

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第12期

Vol.36 No.12

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(卷终)

2014年APEC前后北京城区PM_{2.5}中水溶性离子特征分析 杨懂艳,刘保献,张大伟,石爱军,周健楠,景宽,富佳明(4325)

2013年北京市不同方位PM_{2.5}背景浓度研究 李云婷,程念亮,张大伟,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,陈晨(4331)

APEC期间北京空气质量改善对比分析 李文涛,高庆先,刘俊蓉,李亮,高文康,苏布达(4340)

嘉兴市春季PM₁₀、主要污染气体和气溶胶粒径分布的周末效应 沈利娟,王红磊,吕升,李莉,张孝寒,章国骏,王聿(4348)

烟花燃放对珠三角地区春节期间空气质量的影响 赵伟,范绍佳,谢文彰,孙家仁(4358)

典型钢铁行业汞排放特征及质量平衡 张雅惠,张成,王定勇,罗程钟,杨熹,徐凤(4366)

上海市公园绿地树叶对大气重金属污染的磁学响应 刘飞,褚慧敏,郑祥民(4374)

重庆金佛山降雪中飞灰颗粒物特征及来源解析 于正良,杨平恒,景伟力,袁道先,任坤,李林立(4381)

利用新型组合填料的生物滴滤塔净化混合废气研究 梅瑜,成卓韦,王家德,陆胤(4389)

低浓度CO₂在聚苯胺/Y分子筛复合材料上的吸附 刘凤玲,卢霞,张慧,葛鑫,刘杰,张泳真(4396)

红壤丘陵区冬季大气湿沉降化学特征及森林冠层对其截留作用机制 郝卓,高扬,张进忠,于贵瑞(4403)

中亚热带常绿阔叶林湿沉降过程中盐基离子变化特征 安思危,孙涛,马明,王定勇(4414)

基于Landsat 8影像估算新安江水库光合有效辐射漫射衰减系数 张毅博,张运林,查勇,施坤,周永强,刘明亮(4420)

白石水库颗粒有机物及沉积物中碳、氮稳定同位素的空间分布特征 郭凯,赵文,王珊,戴玉新,张荣坤,李东明(4430)

小关水库夏季浮游植物功能群对富营养化特征的响应 李磊,李秋华,焦树林,李钥,肖晶,邓龙,孙荣国,高永春,骆兰(4436)

湖泊基质客土改良的环境效应:对芦苇生长及光合荧光特性的影响 余居华,钟继承,范成新,黄蔚,商景阁,古小治(4444)

贵州纳朵洞洞穴水水文地球化学变化特征及其环境意义 沈蔚,王建力,王家录,蒋先淑,毛庆亚,陈挚秋,刘肖(4455)

碧水岩地下河中微量金属元素对降雨的响应特征及来源分析 邹艳娥,蒋萍萍,张强,汤庆佳,康志强,龚晓萍,陈长杰,俞建国(4464)

钱塘江(杭州段)表层水中全氟化合物的残留水平及分布特征 张明,唐访良,俞雅雯,徐建芬,李华,吴敏华,张伟,潘见阳(4471)

长江中游沉积物中多溴联苯醚的污染特征及风险评价 田奇昌,唐洪波,夏丹,王莎莎,高丽荣(4479)

城市地表水表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评估:以永康市为例 齐鹏,余树全,张超,梁立成,车继鲁(4486)

柠檬酸对三峡水库消落区土壤中汞活化及甲基化的影响 覃蔡清,梁丽,游蕊,邓晗,王定勇(4494)

微生物对冰封期湖泊沉积物中有机磷降解释放的影响 左乐,吕昌伟,何江,王伟颖,颜道浩(4501)

扰动和加藻共同作用下太湖沉积物中形态磷变化规律 陈俊,李大鹏,朱培颖,黄勇,王忍(4509)

生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应 张树楠,肖润林,刘锋,吴金水(4516)

开放系统下方解石对磷的去除 李振炫,刁家勇,黄利东,陈艳芳,刘大刚,许正文(4523)

铜在壳核结构磁性颗粒上的吸附:效能与表面性质的关系 李秋梅,陈静,李海宁,张晓蕾,张高生(4531)

基于优质碳源提供的CAMBR复合工艺短程硝化-反硝化除磷研究 程继辉,吴鹏,程朝阳,沈耀良(4539)

ANAMMOX菌利用零价铁转化氨和硝酸盐实验 周健,黄勇,袁怡,刘忻,李祥,沈杰,杨朋兵(4546)

基于GIS的天津市饮用水水质健康风险评价 符刚,曾强,赵亮,张玥,冯宝佳,王睿,张磊,王洋,侯常春(4553)

北京自备井水源内毒素污染及与其他水质参数的相关分析 张灿,刘文君,敖澍,史云,安代志,刘治平(4561)

广州市小学生多环芳烃内暴露水平 苏慧,赵波,张素坤,刘珊,任明忠,李杰,石小霞(4567)

构建三元混合污染物的三维等效图 刘雪,刘树深,刘海玲(4574)

化学提取法表征污染土壤中PAHs老化规律和蚯蚓富集特征 张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,刘总堂,李娇,王代长,蒋新(4582)

不同取样尺度下华北落叶松人工林土壤呼吸的空间变异性 严俊霞,梁雅南,李洪建,李君剑(4591)

基于环境效应的土壤重金属临界负荷制图 施亚星,吴绍华,周生路,王春辉,陈浩(4600)

土壤中铅锌的稳定化处理及机制研究 谢伟强,李小明,陈灿,陈寻峰,钟宇,钟振宇,万勇,王琰(4609)

纳米氧化锌、硫酸锌和AM真菌对玉米生长的影响 李帅,刘雪琴,王发园,苗艳芳(4615)

蜈蚣草中砷与铊的赋存特征及其相互作用 张玉秀,马旭,廖晓勇,阎秀兰,马栋,龚雪刚(4623)

纳米沸石对土壤Cd形态及大白菜Cd吸收的影响 熊仕娟,徐卫红,谢文文,陈蓉,陈永勤,迟芬琳,陈序根,张进忠,熊治庭,王正银,谢德体(4630)

黑麦草、丛枝菌根对番茄Cd吸收、土壤Cd形态的影响 陈永勤,江玲,徐卫红,迟芬琳,陈序根,谢文文,熊仕娟,张进忠,熊治庭(4642)

耐盐类固醇激素降解菌交替赤杆菌MH-B5的降解特性、降解途径及其固定化 马聪,秦丹,孙倩,于昌平(4651)

浙江省瓯江氨氧化古菌和氨氧化细菌分布及多样性特征 李虎,黄福义,苏建强,洪有为,俞慎(4659)

缙云山马尾松林和柑橘林土壤微生物PLFA沿海拔梯度的变化 曾清苹,何丙辉,毛巧芝,吴耀鹏,黄祺,李源(4667)

