

南方某水源水库富营养化水质主控因子识别与评价研究

刘洪波, 朱梦羚, 高赛赛

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 淡水湖泊与水库富营养化使其农业灌溉、防洪、发电以及生活用水水源的功能日趋受损。本文以南方某水源水库富营养化动态监测的 10 个指标 (UV_{254} 、 COD_{Mn} 、TOC、可溶性硅、总氮、硝酸盐氮、氨氮、亚硝酸盐氮、总磷和磷酸盐) 为自变量, 叶绿素 a 为因变量。通过主成分分析 (PCA) 与多元线性回归 (MLR) 对变量进行分析, 最后得到了以 TOC、总氮 (总磷)、亚硝酸盐氮为自变量, 叶绿素 a 为因变量的拟合曲线。统计分析表明模型的 F 值为 18.670, Sig. 值为 0, 证明曲线相关性很高; 通过回代检验得到模型的符合率为 86.1%, 表明该评价模型对富营养化具有一定预报能力; 模型分析结果进一步表明叶绿素 a、总氮 (总磷) 是该水库富营养的水质主控因子, 其中总氮与总磷对该水源水库富营养化水平的影响程度相近。

关键词: 水源水库; 富营养化; 水质主控因子; 模型预报

中图分类号: X524

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2013)04-0049-05

Identification and evaluation of main control factor of water quality on eutrophication of a water source reservoir in South China

LIU Hongbo, ZHU Mengling, GAO Saisai

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093)

Abstract: Eutrophication is impairing the function of fresh water lakes and reservoirs which are the main water source for agriculture irrigation, flood control, power generation and domestic water. The paper took the ten indexes (UV_{254} and COD_{Mn} , TOC, soluble silica, total nitrogen, nitrate nitrogen, ammonia nitrogen, nitrite nitrogen, total phosphorus and phosphate) as independent variables, and chlorophyll a as attributive variable during dynamic monitoring of a water source reservoir in south China. Through the methods of principal component analysis (PCA) and multiple linear regression (MLR), the paper got the fitting curve of taking TOC, total nitrogen, total phosphorus and nitrite nitrogen as independent variables and chlorophyll a as attributive variable. Through the test of F and Sig value, F and Sig value are 18.670 and 0 respectively, which indicates a very good linear correlation and confirms good accuracy. The validation test of the model shows 86.1% fitness, which demonstrates the forecasting ability of the model. chlorophyll a and total nitrogen (and/or total phosphorus) are demonstrated to be the eutrophic control factors of the study reservoir. The total nitrogen and total phosphorus have the similar influence on eutrophication level of water reservoir.

Key words: water reservoir; eutrophication; control factor; model forecast

1 概述

我国五大淡水湖中的太湖和巢湖富营养化问题屡见报道, 其他三个淡水湖泊也有富营养化趋势^[1]; 对我国 135 个具有代表性的水库调查发现, 属于中贫营养型水库有 38 座, 中营养化型 40 座, 富营

养型水库 57 座, 总体情况堪忧^[2]。淡水湖泊与水库是农业灌溉、防洪、发电以及生活用水的主要来源, 而富营养化的湖库水体中由于水藻的大量繁殖, 使得原水中藻类密度偏高; 水生生物的腐败会释放出对人体健康有害的有毒物质和致嗅物质, 从而增加了给水处理成本, 也给农业与生态安全带来了潜在

收稿日期: 2013-03-26; 修回日期: 2013-04-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21206092)

作者简介: 刘洪波 (1979-), 男, 工学博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为水污染控制理论与技术。

风险。

大多数学者认为氮磷浓度是引起水体富营养化的主要因素,其中磷更是关键因素,只有当可溶性磷浓度上升时,溶解性无机氮才能被更好地利用^[3]。此外,温度、光照、pH、微量元素、有机物、水生生物、溶解氧等因素也常用来评价湖库富营养化程度^[4-7]。

