

## 基于贝叶斯方法的贵州高原百花水库水体营养盐变化及评价 (2014—2018 年)\*

袁振辉<sup>1</sup>, 李秋华<sup>1\*\*</sup>, 何 应<sup>1</sup>, 马欣洋<sup>1</sup>, 韩孟书<sup>2</sup>, 孙荣国<sup>3</sup>, 张华俊<sup>4</sup>

(1: 贵州师范大学贵州省山地环境信息系统与生态环境保护重点实验室, 贵阳 550001)

(2: 贵州省信息与计算科学重点实验室, 贵阳 550001)

(3: 贵州师范大学化学与材料科学学院, 贵阳 550001)

(4: 贵州中环科技有限公司, 贵阳 550003)

**摘 要:** 为了确定百花水库营养盐变化特征, 选取百花水库 5 个监测点 2014 年 1 月—2018 年 7 月共 28 个月份的水质实测数据, 分析溶解氧、高锰酸盐指数、氨氮、总磷和总氮的年际变化特征. 采用基于熵权法赋权的贝叶斯理论对 5 个监测点的水质综合状况进行评价, 并结合水库的实际状况, 从生态修复、工业污染源、沉积物中营养盐、水库季节性热分层及农业与生活污染源 5 个方面对其水质变化的影响因素进行分析. 结果表明: 2014—2018 年水体环境波动较大; 除总氮外, 各污染指标浓度均有不同程度的下降; 综合水质后验概率表明百花水库水质有逐渐变差的趋势; 总氮和总磷治理应成为百花水库污染治理的主要方面; 生态修复工程的开展和工业污染源的削减是百花水库水质转好的主要影响因素, 农业与生活污染源的增加是百花水库水质转差的主要影响因素.

**关键词:** 贝叶斯理论; 富营养化指标; 水质评价; 百花水库; 贵州高原

## Variation and evaluation of nutrients in Baihua Reservoir in Guizhou Plateau based on Bayesian method, 2014–2018

YUAN Zhenhui<sup>1</sup>, LI Qiuhua<sup>1\*\*</sup>, HE Ying<sup>1</sup>, MA Xinyang<sup>1</sup>, HAN Mengshu<sup>2</sup>, SUN Rongguo<sup>3</sup> & ZHANG Hua-jun<sup>4</sup>

(1: *Key Laboratory for Information System of Mountainous Area and Protection of Ecological Environment of Guizhou Province, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, P.R.China*)

(2: *Key Laboratory of Information and Computing Science Guizhou Province, Guiyang 550001, P.R.China*)

(3: *School of Chemistry and Materials Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, P.R.China*)

(4: *Guizhou Zhonghuan Technology Co., Ltd., Guiyang 550003, P.R.China*)

**Abstract:** To determine the variations of nutrients, the observation data on water quality are analyzed at five monitoring sites of Baihua Reservoir from January 2014 to July 2018, including the characteristics of annual variation of dissolved oxygen, permanganate index, ammonia nitrogen, total phosphorus (TP) and total nitrogen (TN). The Bayesian theory based on entropy weight method was used to evaluate the comprehensive water quality of the five monitoring sites according to the situation of Baihua Reservoir. The driving force analysis on the water quality variation is carried out in terms of ecological restoration, industrial pollution sources, nutrients in sediments, seasonal thermal stratification of reservoirs and agricultural and domestic pollution sources. The results show that during the period of 2014 to 2018, the water environment of Baihua Reservoir was fluctuated greatly. Except TN, the concentration of each pollution index decreased with different degrees. The comprehensive water quality posterior probability in-

\* 国家自然科学基金项目(41563012, U1612442)、贵州省科技厅项目(黔科合平台人才[2018]5805)、贵州省教育厅(黔教合 KY 字[2017]032)、贵阳市科技计划项目(筑科合同[2019]2-9 号)和白云区科技局项目(白科合同[2017]19 号)联合资助. 2018-12-25 收稿; 2019-04-17 收修改稿. 袁振辉(1993~), 男, 硕士研究生; E-mail: zhenhuiYuan@hotmail.com.

\*\* 通信作者; E-mail: qiuhua2002@126.com.

indicates that the water quality of Baihua Reservoir had gradually deteriorated and the governance of TN and TP should be the main manner of pollution controls. The key driving factors of the water quality were getting better due to the development of ecological restoration projects and the reduction of industrial pollution sources, while the increase of agricultural and domestic pollutions were the main factors for the deterioration of water quality in Baihua Reservoir.

**Keywords:** Bayesian theory; eutrophication index; water quality evaluation; Baihua Reservoir

水库是拦洪蓄水和调节水流的水利工程,在水力发电、蓄水灌溉、蓄洪补枯等方面具有极其重要的作用。在气候变化和人类活动干扰下,我国流域水循环及其伴生的水生态、水环境过程发生了显著变化<sup>[1]</sup>。百花水库作为贵阳市重要的饮用水水源地,其流域是贵阳市生态环境建设和污染防治的首要区域。然而,随着贵阳市城市现代化的迅速扩张,自然环境的恶化,严重影响了百花水库流域生态环境和水质状况<sup>[2-4]</sup>。夏品华等<sup>[5]</sup>对百花水库的水文、营养盐及相关理化因子进行分析,认为流域地表径流输入是水库营养盐的主要来源,同时指出突发性水质恶化与水体分层及富营养化有关。廖国华等<sup>[6]</sup>、高廷进等<sup>[7]</sup>、李秋华<sup>[8]</sup>分别对百花水库 1997—1998 年的水质状况、2011 年的营养盐水平和贵州省 20 座代表性水库 2014—2015 年的营养盐水平进行分析,指出百花水库已呈富营养化状态,浮游植物种类不断减少,生物多样性遭到破坏。目前众多学者对百花水库水环境、沉积物和重金属等方面的研究已取得很大进展,但都是基于短时间序列上的现状评价研究。因此,确定湖泊水质的污染风险和潜在污染源,选择合理的水质指标,对百花水库进行长序列的水质变化研究,为百花水库的功能调整和旅游业、流域农业发展的协同发展提供科学依据。

目前,单因子评价法、综合营养状态指数法、主成分分析法、灰色评价法、BP 神经网络法等<sup>[9-13]</sup>,均在水质评价和污染状况分析中得到大量应用。而贝叶斯公式,最早是由英国哲学家托马斯贝叶斯提出,使用贝叶斯公式的统计方法是以数学理论为基础<sup>[14]</sup>,主要通过对不完全的数据信息进行概率推断,因此在水质评价过程中应用较为广泛,较传统的水质评价更具有实用性和科学性。贝叶斯公式的优势在于依靠较少理化指标数据,通过计算出综合后验水质概率来确定对应的水质级别,直观地呈现出评价结果,为湖泊污染源分析和预测提供一定的科学依据。在国外,贝叶斯方法在水资源管理、医疗服务等领域得到广泛应用, Qian 等<sup>[15]</sup>引入贝叶斯方法,将预实施模型预测与实施后测量相结合,以评估北卡罗来纳州 Neuse 河口水质标准的符合性; Molina 等<sup>[16]</sup>以西班牙南部穆尔西亚的阿尔蒂普拉诺地区为背景,基于 Bayes 定理多变量集成技术,描述了一种综合分析 4 个含水层地下水供应复杂水系统的方法; Ferrante 等<sup>[17]</sup>提出贝叶斯分层模型,用于评估伦敦地区空气污染事件期间,  $PM_{10}$  对心脏病呼吸系统疾病的影响。国内则较多应用于环境科学、水质监测分析和污染评价等领域, 候佑泽等<sup>[18]</sup>、孙玲玲等<sup>[19]</sup>、Ma 等<sup>[20]</sup>分别采用贝叶斯公式对武烈河水质、黄壁庄水库和丹江口水库进行水质综合评价; 孙鹏程等<sup>[21]</sup>通过贝叶斯网络,结合时序蒙特卡罗算法将风险源状态模拟、水质模拟,对河流突发性水质污染事故的超标风险进行量化评估。

本研究利用百花水库 5 个监测点 2014 年 1 月—2018 年 7 月的水质实测数据,通过分析溶解氧(DO)、高锰酸盐指数( $COD_{Mn}$ )、氨氮( $NH_3-N$ )、总磷(TP)和总氮(TN)等主要水质指标的年际变化特征,采用熵权法确定了水质评价指标的权重系数,建立了贝叶斯水质评价模型对百花水库 2014—2018 年的水质状况进行评价,并结合研究区的实际状况,分析百花水库水质变化的影响因素,为百花水库水环境治理和科学管理提供参考和建议。

