第30卷 第2期 Vol. 30 No. 2
中国稀土学报
JOURNAL OF THE CHINESE SOCIETY OF RARE EARTHS
2012年4月 Apr. 2012

外源稀土 Ce^{3+} 对紫背浮萍光合作用和水体富营养化的影响

张贝克[1]，余 江[2*]，廖 洋[1]，宋雪梅[1]，高 旭[1]
(1. 四川师范大学化学与材料科学学院，四川 成都 610068；2. 四川大学建筑与环境学院，四川 成都 610065)

摘要：随着稀土的大量开采、冶炼和应用，导致稀土元素正逐渐由岩石圈向水圈和生物圈转移，由此对水环境很可能造成类同重金属的环境负面效应。基于适量稀土对植物生长的促进作用，以四川境内较为常见且易引起水体富营养化的紫背浮萍为研究对象，运用室内受控实验，观测不同浓度稀土 Ce^{3+} 对紫背浮萍光合作用的影响，并对紫背浮萍鲜重以及培养液进行了 15 d 的监测。结果表明较低浓度 Ce^{3+} (0.30，0.60 mg·L^{-1}) 能提高紫背浮萍叶绿素 a 的含量和碳酸酐酶活性，促进植物的光合作用，其鲜重均高于空白样($P<0.05$)，并随着时间推移，培养液中 DO 含量逐渐下降，COD 含量则显示出上升趋势；而较高浓度 Ce^{3+} (1.50，3.00 mg·L^{-1}) 条件下，紫背浮萍叶绿素 a 和碳酸酐酶活性明显降低，鲜重低于空白样，光合作用下降，植物生长受到抑制。研究结果可知，水域中适量浓度 Ce^{3+} (0～0.60 mg·L^{-1}) 可提高水生植物光合作用，加快新陈代谢，进而使水质恶化，促进水体富营养化的发生。

关键词：铈；紫背浮萍；光合作用；水体富营养化
中图分类号： 文献标识码：A 文章编号：1000－4343(2012)02－0236－07

四川省位于长江中上游地区，是长江流域重要的生态屏障，随着三峡大坝的建成，其生态安全更加强烈地影响着三峡水电站的正常运行及长江中下游的环境安全。近年来的研究表明长江三峡库区的水质状况并不乐观，多数水库及支流水体的营养水平已达到富营养化状态，三峡蓄水后，水流条件发生了变化，支流回水区平均流速在 0.01 m·s^{-1} 以下，这些无疑为“水华”的爆发提供了必要的物理条件[1,2]。

另一方面，四川又是我国轻稀土矿的重要产地，以矿床规模最大的牦牛坪稀土矿为例，矿床的工业矿物绝大部分为氟碳铈矿，其次为氟碳钙铈矿，少量硅钛铈矿等，矿石中 80% REO 集中在氟碳铈矿内[3]。随着近年来四川省内轻稀土矿的大量开采和应用，省内的一些水库和河流中稀土含量偏高[4]。笔者所在研究团队 2009 年对四川省内长江干流、支流及水库中的稀土含量进行了调查，结果表明全年稀土含量在 22.46～52.80 μg·L^{-1} 范围，部分水域枯水期稀土含量已达到 90.20 μg·L^{-1}[5]。已有研究表明适量稀土对生物体生长有着显著影响，稀土离子可替代 Ca^{2+} 进入植物叶绿素基体内增加 Mg^{2+}-ATPase 和 Ca^{2+}-ATPase 的活性，提高希尔反应速率，进而提高植物光合速率，促进植物生长[6～8]。因此，大量的稀土元素由岩石圈进入水圈和生物圈，对水生植物生长和繁殖，进而对水体富营养化也必将产生影响[9]。目前稀土对水生植物引起富营养化等水污染现象的影响研究还十分薄弱，所见报道也主要集中在稀土对微藻如蓝绿藻等引起水体富营养化的促进作用方面的研究[10,11]，而对一些飘浮类植物在稀土作用下同样可能引起水体富营养化方面的研究更是鲜有报道。

紫背浮萍是四川地区较为常见且易引起水体富营养化的漂浮植物之一。春夏气温较高的时节，紫背浮萍在一些流速较慢或静止且呈富营养化的水体中常形成一层约 0.5 cm 的覆盖层，阻碍阳光和氧气进入水体，导致水体中的溶解氧被水生生物不断消耗而得不到补充，最终形成厌氧环境，引起水质恶化。同时紫背浮萍由于其生长快、个体小、分布广、易实验室培养而常成为生物检测和评价的供选植物种类[12]。

