(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 109251854 A
(43)申请公布日 2019.01.22

(21)申请号 201710575742.0

(22)申请日 2017.07.14

(71)申请人 中国石油化工股份有限公司
地址 100728 北京市朝阳区朝阳门北大街22号
申请人 中国石油化工股份有限公司石油化工科学研究院

(72)发明人 荣峻峰 黄绪耕 周旭华 朱俊英 程琳 纪洪波

(51)Int.Cl.
C12M 1/38(2006.01)
C12M 1/36(2006.01)
C12M 1/34(2006.01)
C12M 1/04(2006.01)
C12N 1/12(2006.01)
C12P 1/00(2006.01)
B01D 53/84(2006.01)
B01D 53/56(2006.01)
C11B 1/10(2006.01)
C10G 1/04(2006.01)
C12R 1/89(2006.01)

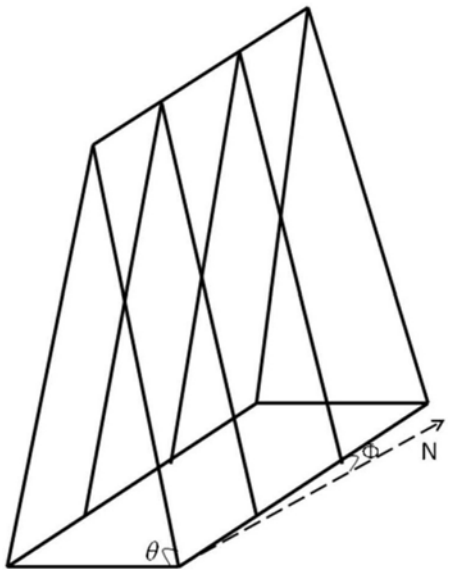
权利要求书1页 说明书15页 附图5页

(54)发明名称

利用阳光培养光合微生物的装置及方法

(57)摘要

本发明涉及一种利用阳光培养光合微生物的装置,包括:(1)由柔性透明薄膜袋构成的封闭养殖空间;(2)若干用于气体和液体输送的出入口;(3)位于所述封闭养殖空间底部的曝气装置;和(4)支架,所述支架由两个支撑面呈Λ形布置而成;所述支撑面与水平面的夹角为θ,θ为大于30°至小于90°,所述支撑面与水平面的交线与南北向的夹角为φ,φ为0°～15°,所述的支撑面用于支撑所述的封闭养殖空间。本发明还涉及使用该装置培养光合微生物的方法及生产生物质、生物能源的方法。本发明的装置和方法更适合大规模、高效率地培养光合微生物。



CN 109251854 A

1.一种利用阳光培养光合微生物的装置,包括:(1)由柔性透明薄膜袋构成的封闭养殖空间;(2)若干用于气体和液体输送的出入口;(3)位于所述封闭养殖空间底部的曝气装置;和(4)支架,所述支架由两个支撑面呈Λ形布置而成;所述支撑面与水平面的夹角为θ,θ为大于30°至小于90°,所述支撑面与水平面的交线与南北向的夹角为φ,φ为0°～15°,所述的支撑面用于支撑所述的封闭养殖空间。

2.按照权利要求1所述的装置,其特征在于,所述封闭养殖空间的厚度为10mm～200mm,优选为20mm～100mm;和/或

所述封闭养殖空间的长度为200mm～2000mm,优选为600mm～1200mm;和/或

所述封闭养殖空间被纵向分隔成10mm～200mm宽的沿上下方向延伸的小空间,这些延伸的空间在其顶部和底部相互连通,且位于两侧的小空间下部的宽度大于上部的宽度(优选地,所述封闭养殖空间的分隔是由热封线沿直线分隔方形柔性透明薄膜袋而形成的,中间的热封线平行于所述方形柔性透明薄膜袋的边)。

3.按照权利要求1所述的装置,其特征在于,多个所述的封闭养殖空间的曝气装置统一控制,且只有在曝气装置内部气压P≥1.2P_0时才发生曝气,P_0为所述封闭养殖空间在设计养殖量下的最底部的水压;和/或

多个所述的封闭养殖空间在养殖液面以下通过管道相互连通;和/或

设置有驱动培养液在多个所述的封闭养殖空间之间循环的培养液循环子系统。

4.按照权利要求1所述的装置,其特征在于,所述θ为70°至85°;和/或

当所述封闭养殖空间为多个(比如>20个)时,各支架相邻布置,基本或完全覆盖地面。

5.一种利用阳光培养光合微生物的系统,包括:(1)权利要求1～4中任一所述的装置;(2)培养基的配制子系统;(3)培养液pH值监控子系统;(4)培养液温度监控子系统;(5)输入气体净化子系统;和(6)培养液输出及采收子系统。

6.一种利用阳光培养光合微生物的方法,其特征在于,采用权利要求1～4中任一所述的装置或权利要求5所述的系统培养光合微生物。

7.按照权利要求6所述的方法,其特征在于,采用权利要求1所述的装置;和/或

Imax>40000lux,优选大于>60000lux,更优选>80000lux,进一步优选>100000lux。

8.按照权利要求7所述的方法,其特征在于,驱动培养液在多个所述的封闭养殖空间之间循环,循环量<10V/h,V为封闭养殖空间的体积。

9.按照权利要求6所述的方法,其特征在于,所述的光合微生物为微藻;和/或

养殖方式为兼养培养;和/或

曝气量为0.5L/(L·min)～6L/(L·min),优选为0.8L/(L·min)～4L/(L·h)。

10.一种利用阳光培养光合微生物与工业废气脱硝的联合方法,其特征在于,用工业废气脱硝获得的NOx固定物为权利要求6的方法提供氮源。

11.一种生产生物质的方法,包括从光合微生物中提取油组合物、蛋白质、碳水化合物、核酸、色素、维生素、生长因子之一或其任意组合的步骤;其中,所述的光合微生物由权利要求6或10的方法获得。

12.一种生产生物能源的方法,其特征在于,原料由权利要求11所述的方法获得。

利用阳光培养光合微生物的装置及方法

技术领域

[0001] 本发明涉及利用阳光培养光合微生物的装置及方法，特别涉及利用阳光大规模培养光合微生物的装置及方法。

背景技术

[0002] 光合微生物是一类能够利用光进行光合作用的生物，例如光合细菌和微藻。微藻是一类在水中生长的种类繁多且分布极其广泛的低等植物，它是由阳光驱动的细胞工厂，通过微藻细胞高效的光合作用，吸收CO_2，将光能转化为脂肪或淀粉等碳水化合物的化学能，并放出O_2。利用微藻生产生物能源与化学品有望同时达到替代化石能源、减少CO_2排放等目的。由于微藻具有极高的生产效率，所以近年来得到人们的广泛关注。微藻的另一个特点是许多微藻种类，例如小球藻、栅藻、单针藻、螺旋藻等，不仅可以利用光能自养培养，还可以利用有机碳源如葡萄糖进行化能异养培养，还可以同时进行光能自养与化能异养的兼养培养。当微藻进行异养或兼养培养时其效率远高于自养培养，尤其是对于微藻的兼养培养，可以同时利用光能和有机碳的化学能，高效地生产特定的微藻生物质，如油脂、蛋白质、多糖等，具有十分重要的意义。

[0003] 自养或兼养培养的光源可以是阳光，也可以是人工光源。利用阳光在室外培养可以降低生产成本，但受自然条件的影响大，特别是光照强度不稳定，难以控制，在光照不足时的生产效率低；人工光源的光强可根据需要设置，但能耗较大，一般仅用于实验室研究或小规模生产，不适合生产生物能源。

[0004] 光合微生物一般在光生物反应器(或装置)中进行培养。光生物反应器目前主要有开放式和封闭式两种类型。

[0005] 开放式光生物反应器中最为典型的是跑道池，它是目前广泛应用的培养微藻的装置，其结构为带有浆轮的跑道型浅池，池中盛放养殖的藻液，池中藻液的厚度一般为15cm～30cm，藻液需要在跑道池中快速地流动，藻液流动的线速度一般为30cm/s～200cm/s，藻液在浆轮的驱动下沿着跑道池流动，接受阳光迅速生长。开放池的优点是结构简单、成本低、易于放大，缺点是微藻生长的效率较低、藻液浓度低(最终藻液的光密度值一般小于2)，且由于开放的缘故，培养过程中易遭受敌害生物的侵袭，微藻的生长条件无法精确控制，水分蒸发大等。开放池反应器无法使用异养或者兼养的方法养殖微藻，因为这种方式无法控制藻液中的微生物污染。

