

# 基于多模式逆向水质模型的程海水位调控-水质响应预测研究

邹锐<sup>1,4</sup>, 董云仙<sup>2</sup>, 颜小品<sup>3</sup>, 赵磊<sup>2</sup>, 贺彬<sup>2</sup>, 刘永<sup>3\*</sup>

(1. Tetra Technologies Incorporated Company 10306 Eaton Place, Ste 340, Fairfax, VA 22030, USA; 2. 中国昆明高原湖泊国际研究中心, 昆明 650034; 3. 北京大学环境科学与工程学院, 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100871; 4. 昆明诚锐环保科技有限公司, 昆明 650224)

**摘要:**以云南省程海为例, 基于 CE-QUAL-W2 计算平台开发了水动力-水质模型. 由于程海现有的数据不足以支撑开发可靠的流域水文与污染物负荷模型, 为弥补由此引起的水质模型边界条件缺失的限制, 本研究提出了基于逆向模拟与遗传算法的多模式负荷-参数识别方法来实现对水质模型的校正和鲁棒校验. 应用校验后的模型对程海不同水位调控情景的水质响应进行鲁棒预测分析, 为决策者提供了基于不确定性的量化水质响应, 从而有助于制定可靠的管理策略. 研究结果表明, 程海水位调控对 TN、TP 及 COD 等水质指标的改善作用非常有限.

**关键词:**水质水动力模型; 逆向模拟; 遗传算法; 多模式参数识别; 鲁棒预测

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)11-3193-07

## Multiple Pattern Inverse Water Quality Modeling Approach for Predicting the Water Quality Consequence of Lake Chenghai Water Elevation Control

ZOU Rui<sup>1,4</sup>, DONG Yun-xian<sup>2</sup>, YAN Xiao-pin<sup>3</sup>, ZHAO Lei<sup>2</sup>, HE Bin<sup>2</sup>, LIU Yong<sup>3</sup>

(1. Tetra Technologies Incorporated Company 10306 Eaton Place, Ste 340, Fairfax, VA 22030, USA; 2. Kunming International Center for Pleantu Lakes, Kunming 650034, China; 3. The Key Laboratory of Water and Sediment Sciences, Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China; 4. Kunming Challenger Technology, Ltd., Kunming 650224, China)

**Abstract:** A water quality model was developed through incorporating the water surface elevation and water quality data of Lake Chenghai into the CE-QUAL-W2 computational platform. The model integrates the water surface elevation and water quality into a holistic dynamic system based on the data of Lake Chenghai, and was calibrated against observed data using a multiple pattern inverse water quality modeling technology, which was driven by a robust genetic algorithm (GA). After the model was calibrated, it was used to produce robust predictions of the lake water quality in response to various water elevation controlled scenarios. The model established a basis for quantifying the water quality responses under uncertainty, and is valuable for supporting effective and reliable management decision making. The results of this research suggest that various water elevation control scenarios only result in insignificant water quality improvement in terms of TN, TP, and COD concentrations, therefore, it does not recommend to consider water elevation control to be the major water quality management option for Lake Chenghai.

**Key words:** hydrodynamic and water quality model; inverse modeling; genetic algorithms (GA); multiple pattern parameter identification; robust prediction

水位及水量变动是影响湖泊水质与水生态系统长期变化的重要因素; 湖泊的水位调控不仅可调节水体中营养物质的浓度, 同时还可以进而影响浮游植物生产力和空间分布的差异; 因此, 研究湖泊水位变动的水质与水生态响应, 对于湖泊水质改善与生态恢复具有重要价值. 已有研究分析了湖泊水位变动的响应, 但在定量的模拟研究方面相对缺乏<sup>[1-5]</sup>. 由于湖泊水位变化与水质、水生态间的关系较为复杂, 且难以用单纯的数学统计方法获得, 因此基于机制数学表达的水质模型被认为是解析真实系统中水位调控对水质影响的可靠方法<sup>[6,7]</sup>. 参数识别对水

质模型的精确性和稳定性十分重要; 传统上, 水质模型的参数识别是通过试错法进行校正实现的, 但是该方法存在主观性, 且不能充分处理参数模式不确定性的问题<sup>[8]</sup>. 为弥补传统方法的缺陷, 同时也为了解决在某些情况下水质模型参数估值时数据不足的缺陷, 基于反演模型方法(或逆向模型方法)的系

收稿日期: 2010-12-15; 修订日期: 2011-04-19

基金项目: 云南省科技厅社会事业发展专项(2009CA002); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07102-001)

作者简介: 邹锐(1968~), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为水环境模型, E-mail: rz5q@yahoo.com