华北平原耕作土壤特性对基因工程菌迁移的影响 张静,刘平,刘春,陈晓轩,张磊(4676)

再生铜冶炼过程多氯萘与二噁英类排放特征分析与控制技术评估 田亚静,姜晨,吴广龙,丁琼,王铁宇,吕永龙(4682)

《环境科学》第36卷(2015年)总目录 (4690)

《环境科学》征订启事(4347) 《环境科学》征稿简则(4454) 信息(4463,4530,4573,4581)

构建三元混合污染物的三维等效图

刘雪, 刘树深*, 刘海玲

(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: 等效线分析法广泛应用于二元混合物的毒性相互作用评估。然而, 如何构建三维等效图以考察三元混合物中发生的毒性相互作用至今没有文献报道。本研究的主要目的即以三元混合物中3个组分的相对浓度为坐标轴建立三维等效图以考察三元混合物的毒性相互作用。以6种目前在中国广泛使用的农药, 包括3种除草剂(2,4-D、敌草净、西草净)和3种杀虫剂(乐果、吡虫啉、残杀威)为混合物组分, 采用均匀设计射线法(UD-Ray)分别对三元除草剂和三元杀虫剂混合物中各组分浓度分布进行优化设计, 以全面表征实际混合物的浓度多样性。通过费氏弧菌微板毒性分析法测定农药及其三元混合物在不同浓度下的发光抑制毒性, 以浓度加和(CA)模型为加和参考模型, 建立三维等效图, 分析各混合物的毒性相互作用。结果表明, 三维等效图能清晰、直观地反映三元混合物的毒性相互作用信息, 开拓等效分析法在二元混合物毒性分析中的应用。

关键词: 三维等效图; 均匀设计射线法; 费氏弧菌; 三元农药混合物; 毒性相互作用; 微板毒性分析

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)12-4574-08 DOI: 10.13227/j. hjkx. 2015. 12. 033

Construction of Three-Dimensional Isobologram for Ternary Pollutant Mixtures

LIU Xue, LIU Shu-shen*, LIU Hai-ling

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

Abstract: Isobolographic analysis was widely used in the interaction assessment of binary mixtures. However, how to construct a three-dimensional (3D) isobologram for the assessment of toxicity interaction within ternary mixtures is still not reported up to date. The main purpose of this paper is to develop a 3D isobologram where the relative concentrations of three components are acted as three coordinate axes in 3D space to examine the toxicity interaction within ternary mixtures. Taking six commonly used pesticides in China, including three herbicides (2, 4-D, desmetryne and simetryn) and three insecticides (dimethoate, imidacloprid and propoxur) as the mixture components, the uniform design ray procedure (UD-Ray) was used to rationally design the concentration composition of various components in the ternary mixtures so that effectively and comprehensively reflected the variety of actual environmental concentrations. The luminescent inhibition toxicities of single pesticides and their ternary mixtures to *Vibrio fischeri* at various concentration levels were determined by the microplate toxicity analysis. Selecting concentration addition (CA) as the addition reference, 3D isobolograms were constructed to study the toxicity interactions of various ternary mixtures. The results showed that the 3D isobologram could clearly and directly exhibit the toxicity interactions of ternary mixtures, and extend the use of isobolographic analysis into the ternary mixtures.

Key words: three-dimensional isobologram; uniform design ray; *Vibrio fischeri*; ternary pesticide mixtures; toxicity interaction; microplate toxicity analysis

等效线图(isobologram)是具有相同效应(通常是半数效应)的浓度点的组合, 常用于二元混合物的毒性相互作用分析^[1, 2]。等效线图已成功应用于研究两种止痛药的联合药效^[3], 鱼藤素和顺铂对人胃癌细胞株 MGC-803 的二元联合效应^[4], 重金属与有机磷农药二元混合物的联合毒性^[5], 氟唑磺隆与苯磺隆两种除草剂混合物的毒性相互作用^[6]以及离子液体与甲霜灵二元混合物的联合毒性^[7]等。然而, 等效线图是一个二维浓度图, 只能描述两组分之间的毒性相互作用^[8]。有学者将混合物效应作为第3个坐标引进传统等效线图中, 制作了所谓三维等效线图, 从而能考察任意等效效应而不仅仅限于半数效应浓度水平下的二元混合物中的毒性相互作用^[9, 10]。但是, 这个三维图并非处处等效, 只有当

第3个坐标固定时才是等效的。事实上, 如何构建3个物质之间的等效图进而考察三元混合物中发生的毒性相互作用尚无研究报道。本研究的主要目的即是以三元混合物中3个组分的相对浓度为坐标轴建立等效图以考察三元混合物中产生的毒性相互作用。这个图是三维的, 也是处处等效的, 称之为三维等效图。

混合污染物是一个复杂的体系^[11], 其效应不仅与混合物组成有关, 也与混合物中各组分的浓度

收稿日期: 2015-05-15; 修订日期: 2015-07-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(21177097); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20120072110052)

作者简介: 刘雪(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为混合污染物的分析毒理, E-mail: lurel_duoduo@sina.com

* 通讯联系人, E-mail: ssluohl@263.net

有关^[12~14], 仅仅研究其中某些等毒性浓度比混合物^[15, 16]或随机地考察几个非等毒性浓度比混合物的效应^[17, 18]来分析混合物的毒性变化规律是不全面的. 因此, 必须采用优化实验设计方法对混合物中各种浓度组成进行设计, 以全面表征实际混合物的浓度多样性. Dou 等^[19]提出了适用于二元混合物设计的直线均分射线法, Zhang 等^[20]首次将均匀设计(UD)的思想用于多元(六元)混合物的实验设计. 为了说明本研究建立的三维等效图在三元混合污染物中的应用, 以 6 种目前在中国广泛使用的农药, 包括三种除草剂(西草净、敌草净、2,4-D)和 3 种杀虫剂(乐果、吡虫啉、残杀威)为混合物组分, 采用均匀设计射线法(uniform design ray, UD-Ray)^[21]分别对三元除草剂和三元杀虫剂混合物中

各组分浓度分布进行优化设计, 以费氏弧菌微板毒性分析法测定农药及其三元混合物在不同浓度下的发光抑制毒性, 以浓度加和(concentration addition, CA)为加和参考, 建立三维等效图, 分析各混合物的毒性相互作用.

1 材料与方法

1.1 主要试剂

3 种除草剂(西草净、敌草净、2,4-二氯苯氧乙酸)和 3 种杀虫剂(乐果、吡虫啉、残杀威)购自 Dr Ehrenstorfer GmbH 公司(德国), 其名称、纯度、CAS 登记号(CAS RN)等基本性质及储备液浓度见表 1. 农药的储备液使用含 2% NaCl 的 Milli-Q 水配置, 使用前置于 4℃ 冰箱避光保存.

