

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

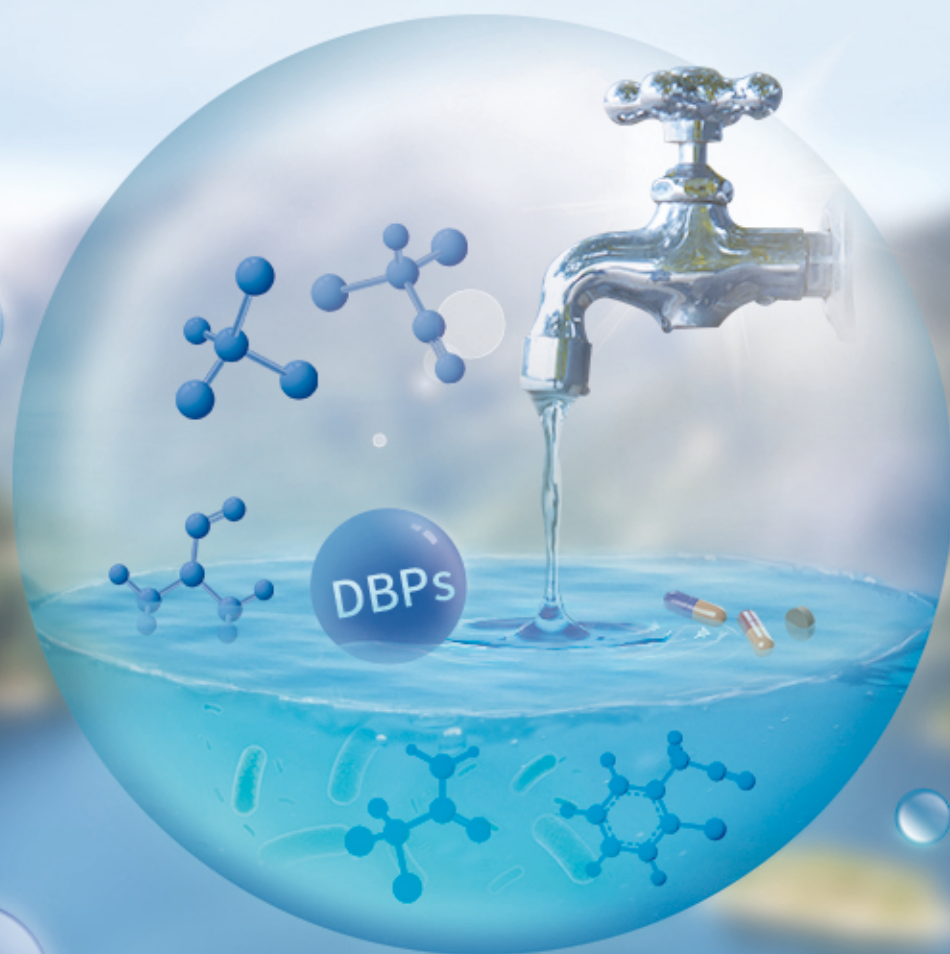
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

饮用水中的消毒副产物及其控制策略

楚文海, 肖融, 丁顺克, 张瑞华



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年11月

第42卷 第11期
Vol.42 No.11

目次

综述与专论

- 饮用水中的消毒副产物及其控制策略 楚文海, 肖融, 丁顺克, 张瑞华 (5059)
生物炭吸附硫化氢机制与影响因素研究进展 徐期勇, 梁铭坤, 许文君, 黄丹丹 (5086)

研究报告

- 1998~2016 中国八大经济区植被覆盖对 $PM_{2.5}$ 浓度时空分布的影响 杨玉莲, 杨昆, 罗毅, 喻臻钰, 孟超, 李岑 (5100)
COVID-19 疫情期间北京市两次重霾污染过程大气污染物演变特征及潜在源区分析 赵德龙, 田平, 周崑, 肖伟, 盛久江, 王飞, 杜远谋, 黄梦宇, 何晖, 丁德平 (5109)
汾渭平原临汾市 2019 年春节期间大气污染特征与来源解析 刘威杰, 胡天鹏, 毛瑶, 许安, 苏业旺, 李星谕, 程铖, 石明明, 梁莉莉, 邢新丽, 张家泉, 祁士华 (5122)
石家庄市大气污染物的季节性时空特征及潜在源区 聂赛赛, 王帅, 崔建升, 刘大喜, 陈静, 田亮, 贺博文, 沈梦宇 (5131)
天津市冬季空气湿度对 $PM_{2.5}$ 和能见度的影响 丁净, 唐颖潇, 郝天依, 姚青, 蔡子颖, 张裕芬, 韩素芹 (5143)
承德市 $PM_{2.5}$ 中碳质组分的季节分布特征及来源解析 贺博文, 聂赛赛, 王帅, 冯亚平, 姚波, 崔建升 (5152)
中国生活源挥发性有机物排放清单 梁小明, 陈来国, 沈国锋, 卢清, 刘明, 陆海涛, 任璐, 孙西勃, 林奎, 梁明易, 叶代启, 陶澍 (5162)
2011~2019 年中国工业源挥发性有机物排放特征 刘锐源, 钟美芳, 赵晓雅, 卢诗文, 田俊泰, 李银松, 侯墨, 梁小明, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启 (5169)
基于 LHS-MC 青岛市工业源 VOCs 排放清单及不确定性 徐琬莹, 付飞, 吕建华, 李瑞凡, 邵蕊, 和慧, 李淑芬, 左华 (5180)
典型橡胶制品业 VOCs 排放特征及对周边环境的影响 王海林, 辛国兴, 朱立敏, 薛松, 聂磊, 郝润 (5193)
沈阳市不同功能区挥发性有机物分布特征及臭氧生成潜势 库盈盈, 任万辉, 苏枫棋, 于兴娜 (5201)
天津城区夏冬季典型污染过程中 BTEX 变化特征及其健康风险评估 韩婷婷, 李颖若, 蒲维维, 姚青, 刘敬乐, 吴进, 张楠楠, 李梓铭, 马志强 (5210)
郑州市大气氨排放清单及驱动力分析 计尧, 王琛, 卢轩, 张欢, 尹沙沙 (5220)
基于 GAMs 模型分析成都市气象因子交互作用对 O_3 浓度变化的影响 张莹, 倪长健, 冯鑫媛, 王式功, 张小玲, 张家熙, 李运超 (5228)
长江干流表层水体悬浮物的空间变化特征及遥感反演 李建鸿, 黄昌春, 查勇, 王川, 尚娜娜, 郝维月 (5239)
河北省夏季降雨溶解性有机物光谱特征的空间分布、来源解析及氮素响应 张紫薇, 周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 董宛佳, 甄瑞吟, 张馨童, 姚波, 崔建升 (5250)
城镇与城郊污染河道中 DOM 成分分布与影响因素 朱奔, 陈浩, 丁国平, 孙晓楠, 刘辉, 叶建锋 (5264)
北京城市河流河水和沉积物中微塑料的组成与分布 胡嘉敏, 左剑恶, 李颀, 谢珍雯, 陈磊 (5275)
太湖西岸地表水中极性有机污染物非靶向筛查与生态风险评估 卢昕妍, 王菲, 张丽敏, 任晓鸣, 于南洋, 韦斯 (5284)
河水-地下水交互带沉积物中抗生素和代谢产物提取方法优化及其分布特征 李玉琼, 童蕾, 严涵, 尤悦, 卢钰茜, 刘慧 (5294)
白洋淀清淤示范区沉积物中抗生素和多环芳烃的分布特征与风险评估 王同飞, 张伟军, 李立青, 张美一, 廖桂英, 王东升 (5303)
雄安新区唐河污水库残留污染物对地下水水化学动态的作用机制 张志雄, 王仕琴, 张依章, 冯文钊 (5312)
基于时间序列模型的饮用水源地重金属健康风险分析与预测 姬超, 侯大伟, 谢丽, 孙华, 李发志, 周宇, 邓爱萍, 沈红军, 包广静, 王逸南 (5322)
千河下游水体-沉积物重金属空间分布、风险及影响因素 高煜, 王国兰, 金梓函, 张军, 耿雅妮 (5333)
巢湖流域丰水期可溶态重金属空间分布及污染评价 何苗, 刘桂建, 吴蕾, 齐翠翠 (5346)
洪泽湖围栏养殖对表层沉积物重金属含量影响与生态风险评估 瞿鑫源, 张鸣, 谷孝鸿, 阚可聪, 毛志刚, 陈辉辉, 曾庆飞 (5355)
成都市地表水天然水化学变化特征及影响因素 许秋瑾, 赖承钺, 丁瑶, 王照丽, 程中华, 于涛 (5364)
雷州半岛地下水化学特征及控制因素分析 彭红霞, 侯清芹, 曾敏, 黄长生, 师环环, 皮鹏程, 潘羽杰 (5375)
粤港澳大湾区陆源氮污染来源结构与空间分布 董斯齐, 黄翀 (5384)
红壤丘陵区小流域典型土地利用的面源氮磷输出特征 房志达, 苏静君, 赵洪涛, 胡炼, 李叙勇 (5394)
减氮条件下不同施肥模式对稻田氮素淋溶流失的影响 姜海斌, 张克强, 邹洪涛, 马璇骏, 渠清博, 谷艳茹, 沈仕洲 (5405)
互花米草入侵对胶州湾湿地土壤磷赋存形态的影响 沙梦乔, 柴娜, 赵洪涛, 刘春井, 丁文超, 谢文霞 (5414)
基于 16S rRNA 高通量测序的北运河水体及沉积物微生物群落组成对比分析 彭柯, 董志, 邱琰茗, 郭道宇 (5424)
硅改性花生壳生物炭对水中磷的吸附特性 赵敏, 张小平, 王梁嵘 (5433)
高锰酸钾改性松木生物炭对 Pb(II) 的吸附特性 莫贞林, 曾鸿鹄, 林华, Asfandiyar Shahab, 石清亮, 张华 (5440)
混合金属氧化物/碳复合材料的制备及其对 Pb(II) 的吸附性能 卢予沈, 宗莉, 于惠, 牟斌, 王爱勤 (5450)
负载型钛凝胶的制备及其吸附去除三价砷的性能 孙晔洋, 周畅, 甘永海, 吴兵党, 张淑娟 (5460)
一体式短程硝化-厌氧氨氧化工艺启动过程的亚硝酸盐调控 左富民, 郑蕊, 隋倩雯, 钟慧, 陈彦霖, 魏源送 (5472)
生物炭和秸秆还田对紫色土旱坡地土壤团聚体与有机碳的影响 邓华, 高明, 龙翼, 赖佳鑫, 王莹燕, 王子芳 (5481)
紫色土旱坡地不同坡位土壤有机碳组分含量对施肥管理的响应 徐曼, 余添, 王富华, 王丹, 王莹燕, 杨文娜, 高明, 王子芳 (5491)
南阳盆地东部山区土壤重金属分布特征及生态风险评估 赖书雅, 董秋瑶, 宋超, 杨振京 (5500)
城郊农田土壤多环芳烃污染特征及风险评估 张秀秀, 卢晓丽, 魏宇宸, 朱昌达, 潘剑君 (5510)
我国东部沿海地区蔬菜中重金属累积分布特征及居民膳食暴露评估 孙帅, 耿柠波, 郭崔崔, 张保琴, 卢宪波, 张海军, 陈吉平 (5519)
典型矿区周边农业用地农产品安全风险及影响因素 霍彦慧, 王美娥, 谢天, 姜蓉, 陈卫平 (5526)
稻田土壤 Cd 污染与安全种植分区: 以重庆市某区为例 曹淑珍, 母悦, 崔敬鑫, 刘安迪, 程先, 符远航, 魏世强, 张进忠 (5535)
镉污染大田条件下不同品种水稻镉积累的特征及影响因素 王宇豪, 杨力, 康愉晨, 陈小红, 彭杰, 李佳欣, 陈文清 (5545)
纳米膜覆盖对畜禽粪便好氧堆肥进程及恶臭气体排放的影响 李永双, 孙波, 陈菊红, 彭霞薇, 白志辉, 庄绪亮 (5554)
《环境科学》征订启事 (5108) 《环境科学》征稿简则 (5151) 信息 (5249, 5263, 5283)

目 次

综述与专论

- 饮用水中的消毒副产物及其控制策略 楚文海, 肖融, 丁顺克, 张瑞华 (5059)
地表臭氧污染与其他环境因子复合胁迫对中国城市森林的影响研究进展 李品, 袁相洋, 代碌碌, 冯兆忠 (5075)
生物炭吸附硫化氢机制与影响因素研究进展 徐期勇, 梁铭坤, 许文君, 黄丹丹 (5086)

