

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.23.018

# 基于污染物扩散模拟的饮用水水源地保护区划分研究

金磊<sup>1</sup>, 潘亚雷<sup>1</sup>, 邱全毅<sup>2</sup>, 王艺玮<sup>1</sup>, 郑小华<sup>3</sup>, 成杨<sup>1</sup>

(1. 厦门理工学院 环境科学与工程学院, 福建 厦门 361024; 2. 中国科学院 城市环境研究所, 福建 厦门 361021; 3. 厦门市湖里生态环境局, 福建 厦门 361100)

**摘要:** 使用科学合理的方法划分饮用水水源保护区,能使饮用水污染治理的成本降至最低。以厦门市莲花水库为例,在对其水文地质条件进行详细分析的基础上,结合当地水源地的地形、水文、生态红线和社会经济要求,通过有限元离散处理模型的方法,建立二维水质模型。以 MIKE21 和 ArcGIS 为实验平台对饮用水水源保护区污染物的扩散进行模拟和分析,确定了一级保护区面积为 18.02 km<sup>2</sup>、二级保护区面积为 48.4 km<sup>2</sup>、准保护区面积为 90.36 km<sup>2</sup>、保护区总面积为 156.78 km<sup>2</sup>。并依据《饮用水水源保护区划分技术规范》(HJ 338—2018)及当前该区域的水源地水质影响因数进行修正,预测划分区域未来的水质变化情况,以期为莲花水库饮用水水资源的可持续发展提供参考。

**关键词:** 水源地; 保护区划分; 污染物扩散; 水质模拟; 技术规范

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)23-0106-08

## Zoning of Drinking Water Source Protection Areas Based on Pollutant Diffusion Simulation

JIN Lei<sup>1</sup>, PAN Ya-lei<sup>1</sup>, QIU Quan-yi<sup>2</sup>, WANG Yi-wei<sup>1</sup>, ZHENG Xiao-hua<sup>3</sup>, CHENG Yang<sup>1</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China; 2. Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China; 3. Xiamen Huli Municipal Ecology and Environmental Bureau, Xiamen 361100, China)

**Abstract:** Scientific and reasonable zoning of drinking water source protection areas can reduce the cost of drinking water pollution treatment to the minimum. Based on detailed analysis of hydrogeological conditions of Xiamen Lianhua Reservoir, a two-dimensional water quality model was established by combining local topography, hydrology, ecological red line and social and economic requirements of the local water source and using discrete finite element method. MIKE21 and ArcGIS were employed as the test platforms to simulate and analyze the diffusion of pollutants in drinking water source protection areas, and the first-level protection area was determined to be 18.02 km<sup>2</sup>, the second-level protection area was 48.4 km<sup>2</sup>, the quasi-protected area was 90.36 km<sup>2</sup> and the total protected area was 156.78 km<sup>2</sup>. According to the *Technical Guideline for Delineating Source Water Protection Areas* (HJ 338-2018) and revision of water quality influence factors of the water source in the current region,

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2021J011176); 科研攀登计划项目(XPDKT18010)

future water quality changes in the divided region were predicted to provide reference for sustainable and healthy development of drinking water resources of Lianhua Reservoir.

**Key words:** water source; protection area zoning; pollutant diffusion; water quality simulation; technical guideline

水源地是人类赖以生存的物质基础和重要的生态环境因素,为了保护水源地免受污染,划分饮用水水源保护区并配备有效的管理方案,是国际上常见的水源地保护措施。我国借鉴美国和欧盟流程时间的划分理念,发布了《饮用水水源保护区划分技术规范》(HJ 338—2018),提出了应急响应时间法确定地表水源水域保护区的划分方法。同时,在地表水源陆域划分方法中,借鉴了美国和欧盟全流域保护理念,增加了地形边界法和缓冲区法,并将我国土地利用紧张的现状纳入考虑因素,对两种方法增加了约束条件,以作为各个地区进行水源地保护区域划分的参考。

