

文章编号: 1673-5196(2020)04-0073-06

生活污水高效培养小球藻的环境优化

王 昱^{1,2}, 时文强^{1,2}, 郭亚敏^{1,2}, 卢世国^{1,2}, 刘娟娟^{1,2}

(1. 兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 甘肃省生物质能与太阳能互补供能系统重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 为了在我国北方地区村镇用生活污水高效培养小球藻, 对小球藻的生长环境(初始污水浓度、环境温度、光照强度和光照时间)进行了单因素和正交实验研究. 结果表明: 在单因素环境条件下, 污水的初始污水浓度、环境温度、光照强度和光照时间对小球藻生长具有显著影响. 最佳的初始污水浓度是将原生活污水稀释 2 倍, 环境温度达到 30 ℃, 光照强度为 12 000 Lux, 光照时间为 20 h. 正交实验研究表明, 生活污水培养小球藻的最优培养条件并非各环境因子最佳水平的简单叠加, 而是受环境因子间耦合作用的控制, 主导性环境因子是初始污水浓度和光照时间. 将原生活污水稀释 2 倍、环境温度为 30 ℃、光照强度为 10 000 Lux、光照时间达 16 h, 此时的生活污水培养小球藻的效率最高.

关键词: 生活污水; 小球藻; 环境因子

中图分类号: X17 **文献标志码:** A

Environmental optimization of high-efficiency cultivation of *Chlorella* in domestic sewage

WANG Yu^{1,2}, SHI Wen-qiang^{1,2}, GUO Ya-min^{1,2}, LU Shi-guo^{1,2}, LIU Juan-juan^{1,2}

(1. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China; 2. Key Laboratory of Complementary Energy System of Biomass and Solar Energy, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

Abstract: In order to cultivate *Chlorella* effectively with domestic sewage in villages and towns in northern China, the growth environment (initial sewage concentration, ambient temperature, illumination intensity and illumination time) for *Chlorella* was studied by single factor and orthogonal experiments in this study. The results showed that the initial sewage concentration, ambient temperature, illumination intensity and illumination time of sewage have respectively a significant effect on the growth of *Chlorella* under single-factor environmental conditions. The optimum initial sewage concentration is two times dilution of raw sewage, an ambient temperature of 30 ℃, an illumination intensity of 12 000 Lux, and a illumination time of 20 h. The results of orthogonal experiments showed that the optimal culture conditions of *Chlorella* are not a simple overlay of environmental factors, but controlled by the coupling of environmental factors. The dominant environmental factors are the initial sewage concentration and illumination time. Two times dilution of the raw sewage, the ambient temperature of 30 ℃, the illumination intensity of 10 000 Lux, the illumination time of 16 h, the sewage culture *Chlorella* reaches the highest efficiency at this time.

Key words: domestic sewage; *Chlorella*; environmental factors

随着我国农村城镇化建设的快速发展, 人民生活质量显著提升, 村镇居民人均用水量在不断增加,

致使村镇污水排放量也逐年增大^[1-2]. 然而, 由于村镇污水收集系统和无害化处理设施严重匮乏, 大量未经处理的污水无序乱流或直接排放, 已经造成众多村镇环境污染严重, 加剧了我国水资源匮乏的危机, 严重制约了村镇和农村经济的可持续发展. 因此, 生活污水净化处理已经成为我国农村城镇化发

收稿日期: 2018-09-21

基金项目: 国家自然科学基金(51669011), 甘肃省重大研发计划(18JR4RA002)

作者简介: 王 昱(1979-), 男, 甘肃永昌人, 博士, 副教授.

展亟需解决的难题之一^[3]。

微藻是大自然中广泛存在的自养型微生物,其在生长过程中,以 CO₂ 和碳酸盐为碳源,以水体中的氮素为氮源,同时能够以多种无机磷酸盐为磷源,通过藻类细胞中的叶绿素进行光能自养,完成细胞增殖并释放氧^[4]。自 20 世纪 50 年代 Oswald 等提出利用藻类净化污水以来^[5],国内外对利用藻类净化污水的研究也越来越多,并取得了较大进展^[6-8]。研究表明,微藻在污水中生长受到环境条件的约束,如生活污水中的氮磷浓度、环境温度和光照条件等都会影响微藻的生长速度和培养效率^[9-11]。由于我国北方地区气温年较差大,昼夜温差大,限制了村镇规模化培养微藻深度净化处理污水技术的发展。因此,本文基于生活污水培养小球藻的实验,探究环境因子(初始污水浓度、环境温度、光照强度和光照时间)对小球藻的生长影响,确定污水培养小球藻的最优环境条件,为我国北方地区利用微藻高效深度净化村镇生活污水技术的发展奠定基础。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 实验藻种

