

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.23.001

沉水植物引发水体DO与ORP负相关变化:现象与机制

李 檬^{1,2}, 田腾飞^{1,2}, 黄 鹏^{1,2}, 孙永利^{1,2}, 范 波^{1,2}, 李家驹^{1,2}

(1. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074; 2. 天津市城镇排水系统重点实验室, 天津 300074)

摘 要: 传统水环境管理者普遍认为溶解氧(DO)与氧化还原电位(ORP)是正相关关系。本研究首次揭示了沉水植物型水体中DO与ORP呈现昼夜负相关变化规律:白天DO升高时ORP降低,而黑夜DO下降时ORP回升。通过多体系对比实验,证实该现象由沉水植物光合作用直接驱动,光照度、光照时长、植株密度及pH等变量的改变仅能调节DO与ORP的波动幅度,并未改变二者固有的负相关变化特征,而沉水植物存在与否是决定该负相关现象形成的核心因素。基于系统物质平衡与电位理论分析,其内在机制可能涉及沉水植物同步释氧与分泌还原性物质,从而导致氧化还原状态的动态失衡。此现象的发现与确认为城市水体水质监测和生态系统健康评估提供了新的科学视角。

关键词: 溶解氧; 氧化还原电位; 沉水植物; 金鱼藻; 光合作用; 权重模型

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)23-0001-07

Submerged Macrophytes Induced Negative Variation between Dissolved Oxygen and Oxidation-Reduction Potential in Water: Phenomenon and Mechanism Exploration

LI Meng^{1,2}, TIAN Teng-fei^{1,2}, HUANG Peng^{1,2}, SUN Yong-li^{1,2}, FAN Bo^{1,2},
LI Jia-ju^{1,2}

(1. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300074, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Urban Drainage System, Tianjin 300074, China)

Abstract: Conventional water quality management assumes a positive correlation between dissolved oxygen (DO) and oxidation-reduction potential (ORP). Here, we report a previously unrecognized negative correlation pattern between DO and ORP in submerged macrophyte-dominated waters: ORP decreases during daytime DO elevation, whereas ORP rebounds during nighttime DO depletion. Comparative experiments across different systems demonstrated that this phenomenon was mechanistically driven by macrophyte photosynthesis. Changes in light illuminance and duration, plant density, and pH only changed the range of DO and ORP variations, without altering their intrinsic negative correlation. The presence or absence of submerged macrophytes constituted the determinant of this inverse relationship. Mechanistic analysis integrating mass balance and potential theory suggested that oxygen release and reducing metabolite secretion by plants might induce the imbalance of redox

基金项目: 住房和城乡建设部科学技术计划项目(2021-K-128、2020-K-038)

通信作者: 孙永利 E-mail: tjsunyongli@163.com

state. The discovery and confirmation of this phenomenon will provide a new scientific perspective for urban water body quality monitoring and ecosystem health assessment.

Key words: dissolved oxygen (DO); oxidation-reduction potential (ORP); submerged macrophyte; *C. demersum*; photosynthesis; weight model

溶解氧(DO)和氧化还原电位(ORP)是诊断水体健康、识别黑臭水体、评估修复工程效果的关键指标。了解水体中DO和ORP的周期性变化及其关系,对于确保水体状态监测质量、科学开展水体健康评估以及实施水环境治理至关重要。氧气是一种强氧化性物质,理论上DO增加或降低对ORP值升高或下降有显著的促进作用。例如,在污水处理系统,DO和ORP水平会随着好氧-缺/厌氧的阶段变化同步上升或下降;在湿地系统中,沿程与不同深度的水体DO和ORP的变化趋势也保持显著的一致性;在湖库环境中,水层氧含量越高,ORP值通常也越高^[1]。因此,水环境与水生态领域的专家普遍认为DO和ORP呈正相关关系。

