

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第8期

Vol.34 No.8

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

2006 ~ 2009 年我国超大城市霾天气特征及影响因子分析	戴永立, 陶俊, 林泽健, 谢绍东, 曹军骥, 张仁健 (2925)
南京北郊秋季 VOCs 及其光化学特征观测研究	李用宇, 朱彬, 安俊琳, 高晋微, 夏丽, 张祥志, 秦玮, 汤莉莉 (2933)
大气 PM _{2.5} 中水溶性离子在线观测技术的应用研究	程萌田, 潘月鹏, 王辉, 刘全, 王跃思 (2943)
一种纳米气溶胶发生系统的设计及性能测试	麦华俊, 蒋靖坤, 何正旭, 郝吉明 (2950)
焦炉顶和厂区环境中有机碳和元素碳的粒径分布	刘效峰, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 宋耕芳 (2955)
昼夜增温对大豆田土壤 N ₂ O 排放的影响	胡正华, 周迎平, 崔海玲, 陈书涛, 肖启涛, 刘艳 (2961)
不同土地利用方式下冬季 N ₂ O 排放及其影响因素	伍延正, 张苗苗, 秦红灵, 侯海军, 陈春兰, 魏文学 (2968)
基于支持向量回归模型的水稻田甲烷排放通量预测研究	陈强, 蒋卫国, 陈曦, 袁丽华, 王文杰, 潘英姿, 王维, 刘孝富, 刘海江 (2975)
夏季黄海和渤海微表层和次表层海水中营养盐的分布特征	王文涛, 杨桂朋, 于娟, 吴冠伟 (2983)
氮磷浓度对东海原甲藻优势种群吸附 BDE28 和 BDE47 的影响	汪芳, 葛蔚, 柴超, 孟祥霞 (2992)
基于光学分类的太湖水体叶绿素 a 浓度高光谱遥感	孙德勇, 周晓宇, 李云梅, 陈晓玲, 黄昌春, 龚绍琦 (3002)
基于浮游细菌生物完整性指数的河流生态系统健康评价——以滇池流域为例	黄艺, 舒中亚 (3010)
珠江三角洲城市非点源 COD 影响因素分析及其负荷估算	廖义善, 卓慕宁, 李定强, 郭太龙 (3019)
珠江流域河流碳输出通量及变化特征	张连凯, 覃小群, 杨慧, 黄奇波, 刘朋雨 (3025)
三峡库区兰陵溪小流域养分流失特征	曾立雄, 肖文发, 黄志霖, 王佐庆 (3035)
三峡库区消落带典型草本植物淹水浸泡后可溶性有机碳的释放特征	谭秋霞, 朱波, 花可可 (3043)
混合层深度对藻类生长的影响研究	陈洋, 杨正健, 黄钰铃, 张平, 刘德富 (3049)
伊乐藻-氮循环菌联用对太湖梅梁湾水体脱氮的研究	赵琳, 李正魁, 周涛, 吴宁梅, 叶忠香, 刘丹丹 (3057)
组合型生态浮床对上覆水和沉积物之间氮磷的影响	郑立国, 杨仁斌, 王海萍, 宋建军 (3064)
生物炭覆盖对底泥污染物释放的影响	李扬, 李锋民, 张修稳, 吴召富, 于辉 (3071)
东莞石马河流域重金属污染及生态毒性的时空差异	高磊, 陈建耀, 柯志庭, 王江, 杨雪韵, 清水裕太 (3079)
连环湖牙门气泡沉积物重金属演化 and 污染研究	肖海丰, 臧淑英, 关莹, 刘少军, 徐海凤, 孙清展, 王京京, 李苗 (3088)
人工湿地净化工业区含非污染降雨径流的效果研究	敬丹丹, 王金泉, 马邕文, 李东亚, 王艳, 黄明智 (3095)
四环素抗性基因在人工湿地中的去除及累积	郑加玉, 刘琳, 高大文, 刘超翔 (3102)
不确定节点水量下水质监测点优化选址方法	刘书明, 吴雪, 欧阳乐岩 (3108)
饮用水中含氮消毒副产物三氯硝基甲烷的形成过程和影响因素	丁春生, 邹邦文, 缪佳, 傅洋平, 沈嘉辰 (3113)
漆酶催化氧化水中雌激素的研究	夏青, 谢卫平, 刘国强, 廖云燕, 王斌楠, 孔德洋, 陆隼鹤 (3119)
碳纳米管电极电还原降解水中头孢他啶	朱宏, 胡翔, 李俊峰 (3125)
UV-vis 光照下喹类抗菌药氟康唑的光化学反应类型	葛林科, 李凯, 杨凯, 邢广水, 于春艳, 张蓬, 姚子伟 (3132)
氙灯/TiO ₂ 体系下敌草隆光催化降解动力学研究	阳海, 曾健, 黎源, 阳立平, 易兵 (3137)
羟基磷灰石对水中刚果红的吸附作用研究	詹艳慧, 林建伟 (3143)
乙醇处理对树脂基纳米水合氧化铁结构及其除砷性能的影响	万琪, 李旭春, 潘丙才 (3151)
污水中溶解性有机氮类化合物的氯化反应特性及其消毒副产物生成潜能	刘冰, 于鑫, 余国忠, 古励, 赵承美, 翟慧敏, 李清飞 (3156)
短程深度脱氮中试工艺的低温启动和维持	顾升波, 王淑莹, 彭永臻 (3164)
生物活性炭厌氧氨氧化反应器启动过程研究	赖玮毅, 周伟丽, 何圣兵 (3171)
东北三省畜禽养殖粪固氮激素排放及其潜在污染风险	刘妹芳, 李艳霞, 张雪莲, 冯成洪, 鲁肖飞, 杨明, 李帷, 朱铁群, 黄泽春 (3180)
淮河流域土壤中全氟化合物的空间分布及组成特征	孟晶, 王铁宇, 王佩, 吕永龙 (3188)
华北平原典型区土壤氟的形态及其分布特征	易春瑶, 汪丙国, 靳孟贵 (3195)
长期施磷的产量效应及其环境风险评价	颜晓, 王德建, 张刚, 冉景, 郑继成 (3205)
污灌渠中有机氯农药对沿岸土壤的影响	徐亮, 张彩香, 刘敏, 廖小平, 姚林林, 李佳乐, 向青清 (3211)
表面活性剂及其组合洗脱污染土壤中的硫丹	熊佰炼, 郑国灿, 张进忠, 邢贻, 徐卫红 (3216)
黄土丘陵区不同坡向对土壤微生物生物量和可溶性有机碳的影响	赵彤, 蒋跃利, 闫浩, 黄懿梅, 安韶山 (3223)
氮素添加对樟树林红壤微生物的影响	郁培义, 朱凡, 宿少锋, 王志勇, 闫文德 (3231)
医疗废物焚烧炉周边环境介质中二噁英的浓度、同系物分布与来源分析	黄文, 张素坤, 杜国勇, 张漫雯, 冯桂贤, 任明忠 (3238)
固相微萃取和固相萃取评价多环芳烃降解过程中的生物有效性变化	郭美霞, 巩宗强, 李晓军, 刘丹, 王悦 (3244)
改良型固定化 <i>Pseudomonas oleovorans</i> DT4 降解四氢呋喃的研究	邵钱, 叶杰旭, 欧阳杜娟, 陈建孟, 陈东之 (3251)
PCR-DGGE 技术解析固体碳源表面生物膜的微生物群落结构	徐影, 仇天雷, 韩梅琳, 李军, 王旭明 (3257)
温度对嗜酸性硫杆菌活性和生物成因次生铁矿物形成的影响	宋永伟, 赵博文, 霍敏波, 崔春红, 周立祥 (3264)
小白菜对外源硝酸盐和亚硝酸盐动态吸收的差异及其机制研究	郭璐, 满楠, 梁东丽, 谢钧宇, 刘娟娟 (3272)
预处理对打捆麦秸贮存和厌氧生物产沼气的的影响	马慧娟, 陈广银, 杜静, 常志州, 叶小梅 (3280)
硝酸盐对淡水水生生物毒性及水质基准推导	张铃松, 王业耀, 孟凡生, 周岳溪, 于海斌 (3286)
生物毒性测试微孔板 MTOXPlate 的分析性能研究	林奕云, 张国霞, 贺丽苹, 孙国萍, 许玫英 (3294)
两种实验设计研究 DES 和 EV 对 MCF-7 细胞增殖的联合作用	刘倩, 雷炳莉, 安静, 尚羽, 钟玉芳, 康佳, 文育 (3303)
中国近海海洋环境多氯联苯 (PCBs) 污染现状及其影响因素	刘敏霞, 杨玉玉, 李庆孝, 王俊 (3309)
城市污水处理厂出水中的药品和个人护理品	郑少奎, 李晓峰 (3316)
生物炭封存技术研究进展	姜志翔, 郑浩, 李锋民, 王震宇 (3327)
饮用水水源地严格管理水质的对策分析——对实行严格水资源管理问题上的看法和建议	傅国伟 (3334)
《环境科学》征稿简则 (2967) 《环境科学》征订启事 (3034) 信息 (3063, 3136, 3194, 3302)	

