

doi: 10.3969/j.issn.2095-0780.2011.02.013

· 综述 ·

水中丝状藻类有害藻华的形成与对策

陈孝花, 潘连德, 张饮江

(上海海洋大学省部共建水产种质资源发掘与利用教育部重点实验室, 上海 201306)

摘要: 文章通过对常见丝状藻类及其形成藻华形态的描述, 综述丝状藻藻华的形成条件及危害, 说明各种水体中控制丝状藻藻华的必要性及紧迫性, 概述了常见控制藻类药物和药物的致毒机理, 为丝状藻类及其藻华的控制提供参考。

关键词: 丝状藻类; 有害藻华; 药物控制; 中毒机理

中图分类号: S 917.3

文献标志码: A

文章编号: 2095-0780-(2011)02-0077-06

Formation and countermeasures of harmful filamentous algae in water

CHEN Xiaohua, PAN Liande, ZHANG Yinjiang

(Key Lab. of Exploration and Utilization of Aquatic Genetic Resources, Shanghai Ocean University,
Ministry of Education, Shanghai 201306, China)

Abstract: The paper introduces common filamentous algae and the morphological characteristics of their algal bloom, summarizing the forming conditions and harms of filamentous algae bloom which is necessary and urgent to control in various waters. Moreover, it overviews the common controlling drugs and toxicity mechanism, which provides references for controlling filamentous algae and their blooms.

Key words: filamentous algae; harmful algal bloom; drug control; toxicity mechanism

随着富营养化程度加剧, 水体中的藻类生物量愈来愈大, 其中优势种类很容易形成藻华, 生态平衡遭到破坏时成为水体中的有害藻华。单胞藻类的藻华通称“水华”, 微囊藻 (*Microcystis*) 藻华俗称“蛤蟆被、蛤蟆皮”。丝状藻的藻华俗称为“青苔、青泥苔、水毛子”。由于人为干预, 导致了湖泊、水库、河流以及近海水体中营养物质过量, 从而引起水体藻类的大量生长, 形成藻华, 如滇池和太湖的蓝藻 (*Cyanophyta*) 水华, 为危害十分严重的单胞藻藻华案例, 而丝状藻类的大量生长、繁殖, 并形成的藻华, 对水体及水生生物本身造成了一定的危害^[1]。研究发现, 人工湿地维系的景观水体^[2]、种草养殖河蟹 (*Eriocheir sinensis*) 的水体^[3]、养鱼池塘^[4]、稻田^[5]、种植观赏水草的池塘^[6]等出现了丝状藻藻华泛滥现象, 产生不良

影响, 日渐严重。文章通过对丝状藻类藻华基本形态、发生条件及危害、药物的控制及药物毒理学方面的研究成果汇总和分析, 为了解相关研究成果, 探讨丝状藻藻华控制提供参考。

1 丝状藻常见的种类及其藻华形态

春、夏季节是丝状藻类容易大量繁殖的时期, 开始是在浅水底处萌发生长, 渐渐蔓延开来, 严重时像一张巨网布满整个池塘, 经过一段时间变成棉絮状, 漂浮水面, 尤其晴好天气面光充沛时水面随处可见^[4]。形成丝状藻藻华的藻类主要隶属于绿藻门、蓝藻门、黄藻门等^[1-8], 仅仅观察丝状藻藻华的外部形态并不能分辨其属、种, 必须通过显微观察来确定, 藻华的形态和色彩有所不同 (表1)。

收稿日期: 2010-08-07; 修回日期: 2010-10-09

资助项目: 上海市科技兴农项目 (沪农科推字 2006-3-5); 上海市教育委员会重点项目 (07ZZ135); 上海市重点学科建设项目 (Y1101); 上海市科委世博专项 (05dz05823)

