

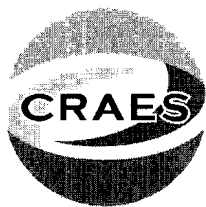


中国环境科学研究院 建院30周年论文集

(1978 — 2008)

中国环境科学研究院 编

中国环境科学出版社



中国环境科学研究院 建院30周年论文集

(1978 — 2008)

中国环境科学研究院 编

内 容 简 介

中国环境科学研究院是国家级综合性环境科学研究机构,肩负着发展环境科学技术、解决经济社会发展中全局性、区域性重大环境问题、开展全球性环境问题的国际合作与交流、服务国家宏观决策的历史使命。

本论文集精选了中国环境科学研究院 21 世纪以来(2000—2008)的主要研究论文 100 篇,内容涵盖水环境与污染控制、环境安全与风险评估、大气环境与污染控制、生态环境及生态修复、固体废物处理与处置技术、清洁生产与循环经济、环境管理和机动车与移动源污染控制等多个领域的最新研究成果,用以集中体现中国环科院近年来的主要科研创新内容和学术活动。

本论文集可供国内外同行借鉴,也可供环境保护科技、管理人员及大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国环境科学研究院建院 30 周年论文集/中国环境科学
研究院编. —北京:中国环境科学出版社,2008. 12
ISBN 978-7-80209-884-8

I. 中… II. 中… III. 环境科学-中国-文集 IV. X-12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 193706 号

责任编辑:葛 莉

封面设计:龙文视觉

出版发行 中国环境科学出版社
(100062 北京崇文区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.cn>
联系电话:010-67112765(总编室)
发行热线:010-67125803

印 刷 北京中科印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2008 年 12 月第 1 版
印 次 2008 年 12 月第 1 次印刷
开 本 889×1194 1/16
印 张 44.5
字 数 1800 千字
定 价 178.00 元

【版权所有。未经许可请勿翻印、转载,侵权必究】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题,请寄回本社更换

编 委 会

主 编：孟 伟

副 主 编：段 宁 舒俭民 王业耀

编 委：（以姓氏笔画为序）

于云江 王 琪 乔 琦 汤大钢 李发生

宋乾武 武雪芳 郑丙辉 柴发合 高吉喜

顾 问：刘鸿亮 王文兴 任阵海 陈 复

执行秘书：杨鹊平

序

沐浴着改革开放的春风，中国环境科学研究院走过了三十年的成长历程，如今满怀喜悦地迎来了它三十周岁的生日。三十年来，中国环境科学研究院坚持“自然和谐，厚积薄发”的发展理念，继往开来，开拓进取，求真务实，取得了累累硕果。

粗读这本院庆学术论文集，浮现在我眼前的是一部中国环科院的成长史。合抱之木，生于毫末；九层之台，起于累土。中国环科院人为了环境保护科技事业的兴旺发达，始终不渝，从无做起；孜孜不倦，从我做起；辛勤奉献，从小做起，用几代人无私的汗水与智慧推动了环境科技的发展。眼前这部论文集，是中国环科院科研人员劳动汗水的结晶，集体智慧的凝聚，是中国环科院不断成长的历史缩影。

细读这本院庆学术论文集，呈现在我面前的是一部中国环科院的实践史。宝剑锋从磨砺出，梅花香自苦寒来。三十年来，中国环科院人为了用科技支撑环境管理，勇挑重担，积极进取；严谨务实，不断探索；包容并蓄，勤于实践，用几代人从实践中来，到实践中去的求真行动促进了环境管理的发展。面前这部论文集，是中国环科院科研人员实事求是的声音，验证真理的写照，是中国环科院以科技进步推动环境管理实践的历史见证。

精读这本院庆学术论文集，印在我脑海里的是一部中国环科院的创新史。周虽旧邦，其命惟新，如将不尽，与古为新。三十年来，中国环科院人为了促进人与自然的和谐，解放思想，挑战经典；创新思维，挑战权威；不囿禁锢，挑战自我，用几代人勇往直前的创新努力推动了人与自然的融合。脑海中的这部论文集，是中国环科院科研人员奋力开拓的身影，永不停滞的脚步，是中国环科院勇于变革、与时俱进的历史丰碑。

这本院庆学术论文集，内容全面，结构严谨，条理清晰，观点新颖，科学性、理论性、学术性和实用性强。论文集囊括了水环境与污染控制、环境安全与风险评估、大气环境与污染控制、生态环境及生态修复、固体废物处理与处置技术、清洁生产与循环经济、环境管理和机动车与移动源污染控制八个重点学术领域。特别是流域水质目标管理、水体富营养化控制、环境污染与健康、土壤污染、大气污染物总量控制、生态保护、固废处置和循环经济等方面高水平学术论文的发表，为中国环科院赢得了相关领域的话语权，奠定了其在国内环境科技方面的学术引领地位。

千里之行，始于足下。深入贯彻落实科学发展观，推动环境保护的三个历史性转变，创建生态文明等一系列国家重大决策为环境保护的科技事业提供了前所未有的机遇。新时期，新阶段，时代赋予了中国环科院新的历史使命。相信中国环科院一定能够承担起解决经济社会发展全局性、区域性重大环境问题、开展全球性环境问题的国际合作与交流、服务国家宏观决策、培养高级科研人才的历史重任；一定能够以建院三十周年为新的历史起点，戒骄戒躁，再立新功；一定能够不负众望，抓住机遇，迎难而上；一定能够自强不息，再接再厉，再创辉煌。

