

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第4期

Vol.34 No.4

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

唐山大气颗粒物中水溶性无机盐的观测研究 苗红妍,温天雪,王丽,李杏茹,王跃思(1225)

鼎湖山 PM_{2.5} 中水溶性离子浓度特征分析 赵亚南,王跃思,温天雪,刘全(1232)

北京夏冬季霾天气下气溶胶水溶性离子粒径分布特征 黄怡民,刘子锐,陈宏,王跃思(1236)

深圳市 PM_{2.5} 化学组成与时空分布特征 云慧,何凌燕,黄晓峰,兰紫娟,李响,曾立武(1245)

福州城市及郊区冬、夏两季大气中多环芳烃特征研究 易志刚,黄幸然,毕峻奇,郭萍萍,郑丽丽(1252)

河西走廊及兰州地区典型有机氯农药的大气残留及时空分布特征 丁中原,毛潇萱,马子龙,田慧,郭强,黄韬,高宏,李军,张干(1258)

淄博市大气污染特征模型模拟及环境容量估算 薛文博,王金南,杨金田,雷宇,燕丽,贺晋瑜,韩宝平(1264)

香溪河秋季水-气界面温室气体通量日变化观测及影响因素分析 黄文敏,朱孔贤,赵玮,余博识,袁希功,冯瑞杰,毕永红,胡征宇(1270)

变异系数法评价人类活动对地下水环境的影响 赵微,林健,王树芳,刘记来,陈忠荣,寇文杰(1277)

基于 ArcSWAT 模型的长乐江流域非点源氮素污染源识别和分析 邓欧平,孙嗣咏,吕军(1284)

西安周边河流溶解无机碳浓度及同位素组成初探 郭威,李祥忠,刘卫国(1291)

滇池流域宝象河暴雨径流初始冲刷效应 郭怀成,向男,周丰,王永华,李发荣,朱翔,毛国柱,于书霞,李娜,盛虎,杨永辉,何成杰,王翠榆(1298)

三峡库区沉积物秋冬初的磷释放通量估算 牛凤霞,肖尚斌,王雨春,刘德富,黎国育,王亮,纪道斌,杨正健(1308)

海南东部河流、河口及近岸水域颗粒态重金属的分布及污染状况 辛成林,任景玲,张桂玲,郭亚平,张国玲,刘素美(1315)

黄河口表层沉积物中重金属的环境地球化学特征 吴斌,宋金明,李学刚(1324)

扎龙湿地沉积物重金属空间分布特征及其潜在生态风险评价 叶华香,臧淑英,张丽娟,张玉红(1333)

上海市典型疏浚泥重金属生态风险评价 唐庆丽,程金平,高昊旻,姚磊,蒋真毅,吴旻,谢翠松,梁海,王鹤,皮帅帅,余朝毅(1340)

我国沿海地区城镇污水处理厂污泥重金属污染状况及其处置分析 张灿,陈虹,余忆玄,王立军,韩建波,陶平(1345)

江苏某地长江、太湖水源水及出厂水中有机物雌激素活性的比较 金涛,吕学敏,曾一凡,张冰冰,马鲲鹏,姜朴,唐非(1351)

北京市污水处理厂中邻苯二甲酸酯污染水平及其归趋 周益奇,刘云霞(1357)

降解 DMF 引起污泥毒性及其毒性空间分布特性研究 胡园园,杨娜,丁毅,徐文璐,陈秀荣,艾奇峰,陈善佳,王利鹏,黄华(1363)

渤海湾有机锡污染对野生脉红螺的生态风险 安立会,张燕强,宋双双,刘玥,高俊敏,陈浩,赵兴茹,雷坤,郑丙辉(1369)

巨牡蛎(*Crassostrea* sp.)对燃煤电厂脱硫海水中汞的生物累积 刘锡尧,袁东星,陈耀瑾(1374)

咪唑氯盐离子液体对蚯蚓急性毒性及体重影响研究 黄若男,范军杰,涂宏志,谭凌燕,刘惠君,徐冬梅(1380)

铝盐混凝除磷影响因素及机制研究 陈桂霞,胡承志,朱灵峰,童华卿(1386)

混凝和活性炭吸附去除微污染源水中 DON 的研究 刘冰,余国忠,古励,赵承美,李清飞,翟慧敏(1392)

活性炭催化臭氧氧化扑热息痛的机制研究 王佳裕,戴启洲,鱼杰,颜亦舟,陈建孟(1402)

氯酚溶液的 γ 辐照还原降解研究 彭云霞,何仕均,龚文琪,王建龙(1411)

C/N 比对反硝化过程中亚硝酸盐积累的影响分析 袁怡,黄勇,邓慧萍,盛学敏,潘杨,李祥(1416)

以甲醇为碳源生物反硝化过程释放一氧化二氮的试验研究 翟晓峰,蒋成爱,吴光学,曾运涛(1421)

固体纤维素类废物作为反硝化碳源滤料的比选 李斌,郝瑞霞(1428)

基于能源回收的城市污水厌氧氨氧化生物脱氮新工艺 卢健聪,高大文,孙学影(1435)

多模式厌氧/缺氧/好氧污水处理工艺的稳态与动态模拟 周振,吴志超,王志伟,杜兴庄,蒋玲燕,邢灿(1442)

高氨氮废水与城市生活污水短程硝化系统菌群比较 赵志瑞,马斌,张树军,李滨,白志辉,王晓辉,庄国强,张洪助(1448)

活性污泥絮体的分形结构分析 阮晓东,刘俊新(1457)

负荷交替法快速培养好氧硝化颗粒污泥的研究 沈娜,杨昌柱,濮文虹,罗应东(1464)

预加不同比例不同粒径好氧颗粒对 SBR 中好氧颗粒污泥形成的影响 熊光城,濮文虹,杨昌柱(1472)

同时回收氮磷提高碱性发酵污泥脱水性能的机制研究 张超,陈银广,顾国维(1479)

利用流式细胞仪分选技术研究湖泊真核超微藻的遗传多样性 谢薇薇,袁伊,王志伟,孔繁翔,史小丽(1485)

阿魏酸和香豆素对铜绿微囊藻的化感作用 郭亚丽,傅海燕,黄国和,高攀峰,柴天,严滨,廖欢(1492)

象山港国华电厂强增温海域浮游动物群落结构和多样性的时空特征 朱艺峰,黄简易,林霞,杨莹,邢超,严小军(1498)

环氧树脂降解嗜盐菌的筛选及其处理高盐环氧树脂废水的特性研究 王进,徐真,彭书传,夏明山,岳正波,陈天虎(1510)

铜绿假单胞菌胞内酶粗提液对十溴联苯醚的降解 史广宇,尹华,叶锦韶,彭辉,张娜,何宝燕(1517)

酵母提取物对葡萄糖发酵生产生物破乳菌 *Alcaligenes* sp. S-XJ-1 的影响 黄翔峰,王凯,黎明霞,王彩林,陆丽君,刘佳(1524)

玉米秸秆厌氧降解复合菌系的微生物群落结构 乔江涛,郭荣波,袁宪正,师晓爽,许晓晖,范晓蕾,邱艳玲(1531)

