

硫酸盐对淡水浮游藻类群落结构的影响研究

钟远^{1,2}, 樊娟¹, 刘春光¹, 庄源益^{1*}

(1. 南开大学环境科学与工程学院, 环境污染过程与基准教育部重点实验室, 天津 300071; 2. 天津城市建设学院, 天津 300084)

摘要: 为了解硫酸盐含量增加对富营养化淡水水体藻类生长及群落演替的影响, 对天津市某景观水体藻类进行了室内模拟试验研究. 按硫酸盐投加方式分设对照组(G0)、逐步投加组(G1)和一次性投加组(G2). 结果表明, 向水中投加一定浓度硫酸盐可以抑制原有蓝藻和硅藻生长, 而绿藻种类和生物量增加. G0和G1组的种类数和生物量相近但是大于G2组. G0、G1和G2组的平均总生物量分别为98.46、96.09和81.19 mg·L⁻¹. 对照组几乎始终是皮状席藻(*P. corium*)和两栖颤藻(*O. amphibia*)等蓝藻为第一优势种, 而投加硫酸盐的G1和G2组优势种从皮状席藻和小颤藻(*O. tenuis*)等蓝藻向四尾栅藻(*S. quadricauda*)、放射多芒藻(*G. radiate*)和斜生栅藻(*S. obliquus*)等绿藻演替. 群落平均多样性指数与对照组G0(1.49 ± 0.32)相比, 投加硫酸盐的G1(1.70 ± 0.18)与G2组(1.68 ± 0.40)均有提高.

关键词: 硫酸盐; 浮游藻类; 群落结构

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)08-2253-06

Effects of Sulfate on the Community Structure of Phytoplankton in Freshwater

ZHONG Yuan^{1,2}, FAN Juan¹, LIU Chun-guang¹, ZHUANG Yuan-yi¹

(1. Key Laboratory of Pollution Processes and Environmental Criteria, Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China; 2. Tianjin Institute of Urban Construction, Tianjin 300084, China)

Abstract: In order to promote the understanding of sulfate enrichment on the growth and succession of phytoplankton communities in eutrophic freshwater body, laboratory experiment of phytoplankton in a landscape water body was conducted. Three treatment groups were set up in experiment: control (G0), step by step enrichment (G1) and enrichment at a time (G2). The result indicated that the addition of sulfate promoted the increase of Chlorophyta species and biomass, while inhibited the growth of native Cyanobacteria and diatom species. Species and biomass of G0, G1 group were similar and much higher than those of G2 group. Average biomass of G0, G1 and G2 group was 98.46, 96.09 and 81.19 mg·L⁻¹, respectively. G0 group was almost always dominated by Cyanobacteria species such as *P. corium* and *O. amphibia*, dominant species in G1 and G2 groups changed from Cyanobacteria species to Chlorophyta species including *S. quadricauda*, *G. radiate* and *S. obliquus*. Compared with that of control group G0 (1.49 ± 0.32), the average community diversity indices of G1 (1.70 ± 0.18) and G2 groups (1.68 ± 0.40) were elevated.

Key words: sulfate; phytoplankton; community structure

淡水中硫酸盐浓度因地区、气候、水文、水环境质量等而变. 我国柴达木盆地主要河流的硫酸根离子含量为8~81 mg/L^[1]; 宁夏鹤泉湖硫酸盐浓度为164 mg/L^[2]. 在有些水体硫酸盐浓度很高, Fathi等^[3]曾报道过由于地下水溶解石膏等原因, 埃及卡伦湖水中硫酸盐浓度升至8 500 mg/L. 我国北方某些地区受污水污染和盐碱地淋溶作用影响, 地表水中的硫酸盐浓度也在增加, 如淄博孝妇河和天津市团泊洼水库硫酸盐浓度达到1 000 mg/L^[4,5]. 此外, 天津市降水中硫酸根离子含量较高. 但由于天津等北方地区土壤中碱性物质含量较高, 加上大气颗粒物浓度较大, 对酸雨缓冲能力较强, 甚至小雨时雨水呈弱碱性^[6,7]. 因此, 地表水对酸化不敏感, 酸雨中硫酸根离子最终以硫酸盐形式存在水体中.