\* 通讯联系人, E-mail: yongliu@pku.edu.cn

统性参数识别方法在近年来逐步成为研究的热点<sup>[9-11]</sup>,但求解这类多模式逆向模型问题常常存在解不唯一的问题;克服这个困难的一个可行方法是使用非单值解来表征水质模型参数模式的不确定性<sup>[8,12,13]</sup>.程海为云南省九大高原湖泊之一,在其水质恢复与富营养化控制中,有关管理机构提出了实施外流域调水工程、调控程海水位以改善水质状况的建议;但由于缺乏系统深入的研究,目前对外流域调水的水质影响尚不可知.为此,本研究主要目标是构建基于 CE-QUAL-W2 的水动力-水质模型,采用逆向模型技术和遗传算法(GA)构建多模式逆向参数估值技术来识别模型参数;并应用此模型对拟实施的程海水位调控的水质响应进行预测分析.

## 1 模型框架

### 1.1 程海流域

程海是云贵高原较为独特的湖泊,地处青藏高原与云贵高原的衔接部位,东经 $100^{\circ}33' \sim 100^{\circ}45'$ 、北纬 $26^{\circ}25' \sim 24^{\circ}40'$ ;湖面面积 $74.6 \text{ km}^2$ 、平均水深 $26.5 \text{ m}$ ,流域面积 $318.3 \text{ km}^2$ .程海多年平均入湖水量 $1.67 \text{ 亿 m}^3$ ,蓄水量 $19.2 \text{ 亿 m}^3$ .由于程海特殊的封闭型特征、无水体交换,造成营养物质的长期积累;尤其是1980年代后,湖周农业生产方式转变和湖滨区螺旋藻养殖业快速发展,程海富营养化发展加速,甚至在冬季都有水华暴发<sup>[14-18]</sup>.为了评估拟实施的仙人河补水工程的效果,并避免工程的盲目上马以及可能对水质和水生态系统产生的风险,本研究以水质模型为基础,定量分析了外流域调水与水位调控的可能水质响应,以期有效地决策提供科学依据.仙人河的可引用水量为 $3140 \text{ 万 m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ ,年补水量占程海蓄水量的 $1.64\%$ ;补水水质为TN $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、TP $0.14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、COD $2.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ .

### 1.2 水动力-水质模型开发

#### 1.2.1 水动力-水质模型

CE-QUAL-W2是由美国陆军工程兵团开发的二维、纵直两向水动力与迁移模型<sup>[19]</sup>,共含有5个控制方程用来描述水动力情况,包括了连续性方程、 $x$ -动量方程、 $z$ -动量方程、状态方程以及自由表面方程<sup>[6]</sup>;其中连续性方程、状态方程和自由表面方程可表示为式(1)~(3).

$$\frac{\partial UB}{\partial x} + \frac{\partial WB}{\partial z} = qB \quad (1)$$

$$\rho = f(T_w, \Phi_{\text{TDS}}, \Phi_{\text{ISS}}) \quad (2)$$

$$B_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \int_{\eta}^h UB dz - \int_{\eta}^h qB dz \quad (3)$$

式中, $U$ 为水平速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $B$ 为时空变化的截面宽度, $\text{m}$ ;  $x$ 为沿水表层体中心线的纵向笛卡尔坐标值,右侧为正;  $W$ 为垂向速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $z$ 为垂向笛卡尔坐标,向下为正方向;  $q$ 为立面流的源与汇, $\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{s})^{-1}$ ;  $\rho$ 为密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^3$ ;  $f(T_w, \Phi_{\text{TDS}}, \Phi_{\text{ISS}})$ 为依赖于温度( $T_w$ )、总溶解固体物浓度与盐度含量( $\Phi_{\text{TDS}}$ )及无机悬浮颗粒物浓度( $\Phi_{\text{ISS}}$ )的密度函数;  $B_{\eta}$ 为表面宽度, $\text{m}$ ;  $\eta$ 为水面高度, $\text{m}$ ;  $t$ 为时间, $\text{s}$ ;  $h$ 为相对地平面高度, $\text{m}$ .模型中各水质组分的迁移转化关系需要用在源汇项中表示出的动力反应速率来计算. CE-QUAL-W2的水质迁移转化的控制方程为:

$$\frac{\partial B\Phi}{\partial t} + \frac{\partial UB\Phi}{\partial x} + \frac{\partial WB\Phi}{\partial z} - \frac{\partial(BD_x \frac{\partial \Phi}{\partial x})}{\partial x} - \frac{\partial(BD_z \frac{\partial \Phi}{\partial z})}{\partial z} = q_{\phi}B + S_{\phi}B \quad (4)$$

式中, $\Phi$ 为立面成分浓度, $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $D_x$ 为温度与组分纵向弥散系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $D_z$ 为温度与组分垂向弥散系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $q_{\phi}$ 为立面单位体积内流入、流出量变化率, $\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{s})^{-1}$ ;  $S_{\phi}$ 为立面源汇项, $\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{s})^{-1}$ .本研究以程海为例,基于数据和时间的可行性,确定了与程海数据可获得性及决策支持需求相匹配的模型结构,对与水质标准及相关的指标TN、TP、COD与TDS(矿化度)进行模拟.对于TN、TP与COD来说,运用一阶衰减项对总动力反应通量进行表征,而TDS则按保守成分处理,采用零衰减速率的方式进行模拟.