红霉素对产甲烷菌的抑制及其驯化 刘子旭,孙力平,李玉友,邱春生(1540)

4 种 NAPLs 污染物在二维砂箱中的指进锋面形态特征研究 杨宾,李慧颖,伍斌,杜晓明,李发生(1545)

污灌区土壤中多环芳烃的垂直分布及可能来源 姚林林,张彩香,李佳乐,廖小平,王焰新(1553)

呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价 郭伟,孙文惠,赵仁鑫,赵文静,付瑞英,张君(1561)

水稻光合同化碳在土壤不同粒径、密度分组中的分配特征 李苗苗,聂三安,陈晓娟,罗璐,朱捍华,石辉,葛体达,童成立,吴金水(1568)

亚热带不同稻田土壤微生物生物量碳的剖面分布特征 盛浩,周萍,袁红,廖超林,黄运湘,周清,张杨珠(1576)

施用堆腐有机肥对水稻土中六氯苯脱氯降解影响 刘翠英,蒋新(1583)

螯合剂和生物表面活性剂对 Cu、Pb 污染壤土的淋洗修复 刘霞,王建涛,张萌,王力,杨亚提(1590)

不同温度下烧制的秸秆炭对可变电荷土壤吸附 Pb(II) 的影响 蒋田雨,姜军,徐仁扣,周立祥,王世梅(1598)

绿色木霉改性玉米秸秆溢油吸附剂的制备及其性能研究 蓝舟琳,彭丹,郭楚玲,朱超飞,薛秀玲,党志(1605)

改性与成型层状氢氧化镁铝对不同水体中 PO₄³⁻ 的脱除性能 邢坤,王海增(1611)

羧基化碳纳米管载铂催化剂对微生物燃料电池阴极氧还原性能的影响 涂丽杏,朱能武,吴平霄,李平,吴锦华(1617)

新型生物质活性炭烟气脱硫研究 刘洁岭,汤争光,陈杰,蒋文举,江霞(1623)

城市工业行业能源消费强度等级划分方法及应用 毛建素,马兰(1628)

厦门城市化进程中的居民食物碳消费及其环境负荷 闫祯,崔胜辉,李桂林,任引,徐礼来(1636)

《环境科学》征订启事(1283) 《环境科学》征稿简则(1332) 信息(1350,1509,1582,1644) 专辑征稿通知(1523)

咪唑氯盐离子液体对蚯蚓急性毒性及体重影响研究

黄若男¹, 范军杰¹, 涂宏志¹, 谭凌燕¹, 刘惠君^{1*}, 徐冬梅²

(1. 浙江工商大学环境科学与工程学院, 浙江省固体废物处理与资源化重点实验室, 杭州 310018; 2. 浙江树人大学生物与环境工程学院, 杭州 310015)

摘要: 采用 OECD 标准滤纸接触法和人工土壤法, 研究了 3 种离子液体 1-丁基-3-甲基咪唑氯盐 ([Bmim]Cl)、1-己基-3-甲基咪唑氯盐 ([Hmim]Cl)、1-辛基-3-甲基咪唑氯盐 ([Omim]Cl) 对赤子爱胜蚓 (*Eisenia fetida*) 的急性致死作用, 并测定亚慢性暴露试验下蚯蚓的体重变化. 滤纸接触法测得 [Bmim]Cl、[Hmim]Cl、[Omim]Cl 对蚯蚓 24 h 的半致死浓度 (LC₅₀) 分别为 109.60、50.38、7.94 μg·cm⁻²; 48 h 的 LC₅₀ 分别为 98.52、39.14、3.61 μg·cm⁻². 人工土壤法得到 [Bmim]Cl、[Hmim]Cl、[Omim]Cl 对蚯蚓 7 d 的 LC₅₀ 分别为 447.78、245.56、180.51 mg·kg⁻¹, 14 d 的 LC₅₀ 分别为 288.42、179.75、150.35 mg·kg⁻¹. 蚯蚓在 3 种离子液体作用下表现出不同的中毒症状. 3 种离子液体对蚯蚓的生长表现出不同程度的抑制作用, 体重随着浓度增加而下降. 离子液体对蚯蚓毒性随着碳链长度的增加而增大.

关键词: 离子液体; 赤子爱胜蚓; 滤纸接触法; 人工土壤法; 半致死浓度; 体重

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)04-1380-06

Effects of Imidazolium Chloride Ionic Liquids on the Acute Toxicity and Weight of Earthworm

HUANG Ruo-nan¹, FAN Jun-jie¹, TU Hong-zhi¹, TANG Ling-yan¹, LIU Hui-jun¹, XU Dong-mei²

(1. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Solid Waste Treatment and Recycling, College of Environmental Science and Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China; 2. College of Biological and Environmental Engineering, Zhejiang Shuren University, Hangzhou 310015, China)

Abstract: Standard contact filter paper test of OECD and artificial soil test were used to study the acute lethal effect of three imidazolium chloride ionic liquids, 1-butyl-3-methylimidazolium chloride ([Bmim]Cl), 1-hexyl-3-methylimidazolium chloride ([Hmim]Cl), and 1-octyl-3-methylimidazolium chloride ([Omim]Cl) on earthworm (*Eisenia fetida*), and the weight of the earthworms was measured after subtle exposure. The 24 h-LC₅₀ values of [Bmim]Cl, [Hmim]Cl and [Omim]Cl using the contact filter paper method were 109.60, 50.38 and 7.94 μg·cm⁻², respectively. The 48 h-LC₅₀ values were 98.52, 39.14 and 3.61 μg·cm⁻², respectively. Using the artificial soil method, the 7 d-LC₅₀ values of [Bmim]Cl, [Hmim]Cl and [Omim]Cl were 447.78, 245.56 and 180.51 mg·kg⁻¹, respectively, and the 14 d-LC₅₀ values were 288.42, 179.75, 150.35 mg·kg⁻¹, respectively. There were differences in poisoning symptoms of the three ionic liquids on earthworms. The growth of *Eisenia fetida* was inhibited and declined with increasing ionic liquid concentration. The toxicity of ionic liquids on *Eisenia fetida* increased with the length of carbon chain.

Key words: ionic liquids; *Eisenia fetida*; contact filter paper test; artificial soil test; LC₅₀; weight

因具有极低的蒸气压、不挥发、导电性强、对许多无机盐和有机物有良好溶解性等诸多优点, 离子液体逐渐取代有机溶剂而成为一种环境友好的新型“绿色溶剂”^[1]. 目前在实验室已经合成了多达上千种的离子液体, 并广泛应用于化学化工、功能材料等领域^[2]. 然而由于离子液体的化学和热力学稳定性, 其环境行为及生态毒性引起了关注^[3]. Wells 等^[4]研究发现所有选用的离子液体都没有明显的生物降解迹象. 离子液体对大型蚤^[5,6]、藻类^[7]、卤虫^[8]、海藻^[9]等水生生物的毒性影响受到了广泛关注, Pretti 等^[10]研究表明离子液体对斑马鱼的急性毒性作用强于甲醇、丙酮等传统有机溶剂. Matzke 等^[11]调查了含有不同金属矿物的黏土

中咪唑类离子液体不同阴离子对 *Triticum aestivum* (小麦) 生长的影响. 然而离子液体对土壤生态的影响研究较少.

