

相同条件下四种微藻(栅藻、小球藻、鱼腥藻、水华鱼腥藻)生长速度的比较

徐雪宁, 孙东红*, 孙鹏芳, 王亚琳, 司书舟, 崔坤淼, 杜雅煦, 李容兆, 马夏南, 李佳聪
鲁东大学生命科学学院, 山东 烟台

收稿日期: 2023年5月2日; 录用日期: 2023年6月14日; 发布日期: 2023年6月26日

摘要

小球藻、栅藻、鱼腥藻、水华鱼腥藻均是微藻中重要的应用及研究品种, 本实验探究了这四种微藻分别在相同培养条件下, 各类微藻的生长情况并对其各自的生长速度进行比较。探究在相同环境中这四种微藻中的优势品种。通过实验得知, 水华鱼腥藻明显处于优势地位为其中的优势藻种, 栅藻明显处于劣势地位。四种微藻生长速度的比较结果为: 水华鱼腥藻 > 鱼腥藻 > 小球藻 > 栅藻。

关键词

小球藻, 栅藻, 鱼腥藻, 水华鱼腥藻, 生长速度, 生长比较

Comparison of the Growth Rate of Four Microalgae (*Scenedesmus*, *Chlorella*, *Anabaena* and *Anabaena algal bloom*) under the Same Conditions

Xuening Xu, Donghong Sun*, Pengfang Sun, Yalin Wang, Shuzhou Si, Kunmiao Cui, Yaxu Du, Rongzhao Li, Xianan Ma, Jiacong Li

School of Life Science, Ludong University, Yantai Shandong

Received: May 2nd, 2023; accepted: Jun. 14th, 2023; published: Jun. 26th, 2023

Abstract

Chlorella, *Scenedesmus*, *Anabaena*, and *Anabaena algal bloom* are important applications and re-
*通讯作者。

文章引用: 徐雪宁, 孙东红, 孙鹏芳, 王亚琳, 司书舟, 崔坤淼, 杜雅煦, 李容兆, 马夏南, 李佳聪. 相同条件下四种微藻(栅藻、小球藻、鱼腥藻、水华鱼腥藻)生长速度的比较[J]. 微生物前沿, 2023, 12(2): 83-93. DOI: 10.12677/amb.2023.122010

search varieties of microalgae. This experiment explored the growth of various microalgae under the same culture conditions. The situation is compared to their respective growth rates. It explored the dominant species of these four microalgae in the same environment. The results showed that *Anabaena algal bloom* was the dominant species of the microalgae in the water chinensis group, and *Scenedesmus* was in the inferior position. The comparison results of the growth rates of the four microalgae were: *Anabaena algal bloom* > *Anabaena* > *Chlorella* > *Scenedesmus*.

Keywords

Chlorella, *Scenedesmus*, *Anabaena*, *Anabaena algal bloom*, Growth Rate, Growth Comparison

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

微藻的细胞结构简单、生长繁殖速度快，在自然水体中广泛存在[1][2]，是一种种类繁多、资源丰富、生长速度快并具有极大的应用价值的生物资源。微藻广泛分布于海洋、河流和湖泊等水体，是这些系统中初级生产力的主要组成部分；甚至存在于极地、冰川、沙漠和盐碱地等各种极端生境，成为这些生境中的“先锋植物”[3]。微藻及其代谢产物可以用于污水处理、食品的加工、生物药品的研制、生物饵料应用、可持续利用能源生产研发等方面，具有重要的经济和社会价值，在国内依然具有着非常巨大的发展空间。但目前微藻的生产仍存在着种种问题，在优良品种的筛选、培育与推广、培养方法及场所的选择和优化、应用价值的挖掘及市场开拓等方面，均有大量工作亟待开展[4]。

小球藻(*Chlorella vulgaris*)营养价值兼具保健功能，在一些国家和地区已有很大程度的开发和利用，先后开发成蛋白源饲料、食品、饮料、医药制品[5]。近年来，我国也开始重视对小球藻的开发利用，但在养殖业上的可利用价值没有引起足够的重视[6]。小球藻一般以个体形式单独存在，但也会以粘质层的形式沉入水底或粘着在器皿底部。小球藻唯一的生殖方法是依靠细胞内原生质体分裂形成似亲孢子，每一个孢子都会长成一个新的个体[7]。现已有研究表明，小球藻中含有大量的蛋白质、多种维生素、生物多糖、不饱和脂肪酸、叶绿素、类胡萝卜素及人体所需的各种矿物质等[8]，小球藻蛋白质含量高达 63%，18 种氨基酸总量高达 55%，其中小球藻碳水化合物含量为 10%~20%，脂类含量为 5%~10%，小球藻的叶绿素含量为 3%~5%，是自然界中最高的。小球藻的虾青素含量可高达 2.2 mg/g，小球藻细胞还含有丰富的维生素 A、B、K 和叶酸。并被广泛的应用于医药保健、食品加工、生物饲料、污水处理以及基因工程等领域[4]。

