

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2019.05.11

广东江门四堡水库水质时空变化及综合评价研究

傅 博¹, 黄国如^{1,2,3}

(1. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640; 2. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室,
广东 广州 510640; 3. 广东省水利工程安全与绿色水利工程技术研究中心, 广东 广州 510640)

摘要: 为了解江门市四堡水库水质状况, 在该水库布置了13处采样点, 于2018年6~12月进行了7次水样采集和检测工作, 分析水质因子时空变化规律。分别采用单因子评价法、BP神经网络法、主成分分析法及指数法等对四堡水库水质和富营养化状况进行综合评价。利用Pearson方法研究叶绿素a与水质因子的相关性, 分析影响水库富营养化的主要驱动因子。结果表明: 不同月份的总磷、总氮和氨氮变化较为复杂, 靠近水库中下游区域的水质较好, 水库汇水区的水质较差; 单因子评价法和BP神经网络的评价结果大体一致, 水库水质总体在III~IV类之间, 主成分分析法表明水质主要受高锰酸盐指数、总磷、总氮、氨氮影响, 指数法表明水库处于轻度富营养化状态, 在水库汇水区的富营养化程度较高; 相关性分析表明, 叶绿素a与氨氮相关性较强, 氮为浮游植物生长的限制因子, 控制氮素浓度能够有效地治理水体富营养化。

关键词: 水质时空变化; 水质评价; 单因子评价法; BP神经网络; 主成分分析; 指数法; 水库富营养化

中图分类号:X824 文献标识码:A 文章编号: 1672-643X(2019)05-0064-08

Study on spatiotemporal variations and comprehensive evaluation of water quality of Sibao Reservoir in Jiangmen City, Guangdong Province

FU Bo¹, HUANG Guoru^{1,2,3}

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 3. Guangdong Engineering Technology Research Center of Safety and Greenization for Water Conservancy Project, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In order to find out the water quality of the Sibao Reservoir in Jiangmen City, water samples were collected and tested seven times from 13 sampling locations in June to December 2018 to analyze the temporal and spatial variations of water quality factors. The water quality and eutrophication of Sibao Reservoir were evaluated using the single factor evaluation method, BP neural network, principal component analysis method and index method. The Pearson method was used to study the correlation between chlorophyll a and water quality factors, and to analyze the main driving factors affecting reservoir eutrophication. The results indicated that the changes of total phosphorus, total nitrogen and ammonia nitrogen in different months were relatively complicated. The water quality near the middle and lower reaches of the reservoir was better, and that in the catchment area was poorer. The results from the single factor evaluation and BP neural network were consistent, indicating that the water quality of the reservoir was generally between class III~IV. The principal component analysis showed that the water quality was mainly affected by permanganate index, total phosphorus, total nitrogen and ammonia nitrogen. The results of the index method showed that the reservoir was in a state of mild eutrophic, and the degree of eutrophication in the catchment area was higher. The correlation analysis showed that chlorophyll a had strong correlation with ammonia nitrogen and permanganate index. Nitrogen was the limiting factor for the growth of phytoplankton, and the control of nitrogen concentration could effectively control the eutrophication of water

收稿日期:2019-03-18; 修回日期:2019-05-08

基金项目:广东省水资源节约与保护资金项目(201711031)

作者简介:傅博(1995-),女,广西北流人,硕士研究生,研究方向为水文水资源。

通讯作者:黄国如(1969-),男,江苏南京人,博士,教授,博士生导师,研究方向为水文学及水资源。

bodies.

Key words: spatiotemporal variations of water quality; water quality evaluation; single factor evaluation; BP neural network; principal component analysis; index method; reservoir eutrophication

1 研究背景

随着经济的飞速发展和人类生产活动规模不断扩大,河湖水库饮用水水源地的水质污染和水体富营养化问题日趋严重,为有效控制水污染,需对河湖水库水质状况进行综合评价。从20世纪以来各种水质评价方法不断出现和发展完善,主要包括单因子法、人工神经网络法、多元统计方法、模糊综合评价法、内梅罗污染指数法和水质指数法等^[1-9]。例如,初海波等^[10]以东辽河为例,比较BP网络、Hopfield网络、模糊综合评价法、内梅罗污染指数法4种方法的水质评价结果;李清芳等^[11]利用多元统计分析方法,研究3个典型水源地水库的水质情况;高红杰等^[12]运用内梅罗法、均值法、水质指数法对城市地表水质进行综合评价,发现内梅罗法更适用于部分典型城市地表水质评价;杨永宇等^[13]对比灰色关联法和BP神经网络法2种方法,从不同层次分析黑河流域水质优劣,发现神经网络法结果更加合理。上述各种方法都有其自身的特点和局限性,单因子评价法清晰易懂,能够直观地反映水质指标与对应标准值之间的关系,以所选水质指标中评价最差的某项指标类别作为水质类别;BP神经网络方法呈现较高的自适应性、自组织性和一定的容错性,使评价结果与实际情况较为相符;主成分分析法具有降维、简化变量的特点,可筛选出主要污染物指标;指数法则可以分析湖泊、水库等水体的富营养化状况。

