

# 网箱养鱼对河流型水库水质影响的研究

曹碧波<sup>1</sup>, 戴乙<sup>2</sup>, 朱龙基<sup>2</sup>, 李川<sup>1</sup>, 刘艳<sup>1</sup>, 王玉秋<sup>1</sup>

(1. 南开大学 环境科学与工程学院, 天津 300071; 2. 海河流域水资源保护局, 天津 300170)

**摘要:** 针对网箱养鱼所造成的水污染问题,运用水质模型对网箱养鱼污染进行模拟和预测成为重要的研究课题。提出将网箱养鱼污染概化为面源负荷,采用校准后的 QUAL2Kw 模型对潘家口水库网箱养鱼污染和网箱撤消后两个方案进行水质模拟和预测,并采用均方根误差法对模型适用性进行评价。同时提出具有绝对负荷量百分比和贡献比例计算模块的 QUAL2Kw 模型,对不同污染源对出库水质的影响程度进行评价。结果表明:QUAL2Kw 模型在潘家口水库的适用性较好;网箱养鱼全部撤消后,潘家口水库的水质状况整体改善的程度不高;为有效改善潘家口水库出库水质,应优先削减潘家口(S6)–潘坝前(S7)的污染物入库负荷量。本文所提出的模型方法及针对出口断面的污染物贡献比例分析可为进一步研究潘家口水库的水环境管理提供科学依据和决策支持。

**关键词:** 网箱养鱼; 水库水质模拟; 河流型水库; QUAL2Kw 模型; 潘家口水库

中图分类号: X524

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)01-0075-07

## Study on simulation of influence of fish cage culture on water quality in riverine reservoir

CAO Bibo<sup>1</sup>, Dai Yi<sup>2</sup>, Zhu Longji<sup>2</sup>, LI Chuan<sup>1</sup>, LIU Yan<sup>1</sup>, WANG Yuqiu<sup>1</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, NanKai University, Tianjin 300071, China;

2. Water Resources Protection Bureau of Haihe River Basin, Ministry of Water Resources, Tianjin 300170, China)

**Abstract:** Aimed at the pollution problem of fish cage culture, the paper used water quality model to simulate and predict the pollution problem of fish cage culture. Fish cage culture pollution in the Panjiakou Reservoir was generalized to surface source load, and the calibrated QUAL2Kw model was applied for fish cage culture pollution in the Panjiakou reservoir both before and after banning cage cultures, and used root mean square meters (RMSE) to carry out applicability evaluation for QUAL2Kw model. The influence of different pollution sources on water quality at outlet was assessed by the improved QUAL2Kw model with pollutant load ratios and contribution ratio modules. The results show that the QUAL2Kw model has good adaptability and can provide a reliable model foundation to simulate and analyze fish cage culture pollution problems in the Panjiakou Reservoir; if fish cage culture is banned, the concentrations of constituents would decrease finitely. To improve water quality of Panjiakou Reservoir at outlet. It is more effective to reduce pollutant load between S6 to S7. The method can provide the scientific basis and decision support for the water environmental management of Panjiakou reservoir.

**Key words:** fish cage culture; water quality simulation of reservoir; riverine reservoir; QUAL2Kw model; Panjiakou reservoir

## 1 研究背景

从世界范围内来看,20世纪30年代开始河流筑坝工程开发,随后的几十年间,许多大河流域的大中型和梯级筑坝工程的开发迅速兴起<sup>[1]</sup>。随着经济社会的快速发展,出于对发电、防洪、灌溉等的需

求也逐渐增强,越来越多的人工大坝筑立在天然河道之中。人工筑坝截蓄水源,使水位抬升,改变了原有的区域水环境特性,水生态系统也发生了一系列的变化<sup>[2]</sup>。

由于水位的抬升常常使得原有的一部分居住地以及农、林、牧业用地等淹没于水位之下,加之受当

收稿日期:2015-09-17; 修回日期:2015-10-20

基金项目:中央分成水资源费项目

作者简介:曹碧波(1988-),女,甘肃兰州人,博士研究生,研究方向:水环境数值模拟。

通讯作者:王玉秋(1965-),男,黑龙江齐齐哈尔人,教授,博士生导师,研究方向:水环境管理决策与技术支持。

时的经济条件的限制,库区移民多数就地安置,土地贫瘠,生活条件落后<sup>[3]</sup>。库区的农民为了解除饥饿、提高经济收益、增加就业机会等,开始寻求渔业养殖的方法<sup>[4]</sup>。网箱养殖是当前主要的渔业养殖模式,养殖范围集中,便于管理和维护,具有高投入高产出的特点。