为此，本文选取紫背浮萍为研究对象，以室内受控实验研究为手段，通过设置 Ce^{3+} 的浓度梯度，测定在不同浓度下紫背浮萍处于稳定期时的叶绿

收稿日期：2011－10－09；修订日期：2011－10－25
基金项目：国家自然科学基金(31100374)；四川省科技计划项目(2011JY0026)资助
作者简介：张贝克(1986－)，男，硕士研究生；研究方向：稀土对水体环境的影响
* 通讯联系人(E－mail：yujianggz@163.com)

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

素 a，碳酸酐酶活性以及光合速率，分析不同浓度的 Ce^{3+} 对紫背浮萍光合系统的影响；在第二阶段的实验中，对紫背浮萍进行了 15 d 的连续培养，每 3 d 对紫背浮萍鲜重以及培养液的溶解氧(DO)、化学需氧量(COD)、总氮(TN)、总磷(TP)进行测定，观察各浓度下 Ce^{3+} 对紫背浮萍的生长量和代谢作用引起的水质变化的影响。从中找出 Ce^{3+} 对紫背浮萍的光合作用促进与抑制的浓度范围，并结合培养液水质的变化情况分析其对自然水体环境可能的影响，为长江三峡水环境安全的污染预防提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　材料培养及 Ce^{3+} 浓度设置

选取已驯化后个体良好的紫背浮萍，放于 1 L 盛有不同浓度 Ce^{3+} 的 Hoagland 营养液的烧杯中培养，每个烧杯内紫背浮萍起始鲜重 0.7 g，烧杯杯身用黑色塑料袋遮光处理，避免光线从杯身方向射入，于 25 ℃培养箱中，光照强度 6000 lx，光照比 13∶11。

Ce^{3+} 的浓度设置为 0.00，0.30，0.60，1.50，3.00 $mg \cdot L^{-1}$，每个浓度设置两个平行样。

1.2　紫背浮萍光合作用强度的测定

培养紫背浮萍后的第 12 d(稳定期)对紫背浮萍各光合指标进行测定。

1.2.1　叶绿素 a　　叶绿素 a 是生物的重要指标，能体现植物对光的利用能力，近年来的研究还表明叶绿素 a 含量与生物量呈显著正相关关系[13]。紫背浮萍叶绿素 a 的含量采用 Arnon 法进行测定。取约 0.20 g 的紫背浮萍放入研钵，加少量石英砂后加入 3～5 ml 95% 乙醇研磨，过滤，将滤液转移至 25 ml 比色管中，用 95% 乙醇定容后用分光光度计分别测定 663，645，652 nm 波长下的吸光度，计算得出叶绿素 a 的含量[14]。

1.2.2　碳酸酐酶　　碳酸酐酶(carbonic anhydrase，CA；EC4.2.1.1)是一种含锌金属酶，参与多种生物光合过程，包括：pH 调节、离子交换、CO_2 转运、呼吸作用、生物合成和光合 CO_2 固定[15]。碳酸酐酶的活性采用 pH 计法[16]测定。取 0.2 g 紫背浮萍放入预冷的研钵中加入少量巴比妥缓冲液(pH = 8.13，20 $mmol \cdot L^{-1}$)研磨，用离心机以 4000 × g 离心 10 min 后收集细胞悬浮液，用巴比妥缓冲液(pH = 8.13，20 $mmol \cdot L^{-1}$)洗涤一次，离心后再用巴比妥缓冲液悬浮，细胞悬浮液最终体积为 8 ml。在 4 ℃下迅速加入 4 ml 0 ℃ CO_2 饱和水，用酸度计监测反应体系 pH 值的变化，记录 pH 值从 8.13 降至 7.13 所需的时间，碳酸酐酶活性(U)的计算公式：$EU = 10 \times (T_0/T - 1)$，其中 T_0 为反应体系中未加藻细胞时 pH 值下降所需的时间，T 为反应体系中加藻细胞时 pH 值下降所需的时间。碳酸酐酶活性单位为 $EU \cdot \mu g^{-1}$。

1.2.3　光合速率　　植物在光合作用中吸收二氧化碳的能力称为光合速率，又叫净光合强度或二氧化碳净同化率。光合速率越高，植物在光合作用中吸收的二氧化碳越多，制造的碳水化合物就越多，产量越高，光合速率是植物光合作用强度的主要指标[17]。测定方法为连根捞出，用蒸馏水洗净，去掉根须后，移入 Dkb-1915 低温恒温槽，保持恒温 20 ℃，置于强光下照射 1 h 后使用 oxygen 氧电极测定紫背浮萍通过光合作用产生的氧气的含量来计算光合速率[18]。

