

沙产业中微型藻类的规模生产

贾灵史培军

(北京师范大学好源与环境科学系)

提要 我国西北部沙区降水量小, 蒸发强烈, 地表干燥, 制约着植被生产力的积累。但是日照充足、内陆咸水丰富的特点又使得发展微型藻类(主要是绿藻)培植具有广阔的前景。微型藻类的大规模培植已先后在近 20 个国家和地区进行, 大量的实验研究表明: 微型藻类适合于在光照充足、温度较高、矿物质营养丰富的内陆水体中生长, 在优化的种群密度、适度的搅动和严格控制生物污染条件下, 最大净第一性生产力可达到 25~80 吨/公顷/年, 基本的物质组成为蛋白质 45%~55%、碳水化合物 25%~40%、脂类 15% 左右。藻类可以做为饲料甚至人类的食物, 是高产优质的蛋白质来源。目前, 进一步提高藻类的群体光合效率, 控制有害生物的侵入以及促进藻类干物质的深加工, 尚待深入研究。

关键词 沙产业 微型藻类 规模培植 单位面积密度

干旱、半干旱地区是中国三大自然区之一, 面积约占全国的 20% (其中干旱区 21.4%, 半干旱区 8.6%)。本文所指的沙漠与沙地分布区(简称沙区)系指干草原地带、荒漠化草原地带、草原化荒漠地带以及荒漠地带的沙区, 面积共约 63.7 万平方公里。这些区域降水量偏低且年际波动很大, 蒸发强烈, 地表干燥, 成为制约农作物产量提高和牧草生长的重要因素。我国自 30 年代末开始, 一直致力于沙区治理, 提高沙区的第一性生产力的途径, 是人们始终不懈地探求的课题。80 年代中期, 以钱学森教授为代表的一批学者开始致力于“沙产业”的研究和实践, 试图利用生物技术、工程技术及一切可利用的知识, 来提高沙区太阳能转化效率, 提高第一性生产力。沙产业越发达, 第一性产品越多, 人们为追求生活必需品而进行的盲目开垦和过度放牧就会相对得到控制, 自然生态系统就会免受太大压力。事实上, 我国西北部沙区虽然有种种限制因素, 但这些地区长年日照充足, 太阳总辐射量达 140~160 千卡/平方厘米/年, 年日照时数多在 2800 小时以上, 日照百分率大于 60%, 光合作用潜力很大。在充足光照下, 沙区中大量的内陆咸水湖为自养型低等植物(主要是绿藻)提供了良好的生长条件。下面就国际上绿藻培植的进展、绿藻生产力的主要影响因素及利用前景, 探讨我国沙产业的发展途径。

一、绿藻的培植历史和现状

本世纪初, 由于使用绿藻进行光合作用实验, 人们认识到了它们迅速生长的特点, 进而萌发了将绿藻作为饲料或辅助食品的想法。但是由于没有多少市场, 进展甚微。40 年代初, 开始出现了大规模培植绿藻的实验研究, 首先是在战时的德国。其后陆续出现于许多别的国家和地区, 其中包括荷兰、日本、捷克、斯洛伐克、罗马尼亚、前苏联、法国、比利时、印度、以色列、意大利、墨西哥、秘鲁、南非、台湾和美国。

如今, 人们大规模培植绿藻不再仅仅是为了直接获取饲用和食用蛋白, 而且包括了以下一些内容: (1) 废水处理; (2) 用作水体养殖的饵料; (3) 维持太空航行中封闭的生命系统; (4) 提取某些化学物质; (5) 制造绿色保健食品; (6) 太阳能的生物转化。

从户外的粗放培植到严格控制各生态因子的人工气候室, 绿藻培植的技术差异很大。在纯净的培养基中进行绿藻培植称为“纳基培植”(Clean culture), 另一类则主要在废弃物或污水中培养。在后一情形中, 生物产品除了绿藻以外还有其他微生物侵入, 特别是细菌, 因而这实际上产生的是藻—菌生物量。根据营养方式, 纯基培植可分为自养型(只通过光合作用进行生产), 兼养型(光合和异养兼存)和异养型(次级生产)三大类。本文只讨论自养型纯基培植。

二、不同环境下绿藻的适生种类

如果不考虑用于接种体的那些种, 通常藻类培植系统中总是有限的几个种占优势。主

要种类有淡水系统中的小球藻属 (*Chlorella*)、Microctinum 属、栅列藻属 (*Scenedesmus*) 以及海水系统中的 *Phaeodactylum* 属、*Skeletomema* 属等。在纯基培植中, 单一物种可以长期维持, 如在德国 *Coelastrum probiscideum* 被连续单种培植达 7 年之久。