硝酸盐对淡水水生生物毒性及水质基准推导

张铃松^{1,2}, 王业耀^{1,3*}, 孟凡生², 周岳溪^{1,2}, 于海斌³

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 3. 中国环境监测总站, 北京 100012)

摘要: 为推导保护淡水水生生物的 NO_3^- 水质基准, 收集了 NO_3^- 的水生生物毒性数据, 然后分析了不同水生生物类群的毒性敏感性, 并分别采用评价因子法、毒性百分数排序法和物种敏感度分布法进行基准值推导。结果表明, 不同生物类群的水生生物对 NO_3^- 毒性的敏感性存在明显差异, 其敏感性排序为节肢动物门 > 软体动物门 > 脊索动物门; 甲壳纲 > 昆虫纲 > 腹足纲 > 双壳 > 两栖纲 > 辐鳍纲。3种基准计算方法得到的基准值存在一定差异, 最终推荐采用毒性百分数排序法得出的 $87.97 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $5.17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 为现阶段 NO_3^- (以 N 计) 的水质急性毒性和慢性毒性基准值。

关键词: 硝酸盐氮; 水生生物; 评价因子法; 毒性百分数排序法; 物种敏感度分布法; 基准

中图分类号: X174 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)08-3286-08

Toxicity of Nitrate-N to Freshwater Aquatic Life and Its Water Quality Criteria

ZHANG Ling-song^{1,2}, WANG Ye-yao^{1,3}, MENG Fan-sheng², ZHOU Yue-xi^{1,2}, YU Hai-bin³

(1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. National Environmental Monitoring Centre, Beijing 100012, China)

Abstract: The toxicity sensitivity of different freshwater aquatic organisms was analyzed using the collected toxicity data in this paper. Three methods were used to estimate the criteria of nitrate to protect the freshwater aquatic life. The results showed that the species sensitivity to nitrate followed the order of Arthropoda > Mollusca > Chordata, and Crustacea > Insecta > Gastropoda > Bivalvia > Amphibia > Actinopterygii. Moreover, the output of assessment factor method, species sensitivity distribution method and USEPA's method was significantly different. Finally, criterias of $87.97 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $5.17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ to protect aquatic life from acute and chronic toxicity were proposed using USEPA's method.

Key words: nitrate-N; aquatic life; assessment factor method; toxicity percentile rank method; species sensitivity distribution method; criteria

NO_3^- -N 是一种来源广泛的活性氮化合物^[1]。近年来, 由于人类活动影响, 大量的含氮化合物排入水体中, 水环境系统原有的氮循环平衡受到一定影响^[2]。 NO_3^- 是含氮化合物氧化过程的最终产物, 其在水环境中有较强的稳定性, 因此水体中含氮化合物经过氨化、硝化作用后, 更趋向于转化为 NO_3^- ^[3]。截至目前, 国外研究人员已经逐渐认识到 NO_3^- 的水生生物的毒性影响^[4~6], Camargo 等^[7]于 2005 年对 NO_3^- 的水生生物毒性进行了综述, 结果发现大部分水体中 NO_3^- 浓度对水生生物可能存在一定毒性风险, 尤其是长期暴露的毒性影响。随着人类活动加剧, 环境中 NO_3^- 的不断增加^[8~11], NO_3^- 对水生生物的毒性影响逐渐引起环境问题专家的重视, USEPA 正着手开展保护水生生物的 NO_3^- 国家推荐基准值研究^[12,13], 加拿大则在 2012 年对 NO_3^- 水生生物基准进行修订^[14]。目前, 国内鲜见 NO_3^- 的水生生物毒性和保护水生生物的 NO_3^- 水质基准值推导的文献报道, 仅参考国外饮用水标准制定了阈值(以 N

计)为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的饮用水标准^[15], 在保护水生生物的 NO_3^- 水质基准、标准或其他指导性限值方面尚属空白。因此分析不同水生生物类群的毒性敏感性, 并进行水生生物基准推导是非常有意义的。本研究以保护水生生物为出发点, 收集国际上已公开发表的 NO_3^- 的水生生物毒性数据, 分析不同生物类群的毒性敏感性差异, 为下一步我国相关研究中敏感物种的选取提供借鉴, 并从中选取我国物种, 计算保护水生生物的 NO_3^- 水质基准值, 以期水环境质量管理提供参考和依据。

1 材料与方法

1.1 数据检索与筛选

在 ECOTOX 数据库、Elsevier 数据库、CNKI 数

收稿日期: 2012-08-26; 修订日期: 2013-02-05

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX070207-001-02)

作者简介: 张铃松(1982~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为水污染控制与风险评价, E-mail: zlingsong@163.com

* 通讯联系人, E-mail: yeyawang@163.com

数据库中检索迄今已发表的 NO_3^- 水生生物毒性实验数据,参照文献中毒性实验标准方法和数据筛选原则^[16~18],最终确定毒性实验应当满足:①实验中必须设置对照实验,对照组和实验组的实验条件一致,对照组中受试生物不得出现胁迫和疾病症状;②实验过程中目标物质浓度应以实测为准,其浓度尽量保持恒定;③实验过程需控制温度、pH、DO 等水质理化参数恒定;④急性毒性的实验终点为半效应浓度(50% effect concentration, EC_{50})或半致死浓度(50% lethal concentration, LC_{50}),其测试时间一般为 45~96 h;慢性毒性的实验终点为最大无观察效应浓度(maximum no observed effect concentration, NOEC)或最低观察效应浓度(lowest observed effect concentration, LOEC),其中鱼类测试时间一般应大于 28 d,溞类测试时间一般应大于 7 d. 当同一物种在不同实验条件下进行实验时,取其中最小值作为最终毒性数据;当同一物种在同一实验条件进行实验时,取其几何平均值作为最终毒性值. 表 1、表 2 分别为经筛选之后的急、慢性毒性数据.

