

天然水体对有机氯污染物藻类毒性的影响

屠兴坤^{1,2}, 张 帅^{1,2*}, 唐世坤^{1,2}, 方 润^{1,2}, 李子寒^{1,2}, 刘安蓉^{1,2}

(1. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵州贵阳 550025; 2. 贵州省喀斯特山地生态环境国家重点实验室培育基地, 贵州贵阳 550025)

摘要 用去离子水和天然水体分别配制不同浓度的阿特拉津和 PCB-77, 研究 2 种有机氯污染物对蛋白核小球藻的毒性效应。通过观察藻的生长, 计算出不同水体条件下有机氯污染物对小球藻生长抑制的 96 h-IC₅₀。结果表明, 不同水体条件下阿特拉津和 PCB-77 对蛋白核小球藻的生长抑制作用存在差异, 观山湖水体显著减小了阿特拉津和 PCB-77 的 96 h-IC₅₀ 值; 天河潭水体显著减小了阿特拉津的 96 h-IC₅₀ 值, 增大了 PCB-77 的 96 h-IC₅₀ 值, 表明天然水体会影响有机氯污染物对藻类的毒性效应。

关键词 天然水体; 有机氯污染物; 毒性影响; 藻类; 阿特拉津; PCB-77

中图分类号 X 171.5 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2022)12-0060-03

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.12.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Natural Water on Algae Toxicity of Organochlorine Pollutants

TU Xing-kun^{1,2}, ZHANG Shuai^{1,2}, TANG Shi-kun^{1,2} et al (1. College of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou 550025; 2. State Key Laboratory Breeding Base for Karst Mountain Eco-environment of Guizhou Province, Guiyang, Guizhou 550025)

Abstract Different concentrations of atrazine and PCB-77 were prepared with deionized water and natural water respectively, and the toxic effects of the two organochlorine pollutants on *Chlorella pyrenoidosa* were studied. By observing the growth of algae, the 96 h-IC₅₀ of the inhibition of organic chlorine pollutants on algae under different water conditions was calculated. The results showed that the inhibitory effects of atrazine and PCB-77 on algae were different under different water conditions, the water body of Guanshan Lake significantly decreased the 96 h-IC₅₀ values of atrazine and PCB-77; the Tianhetan water body significantly decreased the 96 h-IC₅₀ value of atrazine and increased the 96 h-IC₅₀ value of PCB-77, indicating that natural water would affect the toxic effects of organochlorine pollutants on algae.

Key words Natural water; Organochlorine pollutants; Toxic effect; Algae; Atrazine; PCB-77

由于现代工农业的快速发展,越来越多的工业废弃物和残留农药等污染物通过各种途径进入环境中,其中包括有机氯农药和多氯联苯等有机氯污染物^[1]。有机氯污染物是一种典型的持久性污染物,在环境中可以通过多种介质进行迁移,并通过食物链在生物体内富集,从而对生态环境和人体健康产生危害^[2]。联合国环境规划署(UNEP)已将持久性有机污染物看作世界面临的重大环境挑战之一,有机氯污染物也因其具有难降解性、生物积累性和致癌性等特点而受到广泛关注^[3-4]。

据水环境研究显示,我国水体中有机氯污染物残留水平非常高,特别是南方地区经常出现水体有机氯含量超标现象^[3,5]。水体中的有机氯污染物能够被细小生物摄取,并通过食物链传递到高等生物体内^[6]。藻类是水环境中的初级生产者,对环境因子极其敏感,当其暴露于有害物质时,毒理效应将会对整个水环境生态系统产生影响^[7-8]。同时,由于藻类具有对毒物敏感、易获得、个体小、繁殖快等特点,能够在较短时间内得到污染物对藻类世代及种群水平的影响评价,因此常被作为毒性测试的模式生物^[1]。如曾莎莎等^[9]在