特殊的绿藻种类常被选择在极端环境下培植, 在盐渍环境中, 盐藻 (*Dunaliella*) 的产量很高。

三、绿藻培植装置的设计

绿藻培植装置可以小到培养皿, 大到数百公顷的池塘。早期设计绿藻培养装置时多考虑可靠性, 而现在则主要考虑能量的利用率。设计方式包括垂直水道、斜伸瀑流、河流、圆形湖沼。底部平坦或槽状的长形水槽、U 形湖沼以及覆盖塑料的湖沼。

培植深度和搅动效果是进行大规模绿藻培植时首先要考虑的问题。不断的搅动可以有效地阻止细胞 (或个体) 的沉淀, 有利于它们与营养物质充分接触, 也有利于提高光能利用率。一般来说, 将水深控制在 15~20 厘米, 并配备一台脚踏式搅拌机, 就可以达到很好的效果。在深水中则以水泵代替搅拌机效果更理想。

培植装置的合理设计是为了使光能利用达到最充分, 因为制约绿藻培植的主要因素是光能转化率低。通常光合作用的主要限制因素有: (1) 植物对占太阳总辐射 45% 的可见光部分 (生理有效辐射, PAR) 的依赖程度; (2) 光能的反射损失 (10%~20%); (3) 最大的光合效率 (25% 左右); (4) 呼吸损失。

鉴于绿藻培植受到诸多复杂因素的影响, 其培植装置可以有多种设计方式, 只要有利于提高净第一性生产力。不过到目前为止, 世界上还没有哪一种绿藻培植装置被认为是最优化设计。

四、绿藻净第一性生产力的影响因素

50 年代到 60 年代初期, 一般开放湖沼 (没有塑料膜覆盖) 中绿藻干物质产量为 2~15 克/平方米/天, 到 80 年代上升到了 15~25 克/平方米/天。在一年中生长最适宜的时段绿藻干物质产量一般在 30~40 克/平方米/天, 高峰时期可以达到 54 克/平方米/天。

我们有必要区别总产量和净产量, 前者是单位面积、单位时间内绿藻生物量的增量, 后者是单位面积、单位时间内可以获得的实际产量。一个面积为 0.1~0.2 公顷的培植池中总产量的 20%~30% 通常要损失掉, 而在 6 公顷大小的培植地中损失率约有 10%。造成损失的原因主要是收获过程中的散失、异养生物消耗以及基底留存等。

Walmesley 等人 (1984) 研究了覆盖塑料膜的封闭培植地的产量。他们在一个 100 平方米的池中培植小球藻, 一年中每 4 天收获一次, 测得平均净产量为 10 克/平方米/天, 高峰季节可达到 15 克/平方米/天。在封闭型微型培植地中, 他们测得小球藻净产量从 7.9 克/平方米/天 (保留 12 天) 到 16.6 克/平方米/天 (保留 2 天)。

总的来看, 在开放型绿藻培植装置中净产量波动在 25~80 吨/公顷/年, 而在封闭型绿藻培植装置中净产量变化不大, 因为塑料膜保持了池内环境的相对稳定。

绿藻生产力的大小受到一系列生态因素的综合影响, 这些因素包括光照、温度、矿物质营养、绿藻种群密度和保留时间等。绿藻培植的成败取决于对各生态因子的合理调节, 也就是优化生产。

(一) 光照

绿藻大规模培植时其生产力取决于光渗功能 (irradiation)。Castillo 等人 (1980 年) 发现在柳列藻 (*Scenedesmus*) 的产量与光照强度之间存在线性相关。这种显著的线性相关也存在于各种培植装置中。Goldman (1979 年) 提出了一个表征绿藻生产力与光强度关系的模型, 指出它们之间为非线性关系, 而过高的光渗下生产力反而下降。要确定它们是线性相关还是非线性相关还要视具体情况。

光饱和点 (Saturation light intensity, I_s) 是光合器官可以接受的最大光照强度。在光饱

和点以上, 多余的光照不再被利用。Is 是生产力——光强模型中的重要指标, 在一定的培养装置中它是一个恒量, 其值通常为 0.02~0.06 卡/平方厘米/分。初步估算, 在封闭型湖沼中 Is 一般为 0.02 卡/平方厘米/分, 而在开放型湖沼约为全日照的 7%。