当污染物进入生态环境后, 将对生态系统的各级生物学水平产生影响, 而蚯蚓位于陆生生态系统中食物链的低端, 会对污染物有一定的富集作用, 因此研究蚯蚓的急性毒性效应可以用于土壤生态风险评估^[12]. 赤子爱胜蚓是国际通用的标准毒理学试

收稿日期: 2012-07-17; 修订日期: 2012-09-06

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(20907046); 浙江省自然科学基金项目(Y5100376)

作者简介: 黄若男(1987~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为生态毒理学, E-mail: hrm1987@163.com

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

验模式动物,本研究以赤子爱胜蚓为受试生物,采用 OECD 标准滤纸接触法和人工土壤法^[13]测定 3 种不同碳链长度的咪唑氯盐类离子液体对蚯蚓急性致死的影响,并分析亚慢性毒性下蚯蚓的体重变化,以期初步探讨离子液体的毒性作用及其对土壤生态系统的影响提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 供试动物

试验选用由浙江杭州某蚯蚓养殖场提供的赤子爱胜蚓 (*Eisenia fetida*),挑选体重 300 mg 左右,体长 5~6 cm,性成熟有生殖环的健康成蚓,试验前于温室中驯服 7 d。蚯蚓培养条件为温度为 (20 ± 1) °C,相对湿度约 80%~85%。

1.2 供试污染物

离子液体 1-丁基-3-甲基咪唑氯盐 (1-Bexyl-3-methylimidazolium chloride, [Bmim]Cl)、1-己基-3-甲基咪唑氯盐 (1-Hexyl-3-methylimidazolium chloride, [Hmim]Cl)、1-辛基-3-甲基咪唑氯盐 (1-Octyl-3-methylimidazolium chloride, [Omim]Cl),由中国科学院兰州化学物理研究所绿色化学与催化中心提供,纯度为 99%,结构式见图 1。

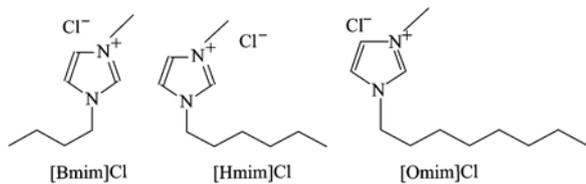


图 1 3 种咪唑氯盐离子液体结构式

Fig. 1 Molecular structures of three imidazolium chloride ionic liquids

1.3 试验方法

1.3.1 蚯蚓清肠

培养皿底部铺一层滤纸,加少量蒸馏水,将蚯蚓放在滤纸上,用塑料薄膜封口并扎孔,将培养皿放入温室中,清肠 24 h。

1.3.2 滤纸接触法

培养皿内垫滤纸一层,加入 1.6 mL 不同浓度的 [Bmim]Cl、[Hmim]Cl、[Omim]Cl 溶液,清肠后的蚯蚓冲洗干净,吸干水分后放入培养皿中(每皿 1 条),用塑料薄膜封口并扎孔后置于温室中黑暗培养,于处理 24 h、48 h 各记录蚯蚓的存活情况,以前尾部对机械刺激无反应视为死亡^[14]。浓度设置 [Bmim]Cl 为 0、80、90、100、110、120 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$, [Hmim]Cl 为 0、35、40、45、50、55 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$,

[Omim]Cl 为 0、2、4、6、8、10 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。每个处理设 10 个重复。

1.3.3 人工土壤法

试验中人工土壤各成分含量如下:石英砂 69%,高岭土 20%,草炭土 10%,CaCO₃ 1%,pH 为 7.0 ± 0.2。将 3 种离子液体配成系列浓度,分别拌于 10 g 石英砂中,再与 490 g 人工土壤混匀,加入蒸馏水保持含水量 35%,在温室中黑暗平衡 1 d 后,取 10 条清肠后的蚯蚓放入人工土壤中培养,用纱布封口。浓度设置 [Bmim]Cl 为 0、200、275、350、425、500 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, [Hmim]Cl 为 0、110、155、200、245、290 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, [Omim]Cl 为 0、50、100、150、200、250 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。在温室内 16 h/8 h 光暗交替培养^[15]。培养 7 d、14 d 各记录死亡数及中毒症状。每一处理设置 3 个重复。

1.3.4 体重影响试验

设置 [Bmim]Cl、[Hmim]Cl、[Omim]Cl 浓度为 0、2、4、8、16、32 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,每个处理 3 个重复。采用与急性毒性人工土壤法相同的方法处理与培养,为维持蚯蚓的生存,从第 15~28 d,每周添加干牛粪 5 g^[16],培养 3、7、14、28 d 后将蚯蚓取出,清肠 1 d 后称重。

1.4 数据处理

用 SPSS 13.0 统计软件处理数据,采用概率回归的方法根据蚯蚓的死亡率计算蚯蚓的半致死剂量 LC₅₀。体重变化率采用下列方程计算^[17]:

$$W_c = \frac{(W_0 - W_t)}{W_0} \times 100\%$$

式中, W_c 是离子液体 c 浓度处理的蚯蚓体重变化率, W_0 是试验开始时蚯蚓的体重, W_t 是处理第 t 天时蚯蚓的体重。对处理组和对照组之间的差异性进行 t -检验。

2 结果与讨论

2.1 滤纸接触法急性毒性

滤纸接触法急性毒性结果见图 2,从中可知,3 种离子液体对蚯蚓的急性毒性作用与染毒时间和染毒浓度相关,蚯蚓的死亡率随 [Bmim]Cl、[Hmim]Cl、[Omim]Cl 溶液浓度的增加、染毒时间的延长而升高。染毒 24 h 后, [Bmim]Cl 80 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 处理组蚯蚓仅死亡 1 条, 110 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 处理组蚯蚓死亡率达到 50%; [Hmim]Cl 40 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 处理组蚯蚓死亡 2 条, 55 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 处理组蚯蚓死亡率为 60%; [Omim]Cl 2 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 处理组蚯蚓死亡 1 条, 8

$\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 处理组蚯蚓死亡5条. 染毒48 h后,相同浓度处理死亡率较24 h增大, [Bmim]Cl 110 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 处理组死亡蚯蚓增至7条; [Hmim]Cl 55 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 处理组死亡蚯蚓为100%; [Omim]Cl 8 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 处理组死亡蚯蚓达9条. 3种离子液体的毒性大小顺序为[Bmim]Cl < [Hmim]Cl < [Omim]Cl,

毒性随碳链长度增加而增大. 应用SPSS求得滤纸接触法3种离子液体对蚯蚓急性毒性 LC_{50} 及置信区间(表1), [Bmim]Cl、[Hmim]Cl和[Omim]Cl的24 h- LC_{50} 分别为109.60、50.38和7.94 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$, 48 h- LC_{50} 分别为98.52、39.14和3.61 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$.

