



[12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 02134387. X

[43] 公开日 2003 年 1 月 22 日

[11] 公开号 CN 1392251A

[22] 申请日 2002. 7. 18 [21] 申请号 02134387. X

[71] 申请人 中山大学

地址 510275 广东省广州市新港西路 135 号

[72] 发明人 刘 昕 王江海 袁建平 黄晓霓

权利要求书 3 页 说明书 9 页

[54] 发明名称 光生物反应器促进雨生红球藻生长增殖及调控虾青素合成和积累的方法

[57] 摘要

本发明涉及一种可调控的全天候封闭式大规模运行系统光生物反应器培养和促进雨生红球藻生长增殖及提高种群密度和调控细胞内次生代谢产物虾青素合成和积累的方法,包括在主体反应器底部及四周和封盖采用透光材料及外置可调控的光照设施,调速桨叶轮搅拌器及卷水轮,无菌空气鼓气设施及 O₂ 气体系统,咸淡水营养液调配和温度调控系统,清洗和消毒杀菌系统等人工可调控的环境条件诱导调控雨生红球藻生长增殖及提高种群密度和调控雨生红球藻细胞内次生代谢产物虾青素的合成和积累,经分离收获藻细胞及低温干燥等工序获取富含虾青素的藻细胞。

I S S N 1 0 0 8 - 4 2 7 4

1. 一种可调控的全天候封闭式大规模运行系统光生物反应器培养和促进雨生红球藻生长增殖及提高种群密度和调控细胞内次生代谢产物虾青素合成和积累的方法，其特征是该方法包括在主体反应器底部及四周和封盖采用透光材料及外置可调控的光照设施，调速桨叶轮搅拌器及卷水轮，无菌空气鼓气设施及 O₂ 气体系统，咸淡水营养液调配和温度调控系统，清洗和消毒杀菌系统等人工可调控的环境条件诱导调控雨生红球藻生长增殖及提高种群密度和调控雨生红球藻细胞内次生代谢产物虾青素合成和积累、分离收获藻细胞及低温干燥等工序。

2. 一种如权利要求 1 所述的促进雨生红球藻生长增殖及提高种群密度和调控细胞内次生代谢产物虾青素合成和积累的方法，其特征是该方法的具体步骤如下：

(1)、改造并优化通常工业培养微藻使用的浅水道光生物反应器成为封闭式光生物反应器，或设计光利用率高的全天候封闭式大规模运行系统光生物反应器，其中包括支撑式主体底座，设置封闭式可调控排放系统的主体反应器（水槽），设置可调控的光照设施，设置调速桨叶轮搅拌器及卷水轮、设置有进排气口的无菌空气设施及 O₂ 气体系统，设置有回流装置的咸淡水营养液调配和温度调控系统，清洗和消毒杀菌系统及设置分离收获藻细胞和干燥系统等设施；亦可将全天候封闭式大规模运行系统光生物反应器包括咸淡水营养液调配、控光、控温、清洗、消毒、杀菌、搅拌、鼓气、分离收获藻细胞及干燥等工序由计算机控制实现长期半连续生产；

(2)、主体反应器呈长方形，长宽为 200—1500cm×100—300cm，深度为 450—700cm；

(3)、透光材料可选用高抗张力及抗压力的无色透明钢化玻璃或特种玻璃，厚度为 0.8—3cm，封盖部分透光材料可选用市售透明塑料薄膜或复合材料透明薄膜，厚度为 0.01-0.6mm；在主体反应器四周及上下安装多盏可调亮度的照明用的日光灯、白炽灯、太阳灯或节能射灯，每盏灯功率为 40—2000w；可单独使用或组合使用；促进雨生红球藻生长增殖及提高种群密度调控阶段光照强度为 800—1800 勒克斯；调控细胞内次生代谢产物虾青素合成和积累阶段光照强度为 1900—3200 勒克斯；

(4)、采用工业上使用的可调速桨叶轮搅拌器，转速为 10—400r/m，卷水轮为工业上使用的卷水轮，转速为 10—300r/m，卷水轮装置于主体反应器的一侧，调控咸淡水营养液循环流动的流速；

(5)、采用工业上使用的空压机并经常规的滤油滤水滤菌处理成为无菌空气； O_2 气体采用工业氧气瓶，并采用过滤法除菌。通过调节阀及分布于主体反应器底部管道式微孔导流孔鼓入无菌空气及氧气；雨生红球藻生长增殖阶段无菌空气鼓入量为 $0.02—2\text{m}^3/\text{m}$ ；调控细胞内次生代谢产物虾青素合成和积累阶段无菌空气鼓气量为 $0.01—0.08\text{m}^3/\text{m}$ ； O_2 气体按咸淡水营养液所需溶解氧的浓度进行调节；

