

1990—2018 年于桥水库流域氮磷浓度变化趋势及影响因素^{*}

张 晨^{**}, 周雅迪, 宋迪迪

(天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300350)

摘要: 基于 1990—2018 年于桥水库流域入库河流与水库的逐月总氮(TN)和总磷(TP)监测数据, 整理并分析了 1990—2002、2003—2014 和 2015—2018 年 3 个时段 TN、TP 浓度和氮磷比(TN/TP)的时空变化特征, 探究流域内点面源污染削减、调水、氮磷滞留等对营养盐浓度变化的影响。结果表明, 1990—2018 年于桥水库 TN 浓度年均值在 1.14~3.74 mg/L 之间, 水库 TP 浓度年均值在 0.025~0.131 mg/L 之间, 多年 TN/TP 平均值为 45, 远高于淡水磷限氮磷比, 是磷限水库。于桥水库流域 5 个测点中, 沙河 TN 浓度最高, 黎河 TP 浓度最高, 入库 TN、TP 浓度大于库区, 水库 TP 滞留率略大于 TN。水库 TN、TP 浓度在 2000s 中后期下降, 之后出现反弹。原因是 2003 年水源保护工程实施后, 入库营养物浓度降低; 2014 年底南水北调中线一期工程通水后, 于桥水库的引水量减少, TN 的稀释效应弱化, 上游来水 TP 浓度上升与水库内夏秋两季浮游植物的增殖, 导致第三时段水库内 TP 浓度上升。基于月尺度水质分析, 夏季水库 TN 浓度最低, TP 浓度达到峰值, 主成分分析表明, 历年 6—10 月的水库 Chl.a 浓度与 TP 浓度呈显著正相关。后续富营养化治理应当控制沙河及库周围源的 TN 输入, 同步削减流域内 TP 负荷, 并通过建设和完善前置库、截污沟等工程措施降低入库氮磷浓度。

关键词: 营养盐; 氮磷比; 调水; 于桥水库; 氮磷滞留

Variation trend and impact factors of total nitrogen and total phosphorus concentrations in Yuqiao Reservoir Basin during 1990–2018^{*}

Zhang Chen^{**}, Zhou Yadi & Song Didi

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, P.R.China)

Abstract: To explore the variations in nutrients concentrations of the Yuqiao Reservoir Basin, we analyzed the spatial and temporal variations of total nitrogen and total phosphorus concentrations and TN/TP (mass ratio of total nitrogen to total phosphorus) in three periods from 1990–2002, 2003–2014 and 2015–2018. Simultaneously, the effect of pollution reduction, water transfer, and retention on nutrient concentrations were elucidated based on the monthly observed data of inlet rivers and reservoirs in the basin from 1990 to 2018. The results showed that the annual average TN concentration of Yuqiao Reservoir from 1990 to 2018 ranged from 1.14–3.74 mg/L and the annual average TP concentration ranged from 0.025–0.131 mg/L. The multi-year average TN/TP of Yuqiao Reservoir from 1990 to 2018 was 45, which was a phosphorus-limited reservoir. Both TN and TP concentrations were higher in the inflow than that were in the reservoir. Additionally, the TP retention rate in the reservoir was slightly higher than that of TN. The TN and TP concentrations in the reservoir decreased in the mid-to-late 2000s, but rebounded thereafter. The water protection project implemented in 2003 effectively reduced the incoming nutrient concentrations, especially the TP concentration. At the end of 2014, when the first-stage of the Middle Route South-to-North Water Diversion Project delivered water, the amount of diversion from Luanhe River was decreased and TP concentration increased. Excessive growth of phytoplankton in summer and autumn led to an increase in TP concentration during the third period in the reservoir. Based on the monthly water quality dataset, TN concentration in the reservoir was the lowest and TP concentration reached its peak in summer. The principal component analysis showed that a significantly positive correlation between Chl.*a* concentrations and TP concentrations in the reservoir from June to October. In the future, the TN from the Shahe River and the surrounding non-point sources should be controlled, and it should reduce the TP loadings of the whole basin simultaneously. In addition, engineering measures, such as front storage, sewage intercepting ditch, can be

* 2022-11-30 收稿; 2023-04-14 收修改稿。

国家自然科学基金项目(52079089)资助。

** 通信作者; E-mail: emil@tju.edu.cn。

used to reduce the incoming nutrient concentrations.

Keywords: Nutrients; nitrogen to phosphorus ratio; water transfer; Yuqiao Reservoir; nitrogen and phosphorus retention

富营养化是全球湖泊水库生态系统普遍面临的问题^[1]。国家生态环境部2018年监测统计结果显示,107个湖泊(水库)中贫营养占9.3%、中营养占61.7%、轻度富营养占23.4%、中度富营养占5.6%^[2]。氮和磷的浓度过高是导致湖泊富营养化的重要原因^[3-5]。为保证湖库水生态安全,抑制浮游植物的暴发,需控制水体氮磷养分。随着人类活动加剧,总氮(TN)和总磷(TP)的输入增加,Terrer^[6]指出半个世纪以来,大气氮沉降的增加与工业化肥的使用导致北半球土壤与水体的TN浓度普遍增加;赵晨英等^[7]研究指出黄渤海周边河流携带氮通量也逐渐升高。

湖库氮磷输入随着社会经济发展不断变化,所以在长时序尺度上探究湖库TN、TP浓度变化规律十分必要。诸多研究^[8-10]总结了国内外湖泊氮磷在不同历史时期的变化特征,分析了各个时段营养物的时空差异并提出了针对流域和湖泊的治理对策。朱广伟等^[11]分析太湖近70年水质的时空变化,探究用地、人口增长等外源因素与沉水植物退化、蓝藻扩张等内源因素对太湖总磷浓度的影响;Smith等^[12]分析了新西兰Rotorua湖实施水质修复后2001—2015年TN、TP浓度变化,量化湖泊富营养化控制的效果。研究湖库氮磷营养盐变化趋势将为控制湖库富营养化与水华暴发提供依据,除此之外相对浓度变化趋势也能提供一定参考。在我国,Tong等^[13]根据2007—2018年中国46个湖泊的数据集,观察到大多数湖泊的TN/TP呈上升的趋势;Qin等^[14]的研究显示2008—2018年间,中国30个湖泊中仅有13%的湖泊TN/TP增加,而20%的湖泊的TN/TP下降。不同学者分析湖库氮磷浓度变化趋势的着眼点不同,湖泊自然生物化学过程和人为因素亦存在区域性差异。

于桥水库作为天津市饮用水水源地,自1983年引滦入津通水后,为天津市生产生活用水提供了重要保障。许多研究已从入库营养物负荷^[15-16]、水库水质^[17-18]、沉积物^[19-20]等方面探究了于桥水库的营养状态与藻类生长过程。目前对于桥水库水环境的相关研究,多局限于雨季、调水期或特定年份等较短时间尺度,或是聚焦水库自身,缺乏对于桥水库流域营养物的长期变化趋势分析。本文基于1990—2018年于桥水库流域监测数据,分析TN、TP的时空变化趋势,重点分析流域尺度下点面源污染削减、调水、氮磷滞留等因素对水库TN、TP浓度及TN/TP的影响,为于桥水库调控与治理、流域水环境管理提供一定参考。

