

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第9期

Vol.35 No.9

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长江三角洲地区霾判别方法的对比分析 刘晓慧,朱彬,高晋徽,张恩红,王红磊,陈焯鑫,王姝 (3239)

1980~2012年江苏省城市霾日的时空分布及成因分析 刘端阳,魏建苏,严文莲,吕军,孙燕 (3247)

瓦里关大气二氧化碳和甲烷时间变化特征 刘鹏,张国庆,王剑琼,吴昊,李宝鑫,王宁章 (3256)

上海城区PM_{2.5}中有机碳和元素碳变化特征及来源分析 张懿华,王东方,赵倩彪,崔虎雄,李娟,段玉森,伏晴艳 (3263)

亚青会期间南京市气溶胶中OC和EC的粒径分布 王红磊,朱彬,安俊琳,段卿,邹嘉南,沈利娟 (3271)

无锡市冬季典型天气PM_{2.5}中碳组分的污染特征 云龙,陆钊,张天舒,伍德侠,盛世杰,陆亦怀,刘建国 (3280)

高炉炼铁工艺细颗粒物PM_{2.5}排放特性分析 范真真,赵亚丽,赵浩宁,梁兴印,孙静雯,王保贵,王亚军 (3287)

重庆市北碚城区大气中VOCs组成特征研究 祁心,郝庆菊,吉东生,张军科,刘子锐,胡波,王跃思,江长胜 (3293)

双组分VOCs的催化氧化及动力学分析 卜龙利,杨力,孙剑宇,梁欣欣,虎雪姣,孟海龙 (3302)

汽车排放超细颗粒物浓度及粒径谱特征的研究 陆叶强,陈秋方,孙在,蔡志良,杨文俊 (3309)

疏勒河上游地表水化学离子特征及其控制因素 周嘉欣,丁永建,曾国雄,吴锦奎,秦甲 (3315)

河流库区沉积物-水界面营养盐及气态氮的释放过程和通量 陈朱虹,陈能汪,吴殷琪,莫琼利,周兴鹏,鲁婷,田蕴 (3325)

大辽河感潮段及其近海河口重金属空间分布及污染评价 张雷,秦延文,马迎群,赵艳民,时瑶 (3336)

雅鲁藏布江中段表层沉积物重金属形态分布及风险评价 柏建坤,李潮流,康世昌,陈鹏飞,王建力 (3346)

北京奥林匹克公园地表颗粒物粒度特征分析 李海燕,石安邦,瞿杨晨,岳靖淋 (3352)

黄河表层沉积物中类二噁英多氯联苯水平分布 李光耀,金军,何畅,王英,马召辉,李明园 (3358)

合肥城郊典型源头溪流不同渠道形态的氮磷滞留特征 李如忠,杨继伟,钱靖,董玉红,唐文坤 (3365)

基于水资源调度的平原河网区城市河道氮迁移转化研究 刘波,盛明,朱强,杨霜,檀炳超,范冉,南旭军,何茂阳,王国祥 (3373)

杭州湾潮滩湿地植物不同分解过程及其磷素动态 邵学新,梁新强,吴明,叶小齐,蒋科毅 (3381)

基于数据同化的太湖叶绿素多模型协同反演 李渊,李云梅,吕恒,朱利,吴传庆,杜成功,王帅 (3389)

天然日光辐照下两江交汇处溶解性有机质(DOM)光漂白过程:以涪江-嘉陵江为例 高洁,江韬,闫金龙,魏世强,王定勇,卢松,李璐璐 (3397)

利用紫外-可见吸收光谱估算三峡库区消落带水体、土壤和沉积物溶解性有机质(DOM)浓度 李璐璐,江韬,卢松,闫金龙,高洁,魏世强,王定勇,郭念,赵铮 (3408)

Cu₂O-Ag-AgBr/MA可见光催化剂的制备及其降解2-氯苯酚的研究 王冉,周雪峰,胡学香,胡春 (3417)

不同粒径零价铁活化过硫酸钠氧化降解酸性橙7的影响及动力学研究 李欢旋,王金泉,马邕文,黄明智,王艳,陈杨梅 (3422)

还原脱氯-生物联合降解2,4-二氯苯氧乙酸 周红艺,曾思思,梁思,韩鉴 (3430)

多介质土壤滤层系统(MSL)与潜流式人工湿地技术处理海水养殖废水的效能比较 宋颖,黄玉婷,葛川,张浩,陈昕,张志剑,罗安程 (3436)

不同碳源在污水处理过程中的变化规律研究 金鹏康,常晋,王先宝,刘柯君,王晓昌 (3443)

气升装置对厌氧氨氧化反应器脱氮效能的影响 李祥,张大林,黄勇,陈宗炬,袁怡 (3449)

微波及其组合工艺强化污泥厌氧消化研究 刘吉宝,倪晓棠,魏源送,佟娟,王亚伟 (3455)

“热水解-高温厌氧消化”工艺处理高含固率剩余污泥的中试研究 吴静,王广启,曹知平,李中华,胡玉瑛,王凯军,左剑恶 (3461)

温度对ABR-MBR复合工艺处理生活污水的影响及其微生物群落分析 吴鹏,陆爽君,徐乐中,刘捷,沈耀良 (3466)

污水处理厂尾水细菌群落结构分析 徐爱玲,任杰,宋志文,吴等等,夏岩 (3473)

沼液养殖钝顶螺旋藻的中试研究 国青青,刘锐,罗金飞,王根荣,陈吕军,刘笑 (3480)

内源呼吸过程溶解性代谢产物的光谱特性分析 李志华,张芹,白旭丽,刘毅 (3487)

基于呼吸图谱的自养菌与异养菌内源呼吸过程分析 李志华,白旭丽,张芹,刘毅,贺春博 (3492)

S-异丙甲草胺与镉对斜生栅藻光合作用的影响 陈彩东,胡晓娜,章小强,刘惠君 (3498)

影响浑太河流域鱼类群落结构的不同尺度环境因子分析 李艳利,李艳粉,徐宗学 (3504)

河口区新建河道轮虫群落演替及与水环境的关系 马文华,张玮,顾琬雯,张瑞雷,王丽卿 (3513)

Fontibacter sp. SgZ-2厌氧腐殖质/Fe(III)还原特性及电子传递机制研究 马晨,杨贵芹,陆琴,周顺桂 (3522)

基于UNMIX模型的夹皮沟金矿区土壤重金属源解析 艾建超,王宁,杨净 (3530)

石河子市土壤环境磁学特征及空间分布研究 杨涵,熊黑钢,陈学刚 (3537)

不同施磷量(KH₂PO₄)作用对Cu、Zn在红壤中的迁移转化 郭亮,李忠武,黄斌,王艳,张艳 (3546)

