

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



2020

Vol.41 No.2
第41卷 第2期

目次

基于GAM模型分析中国典型区域网格化PM _{2.5} 长期变化影响因素	南洋, 张倩倩, 张碧辉 (499)
我国PCDD/Fs网格化大气排放清单	陈露露, 黄韬, 陈凯杰, 宋世杰, 高宏, 马建民 (510)
成都平原PM _{2.5} 中碳质组分时空分布特征与来源	史芳天, 罗彬, 张巍, 刘培川, 郝宇放, 杨文文, 谢绍东 (520)
南京江北新区冬季PM _{2.5} 中化学组分的昼夜变化特征及其来源解析	邱晨晨, 于兴娜, 丁铖, 时政, 张瑞芳, 侯思宇, 侯新红 (529)
南京北郊四季PM _{2.5} 中有机胺的污染特征及来源解析	李栩婕, 施晓雯, 马嫣, 郑军 (537)
长三角背景点夏季大气PM _{2.5} 中正构烷烃和多环芳烃的污染特征和来源解析	薛国艳, 王格慧, 吴灿, 谢郁宁, 陈玉宝, 李杏茹, 王心培, 李大鹏, 张思, 葛双双, 丁志健 (554)
2017年秋季长春市PM _{2.5} 中多环芳烃的污染来源及健康风险评价	张艺璇, 曹芳, 郑涵, 张东东, 翟晓瑶, 范美益, 章炎麟 (564)
京津冀及周边区域PM _{2.5} 叠加沙尘重污染过程特征及预报效果分析	朱媛媛, 高愈霄, 柴文轩, 王帅, 李亮, 王威, 王光, 刘冰, 王晓彦, 李健军 (574)
河南省臭氧污染特征与气象因子影响分析	齐艳杰, 于世杰, 杨健, 尹沙沙, 程家合, 张瑞芹 (587)
河南省气溶胶光学特性的时空变化特征	张瑞芳, 于兴娜 (600)
黑炭气溶胶质谱仪(SP-AMS)分析春季PM _{2.5} 中水溶性有机气溶胶	黄雯倩, 陈彦彤, 李旭东, 赵竹子, 马帅帅, 叶招莲, 盖鑫磊 (609)
南京市黑炭气溶胶时间演变特征及其主要影响因素	杨晓旻, 施双双, 张晨, 王红磊, 王振彬, 朱彬 (620)
连云港不同功能区挥发性有机物污染特征及臭氧生成潜势	乔月珍, 陈凤, 李慧鹏, 赵秋月 (630)
挥发性有机物污染控制方案的运行费用效能比较	羌宁, 史天哲, 缪海超 (638)
西安市大气降水污染和沉降特征及其来源解析	丁铖, 于兴娜, 侯思宇 (647)
4种动物养殖场空气中抗生素耐药菌的生物多样性及群落结构	沙云菲, 孙兴滨, 辛文鹏, 高浩泽, 程首涛, 高敏, 王旭明 (656)
辽宁省2000~2030年机动车排放清单及情景分析	金嘉欣, 孙世达, 王芃, 林应超, 王婷, 吴琳, 魏宁, 常俊雨, 毛洪钧 (665)
国六柴油机DPF再生时VOCs排放特性	钱枫, 薛常鑫, 许小伟, 马东, 李朋, 祝能 (674)
南小河流域地表水和地下水的稳定同位素和水化学特征及其指示意义	郭亚文, 田富强, 胡宏昌, 刘亚平, 赵思晗 (682)
乐安河中下游重金属时空分布特征及风险评价	余杨, 吕雅宁, 王伟杰, 渠晓东, 刘聚涛, 温春云 (691)
温榆河水环境质量与浮游植物群落结构的时空变化及其相互关系	朱利英, 陈媛媛, 刘静, 王亚炜, 王春荣, 魏源送, 张育新 (702)
新安江水库河口区水质及藻类群落结构高频变化	宣文怡, 朱广伟, 黎云祥, 吴志旭, 郑文婷, 兰佳, 王裕成, 许海, 朱梦圆 (713)
环渤海芦苇湿地磷的吸附容量及释放风险评估	宋佳伟, 徐刚, 张扬, 吕迎春 (728)
洱海藻类水华高风险期沉积物氮磷释放通量时空变化	刘思儒, 赵继东, 肖尚斌, 倪兆奎, 王圣瑞 (734)
西安市降雪中DOM荧光特性和来源分析	杨毅, 韩丽媛, 刘焕武, 雷颖, 李兢, 徐会宁 (743)
透水砖铺装的设施构造对运行效果的影响	张佳炜, 刘勇, 金建荣, 李田 (750)
微米SiC/石墨烯复合物光催化降解罗丹明B	朱红庆, 杨兵, 魏世强, 杨静静, 张进忠 (756)
