

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.05.014

# 基于DO和ORP考量水生植物的生态修复效果

赵青, 黄鹏, 李鹤男, 李鹏峰, 田腾飞, 刘钰, 张玮嘉,  
张岳, 李家驹, 范波, 孙永利, 李檬, 耿官杰  
(中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074)

**摘要:** 目前,我国城市黑臭水体整治初见成效,开展水体生态修复成为实现城市水体长制久清目标的重要措施,其中水生植物在提升水体溶解氧(DO)和氧化还原电位(ORP)方面具有重要作用。但在实际工程中,普遍存在对水生植物水体生态修复功能特征不明确、选取盲目性较大等问题,备受推崇的“生态浮岛”难以独立支撑水体修复目标。基于此,以城市水体重要考核指标DO和ORP为研究对象,结合挺水植物、沉水植物、漂浮植物(含“浮岛型”植物)和浮叶植物释放氧气的部位进行特征测试,在自然光条件下观察水体上下层DO和ORP随时间变化的情况。结果表明,沉水植物增氧效果最佳,主要依靠叶片提升水体DO,其余类型水生植物仅通过根部对水体释氧,增氧效果微弱,沉水植物对水体上层DO增幅分别是挺水植物、漂浮植物、“浮岛型”植物和浮叶植物的7.4、4.1、14.8和11.6倍;除“浮岛型”植物外,其余4类水生植物对水体ORP均有较好的保持能力,尤其沉水植物可使水体上层ORP增加约200 mV。综上所述,以DO和ORP为考核指标考察城市水体生态修复时,可以沉水植物为主导,并联用其他类型水生植物。

**关键词:** 水生植物; 生态修复; 溶解氧; 氧化还原电位

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)05-0094-07

## Ecological Restoration Performance of Aquatic Plants Based on DO and ORP Consideration

ZHAO Qing, HUANG Peng, LI He-nan, LI Peng-feng, TIAN Teng-fei, LIU Yu,  
ZHANG Wei-jia, ZHANG Yue, LI Jia-ju, FAN Bo, SUN Yong-li, LI Meng,  
GENG Guan-jie

(China Municipal Engineering North China Design and Research Institute Co. Ltd., Tianjin  
300074, China)

**Abstract:** At present, preliminary progress has been made in the restoration of urban black and odorous water bodies in China. The implementation of water ecological restoration has become an important measure to achieve the goal of long-term clean-up of urban water bodies, of which aquatic plants play an important role in improving dissolved oxygen (DO) and oxidation reduction potential (ORP) of water bodies. However, in practical projects, there are widespread problems such as unclear functional characteristics of aquatic plant for ecological restoration and great blindness in plant selection. The highly respected “ecological floating island” is difficult to support the objective of water restoration

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07403001); 住房和城乡建设部研究开发项目(2021-K-128)  
通信作者: 孙永利 E-mail: tjsunyongli@163.com

independently. Based on this, the characteristics of oxygen released from emergent plants, submerged plants, floating plants (including “floating island” plants) and floating-leaved plants were tested, and the changes of DO and ORP in upper and lower water bodies over time were observed under the condition of natural light. The submerged plants had the best performance of increasing oxygen, mainly relying on leaves to increase the DO in water. By contrast, other aquatic plants only released oxygen to the water through roots, and the oxygen increasing performance was weak. The increase of DO released from submerged plants to the upper water body was 7.4 times, 4.1 times, 14.8 times and 11.6 times of that of emergent plants, floating plants, “floating island” plants and floating-leaved plants, respectively. Except for “floating island” plants, the other four aquatic plants all had a good ability to maintain ORP in the water bodies, and the submerged plants in particular increased the ORP in the upper water body by approximately 200 mV. In conclusion, urban water ecological restoration can be carried out by adopting a lot of submerged plants combined with a small amount of other aquatic plants when DO and ORP are used as assessment indicators.