然而,近年来在经济利益的背后,无序发展的网箱养鱼对水环境的危害也逐渐显现出来<sup>[5-7]</sup>。为了提高渔产量,网箱养鱼需昼夜多次投饵,大量的外源性饵料、粪肥等营养物质投入水体之中。国内外有关文献表明,投喂的饵料利用率较低,只有25%~35%用于增加鱼类体重,65%~75%残留于养殖水域环境中,从而造成水体污染<sup>[8]</sup>。目前国内网箱养鱼对水体污染规律的研究主要是采用围隔试验来进行对比分析的方法<sup>[9-10]</sup>,通过投饵网箱与浮游植物密度之间的关系间接反映网箱养鱼对水环境的影响。总的来说,这类方法能够从一定程度上说明网箱养鱼的环境行为及其危害,但也存在一定局限性:首先,原位围隔对比试验的设计复杂,周期长,需耗费大量人力物力,且自然状况下干扰因素较多;其次,从养殖区与非养殖区分别采样,对于大型水库而言,具有一定的随机性和偶然性,水质结果的代表性值得商榷。

运用水质模型来对网箱养殖的水环境影响进行预测和评价是目前研究的一个难点和热点,国外有文献[11]曾用二维水质模型CE-QUAL-W2模型对巴西Tucuruí水库的水产养殖对水质的影响进行模拟,重建了水质指标在水平和垂直方向上的时空变化。但该模型需要长期连续的水文水质数据,易受到数据缺乏等客观因素的制约。对于河流型水库,一维河道水质模型曾进行成功应用<sup>[12]</sup>,将狭长型的河流型水库概化为自然流动的河道,使用模型进行水质预测。

本研究运用一维水质模型(以下简称QUAL2Kw),对网箱养鱼分布密集的典型的河流型水库——潘家口水库进行水质模拟和预测<sup>[13]</sup>,以厘清网箱养鱼负荷对水库水质的影响,为水环境管理决策部门提供决策依据,从而有利于达到改善水质状况,保障区域饮水安全,维护水生态平衡的目的。

## 2 材料与方法

### 2.1 研究区概况

我国第一个跨流域供水的大型水库——潘家口水库位于河北省唐山市和承德市交界处,地跨承德、

宽城、兴隆、迁西四县,控制流域面积3.37万km<sup>2</sup>,占滦河流域面积75.3%。设计库容29.3亿m<sup>3</sup>,兴利库容19.5亿m<sup>3</sup>,供给天津、唐山市两市共1960万人口用水。潘家口水库位于高纬度山区地带,主要的入库河流为滦河干流、柳河、清河和瀑河(如图1所示),其中滦河干流的入库量占总入库量的70%以上,滦河干流的水质状况对潘家口水库水源地的影响程度极高<sup>[14]</sup>。滦河流域地处温带大陆性季风气候区,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥,春秋干旱少雨,多年平均降雨量400~700mm。

### 2.2 水质采样及分析

2.2.1 采样点位与时间 潘家口水库是典型的河流型水库,自潘家口水库上游乌龙砬断面到潘家口坝前总长约80km,呈狭长型。本研究共布设采样点7个,自北向南包括乌龙砬、柳河口、清河口、瀑河口、燕子峪、潘家口、潘坝前,分别记为S1-S7,如图1所示。本研究以采样时间在2013年5月10日的监测数据作为模型校准数据,采样时间在2013年6月13日的监测数据作为模型验证数据。

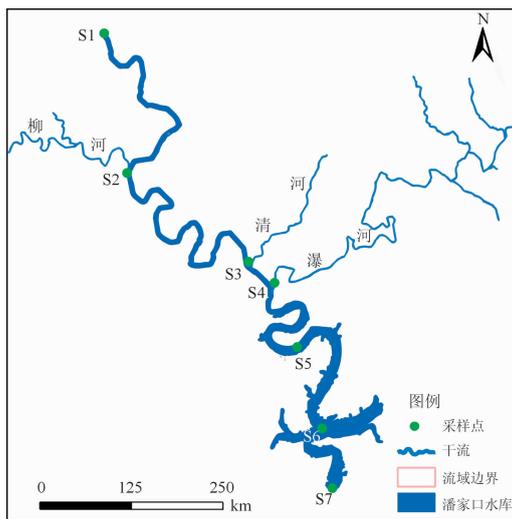


图1 潘家口水库及采样点分布示意图

2.2.2 水质指标及分析 采样步骤及样品分析步骤严格按照《地表水和污水监测技术规范 HJ/T91-2002》及《地表水环境质量标准 GB3838-2002》进行。QUAL2Kw模型所需的水质数据包括温度、电导率、无机悬浮颗粒物、溶解氧、CBOD、有机氮、氨氮、硝态氮、有机磷、无机磷、浮游植物、腐殖质、病原体、碱度。

### 2.3 网箱养鱼现状分析

1994年10月,迁西县委发布《关于大力发展网箱养鱼的决定》,潘家口网箱养鱼开始呈现出“飞跃

式”发展,从最初的百余网箱发展到数万箱。根据 2014 年调查结果,潘家口水库目前约有网箱 37 347 个,养殖水域 2.36 km<sup>2</sup>,占总水域面积的 4.45%,其中投饵面积 1.32 km<sup>2</sup>。然而随着网箱养鱼的快速发展,大量饵料等营养物质进入水体,潘家口水库的水质基本呈现逐年下降的趋势。