环境保护部副部长

2008年12月于北京

前 言

在全国各族人民喜逢改革开放三十周年之际，隶属于中华人民共和国环境保护部的中国环境科学研究院迈入了踌躇满志的而立之年。

三十年来，强烈的科研使命感铺就了中国环科院的发展道路。自创建之日起，我院一直以科技兴环保为己任，在不断成长的道路上肩负着发展环保科学技术、解决经济社会发展全局性、区域性重大环境问题、开展全球性环境问题的国际合作与交流、服务国家宏观决策、培养高级科研人才的历史使命。承担着全国环境保护基础研究、前沿高技术开发、科技支撑计划实施、社会公益共性关键技术攻关以及重大技术集成与示范、推广与转化的重要任务。发挥着解决环境保护工作中战略性、基础性、方向性、全局性、前瞻性重大问题和关键技术，引领我国环境保护科学技术发展，为经济社会环境协调发展、建设环境友好型社会提供环境保护技术保障的重要职责。

三十年来，执著的科研探索谱写了中国环科院的壮丽诗篇。在“自然和谐、厚积薄发”的理念和“自主创新、重点跨越、支撑未来、引领未来”的科技发展战略指引下，环科院在环境科学基础理论、应用基础研究和高新技术研发等方面取得了一大批重大科技成果，发表了大量学术论文著作，这些成果集中体现了我院改革开放三十年以来在环保科研工作中所取得的成绩。为了交流与推广这些成果，我院学术委员会已先后编印、出版了论文集，重点反映了我院在不同阶段的研究内容和研究水平。为了庆祝我院建院三十周年，我院组织专家从大量学术成果中精选了中文论文 100 篇、英文论文 65 篇分别集集成中、英文论文集。这两本论文集重点反映了我院进入 21 世纪以来（2000—2008）的主要科研成就，包括大气环境与污染控制、水环境与污染控制、环境安全与风险评估、生态环境及生态修复、固体废物处理与处置技术、清洁生产与循环经济、环境管理和机动车与移动源污染控制等八个领域。

三十年来，丰沛的科研汗水孕育了中国环科院的累累硕果。特别是在水环境与污染控制方面，通过多年的探索和深入研究，总结出了一系列控制水体富营养化的有效方法；在流域水环境治理领域重点开展了流域水质目标管理技术研究，产生了一系列重要的技术成果；在大气环境与污染控制方面，烟气脱硫和可吸入颗粒物污染控制都得到了广泛的研究；随着大气化学研究的不断深入，边界层大气污染、亚洲棕色云、大气污染物总量控制以及 $PM_{2.5}$ 污染等研究都有较大进展；在生态环境及生态修复方面，已深入河口海岸带、湿地、生物群落和生物多样性等各个角度，研究区域遍布我国中东部和西部地区。在固体废物处理与处置技术方面，我院继续深入开展垃圾无害化填埋、垃圾焚烧与生物堆肥等多种处理处置与资源化方法研究，在危废鉴别与风险管理方面形成特色；在清洁生产与循环经济方面，重点围绕清洁生产技术和生态园区建设等领域开展研究；在环境安全与风险评估方面，我院近几年取得了快速发展，分别从污染物生态效应、环境污染与健康、土壤污染控制和气候变化几个角度对有害化学品的毒性及风险展开了系统研究，取得了一系列重要的研究成果。

三十年来，求真的科研实践夯实了中国环科院的管理支撑。在进行科研创新的同时，我院本着学以致用的求实精神，着力为环保管理与决策服务，努力将科研成果转化为环境管理制度、环境保护技术法规和标准，为国家解决重大环境问题、制定生态保护对策以及转变经济增长方

式和促进环境友好型社会建设等方面作出应有的贡献。

成绩只能代表过去，未来更需加倍努力。30年，在人类历史的长河中还显得太过短暂。我们必须清醒地认识到，30年的学术沉淀仍然不能完全应对时代赋予我们的新期望，仍然不能完全应对历史赋予我们的新使命，仍然不能完全应对“科技兴环保”和环保事业“三个历史性转变”赋予我们的新责任。

这两本论文集只是环科院在新世纪学术活动的缩影，我们希望通过他能让更多的读者了解和感受中国环科院在环境科学奥妙中探索的步伐。同时也希望环科院全体人员能回顾过去，放眼未来，以此为新的起点，紧紧抓住环境保护科技事业发展千载难逢的历史性机遇，沿着“创新、高效、绿色、和谐”的发展方向，弘扬“求真、继承、包容、引领”的环科院学术精神，再接再厉，开拓进取，万众一心谋发展，聚精会神搞创新，为环保事业的兴旺发达，为环保科技的自主创新，为构建资源节约型、环境友好型社会贡献力量。

中国环境科学研究院院长



2008年12月

目 录

水环境与污染控制

氨氮与镉单一和复合作用对沉水植物穗花狐尾藻和轮叶黑藻光合能力的影响	许秋瑾	金相灿	王兴民等	(2)
不同改良条件下硫酸铝对滇池污染底泥磷的钝化效果	胡小贞	金相灿	梁丽丽等	(9)
沉积物-水系统中氮磷变化与上覆水对藻类生长的影响	卢少勇	金相灿	郭建宁等	(16)
靛红钾法测定水溶液臭氧浓度的研究	王业耀	王占生		(23)
浮萍塘中氮归趋模式模拟分析	彭剑峰	宋永会	袁 鹏等	(26)
浮萍在水体污染治理中的应用	侯文华	宋关玲	汪群慧	(33)
负载型催化剂光催化氧化五氯苯酚钠研究	席北斗	刘纯新	孔 欣等	(39)
光照与通气方式对蓝、绿藻竞争生长和磷的水-沉积物界面过程的影响	姜 霞	王 琦	金相灿等	(44)
湖泊营养物控制的国家战略	刘鸿亮	李小平		(51)
流域水质目标管理技术研究 (I) ——控制单元的总量控制技术	孟 伟	张 楠	张 远等	(56)
流域水质目标管理技术研究 (II) ——水环境基准、标准与总量控制	孟 伟	刘征涛	张 楠等	(65)
流域水质目标管理技术研究 (III) ——水环境流域监控技术研究	孟 伟	秦延文	郑丙辉等	(75)
流域水质目标管理技术研究 (IV) ——控制单元的水污染物排放限值 与削减技术评估	孟 伟	王海燕	王业耀	(84)
流域水质目标管理技术研究 (V) ——水污染防治的环境经济政策	孟 伟	张 远	王西琴等	(94)
排水管网平面布置优化设计与计算	王之晖	宋乾武		(104)
入湖污染河流对受纳湖湾水质的影响	金相灿	辛玮光	卢少勇等	(109)
水生植物法再生景观回用水水质稳定技术研究	宋永会	郑丙辉	刘佑华等	(115)
太湖梅梁湾沉积物中磷吸附/解吸平衡特征的季节性变化	金相灿	姜 霞	王 琦等	(121)
钛酸四丁酯水解制备 TiO ₂ 光催化氧化五氯苯酚钠研究	席北斗	刘纯新	周岳溪等	(129)
污水再生用于湖泊的补水模式及其环境效应	彭剑峰	宋永会	郑丙辉等	(134)
总氮质量浓度对 3 种沉水植物生长的影响	叶 春	邹国燕	付子斌等	(140)