锰铁改性针簇莫来石对水中BPA和EE2的去除	周秋红, 龙天渝, 何靖, 郭劲松, 高俊敏 (763)
载钼磁性水热生物炭的制备及其除磷性能	宋小宝, 何世颖, 冯彦房, 花昀, 唐婉莹, 朱秋蓉, 薛利红, 杨林章 (773)
复合金属改性生物炭对水体中低浓度磷的吸附性能	孙婷婷, 高菲, 李莉, 黎睿, 董磊 (784)
磁性硅藻土负载纳米过氧化钙对水中磷酸盐吸附	徐楚天, 李大鹏, 张帅, 耿雪, 陈丽媛, 宋小君, 郭超然, 黄勇 (792)
污水厂尾水受纳河段沉积物磷形态及释放风险效应	汤宁, 李如忠, 王丰庆, 何瑞亮, 刘超 (801)
生物膜生态浮床对城市尾水净化特征分析	赵志瑞, 张佳瑶, 李铎, 李方红 (809)
磁凝凝对市政污水中抗生素抗性基因和重金属抗性基因的削减效能	于雯超, 郑利兵, 魏源送, 王哲晓, 张鹤清, 黄光华, 焦赞仪, 吴振军 (815)
四环素抗生素对污泥中四环素抗性基因丰度和表达水平的作用影响	阮晓慧, 钱雅洁, 薛罡, 高品 (823)
异养硝化细菌Pseudomonas aeruginosa YL的脱氮过程及N ₂ O产生特性	杨垒, 崔坤, 任勇翔, 郭淋凯, 张志昊, 肖倩, 陈宁, 汪旭晖 (831)
包埋厌氧氨氧化菌的环境因子影响特性及群落结构分析	王晓瞳, 杨宏, 苏杨, 刘旭妍 (839)
包埋反硝化填料强化二级出水深度脱氮性能研究及中试应用	周亚坤, 杨宏, 王少伦, 何海超, 刘宗跃, 苏扬, 张辉 (849)
厌氧时间对间歇进水-间歇曝气的好氧颗粒污泥系统影响	张杰, 王玉颖, 李冬, 曹思雨, 李帅 (856)
除磷颗粒诱导的同步短程硝化反硝化除磷颗粒污泥工艺	李冬, 刘博, 王文琪, 张杰 (867)
桂西南地区地球化学异常区农田重金属空间分布特征及污染评价	王佛鹏, 肖乃川, 周浪, 虎瑞, 宋波 (876)
青藏高原表土重金属污染评价与来源解析	杨安, 王艺涵, 胡健, 刘小龙, 李军 (886)
黄河三角洲不同植物群落土壤酶活性特征及影响因子分析	莫雪, 陈斐杰, 游冲, 刘福德 (895)
管理措施对黄土高原油松人工林土壤水溶性碳氮及其三维荧光特征的影响	宋亚辉, 张娇阳, 刘鸿飞, 薛蕊, 李秧秧 (905)
生物炭输入对不同滨岸带土壤营养元素有效态变化的影响	周慧华, 袁旭音, 熊钰婷, 韩年, 叶宏萌, 陈耀祖 (914)
水热炭减少稻田氨挥发损失的效果与机制	余姗, 薛利红, 花昀, 李德天, 谢斐, 冯彦房, 孙庆业, 杨林章 (922)
接种菌根真菌对湿生植物根际土壤硝化反硝化活性的影响及其微生物机制	刘猷, 王磊, 曹湛波, 段灏 (932)
基于漂浮箱法和扩散模型测定淡水养殖鱼塘甲烷排放通量的比较	胡涛, 黄健, 丁颖, 孙志荣, 徐梦凡, 刘树伟, 邹建文, 吴双 (941)
超高效液相色谱串联质谱法同时测定叶菜中13种抗生素	陈乾, 刘洋, 肖丽君, 邹德玉, 刘海学, 吴惠惠 (952)
青菜中镉的吸收和累积对硒的响应规律	余焱, 罗丽韵, 刘哲, 付平南, 李花粉 (962)
两种不同镉富集能力油菜品种耐性机制	卞建林, 郭俊梅, 王学东, 杨俊兴, 杨军, 陈同斌, 曹柳, 成永霞, 任战红, 王杰, 周小勇 (970)
可生物降解螯合剂GLDA强化三叶草修复镉污染土壤	贺玉龙, 余江, 谢世前, 李佩柔, 周宽, 何欢 (979)
我国畜禽粪便重金属含量特征及土壤累积风险分析	穆虹宇, 庄重, 李彦明, 乔玉辉, 陈清, 熊静, 郭丽莉, 江荣凤, 李花粉 (986)
畜禽粪便和桃树枝工业化堆肥过程中微生物群落演替及其与环境因子的关系	蔡涵冰, 冯雯雯, 董永华, 马中良, 曹慧锦, 孙俊松, 张保国 (997)
4种粪便堆肥过程中抗生素的降解特性	朱为静, 朱凤香, 王卫平, 洪春来, 姚燕来 (1005)
《环境科学》征订启事(553)	
《环境科学》征稿简则(655)	
信息(664, 755, 885)	

