

过量硼对淡水浮游植物生长及种类变化的影响

李海叶^{1,2}, 刘春光^{2*}, 赵玲娟¹, 赵倩^{1,2}, 马成仓¹

(1.天津师范大学生命科学学院, 天津 300387; 2.南开大学 环境污染过程与基准教育部重点实验室, 天津 300071)

摘要:以自然水体中的浮游植物为对象,通过室内模拟试验,研究了硼浓度为 0~400 mg·L⁻¹ 的水体中浮游植物的生长和种群变化。结果表明:低浓度的硼(≤50 mg·L⁻¹)会提高浮游植物生物量,增大浮游植物多样性;高浓度的硼(≥100 mg·L⁻¹)会降低浮游植物生物量,减小生物多样性;蓝藻门的皮状席藻和微小平裂藻对硼耐受性最强,可以在硼浓度为 400 mg·L⁻¹ 的水体中存活并成为优势种。低浓度硼对某些淡水浮游植物的生长有促进作用,高浓度硼则有抑制作用。随水体中硼浓度升高,耐受性弱的浮游植物种类的优势地位逐渐被高耐受物种取代。

关键词:淡水浮游植物;硼毒害;硼耐受性;优势种

中图分类号:X503.233 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2013)02-0232-06 **doi:**10.11654/jaes.2013.02.004

Effect of Excess Boron on Growth and Composition of Freshwater Phytoplankton

LI Hai-ye^{1,2}, LIU Chun-guang^{2*}, ZHAO Ling-juan¹, ZHAO Qian^{1,2}, MA Cheng-cang¹

(1.College of Life Sciences, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China; 2.Key Laboratory of Pollution Processes and Environmental Criteria, Ministry of Education, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: To investigate the effect of different concentrations of boron (0~400 mg·L⁻¹) on the growth and composition of freshwater phytoplankton, laboratory experiments were conducted in the present study. The results showed that lower concentrations of boron (≤50 mg·L⁻¹) increased the biomass and biodiversity of phytoplankton, whereas the higher concentrations of boron (≥100 mg·L⁻¹) decreased the biomass and biodiversity of phytoplankton. Particularly, *Phormidium corium* and *Merismopedia tenuissima* were the most tolerant species and were able to survive at boron concentrations up to 400 mg·L⁻¹. These results suggested that lower concentrations of boron accelerated the growth of specific freshwater phytoplankton species, while higher concentrations of boron inhibited the growth of phytoplankton. Moreover, with the increase of boron concentrations, the dominant species of those with less boron tolerance were replaced progressively by more tolerant species.

Keywords: freshwater phytoplankton; boron toxicity; boron tolerance; dominant species

硼(B)是一种非金属元素,存在于自然环境中,并被广泛应用于工业和居家产品的生产^[1]。近年来,由于硼矿开采,以及硼砂、硼酸盐、硼酸生产等造成土壤和水体硼浓度的异常升高问题,引起了研究者的关注。有报道表明,从煤炭发电等企业排出的废水中,硼浓度可达 1~50 mg·L⁻¹^[2]。Xu 等在中国对饮用水源进行调查发现,在受调查的硼工业区,地表水和地下水硼浓度分别为 0.007~3.8 mg·L⁻¹ 和 0.015~140 mg·L⁻¹,

表明不少水体已经受到硼工业的污染^[3]。

由于传统污水处理工艺去除硼的能力非常有限,导致过量的硼很容易随污水排放而进入自然水体^[4]。通常,自然或人为原因导致的水体营养物浓度变化,势必影响到海洋和淡水浮游植物的生长^[5]。地表水中硼浓度的异常升高,极有可能对浮游植物的生长和种群变化产生显著影响,进而影响到水生生态系统的结构和功能。然而,目前尚鲜有关于自然水体中硼浓度变化的对生态系统影响的报道。

硼是高等植物必需的一种微量营养元素^[6],但是如果过量则会对植物产生毒害^[7]。对于浮游植物,硼是否必需则取决于植物种类。Lewin 研究发现,硼对于大部分(甚至可能是全部)供试的 12 种海洋和淡水硅藻是必需元素^[8]。硼可能与藻细胞代谢有关(如同在高