1.3　紫背浮萍鲜重及培养液指标的测定

该阶段按照上述的 Ce^{3+} 浓度对紫背浮萍进行 15 d 的培养，每 3 d 对紫背浮萍的鲜重以及培养液的不同指标进行测定。

1.3.1　鲜重　　将各样品中的全部紫背浮萍进行抽滤，滤取的紫背浮萍吸水 5 min 后用电子天平进行称量总重，将紫背浮萍倒回原培养液中，再次称量吸水纸重量，两次重量之差即为鲜重。

1.3.2　溶解氧(DO)　　采用便携式溶解氧仪进行测定。由于测定鲜重等其他指标时会对培养液中 DO 产生扰动，故每次在测量其他指标前后分别对 DO 进行测定以减少误差。

1.3.3　化学需氧量(COD)　　采用高锰酸钾法测定 COD。取 50 ml 水样加入 250 ml 锥形瓶中，加入 5 ml 硫酸(1 + 3)后再加 10.00 ml 高锰酸钾溶液(0.01 $mol \cdot L^{-1}$)，摇匀，放入沸水浴中加热 30 min，趁热加入 10 ml 0.01 $mol \cdot L^{-1}$ 草酸钠标准溶液，立即用 0.01 $mol \cdot L^{-1}$ 的高锰酸钾溶液滴定至微红，记录高锰酸钾消耗量，可计算出培养液 COD 值。

1.3.4　总氮(TN)　　采用 GB11894-89 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度计法测定，向 10 ml 水样中

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

加入 5 ml 碱性过硫酸钾溶液，放入高压灭菌锅中消解 30 min 后，加入 1 ml HCl (1 + 9)，定容至 25 ml，用分光光度计测定 220 和 275 nm 处的吸光度，计算出水体中 TN 的含量。

1.3.5 总磷(TP) 采用 GB11893-89 钼酸铵分光光度计法测定。向 25 ml 水样中加入 4 ml 过硫酸钾溶液，置于高压蒸汽消毒器中加热至 120 ℃，30 min后取出放冷，加入 1 ml 抗坏血酸溶液，30 s 后加入 2 ml 钼酸盐溶液，充分混匀。室温放置 15 min后，在 700 nm 波长下测定其吸光度，并绘制标准曲线，得出 TP。

2 结果与分析

2.1 叶绿素 a

图 1 为各 Ce^{3+} 浓度作用下紫背浮萍叶绿素 a 的含量。由图 1 可见，0.30 mg·L^{-1} Ce^{3+} 下的紫背浮萍叶绿素 a 的含量最高，为 8.70 mg·g^{-1}，之后随着浓度的升高持续下降，0.60 mg·L^{-1}下叶绿素 a 的含量仍高于空白样，1.50 和 3.00 mg·L^{-1}已经低于空白样。

2.2 碳酸酐酶

图 2 为各浓度 Ce^{3+} 作用下紫背浮萍碳酸酐酶的活性。由图 2 可以发现，碳酸酐酶活性与紫背浮萍叶绿素 a 含量的变化趋势相近，但碳酸酐酶活性最大时对应的浓度为 0.60 mg·L^{-1}，之后活性迅速降低，1.50 mg·L^{-1}下的活性低于空白组，说明此时碳酸酐酶已受到高浓度 Ce^{3+} 的影响，活性受到抑制。

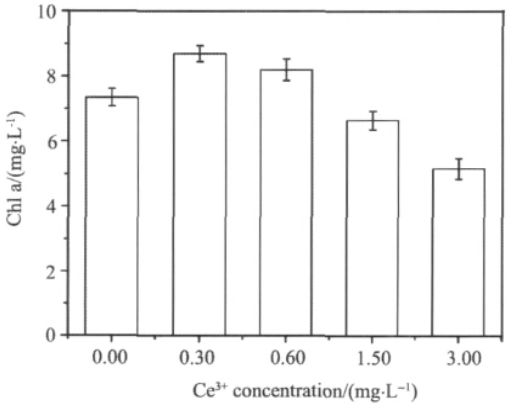

图 1 各 Ce^{3+} 浓度下紫背浮萍叶绿素 a 的含量

Fig. 1 Content of chlorophyll a in *Spirodela polyrhiza* under different Ce^{3+} concentrations

