江素芳，卓静，张俊轩，等. 闽江流域典型河道型水库溶解氧时空分异特征及影响因子[J]. 水利水电技术(中英文)，2026，57(9)：172-182. DOI：10. 13928/j. cnki. wrahe. 2026. 09. 013
JIANG Sufang，ZHUO Jing，ZHANG Junxuan，et al. Spatiotemporal heterogeneity characteristics of dissolved oxygen and their influencing factors in typical channel-type reservoir of Minjiang River Basin[J]. Water Resources and Hydropower Engineering，2026，57(9)：172-182. DOI：10. 13928/j. cnki. wrahe. 2026. 09. 013

闽江流域典型河道型水库溶解氧时空分异特征及影响因子

江素芳[1]，卓　静[2]，张俊轩[3]，蔡杰文[4]，蔡海滨[5]，毛劲乔[5]

(1. 南平市生态环境局，福建 南平　354200；2. 福建省环境保护设计院有限公司，福建 福州　350000；3. 南平市延平环境监测站，福建 延平　353000；4. 南平市邵武环境监测站，福建 邵武　354000；5. 河海大学 水利水电学院，江苏 南京　210098)

摘　要：【目的】河道型水库水动力兼具河流与湖泊的双重特性，对水环境要素纵向梯度分布产生重要影响。闽江是我国东南沿海第一大河，但其干流水库的 DO 时空分异特征及其影响因子目前尚不清晰。【方法】基于 2020—2024 年闽江水口水库上游支流及库区逐小时监测数据，有机结合 STL 时间序列分解、改进 Mann-Kendall 趋势检验、Pettitt 突变点检测及皮尔逊相关性分析方法，以数据处理、特征剖析、趋势检验、归因分析为递进研究思路，建立了适用于河道型水库的综合分析方法，系统解析了水口水库溶解氧的时空演化规律。【结果】研究表明：水口水库表层 DO 呈现显著的纵向异质性，其浓度沿河流区(6. 5~7. 3 mg/L)、过渡区(5. 6~6. 8 mg/L)、湖泊区(5. 2~6. 2 mg/L)逐渐递减，低氧风险相应升高，具体表现为河流区低氧概率为 0. 7%~16. 9%，过渡区为 16. 1%~38. 3%，湖泊区为 27. 6%~46. 1%；不同分区的 DO 主导驱动机制存在显著差异，且各驱动因子的影响程度随时间发生动态变化。此外，同一外部事件在不同分区中表现出明显的时间滞后效应，响应时差可达 1~4 个月。【结论】结果显示，所建综合分析方法可充分挖掘高频监测数据的深层信息，阐释其 DO 时空分异特征及其驱动机制，为进一步采取河流区外源管理、过渡区水动力-污染调控、湖泊区内源治理与生态调控等系统性改善措施提供依据。

关键词：河道型水库；溶解氧；时空分异；纵向分异；低氧风险；分区治理；闽江流域；影响因素

DOI：10. 13928/j. cnki. wrahe. 2026. 09. 013　　开放科学(资源服务)标志码(OSID)：

中图分类号：X171　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000-0860(2026)09-0172-11

听语音 聊科研 与作者互动

收稿日期：2025-01-24；**修回日期**：2025-06-20；**录用日期**：2025-06-24；**网络出版日期**：2025-10-14

基金项目：国家自然科学基金(52279013)

作者简介：江素芳(1979—)，女，高级工程师，学士，主要从事流域水生态环境保护研究。E-mail：21951806@ qq. com

通信作者：毛劲乔(1978—)，男，教授，博士，主要从事水利工程生态环境调控研究。E-mail：maojq@ hhu. edu. cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Spatiotemporal heterogeneity characteristics of dissolved oxygen and their influencing factors in typical channel-type reservoir of the Minjiang River Basin

JIANG Sufang[1], ZHUO Jing[2], ZHANG Junxuan[3], CAI Jiewen[4], CAI Haibin[5], MAO Jingqiao[5]

(1. Nanping Bureau of Ecology and Environment, Nanping 354200, Fujian, China; 2. Fujian Environmental Protection Design Institute Company Limited, Fuzhou 350000, Fujian, China; 3. Yanping Environmental Monitoring Station, Yanping 353000, Fujian, China; 4. Shaowu Environmental Monitoring Station, Shaowu 354000, Fujian, China; 5. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China)

Abstract: [Objective] The hydrodynamics in channel-type reservoirs exhibit dual characteristics of both rivers and lakes, significantly influencing the longitudinal gradient distribution of water environmental factors. The Minjiang River is the largest river in the coastal region of southeastern China, but the spatiotemporal heterogeneity characteristics of dissolved oxygen (DO) and its influencing factors in mainstream reservoirs remain unclear. [Methods] Based on the hourly monitoring data from 2020 to 2024 in the upstream tributaries and reservoir area of the Shuikou Reservoir in the Minjiang River, an integrated analytical method suitable for channel-type reservoirs was developed by combining STL time series decomposition, modified Mann-Kendall trend testing, Pettitt's test for change-point detection, and Pearson correlation analysis. This method followed a progressive research framework of data processing, feature characterization, trend assessment, and attribution analysis, thereby systematically elucidating the spatiotemporal evolution patterns of DO in the Shuikou Reservoir. [Results] The result showed that the surface-layer DO in Shuikou Reservoir exhibited significant longitudinal heterogeneity, with DO concentrations gradually decreasing from the riverine zone (6.5~7.3 mg/L), through the transition zone (5.6~6.8 mg/L), to the lacustrine zone (5.2~6.2 mg/L). Consequently, the risk of hypoxia increased correspondingly, specifically manifested as hypoxia probabilities of 0.7%~16.9% in the riverine zone, 16.1%~38.3% in the transition zone, and 27.6%~46.1% in the lacustrine zone. The dominant driving mechanisms of DO exhibited significant differences among these zones, and the influence degree of each driving factor dynamically changed over time. Furthermore, the same external events demonstrated significant temporal lag effects across different zones, with response delays ranging from 1 to 4 months. [Conclusion] It is evident that the established integrated analytical method can fully extract deep information from high-frequency monitoring data, elucidating the spatiotemporal heterogeneity characteristics of DO and their driving mechanisms. This provides a basis for further implementing systematic improvement measures, such as external source management in the riverine zone, hydrodynamic-pollution regulation in the transition zone, and internal source control and ecological regulation in the lacustrine zone.

