

微量元素铁对 3 种水华藻类生长的影响

马剑敏, 王洁玉, 张婵, 赵闪闪, 褚一凡, 姜小玉

(河南师范大学 生命科学学院, 河南 新乡 453007)

摘要:在温度为 25 ℃, 光照强度为 2500 lx, 光暗比为 14 h : 10 h 的实验室条件下, 研究微量元素铁对 3 种水华藻类(铜绿微囊藻、小球藻和小环藻)生长的影响. 结果表明:当其他营养盐富足时, 培养液中的微量元素铁对 3 种水华藻类的生长均有显著的影响. 在培养中期, 较高的铁浓度对细胞密度和叶绿素 a 质量浓度均有明显的促进作用; 在培养 20 d 后, 当培养液中的铁浓度分别低至 0.19~0.24、0.22~0.47 和 0.15~0.16 mg · L⁻¹时, 铜绿微囊藻、小球藻和小环藻细胞增殖缓慢. 因此, 有效调节微量元素铁的浓度也会影响到自然水体中藻类的生长.

关键词:铁浓度; 铜绿微囊藻; 小球藻; 小环藻; 细胞密度; 叶绿素 a 质量浓度

中图分类号:Q178.1; Q945.79

文献标志码:A

近些年来, 湖泊等水体的富营养化已成为我国面临的重大水环境问题之一. 湖泊的富营养化^[1]是由于水体中的营养盐增加, 导致藻类生物量增加、水中溶解氧耗尽、水质下降等一系列变化, 从而使水的用途受到一定的影响. 浮游植物在短时间内的快速繁殖导致水华的发生^[2], 这是水体富营养化的表现之一. 浮游藻类的种类很多, 在淡水湖泊中都有广泛的分布, 但并非全部的藻类都能形成水华. 能引起水华发生的藻类主要包括蓝藻、硅藻、绿藻、隐藻、裸藻、金藻、甲藻等 15 个类群, 其中以蓝藻水华为最常见也最普遍的水华藻类^[3].

诸多因素都会影响水华的发生和发展, 一般认为, 淡水水体中浮游植物的大量生长主要受到水中氮和磷浓度的影响^[4]. 随着近年来研究的不断深入, 许多学者也开始注意水体中的各种微量元素对藻类水华发生的影响. 其中, 微量元素铁(Fe)也成为研究的一个热点. 目前已有大量的研究发现微量元素 Fe 在浮游植物代谢过程中起重要作用^[5-6]. 在 Fe 限制条件下, 藻类细胞生长缓慢. 藻类叶绿素的合成也受到 Fe 的影响, 它的缺乏将会对浮游植物的生长和光合作用产生重要影响, 尤其是抑制光系统 II 的光合效率. Martin^[7]等经过实验研究, 针对海洋浮游植物提出了 Fe 限制假说. 而对于淡水水体, 可溶性 Fe 含量虽相对较高, 但 Fe 也可以成为藻类生长的营养限制因子.

本实验主要通过营养盐加富试验重点探究水体中 Fe 对该 3 种藻类的限制作用. 深入了解浮游藻类生长的营养限制类型, 阐明微量元素 Fe 对这 3 种水华藻类生长的影响, 对有效控制水体的富营养化也有理论指导意义.

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验中所使用的藻类包括蓝藻、绿藻和硅藻, 分别以铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)、小球藻(*Chlorella vulgaris*)和小环藻(*Cyclotella* sp.)作为其代表进行实验. 3 种藻均是淡水中常见的可以引起水华的浮游藻类, 均购自中国科学院水生生物研究所藻种库. 在温度为 25 ℃, 光照强度为 2500 lx, 光暗比为 14 h : 10 h 的条件下, 分别将铜绿微囊藻、小球藻保存于 BG11 培养液中, 而小环藻保存于 D1 培养液中.

收稿日期:2017-01-10; 修回日期:2017-06-13.

基金项目:河南省重点科技攻关项目(152102310087); 河南省教育厅科学技术重点研究项目(14B180009).

作者简介(通信作者):马剑敏(1964-), 男, 河南偃师人, 河南师范大学教授, 博士, 主要从事生态污染与修复和环境生物学研究, E-mail: mjm6495@sina.com.