鱼腥藻(*Anabaena*)隶属蓝藻门(Cyanophyta)念珠藻目(Nostocales)，是一种典型的固氮微生物，主要由两种形状不同的细胞组成，其中形状较小的为营养细胞，形状较大的为异形细胞。很早以前人们就发现了藻类对植物具有肥效作用[9][10]。1939 年人们发现生长在稻田的固氮蓝藻可以使水稻连年保持较高的产量[11]。此外，鱼腥藻大多数菌株都可以通过光合作用来进行高效地固氮和固碳，同时还能利用太阳能进行产氢。因此，人们希望可以通过这种绿色无污染的生物途径获得可持续性的新型清洁能源。而且现研究还表明鱼腥藻对水体中的低浓度铀和重金属的净化效果较好，在防治污染方面具有广阔的应用前景[12]。

水华鱼腥藻(*Anabaena flos-aquae*)是造成淡水水体水华即导致水体富营养化的主要藻种之一，分布极

广, 而且能够产生藻毒素, 直接和间接的危害到人类。目前, 已发现水华鱼腥藻能产生 6 种鱼腥藻毒素 (anatoxins), 均为神经性毒素, 以肝毒素和鱼腥藻毒素为主, 可以作用于动物的肝脏并引起中毒死亡[12]。对于水华鱼腥藻的防治工作也是环境保护的重点方向。但水华鱼腥藻作为固氮蓝藻中的一类也可以应用到水稻田间固氮, 作为天然氮肥。研究中当水稻田中当蓝藻大量覆盖水面时, 可以有效抑制杂草生长[13]。藻类生长受水体中氮磷比的影响, 当氮磷比为 2 时, 蓝藻可以大量繁殖生长, 进而抑制杂草的生长。同时水华鱼腥藻可以应用于对氨氮的降解, 研究表明水华鱼腥藻在包埋固定的方式下, 对氨氮降解能力有明显较好的效果[14]。

栅藻(*Scenedesmus*)是绿藻门绿球藻目栅藻科中的一属, 因为其繁殖速度较快、对环境适应性较强、并具有很强的耐污性的特点, 所以是有机污水氧化塘生物相中的优势种类, 所以被用作处理污水的首选微藻之一。同时还因为其特殊的细胞壁结构和较高的重金属富集能力等特点, 被应用于水体重金属修复。而与其他能源微藻相比, 栅藻更是具有含油量较高[15]、适应性好、CO₂ 利用率高等优势, 因而常常被众多的研究者选为能源微藻的研究对象, 是一种具有巨大潜能的生产生物柴油的藻类。

本实验中, 希望通过在相同环境下对四种微藻的生长速度的记录以及比较, 从而探究在相同培养条件中这四种微藻的优势品种, 从而为生物防治、微藻规模培养、污水处理等方面提供有效数据, 满足相关市场和研究的需要。

2. 实验材料与装置

2.1. 实验材料

2.1.1. 实验藻种

小球藻藻种、鱼腥藻藻种、水华鱼腥藻藻种、栅藻藻种由鲁东大学藻类研究所提供。

2.1.2. 实验设备

所做试验中, 需要测量各种藻类的数值, 为保证实验的严谨性和数据的准确性, 需要用到: 分光光度计、数字式照度仪、血球计数板、电子天枰、10 ml 移液枪(见表 1)。

Table 1. Experimental instruments and factory companies

表 1. 实验仪器和出厂公司

显微镜(型号 4B003 00)	日本 OLYMPLUS 公司
分光光度计(型号 R040 502 7)	上海尤尼柯仪器有限公司
数字式照度仪(型号 V959 32)	北京师范大学光电仪器厂
血球计数板(型号 022 701 13)	上海求精生化试剂仪器有限公司
电子天枰(型号 PL300 2)	赛多利斯科学仪器(北京)有限公司
10mL 移液枪(型号 V959 32)	Thermo 公司

2.2. 实验装置

由所做实验的目的以及变量控制方面要求, 需要设计尽量符合条件的实验装置: 满足良好适应不同种类的微藻相同的生长环境条件。保持装置内空气流通, 隔绝与培养缸外空气的接触, 保持气密性。便于取样和检测的装置构造条件。装置应尽量避免因设备问题所导致的藻种污染。

本次实验中所用到的实验装置: 58 cm*10 cm*56 cm 的藻类培养缸、电磁炉、通气空气泵、通气设备等。

2.3. 实验思路

本实验的思路是设置尽量相同的实验环境条件，并尽量统一光照条件和温度条件，在同一实验场所内分别设置 4 组(1 号——水华鱼腥藻、2 号——小球藻、3 号——鱼腥藻、4 号——栅藻)相同培养条件的实验组。测量实验组的 OD 值和细胞密度的变化并绘制折线图，通过比较折线图的斜率来确定各实验组的最大生长速率，从而确定生长速度。并对 4 组数据进行生长速度的比较。