硫素对水稻吸收砷的生物有效性及其在土壤中的形态影响 杨世杰,唐冰培,王代长,饶伟,张亚楠,王丹,朱云集 (3553)

硫对土壤中硒形态变化及油菜硒吸收的影响 刘新伟,段碧辉,夏全杰,矫威,郭再华,胡承孝,赵竹青 (3564)

再生水灌溉对土壤化学性质及可培养微生物的影响 龚雪,王继华,关键飞,杨雪辰,陈黛慈 (3572)

西南喀斯特山区寿竹林地土壤微生物量与酶活性在不同坡位和剖面层次分布特征 秦华军,何丙辉,赵旋池,李源,毛文韬,曾清平 (3580)

黔中喀斯特石漠化区不同土壤类型对常见植物叶片δ¹³C值的影响 杜雪莲,王世杰,罗绪强 (3587)

碳底物含量对厌氧条件下水稻土N₂、N₂O、NO、CO₂和CH₄排放的影响 陈诺,廖婷婷,王睿,郑循华,胡荣桂, Klaus Butterbach-Bahl (3595)

北京市典型绿化灌木阻滞吸附PM_{2.5}能力研究 梁丹,王彬,王云琦,张会兰,杨松楠,李昂 (3605)

污泥焚烧过程中氯化物对Cd迁移行为的影响 刘敬勇,卓钟旭,孙水裕,罗光前,李晓明,谢武明,王玉洁,杨佐毅,赵素莹 (3612)

京津冀区域生产和消费CO₂排放的时空特点分析 汪浩,陈操操,潘涛,刘春兰,陈龙,孙莉 (3619)

水泥工业大气污染物排放控制水平确立研究 任春,江梅,邹兰,李晓倩,魏玉霞,赵国华,张国宁 (3632)

《环境科学》征稿简则(3279) 《环境科学》征订启事(3545) 信息(3364,3486,3552,3563)

S-异丙甲草胺与镉对斜生栅藻光合作用的影响

陈彩东, 胡晓娜, 章小强, 刘惠君*

(浙江工商大学环境科学与工程学院, 浙江省固体废物处理与资源化重点实验室, 杭州 310018)

摘要: 采用毒性试验标准方法研究了 Cd^{2+} 与 S-异丙甲草胺单独及联合作用对斜生栅藻叶绿素含量及叶绿素荧光特性的影响。暴露 96 h 后, Cd^{2+} 和 S-异丙甲草胺单独作用对斜生栅藻叶绿素含量和叶绿素荧光参数 F_0 、 F_v/F_m 、 F_v/F_0 、 $Y(\text{II})$ 、 qP 、 NPQ 和 $r\text{ETR}$ 均有一定影响, 表明 Cd^{2+} 和 S-异丙甲草胺对斜生栅藻光合作用产生影响, PS II 受损, 抑制光合作用的原初反应, 阻碍光合电子传递的过程, 对热能的耗散能力逐渐丧失。 Cd^{2+} 对斜生栅藻叶绿素含量和叶绿素荧光参数影响要显著大于 S-异丙甲草胺的影响, 影响程度随有毒物质浓度的升高而增加, 光强为 $231 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 时, 空白组 $Y(\text{II})$ 的平均降幅为 62.5%, Cd^{2+} 处理组随 Cd^{2+} 浓度的升高平均降幅分别为 68.0%、82.5% 和 100%, S-异丙甲草胺处理组平均降幅分别为 66.1%、72.1% 和 79.6%。 Cd^{2+} 与 S-异丙甲草胺联合作用对叶绿素荧光参数的影响主要是 Cd^{2+} 的影响。

关键词: S-异丙甲草胺; 镉; 斜生栅藻; 叶绿素含量; 叶绿素荧光

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)09-3498-06 DOI: 10.13227/j.hjkk.2014.09.036

Influence of S-Metolachlor and Cd^{2+} on Photosynthesis of *Scenedesmus obliquus*

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

(Zhejiang Provincial Key Laboratory of Solid Waste Treatment and Recycling, College of Environmental Science and Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The single and combined effects of Cd^{2+} and S-metolachlor on the chlorophyll content and chlorophyll fluorescence parameters of *Scenedesmus obliquus* were studied by using standard toxic testing method. Both Cd^{2+} and S-metolachlor had effects on the chlorophyll content and fluorescence parameters such as F_0 , F_v/F_m , F_v/F_0 , $Y(\text{II})$, qP , NPQ and $r\text{ETR}$ after 96 h-exposure, showing that Cd^{2+} and S-metolachlor damaged the PS II in algae, inhibited the primary reaction of photosynthesis, stopped the process of photosynthetic electron transport, and destroyed its ability of heat dissipation. The effects of Cd^{2+} on the chlorophyll content and fluorescence parameters were greater than those of S-metolachlor, and the effects increased with the increasing concentration. The average drop of $Y(\text{II})$ was 62.5% in the control group when the light intensity was $231 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$, and it was 68.0%, 82.5% and 100% respectively in Cd^{2+} -treated groups, and 66.1%, 72.1% and 79.6% respectively in S-metolachlor-treated group with the increasing concentration. The combined effects of Cd^{2+} and S-metolachlor on the chlorophyll fluorescence parameters were mainly due to the impacts of Cd^{2+} .

Key words: S-metolachlor; cadmium; *Scenedesmus obliquus*; chlorophyll content; chlorophyll fluorescence

S-异丙甲草胺(S-metolachlor)是手性农药对映体纯研究与应用成功的一例,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,其环境行为研究已受到关注^[1]。镉作为毒性最强的重金属元素之一,已被证实能诱导植物组织产生活性氧^[2,3],导致细胞膜过氧化,破坏细胞膜的完整性,破坏细胞器结构,降低叶绿体PS II感光系统活性等^[4]。随着工农业的发展,进入环境的污染物数量和种类明显增加,复合污染的研究正处于不断深入之中^[5],但有机-无机复合污染中手性农药和重金属的复合污染机制研究较少。

叶绿素荧光与光合作用中各个反应过程紧密相关,任何逆境对光合作用各过程产生的影响都可通过体内叶绿素荧光诱导动力学变化反映出来^[6,7]。因此,叶绿素荧光参数可作为逆境条件下植物抗逆

反应的指标之一^[8]。本文选择斜生栅藻为毒性指示生物,研究了S-异丙甲草胺与 Cd^{2+} 单独及联合作用对斜生栅藻叶绿素含量及叶绿素荧光特性的影响,从光合作用角度分析了手性农药与重金属复合污染对微藻的毒性及可能机制,以期评估污染物生态风险提供理论依据。

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

收稿日期: 2014-02-18; 修订日期: 2014-03-31

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

作者简介: 陈彩东(1990~),女,硕士研究生,主要研究方向为污染物环境生态毒理, E-mail:1019734064@qq.com

* 通讯联系人, E-mail:lhj@mail.zjgsu.edu.cn

院水生生物研究所,培养基采用水生 4 号(HB-4)人工培养液^[9],恒温光照培养^[10].