近年来,研究人员在水源地水质污染及保护区划分等方面开展了诸多科学研究和工程实践。在我国农村地区中小河流水质改善的研究中,翟敏婷等<sup>[1]</sup>基于 QUAL2K 水质模型模拟了大连市登沙河流域污染物的迁移转化规律,分析了不同污染源在不同时空尺度下对河流中下游水质考核断面的污染负荷贡献。李亚娟等<sup>[2]</sup>基于湿地植物在河流湖泊中的物理、生化反应机制,应用 MIKE 软件建立了奶水河下游与三里河的模型,实现了水质模拟,为水源地保护、河湖湿地生态修复等水质响应研究提供了模型方法和技术支撑。Xu 等<sup>[3]</sup>采用模糊综合评价(FCE)和主成分分析(PCA)法对南四湖流域水质进行了模拟评价,结果表明南四湖流域水质中最主要的污染物是重金属元素。水质是水源地保护的基础,水源地保护区范围的划分为水源地的长久发展提供了保障。孟楠<sup>[4]</sup>基于 GMS 模拟软件并结合银川平原水源地具体地形、水文、开采量等因素,选取了经验公式法和数值模型法,对银川平原地下水水源地保护区进行划分。计量等<sup>[5]</sup>以山东省莒县城区的三个水源地为研究对象,利用 GMS 软件进行地下水水流模拟以评定保护区级别,并模拟将三个水源地整体划入一个沿河谷的条带区域内进行保护管理,为莒县城区的水源地保护和开发利用提供依据。焦军丽等<sup>[6]</sup>基于一维、精细二维水动力模型与水质模型,确立了饮用水水源地一级保护区和二级保护

区的划分范围。

综上所述,对于水文地质条件复杂、边界条件极多的水源地保护区进行划分,可使用数值模拟的方法并结合饮用水水源地保护区污染物的扩散情况进行模拟和分析,通过计算得到饮用水水源地的保护区范围,这对于防范饮用水水源地被污染具有重要的现实意义。笔者立足于《饮用水水源保护区划分技术规范》(HJ 338—2018),探讨了基于二维水质模型和 ArcGIS 的饮用水水源保护区的划分方法<sup>[7]</sup>,以厦门市莲花水库为研究区域,在二维水流水质模拟模型中以不同的水质指标为标准,分析在不同标准下得到的二级保护区划分范围并进行比较,选定安全与经济发展并存的范围作为划分结果。利用 ArcGIS 得到的结果对莲花水库饮用水水源保护区进行准确的划分,同时对莲花水源地保护区进行了水质变化的可能性分析,可为莲花水库流域的饮用水水源地保护提供切实可行的技术支持。

## 1 研究方法

厦门市莲花水库位于同安区西北部东西溪的莲花溪支流上,该水库库区以冲积盆地为主,坝址在低山地区。该水库的地理位置及相关水系见图1。

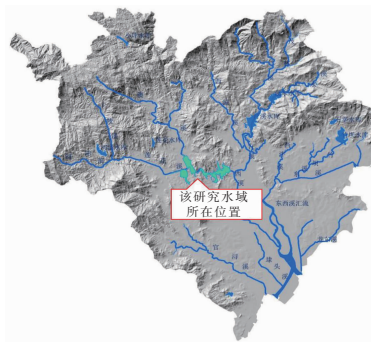


图1 莲花水库的地理位置及相关水系

Fig.1 Location and river system of Lianhua Reservoir

水库集雨区主要涉及莲花镇、祥平街道、白沙仑农场、祥溪农场和汀溪镇,面积约为 178 km<sup>2</sup>。调查显示,莲花水库取水口总氮、总磷、锰均出现不同程度的超标,超标率分别为 82.8%、100%、58.6%,最大超标倍数分别为 1.7 倍、4.4 倍和 6.5 倍,无法满

足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅲ类水要求。总氮、总磷超标表示水库受上游面源污染影响,锰超标与库底缺氧、pH值下降、沉积物向上覆水释放造成的二次污染等密切相关,锰超标还与流域土壤环境背景值偏高有关。另外,莲花水库的氨氮、锰浓度呈现明显分层现象,水深超过约5 m时,氨氮易发生超标现象,水深超过约4.5 m时,锰浓度易发生超标。

目前水源地保护区划分的方法主要有经验值法、经验公式法、计算固定半径法和数值模拟法,前三种方法虽然简易、实施方便、成本低、耗时少,且需要的水文地质材料较少,但其在非均质各向异性的地区不准确,使用在水文地质条件复杂的区域时精度较低,且对技术人员的专业经验和判断能力要求很高。为提高保护区划分的精度,本研究使用效果相对较好的、技术性强且得出的划分保护区精度更高的数值模拟方法。在对研究区域水文地质条件进行详细分析的基础上,结合当地水源地的地形、水文、生态红线和社会经济要求,通过有限元离散处理模型,建立了二维水质模型。

