

千岛湖水体生态风险胁迫因子氮、磷预测模型应用研究

文 军¹, 罗献宝¹, 骆东奇¹, 方志发²

(1. 广西大学, 南宁 530005; 2. 淳安县环境保护监测站, 浙江 淳安 311700)

摘 要: 引起水体富营养化的限制因子主要是氮和磷。现有的研究表明, 千岛湖水体中TN 浓度较高, 已达到导致水体富营养化的危险程度, 磷是千岛湖水体富营养化的限制因子。因此模拟和预测千岛湖水体中氮、磷的变化对指导千岛湖生态风险管理具有重要意义。建立了千岛湖氮、磷预测模型, 通过对千岛湖水体总氮和总磷预测模型的预测结果进行检验, 结果表明所构建模型应用于近期千岛湖总氮和总磷的模拟有较好的预测精度。因此, 通过对千岛湖水水质参数构建数学模型, 模拟其水质变化过程, 为科学评估千岛湖水水质下降风险提供参考依据在理论上是完全可行的。根据氮、磷预测模型的运算结果显示, 千岛湖全湖总氮与总磷的平均比值将持续维持在35~ 40 1 范围内, 进一步肯定了总磷仍然是千岛湖总体水质下降及富营养化的限制因子, 其对于流域内总磷输入的防控管理是整个水体系统功能维持稳定状态的关键。

关键词: 千岛湖; 水质; 氮预测模型; 磷预测模型

中图分类号: X524

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2005)06-0065-03

Application Research of Ecological Risk Stressors: Nitrogen and Phosphorus Forecasting Models of Water Body of Qiandao Lake

W EN Jun¹, LUO Xian-bao¹, LUO Dong-qi¹, FANG Zhi-fa²

(1. Guangxi University, Guangxi, Nanning 530005, China;

(2. Environmental Protection Department of Chunan County, Chunan, Zhejiang 311700, China)

Abstract: N and P are the restricting factors that lead to water eutrophication. From the current research results, the concentration of TN in the Qiandao Lake water body has reached the dangerous extent that lead to eutrophication, and phosphorus is the restricting factor of eutrophication. Simulating and forecasting the changing of N and P are very important, which can guide the ecological risk management of Qiandao Lake. The authors employed the forecasting models of N and P constructed to test the water body of Qiandao Lake, it is found that these models have a good predictive precision. This indicates that it is absolutely theoretically feasible to scientifically assess the risk of water quality deterioration in Qiandao Lake through constructing mathematical models and simulating the process of water quality change. According to the forecasting models, the average ratio of total N to total P in Qiandao Lake will maintain in the range of 35~ 40 1, which further confirms that total P is still the restricted factor of the overall water quality deterioration and eutrophication in the Qiandao Lake. Thus, preventing and controlling the input of total P is the key to maintaining stable status of the whole water body system.

Key words: Qiandao Lake; water quality; nitrogen forecasting model; phosphorus forecasting model

千岛湖所在的淳安县位于浙江省西部, 地处钱塘江上游, 介于东经 118 21 ~ 119 20 之间, 北纬 29 11 ~ 30 02 之间, 1959 年新安江水电站建成后, 形成了汇水面积达 10 442 km², 水域面积 573 km², 平均水深 34 m, 库容量 178.4 亿 m³ 的千岛湖。随着千岛湖区域经济的发展, 尤其是旅游业的发展, 本区域的环境问题愈来愈引起人们的重视, 对千岛湖水资源的保护、利用与分配等现实问题成了人们必须面对和正视的问题。每年由于区域内的水土流失、来自上游的水土流失与污染, 以及沿江沿湖工矿企业等点源污染及其它面源污染, 使得千岛湖区域的环境形势变得严峻和复杂。水体的富营养化程度在加剧, 使贫营养型千岛湖迅速转化成贫-中营

