

基于响应面分析的水生植物复氧环境因子参数优化研究

张岳^{1,2}, 颜秀勤², 赵新华¹, 孙永利², 张维², 韩旭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 [目的]研究多种环境因子及其交互作用对水生植物复氧的影响。[方法]采用不同种类水生植物对实施环境调控后水生植物复氧能力的响应情况进行考察, 研究主效环境因子之间交互作用产生的影响, 从而解析不同种类水生植物复氧变化规律。[结果]黑藻、荇菜和香蒲响应面模型方程中一次项和二次项影响较为显著, 试验中因素与响应值之间的影响是较为复杂的线性关系。单个因素对黑藻、荇菜和香蒲的复氧能力值(OE)影响顺序分别为 pH>光照(L)>盐度(S)>温度(T), S>L> pH>T, L>S>pH>T。根据响应面二次模型可得到3种水生植物环境因子优化方案, 黑藻优化方案为: L为10 159 lx、T为21 ℃、pH为7.69, S为0.10%, 在上述优化条件下, 黑藻OE值为58.72; 荇菜优化方案为: L为11 956 lx、T为26 ℃、pH为7.5, S为0.12%, 在上述优化条件下, 荇菜OE值为46.32; 香蒲优化方案为: L为12 000 lx、T为21 ℃、pH为7.14, S为0.11%, 在上述优化条件下, 香蒲OE值为59.22。[结论]该研究为臭水体水生植物光合作用复氧技术研究提供依据。

关键词 水生植物; 水体复氧; 黑臭水体; 响应面分析; 环境因子; 参数优化

中图分类号 X52 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2018)28-0060-05

Study on Optimization of Reoxygenation Environmental Factors Parameters of Aquatic Plants Based on Response Surface Analysis

ZHANG Yue^{1,2}, YAN Xiu-qin², ZHAO Xin-hua¹ et al (1. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072; 2. China Municipal Engineering North China Design and Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300074)

Abstract [Objective] The research aimed to study the effects of various environmental factors and their interactions on reoxygenation of aquatic plants. [Method] The response of different types of aquatic plants to the reoxygenation capacity of aquatic plants after environmental regulation was investigated to study the effects of interactions between major environmental factors, and to analyze the changes of reoxygenation of different aquatic plants. [Result] The effects of primary and secondary terms in the model equations of *Hydrilla verticillata*, *Nymphaoides peltatum* and *Typha orientalis* were relatively significant, and the influence between the experimental factors and the response values was a more complex linear relationship. The influence order of single factor on the reoxygenation capacity (OE) of *Hydrilla verticillata*, *Nymphaoides peltatum* and *Typha orientalis* was pH>Lighting (L)>Salinity (S)>Temperature (T), S>L>pH>T, L>S>pH>T. According to the response surface quadratic model, three aquatic plant environmental factor optimization schemes could be obtained. The optimization scheme of *Hydrilla verticillata* was: L was 10 159 lx, T was 21 ℃, pH was 7.69, S was 0.10%; under the above optimized conditions, the OE value was 58.72. The optimization scheme of *Nymphaoides peltatum* was: L was 11 956 lx, T was 26 ℃, pH was 7.5, S was 0.12%; under the above optimized conditions, the OE value of *Nymphaoides peltatum* was 46.32; the optimization scheme of scheme was: L was 12 000 lx, T was 21 ℃, pH was 7.14 and S was 0.11%; under the above optimized conditions, the cattail OE value was 59.22. [Conclusion] The study provides the theoretical basis for the monitoring of the water environment.

Key words Aquatic plants; Water reoxygenation; Black odor water; Response surface analysis; Environmental factors; Parameter optimization

城市黑臭水体的治理是一项复杂的工程, 由于城市河流在城市发展过程中发挥着举足轻重的作用, 对黑臭水体的治理技术研究已经成为现阶段水体治理领域关注的重点^[1-3]。为了改善城市河道水质, 在对城市黑臭水体进行治理时, 增加河流中的溶解氧含量是提高水体自净能力、加速水中污染物降解、改善水体黑臭的重要措施^[4-7]。