硫是藻类等植物生长必需的营养元素之一, 在

光合作用、酶活性控制和生命物质合成等方面起重要作用, 硫缺乏可能限制植物生长^[8,9]. 目前与浮游藻类相关研究主要是藻类在硫循环中作用, 特别是藻类产生二甲基巯基丙酸内盐(DMSP)方面^[10~12], 硫对藻类生长与群落分布的影响研究相对较少^[13~15]. 硫对杜氏盐藻利用镉的影响^[16]、硫限制时藻的生理反应^[17]、绿藻中硫吸收与调控^[18]等研究也有报道. 笔者^[19]曾研究过高氯化钠和高硫酸钠盐度对天津市滨海新区低盐度淡水中藻类生长的影响, 结果表明硫酸盐形成的盐度对藻类的影响大于氯离子. 本研究在此基础上, 采用逐步增加和一次性投加

收稿日期: 2008-10-22; 修订日期: 2008-12-28

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07314)

作者简介: 钟远(1974~), 男, 博士研究生, 主要研究方向水污染生态, E-mail: zhongyuan@mail.nankai.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: zhuangyuanyi@nankai.edu.cn

硫酸盐方式,着重分析一定浓度硫酸盐对常出现蓝藻水华的淡水水体中藻类生长与群落演替的影响. 所得结果能够补充先前工作成果,并为了解淡水蓝藻水华发生与控制提供借鉴.

1 材料与方法

1.1 试验用水情况

试验用水取自南开大学校内新开湖西区. 该水体位于天津市区西南部(东经 117°10′, 北纬 39°16′), 平均水深 1.8 m, 水质情况见表 1. 选取该水体作试验用水是因为该水体的本底硫酸盐含量相对较低, 同时在春、夏、秋季常出现蓝藻水华.

表 1 试验用水理化指标
Table 1 Quality of the tested water

项目	数值	项目	数值
水温/℃	27.5	总磷/mg·L ⁻¹	0.14
pH	8.46	溶解性总磷/mg·L ⁻¹	0.015
氨氮/mg·L ⁻¹	1.01	溶解态硫酸盐/mg·L ⁻¹	186.3
硝酸盐氮/mg·L ⁻¹	0.19	正磷酸盐/μg·L ⁻¹	31.0
总氮/mg·L ⁻¹	3.58	叶绿素 a/μg·L ⁻¹	71.5
溶解性总氮/mg·L ⁻¹	1.49	总碱度/mg·L ⁻¹	2.97

1.2 试验设置

将采回湖水滤去悬浮物质后注入 9 个 50 cm × 25 cm × 40 cm 的水族箱中, 每箱 40 L. 试验温度控制在(28 ± 1)℃, 光照采用日光灯光照, 强度为 6 000 lx, 光暗比为 12 h: 12h. 试验时间为 2008-07-31 ~ 2008-08-25. 试验开始前, 试验水在箱中静置平衡 3 d. 然后投加 K₂HPO₄ 和 NaNO₃, 调节总氮到 4.5 mg/L, 总磷到 0.18 mg/L, 即 N:P(质量比)为 25:1. 为了研究硫酸盐浓度急剧增加与逐渐提高对藻类演替的可能影响, 结合天津市水体硫酸盐实测浓度, 将试验分为 3 个处理组, 每组设 3 个平行: 其中对照组为 G0; 硫酸盐逐步增加组 G1 每 3 d 投加 1 次, 直到试验结束, 每次投加 0.6 mmol·L⁻¹ 硫酸钠; 一次性增加组 G2 一次投加 5 mmol·L⁻¹ 硫酸钠. 整个试验过程中, 各组均用 K₂HPO₄ 和 NaNO₃ 控制氮磷质量比 25:1 不变, 投药时间为每次水质化学指标测定后. 每天搅拌 3 次减少藻类下沉, 并用蒸馏水补充蒸发损失.