实验所用藻种是由甘肃省科学院生物研究所提供的小球藻(*Chlorella*),藻种采用 BG-11 培养基^[12]进行传代培养,保藏于 4 °C 冰箱。

1.1.2 培养液

实验开始前,采用 BG-11 培养基对长期保存的小球藻进行活化,培养 4~5 d,每天摇瓶 3~4 次防止小球藻细胞下沉或贴壁生长。实验所用的培养基为生活污水培养基,采集的污水去除大量的固体颗粒,再经过 24 h 自然沉淀,去除小的悬浮颗粒,取其上清液,储存在玻璃容器中备用。不同时段所取生活污水的水质指标为 COD=225.50~282.64 mg/L, TN=55.06~70.26 mg/L, TP=5.46~9.87 mg/L, NH₄⁺-N=53.35~60.23 mg/L, pH=8~9。

1.2 实验设计

实验采用装有 300 mL 生活污水培养基的锥形瓶(500 mL),接种时,将活化至对数期的藻种,于无菌条件下接种到锥形瓶,使其初始 OD₆₈₀ 为 0.2 左右。针对我国北方地区昼夜温差大,光照充足的特点,自制恒温控光微藻培养装置,控制培养环境的光温条件。连续培养 8 d,每天定时摇动 3~4 次。每天定时取样,测定小球藻液的光密度值。培养结束后,测定小球藻的干重。

1.3 实验方法

1.3.1 藻细胞生长测定

自接种日起,每 24 h 取样一次,利用 756s 型号的紫外可见分光光度计,测定小球藻液在波长为 680 nm 波长处的吸光值,用 OD₆₈₀ 变化表征细胞的生长情况。

1.3.2 干重测定

小球藻的干重采用重量法测定^[13],20 mL 小球藻液经预称重(W₁)的微孔滤膜(φ0.45 μm)过滤、洗涤,于 105 °C 下烘干至恒重(W₂),不加小球藻的空白对照组干重为 W₀,小球藻干重 DW(g·L⁻¹)的计算公式用式(1)计算:

$$DW = (W_2 - W_1 - W_0) / 0.02 \quad (1)$$

1.3.3 生长速度测定

用比生长速率表示小球藻的生长速度,即比生长速率(Specific growth rate, SGR)根据普通生物学通用的计算公式^[11],用式(2)计算:

$$\mu = (\ln N_T - \ln N_t) / (T - t) \quad (2)$$

式中: N_T 为 T 时间的小球藻液细胞密度; N_t 为 t 时间的小球藻液细胞密度; t、T 为生长时间, μ 表示小球藻生长速度,计算小球藻快速生长阶段的生长速度平均值,单位为 d⁻¹。

1.3.4 数据分析

采用 SPSS 20 进行数据处理,应用 Origin Pro 9.0 进行作图分析,利用正交实验直观分析^[14]方法对实验结果进行分析。

2 实验结果与分析

2.1 单因素条件下环境因子对污水培养小球藻的影响结果

1) 初始污水浓度对小球藻的生长速度及干重的影响结果

在环境温度 25 °C、光照强度 10 000 Lux、光照时间 12 h 的条件下,研究生活污水初始浓度分别为原水、稀释 2、4、6、8 倍时对小球藻生长速度和干重的影响,设 3 组平行实验,结果如图 1 所示。

从图 1 可以看出,初始污水浓度在原水和稀释 2 倍之间时,小球藻的生长速度随污水浓度降低而急剧增大;初始污水浓度在稀释 2 倍和稀释 8 倍时,随着污水浓度逐渐降低,小球藻的生长速度缓慢下降。当污水稀释 2 倍时,小球藻的比生长速率 μ 最大为 0.096 2 d⁻¹。统计分析表明,不同初始浓度下的小球藻生长速度具有显著性差异。初始污水浓度在原水和稀释 4 倍之间时,小球藻的干重随污水浓度降低而增加;初始污水浓度在稀释 4 倍和稀释 8 倍时,

