

刚毛藻3种培养方式比较*

李露^{1,2} 宋学宁^{1,2} 代亮亮^{1,2} 郭亮亮^{1,2} 李根保^{1**}

¹中国科学院水生生物研究所淡水生态与生物技术国家重点实验室 武汉 430072

²中国科学院大学 北京 100049

摘要 刚毛藻野外生长旺盛,但是室内培养生长效果不好.为促进刚毛藻生态学、水环境治理特性研究及开发利用,以寡枝刚毛藻(*Cladophora oligoclona*)为对象,分析3种培养方式(静置、通气、水体流动+通气)对刚毛藻生物量、形态和光合活性变化的影响,以建立和评估刚毛藻室内培养的方法.结果显示,水体流动+通气培养方式能有效促进刚毛藻生物量的积累;刚毛藻在3种培养方式下培养,形态变化不同,在水体流动+通气培养方式下单个细胞的长度变长、直径变短,从而表现出主枝细胞长度、分枝细胞长度、株高、分枝总长显著高于静置和通气培养方式培养的刚毛藻($P < 0.05$);刚毛藻在水体流动+通气培养方式下显示出更高的光合活性.综上所述,水体流动+通气培养方式更适合刚毛藻的室内培养,该方法可为刚毛藻室内进一步的大量培养提供技术参考.(图5 表2 参39)

关键词 寡枝刚毛藻;培养方式;生物量;形态;光合活性

CLC Q93-335

Comparison of three culture methods for *Cladophora oligoclona**

LI Lu^{1,2}, SONG Xuening^{1,2}, DAI Liangliang^{1,2}, GUO Liangliang^{1,2} & LI Genbao^{1**}

¹ State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The growth of *Cladophora* spp. is vigorous in the field, but not good under indoor culture conditions. In order to promote the study on ecology, water environment treatment characteristics, and the development and utilization of *Cladophora*, the effects of three different culture methods (standing, ventilating, water flowing + ventilating) on biomass, morphology, and photosynthetic activity of *C. oligoclona* were compared in order to find a suitable method for its indoor culture. The results showed that the culture method of water flowing + ventilating could effectively promote *C. oligoclona* biomass accumulation; the morphologies in the three culture methods were different. *C. oligoclona* with increased single cell length and reduced cell diameter was found in the culture method involving water flowing + ventilating; in this method, the length of the main branch and branch of the cell, plant height, and branch length of *C. oligoclona* were significantly higher than that in the standing and ventilating culture methods ($P < 0.05$). *C. oligoclona* cultured in the water flowing + ventilating method also showed a higher photosynthetic activity. In conclusion, among the three culture methods, the water flowing + ventilating culture method is the most suitable for the indoor culturing of *C. oligoclona*; this method can also provide a technical reference for the further indoor mass culture of *C. oligoclona*.

Keywords *Cladophora oligoclona*; culture method; biomass; morphology; photosynthetic activity

刚毛藻(*Cladophora*)属于绿藻门绿藻纲刚毛藻目刚毛藻科刚毛藻属,是一种大型丝状绿藻.刚毛藻一般在春季开始快速生长和繁殖,夏季生物量达到最大.大量的刚毛藻生物量易形成刚毛藻水华,不仅影响水体景观,而且不利于沉水植物生长^[1-2].尽管如此,刚毛藻的利用也越来越受到重视.刚毛藻环境适应性强,能净化水体中的氮、磷^[3-6],田忠峰等利用刚毛藻藻膜系统处理富营养化水体,静态试

验连续处理5 d,对TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、TP和PO₄³⁻-P的去除率分别达到了77.51%、96.81%、99.74%、94.87%和98.68%,表明刚毛藻藻膜系统能有效降低水体中的氮磷含量^[4];刚毛藻也能有效去除有机污染物^[7-8],樊兰英等研究了脆弱刚毛藻(*Cladophora fracta*)对水体中3种苯系物的去除作用,结果显示,脆弱刚毛藻对苯、甲苯和二甲苯的去除率分别为46.6%、13.6%和7.4%^[7];刚毛藻细胞壁中的多糖可以通过离子交换结合金属离子,因此可用于控制并修复水体中的重金属^[9-13],将团集刚毛藻(*Cladophora glomerata*)分别在0.1和1.0 mg/L的Cd溶液中培养15 d和30 d,刚毛藻在第15天时体内Cd含量分别达到690 ± 70 mg/kg和3 430 ± 470 mg/kg,在第30天Cd含量分别达到1 130 ± 180 mg/kg和6 830 ± 1 540 mg/kg^[14],表明刚毛藻对重金属Cd具有一定的吸附能力.因此,刚毛藻

收稿日期 Received: 2017-07-26 接受日期 Accepted: 2017-09-01

*国家自然科学基金项目(31370472)和国家水体污染控制与治理科技重大专项(2013ZX0712-005)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (31370472) and the Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment (2013ZX07102-005)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: ligb@ihb.ac.cn)