(6)、咸淡水营养液调配及温度调控系统由配置有冷水循环制冷装置、加热装置、营养液循环泵、回流管道、测温控温设施及带搅拌器的工业上使用的夹层贮液罐组成。每组贮液罐为 2 至 3 只，贮液罐容量为 $100—10000\text{L}$ ；搅拌器转速为 $20—300\text{r}/\text{m}$ ；

(7)、咸淡水营养液组成：咸淡水配比为清水 $30—70\%$ ，海水 $25—75\%$ ；亦可采用人工调配海水；营养液配比为硝酸钾 $0.1—0.42\text{g}/\text{L}$ ，醋酸钠 $0.3—0.65\text{g}/\text{L}$ ，亦可以加入尿素、硫酸镁、磷酸二氢钾等营养盐，可以是一种或一种以上，加入量为 $0.01—1\text{g}/\text{L}$ ；雨生红球藻生长增殖及提高种群密度调控阶段咸淡水营养液溶解氧浓度为 $40—55\%$ 饱和度；最适 pH 值为中性；最适温度为 $14—27^\circ\text{C}$ ，藻细胞迅速生长增殖处于对数生长期的培养周期为 $48—96\text{h}$ ；

(8)、咸淡水中清水及海水可采用工业上使用的臭氧发生器进行杀菌；营养液可采用加热法杀菌，加热温度为 $70—80^\circ\text{C}$ ，时间 $15—25$ 分钟，或 $95—100^\circ\text{C}$ ，时间 $5—15$ 分钟；亦可采用化学杀菌法进行杀菌。循环使用的咸淡水营养液可采用加热法杀菌后再投入使用；

(9)、收获雨生红球藻细胞采用工业上连续式浆渣分离装置，转速为 $3000—30000\text{r}/\text{m}$ ；将分离的雨生红球藻细胞采用工业上使用的低温干燥设施，如真空冷冻干燥、真空干燥、低温热风干燥、低温喷雾干燥等设备，干燥温度为 $38—85^\circ\text{C}$ ；干燥后产物含水份低于 3% 。

3. 一种如权利要求 2 所述的促进雨生红球藻生长增殖及提高种群密度和调控细胞内次生代谢产物虾青素合成和积累的方法，其特征是主体反应器呈长方形，长宽为 $220—500\text{cm}\times 110—150\text{cm}$ ；深度为 $350—450\text{cm}$ ；封盖部分透光材料可选用市售透明塑料薄膜或复合材料透明薄膜，厚度为 $0.03-0.3\text{mm}$ ；在主体反应器四周及上下安装多盏可调亮度的照明用的日光灯、白炽灯、太阳灯或节能射灯，每盏灯功率为 $40—300\text{w}$ ；采用工业上使用的可调速桨叶轮搅拌器，转速为 $20—60\text{r}/\text{m}$ ；卷水轮为工业上使用的卷水轮，转速为 $20—80\text{r}/\text{m}$ ；每组贮液罐为 2 至 3 只，贮液罐容量为 $1000—6000\text{L}$ ；搅拌器转速为 $60—80\text{r}/\text{m}$ ；咸淡水营养液组成：清水为 $45—65\%$ ；海水为 $35—55\%$ ；硝酸钾为 0.2

—0.3g/L; 醋酸钠为 0.45—0.55g/L。

4. 一种如权利要求 2 所述的促进雨生红球藻生长增殖及提高种群密度和调控细胞内次生代谢产物虾青素合成和积累的方法,其特征是雨生红球藻生长增殖及提高种群密度调控阶段光照强度为 1000—1500 勒克斯; 最适培养温度为 20—24℃; 无菌空气鼓入量为 0.03—0.2m³/m; 藻细胞迅速生长增殖处于对数生长期的培养周期为 60—72h。

5. 一种如权利要求 2 所述的促进雨生红球藻生长增殖及提高种群密度和调控细胞内次生代谢产物虾青素合成和积累的方法,其特征是调控细胞内次生代谢产物虾青素合成和积累阶段光照强度为 1000—1500 勒克斯; 光照强度为 2000—2500 勒克斯; 最适培养温度为 26—29℃; 无菌空气鼓入量为 0.02—0.05m³/m; 最适 pH 值为微碱性; 调控细胞内次生代谢产物虾青素合成和积累培养周期为 60—72h; 收获藻细胞分离装置转速为 8000—15000 r/m; 藻细胞干燥温度为 43—48℃; 干燥后产物含水份低于 1%以下。

发明内容

本发明的目的是提供一种可调控的全天候封闭式大规模运行系统光生物反应器培养和促进雨生红球藻细胞生长增殖及提高种群密度和调控细胞内次生代谢产物虾青素合成和积累的方法。

