

百方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.12  
第40卷 第12期

目次(卷终)

研究报告

京津冀秋冬季 PM<sub>2.5</sub> 污染概况和预报结果评估 ..... 朱媛媛,高愈霄,刘冰,王晓彦,朱莉莉,许荣,汪巍,丁俊男,李健军,段小丽(5191)

2016~2017年采暖期华北平原东部 PM<sub>2.5</sub> 组分特征及来源解析 ..... 张逸琴,王杰,高健,徐仲均,车飞,马彤,杨艳,刘素,闫璐璐(5202)

霾不同发展阶段下污染气体和水溶性离子变化特征分析 ..... 王振彬,刘安康,卢文,杨晓旻,王红磊,陈魁,夏丽(5213)

上海郊区家庭妇女 PM<sub>2.5</sub> 重金属组分暴露水平、来源与健康风险 ..... 罗燃燃,戴海夏,张蕴晖,乔利平,马英歌,周敏,夏斌,朱清扬,赵迎亚,黄成(5224)

固定污染源可凝结颗粒物测量方法 ..... 蒋靖坤,邓建国,王刚,张莹,李妍菁,段雷,郝吉明(5234)

家具企业挥发性有机物排放特征及其环境影响 ..... 张嘉妮,曾春玲,刘锐源,姚懿娟,柯云婷,范丽雅,叶代启(5240)

抗生素企业 VOCs 排放清单及影响范围模拟 ..... 竹涛,吕怡蓉,边文璟,牛文凤,袁前程,段二红,于洋,林军(5250)

新乡市机动车排放对道路灰尘中重金属与多环芳烃污染的影响 ..... 李琦路,吴锦涛,张颖,孙玉静,乔泓钦,张子伟,裴梦园,张孟琼,任明浩(5258)

成都市道路积尘中全氟化合物的污染特征及暴露风险评估 ..... 方淑红,朱和祥,叶芝祥,印红玲,孙静(5265)

祁连山北坡中段降水稳定同位素特征及水汽来源分析 ..... 张百娟,李宗省,王昱,李永格,吕越敏,袁瑞丰,桂娟(5272)

长江南京段水源水中抗生素的赋存特征与风险评估 ..... 封梦娟,张芹,宋宁慧,卜元卿,杨正标,刘艳华,郭瑞昕,陈建秋,张圣虎(5286)

夏秋季混凝剂对复合锰氧化膜去除地表水中氨氮和锰的影响 ..... 程丽杰,黄廷林,程亚,张莎莎,阮昭意,卢磊(5294)

浙江省 H 市供水系统消毒副产物及其健康风险评价 ..... 刘俊萍,于建全,李青松,马晓雁,杨玉龙,贾佳(5302)

三峡库区城镇化背景下河流 DOM 的吸收及荧光光谱特征 ..... 陈昭宇,李思悦(5309)

川西高原河流水体 CDOM 的光化学降解特性 ..... 刘堰杨,孙辉,刘琛,王小沁(5318)

三峡库区典型紫色土小流域径流及氮磷流失特征 ..... 曹瑞霞,刘京,邓开开,先宇,王伟,方芳,欧阳文娟,郭劲松(5330)

九龙江流域河流磷输出对土地利用模式及水文状况的响应 ..... 黄亚玲,唐莉,黄金良,肖才荣(5340)

不同尺度土地利用方式对鄱阳湖湿地水质的影响 ..... 方娜,刘玲玲,游清徽,田娜,吴燕平,阳文静(5348)

太湖草藻型湖区磷赋存特征及其环境意义 ..... 耿雪,文帅龙,孙培荣,徐楚天,李大鹏,黄勇(5358)

太湖竺山湾沉积物碳氮磷分布特征与污染评价 ..... 方家琪,祁闯,张新厚,韩睿明,黄和笑,王卓森,王国祥(5367)

降雨强度对洱海流域凤羽河氮磷排放的影响 ..... 李晓虹,雷秋良,周脚根,张亦涛,李影,胡万里,武淑霞,翟丽梅,王洪媛,刘宏斌(5375)

外源 Ca<sup>2+</sup> 和 K<sup>+</sup> 作用下河口区碱蓬水质净化效果和耐盐碱提高机制 ..... 吴丹,孙萍,陈广琳,陈友媛,彭昌盛(5384)

泽泻(*Alisma orientale*) 对全氟化合物的吸收和传输特征-浓度的影响 ..... 王团团,李贝贝,王赛,华佩,陈军,应光国(5394)

复合人工湿地中反硝化除磷作用的发生及其稳定性 ..... 刘冰,郑煜铭,李清飞,赵承美,魏巍,张凯(5401)

锆、镧和镧锆改性沸石添加控制底泥磷释放的对比 ..... 刘婷,赵钰颖,林建伟,詹艳慧,秦琴(5411)

生物炭结构性质对氨氮的吸附特性影响 ..... 陈梅,王芳,张德俐,易维明(5421)

溶解氧对悬浮与附着生长系统短程硝化反应的影响机制 ..... 王嗣禹,刘灵婕,王芬,季民(5430)

间歇恒定/梯度曝气对 SNAD 工艺启动的影响 ..... 李冬,刘志成,徐贵达,李帅,张杰(5438)

共基质模式下铁盐脱氮反应器的运行性能及微生物学特征 ..... 王茹,刘梦瑜,刘冰茵,赵治国,袁林江(5446)

阶梯曝气对城市污水好氧颗粒污泥系统的影响 ..... 李冬,魏子清,劳会妹,李帅,张杰(5456)

酵母菌降解胞外聚合物提升剩余活性污泥的脱水性能 ..... 俞心怡,向金豪,刘英,龚天翼,张彬辉,吕文洲(5465)

基于 GEE 的 1998~2018 年京津冀土地利用变化对生态系统服务价值的影响 ..... 娄佩卿,付波霖,林星辰,闭璐,马瑞雪,唐廷元(5473)

基于 MDS 与 TOPSIS 模型的滨海滩涂围垦区土壤质量评价 ..... 解雪峰,濮励杰,朱明,吴涛,许艳(5484)

淹水增加对闽江河口淡水潮汐湿地孔隙水地球化学特征及 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 排放通量的影响 ..... 李敬,黄佳芳,罗敏,刘育秀,谭季,朱爱菊,王声钰,仝川(5493)

养殖塘 CH<sub>4</sub> 排放特征及其影响因素 ..... 王娇,肖薇,张秀芳,张弥,张文庆,刘强,陈争,董保华,李旭辉(5503)

施肥对高粱地土壤呼吸及其温度敏感性的影响 ..... 严俊霞,张媛,焦晓燕(5515)

高硒高镉区土地安全区划方法 ..... 王锐,侯宛苓,李雨潼,余涛,陈娟(5524)

不同配比复合材料对农田镉污染土壤的修复效果 ..... 陈树兰,许晨阳,耿增超,王强,祝乐,龚园,拓卫卫(5531)

水铝钙石对不同镉污染农田重金属的钝化效果及机制 ..... 吴秋梅,刘刚,王慧峰,胡文友,黄标(5540)

狮子山矿区不同土地利用类型对土壤微生物群落多样性的影响 ..... 黄健,朱旭炎,陆金,孙雨,赵兴青(5550)

林地转型耕地对东北丘陵区白浆土 *cbbL* 细菌群落丰度和结构的影响 ..... 王蕊,吴宪,李刚,修伟明,王丽丽,张贵龙(5561)

**粤港澳大湾区场地污染特征、治理修复与环境管理研究专辑**

粤港澳大湾区污染场地土壤风险管控制度体系建设与思考 ..... 常春英,董敏刚,邓一荣,肖荣波,刘丽丽(5570)

粤港澳大湾区土壤污染问题计量及可视化分析 ..... 张宁,张盛,杨海超,张建通(5581)

城市生活垃圾填埋场的物质存量特征及其环境影响:以粤港澳大湾区为例 ..... 马仕君,周传斌,杨光,赵志岚,刘懿颀(5593)

粤港澳大湾区丘陵区带某电镀场地重金属污染特征与迁移规律分析 ..... 侯文隽,龚星,詹泽波,刘锋,黄子航,杨立宏,林晓琛(5604)