(Goldman, 1979 年)事实上, 目前人们对这一常数还知之甚少, 研究生长速率与光照强度的数量关系将有助于准确估测 Is 值。

同时, 光呼吸、光抑制对生产力的影响也不容忽视。在某些情况下呼吸损失可达 10%。Ryther (1956 年)估计在全日照的 10%左右时海藻中可以看到光抑制现象。利用 C14 同化检测技术研究第一性生产力, 证明绿藻在静态检测时存在明显的表层光抑制作用, 但是在不断搅动的情况下不存在光抑制。

对于绿藻的光能利用率的估算存在很大差异, 在实验室培养的绿藻可达到 10%~12% 的光能转化率 (Radmer 等, 1977 年), 但也有报导说只达到 5%~5.6% (Benemann et al. 1977 年)。通常在自然状态下绿藻的光能转化率为 1%~2%, 在开放型系统中为 2.0%~3.1%。随着塑膜覆盖层数的增加, 封闭型水池中最大光能利用率可以达到 5.8%, 但与此同时光能供应却会下降。

(二) 温度

在冬季, 温度和光照都会成为绿藻生产的制约因素。我国西北部沙区多属温带, 冬季气温很低, 开放型值几乎是不可能的。Goldman (1977 年)认为温度对生产力的影响不及光照重要, 他给出了以下方程:

$$P' = 0.087db (1.066)^{(2t)}$$

这里 P' 表示单位面积的最大生产力, d 是培植深度, b 是一个经验常数, t 是温度 (摄氏度), 方程描述了温度对绿藻生产力的影响。Walmsley 和他的同事们用开放型微型水池、封闭型微型水池和开放型加热的微型水池来对照研究绿藻培植中温度的影响。他们使封闭的培植池内温度高于开放型培植地, 而开放加热池内的温度由电热器控制在与封闭池相同的水平。实验表明, 开放加热的培植地内第一性生产力与封闭池相差无几, 而开放池内的生产力却低大约 10%~48%。可见温度是微型培植池内生产力的重要限制因素, 无论在冬季还是夏季都是如此。

高温并不象人们想象的那样会抑制绿藻生长。Vanshak 等人 (1982 年)在盛夏的以色列 Negev 沙漠研究了封闭型湖沼中的“热陷阱”效应以及由此产生的高温, 证明管理良好的藻群很难达到光饱和点和温度饱和点。在那里, 夏季水温常常高达 45 摄氏度, 但绿藻仍可以保持相当高的生产力 (>10 克/平方米/天)。

(三) 矿质营养

当矿质元素充分供应, 而光照成为主要限制因子时, 大多数绿藻种类表现出相对稳定的化学组成: 45%~50%的碳, 8%~10%的氮和 1%的磷。较高的碳含量反映了绿藻在光合作用时对二氧化碳供应的依赖。绿藻对二氧化碳的平均需求量是 45 克/平方米/天, 需求变化主要取决于生产能力。通常在绿藻大规模培植生产中二氧化碳的供应是很昂贵的, 其最经济的来源是燃烧后的气体和发酵过程产生的废气。在封闭型培植中二氧化碳的利用率可以达到很高, 因为塑料膜阻止了气体的散失, 同时还可以通过特殊的装置不断充入二氧化碳。在一些较完善的装置中还可适量充入二氧化碳来调节水中的 PH 值。

绿藻培植池中氮元素和磷元素的供应量必须分别控制在 1.6~6.5 克/平方米/天和 0.2~0.83 克/平方米/天。从浓度来看, 氮的供应应控制在 25~500 毫克/升。研究发现, 将硝态氮和铵态氮以 3:1 的比例施入可以取得较高的产量。

可溶性过磷酸钙是培植池中许多微量元素的来源, 它和尿素、天然水一起提供了绿藻所需的大部分营养元素。

(四) 绿藻种群密度

绿藻培植中的优化生产还取决于其种群密度。最适种群密度因培植深度不同而不同, 密度过低会造成资源的闲置, 而密度过高则会抑制生长。Grobbelaar (1981 年) 通过一模型计算出获得最大生产力所要求的最佳种群密度为 16~22 克/平方米。这一结果是通过野外实验得到的, 实验中选定一基本种群密度, 然后每天都用纯培养液稀释藻群, 并进行测定。Vanshak 等人 (1982 年) 发现在一定的临界值以上, 随着种群密度的提高, 绿藻光合能力、呼吸作用和生长速率都会下降, 而当种群密度在 300~400 克/平方米时生产力达到峰值。最优种群密度还与水中的最高氧浓度有关, 因此水中氧浓度的变出是检验种群密度优化与否的敏感的指示体。