尽管在复杂环境因素干扰下,二者的关联可能呈现非线性或滞后性,但学界对其正相关性存在普遍共识。然而研究发现,种植苦草、金鱼藻等沉水植物的水生态系统中,水体DO与ORP呈现显著的昼夜周期性波动,且二者变化呈显著负相关:光照时段DO持续上升而ORP下降,黑暗时段则相反^[2]。这种“反直觉”现象可能导致水环境监测人员和决策者对水体健康状况的误判,从而影响策略部署的科学性和准确性。团队前期研究显示,该关联现象仅在健康沉水植物生态系统中能观察到,而在挺水植物与浮叶植物生态系统中均未出现;当系统存在重污染底泥时,DO与ORP负相关的关联变化呈现出滞后响应或消失。这表明该现象可能由沉水植物特定机制驱动,且在低有机污染水系中更易被观测到。因此,拟通过多体系对比,确认沉水植物的关键作用,探究DO与ORP负相关的边界条件和驱动机制,为阐明水环境中两者之间的关系提供新的见解,更为科学开展基于ORP的水体监测与健康评价提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 实际水体环境监测

为确认水环境DO和ORP的负相关变化现象,选取两个典型水体进行研究。一是城区有沉水植

物生长的某生态水体,其水质满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅳ类标准;二是某城市富营养化河段,该河段是城区缓流河段,夏季常发生水华现象。两个水体均布设了DO、ORP等在线测定仪器,开展24 h连续监测。其中,富营养化河段主要采集藻类暴发时期的水质数据,植物生态水体主要采集常态化水质数据。

1.2 模拟体系

为了确认DO和ORP的协同变化关系,在净水、携污雨水、沉水植物-水体等不同体系(如图1所示)对水中DO和ORP的协同变化规律进行了监测与对比分析。

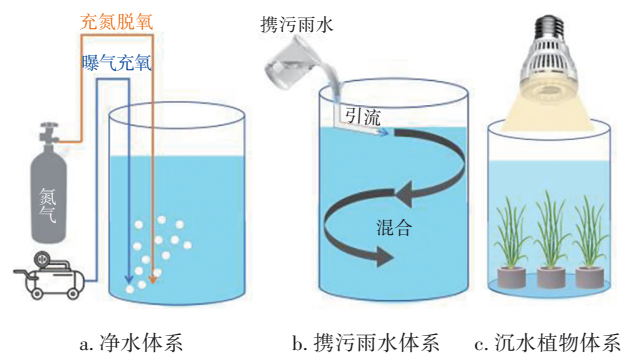


图1 不同体系构建示意

Fig.1 Schematic diagram of different systems construction

净水体系使用市政自来水(pH为6.7),在室温条件(约20℃)下,通过物理手段充氧、脱氧,调控水中的DO水平,同时监测DO和ORP值的变化。其中,充氧过程采用空气曝气方式,曝气头与管路预先经过深入清理与灭菌;脱氧过程采用氮气吹脱方式。为了排除水中微生物代谢的潜在影响,对水进行高温高压处理,然后同步按照上述流程对其DO和ORP值进行监测分析。在该过程中,潜在影响ORP值的主要因素是DO。

携污雨水体系使用携污雨水,构建高负荷污染条件下的微生物降解耗氧场景。将实际雨水管道沉积物与纯水配制成悬浊液以模拟携污雨水,管道沉积物取自天津城区某生活区分流制雨水管道。

实验在柱状箱体内进行,启动前箱体内加入新鲜的城市地表河水。启动时,将携污雨水沿水面方向快速导入地表河水,确保二者充分混合,混合后的TOC、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、TN分别为75、1.45、4.1、0.4、4.9 mg/L, pH为7.8。待体系初步稳定后,在室温环境下对水体的DO和ORP进行连续动态监测。该过程中影响ORP值变化的潜在因素主要是DO、还原性污染物、pH与微生物等。

在沉水植物体系中,沉水植物选用金鱼藻,在同样的柱状箱体以及28℃水温条件下进行。采用无土栽培种植模式,以避免沉积的污染物释放对体系的干扰。整个培养装置放置在上海喆图ZGC-250恒温光照培养箱中,通过光照/黑暗环境切换,模拟自然状态下水生态系统的日夜周期变化。实验过程中分别监测了沉水植物叶片附近水体的DO和ORP值变化情况。在该系统中,水体初始TOC、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、TN浓度分别为2.6、0.16、0.3、3.2、3.7 mg/L, pH为7.2,影响ORP值变化的潜在因素主要是DO和硝酸盐等氧化性物质、植物代谢分泌物以及pH等。