作者简介: 陈孝花 (1986-) 女, 硕士研究生, 从事水产动物医学研究。E-mail: xhchen19@hotmail.com

通讯作者: 潘连德, E-mail: ldpan@shou.edu.cn

表1 水体中常见的丝状藻类及其藻华形状

Tab.1 Common filamentous algae in water and their algal blooms' morphology

门 division	属 genus	藻华形状 algal blooms' morphology
绿藻门 Chlorophyta	水绵属 <i>Spirogyra</i>	云朵状，翠绿色、沉水和漂浮水面
	双星藻属 <i>Zygnema</i>	云朵状，翠绿色、沉水和漂浮水面
	转板藻属 <i>Mougeotia</i>	云朵状，翠绿色、沉水和漂浮水面
	水网藻属 <i>Hydrodictyon</i>	云朵状，翠绿色、沉水和漂浮水面
	刚毛藻属 <i>Cladophora</i>	翠绿色、附池壁和水底
	毛枝藻属 <i>Stigeoclonium</i>	翠绿色、附池壁和水底
	鞘藻属 <i>Oedocladium</i>	翠绿色、附池壁和水底
蓝藻门 Cyanophyta	浒苔属 <i>Enteromorpha</i>	翠绿色、附池壁和水底
	席藻属 <i>Phormidium</i>	云朵状，翠绿色、沉水和漂浮水面
黄藻门 Xanthophyta	鞘丝藻属 <i>Lyngbya</i>	云朵状，翠绿色、沉水和漂浮水面
	黄丝藻属 <i>Tribonema</i>	云朵状，翠绿色、沉水和漂浮水面

2 丝状藻藻华形成条件及其危害

2.1 形成条件

丝状藻类在管理不善的池塘中大量繁殖，主要表现在池塘中存有积水，开春没有排干；池塘清整消毒后，没有做好肥水工作，致使水质过清；水位较浅和光照较强；水源中滋生较多青苔、移栽水草时带入；大量施肥和过量投饵^[1,7]。再加上连续几天的晴朗天气，容易造成丝状藻类的迅速繁殖。

2.2 产生危害

丝状藻类的大量繁殖对养殖水体造成的危害相当大，1) 消耗水中的营养物质，使池水严重变瘦，还加剧了养殖水体通风及光照条件的持续恶化，使池中的浮游生物增殖受阻，降低生物多样性，从而影响养殖动物的生长；2) 至夜间会消耗大量氧气，引起池水缺氧，造成鱼、虾、蟹、贝类因缺氧而死亡或影响其正常生长；3) 随着气温、水温的升高，藻类发生大量死亡，腐烂变质，使池底散发一种恶臭味，产生许多有害物质，致使水生动物免疫能力降低，抵抗力减弱，引发病害^[4]。同时，丝状藻藻华对已经起水的鱼、虾、蟹苗也会构成很大威胁，容易使钻入其中的虾、蟹被缠住而死亡。虾、蟹腹部、额部、基关节附着丝状藻类，会使虾、蟹活动困难，很少进食，严重时导致窒息死亡；丝状藻藻华变黄发白，有的沉底变黑，使之散发一种恶臭味，极易引起池虾泛塘。因此，必须有效地对养殖池塘中的丝状藻藻华进行预防和控制。丝状藻藻华腐烂时不仅导致水质恶化还影响其他生物的生长。李敦海等^[9]研究发现在封闭水体中，大量丝状绿藻的腐烂严重影响到沉水植物黑藻的生长，甚至使其全部死亡；丝状绿藻的腐烂引

起水体 pH 下降，穿透到水体下的光照减弱，水体高锰酸钾指数上升、溶解氧降低、总氮和总磷升高。

丝状藻的生长、繁殖及消亡，危害养殖动物生长、存活和种植水草的生长、繁殖，导致水质条件的恶化，乃至破坏生态环境，因此应控制丝状藻类的生长及丝状藻藻华的形成。

3 丝状藻藻华的控制及其药物（效果）

目前，常用的控制藻类的方法主要有物理法^[10]、生物法^[11-14]和化学法。化学法是化学药剂对藻类细胞产生破坏和抑制生物活性从而进行杀灭控制藻类的方法，由于丝状藻类藻华爆发速度很快，化学药剂除藻法显示了其独特的优越性，如除藻速度快、方法简便、效果显著，因此，仍然是藻华治理研究的热点和实际应用的首选^[15]。常用的药物主要包括重金属化合物和有机类药物。研制和开发控制有害藻华的无毒、高效、环保、食品安全的新药，已经成为业内重点。

3.1 铜（Cu）类除藻剂

许多重金属化合物的存在对藻类具有毒性和危害，生产上常用硫酸铜（CuSO₄）作为控制藻华的药物。有研究表明，1.5 mg·L⁻¹的铜离子（Cu²⁺）对铜绿微囊藻（*Microcystis marginata*）表现出极为明显的致毒效应，是杀灭铜绿微囊藻的最佳有效成分^[16]。而李坤等^[17]研究表明 Cu²⁺ 对巴夫金藻（*Monochrysis lutheri*）生长抑制程度最强，其毒害 EC₅₀（半数效应质量浓度）为 15.0 mg·L⁻¹，超过 50 mg·L⁻¹时，单胞藻停止生长。以上表明，重金属离子的毒性与藻的种类有关。另有研究表明，重金属对植物体的毒害性与总积累量无关，而与游离的金属离子浓度关系密切^[18]。