环境安全与风险评估

3 种刺激性化学战剂对鱼类的急性毒性	杨霓云	王鲁昕	王 宏等	(150)
持久性有机污染物的主要特征和研究进展	刘征涛			(154)
毒理学发展的新方向——系统毒理学	王先良	于云江	王红梅等	(167)
酚类化合物在模拟海水中的生物耗氧特性及其构效相关研究	李 霖	刘征涛	李捍东等	(172)
国内外环境与健康的管理与研究	孟 伟	于云江	郭 庶	(178)
环境砷污染对人体健康损害研究进展	于云江	王菲菲	房吉敦等	(184)
浑蒲污灌区表层土壤中多环芳烃的健康风险评估	曹云者	施烈焰	李丽和等	(190)
几种典型有害化学品对水生生物的急性毒性	王 宏	沈英娃	卢 玲等	(199)
垃圾渗滤液所致大鼠肝毒性研究	于云江	王红梅	赵秀阁等	(205)
模拟酸雨对红壤中硅铝铁释放的影响	刘 俐	宋存义	李发生	(208)

某锌厂周围表层土壤及典型剖面镉污染特征	杜 平	张跃进	杜晓明等	(216)
祁连山中部高寒草甸土壤氮矿化及其影响因素研究	吴建国	韩 梅	苒 伟等	(222)
铅神经毒性的分子生物学研究回顾与展望	王红梅	于云江	赵秀阁等	(231)
蚯蚓生态毒理试验在土壤污染风险评估中的应用	颜增光	何巧力	李发生	(235)
土壤有机碳和氮分解对温度变化的响应趋势与研究方法	吴建国			(246)
完全生物降解高分子薄膜 PHBV 在土壤和水介质中的降解过程研究	徐忠厚	徐 刚	杜晓明等	(257)
五氯苯酚与邻氯苯酚和 2, 4-二氯苯酚对斑马鱼的联合毒性	杨霓云	刘征涛	王 宏等	(263)
污染场地修复技术的分类、应用与筛选方法探讨	谷庆宝	郭观林	周友亚等	(268)
新型 PHBV 吸油材料与传统聚丙烯吸油材料的性能比较研究	韩 梅	吴 兵	陈学军等	(275)
血清锰的石墨炉原子吸收分光光度计测定方法	王先良	王小利	张金良等	(279)
中国北方典型地区农用地膜污染现状调查及其防治对策	杜晓明	徐 刚	许端平等	(283)

大气环境与污染控制

半干半湿法烟气脱硫技术研究	张 凡	张 伟	杨霓云等	(290)
北京市冬季大气细粒子数浓度的粒径分布特征	段菁春	李兴华	郝吉明	(296)
北京夏季大气环境质量状况及特征研究	王文兴	柴发合	张 凯等	(302)
边界层内大气排放物形成重污染背景分析	任阵海	苏福庆	高庆先等	(309)
不同尺度大气系统对污染边界层的影响及其水平流场输送	任阵海	万本太	虞 统等	(318)
交通来源颗粒物及其无机成分污染特征的研究	王 玮	叶慧海	金大善等	(326)
交通来源颗粒物粒径谱分布及其能见度关系	王 玮	潘 志	刘红杰等	(332)
利用静止卫星资料跟踪沙尘天气的发生、发展及其传输	高庆先	任阵海	张运刚等	(339)
秋季嘉兴 PM _{2.5} 质量浓度特征分析	张 凯	柴发合	张新民等	(345)
区域大气污染物总量控制技术与示范研究	柴发合	陈义珍	文 毅等	(353)
全流稀释风道机动车排放颗粒物采集系统的集成及其流量控制和调节	王 玮	胡永红	刘红杰等	(364)
我国酸沉降控制策略	陈 复	柴发合	张德发	(370)
夏秋季节天气系统对边界层内大气中 PM ₁₀ 浓度分布和演变过程的影响	任阵海	苏福庆	陈朝晖等	(379)
杨树叶作为空气有机氯农药生物指示物的可行性	戴天有	朱晓华	王 玮等	(391)
中国 PM _{2.5} 污染状况和污染特征的研究	王 玮	汤大钢	刘红杰等	(399)

生态环境及生态修复

放牧扰动对山地荒漠草地植物群落结构的影响	李俊生	郭玉荣		(406)
改良生态足迹法在珠海的应用	李 翔	舒俭民		(412)
过程与格局的关系及其在区域景观生态规划中的应用	何 萍	史培军	高吉喜	(418)
河口区营养物基准制定方法探讨	孟 伟	王丽婧	郑丙辉等	(425)
基于 GIS 的视觉景观影响定量评价方法理论与实践	张林波	王 维	吴春旭等	(434)
空难对湿地浮游植物的影响	舒俭民	杨荣金	孟 伟等	(442)
流域生态安全评价关键问题研究	高吉喜	张向晖	姜 昀等	(448)
区域洪水灾害易损性评价	高吉喜	潘英姿	柳海鹰等	(459)
我国中东部地区土地利用/土地覆盖动态分析	田自强	郑丙辉	王文杰等	(466)
西部生态环境问题及对策建议	高吉喜			(477)
西太湖湖滨带水生生物分布特征及水质营养状况分析	郑丙辉	田自强	黄 成等	(484)
西太湖湖滨带已恢复与受损芦苇湿地环境功能比较研究	田自强	郑丙辉	张 雷等	(494)
中东部地区湿地现状评价与影响分析	潘英姿	高吉喜		(503)

