

综 述

环境有机污染物对藻类生长作用的研究进展

沈 宏 周培疆

(武汉大学环境科学系, 武汉 430072)

ADVANCE IN THE STUDIES ON EFFECT OF ENVIRONMENTAL ORGANIC POLLUTANTS ON THE ALGAE GROWTH

SHEN Hong and ZHOU Pei jiang

(Department of Environmental Science, Wuhan University, Wuhan 430072)

关键词: 环境有机污染物; 藻类; 生长效应; 毒性效应

Key words: Environmental organic pollutants; Algae; Growth effects; Toxic effects

中图分类号: X13 文献标识码: A 文章编号: 1000-3207(2002)05-0529-07

随着现代工农业的迅速发展和城市人口的增加,越来越多的工业废弃物、残留农药、生活垃圾等有机污染物通过各种途径进入到环境中。这些有机污染物主要包括两大类,它们分别是有机无毒物和有机有毒物。有机无毒物主要是耗氧有机物如碳水化合物、蛋白质、脂肪等;有机有毒物的种类很多,主要包括酚类化合物、有机农药、聚氯联苯、多环芳烃等,其中很多是持久性有机污染物(Persistent Organic Pollutants,简称 POPs)在环境中具有长期残留性、生物积蓄性、半挥发性和高毒性。有机污染物对环境的巨大危害以及带来的环境问题越来越被人们所认识,目前已成为一个倍受关注的新的全球性环境问题。

水体富营养化是目前水污染的重要问题之一,近年来,我国许多淡水湖泊都不同程度的出现了富营养化现象,有的海洋也出现了赤潮。藻类的异常增殖,破坏了湖泊和海洋的生态环境,有些藻类如微囊藻(*Microcystis*)、鱼腥藻(*Anabaena*)、颤藻(*Oscillatoria*)等,还分泌出大量的藻毒素,对人畜造成危害,严重污染环境,影响自然景观和城市正常供水。有机物大量进入水体后,虽然在水中的浓度很低,但对藻类的生长影响却很大。作为水生态

收稿日期: 2002-01-22; 修订日期: 2002-05-15

基金项目: 科技部、云南省重大科技攻关课题“滇池蓝藻水华污染控制技术研究”[K99-05-35-01]; 湖北省自然科学基金[99J122]资助

作者简介: 沈宏(1978—),女,武汉市人;硕士研究生;研究方向是环境生态化学

通讯作者: 周培疆

系统的初级生产者,藻类能通过光合作用,为无脊椎动物、鱼类、水鸟等生物提供氧和食物,其种类多样性和初级生产量直接影响水生生态系统的结构和功能。另外,藻类对毒物敏感、易获得、个体小、繁殖快,在较短时间内可得到化学物质对藻类许多世代及种群水平的影响评价,是一个很好的测试生物^[1],有些藻类如斜生栅藻(*Scenedesmus obliquus*)等被国际经济合作与发展组织(OECD)规定为藻类阻碍生长实验测试的标准藻种。

开展环境有机污染物对藻类生长作用的影响的研究,对控制藻类水华暴发,监测和消除有机污染物的污染,保持水生生态系统的平衡以及对有机物进行生态风险评价都有着十分重要的意义。关于氮、磷等营养盐以及重金属对藻类的生长作用及作用机制等已有许多研究。近年来,有机污染物对藻类的作用已引起了广泛的重视,对其机理的研究也逐渐深入。国内外许多研究者已开展了有关有机污染物对藻类的毒性效应、生长效应以及有机污染物对藻类生长机理等多方面的研究。本文着重介绍了环境中较低浓度和较高浓度的有毒与无毒有机污染物对藻类生长的效应和影响某效应的环境因子两方面的研究进展,同时就目前研究中存在的问题及进一步发展的方向进行了展望。

