

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第9期

Vol.36 No.9

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长江三角洲 PM_{2.5} 质量浓度遥感估算与时空分布特征 徐建辉, 江洪 (3119)

宁波市 PM_{2.5} 中碳组分的时空分布特征和二次有机碳估算 杜博涵, 黄晓锋, 何凌燕, 胡敏, 王川, 任宇超, 应红梅, 周军, 汪伟峰, 许丹丹 (3128)

青岛大气中酸碱气体及 PM_{2.5} 中水溶性离子的浓度特征和气粒平衡关系 周佳佳, 石金辉, 李丽平, 姚小红, 高会旺 (3135)

北京雾霾天大气颗粒物中微生物气溶胶的浓度及粒谱特征 胡凌飞, 张柯, 王洪宝, 李娜, 王洁, 杨文慧, 殷喆, 焦周光, 温占波, 李劲松 (3144)

2015 年春节北京市空气质量分析 程念亮, 陈添, 张大伟, 李云婷, 孙峰, 魏强, 刘嘉林, 刘保献, 孙瑞雯 (3150)

上海市大气挥发性有机化学消耗与臭氧生成的关系 王红丽 (3159)

生物滴滤塔净化氯代烃混合废气的研究 陈东之, 缪孝平, 欧阳杜娟, 叶杰旭, 陈建孟 (3168)

一种基于 GOCI 数据的叶绿素 a 浓度三波段估算模型 郭宇龙, 李云梅, 李渊, 吕恒, 刘闯, 王旭东, 张思敏 (3175)

巢湖溶解性有机物时空分布规律及其影响因素 叶琳琳, 吴晓东, 刘波, 闫德智, 张攻琪, 周阳 (3186)

河北洺河溶解性有机物光谱学特性 虞敏达, 张慧, 何小松, 檀文炳, 张媛, 马丽娜, 席北斗, 党秋玲, 高如泰 (3194)

东山岛地下水“三氮”空间分布特征 吴海燕, 傅世锋, 蔡晓琼, 汤坤贤, 曹超, 陈庆辉, 梁修雨 (3203)

重庆典型岩溶区地下河中溶解态正构烷烃、脂肪酸来源、迁移及转化 梁作兵, 孙玉川, 王尊波, 师阳, 江泽利, 张媚, 谢正兰, 廖昱 (3212)

硫酸对乌江中上游段岩溶水化学及 δ¹³C_{DIC} 的影响 黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 张连凯, 苏春田 (3220)

阆中市思依镇水化学特征及其成因分析 张艳, 吴勇, 杨军, 孙厚云 (3230)

东南沿海河流-水库系统藻类生长营养盐限制季节变动 陈聪聪, 饶拉, 黄金良, 白敏冬 (3238)

水体氮磷营养盐水平与氯霉素浓度复合水体对苦草的生理生化影响 胡珍珍, 崔益斌, 李梅, 余静 (3248)

溶藻活性物质对棕囊藻溶藻及其脂肪酸影响的模拟 杨秋婵, 赵玲, 尹平河, 谭烁, 舒万姣, 侯少玲 (3255)

坡岸截留强化处理设施在不同运行条件下对农业面源污染物去除效果 李怀正, 陈珂莉, 危忠, 王卫刚 (3262)

典型材料屋面积尘重金属形态分布与风险评估 李敦柱, 管运涛, 刘安, 李思远 (3269)

南水北调丹江口水库水氯(胺)化消毒副产物产生特性与消毒工艺对比 张民盛, 徐斌, 张天阳, 程拓, 夏圣骥, 楚文海 (3278)

臭氧-混凝交互作用对混凝效果的影响 刘海龙, 郭雪峰, 王敏慧, 焦茹媛, 石健 (3285)

含溴水臭氧化过程阴离子对溴酸盐生成的影响 吴悦, 吴纯德, 刘吕刚, 袁博杰 (3292)

厌氧环境雌黄溶解产物形态的 XAS 研究 王莹, 许丽英, 王少锋, 肖翻, 贾永锋 (3298)

印染及染料行业废水生物处理系统中的 AOX 污染研究 申洋洋, 刘锐, 徐灿灿, 舒小铭, 许江军, 兰亚琼, 陈吕军 (3304)

螺旋霉素制药废水处理过程中耐药菌和抗性基因的转归特征 覃彩霞, 佟娟, 申佩弘, 魏源送 (3311)

两种膜生物反应器处理养猪沼液的比较研究 税勇, 川岸朋树, 宋小燕, 刘锐, 陈吕军 (3319)

农村污水膜生物反应器系统中微生物群落解析 孔晓, 崔丙健, 金德才, 吴尚华, 杨波, 邓晔, 庄国强, 庄绪亮 (3329)

四区一体反应器冬季启动脱氮特性及硝化菌群结构分析 张岩, 孙凤侠, 谢杭冀, 陈敬, 睦稀, 甘志明, 王修平, 史扬 (3339)

从亚硝酸还原厌氧氨氧化转变为硫酸盐型厌氧氨氧化 刘正川, 袁林江, 周国标, 李晶 (3345)

提高有机负荷对好氧颗粒污泥形成与稳定过程的影响 刘小鹏, 王建芳, 钱飞跃, 王琰, 陈重军, 沈耀 (3352)

常规施肥条件下农田不同途径氮素损失的原位研究, 以长江中下游地区夏玉米季为例 桑蒙蒙, 范会, 姜珊珊, 蒋静艳 (3358)

水氮组合模式对双季稻甲烷和氧化亚氮排放的影响 傅志强, 龙攀, 刘依依, 钟娟, 龙文飞 (3365)

厌氧条件下砂壤水稻土 N₂、N₂O、NO、CO₂ 和 CH₄ 排放特征 曹娜, 王睿, 廖婷婷, 陈诺, 郑循华, 姚志生, 张海, Klaus Butterbach-Bahl (3373)

黄土丘陵区不同有机碳背景下侵蚀坡面土壤呼吸特征 陈盖, 许明祥, 张亚锋, 王超华, 樊会敏, 王闪闪 (3383)

生物炭添加对半干旱地区土壤温室气体排放的影响 郭艳亮, 王丹丹, 郑纪勇, 赵世伟, 张兴昌 (3393)

宁夏山区林地土壤原位矿化过程中碳氮转化耦合特征 倪银霞, 黄懿梅, 牛丹, 赵彤, 闫浩, 蒋跃利 (3401)

石漠化山地植被恢复过程土壤团聚体氮分布及与氮素矿化关系研究 胡宁, 马志敏, 蓝家程, 伍宇春, 陈高起, 傅瓦利, 文志林, 王文净 (3411)

江汉平原农田土壤有机碳分布与变化特点: 以潜江市为例 王玉竹, 肖和艾, 周萍, 童成立, 葛体达, 曾冠军, 吴金水 (3422)