中国神农架地区的植被制图及植物群落物种多样性 田自强 陈 玥 赵常明等 (508)

固体废物与处理处置技术

CaCl₂对垃圾焚烧飞灰热处理特性的影响 王 琪 田书磊 汪群慧等 (522)

高效复合微生物菌群在垃圾堆肥中的应用 席北斗 刘鸿亮 孟 伟等 (527)

国外持久性有机污染物废物的环境无害化管理 周炳炎 黄 翔 王 琪等 (531)

垃圾焚烧飞灰熔融渣特性分析 席北斗 王 琪 姜永海等 (536)

氯丹和灭蚁灵在污染场地中的空间分布研究 王 琪 赵娜娜 黄启飞等 (541)

填埋结构对渗滤液水质变化影响研究 王 琪 杨玉飞 黄启飞等 (547)

危险废物浸出毒性试验方法的研究 段华波 王 琪 黄启飞等 (551)

危险废物名录鉴别体系研究 黄启飞 段华波 王 琪等 (556)

我国危险废物特性鉴别技术体系研究 王 琪 黄启飞 段华波等 (560)

中国典型城市固体废物可降解有机碳含量的测定与研究 高庆先 杜吴鹏 卢士庆等 (578)

准好氧填埋结构耗氧半径的确定 刘玉强 黄启飞 董 路等 (585)

清洁生产与循环经济

赶不上定理及其循环经济理论意义 段 宁 (592)

基于水电盐联产的虚拟型生态工业园区研究 毛玉如 孙启宏 沈 鹏等 (598)

焦化企业工业共生模式实证研究 毛玉如 孙启宏 乔 琦等 (602)

耐高温阴离子交换树脂的合成及在环氧烷催化水合反应中的应用 王 璠 (609)

啤酒行业清洁生产技术要求 于秀玲 段 宁 尹 洁 (614)

生命周期评价在我国的应用 乔 琦 刘景洋 孙启宏 (621)

生态工业技术：概念、特征及比较研究 傅泽强 杨 明 段 宁等 (627)

生态工业园区评价指标体系研究——综合类生态工业园区 刘景洋 乔 琦 姚 扬等 (632)

我国聚氯乙烯（PVC）树脂行业耗汞量削减方案研究 郝春玲 沈英娃 张亚珍 (638)

物质代谢与循环经济 段 宁 (643)

环 境 管 理

21 世纪经济与环境协调发展全新思维模式的建立 刘鸿亮 曹凤中 (650)

北京市汽车行驶工况和污染物排放系数调查研究 周泽兴 袁 盈 刘希玲等 (657)

定量风险评价标准探讨 武雪芳 陈家宜 (663)

基于 EW-MFA 方法的我国 1990—2003 年资源利用与环境影响特征研究 ... 孙启宏 李艳萍 段 宁等 (668)

中国绿色壁垒措施现状 罗 宏 (675)

机动车与移动源污染控制

CeO₂ 基氧化物储氧材料研究（I）制备、储氧性能研究 李 凯 周卫华 王学中等 (684)

公路隧道机动车流量调查及其构成特点 丁 焰 叶慧海 王 玮等 (689)

利用超短距离碰撞效应的高效燃油雾化系统 鲍晓峰 郭瑞莲 郭常亮等 (695)

水环境 与污染控制

中国环境科学研究院建院30周年

论文集

氨氮与镉单一和复合作用对沉水植物穗花狐尾藻和轮叶黑藻光合能力的影响

许秋瑾 金相灿 王兴民 陈书琴 颜昌宙

(中国环境科学研究院湖泊研究中心, 北京, 100012)

摘要 在水-土环境中, 单一物质引起的污染很少, 绝大多数污染是多种污染物质共存所造成的。利用碘量法测定溶解氧, 研究了氨氮与镉单一和复合作用对沉水植物穗花狐尾藻和轮叶黑藻光合能力的影响。结果显示, 氨氮质量浓度在 $4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 对轮叶黑藻有较强的胁迫作用, 表现为光合作用的产氧量与呼吸作用的耗氧量均下降, 而此质量浓度对穗花狐尾藻没有表现出胁迫作用; 当镉处理质量浓度为 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 镉对 2 种沉水植物都表现出明显的胁迫效应, 且对轮叶黑藻的胁迫作用更强; 当镉与氨氮复合作用时, 对轮叶黑藻产生联合毒害作用, 但对穗花狐尾藻毒害作用较轻, 可能原因是穗花狐尾藻所含的粗纤维比轮叶黑藻少, 细胞壁上能结合重金属的位点较少, 所以吸附的镉相应减少, 毒性较小。实验结果表明在进行湖泊水生植物修复时, 相对于轮叶黑藻, 穗花狐尾藻更适合作为生态恢复的先导物种。

关键词 氨氮 镉 穗花狐尾藻 轮叶黑藻 光合作用 呼吸作用

Effects of Both Single and Combined Pollution of Cd and NH_4^+ on *Hydrilla verticillata* and *Myriophyllum spicatum*

XU Qiujin JIN Xiangcan WANG Xingmin

CHEN Shujin YAN Changzhou

(Research Center of Lake Eco-Environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing, 100012)

Abstract Combined pollution is more ubiquitous than the single pollution in water and soil environment. Iodine method was used to study the effects of both single and combined pollution of Cd and NH_4^+ on *Hydrilla verticillata* and *Myriophyllum spicatum*. Results came out that *H. verticillata* was distinctly stressed at $4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ concentration of NH_4^+ , oxygen production of photosynthesis and oxygen depletion of respiration all declined, but for *M. spicatum*, it was not be stressed. If treated with $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd, *H. verticillata* and *M. spicatum* all were stressed, and *H. verticillata* was stressed more seriously. Combined pollution of Cd and NH_4^+ produced cooperative adverse effects on *H. verticillata*. But for *M. spicatum*, the stress was less severe comparatively. The main reason was that *M. spicatum* made of less crude cellulose. So it had less combined pathway with heavy metal than *H. verticillata*. It dem-

文章出处: 环境科学, 2006, 27 (10)。

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2002CB412307); 国家“十五”重大科技专项 (2002AA601013)。

onstrated that *M. spicatum* is suit for pioneer plant comparatively during the process of lake restoration.