96 h 的急性暴露下研究了 5 种有机磷农药对蛋白核小球藻的毒性相互作用。

当前对于有机氯污染物藻类毒性影响的研究主要集中在有机氯污染物的暴露浓度,对于其他环境因子与藻类毒理效应的研究较少^[1]。开展天然水体对有机氯污染物藻类毒性影响的研究有利于进行生态风险评估,对水环境生态保护具有十分重要的意义。为进一步评价有机氯污染物的环境毒理效应,该研究以蛋白核小球藻为模式生物,研究不同天然水体环境下阿特拉津、3,3',4,4'-四氯联苯(3,3',4,4'-Tetrachlorobiphenyl, PCB-77) 2 种典型有机氯污染物的毒理效应,以为水环境生态保护和管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试材 阿特拉津,纯度 97%,购买自百威林公司;PCB-77,纯度 99%,购买于 Accustandard 公司。试验所用蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*)购买自中国科学院水生生物研究所淡水藻种库。试验用水为去离子水。

1.2 样品采集 试验所用天然水体采集于贵阳市观山湖公园(106°64'E, 26°64'N)和天河潭风景区(106°58'E, 26°44'N),采集时间为 2021 年 8 月 5 日。采集时利用便携式水质采样器采样,每个采样地分 5 个采样点采取混合水样,采集后避光运输至实验室,利用 0.45 μm 微孔滤膜抽滤后于 4 ℃ 条件下冷藏保存直至试验时使用。

1.3 试验方法

1.3.1 藻的培养。 试验所用器皿均经过 121 ℃ 高压蒸汽灭菌 30 min,所用藻种利用 BG-11 培养液培养,培养至对数增长期备用。培养时放入智能光照培养箱,设置培养温度为

基金项目 国家自然科学基金项目(41807336);贵州省科技计划项目(黔科合基础[2020]Y189,黔科合 LH 字[2017]7345 号,黔科合平台人才[2018]576919);贵州师范大学 2016 年博士科研启动项目“NOM 对 TiO₂ 纳米颗粒与有机氯污染物藻类复合毒性的影响”;贵州师范大学 2019 年度大学生科研训练计划项目(DK2019Z008);贵州省世界一流学科建设计划项目(黔教科研发[2019]125 号)。

作者简介 屠兴坤(2000—),男,贵州盘州人,从事环境化学与环境毒理学研究。*通信作者,副教授,博士,硕士生导师,从事环境化学与环境毒理学研究。

收稿日期 2021-09-06

(25.0±0.5)℃,光照度为3级,光暗比为14 h:10 h,每天定时晃动3次。

BG-11培养基主要由超纯水和以下组分组成:NaNO₃、K₂HPO₄、MgSO₄·7H₂O、Na₂CO₃、柠檬酸、柠檬酸铁铵、ED-TANa₂、CaCl₂·2H₂O、A5溶液[H₃BO₃、MnCl₂·4H₂O、ZnSO₄·7H₂O、CuSO₄·5H₂O、Na₂MoO₄·2H₂O、Co(NO₃)₂·6H₂O],均为分析纯^[10],详细配方如表1。

表1 BG-11培养基配方

Table 1 The formula of BG-11 culture medium

化合物 Compound	母液浓度 Mother liquid concentration	终浓度* Final conc- entration//g/L
硝酸钠 NaNO ₃	15 g/100 mL	1.5
磷酸氢二钾 K ₂ HPO ₄	2 g/500 mL	0.04
硫酸镁 MgSO ₄ ·7H ₂ O	3.75 g/500 mL	0.075
碳酸钠 Na ₂ CO ₃	1.0 g/500 mL	0.02
柠檬酸 Citric acid	0.3 g/500 mL	0.006
柠檬酸铁铵 Ferric ammonium citrate	0.3 g/500 mL	0.006
乙二胺四乙酸二钠 EDTANa ₂	0.05 g/500 mL	0.001
氯化钙 CaCl ₂ ·2H ₂ O	1.8 g/500 mL	0.036
硼酸 H ₃ BO ₃	2.86 g/L	0.002 86
四水氯化锰 MnCl ₂ ·4H ₂ O	1.86 g/L	0.001 86
七水硫酸锌 ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0.22 g/L	0.000 22
五水硫酸铜 CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.08 g/L	0.000 08
二水钼酸钠 Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	0.39 g/L	0.000 39
六水硝酸钴 Co(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	0.05 g/L	0.000 05

注: *表示配制1 L培养基时各化合物所对应的最终浓度

Note: * indicates the final concentration of each compound when prepar- ing 1 L of medium

