

2009~2018年贵阳市阿哈水库水质时空变化特征分析

曾华献^{1,2}, 李玉麟³, 王敬富^{1,*}, 陈敬安¹, 杨永琼^{1,4}, 魏星宇^{1,4}

(1. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081; 2. 中国科学院大学 北京 100049;
3. 贵阳市两湖一库环境保护监测站, 贵阳 551400; 4. 贵州师范大学, 贵阳 500025)

摘要:为更好了解贵阳市饮用水源地阿哈水库的水质动态变化规律,对近10年来(2009~2018)库区及主要支流的水质、水文气象数据进行系统分析研究。结果表明:受水文气象及藻类生长的周期性影响,阿哈水库库区及支流水体的营养盐、透明度(SD)、叶绿素a(Chl. a)均呈季节性变化。阿哈水库水质以III类为主,库中水质(超标率为19.82%)优于库东(超标率为45.05%)。综合营养状态指数(TLI)分析表明,阿哈水库水体处于中营养至轻度富营养状态,近年来水质有所改善。入库支流水质优劣顺序为:游鱼河>白岩河>蔡冲河>金钟河,主要表现为总磷(TP)和氨氮(NH₃-N)超标。Pearson相关性分析表明,库区Chl. a和NH₃-N、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、气温、降雨量、日照时数等呈显著正相关,和SD、水位、气压呈显著负相关。主成分分析表明,藻类生长主要受控于水文气象因子。当前,加大金钟河等入库支流外源污染治理力度,是提升库区水质的关键。未来应加强水文、气象因子作用于藻类水华的过程机制研究,提升藻华应急处理能力。

关键词:阿哈水库;水质;TLI;营养盐;水文气象因素

中图分类号:X524 文献标识码:A 文章编号:1672-9250(2021)04-0367-08 doi: 10.14050/j.cnki.1672-9250.2021.49.036

水是人类生存和发展的重要资源,由于水质下降、水量减少,水资源已不能满足社会经济发展的需要。水资源保护成为许多国家经济发展的关键因素,也是环境保护的重中之重^[1]。水库是由人工筑坝形成的半自然半人工水体,具有饮水、发电、灌溉等多项功能,在地表水资源的控制和管理中起着关键作用^[2],作为陆地淡水的重要存储形式,其水文、水质变化规律与天然湖泊显著不同。水库沉淀作用强、流速及水交换缓慢,污染物进入水库后,往往不易被水体稀释,容易发生沉积^[3]。天然湖泊和水库的一个重要区别是,水库是介于河流和湖泊之间的水生生态系统连续体,所以认识河流对水库生态系统的影响,将加强对水库时空变化不均一性的认识^[4]。

国内外许多学者对不同河流、湖泊的水质时空变化进行大量研究,杨琴等^[5]研究表明淮河流域水体理化特征存在明显的季节性变化,大部分地区营养盐呈下降趋势。Yang等^[6]研究表明2005~2020年滇池水体Chl. a和总氮(TN)由北向南扩散,滇

池北部为污染最严重区域。Bu等^[7]对南秦岭金水河进行研究,发现从源头到下游地区水质逐渐恶化。而关于贵州高原喀斯特水库水体理化特征的时空变化报道较少^[8-9]。

西南地区的人工深水水库存在如下特点:水位逆周期可人为调控、水体富营养化与重金属污染叠加、物质循环和生物过程受多界面作用控制等^[10]。西南地区深水人工水库数量众多,其中相当一部分承担城市供水功能,这些水源地水库的水质安全影响社会经济的稳定。阿哈水库是贵阳市饮用水源地水库的典型代表,当前污染形势也很严峻,其主要支流(如金钟河)N、P污染未得到有效控制,库区水质不稳定、局部区域藻华时有发生,取水点水质稳定达标面临严峻挑战。蓝藻产生的藻毒素,对水生生态安全和人类健康构成潜在威胁^[11]。当前对阿哈水库长时间尺度的水质变化规律及其关键影响因子的认识还很缺乏,制约阿哈水库水环境保护和治理工作。为此,本文对阿哈水库近10年来水体理化特征的时空变化进行系统分析,旨在为水源

收稿日期:2020-10-30; 改回日期:2020-12-21

基金项目:中国科学院野外站联盟项目(KFKFJ-SW-YW0YW036);贵州省科技计划项目(黔科合LH字[2017]7344号、黔科合支撑[2020]4Y006号);贵阳市科技项目(筑科合同[2019]2-9号)。

第一作者简介:曾华献(1996-),女,硕士研究生,主要研究方向为湖泊环境。E-mail: zenghuaxian@mail.gyig.ac.cn.

* 通讯作者:王敬富(1983-),男,博士,研究方向为湖泊环境。E-mail: wangjingfu@vip.skleg.cn.