粤港澳大湾区典型化工场地苯系物污染特征及迁移规律 ..... 邓一荣,陆海建,董敏刚,程洲,庄长伟,肖荣波,钟音,彭平安(5615)

针铁矿-富里酸复合材料对铅镉污染土壤的钝化修复性能 ..... 刘千钧,李想,周阳媚,唐杰鹏,林亲铁,姚琨(5623)

广东大宝山矿区土壤植物体系重金属迁移过程及风险评价 ..... 陈洁宜,刘广波,崔金立,肖唐付(5629)

Hydrus-1D 模型在推导基于保护地下水的土壤风险控制值中的应用 ..... 林挺,罗飞,朱艳,杨坤,郝秀平(5640)

《环境科学》第 40 卷(2019 年)总目录 ..... (5649)

《环境科学》征订启事(5233) 《环境科学》征稿简则(5285) 信息(5357, 5420, 5429)

## 抗生素企业 VOCs 排放清单及影响范围模拟

竹涛<sup>1,2</sup>, 吕怡蓉<sup>1,2</sup>, 边文璟<sup>1,2</sup>, 牛文凤<sup>1,2</sup>, 袁前程<sup>1,2</sup>, 段二红<sup>3</sup>, 于洋<sup>4</sup>, 林军<sup>4</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京)大气环境管理与污染控制研究所, 北京 100083; 3. 河北科技大学环境科学与工程学院, 石家庄 050018; 4. 生态环境部固体废物与化学品管理技术中心, 北京 100029)

**摘要:** 药品生产要消耗大量的原材料, 是公认的“高污染、高耗能”行业。鉴于制药行业排放清单研究匮乏, 本研究首先依据典型抗生素企业的实际监测数据及生产信息, 采用实测法确定了各 VOCs 物质的排放因子; 然后结合同一园区内抗生素 A~G 厂的活动水平信息, 采用排放因子法计算得到各个厂的排放量, 建立排放清单, 并运用 Monte Carlo 法对清单进行了不确定性分析; 最后用 CALPUFF 模型对 A~G 厂进行春夏秋冬四季的环境影响范围模拟。结果表明, 抗生素企业生产中的总 VOCs 排放因子(以抗生素计, 下同)为  $6\,655.61\text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$ , 其中结晶工序排放因子最大, 为  $3\,603.476\text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$ 。A~G 厂每年生产抗生素会分别产生 VOCs  $6\,655.610$ 、 $7\,454.283$ 、 $998.342$ 、 $11\,980.098$ 、 $4\,492.537$ 、 $42\,462.792$  和  $18\,302.928\text{ kg}$ , 其中排放量最大的前 4 种物质依次为乙酸丁酯、正丁醇、正己烷和丙酮。通过对 A 厂进行 Monte Carlo 模型验证发现, A 厂排放量基本呈对数正态分布, 95% 置信区间的 uncertainty 为  $(-60.62\%, 131.78\%)$ , 处于可接受范围。通过 CALPUFF 模拟, 各季节 VOCs 扩散方向和扩散范围均不同, 夏季出现中心聚集现象。

**关键词:** 排放清单; 排放因子(EF); 抗生素企业; 不确定性; 影响范围模拟

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)12-5250-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.201905158

## VOCs Emission Inventory and Impact Range Simulation of Antibiotic Enterprises

ZHU Tao<sup>1,2</sup>, LÜ Yi-rong<sup>1,2</sup>, BIAN Wen-jing<sup>1,2</sup>, NIU Wen-feng<sup>1,2</sup>, YUAN Qian-cheng<sup>1,2</sup>, DUAN Er-hong<sup>3</sup>, YU Yang<sup>4</sup>, LIN Jun<sup>4</sup>

(1. School of Chemical & Environmental Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Institute of Atmospheric Environmental Management and Pollution Control, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 3. School of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China; 4. Solid Waste and Chemical Management Center, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Drug production consumes a large amount of raw materials and is recognized as a “high-pollution, high-energy-consumption” industry. In consideration of the small amount of emission inventory research in the pharmaceutical industry, firstly, based on the actual monitoring data and production information of typical antibiotic enterprises, the emission factors of various volatile organic compounds (VOCs) were determined using the field measurement method. Then, combined with the activity level information of antibiotics from A to G plant in the same park, the emission factor method was used to calculate and obtain the emissions of each plant, and an emission list was established. Uncertainty analysis of the list was carried out using the Monte Carlo method. Finally, the CALPUFF model was used to simulate the environmental impact range of the A-G plants in spring, summer, autumn, and winter. The results showed that the total VOCs emission factor in the production of antibiotic enterprises was  $6\,655.61\text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$ , and the crystallization process emission factor was the largest, at  $3\,603.476\text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$ . The A to G plants produce  $6\,655.610$ ,  $7\,454.283$ ,  $998.342$ ,  $11\,980.098$ ,  $4\,492.537$ ,  $42\,462.792$ , and  $18\,302.928\text{ kg}$ , respectively, of VOCs each year for the production of antibiotics, and the four substances with the largest emissions are butyl acetate, *n*-butanol, *n*-hexane, and acetone, respectively. Through the verification of the Monte Carlo model for plant A, it was found that the emissions of plant A basically presented as a lognormal distribution, and the uncertainty of 95% confidence interval was  $(-60.62\%, 131.78\%)$ , which was within the acceptable range. Through CALPUFF simulation, the diffusion direction and range of VOCs were found to be different in each season, and an aggregation phenomenon occurs in summer.

**Key words:** emission inventory; emission factor(EF); antibiotic enterprise; uncertainty; impact range simulation

挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)除了对人体感官产生刺激作用外,还可能具有毒性,对人体健康产生多种不良影响<sup>[1]</sup>,此外还是臭氧生成的前驱体<sup>[2]</sup>,能引起光化学烟雾<sup>[3]</sup>。生态环境部公布《有毒有害大气污染物名录(2018

收稿日期: 2019-05-21; 修订日期: 2019-07-21

基金项目: 山西省科技重大专项(20181102017); 国家环境保护恶臭污染控制重点实验室开放基金项目(201903103); 中央高校基本科研业务费专项(2009QH03)

作者简介: 竹涛(1979~),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为大气污染控制, E-mail: bamboozt@cumtb.edu.cn

年)》的 11 种污染物中有 6 种是 VOC, 而制药行业排放的污染物中 VOC 占很大比例, 所以很有必要对制药行业的 VOC 进行研究, 以清楚其 VOC 的排放特征。目前国内外学者对于人为源 VOCs 排放清单开展了大量的研究, 已编制了全球<sup>[4]</sup>、亚洲地区<sup>[5,6]</sup>、国家<sup>[7]</sup>、区域<sup>[8,9]</sup>和省市<sup>[10~13]</sup>等不同尺度, 以及加油站<sup>[14]</sup>、建筑涂料<sup>[15]</sup>、钢铁和铸造<sup>[16~18]</sup>等不同行业的 VOCs 排放清单。如闫静等<sup>[18]</sup>依据北京市铸造行业典型企业实际调研及监测数据, 确定了北京市铸造行业大气污染物的排放因子, 再依据活动水平——2012 年铸件产量, 得到该年铸造行业大气污染物的排放清单; 邓子钰等<sup>[15]</sup>依据北京市建筑行业防水涂料本地化排放因子, 结合建筑竣工面积来确定活动水平, 估算得到北京市建筑类涂料 VOC 排放清单。但对制药行业的排放清单研究很少, 因此制定一份制药行业的 VOCs 排放清单十分必要。清单有多种编制方法, 但监测算法监测成本高、污染源调查法信息不易获得、模型反演法所需参数具有地域差异性。虽然排放因子法

各地排放因子差异性大, 但其剪表性强、应用广泛、理论成熟, 因此本研究最终选用排放因子法来编制排放清单。制定一份抗生素企业 VOCs 排放清单, 能够清楚现阶段抗生素制药行业 VOCs 的排放基本情况, 明确详细的污染源类别以及需要重点关注的治理区域。

