

稀土元素对富营养化水体中藻类增长的影响*

尹大强 杨兴烨 周凤帆 薛 颖

(南京大学环境科学与工程系 污染控制与资源化国家重点实验室, 南京 210093 E-mail: yindq@nju.edu.cn)

摘要 利用藻类生长潜力测试方法(AGP 试验), 在太湖五里湖区水样中分别添加不同浓度轻、中、重 3 种稀土元素(La()、Gd()、Y())与 3 种稀土混合物, 研究稀土元素对富营养化水体中藻类增长的影响。结果表明, 在本试验条件下, 单独添加 La、Gd 和 Y 在低浓度水平(0.2mg/L)能显著促进羊角月芽藻的增长, 而添加混合稀土元素无明显的促长作用。在单独添加 3 种稀土元素和混合稀土的同时添加磷(HPO_4^{2-} , 0.04mg/L), 仅轻稀土 La 在 0.2mg/L 水平上表现了与磷对羊角月芽藻的协同促长作用。

关键词 富营养化, 稀土元素, 藻类增长, 太湖, 平均最大现存量, 平均最大特定增长率。

Effects of Rare Earth Elements on Algal Growth in Eutrophical Water

Yin Daqiang Yang Xingye Zhou Fengfan Xue Ying

(The State Key Lab of Pollution Control and Resource Reuse, Dept. of Environ. Sci. and Eng., Nanjing Univ., Nanjing 210093

E-mail: yindq@nju.edu.cn)

Abstract In this study, Taihu Lake water was spiked with rare earth elements (REEs) La(), Gd() and Y() in various doses, and the effects of REEs on algal growth were investigated. Results showed that the growth of algae (*Selenastrum capricornutum*) as the increase of average maximum standing crop ($\bar{X}_{\max}$) and the average algal special growth rate ($\bar{U}_{\max}$) was obviously stimulated by adding 0.2mg/L La(), Gd(), Y() alone, but there did not show any stimulation effects when adding mixed REEs. When these three REEs were added together with phosphorous (HPO_4^{2-}), synergism for algal growth showed only in the lowest concentration (0.2mg/L) test.

Keywords eutrophication, rare earth elements (REEs), algal growth, Taihu Lake, average maximum standing crop, average algal special growth rate.

国内外对稀土元素研究主要集中在稀土元素对生物的急性和亚急性毒性效应^[1,2]。有研究报道认为稀土元素在水体食物链中易富集、迁移并具有一定的生物放大作用^[3,4]。因此, 研究稀土元素在水体中产生的长期环境效应具有重大的意义。

研究报道认为: 稀土元素可以促进植物对氮磷元素的吸收, 增加光合作用强度, 提高生物量^[5]; 稀土元素 La()对固氮鱼腥藻具有明显的促长作用, La()等稀土元素能促进衣藻生长, 并随不同稀土形态和不同的藻类有着不同

的作用^[6,7]。但有关稀土元素对太湖藻类增长影响的研究未见报道。

本试验在实验室条件下, 在太湖五里湖区水样中分别添加轻、中、重 3 种稀土元素 La()、Gd()、Y()和 3 种稀土的混合物, 研究其对太湖水体中藻类增长的影响, 同时研究轻、中、重 3 种稀土元素与磷对太湖藻类增长的

* 国家自然科学基金资助项目 (Project Supported by National Natural Science Foundation of China) 29377275
尹大强: 男, 36 岁, 副教授
收稿日期: 1997-12-20

相互关系,探讨稀土元素对太湖富营养化过程的影响,进一步为太湖富营养化防治提供科学依据.

1 材料和方法

1.1 材料

(1)湖水 湖水采自太湖五里湖区.用采水器采取水面下 0.5m 处上层水,经 0.45μm 微孔滤膜过滤备用,过滤湖水 pH 为 7.8,TDP 为 0.0528mg/L.

(2)藻类 中科院武汉水生所纯种培养的羊角月芽藻(*Selenastrum capricornutum*).接种在水生 4 号培养基中^[8],每 3—4d 转接 1 次,重复 2—3 次后即为试验藻种.

(3)稀土元素 分别用 La(NO₃)₃·nH₂O (AR),Gd₂O₃(99.9%)和 Y₂O₃(99.9%)配制成 1000mg/L 的硝酸储备液,实验时稀释至 100mg/L 高压灭菌后备用.

1.2 方法

用标准的藻类生长潜力测试方法(Algal Growth Potential Test, AGP)进行^[9].