CuSO_4 在应用过程中存在一系列的问题, CuSO_4 会引起鱼类的蓄积性中毒, 造成肝和肾组织的损害, 影响鱼的生长。因此, CuSO_4 不能经常使用, 只有在有害藻类高密度出现时作为应急药物使用^[16]。

MURRAY-GULDE 等^[19]对 3 种 Cu 类除藻剂的有效性和安全性做了系统的试验研究。表明 Cu 类杀藻剂对非目标物种的长期累积影响可以不考虑, 而最初暴露 24 h 的毒性作用则应当重视。MASTIN 和 RODGERS^[20]的研究证实了与 CuSO_4 比较, 络合铜 (clearigate, cutrine-plus) 杀藻剂对非目标物种具有更高的安全性, 其中以 cutrine-plus 为最高。试验结果还表明, 大型溞 (*Daphnia magna*) 是 4 种试验动物中最敏感的物种。

金属 Cu 类除藻剂存在毒性大、环境污染等诸多弊端, 选择络合铜可以降低以上不利因素, 但应该作为应急药物使用, 不作为主要的控藻药物, 避免长期使用。实践证实, 在水草的水体不能使用金属铜类和络合铜除藻剂, 其在水草的杀伤力十分强烈, 甚至影响延续到第 2 年。种草养蟹池塘、生态水景池塘、种草池塘等水体不能使用这种除藻剂。

3.2 异噻唑啉酮类除藻剂

异噻唑啉酮属于非氧化性杀生剂, 具有高效、广谱、适用 pH 广等优点, 并对真菌、细菌、藻类、软体动物等有良好的杀灭效果。当异噻唑啉酮的质量浓度大于 $0.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 3 d 后对棕囊藻 (*Phaeocystis globosa*) 的去除率达到了 80% 以上^[21]; 另在海水环境下, 异噻唑啉酮在 $2.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 这样的低质量浓度下对纯培养的塔胞藻 (*Pyramidomonas* sp)、青岛大扁藻 (*Platymonas hegoalandica*)、叉鞭金藻 (*Dicrateria inornata*)、新月菱形藻 (*Nitzschia closterium*) 有较高的杀灭效果。值得注意的是, 异噻唑啉酮的生物毒性试验的结果表明异噻唑啉酮的毒性小, 对卤虫无节幼体的 96 h LC_{50} (半数致死质量浓度) 为 $10.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[22]。

异噻唑啉酮为主成分的除藻剂具有弥补金属 Cu 类和络合铜除藻剂的不足, 对水草的杀伤较小, 安全性提高, 在工业和生活用水的有害藻华控制上应用广泛。

3.3 对羟基苯甲酸类除藻剂

对羟基苯甲酸是重要的化感物质, 对植物的生长发育具有他毒和自毒作用。张庭廷等^[23]研究表明在可抑制铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 的最大浓度范围内 ($0.8 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$), 通过对鱼腮、肌肉、肝脏以及血液等多种生化指标分析证明, 对羟基苯甲酸对鲤 (*Cyprinus carpio*) 没有明显的毒性。

对羟基苯甲酸属于植物的次生代谢物, 在自然水体能被生物降解, 因而不会导致二次污染的现象^[23]。

3.4 四烷基络合碘除藻剂

兼具了氧化性和非氧化性除藻剂的特性, 具有渗透力强和药效期长的优点。试验研究表明, 当四烷基络合碘的

质量浓度等于或大于 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 除藻率可达 80% 以上; 当其质量浓度增加到 $35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 第 5 天除藻率几乎达到 90%^[24]。

四烷基络合碘用于藻类生物灭杀具有速效、低毒安全、性能稳定、药效期长等优点, 同时又避免了藻类对单一除藻剂产生抗性, 是一种较理想的环保型除藻剂。

3.5 碘伏

碘伏 (povidone-iodine, PVP-I) 中的自由碘具有杀藻灭菌作用, PVP-I 是一种环保型除藻剂, 对海洋生态系统不会产生不良的影响, PVP-I 中的聚乙烯吡咯烷酮 (PVP) 能缓慢释放出自由碘, 不会因为局部浓度过大而伤害其他生物。单独使用时具有一定的除藻能力, 在棕囊藻指数生长前期加入碘伏除藻剂 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 可以有效地去除和控制棕囊藻^[21]。另外, 棕囊藻具有溶血性毒素, PVP 具有与毒素结合降低其毒性的作用。

