

刘子赫, 孟瑞红, 代辉祥, 等. 基于改进地累积指数法的沉积物重金属污染评价[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(9): 2157–2164.

LIU Zi-he, MENG Rui-hong, DAI Hui-xiang, et al. Evaluation of heavy metals pollution in surface sediments using an improved geo-accumulation index method[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(9): 2157–2164.

## 基于改进地累积指数法的沉积物重金属污染评价

刘子赫<sup>1</sup>, 孟瑞红<sup>1</sup>, 代辉祥<sup>1</sup>, 洪庆洋<sup>1</sup>, 闫秋鹤<sup>1</sup>, 刘彦廷<sup>1</sup>, 王洪涛<sup>1\*</sup>, 陈 坦<sup>2\*</sup>

(1. 清华大学环境学院, 北京 100084; 2. 中央民族大学生命与环境科学学院, 北京 100081)

**摘 要:** 沉积物中重金属污染评价的常用方法——地累积指数法, 可定量分析确定点位特定重金属污染程度, 但在流域重金属污染评价或多种重金属复合污染评价中难以适用。针对特定重金属污染评价情景, 本文将最大浓度与浓度平均值以内梅罗指数法引入地累积指数法中; 针对复合污染评价情景, 综合考虑重金属浓度及其生态毒性, 提出“等当量生态毒性指数”的概念, 以此为依据筛选出生态危害贡献最大的重金属, 将其浓度变化指数及多种重金属浓度变化指数的平均值以内梅罗指数法引入地累积指数法中。改进的地累积指数法既考虑了重金属浓度的最大值, 又兼顾各重金属的毒性特征。本文以丹江口水库支流朝北河沉积物中重金属的污染评价为例, 验证改进的地累积指数法的评价结果。在评价流域特定重金属污染时, 改进的地累积指数法避免了地累积指数取平均值忽视重污染点位的问题, 能够有效识别出流域内 Hg 元素在个别点位存在的严重污染, 各重金属污染等级排序结果更有利于全面反映流域内重金属污染情况。在评价重金属复合污染时, 改进的地累积指数法与潜在生态危害指数法的评价结果总体一致, 且有效避免了潜在生态危害指数法直接利用未修正重金属毒性系数造成的评价结果不合理的问题。

**关键词:** 沉积物; 重金属; 污染评价; 改进的地累积指数法; 等当量生态毒性指数

中图分类号: X824 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2019)09-2157-08 doi:10.11654/jaes.2019-0140

### Evaluation of heavy metals pollution in surface sediments using an improved geo-accumulation index method

LIU Zi-he<sup>1</sup>, MENG Rui-hong<sup>1</sup>, DAI Hui-xiang<sup>1</sup>, HONG Qing-yang<sup>1</sup>, YAN Qiu-he<sup>1</sup>, LIU Yan-ting<sup>1</sup>, WANG Hong-tao<sup>1\*</sup>, CHEN Tan<sup>2\*</sup>

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. College of Life and Environmental Sciences, Minzu University of China, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The geo-accumulation index method (GAI) is a commonly used approach for the quantitative assessment of heavy metal pollution in sediments. However, it can hardly be adapted to conduct an integrated evaluation of multi-heavy metals pollution in an entire river basin as it focuses only on a specific heavy metal in individual sampling locations. This investigation presents a novel approach in which pollution of multi-heavy metals sampled from different locations in a basin can be systematically assessed. Two indicators of both maximum and average concentrations were embedded into the GAI method through the Nemerow index method. The concept of “Equivalent Eco-Toxicity Index” was proposed considering the integrated effects on environment as different heavy metals have different eco-toxicities and different concentrations. This improved approach used the maximum concentration of heavy metals that plays a key role in the assessment, as well as the eco-toxicity of all metals presented. Therefore, a more integrated assessment result was obtained. The improved Geo-Accumulation Index (IGAI) approach was employed and validated for evaluating heavy metal pollution in the sediments of the Chaobei river catchment (a river branch of Danjiangkou reservoir basin). That IGAI approach avoided the problem of averaging the heavy pollution points used

收稿日期: 2019-02-10 录用日期: 2019-04-23

作者简介: 刘子赫(1993—), 女, 天津人, 硕士研究生, 从事场地污染调查与修复研究。E-mail: 15510309177@163.com

\*通信作者: 王洪涛 E-mail: htwang@mail.tsinghua.edu.cn; 陈 坦 E-mail: chentan05@tsinghua.org.cn

基金项目: 国家科技重大专项(2015ZX07205-003, 2017ZX07205-001); 国家自然科学基金专项项目(5157812)

**Project supported:** The National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (2015ZX07205-003, 2017ZX07205-001); The Special Funds of the National Natural Science Foundation of China (5157812)

by conventional GAI. It could effectively express the serious pollution condition of Hg at individual points. The results of the pollution ranking sequence of different heavy metals could systematically reflect the pollution status at the catchment. In assessing the composite pollution of heavy metals, the IGAI approach produced similar results as the Potential Eco-Hazard Index method, but with much less deviation caused by using uncorrected heavy metal toxicity coefficients as in the previous study.

