

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.02.011

大黑汀水库水质时空变化特征及下游引水策略

吴 涛,王建波,杨 洁,郝志香

(天津市水利科学研究院,天津 300061)

摘要:为探究大黑汀水库 2017 年养鱼网箱拆除后水质特征,于 2018 年分季节采集水库表层和分层水样分析水库水质时空变化特征。结果表明:大黑汀水库表层水体总氮在冬季最高,总磷在夏季最高,硝态氮是溶解性无机氮中的主要成分;大黑汀水库总氮、硝态氮、总磷和磷酸盐质量浓度总体上都表现出上游最高、中游次之、下游最低的空间分布特征,氨氮和亚硝态氮则相反;垂向上主要表现为夏季总磷质量浓度底层大于表层,与温跃层及溶解氧水平有关;养鱼网箱拆除后显著降低了水库总磷和磷酸盐质量浓度,氨氮质量浓度也显著降低,总氮和硝态氮质量浓度无显著变化;氮磷比表明磷是该水库水体富营养化的限制因子,因此养鱼网箱拆除能有效控制该水库富营养化进程;根据水质时空分布特征,下游引水应避免在冬季取水,引水高度上应选择从坝前中层水柱取水。

关键词:水质;富营养化;氮磷比;养鱼网箱;引水策略;大黑汀水库;于桥水库

中图分类号:TV697;X824 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2020)02-0065-08

Spatio-temporal characteristics of water quality in Daheiting Reservoir and downstream water transfer strategy // WU Tao, WANG Jianbo, YANG Jie, HAO Zhixiang(*Tianjin Hydraulic Research Institute, Tianjin 300061, China*)

Abstract: In order to explore the water quality characteristics of Daheiting Reservoir after the removal of fish cage in 2017, the surface water samples and stratified water samples of the reservoir were collected in 2018 to analyze the spatio-temporal characteristics of the water quality of the reservoir. The results show that the total nitrogen and total phosphorus in the surface water of Daheiting Reservoir are the highest in winter and summer, and nitrate nitrogen is the main component of dissolved inorganic nitrogen. The spatial distribution characteristics of total nitrogen, nitrate nitrogen, total phosphorus and phosphate concentration in Daheiting Reservoir are the highest in the upper reaches, the second in the middle reaches and the lowest in the lower reaches. Ammonia nitrogen and nitrite nitrogen are opposite. Vertically, the total phosphorus concentration in the bottom layer is higher than that in the surface layer, which is related to thermocline and dissolved oxygen level. After the removal of the fish cages, the concentration of total phosphorus and phosphate, ammonia nitrogen and nitrate nitrogen in the reservoir decreased significantly, but there was no significant change in the mass concentration of total nitrogen and nitrate nitrogen. The N/P ratio shows that phosphorus is the limiting factor of the reservoir, so the removal of fish cages can effectively control the eutrophication process of the reservoir. According to the spatio-temporal distribution characteristics of water quality, the downstream water diversion should avoid taking water in winter, and the middle water column in front of the dam should be selected as the water diversion height.

Key words: water quality; eutrophication; N/P ratio; fish cage; water transfer strategy; Daheiting Reservoir; Yuqiao Reservoir

大黑汀水库作为唐山市及下游居民生活用水和工农业用水的水源地,识别其水质变化趋势和时空特征是合理开发、保护水资源的基础工作^[1]。有关大黑汀水库水环境变化及污染的研究多有报道,陈勇等^[2]基于 2006—2014 年大黑汀水库水环境因子调查,发现总氮和总磷是该水库的主要污染物;暴柱

等^[3]研究发现,自 2012 年开始大黑汀水库总磷迅速升高,水质总体上处于 IV 类水水平;王燕等^[4]对滦河干流水质状况分析表明其水体主要污染物为氨氮、总磷和六价铬,对浮游植物的监测分析发现大黑汀水库优势种群由原来的硅藻向蓝藻、绿藻、硅藻门变化;通过对大黑汀水库水体污染空间特征的分析,

基金项目:天津市水利科学研究院科研基金(2017SZC-C-89)

作者简介:吴涛(1982—),男,高级工程师,硕士,主要从事水环境与水生态研究。E-mail:3383707479@qq.com

杨晨昱等^[5]发现大黑汀水库表现出从上游到下游污染逐渐加重的趋势,表明大黑汀水库来自水库内部的污染对水库污染有较大的贡献。事实上,2000年后随着水库上游和周边的经济社会快速发展,尤其是库区养鱼网箱的迅速增加,大黑汀水库的水质和水生态状况持续恶化^[6]。2016年11月至2017年6月河北省开展了潘家口水库和大黑汀水库养鱼网箱的拆除工作,据水利部海河水利委员会水环境监测中心2017年10月监测数据,大黑汀水库总磷较治理前下降了85%,逐步达到Ⅲ类水质。目前关于大黑汀水库养鱼网箱拆除后水质特征的研究还相对较少,其氮磷污染与富营养化的时空变化特征还不清楚。本文基于2018年大黑汀水库不同季节的水质监测数据,对养鱼网箱拆除后水体氮磷时空分布与富营养化特征进行了分析,以期为大黑汀水库氮磷污染防治及下游于桥水库引水决策提供参考。

1 研究区概况

大黑汀水库(40°11'N~40°21'N,118°15'E~118°19'E)位于唐山市迁西县城北5 km的滦河干流上,1986年建成,控制流域面积3.51万km²,总库容3.37亿m³。大黑汀水库地处暖温带大陆性季风气候区,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥。大黑汀水库上接潘家口水库,两库联合运用发挥防洪、供水作用。大黑汀水库作为引滦系列工程之一,通过滦河干流向唐山市及下游供水,发挥了巨大的经济效益和社会效益,缓解了天津市多年来的水源危机。由于长期的网箱养鱼,近年来大黑汀水库底泥积累了大量的污染物,水体水质严重恶化。