在受污染水体的修复中具有显著的作用。刚毛藻也是一种非常好的可再生资源 and 能源, 刚毛藻的纤维和果胶质含量高, 蛋白、多糖等营养成分丰富, 可用于造纸^[15]、制备生物乙醇和微生物蛋白饲料^[16]; Plis等对刚毛藻(*C. glomerata*)的热解过程进行分析, 发现刚毛藻可以作为小型燃料^[17]。

刚毛藻虽然广泛分布于淡水、半咸水及海水中, 能在沿岸水域大量生长^[2], 但在室内培养其生长较差。目前, 在实验室内都是以培养绿藻的常规方法培养刚毛藻其生长速度很慢, 很难短时间内获得大量的刚毛藻, 且生长状态也不好。因此, 刚毛藻的培养方法不仅限制了刚毛藻在生态学、水环境治理的特性研究, 也不利于刚毛藻的开发利用。本文比较了不同的培养方式对刚毛藻生长、形态学及其光合活性的影响, 以期寻求较好的培养刚毛藻方法, 为刚毛藻的规模化培养提供科学依据和技术手段。

1 材料与方法

1.1 实验材料

所用刚毛藻为寡枝刚毛藻(*C. oligoclona*), 采集于武汉东湖岸边, 将藻样品取回带至实验室, 用自来水冲洗干净, 并去除其他杂藻, 用自来水培养待用。

1.2 实验设计

采用静置、通气、水体流动+通气3种培养方式培养刚毛藻, 培养装置见图1。称取1.1 g鲜重刚毛藻, 将其附着于立体弹性填料上, 并放置在长20.9 cm、宽22 cm、高26 cm的普通玻璃缸中。水体流动+通气培养方式是利用潜水泵循环流动玻璃缸中的水, 潜水泵功率为3 W, 最大循环量为300 L/h, 并对水体进行通气。通气培养方式和水体流动+通气培养方式的通气量为35 mL/min, 每天不间断地通气。每种培养方式的玻璃缸中添加8 L自来水培养刚毛藻, 每天用自来水补充蒸发的量, 同时每隔3 d更换一半的自来水。水下光强为10 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 光暗比12 h:12 h, 培养期间的温度为25 $^{\circ}\text{C}$, 培养周期为27 d。

1.3 测量方法

1.3.1 刚毛藻鲜重测定 刚毛藻鲜重的获得方式为先用吸水纸吸取刚毛藻表面的水分, 之后把刚毛藻放在两张吸水纸之间, 均匀按压(尽量保持所有样品按压的力度相同), 最后称重^[18-19], 实验测定了初始和结束时的鲜重。

1.3.2 刚毛藻形态学指标 刚毛藻在3种培养方式下培养27 d, 利用显微镜测定培养结束后刚毛藻形态学指标^[20]。测定每种培养方式下刚毛藻的株高, 重复4次; 分别测定刚毛藻的主枝细胞长度、主枝细胞直径、分枝细胞长度、分枝细胞

直径、分枝总长, 重复14次。

1.3.3 刚毛藻光合活性测定 每隔2 d测定刚毛藻的光合活性指标。每种培养方式培养的刚毛藻, 取分布在立体弹性填料不同位置的藻, 利用Water-Pam(WALZ, 德国)监测叶绿素荧光。 F_v/F_m 的数值可以在荧光仪上直接读出。快速光响应曲线(Rapid response light curve, RLC)的3个参数: 线性区段斜率(α)、最大相对电子传递速率($rETR_{\text{max}}$)和饱和光照强度点(E_k), 可以通过测定快速光曲线之后, 直接读出。

