基于 MIKE21 和灰色模式识别模型的洪湖水质模拟与 评价¹

张婷¹,王学雷²,耿军军³,班璇²,杨超²,吕晓蓉²

(1. 湖北科技学院资源环境科学与工程学院,湖北咸宁 437100;2. 中国科学院测量与地球物理研究所环境与灾害评估湖北省重点实验室,湖北武汉 430077;3. 武汉大

学资源与环境科学学院,湖北武汉 430072)

【摘要】:认识自然和人为因素驱动下湖泊水环境质量的响应和变化规律,有利于更精确地进行湖泊水质模拟和评价。运用二维水质模型和灰色模式识别模型评价了不同污染源削减方案对洪湖水质的影响。基于 2012 年实测地形、水文、气象、水质和污染源定量输入,建立了洪湖二维水动力和水质耦合模型。模拟结果显示:水位率定和验证的均方根误差分别为 0.10 和 0.08m,总氮、总磷、铵态氮和高锰酸盐指数的率定误差分别为 0.171、0.009、0.110 和 0.627mg/L,验证误差分别为 0.191、0.020、0.079 和 0.689mg/L,水动力模型和水质模型的模拟结果满足精度要求。不同管理措施方案下洪湖水质的恢复效果比较显示,洪湖蓝田和下新河入水口各污染物指标浓度减少 50%方案下,水质的恢复效果最好,全湖总氮、总磷、铵态氮和高锰酸盐指数均值减少率分别为 37.2%、35.1%、37.3%和 21.3%,全湖 V 类水质水域基本不存在,全湖 90%的区域水体水质综合等级达到 ID 类。影响洪湖水质的驱动因子中,关键因素是径流入湖所携带的四湖流域上游地区的非点源污染物。应大力控偷上游地区的非点源污染,积极开展洪湖东北部和西北部的湿地水生植被生态修复工程,恢复水体的截污和自净能力。

【关键词】:水质模拟 MIKE21 灰色模式识别模型 水质评价 洪湖

【中图分类号】: X52【文献标识码】: A【文章编号】: 1004-8227(2018)09-2090-11

DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201809019

湖泊作为最常见的湿地类型,具有调节气候、净化水质、调蓄洪水、提供动植物资源等多种生态功能。随着湖泊外源污染的加重和对湖泊过度的开发利用,湖泊富营养化已成为最重要的水环境问题之一^[1]。湖泊水体污染源分为.外源污染物和内源污染物,其中外源污染源主要包括以入湖径流、养殖区污染和大气沉降为主的非点源污染^[2*4]。流域入湖径流及其所携带的物质成分均会引起湖泊水文和水环境要素产生不同程度的响应^[5]。综合定量考虑各项污染源和环境影响因素,探讨湖泊水环境变化的驱动因素,在此基础上进行水质模拟和评价,能够为湿地水环境保护和湖泊管理决策提供科学依据^[6]。

在湖泊水体富营养化问题研究中,通过建立水质模型模拟各污染物组分在水域迁移转化过程,探究污染物运移的时空分布 规律,可以为水质预报和预测、制定污染物排放标准、水质规划和管理提供有力的技术与方法支持^[7]。国内外关于湖泊、水库

¹收稿日期: 2017-10-18; 修回日期: 2018-02-11

基金项目:湖北省自然科学基金(2017CFB317);湖北科技学院博士启动基金(2016-19XB005)

作者简介: 张婷(1989~), 女,博士研究生,主要从事水环境模拟方面研究.E-mail:annie_ztl2@163.com 通讯作者 E-mail:xlwang_2017@163.Com