1.3 藻类计数与生物量计算

每隔 3 d 从水族箱中取样 100 mL, 加入 2 mL 甲醛固定藻类, 沉淀 48 h 后, 浓缩到 10 mL 进行浮游藻类识别计数. 藻类识别参考胡鸿钧等《中国淡水藻

类》与中国科学院中国孢子植物志编辑委员会编辑《中国淡水藻志》. 生物量计算方法如下: 在光学显微镜下采用目镜测微尺测量每种藻类 10 ~ 30 个藻个体的大小, 根据藻细胞几何形状计算出藻细胞平均近似体积. 设 1 μm³ 藻体的鲜湿重为 10⁻⁶ μg, 换算为鲜湿藻浓度, 用 mg/L 表示.

1.4 水质指标测定与数据统计

水样测定参照文献[20]的方法进行. 采样时间为 09:00. 测定项目包括溶解态硫酸盐(DS)、总磷(TP)、溶解态总磷(DTP)、溶解态正磷酸盐(SRP)、总氮(TN)、溶解态总氮(DTN)、氨氮(AN)、硝酸盐氮(NAN)、叶绿素 a(Chl-a). 所有藻类与水质数据均采用 SPSS13 统计软件进行处理.

2 结果与讨论

2.1 藻类生长情况

图 1 为不同处理组叶绿素 a 浓度和藻类生物量随时间变化情况. 投加氮磷营养后藻类开始增殖. 对照组叶绿素 a 在试验第 6 d 就达到最大值 148.45 μg·L⁻¹, 而后开始下降. 自试验第 18 d 到结束又呈上升趋势. 在 G1、G2 组中, 叶绿素 a 浓度波动程度比对照组小. G1、G2 组的叶绿素 a 浓度分别在第 24 和 18 d 上升至最高值.

虽然叶绿素与藻类总生物量测定时间间隔不同, 但是它们之间仍具有较好的相关性, 藻类生物量变化的趋势与叶绿素 a 基本一致(图 1). 对藻类生物量变化来说, 试验进行中的第 12 d 内对照组的藻类总生物量均高于投加硫酸盐组. 可见, 适量投加硫酸盐在短期内对藻类生长有一定抑制作用. 而此阶段内 G1 组生物量又高于 G2 组, 可见, 缓慢增加的硫酸盐干扰和冲击比急剧增加硫酸盐对藻类生长的影响小. 第 12 d 后生物量变化交错进行, 且在第 15 ~ 24 d, G1 组的生物量高于对照组, 可能藻类在试验后期适应了硫酸盐浓度较高的生境.

2.2 主要藻门生物量变化

整个试验过程中, 蓝、绿、硅藻在种类与生物量上均占绝对优势. 而裸藻、甲藻等其他藻门在绝大多数计数中都没有超过总生物量的 15%. 因此, 以下着重分析蓝、绿、硅藻等主要藻门(图 2).

蓝藻是新开湖水中常见优势种和水华种^[21]. 在本试验开始时蓝藻门占总生物量的 65% 以上. 对照组(G0)中除第 21 d 外, 蓝藻门生物量始终占优势. 绿藻门生物量变化较小, 但藻类种类数变化较大. 硅藻门生物量在波动中缓慢下降, 直到试验终止.

