

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2015.02.006

# 金属矿区重金属迁移对水体影响的数值模拟

轩晓博<sup>1,2</sup> 逢勇<sup>1,3</sup>, 李一平<sup>1,3</sup>, 王仕彬<sup>4</sup>, 王雪<sup>1</sup>

(1. 河海大学环境学院, 江苏南京 210098; 2. 黄河勘测规划设计有限公司, 河南郑州 450003;

3. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏南京 210098;

4. 福建省闽东南地质大队, 福建泉州 362021)

**摘要:** 为了解矿区土壤中重金属对周围地表水体的影响, 以闽江支流泸溪河彭村水库为例, 基于 MIKE21 模型平台构建二维重金属预测模型, 根据重金属在水体和底泥中的转移扩散、悬浮沉积及吸附解吸原理, 采用土壤淋溶及浸泡试验所获取的库区土壤重金属含量等数据, 模拟不同入库流量下库区 Zn、Cd、Pb 等 3 种重金属污染分布规律。结果表明: 小流量条件下, Zn 的浓度为库区中央最小, 两岸次之, 靠近矿区区域最大; 大流量下, 库区中央大于两岸, 下游大于上游。Pb 的浓度为库区中央大于两岸, 下游大于上游。Cd 的浓度为库区中央大于两岸, 下游大于上游。水库蓄水后, 重金属浓度基本满足 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》II 类水质标准。

**关键词:** 金属矿区; 重金属迁移; MIKE 21; 水质; 数值模拟

中图分类号: X524

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2015)02-0030-06

## Numerical simulation of influence of heavy metal migration on water in metallic mining areas

XUAN Xiaobo<sup>1,2</sup>, PANG Yong<sup>1,3</sup>, LI Yiping<sup>1,3</sup>, WANG Shibin<sup>4</sup>, WANG Xue<sup>1</sup>

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Yellow River Engineering Consulting Co. Ltd., Zhengzhou 450003, China;

3. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resources Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;

4. Southeast Fujian Geological Brigade of Fujian Province, Quanzhou 362021, China)

**Abstract:** In order to make it clear the effects of heavy metals in the soil of mining area to its surface water around, taking the Pengcun Reservoir on the Chanxi River which is a branch of Minjiang River as an example, a two-dimension heavy metal prediction model was set up based on the MIKE21 model. According to the principles of migration-diffusion, suspension-deposition and adsorption-desorption of heavy metals in water and sediment, and by using the concentration data of heavy metals in the reservoir area obtained from the experiment of soil leaching and immersion, the contamination distribution of heavy metals such as Zn, Cd and Pb under different reservoir inflow was simulated. The results show that the distribution order from small to big of Zn concentration under a low flow condition is the central zone of reservoir, river banks, the places close to mining area, while under a high flow condition, the order from big to small is the central zone of reservoir, river banks and downstream, upstream; the distribution order from big to small of Pb concentration is the central zone of reservoir, river banks and downstream, upstream; the distribution order from big to small of Cd concentration is the central zone of reservoir, river banks and downstream, upstream; after reservoir impounding, the concentration of heavy metals in the reservoir can basically meet the water quality standard of Class II in GB 3838—2002 surface water environment quality standard.

**Key words:** metallic mining area; heavy metal migration; MIKE21; water quality; numerical simulation

基金项目: 国家自然科学基金(51179053)

作者简介: 轩晓博(1979—), 男, 工程师, 硕士研究生, 主要从事水资源保护规划及环境影响评价研究。E-mail: xbxuan@126.com

重金属在土壤中的迁移转化受金属的化学特性、土壤的物理特性、生物特性和环境条件等因素影响,其迁移转化过程分为物理迁移、化学迁移、物理化学迁移和生物迁移,其迁移转化形式复杂多样,是多种形式的错综结合<sup>[1-3]</sup>。

通常状况下,土壤中的重金属基本处于相对稳定的状态,且难以迁出土体<sup>[4]</sup>,当土壤物理特性以及环境条件发生变化时,重金属就会发生迁移转化。对于水库,当其蓄水后,由于水体的浸泡作用,土壤中的重金属除部分发生水解生成难溶物外,剩余重金属多会析出,并且能以离子态在底泥以及水体中转移扩散,从而有可能影响水体质量。多年来因重金属污染物进入河流、水库、湖泊等导致水环境污染酿成了不少悲剧,因此它是水库(湖泊)、河流水环境评价的重要内容之一。