Key words NH_4^+ , Cd, *Hydrilla verticillata*, *Myriophyllum spicatum*, Photosynthesis, Respiration

由于人类活动,使重金属元素(如镉、汞、铅、铬、铜等)在土壤、水体中大量积累。重金属进入水体后,大部分被水中各种有机和无机胶体及微粒物质所吸附,经聚集沉降沉积于水体底部,小部分在碱金属背景下溶解于水中,其他部分则被水生动植物吸收。重金属在水生动物及水生植物根、茎、叶、籽粒中的累积,不仅严重影响水生动物及水生植物的生长和发育,而且可能进入食物链,危及人类的健康。国内外有关重金属对环境污染的研究大多只涉及单一污染物的环境效应,对多种污染物所形成的环境复合污染效应及其机理的认识还远远不够,已有的复合污染效应研究多注重2种重金属对植物的复合作用^[1],且以农作物为主^[2],对水生植物的研究不多见,特别是沉水植物。在我国,由于大部分湖泊富营养化问题十分严重,水体中氮磷营养质量浓度较高,因此水生植物除了可能受重金属胁迫外,在生长过程中还必然需耐受高浓度营养盐的胁迫,高质量浓度营养盐,特别是氨氮对沉水植物具有胁迫作用^[3]。但有关氨氮与重金属镉对沉水植物的复合效应未见报道,本文旨在通过实验研究,阐明随着富营养化进程,总氮升高,特别是 NH_4^+ 质量浓度增加,是否和重金属镉污染产生交互作用,从而影响沉水植物的光合能力。

轮叶黑藻 [*Hydrilla verticillata* (L. f.) Rolye], 水鳖科沉水草本,穗花狐尾藻 (*Myriophyllum spicatum* L.), 小二仙草科沉水草本,此2种沉水植物常见于水田、池塘、湖泊或溪流等淡水中,广布于我国大部分地区,具有较好的代表性,而且断枝能繁殖,是实验室研究的好材料。

1 材料与方法

1.1 材料

穗花狐尾藻和轮叶黑藻均为野生,取自北京房山区拒马河。

1.2 沉水植物的预处理与培养

沉水植物于铺有湖泥的水槽培养驯化2周后,选取生长良好、形态大小较均一的新鲜顶枝1g,进行光合能力的实验,每组设3个平行。

1.3 实验设计

穗花狐尾藻处理质量浓度:氨氮设3个质量浓度梯度,分别是0、0.2、4.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,镉设4个质量浓度梯度,分别是0、0.05、0.1、0.2 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。轮叶黑藻处理质量浓度:氨氮设4个质量浓度梯度,分别是0、0.05、0.2、4.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,镉设3个质量浓度梯度,分别是0、0.1、0.2 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。培养液均为1/10Hoagland's稀释液。

1.4 光合能力的测定^[4,5]

将植株置于黑白瓶中,用虹吸法注满培养液,黑瓶用黑色塑料布包裹,与白瓶一起置于光照强度为5000lx,水温为24℃的恒温水槽中,12h后取出进行溶解氧的测定,方法为碘量法,国标法^[6],用以下公式计算出每克湿重植物在单位时间内(每小时)的产氧量,耗氧量($\text{mg} \cdot \text{h}^{-1}$)。

光合作用总产氧量 = (白瓶溶解氧量 - 黑瓶溶解氧量) × 实验瓶容量 / 时间

光合作用净产氧量 = (白瓶实验溶解氧 - 初始瓶溶解氧) × 实验瓶容量 / 时间

呼吸作用耗氧量 = (初始瓶溶解氧量 - 黑瓶实验后溶解氧量) × 实验瓶容量 / 时间

2 结果与分析

2.1 氨氮对穗花狐尾藻和轮叶黑藻光合能力的影响

穗花狐尾藻在本实验处理的质量浓度范围内,即氨氮质量浓度0~4.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间时,

其光合能力呈上升趋势,表现在净产氧量和总产氧量都增加,并且和氨氮为 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的对照组相比有显著性差异, $p < 0.05$ (图 1)。随着氨氮质量浓度的增高,黑藻的耗氧量、净产氧量、总产氧量有下降趋势,氨氮质量浓度为 $4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,净产氧量显著性下降, $p < 0.05$ (图 2)。

