



白洋淀入淀河流影响区水体综合耗氧特征及影响因素

朱子扬^{1,2}, 曹恩娟^{1,2}, 温胜芳^{1,✉}, 单保庆^{1,2,✉}

1. 中国科学院生态环境研究中心, 环境水质学国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 针对白洋淀入淀河流影响区夏季溶解氧 (DO) 浓度过低的现象, 综合采用水质数据时间序列分析、水体综合耗氧实验模拟和相关性统计分析等方法深入研究了府河影响区的南刘庄国控断面溶解氧逐时变化规律、不同下垫面类型水体耗氧速率以及其影响因素。结果表明: 1) 南刘庄断面 DO 质量浓度呈现出春秋高夏季低的趋势, 在水质逐年改善的背景下 2022 年夏季 DO 质量浓度仍低至 $1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右; DO 质量浓度日变幅在 $0.5 \sim 5.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 均值为 $2.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 呈现出夏季>春季>秋季的状态; 2) 府河影响区水体耗氧速率在 $0.024 \sim 0.049 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ 之间, 不同下垫面水域类型水体呈现水道~淀面>沟壕的状态; 不同深度水体基本呈现下层>上层和中层的趋势; 水体综合耗氧速率中沉积物耗氧速率与水体耗氧速率的比值为 1.55, 水体和沉积物耗氧均是水体 DO 较低的重要原因; 3) 南刘庄断面 DO 质量浓度年内变化趋势与叶绿素 a (Chla) ($p<0.01$)、浊度 ($p<0.01$) 和 COD_{Mn} 质量浓度 ($p<0.01$) 呈显著负相关关系; 水体耗氧速率与叶绿素 a (Chla) ($p<0.01$)、DOC ($p<0.05$) 和 COD_{Mn} 质量浓度 ($p<0.05$) 呈显著正相关关系。降低河流来水浊度、抑制入淀河流影响区域夏季浮游藻类爆发增长、阶段开展生态清淤降低沉积物本身和孔隙水污染物扩散带来的高耗氧本底问题是白洋淀水质稳定达到Ⅲ类的根本保障。

关键词 白洋淀; 入淀河流影响区; 溶解氧; 水体综合耗氧; 影响因素

溶解氧 (dissolved oxygen, DO) 是我国地表水环境质量监测的重要指标之一, 对维持水生生态系统健康具有重要意义^[1-2]。水体中 DO 质量浓度波动变化受到耗氧和复氧的综合影响, 耗氧主要包括水生生物呼吸耗氧、还原性污染物质耗氧、有机物降解耗氧^[3-5], 复氧主要包括大气复氧、水中浮游植物光合作用等^[6-7]。水体中 DO 质量浓度受到多种因素的影响, 水温、辐射、浊度和叶绿素 a 等环境因子的变化会影响上述耗氧和复氧两种作用, 进而影响水体中 DO 的质量浓度^[8-10]。当水体耗氧速率大于水体供氧速率时, DO 无法及时补充, DO 质量浓度逐渐降低。当 DO 质量浓度低于某一值时 (通常定义 DO 质量浓度低于 $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 为低氧, 低于 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 为缺氧, 低于 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 为厌氧), 水体中厌氧菌迅速繁殖, 导致有机物快速分解从而出现腐败发酵的现象; 水体黑臭、鱼类死亡, 影响水生生物的生长, 严重威胁水体生态安全^[11]。水体脱氧已成为全球关注的重大生态环境问题^[12-15]。目前对自然水体 DO 开展了大量研究, 主要涉及 DO 动态变化规律研究、影响水体 DO 动态变化的因素研究等方面, 以及沉积物耗氧^[16-18]的相关研究。水体耗氧物质^[19]有学者进行了研究, 对于水体耗氧速率未见报道。

白洋淀是我国华北地区最大的以浅水淀泊为主的淡水湿地系统^[20], 是众多河流、淀泊、芦苇台田、浅沼、高地、沙洲与人类和谐共生发展而形成的独特的生态系统复合体。近年来, 通过流域污染控制、入淀河流治理、内源生态清淤等措施, 白洋淀水质得到极大改善, 整体达到国家地表水Ⅲ类水质标准, 但入淀河流影响区域 6—10 月出现 DO 质量浓度过低现象, DO 质量浓度甚至低于 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。针对白洋淀入淀河流影响区夏季水体缺氧问题, 本研究通过自动监测站水质参数逐时数据的时间序列分析和水体耗氧实验模拟等方式, 探究白洋淀入淀河流影响区 DO 时间变化特征、水体综合耗氧特征及相关影响因素, 为白洋淀水环境治理和水生态修复提供决策依据。

收稿日期: 2023-12-12; 录用日期: 2024-03-11

第一作者: 朱子扬 (1999—), 男, 硕士研究生, zyzhu2021_st@rcees.ac.cn; ✉通信作者: 温胜芳 (1983—), 女, 博士, 工程师, sfwen@rcees.ac.cn; 单保庆 (1969—), 男, 博士, 研究员, bqshan@rcees.ac.cn

1 材料与方法

1.1 研究区域与样品采集

白洋淀 (115°38'—116°07'E, 38°43'—39°02'N)^[21] 位于雄安新区, 是海河流域大清河水系中游的缓洪滞洪区, 承担着府河、漕河、瀑河、萍河等河流的洪水调蓄, 是华北平原最大的浅水型湿地^[22]。府河是白洋淀入淀河流中少数常年有水的河流之一, 承纳保定市污水处理厂尾水, 在白洋淀南刘庄区域正式汇入白洋淀, 该区域设有南刘庄国控断面, 是白洋淀八大国控断面之一, 也是水体 DO 指标不达标的主要断面。南刘庄区域水体类型相对复杂, 主要包括淀面、水道、沟壕等。水道水体类型在淀区受府河来水的影响较为显著。府河水流进入淀区后, 与水道相交会导致水道水体的扰动增加, 并引入大量泥沙, 从而影响了水道中的水体特性。水道中常有船只行驶, 这进一步加剧了水体的扰动程度。沟壑水体两侧生长着大量的芦苇等植被, 植被比较茂密。这些植被可以起到固定河岸、减缓水流、过滤水质等作用, 使得沟壑水体相对于水道而言更为稳定, 其受府河来水的影响相对较小, 整体处于较为静缓的状态。淀面水体通常包含沉水植物和浮游生物, 并形成一个较大的水面。2023 年 10 月上旬对南刘庄区域入淀河流影响范围的水道 (S1)、沟壕 (S2) 和淀面 (S3) 3 种不同下垫面类型的水体 (图 1), 现场分层测定部分水质, 并采集水和沉积物开展室内指标分析和水体综合耗氧模拟研究。南刘庄国控断面与采样点 S1 (水道) 相重合, 均在入淀河流府河影响范围内, 利用南刘庄国控断面水质逐时数据分析 DO 年际变化及相关影响因素。