Keywords: channel-type reservoir; dissolved oxygen; spatiotemporal differentiation; longitudinal heterogeneity; hypoxia risk; zonal management; Minjiang River Basin; influencing factors

0 引 言

溶解氧(DO)是表征水生态系统健康的核心指标。水体缺氧可触发沉积物与水交界面污染物的二次释放(如内源磷活化)，并通过改变食物链、能量代谢和迁移模式，造成生物直接死亡、种群退化、渔业资源衰退、温室气体释放等[1-2]。在气候变化和人类活动的影响下，全球范围内湖库缺氧事件频繁发生，缺氧程度和持续时间呈现加剧态势[3-4]。因此，亟需研究明晰不同典型水体 DO 演变规律与驱动机制，为江河湖库生态风险防控提供支撑。

水库作为人工-自然复合生态系统，其 DO 动态演变机制十分复杂，长期以来备受关注。然而，现有水库 DO 相关成果主要聚焦于由水库热分层主导的季节性垂向变化特征及其生态效应[5]。例如，成晓奕等[6]基于 ELCOM-CAEDYM 三维水动力水质模型研究，揭示了沙河水库 DO 分层与温跃层的季节性协同演变规律，并发现 DO 变化会对藻类活动产生连锁影响。ZHANG 等[7]基于 5 a 的观测数据开展统计分析研究，揭示了千岛湖 DO 分层与水温、可溶性有机物之间的耦合作用机制，发现氧跃层动态与热分层参数呈显著季节相关性，表明全球气候变化将会加剧水库 DO 分层，进而迫使整体水生态环境趋于退化。针对潘家口水库开展的现场监测与机理分析研究表明，在水库季节性热分层驱动下，水体 DO 形成三层垂向结构(混合层、氧跃层、氧亏层)，这一垂向差异会导致底层缺氧并加速内源污染释放[8]。YAN 等[9]基于 2017—2018 年夏季的实地观测，发现水口水库暴雨异重流和特殊水力结构(出水口距底 40 m)导致双温

跃层形成，会加剧深层水体缺氧，且缺氧由底层向近表层扩展。

值得注意的是，经典理论认为，大型水库物理、化学和生物要素往往空间差异显著，仅靠深水区单点采样难以完整表征整体水质状况[10]。河道型水库兼具河流与湖泊的双重特性，且长度远大于水深和水面宽度，纵向梯度效应不容忽视。KIMMEL 等[11]首次从水文与水环境视角阐释了水库的纵向差异性，将其定性划分为河流区、过渡区、湖泊区，其中，河流区河道狭窄、流速较高、浊度及营养盐输入量高；过渡区河道变宽、水深增加、流速减缓、浊度降低、营养盐发生沉降；湖泊区则河道宽深、流速极低、浊度低，并容易出现显著分层现象。基于此，诸多学者结合不同案例不断扩展水库纵向分区理论，如 DAI 等[12]通过三维水动力模型，依据水动力特征将三峡水库香溪河支流库湾沿纵向划分为河流区、过渡区、湖泊区和主流影响区，发现湖泊区藻华暴发风险最高，河流区最低。以往研究表明，河道型水库水质存在明显的纵向梯度分异，但多聚焦于水动力、营养盐与藻类等方面，对于河道型水库沿纵向梯度上 DO 空间分异规律的研究尚显不足。

从时间维度上看，以往机理研究多建立在周或月尺度观测资料基础上，虽能反映 DO 时空长期演变趋势，但不能细致刻画短时水文扰动下的 DO 快速波动过程，因此难以深入揭示其内在的驱动机制[13]。近年来，随着监测手段不断提升，大量小时乃至分钟级高频观测为解决这一问题提供了新途径。这些高频观测虽蕴含丰富的水质动态信息，但传统分析方法(如滑动平均、线性回归)依旧无法有效解析 DO 序列中的长期趋势(如气候变化)、周期性波动(如光合作用)与突发扰动(如暴雨和水库调度)，也难以量化物理过程(如热分层)与生物化学过程(如有机物降解)的相互作用[14]。

闽江是福建的母亲河，是我国东南地区重要水源涵养地，保障着全省 40%经济总量的用水需求和 1/3 人口的饮水安全[15]。闽江流域地处亚热带季风气候区，强季节性降水使得径流波动剧烈，直接影响水体的物质输移[16]。水口水库是闽江干流上最重要的水库，控制集水面积占闽江总流域面积的 86%，其水文节律和水动力条件具有显著的时空分异性。受河道形态制约，水库纵向水力梯度自上游至坝前逐渐衰减。但受季风气候调控，水库入流量年内变幅剧烈，而水口水库库容相对有限，其径流过程随之相应波动，水库频繁泄流又会进一步放大水体交换速率的季节性波动。可见，在亚热带季风气候影响下，水口水库呈现特有的季节性高水力负荷、短滞留时间特性，库区内 DO 变化机理尤为复杂，水体缺氧问题时有发生，目前已成为区域水环境综合治理中的关键问题。

因此，本文基于水口水库上游支流及库区河流区、过渡区、湖泊区等多个国控站点的逐时高频监测数据(2020—2024 年)，以数据处理、特征剖析、趋势检验、归因分析为递进研究思路，通过有机融合时间序列分解、趋势检验、突变点识别、相关性分析等方法，提出适用于河道型水库水环境要素演变规律及其驱动机制的综合分析技术，以期揭示库区 DO 沿“河流区-过渡区-湖泊区”纵向梯度的时空分异特征，解析其在不同季节对边界条件及工程运行的动态响应，为闽江流域典型河道型水库分区监测与风险管理提供支撑。

1 资料与方法

1.1 数据来源

本研究采用水口水库 2020—2024 年逐小时水质监测数据，涵盖上游支流(富屯溪浪石、沙溪水汾桥)及库区(十里庵、古田黄田、闽清雄江)等 5 个国家地表水自动监测站(见图 1)，水质指标包括表层的 DO、水温、酸碱度(pH)、电导率、浊度、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、氨氮、总氮和总磷。其中，库区的 3 个国控站点为十里庵、古田黄田、闽清雄江，分别位于水口水库的库尾、库中和库首，依据 KIMMEL 等[11]对于水库河流区、过渡区和湖泊区的划分描述，可分别代表水口水库的河流区、过渡区和湖泊区，此分区结果也与 WU 等[17]的研究一致。研究中所用气象数据包括气温、露点温度、气压、相对湿度、风向、风速和降雨，以及库区水位及下泄流量。

1.2 研究方法

本文以数据处理、特征剖析、趋势检验、归因分析为递进研究思路，通过有机融合多技术手段，深入挖掘高频观测资料的内在信息(见图 2)。首先，通过数据预处理去除异常值并填补缺失数据，提升数据可靠性；其次，开展特征剖析，通过事件分析法和月均值折线图法实现对 DO 的年际和年内变化的细致刻画；再次，开展趋势检验分析，运用 STL(Seasonal-Trend Decomposition using LOESS)方法将 DO 时间序列分解为季节项、趋势项与残差项，结合改进 Mann-Kendall 检验对趋势项评估趋势显著性，并用 Pettitt 检验识别突变年份；最后，运用归因分析方法分季节

