

刘灿平,唐欣,严夏轩等.珠江三角洲水资源配置工程沿线节点的水质变化特征与趋势分析[J].人民珠江,DOI:10.3969/j.issn.1001-9235.XXXX.XX.001.

珠江三角洲水资源配置工程沿线节点的水质变化特征与趋势分析

刘灿平¹,唐欣²,严夏轩¹,刘威²,雷腊梅^{2*}

(1. 广东粤海珠三角供水有限公司,广东广州 511458;2. 暨南大学生命科学技术学院,广东广州 510632)

摘要:为评估珠江三角洲水资源配置工程沿线调水节点水质变化情况,对鲤鱼洲泵站、高新沙水库、罗田水库和公明水库2025年1—12月水质理化因子进行监测并计算营养状态指数(Trophic State Index, TSI),结合主成分分析(Principal Components Analysis, PCA)与置换多元方差分析(Permutational Multivariate Analysis of Variance, PERMANOVA),探讨了珠三角调水沿线节点的水质变化特征与趋势。结果表明,高新沙水库水质主要受鲤鱼洲调水口影响,沿鲤鱼洲-高新沙-罗田-公明水库调水方向的TN、TP、NO₃-N及电导率逐渐降低,透明度升高,TSI在工程末端显著下降。和鲤鱼洲的西江来水相比,经三座水库输送后至罗田水库,水体的营养盐浓度显著降低,水质明显改善。季节上,TN、Chl. *a*和TSI呈夏秋升高、春冬降低的格局,TP在不同节点水体间差异明显。PCA和PERMANOVA分析表明水质变化由氮、磷和营养状态主导,3座水库间环境因子存在显著差异。本研究表明珠江三角洲水资源配置工程沿线节点水体处于贫-中营养水平,但营养盐结构存在空间分化,需关注高温季节影响水质的关键因素。

关键词:水质;氮磷营养盐;营养状态;时空分布;珠三角水资源配置工程

中图分类号: 文献标识码:A 文章编号:1001-9235(XXXX)XX-0001-10

水库是国家重要的淡水资源基础,不仅承担供水与灌溉等基本功能,还兼具旅游、防洪和水力发电等多种综合利用价值。广东省地处我国华南地区,位于热带与亚热带交界地带,淡水资源较为丰富,是中国重要的水资源分布区之一。然而,该省内部存在明显的区域性水资源短缺问题,根据《广东省水资源公报》,广州、深圳、东莞等珠三角核心城市人均本地水资源量不足500 m³,低于国际极度缺水标准,区域用水供需矛盾突出。特别是珠江三角洲核心地区,水资源供给与经济生产布局之间存在严重失衡^[1-2]。基于珠三角地区水资源天然分布与区域高速发展的用水矛盾的背景^[3],广东省实施

了“珠江三角洲水资源配置工程”(以下简称“珠三角调水工程”),通过从西江流域调水向珠三角东部地区输送,以解决广州、深圳、东莞等城市的水资源短缺问题^[4]。

氮和磷等营养盐是影响水体生态健康状况的关键因子,其浓度决定了淡水生态系统的初级生产力水平^[5-6]。然而,在调水工程体系中,水体通过跨流域输送与多节点串联,水动力条件、水体停留时间及营养盐来源均出现明显变化,从而可能引起水质在空间上的重新分布及富营养化风险沿输水路线呈现高低梯度分化。已有研究多集中于单一水库或天然水体中营养盐对水质的影响^[7-12],而针对

基金项目:藻类防控及智慧化管理关键技术研究项目(CD88-JS04-2025-0005)

收稿日期:2026-05-20 **修回日期:**2026-07-17

作者简介:刘灿平(1992—),男,硕士,主要从事水利工程建设与管理工作。

通信作者:雷腊梅(1974—),女,博士,教授,主要从事藻类生物学、水环境监测及毒理学研究等工作。

联系作者:致信 rmzj@pearlwater.gov.cn,由期刊转接。

大型调水工程沿线节点水质演变规律及其改善效果的系统研究仍相对不足,特别是对营养盐在调水过程中的迁移转化及其对水体营养状态的影响缺乏深入认识。因此,明确调水过程中营养盐的时空变化特征及其对水质改善的作用,对于评估工程运行的生态效应和保障供水安全具有重要意义。

本研究以珠三角调水工程在调水过程中的鲤鱼洲泵站、高新沙水库、罗田水库和公明水库为研究对象,系统分析氮、磷等营养盐在调水过程中的时空分布特征,识别该调水工程潜在的水环境问题关键区域,旨在为珠三角调水工程的水质评估与生态治理提供科学依据和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域及采样点

珠三角调水工程为单向加压跨流域调水系统,起于西江干流鲤鱼洲泵站(113°06' E, 22°80' N),先

通过长约 7.2 km 的地下封闭的输水隧洞接入高新沙水库(113°42' E, 22°83' N),再依次串联罗田水库(113°88' E, 22°84' N)与公明水库(113°97' E, 22°77' N)。本研究综合四个水库地形、水动力、营养输入等空间分布特征共设置 13 个采样点(图 1),可全面表征水库水文、营养盐及生态空间分布特征。具体如下:鲤鱼洲泵站的采样点设置于取水口;高新沙水库共设置 6 个采样点,分别为泵站进水闸(S1)、水库中(S2)、巡查点 2(S3)、右线进库闸(S4)、万顷沙分水口(S5)和左线进库闸(S6);罗田水库设置 3 个采样点,分别为进库闸(S1)、进水前池(S2)和东莞分干线(S3);公明水库设置 3 个采样点,分别为进库闸(S1)、进库闸左侧受影响的区域(S2)和进库闸右侧受影响的区域(S3)。珠三角调水工程设计年均调水 17.08 亿 m^3 ,调水流量为 $80 \text{ m}^3/\text{s}$;2024 年 1 月至 2026 年 1 月,两年累计总输水量为 12.8 亿 m^3 ,年均负荷率为 37.5%。

