

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2016.03.008

基于斜生栅藻培养的城市生活废水资源化利用研究

赵昕宇,廖利民,成杰,张凯凯,季祥,巩东辉,蔡禄
(内蒙古科技大学生命科学与技术学院,内蒙古 包头 014010)

摘要:为降低微藻培养成本,实现城市生活废水的资源化利用,研究了补加不同质量浓度的 NaNO_3 、 $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 Na_2CO_3 营养盐情形下,斜生栅藻 (*Scenedesmus obliquas*) 的生长和油脂积累特性。结果表明:城市生活废水中自身含有的磷、碳基本满足微藻正常的生长和油脂代谢,同时在低氮和高铁环境下更有利于微藻油脂的积累。此外,在补加 NaNO_3 质量浓度 2.25 g/L、 $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 质量浓度 40 mg/L、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 质量浓度 56.25 mg/L、 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 质量浓度 9 mg/L、 Na_2CO_3 质量浓度 15 mg/L 的条件下,斜生栅藻生长状况良好,生物量可达 3.04 g/L,是废水原液条件下的 2.8 倍。利用城市生活废水来培养富油的微藻,可以实现废水的资源化利用与微藻的低成本培养,对工业化生产具有重要意义。

关键词:城市生活废水;斜生栅藻;生物量;油脂积累;培养成本

中图分类号:X703 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2016)03-0044-06

Resource utilization of urban sewage water based on cultivation of *Scenedesmus obliquas*

ZHAO Xinyu, LIAO Limin, CHENG Jie, ZHANG Kaikai, JI Xiang, GONG Donghui, CAI Lu
(School of Life Science and Technology, Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: Characteristics of growth and lipid accumulation of *Scenedesmus obliquas* were investigated under the condition of adding different concentrations of NaNO_3 , $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, and Na_2CO_3 in urban sewage water for reducing the cost of microalgae cultivation and resource utilization of urban sewage water. Results show that phosphorus and carbon in urban sewage water can meet the needs of nature growth and lipid metabolism of microalgae and low nitrogen and high Fe^{3+} concentrations are conducive to the accumulation of lipid. In addition, under the condition of adding NaNO_3 of 2.25 g/L, $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ of 40 mg/L, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ of 56.25 mg/L, $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ of 9 mg/L, and Na_2CO_3 of 15 mg/L in urban sewage water, *Scenedesmus obliquas* grows well and the biomass is 3.04 g/L, which is 2.8 times of the biomass under the condition of original wastewater. Using urban sewage water in the cultivation of microalgae can achieve the purposes of resource utilization of wastewater and lowcost cultivation of microalgae, which is of great significance for industrial production.

Key words: urban sewage water; *Scenedesmus obliquas*; biomass; lipid accumulation; cost of cultivation

能源与水资源危机是当今世界发展所面临的两大问题^[1-2]。为了满足对能源的需求,亟需开发可再生能源,而废水再利用是解决水资源危机的重要途径之一。微藻是自然界分布广泛、繁殖迅速、光合效率高的一类自养型微生物,其中的富油微藻可作为生物柴油的原料^[2],微藻生物柴油发展所面临的最

基金项目:内蒙古自然科学基金项目(2015MS0335);内蒙古教育厅自然科学重点(NJZZ14162);包头市应用研发资金科技计划项目(2015Z2010-3);内蒙古自治区研究生科研创新项目(S20151012709)

作者简介:赵昕宇(1991—),女,硕士研究生,研究方向为微藻生物质能。E-mail: 429675908@qq.com

通信作者:蔡禄,教授。E-mail: nmcailu@163.com

大瓶颈是生产成本低,为了降低微藻的培养成本,利用废水及廉价的营养盐是关键。微藻生长过程中需要消耗大量的淡水资源和营养盐,城市生活废水因其排放比较集中、排放量大、富含氮磷无机盐等特点,具有为能源微藻培养供应水源的潜力。因此,利用城市生活废水培养微藻,不仅可以使废水资源化利用,还可以有效解决微藻培养的水源问题。

