

张玥,徐栋,刘碧云,等.铝盐絮凝剂对沉水植物五刺金鱼藻生长的影响[J].环境科学与技术,2016,39(4):5-10. Zhang Yue, Xu Dong, Liu Biyun, et al. Effects of aluminum flocculant on growth of submerged macrophyte *Ceratophyllum oryzetorum* Kom.[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 39(4):5-10.

铝盐絮凝剂对沉水植物五刺金鱼藻生长的影响

张玥^{1,2}, 徐栋^{1*}, 刘碧云¹, 曾磊^{1,2}, 代志刚¹, 杜明普^{1,2}, 陈迪松¹, 吴振斌¹

(1.中国科学院水生生物研究所淡水生态与生物技术国家重点实验室,湖北 武汉 430072; 2.中国科学院大学,北京 100049)

摘要:铝盐絮凝剂在湖泊富营养化治理中得到了广泛应用,应用过程中对水环境的改变可能会影响沉水植物的生长。该研究采用室外模拟试验,考察了连续投加不同浓度梯度的明矾($KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$)铝盐对五刺金鱼藻(*Ceratophyllum oryzetorum* Kom.)生长的影响。试验设置了6个处理:1#(对照组)、2#、3#、4#、5#、6#,分别投加6个梯度的明矾,投加量分别为0.0、0.2、0.8、2.0、4.0、10.0 mg/L。结果表明:(1)当投加量达到约2.0 mg/L时,水中铝盐浓度明显升高,并随着投加的积累持续升高,低浓度投加对水中铝盐浓度影响不大;(2)水中铝盐浓度约(250±100) μg/L时,最适于金鱼藻的生长;低于150 μg/L,金鱼藻生长一般;高于700 μg/L,则对金鱼藻的生长有明显损害,叶绿素含量显著降低;(3)水中铝盐浓度达到360 μg/L时,对刚毛藻有明显毒害作用,抑制其光合作用,但藻体并没有死亡;铝盐浓度达到700 μg/L时,铝盐已导致了刚毛藻藻体的死亡。

关键词:铝盐;五刺金鱼藻;沉水植物;明矾;絮凝剂

中图分类号:X173 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1003-6504.2016.04.002 文章编号:1003-6504(2016)04-0005-06

Effects of Aluminum Flocculant on Growth of Submerged Macrophyte *Ceratophyllum oryzetorum* Kom.

ZHANG Yue^{1,2}, XU Dong^{1*}, LIU Biyun¹, ZENG Lei^{1,2}, DAI Zhigang¹,
DU Mingpu^{1,2}, CHEN Disong¹, WU Zhenbin¹

(1.State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Aluminum flocculant has been often applied for lakes eutrophication control, which however could likely cause the changes of water environment in the process of application, affecting the submerged macrophytes growing in the water. In an outdoor simulation experiment, effects of continuous addition of alum in different concentrations on the growth of submerged macrophyte *C. oryzetorum* Kom were studied. Six treatment groups were set up: 1# (the control group, no addition), 2# (0.2 mg/L), 3# (0.8 mg/L), 4# (2.0 mg/L), 5# (4.0 mg/L), 6# (10.0 mg/L). The results showed that when added dosage of alum was as high as 2.0 mg/L, aluminum salt concentration of the dramatically and continued to rise as alum being accumulated; while lower dosage had little impacts. When aluminum salt concentration of the water maintained (250±100) μg/L, *C. oryzetorum* Kom grown in the water well thrived; when less than 150 μg/L, *C. oryzetorum* Kom. kept in general state; but when more than 700 μg/L, the detrimental effect on *C. oryzetorum* Kom. growth was noted, and in the same time, its chlorophyll content decreased notably. On the other hand, as to *Cladophora oligoclona*, 360 μg/L of alum was harmful and its photosynthesis was inhibited, though it remained live; however, 700 μg/L of alum in the water could lead to the perishing of *Cladophora oligoclona* body.