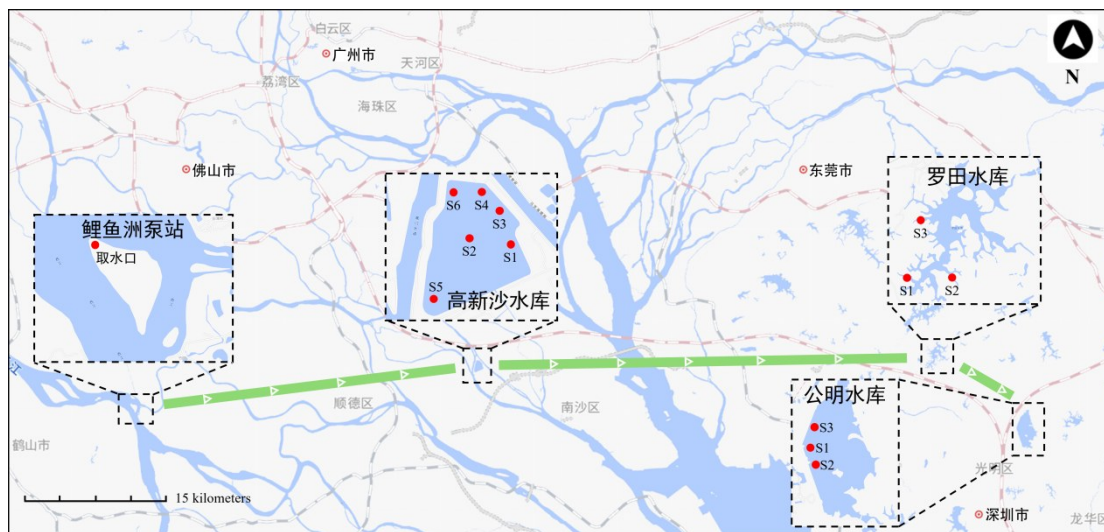


图 1 珠江三角洲水资源配置工程线路与采样点

Fig. 1 Route of the Pearl River Delta Water Resources Allocation Project and sampling sites

1.2 样品采集与处理

采样工作于 2025 年 1—12 月期间进行,每月中下旬固定日期完成现场水样采集,各月度采样时间间隔基本均等,以规避时间偏差对水质时序分析的干扰。依据 HJ 91.2—2022《地表水环境质量监测技术规范》,在现场使用 YSI ProDSS 便携式多参数

仪(每次采样前均用标准缓冲液进行 pH 和 DO 校准,电导率探头定期清洗)测定各采样点的水温(Water Temperature, WT)、pH、溶解氧(Dissolved Oxygen, DO)和电导率(Conductivity, Cond),并采用塞氏盘(Secchi disk)测定水体透明度(Secchi Depth, SD)。使用有机玻璃采水器在水体表层(约 0.5 m 深

处)采集 1 L 水样,带回实验室后立即将水样置于 4℃暗处保存,所有指标:总氮(Total Nitrogen, TN)、总磷(Total Phosphorus, TP)、硝酸盐氮(NO₃-N)及叶绿素 *a*(Chl. *a*) 在 72 h 内完成测定,每个样本设 3 个平行样,相对偏差控制在±10%。各项指标的测定方法参照国家标准《水和废水监测分析方法》(第四版)执行。

1.3 水体营养状态评价

选择 TN、TP、Chl. *a* 和 SD 指标计算营养状态指数(Trophic State Index, TSI)^[13]:

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

式中:TSI(Σ)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;TSI(j)为代表第j种参数的营养状态指数。

各项目营养状态指数计算:TSI(Chl. *a*) = 10*(2.46+ln(Chl. *a*)/ln(2.5));TSI(TN) = 10*(2.46+(1.912-1.349*ln(TN))/ln(2.5));TSI(TP) = 10*(2.46+(3.497+0.654*ln(TP))/ln(2.5));TSI(SD) = 10*(2.46+(1.912-1.349*ln(SD))/ln(2.5))。式中:ln表示自然对数,Chl. *a* 单位为 μg/L,SD 单位为 m;其他指标单位均为 mg/L。

营养状态指数相关系数 r_{ij}^2 与 5 个营养状态指数相关权重参照《湖泊(水库)富营养化评价方法及分级技术规定》(中国环境监测总站,总站生字[2001]90号),本研究未监测 COD_{mn} 指标,仅选取 Chl. *a*、TN、TP、SD 四项重新归一化权重,分别为:Chl. *a* 占 33.8%,TN 占 20.3%,TP 占 22.3%,SD 占 23.6%。并参照此规定对湖泊(水库)营养状态进行分级,TSI < 30 为贫营养,30 ≤ TSI < 50 为中营养,TSI ≥ 50 为富营养。

1.4 数据处理与分析

使用 Excel 2024 软件对原始监测数据进行整理与预处理,通过异常值筛选、缺失值校验及数据统一校正,剔除误差样本,保证数据可靠性。运用 SPSS 27.0 软件进行统计分析,使用 Origin 2024 绘制 4 座水库理化因子的箱线图和折线图。PCA (Principal Components Analysis) 与 PERMANOVA