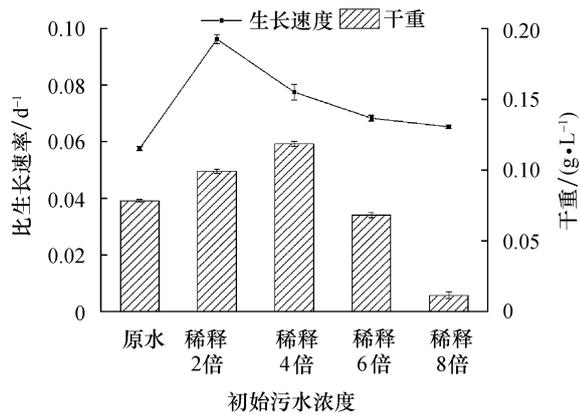


图1 不同初始污水浓度下小球藻的比生长速率和干重
Fig.1 Specific growth rate and dry weight of *Chlorella* at different initial sewage concentrations

小球藻的干重随污水浓度的降低而急剧减少.当污水稀释4倍时小球藻的干重 DW 最大为 $0.1183 g \cdot L^{-1}$.统计分析表明,不同污水浓度下的小球藻干重具有显著差异.由图1可知,小球藻在各初始浓度的生活污水中均能生长,说明该藻种具有一定的耐污能力.当生活污水稀释2、4、6倍时小球藻的生长状况较好,稀释2倍时小球藻的生长速度最快,培养效果最佳.

未经稀释的生活污水初始氮、磷浓度和浊度较高,导致光透过率降低,影响小球藻的光合作用,抑制小球藻在污水中的生长.生活污水浓度过低时,虽提升了小球藻的光合作用,提高培养前期的生长速度,但由于污水浓度较小,富含的氮磷营养物质含量减少,导致培养后期营养供给不足,影响其代谢产物的积累,同时消耗大量的淡水资源,有悖于微藻净化污水的目的^[15].

2) 环境温度对小球藻的生长速度及干重的影响结果

在污水稀释2倍,光照强度10000 Lux,光照时间为12 h的条件下,研究环境温度分别为20、25、30、35、40℃对小球藻生长速度和干重的影响,设3组平行实验,结果如图2所示.

从图2可以看出,当环境温度在20~30℃时,小球藻的生长速度和干重均随环境温度的升高增大;当环境温度为30~40℃时,小球藻的生长速度和干重均随环境温度的升高而减小.当环境温度为30℃时,小球藻的比生长速率 μ 和干重 DW 均最大,分别为 $0.0740 d^{-1}$ 、 $0.2572 g \cdot L^{-1}$.统计分析表明,环境温度为30℃的生长速度和35℃的生长速度无显著性差异,与其它环境温度水平有显著性差异.小球藻的干重在各环境温度下均有显著性差

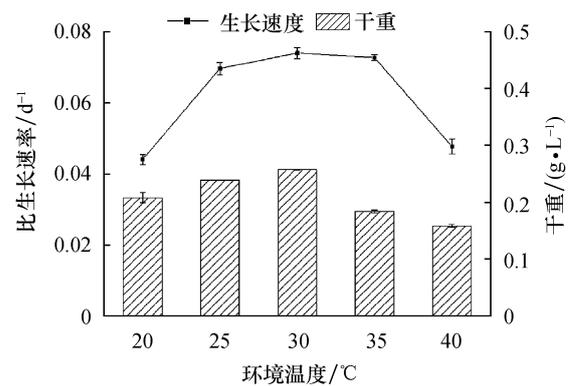


图2 不同环境温度下小球藻的比生长速率和干重
Fig.2 Specific growth rate and dry weight of *Chlorella* at different ambient temperatures

异.由图2可知,当环境温度为25、30、35℃时小球藻在污水环境中生长状况较好,环境温度为30℃时小球藻的生长速度最快,培养效果最佳.

环境温度控制藻细胞内酶的活性,不仅影响藻类的光合作用和生长活动^[16-17],也影响藻类对营养盐的吸收效率^[18].环境温度较低时,藻细胞内酶活性较低,生长相对较慢.过高时,抑制藻的呼吸作用代谢减慢,不利于藻的生长和物质积累^[19-20].

