

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第3期

Vol.35 No.3

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

青岛近海生物气溶胶中可培养微生物浓度及群落多样性的季节变化 祁建华, 武丽婧, 高冬梅, 金川 (801)

基于重庆本地碳成分谱的 PM_{2.5} 碳组分来源分析 张灿, 周志恩, 翟崇治, 白志鹏, 陈刚才, 姬亚芹, 任丽红, 方维凯 (810)

重庆市北碚城区大气污染物浓度变化特征观测研究 徐鹏, 郝庆菊, 吉东生, 张军科, 刘子锐, 胡波, 王跃思, 江长胜 (820)

基于气溶胶光学特性垂直分布的一次浮尘过程分析 王苑, 邓军英, 史兰红, 陈勇航, 张强, 王胜, 徐婷婷 (830)

基于悬铃木叶片重金属累积特性的大气污染分析和评价 刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 汪承润 (839)

典型染整企业定型机废气排放特征及潜在环境危害浅析 徐志荣, 王鹏, 王浙明, 许明珠, 吴剑波, 李嫣 (847)

火电厂大气污染物排放标准实施效果的数值模拟研究 王占山, 潘丽波 (853)

国IV天然气公交车实际道路颗粒物排放特性 楼狄明, 成伟, 冯谦 (864)

稻草和玉米秸秆烟尘中的正构脂肪醇 刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 (870)

河口湿地近地面大气 CO₂ 浓度日变化和季节变化 张林海, 仝川, 曾从盛 (879)

三峡库区库中干流及支流水体夏季二氧化碳分压及扩散通量 李双, 王雨春, 操满, 钱慧君, 许涛, 周子然, 邓兵, 汪福顺 (885)

施用畜禽粪便堆肥的蔬菜地 CH₄、N₂O 和 NH₃ 排放特征 万合锋, 赵晨阳, 钟佳, 葛振, 魏源送, 郑嘉熹, 鄢玉龙, 韩圣慧, 郑博福, 李洪枚 (892)

干湿交替条件下不同晶型铁氧化物对水稻土甲烷排放的影响 张天娇, 汤佳, 庄莉, 熊格生, 刘志, 周顺桂 (901)

长江口邻近海域沉积物中生物硅溶解行为研究 吴彬, 吕伟香, 鲁超, 刘素美 (908)

汾河中下游浮游藻类群落特征及水质分析 王爱爱, 冯佳, 谢树莲 (915)

基于三维荧光光谱-平行因子技术联用的湖泊浮游藻化学分类学研究 陈小娜, 韩秀荣, 苏荣国, 石晓勇 (924)

三峡库区典型消落带土壤及沉积物中溶解性有机质 (DOM) 的紫外-可见光谱特征 李璐璐, 江韬, 闫金龙, 郭念, 魏世强, 王定勇, 高洁, 赵铮 (933)

黄河口湿地表层沉积物中磷赋存形态的分析 于子洋, 杜俊涛, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (942)

太湖和呼伦湖沉积物对磷的吸附特征及影响因素 揣小明, 杨柳燕, 程书波, 陈小锋, 穆云松 (951)

黄浦江溶解有机质光学特性与消毒副产物 NDMA 生成潜能的关系 董倩倩, 张艾, 李咏梅, 陈玲, 黄清辉 (958)

纳米零价铁降解水中多溴联苯醚 (PBDEs) 及降解途径研究 杨雨寒, 徐伟伟, 彭思侃, 卢善富, 相艳, 梁大为 (964)

铸铁还原氯乙酸的影响因素与机制研究 唐顺, 杨宏伟, 王小任, 解跃峰 (972)

磷回收对厌氧/好氧交替式生物滤池蓄磷/除磷的影响 张顺, 田晴, 汤曼琳, 李方 (979)

预处理方法对玉米芯作为反硝化固体碳源的影响 赵文莉, 郝瑞霞, 李斌, 张文怡, 杜鹏 (987)

陶粒 CANON 反应器的接种启动与运行 付昆明, 左早荣, 仇付国 (995)

冬季低温下 MBR 与 CAS 工艺运行及微生物群落特征 黄菲, 梅晓洁, 王志伟, 吴志超 (1002)

烷基多苷促进污泥水解产酸的研究 陈灿, 孙秀云, 黄诚, 沈锦优, 王连军 (1009)

高温厌氧消化中底物浓度对病原指示微生物杀灭的影响 操宏庆, 章菲菲, 李健, 童子林, 胡真虎 (1016)

兰州市大气降尘重金属污染评价及健康风险评价 李萍, 薛粟尹, 王胜利, 南忠仁 (1021)

珠江河口水域有机磷农药水生生态系统风险评价 郭强, 田慧, 毛潇萱, 黄韬, 高宏, 马建民, 吴军年 (1029)

海州湾表层沉积物重金属的来源特征及风险评价 李飞, 徐敏 (1035)

再生水无计划间接补充饮用水的雌激素健康风险 吴乾元, 邵一如, 王超, 孙艳, 胡洪营 (1041)

瓦埠湖流域庄集镇农田土壤氮磷分布及流失风险评估 李如忠, 邹阳, 徐晶晶, 丁贵珍 (1051)

三峡库区消落带土壤汞形态分布与风险评估 张成, 陈宏, 王定勇, 孙荣国, 张金洋 (1060)

基于棕地的居民小区土壤重金属健康风险评价 陈星, 马建华, 李新宁, 刘德新, 李一蒙 (1068)

干旱区绿洲土壤氟污染生态风险评估研究 薛粟尹, 李萍, 王胜利, 南忠仁 (1075)

缙云山 3 种典型森林降雨过程及其氮素输入 孙素琪, 王玉杰, 王云琦, 张会兰, 于雷, 刘婕 (1081)

三峡库区兰陵溪小流域土地利用及景观格局对氮磷输出的影响 韩黎阳, 黄志霖, 肖文发, 田耀武, 曾立雄, 吴东 (1091)

黄土丘陵区县域农田土壤近 30 年有机碳变化及影响因素研究: 以甘肃庄浪县为例 师晨迪, 许明祥, 邱宇洁, 张志霞, 张晓伟 (1098)

天然林土壤有机碳及矿化特征研究 杨添, 戴伟, 安晓娟, 庞欢, 邹建美, 张瑞 (1105)