随着计算机水平的快速发展,采用先进的计算软件平台来构建符合实际的重金属预测模型,将成为一种新的预测手段。常见的水质预测模型有美国陆军工程兵团水道实验站的模型 SELECT、CE-QUAL-R1 和 CE-QUAL-W2<sup>[4]</sup> 等模型,美国国家环保署(EPA)开发的 WASP<sup>[5]</sup>、EFDC<sup>[6]</sup> 模型,美国农业部(USDA)开发的 SWAT 模型<sup>[7]</sup> 等,以及丹麦水力学研究所(DHI)研制开发的 MIKE 软件模型,这些模型在水库水质模拟预测过程中都发挥了极其重要的作用。

以上各类模型软件都有各自的侧重点和局限性,并且在模拟水流流场以及水质分布方面存在一定的差异。如 SELECT 模型,只能预测已知密度水库的垂向水质分布,且对一些参数进行了物质化处理;CE-QUAL-R1 模型与 SELECT 模型一样,也是确定水质参数垂向位置随时间变化的值,它将水库概化为垂直方向一系列的水平层,且每一次的热能与杂质都均匀分布;另外该模型对氮、磷等营养元素的迁移转化过程能较好地模拟,但对重金属等应用较少;SWAT 模型主要针对农业面源污染进行模拟,等等。近年来经过国内外许多工程实际运用,认为 MIKE 模型在预测水库水质方面具备明显优势,且能模拟接近实际的水流条件,尤其对难溶解的污染物如重金属的迁移扩散等能进行较好地模拟。MIKE 模型分为 MIKE11、MIKE21 以及 MIKE Basin 等,MIKE21 是应用较为广泛的平面二维数学模型,该模型可用于模拟河流、湖泊、河口、海湾的水流、波浪、泥沙及环境场。MIKE21 模型包括水动力学模块和水质模块两大部分,可定义多种类型的水边界条件,如流量、水位或流速等,能进行干、湿节点和干、湿单元的设置,能较方便地进行滩地水流的模

拟。其中水动力学模块是 MIKE 21 软件最核心的基础模块,可以模拟由于各种作用力的作用而产生的水位及水流变化,它包括了广泛的水力现象,可用于任何忽略分层的二维自由表面流的模拟,该模块为环境模拟提供了水动力学的计算基础。

目前该软件在国内的应用发展很快,并在一些大型工程中被广泛应用。如浑河流域采用了 MIKE11 模型进行水质预测,较好地分析了不同发展模式的合理性<sup>[8]</sup>;上海世博园白莲泾区域水量水质预测模型依据 MIKE11 进行构建,并模拟了“6·29 大雨”白莲泾河区域的河道水量水质情况<sup>[9]</sup>;刘伟等<sup>[10]</sup>利用 MIKE11 模型计算了松花江干流松江大桥至通气河口段的  $\text{NH}_3\text{-N}$  纳污能力,对不同水文条件下的流量、流速进行实时模拟,避免了因排污口概化造成的计算偏差;此外,MIKE 模型还应用于长江口综合治理工程、太湖富营养化治理工程、香港新机场工程建设等<sup>[11]</sup>。

通过查询相关课题研究成果及设计报告,并检索了相关文献,目前在国内对 MIKE 软件的使用,多数集中在天然河流、湖泊以及人工水库的模拟计算,但对于土壤中重金属迁移对水库的影响研究案例较少。本文以闽江支流产溪河彭村水库为例,基于 MIKE21 模型平台构建二维重金属预测模型,采用土壤淋溶及浸泡试验所获取的库区土壤重金属含量等数据,模拟不同入库流量下库区重金属污染分布规律,参照 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》对水库水质进行影响评价。

## 1 数据获取与分析

### 1.1 数据来源

彭村水库地处福建省德化县,位于闽江下游的支流——大樟溪上游段,水库正常蓄水位为 642.0 m,总库容 7 871 万  $\text{m}^3$ ,具有多年调节性能。水库坝址控制流域面积 144.50  $\text{km}^2$ ,占产溪全流域的 14.7%。该水库主要功能以供水、防洪为主,兼顾发电等,具有较好的调节性能,可对流域来水“蓄丰补枯”,对下游起到一定的补偿作用。彭村水库库区上游段河道右岸分布有未开发的铅锌矿,矿体分布高程 725 m 以上,高于正常蓄水位约 83 m(图 1)。