## 1 材料与方 法

### 1.1 采样及分析方法

根据石家庄某些典型抗生素企业实际生产过程, 分析其原辅材料使用、生产排污环节和主要产品种类等信息, 确定了抗生素产品的生产工艺流程检测 VOCs 浓度的采样点。由于实际生产过程中把结晶车间废气进行集中收集处理, 实现了无组织向有组织的转变, 故也将结晶车间排风处归为有组织处理, 共计 4 个有组织采样点, 分别为发酵工序、结晶工序、干燥工序、结晶车间排风处。有组织排放采样点每天各点位采样 3 次, 采样 3 d。具体的抗生素生产流程及采样点位如图 1 所示。

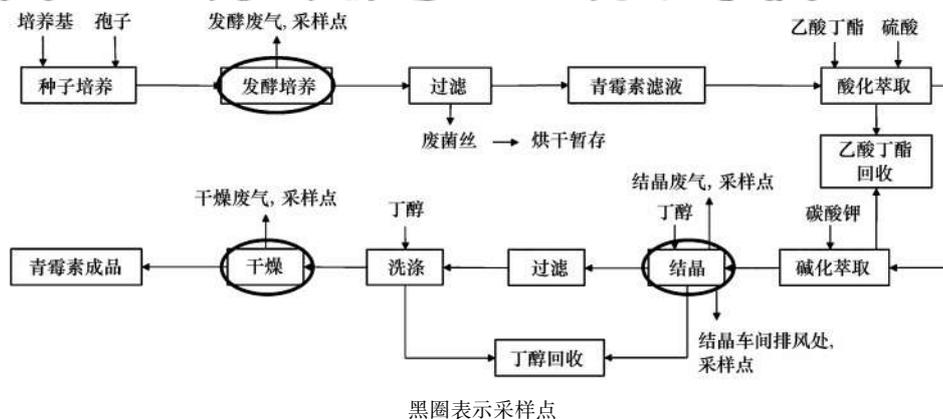


图 1 抗生素产品的生产工艺流程及采样点布设示意

Fig. 1 Production process and sampling point layout of antibiotic products

VOCs 样品依据 SUMMA 罐采样-三级冷阱预浓缩-气相色谱/质谱 (GC/MS) 分析法<sup>[19]</sup>进行采样和分析。使用预先准备好的 SUMMA 罐 (由瑞思泰康科技 (北京) 有限公司提供的 Resetk TO-Can 空气检测采样罐), 采集气体后在罐上粘贴标签, 记录采样罐序号、采样地点及时间。每天采集后带回实验室进行分析。将 SUMMA 罐采集的样品进行三级冷阱预浓缩后, 用 GC/MS 来分析样品, 明确各工序产生的污染物种类及浓度。所用仪器为上海磐合科学仪器股份有限公司生产的磐合 TT24-7 GCMS 全在线双冷阱大气预浓缩常规四级杆气质仪。

### 1.2 排放清单编制方法

常见的排放清单编制方法主要有 4 种, 分别是监测算法、污染源调查法、模型反演法和排放因

子法<sup>[20]</sup>。其中, 监测算法的实际监测成本高, 污染源调查法相关资料和信息不易获得, 模型反演法所需参数具有地域差异性, 排放因子法虽然存在各地排放因子差异性大的不足, 但其剪表性强、应用广泛、理论成熟。因此本研究最终选用排放因子法来编制排放清单。本文选取的几家抗生素企业的产品、生产工艺及处理工艺基本相同, 对 1 家抗生素企业 (实测厂 G 厂) 进行采样, 以监测数据及生产信息计算确定各 VOCs 物质的排放因子; 然后结合其余各厂的活动水平信息, 采用排放因子法计算得到各个厂的排放量, 建立排放清单。这样做可大大降低监测成本。

#### 1.2.1 排放因子计算方法

排放因子 (emission factor, EF), 指典型工况生

产条件下,生产单位产品(使用单位原料)所产生的污染物经末端治理设施削减后的残余量或未经消减直接排放到环境中的大气污染物的量. 本研究参考其他行业的排放因子研究<sup>[21,22]</sup>,得到适合抗生素企业的排放因子,如公式(1)所示:

$$EF_{ij} = \frac{c_{ij} \times Q_j \times 10^{-3}}{B} \quad (1)$$

式中, $EF_{ij}$ 为*i*物质在*j*工序的排放因子, $g \cdot t^{-1}$ ;  $c_{ij}$ 为*i*物质在*j*工序的排放浓度, $mg \cdot m^{-3}$ ;  $Q_j$ 为标准状态下*j*工序的排气量, $m^3 \cdot h^{-1}$ ;  $B$ 为单位时间的产能, $t \cdot h^{-1}$ . 相应地参数取值见表 1.

### 1.2.2 活动水平的确定

活动水平是指在一定时间范围内以及在界定地区里,与某项大气污染物(本研究中指 VOCs)排放相关的生产或消费活动的量. 产能  $B = P/t_i$  是抗生素的年产量/年排放时间. 相应地参数取值见表 1.

表 1 参数名称和取值信息

Table 1 Parameter name and value information table

参数符号	参数名称	取值	单位
$Q_1$	结晶工序排放流量	4 000	$m^3 \cdot h^{-1}$
$Q_2$	结晶车间排风处流量	6 000	$m^3 \cdot h^{-1}$
$Q_3$	干燥工序排放流量	15 000	$m^3 \cdot h^{-1}$
$Q_4$	发酵工序排放流量	120 000	$m^3 \cdot h^{-1}$
$P$	G厂(实测厂)抗生素的年产量(以抗生素计)	2 750	t
$t_i$	各工序年排放时间	7 920	h
$P_1$	A厂抗生素的年产量	1 000	t
$P_2$	B厂抗生素的年产量	1 120	t
$P_3$	C厂抗生素的年产量	150	t
$P_4$	D厂抗生素的年产量	1 800	t
$P_5$	E厂抗生素的年产量	675	t
$P_6$	F厂抗生素的年产量	6 380	t

### 1.2.3 排放量的计算方法

具体有组织排放量计算如公式(2)所示:

$$E_{ij} = A \times t \times EF_{ij} \times \left[ 1 - \left( \frac{ER}{100} \right) \right] \times 10^{-3} \quad (2)$$

式中, $E_{ij}$ 为*i*物质在*j*工序的年排放量,kg;  $A$ 为活动水平; $t$ 为活动时间或另一个变量,本研究中  $t$  为时间,按 7 920 h 计;  $EF_{ij}$ 为排放因子, $g \cdot t^{-1}$ ;  $ER$ 为消减率,%. 本文选取的是经 VOC 治理设施处理后的点位进行采样,而非治理前采样,故  $ER$  此次不予考虑. 如若选取治理前采样,就必须考虑实际的污染物消减率.

### 1.3 清单的不确定性分析

制定一份抗生素企业 VOCs 排放清单,能够清楚现阶段抗生素制药行业 VOCs 的排放基本情况,明确详细的污染源类别以及需要重点关注的治理区域,进而可以有效控制制药行业 VOCs 的排放. 然

而在清单编制过程中,不可避免地存在着监测误差、随机误差、关键数据缺乏以及数据代表性不足等不确定性因素<sup>[23~25]</sup>,因此需要进行不确定性分析.

对清单的不确定性研究,包括确定输入信息的不确定性以及不确定性的传递两部分内容. 本研究选用 Crystal Ball 软件来进行 Monte Carlo 数值模拟,假设所有输入信息均服从对数正态分布,由于活动水平数据直接来源于企业统计数据,认为其不确定度为  $\pm 30\%$ ; 排放因子数据来自公式计算,通过实测的污染物浓度、排气量、产能等信息来计算排放因子,而且其行业差异小、经验公式认可度高、公式内参数可代表我国该类排放源平均水平,认为其不确定度为  $\pm 80\%$ .

### 1.4 环境影响范围的模拟

CALPUFF 模型可用来模拟污染源从几十米到几百千米的扩散情况<sup>[26]</sup>,本研究以石家庄某化工园区内的 A~F 抗生素厂为研究对象,选取典型月份 1、4、7 和 11 月分别代表冬春夏秋四季,结合气象数据、地形数据、土地利用数据等信息用 CALPUFF 模型进行 A~F 厂的 VOCs 扩散范围模拟,并分析 VOCs 污染变化情况.