水生植物复氧与多种环境因子密切相关, 目前国内外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^[8-10]。笔者基于多参数的响应面环境因子调控试验, 通过分析环境因子对水生植物复氧的影响, 探讨环境因子与复氧效果之间的关系, 从而确定主效环境因子以及因子之间交互作用产生的影响, 实现水生植物复氧环境因子的优化调控, 进而掌握水生植物复氧变化规律, 为研究黑臭水体水生植物光合作用复氧技术提供依据, 同时为城市水体水污染治理工程的建设提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 水生植物。通过查阅文献, 根据生物量大、适应性强、具有经济利用性等原则选取水生植物。沉水植物中黑藻、浮叶植物中荇菜、挺水植物中香蒲具有较好的复氧效果, 故选取上述3种水生植物进行响应面试验。

1.1.2 试验用水。试验用水取自宜兴市蛟桥河, 河面宽度为2~3 m, 河道水深1~2 m, 流速较慢, COD 50~62 mg/L, TN 8.15~10.5 mg/L, TP 3.23~6.19 mg/L, 氨氮 5.22~9.34 mg/L, 透明度10~20 cm, 溶解氧 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15 cm、高度40 cm的有机玻璃柱构成, 在装置侧面设置出水口, 装置底部基质主要由砾石(粒径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, 装置水体深度为30 cm。采用自来水冲洗试验所用水生植物, 之后将水生植物置于富营养化水体中进行适应性水培。水培7 d后挑选出生长状况较好的水生植物, 清洗干净后自然风干10 min, 称重后放入试验装置中。

1.3 水生植物响应面环境因素水平 该研究所选取的影响复氧的环境参数包括光照(L)、温度(T)、pH、盐度(S), 采用水生植物复氧能力OE值作为考察的指标, 综合考虑单因素

基金项目 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07403001)。

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

收稿日期 2018-06-02

试验中环境因子对水生植物生理生长、净化污染物能力和复氧能力的影响,3种水生植物单因素环境因子结果如表1所示。

表1 3种水生植物单因素环境因子的范围

Table 1 Range of three-factor environmental factors for three aquatic plants

植物 Plant	光照 Light lx	温度 Temperature °C	pH	盐度 Salinity %
黑藻 <i>Hydrilla verticillata</i>	9 600~12 000	19~21	7.0~8.0	0~0.2
荇菜 <i>Nymphoides peltatum</i>	9 600~12 000	24~26	6.5~7.5	0~0.2
香蒲 <i>Typha orientalis</i>	9 600~12 000	19~21	6.5~7.5	0.1~0.3

根据单因素试验结果确定各环境因子的范围,试验采用4因素3水平,运用响应面分析软件 Design-Expert 8.0 对数据进行处理优化,响应面分析中所需3种水生植物环境因子参数的变量水平,其取值依据主要为上一年度单因素试验中复氧能力较高的环境因子范围。变量水平以及编码如表2所示。

表2 3种水生植物环境因子变量水平及编码

Table 2 Levels and codes of environmental factors of three aquatic plants

植物 Plant	水平	A(光照 Light) lx	B(温度 Temperature) //°C	C(pH)	D(盐度 Salinity) %
黑藻	-1	9 600	19	7.0	0
<i>Hydrilla</i>	0	10 800	20	7.5	0.1
<i>verticillata</i>	1	12 000	21	8.0	0.2
荇菜	-1	9 600	24	6.5	0
<i>Nymphoides</i>	0	10 800	25	7.0	0.1
<i>peltatum</i>	1	12 000	26	7.5	0.2
香蒲	-1	9 600	19	6.5	0.1
<i>Typha</i>	0	10 800	20	7.0	0.2
<i>orientalis</i>	1	12 000	21	7.5	0.3

1.4 水生植物复氧能力指标的建立 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,在此采用单位鲜重水生植物单位时间内平均复氧能力作为评价水生植物复氧能力的指标,其计算公式为:

$$\text{复氧能力指标 OE} = \frac{\sum_{i=1}^n [D_i \times V_i - D_{ci} \times V_{ci}] \times \Delta t}{m_0 \times t} \quad (1)$$