(五) 保留时间

当光照充足时, 培植池中的绿藻在某一特定的生长速率 (或保留时间) 下达到最大生产力, 将保留时间延长或缩短, 都会使生产力下降。生产力与生长速率的关系表现为一种形曲线, 随着生长速率的提高, 绿藻的生物量表现为非线性增长。

(六) 搅动

以下方面决定了搅动在绿藻培植中的重要性: (1) 阻止沉淀; (2) 随下层个体充分见光; (3) 使绿藻细胞与营养物质充分接触。搅动中水流速度可以从每秒几厘米到近 50 厘米。在较小、较浅的培植池中一般用脚踏式搅动机, 而在大型培植池中最好用水泵来完成这一任务。

(七) 生物感染

户外培植的绿藻常常会受到细菌、真菌, 其他藻类以及无脊椎动物的感染。原生动物和轮虫纲是最常见的感染生物, 其次摇蚊虫蛹也十分普遍地感染培植池, 由于它们较专一的食性, 可使池中绿藻的物种优势程度大大降低。

控制生物污染主要有以下四种途径: (1) 保持绿藻生长的最适环境; (2) 使用化学药品, 这要视具体种类而定; (3) 使用物理方法, 如在显微镜下剔除侵入的生物体; (4) 造成环境因子的突发性变化 (但不要伤及绿藻)。如在冬季将水温降到 5 摄氏度以下, 或使用有机酸将 PH 值降到 3.5 以下数小时, 然后再恢复。即使使用了以上技术, 纯净的藻群也只能维持数月, 感染问题不会彻底得到解决。

在单种培植中, 其他藻类种群的入侵是一个令人头痛的问题, 特别是在极端环境如盐渍环境下。影响种间竞争的机制目前还很明白了, 但一般认为温度和选择性采食等因素影响较大。

最后, 地理位置也是不可忽视的因素, 它部分地决定绿藻培植中所需的光照和热量。总的来讲, 干旱、半干旱地区具有较充足的太阳辐射和酷热的气候, 最适合培植绿藻。尽管那些区域蒸发量很大, 但在封闭型培植中蒸发量可以降低到极低水平。

四、绿藻的产量和产品质量

根据 Goldman (1979 年) 的生产力预测模型, 藻群生产力的上限为 60 克/平方米/天, 但是这一模型没有考虑呼吸和光抑制所产生的影响。在养分充足的情况下, 大多数绿藻都表现出相对稳定的干物质组成: 50% 的蛋白质、30% 的糖类和 15% 的脂肪, 但是个别种类以及在其他限制因子作用下, 个体的物质组成会有很大变化。

绿藻的蛋白质含量因培植池养分浓度的不同而发生变化, 养分不足的情况下, 开放型培植池中绿藻粗蛋白含量可以由平时的 36%~74% 降低到 5% 以下。在控制养分输入的情况下, 藻类细胞中蛋白质含量与糖类含量呈负相关, 此外, 气温、水温、光照强度、光质和磷肥浓度都会对藻类细胞中蛋白质含量产生影响。

绿藻细胞中通常含有较少的含硫氨基酸, 这一问题可以通过控制培植环境、选择适当的品系和控制基因重组来解决。事实上小球藻中高蛋氨酸品系是一孤立性状, 可以指示含硫氨基酸的比例。

绿藻的细胞壁含有复杂的多糖, 大约占其生物量的 10%, 这些多糖包括纤维素、甘露糖和木质素等。淀粉和其他糖类是绿藻细胞的物质贮存形式, 但由于物理和化学的障碍, 绿藻细胞中的糖类很难被人或哺乳动物消化。

绿藻生物量中脂肪的比例一般不高 ($<15\%$), 但有时也可能高达 53%, 这反映了绿藻脂肪的生产能力。绿藻细胞中常具有一些长链脂肪酸, 不易吸收。

叶绿素和类胡萝卜素等色素含量约为总生物量的 3%~5%, 在作为食品时常引起一些问题。如少量喂饲母鸡时, 藻色素会使蛋黄颜色加深, 剂量大时还常常引起色素过敏症。此外, 绿藻细胞含有大量的核苷酸, 它们对人体有害。但是目前已有一些手段可以解除这些毒性, 从而大大提高了绿藻的实用价值。