上覆水、表层沉积物样品采集: 用带有刻度的金属杆对采样点进行水深的测量, 之后使用分层采水器对水体进行分层 (上层、中层、下层) 采样。上层水样是在距上覆水面 0.5 m 处进行采集, 中层水样是在距上覆水面 1.0 m 处进行采集, 下层水样是在距沉积物-水界面 0.5 m 处进行采集。采满整个采样瓶, 立即盖上盖子, 拧紧瓶盖, 用封口膜将瓶口密封, 冷藏运输。表层沉积物样品使用不锈钢式抓泥斗 (HYDRO-BIOS, Germany) 进行采集, 装入密封袋密封, 冷藏运输。

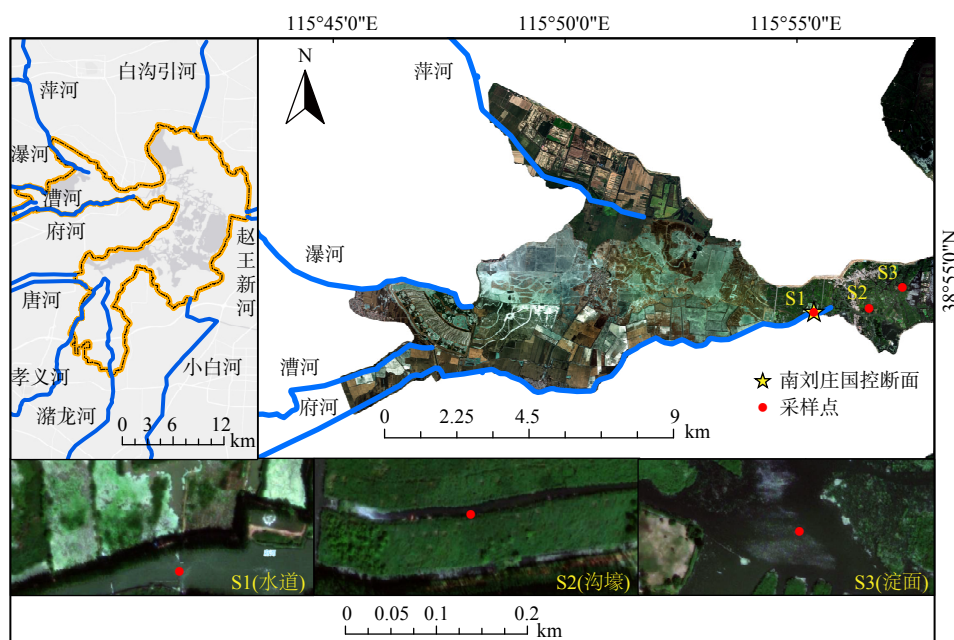


图 1 研究区域及采样点落位图

Fig. 1 Location map of study area and sampling points

1.2 实验分析与室内模拟

1) 水和沉积物基础理化指标测定。现场使用溶氧仪 (HQ30d, 美国 HACH 公司) 与探头 (LDO10103, 美国 HACH 公司) 测定水样 DO; 便携式水质仪 (YSI Professional Plus, 美国 HACH 公司) 测定水样温度 (T)、pH、氧化还原电位 (ORP)、电导率 (COND)、总溶解固体 (TDS); 浊度仪 (2100Q, 美国 HACH 公司) 测定浊度; 塞氏盘法测定透明度。

采集的样品立即运回实验室冷藏保存, 并进行后续实验分析。部分水样用 $0.45\ \mu\text{m}$ 的滤头 (津腾) 过滤, 过滤后的水样装入棕色瓶中 $4\ ^\circ\text{C}$ 冷藏保存, 用于活性磷 (SRP)、硝态氮 ($\text{NO}_3\text{-N}$)、氨氮 ($\text{NH}_4\text{-N}$) 与溶解性有机碳 (DOC) 浓度的测定; 原水样用于测定总磷 (TP)、总氮 (TN)、化学需氧量 (COD_{Cr})、高锰酸盐指数 (COD_{Mn})、叶绿素 a (Chla) 等指标的测定。表层沉积物样品使用实验室内的真空冷冻干燥机 (FD-1A-50, 北京博医康实验仪器有限公司) 冷冻干燥, 用于沉积物样品基础理化指标的分析。水体中 SRP、TP、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、TN 的测定方法参照《水和废水监测分析方法 (第 4 版)》^[23] 进行分析; Chla 采用热乙醇法提取, 使用紫外分光光度法测定^[24]; COD_{Cr} 和 COD_{Mn} 采用哈希试剂结合可见分光光度计 (DR3900, 美国 HACH 公司) 测定; 使用总有机碳分析仪测定 DOC (Vario TOC, 德国 Elementar 公司); 采用微生物传感器快速测定法 BOD 微生物传感器 (LH-BODK81 型, 北京连华永兴科技发展有限公司) 快速测定仪测试 BOD_5 。

表层沉积物 OM 含量使用灼烧减量法^[25] 进行测定; 总氮用 CHNS 元素分析仪 (Vario EL III, 德国 Elementar 公司) 测定; TP 使用 ASPILA 等^[26] 的方法高温灼烧后, 用盐酸浸提后进行测定。本研究涉及紫外检测的仪器均为仪器型号为岛津 UV-2700 的紫外分光光度计。

2) 实验模拟方法。对不同下垫面类型的采集水样, 放入实验室模拟装置 (图 2) 开展水体耗氧速率测定。水体耗氧速率模拟装置是主体为直径为 6 cm、高度为 26 cm 的圆柱状有机玻璃容器。水样曝氧 (使初始 DO 质量浓度达到饱和) 后取 730 mL 缓慢转移至模拟装置 (转移过程确保无气泡), 塞上装有溶解氧电极 (LDO10103) 的橡胶塞, 保持装置密闭。在 $25\ ^\circ\text{C}$ 恒温条件下进行水体耗氧监测, 间隔 2~4 h 读取溶氧仪数值。当 DO 质量浓度小于 $2\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时停止监测, 绘制 DO 质量浓度-时间曲线并计算水体耗氧速率。

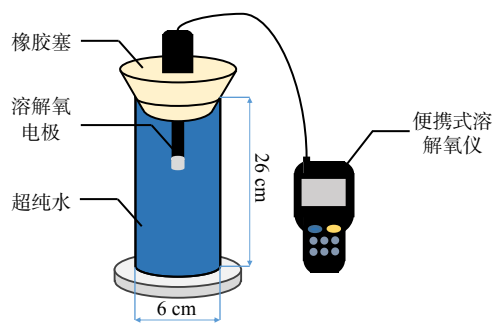


图 2 实验模拟装置图

Fig. 2 Diagram of the experimental simulation device

1.3 数据分析

水体综合耗氧是水体中溶解氧消耗的综合情况, 涉及水体耗氧和沉积物耗氧对水体的影响, 水体综合耗氧速率包括水体耗氧速率 (water oxygen demand, WOD) 和沉积物耗氧速率 (sediment oxygen demand, SOD)。

水体耗氧速率 (WOD) 计算方法: DO 质量浓度-时间曲线的直线斜率, 单位为 $\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$ 。

$$\text{WOD} = \frac{\text{DO}_1 - \text{DO}_2}{t_1 - t_2} \quad (1)$$

式中: t_1 为实验起始时时间, h; t_2 为实验结束时时间, h; DO_1 为 t_1 时刻的 DO 质量浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; DO_2 为 t_2 时刻的 DO 质量浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

