

# 于桥水库上游支流沉积物重金属含量及生态风险评价

胡晓芳, 王祖伟\*, 宋晓旭, 吕佳芮, 陈安冉

(天津师范大学城市与环境科学学院, 天津 300387)

**摘要:** 于桥水库是引滦入津工程重要调蓄水库,也是天津市居民生活饮用水的水源地。分析了于桥水库上游支流沉积物中 Cr、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb 6 种重金属含量及分布特征,通过 Hakanson 生态危害指数法评价沉积物中重金属的潜在生态风险。结果表明:于桥水库上游河流表层沉积物中 Ni、Cu、Zn、Cd 污染超标,高值区大致均在 2 号和 6 号位点,其中 Cd 超标最明显。于桥水库上游三条河流中沙河重金属污染最严重,其潜在生态风险最大。由潜在生态风险系数可知,Cd 为潜在生态风险最大的重金属元素,Cu、Pb 次之。各样点重金属的潜在生态风险指数表明,于桥水库上游支流各样点大部分处于轻微潜在生态危害,八户庄下游为中等生态风险,遵化市上游为强生态风险,遵化市下游为很强生态风险,其中 Cd 在各样点的潜在生态风险指数中贡献最大。Zn-Cd 同源性较强,重金属矿区的分布特征及河道的自然特征是造成于桥水库重金属污染的主要原因。

**关键词:** 沉积物;重金属污染;生态风险评价;来源;于桥水库

**中图分类号:** X820.4    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1672-2043(2013)06-1210-09    doi:10.11654/jaes.2013.06.018

## Concentrations and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments from Tributaries of Yuqiao Reservoir

HU Xiao-fang, WANG Zu-wei\*, SONG Xiao-xu, LÜ Jia-rui, CHEN An-ran

(School of City and Environmental Science, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China)

**Abstract:** Yuqiao Reservoir, an important adjusting reservoir in the project of diverting water from the Luanhe River to Tianjin City, is important water resource for Tianjin City. The potential ecological risk of heavy metals were assessed by using Hankanson ecological risk index methods and the sources of heavy metal contamination were estimated with correlation analysis after the sediments samples from three tributaries of Yuqiao reservoir were collected and the concentrations of heavy metals such as cadmium (Cd), lead (Pb), chromium (Cr), copper (Cu), zinc (Zn), manganese (Mn) and nickel (Ni) were analyzed by ICP-MS. The results showed that sediments of three tributaries of Yuqiao reservoir are uncontaminated by Cr, Pb, lightly contaminated by Ni, Cu, Zn, moderately contaminated by Cd. The Hankanson's ecological risk factor of Cd averagely was 106.78, meaning the highest level ecological risk. The ecological risk of Shahe River in three tributaries was at highest level. The total potential ecological risks of heavy metals in sediments were at low level assessed by potential ecological risk index. The ecological risk of Bahuzhuang sampling site of Shahe River was at medium level ecological risk, the sampling site near Zunhua city was at the intensity level and the Xiliucun sampling site was at high intensity level. There was better correlation between Zn and Cd with correlation analysis. The resource of heavy metals pollutants of three tributaries of Yuqiao Reservoir may be controlled by mining area distribution and riverway shape.

**Keywords:** sediments; heavy metal pollution; ecological risk assessment; source; Yuqiao Reservoir tributaries

水库作为陆地水环境的重要组成部分,在工农业用水、生活用水、水产养殖、旅游开发、跨流域调水及调节区域气候等方面发挥着重要作用<sup>[1]</sup>,其水质的好坏直接或间接影响人类的身体健康和生命安全及城市和社会的可持续发展。沉积物是水环境的基本组成

部分,它既能为水体中的各种生物提供营养物质,同时又是有毒有害物质的贮藏库<sup>[2]</sup>。在众多污染物中,重金属由于其毒性和持久性而成为影响沉积物质量较严重的一类<sup>[3-5]</sup>。通过各种途径进入水体的重金属很容易被水体悬浮物或沉积物所吸附、络合或共同沉淀,从而在水底的沉积物中富集,致使沉积物中重金属浓度相对于水中要高得多<sup>[6]</sup>。因此,沉积物中重金属含量常被用作判别水环境质量的重要参考指标<sup>[7]</sup>。

近年来,国内外学者在河流、湖库及饮用水源地氮磷营养盐、重金属等污染物的污染状况及健康危害

收稿日期:2012-10-31

基金项目:国家自然科学基金项目(40973078)

作者简介:胡晓芳(1987—),女(汉族),内蒙古乌兰察布人,硕士研究生,主要从事土壤重金属污染方面的研究。

E-mail: bthuxiaofang@163.com

\* 通信作者:王祖伟 E-mail: zuweiwang@126.com

方面开展了大量的工作<sup>[8]</sup>,已经研究了一些对土壤及江河湖泊底泥重金属的污染状况。国内已采用 Hakanson 指数法对重金属的潜在生态危害进行评价研究,部分研究使用潜在生态风险指数法进行风险评价,少数仅对底泥重金属污染进行简单的相关性分析<sup>[9]</sup>。在水体健康风险评价中饮用水被认为是对人体健康危害中最重要的一个暴露途径<sup>[10]</sup>。

于桥水库是天津市一座大型水库,是以防洪、城市供水为主,兼顾灌溉、发电等综合利用的大型水利工程,是国家重点大型水库之一。1983 年经过加固增容并纳入引滦入津工程以后,成为天津市唯一的生活饮用水和工农业用水水源地,其主要入库河流为沙河、黎河、淋河三大支流,其中以沙河水量最大。近年来流域和库区周边的社会经济迅速发展,水库受到人类活动的干扰严重,大量的鱼塘、村落、农田形成围库之势,使水库水质污染严重,富营养化进展迅速,水体持久性污染物严重富集,水库水质变差对天津市的供水影响严重<sup>[16]</sup>。本文在分析于桥水库上游沉积物中重金属的含量及其分布特征的基础上,进行了污染程度、来源分析、相关性分析和生态风险评价,其成果可为于桥水库环境质量评价与生态环境保护提供一定的科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