本次评价所采取的源数据以及相关参数根据现场试验获取,试验内容包括淋溶试验、浸泡试验及试坑渗水试验,其中浸泡试验包括水泡试验和酸泡试验。现场采样根据不同的高程按等高距 10 m 结合 100 m×20 m 网度进行取样控制,自下游向上游垂直于主河道在库区左岸布置 16 条测线,测线间距 100 m,共采取 50 个样品,样品测试因子为 Pb、Zn、Cd。

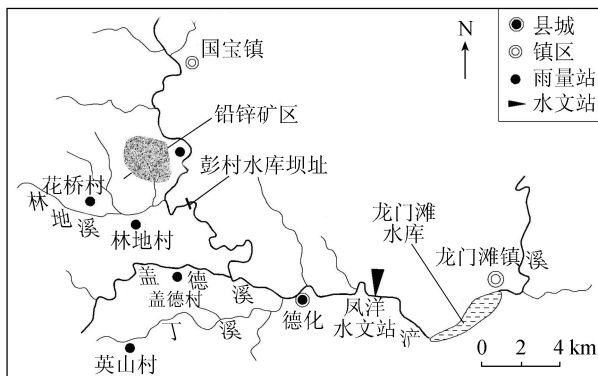


图1 彭村水库工程位置及与矿区位置关系

本次试验,采用不同的 pH 值分别进行试验,试验结果随着 pH 的不同而有所不同。

土壤淋溶试验。测定 Zn、Cd、Pb 的质量浓度分别为: 2.61 ~ 16.70 mg/m<sup>3</sup>、0.01 ~ 0.91 mg/m<sup>3</sup>、0.49 ~ 3.97 mg/m<sup>3</sup>。

土壤水泡试验。采用蒸馏水进行试验,浸取结果显示: Zn、Cd、Pb 的质量浓度分别为 30.44 ~ 212.30 mg/m<sup>3</sup>、0.40 ~ 1.21 mg/m<sup>3</sup>、1.18 ~ 21.62 mg/m<sup>3</sup>; Zn、Cd 达到 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》I ~ II 类标准,Pb 符合 I 类标准占 40%,其余符合 II ~ III 类标准。

土壤酸泡试验。采用稀硫酸和硝酸进行试验,酸泡试验 pH 值选取 5.2、5.5、5.8、6.0,之所以选取这四个值,是根据彭村水库下游龙门滩水库 2012 年 1 月 3 日以来的逐日监测报表,于当年 7 月 25 日出现最低 pH 值 5.2 确定的。浸取结果显示: Zn、Cd、Pb 的质量浓度分别为 31.51 ~ 153.80 mg/m<sup>3</sup>、0.18 ~ 6.71 mg/m<sup>3</sup>、0.07 ~ 2.42 mg/m<sup>3</sup>;均小于 GB 5085.3—2007《危险废物鉴别标准-浸出毒性鉴别》的标准中所列的浓度限值,该土壤不具有浸出毒性特征的危险废物。

试坑渗水试验。试验得出该区域土壤渗透系数为 0.0994 ~ 0.3057 m/d。

## 1.2 数据可靠性分析

本次预测源数据通过现场布点、进行一系列的浸溶试验得到,布点时考虑了水库水位上涨与消落的过程,取不同高程点进行垂向布置,并根据矿区与水库的位置关系,依据“近密远疏”的原则,进行了纵向与横向的布置,试验的每一个过程严格按照 GB/T 14158—93《区域水文地质工程地质环境地质综合勘查规范》(1:50000)试验规范要求,因此,所取得的数据是可靠的。

## 2 模型构建

所构建的模型包括水动力学模块和水质模块两个部分,水动力学模块主要模拟水流条件,水质模块

主要模拟污染物的迁移转化过程。

### 2.1 水动力学模块

MIKE 21 FM 水动力部分的输入数据分为以下几个部分:①计算域和相关时间参数,包括网格地形及时间设置;②校准要素,包括底床阻力、涡黏系数和摩擦阻力系数;③初始条件,如水面高程;④边界条件,分为开边界条件和闭边界条件,这里主要为开边界条件,包括流量、水位等;⑤其他驱动力,包括风速、风向、源汇项和波浪辐射应力等。