3. 实验步骤

3.1. 营养配置

藻种培养基的配置

配制四瓶 5000 mL 的统一培养基:取四只 5000 mL 规格的三角培养瓶,清洗消毒后分别加入 5000 mL 的自来水,并对自来水进行化学或物理消毒。称取配制培养基所需的药品,药品的用量及浓度(见表 2)。

Table 2. Amount and concentration of drugs

表 2. 药品的用量及浓度

药品名称	浓度	称取量
NaNO ₃	1.5 (g/L)	7.5 (g)
KH ₂ PO ₄	0.04 (g/L)	0.2 (g)
柠檬酸铁	0.004 (g/L)	0.02 (g)
微量元素	1 (ml/L)	5 (ml)

将称量好的 NaNO₃、柠檬酸铁和微量元素溶液分别放入四个 5000 mL 三角培养瓶中,将称取的 KH₂PO₄ 分别放入另外四个 500 mL 的三角培养瓶中,并加入少量蒸馏水溶解。

用牛皮纸密封培养瓶的瓶口,放在电磁炉上加热进行高温消毒,沸腾后取下,待培养液冷却至室温后,将三角瓶中的 KH₂PO₄ 培养液对应的倒入另外四瓶培养瓶中。按此步骤配制四瓶培养基。

3.2. 藻种接种、培养与扩种

3.2.1. 藻种的接种与培养

将盛有高温杀菌的 KH₂PO₄ 的培养瓶放置在实验台上,冷却至室温后,进行接种操作。首先在周围空气中喷洒酒精进行消毒,然后小心取下牛皮纸盖和橡皮筋,保持盖口向上放在实验台上。

将准备好的藻种迅速倒入培养瓶中,快速盖上牛皮纸盖并套好橡皮筋。左右轻轻摇晃培养瓶,使藻种分散,注意不要让培养液接触到牛皮纸盖。待摇晃充分后放在有一定光照但光照不过于强烈的地方,培养 7 天。

培养期间每日摇晃培养瓶防止藻种堆叠在一起而过于密集,从而导致无法充分吸收养分进行生长。当藻种生长至适宜浓度可移至阳光较强的地方进行培养。

3.2.2. 藻种扩种培养

对藻种进行消毒接种后,在适宜的环境下培养 7 d 并使藻液达到一定的浓度时,对藻液进行进一步扩种。预先准备好四个相同的 58 cm*10 cm*56 cm 规格的藻类培养缸,接入通气设备并对缸内进行充分消毒,在缸口封好保鲜膜。倒入已经消毒好的淡水 19.5 L,再用保鲜膜密封好。将培养好的藻种按以上步骤倒入缸中。再将按照培养方案配置好的四组培养基,在酒精喷洒消毒后的环境中迅速倒入培养缸中并用消过毒的玻璃棒充分搅拌使其混合均匀。打开通气装置,并将培养缸放置在同等阳光照射环境中。

3.3. 测量初始接种浓度

第一次实验测试之前,藻种培养 7 d 后转移到藻类培养缸中,用移液枪在酒精喷洒消毒的环境在四个缸中分别取部分藻液,用分光光度仪、血球计数板以及显微镜来分别测量处于此时的小球藻藻液、鱼腥藻藻液、水华鱼腥藻藻液、栅藻藻液的 OD 值和单位体积内的细胞密度,测量结果(见表 3)。

Table 3. OD values of each algae solution and cell density in each unit volume

表 3. 各藻液的 OD 值和单位体积内的细胞密度

	小球藻	鱼腥藻	水华鱼腥藻	栅藻
OD 值	0.091	0.203	0.102	0.138
细胞密度(个/mL)	9	31	24	23

并以此数据作为下面实验中藻种的原始数据。

3.4. 四种藻的分缸培养

分别设置 4 组(1 号——水华鱼腥藻、2 号——小球藻、3 号——鱼腥藻、4 号——栅藻)实验组,将其放置于阳光温度均适宜的同场所。在同一时间,将藻种分别放入培养缸中,分别放入配置好的且所含相同的营养液,搅拌均匀使其充分生长。培养过程中定时对培养缸内藻种进行搅匀,防止其贴壁生长影响生长状况和光照条件。

3.5. 数据测量与处理

在实验培养期间,每间隔一天就分别测量 1~4 号培养瓶中微藻藻液的 OD 值和细胞密度,记录后绘成折线图,进行观察比较。同时按时对各缸进行镜检,防止藻种污染并及时止损。

实验最后进行干重的测量,测量方法如下:

- 1) 在消毒环境下,在四个缸中分别取一定比例的藻液(因使用 20 L 的培养缸所以本次实验取 2 L 的藻液,按 10%的比例来计算整缸的干重)。
- 2) 对抽取出的藻液用滤网进行初步过滤。
- 3) 准备四张滤纸并将其剪成与抽滤装置中的抽滤口相符合的大小,将其分别放入四个洁净干燥的培养皿中,并分别对其进行称重。得到 G1 (滤纸加培养皿的重量)
- 4) 将抽滤装置安装好,测试其气密性,将滤纸放置于过滤杯与漏斗基座的卡槽中,将初步过滤的藻液倒入过滤杯中,打开抽滤泵,进行抽滤。
- 5) 在抽滤过程中用蒸馏水将杯壁上的残留藻液冲下,避免误差。
- 6) 抽滤完成后,将滤纸分别放入对应的培养皿中,放入烘箱中进行烘干,在 60℃ 的高温下烘干至恒重。
- 7) 等烘箱完全冷却至室温后,快速将培养皿盖好并取出。放置室温后,用精密电子天平进行称量。得到 G2。
- 8) 进行数据处理: $DW(\text{干重}) = (G2 - G1) / 10\%$ 。

4. 实验结果

通过分别测量四种藻液吸光度和细胞数来跟踪测定各藻生长状况并进行数据比较,测出四种藻液各自的干重并进行比较分析(见图 1~8)。

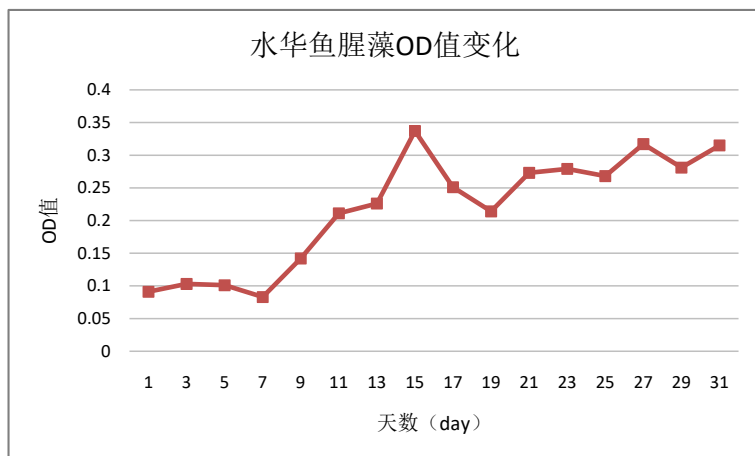


Figure 1. OD change of *Anabaena* algal bloom over time
图 1. 水华鱼腥藻随时间增长 OD 值的变化

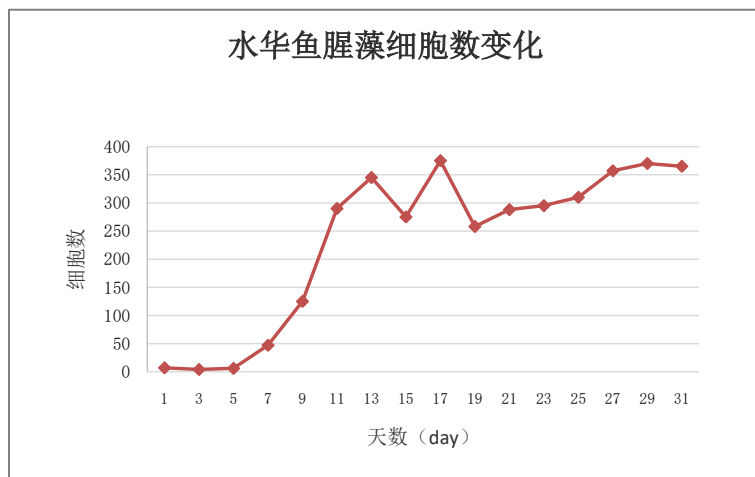


Figure 2. Change of cell number in *Anabaena* algal bloom over time
图 2. 水华鱼腥藻随时间增长细胞数的变化