采样时间为 2011 年 10 月,采样点的选取原则为在水流缓慢的水动力条件下未发生扰动的沉积物,用

手持式 GPS 定位系统定位,在于桥水库上游主要入库河流设 14 个采样点(图 1),用塑料小铲采集沉积物表层 0~5 cm 土样,装入聚乙烯塑料袋中于 0~4 ℃ 密闭冷藏保存,带回实验室尽快分析。

### 1.2 样品预处理及分析

采集的样品常温风干后,去除样品中贝壳、杂草、沙石等杂物,混合均匀。为消除不同粒径沉积物样品对重金属吸附的影响,用玛瑙研钵研磨后,先过 150 目(孔径 0.1 mm)筛,再过 200 目(孔径 0.071 mm)筛,将样品分为砂粒和粘粒,装入聚乙烯塑料袋于干燥器中保存,备用。

样品消解方法参照国标四酸( $\text{HNO}_3+\text{HF}+\text{HClO}_4+\text{HCl}$ )消解法(GBT 20260—2006)。采用 ICP-MS 测定沉积物中重金属含量,测定结果用统计软件 SPSS17.0 进行分析,计算结果见表 1。

沉积物砂粒和粘粒中重金属含量分析,由图 2 可知,各样点粘粒重金属含量均大于砂粒重金属含量。由于粘土矿物具有比表面积大、极性、吸附性、离子交换性强等突出特性<sup>[17]</sup>,在水体中是吸附重金属的主要胶体物质,其吸附重金属的能力大于砂粒。

用分析天平分别称量并计算砂粒和粘粒占每个样品的质量百分比  $Q_i$  和  $q_i$ ,利用公式(1)确定最终每个样品的重金属含量。

$$W_i = m_i q_i + M_i Q_i \quad (1)$$

式中: $W$  为沉积物重金属含量; $i$  为采样点编号( $i=1,2,3,\dots,14$ ); $m$  为沉积物中粘粒重金属含量; $M$  为沉积物砂粒中重金属含量; $q$  为沉积物中粘粒的百

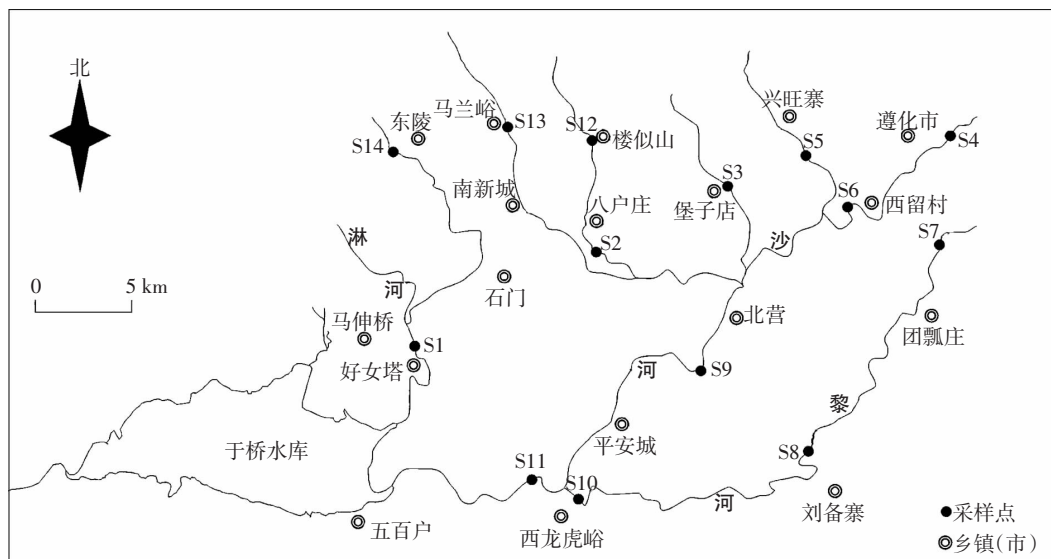


图 1 于桥水库上游沉积物采样点分布

Figure 1 Sampling sites of sediments in the upper reaches of Yuqiao reservoir

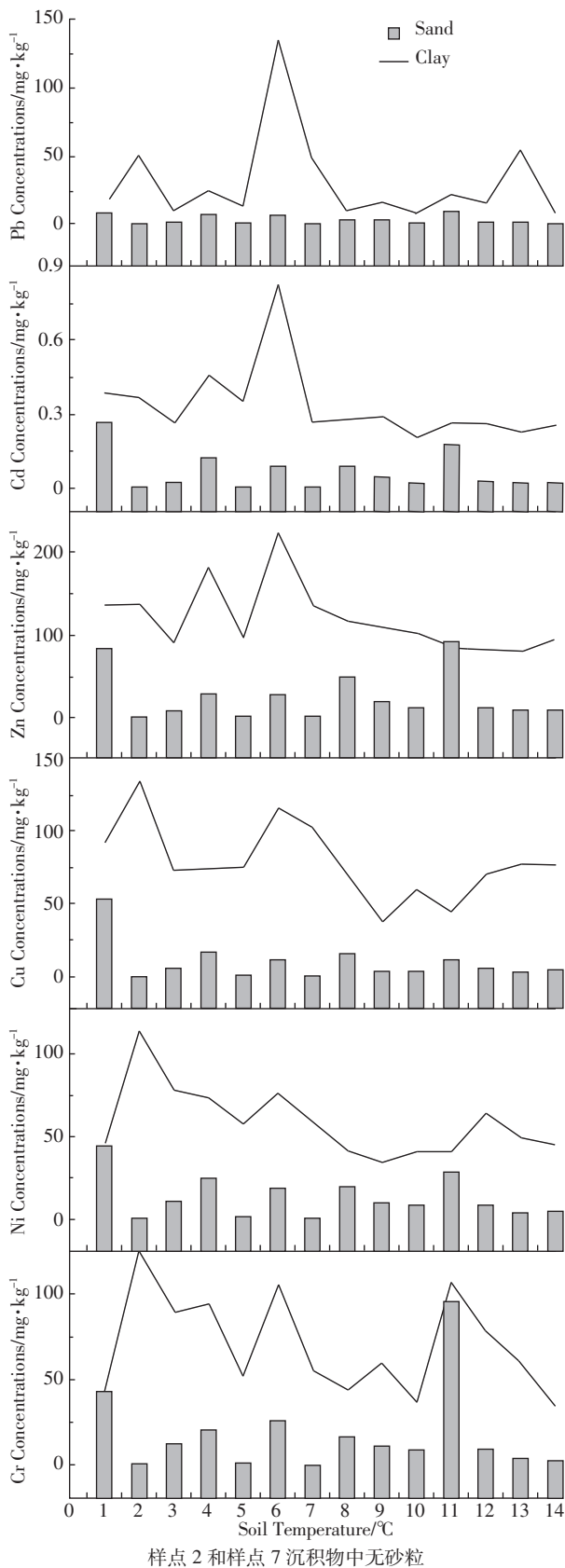


图 2 于桥水库上游各样点沉积物粘粒和砂粒中重金属含量对比  
Figure 2 Comparison between sand and clay of heavy metals in sediments from the upper reaches of Yuqiao Reservoir

