

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第1期

Vol.34 No.1

**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

长三角背景地区秋冬季节大气气态总汞含量特征研究	窦红颖,王书肖,王龙,张磊,郝吉明	( 1 )
厦门城区大气颗粒物 PM <sub>10</sub> 中有机酸源谱特征分析	杨冰玉,黄星星,郑桢,刘碧莲,吴永平	( 8 )
兴隆大气气溶胶中水溶性无机离子分析	李杏茹,宋爱利,王英锋,孙颖,刘子锐,王跃思	( 15 )
气相组分对氨吸收同步脱除模拟烟气 SO <sub>2</sub> 和 NO <sub>x</sub> 的影响	王鸿,朱天乐,王美艳	( 21 )
麦秸全量还田下太湖地区两种典型水稻土稻季氮挥发特性比较	汪军,王德建,张刚,王远	( 27 )
单光子/光电子在线质谱实时分析聚氯乙烯热分解/燃烧产物	陈文东,侯可勇,陈平,李芳龙,赵无垠,崔华鹏,花磊,谢园园,李海洋	( 34 )
碱性活性炭表面特征及其吸附甲烷的研究	张梦竹,李琳,刘俊新,孙永军,李国滨	( 39 )
夏季黄渤海表层海水中二甲亚砜 (DMSO) 的浓度分布	王敏,张洪海,杨桂朋	( 45 )
2010年秋季长江口口外海域 CDOM 的三维荧光光谱-平行因子分析	闫丽红,陈学君,苏荣国,韩秀荣,张传松,石晓勇	( 51 )
基于集合均方根滤波的太湖叶绿素 a 浓度估算与预测	李渊,李云梅,王桥,张卓,郭飞,吕恒,毕坤,黄昌春,郭宇龙	( 61 )
基于 HJ1A-CCD 数据的高光谱影像重构研究	郭宇龙,李云梅,朱利,徐德强,李渊,檀静,周莉,刘阁	( 69 )
重庆雪玉洞岩溶地下河地球化学敏感性研究	徐尚全,杨平恒,殷建军,毛海红,王鹏,周小萍	( 77 )
区域点源和非点源磷入河量计算的二元统计模型	陈丁江,孙嗣畅,贾颖娜,陈佳勃,吕军	( 84 )
秦淮河典型河段总氮总磷时空变异特征	李跃飞,夏永秋,李晓波,熊正琴,颜晓元	( 91 )
湘江沉积物镉和汞质量基准的建立及其应用	蒋博峰,桑磊鑫,孙卫玲,郝伟,李丽,邓宝山	( 98 )
丹江口水库迁建区土壤重金属分布及污染评价	张雷,秦延文,郑丙辉,时瑶,韩超男	( 108 )
汾河水库周边土壤重金属含量与空间分布	李晋昌,张红,石伟	( 116 )
黄河下游引黄灌区地下水重金属分布及健康风险评估	张妍,李发东,欧阳竹,赵广帅,李静,柳强	( 121 )
胶州湾、套子湾及四十里湾表层沉积物中有机氯农药的含量和分布特征	刘艺凯,钟广财,唐建辉,潘晓辉,田崇国,陈颖军	( 129 )
基于干扰梯度的钦江流域底栖动物完整性指数候选参数筛选	卢东琪,张勇,蔡德所,刘朔孺,陈燕海,王备新	( 137 )
海洋细菌 <i>Marinobacter adhaerens</i> HY-3 分离鉴定及对中肋骨条藻的化感作用	王洪斌,陈文慧,李信书,李士虎,阎斌伦	( 145 )
水稻秸秆浸泡液对铜绿微囊藻生理特性的影响	苏文,孔繁翔,于洋,贾育红,张民	( 150 )
化感物质肉桂酸乙酯对蛋白核小球藻生长及生理特性的影响	高李李,郭沛涌,苏光明,魏燕芳	( 156 )
无负压供水模式下管网水力模拟与安全评价分析	王欢欢,刘书明,姜帅,孟凡琳,白璐	( 163 )
天然有机物的相对分子量分布及亲疏水性对微滤膜组合工艺中膜污染的影响	胡孟柳,林洁,许光红,董秉直	( 169 )
不同基质条件下透性处理对脱硫弧菌硫酸盐还原活性的影响	徐慧伟,张旭,李立明,郑光洁,李广贺	( 177 )
基于零价铁的双金属体系对六氯苯还原脱氯研究	曾宪委,刘建国,聂小琴	( 182 )
负载型 TiO <sub>2</sub> 光电催化降解孔雀石绿的动力学研究	张小娜,周少奇,周晓	( 188 )
污水厂微孔曝气系统工况下充氧性能测试与分析	吴媛媛,周小红,施汉昌,邱勇	( 194 )
微气泡及其产生方式对活性污泥混合液性质的影响	刘春,马锦,张磊,张静,张明,吴根	( 198 )
不同氮浓度冲击对颗粒污泥脱氮过程中 N <sub>2</sub> O 产生量的影响	韩雪,高大文	( 204 )
模拟电镀污泥重金属浸出液对氧化亚铁硫杆菌活性的影响	谢鑫源,孙培德,楼菊青,郭茂新,马王钢	( 209 )
嗜麦芽窄食单胞菌对铜镉的吸附特性与离子交换	白洁琼,尹华,叶锦韶,彭辉,唐立栲,何宝燕,李跃鹏	( 217 )
阴离子表面活性剂改性水滑石吸附硝基苯的特性研究	夏燕,朱润良,陶奇,刘汉阳	( 226 )
活性氧化铝对水中磷的去除与回收研究	孟文娜,谢杰,吴德意,张振家,孔海南	( 231 )
北京城区可吸入颗粒物分布与呼吸系统疾病相关分析	杨维,赵文吉,官兆宁,赵文慧,唐涛	( 237 )
北京市市售鸡蛋和鸭蛋中全氟化合物的污染水平研究	齐彦杰,周珍,史亚利,孟昭福	( 244 )
北京市场常见淡水食用鱼体内农药残留水平调查及健康风险评估	千志勇,金芬,孙景芳,原盛广,郑蓓,张文婧,安伟,杨敏	( 251 )
多效应残差法 (MERA) 表征二甲亚砜-农药二元混合物毒性相互作用	霍向晨,刘树深,张晶,张瑾	( 257 )
利用 DGGE-菌落原位杂交法分离土壤中精喹禾灵降解菌	吕欣,彭霞薇,呼庆,马安周,江泽平,魏远	( 263 )
不同白腐真菌复配方式对产酶的影响	孟瑶,梁红,高大文	( 271 )
不同施肥措施对土壤活性有机碳的影响	张瑞,张贵龙,姬艳艳,李刚,常泓,杨殿林	( 277 )
垦殖对湿地土壤有机碳垂直分布及可溶性有机碳截留的影响	霍莉莉,邹元春,郭佳伟,吕宪国	( 283 )
黄河三角洲碱蓬湿地土壤有机碳及其组分分布特征	董洪芳,于君宝,管博	( 288 )
丘陵林地土壤酸化改良剂的集中施用-自然扩散修复技术研究	方熊,刘菊秀,尹光彩,赵亮,刘世忠,褚国伟,李义勇	( 293 )
重度滴滴涕污染土壤低温等离子体修复条件优化研究	陈海红,骆永明,滕应,刘五星,潘澄,李振高,黄玉娟	( 302 )
无定形 Fe(OH) <sub>3</sub> 和 Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 共沉淀态 As 的化学提取	陈义萍,王少锋,贾永锋	( 308 )
铝和锰对外生菌根真菌生长、养分吸收及分泌作用的影响	李华,黄建国,袁玲	( 315 )
污泥和餐厨垃圾联合干法中温厌氧消化性能研究	段妮娜,董滨,李江华,戴翎翎,戴晓虎	( 321 )
高比表面生物质炭的制备、表征及吸附性能	李坤权,李焯,郑正,桑大志	( 328 )
基于情景分析的浙江沿海地区环境污染防治战略研究	田金平,陈吕军,杜鹏飞,钱易	( 336 )
微生物全细胞传感器在重金属生物可利用度监测中的研究进展	侯启会,马安周,庄绪亮,庄国强	( 347 )
<b>2012 城市生态学术研讨会会议论文</b>		
北京市城乡环境梯度下街尘中重金属污染特征	何小艳,顾培,李叙勇,赵洪涛	( 357 )
北京市道路灰尘中污染物含量沿城乡梯度、道路密度梯度的变化特征	唐荣莉,马克明,张育新,毛齐正	( 364 )
北京城市典型下垫面降雨径流污染初始冲刷效应分析	任玉芬,王效科,欧阳志云,侯培强	( 373 )
洋河流域张家口段河流水质演化及驱动因子分析	虎博,王铁宇,吕永龙,杜立宇,罗维	( 379 )
低碳交通电动汽车减排潜力及其影响因素分析	施晓清,李笑诺,杨建新	( 385 )
北京市社区生活垃圾分类收集实效调查及其长效管理机制研究	邓俊,徐琬莹,周传斌	( 395 )
人工湿地在应用中存在的问题及解决措施	黄锦楼,陈琴,许连煌	( 401 )
《环境科学》征订启事(26)	《环境科学》征稿简则(68)	信息(76,144,301,400)
		专辑征稿通知(394)