1.3 环境变量影响

基于沉水植物体系,通过调控光照度(3 000、15 000 lx)、日夜交替周期(6、24 h)以及种植数量(2、4株),对比分析光合作用的主要环境因素及pH对DO与ORP协同变化的影响。除控制变量外,其他实验条件与操作方法同1.2节。

1.4 分析方法

实验分别采用荧光电极法和直接电位法对水体的DO和ORP值进行监测(德国WTW Multi 3630 IDS多参数水质测定仪),通过数据连续采集记录功能,采集不同模拟体系中DO、ORP以及水温变化情况,并通过pH计测定水体pH变化。

2 研究结果

2.1 实际水体中DO和ORP的变化规律

图2显示了两类城市水体中DO和ORP的变化情况。可以看出,在富营养化水体与植物生态水体中均出现了DO和ORP的负相关变化现象。在沉水植物型水体中,DO从1 mg/L逐步升至15~17 mg/L,但ORP在日间逐渐从330 mV同步降低到110 mV;当午后DO由极大值回落时,ORP同步回升,二者保持了负相关变化规律。在富营养化水体中,DO和ORP也表现了相似的变化规律。

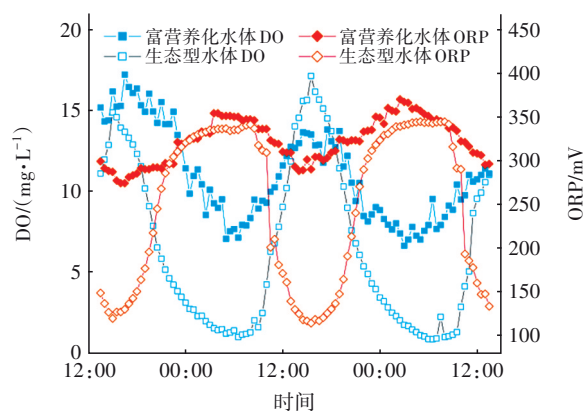


图2 城市富营养化水体与沉水植物型生态水体中DO和ORP的变化

Fig.2 Variation of DO and ORP in urban eutrophic and submerged macrophytes ecological water bodies

2.2 不同体系中DO和ORP的变化规律

2.2.1 净水体系

图3显示了溶解氧吹脱和曝气充氧过程中DO和ORP的变化规律。随着氮气开始吹脱水中的氧气,DO和ORP同步下降,随着DO逐步降低至接近于0,ORP也逐渐降至70 mV,两者保持相对一致的变化趋势。当对低氧水进行曝气后,DO逐渐升高并恢复至近饱和状态,ORP随DO上升快速升至220 mV以上。在随后DO浓度饱和且稳定状态下,ORP逐渐由220 mV升高至257 mV。总体来看,在由非生物过程主导的净水体系中,DO和ORP的变化遵循正相关协同变化的规律。

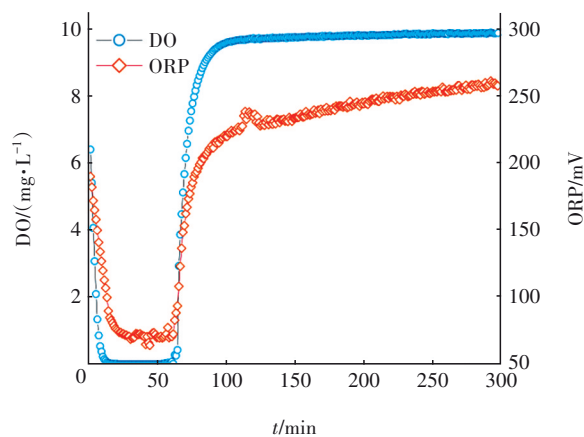


图3 净水体系中DO与ORP的协同变化特征

Fig.3 Variation characteristics of DO and ORP in clean water system

2.2.2 携污雨水体系

图4显示了携污雨水体系和沉水植物体系的DO和ORP协同变化规律。其中,携污雨水体系中

微生物降解耗氧过程驱动了DO和ORP协同变化。在前2 h内DO迅速由6.5 mg/L降至3.8 mg/L,同时ORP迅速由133 mV下降至34 mV。随后DO持续降低至接近无氧水平,ORP则逐渐由34 mV降至-80 mV。总体来看,在携污雨水耗氧过程中DO与ORP之间保持正相关变化关系。