收稿日期:2012-06-06

基金项目:水利部公益性行业科研专项经费项目(201101060);国家科技支撑计划项目(2012BAC07B02);中央高校基本科研业务费专项

作者简介:李海叶(1987—),女,山西朔州人,硕士研究生,主要研究方向为污染生态学。

* 通信作者:刘春光 E-mail:liuchunguang@nankai.edu.cn

等植物中的作用),或者参与形成硅藻的硅质外壳^[9]。Bonilla 等的试验发现,硼对于供试的 3 种固氮蓝藻都是必需元素,认为硼可能参与光合组织的形成^[10]。也有研究认为,硼对于某些浮游植物并非必需,例如有人使用 4 种小球藻进行试验,未发现足够证据表明硼是小球藻的必需元素^[11]。

近年来,有部分研究者尝试改变水体硼浓度,探讨硼如何影响浮游植物生长,但其中多数只是将硼作为营养物添加的,很少涉及高浓度的硼及其毒害作用。例如,Downs 等通过添加铁、硼、钴、铜、钼等,研究了微量元素对浮游植物生长和种类变化的影响,发现单独添加硼可以使浮游植物生产力增加约 40%^[5]。Hyenstrand 等研究了 Erken 湖中蓝藻 *Gloeotrichia echinulata* 对添加铁和硼的响应^[12]。Rao 研究了添加硼对海洋微型浮游植物的影响,发现过量硼可以缓解其他营养物的不足,可能导致浮游植物种群发生变化^[13]。

已有研究者关注到海洋中较高浓度的硼对海洋浮游植物的潜在毒害效应^[14]。然而,对于淡水浮游植物,高浓度硼的影响,特别是毒害作用的研究还存在明显不足。为了探究硼污染对淡水浮游生态系统的影响,本研究在室内模拟条件下,以自然水体中的浮游植物为研究对象,通过人为添加的方法改变水体硼浓度,研究了不同浓度的硼对浮游植物生长和种群变化的影响。本研究希望通过试验探究以下问题:(1)硼浓度的提高能否抑制浮游植物的生长;(2)不同浓度的硼是否会改变浮游植物种类组成;(3)自然水体中主要浮游植物对硼的耐受能力如何。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验用水采自天津市西青区某大学校园内景观湖表层 20 cm,滤去悬浮物质后注入小型塑料水箱中,每箱容纳 8 L。水箱上置 40 W 日光灯 6 支作为光源,水面照度 $260 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,光周期 12 h:12 h,温度范围 $(25 \pm 5)^\circ\text{C}$,连续曝气。正式试验开始前,先将试验用水静置 5 d 使其达到稳定。试验用水初始硼浓度为 $0.339 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (姜黄素分光光度法, HJ/T 49—1999)。

1.2 试验方法

根据预备试验(硼浓度为 $0 \sim 2000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)的结果,正式试验通过添加硼酸(H_3BO_3)^[15]设定硼浓度依次为 $0, 25, 50, 100, 200, 400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。因背景浓度较低($0.339 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),为方便表述,将未添加硼酸的对照硼浓度计为 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。为保证充足的氮、磷营养条件,参

照藻类培养通用的 BG-11 培养基配方,添加硝酸钾和磷酸氢二钾,使水体总氮、总磷浓度分别达到 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。用氢氧化钠或稀盐酸溶液调节水体 pH 值至 8.0 ± 0.2 。每隔 5 d 取样测定一次相关指标,每日用去离子水补充蒸发的水分,整个试验持续 30 d。

1.3 测定项目

藻类识别与计数:每次取水样 100 mL,加入 2 mL 鲁哥氏液固定藻类,沉淀 48 h,浓缩到 10 mL 后在光学显微镜下进行浮游藻类识别和计数。藻类识别参考胡鸿钧等《中国淡水藻类》^[16]。

生物量计算:在光学显微镜下采用目镜测微尺测量每种藻类 10~30 个体积的大小,根据藻细胞几何形状计算出藻细胞平均近似体积。设 $1 \mu\text{m}^3$ 藻体的鲜湿重为 $10^{-6} \mu\text{g}$,换算为鲜湿藻浓度,用 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 表示^[17]。

叶绿素 a 浓度:丙酮浸提-分光光度法,详见《水和废水监测分析方法(第四版)》^[18];

多样性指数:采用香农-威纳(Shannon-Wiener)指数(H'),计算公式如下^[19]:

$$H' = - \sum |n_i/N \lg(n_i/N)|$$

式中: n_i —第 i 个种的个体数目;