1.2 基准值推导方法

当前常用的水质基准值推导方法包括评价因子法^[19]、毒性百分数排序法^[16]以及物种敏感度分布法^[20,21]. 评价因子法(assessment factor method, AFM)是最早用于推导水生生物基准的方法. 该方法采用已知的最敏感生物的毒性值乘以相应的评价因子^[22],以得到保护水生生物的基准值. 其计算公式如下:

$$\text{WQC} = \frac{\text{毒性值}}{\text{AF}} \quad (1)$$

式中, WQC 表示水质基准; AF 表示评价因子; 毒性值可以是慢性毒性实验中最敏感生物的 LOEC 或 NOEC,也可以是急性毒性实验中最敏感生物的 LC_{50} 或 EC_{50} ^[17]. 评价因子(AF)的取值一般基于基准制定者对污染物毒性效应的长期经验^[23],对于易降解污染物, AF 的取值一般为 10~20^[8,23].

毒性百分数排序法(toxicity percentile rank, TPR)是美国环境保护署推导基准的标准方法^[16],该方法能够避免高值毒性数据对拟合曲线的影响,避免拟合产生较大的背离,并在使用过程中日臻完善^[24],其计算步骤参见文献^[16].

物种敏感度分布法(species sensitivity distribution, SSD)在 1980 年代末首次提出^[25],并经过多次改进^[26~28]. 该方法使用典型的分布模型对毒性数据和累积概率构建物种敏感度分布曲线,并

确定一个统计学上的截止点来计算基准阈值. 截止点通常设定为 0.05^[17,23,26~28],即保护水生生态系统中 95% 的物种的浓度. 截至目前用于构建物种敏感度分布曲线的模型有多种^[17,18,21,27],本研究选取目前比较常用的 4 种模型进行拟合,并通过拟合优度系数辅助确定最终的物种敏感度分布模型.

2 结果与讨论

2.1 物种的敏感性差异分析

经筛选后,急性毒性数据共涉及 3 门 6 纲 14 科 20 属 21 种水生生物. 其中,从生物类群的组成来看,脊椎动物 10 种,包括鱼类 7 种,两栖类 3 种;无脊椎动物 11 种,包括软体动物 4 种,节肢动物 7 种. 毒性数据中受试生物的种类涵盖了水生生态系统的主要生物类别. 通常认为生态系统对污染物毒性的耐受性由系统中最敏感的生物物种决定^[29],而不同生物类群的生物对污染物可能具有不同的敏感性,分析各类别生物的敏感性差异对进一步毒性实验的物种选择以及确定水生态重点保护对象有重要意义^[30]. 因此本研究对基于不同受试生物的 LC_{50} 值计算得到的 SMAV 按照不同生物分类阶元进行划分,并对其敏感性差异进行比较,不同分类阶元水生生物的确氮毒性敏感度比较结果如图 1 所示.

由图 1 可知,水生生物对 NO_3^- 毒性的敏感性表现出明显差异和生物类群特征. 当按照门分类阶元划分,敏感性排序为节肢动物门 > 软体动物门 > 脊索动物门,其门平均急性毒性值分别为 871.85、503.09、173.98 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 按照纲分类阶元划分,敏感性排序为甲壳纲 > 昆虫纲 > 双壳 > 腹足纲 > 两栖纲 > 辐鳍纲,其纲平均急性毒性值分别为 139.96、204.82、498.80、516.20、791.77、908.60 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

从 NO_3^- 的毒性机制来看,目前一般认为 NO_3^- 会影响水生生物的载氧色素,使其丧失载氧能力,而造成水生生物中毒^[31~35]. 节肢动物与脊椎动物的载氧色素分别为血蓝蛋白和血红蛋白,因此可以推断 NO_3^- 对节肢动物的血蓝蛋白可能具有更强的毒性作用,从而使节肢动物更加敏感. 从整个水生生态系统的角度来看,甲壳纲动物中的枝角类和桡足类动物是食物链中的初级消费者,是高等水生生物的主要食物来源^[36,37],对生态系统平衡有至关重要的作用. 因此,在后续的毒性实验和风险评价中,可以优先选择节肢动物作为受试生物进行研究,以确保在水质基准计算和生态风险评价包含尽量多的敏感物种,以期对生态系统提供更加全面的保护.

表 1 NO₃⁻-N 水生生物急性毒性数据¹⁾

Table 1 Acute toxicity data of NO₃⁻ to aquatic life

门类	生物类群 (<i>n</i>)	物种名称			类型	LC ₅₀ /mg·L ⁻¹	SMAV /mg·L ⁻¹	GMAV /mg·L ⁻¹	文献	
脊椎 动物(10)	辐鳍纲(7) Actinopterygii	花鲮科(1) Poeciliidae	花鲮属(1) <i>Poecilia</i>	孔雀鱼	<i>Poecilia reticulatus</i>	本地种	191	191	191	[38]
		鲤科(1) Cyprinidae	胖头鲮属(1) <i>Pimephales</i>	黑头呆鱼	<i>Pimephales promelas</i>	本地种	415	415	415	[12]
			红点鲑属(1) <i>Salvelinus</i>	湖红点鲑	<i>Salvelinus namaycush</i>	本地种	1 121	1 121	1 121	[22]
		鲑科(4) Salmonidae	太平洋鲑属(2) <i>Oncorhynchus</i>	大鳞大麻哈鱼	<i>Oncorhynchus tshawytscha</i>	本地种	1 310	1 310	1 474	[39]
				虹鳟鱼	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	本地种	1 658	1 658	1 474	[40]
				白鲑属(1) <i>Coregonus</i>	鲱形白鲑	<i>Coregonus clupeaformis</i>	非本地种	1 903	1 903	1 903
		叉尾鲷科(1) Ictaluridae	真鲷属(1) <i>Ictalurus</i>	斑点叉尾鲷	<i>Ictalurus punctatus</i>	本地种	1 392	1 392	1 392	[41]
	两栖纲(3) Amphibia	雨蛙科(1) Hylidae	拟蝗蛙属(1) <i>Pseudacris</i>	北太平洋树蛙	<i>Pseudacris regilla</i>	非本地种	471.12	471.12	471.12	[42]
		负子蟾科(1) Pipidae	爪蟾属(1) <i>Xenopus</i>	非洲爪蛙	<i>Xenopus laevis</i>	本地种	1 655.8	1 655.8	1 655.8	[43]
		蛙科(1) Ranidae	蛙属(1) <i>Rana</i>	红腿蛙	<i>Rana aurora</i>	非本地种	636.3	636.3	636.3	[44]
无脊椎 动物(11)	双壳纲(3) Bivalvia	珠蚌科(2) Unionidae	淡水沟贝属(1) <i>Lampsilis</i>	淡水沟贝	<i>Lampsilis siliquiodora</i>	本地种	357	357	357	[12]
			<i>Megalonaias</i> (1)	—	<i>Megalonaias nervosa</i>	非本地种	937	937	937	[12]
		球蚬科(1) Sphaeriidae	球蚬属(1) <i>Sphaerium</i>	球蚬	<i>Sphaerium simile</i>	非本地种	371	371	371	[12]
	腹足纲(1) Gastropoda	苹果螺科(1) Ampullariidae	福寿螺属(1) <i>Pomacea</i>	佛罗里达 苹果螺	<i>Pomacea paludosa</i>	本地种	516.2	516.2	516.2	[45]
	昆虫纲(4) Insecta	纹石蛾科(2) Hydropsychidae	纹石蛾属 <i>Hydropsyche</i>	西石蛾	<i>Hydropsyche occidentalis</i>	非本地种	97.3	100.1	100.1	[46]
109							100.1	100.1	[15]	
90							100.1	100.1	[47]	
105							100.1	100.1	[16]	
合脉石蛾属(1) <i>Cheumatopsyche</i>			莎草 小纹石蛾	<i>Cheumatopsyche pettiti</i>	非本地种	113.5	138.7	138.7	[15]	
		165.5				138.7	138.7	[15]		
		154				138.7	138.7	[16]		
		128				138.7	138.7	[16]		
摇蚊科(1) Chironomidae		摇蚊属(1) <i>Chironomus</i>	摇蚊	<i>Chironomus dilutus</i>	本地种	278 *	278 *	278 *	[12]	
叉襴科(1) Nemouridae		颈腮石蝇属(1) <i>Amphinemura</i>	石蝇 Eastern forestfly	<i>Amphinemura delosa</i>	非本地种	456	456	456	[12]	
甲壳纲(3) Crustacea	蚤科(2) Daphniidae	网纹蚤属(1) <i>Ceriodaphnia</i>	模糊网纹蚤	<i>Ceriodaphnia dubia</i>	本地种	374 *	374 *	374 *	[31]	
		水蚤属(1) <i>Daphnia</i>	大型蚤	<i>Daphnia magna</i>	本地种	611 *	447 *	447 *	[17]	
	323 *					447 *	447 *	[17]		
	钩虾科(1) Gammaridae	Hyalella(1)	端足虫	<i>Hyalella azteca</i>	非本地种	453 *	447 *	447 *	[17]	
16.4						16.4	16.4	[12]		