式(1)中,OE 为单位鲜重水生植物在监测时间内平均复氧能力; n 为检测次数; t 为监测时间; Δt 为2次 DO 监测时间间隔; D_i 为种有水生植物容器中第 i 次 DO 监测值; V_i 为种有水生植物容器中第 i 次 DO 监测时水体体积; D_{ci} 为对照第 i 次 DO 监测值; V_{ci} 为对照第 i 次 DO 监测时水体体积; m_0 为试验水体中种植的水生植物初始鲜重。

2 结果与分析

2.1 沉水植物黑藻环境因子响应面分析 表3为沉水植物黑藻响应面试验结果,表中有29个试验点所得出水生植物复氧能力 OE 值的试验结果,这些试验点可分为两类:第一类为零点,作为试验区域的中心点,进行5次零点试验;第二类为析因点,A、B、C、D 共构成24个析因点。试验中采用 OE

作为响应面,利用软件 Design-Expert 8.0 对试验结果进行拟合,从而得到拟合模型、方差分析以及置信度分析。

表3 黑藻响应面试验结果

Table 3 Result of response surface tests for *Hydrilla verticillata*

运行次数 Number	光照 Light lx	温度 Temperature °C	pH	盐度 Salinity %	OE
1	9 600	19	8.0	0	40.26
2	10 800	20	7.5	0.1	47.90
3	12 000	21	7.0	0.2	55.18
4	9 600	19	7.0	0.2	43.83
5	12 000	19	8.0	0	37.02
6	10 800	20	7.5	0.1	45.49
7	12 000	19	7.0	0.2	56.28
8	10 800	20	7.5	0.1	43.38
9	10 800	20	7.5	0.3	45.01
10	9 600	21	8.0	0	33.19
11	12 000	21	7.0	0	57.73
12	12 000	19	8.0	0.2	30.84
13	8 400	20	7.5	0.1	32.94
14	10 800	20	7.5	0.1	50.29
15	9 600	21	8.0	0.2	34.84
16	10 800	20	7.5	0.1	48.93
17	10 800	22	7.5	0.1	45.03
18	12 000	19	7.0	0	55.12
19	10 800	20	7.5	0	45.04
20	10 800	20	8.5	0.1	30.93
21	12 000	21	8.0	0	48.93
22	9 600	21	7.0	0	43.28
23	9 600	19	7.0	0	42.93
24	9 600	19	8.0	0.2	32.93
25	10800	18	7.5	0.1	50.98
26	10 800	20	6.5	0.1	49.21
27	12 000	21	8.0	0.2	35.87
28	9 600	21	7.0	0.2	39.02
29	10 800	20	7.5	0.1	44.29

对试验数据进行多项式回归分析,拟合结果显示二阶模型适合数据响应。以水生植物复氧能力 OE 为因变量,以光照(A)、温度(B)、pH(C)、盐度(D)为自变量,采用 Box-Behnken 对试验数据进行拟合,得到二次响应曲面方程: $OE = 46.71 + 3.57A - 0.13B - 5.67C - 1.24D + 1.75AB - 2.74AC - 0.72AD + 0.92BC - 0.42BD - 1.26CD - 2.22A^2 + 0.37B^2 - 1.62C^2 - 0.38D^2$ 。

对模型进行方差分析,结果表明,在4种拟合模型中(线性拟合模型、双因素线性拟合模型、二次方拟合模型、三次方拟合模型)只有二次拟合模型可以比较明确地说明各个因素与响应值之间的关系。比较各个模型的相关系数、均方差平方和、偏方差平方和的结果可知,二次拟合模型为最适用。

对二次方程拟合模型回归方程进行方差分析。当模型 P 值小于 0.10 时,因素条件与响应值之间作用显著;当模型 P 值小于 0.05 时,因素条件与响应值之间作用非常显著,而当模型 P 值大于 0.10 时,因素条件与响应值之间作用不显著。由以上分析可知,该研究所得模型适应性显著 ($P < 0.0001$),失拟项并不显著。说明该试验采用的响应面分析方法是可靠的。模型方程中一次项和二次项影响较为显著,试验中因素与响应值之间的影响为较为复杂的线性关系,影响较为显著的因素主要为 A、C、AC、 A^2 、 C^2 。四因素交