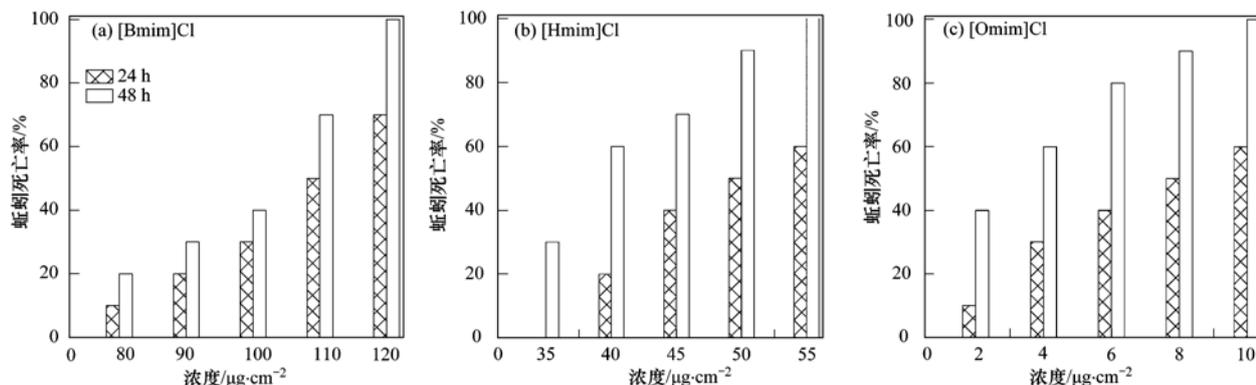


图2 [Bmim]Cl、[Hmim]Cl和[Omim]Cl对蚯蚓的急性致死作用(滤纸法)

Fig. 2 Acute lethal toxicity of [Bmim]Cl, [Hmim]Cl, and [Omim]Cl on earthworm (filter paper method test)

表1 [Bmim]Cl、[Hmim]Cl、[Omim]Cl对蚯蚓急性毒性统计结果¹⁾

Table 1 Acute toxicity statistical results of [Bmim]Cl, [Hmim]Cl, [Omim]Cl on earthworm

染毒方式	离子液体	时间/d	回归方程	LC_{50}	95% 置信区间
				$/\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 或 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$/\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 或 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
滤纸法	[Bmim]Cl	1	$Y = -4.929 + 0.045X$	109.60	101.00 ~ 128.00
		2	$Y = -6.042 + 0.0613X$	98.52	90.98 ~ 105.95
	[Hmim]Cl	1	$Y = -4.852 + 0.0963X$	50.38	46.31 ~ 59.24
		2	$Y = -4.912 + 0.1255X$	39.14	32.90 ~ 42.48
	[Omim]Cl	1	$Y = -1.631 + 0.206X$	7.94	6.17 ~ 11.63
		2	$Y = -1.336 + 0.370X$	3.61	2.27 ~ 4.76
人工土壤法	[Bmim]Cl	7	$Y = -2.826 + 0.006X$	447.78	385.02 ~ 595.98
		14	$Y = -2.592 + 0.009X$	288.42	228.58 ~ 335.71
	[Hmim]Cl	7	$Y = -2.351 + 0.0096X$	245.56	206.33 ~ 325.82
		14	$Y = -2.188 + 0.0122X$	179.75	142.19 ~ 213.50
	[Omim]Cl	7	$Y = -2.522 + 0.014X$	180.51	150.61 ~ 219.85
		14	$Y = -2.362 + 0.016X$	150.35	122.53 ~ 181.53

1) Y为死亡概率, X为离子液体浓度, 滤纸法 LC_{50} 单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$, 人工土壤法 LC_{50} 单位为 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

滤纸试验观察到[Bmim]Cl、[Hmim]Cl、[Omim]Cl对蚯蚓的急性毒性表现出不同的中毒症状. [Bmim]Cl处理组:接触滤纸一段时间后,低浓度组蚯蚓无明显的逃逸行为,高浓度组蚯蚓表现四处爬行的逃逸行为,爬行到滤纸边缘或躲于滤纸下;染毒24 h后,蚯蚓身体卷曲变柔软,失去逃逸能力,死亡的蚯蚓成伸长状态;染毒48 h后,个别蚯蚓环节变得不明显,出现破裂出血的现象. [Hmim]Cl处理组:在接触滤纸几分钟后,低浓度时蚯蚓便有寻找出口的逃逸行为;染毒24 h后,蚯蚓对外界的刺激不灵敏,身体呈暗红色,体表有黄色渗出液;染毒

48 h后,大多数蚯蚓身体扭曲,环带肿大,背部出现脓包. [Omim]Cl处理组:在刚接触滤纸时,蚯蚓剧烈弹跳扭动,随后蜷缩成一团,失去逃逸能力;染毒24 h后,蚯蚓尾部环节松弛,有黄色液体渗出,身体因极度伸长而脱节,甚至断裂,环带周围极度充血肿大;染毒48 h后,蚯蚓环带部分糜烂,节间沟深陷,整条蚯蚓成串珠状,有自溶的趋势,并带有恶臭.

2.2 人工土壤法急性毒性

人工土壤法观察到蚯蚓对3种离子液体的中毒症状也不同. [Bmim]Cl处理组:刚开始接触到土壤后蚯蚓很快钻入土中,在试验期间将蚯蚓取出,可观

观察到蚯蚓身体呈伸长状态,对外界刺激不灵敏.死亡的蚯蚓身体极度伸长,有部分脱节. [Hmim]Cl 处理组:接触土壤后,蚯蚓四处爬行,而后钻入土壤.蚯蚓身体缩短变粗,生命力不强的蚯蚓身上沾满了土壤,其余的蚯蚓则对外界刺激灵敏. [Omim]Cl 处理组:接触到加入离子液体的土壤会分泌类似于“唾液”的液体,在土壤表面爬行后部分钻入土壤,处理浓度越高,蚯蚓钻入土壤中的比例越低. 试验期间将蚯蚓取出,可观察到死亡的蚯蚓环带肿大,有断节,身体糜烂,并有恶臭,与滤纸法的中毒症状相似.

蚯蚓暴露于经不同浓度的 [Bmim]Cl、[Hmim]Cl、[Omim]Cl 染毒处理的人工土壤中 7 d、14 d 后的死亡率如图 3 所示. 从中可以看出,蚯蚓死亡率呈显著的剂量-效应和时间-效应关系,3 种离子液体

的毒性大小顺序为 [Bmim]Cl < [Hmim]Cl < [Omim]Cl,毒性随碳链长度增加而增大. 染毒 7 d 后,[Bmim]Cl 200 mg·kg⁻¹ 处理组蚯蚓开始出现死亡现象,500 mg·kg⁻¹ 处理组蚯蚓死亡率达到 70%; 14 d 后蚯蚓死亡率较 7 d 有所增大,200、500 mg·kg⁻¹ 处理组死亡率分别为 26.7% 和 100%. [Hmim]Cl 200 mg·kg⁻¹ 处理组蚯蚓的 7 d、14 d 死亡率分别为 33.3% 和 60%,290 mg·kg⁻¹ 处理组蚯蚓 7 d、14 d 的死亡率分别达到 63.3% 和 100%; [Omim]Cl 250 mg·kg⁻¹ 处理组蚯蚓的死亡率分别达到 86.7% 和 100%. 应用 SPSS 求得人工土壤法 3 种离子液体对蚯蚓急性毒性 LC₅₀ 及置信区间(表 1),[Bmim]Cl、[Hmim]Cl 和 [Omim]Cl 的 7 d-LC₅₀ 分别为 447.78、245.56 和 180.51 mg·kg⁻¹,14 d-LC₅₀ 分别 288.42、179.75 和 150.35 mg·kg⁻¹.