本文以江门市四堡水库为研究对象,在充分分析典型水质指标时空变化规律的基础上,采用单因子评价法、BP神经网络法、主成分分析法和指数法等从多维角度对水库水质和富营养化状况进行综合评价,为四堡水库水资源保护、水污染防治及生态良好发展提供支撑。

2 研究区域概况及资料

四堡水库位于广东省江门鹤山市龙口镇,沙坪河龙口支流上游,属西江水系,是一座以防洪灌溉为主的中型水库。四堡水库为附近村镇的供水水源地,根据《鹤山市供水专项规划(2008-2020)》,在突发情况下该水库也为周边城镇提供应急供水。在对库区水环境现状进行调查后发现,农村生活污染、

农田面源污染等均会对水质造成影响,排入的氨氮极有可能产生水华现象。

为开展研究需要,在四堡水库布设采样点13处,编号为W₁~W₁₃(图1)。其中,W₁、W₇靠近水库大坝,W₂~W₆位于水库北部,W₈~W₁₀位于水库中部,W₁₁~W₁₃位于水库南尾部,以上采样点大体占据了四堡水库整个范围,具有良好的代表性。于2018年6~12月组织了7次水质样本采集和检测工作,检测指标主要有水温、透明度、pH值、溶解氧(DO)、五日生化需氧量(BOD₅)、化学需氧量(COD_{Cr})、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、总磷(TP)、总氮(TN)、氨氮(NH₃-N)和叶绿素a等。

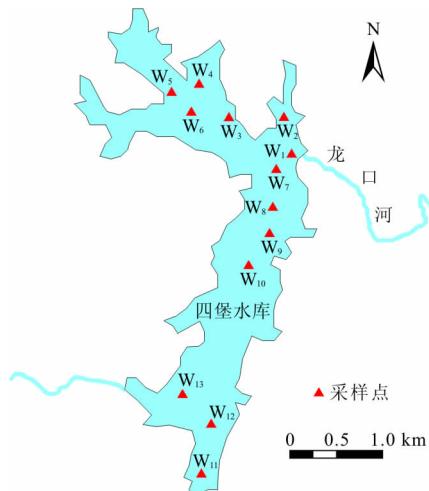


图1 四堡水库采样点分布

3 水质评价方法

根据不同水质评价方法的特点和要求,选择DO、BOD₅、COD_{Cr}、COD_{Mn}、TP、TN和NH₃-N等7项评价指标,采用单因子评价法、BP神经网络法和主成分分析法等从多维角度对四堡水库水质状况进行评价和分析,选择透明度、TP、TN、NH₃-N和叶绿素a等5项指标,采用指数法对四堡水库富营养化状况进行评价和讨论。具体方法简介如下。

3.1 单因子评价法

单因子评价法简单常见,在此不再赘述,详见文献[1]、[14]。

3.2 BP神经网络法

BP神经网络包括输入层、输出层和隐含层,以误差反向算法训练网络模型^[15]。在水质评价方面,

通过设计一个BP神经网络,训练设定的数据样本(参考《地表水环境质量标准 GB3838-2002》^[14]所选项目的标准限值),得出与选定样本预期输出相符合的计算结果,再将实测数据输入训练好的BP网络,根据输出值进行水库水质评价。

3.3 主成分分析法

主成分分析法利用降维,将多指标通过线性转换为少量主要指标(主成分)来解释原始数据信息^[16]。原理是先将所选的 p 个指标分别设为 X_1, X_2, \dots, X_p ,该 p 个指标构成的矩阵设为 X ,经过标准化后得到 ZX ,再通过线性变换得到新的变量 F ,之后通过综合评价函数对水质情况进行定量化描述,计算公式为:

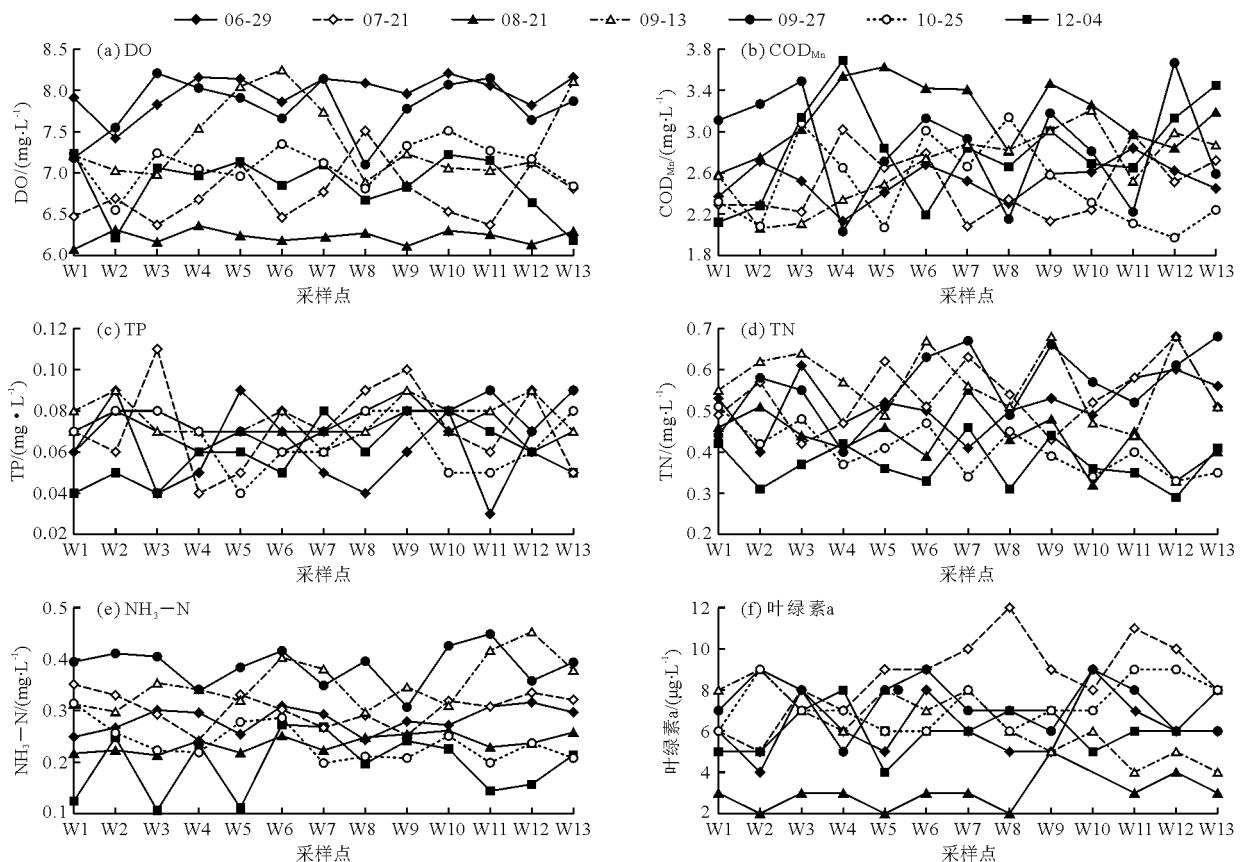


图2 2018年6~12月四堡水库不同采样日期水样部分水质指标检测结果

由图2可知,DO浓度在6~9月先降后升,到8月浓度最低,在10~12月期间DO浓度又开始减少。由于8月温度较高,同时降雨较多,导致地表径流携带营养盐进入水体,增大微生物耗氧量,另外底层有机质分解耗氧等等^[18],多种因素使得DO浓度下降;而冬季温度降低,浮游植物减少,光合作用减弱,水体DO浓度相对较低。COD_{Mn}浓度在6~7月略微减少,到8月明显增加,之后又减少,变化规律

$$F = \frac{\lambda_1}{\lambda} F_1 + \frac{\lambda_2}{\lambda} F_2 + \cdots + \frac{\lambda_n}{\lambda} F_m \quad (1)$$

式中: F 为主成分综合得分; λ_i 为特征值; λ 为特征值之和。 F 得分越大,说明水质状况越差,得分越小则水质状况越好。

3.4 指数法

指数法常用来衡量湖库营养状态,在此也不再赘述,具体参考文献[17]。

4 评价结果与分析

4.1 水质因子时空变化规律

2018年6~12月对四堡水库进行了7次水样采集和检测工作,部分检测结果见图2。

较为复杂,浓度在1.97~3.69 mg/L浮动。

TP浓度整体均较高,6月有8处断面TP浓度大于0.05 mg/L,到7月增加到10处,而8~9月浓度全处于0.06~0.09 mg/L,10月有3处TP浓度降到0.05 mg/L以下,12月则有5处,从汛期到非汛期TP浓度变化较大,TP浓度较高的有W₉、W₁₀、W₁₂等处。TN浓度有增有减,在0.29~0.68 mg/L之间浮动,最高值出现在9月,之后开始减少,在12月达

到最低,TN 浓度较高的有 W₆、W₇、W₉、W₁₂、W₁₃ 等处。N、P 元素明显超过国内外一致认可的 TN 达到 0.2 mg/L、TP 达到 0.02 mg/L 为富营养化发生的浓度^[19]。藻类生长期水体中 N/P < 10, N 为可能的限制性营养盐;而 N/P > 10, 则 P 为可能的限制性营养盐^[20]。四堡水库大部分点位的 N/P 值小于 10, 因此, N 为可能的限制性营养盐。

NH₃-N 浓度在 6~7 月有所增加,到 8 月又略微减少,9 月又有所增加,在 9 月后明显减少,12 月达到最低,浓度在 0.106~0.453 mg/L 浮动,变化规律与 TN 浓度变化大体相似。可能因为 8 月气温较高,氨化作用减小,硝化作用增加,NH₃ 向 NO₃ 转

化,DO 浓度较低,微生物氨化作用较小,有机氮转化的 NH₃ 也随之减少,使 8 月 NH₃-N 浓度较小;而 9 月后进入秋冬季节,降雨量少,流入水体的营养盐减少,10、12 月测得的 NH₃-N 浓度减少。NH₃-N 浓度较高的点位有 W₆、W₁₀、W₁₁ 等处。