不同土壤湿润速率下中性紫色土磷素淋溶的动态变化 张思兰, 石孝均, 郭涛 (1111)

硫脲对酸性红壤 pH 值与金属元素有效性的影响 杨波, 王文, 曾清如, 周细红 (1119)

6 种陕北适生豆科植物生长对原油污染土壤的响应 山宝琴, 张永涛, 曹巧玲, 康振妍, 李淑媛 (1125)

基于 N:P 化学计量特征的高寒草甸植物养分状况研究 张仁懿, 徐当会, 陈凌云, 王刚 (1131)

人工生物结皮的发育演替及表土持水特性研究 吴丽, 陈晓国, 张高科, 兰书斌, 张德禄, 胡春香 (1138)

农田土壤自养微生物碳同化潜力及其功能基因数量、关键酶活性分析 陈晓娟, 吴小红, 简燕, 袁红朝, 周萍, 葛体达, 童成立, 邹冬生, 吴金水 (1144)

中亚热带马尾松林凋落物分解过程中的微生物与酶活性动态 宋影, 辜夕容, 严海元, 毛文韬, 吴雪莲, 万宇轩 (1151)

苏南地区香樟树皮中有机氯农药 (OCPs) 的污染水平及来源解析 周丽, 张秀蓝, 杨文龙, 李玲玲, 史双昕, 张利飞, 董亮, 黄业茹 (1159)

UV-B 辐射增强与 1,2,4-三氯苯污染复合胁迫对青菜生长的影响 刘翠英, 樊建凌, 徐向华 (1164)

Cu 和 Cd 胁迫下接种外生菌根真菌对油松根际耐热蛋白固持重金属能力的影响 张英伟, 柴立伟, 王东伟, 汪杰, 黄艺 (1169)

对硝基苯胺耐盐降解菌 S8 的筛选及特性研究 宋彩霞, 邓新平, 厉阆, 肖伟 (1176)

克雷伯氏菌生产絮凝剂 M-C11 的培养优化及其在污泥脱水中的应用 刘杰伟, 马俊伟, 刘彦忠, 杨娅, 岳东北, 王洪涛 (1183)

铅元素人为循环环境释放物形态分析 梁静, 毛建素 (1191)

污染排放与环境质量关系模型构建与应用 李名升, 孙媛, 陈远航, 张建辉 (1198)

微囊藻毒素微生物降解途径与分子机制研究进展 闫海, 王华生, 刘晓璐, 尹春华, 许倩倩, 吕乐, 马万彪 (1205)

《环境科学》征订启事 (809) 《环境科学》征稿简则 (819) 信息 (971, 978, 1050, 1175)

珠江河口水域有机磷农药水生生态系统风险评价

郭强¹, 田慧¹, 毛潇萱¹, 黄韬¹, 高宏^{1*}, 马建民^{1,2}, 吴军年¹

(1. 兰州大学资源环境学院, 兰州 730000; 2. 加拿大环境部科学技术局, 多伦多 M3H 5T4)

摘要: 通过风险商法和概率风险法评价了珠江河口水域中甲拌磷、敌敌畏及乙拌磷等 9 种有机磷农药对硅藻、水蚤及糠虾等 8 种水生生物的生态风险。风险商法评价结果表明, 9 种有机磷农药混合物总风险商为: 糠虾处于高风险中水平, 水蚤和摇蚊在中等风险水平, 硅藻、牡蛎、鲤鱼、鲶鱼和鳗鱼均处于低风险水平; 甲拌磷对风险值的贡献最大, 且对每种生物都有影响。概率风险法结果表明, 以 HC_5 为参考值评估总风险商时, 95% 置信水平下的 HC_5 比 50% 置信水平的 HC_5 保守, 50% 置信水平的 HC_5 中乐果的 HC_5 最大, 毒死蜱的最小; 丰水期 9 种有机磷农药混合物总风险比枯水期农药混合物总风险大, 甲拌磷对总风险贡献最大。单一污染物的概率风险表明, 甲拌磷和乙拌磷对珠江河口水域中 10% 以上的生物都有危害; 而 9 种有机磷农药混合物的概率风险表现为: 丰水期大于枯水期, 均大于 5%, 说明超过了保护 95% 生物的安全阈值。

关键词: 有机磷农药; 珠江河口水域; 水生生态风险评价; 风险商法; 概率风险评价法

中图分类号: X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)03-1029-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.03.030

Ecological Risk Assessment of Organophosphorus Pesticides in Aquatic Ecosystems of Pearl River Estuary

GUO Qiang¹, TIAN Hui¹, MAO Xiao-xuan¹, HUANG Tao¹, GAO Hong¹, MA Jian-min^{1,2}, WU Jun-nian¹

(1. College of Resource and Environment, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China, 2. Science and Technology Branch, Environment Canada, Toronto M3H 5T4, Canada)

Abstract: The risk quotient method and a probabilistic risk assessment method were applied for assessing aquatic ecological risk of nine organophosphorus pesticides, including thimet, dichlorovos, disulfoton, dimethoate, dimethyl parathion, chlorpyrifos, ethoprophos, sumithion and malathion on eight aquatic organisms in the Pearl River Estuary. Results using the risk quotient method revealed that the risk level of opossum shrimp was the highest among eight aquatic organisms of the Pearl River Estuary. The risk of water flea and midge was in medium level, followed by the rest six aquatic organisms, including diatom, oyster, carp, catfish and eel, which were in the low risk by the examined organophosphorus pesticides. It was found that thimet made the largest contribution to total aquatic ecological risk among nine organophosphorus pesticides to every organism. The results from probabilistic risk assessment showed that the total ecological risk in high water period was higher than that in low water period determined by the HC_5 under the 95% confidence level. The largest contribution of thimet to total aquatic ecological risk subject to the HC_5 in 50% confidence level was regarded as the toxic reference value. The probabilistic risk of a single contaminant showed that thimet and disulfoton were harmful to exceeded 10% organisms in the estuarine. The probabilistic risk of nine pesticides mixture in high water period was also higher than that in low water period, and both risks were greater than 5% which exceeded safety threshold for 95% organisms in the Pearl River Estuary.