**Keywords:** sediment; heavy metal; pollution evaluation; improved geo-accumulation index method; equivalent ecotoxicity index

沉积物是水体生态系统的重要组成部分,既是水体中重金属主要的汇,也是水体中重金属重要的源。在适当条件下沉积物中的重金属会再次释放到上覆水中,引起河流的“二次污染”<sup>[1-3]</sup>。因此,加强沉积物中重金属的浓度监测及污染评价尤为重要。近年来,该领域已成为研究热点,主要涉及海湾、湖泊、水库和大型河流等水体<sup>[4-11]</sup>,评价结果既可反映人类活动对水体造成的污染程度,更可为水体重金属污染控制提供依据,保障农业灌溉用水和饮用水安全。

沉积物重金属污染评价方法主要为指数评价法,包括污染负荷指数法、地累积指数法、潜在生态危害指数法及沉积物富集系数法等<sup>[12-13]</sup>,以实测浓度与沉积物背景值为基础,通过不同计算公式和分级标准,评价重金属污染程度<sup>[14]</sup>。如高秋生等<sup>[15]</sup>利用综合污染指数法、地累积指数法和潜在生态危害指数法对白洋淀重金属污染程度进行评价;乔飞等<sup>[16]</sup>采用地累积指数法和综合污染指数法评价了岷江干流表层沉积物中 As、Cd、Cr 等 6 种重金属的污染程度;Agah 等<sup>[17]</sup>采用富集系数法和潜在生态危害指数法评价了查赫巴尔湾 Al、Cr、V 等 10 种重金属污染程度;Shah 等<sup>[18]</sup>运用地累积指数法和富集系数法评价了印度泰普提布河河口底泥重金属污染情况。但指数评价法仍存在单点和流域评价兼顾性较差、重金属浓度及其毒性综合应用薄弱的问题,此外不同重金属毒性数据等量化的方法也有待进一步研究<sup>[19]</sup>。其中,地累积指数法是目前应用最广泛的评价方法,可定量评价采样点特定重金属的污染程度,但实际工作中需要开展多位点或多种重金属复合污染评价,地累积指数法难以适用<sup>[20]</sup>。

本文综合考虑重金属浓度及其生态毒性,以内梅罗指数法将平均值和极值引入地累积指数的计算公

式中,提出改进的地累积指数法并应用验证。以丹江口水库主要支流朝北河(钒矿厂下游段)为例,测量水体沉积物中断面标志性重金属元素钒(V)和 5 种重点防控的其他重金属汞(Hg)、铬(Cr)、铅(Pb)、砷(As)和镉(Cd)的浓度,应用改进的地累积指数法评价朝北河沉积物中的重金属污染程度,并将结果与地累积指数法和潜在生态危害指数法的评价结果比较,验证改进的地累积指数法在评价流域重金属污染程度及多种重金属复合污染评价时的有效性和全面性。

1 地累积指数法及其改进

1.1 地累积指数法

德国学者 Muller 首先提出了地累积指数法<sup>[21]</sup>,可定量评价水体沉积物中特定重金属的污染程度。地累积指数考虑了自然地质过程,通过重金属元素实测值相对于环境背景值的变化,能直观反映重金属的污染水平<sup>[22-23]</sup>,计算方法如下:

$$I_{geo} = \log_2(C_i / KB_i)$$
 (1)

式中: $I_{geo}$ 为地累积指数; $C_i$ 为沉积物中第*i*种重金属的浓度,mg·kg<sup>-1</sup>;  $B_i$ 为沉积物中第*i*种重金属元素的地球环境背景值,本研究中依据丹江口沉积物背景值取值,mg·kg<sup>-1</sup>;  $K$ 为变动转换系数,考虑各地岩石差异可能会引起背景值的变动,一般取 1.5;  $C_i / KB_i$ 为第*i*种重金属的浓度变化指数。地累积指数的变化可以反映出采样点沉积物特性以及污染来源的变化,分级标准见表 1<sup>[24]</sup>。

1.2 针对流域内特定重金属污染评价的改进地累积指数法

针对地累积指数法难以评价流域内特定重金属污染水平的问题,以内梅罗指数法代换地累积指数计算公式的参数,提出改进的地累积指数法。内梅罗指

表 1 地累积指数法分级标准<sup>[24]</sup>  
Table 1 Classification of geo-accumulation index<sup>[24]</sup>

| $I_{geo}$    | <0  | 0~1    | 1~2  | 2~3     | 3~4  | 4~5     | >5   |
|--------------|-----|--------|------|---------|------|---------|------|
| $I_{geo}$ 级别 | I   | II     | III  | IV      | V    | VI      | VII  |
| 污染程度         | 无污染 | 无到中度污染 | 中度污染 | 中度到强度污染 | 强度污染 | 强度到极强污染 | 极强污染 |

数法<sup>[25-26]</sup>是基于单因子的分指数结果,取最大分指数和分指数均值的计算方法,既能体现单因子的影响,又能反映多因子的综合情况。本研究利用流域内各采样点重金属浓度的平均值及重金属浓度最大值的平方平均数代替公式(1)单一重金属浓度,使其既能综合考虑各采样点重金属的污染情况,同时突出严重污染的点位,有效评价流域特定重金属的污染程度。改进的地累积指数法计算公式如下:

$$P_{ave1} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_n / KB) \quad (2)$$

$$P_{max1} = C_{max} / KB \quad (3)$$

$$I_{m1} = \log_2 \sqrt{(P_{ave1}^2 + P_{max1}^2) / 2} \quad (4)$$

式中: $P_{ave1}$ 为流域内 $n$ 个采样点重金属浓度变化指数的平均值; $C_n$ 为第 $n$ 个采样点重金属浓度, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $B$ 为特定重金属的环境背景值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $P_{max1}$ 为浓度最大的采样点的重金属浓度变化指数; $C_{max}$ 为重金属浓度最大值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $I_{m1}$ 为改进的地累积指数。 $K$ 取1.5;沿用原地累积指数法分级标准(见表1)。