挥发性有机物污染控制方案的运行费用效能比较

羌宁, 史天哲, 缪海超

(同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 当前, 中国挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs) 的污染控制工作已进入深水区, VOCs 污染控制措施费用效能的高低将决定其减排工作的环保意义, 筛选出费用效能高的措施也是 VOCs 减排工作能够持续稳定进行的必要基础. 本文从排放浓度、排放风量及连续还是间歇排放等污染源排放特征角度确定出 12 种典型的 VOCs 排放情景, 针对这些典型情景估算了目前主流减排方案的运行费用, 并以减排单位质量 VOCs 的运行费用 (unit abatement cost, UAC, 元·kg⁻¹, 以 VOCs 计) 为费用效能指标进行了技术经济比较, 以期为依据 VOCs 排放特征选择适宜的减排方案提供参考. 分析结果表明, 对于低浓度 VOCs 排气, 其减排 UAC 总体达 8 元·kg⁻¹ 以上, 浓缩工序可有效减少 UAC, 通过合理地气体收集方式减少排放风量并提高排气浓度对后续处理的费用效能影响巨大. 强化 VOCs 排放过程的按质分类收集以提高得到 VOCs 液体的资源化属性, 也是今后提高 VOCs 控制费用效能的有效途径之一.

关键词: 运行费用; 挥发性有机物减排; 末端治理; 费用效能比较; 排放特征

中图分类号: X511; X701 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)02-0638-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.201907029

Operation and Maintenance of Cost-Effective Volatile Organic Compounds Abatement Alternatives

QIANG Ning, SHI Tian-zhe, MIAO Hai-chao

(College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Presently, volatile organic compounds (VOCs) pollution control in China has entered the deep-water zone, facing difficult challenges. The cost-effectiveness of VOCs abatement alternatives will determine the final environmental benefits. Screening of abatement alternatives with good cost-effectiveness and performance is important to form a sound basis for VOCs emission abatement work to create sustainable and stable alternatives. In this study, 12 typical emission scenarios are set up based on the emission characteristics of pollution sources, such as emission concentration, airflow volume, continuous or intermittent emissions, and fluctuations in concentration. Based on these typical scenarios, the operation costs of current mainstream emission abatement alternatives is estimated, and a cost-effectiveness comparison is made using the unit abatement cost (UAC, yuan·kg⁻¹, VOCs) as the index. The results obtained can provide a reference for choosing appropriate VOCs abatement alternatives according to the characteristics of VOCs emission. Results show that for low concentration VOCs, the UAC of emission abatement is normally more than 8 yuan·kg⁻¹. The concentration in the process plays an important role in reducing UAC. Therefore, the reasonable collection of VOCs gas, resulting in smaller emission volume and higher concentration, has a significant impact on the subsequent emission abatement cost-effectiveness. Enhancing the classification collection of VOCs to improve resource attributes of the recovered VOCs liquid is also an effective way to improve the cost effectiveness of VOCs abatement.