1.2 实验方法

实验开始前,将铜绿微囊藻、小球藻接种于灭菌过的无 Fe 的 BG11 培养液中,小环藻接种于灭菌过的无 Fe 的 D1 培养液中进行饥饿处理,处理时间为 72 h. 饥饿处理结束后,在无菌条件下,将 3 种藻分别接种于不同初始 Fe 质量浓度的 BG11 和 D1 培养液中进行实验. BG11 培养液中 Fe 的质量浓度梯度为:0, 0.30, 0.60, 1.20, 1.80 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; D1 培养液中 Fe 的浓度梯度为:0, 0.21, 0.42, 0.84, 1.26 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 接种的初始密度为:铜绿微囊藻和小球藻均为 $1 \times 10^5 \text{ mL}^{-1}$,小环藻为 $1 \times 10^4 \text{ mL}^{-1}$.

接种后放置于温度为 25 $^{\circ}\text{C}$,光照强度为 2500 lx,光暗比为 14 h : 10 h 的光照培养箱中进行培养,培养周期为 20 d. 培养期间,每天定时摇匀 2 次,防止藻细胞贴壁生长而影响实验结果.

1.3 测定指标

1.3.1 藻细胞密度

在培养期间,每 2 d 用分光光度计对 3 种藻液液的吸光值(OD 值)进行测定. 铜绿微囊藻^[8]、小球藻、小环藻^[9]藻液的吸光值与其藻细胞密度有线性关系,其回归方程分别为: $y_1 = 119.579x_1 - 2.107 (R^2 = 0.993)$; $y_2 = 2358.5x_2 + 23.44 (R^2 = 0.9986)$; $y_3 = 42.346x_3 - 1.6933 (R^2 = 0.9555)$,其中 x_1, x_2, x_3 分别代表 3 种藻液的吸光值, y_1 和 y_2 分别代表铜绿微囊藻和小球藻的藻细胞密度(10^6 mL^{-1}), y_3 代表小环藻的藻细胞密度(10^5 mL^{-1}). 因此可以用吸光值的大小代表其藻细胞密度.

1.3.2 叶绿素 a 质量浓度

用热乙醇提取法^[10]每 2 d 测定铜绿微囊藻、小球藻和小环藻的叶绿素 a 质量浓度. 每瓶取藻液样品 10 mL 用 0.45 μm 滤膜过滤,并将藻细胞冷冻保存 12 h 以上. 再用 90% 乙醇 80 $^{\circ}\text{C}$ 水浴 2 min,待暗处萃取 5 h. 然后用 0.22 μm 的滤膜过滤取滤液,定容至 10 mL 得叶绿素 a 提取液. 最后,用分光光度计分别测得其 665 nm 和 750 nm 处的吸光值 E_{665} 和 E_{750} ,酸化后的吸光值 A_{665} 和 A_{750} . 叶绿素 a 质量浓度/ $(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}) = 27.9 \times [(E_{665} - E_{750}) - (A_{665} - A_{750})]V_1/V_2$, V_1 和 V_2 分别为乙醇萃取液的体积(mL)和藻液样品的体积(L).

1.3.3 培养液最终 Fe 质量浓度

在培养周期 20 d 结束后,用硫氰酸钾分光光度法^[11]测定各培养液中的最终 Fe 质量浓度. 用硫酸铁铵标准液配制标准的比色液,以空白为对照,用分光光度计测定 480 nm 波长下的吸光值. 以 Fe 标液的含量为横坐标,吸光度值为纵坐标,得到标准曲线方程: $y = 0.4079x + 0.0084, R^2 = 0.9957$. 其中, x 是 Fe 标液的含量, y 是吸光度. 用于计算培养液中最终的 Fe 质量浓度及 Fe 的消耗率.

1.4 数据处理

实验所得的数据均用 SPSS 19.0 软件处理,利用单因素方差分析和多重比较分析不同处理(即不同初始 Fe 质量浓度)间差异性,其显著水平为 $P < 0.05$,并用 EXCEL 2010 软件作图.

