

环境因子对水生植物复氧及除污效果的影响

张岳^{1,2}, 颜秀勤², 赵新华¹, 孙永利², 刘钰², 张维²

(1. 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300072; 2. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074)

摘要: 单一环境因子对水生植物复氧能力影响较大且存在不少分歧,因此研究了环境因子(光照、温度、pH值、盐度)对水生植物复氧和去除污染物能力的影响。结果表明:菹草在光照强度为80%自然光(9 600 lx)条件下,复氧能力最高,OE值达到 127×10^{-5} ;黑藻、浮萍、香蒲的复氧能力随着光照强度的升高而增加。高温不利于水生植物向水体复氧,因此在夏季高温时,可采用机械曝气方式向水体复氧。水生植物在中性环境中可向水体输送较多的氧气,在整个pH值梯度范围(6.0~8.0)内,沉水植物、挺水植物去除TN、TP、COD的能力较高,浮叶植物对富营养盐的去除效果欠佳。水生植物复氧能力随盐度的升高而明显下降,在盐度过高区域(0.8%),黑藻、菹草、浮萍和荇菜几乎没有复氧能力;水生植物对水体中TN、TP和COD的去除能力随盐度的增加也呈下降趋势。

关键词: 黑臭水体; 水生植物; 水体复氧; 环境因子

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)21-0064-06

Reoxygenation and Decontamination Effect of Aquatic Plants under Different Levels of Environmental Factors

ZHANG Yue^{1,2}, YAN Xiu-qin², ZHAO Xin-hua¹, SUN Yong-li², LIU Yu²,
ZHANG Wei²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. North China Municipal Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300074, China)

Abstract: The effects of environmental factors on the aquatic plants reoxygenation are complicated. The influences of environmental factors (illumination, temperature, pH, and salinity) on the ability of aquatic plants to recover oxygen and remove pollutants were studied. With 80% light intensity (9 600 lx), *Potamogeton crispus* showed the highest reoxygenation capacity and the OE value reached 127×10^{-5} . The reoxygenation capacity of black algae, duckweed, and cattail increased with the increase of the light intensity. High temperature inhibited the aquatic plants from restoring DO, therefore it was recommended to utilize mechanical aeration methods under summer temperatures. Aquatic plants could transport more oxygen to the water in a neutral environment. Within the pH gradient from 6.0 to 8.0, submergent and emergent plants were more efficient in the removal of TN, TP and COD comparing to floating-leaf plants. The reoxygenation capacity of aquatic plants decreased significantly with the increase of salinity. In high salinity water (0.8%), black algae, *Potamogeton crispus*, duckweed, and *Nymphaeoides peltatum* barely had any reoxygenation capacity. The purification capacity of the six aquatic plants

for TN, TP and COD decreased as the salinity increased.

Key words: odorous water; aquatic plant; water reoxygenation; environmental factor

增加河流中的溶解氧含量是满足好氧微生物生长繁殖、提高水体自净能力、加速水中污染物降解、改善水体黑臭的重要措施之一^[1,2]。对河流、湖泊、景观水等水体的复氧,生态的方法是通过植物的光合作用,以植物根系为媒介将释放的氧传输到水体。

水生植物复氧与多种环境因子密切相关,目前国内关于环境因子尤其单一环境因子对水生植物复氧的影响存在不少分歧,环境因子对水生植物复氧的影响有待进一步研究^[3,4]。笔者基于多参数的环境因子调控试验,通过改变环境光照强度、温度、pH 值、盐度等参数,研究不同类型水生植物复氧规律,分析环境因子对黑臭水体中污染物迁移转化的影响,旨在实现水生植物复氧环境因子的优化调控。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

通过查阅文献,选取耐污和去污能力强、根系发达且具有经济及观赏价值的 6 种植物,分别为沉水植物中的黑藻和菹草、浮叶植物中的浮萍和荇菜以及挺水植物中的香蒲和芦竹。

试验用水取自宜兴市蛟桥河,河面宽度为 2~3 m,河道水深为 1~2 m,水体流速较慢,具体水质如下:COD 为 50~62 mg/L, TN 为 8.15~10.5 mg/L, TP 为 3.23~6.19 mg/L,氨氮为 5.22~9.34 mg/L,透明度为 10~20 cm,溶解氧为 4.51~8.57 mg/L, ORP 为 -52.63~75.74 mV。

