梁兰唯,孙雯雯,王倩,等. 云南昭通渔洞水库枯水期水质及其变化特征[J]. 环境科学与技术,2024,47(S1):198-206. Liang Lanwei, Sun Wenwen, Wang Qian, et al. Characteristics and variation of water quality during dry season in Yudong Reservoir of Zhaotong district in Yunnan province[J]. Environmental Science & Technology,2024,47(S1):198-206.

云南昭通渔洞水库枯水期水质及其变化特征

梁兰唯[1,3], 孙雯雯[2], 王倩[2], 熊永英[2], 黄梅[2],
付宋捷[1,3], 陈雪梅[3,4], 刘潇涵[3], 焦阳[3],
顾森[3], 颜诚[1], 李清曼[3*]

(1.中国地质大学(武汉)环境学院,湖北 武汉 430074;
2.云南昭通渔洞水库管理局,云南 昭通 657000;
3.中国科学院水生生物研究所,湖北 武汉 430072;
4.中国科学院大学,北京 100049)

摘 要:云南昭通渔洞水库集城市供水、农业灌溉、防洪、发电、渔业等功能,了解其枯水期水质及变化对指导水力调度,保障水库水质和水量稳定具有重要的科学意义。该文通过在库区不同水域布设30个监测点,在1月和5月对水库表层、中层和底层水样进行采集,分析了水质主要理化参数和营养物浓度,并利用综合指数法对水质进行了评价。结果表明:从1月到5月,水库水温、电导率和pH显著升高(P<0.05),但表层水透明度显著地下降(P<0.05)。平均COD从(8.21±3.10) mg/L降至(7.68±2.26) mg/L。水域和水层不同,COD各异,但总体上差异不明显(P>0.05)。1月份水库平均TN为(2.65±0.35) mg/L,其中NO_3^--N占约90%,NH_3-N仅1.5%,平均值则主库区显著低于库湾(P<0.05);而到了5月份,平均TN为(0.96±0.12) mg/L,NO_3^--N占约74%,NH_3-N仅6.7%,且底层显著高于表层(P<0.05)。水库TDP和SRP在1月份分别为(4.92±1.36) μg/L和(2.25±1.89) μg/L,且水域不同,它们的含量各异;到了5月份,则分别上升至(11.6±11.0) μg/L和(6.72±9.38) μg/L。综合指数评价结果说明,渔洞水库在1月为Ⅲ类水质,但到了5月上升至Ⅱ类,表明渔洞水库在枯水期具有较强的自净能力。枯水期渔洞水库的自净能力可能与硅藻生长有关。水柱中溶解硅较高,水温升高利于硅藻生长,从而消耗了水柱中的NO_3^--N和溶解硅,水质得到了提升。

关键词:渔洞水库; 水质; 自净能力; 综合评价指数; 溶解硅
中图分类号:X524 **文献标志码**:A **doi**:10.19672/j.cnki.1003-6504.0838.23.338 **文章编号**:1003-6504(2024)S1-0198-09

Characteristics and Variation of Water Quality During Dry Season in Yudong Reservoir of Zhaotong District in Yunnan Province

LIANG Lanwei[1,3], SUN Wenwen[2], WANG Qian[2], XIONG Yongying[2], HUANG Mei[2],
FU Songjie[1,3], CHEN Xuemei[3,4], LIU Xiaohan[3], JIAO Yang[3],
GU Sen[3], YAN Cheng[1], LI Qingman[3*]

(1. School of Environment Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;
2. Yudong Reservoir Administration Bureau, Zhaotong 657000, China;
3. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China;
4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Yudong Reservoir of Zhaotong District in Yunnan Province plays an important role of local drinking water supply, irrigation, flood control, electric power generation, and fisheries. It is of great scientific significance to understand the water quality and changes during the dry period to guide hydraulic scheduling and ensure the stability of water quality and quantity in the reservoir. In this paper, by setting 30 monitoring points in different water fields of the reservoir and collecting water samples from the surface, middle and bottom layers of the reservoir during the dry period (January and May), the main physicochemical indicators and nutrient concentrations of water quality were analyzed and the water quality was evaluated by using the integrated index method. The results showed that that water temperature, conductivity and pH were significantly

《环境科学与技术》编辑部:(网址)http://fjks.chinajournal.net.cn(电话)027-87643502(电子信箱)hjkxyjs@vip.126.com
收稿日期:2023-04-27;修回2023-07-05
基金项目:渔洞水库底泥生态环境风险评估项目(E290040101)
作者简介:梁兰唯(1999-),女,硕士,研究方向为水环境化学,(电子信箱)18977601613@163.com;*通讯作者,(电子信箱)qmli@ihb.ac.cn。

increased from January to May (P<0.05), but transparency was significantly decreased (P<0.05). Mean COD in whole reservoir was decreased from (8.21±3.10) mg/L in January to (7.68±2.26) mg/L in May. Water fields and layers differed, COD presented in difference indeed, but not reaching a significant level (P>0.05). Mean TN was (2.65±0.35) mg/L in January, in which NO_3^-−N and NH_3−N accounted for 90% and 1.5%, respectively, and it was significantly lower in main reservoir area than bays (P<0.05). However, TN decreased to (0.96±0.12) mg/L in May, in which NO_3^-−N and NH_3−N accounted for 74% and 6.7%, respectively, and it was significantly higher in bottom water layers than surface water layers (P<0.05). Mean TDP and SRP in January were (4.92±1.36) μg/L and (2.25±1.89) μg/L, respectively, and changed with different water fields. However, TDP and SRP in May increased to (11.6±11.0) μg/L and (6.72±9.38) μg/L, respectively, in which different water fields increased by different extents. The integrated indictor showed that the water quality in whole reservoir was in a range of Standard Ⅲ grade (GB 3838−2002), but it raised to Ⅱ grade in May, suggesting the reservoir had a strong self−purification potential during dry season. The self−purification potential shall be attributed to the growth of diatoms in surface water layers. A high dissolved Si in the water column and the increase in water temperature during dry season can promote the growth of diatoms, which can consume NO_3^-−N and dissolved Si with the reservoir water quality improved.

