



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20150145

## 不同水质对杜氏盐藻生长和生理的影响

李 婕, 衣丽霞, 赵 倩, 徐仰仓

(天津市海洋资源与化学重点实验室, 天津科技大学海洋与环境学院, 天津 300457)

**摘 要:** 分析杜氏盐藻 (*Dunaliella salina*) 在不同水质中的生长状况, 确定适合养殖杜氏盐藻的水源. 根据 GB 17378.4—2007 的方法检测天津中心渔港海水、天津北疆电厂冷却水、稀释 10 倍后的青海柴达木盆地察尔汗盐湖原卤水、老卤水及成矿卤水的水质后, 将杜氏盐藻接种于其中, 分析水质对盐藻各生理指标的影响. 结果表明: 除青海柴达木盆地察尔汗盐湖老卤水外, 其余 4 种水样均可以用来培养盐藻. 虽然不同水质对盐藻生长及生理的影响不同, 但综合来看, 利用稀释 10 倍后的成矿卤水培养的杜氏盐藻培养至第 15 天时, 硝酸还原酶活性为  $(4.41 \pm 0.18) \mu\text{g}/(\text{mg}\cdot\text{h})$ , 显著高于用海水培养的杜氏盐藻. 培养至 21 d 时, 叶绿素质量浓度为  $(24.9 \pm 1.0) \text{mg}/\text{L}$ , 藻细胞质量浓度为  $(409.5 \pm 21.1) \text{mg}/\text{L}$ , 与用海水培养的杜氏盐藻间均无显著性差异. 净光合速率为  $(128.6 \pm 3.0) \mu\text{mol}/(\text{mg}\cdot\text{h})$ , 呼吸速率为  $(28.2 \pm 0.9) \mu\text{mol}/(\text{mg}\cdot\text{h})$ . 证明在同样的培养条件下, 利用稀释 10 倍后的成矿卤水培养的杜氏盐藻与用海水培养的杜氏盐藻积累同样多的干物质.

**关键词:** 杜氏盐藻; 水质; 光合速率; 生长

中图分类号: Q949.21<sup>+</sup>2

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2016)04-0030-05

## Effects of Different Water on the Growth and Physiology of *Dunaliella salina*

LI Jie, YI Lixia, ZHAO Qian, XU Yangcang

(Tianjin Key Laboratory of Marine Resources and Chemistry, College of Marine and Environmental Sciences,  
Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

**Abstract:** By analysing the growth parameters of *Dunaliella salina* in different water sources, we found out which kind of water was suitable for culturing *Dunaliella salina*. The basic components of five different kinds of water were determined according to GB 17378.4-2007. They are the seawater from Tianjin Central Fishing Port, the cooling water from Tianjin Beijiang Power Plant and three kinds of brine from Chaerhan Salt Lake of Qinghai Chaidamu Basin which were diluted 10-folds. Those different water was used to culture *Dunaliella salina*, then we analysed their influence on the physical parameters of *Dunaliella salina*. Except the extracted potassium brine, all the other four kinds of water can be used to culture *Dunaliella salina*. Although the effects of different water on the growth and physiology of *Dunaliella salina* were different, after 15 days' culture with the processed brine which had been diluted 10-folds, the nitrate reductase activity was  $(4.41 \pm 0.18) \mu\text{g}/(\text{mg}\cdot\text{h})$ , which was significantly higher than that of the *Dunaliella salina* which was cultured by seawater. After 21 days, the chlorophyll was  $(24.9 \pm 1.0) \text{mg}/\text{L}$ ; the dry weight of the *Dunaliella salina* was  $(409.5 \pm 21.1) \text{mg}/\text{L}$ , which was not significantly higher than that of the *Dunaliella salina* cultured by seawater. The net photosynthetic rate was  $(128.6 \pm 3.0) \mu\text{mol}/(\text{mg}\cdot\text{h})$ , and the respiration rate was  $(28.2 \pm 0.9) \mu\text{mol}/(\text{mg}\cdot\text{h})$ . This shows that under identical conditions, *Dunaliella salina* cultured by processed brine which was diluted 10-folds can accumulate the same amount of dry matter as *Dunaliella salina* cultured by seawater.