1 数据来源和方法

1.1 研究区域

于桥水库($40^{\circ}00' \sim 40^{\circ}04'N, 117^{\circ}26' \sim 117^{\circ}37'E$)位于天津市蓟州区城东,作为天津供水水源地,是中转滦河水的大(1)型水库。自1983年引滦入津开始至2014年,于桥水库对天津市的年均供水量为7.60亿 m^3 ,其中引滦水5.38亿 m^3 ;2014年底南水北调中线工程通水后,天津市引水结构从单一水源调整为双水源^[21],2015—2018年于桥水库的年均供水量为4.92亿 m^3 ,其中引滦水2.77亿 m^3 ,下降49%,南水北调中线向天津市供水8.31亿 m^3 。于桥水库正常蓄水位21.16 m,相应库容为3.85亿 m^3 、水面面积为86.8 km²,总库容15.59亿 m^3 ,控制流域面积2060 km²。于桥水库是浅水库,平均水深为4.6 m,最大水深为12.16 m。所在区域属温带半湿润大陆性季风气候,多年平均降水量为748.5 mm,降水主要集中在6—9月,流域蒸发量为6000万 m^3 。淋河、沙河和黎河是于桥水库的三大支流,如图1所示,引滦水通过黎河河道调入,与沙河合流后经果河汇入水库,库内蓄水由放水洞经暗渠输水至下游。

1.2 数据来源

1.2.1 水量数据 分别在沙河、黎河与淋河3条入库河流设置水文站。1990—2018年,黎河逐日流量数据来源于前毛庄监测站,年平均径流量为6.75亿 m^3 ,包括引水量5.20亿 m^3 ;1990—2018年,沙河逐日流量数据来源于水平口监测站,年平均径流量为1.12亿 m^3 ;淋河逐日流量数据来源于龙门口监测站,年平均径流量0.16亿 m^3 ,由于其入库水量远小于黎河和沙河,且年内常处于断流状态,故淋河水量与氮磷负荷不计入本研究。果河水量为黎河与沙河水量之和,即1990—2018年入库平均水量为7.87亿 m^3 。

1.2.2 水质数据 1990—2018年逐月水质监测数据来源于水库水质监测成果年鉴。水质取样点分别位于入

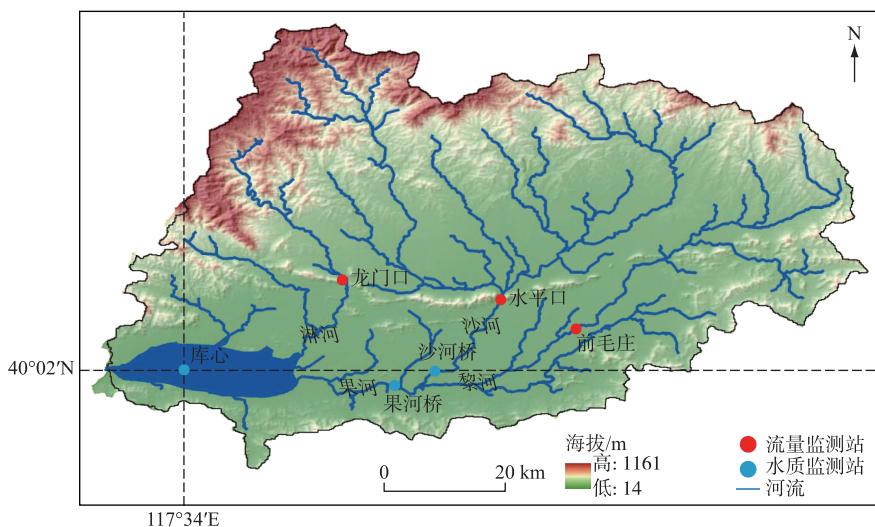


图1 于桥水库流域及水文监测站
Fig.1 Yuqiao Reservoir Basin and monitoring stations

库支流沙河、入库河流果河,以及水库内的库心和放水洞。沙河水质取样点位于沙河桥,入库 TN、TP 浓度取样点位于沙河、黎河汇流后的果河桥;黎河 TN、TP 浓度根据沙河桥、果河桥测点数据,通过氮磷质量平衡反算得出。所有项目监测及分析方法分别按照《环境污染监测方法》和地表水环境质量标准(GB 3838—1988、GB 3838—2002)中规定的地表水环境质量标准基本项目分析方法进行。

1.2.3 数据处理 沙河、黎河缺失月份的水量数据由皮尔逊 III 型曲线插值确定。水库内各测点 TN、TP 浓度均值采用 1—12 月的算数平均值作为年均值,入库河流 TN、TP 平均浓度采用水量加权平均值。在 1990—2018 年月数据中,水质缺失数据小于 2%,缺失数据采用线性插值。年均 TN/TP 为 TN 与 TP 浓度的年均值之比,为质量比。

分别使用 Excel 2016 与 SPSS 26.0 进行水量水质数据的统计和相关性分析与水质主成分分析;通过 ArcGIS 10.2 绘制地图,使用 Origin 2018 绘制图表。

1.3 分析方法

1.3.1 营养负荷计算 河流营养负荷为水量与其营养盐浓度的乘积,如式(1)所示:

$$W_i = Q_i \cdot C_i \quad (1)$$

式中, Q_i 为年径流量(m^3/a); C_i 为营养盐浓度年均值(mg/L)。

沙河营养负荷为沙河自产水氮磷负荷;由于黎河为引水通道,黎河营养负荷为黎河自产水氮磷负荷与引水氮磷负荷之和,在估算引水营养负荷时,取引水氮磷浓度等于黎河氮磷浓度。

1.3.2 Vollenweider 模型 用 Vollenweider 湖泊富营养化经验模型,估算水中的营养物浓度和滞留情况。即将湖泊看作是一完全混合体,同一营养盐浓度相等。营养盐浓度由公式(2)^[22]求出。

$$C_{\text{lake}} = \frac{C_{\text{in}}}{1 + a\tau_w^{b+1}} \quad (2)$$

式中, C_{lake} 代表水库的营养盐浓度(mg/L); C_{in} 为入库的营养盐浓度,在本研究中即果河浓度(mg/L); τ_w 为水力停留时间, $\tau_w = V/Q_{\text{in}}(a)$; V 为水库库容(m^3); Q_{in} 为年入库水量,即果河水量(m^3/a)。参数 a 与 b 由研究区域的实测数据回归分析得到^[21],即 $a = 2.207$ 、 $b = -0.641$ 。

1.3.3 滞留量与滞留率 模型将湖泊内部复杂的物理、化学和生物滞留作用假设为多个一阶作用的组合。本文将氮磷营养物转化损失和沉降等湖泊内部作用统称为滞留^[21]。滞留量 W_{lake} 和滞留率 R 的计算与出入库的水量及营养盐浓度有关,分别如式(3)和式(4)所示:

$$W_{\text{lake}} = W_{\text{in}} - W_{\text{out}} \quad (3)$$

$$R = 1 - \frac{W_{\text{in}}}{W_{\text{out}}} \quad (4)$$

式中, W_{in} 表示入库营养盐负荷(t/a), $W_{\text{in}} = Q_{\text{in}} \times C_{\text{in}}$; W_{out} 表示出库营养盐负荷(t/a), $W_{\text{out}} = Q_{\text{out}} \times C_{\text{out}}$; W_{lake} 为滞留量(t/a); Q_{out} 为出库水量(m^3/a); C_{out} 为出库浓度(mg/L), 与计算的库心浓度 C_{lake} 相等。