等水域的水动力过程及水质变化机理开展了富有成效的研究,建立了多场耦合系:统,可以预测包括总氮、总磷、氨氮和高锰酸盐指数等在内的地表水环境质量标准的基本项目^[8*10]。但基于水质模型的结果仅能反映单个水质指标的优劣情况,缺乏对湿地水环境质量的综 j 合定量评价。有关水环境综合评价的研究方法有 j 很多,比如灰色关联度分析^[111]、模糊综合评判^[12]、神经网络模型^[13]等。史晓新等提出的灰色模式识别模型^[14],克服了灰色关联度分析方法的问题,比模糊综合评判法计算简便、可行,评价结果直观、可靠,能够更精确地反映污染程度的高低,广泛应用于河流、湖泊等地表水水环境质量的综合评价研究^[16*17]。目前国内外研究多单纯的运用水质数值模型对水质进行模拟和预测,或是运用综合定量评价方法对水质现状进行评价,少数研究实现了二者之间的耦合,班璇等^[18]结合二维水质模型和综合水质标识指数方法研究了引水工程对武汉东湖总体水质的影响,但对污染源复杂的养殖型湖泊的二维水质模型和水环境综合评价模型的耦合研究较少。

本研究将洪湖作为研究区域,运用二维水质模型对浅水草型湖泊的围网养殖负荷进行定量化,并结合入湖径流和大气沉降 的时空负荷,将其作为主要污染源输入到模型中,构建了复杂水文和环境条件下养殖型湖泊的水质模型,将水质指标模拟结果 与灰色识别模型进行外部耦合,分析不同湖泊管理措施工况下水环境总体质量的恢复效果。

1研究区概况

洪湖是湖北省最大的天然淡水湖泊,也是长江中下游大型湖泊之一。地处湖北省东南部、江汉平原四湖流域中区。地跨洪湖市和监利市,湖区中心坐标为 29°49'N、113°17'E,是长江和汉江支流东荆河之间的洼地壅塞湖。2012 年"一湖一勘"确定洪湖面积为 308km²。洪湖以调蓄为主,兼具灌溉、渔业、航运等多种功能。洪湖地区具有典型的北亚热带湿润季风气候特征,年平均气温 16.6℃:,年降雨量在 1000[~]1300mm 之间^[19]。洪湖主要承接上游四湖总干渠地面径流,多年平均入湖径流量为 8.0x10⁸m³;通过若干涵闸与长江实现半自然相通,多年平均出湖径流量为 6.91x10⁸m^{3 [20]}。洪湖湖底平坦,高程 22.8[~]24.0m,水位变化主要取决于四湖流域降水与上游地区来水,水位变幅为 24.0~26.5m^[21]。

2 研究方法和数据来源

2.1 模型简介

MIKE21 是丹麦水力研究所开发的平面二维数学模型,用于模拟河流、湖泊、水库等水体流场问题和基于流场下的环境问题。 模型对于水文条件复杂的湖泊水动力过程的模拟具有较好的适用性。本研究选取了 MIKE21 的两个模块,分别是水动力学模块和 对流扩散模块。对流扩散模块中包含降雨和蒸发的污染物浓度输入,可采用该工具对研究面源围网养殖负荷进行定量化。

水动力学模块模拟由于各种作用力的作用而产生的水位及水流变化。描述风生湖流的平面二维非恒定浅水基本方程组如式 1-1、1-2和1-3。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} &= \frac{\partial d}{\partial t} \qquad (1-1) \\ \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h}\right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h}\right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\frac{sp}{\sqrt{p^2 + q^2}}}{C^2 \cdot h^2} - \\ \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x}(h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(h\tau_{xy})\right] - \Omega_q - fVV_x + \\ \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x}(P_a) &= 0 \qquad (1-2) \\ \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q^2}{h}\right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h}\right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\frac{sp}{\sqrt{p^2 + q^2}}}{C^2 \cdot h^2} - \\ \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial y}(h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial y}(h\tau_{xy})\right] - \Omega_q - fVV_y + \\ \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial xy}(P_a) &= 0 \qquad (1-3) \end{aligned}$$