相互作用影响 OE 值的顺序为 AC>AB>CD>BC>AD>BD, 其中 CD、BC、AD、BD 之间的交互影响可以忽略不计。单个因素对 OE 值影响顺序为 C>A>D>B。

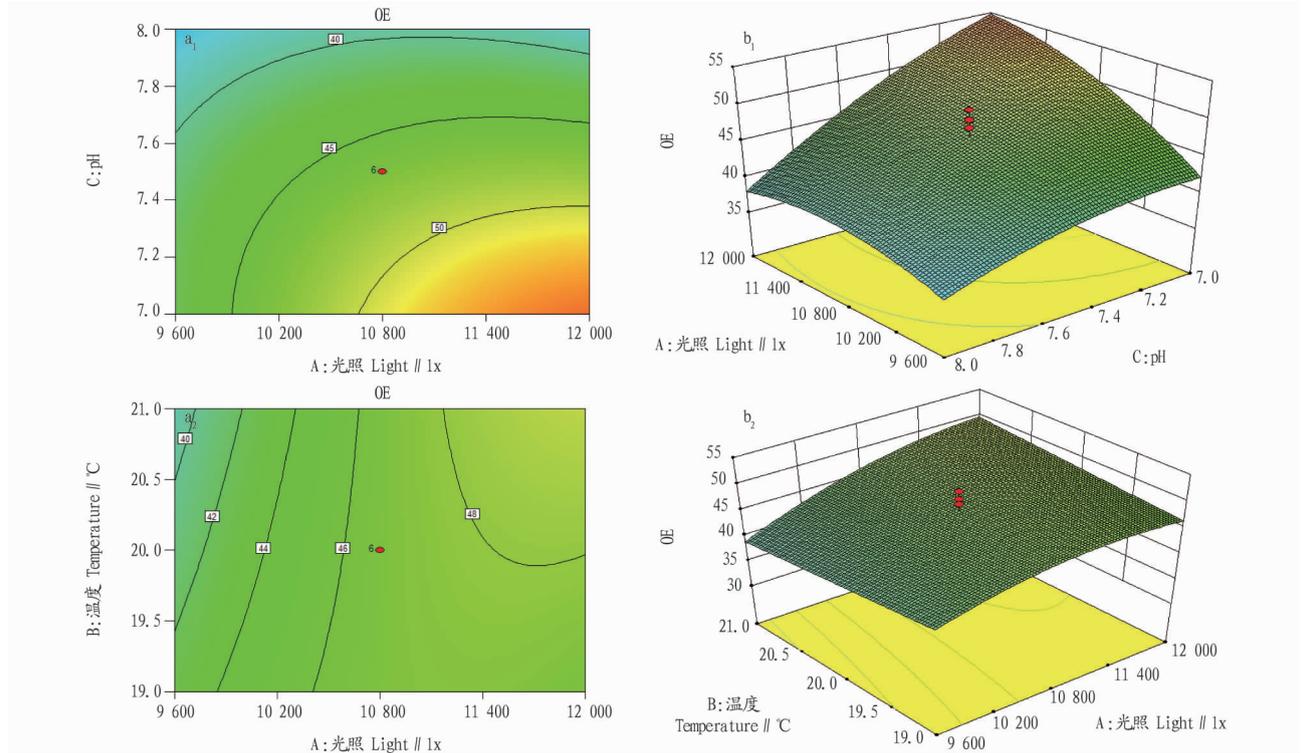
借助响应面软件分析二次模型方程,可以得到两因素之间交互作用响应面图以及等值线图(图1)。根据响应面曲线图可以分析两因素交互作用对 OE 值的影响,进而确定影响 OE 值的最佳因素取值范围。其中,光照与温度、光照与 pH 交互作用显著,其他 2 个因素组合交互作用并不明显,但最优化方案可通过软件计算得出。

由图 1 可知,试验取值范围内,OE 随着光照和 pH 的变化呈抛物线变化趋势;当光照为 12 000 lx, pH 为 7.00 时,OE 值达到最大。试验取值范围内,OE 值随着温度的增加而呈抛物线变化趋势;当 OE 变化曲线为抛物线,其取值大于 48