表 1 6 种农药的基本信息及储备液浓度数

Table 1 Basic information and stock solutions of six pesticides

农药	缩写	英文名	CAS RN	纯度 /%	相对分子质量	储备液浓度 /mol·L ⁻¹
西草净	SIM	Simetryne	1014-70-6	98.5	213.30	1.10E-03
敌草净	DES	Desmetryn	1014-69-3	97.5	213.30	2.48E-03
2,4-二氯苯氧乙酸	2,4-D	2,4-Dichlorophenoxyacetic acid	94-75-7	99.0	221.04	3.50E-03
乐果	DIM	Dimethoate	60-51-5	98.5	229.26	6.08E-03
吡虫啉	IMI	Imidacloprid	138261-41-3	99.0	255.66	1.48E-03
残杀威	PRO	Propoxur	114-26-1	99.5	209.24	7.46E-03

1.2 费氏弧菌微板毒性分析法

根据 Wang 等^[22]提出的方法做适当修改而成. 具体操作过程如下.

1.2.1 菌种、培养基及细菌培养

费氏弧菌冻干粉购自北京滨松光子技术股份有限公司(产品型号为 CS234, 编号 D14H021).

培养基配置参照 ISO 11348-1. 具体操作过程如下: 称取 30 g 氯化钠、6.10 g 一水磷酸二氢钠、2.75 g 三水磷酸氢二钾、0.204 g 七水硫酸镁、0.50 g 磷酸氢二铵、3 mL 甘油、5.00 g 蛋白胨、0.500 g 酵母提取物, 溶于约 900 mL Milli-Q 超纯水. 搅拌均匀后用 2 mol·L⁻¹ NaOH 溶液和 1 mol·L⁻¹ HCl 溶液调节 pH 至 7.0 ± 0.2, 定容至 1 L, 取其中约 200 mL 用于制备固体培养基, 剩余 800 mL 用于制备液体培养基. 用量筒量取 200 mL 上述溶液至 250 mL 容量瓶, 加入 2.4 g 生化琼脂粉, 用牛皮纸封口、橡皮筋扎紧后, 和洗净的培养皿一起放入高压蒸汽灭菌锅, 在 121℃ 下灭菌 20 min. 稍作冷却, 移至超净台, 将溶有琼脂粉的培养基分装至直径约 7 cm 的培养皿中, 培养基厚度约 0.5 cm. 待其凝固、冷却后置于 4℃ 冰箱保存, 此即为固体培养基. 余下的

800 mL 溶液则分装至 150 mL 锥形瓶, 每瓶 50 mL, 用牛皮纸封口、橡皮筋扎紧后, 放入高压蒸汽灭菌锅, 在 121℃ 下灭菌 20 min, 冷却后直接置于 4℃ 冰箱保存, 此即为液体培养基.

费氏弧菌培养: 取费氏弧菌冻干粉及复苏液, 无菌条件下, 用移液器吸取 0.5 mL 复苏液至费氏弧菌冻干粉小瓶, 缓缓振荡摇匀. 用接种环沾取适量菌液至配置好的固体培养基, 均匀划线使菌液呈条状均匀分布. 在 20℃ ± 1℃ 下培养 48 h 后, 再分别进行两次传代培养(均在 20℃ ± 1℃ 下培养 24 h), 即可得到发光稳定的第三代菌株. 将发光稳定的菌株接种到液体培养基, 20℃ ± 1℃、180 r·min⁻¹ 下培养约 13 ~ 15 h, 即可得到相对发光数(relative light unit, RLU)在 1.0 × 10⁹ ~ 1.5 × 10⁹ 之间的费氏弧菌菌液(处于对数生长期的菌液). 另取一瓶液体培养基, 20℃ ± 1℃ 下放置 30 min 后, 向其中加入约 5 ~ 10 mL 上述处于对数生长期的菌液, 混匀后测试混合菌液的相对发光数, 混合液的 RLU 在 1.0 × 10⁸ ~ 2.0 × 10⁸ 之间, 即可作为测试菌液使用. 研究中发现, 测试菌液的敏感性与菌液密度密切相关, 本文通过对对数期菌液进行稀释, 来提高

实验的灵敏性;同时通过控制测试菌液的 RLU,来控制实验结果的稳定性.

1.2.2 发光抑制毒性测试

选用白色不透明标准 96 孔板,微板周边的 36 个微孔加入 200 μL Milli-Q 超纯水;第 2、6、7 及 11 列除周边外的 24 个微孔加入 100 μL 2% NaCl 溶液(空白);剩余 36 个微孔按一定稀释因子设计 12 个浓度梯度,各浓度设 3 个平行,试液体积不足 100 μL 时以 2% NaCl 溶液补充.用多道移液枪移取 1.2.1 节中培养至对数生长期的测试菌液 100 μL 加入 96 孔板中间的 60 个孔中,使每孔总体积为 200 μL ,记下加入菌液的时间.在 $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 温育 30 min 后,在 Glomax 微板光度计上测定各孔测试液的 RLU,按式(1)计算发光抑制毒性(E):

$$E = (I_0 - I_i) / I_i \quad (1)$$

式中, I_0 为 24 个空白 RLU 的平均值, I_i 为第 i 个浓度梯度 3 个平行 RLU 的平均值.为减少实验误差,微板实验至少进行 3 次重复.

1.2.3 浓度-效应曲线拟合

采用 3 参数 Hill 函数^[23]对不同浓度下的发光抑制毒性(E)数据进行非线性拟合,拟合优度用拟合相关系数(R)和均方根误差(RMSE)表示.3 参数 Hill 函数如式(2)所示:

$$E = \gamma / [1 + (EC_x / EC_m)]^\beta \quad (2)$$

式中, γ 表示最大效应, EC_x 表示毒性效应为 x 时对应的浓度, EC_m 表示毒性效应为最大效应(γ)一半时的浓度, β 是斜率参数.

1.3 混合物设计

以三元混合物中的 3 个组分为因素,各组分的 5 个效应浓度(EC_{10} 、 EC_{20} 、 EC_{30} 、 EC_{40} 、 EC_{50})为因素水平,采用 $U_5(5^4)$ 均匀表中的第 1、2、3 列设计 5 条混合物射线^[15].混合物射线中各组分浓度在混合物总浓度(各组分浓度之和)中所占分数(p_i)结果见表 2.其中 HMk 和 IMk 分别表示除草剂混合物(herbicide mixture)和杀虫剂混合物(insecticide mixture)体系中的第 k 条射线.

1.4 三维等效图构建

三维等效图是以 3 个组分相对浓度为坐标轴(三维浓度空间)各等效混合物的浓度分布图,它由一个浓度加和等效面和各混合物等效浓度及误差棒(本研究以 95% 置信区间表示)组成.具体构建方法如下.