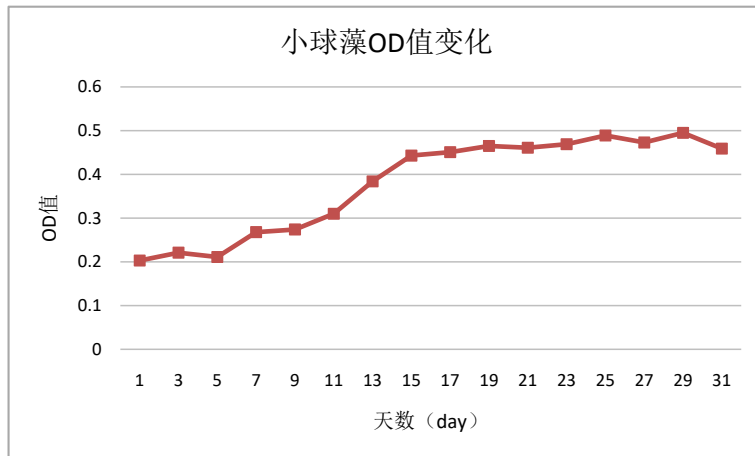


Figure 3. OD change of *Chlorella* growth over time
图 3. 小球藻随时间增长 OD 值的变化

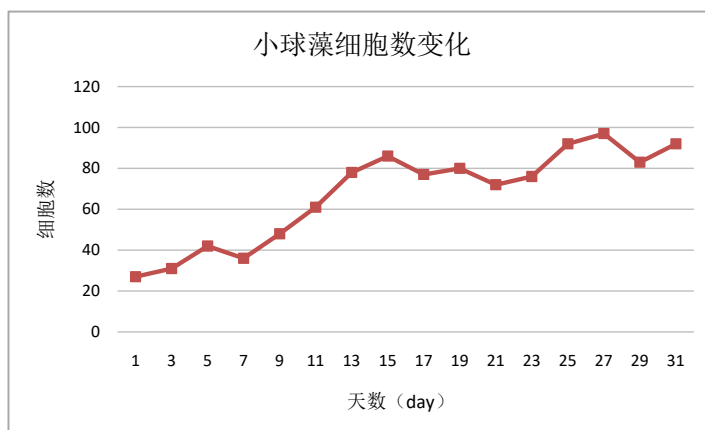


Figure 4. Changes of cell number in *Chlorella* over time

图 4. 小球藻随时间增长细胞数的变化

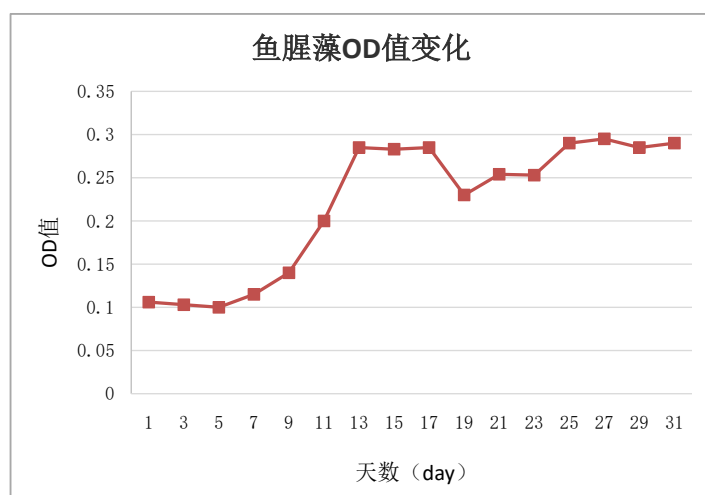


Figure 5. OD change of *Anabaena* growth over time

图 5. 鱼腥藻随时间增长 OD 值的变化

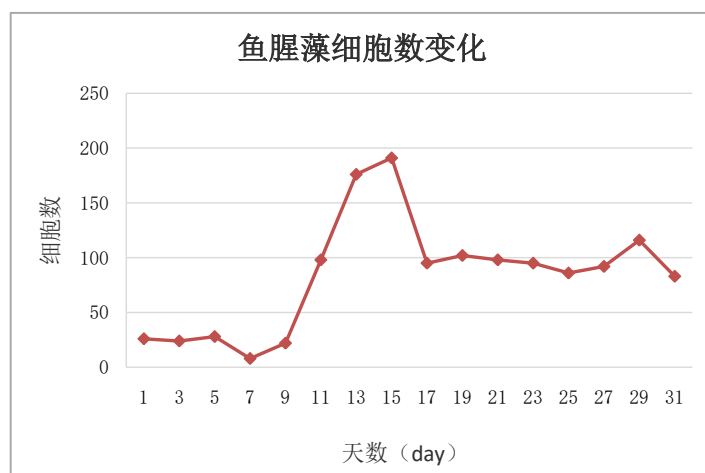


Figure 6. Changes of cell number in *Anabaena* over time

图 6. 鱼腥藻随时间增长细胞数的变化

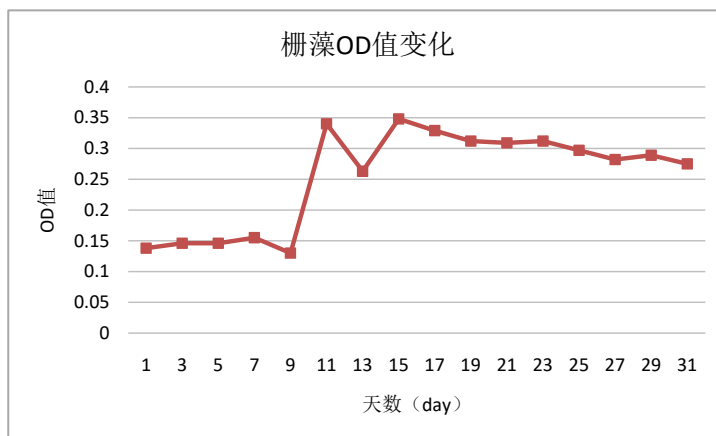


Figure 7. OD change of *Scenedesmus* growth over time
图 7. 栅藻随时间增长 OD 值的变化

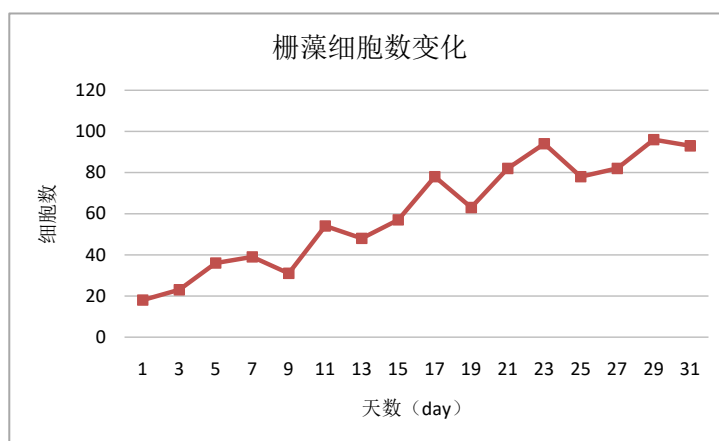


Figure 8. Change of cell number in *Scenedesmus* over time
图 8. 栅藻随时间增长细胞数的变化

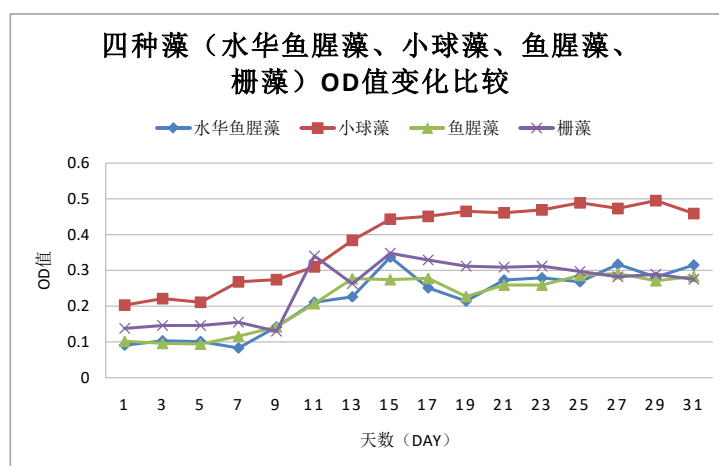