**Key words:** *Dunaliella salina*; water quality; photosynthetic rate; growth

收稿日期: 2015-10-09; 修回日期: 2016-01-05

基金项目: 天津市大学生创新创业训练计划资助项目(201510057096); 天津市科技兴海资助项目(KJXH2012-14)

作者简介: 李 婕(1990—), 女, 甘肃兰州人, 硕士研究生; 通信作者: 徐仰仓, 教授, xuyc@tust.edu.cn.

杜氏盐藻 (*Dunaliella salina*) 是一种嗜盐的绿色微藻, 含有丰富的  $\beta$ -胡萝卜素、蛋白质、盐藻多糖, 在食品、医药保健以及化工和养殖业中具有独特经济价值, 是开发功能食品的优质原料<sup>[1-2]</sup>. 近年来, 世界上对天然  $\beta$ -胡萝卜素的需求量不断增大<sup>[3]</sup>. 我国目前养殖杜氏盐藻的区域主要在内蒙古的吉兰泰、天津的塘沽、甘肃的张掖等地. 为了扩大养殖区域, 查明杜氏盐藻能否在除海水外的其他水源中生长是必做的环节. 本文采集了天津塘沽的海水、锅炉冷却用海水及青海察尔汗盐湖的水样, 检测了 3 个区域的 5 种水样的水质, 并研究了杜氏盐藻在 5 种水质中的生长情况和生理情况, 以期为扩大我国杜氏盐藻的养殖区域提供基础数据.

## 1 材料与方法

### 1.1 水样来源及杜氏盐藻培养方法

本实验所用水样分别取自天津中心渔港海水 (1 号)、天津北疆电厂冷却水 (2 号)、青海柴达木盆地察尔汗盐湖原卤水 (3 号)、提钾后老卤水 (4 号) 及成矿卤水 (5 号), 由于 3 种卤水盐度较高, 用盐度计测量时已超过最大量程 100, 故在后期水质测定和盐藻培养时将 3 种卤水均稀释 10 倍.

实验用杜氏盐藻 (*Dunaliella salina*) 购自中国科学院淡水藻种库, 以 Walne 培养基培养<sup>[4]</sup>, 培养液体积为 150 mL, 接种量为 10%, 培养温度为 30 °C, 光照强度为 3 550 lx, 摇床转速为 130 r/min.

### 1.2 水质指标的检测

水质指标包括 pH、盐度、汞、砷、钙、镁、氯、硫酸根、碱度、总氮、总磷, 测定方法参照 GB 17378.4—2007<sup>[5]</sup>的方法.

### 1.3 盐藻生长指标的检测

#### 1.3.1 叶绿素、藻细胞的质量浓度的测定

用紫外分光光度计测定 652 nm 处藻液的吸光度, 根据式 (1) 计算出藻液叶绿素质量浓度 (mg/L)<sup>[6-7]</sup>. 同时取适量藻液离心, 去上清液, 用生理盐水反复洗涤 2~3 次, 烘干至质量恒定, 测定藻细胞的质量浓度.

$$\rho = A_{652} \times 1\ 000/34.5 \quad (1)$$

式中:  $\rho$  为叶绿素质量浓度, mg/L;  $A_{652}$  为 652 nm 处藻液的吸光度; 34.5 为吸收系数.

#### 1.3.2 硝酸还原酶活性的测定

根据陈薇的离体法<sup>[8]</sup>得到含有硝酸还原酶的粗

酶液, 并测定粗酶液中的  $\text{NO}_2^-$  质量浓度, 再采用双缩脲试剂法测定粗酶液中的蛋白质质量浓度. 根据式 (2) 计算得出盐藻硝酸还原酶活性, 单位为  $\mu\text{g}/(\text{mg}\cdot\text{h})$ <sup>[6]</sup>.

$$\text{硝酸还原酶活性} = \frac{(\rho_0 - \rho_{\text{空白}}) \cdot V_t}{\rho_{\text{蛋白}} \cdot t \cdot V_s} \quad (2)$$

式中:  $\rho_0$  和  $\rho_{\text{空白}}$  分别为粗酶液硝酸还原酶的质量浓度、空白管硝酸还原酶的质量浓度,  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ;  $V_t$  和  $V_s$  分别为反应液总体积、测定时取样体积, mL;  $\rho_{\text{蛋白}}$  为粗酶液中蛋白质质量浓度, mg/mL;  $t$  为反应时间, h.