1.4 数据处理和分析

实验的数据分析软件为Excel、SPSS 19和Origin 9.0。

2 结果与讨论

2.1 3种培养方式下刚毛藻的生长

采用静置、通气、水体流动+通气培养刚毛藻27 d后, 从立体弹性填料上获取全部的刚毛藻, 并称取鲜重。3种培养方式下刚毛藻的鲜重变化见表1。由表1可知, 刚毛藻在水体流动+通气培养方式下, 在培养了27 d后, 生物量增重了约5倍; 静置培养, 刚毛藻的生物量只增重了0.54 g; 而通气培养的刚毛藻生物量比初始生物量降低了0.26 g, 说明在水体流动+通气培养方式下刚毛藻的生长速度最快, 生物量积累最多。自然界中的刚毛藻大部分出现在流动水域, 须附着在石头或其他被水淹没物体上生长, 如其他水生植物或软体动物的壳^[21]。本研究中水体流动+通气培养方式创造的条件适合刚毛藻的野外生活习性, 所以能使刚毛藻的生物量在短时间内大量积累。焦世珺开展的室外实验表明流速对藻类生长的影响主要有延缓、加速、抑制、促进4个作用, 流速为0.001、0.1、0.5 m/s时, 水体运动抑制了藻类的生长; 流速为0.005、0.01、0.05 m/s时, 水体运动促进了藻类的生长, 表明一定范围的水体运动有利于藻类的生长^[22], 而且适中的水流速度能使藻类的生物量达到最高^[22-24]。究其原因, 在流动的水体中藻类能得到新的营养物质的供给, 也能降低藻细胞周围代谢产物的浓度^[25-26]; 宋洋等以铜绿微囊藻为研究对象, 在室内同步检测分析了静水和0.05-0.03 m/s流速下, 藻类的生长状况、水质变化情况及藻类脂质氧化及抗氧化体系响应状况, 结果表明, 水体流动可以通过直接作用影响藻类的生长以及通过水体流动引起pH、光强、营养盐分布等变化间接影响藻类的生长^[27]。比较3种培养方式, 水体流动+通气培养方式中, 刚毛藻处于一定的流速之中, 促进了对营养盐的吸收; 同时本研究也提供了立体弹性填料供刚毛藻附着生长, 分布在立体弹性填料的刚毛藻能更充分地接受光照。因此, 在水体流动+通气培养方式中, 刚毛藻的生物量能迅速积累。

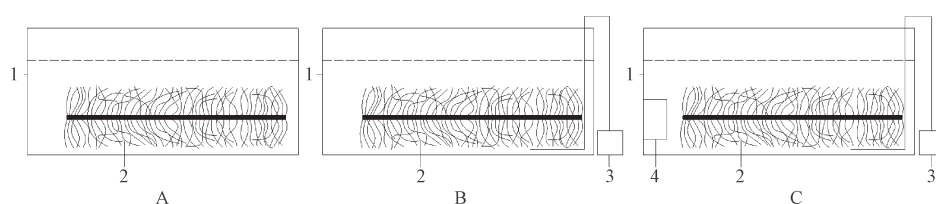


图1 3种培养方式的装置图。A: 静置; B: 通气; C: 水体流动+通气。1: 玻璃缸; 2: 立体弹性填料; 3: 空气泵; 4: 潜水泵。

Fig. 1 The devices of the three culture methods. A: Standing; B: Ventilating; C: Water flowing + ventilating. 1: Glass jar; 2: Solid elastic filter; 3: Air pump; 4: Submersible pump.

表1 3种培养方式下寡枝刚毛藻鲜重变化

Table 1 The fresh weight of *Cladophora oligoclona* in the three culture methods

培养方式 Culture method	初始鲜重 Initial fresh weight (m/g)	结束鲜重 Final fresh weight (m/g)	增重鲜重 Increased fresh weight (m/g)
静置 Standing	1.10	1.64	0.54
通气 Ventilating	1.10	0.84	-0.26
水体流动+通气 Water flowing + ventilating	1.10	6.34	5.24

2.2 3种培养方式下刚毛藻形态变化

由表2可知,3种培养方式下刚毛藻的形态变化比较大.与另外2种培养方式相比,水体流动+通气培养方式下,刚毛藻主枝细胞长度、分枝细胞长度、株高、分枝总长均存在极显著差异 ($P < 0.01$).在水体流动+通气培养方式下,刚毛藻的主枝细胞长度为 $1\ 095.34 \pm 212.45\ \mu\text{m}$,分别比静置和通气培养方式的主枝细胞长度增加了93%、88%,而静置培养与通气培养的刚毛藻主枝细胞长度形态无明显差异.水体流动+通气培养方式培养的分枝细胞长度为 $1\ 260.66 \pm 386.35\ \mu\text{m}$,明显高于静置和通气培养的刚毛藻分枝细胞长度,是静置培养的刚毛藻分枝长度的1.95倍,是通气培养刚毛藻分枝长度的2.2倍.刚毛藻在水体流动+通气培养方式下的株高和分枝总长也显著高于另外2种培养方式 ($P < 0.05$),说明水体流动+通气这种培养方式能够增长细胞的长度.3种培养方式下,细胞的直径也存在显著差异 ($P < 0.05$).水体流动+通气培养的刚毛藻主干细胞直径显著低于静置培养的细胞直径,但是与通气培养的细胞直径差异不明显.通过静置和通气培养方式培养的刚毛藻分枝细胞的直径均明显大于水体流动+通气培养的分枝细胞的直径.腾林宏认为不同的光照能很大程度影响植株的形态,在阴暗环境中刚毛藻的分枝粗壮,暴露于阳光下的分枝细胞纤细^[20].王增福对青岛汇泉角的鼠尾藻 (*Sargassum thunbergii*) 野外实地周年观察发现:夏季的鼠尾藻藻体初生分枝伸展,冬季藻体的初生分枝粗短^[28].巫娟研究也表明水华鱼腥藻的藻丝长度与可获得光资源量有关^[29].本研究中刚毛藻在水体流动+通气培养条件下细胞长度变长,细胞直径变低可能与在水体流动+通气培养方式下,刚毛藻的光合活性最高有关(图2).刚毛藻的形态变化极易受环境的影响,刚毛藻的细胞形状、藻体颜色、质地等形态随着生长环境呈现较大的变异^[20].不同的方式培养给刚毛藻创造了不同的生长环境,从而导致了刚毛藻不同的形态变化.刚毛藻的株高即藻丝长度是刚毛藻生长的重要指标,可以反映刚毛藻的生长状况^[30-31],水体流动+通气培养刚毛藻的株高显著高于静置和通气培养的刚毛藻株高,从而反映出水体的循环流动促进了刚毛藻的生长.