3) 光照强度对小球藻的生长速度及干重的影响结果

在污水稀释2倍,环境温度为30℃,光照时间为12 h的条件下,研究光照强度分别为8000、10000、12000、14000、16000 Lux对小球藻生长速度和干重的影响.设3组平行实验,结果如图3所示.

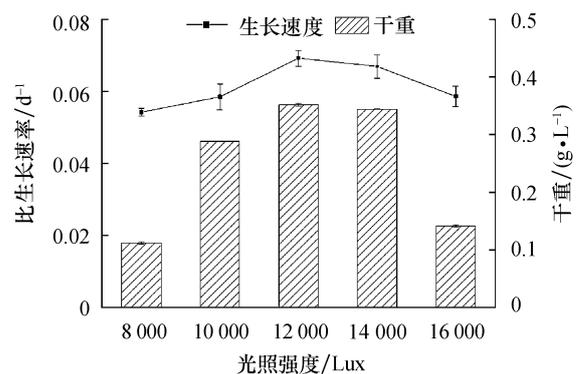


图3 不同光照强度下小球藻的比生长速率和干重
Fig.3 Specific growth rate and dry weight of *Chlorella* at different light intensities

从图3可以看出,当光照强度在8000~12000 Lux时,随着光照强度的加强,小球藻的生长速度和干重逐渐增大,当光照强度在12000~16000 Lux时,小球藻的生长速度和干重随光照强度的加强而减少.当光照强度为12000 Lux时,小球藻的比生

长速率 μ 最大为 $0.069 2 d^{-1}$, 干重 DW 最大为 $0.351 9 g \cdot L^{-1}$. 统计分析表明, 光强为 $12 000 Lux$ 实验组的生长速度与 $8 000$ 、 $10 000$ 、 $16 000 Lux$ 实验组的生长速度有显著性差异, 与 $14 000 Lux$ 实验组的生长速度无显著性差异. 小球藻在不同光照强度下的干重均有显著性差异. 由图 3 可知, 小球藻适宜生长的光照强度范围为 $10 000 \sim 14 000 Lux$, 当光照强度为 $12 000 Lux$ 时小球藻在污水中生长效果最好, 培养效率最佳.

光照强度是藻类进行光合作用的重要能源, 能够影响藻类叶绿素 a 的合成^[21] 以及藻类酶的活性^[18]. 藻类生长所需的光照强度有一定的饱和点. 光强在光饱和点以下时, 藻的光合作用随着光照强度的增加而加强, 促进藻类的生长^[22]; 超过光饱和点时, 藻的光合速率不再增加, 甚至减弱、停止^[17].

4) 光照时间对小球藻的生长速度及干重的影响结果

在污水稀释 2 倍, 环境温度为 $30 ^\circ C$, 光照强度为 $12 000 Lux$ 的条件下, 研究光照时间分别为 8、12、16、20、24 h 时对小球藻生长速度和干重的影响, 设 3 组平行实验, 结果如图 4 所示.

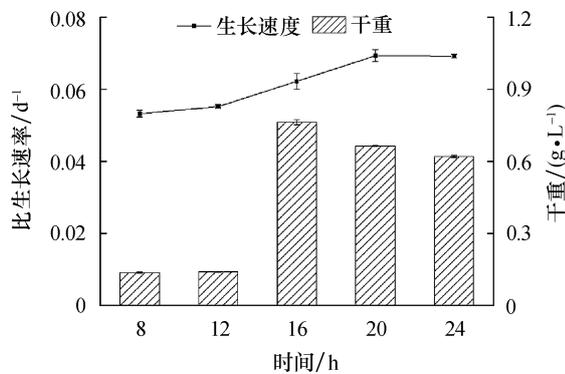


图 4 不同光照时间下小球藻的比生长速率和干重

Fig.4 Specific growth rate and dry weight of Chlorella at different illumination times

从图 4 可以看出, 光照时间在 $8 \sim 20 h$ 时, 小球藻的生长速度随光照时间不断加长而增大. 光照时间在 $20 \sim 24 h$ 时, 随着光照时间的增加, 小球藻的生长速度缓慢减少. 当光照时间为 $20 h$ 时, 小球藻的比生长速率 μ 最大为 $0.069 3 d^{-1}$. 统计分析表明, 光照时间为 $20 h$ 的生长速度与 8 、 12 、 $16 h$ 的生长速度有显著性差异, 与光照时间为 $24 h$ 的无显著性差异. 当光照时间在 $8 \sim 16 h$ 时, 小球藻的干重随光照时间的加长而增加; 当光照时间在 $16 \sim 24 h$ 时, 随着光照时间的加长, 小球藻的干重逐渐降低. 当光照时间为 $16 h$ 时, 小球藻的干重 DW 最大为