研究报告

- 1998 ~ 2016 中国八大经济区植被覆盖对 $PM_{2.5}$ 浓度时空分布的影响 杨玉莲, 杨昆, 罗毅, 喻臻钰, 孟超, 李岑 (5100)
COVID-19 疫情期间北京市两次重霾污染过程大气污染物演变特征及潜在源区分析 赵德龙, 田平, 周崑, 肖伟, 盛久江, 王飞, 杜远谋, 黄梦宇, 何晖, 丁德平 (5109)
汾渭平原临汾市 2019 年春节期间大气污染特征与来源解析 刘威杰, 胡天鹏, 毛瑶, 许安, 苏业旺, 李星谕, 程铖, 石明明, 梁莉莉, 邢新丽, 张家泉, 祁士华 (5122)
石家庄市大气污染物的季节性时空特征及潜在源区 聂赛赛, 王帅, 崔建升, 刘大喜, 陈静, 田亮, 贺博文, 沈梦宇 (5131)
天津市冬季空气湿度对 $PM_{2.5}$ 和能见度的影响 丁净, 唐颖潇, 郝天依, 姚青, 蔡子颖, 张裕芬, 韩素芹 (5143)
承德市 $PM_{2.5}$ 中碳质组分的季节分布特征及来源解析 贺博文, 聂赛赛, 王帅, 冯亚平, 姚波, 崔建升 (5152)
中国生活源挥发性有机物排放清单 梁小明, 陈来国, 沈国锋, 卢清, 刘明, 陆海涛, 任璐, 孙西勃, 林奎, 梁明易, 叶代启, 陶澍 (5162)
2011 ~ 2019 年中国工业源挥发性有机物排放特征 刘锐源, 钟美芳, 赵晓雅, 卢诗文, 田俊泰, 李银松, 侯墨, 梁小明, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启 (5169)
基于 LHS-MC 青岛市工业源 VOCs 排放清单及不确定性 徐琬莹, 付飞, 吕建华, 李瑞凡, 邵蕊, 和慧, 李淑芬, 左华 (5180)
典型橡胶制品业 VOCs 排放特征及对周边环境的影响 王海林, 辛国兴, 朱立敏, 薛松, 聂磊, 郝润 (5193)
沈阳市不同功能区挥发性有机物分布特征及臭氧生成潜势 库盈盈, 任万辉, 苏枫枳, 于兴娜 (5201)
天津城区夏冬季典型污染过程中 BTEX 变化特征及其健康风险评估 韩婷婷, 李颖若, 蒲维维, 姚青, 刘敬乐, 吴进, 张楠楠, 李梓铭, 马志强 (5210)
郑州市大气氨排放清单及驱动力分析 计尧, 王琛, 卢轩, 张欢, 尹沙沙 (5220)
基于 GAMs 模型分析成都市气象因子交互作用对 O_3 浓度变化的影响 张莹, 倪长健, 冯鑫媛, 王式功, 张小玲, 张家熙, 李运超 (5228)
长江干流表层水体悬浮物的空间变化特征及遥感反演 李建鸿, 黄昌春, 查勇, 王川, 尚娜娜, 郝维月 (5239)
河北省夏季降雨溶解性有机物光谱特征的空间分布、来源解析及氮素响应 张紫薇, 周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 董宛佳, 甄瑞吟, 张馨童, 姚波, 崔建升 (5250)
城镇与城郊污染河道中 DOM 成分分布与影响因素 朱奔, 陈浩, 丁国平, 孙晓楠, 刘辉, 叶建锋 (5264)
北京城市河流河水和沉积物中微塑料的组成与分布 胡嘉敏, 左剑恶, 李颀, 谢珍雯, 陈磊 (5275)
太湖西岸地表水中极性有机污染物非靶向筛查与生态风险评估 卢昕妍, 王菲, 张丽敏, 任晓鸣, 于南洋, 韦斯 (5284)
河水-地下水交互带沉积物中抗生素和代谢产物提取方法优化及其分布特征 李玉琼, 童蕾, 严涵, 尤悦, 卢钰茜, 刘慧 (5294)
白洋淀清淤示范区沉积物中抗生素和多环芳烃的分布特征与风险评估 王同飞, 张伟军, 李立青, 张美一, 廖桂英, 王东升 (5303)
雄安新区唐河污水库残留污染物对地下水水化学动态的作用机制 张志雄, 王仕琴, 张依章, 冯文钊 (5312)
基于时间序列模型的饮用水源地重金属健康风险分析与预测 姬超, 侯大伟, 谢丽, 孙华, 李发志, 周宇, 邓爱萍, 沈红军, 包广静, 王逸南 (5322)
千河下游水体-沉积物重金属空间分布、风险及影响因素 高煜, 王国兰, 金梓函, 张军, 耿雅妮 (5333)
巢湖流域丰水期可溶态重金属空间分布及污染评价 何苗, 刘桂建, 吴蕾, 齐翠翠 (5346)
洪泽湖围栏养殖对表层沉积物重金属含量影响与生态风险评价 訾鑫源, 张鸣, 谷孝鸿, 阚可聪, 毛志刚, 陈辉辉, 曾庆飞 (5355)
成都市地表水天然水化学变化特征及影响因素 许秋瑾, 赖承敏, 丁瑶, 王照丽, 程中华, 于涛 (5364)
雷州半岛地下水化学特征及控制因素分析 彭红霞, 侯清芹, 曾敏, 黄长生, 师环环, 皮鹏程, 潘羽杰 (5375)
粤港澳大湾区陆源氮污染来源结构与空间分布 董斯齐, 黄翀 (5384)
红壤丘陵区小流域典型土地利用的面源氮磷输出特征 房志达, 苏静君, 赵洪涛, 胡炼, 李叙勇 (5394)
减氮条件下不同施肥模式对稻田氮素淋溶流失的影响 姜海斌, 张克强, 邹洪涛, 马瑛骏, 渠清博, 谷艳茹, 沈仕洲 (5405)
互花米草入侵对胶州湾湿地土壤磷赋存形态的影响 沙梦乔, 柴娜, 赵洪涛, 刘春井, 丁文超, 谢文霞 (5414)
基于 16S rRNA 高通量测序的北运河水体及沉积物微生物群落组成对比分析 彭柯, 董志, 邸琰茗, 郭道宇 (5424)
硅改性花生壳生物炭对水中磷的吸附特性 赵敏, 张小平, 王梁蝶 (5433)
高锰酸钾改性木生物炭对 $Pb(II)$ 的吸附特性 莫贞林, 曾鸿鹄, 林华, Asfandiyar Shahab, 石清亮, 张华 (5440)
混合金属氧化物/碳复合材料的制备及其对 $Pb(II)$ 的吸附性能 卢予沈, 宗莉, 于惠, 牟斌, 王爱勤 (5450)
负载型钛凝胶的制备及其吸附去除三价砷的性能 孙晔洋, 周畅, 甘永海, 吴兵党, 张淑娟 (5460)
一体式短程硝化-厌氧氨氧化工艺启动过程的亚硝酸盐调控 左富民, 郑蕊, 隋倩雯, 钟慧, 陈彦霖, 魏源送 (5472)
生物炭和秸秆还田对紫色土旱坡地土壤团聚体与有机碳的影响 邓华, 高明, 龙翼, 赖佳鑫, 王莹燕, 王子芳 (5481)
紫色土旱坡地不同坡位土壤有机碳组分含量对施肥管理的响应 徐曼, 余添, 王富华, 王丹, 王莹燕, 杨文娜, 高明, 王子芳 (5491)
南阳盆地东部山区土壤重金属分布特征及生态风险评价 赖书雅, 董秋瑶, 宋超, 杨振京 (5500)
城郊农田土壤多环芳烃污染特征及风险评价 张秀秀, 卢晓丽, 魏宇宸, 朱昌达, 潘剑君 (5510)
我国东部沿海地区蔬菜中重金属累积分布特征及居民膳食暴露评估 孙帅, 耿柠波, 郭崔崔, 张保琴, 卢宪波, 张海军, 陈吉平 (5519)
典型矿区周边农业用地农产品安全风险及影响因素 霍彦慧, 王美娥, 谢天, 姜蓉, 陈卫平 (5526)
稻田土壤 Cd 污染与安全种植分区: 以重庆市某区为例 曹淑珍, 母悦, 崔敬鑫, 刘安迪, 程先, 符远航, 魏世强, 张进忠 (5535)
镉污染大田条件下不同品种水稻镉积累的特征及影响因素 王宇豪, 杨力, 康愉晨, 陈小红, 彭杰, 李佳欣, 陈文清 (5545)
纳膜覆盖对畜禽粪便好氧堆肥进程及恶臭气体排放的影响 李永双, 孙波, 陈菊红, 彭霞薇, 白志辉, 庄绪亮 (5554)
《环境科学》征订启事 (5108) 《环境科学》征稿简则 (5151) 信息 (5249, 5263, 5283)

基于 LHS-MC 青岛市工业源 VOCs 排放清单及不确定性

徐琬莹, 付飞, 吕建华, 李瑞芃, 邵蕊, 和慧, 李淑芬, 左华*

(青岛市环境保护科学研究院, 青岛 266003)

摘要: 采用自下而上法,逐一采集企业活动水平,抽样调查企业获取治理措施变量,使用优化后的排放系数法建立青岛市工业源 VOCs 排放清单,同时将 MC 和 LHS 方法联合,模拟单变量和多变量对 VOCs 清单不确定性影响。结果表明,2019 年青岛市工业源 VOCs 排放总量为 4.47 万 t(未优化排放系数法:3.11 万 t),排放贡献较大行业依次为橡胶与塑料制品业、金属制品业、石油/煤炭及其他燃料加工业,占总量 40.26%。多变量模拟的不确定性高于单变量,工艺过程源(-9.72%~230.51%)和溶剂使用源(-14.14%~122.77%)VOCs 清单的不确定性明显高于燃烧源(-15.62%~36.41%)。影响 VOCs 清单不确定性的行业和主要因素为:化工、造纸和纺织(排放因子);金属制品、汽车制造和化工(去除率和设施运行率);石油加工和黑色金属冶炼(样本数少)。VOCs 排放主要集中在:西海岸新区东部、大珠山北部、即墨区南部、城阳区北部、胶州市东北部、平度市建成区和莱西市东南部。

关键词: 工业源;挥发性有机物(VOCs);排放清单;排放特征;不确定性;青岛

中图分类号:X511 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2021)11-5180-13 DOI:10.13227/j.hjxx.202103148

VOCs Emission Inventory and Uncertainty Analysis of Industry in Qingdao Based on Latin Hypercube Sampling and Monte Carlo Method

XU Wan-ying, FU Fei, LÜ Jian-hua, LI Rui-peng, SHAO Rui, HE Hui, LI Shu-fen, ZUO Hua*

(Qingdao Research Academy of Environmental Sciences, Qingdao 266003, China)

Abstract: In recent years, fine particulate matter ($PM_{2.5}$) and ozone (O_3) have become the main air pollutants in cities in China. Volatile organic compounds (VOCs) are one of the important precursors of $PM_{2.5}$, O_3 , and secondary organic aerosols. The establishment of VOCs emission inventory is therefore of great significance for controlling the amount of $PM_{2.5}$ and O_3 . To date, the coefficient method has been used, which has error transmission of activity level, parameter and model, leading to the uncertainty of emission inventory. Multivariate uncertainty quantitative analysis of VOCs emission inventory provides an accurate alternative which has not been reported in China. The bottom-up method is adopted to collect the activity level of each enterprise. The variables of pollution control measures are obtained from surveys conducted with enterprises. The VOCs emission inventory of Qingdao from industrial source is established using an optimized coefficient method. The uncertainty of the VOCs inventory on the impact of univariate and multivariate variables is simulated by combining the Monte Carlo method (MC) with Latin hypercube sampling method (LHS). The results show that the total VOCs emissions were 44700 tons from industrial sources in 2019 (unoptimized coefficient method: 31100 tons). The rubber and plastic industries, metal products, and oil/coal/other fuel processing contributed more VOCs, which accounted for 40.26% of the total emissions. The uncertainty of multivariate simulation is higher than that of single variable. The uncertainty from process (-9.72%-230.51%) and solvent using source (-14.14%-122.77%) is significantly higher than uncertainty from combustion source (-15.62%-36.41%). The main sectors affecting the uncertainty of the VOCs inventory include: the chemical, papermaking, and textile industries (emission factors); metal, automobile manufacturing, and chemical industries (removal rate, facility operating rate); industries of petroleum processing and ferrous metal smelting (too few samples). VOCs emissions are mainly distributed in the east of the West Coast New district, north of Dazhu Mountain, south of Jimo district, north of Chengyang district, northeast of Jiaozhou district, built-up area of Pingdu district, and southeast of Laixi district.

Key words: industry; volatile organic compounds (VOCs); emission inventory; emission characteristics; uncertainty; Qingdao

近年来,我国大气污染格局发生变化,细颗粒物($PM_{2.5}$)和臭氧(O_3)已成为城市主要大气污染物^[1],而挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)是 $PM_{2.5}$ 、 O_3 和二次有机气溶胶生成的重要前体物之一^[2,3],其排放清单的建立对于 $PM_{2.5}$ 与臭氧(O_3)协同控制研究及政策实施具有重要意义。

我国 VOCs 排放清单研究最早聚焦于天然源排放^[4],与天然源相比,人为源排放的 VOCs 对人类影响更直接^[5],随着我国省级和县级人为源 VOCs 排放清单建立后^[5,6],人为源 VOCs 清单逐渐成为研究热点^[3,7,8]。在人为源中,工业源 VOCs 排放是主要

贡献源,全国工业源 VOCs 排放约占人为源 VOCs 排放总量的 30%~50%^[3,9],因此,许多学者开展了工业源 VOCs 清单深入研究,包括国家^[10]、省级^[11,12]、城市^[2,13]和园区^[14]这 4 种尺度,研究范围涉及全部 VOCs 排放行业^[2,10,12]、重点行业^[3,13,15]或具体某行业^[11,16~18]。大中尺度由于范围广且数据量大,不能全部采用实测法,存在活动水平、参数和

收稿日期:2021-03-16;修订日期:2021-04-23

基金项目:青岛市科技惠民示范引导专项(20-3-4-1-nsh);2020 年青岛市环境保护专项

作者简介:徐琬莹(1984~),女,博士,高级工程师,主要研究方向为污染物管控和生态系统评价,E-mail:wanying-xu@163.com

* 通信作者,E-mail:glzhzh@126.com

模型等误差传递,造成排放清单的不确定性^[19],定量不确定性有助于提高排放清单质量及科学制定污染控制政策。

国内排放清单以定性和半定量方法为主^[3,8,13,19],定量方法中 MC (Monte Carlo) 法因较强灵活性、较高精确度和较为全面性等特性得到较广泛应用^[20],抽样方法为简单随机抽样^[2,10,15,21],包括不同来源排放因子分行业的不确定性^[15]、排放清单总体的不确定性^[2,10]、不同污染物排放的不确定性^[21],其中不同来源排放因子的不确定性较大(−97%~247%)^[15]。由于捕集率低、治理设施日常管理不到位等因素^[8],捕集率、污染物去除率和设施运行率也存在较大不确定性,影响排放清单质量;然而,清单多变量的不确定性定量分析目前未见报道,LHS (Latin hypercube sampling) 为从多元参数分布中近似随机抽样的分层抽样方法,样本代表性比较好,抽样误差比较小,常用于多变量抽样。本文基于 LHS-MC 法,开展多变量的不确定性定量分析,以期对排放清单不确定性定量分析提供方法借鉴,通过提高 VOCs 清单质量,并为我国 PM_{2.5} 与臭氧(O₃)协同控制提供基础支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域

青岛市地处山东半岛南部,位于东经 119°30′~121°00′、北纬 35°35′~37°09′,全市总面积为 11 292 km²,大气污染物排放企业主要分布在西海岸新区、即墨区、城阳区、胶州市和平度市,占全市比例达 80% 以上。本研究涉及的企业分布见图 1。

1.2 数据来源

1.2.1 活动水平

本研究以 2019 年为基准年,逐一采集 7 781 家工业企业的活动水平,包括:燃料使用量、产品产量、原辅料使用量和治理设施等。活动水平采集完成后,工业源 VOCs 排放量按照国民经济行业分类进行初步计算,剔除排放量 < 0.1 t 的企业,最终选取 VOCs 排放量占排放总量 98% 以上的 1 900 家工业企业作为研究对象,涉及金属制品业、化学原料和化学制品制造业、橡胶和塑料制品业等 27 个行业。

1.2.2 排放因子

本研究中 VOCs 排放因子主要来源于国家/省市技术指南、公开发表研究和国内外数据库,个别排放因子来源于本地化实测,详见表 1。不确定性模拟使用全部排放因子,而最终 VOCs 清单估算优先采用二污普排放因子^[22]和本地化因子,如无上述