Key words: aluminium salt; *Ceratophyllum oryzetorum* Kom.; submerged macrophyte; alum; flocculant

我国是一个多湖泊国家,淡水湖泊多集中于长江中下游地区,绝大多数淡水湖泊已经达到富营养

化状态,湖泊富营养化已成为我国淡水湖泊面临的最主要的生态环境问题^[1]。在对富营养湖泊的治理

《环境科学与技术》编辑部(网址)http://fjks.chinajournal.net.cn(电话)027-87643502(电子信箱)hjkxyjs@vip.126.com

收稿日期 2015-08-20 修回 2015-10-20

基金项目 国家“十二五”水专项(2012ZX07101007-005),国家科技支撑计划课题(2012BAJ21B03-04),国家青年科学基金(51208498)

作者简介 张玥(1990-),女,硕士,研究方向为污水生态修复等(电子信箱)lunzhang@126.com,*通讯作者,副研究员(电子信箱)xudong@ihb.ac.cn。

中,投加铝盐(以明矾最常见)是一种常用的化学方法,其大量应用源于 20 世纪 70 年代初期,在近几十年来广泛应用于湖泊、水库,主要用于除磷以及抑制磷从沉积物中释放^[2-3]。铝盐也作为引水工程预处理混凝药剂,在引水过程中输入受体湖泊(如杭州西湖),该部分还尚未受到重视。在富营养化湖泊除藻的化学方法中,铝盐制剂也是一种常用的杀藻剂,使藻类凝聚沉降而去除^[4]。

沉水植物是湖泊生物多样性赖以维持的基础^[5],在一定的营养水平下,沉水植物的有无决定湖泊稳态类型^[6]。提高本土沉水植物覆盖度是恢复湖泊生态系统的重要措施^[7],是改善水质并长期维持的关键。然而实践证明,沉水植被的恢复,必须与其外部环境的改善结合起来,否则很难成功^[8]。铝盐在除磷除藻的过程中对水体环境的改变,也可能反过来影响沉水植物的生长。针对金属胁迫,研究较多的是 Hg、Cr、Cd、Cu、Zn 等重金属及其复合作用对沉水植物的危害^[9-10],铝盐的应用与输入对沉水植物的胁迫研究还较少。

金鱼藻(*Ceratophyllum demersum* L.)是一种具观赏价值的沉水植物,同时也是一种抗污染力极强的植物,在湖泊沉水植物恢复中得到了广泛应用。金鱼藻漂浮于水体中,根部不发达,在多数情况下植株无根,只有茎和叶^[11],叶片表面组织细胞柱状排列,其间有许多沟缝、空隙,叶片外周边缘有一些针状的突起,利于其对水中污染物质的吸收吸附^[12],可能更易受水中离子的影响。故本文选取金鱼藻的常见品种五刺金鱼藻(*C. oryzetorum* Kom.)为研究对象,探讨了铝盐浓度的不断累积对金鱼藻生长的影响,为沉水植物恢复工作提供理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 材料来源及处理方法

2014 年 7 月下旬,从西湖采集五刺金鱼藻,洗净培养备用,7 月底,从西湖乌龟潭采集底泥,混匀后沉淀备用,理化性质见表 1。试验用水为自来水,投加营养盐为氯化铵(NH₄Cl)、硝酸钾(KNO₃)、磷酸二氢钠(NaH₂PO₄)、磷酸氢二钠(Na₂HPO₄),投加絮凝剂为明矾(KAl(SO₄)₂·12H₂O)。试验装置为透明玻璃缸,尺寸为 70 cm×50 cm×80 cm,共 6 个,置于室外。

表 1 乌龟潭底泥性质
Table 1 Sediment physicochemical properties of Turtle Pond

指标	TP /g·kg ⁻¹	TN /g·kg ⁻¹	Al ₂ O ₃ /%	pH	有机质 /%	含水率 /%
含量	1.05	4.12	14.5	7.21	12.66	75.35

1.2 试验设计

设置 1 个对照组(1#)和 5 个试验组(2#、3#、4#、5#、6#)。每个玻璃缸在底部铺 10 cm 厚底泥,加入自来水约 40 cm 深,待水澄清后移栽生长状况良好、株高及湿重基本一致的金鱼藻 7~9 株,生长稳定后加入自来水至 60 cm 深。加入营养盐,使得各缸水中初始 N、P 营养盐浓度约为 TN 2.0 mg/L(氯化铵:硝酸钾=1:6)、TP 0.06~0.08 mg/L(磷酸二氢钠:磷酸氢二钠=1:1),配水营养盐比例参照西湖湖水营养盐浓度。

