

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第3期

Vol.36 No.3

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

重庆市 PM_{2.5} 浓度空间分异模拟及影响因子 吴健生, 廖星, 彭建, 黄秀兰 (759)

2012~2013 年间北京市 PM_{2.5} 中水溶性离子时空分布规律及相关性分析 杨懂艳, 刘保献, 张大伟, 陈圆圆, 周健楠, 梁云平 (768)

南京地区大气 PM_{1.1} 中 OC、EC 特征及来源解析 姜文娟, 郭照冰, 刘凤玲, 芮茂凌, 石磊, 曾钢, 郭子研 (774)

太原市大气 PM_{2.5} 中碳质组成及变化特征 张桂香, 闫雨龙, 郭利利, 何秋生, 陈来国 (780)

朔州市市区 PM_{2.5} 中元素碳、有机碳的分布特征 刘凤娟, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 刘效峰, 李丽娟, 刘欣 (787)

中国 2013 年 1 月 PM_{2.5} 重污染过程卫星反演研究 薛文博, 武卫玲, 付飞, 王金南, 韩宝平, 雷宇 (794)

高空偏北风背景下北京地区高污染形成的环境气象机制研究 廖晓农, 孙兆彬, 唐宜西, 蒲维维, 李梓铭, 卢冰 (801)

重庆缙云山降水中不同形态汞的含量及其沉降量 覃蔡清, 王永敏, 彭玉龙, 王定勇 (809)

海南五指山大气气态总汞含量变化特征 雷育涛, 刘明, 陈来国, 谢东海, 林道征, 赵明江, 张毅强, 孙家仁 (817)

树叶烟尘中的有机碳和元素碳 陈惠雨, 刘刚, 徐慧, 李久海, 吴丹 (824)

介质阻挡放电对氯苯的降解特性及其产物分析 姜理英, 曹书岭, 朱润晔, 陈建孟, 苏飞 (831)

长江口及浙江近岸海域表层沉积物中多环芳烃分布、来源与风险评价 母清林, 方杰, 邵君波, 张庆红, 王晓华, 黄备 (839)

河流沉积物对典型 PPCPs 的吸附特性及其影响因素 王凯, 李侃竹, 周亦圆, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (847)

岩溶地下河表层沉积物多环芳烃的污染及生态风险研究 蓝家程, 孙玉川, 师阳, 梁作兵 (855)

岩溶地下河系统多介质中多环芳烃污染特征及来源解析 卢丽, 王喆, 裴建国 (862)

两江交汇处水体溶解性有机质的吸收和荧光光谱特征: 以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江为例 闫金龙, 江韬, 高洁, 魏世强, 卢松, 刘江 (869)

三峡库区典型农业小流域土壤溶解性有机质的紫外-可见及荧光特征 王齐磊, 江韬, 赵铮, 木志坚, 魏世强, 闫金龙, 梁俭 (879)

夏、冬季降雨中溶解性有机质 (DOM) 光谱特征及来源辨析 梁俭, 江韬, 魏世强, 卢松, 闫金龙, 王齐磊, 高洁 (888)

南水北调丹江口水库原水有机物分子组成规律及其强化混凝处理的效能对比 程拓, 徐斌, 朱贺振, 夏圣骥, 楚文海, 胡广新 (898)

夏季大辽河口区水体反硝化及其影响因素 杨丽标, 雷坤, 孟伟 (905)

太湖入湖河流溶解性有机碳来源及碳水化合物生物可利用性 叶琳琳, 吴晓东, 孔繁翔, 刘波, 闫德智 (914)

汉丰湖夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析 王宇飞, 赵秀兰, 何丙辉, 黄琪 (922)

三峡蓄水期间汉丰湖消落区营养状态时间变化 黄祺, 何丙辉, 赵秀兰, 王宇飞 (928)

太湖水华期营养盐空间分异特征与赋存量估算 金颖薇, 朱广伟, 许海, 朱梦圆 (936)

贝江浮游藻类群落特征及富营养化风险分析 苟婷, 马千里, 许振成, 王丽, 李杰, 赵学敏 (946)

物理和摇蚊幼虫组合扰动对内源磷再生和形态转化的协同作用 史晓丹, 李大鹏, 王忍, 黄勇 (955)

磷限制下光照和温度对水华鱼腥藻生长动力学的影响 殷志坤, 李哲, 王胜, 郭劲松, 肖艳, 刘静, 张萍 (963)

矿物基多孔颗粒材料净化石英纯化废水研究 王恩文, 雷绍民, 张世春, 黄腾 (969)

PAA 改性纳米铁强化还原降解水中亚甲基蓝 和婧, 王向宇, 王培, 刘坤乾 (980)

微球负载双核锰配合物作为新型非均相 CWPO 催化剂对活性蓝 P-3R 的脱色应用 宋敏, 张琳萍, 钟毅, 徐红, 毛志平 (989)

生物合成施氏矿物作为类芬顿反应催化剂降解甲基橙的研究 汪快兵, 方迪, 徐峙晖, 施瑛, 郑冠宇, 周立祥 (995)

污泥厌氧产酸发酵液作碳源强化污水脱氮除磷中试研究 罗哲, 周光杰, 刘宏波, 聂新宇, 陈宇, 翟丽琴, 刘和 (1000)

高含固污泥水热预处理中碳、氮、磷、硫转化规律 卓杨, 韩芸, 程瑶, 彭党聪, 李玉友 (1006)

MBR 与 SMBR 脱氮除磷特性及膜污染控制 郭小马, 赵焱, 王开演, 赵阳国 (1013)

基质 COD 浓度对单室微生物电解池产甲烷的影响 滕文凯, 刘广立, 骆海萍, 张仁铎, 符诗雨 (1021)

天然沸石中离子交换平衡的离子特异性研究 何云华, 李航, 刘新敏, 熊海灵 (1027)

开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价 李一蒙, 马建华, 刘德新, 孙艳丽, 陈彦芳 (1037)

不同种植模式对土壤团聚体及有机碳组分的影响 邱晓蕾, 宗良纲, 刘一凡, 杜霞飞, 罗敏, 汪润池 (1045)

种植花椒对喀斯特石漠化地区土壤有机碳矿化及活性有机碳的影响 张文娟, 廖洪凯, 龙健, 李娟, 刘云飞 (1053)