2 结果

2.1 于桥水库流域 TN、TP 浓度年际变化

1990—2018 年, 于桥水库流域 5 个测点的 TN、TP 浓度年均值变化见图 2。5 个测点的氮磷浓度存在明显的空间差异, 入库河流 TN、TP 浓度年均值高于水库。入库河流中, 沙河的 TN 浓度最高, 年均值范围在 2.59~11.94 mg/L 之间, 1990—2015 年沙河 TN 浓度呈显著上升趋势; 黎河 TN 浓度年均值范围在 2.65~8.39 mg/L 之间, 黎河 TN 浓度峰值出现在 1990s 中后期。沙河 TP 浓度年均值范围在 0.04~0.24 mg/L 之间, 多年均值为 0.09 mg/L, 前期保持低值波动, 至 2016 年达到最高峰; 黎河 TP 浓度年均值范围在 0.06~1.03 mg/L 之间, 多年均值为 0.27 mg/L, 峰值出现在 1995 年与 2016 年, 黎河 TP 浓度显著高于沙河。由于黎河的氮磷负荷(黎河自产水与引水的氮磷负荷之和)贡献率高(图 3), 果河与黎河的 TN、TP 浓度变化趋势相近, 果河 TN 浓度年均值范围在 3.54~9.10 mg/L 之间, 多年均值为 6.15 mg/L; TP 浓度年均值范围在 0.06~0.84 mg/L 之间, 多年均值为 0.24 mg/L。入库 TN、TP 浓度低值期出现在 2000 年后, 2000s 入库 TN 浓度年均值小于 6 mg/L; 2000s 后期至 2010s 前期入库 TP 年均值小于 0.1 mg/L。

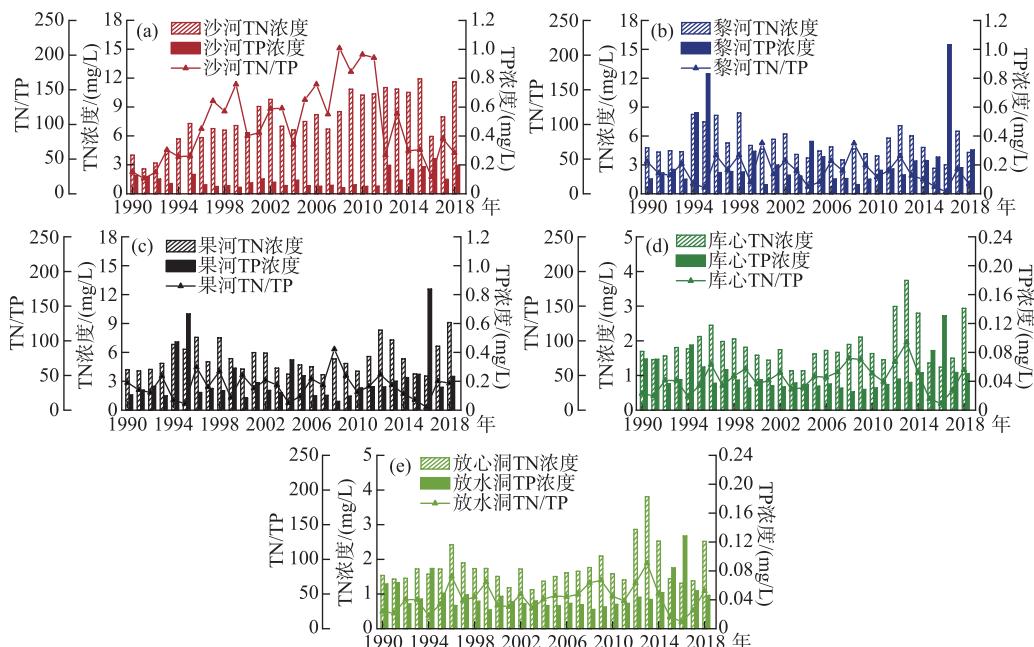


图 2 1990—2018 年于桥水库 TN、TP 浓度与 TN/TP 的变化
(a 沙河; b 黎河; c 果河; d 库心; e 放水洞)

Fig.2 Yearly variation of TN, TP concentrations and TN/TP in Yuqiao Reservoir from 1990 to 2018
(a: Sha River; b: Li River; c: Guo River; d: Reservoir Center; e: Outlet site)

水库内的库心、放水洞 2 个测点 TN、TP 浓度相近, 放水洞 TN、TP 浓度稍低于库心, 且 2 个测点的 TN、TP 变化趋势几乎一致。库心的年均 TN、TP 浓度分别在 1.14~3.74 和 0.025~0.131 mg/L 范围内, 均值分别为 1.89 和 0.048 mg/L, TN 浓度除 1995—1996 与 2012—2014 年外均低于 2 mg/L, TP 浓度双峰出现在 1994

年与2016年,TP浓度在2000s维持低值波动;放水洞的年均TN、TP浓度分别在1.12~3.80和0.026~0.128 mg/L范围内,均值分别为1.79和0.046 mg/L。

入库河流中,沙河、黎河与果河3个点的TN/TP均值分别为67.47、24.04和27.22(图2)。水库内的库心、放水洞2个测点TN/TP均值分别为45.51和44.33。于桥水库水体TN浓度高,TN/TP远高于淡水磷限的氮磷比^[4]22.6:1,是磷限水库。

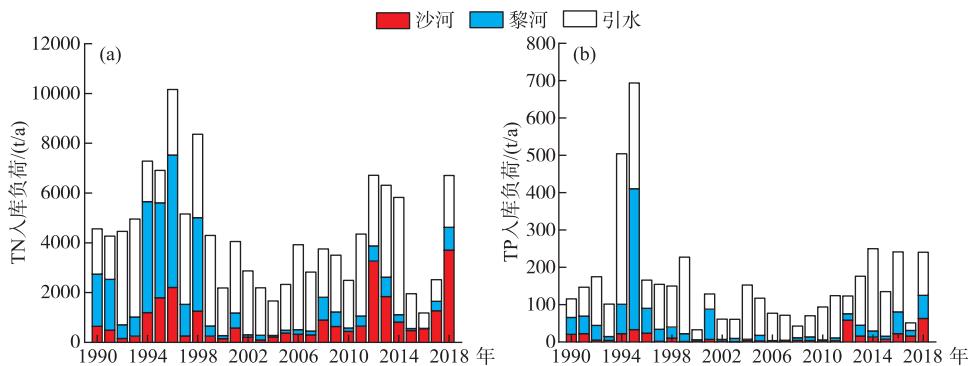


图3 1990—2018年于桥水库入库TN负荷(a)和TP负荷(b)