Key words: Yudong Reservoir; water quality; self−purification capacity; integrated index; dissolved silica

关注水源地的水环境容量，评估其自净能力，是保障饮用水安全的基础，也是制订管理措施的前提[1−3]。水环境容量指受纳水体在一定条件下所能承受最大污染物排放量，即最大污染负荷量[4,5]。水环境容量反映了水体的自净能力[6]。水库蓄水后，入库水质可通过不同的途径得到净化，且与运行年限关系紧密[7−9]。在蓄水初期，由于完整的生态系统尚未形成，水质主要靠固相物的自然沉降、溶氧氧化和光化学降解等[10,11]得以净化。当水库运行一定年限，生态系统形成以后，水质净化除上述途径外，生物过程起着极为重要的作用。因此，水库的自净能力除受自身的水文特征影响外，也与环境因素有关。不同地区水库的自净能力存在较大的差异[12,13]。已有研究结果表明，多数水库的水质在枯水期变差[14,15]，原因是在枯水期入库的水量减小，水动力条件变差，自净能力有所下降[16]。因此，监测水库在枯水期的水质，估算其净化潜力，对指导水力调度，保障水库水质和水量稳定具有重要的科学意义。

渔洞水库位于长江上游金沙江二级支流居乐河上一座重要的国家大Ⅱ型水库，集城市供水、农业灌溉、防洪、发电、渔业等功能，属重要的水源保护地。库区地形陡峭，水系水网密布，共有30余条大小河流汇入。库区森林覆盖率仅33.4%，而耕地面积高达3.24万hm^2。随着库区经济的快速发展和人口的快速增长，周边畜禽养殖、生活用水、化肥施用量等不断增加[17−19]，大量污染物随水流进入水库，对水库水质的安全保障产生了威胁。

本文以渔洞水库在枯水期的水质为研究对象，通过采集不同水域水层的水样，分析了水柱中化学耗氧量、总氮、氨氮、硝氮、溶解性总磷、溶解性活性磷、总硅、溶解硅及相关理化参数，探究了主要水质指标的空间分布，解析了水库水质的净化机制，以期为水库枯水期的水质管理提供理论支撑。

1　材料与方法

1.1　水库及工程基本情况

渔洞水库位于北纬27.395°~27.499°，东经103.475°~103.551°，地处云南省昭通市西北23 km处（图1）。水库于1996年12月下闸蓄水，2000年12月竣工验收。库区水面呈树枝状，长度12.9 km，宽度300~400 m，面积13.6 km^2。最大水深105.3 m，平均水深38.4 m，兴利库容2.73×10^8 m^3，总库容量3.64×10^8 m^3。

枢纽工程由拦河坝、泄洪建筑物、引水建筑物等组成。坝型为细骨料混凝土砌石重力坝，坝顶海拔高程1 988 m，坝高87 m，坝顶长228 m、宽12 m。泄洪建筑物位于5坝段，由溢流堰、底孔及其机电设施组成，溢流堰底板高程1 978 m，设有两扇7 m×7 m弧形闸门，设计最大泄流量642 m^3/s；底孔底板高程1 925 m，设计最大泄流量275 m^3/s[20]。

水库流域面积709 km^2，径流面积大，主要入库河流有拦河、底罗河、瓜寨河、期米黑河、布初河、居乐河和新河。渔洞水库属北亚热带高原季风性气候，流域内全年平均气温为15.5 ℃[21]，年降雨量均值为686.6 mm，多年平均汛期在5月中旬至10上旬的降水量占多年平均年降水量的70%以上[22]。

1.2　监测点设置与采样

全库区设置监测点30个。其中，主库区9个，库首、库中和为库尾各3个，每道入河库湾各设3个，共设监测点21个。具体点位如图1。在水库枯水期分别采样两次，第1次为2022年1月6日，第2次为2022年5月20日。采样时，每个监测点分表、中、下层采样水样3个，表层水样在表层0.5 m处采集，中层水样在

水深度的1/2处采集，底层水样则在泥-水界面上1 m处采集，在水样采集前，先测定采样点的水深。采集水样的体积约2.0 L，每次采集90个水样。

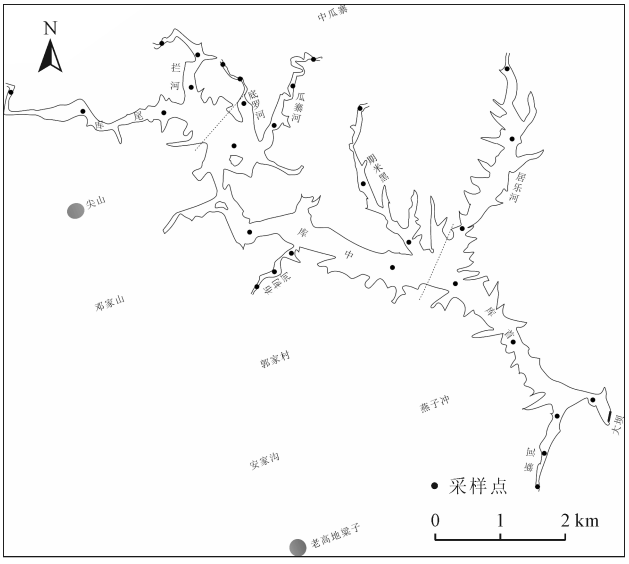


图1 渔洞水库地理位置及水质监测点的设置

1.3 水样处理

水样倒入聚丙烯瓶后，为防止主要水质指标在运输和贮存过程中发生改变，添加几滴硫酸溶液(1∶1浓硫酸)，混匀。水样送至实验室，摇匀后，将其分成2个亚样，一份静置30 min后，进行相关指标的测定。另一份进行过0.45 μm处理后，用于相同指标的测定。

1.4 主要分析指标及方法

分析指标分野外监测指标和室内分析指标。野外监测指标主要包括水深、表层水透明度(transparency)、表层水溶氧(DO，dissolved oxygen)、表层水温度(T，temperature)、电导率(EC，electrical conductivity)、悬浮物(SS，suspended solids)、盐度(SAL，salinity)、pH。利用多参数水质测定仪(Proplus-4，美国Yellow Spring Instrument公司)测定。

室内分析指标主要包括溶解性总磷(TDP，total dissolved phosphorus)、溶解性活性磷(SRP，solubility reactive phosphorus)、总氮(TN，total Nitrogen)、氨氮(NH_3-N，ammonia)、硝氮(NO_3^--N，nitrate)、化学需氧量(COD)、总硅(TSi，total silicon)、溶解硅(DSi，dissolved silica)。

相关指标具体方法参照《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)，TSi和DSi则参照《土壤农业化学分析方法》(鲁如坤，中国农业科技出版社，2000年)。每个指标分析设3个平行重复。