试验组 2#、3#、4#、5#、6# 分别投加 5 个梯度的明矾,投加量为 0.2、0.8、2.0、4.0、10.0 mg/L,每周五投加固体药剂,对照组 1# 不投加,投加量设置参照文献^[13]及西湖引水铝盐浓度范围。每周取水样用于水质测定,每 2 周取植物样用于生理指标测定,取样时每个玻璃缸随机取 3 份植物样作为平行。试验期约 60 d。

1.3 分析方法

1.3.1 水质指标测定

采集水样使用 Hach-HQ40 d 便携式水质分析仪测定 pH、电导率、DO、水温,使用 BZ-1Z 便携式浊度仪测定浊度。采集水样测定水中铝盐含量(以 Al³⁺计),采用铬天青 S 分光光度法(GB/T 5750.6-2006)。

1.3.2 生理指标测定

采集金鱼藻,洗净后测定鲜重、株长、茎节数,取顶端茎叶测定叶绿素含量、可溶性蛋白含量、超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性、丙二醛(MDA)含量等指标。叶绿素采用丙酮萃取分光光度法、可溶性蛋白采用 G-250 考马斯亮蓝法^[14]、SOD 采用氮蓝四唑光化还原法、POD 采用愈创木酚法、MDA 采用硫代巴比妥酸法^[15]。

1.4 数据处理与统计分析

利用 SPSS 13.0 统计软件中的 One-Way ANOVA 法进行多重比较方差分析及 Pearson 法进行相关性分析,并用不同字母表示处理组间差异显著性水平($P < 0.05$)。

2 结果与讨论

2.1 水中理化指标变化情况

2.1.1 水中铝盐含量变化

随着每周明矾的投加,2#、3# 铝盐浓度保持平稳,无明显上升,与对照组接近,保持在约(100±50) μg/L;当 4# 投加浓度达到 2.0 mg/L 时,开始有明显升高,最高达到 547.2 μg/L;当投加浓度达到或高于 4.0 mg/L 时,5#、6# 升高幅度更大,分别达到初始浓度的 3.07 倍、4.55 倍,6# 水中铝盐的浓度更是高达 1 178.2 μg/L,

见图 1。最后一周 5#、6# 铝盐浓度有所下降。明矾投加量对水中铝离子的积累影响很大,当投加量达到约 2.0 mg/L 时,水中铝盐浓度明显升高,并随着投加的积累持续升高。王燕等^[16]研究了聚合铝基复合混凝剂(PAC-PDMDAAC)的混凝性能,发现当投加量为 3.36 mg/L 时,浊度保持在 2.0~4.0 NTU 的较低水平,大于 3.36 mg/L 时,随着投加量的增加,残余铝量快速增大,这与本试验的结论有相似之处。本试验的用水为自配水,初始浊度较低,约(9.0±2.0) NTU,在铝盐和沉水植物的共同作用下很快就能达到较低水平,约(3.0±1.0) NTU,2.0 mg/L 为投加量的分界值,大于 2.0 mg/L 时,水中余铝快速增大,浊度已达到较低水平,持续投加的铝盐难以继续降低浊度,并且这种降低无实际意义。

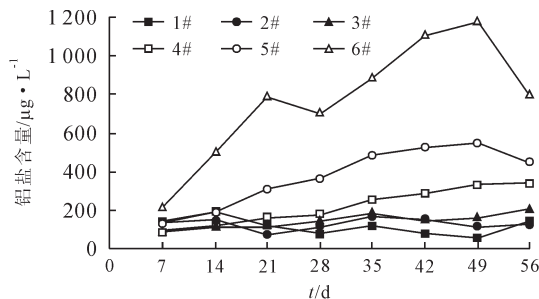


图1 各处理组水中铝盐含量变化情况
Fig.1 Aluminum salt content changes in water of each treatment group

2.1.2 主要水质指标相关性分析

对水质指标进行了 Pearson 相关性分析,见表 2。发现铝盐含量与浊度呈显著负相关,铝盐对浊度的降低有显著作用。水温、pH、电导率、DO 之间均呈显著正相关关系,这几个指标的变化具有协同性。水温对整个水生境的改变起到了重要的作用,温度降低,浮游藻类生长减缓,光合作用减弱,放氧减少,DO 随之降低,并且藻类对 CO₂ 的利用减弱,从而 pH 降低。同时铝盐导致浊度降低,水温一定幅度的降低(从约 35 °C 降至 25~28 °C)和浊度的降低均有助于沉水植物的生长,而浮游藻类的密度变低也是浊度