地水库保护提供理论依据和科学支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

阿哈水库 (106°37′~106°40′E, 26°30′~26°34′N) 位于贵阳市南明河支流小车河上游, 平均水深 13.2 m, 流域面积 190 km², 水面面积 4.5 km², 库容 4.4×10⁷ m³[12], 是贵阳市的饮用水源地之一。阿哈水库主要有 5 条入库支流, 即游鱼河、蔡冲河、金钟河、白岩河和烂泥沟河, 平均径流量为 3.24 m³/s, 年平均入库径流量约 1.02×10⁹ m³[13], 湖水滞留时间 0.44 a。阿哈水库流域属亚热带湿润型季风气候, 年均气温 15.3 °C。根据其气候水文特征, 一般 1~4 月为枯水期, 5~9 月为丰水期, 10~12 月为平水期[14]。自 80 年代中期以来, 阿哈水库流域内小煤窑无序开采、上游水土流失严重, 水质日趋恶化, 对居民用水安全和当地的经济的发展造成较大影响[15]。

1.2 采样点与监测指标

2009~2018 年, 在库区东部 (1 号)、中部 (2 号) 和白岩河 (3 号)、金钟河 (4 号)、游鱼河 (5 号)、蔡冲河 (6 号) 4 条入库支流分别设置采样点 (图 1)。用有机玻璃采样器在表层取水 5 L, 取 1 L 样品加硫酸酸化 (pH ≤ 2) 带回实验室测定 TP、TN、NH₃-N、COD_{Mn}; 另取 1 L 样品加 1% 的碳酸镁悬浊液保存带回实验室测定 Chl. a 浓度。现场利用 YSI 多参数水质监测仪记录水温、pH 和溶解氧 (DO), 利用塞氏罗盘测试水体透明度 (SD)。由贵阳市两湖一库环境保护监测站在实验室按国标方法完成水样 TP、TN、NH₃-N、COD_{Mn} 及 Chl. a 浓度的测定, 上述指标的测定频率为每月一次。其中 2009 年分枯水期、平水期、丰水期进行了 3 次采样, 且未对 Chl. a 和 SD 进行测定。此外, 入库支流水质月度监测时间为 2013~2018 年。2010~2018 年逐日气象数据由贵阳市气象局提供, 包括地表温度、降雨、气压、相对湿度、日照时数、气温和风速。逐日水位信息由贵阳市两湖一库环境保护监测站提供。

1.3 富营养化指数评价方法

该研究采用综合营养状态指数 (Trophic level index, TLI) [16] 对阿哈水库进行评价, 该方法评价结果可靠, 应用广泛。TLI 的计算式为:

$$TLI(\Sigma) = \sum_{j=1}^m W_j \times TLI(j) \quad (1)$$

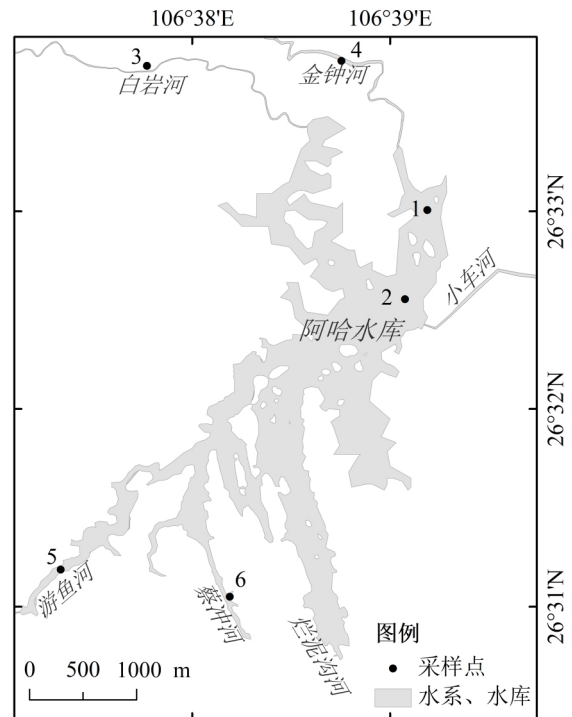


图 1 阿哈水库采样点分布图

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Aha Reservoir

$$W_j = \frac{r_{ij}^2}{\sum_{j=1}^m r_{ij}^2} \quad (2)$$

$$TLI(TP) = 10 \times [9.436 + 1.624 \ln(TP)] \quad (3)$$

$$TLI(TN) = 10 \times [5.453 + 1.694 \ln(TN)] \quad (4)$$

$$TLI(COD_{Mn}) = 10 \times [0.109 + 2.661 \ln(COD_{Mn})] \quad (5)$$

$$TLI(SD) = 10 \times [5.118 - 1.94 \ln(SD)] \quad (6)$$

$$TLI(Chl. a) = 10 \times [2.5 + 1.086 \ln(Chl. a)] \quad (7)$$

式中, $TLI(\Sigma)$ 为综合营养状态指数, W_j 为第 j 种参数的营养状态指数的相关权重, $TLI(j)$ 为第 j 种参数的营养状态指数, r_{ij} 为第 j 中参数与 Chl. a 的相关关系 (表 1), m 为参评参数个数; 式 (3)~(7) 为各项目营养状态指数的计算公式, 其中 SD 的单位 m, Chl. a 的单位是 mg/m³, 其余单位均为 mg/L。为了说明湖泊富营养状态情况, 采用 0~100 的一系列连续数字对湖泊营养状态进行分级 (表 2)。

1.4 数据处理与方法

水质和水文气象数据均采用 Excel 计算逐月均值, 数据图像绘制采用 OriginPro 2017 完成, 相关性分析和主成分分析都采用 SPSS 完成。

表 1 湖泊 Chl. a 与其他参数之间的相关关系^[17]

Table 1 The correlation between Chl. a and other parameters^[17]

参数	Chl. a	TP	TN	COD _{Mn}	SD
r_{ij}	1	0.84	0.82	0.83	-0.83
r_{ij}^2	1	0.705 6	0.627 4	0.688 9	0.688 9

表 2 湖泊营养状态分级^[18]

Table 2 Classification for reservoir nutrition^[18]