1.3.2 总有机碳的测定。总有机碳(total organic carbon, TOC)的测定采用燃烧氧化-非分散红外吸收法,水样直接用TOC-L CPH总有机碳分析仪(岛津,日本)测定总碳和无机碳,用差减法算出TOC^[11]。

1.3.3 有机氯污染物对藻类毒性影响效应试验。用90 mL去离子水和天然水体分别与10 mL培养好的蛋白核小球浓缩藻液混合,置于250 mL锥形瓶中进行培养,初始藻细胞密度约为2.5×10⁶ cells/mL。同时向锥形瓶中添加溶解于助溶剂丙酮中的不同浓度梯度阿特拉津和PCB-77母液,根据有机氯污染物毒性和溶解度设定阿特拉津的初始浓度梯度为0、80、160、320 μg/L,PCB-77的初始浓度梯度为0、2、6、8 μg/L。其中0梯度为空白对照,每个浓度点试验都设置3个平行组。其中,助溶剂丙酮的添加浓度低于1 μL/mL,经前期预试验测定,此浓度以下的丙酮溶液对蛋白核小球藻没有毒性。

样品瓶用灭菌滤纸封口后统一放在(25.0±0.5)℃室内静置培养96 h,光照周期为14 h:10 h,每天定时人工摇藻5次,每24 h对消耗的阿特拉津和PCB-77进行补充。

1.3.4 半抑制浓度测定。藻细胞采用血细胞计数板在显微镜下进行观察计数,并通过以下公式计算:

$$I = (1 - N_t / N_0) \times 100\%$$

式中,I为藻的生长抑制率,N_t和N₀分别代表试验组和空白

组的蛋白核小球藻的细胞密度。依托有机氯污染物浓度与小球藻96 h生长抑制率变化绘制剂量-效应关系曲线,根据所得剂量-效应关系曲线,使用SPSS 25.0软件,选用Four-Parameter logistic方程进行非线性回归计算出阿特拉津和PCB-77的96 h后令小球藻相对抑制率为50%时的污染物浓度(96 h-IC₅₀)。

1.4 数据分析 试验数据采用Excel作图分析,并用SPSS 25.0软件进行方差分析。数据均为3次重复测定值的平均值。

2 结果与分析

2.1 不同水体对有机氯污染物藻类毒性效应的影响 不同有机氯污染物对藻类有不同的毒性效应,按照“1.3.3”试验方法,96 h后取样测定藻细胞密度。根据公式(1)计算出不同水体条件下阿特拉津和PCB-77对蛋白核小球藻的生长抑制率,结果如图1所示。由图1可知,阿特拉津对小球藻的毒性效应在3种水体(观山湖水体、天河潭水体、去离子水体)中总体呈随浓度增加抑制作用增长速率先增强后减弱的趋势,且在受试浓度范围内3种水体中对小球藻的最高抑制率都超过50%。PCB-77对小球藻的毒性效应在观山湖水体和去离子水体中总体同样呈随浓度增加抑制作用增长速率先增强后减弱的趋势,最高抑制率大于50%;但在天河潭水体中,PCB-77对小球藻的生长在浓度低于2 μg/L时无显著影响,在浓度为8 μg/L时对小球藻的抑制率未达到50%。与去离子水相比,观山湖水体显著增强了2种有机氯污染物的毒性,天河潭水体明显增强了阿特拉津毒性,削弱了PCB-77毒性。

2.2 不同水体条件下阿特拉津和PCB-77对小球藻的96 h-IC₅₀值 根据阿特拉津和PCB-77对小球藻的生长抑制剂量-效应关系曲线计算出3种水体(观山湖水体、天河潭水体、去离子水体)条件下有机氯污染物对小球藻生长抑制的96 h-IC₅₀,结果如图2所示。由图2可知,在去离子水体中阿特拉津和PCB-77的96 h-IC₅₀值分别为269.271和6.871 μg/L,观山湖水体明显减小了阿特拉津和PCB-77的96 h-IC₅₀值,分别减小了24.5%和72.4%;相比去离子水体,天河潭水体明显减小了阿特拉津的96 h-IC₅₀值,减小了36.9%,增大了PCB-77的96 h-IC₅₀值,增大了45.6%。