水体综合耗氧速率计算方法: 水体耗氧速率 (WOD) 与沉积物耗氧速率 (SOD) 相加和, 单位为 $\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$ 。

$$\text{综合耗氧速率} = \text{WOD} + \text{SOD} \quad (2)$$

南刘庄国控断面水质数据分析方法: 采用 R 语言软件和 STL (Seasonal-Trend Decomposition using LOESS) 方法分析南刘庄国控断面水质参数逐时数据。STL 方法是一种有效的时间序列分析方法, 可处理除月度数据和季度数据以外的多种数据, 并且其可以估算非线性关系^[27-29], 使用 STL 方法时需选择的主要参数是趋势-周期窗口 (t.window), 该参数控制了趋势-周期项的变化速度, 其值越小则变化的速度则越快^[27-30], 本次模拟选用 STL 方法的趋势-周期项的默认值, 逐时数据采用 720 的频率 (frequency) 进行模拟。

影响因素相关性分析: 使用 SPSS 26 软件和皮尔逊 (Pearson) 相关性分析方法对水质参数变化趋势进行统计分析, 使用 Origin 2021 软件和皮尔逊 (Pearson) 相关性分析方法对不同理化指标和耗氧速率进行统计分析。

2 结果与讨论

2.1 南刘庄断面水体 DO 时间变化特征

1) 入淀河流影响区 DO 年内变化趋势。2020 年至 2022 年南刘庄断面水体 DO 指标逐时数据分析结果(图 3) 显示: DO 全年呈现出先下降后上升的趋势, 春秋季高、夏季低; 从 3 月上旬的 $10.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右下降至 8 月上旬的 $1.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 并且 8—10 月在 $1.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右处波动, 处于全年最低水平, 10 月初 DO 逐渐上升, 至 11 月底达到 $6.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右。DO 变化幅度数据显示 2020—2022 三年中 DO 在每个月呈现出周期性变化, 并且在 1 个月中呈现出先上升后下降的现象, 2020—2022 年波幅依次为 3.9、4.8 和 $2.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。春季藻类由于水中营养物质充足而大量繁殖^[31], 一方面, 大量藻类繁殖遮挡阳光, 阻碍阳光向水体下层传递, 从而下部植物光合作用受到抑制^[32]; 另一方面, 浮游动物数量亦不断增加, 呼吸作用加剧; 其次, 水中植物腐解也会消耗水中溶解氧^[33], 最终导致水体缺氧。夏季是藻类繁殖最多的时节, 因此水体中溶解氧水平最低, 进入秋季后, 藻类数量减少, 水体中溶解氧水平逐渐恢复。

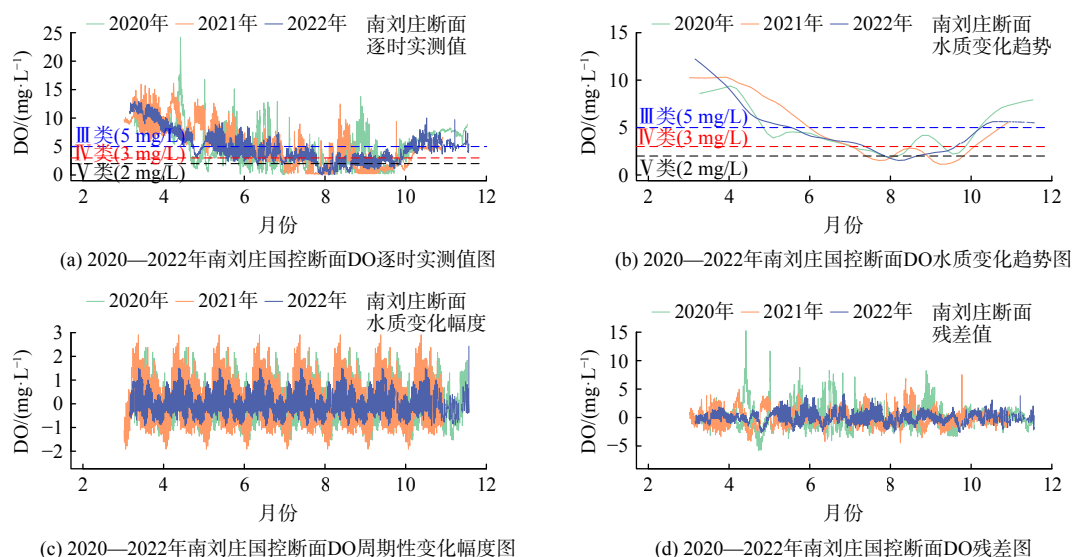


图 3 2020—2022 年南刘庄国控断面 DO 逐时变化图

Fig. 3 Dissolved oxygen variation graphs of the Nanliuzhuang State-controlled Section from 2020 to 2022 (The sampling interval is one hour)

2) 入淀河流影响区 DO 不同季节中日内变化幅度。研究区域 DO 日变化幅度显示出夏季>春季>秋季, DO 在春、夏、秋季的日变化幅度依次为 (3.25 ± 1.38) 、 (3.91 ± 1.96) 、 $(1.25 \pm 1.21) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 图 4 为春、夏、秋季中各选取 10 d 左右的 DO 逐时数据。有研究表明^[34], 水体富营养化水平越大, DO 日变化幅度越大。春季气温逐渐回升, 冰层解冻, 南刘庄区域接受来自府河来水冲击的影响, 水体营养物质增加导致逐渐富营养化^[35], 水生植物、藻类生长繁殖。夏季水体富营养化状态达到最大水平, 水生植物、藻类爆发性生长, 白天水生植物、藻类光合作用加剧, 生产氧气, 夜晚呼吸作用导致水中 DO 大量减少, 所以夏季 DO 日变化幅度最大。秋季水体富营养化状态逐渐减轻, 溶解氧日变化幅度也减小, DO 逐渐上升。

2.2 不同类型水体的综合耗氧特征

1) 水体耗氧速率结果。白洋淀 WOD 数值范

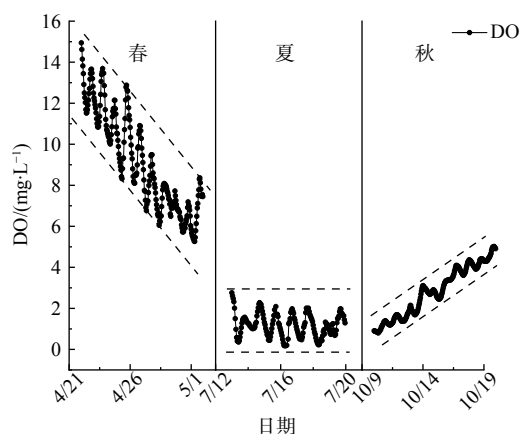


图 4 2021 年南刘庄断面不同季节溶解氧日内逐时变化幅度

Fig. 4 Change amplitude of dissolved oxygen in different seasons of 2021

围为 $0.024\ 0\sim 0.049\ 9\ \text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$, 均值为 $0.037\ 8\ \text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$ (图 5)。不同下垫面水域类型 WOD 存在不同, 基本呈现水道 ($0.040\ 3\pm 0.009\ 9\ \text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$) $\approx$ 淀面 ($0.039\ 7\pm 0.009\ 6\ \text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$) $>$ 沟壕 ($0.033\ 5\pm 0.008\ 9\ \text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$) 的趋势 (图 6)。不同深度 WOD 同样存在不同, 基本呈现下层 ($0.047\ 0\pm 0.004\ 6\ \text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$) $>$ 上

