

抚仙湖流域负荷削减的水质风险分析

邹锐¹, 张晓玲², 刘永², 赵磊³, 朱翔^{3*}, 颜小品², 阳平坚² (1. Tetra Tech, Inc. 10306 Eaton Place, Ste 340, Fairfax, VA 22030, USA; 2. 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; 3. 云南省环境科学研究院, 云南省高原湖泊流域污染过程与管理重点实验室, 云南 昆明 650034)

摘要: 以抚仙湖为研究对象, 基于三维水动力-水质模型 EFDC 平台, 开发了 EFDC-神经网络(NN)耦合模型; 并选用 30d 移动平均值为解译方式核算抚仙湖在不同风险下的流域负荷削减(TMDL)。结果表明, 对于 100% 的达标频度, 为了达到 I 类水质, TP 允许增加 14%~18%, COD 允许增加 9%~11%, 但 TN 需要削减 13%~14%。如果放松对达标频度的要求, 污染负荷将允许相应地增加。研究结果可为流域管理依据不同的风险与管理费用偏好实施流域削减提供基础。

关键词: 三维水动力-水质模型; 人工神经网络; 风险; 负荷削减

中图分类号: X323 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2013)09-1721-07

A Linked EFDC-NN model for risk-based load reduction analysis of Lake Fuxian watershed. ZOU Rui¹, ZHANG Xiao-ling², LIU Yong², ZHAO Lei³, ZHU Xiang^{3*}, YAN Xiao-pin², YANG Ping-jian² (1. Tetra Tech, Inc. 10306 Eaton Place, Ste 340, Fairfax, VA 22030, USA; 2. The Key Laboratory of Water and Sediment Sciences Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China; 3. Yunnan Key Laboratory of Pollution Process and Management of Plateau Lake-Watershed, Yunnan Institute of Environmental Science, Kunming 650034, China). *China Environmental Science*, 2013, 33(9): 1721~1727

Abstract: This study employed an approach linking the Environmental Fluid Dynamics Code (EFDC) model and a Neural Network (NN) model to conduct risk based TMDL analysis for Lake Fuxian in Southwestern China. The EFDC-NN system was developed based on a three-dimensional hydrodynamic-water quality model of the lake, and NN functional approximators of the EFDC model using the 30-day moving average concentration of target nutrients as predictors. The developed NN functional approximators were then applied to conduct risk based TMDL analysis. To reach the primary water quality standard with 100% probability, the TP and COD loadings from the watershed still had room for increase by 14%~18% and 9%~11% respectively, but TN must be reduced by 13%~14%. If the water quality compliance probability was relaxed by various levels, it was found that the load reduction requirement will be correspondingly relaxed such that in most cases further increase of watershed loadings are allowed. The results of this analysis provided decision makers with risk based load management requirement for guiding their management plan in this lake watershed.

Key words: three dimensional hydrodynamic-water quality model; artificial neural network (ANN); risk; load reduction

流域负荷削减, 如最大日负荷总量(TMDL)计划, 被认为是改善水质最为直接和有效的手段。TMDL 的核心思想是指在满足水质标准的条件下, 水体能接受的某种污染物的最大日负荷总量; 经过不断的改进和发展, TMDL 计划已逐步形成一套完整系统的总量控制策略和技术方法体系, 成为水环境管理与决策的主要发展趋势^[1-3]。在美国纽约州的奥农达加湖、北卡罗莱纳州的纽斯河、佛罗里达州的奥基乔比湖、加利福尼亚南部

的新港湾流域及我国的东湖、三峡库区巫溪段等众多案例的研究表明, 推行 TMDL 计划可有效改善水体的水质^[4-12]。

在制定 TMDL 的过程中, 揭示并定量表征流域污染负荷与水质之间的响应关系是最为重要的步骤, 其中选择合适的模型来模拟负荷与水质

收稿日期: 2012-12-15

基金项目: 国家自然科学基金(41101180, 41222002)