养型湖泊, 加快了千岛湖从贫-中营养型湖泊向中营养型甚至中-富营养湖泊过渡的进程。1998 年和 1999 的 5 月份, 千岛湖中心湖区的部分水域, 呈现高营养化、藻类暴长、水体污染、鱼体出现异味等现象, 水质明显受到污染^[1, 2]。给工农业、旅游业造成较大的负面影响, 引起了当地政府部门和当地居民的极大关注。对造成千岛湖水体富营养化主要因子 N、P 的预测, 构建 N、P 风险预测模型在整个千岛湖流域生态风险评价中具有重要的作用。

1 研究概述

千岛湖水体一直保持着国家地表水二类水质以上标准,

* 收稿日期: 2004-11-25

基金项目: 杭州市旅游委员会专项资金 JY03080 项资助

作者简介: 文军 (1970-), 男, 生态学博士, 副教授, 主要研究: 环境生态和生态旅游。

已有多项研究评价其水质总体处于贫- 中或更低水平^[3]。在对千岛湖的多年监测过程中尚未发现有大范围水质恶化的现象出现, 随着整个流域开发活动的加剧, 必然带来大量的对其生态环境不利的问题对其现有水质等级构成威胁。由于水体环境在千岛湖整个流域的生态系统中地位显要, 对其水质恶化问题的有效预测是在千岛湖旅游开发过程中科学决策的重要基础。

就湖泊水体系统而言, 影响其良好生态功能的根本在于其水质和富营养化问题^[4]。湖泊水质和富营养化的影响因子很多, 但事物发展的一般规律表明, 在众多的因子之中总有主次之分。国内外研究成果得出, 反映湖泊水质和富营养化直接的主要特征是湖泊中浮游植物生长量的大小^[5]。根据Hebig最小值定律, 浮游植物的最大生长量由所需的营养盐中总物质质量最少的那种营养盐所控制, 这种营养盐称为限制性营养盐。由藻体中所含碳、氮、磷的原子比率(106C: 16N: 1P)分析^[6], 在藻类生长期, 当所测定的湖泊中可被植物吸收的氮和磷的浓度比小于 7 时, 氮是可能的限制性营养盐; 反之, 如大于 7, 则磷是可能的限制性营养盐; 接近 7 时, 二者都是可能的限制性营养盐, 其绝对含量大小成为限制因素^[7]。

根据前述千岛湖水质分析的结论, 水体总氮是全湖总体水质下降的首要风险来源, 表现在总氮的综合污染分担率高居不下。因此, 总氮的预测是综合评估千岛湖水质及富营养化风险对水质变化的重要分析对象, 而总磷的绝对含量在千岛湖水体中虽然仍处于很低的水平, 但作为水体富营养化的另一个主要限制因子, 其在水质下降的防控问题中显得异常重要, 是整个流域系统风险预测中的关键监控因素。因此, 对千岛湖水体总磷变化的模拟是本次风险预测的另一研究对象。

2 预测模型

对水体系统水质参数变化的模拟方法很多, 其大致可分为统计模型、经验模型和动态机理模型 3 类^[4], 由于构建模型的机理及条件不同, 3 种模型在不同的研究时期和不同的研究条件下存在不同的模拟效度, 限于本研究所掌握资料的具体情况和千岛湖流域水体系统的整体结构的复杂性, 本研究对总氮和总磷的模拟分别构建不同的预测模型。

2.1 灰色系统模型

在对千岛湖水质变化的趋势分析研究中, 本研究已收集整理 1992~ 2002 年间千岛湖水质总氮变化的完整时间序列数据资料, 在风险评价中将用于对千岛湖水质总氮的进行模拟预测。灰色系统预测模型 GM (1, 1) 是一种动态连续的时间函数的数学模型^[8], 由中国学者邓聚龙于 1982 年提出, 以当前时间之前的反映系统特性的数据为基础建模, 对不完全确知元素的处理过程, 不是寻找概率分布、探索系统规律, 而是用“生成”的方法, 求得随机性弱化规律性增强了的新的数据序列, 新数列既体现原数据序列的变化趋势, 又消除了其波动性^[9], 该方法对灰色系统的模拟具有良好的预测精度, 已在多个水体生态系统的模拟分析中取得良好的应用结果^[10~ 12]。