Fig.3 Yearly variation of TN loadings (a) and TP loadings (b) of inflow rivers of Yuqiao Reservoir from 1990 to 2018

2.2 于桥水库TN、TP浓度月均变化

由于沙河对入库营养物的贡献较小,黎河氮磷浓度又受到引滦水的影响,所以下文选取果河描述入库氮磷的情况;库心与放水洞的TN、TP浓度变化趋势相近,选取库心描述水库内氮磷的情况。1990—2018年果河与库心1—12月的TN、TP月均浓度如图4所示。果河与库心的TN月均浓度变化范围分别为3.73~8.83和1.45~2.38 mg/L,果河TN浓度春夏低、冬季高,峰值出现在1—2月,3—4月TN浓度显著下降,5—6月降至最低(图4a),7月后TN浓度逐渐升高;库心TN浓度夏秋低、冬季高,峰谷值分别出现在1—2月与6—8月,库心TN浓度的变化幅度小于果河,最低值的出现通常滞后于果河。

果河与库心的TP月均浓度变化范围分别为0.117~0.516和0.034~0.064 mg/L。果河TP浓度5月显著升高,夏季达到峰值,秋季TP浓度最低。库心TP浓度夏秋高、春冬低,TP浓度峰值常出现在7—8月,秋季各月份TP浓度逐步下降(图4b)。果河TN、TP浓度变幅高于库心,且变化趋势不完全同步。年内,果河的TN/TP长期高于库心,且二者的TN/TP趋势差异较大。果河TN/TP的2个低值为6—7月的60以及12月的40;与果河不同的是,库心的TN/TP最低值仅出现在夏季,库心夏季TN/TP均值为35。

于桥水库的滞留率受出入库水量、浓度的影响。TN的滞留率在3、8、10月出现峰值,对应时段的出入库水量均大于出库;此外,8月与10月的出入库浓度比小于0.3。TP的滞留率峰值出现在3、5、8月,对应时段的出入库水量均大于出库,8月的出入库水量比仅为0.68;3、5月TP出入库浓度比小于0.2。于桥水库对氮磷的滞留作用显著,当出入库水量比与浓度比为低值时使滞留率进一步升高。

3 于桥水库流域氮磷浓度变化成因分析

由于1990—2018年间不同时期的TN、TP浓度存在差异,本研究根据于桥水库水环境保护措施与引水结构变化,划分3个时段:第一个时段为1990—2002年,引滦入津水源保护工程实施前;第二个时段为2003—2014年,在该时段实施了包括削减入库点源和库周环境治理等水源保护工程措施;第三个时段为2015—2018年,如前所述,由于南水北调通水后,天津市引水结构发生了变化,引滦水量减半。下文将从流域内点面源污染削减、调水、氮磷滞留等方面讨论于桥水库氮磷浓度变化原因。

3.1 流域点源污染负荷的影响

于桥水库流域的点源有化肥厂、选矿厂等工业污染源和遵化市生活污水的排污口。2002年,引滦入津

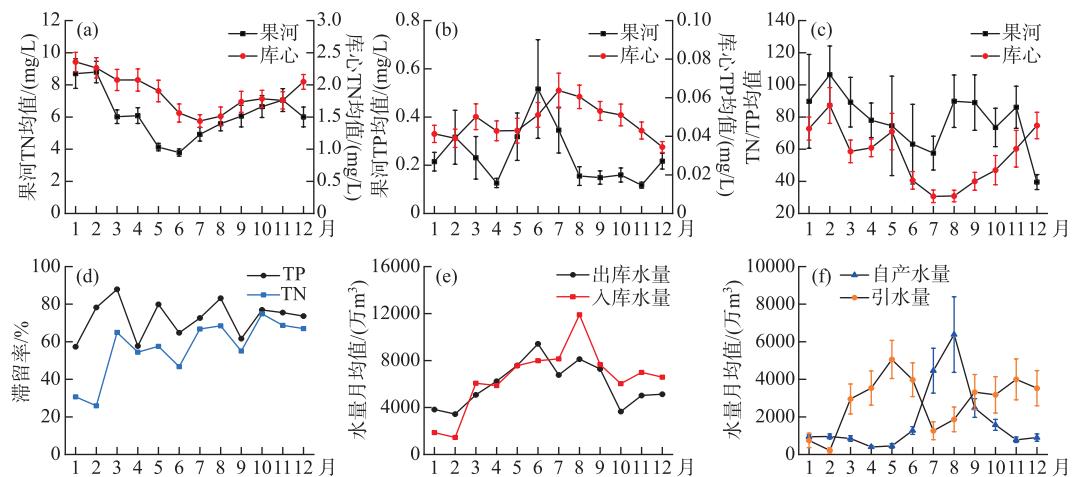


图 4 TN、TP 浓度与滞留率、TN/TP 及水量的月变化

Fig.4 Monthly variation of TN and TP concentrations and retention rates, TN/TP, and water volume

工程水源保护工程实施后,关闭了诸如化肥厂、糖醛厂等流域内点源,加之已停产的平安造纸厂和西铺选矿厂^[23],入库点源营养负荷得到彻底削减,果河 TN、TP 浓度接近上游大黑汀水库(图 5)。3 个时段入库的 TN、TP 浓度均先下降后上升,3 个时段入库的 TN 浓度均值分别为 5.64、5.31 和 6.51 mg/L;TP 浓度均值分别为 0.22、0.17 和 0.38 mg/L。相较于 1990—2002 年,2003—2014 年 TN、TP 入库浓度的分别降低 6% 和 26% (图 2),第二时段由于 TP 降低幅度更大,该时段 TN/TP 高于上一时段;第三时段入库 TP 浓度的大幅提高导致该时段 TN/TP 下降。入库河流中,黎河沿线大部分工业污染企业关闭后,其控制流域 TN、TP 浓度显著下降,第二时段黎河 TN 负荷贡献率由上一时段的 37% 降至 10%,TP 由 31% 降至 9%;但在工程实施后遵化市生活污水排入沙河并未得到有效治理,尽管沙河第二时段年均 TP 浓度维持在低水平,但该时段沙河 TN 浓度并未下降甚至有所升高,第二时段沙河 TN 负荷贡献率由第一时段的 14% 上升至 22%,所以流域自产水 TN 浓度下降幅度较小。

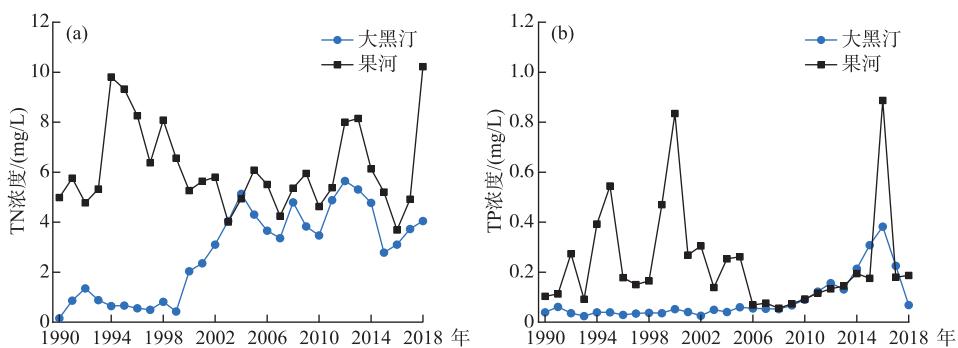


图 5 1990—2018 年果河与大黑汀水库历年 TN、TP 浓度变化

Fig.5 Yearly variation of TN, TP concentrations in Guohai River and Daheiting Reservoir from 1990 to 2018