(Permutational Multivariate Analysis of Variance) 分析均在 R 4.4.2 软件中完成,主要基于“vegan”包实现,并采用“ggplot2”包进行可视化。PCA 用于揭示水体理化因子的综合变化特征。在分析前,对所有环境变量进行标准化处理(scale = TRUE),以消除量纲差异的影响。PCA 采用 vegan 包中的 rda 函数实现,并基于特征值进行降维分析。主成分的筛选依据 Kaiser-Guttman 准则(特征值大于 1),并结合累计解释率进行综合判断。提取的主成分用于样点排序及环境因子结构解释,以展示不同水库之间的空间分布格局及环境梯度变化特征。在此基础上,采用基于欧氏距离的 PERMANOVA (adonis2 函数) 检验不同水库样点间理化指标的整体差异显著性,从而对 PCA 结果所揭示的分组结构进行统计验证。PCA 排序结果与 PERMANOVA 显著性检验相结合,共同用于评估不同水库之间环境因子的空间异质性与群落分异特征。

2 结果与讨论

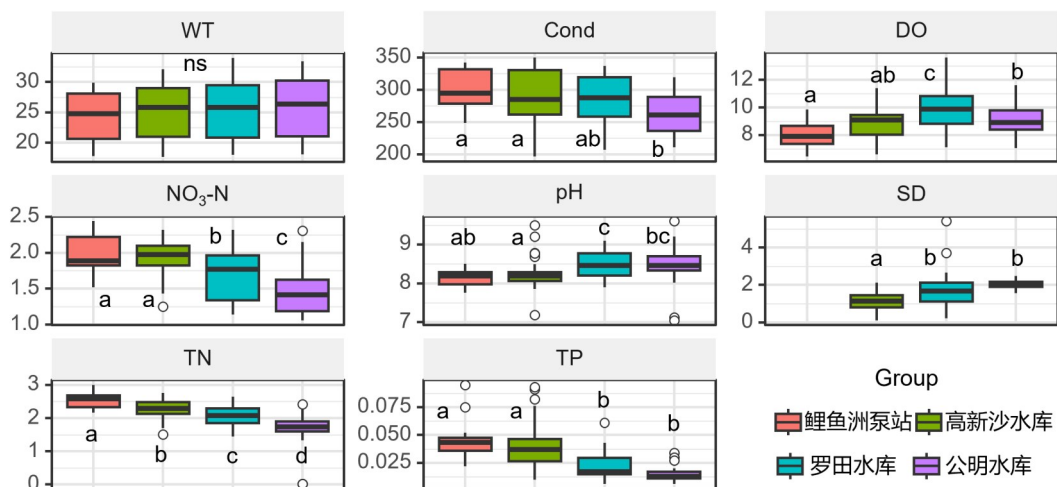
2.1 珠三角调水工程中水库水质理化因子特征

2025 年 1—12 月,鲤鱼洲泵站、高新沙水库、罗田水库和公明水库的水质理化因子变化见图 2。总体来看,随着调水过程的推进,营养盐(TN、TP 和 NO₃-N)浓度和 Cond 逐渐降低,具体变化如下:鲤鱼洲泵站 TN、TP 年均浓度分别为 2.53、0.04 mg/L。水体沿调水干线输送到罗田水库后,2 类指标的年均浓度降至 2.05、0.02 mg/L。到末端的公明水库时进一步降至 1.64、0.01 mg/L。相较于调水起点鲤鱼洲泵站,水体输送至末端公明水库时,氮、磷年均浓度分别降低 35.1%、75.0%。而 SD 呈逐步上升趋势。在珠三角调水工程末端的公明水库中,TN、TP、NO₃-N 和 Cond 显著低于调水起始点的鲤鱼洲泵站和高新沙水库,而 SD 则显著高于调水起始点高新沙水库。

上述结果表明,相较于鲤鱼洲的西江来水,珠三角调水工程沿线输水至末端公明水库的过程中,沿线水体的理化环境得到了一定程度的改善,降低了营养盐负荷与富营养化水平。在调水过程中,

TN、TP 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度降低可能是由于上游水体的持续输入,原有高浓度的氮、磷等营养盐被稀释,同时部分营养物质沉降或被浮游植物吸收转化^[14-15]。电导率的降低同样反映了溶解性无机离子的减少,体现调水输水体系内部存在稀释与自净效应。与

此同时,水体透明度的升高表明悬浮颗粒物和浮游植物的减少。透明度的升高不仅与营养盐降低有关,也可能受到调水流动加快、水体自净作用增强等因素影响^[16-17]。流速的增加可以促进水体混合,减少表层浮游藻类的聚集,从而提升透光性^[18-20]。



注:Group 为 4 座研究水库;不同字母表示组间差异显著($P < 0.05$),相同字母 /ns 代表无显著差异($P > 0.05$)。

图2 水质理化因子特征及其水库间差异

Fig. 2 Water quality physicochemical characteristics and differences among reservoirs

2.2 珠三角调水工程中叶绿素 a 与富营养化的时空变化

此次调查中,不同节点的 Chl. a 浓度存在空间差异(图3)。鲤鱼洲泵站 Chl. a 浓度整体较低且变化范围较窄(2.16~5.72 $\mu\text{g/L}$),而高新沙水库、罗田水库和公明水库变化幅度较大,浓度范围分别为 1.23~40.76、0.25~29.61、1.31~41.66 $\mu\text{g/L}$,平均值分别为 3.46、6.66、8.41、7.17 $\mu\text{g/L}$ 。然而, Kruskal-Wallis H 检验结果表明,各节点之间 Chl. a 浓度差异未达到显著水平($P > 0.05$),表明在调水工程影响下,不同节点间的水体连通性较强,浮游植物生物量在空间上无显著差异。从时间变化特征来看(图3a),各水库 Chl. a 浓度均呈现出明显的季节性变化趋势,整体表现为春冬季较低、夏秋季较高。这一变化模式与亚热带地区的气候特征密切相关:春末夏初光照增强、水温升高以及水体稳定性增强,为浮游植物光合作用和细胞分裂提供了