传统富营养化评价方法以水质评价为基础,耦合水文、水动力、水生态等指标,是典型的多参数模型,评价结果较为可信,但是过程复杂,工作量大,而且多参数之间存在“重叠”效应,评价结果存在一定程度的主观判断性。近年来,以数理统计为基础的模糊评价、灰色分析、层次分析等系统评价方法运用得越来越多^[8-12]。其中模糊数学通过对不确定因素间的隶属关系和权重分析进行结合,可以得到水体整体营养程度,以及单一因素对富营养的影响^[13],但是,在评价的过程中会遗失很多诸如主成分、聚类关系、影响效应等有用信息。

理想的水体富营养化评价模型应既具有模糊评价的综合性与简便性特点,又应该克服其“黑箱”特性,是具有一定预报功能的、过程明晰的、可调性强的、便于操作的富营养化机理性模型。本文基于南方某水库富营养化监测结果,采用耦合模糊分析与传统评价相结合的方法,以期建立具有一定预报功能的富营养化模型,并由此确定该水库富营养化的水质主控因子。

2 案例分析

2.1 影响因素选取

在同一时期,藻类密度与叶绿素 a 的浓度成正相关关系^[14]。因此本文选取叶绿素 a 浓度表征水

体富营养化程度。

选取 UV₂₅₄、COD_{Mn}、TOC、可溶性硅、总氮、硝酸盐氮、氨氮、亚硝酸盐氮、总磷和磷酸盐为富营养化影响因素^[15-18]。

2.2 数据来源

案例分析中数据选自南方某水库近半年的实际监测结果。现场采样方法根据国家环保总局《地表水和污水监测技术规范》(HJ/T91-2002)进行现场采样。首先通过筛选,确定该水库富营养化的表征参数,如表 1 所述,各指标按照《湖泊富营养化调查规范》(第二版)以及《水与废水监测方法》(第四版)所述方法监测。

2.3 模型参数设置

模型因变量为 Y - 叶绿素 a (Chla),自变量为 X₁ - UV₂₅₄, X₂ - COD_{Mn}, X₃ - TOC, X₄ - 可溶性硅, X₅ - 总氮, X₆ - 硝酸盐氮, X₇ - 氨氮, X₈ - 亚硝酸盐氮, X₉ - 总磷, X₁₀ - 磷酸盐,详见表 1。

选择模型的回归系数类型为“估计”和“模拟拟合度”,预测值类型选择为“未标准化”,F 的概率进入值设为 0.05(置信度 95%)。

2.4 数据及处理

表 1 所示为南方某水库 2011 年 1-5 月富营养化监测过程中的 12 个采样点的表、中、底层数据。

根据值域范围,将数据平均分为 5 个等级,各个自变量以及因变量等级划分结果如表 2、表 3 所示。

3 结果分析

3.1 主成分分析结果

如表 4 所示,通过总方差累积发现当成分数量为 2 时,累积比达到 60% 以上,故本次主成分分析选取的成分数为 2,计算得出成分矩阵结果如表 5。

表 1 水库 2011 年 1-5 月各富营养化参数的监测结果

μg/L, cm, mg/L

水质参数	总体	表层	中层	底层
X - 叶绿素 a (Chla)	0.19 ~ 19.565	0.19 ~ 19.565	0.23 ~ 4.450	0 ~ 5.15
X ₁ - UV ₂₅₄	0.013 ~ 0.066	0.017 ~ 0.066	0.021 ~ 0.055	0.013 ~ 0.055
X ₂ - COD _{Mn}	1.8 ~ 4.97	1.80 ~ 4.97	2.26 ~ 3.28	2.04 ~ 3.70
X ₃ - TOC	1.39 ~ 5.23	1.39 ~ 5.23	1.42 ~ 3.77	1.66 ~ 4.24
X ₄ - 可溶性硅	0.194 ~ 3.51	0.194 ~ 3.51	0.387 ~ 1.12	0.38 ~ 1.25
X ₅ - 总氮	0.425 ~ 2.9	0.435 ~ 2.90	0.486 ~ 1.32	0.425 ~ 1.79
X ₆ - 硝酸盐氮	0.2 ~ 2.21	0.20 ~ 2.21	0.21 ~ 0.78	0.2 ~ 1.34
X ₇ - 氨氮	0.02 ~ 0.38	0.037 ~ 0.38	0.067 ~ 0.25	0.02 ~ 0.36
X ₈ - 亚硝酸盐氮	0 ~ 0.34	0.003 ~ 0.34	0.003 ~ 0.16	0 ~ 0.27
X ₉ - 总磷	0.018 ~ 0.209	0.018 ~ 0.209	0.027 ~ 0.058	0.021 ~ 0.099
X ₁₀ - 磷酸盐	0 ~ 0.11	0 ~ 0.11	0 ~ 0.045	0 ~ 0.047
数据数量(组)	95	60	10	25