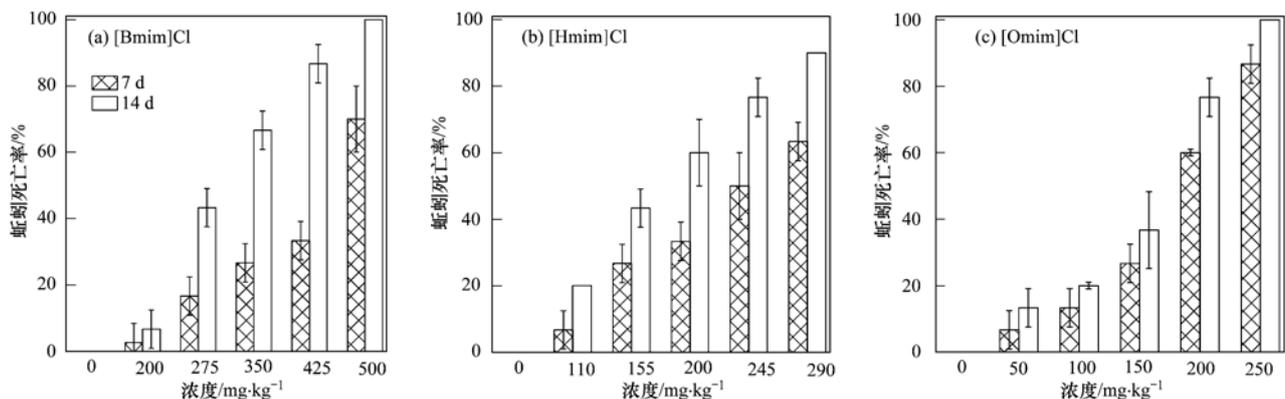


图 3 [Bmim]Cl、[Hmim]Cl 和 [Omim]Cl 对蚯蚓的急性致死作用(人工土壤法)

Fig. 3 Acute lethal toxicity of [Bmim]Cl, [Hmim]Cl, and [Omim]Cl on earthworm (artificial soil test)

作为土壤生态系统中无脊椎动物的代表,蚯蚓是陆生生物与土壤生态环境信息传递的桥梁^[18],因此土壤中的化学物质也会通过蚯蚓皮肤或消化道吸收进入其体内并产生积累,将蚯蚓作为载体研究污染物暴露下的急性毒性可以初步得到该物质的固有毒性和对土壤动物的潜在毒性^[19]. 虽然滤纸法快速、简单易行,但只能作为一种预试验或应急预警试验的方法,而土壤法则更接近蚯蚓在自然状态中接触污染物的方式,能客观准确地得到其毒性^[15],并评价生态环境风险. 本研究采用滤纸接触法、人工土壤法研究了离子液体 [Bmim]Cl、[Hmim]Cl、[Omim]Cl 对蚯蚓的急性毒性作用. 结果表明,滤纸接触法中,蚯蚓的中毒症状比较明显,这可能是由于蚯蚓直接与滤纸表面的离子液体接触,吸收量大、吸收速率快. 由于咪唑类离子液体的高电子接受性以及疏水性,在土壤处理中咪唑阳离子的静电作用使

离子液体可以被土壤及沉积物吸附^[20],降低了蚯蚓的吸收速率. 蚯蚓可以通过皮肤的扩散渗透和吞食作用 2 种途径吸收污染物^[21],滤纸法给出蚯蚓的经皮毒性,人工土壤法则综合考虑污染物对蚯蚓的经皮和经口毒性,研究观察到蚯蚓在 3 种离子液体染毒下的不同中毒症状,在滤纸法中蚯蚓对 [Omim]Cl 毒性反应极为快速,接触后立刻产生弹跳扭动现象,表明 [Omim]Cl 通过皮肤对蚯蚓产生的毒性很强. 人工土壤试验周期为 14 d,可认为污染物主要通过蚯蚓的取食而产生毒性. 参考前苏联制定的化学物质急性毒性分级标准^[22],初步判定 3 种离子液体对蚯蚓属中等毒性. 在滤纸接触法和人工土壤法中,3 种离子液体均对蚯蚓有一定的急性毒性效应,毒性大小顺序为 [Bmim]Cl < [Hmim]Cl < [Omim]Cl,随着阳离子取代基碳链长度增大而增大. 研究结果与 Ranker 等^[23]关于咪唑类离子液体对两种动物细胞的研究结果一