表 1 于桥水库上游表层沉积物各采样点重金属含量  
Table 1 Heavy metals concentration of sample sites in surface sediments from the upper reaches of Yuqiao Reservoir( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

| 站点号 | Cr      | Ni      | Cu      | Zn      | Cd    | Pb      |
|-----|---------|---------|---------|---------|-------|---------|
| S1  | 43.002  | 45.200  | 75.389  | 113.907 | 0.337 | 11.262  |
| S2  | 126.571 | 114.941 | 134.817 | 138.902 | 0.377 | 51.827  |
| S3  | 94.438  | 82.988  | 72.351  | 92.200  | 0.262 | 10.744  |
| S4  | 89.274  | 76.863  | 71.375  | 160.996 | 0.458 | 24.879  |
| S5  | 52.285  | 58.144  | 75.330  | 96.689  | 0.353 | 13.532  |
| S6  | 99.391  | 70.761  | 93.616  | 183.531 | 0.661 | 100.834 |
| S7  | 55.773  | 56.191  | 102.999 | 136.700 | 0.269 | 47.038  |
| S8  | 41.338  | 42.069  | 54.668  | 115.257 | 0.253 | 8.957   |
| S9  | 54.455  | 33.955  | 31.820  | 99.363  | 0.260 | 15.815  |
| S10 | 42.743  | 46.707  | 60.000  | 108.747 | 0.214 | 8.198   |
| S11 | 137.367 | 43.533  | 28.431  | 123.493 | 0.278 | 17.217  |
| S12 | 80.776  | 66.390  | 69.779  | 85.644  | 0.265 | 16.916  |
| S13 | 59.943  | 50.291  | 75.360  | 85.085  | 0.239 | 53.377  |
| S14 | 34.400  | 46.256  | 78.003  | 98.854  | 0.259 | 9.050   |

分含量; $Q$  为沉积物中砂粒的百分含量。

2 结果与讨论

2.1 沉积物中重金属的含量与分布

于桥水库水源地上游各采样点表层沉积物重金属含量如表 1 所示。

从表 2 的分析数据可以看出,Cr、Ni、Cu、Zn、Cd 变异系数相对比较小,Pb 的变异系数很大,说明河流人为污染和自身扰动作用比较大<sup>[18]</sup>。

于桥水库上游河流表层沉积物各重金属元素的变化范围为:Cr:34.4~137.367  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,Ni:33.955~114.941  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,Cu:28.431~134.817  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,Zn:85.085~183.531  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,Cd:0.214~0.661  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,Pb:8.198~100.834  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,其中 Cr 以 11 号站点点最高,Ni、Cu 以 2 号站点点最高,Zn、Cd、Pb 以 6 号站点点最高。

与于桥水库接近地区的水库、河流及海域沉积物

表 2 于桥水库上游表层沉积物重金属质量分数  
Table 2 Heavy metals mass fraction of surface sediments from the upper reaches of Yuqiao Reservoir( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

| 元素 | 平均值     | 最小值    | 最大值     | 中值      | 标准偏差   | 变异系数( $C_v$ ) |
|----|---------|--------|---------|---------|--------|---------------|
| Cr | 72.268  | 34.4   | 137.367 | 57.868  | 52.981 | 0.733         |
| Ni | 59.592  | 33.955 | 114.941 | 53.241  | 34.507 | 0.579         |
| Cu | 73.138  | 28.431 | 134.817 | 73.84   | 43.332 | 0.592         |
| Zn | 117.098 | 85.085 | 183.531 | 111.327 | 46.952 | 0.401         |
| Cd | 0.32    | 0.214  | 0.661   | 0.267   | 0.190  | 0.594         |
| Pb | 27.832  | 8.198  | 100.834 | 16.365  | 42.842 | 1.539         |

重金属相比较(表 3),于桥水库沉积物中 Cd 的平均含量处于相对较低的水平;除大伙房水库沉积物中各重金属含量明显高于其他水库、河流及海域外,于桥水库上游沉积物中的重金属含量均高于其他水体沉

积物。  
由图 3 各采样点重金属污染现状分析可知,于桥水库上游 Ni、Cu、Zn、Cd 污染均超标,Ni 含量 93%样点超过土壤环境质量一级标准,57%样点超过土壤环

表 3 于桥水库上游沉积物中重金属与临近水库、河流及海域平均含量比较(mg·kg<sup>-1</sup>)  
Table 3 Comparison of average content of heavy metals in sediments from the upper reaches of Yuqiao Reservoir and other regions(mg·kg<sup>-1</sup>)

| 项目    | Cr    | Ni    | Cu    | Zn     | Cd   | Pb     | 文献来源 |
|-------|-------|-------|-------|--------|------|--------|------|
| 于桥水库  | 72.27 | 59.59 | 73.14 | 117.10 | 0.32 | 27.832 | 本研究  |
| 大伙房水库 | —     | —     | 97.90 | 289.20 | 1.10 | 68.60  | [11] |
| 滦河流域  | 60.40 | 26.15 | 48.07 | 76.42  | 0.30 | 25.55  | [12] |
| 密云水库  | 72.16 | —     | 29.06 | 89.04  | 0.35 | 23.40  | [13] |
| 渤海    | 31.73 | —     | 14.92 | 73.68  | 0.45 | 21.94  | [14] |