表2 3种培养方式下寡枝刚毛藻的形态学特征

Table 2 The morphology of *Cladophora oligoclona* in the three culture methods

培养方式 Culture method	主枝细胞长度 Cell length of the main branch (l/ μm)	主枝细胞直径 Cell diameter of the main branch (d/ μm)	分枝细胞长度 Cell length of the branch (l/ μm)	分枝细胞直径 Cell diameter of the branch (d/ μm)	株高 Plant height (h/ μm)	分枝总长 Branch length (l/ μm)
静置 Standing	567.52 $\pm$ 100.46	71.28 $\pm$ 7.11	645.99 $\pm$ 84.47	66.26 $\pm$ 5.69	9625.00 $\pm$ 2657.54	2342.67 $\pm$ 484.46
通气 Ventilating	595.75 $\pm$ 106.18	70.58 $\pm$ 5.14	563.52 $\pm$ 76.65	66.99 $\pm$ 9.94	9500.00 $\pm$ 1732.05	1421.78 $\pm$ 396.23
水体流动+通气 Water flowing + ventilating	1095.34 $\pm$ 212.45	65.83 $\pm$ 3.55	1260.66 $\pm$ 386.35	58.27 $\pm$ 3.66	14375.00 $\pm$ 1376.90	4254.84 $\pm$ 1770.60

2.3 3种培养方式下刚毛藻的最大光量子产量

如图2所示,利用不同的培养方式培养刚毛藻,刚毛藻的 F_v/F_m 值都表现出先下降然后逐渐稳定的趋势.在水体流动+通气培养方式下,刚毛藻的 F_v/F_m 值下降幅度显著小于另外两种培养方式 ($P < 0.05$),说明水体流动+通气培养方式创造的条件更接近刚毛藻生长的野外条件,适合刚毛藻的生长;培养了9 d之后,各培养方式下的刚毛藻 F_v/F_m 值均开始逐渐升高并稳定,但静置和通气培养方式下的刚毛藻 F_v/F_m 值显著低于水体流动+通气培养的刚毛藻 ($P < 0.05$).通常认为绿藻的 F_v/F_m 介于0.70-0.75之间,水体流动+通气培养条件下,刚毛藻 F_v/F_m 值约为0.725,显示出良好的生理状态;而在静置和通气培养方式下,刚毛藻的 F_v/F_m 值约为0.59和0.602,明显低于水体流动+通气培养. F_v/F_m 为光系统PSII的最大光量子产量,该值反映了浮游植物潜在的最大光合效率^[32],能反映藻细胞的生理状态.刚毛藻在水体流动+通气的培养条件下生理状态良好,在此培养条件下生物量的积累更快(表1). F_v/F_m 值的变化可以灵敏地反映出藻细胞对环境因子的适应性,通常 F_v/F_m 值是比较稳定的, F_v/F_m 在非胁迫条件下变化极小,一旦处于胁迫环境时,该参数会明显下降^[33].可见,静置和通气培养条件不适合刚毛藻的生长.

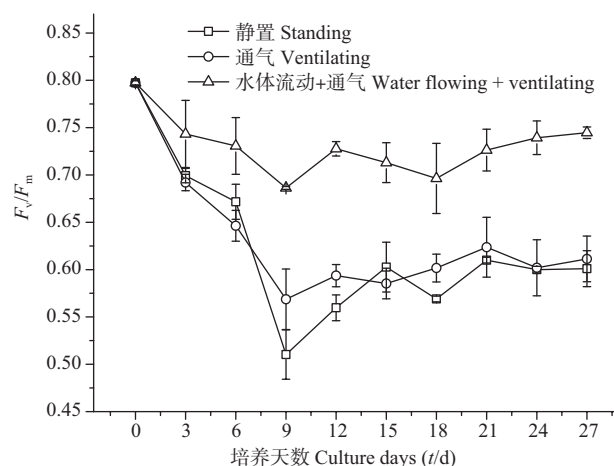


图2 3种培养方式下寡枝刚毛藻最大光量子产量随时间的变化。

Fig. 2 The change in maximum quantum yield of *Cladophora oligoclona* under the three culture methods.