### 1.1 二维水质模型

采用二维数值方法模拟污染物在水中的扩散情况,并以此对饮用水水源保护区进行区域划分。

#### 1.1.1 边界条件

莲花水库的输入流量为 $3.53 \text{ m}^3/\text{s}$ ,纵向径流流速为 $0.0625 \text{ m/s}$ ,库区平均运行水深为 $1.58 \text{ m}$ 。各污染点源污水的浓度按《污水综合排放标准》及《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A要求确定。模拟计算目标:确定准水源保护区上游边界断面达到Ⅲ类水质的氨氮浓度为 $1 \text{ mg/L}$ ,求得其上游水流的流程距离。模拟周期为2018年—2019年。

#### 1.1.2 参数的选择

计算并参照已有经验得出的结果,本研究中 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 降解系数 $k_{\text{COD}_{\text{Mn}}}$ 为 $0.50 \text{ d}^{-1}$ ,氨氮降解系数 $k_{\text{NH}_3-\text{N}}$ 为 $0.50 \text{ d}^{-1}$ 。

采用泰勒法求横向离散系数,见式(1)。

$$D_x = (0.058h + 0.0065B)(ghi)^{\frac{1}{2}} \quad \left(\frac{B}{h} \leq 100\right) \quad (1)$$

采用费希尔公式计算纵向离散系数,见式(2)。

$$D_y = \frac{0.011u^2B^2}{hu^*} \quad (2)$$

式中: $B$ 为河流宽度,m; $u$ 为河流断面的平均流速,m/s; $h$ 为平均水深,m; $u^* = (ghi)^{\frac{1}{2}}$ ;  $g$ 为重力加速度, $\text{m/s}^2$ ;  $i$ 为河段河流坡度。

纵向径流流速为 $0.0625 \text{ m/s}$ ,库区平均运行水深为 $1.58 \text{ m}$ ,经计算, $D_x = 3100 \text{ m}^2/\text{s}$ , $D_y = 0.33 \text{ m}^2/\text{s}$ 。

#### 1.1.3 二维水质模型的基本方程

水流运动可采用二维浅水波控制方程进行描述,详见文献[8]。

对于浅水湖泊水质问题可简化为平面二维方程来处理,描述污染物在水体中输出转化的平面二维运动方程见式(3)。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 \rho}{\partial y^2} - \mu_x \frac{\partial \rho}{\partial x} - \mu_y \frac{\partial \rho}{\partial y} + S + F(\rho) \quad (3)$$

式中: $\rho$ 为污染物浓度, $\text{mg/L}$ ;  $D_x$ 、 $D_y$ 分别为 $x$ 、 $y$ 方向上的离散系数, $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $\mu_x$ 、 $\mu_y$ 分别为 $x$ 、 $y$ 方向的流速分量,m/s;  $S$ 为各种源汇项之和, $\text{g}/(\text{m} \cdot \text{s})$ ;  $F(\rho)$ 为生化反应项; $t$ 为污染物转移的观测时长,s。

各污染物指标的生化反应项均做一级简化处理, $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 考虑自净衰减,通过自净衰减系数表示;TP、TN考虑各种因素引起的释放与沉降,通过综合沉降和释放系数表示,不考虑浮游植物对TP、TN的影响。各生化反应项 $F(\rho)$ 分别进行如下处理:

$$F(\rho_C) = -k_C \rho_C / h \quad (4)$$

$$F(\rho_P) = -k_P \rho_P + S_P / h \quad (5)$$

$$F(\rho_N) = -k_N \rho_N + S_N / h \quad (6)$$

式中: $k_C$ 为 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 的自净衰减系数, $\text{d}^{-1}$ ;  $\rho_C$ 为 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 浓度, $\text{mg/L}$ ;  $h$ 为平均水深,m;  $k_P$ 为TP的综合降解系数, $\text{d}^{-1}$ ;  $\rho_P$ 为TP浓度, $\text{mg/L}$ ;  $S_P$ 为TP的底泥释放系数, $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ;  $k_N$ 为TN的综合降解系数, $\text{d}^{-1}$ ;  $\rho_N$ 为TN浓度, $\text{mg/L}$ ;  $S_N$ 为TN的底泥释放系数, $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