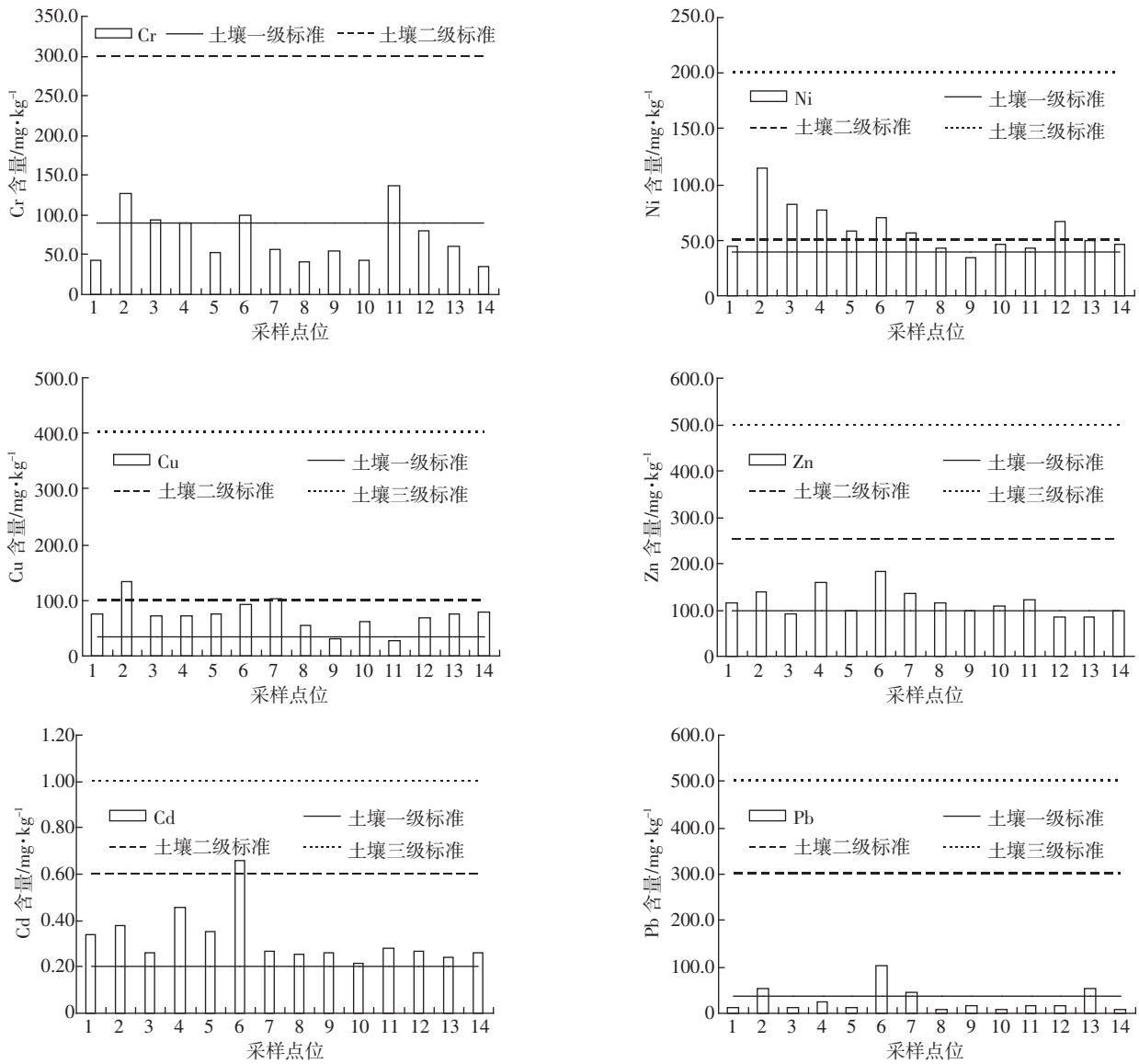


图 3 于桥水库上游各采样点位表层沉积物重金属含量

Figure 3 Concentrations of heavy metals in surface sediments from the upper reaches of Yuqiao Reservoir



境质量二级标准,Cu 含量 86%样点超过土壤环境质量一级标准,14%超过土壤环境质量二级标准,Zn 含量 57%样点超过土壤环境质量一级标准,Cd 含量各样点均超过土壤环境质量一级标准,只有 6 号点超过土壤环境质量二级标准,Ni、Cu 高值区和低值区及 Zn、Cd 高值区和低值区大致相似,最高值均位于 2 号和 6 号点位。

对于桥水库三条支流分别进行各重金属平均含量统计见表 4。

表 4 于桥水库上游支流各重金属平均含量(mg·kg<sup>-1</sup>)

Table 4 Mean concentration of several heavy metals in sediments from the upper reaches of Yuqiao Reservoir(mg·kg<sup>-1</sup>)

| 区域 | Cr     | Ni     | Cu     | Zn      | Cd    | Pb     |
|----|--------|--------|--------|---------|-------|--------|
| 沙河 | 88.278 | 66.430 | 72.542 | 118.434 | 0.350 | 33.905 |
| 淋河 | 38.701 | 45.728 | 76.696 | 106.381 | 0.298 | 10.156 |
| 黎河 | 46.618 | 48.322 | 72.556 | 120.235 | 0.245 | 21.398 |

三条河流重金属污染各不相同。沙河主要受 Cr、Ni、Cd、Pb 的污染高于淋河和黎河,淋河主要受 Cu 污染高于沙河和黎河,黎河主要受 Zn 污染高于沙河和淋河。三条河流污染程度顺序由强到弱分别是:Cr 为沙河>黎河>淋河;Ni 为沙河>黎河>淋河;Cu 为淋河>黎河>沙河;Zn 为黎河>沙河>淋河;Cd 为沙河>淋河>黎河;Pb 为沙河>黎河>淋河。三条河流受污染程度主要以沙河表现最为突出,由于沙河上游经过河北省遵化市,遵化市有丰富的矿产企业<sup>[27]</sup>,淋河和黎河相对污染程度较轻。

## 2.2 沉积物重金属生态风险评价

采用瑞典科学家 Hankanson<sup>[19]</sup>提出的潜在生态风险指数(RI)法,对于桥水库表层沉积物重金属进行生态风险评价,该方法综合了河流沉积物中重金属含量及重金属生态效应、环境效应和毒理学多方面因素,根据重金属性质及环境行为特点,对沉积物中单种或多种重金属污染物造成的污染程度和潜在生态风险危害进行评价,其表达式为:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \cdot C_f^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \cdot \frac{C_i}{C_n^i} \quad (2)$$