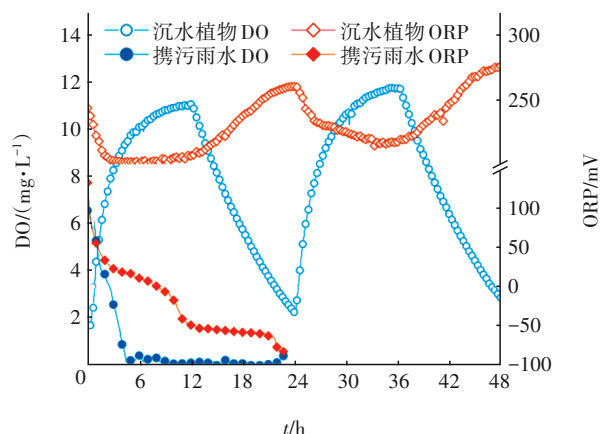


图4 不同体系中DO与ORP的协同变化特征

Fig.4 Variation characteristics of DO and ORP in different systems

2.2.3 沉水植物体系

在沉水植物体系中DO和ORP随昼夜变化(见图4)。在光照/黑暗周期变化过程中,DO在2~11 mg/L之间周期性变化,ORP也在200~275 mV之间呈现周期性变化。但是,在光照期间DO快速上升阶段,ORP由240~260 mV逐渐下降至200~210 mV;在黑暗期间DO逐渐回落,而ORP则又由低位逐渐回升至260~275 mV。可见,在沉水植物体系中,DO和ORP在光照条件切换时呈现同步趋势转变,其始终维持负相关变化关系。

2.3 环境条件影响

上述结果表明,只有沉水植物体系发生了ORP与DO负相关变化现象,而该过程由光照触发,所以该现象极有可能与沉水植物的光合作用相关。因此,进一步分析了相关环境变量对ORP和DO负相关变化的解释性。

2.3.1 光照度

图5显示了不同光照度下,沉水植物体系DO与ORP的协同变化关系。在不同光照度条件下,DO和ORP均保持负相关变化规律。不同的是,低光照度下ORP的波动幅度明显减小, Δ ORP约为35 mV;而在高光照度下, Δ ORP约为90 mV。这表明,光照

度的变化只会影响DO和ORP的波动幅度,而不会改变两者负相关变化的基本特征。

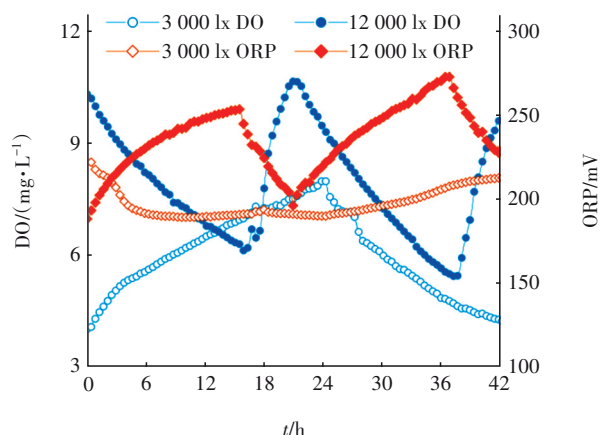


图5 在不同光照条件下DO与ORP的协同变化特征

Fig.5 Variation characteristics of DO and ORP under different illumination conditions

2.3.2 光照时长

图6显示了不同交替周期下DO和ORP的变化特征。可以看出,无论是6 h/6 h还是24 h/24 h交替,DO和ORP始终保持同步变化。延长光照时间只对DO和ORP的变化幅度产生影响,并不会造成变化模式的根本改变。