[0006] 封闭式光生物反应器有各种形式，其根本特征是将培养液“封闭”在一个透光的空间中，避免外部环境的物质进入培养系统，比如避免敌害生物的侵袭，同时能够精确控制各种培养条件，从得到更好的培养效果。封闭式光生物反应器的几何形状和设计结构是影响其性能的关键因素，现有技术中封闭式光生物反应器的设计形式主要包括管道式、平板式、柱式(或者吊袋式)三种。早期人们广泛采用管道式光生物反应器，其优点是比表面积较大，但存在氧解析困难、难以清洗、机械力损伤等问题，同时放大困难，造价较高，并不适于大规模养殖微藻。柱式光生物反应器解决了氧解析困难的问题，但存在放大时光照不充分的问

题。平板式光生物反应器的基本形状和结构通常为采用各种形式支撑并连接的两块垂直的透光平板夹成的培养空间，具有比表面积大、混合均匀、氧解析容易等优点，例如CN100587054C、CN101709264B，以及WO2005/006838中公开的设计。

[0007] 平板式光生物反应器可以水平、垂直或倾斜设置，一般为垂直设置。为了使平板式光生物反应器中微藻光照更加充分，人们还设计了各种形式的扰流件放置在平板式光生物反应器中以强化藻液的湍动效果。中国专利申请CN102260629A公开了一种板式光生物反应器，包括至少一个流道，其中，每一流道包括：至少2块上挡板，设置于光照面的内壁上；至少2块下挡板，设置于无光面的内壁上；其中，上挡板和下挡板的长度方向与培养液流动方向的夹角为20°～70°，且夹角方向相反。该板式反应器具有特定的内部结构，能够实现藻细胞在运动是在光生物反应器的光区和暗区之间穿梭，实现藻细胞的交替曝光，从而提高微藻的培养效率。但是，该方案操作时需要将全部培养液循环流动起来以通过光生物反应器内的挡板，显著增加了运行能耗。

[0008] CN105219616A进一步改进了平板式光生物反应器的结构，并采用柔性薄膜结构降低成本。已知有很多采用柔性薄膜作为光生物反应器材质的方案，例如：CN102373151B、CN101868530B。为了得到较好的光照效果，柔性薄膜袋的厚度必须控制在一定得范围内，例如<200mm，但是不同于价格昂贵的硬透明板式光生物反应器，柔性薄膜如果不加以特殊限制，则藻液会在重力的作用下将其自然撑开成圆柱型，因此要想控制柔性薄膜袋的厚度必须采用一定的手段对柔性薄膜袋进行限制。可以采用热封的方法将柔性薄膜袋分隔成更小的空间，这样在其装入藻液后藻液就被限制成为特定厚度的薄层。然而，在实际使用过程中，这种热封的限制极容易在水压的作用下使柔性薄膜袋产生许多褶皱和死角，严重影响微藻培养的效果。

[0009] 曝气是微藻养殖中的一个非常重要的因素。曝气气泡直径越小，气液间的传质越好，但曝气气泡直径过小，会产生大量泡沫，严重影响微藻的正常养殖，实际上利用泡沫气浮是一种从藻液中分离微藻的方法，比如CN102127509A。曝气不均匀可能成为规模化养殖微藻中的一个严重的技术问题，在需要统一控制多个曝气装置时尤其如此。

[0010] 培养液温度是影响光合微生物生长的重要因素。在炎热的夏季，将培养液封闭在板式反应器中，无法通过水分蒸发散热，容易导致培养液温度急剧升高，造成培养失败，因此，换热问题是板式反应器规模化应用中必须解决的关键问题。然而，板式反应器厚度较小，不宜在其内部换热，如果在厚度较小的板式培养空间内部通过管道或者片层换热，则不仅大大减少了培养体积并影响光照，而且容易造成微藻在换热管道上的粘附和堆积，对培养不利。现有技术一般在板式反应器光照面喷水，通过水分的蒸发来降温，而水分蒸发后会在光照面上形成难清理的硬垢。对于软体薄膜材质的板式反应器，清理硬垢时还易对薄膜造成损坏。换热也会造成物耗和能耗的增加，单纯依靠换热控温还不是理想的解决方案，在规模化养殖微藻时，需要找到更合理的解决办法。

[0011] 现有技术在解决传光问题时，主要考虑的是使光合微生物接受更充分的光照，主要的手段是增加面积体积比(受光面积与培养体积之比)和加强培养液湍动。然而，增加面积体积比的程度有限，而加强培养液湍动必然多消耗能源。现有技术中，无论采用何种形式的光生物反应器，均需要将藻液搅动起来，藻液运动的线速度一般在30cm/s～200cm/s的范围内，而搅动大量藻液的能耗在微藻培养中是十分巨大的，对于以生物能源为目的的微藻

培养而言，其能耗甚至是不可接受的。

[0012] 也有少量关于如何高效利用阳光的文献公开，比如CN105385563A、CN102408980A，这些文献公开的方法是为了尽可能地覆盖地面，避免漏光到地面上。

[0013] 尽管已有大量关于化工过程传质的文献，但光合微生物培养过程的传质与化工过程的传质不同，有关研究还不够深入。一方面，大规模培养时，特别是以获得生物能源为目的时，传质过程的能耗问题不容忽视；另一方面，光合微生物的培养过程中还存在化工过程所没有的问题，比如机械力(或剪切力)损伤、传光等。

[0014] 对于微藻的兼养培养，现有技术主要解决的仍是“如何使微藻接受更充分光照”的问题。如CN103131638A通过凸透镜或凹面反射镜等太阳光会聚装置，将太阳光强度提升1.5～10倍，用于光区容器照射，这种内置部件显著增加了反应器制造成本和运行成本。

[0015] 以能源为目的的规模化养藻要求大量、高效地积累油脂，不可避免地要将大量氮源同步转化为蛋白质。大量消耗常规氮源对养殖微藻而言是昂贵的，如果能从工业大量排放的NOx获得好用的氮源，就可以解决规模化养藻的氮肥来源难题，但这样做需要使养藻的氮源消耗速率与废气脱硝速率相匹配。

[0016] 综上所述，现有技术还不能全面解决传光、传质、传动、清洁和微生物污染的问题，或者能耗大、成本高，或者过于复杂、操作繁琐，因此都不能大规模、高效率地培养光合微生物。为了实现此目的，亟需研发新的装置与技术，全面解决前述的问题。

发明内容

[0017] 本发明提供了一种利用阳光培养光合微生物的装置及方法，该装置和方法更适合大规模、高效率地培养光合微生物(比如微藻)，特别是以获得生物能源和/或降耗减排为目的的培养过程。

[0018] 本发明的主要内容如下。

[0019] 1.一种利用阳光培养光合微生物的装置，包括：(1)由柔性透明薄膜袋构成的封闭养殖空间；(2)若干用于气体和液体输送的出入口；(3)位于所述封闭养殖空间底部的曝气装置；和(4)支架，所述支架由两个支撑面呈Λ形布置而成；所述支撑面与水平面的夹角为θ，θ为大于30°至小于90°，所述支撑面与水平面的交线与南北向的夹角为Φ，Φ为0°～15°，所述的支撑面用于支撑所述的封闭养殖空间。

[0020] 2.按照1所述的装置，其特征在于，所述封闭养殖空间的厚度为10mm～200mm，优选为20mm～100mm；和/或

[0021] 所述封闭养殖空间的长度为200mm～2000mm，优选为600mm～1200mm；和/或

[0022] 所述封闭养殖空间被纵向分隔成10mm～200mm宽的沿上下方向延伸的小空间，这些延伸的空间在其顶部和底部相互连通，且位于两侧的小空间下部的宽度大于上部的宽度(优选地，所述封闭养殖空间的分隔是由热封线沿直线分隔方形柔性透明薄膜袋而形成的，中间的热封线平行于所述方形柔性透明薄膜袋的边)。

[0023] 3.按照前述任一的装置，其特征在于，多个所述的封闭养殖空间的曝气装置统一控制，且只有在曝气装置内部气压$P \geq 1.2P_0$时才发生曝气，P_0为所述封闭养殖空间在设计养殖量下的最底部的水压；和/或