缙云山不同土地利用方式下土壤团聚体中活性有机碳分布特征 李睿, 江长胜, 郝庆菊 (3429)

西北典型工矿型城市街道尘埃重金属污染的环境磁学响应 聂燕, 王新, 王博, 许淑婧, 高福元, 余晔, 夏敦胜, 夏听鸣 (3438)

电镀厂周边环境重金属分布特征及人体健康暴露风险评估 郭鹏然, 雷永乾, 周巧丽, 王畅, 潘佳钊 (3447)

典型电力电容器污染土壤中多氯联苯水平及特性 刘洁, 李晓东, 赵中华, 祁志福, 陈彤, 严建华 (3457)

紫色土对硫丹的吸附与解吸特征 赵炎, 郑国灿, 朱恒, 张进忠, 朱秀英, 胡淑春, 吴娅林 (3464)

紫茉莉对石油污染盐碱土壤微生物群落与石油烃降解的影响 焦海华, 崔丙健, 吴尚华, 白志辉, 黄占斌 (3471)

4 株外生菌根真菌对 Al³⁺ 吸收与吸附的研究 王明霞, 袁玲, 黄建国, 周志峰 (3479)

长春市郊区蔬菜有机磷农药残留与健康风险评估 于锐, 刘景双, 王其存, 刘强, 王洋 (3486)

北京市北神树生活垃圾填埋场产甲烷菌的群落结构和演替规律 宋立娜, 王磊, 夏孟婧, 苏月, 李振山 (3493)

城市分散式粪便颗粒化有机肥用作叶菜肥的肥力及环境影响 吕文洲, 乔宇祥, 余宁, 史荣华, 王光明 (3501)

V₂O₅-WO₃/TiO₂ 催化剂与活性炭混合降解气相二噁英 任咏, 纪莎莎, 俞明峰, 李晓东, 严建华 (3508)

基于出行服务的纯电动公交车节能减排效益分析 林晓丹, 田良, 吕彬, 杨建新 (3515)

我国挥发性有机物定义和控制指标的探讨 江梅, 邹兰, 李晓倩, 车飞, 赵国华, 李刚, 张国宁 (3522)

异化铁还原对土壤中重金属形态转化及其有效性影响 司友斌, 王娟 (3533)

《环境科学》征订启事 (3297) 《环境科学》征稿简则 (3303) 信息 (3127, 3202, 3277, 3318)

水体氮磷营养盐水平与氯霉素浓度复合水体对苦草的生理生化影响

胡珍珍¹, 崔益斌^{2*}, 李梅¹, 余静¹

(1. 南京大学环境学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210023; 2. 环境保护部南京环境科学研究所, 南京 210042)

摘要: 通过实验室静态模拟, 研究了在不同氮磷营养水平(中营养组、富营养组和超富营养组)和不同浓度(0、0.05、0.1、0.2 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)氯霉素复合水体中暴露 7 d 后, 苦草叶片中过氧化物酶(POD)和超氧化物歧化酶(SOD)的活力以及丙二醛(MDA)、可溶性蛋白和叶绿素含量的响应。结果表明, 富营养和 0.2 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯霉素组复合水体中, 苦草的可溶性蛋白含量显著增加, 其浓度为同一营养组中 0 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯霉素组的 2.38 倍。POD 活力显著降低, 富营养和 0.2 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯霉素组复合水体中活力降为同一营养组中 0 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯霉素组的 33.84%。对 SOD 的影响随二者联合浓度增大而减小, 中营养和 0.2 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯霉素组复合水体的联合作用对苦草 SOD 的抑制最大, 其活力为同一营养组中 0 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯霉素组的 28.59%。

关键词: 富营养化; 氯霉素; 联合毒性; 生理生化影响; 氧化应激

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)09-3248-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.09.016

Physiological Effect of *Vallisneria natans* Under Different Concentrations of Nitrogen, Phosphorus and Chloramphenicol

HU Zhen-zhen¹, CUI Yi-bin^{2*}, LI Mei¹, YU Jing¹

(1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China)

Abstract: The effects of peroxidase(POD), superoxide dismutase(SOD) activities and malondialdehyde(MDA), soluble proteins and chlorophyll in the leaves of *Vallisneria natans* exposed to different concentrations of nitrogen and phosphorus in the eutrophication water body and chloramphenicol after 7 days were investigated in the study. The soluble protein content increased significantly in group eutrophic water and 0.2 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ chloramphenicol, and the concentration of protein was 2.38 times of that in group 0 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ chloramphenicol. In group of eutrophic water and 0.2 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ chloramphenicol, POD activities decreased significantly to 33.84% of that in group 0 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ chloramphenicol. With the increasing of the joint concentration, SOD activities decreased. SOD activities in group of mesotrophic and 0.2 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ chloramphenicol was 28.59% of that in group of 0 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ chloramphenicol.

Key words: eutrophication; chloramphenicol; joint toxicity; physiological and biochemical effect; oxidative

近年来, 由于人为和自然原因, 排入湖(库)的氮、磷等营养物质不断增加, 导致中国湖(库)中的水体环境现状令人堪忧, 富营养化情况愈加严重^[1]。作为水体污染的指示生物, 很多水生植物尤其是沉水植物用于水体修复已有较多的研究^[2]。苦草(*Vallisneria natans*)由于其生态适应性广, 具有较强的吸污能力和耐污性, 常被作为主要选用品种^[3]。

虽然氯霉素具有很强的副作用, 但是多年来人们对其重视程度一直不高, 直到最近几年才注意到其副作用和危害。欧洲和美国等国家都已禁止在食用动物尤其是水产养殖中使用氯霉素^[4,5], 我国虽然也已禁止使用, 但由于其价格低廉、药效显著, 因此氯霉素作为一种外用药物和饲料添加剂仍在普遍使用, 在枯季和洪季河水中氯霉素的含量范围为 54 ~

187 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 11 ~ 266 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 检出率达 100%^[6]。近年来, 我国出口的水果和水产品屡屡被查出含有氯霉素, 这除了与氯霉素的直接使用有关外, 也与氯霉素的环境污染有一定关系。

焦少俊等^[7]研究了四环素对苦草生长的影响, Moore 等^[8]研究了富营养化和光照对大叶藻的联合作用, Wang 等^[9]研究了不同磷浓度下对菹草的生长和生理生化指标的影响, 表明了菹草新芽对磷胁迫很敏感, 高浓度磷的胁迫会导致菹草的衰退。然而, 有关不同营养化水体中氮磷营养盐水平和氯霉

收稿日期: 2015-01-03; 修订日期: 2015-04-03

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2013ZX07101014)

作者简介: 胡珍珍(1989~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染生物修复技术, E-mail: huzhenzhen0728@163.com