对羟基苯甲酸、四烷基络合碘、PVP-I 对其他水生植物的影响小, 但使用量大, 相对成本增加, 只适用于较小水体, 如景观水体等。

4 控制丝状藻藻华药物的毒性和致毒机制

毒性机理有 2 种, 即反应性和非反应性毒性。反应性毒性有特殊的分子模型和分子结构。非反应性毒性脂溶性越高、毒物通过细胞膜的能力越大, 毒性就越大^[24]。无论是反应性还是非反应性, 药物都对藻细胞的机构和功能造成了不同程度的伤害。

4.1 破坏细胞壁或膜结构

细胞壁和细胞膜是藻体防御药物的第一道屏障, 药物可以通过多种方式与细胞壁结合, 改变其通透性或破坏细胞壁结构, 使药物进入藻细胞内, 破坏藻细胞的生理功能。

ANDRADE 等^[25]研究发现, Cu^{2+} 可与 5 种不同的藻类结合; 管越强等^[26]研究发现 Cu^{2+} 主要抑制藻类生长和光合作用, 改变原生质膜的通透性, 使钾离子 (K^+) 从细胞中丧失; 王丙莲等^[27]认为金属离子与藻类的亲和性是导致金属抑制藻类生长的主要原因, 与藻类亲和性强的金属离子对抑制藻类生长的毒性越强。Cu 与硫代基有最强的亲和性, 而镁 (Mg) 最容易与含氧 (O) 的官能团进行紧密结合汞 (Hg)、镉 (Cd) 可引起藻细胞去极化, 膜电阻减小, 分析其原因可能汞离子 (Hg^{2+})、镉离子 (Cd^{2+}) 损伤细胞膜, 膜通透性增加甚至可能完全通透, 钠离子 (Na^+)、 K^+ 跨膜流动而在膜两侧重新分布, 同时胞外重金属离子可经简单扩散作用而进出细胞, 导致细胞膜高度去极化, 膜电阻快速减小。除重金属离子外, 有些化合物的毒性也通过破坏细胞壁来实现。曹西华和俞志明^[28]发现季铵盐类化合物灭杀赤潮异弯藻 (*Heterosigma akashiwo*) 的作用机理是由于其具有强表面活性, 容易吸附在具有膜层结构的藻细胞器表面, 而影响和破坏其正常

功能,导致整个细胞死亡。苏秀榕等^[29]通过对扁藻(*Platymonas*)超微结构的观察,发现重金属对叶绿体的网状结构破坏较严重,几种金属中毒性最严重的是类囊体相互堆积在一起,有轻微的解体。

4.2 自由基伤害

正常细胞活性氧的诱导形成与清除之间存在着动态平衡,一旦平衡被打破,随之而来的是机体实质性的损伤。自由基的增加会导致植物细胞被伤害,自由基首先攻击的是膜系统,膜的双分子层含有不饱和脂肪酸极易被氧化,从而造成膜整体的破坏^[30]。植物体在受到轻度的环境胁迫时,超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)和过氧化物酶(peroxidase, POD)的活性会有所升高,以增强植物对活性氧的清除能力;而当受到重度的逆境胁迫时, SOD 和 POD 的活性又会大幅度地降低,造成活性氧的积累和细胞的伤害。

黄玉上等^[31]发现 Cd^{2+} 诱导植物的过氧化损伤中,自由基和丙二醛(malondialdehyde, MDA)担当了重要角色。MDA 积累多, $\cdot\text{OH}$ 和 O_2^- 等自由基亦可能是高水平。MDA 亦是有害的物质,其能与蛋白质、核酸、氨基酸等活性物质交联,形成不溶性化合物(脂褐素)沉积,干扰细胞内正常的生命活动。而对羟基苯甲酸抑藻的机制可能与其能产生氧离子自由基有关,氧自由基可破坏细胞膜结构改变细胞膜的通透性,致细胞内物质如电解质、蛋白质、核酸以及核苷酸的渗出,并最终使细胞溶解破裂^[23]。有研究表明,1,2,4-三氯苯对藻细胞产生活性氧自由基引起脂质及其他生物大分子的氧化损伤可能是其毒性作用的主要机制^[32]。

4.3 细胞内其他主要物质的变化

4.3.1 叶绿素 藻类细胞3种色素中尤以叶绿素a(chlorophyll a, Chl-a)变化较为敏感,因此一般作为生理毒性指标。 Cu^{2+} 对铜绿微囊藻的抑制是通过抑制藻细胞Chl-a的合成进而降低光合作用而实现的^[25]。单细胞生物受到重金属离子损伤后一些酶的活性被抑制使Chl-a合成量下降。也可能是由于 Cu^{2+} 直接破坏了叶绿体结构和功能,干扰了对营养元素的吸收和转移所致。异噻唑啉酮对棕囊藻细胞的叶绿素影响很明显,能在短时间内破坏其叶绿素,阻碍细胞光合作用进行,最终导致藻细胞的死亡^[23]。