## 1 研究区概况

百花水库( $26^{\circ}35' \sim 26^{\circ}41'N$ ,  $106^{\circ}27' \sim 106^{\circ}32'E$ )地处贵州高原中部,位于贵阳市西北郊,属于长江支流乌江水系猫跳河流域,是集发电、灌溉、旅游、养殖等多功能的大型二级水库。湖泊流域面积  $1895 km^2$ ,水域面积  $14.5 km^2$ ,湖泊补给系数为 182.2,最大水深为 45 m,平均水深 10.8 m,总库容  $1.82 \times 10^8 m^3$ ,年总供水量为 2872 万  $m^3$ <sup>[22-24]</sup>。百花水库主要入湖河流包括麦西河、麦城河和东门桥河,其中流量最大的是东门桥河。百花水库所在地区属季风湿润型气候区,区内自然环境特征差异明显,冬暖夏凉<sup>[2]</sup>。百花水库是“两湖一库”的调蓄湖泊,其水质好坏直接关系到贵阳市的人民生命财产安全和水生态环境的改善。了解百花水库水质变化规律,对百花水库整治管理及维持其周边地区的可持续发展与生态平衡具有重要意义。

2 材料与方法

2.1 数据来源

水质监测及分析数据来源于百花水库 2014—2018 年常规水质指标的实测数据. 根据百花水库的库盆形态和入库河流的分布特点,设置 5 个监测点(图 1),分别是湖泊区(大坝、贵铝水厂)、过渡区(麦西河、岩脚寨)、河流区(花桥). 其中,大坝和贵铝水厂监测点分别靠近猫跳河和南门河の入湖口,而贵铝水厂主要负责贵阳市生活用水的供应;麦西河主要接纳清镇市东北部的农业和生活污水,是主要的纳污河流之一;花桥监测点邻近老马河入湖口,老马河是连接百花水库跟红枫湖的重要河流. 在现有的数据资料中,所有监测点均有奇数月监测数据,部分监测点有偶数月的监测数据,为保证数据时间序列间隔的一致性,本研究所采用的数据为大坝等 5 个监测点的奇数月监测数据(2014 年 1 月—2018 年 7 月). 考虑到监测数据的合理性以及某些指标监测值小于检出限,且 pH 值都在 6~9 之间,符合水质标准限值,筛选出 DO、COD<sub>Mn</sub>、NH<sub>3</sub>-N、TP 和 TN 5 项水质参数组成本次的水质评价体系.

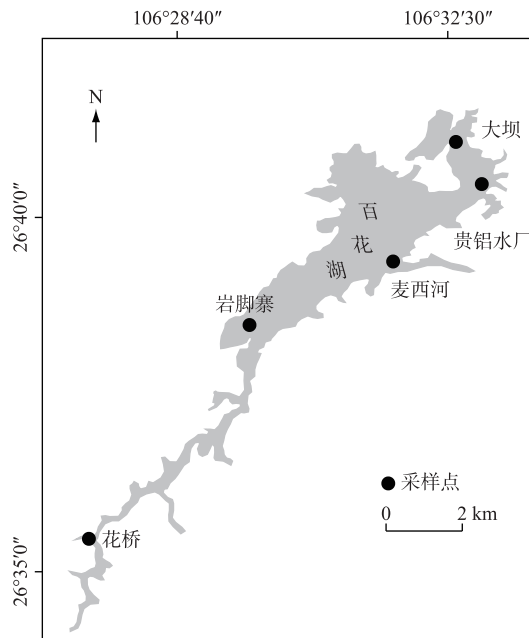


图 1 百花水库采样点分布

Fig.1 Distributions of monitoring sites in Baihua Reservoir

2.2 水质分析方法

DO 浓度使用上海仪电科学仪器股份有限公司生产的便携式多参数分析仪(型号为 DZB-718)现场测定,COD<sub>Mn</sub>使用高锰酸钾氧化滴定法测定,NH<sub>3</sub>-N 浓度使用水杨酸分光光度法(HJ 536—2009)测定,TP 浓度使用钼酸铵分光光度法(GB 11893—1989)测定,TN 浓度使用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB 11894—1989)测定. 用于水体营养盐等指标分析的水样为水柱表、中、底 3 层混合样,用 5 L 不锈钢采水器分别采集水下 0.5 m(表层)、水下 5 m(中层)及水下 10 m(底层)的水样,现场混匀,灌装于 5 L 水样桶中,带回实验室进行营养盐等指标分析.

2.3 基于熵权法赋权的贝叶斯水质评价法

2.3.1 熵权法基本原理 熵表示不确定性的量度,它还可以度量已知数据所提供的有效信息量和确定权重,现已广泛应用于水环境领域中. 倪彬等<sup>[25]</sup>用熵权法赋权对岷江下游水质进行模糊综合评价,并采用 Daniel 趋势检验法对多年水环境质量变化趋势进行分析;汤瑞凉等<sup>[26]</sup>提出熵权系数优化模型,对灌溉水资源进行

优化调配.

熵权法基本思路是根据指标变异性的确定客观权重,一般来说,若某个指标信息熵越小,表明指标值变异程度越大,提供的信息量越多,在综合评价中所能起到的作用也越大,其权重也就越大.相反,某个指标信息熵越大,表明变异程度越小,提供的信息量也越少,在综合评价中所起到的作用也越小,其权重也就越小.

1) 数据矩阵标准化. 设有  $m$  个评价对象,  $n$  个评价指标,其原始数据矩阵为:

$$X = (x_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (i = 1, 2, \cdots, m; j = 1, 2, \cdots, n) \quad (1)$$

对递增型指标  $x_{ij}$ , 令:  $r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_i \{x_{ij}\}}{\max_i \{x_{ij}\} - \min_i \{x_{ij}\}}$ , 对递减型指标  $x_{ij}$ , 令:  $r_{ij} = \frac{\max_i \{x_{ij}\} - x_{ij}}{\max_i \{x_{ij}\} - \min_i \{x_{ij}\}}$ , 可得标准化矩阵:  $R = (r_{ij})_{m \times n}$ .

2) 定义熵. 在  $m$  个评价对象  $n$  个评价指标的评估问题中, 第  $j$  个指标的熵定义为:

$$H_j = -k \sum_{i=1}^m f_{ji} \ln f_{ji} \quad (2)$$

式中,  $f_{ji} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^m r_{ij}}$ ;  $k = \frac{1}{\ln m}$ . 当  $f_{ji} = 0$  时, 令  $f_{ji} \ln f_{ji} = 0$ .

3) 定义熵权. 定义了第  $j$  个指标的熵后, 则其熵权为:

$$\omega_j = (1 - H_j) / [n - \sum_{j=1}^n H_j] \quad (3)$$

式中,  $0 \leq \omega_j \leq 1$ ;  $\sum_{j=1}^n \omega_j = 1$ .

2.3.2 贝叶斯公式基本原理 1) 贝叶斯公式是利用已知信息量进行概率推断进行原因剖析, 它容纳了对概率的主观解释, 提供了在增加新信息条件下将先验概率转化为后验概率的方法, 适用于水质评价<sup>[27-28]</sup>. 其与经典方法主要不同在于, 贝叶斯概念将参数视作随机变量. 根据全概率公式可获取贝叶斯公式, 定义如下:

$$P(A_i | B) = \frac{P(A_i) P(B | A_i)}{\sum_{i=1}^s P(A_i) P(B | A_i)} \quad (4)$$

式中,  $A_i$  表示水质级别 (I, II, III, IV, V), 所使用的水质级别均为国家《地表水环境质量标准》基本项目标准限制所对应的分类<sup>[29]</sup>;  $B$  表示样本水质指标值;  $P(A_i)$  为事件  $A_i$  的先验概率, 即通过先验直觉判断水质属于级别  $i$  的可能性;  $P(B | A_i)$  为条件概率, 即当水质级别为  $i$  时, 出现水质指标值  $A$  的可能性;  $P(A | B_i)$  为后验概率, 即获得水质指标值  $A$  的条件下, 水质属于级别  $i$  的可能性.

2) 针对水质评价情况时, 可将概率论中贝叶斯公式写为:

$$P(x_{ji} | y_j) = \frac{P(x_{ji}) P(y_j | x_{ji})}{\sum_{i=1}^s P(x_{ji}) P(y_j | x_{ji})} \quad (5)$$

式中,  $i$  为标准类型,  $i=1, 2, 3, 4, 5$ ;  $j$  为指标,  $j=1, 2, 3, 4, 5$ ;  $y_j$  为代表站点的指标值;  $x_{ji}$  为水质类型标准值.