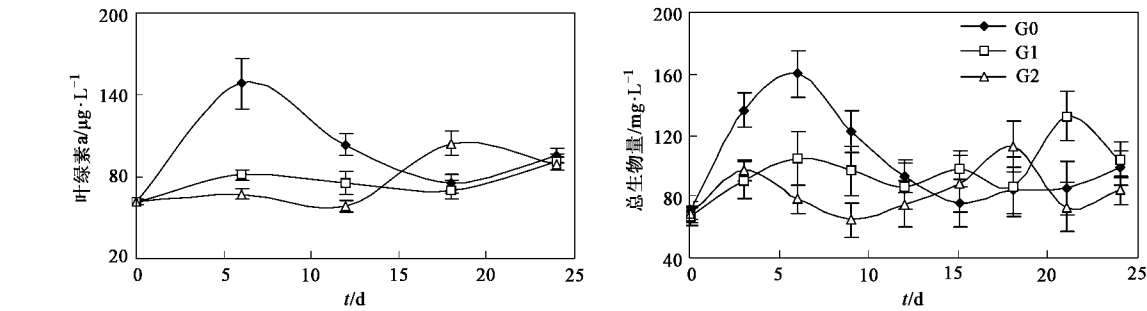


图 1 不同处理组叶绿素 a 和藻类总生物量沿时变化

Fig.1 Temporal changes of Chl-a and total biomass in different groups

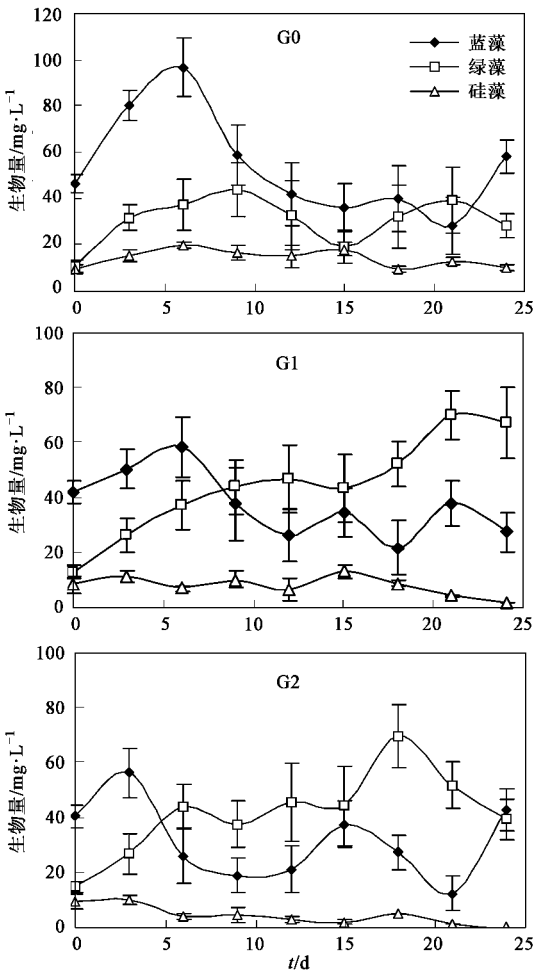


图 2 不同处理组主要藻门生物量沿时变化

Fig.2 Biomass variations of the major phyla in different groups

逐步增加硫酸盐组(G1)和一次性投加硫酸盐组(G2)的变化趋势基本一致,都存在蓝藻被绿藻代替的过程.在硫酸盐逐步增加组(G1)中,前 6 d 蓝、绿藻总体生物量都在增加.随着硫酸盐投加,蓝藻门生物量下降,而绿藻继续升高.从第 12 ~ 18 d 为波动期,各藻门生物量有幅度不大的波动,而后蓝、绿

藻生物量都有先增加再下降的趋势.绿藻生物量在第 21d 达到最大值 70.03 mg·L⁻¹.从第 15 d 开始,在本组其中一个平行中没有观察到硅藻,同组其他平行硅藻生物量与种类也减少.

在硫酸盐一次性增加组(G2)中,蓝藻生物量自第 3 d 后下降,绿藻生物量上升.在第 9 d 蓝藻生物量降至最低,这主要是原有优势种皮状席藻数量下降引起.此后蓝藻生物量开始回升,并出现波动期,直到终止试验时,两栖颤藻成为第一优势种.绿藻生物量在第 18 d 达到峰值 69.72 mg·L⁻¹,随后生物量下降.该组中硅藻生物量从一开始就下降,到第 24 d 生物量降为零.研究表明,一定浓度硫酸盐会影响藻类对其他离子的吸收^[16-22].而硅藻中某些种类能适应较高硫酸盐浓度,甚至成为优势种^[3,5].为了解硫酸盐投加的影响以及本试验中硅藻变化是否与硅酸盐浓度有关,在第 24 d 测试中增加了硅酸盐浓度检测,结果表明各组间无显著差异.硫酸盐对硅藻生长的影响需进一步探讨.