式中: h(x, y, t)为水深(m); d(x, y, t)为随时间变化的水深(m); ζ(x, y, t)为水位 (m); p(x, y, t), q(x, y, t)为 x 和 y 方向上的 流量密度($m^3/(s \cdot m)$), (p, q)=(uh, vh), u 和 v分别为 x 和 y 方向上的平均流速(m/s); C (x, γ)为 Chezy 阻力系数(m^{1/2}/s);g 为重力加速 度(m/s²); f(V)为风摩擦系数; V, V, , V,分别为 风速及 x, y 方向上的分速度(m/s); $\Omega(x, y)$ 为 Coriolis 系数,等于 $2 \cdot \omega \cdot \sin \Psi$, ω 为地球自转角 速度, Ψ 为研究区所处纬度; $P_{a}(x, y, t)$ 为大气 压力(kg/(m·s²)); pw 为水密度(kg/m³); x, y 为空间坐标; t为时间(s); τ_x , τ_y , τ_y 为有效剪 应力的组成部分。 对流扩散模块(AD)描述水体中溶解物由于 对流和扩散作用的传输过程,该过程的平面二维 控制方程式如式 1-4 和 1-5。 $\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial uhC}{\partial x} + \frac{\partial vhC}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial C}{\partial y} \right)$

式中: C 为污染物浓度(mg/L),为标量; h 为水深(m),由水动力学模块提供; u, v 分别为 x 和 y 方向上的水平速度分量(m/s), 由水动力学模块提供; D_h为 x 和 y 方向上的平流扩散系数(m²/s); k_p为一阶线性衰减系数(s⁻¹); C_s为源汇处的污染物浓度(mg/L); S 为源汇处流量(m³/(s•m²))

 $k_{p}hC+C_{s}S hCt+uhC x+vhC y=x$

(1-4)

(1-5)

2.2 灰色模式识别模型

灰色模式识别模型将信息论中的灰色系统理论应用于水质评价,该模型在灰色关联度的基础上引入了加权关联差异度的概 念,采用模糊识别的思想得出最优权系数一灰色从属度,然后利用综合指数法得到水质综合指数^[18]。该模型克服了灰色关联度 分析方法中确定水质级别中评价值趋于均化,以及同一水质级别的不同样本污染程度的高低难以精确比较的问题。评价步骤包 括数据的归一化处理;计算灰色关联度;计算灰色从属度,判断水质等级;计算水质综合指数^[22]。

2.3 数据来源

水动力模型中水位和流量数据源自荆州水情分中心网站(http://hbjzsw.com/slj/),日平均降雨量、蒸发量、风速和风向

数据源自中国气象科学数据共享服务网(http://data.cma.cn/)洪湖气象站的地面气象资料。水质模型中采用的模型水深和总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH⁴₁-N)、高锰酸盐指数(COD_M)水质指标来源于中国科学院江汉平原小港湿地生态试验站于 2012 年 4 月 7 日、8 月 21 日和 11 月 12 日对洪湖进行的水环境调查结果,调查点分布如图 1 所示。



2.4 统计分析

水质模型各水质指标的模拟结果差异采用适用于大样本相关非正态数据的 Wilcoxon (威尔柯克森)成对数据加符秩检验方 法进行比较。



3 洪湖二维水质模型建立

3.1 模拟时间

结合洪湖的养殖周期和实测的水环境理化数据,本研究将模型初始时间设置为2012年4月7日8时,率定时间段设定为2012 年4月7日8时~2012年8月21日8时,模型验证时间段设为2012年8月21日8时~2012年11月12日8时。

3.2 地形文件的建立

将洪湖水体边界矢量化后生成洪湖的陆地边界,根据掌握的水文资料,主要考虑蓝田和下新河两个入水口,小港、张大口和新堤3个出水口。图2所示蓝色点为开边界, a和b分别代表蓝田和下新河; c、d、e分别代表小港、张大口和新堤。采用非结构三角网格对计算区域进行网格划分,经平滑处理后,得到4058个计算网格和2208个计算节点。运用2012年4月7日的实测水深数据和当日挖沟子站的水位值,计算得到洪湖水下地形的散点数据,运用自然邻域法对其做插值处理得到研究区的水下地形。