将实验藻种用 15mg/L NaHCO₃ 液洗涤 2 次,转入不含氮磷元素的 HB-4 培养液中,培养 4—5d 后用 15mg/L NaHCO₃ 液洗涤 2 次,稀释到需要的浓度,即成为测试藻母液.

在高压灭菌的 250ml 锥形瓶中加入 100ml 过滤湖水,分别加入 1ml 试验藻母液,使锥形瓶中藻细胞浓度为 3×10³/ml,再分别添加稀土元素和磷元素.设置分别单独添加 3 种稀土元素试验、添加混合稀土元素试验和同时添加稀土元素与磷试验.

分别单独添加 3 种稀土元素试验中,每种稀土设 0.2、0.5 和 1.0mg/L 3 个添加水平,每个浓度 3 个重复;添加混合稀土元素试验仅设 0.5 和 1.0mg/L 2 个添加水平;同时添加稀土元素和磷试验是在分别单独添加稀土元素试验的浓度水平上分别添加 0.04mg/L 磷(HPO₄²⁻)^[10].全部试验设置 1/4HB-4 培养液、过滤湖水和过滤湖水加磷 3 个对照组.

试验光照强度 4000lx,光暗周期 12 h 12

h.采用显微镜视野法每日计算藻浓度,当试验组藻每天平均增加量低于 5% 时,则认为已达最大现存量,即可求出平均最大现存量($\bar{X}_{max}$)和平均最大特定增长率(U_{max})^[9].

2 结果

2.1 单独添加轻稀土元素 La()以及同时添加 La()和磷(HPO₄²⁻)对羊角月芽藻增长的影响

影响见表 1.单独添加 La(),在 0.2 mg/L 浓度组,其羊角月芽藻 $\bar{X}_{max}$ 和 U_{max} ,均明显高于过滤湖水对照组($P < 0.01$),但在 0.5mg/L 和 1.0mg/L 2 个浓度组羊角月芽藻的 $\bar{X}_{max}$ 和 U_{max} 与过滤湖水组对比没有显著差异,表明单独添加 La()仅在 0.2mg/L 水平对羊角月芽藻具有显著促长作用.同时添加 La()与 HPO₄²⁻ 时,0.2mg/L 浓度组羊角月芽藻的 $\bar{X}_{max}$ 和 U_{max} 均显著高于过滤湖水加磷组和单独添加 La()0.2mg/L 浓度组,而 0.5mg/L 和 1.0mg/L 2 个浓度组没有显著差异,表明 La()和 HPO₄²⁻ 在低浓度下同时作用能显著促进羊角月芽藻增长,且其促长效应大于单独添加 La()和单独添加磷.

表 1 添加 La()和同时添加 La()与 HPO₄²⁻ 各试验组羊角月芽藻的 $\bar{X}_{max}$ 和 U_{max}

添加剂	$\bar{X}_{\max}$		$U_{\max}$		
	生物量/个 细胞 · m ⁻¹	时间/ d	特定增长 率/ d ⁻¹	时间/ d	
1/4HB-4	3.8 × 10 ⁵	未达到	0.971	4—5	
过滤湖水	2.9 × 10 ⁴	5	0.761	2	
过滤湖水+ P	4.1 × 10 ⁴	5	0.882	2	
La()	0.2	3.3 × 10 ⁴ 1)	6	0.883 ¹⁾	2—3
/mg · L ⁻¹	0.5	3.3 × 10 ⁴ 1)	4	0.660	2
	1.0	2.4 × 10 ⁴	4	0.847	2—3
La() +	0.2	4.3 × 10 ⁴ 2)	6	1.905 ²⁾	2—3
P	0.5	3.9 × 10 ⁴	5	1.718 ²⁾	2—3
/mg · L ⁻¹	1.0	2.4 × 10 ⁴	4	0.883	3—4

1)与湖水组对比有显著或极显著差异 2)与湖水加磷组对比有显著或极显著差异

2.2 单独添加中稀土元素 Gd()和同时添加 Gd()和 HPO_4^{2-} 对羊角月芽藻增长的影响

单独添加中稀土元素 Gd()和同时添加 Gd()和 HPO_4^{2-} 对羊角月芽藻增长的影响见表 2。从表 2 可知,单独添加 Gd() 0.2mg/L 试验组羊角月芽藻的 $\bar{X}_{\max}$ 和 $\bar{U}_{\max}$ 均显著高于过滤湖水对照组和过滤湖水加磷组 ($P < 0.01$),表明对羊角月芽藻有明显的促长作用;而 0.5mg/L 和 1.0mg/L 2 个浓度组没有明显的促长作用。除 0.2mg/L 试验组 $\bar{U}_{\max}$ 外,同时添加 Gd()和 HPO_4^{2-} 各试验组羊角月芽藻的 $\bar{X}_{\max}$ 和 $\bar{U}_{\max}$ 与过滤湖水加磷组和相应各单独添加组相比不存在显著差异。