$0.763 3 g \cdot L^{-1}$. 统计分析表明, 光照时间为 $8 h$ 的干重与 16 、 20 、 $24 h$ 的干重有显著性差异, 与光照时间 $12 h$ 的干重无显著性差异. 由图 4 可知, 当光照时间为 16 、 20 、 $24 h$ 时小球藻在污水环境中生长较好, 其中光照时间为 $20 h$ 时小球藻的生长速度最快, 培养效果最佳.

光照时间能够保证微藻光合作用产物的形成和体内物质代谢的正常运行. 在培养系统中适当延长光照时间可以补偿光照强度的不足^[23]. 在一定的光温条件下, 微藻生长速度与光照时间成正比, 而超过饱和光照期时生长速度不再增加, 反而受到抑制, 甚至下降^[10-11, 17].

2.2 正交实验下环境因子组合对污水培养小球藻的影响结果

仅考虑单种环境因子对小球藻生长的影响或将单因素实验研究结果简单的叠加以获得培养小球藻的最优培养条件时, 其实验结果可能与实际状态差别很大^[23]. 有必要将初始污水浓度、环境温度、光照强度和光照时间组合在一起, 通过正交实验探索生活污水培养小球藻的最优环境因子组合.

1) 正交实验结果

结合上述单因素实验结果, 利用适宜小球藻生长的环境因子水平(初始污水浓度: 稀释 2、4、6 倍; 环境温度: 25 、 30 、 $35 ^\circ C$; 光照强度: $10 000$ 、 $12 000$ 、 $14 000 Lux$; 光照时间: 16 、 20 、 $24 h$) 设计正交实验. 正交实验 $L_9(3^3)$ 结果见表 1 所列.

从表 1 可以看出, 污水浓度的极差值 R 最大为

表 1 正交实验 $L_9(3^3)$ 结果

Tab.1 Results of Orthogonal Experiment $L_9(3^3)$

| 序号 | 因素水平 | | | | 结果 |
|-------|-------------|-----------------------|------------------|----------------|------------------------|
| | A 初始污水浓度 | B 环境温度/ $^\circ C$ | C 光照强度/ Lux | D 光照时间/ h | 比生长速率 μ / d^{-1} |
| 1 | 稀释 2 | 25 | 10 000 | 16 | 0.103 4 |
| 2 | 稀释 4 | 25 | 12 000 | 20 | 0.080 3 |
| 3 | 稀释 6 | 25 | 14 000 | 24 | 0.070 3 |
| 4 | 稀释 6 | 30 | 10 000 | 20 | 0.085 8 |
| 5 | 稀释 2 | 30 | 12 000 | 24 | 0.088 4 |
| 6 | 稀释 4 | 30 | 14 000 | 16 | 0.087 1 |
| 7 | 稀释 4 | 35 | 10 000 | 24 | 0.073 4 |
| 8 | 稀释 6 | 35 | 12 000 | 16 | 0.079 1 |
| 9 | 稀释 2 | 35 | 14 000 | 20 | 0.084 9 |
| k_1 | 0.092 2 | 0.084 6 | 0.087 5 | 0.089 9 | |
| k_2 | 0.080 3 | 0.087 1 | 0.082 6 | 0.083 7 | |
| k_3 | 0.078 4 | 0.079 1 | 0.080 8 | 0.077 4 | |
| R | 0.013 8 | 0.008 0 | 0.006 7 | 0.012 5 | |

注: k_1 、 k_2 、 k_3 分别表示不同水平下小球藻的比生长速率的平均值.