2.3.3 熵权法计算过程 考虑到实验对象涉及到多组数据以及不同的监测点, 采用熵权法对每个监测点 2014—2018 年不同评价指标进行权重计算, 以求得到更全面、更准确的权重值, 使得实验结果更具说服力.

1) 首先利用公式 (1) 将每个监测点的数据构成原始矩阵进行初始化处理, 以大坝监测点为例:

$$R_{28 \times 5} = \begin{bmatrix} 0.4674 & 0.7360 & 1.0000 & 0.1818 & 1.0000 \\ 0.8052 & 0.7407 & 0.4629 & 0.1515 & 0.0370 \\ 0.8730 & 0.6434 & 0.9316 & 0.1030 & 0.1049 \\ 0.3724 & 0.5461 & 0.7461 & 0.0970 & 0.7870 \\ 0.7457 & 0.7173 & 0.5506 & 0.0182 & 0.0833 \\ 0.4793 & 0.9491 & 0.6482 & 0.1758 & 0.1358 \\ 0.7047 & 1.0000 & 0.8193 & 0.1394 & 0.2469 \\ 1.0000 & 0.9536 & 0.9951 & 0.0424 & 0.0926 \\ 0.7912 & 0.7638 & 0.4803 & 0.0788 & 0.2006 \\ 0.4165 & 0.8007 & 0.5334 & 0.1030 & 0.2685 \\ 0.4246 & 0.6156 & 0.5043 & 0.1879 & 0.3395 \\ 0.3676 & 0.7268 & 0.7703 & 0.1212 & 0.0586 \\ 0.5540 & 0.7082 & 0.4336 & 0.1333 & 0.0833 \\ 0.2984 & 0.6709 & 0.5078 & 0.0788 & 0.1543 \\ 0.3727 & 0.5064 & 0.8447 & 0.1030 & 0.1944 \\ 0.2301 & 0.9294 & 0.4326 & 0.0667 & 0.1512 \\ 0.3126 & 0.5069 & 0.3086 & 0.0727 & 0.0000 \\ 0.1293 & 0.6270 & 0.0000 & 0.2727 & 0.0710 \\ 0.6843 & 0.5903 & 0.6172 & 0.1333 & 0.0432 \\ 0.9338 & 0.3844 & 0.9574 & 0.3939 & 0.3056 \\ 0.4094 & 0.6501 & 0.6797 & 1.0000 & 0.1173 \\ 0.2464 & 0.7137 & 0.5711 & 0.2848 & 0.0957 \\ 0.2974 & 0.4486 & 0.6744 & 0.1152 & 0.3549 \\ 0.6069 & 0.8955 & 0.3002 & 0.0000 & 0.0648 \\ 0.4705 & 0.6117 & 0.6201 & 0.0121 & 0.0093 \\ 0.0000 & 0.3357 & 0.4814 & 0.2121 & 0.1235 \\ 0.4033 & 0.0000 & 0.3656 & 0.0788 & 0.0003 \\ 0.4481 & 0.3013 & 0.2986 & 0.2667 & 0.0340 \end{bmatrix}$$

(6)

2)定义熵及熵权. 利用公式(2)定义熵, 采用公式(3)定义每个监测点各评价指标的熵权, 得到5个监测点2014—2018年评价指标的熵权系数(表1).

表1 5个监测点2014—2018年  
评价指标的熵权系数

Tab.1 Entropy weight coefficient of evaluation  
indicators at five monitoring sites during 2014-2018

监测点	溶解氧	高锰酸盐指数	氨氮	总磷	总氮
大坝	0.116	0.065	0.066	0.296	0.457
贵铝水厂	0.121	0.058	0.060	0.313	0.448
麦西河	0.117	0.072	0.042	0.328	0.441
岩脚寨	0.112	0.059	0.057	0.288	0.483
花桥	0.100	0.070	0.074	0.296	0.459
平均值	0.113	0.065	0.060	0.304	0.458

2.3.4 贝叶斯水质评价计算过程 1)水质评价可以确定某监测断面的水质究竟属于哪一级别. 遵循无水质信息条件下,水质属于某级的概率相同,则各监测点属于某级的概率相同,即:

$$P(x_{j1}) = P(x_{j2}) = P(x_{j5}) = \frac{1}{5}$$

(7)

2)根据几何概率,采用距离法计算,即监测断面评价指标与水质类型标准之间的距离绝对值倒数进行计算,分别计算 $P(y_i | x_{ji})$  和  $P(x_{ji} | y_i)$ .

3)计算多指标下综合水质后验概率 $P_j$  :

$$P_j = \sum_{i=1}^n m_i p(x_{ji} | x_i)$$

(8)

式中,  $m_i$  表示不同水质指标权重, 可根据各项水质指标对水质类型的影响及水用途来决定. 本文根据 2.3.3 熵权法所计算出的每个监测点各评价指标的熵权系数, 将 TN 权重值设为 44.1% ~ 48.3%, TP 权重值设为 28.8% ~ 32.8%, DO 权重值设为 10.0% ~ 12.1%, COD<sub>Mn</sub> 权重值设为 5.8% ~ 7.2%, NH<sub>3</sub>-N 权重值设为 4.2% ~ 7.4%.  $P_j$  为 5 个评价指标综合后的后验概率, 即综合考虑 5 个指标信息后代表站点水质为级别  $j$  的概率.

4) 确定最终级别. 以最大概率原则决策最终级别:

$$P_h = \max P_j (j=1, 2, 3, 4, 5) \quad (9)$$

通过上述步骤进行计算, 对百花水库 5 个监测点的水质综合状况进行评价, 综合水质后验概率即是某一监测点每年水质污染程度的定量化描述, 概率大小可以反映其水质级别. 根据评价结果以及监测点地理位置的分布, 由以上各个监测点  $P_j$  值根据式 (5) 以概率最大原则取 5 个  $P_j$  的最大值 ( $P_h$ ) 可以得到 5 个监测点的水质级别.

### 3 结果与分析

#### 3.1 水质指标的季节变化趋势

3.1.1 DO 浓度的季节变化 DO 月际平均浓度变化具有显著的季节变化特征, 冬、春季显著高于夏、秋季, 最低值出现在 11 月, 最高值出现在 3 月 (图 2a). 这说明每年 4 月后, 随气温升高, 浮游植物光合作用加强, 植物光合作用产生的氧气释放到水体, 使上层水体 DO 浓度升高; 而 11 月 DO 平均浓度较低, 这可能与表层、底层水体的垂直交换有关, 水体混合过程中, 垂直交换上迁的还原物质被氧化, 使水体 DO 浓度降低; 同时, 入秋以后贵州高原气温降低使浮游植物光合作用减弱, 水体富氧机制降低, 导致表层水中 DO 浓度下降<sup>[3]</sup>.

3.1.2 COD<sub>Mn</sub> 的季节变化 COD<sub>Mn</sub> 月际平均变化具有显著的季节变化特征, 春、夏季显著高于秋、冬季, 最低值出现在 11 月, 最高值出现在 5 月 (图 2b). 5—9 月出现峰值说明夏季的降雨导致的流域冲刷及藻类腐烂分解可能对 COD<sub>Mn</sub> 的水体累积有综合影响; 近年来由于工业和生活污染源的不合理排放导致百花水库的有机污染物长期累积, 使得 COD<sub>Mn</sub> 上升.

3.1.3 NH<sub>3</sub>-N 浓度的季节变化 NH<sub>3</sub>-N 月际平均浓度变化具有显著的季节变化特征, 冬、春季显著高于夏、秋季, 最低值出现在 11 月, 最高值出现在 5 月 (图 2c), 这可能是 NH<sub>3</sub>-N 在水体中发生生物、化学转化及流域氮输入的季节性差异等原因所致<sup>[5]</sup>.

3.1.4 TP 浓度的季节变化 TP 月际平均浓度变化的季节变化特征不明显, 最低值出现在 9 月, 最高值出现在 3 月 (图 2d). DO 较低, 促进了沉积物中氮磷的释放, 使水中营养盐浓度增高, 同时 DO 可通过影响底泥-水界面处电位、藻类聚磷作用及 pH 来影响底泥-水界面的磷交换<sup>[30]</sup>. TP 的空间分布较明显, 其平均浓度的水平空间分布为: 河流区 > 过渡区 > 湖泊区, 这说明流域径流输入是 TP 的主要来源.