Figure 9. Comparison of OD values of four kinds of algae (*Anabaena algal bloom*, *Chlorella*, *Anabaena*, and *Scenedesmus*) over time
图 9. 四种藻(水华鱼腥藻、小球藻、鱼腥藻、栅藻)随时间增长 OD 值的变化比较

相同生长环境同等营养条件下, 小球藻 OD 值变化较稳定, 呈稳定增长状态, 没有太大起伏。栅藻 OD 值变化起伏较大, 主要发生在 9 day 至 13 day 之间, 在 9 day 到 11 day 之间快速上升, 而从 11 day 到 13 day 之间又有所回落, 随后再次上升。水华鱼腥藻 OD 值变化一直起伏波动较大, 但在 13 day 至 17 day 之间起伏相对较大。鱼腥藻 OD 值变化较稳定, 呈稳定增长状态, 无太大起伏, 随偶有波动但影响不大。

微藻生长过程中小球藻的 OD 值一直高于其他三种微藻, 其次是栅藻, OD 值增长速率在小球藻之下鱼腥藻和水华鱼腥藻之上, 虽有时波动过大也在合理范围之内。鱼腥藻与水华鱼腥藻的 OD 值变化幅度相差不大, 但相对来说水华鱼腥藻 OD 值增长速率较高于鱼腥藻(见图 9)。

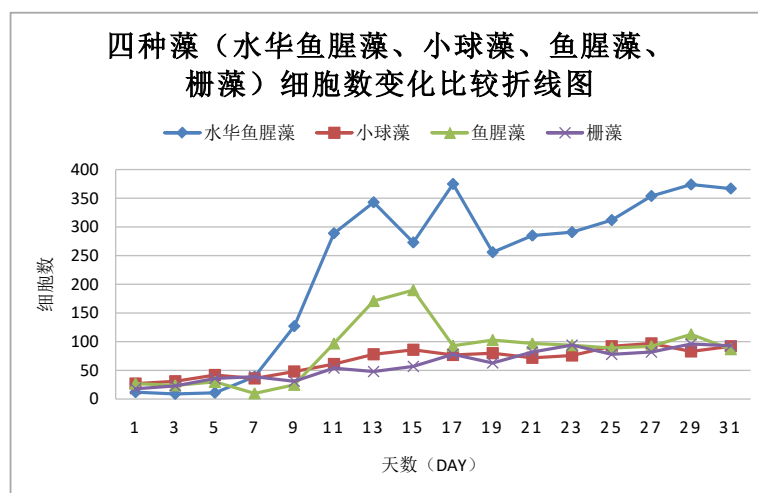


Figure 10. Comparison of cell number changes of four species of algae (*Anabaena algal bloom*, *Chlorella*, *Anabaena*, and *Scenedesmus*) over time