0.013 8,光照时间的极差值 R 为 0.012 5,环境温度和光照强度的极差值 R 相对较小,分别为 0.008 0、0.006 7.表明生活污水培养小球藻过程中污水浓度是影响小球藻生长的主控环境因子,光照时间为次要环境因子.环境因子对小球藻生长的影响顺序:污水浓度>光照时间>环境温度>光照强度,说明各环境因子对小球藻的生长影响程度存在一定差异.由表 1 可知,生活污水培养小球藻的最优环境因子组合为 $A_1D_1B_2C_1$,即污水浓度稀释 2 倍,环境温度为 $30\text{ }^\circ\text{C}$,光照强度为 $10\ 000\ \text{Lux}$,光照时间为 $16\ \text{h}$.该结果与单因素实验最佳因子水平组合有差异,生活污水培养小球藻的最优环境因子并非各环境因子最佳水平的简单叠加,而是受到环境因子间的交互、耦合作用.

2) 对比实验

通过正交实验得到了生活污水高效培养小球藻的最优环境因子组合,为验证该结果是否合理,将正交实验的最优环境因子组合、单因素实验的最佳因子水平组合(初始污水浓度为将原污水稀释 2 倍,环境温度为 $30\text{ }^\circ\text{C}$,光照强度为 $12\ 000\ \text{Lux}$ 、光照时间为 $20\ \text{h}$)和自然环境条件进行对比实验.

取生活污水水样,在上述确定的三种环境条件下培养小球藻并监测每天藻种的 OD 值($680\ \text{nm}$),设置 3 个平行样及空白平行,实验结果如图 5 所示.

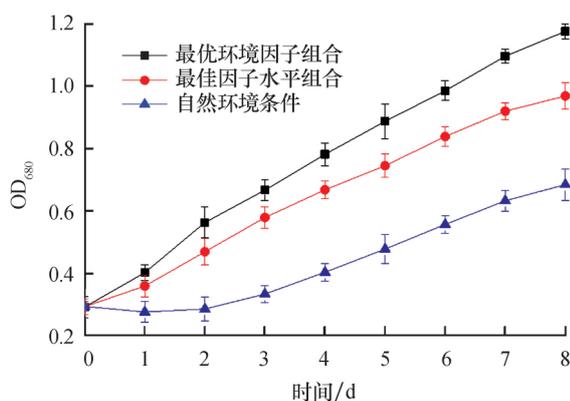


图 5 对比试验结果

Fig.5 Results for contrast tests

从图 5 可以看出,小球藻在空白实验组中前两天出现适应期,几乎没有生长,第 3 天后缓慢增长.在单因素方法最佳组合和正交最优组合实验组中小球藻均没有出现适应期,直接呈爆发式增长,但是正交实验的 OD 值增长量显著的高于单因素实验组合.结果表明,正交实验获得的最优环境因子组合对小球藻生长的促进效果更加显著,进一步验证了实验结果的可靠性.

3 结论

基于生活污水培养小球藻实验,通过单因素实验方法研究环境因子(初始污水浓度、环境温度、光照强度和光照时间)对小球藻生长速度和干重的影响,结果表明:初始污水浓度、环境温度、光照强度和光照时间对污水培养小球藻具有显著影响.在单因素条件下,小球藻生长的最佳初始污水浓度为将原污水稀释 2 倍,环境温度为 $30\text{ }^\circ\text{C}$,光照强度为 $12\ 000\ \text{Lux}$,光照时间为 $20\ \text{h}$.通过正交实验和验证实验表明:生活污水培养小球藻的最优环境因子组合并非单因素实验研究结果的简单叠加,而是受到环境因子间的交互耦合作用.污水培养小球藻的主控环境因子是初始污水浓度和光照时间,其最优环境因子组合为将原污水稀释 2 倍,环境温度为 $30\text{ }^\circ\text{C}$,光照强度为 $10\ 000\ \text{Lux}$,光照时间达 $16\ \text{h}$,该环境因子组合下小球藻的生长速度较快,培养效率较高.

参考文献:

- [1] CHI Z Y, ZHENG Y B, JIANG A P, *et al.* Lipid production by culturing oleaginous yeast and algae with food waste and municipal wastewater in an integrated process [J]. *Appl Biochem Biotechnol*, 2011, 165(2): 442-453.
- [2] DEMIRBAS M F. Biofuels from algae for sustainable development [J]. *Appl Energy*, 2011, 88(10): 3473-3480.
- [3] 胡洪营, 李鑫, 杨佳. 基于微藻细胞培养的水质深度净化与高价值物质生产耦合技术 [J]. *生态环境学报*, 2009, 18(3): 1122-1127.
- [4] 钟成华, 周晓琴, 苏翔, 等. 利用市政污水培养产油微藻的研究 [J]. *安全与环境学报*, 2014, 14(6): 157-160.
- [5] SHAHAT A A, COS P, DE BRUYNE T, *et al.* Antiviral and antioxidant activity of flavonoids and proanthocyanidins from *Crataegus sinaica* [J]. *Planta Med*, 2002, 68(6): 539-541.
- [6] GARCIA J, GREEN B F, LUNDQUIST T, *et al.* Long term diurnal variations in contaminant removal in high rate ponds treating urban wastewater [J]. *Bioresour Technol*, 2006, 97(14): 1709-1715.
- [7] CRAGGS R J, DAVIES-COLLEY R J, TANNER C C, *et al.* Advanced pond system: performance with high rate ponds of different depths and areas [J]. *Water Science and Technology*, 2003, 48(2): 259-267.
- [8] El H F, El H B. Anaerobic reactor/high rate pond combined technology for sewage treatment in the mediterranean area [J]. *Water Science and Technology*, 2005, 51(12): 125-132.
- [9] HU B, ZHOU W G, MIN M, *et al.* Development of an effective acidogenically digested swine manure-based algal system for improved wastewater treatment and biofuel and feed production [J]. *Applied Energy*, 2013, 107(3): 255-263.
- [10] 张桂艳, 温小斌, 梁芳, 等. 重要理化因子对小球藻生长和油

- 脂产量的影响 [J]. 生态学报, 2011, 31(8): 2076-2085.
- [11] 卢碧林, 祁亮, 李明习. 光温培养条件对小球藻 *Chlorella* sp. 生长及产物的影响 [J]. 可再生能源, 2014, 32(10): 1527-1533.
- [12] JOHN B. The cyanobacteria isolation purification and identification [J]. Prokaryotes, 2006(4): 1053-1073.
- [13] 韩松芳, 金文标, 涂仁杰, 等. 基于城市污水资源化的微藻筛选与污水预处理 [J]. 环境科学, 2017, 38(8): 3347-3353.
- [14] CAI T, GE X, PARK S Y, *et al.* Comparison of *Synechocystis* sp. PCC6803 and *Nannochloropsis salina* for lipid production using artificial seawater and nutrients from anaerobic digestion effluent [J]. Bioresource Technology, 2013, 144(5): 255-260.
- [15] PARK J, JIN H F, LIM B R, *et al.* Ammonia removal from anaerobic digestion effluent of livestock waste using green alga *Scenedesmus* sp. [J]. Bioresour Technology, 2010, 101(22): 8649-8657.
- [16] 邓光, 李夜光, 胡鸿钧, 等. 温度、光照和 pH 值对锥状斯氏藻和塔玛亚力山大藻光合作用的影响及光暗周期对其生长速率和生物量的影响 [J]. 武汉植物学研究, 2004, 22(2): 129-135.
- [17] 欧阳峥嵘, 温小斌, 耿亚红, 等. 光照强度、温度、pH、盐度对小球藻 (*Chlorella*) 光合作用的影响 [J]. 武汉植物学研究, 2010, 28(1): 49-55.
- [18] GU B H, ALEXANDER V. Seasonal variations in dissolved inorganic nitrogen utilization in a subarctic Alaskan lake [J]. Arch Hydrobiol, 1993, 126(3): 273-288.
- [19] 王志红, 崔福义, 安全. 水温与营养值对水库藻华态势的影响 [J]. 生态环境, 2005(1): 10-15.
- [20] UGWU C U, AOYAG H, UCHIYAMA H. Influence of irradiance, dissolved oxygen concentration and temperature on the growth of *Chlorella sorokiniana* [J]. Photosynthetica, 2007, 45(2): 309-311.
- [21] 杨桂娟, 栾忠奇, 周笑辉. 温度对小球藻生长量和溶氧量影响研究 [J]. 农机化研究, 2009, 31(9): 157-158.
- [22] 吕福荣, 杨海波, 李英敏, 等. 自养条件下小球藻净化氮磷能力的研究 [J]. 生物技术, 2003(6): 46-47.
- [23] 杨佩昀, 徐婷婷, 高伟. 温度、光照和磷质量浓度对小环藻、大型溇和金鱼藻共培养的影响 [J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2016, 44(1): 110-116.