致,烷基链越长,毒性越大。

2.3 蚯蚓体重增长的抑制效应

整个试验期间,所有对照处理的蚯蚓生长抑制率均为负值,体重都比试验开始时有所增加,生长状况良好,说明培养的营养条件可以保证蚯蚓生长的需要。

[Bmim]Cl、[Hmim]Cl、[Omim]Cl对蚯蚓的生长抑制率见图4。在[Bmim]Cl处理组,第3、7 d

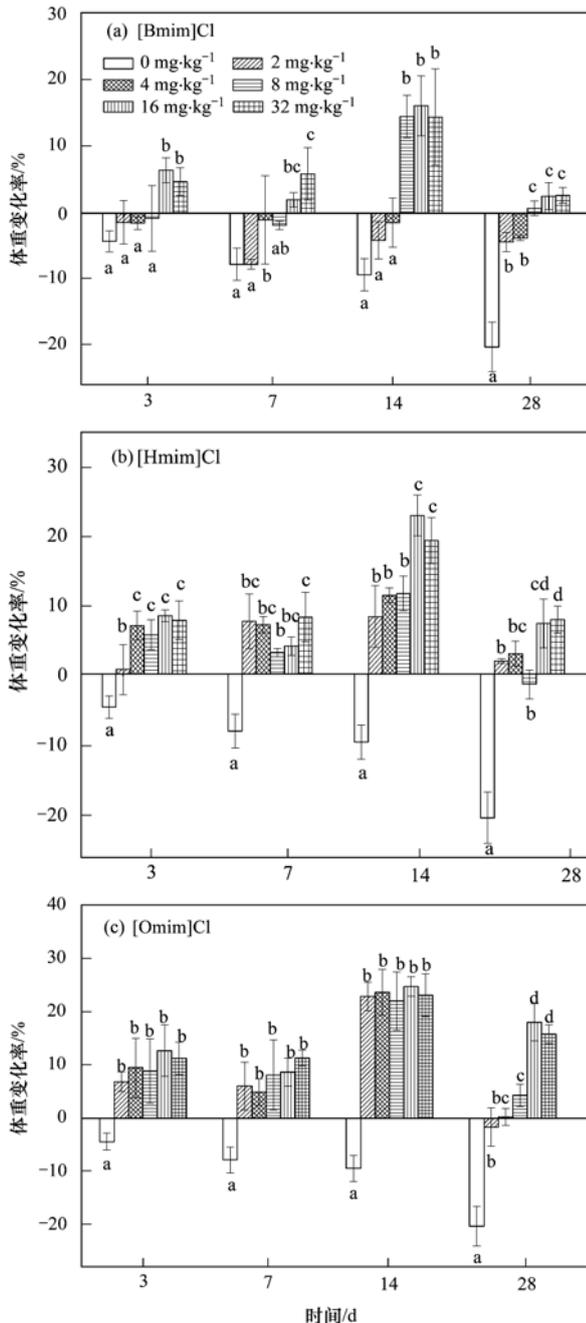


图4 [Bmim]Cl、[Hmim]Cl、[Omim]Cl作用下蚯蚓的体重变化率

Fig. 4 Weight change rate of earthworm exposed to [Bmim]Cl, [Hmim]Cl and [Omim]Cl

低浓度处理组($2 \sim 8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)蚯蚓体重均有增加,与对照组无显著差异,高浓度处理蚯蚓体重下降,与对照相比达到显著差异;第14 d的8、16、 $32 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理蚯蚓体重下降明显,与对照相比达到显著水平,至试验后期28 d时蚯蚓生长有所恢复,与14 d相比体重增加,但仍显著低于对照组。[Hmim]Cl作用下,第3 d低浓度 $2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 组对蚯蚓的体重影响显著,4、8、16、 $32 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理与对照组相比影响极显著;到第14 d体重下降影响显著, $16 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理体重抑制率高达23.05%,说明高浓度严重抑制了蚯蚓的生长,28 d时蚯蚓生长有所恢复,与14 d相比体重增加,但仍显著低于对照组。[Omim]Cl处理组,除 $2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 组到第28 d生长有所恢复体重略有增加外,其余浓度处理对蚯蚓生长抑制率均为正值,体重降低,第14 d所有浓度组均显著抑制蚯蚓的生长,第28 d生长虽然有所恢复,但仍与对照组间表现出显著差异。总体而言离子液体对蚯蚓的生长有不同程度的抑制作用,随着处理浓度的增大,3种离子液体对蚯蚓体重的抑制影响加大;随着培养时间的延长,离子液体对蚯蚓体重的影响增大,到第14 d生长抑制最明显,随后蚯蚓生长有一定的恢复作用,与14 d相比,第28 d的体重有所增加;相同浓度下随着离子液体碳链长度的增长,对蚯蚓体重抑制作用增大,3种离子液体对蚯蚓体重影响的顺序为[Bmim]Cl < [Hmim]Cl < [Omim]Cl。

有研究表明,蚯蚓受到污染物胁迫后,其体重变化是非常敏感的指标^[24,25],可以评价污染物对蚯蚓的毒性。本研究表明3种离子液体不同程度地抑制了蚯蚓的生长,这种生长缓慢的作用可能跟蚯蚓的生存策略有关,在污染物长期保留的条件下,蚯蚓通过减少食物的摄入,降低新陈代谢来适应不良环境,从而规避污染物带来的危害^[26]。本研究表明在远低于 LC_{50} 的浓度下离子液体对蚯蚓也表现出生长的毒性,因而体重抑制率是一个敏感的评价指标。

3 结论

(1) 滤纸接触法得到[Bmim]Cl、[Hmim]Cl、[Omim]Cl 24 h- LC_{50} 分别为109.60、50.38和7.94 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$,48 h- LC_{50} 分别为98.52、39.14和3.61 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。人工土壤法得到[Bmim]Cl、[Hmim]Cl、[Omim]Cl对蚯蚓7 d- LC_{50} 分别为447.78、245.56和180.51 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,14 d- LC_{50} 分别288.42、179.75和150.35 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

(2) 蚯蚓死亡率随 [Bmim] Cl、[Hmim] Cl、[Omim] Cl 溶液的浓度、染毒时间的增加而升高。蚯蚓在 3 种离子液体作用下表现出不同的中毒症状。参考前苏联制定的化学物质急性毒性分级标准,初步判定 3 种离子液体对蚯蚓属中等毒性。

(3) 3 种离子液体对蚯蚓的生长都具有显著的抑制作用,随着处理浓度的增大和培养时间的延长,3 种离子液体对蚯蚓体重的抑制影响加大,到第 14 d 生长抑制最明显,随后蚯蚓生长有一定的恢复作用。

(4) 相同浓度下随着离子液体碳链长度的增长,对蚯蚓影响作用增大,3 种离子液体对蚯蚓影响的顺序为 [Bmim] Cl < [Hmim] Cl < [Omim] Cl。

参考文献:

- [1] 唐尧旭,毛炜坤,马娜,等. 咪唑类离子液体的二氧化硫吸附性能[J]. 环境科学, 2010, **31**(11): 2582-2586.
- [2] Stumpf S, Billard I, Panak P J, *et al.* Differences of Eu(III) and Cm(III) chemistry in ionic liquids: investigations by TRLFS [J]. Dalton Transactions, 2007, **14**(2): 240-248.
- [3] Pham T P, Cho C W, Yun Y S. Environmental fate and toxicity of ionic liquids: a review[J]. Water Research, 2010, **44**(2): 352-372.
- [4] Wells A S, Coombe V T. On the freshwater ecotoxicity and biodegradation properties of some common ionic liquids [J]. Organic Process Research & Development, 2006, **10**(4): 794-798.
- [5] 李效宇,罗艳蕊,李磊,等. 一种离子液体——溴化 1-辛基-3-甲基咪唑对大型溞摄食强度的影响[J]. 环境科学学报, 2008, **28**(11): 2331-2335.
- [6] Bernot R J, Brueseke M A, Evans-White M A, *et al.* Acute and chronic toxicity of imidazolium-based ionic liquids on *Daphnia magna*[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2005, **24**(1): 87-92.
- [7] 段炼,杜耀,陆秋琳,等. 离子液体 1-丁基-3-甲基咪唑氯盐对斜生栅藻的毒性效应[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(5): 886-891.
- [8] 卢珩俊,陆胤,徐冬梅,等. 咪唑类离子液体系列对卤虫的急性毒性研究[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(3): 454-460.
- [9] Latała A, Stepnowski P, Nędzi M, *et al.* Marine toxicity assessment of imidazolium ionic liquids: Acute effects on the Baltic algae *Oocystis submarina* and *Cyclotella meneghiniana*[J]. Aquatic Toxicology, 2005, **73**(1): 91-98.
- [10] Pretti C, Chiappe C, Pieraccini D, *et al.* Acute toxicity of ionic liquids to the zebrafish (*Danio rerio*) [J]. Green Chemistry, 2006, **8**(3): 238-240.
- [11] Matzke M, Stolte S, Arning J, *et al.* Ionic liquids in soils: effects of different anion species of imidazolium based ionic liquids on wheat (*Triticum aestivum*) as affected by different clay minerals and clay concentrations [J]. Ecotoxicology, 2009, **18**(2): 197-203.
- [12] 陈林华,江吉红,杨正见,等. 蚯蚓生物标志在农药污染评价中的应用[J]. 浙江农业学报, 2010, **22**(1): 130-134.
- [13] Earthworm, acute toxicity tests. OECD Guideline for Testing of Chemicals No. 207. Organisation for Economic Cooperation and Development[S].
- [14] 李辉龙,雷震,吴尔苗,等. 1,2,4-三氯苯对蚯蚓生长和表皮及肠道超微结构的影响[J]. 生态毒理学报, 2011, **6**(3): 247-254.
- [15] 张敏,苏康宇,李成涛,等. PBS 基共聚物及其模拟降解产物对赤子爱胜蚓急性生态毒性的研究[J]. 生态环境学报, 2010, **19**(10): 2425-2429.
- [16] Kokta C. Measuring effects of chemicals in the laboratory: effect criteria and endpoints [M]. Ecotoxicology of Earthworms, Interscept, Andover, UK, 1992. 55-62.
- [17] 郑丽莎,史雅娟,孟凡乔,等. 硫丹对蚯蚓存活、生长和肠胃线粒体超微结构的影响[J]. 环境科学学报, 2009, **29**(6): 1283-1287.
- [18] Arnaud C, Saint-Denis M, Narbonne J F, *et al.* Influences of different standardised test methods on biochemical responses in the earthworm *Eisenia fetida Andrei* [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, **32**(1): 67-73.
- [19] 王轶,唐云,徐凌凌,等. 阿苯哒唑对蚯蚓的生态毒理效应[J]. 应用生态学报, 2009, **20**(9): 2296-2300.
- [20] Stepnowski P. Preliminary assessment of the sorption of some alkyl imidazolium cations as used in ionic liquids to soils and sediments[J]. Australian Journal of Chemistry, 2005, **58**(3): 170-173.
- [21] 郜红建,蒋新,王芳,等. 老化对六六六在土壤中可提取态含量及其生物有效性的影响[J]. 环境科学, 2008, **29**(7): 2054-2057.
- [22] 徐新云. 制定统一的“化学物质急性毒性分级标准”之探讨[J]. 现代预防医学, 1997, **24**(2): 246-231.
- [23] Ranke J, Mölter K, Stock F, *et al.* Biological effects of imidazolium ionic liquids with varying chain lengths in acute *Vibrio fischeri* and WST-1 cell viability assays[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2004, **58**(3): 396-404.
- [24] 宋玉芳,周启星,宋雪英,等. 土壤整体质量的生态毒性评价[J]. 环境科学, 2005, **26**(1): 130-134.
- [25] Xiao N W, Jing B B, Ge F, *et al.* The fate of herbicide acetochlor and its toxicity to *Eisenia fetida* under laboratory conditions[J]. Chemosphere, 2006, **62**(8): 1366-1373.
- [26] 史雅娟,吕永龙,王昕,等. 林丹和呋喃丹对赤子爱胜蚓存活、生长和繁殖能力的影响[J]. 生态毒理学报, 2009, **4**(1): 101-107.