水库内,3 个时段库心的 TN 浓度均值分别为 1.81、1.99 和 1.76 mg/L;TP 浓度均值分别为 0.05、0.04 和 0.08 mg/L。第二时段水库内 TN 浓度高于上一时段,如图 6d,而未趋同于该时段降低的入库 TN 浓度,表明该时段有相当的内源 TN 释放以及库周面源含氮物质输入。Tong 等^[13]通过研究得出中国东部地区大部分湖泊近十年呈现 TN/TP 升高的趋势,并指出城市污水处理升级是导致该变化的主要原因,并且污水处理及点源管控对提高水质的效率优于对面源的控制。于桥水库第二时段 TN 浓度上升而 TP 浓度下降引起该时

段 TN/TP 升高,第三时段 TN 浓度下降、TP 浓度上升导致 TN/TP 减小,所以 TN/TP 变化规律不能简要地概况为上升,存在某个时段 TN/TP 升高(或下降)而下一时段呈现出明显相反趋势的情况。

3.2 流域农业面源污染负荷的影响

随着点源的逐步削减,面源占比上升。长期以来,流域自产水携带大量氮负荷输入,入库 TN 浓度在丰水年 1994—1996、1998、2012—2013、2018 年的年均值超过 8 mg/L,入库 TN 浓度与自产水量的关系紧密。第二时段后,入库 TN 浓度与自产水量显著正相关($r=0.3, P<0.01, n=192$),尤其在降雨集中的 7—8 月,TN 与自产水量的相关系数为 0.8,TN 浓度会随着流域自产水的增加而上升,该时段面源氮是入库 TN 的重要影响因素。水源保护工程虽然对鱼池、村落等面源污染治理取得一定成效,但农业面源治理仍需进一步加强。冯爱萍等^[24]研究指出海河流域 TN 面源污染物排放量及入河量大,且农田径流占主导地位。

1990 年以来,津冀的化肥施用量快速增长,在 2014 年到达峰值。在农业部制定《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》后,到 2018 年津冀两地实现化肥总量与化肥施用强度的双减,根据《唐山市统计年鉴》数据估算,氮肥总用量与单位施用强度较于 2014 年分别下降 26% 与 16%。流域农业化肥用量减少、自产水量降低使得 2015 年前后入库 TN 浓度的降至最低值,但在 2018 年自产水量的急剧上升再次提高入库 TN 浓度。在面源氮的削减效果尚不显著的背景下,入库 TN 浓度主要受流域自产水量的影响。

3.3 跨流域调水的影响

于桥水库水源包括流域自产水和引水两部分,其入库营养物的变化与汇入径流水质、引水水质有关。1990—2018 年,引水量、引水 TN 负荷与引水 TP 负荷分别占入库总负荷的 66.0%、55.8% 和 68.5%。于桥水库调水根据每年的水文情况与用水需求做调整,每年调水期的具体时段与引水量并不完全相同。历年春秋两季的引水总量最大,而结冰期(1—2 月)、主汛期(7—8 月)几乎不调水。

引水对果河入库 TN 浓度的稀释作用明显,对果河 TP 浓度则是先降低后升高。根据果河桥测点数据,1990—2002 年、2003—2014 年、2015—2018 年 3 个时段,调水期的 TN 浓度比非调水期降低的比率分别为 39.9%、30.6% 和 37.9%(图 6b)。1990—2002 年,调水期 TP 浓度相较非调水期降低了 9.0%;2003—2014 年、2015—2018 年调水期 TP 浓度对于非调水期都呈升高现象,分别提高了 17.7%、55.3%。3 个时段内引水降低了果河的 TN 浓度,水库内 TN 浓度与果河变化规律相似,3 个时段内引水均导致水库内的 TN 降低,但降低幅度小于果河。虽然 1990s 引水 TP 浓度低,但引水会携带黎河沿线的大量点源,致使水库 TP 浓度增加(图 6e)。第一时段水库 TP 年均浓度的峰值出现在 1994 年,其中 3—7 月的月均浓度均大于 0.1 mg/L,且上述月份是当年引水的时段,引水量占比大于 60%,引水携带沿线超过 300 t 磷负荷入库,致使水库内 TP 浓度显著升高。在 2003—2014 年,实施水源保护工程后,去除了大量点源,入库 TN、TP 负荷也相对减少,入库 TN 浓度略高于大黑汀水库 TN 浓度,而入库 TP 浓度值与变化趋势与大黑汀相近(图 5)^[25],且 TP 的浓度降低比较多,非调水期 TN/TP 显著下降,如图 6c;而调水期 TP 浓度降低较小、甚至增加,由于自产水的 TP 浓度下降明显,引水携带的 TP 负荷对于 TN/TP 贡献变大,果河调水期的 TN/TP 均低于非调水期。

年内,冬季入库 TN 浓度高,在 3—6 月大量引水后,浓度明显降低(图 4a);但随着 7—8 月集中降水,流域自产水量增加,恰逢当地农户施肥,面源氮的输入增加了入库 TN 浓度。在第一时段,引水 TP 浓度小于流域自产水的 TP 浓度,引水降低入库 TP 浓度;水源保护工程逐步实施后,入库 TP 浓度与引水浓度接近。调水期,引水 TN 浓度低于于桥水库流域自产水,稀释了入库 TN 浓度;但引水 TP 浓度与自产水 TP 浓度相近,在 2003—2018 年,引水不但无法稀释自产水 TP 浓度反而增加入库水体 TP 含量。2015—2018 年 TP 浓度的上升,和上游潘家口、大黑汀水库水质恶化有关。2015、2016 年潘家口水库 TP 浓度达到接近 0.4 mg/L,在 2016 年大面积清理网箱养鱼后,水质有所好转^[25],从劣 V 类水质转变为 IV 类、III 类水质。2015 年以后,于桥水库引水结构发生变化,引水量降低^[21],对沿线及入库水体的稀释作用下降。

3.4 水库氮汇和磷汇的影响

年内,TP 滞留率略高于 TN(图 4d),二者滞留率的变化受出入库水量的影响,其中 3 月与 10 月附近时段滞留率高是由于引水量的增加,7—8 月滞留率高则是因为雨季的集中降水增加了入库水量,致使相应时段的入库水量大于出库水量。除水量外,出入库浓度变化的不同步也影响着滞留率,TP 滞留率在 5—6 月显著高于 TN,该时段 TP 入库浓度约为库心与出库浓度的 10 倍,而 TN 入库浓度接近库心与出库的 3 倍。