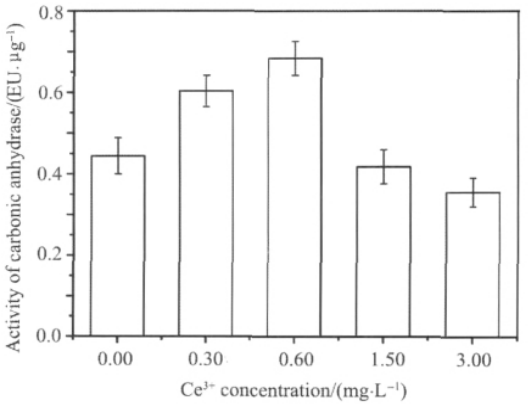

图 2 各 Ce^{3+} 浓度下紫背浮萍碳酸酐酶的活性

Fig. 2 Activity of carbonic anhydrase in *Spirodela polyrhiza* under different Ce^{3+} concentrations

2.3 光合速率

图 3 为不同浓度 Ce^{3+} 作用下，紫背浮萍光合速率的变化情况。由图 3 可看出，紫背浮萍光合速率呈明显的先上升、后下降的变化趋势，在 0.60 mg·L^{-1}处达到最大(458.5 nmol·(min·gFW)$^{-1}$)。但与叶绿素 a，碳酸酐酶活性不同，高浓度下的光合速率下降并不剧烈，1.50 mg·L^{-1}的光合速率仍高于空白组(115.31%)，3.00 mg·L^{-1}也只是略低于空白样(95.51%)。

2.4 鲜重

如图 4 所示，各 Ce^{3+} 浓度下的紫背浮萍整体呈先上升、后稳定的生长趋势。前 6 d 时间内，除 3.00 mg·L^{-1}浓度较为明显地低于其他组外，其他浓度组差别不大且增长率都相对较高，这可能是紫背浮萍在营养元素相对较少的驯化培养箱中培养

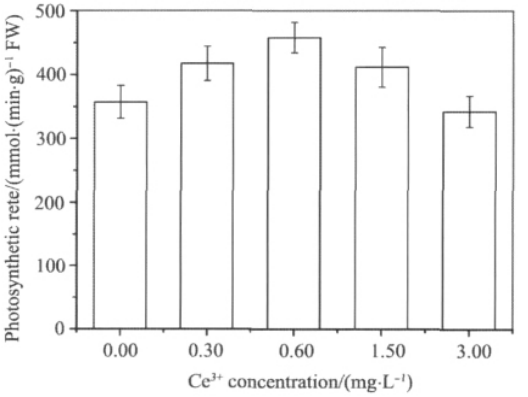

图 3 各 Ce^{3+} 浓度下紫背浮萍光合速率变化趋势

Fig. 3 Photosynthetic rate in *Spirodela polyrhiza* under different Ce^{3+} concentrations

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

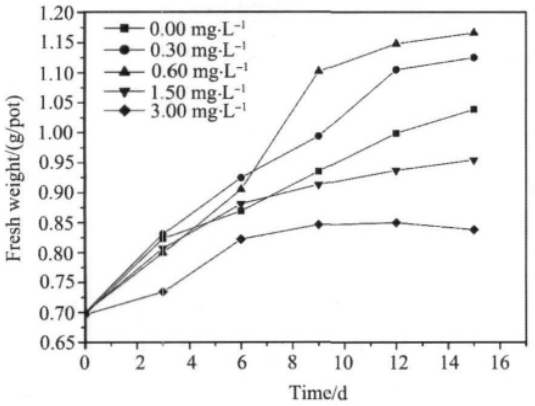

图 4　紫背浮萍的鲜重变化趋势

Fig. 4　Fresh weight change of *Spirodela polyrhiza* under different Ce^{3+} concentrations

后刚进入营养元素较为充足的 Hoagland 培养液迅速吸收营养元素造成的。第 9 d 0.60 mg·L^{-1} 影响下的紫背浮萍出现最大增长率 21.78%（表 1），之后，0.30 和 0.60 mg·L^{-1} 中的紫背浮萍增长量都超过空白组（0.00 mg·L^{-1}），0.60 mg·L^{-1} 一直保持最大值；而 1.50 和 3.00 mg·L^{-1} 下的紫背浮萍鲜重低于空白样，说明 Ce^{3+} 已经起到了抑制作用。第 15 d 时各浓度的增长量均不超过 4.00%，长势趋于停滞。