### 1.3 针对确定点位多种重金属复合污染评价的改进地累积指数法

针对确定点位多种重金属复合污染评价的问题,评价过程不仅需要考虑各种重金属浓度,还需考虑其对生态环境表现出的毒性大小。本文提出反映重金属生态危害特征的毒性数据当量化概念——等当量生态毒性指数( $W_i$ ),筛选出生态危害贡献最大的重金属,基于该指数改进原有的地累积指数法。

#### 1.3.1 等当量生态毒性指数的确定

重金属的环境质量标准限值及其毒性系数是评价重金属生态危害性的重要指标。重金属环境质量标准限值可以反映重金属的理化性质及其累积效应<sup>[27]</sup>,重金属的毒性系数可以体现其毒性强度大小及上覆水对重金属的敏感程度<sup>[23]</sup>。综合考虑两者共同

影响,提出等当量生态毒性指数( $W_i$ )的概念。等当量生态毒性指数可以筛选出对生态危害贡献最大的重金属,避免只考虑浓度而忽视毒性。

(1)相关性权重值 $W_{li}$ 。一般情况下,某种重金属的危害性与其土壤污染风险筛选值呈反比<sup>[28]</sup>,即重金属元素的风险筛选值越低,该元素的生态危害性越大。将各重金属的土壤污染风险筛选值( $S_i$ )的最大值 $S_{max}$ 与 $S_i$ 比较,即第 $i$ 种重金属的相关性比值( $R_i$ )。 $R_i$ 的大小可以反映该元素对外界危害性的相对强弱,重金属元素 $R_i$ 值越大,其对生态环境表现出的危害越大。重金属的相关性比值( $R_i$ )及相关性权重值( $W_{li}$ )计算公式为:

$$R_i = S_{max} / S_i \quad (5)$$

$$W_{li} = R_i / \sum_{i=1}^n S_i \quad (6)$$

(2)毒性系数权重值 $W_{2i}$ 。不同重金属对生态环境产生的影响不同,重金属的毒性系数可以反映重金属的生态危害性。因此在设计等当量生态毒性指数时,将重金属的毒性系数作为重要的一项。毒性系数权重值( $W_{2i}$ )为:

$$W_{2i} = T_i / \sum_{i=1}^n T_i \quad (7)$$

式中: $T_i$ 为第 $i$ 种重金属的毒性系数。

(3)两项权重( $W_{li}$ 、 $W_{2i}$ )都能反映重金属的毒性,权重值无数量级上的差异,综合考虑本文采用上述二者的算术平均值定义等当量生态毒性指数( $W_i$ ),计算公式如下:

$$W_i = (W_{li} + W_{2i}) / 2 \quad (8)$$

土壤环境质量标准列举的重金属的等当量生态毒性指数( $W_i$ )计算结果见表2。

#### 1.3.2 改进的地累积指数法

利用等当量生态毒性指数( $W_i$ )筛选出生态危害

表2 重金属污染物的等当量生态毒性指数( $W_i$ )

Table 2 Equivalent ecotoxicity index of heavy metals ( $W_i$ )

| 重金属 Heavy metals                               | Hg    | Cd    | As    | Ni    | Cu    | V     | Pb    | Zn    | Cr    |
|------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 污染风险筛选值 $S_i / \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ | 0.6   | 0.6   | 25    | 100   | 100   | 130   | 140   | 250   | 300   |
| $W_{li}$                                       | 0.489 | 0.489 | 0.012 | 0.003 | 0.003 | 0.002 | 0.001 | 0.001 | 0.001 |
| 毒性系数 $T_i^b$                                   | 40    | 30    | 10    | 5     | 5     | 2     | 5     | 1     | 2     |
| $W_{2i}$                                       | 0.4   | 0.3   | 0.1   | 0.05  | 0.05  | 0.02  | 0.05  | 0.01  | 0.02  |
| $W_i$                                          | 0.444 | 0.394 | 0.056 | 0.026 | 0.026 | 0.011 | 0.026 | 0.006 | 0.010 |

注:a.《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018,农用地土壤污染风险筛选值,水田,pH 6.5~7.5);b.数据引自文献[29]。

Note:a. Soil Environmental Quality Risk Control Standard for Soil Contamination of Agricultural Land (GB 15618—2018; risk screening values for soil contamination of agricultural land, paddy field, pH 6.5~7.5); b. Data from reference[29].