#### 1.2 二维水质模型的求解

通过分析库区污染源现状分布特征和历年水质监测数据发现, $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 保持在Ⅱ类水质标准范围内,总磷和氨氮在枯水期超过Ⅲ类水质标准的可能性较大。因此,新取水口水源的水质可选择氨氮和总磷作为控制指标,二维水质稳定均匀流条件下的模拟方程见式(7)。



$$\begin{aligned}
& (\rho u_l^{J-1} C_l^{J-1} - D_x \frac{C_l^{J-1} - C_l^J}{\Delta x}) \Delta y - (\rho u_l^J C_l^J - \\
& D_x \frac{C_l^J - C_l^{J+1}}{\Delta x}) \Delta y + (\rho u_l^{J-1} C_l^{J-1} - \\
& D_y \frac{C_l^{J-1} - C_l^J}{\Delta y}) \Delta x - (\rho u_l^J C_l^J - \\
& D_y \frac{C_l^J - C_l^{J+1}}{\Delta y}) \Delta x = k C_l^J \Delta x \Delta y \quad (7)
\end{aligned}$$

由式(7)可得式(8),离散模型中参数非负,即  $\rho \geq 0, v \geq 0, u \geq 0$ 。

$$\begin{aligned}
& (2 \frac{D_x}{\Delta x} + 2 \frac{D_y}{\Delta y} - \rho u_l^J - \rho v_l^J - k \Delta x) C_l^J + \\
& (-\frac{D_x}{\Delta x}) C_l^{J+1} + (-\frac{D_y}{\Delta y}) C_l^{J+1} = (-\rho u_l^{J-1} - \\
& \frac{D_x}{\Delta x}) C_l^{J-1} + (-\rho v_l^{J-1} - \frac{D_y}{\Delta y}) C_l^{J-1} \quad (8)
\end{aligned}$$

水流模型是描述不同水体水文特征和流场时空分布规律的数学模型。分析不同类型水体流场的时空分布规律是研究污染物分布的基础,掌握水体中流场特性才有可能研究污染物的分布特征。本研究通过建立目标函数并综合考虑浓度边界条件构建成渠化型水库饮用水水源保护区划分的优化模型,采用有限元法对模型控制方程进行离散处理,主要包括控制方程的离散化和代数方程求解,其中网格生成是实现计算区域离散化的关键步骤。本研究采用有限元法,通过 MIKE21 软件模拟实际地形边界,采集研究区域的地形信息资料,包括地理坐标和河底高程,自动生成网格。

## 2 结果与讨论

### 2.1 保护区范围的初次确定

一级保护区范围的初次确定:根据《饮用水水源保护区划分技术规范》(HJ 338—2018)中 6.2.2.1 地形边界法划定一级保护区范围为 2.23 km<sup>2</sup>,其中水域一级保护区为 0.65 km<sup>2</sup>,陆域一级保护区为 1.58 km<sup>2</sup>。

二级保护区范围的初次确定:按照地表水饮用水源二级保护区的水质基本项目不得低于 GB 3838—2002 的Ⅲ类标准,总磷的输入浓度需小于 0.2 mg/L,氨氮的输入浓度需小于 1 mg/L。按照总磷的输入浓度需小于 0.2 mg/L 并通过二维水质模型进行计算,其上游水流程应为 31.45 km,此时,到达各监测点断面的污染物浓度见表 1。

表 1 二级保护区各监测点断面的污染物浓度

Tab.1 Pollutants concentration of cross section of each monitoring point in the second-level protection area

项 目	一号 监测点	二号 监测点	三号 监测点	四号 监测点	取水点准保 护区上边界
与上游计算点的 距离/km	15.45	17.45	21.45	25.45	31.45
氨氮/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.91	0.98	0.85	0.81	0.56
总磷/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.25	0.31	0.29	0.30	<0.20

由表 1 可以看出,当控制总磷浓度在标准范围内时,各监测点氨氮浓度均未超标。当氨氮的输入浓度需小于 1 mg/L 时,通过二维水质模型进行计算,其上游水流程应为 18.86 km,此时,到达各监测点断面的污染物浓度见表 2。

表 2 一级保护区各监测点断面的污染物浓度

Tab.2 Pollutants concentration of cross section of each monitoring point in the first-level protection area

项 目	一号 监测点	二号 监测点	三号 监测点	四号 监测点	取水点准保 护区上边界
与上游计算点的 距离/km	2.86	4.86	8.86	12.86	18.86
氨氮/(mg·L <sup>-1</sup> )	1.96	1.83	1.84	1.90	<1.00
总磷/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.37	0.43	0.41	0.43	0.31