2 样品采集与分析方法

自水库下游大坝前至上游靠近潘家口水库大坝处,均匀布设36个采样点,分别于2018年2月下旬、5月中旬、7月下旬和10月下旬采集水库表层上覆水(距水面50 cm深处),代表冬季、春季、夏季和秋季4个季节的水样。另外,为了解大黑汀水库水质的分层特征,分别于2018年4月中旬、8月上旬、10月下旬和12月上旬在下游坝前及库心设置2个采样点,采用分层采水器分层采样,按0.5 m、5 m、7 m、10 m、15 m及20 m水深采集水样。在样品采集的过程中,每个点位或每一个层次分别采集100 mL水样,装入干净的聚乙烯塑料瓶中后放入保温箱中低温保存,并迅速运至引滦工程管理局大黑汀水库管理处实验室进行处理。采样的同时现场用多参数水质仪(YSI)测定各个点位水深、温度、pH值和溶解氧(DO)等参数。采集的水样直接用于测定总氮

(TN)和总磷(TP)质量浓度,用0.45 μm滤膜(Whatman GF/F)过滤后测定氨氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)、亚硝态氮(NO₂⁻-N)和磷酸盐(PO₄³⁻-P)的质量浓度。总氮和总磷质量浓度采用碱性过硫酸钾联合消解法测定;氨氮、硝态氮、亚硝态氮和磷酸盐质量浓度用连续流动分析仪(Skalar Sanplus,荷兰)测定;高锰酸盐指数(COD_{Mn})用高锰酸钾法测定^[7]。

采用Excel 2013和SPSS 22.0进行数据处理与分析,用OriginPro 2017软件作图。不同季节和空间水库水体营养盐质量浓度的差异采用单因素方差分析法分析,用“平均值±标准差”的形式表示数据的均值及离散程度。

3 结果与分析

3.1 表层水体营养盐季节变化特征

图1(图中TN-DIN为总氮与溶解性无机氮的差值;TP-PO₄³⁻-P为总磷与磷酸盐的差值)为大黑汀水库不同季节水体营养盐变化特征,可以看出,表层水体总氮冬季质量浓度明显高于其他3个季节,季节差异显著(α=0.05, P<0.001)。总氮质量浓度在冬季最高,与冬季水量较小有关。此外,大黑汀水库所处的唐山地区冬季气温低且普遍降雪,冬季取暖导致空气中污染颗粒物增多,通过降雪与自然沉积滞留在地表及水体,有研究发现降雪所携带的污染物比降雨更多^[8-10],这些颗粒物往往具有较大的比表面积,携带大量的污染物汇集在水体中,导致大黑汀水库冬季氮磷较高。随着时间的推移,这些难溶颗粒物逐渐沉降到底泥中,使得春季水体氮磷质量浓度下降。夏季总氮和总磷质量浓度较春季有所升高,这与夏季降水量大有关,降雨通过地表径流携带大量的污染物进入水体,同时夏季风的扰动以及较高的温度也会导致污染底泥向上覆水体释放营养盐;此外,由于水位涨高,上游水库向大黑汀水库泄水,也可能导致上游水体的污染物向大黑汀水库转移。

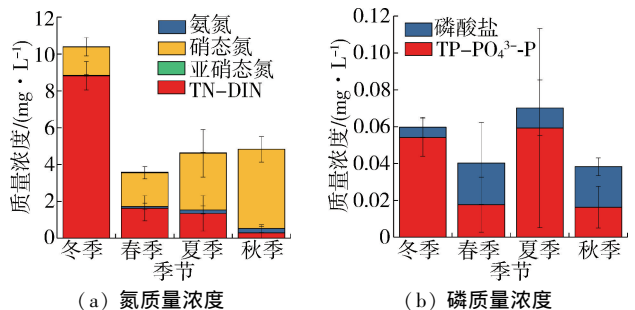


图1 大黑汀水库不同季节水体营养盐变化特征
Fig.1 Variation characteristics of water nutrients in different seasons of Daheiting Reservoir

硝态氮是表层水体无机氮的主要形式,冬春夏秋 4 个季节其在 DIN (包括氨氮、硝态氮和亚硝态氮) 中的质量浓度占比分别为 98.41%、94.59%、93.02% 和 94.70%, 而 DIN 在总氮中的占比分别为 15.10%、55.66%、73.83% 和 94.35%。冬春夏秋 4 个季节表层水体中溶解性磷酸盐在总磷中的质量浓度占比分别为 8.31%、63.60%、19.80% 和 60.59%。水体中的氮形态具有明显的季节性差异,其中夏秋季水体中的氮主要以 DIN 的形式存在,而冬季 DIN 占比最小。冬季水体中 DIN 和磷酸盐占比最小,说明水体中颗粒态物质较多,而水体水华颗粒物及底泥悬浮颗粒物对水体总氮和总磷质量浓度有较大的影响^[11-13]。此外,冬季取暖产生的烟尘以及降雪等也会使得水体中颗粒态氮磷增多。夏秋季大黑汀水库水体溶解性氮磷相对较多,蓝藻水华频发,冬季则无蓝藻产生。虽然冬季水体总氮和总磷质量浓度较高,但溶解性氮磷质量浓度低于夏秋季,这从侧面说明了相较于总氮和总磷,水体中的 DIN 及活性磷是影响藻类暴发的关键因子。

3.2 表层水体营养盐时空分布规律

表 1 为大黑汀水库表层水体营养盐质量浓度空间差异的显著性,图 2 为大黑汀水库表层水体营养盐质量浓度时空分布特征,可以看出,总氮质量浓度在冬春夏季的空间差异不大,仅在秋季表现出显著差异,上游总氮质量浓度高于中下游;氨氮质量浓度在冬季差异显著,冬季中游质量浓度高,春夏季则上游质量浓度高,秋季则无显著差异;硝态氮质量浓度仅在秋季表现出显著差异,其空间特征与总氮相似;亚硝态氮质量浓度仅在春季表现出显著差异,大小