1.2 试验装置

试验装置由直径为 15 cm、高为 40 cm 的有机玻璃柱制成,在装置侧面设出水口,装置底部基质主要由砾石(粒径为 15 cm)和砂子(粒径<2 mm)组成。自下而上分别铺设厚度为 2.5 cm 的砾石和 2.5 cm 的砂子,装置内水深为 30 cm。首先用自来水冲洗试验用水生植物,之后将其置于富营养化水体中进行适应性水培。水培一周后挑选出生长状况较好的水生植物,清洗干净并自然风干 10 min,称重后放入试验装置中。在试验装置外放置纸箱,纸箱规格为 30 cm×30 cm×100 cm,采用纸箱打孔的方式控制外部光线进入纸箱内部,进而控制植物光照强度,例如,试验条件为 40% 自然光,则在纸箱表面 40% 的部分打孔,采用此类方式即可实现不同光照强度。

1.3 试验方法

试验主要研究光照强度(L)、温度(T)、pH 值、盐度(S)对 3 类水生植物复氧能力及去除污染物效果的影响。参考水生植物生长环境参数范围以及多次试验经验值,确定光照强度 L 分别为 100% 自然光(12 000 lx)、80% 自然光(9 600 lx)、60% 自然光(7 200 lx)、40% 自然光(4 800 lx)、20% 自然光(2 400 lx); T 分别为 10、15、20、25、30 °C;pH 值分别为 6.0、6.5、7.0、7.5、8.0; S 分别为 0、0.2%、0.4%、0.6%、0.8%。以种有水生植物的水体为试验水体,以不种水生植物的水体为对照。

1.3.1 水生植物复氧能力指标

为了消除水生植物不同初始生物量对试验结果造成的不利影响,采用单位鲜质量水生植物单位时间内的平均复氧能力 OE 作为评价水生植物复氧能力的指标,即:

$$OE = \frac{\sum_{i=1}^n [(DO_i \times V_i - DO_{ci} \times V_{ci}) \times \Delta t]}{m_0 \times t} \quad (1)$$

其中,OE 为单位鲜质量水生植物在监测时间内的平均复氧能力; n 为监测次数; t 为监测时间; Δt 为两次 DO 监测时间间隔; DO_i 为试验水体中 DO 的第 i 次监测值; V_i 为第 i 次监测 DO 浓度时试验水体体积; DO_{ci} 为对照组 DO 的第 i 次监测值; V_{ci} 为对照组第 i 次监测 DO 浓度时的水体体积; m_0 为水生植物的初始鲜质量。

1.3.2 水生植物去除能力评价指标

为了消除水生植物不同初始生物量对试验结果造成的不利影响,采用单位鲜质量水生植物单位时间内去除污染物的质量 P 作为评价水生植物净化能力的指标,即:

$$P = \frac{(C_0 \times V_0 - C_i \times V_i) - (C_{0i} \times V_{0i} - C_{ci} \times V_{ci})}{m_0 \times t} = \frac{(C_{ci} \times V_{ci} - C_i \times V_i)}{m_0 \times t} \quad (2)$$

其中, C_0 为试验水体中污染物初始浓度; V_0 为试验水体初始体积; C_i 为试验水体第 i 天的污染物浓度; V_i 为试验水体第 i 天的体积; C_{ci} 为对照组第 i 天的污染物浓度; V_{ci} 为对照组第 i 天的水体体积; t 为试验时间。

1.4 分析项目及方法

COD:重铬酸钾法,TN:碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法,TP:钼酸铵分光光度法,DO、水温:便携式溶解氧测定仪。

2 结果与讨论

2.1 光照强度的影响

2.1.1 对水生植物复氧能力的影响

在 T 为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 pH 值为 7.0 、 S 为零的条件下,6 种水生植物在不同光照强度下的复氧能力见图 1。