3.3 初始条件和边界条件

水动力模型的初始水位为各水文站水位均值,运用自然邻域法对初始时间实测散点水质数据做插值处理,得到水质模型的 水质因子初始浓度场。

水动力模型中选用流量过程作为开边界的边界条件,将降雨量和蒸发量作为重要边界条件输入,考虑的外部作用力为风速 和风向,以上边界条件均以日为时间步长输入。由于缺乏洪湖入口污染物浓度的时间序列数据,本研究采用多次采样测量的平 均值作为常数输入。

结合相关文献和降雨数据得到大气沉降随降雨输入模型的总氮、总磷、铵态氮和高锰酸盐指数浓度分别为 1. 18、0. 03、0. 79 和 4. 07mg/L^[23, 24]。前期研究成果显示,洪湖一个养殖周期内,围网养殖活动对水体总氮和总磷的污染负荷量计算为 97. 08 和 14. 03kg/hm^{2 [25]}。假设所有围网区域的负荷量是相同的,对流扩散模块中通过降雨量输入污染物的形式,将围网养殖负荷量结合 降雨量换算成空间分布的污染物浓度场,非围网区域污染物浓度为零。时间上,假设一个养殖周期内负荷量在时间上是不变的,将负荷量以日为时间步长输入。

4 结果与分析

4.1 模型率定和验证

	Tab. 1 Water level calibrated and validated errors of hydrological stations						
	误差	水文站					
		挖沟子站	新堤站	小港站	下新河站	张大口站	
水动力模型率定	平均相对误差(%)	0.27	0.32	0.30	0.32	0.33	
	均方根误差(m)	0.090	0.103	0.102	0.108	0.108	
	相关系数	0.937	0.929	0.904	0.889	0.887	
水动力模型验证	平均相对误差(%)	0.16	0.11	0.52	0.40	0.27	
	均方根误差 (m)	0.048	0.035	0.142	0.108	0.075	
	相关系数	0.991	0.990	0.971	0.979	0.975	

表1各水文站水动力模型率定和验证误差结果

本文前期研究已对水动力模型进行了率定和验证^[25],水动力模型率定的参数结果为:涡粘系数为 0.6m²/s,曼宁数为 20m^{1/3}/s。 五个水文站模拟水位和实测水位的拟合误差如表 1 所示。率定和验证阶段,五个水文站均方根误差均值分别为 0.10 和 0.08m, 平均相对误差均值分别为 0.31%和 0.29%,相关系数均值分别为 0.90 和 0.98。

利用 2012 年 8 月 21 日实测的水质指标实测值和模拟值对比来率定对流扩散模块中的衰减参数,TN、TP、NH₄-N和 COD₄定 后的均方根误差分别为 0.171、0.009、0.110 和 0.627mg/L,平均相对误差分别为 11.6%、14.1%、17.9%和 7.7%(图 3)。采用 相同的参数设置,利用 2012 年 11 月 12 日实测的水质采样点的污染物实测值和模拟值对比来验证水质模型的模拟精度。TN、TP 和 NH₄-N和 COD₄的平均相对误差分别为 15.9%、18.5%、18.5%和 8.7%,误差值在合理的范围内(小于 20%);均方根误差分别为 0.191、0.020、0.079 和 0.689mg/L(图 4)。说明水质模型的参数选择是合理的,可以达到模拟精度的要求。9、10、12 号采样 点位于洪湖西北区,总磷的模拟值与实测值相比偏低(图 4b),分析其原因可能是由于衰减系数值采用空间上一致的设置方法, 但采样点周围植被分布面积较小,衰减系数设置偏大导致该点模拟值偏低。



4.2 不同模拟方案下的水质指标变化

根据对洪湖外源污染物的定量化分析,结合洪湖湿地保护管理措施,设定 5 种污染源削减模拟方案,定量研究径流污染负 荷和围网养殖负荷对水质的影响^[26]。基线值,洪湖蓝田和下新河入湖口各污染物指标浓度减少 0%,围网养殖区面积减小 0%。方 案一,洪湖蓝田和下新河入湖口各污染物指标浓度减少 25%。方案二,洪湖蓝田和下新河入湖口各污染物指标浓度减少 50%。方 案三,拆除洪湖西北区靠近蓝田入口处的围网养殖区域(图 5),使全湖围网养殖区面积减小 25%。方案四,在方案三的基础上, 拆除洪湖东北区靠近下新河入口处的围网养殖区域(图 6),使全湖围网养殖区面积减小 50%。