由表 2 可知,当控制氨氮浓度在标准范围内时,各监测点总磷浓度均超标。综上结果显示,按照历年水质监测数据,在最不利条件下的数值模拟成果,为使水源准保护区上游边界水质达到总磷小于 0.2 mg/L 的Ⅲ类水质标准,在准保护区外的上游流程为 31.45 km,划定为二级保护区水域范围。图 2 为莲花水库饮用水水源地高程图,图 3 为初次划分的保护区范围。

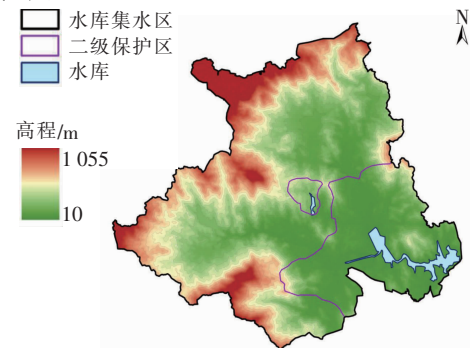


图 2 莲花水库饮用水水源地高程图

Fig.2 Elevation map of drinking water source of Lianhua Reservoir

该区域内的茂口水库由于是应急水库,无输入流量,因此采用类比经验法确定二级保护区范围。陆域范围:根据《饮用水水源保护区划分技术规范》(HJ 338—2018)中 6.3.2.2,采用莲花水库及入库河流上溯 3 000 m 的汇水区域扣除一级保护区以外的范围划定,排除溪林村、汀溪镇两个行政村,陆域保护面积为 34.96 km<sup>2</sup>。因此,划定二级保护区范围为 32.61 km<sup>2</sup>,其中水域二级保护区为 0.28 km<sup>2</sup>,陆域二级保护区为 32.33 km<sup>2</sup>。考虑到莲花水库饮用水水源地的经济发展,需要对各级保护区的范围进行再次划分。



图3 初次划分的保护区范围

Fig.3 First division of protection areas

## 2.2 保护区范围的修正

一级保护区范围的修正:划定一级保护区范围为 7.36 km<sup>2</sup>,其中水域一级保护区为 2.91 km<sup>2</sup>,陆域一级保护区为 4.45 km<sup>2</sup>。水域范围,根据《饮用水水源保护区划分技术规范》(HJ 338—2018)中 6.2.1.1,小型水库和单一供水功能的湖泊、水库应将多年平均水位对应的高程线以下的全部水域划为一级保护区,水域面积为 2.91 km<sup>2</sup>。陆域范围,根据《饮用水水源保护区划分技术规范》(HJ 338—2018)中 6.2.2.1,对于小型水库,一级保护区水域外不小于 200 m 范围内的陆域为一级保护区,陆域面积为 4.45 km<sup>2</sup>。

二级保护区范围的修正:划定二级保护区的范围为 40.55 km<sup>2</sup>,其中水域二级保护区为 2.26 km<sup>2</sup>、陆域二级保护区为 38.29 km<sup>2</sup>。二级保护区水域,根据《饮用水水源保护区划分技术规范》(HJ 338—2018)中 6.3.1.1,采用莲花水库上游溪流入库处上溯 5 500 m 的河段扣除水域一级保护区后的区域划

定,水域面积为 2.26 km<sup>2</sup>。二级保护区陆域,根据《饮用水水源保护区划分技术规范》(HJ 338—2018)中 6.3.2.2,采用莲花水库上游溪流入库处上溯 5 500 m 河段的汇水区扣除一级保护区以外的范围划定,陆域保护面积为 38.29 km<sup>2</sup>。

准保护区范围的修正:根据《饮用水水源保护区划分技术规范》(HJ 338—2018)中 6.3.2.2,采用莲花水库及上游溪流水域汇水区扣除一级保护区和二级保护区后的区域划分来划定,准保护区的范围为 107.24 km<sup>2</sup>,修正后的各级保护区范围见图 4。



图4 二次划分的保护区范围

Fig.4 Second division of protection areas

## 2.3 保护区范围的确定

在前两次划分范围的基础上,为了维护莲花水库的区域生态安全及经济社会的可持续发展、保障人民群众健康,结合生态红线标准(见图 5),对保护区范围进行最终修正,得到的莲花水库饮用水水源地保护区范围如图 6 所示。