叶绿素 a 浓度在 6~7 月有所增加,到 8 月减少,之后又增加,在 8 月份的浓度普遍较低,浓度主要集中在 4~9 μg/L 范围内,W₁₁、W₁₂、W₁₃ 等点位的叶绿素 a 浓度普遍较高。

4.2 单因子评价结果

采用单因子评价法对四堡水库 2018 年的 7 次检测数据进行水质评价,结果见表 1。

表 1 2018 年 6~12 月各检测点单因子水质评价结果

日期/(月-日)	W ₁	W ₂	W ₃	W ₄	W ₅	W ₆	W ₇	W ₈	W ₉	W ₁₀	W ₁₁	W ₁₂	W ₁₃
06-29	IV	IV	III	III	IV	IV	III	III	IV	IV	III	IV	IV
07-21	IV	IV	V	III	III	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	III
08-21	IV	IV	IV	IV									
09-13	IV	IV	IV	IV									
09-27	IV	IV	IV	IV									
10-25	IV	IV	IV	IV	III	IV	IV	IV	IV	III	III	IV	IV
12-04	III	III	III	IV	IV	III	IV	IV	IV	IV	IV	IV	III

由表 1 可知,2018 年 6、7 月水库 13 处采样点基本处于 III~IV 类水之间,到 8~9 月全部处于 IV 类水,主要是由于 TP 浓度达到 IV 类标准,而到 10 月之后水质略有好转,恢复到 III~IV 类水之间。6 月 W₃、W₄、W₇、W₈、W₁₁ 为 III 类水,其余为 IV 类水,III 类水和 IV 类水水样所占比例分别为 38.5% 和 61.5%;7 月 W₄、W₅、W₁₃ 为 III 类水,W₃ 为 V 类水,其余为 IV 类水,III 类水和 IV 类水水样所占比例分别为 23.1% 和 69.2%;8、9 月所有水样评价结果均为 IV 类水,水质达到最差;10 月 W₅、W₁₀、W₁₁ 为 III 类水,其余为 IV 类水,III 类水和 IV 类水水样所占比例分别为 23.1% 和 76.9%;12 月 W₁、W₂、W₃、W₆、W₁₃ 为 III 类水,其余为 IV 类水,III 类水和 IV 类水水样所占比例分别为 38.5% 和 61.5%。由此可见,夏季处于汛期,降雨较多,N、P 营养盐随径流进入水库,水库的 TN、TP 浓度较高,水质相对较差。

4.3 BP 神经网络评价结果

BP 神经网络法中为获取足够的训练样本^[13],利用 MATLAB 软件的 RAND 函数,在各级水质标准间随机生成训练样本,输出层设定的期望值与每级

水质对应,小于 I 级标准输出为 1,I、II 级标准之间输出为 2,其余同理。在 MATLAB 平台上构建 3 层 BP 神经网络,输入层有 7 个节点,隐含层、输出层的节点分别设为 10 和 1,后两层分别选择 tansig、purelin 函数,训练次数定为 1 000 次,误差设为 0.000001。将 7 次检测数据利用 PREMNMX 函数归一化,输入到训练好的 BP 人工神经网络,输出与评价结果见表 2。

由表 2 可知,从时间变化上来看,6~9 月间水质相对变差,9 月后又有所恢复,不同时期水质变化影响较大。有些点位结果异常偏大,可能是相对于其他点位一些指标值偏大,导致归一化后的输入值偏大,使输出值也偏大。W₁、W₄ 输出值大部分在 3 左右,水质在 III~IV 类水之间,更偏于 III 类水,而其余各处输出值大部分在 4 左右,更偏于 IV 类水;W₆、W₁₀、W₁₁ 为 IV 类水,输出值基本在 4 以上,进一步说明处于水库出水口或者下游非汇水区域的水质较好,而水库汇水区的水质较差。另外,由表 1 和表 2 对比可知,BP 神经网络评价结果与单因子评价结果基本一致。

表 2 2018 年 6—12 月各采样点 BP 网络输出值及评价等级结果

日期/ (月-日)	W ₁	W ₂	W ₃	W ₄	W ₅	W ₆	W ₇	W ₈	W ₉	W ₁₀	W ₁₁	W ₁₂	W ₁₃
06-29	3.00	4.00	4.18	3.00	4.00	4.00	3.98	2.84	4.00	4.00	4.00	4.79	4.00
	III	IV	IV	III	IV	IV	IV	III	IV	IV	IV	V	IV
07-21	4.00	4.00	4.00	3.26	4.00	4.00	3.21	3.97	3.00	4.00	4.00	4.00	4.00
	IV	III	IV	IV	IV	IV							
08-21	3.00	3.00	3.16	3.63	4.00	4.00	4.00	4.00	5.00	4.00	4.00	3.00	4.03
	III	III	IV	IV	IV	IV	IV	IV	V	IV	IV	III	IV
09-13	3.43	4.00	4.00	3.00	3.00	5.00	4.00	4.00	4.01	3.96	4.00	4.00	3.00
	IV	IV	IV	III	III	V	IV	IV	IV	IV	IV	IV	III
09-27	3.75	4.00	4.00	2.00	3.96	4.00	4.00	4.00	4.00	4.05	4.00	4.00	4.00
	IV	IV	IV	II	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
10-25	4.00	4.00	4.00	3.97	3.00	4.00	3.00	4.00	3.00	2.00	3.00	3.00	3.00
	IV	IV	IV	IV	III	IV	III	IV	III	II	III	III	III
12-04	2.09	3.00	3.00	4.00	3.00	3.00	4.00	3.00	4.17	4.00	3.00	3.07	4.91
	II	III	III	IV	III	III	IV	III	IV	IV	III	III	V