4.3.2 脯氨酸 脯氨酸是植物体内重要的渗透调节物质,对维护细胞水平衡起着重要作用。脯氨酸含量的增加是植物对逆境胁迫的一种生理反映,其含量的变化能体现植物受胁迫的程度^[33]。

4.3.2 脂肪酸和酶类 MOHR等^[34]发现一些除草剂就是通过影响植物体在生长过程中合成的长链脂肪酸来抑制植物生长,由于水生丝状藻类的生长速度最快,其对药物也最敏感;球等鞭金藻(*Isochrysis galbana*)生长抑制物是

通过影响微藻细胞内的某些重要生化成分的合成过程和一些关键酶的活性来实现其抑藻作用,进而影响微藻细胞的生长^[35]。

任何一种药物的致毒机理都不是单一的,是各种机理综合作用的结果。 Cu^{2+} 使藻细胞的体积明显减少,改变蛋白质和叶绿素的结构,还可抑制一些酶的活性^[36]。四烷基络合碘除藻机理是一个很典型的例子。季铵盐可以吸附带负电的藻细胞表面,使藻细胞聚集产生沉淀;在季铵盐渗透破坏藻的细胞壁和原生质后,季铵盐的疏水基和亲水基可以深入细胞的类脂层和蛋白质,导致酶失去活性和蛋白质变性;其长脂肪链可能与藻细胞叶绿素的叶醇基作用,减弱叶绿素与磷脂双分子膜的结合,破坏叶绿素与蛋白质和磷脂结合成稳定复合体、进行光合作用的功能,导致光合作用的降低;季铵盐和碘共同进入藻细胞发生作用,季铵盐可以与蛋白质、酶作用,使其代谢异常,并引起细胞产生自溶而死亡^[15]。

化学灭藻剂虽能杀死藻类,但久用水中会出现耐药的藻类,灭藻剂的效能会逐渐下降,投药的间隔会越来越短,而投加量会越来越大^[37],因此,灭藻剂需及时更换。

5 控制水体中丝状藻藻华的方法及对策

5.1 控制水体的富营养化是基本对策

一旦环境条件合适,丝状藻类可以在几天内大量爆发,应做好预防措施,注意水源引入时不要带入丝状藻类;合理施肥、投饵。一旦发现丝状藻类藻华出现在水体中,应立即采取措施,使用合理的方法控制。为有效地控制丝状藻藻华的爆发,应加强对丝状藻方面的研究,了解其种类和生长习性,选择合适的控藻药物,寻找一定的生态方法控制丝状藻类的爆发。

5.2 养殖水体控制的基本方法

实验室研究发现,在养殖水体中丝状藻藻华的危害相当普遍,目前实行的池塘和湖泊“种草养蟹”生产中“青苔”的危害有春季和夏季2次,春季“青苔”肆虐可以导致水体种草失败,夏季出现可以导致水质恶化,因此,一年中2次的控制效果直接决定河蟹养殖的效益;养殖海参、对虾、缢蛏、紫菜的水体的“绵苔”和浒苔的危害日渐严重;稻田养鱼虾蟹的水体“青苔”的危害远远重于杂草;各种养殖水体无不例外地受到丝状藻藻华和单胞藻藻华的危害,制定相应控制措施已迫在眉睫。经过多年研究和应用,“攀世丝藻沙”(使用方法见产品说明书)具有生态安全和食品安全等优势被广泛应用到“青苔”预防和控制上。同类产品在使用时注意,以 CuSO_4 和络合铜类为主成分的制剂对水草和水生动物都有强烈的伤害,以“扑草净”等除草剂为主成分的制剂对水草和陆生植物的伤害一样,在使用这些产品时一定要了解基本属性,科学使用,避免带来损失。利用“攀世丝藻沙”可有效防治草型生态系统水

体的有害丝状藻藻华, 如近几年来在江苏、安徽、湖北等地有效控制河蟹养殖池塘中的丝状藻类藻华, 并对河蟹和池中种植的水草没有影响。

参考文献:

- [1] 何义进. 青苔的发生与防治 [J]. 科学养鱼, 2005 (2): 84.
HE Yijin. Occurrence and control of lichen [J]. Sci Fish Farming, 2005 (2): 84. (in Chinese)
- [2] PHILLIPS J A. Drifting blooms of the endemic filamentous brown alga *Hincksia sordida* at Noosa on the subtropical east Australian coast [J]. Mar Pollut Bull, 2006, 52 (8): 962–968.
- [3] 周末根, 张菊妹. 河蟹养殖池塘中青苔的控制方法 [J]. 科学养鱼, 2007 (8): 56.
ZHOU Laigen, ZHANG Jumei. Lichen control of river crab aquaculture pond [J]. Sci Fish Farming, 2007 (8): 56. (in Chinese)
- [4] 张成. 鱼塘青苔的防治方法 [J]. 渔业致富指南, 2003 (9): 46–46.
ZHANG Cheng. Prophylaxis and treatment of lichen in fish pond [J]. Fishery Guide to be Rich, 2003 (9): 46–46. (in Chinese)
- [5] 张贵锋. 水绵发生原因分析与防除技术 [J]. 农药科学与管理, 2004, 25 (8): 19–20.
ZHANG Guifeng. The cause of *Spirogyra* and control techniques [J]. Pesticide Sci Administ, 2004, 25 (8): 19–20. (in Chinese)
- [6] 唐思良. 水草缸藻类发生的原因和去除 [J]. 北京水产, 1998 (1): 25.
TANG Siliang. The causes and elimination of algae in water plant tank [J]. J Beijing Fish, 1998 (1): 25. (in Chinese)
- [7] de PAULA S P H, SHANNON M, de NYS R, et al. Integrating filamentous ‘green tide’ algae into tropical pond-based aquaculture [J]. Aquac, 2008, 284 (1/4): 74–80.
- [8] JOHNSON M, SHIVKUMAR S, BERLOWITZ-TARRANT L. Structure and properties of filamentous green algae [J]. Mater Sci Engin, 1996, 38 (1/2): 103–108.
- [9] 李敦海, 史龙新, 李根保, 等. 丝状绿藻腐烂过程对水质和沉水植物黑藻生长的影响实验研究 [J]. 环境科学与管理, 2006, 31 (6): 27–30.
LI Dunhai, SHI Longxin, LI Genbao, et al. Effect of decomposed filamentous green algae on water quality and the growth of submerged macrophyte *Hydrilla verticillata* [J]. Environ Sci Manag, 2006, 31 (6): 27–30. (in Chinese)
- [10] 梁好, 韦朝海, 盛选军, 等. 高铁酸盐预氧化、絮凝除藻的实验研究 [J]. 工业水处理, 2003, 23 (3): 26–29.
LIANG Hao, WEI Chaohai, SHENG Xuanjun, et al. Experimental research of the removing of algae by pre-oxidation with ferrate [J]. Ind Water Treatment, 2003, 23 (3): 26–29. (in Chinese)
- [11] BARRY M J, LOGAN D C. The use of temporary pond microcosms for aquatic toxicity testing: direct and indirect effects of endosulfan on community structure [J]. Aquat Toxicol, 1998, 41 (1/2): 101–124.
- [12] 李雪梅, 杨中艺, 简曙光, 等. 有效微生物群控制富营养化湖泊蓝藻的效应 [J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2000, 39 (1): 81–85.
LI Xuemei, YANG Zhongyi, JIAN Shuguang, et al. Control of algae bloom in eutrophic water by effective microorganisms [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2000, 39 (1): 81–85. (in Chinese)
- [13] 况琪军, 吴振斌, 夏宜. 人工湿地生态系统的除藻研究 [J]. 水生生物学报, 2000, 24 (6): 655–658.
KUANG Qijun, WU Zhenbin, XIA Yi. Study on the removal efficiency of algae by constructed wet land [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2000, 24 (6): 655–658. (in Chinese)
- [14] 李锋民, 胡洪营. 植物化感作用控制天然水体中有害藻类的机理与应用 [J]. 给水排水, 2004, 30 (2): 1–4.
LI Fengmin, HU Hongying. Mechanism of phyto-allelochemicals and its application for harmful algae control in nature water body [J]. Water Wastewater Engin, 2004, 30 (2): 1–4. (in Chinese)
- [15] 肖锋, 尹平河, 赵玲, 等. 两种碘制剂对球形棕囊藻的去除作用 [J]. 暨南大学学报: 自然科学版, 2006, 27 (1): 131–133.
XIAO Feng, YIN Pinghe, ZHAO Ling, et al. Studies on the removal and control of red tide algae *Phaeocystis globosa* by siwanan-luohedian and povidone-iodine [J]. J Jinan Univ: Natural Science, 2006, 27 (1): 131–133. (in Chinese)
- [16] 张树林, 邢克智, 周艳. 铜离子对铜绿微囊藻的急性毒性效应 [J]. 水产科学, 2007, 26 (6): 323–326.
ZHANG Shulin, XING Kezhi, ZHOU Yan. The acute toxicity of copper ion on alga *Microcystis aeruginosa* [J]. Fish Sci, 2007, 26 (6): 323–326. (in Chinese)
- [17] 李坤, 王福强, 孙慎侠, 等. 巴夫金藻耐受 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 毒害作用的研究 [J]. 大连大学学报, 2003, 24 (4): 92–94.
LI Kun, WANG Fuqiang, SUN Shenxia, et al. Study on endurance capacity of *Monochrysis lutheri* to the toxicity of the heavy metal ions [J]. J Dalian Univ, 2003, 24 (4): 92–94. (in Chinese)
- [18] 刘华, 吴国荣, 周耀民, 等. 模拟酸雨引起水体 pH 下降导致 Zn 对金鱼藻的毒害 [J]. 环境科学学报, 2007, 23 (4): 525–529.
LIU Hua, WU Guorong, ZHOU Yaomin, et al. Effects of Zn toxicity on *Ceratophyllum demersum* L under low pH value [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, 23 (4): 525–529. (in Chinese)
- [19] MURRAY-GULDE C L, HEATLEY J E, SCHWARTZMAN A L, et al. Algicidal effectiveness of clearigate, cutrine-plus, and copper sulfate and margins of safety associated with their use [J]. Arch Environ Contam Toxicol, 2002, 43 (1): 19–27.