N —群落中所有种的个体总数。

2 结果与讨论

2.1 硼对浮游植物生长的影响

由图 1 可以看出,对照水体中的藻细胞密度很快出现最高值(第 10 d),完成第一个生长周期,随后降低,第 20 d 后又开始第二个生长周期。其他处理中的藻在第 20 d 前几乎没有出现对数生长,直至第 20 d 后才呈现藻细胞明显升高的趋势。本研究认为,水体

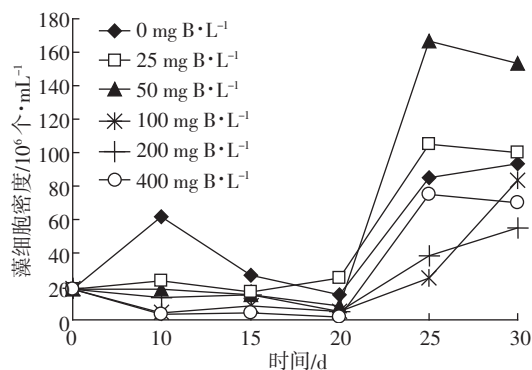


图 1 不同浓度硼处理水体中藻密度随时间的变化

Figure 1 Variation of algal densities at different boron concentrations

中硼浓度增加后延长了浮游植物的适应期,导致对数生长期延迟出现。Antia 和 Cheng^[20] 也发现,50~100 mg·L⁻¹ 硼延长了几种藻的适应期。该研究还发现,逐步提高硼浓度有利于藻类适应硼胁迫。

由图 2A 可以看出,在试验进行到第 30 d 时,在 0、25、50 mg·L⁻¹ 硼处理中,供试水体藻细胞密度是依次增加的,当硼浓度为 50 mg·L⁻¹ 时,藻细胞密度达到

最大值(153×10⁶ 个·mL⁻¹),是对照的 1.65 倍。当硼浓度达到 100 mg·L⁻¹ 时,藻细胞密度急剧下降至低于对照的水平,随着硼浓度的增加,藻细胞密度进一步下降,至硼浓度为 400 mg·L⁻¹ 时,藻细胞密度下降至对照的 59.1%。

本文选取第 30 d 的数据进行了进一步的分析(图 2~图 4)。由图 2B 可以看出,除了在低浓度范围内藻

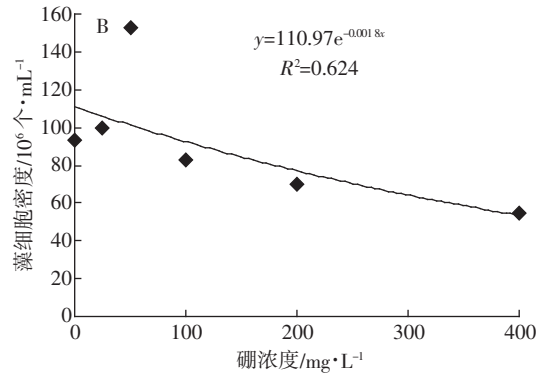
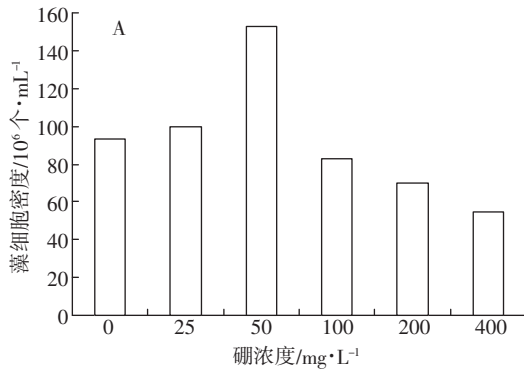


图 2 不同浓度硼对藻细胞密度的影响(第 30 d)

Figure 2 Effect of boron concentrations on the densities of phytoplankton (30th day)