3.1.5 TN 浓度的季节变化 TN 月际平均浓度变化的季节变化特征不明显, 最低值出现在 11 月, 最高值出现在 7 月 (图 2e), 这说明百花水库水体氮污染主要受到城镇生活污水排放、春耕施肥及旅游项目开发的综合影响. TN 的空间分布较明显, 其平均浓度的水平空间分布为: 河流区 > 过渡区 > 湖泊区, 这说明流域径流输入是 TN 的主要来源.

#### 3.2 水质指标的年际变化趋势

3.2.1 DO 浓度的年际变化 2014—2018 年间, 百花水库 DO 年平均浓度变化范围为 4.82 ~ 8.07 mg/L, 平均值为 6.69 mg/L, 最小值出现在 2018 年 3 月的大坝, 最大值出现在 2015 年 3 月的岩脚寨 (图 3a), DO 平均浓度在 2014—2015 年间呈现上升的趋势, 2016—2018 年间, DO 浓度变化波动较大, 在 II 类标准与 IV 类标准之间. 近五年来, DO 平均浓度由 2014 年的 I 类标准下降到 2018 年的 III 类标准.

3.2.2 COD<sub>Mn</sub> 的年际变化 2014—2018 年间, 百花水库 COD<sub>Mn</sub> 年平均变化范围为 1.99 ~ 3.40 mg/L, 平均值为 2.56 mg/L, 最小值出现在 2015 年 1 月的大坝, 最大值出现在 2018 年 3 月的花桥 (图 3b). COD<sub>Mn</sub> 在 2014—2015 年间呈现下降的趋势, 2016—2018 年间, COD<sub>Mn</sub> 呈现上升的趋势, 但仍然维持在 II 类标准.

3.2.3 NH<sub>3</sub>-N 浓度的年际变化 2014—2018 年间, 百花水库 NH<sub>3</sub>-N 年平均浓度变化范围为 0.05 ~ 0.12 mg/L, 平均值为 0.07 mg/L, 最小值出现在 2018 年 5 月的大坝, 最大值出现在 2016 年 1 月的花桥 (图 3c). NH<sub>3</sub>-N 平均浓度在 2014—2018 年间呈现下降的趋势, 从 2016 年后稳定在 0.05 mg/L 左右, 达到国家规定水质标准

的 I 类水标准.

■ 大坝 ● 贵铝水厂 ▲ 麦西河 ▼ 岩脚寨 ◆ 花桥

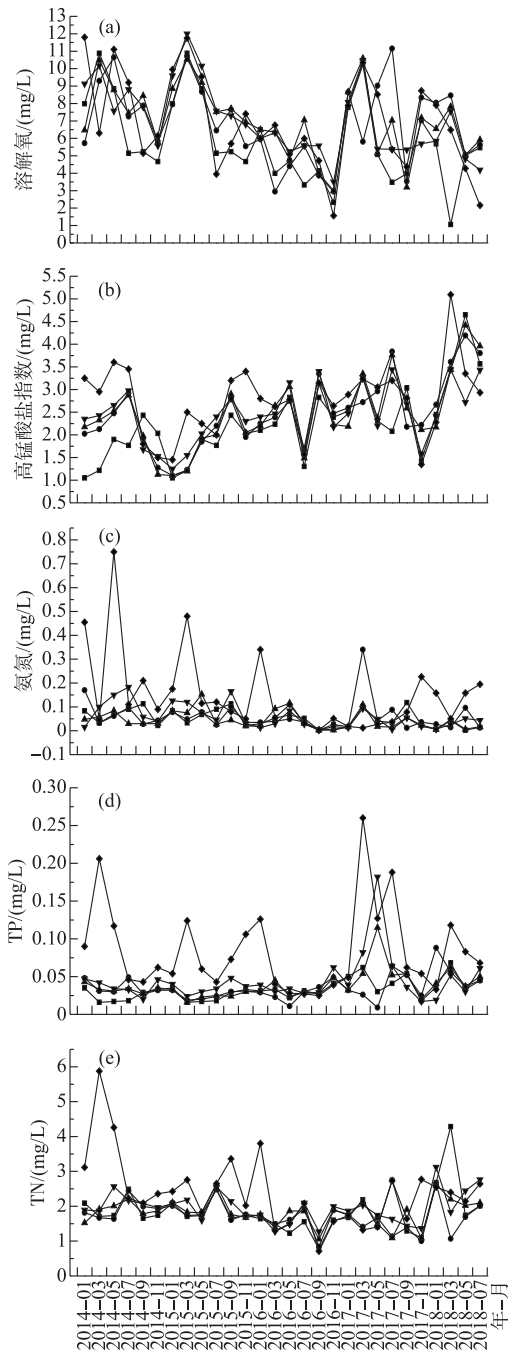


图 2 百花水库 5 个监测点水质指标月际浓度变化

Fig.2 Monthly concentration changes of evaluation indicators of five monitoring sites in Baihua Reservoir

■ 大坝 ● 贵铝水厂 ▲ 麦西河 ▼ 岩脚寨 ◆ 花桥

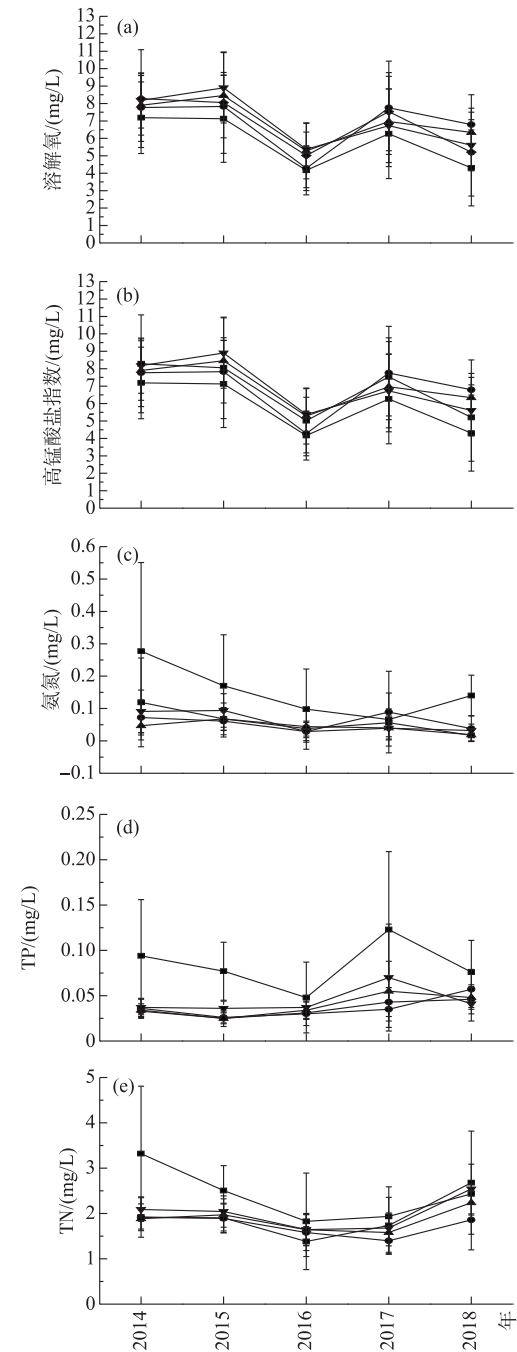


图 3 百花水库 5 个监测点水质指标年际浓度变化

Fig.3 Annual concentration changes of evaluation indicators of five monitoring sites in Baihua Reservoir

**3.2.4 TP 浓度的年际变化** 2014—2018 年间,百花水库 TP 年平均浓度变化范围为 0.04~0.07 mg/L,平均值为 0.05 mg/L,最小值出现在 2017 年 5 月的贵铝水厂,最大值出现在 2017 年 3 月的花桥(图 3d)。TP 浓度呈波动变化趋势,近五年来没有显著下降,处于Ⅲ类标准与Ⅳ类标准之间。

**3.2.5 TN 浓度的年际变化** 2014—2018 年间,百花水库 TN 年平均浓度变化范围为 1.61~2.35 mg/L,平均值为 1.98 mg/L,最小值出现在 2016 年 9 月的花桥,最大值出现在 2014 年 3 月的花桥(图 3e)。TN 浓度平均浓度在 2014—2016 年间呈现下降的趋势,2017—2018 年间呈现上升的趋势。近五年来,TN 平均浓度由 2014 年的 V 类标准上升到 2016 年的接近Ⅳ类标准,随后又下降到 2018 年的 V 类标准。