- [20] MASTIN B J, RODGERS J H, Jr. Toxicity and bioavailability of copper herbicides (clearigate, cutrine-plus, and copper sulfate) to freshwater animals [J]. Arch Environ Contam Toxicol, 2000, 39 (4): 445–451.
- [21] 洪爱华, 尹平河, 赵玲, 等. 碘伏和异噻唑啉酮对球形棕囊藻去除的研究 [J]. 应用生态学报, 2003, 14 (7): 1177–1180.
- HONG Aihua, YIN Pinghe, ZHAO Ling, et al. Povidone-iodine and isothiazolone for removing red tide algae [J]. Chinese J Appl Ecol, 2003, 14 (7): 1177–1180. (in Chinese)
- [22] 张硕慧, 陈轩, 公维民, 等. 异噻唑啉酮的灭藻效应及其生物毒性试验 [J]. 海洋环境科学, 2004, 23 (4): 64–66.
- ZHANG Shuohui, CHEN Xuan, GONG Weimin, et al. Efficacy of killing unicellular algae by isothiazolone and toxicity tests [J]. Mar Environ Sci, 2004, 23 (4): 64–66. (in Chinese)
- [23] 张庭廷, 何梅, 吴安平, 等. 对羟基苯甲酸对铜绿微囊藻的化感效应以及对鲤鱼的毒性作用 [J]. 环境科学学报, 2008, 28 (9): 1887–1893.
- ZHANG Tingting, HE Mei, WU Anping, et al. Allelopathic inhibition of phydroxybenzoic acid on *Microcystis aeruginosa* Kuetz with no toxicological effects on *Cyprinus carpio* Linnaeus [J]. Acta Scientiae Circum Stantiae, 2008, 28 (9): 1887–1893. (in Chinese)
- [24] 高为, 张华, 蔡晓钰. 酮类化合物对斜生栅藻的联合毒性研究 [J]. 江苏环境科技, 2007, 20 (6): 20–25.
- GAO Wei, ZHANG Hua, CAI Xiaoyu. Study on joint toxicity effect to *Scenedesmus Obliquus* of ketones [J]. Jiangsu Environ Sci Technol, 2007, 20 (6): 20–25. (in Chinese)
- [25] ANDRADE S, PULIDO M J, CORREA J A. The effect of organic ligands exuded by intertidal seaweeds on copper complexation [J]. Chemosphere, 2010, 78 (4): 397–401.
- [26] 管越强, 张义科, 陈勇, 等. Cu^{2+} 对钝顶螺旋藻 (*Spirulina platensis*) 的毒性影响 [J]. 河北大学学报: 自然科学版, 2000, 20 (2): 182–184. (in Chinese)
- GUAN Yueqiang, ZHANG Yike, CHEN Yong, et al. Toxic effects of copper ion on *Spirulina platensis* [J]. J Hebei Univ: Natural Science, 2000, 20 (2): 182–184.
- [27] 王丙莲, 孟庆军, 杨俊慧, 等. 藻细胞膜电信号对重金属的快速反应研究 [J]. 生态毒理学报, 2007, 2 (2): 172–177.
- WANG Binglian, MENG Qingjun, YANG Junhui, et al. Study on rapid responses of algae cell membrane electric signal to heavy metals [J]. Asian J Ecotoxicol, 2007, 2 (2): 172–177. (in Chinese)
- [28] 曹西华, 俞志明. 季铵盐类化合物灭杀赤潮异弯藻的实验研究 [J]. 海洋与湖沼, 2003, 34 (2): 201–207.
- CAO Xihua, YU Zhiming. Mechanism of quaternary ammonium compounds extinguishing *Heterosigma akashiwo* [J]. Oceanologia Etlimnologia Sinica, 2003, 34 (2): 201–207. (in Chinese)