4.4 主成分分析评价结果

对水库 7 次检测数据标准化处理,计算相关系数及其矩阵的特征值、特征向量以及主成分贡献率、累计贡献率,最后得出主成分载荷和主成分得分。其中确定主成分个数的原则为取特征值大于 1 且累计贡献率大于 70%^[21]。由于篇幅所限,选择 2018 年汛期(8 月 21 日)和非汛期(12 月 4 日)两次有代表性的主成分污染物负荷计算结果(表 3),其累计贡献率分别达到 68.10% 和 75.81%,达到或接近要求,说明使用该方法可以反映大部分数据信息,表 4 为该方法计算所得的水质综合评价结果。

表 3 2018 年两次代表性采样主成分载荷矩阵表

项目	汛期(2018-08-21)			非汛期(2018-12-04)		
	F ₁	F ₂	F ₃	F ₁	F ₂	F ₃
DO	0.27	0.25	0.41	-0.30	0.55	0.28
BOD ₅	0.08	0.59	-0.24	-0.30	0.51	-0.07
COD _{Cr}	0.47	-0.06	0.07	0.53	0.23	-0.38
COD _{Mn}	0.33	0.23	0.64	0.58	0.26	-0.19
TP	-0.34	0.63	-0.16	0.32	0.08	0.56
TN	-0.52	0.18	0.51	0.22	0.44	0.36
NH ₃ -N	0.45	0.33	-0.28	0.22	-0.35	0.54
贡献率/%	31.09	21.16	15.85	27.71	25.49	22.60

表 4 2018 年 6—12 月主成分析水质综合评价得分与排名

日期/ (月-日)	W ₁	W ₂	W ₃	W ₄	W ₅	W ₆	W ₇	W ₈	W ₉	W ₁₀	W ₁₁	W ₁₂	W ₁₃
06-29	0.00	-1.98	1.20	0.39	0.00	-0.78	0.57	0.19	-0.31	0.56	0.51	0.25	-0.60
	9	13	1	5	8	12	2	7	10	3	4	6	11
07-21	-0.23	0.37	-1.10	-0.81	0.76	-0.39	0.15	0.31	-0.71	-0.28	0.31	1.48	0.14
	8	3	13	12	2	10	6	5	11	9	4	1	7
08-21	-1.73	-1.02	-0.68	0.94	0.72	0.03	-0.14	0.22	0.28	1.01	-0.04	-0.39	0.80
	13	12	11	2	4	7	9	6	5	1	8	10	3
09-13	-0.25	0.77	0.86	-0.15	-0.02	1.59	-0.09	-0.17	0.61	-1.17	-0.60	-0.36	-1.02
	9	3	2	7	5	1	6	8	4	13	11	10	12
09-27	-1.20	0.66	0.59	-1.31	-0.51	-0.08	-0.38	-0.86	0.08	0.85	0.91	0.37	0.89
	12	4	5	13	10	8	9	11	7	3	1	6	2
10-25	1.36	-0.41	0.46	-0.48	0.27	1.29	-0.40	-0.16	-0.10	0.17	-0.35	-0.75	-0.89
	1	10	3	11	4	2	9	7	6	5	8	12	13
12-04	-0.53	-1.36	-0.38	0.89	0.02	-0.85	1.21	-0.46	1.16	0.46	-0.16	-0.30	0.31
	11	13	9	3	6	12	1	10	2	4	7	8	5

在以上的主成分分析中,主要贡献得分的第一、第二主成分中,各个因子载荷都有变动,COD_{Mn}、TP、TN、NH₃-N 在前两个主成分中载荷均较高,对综合得分影响较大,表明水质情况主要受到 N、P 营养盐和有机氧化物质影响。例如,8 月主成分载荷矩阵(表 3),第一主成分上 COD_{Cr}、COD_{Mn}、TN、NH₃-N 载荷较高,第二主成分上 BOD₅、TP 载荷较高,这些指标基本决定了最后的综合得分 F。从表 3 也可以看出,不同月份各个水质指标的得分排名会有所变动,说明水质评估结果受多种因素影响。

从水质综合评价分数(表 4)可以看出,W₁、W₈得分较小,水质排名基本靠后,水质较好。W₄、W₅、W₉、W₁₀、W₁₃ 分数较高,可见这些区域水质污染较为严重。营养盐在随径流入库到水库出水口的过程中逐渐沉积下来,因此在刚进入水库时浓度最大,而到达水库中下游时,浓度减小,到水库出水口时浓度更小,W₁ 在出水口区域,W₈ 离水库汇水区较远,水质