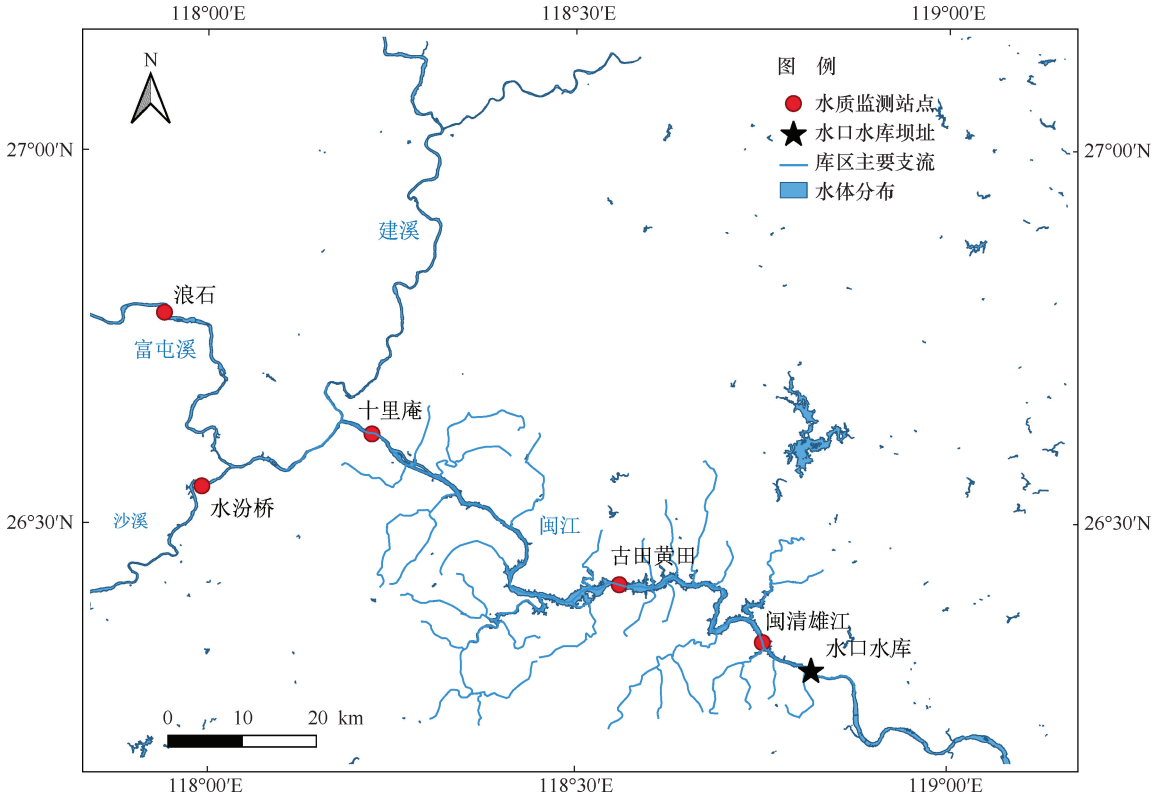


图 1　研究区示意

Fig. 1　Schematic diagram of the study area

解析 DO 与环境因子的相关性。

水口水库上游至坝前的 5 个国家地表水自动监测站的逐小时 DO 监测值，经严格质量控制(剔除仪器误差与异常值)，缺失率<3%，采用线性插值填补，缺失率>3%，采用周期性填补。为定量描述 DO 的年际变化特征，本研究基于逐小时监测数据计算以下指标：年均值与标准差，表征各分区 DO 浓度的年际均值与波动强度；低氧概率，全年 DO 浓度<5 mg/L[《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) Ⅲ类标准]的小时数占比(%)，用于量化各分区低氧风险的时间特征；最大持续低氧天数，全年连续出现 DO 浓度<5 mg/L 的最长天数(按小时数据累积计算，满 24 h 计为 1 d)，反映低氧事件的持续性；低氧事件次数，独立发生的低氧事件定义为连续 24 h 以上 DO 浓度<5 mg/L，且两次事件间隔≥48 h(避免短暂波动干扰)，用于评估低氧发生的频率[18]。为定量描述 DO 的年内变化特征，按月统计均值，绘制 DO 年内变化折线图。采用 STL 方法，将原始的 DO 时间序列分解为趋势项(反映年际变化)、季节项(365 d 周期)与残差项(短期波动)[19]。采用改进 Mann-Kendall 检验[20]对分解出的趋势项进行预白化处理(消除自相关)，计算 Z 值与 p 值，判断趋势显著性，并对时间序列进行 Pettitt 突变点检验[21]，识别趋势项的突变年份，验证其与已知事件的时序关联性。采用皮尔逊相关性分析法，分季节判断表层 DO 与环境因子的相关性[22]。上述方法综合考量了从数据处理到机理溯源的多个环节，可以弥补传统单一统计模型方法的不足，有助于明晰典型河道型水库 DO 时空变化及成因。

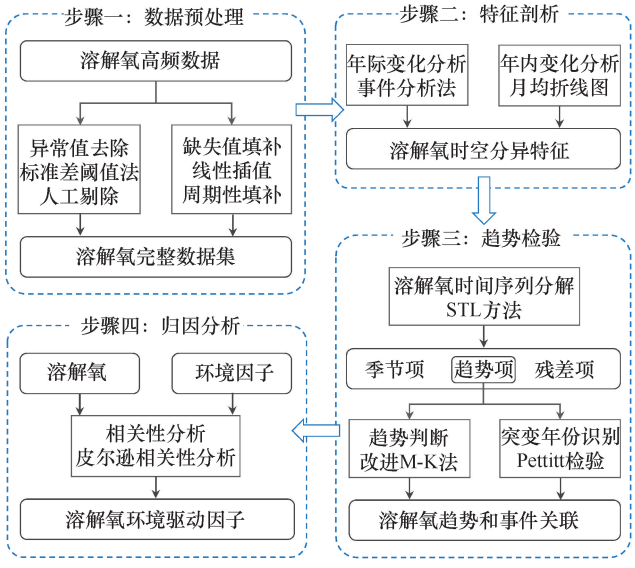


图 2　研究方法流程

Fig. 2　Research method flowchart

2 结果与分析

2.1 DO 时空分异特征

统计 2020—2024 年水口水库河流区、过渡区和湖泊区的逐小时表层 DO 监测数据(见表 1)，水口水库 DO 浓度呈现显著的年际波动和纵向异质性。各分区年际变化特征如下：河流区 DO 小时均值从 2020 年的 6.6 mg/L 升至 2024 年的 7.3 mg/L，年际增长率约为 0.18 mg·L^{-1}·a^{-1}。标准差波动范围 1.0～1.4 mg/L，表明河流区的 DO 浓度相对于过渡区和湖泊区更加稳定。低氧概率(DO <5 mg/L)从 2020 年的 7.9%降至 2024 年的 1.0%，最大持续低氧天数由 14.3 d 缩短至 4.2 d，低氧事件次数从 22 次减少至 6 次，表明河流区 DO 浓度改善显著。

表 1 水口水库三个分区表层 DO 统计分析

Table 1 Statistical analysis of dissolved oxygen in surface layer of three zones in Shuikou Reservoir

分区	年份	小时均值/mg·L^{-1}	标准差/mg·L^{-1}	低氧概率(<5 mg/L)/%	最大低氧持续天数/d	低氧事件次数/次
河流区	2020	6.6	1.2	7.9	14.3	22
	2021	6.5	1.4	16.9	76.4	17
	2022	7.2	1.0	0.7	5.0	9
	2023	6.9	1.3	5.6	21.4	14
	2024	7.3	1.1	1.0	4.2	6
过渡区	2020	5.6	1.7	38.3	63.0	21
	2021	5.8	2.0	33.6	83.4	16
	2022	6.3	2.2	21.8	36.7	17
	2023	6.6	2.1	21.8	22.8	18
	2024	6.8	1.5	16.1	23.0	14
湖泊区	2020	5.2	2.1	46.1	104.1	12
	2021	5.4	1.8	36.7	98.1	13
	2022	6.0	2.3	30.9	110.4	6
	2023	6.1	2.3	37.0	34.4	21
	2024	6.2	1.9	27.6	61.4	13