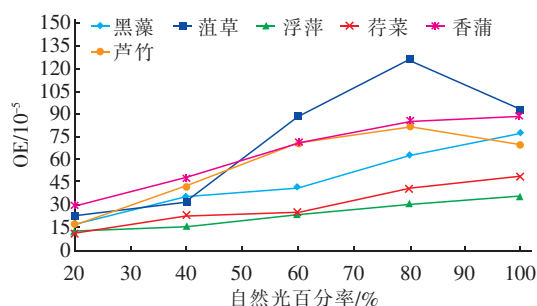


图1 光照强度对水生植物复氧能力的影响

Fig.1 Effect of light intensity on reoxygenation ability of aquatic plants

表1 不同光照强度下水生植物对污染物的去除能力

Tab.1 Decontamination ability of aquatic plants under different light intensities

$\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

项 目	黑藻	菹草	浮萍	荇菜	香蒲	芦竹
光照强度/%						
20	11.3/10.6/10.1	15.6/14.4/2.6	5.8/4.1/5.3	8.7/2.1/2.5	19.5/5.1/4.7	21.5/3.7/7.2
40	25.3/23.5/12.3	15.3/20.4/10.2	16.2/11.7/6.5	10.4/7.5/4.2	22.1/15.1/10.7	17.7/10.3/8.3
60	32.6/27.8/17.6	30.6/24.3/11.3	28.2/15.5/10.5	25.7/10.5/5.3	37.4/17.7/12.3	38.1/22.7/14.4
80	47.1/32.5/20.2	40.8/35.6/18.9	27.6/22.2/13.5	37.1/21.8/7.2	41.6/25.4/16.7	42.6/30.7/13.2
100	49.3/35.1/23.9	42.9/31.4/19.7	32.1/18.9/14.9	40.1/20.2/13.3	53.6/28.9/17.3	44.7/33.4/16.3

注: 每格中3个数据依次是对TN、TP、COD的平均去除量,下同。

由表1可知,水生植物除污能力随着光照强度的升高而增加,其中香蒲、芦竹和黑藻通过光合作用固定水中氮素能力较其他水生植物要强,6种植物去除TN能力排序为:香蒲>芦竹≈黑藻>菹草>荇菜>浮萍。沉水植物通过发达的根系吸收水体中磷素,降低水体中磷含量,6种植物去除TP能力排序为:黑藻>菹草>芦竹>香蒲>浮萍>荇菜。

6种水生植物去除COD的能力普遍较低,对COD的平均去除量基本在 $17\text{ }\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{d})$ 以下,相较于去除TN、TP能力较弱,这是由于水生植物通过光合作用将空气中二氧化碳和水转化为储存能量的有机物,并释放氧气,对水体中有机物吸收较少^[7]。试验水体中COD浓度的降低主要依靠植物根系周围共生微生物对有机物的降解作用来完成,故水生

由图1可以看出,菹草在光照强度为80%自然光条件下,复氧能力最高,OE值达到 127×10^{-5} ;黑藻、浮萍、香蒲复氧能力随光照强度的升高而增加。挺水植物、沉水植物、浮叶植物的OE均值分别为 60.8×10^{-5} 、 59.9×10^{-5} 、 26.6×10^{-5} ,说明挺水植物可以较好地适应环境并能向周围水体中释放氧气,在水质保持过程中可将挺水植物作为维持水体DO的主要植物。

朱丹婷等人^[5]的研究结果表明,光照强度对沉水植物的复氧能力有一定程度的影响。菹草、荇菜、芦竹的复氧能力随着光照强度的变化而出现波动,光照强度最强的环境条件并不能使水生植物复氧能力达到最大,说明植株个体差异也会导致水生植物对水体的复氧能力不同。在光照条件较强时,水生植物生长活性升高,进而植物因呼吸作用消耗的氧气量提高,最终导致植物向水体中释放的氧气量降低^[6]。

2.1.2 对水生植物除污能力的影响

不同光照强度下水生植物对污染物的去除能力如表1所示。

植物本身对COD的降解能力较弱。6种水生植物中,挺水植物香蒲去除TN能力较高,沉水植物黑藻和菹草去除TP能力较高,在水体治理过程中,可根据环境条件选取合适的水生植物种类,从而达到事半功倍的效果。