[0024] 多个所述的封闭养殖空间在养殖液面以下通过管道相互连通；和/或

[0025] 设置有驱动培养液在多个所述的封闭养殖空间之间循环的培养液循环子系统。

[0026] 4.按照前述任一的装置,其特征在于,所述封闭养殖空间被纵向分隔成100mm～200mm宽的沿上下方向延伸的小空间。

[0027] 5.按照前述任一的装置,其特征在于,所述θ为60°至87°,优选为70°至85°;和/或

[0028] 当所述封闭养殖空间为多个(比如＞20个,＞100个,＞500个,＞1000个或＞2000个)时,各支架相邻布置,基本或完全覆盖地面。

[0029] 6.一种利用阳光培养光合微生物的系统,包括:(1)1～5中任一所述的装置;(2)培养基的配制子系统;(3)培养液pH值监控子系统;(4)培养液温度监控子系统;(5)输入气体净化子系统;和(6)培养液输出及采收子系统。

[0030] 7.一种利用阳光培养光合微生物的方法,其特征在于,采用1～5中任一所述的装置或6所述的系统培养光合微生物。

[0031] 8.按照7所述的方法,其特征在于,采用1所述的装置;和/或

[0032] Imax＞40000lux,优选大于＞60000lux,更优选＞80000lux,进一步优选＞100000lux。

[0033] 9.按照7或8所述的方法,其特征在于,驱动培养液在多个所述的封闭养殖空间之间循环,循环量＜10V/h,V为封闭养殖空间的体积。

[0034] 10.按照7～9任一所述的方法,其特征在于,所述的光合微生物为微藻;和/或

[0035] 养殖方式为兼养培养;和/或

[0036] 曝气量为0.5L/(L·min)～6L/(L·min),优选为0.8L/(L·min)～4L/(L·h)。

[0037] 11.一种利用阳光培养光合微生物与工业废气脱硝的联合方法,其特征在于,用工业废气脱硝获得的NOx固定物为7～10中任一所述的方法提供氮源。

[0038] 12.一种生产生物质的方法,包括从光合微生物中提取油组合物、蛋白质、碳水化合物、核酸、色素、维生素、生长因子之一或其任意组合的步骤;其中,所述的光合微生物由7-11任一所述的方法获得。

[0039] 13.一种生产生物能源的方法,其特征在于,原料由12所述的方法获得。

[0040] 本发明主要取得了以下的技术效果。

[0041] 第一,本发明采用“封闭、薄层”的培养方式,通过柔性薄膜养殖空间的合理放置与组合分散阳光光照强度,明显提高了光合微生物的培养效果。结合藻液外循环换热等技术手段,综合解决了光强、控温、清洁和换热能耗高的问题,使大规模、高效率地培养光合微生物,特别是兼养微藻,成为可能。

[0042] 第二,解决了规模化养殖中统一控制多个曝气装置的技术问题,特别是解决了在特殊设计(分隔为多个小空间)下的多个光生物反应器的曝气不均匀的技术问题。采用本发明的曝气方式,避免了曝气不均匀的问题,提高了微藻养殖效率。

[0043] 第三,采用廉价的柔性透明薄膜袋养殖光合微生物,通过本发明特殊的设计避免了柔性薄膜袋在使用时产生严重的褶皱和死角。可实现低流速、高密度、大规模的培养,不仅降低了传动能耗,而且提高了光合微生物的生产力。

[0044] 第四,本发明的装置结构简单、建造成本低、操作方便、适应性更强。

[0045] 本发明的其他特征和优点将在具体实施方式部分进一步详细说明。

附图说明

[0046] 图1为本发明中一个封闭养殖空间及其横截面的示意图。

[0047] 图2为本发明中用于支撑封闭养殖空间的支架的示意图。

[0048] 图3为本发明中有两个封闭养殖空间的装置的示意图。

[0049] 图4为本发明中有八个封闭养殖空间的装置的示意图。

[0050] 图5为本发明中外循环换热器的示意图。

[0051] 图6为实施例1和对比例1、2的微藻生长曲线。

[0052] 图7为实施例2、3和对比例3、4的微藻生长曲线。

[0053] 图8为实施例4、5和对比例5、6的微藻生长曲线。

[0054] 图9为实施例6、7及对比例7的微藻生长曲线。

[0055] 附图标记说明：

[0056] 图1中，100为曝气管线，101为进气口，102为出气口，103为进液口，104为出液口，105为热封线。

[0057] 图2中，θ为支撑面与水平面的夹角，N指示北向，Φ为支撑面和水平面的交线与南北向的夹角。

[0058] 图3中，A1和A2为两个封闭养殖空间。

[0059] 图5中，111为培养液流入口，112为培养液流出口，113为换热介质流入口，114为换热介质流出口。

具体实施方式

[0060] 以下结合具体实施方式详述本发明，但需要说明的是，本发明的保护范围不受这些具体实施方式和原理性解释的限制，而是由权利要求书来确定。

[0061] 本发明中，除了明确说明的内容之外，未提到的任何事宜或事项均直接适用本领域已知的那些而无需进行任何改变。而且，本文描述的任何实施方式均可以与本文描述的一种或多种其他实施方式自由结合，由此形成的技术方案或技术思想均视为本发明原始公开或原始记载的一部分，而不应被视为是本文未曾披露或预期过的新内容，除非本领域技术人员认为该结合明显不合理。

[0062] 本发明所公开的所有特征可以任意组合，这些组合应被理解为本发明所公开或记载的内容，除非本领域技术人员认为该组合明显不合理。本说明书所公开的数值点，不仅包括实施例中具体公开的数值点，还包括说明书中各数值范围的端点，这些数值点所任意组合的范围都应被视为本发明已公开或记载的范围。

[0063] 本发明中的技术和科学术语，给出定义的以其定义为准，未给出定义的则按本领域的通常含义理解。

[0064] 本发明中，上、下或高度等术语均针对重力方向而言。

[0065] 本发明中，“封闭”是指，除了培养光合微生物所需要的物质和循环的培养液以外，外部环境中的物质无法进入培养空间。

[0066] 本发明中，“南北向”是指，在水平面内向正南和正北方向延伸的直线。

[0067] 本发明中，“光照面”是指，阳光直接照射的表面。

[0068] 本发明中,一天内,阳光在与其垂直的平面上的最大光照强度用I_{max}表示。

[0069] (一)利用阳光培养光合微生物的装置

[0070] 本发明提供了一种利用阳光培养光合微生物的装置,包括:(1)由方形柔性透明薄膜袋构成的封闭养殖空间;(2)若干用于气体和液体输送的出入口;(3)位于所述封闭养殖空间底部的曝气装置;和(4)支架,所述支架由两个支撑面呈Λ形布置而成;所述支撑面与水平面的夹角为θ,θ为大于30°至小于90°,所述支撑面与水平面的交线与南北向的夹角为Φ,Φ为0°～15°,所述的支撑面用于支撑所述的封闭养殖空间。

[0071] 根据本发明的装置,任何适宜的透明薄膜都是可用的,只要有足够的强度和透光率,能实现本发明的结构设计及目的即可,比如聚丙烯薄膜或聚丙烯/尼龙复合薄膜。

[0072] 根据本发明的装置,所述封闭养殖空间培养时的厚度为10mm～200mm,优选为20mm～100mm。为了实现柔性薄膜袋培养微藻时的厚度指标,必须将柔性薄膜袋进行分隔限制。根据本发明,可以采用分隔部件(比如采用热封的方法,热封线即分隔部件)将柔性透明薄膜袋纵向分隔成10mm～200mm宽的沿上下方向延伸的小空间。厚度为10mm～200mm时,分隔的宽度范围一般为20mm～400mm;厚度为20mm～100mm,分隔的宽度范围一般为40mm～200mm。应该理解到,所述的分隔限制是为了保证柔性薄膜袋培养微藻时的厚度指标,分隔部件可以限制或不限制其两侧的物质交换。按照本发明,这些延伸的空间在其顶部和底部相互连通,这样既达到了控制柔性薄膜袋养殖液厚度的目的,同时便于藻液均匀混合以及曝气均匀。发明人在实践中发现,如果按照常规的方法将柔性薄膜袋纵向沿直线平行等分分割(被分割的小空间上部和下部的宽度相同),则在灌入培养液时柔性薄膜袋两侧会因为这种分隔限制在下部形成严重的褶皱死角,这样的结构会极大地影响微藻的养殖,必须加以解决。发明人经过反复试验发现,在对柔性薄膜袋纵向沿直线进行分隔时,如果位于两侧的热封线在下方向袋内倾斜,使分隔的最外侧小空间下部的宽度大于其上部的宽度,则可以较好地解决上述褶皱与死角问题。一个优选的方案是,被分隔的两侧小空间中,$L_d \geq 1.2L_u$,L_d为两侧小空间最下部的宽度,L_u为两侧小空间最上部的宽度。