# 多效应残差法 (MERA) 表征二甲亚砜-农药二元混合物毒性相互作用

霍向晨, 刘树深\*, 张晶, 张瑾

(同济大学环境科学与工程学院, 长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 采用直接均分射线设计 (EquRay) 构建二甲亚砜 (DMSO) 分别与 3 种常用农药乐果 (DIM)、敌敌畏 (DIC) 和甲霜灵 (MET) 的二元混合物, 应用微板毒性分析 (MTA) 测试单个物质及混合物对青海弧菌 Q67 (*Vibrio qinghaiensis* sp.-Q67) 的发光抑制毒性. 以浓度加和 (concentration addition, CA) 模型检测混合物的毒性相互作用, 提出并应用多效应残差法 (multi-effect residual analysis, MERA) 定量表征 DMSO-农药二元混合物实验观测毒性相对于 CA 模型预测结果的偏离程度, 即毒性相互作用强度. 表征结果显示 3 组 DMSO-农药二元混合物的毒性相互作用以拮抗作用为主, 最强拮抗作用在 -23% ~ -15% 之间, 发生拮抗作用的浓度范围及拮抗作用强度受混合物组成、组分浓度比和效应水平等因素的影响. 综合分析比较 MERA 与传统等效线图及扩展毒性单位和对 3 组二元混合物的表征结果发现, MERA 从生物效应角度表征毒性相互作用强度, 受到混合物组成和效应水平的限制较少, 适用于分析具有复杂相互作用的二元混合物.

**关键词:** 多效应残差法; 二元混合物; 毒性相互作用; 青海弧菌 Q67; 直接均分射线设计

中图分类号: X131 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)01-0257-06

## Characterizing the Toxicity Interaction of the Binary Mixture Between DMSO and Pesticide by the Multi-Effect Residual Analysis (MERA)

HUO Xiang-chen, LIU Shu-shen, ZHANG Jing, ZHANG Jin

(Key Laboratory of Yangtze River Water Environment, Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Three groups of binary mixtures between dimethylsulfoxide (DMSO) and three widely used pesticides, dimethoate (DIM), dichlorvos (DIC), and metalaxyl (MET), were respectively constructed by using the direct equipartition ray design (EquRay). The luminescent inhibition toxicities of single chemical and binary mixtures to *Vibrio qinghaiensis* sp.-Q67 were determined by the microplate toxicity analysis (MTA). Selecting the concentration addition (CA) model as an additive reference, we developed a new multi-effect residual analysis (MERA) to quantitatively characterize the deviation of the observed toxicity from that predicted by the CA model, i. e. the degree of toxicity interaction. It was shown that the toxicity interactions between DMSO and pesticide were dominated by antagonism, and the highest antagonism distributed between -23% and -15%. The concentration ranges where antagonism existed and the degree of antagonism were influenced by the components in the mixture, the concentration ratios of the components, and the effect level. A comparison of the MERA with the conventional isobologram and the extended toxic unit summation revealed that the MERA characterizes the degree of toxicity interaction in the view of effect, with less limitation by different concentration ratios or effect levels. Therefore, the MERA can be used to evaluate the complex toxicity interactions taking place in binary mixtures.

**Key words:** multi-effect residual analysis; binary mixture; toxicity interaction; *Vibrio qinghaiensis* sp.-Q67; direct equipartition ray design

混合污染物的毒性相互作用及其风险评价是环境领域研究的热点问题<sup>[1]</sup>. 大量混合物研究表明相互作用的浓度比依赖性和效应水平依赖性为常见现象<sup>[2,3]</sup>, 这就需要合理的、易实现的方法来对混合物毒性相互作用进行表征以保障评价结果的可靠性. 传统的相互作用指数如毒性单位、相加指数、混合物指数等原理简单、计算简便, 常用于单点 (如 EC<sub>50</sub>) 比较<sup>[4]</sup>. 二维等效线图作为一种经典的图形分析方法可以直观地反映观测值是否偏离预测模型, 并允许同时分析各个配比的混合物在某个效应水平下的相互

作用类型, 但是不能给出偏离的程度, 也忽略了其他效应水平下混合物相互作用可能发生变化的事实. 基于混合物浓度-效应曲线 (concentration-response curve, CRC) 与加和参考模型比较的方法可以从多个效应水平下分析该混合物毒性相互作用情况<sup>[5,6]</sup>. 如果结合合理的实验设计, 考察多个浓度比混合物, 则

收稿日期: 2012-03-13; 修订日期: 2012-05-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (20977065)

作者简介: 霍向晨 (1989~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为混合物毒性分析与分子模拟, E-mail: xchenhuo@gmail.com

\* 通讯联系人, E-mail: ssluohl@263.net

可以了解各种混合物的相互作用强度随组分浓度比和效应水平的变化趋势。

为了进一步定量表征不同效应下的毒性相互作用强度,本研究对基于 CRC 比较的方法进行了扩展,提出了一个新的方法——多效应残差法(multi-effect residual analysis, MERA),以二甲亚砜(DMSO)和 3 种常用农药乐果(DIM)、敌敌畏(DIC)和甲霜灵(MET)构成的二元混合物为例剖析了它们的毒性相互作用,并与等效线图与扩展毒性单位和方法进行比较分析.之所以选择二甲亚砜(DMSO)是因为它是生产和实验中经常用到的有机

溶剂,尽管许多文献报道了 DMSO 的生物效应,但只有小部分研究涉及溶剂和其他化学物的相互作用,并且仅把 DMSO 作为助溶剂从而只关注低浓度区域<sup>[7-9]</sup>.