2208 个计算节点的统计结果显示(图 7a),与基线值相比,不同方案下洪湖总氮浓度明显降低(P<0.001),总氮浓度均值 分别由基线值的1.109mg/L减小至0.903、0.697,1.020和0.950mg/L。方案一总氮浓度减少率(18.6%)高于方案三(8.0%)。 方案二总氮浓度减少率(37.2%)也高于方案四(14.3%)。各方案下铵态氮浓度减少率规律跟总氮浓度保持一致。铵态氮浓度均 值分别由基线值的0.464mg/L减小至0.379、0.295、0.429和0.402mg/L(p<0.001)(图 7c)。



Fig. 7 Comparison of water quality concentration between baseline and four scenarios modelling

不同方案下总磷浓度均值分别由基线值的 0.082mg/L 减小至 0.069、0.056、0.071 和 0.063mg/L (p<0.001)(图 7b)。方案 一总磷浓度减少率 (17.7%)稍高于方案三 (14.0%)。方案二总磷浓度减少率 (35.1%)也高于方案四 (25.1%)。不同方案下高 锰酸盐指数浓度均值分别由基线值的 5.809mg/L 减小至 5.184、4.558、4.540 和 3.664mg/L (p<0.001)(图 7d)。方案一高锰酸 盐指数浓度减少率 (10.6%)低于方案三 (21.6%)。方案二高锰酸盐指数浓度减少率 (21.3%)也低于方案四 (36.5%)。

比较分析可以得出,在4种方案下,洪湖水体各污染物指标值均有所降低,不同污染源负荷减少下污染物浓度值减少率有 所差异。

4.3 水质综合评价的模拟结果

为了比较各方案下水质恢复整体效果,利用灰色识别模型的算法在 Matlab 中计算得到综合水质指数值和综合水质等级,结果如图 8 和图 9 所示。

基线值下洪湖水体综合水质指数均值为 2.84(图 8a), 全湖 69%的区域水体水质综合等级为III类(图 9a),达到洪湖水环境功能区的要求。

方案一模拟下,洪湖水体综合水质指数均值下降为2.65(图8b),入水口附近水质综合等级为V类和劣V类区域面积缩小, 东北区n类面积增大,全湖II类水体面积百分比由基线值33%增加到41%,V类水体面积百分比由基线值16%降低到6%(图9b)。 方案二模拟下,洪湖水体综合水质指数均值下降为2.44(图8c),全湖V类水质水域基本不存在,IV类水体面积百分比由基线 值 15%降至 10%, 全湖 90%的区域水体水质综合等级达到III类(图 9c)。

方案三模拟下,洪湖水体综合水质指数均值下降为 2.62 (图 8d)。拆除围网所在区域综合水质等级从III类降至 II 类;全湖 II 类水体面积百分比由基线值 33%增加到 47%,高于方案一;但 V 类水体面积百分比下降幅度较小(图 9d)。方案四在方案三的基础上,洪湖水体综合水质指数均值下降为 2.42 (图 8e)。东北区 II ~III类水域面积明显增加。全湖 76%的区域水体水质综合等 级达到III类,达标百分比低于方案二(图 9e)。

上述结果显示,减少污染源负荷对洪湖水环境改善具有明显的效果。对洪湖水环境质量提高的最优方案为方案二,将洪湖 蓝田和下新河入水口各污染物指标浓度减少 50%,全湖总氮、总磷、铵态氮和高锰酸盐指数均值减少率分别为 37.2%、35.1%、 37.3%和 21.3%,全湖 90%的区域水体水质综合等级可以达到III类。