图 10. 四种藻(水华鱼腥藻、小球藻、鱼腥藻、栅藻)随时间增长细胞数的变化比较

相同生长环境同等营养条件下, 小球藻细胞数变化较稳定, 呈稳定增长状态, 没有太大起伏。栅藻细胞数变化较稳定, 呈稳定增长状态, 无太大起伏, 随偶有波动但在合理范围以内。水华鱼腥藻细胞数变化起伏较大, 在 7 day 至 13 day 之间和 15 day 至 17 day 之间一直处于快速增长状态, 在 13 day 到 15 day 之间与在 17 day 到 19 day 之间快速回落, 而从 11 day 到 13 day 之间又有所回落, 随后再次上升。鱼腥藻细胞数起伏波动在 13 day 至 17 day 之间相对较大。鱼腥藻 OD 值增长较稳定, 无太大起伏, 随偶有波动但影响不大。

各微藻细胞数变化折线的比较发现: 微藻生长过程中前五天四种藻除水华鱼腥藻外都保持着较低速率的增长。水华鱼腥藻的细胞数在 5 day 之前一直处于不增长的状态, 从 5 day 开始增长并在 7 day 之后迅速增长并一直保持着高于其他三种微藻的状态, 中间虽有较大的上下波动但影响不大。其次是鱼腥藻, 在 9 day 至 15 day 之间有一段快速增长期, 细胞数增长速率在水华鱼腥藻之下小球藻和栅藻之上。小球藻与栅藻的细胞数在实验过程中均呈稳定增长的状态, 无太大波动。但相对来说小球藻细胞数增长速率高于栅藻(见图 10)。

Table 4. Measurement of dry weight of the four microalgae

表 4. 四种微藻干重的测量表

	水华鱼腥藻	小球藻	鱼腥藻	栅藻
干重(g)	14.6	7.2	13.1	4

在四种藻中水华鱼腥藻的干重值为最高，鱼腥藻次之，再是小球藻，而栅藻干重值最小。其中水华鱼腥藻数值已经是小球藻的两倍，是栅藻的三倍之多(见表 4)。这一结果比较符合图 10 的分析。

因为实验在冬季进行，所以在本次实验中，平均光照强度：245；平均室温：9.6℃。

5. 分析与讨论

本实验的目的是为了探究水华鱼腥藻、小球藻、鱼腥藻、栅藻这四种微藻分别在相同培养条件下，各类微藻的生长情况并对其各自的生长速度进行比较。探究在相同环境中这四种微藻中的优势品种，从而满足相关市场和研究的需要。

培养这四种微藻时外界实验环境对微藻生长情况产生了一定的影响，因实验期在沿海的冬季进行，虽光照条件可以得到基本保障，光照强度处于良好状态但较低的温度也对微藻的生长产生了一定的影响。从实验结果可以看出较低的温度对四种微藻的生长都有所影响，其中小球藻和栅藻生长所受温度的影响较大。但由于小球藻在低温条件下的适应能力较好，在较低温度下依然能生长并保持较好的光合速率[16]，而已知的是栅藻在中温 35℃ 左右下生长最好，并对低温的氮磷要求较高[17] [18]，所以理论上小球藻生长状态要明显比栅藻好一些，与实验得出数据相符合。

同时由结果中的图 1 到图 8 的折线可以看出，四种微藻的 OD 值和细胞密度一般都不是一直上升的状态，有时会出现一定程度的起伏，对实验过程进行原因分析后认为可能存在以下几种可能性：1) 由于实验中的光照条件主要依赖于太阳光照，因此阴天等环境可能会对微藻的生长产生一定的影响，同时实验室中的温度、湿度等不可控的条件变化也有可能对测量结果产生一定的影响。2) 由于培养缸体积过大，在测量取样前虽然都用消毒过的玻璃棒进行了充分搅拌，但由于器材条件所限，一些易于沉积的微藻也无法完全保证测量的准确性。导致数据出现波动。

而从图 9 与图 10 比较来看，四种藻 OD 值与细胞密度状态不符，而干重测试结果明显更符合细胞密度的分析，考虑到中期时水华鱼腥藻和鱼腥藻就因浓度升高而集结成块状、片状，达到了生长周期中的最大值，而在这个时期中鱼腥藻最易于沉降[19]。从而导致有些藻沉积在培养器皿底部，造成 OD 值的不准确，所以最终按细胞数和干重来确定结果更为准确。

根据实验结果分析，这四种微藻(水华鱼腥藻、小球藻、鱼腥藻、栅藻)在相同的培养条件下，水华鱼腥藻明显处于优势地位为其中的优势藻种，栅藻明显处于劣势地位。四种微藻生长速度的比较结果为：水华鱼腥藻 > 鱼腥藻 > 小球藻 > 栅藻。