浓度加和等效面的构造:以浓度加和(CA)作为加和相互作用标准分析混合物相互作用如协同和拮

表 2 除草剂或杀虫剂混合物射线中 3 个组分的浓度比(p_i)

Table 2 Concentration ratios (p_i) of three components in herbicide or insecticide mixture rays

射线 ¹⁾	浓度比(p_i)		
	SIM 或 DIM	DES 或 IMI	2,4-D 或 PRO
HM1	0.046 529	0.798 966	0.154 505
HM2	0.060 957	0.909 944	0.029 099
HM3	0.230 320	0.509 652	0.260 028
HM4	0.178 896	0.756 830	0.064 274
HM5	0.142 790	0.758 532	0.098 678
IM1	0.034 312	0.016 055	0.949 633
IM2	0.221 028	0.143 398	0.635 574
IM3	0.076 577	0.003 809	0.919 614
IM4	0.261 350	0.039 353	0.699 297
IM5	0.105 885	0.028 199	0.865 916

1) HMk 和 IMk ($k=1, 2, 3, 4, 5$) 分别表示第 k 条除草剂和杀虫剂混合物射线

抗作用.三元混合物的浓度加和(CA)模型可表达为式(3).

$$c_1 / EC_{x,1} + c_2 / EC_{x,2} + c_3 / EC_{x,3} = 1 \quad (3)$$

式中, c_1 、 c_2 、 c_3 分别表示效应为 x 时混合物中 3 个组分的浓度, $EC_{x,1}$ 、 $EC_{x,2}$ 、 $EC_{x,3}$ 分别表示 3 个组分单独存在时产生效应 x 时的浓度.

由式(3)可知,符合 CA 模型且效应为 x 的所有三元混合物都位于三维浓度空间的一个平面上.这个平面通过 3 个坐标轴的 $EC_{x,i}$ ($i=1, 2, 3$) 相交.本研究利用 MATLAB 2008 的网格化技术构建这个平面.具体做法如下:任选两组分(1 和 2)分别作为 X 轴和 Y 轴,以合适的步长对 $0 \sim EC_{x,1}$ 和 $0 \sim EC_{x,2}$ 进行网格化处理,对每一个网格化节点计算符合式 3 的第 3 组分的浓度(c_3)值.

等效浓度及误差棒:从实验测定的各混合物射线的浓度-毒性数据的拟合曲线函数计算指定效应 x 下的浓度 EC_x ,从拟合曲线的 95% 观测置信区间^[24]计算该效应浓度的置信上限浓度(UC_x)和置信下限浓度(LC_x),最后各混合物浓度分别与各组分的浓度分数相乘得到各组分浓度.

利用上述符合 CA 模型的等效面数据和混合物实测等效浓度及置信区间数据在 Origin 8.0 中完成作图.

2 结果与分析

2.1 农药的剂量-效应曲线

结果表明, Hill 函数能很好地拟合除草剂和杀虫剂的剂量-效应数据(表 3).由表 3 可知,拟合相

关系数 R 均大于 0.98, 拟合均方根误差 RMSE 均小于 0.030. 若以 EC_{50} 为毒性指标, 除 PRO 外, 杀虫剂的 EC_{50} 比除草剂低 1~2 个数量级, 说明杀虫剂对费氏弧菌的毒性高于除草剂. 6 个农药的浓度-效

应数据点, 拟合剂量-效应曲线 (concentration-response curve, CRC) 及置信区间如图 1 所示, 从中可知, 数据重复性较好, 除个别点外, 大部分数据点均落在较窄的置信区间内.

表 3 6 种农药的 Hill 函数拟合参数与 EC_{50} 值

Table 3 Hill equation fitting parameters and EC_{50} value of six pesticides

农药	α	β	γ	RMSE	R	$EC_{50}/\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	置信区间/ $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$
SIM	1.47E-3	-1.30	1.00	0.0160	0.9983	1.47E-3	(1.30E-3, 1.69E-3)
DES	7.57E-3	-1.65	1.00	0.0174	0.9963	7.57E-3	(6.79E-3, 8.54E-3)
2,4-D	8.53E-4	-1.88	0.78	0.0267	0.9838	1.15E-3	(9.90E-4, ∞)
DIM	1.72E-4	-1.07	0.95	0.0152	0.9984	1.90E-4	(1.46E-4, 1.94E-4)
IMI	4.66E-5	-0.88	0.95	0.0134	0.9984	5.25E-5	(3.96E-5, 5.31E-5)
PRO	1.16E-3	-0.97	0.93	0.0194	0.9962	1.38E-3	(1.13E-3, 1.69E-3)

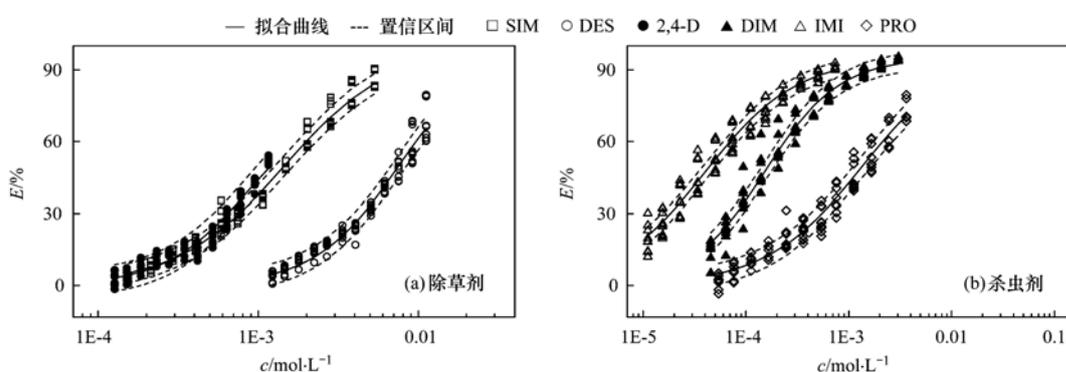


图 1 3 个杀虫剂和 3 个除草剂的剂量-效应关系

Fig. 1 Concentration-response relationships of three insecticides and three herbicides

2.2 农药混合物的毒性相互作用

Hill 函数能够对 HM 体系的 5 条混合物射线及 IM 体系的 5 条射线的毒性数据进行有效拟合. 表 4 结果表明, 拟合相关系数 R 均大于 0.98, 均方根误差 RMSE 均小于 0.035. 各混合物射线的浓度-效应数据点, 拟合 CRC 及置信区间如图 2 所示. 为了从整体 CRC 分析混合物的毒性相互作用, 应用 CA 模型计算各混合物射线的预测 CRC (图 2 中的黑色实线).