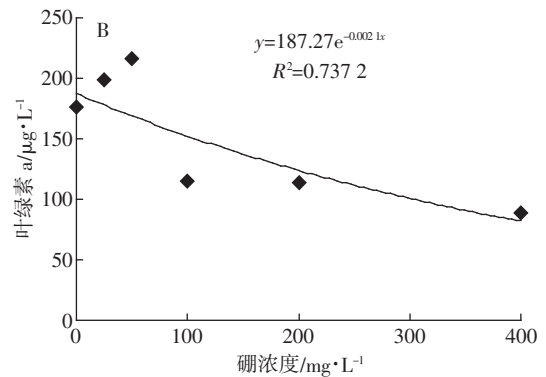
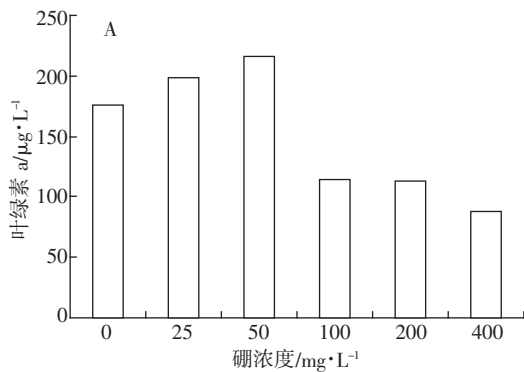


图 3 不同浓度硼对水体叶绿素 a 的影响

Figure 3 Effect of boron concentrations on the chlorophyll a of water

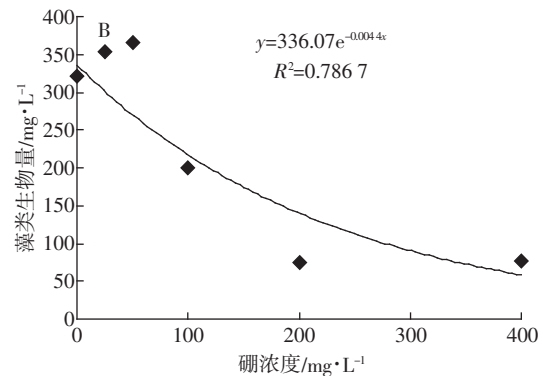
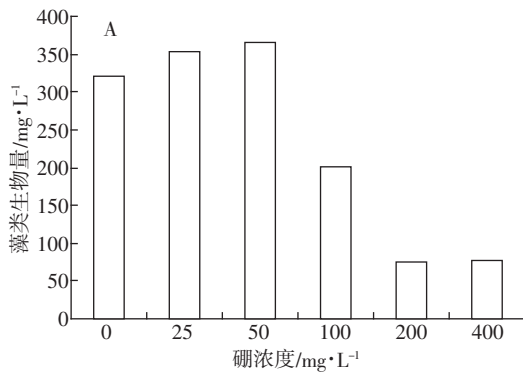


图 4 不同浓度硼对藻类生物量的影响

Figure 4 Effect of boron concentrations on the biomass of phytoplankton

细胞密度会随硼浓度升高而增大外,总体上,水体硼浓度与藻细胞密度呈负相关(R^2 为 0.624)。

从图 3A 可以看出,硼浓度为 $0\sim 50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,水体叶绿素 a 浓度逐渐升高,至 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 达到最高值。当硼浓度为 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,叶绿素 a 浓度比 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的处理降低 47.1%,至 $400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,比 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的处理降低 59.1%,比对照也降低了 49.8%。

由图 4A 可知,藻类生物量随硼浓度变化与藻密度和叶绿素 a 变化趋势相似,只是 $200、400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的硼使生物量降低更明显,这是因为藻的优势种发生了变化所致。水体叶绿素 a 含量与藻类生物量是密切相关的,比较图 3B 和图 4B 的曲线斜率可以看出,高浓度硼对藻类生物量的抑制超过对叶绿素合成的抑制。对于陆生高等植物,硼毒害会降低叶片叶绿素合成量,抑制光合速率和气孔导度^[21]。对于浮游植物,有报道指出硼可能参与光合组织的早期形成过程^[10],然而对于叶绿素合成与硼毒害的关系还缺乏研究。

2.2 硼对浮游植物种类变化的影响

试验初期,供试水体中的藻类以蓝藻门和绿藻门为主,主要优势种为蓝藻门的皮状席藻(*Phormidium corium*)和小颤藻(*Oscillatoria tenuis*),以及裸藻门的尾裸藻(*Euglena caudata* Hubn.)。由表 1 可以看出,在相对较低的硼浓度下 ($0\sim 25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),斜生栅藻(*Scenedesmus obliquus*)成为试验后期的主要优势种;在 $50\sim 100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度下,四尾栅藻(*Scenedesmus quadricanda*)和微小平裂藻(*Merismopedia tenuissima*)是主要优势种;在 $200\sim 400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 硼浓度下,皮状席