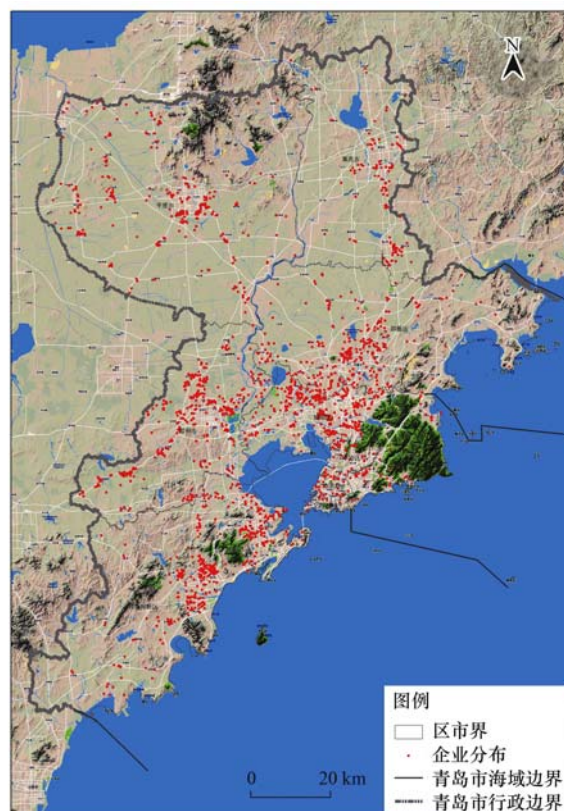


图 1 研究区域及企业分布示意

Fig. 1 Research area and the distribution map of companies

因子则使用排放因子的平均值。

1.2.3 捕集率、去除率及设施运行率

由于捕集设施和运行管理的差异性,捕集效率有所不同,全封闭式负压排风,捕集率能达 95%,而局部排风,捕集率仅为 40%,将不确定性定量分析捕集率范围设定为 40.00%~95.00%。最终 VOCs 清单估算采用的捕集率来源于每类行业抽样调查 3~5 家企业并对厂区内无组织排放量测试,但如果条件允许情况下建议对全部重点企业无组织排放量进行测试,详见表 2。

2019 年青岛市配置 VOCs 治理设施的企业占比 53.47%,通常设施去除率和运行率均有不同,本研究尝试将两个参数纳入核算。不确定性定量分析采用的去除率来源于文献[17,51~58];企业 VOCs 治理设施存在设施停用、设施间歇运行和设施全年运行的情况,将设施运行率范围设定为 0.00%~100.00%。最终清单估算采用的去除率为文献[17,51~58]和企业实测的平均值,不同污染治理设施的设施运行率为企业抽样调研评估结果。综合企业实测和文献数据,UV 光解、光催化氧化法和等离子体技术的清单估算使用去除率均不高,分别为 31.50%、47.5% 和 25.50%,虽目前主管部门已规定不作为推荐技术,但因为企业目前仍在未淘汰,因此清单仍按照实际情况进行估算,详见表 3。

表 1 VOCs 排放因子¹⁾
Table 1 Emission factor of VOCs

源类	行业/锅炉/窑炉	燃料/产品/ 原料	单位	不确定性定量分析					清单使用 因子	
				排放因子 1	排放因子 2	排放因子 3	排放因子 4	排放因子 5		
燃烧源	电力、热力生产和 供应业	煤炭	kg·t ⁻¹ (以燃料计)	0.15 ^[23]	0.18 ^[23]	0.04 ^[24]	0.03 ^[2]	0.02 ^[25]	0.08	
		天然气	kg·m ⁻³ (以燃料计)	4.50E-05 ^[23]	8.80E-05 ^[23]	2.00E-05 ^[24]	8.00E-05 ^[25]	1.80E-04 ^[26]	8.26E-05	
		柴油	kg·t ⁻¹ (以燃料计)	0.13 ^[23]	0.20 ^[23]	0.12 ^[27]	0.19 ^[26]	0.09 ^[25]	0.15	
		生物质	kg·t ⁻¹ (以燃料计)	5.30 ^[23]	1.13 ^[24]	10.56 ^[28]	0.12 ^[29]	—	4.28	
		垃圾	kg·t ⁻¹ (以燃料计)	0.74 ^[23]	1.00 ^[3]	0.91 ^[25]	—	—	0.88	
燃烧源/ 工艺过程源	工业锅炉/窑炉	煤炭	kg·t ⁻¹ (以燃料计)	0.39 ^[23]	2.16 ^[24]	0.18 ^[26]	0.45 ^[30]	0.04 ^[7]	0.64	
		天然气	kg·m ⁻³ (以燃料计)	8.80E-05 ^[23]	1.20E-04 ^[24]	9.40E-05 ^[26]	1.80E-04 ^[31]	2.90E-04 ^[29]	1.54E-04	
		柴油	kg·t ⁻¹ (以燃料计)	0.35 ^[23]	3.00 ^[24]	0.15 ^[26]	0.04 ^[29]	0.59 ^[30]	0.83	
		生物质	kg·t ⁻¹ (以燃料计)	5.30 ^[23]	1.13 ^[24]	10.56 ^[28]	0.12 ^[29]	—	4.28	
		液化气	kg·t ⁻¹ (以燃料计)	44.00 ^[25]	33.00 ^[24]	6.51 ^[32]	—	—	27.84	
		煤气	kg·m ⁻³ (以燃料计)	4.40E-07 ^[23]	2.00E-05 ^[24]	5.00E-05 ^[24]	—	—	2.35E-05	
		沼气	kg·m ⁻³ (以燃料计)	1.80E-04 ^[23]	4.05E-04 ^[33]	4.00E-04 ^[34]	—	—	3.28E-04	
		焦炭	kg·t ⁻¹ (以燃料计)	0.39 ^[23]	0.04 ^[24]	0.03 ^[29]	—	—	0.15	
工艺过程源	农副食品加工业	食用植物油	kg·t ⁻¹ (以产品计)	2.45 ^[23]	9.35 ^[23]	10.35 ^[23]	—	—	7.38	
	食品制造业	肉制品	kg·t ⁻¹ (以产品计)	0.143 ^[23]	0.20 ^[22]	0.14 ^[24]	—	—	0.20	
	酒、饮料和精制茶 制造业	白酒	kg·t ⁻¹ (以产品计)	14.45 ^[2]	25.35 ^[31]	65.53 ^[15]	—	—	35.11	
		葡萄酒	kg·t ⁻¹ (以产品计)	0.50 ^[23]	3.85 ^[2]	0.39 ^[25]	—	—	1.58	
		啤酒	kg·t ⁻¹ (以产品计)	0.25 ^[23]	0.35 ^[35]	0.44 ^[31]	—	—	0.35	
	烟草制品业	卷烟	kg·t ⁻¹ (以产品计)	0.72 ^[22]	0.15 ^[25]	9.08 ^[36]	—	—	0.72	
	纺织业	印染品	kg·t ⁻¹ (以产品计)	10.00 ^[23]	10.60 ^[22]	31.90 ^[37]	—	—	10.60	
	造纸和纸制品业	纸制品	kg·t ⁻¹ (以产品计)	3.10 ^[23]	0.91 ^[22]	0.66 ^[2]	—	—	0.91	
	石油、煤炭及其他 燃料加工业	原油炼制	kg·t ⁻¹ (以原油量计)	1.82 ^[23]	2.65 ^[6]	1.00 ^[38]	—	—	1.82	
		石油制品	kg·t ⁻¹ (以产品计)	0.10 ^[22]	0.32 ^[24]	1.50 ^[39]	—	—	0.10	
		油墨	kg·t ⁻¹ (以产品计)	50.00 ^[23]	22.50 ^[22]	75.00 ^[15]	—	—	22.50	
		漆涂料	kg·t ⁻¹ (以产品计)	15.00 ^[23]	10.00 ^[22]	46.25 ^[40]	—	—	10.00	
		胶粘剂	kg·t ⁻¹ (以产品计)	0.12 ^[22]	0.79 ^[22]	0.10 ^[22]	—	—	0.12	
		塑料树脂	kg·t ⁻¹ (以产品计)	10.00 ^[23]	4.60 ^[22]	5.77 ^[2]	—	—	4.60	
		染料	kg·t ⁻¹ (以产品计)	2 ^[22]	15 ^[22]	16 ^[22]	—	—	11.00	
	化学原料和化学制 品制造业	橡胶	kg·t ⁻¹ (以产品计)	1.97 ^[22]	4.18 ^[2]	12.50 ^[7]	—	—	1.97	
		碳黑	kg·t ⁻¹ (以产品计)	0.70 ^[41]	0.18 ^[25]	26.20 ^[2]	—	—	9.03	
		农药	kg·t ⁻¹ (以产品计)	3.00 ^[22]	12.00 ^[22]	23.00 ^[22]	—	—	12.67	
		日用化学品	kg·t ⁻¹ (以产品计)	0.13 ^[22]	0.25 ^[22]	0.98 ^[40]	—	—	0.19	
		专用化学品	kg·t ⁻¹ (以产品计)	0.98 ^[22]	0.40 ^[22]	1.87 ^[40]	—	—	0.69	
	医药制造业	有机化学品	kg·t ⁻¹ (以产品计)	12.58 ^[22]	13.30 ^[22]	5.03 ^[22]	—	—	10.30	
		化学药	kg·t ⁻¹ (以产品计)	430.00 ^[23]	195.00 ^[22]	114.14 ^[42]	—	—	195.00	
		生物药	kg·t ⁻¹ (以产品计)	400.00 ^[22]	580.00 ^[22]	233.00 ^[22]	—	—	404.33	
		橡胶和塑料制品业	三胶(天然橡胶、再生橡胶、合成橡胶)	kg·t ⁻¹ (以原料计)	3.27 ^[22]	2.76 ^[22]	7.17 ^[22]	—	—	4.40
			乳胶	kg·t ⁻¹ (以原料计)	1.32 ^[22]	0.09 ^[25]	4.15 [*]	—	—	4.15
	塑料制品		kg·t ⁻¹ (以产品计)	2.70 ^[22]	1.90 ^[22]	3.76 ^[22]	—	—	2.79	
	非金属矿物制品业	玻璃钢	kg·t ⁻¹ (以产品计)	1.50 [*]	5.90 ^[25]	2.86 ^[36]	—	—	1.50	
		沥青建材	kg·t ⁻¹ (以产品计)	0.06 ^[22]	0.43 ^[24]	0.16 ^[40]	—	—	0.06	
		烧结矿	kg·t ⁻¹ (以产品计)	0.25 ^[24]	0.24 ^[25]	0.14 ^[36]	—	—	0.21	
	黑色金属冶炼和 压延加工业	焦炭	kg·t ⁻¹ (以产品计)	0.073 ^[40]	0.11 ^[22]	1.25 ^[25]	—	—	0.11	
		铸造产品	kg·t ⁻¹ (以产品计)	0.21 ^[22]	0.33 ^[22]	0.45 ^[22]	—	—	0.33	
		金属制品业/通用 设备制造业/专用 设备制造业/汽车 制造业等	焊料(焊条、焊丝、焊锡、助焊剂)	kg·t ⁻¹ (以原料计)	6.92 ^[22]	6.21 ^[22]	25.21 ^[22]	—	—	12.78
溶剂使用源	粉末涂料	kg·t ⁻¹ (以原料计)	1.20 ^[22]	0.07 ^[22]	5.00 ^[43]	—	—	0.64		
	家具制造业/文教、 工美、体育和娱乐 用品制造业等	溶剂型涂料-非 金属表面	kg·t ⁻¹ (以原料计)	640.00 ^[24]	635.00 ^[22]	494.00 ^[22]	—	—	564.50	
	水性涂料-非 金属表面	kg·t ⁻¹ (以原料计)	120.00 ^[22]	247.00 ^[22]	179.00 ^[22]	—	—	182.00		

续表 1

源类	行业/锅炉/窑炉	燃料/产 品/原料	单位	不确定性定量分析					清单使用 因子
				排放因子 1	排放因子 2	排放因子 3	排放因子 4	排放因子 5	
溶剂 使用 源	金属制品业/通用设备制造业/专用设备制造业/汽车制造业/铁路、船舶、航空	溶剂型涂料-金属表面	kg·t ⁻¹ (以原料计)	607.00 ^[22]	725.00 ^[18]	630.00 ^[44]	—	—	607.00
	制造业/汽车制造业/铁路、船舶、航空	水性涂料-金属表面	kg·t ⁻¹ (以原料计)	150.00 ^[22]	100.00 ^[44]	200.00 ^[45]	—	—	150.00
	航天和其他运输设备制造业等	切削液	kg·t ⁻¹ (以原料计)	5.64 ^[22]	6.34 ^[46]	35.72 ^[46]	—	—	5.64
		淬火油	kg·t ⁻¹ (以原料计)	0.01 ^[22]	1.94 ^[46]	0.57 ^[46]	—	—	0.01
	印刷和记录媒介复制业/皮革、毛皮、羽毛及其制品和制鞋业等	传统油墨	kg·t ⁻¹ (以原料计)	750.00 ^[24]	650.00 ^[7]	689.00 ^[16]	—	—	696.33
		新型油墨	kg·t ⁻¹ (以原料计)	100.00 ^[24]	114.00 ^[22]	166.00 ^[16]	—	—	114.00
	印刷和记录媒介复制业	上光油	kg·t ⁻¹ (以原料计)	600.00 ^[22]	25.00 ^[22]	43.00 ^[22]	—	—	222.67
		润版液	kg·t ⁻¹ (以原料计)	200.00 ^[22]	79.00 ^[22]	620.00 ^[47]	—	—	139.50
	电气机械和器材制造业/金属制品业/汽车制造业/通用设备制造业等	溶剂型清洗剂	kg·t ⁻¹ (以原料计)	1 000.00 ^[24]	950.00 ^[22]	753.00 ^[47]	—	—	950.00
		水性清洗剂	kg·t ⁻¹ (以原料计)	120.00 ^[22]	48.97 ^[22]	68.30 ^[48]	—	—	84.49
	家具制造业/文教、工美、体育和娱乐用品制造业/皮革、毛皮、羽毛及其制品和制鞋业等	溶剂型胶粘剂	kg·t ⁻¹ (以原料计)	750.00 ^[49]	790.00 ^[22]	830.00 ^[50]	—	—	790.00
		水性胶粘剂	kg·t ⁻¹ (以原料计)	85.00 ^[24]	52.40 ^[22]	8.00 ^[50]	—	—	52.40

1) * 表示本地实测排放因子; “—”表示该项没有排放因子 4 和 5(由于现有排放因子数量不同,模拟过程有些是 3 个排放因子,有些为 5 个排放因子)