2.4 3种培养方式下刚毛藻的快速光响应曲线特征参数

快速光曲线中荧光参数的变化可以分别反映出植物光合作用更详细的信息^[34-35],快速光曲线主要有3个重要的特征参数 α 、 E_k 、 $rETR_{max}$,能够反应植物耐受环境胁迫的光合能力,评估环境胁迫损害光系统的程度. α 为快速光曲线的初

始斜率, 反应光合器官对光能的利用率. 实验期间3种培养方式下 α 的变化如图3所示, 在培养的第6天开始, 水体流动+通气培养条件与静置和通气培养条件下刚毛藻的 α 存在显著的差异 ($P < 0.05$), 说明在水体流动+通气的条件下提高了刚毛藻的光能捕获率, 可以更好地进行光合作用. α 与 F_v/F_m 的变化相一致 (图2), 3种培养方式下 α 与 F_v/F_m 均一直下降到第9天之后逐渐稳定, 并都从第6天开始水体流动+通气与另外两种培养方式出现显著性差异 ($P < 0.05$). 水体流动造成的水体扰动, 提高了对光能的利用率, Grobbelaar的研究认为水体扰动促进了光的波动, 同时增加藻与周围物质的营养传递和代谢速率, 藻类能够更有效地利用光强, 增强光合作用效率^[36].

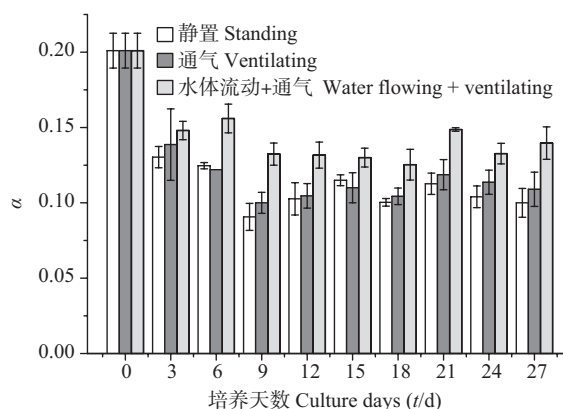


图3 3种培养方式下寡枝刚毛藻的 α 随时间的变化.

Fig. 3 The change in α of *Cladophora oligoclona* under the three culture methods.

当光合效率从光限制到光饱和状态转变时的光强就是 E_k 半饱和光强, 反映藻类耐受强光的能力, 当 E_k 较小时, 表明藻类能在较低的光照下就能达到饱和, 当 E_k 较大时, 表明藻类需要在较高的光照下, 才能更有利于色素捕捉光能, 更能耐受强光. 如图4, 3种培养方式对刚毛藻耐受强光能力没有显著的作用 ($P > 0.05$). 3种培养方式的刚毛藻的半饱和光强没有显著差异 ($P > 0.05$), 说明3种培养方式对刚毛藻的耐受强光能力没有特别显著的影响, 但是3种培养方式的刚毛藻的半饱和光强均出现下降的趋势.

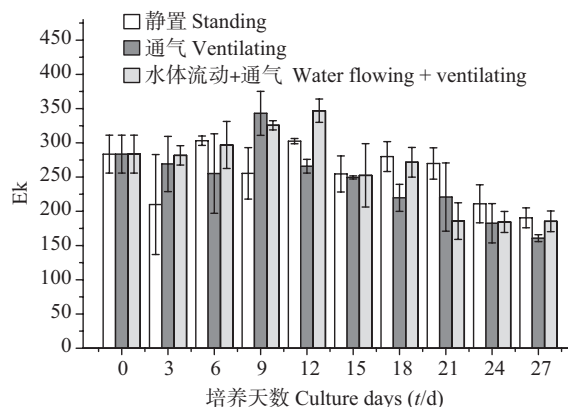


图4 3种培养方式下寡枝刚毛藻的 E_k 随时间的变化.

Fig. 4 The change in E_k of *Cladophora oligoclona* under the three culture methods.

从图5中可以看出初始时在适应新环境时 $rETR_{max}$ 与 E_k 会出现短暂的下降, 然后开始升高. $rETR_{max}$ 与 E_k 的变化趋势比较一致, 因为 E_k 反应了藻类耐受强光的能力, 而耐受强光能力的藻类具有较高的最大电子传递速率 $rETR_{max}$ ^[37-38].

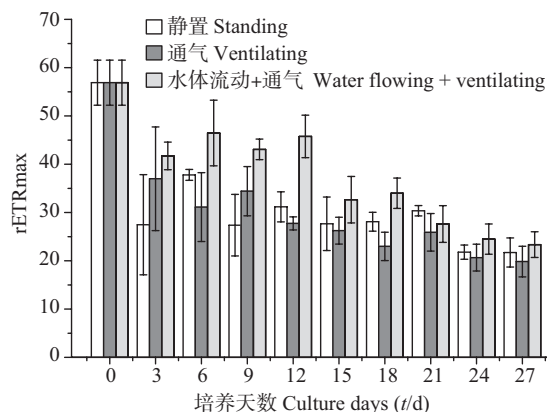


图5 3种培养方式下寡枝刚毛藻的 $rETR_{max}$ 随时间的变化.