Key words: cost-effectiveness comparison; VOCs abatement; end-pipe treatment; operating cost; emission characteristics

随着对挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs) 作为大气光化学污染物和雾-霾污染物的前驱物质认识的加深^[1~9], 近几年来我国出台了一系列的 VOCs 控制政策、法规^[10~14], VOCs 的控制已成为大气污染控制领域的重要工作之一. 与颗粒物、二氧化硫和氮氧化物等常规大气污染物不同, VOCs 污染物的种类多、来源广, 很多排放为分散式非连续排放, 且 VOCs 物质具有资源性属性, 因此其减排是一项涉及源头减排、过程控制、末端治理及管理制度的全过程控制的系统工程. 表 1 所示为我国 VOCs 控制过程的发展阶段分类, 目前大多数地区的 VOCs 的控制还处在以达标为唯一考核指标的达标生存阶段. 由于 VOCs 控制工作的复杂性, 加之基础工作的缺失, 很多情况

下选择 VOCs 控制技术时存在盲目跟风的情况. 从技术经济的角度看, 运行成本很高的减排技术是不利于减排系统长期稳定运行的. 很多情况下, 不合理的控制方案尽管可以满足达标排放的要求, 但会造成资源能源的浪费、二次污染及很高的碳排放, 从生命周期的角度分析, 这类表面上的减排行为往往在更大的范围上形成了更严重的污染. 目前研究较多关注于 VOCs 控制的技术有效性评估^[15~20] 污染控制方案的技术经济评价的方法^[21], 但关于技术经济方面的评价报道很少, 且还限于

收稿日期: 2019-07-02; 修订日期: 2019-09-23

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0209100-01); 大气重污染成因与治理攻关项目 (DQGG0204)

作者简介: 羌宁 (1965 ~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为大气污染控制与空气质量管理, E-mail: tj1926@126.com

单项技术或单情景的分析^[22]。考虑到 VOCs 排放源的复杂性,目前从生命周期的角度全过程地评价控制方案情景的体系将会非常复杂和庞大,因此本文先聚焦于末端治理环节,针对 VOCs 排放的

一些典型情景,系统地估算了目前主流控制方案的运行费用,并以 UAC 为指标进行了技术经济比较,以期为依据 VOCs 排放特征选择适宜的减排方案提供参考。

表 1 VOCs 控制过程的不同发展阶段
Table 1 Different development stages in VOCs control process

项目	启蒙阶段	达标生存阶段	价值回归阶段	最终阶段
管控要求	VOCs 产生及排放数据不清,控制目标、要求不明确	排放要求明确,以堵为主;推行末端治理,大兵团全面开花方式,收集风量,负压要求以大为好	清洁生产真正启动,环保排放要求明确,开始强调全过程控制及其实践	清洁生产的基础上环保排放满足要求,全过程的控制
管控手段	管控措施缺失,监测能力弱	力推在线监测,监测市场比较混乱	第三方监测可靠性提高,第三方专业运维启动	专业的运行维护,过程监控,排放监测
主要应用工艺	大多数企业:从投资成本和运行便利考虑常温氧化,不带再生的吸附工艺为主;部分企业:开始应用高效净化技术	高温氧化为主,其它方法受限,大部分企业在清洁生产控制方法方面因时间及技术限制不普及	源头减排,有效集气,回收回用比例上升,开始形成针对不同排放情景特点的最佳实用技术	源头减排,高效经济集气,回收循环利用,经济有效地末端处理技术工艺
效果	总体减排效果差、资源浪费、二次污染	固定源减排有成效,费用效益比一般,因经济因素,稳定、有效运行比率不高,资源能源消耗较大,部分企业因污染不达标出局	排放稳定达标,部分 VOCs 资源化回收,部分生产企业因污染控制成本出局	排放的 VOCs 从资源或能源的角度得到充分的循环利用,污染控制费用效益比高,二次污染少