过渡区小时均值从 2020 年 5.6 mg/L 升至 2024 年 6.8 mg/L，年际增长率约为 0.30 mg·L^{-1}·a^{-1}，但标准差持续较高(1.5～2.2 mg/L)，反映过渡区 DO 浓度的不稳定性。过渡区低氧概率从 2020 年的 38.3%降至 2024 年的 16.1%，但低氧事件次数减少并不显著。湖泊区小时均值从 2020 年 5.2 mg/L 增至 2024 年 6.2 mg/L，年际增长率约为 0.25 mg·L^{-1}·a^{-1}。但标准差的浮动范围为 1.8～2.3 mg/L，表明 DO 浓度存在显著波动，稳定性较差。且湖泊区低氧概率到 2024 年仍高达 27.6%，最大持续天数波动剧烈(2022 年达 110.4 d，2023 年骤降至 34.4 d，2024 年又升至 61.4 d)。过渡区和湖泊区 DO 虽呈现年际改善趋势，但因内源耗氧顽固、水动力条件限制[23]，低氧风险仍为长期挑战。

从空间的异质性来看，DO 均值从上游至下游递减，虽然低氧事件次数在三个分区没有显著差异，但低氧概率、最大低氧持续天数从上游至下游增加，说明 DO 纵向差异显著。河流区标准差最低，过渡区更高，湖泊区最高，反映湖泊区对扰动的敏感性。低氧概率与最大持续天数均呈现“湖泊区 > 过渡区 > 河流区”的规律，与水库水动力衰减梯度一致[3]。

本段开始聚焦 DO 浓度的年内波动特征，解析不同月份三个分区的动态分异规律。根据 2020—2024 年水口水库河流区、过渡区和湖泊区的月均 DO 折线图(见图 3)，所有分区的年内 DO 均呈现显著的单谷型季节波动，即 DO 在年内仅有一个显著低谷期。DO 浓度从 3 月—7 月开始下降，8—11 月达到全年最低值，12 月—次年 2 月逐步回升至峰值。其中，河流区 DO 的月均值波动范围最窄(4.7～9.2 mg/L)，最低值普遍出现在 8—10 月(4.7～6.4 mg/L)，峰值普遍出现在 1—2 月，达到 8.3±0.6 mg/L。湖泊区年内波动幅度最大(2.0～9.0 mg/L)，9—12 月持续低氧(<5 mg/L)，峰值普遍出现在 2—3 月(7.7±0.7 mg/L)。过渡区和湖泊区更为相似，但年内波动幅度较湖泊区更小(2.9～9.2 mg/L)，低氧持续时间更短(10—11 月)。

如图 3 所示，DO 年际间呈现改善趋势。其中，河流区的夏季低氧现象逐年缓解，2020 年 8 月均值为 5.4 mg/L，2024 年同期升至 6.2 mg/L(增幅约为 0.2 mg·L^{-1}·a^{-1})。自 2021 年开始，月均值再无出现低氧情况。过渡区自 2023 年后改善显著，10 月均值从 2020 年的 5.3 mg/L 升至 2024 年的 5.9 mg/L。湖泊区的改善情况不仅体现在 10 月均值的提升，还体现在低氧持续月份的减少，从 2020 年的 8—12 月缩减为 2024 年的 10—12 月。

月均值年内变化揭示，水口水库 DO 河流区>过渡区>湖泊区，低氧风险集中于 10 月左右的过渡区和湖泊区(均值<5 mg/L)。分区差异表明，需针对过渡区和湖泊区制定增氧策略，而非依赖流域尺度治理的被动扩散。

2.2 DO 时间序列分解

基于 2.1 揭示的时空异质性特征，本节进一步将上游富屯溪与沙溪两条支流纳入时间序列分解体系，对比具有空间连续性的上游支流、河流区、过渡区和湖泊区 STL 分量的同步性与差异性，浅析外源输入与库内过程对 DO 分异格局的贡献。

季节项反映周期性波动。上游支流及水库三个分

区的 DO 水平显示出明显的季节性趋势，这主要受到气象条件、水文变化以及库区调控等因素的影响。如图 4(a)所示，富屯溪与沙溪的季节项振幅(±2.4 mg/L 和±2.2 mg/L)高于河流区(±2.0 mg/L)，表明上游支流的 DO 季节性波动通过水力输送直接影响河流区，但受水库调蓄作用削弱。过渡区与湖泊区的季节项峰值和谷值较支流延迟，反映水库蓄水对水文脉冲的缓冲效应[8]。

趋势项反映 DO 时间序列的长期演变。如图 4(b)所示，富屯溪与沙溪趋势项在 2020—2024 年分别上升 0.5 mg/L 和 0.2 mg/L，河流区趋势项在 2020—2024 年升幅 0.7 mg/L，三者趋势项波动形状相似，河流区 DO 改善可能主要源于上游水质治理。过渡区和湖泊区在 2020—2024 年趋势项上升趋势更为明显，升幅分别为 1.4 mg/L 和 1.0 mg/L，且波动形状异于上游支流及河流区，表明从河流区至湖泊区，外源输入的改善效应随水动力衰减而减弱，内部过程大于外部输入[24]。

残差项，即无法通过趋势和季节性解释的部分，代表短期事件或噪声。通过分析残差项，可以发现富屯溪及河流区的数据中的异常情况、噪声或可能的未知因素相对较低，而沙溪、过渡区和湖泊区中残差相对较高，且过渡区和湖泊区 2022 年以来有所增加。

通过对比支流-库区 STL 分解分量可明确：水口水库 DO 分异格局是外源输入与库内过程的耦合结果。河流区作为上游影响的敏感区，其改善依赖于流域协同治理，而过渡区和湖泊区低氧顽疾需针对库内过程进行解析。

2.3 DO 趋势与突变点验证

基于 2.2 提取的 DO 趋势项(已剥离季节性与突发扰动影响)，本节展示改进的 Mann-Kendall 与 Pettitt 突变点检验结果，聚焦验证 2020—2024 年水