1 较低浓度环境有机污染物对藻类的生长效应

大量研究结果表明,有机污染物对藻类生长的作用在很大程度上表现为浓度相关性。许多有机污染物在较低浓度(< EC₅₀)时能刺激藻类生长(表1)。

表1 部分较低浓度有机污染物对藻类的生长刺激效应

有机污染物 Organic pollutants	藻类 Algae	浓度(mg/L) Concentration	来源 Source
2,4-D	莱哈衣藻(<i>Chlamydomonas reinhardi</i>)	1.0	[2]
	四尾栅藻(<i>Scenedesmus quadricauda</i>)	0.2, 0.02	[3]
草甘膦(Glyphosate)	四尾栅藻(<i>Scenedesmus quadricauda</i>)	0.02	[3]
乐果(Dimethoate)	普通小球藻(<i>Chlorella vulgaris</i>)	0.4, 0.8, 1.2, 1.6	[4]
对硫磷(Parathion)	三角褐指藻(<i>Phaeodactylum tricornutum</i>)	< 1.5	[5]
二嗪磷(Diazinon)	蛋白核小球藻(<i>Chlorella pyrenoidosa</i>)	1.0	[6]
	羊角月芽藻(<i>Selenastrum capricornutum</i>)	1.0	[6]
Patoran	栅藻(<i>Scenedesmus acutus</i>)	1.0	[7]
苯酚(Phenol)	极大螺旋藻(<i>Spirulina maxima</i>)	100	[8]
	铜绿微囊藻(<i>Microcystis aeruginosa</i>)	50	[9]
丙溴磷(Profenofos)	青岛大扁藻(<i>Platymonas helgolandica</i>)	0.4	[10]
	三角褐指藻(<i>Phaeodactylum tricornutum</i>)	0.1	[10]
杀螟松(Fenitrothion)	莱哈衣藻(<i>Chlamydomonas reinhardi</i>)	1	[2]

毒物在较低浓度下出现这种增益现象,是其在无毒情况下的刺激反应,被称之为“毒物的兴奋效应”(Hormesis)^[11]。较低浓度的有机污染物能促进藻类生长,是因为(1)藻类

能直接利用有机污染物作为生长的营养源。如磷胺(Phosphamidon)在较低浓度时可作为颤藻的碳源和磷源而促进颤藻的生长^[12],螺旋藻(*Spirulina*)能以葡萄糖和醋酸盐作为碳源从而促进其迅速增殖^[13, 14]; (2) 有些有机物能增加藻体内某些酶的活性,从而促进藻类的生长。如乐果在较低浓度时可作为磷源而刺激普通小球藻(*Chlorella vulgaris*)生长,体内的APA(碱性磷酸酶)也会增加,APA可使磷酸酯水解成无机磷酸盐被藻类利用^[4]; (3) 有机物对藻类的毒害和藻类降解有机污染物两个过程同时存在,在浓度较低时降解过程占主导地位,因而在整体上表现为降解,降解产物可作为促进藻类生长的营养源^[15]。如甲黄隆(Metsulfuron methyl)、氯黄隆(Chlorosulfuron)、苄黄隆(Bensulfuron methyl)的降解产物甲磺胺、氯磺胺、苄磺胺在较低浓度时均能促进蛋白核小球藻的生长^[16],鱼腥藻HB1017能降解LAS(十二烷基苯磺酸钠)使其作为生长的碳源^[17]; (4) 较低浓度的有机污染物能使藻细胞DNA、RNA和蛋白质合成的增加^[5]; (5) 较低浓度的有机污染物可引起藻细胞脂质过氧化程度在一定范围内升高,而此时脂质过氧化程度的升高并不引发对细胞的伤害而且具有刺激藻细胞生长繁殖的作用^[10]。

2 较高浓度环境有机污染物对藻类的生长作用

2.1 较高浓度环境有机污染物对藻类生长的影响

在许多藻类毒性试验中会发现,随着测试时间的延长,EC₅₀值会发生变化。一般说来,较高浓度的有机污染物对藻类的影响有以下三种情况:

(1) 在较高浓度时,有机污染物对藻类细胞的生长产生不可逆的破坏作用,即藻类细胞受毒害,脱色,生长完全受到抑制,随着时间的延长,毒性增大。丙酮对蛋白核小球藻的EC₅₀值为3.5(24h)、3.0(48h)、3.3%(96h)^[18]。杀草快(Diquat)对普通小球藻、铜绿微囊藻、四尾栅藻和隐藻(*Cryptomonas azolini*)的毒性,7d的EC₅₀值比3d的EC₅₀值小^[19]。较高浓度的对硫磷严重抑制三角褐指藻、扁藻(*Platymonas* sp.)和盐藻的生长^[5, 20]。2-萘酚在25mg/L时完全抑制了普通小球藻的生长,毒性也随时间的延长不断加深^[21]。

较高浓度的有机污染物完全抑制藻类生长,毒害藻细胞,主要是因为有机污染物破坏了藻类的细胞膜^[15, 18, 20],使细胞膜的透性增加,环境中的有毒物质能顺利进入细胞,与某些生命活性物质发生反应,加大了对藻类的毒害。乐果影响藻细胞膜的流动性,使PSB(Phycobilisomes,藻胆体)从PS II(光系统II)反应中分离,抑制类囊体膜上ATP的活性,从而抑制光合作用的电子传递,使PS II荧光增加而光合作用固碳减少^[22]。有机磷农药对海洋微藻的毒性主要是因为有机磷农药积累在藻体内使藻细胞的胆碱酯酶活性下降,细胞膜损伤加剧,并引起细胞蛋白外流,从而影响微藻的生长繁殖而导致死亡^[23]。较高浓度的有机污染物还能引起藻细胞内活性氧的大量产生,进而引起膜脂过氧化及细胞伤害,抑制藻细胞生长。SOD和POD活性的降低是微藻细胞内活性氧过量产生,导致细胞膜脂过氧化及细胞伤害的主要原因之一^[10]。

(2) 在较高浓度有机污染物存在之初,藻类的生长受到明显的抑制,但随着时间的延长,有机污染物的毒性降低,细胞结构恢复正常,甚至还促进生长。在二嗪磷(Diazinon)长期处理下,聚球藻(*Syechococcus leopoliensis*)出现停滞期延长,而后促进生长^[6]。单甲脒(Monoformamidine)对斜生栅藻的毒性随试验时间延长而下降,不但细胞数量上升,细胞内

含物质及形态也不断恢复,甚至还促进藻类繁衍^[1];萘对普通小球藻的毒性随时间延长而逐渐降低^[21];甲胺磷对小球藻 24、48、96hr 的 EC_{50} 值分别为 767、92.3、104.5,且随时间的延长而增加^[24]。有机污染物对藻类的生长起初抑制,而后毒性降低是因为 ①有机污染物的生物降解;②有机污染物自身分解;③藻类对有机污染物的适应性;④因藻细胞的生长而使进入细胞内的有机污染物的量减少^[25]。

(3) 随着时间延长,有机污染物的毒性随之降低,但一段时间后,毒性又开始增加。在许多毒性试验中都可以看到这种现象^[21,24]。这可能是由于毒物作用时间延长,藻细胞分裂速度减慢,死亡速度增加,导致 EC_{50} 值降低;也可能由于培养时间的延长,而在此期间又不添加营养物,导致营养的缺乏或其他理化条件的改变,进而藻细胞数减少, EC_{50} 值下降^[24]。