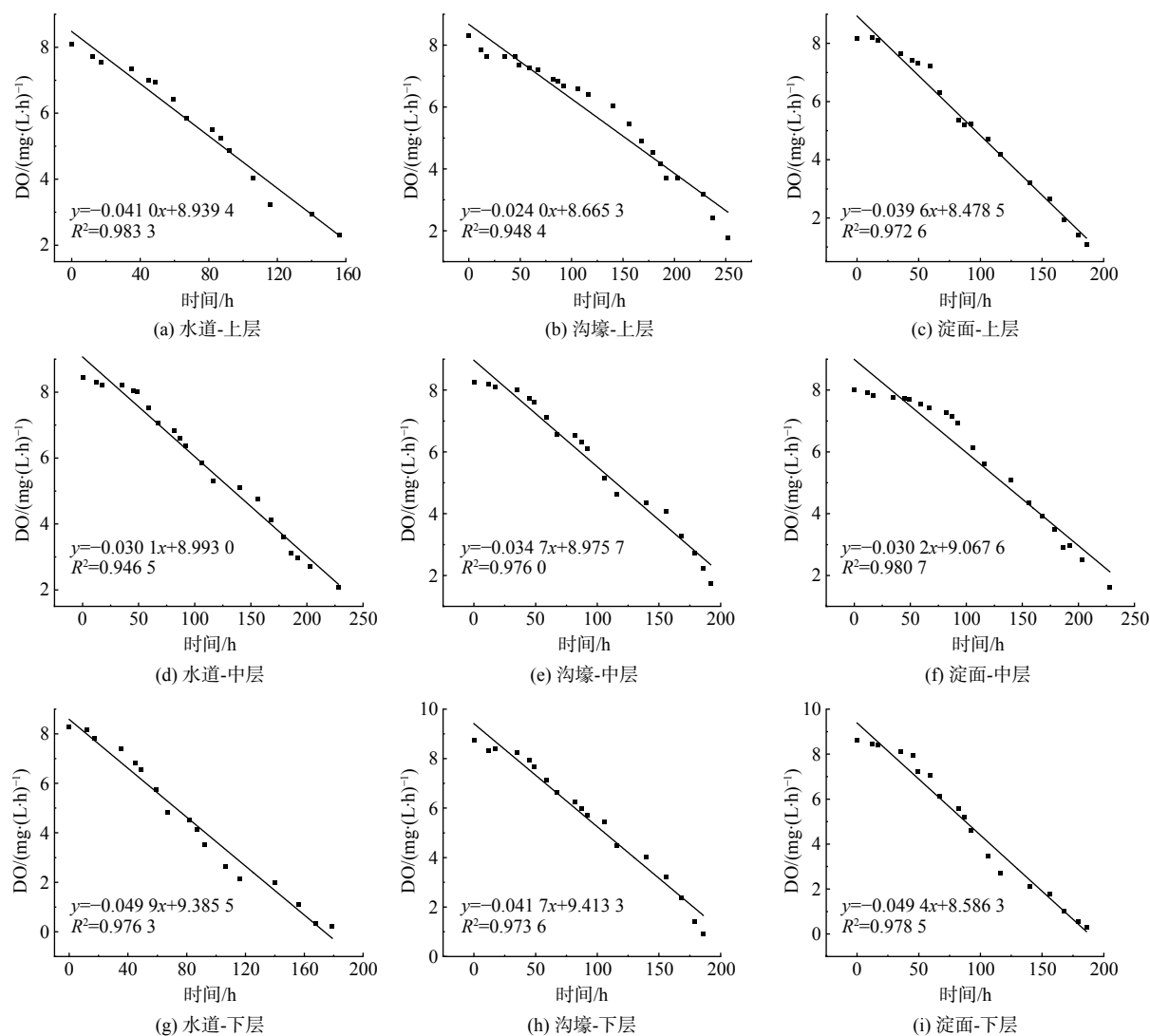


图 5 水体耗氧速率拟合曲线

Fig. 5 Fitting curve of water oxygen demand

层 ($0.034\ 9\pm 0.009\ 4\ \text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$) 和 中 层 ($0.031\ 7\pm 0.002\ 6\ \text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$) 的 趋 势 (图 6)。

2) 不同类型水体耗氧速率差异分析。不同类型水体 WOD 存在差异, 其中沟壕类型的水体 WOD ($0.035\ 5\ \text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$) 小于水道 ($0.040\ 3\ \text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$) 和淀面 ($0.039\ 7\ \text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$) 类型的 WOD, 而水道类型与淀面类型的 WOD 值之间差异较小。水道类型的水体位于府河河道下游, 接收来自上游的水流, 其中含有大量的耗氧物质, 这导致水体中的耗氧速率相对较高。该类型水体常用于船只行驶, 船只行驶会引起水体扰动, 使沉积物中的耗氧物质释放到水体上层, 因此水体的耗氧速率

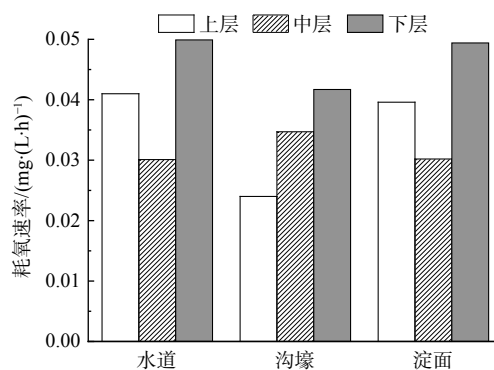


图 6 不同下垫面类型水体耗氧速率图

Fig. 6 Water oxygen demand with different underlying surface types

进一步加快。淀面水体通常呈现为开阔的大水域,这种特征使得湖面易受到风力的影响,导致水体湍流程度增大,进而促进了水中氧气的快速溶解。这种复氧提供了适宜的氧气环境,使得淀面水体中的大量沉水植物等生物能够快速利用 DO 进行生长、繁殖等生物活动^[36]。因此,淀面水体中存在较快的耗氧速率。沟壕类型水体的水文特征和采样时间是导致其 WOD 数值较小的两个主要因素。首先,沟壕水体两侧为芦苇台田,这种环境下水体受到来自府河的水流影响相对较小,形成了一种静缓水体的特征。其次,采样时间选择了10月中上旬,这个时期正值芦苇的种子成熟期,在这个时期芦苇本身对水体的影响减弱,同时芦苇腐烂分解速度较慢^[37],故水体中基本无腐烂的芦苇耗氧物质。综合这两个方面因素,沟壕水体的 WOD 数值最小。

3) 不同水层水体耗氧速率差异分析。不同水层之间 WOD 基本呈现出下层大于上层和中层 WOD 的趋势。有研究表明^[38-40],沉积物通常含有较多的耗氧物质,包括氨氮、 S^2 等还原性物质和有机质,这些耗氧可以向沉积物-水界面上层水体中释放。这种释放导致了下层水体中耗氧物质的增加,从而使得下层水体的耗氧速率增大。其次,沉积物是一个复杂的生态系统,其中包含了大量的营养物质和丰富的微生物种群。这些微生物会利用沉积物中的营养物质进行生长和繁殖,从而展开大量的微生物活动,在这一过程中,微生物消耗了上层水体中的 DO,这种微生物活动加速了上层水体中的耗氧速率增大。因此,造成上层水体 WOD 较中层和上层大。