藻和微小平裂藻是主要优势种。

不同的浮游植物对硼的耐受性有较大差别。Forsberg 等发现, $10\sim 200\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 硼能够抑制部分淡水浮游植物的生长,但同时也促进了部分种类的生长^[22]。Bowen 等发现, $50\sim 100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 硼对小球藻(*Chlorella* spp.) 产生毒害,并显著抑制其生长率^[11]。Antia 和 Cheng 对部分海洋藻类研究发现,硼浓度为 $5\sim 10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,没有藻受到抑制;硼浓度为 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,有 26% 的种类受到抑制;硼浓度为 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,有 63% 受到抑制^[20]。

由表 2 可知,皮状席藻在较低和较高硼浓度下有

表 2 浮游植物优势种在不同硼处理中的出现频率
Table 2 Frequency of occurrences of dominant species at different boron concentrations

优势藻	硼浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$					
	0	25	50	100	200	400
皮状席藻(蓝)	++	+			++	+++
小颤藻(蓝)	++					
针杆藻(硅)	+					
斜生栅藻(绿)	+	+++		+		
湖泊鞘丝藻(蓝)		++				
铜绿微囊藻(蓝)			++			
小球藻(绿)			++		+	
四尾栅藻(绿)			+	+	+	
微小平裂藻(蓝)			+	+	+	++
鼓藻(绿)				++		
波吉卵囊藻(绿)				+	+	

注:每个“+”表示在 3 次调查中以优势种出现 1 次。

表 1 硼浓度对浮游植物优势种的影响

Table 1 Effect of boron concentrations on the dominant species of phytoplankton

硼浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	优势种		
	第 10 d	第 20 d	第 30 d
0	皮状席藻(蓝)	皮状席藻(蓝)	针杆藻(硅)
	小颤藻(蓝)	小颤藻(蓝)	斜生栅藻(绿)
25	皮状席藻(蓝)	湖泊鞘丝藻(蓝)	斜生栅藻(绿)
	斜生栅藻(绿)	斜生栅藻(绿)	湖泊鞘丝藻(蓝)
50	铜绿微囊藻(蓝)	铜绿微囊藻(蓝)	四尾栅藻(绿)
	小球藻(绿)	小球藻(绿)	微小平裂藻(蓝)
100	斜生栅藻(绿)	鼓藻(绿)	波吉卵囊藻(绿)
	鼓藻(绿)	四尾栅藻(绿)	微小平裂藻(蓝)
200	波吉卵囊藻(绿)	微小平裂藻(蓝)	四尾栅藻(绿)
	皮状席藻(蓝)	小球藻(绿)	皮状席藻(蓝)
400	微小平裂藻(蓝)	皮状席藻(蓝)	皮状席藻(蓝)
	皮状席藻(蓝)	微小平裂藻(蓝)	

注:括号内“蓝”表示该藻属于蓝藻门;“绿”表示该藻属于绿藻门;“硅”表示该藻属于硅藻门;水体初始优势种为皮状席藻、小颤藻和尾裸藻。

较高的出现频率,表明该藻对硼的适应范围广,而且耐受能力最强。根据已有报道,皮状席藻是一种耐污能力较强的蓝藻,在氮、磷浓度高,有机污染严重的水体中容易成为优势种^[23]。微小平裂藻在硼浓度为 50~400 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 中成为优势种,表明其比除皮状席藻之外的其他藻更能适应高硼环境。属于类似情况的还有四尾栅藻,该藻在硼浓度为 50~200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的处理中成为优势种。本试验中使用的氮源为硝态氮,根据以往的研究,蓝藻门植物对硝态氮的竞争不如绿藻门^[24]。但是本试验中绿藻门并未占据明显的优势地位,特别是在高浓度硼(400 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)处理中,蓝藻门成为优势种。由此可以推断,本研究结果并未明显受到氮源的影响。

本研究注意到,藻类研究中最常见的几种浮游植物如铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)、小球藻和斜生栅藻都只在相对较低的硼浓度下成为优势种,表明这几种藻对硼的耐受能力有限。在水处理工程中,小球藻被视为一种有潜在利用价值的生物物种。有研究利用小球藻处理含硼污水,发现其对硼有较高的去除效率^[25]。然而,该研究使用的硼浓度仅为 5~10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。本研究发现,小球藻能够在硼浓度为 50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的处理中成为优势种,甚至在 200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 都能够存活,这表明小球藻在更高浓度硼的污水处理上有潜在利用价值。