1.5 水质评价

本研究中选用应用广泛的综合指数法作为水库水质评价方法[23]。以《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中Ⅴ类水质的营养指标(COD、TN、NH_3-N和TDP)为评价基准[24]，获得单因子指数，再利用单因子指数构建对应的分级标准综合指数。单因指数是指实测值与基准的比值。不同监测点水质综合指数计算公式如下[25]：

$$P_i=\frac{C_i}{C_{ib}} \tag{1}$$

$$P=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}P_i \tag{2}$$

式中，P_i为第i因子的指数；C_i为第i因子的实测值；C_{ib}为i因子的评价基准值；P为综合评价指数；n为参与评价因子的数量。

1.6 数据统计与分析

数据统计分析通过SPSS 26软件实现。统计分析得到各参数的平均值、最大值和最小值，利用单因素方差分析和独立T检验比较不同指标的差异性，并在P<0.05的置信水平下表示差异性的显著性。图表制作通过Origin 2021软件来完成。

2 结果与分析

2.1 基本理化指标及变化

水库水温在1月份的平均值在10 ℃左右，主库区与库湾相比，水温没有明显的差异(P>0.05)(表1)。到了5月份，主库区水温上升至(15.0±1.78) ℃，库湾则为(15.8±1.91) ℃，两者差异达到显著水平(P<0.05)。由表1也可以看出，在5月份，水库水温出现了分层，其中表层高于底层。

EC平均值在1月份约为79 μS/cm，其中库湾总体上比主库区的高，但未达到显著水平(P>0.05)。到了5月份，水体EC明显地升高，主库区和库湾分别达(88.5±4.37) μS/cm和(98.0±11.5) μS/cm，其中，库湾显著高于主库区(P<0.05)。尽管水体EC在5月份也发生了分层现象，但未达到显著水平(P>0.05)。

SS平均值在1月份为71 mg/L左右。主库区分布相对较为匀一，而库湾则存在差异，变异系数为4.18%。到了5月份，主库区SS变化不大，而库湾则上升至(77.4±7.14) mg/L，且底层要高于表层。

pH在1月份在8.4左右，且整体分布匀一。到了5月份则平均上升至8.8左右。表层水的透明度在1月份约3.0 m左右。主库区与库湾相比，差异不明显(P>0.05)。到了5月份，水库透明度总体下降，平均值为1.8 m。主库区透明度与库湾相比存在差异，但未达到显著水平(P>0.05)。5月份表层水的DO略高于1月份，且总体上是库湾高于主库区。如5月份平均DO值为7.40 mg/L，在1月份则为7.14 mg/L。

2.2 化学耗氧量及变化

1月份水库COD平均值为(8.21±3.10) mg/L，其中

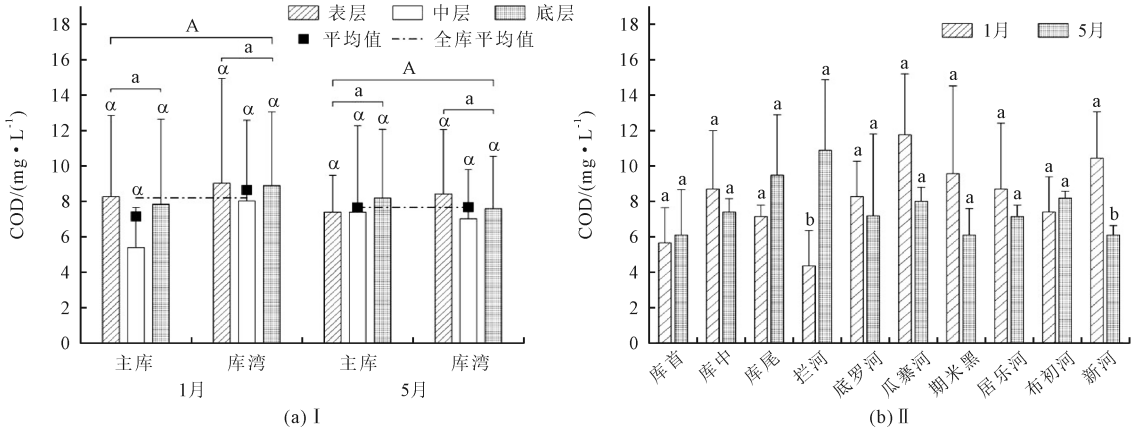
表1　枯水期渔洞水库水质基本理化参数及变化

月份	水域	水层	T/℃	EC/(μS·cm^{-1})	SS/(mg·L^{-1})	pH	透明度/m	DO/(mg·L^{-1})
1月	主库区	表层	10.5±0.13	78.9±0.60	71.0±0.71	8.40±0.12		
		中层	10.5±0.16	78.9±0.76	70.9±0.69	8.36±0.08	–	–
		底层	10.5±0.15	78.4±0.74	70.6±0.65	8.41±0.09		
		平均	10.5±0.15^{cx}	78.7± 0.72^{c}	70.9± 0.67^{b}	8.39±0.10^{b}	2.91±0.18^{a}	7.08±0.33^{b}
	库湾	表层	10.6±0.32	80.1±1.93	71.8±1.93	8.34±0.18		
		中层	10.7±0.27	80.0±2.12	72.1 ±3.41	8.37±0.15	–	–
		底层	10.6±0.25	80.5±4.62	72.6±4.70	8.39±0.10		
		平均	10.6±0.28^{c}	80.2±3.09^{c}	72.1±3.49^{b}	8.37±0.15^{b}	3.18±0.33^{a}	7.20±0.31^{b}
	全库平均值		10.6±0.25	79.8±2.70	71.8±2.99	8.37±0.13	3.10±0.31	7.17±0.31
5月	主库区	表层	16.8±0.43	92.4±2.71	71.4±1.12	8.74±0.10		
		中层	14.5±1.52	87.4±3.54	71.1±1.66	8.90±0.12	–	–
		底层	13.6±1.27	85.7±3.86	71.1±2.45	8.94±0.06		
		平均	15.0±1.78^{b}	88.5±4.37^{b}	71.2±1.76^{b}	8.86±0.13^{a}	1.98±0.54^{b}	7.32±0.25^{ab}
	库湾	表层	16.9±0.32	99.1±8.36	76.3±6.32	8.76±0.18		
		中层	15.9±1.62	98.6±13.1	78.2±7.79	8.83±0.18	–	–
		底层	14.8±2.50	96.3±12.7	77.6±7.47	8.90±0.13		
		平均	15.8±1.91^{a}	98.0±11.5^{a}	77.4±7.14^{a}	8.83±0.17^{a}	1.62±0.60^{b}	7.47±0.33^{a}
	全库平均值		15.6±1.90	95.1±10.7	75.4±6.65	8.84±0.16	1.73±0.59	7.42±0.31