上述结果表明,不同水体条件下阿特拉津和PCB-77对蛋白核小球藻的生长抑制作用存在差异,且不同浓度对小球藻的生长毒性效应也不同。同时天然水体能够增强或削弱阿特拉津和PCB-77对小球藻的毒性。

3 讨论

天然水体中天然有机质(NOM)广泛存在,因此在研究有机污染物在天然水环境中的环境行为和生态效应时还需要考虑天然有机质的影响。天然有机质主要由腐殖质和非腐殖质组成,其中非腐殖质占20%~40%的总有机碳含量;腐殖质占60%~80%的总有机碳含量,在天然有机质中占主要地位。有研究指出,天然有机质能够与有机污染物相互作用,从而影响有机污染物的迁移、转换、降解和生物可利用性

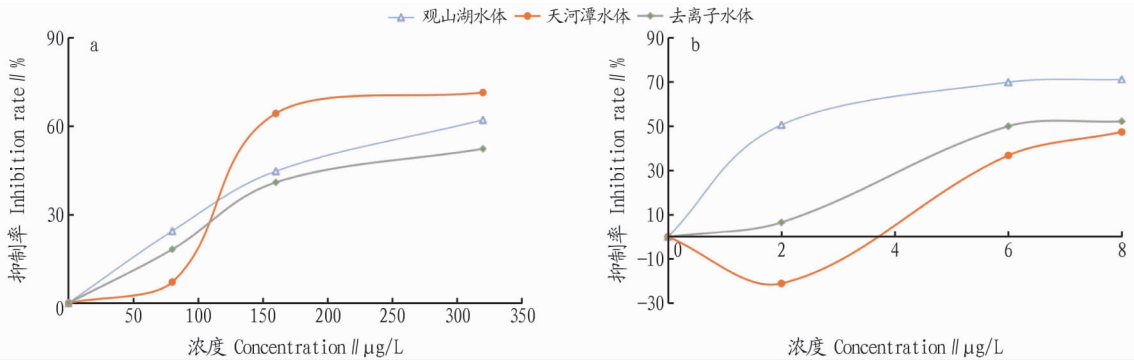


图1 阿特拉津(a)和PCB-77(b)对小球藻抑制率的影响

Fig.1 Effect of atrazine (a) and PCB-77 (b) on chlorella inhibition rate

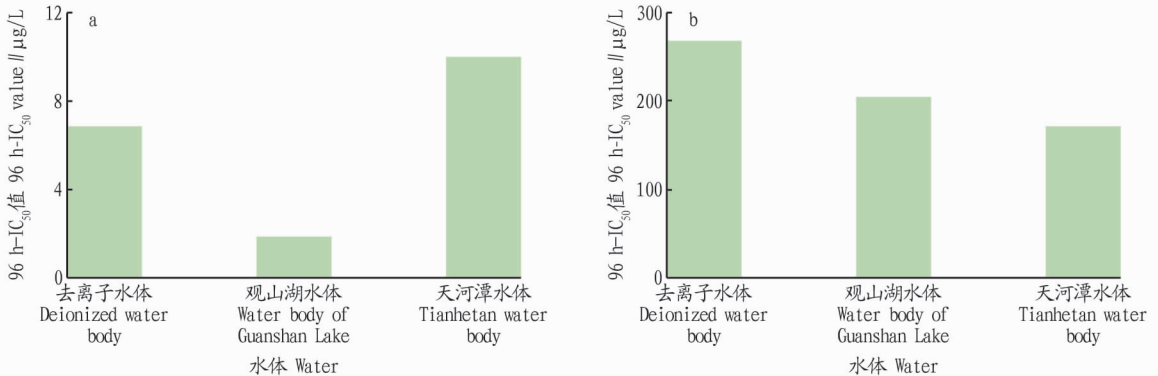


图2 不同水体条件下PCB-77(a)和阿特拉津(b)对小球藻生长抑制的96 h-IC₅₀值

Fig.2 The 96 h-IC₅₀ values of PCB-77 (a) and atrazine (b) on the growth inhibition of chlorella under different water conditions