时,光照取值范围要大于 10 800 lx,同时温度>19.5 ℃。故可知光照>10 800 lx、温度>19.5 ℃时,OE 值达到较高水平。

综上所述,在试验模型以及模型拟合的基础上,可以利用响应面软件对试验因素水平的数据进行进一步优化,即可在获得较高 OE 值的条件下,取得各个影响因子的最优参数方案,即在沉水植物黑藻复氧过程中,使得黑藻获得较高复氧能力。通过分析两因子交互作用,可确定水生植物黑藻主效环境因子,为后续水生植物栽种提供环境参考。

根据响应面二次模型,通过软件将运行环境参数带入模型公式,取得水生植物黑藻 OE 值最大条件下,环境因子优化方案为光照 10 159 lx、温度 21.0 ℃、pH 7.69、盐度 0.10%,在上述优化条件下,OE 值为 58.72。



注: a_1 、 b_1 为光照与 pH; a_2 、 b_2 为光照与温度

Note: a_1 、 b_1 are light and pH; a_2 、 b_2 are light and temperature

图 1 两要素交互作用对 OE 值的等值线 (a) 和响应面 (b)

Fig.1 Contour (a) and response surface (b) of the interaction of two elements on the OE value

2.2 浮叶植物苜蓿环境因子响应面分析 采用 Box-Behnken 对试验数据进行拟合,得到的二次响应曲面方程如下: $OE = 32.83 + 5.224A - 0.28B + 0.89C - 7.55D + 1.95AB + 0.38AC - 1.02AD + 0.30BC - 0.59BD - 0.62CD - 0.71A^2 + 0.42B^2 - 3.07C^2 - 2.64D^2$ 。

对模型进行方差分析可知,该研究所得模型适应性显著 ($P < 0.0001$),失拟项并不显著,说明该试验采用的响应面分析方法是可靠的。影响较为显著的因素主要为 D、A、AB、AD、 D^2 、 C^2 。四因素交互作用影响 OE 值的顺序为: AB>AD>CD>BD>AC>BC, 其中 CD、BD、AC、BC 之间的交互影响可以忽略不计。单个因素对 OE 值影响顺序为 D>A>C>B。

借助响应面软件分析二次模型方程,可以得到两因素之

间交互作用响应面图以及等值线图。根据响应面曲线图可以分析两因素交互作用对 OE 值的影响,进而确定影响 OE 值的最佳因素取值范围。其中光照与温度、光照与盐度交互作用显著,其他 2 个因素组合交互作用并不明显,但最优化方案可通过软件计算得出。

从两因素对复氧能力 OE 交互作用的等值线和响应曲面图(图 2)可看出,试验取值范围内,OE 值随着光照和温度的变化呈抛物线变化趋势,OE 值随着光照和温度的升高而上升;当光照为 12 000 lx、光照为 26.0 ℃时,OE 值达到最大。试验取值范围内,OE 值随着光照和盐度的变化而呈抛物线变化趋势,OE 值随着光照的升高或盐度的降低而上升;当光