1.2 主要试剂

S-异丙甲草胺购自先正达(瑞士)公司,纯度为 96%;氯化镉(CdCl₂)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 实验方法

S-异丙甲草胺和 Cd²⁺ 浓度分别为 0、0.02、0.1、0.2 mg·L⁻¹,进行单独及联合作用正交试验,每组处理设 3 个平行. 处理 96 h 后取藻液进行叶绿素含量和叶绿素荧光测定.

叶绿素含量测定:采用丙酮浸提法^[11],按照 Mackinney 公式计算叶绿素 a(Chl a)和叶绿素 b(Chl b)的含量^[12].

叶绿素荧光特性:藻液 40 mL 浓缩至 1 mL,取 200 μL 至 96 孔酶标板中,用叶绿素荧光仪(德国 WALZ 公司 IMAG-MAX/L)测定其各叶绿素荧光参数和荧光动力学方程. 将放有藻液的酶标板放置在暗处暗适应 20 min 后放入样品室,开启检测光,实时荧光 F_t [$\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$] 相对稳定后得到最小荧光(F_0),打开饱和脉冲,一个脉冲后得到最大荧光(F_m),打开活化光 3 min, F_t 稳定后测得光适应后的最大荧光(F'_m). 快速光响应曲线测定:样本经暗适应后,逐渐开启光强度分别为 0、1、36、81、146、231、336、461、611、801 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 的光化光,每个强度的光化光照射 20 s 后,分别取平均值绘出快速光响应曲线^[13,14].

根据以下公式计算相应叶绿素荧光参数:

可变荧光

$$F_v = F_m - F_0 \quad (1)$$

潜在光化学效应

$$F_v/F_0 = \frac{F_m - F_0}{F_0} \quad (2)$$

PS II 最大量子产量

$$F_v/F_m = \frac{F_m - F_0}{F_m} \quad (3)$$

PS II 实际量子产量

$$Y(\text{II}) = \Delta F_v/F_m = \frac{F'_m - F_t}{F'_m} \quad (4)$$

光化学淬灭系数

$$qP = \frac{F'_m - F_t}{F'_m - F_0} \quad (5)$$

非光化学淬灭系数

$$\text{NPQ} = \frac{F_m}{F'_m} - 1 \quad (6)$$

相对光合电子传递速率

$$\text{rETR} = \frac{F'_m - F_t}{F'_m} \times \text{PAR} \times 0.84 \times 0.5 \quad (7)$$

式中,0.5 表示一个电子传递需要吸收 2 个量子,0.84 表示在入射的光量子中被吸收的占 84%,PAR 为当下光强.

1.4 数据统计与分析

实验数据使用 Microsoft Excel 2010 和 Origin 8.1 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 ± SD 表示.

2 结果与讨论

2.1 S-异丙甲草胺与 Cd²⁺ 对斜生栅藻叶绿素含量的影响

光合色素是在光合作用中参与吸收、传递光能或原初光化学反应的色素,是植物进行光合作用的物质基础^[15],Chl a 或总叶绿素 Chl (a + b) 含量常被作为测定光合作用的指标. 本实验通过测定 Chl a 及含量来探讨 S-异丙甲草胺与 Cd²⁺ 单独及联合作用对斜生栅藻光合作用的影响. 由表 1 可知,处理组的 Chl a 和 Chl (a + b) 含量低于空白组,其含量与有毒物质的浓度呈负相关效应. 与空白组比较,0.02、0.1、0.2 mg·L⁻¹ S-异丙甲草胺处理后 Chl a 含量减少了 19.9%、31.8%、70.3%,Cd²⁺ 处理后使之分别减少了 1.8%、70.8%、87.1%,表明

表 1 暴露 96 h 后斜生栅藻的叶绿素含量/mg·L⁻¹

Table 1 Chlorophyll content of <i>S. obliquus</i> after 96 h exposure/mg·L ⁻¹		
浓度	Chl a	Chl (a + b)
CK	0.559 ± 0.188 f	1.400 ± 0.473 e
0S + 0.02Cd	0.549 ± 0.139 ef	1.414 ± 0.359 e
0S + 0.1Cd	0.163 ± 0.028 abc	0.440 ± 0.075 abc
0S + 0.2Cd	0.072 ± 0.041 ab	0.198 ± 0.111 ab
0.02S + 0Cd	0.448 ± 0.147 def	1.091 ± 0.396 de
0.02S + 0.02Cd	0.423 ± 0.070 def	1.093 ± 0.182 de
0.02S + 0.1Cd	0.196 ± 0.058 bc	0.524 ± 0.153 bc
0.02S + 0.2Cd	0.111 ± 0.028 ab	0.301 ± 0.080 ab
0.1S + 0Cd	0.381 ± 0.172 de	0.808 ± 0.411 cd
0.1S + 0.02Cd	0.319 ± 0.070 cd	0.817 ± 0.177 cd
0.1S + 0.1Cd	0.132 ± 0.050 ab	0.345 ± 0.131 ab
0.1S + 0.2Cd	0.045 ± 0.011 ab	0.126 ± 0.030 ab
0.2S + 0Cd	0.166 ± 0.072 abc	0.212 ± 0.107 ab
0.2S + 0.02Cd	0.363 ± 0.069 d	0.812 ± 0.164 cd
0.2S + 0.1Cd	0.123 ± 0.085 ab	0.300 ± 0.220 ab
0.2S + 0.2Cd	0.005 ± 0.002 a	0.012 ± 0.005 a

低浓度 *S*-异丙甲草胺对 Chl a 含量影响比 Cd^{2+} 大, 但高浓度下 Cd^{2+} 的影响更大. *S*-异丙甲草胺与 Cd^{2+} 联合作用整体呈协同作用, 大于两者单独对斜生栅藻叶绿素含量的影响.