贡献最大的重金属,以内梅罗指数法变换地累积指数计算公式的参数,利用采样点全部重金属浓度变化指数的平均值及生态危害贡献最大的重金属的浓度变化指数的平方平均数代替公式(1)单一重金属浓度变化指数,以综合考虑各重金属的污染情况同时突出生态危害贡献最大的重金属,适用于多种重金属复合污染评价。改进的地累积指数法计算公式如下:

$$P_{ave2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_i / KB_i) \quad (9)$$

$$P_{max2} = C_{max} / KB_{max} \quad (10)$$

$$I_{m2} = \log_2 \sqrt{(P_{ave2}^2 + P_{max2}^2) / 2} \quad (11)$$

式中:  $P_{ave2}$  为确定采样点所有重金属元素浓度变化指数的平均值;  $C_i$  为第  $i$  种重金属的浓度,  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $B_i$  为第  $i$  种重金属的环境背景值,  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $P_{max2}$  为等当量生态毒性指数最大的重金属的浓度变化指数;  $C_{max}$  为等当量生态毒性指数最大的重金属浓度,  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $B_{max}$  为该种重金属的环境背景值,  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $I_{m2}$  为改进的地累积指数。  $K$  取 1.5; 沿用原地累积指数法分级标准 (见表 1)。

## 2 应用研究

### 2.1 研究区域概况及样品的采集与分析

丹江口水库位于汉江中上游,是南水北调中线工程水源区<sup>[30]</sup>。水源区附近重金属矿冶采选加工企业

数量较多,废弃污染场地、尾渣堆存场地众多<sup>[31]</sup>,存在潜在的生态危害性,附近水体可能会受到重金属污染。丹江口水库主要支流朝北河位于钒矿厂下游,河流主要污染源包括钒矿厂生产废水、废渣淋滤液、生活垃圾填埋场渗滤液、高架桥降雨径流、周围农田地表径流及农户生活污水。同时,重金属可能会通过灌溉水或地下水迁移到农作物中并通过食物链最终危害到居民的健康,因此以该水体沉积物作为研究对象具有重要实际意义。

2015—2017 年多次现场试验测得朝北河丰水期 (5—9 月)、平水期、枯水期 (12 月—次年 2 月) 的水量分别为  $1440 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  及  $72 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , 属于小型季节性河流。选取 9 个采样点,具体点位如图 1 所示。沉积物采集避开底质不稳定处和水草茂盛处,采集 0~20 cm 的样品,取 1 kg 装入聚乙烯密封袋中,驱尽空气密闭,在 0~4 °C 下保存。

采用硝酸-盐酸混合试剂在沸水浴中加热消解试样,消解后用硼氢化钾将样品中所含 Hg 还原成原子态 Hg,使用原子荧光分光光度计 (北京普析通用仪器有限公司, PF5 型) 测定沉积物中总 Hg 的含量浓度。使用电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS; 美国 PerkinElmer, NexION 350X 型) 测定沉积物中 V、Cr、Pb、As 和 Cd 5 种重金属的浓度。精密度和准确度控制等严格按照《农用地土壤污染状况详查质量保证与