有利条件,从而促进其快速生长与繁殖,导致夏秋季生物量显著增加^[21-25]。相比之下,鲤鱼洲泵站全年 Chl. a 浓度较低,表明其浮游植物生物量受到抑制。这可能与该区域较强的水动力条件有关,较快水流缩短了水体停留时间,不利于浮游植物的积累与群体形成^[26-31]。

在 TSI 方面,高新沙水库、罗田水库和公明水库的 TSI 变化范围分别为 33.37~49.83、27.09~45.80 和 31.11~45.13(图4)。整体来看,高新沙水库与公明水库总体处于中营养状态,而罗田水库介于贫营养至中营养状态之间,营养水平相对较低。非参数检验结果表明,罗田水库和公明水库 TSI 显著低于高新沙水库,表明从鲤鱼洲西江来水开始的高新沙水库至调水路径末端的公明水库,水体营养状态沿调水路径呈下降趋势。这一结果与 TN、TP 等营养盐浓度沿程递减的变化规律一致,说明其调水路径借助水体稀释、水库水体交换持续降低氮磷营养盐

水平,大幅削减营养盐存量,有效缓解了末端水体富营养化发生风险。黄河小浪底水库在调水后呈现出一致的变化趋势(小浪底水库与珠三角调水工程区域都属于季风气候体系,降水均集中在夏季,雨热同期,季节水文、水温变化明显),其综合营养状态指数明显下降^[31]。此外,南水北调工程中沿线监测断面的水质在调水后也得到显著改善^[32]。从

年内变化特征来看(图4a),高新沙水库与罗田水库TSI波动幅度较大,均呈现出春冬季较低、夏秋季较高的季节性变化趋势,峰值分别出现在5—6月。相比之下,公明水库TSI年内变化相对平稳,但同样表现出春冬偏低、夏秋升高的季节格局,并于6月达到全年最高值。整体而言,3座水库均受到季节性因素的显著影响,夏季为营养状态升高的关键时期。

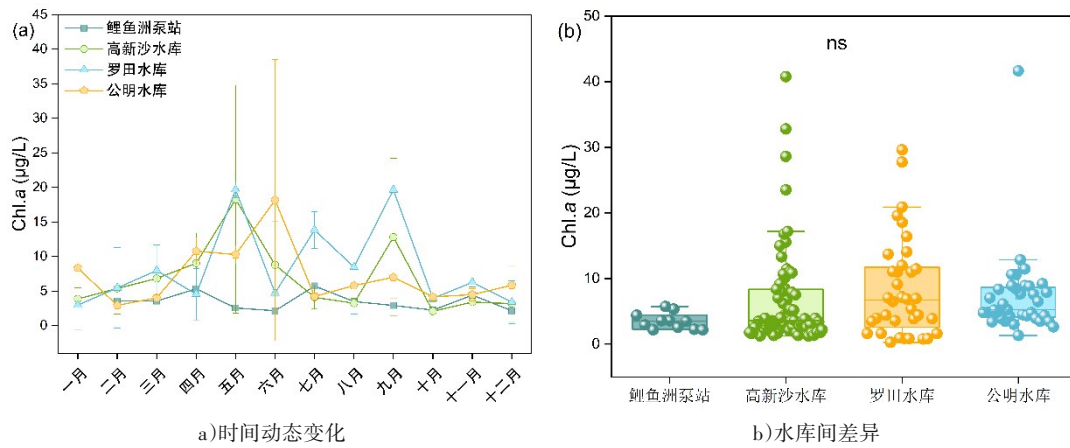


图3 珠三角调水工程中Chl. *a*的时间动态变化及水库间差异

Fig. 3 Temporal dynamics of Chl. *a* TSI in the Pearl River Delta Water Resources Allocation Project and differences among reservoirs

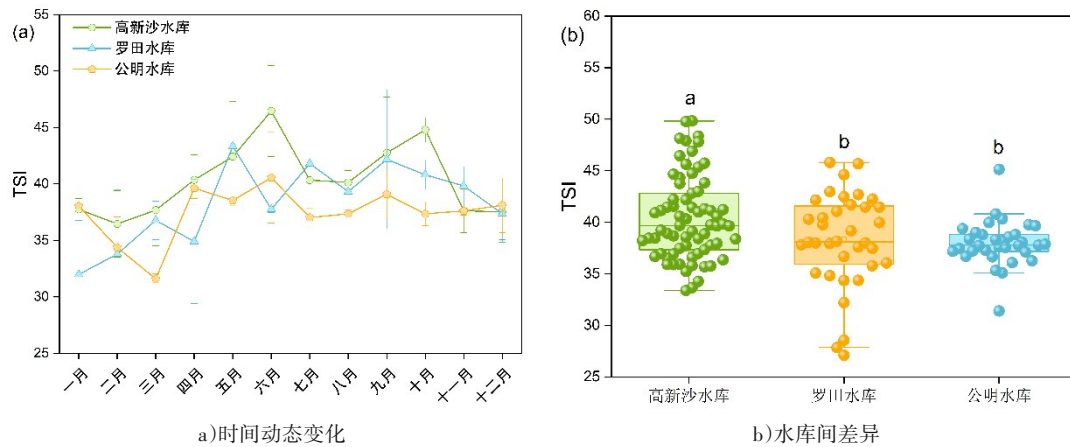


图4 珠三角调水工程中TSI的时间动态变化及水库间差异

Fig. 4 Temporal dynamics of TSI in the Pearl River Delta Water Resources Allocation Project and differences among reservoirs