#### 1.2.2 模型构建

程海水质模型的构造包括模型网格生成、模拟时间确定、初始条件以及边界条件界定等.在本研究中,由于缺乏数据对模型边界条件进行空间解析,因此无法在模拟时对水质空间分布进行动态模拟.基于有限的条件,最合理的选择就是在水平上不对湖泊进行网格划分,而只在垂直方向解析水动力状况<sup>[20,21]</sup>.此类水平空间整合的模型方法往往计算效率高,且可以帮助回答各种流域水资源或污染控制措施对湖泊整体水质影响的问题.基于水平空间整合的技术方案,程海水体被划分为均匀厚度的35层,每层 $1 \text{ m}$ 、最深处 $35 \text{ m}$ ,与实测深度基本吻合;此后还进一步确定了模型网格的水位-体积曲线符合实测的数据.

模型的模拟时间跨度为2009-10-01~2010-06-

01;初始条件为 2009-10-01 的监测数据,并经前处理成为 CE-QUAL-W2 的输入格式.模型的边界条件包括水文、水质和气象边界条件;水文边界条件通过 CE-QUAL-W2 附带的水平衡计算工具经反复迭代得到,气象边界条件则以 2009~2010 年的观测数据为基础,水质边界条件的设立则是本研究面临的一个技术难题.在传统的水质模型研究中,水质边界条件一般是基于流域模型的结果来给定的,但根据程海现有的数据条件,还无法建立可靠的流域模型,因此就无法用传统的方法界定程海水质模型的边界条件.为此,本研究提出了应用多模式逆向水质模型方法来同时推算水质边界条件和模型参数的方法.

### 1.3 基于逆向模拟与遗传算法的水质模型多模式参数识别

综上所述,由于在本研究中缺少能充分表示入湖污染负荷的数据,且现有的数据也不足以支撑开发可靠的流域水文与污染物负荷模型,因此,程海水质模型的开发就面临水质边界条件缺失的限制;本研究应用基于逆向模拟与遗传算法的多模式负荷-参数识别方法来实现对水质模型的校正<sup>[22]</sup>.多模式逆向参数识别方法的本质是一种基于不确定性的从已知条件(观测数据)推算未知状况(参数及边界条件)的数学方法,目的在于克服逆向参数识别方法在应用时常受到数据有限、最优解不唯一的困境<sup>[10]</sup>.在传统上,可以通过耦合先验信息对逆向模拟问题进行预处理,以解决最优解不唯一的问题.但事实上,有时候很难得到充足的先验信息对模型进行预处理;如果将不精确的先验信息强制性地应用到逆向模型中使其收敛,反而会导致不可靠解的产生.为解决这一问题,可行的方法就是使用多组解来表征水质模型参数的不确定性问题.因此,多模式逆向参数识别方法不再寻求单值解,取而代之是在计算可行的前提下寻求多组解;然后应用已被识别的参数模式进行模型模拟和决策情景的不确定性分析.

在本研究中,首先对程海的 CE-QUAL-W2 水质模型构造逆向模型;该逆向模型包括 2 部分的决策变量:①模型静态参数,包括 TN、TP 及 COD 的一阶降解系数;②模型动态边界条件,包括 TN、TP、COD 及 TDS 的动态边界条件.模型的目标函数为整个模型对每次监测的 TN、TP、COD 及 TDS 模拟残差在时间轴上的积分;由此构造的逆向模型的数学形式是个非线性优化问题,因此采用了具有普适性的全局优化算法,也即遗传算法,对该逆向模型进行求解.在实施遗传算法中,采用了不同的计算参数为搜

索过程提供不同的收敛环境,包括种群大小、遗传代数上界、变异系数、微种群算子以及生态位算子等,以便产生不同的参数-负荷组合模式,实现多模式逆向参数-负荷估值.