2.2 *S*-异丙甲草胺与 Cd^{2+} 对斜生栅藻叶绿素荧光的影响

2.2.1 *S*-异丙甲草胺与 Cd^{2+} 复合污染对 F_v/F_m 和 F_v/F_0 的影响

常用的叶绿素荧光参数 F_0 、 F_v/F_m 和 F_v/F_0 等能够较清晰地反映藻类的生理情况. F_0 是经过暗适应的光合机构全部 PS II 反应中心开启时发出的荧光强度^[16]. F_v/F_m 为 PS II 反应中心的内荧光能转换效率, 表征光合系统原初光能转换效率的高低^[17]. F_v/F_0 代表 PS II 的潜在活性^[18]. 由表 2 可

表 2 暴露 96 h 后斜生栅藻的 F_0 、 F_v/F_m 、 F_v/F_0

Table 2 The F_0 , F_v/F_m , F_v/F_0 of *S. obliquus* after 96 h exposure

浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	F_0	F_v/F_m	F_v/F_0
CK	0.192 ± 0.005 b	0.667 ± 0.006 hi	1.999 ± 0.048 i
0S + 0.02Cd	0.251 ± 0.005 cde	0.629 ± 0.016 g	1.696 ± 0.114 g
0S + 0.1Cd	0.275 ± 0.014 f	0.546 ± 0.028 c	1.207 ± 0.135 c
0S + 0.2Cd	0.310 ± 0.015 gh	0.526 ± 0.016 b	1.111 ± 0.069 bc
0.02S + 0Cd	0.203 ± 0.017 b	0.666 ± 0.004 hi	1.997 ± 0.035 i
0.02S + 0.02Cd	0.245 ± 0.014 cd	0.600 ± 0.017 ef	1.504 ± 0.111 ef
0.02S + 0.1Cd	0.263 ± 0.009 def	0.592 ± 0.008 def	1.451 ± 0.050 def
0.02S + 0.2Cd	0.354 ± 0.005 i	0.520 ± 0.002 b	1.085 ± 0.009 b
0.1S + 0Cd	0.199 ± 0.012 b	0.672 ± 0.004 i	2.054 ± 0.042 ij
0.1S + 0.02Cd	0.251 ± 0.018 cde	0.605 ± 0.021 f	1.536 ± 0.129 f
0.1S + 0.1Cd	0.268 ± 0.010 ef	0.577 ± 0.012 d	1.367 ± 0.065 d
0.1S + 0.2Cd	0.312 ± 0.004 gh	0.510 ± 0.007 b	1.043 ± 0.026 b
0.2S + 0Cd	0.196 ± 0.012 b	0.647 ± 0.004 gh	1.837 ± 0.023 h
0.2S + 0.02Cd	0.241 ± 0.015 c	0.642 ± 0.009 g	1.792 ± 0.064 gh
0.2S + 0.1Cd	0.268 ± 0.009 ef	0.583 ± 0.011 de	1.402 ± 0.065 de
0.2S + 0.2Cd	0.330 ± 0.004 h	0.481 ± 0.006 a	0.925 ± 0.024 a

2.2.2 *S*-异丙甲草胺与 Cd^{2+} 复合污染对快速光响应曲线变化的影响

实际量子产量 [$Y(\text{II})$] 表示作用光存在时 PS II 的实际量子效率, 该参数不仅与碳同化有关, 也与光呼吸及依赖 O_2 电子流有关^[21]. 从图 1 可以看出, 暴露 96h 后, *S*-异丙甲草胺与 Cd^{2+} 单独及联合作用均呈现随光强的增加斜生栅藻的 $Y(\text{II})$ 逐渐降低的趋势, 光强一定时, 随有毒物质浓度升高 $Y(\text{II})$ 减小, 且 Cd^{2+} 的影响要显著于 *S*-异丙甲草胺的影响. 光强为 $231 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 时, 空白组 $Y(\text{II})$ 的平均降幅为 62.5%, Cd^{2+} 处理组随 Cd^{2+} 浓度的升高平均降幅分别为 68.0%、82.5% 和 100%, *S*-异丙甲草胺处理组平均降幅分别为 66.1%、72.1% 和 79.6%. 光强一定时, Cd^{2+} 与 *S*-异丙甲草胺联合作用, $Y(\text{II})$ 降幅均

知, *S*-异丙甲草胺对斜生栅藻 F_0 、 F_v/F_m 、 F_v/F_0 值的影响不显著 ($P < 0.05$), 而 Cd^{2+} 对斜生栅藻 F_0 、 F_v/F_m 、 F_v/F_0 值的影响明显, 随 Cd^{2+} 浓度升高斜生栅藻 F_0 值显著增加, F_v/F_m 、 F_v/F_0 值显著减小. F_0 的增加可能是由于 PS II 反应中心出现可逆的失活或遭到不易逆转的破坏, 也可能是由于类囊体膜受到损伤^[19], F_v/F_m 和 F_v/F_0 值降低, 可用来鉴定 PS II 反应中心遭受损伤的情况^[20]. 结果表明 Cd^{2+} 处理的影响显著于 *S*-异丙甲草胺的影响, Cd^{2+} 处理可能导致了斜生栅藻 PS II 反应中心及类囊体膜受损. 当 *S*-异丙甲草胺与 Cd^{2+} 联合作用时, 与 Cd^{2+} 单独作用对斜生栅藻 F_0 、 F_v/F_m 和 F_v/F_0 值的影响差异不大, 说明两者联合作用导致的藻细胞叶绿体的破坏或 PS II 系统的可逆失活主要是受 Cd^{2+} 的影响.

小于 Cd^{2+} 与 *S*-异丙甲草胺单独作用时的降幅. 光强为 $231 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 时, $0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd^{2+} 单独处理组 $Y(\text{II})$ 的降幅为 82.5%, 与 *S*-异丙甲草胺联合作用下, 随 *S*-异丙甲草胺浓度的升高, $Y(\text{II})$ 的降幅分别为 66.4%、69.9% 和 63.9%.

光化学淬灭系数 (qP) 表示总 PS II 反应中心中开放的反应中心所占比例, 即激发能被开放的反应中心捕获并转化为化学能而导致的荧光淬灭, 反映光适应状态下 PS II 进行光化学反应的能力, qP 越大, PS II 的电子传递活性越大^[22]. 图 2 表明, 暴露 96 h 后, *S*-异丙甲草胺与 Cd^{2+} 单独及联合作用对 qP 的影响均呈现随光强的增加 qP 逐渐降低的趋势; 光强一定时, 随有毒物质浓度的升高 qP 减小, 且 Cd^{2+} 作用的影响要显著于 *S*-异丙甲草胺的作用. 光