2.3 珠三角调水工程中环境影响因子分析

为揭示珠三角调水工程中鲤鱼洲泵站、高新沙水库、罗田水库和公明水库的水环境特征,本研究选取TN、TP、NO₃-N、Chl. *a*、WT、DO、pH和Cond等8

项理化指标进行主成分分析。图5中,虚线椭圆表示95%置信区间。前2个主成分累计解释了65.12%的总变异,能够较好地反映水库中水环境因子的主要变化格局。

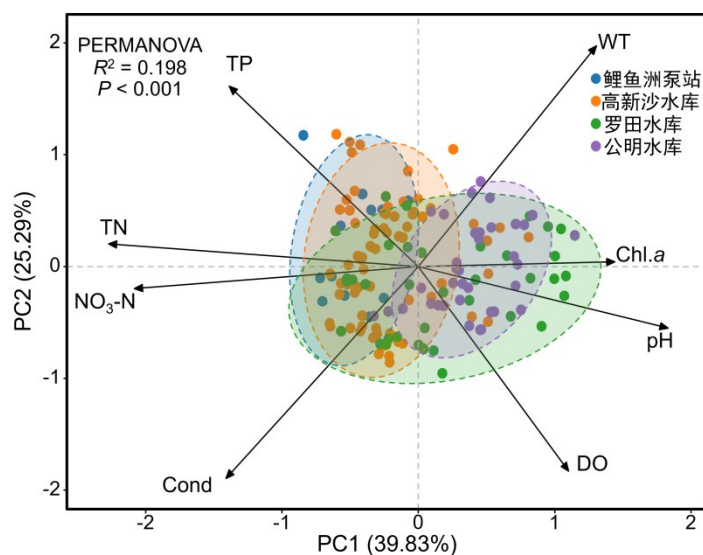


图5 珠三角调水工程中不同节点水体理化指标的主成分分析排序

Fig. 5 PCA ordination of physicochemical parameters in different reservoirs of the Pearl River Delta Water Resources Allocation Project

结合各环境因子的载荷分布特征, TN 和 NO_3-N 在 $PC1$ 轴上具有较高负载荷, 而 pH 、 DO 和 $Chl. a$ 在 $PC1$ 轴上呈正载荷, 说明 $PC1$ 轴主要反映由氮营养水平及其与浮游植物共同驱动的特征梯度, 是区分不同水库水质结构差异的主要环境梯度。在 $PC2$ 轴上, TP 表现为较高正载荷, 而 $Cond$ 呈明显负载荷, DO 也在 $PC2$ 上表现为负方向, 表明该轴主要体现以磷营养盐为主导, 并与水体离子强度及溶解氧存在反向耦合关系。此外, WT 在 $PC2$ 轴上亦呈正载荷, 说明该轴同时受到水温变化的影响, 反映了营养过程与水体物理条件的综合作用。

PERMANOVA 分析结果显示(基于 999 次随机置换检验), 不同水库在多变量空间中的差异显著 ($R^2 = 0.198, P < 0.001$), 表明珠三角调水工程不同节点之间在水环境特征上存在显著差异。基于 Kaiser-Guttman 准则(特征值大于 1), $PC1$ (特征值等于 3.19) 和 $PC2$ (特征值等于 2.02) 均大于 1, 而 $PC3$ 及之后各主成分的特征值均小于 1 (小于等于 0.98), 因此保留前两个主成分用于后续分析。从排序分布来看, 珠三角调水节点的水环境特征呈现出一定的梯度变化。位于调水起点的鲤鱼洲泵站样点与末端公明水库样点在排序图中明显分离, 分

别位于 $PC1$ 轴的负向和正向。结合 $PC1$ 轴上各环境因子的载荷分布可知, 沿调水路线水体氮和磷营养盐水平逐渐降低, 同时 DO 、 pH 和 $Chl. a$ 等指标发生协同变化, 表明水体营养结构趋于优化, 调水过程对水质具有一定改善作用^[34-35]。此外, 鲤鱼洲泵站与高新沙水库样点存在明显重叠, 而高新沙水库与罗田水库逐渐出现分离, 并与公明水库明显区分, 表明沿调水路线水体环境特征逐步发生转变。高新沙水库水质受上游鲤鱼洲泵站控制, 水体经高新沙水库沉降稀释后进入罗田水库, 表现出过渡性特征, 至公明水库在多变量排序空间中与上游各水库节点显著分离 (PERMANOVA 检验组间差异 $P < 0.05$), 形成差异化水环境类型, 反映出调水过程中水质及营养结构的逐级变化与累积效应。

3 结论

本研究基于 2025 年 1—12 月珠三角调水工程沿线调水节点(鲤鱼洲泵站、高新沙水库、罗田水库和公明水库)的监测数据, 系统分析了水体理化因子、叶绿素 a ($Chl. a$) 及综合营养状态指数的时空变化特征, 并结合 PCA 与 PERMANOVA 探讨水环境结构差异。

a)空间与季节变化规律。空间尺度上,珠三角调水工程沿线水体整体处于贫—中营养水平,水质状况较好。沿鲤鱼洲西江来水至公明水库的输水路径,TN、TP和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 等营养盐浓度及电导率沿调水线路递减,水体透明度显著升高,综合营养状态指数在工程末端明显低于起始节点;PCA和PERMANOVA分析显示高新沙水库与公明水库在多变空间分离明显,罗田水库处于过渡状态。季节尺度上,珠三角调水工程营养盐浓度呈现夏秋相对较高,春冬降低的动态变化模式,TN、Chl. *a*与综合营养状态指数在夏秋季升高,春冬季降低。不同水库间TP变化趋势存在差异。

b)原因分析。调水带来的稀释、输移与水动力强化作用,优化了水体营养结构、缓解富营养化并改善水下光环境。温度和营养状态升高对浮游植物生长具有促进作用。TP受外源输入与内源过程的共同影响,具体表现为水库可能通过颗粒物沉降去除部分颗粒态磷,导致下游TP浓度降低。各节点水体在营养盐结构及营养化程度上存在显著空间分化。

c)建议。夏季为富营养化高发时段,未来应加强夏季高温期氮、磷通量监测,并评估底泥释放对局部水域TP反弹的风险。

参考文献:

- [1] 练伟航, 宫鹏杰, 张广传, 等. 鲤鱼洲取水口工程进水流态改善试验研究[J]. 广东水利水电, 2024(11): 6-9, 14.
Lian Weihang, Gong Pengjie, Zhang Guangchuan, et al. Experimental Research on Improving the Inflow Patterns of Liyuzhou Water Intake Project [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2024, (11): 6-9, 14. (in Chinese)
- [2] 罗泯勇. 浅谈水利建筑设计: 以珠江三角洲水资源配置工程鲤鱼洲泵站为例[J]. 广东水利水电, 2023(2): 27-30, 44.
Luo Minyong. Discussion on the Design of Water Conservancy Buildings—Taking the Liyuzhou pump station of the water resources allocation project in the Pearl River Zhujiang Delta as an example [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2023, (02): 27-30, 44. (in Chinese)
- [3] 梁颖珊, 李湘姣, 刘玥. 粤港澳大湾区广东省域城市水资源禀赋及开发利用分析[J]. 人民珠江, 2024, 45(5): 10-18.
Liang Yingshan, Li Xiangjiao, Liu Yue. Analysis on Water Resources Endowment and Exploitation & Utilization of Cities within Guangdong Province in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. Pearl River, 2024, 45(5): 10-18. (in Chinese)
- [4] 徐洪军, 黄永健, 艾锐. 珠江三角洲水资源配置工程运行调度方案研究[J]. 黑龙江水利科技, 2022, 50(11): 79-84.
Xu Hongjun, Huang Yongjian, Ai Rui. Study on operation and scheduling scheme of water resource allocation project in Pearl River Delta [J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology, 2022, 50(11): 79-84. (in Chinese)
- [5] 毛仲蒙, 蒋燕茹, 刘瑞敏, 等. 华南典型大型水库氮磷化学计量时空特征及影响因子分析: 以高州水库为例[J]. 湖泊科学, 2025, 37(4): 1189-1197.
Mao Zhongmeng, Jiang Yanru, Liu Ruimin, et al. Spatio-temporal pattern of nitrogen and phosphorus stoichiometry in a typical large reservoir in South China: A case study of Gaozhou Reservoir [J]. Journal of Lake Sciences, 2025, 37(4): 1189-1197. (in Chinese)
- [6] Elser J J, Bracken M E S, et al. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems [J]. Ecology Letters, 2007, 10(12): 1135-1142.
- [7] 程浩森, 王安安, 张健, 等. 调水工程对过水性湖泊中污染物迁移转化的影响[J]. 人民长江, 2023, 54(3): 49-55, 71.
Cheng Haomiao, Wang An'an, Zhang Jian, et al. Influence of water transfer projects on migration and transformation of pollutants in flow-through lakes [J]. Yangtze River, 2023, 54(03): 49-55, 71. (in Chinese)
- [8] Zeng Qinghui, Qin Lihuan, Li Xuyong. The potential impact of an inter-basin water transfer project on nutrients (nitrogen and phosphorous) and chlorophyll *a* of the receiving water system [J]. Science of the Total Environment, 2015, 536: 675-686.
- [9] Zang Nan, Zhu Jie, Wang Xuan, et al. Eutrophication risk assessment considering joint effects of water quality and water quantity for a receiving reservoir in the South-to-North Water Transfer Project, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 331: 129966.
- [10] Determann M, Musolff A, Frssl M A, et al. Nutrient retention in a small reservoir under changed variability of inflow nutrient concentration [J]. Inland Waters, 2023, 13(4): 560-575.
- [11] Liu Xian, et al. Seasonal water storage of large reservoirs exacerbates eutrophication risk in the fluctuating backwater zone: A case study of Three Gorges Reservoir, China [J]. Ecological