项目	评价等级	项目	评价等级
$0 < TLI(\Sigma) \leq 30$	贫营养	$60 < TLI(\Sigma) \leq 70$	中度富营养
$30 < TLI(\Sigma) \leq 50$	中营养	$70 < TLI(\Sigma) \leq 100$	重度富营养
$50 < TLI(\Sigma) \leq 60$	轻度富营养		

2 结果与讨论

2.1 阿哈水库库区水质变化特征

2009 年,库中、库东 TP 浓度无明显差异 (0.03~0.10 mg/L, 均值 0.06 mg/L), 平水期>丰水期>枯水期 (图 2a)。平水期由于表层水和底层水发生交换, 水体驱动力较强, P 释放速率>沉积速率, P 浓度出现峰值^[19]。TN 浓度整体差异较小 (1.50~2.00 mg/L, 均值 1.71 mg/L), 枯水期>平水期>丰水期 (图 2b)。丰水期降雨丰富, 对营养盐具有一定的稀释作用, 温度较高利于藻类的大量繁殖, 消耗水中的 N、P 营养盐。NH₃-N 浓度差异较小 (0.10~0.14 mg/L, 均值 0.12 mg/L), 丰水期>枯水期>平水期 (图 2c)。COD_{Mn} 整体差异显著 (2.50~3.30 mg/L,

均值 2.80 mg/L), 库中 COD_{Mn} 为平水期>丰水期>枯水期, 库东相反 (图 2d)。结果表明, N、P 等营养盐在不同季节的浓度变化存在差异, 因此在建立污染防治措施时需综合考虑营养盐的季节性差异^[20]。

2010~2018 年,阿哈水库库中、库东 TP、TN、NH₃-N、COD_{Mn}、Chl. a 浓度变化趋势大致相似, 库东整体高于库中 (图 2)。库中 TP 浓度 (0.01~0.23 mg/L, 均值 0.04 mg/L) 和库东 TP 浓度 (0.02~0.18 mg/L, 均值 0.05 mg/L) 均在 2010 年 1 月达到峰值后呈波动下降。库中 TN 浓度 (0.83~4.94 mg/L, 均值 2.11 mg/L) 和库东 TN 浓度 (1.17~5.36 mg/L, 均值 2.35 mg/L) 均在 2010 年 6 月达到峰值后呈波动下降。从库中 NH₃-N 浓度 (0.01~0.66 mg/L, 均值 0.13 mg/L) 和库东 NH₃-N 浓度 (0.01~0.97 mg/L, 均值 0.19 mg/L) 的时间动态变化可以看出, NH₃-N 浓度在 9 年间大幅降低, 分别减少 97.9% 和 98.8%。库中 COD_{Mn} 浓度波动强烈 (1.20~6.20 mg/L, 均值 2.70 mg/L), 库东 COD_{Mn} 浓度波动较平缓 (1.30~6.90 mg/L, 均值 2.80 mg/L)。库东水体 N、P 浓度高于库中, 主要受金钟河来水的影响^[21]。库区 95% 以上的 N、P 污染物均储存在底泥中, 疏浚后底泥主要污染物含量平均降低 56.7%, 孔隙水中主要污染物浓度平均降低 71.2%^[22], 表明在阿哈水库开展底泥内源污染治理的必要性。

SD 是评价水库水质最直观的指标, 藻类生物量或 Chl. a 浓度是影响水体 SD 的主要因素^[23]。库中

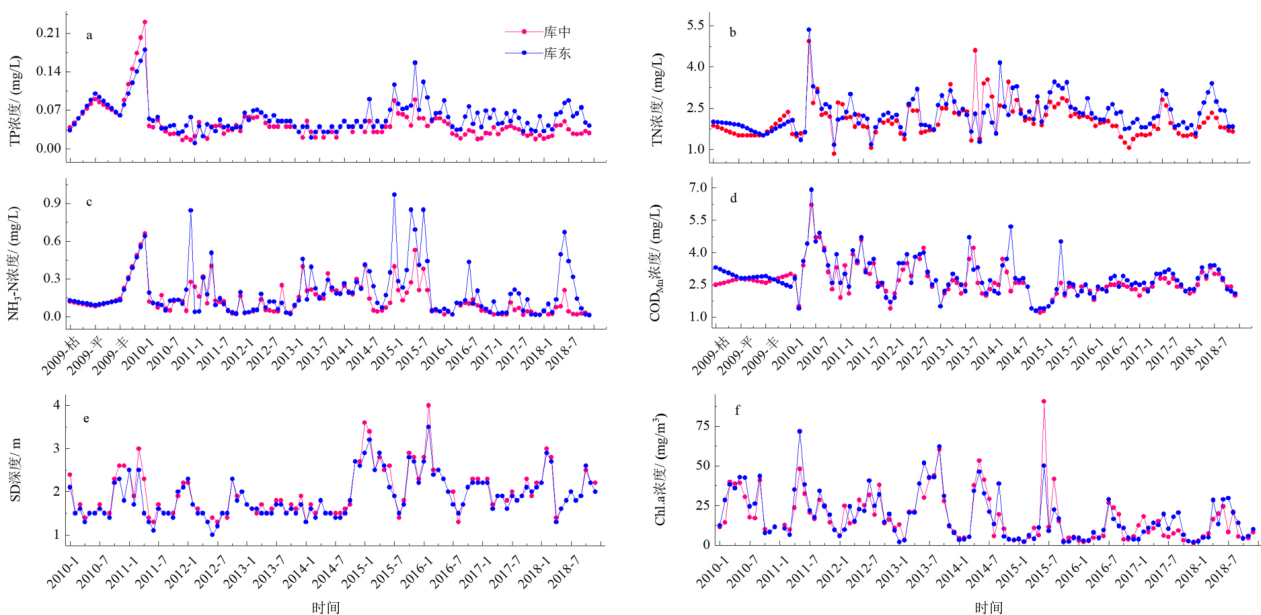


图 2 2009~2018 年阿哈水库主要水质指标的时空变化

Fig. 2 Variations of the water quality indexes of Aha reservoir from 2009 to 2018