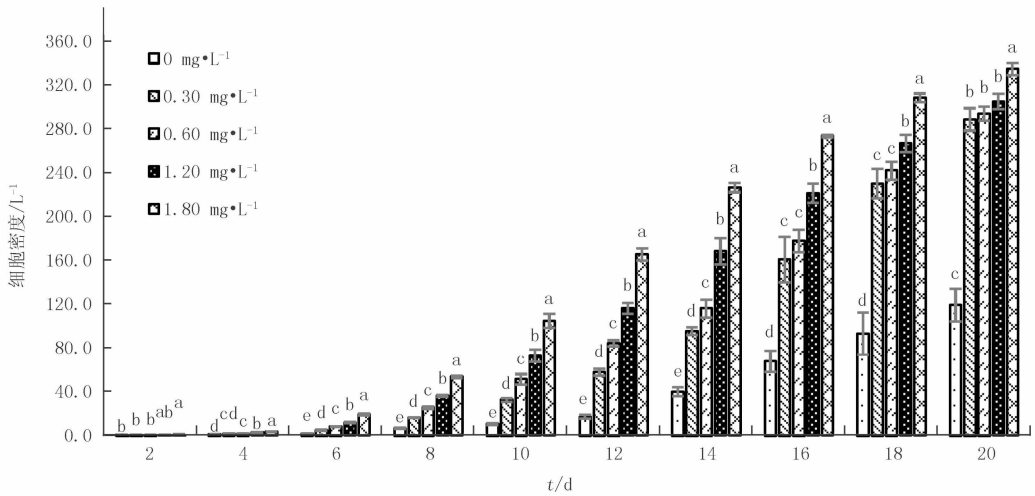
2 结果与分析

2.1 不同 Fe 质量浓度对 3 种水华藻细胞密度的影响

如图 1、图 2 和图 3 所示,总体来看,3 种藻类无铁(即铁浓度为 0)实验组的藻细胞密度均增长缓慢,其中小环藻藻液的细胞密度在第 10 d 基本稳定. 说明微量元素 Fe 对铜绿微囊藻的藻细胞密度有显著的影响.

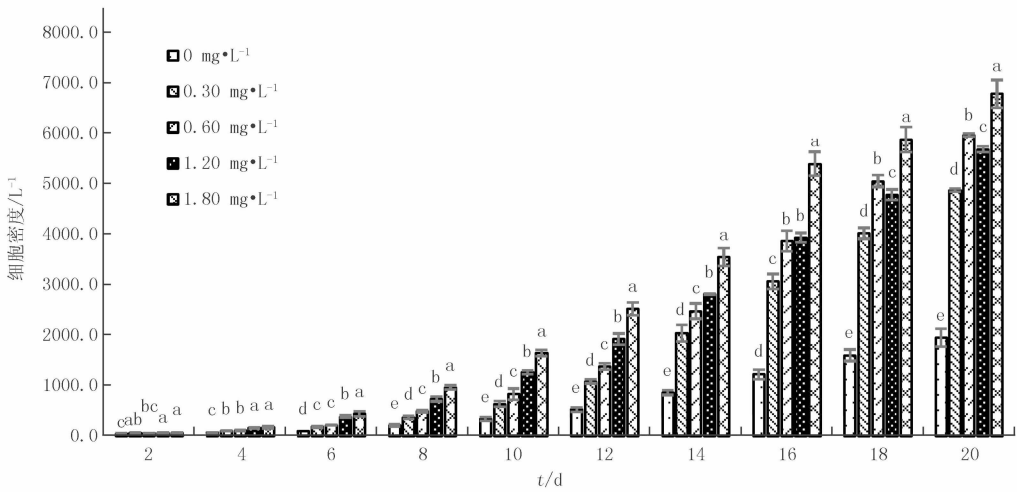
由图 1 可以看出,铜绿微囊藻不同实验间的藻细胞密度均随着初始 Fe 质量浓度的增加而增加. 在第 6~14 d,不同实验间的藻细胞密度两两之间均有显著差异;与初始值相比,第 14 d 含 Fe 实验组的藻细胞密度分别增加了 814 倍、986 倍、1424 倍和 1910 倍左右. 第 20 d,铜绿微囊藻的藻细胞密度在初始 Fe 质量浓度为 0.30 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 0.60 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 1.20 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间均不再具有显著差异.

与铜绿微囊藻相似,图 2 显示出小球藻第 8~14 d,不同实验间的藻细胞密度两两之间也均有显著差异;且藻细胞密度随培养液中初始 Fe 质量浓度的增大而升高. 在第 14 d,含 Fe 实验组的藻细胞密度较初始值分别增加了 855 倍、1040 倍、1181 倍和 1494 倍左右. 培养的第 16 d,初始 Fe 质量浓度为 0.60 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 1.20 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,小球藻的藻细胞密度无显著差异,第 18~20 d 时,初始 Fe 质量浓度为 0.60 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的藻细胞密度反而高于初始 Fe 质量浓度为 1.20 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时的藻细胞密度.