情况良好。处于水库南尾部或北尾部靠近支流入库的区域,营养盐浓度高于其他地方,水质综合评价分数较高,水质相比其他区域较差。

上述 3 种方法各有自身特点,单因子评价法较为严格,可以定性评价各处的水质等级,但对处于同一水质等级的不同采样区域,无法更进一步比较其水质优劣;BP 神经网络法可以定性和定量相结合进行水质评价,其水质评价结果与单因子评价结果基本一致;主成分分析法能从各项目的载荷大小筛选出影响水质的关键因子,通过水质综合得分高低判断水质情况,在空间上反映各处的污染严重程度。利用上述 3 种方法从不同角度进行水库水质评价,更全面科学地反映四堡水库水质时空变化规律。

4.5 指数法评价结果

采用 7 次检测中透明度、TP、TN、NH₃-N 和叶绿素 a 这 5 项相关指标数据计算四堡水库营养状态指数,结果见表 5。

表 5 2018 年 6~12 月四堡水库营养状态指数(得分)结果

日期/ (月·日)	W ₁	W ₂	W ₃	W ₄	W ₅	W ₆	W ₇	W ₈	W ₉	W ₁₀	W ₁₁	W ₁₂	W ₁₃	均值
06-29	53.56	53.31	53.49	52.50	54.42	54.81	52.29	51.83	53.44	55.38	52.56	54.49	54.96	53.62
07-21	53.66	53.30	54.95	52.92	54.80	55.70	56.18	57.95	55.10	54.57	56.23	56.83	54.09	55.10
08-21	52.79	52.59	54.42	53.24	53.03	53.32	54.41	53.51	56.67	53.86	55.07	51.94	52.99	53.68
09-13	55.30	55.81	54.47	54.09	54.52	55.62	54.85	54.33	55.66	54.78	53.12	55.64	53.71	54.76
09-27	53.91	56.46	56.22	52.16	54.88	55.72	55.41	53.85	55.69	55.96	55.23	55.58	55.58	55.13
10-25	53.83	54.15	55.08	53.15	51.04	53.78	52.79	54.51	53.68	51.71	52.78	52.31	53.27	53.24
12-04	50.85	50.71	52.04	54.62	52.24	51.16	54.31	52.16	54.61	52.82	52.62	52.10	53.88	52.62
均值	53.41	53.76	54.38	53.24	53.56	54.30	54.32	54.02	54.98	54.15	53.94	54.13	54.07	

由表 5 可以看出,水库为轻度富营养水平,大部分采样点的营养状态指数于 6、7 月上升,8 月有所下降,之后又上升,到 9 月底有 9 处营养状态指数达到 55 分以上,之后到 12 月,营养状态指数明显降低,总体趋势是先升后降。6~9 月处于汛期,气温逐渐升高,降雨增多,陆地营养盐受到冲刷随径流进入库区水体,TP、TN、NH₃-N 浓度总体趋势增加,浮游植物数量增加,使得叶绿素 a 浓度增加,DO 浓度减少,该时期水库营养状态指数较高。8 月份分数降低,主要是由于叶绿素 a 浓度有所降低,对分数贡献值小。而 8 月叶绿素 a 浓度处于较低水平可能是因为 8 月中旬降雨过大,浮游植物繁殖减弱,从而导致产生的叶绿素 a 减少,再加上不同藻类叶绿素 a 含量不同^[22],水库浮游植物种类较多,硅藻、绿藻、

蓝藻等都占有一定比例,无单一的优势种,也会使叶绿素 a 减少。9 月后降雨减少,进入枯水季,水体中的 TP、TN 浓度相对较低;而冬季随着温度降低,浮游植物数量减少,所产生的叶绿素 a 也会较少,从而使营养状态指数降低,富营养化情况略微好转。

四堡水库 13 处采样点中,W₃、W₆、W₇、W₉、W₁₃ 营养状态指数较高,W₄、W₁ 略低。汇水入库段和水库中游区域营养状态指数较高,富营养化比较严重,坝前取水口处营养状态指数较低,富营养化相对较轻,这与前述方法所得结果大体类似。

早期四堡水库周边大面积范围被承包种植商品林,现今依据政府规定将商品林改造成生态林,但从现场调查看来水库周边仍有相当一部分以桉树林为主的商品林,桉树林 N、P 随径流入库是导致水库营

养盐浓度较高的因素之一,此外禽畜养殖、农业生产产生的氮磷入库也造成水库营养盐浓度较高,加重富营养化程度。

4.6 叶绿素 a 与水质因子的相关性分析

叶绿素 a 为水体富营养化程度的基本指标,常用来反映水体富营养化,由于它受到诸多因素影响,研究其与各类水质指标的相关性便于识别影响湖库

富营养化的因子。由于本水库透明度基本为 30 cm 左右,变化幅度较小,本文未考虑其影响。利用 Pearson 方法分析叶绿素 a 与其他主要水质因子的相关性,结果如表 6 所示。相关系数在 [0.8, 1.0] 为极强相关,[0.6, 0.8] 为强相关,[0.4, 0.6] 为中等程度相关,[0.2, 0.4] 为弱相关,[0.0, 0.2] 为极弱相关或无相关。