4) 水体综合耗氧速率分析。水体综合耗氧速率综合考虑了水体中的两个主要耗氧来源:水体耗氧部分和沉积物耗氧部分。探究水体综合耗氧速率有助于全面理解水体的耗氧特征,以及水体生态系统的健康状况。有关白洋淀南刘庄区域沉积物耗氧速率(SOD)的研究结果显示^[16],南刘庄断面附近区域 SOD 为 $0.37 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$,即为 $0.0586 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ (按照研究区域水深进行换算^[41])。本研究中 WOD 均值为 $0.0378 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ 。将水体耗氧部分和沉积物耗氧部分相结合,按照公式(2)计算得到研究区域水体综合耗氧速率为 $0.0964 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ 。在不考虑复氧的情况下,1 L 水从 25°C 条件下的饱和溶解氧($8.28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)状态降低到鱼类、植物大量死亡的溶解氧水平($2.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)所需要的时间为 65 h。

白洋淀入淀河流影响区受府河影响较大,来水裹挟着大量耗氧物质进入淀区,直接影响了 DO 浓度和耗氧情况。水体耗氧部分和沉积物耗氧部分是影响水体 DO 的两个主要部分,本研究中 SOD 大于 WOD(图7),SOD 与 WOD 之比为 1.55。ZHOU 等^[17]等测定清华大学金春园湖 SOD 为 $0.45 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$,HU 等^[18]等测定香港内陆湾 SOD 为 $0.42 \sim 1.30 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 。因此,入淀河流影响区 WOD 与 SOD 均是造成水体缺氧的主要原因。

2.3 水体耗氧因素分析

1) DO 时间变化趋势相关影响因素分析。南刘庄国控断面浊度、 COD_{Mn} 和 Chla 指标 2020—

2022 年逐时实测值变化图和趋势图如图8所示,浊度指标整体呈现出先上升后下降的趋势,在夏季浊度达到 1 年中的最高水平,最大值达到了 22 NTU 左右; COD_{Mn} 指标从 3 月开始逐渐增大,在 5-9 月达到最大状态,并在 $6.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右波动,而后开始下降;Chla 在 1 年中呈现出先上升后下降的趋势并在夏季期间达到了最高质量浓度,为 $0.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,Chla 从 9 月开始逐渐下降,下降至 $0.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右。

南刘庄断面水质参数指标夏季变化趋势之间的 Person 相关性分析结果(表1)显示:浊度($p < 0.01$)、 COD_{Mn} ($p < 0.01$)和 Chla($p < 0.01$)的变化趋势与 DO 的变化趋势存在显著的负相关关系。浊度与悬浮颗粒物含量存在正相关^[42]关系,悬浮颗粒物可携带多种有机物,包括 DOM 和 DOC^[43-44],因此浊度增加会导致水体中营养物质增多,富营养化加剧。营养物质为藻类和植物提供了必要的生长要素,进一步诱导藻类生长,造成叶绿素 a 增多^[45]。叶绿素 a 被发现与 DO 存在显著相关性^[46],当水中藻类和植物大量繁殖时,造成“水华”现象,水体溶解氧被大量消耗,从而造成水体缺氧的问题。

2) 水体耗氧速率与基础理化指标之间相关影响因素分析。DO 质量浓度变化范围为 $1.18 \sim 2.96 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,

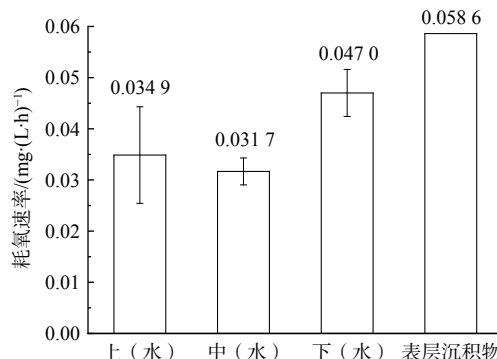


图7 水体耗氧速率和沉积物耗氧速率对比图

Fig. 7 Comparison of water oxygen demand and sediment oxygen demand

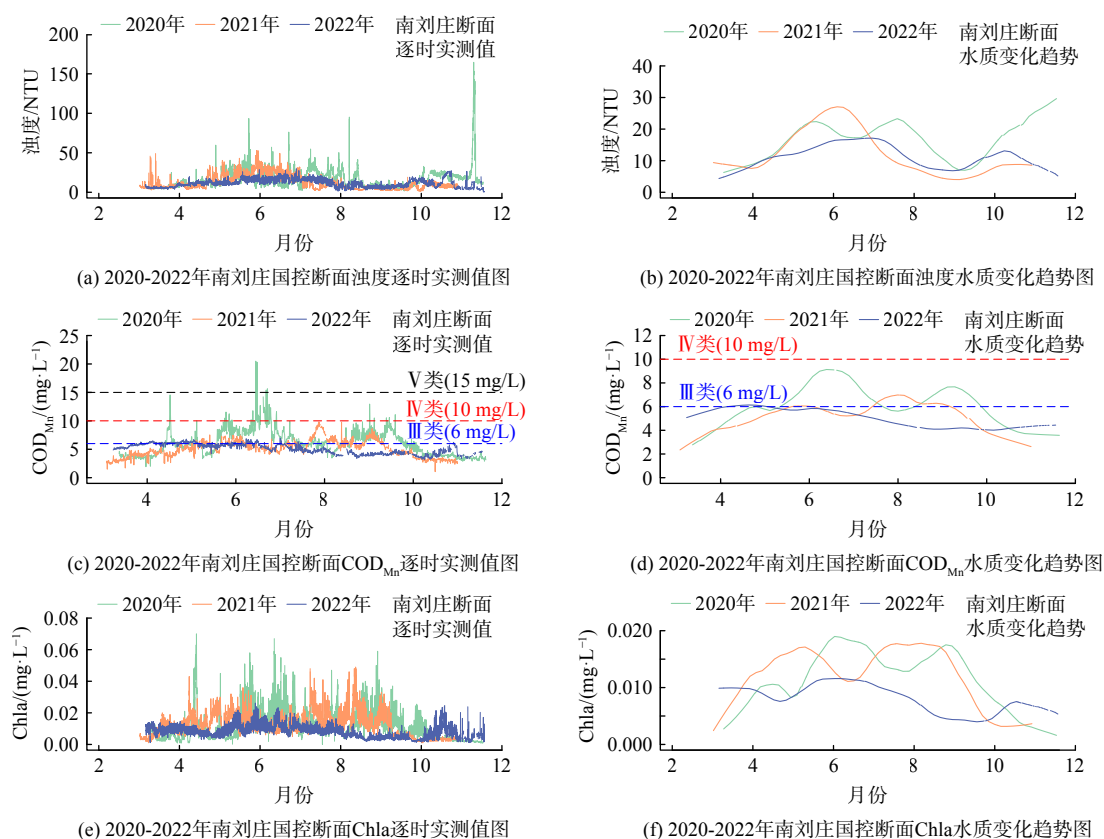


图8 2020-2022年南刘庄国控断面浊度、 COD_{Mn} 和叶绿素a逐时变化图

Fig. 8 Turbidity, COD_{Mn} and Chla variation graphs of the Nanliuzhuang State-controlled Section from 2020 to 2022 (The sampling interval is one hour)