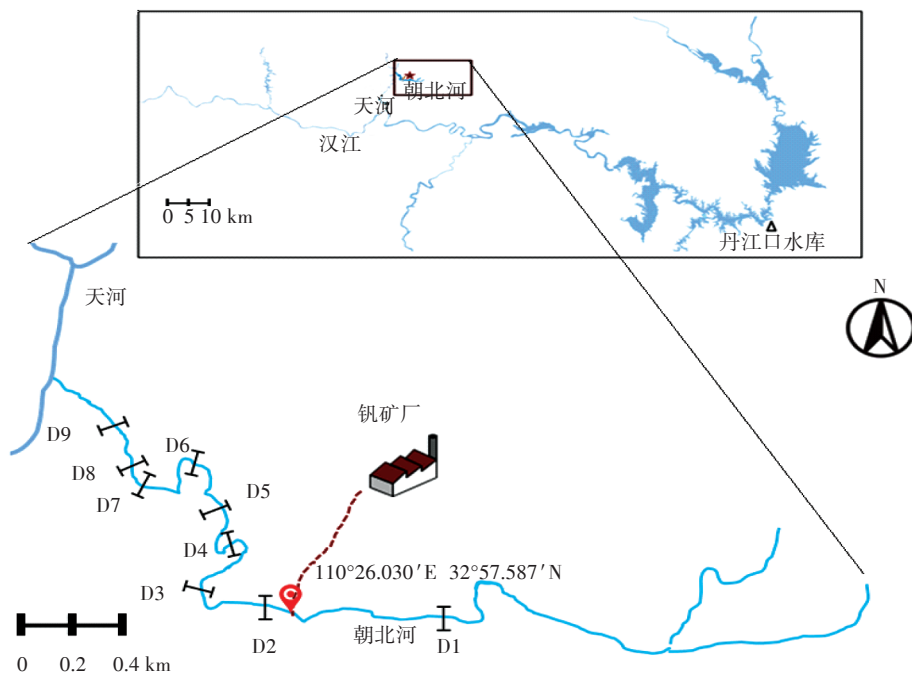


图 1 研究区位置及采样点分布

Figure 1 Location of the study area and distribution of the sampling points

质量控制技术规定》执行。每批样品分析3个空白试样,标准曲线的相关系数大于0.999。每批样品中,分析一个试剂空白加标,加标回收率在80%~120%之间。

2.2 朝北河沉积物重金属含量

朝北河沉积物样品中V、Hg、Cr、Pb、As和Cd 6种重金属元素平均浓度分别为71.4、0.099、43.9、16.8、4.55 mg·kg<sup>-1</sup>和0.382 mg·kg<sup>-1</sup>(见表3),均低于我国农用地土壤污染风险筛选值(GB 15618—2018),沉积物中重金属对环境危害风险极低。与丹江口沉积物背景值相比,沉积物中仅Hg的平均浓度略高,是背景值的1.41倍,Cr的平均浓度与背景值基本一致,其他重金属元素平均浓度均低于背景值。重金属Hg、Cd、V和Cr分别在1、1、2和6个采样点的浓度高于背景值。朝北河沉积物中Pb的变异系数较小(9.7%),小于10%,表现出弱变异性,表明沉积物中Pb的空间分布较均匀;而V、Cr、As、Cd的变异系数(25.9%~62.4%)在10%~100%,呈现中等变异强度。Hg的变异系数(184.2%)远超过100%,表现出强变异性,说明Hg元素在各采样点间的差异极大。采样点Hg元素浓度的偏度和峰度都较大,表明测得的重金属浓度在空间分布上极不均匀,与实测结果D7采样点浓度远高于其他采样点相吻合。分析原因可能是人为异常排放引起的D7采样点Hg浓度严重超标,怀疑D7采样点附近存在点源污染。其余重金属元素的浓度大体符合正态分布。

2.3 流域特定重金属污染评价结果

分别利用地累积指数法及其改进方法评价流域

内特定重金属的污染程度。采用地累积指数取平均值的方法评价流域内特定重金属污染情况,各重金属污染等级排序依次为Cr>V>Hg>Pb>Cd>As(见表4),6种重金属均无污染。改进的地累积指数法的评价结果表明,各重金属污染等级排序依次为Hg>V>Cr>Cd>Pb>As,其中Hg处于中度污染水平,其余重金属均无污染。重金属Hg的评价结果存在较大差异的主要原因是Hg在D7采样点污染严重,浓度是沉积物背景值的8.3倍,若利用各采样点地累积指数取均值评价流域内特定重金属的污染程度,会出现各点位分担的问题,导致人为忽略污染严重的样点(D7),评价结果为无污染。两种评价结果的重金属污染等级排序存在较大差异,这与各重金属的变异性有关,Hg、V和Cd变异性较强,与3种重金属利用改进的地累积指数法评价时污染等级排序有所上升相符,说明Hg、V和Cd在各采样点浓度分布不均,最大浓度采样点可能存在严重超标,而在取均值计算时被忽略掉。改进的地累积指数法在兼顾平均值的同时引入污染物最大

表4 地累积指数法与改进的地累积指数法的评价结果  
Table 4 Assessment results of geo-accumulation index method and improved geo-accumulation index method

| 元素<br>Elements | 地累积指数法                       |                             |      | 改进的地累积指数法              |      |
|----------------|------------------------------|-----------------------------|------|------------------------|------|
|                | <i>I</i> <sub>geo</sub> 变化范围 | <i>I</i> <sub>geo</sub> 平均值 | 污染等级 | <i>I</i> <sub>ml</sub> | 污染等级 |
| Hg             | -3.13~2.47                   | -1.17                       | 无污染  | 1.989                  | 中度污染 |
| V              | -2.41~-0.08                  | -0.94                       | 无污染  | -0.351                 | 无污染  |
| Cr             | -1.71~-0.26                  | -0.64                       | 无污染  | -0.406                 | 无污染  |
| Pb             | -1.63~-1.22                  | -1.39                       | 无污染  | -1.298                 | 无污染  |
| As             | -3.01~-1.15                  | -2.03                       | 无污染  | -1.436                 | 无污染  |
| Cd             | -3.10~-0.50                  | -1.94                       | 无污染  | -0.875                 | 无污染  |

表3 沉积物中重金属浓度的描述性统计  
Table 3 Descriptive statistical parameters of heavy metals in sediment

| 参数 Index                                       | V                  | Hg    | Cr     | Pb     | As     | Cd    |
|------------------------------------------------|--------------------|-------|--------|--------|--------|-------|
| 极小值/mg·kg <sup>-1</sup>                        | 23.3               | 0.012 | 20.1   | 14.2   | 2.12   | 0.147 |
| 极大值/mg·kg <sup>-1</sup>                        | 117                | 0.581 | 54.7   | 18.8   | 7.71   | 0.893 |
| 中位数/mg·kg <sup>-1</sup>                        | 74.2               | 0.047 | 47.1   | 17.4   | 4.21   | 0.280 |
| 均值/mg·kg <sup>-1</sup>                         | 71.4               | 0.099 | 43.9   | 16.8   | 4.55   | 0.382 |
| 标准差/mg·kg <sup>-1</sup>                        | 30.4               | 0.182 | 11.4   | 1.6    | 1.90   | 0.239 |
| 变异系数/%                                         | 42.6               | 184.2 | 25.9   | 9.7    | 41.7   | 62.4  |
| 偏度                                             | -0.005             | 2.959 | -1.292 | -0.594 | 0.574  | 1.334 |
| 峰度                                             | -0.568             | 8.821 | 1.158  | -0.899 | -0.561 | 1.579 |
| 农用地土壤污染风险筛选值 <sup>a</sup> /mg·kg <sup>-1</sup> | 130                | 0.6   | 300    | 140    | 25     | 0.6   |
| 丹江口沉积物背景值 <sup>c</sup>                         | 82.40 <sup>b</sup> | 0.07  | 43.81  | 29.20  | 11.42  | 0.84  |

注:a.《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018,农用地土壤污染风险筛选值,水田,pH 6.5~7.5);b.数据引自文献[32];c.数据引自文献[11]。  
Notes:a. Soil Environmental Quality Risk Control Standard for Soil Contamination of Agricultural Land(GB 15618—2018; Risk screening values for soil contamination of agricultural land, paddy field, pH 6.5~7.5); b. Data from reference [32]; c. Data from reference [11].