[0073] 根据本发明的装置,所述封闭养殖空间的长度一般为200mm～2000mm,优选为600mm～1200mm;宽度一般大于200mm,优选大于600mm,可以为600mm～1200mm。

[0074] 根据本发明的装置,所述封闭养殖空间的分隔是由热封线沿直线分隔方形柔性透明薄膜袋而形成的,中间的热封线平行于所述方形柔性透明薄膜袋的边;位于两侧的两条热封线由上而下向中间的热封线倾斜(由此使位于两侧的小空间下部的宽度大于上部的宽度)。

[0075] 根据本发明的装置,纵向分隔的小空间的长度应使所述封闭养殖空间在整体上满足本发明的厚度指标。一般地,所述小空间的长度为封闭养殖空间长度的3/4～9/10。

[0076] 根据本发明的装置,所述封闭养殖空间设有若干用于气体和液体输送的出入口,用于输入、输出空气和/或二氧化碳、输入培养液和补充的营养物质、输出收获的藻液等。

[0077] 采用柔性薄膜袋对微藻进行养殖,必须对藻液进行均匀的曝气才能获得较好的养殖效果,特别是在将所述柔性薄膜袋分隔成纵向小空间的情况下更是如此。较大的曝气孔会曝出较大的气泡,这样对于藻液的混合十分有利,且不容易产生过多的泡沫。然而,对于较大的曝气孔必须使所有的曝气孔位置水平才能在正常的曝气量下实现所有曝气孔的均匀曝气。实际上,由于安装操作的原因,曝气管难以安放得绝对水平。更严重的是,在规模化

养殖中，不同的柔性薄膜袋之间，安装高度、曝气管的相对位置几乎无法安装得完全一致。这些因素会导致位于浅处的曝气孔曝气，而位于深处的曝气孔不曝气，这种曝气的不均匀性会对微藻的养殖效果造成不利影响。一个解决方案是单独控制每个曝气管，甚至是每个曝气孔，以使所有曝气孔均匀曝气，但是这对于大规模的养殖会极大地增加工作量，实际上是难以接受的。本发明经过反复研究发现，可以通过控制曝气管的材质和/或结构使所述曝气管只有在曝气管内部气压$P \geq 1.2P_0$时才发生曝气(P_0为所述封闭养殖空间在设计养殖量下的最底部的水压)。这样就可以在曝气孔在液面下的深度不一致时，实现均匀曝气，解决了前述的难题。为了实现上述目的，根据所述封闭养殖空间的结构、尺寸和设计的养殖量，曝气管须选用一定厚度的弹性体材料，且曝气缝隙须为一定的尺寸，根据本发明的前述教导及简单实验，本领域技术人员可容易地选择。

[0078] 为了大规模、高效率的养殖，所述封闭养殖空间必然为多个(比如≥20个、≥100个、≥500个、≥1000个或≥2000个)，最好相邻布置。根据本发明的装置，在有多个所述的封闭养殖空间时，部分或全部的封闭养殖空间在养殖液面以下通过管道相互连通(优选在所述封闭养殖空间的底部联通)，从而将各培养空间的全部或分组通过管道连接在一起；优选地，所述装置还设置有驱动培养液在所述封闭养殖空间之间循环的培养液循环系统。封闭养殖空间发明人经过反复实践认识到：将各培养空间的全部或分组相互连通，并使藻液在培养空间之间循环能明显改进整体的养殖效果。因为在实际采用阳光培养微藻时，由于一天之内阳光的光照角度与方位不同，所以各培养空间接受的光照和热量是不同的，导致某一时刻一些培养空间光照强烈，温度较高，而另一些培养空间光照不足，温度较低，如果不采取措施，则可能导致部分微藻因为温度过高或者光照过强而死亡，同时另一部分的微藻则因光照不足、温度较低而导致养殖效率不理想；另一方面，实际操作时，当采用多个封闭养殖空间养殖微藻时，需要将各个封闭养殖空间在液面下连通起来，这样一方面便于进料和采收，同时也可以使各个光生物反应器的液位保持一致，得到较好的养殖效果。

[0079] 根据本发明的装置，所述支架由两个支撑面呈Λ形布置而成。所述的支撑面，既可以是由连续平面形成的支撑面，比如不锈钢板形成的支撑面；也可以是刚性平面框架形成的支撑面，比如由钢筋框架形成的支撑面。

[0080] 根据本发明的装置，所述的两个支撑面之间为固定连接或转动连接。

[0081] 根据本发明的装置，所述支撑面与水平面的夹角为θ(所述封闭养殖空间的光照面与水平面的夹角也基本为θ)，$30° < \theta < 90°$。两个支撑面与水平面的夹角θ，可以相等或不等，分别取自30°、45°、60°、70°、75°、80°、83°、85°、86°、87°、88°和89°中任意二者所组成的范围。优选同组的两个封闭养殖空间的光照面与水平面的夹角θ相等，且大于75°。与水平面的夹角θ越大，单位占地面积摆放的培养空间就越多，这样的设计有效“稀释”了倾斜培养空间上接受的阳光与热量。应该理解到，由于本发明装置的结构设计、布置方向及与水平面之间较大夹角对阳光的“稀释”，加以通过藻液循环系统使藻液在各培养空间之间循环，有效地缓解了换热问题。因此，即使以较低的速度驱动培养液换热，也能将培养液的温度控制在合理的范围内。

[0082] 根据本发明的装置，为了在规模化生产中减少占地面积，当支架为多个时，各支架相邻布置，基本或完全覆盖地面。

[0083] 培养温度既是影响光合微生物生长的主要因素，也是影响培养过程中传质的因

素。对于封闭式光生物反应器，由于培养液被封闭在透光的空间内，很容易造成培养液温度升高，尤其是夏季户外培养中，强烈的阳光很快会造成培养液的温度飙升至难以接受的程度，必须予以解决。尽管现有技术中，存在着大量用于物理、化学过程的换热技术，但这些技术都不适合于光合微生物的大规模培养过程，特别是以获得生物能源为目的的培养过程，培养液的温度控制已经成为制约大规模培养光合微生物的关键性问题。

[0084] 现有技术中，一般采用向光照面喷水的降温方式，一方面显著增加了水耗，另一方面很容易在光生物反应器的光照面上形成盐垢，不仅影响传光，而且清洁起来十分困难和麻烦；这一问题在兼养培养微藻时更加突出，有必要寻找更优的解决方案。

[0085] 根据本发明的装置，通过培养空间倾斜角度的控制和培养液循环可以有效缓解实际培养过程中的温度控制问题。根据本发明的装置，一个优选的方案还包括在所述培养液循环系统的循环回路上，设有与培养液换热的换热器。当培养液的温度超出适宜温度时，通过将培养液循环至培养装置外的换热器中，可将培养液温度控制在适宜温度范围内，实现稳定可靠的培养，从而避免因为在培养空间内部设置换热装置而导致遮挡光线、沉积微藻以及减少有效培养体积，也避免了采用外喷淋系统而导致水分蒸发后盐垢的产生，遮挡光线阻碍正常的培养。所述的换热器可以采用任何已知、成熟的工业换热器。

[0086] 根据本发明的装置，所述支撑面与水平面的交线与南北向的夹角为φ，φ为0°～15°，优选为0°。本发明的这种设置方式显著不同于现有技术，并且由于这种设置方式，一方面，在光照最充足的夏季，使阳光在光照面上的光照强度十分适合于光合微生物的快速生长；另一方面，在光照最强烈时，有效地使阳光“稀释”到更大的培养面积上，使控温更加容易，物耗和/或能耗更低，因此有利于大规模、高效率地培养光合微生物。

[0087] 根据本发明的装置，在I_{max}＞40000lux时更具优势，优选I_{max}＞60000lux，更优选I_{max}＞80000lux，进一步优选I_{max}＞100000lux。

[0088] 根据本发明的装置，θ和φ的取值可以在最需要的时候使阳光“均匀稀释”到更大的培养面积上，在阳光光照最强时，使阳光更合理地分布于培养面积上，避免部份培养面下的微藻因光照过强而遭受损伤，也避免部分培养面积下的微藻因光照不充分而生长缓慢，从而提高光合微生物的培养效果。