Key words: organophosphorus pesticides; Pearl River Estuary; aquatic ecological risk assessment; risk quotient method; probabilistic risk assessment method

农药对农业生产有着很大贡献, 每年全球使用的农药近 250 万 t, 但只有不到 0.1% 的农药停留在作物上发生效用, 其余大部分则残留在环境中^[1,2], 并且通过降雨、淋溶等途径进入水体环境^[3-5], 对人和生物造成严重危害, 引起各国的广泛关注^[6]. 传统的有机氯农药对环境危害较大, 逐渐被易降解、毒性低有机磷农药替代, 但在有机磷农药中一些种类的农药如甲胺磷, 对硫磷, 氧化乐果等都属于高毒性的有机污染物, 而且这些高毒品种在环境中的停留时间也是比较长的; 另外, 有些有机磷农药的降解产物毒性要远远高于母体, 更容易在环境中进行

迁移, 因而会对环境造成很高的危害^[7].

生态风险评价是定量研究污染物对生态环境危害的重要手段。目前, 生态风险评价的方法很多, 风险商法法是风险评价中常用的一种定量评价的方法, 经常用于特定生物暴露于某种环境污染物的初级筛选评价^[8], 但很难反映真实的复杂环境造成的生态风险^[9]. 近年来, 很多学者运用概率风险评价

收稿日期: 2013-07-13; 修订日期: 2013-09-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(40971267/D010903); 国家人力资源和社会保障部留学人员优秀科技项目

作者简介: 郭强(1988~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为干旱区持久性有机污染物区域环境过程。

* 通讯联系人, E-mail: honggao@lzu.edu.cn

方法来进行风险评估,美国 EPA 也建议采纳此方法^[10],王斌等^[11]利用概率风险评价对淮河江苏段水体中有机氯农药进行了生态风险评估,而 Solomon 等^[12]对农业化学品的生态风险评估也是利用的概率方法,并得到了很好的结果。

近年来,随着珠江三角洲工农业的迅速发展和人口的增长,环境质量日趋恶化,生态平衡受到严重威胁和破坏,对于该地区污染状况的报道中常见污染物有重金属、有机氯农药、多溴联苯醚等^[13,14],有机磷农药的污染水平却很少见,而且对于这些污染物的风险评估多集中于人体健康风险评估,对于生态风险鲜有报道。本研究结合周繁等^[15]对珠江河口有机磷农药污染水平的报道,利用风险商法和

概率风险评价法两种生态风险评估方法分析有机磷农药混合物对珠江口水生生物的风险水平,以期对珠江河口水生生态系统和人体健康保护提供参考。

1 材料与方法

1.1 数据收集

本研究使用的珠江河口水体中 9 种常见有机磷农药的污染数据见表 1,分别于 2010 年丰水期与枯水期在珠江河口 20 个采样点采集样品,具体的样品采集及分析见文献^[15]。从表 1 中可以看出,甲拌磷、敌敌畏和乙拌磷是主要的污染物,丰水期的甲基对硫磷和枯水期的毒死蜱为未检出,杀螟硫磷和马拉硫磷在丰水期和枯水期均为未检出。

表 1 珠江河口水体中 9 种有机磷农药平均污染水平/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Average concentration of nine organophosphorus pesticides in water of the Pearl River Estuary/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

时间	甲拌磷	敌敌畏	乙拌磷	乐果	甲基对硫磷	毒死蜱	灭线磷	杀螟硫磷	马拉硫磷
丰水期	9.48	0.15	0.79	0.14	0 ¹⁾	0.003	0.009	0	0
枯水期	2.45	1.88	0.41	0.018	0.003	0	0.029	0	0

1)0 表示为未检出

根据戴娟^[16]和高原等^[17]对珠江口水体中的藻类、浮游动物的研究表明,硅藻为珠江河口的优势藻类;桡足类为常见浮游动物,其中水蚤为代表生物。鲤鱼和鲢鱼是我国常见鱼种;而摇蚊是我国广泛分布的一种昆虫,其幼虫是水质生物检测的重要物种之一^[18];由于珠江河口是咸淡水区域,因此选择鳗鱼、糠虾和牡蛎为咸水生物,原则上评价对象要选择当地种,但由于毒性数据的缺乏,只能选择具有代表性的生物种类。因此,本研究中所评价的具体种属为:硅藻(*Skeletonema costatum* Diatom),水蚤(*Daphnia magna* Water Flea),糠虾(*Americamysis*

bahia Opossum Shrimp),牡蛎(*Crassostrea virginica* Virginia Oyster),摇蚊(*Aedes aegypti* Yellow Fever Mosquito),鲤鱼(*Cyprinus carpio* Common Carp),鳗鱼(*Clarias batrachus* Walking Catfish),鳗鱼(*Anguilla anguilla* Common Eel)。这些生物的毒性数据来源于美国 EPA ECOTOX 数据库(http://cfpub.epa.gov/ecotox/quick_query.htm),搜集有机磷农药对水生生物的 24~96 h 的急性数据,主要为 LC_{50} 值,在没有 LC_{50} 值时用 EC_{50} 值;对于同一个物种或同一个终点有多个毒性值可用时,使用几何平均值^[19],见表 2。

表 2 8 种生物有机磷农药的毒性数据/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 2 Selected toxicity reference values of organophosphorus pesticides for 8 organisms/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

生物	甲拌磷	敌敌畏	乙拌磷	乐果	甲基对硫磷	毒死蜱	灭线磷	杀螟硫磷	马拉硫磷
硅藻	1 300	— ¹⁾	—	10 824	5 300	291	5 650	—	—
水蚤	23.7	35	23.8	1 820	19.5	0.23	1 377	10.2	1.9
糠虾	0.72	28.9	100	15 000	0.67	0.04	14.8	—	4.7
牡蛎	640	31 620	2 297	113 000	12 000	10 200	3 700	690	3 008
摇蚊	108	17.2	81.57	481	1.58	—	—	4 783.3	—
鲤鱼	8 600	340	1 077	26 110	2 707	8	340	1 655	1 900
鳗鱼	800	3 698	631.6	5 701	20 000	—	—	3 750	12 000
鳗鱼	—	852	37	—	4 120	540	—	200	—

1) — 表示没有毒性数据

1.2 风险评估方法

1.2.1 风险商值法

本研究利用风险商值法评价 9 种有机磷农药混

合物对每种生物的风险,先计算单一污染物对一种生物的风险,而农药混合物对一种生物的风险商为各污染物风险商的加和。单一污染物的风险评估具

体方法如下:

$$RQ_i = \frac{MEC_i}{TRV_i} \quad (1)$$

式中, RQ_i 为污染物 i 的风险商; MEC_i 为污染物 i 的环境介质浓度; TRV_i 为污染物 i 的毒性参考值, 一般为 LC_{50} 或 EC_{50} .