江西铜矿及冶炼厂周边土壤和农作物稀土元素含量与评价 金姝兰, 黄益宗, 王斐, 徐峰, 王小玲, 高柱, 胡莹, 乔敏, 李季, 向猛 (1060)

镉与 S-异丙甲草胺对斜生栅藻的联合毒性作用 章小强, 胡晓娜, 陈彩东, 刘惠君 (1069)

高寒灌丛退化演替过程对生态系统呼吸温度敏感性的影响 李东, 罗旭鹏, 曹广民, 吴琴, 胡启武, 卓玛措, 李惠梅 (1075)

黄土高原纸坊沟流域不同植物叶片及枯落物的生态化学计量学特征研究 李鑫, 曾全超, 安韶山, 董扬红, 李娅芸 (1084)

单斜相纳米氧化钴基低温 SCR 催化剂脱硝机制研究 叶飞, 刘荣, 管昊, 贡湘君, 季凌晨 (1092)

不同有机物料中的磷形态特征研究 邓佳, 胡梦坤, 赵秀兰, 倪九派, 谢德体 (1098)

北京电动出租车与燃油出租车生命周期环境影响比较研究 施晓清, 孙赵鑫, 李笑诺, 李金香, 杨建新 (1105)

燃煤电厂排放细颗粒物的水溶性无机离子特征综述 段雷, 马子轸, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥 (1117)

菌根真菌金属耐性机制研究进展 陈保冬, 孙玉青, 张莘, 伍松林 (1123)

亚硝酸盐型甲烷厌氧氧化微生物特性研究进展 沈李东 (1133)

《环境科学》征订启事 (830) 《环境科学》征稿简则 (846) 信息 (838, 861, 913, 935)

镉与 S-异丙甲草胺对斜生栅藻的联合毒性作用

章小强, 胡晓娜, 陈彩东, 刘惠君*

(浙江工商大学环境科学与工程学院, 杭州 310018)

摘要: 采用毒性标准实验方法研究了 Cd²⁺ 与 S-异丙甲草胺单独及联合作用对斜生栅藻急性毒性、总可溶性蛋白含量、超氧化物歧化酶(SOD)活性和细胞膜通透性的影响。结果表明 Cd²⁺ 与 S-异丙甲草胺单独作用时 EC₅₀ 均随着时间的延长而减小, 且 S-异丙甲草胺的急性毒性大于 Cd²⁺; Cd²⁺、S-异丙甲草胺的 EC_{50-24h} 分别为 0.27 mg·L⁻¹、0.24 mg·L⁻¹, EC_{50-96h} 分别为 0.16 mg·L⁻¹、0.13 mg·L⁻¹。Cd²⁺ 与 S-异丙甲草胺联合作用时低浓度表现为协同作用, 高浓度表现为拮抗作用。暴露 96 h 后, Cd²⁺ 与 S-异丙甲草胺单独及联合作用下, 随有毒物质浓度升高, 斜生栅藻总可溶性蛋白含量降低, SOD 酶活性先激活后抑制, 细胞膜通透性逐渐增大。

关键词: S-异丙甲草胺; Cd²⁺; 斜生栅藻; 联合毒性; SOD 酶活性; 细胞膜通透性

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)03-1069-06 DOI: 10.13227/j.hjkk.2015.03.041

Combined Toxicity of Cadmium and S-metolachlor to *Scenedesmus obliquus*

ZHANG Xiao-qiang, HU Xiao-na, CHEN Cai-dong, LIU Hui-jun*

(School of Environmental Science and Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The single and combined effects of Cd²⁺ and S-metolachlor on acute toxicity, total soluble protein content, superoxide dismutase (SOD) activity and cell membrane permeability of *Scenedesmus obliquus* (*S. obliquus*) were studied using the standard toxic testing methods. The results showed that the EC₅₀ of Cd²⁺ and S-metolachlor decreased with time, and the acute toxicity of S-metolachlor was higher than that of Cd²⁺, EC_{50-24h} of Cd²⁺ and S-metolachlor was 0.27 mg·L⁻¹ and 0.24 mg·L⁻¹, respectively, and EC_{50-96h} was 0.16 mg·L⁻¹ and 0.13 mg·L⁻¹, respectively. The combined toxicity of Cd²⁺ and S-metolachlor showed a synergistic effects at low concentration, and antagonism effects at high concentration. After 96h-exposure, the total soluble protein content of *S. obliquus* decreased, the SOD activity first increased and then decreased, and the cell membrane permeability increased with the increasing concentration of both single and combined treatment.

Key words: S-metolachlor; Cd²⁺; *S. obliquus*; the combined toxicity; SOD activity; cell membrane permeability

近年来一些对映体纯或对映体富集的农药制剂得到发展和应用,如 S-异丙甲草胺(S-metolachlor)已实现商品化生产,许多国家包括我国已用 S-异丙甲草胺取代外消旋异丙甲草胺的生产使用,其生态毒性也随之受到关注^[1],研究发现异丙甲草胺对微藻细胞的急性毒性存在立体选择性差异且 S-异丙甲草胺的毒性更大^[2]。镉作为毒性最强的重金属元素之一,可与酶活性中心或蛋白质中的疏水基结合,还可取代金属硫蛋白中的必须元素(Ca²⁺、Fe²⁺、Mg²⁺、Zn²⁺),导致生物大分子构相改变,必须元素缺乏,干扰细胞正常代谢过程^[3],还会抑制斜生栅藻和栅列藻的生长,影响光合作用等^[4]。

随着工业的发展,进入环境的污染物种类和数量明显增多,国内外学者在污染物复合污染方面进行了广泛研究并取得了重要成果^[5-9],然而在有机-无机复合污染中手性农药和重金属复合污染研究方面亟待深入。斜生栅藻是单细胞生物,具有生长周期短、易获得、对毒物敏感、培养方便等特点,是水生毒理研究中较理想的测试生物^[10]。本文以斜生

栅藻为指示生物,研究了 Cd²⁺ 与 S-异丙甲草胺单独及联合作用对斜生栅藻的急性毒性、蛋白含量、超氧化物歧化酶(SOD)活性和细胞通透性的影响,以期为全面合理评价 Cd²⁺ 与 S-异丙甲草胺的生态毒性提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 藻种及培养