1 技术评价指标及计算方法

1.1 评价指标

如前所述,VOCs 污染源种类多、排放特性各异,造成 VOCs 控制的复杂性和多样性,由于设备投资涉及到系统材料、安全等配置要求的不同,对于同一类污染源的控制设备系统的价格可能差异较大,因此本次技术经济评价,主要以从气相中去除单位质量 VOCs 的 UAC 为评价指标,以期为 VOCs 控制系统的选择及 VOCs 控制政策的制定提供参考。

$$UAC = O\&MC \times [Q \times (\rho_{in} - \rho_{out}) \times 10^{-6} \times t]^{-1}$$
式中, Q 是处理气体的流量, $m^3 \cdot h^{-1}$; ρ_{in} 和 ρ_{out} 分别是治理系统进口、出口气体质量浓度, $mg \cdot m^{-3}$; t 是计算的时长, h ; $O\&MC$ 是 t 时间段内减排设施的运行维护成本, 元。

1.2 典型减排情景及工艺的设定

VOCs 控制的技术体系如图 1 所示,目前可行的主流减排工艺为各类热氧化,包括蓄热高温氧化 (regenerative thermal oxidation, RTO)、催化氧化 (catalytic oxidation, CO)^[23,24]、蓄热催化氧化

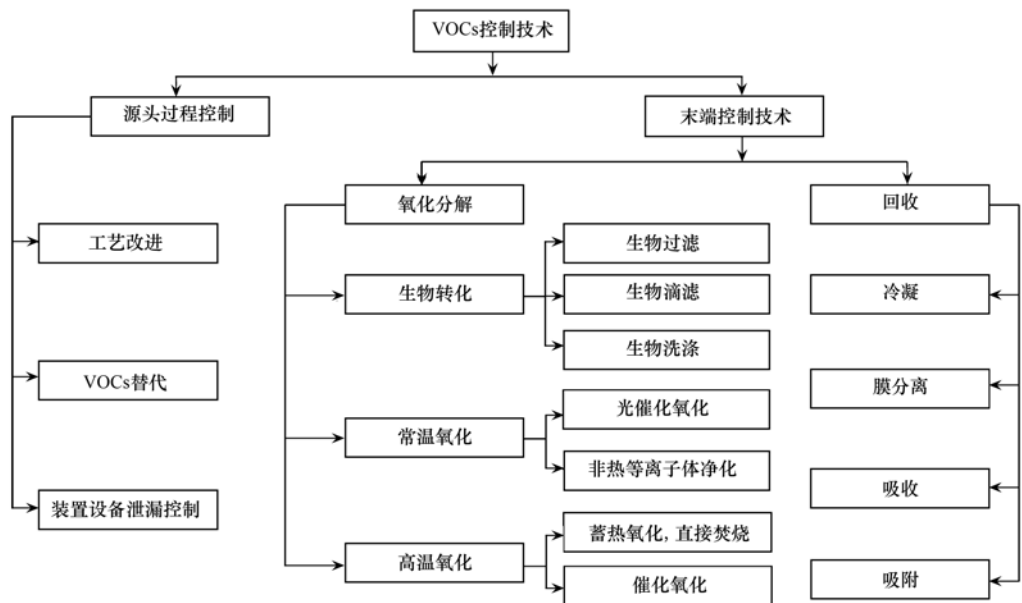


图 1 VOCs 控制技术单元体系
Fig. 1 VOCs control technology unit system

(regenerative catalytic oxidation, RCO)、吸附浓缩加各类热氧化和吸附浓缩回收^[25]. 预处理和后处理(包括调温、调湿、颗粒物去除、酸性气体的洗涤等)对于治理系统的持续稳定运行非常重要,但考虑到本阶段评价工作的简洁性,未将预处理、后处理的成本纳入本阶段的评价范围. 由于常温氧化只适合于一些低污染物负荷的脱臭等场合^[26,27],目前的技术水平还不适合作为 VOCs 的减排手段,因此

也未纳入待评价的备选方案体系.