2.5　培养液 DO 的变化

培养液中溶解氧的含量总体都呈下降趋势（图 5），前 3 d 的下降速度最快，这与前 3 d 总体最快的鲜重增长率相互呼应。第 3 d 后各 Ce^{3+} 浓度下 DO 的降低速度都近似于线性，其中 0.30 和 0.60 mg·L^{-1} 处理的下降速度比空白样快，3.00 mg·L^{-1} 处理的 DO 下降率最慢。

2.6　培养液 COD 的变化

图 6 为各 Ce^{3+} 浓度下培养液 COD 的变化趋势。在前 3 d COD 的变化量都不大，联系鲜重和 DO

表 1　各浓度下紫背浮萍鲜重的增长量（%）

Table 1　Increment of fresh weight in different Ce^{3+} concentration（%）

c/（mg·L^{-1}）	The 3nd day	The 6nd day	The 9nd day	The 12nd day	The 15nd day
0.00	18.12	5.53	7.59	6.82	3.97
0.30	18.71	11.24	7.50	11.18	1.84
0.60	14.10	13.17	21.78	4.18	1.59
1.50	15.36	9.15	3.64	2.62	1.85
3.00	5.41	11.95	2.96	0.41	−1.38

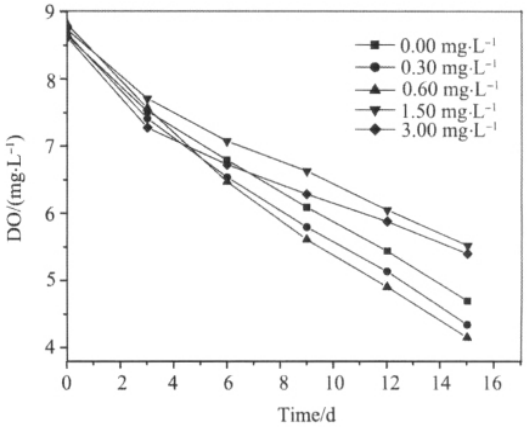

图 5　培养液溶解氧变化趋势

Fig. 5　Change of DO content in culture solution under different Ce^{3+} concentrations

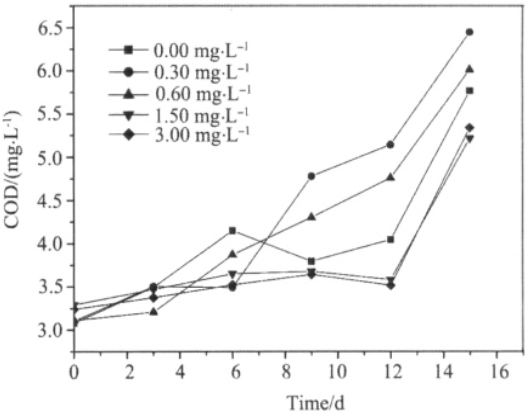

图 6　培养液 COD 变化趋势

Fig. 6　Change of COD in culture solution under different Ce^{3+} concentrations

的变化，推测此阶段紫背浮萍由于初进入营养元素较为丰富的生长环境，生长旺盛而死亡率低。第 3 d 后，0.60 mg·L^{-1} 处理下的培养液 COD 含量开始增大，第 6 d 后 0.30 mg·L^{-1} 处理的 COD 含量也开始迅速增长，并超过 0.60 mg·L^{-1} 的处理，而另 3 个处理的 COD 含量都是在第 12 d 后才开始明显增长，0.60 mg·L^{-1} 下的鲜重也是最高的，由此可知，0.60 mg·L^{-1} 处理作用下的紫背浮萍新陈代谢最为旺盛。

2.7　紫背浮萍对 N/P 的吸收

通过对 TN/TP 的测定，得出紫背浮萍对 N/P 吸收量的趋势，两者总体趋势大致相同，但略有区别。N 的吸收量与紫背浮萍鲜重的增长量趋势较为一致（图 7），在第 6 d ~ 第 9 d 时增长量最大，之后

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

增长速度开始减缓；而 P 的吸收量在第 12 d 前保持一定的增长速率(图 8)，直到第 12 d 后才开始减缓。在培养第 9 d 后，0.30 与 0.60 mg·L^{-1}处理的 N/P 吸收量均高于空白样，1.50 与 3.00 mg·L^{-1}处理则要低于空白样，这与鲜重的变化趋势一致。其中，P 吸收量为 0.60 mg·L^{-1}处理最高，3.00 mg·L^{-1}处理最低，与鲜重的高低顺序一致，而氮吸收量中，0.30 mg·L^{-1}处理的 N 的吸收量略大于 0.60 mg·L^{-1}的吸收量，与鲜重的高低顺序不一致，可能是 Ce^{3+} 与 P 对紫背浮萍生长的协同作用大于 Ce^{3+} 与 N 的协同作用，但就其具体原因还有待于进一步研究。