## 1 材料与方法

### 1.1 主要试剂与仪器

DMSO(迪马科技,纯度 >99.9%)、乐果(Chem Service,纯度 98.5%)、敌敌畏(Chem Service,纯度 95%)和甲霜灵(Dr Ehrenstorfer GmbH,纯度 98.7%)的基本性质见表 1.

表 1 DMSO 和 3 种农药的基本性质、Weibull 拟合参数( $\alpha$  和  $\beta$ )及统计量(RMSE 和  $R^2$ )和半数效应浓度( $EC_{50}$ )及其置信区间(OCI)

化合物	CAS RN	分子式	相对分子质量	$\alpha$	$\beta$	RMSE	$R^2$	$EC_{50}$ 及 OCI/ mol·L <sup>-1</sup>
DMSO	67-68-5	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> OS	78.13	-0.66	4.26	0.022	0.996 9	1.17 (1.07, 1.29)
乐果(DIM)	60-51-5	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> NO <sub>3</sub> PS <sub>2</sub>	229.26	5.61	2.45	0.023	0.993 5	3.64E-03 (3.07E-03, 4.34E-03)
敌敌畏(DIC)	62-73-7	C <sub>4</sub> H <sub>7</sub> Cl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> P	220.98	4.36	1.63	0.021	0.994 5	1.26E-03 (1.02E-03, 1.62E-03)
甲霜灵(MET)	57837-19-1	C <sub>15</sub> H <sub>21</sub> NO <sub>4</sub>	279.33	4.97	1.66	0.013	0.997 7	6.10E-04 (5.40E-04, 7.02E-04)

Glomax 微板光度计(美国 Promega 公司),SW-CJ-IF 超净工作台(苏州佳宝净化工程设备有限公司),150C 型恒温振荡培养箱(金坛市亿通电子有限公司),LS-B50L 型立式压力蒸汽灭菌器(上海医用核子仪器厂),BT25S 型电子天平(赛多利斯公司).

### 1.2 实验设计和毒性测试

为尽可能探究整个浓度空间范围内 DMSO-农药二元混合物的毒性相互作用,二元混合物的浓度设计采用直接均分射线法(direct equipartition ray design, EquRay)法<sup>[3, 10]</sup>.即在由 2 个混合物组分组成的二维浓度坐标平面上选择各组分的半数效应浓度( $EC_{50}$ )点,连接 2 个  $EC_{50}$  点并将线段进行 6 等分,从原点出发并通过分割点做 5 条射线(R1、R2、R3、R4、R5),选择合适的稀释因子在每条射线上设计 12 个浓度点.每条射线的 DMSO 浓度比( $p_{DMSO}$ )和浓度范围( $c_{max}$ 、 $c_{min}$ )见表 2.

单个化合物和二元混合物对 Q67 发光抑制毒性按照微板毒性分析法(microplate toxicity analysis, 简称 MTA)测定<sup>[11]</sup>.青海弧菌 Q67 购自华东师范大学生物系,其培养与保存参照文献<sup>[12]</sup>.在 96 孔微板上设置 12 个空白对照,单个化合物或二元混合物的储备液以预毒性测试中得到的稀释因子等比稀释为 12 个浓度,各浓度作 3 个平行,每孔用蒸馏水补足至 100  $\mu$ L,再用多道移液器向每孔加入 100  $\mu$ L

菌液.染毒 15 min 后用微板光度计测定各孔的相对发光单位(relative light unit, RLU),以 12 个空白对照 RLU 平均值与各浓度梯度 3 个平行 RLU 平均值计算各浓度对 Q67 的百分发光抑制率.为保证实验数据的精度,微板毒性测试重复 3 板.

### 1.3 浓度-效应曲线拟合

由 MTA 测定的 DMSO 与农药以及它们的二元混合物的浓度-效应数据,应用 Weibull 函数进行最小二乘拟合. Weibull 函数及其反函数见式(1)和式(2):

$$\frac{x}{100} = 1 - \exp[-\exp(\alpha + \beta \cdot \lg EC_x)] \quad (1)$$

$$EC_x = 10^{[\ln(-\ln(1-x/100))-\alpha]/\beta} \quad (2)$$

式中, $\alpha$  和  $\beta$  分别是位置参数和斜率参数, $x\%$  为效应即发光抑制率, $EC_x$  是单个化合物或混合物在效应为  $x\%$  时的效应浓度.模型拟合优度采用统计量均方根误差(RMSE)和决定系数( $R^2$ )表征, RMSE 越小, $R^2$  越大,说明拟合效果越好.

得到  $\alpha$  和  $\beta$  后可利用反函数式(2)计算任意  $x\%$  对应的  $EC_x$  及其 95% 置信区间(OCI)<sup>[13, 14]</sup>.

### 1.4 浓度加和模型

选择浓度加和(CA)模型<sup>[15, 16]</sup>作为加和参考模型:

$$\sum \frac{c_i}{EC_{x,i}} = 1 \quad (3)$$

表 2 15 条二元混合物射线的 DMSO 浓度比, 浓度范围, 拟合 Weibull 参数( $\alpha$  和  $\beta$ ) 与统计量(RMSE 和  $R^2$ ), 观测  $pEC_{50}$  (  $-\lg EC_{50}$  ) 和预测的  $pEC_{50}$

Table 2 Concentration ratio of DMSO, concentration range, Weibull parameters ( $\alpha$  and  $\beta$ ) fitted and statistics (RMSE and  $R^2$ ),  $pEC_{50}$  observed, and  $pEC_{50}$  predicted of 15 binary mixture rays

二元混合物	射线	$p_{DMSO}$	$c_{max}$	$c_{min}$	$\alpha$	$\beta$	RMSE	$R^2$	$pEC_{50}$ 及 OCI	预测 $pEC_{50}$
DMSO-DIM	R1	0.999 4	2.29	1.60E-01	-0.41	3.87	0.018	0.997 0	-1.11E-02 (-4.65E-02, 2.43E-02)	-1.51E-02
	R2	0.998 5	1.81	1.26E-01	-0.30	4.33	0.037	0.990 1	1.54E-02 (-4.84E-02, 8.36E-02)	2.22E-02
	R3	0.996 9	1.34	9.31E-02	-0.13	4.35	0.046	0.980 7	5.44E-02 (-2.69E-02, 1.41E-01)	8.85E-02
	R4	0.993 8	8.79E-01	6.13E-02	0.32	2.57	0.019	0.991 7	2.67E-01 (2.07E-01, 3.24E-01)	2.17E-01
	R5	0.984 7	4.37E-01	3.05E-02	1.00	2.35	0.015	0.994 8	5.82E-01 (5.31E-01, 6.28E-01)	5.94E-01
DMSO-DIC	R1	0.999 8	2.51	7.88E-02	-0.51	3.33	0.026	0.993 2	-4.30E-02 (-1.04E-01, 1.84E-02)	-7.45E-03
	R2	0.999 5	2.18	6.84E-02	-0.23	2.45	0.024	0.991 9	5.57E-02 (-2.08E-02, 1.29E-01)	2.64E-02
	R3	0.998 9	1.79	5.60E-02	-0.09	2.48	0.025	0.990 7	1.12E-01 (3.47E-02, 1.88E-01)	9.40E-02
	R4	0.997 9	1.31	4.12E-02	0.10	2.18	0.033	0.980 7	2.14E-01 (9.32E-02, 3.33E-01)	2.07E-01
	R5	0.994 7	7.32E-01	2.30E-02	0.60	1.71	0.018	0.992 8	5.65E-01 (4.81E-01, 6.44E-01)	5.68E-01
DMSO-MET	R1	0.999 9	2.60	8.15E-02	-0.54	3.79	0.025	0.994 6	-4.57E-02 (-9.90E-02, 6.65E-03)	-3.20E-02
	R2	0.999 7	2.35	7.36E-02	-0.38	3.20	0.019	0.996 3	-4.32E-03 (-4.32E-03, 4.10E-02)	3.95E-03
	R3	0.999 5	2.02	6.34E-02	-0.19	2.46	0.038	0.980 6	7.18E-02 (-4.53E-02, 1.92E-01)	3.99E-02
	R4	0.999 0	1.58	4.97E-02	-0.11	2.09	0.024	0.988 6	1.23E-01 (3.14E-02, 2.12E-01)	1.30E-01
	R5	0.997 4	9.61E-01	3.01E-02	0.32	1.65	0.013	0.996 0	4.16E-01 (3.52E-01, 4.73E-01)	4.18E-01