[0089] 根据本发明的装置，在光合微生物的培养过程中，θ和φ为定值。特别是在阳光最充足的时段内(比如夏季)，本发明中的θ和φ取值可取得更优的培养效果。已有文献公开了“根据阳光的方向调节光生物反应器的设置方向”，这些文献的目的是使光生物反应器接受更充足的光照，并非“稀释光”的目的。另外，对于规模化养殖微藻而言，人工或自动化频繁调节光生物反应器的设置方向，或者带来极其繁琐的操作，或者使操作能耗大大增加，难被工业化生产所接受。

[0090] 根据本发明的装置，在驱动光合微生物运动时，光合微生物(微藻)的运动线速度小于30cm/s，优选小于20cm/s。现有技术中，当光合微生物(特别是微藻)的浓度较高或光照太强时，为了保证光合微生物不相互遮挡，提高群体的光合作用效率，或避免强光损伤，须使培养液快速流动起来，如果培养液的流动速度较低(藻液运动的线速度＜30cm/s)，则会显著地降低光合微生物的培养效率，而要维持较高的流动速度则必然增加能耗。为了提高培养液湍动的效果，通常还要设置各种形式的扰流构件，这样做既提高了制作成本，又进一步增加了操作能耗。而采用本发明的方法，由于合理地“控制”了阳光在封闭养殖空间光照

面上的光照强度和封闭养殖空间的厚度，即使光合微生物以极低的速度运动，也能获得好的培养效果。

[0091] 根据本发明的装置，对驱动光合微生物运动的方式没有特别的限制，现有适宜的方式均可为本发明所用，比如采用剪切力小的或零剪切力的隔膜泵或蠕动泵。

[0092] 根据本发明的装置，可以仅通过曝气使光合微生物扰动。

[0093] 所述的设计养殖量为培养时要向每个封闭养殖空间中灌入的培养液量。应该理解到，各个封闭养殖空间中实际灌入的培养液量彼此略有不同。

[0094] (二)利用阳光培养光合微生物的系统

[0095] 本发明提供了一种利用阳光培养光合微生物的系统，包括：(1)前述任一的装置；(2)培养基的配制子系统；(3)培养液pH值监控子系统；(4)培养液温度监控子系统；(5)输入气体净化子系统；和(6)培养液输出及采收子系统。

[0096] 根据本发明的系统，所述的装置用于培养光合微生物，比如微藻。

[0097] 根据本发明的系统，所述的培养基配制子系统用于配制光合微生物，比如微藻，生长所需的培养基。

[0098] 根据本发明的系统，所述的培养液pH值监控子系统包括pH值测量仪表、信号反馈装置和CO_2控制阀门。当pH高于设定值时，通过信号反馈，使CO_2控制阀门开启，向培养液通入CO_2使培养液的pH值降低；当培养液的pH低于设定值时，通过信号反馈，使CO_2控制阀门关闭。这样，通过pH值测量、信号反馈和阀门控制，可实现对培养液pH值的自动控制。本发明的系统中，不排除“使用其他pH值调节剂”的设置。

[0099] 根据本发明的系统，所述的培养液温度监控子系统包括温度测量仪表、信号反馈装置和温度控制装置(循环泵或水喷淋装置)，当温度高于设定值时，通过信号反馈，使循环泵启动，将培养液循环至培养装置外的换热器中，进行换热降温，从而实现对培养液温度稳定可靠的控制；或者当温度高于设定值时，通过信号反馈，使水喷淋装置启动，对所述封闭养殖空间的下表面喷水，从而实现对培养液温度稳定可靠的控制。

[0100] 根据本发明的系统，所述的培养液输出及采收子系统用于当光合微生物培养结束时，将其输送出所述封闭养殖空间并将光合微生物，比如微藻采收。

[0101] 另外，为了更好地观测培养条件及光合微生物的生长状态，根据实际需要，还可以在培养装置中设置溶氧探测器、温度探测器、光强度探测器、电导率探测器、光合微生物浓度探测器等本领域技术人员所知的用于观测培养条件及光合微生物生长状态的各种仪器中的一种或多种，以便实时观测和监控各个参数。

[0102] 通过上述的系统，可以方便地实现对培养条件的稳定控制，从而高效、可靠、低成本地培养光合微生物。

[0103] (三)利用阳光培养光合微生物的方法

[0104] 本发明提供了一种利用阳光培养光合微生物的方法，其中，采用前述任一的装置或者前述任一的系统。

[0105] 根据本发明的方法，所述支架由两个支撑面呈Λ形布置而成，所述支撑面和水平面的交线与南北向的夹角为Φ，Φ为0°～15°(优选为0°)；并且所述支架为多个(比如＞20个，或＞100个，或＞500个，或＞1000个)，各支架相邻布置，基本或完全覆盖地面。根据本发明的方法，既不同于现有的覆盖地面以避免漏光的方法，也不同于随阳光照射方向变化而

频繁调节光生物反应器布置方向的方法，本发明采用特定的装置设计和布置方向，适度“调节”阳光，在阳光照射最强烈的时段分散稀释光照强度，而在其他时段依靠直射光和散射光培养，不仅可取得更佳的培养效果；而且更方便控制培养温度，节约了培养过程的物耗和/或能耗。

[0106] 根据本发明方法的优选实施方式，既不同于跑道池驱动培养液“高速”运动，也不同于板式反应器一般靠气动混合培养液，更不同于现有技术仅在单一的反应器中混合培养液的方式；在本发明的特殊设计下，驱动培养液以较低速度在所述封闭养殖空间之间循环，能明显提高光合微生物的整体培养效果。根据本发明方法的优选实施方式，驱动培养液在所述封闭养殖空间之间循环，循环量＜10V/h(可以为2V/h～5V/h或5V/h～9V/h)，V为封闭养殖空间的体积。

[0107] 根据本发明的方法，所述光合微生物为光合细菌或微藻。

[0108] 根据本发明的方法，所述微藻选自硅藻门、绿藻门、金藻门、蓝藻门、甲藻门、裸藻门、隐藻门和黄藻门中的一种。优选地，所述微藻选自硅藻门、绿藻门和金藻门中的一种。

[0109] 根据本发明的方法，所述微藻优选为绿藻或蓝藻，如小球藻、栅藻、单针藻、微芒藻或螺旋藻等。

[0110] 微藻生长需要必要的条件，比如适宜的温度，充足的光照，足够的水、CO_2以及氮肥、磷肥等营养物质，调控藻液中的溶解氧、pH值在合适的范围内等。尽管对于不同的微藻，这些条件不尽相同，但这些都是本领域已知的。

[0111] 一般而言，培养温度为15～40℃，优选为25～35℃；培养液pH值为5～11，优选为7～9。

[0112] 根据本发明的方法，使用的碳源为无机碳源和可选的有机碳源。

[0113] 根据本发明的方法，培养方式为光能自养或兼养培养时，使用的无机碳源优选为含CO_2的气体，比如空气。

[0114] 根据本发明的方法，曝气量一般为0.5L/(L·min)～6L/(L·min)，优选为0.8L/(L·min)～4L/(L·h)。其中，L/(L·min)是指对于每升培养液每分钟的曝气量，曝气体积按标态计。

[0115] 根据本发明的方法，培养方式为兼养培养时，所用的有机碳源可选自糖类、有机酸、有机酸盐、醇、纤维素水解物和与淀粉水解物中的一种或几种；比如可选自葡萄糖、果糖、乙酸、乙酸钠、乳酸、乙醇、甲醇、纤维素水解物和纤维素水解物中的一种或几种，较佳的选择是葡萄糖。

[0116] 根据本发明的方法，培养方式为兼养培养时，应先对培养装置进行灭菌处理，然后才能接入无菌培养基与无菌藻种进行兼养。本发明对灭菌操作没有特别的限制，任何已知合适的方法均可为本发明所用，比如高温蒸汽灭菌或者紫外光照射灭菌等。由于本发明采用用柔性薄膜袋，所以可以方便地将所有柔性薄膜袋至于蒸汽灭菌设备中进行灭菌，然后再用于养殖。

[0117] 根据本发明的方法，对于培养液，本领域技术人员可根据具体藻种，选用合适的培养液。本领域常用的培养液均可为本发明所用，比如BG11或Zarrouk。

[0118] 根据光合微生物(如微藻)生物量的增长情况以及培养液中营养物质的消耗情况，需要及时补充不足的营养物质。根据本发明，任何补加营养物质的方式都是可用的，比如分

段补加或连续补加，只要将营养物质的量控制在合适的范围内即可。

[0119] 根据本发明的方法，当培养液的pH值超出光合微生物(如微藻)生长所允许的范围时，优选通过控制CO_2曝气量，将藻液的pH值控制在合适的范围内，但本发明可以使用或不使用pH值调节剂。