斜生栅藻 (*Scenedesmus obliquas*) 是一种常见的淡水微藻,属绿藻门,绿球藻目,栅藻科,栅藻属。由于具有生长速度快、环境耐受性强、氮磷利用率高等特点而被广泛用于废水培养和废水处理中^[3-5],同时也是迄今已知含油量较高的藻种之一^[6],可作为生产生物柴油的原料^[7]。利用包头市城市生活废水培养富油斜生栅藻,考察废水中补加营养盐对斜生栅藻生长及油脂积累的影响,探究其最佳营养盐条件,以期实现废水资源化利用的同时降低微藻培养成本。

1 材料与方法

1.1 废水来源

实验所用城市生活废水取自包头市北郊水质净化厂二级出水口,部分水质指标见表 1。

表 1 实验用水部分水质指标

pH	$\rho(\text{COD})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{BOD}_5)/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TP})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TN})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
7.12	31.5	5.6	6.46	17.9

1.2 藻种

实验藻种为斜生栅藻,由内蒙古自治区生物质能源化利用重点实验室所筛选、鉴定、保存。

1.3 微藻的培养

实验以 250 mL 三角瓶为反应器,城市生活废水为主体,配制不同质量浓度的废水培养基,装液量 100 mL,以处于对数生长期的斜生栅藻为藻种,接种量 5% (体积分数),放置光照强度 5 000 Lx,光照周期为 $L/D=14/10$ (L 为明期, D 为暗期),温度为 $(25\pm1)^\circ\text{C}$ 的恒温光照培养箱中培养。

1.4 分析方法

a. 微藻生物量的测定。微藻生物量的测定采用浊度比色法^[8]、干重法^[9]。微藻在同一时刻的吸光度值与其细胞干重存在一定的线性关系,该实验藻株关系式为

$$Y = 1.621X \tag{1}$$

式中: Y 为生物量, g/L ; X 为 680 nm 的光吸收值。关系式的相关系数 R^2 为 0.998。

b. 微藻油脂的测定。参照 Bligh-Dyer 法^[10]对微藻细胞进行总脂提取,以重量法测定并计算微藻

油脂含量。

c. 数据分析方法。实验结果数据采用 Excel 2007 及 SPSS Statistics 17.0 软件进行统计分析。

1.5 实验设计

1.5.1 5 种营养盐对斜生栅藻生长的影响

以城市生活废水作为培养液,分别研究了 NaNO_3 、 $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 Na_2CO_3 、 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 5 种营养盐对斜生栅藻生长以及油脂积累的影响。在相同体积的城市生活废水中,分别加入上述不同质量浓度的营养盐,考察在不同质量浓度的营养盐条件下斜生栅藻的生长情况。各实验组加入的营养盐质量浓度情况见表 2。

表 2 各实验组加入营养盐情况

实验组	$\rho(\text{NaNO}_3)/(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{Na}_2\text{CO}_3)/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
1	0	0	0	0	0
2	0.75	20	18.75	3	10
3	1.50	40	37.50	6	20
4	2.25	60	56.25	9	30
5	3.00	80	75.00	12	40
6	4.50	120	93.75	18	60
7			112.50		

1.5.2 5 种营养盐对斜生栅藻生长和油脂积累的影响

参照正交试验法^[11]选用 $\text{L18}(3^7)$ 设计,在单因素实验的基础上进行正交实验,按表 3 中各水平分别加入营养盐。

表 3 5 种营养盐正交水平

水平	$\rho(\text{NaNO}_3)/(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{Na}_2\text{CO}_3)/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
1	1.50	20	37.50	6	5
2	2.25	40	56.25	9	10
3	3.00	60	75.00	12	15