其中 CALPUFF 模型的数据预处理包括 4 方面内容,分别为地形数据、土地利用数据、地面气象数据和高空气象数据预处理<sup>[27]</sup>. 其中,地形数据和土地利用数据为模型自带数据;地面气象数据使用 2015 年站台号为 53697 的藁城和站台号为 53693 的井耕地面气象数据,地面数据包括 7 项,分别为一年 365 d 每天 24 h 的风向、风速、低云量、干球温度( $^{\circ}C$ )、相对湿度(% )、云底高度(km)和海平面气压(hPa);高空气象数据使用 2015 年井耕高空气象数据,高空数据包括 5 项,分别为一年 365 d 每天 08:00 和 20:00 的气压(hPa)、离地高度(m)、气温( $^{\circ}C$ )、露点温度( $^{\circ}C$ )、风速和风向. CALPUFF 点源中各个厂的 VOC 排放速率为各个厂的年排放量除以年排放时间.

## 2 结果与讨论

### 2.1 排气筒及车间废气 VOCs 浓度水平与组分特征

由监测结果可知,发酵工序尾气主要成分是水蒸气和  $CO_2$ , VOCs 浓度极低,因此假设此工序段无 VOCs 排放. 其余各工序主要污染物质(取该物质占总 VOCs 浓度比大于 0.05% 的物质)浓度占比如图 2 所示. 从中可知,各工序主要污染物质均为乙酸丁酯和正丁醇,因为这二种物质是抗生素企业生产过程中的主要溶剂,而且易挥发. 之所以会产生其余 60 种 VOCs,是因为乙酸丁酯和正丁醇在气相降

解和扩散过程中与空气中  $O_3$ 、 $NO_x$ 、 $\cdot OH$ 和 $H_2O$ 等发生复杂的化学反应,其中涉及几百个反应式,100 多种二次污染物. 并将已测得的各生产工序 VOCs 物质按官能团分为以下 7 大类,分别为芳香烃、烷烃、卤代烃、烯烃、醇类、酮类和酯类.

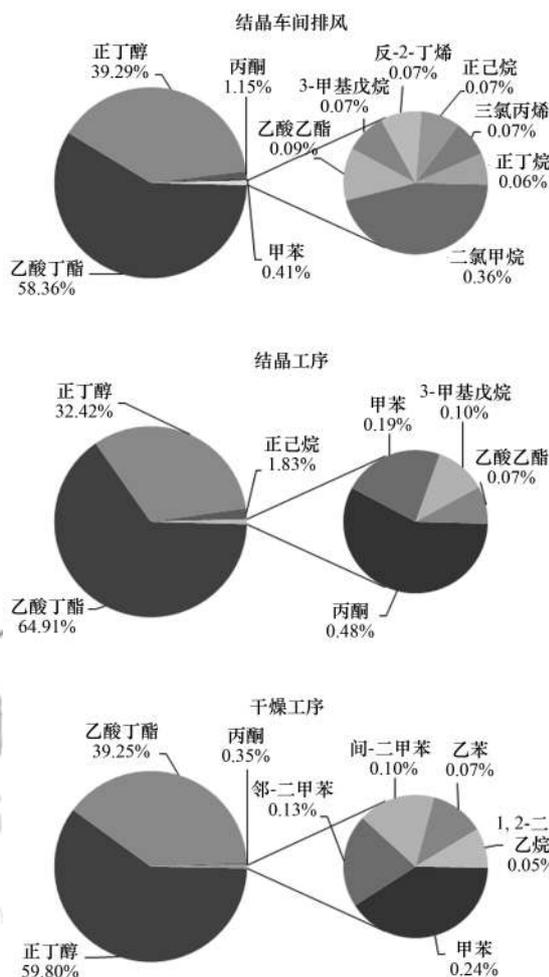


图 2 各工序主要污染物浓度占比

Fig. 2 Ratio of major pollutants in each process

## 2.2 VOCs 排放因子及排放量

根据式(1)可求出各工序中的不同 VOCs 物质的排放因子,详细情况见表 2. 从中可知,整个抗生素生产工艺流程的 VOCs 排放因子(以抗生素计,下同)为  $6\ 655.61\ g\cdot t^{-1}$ ,各工序 VOCs 排放因子从大到小依次为结晶工序 > 干燥工序 > 结晶车间排风处,对应的数值分别为  $3\ 603.476$ 、 $1\ 853.215$  和  $1\ 198.919\ g\cdot t^{-1}$ . 整个抗生素生产过程中,各物质种类芳香烃、烷烃、卤代烃、烯烃、醇类、酮类、酯类的排放因子分别为  $28.871$ 、 $79.821$ 、 $17.607$ 、 $7.510$ 、 $2\ 732.437$ 、 $37.280$  和  $3\ 752.084\ g\cdot t^{-1}$ ,总排放因子为  $6\ 655.6\ g\cdot t^{-1}$ . 其中,酯类中的乙酸丁酯和醇类中的正丁醇排放因子最大,分别为  $3\ 748.388\ g\cdot t^{-1}$  和  $2\ 732.437\ g\cdot t^{-1}$ ;其余种类芳香烃、烷烃、卤代烃、烯烃和酮类中排放因子最大的物质分别是甲

表 2 各工艺 VOCs 物质的排放因子/ $g\cdot t^{-1}$

Table 2 Emission factors of VOCs in each process/ $g\cdot t^{-1}$

物质	结晶工序	结晶车间	干燥工序	合计
芳香烃	10.316	8.040	10.515	28.871
苯	0.075	0.432	0.471	0.978
甲苯	6.801	4.826	4.463	16.090
对-二甲苯	0.054	0.000	0.000	0.054
间-二甲苯	1.189	0.874	1.901	3.964
邻-二甲苯	0.867	1.128	2.316	4.311
乙苯	0.714	0.164	1.339	2.218
异丙苯	0.189	0.173	0.000	0.362
丙苯	0.092	0.035	0.026	0.153
1,3,5-三甲苯	0.300	0.373	0.000	0.673
1,2,4-三甲苯	0.035	0.035	0.000	0.069
烷烃	72.032	3.672	4.117	79.821
丙烷	0.249	0.083	0.346	0.677
正丁烷	0.494	0.674	0.791	1.959
异戊烷	0.089	0.378	0.095	0.562
正戊烷	0.012	0.000	0.000	0.012
2,2-二甲基丁烷	0.046	0.000	0.216	0.262
2,3-二甲基丁烷	0.000	0.270	0.013	0.283
2-甲基戊烷	0.418	0.548	0.592	1.558
环戊烷	0.067	0.197	0.829	1.093
3-甲基戊烷	3.456	0.207	0.000	3.663
正己烷	65.780	0.833	0.562	67.175
甲基环戊烷	0.058	0.088	0.009	0.154
环己烷	0.373	0.000	0.000	0.373
2-甲基己烷	0.000	0.026	0.000	0.026
2,3-二甲基戊烷	0.706	0.076	0.173	0.955
正庚烷	0.121	0.059	0.492	0.672
甲基环己烷	0.002	0.009	0.000	0.011
2-甲基庚烷	0.161	0.062	0.000	0.223
3-甲基庚烷	0.000	0.162	0.000	0.162
卤代烃	2.070	8.434	7.102	17.607
二氟二氯甲烷	0.104	0.276	0.518	0.899
1,1,2,2-四氟-1,2-二氯乙烷	0.194	0.403	0.829	1.426
氯甲烷	0.134	0.268	0.458	0.859
氯乙烯	0.107	0.209	0.117	0.433
氯乙烷	0.000	0.021	0.000	0.021
一氟三氯甲烷	0.035	0.263	0.376	0.673
1,1-二氯乙烯	0.058	0.361	0.164	0.583
三氟三氯乙烷	0.000	0.048	0.000	0.048
三氯丙烯	0.165	0.781	0.605	1.551
二氯甲烷	0.115	4.330	0.665	5.111
1,1-二氯乙烷	0.005	0.000	0.000	0.005
1,1,1-三氯乙烷	0.010	0.000	0.000	0.010
1,2-二氯乙烷	0.023	0.052	0.989	1.064
四氯化碳	0.041	0.085	0.000	0.126
1,2-二氯丙烷	0.069	0.463	0.752	1.284
1,1,2,2-四氯乙烷	0.112	0.335	0.743	1.190
二氯苯	0.257	0.295	0.747	1.300
三氯甲烷	0.010	0.107	0.000	0.118
顺-1,2-二氯乙烯	0.000	0.026	0.099	0.125
顺-1,3-二氯丙烯	0.423	0.111	0.000	0.533
反-1,3-二氯丙烯	0.210	0.000	0.039	0.249
烯烃	3.038	2.589	1.884	7.510
苯乙烯	0.141	0.026	0.000	0.166
丙烯	0.253	0.156	0.311	0.720