式中,  $c_i$  表示总效应为  $x\%$  时某混合物中第  $i$  个组分的浓度,  $EC_{x,i}$  为第  $i$  个组分单独存在时引起等效效应  $x\%$  的浓度. 对于 1 条射线(如 R1 与 R2 等)中的 12 个混合物, 第  $i$  个组分在这些混合物中的浓度分数即  $p_i$  是常数. 那么, 在指定效应( $x\%$ )及各组分效应浓度( $EC_{x,i}$ )下由 CA 模型预测的混合物总浓度( $\hat{EC}_{x,CA}$ )可通过下式计算:

$$\hat{EC}_{x,CA} = \left( \sum \frac{p_i}{EC_{x,i}} \right)^{-1} \quad (4)$$

### 1.5 多效应残差( $dCA_x$ )

指定某一效应( $x\%$ ), 从式(4)计算 CA 模型预测混合物浓度( $\hat{EC}_{x,CA}$ ), 进而代入式(1)求得混合物拟合效应( $E_{OBS}$ ), 则定义该效应下的绝对偏差为多效应残差( $dCA_x$ ):

$$dCA_x = E_{OBS} - \frac{x}{100} \quad (5)$$

当  $dCA_x = 0$  时为加和作用,  $dCA_x > 0$  时为协同作用,  $dCA_x < 0$  时为拮抗作用. 式(5)可以定量表征任意效应下的实验值与 CA 预测值之间的差异程度, 从而从多个效应下评价混合物毒性相互作用情况. 为直观形象地表征不同效应下的毒性相互作用, 可以效应水平为横坐标,  $dCA_x$  为纵坐标建立多效应残差图.

### 1.6 扩展毒性单位和

某组分的毒性单位(TU)是指该组分在混合物中的浓度与其半数效应浓度的比值. 混合物的毒性

单位之和(STU)即该混合物中各个组分的 TU 相加, 可以表征混合物在 50% 效应水平下的毒性相互作用<sup>[17]</sup>. 为了与 MERA 进行比较, 我们对 STU 在多个效应水平下进行扩展, 定义效应为  $x\%$  下的  $TU_x$  为某组分在混合物中的浓度与其在效应  $x\%$  下的浓度之比值, 则  $x\%$  下的毒性单位和为  $STU_x$ . 如果  $STU_x = 1$ , 为加和作用,  $STU_x < 1$  时为协同作用,  $STU_x > 1$  时为拮抗作用.

以上所有计算均使用 APTox 2.0<sup>[18]</sup>完成.

## 2 结果与讨论

### 2.1 单个物质对 Q67 的毒性

通过 MTA 法测得 DMSO 和 3 种农药对 Q67 的浓度-效应数据点及 Weibull 函数拟合得到的浓度-效应曲线(CRC)见图 1. 拟合参数( $\alpha$  和  $\beta$ )、拟合模型统计量(RMSE 和  $R^2$ )和单个物质的  $EC_{50}$  及其 OCI 列于表 1. 由图 1 和表 1 可知拟合结果良好, 浓度-效应关系可由 Weibull 函数有效表征. 由表 1 可知, DMSO 的毒性( $EC_{50}$ )比 3 种农药的毒性小 3~4 个数量级. 董玉瑛等<sup>[8]</sup>报道了 DMSO 对明亮发光杆菌的  $pEC_{50}$  (即  $-\lg EC_{50}$ ) 值为 0.595, Mariscal 等<sup>[19]</sup>观察到 DMSO 对费氏弧菌具有低剂量刺激作用. 本研究中 DMSO 对 Q67 的 CRC 呈 S 型, 与先前的研究一致(S 型,  $pEC_{50} = -0.080$ )<sup>[20]</sup>.

### 2.2 二元混合物对 Q67 的浓度-效应关系

3 组 DMSO 与农药的二元混合物共 15 条射线

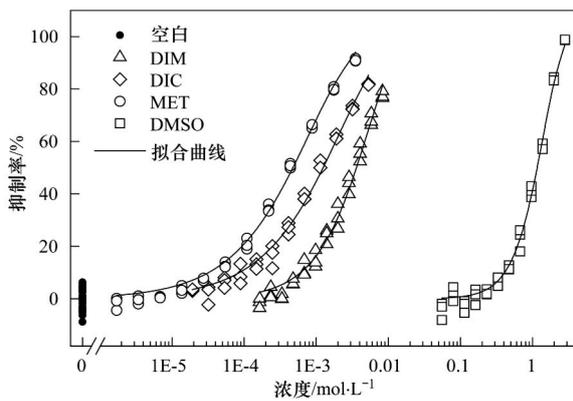


图1 DMSO和3种农药的浓度-效应关系

Fig. 1 Concentration-response curves of DMSO and three pesticides

的浓度-效应数据可用 Weibull 函数有效拟合,其回归参数( $\alpha$  和  $\beta$ )、拟合统计量(RMSE 和  $R^2$ )和每条射线的  $pEC_{50}$ 及其 OCI 列于表2. 由表2可知,拟合统计性显著, $R^2$ 均大于0.98, RMSE均小于0.046.

### 2.3 MERA 表征混合物相互作用

图2为3组DMSO-农药二元混合物的多效应残差图,即  $dCA_x$  随效应  $x\%$  的变化图. 可知,  $dCA_x$  均小于0,表明混合物组分间可能存在拮抗作用. 综观  $dCA_x$  随效应的变化情况可知, DMSO-DIM混合物的5条射线具有不同的走势: R1基本保持水平, R2和R3先下降,在30%效应水平附近达到最小值,之后上升并趋于0,而R4和R5在70%效应水平附近出现低谷,最低值-23%出现在R3的30%效应水平附近. DMSO-DIC混合物的5条射线变化相对平缓,整体上呈缓慢降低的趋势,最低值-15%出现在R4的65%效应水平附近. DMSO-MET混合物的R1和R2平缓上升, R3略有下降, R4和R5在60%效应水平附近达到低谷,最低值-23%出现在R4的60%效应附近.

通过分析表2可知,尽管  $dCA_x$  和  $p_i$  之间没有明显相关关系,但  $pEC_{50}$  与  $p_i$  之间存在良好线性关系,由这个线性关系预测的  $pEC_{50}$  全部落在观测  $pEC_{50}$  的置信区间(OCI)之内,这与 Zhang 等<sup>[21]</sup> 研究结果相似. 此外,在不同效应水平下,各组二元混合物的5个浓度比混合物射线的相互作用强度排序不尽相同. 例如,在 DMSO-DIM 混合物中,20%效应下是  $R3 > R2 > R4 > R5 > R1$ , 80%效应下是  $R4 > R5 > R3 > R2 > R1$ , 这可能是各个混合物的 CRC 斜率不尽相同所致<sup>[22]</sup>.