- [29] 苏秀榕, 刘照彬, 迟庆宏, 等. 从扁藻超微结构变化研究 Cu、Zn、Se、Cd 离子毒性效应 [J]. 水产科学, 2000, 19 (1): 1–9.
- SU Xiurong, LIU Zhaobin, CHI Qinghong, et al. Studies on the toxicity of Cu, Zn, Se, Cd ion effects the change of ultrastructure of *Platymonas hegolandica* [J]. Fish Sci, 2000, 19 (1): 1–9. (in Chinese)
- [30] 王海涛, 杨祥良, 徐辉碧. 活性氧的信号分子作用 [J]. 生物化学, 2001, 21 (1): 39–41.
- WANG Haitao, YANG Xiangliang, XU Huibi. The role of reactive oxygen species signaling molecules [J]. Biol Chem, 2001, 21 (1): 39–41. (in Chinese)
- [31] 黄玉上, 罗广华, 关荣文. 铬诱导植物的自由基过氧化损伤 [J]. 植物学报, 1997, 39 (6): 522–526.
- HUANG Yushang, LUO Guanghua, GUAN Qiwen. Peroxidation damage of oxygen free radicals induced by cadmium to plant [J]. Acta Botanica Sinica, 1997, 39 (6): 522–526.
- [32] 杜青平, 黄彩娜, 贾晓珊. 1,2,4-三氯苯对斜生栅藻的毒性效应及其机制研究 [J]. 农业环境科学学报, 2007, 26 (4): 1375–1379.
- DU Qingping, HUANG Caina, JIA Xiaoshan. Toxic effects and mechanisms of 1,2,4-Trichlorobenzene on *Scenedesmus obliquus* [J]. J Agro-Environ Sci, 2007, 26 (4): 1375–1379. (in Chinese)
- [33] 胡韧, 林秋奇, 张小兰. Cr^{3+} , Cr^{6+} 及其复合污染对狐尾藻的毒害作用 [J]. 生态科学, 2003, 22 (4): 327–331.
- HU Ren, LIN Qiuqi, ZHANG Xiaolan. Toxic effects of Cr^{3+} , Cr^{6+} and their combined pollution on *Myriophyllum verticillatum* [J]. Ecol Sci, 2003, 22 (4): 327–331. (in Chinese)
- [34] MOHR S, BERGHAHN R, FEIBICKE M, et al. Effects of the herbicide metazachlor on macrophytes and ecosystem function in freshwater pond and stream mesocosms [J]. Aquat Toxicol, 2007, 82 (2): 73–84.
- [35] 孙颖颖, 王长海. 球等鞭金藻生长抑制物的抑藻机理 [J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2009, 35 (1): 51–57.
- SUN Yingying, WANG Changhai. Antialgal mechanism of growth-inhibitor from marine microalgae of *Isochrysis galbana* [J]. J Zhejiang Univ: Agriculture Life Science, 2009, 35 (1): 51–57. (in Chinese)
- [36] 张建民, 赵宏, 咎金东, 等. 含铜化合物培养微藻的生物学效应的研究 [J]. 曲阜师范大学学报, 2005, 31 (1): 91–94.
- ZHANG Jianmin, ZHAO Hong, ZAN Jindong. The reseaches of biologic effects of *Pyramimonas* sp. cultured in medium containing copper ion [J]. J Qufu Normal Univ, 2005, 31 (1): 91–94. (in Chinese)
- [37] MITROVIC S M, ALLIS O, FUREY A, et al. Bioaccumulation and harmful effects of microcystin-LR in the aquatic plants *Lemna minor* and *Wolffia arrhiza* and the filamentous alga *Chladophora fracta* [J]. Ecotoxicol Environ Saf, 2005, 61 (3): 345–352.