斜生栅藻(*Scenedesmus obliquus*)购自中国科学院水生生物研究所,培养基采用水生4号(HB-4)人工培养液,恒温光照培养^[11]。

1.2 主要试剂

S-异丙甲草胺购自先正达(瑞士)公司,纯度为

收稿日期: 2014-09-09; 修订日期: 2014-11-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(21377115); 浙江省大学生创新创业孵化项目; 浙江工商大学研究生科技创新项目(1260XJ1513145)

作者简介: 章小强(1990~),男,硕士研究生,主要研究方向为污染物环境生态毒理, E-mail: 1968287085@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: lhj@mail.zjgsu.edu.cn

96%；氯化镉(CdCl_2)购自国药集团化学试剂有限公司,为分析纯；其他试剂、药品均为分析纯。水为二次亚沸蒸馏水。

1.3 分析测定方法

1.3.1 急性毒性的测定

根据有毒化学品对藻类毒性测试的标准实验方法^[12],结合预实验结果,设置 Cd^{2+} 和 *S*-异丙甲草胺浓度均分别为 0、0.02、0.05、0.10、0.15、0.20 和 0.50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,进行单独及联合培养,每组设置 3 个平行；分别于 24、48、72、96 h 用可见光分光光度计测定藻液在 680 nm 处的吸光值,由藻细胞密度和光密度之间的线性关系得到藻细胞密度,计算生长抑制率,通过 Logistic 模型进行拟合得到 EC_{50} 值。

采用毒性单位法^[13]和相加指数法^[14]对 Cd^{2+} 与 *S*-异丙甲草胺的联合毒性进行分析。

1.3.2 蛋白含量及酶活性测定

设置 Cd^{2+} 与 *S*-异丙甲草胺浓度分别为 0、0.02、0.1 和 0.2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,每组 3 个平行。取暴露 96 h 后的斜生栅藻,在 4℃ 下 6 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 10 min,弃去上清液,加入 10 mL 预冷的 0.05 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 磷酸缓冲液混匀,超声破碎仪破碎 15 min 后在 4℃ 下 15 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 10 min,上清液为酶液。采用 Bradford 法测定总可溶性蛋白含量^[15]。SOD 活性的测定采用氮蓝四唑法(NBT 法)^[16]。

1.3.3 藻细胞通透性测定

设置 Cd^{2+} 与 *S*-异丙甲草胺浓度分别为 0、

0.02、0.1 和 0.2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,每组 3 个平行。采用荧光素二乙酸酯(FDA)荧光色素染色法^[17]进行测定。

1.4 数据统计与分析

实验数据使用 Microsoft Excel 2010 和 Origin 8.0 进行处理,用 SPSS 15.0 进行单因素方差分析(ANOVA)并用 Duncan 法进行显著性检验,结果以平均值 \pm SD 表示。

2 结果与讨论

2.1 Cd^{2+} 与 *S*-异丙甲草胺复合污染的急性毒性及联合毒性分析

不同浓度 Cd^{2+} 与 *S*-异丙甲草胺单独及联合作用下,斜生栅藻细胞密度均明显低于空白组($P < 0.05$),说明两者单独及联合作用均对斜生栅藻细胞的生长有显著的抑制作用。由表 1 可知, Cd^{2+} 与 *S*-异丙甲草胺对斜生栅藻单独及联合作用的 EC_{50} 值均表现为随着处理时间的延长而减小, Cd^{2+} 、*S*-异丙甲草胺、0.02 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ *S*-异丙甲草胺 + Cd^{2+} 、0.1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ *S*-异丙甲草胺 + Cd^{2+} 的 $\text{EC}_{50-24\text{h}}$ 分别为 0.27、0.24、0.27 和 0.16 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{EC}_{50-96\text{h}}$ 分别为 0.16、0.13、0.12 和 0.20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,表明 Cd^{2+} 与 *S*-异丙甲草胺单独及联合作用对斜生栅藻的急性毒性随着处理时间的延长而增大。同一处理时间内, Cd^{2+} 单独作用对斜生栅藻的 EC_{50} 值均大于 *S*-异丙甲草胺单独作用的 EC_{50} 值,说明 Cd^{2+} 对斜生栅藻的急性毒性小于 *S*-异丙甲草胺。

表 1 Cd^{2+} 与 *S*-异丙甲草胺复合污染的 EC_{50} 值¹⁾

Table 1 EC_{50} values of Cd^{2+} and *S*-metolachlor combined pollution

暴露时间/h	浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	A_1	A_2	EC_{50}	R^2	P
24	Cd	-1.80	98.4	0.27	0.998 1	3.89
	<i>S</i> ²⁾	-4.05	75.6	0.24	0.999 7	4.81
	0.02S + Cd	8.83	81.8	0.27	0.979 5	1.42
	0.1S + Cd	10.4	64.0	0.16	0.989 6	3.00
48	Cd	9.99	85.0	0.17	0.995 3	2.25
	<i>S</i>	-10.1	92.6	0.16	0.987 6	6.04
	0.02S + Cd	38.5	84.2	0.17	0.981 7	2.90
	0.1S + Cd	20.2	80.9	0.15	0.999 2	4.01
72	Cd	9.32	95.2	0.16	0.980 6	2.01
	<i>S</i>	-2.32	97.9	0.14	0.985 9	3.42
	0.02S + Cd	30.7	93.3	0.14	0.981 4	1.66
	0.1S + Cd	22.1	87.0	0.16	0.999 8	3.62
96	Cd	8.46	97.2	0.16	0.976 4	2.02
	<i>S</i>	-2.68	97.5	0.13	0.960 8	3.94
	0.02S + Cd	-4.40	108.5	0.12	0.998 6	1.40
	0.1S + Cd	22.0	94.2	0.20	0.998 6	2.65

1) Logistic 模型: $y = A_2 + (A_1 - A_2) / [1 + (x/\text{EC}_{50})^P]$; 式中, y 表示有毒物质对斜生栅藻细胞的生长抑制率(%), x 表示有毒物质的浓度, 数据由 Origin 8.0 软件计算所得; 2) *S* 为 *S*-异丙甲草胺, 下同