注：小写字母表示平均值的统计分析结果，字母相同表示差异不显著（P>0.05）；字母不同表示差异显著（P<0.05）。

主库区为(7.17±2.36) mg/L，库湾则为(8.65±3.46) mg/L（图2(a)）。水层不同，COD值各异。在主库区，表层水COD为(8.28±4.57) mg/L，中层为(5.40±2.27) mg/L，底层则为(7.84±4.80) mg/L。就库湾而言，表层水COD为(9.03±5.91) mg/L，中层为(8.03±4.55) mg/L，底层则为(8.89±4.17) mg/L。到了5月份，水库COD平均值为(7.68±2.26) mg/L，其中主库区为(7.67±2.63) mg/L，库湾则为(7.68±2.40) mg/L。不同水层的COD则是：主库区表层水为(7.40±2.08) mg/L，中层(7.40±4.88) mg/L，底层(8.19±3.88) mg/L；库湾表层水为(8.43±3.63) mg/L，中层(7.02±2.78) mg/L，底层(7.60±2.96) mg/L。与1月相比，在5月，水温尽管显著上升（表1），但COD总体上略有下降，尚未达到显著水平（P>0.05）。

水库不同水域的COD及变化存在差异（图2(b)）。在1月，主库区的库中COD最高，库首最低，而库尾则界于两者之间。到了5月，库首和库中COD平均值变化不大，但库尾则增加明显。就库湾而言，COD在1月份除了拦河湾相对较低外，其他库湾尽管存在差异，但未达到显著水平（P>0.05）。到了5月，拦河湾COD平均值显著升高（P<0.05，其他库湾（外除布初河）则有不同程度的下降。



注：Ⅰ为主要水域和水层COD；Ⅱ为不同水域COD；Ⅰ中大写、小写字母以及希腊字母分别表示月份、主要水域和水层之间的比较；Ⅱ中小写字母表示月份间的比较；字母不相同为显著（P<0.05）。

图2 枯水期渔洞水库COD及变化

2.3　氮形态组成及变化

在1月水库平均TN为(2.65±0.35) mg/L，但主库区为(2.49±0.09) mg/L，而库湾则为(2.72±0.39) mg/L，显著地高于主库区（P<0.05）（图3(a)）。TN在水层上表现出差异，平均值总体上是表层>中层>底层。到了5月，水库TN显著下降（P<0.05），平均值为

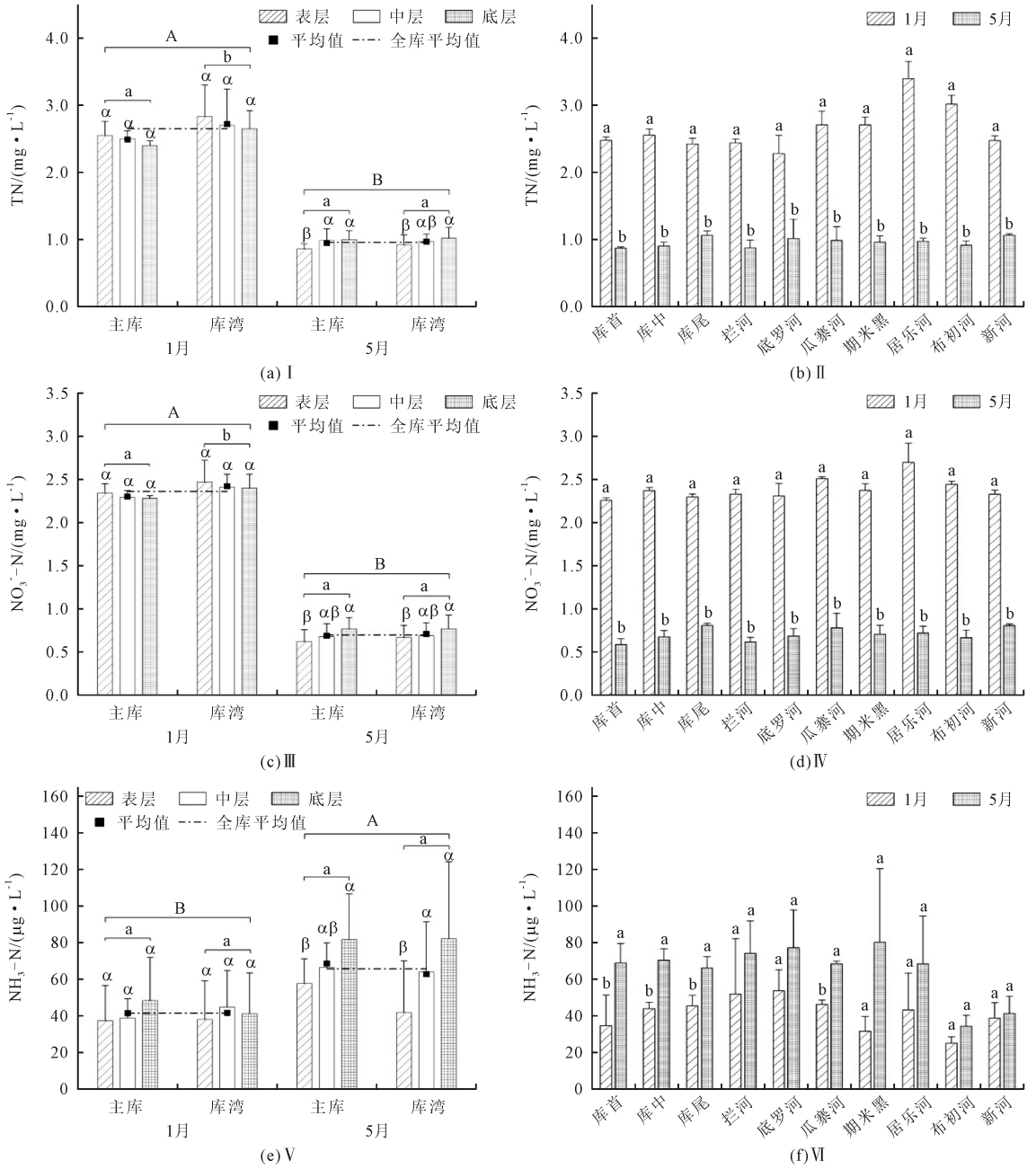
(0.96±0.12) mg/L,且分布匀一。如主库区TN为(0.95±0.10) mg/L,库湾则为(0.97±0.12) mg/L。TN在水层上的差异表现为底层显著高于表层(P<0.05)。