表 2 各变量的值域等级划分结果

μg/L, cm⁻¹, mg/L

等级	Chla	UV ₂₅₄	COD	TOC	可溶性硅	总氮
1	0~4	0~0.014	1~1.8	1~2	0~0.8	0~0.6
2	4~8	0.014~0.028	1.8~2.6	2~3	0.8~1.6	0.6~1.2
3	8~12	0.028~0.042	2.6~3.4	3~4	1.6~2.4	1.2~1.8
4	12~16	0.042~0.056	3.4~4.2	4~5	2.4~3.2	1.8~2.4
5	16~20	0.056~0.07	4.2~5.0	5~6	3.2~4.0	2.4~3.0

等级	硝酸盐氮	氨氮	亚硝酸盐氮	总磷	磷酸盐	-
1	0~0.5	0~0.08	0~0.07	0~0.05	0~0.024	-
2	0.5~1.0	0.08~0.16	0.07~0.14	0.05~0.1	0.024~0.048	
3	1.0~1.5	0.16~0.24	0.14~0.21	0.1~0.15	0.042~0.072	
4	1.5~2.0	0.24~0.32	0.21~0.28	0.15~0.20	0.072~0.096	
5	2.0~2.5	0.32~0.40	0.28~0.35	0.20~0.25	0.096~0.12	

表 3 变量等级划分结果

水质参数	1级(个数)	2级	3级	4级	5级
Ychla	45	17	5	2	3
X ₁ - UV ₂₅₄	1	17	37	15	2
X ₂ - COD _{Mn}	1	25	32	9	5
X ₃ - TOC	7	23	37	4	1
X ₄ - 可溶性硅	25	33	4	7	3
X ₅ - 总氮	16	12	26	10	8
X ₆ - 硝酸盐氮	17	26	16	7	6
X ₇ - 氨氮	19	30	13	7	3
X ₈ - 亚硝酸盐氮	52	4	9	4	3
X ₉ - 总磷	31	30	5	5	1
X ₁₀ - 磷酸盐	53	12	5	1	1

表 4 累积结果总方差 %

成分	初始特征值			提取平方和载入		
	合计	方差	累积	合计	方差	累积
1	4.158	41.58	41.578	4.158	41.578	41.578
2	2.046	20.457	62.034	2.046	20.457	62.034
3	0.975	9.752	71.787			
4	0.932	9.318	81.105			
5	0.743	7.433	88.537			
6	0.482	4.820	93.357			
7	0.321	3.208	96.565			
8	0.176	1.763	98.328			
9	0.120	1.198	99.526			
10	0.047	0.474	100			

表 5 成分矩阵

水质参数	成分		水质参数	成分	
	1	2		1	2
UV ₂₅₄	0.051	-0.668	硝酸盐氮	0.893	0.356
COD _{Mn}	-0.246	0.540	氨氮	0.522	0.077
TOC	-0.411	0.395	亚硝酸盐氮	0.164	0.884
可溶性硅	0.912	0.097	总磷	0.829	-0.014
总氮	0.913	0.081	磷酸盐	0.691	-0.469