从图 2(a) 可以看出, 对于 HM 体系, 低浓度

下, 5 条混合物射线的 CA 预测 CRC 都落在 95% 置信区间内, 是浓度加和作用; 随着混合物浓度增加, 射线 HM1 和 HM2 的 CA 预测 CRC 逐渐低于置信区间下限, 呈协同作用. 从图 2(b) 可以看出, 对于 IM 体系, 低浓度下, 部分混合物射线的 CA 预测 CRC 高于置信区间上限, 呈拮抗作用; 中等浓度下, CA 预测 CRC 位于置信区间内, 呈加和作用; 在高浓度时, CA 预测 CRC 低于置信区间下限, 呈协同作用.

表 4 三元除草剂和杀虫剂混合物射线的拟合函数与 EC_{50} 及置信区间

Table 4 Fitting functions and EC_{50} s with their 95% confidence intervals of ternary herbicide and insecticide mixture rays

射线	α	β	γ	RMSE	R	$EC_{50}/\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	置信区间/ $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$
HM1	2.89E-3	-1.69	0.93	0.0245	0.9933	3.16E-03	(2.67E-3, 3.85E-3)
HM2	4.60E-3	-1.49	1.00	0.0227	0.9952	4.60E-03	(3.94E-3, 5.51E-3)
HM3	1.97E-3	-1.47	0.92	0.0330	0.9859	2.22E-03	(1.71E-3, 3.03E-3)
HM4	3.67E-3	-1.31	1.00	0.0222	0.9946	3.67E-03	(3.09E-3, 4.46E-3)
HM5	3.43E-3	-1.59	0.97	0.0258	0.9930	3.57E-03	(2.99E-3, 4.53E-3)
IM1	9.87E-4	-0.99	1.00	0.0172	0.9976	9.87E-04	(8.36E-4, 1.21E-3)
IM2	2.83E-4	-0.99	0.99	0.0149	0.9986	2.88E-04	(2.43E-4, 3.31E-4)
IM3	9.06E-4	-1.00	1.00	0.0179	0.9976	9.06E-04	(7.53E-4, 1.10E-3)
IM4	4.62E-4	-1.02	1.00	0.0140	0.9987	4.62E-04	(4.06E-4, 5.42E-4)
IM5	7.68E-4	-1.11	0.98	0.0121	0.9991	7.97E-04	(6.80E-4, 8.69E-4)

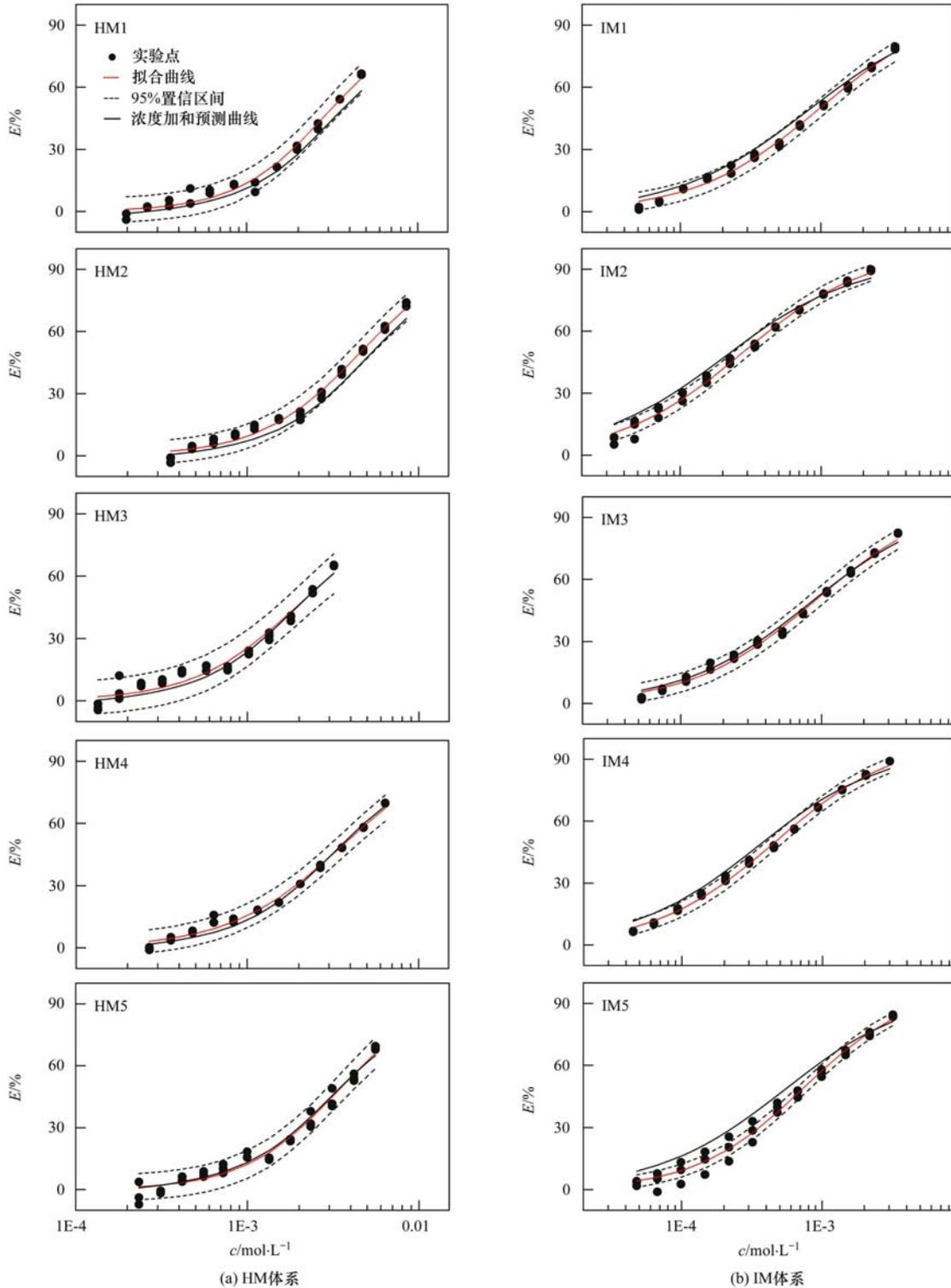


图2 HM体系及IM体系各混合物射线的剂量-效应关系

Fig. 2 Concentration-response relationships of various mixture rays in the HM and IM systems

2.3 三维等效图在混合物毒性分析中的应用

应用三维等效图可以考察三元混合物在任意效应水平下的毒性相互作用, 本研究以效应 $x = 50$ 为例, 制作三元除草剂和三元杀虫剂混合物的三维等效图(图3). 图3中三角平面表示浓度加和等效

面, 各线段(三点)表示各混合物射线的 EC_{50} (中点)及其浓度置信区间(两 endpoints). 若线段与三角平面相交说明该混合物射线在 EC_{50} 水平下呈加和作用; 若线段位于三角平面左下方, 则呈协同相互作用; 若位于右上方则呈拮抗相互作用.