**Key words:** aquatic plant; ecological restoration; dissolved oxygen; oxidation reduction potential

溶解氧(DO)和氧化还原电位(ORP)是水体“黑臭化”最直接的表征指标,也是评估水体水质和长制久清的关键指标。氧气是水体中好氧微生物增殖、污染物降解等活动的重要参与者,满足各阶段耗氧需求是改善水体水质的基础<sup>[1]</sup>;城市水体可以看作氧化还原缓冲体系,ORP相对较高时,水体呈现氧化性特征,缓冲还原性污染物的能力相对较强<sup>[2]</sup>,故维持较高水平的DO和ORP对实现水体长制久清具有重要意义。

水生植物修复技术是常见且重要的工程手段,对水体修复效果显著<sup>[3]</sup>。根据各类水生植物生活方式的差异性,水生植物可分为挺水植物、沉水植物、漂浮植物和浮叶植物。实际工程中常将挺水植物置于浮床上,挺水植物借助浮床浮力漂浮在水面上,根部悬在水体中,其生活方式和对水体净化机理与漂浮植物类似,但又有所不同,因此将该类植物命名为“浮岛型”植物,并单独进行研究。然而,随着水生植物在水体生态修复工程中的推广应用,工程设计中存在的一些认知误区凸显出来,如对各类植物功能特征不明确、盲目选择植物种类、在水体堆砌各类植物等。水生植物释氧毋庸置疑,但其释氧量能否满足水体需氧量,进而提升水体DO需要重新审视。不同类型水生植物生理生态条件以及与水体接触部位、面积的不同,直接影响其释氧量和提升水体DO的效果<sup>[4]</sup>。

挺水植物、漂浮植物、浮叶植物与水体主要接触部位为根系,针对其根系释氧可提升水体DO存在争议。Polprasert等<sup>[5]</sup>认为水葫芦(漂浮植物)叶片产生的氧气可输送至根部及水体。然而,卢晓明<sup>[6]</sup>发现种植梭鱼草(挺水植物)或睡莲(浮叶植物)的水体DO增幅虽超过未种植植物的水体,但差距微小,仅为0.87~1.12 mg/L。因此,对以根系释氧为主作用于水体的挺水植物、漂浮植物、浮叶植物,其通过根系提升水体DO能否支撑水体修复要求,需要深入研究。同时,相关报道中实验对象多以影响因素较单一的湿地为主<sup>[7-8]</sup>,而非含有复杂底泥的水体。沉水植物不同于其他3类植物之处为,沉水植物的植株整体没于水面之下,除根系外,叶片也可与水体密切接触。田琦等<sup>[9]</sup>发现含伊乐藻、金鱼藻、苦草、菹草和马来眼子菜水体的日间DO比无植物的对照样本高4 mg/L以上,水体DO最高值可超过仪器检出上限(20 mg/L)。但沉水植物对水体增氧的部位是根系或是叶片,还是两者共同作用仍有待进一步研究。

水生植物的释氧行为会对水体环境的氧化还原电位产生影响,但是水生植物对水体ORP的影响却鲜有研究,尤其是与复杂底泥接触的下层水体ORP的变化。同时,由于水生植物释氧部位在水体中的位置具有差异性,笔者以上下层DO和ORP作为考察因子,观察在不同水生植物作用下水体DO

和ORP随时间变化的规律,分析水生植物释氧部位对水体增氧和提升ORP的效果,旨在为水体生态恢复中水生植物的选取提供数据支撑和建议,实现水生植物的合理配置。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验植物

实验植物采用水体中常见的挺水植物、沉水植物、漂浮植物和浮叶植物中代表性植物,分别为风

车草(*Cyperus alternifolius* L.)、苦草[*Vallisneria spiralis* (L.) Hara]、大藻(*Pistia stratiotes* L.)和黄荇[*Nymphaea peltatum* (Gmel.) O. Kuntze],“浮岛型”植物选用鸢尾(*Iris tectorum* Maxim.)。植物种植方式模拟实际工程,如沉水植物株高与水面齐平,漂浮植物和“浮岛型”植物的根系长度与水深等长,挺水植物、沉水植物、漂浮植物、“浮岛型”植物和浮叶植物在实际工程中的应用特点和要点见表1。

表1 不同水生植物的工程应用特点和要点

Tab.1 Engineering application characteristics and experimental points of different aquatic plants