[0120] 根据本发明的方法，培养方式为兼养培养时，所用有机碳源的浓度控制在1g/L藻液～30g/L藻液。采用流加的方式比较有利，可以避免糖浓度过高，抑制微藻细胞的生长。

[0121] (四)培养光合微生物与工业废气脱硝的联合方法

[0122] 本发明提供了一种利用阳光培养光合微生物与工业废气脱硝的联合方法，特别是利用阳光培养微藻与工业废气脱硝的联合方法；该方法中，用工业废气脱硝获得的NOx固定物为前述任一的培养方法提供氮源。

[0123] 本发明的培养光合微生物的方法(特别是兼养微藻的方法)中，氮源被光合微生物快速消耗，使氮源的消耗速率与工业废气脱硝的速率更匹配，从而使本发明的培养方法更适合与工业废气脱硝的方法联合。

[0124] (五)生产生物质的方法和生产生物能源的方法

[0125] 本发明提供了一种生产生物质的方法，包括从光合微生物中提取油组合物、蛋白质、碳水化合物、核酸、色素、维生素、生长因子之一或其任意组合的步骤；其中，所述的光合微生物由前述任一的方法获得。

[0126] 所述的油组合物主要由烃和/或油脂(脂肪酸甘油酯)组成，其可以通过先后或同时对产油微藻进行破壁、抽提来获得。所述的破壁可使用现有的技术手段完成，比如利用热、机械力、碱、酸、酶之一或它们的组合来进行破壁。所述的抽提可以采用有机溶剂比如己烷进行抽提，或采用CO_2进行超临界抽提。

[0127] 本发明还提供了一种生产生物能源的方法，其原料由前述生产生物质的方法获得。

[0128] 以下结合附图说明本发明及实施例中的通用部分。

[0129] 实施例中，封闭养殖空间由透明聚丙烯/尼龙复合薄膜袋制成；如图1所示，上下长100cm、左右宽50cm、最厚处的厚度约8cm；其内部被热封线分隔成4个沿上下方向延伸的小空间，这些小空间的上、下部相互连通；位于外侧的小空间其最下部宽度为13cm，最上部宽度为10cm；在该封闭养殖空间的底部设置有曝气管100，曝气管100由管外径为10mm，管壁厚度为1mm的橡胶管制成，曝气管上开有长度为1mm的曝气缝。

[0130] 实施例中，支架为钢筋制成的框架；如图2所示，支架呈Λ形布置，向上的两侧面的框架构成支撑面，每个支撑面各支撑一个封闭养殖空间；如图2所示，支撑面与水平面的夹角相等，均为θ，支撑面与水平面的交线与南北向的夹角为Φ。实际生产中，每个支撑面也可以支撑多个封闭养殖空间。

[0131] 实施例中，安装一组(两个)封闭养殖空间的装置如图3所示，两个封闭养殖空间的底部通过连通管相互连通(图中未画出)。

[0132] 实施例中，安装四组(八个)封闭养殖空间的装置如图4所示，这八个封闭养殖空间的底部通过连通管相互连通(图中未画出)，并设置有外循环泵驱动培养液在八个封闭养殖空间之间循环；各组封闭养殖空间呈一排、彼此相邻紧密布置(本发明中，将一排中封闭养殖空间布置的密集程度称为密集度)。实际生产中，封闭养殖空间可以为成百上千组，呈多

排、彼此相邻紧密布置。

[0133] 实施例中，在培养过程中，通过温度检测电偶实时监测培养液的温度，当温度高于设定值时，将培养液循环至图5所示的换热器中，进行换热降温，或者对封闭养殖空间的下表面喷水降温，从而实现对培养液温度稳定可靠的控制，这样通过检测和信号反馈将培养液温度控制在合适的范围内。

[0134] 实施例中，在培养光合微生物前，首先对培养系统进行灭菌处理；然后配制培养液并对其进行灭菌处理；用输送泵将灭菌后的培养液输送至封闭养殖空间中；开启空气压缩机向封闭养殖空间中通入空气，通入的空气量为0.5L/(L·min)～6L/(L·min)；然后接入光合微生物，开始培养。

[0135] 实施例中，在培养过程中，通过pH检测器实时监测藻液的pH值，当pH值高于设定值时，通过信号反馈开启CO_2气体控制阀门向培养液中送入CO_2；当培养液pH值低于设定值时，通过信号反馈关闭CO_2气体控制阀，这样通过检测和信号反馈将培养液的pH值控制在合适的范围内。

[0136] 实施例中，当培养结束时，用泵将培养液输送至离心机，通过离心分离得到光合微生物。

[0137] 藻液光密度值(OD值)测定：光密度值用分光光度计测定，以蒸馏水作对照，测定藻液在特定波长处的吸光值，作为微藻浓度的指标。

[0138] 下面通过实施例进一步说明本发明。

[0139] 实施例1

[0140] 本实施例用于说明本发明装置及方法的效果。

[0141] 采用图3所示的装置培养螺旋藻。培养过程中，φ为0°，θ为80°；I_{max}约为60000lux～160000lux。

[0142] 采用Zarrouk培养液，并在120℃下进行消毒灭菌30min，冷却后备用。向每个培养空间中输入培养液，开启空气压缩机，以0.7L/L·min(气体体积按标态计)的通气量通入空气。封闭养殖空间最底部的静压约为7.5KPa，曝气管内的压力为9.75KPa时曝气孔开始曝气。接入螺旋藻进行养殖。当藻液pH值大于10.5时通过CO_2，当藻液pH值小于8.5时停止通入CO_2。通过在封闭养殖空间下表面喷水的方式将养殖温度控制在26℃～35℃之间。

[0143] 培养结束时，两个封闭养殖空间的OD值分别为8.96，9.28，其中一个封闭养殖空间的螺旋藻生长曲线如图6所示。

[0144] 对比例1

[0145] 采用与实施例1相同的方法和条件，在相同的日期内培养相同的螺旋藻，与实施例1的不同之处仅在于：与实施例1相同的柔性透明薄膜袋被等分成4个沿上下方向延伸的小空间。在灌入培养液后，该柔性透明薄膜袋产生许多褶皱和死角。

[0146] 培养结束时，两个封闭养殖空间的OD值分别为7.21，7.35，其中一个封闭养殖空间的螺旋藻的生长曲线如图6所示。由图6可见，由于封闭养殖空间存在着褶皱和死角，因此养殖效果较差。

[0147] 对比例2

[0148] 采用与实施例1相同的方法和条件，在相同的日期内培养相同的螺旋藻，与实施例1的不同之处仅在于：曝气装置为带有孔径为1mm的曝气孔的硬质塑料管。封闭养殖空间最

底部的静压约为7.5KPa，当曝气管内的气压为8.25KPa时，部分曝气孔即开始曝气，但同时有部分曝气孔不曝气。

[0149] 培养结束时，两个封闭养殖空间的OD值分别为7.11，7.21，其中一个封闭养殖空间的螺旋藻的生长曲线如图6所示。由图6可见，由于养殖过程中曝气管的曝气不均匀，因此养殖效果较差。

[0150] 实施例2

[0151] 本实施例用于说明本发明装置及方法的效果。

[0152] 采用与实施例1相同的方法和条件，在相同的日期内培养相同的螺旋藻，与实施例1的不同之处仅在于：采用图4所示的装置。

[0153] 培养结束时，八个封闭养殖空间的OD值分别为8.95，9.35，9.29，9.18，9.83，9.25，9.80，9.04；其中中部一个封闭养殖空间的螺旋藻生长曲线如图7所示。

[0154] 对比例3

[0155] 采用与实施例2相同的方法和条件，在相同的日期内培养相同的螺旋藻，与实施例2的不同之处仅在于：培养过程中，八个封闭养殖空间彼此平行，垂直地面且光照面正对南方布置(即θ为90°，Φ为90°)，八个封闭养殖空间以与实施例2相同的密集度间隔。

[0156] 培养结束时，八个封闭养殖空间的OD值分别为6.01，6.25，6.21，6.78，6.61，5.97，6.29，6.08；其中中部一个封闭养殖空间的螺旋藻的生长曲线如图7所示。

[0157] 对比例4

[0158] 采用与实施例2相同的方法和条件，在相同的日期内培养相同的螺旋藻，与实施例2的不同之处仅在于：培养过程中，八个封闭养殖空间彼此平行，垂直地面且光照面正对南方布置(即θ为90°，Φ为0°)，八个封闭养殖空间以与实施例2相同的密集度间隔。