续表 2

物质	结晶工序	结晶车间	干燥工序	合计
反-2-丁烯	1.261	0.871	0.298	2.430
丁烯	0.247	0.404	0.389	1.040
顺-2-丁烯	0.226	0.358	0.592	1.175
戊烯	0.104	0.181	0.168	0.454
顺-2-戊烯	0.115	0.181	0.125	0.422
己烯	0.000	0.368	0.000	0.368
1,3-丁二烯	0.691	0.043	0.000	0.734
醇类	1 164.554	467.618	1 100.265	2 732.437
正丁醇	1 164.554	467.618	1 100.265	2 732.437
酮类	17.259	13.636	6.385	37.280
丙酮	17.259	13.636	6.385	37.280
酯类	2 334.205	694.931	722.948	3 752.084
乙酸乙酯	2.544	0.314	0.838	3.696
乙酸丁酯	2 331.662	694.616	722.110	3 748.388
各工序 EF	3 603.476	1 198.919	1 853.215	6 655.61

苯、正己烷、二氯甲烷、反-2-丁烯和丙酮。

由表 2 信息绘制各工序不同 VOCs 种类排放因子占比,详见图 3。酯类、酮类、烯烃和烷烃的排放因子最高工序均为结晶工序,约为总排放因子的 62.21%、46.30%、40.45% 和 90.24%;醇类的结晶工序和干燥工序排放因子基本差不多;卤代烃的

结晶车间排风处和干燥工序排放因子基本差不多;芳香烃在 3 个工序的排放因子基本差不多。

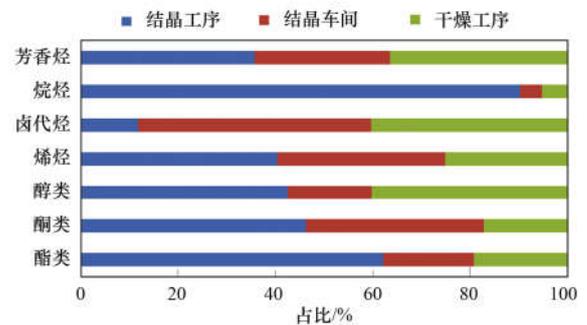


图 3 各工序不同 VOCs 种类排放因子占比

Fig. 3 Ratio of emission factors of different VOCs in each process

根据式(2),由计算得到的排放因子信息和 A~G 厂相应活动水平信息,得到同一工业园区内 A~G 厂的主要 VOCs 物质排放量,详见表 3。从中可知,A、B、C、D、E、F 和 G 厂每年生产抗生素会分别产生 VOCs 6 655.610、7 454.283、998.342、11 980.098、4 492.537、42 462.792 和 18 302.928 kg,其中排放量最大的前 4 种物质依次为乙酸丁酯、正丁醇、正己烷和丙酮。

表 3 A~F 厂主要 VOCs 物质的排放量/kg

Table 3 Emissions of major VOCs from A to F plant/kg

物质	A 厂	B 厂	C 厂	D 厂	E 厂	F 厂	G 厂
甲苯	16.090	18.021	2.414	28.962	10.861	102.656	44.248
对-二甲苯	0.054	0.061	0.008	0.097	0.037	0.345	0.149
间-二甲苯	3.964	4.440	0.595	7.135	2.676	25.291	10.901
乙苯	2.218	2.484	0.333	3.992	1.497	14.148	6.098
正丁烷	1.959	2.194	0.294	3.526	1.322	12.496	5.386
3-甲基戊烷	3.663	4.103	0.550	6.594	2.473	23.372	10.074
正己烷	67.175	75.236	10.076	120.915	45.343	428.576	184.731
三氯丙烯	1.551	1.737	0.233	2.791	1.047	9.893	4.264
二氯甲烷	5.111	5.724	0.767	9.200	3.450	32.607	14.055
1,2-二氯乙烷	1.064	1.192	0.160	1.915	0.718	6.789	2.926
反-2-丁烯	2.430	2.722	0.365	4.375	1.641	15.506	6.684
正丁醇	2 732.437	3 060.330	409.866	4 918.387	1 844.395	17 432.949	7 514.202
丙酮	37.280	41.753	5.592	67.104	25.164	237.846	102.520
乙酸乙酯	3.696	4.140	0.554	6.653	2.495	23.582	10.165
乙酸丁酯	3 748.388	4 198.194	562.258	6 747.098	2 530.162	23 914.713	10 308.066
其他物质	28.530	31.954	4.280	51.354	19.258	182.022	78.458
总 VOCs	6 655.610	7 454.283	998.342	11 980.098	4 492.537	42 462.792	18 302.928

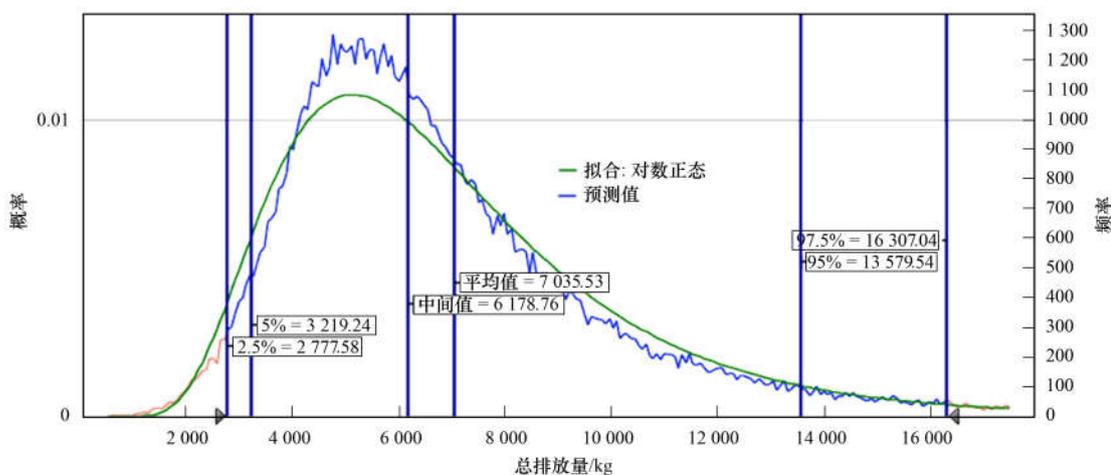
### 2.3 不确定性结果输出

选取 A 厂排放量,根据 1.3 节中的不确定性分析方法,运用 Crystal Ball 进行 Monte Carlo 模拟计算,模拟次数分别为 10 000、50 000 和 100 000,当达到 100 000 次时结果分布情况基本稳定,详细结果见图 4 和表 4。从图 4 可看出 A 厂 VOCs 排放量基本呈对数正态分布。计算得到的 VOCs 排放量平均值为

7 035.53 kg,比中间值 6 178.76 kg 略高。结果显示,排放因子法计算的 A 厂 VOCs 排放量 95% 的置信区间为(2 770.58, 16 307.04),不确定性为(-60.62%, 131.78%),90% 的置信区间为(3 219.24, 13 579.54),不确定性为(-54.24%, 93.01%)。