1) n 为物种数量; SMAV 为种平均急性值; GMAV 为属平均急性值; * 表示毒性实验为 48 h, 其余则为 96 h

2.2 硝酸盐基准值推导

从表 1、表 2 的毒性数据中进一步筛选出中国本地物种. 经筛选, 急性毒性数据共涉及 3 门 8 科 11 属 12 种. 从物种类别来看, 毒性数据中鱼类 3 属 6 种, 底栖类 3 属 3 种, 浮游类 2 属 2 种. 其中包括

了占我国淡水鱼类一半以上的鲤科和鲢科, 在我国水体广泛分布的贝类、枝角类、桡足类等动物. 从生态类群来看, 物种涵盖了底栖动物、浮游动物等. 从其在食物链中所处的营养级来看, 包括了初级消费者、次级消费者和第三级消费者等, 涵盖了食

表 2 NO₃⁻-N 水生生物慢性毒性数据

生物类群 (n)		物种名称	类型	LC ₅₀ /mg·L ⁻¹	NOEC /mg·L ⁻¹	LOEC /mg·L ⁻¹	慢性毒性 /mg·L ⁻¹	ACR ¹⁾	文献
脊椎动物 (1)	辐鳍纲 (1)	黑头呆鱼 <i>Pimephales promelas</i>	本地种	415	49	109	73.08	5.68	[12]
					7.1	14.1			[17]
					7.1	14.1			[17]
无脊椎动物 (1)	甲壳纲 (1)	模糊网纹溞 <i>Ceriodaphnia dubia</i>	本地种	374	17.9	35.9	22	17	[17]
					17.9	35.9			[17]
					56.5	11.3			[17]

1) ACR 为急慢性比率

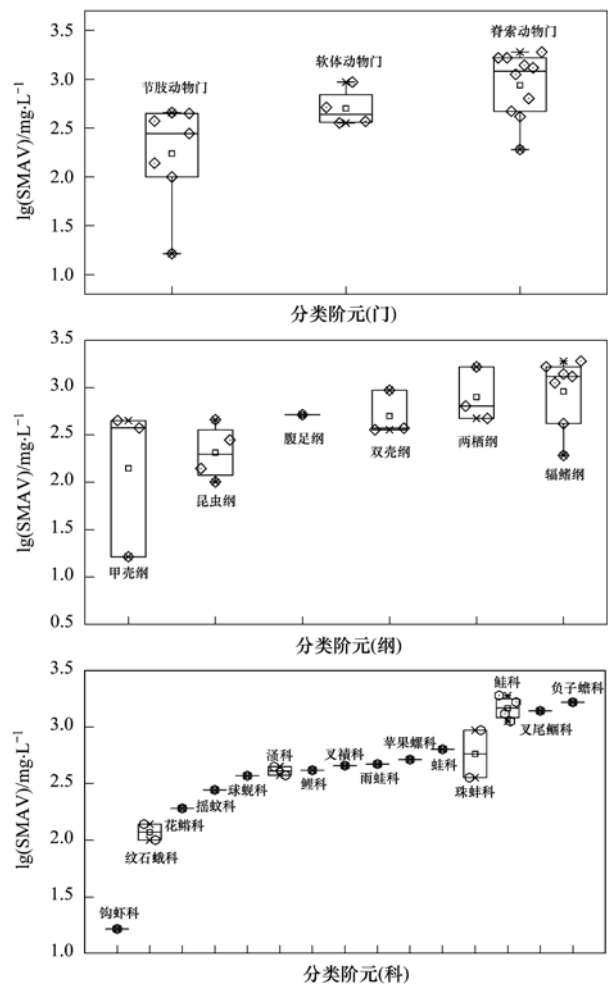


图 1 不同分类阶元水生生物的确氮毒性敏感度比较
Fig. 1 Comparasion of the toxicity sensitivity to NO₃⁻ in different taxonomic category

物链中不同营养级的生物。总体来说,毒性数据具有较高的物种多样性,能够满足毒性百分数排序法和物种敏感度分布法推导水生生物基准值的最小数据要求^[16,17]。慢性毒性数据则较少,仅有黑头呆鱼 (*Pimephales promelas*) 和模糊网纹溞 (*Ceriodaphnia dubia*) 2 种水生生物,不能满足毒性百分数排序法和物种敏感度分布法推导水生生物基准值的最小数

据要求。因此慢性毒性基准值使用急慢性比率 (ACR) 进行计算^[16,17,20]。

2.2.1 评价因子法

一般情况下,当使用慢性毒性数据计算基准值时,评价因子选择 10; 使用急性毒性数据计算基准值时,评价因子设定为 20^[18]。由表 1、表 2 中毒性数据可知,慢性毒性实验中,最敏感生物为模糊网纹溞 (*Ceriodaphnia dubia*), 其慢性毒性值为 22 mg·L⁻¹, 因此水质基准值 WQC = 22/10 = 2.2 mg·L⁻¹; 急性毒性实验中,最敏感生物为孔雀鱼 (*Poecilia reticulatus*), 其急性毒性值为 191 mg·L⁻¹, 因此水质基准值 WQC = 191/20 = 9.55 mg·L⁻¹。综合比较两种途径获得的基准值,由急性毒性值推导得出的水质基准值明显大于由慢性毒性值得出的水质基准值,因此最终确定取其中最小值作为评价因子法的最终基准值。

2.2.2 毒性百分数排序法

按照文献[16]步骤,计算获得最终急性值 (final acute value, FAV) 为 175.94 mg·L⁻¹, 进而得到 NO₃⁻ 的急性毒性基准值 CMC = FAV/2 = 87.97 mg·L⁻¹。由于慢性毒性数据不能满足最小数据要求,因此采用急慢性比率 (acute chronic ratio, ACR) 来计算慢性毒性基准值。由表 2 可知,现有的两个物种的 ACR 差别较大,因此选择 LC₅₀ 值更接近 FAV^[16,21] 的模糊网纹溞 (*Ceriodaphnia dubia*) 的 ACR 作为最终急慢性比率 (final acute chronic ratio, FACR), 因此慢性毒性基准值 CCC = CMC/ACR = 5.17 mg·L⁻¹。

2.2.3 物种敏感度分布法

对经过筛选之后的毒性数据进行对数转换,并采用 Kolmogorov-Smirnov、Anderson-Darling 检验法对其进行正态分布检验,结果发现在 0.01 的置信水平上服从正态分布。以各物种 SMAV 的对数值为自变量,累计概率为因变量绘制散点图,并分别采用 Logistic、Sigmoid、Gompertz、Gaussian 模型进行拟合,获得物种敏感度分布曲线,拟合结果如图 2 所示。