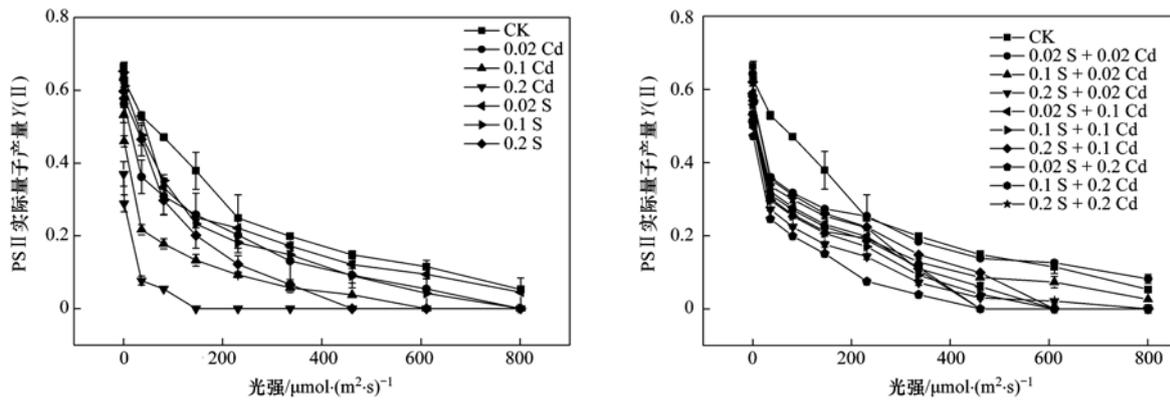


图1 PS II 实际量子产量 $Y(II)$ 随光强的变化

Fig. 1 Change of $Y(II)$ as a function of PAR

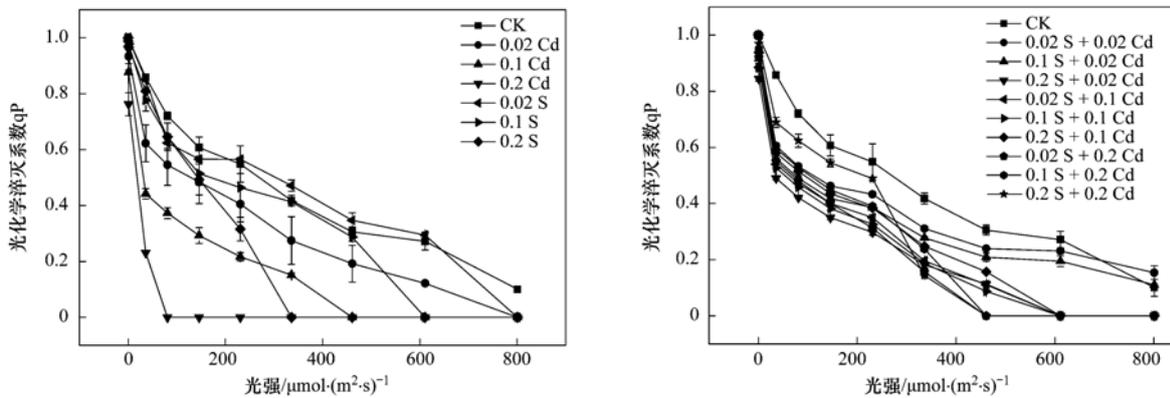


图2 光化学淬灭系数 qP 随光强的变化

Fig. 2 Change of photochemical quenching (qP) as a function of PAR

强为 $231 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 时,空白组 qP 平均降幅为 45.1%, Cd^{2+} 处理组随 Cd^{2+} 浓度的升高平均降幅分别为 59.5%、78.2% 和 100%, *S*-异丙甲草胺处理组平均降幅分别为 43.5%、53.6% 和 68.0%。光强一定时, *S*-异丙甲草胺与 Cd^{2+} 联合作用时, qP 降幅小于 *S*-异丙甲草胺或 Cd^{2+} 单独处理组。光强为 $231 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 时, $0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \text{ Cd}^{2+}$ 单独处理组的

qP 的降幅为 78.2%, 与 *S*-异丙甲草胺联合作用下, 随 *S*-异丙甲草胺浓度的升高, qP 的降幅分别为 65.0%、67.4%、61.6%。 *S*-异丙甲草胺与 Cd^{2+} 单独及联合作用对 qP 的影响趋势和其对 $Y(II)$ 的影响趋势一致。

非光化学淬灭系数 (NPQ) 常用于衡量过剩激发能的耗散情况, 反映的是天线色素吸收的光能不

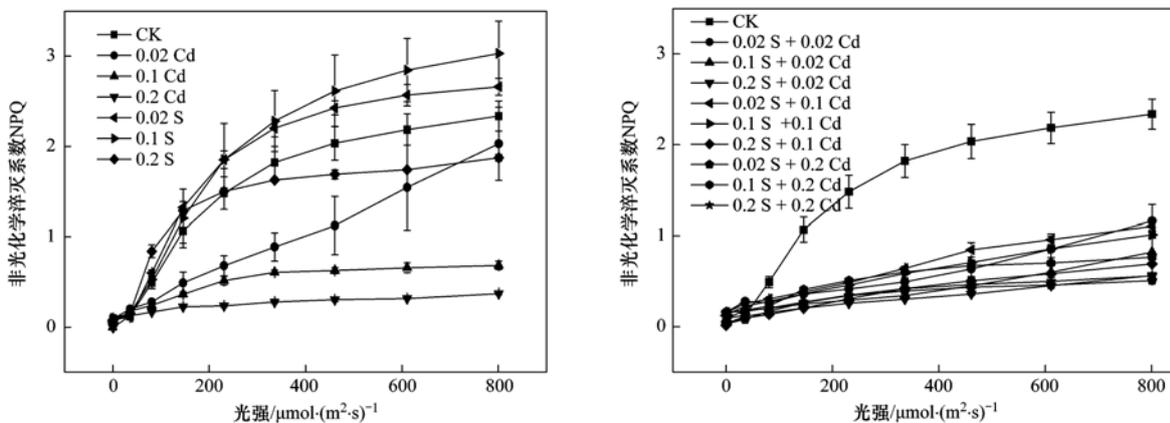


图3 非光化学淬灭系数 NPQ 随光强的变化

Fig. 3 Change of non-photochemical quenching (NPQ) as a function of PAR

能用于电子传递而以热等形式耗散掉的光能部分,而热耗散是植物保护 PS II 的重要机制^[16]. 图 3 为 *S*-异丙甲草胺与 Cd^{2+} 单独及联合作用下对斜生栅藻 NPQ 的影响. 结果表明,暴露 96 h 后,*S*-异丙甲草胺与 Cd^{2+} 单独及联合作用对 NPQ 的影响均呈现随光强的增加 NPQ 逐渐增大的趋势;光强一定时,随有毒物质浓度的升高 NPQ 减小. 光强为 $461 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 时, Cd^{2+} 处理组随 Cd^{2+} 浓度的升高 NPQ 分别是空白组的 0.55 倍、0.31 倍和 0.15 倍,使热耗散减少造成对 PSII 系统的影响; *S*-异丙甲草胺处理组随浓度的升高分别是空白组的 1.19 倍、1.29 倍和 0.45 倍,在 *S*-异丙甲草胺低浓度下有增加热耗散的作用. Cd^{2+} 对热耗散的影响要显著于 *S*-异丙甲草胺的影响. 光强一定时, Cd^{2+} 与 *S*-异丙甲草胺联合作用对 NPQ 的影响要小于 Cd^{2+} 单独作用,光强为 $461 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 时, $0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \text{ Cd}^{2+}$ 单独作用处理组的 NPQ 是空白组的 0.15 倍,而与 *S*-异丙甲草胺

联合作用时,随 *S*-异丙甲草胺浓度的升高, NPQ 分别是空白组的 0.21 倍、0.33 倍、0.23 倍.