### 2.4 CALPUFF 模型模拟结果

根据 CALPUFF 模型模拟结果可看出,污染物



图中等号前为置信度,等号后为该置信度下对应的预测 A 厂排放量

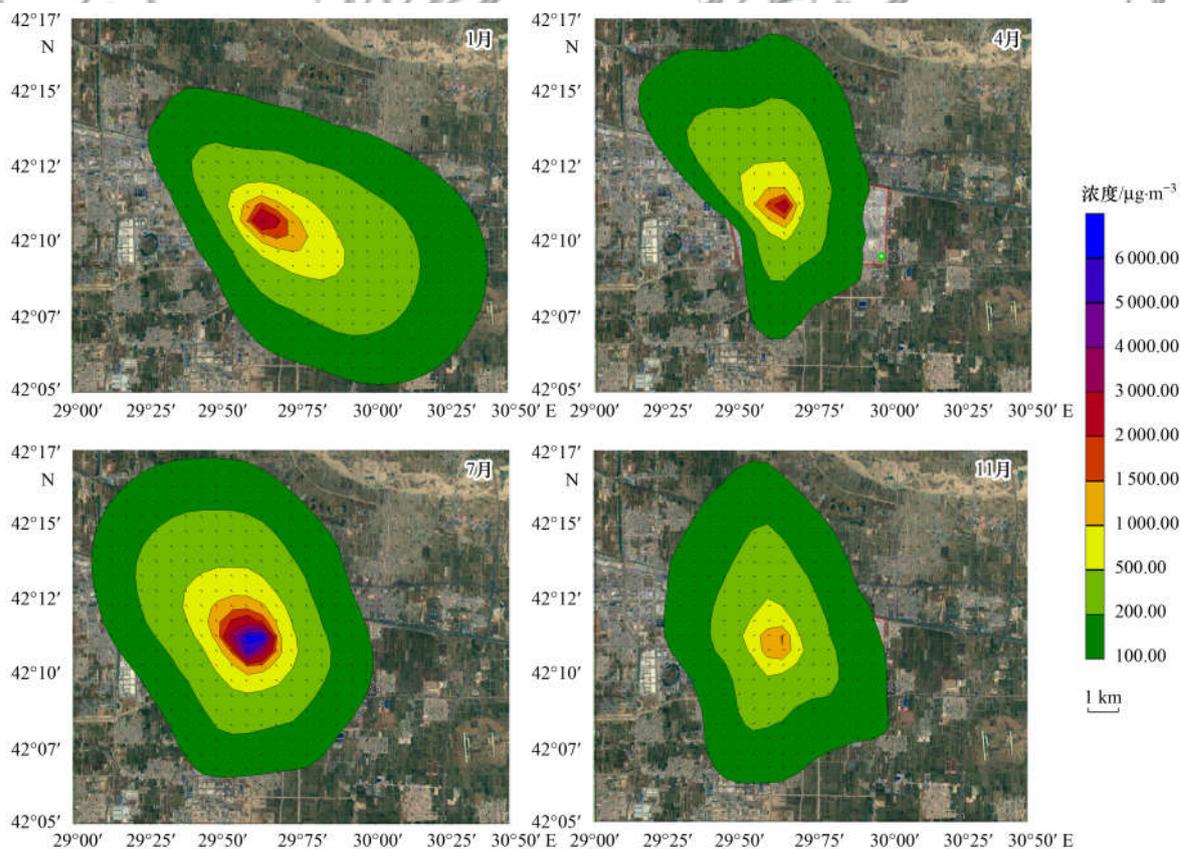
图 4 A 抗生素厂 VOCs 总排放量不确定性模拟结果

Fig. 4 Simulation results of uncertainty in total emissions of VOCs in antibiotic enterprises

表 4 Monta Carlo 法获得的清单不确定性结果对比

Table 4 Comparison of inventory uncertainty results obtained by Monta Carlo method

置信区间/%	排放量/kg				不确定性/%
	平均值	中间值	最小取值	最大取值	
95	7 035. 53	6 178. 76	2 770. 58	16 307. 04	-60. 62 ~ 131. 78
90	7 035. 53	6 178. 76	3 219. 24	13 579. 54	-54. 24 ~ 93. 01



色块数值表示模拟扩散浓度,单位是  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

图 5 CALPUFF 模型模拟浓度结果

Fig. 5 Simulation concentration results using the CALPUFF model

每小时、每天、每个月的扩散情况均不相同,选取 1、4、7 和 11 月作为典型月份来反映春夏秋冬的四

季变化. 结合气象数据分析,污染物扩散与风向、风速有关. 污染物夏季扩散范围最小,平均浓度最

大,最大值出现在7月,为 $6\,432\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;冬季扩散范围最大,平均浓度最小,最小值出现在11月,为 $1\,524\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 结合气象数据分析,污染物扩散与风向等有关. 春季(4月)盛行东南风,污染物向西北方向扩散的范围较大,污染物浓度低;夏季(7月)风速逐渐减小,污染物出现中心聚集现象,向四周较均匀地扩散,中心区域污染物浓度较高,结合CALPUFF分析可知是由于夏季风速较小造成的;秋季(11月)西风和西南风逐渐增强,污染物向四周较均匀地扩散;冬季(1月)主要为西北风,污染物向东南方向扩散的范围增大. CALPUFF模型模拟结果如图5所示.

根据模型模拟结果可得出,厂界监测点位的污染物模拟月平均浓度最大值为 $4\,743\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,最小值为 $1\,723\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,年平均浓度为 $2\,884\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,实际监测值为 $768.0\sim 6\,012.8\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,实际监测平均值为 $3\,354.7\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 模拟值略小于实际监测值,分析原因可能是园区内还存在其他VOCs排放企业,而模型模拟只添加了7家抗生素企业,没有考虑其他污染企业对环境空气的影响,因此造成模拟值小于实际监测值.

### 3 结论

(1)采用实测法,计算得到抗生素企业生产过程中总VOCs排放因子(以抗生素计,下同)为 $6\,655.61\ \text{g}\cdot\text{t}^{-1}$ . 结晶工序的VOCs排放因子最大,为 $3\,603.476\ \text{g}\cdot\text{t}^{-1}$ ;各物质中,酯类中的乙酸丁酯和醇类中的正丁醇排放因子最大,分别为 $3\,748.388\ \text{g}\cdot\text{t}^{-1}$ 和 $2\,732.437\ \text{g}\cdot\text{t}^{-1}$ .

(2)用排放因子法,得到A~G厂每年生产抗生素会分别产生 $6\,655.610$ 、 $7\,454.283$ 、 $998.342$ 、 $11\,980.098$ 、 $4\,492.537$ 、 $42\,462.792$ 和 $18\,302.928\ \text{kg}$  VOCs,其中排放量最大的前4种物质依次为乙酸丁酯、正丁醇、正己烷和丙酮.

(3)抗生素生产排放的VOC物质与《有毒有害大气污染物名录(2018年)》中共有的物质有2种,为二氯甲烷和三氯甲烷.

(4)A抗生素厂VOCs排放清单95%置信区间的不确定性为 $(-60.62\%, 131.78\%)$ ,90%置信区间的不确定性为 $(-54.24\%, 93.01\%)$ ,处于可接受范围.

(5)通过CALPUFF模拟可知,各季节VOCs扩散方向和扩散范围均不同,夏季出现污染物中心聚集现象,结合CALPUFF分析可知是由于夏季风速较小造成的.

致谢:本研究的现场采样工作由河北省科技大

学段二红老师等协助完成,在此表示感谢.