CONTENTS

Water-soluble Inorganic Salts in Ambient Aerosol Particles in Tangshan	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Li, <i>et al.</i> (1225)
Characterization of Water-soluble ions in PM _{2.5} at Dinghu Mount	ZHAO Ya-nan, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1232)
Characteristics of Mass Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Winter Haze Days of Beijing	HUANG Yi-min, LIU Zi-ru, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1236)
Characterising Seasonal Variation and Spatial Distribution of PM _{2.5} Species in Shenzhen	YUN Hui, HE Ling-yan, HUANG Xiao-feng, <i>et al.</i> (1245)
Characteristics of PAHs in the Atmosphere in Winter and Summer in the Urban and Suburban of Fuzhou	YI Zhi-gang, HUANG Xing-ran, BI Jun-qi, <i>et al.</i> (1252)
Seasonal Variation and Spatial Distribution of Typical Organochlorine Pesticides in the Atmosphere of Hexi Corridor and Lanzhou, Northwest China	DING Zhong-yuan, MAO Xiao-xuan, MA Zi-long, <i>et al.</i> (1258)
Simulation of Air Pollution Characteristics and Estimates of Environmental Capacity in Zibo City	XUE Wen-bo, WANG Jin-nan, YANG Jin-tian, <i>et al.</i> (1264)
Diurnal Changes in Greenhouse Gases at Water-Air Interface of Xiangxi River in Autumn and Their Influencing Factors	HUANG Wen-min, ZHU Kong-xian, ZHAO Wei, <i>et al.</i> (1270)
Influence of Human Activities on Groundwater Environment Based on Coefficient Variation Method	ZHAO Wei, LIN Jian, WANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1277)
Nitrogen Non-Point Source Pollution Identification Based on ArcSWAT in Changlu River	DENG Ou-ping, SUN Si-yang, LÜ Jun (1284)
Study on the Content and Carbon Isotopic Composition of Water Dissolved Inorganic Carbon from Rivers Around Xi'an City	GUO Wei, LI Xiang-zhong, LIU Wei-guo (1291)
First Flush Effects of Storm Events of Baoxiang River in Lake Dianchi Watershed	GUO Huai-cheng, XIANG Nan, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (1298)
Estimation of Releasing Fluxes of Sediment Phosphorus in the Three Gorges Reservoir During Late Autumn and Early Winter	NIU Feng-xia, XIAO Shang-bin, WANG Yu-chun, <i>et al.</i> (1308)
Distributions and Pollution Status of Heavy Metals in the Suspended Particles of the Estuaries and Coastal Area of Eastern Hainan	XIN Cheng-lin, REN Jing-ling, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (1315)
Environmental Characteristics of Heavy Metals in Surface Sediments from the Huanghe Estuary	WU Bin, SONG Jin-ming, LI Xue-gang (1324)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Zhalong Wetland	YE Hua-xiang, ZANG Shu-ying, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (1333)
Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals of the Typical Dredged Mud in Shanghai	TANG Qing-li, CHENG Jin-ping, GAO Hao-min, <i>et al.</i> (1340)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in Sludge from Wastewater Treatment Plants and Sludge Disposal in Chinese Coastal Areas	ZHANG Can, CHEN Hong, YU Yi-xuan, <i>et al.</i> (1345)
Comparison of the Estrogenic Activity of Organic Compounds in Source Water and Finished Water from the Yangtze River and Taihu Lake in Certain Areas of Jiangsu Province	JIN Tao, LÜ Xue-min, ZENG Yi-fan, <i>et al.</i> (1351)
Occurrence and Fate of Phthalates in Wastewater Treatment Plants in Beijing, China	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia (1357)
Research on Sludge Toxicity Caused by DMF Biodegradation and Toxicity Spatial Distribution in Sludge Floes	HU Yuan-yuan, YANG Na, DING Yi, <i>et al.</i> (1363)
Study on the Ecological Risk of Wild Veined Rapa Whelk (<i>Rapana venosa</i>) Exposed to Organotin Compounds in Bohai Bay, China	AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, SONG Shuang-shuang, <i>et al.</i> (1369)
Bioaccumulation of Mercury in <i>Crassostrea</i> sp. Exposed to Waste Seawater Discharged from a Coal-fired Power Plant Equipped with a Seawater Flue-gas Desulfurization System	LIU Xi-yao, YUAN Dong-xing, CHEN Yao-jin (1374)
Effects of Imidazolium Chloride Ionic Liquids on the Acute Toxicity and Weight of Earthworm	HUANG Ruo-nan, FAN Jun-jie, TU Hong-zhi, <i>et al.</i> (1380)
Influencing Factors and Mechanism of Arsenic Removal During the Aluminum Coagulation Process	CHEN Gui-xia, HU Cheng-zhi, ZHU Ling-feng, <i>et al.</i> (1386)
Removal of DON in Micro-polluted Raw Water by Coagulation and Adsorption Using Activated Carbon	LIU Bing, YU Guo-zhong, GU Li, <i>et al.</i> (1392)
Mechanism of Catalytic Ozonation for the Degradation of Paracetamol by Activated Carbon	WANG Jia-yu, DAI Qi-zhou, YU Jie, <i>et al.</i> (1402)
Reductive Degradation of Chlorophenols in Aqueous Solution by Gamma Irradiation	PENG Yun-xia, HE Shi-jun, GONG Wen-qi, <i>et al.</i> (1411)
Effect of C/N Ratio on Nitrite Accumulation During Denitrification Process	YUAN Yi, HUANG Yong, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (1416)
Nitrous Oxide Emission During Denitrification for Activated Sludge Acclimated with Methanol as the Organic Carbon	ZHAI Xiao-feng, JIANG Cheng-ai, WU Guang-xue, <i>et al.</i> (1421)
Comparison and Optimization of Cellulose Carbon Source for Denitrification Filter	LI Bin, HAO Rui-xia (1428)
A Novel Municipal Wastewater Treating Process for Energy Production and Autotrophic Nitrogen Removal Based on ANAMMOX	LU Jian-cong, GAO Da-wen, SUN Xue-ying (1435)
Modeling and Dynamic Simulation of the Multimode Anaerobic/Anoxic/Aerobic Wastewater Treatment Process	ZHOU Zhen, WU Zhi-chao, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1442)
Comparing Microbial Community of High Ammonia Wastewater and Municipal Sewage in a Partial Nitrification System	ZHAO Zhi-rui, MA Bin, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (1448)
Analysis of the Fractal Structure of Activated Sludge Floes	RUAN Xiao-dong, LIU Jun-xin (1457)
Rapid Cultivation of Aerobic Nitrifying Granular Sludge with Alternate Loading Method	SHEN Na, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1464)
Acceleration of the Formation of Aerobic Granules in SBR by Inoculating Different Proportions and Different Diameters of Mature Aerobic Granules	XIONG Guang-cheng, PU Wen-hong, YANG Chang-zhu (1472)
Mechanisms of the Improvement in Dewaterability of Alkaline Fermented Sludge by Simultaneous Ammonium and Phosphate Recovery	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang, GU Guo-wei (1479)
Use of Flow Cytometric Sorting to Assess the Diversity of Eukaryotic Picophytoplankton of Lakes	XIE Wei-wei, GONG Yi, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1485)
Allelopathy Effects of Ferulic Acid and Coumarin on <i>Microcystis aeruginosa</i>	GUO Ya-li, FU Hai-yan, HUANG Guo-he, <i>et al.</i> (1492)
Spatiotemporal Characteristics of Zooplankton Community Structure and Diversity in the Strong Temperature Increment Seawaters near Guohua Power Plant in Xiangshan Bay	ZHU Yi-feng, HUANG Jian-yi, LIN Xia, <i>et al.</i> (1498)
Screening of Epoxy-degrading Halophiles and Their Application in High-salt Wastewater Treatment	WANG Jin, XU Zhen, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (1510)
Biodegradation of Decabromodiphenyl Ether by Intracellular Enzyme Obtained from <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1517)
Influence of Yeast Extract on the Fermentation of Glucose by the Demulsifying Strain <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1	HUANG Xiang-feng, WANG Kai, LI Ming-xia, <i>et al.</i> (1524)
Phylogenetic Analysis of Methanogenic Corn Stalk Degrading Microbial Communities	QIAO Jiang-tao, GUO Rong-bo, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> (1531)
Inhibition of Methanogenium by Erythromycin and Its Domestation	LIU Zi-xu, SUN Li-ping, LI Yu-you, <i>et al.</i> (1540)
Sand Box Study on Fingering Front Morphology for NAPLs Infiltrated in Homogeneous Porous Media	YANG Bin, LI Hui-ying, WU Bin, <i>et al.</i> (1545)
Vertical Distribution and Possible Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon in Sewage Area Soil	YAO Lin-lin, ZHANG Cai-xiang, LI Jia-le, <i>et al.</i> (1553)
Characteristic and Evaluation of Soil Pollution by Heavy Metal in Different Functional Zones of Hohhot	GUO Wei, SUN Wen-hui, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1561)
Distribution Characteristics of Rice Photosynthesized Carbon in Soil Aggregates of Different Size and Density	LI Miao-miao, NIE San-an, CHEN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1568)
Profile of Soil Microbial Biomass Carbon in Different Types of Subtropical Paddy Soils	SHENG Hao, ZHOU Ping, YUAN Hong, <i>et al.</i> (1576)
Effect of Composting Organic Fertilizer Supplies on Hexachlorobenzene Dechlorination in Paddy Soils	LIU Cui-ying, JIANG Xin (1583)
Remediation of Cu-Pb-Contaminated Loess Soil by Leaching with Chelating Agent and Biosurfactant	LIU Xia, WANG Jian-tao, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (1590)
Effects of Different Temperatures Biochar on Adsorption of Pb(II) on Variable Charge Soils	JIANG Tian-yu, JIANG Jun, XU Ren-kou, <i>et al.</i> (1598)
Preparation and Performance Investigation of <i>Trichoderma viride</i> -Modified Corn Stalk as Sorbent Materials for Oil Spills	LAN Zhou-lin, PENG Dan, GUO Chu-ling, <i>et al.</i> (1605)
Removal of PO ₄ ³⁻ from Solution, Wastewater and Seawater by Modification and Granulation Magnesium and Aluminium Layered Double Hydroxide	XING Kun, WANG Hai-zeng (1611)
Influence of Carboxylic Carbon Nanotube Supported Platinum Catalyst on Cathode Oxygen Reduction Performance of MFC	TU Li-xing, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1617)
Flue Gas Desulfurization by a Novel Biomass Activated Carbon	LIU Jie-ling, TANG Zheng-guang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1623)
Method for Grading Industrial Sectors in Energy Consumption and Its Application	MAO Jian-su, MA Lan (1628)
Dynamics and Environmental Load of Food Carbon Consumption During Urbanization: A Case Study of Xiamen City, China	YAN Zhen, CUI Sheng-hui, LI Gui-lin, <i>et al.</i> (1636)

《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4月15日 34卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 4 Apr. 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