#### 1.3.3 光合作用指标的测定

使用液相氧电极 OxyLab 测定, 使用前先进行饱和氧、零氧的标定. 利用恒温循环水浴系统, 保持小室内温度为 30 °C, 转子转速为 50 r/min, 设置光照强度分别为 0、1.11、2.78、5.56、8.33、11.11、13.89、16.67、19.44、22.22 lx, 每个梯度保持 3 min, 取藻液放入氧电极小室中开始检测, 结束后根据公式 (3) 计算得出藻液的光合速率 ( $P$ ), 单位为  $\mu\text{mol}/(\text{mg}\cdot\text{h})$ .

$$P = vK \times 60/\rho \quad (3)$$

式中:  $v$  为小室内氧气浓度变化速率,  $\text{min}^{-1}$ ;  $K$  为 30 °C 水中的溶氧量 235  $\mu\text{mol}/\text{L}$ ; 60 为换算系数, min/h;  $\rho$  为叶绿素质量浓度, mg/L.

再利用 Matlab 软件拟合光合作用相关参数, 拟合公式为式 (4)<sup>[9-10]</sup>.

$$P = P_m \cdot \tan(\alpha \cdot I/P_m) + R_d \quad (4)$$

式中:  $P_m$  和  $R_d$  分别为盐藻理论上能达到的净光合速率最大值、光照强度为零时的呼吸速率,  $\mu\text{mol}/(\text{mg}\cdot\text{h})$ ;  $\alpha$  为初始斜率;  $I$  为光照强度, lx.

### 1.4 数据处理

采用 SPSS 19.0 进行差异显著性分析, \* 表示与天津中心渔港海水 (1 号) 相比具有显著差异 ( $P < 0.05$ ).

## 2 结果与分析

### 2.1 水质检测

水质检测结果见表 1. 5 种水样均属碱性, 根据 GB 3097—1997<sup>[11]</sup>, 5 种水样在重金属汞、砷质量浓度方面均符合一类海水水质标准. 除 1 号外, 其余 4 种水样盐度均高于世界海水平均盐度 35<sup>[12]</sup>. 以 1 号海水作为参照, 研究发现 2 号冷却水的钙离子质量浓度高于 1 号水样, 3 种卤水的钙离子质量浓度低于 1

号水样,分别为1号水样的152%、4.6%、5.1%、4.2%,但镁离子浓度较高,分别为1号水样的143%、659%、680%、668%。同时水体总硬度(水中钙、镁离子的总质量浓度)也较高,分别是1号水样的158%、423%、437%、429%。氯离子质量浓度分别是1号水样的145%、155%、202%、158%。硫酸根离子质量浓度分别是1号水样的103%、53.7%、6.8%、56.8%。碳酸根离子质量浓度分别是1号水样的431%、1327%、

1973%、1279%,碳酸氢根离子质量浓度分别是1号水样的88.6%、54.1%、59.2%、56.2%。3种卤水的总氮、总磷质量浓度相对较高,其中3号水样的总氮、总磷质量浓度分别是1号水样的132.7%和142.1%,4号水样的总氮、总磷质量浓度分别是1号水样的169.7%和163.2%,5号水样的总氮、总磷质量浓度分别是1号水样的141.8%和131.6%。