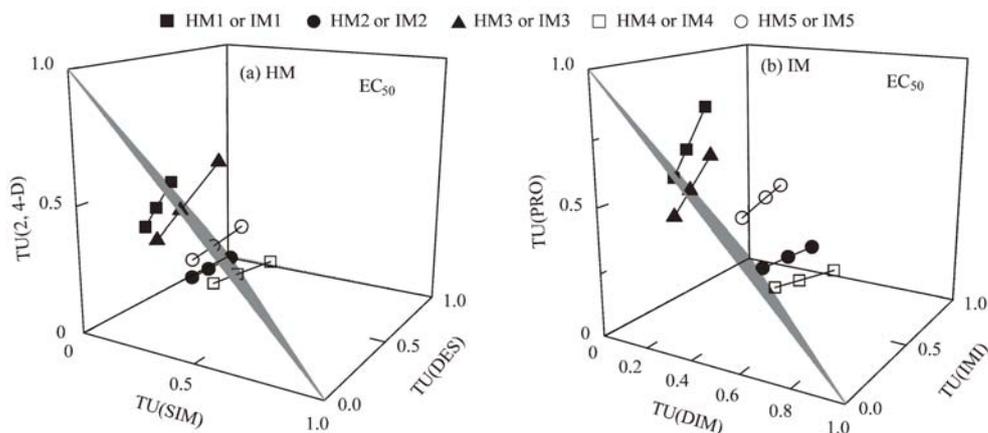


图3 HM和IM混合物射线在 EC_{50} 下的三维等效图

Fig. 3 Three-dimensional isobologram of HM and IM mixture rays at EC_{50}

由图3(a)可知,对于HM体系,浓度加和等效面与所有混合物射线的 EC_{50} 及其误差棒相交.表明,所有除草剂混合物射线在 EC_{50} 水平下呈加和作用.由图3(b)可知,对于IM体系,浓度加和等效面与IM1和IM3混合物射线的 EC_{50} 及其误差棒相交,而IM2、IM4和IM5混合物射线的 EC_{50} 及其误差棒位于浓度加和等效面的右上方.表明IM1和IM3混合物射线在 EC_{50} 水平下呈加和作用,而IM2、IM4和IM5混合物射线在 EC_{50} 水平下呈拮抗作用.这些结果分别与5条HM射线和5条IM混合物射线的CRC及CA预测CRC图的比较结果相吻合.

3 讨论

评价混合物中组分间的毒性相互作用有图形法和指数法两大类.等效线图法是应用最广泛的图形方法,但只适用于二元混合物的相互作用分析.指数方法^[25-28]将混合物相互作用用一个定量的数值表示,简单实用,也适用于多元混合物.最常使用的指数方法有毒性单位法、加和指数法、混合物毒性指数法、相似性参数法等.然而,使用这些指数的参考浓度都是半数效应浓度,一般较难反映混合物毒性相互作用随混合物浓度组成可能发生变化的事实.

传统等效线图是二维图,只能用于二元混合物的毒性相互作用分析^[29,30].要获得比较完整的等效线图,必须按固定浓度比法设计具有多种浓度比(比如 $EC_{50,1}/EC_{50,2}$ 为5:1、4:2、3:3、2:4和1:5)的大量二元混合物进行毒性测试,从而求得各混合物的 EC_{50} ^[15,16].Dou等^[19]提出应用直接均分射线

法(direct equipartition ray design, EquRay)设计二元混合物,使得各混合物射线在二维浓度空间中均匀分布,从而实现混合物毒性实验的程序化.由EquRay设计并经毒性测试获得的实验数据可以方便地构建不同效应或浓度水平下的多个等效线图,从而系统分析混合物在不同等效效应下的毒性相互作用^[7,31].

传统等效线图不能用于三元混合物的毒性相互作用分析.虽然利用EquRay设计各种混合物射线可以系统并程序化地得到多个效应下的等效线图,但仍不能应用于三元混合物.要全面反映三元混合物中的各种浓度组成与分布,需要比二元混合物更大量的毒性测试数据,这只有通过优化实验设计才能在有限的实验测试范围内获得尽可能好的结果.本研究采用UD-Ray对农药三元混合物进行优化设计,对每个混合物体系(HM与IM)设计了5条射线并进行毒性测试,获得了能有效反映三元混合物体系中各种不同浓度组成混合物在不同等效效应(例如 EC_{50} 或其它 EC_x)下的三维等效图.这个三维等效图可以清晰、直观地反映三元混合物的毒性相互作用特征;将三维等效图的分析结果与常规的CRC及CA预测CRC图的分析结果进行对比,说明了三维等效图的分析结果准确可靠;结合UD-Ray设计法制作三维等效图,可以全面地反映三元混合物体系在特定等效效应下的毒性相互作用特征.