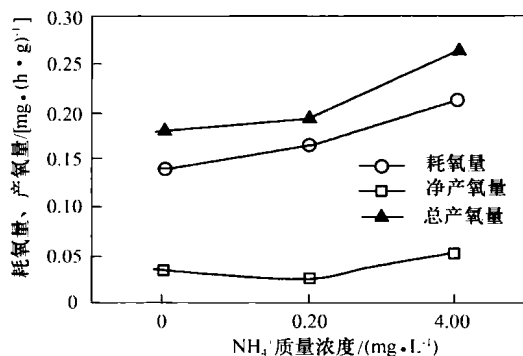


图 1 不同质量浓度氨氮对穗花狐尾藻光合能力的影响

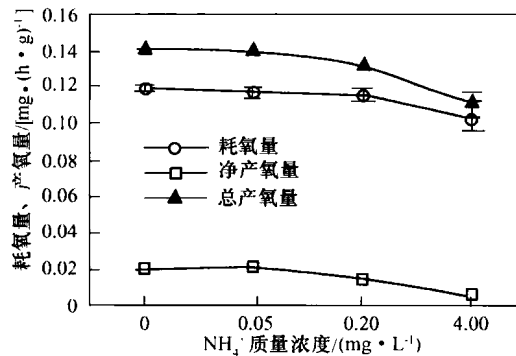


图 2 不同质量浓度氨氮对轮叶黑藻光合能力的影响

2.2 镉对穗花狐尾藻和轮叶黑藻光合能力的影响

镉质量浓度低于 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,镉对轮叶黑藻和穗花狐尾藻的胁迫作用不明显,耗氧量、净产氧量、总产氧量和镉质量浓度为 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的对照组相比没有显著性差异。镉质量浓度为 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,穗花狐尾藻净产氧量和总产氧量明显下降 ($p < 0.05$),但耗氧量变化不明显;轮叶黑藻在此浓度下耗氧量和总产氧量都明显下降,净产氧量与对照组相比无明显差异 (图 3、图 4)。高质量浓度镉处理对 2 种沉水植物有较强的胁迫作用,但对黑藻的胁迫作用更强,镉质量浓度为 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,轮叶黑藻的耗氧量平均只有 $0.083 \text{ mg} \cdot \text{h}^{-1}$,而穗花狐尾藻是 $0.151 \text{ mg} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

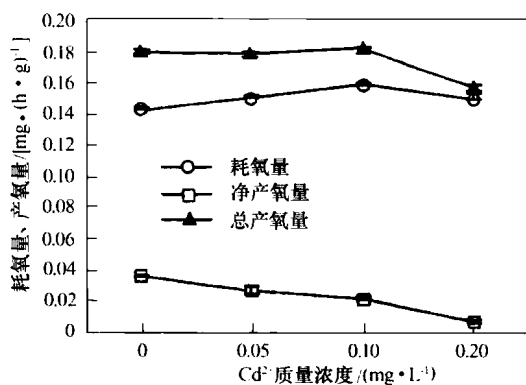


图 3 不同质量浓度镉对穗花狐尾藻光合能力的影响

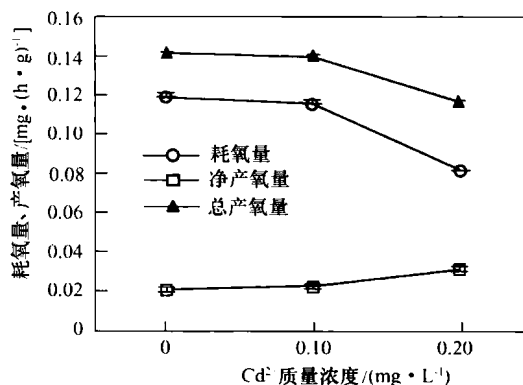


图 4 不同质量浓度镉对轮叶黑藻光合能力的影响

2.3 氨氮与镉对穗花狐尾藻光合能力的复合作用

镉浓度一致的情况下,随着氨氮质量浓度的升高,穗花狐尾藻光合能力表现出先下降后升高的趋势,氨氮质量浓度为 $4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 实验组的总产氧量与对照组相比有明显差异 ($p < 0.05$),见表 1。

表 1 氨氮对镉胁迫穗花狐尾藻光合能力的影响

$\text{NH}_4^+ / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\text{Cd}^{2+} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	呼吸耗氧量/ [$\text{mg} \cdot (\text{h} \cdot \text{g})^{-1}$]	净产氧量/ [$\text{mg} \cdot (\text{h} \cdot \text{g})^{-1}$]	总产氧量/ [$\text{mg} \cdot (\text{h} \cdot \text{g})^{-1}$]
0	0.05	0.151 ± 0.001	0.027 ± 0.003	0.178 ± 0.002
0.2	0.05	0.141 ± 0.001	0.015 ± 0.000	0.156 ± 0.000
4.0	0.05	0.173 ± 0.004	0.033 ± 0.002	$0.206 \pm 0.003^*$
0	0.1	0.159 ± 0.001	0.022 ± 0.001	0.183 ± 0.000
0.2	0.1	0.156 ± 0.001	0.012 ± 0.000	0.169 ± 0.000
4.0	0.1	0.174 ± 0.004	0.033 ± 0.002	$0.201 \pm 0.003^*$
0	0.2	0.151 ± 0.002	0.006 ± 0.000	0.157 ± 0.002
0.2	0.2	0.120 ± 0.002	0.008 ± 0.000	0.128 ± 0.002
4.0	0.2	0.185 ± 0.003	0.015 ± 0.001	$0.200 \pm 0.000^*$

* 表示 $p < 0.05$ 。

在氨氮质量浓度一致的情况下，随着镉浓度的升高，穗花狐尾藻总产氧量、净产氧量与耗氧量总体呈降低的趋势，镉质量浓度为 $0.2 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，氨氮质量浓度为 $4.0 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的处理组，出现伤呼吸，即耗氧量增加（图 5）。

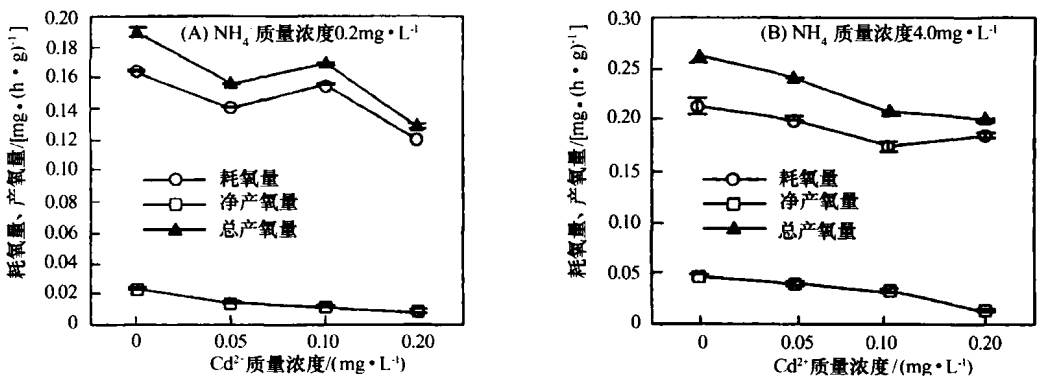


图 5 镉对氨氮胁迫穗花狐尾藻光合能力的影响

2.4 氨氮与镉对轮叶黑藻光合能力的复合作用

镉质量浓度一致的情况下，随着氨氮质量浓度的升高，轮叶黑藻的净产氧量、总产氧量和耗氧量呈下降趋势（表 2）。氨氮质量浓度为 $4.0 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 实验组的净产氧量，总产氧量与对照组相比有明显差异（ $p < 0.05$ ）。