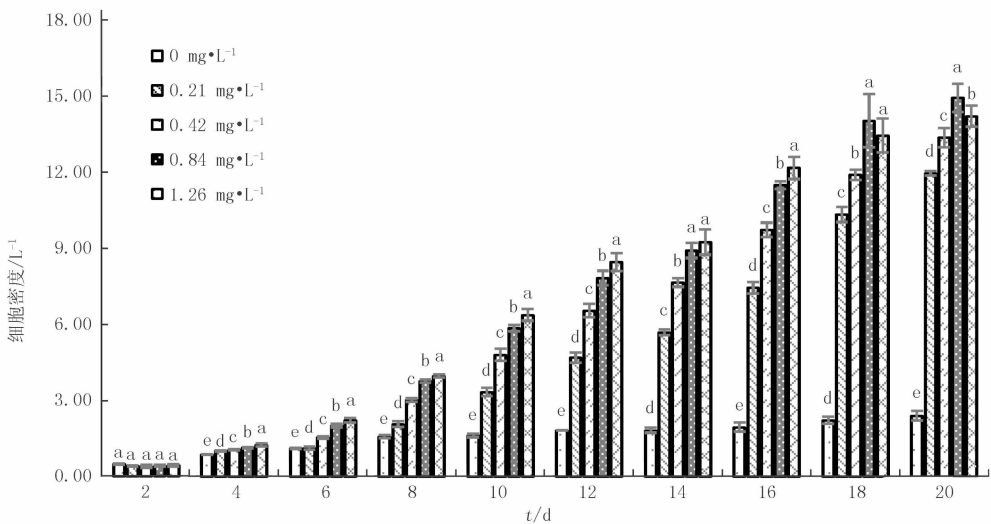
注:图中不同的小写字母表示不同实验组间的显著差异性,其显著水平为 $P<0.05$.

图1 不同初始Fe质量浓度下铜绿微囊藻的细胞密度



注:图中不同的小写字母表示不同实验组间的显著差异性,其显著水平为 $P<0.05$.

图2 不同初始Fe质量浓度下小球藻的细胞密度



注:图中不同的小写字母表示不同实验组间的显著差异性,其显著水平为 $P<0.05$.

图3 不同初始Fe质量浓度下小环藻的细胞密度

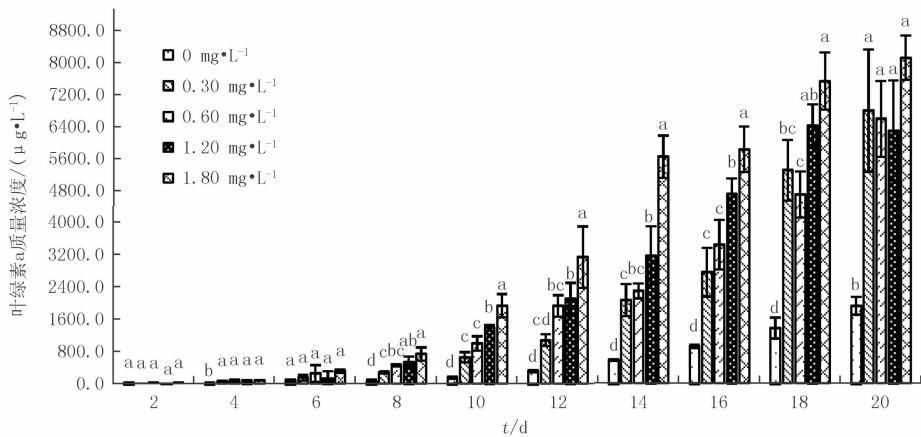
从图3可以看出,与对照组相比,不同实验间小环藻的藻细胞密度的增加也有差异.对于小环藻,第4~12 d,藻细胞密度在不同实验间两两之间均具有显著差异,且培养液中初始Fe质量浓度越大时,藻细胞密度的增加量也越大.与初始值相比,在第14 d,含Fe实验组的藻细胞密度分别增加了223倍、300倍、350倍和363倍左右.而在第18~20 d,初始Fe质量浓度为 $0.84 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时的藻细胞密度较高于初始Fe质量浓度为 $1.26 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时的藻细胞密度.此外,在本实验的培养后期,进行小环藻细胞计数时,能明显看到其细胞分解、死亡.

2.2 不同Fe质量浓度对3种水华藻叶绿素a合成的影响

由图4、图5和图6可得,铜绿微囊藻和小球藻的叶绿素a质量浓度随着培养天数的增加而不断增大,小环藻的叶绿素a质量浓度则出现先增加后减少的趋势.其整体变化与细胞密度具有相似性.