表1 南刘庄国控断面水质指标变化趋势相关性

Table 1 Correlation between changes in water quality indicators of Nanliuzhuang national control section

相关系数及显著性检验	指标	DO	浊度	Chla	COD_{Mn}
person相关性	DO	1	-0.598**	-0.756**	-0.473**
双尾检验			0.000	0.000	0.000
person相关性	浊度	-0.598**	1	0.892**	0.130**
双尾检验		0.000		0.000	0.000
person相关性	Chla	-0.756**	0.892**	1	0.359**
双尾检验		0.000	0.000		0.000
person相关性	COD_{Mn}	-0.473**	0.130**	0.359**	1
双尾检验		0.000	0.000	0.000	

注：**表示在0.01水平下相关性显著

均值为 $2.06 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (表2), 不同水域类型 DO 含量排序为淀面<水道<沟壕。上覆水 TN、TP 和 COD_{Mn} 总体水平为 (1.29 ± 0.52) 、 (0.43 ± 0.10) 和 $(4.09 \pm 0.26) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (表1)。沉积物 OM、TP 和 TN 含量分别为 9.09%、1 188.83 和 3 372.17 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表1)。按加拿大安大略省环境和能源部 (1992) 制定的沉积物质量评价指南 (Sediment quality guidelines, SQGs) 分析, 研究区域内 OM、TP 和 TN 属于中度污染水平, 存在内源释放风险。

研究区域内 WOD 与基础理化指标的 Pearson 相关性分析结果显示, WOD 与 COD_{Mn} ($p < 0.05$,

表 2 研究区域采样点位上覆水、沉积物基础理化指标

Table 2 Basic physicochemical indexes of overlying water and sediments at sampling sites in the study area

点位	上覆水基础指标							沉积物指标		
	T/℃	pH	ORP/(mV)	COND/(μS·cm ⁻¹)	TDS/(mg·L ⁻¹)	DO/(mg·L ⁻¹)	浊度/NTU	OM/%	TP/(mg·kg ⁻¹)	TN/(mg·kg ⁻¹)
S1	17.7±0.7	7.57±0.02	89±1	539.2±0.8	368.2±0.9	2.13±0.5	7.47±0.29	8.30	1 390.30	2 993.72
S2	16.3±0.6	7.68±0.37	106±1	545.2±0.4	373.4±0.4	2.21±0.42	5.80±0.61	9.02	1 069.88	2 843.59
S3	18.3±1.3	8.46±0.23	101±5	547.1±2.8	373.1±2.9	1.84±0.97	2.69±0.12	9.94	1 106.29	4 279.20

点位	上覆水营养指标									
	TP/(mg·L ⁻¹)	SRP/(mg·L ⁻¹)	TN/(mg·L ⁻¹)	NO ₃ ⁻ -N/(mg·L ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N/(mg·L ⁻¹)	Chla/(ug·L ⁻¹)	DOC/(mg·L ⁻¹)	BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	COD _{Cr} /(mg·L ⁻¹)	COD _{Mn} /(mg·L ⁻¹)
S1	0.41±0.06	0.12±0.09	1.92±0.14	0.93±0.04	0.32±0.15	10.78±1.40	9.82±2.18	0.23	11.67±1.53	4.01±0.03
S2	0.52±0.15	0.13±0.01	1.10±0.49	0.30±0.03	0.46±0.01	9.12±1.64	9.89±2.77	0.25	17.00±2.65	4.38±0.28
S3	0.37±0.03	0.06±0.01	0.84±0.05	0.19±0.13	0.02±0.00	9.89±3.01	13.13±1.24	0.25	7.33±0.58	3.88±0.18

$R^2=0.68$)、DOC ($p<0.05$, $R^2=0.69$) 和 Chla 质量浓度 ($p<0.01$, $R^2=0.82$) 均呈现显著的正相关关系 (图 9)。WOD 与 COD_{Mn} 相关, 说明湖泊有机污染加重, 水体富营养化加剧^[47-48], 导致水体中藻类大爆发, 从而导致 DO 消耗增加, WOD 增加。WOD 与 Chla 相关, 表明 WOD 与水体中水生植物的降解、新陈代谢活动有着密切关系。当水生植物大量繁殖而过多时, 会产生“水华”现象而使 DO 逐渐降低, 即使 WOD 加快, 所以 WOD 与 Chla 质量浓度呈正相关关系。有研究表明, 水中 DOC 含量和耗氧速率和耗氧量存在正相关关系^[49-50], DOC 增加会导致浮游植物、浮游动物等可利用营养物质增加, 从而造成富营养化, 最终导致水体耗氧增加。

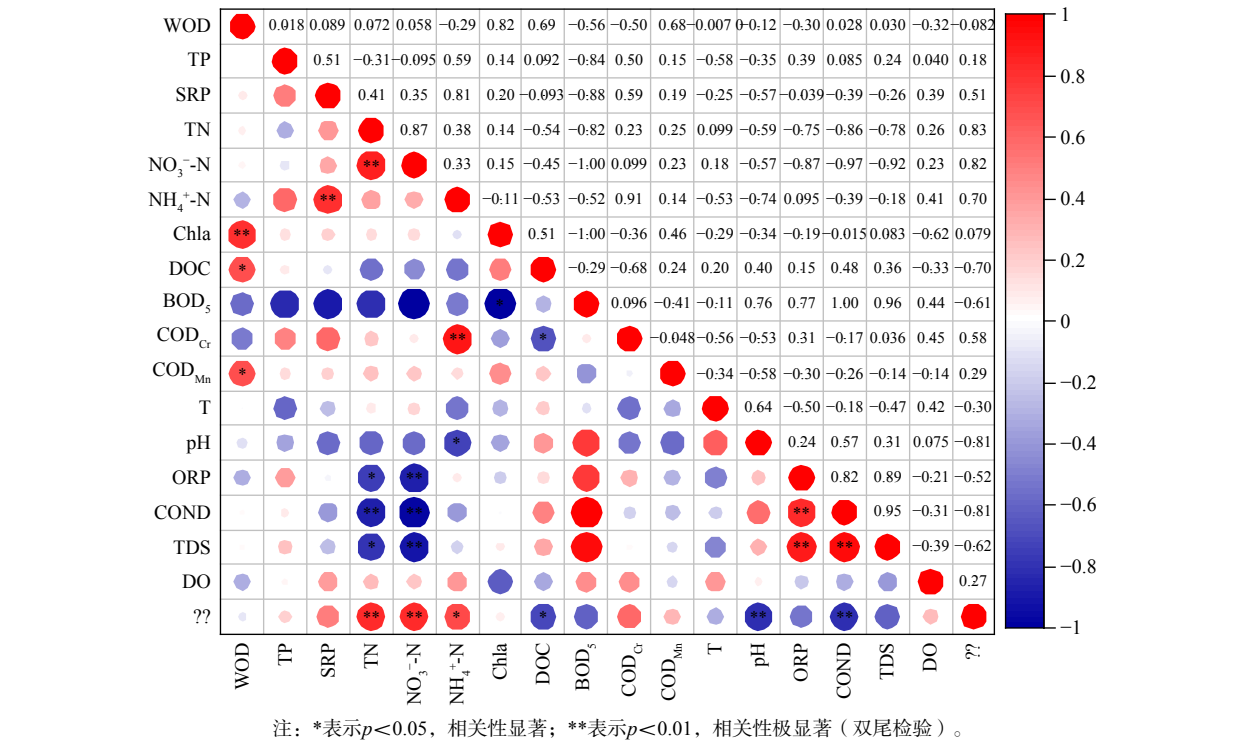


图 9 水体耗氧速率与基础理化指标的相关性

Fig. 9 The correlation between water oxygen demand and basic physicochemical indicators