表1 水质检测结果

Tab. 1 Testing results of water quality

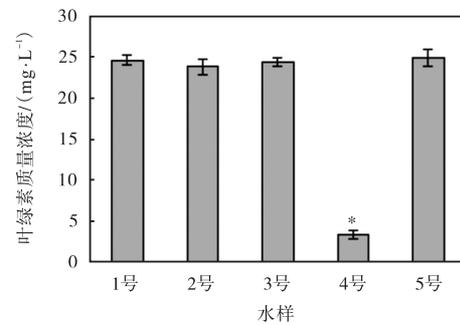
水样	1号	2号	3号	4号	5号
pH	8.88 ± 0.09	9.12 ± 0.08*	9.37 ± 0.08*	9.24 ± 0.07*	9.32 ± 0.09*
盐度	29.0 ± 1.1	42.0 ± 1.0*	45.0 ± 1.2*	59.0 ± 1.2*	45.0 ± 0.9*
汞/(μg·L <sup>-1</sup> )	0.02 ± 0.02	0.05 ± 0.01*	0.05 ± 0.01*	0.03 ± 0.02*	0.05 ± 0.01*
砷/(μg·L <sup>-1</sup> )	4.38 ± 0.07	2.18 ± 0.05*	1.57 ± 0.02*	2.27 ± 0.04*	1.57 ± 0.05*
Ca <sup>2+</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )	378.7 ± 1.8	575.9 ± 12.7*	17.6 ± 0.1*	19.4 ± 0.1*	15.9 ± 0.1*
Mg <sup>2+</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )	672.9 ± 5.6	967.2 ± 6.1*	4 435.9 ± 5.0*	4 574.9 ± 9.8*	4 491.8 ± 5.2*
Cl <sup>-</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )	16 296.4 ± 10.8	23 632.9 ± 10.8*	25 303.3 ± 6.3*	32 939.9 ± 9.6*	25 751.1 ± 10.2*
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )	1 745.5 ± 24.1	1 792.4 ± 25.1*	936.5 ± 6.3*	119.2 ± 2.3*	991.2 ± 9.2*
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )	5.2 ± 0.4	22.4 ± 0.7*	69.0 ± 0.3*	102.6 ± 0.8*	66.5 ± 0.8*
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )	132.6 ± 2.6	117.5 ± 1.1*	71.7 ± 0.8*	78.5 ± 1.3*	74.5 ± 1.2*
总氮/(mg·L <sup>-1</sup> )	16.5 ± 0.09	8.34 ± 0.11*	21.9 ± 1.21*	28.0 ± 0.19*	23.4 ± 1.02*
总磷/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.19 ± 0.02	0.10 ± 0.02*	0.27 ± 0.06*	0.31 ± 0.04*	0.25 ± 0.01*

2.2 不同水质对盐藻叶绿素、藻细胞质量浓度的影响

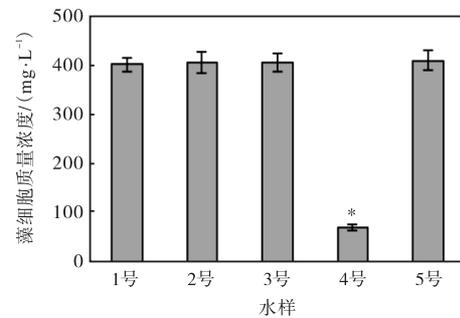
不同水质对盐藻叶绿素和藻细胞质量浓度的影响如图1所示。培养至第21天时,不论从叶绿素质量浓度的角度还是从藻细胞质量浓度的角度分析,4号水样显著低于1号(P<0.05),其余各组与1号间均无显著性差异。