潘家口水库网箱养鱼主要以投饵的草食性鱼类——草鱼 (*Ctenopharynodon idellus*) 与不投饵的滤食性鱼类——鳙鱼 (*Aristichthys nobilis*)、白鲢 (*Hypophthalmichthys molitrix*) 为主。本研究通过实地调查和资料查阅,饵料系数 ( $\alpha$ ) 取 2.2,每平方米鱼产量为:草鱼 60kg,鳙鱼、白鲢 50 kg。根据质量守恒原理,进入潘家口水库的氮、磷负荷量依下式计算:

$$W_{load} = W_{bait}P_{bait} - G_{fish}P_{fish} \quad (1)$$

式中:  $W_{load}$  为网箱养鱼所产生的总氮、总磷污染负荷,kg/a;  $W_{bait}$  为投放饵料量,kg/a;  $G_{fish}$  为鱼体重增加量,kg/a;  $P_{bait}$  和  $P_{fish}$  分别为饵料中和鱼体内氮、磷含量的百分比,本研究饵料和鱼体中氮含量百分比分别取 5% 和 3.5%,磷含量百分比分别为 0.83% 和 0.90%<sup>[15]</sup>。经估算,潘家口水库年渔产量为 14.22 万 t,其中投饵鱼种 7.91 万 t,网箱养鱼产生的年总氮、总磷负荷量分别为:4091.37 t,785.85 t。

## 2.4 QUAL2Kw 模型

### 2.4.1 QUAL2Kw 模型简介

QUAL2Kw 模型是 2005 年由美国华盛顿生态局的 Gregory Pelletier 与塔夫斯大学的 Steven Chapra、Hua Tao 合作并在 QUAL2K 模型的基础上开发完成的,用于取代 1987 年由美国环保局的 Brown 和 Barnwell 开发的简单一维水质模型 QUAL2E<sup>[16]</sup>。国内外均已有多次成功应用<sup>[17-18]</sup>。

QUAL2Kw 只模拟干流水质,并不具体的模拟支流水质状况,只是将支流作为支流点源进行模拟。此外,QUAL2Kw 模型会将真实河流概化,即干流划分成若干长度不等且混合均匀的河段,以河段作为其最小计算单元,且假定每个河段具有相同的水文、水质特征<sup>[19]</sup>(如图 2)。相对于 QUAL2K 模型,QUAL2Kw 主要加入了遗传算法校准模块,从而实现了数据条件有限情况下的参数自动化校准<sup>[16]</sup>。

QUAL2Kw 模型的物质平衡方程为<sup>[20]</sup>:

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{Q_{i-1}}{V_i}c_{i-1} - \frac{Q_i}{V_i}c_i - \frac{Q_{ab,i}}{V_i}c_i + \frac{E'_{i-1}}{V_i}(c_{i-1} - c_i) + \frac{E'_i}{V_i}(c_{i+1} - c_i) + \frac{W_i}{V_i} + S_i + \frac{E'_{hyp,i}}{V_i}(c_{2,i} - c_i) \quad (2)$$

式中:  $c_i$  为第  $i$  河段物质浓度,mg/L;  $Q_{i-1}$  为流入河

段  $i$  的流量, m<sup>3</sup>/s;  $Q_i$  为从河段  $i$  流出到河段  $i-1$  的流量, m<sup>3</sup>/s;  $V_i$  为河段体积, L;  $E_i$  为河段间的弥散系数, L/d;  $W_i$  为外源负荷, mg/d;  $S_i$  为由于化学反应或物质交换的负荷量, mg/L。

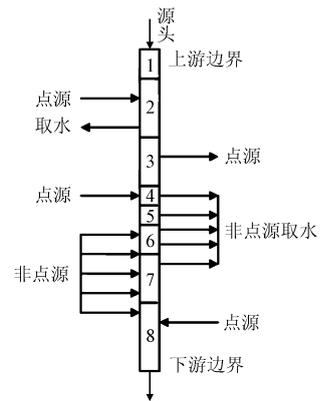


图 2 QUAL2Kw 模型河段概化示意图

### 2.4.2 模型输入

本文选定乌龙矶 (40°43'31.79" N, 118° 8'14.95"E) 为模型模拟的上游边界,潘坝前 (40°23'19.66"N, 118°16'45.35"E) 为下游边界,根据水文条件的一致性将潘家口水库全长 82.10 km 划分为 41 个河段。

经分析,潘家口水库的氮、磷污染负荷的主要来源包括上游乌龙矶来水负荷量(即源头水)、柳河、清河和瀑河 3 条支流点源的负荷量、库周面源负荷量以及库区网箱养鱼投饵所产生的面源负荷量。其中库周面源使用通用流域负荷模型 GWLF 进行计算,其结果经数据处理后输入 QUAL2Kw 模型中。