表 2 捕集率¹⁾
Table 2 Collection rate

行业	不确定性定量分析捕集率范围/%	清单估算使用捕集率/%
电气机械和器材制造业	40.00 ~ 95.00 *	75.00 *
计算机、通信和其他电子设备制造业	40.00 ~ 95.00 *	80.00 *
纺织业	40.00 ~ 95.00	80.00
皮革、毛皮、羽毛及其制品和制鞋业	40.00 ~ 95.00	65.00
非金属矿物制品业	40.00 ~ 95.00	40.00
家具制造业	40.00 ~ 95.00	65.00
木材加工和木、竹、藤、棕、草制品业	40.00 ~ 95.00	65.00
金属制品业	40.00 ~ 95.00 *	75.00 *
汽车制造业	40.00 ~ 95.00 *	95.00 *
铁路、船舶、航空航天和其他运输设备制造业	40.00 ~ 95.00 *	75.00 *
通用设备制造业	40.00 ~ 95.00 *	70.00 *
专用设备制造业	40.00 ~ 95.00 *	70.00 *
橡胶和塑料制品业	40.00 ~ 95.00	55.00
印刷和记录媒介复制业	40.00 ~ 95.00	70.00
文教、工美、体育和娱乐用品制造业	40.00 ~ 95.00 *	60.00 *
造纸和纸制品业	40.00 ~ 95.00	45.00
化学原料和化学制品制造业	40.00 ~ 95.00	95.00
酒、饮料和精制茶制造业	40.00 ~ 95.00	75.00
黑色金属冶炼和压延加工业	40.00 ~ 95.00	70.00
有色金属冶炼和压延加工业	40.00 ~ 95.00	70.00
农副食品加工业	40.00 ~ 95.00	80.00
烟草制品业	40.00 ~ 95.00	65.00
石油、煤炭及其他燃料加工业	40.00 ~ 95.00	95.00
医药制造业	40.00 ~ 95.00	95.00

1) * 表示焊接工序捕集率范围为 30.00% ~ 70.00%,清单使用的捕集率为平均值 50.00%; 全封闭式负压排风(VOCs 产生源设置在封闭空间内,所有开口处包括人员或物料进出口呈负压捕集效率为 95%),局部排风(VOCs 产生源处,配置局部排风罩捕集效率为 40%)

1.3 研究方法

1.3.1 核算方法

VOCs 排放清单估算采用排放系数法^[59],不考

虑捕集率和治理设备运行情况等因素,一般简化为活动水平、排放因子和 1 - 去除率的乘积^[3,45]. 由于捕集装置设计缺陷、密封性差和质量参差不齐等原

因,导致捕集率不高,同时也存在治理设施运行不佳的情况,因此,捕集率和设施运行率应进行考虑,包括有组织和无组织排放两部分.参考文献[22],本研究将工业源 VOCs 的计算方法优化为:

$$EF_i = [A_i \times P_i \times C_j \times (1 - \eta_k \times O_k)] + [A_i \times P_i \times (1 - C_j)] \quad (1)$$

式中,EF 为 VOCs 排放量,t; A 为活动水平(如燃料

消耗量、产品产量和原辅料使用量等),单位根据排放源具体类别确定; P 为 VOCs 的排放因子,单位根据排放源具体类别确定; C 为捕集率,%; η 为治理设施去除率,%; O 为设施运行率,%; i 为排放源类别,不同排放源的活动水平和排放因子存在差异; j 为捕集类别,不同捕集设施存在差异; k 为治理设施类型,不同 VOCs 治理设施存在差异.

表 3 不同污染治理设施去除率及设施运行率¹⁾

Table 3 Removal rate and facility operating rate of different facilities

技术类型	治理设施类型	企业使用占比/%	不确定性定量分析		清单估算采用去除率/%	清单估算采用设施运行率/%	说明
			去除率/%	设施运行率/%			
单一技术	UV 光解	0.47	10.20 ~ 65.00	0.00 ~ 100.00	31.50	56.00	清单采用去除率为企业实测平均;设施运行率为企业抽样调研评估结果
	吸附法	12.74	0 ~ 79.20	0.00 ~ 100.00	42.75	32.00	
	RTO	1.53	70.10 ~ 99.57	0.00 ~ 100.00	96.80	96.00	
	光催化氧化法	0.32	0 ~ 95.00	0.00 ~ 100.00	47.50	58.00	清单采用去除率为参考文献平均;设施运行率为企业抽样调研评估结果
	等离子体技术	0.32	20.00 ~ 31.00	0.00 ~ 100.00	25.50	34.00	
	冷凝法	0.47	0 ~ 99.00	0.00 ~ 100.00	49.50	66.00	
	生物降解法	20.63	0 ~ 33.30	0.00 ~ 100.00	16.65	67.00	
	湿式处理法	1.58	34.00 ~ 48.00	0.00 ~ 100.00	41.00	72.00	
	吸收法	2.11	5.00 ~ 90.30	0.00 ~ 100.00	47.65	43.00	
	燃烧法	0.32	60.00 ~ 95.00	0.00 ~ 100.00	77.50	95.00	
	催化燃烧	0.89	50.00 ~ 99.30	0.00 ~ 100.00	74.65	93.00	
	焊烟净化器	—	78.70 ~ 88.20	0.00 ~ 100.00	83.45	98.00	
组合技术	光催化氧化法 + 等离子体技术	1.58	67.50 ~ 99.70	0.00 ~ 100.00	90.50	55.00	清单采用去除率为企业实测平均;设施运行率为企业抽样调研评估结果
	光催化氧化法 + 臭氧	0.05	83.00 ~ 92	0.00 ~ 100.00	87.50	63.00	
	吸附法 + UV 光解	0.95	7.00 ~ 69.00	0.00 ~ 100.00	43.80	49.00	
	吸附法 + 光催化氧化法	0.16	0 ~ 76.00	0.00 ~ 100.00	27.00	49.00	
	吸附法 + 催化燃烧	6.89	0 ~ 99.10	0.00 ~ 100.00	81.90	93.00	
	沸石转轮 + 催化燃烧	0.26	86.30 ~ 99.80	0.00 ~ 100.00	86.75	92.00	清单采用去除率为参考文献平均;设施运行率为企业抽样调研评估结果
	吸附法 + 等离子体技术	0.26	0 ~ 83.40	0.00 ~ 100.00	41.70	51.00	
	吸附法 + 冷凝法	1.68	0 ~ 95.00	0.00 ~ 100.00	47.50	65.00	
	吸附法 + 湿式处理法	0.05	0 ~ 97.90	0.00 ~ 100.00	48.95	75.00	
	吸收法 + 湿式处理法	0.21	2.70 ~ 19.60	0.00 ~ 100.00	11.15	78.00	

1) “—”表示文中对移动式治理设施未进行企业使用占比统计

1.3.2 LHS-MC 不确定性模拟

使用排放系数法模拟 VOCs 排放量主要涉及活动水平、排放因子、捕集率、去除率和设施运行率这 5 个变量,其中活动水平为企业逐一采集,因此,活动水平不作为本研究不确定性模拟考虑的变量^[2].燃烧源由于未配置 VOCs 治理设施,仅考虑排放因子的不确定性,而工艺过程源和溶剂使用源,考虑排放因子、捕集率、去除率和设施运行率的不确定性.

采用 R 语言 3.6.3 软件对清单不确定性进行模拟.首先,量化输入变量的不确定性,采用自展模拟(bootstrap simulation)将排放因子进行拟合确定其概率分布(对数正态),概率密度函数见式(2);而捕集率、去除率和设施运行率假设范围符合均匀分布,概率密度函数见式(3).

$$f(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2)$$

式中,x 为输入信息的赋值;f 为 x 的概率; μ 为 x 的对数平均值, $\mu = \ln x$; σ 为 x 的对数标准差.

$$fI_{[a,b]}(x) = \frac{1}{b-a} I_{[a,b]} \quad (3)$$

式中,x 为输入信息的赋值;f 为 x 的概率;I 为区间;a 为区间内最小值;b 为区间内最大值.

其次,根据概率分布和参数进行随机抽样,产生代表每个输入变量的随机值,再将每个随机抽样值代入式(1)中计算抽样下的排放量,单变量(燃烧源)抽样方法采用简单随机抽样法,而多变量(工艺过程源/溶剂使用源)采用 LHS 法.最后,统计抽样后排放量大小,得到清单的不确定性.

1.3.3 空间分配

排放清单空间分配是将污染物排放量按照标准和规则分配到相应空间分辨率的网格上,以表达污染物排放的空间分布特征.本研究利用 ArcGIS 软件将

青岛市按 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 的空间分辨率划分为 12 014 个网格. 根据采集的企业经纬度信息, 进行空间属性分配, 对 VOCs 排放信息进行空间统计和汇总.

2 结果与讨论

2.1 青岛市工业源 VOCs 排放清单及特征

根据估算结果, 青岛市工业源 VOCs 排放主要来源于工艺过程, 1900 家企业的 VOCs 排放清单见图 2. 燃烧源未配置 VOCs 治理设施, VOCs 排放主要是煤炭、生物质和垃圾燃烧产生, 占燃烧源比例分别是 23.44%、40.84% 和 26.72%, 应加快推行这 3 类燃烧源的 VOCs 在线监控管理. 一些企业在部分

生产工段安装 VOCs 治理设施, 核算过程中存在两种情况: ①考虑捕集率和设施运行率实际变化(优化后排放系数法, 估算结果如图 2 中 a); ②默认捕集率和设施运行率 100% (未优化排放系数法, 估算结果如图 2 中 b). 在这两种情况下溶剂使用源和工艺过程源的 VOCs 排放量存在较大差异, 其中溶剂使用源为 1.70 倍(a:b), 工艺过程源为 1.44 倍(a:b), 反映目前青岛市 VOCs 治理设施主要配置在溶剂使用源的企业. 总体, 当考虑捕集率和设施运行率实际变化时, 2019 年工业源 VOCs 排放总量为 4.47 万 t; 而当捕集率和设施运行率默认为 100% 时, 2019 年工业源 VOCs 排放总量则为 3.11 万 t.

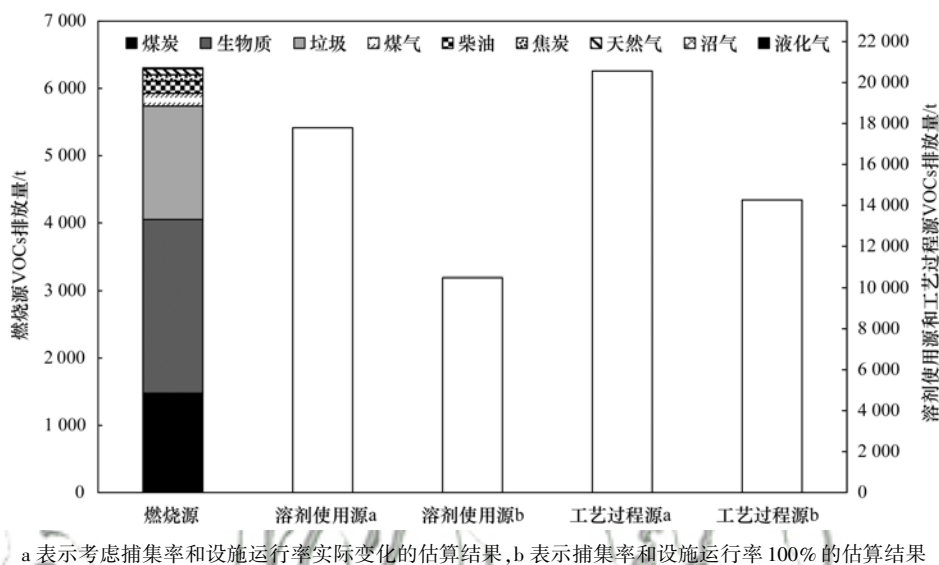


图 2 青岛市工业源 VOCs 排放清单

Fig. 2 VOCs emission inventory from industries in Qingdao

根据 VOCs 排放总量(燃烧源 + 工艺过程源 + 溶剂使用源), 按照行业分类贡献占比得出, VOCs 排放占比较高的行业依次为橡胶与塑料制品业(14.87%, 分担率)、金属制品业(4.32%, 分担率)、石油/煤炭及其他燃料加工业(11.07%, 分担率)、农副食品加工业(10.5%, 分担率)和电力、热力生产和供应业(9.38%, 分担率)。

燃烧源中大部分 VOCs 排放来源于电力、热力生产和供应业(66.42%), 而溶剂使用源中占比较高的行业依次为金属制品行业(34.26%)、汽车制造业(15.89%)、铁路航空船舶设备制造业(13.69%)、印刷业(7.56%)、专用设备制造业(6.62%)和通用设备制造业(5.60%), 溶剂使用源 VOCs 治理设施占比虽较高, 但大部分企业采用的治理设施比较落后, 捕集设施和治理设施运行管理水平也有待提高。

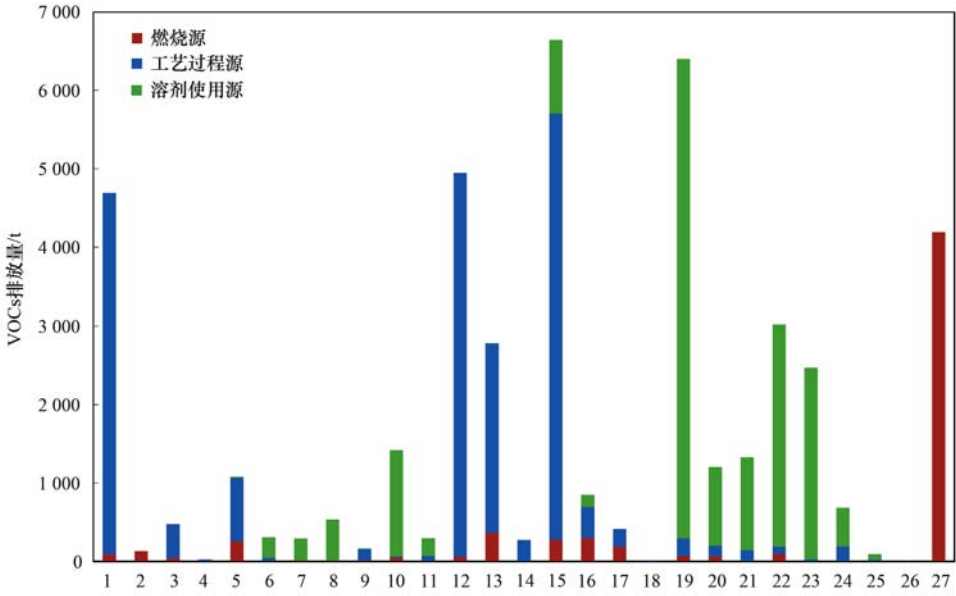
在工艺过程源中, 橡胶与塑料制品业和石油、煤炭及其他燃料加工业的 VOCs 排放量比较高, 分

担率分别是 26.38% 和 23.74%, 这两类行业全过程的废气捕集设施、VOCs 治理设施及各类设施运行管理需进一步提升. 此外, 通常农副食品加工业和纺织业不作为管控重点, 因此, 在当地实际排放清单中工艺过程的 VOCs 排放不进行考虑, 但本研究尝试将两类行业工艺过程排放纳入核算进行对比分析, 结果显示, 农副食品加工业(主要是食用植物油加工)的 VOCs 排放量比较大, 分担率达 22.35%, 工艺过程源中排第三, 应该纳入 VOCs 过程管控. 排放特征具体见图 3.