分别采用毒性单位法和相加指数法对 Cd²⁺ 与 S-异丙甲草胺的联合毒性进行了评价. 由表 2 可知, 低浓度 Cd²⁺ 与低浓度 S-异丙甲草胺的联合毒性表现为协同作用, $M < 1$, 同时 $AI > 0$; 高浓度 Cd²⁺ 与 S-异丙甲草胺的联合毒性表现为拮抗作用, 高浓度 S-异丙甲草胺与 Cd²⁺ 的联合毒性也表现为拮抗作用, $M > M_0$, 同时 $AI < 0$. 在评价 0.1 mg·L⁻¹ Cd²⁺ 与 0.1 mg·L⁻¹ S-异丙甲草胺的联合毒性时, 两种方

法得到的结论出现不一致的现象, 毒性单位法得 $M_0 > M > 1$, 为部分相加作用, 而相加指数法 $AI < 0$ 为拮抗作用. 已有研究通过实验和评价结果发现, 不同评价方法对同一实验结果的毒性评价可能不同, 但多数评价结论是相同的^[18]. 总体而言, 低浓度 Cd²⁺ 与低浓度 S-异丙甲草胺的联合毒性为协同作用, 高浓度 Cd²⁺ 与高浓度 S-异丙甲草胺的联合毒性为拮抗作用.

表 2 Cd²⁺ 与 S-异丙甲草胺的联合毒性分析¹⁾
Table 2 Combined toxicity of Cd²⁺ and S-metolachlor

混合物	M	M ₀	AI	作用类型
0.02Cd + 0.02S	0.279	1.813	2.587	协同
0.10Cd + 0.02S	0.779	1.246	0.284	协同
0.20Cd + 0.02S	1.404	1.123	-0.404	拮抗
0.02Cd + 0.1S	0.894	1.163	0.118	协同
0.10Cd + 0.1S	1.394	1.813	-0.394	部分相加(拮抗)
0.20Cd + 0.1S	2.019	1.615	-1.019	拮抗
0.02Cd + 0.2S	1.664	1.081	-0.664	拮抗
0.10Cd + 0.2S	2.164	1.406	-1.164	拮抗
0.20Cd + 0.2S	2.789	1.812	-1.789	拮抗

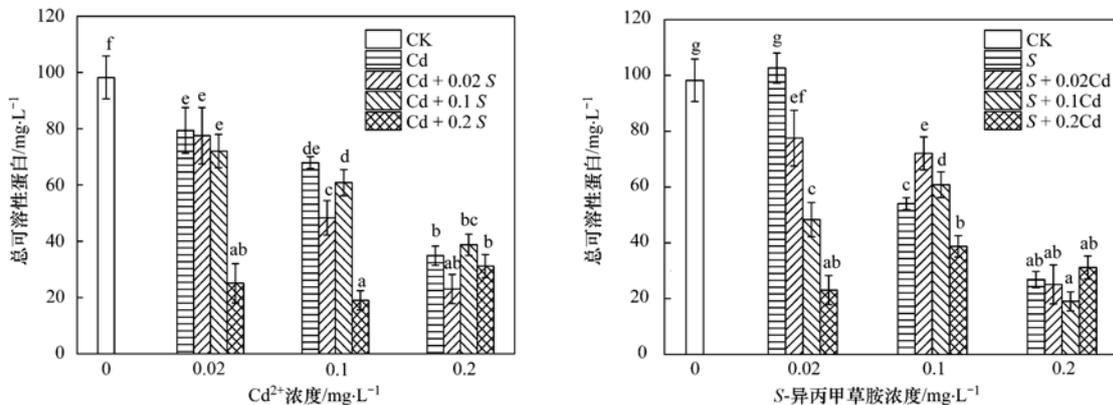
1) 毒性单位法(TU法): $M < 1$ 为协同作用, $M = 1$ 为简单相加作用, $M_0 > M > 1$ 为部分相加, $M = M_0$ 为独立作用, $M > M_0$ 为拮抗作用; 相加指数法(AI法): $AI > 0$ 为协同作用, $AI = 0$ 为简单相加作用, $AI < 0$ 为拮抗作用

2.2 Cd²⁺ 与 S-异丙甲草胺复合污染对斜生栅藻总蛋白含量的影响

从图 1 可知单独作用时, 藻细胞总蛋白含量随 Cd²⁺ 浓度的升高而降低, 且均低于空白组, 分别是对照的 80.84%、69.18% 和 34.87%, 其趋势与其对藻细胞密度的影响一致, 说明 Cd²⁺ 抑制了藻的生长从而导致蛋白含量的减少. 不同浓度 S-异丙甲草胺单独作用时, 藻细胞总蛋白含量分别是对照的 104.50%、55.05% 和 27.30%, 0.02 mg·L⁻¹ 处理组总蛋白含量略高于空白组, 这可能是由于低浓度 S-异丙甲草胺刺激了藻的生长. 在高浓度处理组 S-异丙甲

草胺对藻细胞总蛋白含量的影响高于 Cd²⁺ 的影响.

Cd²⁺ 与 S-异丙甲草胺联合作用时藻细胞的总蛋白含量均明显低于空白组. 由图 1 可知, 总体而言当 Cd²⁺ 浓度一定时, 与 S-异丙甲草胺联合作用对藻细胞蛋白含量的影响随着 S-异丙甲草胺浓度的升高而降低; 当 S-异丙甲草胺浓度一定时, 与 Cd²⁺ 联合作用对藻细胞蛋白含量的影响随着 Cd²⁺ 浓度的升高而降低. 0.1 mg·L⁻¹ S-异丙甲草胺处理下, 与 0.1 mg·L⁻¹ 和 0.2 mg·L⁻¹ Cd²⁺ 联合作用时总蛋白含量均高于 0.02 mg·L⁻¹ S-异丙甲草胺处理下与 Cd²⁺ 联合作用时的总蛋白含量, 总蛋白含量分别为



图例说明同表 1, 下同

图 1 Cd²⁺ 与 S-异丙甲草胺单独及联合作用对斜生栅藻总蛋白含量的影响

Fig. 1 Combined effects of Cd²⁺ and S-metolachlor on the total protein content of S. obliquus

60.85 mg·L⁻¹、38.75 mg·L⁻¹以及 48.34 mg·L⁻¹、23.07 mg·L⁻¹,表现出在 0.1 mg·L⁻¹ *S*-异丙甲草胺处理下与 0.1 mg·L⁻¹和 0.2 mg·L⁻¹ Cd²⁺ 联合作用对藻细胞总蛋白含量的影响产生了拮抗作用,这与联合毒性分析结果一致. 0.2 mg·L⁻¹ *S*-异丙甲草胺处理藻细胞总蛋白含量均较小,没有明显变化,这可能是由于高浓度 *S*-异丙甲草胺对藻细胞的抑制作用已经较大,添加 Cd²⁺ 对藻细胞总蛋白含量影响所起的联合毒性作用不明显.