毒性实验的固有误差会影响相互作用的分析. 由图1可知空白对照的效应在  $\pm 10\%$  内波动,不妨把  $dCA_x < -10\%$  的区域作为发生强拮抗作用的区域. 按照此标准,在 DMSO-DIM 混合物中, R3的大部分效应水平、R4和R5的高效应区域以及R2的部分区域存在强拮抗作用. 在 DMSO-DIC 混合物中, R4在15%效应水平之上拮抗作用较强. 在 DMSO-MET 混合物中, R2~R5在15%效应水平以上都有不同程度的强拮抗作用. 应该指出,目前相互作用指数没有定义置信区间,本研究根据实验数据误差范围提出的标准并不具有严格的统计学意义. 但是多效应残差图给出了连续效应下指数的变化情况,综合考虑指数大小及其随效应水平的变化趋势能够对混合物相互作用全貌进行有效描述.

El Jay 等<sup>[23]</sup>以96 h 叶绿素 a 含量为毒性终点研究了 DMSO 与阿特拉津的混合物对普通小球藻和羊角月牙藻的毒性, DMSO 浓度  $< 0.5\%$  时与阿特拉津表现为加和作用,而  $> 0.5\%$  时与低浓度的阿特拉津发生拮抗作用. DMSO 与金属的相互作用更加复杂<sup>[19]</sup>. 此前大部分研究设计的浓度组合较少,仅能说明局部浓度范围内的联合毒性,很少同时考虑

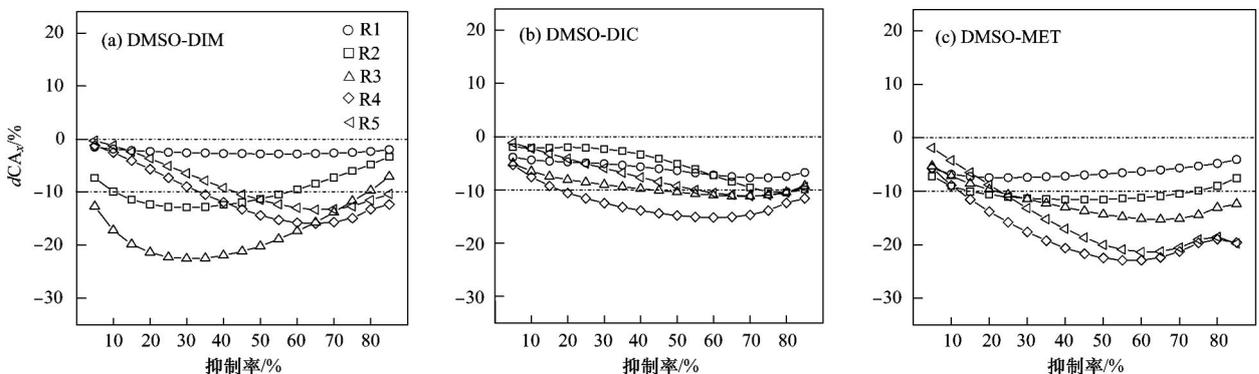


图2 3组二元混合物的多效应残差 ( $dCA_x$ ) 随效应水平的变化

Fig. 2 Plot of  $dCA_x$  versus effect level of three groups of binary mixtures

相互作用的浓度和效应水平依赖性. 从化学物的作用机制分析, DMSO 可以直接或间接影响生物对化学物的响应, 如降低化学物的生物有效性或改变解毒酶的活性<sup>[7]</sup>, 干扰正常的细胞膜结构, 增加细胞内自由态脂肪酸从而增加荧光素酶反应可用的基质<sup>[24]</sup>. DIM 和 DIC 属于有机磷杀虫剂, 作用于昆虫的胆碱能系统. 甲霜灵属于酰胺类杀菌剂, 是核糖体 RNA 的合成抑制剂, 对真菌具有较强的杀灭作用. 目前 3 种农药对 Q67 的作用机制还不明确, DMSO-农药二元混合物相互作用的机制尚无法很好地解释. 此外 Syberg 等<sup>[25]</sup> 指出化学物的作用模式

可能随着浓度改变而变化, 这使得混合物组分在不同效应水平下的相互作用更难预测.

### 2.4 等效线图及扩展毒性单位和 (STU<sub>x</sub>) 表征结果比较与分析

本节比较了 MERA 与传统等效线图及扩展毒性单位和 (STU<sub>x</sub>) 表征 DMSO-农药二元混合物相互作用的差异.

等效线图是基于 CA 模型的图形分析方法, 它是以直角坐标系统表达指定等效效应下各个二元混合物的浓度组成图<sup>[2]</sup>. DMSO 与农药的 3 组二元混合物在 50% 效应水平下的等效线图见图 3.

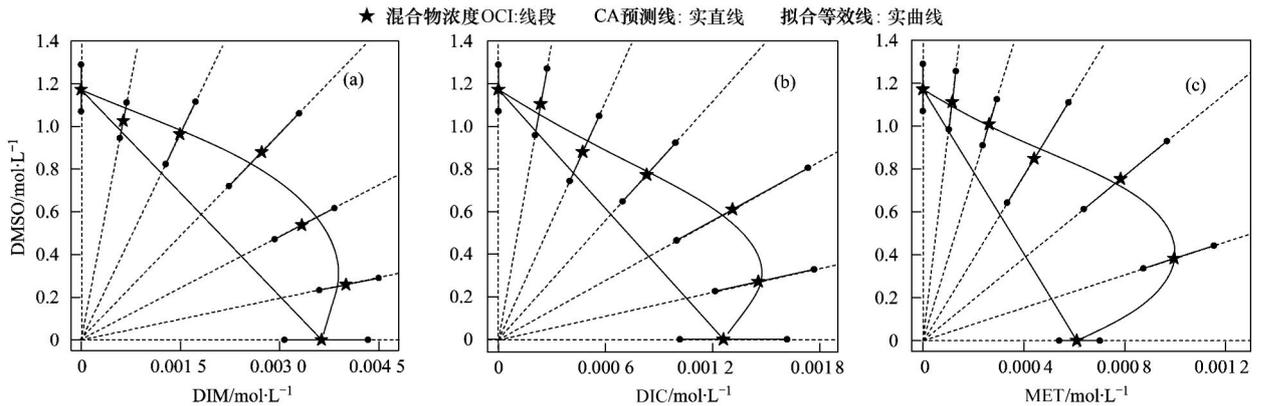


图 3 50% 效应水平下混合物浓度、OCI、CA 预测线和拟合等效线

Fig. 3 Mixture concentrations with OCI, the CA isobole, and the fitted isobole responding to the effect of 50%

由图 3 可知, 3 组混合物的等效线均位于 CA 预测线上方的拮抗区域, 且不对称. CA 预测线在混合物浓度 OCI 下限以下认为发生显著拮抗作用, 对比图 2 与图 3 可知, 图 2 中对强拮抗作用的判断与图 3 中显著拮抗作用的判断相吻合. 通过等效线与 CA 预测线的相对位置判断相互作用类型的方法非常直观简便, 但不足之处在于仅通过观察等效线的形状不能定量表征相互作用的强度.