1.2.2 概率风险评价法

概率风险评价法是另一种定量评估生态风险的方法, 一般的做法是由暴露浓度和毒性数据的概率密度函数重叠面积得到的结果直接反映污染物在研究区域内的风险状况, 并通过联合概率曲线说明生物物种受到危害的程度. 本研究将在 Kooijman^[20] 提出的种群敏感度模型 (species sensitivity distribution, SSD) 基础上结合 Van Straalen 等^[21] 的反推方法评估珠江口水体中有机磷农药的生态风险, 具体做法如下, 首先计算 HC_5 , 即 95% 保护水平下的安全阈值, 并以此作为参考值计算风险商, 反映污染物对 8 种生物的危害大小, HC_5 计算如下:

$$HC_5 = \exp(x_m - k_1 s_m) \quad (2)$$

式中, HC_5 为 5% 的危害浓度; x_m 为毒性数据对数转化后的平均值; s_m 为毒性数据对数转化后的标准差; k_1 为外推常数^[22].

每种农药的概率风险为^[23]:

$$\Phi = \left\{ 1 + \exp \left[\frac{x_m - \ln c}{k_1 / \ln(95/5) s_m} \right] \right\}^{-1} \quad (3)$$

式中, Φ 为水生生态系统的概率风险; c 为污染物环境介质的浓度.

根据容斥原理并且不考虑污染物之间的拮抗与协同作用, 则多种农药混合物的生态风险概率为^[23]:

$$\begin{aligned} \Phi[A_1 + A_1 + \dots + A_n] &= \sum_{i=1}^n \Phi[A_i] - \\ &\sum_{i_1 < i_2} \Phi[A_{i_1} A_{i_2}] + (-1)^{r+1} \sum_{i_1 < i_2 < \dots < i_r} \Phi[A_{i_1} A_{i_2} \dots A_{i_r}] + \\ &(-1)^{n+1} \Phi[A_1 A_2 \dots A_n] \end{aligned} \quad (4)$$

2 结果与讨论

2.1 风险商评价

通过表 1 中各种农药的污染数据和表 2 中 8 种生物的毒性数据利用式 (1) 计算各种农药的风险商, 并求和得到农药混合物对 8 种生物的生态风险, 见图 1. 8 种生物的农药混合物风险中, 最大为糠虾的风险值高达 16.7, 其次为水蚤为 0.63, 最小的为鲤鱼为 0.0089, 而硅藻的总风险商只比鲤鱼的稍高一些为 0.0092. 根据 Sánchez Bayo 等^[24] 的报道, 当

$RQ > 1$ 时, 为高风险; 当 $0.1 \leq RQ < 1$ 时, 为中等风险; 当 $0.001 \leq RQ < 0.1$ 时, 为低风险. 由此可知, 糠虾处于高风险中; 水蚤和摇蚊在中等风险, 但是水蚤的风险值接近于 1, 处于相对较高的风险中了; 其余生物硅藻、牡蛎、鲤鱼、鲶鱼和鳊鱼都处于低风险中, 而硅藻和鲤鱼的风险值都低于 0.01, 说明检测的农药对他们的影响很小.

一般来说, 污染物对低等生物的影响要高于其对高等生物的影响^[25], 但硅藻的风险值却很低, 这可能是由于本研究检测的农药均为有机磷杀虫剂, 这类农药的致毒机理是抑制害虫体内的胆碱酯酶的活性, 破坏神经系统的正常传导, 引起一系列神经系统中毒症直到死亡^[26]; 对于硅藻没有复杂的神经系统, 因此有机磷杀虫剂对它影响不大, 而桡足类的水蚤、甲壳类的糠虾及昆虫类的摇蚊是有神经系统的相对较高级生物, 会受到有机磷杀虫剂影响较大; 其中对糠虾的影响是所有生物中最大的, 从表 2 中糠虾的毒理数据也可以看出, 其毒性数据基本都处于较小范围, 说明糠虾对污染物较敏感. 牡蛎是生活在温带或热带各大洋沿岸水域中的软体动物, 软体动物对污染物的富集能力大^[27], 这可能导致有机磷农药对其风险较低. 3 种鱼类的风险值均较低, 其中鳊鱼在三者中的风险值相对较高, 是因为鳊鱼生活在水质清洁的咸淡水域中, 对生活环境要求较高.

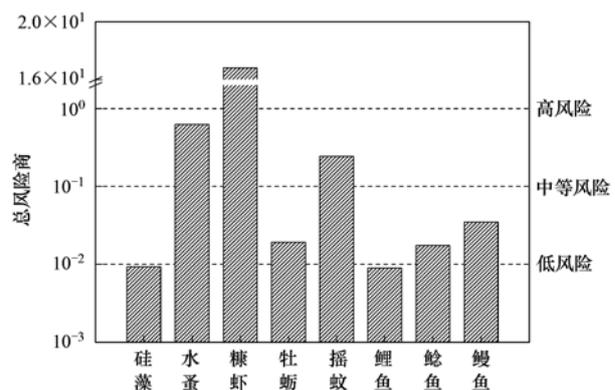


图 1 基于风险商的 9 种农药混合物的水生生态风险

Fig. 1 Aquatic ecological risk of nine pesticides mixture based on the risk question method

9 种有机磷农药对 8 种生物总生态风险的贡献百分比见图 2, 甲拌磷对硅藻、水蚤、糠虾、牡蛎和鲶鱼生态风险商的贡献率高达 80% 以上, 其中对硅藻的贡献率几乎是 100%, 而对于其他生物都有一定的贡献率, 说明甲拌磷在珠江河口水生生态中的生物危害最大; 摇蚊的生态风险商中主要是甲拌磷

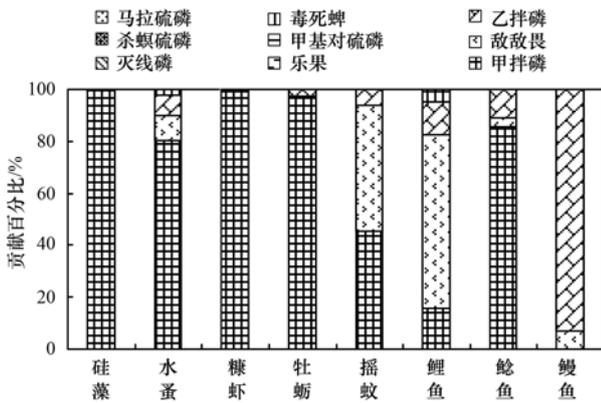


图2 各种有机磷农药对总水生生态风险的贡献百分比(基于毒性参考值)

Fig. 2 Contribution of different organophosphorus pesticides in total aquatic ecological risk (based on toxicant reference values)

和敌敌畏;对鳊鱼风险商贡献率最大的是乙拌磷,是因为缺少甲拌磷的毒性数据.