SD (0.80~3.00 m 均值 1.50 m) 和库东 SD (0.80~3.50 m 均值 1.40 m) 整体差异较小,变化趋势相似(图 2e)。整体上,水库 SD 在前期呈现小幅波动趋势,至 2014 年 11 月后明显增加,达到峰值,之后呈波动式递减。Chl. a 浓度通常用来表征水中的藻类生物量,评价水体营养状态和管理水生态系统^[24]。库中 Chl. a 浓度 (1.30~90.50 mg/m³, 均值 17.10 mg/m³) 和库东 Chl. a 浓度 (2.00~71.70 mg/m³, 均值 18.10 mg/m³) 均呈波动式下降,但个别年份(如 2010 年)夏季 Chl. a 浓度仍较高(图 2f)。

将库区逐月水质监测指标进行总体评价,结果见表 3。2009~2018 年,阿哈水库水质在地表水环境质量标准 II~IV 类之间,以 III 类为主。在监测期的 111 个指标中,以地表 III 类水作为评价标准,库中水质超标率为 19.82%,库东水质超标率为 45.05%,库中水质明显好于库东。

表 3 2009~2018 年阿哈水库各类水质所占百分比

Table 3 Proportion of different water quality classes in Aha Reservoir from 2009 to 2018

采样点	II	III	IV	V	≥
库中	16.22	63.96	18.92	0.00	0.90
库东	2.70	52.25	40.54	4.5	0.00

注“≥”表示低于《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中的 V 类,即劣 V 类。

2.2 阿哈水库水体营养状态评价

2010~2018 年,阿哈水库长期处于中营养状态,少数时期处于轻度富营养状态。TLI 整体呈波动式下降,水库水质逐步改善(图 3)。库中 TLI 均值为 45.98 (35.98~56.45),库东 TLI 均值为 48.04 (38.22~58.75),两者变化趋势相似,且库东富营养化程度略高于库中。年内 TLI 呈“夏季高、冬季低”的变化规律,主要由于夏季日照时间长、水温高,藻类生物量高所致。就年均值而言,9 年内库中 TLI 均小于 50,处于中营养状态;库东仅在 2010 年 (TLI=51.29)、2012 年 (TLI=50.48) 呈轻度富营养状态。各水质参数对阿哈水库富营养状态影响为:Chl. a>TN>SD>TP>COD_{Mn},可见藻类增殖导致生物量增加是水质恶化的关键,需加强控制外源营养盐输入,降低营养盐浓度以限制藻类的生长。

2.3 阿哈水库入库支流水质变化特征

2013~2018 年,金钟河水体 TP、TN、NH₃-N 浓度均值分别为 0.36 mg/L (0.12~0.72 mg/L)、6.89 mg/L (2.98~15.00 mg/L) 和 2.68 mg/L (0.10~8.26 mg/L),呈逐年下降趋势。游鱼河水质污染较轻,水体 TP、TN、NH₃-N 浓度均值分别为 0.02 mg/L (0.01~0.11 mg/L)、2.02 mg/L (0.62~4.66 mg/L) 和 0.14 mg/L (0.02~1.07 mg/L),污染逐渐减