等环境行为^[12]。天然有机质对有机污染物特别是疏水性有机物的水生生物有效性和毒性存在以下几种影响作用:①增溶作用,增加疏水性有机物在水中的溶解度;②对降解性的影响,影响疏水性有机物的光降解速率,从而影响生物毒性;③减小有效浓度,与疏水性有机物结合,降低水体中疏水性有机物的游离态浓度,减小其的生物可利用度;④形成保护膜,减少生物体与污染物的接触,从而减小污染物毒性^[13]。同时,疏水性有机物大多在水中的溶解度较低,天然有机质主要通过增大疏水性有机物在水中溶解度的方式影响其在水体中的环境行为^[14]。

该试验所采用的阿特拉津和PCB-77这2种有机氯污染物具有较高的辛醇-水分配系数,有着一定的亲油疏水性,属于疏水性有机物。采集的天然水体经过总有机碳分析仪测定,天河潭水体和观山湖水体的总有机碳(TOC)浓度分别为13.28、8.21 mg/L。天然水体因天然有机质的存在能够影响阿特拉津和PCB-77对小球藻的毒性作用。推测可能的机理为:观山湖中的天然有机质的结合效应使阿特拉津和PCB-77更易与藻细胞接触,从而增加了阿特拉津和PCB-77进入藻细胞的机会,使2种污染物的毒性高于去离子水;天河潭水体中的天然有机质增加了阿特拉津与藻细胞的接触,反而减小了PCB-77的有效浓度,因此使阿特拉津的毒性高于去离子水中的毒性,而PCB-77的毒性小于去离子水毒性。造成这种现象的原因可能是PCB-77的疏水性比阿特拉津大很多,因为天河潭水中相对较高的总有机碳浓度,

说明天河潭中天然有机质的含量较高,致使PCB-77与水体中更多的天然有机质相结合,且天河潭水体中有机质中疏水亲脂的基团可能更多,使其与PCB-77的结合更紧密,难以解离,从而减小了游离态的PCB-77浓度,使得其毒性削弱。张帅^[13]研究的天然有机质对氯苯小球藻毒性的影响也显示,富集在小球藻细胞表面的高氯取代氯苯与天然有机质结合牢固,很难被藻细胞吸收,从而减小了氯苯的毒性效应。这也说明不同的天然有机质对不同的污染物作用有所不同,主要依赖于天然有机质和污染物的性质,致毒的机理仍需进一步研究。

当前我国在《斯德哥尔摩公约》履行方面的工作取得了很大成效,有机氯污染物的使用也得到了有效的控制^[15],但是据报道,我国水体、沉积物、大气、土壤中都已遭受到有机氯污染物的污染^[16]。现在关于有机氯污染物对藻类和植物的毒害效应研究多关注暴露浓度,很少考虑天然有机质的影响,从实际应用环境来看,天然水体中有机氯污染物的毒性往往与室内实验室毒性试验存在一定差异,因此室内配制的有机氯污染物的毒性效应浓度很有可能会被低估。从该试验所测得的天然水体中阿特拉津和PCB-77对藻类的毒性效应可看出,与去离子水体中有机氯污染物毒性相比,天然水体中有机氯污染物毒性增强现象多于毒性削弱现象。这一结果提示应当注意天然水体中有机氯污染物对水生动植物毒性以及水环境的影响。

(下转第136页)

性为主,整体 pH 等级较好且分布较为均匀,项目实施后,土壤 pH 趋向中性,更趋于稳定均衡。可见,有机肥替代化肥,一定程度上增加了示范区的土壤缓冲性能,土壤碱解氮降低,有效磷、速效钾和有机质增幅较大,对土壤养分和质量提升有较大的促进作用。与化肥相比,有机肥替代化肥处理的包菜和茄子可溶性糖和维生素 C 含量增加,硝酸盐含量降低,蔬菜品质得到了较大改善。

采用指数和法对 20 个监测点土壤质量进行划分的结果表明,项目实施对示范区采样点土壤质量等级均有较好的正效应,指数和法的分级数值则来自对各养分指标分别打分得到的综合得分,有机肥替代化肥对土壤质量影响的正效应趋势已经有所体现。