该模块初始条件根据工程设计的有关技术参数设定,驱动力则由气候统计资料以及现场调查所得。本次研究选择预测范围内 3 个边界的流量以及水位时间序列作为开边界条件。由于一般水库丰水时段水质较差,因此计算时采用典型年份 ( $P = 10\%$  的 1974—1975 年的水文年份) 丰水期的日流量及水位资料,模型参数率定采用水质与水文同步监测的数据。

该模块网格概化见图 2,地形内插结果参见图 3,模型基本设置如下:网格数量为 18981 个,最小网格尺度为 15 m,时间步长为 300 s,涡黏系数为 0.4,曼宁数为 32,摩擦阻力系数为 0.0013。

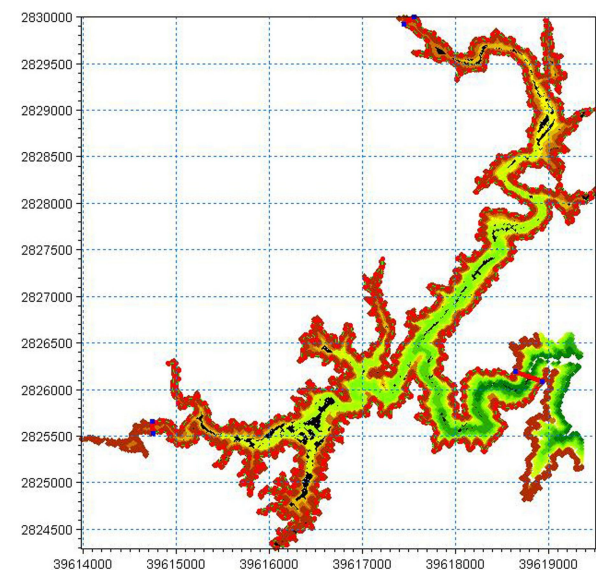


图2 彭村水库水动力学模块网格概化

### 2.2 水质模型

#### 2.2.1 模型基本方程

流域水质模型主要模拟以下污染因子:溶解态重金属、吸附态重金属、底泥孔隙水中溶解态重金属、底泥中吸附态重金属、悬浮颗粒物及沉积物量。重金属在水中和底泥中转移扩散、悬浮沉积及吸附解吸的原理如图 4 所示,据此原理推算出重金属模型见式(1)。

$$\frac{dX_{HM}}{dt} = A_{adss} - D_{dcss} - S_{sev} + R_{resv} \quad (1)$$

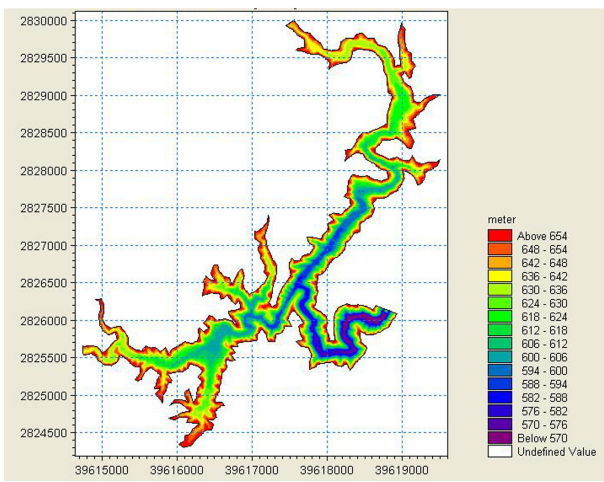


图3 彭村水库水动力学模块地形内插结果

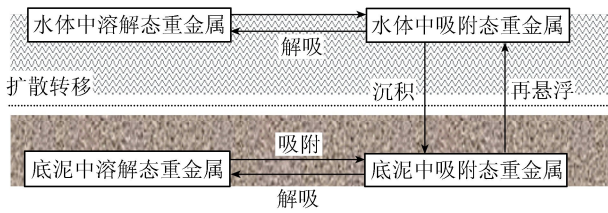


图4 重金属在水体和底泥中的迁移转化示意图

其中

$$A_{\text{adss}} = k_w K_d S_{\text{HM}} X_{\text{SS}}$$

$$D_{\text{dess}} = k_w X_{\text{HM}}$$

$$S_{\text{sev}} = \frac{v_{\text{sm}} X_{\text{HM}}}{dz}$$

$$R_{\text{resv}} = \frac{R_{\text{resrat}} \frac{X_{\text{HMS}}}{X_{\text{SED}}}}{dz}$$