降低的一个重要原因。沉水植物的吸收使水中营养盐减少,离子减少,电导率也随之降低。铝盐进入水体后会发生一系列复杂的化学反应,发生水解,或形成沉淀及络合物,也一定程度上造成了 pH 的降低。最后一周由于下雨,温度降低,且雨水对玻璃缸中的水进行了稀释,故水中铝盐浓度又有一定的降低。

表 2 水质指标 Pearson 相关性分析结果

Table 2 Results of Pearson correlation analysis of water quality indicators

相关系数	Al	pH	电导率	DO	浊度	水温
Al	1	0.167	0.209	0.071	-0.348*	-0.117
pH	—	1	0.339*	0.793**	0.088	0.440**
电导率	—	—	1	0.316*	0.229	0.651**
DO	—	—	—	1	0.254	0.298*
浊度	—	—	—	—	1	0.236
水温	—	—	—	—	—	1

注: *表示显著性相关(P<0.05), **表示极显著性相关(P<0.01)。

2.2 铝盐投加对各处理组金鱼藻生长情况的影响

2.2.1 铝盐投加对金鱼藻生长率、株长、节间长度及叶绿素的影响

如图 2 随着明矾投加浓度的增加,各处理组金鱼藻生长率呈先升高再降低的趋势,4# 与其他组均达到了显著性差异(P<0.05),生长率高达(0.95±0.1) g/d,6# 长势最差,植株矮小,叶片枯黄,生长率仅(0.23±0.04) g/d,与其他组也达到显著性差异(P<0.05)。4#、6# 金鱼藻株长与其他各组均达到显著性差异(P<0.05),4# 金鱼藻株长远大于其他处理组,增长了约(66.98±4.89) cm,6# 株长增长则较小,约(15.88±2.21) cm。4# 平均节间长度与其他各处理组有显著性差异(P<0.05),远大于其他组,约(1.5±0.35) cm,其余各组无显著性差异,但 6# 最低。6# 金鱼藻叶绿素在约 24 d 后明显降低,显著低于其他处理组(P<0.05)。

各处理组生长率、株长增长长度、平均节间距离变化情况相似,都表明 4# 金鱼藻生长显著优于其他各组,而 6# 则生长最差。铝虽然不是植物生长的必须

图中小写字母不同表示有显著性差异, P<0.05。

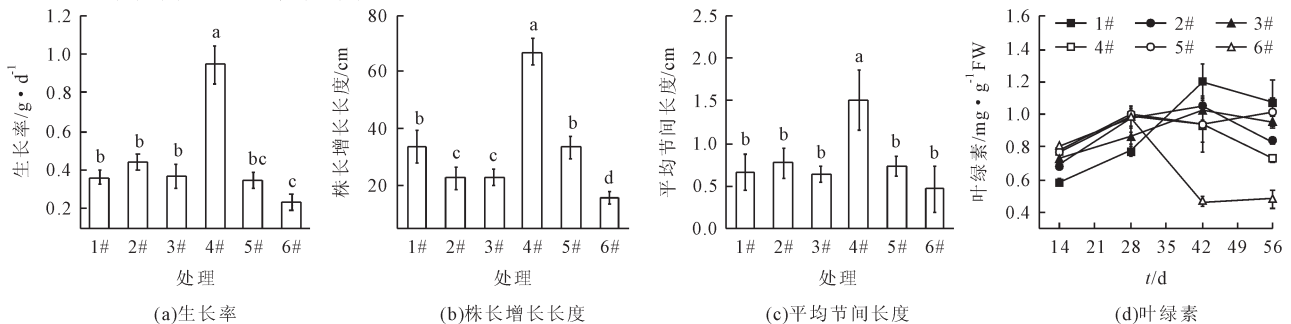


图2 各处理组金鱼藻生长情况
Fig.2 The growth of *C. oryzetorum* Kom. in each treatment group

元素,但一定量的铝对植物的生长可能有促进作用。刘鹏等^[17]认为较低浓度的铝可以维持细胞膜的稳定性,减少细胞内的外渗物,从而对植物的生长有利。

叶绿素作为植物进行光合作用的主要色素,其含量高低能直接反映光合作用能力强弱及其生产力。在铝胁迫下,植物叶绿体被膜会受到破坏^[18],叶绿素含量降低,光合作用受到抑制。金鱼藻表皮细胞含大量的叶绿体,叶绿体沿细胞壁的边缘排列^[11],高浓度铝盐可能更易穿过细胞壁,破坏其叶绿体被膜,从而导致叶绿体的流失。另一方面, Al^{3+} 也可能在植株体内竞争和取代 Mg^{2+} ,影响植物对镁的吸收和运输,使植物缺镁,从而抑制叶绿素的合成,使其含量下降^[19]。