根据 QUAL2Kw 模型的污染源输入要求,将网箱养鱼总氮、总磷污染概化为面源污染,以 7 个采样点为分界点分别计算 6 个区间内的网箱养鱼年总氮、总磷负荷量。通过当地调查,潘家口水库网箱养鱼集中于每年的 5-8 月,在鱼生长初期对营养物质的需求量大,因而饵料投放频次高,投放量大,5、6、7、8 月投放比例约为 5:4:2:2。由此可计算出每个河段的月总氮、总磷面源负荷量,作为 QUAL2Kw 模型的面源输入数据。经过实地调查,乌龙矶 (S1) 到柳河口 (S2) 河段内没有网箱分布,故认为该范围内网箱养鱼总氮、总磷的面源污染均为 0;柳河口 (S2) 到清河口 (S3) 河段内网箱分布较密集,但大多为鲢鱼、鳙鱼的非投饵网箱,网箱养鱼面源输入量较低。

在对模型进行校准和验证的基础上,QUAL2Kw 模型使用均方根误差 (RMSE) 对模型适用性进行评价。

RMSE 的计算公式为:

RMSE =

$$4m \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m [(O_{imax} - P_{imax})^2 + (O_{imin} - P_{imin})^2]}{m}}}{\sum_{i=1}^m (O_{imax} + O_{imin} + P_{imax} + P_{imin})} \quad (3)$$

式中:  $Q_{imax}$  和  $P_{imax}$  分别为实测值和模型模拟值中的最大值;  $O_{imin}$  和  $P_{imin}$  分别为实测值和模型模拟值中的最小值。

## 2.5 网箱养鱼撤消后水质变化预测

为了更准确的了解目前潘家口水库网箱养鱼所造成的环境压力,预测并分析网箱养鱼撤消后水质的改善状况是十分必要的。QUAL2Kw 模型能模拟完全去除网箱养鱼氮磷负荷后的水质状况,对水质进行整体评价。即将网箱面源负荷一次性全部减去,来预测潘家口水库的水质变化情况。根据模型模拟结果,水质恢复水平计算公式(即:水质改善百分比  $R$ ) 如下:

$$R = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n (C_{a,i} Q_i)}{\sum_{i=1}^n (C_{b,i} Q_i)}\right) \times 100\% \quad (4)$$

式中:  $C_{a,i}$  为撤去网箱之后水质浓度,  $\text{mg}/\text{m}^3$ ;  $Q_i$  为每一个河段的流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $C_{b,i}$  为撤去网箱之前的水质浓度,  $\text{mg}/\text{m}^3$ 。

网箱撤消后氮、磷总负荷量降低比例( $T_i$ ) 即为网箱氮、磷负荷量占全部潘家口水库入库氮、磷负荷量的百分比,计算公式如下:

$$T_i = \frac{L_{cage,i}}{L_{total,i}} \times 100\% \quad (5)$$

式中:  $i$  为某种污染物;  $L_{cage,i}$  为网箱养鱼产生的该污染物的负荷量,  $\text{t}$ ;  $L_{total,i}$  为该污染物入库的总负荷量,  $\text{t}$ 。

## 2.6 绝对负荷量百分比和贡献比例

如前所述,潘家口水库是十分重要的饮用水源地,供给天津、唐山市的生产生活用水,因此,为了保障用水安全,维护和改善潘家口水库水环境现状,控制潘家口水库出水水质-潘坝前的水质十分关键。本研究应用 QUAL2Kw 模型模拟了支流点源、库周面源污染、库区网箱养鱼面源污染对河道水质的影响。为此,为了识别不同污染源对出库水质的影响程度,本文在 QUAL2Kw 模型代码层面添加了针对特定断面的贡献比例计算模块。具体计算思路和过程如下:

点源  $\xi_{ps,i,j}$  和非点源  $\xi_{nps,i,j}$  各污染物的绝对负荷量占入库总负荷量的百分比计算如下:

$$\xi_{ps,i,j} = \frac{C_{ps,i,j} \cdot Q_{ps,i,j}}{\sum_{k=1}^{N_{ps,total}} C_{ps,k} \cdot Q_{ps,k} + \sum_{t=1}^{N_{nps,total}} C_{nps,t} \cdot Q_{nps,t}} \quad (6)$$

$$\xi_{nps,i,j} = \frac{C_{nps,i,j} \cdot Q_{nps,i,j}}{\sum_{k=1}^{N_{ps,total}} C_{ps,k} \cdot Q_{ps,k} + \sum_{t=1}^{N_{nps,total}} C_{nps,t} \cdot Q_{nps,t}} \quad (7)$$

进入河段  $i$  的污染物负荷计算如下:

$$W_i = \sum_{j=1}^{N_{ps,i}} Q_{ps,i,j} C_{ps,i,j} + \sum_{j=1}^{N_{nps,i}} W_{nps,i,j} \quad (8)$$

$$W_{nps,i,j} = \frac{Q_{nps,i,j} C_{nps,i,j}}{L_{i,j}} \cdot \Delta X_{i,j} \quad (9)$$