照为12 000 lx、盐度为 0 时,OE 值达到最大值。

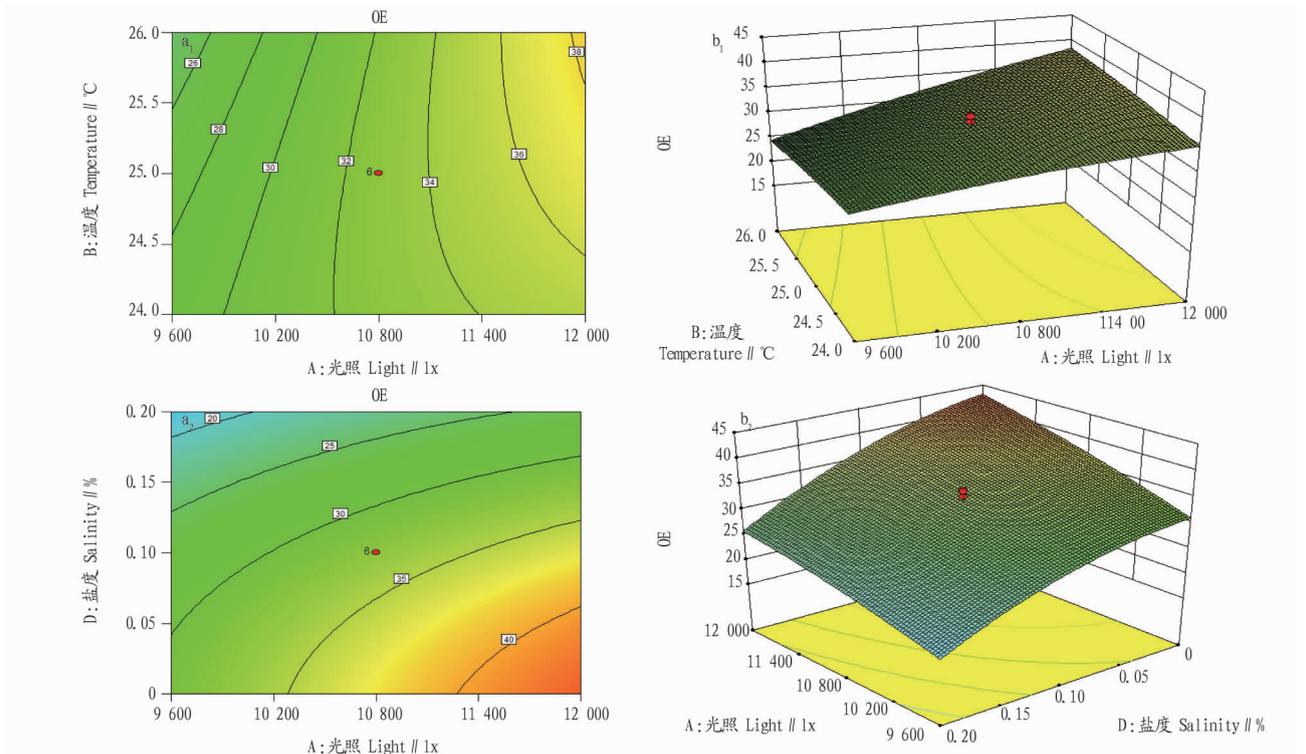
根据响应面二次模型可得到优化方案为光照 11 956 lx、温度 26.0 °C、pH 7.50、盐度 0.12%,在上述优化条件下,苻菜获得较高复氧能力 OE 值,为 46.32。

2.3 挺水植物香蒲环境因子响应面分析 采用 Box-Benhnken 对试验数据进行拟合,得到的二次响应曲面方程为:OE = 56.09+3.26A-0.66B-1.11C-1.33D-0.15AB+3.80AC+1.27AD-0.22BC-0.096BD-1.65CD-0.33A²+0.50B²-4.87C²-2.53D²。

对模型进行方差分析可知,该研究所得模型适应性显著 (P<0.000 1),失拟项并不显著,说明香蒲进行响应面分析所

得的二次项模型是可行的。影响较为显著的因素主要为 A、D、AC、AD、CD、C²、D²。四因素交互作用影响 OE 值顺序为 AC>CD>AD>BC>AB>BD,其中 AD、BC、AB、BD 之间的交互影响可以忽略不计。单个因素对 OE 值影响顺序为 A>D>C>B。

借助响应面软件分析二次模型方程,可以得到两因素之间交互作用响应面图以及等值线图。根据响应面曲线图可以分析两因素交互作用对 OE 值的影响,进而确定影响 OE 值的最佳因素取值范围。其中光照与 pH、pH 与盐度交互作用显著,其他 2 个因素组合交互作用并不明显,但最优优化方案可通过软件计算得出。



注:a₁、b₁ 为光照与温度;a₂、b₂ 为光照与盐度

Note:a₁、b₁ are light and temperature;a₂、b₂ are light and salinity

图 2 两要素交互作用对 OE 值的等值线 (a) 和响应面 (b)

Fig.2 Contour (a) and response surface (b) of the interaction of two elements on the OE value