## 2 结果与讨论

### 2.1 水动力模型校验

模型校正的第一步是对水位和温度等基本物理变量进行模拟和比较分析.水位校正是程海水动力-水质模型校正的基础,同时也是下文分析通过仙人河补水进行水位调控情景对程海水质影响的基础.图 1 的水位校正结果显示,本研究所建立的程海水动力模型可有效实现对程海水位和水量平衡关系的模拟.在水位校正确定水平衡后,温度校正将进一步验证程海水动力模型对湖体的热力学平衡和动力的模拟能力.对程海而言,主要的热平衡过程与影响因子包含太阳辐射、气温-水温交换、大气逆辐射、风以及蒸发等. CE-QUAL-W2 模拟了所有这些过程,由图 2 可知,程海水动力模型较好地实现了对程海热平衡关系的模拟.

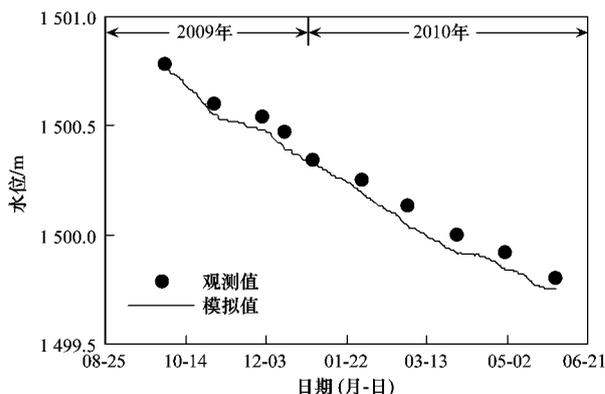


图 1 程海水位校正结果

Fig. 1 Water level calibration

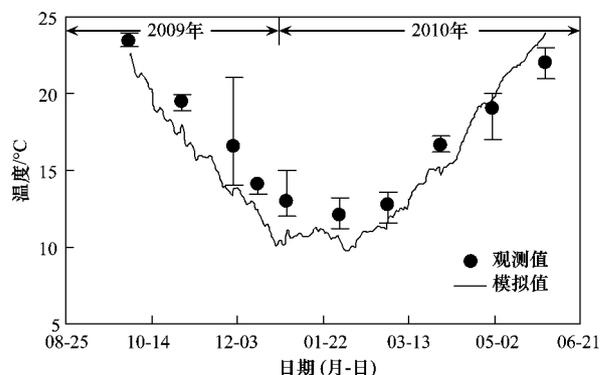


图 2 程海温度校正结果

Fig. 2 Water temperature calibration

## 2.2 多模式参数识别结果

本研究共对程海水水质模型进行了  $12.5 \times 10^4$  次迭代,并从遗传算法的最终收敛种群得到了 5 种不同的参数-负荷组合模式;再分别把这 5 组参数-负荷组合引入程海 CE-QUAL-W2 模型中,得到了多模式鲁棒预测模型.为了评估和应用多模式逆向参数估计方法所获取的程海模型的准确度,

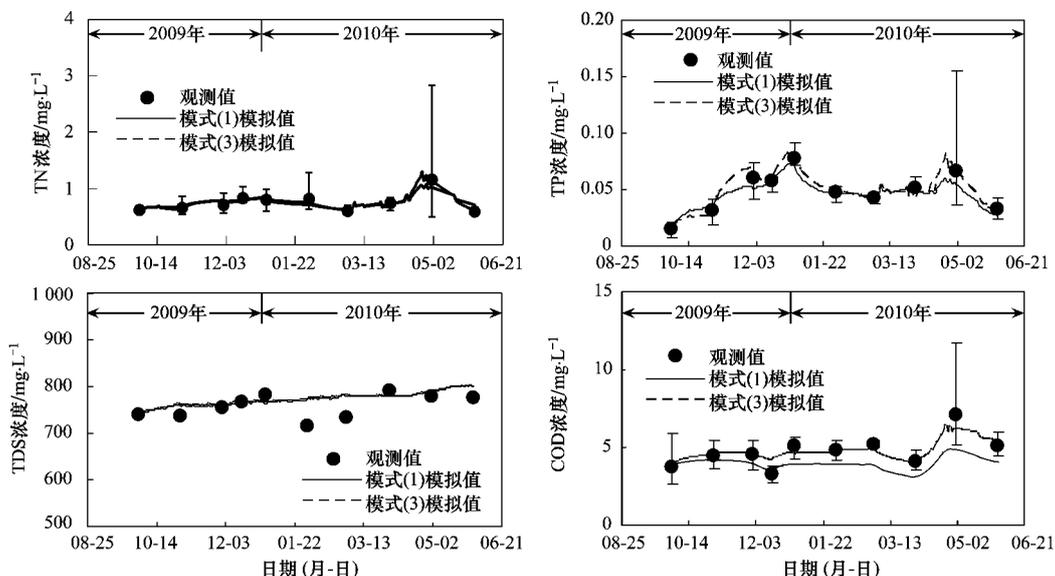


图 3 参数模式(1)和(3)的模拟结果

Fig. 3 Water quality calibration under parameters pattern (1) and (3)