式中:  $W_i$  为河段  $i$  的点源和非点源负荷;  $W_{nps,i,j}$  为河段  $i$  的非点源负荷量;  $N_{ps,i}$  为流入河段  $i$  的点源个数;  $N_{nps,i}$  为流入河段  $i$  的非点源个数;  $C_{ps,i,j}$  为点源  $j$  污染物浓度,  $\text{mg}/\text{m}^3$ ;  $C_{nps,i,j}$  为非点源  $j$  的污染物浓度,  $\text{mg}/\text{m}^3$ ;  $Q_{ps,i,j}$  为点源  $j$  的流量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $Q_{nps,i,j}$  为非点源  $j$  的流量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $L_{i,j}$  为非点源  $j$  流入河段  $i$  的长度,  $\text{m}$ ;  $\Delta X_{i,j}$  为河段  $i$  和非点源  $j$  重叠部分的长度,  $\text{m}$ 。

输入河段  $i$  的污染物通量  $E_{input,i}$  ( $\text{mg}/\text{d}$ ) 为:

$$E_{input,i} = Q_{in,i,up} \cdot C_{in,i,up} + W_i \quad (10)$$

输出河段  $i$  的污染物通量  $E_{output,i}$  ( $\text{mg}/\text{d}$ ) 为:

$$E_{output,i} = Q_{out,i} \cdot C_{out,i} \quad (11)$$

因此,河段  $i$  的污染物通量变化率( $K_i$ ) 为:

$$K_i = 1 - \frac{E_{output,i}}{E_{input,i}} \quad (12)$$

河段  $i$  的污染物通量变化( $\Delta_i$ ) 为:

$$\Delta_i = E_{input,i} - E_{output,i} = K_i \cdot E_{input,i} \quad (13)$$

综上,河段  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) 对特定断面的贡献比例计算公式如下:

$$\xi_{ps,i,j,n} = \frac{\left(\prod_{k=i}^n (1 - K_k)\right) \cdot (C_{ps,i,j} \cdot Q_{ps,i,j})}{C_{out,n} \cdot Q_{out,n}} \quad (14)$$

$$\xi_{nps,i,j,n} = \frac{\left(\prod_{k=i}^n (1 - K_k)\right) \cdot W_{nps,i,j}}{C_{out,n} \cdot Q_{out,n}} \quad (15)$$

式中:  $\xi_{ps,i,j,n}$  为河段  $i$  中第  $j$  个点源对目标河段  $n$  的污染贡献率;  $\xi_{nps,i,j,n}$  为第  $i$  个河段中所涉及的第  $j$  个面源的直接污染负荷量对目标河段  $n$  的污染贡献率;  $Q_{in,i,up}$  为河段  $i$  上一个河段的入流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $C_{in,i,up}$  为河段  $i$  上一个河段中污染物浓度,  $\text{mg}/\text{L}$ ;  $C_{out,i}$  为河段  $i$  的输出污染物浓度,  $\text{mg}/\text{L}$ ;  $Q_{out,i}$  为河段  $i$  的出流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $Q_{out,n}$  为研究目标河段的出流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $C_{out,n}$  为研究目标河段的污染物浓度,  $\text{mg}/\text{L}$ 。