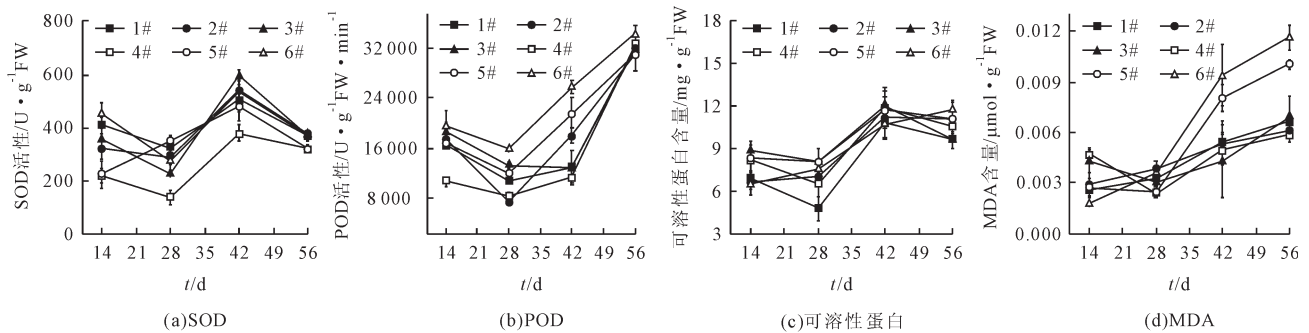


图3 各处理组金鱼藻SOD、POD、可溶性蛋白、MDA变化情况

Fig.3 SOD, POD, soluble protein and MDA of *C. oryzaetorum* Kom. in each treatment group

胁迫会导致植物体内产生过量的活性氧,加剧植物细胞的膜脂过氧化,从而破坏细胞内的代谢活动。SOD作为重要的活性氧清除剂,能催化活性氧转变为 H_2O_2 ,在逆境胁迫下会增大活性,从而减轻活性氧的伤害,抑制膜脂过氧化产物MDA的积累,以保障细胞膜的结构和正常功能,而当逆境对植物造成不可逆的伤害时,SOD活性则会下降^[20]。各处理组金鱼藻随着明矾的持续处理,SOD先有较大幅度的升高,而后又有所降低,可见铝盐的胁迫作用一直存在,随着浓度的不断升高和时间的持续,这种伤害也不断加大。4#金鱼藻SOD始终较低,升高后几乎一直保持,铝盐的胁迫使得SOD活性增加用于清除活性氧,但并没有达到严重不可逆的程度。POD可把SOD等产生的 H_2O_2 变成 H_2O ,使活性氧维持在较低水平,减轻其对植物生长的损害,因此POD与SOD变化趋势相似。MDA作为膜脂过氧化产物,其产生会加剧膜的损伤。MDA始终为升高趋势,在铝盐胁迫下有明显的积累,尤其是5#、6#,在30d之后急剧升高,与叶绿素含量呈显著的负相关,可见铝胁迫下光合色素的降解与膜脂过氧化密切相关,这与肖祥希等^[21]的研究结果是一致的。而后期SOD的降低也导致对MDA的抑制减弱,MDA持续积累。可溶性蛋白是重要的渗透调节物质和营养物质,它的增加和积累能提高细胞的保水能

2.2.2 铝盐投加对金鱼藻SOD活性、POD活性、可溶性蛋白及MDA含量的影响

图3是各处理组金鱼藻生化指标的变化情况。各处理组金鱼藻SOD活性随时间变化趋势接近,呈降低升高再降低的变化,4#活性始终低于其他组。POD活性随时间呈先降低后升高的趋势,4#活性较低,5#、6#在第42天开始活性高于其他处理组。可溶性蛋白在第42天时有一定幅度增加,之后保持平稳,增加了9.23%~80.1%,6#金鱼藻增加了80.1%,明显高于其他组,有较多积累。各处理组MDA均呈上升趋势,5#、6#较其他组有显著而持续的增加,比最初分别增加了2.77倍、5.66倍。