达<sup>[2, 26]</sup>, 已广泛用于评价联合效应. Tian 等<sup>[17]</sup> 建立了利用 50% 效应下等毒性比混合物的相似性参数预测 50% 效应下非等毒性比混合物毒性单位和方法, 并提出了将此方法推广到其他效应水平的可能性. 多数研究仅将毒性单位和用于判断混合物相互作用的类型, 而没有考虑毒性单位和能否反映不同浓度比混合物在不同效应水平下相互作用的强度.

毒性单位和是基于某一效应的 CA 模型表

图 4 所示为 3 组混合物的扩展毒性单位和

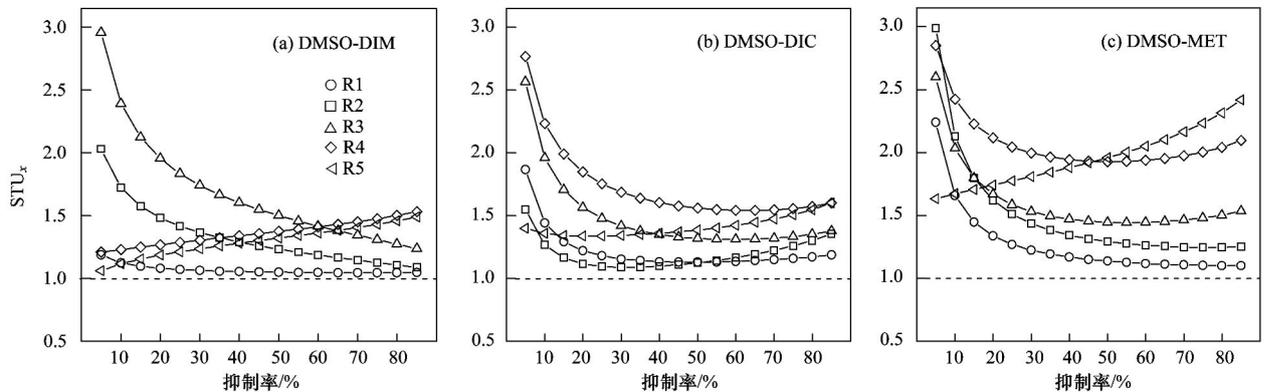


图 4 混合物射线的毒性单位和 (STU<sub>x</sub>) 随效应水平的变化

Fig. 4 Plot of the toxic unit summation of mixture rays with the effect level

( $STU_x$ )随效应水平的变化情况. 所有  $STU_x$  都  $> 1$ , 表明混合物可能存在拮抗作用. 比较图 2 和图 4 可知,  $dCA_x$  与  $STU_x$  判断不同混合物在同一效应水平下相互作用强度的结果基本一致. 然而,  $STU_x$  随效应水平的变化规律与  $dCA_x$  相异, 特别是在低效应处迅速增大, 似乎不甚合理, 因此不宜用于定量比较各效应水平下混合物相互作用的强度.

### 3 结论

(1) DMSO 分别与乐果(DIM)、敌敌畏(DIC)、甲霜灵(MET) 3 种农药对 Q67 的毒性相互作用以拮抗作用为主, 最强拮抗作用分别为  $-23\%$ ,  $-15\%$  和  $-23\%$ . 发生拮抗作用的浓度范围及拮抗作用强度受混合物组成、组分浓度比和效应水平等因素的影响.

(2) 多效应残差法(MERA)从效应的角度定量表征二元混合物的毒性相互作用. 相比于等效线图和毒性单位和, MERA 可以比较不同浓度比混合物在任意效应水平下的相互作用强度, 适用于分析具有复杂相互作用的二元混合物.

#### 参考文献:

- [ 1 ] Spurgeon D J, Jones O A H, Dorne J L C M, *et al.* Systems toxicology approaches for understanding the joint effects of environmental chemical mixtures [ J ]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(18): 3725-3734.
- [ 2 ] Koutsaftis A, Aoyama I. Toxicity of four antifouling biocides and their mixtures on the brine shrimp *Artemia salina* [ J ]. *Science of the Total Environment*, 2007, **387**(1-3): 166-174.
- [ 3 ] Dou R N, Liu S S, Mo L Y, *et al.* A novel direct equipartition ray design (EquRay) procedure for toxicity interaction between ionic liquid and dichlorvos [ J ]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2011, **18**(5): 734-742.
- [ 4 ] Faust M, Altenburger R, Backhaus T, *et al.* Joint algal toxicity of 16 dissimilarly acting chemicals is predictable by the concept of independent action [ J ]. *Aquatic Toxicology*, 2003, **63**(1): 43-63.
- [ 5 ] Junghans M, Backhaus T, Faust M, *et al.* Predictability of combined effects of eight chloroacetanilide herbicides on algal reproduction [ J ]. *Pest Management Science*, 2003, **59**(10): 1101-1110.
- [ 6 ] Zhang Y H, Liu S S, Liu H L, *et al.* Evaluation of the combined toxicity of 15 pesticides by uniform design [ J ]. *Pest Management Science*, 2010, **66**(8): 879-887.
- [ 7 ] Haap T, Triebkorn R, Köhler H R. Acute effects of diclofenac and DMSO to *Daphnia magna*: immobilisation and hsp70-induction [ J ]. *Chemosphere*, 2008, **73**(3): 353-359.
- [ 8 ] 董玉瑛, 雷炳莉, 马静, 等. 助溶剂对发光菌生物毒性测试的影响 [ J ]. *化工学报*, 2006, **57**(3): 636-639.
- [ 9 ] Hutchinson T H, Shillabeer N, Winter M J, *et al.* Acute and chronic effects of carrier solvents in aquatic organisms; a critical review [ J ]. *Aquatic Toxicology*, 2006, **76**(1): 69-92.
- [ 10 ] 窦容妮, 刘树深, 刘海玲, 等. 部分含 J-型剂量-效应关系二元混合物的毒性效应 [ J ]. *生态毒理学报*, 2010, **5**(4): 498-504.
- [ 11 ] 刘保奇, 葛会林, 刘树深. 测定环境污染物对青海弧菌发光强度抑制的微板发光法研究 [ J ]. *生态毒理学报*, 2006, **1**(2): 186-191.
- [ 12 ] 莫凌云, 刘海玲, 刘树深, 等. 5 种取代酚化合物对淡水发光菌的联合毒性 [ J ]. *生态毒理学报*, 2006, **1**(3): 259-264.
- [ 13 ] 张瑾, 刘树深, 窦容妮, 等. 30 种离子液体对青海弧菌 Q67 的毒性效应 [ J ]. *环境科学*, 2011, **32**(4): 1108-1113.
- [ 14 ] 朱祥伟, 刘树深, 葛会林, 等. 剂量-效应关系两种置信区间的比较 [ J ]. *中国环境科学*, 2009, **29**(2): 113-117.
- [ 15 ] Faust M, Altenburger R, Backhaus T, *et al.* Predicting the joint algal toxicity of multi-component s-triazine mixtures at low-effect concentrations of individual toxicants [ J ]. *Aquatic Toxicology*, 2001, **56**(1): 13-32.
- [ 16 ] McCarty L S, Borgert C J. Review of the toxicity of chemical mixtures: theory, policy, and regulatory practice [ J ]. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 2006, **45**(2): 119-143.
- [ 17 ] Tian D Y, Lin Z F, Ding J Q, *et al.* Application of the similarity parameter ( $\lambda$ ) to prediction of the joint effects of nonequotoxic mixtures [ J ]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2012, **62**(2): 195-209.
- [ 18 ] 刘树深, 张瑾, 张亚辉, 等. APTox: 化学混合物毒性评估与预测 [ J ]. *化学学报*, 2012, **70**(14): 1511-1517.
- [ 19 ] Mariscal A, Peinado M T, Camero-Varo M, *et al.* Influence of organic solvents on the sensitivity of a bioluminescence toxicity test with *Vibrio harveyi* [ J ]. *Chemosphere*, 2003, **50**(3): 349-354.
- [ 20 ] 刘树深, 刘芳, 刘海玲. 20 种水溶性有机溶剂对发光菌的毒性效应 [ J ]. *中国环境科学*, 2007, **27**(3): 371-376.
- [ 21 ] Zhang J, Liu S S, Dou R N, *et al.* Evaluation on the toxicity of ionic liquid mixture with antagonism and synergism to *Vibrio qinghaiensis* sp. -Q67 [ J ]. *Chemosphere*, 2011, **82**(7): 1024-1029.
- [ 22 ] Sørensen H, Cedergreen N, Skovgaard I M, *et al.* An isobole-based statistical model and test for synergism/antagonism in binary mixture toxicity experiments [ J ]. *Environmental and Ecological Statistics*, 2007, **14**(4): 383-397.
- [ 23 ] El Jay A. Toxic effects of organic solvents on the growth of *Chlorella vulgaris* and *Selenastrum capricornutum* [ J ]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 1996, **57**(2): 191-198.
- [ 24 ] Heitzer A, Applegate B, Kehrmeier S, *et al.* Physiological considerations of environmental applications of lux reporter fusions [ J ]. *Journal of Microbiological Methods*, 1998, **33**(1): 45-57.
- [ 25 ] Syberg K, Elleby A, Pedersen H, *et al.* Mixture toxicity of three toxicants with similar and dissimilar modes of action to *Daphnia magna* [ J ]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2008, **69**(3): 428-436.
- [ 26 ] Faust M, Altenburger R, Boedeker W, *et al.* Algal toxicity of binary combinations of pesticides [ J ]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 1994, **53**(1): 134-141.