由图 5A 可知,藻类多样性在硼浓度为 25、50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时最大,当硼浓度超过 50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 后,多样性随硼浓度增加逐渐减小。这表明低浓度的硼会提高浮游植物的物种多样性,而高浓度的硼会使多样性降低。Antia 和 Cheng^[20]认为,较高的硼浓度(100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上)会促使耐受性强的种类通过与敏感种的竞争占据优势。图 5B 显示,硼浓度与香农-威纳多样性指数呈明显负相关($R^2=0.8818$)。

本研究是在室内可控条件下,小型的人工水体环境中进行的,其结果与实际水体中可能存在较大差别,尚需要通过野外试验进行检验。试验中硼的浓度远高于自然水体,为了避免高浓度硼带来的急性毒害,今后的试验中应考虑使硼浓度缓慢升高。另外,为了保证浮游植物的生长不受氮、磷等营养盐的限制,本研究使用淡水藻类培养通用的 BG-11 培养基,使得氮、磷浓度超过一般自然水体。这一方法也在其他学者研究硼与藻类关系中得到应用,例如 Taştan 等利用小球藻去除水中过量硼的试验即采用 BG-11 培养基^[25],Marín 和 Oron 利用浮萍去除水体中硼的研究

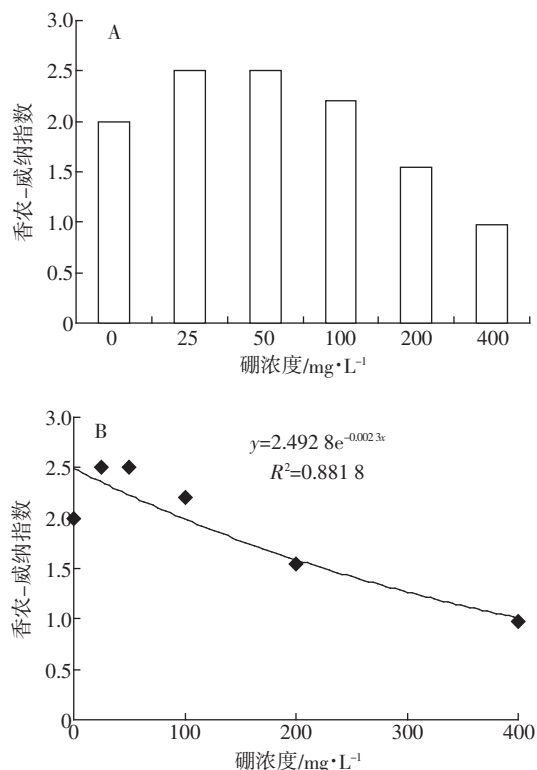


图5 硼浓度对藻类多样性指数的影响

Figure 5 Effect of boron concentrations on biodiversity index of phytoplankton

使用了 1/2 霍格兰培养基^[26]。因此,在下一步的研究中,有必要考虑设置氮、磷浓度较低的对照,以判断过量氮、磷是否影响了试验结果。

3 结论

(1)本试验条件下,低浓度的硼($\leq 50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)会使浮游植物生物量增加,高浓度的硼($\geq 100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)则降低浮游植物生物量,降低程度随硼浓度升高而增大。

(2)硼浓度的增加会导致浮游植物优势种发生变化,改变浮游植物多样性。低浓度硼($\leq 50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)增大多样性,高浓度的硼($\geq 100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)降低多样性。

(3)蓝藻门的皮状席藻和微小平裂藻是供试水体中对硼耐受性最强的种,可以在硼浓度为 400 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的水体中存活;皮状席藻适应范围最广,在最低(对照)和最高浓度中均能够成为优势种。

参考文献:

- [1] Butterwick L, Oude N, Raymond K. Safety assessment of boron in aquatic and terrestrial environments[J]. *Ecotox Environ Safe*, 1989, 17: 339-371.
- [2] Verce M F, Stiles A R, Chong K C, et al. Isolation of an extremely