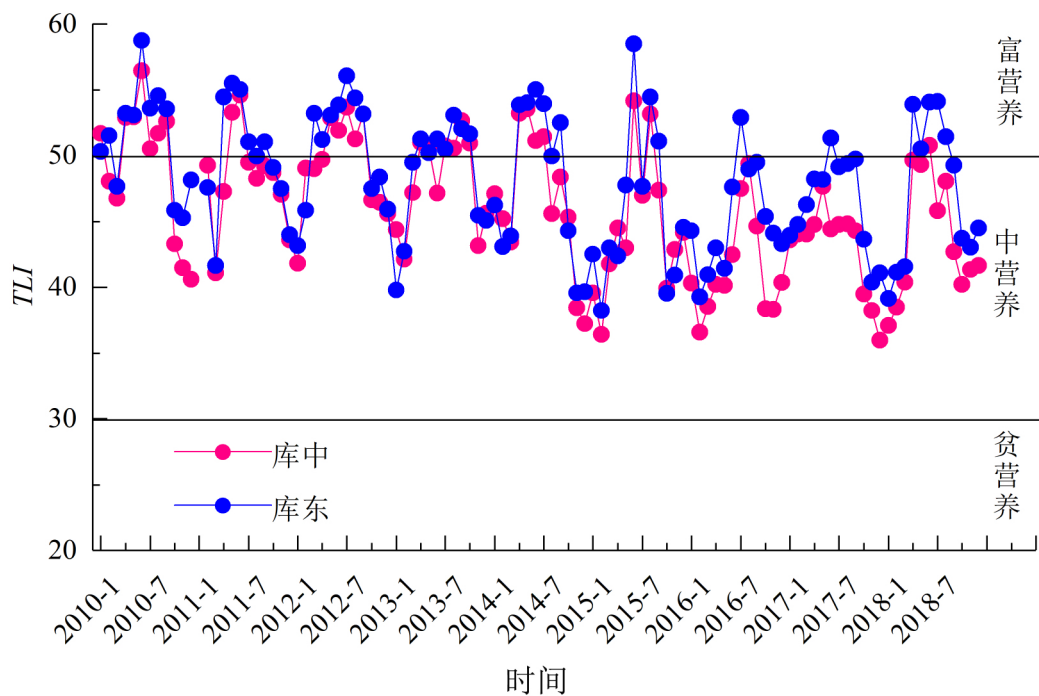


图 3 2010~2018 年阿哈水库水体营养状态

Fig. 3 Water trophic state of Aha Reservoir from 2010 to 2018

轻。金钟河和游鱼河水体 COD_{Mn} 均值分别为 3.60 mg/L (2.10~6.20 mg/L) 和 1.40 mg/L (0.50~4.20 mg/L), 多年来变化不大。白岩河水质整体较好, 且基本保持稳定(图4)。蔡冲河水体 TP、TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 COD_{Mn} 均值分别为 0.04 mg/L (0.01~0.19 mg/L)、4.96 mg/L (1.59~10.40 mg/L)、0.18 mg/L (0.02~1.04 mg/L) 和 1.60 mg/L (0.50~3.80 mg/L) 均呈波动上升, 表明蔡冲河水质仍在逐渐恶化。阿哈水库入库支流水质高变幅的季节波动特征, 反映出外源输入对水库水质存在一定影响^[25]。

以地表 III 类水为标准, 各支流逐月水质达标率分别为: 游鱼河 (95.83%) > 白岩河 (94.44%) > 蔡冲河 (88.89%) > 金钟河 (2.78%)。金钟河水质较差, 主要表现为 TP 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 超标。阿哈水库 4 条入库支流均流经居民区, 居民生产、生活造成的面源污染可能是水库中 N、P 营养盐的重要来源。流域范围内居民含 P 洗涤剂的使用率为 16.3%, TP 排量为 2.27 吨, TP 入湖量为 1.6 吨^[26], 是水库 P 的一大来源。金钟河是阿哈水库的第二大支流, 受城市污水的影响, 水质较差^[21], 应对其重点治理。

2.4 阿哈水库水质与水文、气象因素的相关性

将阿哈水库 2010~2018 年逐月 Chl. a 和主要营

养盐及水文、气象指标进行相关性分析。阿哈水库 Chl. a 与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 COD_{Mn} 、DO、pH、水温、降雨量、气温、日照时数均呈显著正相关, 与 SD、水位、气压呈显著负相关, 与 TP、TN、TP/TN、风速、相对湿度无显著相关关系(表4)。

阿哈水库水体 Chl. a 与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 COD_{Mn} 呈显著正相关, 说明 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 COD_{Mn} 是影响藻类生长的关键因子, 控制 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 COD_{Mn} 以减少阿哈水库藻华的爆发尤为重要。然而, 水体 Chl. a 与 TP 无显著相关性, 并不能表明水体 P 浓度与藻类生长无关^[27]。Chl. a 与 DO 呈显著正相关, 说明 DO 也是影响阿哈水库藻类水华重要因子。

大量研究^[28-29]表明, N、P 等营养盐是影响藻类生长的关键因子。2009~2018 年近 10 年来, 阿哈水库水体 TN、TP 浓度一直处于较高水平, 且与 Chl. a 并无显著相关关系, 表明 N、P 等营养盐很可能不再是影响藻类生物量及时空分布的主要因子。相关性分析表明, 阿哈水库 Chl. a 与降雨量、气温、日照时数等气象条件呈显著正相关, 与水位等水文条件呈显著负相关。气温直接影响藻类的生理过程, 也通过改变水温的波动、水体热力分层等间接对藻类生长产生影响^[30], 日照时数往往与气温关系密切,