2 结果与分析

2.1 5 种营养盐单因素补加浓度对斜生栅藻生长及油脂积累的影响

城市生活废水中含有的少量营养物质并不足以满足微藻的整个生长周期,因此利用废水作为微藻培养液时,适宜的营养盐补加显得至关重要,而微藻在不同环境中对不同营养盐的需求差异较大。几种主要营养盐的优化对废水培养微藻有着重大的意义。

2.1.1 NaNO_3

氮是微藻体内许多重要有机化合物的组成成分之一,在多方面影响着微藻的生长代谢过程。实验以 NaNO_3 为补加氮源,在废水中加入不同质量浓度的 NaNO_3 ,考察不同质量浓度的 NaNO_3 对斜生栅藻

生长及油脂积累的影响,结果见图 1。

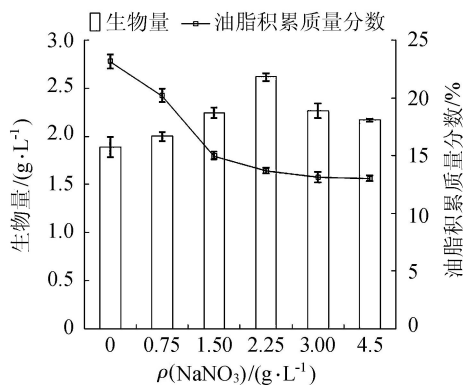


图 1 NaNO_3 补加质量浓度对微藻生长及油脂积累的影响

从图 1 可知,随着 NaNO_3 补加质量浓度的增加,斜生栅藻生物量呈现先上升后下降的趋势,当补加的 NaNO_3 质量浓度为 2.25 g/L 时,斜生栅藻生物量达到最大 2.61 g/L,与其余各组间差异显著 ($P < 0.05$)。实验证明,过高的氮浓度并不能持续促进微藻的生长,反而会对微藻的生长产生抑制作用。因此,在城市生活废水环境下, NaNO_3 的最佳补加质量浓度为 2.25 g/L。

由图 1 中油脂曲线可知,斜生栅藻在低氮质量浓度下油脂含量较高,而低氮条件下会影响微藻生物量的积累并不利于微藻的生长。因此,对于以生物柴油原料为目的的微藻工业化生产来说,需要尽可能高地获得单位时间、单位体积的微藻生物量与油脂产量,对微藻生物量与油脂积累的亚适量研究是必不可少的。此外,实验也印证了诸多有关氮缺乏会导致微藻油脂大量积累的报道^[12-14]。

2.1.2 $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$

实验以 $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 为补加磷源,研究城市生活废水中 $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 补加质量浓度对斜生栅藻生长及油脂积累的影响,结果见图 2。

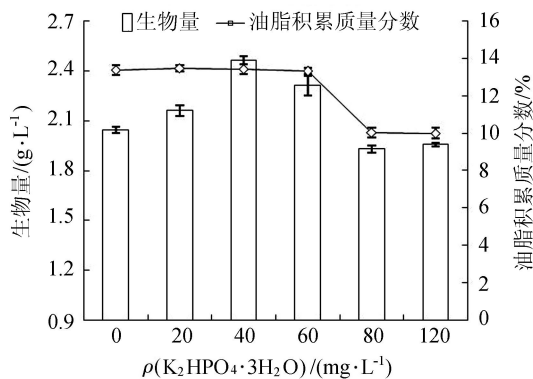


图 2 $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 补加质量浓度对微藻生长及油脂积累的影响

由图 2 可知,在城市生活废水环境下, $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 的补加质量浓度为 40 mg/L 时,斜生栅藻生物