力。铝胁迫膜脂过氧化加剧,也会抑制蛋白质的合成^[22],但后期金鱼藻可溶性蛋白并没有明显降低,可能是铝诱导了结合蛋白的合成,以降低铝对细胞内重要位点的毒害作用。Basu等^[23]分离得到了铝诱导的51KD的微粒体膜蛋白,除了能被Cd、Ni部分诱导外,不能被其他环境胁迫诱导合成,并且这种蛋白只在耐铝品种中发现,与植物的抗铝性有直接关系,说明铝胁迫下植物细胞合成一些多肽与铝进行络合作用,是植物减轻铝毒害的内部机制。

2.2.3 铝盐投加对水中丝状藻的影响

在金鱼藻生长几天后,每个试验组均出现了丝状藻,主要为刚毛藻和水绵,来源于底泥及植株,附着在沉水植物、底泥及缸内壁,属于着生藻类。丝状藻多和水生植物相伴生,且生命力旺盛、繁殖能力强,极易大量孳生^[24]。1#、2#、3#均有少量丝状藻附着于金鱼藻茎叶,丝状藻多附着于根部,随着明矾的连续投加,丝状藻有一定减少,主要附着在根部,4#金鱼藻几乎没有丝状藻附着,5#、6#有大量丝状藻附着。丝状藻的大量存在会与沉水植物形成竞争作用,争夺水体中营养成分和光照,附着在沉水植物上的丝状藻也会造成沉水植物的机械损伤,丝状藻死亡腐烂之后释放的有害物质更是会影响水质及整个生态系统^[25-26]。丝状藻对沉水植物还会有化感作用,会影响沉水植物的生长,金

鱼藻植株柔软,叶片呈针状,更易被丝状藻附着,且丝状藻易附着缠绕在根部造成机械损伤,同时争夺养分,相对来说金鱼藻较其他种类的沉水植物更易受到丝状藻伤害^[24]。4# 铝盐浓度约(250±100) μg/L,对丝状藻有一定抑制作用,以减小其对金鱼藻的影响。

约24 d时,5# 水中铝盐浓度达到360 μg/L,出现了白色丝状藻藻体,主要为刚毛藻。进入刚毛藻体内的金属离子会改变其细胞膜透性,对叶绿体造成一定程度的破坏,致使叶绿素结构破坏,刚毛藻体失绿^[27],说明铝盐对刚毛藻有明显毒害作用,抑制其光合作用。但刚毛藻仍大团簇集,数量上并无明显减少,虽受到严重损害,藻体并没有死亡。当水中铝盐浓度达到700 μg/L时,白色藻体已不再大量簇集成团,而是细小分散地附着于金鱼藻或缸内壁,数量上也明显减少,此浓度铝盐已导致了藻体的死亡。

3 结论

(1)当投加量达到约2.0 mg/L时,水中铝盐浓度明显升高,并随着投加的积累持续升高。铝盐对浊度的降低有显著作用,但铝盐浓度的持续升高对已经很低的浊度不再有明显的降低效果。水温对整个水生境的改变起到了重要的作用。

(2)水中铝盐浓度约(250±100) μg/L时,最适于金鱼藻的生长,对其植株的生长有促进作用;低于150 μg/L,金鱼藻生长一般,高于700 μg/L,则对金鱼藻的生长有明显损害,叶绿素含量明显降低。

(3)水中一定量铝盐(约(250±100) μg/L)对丝状藻有一定抑制作用,促进金鱼藻的生长;水中铝盐浓度达到360 μg/L时,对刚毛藻有明显毒害作用,抑制其光合作用,但藻体并没有死亡,铝盐浓度达到700 μg/L时,铝盐已导致了刚毛藻藻体的死亡。

[参考文献]