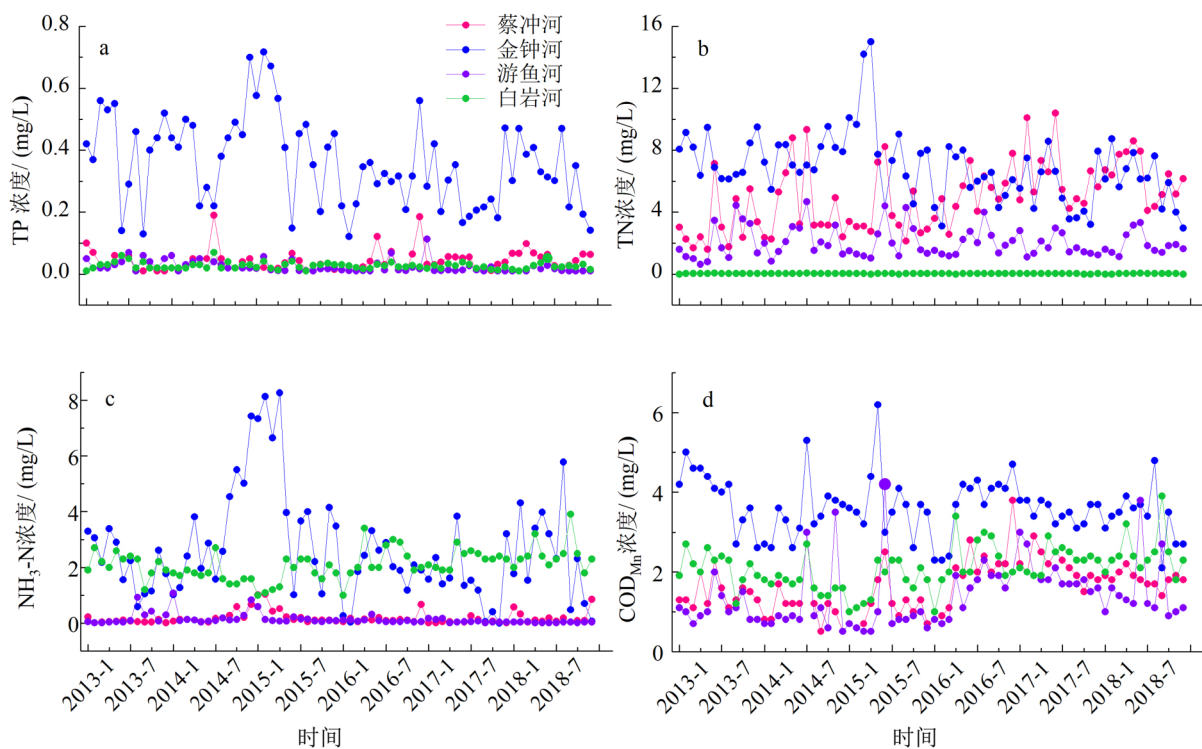


图4 2013~2018年阿哈水库入库支流水质的时空变化

Fig. 4 Variations of the water quality indexes in tributary of Aha Reservoir from 2013 to 2018

日照时数长则气温高。水温和日照时数通过调节碳水化合物的产生速率,细胞的光合作用来影响藻类的增殖^[31]。此外,降雨量增加造成营养盐大量输入可能在藻类生长中起重要作用^[32]。

对阿哈水库的水质和水文气象指标进行主成分分析,结果显示:KMO = 0.63, Bartlett球形检验

$P < 0.001$, 可进行主成分分析。计算相关矩阵的特征值及累计贡献率,依据特征值 > 1 、累计贡献率 $> 70\%$ 的前提条件,阿哈水库水环境因子提取 5 个主成分,累计贡献率 73.64% (表 5)。气温、气压、COD_{Mn}、水温、日照时数、Chl. a、SD、降雨量以上 8 个变量在第 1 主成分上具有较高载荷; DO、水位、TN

表 4 2010~2018 年阿哈水库水体 Chl. a 和营养盐及水文气象指标的相关矩阵

Table 4 Correlation matrix among Chl. a and nutrient and hydrometeorology in Aha Reservoir from 2010 to 2018

参数	TP	TN	TN/TP	NH ₃ -N	COD _{Mn}	SD	DO	pH	水温	水位	降水量	气温	日照时数	气压	风速	相对湿度
TN	0.14															
TN/TP	-0.57**	0.56**														
NH ₃ -N	0.53**	0.29**	-0.10													
COD _{Mn}	-0.13	0.28**	0.36**	0.01												
SD	0.20*	-0.10	-0.20*	0.03	-0.53**											
DO	0.01	-0.02	0.03	-0.15	0.35**	-0.21**										
pH	-0.11	0.07	0.26**	0.06	0.33**	-0.28**	0.60**									
水温	-0.14	0.23*	0.21*	-0.04	0.50**	-0.41**	-0.06	0.01								
水位	-0.15	0.14	0.18	0.08	-0.32**	0.24*	-0.55**	-0.22*	-0.06							
降水量	0.12	0.26**	0.06	0.23*	0.32**	-0.28**	0.05	-0.01	0.48**	-0.09						
气温	-0.08	0.31**	0.24*	0.15	0.53**	-0.44**	0.06	0.17	0.84**	-0.10	0.57**					
日照时数	-0.10	0.21*	0.21*	0.08	0.35**	-0.33**	0.18	0.34**	0.57**	0.02	0.20*	0.73**				
气压	0.04	-0.17	-0.07	-0.07	-0.40**	0.41**	-0.22*	-0.17	-0.54**	0.23*	-0.55**	0.73**	-0.51**			
风速	-0.13	-0.28**	-0.13	-0.23*	-0.05	0.04	0.07	0.01	0.15	-0.10	0.01	0.13	0.14	-0.50**		
相对湿度	0.06	0.02	0.02	-0.18	0.20*	-0.05	0.07	-0.27**	0.01	-0.17	0.16	-0.17	-0.51**	0.02	-0.07	
Chl. a	0.02	0.18	0.14	0.31**	0.60**	-0.55**	0.23*	0.32**	0.34**	-0.28**	0.38**	0.53**	0.33**	-0.38**	-0.15	-0.08

注: ** 在 0.01 级别 (双尾) 相关性显著. * 在 0.05 级别 (双尾) 相关性显著。

表 5 2010~2018 年阿哈水库水质和水文气象因子的主成分分析

Table 5 Principal component analysis of water quality and hydrometeorological factors in Aha Reservoir from 2010 to 2018