图4显示出铜绿微囊藻的叶绿素a质量浓度随培养天数而不断增加,初始Fe质量浓度越高,叶绿素a质量浓度也越高.在培养的第10~16 d,初始Fe质量浓度为 $1.80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的实验组与其他组有显著差异.在第20 d,含Fe的各实验组之间均无显著差异.如图5所示,不同实验组间小球藻的叶绿素a质量浓度的变化有很大差异,与铜绿微囊藻相似,初始Fe质量浓度越大,其叶绿素a质量浓度也越多.在培养第8~14 d,初始Fe质量浓度为 $1.80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,叶绿素a质量浓度与其他实验组有显著差异.在第20 d,叶绿素a质量浓度在初始Fe质量浓度为 $0.60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 间不再具有明显的差异性.

对于小环藻,如图6不同实验组的叶绿素a质量浓度会达到最大值再下降.在第14 d,初始Fe质量浓度为 $1.26 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时叶绿素a质量浓度达到最大值,并显著高于其余组,之后叶绿素a质量浓度开始下降.在第18 d时,初始Fe质量浓度为 $0.42 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.84 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的叶绿素a质量浓度分别达到最大值,均较高于Fe质量浓度为 $1.26 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时的最大叶绿素a质量浓度.



注:图中不同的小写字母表示不同实验组间的显著差异性,其显著水平为 $P < 0.05$.

图4 不同初始Fe质量浓度下铜绿微囊藻的叶绿素a质量浓度

2.3 培养周期结束最终Fe质量浓度与初始值的对比

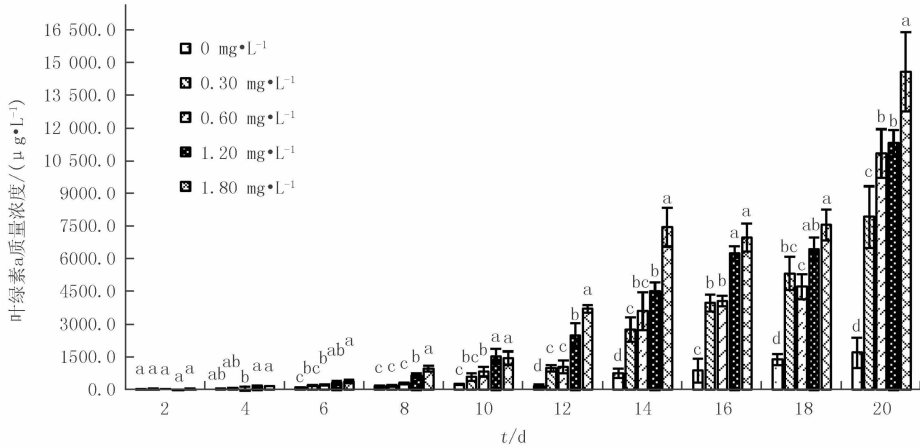
由表1和表2可得,在培养周期结束后,不同实验组培养液的Fe质量浓度有明显的下降,但均维持在一定的浓度范围内.总体来看,小球藻的最终Fe质量浓度较高,其Fe的消耗率也最低,仅为26.72%~74.17%.随着培养液中Fe的不断消耗,3种藻类的细胞增殖也逐渐减慢.对于第20 d的细胞密度大小与培养液中最终Fe质量浓度存在一致性.

3 讨论

藻类水华的暴发是一个复杂的过程,影响因素诸多且相互影响和制约,其中营养盐是重要因子之一.大量研究表明氮、磷的质量浓度增加^[12]对水华的发生和发展有促进作用,藻类的生长也受到氮限制和磷限制.而微量元素作为一些生化反应的辅助因子,参与藻类的代谢过程,许多实验也发现铁、锰、锌等对藻类的生长也表现出低质量浓度促进藻类生长,高质量浓度抑制藻类生长的现象^[13].