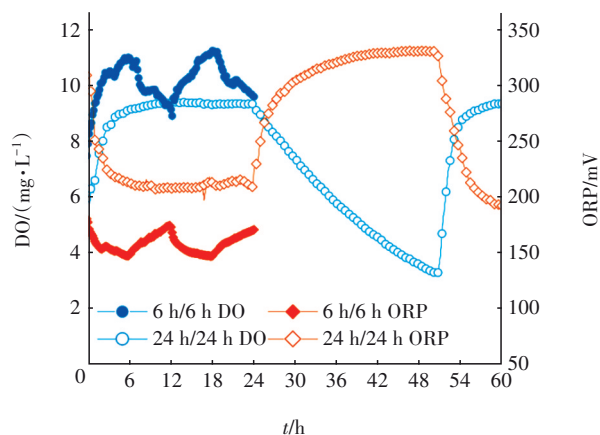


图6 不同光照时长下DO与ORP的协同变化特征

Fig.6 Variation characteristics of DO and ORP under different illumination durations

2.3.3 pH

图7显示了沉水植物体系在昼夜循环过程中pH的典型变化规律。可以看出,pH随着日夜过程也呈现周期性变化,这与光合作用、呼吸作用分别吸收和释放 CO_2 有关:光照时(0~12 h和24~36 h)pH逐渐上升,而在黑暗期间(12~24 h和36~48 h)pH呈现下降趋势。总体来看,pH在8.0~8.8范围内波

动。根据理论推算,氧还原半反应在 $\Delta\text{pH}=0.8$ 时的电势可降低47 mV,但同时还原性物质的氧化半反应中 H^+ 通常作为产物,pH升高会造成该氧化半反应电势升高。二者相抵后,理论上由pH波动引发的电势变化较小,难以解释ORP的大幅波动。

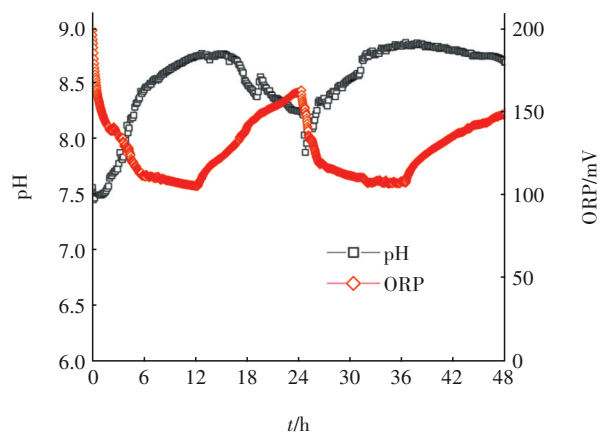


图7 昼夜交替下系统pH变化规律

Fig.7 pH variation under alternation of light and dark

2.3.4 植株密度

图8显示了沉水植物密度对DO和ORP协同变化特征的影响。可以看出,种植2株金鱼藻(相当于28株/ m^2)和种植4株金鱼藻(相当于55株/ m^2)的DO和ORP变化规律相似,同样呈现负相关变化,但植物密度对ORP波动幅度影响显著:高密度植株系统的ORP变化幅度($\Delta\text{ORP}=93\text{ mV}$)明显大于低密度植株系统($\Delta\text{ORP}=44\text{ mV}$)。

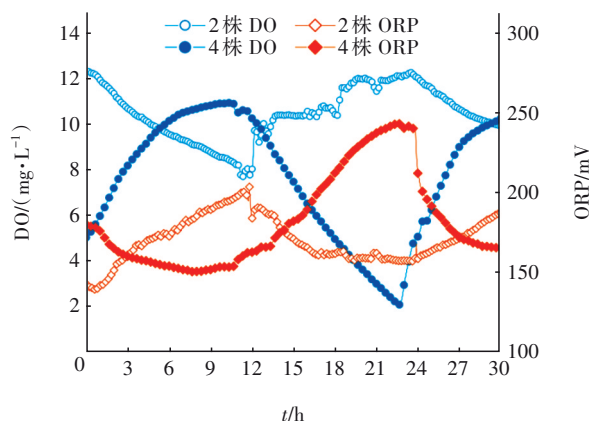


图8 不同植株密度下DO与ORP的协同变化特征

Fig.8 Variation characteristics of DO and ORP under different plant densities

3 讨论

3.1 现象与特征

根据实验结果,DO和ORP的负相关变化表现

出如下特征:①沉水植物或水华水体中易出现此现象。②DO升高或降低时,ORP呈负相关变化;DO趋于稳定时,ORP也趋于稳定。③有光照和黑暗切换时,DO和ORP的变化趋势同步反转。④植物密度越高,ORP波动幅度越大。这表明,ORP的负相关变化与系统内的释氧、耗氧过程可能有一定关联,与DO变化规律存在显著的时间一致性,并且与光照条件变化驱动的过程存在明显关联。因此,该现象可能与光照条件、植物光合作用存在密切联系。