式中:  $X_{\text{HM}}$  为水体中吸附态重金属质量浓度,  $\text{g}/\text{m}^3$ ;  $A_{\text{adss}}$  为吸附过程中溶解态重金属浓度,  $\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ;  $D_{\text{dess}}$  为解吸过程中溶解态重金属浓度,  $\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ;  $S_{\text{sev}}$  为沉积过程吸附态重金属浓度,  $\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ;  $R_{\text{resv}}$  为起悬过程吸附态重金属浓度,  $\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ;  $t$  为计算时段,  $\text{s}$ ;  $k_w$  为水体中的解吸率,  $\text{d}^{-1}$ ;  $k_d$  为重金属在颗粒态和水之间的分配系数;  $S_{\text{HM}}$  为水体中溶解态重金属质量浓度,  $\text{g}/\text{m}^3$ ;  $X_{\text{SS}}$  为水体中悬浮颗粒质量浓度,  $\text{g}/\text{m}^3$ ;  $v_{\text{sm}}$  为 SS 的沉降速度,  $\text{m}/\text{d}$ ;  $Z$  为计算层厚度,  $\text{m}$ ;  $R_{\text{resrat}}$  为 SS 的再悬浮率,  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ;  $X_{\text{HMS}}$  为底泥里吸附态重金属浓度,  $\text{g}/\text{m}^2$ ;  $X_{\text{SED}}$  为沉降通量,  $\text{g}/\text{m}^2$ 。

由于吸附态重金属占总量的 95% 以上, 所以一般不考虑水体中溶解态重金属, 则上式有时也可简化为

$$\frac{dX_{\text{HM}}}{dt} = \frac{v_{\text{sm}} X_{\text{HM}}}{dz} + \frac{R_{\text{resrat}} \frac{X_{\text{HMS}}}{X_{\text{SED}}}}{dz}$$

## 2.2.2 模型边界条件

模型边界条件包括水动力边界条件以及水质边

界条件。根据 MIKE 21 模型设置要求, 水质模型边界主要为开边界, 与水动力学模块开边界一样, 此次研究中共有 3 个水质开边界, 包括 1 个上游开边界和 2 个下游开边界。从偏保守角度考虑, 本次模拟时的边界浓度取最不利情况下的数值。风场边界的确定根据德化县 30 年长系列气象观测资料, 考虑概化为空间均匀的风场, 利用风速和风向因子, 数据格式为 dfs0 文件格式。

## 2.2.3 模型率定和验证

对浚溪流域水体监测断面进行了污染物计算值与实测值验证, 结果见图 5。采用 2012 年 2 月浚溪流域的实测水质资料进行模型参数率定。

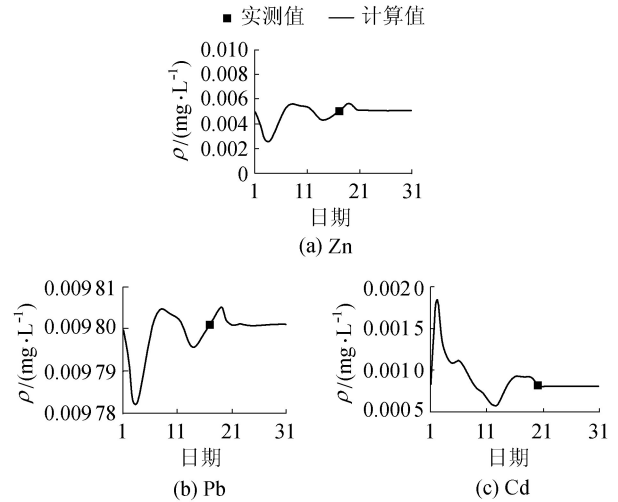


图5 浚溪河监测断面污染物质量浓度计算值与实测值验证

水动力模型参数率定过程中, 针对模型的糙率进行调整, 通过对水位和流量的率定确定模型糙率值为 0.03。模型验证过程中, 水位和流量误差均在 25% 以内, 表明参数选取较为合理。水质模型参数主要利用 ECO Lab 中的水质模块和重金属模块进行率定验证, 通过反复的试算与比较, 最终确定参数值。模型中部分参数的变化对整个模型的影响相对较小, 故采用默认值。最终确定的主要参数见表 1。

## 3 结果及分析

### 3.1 模型预测结果

采用已建模型对蓄水后矿区附近水库水质进行模拟计算, 分大、小流量不同条件进行计算, 大流量采取典型年份丰水期的平均值, 小流量采取典型年份枯水期的平均值。通过计算得出不同条件下的污染分布图, 结果见图 6。