本发明的方法包括建立可调控的全天候封闭式大规模运行系统光生物反应器，在主体反应器底部及四周和封盖采用透光材料及外置可调控的光照设施，调速桨叶轮搅拌器及卷水轮，无菌空气鼓气设施及 O₂ 气体系统，咸淡水营养液调配和温度调控系统，清洗和消毒杀菌系统，通过环境条件的改变进行生理诱导调控雨生红球藻生长增殖及提高种群密度和调控雨生红球藻细胞内次生代谢产物虾青素的合成和积累、分离收获藻细胞及低温干燥等工序。

本发明的方法具体步骤如下：

一、建立全天候封闭式大规模运行系统光生物反应器：改造并优化通常工业培养微藻使用的浅水道光生物反应器成为封闭式光生物反应器，或设计光利用率高的全天候封闭式大规模运行系统光生物反应器，其中包括支撑式主体底座，设置封闭式可调控排放系统的主体反应器（水槽），设置可调控的光照设施，设置调速桨叶轮搅拌器及卷水轮，设置有进排气口的无菌空气设施及 O₂ 气体系统，设置有回流装置的咸淡水营养液调配和温度调控系统，清洗和消毒杀菌系统及分离收获藻细胞和低温干燥设施。主体反应器呈长方形，长宽为 200—1500cm×100—300cm，通常为 220—500cm×110—150cm；深度为 450—700cm，通常为 550—650cm。亦可将全天候封闭式大规模运行系统光生物反应器包括咸淡水营养液调配、控光、控温、清洗、消毒、杀菌、搅拌、鼓气、分离收获藻细胞及干燥等工序由计算机控制实现长期半连续生产。

二、在主体反应器底部及四周和封盖采用透光材料及外置可调控光照设施：透光材料可选用高抗张力及抗压力的无色透明钢化玻璃或特种玻璃，厚度为 0.8—3cm，通常为 1.5—2cm；封盖部分透光材料可选用市售透明塑料薄膜或复合材料透明薄膜，厚度为 0.01-0.6mm，通常为 0.03-0.3mm；透明薄膜用作主体反应器封盖并用胶带纸封贴或胶粘剂封贴；封盖部分透光材料也可选用有机玻璃等透光材料；在主体反应器四周及上下安装多盏可调亮度的照明用的日光灯、白炽灯、太阳灯或节能射灯，每盏灯功率为 40—2000w，通常为 40—300w；可单独使用或组合使用；雨生红球藻生长增殖及提高种群密度调控阶段光照强度为 800—1800 勒克斯，通常为 1000—1500 勒克斯；调控细胞内次生代谢产物虾青素合成和积累阶段光照强度为 1900—3200 勒克斯，通常为 2000—2500 勒克斯；光照强度和光照周期可根据自然日光光照强度及通过灯的数量和功率及光照时

光生物反应器促进雨生红球藻生长增殖及调控虾青素合成和积累的方法

技术领域

本发明涉及一种可调控的全天候封闭式大规模运行系统光生物反应器培养和促进雨生红球藻生长增殖及提高种群密度和调控细胞内次生代谢产物虾青素合成和积累的方法。

背景技术

雨生红球藻 (*Haematococcus pluvialis*) 是一种单细胞绿藻, 细胞呈椭圆形或卵形, 大小从 5 微米左右到 20-30 微米不等, 有时甚至更大些; 有两条等长鞭毛, 鞭毛的摆动推动细胞自由游动; 细胞壁和原生质间具空隙, 其间充满胶状物质, 细胞壁和原生质体间有细胞质连丝相连, 营养繁殖为细胞分裂, 形成 2、4、8、16 甚至更多个子细胞, 无性生殖在环境不良时形成胶群体或厚壁孢子。处于生长增殖阶段的雨生红球藻呈绿色; 当环境条件的改变对其生长不利时, 如在缺乏氮、磷和双价离子镁或在强光照射条件下, 雨生红球藻细胞的生长将趋于缓慢并使运动细胞失去鞭毛, 形成胶群体或厚壁孢子, 同时, 促进细胞内次生代谢产物合成, 主要是虾青素的大量积累, 使雨生红球藻细胞的颜色迅速形成砖红色。影响雨生红球藻的生理、生物量、产量和细胞内次生代谢产物成分和生成量, 主要涉及藻的品种和良好的培养条件 (如环境的净化程度、温度、光照、溶解氧、营养液组成、流体切变力等)。通过物理或化学以至基因工程及遗传工程手段改造现有藻种获得优良工程菌株, 提高藻种的光饱和值、抗光抑制, 以及抗逆、抗污染能力, 可以获得耐高温、细胞增殖快和虾青素积累能力强的藻种。有研究表明, 经过优化的光生物反应器及良好的培养条件, 可促使雨生红球藻中虾青素的含量高达细胞干重的 4-5%, 而采用细菌或酵母菌等培养生成虾青素的含量最高不足细胞干重的 0.8%。