3 结论

1) WOD 基本呈现下层>上层和中层的趋势。研究区域内 SOD 与 WOD 的比值为 1.55, 水体和沉积物耗氧均是水体 DO 较低的重要原因。

2) 叶绿素 a、DOC、浊度和 COD_{Mn} 是 DO 消耗的主要影响因素。研究区域 DO 年内变化趋势与叶绿素 a (Chla) ($p<0.01$)、浊度 ($p<0.01$) 和 COD_{Mn} 质量浓度 ($p<0.01$) 呈显著负相关关系; 水体耗氧速率与叶绿素 a (Chla) ($p<0.01$)、DOC ($p<0.05$) 和 COD_{Mn} 质量浓度 ($p<0.05$) 呈正相关关系。

3) 降低河流来水浊度, 抑制入淀河流影响区域夏季浮游藻类爆发增长, 阶段开展生态清淤降低沉积物本身和孔隙水污染物扩散带来的高耗氧本底问题是白洋淀水质稳定达到Ⅲ类的根本保障。

参考文献

- [1] KANNEL P R, LEE S, LEE Y-S, et al. Application of water quality indices and dissolved oxygen as indicators for river water classification and urban impact assessment[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2007, 132(1-3): 93-110.
- [2] AY M, KISI O. Modeling of dissolved oxygen concentration using different neural network techniques in Foundation Creek, El Paso County, Colorado[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2012, 138(6): 654-662.
- [3] TERRY J, SADEGHIAN A, LINDENSCHMIDT K-E. Modelling dissolved oxygen/sediment oxygen demand under ice in a shallow eutrophic prairie reservoir[J]. *Water*, 2017, 9(2): 131.
- [4] OSCHLIES A, BRANDT P, STRAMMA L, et al. Drivers and mechanisms of ocean deoxygenation[J]. *Nature Geoscience*, 2018, 11(7): 467-473.
- [5] SONG S, LI C, SHI X, et al. Under-ice metabolism in a shallow lake in a cold and arid climate[J]. *Freshwater Biology*, 2019, 64(10): 1710-1720.
- [6] D'ASARO E, MCNEIL C. Air-sea gas exchange at extreme wind speeds measured by autonomous oceanographic floats[J]. *Journal of Marine Systems*, 2008, 74(1-2): 722-736.
- [7] HOUSER J N, BARTSCH L A, RICHARDSON W B, et al. Ecosystem metabolism and nutrient dynamics in the main channel and backwaters of the Upper Mississippi River[J]. *Freshwater Biology*, 2015, 60(9): 1863-1879.
- [8] HAMPTON S E, SCHEUERELL M D, CHURCH M J, et al. Long-term perspectives in aquatic research[J]. *Limnology and Oceanography*, 2018, 64(S1): S2-S10.
- [9] WOOLWAY R I, MERCHANT C J. Worldwide alteration of lake mixing regimes in response to climate change[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12(4): 271-276.
- [10] 杨凡, 纪道斌, 王丽婧, 等. 三峡水库汛后蓄水期典型支流溶解氧与叶绿素 a 垂向分布特征[J]. *环境科学*, 2020, 41(5): 2107-2115.
- [11] HUANG Y Q, CAI D S, LI M Q, et al. Influence of changes in dissolved oxygen content on fish behavioral trajectories during water eutrophication[J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2019, 17(1): 653-666.
- [12] WANG F, LI X, TANG X, et al. The seas around China in a warming climate[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2023, 4(8): 535-551.
- [13] ZHI W, KLINGLER C, LIU J, et al. Widespread deoxygenation in warming rivers[J]. *Nature Climate Change*, 2023, 13(10): 1105-1113.
- [14] JANE S F, HANSEN G J A, KRAEMER B M, et al. Widespread deoxygenation of temperate lakes[J]. *Nature*, 2021, 594(7861): 66-70.
- [15] BREITBURG D, LEVIN L A, OSCHLIES A, et al. Declining oxygen in the global ocean and coastal waters[J]. *Science*, 2018, 359(6371): 46.
- [16] 曹阳, 温胜芳, 王晓, 等. 白洋淀沉积物耗氧速率及氧亏效应研究[J]. *环境科学学报*, 2022, 42(2): 240-248.
- [17] ZHOU X H, WANG X Y, SHI H C. Inhibitory effect of nitrobenzene on oxygen demand in lake sediments[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, 24(5): 934-939.
- [18] HU W F, LO W, CHUA H, et al. Nutrient release and sediment oxygen demand in a eutrophic land-locked embayment in Hong Kong[J]. *Environment International*, 2001, 26(5-6): 369-375.
- [19] 范傲翔, 王智鹏, 王超, 等. 南水北调中线总干渠水体耗氧特征及成因[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(3): 871-879.
- [20] 武士蓉, 徐梦佳, 赵彦伟, 等. 白洋淀湿地水质与水生生物相关性研究[J]. *环境科学学报*, 2013, 33(11): 3160-3165.
- [21] 李必才, 何连生, 杨敏, 等. 白洋淀底泥重金属形态及竖向分布[J]. *环境科学*, 2012, 33(7): 2376-2383.
- [22] 文艳, 单保庆, 张文强. 低温期浅水湖泊氮的分布及无机氮扩散通量: 以白洋淀为例[J]. *环境科学*, 2021, 42(6): 2839-2847.
- [23] 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.
- [24] 陈明, 孙洁梅, 李敏. 水体中藻类叶绿素 a 提取方法的比较[J]. *环境监测管理与技术*, 2017, 29(4): 57-59.
- [25] 中华人民共和国生态环境部. 固体废物 有机质的测定 灼烧减量法: HJ 761-2015[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2015.
- [26] ASPILA K I, AGEKIAN H, CHAU A S Y. A semi-automated method for the determination of inorganic, organic and total phosphate in sediments[J]. *The Analyst*, 1976, 101(1200): 187-197.
- [27] CLEVELAND R B, CLEVELAND W S, MCRAE J E, et al. STL: A seasonal-trend decomposition[J]. *Journal of Official Statistics*, 1990, 6(1): 3-73.
- [28] SELLINGER C E, STOW C A, LAMON E C, et al. Recent water level declines in the Lake Michigan-Huron system[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(2): 367-373.
- [29] GARCIA-MOZO H, OTEROS J A, GALÁN C. Impact of land cover changes and climate on the main airborne pollen types in Southern Spain[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 548: 221-228.
- [30] WANG F, WANG X, ZHAO Y, et al. Long-term periodic structure and seasonal-trend decomposition of water level in Lake Baiyangdian, Northern China[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2013, 11(2): 327-338.
- [31] CARPENTER S R, CARACO N F, CORRELL D L, et al. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen[J]. *Ecological Applications*,