2.2 青岛市工业源 VOCs 排放清单不确定性分析

2.2.1 总清单及分源类清单不确定性分析

不确定性模拟结果显示(表 4 和图 4), 青岛市工业源 VOCs 排放清单在 95% 置信区间不确定范围为(-12.32%~160.19%), 不确定性高于杭州市工业源 VOCs 清单(-28%~67%)^[2] 和我国工业源 VOCs 清单(-32%~48%)^[10], 其中上限值远高于杭州市和全国, 主要因为模拟过程同时考虑排放因



1. 农副食品加工业, 2. 食品制造业, 3. 酒、饮料和精制茶制造业, 4. 烟草制品业, 5. 纺织业, 6. 皮革、毛皮、羽毛及其制品和制鞋业, 7. 木材加工和木、竹、藤、棕、草制品业, 8. 家具制造业, 9. 造纸和纸制品业, 10. 印刷和记录媒介复制业, 11. 文教、工美、体育和娱乐用品制造业, 12. 石油、煤炭及其他燃料加工业, 13. 化学原料和化学制品制造业, 14. 医药制造业, 15. 橡胶和塑料制品业, 16. 非金属矿物制品业, 17. 黑色金属冶炼和压延加工业, 18. 有色金属冶炼和压延加工业, 19. 金属制品业, 20. 通用设备制造业, 21. 专用设备制造业, 22. 汽车制造业, 23. 铁路、船舶、航空航天和其他运输设备制造业, 24. 电气机械和器材制造业, 25. 计算机、通信和其他电子设备制造业, 26. 废弃资源综合利用业, 27. 电力、热力生产和供应业(包括垃圾焚烧); 排放特征中 VOCs 排放量为考虑捕集率和实际设施运行率

图3 青岛市工业源 VOCs 排放特征

Fig. 3 VOCs emission characteristics from industries in Qingdao

子、捕集率和去除率等多变量,且捕集率和设施运行率未能全面采集,部分抽样企业治理水平较高,导致不确定性范围增大、上限值较高.从分源类模拟结果得出,燃烧源(仅考虑排放因子单变量)的不确定性(−15.62%~36.41%),明显低于考虑多变量的工艺过程源(−9.72%~230.51%)和溶剂使用源(−14.14%~122.77%),反映出工业源 VOCs 清单

的不确定性主要来自工艺过程源和溶剂使用源,结果与成都市研究一致^[41].燃烧源和溶剂源 VOCs 排放量概率分布呈现不对称特性(图4),其原因为影响概率分布的变量主要是排放因子,而排放因子样本较少(燃烧源: $n = 48$; 溶剂源: $n = 42$),导致概率分布为偏态,其中燃烧源为正偏态、溶剂源为负偏态;工艺过程源概率分布趋于正态($n = 102$).

表4 青岛市工业源 VOCs 排放清单不确定性模拟结果

Table 4 Uncertainty simulation results of VOCs emission inventory from industries in Qingdao

排放源	输入变量概率分布类型		平均值/t	中位值/t	95% 置信区间 不确定性/%	清单估算值 /t
	排放因子	捕集率、去除率和 设施运行率				
燃烧源	对数正态分布	—	6 503.95	6 362.15	[−15.62, 36.41]	6 304.40
工艺过程源	对数正态分布	均匀分布	38 648.75	36 744.03	[−9.72, 230.51]	20 564.26
溶剂使用源	对数正态分布	均匀分布	29 748.65	30 662.57	[−14.14, 122.77]	17 794.24
总清单	对数正态分布	均匀分布	74 901.35	73 768.75	[−12.32, 160.19]	44 662.89

2.2.2 分行业类型清单不确定性分析

为了探索影响清单不确定性的行业和主要因素,将溶剂使用源和工艺过程源分行业类型进行不确定性模拟.溶剂使用源 VOCs 清单整体不确定性低于工艺过程源(表5和表6),仅有行业8、9、16和17不确定性>100%.行业8和9主要是因为去除率和设施运行率差异性较大所致,因此,应加强金属制品、汽车制造行业设施运行率的采集及不同治理设施去除率的实测.而行业16和17则是因为样

本数量过少导致,从采集的活动水平、排放因子、去除率等信息判断,不确定性范围属正常,且二者 VOCs 排放量非常小,不影响总清单变化.

工艺过程源分行业类型的不确定性模拟见表6,估算值除了行业15、17和20位于99%置信区间内,其它行业均位于95%和99%置信区间内,反映出这3类行业清单不确定性大(99%置信区间排放量不确定性>200%),估算值与平均值差异性也大.行业15和17主要是因为排放因子集范围较大

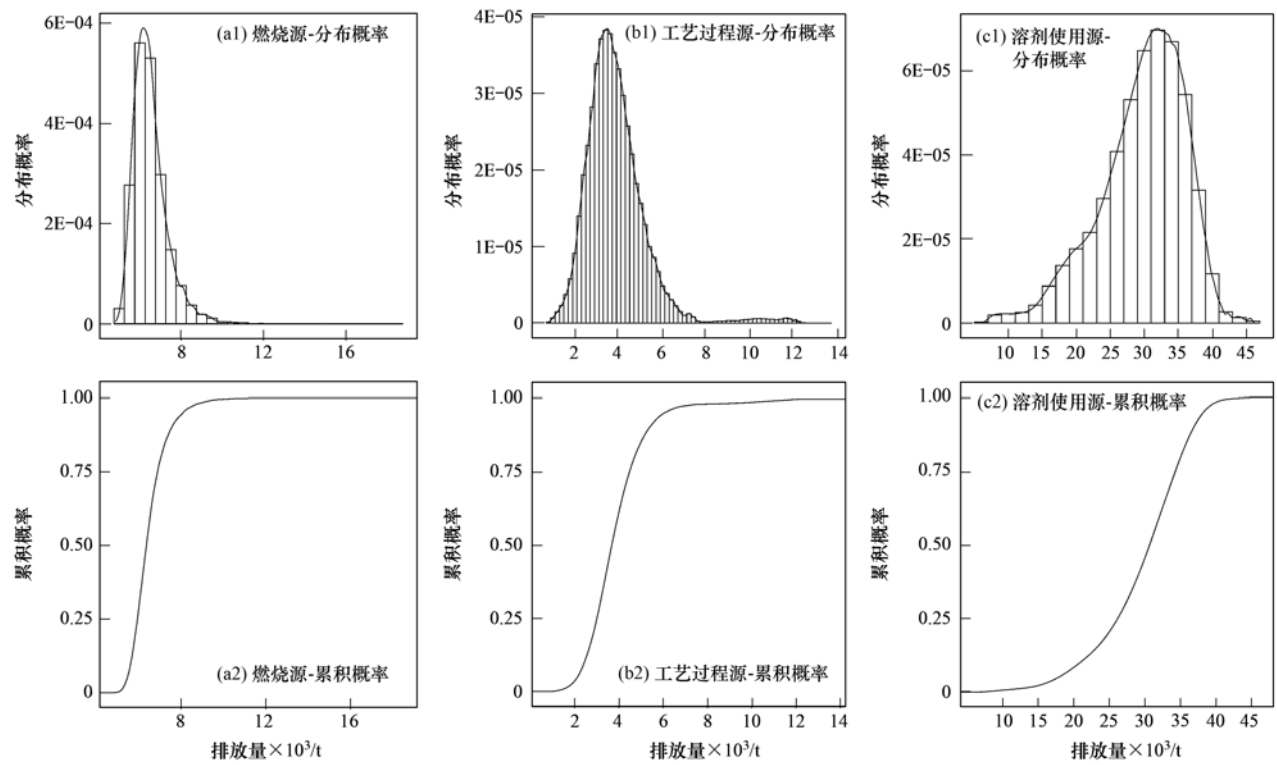


图4 青岛市工业源 VOCs 清单不确定性模拟

Fig. 4 Uncertainty simulation of VOCs emission inventory from industries in Qingdao

表5 溶剂使用源分行业类型 VOCs 排放量不确定性模拟结果¹⁾

Table 5 Uncertainty simulation results of VOCs emission from solvent use from different industry types

行业类型	平均值/t	中位值/t	95% 置信区间 排放量/t	99% 置信区间 排放量/t	清单估算值 /t
1. 电气机械和器材制造业	575.70	581.70	282.03 ~ 840.62	164.87 ~ 1 017.09	485.12
2. 计算机、通信和其他电子设备制造业	78.52	81.08	46.62 ~ 99.02	32.02 ~ 106.26	70.16
3. 纺织业	5.70	6.00	3.49 ~ 6.68	2.41 ~ 6.84	5.83
4. 皮革、毛皮、羽毛及其制品和制鞋业	250.39	251.18	129.21 ~ 368.58	83.68 ~ 460.17	256.38
5. 非金属矿物制品业	139.74	136.66	98.21 ~ 196.58	85.05 ~ 258.89	146.69
6. 家具制造业	549.96	559.34	354.84 ~ 701.36	273.01 ~ 788.09	517.41
7. 木材加工和木、竹、藤、棕、草制品业	268.67	258.00	196.95 ~ 402.43	184.11 ~ 484.31	274.81
8. 金属制品业	10 443.40	10 808.80	5 067.08 ~ 13 999.63	2 747.66 ~ 14 961.03	6 096.24
9. 汽车制造业 *	7 771.01	7 981.81	3 751.38 ~ 10 601.12	2 298.18 ~ 11 213.46	2 827.96
10. 铁路、船舶、航空航天和其他运输设备制造业	3 792.93	3 979.78	1 981.7 ~ 4 792.03	1 113.43 ~ 5 042.59	2 435.51
11. 通用设备制造业	1 194.22	1 226.66	723.00 ~ 1 505.86	520.53 ~ 1 594.83	996.11
12. 专用设备制造业	1 635.68	1 685.24	840.51 ~ 2 159.27	522.45 ~ 2 255.97	1 177.40
13. 橡胶和塑料制品业	1 116.10	1 143.88	612.24 ~ 1 480.6	415.01 ~ 1 608.88	934.30
14. 印刷和记录媒介复制业	1 695.91	1 734.30	1 024.7 ~ 2 179.39	748.19 ~ 2 413.1	1 345.86
15. 文教、工美、体育和娱乐用品制造业	228.16	225.85	164.73 ~ 301.47	142.33 ~ 377.43	221.72
16. 造纸和纸制品业	0.60	0.54	0.25 ~ 1.27	0.19 ~ 1.69	0.63
17. 化学原料和化学制品制造业	1.99	1.76	0.67 ~ 4.65	0.49 ~ 6.29	2.10

1) * 表示溶剂使用源中该行业清单估算值仅位于 99% 置信区间内

导致^[15],且行业 15 捕集率集、去除率集、设施运行率集的范围也较大,因此,应开展化工行业(农药、漆涂料、塑料树脂、碳黑)和造纸行业(纸浆)的排放因子本地化研究,同时应全面采集化工行业的捕集率、去除率、设施运行率^[2].而行业 20 存在较大不确定,一方面是因为样本数较少(4 家企业),另一方面是由于过程复杂,通常为十大源项的核

算^[17,38],排放因子差异性较大,因此,有条件的情况下石油加工行业应参照文献[60]进行十大源项核算,尽可能减少该行业的不确定性.

此外,不确定性 >100% 的行业还有 3、4、6、7、11、13、14、19 和 23(95% 置信区间排放量不确定性 >100%),但行业 3、4、6、7、11 和 19 排放量小,基本不影响总清单变化.行业 13 不确定性较大的原

因是非金属制品行业中有些企业既有建材生产,也有化工生产(漆涂料),导致不确定性的因素同上述化工行业;行业 14 样本数较少(仅 1 家企业);行业 23 主要是因为排放因子集范围较大^[15]导致,因此,应开展纺织行业(印染品)排放因子本地化研究,而黑色金属冶炼行业减少不确定性可采用实测法核算.