顺序为下游、中游、上游;总磷和磷酸盐质量浓度在冬春夏季表现出显著差异,总磷质量浓度冬夏季表现出大小顺序为中游、上游、下游的空间特征,而春季则表现出上游高、下游低的空间特征;磷酸盐与总磷质量浓度的空间特征在冬春季相似,不同的是夏季磷酸盐质量浓度表现出大小顺序为上游、下游、中游的空间特征。

表 1 大黑汀水库表层水体营养盐质量浓度空间差异显著性

Table 1 The significance of spatial differences of nutrients concentration in surface water of Daheiting Reservoir

季节	总氮	总磷	氨氮	硝态氮	亚硝态氮	磷酸盐
冬季	0.781	0.004	0.035	0.061	0.078	0.000
春季	0.069	0.000	0.616	0.888	0.003	0.005
夏季	0.310	0.014	0.110	0.213	0.246	0.001
秋季	0.002	0.154	0.710	0.006	0.094	0.418

注:显著性水平为 0.05。

图 3 为大黑汀水库表层水体全年营养盐空间特征,可以看出,在全年尺度上,水库表层水体总氮和硝态氮质量浓度表现为上游高、下游低,而氨氮和亚硝态氮表现为下游高、上游低;总磷质量浓度表现为上游和中游较高,下游较低,而磷酸盐表现为上游高、下游低。陈勇等^[2]研究发现大黑汀水库总氮除了受到上游潘家口水库下泄水的影响外,更受到上游洒河来水的影响。洒河途经洒河镇,周边居民生活污水和铁矿厂工业废水^[14]可能是造成大黑汀水库上游氮磷质量浓度较高的原因。大黑汀水库上、中、下游平均水深分别为(4.11 ± 0.70) m、(7.69 ± 3.69) m 和(16.87 ± 5.44) m,上下游不同的水深伴随着不同的氧化还原环境,其上、中、下游的氧化还原电位分别为(170.01 ± 20.84) mV、(126.36 ±

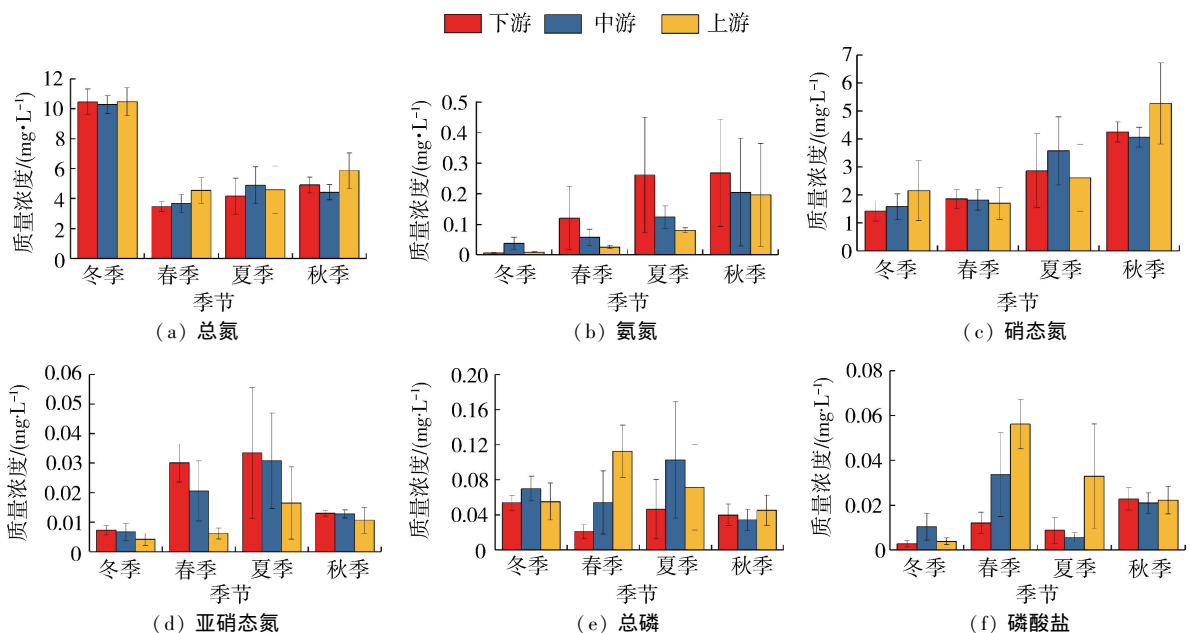


图 2 大黑汀水库表层水体营养盐质量浓度时空分布特征

Fig. 2 Spatio-temporal distribution characteristics of nutrients concentration in surface water of Daheiting Reservoir

9.67) mV 和 (115.34 ± 9.91) mV, 上游相对较高的氧化环境使得水体中的无机氮向硝态氮转化, 而下游相对较低的氧化环境使得无机氮向氨氮和亚硝态氮转化。总磷和磷酸盐质量浓度在中上游明显高于下游, 下游水域开阔, 较大的水量稀释了来自中上游的总磷质量浓度较高的水体。大黑汀水库中游是网箱养殖最集中的区域, 该区域来自污染沉积物内源释放的磷可能是造成中游磷质量浓度和上游同样较高的原因。杨晨昱等^[5]研究发现大黑汀水库从上游到下游污染逐渐加重(养鱼网箱拆除前), 而本文研究发现该水库上游比下游污染严重, 说明大黑汀水库养鱼网箱拆除后, 其水质污染源特征发生了改变, 网箱养鱼造成的内源污染变小。相关研究^[15-16]表明, 总磷质量浓度在 $0.02 \sim 0.05$ mg/L 的水体为中营养型, $0.05 \sim 0.09$ mg/L 为富营养型, 因此大黑汀水库下游水体为中营养型, 而中上游达到了富营养型。

