

浙江青山水库富营养化状况评价

施沁璇^{1,2}, 韦肖杭^{1,2}, 施礼科³, 张敏^{1,2}, 姚伟忠^{1,2}, 崔雁娜^{1,2}, 王俊^{1,2}, 沈萍萍¹, 赵汉取^{1,2}

(1. 浙江省淡水水产研究所, 浙江 湖州 313001; 2. 农业部淡水渔业健康养殖重点实验室, 浙江 湖州 313001;
3. 杭州市水产技术推广总站, 浙江 杭州 310001)

摘要:对青山水库富营养化情况进行评价,为管理和决策提供理论依据。沿库区水流方向共设7个采样点,其中S1、S2、S4位于水库上游,分别靠近入库支流灵溪、横溪、南苕溪;S7位于水库下游,靠近大坝。2013年4、7、10及12月,现场测定透明度,实验室内测定表层水样的高锰酸盐指数、总氮、总磷、叶绿素a等4个指标,应用BP神经网络模型进行水质富营养化评价。青山水库水质富营养化状态总体为中营养。人工神经网络评价结果,富营养化状态4月最低、平均为1.130,7月相对较高、平均为1.338;4、7月与其他月份之间富营养化状态差异显著($P < 0.01$),10月与12月间无显著性差异($P > 0.05$)。富营养化数值最大的站点4、7月为下游S6,10、12月为下游S7;水库的上游(S4)站位富营养化评价结果与其他6个站位间差异极显著($P < 0.01$)。青山水库富营养化程度随着水流方向呈现增加的趋势,受入库支流影响较大。

关键词:青山水库, BP神经网络, 富营养化

中图分类号:X824 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2015)04-0020-05

近年来,随着社会发展,工农业污染日益严重。2013年全国646座水库富营养化评价结果,58.0%的水库处于中营养状态,42.0%处于富营养状态(中华人民共和国水利部,2014),水库富营养化问题较为突出。同时水库因功能性调整,泥沙淤积、蓄水量减少。

浙江省水库大部分建于20世纪50-70年代。近10年来,相继有余杭区四岭水库、台州市长潭水库、慈溪市杜湖水水库等暴发蓝藻,富营养化态势明显,直接影响饮水安全(吕振平等,2010)。杭州青山水库位于南苕溪中下游的宽谷盆地,属于低山丘陵-河谷型地貌(倪婉敏等,2012),上游主要由南苕溪、横溪、灵溪等分支水系汇入。流域属亚热带季风气候区,4-7月有梅雨,7-9月有台风影响,春、夏两季降水量较大,约占全年的70%,秋、冬两季则雨量偏少(徐兵兵,2011)。国内外对于青山水库的研究相对较少,主要集中在表层沉积物重金属污染、水生生物等方面(张芬等,2013;虞左明,2001)。

对水质富营养化评价应用较多的方法包括因子法、水质综合污染指数法、模糊评价法、灰色评价

法、人工神经网络评价法等。本文根据监测结果,运用BP神经网络模型对其富营养化情况进行评价,以期为青山水库的管理和决策提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 采样与分析方法

根据青山水库的地理特点,沿库区水流方向共设7个采样点,具体站点位置见图1。其中S1、S2、S4位于水库上游,分别靠近入库支流灵溪、横溪、南苕溪;S7位于水库下游,靠近大坝。按照《水质采样

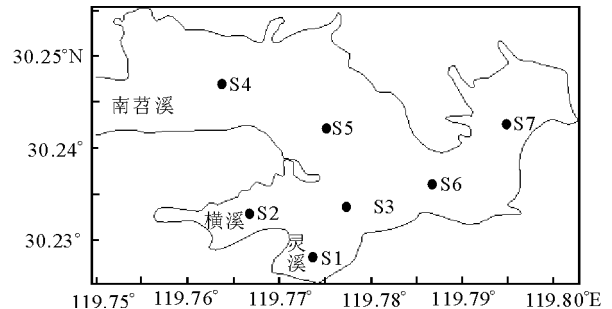


图1 青山水库采样站点位置

Fig.1 Location of the sampling sites in
Qingshan Reservoir

技术指导(HJ 494-2009)》等相关技术规范要求对青山水库进行表层水样采集,采样时间为2013年4、7、10和12月。现场测定透明度(SD),将采集水样带回实验室,按照相应的标准测定高锰酸盐指数(COD_{Mn})、总磷(TP)、总氮(TN)、叶绿素(Chla)