2.3 Cd²⁺ 与 *S*-异丙甲草胺复合污染对斜生栅藻 SOD 酶活性的影响

逆境胁迫下植物细胞会产生过多的活性氧自由基(ROS),包括过氧化氢(H₂O₂)、基态氧(¹O₂)、超氧阴离子自由基(O₂^{·-})和羟自由基(·OH)等,而生物则会启动自身细胞内的抗氧化系统清除多余的活性氧自由基以防止细胞损伤. 在酶促过程中 SOD 是清除自由基的重要酶之一,将毒性较强的 O₂^{·-} 转化为毒性次级的 H₂O₂ 和基态氧,减少·OH的生成,常被作为评价抗氧化水平的有效生物指标^[19].

从图 2 可知单独作用时 SOD 酶活性随 Cd²⁺ 浓

度的升高而下降,分别为 3.56、2.51 和 1.45 U·mg⁻¹; SOD 酶活性随 *S*-异丙甲草胺浓度的升高呈先增大后减小、先刺激后抑制的趋势,分别为 3.12、5.69 和 1.23 U·mg⁻¹. 0.02 mg·L⁻¹、0.1 mg·L⁻¹ Cd²⁺ 和 0.02 mg·L⁻¹、0.1 mg·L⁻¹ *S*-异丙甲草胺联合作用对 SOD 酶活性的刺激作用大于其单独作用,SOD 酶活性分别为空白组的 2.12 倍(0.02 mg·L⁻¹ Cd²⁺ + 0.02 mg·L⁻¹ *S*-异丙甲草胺)、2.26 倍(0.02 mg·L⁻¹ Cd²⁺ + 0.1 mg·L⁻¹ *S*-异丙甲草胺)、1.43 倍(0.1 mg·L⁻¹ Cd²⁺ + 0.02 mg·L⁻¹ *S*-异丙甲草胺)和 1.56 倍(0.1 mg·L⁻¹ Cd²⁺ + 0.1 mg·L⁻¹ *S*-异丙甲草胺). 根据联合毒性分析,0.02 mg·L⁻¹、0.1 mg·L⁻¹ Cd²⁺ 和 0.02 mg·L⁻¹、0.1 mg·L⁻¹ *S*-异丙甲草胺联合作用属于协同作用或部分相加作用,氧化应激响应使 SOD 酶活性增加以清除更多的自由基. 0.2 mg·L⁻¹ Cd²⁺ 或 0.2 mg·L⁻¹ *S*-异丙甲草胺联合作用对 SOD 酶活性抑制作用明显,这可能是由于高浓度作用下藻细胞生长抑制率较大,导致大量自由基生成从而细胞的抗氧化酶活性下降.

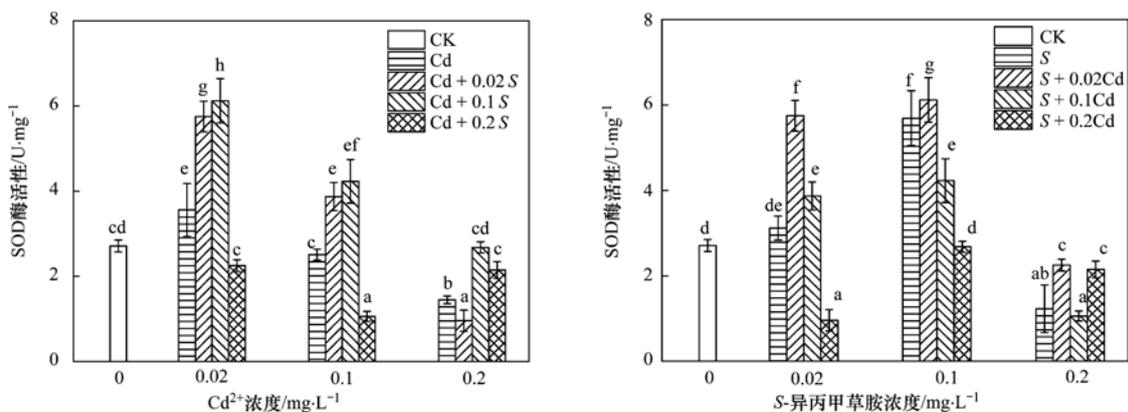


图 2 Cd²⁺ 与 *S*-异丙甲草胺单独及联合作用对斜生栅藻 SOD 酶活性的影响

Fig. 2 Combined effects of Cd²⁺ and *S*-metolachlor on the SOD activity of *S. obliquus*

SOD 激活说明有毒物质的存在使藻细胞内产生了氧化应激反应,随着有毒物质浓度的升高酶活性被抑制,产生的过量自由基会转化为毒性更强的·OH,从而导致细胞大分子或其结构的破坏,被破坏的大分子中可能包括蛋白酶类等,如藻细胞内的总可溶性蛋白和 SOD 酶蛋白,而这些蛋白含量的减少会造成抗氧化能力的下降. 这与 Liu 等^[20]研究得到的异丙甲草胺对蛋白核小球藻的 CAT 酶活性影响结果一致.

2.4 Cd²⁺ 与 *S*-异丙甲草胺复合污染对斜生栅藻的细胞通透性的影响

由图 3 可知,各处理组藻细胞膜通透性均高于对照组,说明 Cd²⁺ 与 *S*-异丙甲草胺的存在破坏了藻细胞膜的完整性. 单独作用下,藻细胞膜通透性随 *S*-异丙甲草胺浓度的增加而逐渐增大,各浓度处理组藻细胞通透性分别是对照组的 1.11、3.73、29.81 倍; Cd²⁺ 单独作用时呈现相同的趋势,各浓度处理组藻细胞通透性分别是对照组的 0.91、4.0、

10.87 倍. 说明 Cd^{2+} 与 *S*-异丙甲草胺单独作用对斜生栅藻细胞通透性的影响与其各自浓度呈正相关效应, 且 *S*-异丙甲草胺对藻细胞膜通透性的影响显著大于 Cd^{2+} 的影响. Cd^{2+} 浓度一定时, 随着 *S*-异丙甲草胺浓度的增加, 藻细胞膜通透性增加, 与 $0.02 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ *S*-异丙甲草胺联合作用处理组藻细胞内产生荧光信号的强度与 Cd^{2+} 单独处理组相比增强不明显, 与 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ *S*-异丙甲草胺联合作用处理组荧光信号强度明显增强, 细胞膜通透性明显增大, 分别是对照组的 20.78、23.55 和 12.60 倍; 当 *S*-异丙甲草胺浓度一定时, 随着 Cd^{2+}

浓度升高, 荧光信号强度增强, 细胞膜通透性增大.

