

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第7期

Vol.34 No.7

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

唐山市大气颗粒物 OC/EC 浓度谱分布观测研究	郭育红, 辛金元, 王跃思, 温天雪, 李杏茹, 封孝信 (2497)
北京东灵山地区主要大气污染物浓度变化特征	于阳春, 胡波, 王跃思 (2505)
奥运前期与奥运期间北京市大气细颗粒物特征比较分析	张菊, 欧阳志云, 苗鸿, 王效科, 任玉芬, 宋文质 (2512)
华东森林及高山背景区域臭氧变化特征及影响因素	苏彬彬 (2519)
北京市居家空气微生物粒径及分布特征研究	方治国, 孙平, 欧阳志云, 刘芄, 孙力, 王小勇 (2526)
民用燃煤源中多环芳烃排放因子实测及其影响因素研究	海婷婷, 陈颖军, 王艳, 田崇国, 林田 (2533)
醇类汽油车醇醛酮、芳香烃和烯烃类排放的试验研究	张凡, 王建海, 王小臣, 王建昕 (2539)
微波解吸-催化燃烧净化甲苯研究	曹晓强, 张浩, 黄学敏 (2546)
生物滴滤池对 BTEX 的去除及相应细菌群落分析	李建军, 廖东奇, 许玫英, 孙国萍 (2552)
炼油厂废水处理站挥发性羰基化合物成分谱研究	周博宇, 刘旺, 王伯光, 周咪, 黄青, 周磊 (2560)
春季东、黄海溶解甲烷的分布和海气交换通量	曹兴朋, 张桂玲, 马啸, 张国玲, 刘素美 (2565)
千岛湖湖泊区水体季节性分层特征研究	董春颖, 虞左明, 吴志旭, 吴春金 (2574)
新安江流域土地利用结构对水质的影响	曹芳芳, 李雪, 王东, 赵越, 王玉秋 (2582)
长江中下游草型湖泊浮游植物群落及其与环境因子的典范对应分析	孟睿, 何连生, 过龙根, 席北斗, 李中强, 舒俭民, 刁晓君, 李必才 (2588)
河口盐度梯度下溶解态核酸的微生物可利用性	杨青青, 李朋辉, 黄清辉 (2597)
水藻暴发的影响因素定量化研究初步	张卓, 宋志尧, 黄昌春, 俞肇元 (2603)
深水型水库藻类功能组时空演替及生境变化的影响	卢金锁, 胡亚潘 (2611)
结合水体光学分类反演太湖总悬浮物浓度	周晓宇, 孙德勇, 李云梅, 李俊生, 龚绍琦 (2618)
Subwet 模型在人工湿地设计中的应用	李慧峰, 黄津辉, 林超 (2628)
白洋淀荷茎叶提取液对铜绿微囊藻及四尾栅藻化感效应	何连生, 孟繁丽, 刁晓君, 李一葳, 孟睿, 席北斗, 舒俭民 (2637)
苦草 (<i>Vallisneria spiralis</i>) 对城市缓流河道黑臭底泥理化性质的影响	许宽, 刘波, 王国祥, 马久远, 曹勋, 周峰 (2642)
铁屑-微生物协同还原去除水体中 Cr(VI) 研究	汤洁, 王卓行, 徐新华 (2650)
铁铜催化剂非均相 Fenton 降解苯酚及机制研究	杨岳主, 李玉平, 杨道武, 段锋, 曹宏斌 (2658)
不同形态无机氮对水中微量药物安替比林光降解效能影响	赵倩, 陈超, 封莉, 张立秋 (2665)
邻苯二甲酸二甲酯的紫外光-H ₂ O ₂ 降解机制研究	刘青, 陈成, 陈泓哲, 杨绍贵, 何欢, 孙成 (2670)
二胺基改性有序多孔 SBA-15 对溶液中 Cd ²⁺ 离子的吸附研究	张萌, 杨亚提, 秦睿, 王力, 张增强, 李忠宏, 李荣华, 孟昭福 (2677)
酸化蛭石的表面有机修饰及其对疏水性微污染物的吸附	蒋争明, 于旭彪, 胡芸, 任源, 李雪辉, 韦朝海 (2686)
基于废陶瓷的多孔陶瓷研制及其对 Ni ²⁺ 的吸附性能	张永利, 王承智, 史册, 尚玲玲, 马瑞, 董婉莉 (2694)
树皮支持的厌氧生物法去除地下水中的高氯酸盐	王蕊, 刘菲, 陈楠, 陈鸿汉 (2704)
Cr(VI) 污染地下水修复的 PRB 填料实验研究	朱文会, 董良飞, 王兴润, 翟亚丽 (2711)
化学沉淀法去除稀土湿法冶炼废水中钙与高浓度氨氮研究	王浩, 成官文, 宋晓薇, 徐子涵, 蒙金结, 董传强 (2718)
镍铁尾矿硫酸浸出动力学研究	陈安安, 周少奇, 黄鹏飞 (2729)
HRT 对 A ² O 工艺中典型多环麝香迁移转化的影响	刘鹏程, 黄满红, 陈东辉, 陈亮 (2735)
发酵液作为 EBPR 碳源的动力学模拟	张超, 陈银广 (2741)
强化污泥利用水解反应器改善碳源与污泥减量作用研究	熊娅, 王强, 宋英豪, 朱民, 林秀军 (2748)
污泥胞外聚合物的提取方法及其对污泥脱水性能的影响	周俊, 周立祥, 黄焕忠 (2752)
不同粒径铁铝泥对砷(Ⅲ)的吸附效果	林璐, 胥嘉瑞, 吴昊, 王昌辉, 裴元生 (2758)
我国畜禽粪便污染的区域差异与发展趋势分析	仇焕广, 廖绍攀, 井月, 栾江 (2766)
浙北平原富硒土壤资源区硒来源的定量分离	徐明星, 潘卫丰, 岑静, 马学文 (2775)
三江平原土地利用方式变化对土壤锰形态影响	张仲胜, 吕宪国, 宋晓林 (2782)
吉林前郭水田土壤有机碳垂直分布规律和储量研究	汤洁, 张雯辉, 李昭阳, 张楠, 胡猛 (2788)
关中地区农田土壤有机碳固存速率及影响因素: 以陕西武功县为例	张晓伟, 许明祥 (2793)
三峡库区不同林草措施土壤活性有机碳及抗蚀性研究	黄茹, 黄林, 何丙辉, 周立江, 于传, 王峰 (2800)
土壤自养微生物同化碳向土壤有机碳库输入的定量研究: ¹⁴ C 连续标记法	史然, 陈晓娟, 吴小红, 简燕, 袁红朝, 葛体达, 隋方功, 童成立, 吴金水 (2809)
西南丘陵区保护性耕作下小麦农田土壤呼吸及影响因素分析	张赛, 张晓雨, 王龙昌, 罗海秀, 周航飞, 马仲炼, 张翠微 (2815)
丹江口水库迁建区土壤有机氯农药的分布特征及风险评价	李子成, 秦延文, 郑丙辉, 张雷, 赵艳民, 时瑶 (2821)
农药企业场地苯系物污染风险及调控对策	庞博, 王铁宇, 杜立宇, 谭冰, 朱朝云, 吕永龙 (2829)
水分管理对硫铁镉在水稻根区变化规律及其在水稻中积累的影响	张雪霞, 张晓霞, 郑煜基, 王荣萍, 陈能场, 卢普相 (2837)
硝酸盐对沉积物中有机物氧化减量及微生物群落结构的影响	刘近, 邓代永, 孙国萍, 刘永定, 许玫英 (2847)
零价铁对脱色希瓦氏菌 S12 偶氮还原的促进作用	周庆, 陈杏娟, 郭俊, 孙国萍, 许玫英 (2855)
2 株好氧反硝化菌的筛选及其强化贫营养生物膜脱氮效果	全向春, 岑艳, 钱殷 (2862)
反硝化聚磷菌快速富集、培养及其荧光原位杂交技术鉴别	刘立, 汤兵, 黄绍松, 付丰连, 张启泰, 黎健彬, 罗建中 (2869)
1 株反硝化除磷菌的鉴定及其反硝化功能基因研究	张倩, 王弘宇, 桑穗姣, 李孟, 杨开, 马放 (2876)
1 株高效 BBP 降解菌的分离与特性研究	陈湖星, 杨雪, 张凯, 钟秋, 郭佳, 王攀, 熊丽, 刘德立 (2882)
微生物-化学水解联合作用下烟嘧磺隆的降解	张小林, 李咏梅, 袁志文 (2889)
扑草净降解菌的分离、筛选与鉴定及降解特性初步研究	周际海, 孙向武, 胡锋, 李辉信 (2894)
固定化 <i>Lysinibacillus cresolovorans</i> 的 PVA-SA-PHB-AC 复合载体制备及间甲酚的降解	李婷, 任源, 韦朝海 (2899)
生物破乳菌 <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1 表面活性物质提取与其破乳特性分析	黄翔峰, 张树聪, 彭开彰, 陆丽君, 刘佳 (2906)
A ² O 工艺活性污泥中可培养丝状细菌的多样性	高莎, 金德才, 赵志瑞, 齐嵘, 彭霞薇, 白志辉 (2912)
生活垃圾堆肥渗滤液污染物组成与演化规律研究	李丹, 何小松, 席北斗, 魏自民, 潘红卫, 赵国鹏, 崔东宇 (2918)
专辑征稿通知 (2551) 《环境科学》征稿简则 (2685) 《环境科学》征订启事 (2868) 信息 (2875)	