* 通讯联系人, E-mail: cyb@nies.org

素对苦草的联合作用的研究却鲜有报道。水体中氮、磷浓度影响沉水植物的生长, 残留的氯霉素也会对生态系统产生一定效应, 研究二者的联合作用对于保护水体中沉水植物的污染环境的生物修复以及对包括氯霉素在内的抗生素的管理等均具有重要意义。

SOD 作为防御活性氧的第一道防线, 主要作用是催化 O_2^- 转化为 H_2O_2 , 保护细胞免受损伤, 对机体的氧化与抗氧化平衡起着至关重要的作用^[10]。POD 的作用是催化 H_2O_2 分解成 H_2O 和 O_2 , 它主要位于细胞质、细胞壁、液泡和细胞外空间, 具有消除过氧化氢和酚类、胺类毒性的双重作用^[11]。本研究在实验室模拟条件下, 通过测定苦草叶片中过氧化物酶(POD)和超氧化物歧化酶(SOD)的活力以及丙二醛(MDA)、可溶性蛋白、叶绿素的含量来揭示不同营养化水平和氯霉素浓度复合水体中苦草的生理生化响应, 以期对水生植物系统的保护和对抗生素的管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料与预培养

氯霉素(Chloramphenicol, CAP)购自阿拉丁工

业公司(中国), 纯度为 98%; 苦草 [*Vallisneria natans* (Lour.) Hara], 俗名面条草、扁担草、水韭菜等, 属水鳖科 (Hydrocharitaceae) 苦草属 (*Vallisneria* L.) 多年生沉水植物, 为我国最常见的沉水植物之一, 可从水体中吸收大量营养盐。实验所用苦草购于宿迁花卉市场, 经初步鉴定后清洗干净, 置于 5 L 的玻璃烧杯中, 用不含氮、磷的霍格兰稀释培养液预培养 7 d。

1.2 实验设计

预培养结束后, 选取株高 10~15 cm、生长状况良好且生物量接近的 4 株苦草种植在 5 L 的玻璃烧杯中, 用经过盐酸浸泡 24 h 后清洗至中性的 3~4 mm 石英砂固定, 每个烧杯中装 4 L 不含氮、磷的霍格兰稀释培养液。用 $NaNO_3$ 和 NH_4Cl 做氮源、 NaH_2PO_4 做磷源, 配制 3 种 N、P 浓度。N、P 浓度设置参照湖水富营养化标准设定, 分别表示中营养化、富营养化和超富营养化水体。氯霉素用无水乙醇助溶, 查阅文献知枯季和洪季河水中氯霉素的含量范围为 $54 \sim 187 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $11 \sim 266 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[12], 故根据实际水体中的平均含量设置氯霉素浓度梯度为 0、0.05、0.1 和 $0.2 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 设计正交试验如表 1 所示。

表 1 不同营养水体和氯霉素浓度的正交试验¹⁾

Table 1 Experiment design of different concentrations of nitrogen, phosphorus and chloramphenicol

氯霉素浓度 $/\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	营养水体		
	中营养组 ($N 0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $P 0.025 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	富营养组 ($N 0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $P 0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	超富营养组 ($N 4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $P 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
0 (CK)	T ₁	T ₂	T ₃
0.05	T ₄	T ₅	T ₆
0.1	T ₇	T ₈	T ₉
0.2	T ₁₀	T ₁₁	T ₁₂

1) 表中用不同编号来表示不同营养组和不同浓度氯霉素的联合作用, 如 T₁ 表示中营养组和 $0 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 氯霉素的联合作用, 文中 $0 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 氯霉素组用 CK 表示

将种有苦草的烧杯置于恒温恒湿植物培养室中, 光照强度 $3 100 \text{ lx}$, 湿度为 36.4%, 温度 $25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, 光暗时间比为 12:12。每个浓度组设置 2 个平行, 一天换一次水以保持水体中氮、磷和氯霉素浓度相对不变, 第 7 d 取苦草叶片用于分析。

1.3 生理生化指标测定

冲洗干净的苦草叶片用于测定可溶性蛋白、过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)、丙二醛(MDA)和叶绿素等生理生化指标。其中可溶性蛋白、POD、SOD 和 MDA 均用南京建成生物技术有限公司研制的试剂盒进行测定, 用热乙醇法^[13]测定叶绿素的含量。

实验结果表示为平均数 \pm 标准误差 (Mean \pm SD), 用 SPSS 19.0 统计软件和 ANOVA 法对各种数据进行显著性差异分析, 当 $P < 0.05$ 时表示具有显著性差异, $P > 0.05$ 时表示不具有显著性差异。

2 结果与分析

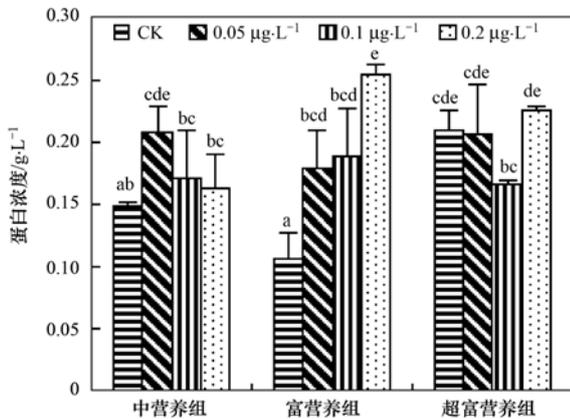
2.1 苦草可溶性蛋白含量的变化

图 1 表示的是苦草可溶性蛋白含量的变化。从中可见, 同一营养组中不同氯霉素浓度对苦草可溶性蛋白含量的影响不同, 随氯霉素浓度的增加, 中营养组中可溶性蛋白含量先上升后下降, 上升趋势显著; 富营养组中可溶性蛋白含量呈上升趋势且变化

显著 ($P < 0.05$); 超富营养组中, 随氯霉素浓度的增加可溶性蛋白含量先下降后上升, 变化较显著。

同一氯霉素浓度不同营养程度对苦草可溶性蛋白的影响, 在低氯霉素浓度 (CK 和 $0.05 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 时, 随营养程度增加, 可溶性蛋白含量先下降后上升, CK 组中可溶性蛋白含量变化较显著, $0.05 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 组中可溶性蛋白含量变化不显著; 高氯霉素浓度 ($0.1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.2 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 时, 随营养程度增加, 可溶性蛋白含量先上升后下降, $0.1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 组中可溶性蛋白含量变化不显著, 而 $0.2 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 组中可溶性蛋白含量变化显著。

对比不同氮磷的影响和不同氮磷与不同氯霉素的联合作用, 发现富营养组和 $0.2 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯霉素的联合作用对苦草可溶性蛋白含量影响最显著, 其浓度为同一营养组中 CK 组的 2.38 倍。