Fig. 5 The change in $rETR_{max}$ of *Cladophora oligoclona* under the three culture methods.

水体流动+通气培养方式与通气培养方式的最大潜在相对电子传递速率存在显著差异 ($P < 0.05$). $rETR_{max}$ 代表PSII的光合作用强度, 在光合作用中光合速率越高, 制造的碳水化合物也就越多, 越有利于生物量的增加^[39]. 这与刚毛藻3种培养方式鲜重的变化相对应, 整个培养期间水体流动+通气培养方式的 $rETR_{max}$ 的值显著 ($P < 0.05$) 大于通气培养的值, 刚毛藻的鲜重明显高于通气培养的鲜重. 静置培养方式 $rETR_{max}$ 的值约为31.029, 小于水体流动+通气培养方式 $rETR_{max}$ 的值37.597, 刚毛藻的鲜重也表现出相应的变化.

3 结论

通过比较3种培养寡枝刚毛藻的方式, 发现水体流动+通气培养方式更有利于寡枝刚毛藻生物量的快速积累, 在此培养方式下显示出更强的光合活性. 同时, 寡枝刚毛藻在3种培养方式下形态学变化显著, 是其对不同生长环境的形态学适应. 本研究获得大量生物量的培养方法为刚毛藻后继开发利用奠定了物质基础. 然而, 在大体积规模化刚毛藻培养中, 仍需要完善培养技术参数.

参考文献 [References]

- 李敦海, 史龙新, 李根保, 王高鸿, 陈武雄, 刘永定. 丝状绿藻腐烂过程对水质和沉水植物黑藻生长的影响实验研究[J]. 环境科学与管理, 2006, 31 (6): 27-30 [Li DH, Shi LX, Li GB, Wang GH, Chen WX, Liu YD. Effect of decomposed filamentous green algae on water quality and the growth of submerged macrophyte *Hydrilla verticillata* [J]. *Environ Sci Manage*, 2006, 31 (6): 27-30]
- 杨凯, 董静, 郭亮亮, 李根保. 滇池沿岸带刚毛藻种群结构及分布特征[J]. 水生态学杂志, 2013, 34 (3): 8-16 [Yang K, Dong J, Guo LL, Li GB. The population structure and the distributing characteristics of *Cladophora* in the littoral zone of Dianchi Lake [J]. *J Hydroecol*, 2013,