表 6 2018 年 6—12 月叶绿素 a 与其他水质因子间的 Pearson 相关系数

日期/(月-日)	水温	pH	DO	BOD ₅	COD _{Cr}	COD _{Mn}	TP	TN	NH ₃ —N
06-29	0.137	0.347	0.295	0.383	0.259	0.246	-0.197	0.338	0.440
07-21	0.193	-0.103	0.466	-0.238	0.097	0.098	0.312	0.349	-0.239
08-21	0.231	0.286	-0.436	0.057	0.148	0.201	0.089	-0.332	0.461
09-13	0.119	0.199	0.072	0.447	0.465	-0.469	-0.135	0.167	-0.513
09-27	-0.345	-0.033	0.056	0.547	-0.022	0.230	0.010	0.101	0.747 **
10-25	0.042	-0.298	-0.013	0.693 **	0.308	0.357	0.063	0.088	0.303
12-04	-0.009	-0.042	-0.353	-0.168	0.405	0.684 **	-0.049	0.287	0.262

注: * * 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

从表 6 可以看出,水库叶绿素 a 受到多种因素影响,其中,叶绿素 a 与水温、pH 值、TP、TN 为极弱相关或弱相关,与 DO、COD_{Cr} 达到中等程度相关,与 BOD₅、COD_{Mn}、NH₃—N 达到中等程度相关或强相关,而且在不同时期叶绿素 a 与各个因子的相关系数有所变动。可能有如下原因:一是叶绿素 a 在时空上有较强的不确定性,二是水库水量、水位、流速、降雨量、光照等水文气象因子可能影响叶绿素 a 浓度变化,这些因子具有较强的不确定性。四堡水库位于南方亚热带地区,水温基本在 18℃ 以上,对叶绿素 a 影响较小;pH 值基本在 7 左右,波动幅度较小,其对叶绿素 a 影响也较小。叶绿素 a 与 DO 呈现的相关关系有正有负,叶绿素 a 含量越多,浮游植物越多,光合作用产生的氧气远大于浮游生物耗氧量时,使水中 DO 增加,叶绿素 a 与 DO 呈现正相关,反之光合作用释放的氧气不足以补充耗氧量时,水中 DO 减少,两者呈现负相关。BOD₅、COD_{Cr}、COD_{Mn} 这些有机污染物对水体中的叶绿素 a 有一定影响,大多数情况下呈正相关关系,可能是藻类大量繁殖而排泄有机物质所导致^[23],藻类越多,有机物质越多,使得水体有机耗氧物的污染越多。N、P 等营养盐是浮游植物生长的必要因素,而叶绿素 a 又是浮游植物存量的表征指标,两者的关系较为复杂^[24]。从相关系数可以看出,水库叶绿素 a 与 TN 的相关性比与 TP 的相关性更强,特别是与以 NH₃—N 形式

存在的氮相关更强,可见 N 为浮游植物生长的限制因子,因此控制氮素的浓度能够有效调控水体富营养化。

5 结 论

(1) 不同月份 TP、TN、NH₃—N 变化较为复杂,汛期四堡水库营养盐浓度普遍上升,非汛期营养盐浓度回落,靠近水库中下游区域的水质较好,水库汇水区的水质较差。单因子评价法和 BP 神经网络的评价结果较为一致,水库水质基本在 III—IV 类之间,主成分分析法表明水质主要受 COD_{Mn}、TP、TN、NH₃—N 影响,指数法表明水库为轻度富营养化,在水库汇水区的富营养化程度较高。

(2) BOD₅、COD_{Cr}、COD_{Mn} 这些有机污染物对水体中的叶绿素有一定影响,大多呈正相关关系,四堡水库中叶绿素 a 与 TN 的相关性比与 TP 的相关性更强,特别是与以 NH₃—N 形式存在的氮相关更为显著,N 是浮游植物生长的限制因子,控制氮素的浓度能够有效调控水体富营养化。

参 考 文 献:

- [1] 何晓丽,吴艳宏,周俊,等.贡嘎山地区地表水化学特征及水环境质量评价[J].环境科学,2016,37(10):3798—3805.
- [2] 李世明,王小艺,许继平,等.基于人工神经网络的河湖蓝藻水华状态评价研究[J].水资源与水工程学报,2017,28(4):93—96.