Cd^{2+} 与 *S*-异丙甲草胺单独及联合作用下, 藻细胞膜通透性随有毒物质浓度的升高呈逐渐增大的趋势, 该过程使细胞内各种物质正常的运输过程遭到干扰, 增大了污染物透过细胞膜进入细胞内部的可能性. 研究认为污染物等逆境胁迫下生物细胞内过量 ROS 的产生可能会使细胞膜完整性受损^[21~23]. 有毒物质对藻类的毒害作用是由于对藻细胞膜的破坏导致细胞膜通透性增加, 使环境中的有毒物质能顺利进入细胞, 并与细胞中有生命活性的物质发生反应, 干扰或破坏了细胞正常的代谢^[24,25].

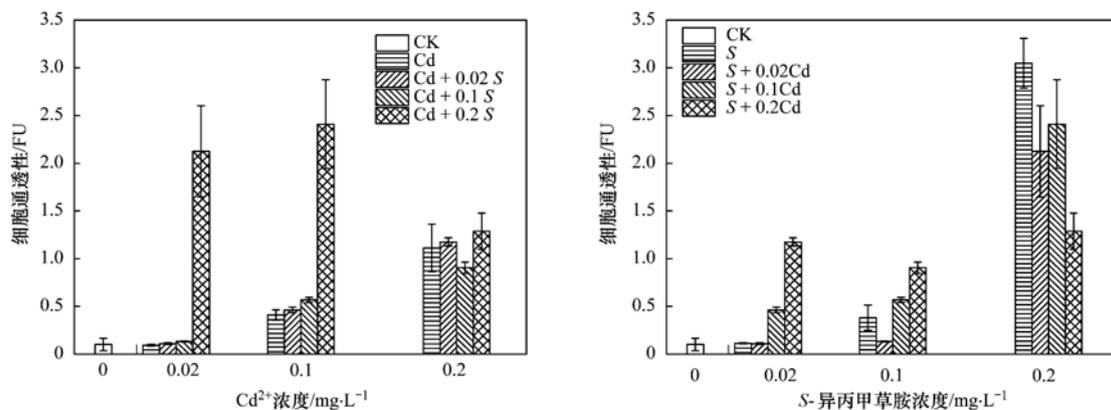


图3 Cd^{2+} 与 *S*-异丙甲草胺单独及联合作用对斜生栅藻的细胞通透性影响

Fig. 3 Combined effects of Cd^{2+} and *S*-metolachlor on the cellular membrane permeability of *S. obliquus*

3 结论

(1) Cd^{2+} 与 *S*-异丙甲草胺单独作用对斜生栅藻的 EC_{50} 均随着暴露时间的延长而减小, 且 *S*-异丙甲草胺毒性大于 Cd^{2+} ; Cd^{2+} 与 *S*-异丙甲草胺联合作用时低浓度表现为协同作用, 高浓度表现为拮抗作用.

(2) Cd^{2+} 与 *S*-异丙甲草胺单独及联合作用下, 斜生栅藻细胞总可溶性蛋白含量随有毒物质浓度的升高而降低; Cd^{2+} 单独作用的影响大于 *S*-异丙甲草胺单独作用的影响.

(3) Cd^{2+} 与 *S*-异丙甲草胺单独及联合作用下, 斜生栅藻细胞 SOD 酶活性随有毒物质浓度的升高呈先激活后抑制的趋势; 高浓度 Cd^{2+} 或高浓度 *S*-异丙甲草胺联合作用对 SOD 酶活性的抑制作用明显.

(4) Cd^{2+} 与 *S*-异丙甲草胺单独及联合作用对斜生栅藻细胞膜通透性的影响总体呈逐渐增大的趋势; *S*-异丙甲草胺单独作用的影响大于 Cd^{2+} 单独作用的影响; 在高浓度 *S*-异丙甲草胺条件下, Cd^{2+} 与

S-异丙甲草胺复合作用对藻细胞膜通透性的影响逐渐减弱.

参考文献:

- [1] Vallotton N M, Moser D, Eggen R I L, et al. *S*-metolachlor pulse exposure on the alga *Scenedesmus vacuolatus*: Effects during exposure and the subsequent recovery[J]. *Chemosphere*, 2008, **73**(3): 395-400.
- [2] 蔡卫丹, 刘惠君, 方治国. *Rac*-及 *S*-异丙甲草胺对 2 种微藻毒性特征影响研究[J]. *环境科学*, 2012, **33**(2): 448-453.
- [3] Chen Y X, He Y F, Yang Y, et al. Effect of cadmium on nodulation and N_2 -fixation of soybean in contaminated soils[J]. *Chemosphere*, 2003, **50**(6): 781-787.
- [4] Monteiro C M, Fonseca S C, Castro P M L, et al. Toxicity of cadmium and zinc on two microalgae, *Scenedesmus obliquus* and *Desmodesmus pleiomorphus*, from Northern Portugal[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2011, **23**(1): 97-103.
- [5] Varaksin A N, Katsnelson B A, Panov V G, et al. Some considerations concerning the theory of combined toxicity: a case study of subchronic experimental intoxication with cadmium and lead[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2014, **64**: 144-156.
- [6] 徐向华, 徐德福, 王晓蓉, 等. 玉米幼苗对镉、菲单一与复合污染的生理生化响应[J]. *环境科学*, 2011, **32**(5): 1471-1476.