目前, 阻碍雨生红球藻大规模生产的主要因素是生物污染和雨生红球藻培养过程种群密度低使单位面积产量低所导致的高成本。小规模由管道式光生物反应器或小型固定化系统组成的生物反应器或气升式生物反应器进行培养的雨生红球藻, 存在的缺陷是管道壁易被藻细胞粘连遮蔽导致培养期间透光性下降及清洗困难, 虽然已采用不同类型的桨叶轮搅拌混合, 以尽量降低藻细胞之间的遮蔽作用及提高光照的利用, 但只适应实验室的小规模试验。

洁净无污染，咸淡水中清水及海水可采用工业上使用的臭氧发生器进行杀菌；营养液可采用加热法杀菌，加热温度为 70—80℃，时间 15—25 分钟，或 95—100℃，时间 5—15 分钟；亦可采用化学杀菌法进行杀菌。循环使用的咸淡水营养液可采用加热法杀菌后再投入使用。

七、收获雨生红球藻细胞及低温干燥：离心是目前应用最广的收获藻细胞的方法，通常采用工业上连续式浆渣分离装置，转速为 3000—30000r/m，通常为 8000—15000r/m。亦可采用其他分离设备或过滤法收获藻细胞。将分离的雨生红球藻细胞采用工业上使用的低温干燥设施，如真空冷冻干燥、真空干燥、低温热风干燥、低温喷雾干燥等设备进行干燥，干燥温度为 38—85℃，通常为 43—48℃。要求干燥后产物含水份低于 3%，通常为 1%以下。

封闭式大规模运行系统中光生物反应器的设计对于提供可调控的环境条件促进雨生红球藻迅速生长增殖和提高种群密度及促进细胞内次生代谢产物虾青素的合成和积累至关重要。培养雨生红球藻由于非生物因素的变量太多，如生物污染、光照强度、溶解氧、温度和营养液组成等多种因子的影响和应变环境促进细胞内目标产物的合成和积累而变得非常复杂。光照是雨生红球藻生长的重要因素。最适于雨生红球藻生长增殖的光照度为中等强度光照 1000—1600 勒克斯；加大光照强度在 1900—3200 勒克斯，可促进雨生红球藻细胞内次生代谢生物虾青素合成和积累；大于 3500 勒克斯的光照强度将抑制雨生红球藻的生长，分裂的细胞也由营养生长转为休眠状态。昼夜连续光照有利于雨生红球藻的生长增殖并明显提高细胞体积产率。培养过程光照不足及藻细胞相互之间的遮蔽作用，将导致藻细胞生长受到抑制而增加了其他生物污染的机会。在室外人工培养微藻采用的桨叶轮搅拌的浅水道光生物反应器，构造上只接受正面光的光照，对光线的充分利用及光照的调控受到局限，特别是昼夜和阴晴天与正常日光光照强度差别大的影响成为大规模培养雨生红球藻及调控细胞内次生代谢产物虾青素的合成和积累的关键性技术难题。

通过改造并优化浅水道光生物反应器系统成为封闭式光生物反应器，在主体反应器的底部及四周和封盖采用透光材料提高光生物反应器内整体光照强度，改善整体的培养条件为可调控的高净化度的环境条件，利用日光光照并外置可调控的人工光源照射使藻细胞昼夜能均匀地接受到中等以上强度光照，对光能利用率较高，既可促进雨生红球藻细胞生长增殖，又能调控雨生红球藻细胞内次生代谢产物虾青素的合成和积累，雨生红球藻细胞体积产量高达 4-6g/L 以上，其中虾青素含量可高达细胞干重的 4—5%以上，同

间进行调控。

三、调速桨叶轮搅拌器及卷水轮：调速桨叶轮搅拌器可使主体反应器咸淡水营养液处于轻微流动状态并保持咸淡水营养液组成及溶解氧浓度和 PH 值的可调控性，使藻细胞的生长处于悬浮状态；雨生红球藻在合适的流体切变力作用下，如咸淡水营养液以 0.01—0.08 m/s 流速循环，可有效减少藻细胞之间的遮蔽作用及提高光照的利用。采用工业上使用的可调速桨叶轮搅拌器，转速为 10—400r/m，通常为 20—60r/m；卷水轮为工业上使用的卷水轮，转速为 10—300r/m，通常为 20—80r/m；卷水轮装置于主体反应器的一侧，调控咸淡水营养液循环流动的流速。

四、设置有进排气口的无菌空气设施及 O₂ 气体系统：采用工业上使用的空压机并经常规的滤油滤水滤菌处理成为无菌空气；O₂ 气体采用工业氧气瓶，并采用过滤法除菌。通过调节阀及分布于主体反应器底部管道式微孔导流孔鼓入无菌空气及氧气。雨生红球藻生长增殖阶段无菌空气鼓入量为 0.02—2m³/m，通常为 0.03—0.2m³/m；调控雨生红球藻细胞内次生代谢产物虾青素合成和积累阶段无菌空气鼓气量为 0.01—0.08 m³/m，通常为 0.02—0.05m³/m；O₂ 气体按咸淡水营养液所需溶解氧的浓度进行调节。