## CONTENTS

Characteristics of Total Gaseous Mercury Concentrations at a Rural Site of Yangtze Delta, China .....	DOU Hong-ying, WANG Shu-xiao, WANG Long, <i>et al.</i> ( 1 )
Compositions of Organic Acids in PM <sub>10</sub> Emission Sources in Xiamen Urban Atmosphere .....	YANG Bing-yu, HUANG Xing-xing, ZHENG An, <i>et al.</i> ( 8 )
Analysis on Water-soluble Inorganic Ions in the Atmospheric Aerosol of Xinglong .....	LI Xing-ru, SONG Ai-li, WANG Ying-feng, <i>et al.</i> ( 15 )
Effects of Gaseous Compositions the on Simultaneous Removal of NO <sub>x</sub> and SO <sub>2</sub> from Simulated Flue Gas by Ammonia Absorption .....	WANG Hong, ZHU Tian-le, WANG Mei-yan ( 21 )
Comparing the Ammonia Volatilization Characteristic of Two Typical Paddy Soil with Total Wheat Straw Returning in Taihu Lake Region .....	WANG Jun, WANG De-jian, ZHANG Gang, <i>et al.</i> ( 27 )
Real-Time Analysis of Polyvinyl Chloride Thermal Decomposition/Combustion Products with Single Photon Ionization/Photoelectron Ionization Online Mass Spectrometer .....	CHEN Wen-dong, HOU Ke-yong, CHEN Ping, <i>et al.</i> ( 34 )
Surface Characteristics of Alkali Modified Activated Carbon and the Adsorption Capacity of Methane .....	ZHANG Meng-zhu, LI Lin, LIU Jun-xin, <i>et al.</i> ( 39 )
Distribution of Dimethylsulfoxide(DMSO) in the Surface Water of the Yellow Sea and the Bohai Sea .....	WANG Min, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng ( 45 )
Resolving Characteristic of CDOM by Excitation-Emission Matrix Spectroscopy Combined with Parallel Factor Analysis in the Seawater of Outer Yangtze Estuary in Autumn in 2010 .....	YAN Li-hong, CHEN Xue-jun, SU Rong-guo, <i>et al.</i> ( 51 )
Estimation and Forecast of Chlorophyll a Concentration in Taihu Lake Based on Ensemble Square Root Filters .....	LI Yuan, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> ( 61 )
Research of Hyperspectral Reconstruction Based on HJ1A-CCD Data .....	GUO Yu-long, LI Yun-mei, ZHU Li, <i>et al.</i> ( 69 )
Research on the Sensitivity of Geochemical of Underground River in Chongqing Xueyu Cave .....	XU Shang-quan, YANG Ping-heng, YIN Jian-jun, <i>et al.</i> ( 77 )
Bivariate Statistical Model for Calculating Phosphorus Input Loads to the River from Point and Nonpoint Sources .....	CHEN Ding-jiang, SUN Si-yang, JIA Ying-na, <i>et al.</i> ( 84 )
Temporal and Spatial Variations of Total Nitrogen and Total Phosphorus in the Typical Reaches of Qinhuai River .....	LI Yue-fei, XIA Yong-qiu, LI Xiao-bo, <i>et al.</i> ( 91 )
Derivation and Application of Sediment Quality Criteria of Cd and Hg for the Xiangjiang River .....	JIANG Bo-feng, SANG Lei-xin, SUN Wei-ling, <i>et al.</i> ( 98 )
Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Soil of Relocation Areas from the Danjiangkou Reservoir .....	ZHANG Lei, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> ( 108 )
Concentrations of Soil Heavy Metals and Their Spatial Distribution in the Surrounding Area of Fenhe Reservoir .....	LI Jin-chang, ZHANG Hong, SHI Wei ( 116 )
Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals of Groundwaters in the Irrigation District of the Lower Reaches of Yellow River .....	ZHANG Yan, LI Fa-dong, OUYANG Zhu, <i>et al.</i> ( 121 )
Concentrations and Distribution of Organochlorine Pesticides in the Surface Sediments of Jiaozhou Bay, Taotzi Bay and Sishili Bay .....	LIU Yi-kai, ZHONG Guang-cai, TANG Jian-hui, <i>et al.</i> ( 129 )
Choice of Macroinvertebrate Metrics for Constructing a Benthic-Index of Biotic Integrity Based on the Disturbance Gradients in the Qinjiang River Basin .....	LU Dong-qi, ZHANG Yong, CAI De-suo, <i>et al.</i> ( 137 )
Isolation and Identification of <i>Marinobacter adhaerens</i> HY-3 and Its Allelopathy on <i>Skeletonema costatum</i> .....	WANG Hong-bin, CHEN Wen-hui, LI Xin-shu, <i>et al.</i> ( 145 )
Effects of the Rice Straw on <i>Microcystis aeruginosa</i> Analyzed by Different Physiological Parameters .....	SU Wen, KONG Fan-xiang, YU Yang, <i>et al.</i> ( 150 )
Effects of Allochemicals Ethyl Cinnamate on the Growth and Physiological Characteristics of <i>Chlorella pyrenoidosa</i> .....	GAO Li-li, GUO Pei-yong, SU Guang-ming, <i>et al.</i> ( 156 )
Hydraulic Simulation and Safety Assessment of Secondary Water Supply System with Anti-Negative Pressure Facility .....	WANG Huan-huan, LIU Shu-ming, JIANG Shuai, <i>et al.</i> ( 163 )
Effect of Relative Molecular Mass Distribution and Hydrophilicity/Hydrophobicity of NOM on Membrane Fouling in MF-combined Process .....	HU Meng-liu, LIN Jie, XU Guang-hong, <i>et al.</i> ( 169 )
Effect of Permeabilization on Sulfate Reduction Activity of <i>Desulfovibrio vulgaris</i> Hildenborough Cells in the Presence of Different Electron Donors .....	XU Hui-wei, ZHANG Xu, LI Li-ming, <i>et al.</i> ( 177 )
Dechlorination of HCB by Bimetals Based on Zero Valent Iron .....	ZENG Xian-wei, LIU Jian-guo, NIE Xiao-qin ( 182 )
Study on Kinetics of Photoelectrocatalytic Degradation of Supported TiO <sub>2</sub> on Malachite Green .....	ZHANG Xiao-na, ZHOU Shao-qi, ZHOU Xiao ( 188 )
Measurement and Analysis of Micropore Aeration System's Oxygenating Ability Under Operation Condition in Waste Water Treatment Plant .....	WU Yuan-yuan, ZHOU Xiao-hong, SHI Han-chang, <i>et al.</i> ( 194 )