量为最大,同时生物量与其余各组间差异显著 ($P < 0.05$)。因此,以微藻生物量为响应,最佳 $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 质量浓度为 40 mg/L。随着磷盐补加质量浓度的增加,微藻生物量逐渐降低甚至低于对照组。这可能是由于微藻细胞中需要磷元素参与合成的核酸、ATP 等含磷化合物含量较低,对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的需求量相对较小^[15],而过高的 $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 质量浓度会对微藻生长产生抑制。此外,废水中含有一定质量浓度的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ (6.46 mg/L),而 BG-11 培养液中的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 质量浓度为 5.3 mg/L,废水中的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 原始质量浓度能满足微藻的正常生长但并不是最佳质量浓度。

图 2 中油脂曲线表明,在城市生活废水环境下, $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 补加质量浓度对斜生栅藻油脂积累影响不明显,而高质量浓度的 $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 反而会影响其油脂的积累。这可能是由于高质量浓度 $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 环境下,培养液中的氮磷比失调所致^[15]。

2.1.3 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$

镁是叶绿素的组成成分,在叶绿素合成和光合作用中起重要作用^[16],镁还参与生物体内的氮代谢和活性氧代谢。实验选取 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 提供镁元素,研究废水中补加不同浓度的 Mg^{2+} 对斜生栅藻生长和油脂积累的影响,实验结果如图 3 所示。

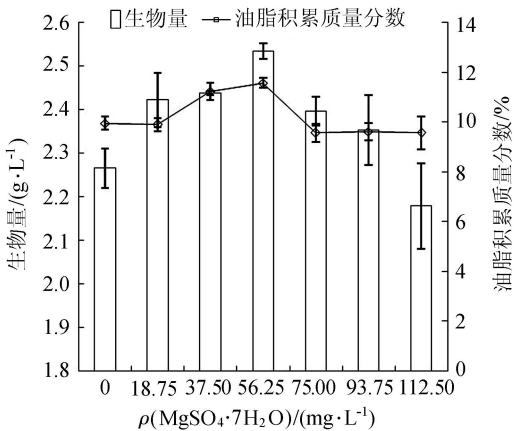


图 3 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 补加质量浓度对微藻生长及油脂积累的影响

由图 3 可知,随着 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 补加质量浓度的增加,微藻生物量呈现出先上升后下降的趋势。当 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 补加质量浓度为 56.25 mg/L 时,微藻生物量最大为 2.53 g/L,同其余各组间差异显著 ($P < 0.05$),油脂含量也处于各组间最高。总体来说,适宜的 Mg^{2+} 浓度能够很好地促进斜生栅藻生物量和油脂的积累。因此, Mg^{2+} 适宜的补加质量浓度为 56.25 mg/L。

2.1.4 FeCl₃ · 6H₂O

铁在微藻体内以各种形式与蛋白质结合,作为重要的电子传递体或催化剂,参与微藻细胞内许多生命活动。实验以 FeCl₃ · 6H₂O 为补加铁盐,考察了废水中补加不同浓度的 Fe³⁺对斜生栅藻生长和油脂积累的影响,结果如图 4 所示。

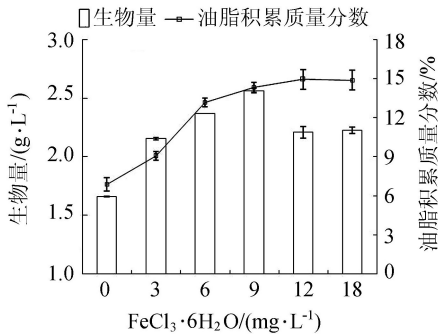


图 4 FeCl₃ · 6H₂O 补加质量浓度对微藻生长及油脂积累的影响

由图 4 可知,Fe³⁺对斜生栅藻生长和油脂积累均有显著影响。其中在未补加 Fe³⁺(对照组)的培养液中,微藻生物量及油脂含量均为最低,这可能是因为培养液中缺铁导致微藻细胞中光合作用相关酶和电子传递受阻,影响微藻的正常生长和代谢。而 FeCl₃ · 6H₂O 质量浓度为 9 mg/L 时,微藻生物量最大,可达 2.57 g/L,持续增加 Fe³⁺浓度时微藻生物量开始降低,表现出高浓度抑制的现象。此外,油脂曲线表明,适宜的高浓度 Fe³⁺可以在一定程度上促进微藻油脂的积累,这与相关报道的高铁环境能够促进微藻油脂积累相符^[17-18]。综上,在废水中 FeCl₃ · 6H₂O 最佳补加质量浓度为 9 mg/L。