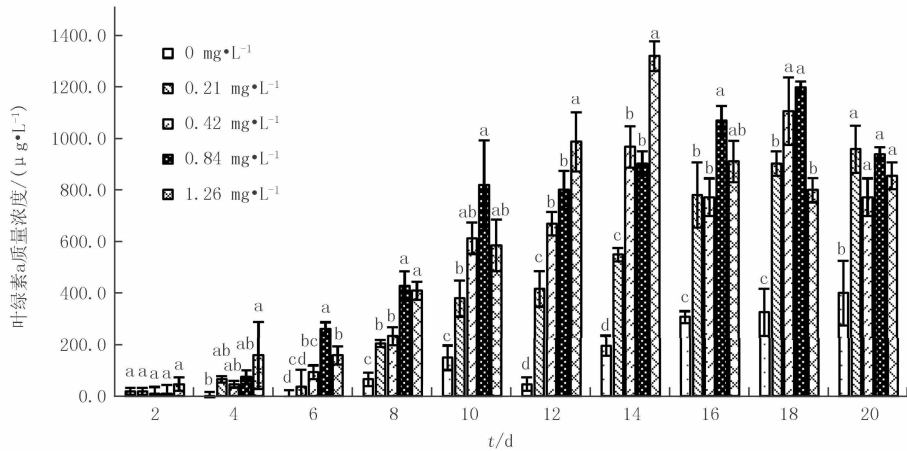
实验结果表明在其他营养盐富足的条件下,微量元素Fe对铜绿微囊藻、小球藻和小环藻的生长表现出

一定的促进作用. 于洪贤等^[14]研究了铁浓度对蛋白核小球藻的生长影响, 结果也显示 Fe 对小球藻先有促进作用, 后出现抑制. 郭延等^[15]以水华鱼腥藻(*Anabaena aquae*)作为研究对象, 发现微量元素铁是促进水华鱼腥藻(蓝藻)增殖的主要因素. 刘静等^[16]对太湖中常见的藻类进行室内培养实验, 同样发现在一定范围内初始 Fe 质量浓度的增加促进藻类的生长. 本实验中初始铁质量浓度最大值为 $1.80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 结果发现在该质量浓度范围内, 在培养中期, 初始 Fe 质量浓度越高, 3 种藻的藻细胞密度和叶绿素 a 质量浓度也越大.



注: 图中不同的小写字母表示不同实验组间的显著差异性, 其显著水平为 $P < 0.05$.

图5 不同初始Fe质量浓度下小球藻的叶绿素a质量浓度



注: 图中不同的小写字母表示不同实验组间的显著差异性, 其显著水平为 $P < 0.05$.

图6 不同初始Fe质量浓度下小环藻的叶绿素a质量浓度

表 1 培养周期结束后铜绿微囊藻和小球藻最终 Fe 质量浓度及消耗率

初始铁质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	铜绿微囊藻		小球藻	
	最终铁质量浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	消耗率/%	最终铁质量浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	消耗率/%
0	—	—	—	—
0.30	0.191 ± 0.025	36.26 ± 8.17	0.220 ± 0.019	26.72 ± 6.24
0.60	0.187 ± 0.028	68.81 ± 4.72	0.355 ± 0.046	40.89 ± 7.73
1.20	0.236 ± 0.031	80.32 ± 2.57	0.342 ± 0.062	71.47 ± 5.14
1.80	0.244 ± 0.055	86.43 ± 3.07	0.465 ± 0.046	74.17 ± 2.58

注: 均值±标准差, 下同.

在缺 Fe 或低 Fe 的条件下, 藻细胞的代谢过程发生异常, 不利于藻类的生长及叶绿素 a 的合成^[17]. 实验结果表明, 随着培养液中 Fe 的大量消耗, 藻细胞在培养后期生长缓慢, 其细胞密度和叶绿素 a 质量浓度均不再快速增长. 研究发现 Fe 对藻类生长的限制作用来自于微量元素 Fe 对所参与的代谢过程的影响或者通过

影响环境中其他营养元素(如氮和磷等)参与的生化反应过程来间接限制藻类的生长^[18]. 薛凌展等^[19]研究不同初始铁浓度对铜绿微囊藻和小球藻生长影响,发现两种藻均受到铁限制,且缺铁对铜绿微囊藻的影响较为显著. 本实验结果显示,培养液中 Fe 质量浓度虽不断降低,这两种藻类依旧维持一定的生长速率缓慢增长. 这应该与前期铜绿微囊藻和小球藻生长过程中对微量元素 Fe 的一定的富集作用^[20]相关. 在培养后期小环藻细胞的形态变化,可能会是导致小环藻的叶绿素 a 质量浓度增长到最大值随后出现下降的原因.