表 2 氨氮对镉胁迫黑藻光合能力的影响

$\text{NH}_4^+ / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\text{Cd}^{2+} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	呼吸耗氧量/ [$\text{mg} \cdot (\text{h} \cdot \text{g})^{-1}$]	净产氧量/ [$\text{mg} \cdot (\text{h} \cdot \text{g})^{-1}$]	总产氧量/ [$\text{mg} \cdot (\text{h} \cdot \text{g})^{-1}$]
0	0.1	0.116 ± 0.003	0.023 ± 0.000	0.139 ± 0.002
0.05	0.1	0.122 ± 0.003	0.018 ± 0.001	0.140 ± 0.002
0.2	0.1	0.118 ± 0.003	0.016 ± 0.001	0.134 ± 0.002
4.0	0.1	0.109 ± 0.009	$0.010 \pm 0.001^*$	$0.119 \pm 0.008^*$
0	0.2	0.083 ± 0.001	0.032 ± 0.001	0.115 ± 0.000
0.05	0.2	0.081 ± 0.003	0.029 ± 0.001	0.019 ± 0.002
0.2	0.2	0.087 ± 0.006	0.025 ± 0.001	0.112 ± 0.006
4.0	0.2	0.074 ± 0.002	$0.014 \pm 0.001^*$	$0.088 \pm 0.006^*$

* 表示 $p < 0.05$ 。

氨氮质量浓度一致的情况下,高质量浓度镉处理组的植物比低质量浓度镉处理组的植物产氧量与耗氧量都明显下降,但净产氧量变化不显著(图6)。

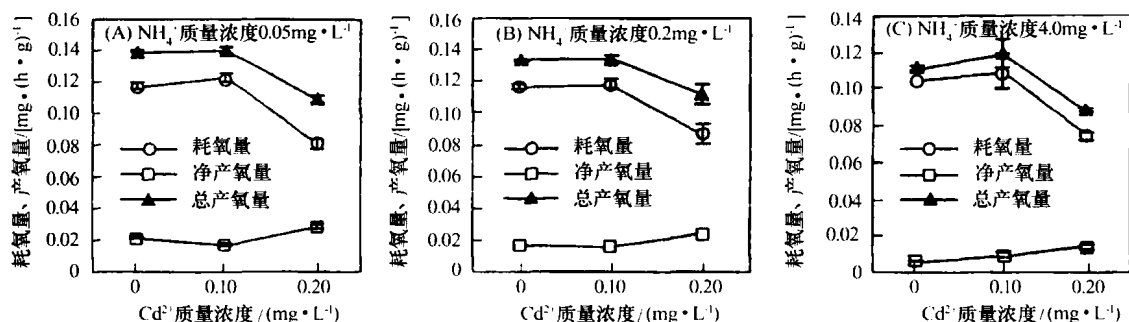


图6 镉对氨氮胁迫轮叶黑藻光合能力的影响

3 讨论

氨氮的处理质量浓度有一定的代表性,根据地表水质环境质量标准(GB 3838—2002),氨氮质量浓度为 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,相当于Ⅰ~Ⅱ类水,氨氮质量浓度为 $4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,相当于劣Ⅴ类水。氮素营养是植物需求量最多、质量分数最高的营养元素,植物干体中氮含量约占 $0.3\% \sim 5\%$ 。植物缺氮时会表现为生长缓慢,植株矮小,植物分枝,分蘖减少。但是高质量浓度的氨氮会导致植物中毒,甚至死亡^[7]。施氮过多会引起植株旺长,还会造成植株的营养生长与生殖生长失调,果实风味品质下降^[8]。本实验结果显示随着氨氮质量浓度的增高,黑藻的耗氧量、净产氧量、总产氧量有下降趋势,氨氮质量浓度为 $4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,净产氧量显著性下降 ($p < 0.05$) (图2),表现出较明显的胁迫作用。此结果在农作物研究方面也有类似报道,研究氮素营养对小麦根冠协调生长的调控实验中发现不同氮素质量浓度下,氮肥用量的提高对地上部干重和叶片气体交换参数表现为增效效应,但当用量增至一定程度时,地上部干重和叶片气体交换参数均呈下降趋势^[9];无论是高淀粉玉米还是普通玉米,其淀粉含量、粗蛋白含量,脂肪酸总量以及支链淀粉、醇溶蛋白、软脂酸、油酸和亚油酸含量,均随施氮量的增加而增加,但过量施氮则其含量下降^[10]。穗花狐尾藻在本实验处理的质量浓度范围内,即氨氮质量浓度在 $0 \sim 4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间时,其光合能力呈上升趋势,表现在净产氧量和总产氧量都增加,并且和氨氮质量浓度为 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的对照组相比有显著性差异, $p < 0.05$ (图1)。说明对于穗花狐尾藻,目前实验处理的氨氮质量浓度还未过量,仍在其生长条件的适宜质量浓度范围之内;和轮叶黑藻相比,穗花狐尾藻更能耐受高质量浓度的氨氮,此实验结果也从另一个角度证明了穗花狐尾藻比较耐污,而轮叶黑藻作为演替早期的水生植物,其生长的水质条件相对需要较好,耐污能力不如穗花狐尾藻^[11,12]。