五、设置有回流装置的咸淡水营养液调配和温度调控系统：咸淡水营养液调配及温度调控系统由配置冷水循环制冷装置、加热装置、营养液循环泵、回流管道、测温控温设施及带搅拌器的工业上使用的夹层贮液罐组成。每组贮液罐为 2 至 3 只，贮液罐容量为 100—10000L，通常为 1000—6000L；搅拌器转速为 20—300r/m，通常为 60—80r/m。

处于细胞生长增殖阶段的雨生红球藻咸淡水营养液组成：咸淡水配比为清水 30—70%，通常为 45—65%；海水 25—75%，通常为 35—55%；亦可采用人工调配海水；营养液配比为硝酸钾 0.1—0.42g/L，通常为 0.2—0.3g/L；醋酸钠 0.3—0.65g/L，通常为 0.45—0.55g/L；亦可以加入尿素、硫酸镁、磷酸二氢钾等营养盐，可以是一种或一种以上，加入量为 0.01—1 g/L；咸淡水营养液溶解氧浓度为 40—55%饱和度；雨生红球藻生长增殖阶段最适 pH 值为中性；藻细胞生长增殖阶段最适温度为 14—27℃，通常为 20—24℃；藻细胞迅速生长增殖处于对数生长期的培养周期为 48—96h，通常为 60—72h。

通过环境条件的改变进行生理诱导调控促进雨生红球藻细胞内次生代谢产物虾青素合成和积累阶段最适培养温度为 21—32℃，通常为 26—29℃，最适 pH 值为微碱性；培养周期为 50—80h，通常为 60—72h。

六、清洗和消毒杀菌系统：投入生产之前应将光生物反应器彻底清洗消毒，每次清洗时均应清除封盖部分的透明薄膜并更换新的透明薄膜，咸淡水营养液调配过程应保持

时又能克服开放式大规模运行系统光生物反应器运转期间昼夜和阴晴天的影响及其他杂藻和生物沾污以及大气污染。由于主体反应器封盖部分透光材料更换方便，使主体反应器整体清洗更加便利快捷，有利于实现由计算机控制长期半连续化生产。因此，建立可调控的全天候封闭式大规模运行系统光生物反应器比浅水道光生物反应器培养和促进雨生红球藻细胞生长增殖及提高种群密度和调控细胞内次生代谢产物虾青素合成和积累更具优越性。

具体实施方式

下面结合实施例对本发明作进一步详细说明。

实施例一：

建立全天候封闭式大规模运行系统光生物反应器，主体反应器（水槽）长宽深为 500×150×65cm，底部及四周采用 2cm 厚的无色透明钢化玻璃，封盖部分采用厚度为 0.2mm 的透明薄膜并用胶带纸封贴，主体反应器四周及上下安装可调亮度的功率为 100W 太阳灯 20 盏，40W 节能射灯 20 盏；反应器内调速浆叶轮搅拌器转速为 30r/m；卷水轮转速为 50r/m，咸淡水营养液以 0.04m/s 流速循环；咸淡水营养液调配及温度调控系统配备 3 只容量 4000L 的贮液罐，搅拌器转速为 80r/m。藻细胞生长增殖及提高种群密度调控阶段的培养条件为，咸淡水营养液组成：清水 65%，海水 35%，硝酸钾 0.21g/L，醋酸钠 0.52g/L，硫酸镁 0.04g/L，磷酸二氢钾 0.04g/L，尿素 0.9g/L；清水及海水可经臭氧发生器杀菌；营养液采用经 100℃加热杀菌 5 分钟；藻细胞生长增殖温度为 20℃；光照强度为 1300—1700 勒克斯；无菌空气鼓入量为 0.3m³/m；咸淡水营养液溶解氧浓度为 43% 饱和度；最适藻细胞生长增殖 pH 值为 6.8，培养周期为 60h，藻细胞生长增殖处于对数生长期，藻细胞呈绿色。通过环境条件的改变进行生理诱导调控促进雨生红球藻细胞内次生代谢产物虾青素合成和积累，此阶段培养条件：培养温度为 28℃；光照强度为 2300—2800 勒克斯；无菌空气鼓入量为 0.1m³/m；最适 pH 值为 8.2；培养周期为 72h，藻细胞呈砖红色。经连续式浆渣分离装置收获雨生红球藻细胞，转速为 10000r/m，然后再经 45℃真空干燥处理，使藻细胞水份含量低于 1%。经分析，藻细胞虾青素含量高达细胞干重的 3.9%。