3 讨 论

通过实验表明，在 0.00 ~ 0.60 mg·L^{-1}的 Ce^{3+} 浓度范围内紫背浮萍的光合作用受到促进，1.50 ~ 3.00 mg·L^{-1}范围内则被抑制。紫背浮萍鲜重也存在与光合作用一致的变化趋势。其中 0.60 mg·L^{-1}下的紫背浮萍生长最快，高浓度 Ce^{3+}(1.50，3.00 mg·L^{-1})作用下的紫背浮萍鲜重均低于空白样。由于各浓度下紫背浮萍的生长状况不同，导致培养液中 DO，COD 等也发生了不同的变化。低浓度下(0.30，0.60 mg·L^{-1})由于紫背浮萍新陈代谢旺盛，根部呼吸作用较强，更多的植物残渣进入水体，导致水体中 DO 下降率、COD 增长率均比空白样高，N/P 的吸收率也较之于空白样的吸收率高，而 1.50 与 3.00 mg·L^{-1}两个浓度下 DO 下降速度、COD 增加量等均低于空白样，紫背浮萍对 N/P 的吸收量也相对较低。综上可推测出，Ce^{3+} 浓度在 0.60 mg·L^{-1}附近时对紫背浮萍有最大的促进作用。

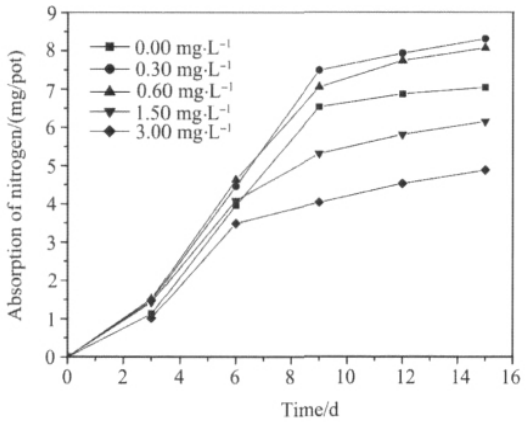

图 7 紫背浮萍对 N 的吸收量

Fig. 7 Absorption of N under different Ce^{3+} concentrations

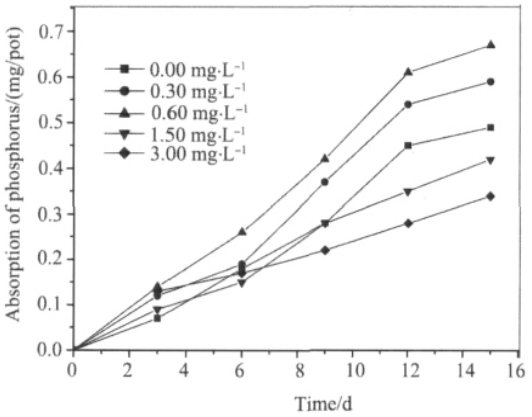

图 8 紫背浮萍对 P 的吸收量

Fig. 8 Absorption of P under different Ce^{3+} concentrations

营养液水质发生的上述变化恰与水体富营养化的成因相同。目前人们对水体富营养化形成的原因主要认为是由于水体中富含 N/P，导致水体表面的水生植物(浮游植物、漂浮植物等)疯长，遮盖整个水体表面，深层水体植物无法接收到太阳光进行光合作用而出现耗氧，DO 降低，COD 升高，引起大量死亡的植物都沉淀到底层从而把有机物转入深层或底层的水中，在这里聚集了大量待分解的有机物，然而没有足够的溶解氧供应，处于厌氧分解的腐化状态，致使大量的厌氧细菌繁殖，反硝化过程占主要地位，最终使整个水域变成腐化区[19,20]。本实验结果表明较低浓度(0.00 ~ 0.60 mg·L^{-1})的 Ce^{3+} 会促进紫背浮萍的生长，使水体的 DO 降低，COD 升高，这与水体富营养化的水质变化原理是一样的。

