向上,除As和Hg含量变化较为明显外,其他4种重金属元素含量变化相对平缓,且总体的变化趋势是随着土层深度的增加含量有所降低。

(3)污染评价的结果表明,武河湿地表层沉积物中Hg内梅罗污染综合指数最大,为3.74,属于重度污染;Cd为2.13,属于中度污染;As、Zn属于轻度污染;Cu、Pb的污染程度处于安全等级。各重金属的内梅罗综合污染指数按由高到低依次为Hg、Cd、As、Zn、Cu、Pb。

(4)潜在生态风险指数表明,武河湿地表层沉积物中6种重金属对该区域构成极强的潜在生态危害,风险程度由高到低依次为Hg、Cd、As、Zn、Cu、Pb,与内梅罗综合污染指数评价结果一致,其中Hg的潜在生态风险最大。

(5)参照SQGs基准,武河湿地表层沉积物中Cu和Hg含量高于ERM值,对水生生态系统有很强毒性;As和Zn的含量介于ERL和ERM之间,可能会对水域生物产生一定的毒性。

### 参考文献

- [1] 叶华香,臧淑英,张丽娟,等. 扎龙湿地沉积物重金属空间分布特征及其潜在生态风险评价[J]. 环境科学,2013,34(4):1333-1339.
- [2] 毛志刚,谷孝鸿,陆小明,等. 太湖东部不同类型湖区疏浚后沉积物重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 环境科学,2014,35(1):186-193.
- [3] 傅鹏,王飞,马秀平,等. 沁河沉积物重金属垂直分布特征与风险评价[J]. 应用与环境生物学报,2013,19(2):305-312.
- [4] 简敏菲,李玲玉,徐鹏飞,等. 鄱阳湖-乐安河湿地水土环境中重金属污染的时空分布特征[J]. 环境科学,2014,35(5):1759-1765.
- [5] 刘庆,谢文军,游俊娥,等. 湿地沉积物重金属环境化学行为研究进展[J]. 土壤,2013,45(1):8-16.
- [6] 祝云龙,姜加虎. 湖泊湿地沉积物重金属污染的研究现状与进展[J]. 安徽农业科学,2010,38(22):11902-11905,11928.
- [7] 徐明露,方凤满,林跃胜. 湿地土壤重金属污染特征、来源及风险评价研究进展[J]. 土壤通报,2015,46(3):762-768.

确分析此 16 种有机磷农药。

每组加标水平同做 3 个平行,计算加标回收率和相对标准偏差(RSD),结果见表 4。由表 4 可知,16 种有机磷 2 个添加水平的回收率在 71.96% ~ 117.21%,RSD 在 1.73% ~ 12.84%,均能满足日常检测需求。

表 4 方法加标回收率及精密度

Fig. 4 The recovery and precision of this method

农药 Pesticides	添加水平 Adding level mg/kg	回收率 Recovery %	RSD ( $n=3$ ) %
敌敌畏 Dichlorvos	0.08	90.42	6.56
	0.20	90.50	5.77
甲胺磷 Methamidophos	0.08	86.67	5.98
	0.20	80.33	6.36
乙酰甲胺磷 Acephate	0.08	82.75	6.80
	0.20	81.50	3.42
甲拌磷 Phorate	0.08	92.29	5.03
	0.20	85.67	4.72
氧化乐果 Omethoate	0.08	99.17	11.21
	0.20	87.33	1.73
二嗪磷 Diazinon	0.08	96.79	2.99
	0.20	91.50	5.21
乐果 Dimethoate	0.08	93.50	10.90
	0.20	92.17	5.35
甲基对硫磷 Parathion-methyl	0.08	115.42	3.80
	0.20	108.33	5.25
毒死蜱 Chlorpyrifos	0.08	71.96	6.80
	0.20	73.17	10.90
对硫磷 Parathion-ethyl	0.08	102.63	5.09
	0.20	98.33	3.46
甲基异柳磷 Isufenphos-methyl	0.08	117.21	10.18
	0.20	101.33	9.67
水胺硫磷 Isocarbophos	0.08	110.38	6.25
	0.20	100.83	7.09
丙溴磷 Profenofos	0.08	101.92	11.69
	0.20	86.67	6.43
三唑磷 Triazophos	0.08	115.42	12.84
	0.20	104.17	5.96
伏杀硫磷 Phosalone	0.08	92.29	8.73
	0.20	86.00	8.58
亚胺硫磷 Phosmet	0.08	86.46	9.21
	0.20	72.58	5.11

### 3 讨论

在样品净化处理过程中,使极性较强的农药分配于乙腈

相,脂肪和其他极性较弱的杂质分配于正己烷相,从而达到目标检测物与杂质的基本分离,联合石墨化碳黑小柱萃取,进一步去除了残留在乙腈相中的少量油脂,取得了良好的净化效果。火腿基质配制标准溶液消除基质效应,液液二次萃取可提高部分分配至正己烷相中的二嗪农、毒死蜱、甲基异柳磷、丙溴磷等农药的回收率,低温真空浓缩可减少甲拌磷等易挥发农药的损失,16 种农药的加标回收率均能达到国标方法的要求。