实施例二：

建立全天候封闭式大规模运行系统光生物反应器，主体反应器（水槽）长宽深为 220×110×55cm，底部及四周采用 1.5cm 厚的无色透明特种玻璃，封盖部分采用厚度为 0.1mm 的透明薄膜并用胶带纸封贴，主体反应器四周及上下安装可调亮度的功率为 40W

日光灯 20 盏；反应器内调速浆叶轮搅拌器转速为 20r/m；卷水轮转速为 30r/m，咸淡水营养液以 0.02m/s 的流速循环；咸淡水营养液调配及温度调控系统配备 2 只容量 1200L 的贮液罐，搅拌器转速为 60r/m。藻细胞生长增殖及提高种群密度调控阶段的培养条件为，咸淡水营养液组成：清水 40%，海水 60%，硝酸钾 0.2g/L，醋酸钠 0.6g/L，磷酸二氢钾 0.4g/L，硫酸镁 0.2g/L，尿素 1g/L；清水及海水可经臭氧发生器杀菌；营养液采用经 95℃加热杀菌 10 分钟；藻细胞生长增殖温度为 23℃；光照强度为 1100—1500 勒克斯；无菌空气鼓入量为 0.3m³/m；咸淡水营养液溶解氧浓度为 53%饱和度；最适藻细胞生长增殖 pH 值为中性，培养周期为 48h，藻细胞呈绿色。通过环境条件的改变进行生理诱导调控促进雨生红球藻细胞内次生代谢产物虾青素合成和积累，此阶段培养条件：培养温度为 28.5℃；光照强度为 2400—2700 勒克斯；无菌空气鼓入量为 0.1m³/m；最适 pH 值为 8；培养周期为 72h，藻细胞呈砖红色。经过滤装置收获雨生红球藻细胞，然后再经 45℃真空干燥处理，使藻细胞水份含量低于 1%。经分析，藻细胞虾青素含量高达细胞干重的 4.1%。

实施例三：

建立全天候封闭式大规模运行系统光生物反应器，主体反应器（水槽）长宽深为 200×100×65cm，底部及四周采用 1cm 厚的无色透明钢化玻璃，封盖部分采用厚度为 0.2mm 的透明薄膜并用胶粘剂封贴，主体反应器四周及上下安装可调亮度的功率为 40W 日光灯 7 盏，100W 太阳灯 5 盏；反应器内调速浆叶轮搅拌器转速为 10r/m；卷水轮转速为 10r/m，咸淡水营养液以 0.03m/s 流速循环；咸淡水营养液调配及温度调控系统配备 2 只容量 800L 的贮液罐，搅拌器转速为 20r/m。藻细胞生长增殖及提高种群密度调控阶段的培养条件为，咸淡水营养液组成：清水 68%，海水 32%，硝酸钾 0.4g/L，醋酸钠 0.4g/L，尿素 0.3g/L，硫酸镁 0.04g/L；清水及海水可经臭氧发生器杀菌；营养液采用经 98℃加热杀菌 8 分钟；藻细胞生长增殖温度为 24℃；光照强度为 800—1600 勒克斯；无菌空气鼓入量为 0.05m³/m；咸淡水营养液溶解氧浓度为 51%饱和度；最适藻细胞生长增殖的 pH 值为 6.6，培养周期为 60h，藻细胞生长增殖处于对数生长期，藻细胞呈绿色。通过环境条件的改变进行生理诱导调控促进雨生红球藻细胞内次生代谢产物虾青素合成和积累，此阶段培养条件：培养温度为 28℃；光照强度为 2400—2900 勒克斯；无菌空气鼓入量为 0.08m³/m；最适 pH 值为 8.3；培养周期为 68h，藻细胞呈砖红色。经连续式浆渣分离装置收获雨生红球藻细胞，转速为 12000r/m，然后再经 42℃真空干燥处理，使藻细胞水份含量低于 1.5%。经分析，藻细胞虾青素含量高达细胞干重的 4.3%。