2.2 温度的影响

2.2.1 对水生植物复氧能力的影响

在 L 为100%自然光($12\text{ }000\text{ lx}$)、 pH 值为 7.0 、 S 为零的条件下,考察6种水生植物在不同温度梯度下的复氧能力。结果表明,黑藻在温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下,复氧能力最高,OE值达到 82×10^{-5} 。在温度范围为 $10 \sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,水生植物复氧能力随着温度的升高而增加;而温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,复氧能力均有所下降,说明温度过高不适宜水生植物向水体复

氧,由此可知在夏季温度过高时,可采用其他机械曝气方式向水体复氧。香蒲和芦竹的 OE 均值分别为 52.4×10^{-5} 和 52.7×10^{-5} ,要高于其他水生植物,说明香蒲和芦竹可以较好地适应环境,向周围水体释放氧气。

不同温度梯度对水生植物复氧能力产生不同的影响。其中,受温度影响,黑藻和菹草的 OE 值波动较大;在最适温度下,水生植物的最大复氧能力各有差异,说明植株个体的差异也导致了水生植物向水

体复氧能力的不同。

2.2.2 对水生植物除污能力的影响

不同温度下水生植物对污染物的去除能力见表 2。水生植物去除污染物能力随温度的升高而出现波动。总体而言,6 种植物去除 TP 能力排序为:菹草 > 黑藻 ≈ 芦竹 > 香蒲 > 荇菜 > 浮萍,菹草在每个温度梯度上去除 TP 能力均高于其他植物,因为其根系发达,可以大量吸收水体中的磷素,从而降低了水体中 TP 含量^[7]。

表 2 不同温度下水生植物对污染物的去除能力

Tab. 2 Decontamination ability of aquatic plants under different temperatures

$\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

项 目	黑藻	菹草	浮萍	荇菜	香蒲	芦竹
10	17.5/13.2/16.6	15.5/18.5/15.9	19.2/6.2/20.7	10.5/10.7/12.4	17.3/12.8/18.4	21.4/17.6/10.2
15	33.1/26.6/17.2	23.8/28.4/20.1	32.7/11.6/23.3	14.8/20.8/18.3	19.6/10.1/14.9	17.7/25.5/16.8
20	32.8/25.3/25.5	30.6/31.2/19.7	34.9/15.3/20.9	28.1/19.8/18.9	32.1/26.6/23.9	38.1/29.8/17.8
25	29.4/22.6/17.9	25.3/29.7/15.2	22.4/13.8/17.5	33.3/15.5/20.3	39.8/19.7/28.2	35.4/27.3/22.4
30	23.7/23.7/20.7	22.1/27.7/16.6	17.5/7.7/14.2	22.4/13.3/17.7	30.2/15.4/23.1	31.9/19.7/19.6

在整个温度梯度范围内,挺水植物去除 TN、COD 的能力较高,沉水植物去除 TP 的能力较高。在水体治理过程中,如果温度为主效影响因子,可根据去除污染物类型,选取合适的水生植物种类。

2.3 pH 值的影响

pH 值对水质变化、水处理效果、水中溶解物能否生成沉淀物、水生生物生长繁殖等有重要影响。考察了 pH 值分别为 6.0、6.5、7.0、7.5、8.0 时水生植物的复氧能力和去除污染物能力。