Influence of Microbubble and Its Generation Process on Mixed Liquor Properties of Activated Sludge .....	LIU Chun, MA Jin, ZHANG Lei, <i>et al.</i> ( 198 )
Impact of Different Nitrogen Concentrations on the N <sub>2</sub> O Production in the Denitrification Process of Granular Sludge .....	HAN Xue, GAO Da-wen ( 204 )
Effect of Simulated Heavy Metal Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> .....	XIE Xin-yuan, SUN Pei-de, LOU Ju-qing, <i>et al.</i> ( 209 )
Characteristic and Ion Exchanges During Cu <sup>2+</sup> and Cd <sup>2+</sup> Biosorption by <i>Stenotrophomonas maltophilia</i> .....	BAI Jie-qiong, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> ( 217 )
Sorption of Nitrobenzene to Anionic Surfactant Modified Layered Double Hydroxides .....	XIA Yan, ZHU Run-liang, TAO Qi, <i>et al.</i> ( 226 )
Study on Phosphate Removal and Recovery by Activated Alumina .....	MENG Wen-na, XIE Jie, WU De-yi, <i>et al.</i> ( 231 )
Spatial Distribution of Inhalable Particulate and Association with Respiratory Disease in Beijing City .....	YANG Wei, ZHAO Wen-ji, GONG Zhao-ning, <i>et al.</i> ( 237 )
Pollution Levels of Perfluorochemicals in Chicken Eggs and Duck Eggs from the Markets in Beijing .....	QI Yan-jie, ZHOU Zhen, SHI Ya-li, <i>et al.</i> ( 244 )
Residual Levels of Pesticides in Freshwater Fish from Beijing Aquatic Product Markets and Health Risk Assessment .....	YU Zhi-yong, JIN Fen, SUN Jing-fang, <i>et al.</i> ( 251 )
Characterizing the Toxicity Interaction of the Binary Mixture Between DMSO and Pesticide by the Multi-Effect Residual Analysis ( MERA) .....	HUO Xiang-chen, LIU Shu-shen, ZHANG Jing, <i>et al.</i> ( 257 )
Isolation of Quinolofop- <i>p</i> -ethyl-degrading Bacteria from Soil by DGGE-Colony <i>in situ</i> Hybridization .....	LÜ Xin, PENG Xia-wei, HU Qing, <i>et al.</i> ( 263 )
White-Rot Fungi Combinations Impact on Enzyme Productions .....	MENG Yao, LIANG Hong, GAO Da-wen ( 271 )
Effects of Different Fertilizer Application on Soil Active Organic Carbon .....	ZHANG Rui, ZHANG Gui-long, JI Yan-yan, <i>et al.</i> ( 277 )
Effect of Reclamation on the Vertical Distribution of SOC and Retention of DOC .....	HUO Li-li, ZOU Yuan-chun, GUO Jia-wei, <i>et al.</i> ( 283 )
Distribution Characteristics of Soil Organic Carbon and Its Composition in <i>Suaeda salsa</i> Wetland in the Yellow River Delta .....	DONG Hong-fang, YU Jun-bao, GUAN Bo ( 288 )
Study the Restoration Technology of Concentrated Application-Natural Diffusion about Amendments of Acidified Soil of Hilly Woodland .....	FANG Xiong, LIU Ju-xiu, YIN Guang-cai, <i>et al.</i> ( 293 )
Optimizing Remediation Conditions of Non-thermal Plasma for DDTs Heavily Contaminated Soil .....	CHEN Hai-hong, LUO Yong-ming, TENG Ying, <i>et al.</i> ( 302 )
Chemical Extraction of Arsenic Co-precipitated with Amorphous Fe(OH) <sub>3</sub> and Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> .....	CHEN Yi-ping, WANG Shao-feng, JIA Yong-feng ( 308 )
Influence of Aluminum and Manganese on the Growth, Nutrient Uptake and the Efflux by Ectomycorrhizal Fungi .....	LI Hua, HUANG Jian-guo, YUAN Ling ( 315 )
High-solids Anaerobic Co-digestion of Sludge and Kitchen Garbage Under Mesophilic Conditions .....	DUAN Ni-na, DONG Bin, LI Jiang-hua, <i>et al.</i> ( 321 )
Preparation, Characterization and Adsorption Performance of High Surface Area Biomass-based Activated Carbons .....	LI Kun-quan, LI Ye, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> ( 328 )
Study on Strategies of Pollution Prevention in Coastal City of Zhejiang Province Based on Scenario Analysis .....	TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun, DU Peng-fei, <i>et al.</i> ( 336 )
Advance in the Bioavailability Monitoring of Heavy Metal Based on Microbial Whole-cell Sensor .....	HOU Qi-hui, MA An-zhou, ZHUANG Xiu-liang, <i>et al.</i> ( 347 )
Characteristics of Heavy Metal Contamination in Street Dusts Along the Urban-Rural Gradient Around Beijing .....	HE Xiao-yan, GU Pei, LI Xu-yong, <i>et al.</i> ( 357 )
Content Trends of Pollutants in Street Dust of Beijing Along the Urban-Rural Gradient and Road Density Gradient .....	TANG Rong-li, MA Ke-ming, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> ( 364 )
Analysis of First Flush Effect of Typical Underlying Surface Runoff in Beijing Urban City .....	REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> ( 373 )
Temporal Variation of Water Quality and Driving Factors in Yanghe Watershed of Zhangjiakou .....	PANG Bo, WANG Tie-yu, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> ( 379 )
Research on Carbon Reduction Potential of Electric Vehicles for Low-Carbon Transportation and Its Influencing Factors .....	SHI Xiao-qing, LI Xiao-nuo, YANG Jian-xin ( 385 )
Investigation of Waste Classification and Collection Actual Effect and the Study of Long Acting Management in the Community of Beijing .....	DENG Jun, XU Wan-ying, ZHOU Chuan-bin ( 395 )
Problems and Countermeasures in the Application of Constructed Wetlands .....	HUANG Jin-lou, CHEN Qin, XU Lian-huang ( 401 )

# 《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1月15日 34卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 1 Jan. 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