### 3.3 基于熵权法赋权的贝叶斯公式的水质综合分析与评价

利用贝叶斯公式和基于熵权法的熵权系数,由式(1)~(5)确定水质类别并与等权重贝叶斯法相比较,结果见图 4 和图 5。假设赋予均匀权重,则 5 个监测点的水质评价结果,除花桥的 2014 和 2018 年外,均达到 I 类(图 4),与实际情况不尽相符,这是由于研究区的主要污染物较明显,不适合均匀权重。因此,基于熵权法赋权的贝叶斯水质评价法对水质分析是根据评价指标对水质的影响程度而得,其充分地考虑了多个样本间的联系,可减弱异常值的影响,使评价结果更加准确、合理。

根据百花水库 2014 年 1 月—2018 年 7 月 DO、COD<sub>Mn</sub>、TN、TP 及 NH<sub>3</sub>-N 的水质实测数据,利用贝叶斯公式对百花水库 2014 年 1 月—2018 年 7 月的水质进行评价。表 2 为 2014—2018 年 5 个监测点最大综合后验水质概率  $P_k$  对应的水质类别月均变化评价结果。

2014—2018 年大坝监测点(图 5a)最大水质综合后验概率分别为 0.346、0.344、0.311、0.244 和 0.299;由表 2 可知,大坝监测点处在 V 类标准的时间大多集中在冬季和夏季,其余时间都处在Ⅲ类与Ⅳ类标准,水质状况波动较大,近两年来水质状况整体上升。

2014—2018 年贵铝水厂监测点(图 5b)最大水质综合后验概率分别为 0.335、0.329、0.355、0.304 和 0.331;由表 2 可知,2014—2015 年贵铝水厂监测点大部分时间处在Ⅳ类与 V 类标准,而 2016—2018 年处在 V 类标准的时间集中在冬季和夏季,其余时间都处在Ⅲ类与Ⅳ类标准,近两年来水质状况整体上升。

2014—2018 年麦西河监测点(图 5c)最大水质综合后验概率分别为 0.295、0.399、0.275、0.339 与 0.354;由表 2 可知,2014—2018 年麦西河监测点处在 V 类标准的月份占有所有月份的 57.1%,虽然 2016—2017 年水质状况有所改善,曾达到Ⅲ类与Ⅳ类标准,但 2018 年来水质标准又重新下降,达到 V 类标准,水体状况有变差的趋势。

2014—2018 年岩脚寨监测点(图 5d)最大水质综合后验概率分别为 0.376、0.431、0.295、0.314 和 0.297;由表 2 可知,2014—2018 年岩脚寨监测点处在 V 类标准的月份占有所有月份的 57.1%;2014—2015 年绝大部分时间处于 V 类标准,2016—2017 年水质状况有所改善,曾达到Ⅲ类与Ⅳ类标准,但 2018 年来水质标准又重新上升,达到Ⅲ类标准,水体状况有变好的趋势。

2014—2018 年花桥监测点(图 5e)最大水质综合后验概率分别为 0.357、0.240、0.390、0.401 和 0.241;由表 2 可知,2014—2018 年花桥监测点处在 V 类标准的月份占有所有月份的 35.7%,仅次于麦西河与岩脚寨监测点;2014—2015 年大部分时间处在Ⅳ类与 V 类标准,2016—2017 年水质状况有所改善,曾达到Ⅲ类与Ⅳ类标准之间,但 2018 年来水质标准又重新下降,达到 V 类标准,水体状况有变差的趋势。

从整体来看,根据监测点水质标准达到Ⅳ与 V 类水的时间百分比来看,其水质状况从好到差排列为:大坝>贵铝水厂>花桥>麦西河>岩脚寨,麦西河—花桥段水质状况较差,大坝—贵铝水厂段水质状况较好;另外,2014—2018 年百花水库水体环境波动较大,近年有变差的趋势,2016 年 9 月、2017 年 11 月是水质变化的拐点,从 2014 年 1 月到 2016 年 9 月呈上升的趋势,水质类别达到了Ⅲ类标准;从 2016 年 9 月到 2017 年 11 月,水质状况整体保持稳定,水质类别达到了Ⅲ类标准;但从 2017 年 11 月到 2018 年 7 月,水质状况整体呈下降的趋势,大部分监测点水质类别下跌到 V 类标准。



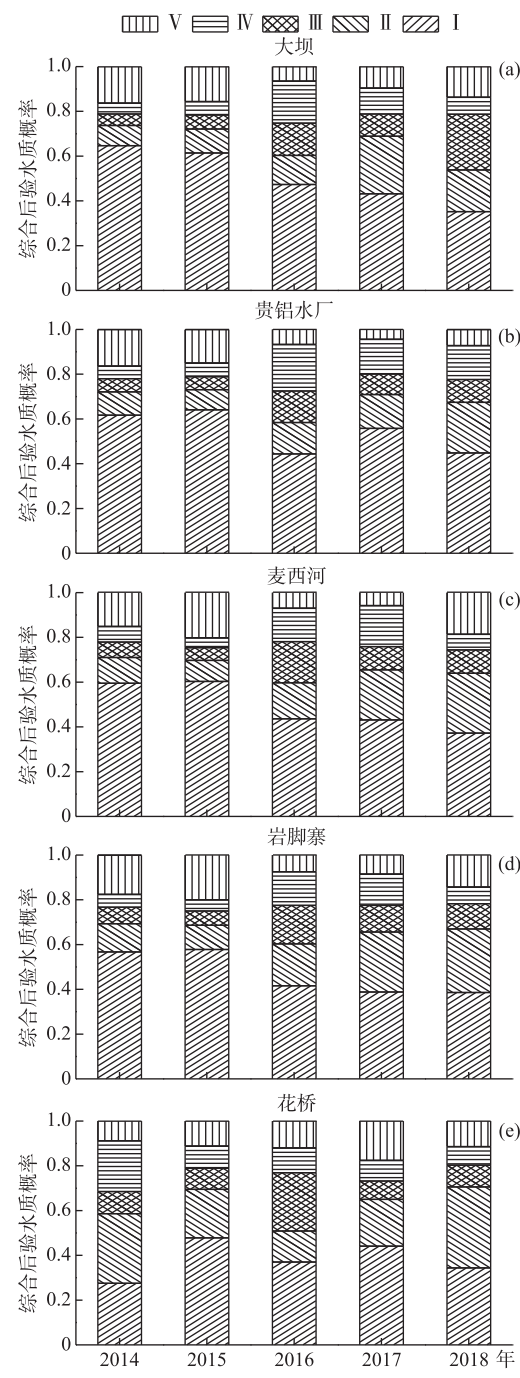


图4 2014—2018 年百花水库 5 个  
监测点贝叶斯水质评价结果(均匀权重)  
Fig.4 Results of water quality assessment using Bayesian  
method based on equal weight of five monitoring  
sites in Baihua Reservoir during 2014–2018

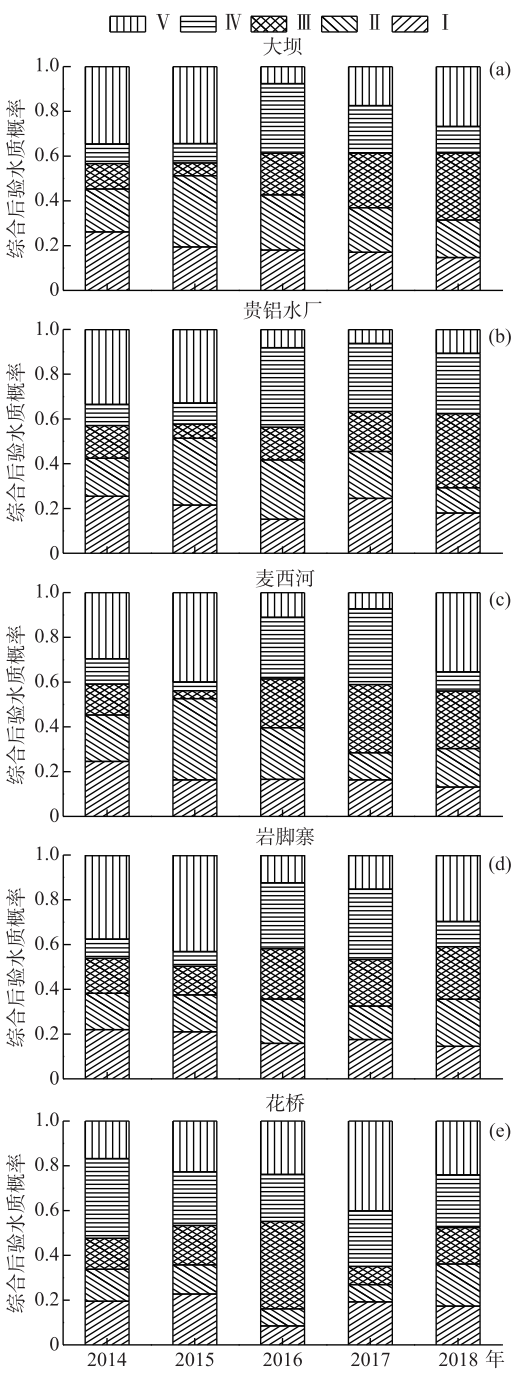


图5 2014—2018 年百花水库 5 个  
监测点贝叶斯水质评价结果(熵权法)  
Fig.5 Results of water quality assessment using Bayesian  
method based on entropy weight of five monitoring  
sites in Baihua Reservoir during 2014–2018