- [1] 秦伯强,高光,朱广伟,等. 湖泊富营养化及其生态系统响应[J]. 科学通报, 2013, 58(10): 855-864.
Qin Boqiang, Gao Guang, Zhu Guangwei, et al. Lake eutrophication and its ecosystem response[J]. Chin Sci Bull, 2013, 58(10): 855-864.(in Chinese)
- [2] Cooke G D, Welch E B, Peterson S A, et al. Restoration and Management of Lakes and Reservoirs [M]. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2005.
- [3] Nogaro G, Burgin A J, Schoepfer V A, et al. Aluminum sulfate (alum) application interactions with coupled metal and nutrient cycling in a hypereutrophic lake ecosystem[J]. Environmental Pollution, 2013, 176: 267-274.
- [4] 付军,闫海,王东升,等. 聚铝及其加载粘土矿物高效絮凝沉降铜绿微囊藻的研究[J]. 环境污染治理技术与设备,

2006, 7(1): 76-79.

- Fu Jun, Yan Hai, Wang Dongsheng, et al. Effective flocculations of *Microcystis aeruginosa* by HPACs and embedded with clays[J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2006, 7(1): 76-79.(in Chinese)
- [5] 吴振斌. 水生植物与水体生态修复[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
Wu Zhenbin. Macrophyte and Aquatic Ecological Restoration[M]. Beijing: Science Press, 2011.(in Chinese)
- [6] Scheffer M. Multiplicity of stable states in freshwater systems [J]. Hydrobiologia, 1990, 200/201(1): 475-486.
- [7] Van Nes EH, Scheffer M, Van den Berg MS, et al. Aquatic macrophytes: restore, eradicate or is there a compromise[J]. Aquatic Botany, 2002, 72: 387-403.
- [8] 秦伯强,许海,董百丽. 富营养化湖泊治理的理论与实践[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
Qin Boqiang, Xu Hai, Dong Baili. Eutrophication of Lakes Governance: Theory and Practice[M]. Beijing: Higher Education Press, 2011.(in Chinese)
- [9] 黄敏,施国新,夏海威,等. 不同pH处理对菹草(*Potamogeton crispus* L.)Cr⁶⁺毒害效应的影响[J]. 湖泊科学, 2014, 26(4): 607-615.
Huang Min, Shi Guoxin, Xia Haiwei, et al. Toxicological effects of Cr⁶⁺ on *Potamogeton crispus* L. under different pH values[J]. Lake Sci, 2014, 26(4): 607-615.(in Chinese)
- [10] 吴振斌,马剑敏,赵强,等. Hg²⁺、Cd²⁺及其复合胁迫对伊乐藻的毒害[J]. 中国环境科学, 2005, 25(3): 262-266.
Wu Zhenbin, Ma Jianmin, Zhao Qiang, et al. Toxic harm of Hg²⁺, Cd²⁺ and their combined stress on *Elodea nuttallii*[J]. China Environmental Science, 2005, 25(3): 262-266.(in Chinese)
- [11] 顾庆龙,陈刚,谢田. 金鱼藻营养器官的形态解剖学研究[J]. 中国野生植物资源, 2005, 24(6): 41-44.
Gu Qinglong, Chen Gang, Xie Tian. Anatomical studies on the vegetative organs of *Ceratophyllum demersum* L. [J]. Chinese Wild Plant Resource, 2005, 24(6): 41-44.(in Chinese)
- [12] 姚曼菲,谭杨. 金鱼藻叶表的形态及其对悬浮物的吸附[J]. 现代农业科学, 2009, 16(4): 153-154.
Yao Manfei, Tan Yang. Morphology of *Ceratophyllum demersum* and its adsorption to suspended substances[J]. Modern Agricultural Science, 2009, 16(4): 153-154.(in Chinese)
- [13] 包先明,陈开宁,范成新. 化学物添加控制湖泊内源磷负荷的有效性研究[J]. 生态环境, 2007, 16(1): 8-11.
Bao Xianming, Chen Kaining, Fan Chengxin. Effectiveness of controlling internal phosphorus loading by using chemical substance[J]. Ecology and Environment, 2007, 16(1): 8-11.(in Chinese)
- [14] 史树德,孙亚卿,魏磊. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中