5 结论与讨论

本研究建立了洪湖二维水动力和水质耦合模型,模拟结果满足精度要求,该二维水质模型能有效模拟复杂水文条件和污染 源作用下的浅水湖泊主要水质指标的时空变化,但仍然存在由于数据难获取导致某些影响因素考虑不全所带来的模型不确定性 问题。水动力模块中,考虑的降雨、蒸发等气象因素采用空间上一致而时间上不一致的设置会使模拟结果与真实值产生偏差, 但研究结果显示对水位的模拟误差影响不大,水位模拟验证的均方根误差小于 0.1m。影响湖泊水动力模型模拟结果产生决定性 影响的因素有湖底地形、湖泊周围地形、水面风场、出入湖流量、初始水位等^[27,28]。本文研究显示湖泊周围灌溉取水设施和泵站 等水利设施的影响对水动力模拟结果有一定影响。对流扩散模块中,MIKE21 在衰减系数空间上的设置具有一定局限性,在草型 湖泊的应用中会带来局部区域水质参数的模拟误差;氨氮作为水体中不稳定形态,与其他无机氮形态会发生相互转化,对其模 拟结果有较大影响^[29]。本文构建的二维水质模型的不确定性问题有待进一步深入研究,是本文研究的不足之处。

研究从降低径流污染物浓度和减少围网养殖区面积两个方面设置不同的方案,将模拟结果与灰色模式识别模型进行外部耦合,预测不同方案下减少外源污染负荷对洪湖水质的整体恢复效果。模拟结果表明,将洪湖蓝田和下新河入水口各污染物指标浓度减少 50%方案下,水质的恢复效果最好,全湖总氮、总磷、铵态氮和高锰酸盐指数均值减少率分别为 37.2%、35.1%、37.3% 和 21.3%,全湖 V 类水质水域基本不存在,全湖 90%的区域水体水质综合等级达到 m 类。通过对基线模拟方案下洪湖总氮和总磷各污染源通量的统计,在污染源负荷不削减的方案下,洪湖总氮外源负荷总量为 5004.5t,其中径流负荷为 3611.5t,围网养殖负荷为 1037.7t;洪湖总磷外源负荷总量为 471.6t,其中径流负荷为 295.2t,围网养殖负荷为 167.4t。洪湖水体的外源污染负荷中,72.2%的总氮和 62.2%的总磷来源于四湖流域随四湖总干渠携带的污染物,说明在影响洪湖水质恶化的驱动因子中,关键因素是径流入湖所携带的四湖流域上游地区的非点源污染物。以上结果与李涛等^[30]2005[~]2006 年的研究结果相比,总氮径流负荷增加了 1.8%,总磷径流负荷减少了 27.6%,总氮和总磷的围网养殖负荷分别减少了 39.4%和 30.7%。2005 年在洪湖实施"湿地保护和恢复示范工程项目"使洪湖养殖污染减少,生态环境逐步改善^[22]。为了使洪湖水环境质量达到水环境功能区划的标准,应大力发展上游地区的生态农业,减少化肥和农药的使用量和流失量;积极开展洪湖东北部和西北部的湿地水生植被生态修复工程,恢复水体的截污和自净能力。

参考文献:

[1]范成新, 王春霞.长江中下游湖泊环境地球化学与富营养 化[M].北京: 科学出版社, 2007.

[2] CARPENTER, S R. Eutrophication of aquatic ecosystems: bistability and soil phosphorus [J]. Proceedings of the National A-cademy of Sciences of the United States of America, 2005, 102: 10002-10005. DOI: http://dx. doi. org/10. 1073/ pnas. 0503959102. [3] OWENS N, GALLOWAY J, DUCE R. Episodic atmospheric nitrogen deposition to oligotrophic oceans [J] . Nature, 1992, 357: 397-399. DOI: http: //dx. doi. org/10. 1038/ 357397a0.

[4]郝芳华.流域水质模型与模拟[M].北京师范大学出版社, 2008.

[5] 李云良,张奇,姚静,等.湖泊流域系统水文水动力 联合模拟研究进展综述[J].长江流域资源与环境,2015,24(2):263-270.