表 2 2014—2018 年百花水库  
5 个监测点最大综合后验水质概率  $P_h$

对应的水质类别月际变化评价结果

Tab.2 Estimation of monthly variation of water quality categories corresponding to the maximum comprehensive posterior water quality probability  $P_h$  of five monitoring sites in Baihua Reservoir during 2014–2018

时间 (年-月)	大坝	贵铝水厂	麦西河	岩脚寨	花桥
2014-01	V	III	IV	V	IV
2014-03	IV	IV	V	V	V
2014-05	IV	IV	V	V	IV
2014-07	V	III	V	V	III
2014-09	IV	V	V	V	V
2014-11	IV	V	V	V	V
2015-01	V	V	V	V	III
2015-03	IV	IV	V	V	IV
2015-05	IV	IV	V	IV	V
2015-07	V	V	V	V	III
2015-09	IV	IV	V	V	IV
2015-11	IV	V	IV	IV	V
2016-01	IV	IV	V	IV	IV
2016-03	IV	IV	III	IV	III
2016-05	III	IV	V	IV	IV
2016-07	IV	V	V	V	V
2016-09	III	III	III	III	III
2016-11	IV	III	III	V	IV
2017-01	III	V	IV	V	III
2017-03	V	IV	III	V	IV
2017-05	IV	IV	IV	V	IV
2017-07	III	III	III	III	V
2017-09	III	III	V	IV	IV
2017-11	III	III	III	III	III
2018-01	III	IV	III	V	V
2018-03	III	III	V	III	IV
2018-05	III	IV	V	III	V
2018-07	V	V	III	III	V

## 4 讨论

### 4.1 百花水库水质变化趋势的影响因素

根据百花水库 2014—2018 年各水质指标及水质变化综合分析结果可知,除 TN、TP 外,各水质指标状况均有不同程度的改善. 百花水库的整体水质状况从 2014 年 1 月到 2016 年 9 月呈上升的趋势,水质类别达到了Ⅲ类标准;从 2016 年 9 月到 2017 年 11 月,水质状况整体保持稳定,水质类别达到了Ⅲ类标准;但从 2017 年 11 月到 2018 年 7 月,水质状况整体呈下降的趋势,大部分监测点水质类别下跌到 V 类标准,结合百花水库实际状况分析,引起整体水质状况变化的影响因素主要有以下几个方面:

1)生态修复工程的开展. 2014 年来,贵阳市针对“两湖一库”生态状况开展了湖滨水淹区生态修复项目,通过生境改造和生态修复,达到固岸护坡、减少土壤侵蚀、涵养水源、增加生态多样性,营造湖岸景观效果以及改善库区小气候等效果,以稳定和改善“两湖一库”的水质,这与百花水库水质状况变化的时间相一致. 从生态系统的角度分析,通过水生植物的吸收、化感和遮光作用降解水体中的 N、P 营养盐,抑制蓝藻藻类生长,通过生态系统整体功能的发挥促进水质改善,这就使百花水库的水质得到改善.

2)工业污染源的削减. 2014—2015 年,贵阳市主要污染物化学需氧量排放量由 4.78 万吨降到 3.90 万吨,氨氮排放量由 0.60 万吨降到 0.49 万吨,分别下降了 18.3% 和 17.1%<sup>[31-32]</sup>,使百花水库水质状况有所改善. 在工业点源污染方面,针对百花水库不断加剧的生态问题,2017 年年末,清镇市政府实施百花水库南门河和麦西河水质达标专项整治,加快建设 2 个河流域污水截污提升系统,完善污水处理厂处理能力,建成截污管网、市政收集管网,减缓西南商贸城等对麦西河的影响,完成反岭

山废弃煤矿废水治理设施提升改造以及完成麦西生态湿地建设投入运行. 通过这些综合治理项目的实施,使排入百花水库的污水得到有效控制,其下游水质状况有所改善.

3)沉积物中营养盐含量变化与释放. 百花水库的底泥平均厚度为 34.3 cm;蓄积总体积为 370.8 万  $m^3$ , TN、TP 蓄积量分别为 5400、1600 t,其氮磷含量对百花水库水质影响较大<sup>[33]</sup>. 近年来,百花湖沉积物中 TN 含量呈增加趋势,TP 含量则较为平稳,略有降低<sup>[24]</sup>,其表层沉积物 TN 含量的平均值为 4168.53  $mg/kg$ <sup>[34]</sup>,远高于太湖的 859.7  $mg/kg$ <sup>[35]</sup>及洪泽湖的 1020.0  $mg/kg$ <sup>[36]</sup>. 另外一点就是,底泥悬浮颗粒物对水体 TN、TP 浓度均会造成较大的影响<sup>[37-38]</sup>. 频繁的动力悬浮使得沉积物表层的底泥发生悬浮,底泥孔隙水中营养盐也因此得以释放,在动力作用消失,悬浮物沉降下来掩埋在底泥中,在还原环境下发生降解,等待下一次风浪过程来临再发生悬浮与释放<sup>[39]</sup>.

4) 水库(湖泊)季节性热分层. 水库建成后会在水动力减弱、水力停留时间延长以及水体垂向对流不佳等现象,使水环境可能发生类似于天然湖泊的“湖沼学反应”<sup>[40]</sup>. 在秋季初期,由于受太阳辐射作用,上层水体温度逐渐升高,密度减小,下层水体因传热不均而温度相对稳定,密度较大. 在密度差作用下,密度低的水悬浮于上层,而密度高的水沉于底层,从而阻碍了上下层水体的循环交换,形成稳定的分层结构. 9—11月,随着气温升高,百花水库水体上层和下层水温出现差异,此时水柱温度维持上高下低的分层结构,上下层温度差在 2~8℃,水体分层阻隔了底层较高氮、磷浓度水体的交换,从而影响百花水库的水质.

5) 农业与生活污染源的增加. 在农业面源污染方面,入湖污染主要受农业施肥量的影响,岩脚寨监测点附近居住的人口较密集,农田较为集中,生活、养殖、种植污染较集中;麦西河流域年平均降雨量为 961.4 mm,年内降水分配不均匀,主要集中在 5—9 月,约占全年降雨量的 72%<sup>[2]</sup>,在夏季,入湖河流的流量和流速均明显增大,且极易引起湖区底泥扰动,促进水体与湖底沉积物的物质交换,从而导致水质状况变差;而麦西河口是麦西河的入湖口,靠近清镇市东北部,其流域范围的非点源污染是农药化肥,同时也是游船靠岸的集中点,生活和旅游污染占主导. 百花水库作为红枫水库的下游,百花水库水质状况受红枫湖的影响,而花桥作为两湖的连接点,需要重点关注. 就 TN 而言,花桥的 TN 年均浓度要比其他监测点的要高得多,原因之一可能是花桥上游水流较为湍急,而附近旅游景区所排放的污染物大量涌入到花桥区域,使得其 TN 浓度偏高.

#### 4.2 水体主要污染指标分析与防治策略

在基于熵权法赋权的贝叶斯公式进行水质评价的过程中,根据百花水库的污染源特征和熵权系数,可以得出大坝等 5 个监测点共有的主要水质污染指标为 TN 和 TP,两者的平均权重系数分别为 45.8%、30.4%,共占 76.2%. 因此,百花水库主要是河水浑浊、氮磷营养输入污染.