2.3.1 对水生植物复氧能力的影响

6 种水生植物在不同 pH 值下的复氧能力如图 2 所示。

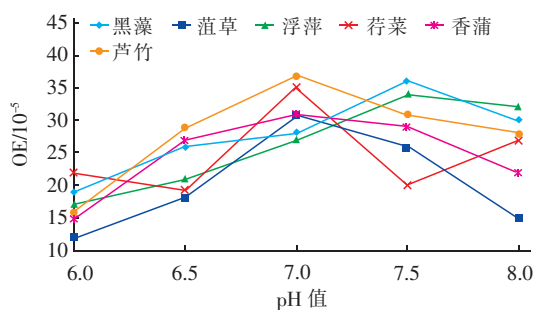


图 2 pH 值对水生植物复氧能力的影响

Fig. 2 Effect of pH on reoxygenation ability of aquatic plants

挺水植物芦竹在 pH 值为 7.0 的环境条件下复氧能力最高,OE 值达到 37×10^{-5} ,这是由于挺水植物生物量较大,根系较发达,根系的输氧能力较强。

在水生植物修复水体过程中,pH 值过低会导致植物生长不良、根系腐烂。因此,在实际应用中,不仅要了解植物种类及其生态习性等,还要从处理成本等诸多方面考虑辅以适当的物理措施,以期使物理-植物工程的处理效果更加明显。

随着 pH 值的变化,菹草、荇菜的复氧能力出现较大幅度波动,说明这 2 种水生植物对水体中 pH 值变化最为敏感。当 pH 值为 6.5 ~ 7.5 时,6 种水生植物均表现出较高的复氧能力;黑藻、菹草、浮萍、荇菜、香蒲、芦竹复氧能力最强时对应的 pH 值分别为 7.5、7.0、7.5、7.0、7.0、7.0,说明水生植物在中性环境中可以向水体输送较多的氧气,提高水体的自净能力。

2.3.2 对水生植物除污能力的影响

不同 pH 值下水生植物对污染物的去除能力如表 3 所示。可以看出,水生植物去除污染物能力随着 pH 值的升高而出现波动,其中对 TN 的去除能力整体排序为:沉水植物 > 挺水植物 > 浮叶植物。pH 值不仅能影响植物的生长而且能影响水体中氮的存在形态,故不同的水生植物去除氮的最适 pH 值也有所差异。黑藻、菹草、浮萍、荇菜、香蒲、芦竹脱氮效果最佳时对应的 pH 值范围分别为 7.5 ~ 8.0、7.0 ~ 8.0、7.0 ~ 8.0、6.0 ~ 7.0、7.0 ~ 8.0、6.5 ~ 7.0,说明对于一些耐营养盐特性的水生植物而言,高 pH 值下脱氮效果较好,黑藻在 pH 值为 7.5 ~ 8.0 的范围内生长速率、叶绿素含量都很高,并且对氮、磷营养

盐有很好的吸收作用。研究显示,水体中氢离子浓度不宜过高,当它超过一定值时,便会对植物产生毒害作用,一般对根的影响最大。水体 pH 值是影响水生植物生长的重要环境因素,pH 值的作用与生物

量的多少也有很大关系,当生物量较多时,即使 pH 值发生细微的变化也会促进对氮的去除。这也与试验结果相吻合,沉水植物和挺水植物根部较为发达,这两种类型的水生植物脱氮能力要强于浮叶植物。

表3 不同 pH 值下水生植物对污染物的去除能力

Tab.3 Decontamination ability of aquatic plants under different pH

$\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

项 目		黑藻	菹草	浮萍	荇菜	香蒲	芦竹
pH 值	6.0	16.5/9.3/6.8	16.3/12.3/10.8	13.2/5.5/7.8	18.9/6.4/4.1	14.2/11.8/5.0	16.5/7.8/9.6
	6.5	22.7/14.5/9.9	18.5/16.4/11.8	15.7/8.4/7.4	23.3/6.0/8.3	20.4/12.7/14.4	19.3/18.8/12.7
	7.0	21.1/15.3/16.8	23.4/18.9/13.8	26.6/13.2/8.9	20.7/9.3/10.9	24.6/21.9/20.4	26.7/23.6/15.9
	7.5	28.7/19.8/19.9	23.3/15.1/22.7	25.8/9.8/12.8	17.2/17.4/16.8	25.5/12.8/13.8	18.9/20.7/20.7
	8.0	30.2/23.3/15.3	25.7/8.6/21.8	21.1/7.5/12.9	16.4/6.9/10.4	21.2/11.2/18.9	19.8/19.9/18.1