不同填充色的条形柱表示不同的氯霉素浓度组, 字母区分显著性差异, 其中, 相同字母表示不具有显著性差异 ($P < 0.05$), 而不同字母则表示有显著性差异 ($P < 0.05$), 下同

图 1 苦草可溶性蛋白含量的变化

Fig. 1 Changes of soluble protein content of *V. natans*

2.2 苦草 POD 活力的变化

图 2 表示的是苦草 POD 活力的变化。从中可见, 同一营养组中不同氯霉素浓度对苦草 POD 活力的影响不同, 其中, 中营养组中, 氯霉素浓度为 $0.05 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时 POD 活力受到抑制; 富营养组中, 随氯霉素浓度增加, POD 活力显著性下降; 超富营养组中, 随氯霉素浓度增加, POD 活力呈现先增大后减小的显著变化。

同一氯霉素浓度不同营养程度对苦草 POD 活力的影响, 随富营养程度增加, CK 组中 POD 活力先增大后减小且变化极显著 ($P < 0.01$); $0.05 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 组中 POD 活力无明显变化; $0.1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 组中 POD 活力先减小后增大且变化显著; $0.2 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 组中

POD 活力显著性减小。

这表明不同营养化水体中氮磷和氯霉素的联合作用对苦草中 POD 活力影响显著, 对比不同氮磷的影响和氮磷与氯霉素的联合作用, 发现富营养组和 $0.2 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯霉素的联合作用对苦草 POD 活力有极显著抑制, 其活力降为同一营养组中 CK 组的 33.84%。

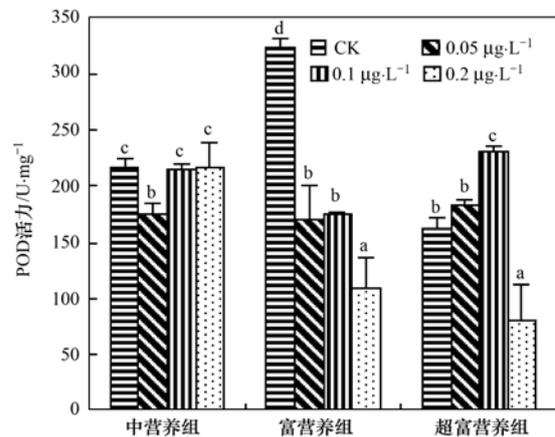


图 2 苦草 POD 活力的变化

Fig. 2 Changes of POD of *V. natans*

2.3 苦草 SOD 活力的变化

图 3 表示的是苦草 SOD 活力的变化。从中可见, 同一营养组中不同氯霉素浓度对苦草 SOD 活力的影响, 都是随氯霉素浓度增加, SOD 活力均呈减小趋势。其中, 中营养组中, 从 $0.1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 组到 $0.2 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 组减小极显著 ($P < 0.01$); 富营养组中, 从 CK 组到 $0.05 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 组变化极显著; 超富营养组中 SOD 活力变化不显著。

同一氯霉素浓度不同营养程度对苦草 SOD 活力的影响, CK 组中随营养程度增大, SOD 活力先上升后下降但变化不显著; $0.05 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 组和 $0.1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 组中 SOD 活力随营养程度增大, SOD 活力先减小后增大, 其中, $0.05 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 组变化显著而 $0.1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 组无显著变化; $0.2 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 组中 SOD 活力持续增大且显著变化。

这表明不同营养程度氮磷对苦草的单独作用不显著, 然而氮磷和氯霉素的联合作用显著, 且随着二者浓度同时增大, 联合作用的影响减小, 中营养组和 $0.2 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯霉素的联合作用对苦草 SOD 的抑制作用最大, 其活力为同一营养组中 CK 组的 28.59%。

2.4 苦草 MDA 含量的变化

图 4 表示的是苦草 MDA 含量的变化。从中可见, 同一营养组中不同氯霉素浓度对苦草 MDA 含

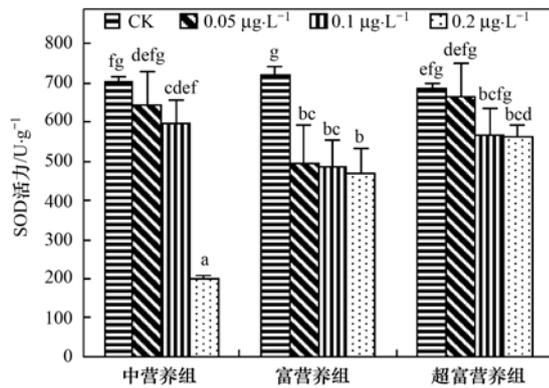


图3 苦草 SOD 活力的变化

Fig. 3 Changes of SOD of *V. natans*

量的影响不同,随氯霉素浓度增加,中营养组和超富营养组中 MDA 的含量都是先减少后增多,且都是从 $0.1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 组到 $0.2 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 组显著性增大,但是减小趋势不显著;富营养组中 MDA 含量则是先增多后减少,呈显著性变化。

同一氯霉素浓度不同营养程度对苦草 MDA 含量的影响,CK 组和 $0.2 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 组中 MDA 含量均是先减少后增多,但是 CK 组变化不显著而 $0.2 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 组变化显著; $0.05 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 组和 $0.1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 组中 MDA 含量都是先增多后减少, $0.05 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 组增大趋势不显著而减少趋势显著,而 $0.1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 则增多趋势显著而减少趋势不显著。

和 SOD 活力影响相似,单独的氮磷浓度对苦草 MDA 含量影响不显著,但是联合作用对苦草 MDA 含量影响显著。

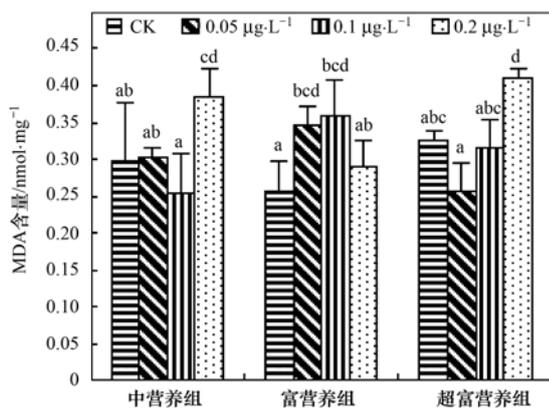


图4 苦草 MDA 含量的变化

Fig. 4 Changes of MDA of *V. natans*

2.5 苦草叶绿素含量的变化

图5表示的是苦草叶绿素 a 含量的变化。根据图5可看出叶绿素 a (Chla) 含量的变化情况:同一营养组中不同氯霉素浓度对苦草 Chla 含量的影响

不同,随氯霉素浓度增加,中营养组中 Chla 含量先增大后减小且变化极显著 ($P < 0.01$);富营养组中 Chla 含量先减小后增大且变化极显著;超富营养组中呈增加趋势且变化显著。