氮、磷是藻类叶绿素进行光合作用所必需的营养物质,高玉荣等<sup>[13]</sup>发现叶绿素质量浓度会随着氮磷比的上升而上升。另外,镁是叶绿素的重要组成部分<sup>[14]</sup>,镁离子质量浓度增大,有助于植物叶绿素的合成。5号水样的氮磷比最高,镁离子质量浓度也最高(除4号外),故叶绿素质量浓度也相对最高。同时适当的氮、磷浓度可促进杜氏盐藻的生长,质量浓度足够时,会合成一系列含氮、含磷的生命物质,促进细胞的生长与代谢过程<sup>[15]</sup>。4号水样为察尔汗盐湖原卤水提钾后的老卤水,虽然其稀释10倍后氮磷质量浓度最高,但生长量最低。有研究表明老卤水含硼量较高约为100 mg/L<sup>[16]</sup>,而当培养液中硼质量浓度大于8 mg/L时不利于盐藻细胞的生长<sup>[17]</sup>。同时4号水样的盐度为59 ± 1.2,约为60,韦芳三等<sup>[18]</sup>发现,当盐度超过60时会抑制盐藻的生物量。由此可推断杜氏盐藻在4号水样中生物量不高的可能原因是较高的

盐度和硼含量。



(a) 叶绿素



(b) 藻细胞

图1 不同水质对盐藻叶绿素、藻细胞质量浓度的影响  
Fig. 1 Chlorophyll content and dry weight of *Dunaliella salina* cultured with different water

### 2.3 不同水质对盐藻硝酸还原酶活性的影响

培养至第 15 天时, 1—5 号各组盐藻硝酸还原酶活性结果如图 2 所示. 除 2 号外, 其余各组均与 1 号间有显著性差异 ( $P < 0.05$ ). 硝酸还原酶是一种底物诱导酶,  $\text{NO}_3^-$  是硝酸还原酶的诱导剂, 硝酸还原酶可将浮游植物所吸收的氧化态氮化合物转化为还原态的氮, 进一步合成氨基酸和蛋白质<sup>[19]</sup>. 因为 3 号、5 号卤水中硝酸盐氮含量高, 当盐藻利用水中的氮进行生物量积累时, 硝酸还原酶活性也相应的提高. 所以, 当盐藻培养至第 15 天时, 3 号、5 号的硝酸还原酶活性相对较高, 故其在生长后期可以更好地吸收水中的氮化合物, 为后期生物量的积累提供保证.

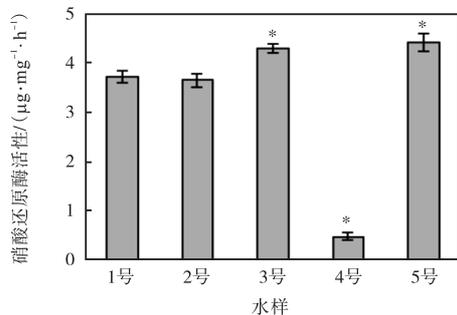


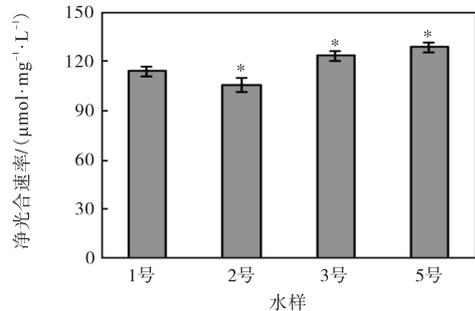
图 2 不同水质对盐藻硝酸还原酶活性的影响

Fig. 2 Nitrate reductase activity of *Dunaliella salina* cultured with different water