图5 生态红线标准

Fig.5 Standard diagram of ecological red line



图6 莲花水库饮用水水源地保护区范围

Fig. 6 Protection area scope of drinking water source of Lianhua Reservoir

## 2.4 讨论

### 2.4.1 水质评价方法

对于水源地水质的评价通常要考虑基于水质出现富营养化的可能性和程度<sup>[9-10]</sup>。富营养化程度评价标准采用中国环境监测总站生态室推荐的《湖泊(水库)富营养化评价方法及分级技术规定》中的综合营养状态指数法,其综合营养状态指数见式(9)~(14)。

$$TLI(\text{Chl-a}) = 10(2.5 + 1.086 \ln \text{Chl-a}) \quad (9)$$

$$TLI(\text{TP}) = 10(9.436 + 1.624 \ln \text{TP}) \quad (10)$$

$$TLI(\text{TN}) = 10(5.453 + 1.694 \ln \text{TN}) \quad (11)$$

$$TLI(\text{SD}) = 10(5.118 - 1.94 \ln \text{SD}) \quad (12)$$

$$TLI(\text{COD}_{\text{Mn}}) = 10(0.109 + 2.661 \ln \text{COD}_{\text{Mn}}) \quad (13)$$

$$TLI(\Sigma) = \sum_{j=1}^m W_j \cdot TLI(j) \quad (14)$$

式中:TLI(Σ)为综合营养状态指数; $W_j$ 为第 $j$ 种参数的营养状态指数的相关权重;TLI( $j$ )为第 $j$ 种参数的营养状态指数。以叶绿素a(Chl-a)作为基准参数,则第 $j$ 种参数归一化的相关权重计算见式(15)。

$$W_j = \frac{r_{ij}^2}{\sum_{j=1}^m r_{ij}^2} \quad (15)$$

式中: $r_{ij}$ 为第 $j$ 种参数与基准参数Chl-a的相关系数; $m$ 为评价参数的个数。

### 2.4.2 保护区水质预测

应用MIKE21模型系统中的水质生态模块(ECO lab)对运行期莲花水库水质情况进行预测。

ECO lab 是用于生态模拟的开放性数值实验模组,可以描述物理变化过程,也可以描述自然水体中化学、生物、生态之间的复杂生化作用,能够快速高效地计算模拟水体水质和富营养化的变化过程<sup>[11]</sup>。

采用对流扩散方程描述污染物在水体中的运动变化过程,见式(16)。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(hc) + \frac{\partial}{\partial x}(uhc) + \frac{\partial}{\partial y}(vhc) &= \frac{\partial}{\partial x}(h \cdot D_x \cdot \\ \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(h \cdot D_y \cdot \frac{\partial c}{\partial y}) - khc + S \end{aligned} \quad (16)$$

式中: $c$ 为污染物浓度; $u$ 、 $v$ 分别为 $x$ 、 $y$ 方向的流速; $D_x$ 、 $D_y$ 分别为 $x$ 、 $y$ 方向的离散系数; $k$ 为降解系数; $S$ 为源汇项; $h$ 为静止水深。

ECO lab 过程的常微分方程见式(17)。

$$P_c = \frac{dc}{dt} = \sum_{i=1}^n p \quad (17)$$

式中: $P_c$ 为污染成分中的生化反应过程; $p$ 为污染物不同阶段的生化反应过程。

采用UPWIND格式对方程进行离散和求解。水质模型计算范围与水动力模型相同,仍考虑丰水期、平水期、枯水期三种设计水文条件。入库 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、TN、TP量根据污染源调查结果分别取为847.64、162.38、13.99 t/a,水库出流处边界设定为 $\partial c / \partial n = 0$ 。由于莲花水库为待建水库,污染物降解系数等水质参数无法通过实测资料获得,故参考其他湖库污染物降解系数,并取偏保守的较低值,水质模型各参数取值如下: $D_x$ 为 $1.0 \text{ m}^2/\text{s}$ 、 $D_y$ 为 $1.0 \text{ m}^2/\text{s}$ 、 $k_{\text{COD}_{\text{Mn}}}$ 为 $0.006 \text{ d}^{-1}$ 、 $k_{\text{TN}}$ 为 $0.01 \text{ d}^{-1}$ 、 $k_{\text{TP}}$ 为 $0.008 \text{ d}^{-1}$ 。