由于不同的参数模式代表了水质对外部条件变化(如水位调控)的不同响应方式,因此当所有 5 种参数模式都被用来进行情景分析时,其结果就涵盖了预测结果中的不确定性,由此做出的科学推论或管理决策就具有了鲁棒性(或可靠稳定性).如果在某个参数模式下模型预测结果表明水位调控对水质会产生明显影响,但是在另一个参数模式下模型结构显示水质响应不明显,那么这种预测的不确定性就告诉决策者应该对相应的水位调控决策持慎重态度,并在实施任何此类工程前最好实施进一步的数据收集和更高精度的模型研究以减小预测的不确定性.另一方面,如果所有参数模式下模型预测结果都显示水位调控方案对水质有明显改善作用,那么决策者就可以较为确定地相信水位调控方案的效益;反之,如果在所有参数模式下模型预测结果都显示水位调控对水质没有显著改善,那么决策者同样也可以比较确信相应的水位调控方案对水质改善没有显著效益.

图 3 显示了模式(1)和模式(3)情况下模型模拟得到的水质与观测值的比较.其余模式条件下,也均取得了同样的准确度,限于篇幅,在此不做赘述.由此,在 5 种通过逆向模型识别的参数模式下,本研究所开发的程海水动力-水质模型较好地实现了对水质浓度趋势的预测,因而可据此开展进一步的情景分析.

## 3 程海水位调控的水质响应及多情景鲁棒预测

在完成程海水动力-水质模型的多参数模式逆向估值的基础上,应用该模型对程海水位调控的水质影响进行了基于不确定性的鲁棒预测研究.对于程海的水位调控,本研究集中考虑了调控水源为仙人河的 4 种模拟情景.在情景模拟中,预测的时间跨度为 2 a,对水质影响的评估以模拟出的第 2 a 结果为依据,以充分考虑水位变化之后的水质响应.在下文的分析中,首先以第 1 种参数模式为基础,对情景模拟结果进行包含时间序列和平均响应在内的详细阐释,而后再基于多模式鲁棒预测结果对水位调控的水质影响进行综合评估.

### 3.1 仙人河在当前水质条件下以最大设计能力补水(情景 1)

情景 1 是模拟在当前水质条件下,仙人河以最大设计补水能力向程海进行补水,从而引起程海水位变动及相应的水质变化.图 4 显示了情景 1 下第

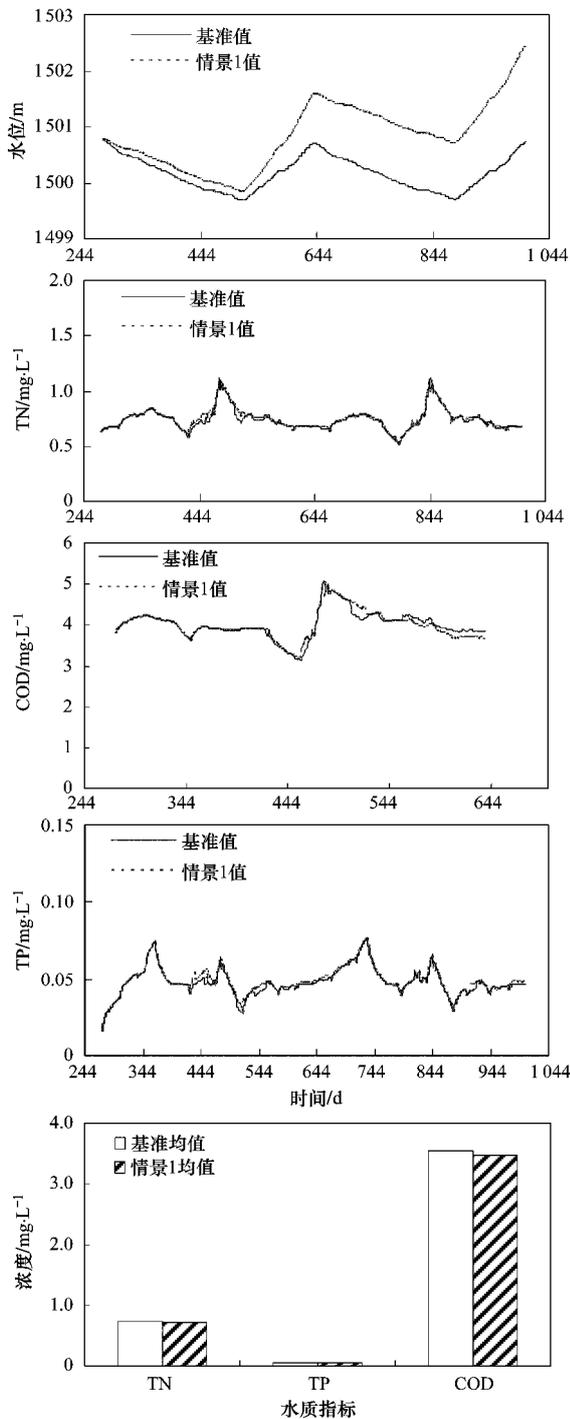


图4 情景1下的仙人河补水及水质响应

Fig. 4 Lake Xianren water replenishment and the response of water quality under scenario 1