式中: $C_f^i$ 为重金属*i*相对于沉积物背景值的污染系数; $C_i$ 为表层沉积物重金属*i*实测值; $C_n^i$ 为沉积物重金属*i*的背景参考值,本文采用国际上常用的工业化以前沉积物中重金属的全球最高背景值及天津市土壤背景值(表 5)<sup>[20]</sup>;  $T_r^i$ 为各重金属的毒性相应系数<sup>[8]</sup>;  $E_r^i$ 为单个重金属的潜在生态危害系数; $RI$ 为多种重

表 5 沉积物中重金属背景参考值( $C_n^i$ )和毒性系数( $T_r^i$ )

Table 5 Background reference values( $C_n^i$ ) and toxicity coefficient( $T_r^i$ ) of heavy metals in sediments

| 元素                                      | Cr    | Ni     | Cu    | Zn     | Cd   | Pb    |
|-----------------------------------------|-------|--------|-------|--------|------|-------|
| $T_r^i$                                 | 2     | 2      | 5     | 1      | 30   | 5     |
| 工业化前全球沉积物<br>重金属背景值/mg·kg <sup>-1</sup> | 90.00 | 89.00* | 50.00 | 175.00 | 1.00 | 70.00 |
| 天津市土壤背景值/mg·kg <sup>-1</sup>            | 82.50 | 32.29  | 28.00 | 76.27  | 0.09 | 20.00 |

注:\*表示文献中未列出 Ni 含量背景值,本文采用地壳中该重金属含量值<sup>[21]</sup>。

金属潜在生态风险危害指数。

$E_r^i$ 描述某一污染物(元素)的潜在污染危害程度,分为 5 个等级; $RI$ 是描述某一点多种污染物的潜在生态污染危害指数的综合值<sup>[8,22-23]</sup>,分为 4 个等级(表 6)。

表 6 潜在生态危害指数和分级关系

Table 6 Indices and grades of potential ecological risk assessment

|              |                            |                                             |                                              |                                         |                  |
|--------------|----------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------|------------------|
| 潜在生态<br>危害指数 | $E_r^i < 40$<br>$RI < 150$ | $40 \leq E_r^i < 80$<br>$150 \leq RI < 300$ | $80 \leq E_r^i < 160$<br>$300 \leq RI < 600$ | $160 \leq E_r^i < 320$<br>$RI \geq 600$ | $E_r^i \geq 320$ |
| 危害程度         | 轻度                         | 中度                                          | 强                                            | 很强                                      | 极强               |

由表 7 可知,以工业化前全球沉积物中重金属含量的最高背景值为标准,于桥水库上游支流重金属潜在生态危害总体上均属于轻度危害,各样点重金属的单项潜在生态风险系数( $E_r^i$ )从大到小的顺序为 Cd>Cu>Pb>Cr>Ni>Zn,各样点重金属的潜在生态风险指数(RI)表明沙河>淋河>黎河。

以天津市土壤背景值为标准<sup>[24-25]</sup>,于桥水库上游支流沉积物中 Cd 的潜在生态风险系数在样点 6 达到很强生态风险,其余 13 个样点中均达到强生态风险的范畴,Cr、Ni、Cu、Zn、Pb 的潜在生态风险系数在各样点均处于轻微潜在生态风险。各样点重金属的潜在生态风险指数表明:样点 2 为中等生态风险,其 Cd 和 Cu 的贡献水平分别为 71.93%和 13.78%;样点 4(遵化市)为强生态风险,其 Cd 的贡献水平达到 84.5%;样点 6(遵化市下游)为很强生态风险,其 Cd、Pb 和 Cu 的贡献水平分别为 81.16%、0.09%和 0.06%。Cd 为主要的潜在生态风险重金属元素,由于遵化市有大量的工矿企业<sup>[26-27]</sup>,其排放的工业废水及生活污水中的重金属在该河段底泥中沉积,导致样点 4 和 6 沉积物有较高的潜在生态危害。三条河流重金属潜在生态危害指数由大到小为沙河>淋河>黎河,各重金属潜在生态危害程度由大到小分别为:①沙河: Cd>Cu>Pb>Ni>Cr>Zn;②淋河: Cd>Cu>Ni>Pb>Zn>Cr;③黎河: Cd>Cu>Pb>Ni>Zn>Cr。三条河流各重金属潜

表 7 于桥水库三条支流沉积物中重金属生态风险系数( $E_r$ )和潜在生态风险指数( $RI$ )Table 7 Ecological risk factor( $E_r$ ) and the potential ecological risk index( $RI$ ) of heavy metals in sediments from three rivers in Yuqiao Reservoir