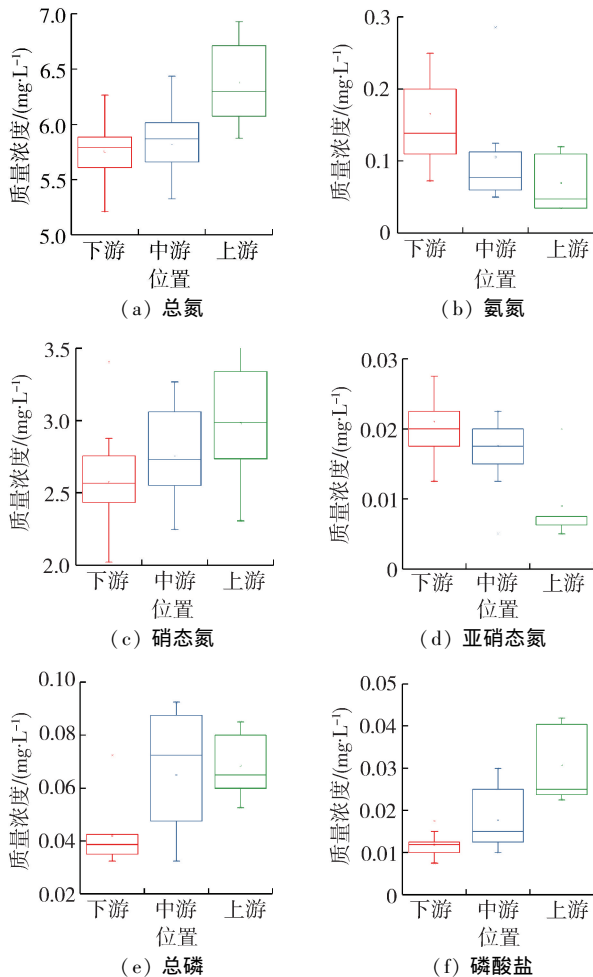


图3 大黑汀水库表层水体全年营养盐空间特征

Fig. 3 Spatial characteristics of nutrients concentration in surface water of Daheiting Reservoir

3.3 水库水质分层特征

图4为大黑汀水库水温和溶解氧垂向变化特

征。12月水库上下层水体水温一致, 坝前比库心高 1.25°C , 差异显著 ($P < 0.05$); 4月、8月和10月存在明显的温度分层, 随着春季到来气温回升, 库区表层水温开始升高, 而下层水温上升缓慢, 8月表层和20m深度水温差异达 13.3°C , 形成明显的温跃层, 而坝前和库心的水体温度差不显著。水温是影响水密度的重要因素^[17], 由热分层引起的水体分层使得上下层水体缺乏交换, 进而影响水体溶解氧的传递^[18]。溶解氧质量浓度季节差异明显, 4月和12月较高, 12月无明显分层特征, 4月水体底部略有降低; 8月在 $0 \sim 5$ m 范围内明显变小, 5m以下坝前位置垂向无较大变化, 库心位置继续随深度增加而降低; 10月有一个明显的分层特征, 在10m以上较高, 平均为 10.1 mg/L, 在 $10 \sim 15$ m 范围急速降低, 在15m以下平均为 1.9 mg/L, 处于厌氧状态。坝前和库心溶解氧质量浓度在12月差异显著 ($P < 0.05$), 其他季节无明显差异。

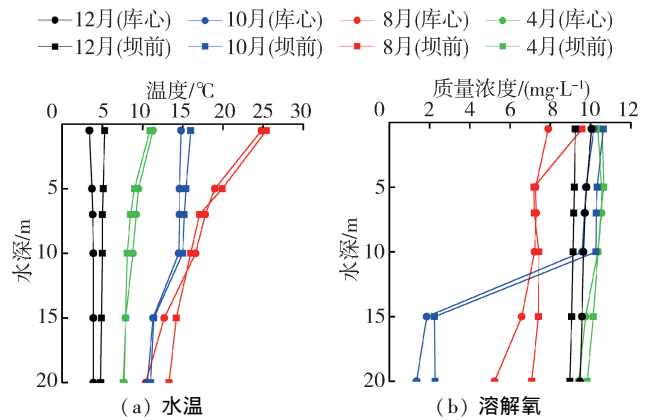


图4 大黑汀水库水温和溶解氧垂向变化

Fig. 4 Vertical variation of water temperature and dissolved oxygen in Daheiting Reservoir

图5为大黑汀水库水体氮磷和 COD_{Mn} 垂向变化。坝前和库心水体总氮质量浓度10月差异显著 ($P < 0.05$), 坝前比库心平均高 0.17 mg/L, 其他3个月坝前和库心总氮差异不显著。硝态氮是水体氮的主要成分, 其变化特征与总氮相似。氨氮质量浓度4月随深度增加而增大, 8月则相反, 10月随深度波动增加, 12月垂向无明显变化。总磷质量浓度的垂向变化在坝前和库心无显著差异, 8月随深度增加逐渐增大, 10月垂向变化较小, 12月和4月波动中略有增大。 COD_{Mn} 质量浓度季节差异明显, 10月显著高于4月、8月和12月, 除8月垂向逐渐减小外, 其他月垂向变化特征不明显; 4月和10月坝前水体 COD_{Mn} 质量浓度显著高于库心 ($P < 0.05$), 8月和12月则差异不显著。