### 2.4.3 预测结果分析

模拟结果表明,随着水流从上游向下游缓缓流动,入库污染物在水中不断稀释扩散,库区污染物浓度逐渐下降。莲花水库库容较大,具有较大的自净容量,入库的有机物在库区内得到了充分降解。整个水库水质指标浓度分布呈现由库首至库尾逐渐降低的规律,各水文条件下水质相差较大,丰水期水质最好、平水期次之、枯水期水质最差。丰水期水质可以达到Ⅲ类标准,平、枯水期水质为Ⅳ类。三种水文条件下水库污染物情况如下:丰水期时, $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、TN、TP分别为2.76、0.50、0.04 mg/L;平水期时,分别为3.95、0.74、0.06 mg/L;枯水期时,分别为6.48、1.11、0.10 mg/L。



为了说明湖泊富营养状态情况,采用0~100的连续数字对湖泊(水库)的营养状态进行分级<sup>[12]</sup>。TLI( $\Sigma$ )<30:贫营养;30≤TLI( $\Sigma$ )≤50:中营养;TLI( $\Sigma$ )>50:富营养。其中,50<TLI( $\Sigma$ )≤60:轻度富营养;60<TLI( $\Sigma$ )≤70:中度富营养;TLI( $\Sigma$ )>70:重度富营养。在同一营养状态下,数值越高,营养程度越重。

#### 2.4.4 预测结果评估

根据水质预测结果,水库富营养化程度评分见表3。

表3 莲花水库水体富营养化程度评分

Tab.3 Scoring of water body eutrophication degree of Lianhua Reservoir

项 目	营养状态指数			综合营养状态指数
	COD <sub>Mn</sub>	总氮	总磷	
丰水期	28.1	42.8	42.1	37.7
平水期	37.6	49.4	48.7	45.2
枯水期	50.8	56.3	57.0	54.7

不同时期水库富营养化程度如图7所示。对照湖泊、水库富营养化分级标准,结合图7可知,莲花水库丰水期、平水期属于中营养化,枯水期属于轻度富营养化,需采取措施预防富营养化的发生。通过上述预测可知,水库建成以后,由于污染源的减少,水库水质将优于现状,其下泄水水质也将得到改善。

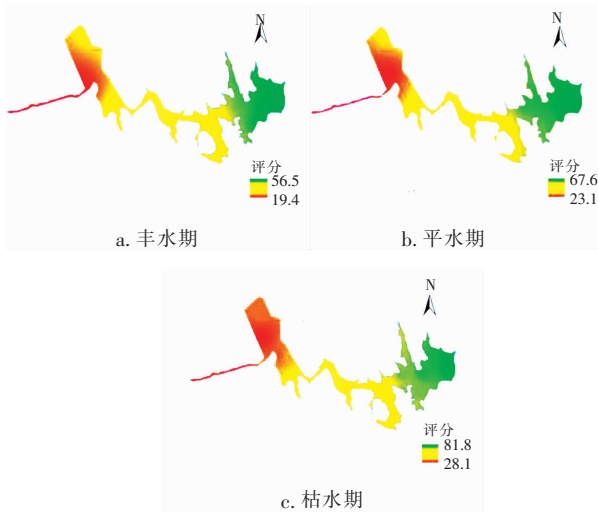


图7 不同时期水库富营养化程度

Fig.7 Eutrophication degree of reservoir in different periods

### 3 结论

① 以厦门市莲花水库为例,综合经验值法、数值模拟法,并结合水源地周边地形、水文、社会经济等信息建立了二维水质模型,模拟了污染物在水源

地的扩散趋势,拟合生态红线标准对水源地保护区范围进行划分,并根据当地人文和社会需求修正了划分结果,最终得到莲花水库水源保护区范围:一级保护区面积为18.02 km<sup>2</sup>、二级保护区面积为48.4 km<sup>2</sup>、准保护区面积为90.36 km<sup>2</sup>、保护区总面积为156.78 km<sup>2</sup>。

② 划分水源地保护区后,根据当前库区水质影响因数对划分后的莲花水库水源地保护区水质情况进行预测,并采用水体富营养化算法对未来水质变化情况进行综合评价。结果表明,莲花水库水质指标的浓度分布呈现由库首至库尾逐步降低的规律,各水文条件下水质相差较大,丰水期水质最好、平水期次之、枯水期水质最差。对照湖泊、水库富营养化分级标准,水库丰水期、平水期属于中营养化,枯水期属于轻度富营养化。