项目	选用植物	结构及生活方式	应用范围	应用要点
挺水植物	风车草	根系扎在底泥,部分茎叶挺出水面	岸堤、中心岛	
沉水植物	苦草	根系扎在底泥,植株整体没于水面之下	整个水底	株高与水面齐平
漂浮植物	大藻	叶片漂浮在水面,根系悬浮在水体	部分水面	根系长度与水深相等
“浮岛型”植物	鸢尾	叶片在水面之上,根系悬浮在水体	部分水面	根系长度与水深相等
浮叶植物	黄荇	根系在底泥中,叶片漂浮在水面,茎悬浮在水体	部分水面	

### 1.2 实验装置

实验装置如图1所示。装置采用直径为20 cm、高为70 cm的有机玻璃柱。为尽可能贴合实际工程,装置底部铺设5 cm天津某河道的底泥。实验用水来自天津市某黑臭整治后的水体,该水体原为黑臭水体,经控源截污、底泥清淤等一系列工程措施处理后,其水质状况如下: $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 为1.02~5.39 mg/L、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 为0.03~0.11 mg/L、COD为46~77 mg/L、DO为5.5~8.98 mg/L、ORP为110~250 mV、透明度约为40~50 cm,水体状态为不黑不臭。装置体积约为21.98 L,底泥体积约为1.57 L,水体积约为18.84 L。装置外面包裹遮光布,一方面模拟水体状况,另一方面避免藻类生长。

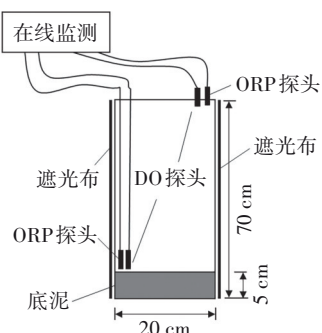


图1 实验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of experimental device

### 1.3 实验设计

水生植物对水体DO、ORP的影响与其光合作用和呼吸作用息息相关,故实验结果受光照的影响

显著。为贴合工程的实际情况,光照条件选择自然光,没有外加光源,以24 h为一个周期,在自然光条件下观察水体上下层DO和ORP随时间变化的规律。

为验证植物对水体增氧的部位、对水体上下层增氧的能力及提升ORP的能力,将上下层水体监测的两组DO和ORP探头分别放置于近水面和近泥面5 cm处。探头连接便携式多参数水质检测仪,每隔30 min记录一次数据。

5种植物分别放置在5个实验装置内预培养一段时间,待植物长势良好后同时进行监测。为保证实验结果显著,选择6月—8月中光照良好的晴天,且此时处于植物生长旺盛期。为保障实验结果的重复性和可靠性,实验周期至少持续48 h。本实验旨在为整治工程选取植物种类提供建议,因此以定性研究为主。装置中放置的植株数量以其充满水体或铺满水面为标准,实验用水高度符合植物在实际工程中的生长情况。