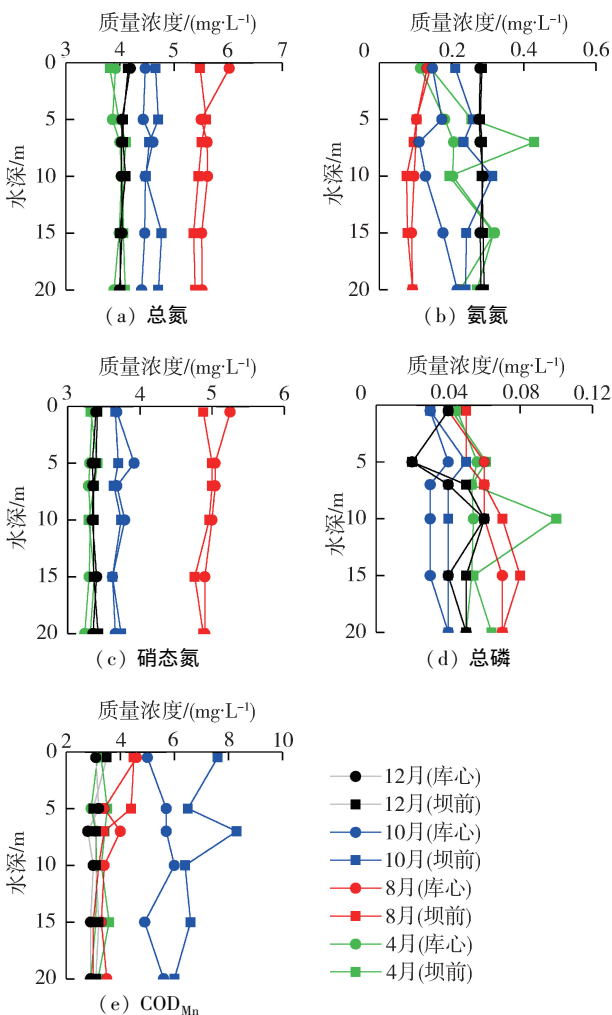
水体季节性热分层是引起水体溶解氧分布、底泥营养盐释放等过程变化的主要因素, 对生物新陈

4 讨论

4.1 水体氮磷污染特征

氮磷是引起湖库水体富营养化的重要环境因子^[22-24],氮磷比是判断水体富营养化及其限制因子的一个重要参数^[16,25]。浮游植物健康生长及生理平衡所需氮磷原子比为 16:1,其比值小于 16 表明氮为浮游植物生长的限制因子,大于 16 则磷为浮游植物生长的限制因子^[26]。由表 2 可知,大黑汀水库水体的氮磷比在 40.42 ~ 220.98 之间,平均值显著高于 16,因此磷是大黑汀水库水体富营养化的主要限制因子。大黑汀水库水体氮磷比在时间上表现为夏季最低,冬季最高;在空间上表现为中游最低,下游最高。蓝藻水华暴发会导致氮质量浓度下降,磷质量浓度升高,氮磷比减小, Schindler^[27] 研究发现低氮磷比能诱导藻类大量生长,认为低氮磷比更易导致蓝藻水华的暴发。许海等^[28] 研究发现,当氮磷比较充足时(磷质量浓度达到 2 mg/L),氮磷比对藻类的生长不再具有显著影响,而当磷质量浓度在 0.02 ~ 0.20 mg/L 时,不同的氮磷比能显著抑制或者促进藻类的生长,低氮磷比是蓝藻水华暴发导致氮质量浓度下降、磷质量浓度升高的结果。大黑汀水库水体总磷质量浓度小于 0.1 mg/L,且其在夏季最高(图 1),而氮磷比在夏季最低,因此夏季极易发生蓝藻水华现象。此外,大黑汀水库独特的地理特征也造成了各个区域的水量大小不一,其对水体氮磷比也有较大影响^[16],下游较大的水量和相对较低的磷质量浓度是导致下游氮磷比较高的原因。因此磷是大黑汀水库水体富营养化的限制因子,磷质量浓度增大会显著地促进藻类的生长。

富营养化的发生受多种因素的影响,如温度、流速等,但最主要的是水体中氮磷等营养物质充足^[8]。国内外水体的治理经验都表明,控制外源氮磷的输入是抑制水体蓝藻水华暴发的根本途径^[29]。对于污染富集严重的沉积物,其仍能在长时间尺度上通过沉积物-水界面向上覆水体释放营养盐,当外源污染得到控制后,控制来自沉积物的内源氮磷负荷对于水体治理同样至关重要^[30],大黑汀水库内源负荷远高于国内其他富营养化湖库,必须重视水库

图 5 大黑汀水库水体氮磷和 COD_{Mn} 垂向变化Fig. 5 Vertical variation of N, P and COD_{Mn} in Daheiting Reservoir

代谢和物质分解过程起着重要作用^[19-20]。夏季底层水体低温和相对较低的溶解氧质量浓度促进沉积物磷的释放,导致底层水体总磷质量浓度高于表层。而夏季较强的光照、较高的水体总氮和总磷质量浓度(图 5)促进藻类的暴发,通过水气界面及藻类的光合作用进行复氧^[21],使得 8 月水体垂向上有相对较高的溶解氧水平。在之后的藻类死亡分解过程中,产生大量的有机物,使得秋季水体 COD_{Mn} 质量浓度升高,受风向和水流影响,藻类往下游坝前汇集,这是导致坝前水体 COD_{Mn} 质量浓度高于库心的原因。秋季藻类死亡降解消耗大量的溶解氧,使得秋季底层水体溶解氧质量浓度快速降低,侧面反映了

表 2 大黑汀水库水体氮磷比时空分布

Table 2 Spatio-temporal distribution of nitrogen phosphorus ratio in Daheiting Reservoir