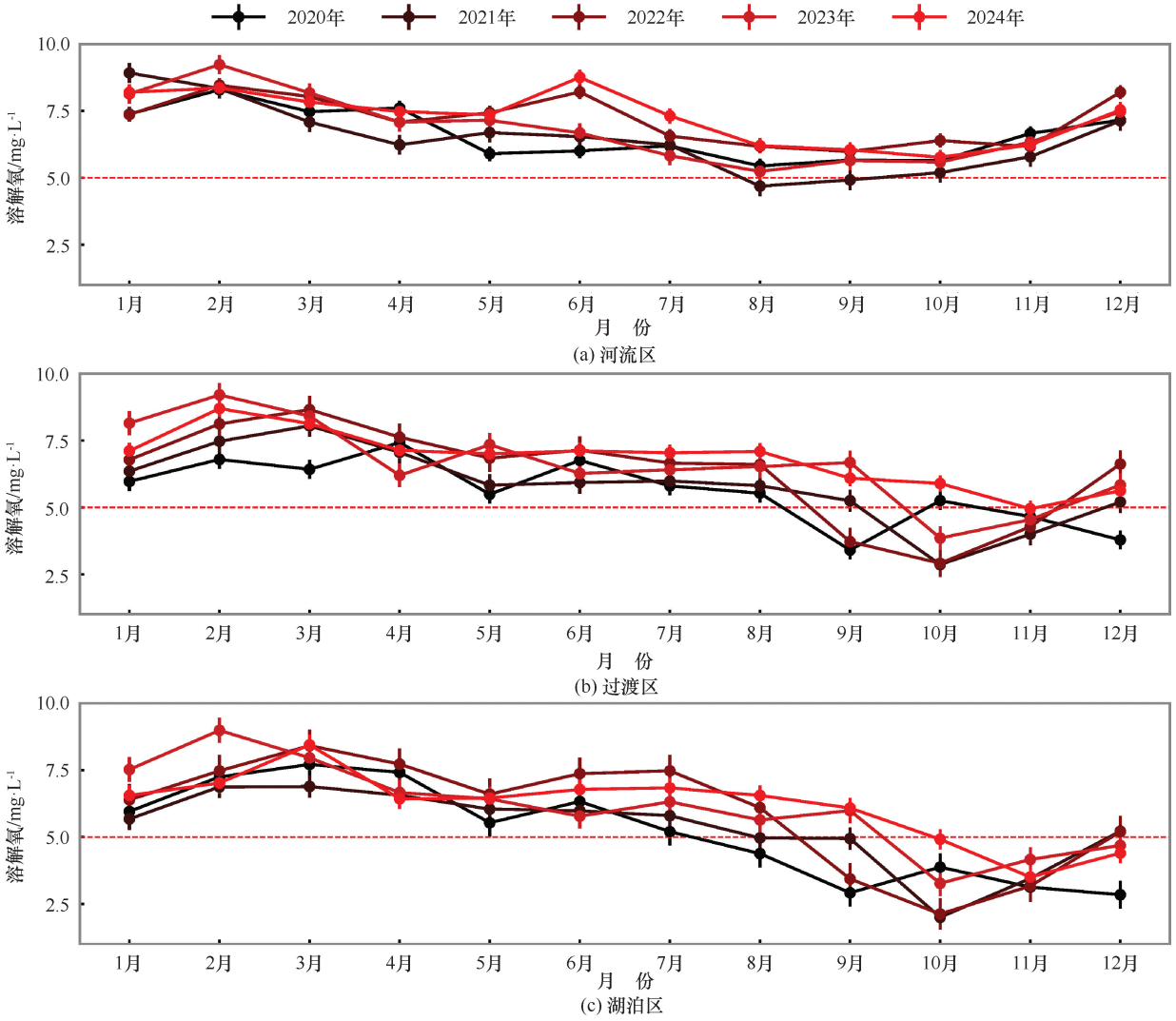


图 3 水口水库三个分区月均 DO 浓度

Fig. 3 Monthly average concentrations of dissolved oxygen in three zones of Shuikou Reservoir

口水库 DO 整体演变方向，明确其长期趋势，并验证其与 2021 年 10 月 28 日一线船闸通航事件的时序关联性。

M-K 结果显示(见表 2)，水库各分区及上游支流趋势方向与强度呈现显著空间异质性。富屯溪和沙溪作为外源输入影响水口水库的 DO 浓度，其中富屯溪的 DO 呈现显著上升趋势($Z=2.1$，$p=0.04$)，而沙溪 DO 趋势不显著($Z=1.69$，$p=0.09$)，反映流域治理措施对支流水质的影响不均衡。河流区、过渡区及湖泊区的 DO 上升趋势都极显著($p<0.01$)，表明库区整体 DO 水平在 2020—2024 年期间持续改善。

所有分区突变点集中于 2022 年 2—6 月，与 2021 年 10 月 28 日水口水库一线船闸首次通航(水库水位整体抬升)的滞后响应期吻合，表明水力调控是趋势转折的核心驱动力。河流区突变点(2022 年 3 月)早于支流(2022 年 4 月)，提示水位调控对 DO 的改善

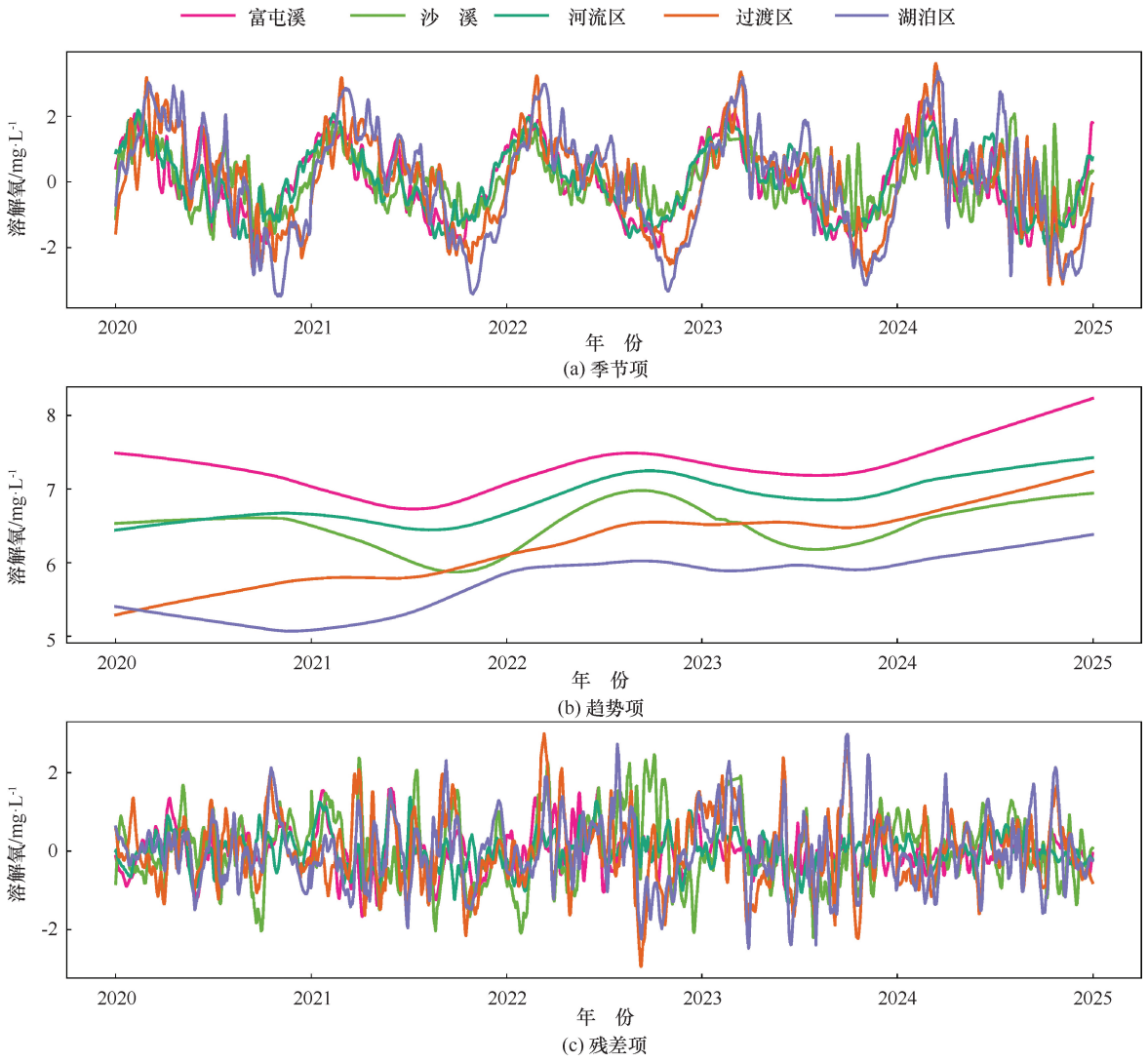


图 4 上游支流及库区 DO 时间序列分解

Fig. 4 Decomposition of dissolved oxygen time series in upstream tributaries and reservoir area