- boron-tolerant strain of *Bacillus firmus*[J]. *Can J Microbiol*, 2012, 58: 811–814.
- [3] Xu R J, Xing X R, Zhou Q F, et al. Investigations on boron levels in drinking water sources in China[J]. *Environ Monit Assess*, 2010, 165: 15–25.
- [4] Waggott A. An investigation of the potential problem of increasing boron concentrations in rivers and water courses[J]. *Water Res*, 1969, 3: 749–765.
- [5] Downs T M, Schallenberg M, Burns C W. Responses of lake phytoplankton to micronutrient enrichment: A study in two New Zealand lakes and an analysis of published data[J]. *Aquat Sci*, 2008, 70: 347–360.
- [6] Howe P D. A review of boron effects in the environment[J]. *Biol Trace Elem Res*, 1998, 66: 153–166.
- [7] Camacho-Cristobal J J, Rexach J, Gonzalez-Fontes A. Boron in plants: Deficiency and toxicity[J]. *Integr Plant Biol*, 2008, 50(10): 1247–1255.
- [8] Lewin J. Boron as a growth requirement for diatoms[J]. *J Phycol*, 1966, 2: 160–163.
- [9] Deyhle A, Hodge V, Lewin R A. Boron in diatoms[J]. *J Phycol*, 2003, 39(Suppl 1): 12–13.
- [10] Bonilla I, Garcia-González M, Mateo P. Boron requirement in cyanobacteria[J]. *Plant Physiol*, 1990, 94: 1554–1560.
- [11] Bowen J E, Gauch H G, Krauss R W, et al. The nonessentiality of boron for *Chlorella*[J]. *J Phycol*, 1965, 1: 151–154.
- [12] Hyenstrand P, Rydin E, Gunnerhed M, et al. Response of the cyanobacterium *Gloeotrichia echinulata* to iron and boron additions—an experiment from Lake Erken[J]. *Freshwater Biol*, 2001, 46: 735–741.
- [13] Rao D V S. Effect of boron on primary production of nanoplankton[J]. *Can J Fish Aquat Sci*, 1981, 38: 52–58.
- [14] Carrano C J, Schellenberg S, Amin S A, et al. Boron and marine life: A new look at an enigmatic bioelement[J]. *Mar Biotechnol*, 2009, 11: 431–440.
- [15] McBride L, Chorney W, Skok J. Growth of *Chlorella* in relation to boron supply[J]. *Bot Gaz*, 1971, 132: 10–13.
- [16] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类: 系统、分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [17] 钟远, 樊娟, 刘春光, 等. 硫酸盐对淡水浮游藻类群落结构的影响研究[J]. 环境科学, 2009, 30(8): 2253–2258.
- ZHONG Y, FAN J, LIU C G, et al. Effects of sulfate on the community structure of phytoplankton in freshwater[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(8): 2253–2258.
- [18] 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: 670–771.
- [19] 李博. 生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 343–348.
- [20] Antia N J, Cheng J Y. Culture studies on the effects from borate pollution on the growth of marine phytoplankters[J]. *J Fish Res Board Can*, 1975, 32(12): 2487–2494.
- [21] Roessner U, Patterson J H, Forbes M G, et al. An investigation of boron toxicity in barley using metabolomics[J]. *Plant Physiol*, 2006, 142: 1087–1101.
- [22] Forsberg C, Jinnerot D, Davidsson L. The influence of synthetic detergents on the growth of algae[J]. *Vatten*, 1967, 23: 2–16.
- [23] 刘春光, 金相灿, 王雯, 等. 城市景观河流夏季污染状况及营养水平动态分析——以天津市津河为例[J]. 环境污染与防治, 2004, 26(4): 312–316.
- LIU C G, JIN X C, WANG W, et al. Dynamic analysis of water quality and nutrition status of a landscape river: A case study on Jinhe River in Tianjin[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2004, 26(4): 312–317.
- [24] 刘春光, 金相灿, 孙凌, 等. 不同氮源和曝气方式对淡水藻类生长的影响[J]. 环境科学, 2006, 27(1): 101–104.
- LIU C G, JIN X C, SUN L, et al. Effects of nitrogen source and aeration mode on algae growth in freshwater[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(1): 101–104.
- [25] Taştan B E, Duygu E, Dönmez G. Boron bioremoval by a newly isolated *Chlorella* sp. and its stimulation by growth stimulators[J]. *Water Res*, 2012, 46: 167–175.
- [26] Marín C M D, Oron G. Boron removal by the duckweed *Lemna gibba*: A potential method for the remediation of boron-polluted waters[J]. *Water Res*, 2007, 41: 4579–4584.