农药企业场地苯系物污染风险及调控对策

庞博^{1,2}, 王铁宇^{1*}, 杜立宇², 谭冰^{1,3}, 朱朝云¹, 吕永龙¹

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110866; 3. 辽宁工程技术大学环境科学与工程学院, 阜新 123000)

摘要: 苯系物是一类重要的环境污染物, 可通过呼吸道、消化道和皮肤进入人体而产生危害, 其毒性主要表现在对人体致畸、致突变和致癌等方面. 以河北省某农药企业为例, 采用吹扫捕集气质联用、固体吸附/热脱附-气相色谱和 EPA 健康风险评价模型, 对场地内苯系物的分布及人体健康风险进行了综合分析, 并据此提出相应的风险调控对策建议. 结果表明, 厂区内土壤、灰尘、空气、地下水及废水中均不同程度检出苯系物, 生产区内灰尘中苯系物含量较高 ($7.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 其中甲苯的含量 ($5.64 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 超过了加拿大工业用地标准. 设定 10 a、20 a、30 a 这 3 个工作年限情景, 相应的总非致癌危害指数分别为 4.19×10^{-3} 、 8.25×10^{-3} 和 1.22×10^{-2} , 均小于 1; 苯的致癌危害指数依次是 1.70×10^{-7} 、 3.34×10^{-7} 和 4.92×10^{-7} , 小于 10^{-6} , 表明该企业场地苯系物对职工尚没有造成明显的致癌和非致癌风险, 但是随着工作年限的增加, 职工受到健康危害的风险程度加大. 基于研究结果, 提出了厂区环境质量改善和人员安全防护的风险对策建议.

关键词: 苯系物; 农药化工场地; 致癌风险指数; 非致癌风险指数; 风险管理

中图分类号: X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)07-2829-08

Risk Assessment and Countermeasure of BTEX in Pesticide Factory

PANG Bo^{1,2}, WANG Tie-yu¹, DU Li-yu², TAN Bing^{1,3}, ZHU Zhao-yun¹, LÜ Yong-long¹

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: BTEX are important environmental pollutants, harmful to human through respiratory inhalation, digestive tract and skin contact, and also have teratogenic, mutagenic and carcinogenic effects. BTEX were detected in multi-media to identify their distributions and assess their human health risk in a pesticide factory in Hebei province. Purge and trap GC-MS, adsorption/thermal desorption GC chromatography and the health risk assessment model were applied, and corresponding management measures were proposed. The results showed that BTEX existed in soil, dust, air, groundwater and wastewater. The concentration of BTEX in dust of the production area was $7.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, in particular the concentration of toluene was $5.64 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, exceeding the Canadian industrial land standard. Building three scenarios for working more than 10 years, 20 years and 30 years, the total non-carcinogens index was 4.19×10^{-3} , 8.25×10^{-3} and 1.22×10^{-2} , respectively, all lower than 1; the carcinogens index of benzene was 1.70×10^{-7} , 3.34×10^{-7} and 4.92×10^{-7} , respectively, all lower than 10^{-6} . It indicated that there was no significant non-carcinogens and carcinogens hazard to workers inside the factory, but they might be exposed to more health risks if their work experience increase. Finally, recommendations for improving the environmental quality and personnel security in the factory were proposed based on the research results.

Key words: BTEX; pesticide factory; carcinogens index; non-carcinogens index; risk management

随着经济和社会的迅速发展, 苯系物在生活和生产中的使用与日俱增, 在石油、化工、炼焦等生产活动以及运输、储存过程中的成品泄漏等均可能导致苯系物进入环境中^[1,2], 对空气、水体、土壤以及农作物等造成污染, 并对人体健康产生危害^[3~5]. 苯系物(BTEX)通常包括苯、甲苯、乙苯、二甲苯和苯乙烯等, 属芳香烃类化合物, 可对人体造成急性和慢性毒性作用, 损伤肝脏和造血系统, 具有持久性和蓄积性作用, 其中苯已被世界卫生组织(WHO)确定为强烈致癌物质, 并列为优先检测污染物. 因此, BTEX的环境暴露、源排放估算以及健康风险评价

等研究已引起国内外广泛关注^[6~11]. 然而针对以甲苯为原料的农药化工企业场地苯系物分布及健康风险评价鲜见报道. 因此, 研究农药企业苯系物来源、分布及健康风险, 对于采取相应的治理和管理措施, 加强苯系物的有效控制及职工防护具有重要意义.

收稿日期: 2012-10-29; 修订日期: 2013-01-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171394); 环境保护公益性行业科研专项(201009032)

作者简介: 庞博(1988~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为区域环境质量评价与管理对策, E-mail: 13998363945@163.com.cn

* 通讯联系人, E-mail: wangty@rcees.ac.cn

1 材料与方法

1.1 研究企业状况

河北省某农药企业所在区域内年主导风向为 NNE, 频率为 13%, 春季主导风向为 NNW, 东亚大陆性季风气候, 中温带亚干旱的蒙中区, 年均降水量 414.4 mm 左右. 该厂地处冲击带状平原, 该段上部为厚 30~50 m 的冲击砂砾石层, 透水性较强, 对污染物的吸收净化能力较弱; 下部为一层厚 50~80 m 的黏土为主的地层, 中央夹有淤泥质的砂砾薄层. 该区含水层厚度 20~120 m, 埋藏深度 2~120 m, 以潜水为主. 含水层以粗砂粒石夹粉细砂透镜体为主, 集中分布在上部 50 m 深度以内, 含水层在 20~40 m 左右. 大气降水和基岩裂隙水为地下水的主要补给来源.