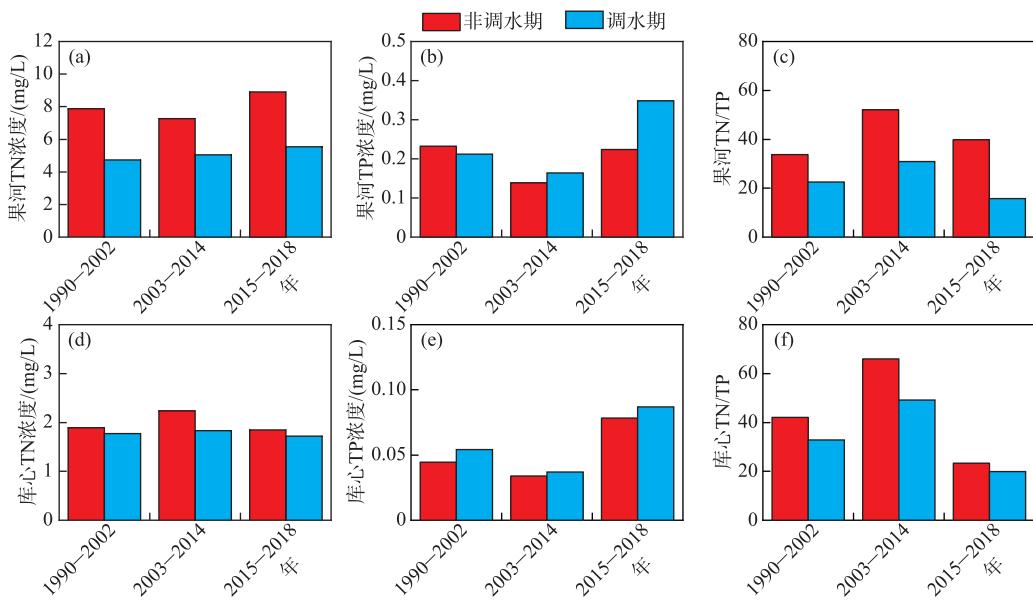


图 6 调水期与非调水期的 TN、TP 浓度及 TN/TP 变化对比(a~c 果河、d~f 库心)

Fig.6 Comparison of TN, TP concentrations and TN/TP during the transfer period and non-transfer period
(a-c: Guo River, d-f: Reservoir Center)

在调水期,引水降低入库 TN 浓度,如图 6;而调水期 TP 滞留率大于 TN,但调水期的 TN 浓度的降幅大于 TP。年内,引水对流域自产水稀释与水库的滞留共同降低营养物浓度,引水稀释对 TN 浓度下降的贡献为 32%,水库滞留为 68%;TP 浓度的降低主要受水库滞留的影响。水库 TN 滞留的变化幅度较 TP 平稳,在调水期,TN 的平均滞留率达到 71%,TP 的平均滞留率为 78%。与非调水期相比,调水期水位低、入流量大,水力停留时间短。在调水期,入库径流的 TN 负荷增加,且入库的氮素以硝酸盐为主,使脱氮作用有充足的底物^[26];调水期的水力停留时间为 0.34 a,能进行有效的氮素沉积与脱氮反应^[27]。当出流量小于入流量,氮素一部分通过反应进入大气和沉积物中,另一部分则蓄存在尚未流向下游的水体中,所以调水期的 TN 滞留率高。经过数年库周环境治理,目前于桥水库入库 TP 以面源为主,所以流量增加并未对 TP 浓度有明显的稀释作用。Elliott 等^[28]的研究认为污染为面源时,TP 和叶绿素随水力停留时间的增加而略微下降,此时更多的养分被带入湖中,同时更多的养分被冲出湖外。调水期 TP 滞留率与入库负荷相关性低($r=0.08, P<0.01$),意味着此时内源释放、藻类生长对水体 TP 浓度有不可忽视的影响。

1990–2002 年,TN 库心浓度比入库浓度降低了 72.7%,2003–2014 年降低了 64.5%;2 个时段 TP 库心浓度分别比入库浓度降低了 83.5% 与 73.5%。水源保护工程点源等治理维持 TP 浓度处于低水平,第二时段的入库 TP 浓度降低,该时段 TP 滞留率有所下降,但库心 TP 浓度仍显著低于入库。空间上,水库内的 TN/TP 小于入库 TN/TP,是水库的 TP 滞留率更大导致的。

3.5 浮游植物生物过程的影响

每年春夏交际时,随着水位上涨、水温升高,库内水草大量死亡,藻类增殖。氮磷浓度对藻类增殖有重要影响,当磷浓度低于 0.0155 mg/L 时可视作独立的缺磷指标^[5],当湖库 TN、TP 浓度分别大于 0.15 和 0.01 mg/L 时,可能诱发蓝藻水华^[29–30]。夏季于桥水库的 TN、TP 浓度范围分别为 0.58~4.19 和 0.012~0.277 mg/L。显然,水库充足的营养盐易引起藻类的增殖。

藻类暴发受到短期不断变化的营养盐与复杂的水文气象因素的影响,选取数据集中有 Chl.a 指标的库心水质月数据(2003–2018 年)进行分析。Chl.a 与营养盐的相关性一定程度上反映了藻类增殖过程中生物与营养盐的相互作用。主成分分析如图 7 所示,6–10 月水库水质的主要贡献因子为 Chl.a 和 TP。主成分 1

中 Chl.a、TP 正向负荷均大于 0.8, pH、DO 大于 0.6, 反映了水库的浮游植物的变化情况, 浮游植物生长与 TP 浓度、pH 和 DO 浓度呈正相关; 主成分 2 中 TN、NO₃⁻-N 和 NH₃-N 因子负荷较大, 反映水体氮的污染情况, TN、NO₃⁻-N 的正向负荷均大于 0.85, NH₃-N 与 PC2 呈负相关, 水体 TN 浓度与 NO₃⁻-N 浓度呈显著正相关 ($P<0.01$)。在氮磷营养盐中, Chl.a 与磷相关程度更高, TP、SRP 均为正相关 ($P<0.01$), 且 TP 中包括藻类生物体中的磷, 叶绿素与 TP 的相关性强且趋势相同, 既表明水体磷浓度升高可能引起藻类增殖, 也表现出藻类生物量的增加提高了 TP 浓度, 2017 年 6—7 月 Chl.a 增加 30% 时 TP 浓度相应提高 48%。Chl.a 与 NH₃-N 呈正相关, 与 NO₃⁻-N 呈负相关, 水库氮源充足, 可以满足藻类季节性生长所需氮, 所以吸收的氮盐不受限, 在生长阶段藻类首先吸收水体中的 NH₃-N, 后续藻类消亡 NH₃-N 浓度将随着蓝藻的降解而上升, 并且在降解阶段会促进反硝化作用^[31]; 而此时由于入库水量增加稀释了水体氮浓度同时夏季的高温提高了水库的脱氮能力, 水体 TN、NO₃⁻-N 浓度下降(图 4a), 与 Chl.a 浓度的升高呈现出不同的趋势。