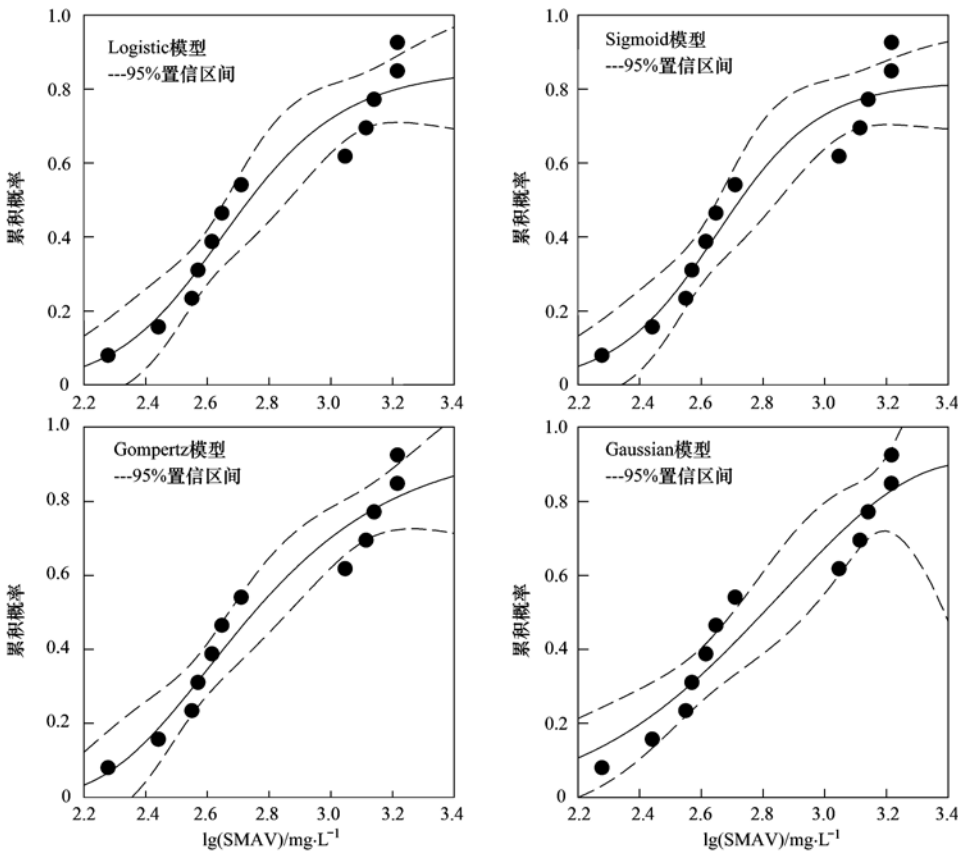


图 2 不同拟合模型获得的物种敏感度分布曲线

Fig. 2 Comparison of species sensitivity distribution curves simulated by different models

大量研究表明,没有任何一个模型对所有数据集都有很好的拟合效果,应根据毒性数据的实际分布情况确定拟合模型^[28, 48]. 目前,在物种敏感度分布法中一般采取拟合优度检验等方法来辅助模型选择^[49],但也有学者认为在毒性数据较少时拟合优度检验不能说明模型选择是合理的^[50]. 由于水生生态系统对毒性物质的耐受性主要取决于水生生态系统中最敏感的水生生物,尤其是当敏感生物在水生生态系统中具有重要作用时^[29]. 而用物种敏感度分布法推导基准值时,所获得的 5% 危害浓度值 (5% hazardous concentration, HC5) 的大小很大程度上取

决于模型对敏感数据的拟合效果,因此在构建物种敏感度曲线时,应当关注曲线尾部的拟合效果,首选对曲线尾部拟合效果好的模型进行基准值计算. 通常调整可决系数越大、残差平方和越小则表明拟合效果越好^[51],因此,为了判断拟合模型对敏感物种的敏感性拟合效果,本研究借鉴 USEPA 在推导基准值时,选择累计概率最接近 0.05 的 4 个属以避免高值区间的影响^[52]的方法,采用最敏感的 4 个物种的残差值平方和大小来判定分布模型对敏感物种的拟合效果,以保证获得的阈值更加合理. 各拟合模型的拟合效果如表 3 所示.

表 3 不同拟合模型的拟合优度系数、残差及 HC5 值比较

Table 3 Comparison of goodness of fit coefficient, residuals and HC5 values by different models

项目	模型			
	Logistic	Sigmoid	Gompertz	Gaussian
调整可决系数	0.924	0.920	0.930	0.913
残差平方和	0.053	0.055	0.048	0.060
4 个最敏感物种残差平方和	0.005	0.004	0.006	0.013
HC5/mg·L ⁻¹	158.48	158.24	175.42	98.57
95% 置信区间/mg·L ⁻¹	12.12 ~ 192.28	83.55 ~ 272.50	105.05 ~ 254.05	31.68 ~ 195.25

由表 3 可以看出,4 种拟合模型的调整可决系数为 0.920 ~ 0.930,残差平方和为 0.048 ~ 0.060,4

种最敏感物种的残差平方和为 0.004 ~ 0.013. 其中 Sigmoid 模型对敏感物种的拟合效果最佳,因此选定

采用 Sigmoid 模型进行 HC5 值计算. 最终计算得到短期 5% 危害浓度值 (5% short term hazardous concentration STHC5) 为 $158.24 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 同样, 由急慢性比率计算得到长期 5% 危害浓度值 (5% long term hazardous concentration LTHC5) 为 $9.31 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

2.2.4 基准值定值及与国外基准值的比较

本研究采用不同方法得出的基准值列于表 4. 比较发现不同方法的计算结果差异比较明显, 其中评价

因子法获得的基准值最小, 物种敏感度分布法获得基准值最大. 通过与已知水生生物的 LC_{50} 、NOEC、LOEC 值比较发现, 评价因子法得到的阈值远远小于最小的毒性值, 可能存在“过保护”的问题; 而物种敏感度分布法获得的慢性毒性阈值则与已知水生生物的 NOEC、LOEC 值比较接近, 可能无法为水生生物提供充足的保护. 因此建议管理部门选择毒性百分数排序法得到的阈值作为现阶段的水质基准值, 即 STHC5 为 $87.97 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, LTHC5 为 $5.17 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

表 4 不同国家的 NO_3^- 水生生物基准与标准比较

Table 4 Comparison of aquatic life criterias and standards of NO_3^- -N in different countries							
国家	毒性数据数量 (急性/慢性)	最小急性/慢性值 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	STHC5 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	LTHC5 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	适用范围	计算方法	文献
中国	12/2	191/22	—	2.2		AFM	本研究
			87.97	5.17		TPR	本研究
			158.24	9.31		SSD	本研究
加拿大	23/12	97.3/3.16	124	3		SSD	[14]
美国 明尼苏达州	17/8	100.1/22	41	3.1	2A 类水体	TPR	[14]
				4.9	2B 类水体		
澳大利亚	11/2	5.19/2.03	—	0.017 (HC1)	高级生态保护区	SSD	[21]
			—	0.7 (HC5)	受轻-中度影响生态区		
			—	3.4 (HC10)	受强烈影响生态区		
			—	17 (HC20)	受强烈影响生态区		
中国	—	—	—	—	饮用水标准 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$	—	[15]