综上所述,该方法具有操作简便、成本低廉、测定结果准确可靠、灵敏度高特点,适用于火腿中有机磷农药残留检测实际工作的需要。

### 参考文献

- [1] 中华人民共和国卫生部. 蔬菜中有机磷和氨基甲酸酯类农药残留量的快速检测:GB/T5009.199—2003[S]. 北京:中国标准出版社,2003.
- [2] 黄行九,王连超,孙宇峰,等. 固相微萃取/二氧化锡气体传感器联用技术对果蔬中有机磷农药残留的快速检测[J]. 分析化学,2005,23(3):363-365.
- [3] 饶志明,王建宁,李隆弟,等. 流动注射化学发光测定甲基对硫磷[J]. 分析化学,2001,29(4):373-377.
- [4] 万益群,谢明勇. 毛细管气相色谱法测定中药中有机磷农药残留量[J]. 分析科学学报,2005,21(3):286-288.
- [5] 顾明松,罗毅. 毛细管气相色谱法测定七种热不稳定有机磷农药[J]. 环境化学,1995,14(3):226-229.
- [6] 李永新,孙成均,赵剑虹,等. 高效液相色谱法同时测定蔬菜水果中的 12 种农药残留[J]. 色谱,2006,24(3):251-255.
- [7] 万益群,李艳霞. 气相色谱-质谱法同时测定中药中有机磷和有机氮农药残留量[J]. 分析测试学报,2005,24(3):90-94.
- [8] 刘庆斌,张睿,王海涛,等. 高效液相色谱串联质谱法对茄子中 11 种有机磷农药残留的检测[J]. 分析测试学报,2010,29(1):73-76.
- [9] 盛华栋,廖上富,鲁燕骅. 凝胶渗透色谱技术(GPC)分离检测火腿肉中敌敌畏的残留方法研究[J]. 浙江农业科学,2008,1(3):374-376.
- [10] 张从兰,张泽英. 火腿中敌敌畏的气相色谱检测[J]. 现代农业科学,2009,16(10):10-12.
- [11] 吴通华,田真. 气相色谱法快速检测火腿中的敌敌畏[J]. 实用医技杂志,2004,11(6):1015
- [12] 中华人民共和国卫生部. 食品中有机磷农药残留量的测定:GB/T 5009.20—2003[S]. 北京:中国标准出版社,2003.
- [13] 张艳. 农药残留分析中不同提取溶剂的评价[J]. 甘肃农业科技,2006(9):28-29.
- [14] 滕小沛,吴巧珍,沈小婉. 气相色谱法同时测定肉、鱼类 4 种有机磷农药残留量[J]. 中国公共卫生,1993,9(3):116-117.
- [15] 张卫锋,洪振涛,李嘉静. 气相色谱法测定咸鱼中的敌百虫和敌敌畏[J]. 中国兽药杂志,2007,41(6):14-16.
- [16] 王耀,刘少彬,谢翠美,等. 加速溶剂萃取凝胶渗透色谱/固相萃取进口气相色谱质谱法测定咸鱼中有机磷农药残留[J]. 分析化学,2011,39(1):67-71.

(上接第 62 页)

- [8] 王淑军,刘佩楼,徐世鹏,等. 临沂市武河湿地的设计及其水质净化效果分析[J]. 中国给水排水,2011,27(22):61-64.
- [9] 徐中义,陈敬安,张阳,等. 阿哈水库沉积物重金属形态分布及生态风险评价[J]. 西南师范大学学报(自然科学版),2014,39(3):71-76.
- [10] 范拴喜,甘卓亭,李美娟,等. 土壤重金属污染评价方法进展[J]. 中国农学通报,2010,26(17):310-315.
- [11] 周志勇,邱继彩. 汴河沉积物重金属(Cu,Zn,Cd)的污染评价[J]. 环境保护科学,2013,39(3):95-98.
- [12] 徐勇,马绍赛,陈聚法,等. 大沽河湿地表层沉积物重金属分布特征及

污染评价[J]. 农业环境科学学报,2012,31(6):1209-1216.

- [13] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. Water Res,1980,14(8):975-1001.
- [14] 孙敏华,姜翠玲,张鹏,等. 太湖流域梁塘河沉积物重金属生态风险评价[J]. 环境工程,2015,33(8):118-122.
- [15] 焦永杰,霍宁,董菁,等. 大沽排污河口地区沉积物中重金属污染及其潜在生物毒性风险评价[J]. 城市环境与城市生态,2014,27(3):39-42.
- [16] 王世和. 人工湿地污水处理理论与技术[M]. 北京:科学出版社,2007:184.