表 2 DO 的 M-K 趋势及 Pettitt 突变点检验结果

Table 2 Results of M-K trend test and Pettitt's test for change-point detection for dissolved oxygen

分 区	富屯溪	沙 溪	河流区	过渡区	湖泊区
Z 值	2.1	1.69	5.23	6.2	4.41
趋 势	上 升	无	上 升	上 升	上 升
M-K 趋势 p 值	0.04	0.09	<0.01	<0.01	<0.01
Pettitt 突变点	2022 年 4 月	2022 年 4 月	2022 年 3 月	2022 年 6 月	2022 年 2 月
Pettitt p 值	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

速度快于流域尺度措施。突变点从湖泊区(2 月)到过渡区(6 月)逆序出现，反映水位抬升初期主要影响湖泊区表层复氧，随后传递到过渡区。沙溪支流趋势不显著($p=0.09$)但存在突变点(2022 年 4 月)，可能因局部污染事件(如临时排污)导致短期波动，但未形成持续趋势。M-K 与 Pettitt 检验共同揭示，水口水库 DO 改善是外源治理与库区工程协同作用的结果。库区的极显著趋势印证了水力调控的速效性[25]。

2.4 DO 和环境因子的相关性分析

基于上述结果进行推断，水口水库表层 DO 均呈现显著的增长趋势，且具有显著的纵向差异。闽江流域地处亚热带季风气候区，降水的时空分布受季风、洋流、热带气旋等多种因素影响[26]。根据降水可将全年分为春雨期(3—4 月)、梅雨期(5—6 月)、台风暴雨期(7—9 月)和旱季(10—2 月)，年均降雨量 1 758 mm，其中 70%集中在 3—9 月。其中，梅雨期由大范围锋面雨主导，形成高流量、长历时(5—7 天)的复峰洪水；台风季则以局地短历时暴雨为主，降雨集中在台风登陆前 12 h，引发快速汇流的尖峰洪水[27]。因此，本节将引言提到的亚热带季风气候背景下的季节性水文特征(春雨期、梅雨期、雷雨期、干旱期)，结合河流区、过渡区、湖泊区 DO 与环境因子的皮尔逊相关性分析，尝试分析不同分区 DO 的环境驱动因子。

水口水库河流区、过渡区和湖泊区的 DO 与环境因子的相关性在春雨期(3—4 月)、梅雨期(5—6 月)、雷雨期(7—9 月)和干旱期(10—2 月)呈现显著变化(见图 5)，具体表现为从三个雨期到干旱期增强的趋势。水库三个分区在干旱期与环境因子的相关性显著高于三个雨期，且三个分区的相关性较为

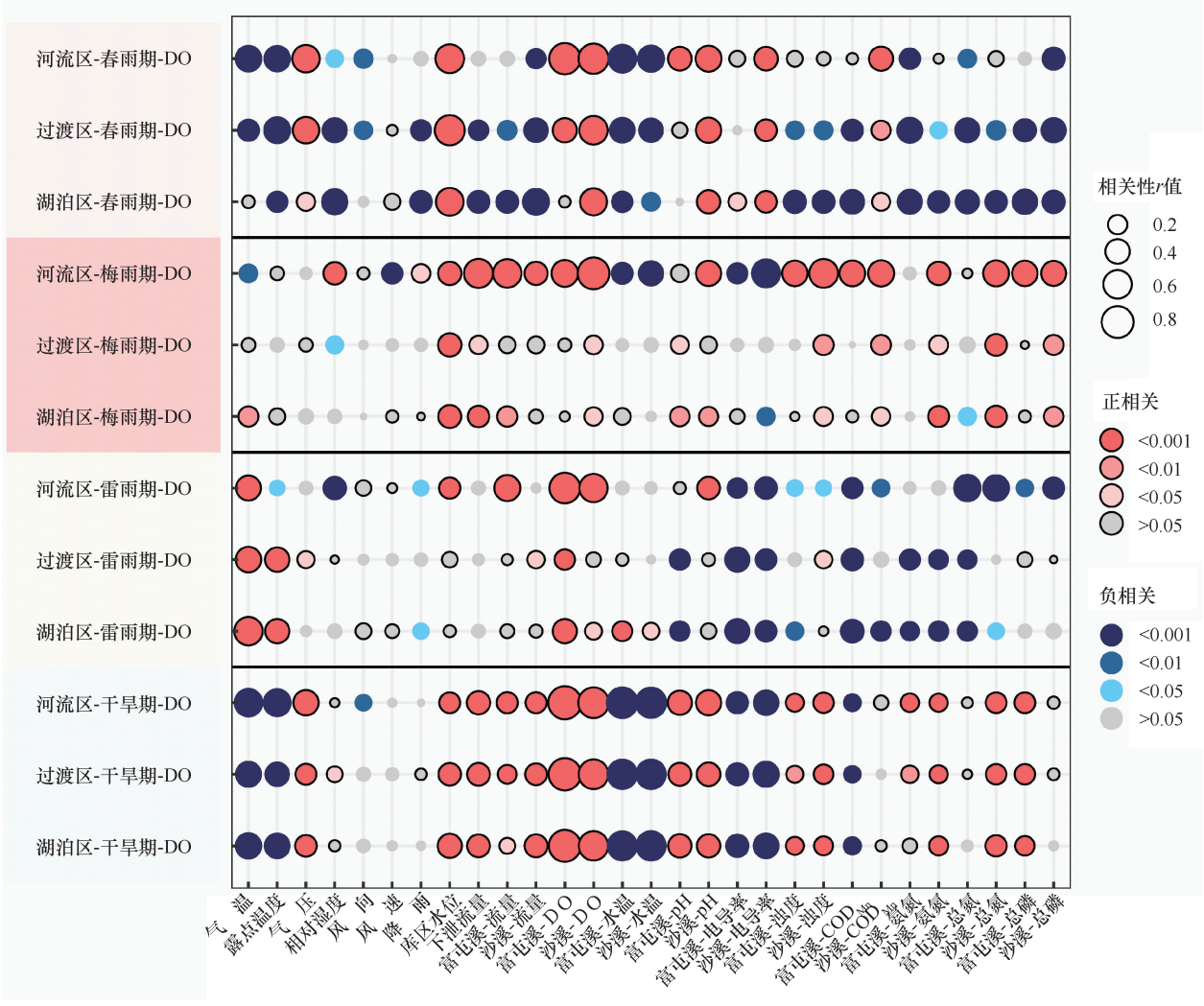


图 5　水口水库三个分区不同气候季节 DO 和环境因子相关性分析

Fig. 5　Correlation analysis between dissolved oxygen and environmental factors in three zones of Shuikou Reservoir across different climatic seasons