2.3 青岛市工业源 VOCs 排放空间分布

由于燃烧源 VOCs 排放量总体低于工艺过程源

和溶剂使用源,因此,分级显示阈值最大为 5 t,而工艺过程源和溶剂使用源分级显示阈值最大为 25 t. 燃烧源 VOCs 排放主要分布于即墨区西南部、城阳区北部、西海岸新区东部及大珠山北部,其它区市围绕建成区零星分布(图 5). 市内 4 个区(市南区、市北区、崂山区和李沧区)存在热电行业,也有 >5 t 的网格分布. 工艺过程源的 VOCs 排放主要分布在西海岸新区东部和大珠山北部、城阳区北部和东部、即墨区西南部、胶州市东部、莱西市东南部、

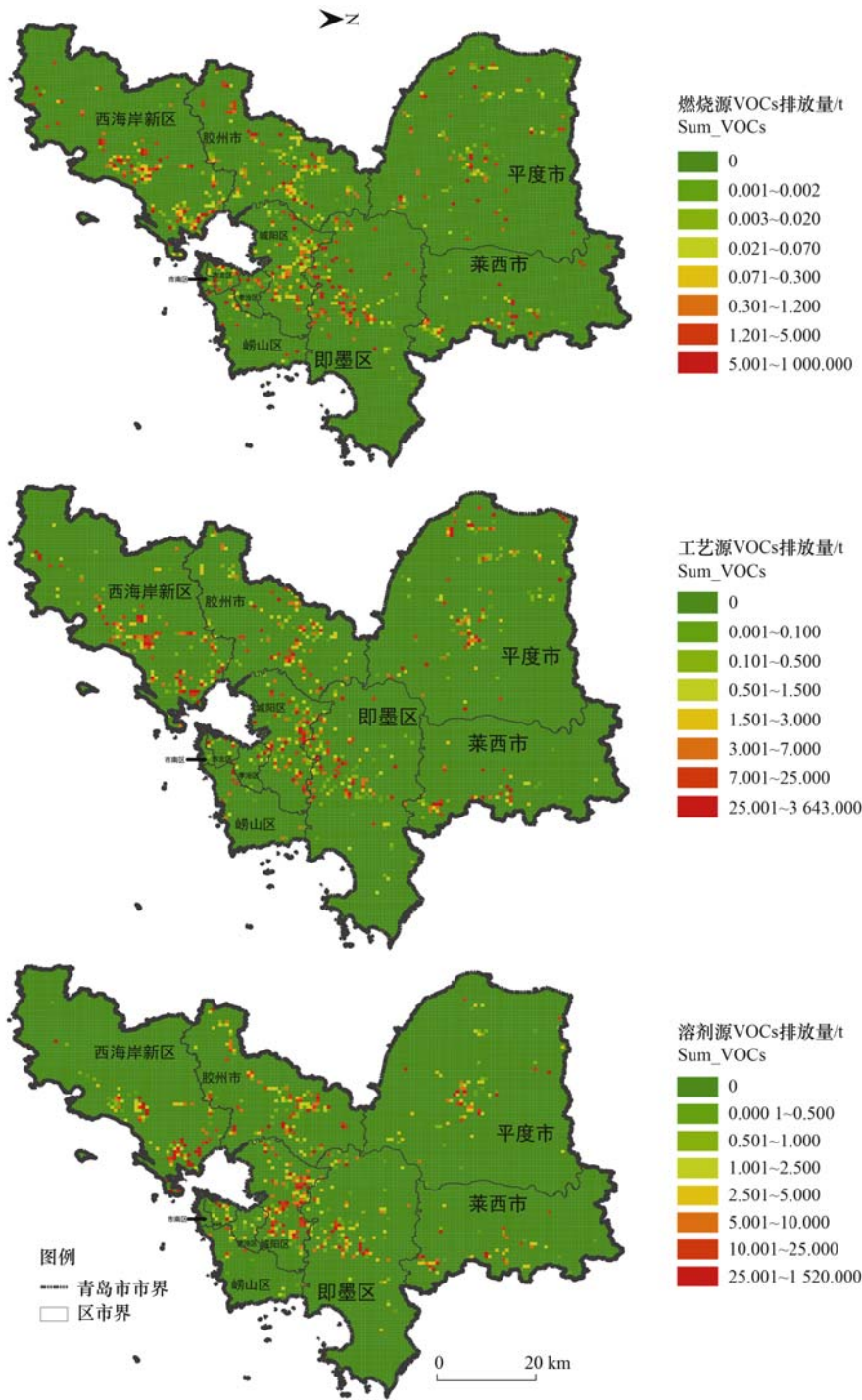


图 5 青岛市工业源 VOCs 排放空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of VOCs emission from industries in Qingdao

平度市东部,市内四区和平度市建成区中 > 25 t 的网格也有零星分布,其中 VOCs 排放量 > 3 000 t 的网格分别位于西海岸新区和市北区. 溶剂使用源 VOCs 排放主要分布在西海岸新区东部、城阳区北部和南部、莱西市南部,及即墨区、胶州市、平度市

的建成区. 市内四区仅市北区分布有 > 25 t 的网格. 与燃烧源和工艺过程源相比,溶剂使用源的空间分布更趋向于环胶州湾发展,显示出表面涂装类行业在环胶州湾的聚集. 青岛市分源类的 VOCs 排放空间分布特征见图 5.

表 6 工艺过程源分行业类型 VOCs 排放量不确定性模拟结果¹⁾

行业类型	平均值/t	中位值/t	95% 置信区间 排放量/t	99% 置信区间 排放量/t	清单估算值 /t
1. 计算机、通信和其他电子设备制造业	21.44	21.37	11.95 ~ 30.98	8.76 ~ 37.9	21.78
2. 电气机械和器材制造业	192.87	191.10	106.87 ~ 285.08	78.07 ~ 369.92	190.51
3. 皮革、毛皮、羽毛及其制品和制鞋业	96.82	86.70	34.00 ~ 215.22	23.87 ~ 356.92	38.01
4. 家具制造业	1.71	1.50	0.76 ~ 3.73	0.62 ~ 7.14	1.14
5. 金属制品业	233.72	231.63	189.8 ~ 288.93	177.39 ~ 337.67	229.65
6. 汽车制造业	136.27	134.92	88.54 ~ 191.61	75.12 ~ 231.11	91.12
7. 铁路、船舶、航空航天和其他运输设备制造业	26.58	25.12	14.18 ~ 47.06	12.07 ~ 67.8	23.14
8. 通用设备制造业	144.23	141.57	114.64 ~ 188.74	107.88 ~ 231.56	137.89
9. 专用设备制造业	159.09	154.72	107.85 ~ 236.06	96.11 ~ 302.35	145.65
10. 橡胶和塑料制品业	5 399.54	5 310.73	2 966.7 ~ 8 239.67	2 240.07 ~ 10 523.53	5 424.65
11. 文教、工美、体育和娱乐用品制造业	150.93	135.43	55.27 ~ 333.8	40.64 ~ 547.59	60.05
12. 酒、饮料和精制茶制造业	423.42	420.17	353.35 ~ 512.27	335.53 ~ 550.98	425.69
13. 非金属矿物制品业	862.05	785.31	321.44 ~ 1 840.95	241.86 ~ 2 874.79	395.47
14. 黑色金属冶炼和压延加工业	867.35	590.20	138.17 ~ 3 266.42	98.46 ~ 5 677.93	218.57
15. 化学原料和化学制品制造业*	8 374.95	7 487.60	3 467.33 ~ 17 579.62	2 403.66 ~ 42 018.35	2 413.21
16. 有色金属冶炼和压延加工业	8.71	8.64	6.84 ~ 10.97	6.36 ~ 11.84	8.72
17. 造纸和纸制品业*	245.52	237.46	149.34 ~ 388.24	129.56 ~ 458.34	143.03
18. 农副食品加工业	4 666.27	4 407.83	2 092.14 ~ 8 712.94	1 577.08 ~ 12 526.59	4 595.34
19. 烟草制品业	125.99	59.85	5.9 ~ 525.84	3.7 ~ 1 768.71	21.18
20. 石油、煤炭及其他燃料加工业*	14 829.78	14 435.61	6 272.96 ~ 25 265.34	3 571.63 ~ 34 709.48	4 882.55
21. 医药制造业	290.53	287.83	210.48 ~ 388.28	188.26 ~ 434.84	270.33
22. 印刷和记录媒介复制业	21.44	21.47	10.5 ~ 32.29	6.71 ~ 38.81	16.76
23. 纺织业	1 369.56	1 307.04	766.61 ~ 2 314.21	645.02 ~ 3 237.23	809.84

1) *表示工艺过程源中该行业清单估算值仅位于 99% 置信区间内

3 结论

(1)捕集率和设施运行率纳入估算影响 VOCs 排放总量,当考虑捕集率和设施运行率实际变化时(优化后排放系数法),2019 年青岛市工业源 VOCs 排放总量为 4.47 万 t;而当捕集率和设施运行率默认为 100% 时(未优化排放系数法),2019 年青岛市工业源 VOCs 排放总量则为 3.11 万 t.

(2)工艺过程源和溶剂使用源是最主要 VOCs 排放贡献源,贡献率达到 85.88%. VOCs 排放占比较高的行业依次为橡胶与塑料制品业、金属制品业、石油/煤炭及其他燃料加工业,分担率分别是 14.87%、14.32% 和 11.07%.

(3)LHS-MC 法可应用在清单的多变量不确定性分析,排放因子、捕集率、去除率等多变量模拟的不确定性高于排放因子单变量,青岛市工业源中工艺过程源(- 9.72% ~ 230.51%)和溶剂使用源(- 14.14% ~ 122.77%)VOCs 清单的不确定性明显

高于燃烧源(- 15.62% ~ 36.41%).

(4)分行业类型进行不确定性分析可探索影响清单不确定性的行业和主要因素:应开展化工行业(农药、漆涂料、塑料树脂、碳黑)、造纸行业(纸浆)、纺织行业(印染品)工艺过程的排放因子本地化研究;加强金属制品、汽车制造、化工行业去除率、设施运行率的采集;此外,企业数量少且条件允许情况下,石油加工、黑色金属冶炼行业应采用实测法减少其不确定性.

(5)2019 年青岛市工业源 VOCs 空间排放特征:25 t 排放网格主要分布在西海岸新区东部、大珠山北部,即墨区南部,城阳区北部,胶州市东北部,平度市建成区,以及莱西市东南部.

参考文献:

[1] 李红,彭良,毕方,等.我国 PM_{2.5}与臭氧污染协同控制策略研究[J].环境科学研究,2019,32(10):1763-1778.
Li H, Peng L, Bi F, et al. Strategy of coordinated control of PM_{2.5} and ozone in China [J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32(10): 1763-1778.

- [2] 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.
- [3] 李璇, 王雪松, 刘中, 等. 宁波人为源 VOC 清单及重点工业行业贡献分析[J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2497-2502.
Li X, Wang X S, Liu Z, *et al.* Anthropogenic VOC emission inventory and contribution from industrial sources in Ningbo[J]. Environmental Science, 2014, **35**(7): 2497-2502.
- [4] 胡泳涛, 张远航, 谢绍东, 等. 区域高时空分辨率 VOC 天然源排放清单的建立[J]. 环境科学, 2001, **22**(6): 1-6.
Hu Y T, Zhang Y H, Xie S D, *et al.* Development of biogenic VOC emissions inventory with high temporal and spatial resolution [J]. Environmental Science, 2001, **22**(6): 1-6.
- [5] 刘金凤, 赵静, 李湉湉, 等. 我国人为源挥发性有机物排放清单的建立[J]. 中国环境科学, 2008, **28**(6): 496-500.
Liu J F, Zhao J, Li T T, *et al.* Establishment of Chinese anthropogenic source volatile organic compounds emission inventory [J]. China Environmental Science, 2008, **28**(6): 496-500.
- [6] Klimont Z, Streets D G, Gupta S, *et al.* Anthropogenic emissions of non-methane volatile organic compounds in China [J]. Atmospheric Environment, 2002, **36**(8): 1309-1322.
- [7] 魏巍. 中国人为源挥发性有机化合物的排放现状及未来趋势 [D]. 北京: 清华大学, 2009.
Wei W. Study on current and future anthropogenic emissions of volatile organic compounds in China [D]. Beijing: Tsinghua University, 2009.
- [8] 夏思佳, 赵秋月, 李冰, 等. 江苏省人为源挥发性有机物排放清单[J]. 环境科学研究, 2014, **27**(2): 120-126.
Xia S J, Zhao Q Y, Li B, *et al.* Anthropogenic source VOCs emission inventory of Jiangsu province [J]. Research of Environmental Sciences, 2014, **27**(2): 120-126.
- [9] Wu R R, Bo Y, Li J, *et al.* Method to establish the emission inventory of anthropogenic volatile organic compounds in China and its application in the period 2008-2012 [J]. Atmospheric Environment, 2016, **127**: 244-254.
- [10] 梁小明, 孙西勃, 徐建铁, 等. 中国工业源挥发性有机物排放清单[J]. 环境科学, 2020, **41**(11): 4767-4775.
Liang X M, Sun X B, Xu J T, *et al.* Industrial volatile organic compounds (VOCs) emission inventory in China [J]. Environmental Science, 2020, **41**(11): 4767-4775.
- [11] 姚轶, 王浙明, 何志桥, 等. 浙江省木制品行业挥发性有机物排放特征及排放系数[J]. 环境科学, 2016, **37**(11): 4080-4085.
Yao Y, Wang Z M, He Z Q, *et al.* Pollution characteristics and emission coefficient of volatile organic compounds from woodwork-making industry in Zhejiang province [J]. Environmental Science, 2016, **37**(11): 4080-4085.
- [12] 孟琛琛, 倪爽英, 陆雅静, 等. 河北省工业源大气污染物排放清单及减排潜力[J]. 环境科学与技术, 2019, **42**(S2): 186-193.
Meng C C, Ni S Y, Lu Y J, *et al.* Emission inventory and emission reduction potential of typical industrial sources in Hebei province [J]. Environmental Science & Technology, 2019, **42**(S2): 186-193.
- [13] 赵锐, 黄络萍, 程军, 等. 成都市工业源重点 VOC 排放行业排放清单及空间分布特征[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(4): 1358-1367.
Zhao R, Huang L P, Cheng J, *et al.* VOC emissions inventory from the key industries in Chengdu City and its associated spatial distribution characteristics [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38**(4): 1358-1367.
- [14] 陈小方, 张嘉妮, 张伟霞, 等. 化工园区挥发性有机物排放清单及其环境影响[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(11): 4062-4071.
Chen X F, Zhang J N, Zhang W X, *et al.* VOCs emission inventory of a chemical industry park and its influence on atmospheric environment [J]. China Environmental Science, 2017, **37**(11): 4062-4071.
- [15] 余宇帆, 卢清, 郑君瑜, 等. 珠江三角洲地区重点 VOC 排放行业的排放清单[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(2): 195-201.
Yu Y F, Lu Q, Zheng J Y, *et al.* VOC emission inventory and its uncertainty from the key VOC-related industries in the Pearl River Delta Region [J]. China Environmental Science, 2011, **31**(2): 195-201.
- [16] 王家德, 吕建璋, 李文娟, 等. 浙江省包装印刷行业挥发性有机物排放特征及排放系数[J]. 环境科学, 2018, **39**(8): 3552-3556.
Wang J D, Lü J Z, Li W J, *et al.* Pollution characteristics and emission coefficients of volatile organic compounds from the packaging and printing industry in Zhejiang province [J]. Environmental Science, 2018, **39**(8): 3552-3556.
- [17] 席富娟. 长三角地区石化行业大气污染物排放状况及 VOCs 控制技术分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
Xi F J. Analysis of pollutants emission status and evaluation of VOCs control technologies for petrochemical industry in Yangtze River Delta [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [18] 王家德, 金旦军, 顾震宇, 等. 金属表面涂装行业 VOCs 排放特征及排放系数[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(5): 1940-1945.
Wang J D, Jin D J, Gu Z Y, *et al.* The VOCs emission characteristics of metal surface coating industry and its emission factors [J]. China Environmental Science, 2020, **40**(5): 1940-1945.
- [19] 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.
- [20] 钟流举, 郑君瑜, 雷国强, 等. 大气污染物排放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, Lei G Q, *et al.* Quantitative uncertainty analysis in air pollutant emission inventories: methodology and case study [J]. Research of Environmental Sciences, 2007, **20**(4): 15-20.
- [21] 张凯, 于周锁, 高宏, 等. 兰州盆地人为源大气污染物网格化排放清单及其空间分布特征[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(4): 1227-1242.
Zhang K, Yu Z S, Gao H, *et al.* Gridded emission inventories and spatial distribution characteristics of anthropogenic atmospheric pollutants in Lanzhou valley [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, **37**(4): 1227-1242.
- [22] 生态环境部. 生态环境部关于印发《第二次全国污染源普查产排污核算系数手册(试用版)》的通知 [EB/OL]. <http://sthj.fy.gov.cn/content/detail/5d75b3b17f8b9a437a8b4572.html>, 2020-03-05.
- [23] 环境保护部. 大气挥发性有机物源排放清单编制技术指南