- 34 (3): 8-16]
- 3 Liu JZ, Vyverman W. Differences in nutrient uptake capacity of the benthic filamentous algae *Cladophora* sp., *Klebsormidium* sp. and *Pseudanabaena* sp. under varying N/P conditions [J]. *Bioresour Technol*, 2015, **179**: 234-242
- 4 田忠峰, 曹德菊, 徐辉. 刚毛藻藻膜系统处理富营养化水体的研究[J]. 安徽农业大学学报, 2012, **39** (2): 302-305 [Tian ZF, Cao DJ, Xu H. Application of *Cladophora glomerata* biofilm system in the treatment of eutrophication of natural water [J]. *J Anhui Agric Univ*, 2012, **39** (2): 302-305]
- 5 den Haan J, Huisman J, Brocke HJ, Goehlich H, Latijnhouwers KRW, van Heeringen S, Honcoop SAS, Bleyenbergh TE, Schouten S, Cerli C, Hoitinga L, Vermeij MJA, Visser PM. Nitrogen and phosphorus uptake rates of different species from a coral reef community after a nutrient pulse [J]. *Sci Rep*, 2016, **6**: 28821
- 6 叶碧碧, 曹德菊, 张良昆, 彭娟, 杨旻. 刚毛藻对水中N、P的控制及其环境条件研究[J]. 安徽农业大学学报, 2011, **38** (4): 575-578 [Ye BB, Cao DJ, Zhang LK, Peng J, Yang M. Study on the parameters for removal of N and P in water by *Cladophora* [J]. *J Anhui Agric Univ*, 2011, **38** (4): 575-578]
- 7 樊兰英, 冯佳, 张猛, 刘晓铃, 李砧, 谢树莲. 脆弱刚毛藻对水体中三种苯系物的去除效果[J]. 水土保持通报, 2010, **30** (3): 73-77 [Fan LY, Feng J, Zhang M, Liu XL, Li Z, Xie SL. Removal effect of *Cladophora fracta* on benzene, toluene and xylene [J]. *Bull Soil Water Conserv*, 2010, **30** (3): 73-77]
- 8 石瑛, 李砧, 张猛, 杜青平, 吴鹏伟. 二氯苯对刚毛藻生理指标的影响[J]. 广东农业科学, 2012, **1** (7): 153-155 [Shi Y, Li Z, Zhang M, Du QP, Wu PW. Effects of dichlorobenzene on physiology of *Cladophora* [J]. *Guangdong Agric Sci*, 2012, **1** (7): 153-155]
- 9 Bagda E, Tuzen M, Sari A. Equilibrium, thermodynamic and kinetic investigations for biosorption of uranium with green algae (*Cladophora hutchinsiae*) [J]. *J Environ Radioact*, 2017, **175**: 7-14
- 10 Cao DJ, Shi XD, Li H, Xie PP, Zhang HM, Deng JW, Liang YG. Effects of lead on tolerance, bioaccumulation, and antioxidative defense system of green algae, *Cladophora* [J]. *Ecotox Environ Saf*, 2015, **112**: 231-237
- 11 Jasrotia S, Kansal A, Kishore VVN. Arsenic phyco-remediation by *Cladophora* algae and measurement of arsenic speciation and location of active absorption site using electron microscopy [J]. *Microchem J*, 2014, **114**: 197-202
- 12 从善畅, 汪家权, 董玉红, 程婷, 吕宙. 刚毛藻对重金属Pb²⁺的耐受性及吸附性研究[J]. 安徽农业科学, 2014, **42** (2): 552-554 [Cong SC, Wang JQ, Dong YH, Cheng T, LV Z. Study on characteristics of tolerance and adsorption of *Cladophora* to Pb²⁺ [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2014, **42** (2): 552-554]
- 13 李浩. 重金属的刚毛藻毒害效应及藻体富集机理[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2013 [Li H. The study of toxic effect, enrichment and tolerance mechanism between heavy metal and *Cladophora* [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2013]
- 14 Akin HK, Unlu E. Cadmium accumulation by green algae *Cladophora glomerata* (L.) Kutz. (Chlorophyta) in presence of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* (L.) [J]. *Toxicol Environ Chem*, 2013, **95** (9): 1565-1571
- 15 华栋, 牛德中. 江苏盐田刚毛藻资源的综合利用[J]. 资源科学, 1998, **20** (6): 58-62 [Hua D, Niu DZ. Comprehensive utilization of *Cladophora* resources in JiangSu salt pan [J]. *Resour Sci*, 1998, **20** (6): 58-62]
- 16 杨楠楠. 刚毛藻发酵制备生物乙醇和微生物蛋白饲料的研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2014 [Yang NN. Preparation of bioethanol and microbial protein feed using *Cladophora* [D]. Yantan: Yantai University, 2014]
- 17 Plis A, Lasek J, Skawińska A, Zuwała J. Thermochemical and kinetic analysis of the pyrolysis process in *Cladophora glomerata* algae [J]. *J Anal Appl Pyrol*, 2015, **115**: 166-174
- 18 Higgins SN, Pennuto CM, Howell ET, Lewis TW, Makarewicz JC. Urban influences on *Cladophora* blooms in Lake Ontario [J]. *J Great Lakes Res*, 2012, **38** (S4): 116-123
- 19 郭亮亮, 周维成, 周起超, 李根保. 光照强度和磷浓度对寡枝刚毛藻生长的影响[J]. 中国环境科学, 2015, **35** (7): 2153-2159 [Guo LL, Zhou WC, Zhou QC, Li GB. Effects of light intensity and phosphorus concentration on the growth of *Cladophora oligoclona* [J]. *Chin Environ Sci*, 2015, **35** (7): 2153-2159]
- 20 滕林宏. 中国刚毛藻目海藻的形态及系统发育学研究[D]. 青岛: 中国科学院研究海洋研究所, 2011 [Teng LH. Study on morphology and molecular phylogeny of *Cladophorales* (Chlorophyta) along China sea coast, with its DNA barcoding based on ITS and 18SrDNA sequences [D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2011]
- 21 Johri RM, Lata S, Sharma S. Textbook of algae [M]. New Delhi: Tata McGraw-Hill Education, 1986
- 22 焦世珺. 三峡库区低流速河段流速对藻类生长的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2007 [Jiao SJ. The effects of velocity of flow to the growth of algae in low current area of the Three Gorges [D]. Chongqing: Southwest University, 2007]
- 23 Stevenson RJ, Bothwell ML, Lowe RL, Thorp JH. Algal ecology: freshwater benthic ecosystem [M]. New York: Academic Press, 1996
- 24 Liu JZ, Danneels B, Vanormelingen P, Vyverman W. Nutrient removal from horticultural wastewater by benthic filamentous algae *Klebsormidium* sp., *Stigeoclonium* spp. and their communities: from laboratory flask to outdoor Algal Turf Scrubber (ATS) [J]. *Water Res*, 2016, **92**: 61-68
- 25 梁培瑜, 王烜, 马芳冰. 水动力条件对水体富营养化的影响[J]. 湖泊科学, 2013, **25** (4): 455-462 [Liang PY, Wang X, Ma FB. Effect of hydrodynamic conditions on water eutrophication: a review [J]. *J Lake Sci*, 2013, **25** (4): 455-462]
- 26 吴晓辉, 李其军. 水动力条件对藻类影响的研究进展[J]. 生态环境学报, 2010, **19** (7): 1732-1738 [Wu XH, Li QJ. Reviews of influences from hydrodynamic conditions on algae [J]. *Ecol Environ Sci*, 2010, **19** (7): 1732-1738]
- 27 宋洋, 张陵蕾, 陈旻, 蔡俊驰, 李嘉. 流速对水库水华优势种铜绿微囊藻生长的影响研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2016, **48** (S1): 25-32 [Song Y, Zhang LL, Chen M, Cai JC, Li J. Impacts of flow velocity on growth of dominant species *Microcystis aeruginosa* of algae-bloom in reservoirs [J]. *J Sichuan Univ (Eng Sci Ed)*, 2016, **48** (S1): 25-32]
- 28 王增福. 鼠尾藻的生理生态和繁殖生物学研究[D]. 青岛: 中国科