一致。这一现象可能源于水动力的季节分异。雨季降水导致水库的高流量、强对流和强稀释效应，污染物快速迁移或分散，DO 变化受物理混合作用主导，环境因子间交互复杂化，削弱了单一因子的主导性[9]。例如，过渡区和湖泊区梅雨期与环境因子的相关系数范围多为 0.2~0.4。相比之下，干旱期水量减少、流速降低，水动力条件减弱，此时 DO 变化由物理、化学及生物过程共同驱动。

以春雨期为例，分析水库三个分区与环境因子相关性的异同。河流区 DO 与环境因子之间的相关性最低，过渡区相关性中等，湖泊区相关性最高，与外源营养盐的相关性从河流区往湖泊区增强。这可能是因为春季河流区流速较快，复氧作用显著，DO 变化主要由物理过程(如气温、露点温度、水温，相关系数为−0.8，$p<0.001$)主导。过渡区兼具河流与湖泊特征，受上游径流与下游滞留作用的双重影响，污染物在此短暂积累，微生物活动开始增强，导致 DO 与营养盐(如氨氮)的关联性初步显现。湖泊区水体滞留时间长，底层因有机物分解耗氧，DO 与营养盐的相关性显著增强(相关系数为−0.6，$p<0.001$)[28]。

水口水库表层 DO 与环境因子之间的相关性在季节(春雨期、梅雨期、雷雨期、干旱期)和区域(河流区、过渡区、湖泊区)间呈现显著差异。雨季受水动力过程主导，而旱季则可能由物理、化学及生物过程共同作用。河流区、过渡区与湖泊区与环境因子相关性的差异则呼应了 2.1 节和 2.2 节内容，猜测河流区 DO 水平依赖外部输入，过渡区受上游来流和内源过程复合作用调控，湖泊区则由内部过程主导。为提升水质管理效能，需分季节、分区域制定精准治理策略。河流区应以外源输入稳定性为核心，强化流域协同管理；过渡区需平衡水动力扰动与污染输入控制；湖泊区应聚焦内源过程调控与生态阈值提升。研究结果为水库精准治理提供了理论依据，但需进一步验证区域异质性驱动机制及管理措施的长期效应。

3 结果讨论

上述研究结果表明，水口水库表层 DO 存在显著的纵向分异特征，表现为河流区、过渡区和湖泊区的 DO 年际变化、年内动态及低氧概率存在显著差异。各分区驱动机制不同，对同期环境响应的敏感性各异，且主导环境因子随时间发生区段性转变。这表明，在解析河道型水库表层 DO 时空演变机制时，尤其需要重视其纵向分异特征。但需要指出，本研究主要从宏观的角度揭示表层 DO 纵向分异，并未定量分析各环境因子的贡献，且未涉及垂向分布。需注意的是，过渡区与湖泊区平均水深分别为 30 m 和 55 m，夏季易形成稳定热分层[17]。但受季风气候调控，同期台风暴雨事件频发，致使入库径流剧烈波动，因水库库容有限，径流响应敏感，热分层结构易被暴雨事件破坏，加剧 DO 垂向分布的复杂性。为系统揭示 DO 时空分异机制，需整合垂向分布研究，当前 YAN 等[9]的研究仅报道了湖泊区单个断面垂向 DO 特征，未来应通过长期监测或机理模型，量化过渡区与湖泊区垂向断面 DO 动态，进而耦合纵向分异规律，构建完整的时空演变框架。

充分利用高频数据的潜力高度依赖于有效的分析方法。KIRCHNER 等[13]曾预测，高频监测数据将显著增加统计和数据驱动方法的应用前景。本研究提出的数据预处理、特征剖析、趋势检验、归因分析的递进分析框架，通过融合 STL 分解、改进 Mann-Kendall 检验、Pettitt 突变点检测及皮尔逊相关分析，系统覆盖从数据质控到机理解析的全链条环节。该框架的优势在于：(1)宏观机制解析能力，即高效识别 DO 的时空分异规律(如纵向梯度递减、雨季水动力主导等宏观特征)；(2)方法易用性，即各环节均采用经典方法或其改良版本(如预白化处理消除自相关)，显著降低学习与应用成本。然而，该框架在非线性驱动解析上也不可避免地存在一些局限，如皮尔逊相关仅能表征线性统计关联，无法量化多因子交互贡献。为突破此局限，需进一步结合时间序列统计与机器学习方法：如通过频谱分解、小波变换等技术识别周期性信号(如昼夜代谢循环)及溶质输移的脉冲时刻[29]，或通过机器学习方法(如 LSTM、随机森林)量化环境变量间的复杂依赖关系，解析非线性驱动机制[30]。

4 结 论

(1)闽江流域典型河道型水库水口水库的表层 DO 呈现显著的纵向分异特征。自河流区至湖泊区 DO 浓度逐级递减，低氧风险(DO<5 mg/L)随水动力衰减梯度上升。具体表现为：河流区低氧概率从 2020 年 7.9%降至 2024 年 1.0%，主要归因于外源治理(富屯溪支流 DO 显著提升，$Z=2.1$)与水力调控(2021 年船闸通航诱发 2022 年 3 月突变)；过渡区 DO 年际增幅最大(0.30 mg·L^{-1}·a^{-1})，但因水动力梯度衰减与污染输入交互作用，其标准差高(1.7~2.2 mg/L)且低氧事件持续性强；湖泊区虽存在年际改善趋势(1.0 mg·L^{-1}·a^{-1})，2024 年低氧概率仍高达 27.6%，最大持续低氧天数波动剧烈(34.4~

110.4 d)，凸显内源耗氧过程的长期制约效应。

(2)本研究针对高频监测数据，以数据处理、特征剖析、趋势检验、归因分析为递进研究思路，通过有机融合时间序列分解、趋势检验、突变点识别、相关性分析等方法，提出的适用于河道型水库水环境要素演变规律及其驱动机制的综合分析技术，能够有效地揭示库区表层 DO 纵向梯度的时空分异特征，并解析不同分区在不同季节对边界条件及工程运行的动态响应，为河道型水库分区监测与风险管理提供支撑。

(3)基于闽江流域典型河道型水库水口水库的表层 DO 纵向时空异质性及各分区驱动机制不同，主导环境因子随时间发生区段性转变，且对同期环境响应的敏感性各异，需分区域、分季节制定治理策略，通过差异化水库精准治理以提升这一类水库的水环境治理能力。

参考文献(References)：

[1] WEINKE A D, BIDDANDA B A. From bacteria to fish: Ecological consequences of seasonal hypoxia in a Great Lakes Estuary[J]. Ecosystems, 2018, 21(3): 426-442.

[2] RABALAIS N N, DÍAZ R J, LEVIN L A, et al. Dynamics and distribution of natural and human-caused hypoxia[J]. Biogeosciences, 2010, 7(2): 585-619.

[3] DUGENER N M, STONE I P, WEINKE A D, et al. Out of oxygen: Stratification and loading drove hypoxia during a warm, wet, and productive year in a Great Lakes estuary[J]. Journal of Great Lakes Research, 2023, 49(5): 1015-1028.