1种参数模式的模拟结果(横轴为天,起始时间为2009年1月1日),其中基准条件代表了没有水位调控的状况.由图4,在进行水位调控1a后,程海水位明显升高;但就水质指标而言,与基准相比虽然在局部时间点上会有差异,但总体变化并不明显.由于

情景1已经建立在仙人河最大引水能力的基础上,因此进一步增加引水量并不现实.当然,从其他水源地调水也许可以进一步提高程海水位,但如图4所示,即使在只有仙人河水源的条件下,持续的调水将超出程海湖盆所能容纳的限度;也即,如果实施更多的引入水就必须考虑建造出流工程以维持适当的水平衡.为了探索情景1下程海水水质响应微弱的原因,下文构造了另外3个情景,对不同的仙人河来水水质对程海水质的影响进行模拟分析.

### 3.2 仙人河在当前水质浓度降低20%条件下以最大设计能力补水(情景2)

情景2模拟在当前仙人河所有水质指标浓度均降低20%的条件下,仙人河以最大设计补水能力补水所造成的影响(图5).如图5所示,尽管仙人河水水质浓度改善了20%,在以最大设计能力引水的情况下,程海水质的变化也只是比情景1稍改善了一点,效果非常有限.

### 3.3 仙人河在当前水质浓度降低50%条件下以最大设计能力补水(情景3)

情景3在情景2的基础上进一步降低仙人河的TN、TP和COD浓度.该情景模拟在当前仙人河水水质浓度降低50%的条件下,仙人河以最大设计补水能力排水所造成的水质响应(图6).同样,尽管对引入水的水质进行了大幅度的改善,由此引起的程海水水质改善并不明显.

### 3.4 仙人河在完全去除水中的污染物条件下以最大设计能力补水(情景4)

为了彻底对仙人河引水对程海水水质影响的上界做出评估,设计了一个极端情景——情景4,即在最大设计引水能力基础上,完全去除仙人河来水中的污染物.由于模型结果从时间序列上看不出与其他3个情景的明显差异,在此本研究不单独绘制其时间序列结果.由此,即使对仙人河来水在进入程海之前进行深度处理,然后再以最大引水能力排水入程海中,产生的水质响应也可能还是低到观测不到的程度.

### 3.5 水位调控的程海水水质响应综合分析

上文分析了第1种参数模式下4种不同情景的水质响应结果,这些结果仅能被用作观察模型行为,而无法基于此对水位调控的水质影响做结论.主要的原因在于,参数模式只是代表了可能的系统响应途径,上文识别的5种参数模式代表了系统的5种可能的响应方式.因此,对程海水位调控的水质影响的结论性评估必须考虑这些可能的响应模式下的水

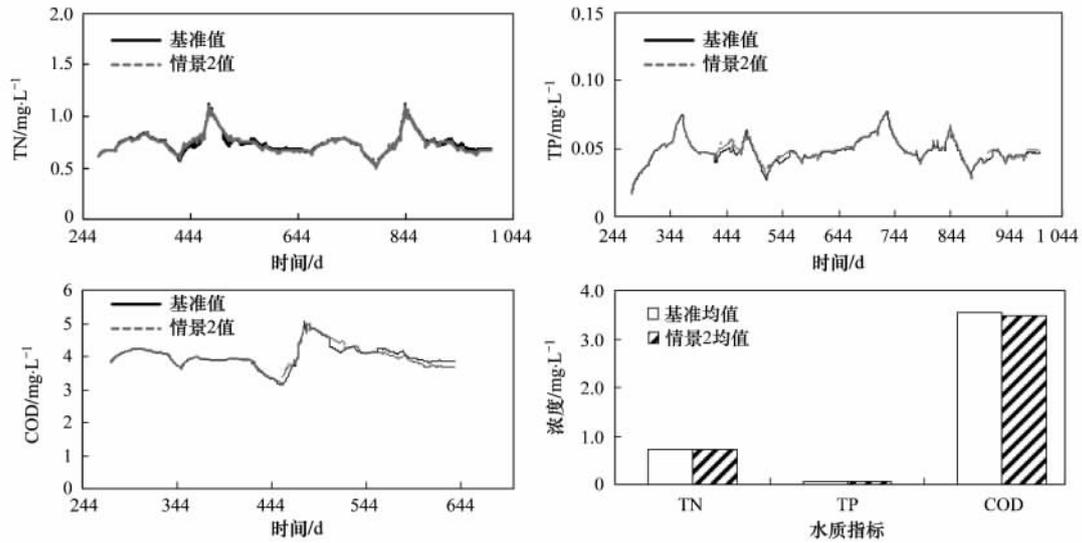


图 5 情景 2 下的仙人河补水及水质响应

Fig. 5 Lake Xianren water replenishment and the response of water quality under scenario 2