在实验周期结束后,培养液中的最终 Fe 质量浓度均维持在一定的浓度范围,而 Fe 的消耗率各不相同,这可能与藻类对 Fe 的吸收和利用有关. 有研究发现海洋硅藻细胞内的铁含量与环境中的其他营养元素有关^[21]. 因此,实验中铜绿微囊藻、小球藻和小环藻对培养液中 Fe 的吸收和利用也会比较复杂,培养液中 Fe 的去向还有待进一步研究. 但从培养后期 3 种藻类均生长缓慢来看,铁浓度的降低在一定范围内限制了藻类的生长. 可见在自然水体中,有效控制微量元素 Fe 的浓度也可能在一定程度上影响水华藻类的生长,以此作为调控水体富营养化的一种方法.

表 2 培养周期结束后小环藻最终 Fe 质量浓度及消耗率

初始铁质量浓度/ (mg · L ⁻¹)	小环藻	
	最终铁质量浓度/(mg · L ⁻¹)	消耗率/%
0	—	—
0.21	0.146±0.019	30.34±8.92
0.42	0.159±0.014	62.25±3.37
0.84	0.171±0.026	79.67±3.04
1.26	0.163±0.019	87.09±1.49

参 考 文 献

- [1] 孔繁翔,高光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考[J]. 生态学报,2005(03):589-595.
- [2] 肖永辉,王志刚,刘曙照. 水体富营养化及蓝藻水华预警模型研究进展[J]. 环境科学与技术,2011(11):152-157.
- [3] 张君枝,邱丽佳,张艳娜,等. 高温热浪下北京城市水体典型蓝绿藻生长规律研究[J]. 河南师范大学学报(自然科学版),2016,44(2):89-94.
- [4] 马健荣,邓建明,秦伯强,等. 湖泊蓝藻水华发生机理研究进展[J]. 生态学报,2013(10):3020-3030.
- [5] 孔赞,邹培,宋黎明,等. 铁对藻类生长及藻毒素合成影响研究进展[J]. 应用生态学报,2014(05):1533-1540.
- [6] 姚波,席北斗,胡春明,等. 铁限制对浮游植物生长和群落组成的影响研究综述[J]. 生态环境学报,2010(02):459-465.
- [7] 朱明远,牟学延,李瑞香. 铁在海洋初级生产过程中的作用[J]. 黄渤海海洋,1997(03):51-56.
- [8] 郭萌. 磷、温度和光照对铜绿微囊藻-大型溞-金鱼藻三者相互作用的影响研究[D]. 新乡:河南师范大学,2013.
- [9] 徐婷婷. 磷、温度和光照对小环藻-大型溞-金鱼藻三者相互作用的影响[D]. 新乡:河南师范大学,2014.
- [10] 陈宇炜,陈开宁,胡耀辉. 浮游植物叶绿素 a 测定的“热乙醇法”及其测定误差的探讨[J]. 湖泊科学,2006(05):550-552.
- [11] 尚尔坤,田然,马丽媛,等. 4 种分光光度法测定铁含量的对比分析[J]. 食品工业,2013(10):223-225.
- [12] 杨佩昀,徐婷婷,高伟,等. 温度、光照和磷质量浓度对小环藻、大型溞和金鱼藻共培养的影响[J]. 河南师范大学学报(自然科学版),2016,44(1):110-116
- [13] 陈仕光,王志红. P 和 Fe、Mn、Zn 对藻类生长影响的协同性[J]. 仲恺农业工程学院学报,2012(02):22-23;29.
- [14] 于洪贤,孙旭,马成学. Fe²⁺ 浓度对淡水蛋白核小球藻 *Chlorella pyrenoidosa* 生长的影响[J]. 水产学杂志,2016(01):34-37.
- [15] 郭延,王志红,骆科枢,等. 4 种营养元素对水华鱼腥藻和四尾栅藻增殖的影响[J]. 环境工程学报,2015(05):2113-2118.
- [16] 刘静,赵海涛,盛海君,等. 铁对太湖常见藻类生长及 Ca²⁺、Mg²⁺ 离子吸收的影响[J]. 环境科学与技术,2011(01):59-64.
- [17] Wang Chong, Kong Hainan, Wang Xinze, et al. Effects of Iron on Growth and Intracellular Chemical Contents of *Microcystis aeruginosa* [J]. Biomedical and Environmental Sciences, 2010(23):48-52.
- [18] Xu H Hai, Zhu Guangwei, Qin Boqiang, et al. Growth response of *Microcystis* spp. to iron enrichment in different regions of Lake Taihu, China [J]. Hydrobiologia, 2013, 700:187-202.
- [19] 薛凌展,黄种持,林泽,等. Fe²⁺ 对鳊池中铜绿微囊藻和小球藻生长的影响[J]. 福建水产,2010(01):49-53.
- [20] Wang Xiaoqin, Jiang Haiibo, Qiu Baosheng. Effects of iron availability on competition between *Microcystis* and *Pseudanabaena* or *Chlorella* species [J]. European Journal of Phycology, 2015, 50:260-270.
- [21] Wang Wenxiong, Robert C II. Biological uptake and assimilation of iron by marine plankton; influences of macronutrients [J]. Marine Chemistry, 2001, 74:213-226.