2.2 概率风险

2.2.1 9种农药的HC₅及以HC₅为参考值的风险商
利用式(2)计算得到两种不同置信水平的HC₅,见表3,对比两种结果可以看出,95%置信水平

下的HC₅比50%置信水平下的HC₅小1~5个数量级,尤其是马拉硫磷要相差5个数量级,而乐果的则只差1个数量级,若以95%置信水平下的HC₅计算生态风险商时要保守一些,因此,用50%置信水平下的HC₅评估生态风险.在50%置信水平下的HC₅中,乐果的HC₅最大,达到340 μg·L⁻¹,说明乐果对生物的潜在危害是比较小的;毒死蜱的HC₅最小,值为3.59 × 10⁻³,其潜在危害较大.

为了进一步说明每种有机磷农药对珠江河口生态系统生物的影响,以HC₅为参考值利用式(1)计算生态风险商,见表4.结果表明,丰水期的风险商范围为0~12.05,而枯水期的则为0~3.12,丰水期的总风险商比枯水期的总风险商大,这可能是由于丰水期使用大量的农药,导致水体的农药污染浓度丰水期的比枯水期的大.从风险商的贡献百分比图(见图3)可知,丰水期与枯水期的总风险商占比例较大的是甲拌磷,说明甲拌磷对生态系统中的生物危害较大.敌敌畏、乙拌磷和乐果在丰水期的污染水平均大于毒死蜱,但毒死蜱对生态风险的贡献要大于这3种农药,说明生态风险不仅与污染水平有关,也与污染物的毒性大小有关.

表3 9种有机磷农药的HC₅

Table 3 HC₅ of nine organophosphorus pesticides

农药	x _m /μg·L ⁻¹	s _m /μg·L ⁻¹	m	k ₁		HC ₅ /μg·L ⁻¹	
				95% 置信区间	50% 置信区间	95% 置信区间	50% 置信区间
甲拌磷	5.27	3.10	7	3.59	1.78	2.90 × 10 ⁻³	7.87 × 10 ⁻¹
敌敌畏	5.85	2.81	7	3.59	1.78	1.46 × 10 ⁻²	2.34 × 10 ⁰
乙拌磷	5.28	5.28	7	3.59	1.78	3.43 × 10 ⁻¹	8.42 × 10 ⁰
乐果	9.01	1.78	7	3.59	1.78	1.35 × 10 ¹	3.40 × 10 ²
甲基对硫磷	5.89	4.19	8	3.37	1.76	2.62 × 10 ⁻⁴	2.55 × 10 ⁻¹
毒死蜱	3.10	4.82	6	3.93	1.81	1.31 × 10 ⁻⁷	3.59 × 10 ⁻³
灭线磷	6.36	2.48	5	4.47	1.85	8.68 × 10 ⁻³	5.81 × 10 ⁰
杀螟硫磷	6.38	2.30	6	3.93	1.81	6.90 × 10 ⁻²	9.11 × 10 ⁰
马拉硫磷	5.43	4.03	5	4.47	1.85	3.48 × 10 ⁻⁶	1.33 × 10 ⁻¹

表4 以HC₅为参考值的9种有机磷农药风险商

Table 4 Risk quotient for nine organophosphorus pesticides using HC₅ as the reference value

时间	甲拌磷	敌敌畏	乙拌磷	乐果	甲基对硫磷	毒死蜱	灭线磷	杀螟硫磷	马拉硫磷	总风险商
丰水期	1.21 × 10 ¹	6.23 × 10 ⁻²	9.38 × 10 ⁻²	4.00 × 10 ⁻⁴	0	8.35 × 10 ⁻¹	1.55 × 10 ⁻³	0	0	1.30 × 10 ¹
枯水期	3.12 × 10 ⁰	8.03 × 10 ⁻¹	4.87 × 10 ⁻²	5.29 × 10 ⁻⁵	1.33 × 10 ⁻²	0	4.90 × 10 ⁻³	0	0	3.99 × 10 ⁰

2.2.2 概率风险评价

通过式(3)与式(4)计算得到的各种农药的概率风险值,由于杀螟硫磷和马拉硫磷的污染水平为未检出,在此处不做讨论.从图4可知,各种农药的风险概率都不超过20%,甲拌磷和乙拌磷的丰水期风险值都高于枯水期风险值且都超过了10%;敌敌

畏、乐果、甲基对硫磷、毒死蜱和灭线磷的风险值都没有超过5%,说明以单一农药对珠江河口水生生态系统进行生态风险评价,这几种农药都没有超过5%的生物受到危害的安全阈值,而甲拌磷和乙拌磷对珠江河口10%以上的生物都有危害.