LI Y L, ZHANG Q, YAO J, et al. Advances in integrated hydrological and hydrodynamic simulation of lake-catchment system [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(2) : 263-270.

[6] 张青,王学雷,张婷,等.基于 BP 神经网络的洪湖水 质指标预测研究[J].湿地科学,2016,14(2):212-218. ZHANG Q, WANG X L, ZHANG T, et al. Prediction of water quality index of Honghu Lake based on back propagation neural network model[J]
Wetland Science, 2016, 14(2): 212-218.

[7] 万金保,李媛媛.湖泊水质模型研究进展[J].长江流域资源与环境,2007,16(6):805-809.

WAN J B, LI Y Y. Progress in the research of lake water quality model [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2007, 16(6) : 805-809.

[8]郑丙辉, 张永泽. 滇池生态动力学模型的改进[J]. 环境科 学研究, 1994, 7(4): 1-6.

ZHENG B H, ZHANG Y Z. Improvement of ecological dynamic model of Lake Dianchi [J]. Research of Environmental Sciences ,1994, 7(4) : 1-6.

[9] XU F-L, JORGENSEN S-E, TAO S, et al. Modeling the effects of ecological engineering on ecosystem health of a shallow eu-trophic Chinese lake (Lake Chao) [J]. Ecological Modelling, 1999, 117 (2): 239 - 260. DOI: https: //doi. org/10.1016/S0304- 3800 (99) 00005-8

[10] BI S, SONG L, ZHOU J, et al. Two-dimensional shallow water flow modeling based on an improved unstructured finite volume algorithm [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2015 , 7 (8).

[11] 刘金英,杨天行,李明,等.一种加权绝对灰色关联度及 其在密云水库水质评价中的应用[J].吉林大学学报(地), 2005, 35(1):54-58.

LIU J Y, YANG T X, LI M, et al.. A weight absolute grey correlation degree and it 's application in evaluation of water quality Miyun Reservior [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2005, 35(1): 54-58.

[12] 傅金祥,陈喆,马兴冠,等.改良模糊综合评价法在水 质评价中的应用[J].环境工程,2011,29(6): 120-123.

FU J X, CHEN Z, MA X G, et al. Application of improved fuzzy comprehensive evaluation method in water quality assessment [J]. Environmental Engineering, 2011, 29 (6): 120-123.

[13] 陈永灿,陈燕,郑敬云,等. 概率神经网络水质评价模型 及其对三峡近坝水域的水质评价分析[J]. 水力发电学报, 2004, 23(3): 7-12.

CHEN Y C, CHEN Y, ZHENG J Y, et al. Probabilistic neural network model and its application in evaluation of the water quality near the dam area of Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2004, 23(3) : 7-12.

[14] 史晓新, 夏军. 水环境质量评价灰色模式识别模型及应用[门. 中国环境科学, 1997, 17(2): 127-130.

SHI X X, XIA J. Grey-mode identification model for water environmental quality assessment and its application [J]. China Environmental Science, 1997, 17(2) : 127-130.

[15] 芦云峰, 谭德宝, 王学雷. 基于灰色模式识别模型的洪湖 水质评价初探[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(5): 58-61.

LU Y F, TAN D B, WANG X L. Assessment of water quality by grey-mode identification model in Honghu Lake[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26(5): 58-61.

[16] 水艳. 太湖流域平原地区水质综合评价与水资源价值评价研究[D]. 河海大学, 2006.

[17] 赵秀春. 灰关联分析法在大沽河青岛段水质评价中的应用[J]. 水生态学杂志, 2009, 30(5): 115-118.

ZHAO X C. Application of gray relational analysis method in e-valuation of water quality in Qingdao Part of Dagu River [J]. Journal of Hydroecology, 2009, 30(5) : 115-118.

[18] BAN X, YU C, PAN B, et al. Application of the CWQII method and a 2D water quality model to assess diversion schemes for East Lake (Donghu) , Wuhan, China [J]. Lake & Reservoir Management, 2014, 30(4) : 358-370.