截至目前, 加拿大、澳大利亚、美国部分州已经制定并颁布了各自的 NO_3^- 基准值. 通过与国外的 NO_3^- 水生生物基准值比较发现, 澳大利亚的 NO_3^- 基准值最为严格, 其基准值分为 4 个等级, 分别应对不同的生态区域, 其中高级生态保护区与受轻度-中度影响的生态区的基准值远远小于其他国家地区的基准值. 这与澳大利亚的生物区系特点有很大关系, 其在基准值推导中用到的最小急性、慢性值分别为 $5.19 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2.03 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 这导致其推导获得的基准值较小. 与美国基准值相比, 慢性基准较为接近, 而急性基准则相差较大, 由毒性数据可以看出, 最小急性毒性值分别为 $191 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $100.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 造成这种差异的原因可能是生物区系的差别. 此外, 澳大利亚、加拿大在毒性数据筛选时并未对实验终点做出严格要求, 这也是造成基准值差异的因素. 目前我国还没有相应的保护水生生物的标准, 仅有借鉴欧美国家颁布的阈值为 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的饮用水标准. 综合上述分析来看, 不同国家的基准值存在较大差异, 这进一步说明基准值的区域适用性, 完全照搬国外的水质基准可能不能对水生态系统提供合理的保护. 因此建议加强相关的基础研究, 以期为我国的水生态系统保护提供基础.

3 结论

(1) 不同水生生物对 NO_3^- 毒性的敏感性存在明显差异, 相比其他类别的水生生物, 节肢动物表现出更强的敏感性; 已有的毒性数据显示, 钩虾科对 NO_3^- 的毒性非常敏感, 应首选本地钩虾科物种进行毒性实验.

(2) 比较 3 种方法得出的基准值发现, 毒性百分数排序法得出的基准值较其他 2 种方法更为恰当. 因此建议以毒性百分数排序法得到的阈值作为现阶段的基准值, 即急性毒性基准值为 $87.97 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 慢性毒性基准值为 $5.17 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

(3) 通过比较发现, 不同国家的基准值存在一定的差异, 主要是由各国生物区系存在的差异造成的. 这进一步说明基准值的区域适用性, 完全照搬国外的水质基准可能无法对水生态系统提供合理的保护, 建议加强基础研究工作.

参考文献:

[1] Galloway J N, Cowling E B. Reactive Nitrogen and the world: 200 years of change [J]. AMBIO: A Journal of the Human Environment, 2002, 31(2): 64-71.

[2] Canfield D E, Glazer A N, Falkowski P G. The evolution and future of Earth's nitrogen Cycle [J]. Science, 2010, 330

- (6001): 192-196.
- [3] Wetzel R G. Limnology. Lake and river ecosystems[M]. (3rd edition). New York: Academic Press, 2001.
- [4] Hamlin H J. Nitrate toxicity in *Siberian sturgeon* (*Acipenser baeri*) [J]. Aquaculture, 2006, **253**(1-4): 688-693.
- [5] Kuhn D D, Smith S A, Boardman G D, *et al.* Chronic toxicity of nitrate to Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*: Impacts on survival, growth, antennae length, and pathology [J]. Aquaculture, 2010, **309**(1): 109-114.
- [6] Cheng S Y, Tsai S J, Chen J C. Accumulation of nitrate in the tissues of *Penaeus monodon* following elevated ambient nitrate exposure after different time periods [J]. Aquatic Toxicology, 2002, **56**(2): 133-146.
- [7] Camargo J A, Alonso A, Salamanca A. Nitrate toxicity to aquatic animals: a review with new data for freshwater invertebrates [J]. Chemosphere, 2005, **58**(9): 1255-1267.
- [8] Rabalais N N. Nitrogen in aquatic ecosystems [J]. AMBIO: A Journal of the Human Environment, 2002, **31**(2): 102-112.
- [9] 张娜, 何大伟, 陈静生, 等. 黄河水系氮污染特征初探 [J]. 环境化学, 2003, **22**(2): 105-109.
- [10] 张学青, 夏星辉, 杨志峰. 黄河水体氨氮超标原因探讨 [J]. 环境科学, 2007, **28**(7): 1435-1441.
- [11] 单保庆, 菅宇翔, 唐文忠, 等. 北运河下游典型河网区水体中氮磷分布与富营养化评价 [J]. 环境科学, 2012, **33**(2): 352-358.
- [12] U. S. EPA. Final Report on Acute and Chronic Toxicity of Nitrate, Nitrite, Boron, Manganese, Fluoride, Chloride and Sulfate to Several Aquatic Animal Species [R]. Office of Science and Technology, Chicago, 2010. 1.
- [13] MPCA. Aquatic Life Water Quality Standards Technical Support Document for Nitrate [R]. Minnesota. Minnesota Pollution Control Agency, 2010. 10.
- [14] CCME. Scientific Criteria Document for the Development of the Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life: Nitrate Ion [R]. Gatineau: Canadian Council of Ministers of the Environment, 2012. 28-134.
- [15] 国家环境保护总局. GB 3838-2002. 地表水环境质量标准 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [16] EPA U S. Guidelines for Deriving Numerical National Water Quality Criteria for the Protection of Aquatic Organisms and Their Uses [R]. Washington DC: Office of Research and Development, 1985.
- [17] CCME. A Protocol for the Derivation of Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life [R]. Winnipeg: Canadian Council of Ministers of the Environment, 2007.
- [18] 吴丰昌, 冯承莲, 曹宇静, 等. 我国铜的淡水生物水质基准研究 [J]. 生态毒理学报, 2011, **6**(6): 617-628.
- [19] 中国环境科学研究院. 水质基准的理论与方法学导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2010. 24.
- [20] Posthuma L, Suter G W II, Traas T P. Environmental and ecological risk assessment: species sensitivity distributions in ecotoxicology [M]. Washington, D. C. Lewis Publishers, 2002.
- [21] ANZECC & ARMCANZ. Australian and New Zealand guidelines for fresh and marine water quality Volume 1 The guidelines [R]. Canberra: Australian and New Zealand Environment and Conservation Council, Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand, 2000. 3-5.
- [22] McGurk M, Landry F, Tang A, *et al.* Acute and chronic toxicity of nitrate to early life stages of lake trout (*Salvelinus namaycush*) and lake whitefish (*Coregonus clupeaformis*) [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2006, **25**(8): 2187-2196.
- [23] 周永欣, 王士达, 夏宜铮. 水生生物与环境保护 [M]. 北京: 科学出版社, 1983, 77-83.
- [24] Leeuwen L J V, Vermeire T G. Risk assessment of chemicals: an introduction [M]. (2nd edition). The Netherlands: Springer, 2007. 338-341.
- [25] Kooijman S A L M. A safety factor for LC₅₀ values allowing for differences in sensitivity among species [J]. Water Research, 1987, **21**(3): 269-276.
- [26] Van Straalen N M, Denneman C A J. Ecotoxicological evaluation of soil quality criteria [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 1989, **18**(3): 241-251.
- [27] Aldenberg T, Jaworska J S. Uncertainty of the hazardous concentration and fraction affected for normal species sensitivity distributions [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2000, **46**(1): 1-18.
- [28] Shao Q. Estimation for hazardous concentrations based on NOEC toxicity data: an alternative approach [J]. Environmetrics, 2000, **11**(5): 583-595.
- [29] 苏海磊, 吴丰昌, 李会仙, 等. 我国水生生物水质基准推导的物种选择 [J]. 环境科学研究, 2012, **25**(5): 506-511.
- [30] Maltby L, Blake N, Brock T C M, *et al.* Insecticide species sensitivity distribution: Importance of test species selection and relevance to aquatic ecosystems [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2005, **24**(2): 379-388.
- [31] Scott G, Crunkilton R L. Acute and chronic toxicity of nitrate to fathead minnows *Pimephales promelas*, *Ceriodaphnia dubia* and *Daphnia magna* [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2000, **19**(12): 2918-2922.
- [32] Grabda E, Einszporn-Orecka T, Felinska C, *et al.* Experimental methemoglobinemia in rainbow trout [J]. Acta Ichthyologica et Piscatoria, 1974, **4**: 43-71.
- [33] WHO. Health hazards from nitrates in drinking water. Environmental Health [R]. Copenhagen. World Health Organization, Regional Office for Europe, 1986. 102.
- [34] Jensen F B. Uptake, elimination and effects of nitrite and nitrate in freshwater crayfish (*Astacus astacus*) [J]. Aquatic Toxicology, 1996, **34**(2): 95-104.
- [35] Cheng S Y, Chen J C. Study on the oxyhemocyanin, deoxyhemocyanin, oxygen affinity and acid - base balance of *Marsupenaeus japonicus* following exposure to combined elevated nitrite and nitrate [J]. Aquatic Toxicology, 2002, **61**(3-4): 181-193.