由图 6 可知不同流量条件下不同重金属污染分布规律如下:

a. Zn 的质量浓度分布规律。在小流量情况下, 库区内靠近矿区一岸的狭长区域污染浓度较大,

表 1 水质模型参数取值范围

参数	有机碳分配系数/ $\text{kg}^{-1}$	$k_w/\text{d}^{-1}$	沉积物中解吸附速率/ $\text{d}^{-1}$	固体悬浮物中有机碳比例	沉积物中有机碳比例	水膜的厚度/ $\text{mm}$	沉积物厚度和其在扩散层中的厚度之比	扩散因素/个	重金属摩尔质量/ $(\text{g} \cdot \text{mol}^{-1})$	计算时间步长/ $\text{s}$	沉积物孔隙率	$V_{\text{vsm}}/(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$	$R_{\text{resrat}}/(\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1})$	颗粒产生率/ $(\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1})$	沉积物再悬浮的临界速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
Zn	50000	1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	1	65	30	0.8	0.1	1	1	1
Pb	50000	0.01	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	1	207	30	1	0.1	10	1	1
Cd	50000	0.1	10	0.1	0.2	0.1	0.2	1	112	30	0.8	0.1	1	1	100

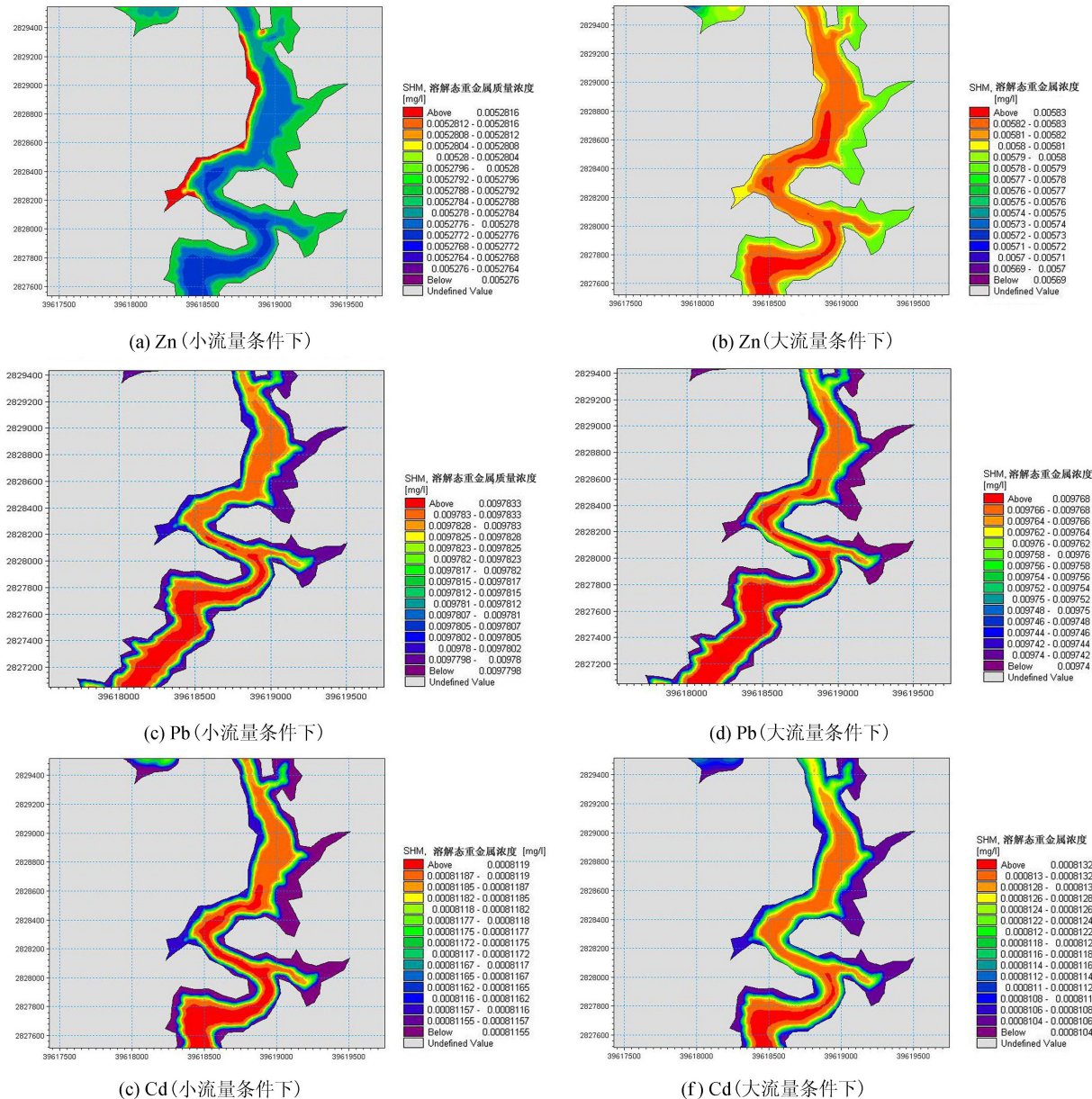


图 6 彭村水库中重金属在不同流量条件下的污染分布

大致介于  $5.2812 \times 10^{-3} \sim 5.2816 \times 10^{-3} \text{ mg/L}$ , 在水库中央以及下游浓度最小, 基本介于  $5.2768 \times 10^{-3} \sim 5.2776 \times 10^{-3} \text{ mg/L}$ , 其他靠近河岸边的区域浓度居中; 在大流量情况下, 整体的浓度要较小流量条件下的大, 库区内的分布规律与小流量条件下的恰好相反, 在库区中央地带浓度较大, 基本处于  $5.8 \times 10^{-3} \sim 5.83 \times 10^{-3} \text{ mg/L}$ , 靠近两岸处较小, 为  $5.78 \times 10^{-3} \sim 5.81 \times 10^{-3} \text{ mg/L}$ 。不管是小流量条件下, 还是大流量条件下, 库区蓄水后, Zn 的质量浓度整体满足