收稿日期:2014-09-15

基金项目:湖州市科技计划项目(2013GY04);浙江省科技计划项目(2015F30020)。

作者简介:施沁璇,女,1989年生,助理工程师,主要从事渔业水域生态环境保护。E-mail: shizhuhuan@163.com

通信作者:赵汉取。E-mail: hq-zhao@126.com

等 5 个指标。

1.2 评价方法

1.2.1 BP 神经网络模型 所建立的 BP 神经网络模型如图 2,包含 1 个输入层、1 个隐含层和 1 个输出层,节点数分别为 5、2、1。虽然隐含层层数及节点数的选择目前尚无统一的标准,但研究显示,进行水质评价一般 1 个隐含层的网络结构即可在满足精度的前提下确保训练后网络模型具有较好的泛化和预测能力(马细霞等,2002);同时,在水质评价等简单的计算中,增加网络层数不能有效提高计算精度且会增加计算量,导致训练时间的延长,从而造成网络不能收敛而发散(宋国浩,2008)。在建模训练过程中,经过多次改变训练样本、非训练样本的组合及网络初始值,当隐层数为 1、隐层节点数为 2 时,训练样本、检验样本和测试样本误差较为接近且趋于稳定,达到全局最小值,能够较好地评价待测样本。模型的建立与训练由 STATISTICA Neural Networks 软件完成,应用 Surfer 软件对评价结果绘制趋势图,并用 *F* 检验法对组间数据进行差异显著性分析。

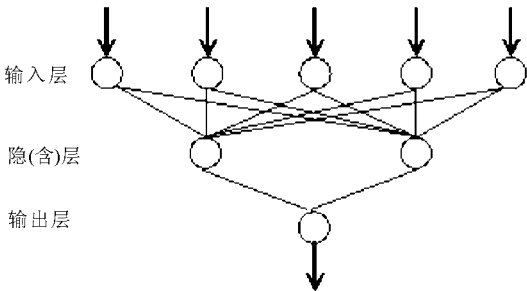


图 2 富营养化状况 BP 人工神经网络评价模型
Fig.2 BP neural network model for eutrophication assessment

1.2.2 评价标准及参数 参照金相灿(1995)关于全国 26 个主要湖泊的调查研究及水库富营养化评

价标准,选择与富营养化直接相关的高锰酸盐指数、透明度、总氮、总磷、叶绿素 a 等 5 个评价指标,每个指标分 5 个等级,如表 1。按评价标准,随机选取各评价指标营养状态分级临界值之间的任意数值为建模原始数据进行 BP 神经网络建模。

表 1 富营养化分级标准

营养状态	classification				
	COD _{Mn} / mg · L ⁻¹	SD/ m	TP/ mg · L ⁻¹	TN/ mg · L ⁻¹	Chla/ mg · m ⁻³
贫营养	≤2.964	≥2.979	≤0.019	≤0.235	≤1.58
中营养	≤6.284	≥1.063	≤0.065	≤0.765	≤9.99
轻度富营养	≤9.151	≥0.635	≤0.121	≤1.381	≤25.10
中度富营养	≤13.325	≥0.379	≤0.223	≤2.492	≤63.03
重度富营养	>13.325	<0.379	>0.223	>2.492	>63.03

2 结果

2.1 BP 神经网络模型学习训练结果

根据富营养化分级标准(表 1)进行 BP 神经网络模型的学习训练,得到不同营养状态的分界值输出,其中小于 0.9376 为贫营养,大于 3.1722 为重度富营养,具体分界值如表 2。

2.2 青山水库水质变化的时空差异

将青山水库 2013 年 4 次各点位监测数据依次输入训练好的 BP 神经网络模型,获得实际输出值,并根据模型的分界样本输出值,获得各站位的富营养化等级见表 3。