* 责任作者, 高级工程师, zx@yies.org.cn

响应是关键要素^[13].复杂的三维水动力-水质数值模型近年来广泛应用于 TMDL 研究的重要基础^[14-16].数值机理模型可实现对湖泊三维水流及相应的营养盐迁移转化的模拟,准确再现污染物在湖体的时空分布特征.同时,在实际的流域决策中,由于在数据、模型结果等方面存在不确定性,使得开展基于风险分析的 TMDL 研究成为必然,并藉此为决策者提供更为准确和多样的支撑^[16-19].所谓基于风险的污染负荷控制,是针对传统的 TMDL 对环境标准的解译方式提出的.在传统的 TMDL 框架下,水质目标多是静态解译的,比如营养盐,美国最常用的是生长季节平均值或者月均值等,一般不对允许的超标频度做显性的表达.但在实际操作中,流域管理者常常面临费用与污染控制效益之间矛盾的问题.因此,决策者需要根据技术经济可行性,考虑允许适当的超标风险,就需要研究相应于此风险的容量水平.此时,最可靠的方法就是用三维数值模型对不同达标频度下的情景进行模拟分析,但由于数值模型中非线性过程的存在,直接应用三维数值模型存在计算量过大的瓶颈,因此无法在实际的 TMDL 中得到广泛应用.人工神经网络模型^[20-21](NN)能够模仿人脑的功能,在预先不知道具体函数形式的情况下,对模糊信息或复杂的非线性关系进行识别与映射,在环境^[22-24]领域应用广泛.本文以云南高原湖泊抚仙湖为例,基于前期研究建立的三维水动力-水质模型,在模型校正和验证的基础上,采用 ANN 耦合数值水质模型方法,以 30d 移动平均值为解译方法,对抚仙湖流域污染负荷与湖泊达标风险之间的关系进行量化,继而核算不同风险下的 TMDL,为在抚仙湖实施智能流域管理和决策提供支持^[25].

1 抚仙湖三维水动力-水质模型的构建

抚仙湖三维水动力-水质模型的构建基于美国 EPA 开发的环境流体动力学模型(EFDC)平台^[14-18],在前期的研究中^[3],已经建立了整个湖体的三维动态模型,并基于 4 个监测点位进行模拟校正,主要的模拟指标为 COD、TN 和 TP;主要的模拟步骤包括:网格生成、初始条件配置、边界

条件设定、模型校准及应用.为精确描述抚仙湖的湖岸线,采用了曲线网格法;将抚仙湖在水平方向上划分为 323 个正交曲线网格,每个网格在垂直方向上按西格玛坐标切割成为 50 层以代表抚仙湖的深水特征.设置 2009 年 1 月 1 日观察到的水面高度 1723.28m 为初始高程,初始温度以 1 月初的观测值 13.5℃为基础,3 个速度向量按水动力学常规初始化为 0.0m/s,挑选 2009 年 1 月 6 日获得的水质数据 TP 0.005mg/L、TN 0.171mg/L、COD 0.98mg/L 为初始条件,湖流和营养物质的水平边界条件是以 2009 年 1~12 月主要入湖河流的流域模型结果为基础;驱动流体模型的大气边界数据来自澄江县气象站获得的每小时的气象数据.在模拟中,首先对水动力过程进行校准,计算步长为 30s,模拟的时间涵盖 2009 年全年,模拟变量为流场、水位和温度,校准参数是湖水水位和水温.在水动力校准的基础上,对水质过程进行模拟.抚仙湖水质模型的模拟时段与水动力模型相同,关键校验参数为各个水质状态变量的一阶衰减速率及沉降速率,模型进行了大约 20 次迭代校准.模型经过校正和验证,模拟的流场、水位、温度及水质与观测到的时空分布状况匹配良好,表明模型可用于进一步的决策分析.在此基础上,应用该模型对 2 种 TMDL 情景进行了分析^[3],发现在 2 种极端的风险水平上,核算的 TMDL 值差别很大,表明要实现对流域管理的有效支持,有必要探索风险与流域污染负荷之间的关系,而非仅依据 2 种极端情景来指导流域管理决策.