2.2 较高浓度环境有机污染物对藻类毒害的差异性

不同的藻类,由于其自身的生理原因,对有机污染物的敏感性也各不相同。同种有机污染物对不同藻类的毒性不一样。一般说来,绿藻对毒物的耐药性比其他藻类更强。如绿藻比其他藻类对磺酰脲类化合物的耐药性强^[26];许多抗生素对铜绿微囊藻的 EC_{50} 值比对羊角月芽藻的 EC_{50} 值低很多,相差 2 到 3 个数量级^[27]。这是因为不同的藻类,细胞的结构不同。绿藻的不同属对有机污染物的敏感程度也有很大差异,如氯黄隆对栅藻和小球藻 96h 的 EC_{50} 值分别为 0.22mg/L 和 54.0mg/L^[26]。不同的有机污染物,毒害藻类的靶位机理也不尽相同,如莠去津(Atrazine)对藻类的毒害作用的靶位在 PS II,而玉农乐(Nicosulfuron)对藻类的毒害作用的靶位则在 ALS(乙酰乳酸合酶),它们对藻类生长的影响也是不同的^[28]。

同一类有机污染物对藻类的毒性也有很大差异,这主要与有机污染物的分子结构有关。如取代基在多酚上的位置不同,对铜绿微囊藻的毒性也不同,酚基在邻位和对位的多酚比酚基在间位的多酚毒性大^[29]。有机磷农药的分子结构和它对扁藻的毒性有如下关系:①以 P 为中心的共价结合 S 被 O 取代时,毒性明显增大;②与磷酸基上 O 结合的 R_1 、 R_2 烷基分子量越大,结构越复杂,毒性越大;③ R_3 为亚烷基时,农药的渗透性强^[23]。近年来,用 QSAR(Quantitative Structure—Activity Relationship)方法^[30–33]研究有机物对藻类的毒性效应发现,有机物的分子结构及理化性质与有机物对藻类的 EC_{50} 值密切相关。“受体学说”认为:有机物对生物产生效应是由于它与生物体内的受体发生了相互作用,这种作用通常包括电核迁移、氢键等。用 QSAR 方法研究表明有机化合物对水生生物的毒性大小主要由两个环节所决定:一是化合物在生物体内的富集能力;二是毒性物质与受体物质发生相互作用的能力^[34]。

3 影响有机污染物对藻类生长作用的环境因子

有机污染物对藻类的生长的影响,除了与有机污染物的浓度有很大关系,同时还受到很多环境因子的影响。如光照强度、温度、pH 值和营养盐等。

光照强度是影响有机污染物对藻类生长的重要环境因子。光照强度不同时,有机污染物对藻类的毒性效应和生长效应也不同。草达灭(Molinate)对球孢鱼腥藻(*Anabaena*

sphaerica) 的抑制作用在 3000lx 的光照下比 300lx 的光照强度下更强^[35]。在光照强度为 2000—4000lx 时, 葡萄糖和醋酸盐能显著增加螺旋藻细胞的增长, 超过此范围, 螺旋藻生长速率明显降低甚至停止, 而在此范围内, 葡萄糖和醋酸盐浓度越高, 需要的光照强度就越高, 而光照强度越高, 藻细胞内藻蓝蛋白(Phycocyanin)的含量也越高^[13]。因为藻蓝蛋白是光合作用重要的附属部分, 光照强度影响藻蓝蛋白的结构和含量^[13, 14]。光照强度影响藻类生长还因为有些有机污染物能吸收紫外光, 在催化剂存在的情况下发生光化学反应, 光照强度不同, 有机污染物在水中的光解程度也不同。

温度对藻类生长也有明显的影响, 每种藻类都有自己适宜生长的温度范围。一般说来, 适宜藻类生长的温度能减小有机污染物对藻类的毒性而刺激藻类生长。但有的有机污染物如莠去津, 随温度升高其毒性增大^[36]。

pH 值能改变有机污染物在自然条件下的降解速度、稳定性及溶解性等, 从而影响到有机物对藻类的生长作用。二嗪磷在 pH3.1 时半衰期仅有 12h, 而在 pH7.4 时为 184d^[21]。单甲脒在酸性条件下稳定而碱性条件下极不稳定^[1]。氯黄隆在 pH5 时溶解度为 0.3g/L, 而 pH7 时溶解度为 28g/L, 当 pH 值从 6.5 降到 5.0 时, 氯黄隆对小球藻的毒性增加^[26]。