青山水库水质总体处于中营养状态,与综合营养状态指数法的评价结果(王明翠等,2002)基本一致;综合营养状态指数范围为 41.1 ~ 48.7,均为中营养,这与张振克等(2006)对于中国南方水库调查的结论相一致。从不同的采样时间来看,4 月富营养化程度最低,人工神经网络评价结果为 0.948 ~

表 2 训练后 BP 神经网络模型输出的评价标准

Tab.2 Assessment standard deduced by BP neural network model after being trained

营养状态	贫营养	中营养	轻度富营养	中度富营养	重度富营养
分界值	≤0.9376	(0.9376,1.4465]	(1.4465,2.5388]	(2.5388,3.1722]	>3.1722

表 3 青山水库各监测点的 BP 神经网络评价结果

Tab.3 Eutrophication assessment of each sampling site in Qingshan Reservoir by BP neural network model

采样地点	4 月		7 月		10 月		12 月	
	实际输出	富营养化等级	实际输出	富营养化等级	实际输出	富营养化等级	实际输出	富营养化等级
S1	1.143	中营养	1.315	中营养	1.310	中营养	1.287	中营养
S2	1.216	中营养	1.276	中营养	1.263	中营养	1.248	中营养
S3	1.160	中营养	1.318	中营养	1.295	中营养	1.279	中营养
S4	0.948	中营养	1.154	中营养	1.045	中营养	1.027	中营养
S5	0.974	中营养	1.370	中营养	1.215	中营养	1.204	中营养
S6	1.242	中营养	1.484	轻度富营养	1.324	中营养	1.280	中营养
S7	1.227	中营养	1.448	轻度富营养	1.366	中营养	1.308	中营养

1.242, 平均 1.130; 7 月相对较高, 人工神经网络评价结果为 1.154 ~ 1.484, 平均 1.338, 这与南京主要湖库富营养化评价结果(杜勇等, 2012)基本一致, 其中 2 个站位为轻度富营养, 这点不同于综合营养状态指数法的评价结果, 可能与评价方法的不同分级标准有关, BP 网络输出值正好达到了轻度富营养的分级标准, 使得划分等级产生了变化。

F 检验结果显示, 青山水库富营养化程度人工神经网络评价结果存在季节性差异, 其中 4 月、7 月与其他月份之间差异显著($P < 0.01$), 10 月与 12 月无显著性差异($P > 0.05$)。

不同站位间 F 检验结果显示, 水库的上游(S4)、下游(S6、S7)与其他站位之间存在显著性差异; 其中, S4 站位富营养化评价结果与其他 6 个站位间差异极显著($P < 0.01$); S7 站位与 S4、S5 间差异极显著($P < 0.01$), 与 S1、S2、S3 间存在显著性差异($P < 0.05$); S6 站位与 S4、S5 间差异极显著($P < 0.01$), 与 S2 间存在显著性差异($P < 0.05$)。

2.3 青山水库水质变化的时空趋势

应用 Surfer 绘图软件对表 3 评价结果进行趋势分析, 得到 2013 年 4 月、7 月、10 月、12 月青山水库各点位富营养化状况的分布趋势(图 3)。