实验结果还显示:① CO_2 吸收与释放只能引起pH的小幅波动,不足以引发ORP的大幅变化;②光照度、光照时长的变化并不会从根本上改变DO与ORP的负相关变化模式。这表明,pH、光照度与光照时长等环境变量不是驱动负相关现象的核心因素。综上特征推测,DO和ORP的负相关变化是一种发生在沉水植物型水体中,由通过光辐射诱发相关的一系列生理代谢与化学反应过程(如光合作用)引发的特殊现象。

3.2 理论框架

沉水植物型水体DO与ORP负相关变化现象涉及多种类型的过程,包括植物光合作用与合成代谢过程、微生物代谢与水化学反应过程、电极测量反应过程等。这些过程涉及大量基础理论,其中的一些理论与科学结论或许能够成为解开这一现象的“钥匙”。因此,对这些过程及其理论进行系统梳理,为破解该现象的基本原理提供基本理论框架。

氧化还原电位最核心的是混合电位理论,它描述了复杂氧化还原体系中ORP响应的基本原理,即当多个电化学反应同时发生时,电极表面的电位会调整到一个特定值,使所有反应的净电流为零^[3-4]。由此,混合电位可看作各个电对电位的加权平均值,其中权重函数与各电对反应的电流密度或反应速率相关。

$$E_{\text{sys}} = \frac{\sum(E_i \cdot \omega_i)}{\sum \omega_i} \quad (1)$$

式中: E_{sys} 为系统混合电位值,mV; E_i 为第*i*个电对的电位,mV; ω_i 为第*i*个电对的权重,通常与电流密度成正比。

该公式经简化概化后,可写作:

$$E_{\text{sys}} = \frac{E_{\text{O}_2} \cdot \omega_{\text{O}_2} + E_{\text{Red}} \cdot \omega_{\text{Red}}}{\omega_{\text{O}_2} + \omega_{\text{Red}}} = \gamma \cdot E_{\text{O}_2} + (1 - \gamma) \cdot E_{\text{Red}} \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{\omega_{O_2}}{\omega_{O_2} + \omega_{Red}} = \frac{n_{O_2}[O_2]}{n_{O_2}[O_2] + n_{Red}[Red]} \quad (3)$$

式中: γ 为权重系数; n_{O_2} 为氧化还原总反应中 O_2 的转移电子数,如完全氧化过程中 $n_{O_2}=4$; n_{Red} 为氧化还原总反应中还原性物质的转移电子数。

基于DO与ORP的负相关变化规律,在有光时溶解氧对混合电位的权重 ω_{O_2} 应相对于还原性物质的权重 ω_{Red} 降低。这可以从三个角度进行解释:

一是从系统物质平衡计算的角度来看。在光合作用光反应阶段,沉水植物持续光解水,形成氧气和还原力(NADPH),这些还原力被用于合成碳水化合物以及其他还原性产物。但对于水生生态系统这种开放系统,高浓度 O_2 会持续向空气扩散,而还原性物质在水相中持续积累。因此,在光照条件下,系统还原性与氧化性之间的差异将持续放大。从整个系统角度看,光照条件下氧化性物质持续逸散损失,还原性物质持续积累,系统平衡偏向还原性。因此,系统可能会出现ORP值持续降低的现象。同理,在黑夜期系统中还原性物质持续被消耗,但由于存在复氧过程,水中氧气有外源输入,系统平衡偏向氧化性。