指标	成分					方差
	1	2	3	4	5	
气温	0.89	0.25	-0.07	-0.23	0.02	0.85
气压	-0.76	0.03	-0.04	0.45	0.07	0.86
COD _{Mn}	0.75	-0.18	0.04	0.29	-0.23	0.90
水温	0.75	0.23	-0.19	-0.28	-0.21	0.76
日照时数	0.70	0.12	-0.20	-0.19	0.49	0.74
Chl. a	0.70	-0.01	0.30	0.23	0.04	0.69
SD	-0.66	0.20	0.00	-0.12	0.14	0.85
降水量	0.58	0.30	0.25	-0.15	-0.33	0.78
DO	0.33	-0.71	0.27	0.22	0.16	0.78
水位	-0.27	0.61	-0.48	0.03	0.14	0.69
TN	0.37	0.50	-0.03	0.48	-0.05	0.64
TP	-0.13	0.30	0.83	-0.10	0.10	0.91
TN/TP	0.36	0.09	-0.61	0.57	-0.07	0.82
NH ₃ -N	0.13	0.56	0.56	0.15	0.30	0.85
风速	0.11	-0.31	-0.20	-0.72	0.03	0.78
相对湿度	-0.09	-0.15	0.17	0.15	-0.87	0.86
pH	0.40	-0.45	0.05	0.35	0.52	0.77
特征值	4.90	2.13	1.99	1.85	1.65	
贡献率/%	28.81	12.55	11.69	10.86	9.73	
累计贡献率/%	28.81	41.35	53.05	63.91	73.64	

以上3个变量在第2主成分上具有较高载荷; TP、TN/TP、NH₃-N以上3个变量在第3主成分上具有较高载荷; 风速在第4主成分上具有较高载荷; 相对湿度、pH在第5主成分上具有较高载荷, 以上载荷值均在0.50以上, 能较好地反映指标信息。因此, 所提取的5个主成分基本可以反映绝大部分指标的信息, 代替17个变量进行分析。Chl. a在第1主成分上与其原始变量的相关性最强, 故只对第1主成分进行分析。第1主成分(28.81%)中, 气温、气压、水温、日照时数、COD_{Mn}、SD、降雨量和Chl. a间的相关性较强, 且主要以水文气象因子为主。结果表明, 水文、气象因子与营养盐共同作用于藻类生长, 而又主要受控于水文气象变化。

3 结论

1) 近10年来, 阿哈水库水质处于地表II~IV类之间, 以III类为主, 库中水质优于库东。库区水体处于中营养至轻度富营养状态, TLI呈波动式下降, 水质有所改善。

2) 阿哈水库入库支流水质由优到劣为: 游鱼河>白岩河>蔡冲河>金钟河, 金钟河主要表现为NH₃-N和TP超标。

3) 相关性分析表明阿哈水库水体Chl. a和营养盐、水位、气温等因子呈显著相关, 主成分分析表明水文、气象因子与营养盐共同作用于藻类生长, 而又主要受控于水文气象变化。

参 考 文 献

- [1] Wang L T, Wang S X, Zhou Y, et al. Landscape pattern variation, protection measures, and land use/land cover changes in drinking water source protection areas: A case study in Danjiangkou Reservoir, China[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 21: 1-14.
- [2] Dang C Y, Xia Y, Zheng M S, et al. Metagenomic insights into the profile of antibiotic resistomes in a large drinking water reservoir[J]. *Environment International*, 2020, 136: 105449.
- [3] 张丽红. 水库水源保护与防治对策研究[J]. *黑龙江科学*, 2020, 11(2): 156-157.
- [4] Kimmel B L, Groeger A W. Factors controlling primary production in lakes and reservoirs: A perspective[J]. *Lake and Reservoir Management*, 1984, 1(1): 277-281.
- [5] 杨琴, 汤秋鸿, 张永勇. 淮河流域(河南段)水质时空变化特征及其与土地利用类型的关系[J]. *环境科学研究*, 2019, 32(9): 1519-1530.
- [6] Yang K, Yu Z Y, Luo Y, et al. Spatial and temporal variations in the relationship between lake water surface temperatures and water quality - A case study of Dianchi Lake[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 624: 859-871.
- [7] Bu H M, Tan X, Li S Y, et al. Temporal and spatial variations of water quality in the Jinshui River of the South Qinling Mts., China. [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2010, 73(5): 907-913.
- [8] Varol M, Gokot B, Bekleyen A, et al. Spatial and temporal variations in surface water quality of the dam reservoirs in the Tigris River basin, Turkey[J]. *Catena*, 2012, 92: 11-21.
- [9] Xie P X, Zhuo L, Yang X, et al. Spatial-temporal variations in blue and green water resources, water footprints and water scarcities in a large river basin: A case for the Yellow River basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2020: 590.
- [10] 陈敬安, 王敬富, 于佳, 等. 西南地区水库生态环境特征与研究展望[J]. *地球与环境*, 2017, 45(2): 115-125.
- [11] Han M S, Li Q H, Chen H L, et al. Spatial and temporal variations in cyanobacteria and microcystins in Aha Reservoir, Southwest China[J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2018, 36(4): 1126-1131.
- [12] 向文英, 龙天渝, 蔡增基, 等. 阿哈水库水环境质量预测分析[J]. *重庆大学学报(自然科学版)*, 2003, 26(11): 121-125.
- [13] 邓立斌, 颜伟, 汪贵庆. 贵州贵阳阿哈湖国家湿地公园湿地资源现状及保护研究[J]. *农学学报*, 2014, 4(7): 37-40.
- [14] 孟凡非, 杨成, 彭艳, 等. 阿哈水库枯水期入库河流可溶性氮、磷含量分布特征[J]. *地球与环境*, 2020, 48(5): 612-621.
- [15] 颜强, 张勤, 龙腾锐. 贵阳市阿哈水库游鱼河废水处理厂方案的优选[J]. *重庆环境科学*, 2001, 23(4): 34-38.
- [16] 王明翠, 刘雪芹, 张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准[J]. *中国环境监测*, 2002, 18(5): 47-49.
- [17] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [18] 李林衡, 郑飞, 何春花, 等. 综合营养状态指数法评价鄞州区水库富营养化程度[J]. *中国给水排水*, 2016, 32(13): 75-78.
- [19] 周晨, 喻理飞, 蔡国俊, 等. 草海高原湿地湖泊水质时空变化及水质分区研究[J]. *水生态学杂志*, 2016, 37(1): 24-30.
- [20] Ouyang Y, Nkedi-Kizza P, Wu Q T, et al. Assessment of seasonal variations in surface water quality[J]. *Water Research*, 2006, 40(20): 3800-3810.
- [21] 李玉麟, 夏品华. 阿哈水库理化环境因子的时空格局研究[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(11): 6634-6636.
- [22] 王敬富, 陈敬安, 孙清清, 等. 底泥疏浚对阿哈水库内源污染的影响[J]. *环境工程*, 2018, 36(3): 69-73+147.
- [23] Zhu G W, Cui Y, Han X X, et al. Response of phytoplankton to nutrient reduction in Shahe Reservoir, Taihu catchment, China[J]. *Journal of Freshwater Ecology*, 2015, 30(1): 41-58.