表 2 添加 Gd()和同时添加 Gd()与 HPO_4^{2-} 各试验组羊角月芽藻的 $\bar{X}_{\max}$ 和 $\bar{U}_{\max}$

添加剂	$\bar{X}_{\max}$		$\bar{U}_{\max}$	
	生物量/个 细胞·mL ⁻¹	时间/d	特定增长 率/d ⁻¹	时间/d
1/4HB-4	3.8×10^5	未达到	0.971	4—5
过滤湖水	2.9×10^4	5	0.761	2
过滤湖水+ P	4.1×10^4	5	0.882	2
Gd() /mg·L ⁻¹	0.2	5.6×10^4 1)2)	6	1.54 1)2)
	0.5	2.9×10^4	5	1.01 1)
	1.0	3.1×10^4	5	0.738
Gd()+ P /mg·L ⁻¹	0.2	3.5×10^4	6	0.949 2)
	0.5	2.8×10^4	4	0.734
	1.0	3.1×10^4	4	0.738

1) 表示与湖水组对比有显著或极显著差异 2) 表示与湖水加磷组对比有显著或极显著差异

2.3 单独添加重稀土元素 Y()和同时添加 Y()和 HPO_4^{2-} 对羊角月芽藻增长的影响

单独添加重稀土元素 Y()和同时添加 Y()和 HPO_4^{2-} 对羊角月芽藻增长的影响见表 3。单独添加 Y() 0.2mg/L 试验组羊角月芽藻的 $\bar{X}_{\max}$ 和 $\bar{U}_{\max}$ 均显著高于过滤湖水对照组 ($P < 0.01$),表明对羊角月芽藻有明显的促长作用;0.5mg/L 和 1.0mg/L 2 个浓度组没有显著性差异。同时添加 Y()和 HPO_4^{2-} 各试验组与过滤湖水加磷对照组和相应各单独添加 Y()组相比,其 $\bar{X}_{\max}$ 和 $\bar{U}_{\max}$ 均不具有显著差异。

2.4 添加混合稀土元素和同时添加混合稀土元素与 HPO_4^{2-} 对羊角月芽藻增长的影响

表 3 添加 Y()和同时添加 Y()与 HPO_4^{2-} 各试验组羊角月芽藻的 $\bar{X}_{\max}$ 和 $\bar{U}_{\max}$

添加剂	$\bar{X}_{\max}$		$\bar{U}_{\max}$	
	生物量/个 细胞·mL ⁻¹	时间/d	特定增长 率/d ⁻¹	时间/d
1/4HB-4	3.8×10^5	未达到	0.971	4—5
过滤湖水	2.9×10^4	5	0.761	2
过滤湖水+ P	4.1×10^4	5	0.882	2
Y() /mg·L ⁻¹	0.2	4.1×10^4 1)	6	0.988 1)
	0.5	2.6×10^4	4	0.611
	1.0	2.1×10^4	4	0.738
Y()+ P /mg·L ⁻¹	0.2	4.1×10^4	6	0.864
	0.5	3.1×10^4	3	0.833
	1.0	2.1×10^4	5	0.805

1) 表示与湖水组对比有显著差异

添加混合稀土和同时添加混合稀土和 HPO_4^{2-} 对羊角月芽藻增长的影响见表 4。除添加混合稀土元素 0.5mg/L 浓度组羊角月芽藻的 $\bar{X}_{\max}$ 高于过滤湖水对照组外,无论添加混合稀土还是同时添加混合稀土与磷各试验组,其 $\bar{X}_{\max}$ 和 $\bar{U}_{\max}$ 均小于过滤湖水对照组和过滤湖水加磷对照组,表明在本试验的添加水平,3 种混合稀土和混合稀土加磷对羊角月芽藻无明显促

表 4 添加混合稀土 La()、Gd()、Y()和同时添加混合稀土与 HPO_4^{2-} 各试验组羊角月芽藻的 $\bar{X}_{\max}$ 和 $\bar{U}_{\max}$