该企业于 2001 年 7 月组建, 主要产品是农药原药, 如三氯吡氧乙酸 ($300 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$)、氯氟吡氧乙酸 ($600 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$), 生产过程中使用大量的有机溶剂甲苯 ($29.7 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$), 三氯吡啶醇钠 DMF ($330 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$), 氯乙酸甲酯 ($150.2 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$), 二甲基甲酰胺 ($9.9 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$), 环丁砜 ($8.4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$), 工艺环节有缩合、脱色、压滤、蒸馏、离心、氟化、氨解、静置分层等. 农药厂内存放大量的原辅料及产品, 生产车间内各工艺环节均有可能产生苯系物.

1.2 样品采集和分析

2012 年 5 月在研究区内采取空气、土壤、灰尘、地下水以及工艺废水样品. 灰尘和土壤样品分别采自企业内生活区和生产区, 地下水样品采自企业内供职工生活的井水 (图 1). 空气样品由 Tenax 采样管收集企业内生活区和生产区的空气样品. 空气样品分析方法参照文献 [12, 13], 其他样品分析方法采用吹扫捕集-GC/MS 联用, 参照 EPA method 5035 和 8260c [14, 15].

1.3 健康风险评价

1.3.1 暴露评估

暴露评估指定量或定性估计暴露量、暴露频率、暴露期和暴露方式. 一般情况下暴露途径主要有: 经口、吸入、皮肤直接接触及食用场地上的植物果实等 [16]. 结合研究区实际情况, 厂内职工暴露途径主要有 3 条: 灰尘直接暴露于人群, 通过吸入或皮肤接触受到健康威胁; 苯系物挥发至大气中, 通过呼吸暴露于人群; 苯系物经降雨淋滤进入地下水, 暴露于饮用厂内地下水的人群. 本研究基于 US EPA 的暴露计算方法 [17], 对厂区内苯系物的健康风

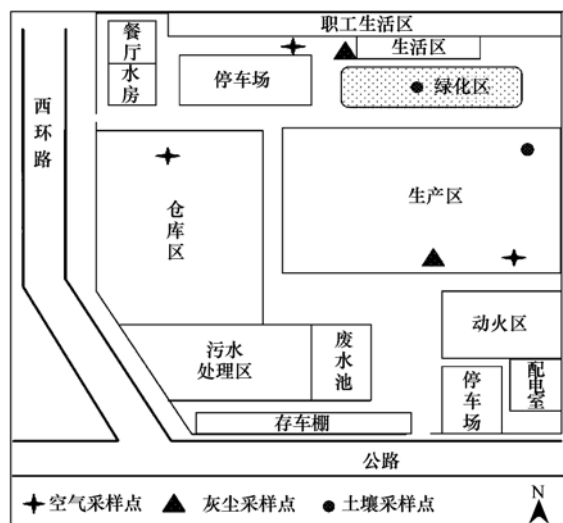


图 1 厂区结构及采样点分布示意

Fig. 1 Plant structure and sampling sites

险进行评价, 具体计算公式如下.

(1) 灰尘经口摄入量 [18]:

$$CDI_{\text{经口}} = \frac{c \times IR \times CF \times EF \times L}{BW \times AT} \quad (1)$$

(2) 灰尘经皮肤接触摄入量 [18]:

$$CDI_{\text{皮肤接触}} = \frac{c \times CF \times SA \times AF \times ABS \times EF \times L}{BW \times AT} \quad (2)$$

(3) 空气吸入摄入量 [19]:

$$CDI_{\text{空气吸入}} = \frac{c \times IR \times EF \times ED \times L}{BW \times AT} \quad (3)$$

(4) 饮水途径摄入量 [20]:

$$CDI_{\text{饮用水}} = \frac{c \times U \times EF \times L}{BW \times AT} \quad (4)$$

式中, EF 为空气 ($\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$)、水 ($\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$) 和灰尘 ($\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$) 中暴露频率, ED 为空气中暴露时间 ($\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$), L 为暴露期 (a), 其他参数意义和赋值 [21] 见表 1.

1.3.2 风险表征

(1) 非致癌风险评价

非致癌风险通常以危害指数表示, 定义为由于暴露造成的长期摄入量与参考剂量的比值. 当潜在风险物质只有一种时, 非致癌风险通常用 HQ (hazard quotient) 表示:

$$HQ = CDI/RfD \quad (5)$$

当潜在风险物质超过一种时, 非致癌风险通常用 HI (hazard index) 表述:

$$HI = HQ_1 + HQ_2 + \cdots + HQ_n \quad (6)$$

式中, CDI 为长期日摄入量 [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$]; RfD 为参考剂量 [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$] (见表 2), HQ_1 、 $HQ_2 \cdots$

表 1 苯系物日平均暴露量计算参数
Table 1 Average daily exposure parameters of BTEX

项目	参数	单位	含义	成人取值	数据来源
基础参数	<i>c</i>	mg·L ⁻¹	地下水中苯系物质量浓度	90% UCL	本研究
		mg·cm ⁻³	大气中苯系物质量浓度		
		mg·kg ⁻¹	土壤中苯系物质量浓度		
暴露行为参数	BW	kg	平均体重	65	本研究
	AT	d	平均作用时间	10 950(非致癌) 25 550(致癌)	US EPA
其他参数	IR	m ³ ·h ⁻¹	空气摄入量	0.27	US EPA
		mg·d ⁻¹	灰尘摄入量	30	
	<i>U</i>	L·d ⁻¹	日饮用水量	2	
	CF		转化系数	10 ⁻⁶	
	SA	cm ² ·d ⁻¹	皮肤暴露面积	2 011	[22,23]
	AF	mg·cm ⁻²	皮肤对灰尘吸附系数	0.07	US EPA
	ABS		皮肤吸收系数	0.1	

HQ_{*n*} 为 *n* 种风险物质的非致癌风险. 非致癌健康风险指数小于或等于 1.0 的风险指数是可以接受的.

(2) 致癌风险评价

对于致癌性物质, 一般没有剂量阈值, 只要微量存在, 即会对人体产生不利影响. 致癌风险值 (Risk) 表示, 通过人体长期日摄入量与致癌斜率因

子 SF 的乘积来表示(见表 2), 可用下式计算:

$$\text{Risk} = \text{CDI} \times \text{SF} \tag{7}$$

US EPA 对致癌物质可接受的风险水平数量级在 10⁻⁶ ~ 10⁻⁴, 小于 10⁻⁶ 表示风险不明显, 10⁻⁶ ~ 10⁻⁴ 表示有风险, 大于 10⁻⁴ 表示有较显著的风险^[24].

表 2 苯系物毒性因子
Table 2 BTEX toxicity factors

苯系物	IARC 致癌等级	毒理效应	RfD/mg·(kg·d) ⁻¹	SF/kg·d·mg ⁻¹
苯	G1	神经系统、造血系统及致癌毒性	4 × 10 ⁻³	2.73 × 10 ⁻²
甲苯	G3	肝、肾、神经系统病变, 鼻上皮组织恶化	8 × 10 ⁻²	
乙苯	G2B	肝肾、生殖系统毒性	1 × 10 ⁻¹	
二甲苯	G3	肥胖症、降低运动协调能力	2 × 10 ⁻¹	
苯乙烯	G2B	眼、呼吸道毒性	2 × 10 ⁻¹	

2 结果与讨论

2.1 农药企业场地苯系物暴露特征

2.1.1 厂区内空气中的苯系物

由表 3 可以看出, 空气中苯系物主要由苯和甲苯组成, 乙苯、二甲苯和苯乙烯虽有检出但量极少. 厂区内空气中苯系物各组分浓度远低于国内职业卫生标准中关于工作场所有害物质规定的限值(平均容许浓度: 苯 < 6 000 μg·m⁻³, 甲苯 < 50 000 μg·m⁻³, 乙苯 < 150 000 μg·m⁻³, 二甲苯 < 50 000 μg·m⁻³, 苯乙烯 < 50 000 μg·m⁻³)^[25]; 与 US EPA 工业区空气筛选值相比(苯 < 1.6 μg·m⁻³, 甲苯 < 22 000 μg·m⁻³, 乙苯 < 49 μg·m⁻³, 二甲苯 < 440 μg·m⁻³, 苯乙烯 < 4 400 μg·m⁻³)^[26], 厂内空气中苯的最大值 3.10 μg·m⁻³, 是 EPA 筛选值的 1.94 倍, 其他苯系物都未超过 EPA 工业筛选值.