位置	冬季	春季	夏季	秋季	全年
下游	200.46 ± 42.27	189.39 ± 64.89	113.81 ± 59.04	134.19 ± 50.25	149.17 ± 25.20
中游	153.09 ± 34.74	107.97 ± 76.95	82.30 ± 74.04	141.02 ± 42.13	99.85 ± 41.82
上游	220.98 ± 119.77	40.42 ± 10.00	97.35 ± 62.17	141.26 ± 45.19	125.30 ± 86.22
全库	185.10 ± 53.84	150.44 ± 81.60	100.15 ± 65.03	137.87 ± 45.04	142.41 ± 69.69

由于长期的网箱养殖等人为活动导致的沉积物污染及内源负荷^[31]。针对大黑汀水库水体富营养化问题,应采取“控源截污、生态修复”的策略,通过阻止外源输入、改善库区沿岸带生态环境、采用底泥疏浚及生态修复等手段对水库进行综合治理。应加强工业污染治理和农村城市生活污染源治理,提高上游污水处理厂效率;此外,要加大农业面源治理力度,减少水库周边化肥、农药、除草剂的使用量^[4]。因为春季上游和夏季中上游较高的氮磷质量浓度和较低的氮磷比,有关部门应着重加强对中上游水质变化的监控。

4.2 养鱼网箱拆除前后水库水质特征

大黑汀水库养鱼网箱于2017年5月拆除完毕,采用2016年7月至2017年5月的月平均值代表养鱼网箱拆除前水库水质特征,2017年6月至2018年11月的月平均值代表养鱼网箱拆除后水库水质特征,养鱼网箱拆除前后水库水质变化情况如图6所示。总体上网箱拆除前后总氮质量浓度无显著差异($P = 0.167 > 0.05$)。氨氮质量浓度表现出随深度增加逐渐变大的趋势,网箱拆除后质量浓度显著降低($P = 0.01$),平均降低48.34%~67.47%。硝态氮质量浓度表现出与总氮相似的分布特征,网箱拆除前后无显著变化($P = 0.247 > 0.05$)。总磷和磷酸盐表现出相似的时空分布特征,在10 m以下水深随深度增加磷质量浓度逐渐增大,且在养鱼网箱拆除后,水体磷质量浓度显著降低(总磷: $P = 0.004$;磷酸盐: $P = 0.005$),较网箱拆除前,总磷和磷酸盐质量浓度分别下降了61.91%~83.28%和67.03%~86.09%。因为磷是大黑汀水库水体富营养化的限制因子,养鱼网箱拆除能有效降低水库水体磷质量浓度,进而发挥出改善水库水质、遏制富营养化进程及防治蓝藻水华暴发的作用。

5 下游于桥水库的引水策略

于桥水库是引滦入津工程的重要调蓄水库,同时又是天津市工农业和生活用水的主要水源地^[32],大黑汀水库是于桥水库重要的水源补给水库,每年

通过于桥水库主要入库河流黎河向于桥水库供水,据统计,2010—2018年于桥水库每年从大黑汀水库引水1.0~9.5亿 m^3 ,年均引水量为4.6亿 m^3 。为尽可能地避免或减小引水对于桥水库水质的负面影响,要科学制定于桥的引水方案。

大黑汀水库的下游水质要优于中上游,而大黑汀水库的引水闸门位于下游大坝,这对于桥水库的引水有着积极的意义。根据大黑汀水库水质的季节变化特征,在引水时机的选择上要避免冬季引水,尤其是冬季春初冰雪消融时期。在引水高度的选择上,建议选择中层水柱,原因是:大黑汀水库夏秋季节表层水柱中藻类聚集现象明显,而且还存在漂浮陆源的新鲜有机质及其他漂浮物;具有分层现象的湖库底层水柱尤其是沉积物-水界面处水柱通常含有较高的营养盐^[33],而大黑汀水库总磷存在分层现象,且表层5 cm左右沉积物呈果冻状悬浮体,非常容易发生再悬浮导致营养盐释放,引水时应尽量避免扰动下层水柱尤其是沉积物-水界面及表层沉积物。

6 结论

a. 大黑汀水库表层水体中总氮质量浓度在冬季最高,夏秋次之,春季最低;总磷质量浓度在冬夏较高,春秋次之。硝态氮是水体DIN的主要成分。

b. 总氮、硝态氮、总磷和磷酸盐的质量浓度在水平方向上呈现自上游到下游逐渐减小的趋势,垂向上水体总氮、硝态氮和总磷质量浓度8月最高,COD_{Mn}质量浓度10月最高。水体热分层主要出现在夏秋季节,溶解氧分层主要表现在秋季。养鱼网箱拆除后显著降低了水库总磷和磷酸盐质量浓度,氨氮质量浓度也显著降低,总氮和硝态氮质量浓度无显著变化。

c. 大黑汀水库水体氮磷比表明磷为水库水体富营养化的限制因子。氮磷比在夏季最低,冬季最高,中游最低,下游最高。较高的氮磷比使得大黑汀水库对磷比较敏感,养鱼网箱拆除能显著降低水库

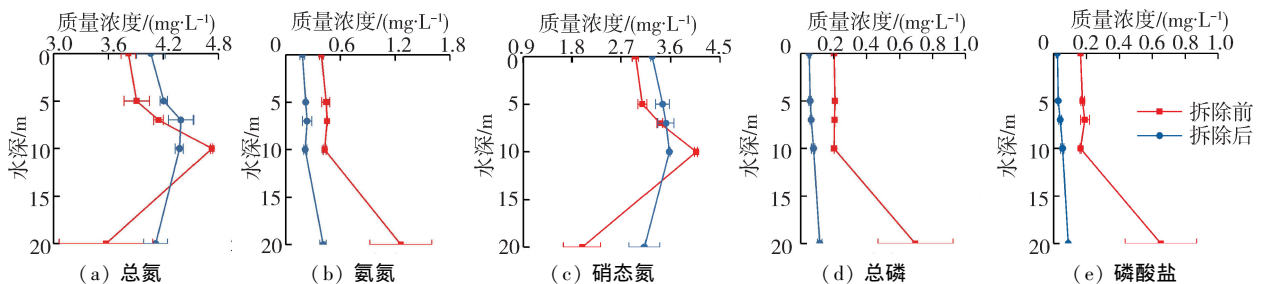


图6 养鱼网箱拆除前后大黑汀水库水质比较

Fig. 6 Comparison of water quality before and after the removal of fish cages in Daheiting Reservoir