#### 参考文献:

- [1] 翟敏婷,辛卓航,韩建旭,等. 河流水质模拟及污染源归因分析[J]. 中国环境科学,2019,39(8):3457-3464.  
ZHAH Minting,XIN Zhuohang,HAN Jianxu,et al. Water quality simulation and multi-source attribution analysis [J]. China Environmental Science, 2019, 39(8): 3457-3464(in Chinese).
- [2] 李亚娟,杜彦良,毕二平,等. 奶水河湿地植物作用及调水水质响应模拟[J]. 环境科学,2020,41(9):4095-4104.  
LI Yajuan,DU Yanliang,BI Erping,et al. Simulation of water quality response of Guishui River wetland plants and water diversion[J]. Environmental Science,2020, 41(9):4095-4104(in Chinese).
- [3] XU S G,CUI Y X,YANG C X,et al. The fuzzy comprehensive evaluation (FCE) and the principal component analysis (PCA) model simulation and its applications in water quality assessment of Nansi Lake Basin,China[J]. Environmental Engineering Research, 2020,26(2):222-232.
- [4] 孟楠. 基于GMS的银川平原地下水水源地保护区的划分[D]. 北京:中国地质大学(北京),2019.  
MENG Nan. Division of Groundwater Source Protection Area in Yinchuan Plain Based on GMS[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019 (in Chinese).
- [5] 计量,鲍新华,张大勇,等. GMS在莒县城区地下水水

- 源地保护区划分中的应用[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2020,39(1):21-27.
- JI Liang, BAO Xinhua, ZHANG Dayong, *et al.* Application of GMS method in zoning of groundwater source protected areas in Juxian urban area[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2020, 39(1): 21-27 (in Chinese).
- [6] 焦军丽,马巍,裴倩楠,等. 基于精细模拟的河流型饮用水水源地保护区划分研究[J]. 水电能源科学,2018,36(7):33-36.
- JIAO Junli, MA Wei, PEI Qiannan, *et al.* Study on division of river drinking water source protection area based on fine simulation [J]. Water Resources and Power, 2018, 36(7): 33-36 (in Chinese).
- [7] WANG L T, WANG S X, ZHOU Y, *et al.* Landscape pattern variation, protection measures, and land use/land cover changes in drinking water source protection areas: a case study in Danjiangkou Reservoir, China [J]. Global Ecology and Conservation, 2019. DOI:10.1016/j.gecco.2019.e00827.
- [8] 陶涛,王韵珏,信昆仑,等. 基于二维水流模拟的湖泊型水源保护区划分方法[J]. 同济大学学报(自然科学版),2012,40(6):882-889.
- TAO Tao, WANG Yunjue, XIN Kunlun, *et al.* Delineating water source protection area based on two-dimensional flow-pollutant model[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2012, 40(6): 882-889 (in Chinese).
- [9] 俞蕴芳,丁根宝,应琦琰,等. 阳澄湖水源地水质调查及微污染原因浅析[J]. 中国给水排水,2019,35(13):35-42.
- YU Yunfang, DING Genbao, YING Qiyang, *et al.* Water quality investigation and micro-pollution analysis of Yangcheng Lake water source [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(13): 35-42 (in Chinese).
- [10] 张玲玲,郭兴芳,顾森,等. 大型调水对受水湖体富营养化关键因子的影响[J]. 中国给水排水,2020,36(1):58-62.
- ZHANG Lingling, GUO Xingfang, GU Miao, *et al.* Influence of large-scale water diversion project on key factors of eutrophication of lake water[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(1): 58-62 (in Chinese).
- [11] 张虎,徐学军,代涛. MIKE21 FM 在引江济巢工程规划中的应用[J]. 水电能源科学,2016,34(9):103-106,93.
- ZHANG Hu, XU Xuejun, DAI Tao. Application of MIKE21 FM in water diversion project from Yangtze River to Chaohu Lake[J]. Water Resources and Power, 2016, 34(9): 103-106, 93 (in Chinese).
- [12] 郝有志,孔祥娟. 北京动物园水体及长河湾富营养化状态评价[J]. 中国给水排水,2014,30(5):78-80.
- HAO Youzhi, KONG Xiangjuan. Evaluation on eutrophic status of water system in Beijing Zoo and Changhewan River[J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(5): 78-80 (in Chinese).

作者简介:金磊(1980-),男,湖南常德人,博士,副教授,主要研究方向为水资源规划、环境系统优化。

E-mail: seabook2000@msn.com

收稿日期:2020-12-01

修回日期:2020-12-22

(编辑:任莹莹)

**全面推进水生态环境保护和修复**  
**打造水清岸绿、河畅湖美的美丽家园**