2 EFDC-NN 耦合模型

在进行 TMDL 核算之前,首先必须确定对环境质量标准的解译方式.对于抚仙湖这类高原湖泊而言,虽然直观上的水质目标是以营养盐浓度描述的,但实际上,决策中真正的水质风险是富营养化和藻类爆发问题.考虑到富营养化及藻类的爆发不仅需要较高的营养盐浓度,同时需要足够的维持这种较高浓度的时间.基于这种考虑,在前期的研究中^[3],以瞬时极大值或全年平均值来解译水质目标的情景,但这种方法只能提供上、下限范围,而不具实际决策意义.因此,本文以月为时间尺

度来探究营养盐达标的问题.不同于一般的按月进行评价的方法,采用 30d 移动平均的方法来表征水质特征,即:在开展 TMDL 的风险研究时,水质达标的评估方式是以全湖表层 30d 移动平均浓度满足 GB3838-2002 的Ⅰ类标准^[26]为依据.除了时间尺度,在实际管理中另一个重要的决策维度是风险,即湖体 TP、TN、COD 浓度达标的频度与流域污染负荷削减(或增加)间的不确定性响应关系.在明确了不同的污染负荷水平对应的湖泊水质风险后,决策者才能根据实际情况做出判断,制定合理的适应性流域管理方案^[25].由于抚仙湖三维水动力-水质模型每次情景运行时间需要 2d 以上,而要获得完整的流域污染负荷和风险响应关系则有可能需要上百次的模拟,显然这在计算上是不可行的.为了高效实现对抚仙湖污染负荷与水质风险响应关系的定量化,本研究采用 EFDC-NN 耦合模型将水质风险与流域污染负荷关联起来.

2.1 耦合模型构建

首先用已开发和校正的 EFDC 模型进行了一系列的情景分析,并在模型开发和校验年的水文条件下,按照月均值的解译方式要求对 TP、TN、COD 结果进行了 30d 移动平均,以便对神经网络(NN)进行训练和验证;而后以流域污染负荷削减(或增加)与达标频度为输入变量,以相应的 TP、TN 和 COD 浓度为输出变量构建神经网络模型,选用 BP 网络架构.一个隐层含有 $2m+1$ 个神经元的 3 层神经网络模型,可以实现一个 m 维的实向量与一个 n 维实向量之间的函数映射^[20].在抚仙湖 BP 模型中,由于 $m=2$,因此 5 个或 5 个以下隐层神经元就应足以完成对染负荷削减(或增加)和达标频度与 TP、TN 和 COD 之间的函数映射.但由于神经网络这类人工智能模型,其收敛性和泛化度确认都没有明确的指标,所以为了表达模型分析可能存在的不确定性,在本研究中构造了 6 个 BP 模型,其隐层神经元数目分别为 2、3、4、5、6、7.

2.2 模型训练与校正

模型选取 EFDC 情景分析得到并经过月均处理的 700 组数据作为训练数据,另外 400 组数据作为验证数据.网络的训练采用多次重启的方法,以

避免陷入局部最优网络,而训练的收敛条件定为当模型泛化度开始下降为止,这样做有助于避免过度训练问题.由于研究对象存在大量的数据,可以有效地解决神经网络的泛化度问题.在神经网络对每种污染负荷的预测值和 EFDC 模拟值间进行线性拟合,线性系数越接近于 1,表示二者越近似相等; R^2 值越接近于 1,表示线性拟合的可信度越高;因此可以用线性系数和 R^2 值表示预测精度.表 1 展示了不同网络结构的模拟结果,6 个神经网络对每种污染负荷的响应值近似等于 EFDC 的模拟值,说明 6 个神经网络模型虽然隐含神经元数目不同,但均能较精确地描述真实系统中的响应关系.