浓度,因此改进的地累积指数( $I_{mi}$ )大于地累积指数( $I_{geo}$ ),评价结果比地累积指数法评级略高,本研究有效识别出流域内Hg元素在个别采样点存在严重的污染,各重金属污染等级排序更为科学合理。

2.4 特定点位多种重金属复合污染评价结果

本文利用改进的地累积指数法和潜在生态危害指数法评价确定点位多种重金属复合污染的污染情况,比较两种方法的评价结果,验证改进地累积指数法的可行性和有效性。潜在生态危害指数法是一种常用的重金属污染评价方法,侧重于毒理方面的评价,综合考虑了沉积物中重金属浓度、毒性水平及评价区域的敏感度等因素,将重金属潜在的生态危害划分为四级<sup>[33]</sup>。潜在生态危害指数( $RI$ )为:

$$RI=\sum_{i=1}^n\left(T_i\times\frac{C_i}{C_{i0}}\right) \tag{12}$$

式中: $T_i$ 、 $C_i$ 、 $C_{i0}$ 分别为第*i*种重金属的毒性系数、实测浓度、环境背景值。Hakanson<sup>[34]</sup>基于Hg、As、Cr、Pb、Cd、Cu、Zn和多氯联苯(PCBs)等8个参数的毒性系数总和(133)提出了生态风险分级划分限值。本文6种重金属的毒性系数总和为89,以此修正潜在生态风险指数分级标准为:<100,轻度危害;100~200,中度危害;200~400,重度危害;≥400,严重危害。

由表5可知,改进的地累积指数法和潜在生态危害评价法对9个采样点的重金属复合污染评价结果基本一致,各采样点重金属污染等级排序依次为D7>D2>D6>D3>D4>D1>D8>D5>D9,除D7点外,其他采样点均无污染。潜在生态危害法评价结果表明D7点为重度危害水平,这与D7点Hg浓度严重超标现象相吻合,且Hg是该研究区域最主要的生态危害因子,其他采样点均处于轻度危害水平。改进的地累积指数

法对D7点评价结果为中度污染水平,相比于潜在风险危害指数法的评价结果等级偏低。分析主要原因是:潜在生态危害指数法在计算时对各重金属的浓度系数和毒性响应系数进行了乘积运算,由于D7采样点不仅Hg浓度严重超标,且Hg具有极强的毒性,因而评价结果为重度污染。但针对不同的研究介质,沉积物理化性质对重金属毒性影响不同,不经修正直接使用已有文献报道的毒性系数会使得评价结果不够科学合理<sup>[35]</sup>。改进的地累积指数法综合考虑重金属毒性指标,通过等当量生态毒性指数筛选出生态危害性最大的重金属元素,但重金属的毒性系数并未参与改进公式的计算,地累积指数计算过程中只对筛选出的重金属浓度变化指数进行运算,从而避免了潜在生态危害法存在的未修正重金属毒性系数的问题。

3 结论

(1)本文构建了兼顾重金属浓度变化指数均值和极值的改进的地累积指数法。针对流域内特定重金属污染的生态风险评价情景,以内梅罗指数法将最大浓度和浓度平均值引入地累积指数法;针对确定点位复合重金属污染的生态风险评价情景,提出反映重金属生态危害特征的“等当量生态毒性指数”概念,筛选出生态危害贡献最大的重金属,建立了涵盖多种重金属的平均浓度变化指数及生态危害最大的重金属浓度变化指数的改进地累积指数法。

(2)本文研究区域朝北河的沉积物中V、Hg、Cr、Pb、As和Cd 6种重金属元素平均浓度分别为71.4、0.099、43.9、16.8、4.55 mg·kg<sup>-1</sup>和0.382 mg·kg<sup>-1</sup>,均低于我国农用地土壤污染风险筛选值,总体上沉积物中重金属的环境危害极低。与丹江口沉积物背景值相比,沉积物中仅Hg的平均浓度偏高,是背景值的1.41倍,Cr的平均浓度与背景值基本一致,其他重金属的平均浓度均低于背景值。

(3)针对流域内特定重金属污染评价时,改进的地累积指数法的评级结果比地累积指数法略高,本应用研究有效识别出流域重金属Hg元素在个别采样点存在的严重污染,各重金属污染等级排序结果更为科学合理;针对确定点位重金属复合污染评价时,改进的地累积指数法与潜在生态危害指数法的评价结果基本一致,且有效避免了潜在生态风险指数法直接利用未修正重金属毒性系数造成的评价结果不合理的问题,验证了改进的地累积指数法的科学性和可行性。