空气中甲苯最大值(49.30 μg·m⁻³) 位于生产

区东南角, 最小值(4.30 μg·m⁻³) 则位于生产区西北角, 这与企业所在区域的主导西北向东南的季风特征密切相关. 甲苯是该农药化工企业的重要原料溶剂之一, 年使用量 29.7 t, 虽然大部分甲苯在工艺中被回收利用, 但仍有部分甲苯进入末端废气, 含甲苯的废气经有机废气燃烧器, 20 m 高排气筒排入空气. 此外, 区域的主导风向为西北风, 致使空气中的甲苯随风力作用由西北方向迁移至东南方向, 受风力作用, 可能会影响厂区下风向的村庄. 生活区空气中甲苯含量为 28.80 μg·m⁻³, 生活区较高水平的甲苯, 可能与生活区内设有停车厂, 机动车尾气排放有关. 其他苯系物可能来源于碳氢化合物不完全燃烧、农药合成中复杂的化学反应产生的副产物, 还有光化学反应的共同作用.

2.1.2 厂区内土壤和灰尘中的苯系物

厂内生活区和生产区土壤样品中只检出少量的二甲苯(11.07 ng·g⁻¹); 灰尘中苯系物主要由甲

苯、乙苯和二甲苯组成(见表3)。鉴于国内还未将苯系物纳入工业厂区土壤和灰尘标准中,本研究选取加拿大工业用地标准做参比,该土壤标准按照土地利用类型分类^[27]。灰尘中乙苯(383.54~462.47 ng·g⁻¹)和二甲苯(394.70~358.47 ng·g⁻¹)均远小于加拿大标准限值(20 000 ng·g⁻¹),只有甲苯(5 640.8 ng·g⁻¹)高于标准800 ng·g⁻¹,超过加拿大标准的7.05倍。空气中较高含量的甲苯通过干湿沉降进入地表灰尘,可能是造成灰尘甲苯污染的重要原因。生活区土壤中苯系物含量整体较低,可见机动车尾气主要对厂内生活区中空气影响较大,而对其他环境介质影响较小,因此厂内苯系物的主要来源是该农药厂生产过程。

苯系物在厂区内土壤和灰尘中的分布趋势表现为:生产区灰尘>生活区灰尘>生产区土壤>生活区土壤。生活区土壤接触污染物的浓度低,随温度的变化,土壤中苯系物向空气挥发,并向深层土壤迁移。灰尘粒径较小,在空气中漂浮,与空气中苯系物接触时间长,接触面积大,吸附量大,降落至地面时有一部分苯系物挥发出去,同时有一部分吸附在灰尘上。生活区灰尘离生产工艺及排放源较远,运输距离较长,挥发较多;生产区内灰尘,离苯系物排放源较近,接触空气中苯系物浓度高,运输距离短,挥发较少,因此生产区内灰尘中的苯系物含量相对较高。需要注意的是,地表灰尘

颗粒较小,易随风力漂浮,而长距离运输极易造成企业周边水体、土壤以及地表植物的污染,并通过吸入或摄食等多种途径形成企业周边居民的健康风险危害。

2.1.3 厂区内地下水和废水中的苯系物

工艺废水中检出甲苯质量浓度较高23.08 μg·L⁻¹,高于苯、二甲苯和苯乙烯1~2个数量级(见表3)。废水中苯系物的检出量均达到国家《污水排放综合标准》一级排放标准(苯<100 μg·L⁻¹,甲苯<100 μg·L⁻¹,二甲苯<400 μg·L⁻¹)的要求^[28]。地下水中二甲苯检出量较高,为73.65 μg·L⁻¹,高于其他苯系物1~2个数量级。地下水中苯系物含量远低于生活饮用水卫生标准(甲苯<700 μg·L⁻¹、乙苯<300 μg·L⁻¹、二甲苯<500 μg·L⁻¹、苯乙烯20 μg·L⁻¹)^[29]。

整体来看,废水中苯系物的检出量不高,低于灰尘和空气中苯系物含量,由于苯系物自身的挥发性外加大气的涡流作用,导致苯系物大部分进入产品中或生产过程中挥发出去,少部分进入到工艺末端。地下水中苯系物的主要来源可能是土壤中苯系物解吸进入到含水层。厂区下部为一层厚50~80 m的黏土为主的地层,黏土具有较大的比表面积,可以吸附污染物。表层土壤中苯系物迁移至深层土壤,由黏土吸附污染物,苯系物的挥发作用较为强烈,又释放到地下水中。

表3 厂区内苯系物检测结果

Table 3 Test results of BTEX in the factory area

样品类型	名称	苯	甲苯	乙苯	二甲苯	苯乙烯
大气/μg·m ⁻³	生活区	3.10	28.80	1.00	4.90	—
	厂区西北角	1.00	4.30	— ¹⁾	2.50	0.90
	厂区东南角	1.20	49.30	0.90	4.40	—
土壤/ng·g ⁻¹	生活区土壤	—	—	—	—	—
	生产区土壤	—	—	—	11.07	—
灰尘/ng·g ⁻¹	生活区灰尘	—	—	383.54	394.70	—
	生产区灰尘	—	5 640.8	462.47	358.47	—
废水/μg·L ⁻¹	废水01	0.69	23.08	—	1.22	2.02
	废水02	—	21.91	—	—	2.08
地下水/μg·L ⁻¹	厂区内地下水	—	0.70	6.65	73.65	2.59

1) “—”表示未检出,低于检出限

2.2 苯系物的健康风险评价

根据研究区的具体情况,按照劳动法规定去除享受带薪年假,设置10 a、20 a、30 a这3个梯级的风险周期,每天工作8 h,相应的职工每年工作天数分别为:300、295、290 d。利用US EPA健康风险评价模型,评价农药化工企业生产过程对厂内职工

的健康风险。目标污染物中除了苯为致癌物,存在致癌风险外,其他苯系物只需计算非致癌风险值。厂内苯系物不同暴露途径的非致癌风险评价结果见表4和图2。

2.2.1 非致癌健康风险评价

图2是苯系物通过吸入污染灰尘、皮肤接触污

表 4 不同风险周期的非致癌风险
Table 4 Non-carcinogenic risks of different risk cycle

组别	类型	10 a	20 a	30 a
暴露途径	灰尘经口	1.70×10^{-6}	3.34×10^{-6}	4.92×10^{-6}
	灰尘经皮	7.96×10^{-7}	1.57×10^{-6}	2.31×10^{-6}
	空气经口	3.04×10^{-3}	5.98×10^{-3}	8.81×10^{-3}
	饮用水	1.15×10^{-3}	2.27×10^{-3}	3.35×10^{-3}
风险物质	甲苯	2.84×10^{-3}	5.58×10^{-3}	8.23×10^{-3}
	乙苯	2.20×10^{-4}	4.33×10^{-4}	6.38×10^{-4}
	二甲苯	1.09×10^{-3}	2.15×10^{-3}	3.17×10^{-3}
	苯乙烯	4.51×10^{-5}	8.87×10^{-5}	1.31×10^{-4}
总非致癌风险		4.20×10^{-3}	8.25×10^{-3}	1.22×10^{-2}