- [7] 武文飞, 南忠仁, 王胜利, 等. 单一与复合胁迫下油菜对镉、铅的吸收效应[J]. 环境科学, 2012, **33**(9): 3253-3254.
- [8] Petersen K, Heiaas H H, Tollefsen K E. Combined effects of pharmaceuticals, personal care products, biocides and organic contaminants on the growth of *Skeletonema pseudocostatum* [J]. Aquatic Toxicology, 2014, **150**: 45-54.
- [9] Gauthier P T, Norwood W P, Prepas E E, et al. Metal-PAH mixtures in the aquatic environment: a review of co-toxic mechanisms leading to more-than-additive outcomes[J]. Aquatic Toxicology, 2014, **154**: 253-269.
- [10] Lewis M A. Use of freshwater plants for phytotoxicity testing: a review[J]. Environmental Pollution, 1995, **87**(3): 319-336.
- [11] 胡晓娜, 张淑娴, 陈彩东, 等. 异丙甲草胺与锌共存对斜生栅藻毒性手性差异影响[J]. 环境科学, 2014, **35**(1): 292-298.
- [12] OECD Guidelines for the testing of chemicals, proposal for updating guideline 201, freshwater alga *cyanobacteria*, growth inhibition test[S]. 2002.
- [13] Sprague J B, Ramsay B A. Lethal levels of mixed copper-zinc solutions for juvenile salmon [J]. Journal of the Fisheries Research Board of Canada, 1965, **22**(2): 425-432.
- [14] Marking L L. Method for assessing additive toxicity of chemical mixtures[A]. In: Mayer F L, Hamelink J L (Eds.). Aquatic toxicology and hazard evaluation. Proceedings of the first annual symposium on aquatic toxicity[C]. Philadelphia: ASTM Special Technical Publication, 1977. 99-108.
- [15] Bradford M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding[J]. Analytical Biochemistry, 1976, **72**(1-2): 248-254.
- [16] Beyer W F, Fridovich I. Assaying for superoxide dismutase activity: Some large consequences of minor changes in conditions [J]. Analytical Biochemistry, 1987, **161**(2): 559-566.
- [17] Vigneault B, Percot A, Lafleur M, et al. Permeability changes in model and phytoplankton membranes in the presence of aquatic humic substances [J]. Environmental Science and Technology, 2000, **34**(18): 3907-3913.
- [18] 杨良, 葛飞, 喻方琴, 等. 十六烷基三甲基氯化铵与荧蒹对小球藻的联合毒性及其作用机制[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(1): 150-155.
- [19] Geoffroy L, Teisseire H, Couderchet M, et al. Effect of oxyfluorfen and diuron alone and in mixture on antioxidative enzymes of *Scenedesmus obliquus* [J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 2002, **72**(3): 178-185.
- [20] Liu H J, Xiong M Y. Comparative toxicity of racemic metolachlor and S-metolachlor to *Chlorella pyrenoidosa* [J]. Aquatic Toxicology, 2009, **93**(2-3): 100-106.
- [21] Cherry J H, Nielsen B L. Metabolic engineering of chloroplasts for abiotic stress tolerance [J]. Molecular Biology and Biotechnology of Plant Organelles, 2004, **3**: 513-525.
- [22] Wen Y Z, Chen H, Sheng C S, et al. Enantioselectivity tuning of chiral herbicide dichlorprop by copper: roles of reactive oxygen species [J]. Environmental Science and Technology, 2011, **45**(11): 4778-4784.
- [23] Saison C, Perreault F, Daigle J C, et al. Effect of core-shell copper oxide nanoparticles on cell culture morphology and photosynthesis (photosystem II energy distribution) in the green alga, *Chlamydomonas reinhardtii* [J]. Aquatic Toxicology, 2010, **96**(2): 109-114.
- [24] 沈国兴, 严国安, 彭金良, 等. 农药对藻类的生态毒理学研究——II. 毒性机理及其富集和降解[J]. 环境科学进展, 1999, **7**(6): 131-140.
- [25] 沈宏, 周培疆. 环境有机污染物对藻类生长作用的研究进展 [J]. 水生生物学报, 2002, **26**(5): 529-535.