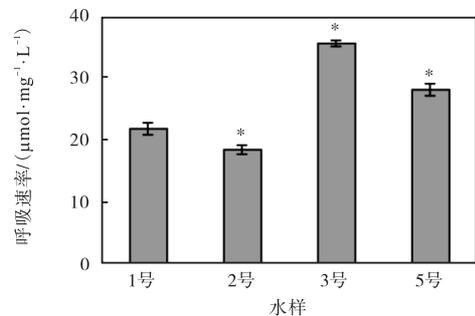
### 2.4 不同水质对盐藻光合作用参数的影响

由于 4 号水样盐藻藻细胞密度较低, 通过氧电极的方法无法检测出其净光合速率, 故在本部分中只讨论不同水质对其余 4 种水样盐藻光合作用的影响. 在不同水质条件下培养至第 15 天时, 1、2、3、5 号水样盐藻的净光合速率结果如图 3(a) 所示, 2 号、3 号、5 号显著高于 1 号 ( $P < 0.05$ ). 因为植物进行光合作用需要  $\text{CO}_2$  作为原料,  $\text{CO}_2$  溶于水后会以  $\text{CO}_3^{2-}$  和  $\text{HCO}_3^-$  的形式存在<sup>[20]</sup>, 而 4 种水样的  $\text{CO}_3^{2-}$  和  $\text{HCO}_3^-$  的总含量分别为  $(137.8 \pm 3.0)$ 、 $(139.9 \pm 1.8)$ 、 $(140.7 \pm 1.1)$ 、 $(141.0 \pm 2.0)$  mg/L, 说明稀释 10 倍后的卤水中仍含有相对较高的  $\text{CO}_3^{2-}$  和  $\text{HCO}_3^-$ , 可为光合作用提供较充足的原料. 1、2、3、5 号水样盐藻的呼吸速率结果如图 3(b) 所示, 2 号、3 号、5 号显著高于 1 号 ( $P < 0.05$ ). 其中 3 号水样盐藻的呼吸速率最高, 为  $(35.7 \pm 0.5)$   $\mu\text{mol}/(\text{mg}\cdot\text{h})$ , 说明杜氏盐藻在 3 号水中的生命活动旺盛. 盐藻的总光合速率结果如图 4 所示, 说明在同样的培养条件下, 5 号水样盐藻的呼吸速率虽然不是最低的, 但就整体来看, 净光合作用的积累量与呼吸作用的消耗量之和为 4 组中最高的, 所

以利用 5 号水样培养杜氏盐藻可以提高其对光的利用率, 进而提高细胞的光合速率, 最终增加藻细胞干物质的积累.



(a) 净光合速率



(b) 呼吸速率

图 3 不同水质对盐藻净光合速率和呼吸速率的影响  
Fig. 3 Net photosynthetic rate and respiration rate of *Dunaliella salina* cultured with different water

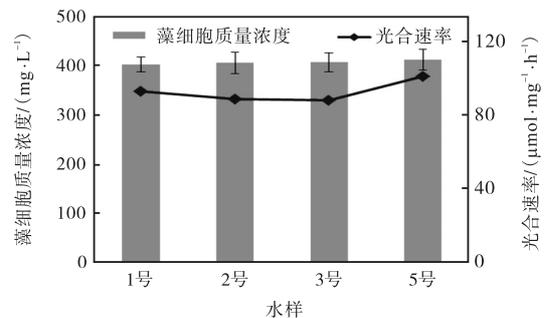


图 4 盐藻藻细胞质量浓度与光合速率之间的关系

Fig. 4 The relationship between dry weight and photosynthetic rate of *Dunaliella salina*

### 2.5 影响杜氏盐藻生长的因素

根据文章上述实验结果得知, 在相同的培养条件下, 利用不同的水源对杜氏盐藻进行培养, 会对盐藻的生长有一定的影响. 其中总氮、总磷及  $\text{Mg}^{2+}$  的质量浓度高, 会对盐藻叶绿素的积累及生长产生积极的影响. 但水源中含硼量和盐度过高, 则会抑制盐藻的生长.  $\text{CO}_3^{2-}$  和  $\text{HCO}_3^-$  质量浓度高, 会为盐藻的光合作用提供充足的原料, 提高其对光的利用率, 促进盐藻

干物质的积累.