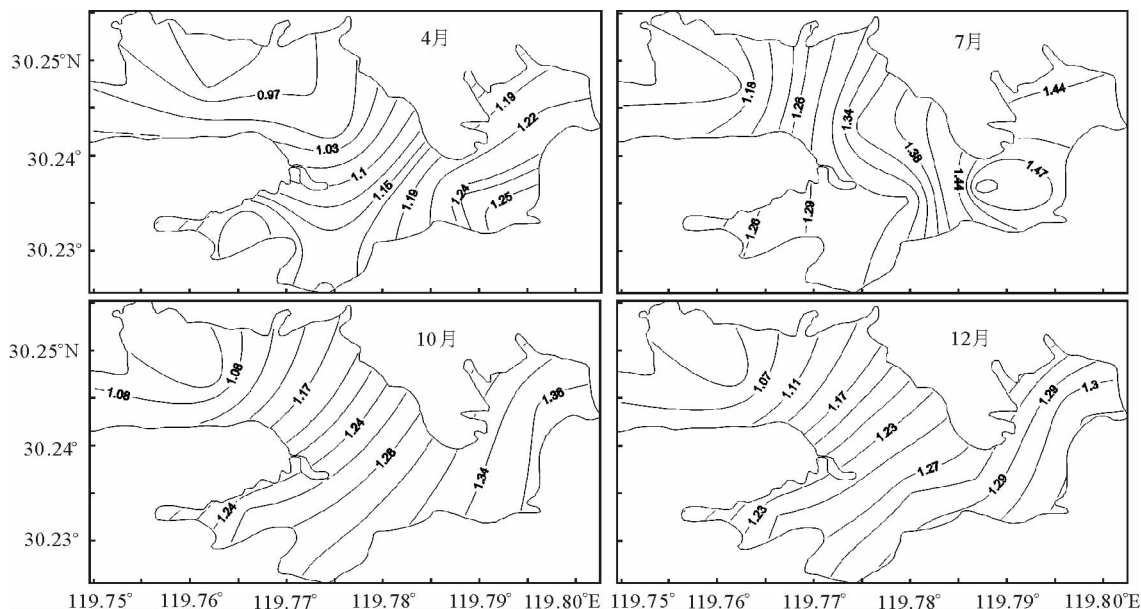


图 3 青山水库水质富营养化状况分布

Fig. 3 Spatial distribution of water quality eutrophication in Qingshan Reservoir

4 次调查结果青山水库水质富营养化状态随空间变化的分布趋势大致相似, 均为随着水流方向, 富营养化程度呈现增加的趋势。4 月、7 月富营养化数值最大的站点为 S6, 人工神经网络评价结果分别为 1.242 和 1.484, 趋势图中的高点也出现在 S6 站位附近, 而不是本文调查采样 7 个站位中的最下游位置, 笔者认为出现这种情况与上游水流的湍急程度及该处的地理位置有关。作为青山水库的主要入库支流, 南苕溪为典型山溪性河流, 具有源短流急、汛期洪水峰高量大等特征(袁淑方等, 2013), 4-9 月为丰水期, 占全年径流量 70% 左右(董慧峪等, 2010), 较大的水流流经 S6 站位后由于水面变窄流速加快, 加之地形上接近垂直角度的拐弯, 使得水流只能沿水库一侧而下, 过 S7 站位后遇到水库大坝阻拦, 水流便掉头沿水库另一侧迂回至 S6 站位附近达到平衡, 使得该处易于浮游植物的生长和堆积, 形成

了富营养化程度高点。10 月、12 月由于是枯水期, 流量小、流速慢, 富营养化程度沿水流方向递增, 最高点出现在靠近大坝的 S7 站点, 人工神经网络评价结果分别为 1.366 和 1.308。

3 讨论

BP 神经网络是采用误差反向传播算法对网络权值进行训练的多层前向神经网络, 以其优良的非线性逼近能力获得广泛应用(楼文高, 2002)。但是, 建模需要一定的基础条件, 对于在湖库水质富营养化评价中的应用, 一般采取以评价标准作为建模依据, 以获得足够多的训练样本、检验样本及测试样本来保证建立的模型具有一定的泛化能力。目前, 通常采用的标准是根据 20 世纪 80 年代对全国主要湖泊调查结果而确定的高锰酸盐指数、透明度、总氮、总磷、叶绿素 a 等 5 个指标的营养状态, 该分级

标准能否适合现在的水质环境评价还需深入地探讨。从评价结果来看,与综合营养状态指数法基本一致,BP神经网络克服了需要对各指标人为赋值的干扰,具备较强的抗干扰能力及较好的通用性;但是,建模过程需要一定的专业知识和人为经验,否则会出现局部极小点、过度拟合等现象(田大钢等,1997),使得建立的模型没有应用价值。