从两因素对复氧能力 OE 交互作用的等值线和响应曲面图(图 3)可看出,试验取值范围内,OE 随着光照和 pH 的变化呈抛物线变化趋势;OE 值随着光照的升高而升高,同时也随着 pH 的变化而变化;当 pH 为 7.15、光照为 12 000 lx 时,OE 值达到最大值。试验取值范围内,OE 值随着 pH 和盐度的变化而呈抛物线变化趋势;OE 值随着盐度的升高而升高,同时也随着 pH 的变化而变化;当 pH 为 7.00、盐度为 0.15%,OE 值达到最大值。

根据响应面二次模型可得到环境参数条件为光照 12 000 lx、温度 21.0 °C、pH 7.14、盐度 0.11%,在此优化条件下,OE 值为 59.22。

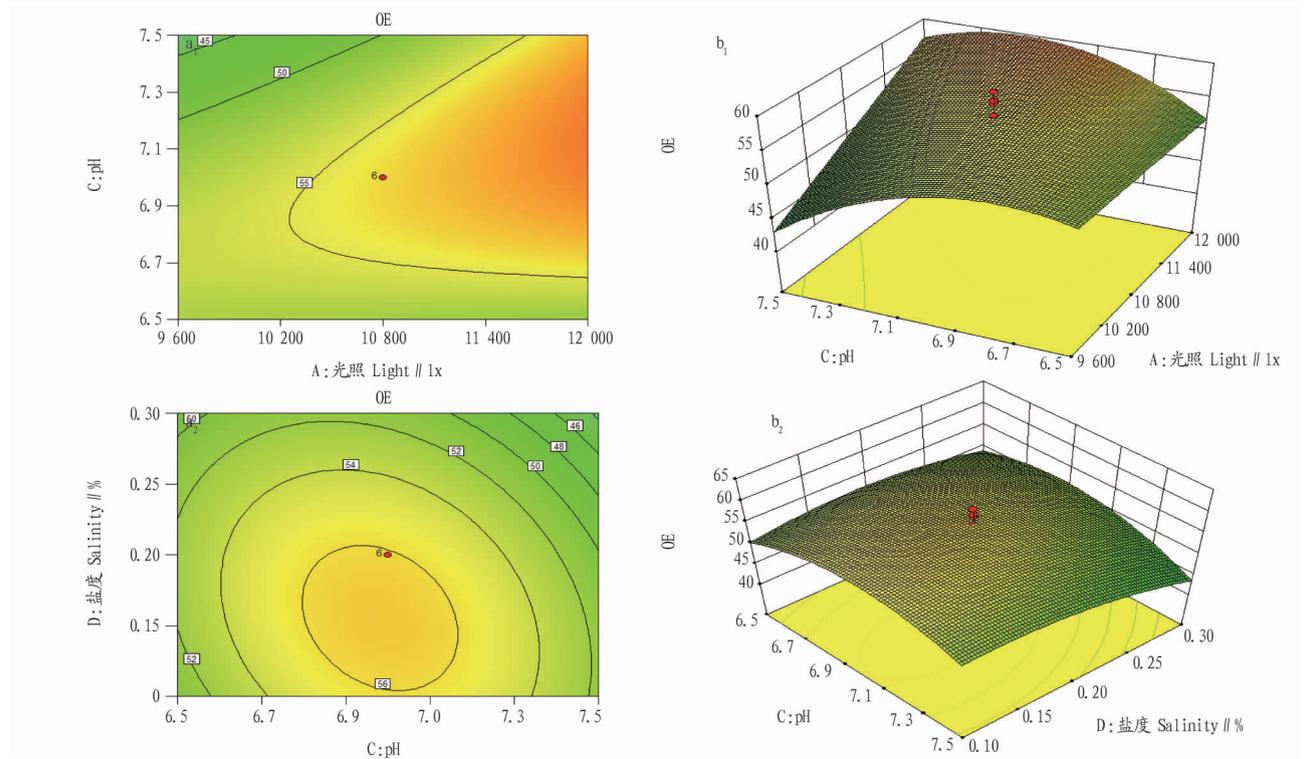
3 结论

(1)黑藻、苻菜和香蒲响应面模型方程中一次项和二次项

影响较为显著,试验中因素与响应值之间的影响是较为复杂的线性关系。黑藻影响较为显著的因素主要为 A、C、AC、A²、C²。四因素交互作用影响 OE 值的顺序为 AC>AB>CD>BC>AD>BD,其中 CD、BC、AD、BD 之间的交互影响可以忽略不计。单个因素对沉水植物黑藻 OE 的影响顺序为 C>A>D>B。