- 1998, 8(3): 559-568.
- [32] HONG M H, MA Z L, WANG X Y, et al. Effects of light intensity and ammonium stress on photosynthesis in *Sargassum fusiforme* seedlings[J]. *Chemosphere*, 2021, 273.
- [33] MOSLEY L M, WALLACE T, RAHMAN J, et al. An integrated model to predict and prevent hypoxia in floodplain-river systems[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 286: 112213.
- [34] VAN DER LEE G H, VERDONSCHOT R C M, KRAAK M H S, et al. Dissolved oxygen dynamics in drainage ditches along a eutrophication gradient[J]. *Limnologia*, 2018, 72: 28-31.
- [35] SALK K R, VENKITESWARAN J J, COUTURE R M, et al. Warming combined with experimental eutrophication intensifies lake phytoplankton blooms[J]. *Limnology and Oceanography*, 2022, 67(1): 147-158.
- [36] VIONE D, MINERO C, CARENA L. Fluorophores in surface freshwaters: importance, likely structures, and possible impacts of climate change[J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2021, 23(10): 1429-1442.
- [37] 汤楠. 洞庭湖芦苇腐解过程对周边水体水质影响的研究[D]. 湖南: 湘潭大学, 2021.
- [38] WENDT-POTTHOFF K, KOSCHORRECK M. Functional groups and activities of bacteria in a highly acidic volcanic mountain stream and lake in Patagonia, Argentina[J]. *Microbial Ecology*, 2002, 43(1): 92-106.
- [39] ZHANG L, SHEN Q S, HU H Y, et al. Impacts of corbicula fluminea on oxygen uptake and nutrient fluxes across the sediment-water interface[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2011, 220(1-4): 399-411.
- [40] WALLACE T A, GANF G G, BROOKES J D. Sediment oxygen demand in a constructed lake in south-eastern Australia[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 181: 449-454.
- [41] 王豆豆. 白洋淀沉水植物分布特征、净水效果及重建策略[D]. 北京: 北京林大学, 2019.
- [42] 高永强, 高磊, 朱礼鑫, 等. 长江口及其邻近海域悬浮颗粒物浓度和粒径的时空变化特征[J]. *海洋学报*, 2018, 40(3): 62-73.
- [43] OLIVER B G, CHARLTON M N. Chlorinated organic contaminants on settling particulates in the Niagara River vicinity of Lake Ontario [Canada] [J]. *Environmental Science & Technology*, 1984, 18(12): 903-908.
- [44] SCHELLENBERG K, LEUENBERGER C, SCHWARZENBACH R P. Sorption of chlorinated phenols by natural sediments and aquifer materials[J]. *Environmental Science & Technology*, 1984, 18(9): 652-657.
- [45] 于海燕, 周斌, 胡尊英, 等. 生物监测中叶绿素 a 浓度与藻类密度的关联性研究[J]. *中国环境监测*, 2009, 25(6): 40-43.
- [46] BOYNTON W R, MURRAY L, HAGY J D, et al. A comparative analysis of eutrophication patterns in a temperate coastal lagoon[J]. *Estuaries*, 1996, 19: 408-421.
- [47] CHEN X M, PENG L, WANG J C, et al. Determination of chemical oxygen demand in water samples using gas-phase molecular absorption spectrometry[J]. *Analytical Sciences*, 2020, 36(7): 841-846.
- [48] LI X D, CHEN Y H, LIU C, et al. Eutrophication and related antibiotic resistance of enterococci in the Minjiang river, China[J]. *Microbial Ecology*, 2020, 80(1): 1-13.
- [49] OBERTEGGER U, OBRADOR B, FLAIM G. Dissolved oxygen dynamics under ice: Three winters of high-frequency data from Lake Tovel, Italy[J]. *Water Resources Research*, 2017, 53(8): 7234-7246.
- [50] KLAUS M, KARLSSON J, SEEKELL D. Tree line advance reduces mixing and oxygen concentrations in arctic-alpine lakes through wind sheltering and organic carbon supply[J]. *Global Change Biology*, 2021, 27(18): 4238-4253.

(责任编辑: 金曙光)

Integrated oxygen consumption characteristic and influencing factors in inflow river impact zone of Baiyangdian Lake

ZHU Ziyang^{1,2}, CAO Enjuan^{1,2}, WEN Shengfang^{1,*}, SHAN Baoqing^{1,2,*}

1. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

*Corresponding author, E-mail: sfwen@rcees.ac.cn, E-mail: bqshan@rcees.ac.cn

Abstract Regarding the phenomenon of low dissolved oxygen (DO) concentration in the affected area of the Baiyangdian River during summer, this study employed time series analysis of water quality data, comprehensive oxygen consumption experiments on water bodies, and correlational statistical analysis to research the diurnal variation patterns of dissolved oxygen (DO) concentration at the Nanliuzhuang national control section within the Fu River's influence zone, the water oxygen demand over different underlying surface types, and their influencing factors during summer. The results showed that the DO concentration at the Nanliuzhuang section exhibited a seasonal pattern of higher levels in spring and autumn and lower levels in summer, with the concentration dropping to around $1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ in summer of 2022 despite overall improvements in water quality over the years. The daily fluctuation range of DO concentration varied between $0.5 \sim 5.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, with an average of $2.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, showing a trend of summer > spring > autumn. The water oxygen demand in the Fu River's influence zone ranged from 0.024 to $0.0499 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, with the water bodies showing a pattern of canal $\approx$ lake surface > ditch in terms of different underlying surface water types. The water oxygen demand generally exhibited a trend of bottom layer > surface layer and middle layer across different depths. The ratio of sediment oxygen demand to water oxygen demand in the comprehensive oxygen consumption rates of water bodies was 1.55 , indicating that both water and sediment oxygen demand significant reasons for the low DO concentration. The annual variation trend of DO concentration at the Nanliuzhuang section showed a significant negative correlation with chlorophyll a (Chla) content ($p < 0.01$), turbidity ($p < 0.01$), and COD_{Mn} concentration ($p < 0.01$), and the water oxygen demand was significantly positively correlated with chlorophyll a (Chla) content ($p < 0.01$), DOC concentration ($p < 0.05$), and COD_{Mn} concentration ($p < 0.05$). Reducing the turbidity of river inflows, suppressing the explosive growth of phytoplankton in the river inflow influence area during summer, and periodically conducting ecological dredging to reduce the high oxygen consumption background caused by sediment and pore water pollutant diffusion were fundamental to ensuring the stable achievement of Class III water quality standards in Baiyangdian Lake.

Keywords Baiyangdian Lake; inflow river impact zone of Baiyangdian Lake; dissolved oxygen; water comprehensive oxygen consumption; influencing factors