比较不同藻门在试验期内的平均生物量(图 3),可见添加硫酸盐后绿藻比例明显增加,蓝藻和硅

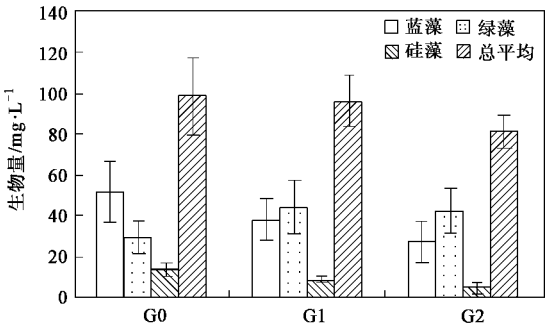


图 3 不同处理组主要藻门平均生物量

Fig.3 Average biomass of the major phyla in different groups

藻所占比例则下降. G1 组各藻门生物量大于 G2 组,这是因为逐步增加硫酸盐过程相对更有利于藻

类逐步适应生境. G0 和 G1 组的平均总生物量相差不大, 分别为 98.46 与 96.09 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 明显高于 G2 组的 81.19 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 这主要是 G2 组蓝藻特别是原有优势种生物量下降引起的, 并且 G2 中的硅藻平均总生物量也低于其他组. 硫酸盐投加可能对原有蓝藻和硅藻产生抑制作用.

2.3 优势种变化

优势种变化列于图 4. 其中 RDT 符号代表优势种生物量占样本总生物量的百分比.

在对照组, 皮状席藻的绝对优势地位一直维持到第 18 d, 随后被两栖颤藻取代. 两栖颤藻从第 6 d 开始增长, 到第 24 d 占优势地位. 对照组的第二优势种是极大螺旋藻, 它的存在周期和皮状席藻相同, 而小颤藻在前期也曾以第二优势种出现过. 可见, 在对照组, 蓝藻占优势地位, 这与水样来源水体的浮游植物群落结构相似.

在 G1 组, 从图 4 中可以看出第一优势种由蓝藻门的皮状席藻、极大螺旋藻到绿藻门的四尾栅藻、斜生栅藻、繁茂栅藻的演替轨迹. 可以看出, 逐步投加硫酸盐后, 大约经过 10d 才表现出对蓝藻原有优势种的抑制效果.

皮状席藻在 G2 组占绝对优势地位的时间较短, 到第 6d 时两栖颤藻已占据优势地位. 第 9~21 d, 绿藻占据优势地位. 从图 4 中数据点走向可以看出, 优势种皮状席藻的生物量比例从开始的高处逐渐下降, 到第 15 d 降至最低点, 然后慢速回升, 到第 24 d 升至第二优势种位置. 而绿藻中的四尾栅藻和放射多芒藻的演替轨迹与皮状席藻相反, 中间高, 开始和结尾生物量比例均低.

综上所述, 投加硫酸盐抑制蓝藻门中的皮状席藻和极大螺旋藻等优势种生长, 促进绿藻门中的四尾栅藻和斜生栅藻等生长并成为优势种.

2.4 藻类种类及生物多样性

不同处理组中藻门种类比例列于图 5. 其中一个显著特征是 G2 组的蓝藻门藻种类数低而绿藻门高. 与对照组相比, G2 组蓝藻生物量下降迅速而种类变化不大. 总体上可看出投加硫酸盐主要抑制蓝藻门皮状席藻等原有优势种, 同时促进绿藻门生物量和种类数增加. 从藻种类看, G1 组群落结构与对照组接近, 但是蓝藻种类比例相对高而绿藻比例相对低.

不同处理组内藻类群落的 Shannon-Weiner 多样性指数沿时变化列于图 6. 在试验第 18 d 前, 对照组蓝藻优势种优势度较高, 投加硫酸盐的 G1 与 G2 组