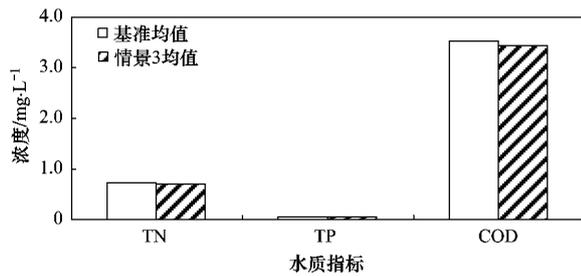


图 6 情景 3 下的仙人河补水及水质响应

Fig. 6 Lake Xianren water replenishment and the response of water quality under scenario 3

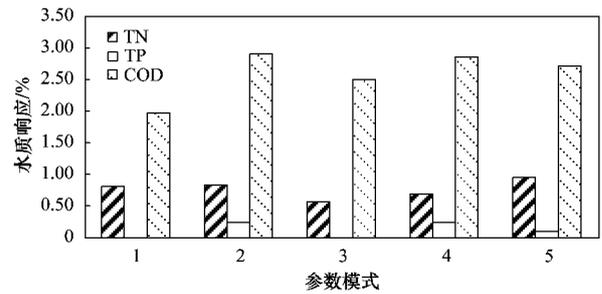


图 7 不同参数模式下的水质响应

Fig. 7 Response of water quality under different parameter patterns

质结果,即必须以鲁棒预测分析的结果作为评估依据.图 7 展示了情景 1 下程海水水质响应情况的鲁棒预测结果,其中纵坐标代表相应的水位调控情景所引起的水质相对变化;由图 7 可见,对于相同的水位调控情景,用不同的参数模式得到的相对水质响应强度具有一定的差异,但总的来看,这种由于系统响应方式不确定性引起的水质变化差异比较小,而且从趋势上具有一致性.其余 3 个情景下的结论与情景 1 类似,限于篇幅,在此不再赘述.

综合 5 种参数模式的模拟结果,图 8 总结了上述 4 种水位调控情景的水质响应区间.图 8 的结果显示,由单纯的水位调控所引起的最大水质响应水平甚至没有达到可以观测到的程度;在极端水质控制强度下(情景 4),TN 响应可达到约 2.5%,TP 响应也可达到约 1.5%,而 COD 则可以达到 4.5%;这些情景进一步证明了程海水位调控对水质改善效果的局限

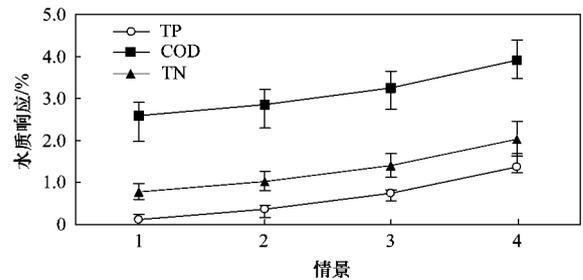


图 8 不同情景下的程海水水质 (TN、TP 和 COD) 的响应区间

Fig. 8 Response of Lake Chenghai water quality ranges under different scenarios

性.需要注意的是,所有这些情景都是以多模式鲁棒预测的方法进行分析的;虽然不同的参数模式给出的响应不完全一样,体现了模型中的不确定性,但对每一个情景,所有参数模式预测出的响应在趋势和水平上又是彼此一致的;说明在充分考虑模型不确

定性的情况下,本研究结果确认了程海水位调控对 TN、TP 及 COD 等水质指标的改善作用是非常有限的.其主要原因在于:引水量只有程海现状蓄水量的 1.64%,对水动力条件的改善有限;而程海为封闭湖,没有对外的污染负荷输出.

#### 4 结论

(1)本研究基于 CE-QUAL-W2 构建水质-水动力模型,模拟程海水量与热动力平衡过程.水位校验和温度校正结果表明,本研究建立的程海水动力-水质模型可有效实现对程海水位和水量平衡与热平衡关系的模拟.