- 学院海洋研究所, 2007 [Wang ZF. The physiological ecology and reproduction biology of *Sargassum thunbergii* [D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2007]
- 29 巫娟, 陈雪初, 孔海南, 安阳, 吴辰, 何圣兵. 光照度对水华鱼腥藻细胞比重与藻丝长度的影响研究[J]. 中国环境科学, 2012, **32** (5): 875-879 [Wu J, Chen XC, Kong HN. The effect of light intensity on the cell density and chain length of *Anabaena flos-aquae* [J]. *Chin Environ Sci*, 2012, **32** (5): 875-879]
- 30 Marks JC, Power ME. Nutrient induced changes in the species composition of epiphytes on *Cladophora glomerata* Kütz. (Chlorophyta) [J]. *Hydrobiologia*, 2001, **450** (1): 187-196
- 31 Silva PH, McBride S, Nys R, Paul NA. Integrating filamentous “green tide” algae into tropical pond-based aquaculture [J]. *Aquaculture*, 2008, **284** (1-4): 74-80
- 32 Zhang M, Kong F, Wu X, Xing P. Different photochemical responses of phytoplankters from the large shallow Taihu Lake of subtropical China in relation to light and mixing [J]. *Hydrobiologia*, 2008, **603** (1): 267-278
- 33 陈辰, 何小定, 秦金舟, 刘桂华. 4种含笑叶片叶绿素荧光参数 F_v/F_m 特性的比较 [J]. 安徽农业大学学报, 2013, **40** (1): 32-37 [Chen C, He XD, Qin JZ., Liu GH. Comparison of chlorophyll fluorescence F_v/F_m characteristics of four michelia trees [J]. *J Anhui Agric Univ*, 2013, **40** (1): 32-37]
- 34 Ralph PJ, Gademann R. Rapid light curves: a powerful tool to assess photosynthetic activity [J]. *Aquat Bot*, 2005, **82** (3): 222-237
- 35 李大命, 于洋, 张彤晴, 唐晟凯, 周军, 周刚. 太湖春季和秋季浮游植物的光合作用活性[J]. 环境科学学报 2014, **27** (8): 848-856 [Li DM, Yang Z, Yu Y, Tang SK, Zhang TQ, Zhou G. Photochemical vitality of cyanobacteria in Taihu Lake in spring and autumn season [J]. *Acta Sci Circumst*, 2014, **27** (8): 848-856]
- 36 Grobbelaar JU. Turbulence in mass algal cultures and the role of light/dark fluctuations [J]. *J Appl Phycol*, 1994, **6** (3): 331-335
- 37 高丽楠, 张宏, 陈舒慧, 贺琼, 孙佳媛. 高原2种草本植物的光合作用和叶绿素荧光参数日动态[J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 2015, **38** (4): 550-560 [Gao LN, Zhang H, Chen SH, He Q, Sun JY. Diurnal variation in photosynthesis and chlorophyll fluorescence of two dominant herb species at Tibetan Plateau [J]. *J Sichuan Norm Univ (Nat Sci Ed)*, 2015, **38** (4): 550-560]
- 38 经博翰, 袁龙义. 洪湖5种优势沉水植物光合荧光特性比较研究[J]. 西北植物学报, 2015, **35** (2): 344-349 [Jing BH, Yuan LY. Photosynthetic fluorescence characteristics of five dominant submerged macrophytes in Honghu Lake [J]. *Acta Bot Bor-Occid Sin*, 2015, **35** (2): 344-349]
- 39 马梦洁, 张毅敏, 杨飞, 高汾, 丁轶睿, 孔明, 李定龙. 沉水植物黑藻的拓殖能力和光合荧光特性[J]. 应用与环境生物学报, 2016, **22** (5): 752-758 [Ma MJ, Zhang YM, Yang F, Gao F, Ding YR, Kong M, Li DL. The propagation ability and photosynthetic fluorescence characteristics of submerged plant *Hydrilla verticillata* [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2016, **22** (5): 752-758]