2.1.5 Na₂CO₃

碳元素含量占微藻干细胞的 40% ~ 50%,是细胞生长的主要元素之一。微藻生长所需的碳源可分为无机碳源和有机碳源,影响藻细胞生长和脂类、糖类物质的积累。实验以 Na₂CO₃ 为碳源,考察了废水中补加不同质量浓度的 Na₂CO₃ 对斜生栅藻生长和油脂积累的影响,结果如图 5 所示。

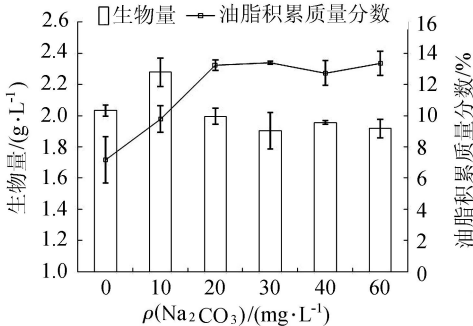


图 5 Na₂CO₃ 补加质量浓度对微藻生长及油脂积累的影响

由图 5 可知,未补加碳源(对照组)微藻生物量能达到 2.03 g/L,当补加 Na₂CO₃ 质量浓度为 10 mg/L 时,微藻生物量最高,可达 2.28 g/L,与其余各组间差异显著($P<0.05$)。BG-11 培养液中 Na₂CO₃ 的质量浓度为 20 mg/L,说明废水中含有一定浓度的碳源可供微藻生长代谢,补加少量 Na₂CO₃ 时,微藻处于最佳生长状态。此外,在不同碳浓度条件下对微藻油脂含量测定可知,在低浓度碳源下,微藻油脂含量较低,随着 Na₂CO₃ 质量浓度增加,其油脂的积累在 20 mg/L 时达到最高,之后高质量浓度的 Na₂CO₃ 对微藻油脂积累影响不明显。而高碳浓度对微藻生长的抑制现象可能是由于培养液中碳磷比变化所致,合适的碳磷比可以很好地促进微藻生物量和油脂的积累^[19],这也是当前微藻培养优化的研究热点之一。

2.2 营养盐正交试验结果

表 4 为以生物量为响应的 L18(3⁷) 营养盐正交实验的结果,表 5 为正交实验结果的方差分析。

表 4 以生物量为响应的 L18(3⁷) 正交实验结果

实验方案	NaNO ₃	K ₂ HPO ₄ · 3H ₂ O	MgSO ₄ · 7H ₂ O	FeCl ₃ · 6H ₂ O	Na ₂ CO ₃	实验结果
1	1	1	1	1	1	1.405
2	1	2	2	2	2	1.551
3	1	3	3	3	3	1.411
4	2	1	1	2	2	1.553
5	2	2	2	3	3	1.584
6	2	3	3	1	1	1.488
7	3	1	2	1	3	1.465
8	3	2	3	2	1	1.526
9	3	3	1	3	2	1.405
10	1	1	3	3	2	1.423
11	1	2	1	1	3	1.457
12	1	3	2	2	1	1.469
13	2	1	2	3	1	1.470
14	2	2	3	1	2	1.521
15	2	3	1	2	3	1.552
16	3	1	3	2	3	1.487
17	3	2	1	3	1	1.464
18	3	3	2	1	2	1.471
均值 1	1.453	1.467	1.473	1.468	1.470	
均值 2	1.528	1.517	1.502	1.523	1.487	
均值 3	1.470	1.466	1.476	1.459	1.493	
极差 R	0.075	0.051	0.029	0.064	0.023	