- [EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201408/W020140828351293705457.pdf>, 2014-08-19.
- [24] 贺克斌. 城市大气污染物排放清单编制技术手册[EB/OL]. <https://max.book118.com/html/2018/1116/8107025055001133.shtm>, 2015-04-01.
- [25] Cheremisinoff N P. AP-42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, Ltd, 2016.
- [26] Bo Y, Cai H, Xie S D. Spatial and temporal variation of emission inventories for historical anthropogenic NMVOCs in China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 2008, 8(23): 11519-11566.
- [27] Wei W, Wang S X, Chatani S, et al. Emission and speciation of non-methane volatile organic compounds from anthropogenic sources in China[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(20): 4976-4988.
- [28] Wang S X, Wei W, Du L, et al. Characteristics of gaseous pollutants from biofuel-stoves in rural China[J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(27): 4148-4154.
- [29] 赵斌, 马建中. 天津市大气污染源排放清单的建立[J]. 环境科学学报, 2008, 28(2): 368-375.
- Zhao B, Ma J Z. Development of an air pollutant emission inventory for Tianjin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(2): 368-375.
- [30] 杜普勒. 大气污染物排放源: 发生过程与排放系数[M]. 朱冠友, 译. 广州: 中山大学出版社, 1985.
- [31] Zheng J Y, Zhang L J, Che W W, et al. A highly resolved temporal and spatial air pollutant emission inventory for the Pearl River Delta region, China and its uncertainty assessment[J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(32): 5112-5122.
- [32] Zhang Y S, Shao M, Lin Y, et al. Emission inventory of carbonaceous pollutants from biomass burning in the Pearl River Delta Region, China[J]. Atmospheric Environment, 2013, 76: 189-199.
- [33] 阚士亮, 张培栋, 孙荃, 等. 大中型沼气工程生命周期能效评价[J]. 可再生能源, 2015, 33(6): 908-914.
- Kan S L, Zhang P D, Sun Q, et al. Assessment of energy efficiency for the life cycle of large and medium-sized methane project[J]. Renewable Energy Resources, 2015, 33(6): 908-914.
- [34] Jury C, Benetto E, Koster D, et al. Life cycle assessment of biogas production by monofermentation of energy crops and injection into the natural gas grid[J]. Biomass and Bioenergy, 2010, 34(1): 54-66.
- [35] 广东省环境保护监测中心站, 香港特别行政区政府环境保护署. 珠江三角洲地区空气污染物排放清单编制手册[M]. 广州: 广东省环境保护局, 2005.
- [36] Agency European Environment (EEA). EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019 [EB/OL]. <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019>, 2021-02-20.
- [37] 东东, 席劲瑛, 张荣社. 浙江省某印染企业 VOCs 的产生特征及去除特性[J]. 环境工程学报, 2020, 14(2): 432-439.
- Dong D, Xi J Y, Zhang R S. Characteristics of VOCs production and removal in a dyeing enterprise of Zhejiang province, China [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(2): 432-439.
- [38] 鲁君. 典型石化企业挥发性有机物排放测算及本地化排放系数研究[J]. 环境污染与防治, 2017, 39(6): 604-609.
- Lu J. A study on VOCs emission inventory of typical petrochemical plant and its local emission factor [J]. Environmental Pollution & Control, 2017, 39(6): 604-609.
- [39] 捷客斯(广州)润滑油有限公司. 二期生产能力扩建项目环评报告[R]. 北京: 国家环境保护总局, 2016.
- [40] 杨强, 黄成, 卢滨, 等. 基于本地污染源调查的杭州市大气污染物排放清单研究[J]. 环境科学学报, 2017, 37(9): 3240-3254.
- Yang Q, Huang C, Hu B, et al. Air pollutant emission inventory based on local emission source surveys in Hangzhou, China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(9): 3240-3254.
- [41] 周子航, 邓也, 陆成伟, 等. 成都市人为源挥发性有机物排放清单及特征[J]. 中国环境监测, 2017, 33(3): 39-48.
- Zhou Z H, Deng Y, Lu C W, et al. Emission inventory and characteristics of volatile organic compounds from anthropogenic sources in Chengdu [J]. Environmental Monitoring in China, 2017, 33(3): 39-48.
- [42] 中国台湾环境保护署. 公私场所固定污染源申报空气污染防制费之挥发性有机物之行业制程排放系数、操作单元[含设备组件] 排放系数、控制效率及其他计量规定[S]. 2012.
- [43] 梁小明, 陈来国, 孙西勃, 等. 基于原料类型及末端治理的典型溶剂使用源 VOCs 排放系数[J]. 环境科学, 2019, 40(10): 4382-4394.
- Liang X M, Chen L G, Sun X B, et al. Raw materials and end treatment-based emission factors for volatile organic compounds (VOCs) from typical solvent use sources [J]. Environmental Science, 2019, 40(10): 4382-4394.
- [44] 高宗江. 典型工业涂装行业 VOCs 排放特征研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- Gao Z J. Source characteristics of VOC emissions from typical industrial painting sources [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [45] Huang C F, Chen C H, Li L, et al. Emission inventory of anthropogenic air pollutants and VOC species in the Yangtze River Delta region, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, 11(9): 4105-4120.
- [46] 陆沁莹, 孙成杰, 魏朝良, 等. 金属加工油(液)有机挥发物含量的测定——热重法[J]. 润滑油, 2019, 34(2): 53-56.
- Lu Q Y, Sun C J, Wei C L, et al. Standard test method for volatile organic compound of metalworking fluids by thermogravimetric analyzer (TGA) method [J]. Lubricating Oil, 2019, 34(2): 53-56.
- [47] 何晓辉. 印刷材料 VOCs 含量测试[J]. 中国印刷与包装研究, 2014, 6(1): 66-70.
- He X H. Test on Content of VOCs in printing materials [J]. China Printing and Packaging Study, 2014, 6(1): 66-70.
- [48] 高广亮. 汽车涂装挥发性有机化合物排放量的计算与分析[J]. 汽车工艺与材料, 2013, (1): 46-54.
- [49] 中国涂料工业协会, 全国涂料工业信心中心. 中国涂料工业年鉴 2010[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [50] 广东省生态环境厅. 广东省生态环境厅关于印发重点行业挥发性有机物排放量计算方法的通知[EB/OL]. http://gdee.gd.gov.cn/wj5666/content/post_2858467.html, 2019-02-18.
- [51] 余关龙. 生物滴滤器去除 VOC 的性能及其强化研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
- Yu G L. Performance and enhancement of VOC removal in biotrickling filters [D]. Changsha: Hunan University, 2011.
- [52] 高宗江, 李成, 郑君瑜, 等. 工业源 VOCs 治理技术效果实测评估[J]. 环境科学研究, 2015, 28(6): 994-1000.
- Gao Z J, Li C, Zheng J Y, et al. Evaluation of industrial VOCs treatment techniques by field measurement [J]. Research of Environmental Sciences, 2015, 28(6): 994-1000.
- [53] 苏伟健, 徐绮坤, 黎碧霞, 等. 工业源重点行业 VOCs 治理技术处理效果的研究[J]. 环境工程, 2016, 34(S1): 518-522,

- 451.
- Su W J, Xu Q K, Li B X, *et al.* Research on effects of key industrial VOCs treatment methods [J]. Environmental Engineering, 2016, **34**(S1): 518-522, 451.
- [54] 赵倩. 某企业焊接车间职业病危害治理效果分析[J]. 化工管理, 2017, (1): 122-123.
- Zhao Q. Analysis of Treatment Effect of occupational hazards in welding workshop of an enterprise [J]. Chemical Enterprise Management, 2017, (1): 122-123.
- [55] 陆建海, 董事壁, 李文娟, 等. 浙江省工业涂装 VOCs 治理现状[J]. 环境保护科学, 2018, **44**(1): 113-117, 121.
- Lu J H, Dong S B, Li W J, *et al.* Present situation of VOCs control technologies for the industrial coating process in Zhejiang province[J]. Environmental Protection Science, 2018, **44**(1): 113-117, 121.
- [56] 张永明, 邓娟, 梁健. 工业源 VOCs 末端治理技术浅析及减排展望[J]. 环境影响评价, 2018, **40**(2): 46-50.
- Zhang Y M, Deng J, Liang J. The analysis and prospect of industrial VOCs terminal treatment techniques [J]. Environmental Impact Assessment, 2018, **40**(2): 46-50.
- [57] 柯云婷. 溶剂使用行业挥发性有机物排放特征及控制技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- Ke Y T. Characteristics and control technology of volatile organic compounds emission from solvent use sources[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [58] 雒瑞, 张巍, 张培勇, 等. 德州市典型溶剂使用行业 VOCs 排放特征及末端治理技术研究[J]. 涂料工业, 2020, **50**(9): 67-75.
- Luo R, Zhang W, Zhang P Y, *et al.* Study on emission characteristics and end-control measurements for VOCs from typical solvent-usage industries in Dezhou City [J]. Paint & Coatings Industry, 2020, **50**(9): 67-75.
- [59] 乔琦, 白璐, 刘丹丹, 等. 我国工业污染源产排污核算系数法发展历程及研究进展[J]. 环境科学研究, 2020, **33**(8): 1783-1794.
- Qiao Q, Bai L, Liu D D, *et al.* Development and research progress of pollutant generation and discharge coefficients for industrial pollution sources in China [J]. Research of Environmental Sciences, 2020, **33**(8): 1783-1794.
- [60] 环境保护部. 石化行业 VOCs 污染源排查工作指南[EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201511/W020151124546327744099.pdf>, 2015-11-18.