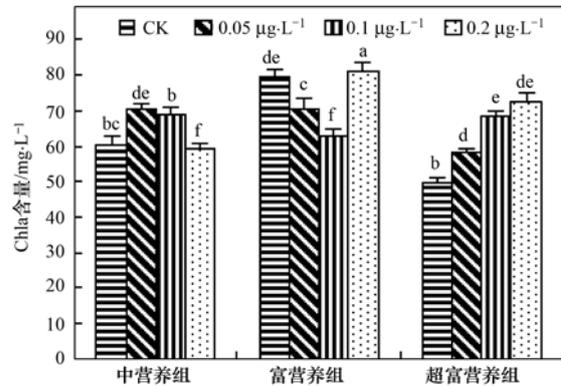


图5 苦草叶绿素 a 含量的变化

Fig. 5 Changes of Chla of *V. natans*

同一氯霉素浓度不同营养程度对苦草 Chla 含量的影响,CK 组和 $0.2 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 组都是先增大后减小且变化显著,而 $0.05 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 组中 Chla 含量持续减小且变化显著, $0.1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 组中 Chla 含量则是先减小后增大且变化显著。

图6表示的是苦草叶绿素 b 含量的变化,其反映了叶绿素 b (Chlb) 含量的变化趋势和 Chla 含量的变化趋势一样,但是其变化程度较 Chla 大。

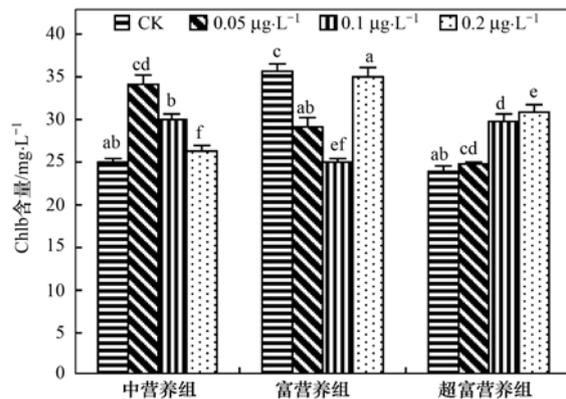


图6 苦草叶绿素 b 含量的变化

Fig. 6 Changes of Chlb of *V. natans*

图7表示的是苦草类胡萝卜素含量的变化,其表明了类胡萝卜素(car)含量的变化情况:同一营养组中不同氯霉素浓度对苦草 car 含量的影响不同,随氯霉素浓度增加,3个营养组中 car 含量的变化趋势都是先增大后减小,其中中营养组和超富营养组中 car 含量的变化趋势显著,富营养组中 car 含量的增大趋势不显著而减小趋势显著。

同一氯霉素浓度不同营养程度对苦草 car 含量

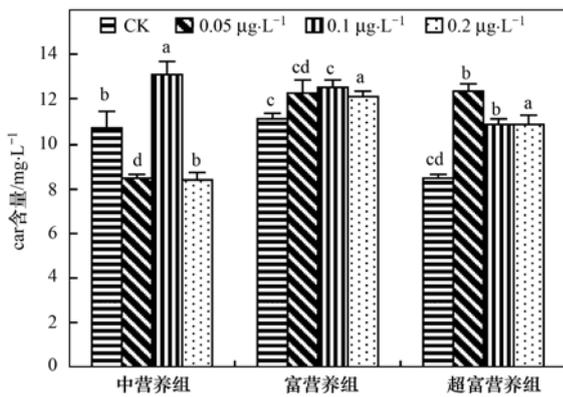


图 7 苦草类胡萝卜素含量的变化

Fig. 7 Changes of carotenoid of *V. natans*

的影响,CK 组和 $0.2 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 组中 car 的含量都是先增大后减小,增大趋势显著但减小趋势不显著;

$0.05 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 组中 car 含量持续增加且趋势较显著, $0.1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 组中 car 含量持续减少且变化极显著。

2.6 交互作用分析

交互作用影响是指多个变量不同水平相互搭配后对观测变量产生的影响,例如:当变量 A 从水平 A_1 变为 A_2 ,观测变量值在控制变量 B 的 B_1 水平上增加了,而在 B_2 水平上却减少了,与控制变量 B 取 B_1 或取 B_2 有关,同理变量 B 变化时观测变量值与控制变量 A 的取值有关,则表示两控制变量有交互作用,否则,不具有交互作用^[14]。

根据这一原理,利用 SPSS 19.0 对上述指标进行了交互作用分析, P 值结果如表 2 所示,其中 $P > 0.05$ 表示不具有显著性交互作用, $P < 0.05$ 表示具有显著性交互作用。

表 2 不同指标的交互作用

Table 2 Interaction effect of different parameters

项目	可溶性蛋白	POD	SOD	MDA	Chla	Chlb	car
P 值	0.03	0.07	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01

从表 2 中可以看出,除了 POD 之外,其他指标均有显著性交互作用,也就是说,不同氮磷和氯霉素浓度对除了 POD 以外的其他指标的联合作用很显著。

3 讨论

机体内产生的氧自由基能攻击生物膜中的多不饱和脂肪酸引发脂质过氧化作用,并因此形成脂质过氧化物从而损伤细胞。过量的活性氧可能导致代谢紊乱,包括光合作用效率下降、蛋白质和糖含量减少,从而引起植物生物量的减少甚至死亡,植物叶片中的可溶性蛋白大多是参与各种代谢的酶类,因此可溶性蛋白的含量被广泛用作衡量叶片衰亡的指标^[15]。同一氯霉素浓度不同营养程度,在低氯霉素浓度(CK 和 $0.05 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)时,随营养程度增加,可溶性蛋白含量先下降后上升,说明酶活性的提高可能源于酶原的加工、激活,而不是存在于翻译与转录等基础上^[16]。

植物体中含有大量过氧化物酶体,是活性较高的一种酶,它与呼吸作用、光合作用及生长素的氧化等都有关系^[11]。Sanderson 等^[17]采用 QSARs 和现有的水生生态毒理学实验数据,对 226 种抗生素的生态危害性进行了评价,结果表明:预测有 1/5 的抗生素对藻类非常毒。Dayton 等^[18]的研究表明氯霉素会抑制细胞生长以及 SOD 的相关物质的合成,