表 1 六个网络结构对污染负荷的模拟精度
Table 1 Accuracy of the six network structures

项目		2-2-3	2-3-3	2-4-3	2-5-3	2-6-3	2-7-3
线性系数	TP	0.986	0.996	0.983	0.993	0.992	0.996
	TN	0.996	0.999	0.995	0.996	0.996	0.999
	COD	0.996	0.999	0.995	0.997	0.996	0.999
R^2 值	TP	0.974	0.989	0.983	0.984	0.985	0.990
	TN	0.987	0.995	0.990	0.990	0.990	0.995
	COD	0.986	0.995	0.990	0.990	0.990	0.995

2.3 抚仙湖人工神经网络的响应分析

抚仙湖神经网络的响应是通过分析 TP、TN 和 COD 浓度在一系列不同的风险水平(达标频度)、不同污染负荷削减率/增加比例下的响应来实现的.神经网络模型本质上是一类统计模型,因此在应用该模型进行响应分析时不能无限地改变输入以获取输出.鉴于此,在模拟和情景分析中将污染负荷削减率/增加比例的上限设定为 100%(污染负荷最多可增加 100%),下限定为 20%(污染负荷最多可削减 20%);将达标频度的降低比例上限设定为 25%,即:达标频度不能低于 75%,以确保抚仙湖的水质风险不会太高.然后分别用 6 个神经网络模型模拟污染负荷削减率/增加比例在不同的达标频度下的 TP、TN 和 COD 响应.污染负荷削减率/增加比例和达标频度均以 1%为离散步长,对 TN 单因子、TP 单因子和 COD 单因子进行一系列的模拟.模拟过程中,先设定达标频度值,分析污染负荷削减率(或增加比例)每改

变 1%对 TP、TN 和 COD 的响应,再依次改变达标频度数值.图 1 展示了几个典型的达标频度下削减率/增加比例与 TP、TN 和 COD 的响应曲线. 由图 1 可见,TP、TN 和 COD 的浓度都随着污染负荷削减率的减少和增加比例的增加而升高,随达标频度的降低而降低.