1月份TN在不同水域的分布有所差异,但除了居乐河和布初河相对较高外,所有水域的差异尚未达到显著水平(P>0.05)(图3(b))。到了5月,所有水域的TN整体下降,且各水域间的差异也不明显。

水库NO_3^--N随月份变化明显(图3(c))。在1月,水库NO_3^--N平均为(2.39±0.15) mg/L,其中主库为(2.30±0.06) mg/L,略低于库湾的(2.42±0.16) mg/L,且各水层差别不明显。到了5月,水库NO_3^--N显著下降(P<0.05),平均值仅为(0.71±0.10) mg/L,其中主库区为(0.69±0.11) mg/L,库湾则为(0.71±0.10) mg/L。不同水层表现出了差异,其中表层和底层差异性达到显著水平(P<0.05)。

水库NO_3^--N在水域上的差异与TN相似(图3(d))。1月份全库相对较高,所有水域分布匀一。到了5月份,所有水域下降,且相差不大。

水库NH_3-N分布不匀且变化明显(图3(e))。在1月,水库平均NH_3-N为(41.5±14.4) μg/L,但主库区为(41.4±10.3) μg/L,而库湾为(41.6±16.1) μg/L。水层分布是主库区底层高于中层,库湾则是中层最高。如主



注:Ⅰ、Ⅲ和Ⅴ分别是主要水域和水层TN、NO_3^--N和NH_3-N;Ⅱ、Ⅳ和Ⅵ分别是不同水域TN、NO_3^--N和NH_3-N;Ⅰ、Ⅲ和Ⅴ中大写、小写字母以及希腊字母分别表示月份、主要水域和水层之间的比较;Ⅱ、Ⅳ和Ⅵ中小写字母表示月份间的比较;字母不相同为显著(P<0.05)。

图3 枯水期渔洞水库氮形态及其变化

库区表层和中层水中NH_3-N分别为(37.3±19.2) μg/L和(38.7±10.7) μg/L，但底层为(48.2±23.6) μg/L。到了5月，水库NH_3-N上升至(64.6±20.9) μg/L。其中，主库区NH_3-N为(68.6±7.08) μg/L，高于库湾的(62.8±24.7) μg/L。水库NH_3-N也分层明显。如库湾表层水NH_3-N为(41.8±28.2) μg/L，显著低于中层的(64.0±27.4) μg/L和底层的(82.0±42.0) μg/L。

NH_3-N在水域上的差异表现在1月份底罗河库湾最高，布初河库湾最低，其他水域有差异，但未到显著水平(P>0.05)(图3(f))。5月份，平均值是期米黑库湾最高，布初河库湾最低，其它库湾有差异，但不明显。

比较图3(a)、(c)和(e)发现，水库TN中，NO_3^--N的比例较高。在1月份，NO_3^--N占TN的90.2%，NH_3-N则仅占1.5%。到了5月份，NO_3^--N占TN的比例降至74.0%，而NH_3-N比例则上升至6.7%。

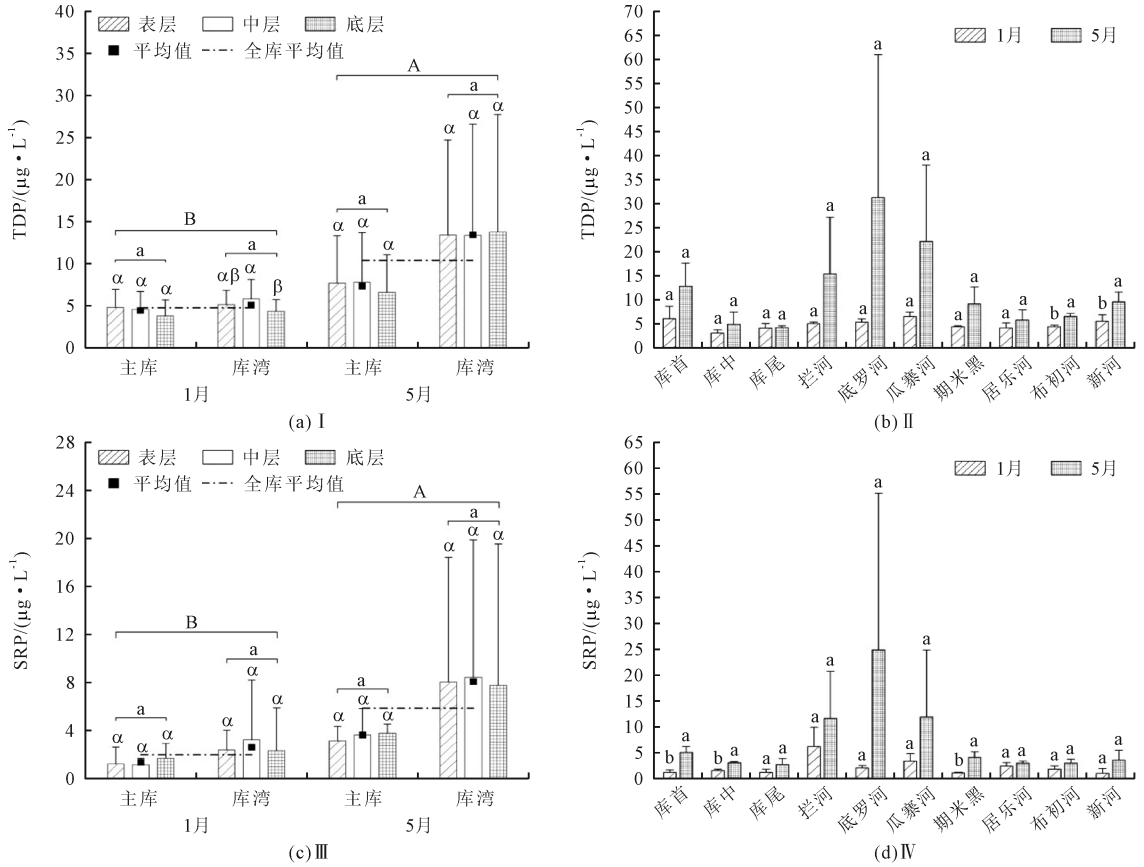
2.4　水库磷形态及变化

水库TDP在1月份总体相差不大。全库平均值为(4.92±1.36) μg/L，其中，主库区为(4.47±1.94) μg/L，库湾为(5.11±1.03) μg/L。TDP的水层分布表现为表层和中层高于底层。到了5月份，水库TDP显著升高(P<0.05)，平均值为(11.6±11.0) μg/L，其中，库湾TDP的平均值明显高于主库区，但尚未达到显著水平(P>0.05)。如主库区TDP为(7.37±4.95) μg/L，但库湾高达(13.5±12.5) μg/L。TDP的水层分布表现为主库区底层低于表层和中层，库湾总体上则分层不明显。