2014 年 1 月到 2017 年 11 月,百花水库整体水质保持稳定,是源于 2014—2015 年,贵阳市针对“两湖一库”生态状况开展生态修复工程,贵阳市主要污染物均有不同程度的下降,外源输入减少,使得“两湖一库”的水质稳定和改善. 而 2017 年 11 月到 2018 年 7 月,百花水库整体水质变差,是源于近年来沿湖地区快速开发,部分污染物随红枫湖的补给进入百花水库,其中入湖口花桥监测点受影响程度最明显(表 2). 百花水库旅游及水上游乐项目开发,例如划船、游艇等,加剧了人为因素对湖底的扰动,使得底泥中氮磷释放速率加快. 此外,2017 年以来,百花水库饮用水源二级保护区内的养鸡场、污水处理厂和堆场的排放不达标,从而对  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、TN 等指标产生影响. 所以底泥悬浮颗粒的释放、水库(湖泊)季节性热分层、农业与生活污染和企业排污是百花水库的主要污染源,湖区生态环境系统的恢复治理首先要解决农业污染和居民区污染负荷的产生和输送问题.

在生态修复方面:继续进行生态修复工程,逐步恢复其水体自净能力,实现百花水库水环境的可持续发展;在工业污染源方面:提高工厂污水处理能力,提升污水截流能力,对百花水库上游违规工厂和违规农家乐进行整治或拆迁. 针对沉积物营养盐释放:根据水体污染程度,可在沿岸浅水区域恢复沉水植物,而在沉积物污染重的深水区域通过原位钝化、曝气复氧等方式控制沉积物营养盐释放,限制或禁止在湖泊进行网箱养鱼;针对农业与生活污染源:保护流域自然植被(森林、湿地),调整流域农业生产方式,减少灌区农药与化肥使用量,合理利用旅游资源进行适度开发,实现百花水库生态与经济效益的协同发展.

### 5 结论

1) 2014—2018 年间,百花水库 DO、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、TN、TP 和  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度存在显著的年际变化. DO 浓度波动较大,呈下降趋势; $\text{COD}_{\text{Mn}}$  浓度变化幅度明显,呈上升趋势; $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度呈下降趋势;TP 浓度趋于稳定;TN 浓度虽曾出现下降,但近年重新呈上升趋势. 基于熵权法赋权的贝叶斯公式对百花水库的水质得出的评价结果表明:从整体来看,其水质状况从好到差依次为:大坝>贵铝水厂>花桥>麦西河>岩脚寨;另外,2014—2018 年百花水库水体环境波动较大,近年有变差的趋势,2016 年 9 月、2017 年 11 月是百花水库水质变化的拐点,从 2014 年 1 月到 2016 年 9 月呈上升的趋势;从 2016 年 9 月到 2017 年 11 月,水质状况整体保持稳定;但从 2017 年 11 月到 2018 年 7 月,水质状况整体呈下降的趋势.

2) TN 与 TP 是百花水库的主要污染指标,其河水浑浊、氮磷营养输入污染的特点较为明显. 本研究根据

沿湖地区经济社会发展现状,提出如下的百花水库污染防治策略。在生态修复方面:继续进行生态修复工程,逐步恢复其水体自净能力,实现百花水库水环境的可持续发展;在工业污染源方面:提高工厂污水处理能力,提升污水截流能力,对百花水库上游违规工厂和违规农家乐进行整治或拆迁。针对沉积物营养盐释放:根据水体污染程度,可在沿岸浅水区域恢复沉水植物,而在沉积物污染重的深水区域通过原位钝化、曝气复氧等方式控制沉积物营养盐释放,限制或禁止在湖泊进行网箱养鱼;针对农业与生活污染源:保护流域自然植被(森林、湿地),调整流域农业生产方式,减少灌区农药与化肥使用量,合理利用旅游资源进行适度开发,实现百花水库生态效益和经济效益的协同发展。

## 6 参考文献

- [1] Wang H, Yan DH, Jia YW *et al.* Subject system of modern hydrology and water resources and research frontiers and hot issues. *Advances in Water Science*, 2010, **21**(4): 479-489. [王浩, 严登华, 贾仰文等. 现代水文水资源学科体系及研究前沿和热点问题. 水科学进展, 2010, **21**(4): 479-489.]
- [2] Feng YS, Lin T, Yang QY. Temporal and spatial characteristic of nitrogen and phosphorus output in the suburb watershed around the Baihua Lake. *Environmental Science*, 2014, **35**(12): 4537-4543. [冯源嵩, 林陶, 杨庆媛. 百花湖周边城市近郊小流域氮、磷输出时空特征. 环境科学, 2014, **35**(12): 4537-4543.]
- [3] Wang YC, Zhu J, Ma M *et al.* Thermal stratification and paroxysmal deterioration of water quality in a Canyon Reservoir. *J Lake Sci*, 2005, **17**(1): 54-60. DOI:10.18307/2005.0109. [王雨春, 朱俊, 马梅等. 西南峡谷型水库的季节性分层与水质的突发性恶化. 湖泊科学, 2005, **17**(1): 54-60.]
- [4] Feng X, Yan H, Wang S *et al.* Seasonal variation of gaseous mercury exchange rate between air and water surface over Baihua reservoir, Guizhou, China. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(28): 4721-4732. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2004.05.023.
- [5] Xia PH, Li QH, Lin T *et al.* Limnological characteristics and environmental effects of the Baihua Reservoir in Guizhou Plateau, China. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, **31**(8): 1660-1669. [夏品华, 李秋华, 林陶等. 贵州高原百花湖水湖沼学变量特征及环境效应. 环境科学学报, 2011, **31**(8): 1660-1669.]
- [6] Liao GH. Analysis of water pollution trend and control measures in both Hongfeng Lake and Baihua Lake. *Earth and Environment*, 2004, **32**(3): 49-52. [廖国华. 红枫湖、百花湖水污染趋势分析及控制对策. 地质地球化学, 2004, **32**(3): 49-52.]
- [7] Gao TJ, Li QH, Chen FF *et al.* Analysis on eutrophication characteristics of Baihuahu Reservoir in the Guizhou Plateau. *Environmental Protection Science*, 2014, **40**(2): 22-29. [高廷进, 李秋华, 陈峰峰等. 贵州高原水库百花湖富营养化特征分析. 环境保护科学, 2014, **40**(2): 22-29.]
- [8] Li QH. Characteristics and evaluation of eutrophication in Guizhou plateau reservoirs. *Journal of Guizhou Normal University: Natural Sciences*, 2018, **36**(2): 1-8. [李秋华. 贵州高原水库富营养化特征及评价. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2018, **36**(2): 1-8.]
- [9] Li K, Wang JQ, Li K *et al.* Research and evaluation of water pollution in Lake Wabu Basin, Huaihe Catchment. *J Lake Sci*, 2017, **29**(1): 143-150. DOI:10.18307/2017.0116. [李凯, 汪家权, 李堃等. 淮河流域瓦埠湖流域水体污染研究与现状评价(2011—2015年). 湖泊科学, 2017, **29**(1): 143-150.]
- [10] Liang LE, Li CY, Shi XH *et al.* Analysis on the eutrophication trends and affecting factors in Lake Hulun, 2006-2015. *J Lake Sci*, 2016, **28**(6): 1265-1273. DOI:10.18307/2016.0612. [梁丽娥, 李畅游, 史小红等. 2006—2015年内蒙古呼伦湖富营养化趋势及分析. 湖泊科学, 2016, **28**(6): 1265-1273.]
- [11] Xie WJ, Wang S, Lou SC *et al.* Evaluation of temporal water quality change (2008-2014) and the cause analysis in the upper-reach lakes of Lake Nansi, Shandong Province. *J Lake Sci*, 2016, **28**(3): 513-519. DOI:10.18307/2016.0306. [解文静, 王松, 娄山崇等. 山东南四湖上级湖水质变化评价(2008—2014年)及成因分析. 湖泊科学, 2016, **28**(3): 513-519.]
- [12] Lu Z, Li Y, Ma X *et al.* Surface water quality assessment in period 2000-2009 and forecasting on changing tendency of pollution in Daye Lake. *Environmental Science & Technology*, 2012, **35**(5): 174-178. [鲁珍, 李晔, 马啸等. 大冶湖2000—2009年地表水质评价及污染趋势预测. 环境科学与技术, 2012, **35**(5): 174-178.]
- [13] Wang Q, Zhou ZH. Application of BP neural network in water quality assessment for Miyun Reservoir recharged with re-