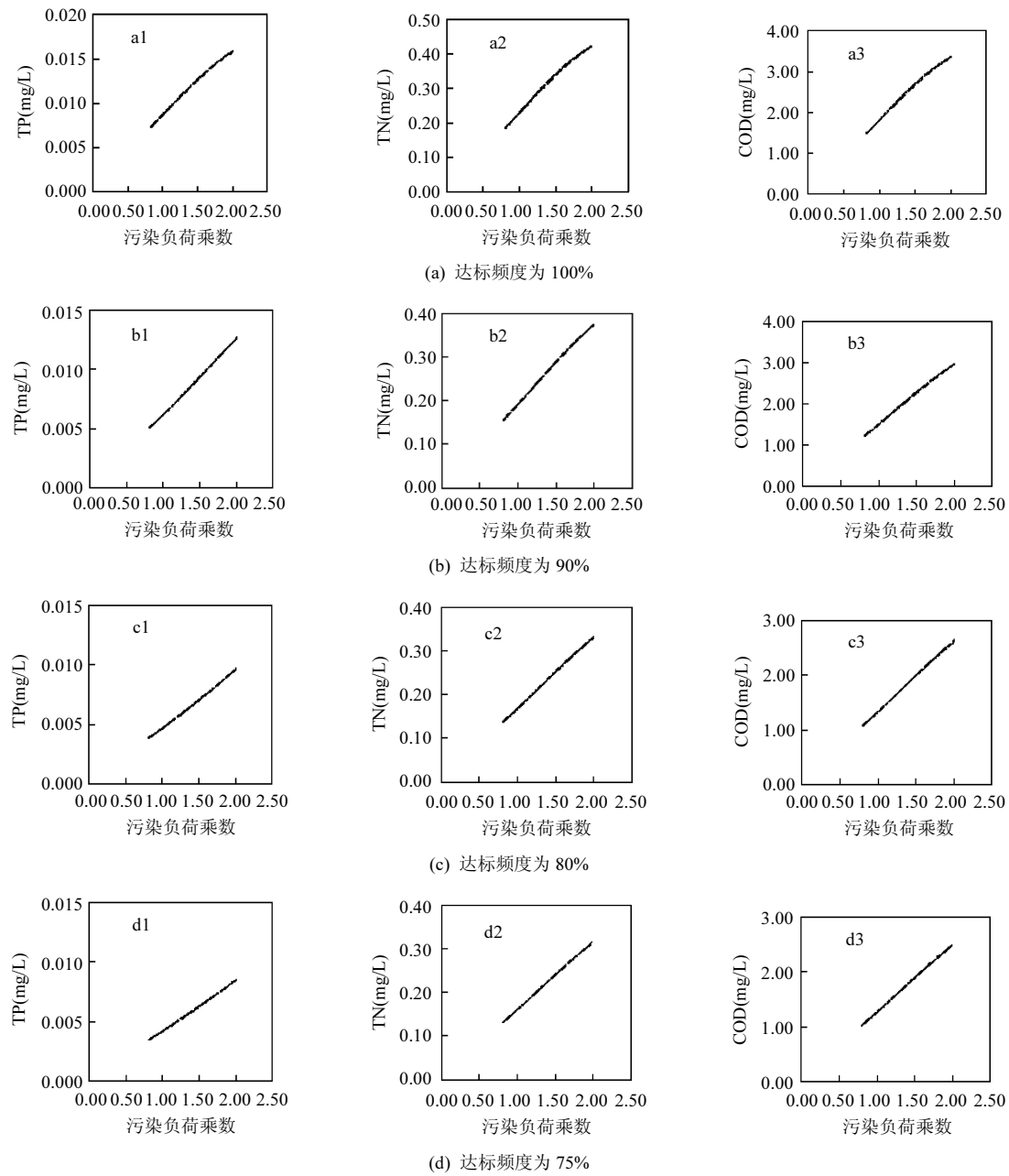


图 1 不同达标频度下削减率/增加比例与 TP、TN 和 COD 响应曲线

Fig.1 TP, TN and COD responses to watershed loading variations under different risks

当横坐标污染负荷乘数的数值小于或等于 1.00 时,“1-污染负荷乘数”表示污染负荷削减率;当其数值大于 1.00 时,“污染负荷乘数-1”表示污染负荷增加比例

-----网络 1 ———网络 2 -·-·-·网络 3 ———网络 4 -·-·-·网络 5 -----网络 6

3 抚仙湖流域 TMDL 的风险分析

通过响应分析可知,6 个网络结构的模拟结果基本一致.当达标频度一定时,随着污染负荷削减率的减少,TP、TN 和 COD 浓度逐渐升高,经过削减率为 0 这一特殊点后,随着污染负荷增加比例的升高,污染物浓度继续升高.综合分析基于不同风险的情况,在污染负荷削减率/增加比例一定时,随着达标频度的增加,TP、TN 和 COD 的响应值升高,因为达标频度的增加意味着基于风险的 TMDL 达标频率升高、超标频率降低,会产生浓度更低的污染负荷,从而允许有更高的环境容量.