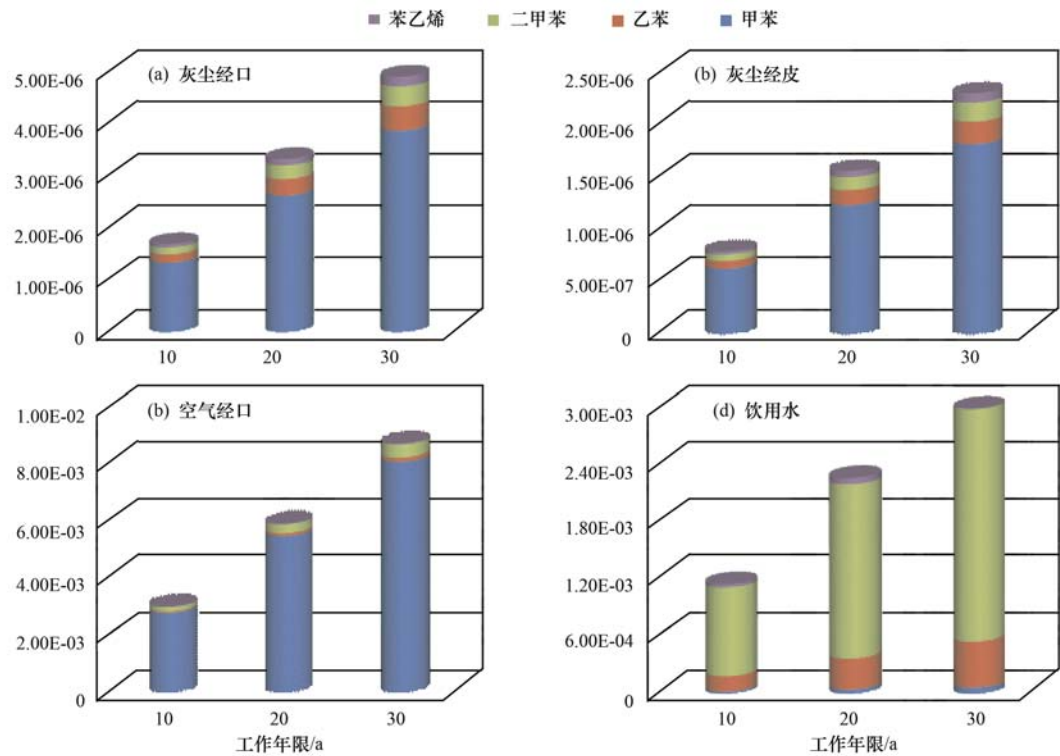


图 2 厂内苯系物不同途径非致癌风险趋势

Fig. 2 Non-carcinogenic risk trends of BTEX in the factory

染灰尘、呼吸污染空气和饮用厂内地下水这 4 种途径,不同工作年限对职工非致癌风险趋势. 由图 2 可以清楚看出,随着工作年限的增加,4 种暴露途径对厂内职工非致癌风险均呈上升趋势. 在灰尘和空气两种暴露途径中,甲苯的非致癌风险远高于乙苯、二甲苯和苯乙烯;而在饮用水暴露途径中,二甲苯的非致癌风险远高于甲苯、乙苯和苯乙烯. 由此可见,不同苯系物通过不同暴露途径对人体造成的非致癌危害也不同. 对于非致癌健康风险,当风险指数超过 1 时,认为会对人体健康产生危害. 表 4 中给出当工作年限分别为 10 a、20 a 和 30 a 时,不同途径和风险物质对厂内职工造成的非致癌危害,

可以看出,无论是单种风险物质或是单种暴露途径产生的非致癌危害指数均未超过 1. 工作年限为 10 a、20 a、30 a 总非致癌危害指数分别是 4.20×10^{-3} 、 8.25×10^{-3} 、 1.22×10^{-2} 也小于 1,苯系物不会对厂区内职工产生明显的非致癌危害,但是职工工作时间越长,受到的非致癌危害也越大.

灰尘对人体健康危害主要通过吸食和皮肤接触途径,吸入灰尘和皮肤接触对职工的非致癌指数的数量级为 10^{-6} ,并且经口途径高于皮肤接触(见图 2). 通过空气吸入途径产生的非致癌危害大约是饮用水的 2~3 倍,这两种暴露途径的非致癌指数数量级均为 10^{-3} (见表 4),远远高于灰尘经口和经皮.

计算单种途径占总非致癌风险的百分比, 3 个不同工作年限的情景假设,并不影响暴露途径非致癌风险的百分比组成(见图 3). 从图 3 中可以看出空气吸入占总非致癌危害的 72%, 饮用水占总非致癌危害的 28%. 甲苯在灰尘和空气中非致癌危害较大, 二甲苯在饮用水中非致癌危害较大(见图 2); 计算单种物质占总非致癌风险的百分比, 工作年限的情景假设也同样不影响风险物质非致癌风险的百分比组成(见图 4). 从图 4 中可以清晰体现出, 甲苯和二甲苯占总非致癌风险的百分比较多, 其中甲苯占 68%, 二甲苯占 26%, 甲苯和二甲苯的非致癌危害指数超过 10^{-3} , 高于乙苯的非致癌危害指数一个数量级, 高于苯乙烯两个数量级(见表 4). 因此, 苯系物中甲苯和二甲苯是主要的非致癌污染物, 空气吸入和饮用水摄入是危害人体健康的主要暴露途径.

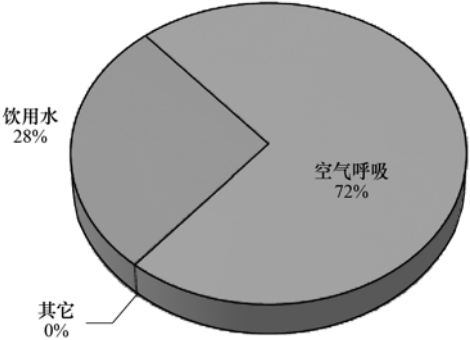


图 3 不同途径非致癌风险
Fig. 3 Non-carcinogens risk of different pathways

2.2.2 致癌健康风险评价

本研究只有空气中检出致癌物苯, 因此只考虑吸入空气中苯的致癌健康风险. US EPA 致癌风险评价指南中, 认为风险水平处于 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ 是可以接受范围, 小于 10^{-6} 风险不明显. 工作年限为 10 a、20 a、30 a 时, 厂内苯的致癌危害指数分别是 1.70×10^{-7} 、 3.34×10^{-7} 和 4.92×10^{-7} , 通过呼吸途径

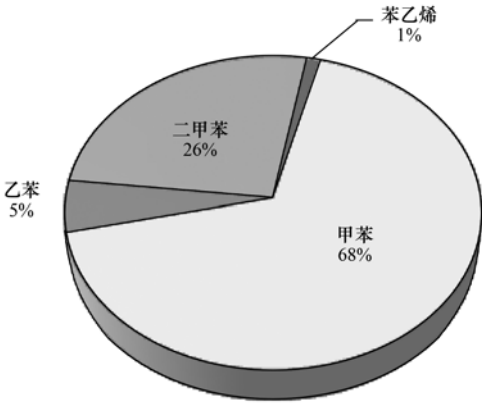


图 4 不同物质非致癌风险
Fig. 4 Non-carcinogens risk of different pollutants

对厂内职工致癌危害较小, 但是随着工作年限的增加, 致癌风险也随之增加. US EPA 研究表明, 空气中存在痕量的苯系物也会对人体健康有较大影响, 尤其是苯, 在低浓度下亦有较强的致癌级, 人体长期暴露于含有 $0.13 \sim 0.23 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 苯的空气中, 将会使致癌风险增加万分之一^[30]. 厂内空气中苯的含量范围 $1.20 \sim 3.20 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ (见表 3), 高于 $0.23 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$. 因此, 虽然致癌危害指数小于 10^{-6} , 但是长期暴露于厂内空气中, 会增加厂内职工致癌风险.