近年来,由于防洪、养殖、饮用水等方面的需要,许多水库相继建成。水库在发挥其综合性功能的同时,水质富营养化的问题日益显现。在河流中,由于水流较快,浮游生物不易大量繁殖,但随着水库的建成,水流速度大大减缓,静水面积扩大,为静水浮游生物的生长提供了很好的繁殖条件(周世良,2008)。有研究表明,浮游植物最适宜的生长温度为 28°C 左右(于旭青,2009),现场测得青山水库7月的平均水温为 28.4°C ,4月、10月、12月分别为 18.0°C 、 21.3°C 、 11.2°C 。因此,7月较好的温度、日照等条件,加上水库特殊的静水环境,促进了静水浮游生物的生长,使水体自净能力下降,从而造成水库水质富营养化程度最高。同时,本研究评价结果显示,青山水库水质富营养化程度4月最低,7月最高,4月、7月与其他月份之间差异显著($P < 0.01$),呈现明显的季节性变化,这与张述太等(2010)的研究结果基本一致。

青山水库入库支流为南苕溪、横溪、灵溪,其中南苕溪流域面积 720 km^2 ,经青山水库水文站实测,多年平均流量 $14.5\text{ m}^3/\text{s}$ (徐兵兵,2011),加之南苕溪为典型的山溪性河流,因此其对水库影响最大。相关性分析显示,位于水库上游、南苕溪汇入点附近的S4站位富营养化评价结果与其他6个站位间差异极显著($P < 0.01$),水库富营养化程度随着水流方向呈现增加趋势,因此青山水库富营养化程度受入库支流影响较大。相关研究资料显示,造成水库富营养化的原因包括农业污染的日益加剧、城市污水排放量的激增、水库网箱养鱼的快速发展等(张振克等,2006)。近年来,随着社会经济持续高速发展,青山水库入库支流周边生活污水、工业污染排放增加,流经临安市区河段富营养化严重(沈海波,2013),这可能会导致入库支流水质恶化,进而使青山水库水体富营养化加剧,因此应采取必要方式,积极改善水库环境。此外,分析结果显示,在水库水流较大的季节,富营养化最高的点位于水面急剧变窄的拐弯处附近而非大坝附近,笔者认为这可能与大坝的拦截作用有关,在拐弯处附近,水流达到平衡,

易于浮游植物的生长和堆积。由于本研究时间所限,青山水库特殊地理环境和水库构造对水质富营养化的影响尚需深入研究。

参考文献

- 董慧峪,强志名,李庭刚,等.2012.南苕溪支流锦溪水质时空变化特征分析[J].环境工程学报,6(3):772-778.
- 杜勇,沈乐,王文辉.2012.南京市主要湖库富营养化评价及特征分析[J].人民长江,43(S2):167-170.
- 金相灿.1995.中国湖泊环境:第一、二册[M].北京:海洋出版社.
- 楼文高.2002.BP神经网络模型在水环境质量综合评价应用中的一些问题[J].水产学报,26(1):90-96.
- 吕振平,董华,何锡君.2010.浙江省供水水库的水质评价及富营养化防治对策研究[J].水生态学杂志,3(1):18-21.
- 马细霞,贺晓菊,赵道全,等.2002.B-P网络隐含层对水质评价结果的影响分析[J].水电能源科学,20(3):16-5.
- 倪婉敏,朱蕊,张建英.2012.大气氮湿沉降对青山湖富营养化的影响[J].环境化学,31(5):361-365.
- 沈海波.2013.青山湖流域水环境评价研究[D].临安:浙江农林大学.
- 宋国浩.2008.人工神经网络在水质模拟与水质评价中的应用研究[D].重庆:重庆大学.
- 田大钢,费奇,郭俐.1997.人工神经网络学习的多模式现象[J].预测,理论与方法研究,(4):60-62.
- 王明翠,刘雪芹,张建辉.2002.湖泊富营养化评价方法及分级标准[J].中国环境监测,18(5):47-49.
- 徐兵兵.2011.南苕溪青山湖流域水污染特征分析[D].临安:浙江农林大学.
- 于旭青.2009.富营养化水体中藻类突发性增长生长特性的研究[D].成都:西南交通大学.
- 虞左明.2001.青山水库底栖动物群落初步研究[J].环境污染与防治,23(5):229-231.
- 袁淑方,王为东,董慧峪,等.2013.太湖流域源头南苕溪河口生态工程恢复及其初期水质净化效应[J].环境科学学报,33(5):1475-1483.
- 张芬,杨长明,潘睿捷.2013.青山水库表层沉积物重金属污染特征及生态风险评价[J].应用生态学报,24(9):2625-2630.
- 张述太,薛俊增,姚建良,等.2010.三峡水库大宁河库湾水环境的时空变化特征[J].水生态学杂志,3(2):1-7.
- 张振克,孟红明,殷勇.2006.中国水库环境面临的主要问题及其对策[J].科技导报,24(12):82-84.
- 中华人民共和国水利部.2014.2013年中国水资源公报[R].
- 周世良.2008.水库富营养化成因分析与对策[J].海峡科学,(7):20,34.
- (责任编辑 张俊友)