- [36] 蒋燮治,堵南山. 中国动物志无脊椎动物(第一卷)甲壳纲淡水枝角类[M]. 北京:科学出版社,1979. 42.
- [37] 沈嘉瑞. 中国动物志无脊椎动物(第二卷)甲壳纲淡水桡足类[M]. 北京:科学出版社,1979. 50-51.
- [38] Rubin A J, Elmaraghy G A. Studies on the toxicity of ammonia, nitrate and their mixture to guppy fry[J]. Water Research, 1977, **11**(10): 927-935.
- [39] Westin D T. Nitrate and nitrite toxicity to salmonoid fishes[J]. The Progressive Fish-Culturist, 1974, **36**(2): 86-89.
- [40] Buhl K J, Hamilton S J. Acute toxicity of fire-control chemicals, nitrogenous chemicals, and surfactants to rainbow trout [J]. Transactions of the American Fisheries Society, 2000, **129**(2): 408-418.
- [41] Colt J, Tchobanoglous G. Evaluation of the short-term toxicity of nitrogenous compounds to channel catfish, *Ictalurus punctatus* [J]. Aquaculture, 1976, **8**(3): 209-221.
- [42] Schuytema G S, Nebeker A V. Comparative effects of ammonium and nitrate compounds on Pacific treefrog and African clawed frog embryos [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 1999, **36**(2): 200-206.
- [43] Schuytema G S, Nebeker A V. Comparative toxicity of ammonium and nitrate compounds to Pacific treefrog and African clawed frog tadpoles [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1999, **18**(10): 2251-2257.
- [44] Schuytema G S, Nebeker A V. Effects of ammonium nitrate, sodium nitrate, and urea on red-legged frogs, Pacific treefrogs and African clawed frogs [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 1999, **63**(3): 357-364.
- [45] Corrao N M, Darby P C, Pomory C M. Nitrate impacts on the Florida apple snail, *Pomacea paludosa* [J]. Hydrobiologia, 2006, **568**(1): 135-143.
- [46] Camargo J A, Ward J V. Short-term toxicity of sodium nitrate (NaNO_3) to non-target freshwater invertebrates [J]. Chemosphere, 1992, **24**(1): 23-28.
- [47] Camargo J A, Ward J V. Nitrate (NO_3^- -N) toxicity to aquatic life: A proposal of safe concentrations for two species of Nearctic freshwater invertebrates[J]. Chemosphere, 1995, **31**(5): 3211-3216.
- [48] Smith E P, Cairns J J. Extrapolation methods for setting ecological standards for water quality: statistical and ecological concerns[J]. Ecotoxicology, 1993, **2**(3): 203-219.
- [49] Zajdlik & Associates Inc. Potential statistical model for describing species sensitivity distributions [R]. Hardcover; Canadian Council of Ministers of the Environment, 2006.
- [50] Warne M S. Derivation of the Australian and New Zealand water quality guidelines for toxicants [J]. Australasian Journal of Ecotoxicology, 2001, **7**(2): 123-136.
- [51] 李子奈. 潘文卿. 计量经济学[M]. (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2005. 40-42.
- [52] Leeuwen L J V, Vermeire T G. Risk assessment of chemicals: an introduction [M]. (2nd edition). The Netherlands: Springer, 2007. 338-341.