小球藻、栅列藻和 *Spirulina* 等属的许多种类是完全无毒的, 长期的动物饲喂实验证明“纯净”培植的绿藻产品没有毒性。无论是直接摄取还是通过家畜来转化, 它们都可作为人类一种重要的蛋白质来源。但是人类也不能无节制地大量摄取绿藻产品, 否则尿酸在体内聚集会引起不良反应。还有一个问题是, 由于使用化肥以及来自大气和水体的污染, 有毒矿物质和复环糖类等污染物常在绿藻体内富集, 通常开放型培植地更容易受到污染。

五、绿藻培植系统的管理

绿藻的培植可以是相当自然和粗放的, 就象印度农村那样, 将 *Spirulina* 密集地培植在一条条小水沟内直接供牛采食, 偶尔用扫帚搅动一下, 如果收获则只需用一种布网将藻群捞出晒干即可。然而在日本的小球藻培植厂, 无菌的绿藻细胞被装在可自动控制环境因子的培植管内, 培植过程中有计算机控制, 收获时采用离心技术, 经清洁过程然后移入干燥间干燥。前者类似于大田农业, 而后者是真正的实验室培植技术。

绿藻大规模培植的目标是争取最大的生长速率以求获得尽可能多的生物干物质或某些化学物质, 这便引发了人们对绿藻培植生产潜力的研究。在某些方面, 已有人提出一些定量研究方法和结论, 但还很不完善。例如有的学者认为正确控制单位面积种群密度至关重要, 他们通过数学模型算出, 达到最大生产力的最优种群密度是 16~22 克/平方米, 在此水平以下, 种群密度的轻微变化都会影响生产力, 但是在此水平以上则影响并不明显 (Grabbelaar, 1982 年)。这个模型告诉我们, 在绿藻大规模培植时, 为了使生产力在较高水平上保持相对稳定, 最好使单位面积种群密度保持最优或者略微高于此水平。数学模型对于作用因子的调控和最优培植系统的设计很有帮助, 但遗憾的是至今还没有一种数学模型能够测算外来生物的侵入。单一种群的绿藻培植中生产力常常波动很大, 除非该物种具有极强的抗逆性和对入侵者的排斥性。在这种情况下, 反复的试验是必要的。

迄今, 绿藻大规模培植的管理还是一门尚不完善的科学, 在这里只是介绍人类在绿藻培植领域的几方面进展, 以期我们能够积极利用这些成果, 提高我国西北部大面积沙区的第一性生产力和干物质产量, 从而补偿这些区域农牧业的不足, 缓减环境压力, 促进区域持续发展。同时, 作为探索和试验, 建议将这个领域列入沙产业的一个优先项目。

参考文献

1. Benemann, J. R, Weisman, J. C, Koopman, B.L. and () swald, W. J., 1977, Energy production by microbial photosynthesis, *Nature*.268 19--23.
2. Shelef, G. and Soeder, C. J. (Editors), 1980, *Algae Biomass: production and Use*, Elsevier/North -- Holland Biomedical press , Amsterdam.
3. Clement, c., Louchams, D., Rebeller, M. and Van Landeghem,G., 1980, The development of *Spirulina* algae cultivation *Chem. Eng. Sci.*, 35: 119 -- 126.
4. Eppley, R. W. and Dyer, D. L., 1965. Predicting Production in light --- limited culture of algae, *Appl. Microbiol.*, 13: 833 ---- 837.
5. Goldman, J. C., 1979a. Outdoor algal mass cultures I. Applications *Water Res.*, 13: 1 -- 19.

6. Goldman, J. C., 1979b. Outdoor algal mass cultures. II. Photosynthetic yield limitations. *Water Res.*, 13: 119 -- 136.
7. Radmer, R. and Kok, B., 1977. Photosynthesis: limited yields, unlimited dreams, *Bioscience*, 27: 599 -- 605.
8. Ryther, J. H., 1959. Potential productivity of the sea, *Science*, 130: 602 -- 608.
9. Soeder, C. J., 1980. Massive cultivation of microalgae: results and Prospects, *Hydrobiologia*, 72: 197 -- 209.
10. S poehr, H. A. and Milner, H. W., 1949. The chemical composition of *Chlorella*: effect of environmental conditions, *Plant Physiol*, 24: 120 -- 149.
11. Tamiya, H., 1957. Mass culture of algae. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 8: 309--334.
12. Vanshak, A., Abeliovich, A., Boussiba, S., Arad, S. and Richmond, A., 1982, Production of *Spirulina* biomass: effects of environmental factors and population density, *Biomass*. 2: 175 -- 185.
13. Walmsley, R. D. and Shillinglaw, S. N., 1984. Mass algal culture in outdoor plastic -- covered minipond systems. *Ann. Appl. Biol.*, 104: 185-- 197.