- 国林业出版社, 2011.
Shi Shude, Sun Yaqing, Wei Lei. Plant Physiology Experiment Instruction [M]. Beijing :China Forestry Publishing, 2011.(in Chinese)
- [15] 李合生, 孙群, 赵世杰, 等. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
Li Hesheng, Sun Qun, Zhao Shijie, et al. The Experiment Principle and Technique on Plant Physiology and Biochemistry [M]. Beijing :Higher Education Press, 2000.(in Chinese)
- [16] 王燕, 高宝玉, 刘玉真, 等. 聚合铝基复合混凝剂残余铝及混凝性能的初步研究[J]. 环境化学, 2003, 22(5) :474-477.
Wang Yan, Gao Baoyu, Liu Yuzhen, et al. Preliminary study on residual aluminum and characterized of coalgulation by composite flocculants [J]. Environmental Chemistry, 2003, 22(5) :474-477.(in Chinese)
- [17] 刘鹏, 徐根娣, 姜雪梅, 等. 铝对大豆幼苗膜脂过氧化和体内保护系统的影响[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(1) :51-54.
Liu Peng, Xu Gendi, Jiang Xuemei, et al. Effects of aluminum on membrane lipid peroxidation and endogenous protective systems of soybean seedling [J]. Journal of Agri-environment Science, 2004, 23(1) :51-54.(in Chinese)
- [18] Hampp H, Schnabl H. Effect of aluminum ions on $^{14}\text{CO}_2$ -fixation and membrane system of isolated spinach chloroplasts [J]. Z Pflanzenphysiol, 1975, 76 :300-306.
- [19] Matsumoto H. Cell biology of aluminum toxicity and tolerance in higher plants [J]. International Review of Cytology, 2000, 200 :1-46.
- [20] 王建华, 刘鸿先, 徐同. 超氧化物歧化酶(SOD)在植物逆境和衰老生理中的作用[J]. 植物生理学通讯, 1989, 1 :1-7.
Wang Jianhua, Liu Hongxian, Xu Tong. The role of superoxide dismutase (SOD) in stress physiology and senescence physiology of plant [J]. Plant Physiology Communications, 1989, 1 :1-7.(in Chinese)
- [21] 肖祥希, 杨宗武, 谢一青, 等. 铝胁迫对龙眼叶片活性氧代谢及膜系统的影响[J]. 林业科学, 2003, 39(1) :52-57.
Xiao Xiangxi, Yang Zongwu, Xie Yiqing, et al. Effect of aluminum stress on active oxygen metabolism and membrane system of longan (*Dimocarpus longan*) leaves [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2003, 39(1) :52-57.(in Chinese)
- [22] 肖祥希, 刘星辉, 杨宗武, 等. 铝胁迫对龙眼幼苗蛋白质和核酸含量的影响[J]. 林业科学, 2006, 42(10) :24-30.
Xiao Xiangxi, Liu Xinghui, Yang Zongwu, et al. Effect of aluminum stress on the content of protein and nucleic acid of longan (*Dimocarpus longan*) seedlings [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2006, 42(10) :24-30.(in Chinese)
- [23] Basu A, Basu U, Taylor G J. Induction of microsomal membrane proteins in roots of an aluminum-resistant cultivar of *Triticum aestivum* L. under conditions of aluminum stress [J]. Plant Physiology, 1994, 104(3) :1007-1013.
- [24] 马顷. 水绵和刚毛藻的生态适应性及其干扰作用对四种沉水植物的影响[D]. 新乡: 河南师范大学, 2011.
Ma Qing. Ecological Adaptability of *Spirogyra communis* and *Cladophora oligoclona* and Its Interference Effects on Four Submerged Macrophytes [D]. Xinxiang :Henan Normal University, 2011.(in Chinese)
- [25] Veronneau H, Greer A F, Daigle S, et al. Use of mixtures of allelochemicals to compare bioassays using red maple, pin cherry and American elm [J]. Journal of Chemical Ecology, 1997, 23 :1101-1117.
- [26] McGlathery K J. Macroalgal blooms contribute to the decline of seagrass in nutrient-enriched coastal waters [J]. Journal of Phycology, 2001, 37(4) :453-456.
- [27] 从善畅, 汪家权, 董玉红, 等. 刚毛藻对重金属 Pb^{2+} 的耐受性及吸附性研究[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(2) :552-554.
Cong Shanchang, Wang Jiaquan, Dong Yuhong, et al. Study on characteristics of tolerance and adsorption of chadophorasle to Pb^{2+} [J]. Journal of Anhui Agri Sci, 2014, 42(2) :552-554.(in Chinese)