镉是一种环境污染物质,被广泛应用于机械、化工、电镀和印染等部门,这些工业排放的废弃物成为环境中镉的污染源,镉进入生物体内循环,对人和植物都造成很大危害。镉和其它微量元素一样其质量浓度的变化会引起维管束植物一系列生理生化变化^[13]。镉是光合作用的一种有效抑制剂^[14]。用含不同质量浓度镉的海水培养石莼18 d,石莼的光合作用、呼吸作用和叶绿素含量受到了明显的影响,光合速率和叶绿素含量明显下降。低质量浓度的镉对呼吸有促进作用,会出现伤呼吸,高浓度的镉对呼吸有明显抑制作用^[15]。本文的研究结果显示镉质量浓度低于 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,镉对轮叶黑藻,穗花狐尾藻的胁迫作用不明显,表现在耗氧量、净产氧量、总产氧量和镉质量浓度为 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的对照组相比没有显著性差异,但镉质量浓度为 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,穗花狐尾藻净产氧量和总产氧量明显下降 ($p < 0.05$),耗氧量变化不明显;而

轮叶黑藻在此质量浓度下耗氧量和总产氧量都明显下降,净产氧量与对照组相比无明显差异(图3、图4)。高质量浓度镉处理对2种沉水植物有较明显的胁迫作用,相比而言,穗花狐尾藻耐镉能力较强,相关的实验研究表明穗花狐尾藻对镉有较强的生物吸附作用,生物吸附量干重为 $1.57\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,远高于挺水植物^[16]。穗花狐尾藻(*M. spicatum*)又比同科的另一种水生植物(*M. triphyllum*)更能耐受高质量浓度的镉^[17]。而轮叶黑藻耐镉的能力较弱,因为镉质量浓度为 $0.2\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,轮叶黑藻的耗氧量平均只有 $0.083\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}$,穗花狐尾藻则是 $0.151\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}$ 。呼吸作用是新陈代谢过程一项最基本的生命活动,它是为生命活动的各项具体过程提供能量(ATP)的。所以呼吸作用在一切生物的生命活动过程是一刻都不能停止的,呼吸作用的停止意味着生命的结束。呼吸作用降低,意味生命的衰落,穗花狐尾藻比轮叶黑藻更耐镉的原因可能是由其生理结构决定的。Kapoor等^[18]通过化学修改黑曲霉(*Aspergillus niger*)吸附重金属的研究表明,在吸附过程中,细胞壁上的羧基和氨基起重要作用,磷酸基和脂类作用很小。因此,沉水植物细胞壁上的多糖与金属离子的结合可能主要是通过多糖的—OH和—CONH₂与金属离子进行络合作用的,轮叶黑藻的粗纤维素占干物质的比重是穗花狐尾藻的2倍多^[19],而粗纤维素主要由多糖构成,因此可以初步推断轮叶黑藻应比穗花狐尾藻吸附更多的重金属^[20],从而对轮叶黑藻的光合能力的抑制作用更强。

氨氮对轮叶黑藻光合作用的抑制是毋庸置疑的,镉质量浓度一致的情况下,随着氨氮质量浓度的升高,轮叶黑藻光合作用的净产氧量、总产氧量、耗氧量都下降(表2)。镉对轮叶黑藻的光合作用的抑制也是明确的,氨氮质量浓度一致的情况下,高质量浓度镉组的植物比低质量浓度镉处理组的轮叶黑藻总产氧量与耗氧量都明显下降,净产氧量变化不显著(图6)。对轮叶黑藻来说,镉与氨氮对其有联合毒害作用,特别是在高质量浓度处理组。镉质量浓度一致的情况下,氨氮对穗花狐尾藻的产氧量和耗氧量,随着氨氮质量浓度的升高,表现出低质量浓度时变化不大,而高质量浓度时显著升高, $p<0.05$ (表1)。氨氮质量浓度一致的情况下,随着镉质量浓度的升高,穗花狐尾藻总产氧量、净产氧量与耗氧量呈降低的趋势(图5),但在镉为 $0.2\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,氨氮为 $4.0\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的处理组,出现伤呼吸,即耗氧量增加(图5)。镉与氨氮对穗花狐尾藻没有明显的联合毒害作用,原因是 $4.0\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 质量浓度氨氮依然能促进光合作用,此外氨氮与镉同属阳离子,与穗花狐尾藻作用时会与镉竞争相同的结合位点,从而减弱镉对其的胁迫作用,轮叶黑藻的实验结果与穗花狐尾藻的实验结果差异很大,可能是轮叶黑藻所含的粗纤维比穗花狐尾藻多^[19],植物细胞壁上能结合重金属的位点相应多,所以这种竞争结合的作用表现不明显,轮叶黑藻仍能结合较多的重金属镉,氨氮又通过影响植物细胞内固有的氧自由基代谢平衡,导致产生过量氧自由基,过量的氧自由基引发或加剧膜脂过氧化反应,造成细胞膜损伤,干扰植物细胞的光合,呼吸以及其它代谢活动^[20]。所以氨氮与镉两者对轮叶黑藻产生了协同的胁迫作用。

4 结论

当氨氮质量浓度在 $4.0\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,对轮叶黑藻有较强的胁迫作用,表现为产氧量与耗氧量均下降,而此浓度对穗花狐尾藻没有表现出胁迫作用;当镉处理质量浓度为 $0.2\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,镉对2种沉水植物都表现出明显的胁迫效应,且对轮叶黑藻的胁迫作用更强;当镉与氨氮复合作用时,对轮叶黑藻产生协同的毒害作用,但对穗花狐尾藻毒害作用较轻,主要原因可能是穗花狐尾藻所含的粗纤维比轮叶黑藻少,细胞壁上能结合重金属的位点较少,所以吸附的镉相应减少,毒性也较小,但此机理尚需进一步论证。