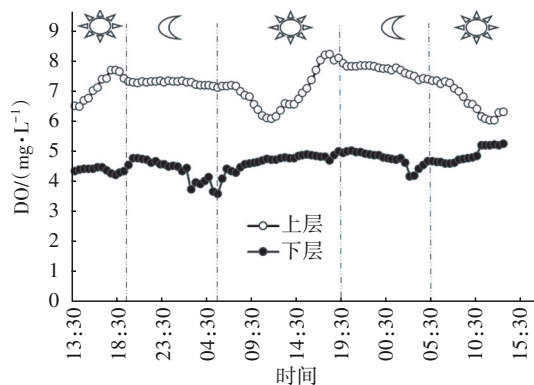
## 2 结果与讨论

### 2.1 不同水生植物对水体DO的影响

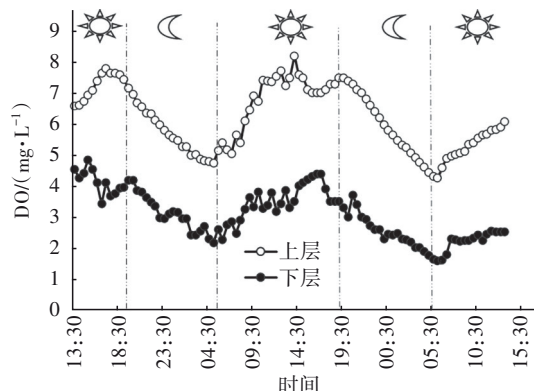
不同水生植物对上下层水体DO的影响如图2所示。实验在自然光下进行,日出、日落时间分别为05:30和19:30。由图2(a)可知,在风车草作用下,DO随光照波动明显。上层水体DO浓度约在11:30—19:30出现明显增长,DO最高值约为8 mg/L;下层水体DO浓度在每日05:30开始增长,说明挺

水植物对水体具有增氧作用。上层DO浓度增长较下层具有滞后性,同样地,曲线下降段也有相同的规律,说明上层DO浓度变化受下层影响,即挺水植物可通过根部释氧实现水体增氧。

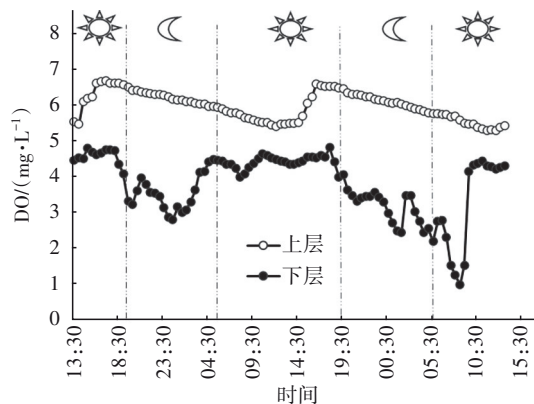
在大藻和黄荇作用下,水体DO的变化情况与风车草类似,如图2(b)、(c)所示。受植物光合作用影响,水体上下层DO浓度在日间均有小幅增长,大藻和黄荇对应的上层DO峰值分别约为8和7 mg/L,下层DO峰值均约为5 mg/L。夜间(19:30—次日05:30)水体DO均下降,说明漂浮植物和浮叶植物依靠根部释氧作用提升水体的溶解氧。



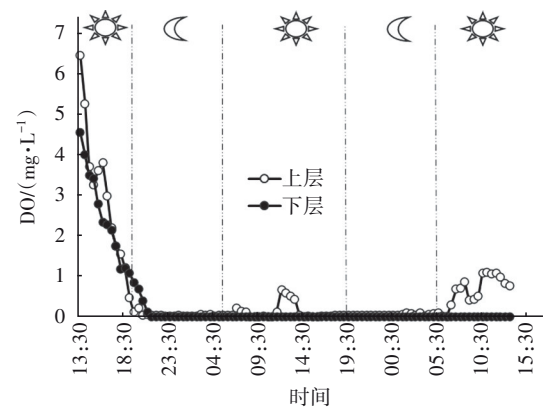
a. 风车草(挺水植物)



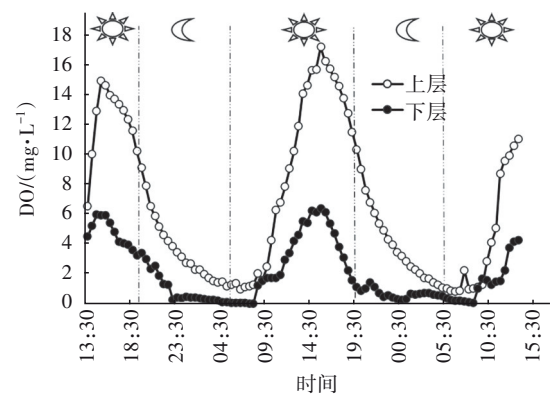
b. 大藻(漂浮植物)



c. 黄荇(浮叶植物)



d. 鸢尾("浮岛型")植物)



e. 苦草(沉水植物)

图2 不同水生植物对上下层水体DO的影响

Fig.2 Effect of different aquatic plants on DO of upper and lower water bodies

从图2(d)可以看出,在鸢尾作用下,水体DO呈现下降趋势,在7 h(13:30—20:30)内即可降至0。上层水体DO在实验中后期的光照条件下出现微弱上升,但持续时间较短,且DO最高仅约为1 mg/L,下层水体DO在7~48 h无变化,一直处于厌氧状态,说明“浮岛型”植物根系释氧可短时间提升水体DO浓度,但对整体氧环境的提升能力不足,甚至出现缺氧现象。