### 3 结果与分析

型校准期及验证期水质模拟结果分别如图 3、图 4 所示。均方根误差 (*RMSE*) 结果见表 1。

#### 3.1 QUAL2Kw 模型模拟结果

潘家口水库水质取样实测结果及 QUAL2Kw 模

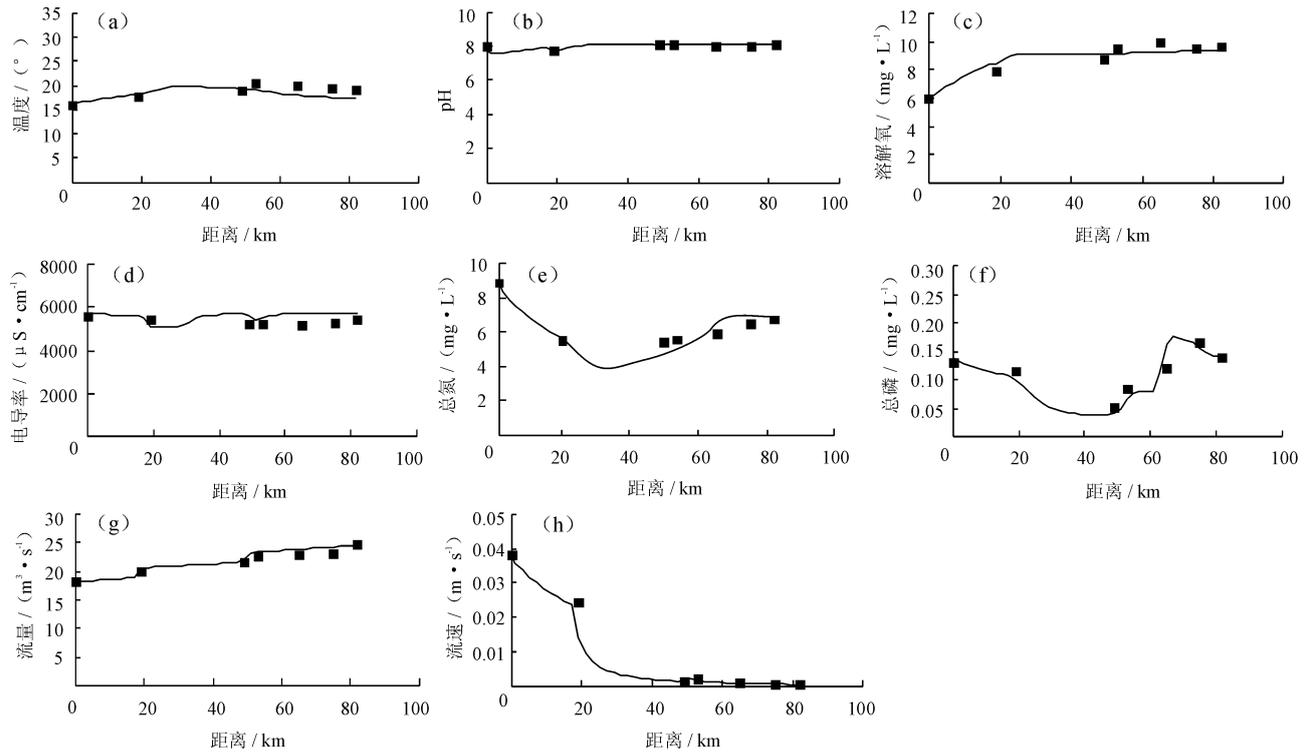


图 3 潘家口水库 QUAL2Kw 模型校准期结果

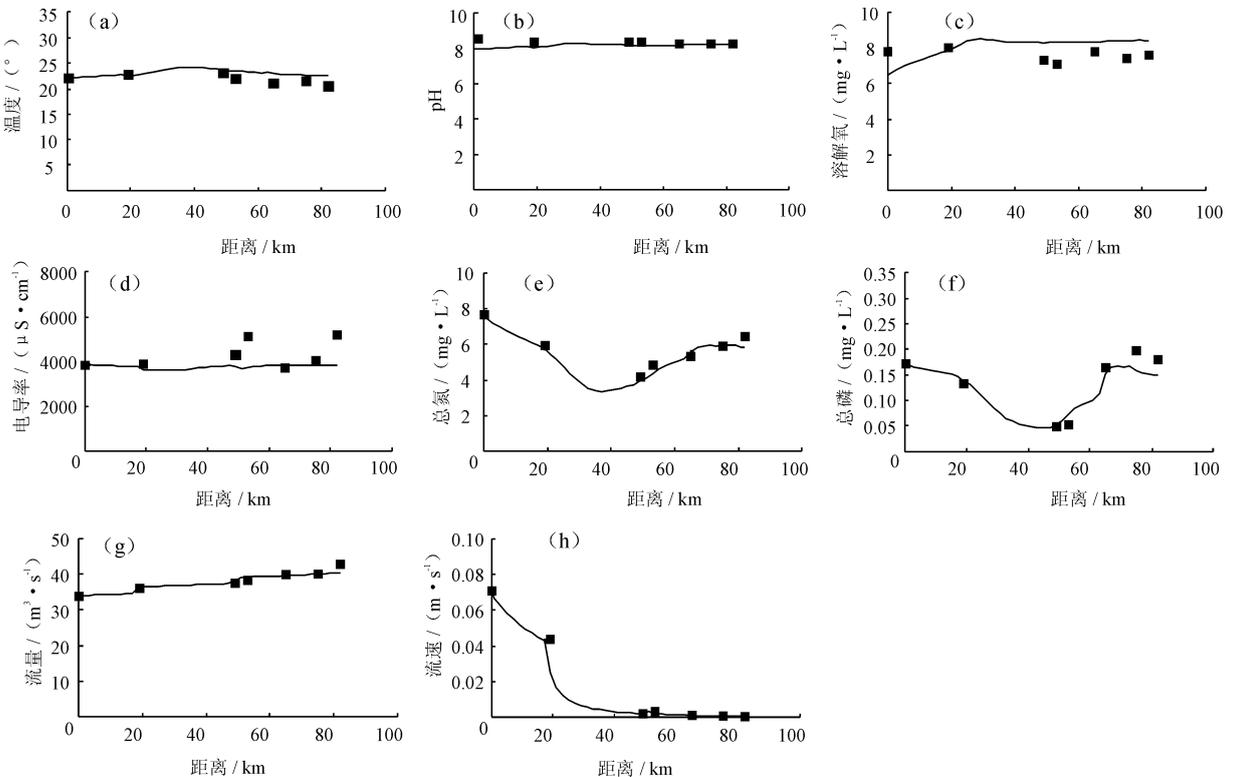


图 4 潘家口水库 QUAL2Kw 模型验证期结果

表1 模型验证期和校准期 RMSE 结果

参数	时段	温度	pH 值	溶解氧	电导率	总氮	总磷	氨氮	硝态氮	有机氮
均方根误差 (RMSE)	校准期	7.79	4.12	9.26	6.40	8.55	19.16	15.32	7.70	18.85
	验证期	5.63	4.62	15.33	15.90	4.71	15.36	14.02	11.59	14.36