对农药混合物的概率风险评价结果见图5,丰

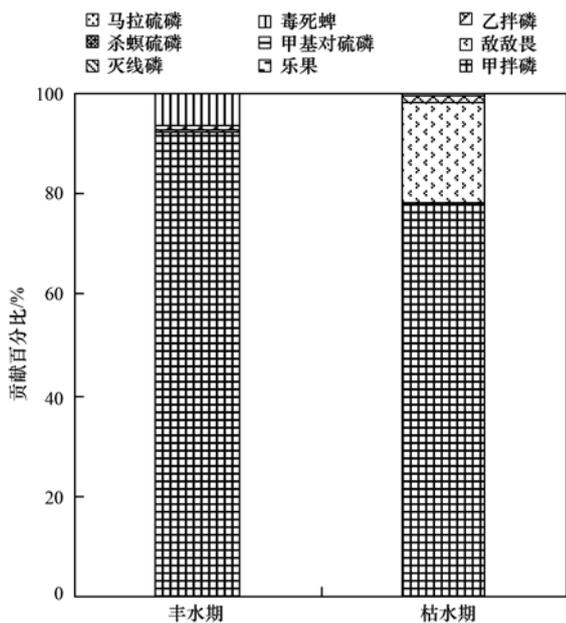


图3 各种农药的总水生生态风险的贡献百分比(基于 HC₅)

Fig. 3 Contribution of different pesticides to total aquatic ecological risk (based on HC₅)

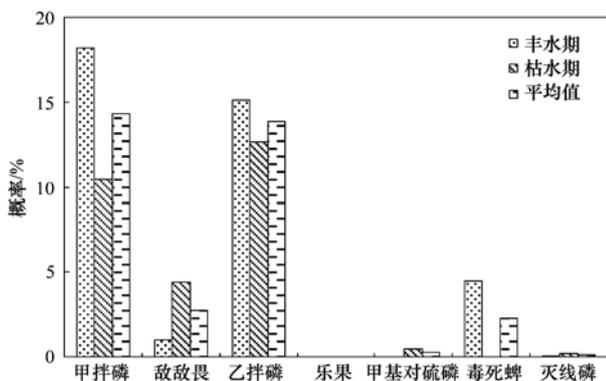


图4 丰水期与枯水期单一农药的概率风险

Fig. 4 Probabilistic risk of single pesticide in high water season and low water season

水期的概率风险值达到了 21.85%，而枯水期的达到了 13.91%，均超过了 5% 的限值；丰水期的风险值大可能是由于夏季在农田和水中使用了大量的农药。对比单一污染物的概率风险值，混合物的概率风险值均比其大，若在计算混合物的生态风险概率值时，不包括甲拌磷和乙拌磷两种风险值高的农药，则丰水期与枯水期的概率风险值分别为 5.77% 和 11.30%，说明虽然单一污染物的生态风险可能不会超过安全阈值，但混合物的也许会超过。

3 结论

(1) 商值法评价有机磷农药混合物的总风险

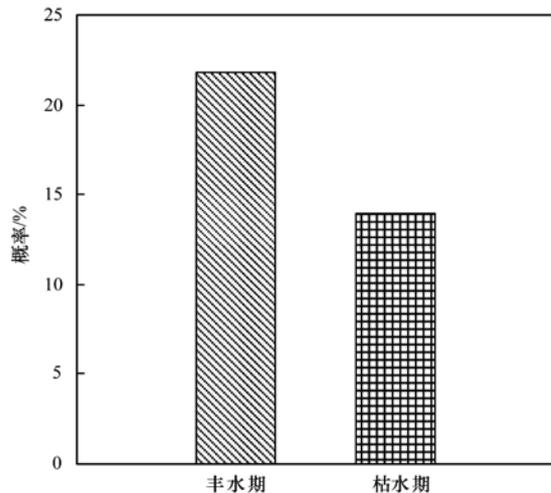


图5 丰水期与枯水期农药混合物的概率风险

Fig. 5 Probabilistic risk of pesticide mixture in high water season and low water season

商, 糠虾处于高风险水平; 水蚤和摇蚊在中等风险水平; 其余生物硅藻、牡蛎、鲤鱼、鲶鱼和鳗鱼都处于低风险水平; 甲拌磷在珠江河口水生生态中的生物危害最大。

(2) 概率风险中, 单一污染物中的甲拌磷和乙拌磷及农药混合物在丰水期与枯水期的风险值均超过了 5% 的限值。另外, 虽然单一污染物的生态风险可能不会超过安全阈值, 但混合物的也许会超过。

(3) 无论是商值法还是概率风险法评价有机磷农药对珠江河口水体生物的风险, 丰水期的风险值均大于枯水期的风险值。

参考文献:

[1] Pimentel D. Amounts of pesticides reaching target pests- Environmental impacts and ethics [J]. Journal of Agricultural and Environmental Ethics, 1995, 8(1) : 17-29.

[2] Thwih M. Current status of pesticides residue analysis of food in relation with food safety. [EB/OL]. <http://www.fao.org/DOCREP/MEETING/004/AB429E.HTM>. 2002-01-28.

[3] Vryzas Z, Vassiliou G, Alexoudis C, et al. Spatial and temporal distribution of pesticide residues in surface waters in northeastern Greece [J]. Water Research, 2009, 43(1) : 1-10.

[4] Willis G H, McDowell L L. Pesticides in agricultural runoff and their effects on downstream water quality [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1982, 1(4) : 267-279.

[5] 宋宁慧, 卜元卿, 单正军. 农药对地表水污染状况研究概述 [J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(Z1) : 49-57.

[6] 程燕, 周军英, 单正军. 美国农药水生生态风险评价研究进展 [J]. 农药学报, 2005, 7(4) : 293-298.

[7] 杨璇. 珠江河口水体常见有机磷农药污染现状及风险评价 [D]. 广州: 暨南大学, 2011. 6-7.