4 结论

(1) 利用UD-Ray设计三元混合物的各种浓度组成,并测试各种混合物对费氏弧菌的发光抑制毒性,进而以Hill函数拟合浓度-发光抑制毒性数据,

浓度加和为加和标准, 构建了三元混合物在不同等效效应下的三维等效图。

(2) 以三元除草剂和三元杀虫剂混合物体系为例, 给出了在 EC_{50} 水平下的三维等效图, 分析了三元混合物体系中的毒性相互作用。

(3) 三维等效图可以清晰、直观地反映三元混合物的毒性相互作用特征, 开拓了等效分析在三元混合物毒性评估中的应用。结合 UD-Ray 混合物设计方法, 不仅扩大了三元混合物毒性研究的浓度比范围, 同时也提高了三元混合物毒性研究的效率。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Matsumura N, Nakaki T. Isobolographic analysis of the mechanisms of action of anticonvulsants from a combination effect [J]. European Journal of Pharmacology, 2014, **741**: 237-246.
- [3] Sałat R, Sałat K. Modeling analgesic drug interactions using support vector regression; A new approach to isobolographic analysis [J]. Journal of Pharmacological and Toxicological Methods, 2015, **71**: 95-102.
- [4] 袁金金, 吴昌平, 李争光, 等. 鱼藤素联合顺铂对人胃癌细胞株 MGC-803 的协同抑制作用[J]. 中华实验外科杂志, 2013, **30**(2): 222-224.
- [5] 吴宗凡, 刘兴国, 王高学. 重金属与有机磷农药二元混合物对卤虫联合毒性的评价及预测[J]. 生态毒理学报, 2013, **8**(4): 602-608.
- [6] 台文俊, 徐小燕, 刘燕君, 等. 等效线法评价氟唑磺隆与苯磺隆相互作用关系[J]. 农药, 2008, **47**(2): 136-137.
- [7] 王成林, 张瑾, 刘树深, 等. 3 种离子液体与甲霜灵二元混合物的联合毒性[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(11): 2090-2094.
- [8] Chou T C. Theoretical basis, experimental design, and computerized simulation of synergism and antagonism in drug combination studies [J]. Pharmacological Reviews, 2006, **58**(3): 621-681.
- [9] Luszczycki J J, Czuczwar S J. Biphasic characteristic of interactions between stiripentol and carbamazepine in the mouse maximal electroshock-induced seizure model; a three-dimensional isobolographic analysis [J]. Naunyn-Schmiedeberg's Archives of Pharmacology, 2006, **374**(1): 51-64.
- [10] Luszczycki J J, Czuczwar S J. Three-dimensional isobolographic analysis of interactions between lamotrigine and clonazepam in maximal electroshock-induced seizures in mice [J]. Naunyn-Schmiedeberg's Archives of Pharmacology, 2004, **370**(5): 369-380.
- [11] 王猛超, 刘树深, 陈浮. 拓展浓度加和模型预测三种三嗪类除草剂混合物的时间依赖毒性[J]. 化学学报, 2014, **72**(1): 56-60.
- [12] 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.
- [13] Zhang J, Liu S S, Yu Z Y, *et al.* Significant contributions of ionic liquids containing tetrafluoroborate and trifluoromethanesulfonate to antagonisms and synergisms in multi-component mixtures [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, **209-210**: 158-163.
- [14] 张瑾, 刘树深. 离子液体与有机磷农药间的毒性相互作用 [J]. 生态毒理学报, 2012, **7**(4): 408-414.
- [15] 葛会林, 刘树深, 刘芳. 多组分苯胺类混合物对发光菌的抑制毒性[J]. 生态毒理学报, 2006, **1**(4): 295-302.
- [16] 刘芳, 刘树深, 刘海玲. 部分离子液体及其混合物对发光菌的毒性作用[J]. 生态毒理学报, 2007, **2**(2): 164-171.
- [17] Syberg K, Binderup M L, Cedergreen N, *et al.* Mixture genotoxicity of 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid, acrylamide, and maleic hydrazide on human caco-2 cells assessed with comet assay [J]. Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A: Current Issues, 2015, **78**(6): 369-380.
- [18] Wang Y H, Chen C, Qian Y Z, *et al.* Toxicity of mixtures of λ -cyhalothrin, imidacloprid and cadmium on the earthworm *Eisenia fetida* by combination index (CI)-isoblogram method [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015, **111**: 242-247.
- [19] 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.
- [20] Zhang Y H, Liu S S, Song X Q, *et al.* Prediction for the mixture toxicity of six organophosphorus pesticides to the luminescent bacterium Q67 [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2008, **71**(3): 880-888.
- [21] 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.
- [22] Wang L J, Liu S S, Yuan J, *et al.* Remarkable hormesis induced by 1-ethyl-3-methyl imidazolium tetrafluoroborate on *Vibrio qinghaiensis* sp. -Q67 [J]. Chemosphere, 2011, **84**(10): 1440-1445.
- [23] Goldoni M, Johansson C. A mathematical approach to study combined effects of toxicants *in vitro*; Evaluation of the Bliss independence criterion and the Loewe additivity model [J]. Toxicology in Vitro, 2007, **21**(5): 759-769.
- [24] 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.
- [25] 贾玉玲, 蔡强, 彭惠民, 等. 乙酰胆碱酯酶和发光菌检测有机磷农药毒性研究 [J]. 环境科学, 2011, **32**(6): 1820-1824.
- [26] 董玉瑛, 邹学军, 陈峥, 等. 三种药品联合毒性作用及其环境风险分析[J]. 环境化学, 2013, **32**(7): 1257-1262.
- [27] 章小强, 胡晓娜, 陈彩东, 等. 镉与 S-异丙甲草胺对斜生栅藻的联合毒性作用 [J]. 环境科学, 2015, **36**(3): 1069-1074.

- [28] 王桂燕, 胡筱敏, 周启星, 等. 对二氯苯和镉对草鱼 (*Ctenopharyngodon idellus*) 的联合毒性效应研究[J]. 环境科学, 2007, **28**(1): 156-159.
- [29] Satyanarayana P S V, Jain N K, Singh A, *et al.* Isobolographic analysis of interaction between cyclooxygenase inhibitors and tramadol in acetic acid-induced writhing in mice[J]. *Progress in Neuro-Psychopharmacology and Biological Psychiatry*, 2004, **28**(4): 641-649.
- [30] Durak A, Gawlik-Dziki U, Kowlska I. Coffee with ginger-Interactions of biologically active phytochemicals in the model system[J]. *Food Chemistry*, 2015, **166**: 261-269.
- [31] 霍向晨, 刘树深, 张晶, 等. 多效应残差法(MERA)表征二甲亚砷-农药二元混合物毒性相互作用[J]. 环境科学, 2013, **34**(1): 257-262.

《环境科学》编辑部关于启用编辑信息管理系统公告

《环境科学》编辑部已经开通本刊网站并启用编辑信息管理系统(网站地址:<http://www.hjcx.ac.cn>). 该系统能实现在线投稿、在线审稿、期刊浏览检索等功能, 欢迎广大作者、读者和审稿专家使用. 目前我刊所有来稿都通过网站编辑信息管理系统进行. 作者使用编辑信息管理系统投稿时请先进行注册, 注册完毕后以作者身份登录, 按照页面上给出的提示投稿即可. 如果您在使用过程中有问题, 请及时与我刊编辑部联系.