### 参考文献:

- [1] van Berlo D, Albrecht C, Knaapen A M, *et al.* Comparative evaluation of the effects of short-term inhalation exposure to diesel engine exhaust on rat lung and Brain [J]. *Archives of Toxicology*, 2010, **84**(7): 553-562.
- [2] Lu Q, Zheng J Y, Ye S Q, *et al.* Emission trends and source characteristics of  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{PM}_{10}$  and VOCs in the Pearl River Delta region from 2000 to 2009 [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **76**: 11-20.
- [3] Derwent R G, Jenkin M E, Passant N R, *et al.* Reactivity-based strategies for photochemical ozone control in Europe [J]. *Environmental Science & Policy*, 2007, **10**(5): 445-453.
- [4] Piccot S D, Watson J J, Jones J W. A global inventory of volatile organic compound emissions from anthropogenic sources [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, **97**(D9): 9897-9912.
- [5] Ohara T, Akimoto H, Kurokawa J, *et al.* An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980-2020 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2007, **7**(3): 6843-6902.
- [6] Streets D G, Bond T C, Carmichael G R, *et al.* An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000 [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, **108**(D21): 8809.
- [7] 梁小明, 张嘉妮, 陈小方, 等. 我国人为源挥发性有机物反应性排放清单 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(3): 845-854.  
Liang X M, Zhang J N, Chen X F, *et al.* Reactivity-based anthropogenic VOCs emission inventory in China [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(3): 845-854.
- [8] 鲁君, 黄成, 胡馨遥, 等. 长三角地区典型城市非道路移动机械大气污染物排放清单 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(7): 2738-2746.  
Lu J, Huang C, Hu Q Y, *et al.* Air pollutant emission inventory of non-road machineries in typical cities in eastern China [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(7): 2738-2746.
- [9] Ou J M, Zheng J Y, Li R R, *et al.* Speciated OVOC and VOC emission inventories and their implications for reactivity-based ozone control strategy in the Pearl River Delta region, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **530-531**: 393-402.
- [10] Wang Q L, Li S J, Dong M L, *et al.* VOCs emission characteristics and priority control analysis based on VOCs emission inventories and ozone formation potentials in Zhoushan [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **182**: 234-241.
- [11] 闫雨龙, 彭林. 山西省人为源VOCs排放清单及其对臭氧生成贡献 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(11): 4086-4093.  
Yan Y L, Peng L. Emission inventory of anthropogenic VOCs and its contribution to ozone formation in Shanxi Province [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(11): 4086-4093.
- [12] 夏思佳, 刘倩, 赵秋月. 江苏省人为源VOCs排放清单及其对臭氧生成贡献 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(2): 592-599.  
Xia S J, Liu Q, Zhao Q Y. Emission inventory of anthropogenically sourced VOCs and its contribution to ozone formation in Jiangsu Province [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 592-599.
- [13] 卢滨, 黄成, 卢清, 等. 杭州市工业源VOCs排放清单及排放特征 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(2): 533-542.  
Lu B, Huang C, Lu Q, *et al.* Emission inventory and pollution characteristics of industrial VOCs in Hangzhou, China [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 533-542.
- [14] 黄玉虎, 胡玮, 李贝贝, 等. 北京城市副中心(通州区)加油

- 站 VOCs 排放清单[J]. 环境科学, 2018, **39**(2): 618-625.
- Huang Y H, Hu W, Li B B, *et al.* VOCs emission inventory of service stations in a subcenter (Tongzhou District) of the city of Beijing [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 618-625.
- [15] 邓子钰, 高美平, 王庆玮, 等. 北京市建筑类涂料 VOCs 排放清单编制技术方法及应用[J]. 环境科学, 2018, **39**(10): 4408-4413.
- Deng Z Y, Gao M P, Wang Q W, *et al.* Research and application of the technical method for the compilation of VOCs emission inventories from architectural coatings in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(10): 4408-4413.
- [16] 段文娇, 郎建全, 程水源, 等. 京津冀地区钢铁行业污染物排放清单及对 PM<sub>2.5</sub> 影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(4): 1445-1454.
- Duan W J, Lang J L, Cheng S Y, *et al.* Air pollutant emission inventory from iron and steel industry in the Beijing-Tianjin-Hebei region and its impact on PM<sub>2.5</sub> [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1445-1454.
- [17] 伯鑫, 赵春丽, 吴铁, 等. 京津冀地区钢铁行业高时空分辨率排放清单方法研究[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(8): 2554-2560.
- Bo X, Zhao C L, Wu T, *et al.* Emission inventory with high temporal and spatial resolution of steel industry in the Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(8): 2554-2560.
- [18] 闫静, 张增杰, 薛亦峰, 等. 北京市铸造行业大气污染物排放清单研究[A]. 见: 2013 中国环境科学学会学术年会论文集(第三卷)[C]. 昆明: 中国环境科学学会, 2013.
- [19] 国家环境保护总局. 空气和废气监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2003.
- [20] 龚芳. 我国人为源 VOCs 排放清单及行业排放特征分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
- [21] 刘丹. 合成氨及客车涂装过程挥发性有机物排放特征研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2016.
- [22] 姚芝茂, 滕云, 李俊, 等. 中小型烟煤层燃炉 NO<sub>x</sub> 排放因子的研究[J]. 环境科学研究, 2009, **22**(11): 1263-1268.
- Yao Z M, Teng Y, Li J, *et al.* NO<sub>x</sub> emission factors from medium and small layer burning boilers firing soft coal [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, **22**(11): 1263-1268.
- [23] 钟流举, 郑君瑜, 雷国强, 等. 大气污染物排放源清单不确定性定量分析方法及案例研究[J]. 环境科学研究, 2007, **20**(4): 15-20.
- Zhong L J, Zheng J Y, Louie P, *et al.* Quantitative uncertainty analysis in air pollutant emission inventories: methodology and case study [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2007, **20**(4): 15-20.
- [24] 魏巍, 王书肖, 郝吉明. 中国人为源 VOC 排放清单不确定性研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(2): 305-312.
- Wei W, Wang S X, Hao J M. Uncertainty analysis of emission inventory for volatile organic compounds from anthropogenic sources in China [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(2): 305-312.
- [25] 卞雅慧, 范小莉, 李成, 等. 广东省非道路移动机械排放清单及不确定性研究[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(6): 2167-2178.
- Bian Y H, Fan X L, Li C, *et al.* A sector-based emission inventory and its uncertainty from non-road mobile machinery in Guangdong Province, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(6): 2167-2178.
- [26] 杨朝旭, 段成龙, 张晶晶, 等. CALPUFF 大气扩散模型研究与应用进展[J]. 广州化工, 2018, **46**(3): 20-22.
- Yang Z X, Duan C L, Zhang J J, *et al.* Research and application of CALPUFF atmospheric diffusion model [J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2018, **46**(3): 20-22.
- [27] 杜世明. AERMOD 和 CALPUFF 模型用于济南地区空气污染模拟效果的对比研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2013.