营养盐影响有机污染物对藻类的生长作用主要是因为改变了藻类的生长状况, 在一些毒性研究中发现, 低剂量的营养盐能减小有机污染物对藻类的毒性。低剂量的 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 、 SO_4^{2-} 都能减小乐果对鱼腥藻的毒性而促进其生长^[37]。纯 2,4-D 的毒性比胺盐形式的 2,4-D 的毒性大, 因为一部分胺盐可作为氮源刺激藻细胞生长^[24]。大量的研究表明, 氮、磷是藻类生长的重要限定因子, 如 2,4-D 对硅藻的毒性在磷不足的介质中比在磷过剩的介质中大^[38]。

伴生物物质对有机污染物对藻类的生长作用的影响很大。有研究表明^[39], 一种腐烂的大麦和稻草的萃取物, 木质素含量很高, 能在浓度很低时($< 0.05\%$) 完全抑制微囊藻和栅藻的生长; 而新鲜的大麦和稻草的萃取物在 $< 1\%$ 时能促进微囊藻的生长。因为腐烂的大麦和稻草中有一种抗藻活性物质可抑制藻类的生长。还有研究表明^[40], 降解稻草对铜绿微囊藻、颤藻和鱼腥藻的生长有明显的抑制效应, 而灭菌的降解稻草对这些藻类的生长没有抑制效应。

4 展 望

许多研究都表明, 环境有机污染物对藻类生长的作用表现为: 较低浓度的有机污染物对藻类生长有刺激和促进作用; 而较高浓度的有机污染物对藻类一般都有毒害作用, 但也有随时间延长, 毒性降低, 甚至对藻类有刺激作用。但是为什么同一种有机污染物在浓度上会造成对藻类完全不同的生物学效应, 目前对其机理的解释都带有猜测性, 并不十分清楚, 仍需继续研究。

目前有机污染物对藻类的毒理学方面的研究较多, 但是, 在自然水体中, 有机污染物的浓度一般是比较低的。所以, 开展较低浓度的有机污染物对自然水体中藻类生长效应的研究, 尤其是有机物污染物对藻类水华暴发的机理方面的研究是非常必要的。另外, 研究有机污染物对藻类的生长作用主要是采用实验方法, 而有机物污染物的种类繁多, 且对

藻类作用的机制复杂多变,对有机污染物一一进行实验是不可能的,因此,应用 QSAR 进行毒性预测,从构效关系上阐述有机物对藻类的毒性效应和致毒机理是一种非常有效的方法。目前在研究有机污染物对藻类的毒性效应中使用较多,但在研究有机物对藻类的生长效应及其机理方面几乎是一片空白,可以在今后的研究中应用 QSAR 方法,寻找与其生物活性间的定量结构—活性相关关系,从构效关系上解释低浓度有机物对藻类生长的刺激效应(Hormesis)。

目前研究有机污染物对藻类生长的影响以及毒性等研究大多集中在不同有机污染物对不同藻类的单一效应,而在自然状态下,多种有机污染物可同时存在于水生生态系统,这些有机污染物共存于水体对藻类生长产生的效应是非常复杂的,与单一有机污染物的作用结果有很大的差异,并且更接近实际的环境的情况。因此,加强低浓度多种有机污染物联合效应的研究尤为重要。

水体污染和藻类生长繁殖有一定的相关性,即在受不同浓度、不同种类环境有机污染物污染的水体中,藻类的数量和种群组成以及优势种都发生相应的变化。在今后的研究中,还应考虑有机污染物对不同藻类种群的生长、竞争以及调控的作用机理等方面的研究,这对藻类水华暴发的预测和控制将有十分重要的意义。

参考文献:

- [1] 高玉荣. 杀虫剂单甲脒对绿藻的毒性研究[J]. 环境科学学报, 1995, 15(2): 92—98
- [2] Wong P K, Chang L. The effect of 2, 4 D herbicide and organophosphorus insecticides on growth, photosynthesis, and chlorophyll a synthesis of *Chlamydomonas reinhardtii* (mt+) [J]. *Environ. Pollut.*, 1988, 55: 179—189
- [3] Wong P K. Effect of 2, 4 D, glyphosate and paraquat on growth, photosynthesis and Chlorophyll a synthesis of *Scenedesmus quadricauda* Berb 614 [J]. *Chemosphere*, 2000, 41: 177—182
- [4] Tian S Z, Liu Z, Weng J H, et al. Growth of *Ghlorella vulgaris* in cultures with low concentration dimethoate as source of phosphorus [J]. *Chemosphere*, 1997, 35(11): 2713—2718
- [5] 唐学玺, 李永祺. 对硫磷对三角褐指藻核酸和蛋白质合成动态的影响[J]. 生态学报, 2000, 20(4): 598—600
- [6] Doggett S M, Rhodes R G. Effects of a diazinon formulation on unialgal growth rates and phytoplankton diversity [J]. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 1991, 47: 36—42
- [7] Edlb Response of freshwater algae (*Scenedesmus* spp.) to phenylurea herbicides [J]. *Water Air and Soil Pollution.*, 1991, 55: 295—303
- [8] 李建宏, 袁俊, 倪霞, 等. 酚对极大螺旋藻生长的影响[J]. 水生生物学报, 2001, 25(3): 293—296
- [9] 司友斌, 岳永德, 吴在鹏, 等. 铜绿微囊藻对苯酚的富集与降解[J]. 安徽农业大学学报, 2000, 27(3): 269—271
- [10] 谢荣, 唐学玺, 李永祺, 等. 丙溴磷影响海洋微藻生长机理的初步研究[J]. 环境科学学报, 2000, 20(4): 437—477
- [11] Stebbins A R D. Hormesis the stimulation of growth by low of inhibitors [J]. *Sci. Tot. Environ.*, 1982, 22: 213—234
- [12] Perona E. Alteration of dinitrogen fixing and metabolism in cyanobacterium *Anabaena* PCC7119 by phosphamidon [J]. *Environ. and Botany.*, 1991, 31(4): 479—488
- [13] Chen F, Zhang Y M, Guo S Y. Growth and phycocyanin formation of *Spirulina platensis* in photoheterotrophic culture [J]. *Biotechnology Letters*, 1996, 18(5): 603—608
- [14] Zhang Y M, Chen F, Guo S Y. The growth and phycocyanin content of *Spirulina platensis* on different carbon sources in mixotrophic culture [J]. *Journal of South China University of Technology*, 1996, 24(6): 130—133
- [15] 沈国兴, 严国安, 彭金良, 等. 农药对藻类的生态毒学研究 II [J]. 环境科学进展, 1999, 7(6): 131—140
- [16] Wei L P, Yu H X, Sun Y, et al. The effects of three sulfonylurea herbicides and their degradation products on the green algae