表 5 正交实验结果方差分析

因素	平方和	自由度	F 比	显著性
NaNO ₃	0.019	2	19	$P<0.05^*$
K ₂ HPO ₄ · 3H ₂ O	0.010	2	10	$P<0.05^*$
MgSO ₄ · 7H ₂ O	0.003	2	3	$P>0.05$
FeCl ₃ · 6H ₂ O	0.014	2	14	$P<0.05^*$
Na ₂ CO ₃	0.002	2	2	$P>0.05$

注: * 表示具有显著影响。

由表 4 中 5 个因素的极差 R 值可知,在城市生活废水中 5 种营养盐对斜生栅藻生物量积累的影响

程度大小: $\text{NaNO}_3 > \text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} > \text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O} > \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{CO}_3$ 。由表 5 方差分析可知, NaNO_3 、 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 质量浓度水平对斜生栅藻生长影响显著, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 和 Na_2CO_3 对其影响不显著。此外,由 5 个因素的均值可知,营养盐的最优水平组合为: NaNO_3 的质量浓度为 2.25 g/L, $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 质量浓度为 40 mg/L, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 质量浓度为 56.25 mg/L, $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 质量浓度为 9 mg/L, Na_2CO_3 质量浓度为 15 mg/L。在正交实验中,5 种营养盐中 Na_2CO_3 的最适质量浓度较单因素实验中的生物量最高的 Na_2CO_3 质量浓度要大,这可能是由于各因素间的交互作用所致。以正交实验分析所得的最适优化组合培养基对斜生栅藻进行培养,可以获得最高的生物量积累。

2.3 优化前后的生长对比

为了进一步验证在城市生活废水中,补加营养盐最佳浓度条件下斜生栅藻的生长状况,将经正交试验所得的营养盐条件与 BG-11 基础培养基条件以及废水原液分别进行微藻整个生长周期的培养,实验结果如图 6 所示。

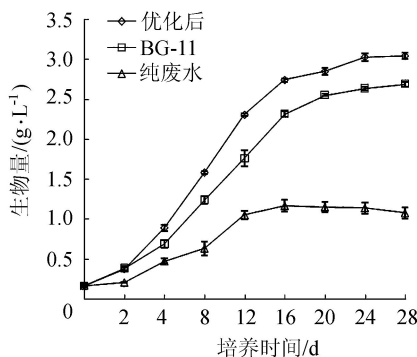


图 6 斜生栅藻在不同培养条件的生长情况

由图 6 可知,斜生栅藻均能在 3 种不同培养条件下生长,各组间生物量差异显著 ($P < 0.05$)。其中优化后的废水培养基与 BG-11 培养基生长趋势相当。在未经处理的废水原液中,斜生栅藻生物量最大仅为 1.08 g/L,而优化后的废水培养体系下,斜生栅藻生长趋势明显好于其余两组,且稳定期收获的生物量最大,可达 3.04 g/L,是废水原液条件下的 2.8 倍。因此,在城市生活废水环境中,适当的补加营养盐可以很好地促进斜生栅藻的生长,最大化利用废水资源,降低微藻培养成本,对工业化生产具有重要意义。

3 结论

a. 在城市生活废水中补加 5 种营养盐,以生物量为响应最佳补加质量浓度为 NaNO_3 2.25 g/L, $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 40 mg/L, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 56.25 mg/L,

$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 9 mg/L, Na_2CO_3 15 mg/L,在此条件下斜生栅藻长势良好,生物量可达 3.04 g/L,远高于废水原液条件。

b. 城市生活废水中自身含有的磷、碳基本满足微藻正常的生长和油脂代谢,适量添加可以更好地促进其生长,在缺氮或低氮条件下更有利于微藻油脂的积累,较高浓度的 Fe^{3+} 也可以在一定程度上促进微藻油脂的积累。

利用城市生活废水来培养富油的微藻,可以实现废水的资源化利用与微藻的低成本培养。后续对藻类生物质的多用途开发和利用可以充分实现其经济效益,具有广阔的工业化应用前景。

参考文献:

[1] PALLIGARNAI T, VASUDEVAN M B. Biodiesel production; current state of the art and challenges [J]. Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology, 2008, 35 (5) : 421-430.