### 3 结 论

利用 5 种不同水源对杜氏盐藻进行培养,除青海柴达木盆地察尔汗盐湖老卤水外,其余 4 种水样均可以用来培养盐藻.虽然不同水质对盐藻生长及生理的影响不同,但综合来看,利用稀释 10 倍后的成矿卤水培养的杜氏盐藻培养至第 15 天时,硝酸还原酶活性为  $(4.41 \pm 0.18) \mu\text{g}/(\text{mg}\cdot\text{h})$ ,显著高于用海水培养的杜氏盐藻.培养至 21 d 时,叶绿素质量浓度为  $(24.9 \pm 1.0) \text{mg}/\text{L}$ ,藻细胞质量浓度为  $(409.5 \pm 21.1) \text{mg}/\text{L}$ ,与用海水培养的杜氏盐藻间均无显著性差异.净光合速率为  $(128.6 \pm 3.0) \mu\text{mol}/(\text{mg}\cdot\text{h})$ ,呼吸速率为  $(28.2 \pm 0.9) \mu\text{mol}/(\text{mg}\cdot\text{h})$ .证明在同样的培养条件下,利用稀释 10 倍后的成矿卤水培养的杜氏盐藻与用海水培养的杜氏盐藻积累同样多的干物质.

察尔汗盐湖地处青海省格尔木市,盐湖中含有丰富矿物质,同时青海省幅员辽阔、光照充足,若能利用盐湖在青海省进行盐藻的培养,进而对其进行开发利用,是一种推动当地经济发展的新途径.

#### 参考文献:

- [1] 伍先绍,贺稚非,龚霄.杜氏盐藻及其在功能食品中的应用[J].中国食品添加剂,2008(2):127-130.
- [2] 尹卫强,刘颖芬,李炳乾,等.国内杜氏盐藻综合利用的现状与发展趋势[J].盐业与化工,2013(12):1-3.
- [3] 熊科.天然胡萝卜素提取及制备相关产品的工艺技术研究[D].长沙:湖南农业大学,2008.
- [4] Walne P R. Culture of Bivalve Molluscs: 50 Years' Experience at Conwy[M]. Hoboken: Wiley, 1979.
- [5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB 17378.4—2007 海洋监测规范·第 4 部分·海水分析[S].北京:中国标准出版社,2007.
- [6] 高俊凤.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社,2006:61-64.
- [7] 张其德.测定叶绿素的几种方法[J].植物学通报,1985(5):60-64.
- [8] 陈薇,张德颐.植物组织中硝酸还原酶的提取、测定和纯化[J].植物生理学通讯,1980(4):45-49.
- [9] Henley W J. Measurement and interpretation of photosynthetic light-response curves in algae in the context of photoinhibition and diel changes[J]. Journal of Phycology, 1993, 29(6): 729-739.
- [10] Liu Xiaojuan, Duan Shunshan, Li Aifei, et al. Effects of organic carbon sources on growth, photosynthesis, and respiration of *Phaeodactylum tricornutum*[J]. Journal of Applied Phycology, 2008, 21(2): 239-246.
- [11] 国家环境保护局. GB 3097—1997 海水水质标准[S].北京:中国标准出版社,1997.
- [12] 徐仰仓,于涛,许文宗,等.祖厉河水质状况及养殖潜力分析[J].安徽农业科学,2012(20):10542-10544.
- [13] 高玉荣,黄玉瑶,曹宏,等.氮磷对污水净化中藻类叶绿素含量的影响[J].水生生物学报,1995(4):291-298.
- [14] 张其德,张世平,张启丰.在植物光合作用中镁离子的作用[J].黑龙江大学自然科学学报,1992(1):82-88.
- [15] 陈晗华,钱凯先.氮、磷对盐藻生长及其 $\beta$ -胡萝卜素积累的影响[J].浙江大学学报:工学版,1997(6):731-736.
- [16] 吴学东.察尔汗盐湖老卤萃取法深度除硼工艺研究[D].成都:成都理工大学,2012.
- [17] 杨晓玲,郭金耀.硼对盐藻生长与物质积累的调控作用[J].盐业与化工,2007(3):20-22.
- [18] 韦芳三,李纯厚,戴明,等.盐度变化对盐藻生物量和总脂含量的影响[J].湖南农业科学,2011(1):134-136.
- [19] 王艳,唐海溶,蒋磊,等.硝酸盐对球形棕囊藻生长和硝酸还原酶活性的影响[J].植物学通报,2006(2):138-144.
- [20] 池晓劲.证明光合作用的原料、产物及条件的系列实验[J].丹东师专学报,1997(1):88-89.

责任编辑:郎婧