笔者所在项目组近期在长江中上游流域进行稀土含量调查表明，部分稀土开采、使用规模较大地区附近的水库和河流中稀土含量已接近 0.10 mg·L^{-1}[5]，这意味着稀土浓度对紫背浮萍生长正处在促进范围内，在条件成熟的情况下，一些因紫背浮萍疯长而引起的水体富营养化会因为稀土元素的作用而提前或加剧爆发，应当引起人们的重视。

4 结 论

通过设置 Ce^{3+} 的浓度梯度，以实验室静态受控试验为手段，发现了 Ce^{3+} 对紫背浮萍生长的影

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

响呈先促进、后抑制的变化趋势，在 0.60 mg•L^{-1} 范围附近时达到最佳促进浓度。当 Ce^{3+} 浓度为 0.60 mg•L^{-1} 时对紫背浮萍鲜重、叶绿素含量、光合速率等各项生理指标均有明显促进作用，此浓度下的紫背浮萍对培养液中 N，P 的吸收也相对较快，DO 值迅速降低。而当 Ce^{3+} 浓度较高时紫背浮萍的生长则受到抑制，各项生理指标均呈现明显下降，培养液中 TN/TP 以及 DO 等变化情况均不大。

参考文献：

[1] 湛　敏，姚建玉，张云怀，杨雄柱，李　婷．光照对三峡库区蓝藻垂直迁移过程的影响模拟 [J]．长江流域资源与环境，2010，19(11)：1302.
Zhan M，Yao J Y，Zhang Y H，Yang X Z，Li T. Simulation of illumination influences to cyanobacteria´s vertical migration in the three gorges reservoir area [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin，2010，19(11)：1302.

[2] 李崇明，黄真理，张晟，常建波．三峡水库藻类“水华”预测 [J]．长江流域资源与环境，2006，16(1)：1.
Li C M，Huang Z L，Zhang C，Chang J B. Risk forecast of algal bloom in the three gorges reservoir [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin，2006，16(1)：1.

[3] 程建忠，车丽萍．中国稀土资源开采现状及发展趋势 [J]．稀土，2010，31(2)：65.
Cheng J Z，Che L P. Current mining situation and potential development of rare earth in China [J]. Chinese Rare Earths，2010，31(2)：65.

[4] 王咏梅，赵仕林，赵　凡，李　可，廖　洋，杨丽雪．农用稀土肥对环境影响的研究 [J]．四川师范大学(自然科学版)，2004，27(2)：202.
Wang Y M，Zhao S L，Zhao F，Li K，Liao Y，Yang L X. Study on the effect of agricultural rare earth fertilizers on environment [J]. Journal of Sichuan Normal University (Natural Science)，2004，27(2)：202.

[5] 刘　佩．轻稀土元素对水体富营养化影响研究 [D]．成都：四川师范大学，2008.
Liu P. Impact on water eutrophication of light rare-earth [D]. Chengdu：Sichuan Normal University，2008.

[6] Huang H，Liu X，Qu C，Liu C，Chen L，Hong F S. Influences of calcium deficiency and cerium on the conversion efficiency of light energy of spinach [J]. Biometals，2008，21：553.

[7] Liu X Q，Su M Y，Liu C. Effects of $CeCl_3$ on energy transfer and oxygen evolution in spinach photosystem II [J]. Journal of Rare Earths，2007，25：624.

[8] Xie Z B，Zhu J G，Chu H Y. Effect of lanthanum on rice production，nutrient uptake，and distribution [J]. Journal of Plant Nutrition，2002，25(10)：2315.

[9] 胡勤海，管丽莉，叶兆杰．稀土元素对小球藻的影响 [J]．环境科学，1996，17(2)：37.
Hu Q H，Guan L L，Ye Z J. Effects of rare-earth elements on growth and reproduction of chlorella pyrenoides [J]. Environment Science，1996，17(2)：37.

[10] Wassana Y，Fryxell G E，Addleman R S. Selective removal of lanthanides from natural waters，acidic stream and dialysate [J]. Journal of Hazardous Materials，2009，168(2/3)：1233.

[11] Leybourne M I，Johannesson，K H. Rare earth elements(REE) and yttrium in stream waters，stream sediments，and Fe-Mn oxyhydroxides；Fractionation，speciation，and controls over REE + Y patterns in the surface environment [J]. Geochimicaet Comsmochimica Acta，2008，72(24)：5962.

[12] 艾勇峰，梁晓高，张　波，胡文方，叶　博．紫背浮萍对污水中总氮、总磷的去除效果研究 [J]．江苏环境科技，2008，21(1)：21.
Ai Y F，Liang X G，Zhang B，Hu W F，Ye B. Purification effect of spirodela polyrhiza on sewage [J]. Jiangsu Environmental Science and Technology，2008，21(1)：21.