磷质量浓度,进而可有效遏制富营养化进程。

d. 下游于桥水库要避免冬季引水,尤其是冬季春初冰雪消融时期;引水口高度建议选择中层水柱,应尽量避免引用表层水柱及扰动底层水柱。

参考文献:

- [1] 郭丽峰,刘明喆,张辉,等. 基于污染物通量的潘家口-大黑汀水源地水污染生态补偿量化研究[J]. 水资源保护,2016,32(5):146-151. (GUO Lifeng, LIU Mingzhe, ZHANG Hui, et al. Quantification research of eco-compensation for water pollution in source area of Panjiakou-Daheiting water source areas based on flux of pollutants[J]. Water Resources Protection,2016,32(5):146-151. (in Chinese))
- [2] 陈勇,张敏,渠晓东,等. 潘大水库水环境时空格局演变动态[J]. 应用与环境生物学报,2016,22(6):1082-1088. (CHEN Yong, ZHANG Min, QU Xiaodong, et al. The spatial-temporal pattern dynamics of the water environment in Panjiakou-Daheiting Reservoir [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2016,22(6):1082-1088. (in Chinese))
- [3] 暴柱,王燕,张晓刚. 潘家口、大黑汀水库三大水环境因子演变趋势分析[J]. 海河水利,2016(3):15-16. (BAO Zhu, WANG Yan, ZHANG Xiaogang. Analysis on evolution trend of three major water environmental factors in Panjiakou and Daheiting Reservoirs [J]. Haihe Water Resources,2016(3):15-16. (in Chinese))
- [4] 王燕,邢海燕,赵恩灵,等. 潘家口、大黑汀水库水污染现状及治理措施浅析[J]. 海河水利,2016(3):17-19. (WANG Yan, XING Haiyan, ZHAO Enling, et al. Water pollution status and control measures of Panjiakou and Daheiting Reservoirs [J]. Haihe Water Resources, 2016(3):17-19. (in Chinese))
- [5] 杨晨昱,陈勇,张敏,等. 京津冀重要饮用水源地潘大水库水体污染特征分析[J]. 科技创新与应用,2018(11):61-62. (YANG Chenyu, CHEN Yong, ZHANG Min, et al. Analysis on water pollution characteristics of Panjiakou-Daheiting Reservoirs, an important drinking water source in Beijing, Tianjin and Hebei [J]. Technology Innovation and Application, 2018(11):61-62. (in Chinese))
- [6] 王佰梅,王潜,张睿昊. 网箱养鱼清理对潘大水库水质影响分析[J]. 海河水利,2017(5):14-15. (WANG Baimei, WANG Qian, ZHANG Ruihao. Analysis of the effect of dismantling fish cage on water quality of Panjiakou-Daheiting Reservoirs [J]. Haihe Water Resources,2017(5):14-15. (in Chinese))
- [7] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京:中国环境科学出版社,2002.
- [8] 郑剑锋,焦继东,孙力平,等. 天津中心城区河网氮磷污染与富营养化特征[J]. 湖泊科学,2018,30(2):326-335. (ZHENG Jianfeng, JIAO Jidong, SUN Liping, et al. Pollution characteristics of nitrogen, phosphate and eutrophication of river network water in central urban area of Tianjin [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(2):326-335. (in Chinese))
- [9] RAYNOR G S, HAYES J V. Differential rain and snow scavenging efficiency implied by ionic concentration differences in winter precipitation [M]. New York: Elsevier,1983:249-264.
- [10] 李怀恩,刘增超,秦耀民,等. 西安市融雪径流污染特性及其与降雨径流污染的比较[J]. 环境科学学报,2012,32(11):2795-2802. (LI Huanen, LIU Zengchao, QIN Yaomin, et al. Characteristics of snowmelt runoff pollution and comparison with rainfall runoff pollution in Xi'an City [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(11):2795-2802. (in Chinese))
- [11] 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. (ZHU Guangwei, QIN Boqiang, ZHANG Yunlin, et al. Variation and driving factors of nutrients and chlorophyll-a concentrations in northern region of Lake Taihu, China, 2005—2017 [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(2):279-295. (in Chinese))
- [12] 朱广伟,秦伯强,高光. 风浪扰动引起大型浅水湖泊内源磷暴发性释放的直接证据[J]. 科学通报,2005(1):66-71. (ZHU Guangwei, QIN Boqiang, GAO Guang. Direct evidence of phosphorus outbreak release from sediment to overlying water in a large shallow lake caused by strong wind wave disturbance [J]. Chinese Science Bulletin, 2005(1):66-71. (in Chinese))
- [13] ZHU M, PAERL H W, ZHU G, et al. The role of tropical cyclones in stimulating cyanobacterial (*microcystis spp.*) blooms in hypertrophic Lake Taihu, China [J]. Harmful Algae, 2014, 39:310-321.
- [14] 李宁. 矿产资源型县域经济转型研究:以迁西为例 [D]. 天津:河北工业大学,2010.
- [15] 牛晓君. 富营养化发生机理及水华暴发研究进展 [J]. 四川环境, 2006, 25(3):73-76. (NIU Xiaojun. Research progress of eutrophication mechanism and breakout of water bloom [J]. Sichuan Environment, 2006, 25(3):73-76. (in Chinese))
- [16] 张耀,杨永琼,李晓燕,等. 贵州红枫湖水质时空变化特征研究[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版),2018,36(5):24-29. (ZHANG Yao, YANG Yongqiong, LI Xiaoyan, et al. Temporal and spatial variation of water quality of Hongfeng Lake in Guizhou [J]. Journal of

- Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2018, 36 (5): 24-29. (in Chinese)
- [17] LAWSON R, ANDERSON M A. Stratification and mixing in Lake Elsinore, California; an assessment of axial flow pumps for improving water quality in a shallow Eutrophic Lake [J]. Water Research, 2007, 41 (19): 4457-4467.
- [18] 邱二生. 黑河水库水质及藻类监测和水体分层研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.
- [19] 刘雪晴, 黄廷林, 李楠, 等. 水库热分层期藻类水华与温跃层厌氧成因分析 [J]. 环境科学, 2019, 40 (5): 2258-2264. (LIU Xueqing, HUANG Tinglin, LI Nan, et al. Algal bloom and mechanism of hypoxia in the metalimnion of the Lijiahe Reservoir during thermal stratification [J]. Environmental Science, 2019, 40 (5): 2258-2264. (in Chinese))
- [20] ZHANG Y L, WU Z X, LIU M L, et al. Thermal structure and response to long-term climatic changes in Lake Qiandaohu, a deep subtropical reservoir in China [J]. Limnology and Oceanography, 2014, 59 (4): 1193-1202.
- [21] 成晓奕, 李慧赞, 戴淑君. 天目湖沙河水库溶解氧分层的季节变化及其对水环境影响的模拟 [J]. 湖泊科学, 2013, 25 (6): 818-826. (CHENG Xiaoyi, LI Huiyun, DAI Shujun. Modeling of seasonal vertical variation of dissolved oxygen and its impacts on water environment in Shahe Reservoir within Tianmuhu Reservoir [J]. Journal of Lake Sciences, 2013, 25 (6): 818-826. (in Chinese))
- [22] LE C, ZHA Y, LI Y, et al. Eutrophication of lake waters in china; cost, causes, and control [J]. Environmental Management, 2010, 45 (4): 662-668.
- [23] 华祖林, 王苑. 水动力作用下河湖沉积物污染物释放研究进展 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2018, 46 (2): 95-105. (HUA Zulin, WANG Yuan. Advance on the release of pollutants in river and lake sediments under hydrodynamic conditions [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46 (2): 95-105. (in Chinese))
- [24] 张鹏, 逢勇, 石成春, 等. 闽江下游水质变化趋势分析 [J]. 水资源保护, 2018, 34 (1): 64-69. (ZHANG Peng, PANG Yong, SHI Chengchun, et al. Analysis of change trend of water quality in Minjiang River downstream [J]. Water Resources Protection, 2018, 34 (1): 64-69. (in Chinese))
- [25] 蔡龙炎, 李颖, 郑子航. 我国湖泊系统氮磷时空变化及对富营养化影响研究 [J]. 地球与环境, 2010, 38 (2): 235-241. (CAI Longyan, LI Ying, ZHENG Zihang. Temporal and spatial distribution of nitrogen and phosphorus of lake systems in China and their impact on eutrophication [J]. Earth and Environment, 2010, 38 (2): 235-241. (in Chinese))
- [26] 张云, 王圣瑞, 段昌群, 等. 滇池沉水植物生长过程对间
隙水氮、磷时空变化的影响 [J]. 湖泊科学, 2018, 30 (2): 314-325. (ZHANG Yun, WANG Shengrui, DUAN Changqun, et al. Spatial-temporal variations of nitrogen and phosphorus forms in sediment porewater as affected by submerged plant in Lake Dianchi [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30 (2): 314-325. (in Chinese))
- [27] SCHINDLER D W. Evolution of phosphorus limitation in lakes [J]. Science, 1977, 195 (4275): 260-262.
- [28] 许海, 朱广伟, 秦伯强, 等. 氮磷比对水华蓝藻优势形成的影响 [J]. 中国环境科学, 2011, 31 (10): 1676-1683. (XU Hai, ZHU Guangwei, QIN Boqiang, et al. Influence of nitrogen-phosphorus ratio on dominance of bloom-forming cyanobacteria (*microcystis aeruginosa*) [J]. China Environmental Science, 2011, 31 (10): 1676-1683. (in Chinese))
- [29] SMITH V H, WOOD S A, MCBRIDE C G, et al. Phosphorus and nitrogen loading restraints are essential for successful eutrophication control of Lake Rotorua, New Zealand [J]. Inland Waters, 2016, 6 (2): 273-283.
- [30] MARTIN S, RIKKE B, ERIK J. Persistent internal phosphorus loading during summer in Shallow Eutrophic Lakes [J]. Hydrobiologia, 2013, 710 (1): 95-107.
- [31] 文帅龙, 吴涛, 杨洁, 等. 冬季大黑汀水库沉积物-水界面氮磷赋存特征及交换通量 [J]. 中国环境科学, 2019, 39 (3): 1217-1225. (WEN Shuailong, WU Tao, YANG Jie, et al. Distribution characteristics and exchange flux of nitrogen and phosphorus at the sediment-water interface of Daheiting Reservoir in winter [J]. China Environmental Science, 2019, 39 (3): 1217-1225. (in Chinese))
- [32] 李俊然, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 于桥水库流域地表水非点源 N 时空变化特征 [J]. 地理科学, 2002, 22 (2): 238-242. (LI Junran, CHEN Liding, FU Bojie, et al. Temporal and spatial characteristics of non-point source n in surface water of Yuqiao Reservoir watershed [J]. Scientia Geographica Sinica, 2002, 22 (2): 238-242. (in Chinese))
- [33] BOUDREAU B, JØRGENSEN B. The benthic boundary layer; transport processes and biogeochemistry [M]. New York: Oxford University Press, 2001.

(收稿日期: 2019-07-17 编辑: 熊水斌)