- Indicators, 2025, 171: 113100.
- [12] Paterson M J, Beaty K G, Findlay D L, et al. Long-term changes in nutrient dynamics and plankton communities following the creation of a new reservoir[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2019, 76(8): 1459–1469.
- [13] 林秋奇, 胡韧, 段舜山, 等. 广东省大中型供水水库营养现状及浮游生物响应[J]. *生态学报*, 2003(6): 1101–1108.
- Lin Qiuqi, Hu Ren, Duan Shunshan, et al. Reservoir trophic states and the response of plankton in Guangdong Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003(6): 1101–1108. (in Chinese)
- [14] 高书铭, 姚爱林, 明玥, 等. 2022年黄河调水调沙对下游有机物和营养盐年内变化的影响[J]. *海洋科学进展*, 2024, 42(4): 753–768.
- Gao Shuming, Yao Ailin, Ming Yue, et al. The Impact of Water and Sediment Regulation on Monthly Changes of Downstream Organic Matter and Nutrients in the Yellow River in 2022 [J]. *海洋科学进展*, 2024, 42(4): 753–768. (in Chinese)
- [15] 薛滨, 姚书春, 王苏民, 等. 长江中下游不同类型湖泊沉积物营养盐蓄积变化过程及其原因分析[J]. *第四纪研究*, 2007(1): 122–127.
- Xue Bin, Yao Shuchun, Wang Sumin, et al. Enrichment of Nutrients and Analysis of Its Reason in Sediments of Different Kinds of Lakes at Middle and Lower Yangtze River Basin [J]. *Quaternary Sciences*, 2007(1): 122–127. (in Chinese)
- [16] 谭夔, 陈求稳, 毛劲乔, 等. 大清河河口水体自净能力实验[J]. *生态学报*, 2007(11): 4736–4742.
- Tan Kui, Chen Qiuwen, Mao Jinqiao, et al. The self-purification capacity of the outlet of Daqinghe River: experiment [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007(11): 4736–4742. (in Chinese)
- [17] 杨思懿, 杜成功, 姜苗苗. 基于Landsat-8 OLI的洪泽湖水体透明度时空变化及其影响因素分析[J]. *遥感技术与应用*, 2025, 40(2): 275–287.
- Yang Siyi, Du Chenggong, Jiang Miaomiao. Temporal and Spatial Variation of Secchi Disc Depth in Hongze Lake based on Landsat-8 OLI and Its Influencing Factors [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2025, 40(2): 275–287. (in Chinese)
- [18] 田艺苑, 杨薇, 刘强, 等. 白洋淀流域水文连通对浮游植物群落的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(07): 1538–1547.
- Tian Yiyuan, Yang Wei, Liu Qiang, et al. Effects of hydrological connectivity on phytoplankton community in Baiyangdian Basin, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(7): 1538–1547. (in Chinese)
- [19] 郭红娟, 郭生练. 水库水文情势与浮游植物群落结构[J]. *水科学进展*, 2001(1): 51–55.
- Wu Hongjuan, Guo Shenglian. The Effect of Hydrological Regime on Phytoplankton Community [J]. *Advances in Water Science*, 2001(1): 51–55. (in Chinese)
- [20] Liao Yipeng, Li Yun, Shu Jingxiang, et al. Water Transparency Prediction of Plain Urban River Network: A Case Study of Yangtze River Delta in China [J]. *Sustainability*, 2021, 13(13): 15.
- [21] 方丽娟, 刘德富, 杨正健, 等. 三峡水库香溪河库湾夏季浮游植物演替规律及其原因[J]. *生态与农村环境学报*, 2013, 29(2): 234–240.
- Fang Lijuan, Liu Defu, Yang Zhengjian, et al. Succession of Phytoplankton in Xiangxi Bay of Three-Gorge Reservoir in Summer and Its Causes [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2013, 29(02): 234–240. (in Chinese)
- [22] 李秋华, 胡韧, 韩博平. 南亚热带贫营养水库春季浮游植物群落结构与动态[J]. *植物生态学报*, 2007(2): 313–319.
- Li Qiuhua, Hu Ren, Han Boping. Spring dynamics of the phytoplankton community of an oligo-trophic reservoir in the southern subtropics of China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2007(2): 313–319. (in Chinese)
- [23] 林秋奇, 胡韧, 韩博平. 流溪河水库水动力学对营养盐和浮游植物分布的影响[J]. *生态学报*, 2003(11): 2278–2284.
- Lin Qiuqi, Hu Ren, Han Boping. Effect of hydrodynamics on nutrient and phytoplankton distribution in Liuxihe Reservoir [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003(11): 2278–2284. (in Chinese)
- [24] Berger S A, Diehl S, Stibor H, et al. Water temperature and stratification depth independently shift cardinal events during plankton spring succession [J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(7): 1954–1965.
- [25] Mei Xueying, Gao Shanshan, Liu Yang, et al. Effects of Elevated Temperature on Resources Competition of Nutrient and Light Between Benthic and Planktonic Algae [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10. DOI: 10.3389/fenvs. 2022. 908088.
- [26] 陈瑞弘, 李飞鹏, 张海平, 等. 面向流量管理的水动力对淡水藻类影响的概念机制[J]. *湖泊科学*, 2015, 27(1): 24–30.
- Chen Ruihong, Li Feipeng, Zhang Haiping, et al. Conceptual mechanism of hydrodynamic effects on freshwater algae for flow management [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, 27(1): 24–30. (in Chinese)
- [27] 田楚铭, 肖淇文, 齐青松, 等. 水动力条件对黑水河库湾浮游植物群落结构和水环境的影响[J]. *水生生物学报*, 2025, 49