[2] 傅晓娜,姚刚. 微藻污水处理与生物质耦合技术综述 [J]. 绿色科技, 2011, 11 (11) : 100-104. (FU Xiaona, YAO Gang. The review of microalgae coupling technology of waste water treatment with biomass energy [J]. Journal of Green Science and Technology, 2011, 11 (11) : 100-104. (in Chinese))

[3] ZHANG E D, WANG B, WANG Q, et al. Ammonia-nitrogen and orthophosphate removal by immobilized *Scenedesmus* sp. isolated from municipal wastewater for potential use in tertiary treatment [J]. Bioresource Technology, 2008, 99 (9) : 3787-3793.

[4] ALVA M S D, LUNA-PABELLO V M, CADENA E, et al. Green microalga *Scenedesmus acutus* grown on municipal wastewater to couple nutrient removal with lipid accumulation for biodiesel production [J]. Bioresource Technology, 2013, 146 : 744-748.

[5] LI X, HU H Y, YANG J. Lipid accumulation and nutrient removal properties of a newly isolated freshwater microalga, *Scenedesmus* sp. LX1, growing in secondary effluent [J]. New Biotechnology, 2010, 27 (1) : 59-63.

[6] 岳龙,付秋果,张素芬,等. 栅藻的优化培养基脂质提取方法研究 [J]. 核农学报, 2012, 26 (6) : 894-899. (YUE Long, FU Qiuguo, ZHANG Sufen, et al. Optimization of culture conditions and lipid extraction methods of *Scenedesmus* sp. [J]. Journal of Nuclear Agricultural Science, 2012, 26 (6) : 894-899. (in Chinese))

[7] SINGH A, NIGAM P S, MURPHY J D. Renewable fuels from algae: an answer to debatable land based fuels [J]. Bioresource Technology, 2011, 102 (1) : 10-16.

[8] MANDOTRA S K, KUMAR P, SUSEELA M R, et al. Fresh water green microalga *Scenedesmus abundans*: a potential

feedstock for high quality biodiesel production [J]. Bioresource Technology,2014,156:42-47.

[9] HO S H,CHEN C Y,YEH K L,et al. Characterization of photosynthetic carbon dioxide fixation ability of indigenous *Scenedesmus obliquus* isolates [J]. Biochemical Engineering,2010,53(1):57-62.

[10] BLIGH G,DYER W J. A rapid method lipid extraction and purification [J]. Canadian Journal of Biochemistry and Physiology,1959,37(8):911-923.

[11] 倪海尔. 生物试验设计与分析 [M]. 北京:科学出版社,2013:156-160.

[12] HANSSON L,DOSTALEK M. Influence of cultivation conditions on lipid production by *Cryptococcus albidus* [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1986, 24 (1):12-18.

[13] ABDELAZIZ A E M,LEITE G B,BELHAJ M A,et al. Screening microalgae native to Quebec for wastewater treatment and biodiesel production [J]. Bioresource Technology,2014,157:140-148.