TDP在水库水域分布及变化也表现出一定的差异。1月份，主库区的库首TDP最高，达(6.10±2.62) μg/L，其次是瓜寨河库湾的(6.54±0.96) μg/L，其他高出平均值的库湾为拦河、底罗河和新河。到了5月，几乎所有水域TDP都不同程度地升高。按浓度从高到低的排序为底罗河>瓜寨河>拦河>库首>新河>期米黑>布初河>居乐河>库中>库尾。按增幅从大到小的顺序为底罗河>瓜寨河>拦河>库首>期米黑>新河>布初河>库中>居乐河>库首。

水库SRP总体浓度较低。1月份平均浓度为(2.25±1.89) μg/L，其中主库区为(1.38±0.44) μg/L，库湾为(2.62±2.15) μg/L。5月，SRP显著升高(P<0.05)，达到(6.72±9.38) μg/L。其中库湾高于主库区。如主库区为(3.66±1.38) μg/L，库湾则为(8.10±11.1) μg/L。

SRP在不同水域的分布与TDP极为相似。1月份拦河库湾最高，其他水域较低。5月份，库首、拦河库湾、底罗河库湾、瓜寨河库湾浓度较高，其他水域比较接近。



注：Ⅰ、Ⅲ分别是主要水域和水层TDP和SRP；Ⅱ、Ⅳ分别是不同水域TDP和SRP；Ⅰ、Ⅲ中大写、小写字母以及希腊字母分别表示月份、主要水域和水层之间的比较；Ⅱ、Ⅳ中小写字母表示月份间的比较；字母不相同为显著(P<0.05)。

图4 枯水期渔洞水库磷形态及其变化

3 讨论

影响渔洞水库水质的主要污染源是位于库区内的点源(规模化养殖场、集镇生活污水和垃圾排放)和面源(农村生活污水垃圾、畜禽养殖、农业固废、农田肥料流失、水土流失等)。在雨季来临前(5月前),降雨量少,水库处于枯水期,农业面源对水质的影响小。既便存在其他来源污染物的输入,在库容不变的情况下,输入水体的营养物质总体下降,水质提升。这一推断与本文监测结果相一致。如采用综合评价法,本文用COD、TN、NH_3-N和TDP四个指标对水库水质进行了评价。得到1月份的不同水域的水质综合指数平均值为0.39,而到了5月份,则降至0.19(表2)。水质总体上得到了提升,主要原因是NO_3^--N的明显下降(图3(c)、(d))。然而,1月与5月相比,水体电导率和pH的明显地升高(P<0.05)(表1),与水质综合指数下降的结果不一致。

表2 渔洞水库水质的综合评价指数

水域	综合评价指数		标准综合指数	
	1月	5月		
库首	0.36	0.17	Ⅰ类水	0.15
库中	0.39	0.18		
库尾	0.36	0.21	Ⅱ类水	0.25
拦河	0.34	0.21		
底罗河	0.36	0.15	Ⅲ类水	0.44
瓜寨河	0.43	0.21		
期米黑	0.41	0.18	Ⅳ类水	0.69
居乐河	0.49	0.18		
布初河	0.43	0.18	Ⅴ类水	1.00
新河	0.39	0.19		
平均值	0.39[a]	0.19[b]	-	-

注:小写字母表示统计分析结果,字母相同表示差异不显著(P>0.05);字母不同表示差异显著(P<0.05)。

电导率是水体固有性质,与水柱中离子浓度有关。单位体积水柱离子总浓度越高,电导率也就越大。5月份水柱电导率的增加,说明输入水库,特别是表层水中易溶解性物质确实增加了。由于向下游生态补水、农业灌溉、城镇供水等,基于水库水情数据,从1月到5月,水库容减少了约1/3,而来水量总量近3 400万m^3,其中5月来水超过1 800万m^3,占总来水量的55%[26],说明水库对来水的稀释能力有所减弱。监测指标(TN、NO_3^--N、NH_3-N、TDP和SRP)在库湾略高于主库区的结果可以支持该推断。很明显,5月份水库水质综合指数的下降不能完全归因于外源污染物输入量的减少。

与水柱的电导率不同,关于水库水柱5月份的pH平均值明显高于1月份(P<0.05)(表1),这不能用污染物输入量来解释。pH升高,说明水体的碱度增加。水库水质呈弱碱性(表1),与溶解弱酸阴离子的浓度和形态有关,如有机酸及其离解离子、碳酸及离解离子等[27,28]。COD的监测结果表明,在1月和5月,COD的浓度较低,属于Ⅱ类水质,且变化并不明显,说明因有机物溶解增加水体pH的可能性较低。水柱pH的升高,最有可能与水柱中浮游植物(各种藻类)同化水中溶解CO_2有关。在5月份,水温明显升高(表1),利于浮游植物生长。当浮游植物利用可见光同化溶解CO_2时,其浓度下降。溶解CO_2可形成H_2CO_3,并离解成HCO_3^-和CO_3^{2-},它们存在如下平衡[29-31]:

$$CO_2+H_2O \rightleftharpoons H_2CO_3 \quad (1)$$

$$H_2CO_3 \rightleftharpoons H^+ + HCO_3^- \quad (2)$$

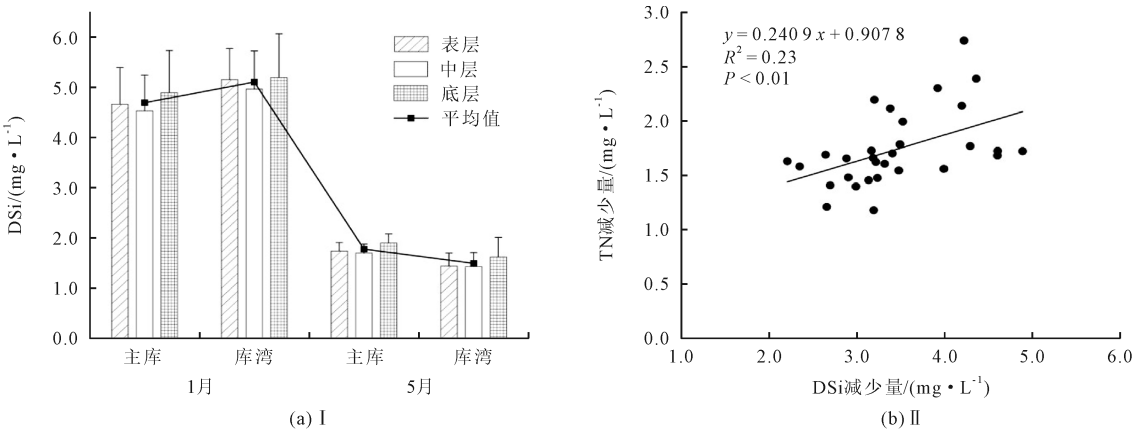
$$H_2CO_3^- \rightleftharpoons H^+ + CO_3^{2-} \quad (3)$$