3 风险管理对策与建议

3.1 企业现有环境管理状况

企业建立了专职的安全部, 目前运行处理设施有一个污水站($400 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$) 和垃圾填埋场, 污水站与生产过程同步运行, 垃圾每年定期填埋 1~2 次. 污水站安装了在线监测仪, 企业有专门的化验室, 每天 3 次监测污水处理的情况, 主要是一些常规指标如 COD、氨氮, 并制定了内部应急监测计划(图 5). 但是并没有针对特定介质及特定污染物制定相应的监管措施.

排放量	环境调查	污染物	排放量	环境调查	污染物
废气 $0.765 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$	厂内空气	苯系物	废气 $0.209 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$	厂内空气	苯系物
	地下水	重金属		地下水	重金属
	土壤	硫酸铵		土壤	环己酮
废水 $2.97 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	灰尘	氯化钠	废水 $0.628 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	灰尘	氯化钠
	工艺废水	其他有机物		工艺废水	其他有机物
氨氯吡啶酸			氯氟吡氧乙酸		
污染特征			管理措施		
主要污染物: 苯、甲苯和二甲苯			机构设置: 安全部、环保部		
健康风险: 无明显致癌和非致癌风险, 长期暴露会增加职工的健康风险			环保设施: 污水处理站、垃圾填埋场		
风险源: 厂内厌氧和地表灰尘			监控项目: BOD ₅ 、COD、氨氮、SO ₂ 、NO _x 等水和大气中常规指标		

图 5 厂内污染特征及管理措施
Fig. 5 Pollution characteristics and management measures in the factory

3.2 企业环境质量改善建议

(1) 废水 增加废水中的监测项目,不仅要包括常规的监测项目如 BOD_5 、 COD 、氨氮等,还要将企业工艺特征污染物如甲苯、二甲苯纳入监测范围,如企业内不具备监测能力,应交由当地环保局协助完成。还应增强监测频率,做到实时动态监测,加强厂内污水处理站的日常维护,保证污水处理有效运行,确保工艺废水达到国家污水排放一级标准要求。

(2) 废气 增强厂内气体污染物的监测力度,除常规大气污染物如烟尘、 SO_2 、 NO_x 等,应加强对苯、甲苯、二甲苯等企业工艺特征污染物的监测。设立多个废气监测点位,确保在锅炉烟气排放口,有机废气净化燃烧器出口,无组织排放源等有明显废气排放的节点进行实时动态监测。

(3) 厂内灰尘和土壤 厂区内土壤应适当种植绿化植被,避免种植蔬菜或粮食等食用植物,利用土壤与植物的吸附作用降低土壤、灰尘和大气污染。厂区内生活和生产区内灰尘应收集后集中处理,建议采用厂内危险固体废物的处理方式。

3.3 主要排放源和排放途径控制

企业的生产工艺过程及其生产原辅料对空气污染较重,具有挥发性的苯系物可能通过烟道途径逸散到大气,并扩散到周边环境。因此,应从污染源头控制烟气的排放,烟气净化是污染控制的关键。建议该厂结合自身的工艺、原料、烟气排放特征及经济条件,采用干式或湿式烟道气处理措施。干式去除法设备结构简单、投资少、灰尘去除效率高、操作方便、但易造成二次污染;湿式去除法使用最普遍的是文丘里管麻石水膜去除器,去除效率高,取材方便,抗腐蚀,耐磨性好,但需要一套回水处理装置。同时应加强控制烟道气的监测与管理,努力使烟道气排放达到国家和地方以及行业颁布和实施的烟道气污染物含量参数的控制标准。

3.4 工作人员安全防护

(1) 目标管理 将保障工作人员的健康安全纳入企业的整体目标,提高企业全生命周期的安全防范意识,让每位职工了解所使用和生产的产品的化学性质,实现清洁安全生产。

(2) 化学物品 为保护厂内职工安全,应加强化学物品的管理,建立针对每个生产环节的化学品使用与流转程序和规则,防止泄漏和人为泼洒。

(3) 工作车间 保持工作车间的通风性;职工进入生产区内,应佩戴含有活性炭的口罩、防毒口

罩或自吸过滤式防毒面具,减少空气中灰尘的吸入量;佩戴玻璃纤维手套、防苯耐油手套,穿防静电工作服等防护服装,减少皮肤暴露面积。

(4) 日常生活 尽量避免在工作车间内饮水或吃饭;厂内应配置水质净化机,地下水使用时应煮沸,使水中苯系物挥发。

4 结论

(1) 选择河北省某农药企业为对象,针对苯系物分析表明,在场内不同介质中均检出苯系物。空气、废水和地下水中苯系物含量均达到国家相关标准要求,只有部分灰尘中苯系物含量超过加拿大工业标准。设定 10 a、20 a、30 a 3 类工作年限情景,对场内职工做健康风险评价,总非致癌危害指数均小于 1,没有明显的非致癌风险;致癌危害指数也均小于 10^{-6} ,无明显致癌风险。但随着工作年限的增加,职工所受的健康危害会一定程度的加大。

(2) 对场内环境管理状况进行调查,发现苯系物是其特征污染物,虽没有对环境造成严重的影响,但仍应加强对苯系物的存放和排放的管理,加强烟气的监测与控制,加强对职工人身安全的保护。

参考文献:

- [1] 鲁炳闻, 韩春媚, 周友亚, 等. 土壤中苯系物的顶空气相色谱-质谱联用测定方法研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(4): 812-816.
- [2] 童玲, 郑西来, 李梅, 等. 不同下垫面苯系物的挥发行为研究[J]. 环境科学, 2008, 29(7): 2058-2062.
- [3] 毛跟年, 许牡丹, 黄建文. 环境中有毒有害物质与分析检测[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. 122-124.
- [4] Hinwood A L, Rodriguez C, Runnion T, et al. Risk factors for increased BTEX exposure in four Australian cities [J]. Chemosphere, 2007, 66(3): 533-541.
- [5] Kwon J, Welsel C P, Turpin B J. Source proximity and outdoor-residential VOC concentrations: Results from the RIOPA study [J]. Environmental Science and Technology, 2006, 40(13): 4074-4082.
- [6] Son B, Breyse P, Yang W. Volatile organic compounds concentrations in residential indoor and outdoor and its personal exposure in Korea [J]. Environment International, 2003, 29(1): 79-85.
- [7] 范亚维, 周启星. BTEX 的环境行为与生态毒理[J]. 生态学杂志, 2008, 27(4): 632-638.
- [8] 陈鸿汉, 谌宏伟, 何江涛, 等. 污染场地健康风险评价的理论和方法[J]. 地学前缘, 2006, 13(1): 216-223.
- [9] 唐秋萍, 张毅, 王伟. 工业废弃场地健康风险评价[J]. 环境保护科学, 2010, 36(4): 62-64.
- [10] 宁晓宇, 王亘, 刘博. 天津市西南部苯系物浓度季节及空间变化特征[J]. 环境科学研究, 2012, 25(6): 639-644.