具体而言,当达标频度为 100%时,为了达到Ⅰ类水质标准,TP、COD 负荷还有继续上升的空间,TP 允许增加比例为 14%~18%,COD 允许增加比例为 9%~11%.这里的增加水平是区间值,反映了由于采用不同的神经网络架构产生的不确定性.但是由于 6 个神经网络的模拟结果一致性很高,均高于 99%.在 100%达标频度水平下,TN 超过Ⅰ类水标准,因此需要在现状负荷的基础上削减 13%~14%.95%的达标频度情况与 100%达标频度相似,但是随着达标频度的降低,对污染负荷的要求严格程度降低,相应地污染负荷削减率降低、增加比例升高,因而 TP、COD 允许增加比例分别为 36%~38%、20%~21%,TN 削减比例为 4%~6%.对于 90%的达标频度而言,由于要求更加宽松,TN 不再需要进行削减,相反也有增加的余地,TN、TP、COD 允许增加比例分别为 2%~4%、56%~60%、30%~32%.对于 85%的达标频度而言,TN、TP、COD 允许增加比例进一步增加,分别为 9%~12%、76%~82%、39%~41%.对于 80%的达标频度,TP 负荷的增加比例达到预设上限(100%)时,仍可满足Ⅰ类水质标准,TN、COD 允许增加比例分别为 16%~19%、48%~50%.当 75%的达标频度时,TP 增加比例仍可达到预设上限,TN、COD 允许增加比例分别为 22%~24%、56%~58%.

表 2 和图 2 展示了不同风险水平下抚仙湖 TN、TP 和 COD 的核算结果(削减率/增加比例取

区间中值).由于在 75%和 80%达标频度下 TP 增加比例达到了预设上限,因此本研究中没有再核算相应的环境容量值.在管理上的含义就是,如果决策者对 TP 的超标风险容忍度比较高,那么将不会显性考虑 TP 的负荷削减问题.

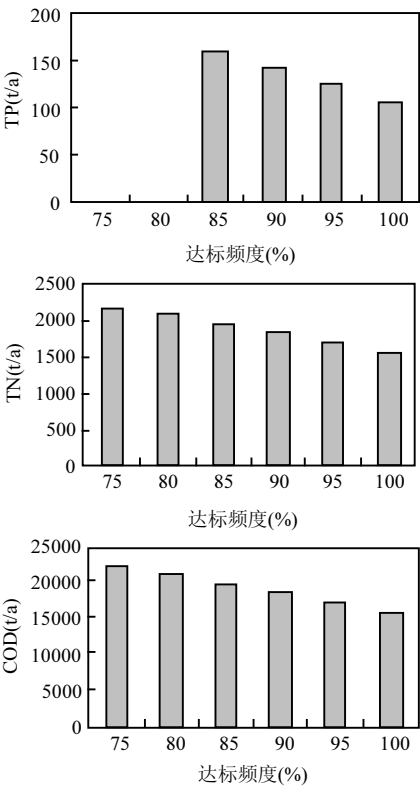


图 2 TP、TN 和 COD 在不同达标频度下的 TMDL
Fig.2 TMDL of Lake Fuxian at different risk levels

表 2 在不同风险水平下抚仙湖的水环境容量

Table 2 Environment capacity of Lake Fuxian at different risk levels						
项目	达标频度 75%	达标频度 80%	达标频度 85%	达标频度 90%	达标频度 95%	达标频度 100%
TN (t/a)		2067	1944	1812	1671	1522
TP (t/a)	2164		161	142	123	104
COD (t/a)	22079	20954	19688	18423	16946	15469

4 讨论

从 TN、TP、COD 的响应可知,抚仙湖水质应以 TN 为治理重点,其次是 COD.虽然 TP 负荷

可增加的空间较大,但作为富营养化的关键因子之一也不容忽视.基于风险的 TMDL 研究为决策管理部门提供了强有力的科学依据,具有非常强的现实意义.但达标频度具体如何选取,应综合考虑抚仙湖现实情况及技术经济可行性,由决策管理部门根据需求来决定.需要指出的是,抚仙湖是深水贫营养湖,内源或藻类动力对营养盐与流域负荷的响应关系没有浅水湖泊(如:滇池和异龙湖)明显;在浅水湖泊中,流域负荷和湖泊水质之间的关系就显示很强的非线性,因此在浅水湖泊应用本方法时需进行对应的改进.

本研究采用的 30d 移动平均值的解译方式不像以瞬时浓度为解译方案(即要求在湖体内表层任何地方、任何时段污染物浓度都满足 I 类水标准)会导致管理目标过于严格,可能面临经济和技术上不可行局面,也不像年平均的解译方案管理目标过于宽松、容易引起水质恶化,是严格程度、可实施性及风险性均介于二者之间的解译方案.