- Chlorella pyrenoidosa* [J]. *Chemosphere*, 1998, **37**(4): 747—751
- [17] Yan G A, Jiang J W, Wu G, et al. Disappearance of linear alkylbenzene sulfonate from different culture with *Anabaena* sp. HB1017[J]. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 1998, **60**: 329—334
- [18] Stratton G W. Effect of the solvent acetone on membrane integrity in the green alga *Chlorella pyrenoidosa* [J]. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 1989, **42**: 754—760
- [19] Philips E J. Effect of the herbicide diquat on the growth of microalgae and cyanobacteria [J]. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 1992, **49**: 750—756
- [20] 唐学玺, 李永祺, 黄健. 对硫磷对扁藻和杜氏藻膜脂的过氧化与脱酯化伤害[J]. 海洋与湖沼, 1999, **30**(3): 295—299
- [21] 沈国兴, 严国安, 余 新, 等. 蔡及其衍生物对普通小球藻的毒性效应[J]. 水生生物学报, 1999, **23**(5): 460—468
- [22] Mohapatra P K, Schubert H, Schiewer U. Effect of dimethoate on photosynthesis and pigment fluorescence of *Syntheticystis* sp. PCC 6803 [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 1997, **36**: 231—237
- [23] 汝少国, 李永祺, 敬永畅. 十种有机磷农药对扁藻的毒性[J]. 环境科学学报, 1996, **16**(3): 337—341
- [24] 王翠红, 徐建红, 辛晓芸, 等. 六种有机磷农药及三种重金属离子对小球藻的毒性的研究[J]. 河南科学, 1999, **17**(专辑): 108—110
- [25] Mohapatra. Growth pattern changes of *Chlorella vulgaris* and *Anabaena doliolum* due to toxicity of dimethoate and endosulfan [J]. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 1992, **49**: 576—581
- [26] Sabater C, Carrasco J M. Effect of chlorsulfuron on growth of three freshwater species of phytoplankton [J]. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 1997, **58**: 807—813
- [27] Halling Sorensen B. Algal toxicity of antibacterial agents used in intensive farming [J]. *Chemosphere*, 2000, **40**: 731—739
- [28] Lehoullanger C, Rimet F, Lacotte M H, et al. Effect of atrazine and nicosulfuron on freshwater microalgae [J]. *Environment International*, 2001, **26**: 131—135
- [29] Nakai S, Inoue Y, Hosomi M. Algal growth inhibition effects and induction modes by plant producing phenols [J]. *Wat. Res.*, 2001, **35**(7): 1851—1859
- [30] Blum D J W, Speece R E. Determining chemical toxicity to aquatic species (the use of QSARs and surrogate organisms) [J]. *Environ. Sci. Technol.*, 1990, **24**(3): 284—293
- [31] Hemmers J. Prediction of environmental toxicity based on structure activity relationships mechanistic information [J]. *Science of the Total Environment*, 1995, **171**(1-3): 235—242
- [32] Lipnick R L. Research needs in developing structure activity relationships [R]. In: Bahner R C., Hansen D. J. ed, Aquatic Toxicology and Hazard Assessment Eighth Symposium. Philadelphia: ASTM Special Technical Publication, 78—82
- [33] Lipnick R. L., Baseline Toxicity QSAR Models: A means to assess mechanism of toxicity for aquatic organisms and mammals [R]. In: Bahner R. C., Hansen D. J. ed, Aquatic Toxicology and Hazard Assessment: Eighth Symposium. Philadelphia: ASTM Special Technical Publication, 610—619
- [34] Lu G H, Yuan X, Zhao Y H. QSAR study on the toxicity of substituted benzenes to the algae [J]. *Chemosphere*, 2001, **44**: 437—440
- [35] Yan G A, Yan X, Wu W. Effects of the herbicide molinate on mixotrophic growth, photosynthetic pigments, and protein content of *Anabaena sphaerica* under different light conditions [J]. *Ecotoxicol and Environ Safety*, 1997, **38**: 144—149
- [36] Kasai F, et al. Effect of simetryne on growth of various freshwater algal taxa [J]. *Environ. Pollut.*, 1993, **79**: 77—83
- [37] Mohapatra P K. Different effect of dimethoate toxicity to *Anabaena doliolum* with change in nutrient status [J]. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 1990, **48**: 223—229
- [38] Okay O S, Gaines A. Toxicity of 2, 4 D acid to phytoplankton [J]. *Wat. Res.*, 1996, **30**(3): 688—696
- [39] Ball A S, Williams M, Vincent D, et al. Algal growth control by a barley straw extract [J]. *Bioresource Technology*, 2001, **77**: 177—181
- [40] 万 宏, 张 均. 降解稻草对蓝藻生长的抑制作用[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2000, **36**(4): 485—488