从图2(e)可以看出,在苦草作用下,水体DO浓度出现大幅度波动,昼夜变化明显,水体上下层DO均在14:00—16:00达到最高值,分别约为17和6.5 mg/L,之后随光照强度变弱,在植物呼吸作用下水体DO浓度逐渐降低,最低可为0。水体上层DO在12:00时超过饱和溶解氧值(25℃时约为8.11 mg/L),至20:00水体DO低于饱和溶解氧值。苦草可使水体DO处于超饱和状态约8 h,说明苦草对水体增氧效果显著。实验过程中,可在苦草叶片上观察到细密的气泡持续逸出,证实了苦草以叶片释氧为主



来提升水体DO。以苦草为代表的沉水植物对水体DO的影响颇大,在其光合和呼吸作用下水体处于好氧、厌氧交替的环境,这与SBR工艺运行方式相似,其繁茂的植株可为微生物提供载体,为强化硝化细菌、反硝化细菌、聚磷菌等功能性细菌提供可能性,对强化水体净化能力具有重要意义。因此,沉水植物光合和呼吸作用与水体脱氮除磷的关系需要做进一步研究。

结合图2,以上层水体DO变化情况为例,在不同水生植物作用下DO的变化情况见表2。可知,苦草光合作用可使水体DO浓度增至17.12 mg/L,远高于其他4类植物;呼吸作用可使DO约降至1 mg/L,此时水体处于低氧状态,说明植物光合作用增氧能力显著,呼吸作用耗氧能力也显著。苦草的氧增幅分别为风车草、大藻、鸢尾和黄荇的7.4、4.1、14.8和11.6倍,可见沉水植物对水体增氧效果显著,挺水植物、漂浮植物、“浮岛型”植物和浮叶植物对水体增氧效果不显著,尤其是“浮岛型”植物甚至会出现氧亏现象。

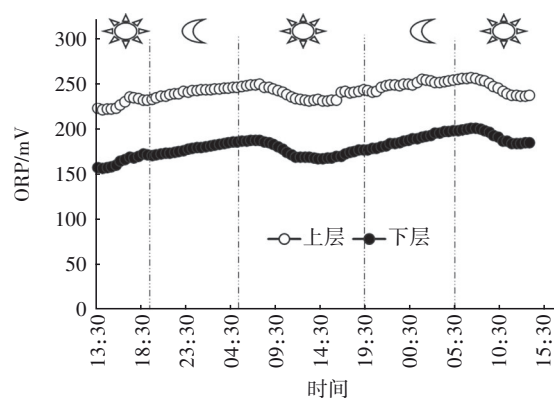
表2 上层水体DO浓度的变化情况

Tab.2 Change of DO in upper water bodies

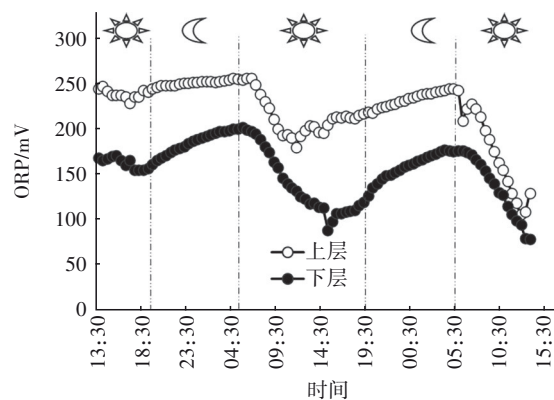
项 目	最大值/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	最小值/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	增幅/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	苦草增幅与其他 植物增幅的比值
风车草	8.24	6.04	2.20	7.4
苦草	17.12	0.83	16.29	
大藻	8.20	4.26	3.94	4.1
鸢尾	1.10	0	1.10	14.8
黄荇	6.67	5.27	1.40	11.6