从图3、图4中可以看出,QUAL2Kw模拟值与实测值拟合度较高,模型模拟效果较好,进一步通过均方根误差(RMSE)对模型适用性评价表明:模型在潘家口水库适用性较好,因此,该模型能够准确地反映潘家口水库的实际水质状况。

### 3.2 网箱养鱼撤消水质改善结果

网箱撤消后,水质改善情况如图5。

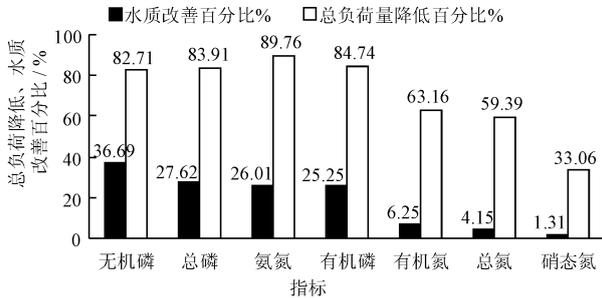


图5 总负荷量降低百分比及水质改善百分比

从图5可以看出,网箱养鱼撤消后,各个指标的总负荷量降低比例均较高,其中氨氮减少89.76%、有机磷减少84.74%、总磷减少83.91%、无机磷减少82.71%、有机氮减少63.16%、总氮减少59.39%、硝态氮减少33.06%。然而进一步的计算结果表明:水质改善幅度却不十分理想:网箱撤消水质恢复程度由高到低依次为:无机磷36.69%,总磷27.62%,氨氮26.01%,有机磷25.25%,有机氮6.25%,总氮4.15%,硝态氮1.31%。

### 3.3 绝对负荷量百分比和贡献比例结果

潘家口水库的各污染源对潘坝前贡献比例和绝对负荷量比例计算结果表示在图6中。可以看出,源头水中硝态氮的绝对负荷量百分比(51.14%)和对潘坝前的贡献比例(38.73%)均最高。燕子峪(S5)-潘家口(S6)在总氮、有机氮、氨氮、总磷的绝对负荷量

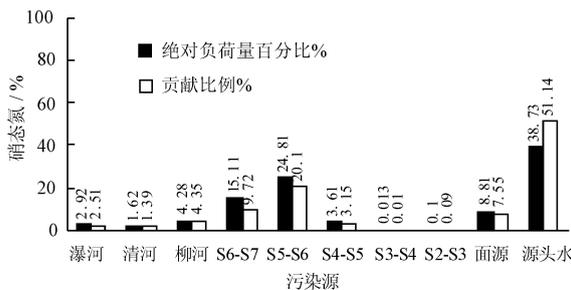
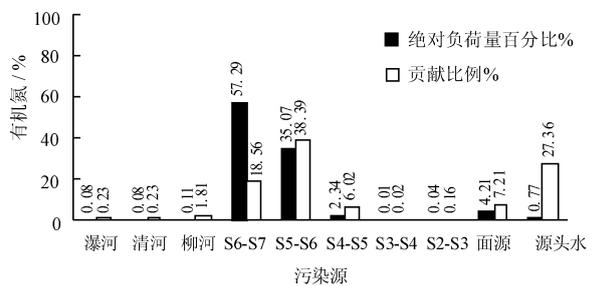
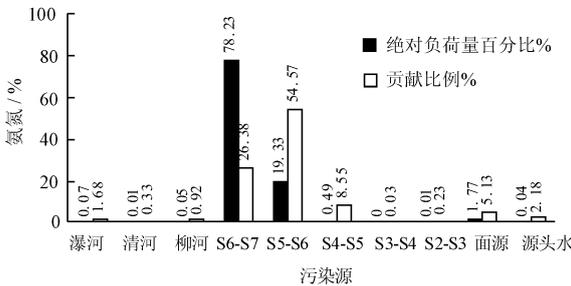
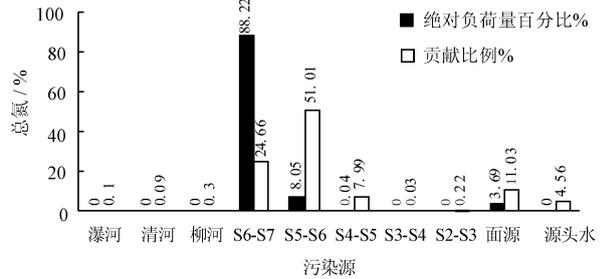
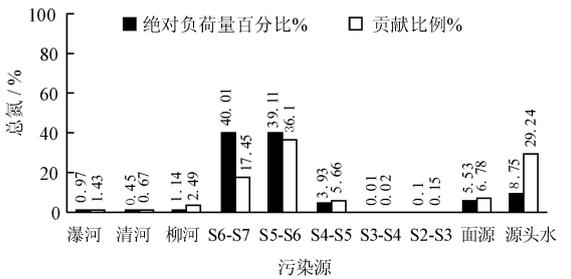