参考文献

- [1] 张志斌.我国设施蔬菜存在的问题及发展重点[J].中国蔬菜,2008(5): 1-3.
- [2] 郭玲娟,史晋鹏,韩会会,等.我国现代设施蔬菜产业建设要点及生产管理[J].上海蔬菜,2019(6):12-15,22.
- [3] 刘文科.我国设施蔬菜产业提质增效的方法与措施[J].农业工程技术,2019,39(10):28-32.
- [4] SCHROEDER H A, BALASSA J J. Cadmium: Uptake by vegetables from superphosphate in soil[J]. Science, 1963, 140(3568): 819-820.
- [5] JU X T, KOU C L, CHRISTIE P, et al. Changes in the soil environment from excessive application of fertilizers and manures to two contrasting intensive cropping systems on the North China Plain[J]. Environmental pollution, 2007, 145(2): 497-506.
- [6] 周勇.设施农业发展与蔬菜病虫害防治策略探析[J].农家参谋,2019(22):36.
- [7] 连青龙,张跃峰,丁小明,等.我国北方设施蔬菜质量安全现状与问题分析[J].中国蔬菜,2016(7):15-21.
- [8] 李娟,赵秉强,李秀英,等.长期有机无机肥料配施对土壤微生物学特性及土壤肥力的影响[J].中国农业科学,2008,41(1):144-152.
- [9] 任凤玲,张旭博,孙楠,等.施用有机肥对中国农田土壤微生物量影响的整合分析[J].中国农业科学,2018,51(1):119-128.
- [10] 臧逸飞,郝明德,张丽琼,等.26 年长期施肥对土壤微生物量碳、氮及土壤呼吸的影响[J].生态学报,2015,35(5):1445-1451.
- [11] 徐明岗,李冬初,李菊梅,等.化肥有机肥配施对水稻养分吸收和产量的影响[J].中国农业科学,2008,41(10):3133-3139.
- [12] 张小莉,孟琳,王秋君,等.不同有机无机复混肥对水稻产量和氮素利用率的影响[J].应用生态学报,2009,20(3):624-630.
- [13] 牛越先.山西省坝地土壤肥力质量评价[J].水土保持学报,2010,24(5):262-265,271.
- [14] 金晟,朴成淳,商照聪,等.山东省寿光市设施蔬菜大棚土壤质量调查与评价:亲土在线-农业土壤治理大数据平台(上)[J].肥料与健康,2020,47(2):22-26.
- [15] 王秋君,马艳,郭德杰,等.设施蔬菜土壤养分状况分析及综合评价[J].江苏农业学报,2019,35(3):624-630.
- [16] 蔡嘉慧.蔬菜设施集约化种植对土壤质量的影响与评价:以昆明市晋宁区为例[D].昆明:云南大学,2019.
- [17] 赵满兴,曹阳阳,焦佳斌,等.延安新区(北区)道路绿地土壤肥力质量评价[J].中国农学通报,2018,34(27):130-136.
- [18] 孙雪亮,赵建港,余勤飞,等.新疆某露天矿排土场土壤质量分级评价[J].金属矿山,2021(8):178-185.
- [19] 刘虎,魏占民,王振宇,等.天津经济技术开发区土壤肥力评价的研究[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2009,30(3):90-94.
- [20] 张建军,樊廷录,赵刚,等.不同有机物料与部分化肥长期定位配合施用对土壤养分的调控效应[J].中国土壤与肥料,2018(3):85-91.
- [21] 陈志龙,陈杰,许建平,等.有机肥氮替代部分化肥氮对小麦产量及氮肥利用率的影响[J].江苏农业科学,2013,41(7):55-57.
- [22] 董文,张青,罗涛,等.不同有机肥连续施用对土壤质量的影响[J].中国农学通报,2020,36(28):106-110.
- [23] 丁晓娟.江苏泗洪县有机肥部分替代化肥对蔬菜地土壤肥力的提升效果[J].农业工程技术,2020,40(23):21-22.
- [24] 李司童,毛凯伦,韦成才,等.蚯蚓粪肥替代部分化肥对连作烟田土壤肥力的影响及评价[J].华北农学报,2018,33(S1):238-245.
- [25] 杨忠赞,迟凤琴,匡恩俊,等.有机肥替代对土壤理化性状及产量的综合评价[J].华北农学报,2019,34(S1):153-160.
- [26] 汤桂容,周旋,田昌,等.有机无机氮肥配施对蔬菜产量、品质及经济效益的影响[J].生态学杂志,2017,36(5):1292-1299.
- [27] 罗佳,黄兴学,林处发,等.有机肥替代部分化肥对生菜产量和品质的影响[J].农业开发与装备,2018(9):126-128.
- [28] 张宇,樊小雪,徐刚,等.不同氮肥与有机肥配施对蒜产量及品质的影响[J].江苏农业科学,2019,47(5):114-117.
- [29] 徐丽萍.塑料大棚栽培下有机无机配施对大白菜产量、品质及土壤肥力的影响[J].江苏农业科学,2021,49(6):109-114.
- [30] 何翠,曾旭,金鑫,等.丢糟有机肥与化肥配施对大头菜产量和品质的影响[J].安徽农业科学,2020,48(1):167-169.