## 2.2 不同水生植物对水体ORP的影响

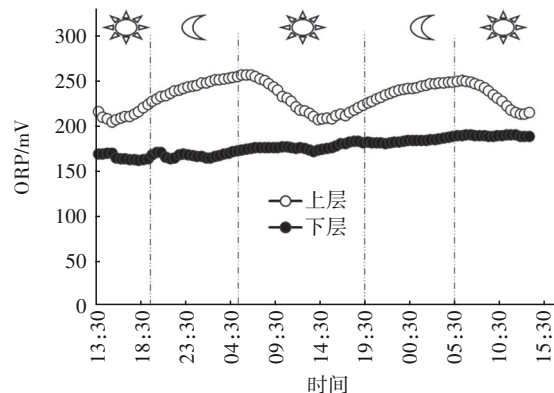
不同水生植物对上下层水体ORP的影响如图3所示。可以看出,在风车草的作用下,水体上下层ORP变化较平缓,总体为上升趋势,上下层ORP波动趋势高度统一,分别在230和160 mV附近波动,水体环境为氧化性。在大藻作用下,水体上下层ORP变化趋势也具有高度统一性,但上下层ORP波动幅度较大,波幅均大于80 mV。在黄荇作用下,水体上下层ORP变化趋势不同,上层ORP波动幅度较大,下层ORP变化较平稳,且整体低于上层。在鸢尾作用下,水体上下层ORP均为下降趋势,第48小时上下层水体ORP分别约为-200和-400 mV,下层的下降幅度高于上层。



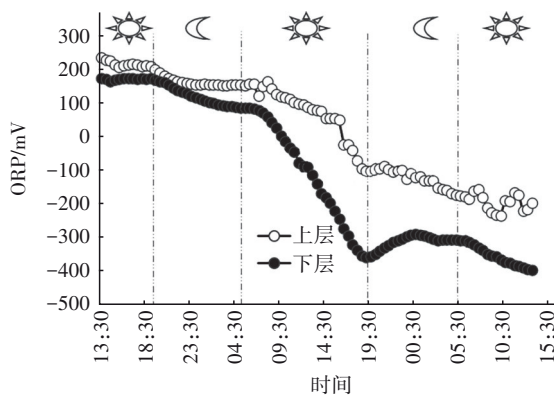
a. 风车草(挺水植物)



b. 大藻(漂浮植物)



c. 黄荇(浮叶植物)



d. 鸢尾("浮岛型")植物)

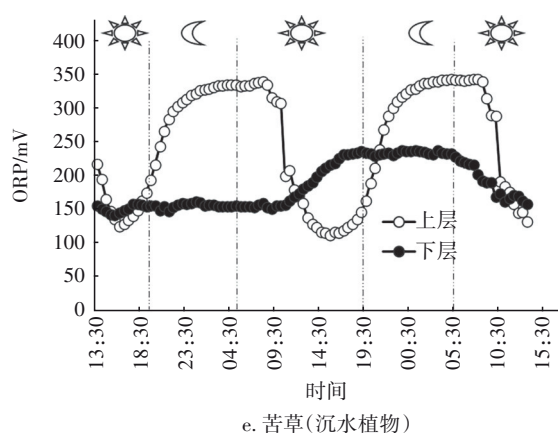


图3 不同水生植物对上下层水体ORP的影响

Fig.3 Effect of different aquatic plants on ORP of upper and lower water bodies

在苦草作用下,水体上下层ORP的变化趋势差异较大。下层ORP的规律性较差,可能是由于受复杂底泥的影响,其在140~230 mV之间波动,呈氧化性。上层ORP规律性较好,日间(05:30—19:30)下降,夜间(19:30—次日05:30)增长,可由150 mV升至350 mV,增幅高达200 mV。在风车草、大藻、黄荇作用下,上层水体夜间ORP增幅分别约为20、50和40 mV;在苦草作用下,ORP的增幅分别是其他3类植物的10、4和5倍。