二是从物质浓度变化率的角度来看。已有研究表明,沉水植物叶片受到光合作用调控会向水体释放酚酸、醛、醇、酮等还原性物质^[5]。例如,金鱼藻水培液中可检出较丰富的乳酸、阿魏酸、琥珀酸、丁二醇等化合物^[6]。通过查阅电化学数据或间接推算,了解到这些物质在pH=7时电势(vs. Ag-AgCl)约为-0.40~-0.25 V^[7],其还原性可促成系统还原性的降低。然而,ORP的动态变化需综合分析氧化物(如DO)与还原物(如植物分泌物)的协同变化,即二者浓度同步变动时二元函数 γ 的响应关系。

根据式(3)可以推导出权重系数 γ 随时间降低的边界条件为:

$$\frac{d[O_2]}{[O_2]} < \frac{d[Red]}{[Red]} \quad (4)$$

其内涵是当还原性物质浓度的增幅大于氧气浓度的增幅时,系统可能出现ORP值下降的趋势。结合实际情况来看,溶解氧浓度基数较高,在光照启动时通常为4~6 mg/L,逐渐增长至10~14 mg/L;而系统初始状态仅含有微量还原性物质,因此植物分泌的还原性物质虽量少但产生的波动幅度大,理论

上可能造成权重系数降低,从而使系统ORP下降。在黑夜环境下,溶解氧与还原性物质同步消耗,但由于二者浓度基数不同,溶解氧的降幅通常小于还原性物质。同时,此时 $d[O_2]$ 和 $d[Red]$ 均为负数, $\frac{d[O_2]}{[O_2]} > \frac{d[Red]}{[Red]}$,因此 γ 为上升趋势,从而使系统ORP上升。基于权重模型,结合沉水植物分泌还原性物质浓度的合理推测及其电势数据,可以理论推演出DO与ORP的负相关变化过程(见图9)。

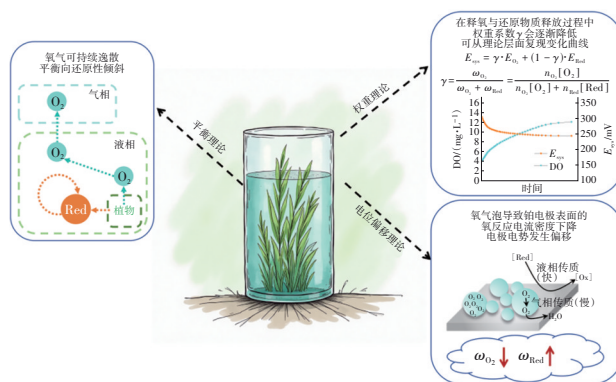


图9 DO与ORP负相关变化现象的解释性机制

Fig.9 Explanatory mechanisms of DO and ORP negative correlation phenomenon

三是从电极表面反应的传质过程角度来看。DO与ORP的测量机制存在显著差异,导致两指标受传质过程的影响明显不同。DO测量主要基于氧淬灭反应与光学检测,该过程不易受水中氧分子形态的影响。相比之下,ORP测量的核心过程依赖于水中氧化还原活性物质在铂电极表面的吸附与电子转移反应。氧分子对ORP的贡献需通过浓度梯度驱动的传质过程到达电极表面,其程度受传质效率与反应动力学共同影响^[8]。沉水植物在光照条件下通过光合作用释放氧气,易在水中形成微气泡^[9]。这些微气泡若附着于铂电极表面,会形成局部气膜屏障,迫使氧分子通过气相传质路径扩散至电极表面。而氧气在电极表面的反应十分迅速,这就导致靠近电极处氧气浓度迅速减小,造成氧分子在铂电极表面反应的电流密度降低,可能引起氧分子对ORP的贡献权重 ω_{O_2} 下降。此外,沉水植物代谢过程释放单宁酸、类黄酮、生物碱、羧酸等含氮含氧有机物,其分子中的活性位点(如氮、氧原子)可能与氧分子竞争铂电极表面的吸附位点,进一步抑制氧分子的电极反应速率,导致 ω_{O_2} 降低。与此同时,植物

释放的还原性物质主要通过液相传质到达电极表面,其传质效率受气膜影响较小,可维持相对稳定的反应活性。因此,在植物光合作用期间,氧分子的电极反应贡献(ω_{O_2})较还原性物质的贡献(ω_{Red})降低,导致电极氧化还原平衡电位(E_{sys})偏移,最终表现为ORP值下降。