4 于桥水库氮磷控制管理启示和工程途径

近 30 年于桥水库流域 5 个测点的氮磷浓度均表现为先下降后上升, TN 浓度高是于桥水库流域的特点, TP 治理成效显著, 水库 TP 浓度的多年均值优于Ⅲ类水标准限值, 但存在反弹现象。对于入库的营养物控制, 入库 TN 负荷较大, 在治理上仍需发力, 加强对沙河及库周面源的 TN 输入的管控。湖库水体 TN 浓度高且 TN 浓度与自产水量的相关性高, 则需要关注流域面源氮的输入, 严格控制农业氮肥的施用, 并基于流域经济水平、人口规模和自然条件, 制定和实施阶段性控制湖库富营养化的目标与方案。流域农业化肥用量在新的政策指导下不断降低, 不过目前化肥施用强度仍高于全国平均水平, 还需调整化肥结构与施肥方式, 控制减少施用面积与降低施用强度。

经过多年的入库河流沿线治理, 流域内磷的削减能力有限, 引水携带的入库 TP 负荷贡献较大, 所以需要协调跨流域调水进行磷污染的源头协同控制; 水库对磷的滞留率大, 沉积磷存在释放的风险, 水库管理者亦应着手削减内源以提高水库对总磷的自净能力。根据上述叶绿素与营养盐的相关性, 历年 6—10 月于桥水库水体 TN 浓度对于藻类而言仍过于丰富, TP 与藻类生长变化的关系更紧密, 水库的富营养化控制要关注磷的浓度变化, 保证上下游流域的污染共治。夏秋两季在控制磷浓度的基础上, 还可以通过调水来满足生态需水和降低水力停留时间来防控藻华暴发。参照天津市水安全保障“十四五”规划, 利用工程措施削减入库面污染源, 提升前置库湿地工程的作用, 续建环库截污沟与入库沟道湿地净化工程, 加强水库的封闭管理建设, 改善库周环境、提升水库水质。虽然水库氮磷浓度主要来自外源的输入, 但浅水水库营养程度与内源释放的关系不可忽视, 有待日后深入研究。

5 结论

TN、TP 浓度是湖泊水库生态系统重要的指标, 本文从流域尺度对于桥水库 TN、TP 浓度进行趋势分析, 得到以下结论:

- 1) 在流域 5 个测点中, 沙河的 TN 浓度最高, 黎河的 TP 浓度最高。1990—2002、2003—2014 和 2015—2018 年 3 个时段, 果河入库 TN、TP 浓度先下降后升高; 水库内 TN、TP 浓度在 2000s 中后期维持在低值, 之后再次升高。
- 2) 3 个时段引水均降低了入库 TN 浓度, 通过流域自产水输入的面源氮是 TN 浓度变化的主要原因。
- 3) 第一时段, 引水稀释了 TP 入库浓度, 第二时段水源保护工程降低了入库 TP 浓度与水库 TP 浓度, 此

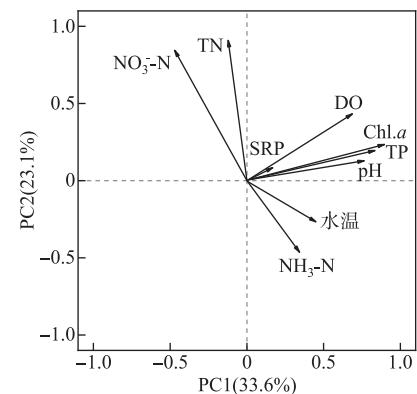


图 7 2003—2018 年于桥水库
库心水质主成分分析图

Fig.7 Principal component analysis
diagram of Yuqiao Reservoir Center
from 2003 to 2018

时引水反而增加了入库 TP 浓度;夏秋两季浮游植物生长加剧引起水库内 TP 浓度升高,导致了第三时段水库内 TP 浓度的反弹。

4) 在管理上,严格控制流域内农业氮肥的施用,协调调水进行磷控,通过水力调控满足生态需水和降低水力停留时间防控藻华暴发。除外,建设和完善前置库、截污沟等净化工程,也有助于削减径流入库和库周氮磷的输入。

6 参考文献

- [1] Conley DJ, Paerl HW, Howarth RW *et al.* Controlling eutrophication: Nitrogen and phosphorus. *Science*, 2009, **323**(5917): 1014-1015. DOI: 10.1126/science.1167755.
- [2] 中华人民共和国生态环境部.《2018年全国生态环境质量简况》发布全国生态环境质量持续改善.中国环境监察, 2019, (2): 4.
- [3] Søndergaard M, Lauridsen TL, Johansson LS *et al.* Nitrogen or phosphorus limitation in lakes and its impact on phytoplankton biomass and submerged macrophyte cover. *Hydrobiologia*, 2017, **795**(1): 35-48. DOI: 10.1007/s10750-017-3110-x.
- [4] Guildford SJ, Hecky RE. Total nitrogen, total phosphorus, and nutrient limitation in lakes and oceans: Is there a common relationship? *Limnology and Oceanography*, 2000, **45**(6): 1213-1223. DOI: 10.4319/lo.2000.45.6.1213.
- [5] Smith VH. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton. *Science*, 1983, **221**(4611): 669-671. DOI: 10.1126/science.221.4611.669.
- [6] Terrer C, Jackson RB, Prentice IC *et al.* Nitrogen and phosphorus constrain the CO₂ fertilization of global plant biomass. *Nature Climate Change*, 2019, **9**(9): 684-689. DOI: 10.1038/s41558-019-0545-2.
- [7] Zhao CY, Zang JY, Liu J *et al.* Distribution and budget of nitrogen and phosphorus and their influence on the ecosystem in the Bohai Sea and Yellow Sea. *China Environmental Science*, 2016, **36**(7): 2115-2127. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6923.2016.07.032. [赵晨英, 臧家业, 刘军等. 黄渤海氮磷营养盐的分布、收支与生态环境效应. 中国环境科学, 2016, **36**(7): 2115-2127.]
- [8] Dai XL, Qian PQ, Ye L *et al.* Changes in nitrogen and phosphorus concentrations in Lake Taihu, 1985–2015. *J Lake Sci*, 2016, **28**(5): 935-943. DOI: 10.18307/2016.0502. [戴秀丽, 钱佩琪, 叶凉等. 太湖水体氮、磷浓度演变趋势(1985—2015年). 湖泊科学, 2016, **28**(5): 935-943.]
- [9] Cui JY, Guo R, Song XW *et al.* Spatio-temporal variations of total nitrogen and total phosphorus in lake and inflow/outflow rivers of Lake Hongze, 2010–2019. *J Lake Sci*, 2021, **33**(6): 1727-1741. DOI: 10.18307/2021.0610. [崔嘉宇, 郭蓉, 宋兴伟等. 洪泽湖出入河流及湖体氮、磷浓度时空变化(2010—2019年). 湖泊科学, 2021, **33**(6): 1727-1741.]
- [10] You AJ, Wu ZY, Han ZC *et al.* Spatial and temporal distributions and variations of nutrients in the West Lake, Hangzhou, after the implementation of integrated water management program (1985–2013). *J Lake Sci*, 2015, **27**(3): 371-377. DOI: 10.18307/2015.0301. [尤爱菊, 吴芝瑛, 韩曾萃等. 引水等综合整治后杭州西湖氮、磷营养盐时空变化(1985—2013年). 湖泊科学, 2015, **27**(3): 371-377.]
- [11] Zhu GW, Qin BQ, Zhang YL *et al.* Fluctuation of phosphorus concentration in Lake Taihu in the past 70 years and future control strategy. *J Lake Sci*, 2021, **33**(4): 957-973. DOI: 10.18307/2021.0401. [朱广伟, 秦伯强, 张运林等. 近70年来太湖水体磷浓度变化特征及未来控制策略. 湖泊科学, 2021, **33**(4): 957-973.]
- [12] Smith V, Wood S, McBride C *et al.* Phosphorus and nitrogen loading restraints are essential for successful eutrophication control of Lake Rotorua, New Zealand. *Inland Waters*, 2016, **6**(2): 273-283. DOI: 10.5268/iw-6.2.998.
- [13] Tong YD, Wang MZ, Peñuelas J *et al.* Improvement in municipal wastewater treatment alters lake nitrogen to phosphorus ratios in populated regions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, **117**(21): 11566-11572. DOI: 10.1073/pnas.1920759117.
- [14] Qin BQ, Zhang YL, Zhu GW *et al.* Are nitrogen-to-phosphorus ratios of Chinese Lakes actually increasing? *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, **117**(35): 21000-21002. DOI: 10.1073/pnas.2013445117.
- [15] Li ZL, Zhou XB, Zhao XH *et al.* Estimating pollution load and evaluating management practices for Yuqiao Reservoir watershed. *Environmental Pollution & Control*, 2017, **39**(7): 752-756, 764. [李泽利, 周笑白, 赵兴华等. 于桥水库流域污染负荷估算和管理效果评估. 环境污染与防治, 2017, **39**(7): 752-756, 764.]
- [16] Li ZL, Luo N, Su DY *et al.* Load estimation and source variation analysis of nitrogen and phosphorus for the Yuqiao Reservoir watershed based on the GWLF model. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, **38**(1): 63-71. DOI: 10.13254/j.jare.2020.0054. [李泽利, 罗娜, 苏德岳等. 基于GWLF模型的于桥水库流域氮磷负荷估算及来源变化解析. 农业资源与环境学报, 2021, **38**(1): 63-71.]
- [17] Wu D, Wang HY, Zhang Z. Investigation of summer plankton community structure in Yuqiao Reservoir, Tianjin. *J Lake Sci*, 2013, **25**(5): 735-742. DOI: 10.18307/2013.0516. [武丹, 王海英, 张震. 天津于桥水库夏季浮游生物调查及群落结构变化. 湖泊科学, 2013, **25**(5): 735-742.]