Liu 等^[19]的研究表明芦苇草叶片中的 SOD 活力随抗生素浓度增大而下降,这与本研究中 SOD 活力随氯霉素浓度增大而减小的现象相吻合。而抗氧化酶活性的变化与污染物的浓度具有相关性,在其耐受限度内,随污染物浓度增加,SOD 和 POD 活力增加,但超过了其耐性阈值,则会抑制应激反应,导致 POD 和 SOD 活力下降^[20],这解释了本研究中出现 POD 活力先增大后减小的现象。对于 SOD 活力的影响,不同营养程度氮磷对苦草的单独作用不显著,然而氮磷和氯霉素的联合作用显著,且随着二者浓度同时增大,联合作用的影响减小,这可能是氯霉素和氮磷之间存在着拮抗作用,从交互作用分析中也可以做出该推论。开始时苦草受到氯霉素的抑制作用导致体内 SOD 活力先下降,后来由于拮抗作用,氯霉素的抑制作用减小,SOD 活力出现了上升的现象。

MDA 是多不饱和脂肪酸氧化的二级终产物,并已用于表征脂质氧化的程度。测定 MDA 的量常可反映机体内脂质氧化的程度,间接反映出细胞损伤的程度,MDA 的测定常和 SOD 的测定相互配合,SOD 活力的高低间接反映了机体清除氧自由基的能力,MDA 含量的高低间接反映了机体细胞受自由基攻击的严重程度^[21, 22]。本研究中单独的氮磷浓度对苦草 MDA 含量影响不显著,但是联合作用对苦草 MDA 含量影响普遍较显著,证明联合作用

下,苦草细胞受自由基攻击较严重。

植物叶片的叶绿素是与其光合能力相关的重要生理指标,叶绿素 a 和 b 是吸收和传递光能的主要色素^[21, 22]。研究结果显示,Chlb 比 Chla 敏感,而 car 最不敏感,这和 Brain 等^[23]的研究一致,表明了尽管叶绿素没有细胞生长指标敏感,但是叶绿素是除了细胞分裂外能很好地补充说明细胞受到的损害的指标。宋玉芝等^[3]的研究表明氮、磷营养盐浓度与光合体系具有相关性,随着氮磷浓度增大,苦草叶绿素含量先增大,到一定浓度后,氮、磷浓度的增加使叶绿素含量减少,这和本研究的结果相一致,证明了超富营养程度水体中氮磷浓度已对叶绿素含量产生了抑制。同时,氮磷和氯霉素的联合作用对叶绿素含量也有显著性影响,表明了联合作用下对细胞也有显著性影响。

多种毒物共存时联合毒性的作用机制是非常复杂的,受多种因素的影响,除了污染物的理化性质外,污染物的浓度起了至关重要的作用。污染物与污染物之间、污染物与生物体内各种组分之间都有可能发生不同的交互作用,导致不同的生态毒理效应^[24, 25]。综合分析实验结果,适宜的氮、磷营养盐浓度有利于提高苦草的抗逆性,更有利于苦草的生长,过高或过低的氮、磷营养盐浓度不利于苦草长期健康的生长。其中,富营养组和 0.2 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯霉素的联合作用下,苦草可溶性蛋白含量的增加为同一营养组中 CK 组的 2.38 倍,POD 活力降为同一营养组中 CK 组的 33.84%,反映了在该浓度下的联合作用对可溶性蛋白含量和 POD 活力影响最显著;而中营养组和 0.2 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯霉素的联合作用对苦草 SOD 的抑制作用最大,其活力为同一营养组中 CK 组的 28.59%,证明了在高浓度氯霉素的存在下对苦草生理影响显著。随氯霉素浓度增加,中营养组、富营养组、超富营养组中除 SOD 活力的变化趋势一致外,其他的生理生化指标的变化趋势都不尽相同,这表明不同浓度的氮磷和氯霉素浓度对苦草的联合作用可能存在差异,两者之间存在的复合作用可能因浓度不同而有所变化。对比不同氮磷的影响和氮磷与氯霉素的联合作用,不同营养化水体中氮磷和氯霉素对苦草的联合作用都较单独的氮磷影响显著,说明水体中氯霉素的存在会增强富营养水体对苦草的不利影响。然而,超富营养组和 0.1 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯霉素的联合作用相比而言不显著,这可能是超富营养组中氮磷浓度和 0.1 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯霉素产生了一定程度的拮抗作用,从而导致影响不显著,这

还需要进一步的研究进行验证。

本研究只是在实验室条件下模拟自然水体中氮磷和氯霉素的联合作用,还需要野外实验的验证。水体中抗生素的残留不仅对微生物有影响,而且对水生植物也存在着潜在的风险,这是需要重视的一个问题。

4 结论

(1) 在富营养组和 0.2 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯霉素的联合作用下,苦草可溶性蛋白含量显著增加,其浓度为同一营养组中 CK 组的 2.38 倍;而在富营养组和 0.2 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯霉素的联合作用下对苦草 POD 活力有极显著抑制,其活力降为同一营养组中 CK 组的 33.84%。

(2) 对于 SOD 活力和 MDA 含量而言,不同营养程度氮磷对苦草的单独作用不显著,然而氮磷和氯霉素的联合作用显著。随着二者浓度同时增大,联合作用对 SOD 活力的影响减小,中营养组和 0.2 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯霉素的联合作用对苦草 SOD 的抑制作用最大,其活力为同一营养组中 CK 组的 28.59%。

(3) 超富营养程度水体中氮磷浓度已对叶绿素含量产生了抑制,且氮磷和氯霉素的联合作用对叶绿素含量也有显著性影响。

参考文献:

- [1] Qin B Q, Xu P Z, Wu Q L, et al. Environmental issues of Lake Taihu, China[J]. *Hydrobiologia*, 2007, **581**(1): 3-14.
- [2] Melzer A. Aquatic macrophytes as tools for lake management [J]. *Hydrobiologia*, 1999, **395-396**: 181-190.
- [3] 宋玉芝, 杨美玖, 秦伯强. 苦草对富营养化水体中氮磷营养盐的生理响应[J]. *环境科学*, 2011, **32**(9): 2569-2575.
- [4] Kümmerer K. Antibiotics in the aquatic environment-a review-Part I[J]. *Chemosphere*, 2009, **75**(4): 417-434.
- [5] Zhang W, Sun W F, An S, et al. Acute and chronic toxic effects of chloramphenicol on *Scenedesmus obliquus* and *Chlorella pyrenoidosa*[J]. *Water Environment Research*, 2013, **85**(8): 725-732.
- [6] 徐维海, 张干, 邹世春, 等. 香港维多利亚港和珠江广州河段水体中抗生素的含量特征及其季节变化[J]. *环境科学*, 2006, **27**(12): 2458-2462.
- [7] 焦少俊, 窦艳艳, 陈良燕, 等. 四环素对苦草 (*Vallisneria spiralis*) 生长及细胞超微结构的影响[J]. *环境化学*, 2008, **27**(3): 335-338.
- [8] Moore K A, Wetzel R L. Seasonal variations in eelgrass (*Zostera marina* L.) responses to nutrient enrichment and reduced light availability in experimental ecosystems [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2000, **244**(1): 1-28.
- [9] Wang L, Yang T W, Zhu D W, et al. Growth and turion