[4] JENNY J P, FRANCUS P, NORMANDEAU A, et al. Global spread of hypoxia in freshwater ecosystems during the last three centuries is caused by rising local human pressure[J]. Global Change Biology, 2016, 22(4): 1481-1489.

[5] 杜彦良，彭文启，刘畅. 分层湖库溶解氧时空特性研究进展[J]. 水利学报，2019，50(8)：990-998.
DU Y L, PENG W Q, LIU C. A review of dissolved oxygen variation and distribution in the stratified lakes or reservoirs[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(8): 990-998.

[6] 成晓奕，李慧赟，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 X Y, LI H Y, DAI S J. 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.

[7] ZHANG Y L, WU Z X, LIU M L, et al. Dissolved oxygen stratification and response to thermal structure and long-term climate change in a large and deep subtropical reservoir (Lake Qiandaohu, China)[J]. Water Research, 2015, 75: 249-258.

[8] 余晓，诸葛亦斯，刘晓波，等. 大型深水水库溶解氧层化结构演化机制[J]. 湖泊科学，2020，32(5)：1496-1507.
YU X, ZHUGE Y S, LIU X B, et al. Evolution mechanism of dissolved oxygen stratification in a large deep reservoir[J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32(5): 1496-1507.

[9] YAN J, CHEN N W, WANG F F, et al. Interaction between oxygen consumption and carbon dioxide emission in a subtropical hypoxic reservoir, southeastern China[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2021, 126(4): e2020JG006133.

[10] DOIG L E, NORTH R L, HUDSON J J, et al. Phosphorus release from sediments in a river-valley reservoir in the northern Great Plains of North America[J]. Hydrobiologia, 2017, 787(1): 323-339.

[11] KIMMEL B L, GROEGER A W. Factors controlling primary production in lakes and reservoirs: A perspective[J]. Lake and Reservoir Management, 1984, 1(1): 277-281.

[12] DAI H C, MAO J Q, JIANG D G, et al. Longitudinal hydrodynamic characteristics in reservoir tributary embayments and effects on algal blooms[J]. PLoS One, 2013, 8(7): e68186.

[13] KIRCHNER J W, FENG X H, NEAL C, et al. The fine structure of water-quality dynamics: The (high-frequency) wave of the future[J]. Hydrological Processes, 2004, 18(7): 1353-1359.

[14] JIANG J P, TANG S J, LIU R T, et al. A hybrid wavelet-Lyapunov exponent model for river water quality forecast[J]. Journal of Hydroinformatics, 2021, 23(4): 864-878.

[15] 孙雪，涂玉凤，孙劭，等. 闽江流域复合极端气候事件的识别与时空格局特征[J]. 水利水电技术(中英文)，2025，56(3)：1-14.
SUN X, TU Y F, SUN S, et al. Identification and spatiotemporal characteristics of compound extreme climate events in the Minjiang River Basin[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(3): 1-14.

[16] 李一平，滑磊，王沛芳，等. 河道型水库水动力特征与气候条件的响应关系[J]. 湖泊科学，2013，25(3)：317-323.
LI Y P, HUA L, WANG P F, et al. Responses of hydrodynamical characteristics to climate conditions in a channel-type reservoir[J]. Journal of Lake Sciences, 2013, 25(3): 317-323.

[17] WU Z, YU D, YU Q, et al. Greenhouse gas emissions (CO_2-CH_4-N_2O) along a large reservoir-downstream river continuum: The role of seasonal hypoxia[J]. Limnology and Oceanography, 2024, 69(5): 1015-1029.

[18] WASKO C, GUO D L. Understanding event runoff coefficient variability across Australia using the hydroEvents R package[J]. Hydrological Processes, 2022, 36(4): e14563.

[19] 张挺，马睿佳，程泳铭，等. 基于 VMD-LSTM 模型的流域径流预报技术[J]. 南水北调与水利科技(中英文)，2025，23(5)：1196-1203.
ZHANG T, MA R J, CHENG Y M, et al. Watershed runoff prediction based on VMD-LSTM model[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2025, 23(5): 1196-1203.

[20] 张洪波，李哲浩，席秋义，等. 基于改进过白化的 Mann-Kendall

趋势检验法[J]. 水力发电学报，2018，37(6)：34-46.
ZHANG H B，LI Z H，XI Q Y，et al. Modified over-whitening process and its application in Mann-Kendall trend tests[J]. Journal of Hydroelectric Engineering，2018，37(6)：34-46.

[21] PETTITT A N. A non-parametric approach to the change-point problem[J]. Journal of the Royal Statistical Society Series C (Applied Statistics)，1979，28(2)：126-135.

[22] 李文婕，黄草，夏丹，等. 2003—2022年洞庭湖区碳储量变化趋势及驱动因素分析[J]. 水利水电技术(中英文)，2025，56(8)：32-48.
LI W J，HUANG C，XIA D，et al. Analysis of carbon stock variation trends and driving factors in Dongting Lake area from 2003 to 2022[J]. Water Resources and Hydropower Engineering，2025，56(8)：32-48.

[23] ZHANG Y N，GAO X P，SUN B W，et al. Oxygen evolution and its drivers in a stratified reservoir：A supply-side perspective for informing hypoxia alleviation strategies[J]. Water Research，2024，257：121694.

[24] JANE S F，MINCER J L，LAU M P，et al. Longer duration of seasonal stratification contributes to widespread increases in lake hypoxia and anoxia[J]. Global Change Biology，2023，29(4)：1009-1023.

[25] XIONG G，MAO J，CAI H，et al. Optimal reservoir operation for transport timescales using an integrated methodology[J]. Environmental Research Letters，2023，18(11)：114025.

[26] 崔洪铭，刘梅冰，甘贝贝，等. 闽江流域极端降水时空演变特征及气候影响因子[J]. 水利水电技术(中英文)，2025，56(11)：59-70.
CUI H M，LIU M B，GAN B B，et al. Characteristics of spatio-temporal evolution of extreme precipitation and climate influencing factors in Minjiang River Basin[J]. Water Resources and Hydropower Engineering，2025，56(11)：59-70.

[27] 甘贝贝，刘梅冰. 1962—2021年闽江流域干湿演变特征及其对ENSO事件的响应[J]. 南水北调与水利科技(中英文)，2024，22(3)：545-556.
GAN B B，LIU M B. Dry-wet evolution characteristics and response to ENSO events in the Minjiang River basin from 1962 to 2021[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology，2024，22(3)：545-556.

[28] SONG Y，YOU L H，CHEN M，et al. Key hydrodynamic principles for controlling algal blooms using emergency reservoir operation strategies[J]. Journal of Environmental Management，2023，325：116470.

[29] LOFTON M E，HOWARD D W，THOMAS R Q，et al. Progress and opportunities in advancing near-term forecasting of freshwater quality[J]. Global Change Biology，2023，29(7)：1691-1714.

[30] BIEROZA M，ACHARYA S，BENISCH J，et al. Advances in catchment science，hydrochemistry，and aquatic ecology enabled by high-frequency water quality measurements[J]. Environmental Science & Technology，2023，57(12)：4701-4719.

（责任编辑　王　璐）