| 区域    | 样点  | $E_r^*$ |      |       |      |       |      | $RI^*$ | $E_r^{**}$ |      |       |      |        |       | $RI^{**}$ |
|-------|-----|---------|------|-------|------|-------|------|--------|------------|------|-------|------|--------|-------|-----------|
|       |     | Cr      | Ni   | Cu    | Zn   | Cd    | Pb   |        | Cr         | Ni   | Cu    | Zn   | Cd     | Pb    |           |
| 淋河    | 1   | 0.96    | 1.02 | 7.54  | 0.65 | 10.11 | 0.80 | 21.08  | 1.04       | 2.80 | 13.46 | 1.49 | 112.33 | 2.82  | 133.95    |
|       | 14  | 0.76    | 1.04 | 7.80  | 0.56 | 7.77  | 0.65 | 18.59  | 0.83       | 2.87 | 13.93 | 1.30 | 86.33  | 2.26  | 107.52    |
|       | 平均值 | 0.86    | 1.03 | 7.67  | 0.61 | 8.94  | 0.73 | 19.83  | 0.94       | 2.83 | 13.70 | 1.39 | 99.33  | 2.54  | 120.73    |
| 沙河    | 2   | 2.81    | 2.58 | 13.48 | 0.79 | 11.31 | 3.70 | 34.68  | 3.07       | 7.12 | 24.07 | 1.82 | 125.67 | 12.96 | 174.71    |
|       | 3   | 2.10    | 1.86 | 7.24  | 0.53 | 7.86  | 0.77 | 20.35  | 2.29       | 5.14 | 12.92 | 1.21 | 87.33  | 2.69  | 111.58    |
|       | 4   | 1.98    | 1.73 | 7.14  | 0.92 | 13.74 | 1.78 | 27.29  | 2.16       | 4.76 | 12.75 | 2.11 | 152.67 | 6.22  | 180.67    |
|       | 5   | 1.16    | 1.31 | 7.53  | 0.55 | 10.59 | 0.97 | 22.11  | 1.27       | 3.60 | 13.45 | 1.27 | 117.67 | 3.38  | 140.64    |
|       | 6   | 2.21    | 1.59 | 9.36  | 1.05 | 19.83 | 7.20 | 41.24  | 2.41       | 4.38 | 16.72 | 2.41 | 220.33 | 25.21 | 271.46    |
|       | 9   | 1.21    | 0.76 | 3.18  | 0.57 | 7.80  | 1.13 | 14.65  | 1.32       | 2.10 | 5.68  | 1.30 | 86.67  | 3.95  | 101.03    |
|       | 11  | 3.05    | 0.98 | 2.84  | 0.71 | 8.34  | 1.23 | 17.15  | 3.33       | 2.70 | 5.08  | 1.62 | 92.67  | 4.30  | 109.69    |
|       | 12  | 1.80    | 1.49 | 6.98  | 0.49 | 7.95  | 1.21 | 19.91  | 1.96       | 4.11 | 12.46 | 1.12 | 88.33  | 4.23  | 112.22    |
|       | 13  | 1.33    | 1.13 | 7.54  | 0.49 | 7.17  | 3.81 | 21.47  | 1.45       | 3.11 | 13.46 | 1.12 | 79.67  | 13.34 | 112.15    |
|       | 平均值 | 1.96    | 1.49 | 7.25  | 0.68 | 10.51 | 2.42 | 24.32  | 2.14       | 4.11 | 12.95 | 1.55 | 116.78 | 8.48  | 146.02    |
| 黎河    | 7   | 1.24    | 1.26 | 10.30 | 0.78 | 8.07  | 3.36 | 25.01  | 1.35       | 3.48 | 18.39 | 1.79 | 89.67  | 11.76 | 126.44    |
|       | 8   | 0.92    | 0.95 | 5.47  | 0.66 | 7.59  | 0.64 | 16.22  | 1.00       | 2.61 | 9.76  | 1.51 | 84.33  | 2.24  | 101.45    |
|       | 10  | 0.95    | 1.05 | 6.00  | 0.62 | 6.42  | 0.59 | 15.63  | 1.04       | 2.89 | 10.71 | 1.43 | 71.33  | 2.05  | 89.45     |
|       | 平均值 | 1.04    | 1.09 | 7.26  | 0.69 | 7.36  | 1.53 | 18.95  | 1.13       | 2.99 | 12.96 | 1.58 | 81.78  | 5.35  | 105.78    |
| 总体平均值 |     | 1.70    | 1.38 | 7.25  | 0.68 | 9.61  | 2.17 | 22.78  | 1.85       | 3.79 | 12.95 | 1.56 | 106.78 | 7.58  | 134.52    |

注:\* 表示以工业化前沉积物重金属背景值为标准,\*\* 表示以天津市土壤背景值为标准。

在生态系数总平均值由大到小依次为  $Cd > Cu > Pb > Ni > Cr > Zn$ 。

## 2.3 于桥水库重金属污染来源分析

### 2.3.1 相关性分析

刘文新等<sup>[31]</sup>研究表明,若同一水体沉积物中元素之间存在良好的相关性,说明这些元素可能存在相同来源,来源包括天然地球化学来源、人为污染来源。河流中的重金属有多种来源,既可能来源于岩石的自然风化和侵蚀,也可能来自灰尘、降雨或水质交换过程等许多非点源污染,同时,被污染河流、居民生活废水和工农业污水排放口等同样会给沉积物当中带来大量的重金属。

于桥水库上游沉积物中不同重金属含量间相关性分析结果(表 8)表明, $Ni-Cr$ 、 $Ni-Cu$ 、 $Zn-Cd$ 、 $Zn-Pb$ 、 $Cd-Pb$  间有较高的相关性,表明它们同源性很高,尤其  $Zn-Cd$  相关系数达 0.828,呈显著相关,而且这两种元素含量均超过背景值,说明底泥中这两种重金属元素污染源可能相同,主要来自周围企业排放的工业废水和居民生活污水。沉积物中各重金属元素间的相关性与元素的性质、吸附特征以及沉积环境有关<sup>[32]</sup>, pH 的增大加快了金属离子与腐植酸及黏土矿物表面

表 8 于桥水库上游沉积物重金属相关系数

Table 8 Correlation coefficient between heavy metal elements of surface sediments from the upper reaches of Yuqiao Reservoir

|    | Cr    | Ni    | Cu    | Zn    | Cd    | Pb    |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Cr | 1.000 |       |       |       |       |       |
| Ni | 0.617 | 1.000 |       |       |       |       |
| Cu | 0.157 | 0.751 | 1.000 |       |       |       |
| Zn | 0.419 | 0.364 | 0.365 | 1.000 |       |       |
| Cd | 0.387 | 0.422 | 0.379 | 0.828 | 1.000 |       |
| Pb | 0.379 | 0.391 | 0.547 | 0.656 | 0.720 | 1.000 |

的络合和吸附作用, $Pb^{2+}$ 、 $Zn^{2+}$ 和  $Cd^{2+}$ 的吸附量逐渐增大<sup>[33]</sup>。通过分析历年于桥水库水质 pH 统计数据<sup>[34]</sup>,10 月份(即本次采样时间)于桥水库 pH 均值为 8.3,有利于  $Pb$ 、 $Zn$  和  $Cd$  重金属离子在沉积物胶体表面的吸附,因此  $Pb$ 、 $Zn$  和  $Cd$  之间也有较强的相关性。

### 2.3.2 于桥水库周围潜在重金属污染源分布

近年来,于桥水库流域和库区周边的社会经济迅速发展,点源污染和面源污染日益增加,使入库污染负荷急剧增加,水库水质恶化,库区水源的污染主要由流域污染源、库周污染源和不可控污染源 3 部分形成<sup>[16]</sup>。于桥水库流域面积约 80%位于河北省遵化市境