GB 3838—2002《地表水环境质量标准》II类标准要求。  
**b. Pb 的质量浓度分布规律。** 在小流量条件下, 库区中央的浓度较大, 基本在  $9.7828 \times 10^{-3} \sim 9.7833 \times 10^{-3} \text{ mg/L}$  之间, 越靠近两岸越小, 基本介于  $9.7812 \times 10^{-3} \sim 9.7798 \times 10^{-3} \text{ mg/L}$  之间; 在大流量条件下, 库区整体分布规律与小流量基本一致, 中央区域大, 两岸较小, 与小流量条件下分布不同的是, 靠近两岸的浓度更小, 基本介于  $9.74 \times 10^{-3} \sim 9.742 \times 10^{-3} \text{ mg/L}$  之间。可以看出, 两种流量条件

下,下游浓度大于上游浓度,整体都满足相关水质标准要求。

c. Cd 的质量浓度分布规律。在小流量条件下,库区中央浓度较大,基本介于  $8.1185 \times 10^{-4} \sim 8.119 \times 10^{-4}$  mg/L,两岸较小,且靠近矿区一侧的较对岸浓度稍大,基本介于  $8.1155 \times 10^{-4} \sim 8.1162 \times 10^{-4}$  mg/L,且中央区域为下游大于上游,两岸区域为下游和上游小于矿区附近;在大流量条件下,整体分布规律与小流量条件下基本一致,中央区域浓度较小流量条件下小,除靠近矿区一侧区域,两岸区域浓度比小流量条件下稍大,介于  $8.106 \times 10^{-4} \sim 8.11 \times 10^{-4}$  mg/L。可以看出,在彭村水库蓄水后,水库的 Cd 质量浓度均可以满足水质标准要求。

综上所述,在不同流量条件下,矿区重金属污染范围均较小,按 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》进行评价,均满足 II 类标准要求。

### 3.2 预测结果合理性分析

本模型是在 MIKE21 平台上,充分考虑污染因子的释放及转移规律而建立起来。首先按照 2012 年 2 月份水质实测资料进行模型率定和验证,并参照太湖流域水质预测模型中有关对重金属预测的参数取值来确定本次预测的参数值。同时在模型计算条件设置中充分考虑了氧化还原、水体紊动强度等方面的因素,使得模拟计算的过程更趋近于实际,因此预测结果基本合理。