Effects of Trace Element Iron on the Growth of Three Kinds of Bloom-forming Algae

Ma Jianmin, Wang Jieyu, Zhang Chan, Zhao Shanshan, Chu Yifan, Jiang Xiaoyu

(College of Life Sciences, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

Abstract: At present study, *Microcystis aeruginosa*, *Chlorella vulgaris* and *Cyclotella* sp. was cultured at the certain laboratory conditions [temperature of 25 °C, illumination intensity of 2500 lx, light:dark of 14 h : 10 h] to study the effects of iron on the growth of three kinds of bloom-forming algae. The results showed that the trace element iron had significant impact on the growth of three kinds of bloom-forming algae with other nutrient rich. In the medium culture period, the higher iron concentration promoted the cell density and chlorophyll a content of three kinds of algae; After cultured 20 days, when the iron concentration of the medium was consumed as low as 0.19—0.24, 0.22—0.47 and 0.15—0.16 mg · L⁻¹ respectively, the cell proliferation of *Microcystis aeruginosa*, *Chlorella vulgaris* and *Cyclotella* sp. was slow. Therefore, effective regulation of the iron concentration can also affect the growth of algae in the natural water.

Keywords: iron concentration; *Microcystis aeruginosa*; *Chlorella vulgaris*; *Cyclotella* sp.; cell density; chlorophyll-a content

[责任编辑 王凤产]

(上接第 48 页)

[12] 秦磊. 牡丹分生结节诱导、发生与发育及细胞组织学观察[D]. 北京:北京林业大学, 2012.

[13] BRUKIHN V B, BATYGINA T B. Embryo culture and somatic embryogeneses in culture of *Paeonia anomala* [J]. Phytomorphology, 1994, 44(34): 151-157.

[14] 贾永芳, 王玉坤, 郭余龙, 等. 安祖花组织培养研究[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2007, 35(1): 164-166.

Adventitious Bud Multiplication and Rooting Induction of *Paeonia suffruticosa* 'yingzhubao'

Zhang Shaowei^{1,2}, Li Guirong³, Zhou Xiumei³, Jia Wenqing³, Sun Zhenyuan¹

(1. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

2. School of Horticulture Landscape Architecture, Henan Vocational College of Agriculture, Zhengzhou 451450, China;

3. School of Horticulture Landscape Architecture, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China)

Abstract: 'yingluobaozhu' peony (*Paeonia suffruticosa*) was used as material in this study. The factors of affecting the adventitious bud differentiation and rooting were studied, and the anatomical structure of root primordium was observed. The results showed that the better medium for adventitious buds differentiation was MSB+6-BA 1.5 mg · L⁻¹+NAA 0.05 mg · L⁻¹. The highest adventitious buds regeneration rate was (90.30 ± 1.56)%, and the highest proliferation coefficient was 5.91 ± 0.20. The best rooting medium was 1/2MSB+ IBA 3.0 mg · L⁻¹+ NAA 0.5 mg · L⁻¹+ 1 g · L⁻¹ activated carbon (AC), in which peony's rooting rate was (75.25 ± 2.43)%, its rooting amount is 3.30 ± 0.09 and its longest root length reached (1.40 ± 0.11) cm. This was significantly different from other treatments ($P < 0.05$). The adventitious roots of peony *suffruticosa* tissue culture seedlings belonged to the induced root of original shape. Adventitious roots primitive body originated in the vascular cambium cells, the number of secondary culture was correlated with rooting. The 4°C treatment for 7 d was beneficial to rooting early, and the root grew best in the natural light scattering. Its average length of root was (2.62 ± 0.28) cm, and the survival rate of transplanting was (85.4 ± 1.13)%.

Keywords: *Paeonia suffruticosa*; adventitious bud; rooting

[责任编辑 王凤产]