CONTENTS

Disinfection By-products in Drinking Water and Their Control Strategies: A Review	CHU Wen-hai, XIAO Rong, DING Shun-ke, <i>et al.</i> (5059)
Progress in the Interactions of Ozone Pollution and Other Environmental Stress on Urban Forests in China	LI Pin, YUAN Xiang-yang, DAI Lu-lu, <i>et al.</i> (5075)
Advances in Mechanism and Influencing Factors Affecting Hydrogen Sulfide Adsorption by Biochar	XU Qi-yong, LIANG Ming-shen, XU Wen-jun, <i>et al.</i> (5086)
Effect of Vegetation Coverage on the Temporal and Spatial Distribution of PM _{2.5} Concentration in China's Eight Major Economic Regions from 1998 to 2016	YANG Yu-lian, YANG Kun, LUO Yi, <i>et al.</i> (5100)
Evolution and Potential Source Apportionment of Atmospheric Pollutants of Two Heavy Haze Episodes During the COVID-19 Lockdown in Beijing, China	ZHAO De-long, TIAN Ping, ZHOW Wei, <i>et al.</i> (5109)
Characteristics and Origin Analysis of Air Pollution During the Spring Festival in Linfen, Fenwei Plain	LIU Wei-jie, HU Tian-peng, MAO Yao, <i>et al.</i> (5122)
Spatio-Temporal Characteristics and Potential Source Areas of Seasonal Atmospheric Pollution in Shijiazhuang	NIE Sai-sai, WANG Shuai, CUI Jian-sheng, <i>et al.</i> (5131)
Impact of Air Humidity on PM _{2.5} Mass Concentration and Visibility During Winter in Tianjin	DING Jing, TANG Ying-xiao, HAO Tian-yi, <i>et al.</i> (5143)
Seasonal Variation and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Chengde	HE Bo-wen, NIE Sai-sai, WANG Shuai, <i>et al.</i> (5152)
Volatile Organic Compounds(VOCs)Emission Inventory from Domestic Sources in China	LIANG Xiao-ming, CHEN Lai-guo, SHEN Guo-feng, <i>et al.</i> (5162)
Characteristics of Industrial Volatile Organic Compounds(VOCs)Emission in China from 2011 to 2019	LIU Rui-yuan, ZHONG Mei-fang, ZHAO Xiao-ya, <i>et al.</i> (5169)
VOCs Emission Inventory and Uncertainty Analysis of Industry in Qingdao Based on Latin Hypercube Sampling and Monte Carlo Method	XU Wan-ying, FU Fei, LÜ Jian-hua, <i>et al.</i> (5180)
Emission Characteristics and Environment Impacts of VOCs from Typical Rubber Manufacture	WANG Hai-lin, XIN Guo-xing, ZHU Li-min, <i>et al.</i> (5193)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Different Functional Zones of Shenyang, China	KU Ying-ying, REN Wan-hui, SU Cong-cong, <i>et al.</i> (5201)
Characteristics of BTEX and Health Risk Assessment During Typical Pollution Episodes in Summer and Winter in Tianjin Urban Area	HAN Ting-ting, LI Ying-ruo, PU Wei-wei, <i>et al.</i> (5210)
Atmospheric NH ₃ Emission Inventory and Analysis of the Driving Force in Zhengzhou City	JI Yao, WANG Chen, LU Xuan, <i>et al.</i> (5220)
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of O ₃ Concentrations Based on GAMs Model in Chengdu	ZHANG Ying, NI Chang-jian, FENG Xin-yuan, <i>et al.</i> (5228)
Spatial Variation Characteristics and Remote Sensing Retrieval of Total Suspended Matter in Surface Water of the Yangtze River	LI Jian-hong, HUANG Chang-chun, ZHA Yong, <i>et al.</i> (5239)
Spatial Distribution Characteristics of the Spectrum, Source Analysis, and Nitrogen Response of Dissolved Organic Matter in Summer Rainfall in the Hebei Province	ZHANG Zi-wei, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (5250)
Distribution and Influencing Factors of DOM Components in Urban and Suburban Polluted Rivers	ZHU Yi, CHEN Hao, DING Guo-ping, <i>et al.</i> (5264)
Composition and Distribution of Microplastics in the Water and Sediments of Urban Rivers in Beijing	HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Di, <i>et al.</i> (5275)
Nontarget Screening and Ecological Risk Assessment of Polar Organic Pollutants in Surface Water on the West Bank of Taihu Lake	LU Xin-yan, WANG Fei, ZHANG Li-min, <i>et al.</i> (5284)
Optimization of Extraction Methods and Distribution Characteristics of Antibiotics and Metabolites in Sediments of a River Water-Groundwater Interaction Zone	LI Yu-qiong, TONG Lei, YAN Han, <i>et al.</i> (5294)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments of Desilting Demonstration Area in Baiyangdian Lake	WANG Tong-fei, ZHANG Wei-jun, LI Li-qing, <i>et al.</i> (5303)
Dynamic Mechanisms of Groundwater Quality by Residual Contaminants of the Tanghe Wastewater Reservoir in Xiong'an New Area	ZHANG Zhi-xiong, WANG Shi-qin, ZHANG Yi-zhang, <i>et al.</i> (5312)
Analysis and Prediction of Health Risk from Heavy Metals in Drinking Water Sources Based on Time Series Model	JI Chao, HOU Da-wei, XIE Li, <i>et al.</i> (5322)
Spatial Distribution, Risk, and Influencing Factors of River Water-Sediment Heavy Metals in the Lower Reaches of the Qianhe River	GAO Yu, WANG Guo-lan, JIN Zi-han, <i>et al.</i> (5333)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Dissolved Heavy Metals in Chaohu Lake Basin During the Wet Season	HE Miao, LIU Gui-jian, WU Lei, <i>et al.</i> (5346)
Impact of Enclosure Culture on Heavy Metal Content in Surface Sediments of Hongze Lake and Ecological Risk Assessment	ZI Xin-yuan, ZHANG Ming, GU Xiao-hong, <i>et al.</i> (5355)
Natural Water Chemistry Change in the Surface Water of Chengdu and Impact Factors	XU Qiu-jin, LAI Cheng-yue, DING Yao, <i>et al.</i> (5364)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Groundwater in the Leizhou Peninsula	PENG Hong-xia, HOU Qing-qin, ZENG Min, <i>et al.</i> (5375)
Land-based Nitrogen Pollution Source Structure and Spatial Distribution in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DONG Si-qi, HUANG Chong (5384)
Output Characteristics of Nitrogen and Phosphorus from Non-Point Source Pollution of Typical Land Use in A Micro-Watershed in Hilly Red Soil Region	FANG Zhi-da, SU Jing-jun, ZHAO Hong-tao, <i>et al.</i> (5394)
Effects of Different Fertilization Patterns on Nitrogen Leaching Loss from Paddy Fields Under Reduced Nitrogen	JIANG Hai-bin, ZHANG Ke-qiang, ZOU Hong-tao, <i>et al.</i> (5405)
Effects of <i>Spartina alterniflora</i> Invasion on Soil Phosphorus Forms in the Jiaozhou Bay Wetland	SHA Meng-qiao, CHAI Na, ZHAO Hong-tao, <i>et al.</i> (5414)
Contrasting Analysis of Microbial Community Composition in the Water and Sediments of the North Canal Based on 16S rRNA High-Throughput Sequencing	PENG Ke, DONG Zhi, DI Yan-ming, <i>et al.</i> (5424)
Characteristics of Phosphorus Adsorption in Aqueous Solution by Si-modified Peanut Shell Biochar	ZHAO Min, ZHANG Xiao-ping, WANG Liang-rong (5433)
Adsorption Characteristics of Pb(II) on Eucalyptus Biochar Modified by Potassium Permanganate	MO Zhen-lin, ZENG Hong-hu, LIN Hua, <i>et al.</i> (5440)
Preparation of Mixed Metal Oxide/Carbon Composites and Its Adsorption Performance for Pb(II)	LU Yu-shen, ZONG Li, YU Hui, <i>et al.</i> (5450)
Fabrication of Supported Titanium Xerogel Adsorbent and Performance Evaluation for Arsenite Removal	SUN Ye-yang, ZHOU Chang, GAN Yong-hai, <i>et al.</i> (5460)
Nitrite Regulation During Start-up of Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process	ZUO Fu-min, ZHENG Rui, SUI Qian-wen, <i>et al.</i> (5472)
Effects of Biochar and Straw Return on Soil Aggregate and Organic Carbon on Purple Soil Dry Slope Land	DENG Hua, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i> (5481)
Response of Soil Organic Carbon Content in Different Slope Positions to Fertilization Management in Purple Soil Sloping Fields	XU Man, YU Luo, WANG Fu-hua, <i>et al.</i> (5491)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin	LAI Shu-ya, DONG Qiu-yao, SONG Chao, <i>et al.</i> (5500)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Suburban Farmland Soil	ZHANG Xiu-xiu, LU Xiao-li, WEI Yu-chen, <i>et al.</i> (5510)
Accumulation Characteristics and Dietary Exposure Estimation of Heavy Metals in Vegetables from the Eastern Coastal Region of China	SUN Shuai, GENG Ning-bo, GUO Cui-cui, <i>et al.</i> (5519)
Security Risk and Influencing Factors of Agro-Products in Farmland Soil Around a Typical Mining Smelter	HUO Yan-hui, WANG Mei-e, XIE Tian, <i>et al.</i> (5526)
Cd Pollution and Safe Planting Zoning in Paddy Soils: A Case Study in a District of Chongqing	CAO Shu-zhen, MU Yue, CUI Jing-xin, <i>et al.</i> (5535)
Characteristics and Influencing Factors of Cadmium Accumulation in Different Rice Varieties Under Cadmium Contaminated Field Conditions	WANG Yu-hao, YANG Li, KANG Yu-chen, <i>et al.</i> (5545)
Effects of Nano-membrane on Aerobic Composting Process and Odor Emission of Livestock Manure	LI Yong-shuang, SUN Bo, CHEN Ju-hong, <i>et al.</i> (5554)

CONTENTS

Disinfection By-products in Drinking Water and Their Control Strategies: A Review	CHU Wen-hai, XIAO Rong, DING Shun-ke, <i>et al.</i> (5059)
Advances in Mechanism and Influencing Factors Affecting Hydrogen Sulfide Adsorption by Biochar	XU Qi-yong, LIANG Ming-shen, XU Wen-jun, <i>et al.</i> (5086)
Effect of Vegetation Coverage on the Temporal and Spatial Distribution of PM _{2.5} Concentration in China's Eight Major Economic Regions from 1998 to 2016	YANG Yu-lian, YANG Kun, LUO Yi, <i>et al.</i> (5100)
Evolution and Potential Source Apportionment of Atmospheric Pollutants of Two Heavy Haze Episodes During the COVID-19 Lockdown in Beijing, China	ZHAO De-long, TIAN Ping, ZHOW Wei, <i>et al.</i> (5109)
Characteristics and Origin Analysis of Air Pollution During the Spring Festival in Linfen, Fenwei Plain	LIU Wei-jie, HU Tian-peng, MAO Yao, <i>et al.</i> (5122)
Spatio-Temporal Characteristics and Potential Source Areas of Seasonal Atmospheric Pollution in Shijiazhuang	NIE Sai-sai, WANG Shuai, CUI Jian-sheng, <i>et al.</i> (5131)
Impact of Air Humidity on PM _{2.5} Mass Concentration and Visibility During Winter in Tianjin	DING Jing, TANG Ying-xiao, HAO Tian-yi, <i>et al.</i> (5143)
Seasonal Variation and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Chengde	HE Bo-wen, NIE Sai-sai, WANG Shuai, <i>et al.</i> (5152)
Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Inventory from Domestic Sources in China	LIANG Xiao-ming, CHEN Lai-guo, SHEN Guo-feng, <i>et al.</i> (5162)
Characteristics of Industrial Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission in China from 2011 to 2019	LIU Rui-yuan, ZHONG Mei-fang, ZHAO Xiao-ya, <i>et al.</i> (5169)
VOCs Emission Inventory and Uncertainty Analysis of Industry in Qingdao Based on Latin Hypercube Sampling and Monte Carlo Method	XU Wan-ying, FU Fei, LÜ Jian-hua, <i>et al.</i> (5180)
Emission Characteristics and Environment Impacts of VOCs from Typical Rubber Manufacture	WANG Hai-lin, XIN Guo-xing, ZHU Li-min, <i>et al.</i> (5193)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Different Functional Zones of Shenyang, China	KU Ying-ying, REN Wan-hui, SU Cong-cong, <i>et al.</i> (5201)
Characteristics of BTEX and Health Risk Assessment During Typical Pollution Episodes in Summer and Winter in Tianjin Urban Area	HAN Ting-ting, LI Ying-ruo, PU Wei-wei, <i>et al.</i> (5210)
Atmospheric NH ₃ Emission Inventory and Analysis of the Driving Force in Zhengzhou City	JI Yao, WANG Chen, LU Xuan, <i>et al.</i> (5220)
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of O ₃ Concentrations Based on GAMs Model in Chengdu	ZHANG Ying, NI Chang-jian, FENG Xin-yuan, <i>et al.</i> (5228)
Spatial Variation Characteristics and Remote Sensing Retrieval of Total Suspended Matter in Surface Water of the Yangtze River	LI Jian-hong, HUANG Chang-chun, ZHA Yong, <i>et al.</i> (5239)
Spatial Distribution Characteristics of the Spectrum, Source Analysis, and Nitrogen Response of Dissolved Organic Matter in Summer Rainfall in the Hebei Province	ZHANG Zi-wei, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (5250)
Distribution and Influencing Factors of DOM Components in Urban and Suburban Polluted Rivers	ZHU Yi, CHEN Hao, DING Guo-ping, <i>et al.</i> (5264)
Composition and Distribution of Microplastics in the Water and Sediments of Urban Rivers in Beijing	HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Di, <i>et al.</i> (5275)
Nontarget Screening and Ecological Risk Assessment of Polar Organic Pollutants in Surface Water on the West Bank of Taihu Lake	LU Xin-yan, WANG Fei, ZHANG Li-min, <i>et al.</i> (5284)
Optimization of Extraction Methods and Distribution Characteristics of Antibiotics and Metabolites in Sediments of a River Water-Groundwater Interaction Zone	LI Yu-qiong, TONG Lei, YAN Han, <i>et al.</i> (5294)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments of Desilting Demonstration Area in Baiyangdian Lake	WANG Tong-fei, ZHANG Wei-jun, LI Li-qing, <i>et al.</i> (5303)
Dynamic Mechanisms of Groundwater Quality by Residual Contaminants of the Tanghe Wastewater Reservoir in Xiong'an New Area	ZHANG Zhi-xiong, WANG Shi-qin, ZHANG Yi-zhang, <i>et al.</i> (5312)
Analysis and Prediction of Health Risk from Heavy Metals in Drinking Water Sources Based on Time Series Model	JI Chao, HOU Da-wei, XIE Li, <i>et al.</i> (5322)
Spatial Distribution, Risk, and Influencing Factors of River Water-Sediment Heavy Metals in the Lower Reaches of the Qianhe River	GAO Yu, WANG Guo-lan, JIN Zi-han, <i>et al.</i> (5333)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Dissolved Heavy Metals in Chaohu Lake Basin During the Wet Season	HE Miao, LIU Gui-jian, WU Lei, <i>et al.</i> (5346)
Impact of Enclosure Culture on Heavy Metal Content in Surface Sediments of Hongze Lake and Ecological Risk Assessment	ZI Xin-yuan, ZHANG Ming, GU Xiao-hong, <i>et al.</i> (5355)
Natural Water Chemistry Change in the Surface Water of Chengdu and Impact Factors	XU Qiu-jin, LAI Cheng-yue, DING Yao, <i>et al.</i> (5364)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Groundwater in the Leizhou Peninsula	PENG Hong-xia, HOU Qing-qin, ZENG Min, <i>et al.</i> (5375)
Land-based Nitrogen Pollution Source Structure and Spatial Distribution in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DONG Si-qi, HUANG Chong (5384)
Output Characteristics of Nitrogen and Phosphorus from Non-Point Source Pollution of Typical Land Use in A Micro-Watershed in Hilly Red Soil Region	FANG Zhi-da, SU Jing-jun, ZHAO Hong-tao, <i>et al.</i> (5394)
Effects of Different Fertilization Patterns on Nitrogen Leaching Loss from Paddy Fields Under Reduced Nitrogen	JIANG Hai-bin, ZHANG Ke-qiang, ZOU Hong-tao, <i>et al.</i> (5405)
Effects of <i>Spartina alterniflora</i> Invasion on Soil Phosphorus Forms in the Jiaozhou Bay Wetland	SHA Meng-qiao, CHAI Na, ZHAO Hong-tao, <i>et al.</i> (5414)
Contrasting Analysis of Microbial Community Composition in the Water and Sediments of the North Canal Based on 16S rRNA High-Throughput Sequencing	PENG Ke, DONG Zhi, DI Yan-ming, <i>et al.</i> (5424)
Characteristics of Phosphorus Adsorption in Aqueous Solution by Si-modified Peanut Shell Biochar	ZHAO Min, ZHANG Xiao-ping, WANG Liang-rong (5433)
Adsorption Characteristics of Pb(II) on Eucalyptus Biochar Modified by Potassium Permanganate	MO Zhen-lin, ZENG Hong-hu, LIN Hua, <i>et al.</i> (5440)
Preparation of Mixed Metal Oxide/Carbon Composites and Its Adsorption Performance for Pb(II)	LU Yu-shen, ZONG Li, YU Hui, <i>et al.</i> (5450)
Fabrication of Supported Titanium Xerogel Adsorbent and Performance Evaluation for Arsenite Removal	SUN Ye-yang, ZHOU Chang, GAN Yong-hai, <i>et al.</i> (5460)
Nitrite Regulation During Start-up of Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process	ZUO Fu-min, ZHENG Rui, SUI Qian-wen, <i>et al.</i> (5472)
Effects of Biochar and Straw Return on Soil Aggregate and Organic Carbon on Purple Soil Dry Slope Land	DENG Hua, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i> (5481)
Response of Soil Organic Carbon Content in Different Slope Positions to Fertilization Management in Purple Soil Sloping Fields	XU Man, YU Luo, WANG Fu-hua, <i>et al.</i> (5491)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin	LAI Shu-ya, DONG Qiu-yao, SONG Chao, <i>et al.</i> (5500)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Suburban Farmland Soil	ZHANG Xiu-xiu, LU Xiao-li, WEI Yu-chen, <i>et al.</i> (5510)
Accumulation Characteristics and Dietary Exposure Estimation of Heavy Metals in Vegetables from the Eastern Coastal Region of China	SUN Shuai, GENG Ning-bo, GUO Cui-cui, <i>et al.</i> (5519)
Security Risk and Influencing Factors of Agro-Products in Farmland Soil Around a Typical Mining Smelter	HUO Yan-hui, WANG Mei-e, XIE Tian, <i>et al.</i> (5526)
Cd Pollution and Safe Planting Zoning in Paddy Soils: A Case Study in a District of Chongqing	CAO Shu-zhen, MU Yue, CUI Jing-xin, <i>et al.</i> (5535)
Characteristics and Influencing Factors of Cadmium Accumulation in Different Rice Varieties Under Cadmium Contaminated Field Conditions	WANG Yu-hao, YANG Li, KANG Yu-chen, <i>et al.</i> (5545)
Effects of Nano-membrane on Aerobic Composting Process and Odor Emission of Livestock Manure	LI Yong-shuang, SUN Bo, CHEN Ju-hong, <i>et al.</i> (5554)