实施例四：

建立全天候封闭式大规模运行系统光生物反应器，主体反应器（水槽）长宽深为 500×150×65cm，底部及四周采用 2cm 厚的无色透明钢化玻璃，封盖部分采用厚度为 0.18mm 的复合材料透明薄膜并用胶带纸封贴，主体反应器四周及上下安装可调亮度的功率为 100W 太阳灯 27 盏；反应器内调速浆叶轮搅拌器转速为 30r/m；卷水轮转速为 50r/m，咸淡水营养液以 0.04m/s 流速循环；咸淡水营养液调配及温度调控系统配备 3 只容量 4000L 的贮液罐，搅拌器转速为 80r/m。藻细胞生长增殖及提高种群密度调控阶段的培养条件为，咸淡水营养液组成：清水 65%，海水 35%，硝酸钾 0.21g/L，醋酸钠 0.5g/L，尿素 0.4g/L，磷酸二氢钾 0.01g/L；清水及海水可经臭氧发生器杀菌；营养液采用经 70℃ 加热杀菌 25 分钟；藻细胞生长增殖温度为 17℃；光照强度为 1600—1750 勒克斯；无菌空气鼓入量为 0.3m³/m；咸淡水营养液溶解氧浓度为 55%饱和度；最适藻细胞生长增殖的 pH 值为 6.9，培养周期为 96h，藻细胞生长增殖处于对数生长期，藻细胞呈绿色。通过环境条件的改变进行生理诱导调控促进雨生红球藻细胞内次生代谢产物虾青素合成和积累，此阶段培养条件：培养温度为 28℃；光照强度为 2300—2500 勒克斯；无菌空气鼓入量为 0.1m³/m；最适 pH 值为 8；培养周期为 72h，藻细胞呈砖红色。经连续式浆渣分离装置收获雨生红球藻细胞，转速为 8000r/m，然后再经 80℃ 低温喷雾干燥处理，使藻细胞水份含量低于 1%。以上光生物反应器配置的营养液调配、控光、控温、清洗、消毒、杀菌、搅拌、鼓气、分离、干燥等装置由计算机控制实现半连续生产。经分析，藻细胞虾青素含量高达细胞干重的 4.2%。

实施例五：

建立全天候封闭式大规模运行系统光生物反应器，主体反应器（水槽）长宽深为 1500×300×70cm，底部及四周采用 3cm 厚的无色透明钢化玻璃，封盖部分采用厚度为 0.6mm 的透明薄膜并用胶粘剂封贴，主体反应器四周及上下安装可调亮度的功率为 300W 白炽灯 20 盏，30W 节能射灯 50 盏；反应器内调速浆叶轮搅拌器转速为 80r/m；卷水轮转速为 100r/m，咸淡水营养液以 0.06m/s 流速循环；咸淡水营养液调配及温度调控系统配备 3 只容量 10000L 贮液罐，搅拌器转速为 60r/m。藻细胞生长增殖及提高种群密度调控阶段的培养条件为，咸淡水营养液组成：清水 70%，海水 30%，硝酸钾 0.33g/L，醋酸钠 0.55g/L，硫酸镁 0.03g/L，磷酸二氢钾 0.08g/L，尿素 0.8g/L；清水及海水可经臭氧发生器杀菌；营养液采用经 95℃ 加热杀菌 10 分钟；藻细胞生长增殖温度为 20℃；光照强度为 1100—1600 勒克斯；无菌空气鼓入量为 1m³/m；咸淡水营养液溶解氧浓度为 54%饱

和度；最适藻细胞生长增殖的 pH 值为 6.9，培养周期为 60h，藻细胞生长增殖处于对数生长期，藻细胞呈绿色。通过环境条件的改变进行生理诱导调控促进雨生红球藻细胞内次生代谢产物虾青素合成和积累，此阶段培养条件：培养温度为 29℃；光照强度为 2300—2500 勒克斯；无菌空气鼓入量为 0.16m³/m；最适 pH 值为 8.1；培养周期为 72h，藻细胞呈砖红色。经连续式浆渣分离装置收获雨生红球藻细胞，转速为 20000r/m，然后再经 43℃真空干燥处理，使藻细胞水份含量低于 1%。经分析，藻细胞虾青素含量高达细胞干重的 4.4%。

实施例六：

建立全天候封闭式大规模运行系统光生物反应器，主体反应器(水槽)长宽深为 1000×200×68cm，底部及四周采用 2.5cm 厚的无色透明钢化玻璃，封盖部分采用厚度为 0.65mm 的透明薄膜并用胶带纸封贴，主体反应器四周及上下安装可调亮度的功率为 150W 太阳灯 18 盏，40W 日光灯 12 盏；反应器内调速浆叶轮搅拌器转速为 30r/m；卷水轮转速为 60r/m，咸淡水营养液以 0.04m/s 流速循环；咸淡水营养液调配及温度调控系统配备 3 只容量 7000L 的贮液罐，搅拌器转速为 100r/m。藻细胞生长增殖及提高种群密度调控阶段的培养条件为，咸淡水营养液组成：清水 56%，海水 44%，硝酸钾 0.38g/L，硫酸镁 0.6g/L，醋酸钠 0.38g/L，尿素 0.9g/L；清水及海水可经臭氧发生器杀菌；营养液采用经 98℃加热杀菌 6 分钟；藻细胞生长增殖温度为 21℃；光照强度为 1200—1600 勒克斯；无菌空气鼓入量为 0.9m³/m；咸淡水营养液溶解氧浓度为 49%饱和度；最适藻细胞生长增殖的 pH 值为 7.2，培养周期为 54h，藻细胞生长增殖处于对数生长期，藻细胞呈绿色。通过环境条件的改变进行生理诱导调控促进雨生红球藻细胞内次生代谢产物虾青素合成和积累，此阶段培养条件：培养温度为 28℃；光照强度为 2400—2500 勒克斯；无菌空气鼓入量为 0.13m³/m；最适 pH 值为 8.2；培养周期为 72h，藻细胞呈砖红色。经连续式浆渣分离装置收获雨生红球藻细胞，转速为 11000r/m，然后再经 45℃真空干燥处理，使藻细胞水份含量低于 1%。经分析，藻细胞虾青素含量高达细胞干重的 4.5%。