[19] 俞立中,许羽,蔡述明,等.GIS 技术在洪湖环境演变研 究中的应用[J].湖泊科学,1993,5(4): 350-357.

YU L Z, XU Y, CAI S M, et al. A GIS-based study on recent environmental change in Honghu Lake [J]. Journal of Lakes Sciences, 1993, 5(4) : 350-357.

[20] 王学雷, 宁龙梅, 肖锐. 洪湖湿地恢复中的生态水位控 制与江湖联系研究[J]. 湿地科学, 2008, 6(2): 316-320.

WANG X L, NING L M, XIAO R. The ecological water level control and relationship between river and lakes for the Restoration of Honghu Lake [J] • Wetland Science, 1993, 5(4): 350-357.

[21] 陈世俭, 王学雷, 卢山. 洪湖的水资源与水位调控[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2002, 36(1): 121-124.

CHEN S J, WANG XL, LU S. Water resources and water level control of Honghu Lake[J]. Journal of Central China Normal U-niversity(Nat. Sci.), 2002, 36(1): 121 -124.

[22] 姜刘志, 王学雷, 厉恩华, 等. 生态恢复前后的洪湖水质 变化特征及驱动因素[J]. 湿地科学, 2012, 10(2): 188-193.

JIANG L Z, WANG XL, UEH, et al. Water quality change characteristics and driving factors of Honghu Lake before and after ecological restoration [J] • Wetland Science, 2012, 10 (2) : 188-193.

[23] 郑丹楠, 王雪松, 谢绍东, 等.2010 年中国大气氮沉降特 征分析[J].中国环境科学, 2014, 34(5): 1089-1097. ZHENG D L, WANG X S, XIE S D, et al. Simulation of atmospheric nitrogen deposition in China in 2010[J]. China Environmental Science, 2014, 34(5): 1089—1097.

[24] MA X, LI Y, ZHANG M, et al. Assessment and analysis of non-point source nitrogen and phosphorus loads in the Three Gorges Reservoir Area of Hubei Province, China. Science of the Total Environment, 2011, 412 - 413, 154 - 161. DOI: http: //dx. doi. org/10. 1016/j. scitotenv. 2011. 09. 034

[25] ZHANG T, BAN X, WANG X, et al. Analysis of nutrient transport and ecological response in Honghu Lake, China by u-sing a mathematical model [J]. Science of the Total Environment, 2017, 575: 418-428. DOI: https: //doi. org/10. 1016/j. scitotenv. 2016. 09. 188

[26] RASMUSSEN E K, PETERSEN O S, THOMPSON JR, et al. Hydrodynamic - ecological model analyses of the water quality of Lake Manzala (Nile Delta, Northern Egypt) [J]. Hydrobiolo-gia, 2009, 622: 195-220. DOI: 10. 1007/s10750-008-9683-7.

[27] 李一平, 邱利, 唐春燕, 等. 湖泊水动力模型外部输入 条件不确定性和敏感性分析[J]. 中国环境科学, 2014, 34 (2): 410-416.

LI Y P, QIU L, TANG C Y, et al. Uncertainty and sensitivity analysis of input conditions in large shallow lake hydrodynamic model [J]. China Environmental Science, 2014, 34 (2): 410-416.

[28] 李一平, 唐春燕, 余钟波, 等. 大型浅水湖泊水动力模型 不确定性和敏感性分析[J]. 水科学进展, 2012, 23(2): 271-277.

LI Y P, TANG C Y, YU Z B, et al. Uncertainty and sensitivity analysis of large shallow lake hydrodynamic models [J]. Advances in Water Science, 2012, 23(2) : 271-277.

[29] 俞盈,陈繁忠,盛彦清,等.污染水体中三氮转化过程 的模拟研究[J].环境工程,2007,25(3): 35-37.

[30] LI T, CAI S M, YANG H D, et al. Fuzzy comprehensive quantifying assessment in analysis of water quality: a case study in Lake Honghu, China. Environmental Engineering Science, 2009, 26, 451-458. DOI: http://dx.doi.org/10. 1089/ ees. 2007. 0270.