相对光合电子传递速率 (rETR) 反映 PS II 实际光强下的表观电子传递效率,用于度量光化学反应导致碳固定的电子传递情况^[23]. 从图 4 可以看出,暴露 96 h 后,*S*-异丙甲草胺与 Cd^{2+} 单独及联合作用对斜生栅藻 rETR 的影响呈现随光强增加 rETR 先升高后降低的趋势;光强一定时, rETR 随有毒物质浓度的升高而减小,且 Cd^{2+} 对 rETR 的影响要显著于 *S*-异丙甲草胺的影响. 光强为 $231 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 时,空白组 rETR 为 $27.6 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$, Cd^{2+} 处理组随 Cd^{2+} 浓度的升高 rETR 分别为 23.4、10.7、0 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$, *S*-异丙甲草胺处理组 rETR 分别为 25.6、20.9、14.1 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$. *S*-异丙甲草胺存在条件下,与不同浓度 Cd^{2+} 联合作用对斜生栅藻 rETR 的影响要小于 Cd^{2+} 单独作用的影响.

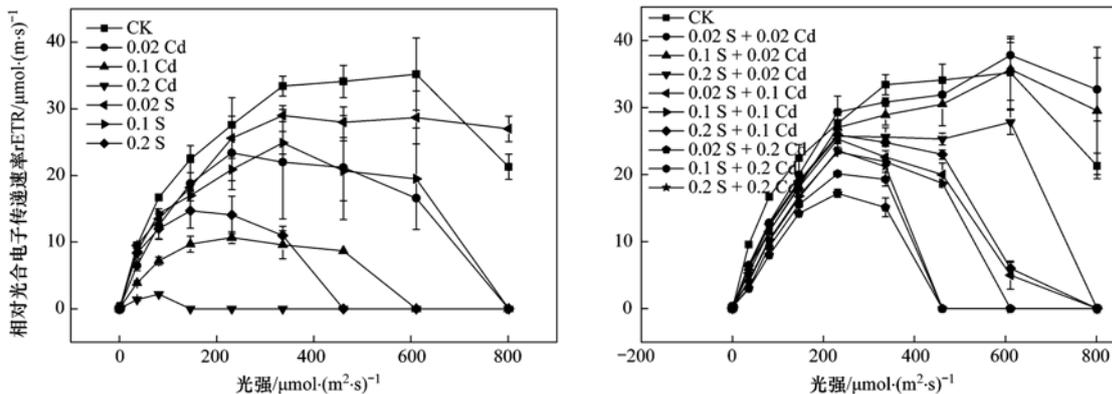


图 4 相对光合电子传递速率 rETR 随光强的变化

Fig. 4 Change of relative electron transport ratio (rETR) as a function of PAR

$Y(\text{II})$ 的整体降低,说明 *S*-异丙甲草胺与 Cd^{2+} 单独及联合作用阻止了斜生栅藻细胞同化力 (NADPH, ATP) 的形成,从而影响对碳的固定与同化^[24]. qP 是 PS II 天线色素吸收的光能用于光化学电子传递的份额,较低的 qP 反映 PS II 中开放的反应中心比例和参与 CO_2 固定的电子减少^[25]. qP 和 rETR 的整体降低表明 *S*-异丙甲草胺与 Cd^{2+} 单独及联合作用使斜生栅藻电子传递效率下降,电子由 PS II 的氧化侧向 PS II 反应中心的传递受阻,用于进行光合作用的电子减少,以热或其他形式耗散的光能增加. 而 NPQ 的整体降低表明 *S*-异丙甲草胺与 Cd^{2+} 胁迫对斜生栅藻正常生理功能造成严重伤害, PS II 受到了影响,对热能的耗散能力逐渐丧失. 光强一定时,叶绿素荧光参数随有毒物质浓度的升高

而减小,且 Cd^{2+} 单独作用的影响要显著于 *S*-异丙甲草胺单独作用的影响,这与对叶绿素含量的影响结果一致. *S*-异丙甲草胺与 Cd^{2+} 单独及联合作用对光合系统具有较强毒害作用.

3 结论

(1) Cd^{2+} 单独作用对斜生栅藻叶绿素含量的影响大于 *S*-异丙甲草胺单独作用的影响, *S*-异丙甲草胺与 Cd^{2+} 联合作用对叶绿素含量的影响整体呈协同作用.

(2) *S*-异丙甲草胺单独作用对斜生栅藻叶绿素荧光参数 F_0 、 F_v/F_m 、 F_v/F_0 、 $Y(\text{II})$ 、 qP 、NPQ 和 rETR 影响不大, Cd^{2+} 单独作用对叶绿素荧光参数影响显著, Cd^{2+} 单独作用对叶绿素荧光参数的影响要

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对斜生栅藻叶绿素荧光参数的影响随有毒物质浓度的升高而增加,对斜生栅藻正常生理功能造成严重伤害,PS II 受损,抑制光合作用的原初反应,阻碍光合电子传递的过程,对热能的耗散能力逐渐丧失。

(4) Cd^{2+} 与 S-异丙甲草胺联合作用对叶绿素荧光参数的影响主要是受 Cd^{2+} 的影响。

参考文献:

- [1] Liu H J, Huang R N, Xie F, *et al.* Enantioselective phytotoxicity of metolachlor against maize and rice root [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, **217-218**: 330-337.
- [2] Lin R Z, Wang X R, Luo Y, *et al.* Effects of soil cadmium on growth, oxidative stress and antioxidant system in wheat seedlings (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Chemosphere*, 2007, **69**(1): 89-98.
- [3] Liu D L, Hu K Q, Ma J J, *et al.* Effects of cadmium on the growth and physiological characteristics of sorghum plants [J]. *African Journal of Biotechnology*, 2011, **10**(70): 15770-15776.
- [4] Van Assche F, Clijsters H. Effects of metals on enzyme activity in plants [J]. *Plant, Cell and Environment*, 1990, **13**(3): 195-206.
- [5] 李华, 黄建国, 袁玲. 铝和锰对外生菌根真菌生长、养分吸收及分泌作用的影响 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(1): 315-320.
- [6] Li G L, Wu H X, Sun Y Q, *et al.* Response of chlorophyll fluorescence parameters to drought stress in sugar beet seedlings [J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2013, **60**(3): 337-342.
- [7] 莫亿伟, 郭振飞, 谢江辉. 温度胁迫对柱花草叶绿素荧光参数和光合速率的影响 [J]. *草业学报*, 2011, **20**(1): 96-101.
- [8] Huang C J, Zhao S Y, Wang L C, *et al.* Alteration in chlorophyll fluorescence, lipid peroxidation and antioxidant enzymes activities in hybrid ramie (*Boehmeria nivea* L.) under drought stress [J]. *Australian Journal of Crop Science*, 2013, **7**(5): 594-599.
- [9] Ma J Y, Wang S F, Wang P W, *et al.* Toxicity assessment of 40 herbicides to the green alga *Raphidocelis subcapitata* [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2006, **63**(3): 456-462.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Marr I L, Suryana N, Lukulay P, *et al.* Determination of chlorophyll a and b by simultaneous multi-component spectrophotometry [J]. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 1995, **352**(5): 456-460.
- [13] Lefebvre S, Mouget J L, Lavaud J. Duration of rapid light curves for determining the photosynthetic activity of microphytobenthos biofilm *in situ* [J]. *Aquatic Botany*, 2011, **95**(1): 1-8.
- [14] 李大命, 阳振, 于洋, 等. 太湖春季和秋季蓝藻光合作用活性研究 [J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(11): 3053-3059.
- [15] 刘炎, 石小荣, 催益斌, 等. 高浓度氨氮胁迫对纤细裸藻的毒性效应 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(11): 4386-4391.
- [16] 张守仁. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论 [J]. *植物学通报*, 1999, **16**(4): 444-448.
- [17] 郑有飞, 赵泽, 吴荣军, 等. 臭氧胁迫对冬小麦叶绿素荧光及气体交换的影响 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(2): 472-479.
- [18] 吴雪霞, 杨晓春, 朱宗文, 等. 外源 6-BA 对低温胁迫下茄子幼苗光合作用、叶绿素荧光参数及光能分配的影响 [J]. *植物生理学报*, 2013, **49**(11): 1181-1188.
- [19] 刘炳响, 王志刚, 杨敏生, 等. 模拟盐胁迫对白榆种子发芽、出苗及幼苗生长的影响 [J]. *草业学报*, 2012, **21**(5): 39-46.
- [20] Bilger W, Björkman O. Role of the xanthophylls cycle in photoprotection elucidated by measurements of light-induced absorbance changes, fluorescence and photosynthesis in leaves of *Hedera canariensis* [J]. *Photosynthesis Research*, 1990, **25**(3): 173-185.
- [21] 许大全. 光合作用效率 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2002. 29-37.
- [22] Genty B, Briantais J M, Baker N R. The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence [J]. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects*, 1989, **990**(1): 87-92.
- [23] 潘国权, 王国祥, 李强, 等. 浊度对苦草 (*Vallisneria spiralis*) 幼苗生长的影响 [J]. *生态环境*, 2007, **16**(3): 762-766.
- [24] 孙艳, 徐伟君, 范爱丽. 高温强光下水杨酸对黄瓜叶片叶绿素荧光和叶黄素循环的影响 [J]. *应用生态学报*, 2006, **17**(3): 399-402.
- [25] 曹响, 王国祥. 土壤水分含量对菖蒲 (*Acorus calamus*) 萌发及幼苗生长发育的影响 [J]. *生态学报*, 2007, **27**(5): 1748-1755.