- [18] Ge N, Feng P, Sun DM *et al.* Effects of non-point source pollution of nitrogen and phosphorus on water quality of the Yuqiao Reservoir. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2015, **13**(3) : 427-433. [葛宁, 冯平, 孙冬梅等. 库区面源氮、磷污染对于桥水库水质的影响. 南水北调与水利科技, 2015, **13**(3) : 427-433.]
- [19] Wen SL, Gong WQ, Wu T *et al.* Distribution characteristics and fluxes of nitrogen and phosphorus at the sediment-water interface of Yuqiao Reservoir. *Environmental Science*, 2018, **39**(5) : 2154-2164. DOI: 10.13227/j.hjkx.201709081. [文帅龙, 龚琬晴, 吴涛等. 于桥水库沉积物-水界面氮磷剖面特征及交换通量. 环境科学, 2018, **39**(5) : 2154-2164.]
- [20] Jiang X, Wen SL, Yao SC *et al.* Environmental significance of phosphorus existing forms in the sediments of Yuqiao Reservoir in Tianjin. *J Lake Sci*, 2018, **30**(3) : 628-639. DOI: 10.18307/2018.0305. [江雪, 文帅龙, 姚书春等. 天津于桥水库沉积物磷赋存特征及其环境意义. 湖泊科学, 2018, **30**(3) : 628-639.]
- [21] Zhang C, Song DD, Lian TH. The influences of the water diversion structure change on total phosphorus retention and implication for ecological flows in Yuqiao Reservoir, Tianjin. *J Lake Sci*, 2020, **32**(2) : 370-379. DOI: 10.18307/2020.0207. [张晨, 宋迪迪, 廉铁辉. 引水结构变化对天津于桥水库磷滞留的影响分析与生态水量估算. 湖泊科学, 2020, **32**(2) : 370-379.]
- [22] Brett MT, Benjamin MM. A review and reassessment of lake phosphorus retention and the nutrient loading concept. *Freshwater Biology*, 2008, **53**(1) : 194-211. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2007.01862.x.
- [23] 刘万宏. 引滦入津工程水质保护研究[学位论文]. 天津: 天津大学, 2007.
- [24] Feng AP, Wu CQ, Wang XL *et al.* Spatial character analysis on nitrogen and phosphorus diffuse pollution in Haihe River Basin by remote sensing. *China Environmental Science*, 2019, **39**(7) : 2999-3008. [冯爱萍, 吴传庆, 王雪蕾等. 海河流域氮磷面源污染空间特征遥感解析. 中国环境科学, 2019, **39**(7) : 2999-3008.]
- [25] 刘思宇, 刘容君. 潘大水库水质变化趋势分析及保护对策探讨. 中国水利学会 2021 学术年会论文集第三分册, 2021: 115-119.
- [26] Ingemar A, Tomas W, Katarina V *et al.* Nitrogen fluctuation related to microbial transformation in lakes. *AMBIO-Journal of Human Environment*, 1994, **23**(6) : 367-377.
- [27] Berge D, Fjeld E, Hindar A *et al.* Nitrogen retention in two different nutrient basins in Norway. *AMBIO-Journal of Human Environment*, 1997, **26**(5) : 276-282.
- [28] Elliott JA, Jones ID, Page T. The importance of nutrient source in determining the influence of retention time on phytoplankton: An explorative modelling study of a naturally well-flushed lake. *Hydrobiologia*, 2009, **627**(1) : 129-142. DOI: 10.1007/s10750-009-9720-1.
- [29] Song YZ, Qin BQ, Gao G. Effect of nutrient on periphytic algae and phytoplankton. *J Lake Sci*, 2007, **19**(2) : 125-130. DOI: 10.18307/2007.0203. [宋玉芝, 秦伯强, 高光. 氮及氮磷比对附着藻类及浮游藻类的影响. 湖泊科学, 2007, **19**(2) : 125-130.]
- [30] Cao J, Tian ZB, Chu ZS *et al.* Nitrogen and phosphorus control thresholds of cyanobacterial blooms in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2022, **34**(4) : 1075-1089. DOI: 10.18307/2022.0403. [曹晶, 田泽斌, 储昭升等. 太湖蓝藻水华暴发的氮磷控制阈值分析. 湖泊科学, 2022, **34**(4) : 1075-1089.]
- [31] Liu ZY, Xu H, Zhan X *et al.* Influence of cyanobacterial blooms on denitrification rate in shallow Lake Taihu, China. *Environmental Science*, 2019, **40**(3) : 1261-1269. DOI: 10.13227/j.hjkx.201808056. [刘志迎, 许海, 詹旭等. 蓝藻水华对太湖水柱反硝化作用的影响. 环境科学, 2019, **40**(3) : 1261-1269.]