(上接第 62 页)

4 结论

(1)不同水体条件下阿特拉津和 PCB-77 对蛋白核小球藻的生长抑制作用存在差异,总体呈随浓度增加抑制作用增长速率先增强后减弱的趋势。

(2)天然水体对有机氯污染物藻类毒性存在影响,观山湖水体显著减小了阿特拉津和 PCB-77 的 96 h-IC₅₀ 值,即增强了 2 种有机氯污染物的毒性效应;天河潭水体显著减小了阿特拉津的 96 h-IC₅₀ 值,增大了 PCB-77 的 96 h-IC₅₀ 值,即增强了阿特拉津毒性效应,削弱了 PCB-77 毒性效应。

(3)不同的天然有机质对不同的污染物作用有所不同,作用效果主要依赖于天然有机质和污染物的性质。

参考文献

- [1] 沈宏,周培疆.环境有机污染物对藻类生长作用的研究进展[J].水生生物学报,2002,26(5):529-535.
- [2] 张嘉雯,魏健,吕一凡,等.衡水湖沉积物中典型持久性有机污染物污染特征与风险评估[J].环境科学,2020,41(3):1357-1367.
- [3] 刘莎.水中持久性有机污染物的监测与治理[J].中国资源综合利用,2019,37(6):159-161.
- [4] 叶凯,孙玉川,贾亚男,等.岩溶地下水水体中有机氯农药和多氯联苯的残留特征及健康风险评价[J].环境科学,2020,41(12):5448-5457.
- [5] 段志刚.持久性有机污染物在中国的环境监测现状[J].科技经济导刊,2018,26(23):111.
- [6] 王静.有机氯农药残留的危害及改善措施[J].湖南农业,2020(8):36.
- [7] DELORENZO M E, LAUTH J, PENNINGTON P L, et al. Atrazine effects on the microbial food web in tidal creek mesocosms[J]. Aquatic toxicology, 1999, 46(3/4):241-251.
- [8] 刘畅,吴文娟,李建宏,等.不同光强对阿特拉津和百草枯藻类毒性的影响[J].环境科学学报,2014,34(5):1339-1343.
- [9] 曾莎莎,梁延鹏,覃礼堂,等.有机磷农药对蛋白核小球藻的毒性相互作用研究[J].生态毒理学报,2019,14(4):121-129.
- [10] BHARTE S, DESAI K. The enhanced lipid productivity of *Chlorella minutissima* and *Chlorella pyrenoidosa* by carbon coupling nitrogen manipulation for biodiesel production[J]. Environmental science and pollution research, 2019, 26(4):3492-3500.
- [11] 环境保护部.水质 总有机碳的测定 燃烧氧化—非分散红外吸收法: HJ 501—2009[S].北京:中国环境科学出版社,2009.
- [12] KUBICKI J D, APITZ S E. Models of natural organic matter and interactions with organic contaminants[J]. Organic geochemistry, 1999, 30(8):911-927.
- [13] 张帅. NOM 和 TiO₂ 纳米颗粒对有机氯污染物藻类毒性与富集的影响[D].南京:河海大学,2016.
- [14] YU H, HUANG G H, WEI J, et al. Solubilization of mixed polycyclic aromatic hydrocarbons through a rhamnolipid biosurfactant[J]. Journal of environmental quality, 2011, 40(2):477-483.
- [15] 余刚,周隆超,黄俊,等.持久性有机污染物和《斯德哥尔摩公约》履约[J].环境保护,2010,38(23):13-15.
- [16] 王佩华,赵大伟,聂春红,等.持久性有机污染物的污染现状与控制对策[J].应用化工,2010,39(11):1761-1765.