由成分矩阵得:第一主成分中,可溶性硅、总氮、硝酸盐氮、总磷、磷酸盐,这五个因素对第一主成分的影响性都在 60% 以上,且总氮和总磷的主成分位置相近,又这五个元素中总氮(总磷)的影响值最大为 91.3%,故选择总氮(总磷)代表这五个元素对结果的影响。相似地,在第二主成分表中 UV₂₅₄,亚硝酸盐氮这两个因素对第二主成分的影响性在 60% 以上,因此选择亚硝酸盐氮 88.4% 代表这两个元素对结果的影响。

主成分分析后,影响因素为 COD_{Mn}、TOC、总氮(总磷)、氨氮、亚硝酸氮。

3.2 多元线性回归分析结果

通过主成分分析,确定影响因素(自变量)为 5 个,分别为:COD_{Mn}、TOC、总氮(总磷)、氨氮、亚硝酸氮,因变量为叶绿素 a,其中总氮和总磷处于相近的主成分位置。

(1)对 10 个自变量进行多元线性回归模型,得到的结论见表 6。

表 6 单因素方差分析

模型	平方和	df	均方	F	Sig.
回归	36.011	10	3.601	5.652	0.000
残差	38.864	61	0.637	-	
总计	74.875	71	-		

单因素方差分析结果:F 值为 5.652,小于 10,元素对结果显著性影响不高;Sig. 值小于 0.001,说明显著性影响较高。通过 F 值和 Sig. 发现这 10 个元素对于因变量的显著性影响不高。

(2)对 5 个自变量进行多元线性回归模拟,结果见表 7。

表7 单因素方差分析

模型	平方和	df	均方	F	Sig.
回归	34.868	5	6.974	11.504	0.000
残差	40.007	66	0.606		
总计	74.875	71			

单因素方差分析结果:F 值为 11.504, 大于 10; Sig. 值小于 0.001, 说明以 COD、TOC、总氮(总磷)、氨氮、亚硝酸氮为自变量, 对于叶绿素 a 的显著性影响较强。进一步分析每个元素对叶绿素 a 的显著性影响, 结果见表 8。

表8 各因素对叶绿素 a 的影响系数

模型	非标准化系数		t	Sig.
	B	标准误差		
(常量)	-0.578	0.586	-0.986	0.328
X ₂ - COD _{Mn}	-0.153	0.120	-1.278	0.206
X ₃ - TOC	0.819	0.127	6.438	0.000
X ₅ - 总氮(总磷)	0.336	0.085	3.955	0.000
X ₇ - 氨氮	-0.045	0.099	-0.456	0.65
X ₈ - 亚硝酸氮	-0.172	0.098	-1.751	0.085

由表 8 可以看出, COD_{Mn}、TOC、总氮(总磷)、氨氮、亚硝酸盐氮的 Sig. 值分别为 0.206、0、0、0.650、0.085, 其中 COD_{Mn} 和氨氮的 Sig. 值都大于 0.1, 说明两因素对于叶绿素 a 的显著性影响不大。因此, 确定多元线性回归拟合富营养化预报模型的自变量为 TOC、总氮(总磷)、亚硝酸盐氮, 因变量为叶绿素 a。

(3) 模型的三元素线性回归拟合结果见表 9。

表9 单因素方差分析

模型	平方和	df	均方	F	Sig.
回归	33.818	3	11.273	18.67	0.000
残差	41.057	68	0.604		
总计	74.875	71			

F 值大于 10 为 18.670, Sig. 值小于 0.001, 说明这三自变量对因变量的影响很显著。

表10 多元回归模型

模型	非标准化系数		t	Sig.
	B	标准误差		
(常量)	-1.127	0.400	-2.821	0.006
X ₃ - COD _{Mn}	0.841	0.123	6.863	0.000
X ₅ - 总氮(总磷)	0.353	0.078	4.549	0.000
X ₈ - 亚硝酸氮	-0.231	0.087	-2.668	0.010

模型的多元回归模拟结果见表 10 所示, 每个自

变量 sig. 都小于 0.01, 因此得到预报模型为:

$$Y_{Chla} = -1.127 + 0.841X_3 + 0.353X_5 - 0.231X_8 \quad (1)$$

预测值 Y 的标准差可用剩余均方估计:

$$S_y = \sqrt{0.604} = \pm 0.777 \quad (2)$$

通过回归方程的显著性检验得到:

F 统计量为 18.670, 系统自动检验的显著性水平为 0.000。F(0.05, 3, 68) 值为 2.73, F(0.01, 3, 68) 值为 4.08, F(0.00000001, 3, 68) 值为 18.06。因此判断回归方程线性相关性很高。

3.3 回代检验

设置非标准化预测值计算后, 得到预测值, 计算“YChla”与“预测值”的差值, 将差值大于 0.9 的视为不符合, 反之则符合, 由此得到“YChla”与“预测值”结果如图 1 所示。72 个拟合值中, 符合真值的为 62 个, 符合率为 86.1%。

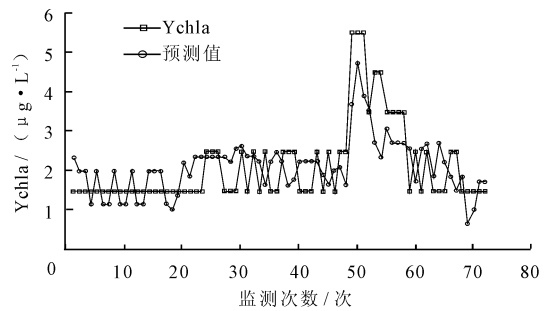


图1 各次监测叶绿素“Y Chla”与“预测值”结果图

4 结 语

在南方某水源水库富营养化动态监测的基础上, 选择十个指标(UV₂₅₄、COD_{Mn}、TOC、可溶性硅、总氮、硝酸盐氮、氨氮、亚硝酸盐氮、总磷和磷酸盐)为自变量, 叶绿素 a 为因变量, 以叶绿素 a 表征该水库富营养化水平, 通过主成分分析(PCA)与多元线性回归(MLR)组合成半模糊分析, 发现该水库富营养化水平与 TOC、总氮(总磷)、亚硝酸盐氮成较好的线性相关关系(F = 18.670, Sig. = 0), 且评价模型的回代检验符合率为 86.1%; 进一步的模型分析结果表明叶绿素 a、总氮(总磷)是该水库富营养的水质主控因子, 对富营养化的影响值高达 91.3%。

参考文献:

- [1] 陆洪省, 曹晓强, 昭日格图, 等. 水体富营养化控制的研究进展[J]. 环境研究与监测, 2012(1): 71 - 73.
- [2] 孟红明, 张振克. 我国主要水库富营养化现状评价[J]. 河南师范大学学报, 2007, 35(2): 133 - 136 +