沉水植物提升ORP的效果显著,挺水植物、漂浮植物、浮叶植物的提升效果不显著,但能维持水体呈氧化性,“浮岛型”植物对水体ORP呈现“负”影响。尽管“浮岛型”植物对增加DO和提升ORP的效果不显著,但其仍具有水体净化、营造景观等功效,在工程应用时应关注其种植密度,并可辅助人工曝气装置,或与沉水植物联用,避免出现厌氧状态。

### 2.3 水生植物作用下水体DO和ORP的关系

ORP是氧化性物质和还原性物质发生氧化还原反应的综合结果,DO只是众多氧化性物质中的一种。可以明确的是,DO与ORP无必然或线性联系,但DO变化可引发ORP变化。由不同水生植物上层水体DO和ORP的变化可知,在日间植物进行光合作用释氧导致水体DO浓度升高时,ORP呈下降趋势;在夜间植物进行呼吸作用消耗DO时,ORP反而呈上升趋势,以沉水植物作用下上层水体为例,分析水体DO与ORP的关系,结果见图4。由于水体下层易受复杂底泥环境的影响,不同水生植物作用下水体下层DO和ORP的变化较大、稳定性较

差,故水体下层DO和ORP的关系不显著。

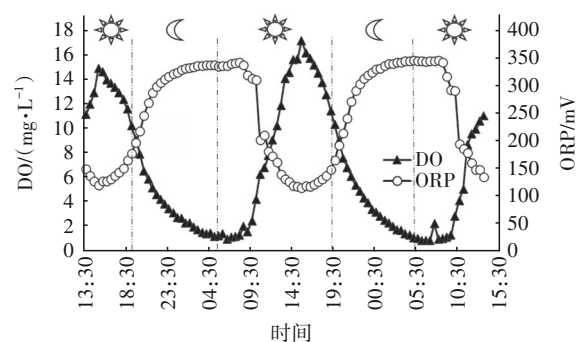


图4 沉水植物作用下水体DO和ORP的关系

Fig.4 Relationship between DO and ORP under the action of submerged plants

由图4可以看出,水体DO和ORP的变化属于此消彼长的关系,两条曲线的突变点发生在同一时刻,推测ORP的变化较DO具有滞后性。当水生植物进行光合作用向水体释氧后,DO浓度升高,微生物活动频繁,污染物降解速率加快,水体中氧化性物质积累,水体氧化性增强,ORP升高;当水生植物呼吸作用占主导地位时,消耗了水体DO,水体中还还原性物质积累,水体的还原性增强,ORP降低。15:00—次日05:30,虽然水生植物光合作用减弱,但水体DO浓度仍处于较高水平,故氧化性物质产生量高于还原性物质,综合表现为水体ORP在夜间升高;05:30之后,虽然光合作用加强,但还原性物质较多,综合表现为水体ORP在日间降低。

上述内容综合分析了挺水植物、沉水植物、漂浮植物、“浮岛型”植物和浮叶植物对增加水体DO和提升ORP的效果,建议在水体生态修复工程中优先考虑本土水生植物,构建以沉水植物为主,其他4类植物为辅的综合性生态型河道。

### 3 结论

① 水体DO、ORP在5类水生植物(挺水植物、沉水植物、漂浮植物、“浮岛型”植物和浮叶植物)光合和呼吸作用下发生了变化且规律不同。挺水植物、沉水植物、漂浮植物、浮叶植物可使水体DO、ORP随时间呈波动性、重复性变化,“浮岛型”植物则使水体DO和ORP下降。

② 沉水植物主要通过叶片释氧提升水体DO,挺水植物、漂浮植物、“浮岛型”植物和浮叶植物依靠根系对水体进行增氧,且沉水植物对水体DO提升效果优于其他4类植物。沉水植物对水体上层

DO浓度的增幅分别是其他4类植物的7.4、4.1、14.8和11.6倍,挺水植物、沉水植物、漂浮植物和浮叶植物可维持水体下层处于好氧状态。

③ 挺水植物、沉水植物、漂浮植物、浮叶植物对水体ORP具有提升作用,且沉水植物的提升效果优于其他3类植物。沉水植物对水体上层ORP的增幅约200 mV,分别为挺水植物、漂浮植物和浮叶植物的10、4和5倍,挺水植物、沉水植物、漂浮植物和浮叶植物可维持水体下层处于氧化态。