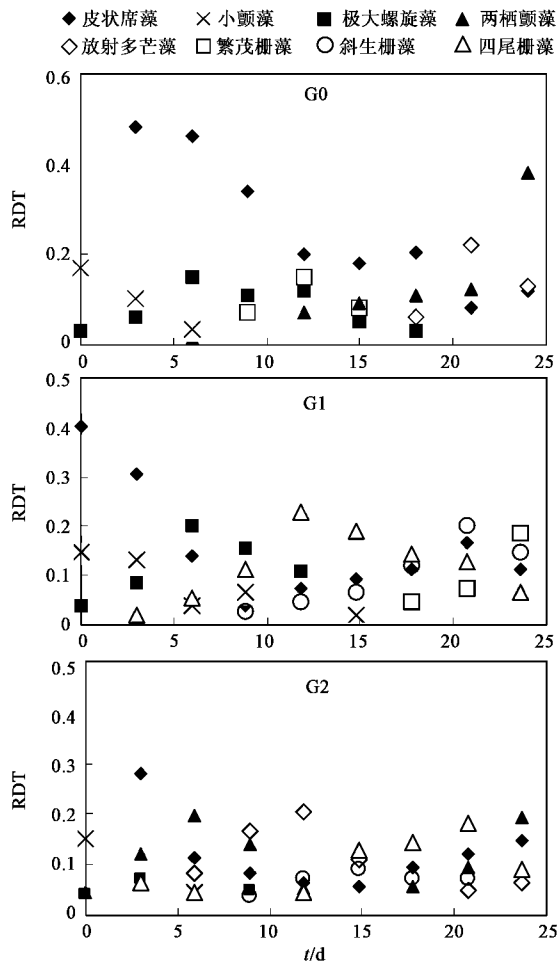


图 4 不同处理组优势藻种沿时变化

Fig.4 Temporal dynamics of dominant species in different treatments

多样性指数值均高于对照组. 第 18 d 以后对照组指数值抬升, 而加硫酸盐组下降. 对照组的指数值波动比较大. 逐步增加硫酸盐的试验组的多样性指数值在试验前 10 d 持续上升, 第 10 d 后缓慢下降; 而一次性投加硫酸盐的 G1 组多样性指数在试验全程的前 15 d 持续上升, 以后较快下降. 另外, G2 组原有蓝藻优势度下降速度比 G1 组快, 相应地大部分时间

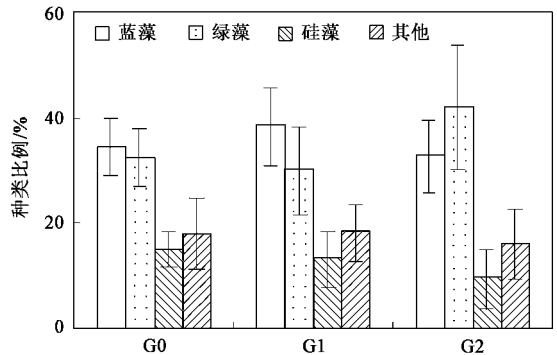


图 5 不同处理组藻门平均种类比例

Fig.5 Species percentages of major phyla in different treatments

其多样性指数值高于 G1 组.由 2.2 节的数据和分析可知,试验第 18 d 以后,G2 组硅藻门的生物量及种类逐渐变为零,两栖颤藻等蓝藻重新占据优势,这使生物多样性减少.另外一个特征是逐步增加硫酸盐的试验组的多样性指数值始终维持在比较平稳的水平,波动程度比较小.这表明在一定范围内增加硫酸盐浓度,一定程度上能够提升浮游植物群落的多样性水平.在本试验中,硫酸盐的增加改变原来水体中颤藻和皮状席藻等少数几种蓝藻占绝对优势的状态,促进绿藻的生长和种类增多.这从各组平均多样性指数值可以看出:对照组为 1.49 ± 0.32 ,G1 与 G2 组分别为 1.70 ± 0.18 和 1.68 ± 0.40 .