(2)对程海水质模型进行  $12.5 \times 10^4$  次迭代,并从遗传算法的最终收敛种群得到了 5 种不同的参数-负荷组合模式.分别把这 5 组参数-负荷组合引入程海 CE-QUAL-W2 模型中,得到的模型就构成了多模式鲁棒预测模型.进行水位调控模型模拟到的水质与观测值的比较结果显示,本研究所开发的程海水动力-水质模型较好地实现了对水质浓度趋势的预测.

(3)本研究设计了 4 种情景模拟仙人河引水的程海水质响应,情景模拟结果显示,无论在何种水质条件下以最大设计能力补水,程海的水质响应都低到观测不到的程度.在充分考虑模型不确定性的情况下,本研究结果确认了程海水位调控对 TN、TP 及 COD 等水质指标的改善作用是非常有限的.

#### 参考文献:

- [ 1 ] 李文朝. 浅型富营养湖泊的生态恢复——五里湖水生植被重建实验[J]. 湖泊科学,1996,8(s1):1-10.
- [ 2 ] 潘红玺,王云飞,董云生. 洱海富营养化影响因素分析[J]. 湖泊科学,1999,11(2):184-188.
- [ 3 ] 李锦秀,杜威,孙以三. 水动力条件对富营养化影响规律探讨[J]. 水利水电技术,2005,36(5):15-18.
- [ 4 ] 刘永,郭怀成,周丰,等. 湖泊水位变动对水生植被的影响机理及其调控方法[J]. 生态学报,2006,26(9):3117-3126.
- [ 5 ] 颜昌宙,金相灿,赵景柱,等. 云南洱海的生态保护及可持续利用对策[J]. 环境科学,2005,26(5):38-42.
- [ 6 ] Chapra S C. Surface water-quality modeling [ M ]. New York: McGraw-Hill,1997. 295-315.
- [ 7 ] Cole T M , Wells S A . CE-QUAL-W2: A Two-dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 3.2 [ R ]. Vicksburg: US Army Engineering and Research Development Center,2003.
- [ 8 ] Zou R, Lung W S. Robust water quality modeling calibration using an alternating fitness genetic algorithm [ J ]. Journal of Water Resource Planning and Management, 2004, 130(6): 471-479.
- [ 9 ] Little K W, Williams R E. Least-squares calibration of QUAL2E [ J ]. Water Environment Research, 1992, 64(2): 170-185.
- [ 10 ] Zou R, Lung W S, Wu J. Multiple-pattern parameter identification and uncertainty analysis approach for water quality modeling [ J ]. Ecological Modeling, 2009, 220(5): 621-629.
- [ 11 ] 沈晔娜,吕军,陈军华,等. 水源区河流非点源污染物入河量计算的水质方程反演方法 [ J ]. 环境科学, 2010, 31(8): 1768-1774.
- [ 12 ] Sen M, Stoffa P L. Global Optimization Methods in Geophysical Inversion [ M ]. New York: Elsevier, 1995.
- [ 13 ] Beven K. On the concept of model structural error [ J ]. Water Science and Technology, 2005, 52(6): 167-175.
- [ 14 ] 王若南,钱澄宇. 程海藻类植物调查研究 [ J ]. 云南大学学报 (自然科学版), 1988, 10(3): 250-258.
- [ 15 ] 吴敬禄,蒋雪中. 云南程海近 500 年来湖泊初始生产力的演化 [ J ]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22(2): 95-98.
- [ 16 ] 杜菊芳. 程海湖流域生态环境现状及综合治理措施探讨 [ J ]. 林业调查规划, 2006, 31(s1): 130-131.
- [ 17 ] 董云仙,金玉,胡锦乾,等. 程海冬季水华特征、成因与控制对策 [ J ]. 环境科学导刊, 2010, 29(3): 28-31.
- [ 18 ] 万国江,陈敬安,胥思勤,等. 210Pbex 沉积通量突发增大对湖泊生产力的指示——以程海为例 [ J ]. 中国科学 (D 辑): 地球科学, 2004, 34(2): 154-162.
- [ 19 ] Edinger J E, Buchak E M. A hydrodynamic and two-dimensional reservoir model; the computational basis [ R ]. Ohio: U. S. Army Engineer Division, 1975.
- [ 20 ] U. S. EPA. Final Report: Nutrients and Mercury TMDLs for Lake Wallenpaupack, Pike and Wayne Counties [ R ]. Pennsylvania: U. S. EPA, 2005.
- [ 21 ] Tetra Tech, Inc. . Lost River model for TMDL development [ R ]. Water Resources and TMDL Center, 2005.
- [ 22 ] 王建平,程声通,贾海峰. 水质模型参数优化的遗传算法实现及控制参数分析 [ J ]. 环境科学, 2005, 26(3): 61-65.