- (5): 124–136.
- Tian Chuming, Xiao Qiwen, Qi Qingsong, et al. Effects of hydrodynamic conditions on phytoplankton community structure and water environment in the bay of Heishuihe Reservoir[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2025, 49(5): 124–136. (in Chinese)
- [28] Paerl H W, Paul V J. Climate change: links to global expansion of harmful cyanobacteria [J]. *Water Research*, 2012, 46 (5): 1349–1363.
- [29] 张海涵, 王娜, 宗容容, 等. 水动力条件对藻类生理生态学影响的研究进展[J]. *环境科学研究*, 2022, 35(1): 181–190.
- Zhang Haihan, Wang Na, Zong Rongrong, et al. Research progress on effects of hydrodynamic conditions on algal ecophysiology[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, 35 (1): 181–190. (in Chinese)
- [30] Song Yang. Hydrodynamic impacts on algal blooms in reservoirs and bloom mitigation using reservoir operation strategies: A review [J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 620: 129375.
- [31] Summer E J, Ryder J L. A critical review of operational strategies for the management of harmful algal blooms (HABs) in inland reservoirs [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 330: 117141.
- [32] 张翎, 韩冰, 唐凤珍, 等. 调水调沙对小浪底库区水环境影响与营养状态评价[J]. *中国科学: 技术科学*, 2025, 55(6): 1032–1042.
- Zhang Ling, Han Bing, Tang Fengzhen, et al. Impact of water and sediment regulation on water environment and trophic state evaluation of Xiaolangdi Reservoir area [J]. *Science China: Technological Sciences*, 2025, 55(6): 1032–1042. (in Chinese)
- [33] 张冰辉, 肖新宗, 韩晓东, 等. 南水北调东线一期工程调水前后水体水质时空变化特征[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2025, 62(2): 346–358.
- Zhang Binghui, Xiao Xinzong, Han Xiaodong, et al. Spatiotemporal variation characteristics of water quality before and after water diversion of the First Phase of the Eastern Route of the South-to-North Water Diversion Project [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2025, 62(2): 346–358. (in Chinese)
- [34] 石展耀, 霍守亮. 跨流域调水工程水生态环境影响研究现状与展望[J]. *前瞻科技*, 2025, 4(3): 29–41.
- Shi Zhanyao, Huo Shouliang. Research status and prospect of water ecological environment impact of inter-basin water transfer projects [J]. *Frontier Science and Technology*, 2025, 4(3): 29–41. (in Chinese)
- [35] 储雪丹, 唐鹊辉, 彭亮. 广东省大型水库富营养化现状与水质管理对策[J]. *人民珠江*, 2016, 37(8): 77–81.
- Chu Xuedan, Tang Quehui, Peng Liang. Current Eutrophication Status and Water Quality Management Countermeasures of Large Reservoirs in Guangdong Province [J]. *Pearl River*, 2016, 37 (8): 77–81. (in Chinese)

Analysis of Water Quality Changes and Trends at Nodes Along the Pearl River Delta Water Resources Allocation Project

LIU Canping¹, TANG Xin², YAN Xiaxuan¹, LIU Wei², LEI Lamei^{2*}

(1. Guangdong Yuehai Pearl River Delta Water Supply Co., Ltd., Guangzhou 511458, China; 2. College of Life Science and Technology, Ji'nan University, Guangzhou 510632, China)

Abstract: Water diversion projects represent critical engineering interventions for mitigating the spatiotemporal mismatch of water resources in densely populated deltaic regions. However, long-distance raw water conveyance inevitably reshapes nutrient concentrations and trophic states in receiving reservoirs, triggering complex non-stationary shifts in aquatic water quality regimes. To systematically assess the temporal dynamics and spatial gradients of water quality across successive diversion nodes along the Pearl River Delta Water Resources Allocation Project, this study conducted year-round continuous monthly monitoring of key physicochemical water quality parameters in 2025 at four representative monitoring sites. These sites cover the full diversion cascade, including the Liyuzhou Pumping Station (the Xijiang River source water intake), Gaoxinsha Reservoir, Luotian Reservoir, and Gongming Reservoir (the terminal impoundment of this diversion corridor). Based on the field monitoring dataset, the Carlson trophic state index (TSI) was quantified for each sampling month to classify the eutrophication risk of each water body. Two multivariate statistical approaches, principal component analysis (PCA) and permutational multivariate analysis of variance (PERMANOVA), were

further applied to disentangle the dominant environmental drivers of water quality differentiation and test the statistical disparities of nutrient regimes across different reservoir sites. The results showed that the water quality status of Gaoxinsha Reservoir, the first receiving impoundment downstream of the intake, was predominantly constrained by the nutrient loads carried by diverted inflow from Liyuzhou Pumping Station. Following the sequential water diversion gradient from Liyuzhou Pumping Station through Gaoxinsha Reservoir and Luotian Reservoir to Gongming Reservoir, the concentrations of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), nitrate nitrogen ($\text{NO}_3\text{-N}$), as well as water electrical conductivity exhibited a steady declining trend, whereas underwater transparency continuously rose along the flow path. Correspondingly, the calculated TSI values dropped significantly at Gongming Reservoir, the terminal section of the entire project. Compared with the raw Xijiang River inflow at Liyuzhou Pumping Station, the three cascaded reservoirs achieved substantial nutrient retention and purification effects after sequential water storage and transport, which led to remarkable reductions in dissolved and particulate nutrient concentrations and obvious overall improvements in water quality. From a seasonal perspective, TN, chlorophyll-*a* (Chl. *a*) and TSI shared identical seasonal fluctuation patterns: their concentrations and index values peaked in summer and autumn, while decreasing to relatively low levels during spring and winter. In stark contrast, total phosphorus exhibited pronounced spatial heterogeneity, with divergent concentration magnitudes across the four monitoring nodes throughout the entire hydrological year. The outputs from PCA and PERMANOVA collectively corroborated that nitrogen nutrients, phosphorus nutrients, and integrated trophic status constituted the primary drivers governing spatial water quality variations. Statistically significant differences in the full suite of measured environmental variables were further confirmed among the three downstream cascade reservoirs. This study confirms that all water bodies along the Pearl River Delta Diversion Project currently stay in the oligotrophic to mesotrophic trophic state, with no severe eutrophication outbreaks recorded. However, significant spatial heterogeneity in nitrogen-phosphorus nutrient stoichiometric ratios was observed across the entire diversion corridor. Given the concurrent rise in chlorophyll-*a* (Chl. *a*) levels and Trophic State Index (TSI) values during the high-temperature summer – autumn transition, we recommend that targeted monitoring and precision water operation management prioritize key environmental drivers governing algal proliferation and nutrient retention in hot seasons. This proactive strategy mitigates latent algal bloom risks and sustains stable raw water quality to underpin regional water supply security.

Keywords: water quality; nitrogen and phosphorus nutrients; trophic state; temporal and spatial distribution; Pearl River Delta Water Resources Allocation Project

(责任编辑:向 飞)