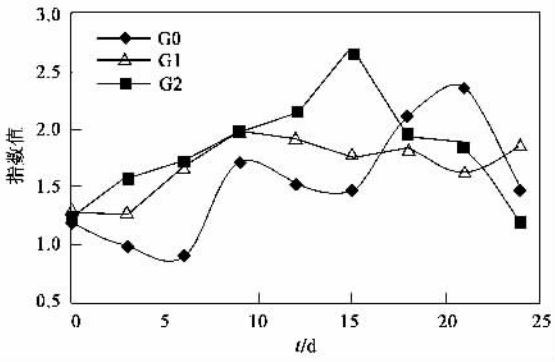


图 6 不同处理组 Shannon-Weiner 指数沿时变化

Fig.6 Temporal change of Shannon-Weiner indices in different treatments

硫酸盐对浮游植物影响的与许多因素相关.在水中硫酸盐浓度处于 $28 \sim 70 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围时,藻类等能竞争吸收水体中 50% 以上的硫酸盐^[10].在硫限制环境下,莱茵衣藻还能通过产生胞外硫酸酯酶等增强对硫摄取^[17].而过高浓度硫酸盐则可能抑制藻细胞生理功能.吴红艳等^[23]用包括硫酸铵在内的无机盐对 6 种蓝藻进行细胞液泡化实验,结果表明硫酸铵和氯化钠是蓝藻的强效型细胞液泡化诱导无机盐,它们能使蓝藻细胞的功能退化.郭厚良等^[24]用包括硫酸铵在内的多种无机盐对柱胞鱼腥藻生长过程细胞结构影响进行研究,发现硫酸盐会使藻细胞结构发生变化.Waiser 等^[25]推测水中高浓度的阴离子组分,包括硫酸根阴离子,可能影响藻类对磷的吸收.从生理学角度,Cole 等^[22]发现硫酸根离子能够竞争性地抑制海洋和淡水藻类对钼酸根阴离子的利用,甚至在钼酸根与硫酸根比例很低条件下这种抑制作用也存在;Marino 等^[26]对固氮蓝藻的研究结果也显示藻对钼酸盐的吸收受硫酸盐的抑制.硫酸盐还可能间接影响藻类.在高有机物浓度与缺氧条件下,高浓度硫酸盐可能被还原成硫化氢,影响藻类

生长与分布^[27,28].本研究对象是藻类群落结构变化,其中的一些蓝藻和硅藻的演替规律在表观上与上述文献报道的相似.由于生境条件的复杂性,硫酸盐在复杂生境中对不同藻类的影响可能还涉及更多的因素,除了对藻细胞的影响,对营养盐吸收的抑制作用外,还可能存在协同作用,促进作用等.对这些未知领域需要进行深入研究.

3 结论

(1) 在 $5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 硫酸盐浓度范围内,逐渐增加硫酸盐浓度对藻类总生物量几乎没有影响,而一次性提高则引起总生物量下降.逐步增加硫酸盐可能更有利于藻类适应生境变化.

(2) 投加硫酸盐均使绿藻门的生物量增加,蓝藻和硅藻生物量和种类减少.一次性提高浓度的作用更明显.

(3) 向富营养化水体中投加硫酸盐会影响藻类群落结构.一定浓度硫酸盐促进绿藻门优势种增殖,抑制蓝藻门优势种生长,改变少数蓝藻占优势状态,提高藻类群落生物多样性.

参考文献:

[1] 周长进,董锁成.柴达木盆地主要河流的水质研究及水环境保护[J].资源科学,2002,24(2):37-41.

[2] 梁文裕,王俊,王志山,等.宁夏鹤泉湖浮游植物现状及水质评价[J].宁夏大学学报(自然科学版),2001,22(4):426-429.

[3] Fathi A A, Flower R J. Water quality and phytoplankton communities in Lake Qarun (Egypt) [J]. Aquat Sci, 2005, 67(3): 350-362.

[4] 吴耀国,沈照理,钟佐,等.淄博孝妇河流域孔隙水硫酸盐污染特征及其形成[J].环境污染与防治,2000,6:38-41.

[5] 方榕乐,朱晓鸣,张水元,等.天津团泊洼水库水体生物生产与渔业开发利用[J].湖泊科学,1992,4(2):38-45.

[6] 叶雪梅,赫吉明,段雷,等.中国地表水酸化敏感性的区划[J].环境科学,2002,23(1):16-21.

[7] 徐梅,郑勇,易笑园.天津市酸雨及其成因初探[J].气象科学,2007,35(6):792-796.