[13] 杜胜蓝，黄岁樑，臧常娟，吴　敏，高　峰．浮游植物现存量表征指标间相关性研究 I：叶绿素 a 与生物量 [J]．水资源与水工程学报，2011，22(1)：40.
Du S L，Huang S L，Zang C J，Wu M，Gao F. Correlation research between the indicators of phytoplankton standing stock I：Chlorophyll a and biomass [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering，2011，22(1)：40.

[14] 黄　帆，郭正元，徐　珍．测定浮萍叶绿素含量的方法研究 [J]．实验技术与管理，2007，24(5)：29.
Huang F，Guo Z Y，Xu Z. Determined methods of chlorophyll from lemma paucicostata [J]. Experimental Technology and Management，2007，24(5)：29.

[15] Wu Y Y，Wu X M，Li P P. Comparison of photosynthetic activity of orychophragmus violaceus and oil-seed rape [J]. Photosynthetic，2005，43(2)：299.

[16] Wibur K M，Anderson N G. Electrometric and colorimetric determination of carbonic anhydrase [J]. J. Biol. Chem.，1948，176：147.

[17] 王　凯，朱教君，于立忠，孙一荣，张金鑫．光环境对胡桃楸幼苗生长与光合作用的影响 [J]．应用生态学报，2010，21(4)：821.
Wang K，Zhu J J，Yu L Z，Sun Y R，Zhang J X. Effects of light environment on Juglans mandshurica seedings growth and photosynthesis [J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2010，21(4)：821.

[18] 刘学庆，李　涛，孙纪霞，刘学卿，杨永杰．应用氧电极方法测定蝴蝶兰光合速率 [J]．山东农业科学，2009，3：

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

111, 119.
Liu X Q, Li T, Sun J X, Liu X Q, Yang Y J. Mensuration of phalaenopsis photosynthetic rate by oxygen electrode [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2009, 3: 111, 119.

[19] 尹大强, 杨兴烨, 周风帆, 薛 颖. 稀土元素对富营养化水体中藻类增长的影响 [J]. 环境科学, 1998, 5(19): 56.
Yin D Q, Yang X Y, Zhou F F, Xue Y. Effects of rare-earth elements on algal growth in eutrophical water [J]. Environment Science, 1998, 5(19): 56.

[20] 韦立峰. 浅谈水体的富营养化的成因及其防治 [J]. 中国资源综合利用, 2006, 24(8): 25.
Wei L F. The Reason of over-nutrition and its countermeasures [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2006, 24(8): 25.

Influence of Exogenous Ce^{3+} on Photosynthesis of *Spirodela polyrhiza* and Water Eutrophication

Zhang Beike[1], Yu Jiang[2*], Liao Yang[1], Song Xuemei[1], Gao Xu[1] (*1. College of Chemistry and Material, Sichuan Normal University, Chengdu 610068, China; 2. College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China*)

Abstract: With the development of rare earth (RE) industry, a mass of RE have been transferred from lithosphere to hydrosphere and biosphere, which may cause negative effects which are similar to heavy metals on water environment. In view of the fact that the moderate rare earth elements (REE) can promote the growth of plants, *Spirodela polyrhiza*, which is common in Sichuan Province and easy to cause the eutrophication, was selected for research. The controlled experiment was used for the observation of the influence of different Ce^{3+} concentration on the photosynthesis of *Spirodela polyrhiza* and quality of nutrient solution. The results showed that, under low Ce^{3+} concentrations (0.30 and 0.60 mg·L^{-1}), the chlorophyll a (Chl. a) content, carbonic anhydrase activity and photosynthetic rate of *Spirodela polyrhiza* could be increased, meanwhile, the fresh weights were higher than that of the blank ($P<0.05$), DO content in nutrient solution decreased and COD increased as time prolonged. However, the chlorophyll a (Chl. a) content, carbonic anhydrase activity, photosynthetic rate and fresh weight under high Ce^{3+} concentrations (1.50, 3.00 mg·L^{-1}) were lower than those of the blank, the growth of *Spirodela polyrhiza* was inhibited. The results indicated, that the moderate REE cerium (0 ~ 0.60 mg·L^{-1}) could boost the photosynthesis and metabolism of *Spirodela polyrhiza*, and thereby caused the water quality deterioration and water eutrophication.

Key words: cerium; *Spirodela polyrhiza*; photosynthesis; water eutrophication

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net