CONTENTS

Simulation and Influencing Factors of Spatial Distribution of PM _{2.5} Concentrations in Chongqing	WU Jian-sheng, LIAO Xing, PENG Jian, <i>et al.</i> (759)
Correlation, Seasonal and Temporal Variation of Water-soluble Ions of PM _{2.5} in Beijing During 2012-2013	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (768)
Characteristics and Sources Apportionment of OC and EC in PM _{1.1} from Nanjing	JIANG Wen-juan, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (774)
Composition and Variation Characteristics of Atmospheric Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Taiyuan, China	ZHANG Gui-xiang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i> (780)
Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Shouzhou City	LIU Feng-xian, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> (787)
Satellite Retrieval of a Heavy Pollution Process in January 2013 in China	XUE Wen-bo, WU Wei-ling, FU Fei, <i>et al.</i> (794)
Meteorological Mechanism for the Formation of a Serious Pollution Case in Beijing in the Background of Northerly Flow at Upper Levels	LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, TANG Yi-xi, <i>et al.</i> (801)
Concentrations and Deposition Fluxes of Different Mercury Species in Precipitation in Jinyun Mountain, Chongqing	QIN Cai-qing, WANG Yong-min, PENG Yu-long, <i>et al.</i> (809)
Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Wuzhi Mountain (Wuzhishan) Background Station in Hainan	LEI Yu-tao, LIU Ming, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i> (817)
Organic and Element Carbon in Foliar Smoke	CHEN Hui-yu, LIU Gang, XU Hui, <i>et al.</i> (824)
Analysis of Characteristics and Products of Chlorobenzene Degradation with Dielectric Barrier Discharge	JIANG Li-ying, CAO Shu-ling, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (831)
Distribution, Sources and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Sediments of Yangtze Estuary and Zhejiang Coastal Areas	MU Qing-lin, FANG Jie, SHAO Jun-bo, <i>et al.</i> (839)
Adsorption Characteristics of Typical PPCPs onto River Sediments and Its Influencing Factors	WANG Kai, LI Kan-zhu, ZHOU Yi-yuan, <i>et al.</i> (847)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediment in Karst Underground River	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, SHI Yang, <i>et al.</i> (855)
Contamination Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Multimedium in Karst Underground River	LU Li, WANG Zhe, PEI Jian-guo (862)
Characteristics of Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter from Confluence of Rivers; Case Study of Qujiang River-Jialing River and Fujiang River-Jialing River	YAN Jin-long, JIANG Tao, GAO Jie, <i>et al.</i> (869)
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) and Fluorescence Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter (DOM) in Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Region	WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (879)
Absorption and Fluorescence Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Rainwater and Sources Analysis in Summer and Winter Season	LIANG Jian, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (888)
Composition of NOM in Raw Water of Danjiangkou Reservoir of South-to-North Water Diversion Project and Comparison of Efficacy of Enhanced Coagulation	CHENG Tuo, XU Bin, ZHU He-zhen, <i>et al.</i> (898)
Denitrification in Water of Daliao River Estuary in Summer and the Effect of Environmental Factors	YANG Li-biao, LEI Kun, MENG Wei (905)
Sources of Dissolved Organic Carbon and the Bioavailability of Dissolved Carbohydrates in the Tributaries of Lake Taihu	YE Lin-lin, WU Xiao-dong, KONG Fan-xiang, <i>et al.</i> (914)
Canonical Correspondence Analysis of Summer Phytoplankton Community and Its Environmental Factors in Hanfeng Lake	WANG Yu-fei, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (922)
Temporal Variation of Trophic Status in Drawdown Area of Hanfeng Lake in the Storage Period of Three Gorges Reservoir in China	HUANG Qi, HE Bing-hui, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> (928)
Spatial Distribution Pattern and Stock Estimation of Nutrients During Bloom Season in Lake Taihu	JIN Ying-wei, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i> (936)
Phytoplankton Community Structure and Eutrophication Risk Assessment of Beijing River	GOU Ting, MA Qian-li, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (946)
Synergistic Effect of Physical and <i>Chironomus plumosus</i> Combined Disturbance on Regeneration and Transformation of Internal Phosphorus	SHI Xiao-dan, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i> (955)
Effect of Light and Temperature on Growth Kinetics of <i>Anabaena flosaquae</i> Under Phosphorus Limitation	YIN Zhi-kun, LI Zhe, WANG Sheng, <i>et al.</i> (963)
Purification of the Wastewater of Quartz Processing by Mineral-based Porous Granulation Material	WANG En-wen, LEI Shao-min, ZHANG Shi-chun, <i>et al.</i> (969)
Enhanced Reductive Decoloration of Methylene Blue by Polyacrylic Acid Modified Zero-valent Iron Nanoparticles	HE Jing, WANG Xiang-yu, WANG Pei, <i>et al.</i> (980)
Decolorization of Reactive Blue P-3R with Microsphere-supported Binuclear Manganese Complex as a Novel Heterogeneous CWPO Catalyst	SONG Min, ZHANG Lin-ping, ZHONG Yi, <i>et al.</i> (989)
Biosynthetic Schwertmannite as Catalyst in Fenton-like Reactions for Degradation of Methyl Orange	WANG Kuai-bing, FANG Di, XU Zhi-hui, <i>et al.</i> (995)
Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal of Wastewater by Using Sludge Anaerobic Fermentation Liquid as Carbon Source in a Pilot-scale System	LUO Zhe, ZHOU Guang-jie, LIU Hong-bo, <i>et al.</i> (1000)
Transformation Characteristics of Carbon, Nitrogen, Phosphorus and Sulfur During Thermal Hydrolysis Pretreatment of Sludge with High Solid Content	ZHUO Yang, HAN Yun, CHENG Yao, <i>et al.</i> (1006)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Control of Membrane Fouling in MBR and SMBR	GUO Xiao-ma, ZHAO Yan, WANG Kai-yan, <i>et al.</i> (1013)
Influence of Substrate COD on Methane Production in Single-chambered Microbial Electrolysis Cell	TENG Wen-kai, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (1021)
Ion Specificity During Ion Exchange Equilibrium in Natural Clinoptilolite	HE Yun-hua, LI Hang, LIU Xin-min, <i>et al.</i> (1027)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risks of Urban Soils in Kaifeng City, China	LI Yi-meng, MA Jian-hua, LIU De-xin, <i>et al.</i> (1037)
Effects of Different Cultivation Patterns on Soil Aggregates and Organic Carbon Fractions	QIU Xiao-lei, ZONG Liang-gang, LIU Yi-fan, <i>et al.</i> (1045)
Effects of Chinese Prickly Ash Orchard on Soil Organic Carbon Mineralization and Labile Organic Carbon in Karst Rocky Desertification Region of Guizhou Province	ZHANG Wen-juan, LIAO Hong-kai, LONG Jian, <i>et al.</i> (1053)
Rare Earth Elements Content in Farmland Soils and Crops of the Surrounding Copper Mining and Smelting Plant in Jiangxi Province and Evaluation of Its Ecological Risk	JIN Shu-lan, HUANG Yi-zong, WANG Fei, <i>et al.</i> (1060)
Combined Toxicity of Cadmium and S-metolachlor to <i>Scenedesmus obliquus</i>	ZHANG Xiao-qiang, HU Xiao-na, CHEN Cai-dong, <i>et al.</i> (1069)
Effect of Degradation Succession Process on the Temperature Sensitivity of Ecosystem Respiration in Alpine <i>Potentilla fruticosa</i> Scrub Meadow	LI Dong, LUO Xu-peng, CAO Guang-min, <i>et al.</i> (1075)
Ecological Stoichiometric Characteristics in Leaf and Litter Under Different Vegetation Types of Zhifanggou Watershed on the Loess Plateau, China	LI Xin, ZENG Quan-chao, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (1084)
Denitration Mechanism of Monoclinic-phase Nano Zirconium Oxide-based Catalysts	YE Fei, LIU Rong, GUAN Hao, <i>et al.</i> (1092)
Characterization of Phosphorus Forms in Different Organic Materials	DENG Jia, HU Meng-kun, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> (1098)
Comparative Life Cycle Environmental Assessment Between Electric Taxi and Gasoline Taxi in Beijing	SHI Xiao-qing, SUN Zhao-xin, LI Xiao-nuo, <i>et al.</i> (1105)
Characteristics of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particles Emitted from Coal-Fired Power Plants	DUAN Lei, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i> (1117)
Underlying Mechanisms of the Heavy Metal Tolerance of Mycorrhizal Fungi	CHEN Bao-dong, SUN Yu-qing, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (1123)
Research Progress on Microbial Properties of Nitrite-Dependent Anaerobic Methane-Oxidising Bacteria	SHEN Li-dong (1133)

《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)

2015年3月15日 第36卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 3 Mar. 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