- [3] SINGH K P , BASANT A , MALIK A , et al. Artificial neural network modeling of the river water quality: a case study [J]. Ecological Modelling, 2009, 220(6):888 – 895.
- [4] KOKLU R , SENGORUR B , TOPAL B . Water quality assessment using multivariate statistical methods: a case study: Melen River System (Turkey) [J]. Water Resources Management, 2010, 24(5):959 – 978.
- [5] TABATA T , HIRAMATSU K , HARADA M . Assessment of the water quality in the Ariake sea using principal component analysis[J]. Journal of Water Resource and Protection, 2015, 7(1): 41 – 49.
- [6] 王彦丽,赵敏宁.近10年辽河干流水质综合评价[J].水资源与水工程学报,2018,29(5):53 – 59.
- [7] 郭艳丽,唐永杰,蔡树伯,等.淡水湖泊沉积物污染评价方法比较——以北大港水库为例[J].水资源与水工程学报,2016,27(6):26 – 30 + 38.
- [8] 刘玲花,吴雷祥,吴佳鹏,等.国外地表水水质指数评价法综述[J].水资源保护,2016,32(1):86 – 90 + 96.
- [9] 张旋,王启山,于森,等.基于聚类分析和水质标识指数的水质评价方法[J].环境工程学报,2010,4(2):476 – 480.
- [10] 初海波,卢文喜,尹津航,等.BP网络、Hopfield网络在水质评价应用中的比较研究[J].中国农村水利水电,2011(10):70 – 72.
- [11] 李清芳,姚靖,黄晓容,等.多元统计分析在典型湖库型饮用水水源地水质评价中的应用[J].环境影响评价,2016,38(6):73 – 79.
- [12] 高红杰,郑利杰,嵇晓燕,等.典型城市地表水质综合评价方法研究[J].中国环境监测,2017,33(2):55 – 60.
- [13] 杨永宇,尹亮,刘畅,等.基于灰关联和BP神经网络法评价黑河流域水质[J].人民黄河,2017,39(6):58 – 62.
- [14] 国家环境保护总局.地表水环境质量标准:GB 3838 – 2002 [S]. 北京:中国环境科学出版社,2002.
- [15] 查木哈,卢志宏,翟继武,等.双隐含层BP神经网络模型在老哈河水质预测中的应用[J].水资源与水工程学报,2018,29(2):56 – 61.
- [16] 程学宁,汤云,卢毅敏.基于多元统计分析的闽江水质时空变化特征[J].水资源与水工程学报,2016,27(6):89 – 94.
- [17] 中华人民共和国水利部.地表水资源质量评价技术规程:SL 395 – 2007[S]. 北京:中国水利水电出版社,2007.
- [18] 陈海生,严力蛟.浙江省长潭水库溶解氧变化特性及其与水温相关性[J].科技通报,2015,31(3):249 – 253.
- [19] 吴雅丽,许海,杨桂军,等.太湖春季藻类生长的磷营养盐阈值研究[J].中国环境科学,2013,33(9):1622 – 1629.
- [20] LIU Xia , LU Xiaohua , CHEN Yuwei. The effects of temperature and nutrient ratios on Microcystis blooms in Lake Taihu, China: An 11 – year investigation [J]. Harmful Algae, 2011, 10(3):337 – 343.
- [21] 刘娟,王飞,韩文辉,等.汾河上中游流域生态系统健康评价[J].水资源与水工程学报,2018,29(3):91 – 98.
- [22] 王伟,顾继光,韩博平.华南沿海地区小型水库叶绿素a浓度的影响因子分析[J].应用与环境生物学报,2009,15(1):64 – 71.
- [23] 毕京博,郑俊,沈玉风,等.南太湖入湖口叶绿素a时空变化及其与环境因子的关系[J].水生态学杂志,2012, 33 (6) : 7 – 13.
- [24] 张文涛.大沙河水库富营养化限制性因子分析[J].广东水利水电,2009(9):26 – 28 + 42.

(上接第63页)

- [8] 李树刚,马超,王国旗.基于未确知测度理论的矿井通风安全评价[J].北京科技大学学报,2006, 28 (2): 101 – 103.
- [9] 刘志祥,郭永乐,周士霖.隧道下穿桥梁的桥墩稳定性未确知测度评价研究[J].中国安全科学学报,2011, 21(4): 91 – 97.
- [10] 陈顺满,许梦国,王平,等.基于未确知测度理论的地下金属矿山合理产能优选[J].武汉科技大学学报,2013, 36(6): 461 – 464.
- [11] 曾佳龙,黄锐,关燕鹤,等.熵权–未确知测度理论在尾矿库安全标准化中的应用研究[J].中国安全生产科学技术,2014, 10(2): 160 – 166.
- [12] 栾婷婷,谢振华,吴宗之,等.基于未确知测度理论的排土场滑坡风险评价模型[J].中南大学学报(自然科学版),2014, 45(5): 1612 – 1617.
- [13] 梁力,季贵斌,赵颖.高速公路边坡暖季型草本植物生态适应性评价[J].东北大学学报(自然科学版),2018, 39(1): 128 – 132.
- [14] 王凤菲,王恩茂,徐同启.基于组合赋权–未确知测度理论的地铁隧道围岩质量评价[J].铁道标准设计,2019, 63(6):129 – 134.
- [15] 刘建,刘丹,宋凯.渝怀铁路歌乐山隧道排水的地下水环境负效应评价[J].现代隧道技术,2012, 49(4): 184 – 189.
- [16] 汪亚莉,许模,张强,等.云南洱海东侧引水隧道地下水环境负效应探讨[J].长江科学院院报,2016, 33 (2):14 – 18.
- [17] 刘建,刘丹.岩溶隧道建设引起的地下水环境负效应研究——以铜锣山隧道为例[J].水土保持研究,2009, 16(3):268 – 271.
- [18] 刘志春,王梦想.石板山隧道与地下水环境相互作用评价技术研究[J].土木工程学报,2015, 48(S1):321 – 325.