## CONTENTS

Concentration Characteristics and Assessment of Model-Predicted Results of PM <sub>2.5</sub> in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in Autumn and Winter .....	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, LIU Bing, <i>et al.</i> (5191)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> During the Heating Period of 2016-2017 in the Eastern Part of the North China Plain .....	ZHANG Yi-qin, WANG Jie, GAO Jian, <i>et al.</i> (5202)
Change in Characteristics of Pollution Gas and Water-soluble Ions at Different Development Stages of Haze .....	WANG Zhen-bin, LIU An-kang, LU Wen, <i>et al.</i> (5213)
Exposure Levels, Sources, and Health Risks of Heavy Metal Components of PM <sub>2.5</sub> in Housewives in Rural Shanghai .....	LUO Ran-ran, DAI Hai-xia, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (5224)
Measuring the Condensable Particle Matter from a Stationary Source .....	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, WANG Gang, <i>et al.</i> (5234)
Volatile Organic Compound Emission Characteristics of Furniture Manufacturing Enterprises and the Influence on the Atmospheric Environment .....	ZHANG Jia-mi, ZENG Chun-ling, LIU Rui-yuan, <i>et al.</i> (5240)
VOCs Emission Inventory and Impact Range Simulation of Antibiotic Enterprises .....	ZHU Tao, LÜ Yi-rong, BIAN Wen-jing, <i>et al.</i> (5250)
Effects of Vehicle Emissions on Heavy Metals and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Pollution in Road Dust in Xinxiang .....	LI Qi-lu, WU Jin-tao, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (5258)
Pollution Characteristics and Exposure Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Road Dust, Chengde .....	FANG Shu-hong, ZHU He-xiang, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (5265)
Characteristics of Stable Isotopes and Analysis of Water Vapor Sources of Precipitation at the Northern Slope of the Qilian Mountains .....	ZHANG Bai-juan, LI Zong-xing, WANG Yu, <i>et al.</i> (5272)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Source Water of the Nanjing Reach of the Yangtze River .....	FENG Meng-juan, ZHANG Qin, SONG Ning-hui, <i>et al.</i> (5286)
Effects of Different Coagulants on Co-manganese Oxides Filter Media for Removing Ammonium and Manganese from Surface Water in Summer and Autumn .....	CHENG Li-jie, HUNAG Ting-lin, CHENG Ya, <i>et al.</i> (5294)
Disinfection By-products and the Relevant Health Risk in the Water Supply System in H City of Zhejiang Province .....	LIU Jun-ping, YU Jian-quan, LI Qing-song, <i>et al.</i> (5302)
Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter in Rivers of the Three Gorges Reservoir Area Under the Background of Urbanization .....	CHEN Zhao-yu, LI Si-yue (5309)
Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Natural Rivers of Western Sichuan Plateau .....	LIU Yan-yang, SUN Hui, LIU Chen, <i>et al.</i> (5318)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses and Runoff in a Typical Purple Soil Watershed in the Three Gorges Reservoir Area .....	CAO Rui-xia, LIU Jing, DENG Kai-kai, <i>et al.</i> (5330)
Responses of Riverine Phosphorus Exports to Land Use and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed .....	HUANG Ya-ling, TANG Li, HUANG Jin-liang, <i>et al.</i> (5340)
Effects of Land Use Types at Different Spatial Scales on Water Quality in Poyang Lake Wetland .....	FANG Na, LIU Ling-ling, YOU Qing-hui, <i>et al.</i> (5348)
Environmental Significance of Phosphorus Fractions of Phytoplankton-and Macrophyte-Dominated Zones in Taihu Lake .....	GENG Xue, WEN Shuai-long, SUN Pei-rong, <i>et al.</i> (5358)
Spatial Distribution and Pollution Evaluation of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Sediments of Zhushan Bay at Taihu Lake .....	FANG Jia-qi, QI Chuang, ZHANG Xin-hou, <i>et al.</i> (5367)
Effect of Rainfall Intensity on the Content of Nitrogen and Phosphorus Components in Plateau Areas: A Case Study of the Fengyu River Watershed .....	LI Xiao-hong, LEI Qiu-liang, ZHOU Jiao-gen, <i>et al.</i> (5375)
Water Purification Effect and Saline-alkali Tolerance Improvement Mechanism of <i>Suaeda salsa</i> in the Estuary Area .....	WU Dan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i> (5384)
Concentration-dependent Accumulation and Translocation of PFASs by Wetland Plant <i>Alisma orientale</i> .....	WANG Tuan-tuan, LI Bei-bei, WANG Sai, <i>et al.</i> (5394)
Occurrence of Denitrifying Dephosphatation in a Hybrid Constructed Wetland System and Its Stability .....	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, LI Qing-fei, <i>et al.</i> (5401)
Comparison of the Control of Sedimentary Phosphorus Release Using Zirconium-, Lanthanum-, and Lanthanum/Zirconium-Modified Zeolites as Sediment Amendments .....	LIU Ting, ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (5411)
Effect of Biochar Structure on Adsorption Characteristics of Ammonia Nitrogen .....	CHEN Mei, WANG Fang, ZHANG De-li, <i>et al.</i> (5421)
Effect of Dissolved Oxygen on Partial Nitrification of Suspended and Attached Growth Systems .....	WANG Si-yu, LIU Ling-jie, WANG Fen, <i>et al.</i> (5430)
Effects of Different Intermittent Aeration Strategies on the Start-up of SNAD Process .....	LI Dong, LIU Zhi-cheng, XU Gui-da, <i>et al.</i> (5438)
Operational Performance and Microbiological Characteristics of an Iron-Salt Denitrification Reactor in Co-substrate Mode .....	WANG Ru, LIU Meng-yu, LIU Bing-yin, <i>et al.</i> (5446)
Effect of Step Aeration on a Municipal Sewage Aerobic Granular Sludge System .....	LI Dong, WEI Zi-qing, LAO Hui-mei, <i>et al.</i> (5456)
Improvement of the Dewaterability of Excess Activated Sludge with Mixed Yeasts by Degrading Extracellular Polymeric Substances .....	YU Xin-yi, XIANG Jin-hao, LIU Ying, <i>et al.</i> (5465)
Influence of Land Use Change on Ecosystem Service Value Based on GEE in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 1998 to 2018 .....	LOU Pei-qing, FU Bo-lin, LIN Xing-chen, <i>et al.</i> (5473)
Assessment of Soil Quality in Coastal Tidal Flat Reclamation Areas Based on MDS-TOPSIS Model .....	XIE Xue-feng, PU Li-jie, ZHU Ming, <i>et al.</i> (5484)
Effect of Increasing Tidewater Inundation on Porewater Geochemistries and CO <sub>2</sub> and CH <sub>4</sub> Effluxes in the Tidal Freshwater Marshes of the Minjiang River Estuary, Southeast China .....	LI Jing, HUANG Jia-fang, LUO Min, <i>et al.</i> (5493)
Methane Emission Characteristics and Its Influencing Factors over Aquaculture Ponds .....	WANG Jiao, XIAO Wei, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (5503)
Effect of Fertilization on Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity in a Sorghum Field .....	YAN Jun-xia, ZHANG Yuan, JIAO Xiao-yan (5515)
Land Safety Zoning Method in High-Selenium and High-Cadmium Areas .....	WANG Rui, HOU Wan-ling, LI Yu-tong, <i>et al.</i> (5524)
Remediation Effects of Different Composite Materials on Cadmium-Contaminated Farmland Soil .....	CHEN Shu-lan, XU Chen-yang, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (5531)
Hydrocalumite Passivation Effect and Mechanism on Heavy Metals in Different Cd-Contaminated Farmland Soils .....	WU Qiu-mei, LIU Gang, WANG Hui-feng, <i>et al.</i> (5540)
Effects of Different Land Use Types on Microbial Community Diversity in the Shizishan Mining Area .....	HUANG Jian, ZHU Xu-yan, LU Jin, <i>et al.</i> (5550)
Effects of Conversion of Forest to Arable Land on the Abundance and Structure of the <i>cblL</i> -Harboring Bacterial Community in Albic Soil of the Hilly Region of Northeast China .....	WANG Rui, WU Xian, LI Gang, <i>et al.</i> (5561)
Thoughts on and Construction of a Risk Management and Control System for Contaminated Sites in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area .....	CHANG Chun-ying, DONG Min-gang, DENG Yi-rong, <i>et al.</i> (5570)
Visualized Quantitative Research of Soil Pollution in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area .....	ZHANG Ning, ZHANG Sheng, YANG Hai-chao, <i>et al.</i> (5581)
Characteristics and Environmental Impacts of Materials Stored in Municipal Solid Waste Landfills: A Case Study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area .....	MA Shi-jun, ZHOU Chuan-bin, YANG Guang, <i>et al.</i> (5593)
Heavy Metal Contamination and Migration in Correspondence of an Electroplating Site on the Hilly Lands of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China .....	HOU Wen-juan, GONG Xing, ZHAN Ze-bo, <i>et al.</i> (5604)
Pollution Characteristics and Migration of BTEX at a Chemical Contaminated Site in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area .....	DENG Yi-rong, LU Hai-jian, DONG Min-gang, <i>et al.</i> (5615)
Immobilization Impact of Goethite-Fulvic Acid Composites on Pb-Cd Contaminated Soil .....	LIU Qian-jun, LI Xiang, ZHOU Yang-mei, <i>et al.</i> (5623)
Mobilization of Heavy Metals in a Soil-Plant System and Risk Assessment in the Dabaoshan Mine Area, Guangdong Province, China .....	CHEN Jie-yi, LIU Guang-bo, CUI Jin-li, <i>et al.</i> (5629)
Calculation of the Soil Risk Control Value through a Hydrus-1D Model for Groundwater Protection .....	LIN Ting, LUO Fei, ZHU Yan, <i>et al.</i> (5640)
INDEX HUANJING KEXUE CONTENTS 2019, Vol. 40 .....	(5659)