(2)苻菜影响较为显著的因素主要为 D、A、AB、AD、D²、C²。四因素交互作用影响 OE 值的顺序为 AB>AD>CD>BD>AC>BC,其中 CD、BD、AC、BC 之间的交互影响可以忽略不计。单个因素对浮叶植物苻菜 OE 影响顺序为:D>A>C>B。

(3)香蒲影响较为显著的因素主要为 A、D、AC、AD、CD、C²、D²。四因素交互作用影响 OE 值得顺序为 AC>CD>AD>BC>AB>BD,其中 AD、BC、AB、BD 之间的交互影响可以忽略不计。单个因素对挺水植物香蒲 OE 值的影响顺序为 A>D>C>B。



注: a_1 、 b_1 为光照与 pH; a_2 、 b_2 为 pH 与盐度

Note: a_1 、 b_1 are light and pH; a_2 、 b_2 are pH and salinity

图3 两要素交互作用对 OE 值的等值线 (a) 和响应面 (b)

Fig.3 Contour (a) and response surface (b) of the interaction of two elements on the OE value

(4) 在试验模型以及模型拟合的基础上,可以利用响应面软件对试验因素水平的数据进行进一步优化,即可在获得较高 OE 值的条件下,取得各个影响因子的最优参数方案,即在水生植物复氧过程中,使得水生植物获得较高复氧能力。根据响应面二次模型可得到 3 种水生植物环境因子优化方案。黑藻优化方案为光照 10 159 lx、温度 21.0 °C、pH 7.69、盐度 0.10%,在上述优化条件下,黑藻 OE 值为 58.72。荇菜优化方案为光照 11 956 lx、温度 26.0 °C、pH 7.50、盐度 0.12%,在上述优化条件下,荇菜 OE 值为 46.32。香蒲优化方案为光照 12 000 lx、温度 21.0 °C、pH 7.14、盐度 0.11%,在上述优化条件下,香蒲 OE 值为 59.22。

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.

- [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(24):35-38.
- [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.
- [4] GAGNON V, CHAZARENCO F, COMEAU Y, et al. Influence of macrophyte species on microbial density and activity in constructed wetlands[J]. Water science & technology, 2007, 56(3): 249-254.
- [5] 王贺贺,王国祥,刘波,等.曝气增氧技术在城市黑臭河流水质改善中的应用与研究[J].安徽农业科学,2012,40(10):6137-6138,6141.
- [6] 肖靛,赵文涛,栾敬师,等.城市河道黑臭评价模型及控制技术进展[J].安徽农业科学,2014,42(26):9116-9120.
- [7] 姜德刚,陈慧,徐海燕,等.不同客水对南淝河水体富营养化的影响及其降解特征[J].安徽农业科学,2017,45(19):51-55.
- [8] 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.
- [9] 成水平,吴振斌,夏宜珍.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.
- [10] 任智智,王通,季宇彬.水生植物在水生态健康中的环境负效应[J].生物技术世界,2013(9):57-59.

名词解释

扩展引用刊数: 引用被评价期刊的期刊数,反映被评价期刊被使用的范围。

扩展学科扩散指标: 指在统计源期刊范围内,引用该刊的期刊数量与其所在学科全部期刊数量之比。

$$\text{扩展学科扩散指标} = \frac{\text{引用刊数}}{\text{所在学科期刊数}}$$

扩展学科扩散指标: 指期刊所在学科内,引用该刊的期刊数占全部期刊数量的比例。

$$\text{扩展学科扩散指标} = \frac{\text{所在学科内引用被评价期刊的数量}}{\text{所在学科期刊数}}$$

扩展被引半衰期: 指该期刊在统计当年被引用的全部次数中,较新一半是在多长一段时间内发表的。被引半衰期是测度期刊老化速度的一种指标,通常不是针对个别文献或某一组文献,而是对某一学科或专业领域的文献的总和而言的。