- [24] Carneiro F M ,Nabout J C ,Vieira L C G ,et al. Determinants of chlorophyll-a concentration in tropical reservoirs [J]. *Hydrobiologia* ,2014 ,740 (1) : 89-99.
- [25] 韩晓霞,朱广伟,吴志旭,等. 新安江水库(千岛湖)水质时空变化特征及保护策略[J]. *湖泊科学*,2013,25(6): 836-845.
- [26] 王长娥. 贵州省红枫湖、百花湖和阿哈水库污染源的现状调查、分析与评价[D]. 贵阳: 贵州师范大学,2009.
- [27] 朱广伟,秦伯强,张运林,等. 2005-2017年北部太湖水体叶绿素 a 和营养盐变化及影响因素[J]. *湖泊科学*,2018,30(2): 279-295.
- [28] Ma J R ,Qin B Q ,Wu P ,et al. Controlling cyanobacterial blooms by managing nutrient ratio and limitation in a large hypereutrophic lake: Lake Taihu ,China [J]. *Journal of Environmental Sciences* ,2015 ,27(1) : 80-86.
- [29] Paerl H W ,Xu H ,Mccarthy M J ,et al. Controlling harmful cyanobacterial blooms in a hyper-eutrophic lake (Lake Taihu ,China) : The need for a dual nutrient (N & P) management strategy [J]. *Water Research* ,2011 ,45(5) : 1973-1983.
- [30] Winder M ,Sommer U. Phytoplankton response to a changing climate [J]. *Hydrobiologia* ,2012 ,698(1) : 5-16.
- [31] Shi K ,Zhang Y L ,Zhou Y Q ,et al. Long-term MODIS observations of cyanobacterial dynamics in Lake Taihu: Responses to nutrient enrichment and meteorological factors [J]. *Scientific Reports* ,2017 ,7(1) : 161-177.
- [32] Toride K ,Cawthorne D L ,Ishida K ,et al. Long-term trend analysis on total and extreme precipitation over Shasta Dam watershed [J]. *Science of the Total Environment* ,2018 ,626: 244-254.

Spatial-temporal Variation of Water Quality in Aha Reservoir of Guiyang City in Recent Ten Years (2009-2018)

ZENG Huaxian^{1 2} , LI Yulin³ , WANG Jingfu¹ , CHEN Jingan¹ ,
YANG Yongqiong^{1 4} , WEI Xingyun^{1 4}

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry , Institute of Geochemistry , Chinese Academy of Sciences , Guiyang 550081 , China; 2. University of Chinese Academy of Sciences , Beijing 100049 , China; 3. Environmental Protection Monitoring Station of Two Lakes and One Reservoir in Guiyang , Guiyang 551400 , China; 4. Guizhou Normal University , Guiyang 550025 , China)

Abstract: In order to learn the dynamic changes of the water quality in Aha Reservoir , the water source of Guiyang City , the water quality monitoring data of the reservoir and its tributaries , hydrological and meteorological data , was analyzed. The results showed that the nutrients , SD and Chl. a in reservoir regions and its tributaries presented seasonal variations , due to the cyclical effect of hydrometeorology and phytoplankton growth. The water quality of the reservoir region mainly in Class III. The water quality in the central area is superior to that in the east area , as the over standard rate of water quality was 19. 82% in the central area and 45. 05% in the east area. The trophic level index(*TLI*) analysis indicated that the reservoir water is in the mesotrophic state to mild eutrophic state. *TLI* indexes showed an overall trend of fluctuating decline over the years , suggesting that the water quality has been improved. The water quality of the tributaries is in decreasing order of Youyu River > Baiyan River > Caichong River>Jinzhong River. TP and NH₃-N were proved as the main indexes exceeding the standard. Pearson correlation analysis showed that Chl. a presented a significant positive correlation to NH₃-N , COD_{Mn} , temperature , precipitation , and sunshine duration in this reservoir; and a significant negative correlation was shown between Chl. a and SD , water level , and atmospheric pressure. Principal component analysis showed that algal growth was mainly controlled by hydrometeorological factors. At present , the crucial measurement to improve water quality in the reservoir shall be a more powerful rectification against external pollution such as Jinzhong River. In the future , the research on the processes and mechanisms of algal blooms affected by hydrological and meteorological factors should be strengthened to enhance the ability to deal with algal blooms.

Key words: Aha reservoir; water quality; trophic level index (*TLI*) ; nutrient; hydrometeorological factor