本文的解译方式是按照一般湖泊标准以月为时间尺度来进行的,但是必须考虑到,30d 移动取平均值虽然在大多数时候都是比较可靠的,但是还是存在下面的风险,即以 30d 为时间尺度往往会忽略掉这期间的浓度峰值情况;而抚仙湖的敏感水层(表层水)短期营养盐浓度过高就可能导致藻类的大量爆发,给湖泊生态系统带来危害.因此,究竟选取何种时间尺度作为解译方式才能使管理决策更具有保障,还需要根据抚仙湖的实际情况在今后进行深入研究,并显性地将营养盐与藻类的动力学关系表达出来.

水环境容量和 TMDL 并不是新概念,但本文的研究对二者是个有益的扩充(表 2).在传统的环境容量或 TMDL 计算中,一般是以一种典型情景作为依据来核算环境容量.但如本文所述,所谓水环境容量或者 TMDL 本身并不是一个孤立的值,而是和管理决策风险紧密相关的变量.因此,在核算 TMDL 时,如果能够同时考虑到风险这一决策维度,获得的结果对实际管理将更为有益.这种基于模型并包括不确定性特征的流域决策模式,充分利用信息和定量决策手段,将为流域决策提供

更为直接、多样和科学的决策集,减少决策失误,因此也是目前广受关注的智能流域管理的重要途径.

5 结论

5.1 构建的三维水动力-水质模型可以有效地模拟抚仙湖流场、水位、温度与水质的实际情况;6 个神经网络模型对 TN、TP 和 COD 的拟合度均大于 0.97,能较精确地反映真实系统的响应关系.

5.2 通过 EFDC-NN 耦合模型进行风险分析可知,当达标频度一定时,TN、TP 和 COD 的浓度随污染负荷削减率的减少而逐渐升高.在污染负荷削减率/增加比例一定时,TN、TP 和 COD 的环境容量随达标频度的增加而增加.

5.3 当达标频度为 100%时,为了达到 I 类水质,TP 允许增加 14%~18%,COD 允许增加 9%~11%,TN 需要削减 13%~14%;达标频度为 90%时,TN、TP、COD 允许增加比例分别为 2%~4%、56%~60%、30%~32%;达标频度为 80%时,TP 增加比例达到预设上限,TN、COD 允许增加比例分别为 16%~19%、48%~50%;达标频度为 75%时,TP 增加比例仍可达到预设上限,TN、COD 允许增加比例分别为 22%~24%、56%~58%.流域管理者可依据不同的风险与管理费用偏好实施流域污染负荷削减.

参考文献:

- [1] Elshorbagy A, Teegavarapu R, Ormsbee L. Total maximum daily load (TMDL) approach to surface water quality management: concepts, issues, and applications [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2005,32(2):442-448.
- [2] Leclair V. Courts push states, EPA to create TMDL water programs [J]. Environmental Science and Technology, 1997,31(4): 178-179.
- [3] Zhao L, Zhang X L, Liu Y, et al. Three-dimensional hydrodynamic and water quality model for TMDL development of Lake Fuxian, China [J]. Journal of Environmental Science, 2012,24(8):1355-1363.
- [4] 王彩艳,彭虹,张万顺,等.TMDL 技术在东湖水污染控制中的应用 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2009,(05):665-668.
- [5] Effler S W, O'Donnell S M, Matthews D A, et al. Limnological