- [11] 王宇亮, 张玉洁, 刘俊峰, 等. 2009 年北京市苯系物污染水平和变化特征[J]. 环境化学, 2011, **30**(2): 412-417.
- [12] HJ 583-2010, 环境空气 苯系物的测定 固体吸附/热脱附-气相色谱法[S].
- [13] 周裕敏, 郝郑平, 王海林. 北京城乡结合地空气中挥发性有机物健康风险评估[J]. 环境科学, 2011, **32**(12): 3566-3570.
- [14] US EPA METHOD 5035. Closed-system purge-and-trap and extraction for volatile organics in soil and waste samples [EB/OL]. <http://www.epa.gov/wastes/hazard/testmethods/sw846/pdfs/5035.pdf>.
- [15] US EPA METHOD 8260c. Volatile organic compounds by gas chromatography/mass spectrometry (GC/MS) [EB/OL]. <http://www.epa.gov/wastes/hazard/testmethods/pdfs/8260c.pdf>.
- [16] 姜林, 王岩. 场地环境评价指南[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004. 42-49.
- [17] US EPA 1989. Risk assessment guidance for superfund, volume 1; Human health evaluation manual (part A) interim final [EPA/540/1-89-002] [M].
- [18] 臧振远, 赵毅, 尉黎, 等. 北京市某废弃化工厂的人类健康风险评估[J]. 生态毒理学报, 2008, **3**(1): 48-54.
- [19] 童宏胜, 姚超英. 不同动力公交流动微环境苯系物(BTEX)的浓度水平及健康风险[J]. 环境化学, 2011, **30**(2): 565-566.
- [20] 张映映, 冯流, 刘征涛. 长江口区域水体半挥发性有机污染物健康风险评估[J]. 环境科学研究, 2007, **20**(1): 18-23.
- [21] US EPA, 2011. Exposure factors handbook [EB/OL]. <http://www.epa.gov/ncea/efh>.
- [22] 王宗爽, 段小丽, 刘平, 等. 环境健康风险评估中我国居民呼吸速率暴露参数探讨[J]. 环境科学研究, 2009, **22**(10): 1164-1170.
- [23] 王喆, 刘少卿, 陈晓民, 等. 健康风险评估中中国人皮肤暴露面积的估算[J]. 安全与环境学报, 2008, **8**(4): 152-156.
- [24] US EPA, 2003. Integrated risk information system (IRIS) [EB/OL]. <http://www.epa.gov/ncea/iris/index.html>.
- [25] GBZ 2.1-2007, 工作场所有害因素职业接触限值 化学有害因素[S].
- [26] US EPA, 2012. Regional Screening Levels (RSL): Industrial Air Supporting [EB/OL]. <http://www.epa.gov/region9/superfund/prg/>.
- [27] Canadian Environmental Quality Guidelines (CCME). Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health [EB/OL]. <http://ceqg-rcqe.ccme.ca/>.
- [28] GB 8978-1996, 污水综合排放标准[S].
- [29] GB 5749-2006, 生活饮用水卫生标准[S].
- [30] 李爽, 陈凤君, 朱利中, 等. 大学校园室内 BTEX 的浓度水平、来源及健康风险[J]. 环境科学学报, 2009, **29**(3): 511-515.