[8] Newsted J L, Nakanishi J, Cousins I, et al. Predicted

- distribution and ecological risk assessment of a "segregated" hydrofluoroether in the Japanese environment [J]. *Environmental Science and Technology*, 2002, **36**(22): 4761-4769.
- [9] Hernando M D, Mezcuca M, Fernandez A R, *et al.* Environmental risk assessment of pharmaceutical residues in wastewater effluents, surface waters and sediments[J]. *Talanta*, 2006, **69**(2): 334-342.
- [10] EPA/630/R- 97/001, Guiding Principles for Monte Carlo Analysis [S].
- [11] 王斌, 余刚, 郁亚娟, 等. 淮河江苏段水体有机氯农药生态风险评价[A]. 见: 余刚. 持久性有机污染物论坛 2006 暨第一届持久性有机污染物全国学术研讨会论文集[C]. 北京: 清华大学出版社, 2006. 424-428.
- [12] Solomon K, Giesy J, Jones P. Probabilistic risk assessment of agrochemicals in the environment [J]. *Crop Protection*, 2000, **19**(8): 649-655.
- [13] Xiao R, Bai J H, Gao H F, *et al.* Distribution and contamination assessment of heavy metals in water and soils from the college town in the Pearl River Delta, China [J]. *Clean-Soil, Air, Water*, 2012, **40**(10): 1167-1173.
- [14] Guan Y F, Wang J Z, Ni H G, *et al.* Organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in riverine runoff of the Pearl River Delta, China: assessment of mass loading, input source and environmental fate [J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(2): 618-624.
- [15] 周慙, 石雷, 李取生, 等. 珠江河口水体有机磷农药的含量与季节变化[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(2): 32-318.
- [16] 戴娟. 珠江河口浮游植物群落特征研究[D]. 广州: 广州海洋大学, 2008. 47-48.
- [17] 高原, 赖子尼, 王超, 等. 珠江口浮游动物分布特征研究[J]. *中国水产科学*, 2008, **15**(2): 260-268.
- [18] 王俊才, 方志刚, 鞠复华, 等. 摇蚊幼虫分布及其与水质的关系[J]. *生态学杂志*, 2000, **19**(4): 27-37.
- [19] Wang B, Yu G, Huang J, *et al.* Development of species sensitivity distributions and estimation of HC₅ of organochlorine pesticides with five statistical approaches [J]. *Ecotoxicology*, 2008, **17**(8): 716-724.
- [20] Kooijman S A L M. A safety factor for LC₅₀ values allowing for differences in sensitivity among species [J]. *Water Research*, 1987, **21**(3): 269-276.
- [21] Van Straalen N M, Denneman C A J. Ecotoxicological evaluation of soil quality criteria [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 1989, **18**(3): 241-251.
- [22] Aldenberg T, Slob W. Confidence limits for hazardous concentrations based on logistically distributed NOEC toxicity data [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1993, **25**(1): 48-63.
- [23] Steen R J C A, Leonards P E G, Brinkman U A T, *et al.* Ecological risk assessment of agrochemicals in European estuaries [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1999, **18**(7): 1574-1581.
- [24] Sánchez-Bayo F, Baskaran S, Kennedy I R. Ecological relative risk (EcoRR): another approach for risk assessment of pesticides in agriculture [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2002, **91**(1-3): 37-57.
- [25] Qu C S, Chen W, Bi J, *et al.* Ecological risk assessment of pesticide residues in Taihu Lake wetland, China [J]. *Ecological Modelling*, 2011, **222**(2): 287-292.
- [26] 杨先乐, 湛嘉, 黄艳平. 有机磷农药对水生生物毒性影响的研究进展[J]. *上海水产大学学报*, 2002, **11**(4): 378-382.
- [27] 张少娜. 经济贝类对重金属的生物富集动力学特性的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2003. 8-9.