[0159] 培养结束时，八个封闭养殖空间的OD值分别为6.89，7.59，6.95，7.02，7.35，7.24，7.69，7.09；其中中部一个封闭养殖空间的螺旋藻的生长曲线如图7所示。

[0160] 实施例3

[0161] 本实施例用于说明本发明装置及方法的效果。

[0162] 采用与实施例2相同的装置、方法和条件，在相同的日期培养相同的螺旋藻，不同之处仅在于：启动循环泵，驱动培养液在八个封闭养殖空间之间循环，培养液循环量为1.5L/min。

[0163] 培养结束时，八个封闭养殖空间的OD值为10.65，其中一个封闭养殖空间的螺旋藻生长曲线如图7所示。

[0164] 实施例4

[0165] 本实施例用于说明本发明装置及方法的效果。

[0166] 采用图4所示的装置培养小球藻。培养过程中，Φ为0°，θ为80°；I_{max}约为60000lux～160000lux。

[0167] 采用BG11培养液，并在120℃下进行消毒灭菌30min，冷却后备用。向每个培养空间中输入培养液，开启空气压缩机，以0.7L/L·min(气体体积按标态计)的通气量通入空气。接入小球藻进行养殖。封闭养殖空间最底部的静压为7.5KPa(为培养液最深处的静压力)，曝气管内的压力为9.75KPa(为封闭养殖空间最底部静压的1.3倍)接入螺旋藻进行养殖。当藻液pH值大于9.5时通过CO_2，当藻液pH值小于7.5时停止通入CO_2。通过在封闭养殖空间下表

面喷水的方式将养殖温度控制在26℃～35℃之间。

[0168] 培养结束时，八个封闭养殖空间的OD值分别为10.02,10.15,10.78,11.56,10.87,10.05,11.21,10.94;其中中部一个封闭养殖空间的小球藻生长曲线如图8所示。

[0169] 对比例5

[0170] 采用与实施例4相同的方法和条件，在相同的日期内培养相同的小球藻，与实施例4的不同之处仅在于：培养过程中，培养过程中，八个封闭养殖空间彼此平行，垂直地面且光照面正对南方布置(即θ为90°，Φ为90°)，八个封闭养殖空间以与实施例2相同的密集度间隔。

[0171] 培养结束时，八个封闭养殖空间的OD值分别为7.85,8.42,8.55,8.18,8.89,8.13,8.57,8.81;其中中部一个封闭养殖空间的小球藻的生长曲线如图8所示。

[0172] 对比例6

[0173] 采用与实施例4相同的方法和条件，在相同的日期内培养相同的小球藻，与实施例3的不同之处仅在于：培养过程中，八个封闭养殖空间彼此平行，垂直地面且光照面正对南方布置(即θ为90°，Φ为0°)，八个封闭养殖空间以与实施例2相同的密集度间隔。

[0174] 培养结束时，八个封闭养殖空间的OD值分别为8.04,8.55,8.28,8.58,8.89,8.97,8.61,8.07;其中中部一个封闭养殖空间的小球藻的生长曲线如图8所示。

[0175] 实施例5

[0176] 本实施例用于说明本发明装置及方法的效果。

[0177] 采用与实施例4相同的装置、方法和条件，在相同的日期培养相同的小球藻，不同之处仅在于：启动循环泵，驱动培养液在八个封闭养殖空间之间循环，培养液循环量为2L/min。

[0178] 培养结束时，八个封闭养殖空间的OD值为13.18,其中一个封闭养殖空间的小球藻生长曲线如图8所示。

[0179] 实施例6

[0180] 本实施例用于说明本发明装置及方法的效果。

[0181] 采用与实施例5相同的装置、方法和条件，在相同的日期培养小球藻，不同之处仅在于：用灭菌的兼养培养基培养，并加入灭菌的葡萄糖作为碳源，每天补加葡萄糖10g/L，每天补充BG11营养盐，补加量使培养液中的营养盐浓度为BG11的2倍。

[0182] 培养结束时，八个封闭养殖空间的OD值分别为，50.70,55.57,54.41,57.44,59.21,53.25,55.78,51.44;其中中部一个封闭养殖空间的小球藻生长曲线如图9所示。

[0183] 实施例7

[0184] 本实施例用于说明本发明装置及方法的效果。

[0185] 采用与实施例6相同的装置、方法和条件，在相同的日期培养相同的小球藻，不同之处仅在于：Φ为90°，启动循环泵，驱动培养液在8个封闭养殖空间循环，培养液循环量为3L/min。