- formation of *Potamogeton crispus* in response to different phosphorus concentrations in water[J]. *Aquatic Ecology*, 2013, **47**(1): 87-97.
- [10] Mittler R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance[J]. *Trends in Plant Science*, 2009, **7**(9): 405-410.
- [11] Li M, Wu Y J, Yu Z L, *et al.* Enhanced nitrogen and phosphorus removal from eutrophic lake water by *Ipomoea aquatica* with low-energy ion implantation[J]. *Water Research*, 2009, **43**(5): 1247-1256.
- [12] 叶计朋, 邹世春, 张干, 等. 典型抗生素类药物在珠江三角洲水体中的污染特征[J]. *生态环境*, 2007, **16**(2): 384-388.
- [13] Ritchie R J. Consistent sets of spectrophotometric chlorophyll equations for acetone, methanol and ethanol solvents [J]. *Photosynthesis Research*, 2006, **89**(1): 27-41.
- [14] 薛薇. 基于 SPSS 的数据分析[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2006. 170-173.
- [15] 宋睿, 姜锦林, 耿金菊, 等. 不同浓度铵态氮对苦草的生理影响[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(3): 448-453.
- [16] 谷巍, 施国新, 张超英, 等. Hg^{2+} 、 Cd^{2+} 和 Cu^{2+} 对菹草光合系统及保护酶系统的毒害作用[J]. *植物生理与分子生物学学报*, 2002, **28**(1): 69-74.
- [17] Sanderson H, Brain R A, Johnson D J, *et al.* Toxicity classification and evaluation of four pharmaceuticals classes: antibiotics, antineoplastics, cardiovascular, and sex hormones [J]. *Toxicology*, 2004, **203**(1-3): 27-40.
- [18] Dayton T M, Diefenbach K A, Fuller M L, *et al.* Production of superoxide dismutases from *Proteus mirabilis* and *Proteus vulgaris* [J]. *Biometals*, 1996, **9**(2): 131-137.
- [19] Liu L, Liu Y H, Liu C X, *et al.* Potential effect and accumulation of veterinary antibiotics in *Phragmites australis* under hydroponic conditions[J]. *Ecological Engineering*, 2013, **53**: 138-143.
- [20] 王桂燕, 李锋, 史济月, 等. 四氯乙烯胁迫对草鱼抗氧化酶活性的影响及其机理[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(6): 1579-1585.
- [21] Wang C, Zhang S H, Wang P F, *et al.* Metabolic adaptations to ammonia-induced oxidative stress in leaves of the submerged macrophyte *Vallisneria natans* (Lour.) Hara [J]. *Aquatic Toxicology*, 2008, **87**(2): 88-98.
- [22] 王珺, 顾宇飞, 纪东成, 等. 富营养条件下不同形态氮对轮叶黑藻 (*Hydrilla verticillata*) 的生理影响[J]. *环境科学研究*, 2006, **19**(1): 71-79.
- [23] Brain R A, Johnson D J, Richards S M, *et al.* Effects of 25 pharmaceutical compounds to *Lemna gibba* using a seven-day static-renewal test[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2004, **23**(2): 371-382.
- [24] 周启星, 程云, 张倩茹, 等. 复合污染生态毒理效应的定量关系分析[J]. *中国科学 C 辑*, 2003, **33**(6): 566-573.
- [25] 华涛, 周启星. Cd-Zn 对草鱼 (*Ctenopharyngodon idellus*) 的联合毒性及对肝脏超氧化物歧化酶(SOD)活性的影响[J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(3): 600-606.