添加剂	$\bar{X}_{\max}$		$\bar{U}_{\max}$	
	生物量/个 细胞·mL ⁻¹	时间/d	特定增长 率/d ⁻¹	时间/d
1/4HB-4	3.8×10^5	未达到	0.971	4—5
过滤湖水	2.9×10^4	5	0.761	2
过滤湖水+ P	4.1×10^4	5	0.882	2
混合稀土 /mg·L ⁻¹	0.5	3.5×10^4 1)	5	0.635
	1.0	1.8×10^4	4	0.660
混合稀土 /mg·L ⁻¹	0.5	1.8×10^4	5	0.733
	1.0	2.8×10^4	4	0.863

混合稀土中 0.5、1.0mg/L 代表添加的 3 种稀土元素浓度分别为 0.5 和 1.0mg/L 1) 表示与湖水组对比有显著差异

长作用.

3 讨论

(1) 有研究表明稀土在低浓度时可刺激植物生长,而在高浓度抑制植物生长^[1,2].本试验结果显示分别单独添加 La(), Gd() 和 Y() 在 0.2mg/L 浓度均对羊角月芽藻具有显著的促长作用,但在较高浓度水平组以及添加混合稀土各浓度组均没有明显的促长作用.并且通过试验发现轻、中、重 3 种稀土对羊角月芽藻增长的影响具有一定的差异性,其顺序为轻稀土> 中稀土和重稀土.已有研究报道不同稀土对植物促长能力顺序为:混合稀土< 钕< 铈< 钇< 镧;而蛋白核小球藻对轻、中和重稀土的富集能力顺序为轻稀土> 中稀土> 重稀土^[3,7].

(2) 同时添加轻稀土 La() 和 HPO_4^{2-} 时,羊角月芽藻的 $X_{\max}$ 和 $U_{\max}$ 均显著高于相应单独加 La() 和过滤湖水加磷对照组,表现出明显的协同促长作用,而 Gd() 和 Y() 与磷对羊角月芽藻增长不具有协同促长作用.资料表明^[1,5], La() 能催化类似磷酸盐之类的含磷化合物分解,除简单的磷酸盐和焦磷酸盐外,还能催化单磷酸己糖,双磷酸己糖等一系列具有较大生物意义的磷酸盐的分解,促进植物对磷的吸收,因而促进植物增长.

(3) 根据本试验结果进一步推测认为,随着可溶性稀土向太湖释放,水体中低浓度稀土对藻类的促长作用可导致水体藻类生物量增加,从而对太湖富营养化过程具有潜在的影响作用.

参 考 文 献

- 1 Tong Shihu, Lu Guozeng. The Biological Effects of Rare Earth Elements. Rare Earth Elements, 1987, 4: 42
- 2 Hu Sicai, Luo Guanyi. Acute Toxicity Test of Nitrate of Rare Earth Elements to Fish. Environmental Science, 1980, 1(2): 60
- 3 Wang Xiaorong, Tu Qiang, Tian Liqing, Dai Lemei. Simulation Study on Transport of Rare Earth Elements along an Aquatic Food Chain. Environmental Chemistry, 1993, 12(3): 212
- 4 Sun Hao, Wang Xiaorong. Bioconcentration and Elimination of Five Light Rare Earth Elements in Carp (*Cyprinus carpio* L.). Chemosphere, 1996, 133(8): 1475
- 5 Xiong Bingkun. Study on Application of Bioactive compounds of Rare Earth Elements. Journal of The Chinese Rare Earth Society, 1994, 12(4): 358
- 6 Wang Lanxian, Xu Zhong. Effect of Rare Earth Elements on Photosynthesis and Photofixation of Nitrogen in *Anabaena azotica*. Journal of The Chinese Rare Earth Society, 1985, 3(3): 72
- 7 Shi Jinyuan, Zhao Wei, Tang Renhuan et al. Effects of Trace Elements Ga, Ge, As, Cs, La, Ce, Ir and Re on Growth of *Chlamydomonas reinhardtii* CR. Journal of Beijing University (Natural Science), 1987, 4: 38
- 8 华汝成. 单细胞藻类的培养与利用. 农业出版社, 北京, 1986
- 9 Zhang Zongshe, Rong Kewen, Shen Guohua. For ALG Oth Potential Test in Water from Donghu Lake, Wuhan. Acta Scientiae Circumstantiae, 1990, 10(4): 445
- 10 Yin Daqiang, Wu Chonghua, Wang Xiaorong et al. Algal Growth Potential as Affected by Lake Water and Phosphorus Released from Sediments in Taihu Lake. Journal of Nanjing University(Natural Science), 1996, 32(2): 253