上述理论可以为沉水植物型水体中DO与ORP的负相关变化现象提供合理解释,基于总量平衡、浓度变化率及电极响应三个维度,可构建系统性解释模型,为深入解析与验证底层机制指明了方向。

4 结论

① 首次揭示了在沉水植物主导且水质良好的生态水体中,DO与ORP之间存在显著的负相关昼夜周期性变化规律。具体表现为:光照期DO持续上升而ORP同步下降,黑暗期则DO下降而ORP回升。这一循环往复现象被证实主要受沉水植物光合作用及光暗条件切换驱动。光照时长、光照度与植物密度等因素仅能调节ORP的波动幅度,无法改变该负相关现象特征。

② 基于系统氧化还原平衡视角与混合电位理论,初步提出了解释该DO与ORP负相关机制的理论模型,为理解其形成基础提供了方向。这一发现打破了DO与ORP呈正相关变化的传统认知,为理解水生生态系统氧化还原动态提供了崭新视角,对水质评价与水环境管理实践具有重要的理论与实践意义。后续将深入探究该“灰箱”过程的具体作用机理,以期全面揭示现象的本质。

参考文献:

- [1] RODAL-MORALES N D, BEUTEL M, FUHRMANN B, *et al.* Hydrology and oxygen addition drive nutrients, metals, and methylmercury cycling in a hypereutrophic water supply reservoir[J]. *Frontiers in Water*, 2024, 6: 1356994.
- [2] 赵青,黄鹏,李鹤男,等. 基于DO和ORP考量水生植物的生态修复效果[J]. *中国给水排水*, 2023, 39(5): 94-100.
- ZHAO Qing, HUANG Peng, LI Henan, *et al.* Ecological restoration performance of aquatic plants based on DO and ORP consideration [J]. *China Water & Wastewater*, 2023, 39(5): 94-100 (in Chinese).
- [3] YAN M, NAMARI N A P, NAJAMURA J, *et al.* Theoretical framework for mixed-potential driven catalysis [J]. *Nature Communications Chemistry*, 2024, 7: 69.
- [4] MATSUMOTO K, MIYAZAKI K, HWANG J W, *et al.* Electrode potentials part 1: fundamentals and aqueous systems[J]. *Electrochemistry*, 2022, 90(10): 102001.
- [5] CHEN W B, WANG L X, WU J, *et al.* Emission pattern of biogenic volatile organic compounds from wetland vegetation[J]. *Atmosphere*, 2024, 15(6): 651.
- [6] 张之浩,李威,吴晓芙. 水体原位修复中沉水植物化感物质的分离与鉴定[J]. *环境工程技术学报*, 2021, 11(6): 1164-1172.
- ZHANG Zhihao, LI Wei, WU Xiaofu. Allelochemicals isolation and identification of submerged macrophyte in in-situ remediation [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2021, 11(6): 1164-1172 (in Chinese).
- [7] 朱丽云,黄连英,罗敏怡,等. 阿魏酸在Au@Cu₂O/石墨烯修饰电极上的电化学反应及测定[J]. *广西科技大学学报*, 2022, 33(1): 33-38.
- ZHU Liyun, HUANG Lianying, LUO Minyi, *et al.* Electrochemical behavior and determination of ferulic acid on Au@Cu₂O/graphene modified electrodes [J]. *Journal of Guangxi University of Science and Technology*, 2022, 33(1): 33-38 (in Chinese).
- [8] WANG S Y, ZHU E B, HUANG Y, *et al.* Direct correlation of oxygen adsorption on platinum-electrolyte interfaces with the activity in the oxygen reduction reaction[J]. *Science Advances*, 2021, 7(24): eabb1435.
- [9] SHIKHANI M, REINSCHKE L, AURICH P, *et al.* Composition of photosynthetic gas bubbles from submerged macrophytes[J]. *Water Resources Research*, 2024, 60(1): e2022WR034010.

作者简介:李檬(1989—),男,山东潍坊人,博士,高级工程师,主要研究方向为城市水环境治理与生态改善。

E-mail: mli_environment@163.com

收稿日期: 2025-07-07

修回日期: 2025-08-01

(编辑:李德强)