[14] LIN Q,LIN J D. Effects of nitrogen source and

(上接第 13 页)

参考文献:

[1] 苏耀明,苏小四. 地下水水质评价的现状与展望 [J]. 水资源保护,2007,23(2):4-9. (SU Yaoming, SU Xiaosi. Present situation and prospecting of groundwater quality evaluation [J]. Water Resources Protection, 2007, 23 (2):4-9. (in Chinese))

[2] 厉艳君,杨木壮. 地下水水质评价方法综述 [J]. 地下水,2007,29(5):19-24. (LI Yanjun, YANG Muzhuang. A review of groundwater quality evaluation methods [J]. Groundwater,2007,29(5):19-24. (in Chinese))

[3] 倪深海,白玉慧. BP 神经网络模型在地下水水质评价中的应用 [J]. 系统工程理论与实践,2000(8):124-127. (NI Shenhai, BAI Yuhui. Application of BP neural network model in groundwater quality evaluation [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2000 (8):124-127. (in Chinese))

[4] 白玉娟,殷国栋. 地下水水质评价方法与地下水研究进展 [J]. 水资源与水工程学报,2010,21(3):115-123. (BAI Yujuan, YIN Guodong. Evaluation method and research progress for groundwater quality [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering,2010,21(3):115-123. (in Chinese))

[5] 陈宇,束龙仓. 基于五元联系数的济宁市漏斗区承压水水质现状评价 [J]. 水电能源科学,2010,28(8):27-29. (CHEN Yu, SHU Longcang. Confined water quality evaluation for cone of depression in Jining City based on

concentration on biomass and oil production of a *Scenedesmus rubescens* like microalga [J]. Bioresource Technology,2011,102(2):1615-1621.

[15] 鲍亦璐. 微藻培养过程的营养优化与控制研究 [D]. 广州:华南理工大学,2012:4-9.

[16] HUBER S C,MAURY W. Effects of magnesium on intact chloroplasts [J]. Plant Physiology,1980,65(2):350-354.

[17] LIN Q, GU N, LIN J D. Effect of ferric ion on nitrogen consumption, biomass and oil accumulation of a *Scenedesmus rubescens*-like microalga [J]. Bioresource Technology,2012,112:242-247.

[18] LIU Z Y,WANG G C,ZHOU B C. Effect of iron on growth and lipid accumulation in *Chlorella vulgaris* [J]. Bioresource Technology,2008,99(11):4717-4722.

[19] CHEN F,JOHNS M R. Effect of C/N ratio and aeration on the fatty acid composition of heterotrophic *Chlorella sorokiniana* [J]. Journal of Applied Phycology, 1991, 3 (3):203-209.

(收稿日期:2015 -05 -26 编辑:王 芳)

five-element connection number [J]. Water Resources and Power,2010,28(8):27-29. (in Chinese))

[6] 束龙仓,朱元牲. 地下水资源评价中的不确定性因素分析 [J]. 水文地质工程地质,2000(6):6-8. (SHU Longcang, ZHU Yuansheng. Analysis of the uncertainties in the groundwater resources evaluation [J]. Hydrogeology & Engineering Geology,2000(6):6-8. (in Chinese))

[7] 束龙仓,朱元牲,孙庆义,等. 地下水资源评价结果的可靠性探讨 [J]. 水科学进展,2000,11(1):21-24. (SHU Longcang, ZHU Yuansheng, SUN Qingyi, et al. Reliability analysis of groundwater resources evaluation results [J]. Advances in Water Science, 2000, 11 (1): 21-24. (in Chinese))

[8] 束龙仓,朱元牲,孙庆义,等. 地下水允许开采量确定的风险分析 [J]. 水利学报,2000(3):77-81. (SHU Longcang, ZHU Yuansheng, SUN Qingyi, et al. Risk analysis of groundwater allowable withdrawal evaluation [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2000(3):77-81. (in Chinese))

[9] POETER E P, ANDERSON D. Multi-model ranking and inference in ground water modeling [J]. Ground Water, 2005,43(3):597-605.

[10] JENNIFER A H, JOSEPH G I. Bayesian predictive simultaneous variable and transformation selection in the linear model [J]. Computational Statistics & Data Analysis,1998,28:87-103.

[11] GB/T14848 地下水质量标准 [S].

(收稿日期:2015 -05 -20 编辑:徐 娟)