表5 朝北河沉积物中重金属复合污染评价结果

Table 5 Pollution assessment results of heavy metals in sediment of Chaobei River

| 采样点<br>Sites | 潜在生态危害评价 |      | 改进地累积指数评价 |      |
|--------------|----------|------|-----------|------|
|              | $RI$     | 危害等级 | $I_{m2}$  | 污染程度 |
| D1           | 48.383   | 轻度   | -1.119    | 无污染  |
| D2           | 68.315   | 轻度   | -0.878    | 无污染  |
| D3           | 56.779   | 轻度   | -1.044    | 无污染  |
| D4           | 51.273   | 轻度   | -1.093    | 无污染  |
| D5           | 23.456   | 轻度   | -2.110    | 无污染  |
| D6           | 58.863   | 轻度   | -0.903    | 无污染  |
| D7           | 344.044  | 重度   | 2.000     | 中度污染 |
| D8           | 35.985   | 轻度   | -1.504    | 无污染  |
| D9           | 20.376   | 轻度   | -2.510    | 无污染  |

## 参考文献:

- [1] Venkatramanan S, Chung S Y, Ramkumar T, et al. Ecological risk assessment of selected heavy metals in the surface sediments of three estuaries in the southeastern coast of India[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(4):116.
- [2] Li H. Heavy metals in surface sediments along the Weihai coast, China: Distribution, sources and contamination assessment[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 115(1/2):551-558.
- [3] Chen F, Lin J, Qian B, et al. Geochemical assessment and spatial analysis of heavy metals in the surface sediments in the eastern Beibu gulf: A reflection on the industrial development of the South China Coast[J]. *International Journal of Environmental Research & Public Health*, 2018, 15(3):496.
- [4] Liu J J, Ni Z X, Diao Z H, et al. Contamination level, chemical fraction and ecological risk of heavy metals in sediments from Daya Bay, South China Sea[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 128:132-139.
- [5] 曾维特, 杨永鹏, 张东强, 等. 海南岛北部海湾沉积物重金属来源分布主控因素及生态风险评价[J]. 环境科学, 2018, 39(3):1085-1094.
- ZENG Wei-te, YANG Yong-peng, ZHANG Dong-qiang, et al. Sources, distribution of main controlling factors, and potential ecological risk assessment for heavy metals in the surface sediment of Hainan Island north bay, South China[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(3):1085-1094.
- [6] Liu J, Xu Y, Cheng Y, et al. Occurrence and risk assessment of heavy metals in sediments of the Xiangjiang River, China[J]. *Environmental Science & Pollution Research International*, 2017, 24(3):2711.
- [7] 郭泌沙, 刘勇勤, 张凡, 等. 西藏湖泊沉积物重金属元素特征及生态风险评估[J]. 环境科学, 2016, 37(2):490-498.
- GUO Bi-xi, LIU Yong-qin, ZHANG Fan, et al. Characteristics and risk assessment of heavy metals in core sediments from lakes of Tibet[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(2):490-498.
- [8] Han D. Spatial distribution, risk assessment and source identification of heavy metals in sediments of the Yangtze River Estuary, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 115(1/2):141-148.
- [9] 丁之勇, 蒲佳, 吉力力·阿不都外力. 中国主要湖泊表层沉积物重金属污染特征与评价分析[J]. 环境工程, 2017, 35(6):136-141.
- DING Zhi-yong, PU Jia, JILILI Abuduwaili. Heavy metal contamination characteristics and its assessment in surface sediments of major lakes in China[J]. *Environmental Engineering*, 2017, 35(6):136-141.
- [10] 李莹杰, 张列宇, 吴易雯, 等. 江苏省浅水湖泊表层沉积物重金属GIS空间分布及生态风险评价[J]. 环境科学, 2016, 37(4):1321-1329.
- LI Ying-jie, ZHANG Lie-yu, WU Yi-wen, et al. GIS spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of shallow lakes in Jiangsu Province[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(4):1321-1329.
- [11] 赵丽, 王雯雯, 姜霞, 等. 丹江口水库沉积物重金属背景值的确定及潜在生态风险评估[J]. 环境科学, 2016, 37(6):2113-2120.
- ZHAO Li, WANG Wen-wen, JIANG Xia, et al. Determination of background value and potential ecological risk assessment of heavy metals in sediments of the Danjiangkou Reservoir[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(6):2113-2120.
- [12] Nur A S, Ahmad Z A, Mohamad P Z, et al. Application of geoaccumulation index and enrichment factors on the assessment of heavy metal pollution in the sediments[J]. *Environmental Letters*, 2013, 48(2):182-190.
- [13] Soliman N F, Nasr S M, Okbah M A. Potential ecological risk of heavy metals in sediments from the Mediterranean coast, Egypt[J]. *Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 2015, 13(1):70.
- [14] 陈晓燕, 范成五, 瞿飞, 等. 土壤重金属污染评价方法概述[J]. 浙江农业科学, 2017, 58(10):1801-1804.
- CHEN Xiao-yan, FAN Cheng-wu, QU Fei, et al. Overview of evaluation methods of heavy metals pollution in soil[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2017, 58(10):1801-1804.
- [15] 高秋生, 田自强, 焦立新, 等. 白洋淀重金属污染特征与生态风险评价[J]. 环境工程技术学报, 2019, 9(1):66-75.
- GAO Qiu-sheng, TIAN Zi-qiang, JIAO Li-xin, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in Baiyangdian Lake[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2019, 9(1):66-75.
- [16] 乔飞, 时瑶, 秦延文, 等. 岷江干流重金属空间分布特征及污染评价[J]. 环境工程技术学报, 2018, 8(6):602-609.
- QIAO Fei, SHI Yao, QIN Yan-wen, et al. Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in Minjiang River mainstream[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2018, 8(6):602-609.
- [17] Agah H, Saleh A, Bastami, K, et al. Ecological risk, source and preliminary assessment of metals in the surface sediments of Chabahar Bay, Oman Sea[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 107(1):383-388.
- [18] Shah B A, Shah A V, Mistry C B, et al. Assessment of heavy metals in sediments near hazira industrial zone at Tapti River Estuary, Surat, India[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 69(7):2365-2376.
- [19] 陈明, 蔡青云, 徐慧, 等. 水体沉积物重金属污染风险评价研究进展[J]. 生态环境学报, 2015, 24(6):1069-1074.
- CHEN Ming, CAI Qing-yun, XU Hui, et al. Research progress of risk assessment of heavy metals pollution in water body sediment[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(6):1069-1074.
- [20] 许桂苹, 王晓飞, 付洁. 土壤重金属污染评价方法研究综述[J]. 农村经济与科技, 2014, 25(1):71-74.
- XU Gui-ping, WANG Xiao-fei, FU Jie. A review of evaluation methods of heavy metal pollution in soil[J]. *Rural Economy and Science-Technology*, 2014, 25(1):71-74.
- [21] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *Geojournal*, 1969, 2(108):108-118.
- [22] Krzysztof L, Wiechuła D, Korus I. Metal contamination of farming soils affected by industry[J]. *Environment International*, 2004, 30(2):159-165.
- [23] 于常武, 王琳, 高超. 水体沉积物重金属污染地累积指数法和分级提取评价技术的差异[J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版),