6 种水生植物去除 TP 能力排序为:芦竹 > 黑藻 > 菹草 > 香蒲 > 荇菜 > 浮萍,整体表现为挺水植物 \approx 沉水植物 > 浮叶植物。在 pH 值为 6.5 ~ 7.5 范围内,芦竹去除 TP 能力要强于其他几种水生植物,说明其在此 pH 值范围内可以较好地适应环境,其发达的根部可以吸收水体中磷元素,从而达到净化水体的目的。6 种水生植物去除 COD 能力排序为:菹草 > 芦竹 > 香蒲 > 黑藻 > 荇菜 > 浮萍,整体表现为挺水植物 \approx 沉水植物 > 浮叶植物。沉水植物和挺水植物可吸收水体中有机物,降低 COD 浓度。在整个 pH 值梯度范围内,沉水植物、挺水植物对 TN、TP、COD 的去除能力较高,浮叶植物对富营养盐的去除效果欠佳。

2.4 盐度的影响

在 L 为 100% 自然光、 T 为 20 $^{\circ}\text{C}$ 、pH 值为 7.0 的条件下,研究盐度 S 分别为 0、0.2%、0.4%、0.6%、0.8% 对植物复氧能力和污染物去除能力的影响。

2.4.1 对水生植物复氧能力的影响

水生植物复氧能力随着盐度的升高而下降明显,在盐度过高区域,黑藻、菹草、浮萍和荇菜几乎没有复氧能力,水生植物向水体复氧的能力受到抑制。6 种水生植物复氧能力由大到小排序为:香蒲 > 芦竹 > 荇菜 > 黑藻 > 菹草 > 浮萍。沉水植物和浮叶植物受盐度影响较大,在高盐碱环境中很难存活,而香蒲和芦竹在盐度为 0.8% 的水体中 OE 值分别为 30×10^{-5} 和 27×10^{-5} ,受盐度影响最小,说明挺水植物可以适应环境的变化继续保持较高的复氧能力。

2.4.2 对水生植物除污能力的影响

试验结果表明,水生植物去除污染物能力随着盐度的升高而下降,对 TN 的去除能力排序为:香蒲

> 芦竹 > 黑藻 > 菹草 > 荇菜 > 浮萍,高盐环境对水生植物吸收水中氮有明显的抑制作用。当盐度达到 0.8% 时,黑藻和菹草去除 TN 能力为零,而香蒲和芦竹则表现出一定的抗逆性,在高盐水体(0.8%)中依然可以保持一定的脱氮能力,分别为 16.6 和 18.6 $\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{d})$ 。

黑藻和菹草在盐度水平 > 0.6% 时,对 TP 和 COD 的去除能力为零,说明沉水植物不适宜生长在高盐环境中,而香蒲和芦竹可作为先锋物种,生长在具有一定盐度的水体中,并吸收水中营养盐。综上,6 种水生植物对水体中 TN、TP 和 COD 的去除能力随盐度增加呈下降趋势。香蒲和芦竹在其存活盐度范围内,均能快速、高效地去除水中的氮、磷等营养物质,且净化能力高于其他两类水生植物。

2.5 环境因子优化结果

综合考虑各环境因素对水生植物复氧和除污能力的影响,优化后适宜黑藻的环境因子如下: L 为 12 000 lx, T 为 20 $^{\circ}\text{C}$,pH 值为 7.5,盐度为零;优化后适宜菹草的环境因子如下: L 为 9 600 lx, T 为 20 $^{\circ}\text{C}$,pH 值为 7.0,盐度为零;优化后适宜浮萍的环境因子如下: L 为 12 000 lx, T 为 25 $^{\circ}\text{C}$,pH 值为 7.5,盐度为零;优化后适宜荇菜的环境因子如下: L 为 12 000 lx, T 为 25 $^{\circ}\text{C}$,pH 值为 7.0,盐度为零;优化后适宜香蒲的环境因子如下: L 为 12 000 lx, T 为 20 $^{\circ}\text{C}$,pH 值为 7.0,盐度为零;优化后适宜芦竹的环境因子如下: L 为 9 600 lx, T 为 20 $^{\circ}\text{C}$,pH 值为 7.0,盐度为零。