[8] Norici A, Hell R, Giordano M. Sulfur and primary production in aquatic environments: an ecological perspective[J]. Photosynth Res, 2005, 86(3): 409-417.

[9] Grossman A R, Takahashi H. Macronutrient utilization by photosynthetic eukaryotes and the fabrics of interactions[J]. Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol, 2001, 52: 163-210.

[10] Urban N R, Sampson C J, Brezonik P L, et al. Sulfur cycling in the water column of Little Rock Lake, Wisconsin [J]. Biogeochem, 2001, 52(1): 41-77.

[11] Vila-Costa M, Simó R, Harada H, et al. Dimethylsulfoniopropionate uptake by marine phytoplankton [J]. Science, 2006, 314(5799): 652-654.

[12] Richards S R, Rudd J W M, Kelly C A. Organic volatile sulfur in

- lakes ranging in sulfate and dissolved salt concentration over five orders of magnitude[J]. *Limnol Oceanogr*, 1994, **39**(3): 562-572.
- [13] Giordano M, Norici A, Hell R. Sulfur and phytoplankton: acquisition, metabolism and impact on the environment [J]. *New Phytologist*, 2005, **166**(2): 371-382.
- [14] Lehman J T, Branstrator D K. Nutrient dynamics and turnover rates of phosphate and sulfate in lake Victoria, East Africa [J]. *Limnol Oceanogr*, 1994, **39**(2): 227-233.
- [15] Nevers M B, Whitman R L. Characterization and comparison of phytoplankton in selected lakes of five Great Lakes area National Parks[J]. *Aquat Ecosyst Health Manage*, 2004, **7**(4): 515-528.
- [16] 马福俊, 龙爱民, 党爱翠, 等. 杜氏盐藻对硫酸盐和镉的吸收及其相互关系[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(5): 873-878.
- [17] Takahashi H, Braby C E, Grossman A R. Sulfur economy and cell wall biosynthesis during sulfur limitation of *Chlamydomonas reinhardtii*[J]. *Plant Physiol*, 2001, **127**(2): 665-673.
- [18] Melis A, Chen H C. Chloroplast sulfate transport in green algae: genes, proteins and effects[J]. *Photosynth Res*, 2005, **86**(3): 299-307.
- [19] 刘春光, 孙红文, 朱琳, 等. 两种无机盐形成的盐度对淡水藻类生长的影响[J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(1): 157-161.
- [20] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 88-131, 243-281.
- [21] 孙凌, 金相灿, 杨威, 等. 硅酸盐影响浮游藻类群落结构的围隔试验研究[J]. *环境科学*, 2007, **28**(10): 2174-2179.
- [22] Cole J J, Howarth R W, Nolan S S, *et al.* Sulfate inhibition of molybdate assimilation by planktonic algae and bacteria: some implications for the aquatic nitrogen cycle [J]. *Biogeochem*, 1986, **2**: 179-196.
- [23] 吴红艳, 赵以军, 郭厚良, 等. 无机盐诱导蓝藻细胞液泡化[J]. *水生生物学报*, 2002, **26**(3): 234-238.
- [24] 郭厚良, 金传荫, 宋文贞. 无机盐对蓝藻细胞结构的影响和原生质球形成[J]. *水生生物学报*, 1997, **21**(2): 190-193.
- [25] Waizer M J, Roberts R D. Microbial nutrient limitation in prairie saline lakes with high sulphate concentration [J]. *Limnol Oceanogr*, 1995, **40**(3): 566-574.
- [26] Marino R, Howarth R W, Chan F, *et al.* Sulfate inhibition of molybdenum-dependent nitrogen fixation by planktonic cyanobacteria under seawater conditions: a non-reversible effect [J]. *Hydrobiologia*, 2003, **500** (1-3): 277-293.
- [27] Hadas O, Pinkas R. Sulfate reduction processes in sediments at different sites in Lake Kinneret, Israel[J]. *Micro Ecol*, 1994, **30** (1): 55-66.
- [28] Gabrie A P. Vertical distribution of phytoplankton in a clear water lake of Colombian Amazon (Lake Boa, Middle Caquetá) [J]. *Hydrobiologia*, 2006, **568** (1): 79-90.