CONTENTS

Comparative Analysis Methods of Haze Distinction over Yangtze River Delta Region	LIU Xiao-hui, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i>	(3239)
Trends of Urban Haze in Jiangsu Province China over the Past 33 Years	LIU Duan-yang, WEI Jian-su, YAN Wen-lian, <i>et al.</i>	(3247)
Temporal Variation of Background Atmospheric CO ₂ and CH ₄ at Mount Waliguan, China	LIU Peng, ZHANG Guo-qing, WANG Jian-qiong, <i>et al.</i>	(3256)
Characteristics and Sources of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Shanghai Urban Area	ZHANG Yi-hua, WANG Dong-fang, ZHAO Qian-biao, <i>et al.</i>	(3263)
Size Distribution and Characterization of OC and EC in Atmospheric Aerosols During the Asian Youth Games of Nanjing, China	WANG Hong-lei, ZHU Bin, AN Jun-lin, <i>et al.</i>	(3271)
Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During Typical Winter Days in Wuxi City	YUN Long-long, LU Fan, ZHANG Tian-shu, <i>et al.</i>	(3280)
Emission Characteristics of PM _{2.5} from Blast Furnace Iron Making	FAN Zhen-zhen, ZHAO Ya-li, ZHAO Hao-ning, <i>et al.</i>	(3287)
Composition Characteristics of Atmospheric Volatile Organic Compounds in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	QI Xin, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i>	(3293)
Catalytic Oxidation of Two-component VOCs and Kinetic Analysis	BO Long-li, YANG Li, SUN Jian-yu, <i>et al.</i>	(3302)
Ultrafine Particle Number Concentration and Size Distribution of Vehicle Exhaust Ultrafine Particles	LU Ye-qiang, CHEN Qiu-fang, SUN Zai, <i>et al.</i>	(3309)
Major Ion Chemistry of Surface Water in the Upper Reach of Shule River Basin and the Possible Controls	ZHOU Jia-xin, DING Yong-jian, ZENG Guo-xiong, <i>et al.</i>	(3315)
Sediment-water Flux and Processes of Nutrients and Gaseous Nitrogen Release in a China River Reservoir	CHEN Zhu-hong, CHEN Neng-wang, WU Yin-qi, <i>et al.</i>	(3325)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Tidal Reach and Its Adjacent Sea Estuary of Daliaohe Area, China	ZHANG Lei, QIN Yan-wen, MA Ying-qun, <i>et al.</i>	(3336)
Chemical Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in the Middle Part of Yarlung Zangbo Surface Sediments	BAI Jian-kun, LI Chao-liu, KANG Shi-chang, <i>et al.</i>	(3346)
Analysis of Particle Size Characteristics of Road Sediments in Beijing Olympic Park	LI Hai-yan, SHI An-bang, QU Yang-sheng, <i>et al.</i>	(3352)
Levels and Distribution of the Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in the Surface Sediment of the Yellow River	LI Guang-yao, JIN Jun, HE Chang, <i>et al.</i>	(3358)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Retention in Two Different Channel Forms in a Typical Headwater Stream in the Suburb of Hefei City, China	LI Ru-zhong, YANG Ji-wei, QIAN Jing, <i>et al.</i>	(3365)
Migration and Transformation of Nitrogen in Urban Stream Located in Plain River-net Area Based on Water Resources Regulation	LIU Bo, SHENG Ming, ZHU Qiang, <i>et al.</i>	(3373)
Decomposition and Phosphorus Dynamics of the Litters in Standing and Litterbag of the Hangzhou Bay Coastal Wetland	SHAO Xue-xin, LIANG Xin-qiang, WU Ming, <i>et al.</i>	(3381)
Muti-model Collaborative Retrieval of Chlorophyll a in Taihu Lake Based on Data Assimilation	LI Yuan, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i>	(3389)
Photobleaching of Dissolved Organic Matter (DOM) from Confluence of Two Rivers Under Natural Solar Radiation; A Case Study of Fujiang River-Jialingjiang River	GAO Jie, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i>	(3397)
Using Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Spectrum to Estimate the Dissolved Organic Matter (DOM) Concentration in Water, Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i>	(3408)
Synthesis of Cu ₂ O-Ag-AgBr/MA Visible Photocatalyst and Its Performance in Degradation of 2-Chlorophenol	WANG Ran, ZHOU Xue-feng, HU Xue-xiang, <i>et al.</i>	(3417)
Effects of Particle Size of Zero-Valent Iron on the Reactivity of Activating Persulfate and Kinetics for the Degradation of Acid Orange 7	LI Huan-xuan, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i>	(3422)
Degradation of 2,4-D by Combined Catalytic Dechlorination and Biological Oxidation	ZHOU Hong-yi, ZENG Si-si, LIANG Si, <i>et al.</i>	(3430)
Treatment of Marine-Aquaculture Effluent by the Multi-Soil-Layer (MSL) System and Subsurface Flow Constructed Wetland	SONG Ying, HUANG Yu-ting, GE Chuan, <i>et al.</i>	(3436)
Variation of Different Carbon Sources in the Sewage Treatment Process	JIN Peng-kang, CHANG Jin, WANG Xian-bao, <i>et al.</i>	(3443)
Effect of Gas-lift Device on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Reactor	LI Xiang, ZHANG Da-lin, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(3449)
Enhancement for Anaerobic Digestion of Sewage Sludge Pretreated by Microwave and Its Combined Processes	LIU Ji-bao, NI Xiao-tang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i>	(3455)
Pilot Study of Thermal Treatment/Thermophilic Anaerobic Digestion Process Treating Waste Activated Sludge of High Solid Content	WU Jing, WANG Guang-qi, CAO Zhi-ping, <i>et al.</i>	(3461)
Effects of Temperature on Combined Process of ABR and MBR for Domestic Sewage Treatment and Analysis of Microbial Community	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i>	(3466)
Microbial Community of Municipal Discharges in A Sewage Treatment Plant	XU Ai-ling, REN Jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i>	(3473)
Pilot-Scale Cultivation of <i>Spirulina plantensis</i> with Digested Piggery Wastewater	GUO Qing-qing, LIU Rui, LUO Jin-fei, <i>et al.</i>	(3480)
Spectral Characteristics of Soluble Metabolites During Endogenous Respiration	LI Zhi-hua, ZHANG Qin, BAI Xu-li, <i>et al.</i>	(3487)
Endogenous Respiration Process Analysis of Heterotrophic Biomass and Autotrophic Biomass Based on Respiration Map	LI Zhi-hua, BAI Xu-li, ZHANG Qin, <i>et al.</i>	(3492)
Influence of S-Metolachlor and Cd ²⁺ on Photosynthesis of <i>Scenedesmus obliquus</i>	CHEN Cai-dong, HU Xiao-na, ZHANG Xiao-qiang, <i>et al.</i>	(3498)
Effect of Environmental Factors on Fish Community Structure in the Huntai River Basin at Multiple Scales	LI Yan-li, LI Yan-fen, XU Zong-xue	(3504)
Succession of Rotifer Community and Its Relationship with Environmental Factors in a New Estuarial Landscape River, Shanghai	MA Wen-hua, ZHANG Wei, GU Wan-wen, <i>et al.</i>	(3513)
Anaerobic Reduction of Humus/Fe(III) and Electron Transport Mechanism of <i>Fontibacter</i> sp. SgZ-2	MA Chen, YANG Gui-qin, LU Qin, <i>et al.</i>	(3522)
Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Jiapigou Goldmine Based on the UNMIX Model	AI Jian-chao, WANG Ning, YANG Jing	(3530)
Environmental Magnetic Properties and Their Spatial Variability of Topsoil in Shihezi City	YANG Han, XIONG Hei-gang, CHEN Xue-gang	(3537)
Effects of Different Amounts of Phosphate Fertilizers on Copper, Zinc Transfer in Red Soil Under the Application of KH ₂ PO ₄	GUO Liang, LI Zhong-wu, HUANG Bin, <i>et al.</i>	(3546)
Influence of Sulfur on the Bioavailability of Arsenic Uptake by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) and Its Speciation in Soil	YANG Shi-jie, TANG Bing-pei, WANG Dai-chang, <i>et al.</i>	(3553)
Effects of Sulfur on Transformation of Selenium in Soil and Uptake of Selenium in Rape	LIU Xin-wei, DUAN Bi-hui, XIA Quan-jie, <i>et al.</i>	(3564)
Impact of Reclaimed Water Irrigation on Soil Chemical Properties and Culturable Microorganisms	GONG Xue, WANG Ji-hua, GUAN Jian-fei, <i>et al.</i>	(3572)
Influence of Different Slope Position and Profile in <i>Disporopsis pernyi</i> Forest Land on Soil Microbial Biomass and Enzyme Activity in Southwest Karst Mountain of China	QIN Hua-Jun, HE Bing-Hui, ZHAO Xuan-chi, <i>et al.</i>	(3580)
Effects of Different Soil Types on the Foliar δ ¹³ C Values of Common Local Plant Species in Karst Rocky Desertification Area in Central Guizhou Province	DU Xue-lian, WANG Shi-jie, LUO Xu-qiang	(3587)
Effect of Carbon Substrate Concentration on N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ and CH ₄ Emissions from a Paddy Soil in Anaerobic Condition	CHEN Nuo, LIAO Ting-ting, WANG Rui, <i>et al.</i>	(3595)
Ability of Typical Greenery Shrubs of Beijing to Adsorb and Arrest PM _{2.5}	LIANG Dan, WANG Bin, WANG Yun-qi, <i>et al.</i>	(3605)
Effects of Chlorides on Cd Transformation in a Simulated Grate Incinerator During Sludge Incineration Process	LIU Jing-yong, ZHUO Zhong-xu, SUN Shui-yu, <i>et al.</i>	(3612)
Spatial Temporal Differentiation of Product-based and Consumption-based CO ₂ Emissions and Balance in the Beijing-Tianjin-Hebei Region; an Economic Input-Output Analysis	WANG Hao, CHEN Cao-cao, PAN Tao, <i>et al.</i>	(3619)
Study on Feasible Emission Control Level of Air Pollutions for Cement Industry	REN Chun, JIANG Mei, ZOU Lan, <i>et al.</i>	(3632)

《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)

2014年9月15日 第35卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 9 Sep. 15, 2014

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@reeces. 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@reeces. 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