## 4 结 语

笔者基于 MIKE21 模型,结合该工程区的特点以及本水库特性,构建了重金属二维预测模型,进一步梳理了重金属在水体、土壤、底泥过程中的迁移转化过程,对未开发矿区水库蓄水所产生的重金属污染影响状况进行了模拟计算。计算结果表明:水库蓄水后,Zn 浓度分布规律为:小流量条件下,库区中央最小,两岸次之,靠近矿区区域最大,大流量下,中央大于两岸,下游大于上游;Pb 浓度分布规律为:中央大于两岸,下游大于上游;Cd 浓度分布规律为:中央大于两岸,下游大于上游。整体上重金属浓度均满足 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》II 类标准要求。由此可知,该未开发的金属矿,在水库蓄水后不会对水库水质产生影响。通过对污染分布规律的研究,为水库设计调度提供优化建议,并为类似水库水质预测提供参考。

### 参考文献:

[1] 孙铁珩. 污染生态学[M]. 北京:科学出版社,2002:18-24.  
[2] 鲍桐,廉梅花,孙丽娜,等. 重金属污染土壤植物修复研究进展[J]. 生态环境,2008,17(2):858-865. (BAO

Tong, LIAN Meihua, SUN Lina, et al. Research progress on the phytoremediation of soil contaminated by heavy metals[J]. Ecology and Environment, 2008, 17(2): 858-865. (in Chinese))

- [3] 李丽,王富华,王旭,等. 韶关土壤重金属污染状况[J]. 农业环境与发展, 2010, 27(1): 24-25. (LI Li, WANG Fuhua, WANG Xu, et al. Heavy metal contamination of soils in Shaoguan [J]. Agricultural Environment and Development, 2010, 27(1): 24-25 (in Chinese))
- [4] 王济,王世杰. 土壤中重金属环境污染元素的来源及作物效应[J]. 贵州师范大学学报:自然科学版, 2005, 23(2): 111-113. (WANG Ji, WANG ShiJie. The sources and crops effect of heavy metal elements of contamination in soil [J]. Journal of Guizhou Normal University: Natural Sciences, 2005, 23(2): 111-113. (in Chinese))
- [5] 孙颖,陈肇和,范晓娜,等. 河流及水库水质模型与通用软件综述[J]. 水资源保护, 2001(2): 9-10. (SUN Ying, CHEN Zhaohe, FAN Xiaona, et al. A review of river and reservoir water quality models and general software [J]. Water Resources Protection, 2001(2): 9-10 (in Chinese))
- [6] 刘夏明,李俊清,豆小敏,等. EFDC 模型在河口水环境模拟中的应用及进展[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(6G): 136-140. (LIU Xiaming, LI Junqing, DOU Xiaomin, et al. The application and advance of environmental fluid dynamics code (EFDC) in estuarine water environment [J]. Environmental Science & Technology, 2011, 34(6G): 136-140. (in Chinese))
- [7] 赖格英,吴敦银,钟业喜,等. SWAT 模型的开发及应用进展[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2012, 40(3): 243-247. (LAI Geying, WU Dunyin, ZHONG Yexi, et al. Progress in development and applications of SWAT model [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2012, 40(3): 243-247. (in Chinese))
- [8] 常旭,王黎,李芬,等. MIKE11 模型在浑河流域水质预测中的应用[J]. 水电能源科学, 2013, 31(6): 60-61. (CHANG Xu, WANG Li, LI Fen, et al. Application of MIKE11 model in water quality prediction of Hunhe River Basin [J]. Water Resources and Power, 2013, 31(6): 60-61. (in Chinese))
- [9] 黄琳煜,聂秋月,周全,等. 基于 MIKE11 的白莲泾区域水量水质模型研究[J]. 水电能源科学, 2011, 29(8): 21-24. (HUANG Linyu, NIE Qiuyue, ZHOU Quan, et al. Study of water quantity and water quality model of Bailianjing Region based on MIKE11 [J]. Water Resources and Power, 2011, 29(8): 21-24. (in Chinese))
- [10] 刘伟,刘洪超,徐海岩. 基于 MIKE11 模型计算河流水功能区纳污能力方法[J]. 东北水利水电, 2009(8): 69-70. (LIU Wei, LIU Hongchao, XU Haiyan. Calculation method of water environment capacity for water function area based on MIKE 11 model [J]. Water Resources & Hydropower of Northeast, 2009(8): 69-70. (in Chinese))
- [11] 王领元. 应用 mike 对河流一、二维的数值模拟[D]. 大连:大连理工大学, 2007: 33-40.

(收稿日期:2014-10-18 编辑:徐娟)