Water Quality Eutrophication Assessment of Qingshan Reservoir in Zhejiang Province

SHI Qin-xuan^{1,2}, WEI Xiao-hang^{1,2}, SHI Li-ke³, ZHANG Min^{1,2}, YAO Wei-zhong^{1,2},
CUI Yan-na^{1,2}, WANG Jun^{1,2}, SHEN Ping-ping¹, ZHAO Han-qu^{1,2}

(1. Zhejiang Institute of Freshwater Fisheries, Huzhou 313001, P. R. China;

2. Agriculture Ministry Key Laboratory of Healthy Freshwater Aquaculture, Huzhou 313001, P. R. China;

3. Hangzhou Aquacultural Technique Extending Center, Hangzhou 310001, P. R. China)

Abstract: The eutrophication evaluation of 646 reservoirs by the Ministry of Water Resources of the People's Republic of China (2013) showed that 58.0% of the reservoirs were mesotrophic, and 42.0% of the reservoirs were eutrophic. These results indicate that the reservoir eutrophication problem is nation-wide. The reservoirs in Zhejiang Province have shown obvious eutrophication over the last 10 years and it is affecting the safety of drinking water. In this study, we evaluated the eutrophication of Qingshan Reservoir in Hangzhou using a backpropagated (BP) artificial neural network model. The eutrophication assessment, and the BP artificial neural network model, of Qingshan Reservoir were based on 5 water quality parameters (COD_{Mn} , SD, TP, TN and Chl-a) monitored in April, July, October and December of 2013. The study provides theoretical evidence that will help administrators manage the reservoir more effectively. Qingshan Reservoir is located in the middle and lower reaches of Nantiaoxi River and three tributaries (Nantiaoxi River, Hengxi River and Lingxi River) flow into it. In the spring and summer, there is plentiful rainfall in this region, accounting for 70% of the annual precipitation and the fall and winter are much drier. Based on water flow patterns in the reservoir, seven sampling sites were selected (S1, S2 and S4 near the three tributary inflows in the upper reservoir, S7 near the dam, and S3, S5 and S6 spatially distributed to give full coverage). The transparency of the water body was measured in situ and surface water samples were collected for laboratory determination of COD_{Mn} , TP, TN and Chl-a. Results indicate that the waters of Qingshan Reservoir are generally mesotrophic, but with obvious spatial and temporal variations. The output values of the BP neural network model were lowest in April and highest in July, averaging 1.130 and 1.338, respectively. These values are significantly different from other months ($P < 0.01$), but differences for October and December were not significant ($P > 0.05$). Spatially, the degree of eutrophication increased with direction of water flow and eutrophication in the upstream section (S4) was significantly different from those for other monitoring sites in the reservoir ($P < 0.05$). The highest eutrophication level in April and July was observed at S6, and the highest eutrophication level in October and December was observed at S7, both located in the lower reach of the reservoir, where the dam creates perfect hydrostatic conditions for phytoplankton growth.

Key words: Qingshan Reservoir; BP neural network; eutrophication