CONTENTS

Observation of Size Distribution of Atmospheric OC/EC in Tangshan, China	GUO Yu-hong, XIN Jin-yuan, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (2497)
Changing Characteristics of the Main Air Pollutants of the Dongling Mountain in Beijing	YU Yang-chun, HU Bo, WANG Yue-si (2505)
Characteristic Comparative Study of Particulate Matters in Beijing Before and During the Olympics	ZHANG Ju, OUYANG Zhi-yun, MIAO Hong, <i>et al.</i> (2512)
Characteristics and Impact Factors of O ₃ Concentrations in Mountain Background Region of East China	SU Bin-bin (2519)
Studies on the Size Distribution of Airborne Microbes at Home in Beijing	FANG Zhi-guo, SUN Ping, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (2526)
Emission Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Residential Coal Combustion and Its Influence Factors	HAI Ting-ting, CHEN Ying-jun, WANG Yan, <i>et al.</i> (2533)
Experimental Research on Alcohols, Aldehydes, Aromatic Hydrocarbons and Olefins Emissions from Alcohols Fuelled Vehicles	ZHANG Fan, WANG Jian-hai, WANG Xiao-cheng, <i>et al.</i> (2539)
Combination Process of Microwave Desorption-Catalytic Combustion for Toluene Treatment	CAO Xiao-qiang, ZHANG Hao, HUANG Xue-min (2546)
Removal of BTEX by a Biotrickling Filter and Analysis of Corresponding Bacterial Communities	LI Jian-jun, LIAO Dong-qi, XU Mei-ying, <i>et al.</i> (2552)
Source Profile of Volatile Carbonyl Compounds in Wastewater Treatment Plant of an Oil Refinery	ZHOU Bo-yu, LIU Wang, WANG Bo-guang, <i>et al.</i> (2560)
Distribution and Air-Sea Fluxes of Methane in the Yellow Sea and the East China Sea in the Spring	CAO Xing-peng, ZHANG Gui-ling, MA Xiao, <i>et al.</i> (2565)
Study on Seasonal Characteristics of Thermal Stratification in Lacustrine Zone of Lake Qiandao	DONG Chun-ying, YU Zuo-ming, WU Zhi-xu, <i>et al.</i> (2574)
Effects of Land Use Structure on Water Quality in Xin'anjiang River	CAO Fang-fang, LI Xue, WANG Dong, <i>et al.</i> (2582)
Canonical Correspondence Analysis Between Phytoplankton Community and Environmental Factors in Macrophtic Lakes of the Middle and Lower Reaches of Yangtze River	MENG Rui, HE Lian-sheng, GUO Long-gen, <i>et al.</i> (2588)
Microbial Bioavailability of Dissolved Nucleic Acids Across the Estuarine Salinity Gradient	YANG Qing-qing, LI Peng-hui, HUANG Qing-hui (2597)
Elementary Quantitative Study on Factors of Phytoplankton Bloom	ZHANG Zhuo, SONG Zhi-yao, HUANG Chang-chun, <i>et al.</i> (2603)
Spatiotemporal Succession of Algae Functional Groups and the Influence of Environment Change in a Deep-water Reservoir	LU Jin-suo, HU Ya-pan (2611)
Hyperspectral Remote Sensing of Total Suspended Matter Concentrations in Lake Taihu Based on Water Optical Classification	ZHOU Xiao-yu, SUN De-yong, LI Yun-mei, <i>et al.</i> (2618)
Application of Subwet Model in the Design of Constructed Wetland	LI Hui-feng, HUANG Jin-hui, LIN Chao (2628)
Allelopathic Effect of <i>Nelumbo nucifera</i> Stem and Leaf Tissue Extract on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Scenedesmus quadricauda</i>	HE Lian-sheng, MENG Fan-li, DIAO Xiao-jun, <i>et al.</i> (2637)
Influence of <i>Vallisneria spiralis</i> on the Physicochemical Properties of Black-odor Sediment in Urban Sluggish River	XU Kuan, LIU Bo, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (2642)
Removal of Cr(VI) by Iron Filings with Microorganisms to Recover Iron Reactivity	TANG Jie, WANG Zhuo-xing, XU Xin-hua (2650)
Degradation of Phenol with a Fe/Cu-Catalytic Heterogeneous-Fenton Process	YANG Yue-zhu, LI Yu-ping, YANG Dao-wu, <i>et al.</i> (2658)
Effect of Different Forms of Inorganic Nitrogen on the Photodegradation of Antipyrine in Water	ZHAO Qian, CHEN Chao, FENG Li, <i>et al.</i> (2665)
Degradation Mechanisms of Dimethyl Phthalate in the UV-H ₂ O ₂ System	LIU Qing, CHEN Cheng, CHEN Hong-zhe, <i>et al.</i> (2670)
Adsorption of Cd ²⁺ Ions in Aqueous by Diamine-Modified Ordered Mesoporous SBA-15 Particles	ZHANG Meng, YANG Ya-ti, QIN Rui, <i>et al.</i> (2677)
Surface Organic Modification of Acid Vermiculite and Its Adsorption of Hydrophobic Micro Pollutants in Aqueous Solutions	JIANG Zheng-ming, YU Xu-biao, HU Yun, <i>et al.</i> (2686)
Preparation of Porous Ceramics Based on Waste Ceramics and Its Ni ²⁺ Adsorption Characteristics	ZHANG Yong-li, WANG Cheng-zhi, SHI Ce, <i>et al.</i> (2694)
Perchlorate Removal from Underground Water by Anaerobic Biological Reduction with Bark	WANG Rui, LIU Fei, CHEN Nan, <i>et al.</i> (2704)
Experimental Study on the Remediation of Chromium Contaminated Groundwater with PRB Media	ZHU Wen-hui, DONG Liang-fei, WANG Xing-run, <i>et al.</i> (2711)
Removal of Calcium and High-strength Ammonia Nitrogen from the Wastewater of Rare-earth Elements Hydrometallurgical Process by Chemical Precipitation	WANG Hao, CHENG Guan-wen, SONG Xiao-wei, <i>et al.</i> (2718)
Leaching Kinetics of Josephinite Tailings with Sulfuric Acid	CHEN An-an, ZHOU Shao-qi, HUANG Peng-fei (2729)
Effects of HRT on Fate of Typical Polycyclic Musk by A ² O Process	LIU Peng-cheng, HUANG Man-hong, CHEN Dong-hui, <i>et al.</i> (2735)
Kinetic Simulation of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Fermentation Broth as Carbon Source	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (2741)
Effluent Carbon Source Improvement and Sludge Reduction by Hydrolysis Reactor with Enhanced Sludge Utilization	XIONG Ya, WANG Qiang, SONG Ying-hao, <i>et al.</i> (2748)
Optimization of Extracellular Polymeric Substance Extraction Method and Its Role in the Dewaterability of Sludge	ZHOU Jun, ZHOU Li-xiang, WONG Woo-chung (2752)
Effectiveness of Arsenite Adsorption by Ferric and Alum Water Treatment Residuals with Different Grain Sizes	LIN Lu, XU Jia-rui, WU Hao, <i>et al.</i> (2758)
Regional Differences and Development Tendency of Livestock Manure Pollution in China	QIU Huan-guang, LIAO Shao-pan, JING Yue, <i>et al.</i> (2766)
Quantitative Partitioning of Soil Selenium in the Selenium-Rich Area of Northern Zhejiang Plain	XU Ming-xing, PAN Wei-feng, CENG Jing, <i>et al.</i> (2775)
Effects of Land Use on Manganese Distribution and Fractions in Wetland Soil of Sanjiang Plain, Northeast China	ZHANG Zhong-sheng, LU Xian-guo, SONG Xiao-lin (2782)
Research on Vertical Distribution Pattern and Reserve of Organic Carbon in Paddy Field Soil of Qianguo, Jilin	TANG Jie, ZHANG Wen-hui, LI Zhao-yang, <i>et al.</i> (2788)
Soil Organic Carbon Sequestration Rate and Its Influencing Factors in Farmland of Guanzhong Plain; A Case Study in Wugong County, Shanxi Province	ZHANG Xiao-wei, XU Ming-xiang (2793)
Effects of Biological Regulated Measures on Active Organic Carbon and Erosion-Resistance in the Three Gorges Reservoir Region Soil	HUANG Ru, HUANG Lin, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (2800)
Quantifying Soil Autotrophic Microbes-Assimilated Carbon Input into Soil Organic Carbon Pools Following Continuous ¹⁴ C Labeling	SHI Ran, CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, <i>et al.</i> (2809)
Analysis of Soil Respiration and Influence Factors in Wheat Farmland Under Conservation Tillage in Southwest Hilly Region	ZHANG Sai, ZHANG Xiao-yu, WANG Long-chang, <i>et al.</i> (2815)
Distribution Characteristics and Risk Evaluation of Organochlorine Pesticides in Soil from Relocation Areas of the Danjiangkou Reservoir	LI Zi-cheng, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2821)
Risk Assessment and Countermeasure of BTEX in Pesticide Factory	PANG Bo, WANG Tie-yu, DU Li-yu, <i>et al.</i> (2829)
Accumulation of S, Fe and Cd in Rhizosphere of Rice and Their Uptake in Rice with Different Water Managements	ZHANG Xue-xia, ZHANG Xiao-xia, ZHENG Yu-ji, <i>et al.</i> (2837)
Effects of Nitrate on Organic Removal and Microbial Community Structure in the Sediments	LIU Jin, DENG Dai-yong, SUN Guo-ping, <i>et al.</i> (2847)
Zero-Valent Iron-Enhanced Azoreduction by the <i>Shewanella decolorationis</i> S12	ZHOU Qing, CHEN Xing-juan, GUO Jun, <i>et al.</i> (2855)
Isolation, Identification of Two Aerobic Denitrifiers and Bioaugmentation for Enhancing Denitrification of Biofilm Under Oligotrophic Conditions	QUAN Xiang-chun, CEN Yan, QIAN Yin (2862)
Rapid Enrichment and Cultivation of Denitrifying Phosphate-Removal Bacteria and Its Identification by Fluorescence <i>in situ</i> Hybridization Technology	LIU Li, TANG Bing, HUANG Shao-song, <i>et al.</i> (2869)
Identification of a Denitrifying Polyphosphate-accumulating Organism (DPAO) and Study on Its Denitrifying Functional Genes	ZHANG Qian, WANG Hong-yu, SANG Wen-jiao, <i>et al.</i> (2876)
Isolation and Characterization of a Highly Efficient BBP-degrading Bacterium	CHEN Hu-xing, YANG Xue, ZHANG Kai, <i>et al.</i> (2882)
Degradation of Nicosulfuron by Combination Effects of Microorganisms and Chemical Hydrolysis	ZHANG Xiao-lin, LI Yong-mei, YUAN Zhi-wen (2889)
Isolation, Screening and Identification of Prometryne-Degrading Bacteria and Their Degrading Characteristics	ZHOU Ji-hai, SUN Xiang-wu, HU Feng, <i>et al.</i> (2894)
Preparation of PVA-SA-PHB-AC Composite Carrier and <i>m</i> -Cresol Biodegradation by Immobilized <i>Lysinibacillus cresolivorans</i>	LI Ting, REN Yuan, WEI Chao-hai (2899)
Extraction of Surface Active Substance and Analysis of Demulsifying Characteristics for the Demulsifying Strain <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1	HUANG Xiang-feng, ZHANG Shu-cong, PENG Kai-ming, <i>et al.</i> (2906)
Diversity of Culturable Filamentous Bacteria in the Activated Sludge from A ² O Wastewater Treatment Process	GAO Sha, JIN De-cai, ZHAO Zhi-rui, <i>et al.</i> (2912)
Composition and Transformation of Leachates During Municipal Solid Waste Composting	LI Dan, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (2918)

《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7月15日 34卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 7 Jul. 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