- 2015, 35(3):196-199.
- YU Chang-wu, WANG Lin, GAO Chao. Difference between index of geo-accumulation and sequential extraction procedure on evaluating heavy pollution in aquatic sediments[J]. *Journal of Liaoning Institute of Technology(Natural Science Edition)*, 2015, 35(3):196-199.
- [24] Zhang L, Liao Q, Shao S, et al. Heavy metal pollution, fractionation, and potential ecological risks in sediments from Lake Chaohu (Eastern China) and the surrounding rivers[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2015, 122:14115-14131.
- [25] Bi S, Yang Y, Xu C, et al. Distribution of heavy metals and environmental assessment of surface sediment of typical estuaries in eastern China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017:S0025326X17304939.
- [26] Miao R Q, Yan Y F, Bai Y, et al. Assessment of heavy metal contamination of soil in Kunming[J]. *Advanced Materials Research*, 2015 (1092/1093):774-779.
- [27] 张 秀, 易廷辉. 城市土壤重金属评价标准限值探讨[J]. 科学咨询, 2008(13):74-75.
- ZHANG Xiu, YI Ting-hui. Discussion on the limit value of heavy metals assessment criteria in urban soil[J]. *Technology & Management*, 2008(13):74-75.
- [28] 孙 华, 谢 丽, 张金婷, 等. 基于改进内梅罗指数法的棕(褐)地周边土壤重金属污染评价[J]. 环境保护科学, 2018, 44(2):98-102.
- SUN Hua, XIE Li, ZHANG Jin-ting, et al. Evaluation of heavy metal pollution in the soils around the brownfield based on the modified Nemerow Index Method[J]. *Environmental Protection Science*, 2018, 44(2):98-102.
- [29] 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):112-115.
- XU Zheng-qi, NI Shi-jun, TUO Xian-guo, et al. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 31(2):112-115.
- [30] 沈 悦, 李 阳. 南水北调工程水资源生态补偿研究——以丹江口水库为例[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(1):119-124.
- SHEN Yue, LI Yang. Water resources ecological compensation of south to north water diversion project: A case study of the Danjiangkou Reservoir[J]. *Power System and Clean Energy*, 2016, 32(1):119-124.
- [31] 吕志涛. 南水北调中线丹江口水源区(河南省域)矿山地质环境水质安全分析[J]. 地下水, 2008, 30(1):28-31.
- LÜ Zhi-tao. Safety analysis of water quality under the condition of mine geological environment at the water source area of Danjiangkou (in Henan Province) in the middle route of south-to-north water diversion[J]. *Ground Water*, 2008, 30(1):28-31.
- [32] 魏复盛, 杨国治, 蒋德珍, 等. 中国土壤元素背景值基本统计量及其特征[J]. 中国环境监测, 1991, 7(1):1-6.
- WEI Fu-sheng, YANG Guo-zhi, JIANG De-zhen, et al. Basic statistics and characteristics of background values of soil elements in China [J]. *Environmental Monitoring in China*, 1991, 7(1):1-6.
- [33] 李一蒙, 马建华, 刘德新, 等. 开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2015, 36(3):1037-1044.
- LI Yi-meng, MA Jian-hua, LIU De-xin, et al. Assessment of heavy metal pollution and potential ecological risks of urban soils in Kaifeng City, China[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(3):1037-1044.
- [34] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sediment ecological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8):975-1001.
- [35] 王玉军, 吴同亮, 周东美, 等. 农田土壤重金属污染评价研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(12):2365-2378.
- WANG Yu-jun, WU Tong-liang, ZHOU Dong-mei, et al. Advances in soil heavy metal pollution evaluation based on bibliometrics analysis[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(12):2365-2378.