从本次实验中，可以清楚地看到水华鱼腥藻恐怖的生长速度，而且水华鱼腥藻作为蓝藻水华中比较具有代表性的藻种[20]，能够释放出大量可以对环境和人类健康造成严重危害的多种鱼腥藻毒素，破坏水体原有生态系统，甚至可以使水体丧失其基本功能。在地表水体富营养化愈加严重的今天，我国作为水体富营养化程度最严重的国家之一，更加直接的面对着水华所造成的危害，我们应尽量加强有关此方面的研究，并积极寻找水华鱼腥藻的应用方向，尽早解决水华的治理问题并实现变害为宝。

6. 研究的局限性

小球藻生长在近岸淡水水域，受海洋地理、水文、生态环境影响极大。培养室局部的温度、光照差异对小球藻生长具有影响，小球藻的研究中光照强度会受天气影响，影响实验数据的准确性。培养室中培养器材具有局限性，培养规模较小，无法更充分体现小球藻的光合速率等。研究人员可能会以为自身的文化或对某些现象的看法而产生偏见，对实验现象的数据和结果有误差和偏见，可能会影响研究的合理性。

参考文献

- [1] Rschaix, J.D. (2013) *Chlamydomonas reinhardtii*. In: Maloy, S. and Hughes, K., Eds., *Brenner's Encyclopedia of Ge-*

- netics*, Elsevier, Amsterdam, 521-524. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374984-0.00230-8>
- [2] 田朝玉, 叶晓, 华威, 等. 基于污水处理的微藻培养研究进展[J]. 环境工程, 2016, 34(3): 4-8.
- [3] 张虎, 谭英南, 朱瑞鸿, 等. 微藻生物固碳技术在“双碳”目标中的应用前景[J]. 生物加工过程, 2022, 45(2): 32-36.
- [4] 胡开辉, 汪世华. 小球藻的研究开发进展[J]. 武汉工业学院学报, 2005, 24(3): 27-30.
- [5] 严美姣, 王银东, 胡贤江. 光照对小球藻、斜生栅藻生长速率及叶绿素含量的影响[J]. 安徽农学通报, 2007, 13(23): 27-29, 59.
- [6] 杨丽君. 污水处理中污泥的处置和利用[J]. 绵阳经济技术高等专科学校学报, 2001, 18(3): 26-29.
- [7] 邹宁, 李艳, 孙东红. 几种有经济价值的微藻及其应用[J]. 烟台师范学院学报(自然科学版), 2005, 21(1): 59-63.
- [8] Borowitzka, M.A. (1995) Microalgae as Sources of Pharmaceuticals and Other Biologically Active Compounds. *Journal of Applied Phycology*, 7, 3-15. <https://doi.org/10.1007/BF00003544>
- [9] 常锋毅, 潘晓洁, 沈银武, 等. 藻类在农业生产中的资源化利用[J]. 华中农业大学学报, 2014, 33(2): 139-144.
- [10] Sharma, N.K., Tiwari, S.P., Tripathi, K. and Rai, A.K. (2011) Sustainability and Cyanobacteria (Blue-Green Algae): Facts and Challenges. *Journal of Applied Phycology*, 23, 1059-1081. <https://doi.org/10.1007/s10811-010-9626-3>
- [11] De P.K. (1939) The Role of Blue-Green Algae in Nitrogen Fixation in Rice-Field. *Biological Sciences*, 127, 121-139. <https://doi.org/10.1098/rspb.1939.0014>
- [12] 蔡文龙, 赵勇, 孟春晓. 鱼腥藻研究进展[J]. 畜牧与饲料科学, 2009, 30(1): 19-20.
- [13] 王秀红, 沈健英, 陆贻通. 单啞磺隆对水华鱼腥藻生长的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2006, 33(4): 530-532.
- [14] 邹晓波. 同时包埋水华鱼腥藻和活性炭对畜禽废水中氮磷的净化研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 四川农业大学, 2012.
- [15] 岳龙, 付秋果, 张素芬, 等. 栅藻的优化培养及脂质提取方法研究[J]. 核农学报, 2012, 26(6): 894-899.
- [16] 岳红, 李巧玉, 喻焱, 等. 铜绿微囊藻与小球藻对低温和黑暗的响应与恢复[J]. 水生生物学报, 2018, 42(1): 190-195. <https://doi.org/10.7541/2018.024>
- [17] 朱伟, 万蕾, 赵联芳. 不同温度和营养盐质量浓度条件下藻类的种间竞争规律[J]. 生态环境, 2008, 17(1): 6-11. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-5906.2008.01.002>
- [18] 李晓莉, 陶玲, 毛梦哲, 苟青, 李谷. 温度和氮磷浓度对平裂藻和栅藻生长及竞争的影响[J]. 水生生物学报, 2015(6): 1217-1223.
- [19] 巫娟, 陈雪初, 孔海南, 等. 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. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6923.2012.05.016>
- [20] 潘晓洁, 常锋毅, 刘永定, 等. 滇池水华鱼腥藻(*Anabaena flos-aquae*)的毒性研究[C]//中国海洋湖沼学会. 中国海洋湖沼学会藻类学分会第七届会员大会暨第十四次学术讨论会论文摘要集. 2007: 36.