在千岛湖水质时间序列的趋势分析部分已知, 千岛湖水质中各项监测指标中, 总氮的问题最突出, 其指标多高于国家二级标准, 表明对千岛湖水质下降风险构成最大威胁自于水体中的总氮含量对水质综合污染指数的分担率, 虽然在 1992~ 2002 年间, 千岛湖水质总氮指数总体呈显著下降趋势, 但是在有序

聚类分析中所确定的水质变化一致性良好的 1998~ 2002 年间, 千岛湖水体中的总氮却出现了轻微的上升趋势, 如下表

表 1 千岛湖 1998~ 2002 年各监测断面总氮平均值 mg/L

各断面总氮	1998	1999	2000	2001	2002
街口	1.03	0.96	1.09	1.13	1.15
三潭岛西	0.80	0.48	0.51	0.62	0.56
大坝前	0.63	0.52	0.48	0.62	0.56
航头岛	0.98	0.69	0.66	0.74	0.89
排岭水厂	0.94	0.50	0.70	0.73	0.88
茅头尖	0.81	0.49	0.05	0.50	0.51
西园	0.79	0.74	0.72	0.71	0.83
百亩畈	0.99	0.54	0.59	0.60	0.65
非输入断面均值	0.79	0.55	0.49	0.64	0.67
输入断面均值	1.00	0.73	0.78	0.82	0.90
总体均值	0.87	0.62	0.60	0.71	0.75

根据水质分析结果(另文讨论), 千岛湖各监测断面可划分为代表着水质污染物输入性断面(街口、航头岛和百亩畈)和非输入性断面(三潭岛、大坝前、排岭水厂、茅头尖和西园)。上表中数据显示, 两类断面总氮均值及全湖总氮均值在 1998~ 2002 年间都有上升趋势, 这一变化趋势进一步提升总氮对千岛湖水质下降的威胁程度, 因此, 对该时段及其后水体中总氮含量变化进行有效的模型预测对科学评估千岛湖水质下降风险的重大意义, 采用灰色系统理论分别对三类总氮指标的时间序列构建灰色预测模型 GM (1, 1), 得出结果列于下表。

表 2 总氮时间序列灰色预测模型分析结果

输入性断面总氮模型					非输入性断面总氮模型					全湖总氮模型				
参数 $a = -0.06856, b = 0.6329$					参数 $a = -0.08928, b = 0.4178$					参数 $a = -0.07586, b = 0.5071$				
$x(t+1) = 10.231e^{0.06856t} - 9.2314$					$x(t+1) = 5.4690e^{0.08928t} - 4.6790$					$x(t+1) = 7.5550e^{0.07586t} - 6.6850$				
No	观察值	拟合值	误差/%		No	观察值	拟合值	误差/%		No	观察值	拟合值	误差/%	
X (2)	0.73	0.73	0.54		X (2)	0.55	0.51	7.14		X (2)	0.62	0.60	3.97	
X (3)	0.78	0.78	0.30		X (3)	0.49	0.56	- 13.97		X (3)	0.60	0.64	- 7.05	
X (4)	0.82	0.83	- 1.56		X (4)	0.64	0.61	4.59		X (4)	0.71	0.69	2.40	
X (5)	0.90	0.89	0.90		X (5)	0.67	0.67	0.36		X (5)	0.75	0.75	0.33	
模型精度评价:					模型精度评价:					模型精度评价:				
后验差比值 $C = 0.0832$ 好					后验差比值 $C = 0.4080$ 合格					后验差比值 $C = 0.2665$ 好				
小误差频率 $p = 1.0000$ 好					小误差频率 $p = 1.0000$ 好					小误差频率 $p = 1.0000$ 好				
未来 2 个时刻预测值:					未来 2 个时刻预测值:					未来 2 个时刻预测值:				
$X(t+1) = 0.955$					$X(t+1) = 0.730$					$X(t+1) = 0.806$				
$X(t+2) = 1.022$					$X(t+2) = 0.798$					$X(t+2) = 0.870$				
$Q_{min} = -0.00652$					$Q_{min} = -0.0292$					$Q_{min} = -0.0177$				