[0186] 培养结束时，八个封闭养殖空间的OD值为60.72;其中一个封闭养殖空间的小球藻生长曲线如图9所示。

[0187] 对比例7

[0188] 采用与实施例5相同的装置、方法和条件，在相同的日期兼养培养相同的小球藻，

不同之处仅在于：φ为90°，θ为20°；仅用一个封闭养殖空间培养，阳光于封闭养殖空间的光照面上的最大光照强度达到160000lux。

[0189] 小球藻生长曲线如图9所示。

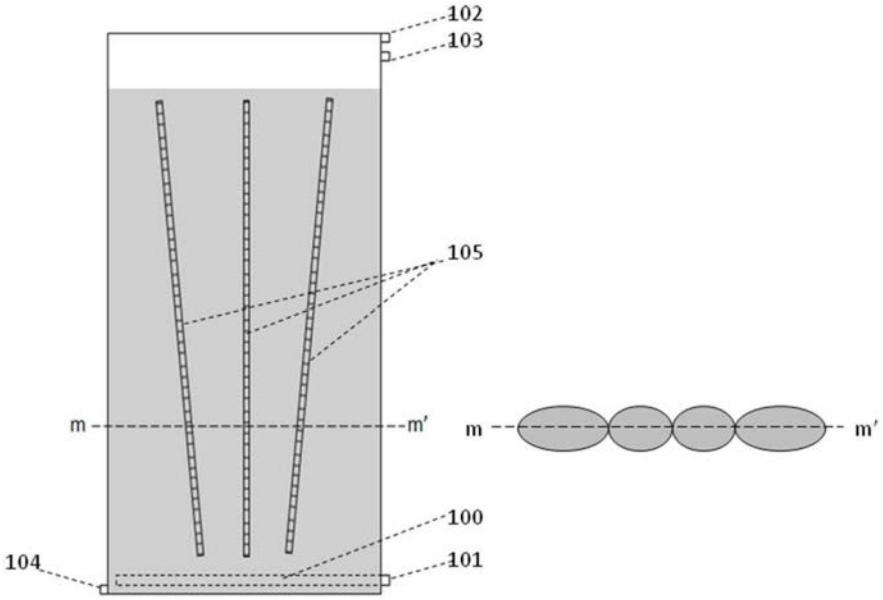


图1

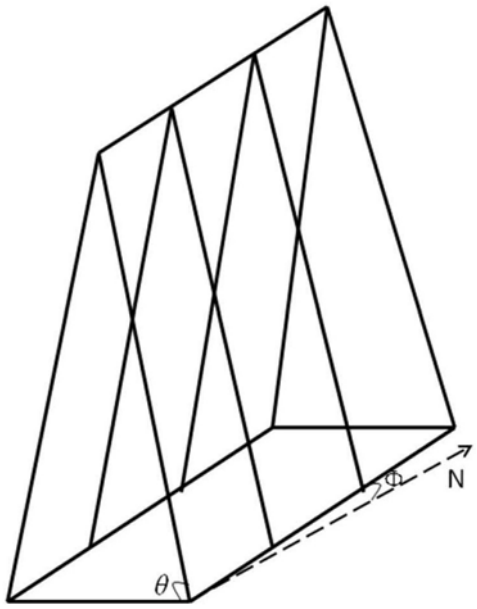


图2

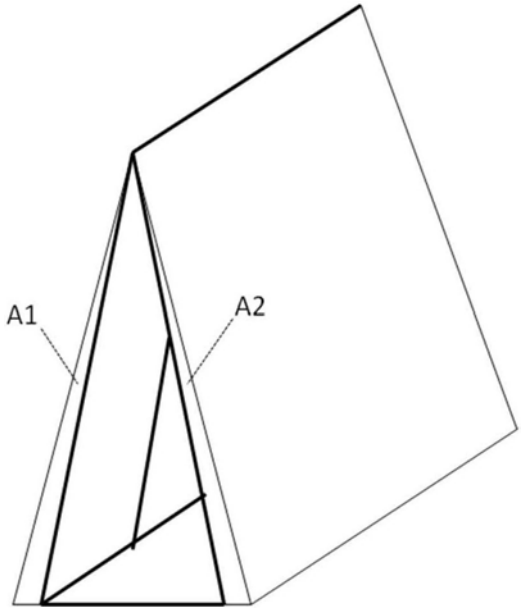


图3

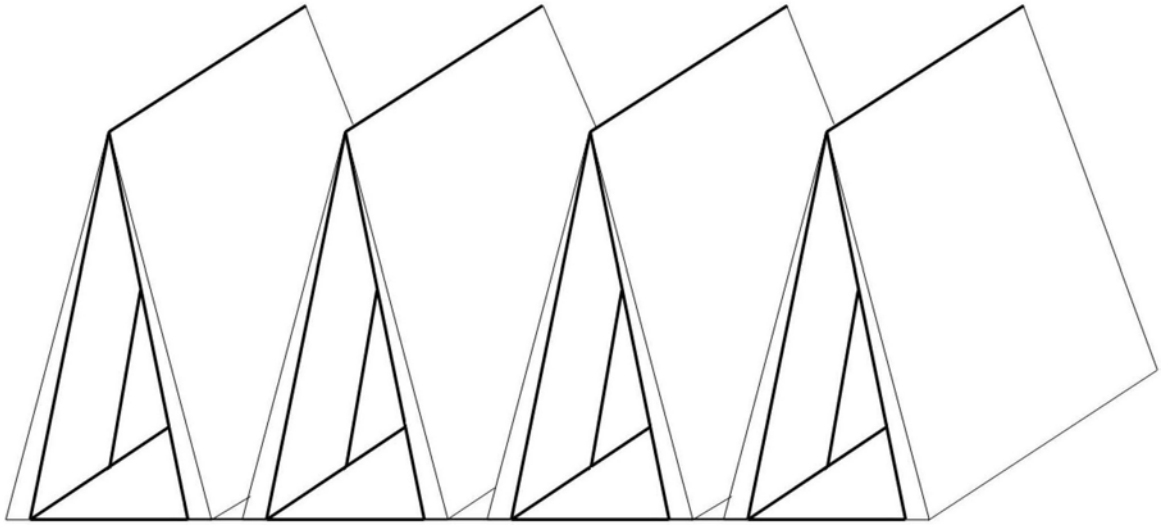


图4

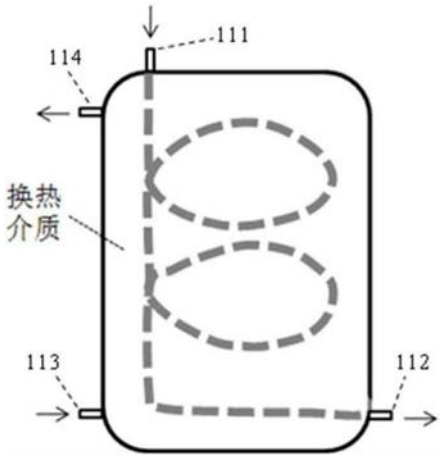

111
114
换热
介质
113
112

图5

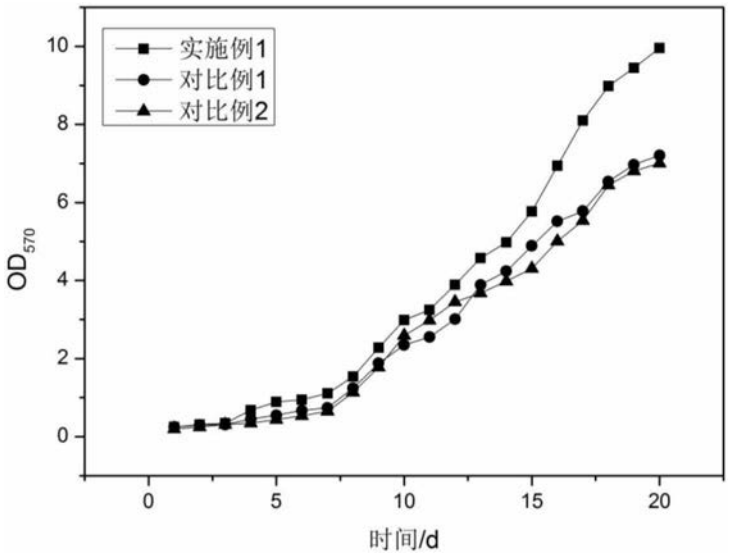

实施例1
对比例1
对比例2
OD570
时间/d
0
2
4
6
8
10
0
5
10
15
20

图6

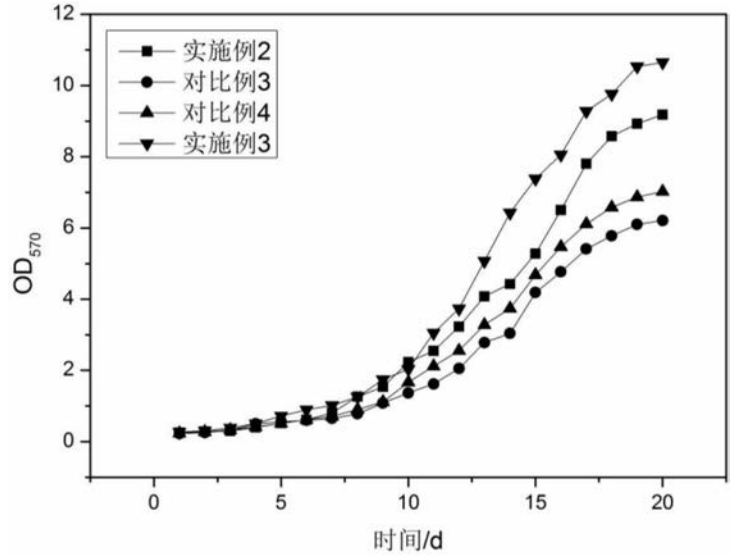


图7

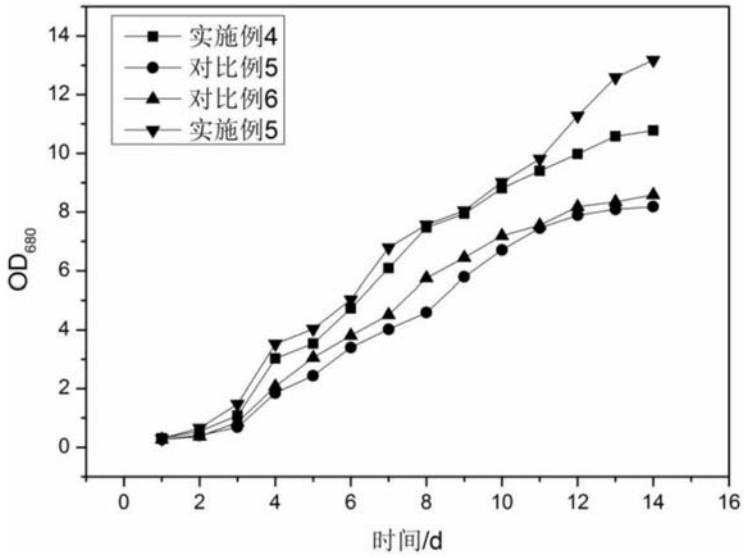


图8

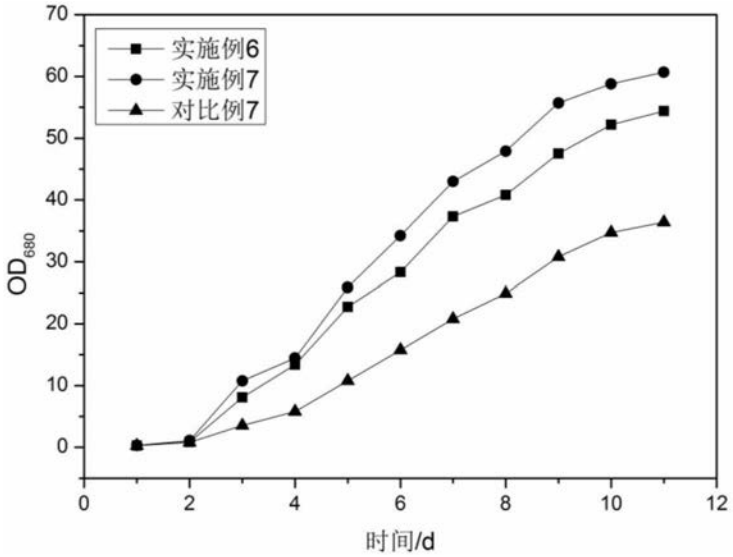


图9