- 141.
- [3] Chau Minh Khoi, Vo Thi Guong, Nguyen Van Hoa, et al. Growth of chaetoceros calcitrans in sediment extracts from artemia franciscana culture ponds points to phosphorus limitation[J]. Journal of the world aquaculture society, 2009, 40(1): 104 - 112.
- [4] Yu J, Chen W Q, Liu J Q. et. al. Study of the promoting mechanism of rare earth on water eutrophication in the upper reaches of the Yangtze River[J]. Disaster Advances, 2012, 4(5): 1882 - 1889.
- [5] Zhang E L, Cao Y M, Langdon P. et. al. Alternate trajectories in historic trophic change from two lakes in the same catchment, Huayang Basin, middle reach of Yangtze River, China[J]. Journal of Paleolimnology, 2012, 48 (2): 367 - 381.
- [6] Da Silva A M, Ludwig T A V, Tremarin P I. et. al. Periphytic diatoms in a Brazilian eutrophic system (Irai reservoir, Parana state)[J]. Acta Botanica Brasilica, 2010, 24 (4): 997 - 1016.
- [7] 余游,冉奎林,张涛. 环境因子对铜绿微囊藻生长、生理影响研究进展[J]. 科技致富向导, 2011(24): 265 - 267.
- [8] Mooij W M, Trolle D, Jeppesen E. et. al. Challenges and opportunities for integrating lake ecosystem modelling approaches[J]. Aquatic Ecology, 2010, 44(3): 633 - 667.
- [9] Tang Xianqiang, Li Qingyun, Wumin, et. al. Ecological environment protection in chinese rural hydropower development practices: a review[J]. Water Air and Soil Pollution, 2012, 223(6): 3033 - 3048.
- [10] Akkoyunlu A, Akiner M E. Feasibility a ssesment of data - driven models in predicting pollution trends of omerli lake, Turkey[J]. Water Resources Management, 2010, 24(13): 3419 - 3436.
- [11] Angulo C, Cabestany J, Rodriguez P, et. al. Fuzzy expert system for the detection of episodes of poor water quality through continuous measurement[J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(1): 1011 - 1020.
- [12] 胡著邦,徐建民,全为民. 模糊评价法在湖泊富营养化评价中的应用[J]. 农业环境保护, 2002, 21(6): 535 - 536, 539.
- [13] 黄盛楠. 模糊数学评价法在山仔水库富营养化评价中的应用[J]. 绿色科技, 2012(4): 167 - 169.
- [14] 于海燕,周斌,胡尊英,等. 生物监测中叶绿素 a 浓度与藻类密度的关联性研究[J]. 中国环境监测, 2009, 25(6): 40 - 43.
- [15] 于浩,李宇. 地表水中 UV₂₅₄ 与 COD 之间的关系分析[J]. 水资源保护, 2009, 25(4): 67 - 69.
- [16] 于春霞,刘亦峰. 中山水库水藻类研究[J]. 城镇供水, 2012(1): 62 - 65.
- [17] 张亚丽,李涵,许秋瑾,等. 不同形态氮对微囊藻叶绿素 a 合成及产毒的影响[J]. 湖泊科学, 2011, 23 (6): 881 - 887.
- [18] Akkoyunlu A, Akiner M E. Pollution evaluation in streams using water quality indices: A case study from Turkey's Sapanca Lake Basin[J]. Ecological Indicators, 2012 (18): 501 - 511.

(上接第 48 页)

- [2] 新华社. 中共中央国务院关于加快水利改革发展的决定[N]. 中国水利报, 2011. 2. 1.
- [3] 王建华,杨志勇. 气候变化将对用水需求带来影响[J]. 中国水利, 2010(1): 5 - 5.
- [4] 吕翠美,吴泽宁,胡彩虹. 用水结构变化主要驱动力因子灰色关联度分析[J]. 节水灌溉, 2008(2): 39 - 41, 45.
- [5] 刘俊良,臧景红,何延青. 系统动力学模型用于城市需水量预测[J]. 中国给水排水, 2005, 21(6): 31 - 34.
- [6] 秦长海,赵勇,裴源生. 农业水价调整对广义水资源利用效用研究[J]. 水利学报, 2010, 41(9): 1095 - 1100.
- [7] 裴源生,方玲,罗琳. 黄河流域农业需水价格弹性研究[J]. 资源科学, 2003, 25(6): 25 - 30.
- [8] 陈莹. 节水型社会系统理论及其驱动因子研究[D]. 北京:北京师范大学, 2004.
- [9] 马黎华,康绍忠,粟晓玲. 西北干旱内陆区石羊河流域用水结构演变及其驱动力分析[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(1): 125 - 130.
- [10] 梅瑞特 S,江莉,刘渝. 水需求的几种解释[J]. 水利水电快报, 2005, 26 (1): 25 - 27.
- [11] 谢中华. Matlab 统计分析与应用: 40 个案例分析[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2010: 374 - 396.
- [12] 杨虎,钟波,刘琼. 应用数理统计[M]. 北京:清华大学出版社, 2006: 161 - 169.
- [13] 江苏省统计局. 江苏省统计年鉴(2001 - 2011)[Z]. 北京:中国统计出版社, 2011.
- [14] 江苏省水利厅. 江苏省水资源公报(2001 - 2011)[Z]. 南京:江苏省水利厅, 2011.