模型精度的分级评价显示, 所构建的三个总氮模型的各项精度指标都达到了良好以上, 对实测值预测的误差都能控制在 5% 以内, 其中仅有非输入源均值模型的后验差比值 c 的精度稍低, 但也达到了合格级, 其预测精度低于其它模型大概与非输入性断面总氮变化的影响因素的随机性大有关(如受人为活动的影响程度大)。

2.2 总磷预测模型

由于千岛湖水质总磷在 1992~ 2002 年间的多数年份中均优于国家地表水二级标准(0.025 mg/L), 其绝对含量水平尚处于较低的风险状态, 在已有的对于千岛湖水体富营养化的相关研究中多认定总磷为限制因素, 但是总磷的外源输入及内源释放过程极为复杂, 尤其是对于千岛湖这类大型深水湖泊, 对于总磷的模拟难以建立高效综合描述的动态模型, 在处理这类建模问题时, 以物源平衡为理论基础的经

模型具有较大优越性。如湖泊专家Vollenweider 建立的磷浓度预测模型,其反映入湖磷负荷和总磷浓度之间的原因-作用响应关系,并不涉及湖泊富营养化过程的具体细节^[13,14]。这类经验模型近年来经过OECD (国际经济合作组织)的国际合作研究做了进一步修改完善,当前OECD 模型已被认为可适用于大范围水体的总磷负荷的模拟预测^[15]。

以国际上经多个湖泊验证的负荷-湖中响应模型为基础,对千岛湖磷营养响应结果进行综合比较和筛选,在已经提出的多个湖泊磷预测模型中,选择OECD 提出的湖泊总磷浓度经验模型构建千岛湖总磷年平均负荷预测模型^[16],该模型的解析结构如下:

$$[P_A]=1.02\times\left[\frac{L_p/q_s}{1+\tau_w}\right]^{0.88}$$

式中: $[P_A]$ ——湖中总磷年平均浓度; L_p ——湖泊输入磷的年面积负荷; $L_p=L/A$; L ——湖泊总磷年负荷; A ——湖泊水域面积; q_s ——湖泊单位面积水量负荷; $q_s=Q/A$; Q ——湖泊年流入水量; τ_w ——水力滞留时间; $\tau_w=V/Q$; V ——库容。

根据千岛湖流域多年水文监测资料,调查1999年至2000年水质监测数据(以千岛湖上游安徽省新安江入湖水水质数据)^[17],整理出磷负荷预测模型中的各项基本参数分别是:

表3 模型运算基本参数

单位	数值
水域面积A /m ²	573 × 10 ⁶
库容量V /m ³	178 × 10 ⁸
多年平均入库水量Q /m ³	94.5 × 10 ⁸
水力滞留系数τ _w /a ⁻¹	1.88
水量负荷q _s /(m · a ⁻¹)	16.5
总磷负荷L /(t · a ⁻¹)	192.58

经计算,由OECD 模型预测2000年千岛湖全湖水总磷年平均浓度的计算值为0.016 mg/L,这一结果接近于当年水质监测的总磷实测平均值0.017 mg/L,因此该模型的预测值与实测值相符合,即对千岛湖总体水质总磷年均值的

参考文献:

[1] 孙燕生 千岛湖投放鲢鳙治水效果好[J]. 中国渔业经济, 2003, 5(5): 52

[2] 韩伟民, 胡水景, 金卫, 等. 千岛湖水环境质量调查与保护对策研究[J]. 环境科学研究, 1997, 10(6): 20- 26

[3] 严力蛟, 蕉荔, 金晓辉, 等. 千岛湖水体营养主控因子分析[J]. 当代生态农业, 2001, (3): 89- 93

[4] 金相灿 中国湖泊富营养化[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990

[5] 胡水景 千岛湖旅游生态环境现状及保护措施[J]. 甘肃环境研究与监测, 1999, 12(3): 156- 158

[6] 舒金华 我国湖泊富营养化程度评价方法的探讨[J]. 环境污染与防治, 1990, 12(5): 2- 7

[7] 陈水勇, 吴振明, 俞伟波, 等. 水体富营养化的形成、危害和防治[J]. 环境科学与技术, 1999, (2): 11- 15

[8] 邓聚龙 灰色系统、社会、经济[M]. 北京: 国防出版社, 1985. 22- 42

[9] 武悦 关于灰色系统模型GM (1, 1)适用范围的讨论[J]. 北京工业大学学报, 1999, 25(1): 72- 75

[10] 李强 灰色动态模型在湖泊TN、TP 贮蓄量预测中的应用[J]. 水资源保护, 1998, (2): 23- 26

[11] 曹东卫, 何玛峰 石河水库水质模型与预报[J]. 水资源研究, 2002, 85(4): 33- 34

[12] 李辉, 杨振宏 黄金矿山水质污染的动态趋势分析[J]. 黄金, 2000, 21(5): 42- 45

[13] 程声通, 陈毓岭 环境系统分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990. 54- 104

[14] 顾丁西, 舒金华 湖水总磷浓度的数学模拟[J]. 海洋与湖沼, 1988, 19(5): 447- 453

[15] 《全国主要湖泊(水库)富营养化调查研究》课题组 全国主要湖泊水库富营养化调查报告[R]. 1990. 1- 120

[16] 金相灿 湖泊富营养化控制和管理技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001. 1- 222

[17] 韩伟民, 胡水景, 金卫, 等. 千岛湖水环境质量调查与保护对策[J]. 湖泊科学, 1996, 8(4): 337- 344

[18] 严力蛟, 全为民 水稻生长动态模拟研究进展[J]. 生态学报, 2002, 22(7): 1143- 1152

[19] 李安伦 系统工程原理[M]. 西安: 西安交大出版社, 1998. 15- 50

预测拟合度良好,在通过控制千岛湖外源性磷负荷对水体的富营养化防治中有较好的应用前景。

3 结论与讨论

对千岛湖水体总氮和总磷预测模型的预测结果进行检验,结果表明所构建模型应用于近期千岛湖总氮和总磷的模拟有较好的预测精度。因此,通过对千岛湖水水质参数构建数学模型,模拟其水质变化过程,为科学评估千岛湖水水质下降风险提供参考依据在理论上是完全可行的。根据上述模型的运用计算,千岛湖全湖总氮与总磷的平均比值将持续维持在35~ 40 1 范围内,这进一步肯定了总磷仍然是千岛湖总体水质下降及富营养化的限制因子,其对于流域内总磷输入的防控管理是整个水体系统功能维持稳定状态的关键,这是基于全湖总氮含量持续上升的预测结论。由于总氮的模拟所采用灰色系统模型GM (1, 1)需要对原有数据序列的进行持续刷新^[18],并且模型预测时效有限,因此,在探讨机理基础上研究水质变化的动态模型才能深入揭示其水质变化的具体过程,而此类模型的开发对于千岛湖流域而言显然需要开展规模极为庞大的研究,还必需借助更为先进并且适于大型系统研究的宏观技术应用^[19]。

对千岛湖流域系统状态的统计描述,综合把握了其各项参数的发展趋势,再通过数学模型的构建可以模拟系统状态演化发展的具体特征。由于大型生态系统存在大量尚未确知的因素,即灰色特征,虽然研究中以灰色系统理论为基础所构建模型对系统总氮状态的还原度较高,但该模型的动态响应性并不高,为了延长模型预测的时间及提高精度,需要采用能反映系统最新信息的等维新信息模型,建立GM (1, 1)模型群,即等维新信息处理时,增加新信息而滤掉旧信息。这是建立在对系统动态演化机理尚不明确的情况下的必然处理方式。而研究中对总磷含量的模拟更能体现这种局限性,由此所带来的模拟误差对系统预测有很大影响。解决这一问题的关键在于对千岛湖流域的系统动态模型的研究与构建,并且需要进一步提高选定模型参数的精度。