实施例七：

建立全天候封闭式大规模运行系统光生物反应器，主体反应器(水槽)长宽深为 800×150×65cm，底部及四周采用 2cm 厚的无色透明钢化玻璃，封盖部分采用厚度为 0.45mm 的透明薄膜并用胶带纸封贴，主体反应器四周及上下安装可调亮度的功率为 300W 太阳灯 8 盏，40W 日光灯 13 盏；反应器内调速浆叶轮搅拌器转速为 60r/m；卷水轮转速为 30r/m，咸淡水营养液以 0.06m/s 流速循环；咸淡水营养液调配及温度调控系统配备 3

只容量 6000L 的贮液罐，搅拌器转速为 200r/m。藻细胞生长增殖及提高种群密度调控阶段的培养条件为，咸淡水营养液组成：清水 70%，海水 30%，硝酸钾 0.33g/L，醋酸钠 0.45g/L，尿素 0.7g/L；清水及海水可经臭氧发生器杀菌；营养液采用经 96℃加热杀菌 10 分钟；藻细胞生长增殖温度为 23℃；光照强度为 1300—1600 勒克斯；无菌空气鼓入量为 0.7m³/m；咸淡水营养液溶解氧浓度为 52%饱和度；最适藻细胞生长增殖的 pH 值为 7.1，诱导调控促进细胞内次生代谢产物虾青素合成和积累的培养周期为 80h，藻细胞生长增殖处于对数生长期，藻细胞呈绿色。通过环境条件的改变进行生理诱导调控促进雨生红球藻细胞内次生代谢产物虾青素合成和积累，此阶段培养条件：培养温度为 28.5℃；光照强度为 2400—2600 勒克斯；无菌空气鼓入量为 0.18m³/m；最适 pH 值为 8.4；培养周期为 72h，藻细胞呈砖红色。经连续式浆渣分离装置收获雨生红球藻细胞，转速为 15000r/m，然后再经 40℃真空冷冻干燥处理，使藻细胞水份含量低于 1%。经分析，藻细胞虾青素含量高达细胞干重的 4.5%。

实施例八：

建立全天候封闭式大规模运行系统光生物反应器，主体反应器（水槽）长宽深为 900×160×65cm，底部及四周采用 2.5cm 厚的无色透明钢化玻璃，封盖部分采用厚度为 0.5mm 的透明薄膜并用胶带纸封贴，主体反应器四周及上下安装可调亮度的功率为 200W 太阳灯 10 盏，30W 节能灯 20 盏；反应器内调速浆叶轮搅拌器转速为 50r/m；卷水轮转速为 30r/m，咸淡水营养液以 0.05m/s 流速循环；咸淡水营养液调配及温度调控系统配备 3 只容量 8000L 的贮液罐，搅拌器转速为 200r/m。藻细胞生长增殖及提高种群密度调控阶段的培养条件为，咸淡水营养液组成：清水 68%，海水 32%，硝酸钾 0.27g/L，硫酸镁 0.01g/L，醋酸钠 0.33g/L，尿素 0.85g/L；清水及海水可经臭氧发生器杀菌；营养液采用经 96℃加热杀菌 4 分钟；藻细胞生长增殖温度为 23℃；光照强度为 1400—1600 勒克斯；无菌空气鼓入量为 0.8m³/m；咸淡水营养液溶解氧浓度为 54%饱和度；最适藻细胞生长增殖的 pH 值为 6.8，培养周期为 60h，藻细胞生长增殖处于对数生长期，藻细胞呈绿色。通过环境条件的改变进行生理诱导调控促进雨生红球藻细胞内次生代谢产物虾青素合成和积累，此阶段培养条件：培养温度为 28.5℃；光照强度为 2500—2600 勒克斯；无菌空气鼓入量为 0.1m³/m；最适 pH 值为 8；培养周期为 65h。经连续式浆渣分离装置收获雨生红球藻细胞，转速为 13000r/m，然后再经 55℃热风干燥处理，使藻细胞水份含量低于 1.2%。经分析，藻细胞虾青素含量高达细胞干重的 4.2%。