图6 污染源贡献比例和绝对负荷量百分比

百分比中均占有最高比例;而对潘坝前的贡献比例计算结果显示,潘家口(S6)–潘坝前(S7)在总氮、有机氮、氨氮、总磷的贡献比例中占有最高比例。

从绝对污染负荷量百分比上来看,燕子峪(S5)–潘家口(S6)之间负荷量普遍较高,直观判断水环境管理工作应以减少该区段污染物排放为重点;而从有效改善潘坝前水质的目标考虑,应该优先减少潘家口(S6)–潘坝前(S7)的污染物负荷量。针对这两项指标的分析可以为管理决策提供一定的支持。

## 4 结 论

(1)根据模型参数校准和模拟结果,QUAL2Kw模型能较好地描述河流型水库的水质变化,均方根误差结果表明模型适用于研究区域。进一步分析表明,尽管在潘家口水库全年入库的氮磷负荷总量中网箱氮磷负荷量占有较高的比例,但如果将网箱全部撤消,在短时间内水质并不能有显著改善,这主要与水库底藻、浮游植物的吸附作用,以及缓流水体的弥散作用有关。

(2)尽管燕子峪(S5)–潘家口(S6)之间百分比的污染物绝对负荷量普遍较高,但从改善潘家口出库水质的管理目标考虑,为有效提升水质状况,应优先削减潘家口(S6)–潘坝前(S7)的污染物入库负荷量。根据模型结果可以对潘家口水库的水环境问题进一步研究,结合本文针对特定断面的贡献比例计算方法,可以进行氮、磷等污染物的来源解析,为库区网箱清理工作提供科学的决策依据。

### 参考文献:

[1] 韩博平. 中国水库生态学研究的回顾与展望[J]. 湖泊科学,2010,22(2):151–160.

[2] 张远,王丁明,王西琴,等. 太子河流域水库建设对河流水文情势的影响[J]. 环境科学研究,2012,25(4):363–371.

[3] 程素珍,许尚杰,刁汇文. 水库网箱养鱼对水质的影响及防治对策[J]. 水利与建筑工程学报,2010,8(1):30–31+147.

[4] Costa–Pierce B. From farmers to fishers: developing reservoir aquaculture for people displaced by dams, fisheries series, world bank technical paper No. 369 [M]. The World Bank: Washington D. C,1997.

[5] 宁丰收,古昌红,游霞,等. 大洪湖水库网箱养殖区污染分析[J]. 环境科学与技术,2006,29(4):47–49.

[6] 陈飞星. 湖泊(水库)网箱养鱼水质模型研究[J]. 环境科学学报,1999,19(2):132–136.

[7] 刘家寿,崔奕波,刘建康. 网箱养鱼对环境的影响研究进展[J]. 水生生物学报,1997,21(2):174–184.

[8] 汤叶涛,贾后磊,温琰茂,等. 网箱养殖对水环境的影响[J]. 水利渔业,2003,23(1):46–48.

[9] 臧常娟,黄岁樑,吴敏,等. 投饵养鱼对潘家口水库围隔中浮游植物及水质的影响[J]. 环境科学学报,2011,31(3):525–532.

[10] 林永泰,张庆,杨汉运,等. 黑龙江水库网箱养鱼对水环境的影响[J]. 水利渔业,1995,(6):6–10.

[11] Deusa R, Britob D, Mateusb M, et al. Impact evaluation of a pisciculture in the Tucuruí reservoir (Pará, Brazil) using a two–dimensional water quality model [J]. Journal of Hydrology, 2013, 487(22):1–12.

[12] Kong D. Water quality modeling of the eutrophic transition zone in a river-type reservoir paldang [J]. Journal of Korean Society on Water Environment, 2014, 30(4):429–440.

[13] 周毓彦,肖伟华,暴柱,等. 潘家口水库叶绿素a分布及与理化因子的相关分析[J]. 中国农村水利水电,2014,(4):34–38.

[14] 吕艳,邢海燕,张海英. 潘大水库2012年水质评价及变化趋势分析[J]. 海河水利,2014(2):29–30.

[15] 王立明,刘德文. 网箱养鱼对潘家口水库水质的影响分析[J]. 河北渔业,2008(6):42–44+49.

[16] Chapra S, Pelletier G. QUAL2K: A modeling framework for simulating river and stream water quality: Documentation and user's manual [M]. Medford: Civil and Environmental Engineering Department Tufts University,2003.

[17] Kannel P R, Lee S, Lee Y S. Application of automated QUAL2Kw for water quality modeling and management in the Bagmati River, Nepal [J]. Ecological Modelling, 2007,202(3):503–517.

[18] Cao Bibo, Li Chuan, Liu Yan et al. Estimation of contribution ratios of pollutant sources to a specific section based on an enhanced water quality model [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(10):7569–7581.

[19] 刘艳,曹碧波,李川,等. QUAL2Kw–GWLF模型联用在新安江干流黄山段的应用研究[J]. 水资源与水工程学报,2014,25(6):163–168+175.

[20] Pelletier G J, Chapra S C, Tao Hua. QUAL2Kw – A framework for modeling water quality in streams and rivers using a genetic algorithm for calibration [J]. Environmental Modelling & Software, 2006,21(3):419–425.