CONTENTS

Characteristics of Haze and Its Impact Factors in Four Megacities in China During 2006-2009	DAI Yong-li, TAO Jun, LIN Ze-jian, <i>et al.</i> (2925)
Characteristics of VOCs and Their Photochemical Reactivity in Autumn in Nanjing Northern Suburb	LI Yong-yu, ZHU Bin, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (2933)
On-Line Measurement of Water-Soluble Composition of Particulate Matter in Beijing	CHENG Meng-tian, PAN Yue-peng, WANG Hui, <i>et al.</i> (2943)
Design and Evaluation of an Aerosol Nanoparticle Generation System	MAI Hua-jun, JIANG Jing-kun, HE Zheng-xu, <i>et al.</i> (2950)
Aerosol Size Distribution of Organic Carbon and Elemental Carbon on the Top of Coke Oven and in the Plant Area	LIU Xiao-feng, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> (2955)
Effects of Diurnal Warming on Soil N ₂ O Emission in Soybean Field	HU Zheng-hua, ZHOU Ying-ping, CUI Hai-ling, <i>et al.</i> (2961)
N ₂ O Flux in Winter and Its Affecting Factors Under Different Land Use Patterns	WU Yan-zheng, ZHANG Miao-miao, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (2968)
Prediction of Methane Emission of Paddy Field Based on the Support Vector Regression Model	CHEN Qiang, JIANG Wei-guo, CHEN Xi, <i>et al.</i> (2975)
Distributional Characteristics of Nutrients in the Sea-surface Microlayer and Subsurface Water of the Bohai and Yellow Sea in Summer	WANG Wen-tao, YANG Gui-peng, YU Juan, <i>et al.</i> (2983)
Effect of Nitrogen and Phosphorus Concentrations on the Adsorption of BDE28 and BDE47 by <i>Prorocentrum donghaiense</i> Dominant Population	WANG Fang, GE Wei, CHAI Chao, <i>et al.</i> (2992)
Hyperspectral Remote Sensing of Chlorophyll a Concentrations in the Lake Taihu, Based on Water Optical Classification	SUN De-yong, ZHOU Xiao-yu, LI Yun-mei, <i>et al.</i> (3002)
Bacterioplankton Index of Biotic Integrity (BP-IBI): An Approach for Assessing River Ecosystem Health in Dianchi Watershed	HUANG Yi, SHU Zhong-ya (3010)
Estimation of Urban Non-Point Source Pollution Loading and Its Factor Analysis in the Pearl River Delta	LIAO Yi-shan, ZHUO Mu-ning, LI Ding-qiang, <i>et al.</i> (3019)
Transported Fluxes of the Riverine Carbon and Seasonal Variation in Pearl River Basin	ZHANG Lian-kai, QIN Xiao-qun, YANG Hui, <i>et al.</i> (3025)
Characteristics of Nutrient Loss of Lanlingxi Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	ZENG Li-xiong, XIAO Wen-fa, HUANG Zhi-lin, <i>et al.</i> (3035)
Characteristics of Dissolved Organic Carbon Release Under Inundation from Typical Grass Plants in the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area	TAN Qiu-xia, ZHU Bo, HUA Ke-ke (3043)
Research on the Influence of Mixing Layer Depth on Algal Growth	CHEN Yang, YANG Zheng-jian, HUANG Yu-ling, <i>et al.</i> (3049)
Denitrification Study of <i>Elodea nuttallii</i> -Nitrogen Cycling Bacteria Restoration in Meiliang Bay, Taihu Lake	ZHAO Lin, LI Zheng-kui, ZHOU Tao, <i>et al.</i> (3057)
Influence of Combined Ecological Floating Bed on Nitrogen and Phosphorus Between Overlying Water and Sediment	ZHENG Li-guo, YANG Ren-bin, WANG Hai-ping, <i>et al.</i> (3064)
Effects of Biochar Covering on the Release of Pollutants from Sediment	LI Yang, LI Feng-min, ZHANG Xiu-wen, <i>et al.</i> (3071)
Temporal-spatial Difference of Ecotoxicity and Heavy Metals Pollution in Shima Catchment, Dongguan	GAO Lei, CHEN Jian-yao, KE Zhi-ting, <i>et al.</i> (3079)
Evolution and Pollution of Heavy Metals in Core Sediments from Yamenqi Lake in Lianhuan Lake, China	XIAO Hai-feng, ZANG Shu-ying, GUAN Ying, <i>et al.</i> (3088)
Effect of Constructed Wetland on the Purification of Industrial Zone Rainfall Runoff Contaminated with Phenanthrene	JING Dan-dan, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (3095)
Removal and Accumulation of the Tetracycline Resistance Gene in Vertical Flow Constructed Wetland	ZHENG Jia-yu, LIU Lin, GAO Da-wen, <i>et al.</i> (3102)
Method for Optimal Sensor Placement in Water Distribution Systems with Nodal Demand Uncertainties	LIU Shu-ming, WU Xue, OUYANG Le-yan (3108)
Formation Process of Nitrogenous Disinfection Byproduct Trichloronitromethane in Drinking Water and Its Influencing Factors	DING Chun-sheng, ZOU Bang-wen, MIAO Jia, <i>et al.</i> (3113)
Removal of Estrogens in Laccase Catalyzed Oxidative Processes	XIA Qing, XIE Wei-ping, LIU Guo-qiang, <i>et al.</i> (3119)
Study on Electrochemical Degradation of Cefazidime by Carbon Nanotubes Electrode	ZHU Hong, HU Xiang, LI Jun-feng (3125)
Photochemical Reaction Types of the Azole Fungicide Fluconazole Under UV-vis Irradiation	GE Lin-ke, LI Kai, YANG Kai, <i>et al.</i> (3132)
Photocatalytic Degradation Kinetics of Diuron by TiO ₂ and Simulated Sunlight	YANG Hai, ZENG Jian, LI Yuan, <i>et al.</i> (3137)
Adsorption of Congo Red from Aqueous Solution on Hydroxyapatite	ZHAN Yan-hui, LIN Jian-wei (3143)
Ethanol-Induced Influence on the Structure and Arsenate Adsorption of Resin-based Nano-hydrated Ferric Oxide	WAN Qi, LI Xu-chun, PAN Bing-cai (3151)
Chlorination Characteristic and Disinfection By-product Formation Potential of Dissolved Organic Nitrogen Compounds in Municipal Wastewater	LIU Bing, YU Xin, YU Guo-zhong, <i>et al.</i> (3156)
Start-up and Maintenance Method for Short-Cut Advanced Nitrogen Removal Process in a Pilot-Scale Reactor at Low Temperature	GU Sheng-bo, WANG Shu-ying, PENG Yong-zhen (3164)
Study on the Start-Up of Anaerobic Ammonium Oxidation Process in Biological Activated Carbon Reactor	LAI Wei-yi, ZHOU Wei-li, HE Sheng-bing (3171)
Excretion of Manure-Borne Steroid Hormones and Their Potential Risk in the Three Northeast Provinces of China	LIU Shu-fang, LI Yan-xia, ZHANG Xue-lian, <i>et al.</i> (3180)
Spatial Distribution and Composition of Perfluorinated Compounds in Soils Around the Huaihe River	MENG Jing, WANG Tie-yu, WANG Pei, <i>et al.</i> (3188)
Fluorine Speciation and Its Distribution Characteristics in Selected Agricultural Soils of North China Plain	YI Chun-yao, WANG Bing-guo, JIN Meng-gui (3195)
Effects of Long-Term Manure and Crop Residues Incorporation on Yield and Phosphorus Saturation in a Paddy Soil	YAN Xiao, WANG De-jian, ZHANG Gang, <i>et al.</i> (3205)
Influence of Organochlorine Pesticides in Wastewater on the Soil Along the Channel	XU Liang, ZHANG Cai-xiang, LIU Min, <i>et al.</i> (3211)
Elution of Endosulfan from Contaminated Soil by Surfactants and Their Combination	XIONG Bai-lian, ZHENG Guo-can, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (3216)
Effects of Different Aspects on Soil Microbial Biomass and Dissolved Organic Carbon of the Loess Hilly Area	ZHAO Tong, JIANG Yue-li, YAN Hao, <i>et al.</i> (3223)
Effects of Nitrogen Addition on Red Soil Microbes in the <i>Cinnamomum camphora</i> Plantation	YU Pei-yi, ZHU Fan, SU Shao-feng, <i>et al.</i> (3231)
Concentration, Profile Distribution and Source Identification of PCDD/Fs in Environmental Medium Around a HSWI	HUANG Wen, ZHANG Su-kun, DU Guo-yong, <i>et al.</i> (3238)
Assessment of Bioaccessibility of PAHs in Microbial Degradation Process Using Solid Phase Micro Extraction and Solid Phase Extraction	GUO Mei-xia, GONG Zong-qiang, LI Xiao-jun, <i>et al.</i> (3244)
Biodegradation of Tetrahydrofuran by Combined Immobilized of <i>Pseudomonas oleovorans</i> DT4	SHAO Qian, YE Jie-xu, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3251)
Analysis on Microbial Community in Biofilm Coating onto Solid Carbon Source Using the PCR-DGGE Technique	XU Ying, QIU Tian-lei, HAN Mei-lin, <i>et al.</i> (3257)
Effect of Temperature on Activity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> and Formation of Biogenic Secondary Iron Minerals	SONG Yong-wei, ZHAO Bo-wen, HUO Min-bo, <i>et al.</i> (3264)
Differences of Selenium Uptake Pattern of Pakchoi and the Possible Mechanism When Amended with Selenate and Selenite	GUO Lu, MAN Nan, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> (3272)
Effect of Pretreatment on Storage and Biogas Production of Baling Wheat Straw	MA Hui-juan, CHEN Guang-yin, DU Jing, <i>et al.</i> (3280)
Toxicity of Nitrate-N to Freshwater Aquatic Life and Its Water Quality Criteria	ZHANG Ling-song, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i> (3286)
Analysis Performance of Biological Toxicity Testing MTOXPlate Using Microplate	LIN Yi-yun, ZHANG Guo-xia, HE Li-ping, <i>et al.</i> (3294)
Study of Combined Effects of DES and EV on the Proliferation of MCF-7 Cells by Two Experimental Designs	LIU Qian, LEI Bing-li, AN Jing, <i>et al.</i> (3303)
Status and Influencing Factors of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) Pollution in the Coastal Areas in China	LIU Min-xia, YANG Yu-yi, LI Qing-xiao, <i>et al.</i> (3309)
Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) in the Effluent of Sewage Treatment Plants	ZHENG Shao-kui, LI Xiao-feng (3316)
Research Progress on Biochar Carbon Sequestration Technology	JIANG Zhi-xiang, ZHENG Hao, LI Feng-min, <i>et al.</i> (3327)
Countermeasures for Strict Water Quality Management of Drinking Water Sources: Some Thoughts and Suggestions on Implementing Strict Water Resources Management	FU Guo-wei (3334)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年8月15日 34卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 8 Aug. 15, 2013

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人