- and loading information and a phosphorus total maximum daily load (TMDL) analysis for Onondaga Lake [J]. *Lake and Reservoir Management*, 2002,18(2):87-108.
- [6] Stow C A, Borsuk M E. Assessing TMDL effectiveness using flow-adjusted concentrations: A case study of the Neuse River, North Carolina [J]. *Environmental Science and Technology*, 2003, 37(10):2043-2050.
- [7] Havens K E, Walker W W. Development of a total phosphorus concentration goal in the TMDL process for Lake Okeechobee, Florida (USA) [J]. *Lake and Reservoir Management*, 2002,18(3): 227-238.
- [8] Zheng Y, Keller A A. Stochastic watershed water quality simulation for TMDL development-A case study in the Newport Bay Watershed [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2008,44(6):1397-1410.
- [9] Santhi C, Williams J R, Dugas W A, et al. Water quality modeling of Bosque River Watershed to support TMDL analysis [J]. *Total Maximum Daily Load (TMDL): Environmental Regulations, Proceedings*. 2002:33-43.
- [10] Bittencourt S, Gobbi E F. Maximum allowable phosphorus load in the Piraquara II Reservoir, a TMDL process application [J]. *Revista Brasileira de Ciencia Do Solo*, 2006,30(3):595-603.
- [11] Boyacioglu H, Alpaslan M N. Total maximum daily load (TMDL) based sustainable basin growth and management strategy [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008,146(1-3):411-421.
- [12] 丁京涛. 大宁河巫溪段水体总磷 TMDL 估算及分配研究 [D]. 北京:北京化工大学, 2009.
- [13] Munoz-Carpena R, Vellidis G, Shirmohammadi A, et al. Evaluation of modeling tools for TMDL development and implementation [J]. *Transactions of the ASABE*, 2006,49(4):961-965.
- [14] Liu Z J, Kingery W L, Huddleston D H, et al. Modeling nutrient dynamics under critical flow conditions in three tributaries of St. Louis Bay [J]. *Journal of Environmental Science and Health Part A-Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 2008,43(6):633-645.
- [15] Rodriguez H N, Cope B, Peene S J. Hydrodynamic and water quality modeling of ward cove, Alaska [J]. *Estuarine and Coastal Modeling, Proceedings*, 2004:628-645.
- [16] Khangaonkar T, Yang Z Q. Coastal circulation and effluent transport modeling at Cherry Point, Washington [J]. *Estuarine and Coastal Modeling, Proceedings*, 2004:475-491.
- [17] Wool T A, Davie S R, Rodriguez H N. Development of three-dimensional hydrodynamic and water quality models to support total maximum daily load decision process for the Neuse River Estuary, North Carolina [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management-ASCE*, 2003,129(4):295-306.
- [18] He G J, Fang H W, Bai S, et al. Application of a three-dimensional eutrophication model for the Beijing Guanting Reservoir, China [J]. *Ecological Modeling*, 2011,222(8):1491-1501.
- [19] Zou R, Carter S, Shoemaker L, et al. An integrated hydrodynamic and water quality modeling system to support nutrient TMDL development for Wissahickon Creek [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2006,132(4):555-566.
- [20] 邹 锐,张祯祯,刘 永,等.神经网络模型用于数值水质模型逼近的适用性及非敏感参数的欺骗效应 [J]. *环境科学学报*, 2010,(10):1964-1970.
- [21] 王 恺,赵 宏,刘爱霞,等.基于风险神经网络的大气能见度预测 [J]. *中国环境科学*, 2009,29(10):1029-1033.
- [22] 胡 康,万金泉,马邕文,等.基于模糊神经网络的 A-2/O 工艺出水氨氮在线预测模型 [J]. *中国环境科学*, 2012,32(2):260-267.
- [23] 王 祎,李静文,邵 雪,等.基于计算智能的流域污染排放优化模式研究 [J]. *中国环境科学*, 2012,32(1):173-180.
- [24] 刘 罡,李 昕,胡 非.大气污染物浓度的神经网络预报 [J]. *中国环境科学*, 2000,20(5):429-431.
- [25] 刘 永,邹 锐,郭怀成.智能流域管理研究 [M]. 北京:科学出版社, 2012.
- [26] GB3838-2002 地表水环境质量标准 [S].

作者简介: 邹 锐(1967-),男,云南大理人,研究员,博士,主要从事水质管理与模型研究.发表论文 70 余篇.