邮政地址: 北京市海淀区双清路 18 号《环境科学》编辑部

邮 编: 100085

电 话: 010-62941102, 010-62849343

传 真: 010-62849343

E-mail: hjcx@rcees.ac.cn

网 址: www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

Characterization of Water-soluble Ions in PM _{2.5} of Beijing During 2014 APEC	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4325)
PM _{2.5} Background Concentration at Different Directions in Beijing in 2013	LI Yun-ting, CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4331)
Comparative Analysis on the Improvement of Air Quality in Beijing During APEC	LI Wen-tao, GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, <i>et al.</i> (4340)
Weekend Effect in Distributions of Particulate Matters, Main Gas Pollutants and Aerosol Size in Spring of Jiaying	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (4348)
Influence of Burning Fireworks on Air Quality During the Spring Festival in the Pearl River Delta	ZHAO Wei, FAN Shao-jia, XIE Wen-zhang, <i>et al.</i> (4358)
Characteristic of Mercury Emissions and Mass Balance of the Typical Iron and Steel Industry	ZHANG Ya-hui, ZHANG Cheng, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4366)
Magnetic Response of Dust-loaded Leaves in Parks of Shanghai to Atmospheric Heavy Metal Pollution	LIU Fei, CHU Hui-min, ZHENG Xiang-min (4374)
Characteristics and Resources of Fly Ash Particles in the Snowpack of Jinfo Mountain, Chongqing	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, JING Wei-li, <i>et al.</i> (4381)
Removal of Mixed Waste Gases by a Biotrickling Filter Packed with a Novel Combined Packing Material	MEI Yu, CHENG Zhuo-wei, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (4389)
Low-Concentration CO ₂ Adsorption on Polyaniline/Zeolite Y Composites	LIU Feng-ling, LU Xia, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (4396)
Chemical Characteristics of Atmospheric Wet Deposition in Winter and Its Forestry Canopy Interception Mechanism in Red Soil Hilly Area	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4403)
Dynamic Characteristics of Base Cations During Wet Deposition in Evergreen Broad-leaf Forest Ecosystem	AN Si-wei, SUN Tao, MA Ming, <i>et al.</i> (4414)
Estimation of Diffuse Attenuation Coefficient of Photosynthetically Active Radiation in Xin'anjiang Reservoir Based on Landsat 8 Data	ZHANG Yi-bo, ZHANG Yun-lin, ZHA Yong, <i>et al.</i> (4420)
Spatial Distribution of Stable Isotopes in Particle Organic Matters and Sediments from Baishi Reservoirs	GUO Kai, ZHAO Wen, WANG Shan, <i>et al.</i> (4430)
Response of Phytoplankton Functional Groups to Eutrophication in Summer at Xiaoguan Reservoir	LI Lei, LI Qiu-hua, JIAO Shu-lin, <i>et al.</i> (4436)
Environmental Effect of Substrate Amelioration on Lake; Effects on <i>Phragmites communis</i> Growth and Photosynthetic Fluorescence Characteristics	YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (4444)
Variation Characteristics of Cave Water Hydrogeochemistry in Naduo Cave of Guizhou and Its Implications for Environment Research	SHEN Wei, WANG Jian-li, WANG Jia-lu, <i>et al.</i> (4455)
Response Mechanism of Trace Metals in the Bishuiyan Subterranean River to the Rainfall and Their Source Analysis	ZOU Yan-e, JIANG Ping-ping, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (4464)
Residue Concentration and Distribution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Surface Water from Qiantang River in Hangzhou Section	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i> (4471)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Surface Sediments from Middle Reaches of the Yangtze River	TIAN Qi-chang, TANG Hong-bo, XIA Dan, <i>et al.</i> (4479)
Pollution Characteristics and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Urban Surface Water Sediments from Yongkang	QI Peng, YU Shu-quan, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4486)
Effects of Citric Acid on Activation and Methylation of Mercury in the Soils of Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	QIN Cai-qing, LIANG Li, YOU Rui, <i>et al.</i> (4494)
Impacts of Microorganisms on Degradation and Release Characteristics of Organic Phosphorus in Lake Sediments During Freezing Season	ZUO Le, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (4501)
Sedimentary Phosphorus Forms Under Disturbances and Algae in Taihu Lake	CHEN Jun, LI Da-peng, ZHU Pei-ying, <i>et al.</i> (4509)
Interception Effect of Vegetated Drainage Ditch on Nitrogen and Phosphorus from Drainage Ditches	ZHANG Shu-nan, XIAO Run-lin, LIU Feng, <i>et al.</i> (4516)
Removal of Phosphate by Calcite in Open-System	LI Zhen-xuan, DIAO Jia-yong, HUANG Li-dong, <i>et al.</i> (4523)
Adsorption of Cu on Core-shell Structured Magnetic Particles: Relationship Between Adsorption Performance and Surface Properties	LI Qiu-mei, CHEN Jing, LI Hai-ning, <i>et al.</i> (4531)
Shortcut Nitrosation-Denitrifying Phosphorus Removal Based on High-quality Carbon Source in Combined Process of CAMBR	CHENG Ji-hui, WU Peng, CHENG Chao-yang, <i>et al.</i> (4539)
Simultaneous Biotransformation of Ammonium and Nitrate via Zero-Valent Iron on Anaerobic Conditions	ZHOU Jian, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4546)
Health Risk Assessment of Drinking Water Quality in Tianjin Based on GIS	FU Gang, ZENG Qiang, ZHAO Liang, <i>et al.</i> (4553)
Endotoxin Contamination and Correlation with Other Water Quality Parameters of Groundwater from Self-Contained Wells in Beijing	ZHANG Can, LIU Wen-jun, AO Lu, <i>et al.</i> (4561)
Internal Exposure Levels of PAHs of Primary School Students in Guangzhou	SU Hui, ZHAO Bo, ZHANG Su-kun, <i>et al.</i> (4567)
Construction of Three-Dimensional Isobologram for Ternary Pollutant Mixtures	LIU Xue, LIU Shu-shen, LIU Hai-ling (4574)
Aging Law of PAHs in Contaminated Soil and Their Enrichment in Earthworms Characterized by Chemical Extraction Techniques	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (4582)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Larch Plantation of North China at Different Sampling Scales	YAN Jun-xia, LIANG Ya-nan, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (4591)
Mapping Critical Loads of Heavy Metals for Soil Based on Different Environmental Effects	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (4600)
Stabilization Treatment of Pb and Zn in Contaminated Soils and Mechanism Studies	XIE Wei-qiang, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (4609)
Effects of ZnO Nanoparticles, ZnSO ₄ and Arbuscular Mycorrhizal Fungus on the Growth of Maize	LI Shuai, LIU Xue-qin, WANG Fa-yuan, <i>et al.</i> (4615)
Occurrence Characteristics of Pyrene and Arsenate and Their Interaction in <i>Pteris vittata</i> L.	ZHANG Yu-xiu, MA Xu, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (4623)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Its Uptake by Cabbage	XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, XIE Wen-wen, <i>et al.</i> (4630)
Effect of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhizal on Cd Absorption by Varieties of Tomatoes and Cadmium Forms in Soil	CHEN Yong-qin, JIANG Ling, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4642)
Degradation of Steroidal Hormones by Salt-tolerant <i>Altererythrobacter</i> Strain MH-B5; Degradation Characteristics, Metabolites and Its Immobilization	MA Cong, QIN Dan, SUN Qian, <i>et al.</i> (4651)
Distribution and Diversity of Ammonium-oxidizing Archaea and Ammonium-oxidizing Bacteria in Surface Sediments of Oujiang River	LI Hu, HUANG Fu-yi, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4659)
Effects of Different Altitudes on Soil Microbial PLFA and Enzyme Activity in Two Kinds of Forests	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, MAO Qiao-zhi, <i>et al.</i> (4667)
Effects of Cultivation Soil Properties on the Transport of Genetically Engineered Microorganism in Huabei Plain	ZHANG Jing, LIU Ping, LIU Chun, <i>et al.</i> (4676)
Assessment of Emission and Co-Reduction of PCDD/Fs and PCNs in the Secondary Copper Production Sector	TIAN Ya-jing, JIANG Chen, WU Guang-long, <i>et al.</i> (4682)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年12月15日 第36卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 12 Dec. 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

国内外公开发刊