CONTENTS

Estimation of PM _{2.5} Concentration over the Yangtze Delta Using Remote Sensing: Analysis of Spatial and Temporal Variations	XU Jian-hui, JIANG Hong	(3119)
Seasonal and Spatial Variations of Carbon Fractions in PM _{2.5} in Ningbo and the Estimation of Secondary Organic Carbon	DU Bo-han, HUANG Xiao-feng, HE Ling-yan, et al.	(3128)
Concentrations of Acidic Gases, Ammonia and Related Water-Soluble Ions in PM _{2.5} and Gas-Particle Partitioning in Qingdao	ZHOU Jia-jia, SHI Jin-hui, LI Li-ping, et al.	(3135)
Concentration and Particle Size Distribution of Microbiological Aerosol During Haze Days in Beijing	HU Ling-fei, ZHANG Ke, WANG Hong-bao, et al.	(3144)
Air Quality Characteristics in Beijing During Spring Festival in 2015	CHENG Nian-liang, CHEN Tian, ZHANG Da-wei, et al.	(3150)
Chemical Loss of Volatile Organic Compounds and Its Impact on the Formation of Ozone in Shanghai	WANG Hong-li	(3159)
Removal of Waste Gas Containing Mixed Chlorinated Hydrocarbons by the Biotrickling Filter	CHEN Dong-zhi, MIAO Xiao-ping, OUYANG Du-juan, et al.	(3168)
A Three Band Chlorophyll-a Concentration Estimation Model Based on GOCI Imagery	GUO Yu-long, LI Yun-mei, LI Yuan, et al.	(3175)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter and Influencing Factors in Lake Chaohu	YE Lin-lin, WU Xiao-dong, LIU Bo, et al.	(3186)
Spectral Characteristic of Dissolved Organic Matter in Xiaohe River, Hebei	YU Min-da, ZHANG Hui, HE Xiao-song, et al.	(3194)
Spatial Variation of Ammonia-N, Nitrate-N and Nitrite-N in Groundwater of Dongshan Island	WU Hai-yan, FU Shi-feng, CAI Xiao-qiong, et al.	(3203)
Sources, Migration and Conversion of Dissolved Alkanes, Dissolved Fatty Acids in a Karst Underground River Water, in Chongqing Area	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, et al.	(3212)
Influence of Sulfuric Acid to Karst Hydrochemical and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in the Upper and Middle Reaches of the Wujiang River	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, et al.	(3220)
Hydrochemical Characteristic and Reasoning Analysis in Siyi Town, Langzhong City	ZHANG Yan, WU Yong, YANG Jun, et al.	(3230)
Seasonal Variation on Nutrient Limitation for Phytoplankton Growth in a Coastal River-Reservoir System, Southeast China	CHEN Cong-cong, RAO La, HUANG Jin-liang, et al.	(3238)
Physiological Effect of <i>Vallisneria natans</i> Under Different Concentrations of Nitrogen, Phosphorus and Chloramphenicol	HU Zhen-zhen, CUI Yi-bin, LI Mei, et al.	(3248)
Effects of Algicidal Substance on <i>Phaeocystis globosa</i> and Its Fatty Acids by the Simulation Experiment	YANG Qiu-chan, ZHAO Ling, YIN Ping-he, et al.	(3255)
Agricultural Non-Point Source Pollutants Removal by Enhanced Riverbank Interception Facilities Under Different Operating Conditions	LI Huai-zheng, CHEN Ke-li, WEI Zhong, et al.	(3262)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Material Roof Dusts	LI Dun-zhu, GUAN Yun-tao, LIU An, et al.	(3269)
Formation of Disinfection By-Products During Chlor(am)ination of Danjiangkou Reservoir Water and Comparison of Disinfection Processes	ZHANG Min-sheng, XU Bin, ZHANG Tian-yang, et al.	(3278)
Effects of Interaction of Ozonation and Coagulation on Coagulation Results	LIU Hai-long, GUO Xue-feng, WANG Min-hui, et al.	(3285)
Effects of Anions on Bromate Formation During Ozonation of Bromide-Containing Water	WU Yue, WU Chun-de, LIU Li-gang, et al.	(3292)
XAS Analysis upon Dissolved Species of Orpiment in Anoxic Environment	WANG Ying, XU Li-ying, WANG Shao-feng, et al.	(3298)
AOX Pollution in Wastewater Treatment Process of Dyeing and Dyestuff Chemical Industries	SHEN Yang-yang, LIU Rui, XU Can-can, et al.	(3304)
Fate of ARB and ARGs During Wastewater Treatment Process of Spiramycin Production	QIN Cai-xia, TONG Juan, SHEN Pei-hong, et al.	(3311)
A Comparative Study on Two Membrane Bioreactors for the Treatment of Digested Piggyery Wastewater	SHUI Yong, Kawagishi Tomoki, SONG Xiao-yan, et al.	(3319)
Analysis of Microbial Community in the Membrane Bio-Reactor (MBR) Rural Sewage Treatment System	KONG Xiao, CUI Bing-jian, JIN De-cai, et al.	(3329)
Start-up Characteristics of Four-zone Integrated Reactor for Nitrogen Removal in Winter and Analysis of Nitro bacteria Community	ZHANG Yan, SUN Feng-xia, XIE Hang-ji, et al.	(3339)
Achievement of Sulfate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation Reactor Started with Nitrate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation	LIU Zheng-chuan, YUAN Lin-jiang, ZHOU Guo-biao, et al.	(3345)
Effect of Increasing Organic Loading Rate on the Formation and Stabilization Process of Aerobic Granular Sludge	LIU Xiao-peng, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, et al.	(3352)
Nitrogen Loss Through Different Ways in Cropland Under Conventional Fertilization: An <i>In-situ</i> Study of Summer Maize Season in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River	SANG Meng-meng, FAN Hui, JIANG Shan-shan, et al.	(3358)
Effects of Water and Nitrogenous Fertilizer Coupling on CH ₄ and N ₂ O Emission from Double-Season Rice Paddy Field	FU Zhi-qiang, LONG Pan, LIU Yi-yi, et al.	(3365)
Characteristics of N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ and CH ₄ Emissions in Anaerobic Condition from Sandy Loam Paddy Soil	CAO Na, WANG Rui, LIAO Ting-ting, et al.	(3373)
Characteristics of Soil Respiration along Eroded Sloping Land with Different SOC Background on the Hilly Loess Plateau	CHEN Gai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, et al.	(3383)
Effect of Biochar on Soil Greenhouse Gas Emissions in Semi-arid Region	GUO Yan-liang, WANG Dan-dan, ZHENG Ji-yong, et al.	(3393)
Characteristics and Coupling Relationship of Soil Carbon and Nitrogen Transformation During <i>In-situ</i> Mineralization Cultivation in Forestlands in the Mountain Area of Southern Ningxia	NI Yin-xia, HUANG Yi-mei, NIU Dan, et al.	(3401)
Nitrogen Fraction Distributions and Impacts on Soil Nitrogen Mineralization in Different Vegetation Restorations of Karst Rocky Desertification	HU Ning, MA Zhi-min, LAN Jia-cheng, et al.	(3411)
Distribution and Dynamics of Cropland Soil Organic Carbon in Jiangnan Plain: A Case Study of Qianjiang City	WANG Yu-zhu, XIAO He-ai, ZHOU Ping, et al.	(3422)
Impact of Land Utilization Pattern on Distributing Characters of Labile Organic Carbon in Soil Aggregates in Jinyun Mountain	LI Rui, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju	(3429)
Magnetic Responses of Heavy Metals in Street Dust of Typical Mine-Based City, Northwest China	NIE Yan, WANG Xin, WANG Bo, et al.	(3438)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Environmental Samples Around Electroplating Factories and the Health Risk Assessment	GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, ZHOU Qiao-li, et al.	(3447)
Homologues Levels and Distribution Pattern of Polychlorinated Biphenyls in Typical Capacitor Contaminated Soil	LIU Jie, LI Xiao-dong, ZHAO Zhong-hua, et al.	(3457)
Adsorption and Desorption Characteristics of Endosulfan in Purple Soil	ZHAO Yan, ZHENG Guo-can, ZHU Heng, et al.	(3464)
Influence of <i>Mirabilis jalapa</i> Linn. Growth on the Microbial Community and Petroleum Hydrocarbon Degradation in Petroleum Contaminated Saline-alkali Soil	JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, WU Shang-hua, et al.	(3471)
Al ³⁺ Absorption and Assimilation by Four Ectomycorrhizal Fungi	WANG Ming-xia, YUAN Ling, HUANG Jian-guo, et al.	(3479)
Contamination of Organophosphorus Pesticides Residue in Fresh Vegetables and Related Health Risk Assessment in Changchun, China	YU Rui, LIU Jing-shuang, WANG Qi-cun, et al.	(3486)
Community Structure and Succession of Methanogens in Beishenshu Landfill, Beijing	SONG Li-na, WANG Lei, XIA Meng-jing, et al.	(3493)
Fertility and Environmental Impacts of Urban Scattered Human Feces Used as Organic Granular Fertilizer for Leaf Vegetables	LÜ Wen-zhou, QIAO Yu-xiang, YU Ning, et al.	(3501)
Degradation of PCDD/Fs by the Mixture of V ₂ O ₅ -WO ₃ /TiO ₂ Catalyst and Activated Carbon	REN Yong, JI Sha-sha, YU Ming-feng, et al.	(3508)
Energy Conservation and Emissions Reduction Benefits Analysis for Battery Electric Buses Based on Travel Services	LIN Xiao-dan, TIAN Liang, LÜ Bin, et al.	(3515)
Definition and Control Indicators of Volatile Organic Compounds in China	JIANG Mei, ZOU Lan, LI Xiao-qian, et al.	(3522)
Influence of Dissimilatory Iron Reduction on the Speciation and Bioavailability of Heavy Metals in Soil	SI You-bin, WANG Juan	(3533)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2015年9月15日 第36卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 9 Sep. 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行