$$CO_3^{2-} \rightleftharpoons HCO_3^- + OH^- \quad (4)$$

当溶解CO_2浓度下降时,促进HCO_3^-利用水分子中的H^+形成H_2CO_3,并伴随着OH^-生成。同理,当HCO_3^-浓度下降时,CO_3^{2-}可利用水分中的H^+形成HCO_3^-,以缓冲HCO_3^-浓度的下降,并伴有OH^-生成。因此,浮游植物同化溶解CO_2可增加水体碱度,pH升高。

事实上,浮游植物在同化CO_2时,也吸收水柱中的营养物质(氮、磷等),实现对水质净化[32,33]。在1月份,由于水温较低,尽管光照条件能够满足部分浮游植物的生长,但生物量较低,对水体净化能力相对较弱。到了5月份则不同,水温的升高利于浮游植物生长,对水质的净化能力也有所增加。有报道表明,渔洞水库浮游植物种类以硅藻门为主[34]。硅是硅藻生长必需的营养元素[35]。硅藻生长,在吸收硅的同时,也吸收氮,特别是NO_3^--N[36,37]。为验证该推断,本文对水库DSi进行了监测(图5(a)),发现DSi的变化趋势与TN和NO_3^--N的极为类似(TN和NO_3^--N的变化趋势类似,是因为水柱TN以NO_3^--N为主)(图3),也是1月份高,5月份低。统计分析表明,表层水中TN减少量与DSi的减少量极显著相关(P<0.01)(图5(b))。

温度的变化能够迅速影响硅藻的细胞生长繁殖。Cohn等[38]在研究硅藻时发现,相比较其他环境因子,温度变化对硅藻的影响最为明显。硅藻多在温度较低的春秋季生长繁殖,适温范围在10~17 ℃[39]。在适宜温度范围内,硅藻的生长速率随着的温度的升高而增长。硅藻的生长和繁殖不仅吸收硅,还吸收大量的氮,而渔洞水库在5月份水质综合指数下降,主要与TN的下降有关,而水库中TN主要由NO_3^--N组成。正是因为水温达到适宜硅藻生长的温度,大量硅藻的生长繁殖可消耗水柱中的氮。同时,硅藻的生长繁殖可降低水库透明度,与本文监测结果一致(表1)。当硅藻死亡并沉降于底泥时,水柱中TN下降,从而实现水库水质的净化。由此可以推断,渔洞水库水质在枯水期提到了提升,可能与硅藻的生长繁殖有关。



(a) Ⅰ　　(b) Ⅱ

注：Ⅰ为主要水域和水层DSi；Ⅱ为DSi减少量与TN减少量的关系。

图5 枯水期渔洞水库溶解硅及与总氮的关系

4　结论

（1）在枯水期，渔洞水库的水温、电导率和pH显著升高（$P<0.05$），而透明度则显著下降（$P<0.05$）。

（2）水库TN以NO_3^--N为主，且枯水期显著下降（$P<0.05$）。

（3）尽管水库的COD、NH_3-N、TDP、SRP等指标在枯水期存在不同的变化趋势，但综合指数下降，水质得到了提升。

（4）在枯水期，渔洞水库水质提升的机制，可能与水温升高促进了浮游植物硅藻生长有关。

[参考文献]

[1] 董飞,刘晓波,彭文启,等. 地表水水环境容量计算方法回顾与展望[J]. 水科学进展, 2014,25(3):451-463.

[2] Shen Z L, Xia H, Zhang W S, et al. On the coordination in diversity between water environmental capacity and regional development in the Three Gorges Reservoir Area[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2023,30(11):29727-29742.

[3] 商正松. 水泊渡水库水环境容量计算及水污染物排放量预测研究[J]. 环境与发展, 2019,31(9):122-123.

[4] 于凤存,方国华,徐佳,等. 中小型湖库型饮用水水源地污染负荷总量控制探讨[J]. 水文, 2015,35(4):42-46.

[5] 冯启申,李彦伟. 水环境容量研究概述[J]. 水科学与工程技术, 2010(1):11-13.
Feng Qishen, Li Yanwei. Overview of water environmental capacity research[J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2010(1):11-13.

[6] Yan R H, Gao Y N, Li L L, et al. Estimation of water environmental capacity and pollution load reduction for urban lakeside of Lake Taihu, Eastern China[J]. Ecological Engineering, 2019,139:105587.

[7] Duca G, Bunduchi E, Gladchi V, et al. Estimation of the natural water self-purification capacity from the kinetic standpoint[J]. Chemistry Journal of Moldova, 2008,3(1):10-21.

[8] Han T, Zhang H J, Hu W P, et al. Research on self-purification capacity of Lake Taihu[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2015,22(11):8201-8215.

[9] Wei G L, Yang Z F, Cui B S, et al. Impact of dam construction on water quality and water self-purification capacity of the Lancang River, China[J]. Water Resources Management, 2009,23(9):1763-1780.

[10] Ostroumov S A. Water quality and conditioning in natural ecosystems: biomachinery theory of self-purification of water[J]. Russian Journal of General Chemistry, 2017,87(13):3199-3204.

[11] 钟泳林,冉娇娇,文雯,等. 长江上游小型水库枯水期水质对景观组成、配置和水库特征的响应[J]. 环境科学, 2023,44(5):2528-2538.

[12] 汪青辽,颜小平,郝红升,等. 我国大中型水库水体自净能力特征研究[J]. 水力发电, 2021,47(9):21-26.
Wang Qingliao, Yan Xiaoping, Hao Hongsheng, et al. Study on the characteristics of water self-purification ability of large and medium-sized reservoirs in China[J]. Water Power, 2021,47(9):21-26.

[13] 王超,贾庆林,裴中平,等. 南水北调中线总干渠典型渠段水体自净能力研究[J]. 南水北调与水利科技:中英文, 2020,18(3):127-141.

[14] Delmiro Rocha M J, Lima Neto I E. Phosphorus mass balance and input load estimation from the wet and dry periods in tropical semiarid reservoirs[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2022, 29(7): 10027-10046.