- claimed water. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(9): 2413-2416. [王倩, 邹志红. BP 神经网络在再生水补给密云水库水质评价中的应用. 环境科学学报, 2014, **34**(9): 2413-2416.]
- [14] Borsuk ME, Stow CA, Reckhow KH. A Bayesian network of eutrophication models for synthesis, prediction, and uncertainty analysis. *Ecological Modelling*, 2004, **173**(2/3): 219-239. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2003.08.020.
- [15] Qian SS, Reckhow KH. Combining model results and monitoring data for water quality assessment. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(14): 5008-5013. DOI: 10.1021/es062420f.
- [16] Molina JL, Bromley J, Sullivan C *et al.* Integrated water resources management of overexploited hydrogeological systems using Object-Oriented Bayesian Networks. *Environmental Modelling & Software*, 2010, **25**(4): 383-397. DOI: 10.1016/j.envsoft.2009.10.007.
- [17] Ferrante V. A Bayesian analysis of the impact of air pollution episodes on cardio-respiratory hospital admissions in the Greater London area. *Izvestiia Na Mikrobiologicheskii Institut*, 2011, **23**(23): 69-80. DOI: 10.1177/0962280210372571.
- [18] Hou YZ, Qin TL, Yan DH *et al.* Comprehensive assessment of water quality in Wulie River using Bayes Method. *South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology*, 2012, **10**(1): 94-97. [侯佑泽, 秦天玲, 严登华等. 基于贝叶斯理论的武烈河水质综合评价. 南水北调与水利科技, 2012, **10**(1): 94-97.]
- [19] Sun LL, Liu B, Shi BH *et al.* Water quality evaluation based on coupling of Bayesian and PCA. *Water Resources and Power*, 2017, **35**(11): 36-39. [孙玲玲, 刘彬, 石宝红等. 基于贝叶斯理论和主成分分析法耦合的水质评价. 水电能源科学, 2017, **35**(11): 36-39.]
- [20] Ma FB, Li CL, Wang X *et al.* A Bayesian method for comprehensive water quality evaluation of the Danjiangkou Reservoir water source area, for the middle route of the South-to-North Water Diversion Project in China. *Frontiers of Earth Science*, 2014, **8**(2). DOI:10.1007/s11707-013-0395-6.
- [21] Sun PC, Chen JN. Risk assessment of river water quality under accidental pollution based on Bayesian Networks. *Environmental Science*, 2009, **30**(1): 47-51. [孙鹏程, 陈吉宁. 基于贝叶斯网络的河流突发性水质污染事故风险评估. 环境科学, 2009, **30**(1): 47-51.]
- [22] Wang YC, Wan GJ, Xue F *et al.* Distribution of total, exchangeable and fixed nitrogen in the sediments of two lakes in Guizhou Province. *J Lake Sci*, 2002, **14**(3): 301-309. DOI:10.18307/2002.0402. [王雨春, 万国江, 黄荣贵等. 红枫湖、百花湖沉积物全氮、可交换态氮和固定铵的赋存特征. 湖泊科学, 2002, **14**(3): 301-309.]
- [23] Xia PH, Liu Y, Xue F *et al.* Dynamics and structure of phytoplankton community in the Baihua Reservoir, Guizhou. *Earth and Environment*, 2012, **40**(2): 179-187. [夏品华, 刘燕, 薛飞等. 贵州百花湖水浮游植物群落结构与季节变化. 地球与环境, 2012, **40**(2): 179-187.]
- [24] Wang JF, Chen JA, Zeng Y *et al.* Spatial distribution of TP, TN and  $C_{org}$  in the sediment of Baihua Lake. *Environmental Chemistry*, 2012, **31**(5): 599-603. [王敬富, 陈敬安, 曾艳等. 贵州百花湖沉积物磷、氮及有机碳的空间分布特征. 环境化学, 2012, **31**(5): 599-603.]
- [25] Ni B, Li XD, Wang HL *et al.* Water quality assessment and trend analysis of the lower reach of the Minjiang River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010, **19**(S2): 172-176. [倪彬, 李旭东, 王红磊等. 岷江下游水环境质量评价与变化趋势分析. 长江流域资源与环境, 2010, **19**(S2): 172-176.]
- [26] Tang RL, Guo CZ, Dong XJ. An optimization model with entropic coefficients for management in irrigation water resources. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2000, **28**(1): 18-21. [汤瑞凉, 郭存芝, 董晓娟. 灌溉水资源优化调配的熵权系数模型研究. 河海大学学报: 自然科学版, 2000, **28**(1): 18-21.]
- [27] Zhao XS, Zhang C, Wang WC. Water quality evaluation model using Bayesian Method based on entropy weight. *Water Resources and Power*, 2011, **29**(6): 33-35. [赵晓慎, 张超, 王文川. 基于熵权法赋权的贝叶斯水质评价模型. 水电能源科学, 2011, **29**(6): 33-35.]
- [28] Zhu HN, Yan Q, Yin J. The model of water quality assessment for lakes based on interval type Bayesian. *Environmental Engineering*, 2015, **33**(2): 130-134. [祝慧娜, 闫庆, 尹娟. 基于区间型贝叶斯的湖泊水质评价模型. 环境工程, 2015, **33**(2): 130-134.]
- [29] Environmental quality standards for surface water. GB 3838-2002. [地表水环境质量标准. GB 3838-2002.]
- [30] Gong CS, Fan CX. Effect factors analysis of phosphorus exchange across lake sediment-water interface under different dissolved oxygen concentration. *J Lake Sci*, 2010, **22**(3): 430-436. DOI:10.18307/2010.0317. [龚春生, 范成新. 不同溶解氧水平下湖泊底泥-水界面磷交换影响因素分析. 湖泊科学, 2010, **22**(3): 430-436.]

- [31] Guiyang ecological civilization construction committee. Guiyang environmental bulletin, 2015. [贵阳市生态文明建设委员会. 贵阳市环境状况公报. 2015.]
- [32] Guiyang ecological civilization construction committee ed. Guiyang environmental bulletin, 2016. [贵阳市生态文明建设委员会. 贵阳市环境状况公报. 2016.]
- [33] Fang ZQ, Li CX, Zhang MS *et al.* Sediment deposition and its nutrient volume in Baihua Lake and Aha Lake. *Journal of Guizhou Normal University: Natural Sciences*, 2009, **27**(4): 30-33. [方志青, 李存雄, 张明时等. 百花湖、阿哈水库底泥及营养盐蓄积量的估算. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2009, **27**(4): 30-33.]
- [34] Meng FL, Li QH, Xiao JS *et al.* Study on distribution characteristics and pollution assessment of total nitrogen and total phosphorus in sediments of Baihua Lake. *Sichuan Environment*, 2018, **37**(5): 100-105. [孟凡丽, 李秋华, 肖劲松等. 百花湖沉积物总氮总磷分布特征及污染评价研究. 四川环境, 2018, **37**(5): 100-105.]
- [35] Yuan HZ, Shen J, Liu EF *et al.* Space distribution characteristics and diversity analysis of phosphorus from overlying water and surface sediments in Taihu Lake. *Environmental Science*, 2010, **31**(4): 954-960. [袁和忠, 沈吉, 刘恩峰等. 太湖水体及表层沉积物磷空间分布特征及差异性分析. 环境科学, 2010, **31**(4): 954-960.]
- [36] Yu H, Zhang WB, Lu SY *et al.* Spatial distribution characteristics of surface sediments nutrients in Lake Hongze and their pollution status evaluation. *Environmental Science*, 2010, **31**(4): 961-968. [余辉, 张文斌, 卢少勇等. 洪泽湖表层底质营养盐的形态分布特征与评价. 环境科学, 2010, **31**(4): 961-968.]
- [37] Zhu GW, Qin BQ, Gao G. Direct evidence of phosphorus outbreak release from sediment to overlying water in a large shallow lake caused by strong wind wave disturbance. *Chinese Science Bulletin*, 2005, **50**(6): 577-582. DOI: 10.1007/bf02897483.
- [38] Zhu MY, Paerl HW, Zhu GW *et al.* The role of tropical cyclones in stimulating cyanobacterial (*Microcystis* spp.) blooms in hypertrophic Lake Taihu, China. *Harmful Algae*, 2014, **39**: 310-321. DOI: 10.1016/j.hal.2014.09.003.
- [39] Qin BQ, Fan CX. Exploration of conceptual model of nutrient release from inner source in large shallow lake. *China Environmental Science*, 2002, **22**(2): 150-153. [秦伯强, 范成新. 大型浅水湖泊内源营养盐释放的概念性模式探讨. 中国环境科学, 2002, **22**(2): 150-153.]
- [40] Lin GE, Wang T, Lin QQ *et al.* Spatial pattern and temporal dynamics of limnological variables in Liuxihe Reservoir, Guangdong. *J Lake Sci*, 2009, **21**(3): 387-394. DOI: 10.18307/2009.0312. [林国恩, 望甜, 林秋奇等. 广东流溪河水库湖沼学变量的时空动态特征. 湖泊科学, 2009, **21**(3): 387-394.]