3 结论

① 菹草、荇菜、芦竹对水体的复氧能力随着光照强度的变化而出现波动,光照强度最大的环境条

件并不能使水生植物复氧能力达到最大。香蒲和芦竹光合作用对水中氮素的平均去除量分别为 34.4、32.4 $\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{d})$,较其他类型水生植物要强;黑藻和菹草去除 TP 能力较高,平均去除量分别为 26、24.8 $\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{d})$ 。

② 温度过高不适宜水生植物向水体复氧,因此在夏季温度过高时,可采用机械曝气方式向水体复氧。香蒲和芦竹复氧能力平均值分别为 52.4×10^{-5} 和 52.7×10^{-5} ,说明香蒲和芦竹可较好地适应环境,向周围水体释放氧气。

③ 挺水植物香蒲和芦竹可以较好地适应水体 pH 值变化,并对酸碱度表现出一定的抗逆性,可种植在工业园区 pH 值变化较大的水域中。水生植物在中性环境中可向水体输送较多的氧气,在整个 pH 值梯度范围(6.0~8.0)内,沉水植物、挺水植物去除 TN、TP、COD 能力较高,浮叶植物对富营养盐的去除效果欠佳。

④ 香蒲和芦竹在盐度胁迫下通过自身的内部机制来平衡植物存活的逆境,可种植于含盐量本底值较高的水体中。水生植物复氧能力随着盐度的升高而明显下降,在盐度过高区域(0.8%),黑藻、菹草、浮萍和荇菜几乎没有复氧能力。6 种水生植物对水体中 TN、TP 和 COD 的去除能力随盐度增加呈下降趋势。

参考文献:

- [1] 张列宇,王浩,李国文,等. 城市黑臭水体治理技术及其发展趋势[J]. 环境保护,2017,45(5):62-65.
Zhang Lieyu, Wang Hao, Li Guowen, et al. Management technology and development trend for urban black and odorous water body[J]. Environmental Protection, 2017, 45(5):62-65(in Chinese).
- [2] 李骏飞,杨磊三,周炜峙. 海绵城市与黑臭水体治理共同建设途径探讨[J]. 中国给水排水,2016,32(24):35-38.
Li Junfei, Yang Leisan, Zhou Weizhi. Discussion on common construction of sponge city and malodorous black river treatment project[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(24):35-38(in Chinese).
- [3] 贺锋,吴振斌,陶菁,等. 复合垂直流人工湿地污水处理系统硝化与反硝化作用[J]. 环境科学,2005,26(1):47-50.
He Feng, Wu Zhenbin, Tao Jing, et al. Nitrification and denitrification in the integrated vertical flow constructed wetlands[J]. Environmental Science, 2005, 26(1):47-50(in Chinese).
- [4] Gagnon V, Chazarenc F, Comeau Y, et al. Influence of macrophyte species on microbial density and activity in constructed wetlands[J]. Water Sci Technol, 2007, 56(3):249-254.
- [5] 朱丹婷,乔宁宁,李铭红,等. 光强、温度、总氮浓度对黑藻生长的影响[J]. 水生生物学报,2011,35(1):88-97.
Zhu Danting, Qiao Ningning, Li Minghong, et al. Effect of light intensity, temperature, total nitrogen concentration and their interaction on *Hydrilla verticillata*[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2011, 35(1):88-97(in Chinese).
- [6] 成水平,吴振斌,夏宜琤. 水生植物的气体交换与输导代谢[J]. 水生生物学报,2003,27(4):413-417.
Cheng Shuiping, Wu Zhenbin, Xia Yizheng. Review on gas exchange and transportation in macrophytes[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2003, 27(4):413-417(in Chinese).
- [7] 王圣瑞,金相灿,赵海超,等. 沉水植物黑藻对上覆水中各形态磷浓度的影响[J]. 地球化学,2006,35(2):179-186.
Wang Shengrui, Jin Xiangcan, Zhao Haichao, et al. Effect of submerged plant *Hydrilla verticillata* on the concentrations of different phosphorus species in overlying water[J]. Geochimica, 2006, 35(2):179-186(in Chinese).



作者简介:张岳(1987-),男,山东聊城人,博士,高级工程师,从事水体污染生态治理技术研究。

E-mail: tjdxhjzy@tju.edu.cn

收稿日期:2018-05-12