[15] Zhang Z F, Yu N, Zhang Y H, et al. Characteristics and source analysis of water pollution in dry season (November to March) of Dongping Lake (China)[J]. Agricultural Water Management, 2022,273:107875.

[16] 朱爱民,胡菊香,李嗣新,等. 三峡水库长江干流及其支流枯水期浮游植物多样性与水质[J]. 湖泊科学, 2013,25(3):

378-385.
Zhu Aimin, Hu Juxiang, Li Sixin, et al. Phytoplankton diversity and water quality in the main stream of the Yangtze River and its tributaries in the Three Gorges Reservoir during dry season[J]. Journal of Lake Sciences, 2013, 25(3): 378-385.

[17] 崔汝静. 昭通渔洞水库饮用水源地保护措施探讨[J]. 水资源开发与管理, 2022,8(3):34-38.
Cui Rujing. Discussion on protection measures of drinking water source in Zhaotong Yudong Reservoir[J]. Water Resources Development and Management, 2022,8(3):34-38.

[18] 张雷,段琪彩,王杰,等. 渔洞水库水体纳污能力研究[J]. 水电能源科学, 2014,32(6):45-48.
Zhang Lei, Duan Qicai, Wang Jie, et al. Study on water pollution carrying capacity of Yudong Reservoir[J]. Water Resources and Power, 2014,32(6):45-48.

[19] 肖军,代堂刚,刘志勇. 云南省渔洞水库水质分析与评价[J]. 人民长江, 2016,47(S2):14-18.

[20] 崔汝静. 渔洞水库运行调度信息化建设[J]. 河南水利与南水北调, 2022,51(4):75-77.
Cui Rujing. Information construction of Yudong Reservoir operation and dispatching[J]. Henan Water Resources and South-to-North Water Diversion, 2022,51(4):75-77.

[21] 裴玥. 昭通市近50年气温变化特征分析[J]. 农业灾害研究, 2022,12(3):125-127.
Pei Yue. Analysis of temperature change characteristics in Zhaotong City in recent 50 years[J]. Journal of Agricultural Catastrophology, 2022,12(3):125-127.

[22] 李绅东,贾韬,申开旭. 基于降水集中度的昭通市昭阳区降水特征分析[J]. 人民长江, 2018,49(S2):70-72.
Li Shendong, Jia Tao, Shen Kaixu. Analysis of precipitation characteristics in Zhaoyang district of Zhaotong City based on precipitation concentration[J]. Yangtze River, 2018, 49(S2):70-72.

[23] 何平,徐玉裕,周侣艳,等. 杭州市区主要河道水质评价及评价方法的选择[J]. 浙江大学学报:理学版, 2014,41(3):324-330.

[24] 兰文辉,安海燕. 环境水质评价方法的分析与探讨[J]. 干旱环境监测, 2002,16(3):167-169.
Lan Wenhui, An Haiyan. Discussion on methods of water quality assessment[J]. Arid Environmental Monitoring, 2002, 16(3):167-169.

[25] 牟春友,徐坤. 在评价微污染水体中均值污染指数评价方法和活性污染指数评价方法的比较[J]. 中国环境监测, 2009,25(3):104-106.

[26] 渔洞水库2022年水情简报[R].

[27] 宋任彬,何锋,郭艳英,等. 滇池水体pH值变化特征及其影响因素初步分析[J]. 环境科学导刊, 2020,39(2):15-19.
Song Renbin, He Feng, Guo Yanying, et al. Preliminary analysis on the variation characteristics of pH value in Dianchi Lake and its influencing factors[J]. Environmental Science Survey, 2020,39(2):15-19.

[28] 莫美仙,张世涛,叶许春,等. 云南高原湖泊滇池和星云湖pH值特征及其影响因素分析[J]. 农业环境科学学报, 2007,26(S1):269-273.
Mo Meixian, Zhang Shitao, Ye Xuchun, et al. Analysis of pH value characteristics and influencing factors of Dianchi Lake and Xingyun Lake in Yunnan Plateau[J]. Journal of Agro-environment Science, 2007,26(S1):269-273.

[29] Tao F X. Air-water CO_2 flux in an algae bloom year for Lake Hongfeng, Southwest China: implications for the carbon cycle of global inland waters[J]. Acta Geochimica, 2017, 36(4):658-666.

[30] Wanninkhof R, Knox M. Chemical enhancement of CO_2 exchange in natural waters[J]. Limnology and Oceanography, 1996,41(4):689-697.

[31] 王晤岩,李清光. 淡水碳酸盐湖泊中$CaCO_3$-CO_3^{2-}-HCO_3-CO_2化学平衡对CO_2的缓冲作用:以贵州百花湖为例[J]. 中国岩溶, 2021,40(4):572-579.

[32] 彭欣,宁修仁,孙军,等. 南海北部浮游植物生长对营养盐的响应[J]. 生态学报, 2006,26(12):3959-3968.
Peng Xin, Ning Xiuren, Sun Jun, et al. Response of phytoplankton growth to nutrients in the northern South China Sea [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006,26(12):3959-3968.

[33] 张艳艳,魏金豹,黄民生,等. 环境因子对滴水湖浮游植物生长的影响分析[J]. 华东师范大学学报:自然科学版, 2015(2):48-57.
Zhang Yanyan, Wei Jinbao, Huang Minsheng, et al. Influence of environmental factors on phytoplankton growth in Dishui Lake[J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2015(2):48-57.

[34] 吴光明,毛杰. 渔洞水库浮游植物群落特征与水环境因子关系研究[J]. 农民致富之友, 2019(12):103.

[35] Chen J G, Li J, Tian S H, et al. Silicon isotope composition of diatoms as a paleoenvironmental proxy in Lake Huguangyan, South China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 45:268-274.

[36] Stief P, Schauberger C, Lund M B, et al. Intracellular nitrate storage by diatoms can be an important nitrogen pool in freshwater and marine ecosystems[J]. Communications Earth & Environment, 2022,3:154.

[37] Kamp A, de Beer D, Nitsch J L, et al. Diatoms respire nitrate to survive dark and anoxic conditions[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011,108(14):5649-5654.

[38] Cohn S A, Farrell J F, Munro J D, et al. The effect of temperature and mixed species composition on diatom motility and adhesion[J]. Diatom Research, 2003,18(2):225-243.

[39] 郑凌凌,张琪,李天丽,等. 三种不同环境因子对汉江硅藻水华优势种冠盘藻(*Stephanodiscus* sp.)生长生理的影响[J]. 海洋湖沼通报, 2017(6):91-97.