CONTENTS

Concentration and Community Diversity of Microbes in Bioaerosols in the Qingdao Coastal Region	QI Jian-hua, WU Li-jing, GAO Dong-mei, <i>et al.</i> (801)
Carbon Source Apportionment of PM _{2.5} in Chongqing Based on Local Carbon Profiles	ZHANG Can, ZHOU Zhi-en, ZHAI Chong-zhi, <i>et al.</i> (810)
Observation of Atmospheric Pollutants in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	XU Peng, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (820)
A Floating-Dust Case Study Based on the Vertical Distribution of Aerosol Optical Properties	WANG Yuan, DENG Jun-ying, SHI Lan-hong, <i>et al.</i> (830)
Analysis and Assessment of Atmospheric Pollution Based on Accumulation Characterization of Heavy Metals in <i>Platanus acerifolia</i> Leaves	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> (839)
Study on the Emission Characteristics and Potential Environment Hazards of the Heat-setting Machine of the Typical Dyeing and Finishing Enterprise	XU Zhi-rong, WANG Peng, WANG Zhe-ming, <i>et al.</i> (847)
Implementation Results of Emission Standards of Air Pollutants for Thermal Power Plants; a Numerical Simulation	WANG Zhan-shan, PAN Li-bo (853)
On Road Particle Emission Characteristics of a Chinese Phase IV Natural Gas Bus	LOU Di-ming, CHENG Wei, FENG Qian (864)
Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanols in Smoke from Rice and Maize Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, <i>et al.</i> (870)
Diurnal and Seasonal Variations of Surface Atmospheric CO ₂ Concentration in the River Estuarine Marsh	ZHANG Lin-hai, TONG Chuan, ZENG Cong-sheng (879)
Partial Pressure and Diffusion Flux of Dissolved Carbon Dioxide in the Mainstream and Tributary of the Central Three Gorges Reservoir in Summer	LI Shuang, WANG Yu-chun, CAO Man, <i>et al.</i> (885)
Emission of CH ₄ , N ₂ O and NH ₃ from Vegetable Field Applied with Animal Manure Composts	WAN He-feng, ZHAO Chen-yang, ZHONG Jia, <i>et al.</i> (892)
Effects of Different Iron Oxides on Methane Emission in Paddy Soil as Related to Drying/Wetting Cycles	ZHANG Tian-jiao, TANG Jia, ZHUANG Li, <i>et al.</i> (901)
Study on the Dissolution Behavior of Biogenic Silica in the Changjiang Estuary Adjacent Sea	WU Bin, LÜ Wei-xiang, LU Chao, <i>et al.</i> (908)
Phytoplankton Community Structure and Assessment of Water Quality in the Middle and Lower Reaches of Fenhe River	WANG Ai-ai, FENG Jia, XIE Shu-lian (915)
Lake Algae Chemotaxonomy Technology Based on Fluorescence Excitation Emission Matrix and Parallel Factor Analysis	CHEN Xiao-na, HAN Xiu-rong, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (924)
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i> (933)
Distribution of Phosphorus in Surface Sediments from the Yellow River Estuary Wetland	YU Zi-yang, DU Jun-tao, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (942)
Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus Adsorption on Sediment in Lake Taihu and Lake Hulun	CHUAI Xiao-ming, YANG Liu-yan, CHENG Shu-bo, <i>et al.</i> (951)
Linking Optical Properties of Dissolved Organic Matter with NDMA Formation Potential in the Huangpu River	DONG Qian-qian, ZHANG Ai, LI Yong-mei, <i>et al.</i> (958)
Reductive Debromination of Polybrominated Diphenyl Ethers in Aquifer by Nano Zero-valent Iron: Debromination Kinetics and Pathway	YANG Yu-han, XU Wei-wei, PENG Si-kan, <i>et al.</i> (964)
Influencing Factors and Reaction Mechanism of Chloroacetic Acid Reduction by Cast Iron	TANG Shun, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> (972)
Effect of Phosphorus Recovery on Phosphorous Bioaccumulation/Harvesting in an Alternating Anaerobic/Aerobic Biofilter System	ZHANG Shun, TIAN Qing, TANG Man-lin, <i>et al.</i> (979)
Effects of Pretreatment Methods on Corncob as Carbon Source for Denitrification	ZHAO Wen-li, HAO Rui-xia, LI Bin, <i>et al.</i> (987)
Start-Up by Inoculation and Operation of a CANON Reactor with Haydite as the Carrier	FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, QIU Fu-guo (995)
Diversity of Operation Performance and Microbial Community Structures in MBRs and CAS Processes at Low Temperature	HUANG Fei, MEI Xiao-jie, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1002)
Enhanced Hydrolysis and Acidification of Waste Activated Sludge by Alkyl Polyglycosides	CHEN Can, SUN Xiu-yun, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1009)
Effect of Substrate Concentration on Pathogen Indicators Inactivation During Thermophilic Anaerobic Digestion	CAO Hong-qing, ZHANG Fei-fei, LI Jian, <i>et al.</i> (1016)
Pollution Evaluation and Health Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Lanzhou	LI Ping, XUE Su-yin, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1021)
Ecological Risk Assessment of Organophosphorus Pesticides in Aquatic Ecosystems of Pearl River Estuary	GUO Qiang, TIAN Hui, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (1029)
Source Characteristics and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Surface Sediments of Haizhou Bay	LI Fei, XU Min (1035)
Health Risk Induced by Estrogens During Unplanned Indirect Potable Reuse of Reclaimed Water from Domestic Wastewater	WU Qian-yuan, SHAO Yi-ru, WANG Chao, <i>et al.</i> (1041)
Distribution Characteristics and Erosion Risk of Nitrogen and Phosphorus in Soils of Zhuangnu Town in Lake Wabuhu Basin	LI Ru-zhong, ZOU Yang, XU Jing-jing, <i>et al.</i> (1051)
Distribution and Risk Assessment of Mercury Species in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Cheng, CHEN Hong, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1060)
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Residential Communities Built on Brownfields	CHEN Xing, MA Jian-hua, LI Xin-ning, <i>et al.</i> (1068)
Study on Ecological Risk Assessment Technology of Fluoride Pollution from Arid Oasis Soil	XUE Su-yin, LI Ping, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1075)
Rainfall Process and Nitrogen Input in Three Typical Forests of Jinyun Mountain	SUN Su-qi, WANG Yu-jie, WANG Yun-qi, <i>et al.</i> (1081)
Effects of Land Use and Landscape Pattern on Nitrogen and Phosphorus Exports in Lanlingxi Watershed of the Three Gorges Reservoir Area, China	HAN Li-yang, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (1091)
Changes and Influencing Factors of the Soil Organic Carbon in Farmland in the Last 30 Years on Hilly Loess Plateau; A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie, <i>et al.</i> (1098)
Organic Carbon and Carbon Mineralization Characteristics in Nature Forestry Soil	YANG Tian, DAI Wei, AN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1105)
Dynamic Change of Phosphorus Leaching of Neutral Purple Soil at Different Re-wetting Rate	ZHANG Si-lan, SHI Xiao-jun, GUO Tao (1111)
Effects of Thiourea on pH and Availability of Metal Ions in Acid Red Soil	YANG Bo, WANG Wen, ZENG Qing-ru, <i>et al.</i> (1119)
Growth Responses of Six Leguminous Plants Adaptable in Northern Shaanxi to Petroleum Contaminated Soil	SHAN Bao-qin, ZHANG Xiong-tao, CAO Qiao-ling, <i>et al.</i> (1125)
Plant N Status in the Alpine Grassland of the Qinghai-Tibet Plateau; Base on the N:P Stoichiometry	ZHANG Ren-yi, XU Dang-hui, CHEN Ling-yun, <i>et al.</i> (1131)
Development and Succession of Artificial Biological Soil Crusts and Water Holding Characteristics of Topsoil	WU Li, CHEN Xiao-guo, ZHANG Gao-ke, <i>et al.</i> (1138)
Carbon Dioxide Assimilation Potential, Functional Gene Amount and RubisCO Activity of Autotrophic Microorganisms in Agricultural Soils	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, JIAN Yan, <i>et al.</i> (1144)
Dynamics of Microbes and Enzyme Activities During Litter Decomposition of <i>Pinus massoniana</i> Forest in Mid-subtropical Area	SONG Ying, GU Xi-rong, YAN Hai-yuan, <i>et al.</i> (1151)
Levels and Possible Sources of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Camphor (<i>Cinnamomum camphora</i>) Tree Bark from Southern Jiangsu, China	ZHOU Li, ZHANG Xiu-lan, YANG Wen-long, <i>et al.</i> (1159)
Combined Stress of Enhanced UV-B Radiation and 1,2,4-Trichlorobenzene Contamination on the Growth of Green Vegetable	LIU Cui-ying, FAN Jian-ling, XU Xiang-hua (1164)
Effect of Ectomycorrhizae on Heavy Metals Sequestration by Thermostable Protein in Rhizosphere of <i>Pinus tabulaeformis</i> Under Cu and Cd Stress	ZHANG Ying-wei, CHAI Li-wei, WANG Dong-wei, <i>et al.</i> (1169)
Isolation and Characterization of a Halotolerant <i>p</i> -nitroaniline Degrading Strain S8	SONG Cai-xia, DENG Xin-ping, LI Tian, <i>et al.</i> (1176)
Optimized Cultivation of a Bioflocculant M-C11 Produced by <i>Klebsiella pneumoniae</i> and Its Application in Sludge Dewatering	LIU Jie-wei, MA Jun-wei, LIU Yan-zhong, <i>et al.</i> (1183)
Speciation Analysis of Lead Losses from Anthropogenic Flow in China	LIANG Jing, MAO Jian-su (1191)
Establishment and Application of Pollutant Discharge-Environment Quality Model	LI Ming-sheng, SUN Yuan, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> (1198)
Advances in the Pathway and Molecular Mechanism for the Biodegradation of Microcystins	YAN Hai, WANG Hua-sheng, LIU Xiao-lu, <i>et al.</i> (1205)

《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3月15日 35卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 3 Mar. 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@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