6号站点点最高。

(3)以天津市土壤背景值为标准,于桥水库上游支流各样点大部分处于轻微潜在生态危害,而Cd的潜在生态风险系数在样点6达到很强生态风险,其余各样点均处于强生态风险。各样点重金属的潜在生态风险指数表明样点2为中等生态风险,样点4为强生态风险,样点6为很强生态风险,其中Cd在各样点的潜在生态风险指数中贡献最大。三条河流中沙河为于桥水库重金属潜在生态危害最为严重的支流,Cd为潜在生态风险最大的重金属元素,Cu、Pb次之。

(4)Zn-Cd呈显著相关,而且这两种元素含量均超过背景值,说明底泥中这两种重金属元素污染源可能相同,主要来自周围企业排放的工业废水和居民生活污水。

(5)重金属矿区的分布特征和尾矿的处理情况以及河道的自然走势和弯曲特征是造成于桥水库重金属污染的主要原因。

#### 参考文献:

- [1] 田海涛,张振克,丁海燕. 40年来江苏石梁河水库重金属污染的沉积记录[J]. 湖泊科学, 2008, 20(5): 600-604.  
TIAN Hai-tao, ZHANG Zhen-ke, DING Hai-yan, et al. Recent 40-year sedimentary record of heavy metal pollution in the Shilianghe Reservoir, Jiangsu Province[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2008, 20(5): 600-604.
- [2] 白晓慧,杨万东,陈华林,等. 城市内河沉积物对水体污染修复的影响研究[J]. 环境科学学报, 2002, 22(5): 562-565.  
BAI Xiao-hui, YANG Wan-dong, CHEN Hua-lin, et al. Influence of sediment in city river on water pollution restoration[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002, 22(5): 562-565.
- [3] Li Y, Yu Z M, Song X X. Application of principal component analysis (PCA) for the estimation of source of heavy metal contamination in marine sediments[J]. *Environmental Science*, 2006, 7(1): 137-141.
- [4] Hawa Bibim, Faruque Ahmed, Hiroaki Ishiga. Assessment of metal concentrations in lake sediments of southwest Japan based on sediment quality guidelines[J]. *Environmental Geology*, 2007, 52: 625-639.
- [5] 郝汉舟,陈同斌,靳孟贵,等. 重金属污染土壤稳定/固化修复技术研究进展[J]. 应用生态学报, 2011, 22(3): 816-824.  
HAO Han-zhou, CHEN Tong-bin, JIN Meng-gui, et al. Recent advance in solidification/stabilization technology for the remediation of heavy metals-contaminated soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(3): 816-824.
- [6] 李创宇. 于桥水库沉积物中营养盐释放特性试验研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2006.  
LI Chuang-yu. A experimental study on the characteristic of nutrient salts release of sediments in Yuqiao Reservoir[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2006.
- [7] 宁建凤,邹献中,杨少海. 广东大中型水库底泥重金属含量特征及潜在生态风险评价[J]. 生态学报, 2009, 9(11): 6059-6067.  
NING Jian-feng, ZOU Xian-zhong, YANG Shao-hai, et al. Heavy metal contents analysis and potential ecological risk appraisal to sediments of large and medium-scaled reservoirs in Guangdong Province[J]. *Acta Ecological Sinica*, 2009, 9(11): 6059-6067.
- [8] 成刚,张远,高宏. 白龟山水库规划区污染特征及潜在生态风险评价[J]. 环境科学研究, 2000, 23(4): 452-457.  
CHENG Gang, ZHANG Yuan, GAO Hong, et al. Contamination characteristics and potential ecological risk assessment of planning areas in Baiguishan Reservoir[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2000, 23(4): 452-457.
- [9] 单丹. 向海湿地沉积物中重金属污染现状及潜在生态风险评价[D]. 吉林:吉林农业大学, 2008.  
SHAN Dan. The assessment of present situation and potential ecological risk of heavy metal pollution in wetland sediment of Xianghai[D]. Jilin: Jilin Agricultural University, 2008.
- [10] Chowdhury Shakhawat, Husain Tahir, Bose Neil. Fuzzy rule-based modeling for human health risk from naturally occurring radioactive materials in produced water[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2006, 89: 1-17.
- [11] 贺斌,郭海英. 大伙房水库底质重金属污染分析[J]. 现代农业科技, 2010(5): 259-260.  
HE Bin, GUO Hai-ying. Analysis on heavy metal pollution in sediment of Dahuofang Reservoir[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2010(5): 259-260.
- [12] 郝红,高博,王健康,等. 滦河流域沉积物中重金属分布特征及风险评价[J]. 岩矿测试, 2012, 31(6): 1000-1005.  
HAO Hong, GAO Bo, WANG Jian-kang, et al. Distribution characteristic and potential ecological risk assessment of heavy metal in sediments of the Luanhe River[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2012, 31(6): 1000-1005.
- [13] 尚林源,孙然好,汲玉河,等. 密云水库入库河流沉积物重金属的风险评价[J]. 环境科学与技术, 2011(34): 344-348.  
SHANG Lin-yuan, SUN Ran-hao, JI Yu-he, et al. Risk assessment on heavy metals in sediments of rivers flowing into Miyun Reservoir[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011(34): 344-348.
- [14] 张雷,秦延文,郑丙辉,等. 环渤海典型海域潮间带沉积物中重金属分布特征及污染评价[J]. 环境科学学报, 2011, 31(8): 1676-1683.  
ZHANG Lei, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, et al. Distribution and pollution assessment of heavy metals in sediments from typical areas in the Bohai Sea[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(8): 1676-1683.
- [15] 张振克,孟红明,殷勇. 中国水库环境面临的主要问题及对策[J]. 科技导报, 2006, 24(12): 82-84.  
ZHANG Zhen-ke, MENG Hong-ming, YIN Yong. The problems and countermeasures of reservoir environment in China[J]. *Science & Technology Review*, 2006, 24(12): 82-84.
- [16] 金丹越,黄艳菊. 天津于桥水库主要环境问题及其防治对策[J]. 环境科学研究, 2004, 17(增刊): 77-85.  
JIN Dan-yue, HUANG Yan-ju. The environmental problems and controlling Countermeasures of Tianjin Yuqiao Reservoir[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2004, 17(Suppl): 77-85.