④ 在水生植物作用下,水体DO和ORP多数呈此消彼长的规律,ORP的变化较DO滞后。水体DO浓度提升发生在日间,ORP增长多发生在夜晚。

⑤ “浮岛型”植物会降低水体DO和ORP,但综合考虑其净化和景观效果,建议工程使用时注意种植密度,并与人工曝气装置或与沉水植物联用。

⑥ 水体生态修复工程应在优先考虑本土水生植物的基础上,构建以沉水植物为主,其他4类植物为辅的综合性生态型河道。

#### 参考文献:

- [1] 赵博,杜宪正. 城市黑臭水体治理中水生植物及微生物对水体净化作用的试验[J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(2):30-32.
- ZHAO Bo, DU Xianzheng. Experimental study on purification of water body by aquatic plants and microorganisms in the treatment of urban malodorous black river [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2019, 37(2):30-32(in Chinese).
- [2] 赵永彬,吴翠鲜. 氧化还原电位在污水和地表水净化中的作用[J]. 节能与环保, 2020(10):29-30.
- ZHAO Yongbin, WU Cuixian. Discussion on the role of oxidation-reduction potential in the purification of sewage and surface water [J]. Energy Conservation & Environmental Protection, 2020 (10): 29-30 (in Chinese).
- [3] 张岳,颜秀勤,赵新华,等. 环境因子对水生植物复氧及除污效果的影响[J]. 中国给水排水, 2018, 34(21): 64-69.
- ZHANG Yue, YAN Xiuqin, ZHAO Xinhua, et al. Reoxygenation and decontamination effect of aquatic plants under different levels of environmental factors[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34 (21): 64-69 (in Chinese).
- [4] 王玮,侯宁宁,杨钙仁,等. 不同水生植物的污染物净化功能及其泌氧量研究[J]. 西南农业学报, 2019, 32(8):1924-1931.
- WANG Wei, HOU Ningning, YANG Gairen, et al. Pollutant purification function and radial oxygen loss of different aquatic plants [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2019, 32 (8): 1924-1931 (in Chinese).
- [5] POLPRASERT C, KHATIWADA N R. An integrated kinetic model for water hyacinth ponds used for wastewater treatment [J]. Water Research, 1998, 32 (1): 179-185.
- [6] 卢晓明. 植物净化槽处理城市黑臭河水的效果、机理及工程示范[D]. 上海:华东师范大学, 2009.
- LU Xiaoming. Effect and Mechanism of Botanic Purifying-tank during Treatment for Heavily Polluted River Water and Engineering Demonstration [D]. Shanghai: East China Normal University, 2009 (in Chinese).
- [7] 刘志宽,牛快快,马青兰,等. 8种湿地植物根部泌氧速率的研究[J]. 贵州农业科学, 2010, 38(4):47-50.
- LIU Zhikuan, NIU Kuaikuai, MA Qinglan, et al. Study on rate radial oxygen loss of eight wetland plants [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2010, 38(4): 47-50 (in Chinese).
- [8] 林剑华,杨扬,李丽,等. 8种湿地植物的生长状况及泌氧能力[J]. 湖泊科学, 2015, 27(6):1042-1048.
- LIN Jianhua, YANG Yang, LI Li, et al. Characteristics of growth and radial oxygen loss of eight wetland plants [J]. Journal of Lake Sciences, 2015, 27 (6): 1042-1048(in Chinese).
- [9] 田琦,王沛芳,欧阳萍,等. 5种沉水植物对富营养化水体的净化能力研究[J]. 水资源保护, 2009, 25(1): 14-17.
- TIAN Qi, WANG Peifang, OUYANG Ping, et al. Purification of eutrophic water with five submerged hydrophytes [J]. Water Resources Protection, 2009, 25 (1):14-17(in Chinese).

作者简介:赵青(1991-),女,河北石家庄人,硕士,工程师,主要研究方向为黑臭水体整治、水生态修复等。

E-mail:zhaoqing505@163.com

收稿日期:2021-08-16

修回日期:2022-02-20

(编辑:任莹莹)