- [17] 娄燕宏, 诸葛玉平, 顾继光. 粘土矿物修复土壤重金属污染的研究进展[J]. 山东农业科学, 2008(2): 68-72.
- LOU Yan-hong, ZHUGE Yu-ping, GU Ji-guang. Research progress of remedying the heavy metal contaminated soils with clay minerals[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2008(2): 68-72.
- [18] 尚英男, 倪师军, 张成江, 等. 成都市河流表层沉积物重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 生态环境, 2005, 14(6): 827-829.
- SHANG Ying-nan, NI Shi-jun, ZHANG Cheng-jiang, et al. Pollution of heavy metals in the surface sediments from rivers in Chengdu and their potential ecological risk[J]. *Ecology and Environment*, 2005, 14(6): 827-829.
- [19] Hakanson L. An ecology risk index for aquatic pollution control a sedimentological approach[J]. *Water Res*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [20] 陈静生, 刘玉机. 中国水环境重金属研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992: 168-170.
- CHEN Jing-sheng, LIU Yu-ji. Research of heavy metal in water environment from China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1992: 168-170.
- [21] 焦伟, 卢少勇, 李光德. 滇池内湖滨带重金属污染及其生态风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(4): 740-745.
- JIAO Wei, LU Shao-yong, LI Guang-de, et al. Heavy metals pollution and potential ecological risk assessment of inner lakeside belt of lake Dianchi[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(4): 740-745.
- [22] 李莲芳, 曾希柏, 李国学, 等. 北京市温榆河沉积物的重金属污染风险评价[J]. 环境科学学报, 2007, 27(2): 289-297.
- LI Lian-fang, ZENG Xi-bai, LI Guo-xue, et al. Heavy metal pollution of Wenyu River sediment and its risk assessment[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(2): 289-297.
- [23] 陆继龙, 郝立波, 赵玉岩. 第二松花江中下游水体重金属特征及潜在生态风险[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(5): 168-172.
- LU Ji-long, HAO Li-bo, ZHAO Yu-yan, et al. Contents and potential ecological risk of heavy metals in middle and lower reaches of Second Songhua River[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 32(5): 168-172.
- [24] 周然, 李树华, 王曦, 等. 天津湿地土壤重金属污染对比分析研究[J]. 天津科技, 2009(4): 41-43.
- ZHOU Ran, LI Shu-hua, WANG Xi, et al. Research of contrastive analysis on Tianjin wetland soil heavy metal pollution [J]. *Tianjin Science & Technology*, 2009(4): 41-43.
- [25] 王祖伟, 张辉. 天津污灌区土壤重金属污染环境质量与环境效应[J]. 生态环境, 2005, 14(2): 211-213.
- WANG Zu-wei, ZHANG Hui. Environmental quality and biological effects of heavy metals in soils in the regions of sewage irrigation in Tianjin[J]. *Ecology and Environment*, 2005, 14(2): 211-213.
- [26] 王立林, 王鸿雁, 杜玉凤. 于桥水库水环境质量现状评价及趋势分析[J]. 海河水利, 2007(3): 18-20.
- WANG Li-lin, WANG Hong-yan, DU Yu-feng. Quality evaluation and trend analysis of water environment for Yuqiao Reservoir [J]. *Haihe Water Resources*, 2007(3): 18-20.
- [27] 陈婧, 王博, 郭昱言, 等. 土壤重金属污染及其修复技术研究[J]. 中国环境管理干部学院学报, 2010(5): 66-72.
- CHEN Jing, WANG Bo, GUO Yu-yan, et al. Research on heavy metal pollution and remediation techniques of soil[J]. *Journal of Environmental Management College of China*, 2010(5): 66-72.
- [28] 黄燕菊. 天津蓟县于桥水库水环境治理研究与对策[J]. 海河水利, 2010: 19-22.
- HUANG Yan-ju. Research of controlling measures on city water environment for Yuqiao Reservoir in Jixian, Tianjin[J]. *Haihe Water Resources*, 2010: 19-22.
- [29] 何江, 王新伟, 李朝生, 等. 黄河包头段水-沉积物系统中重金属的污染特征[J]. 环境科学学报, 2003, 23(1): 53-57.
- HE Jiang, WANG Xin-wei, LI Chao-sheng, et al. Pollution character of heavy metals in the water-sediment system from Baotou section of the Yellow River[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, 23(1): 53-57.
- [30] 赵健, 郑祥民, 毕春娟, 等. 苏州河市郊段底泥重金属污染特征及对河道疏浚的影响[J]. 农业环境保护, 2001, 20(1): 27-30.
- ZHAO Jian, ZHENG Xiang-min, BI Chun-juan, et al. Characteristics of heavy metal pollution in sediments of Suzhou River at suburban interval and influences on dredging plan[J]. *Agro-environmental Protection*, 2001, 20(1): 27-30.
- [31] 刘文新, 李向东. 深圳湾水域中重金属在不同相间的分布特征[J]. 环境科学学报, 2002, 22(3): 305-309.
- LIU Wen-xin, LI Xiang-dong. Distribution of heavy metals among various phases in Shenzhen Bay[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002, 22(3): 305-309.
- [32] 张文斌. 洪泽湖沉积物中营养盐和重金属分布特征、评价及其演化规律研究[D]. 吉林: 吉林建筑工程学院, 2010.
- ZHANG Wen-bin. Study on the distribution, evaluation and evolution of nutrients and heavy metals in Hongze Lake sediments[D]. Jilin: Jilin Construction Engineering College, 2010.
- [33] 路永正, 阎百兴. 重金属在松花江沉积物中的竞争吸附行为及pH的影响[J]. 环境科学研究, 2010, 23(1): 20-25.
- LU Yong-zheng, YAN Bai-xing. Competitive adsorption of heavy metals on Songhua River sediments and effect of pH[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2010, 23(1): 20-25.
- [34] 朱海燕, 戴学颖, 王可玉. 于桥水库pH值变化原因分析及可调控措施[J]. 水科学与工程, 2010(1): 40-42.
- ZHU Hai-yan, DAI Xue-ying, WANG Ke-yu. The causes of change and control measures of pH for Yuqiao Reservoir[J]. *Water Sciences and Engineering Technology*, 2010(1): 40-42.
- [35] GB 15618—1995 土壤环境质量标准[S].
- GB 15618—1995 Environmental Quality Standard for Soils[S].