不同行业 VOCs 污染源的排放特性除与生产工艺特性相关外,还与气体收集方式密切相关,有关过程控制和气体收集环节将另文讨论,本文按 VOCs 排放源是否连续排放、排放浓度的高低及风量的大小等选取设定了表 2 所示的 12 种典型排放情景.

按表 2 情景设定的净化工艺评价方案如表 3 所示.

表 2 典型 VOCs 排放源情景¹⁾

Table 2 Typical VOCs source emission scenarios

编号	排放情景	特征参数
1	连续、大风量、低浓度	$50\,000\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, $300\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$
2	连续、大风量、中低浓度	$50\,000\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, $1\,000\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$
3	连续、大风量、中浓度	$50\,000\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, $2\,000\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$
4	非连续、大风量、低浓度	每日启动,排放时间 $12\text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$, $5\text{ 万 m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, $300\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$
5	非连续、大风量、低浓度	每日启动,排放时间 $8\text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$, $5\text{ 万 m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, $300\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$
6	非连续、大风量、低浓度	每日启动,排放时间 $6\text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$, $5\text{ 万 m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, $300\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$
7	非连续、大风量、中低浓度	每日启动,排放时间 $12\text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$, $5\text{ 万 m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, $1\,000\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$
8	非连续、大风量、中浓度	每日启动,排放时间 $8\text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$, $5\text{ 万 m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, $1\,000\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$
9	非连续、大风量、中浓度	排放时间 $12\text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$, $5\text{ 万 m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, $2\,000\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$
10	连续、浓度波动大、大风量	连续风量 $50\,000\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, 浓度在 $100\sim1\,200\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 波动, $150\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下的时段占 30%, $150\sim450\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的时段占 40%, 大于 $450\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的时段占 30%
11	非连续、间歇、浓度波动大、大风量	每天启动 1 次,风量 $50\,000\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, 浓度在 $100\sim1\,200\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 波动, $150\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下的时段占 30%, $150\sim450\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的时段占 40%, 大于 $450\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的时段占 30%
12	连续、中风量、高浓度	$10\,000\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, $6\,000\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$

1) 连续大风量和高浓度排放应通过清洁生产的途径解决,本文未设为典型排放情景

表 3 不同情景拟评价工艺对应

Table 3 Process correspondence tables for different scenarios

情景编号	旋转浓缩 加 RTO	旋转浓缩 加 CO	RTO	RCO	CO	颗粒炭吸附 蒸汽再生	纤维炭吸附 蒸汽再生	颗粒物吸附 氮气再生	分散收集, 集中再生
1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
3			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
4	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
5	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
6	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
7	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
8	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
9			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
10	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
11	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
12			✓	✓	✓	✓	✓	✓	

1.3 运行费用的计算方法及设定条件

本次评估的运行费用包括电费(包括风机、水泵、冷却循环水、制冷、压缩空气及控制系统等设施的电耗)、补充燃气、加热用水蒸汽、耗材费用(包括催化剂、活性炭、沸石转轮、蓄热材料及阀门等消耗材料及备品备件更换维护费用)、废水处理费用和人工费等. 当净化系统产生有机液体不可回收回用时会产生废液处置费用,而可回收回用时将产生溶剂收益费用. 本文将其划分为电力(相关风

机、水泵、冷却塔、制冷设备、制氮设备的电耗)、燃料及热能(天然气及蒸汽)、人工费、消耗材料及备品备件、二次污染及有机物回收效益等方面进行分析,本文中的运行费用中暂时未包括气体预处理的调温、调湿费用,来气中可能共存的酸性气体洗涤及含杂原子组分燃烧后产生的二次污染等处理费用.

为便于比较,运行费用计算中的基本条件假定如下.

目前工业过程排放较多的有机物有烃类、酮类、酯类、醇类和卤代烃类,由于后续热氧化补充燃料计算涉及到燃烧热值,本文取甲苯、丁酮、乙酸乙酯和异丙醇的平均燃烧热($33\,784\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)为后续计算的燃烧热(卤代烃热值通常较低,且一般情况下不宜燃烧,故未计入)。风机、水泵能耗统一按流量、压差及75%综合能效计,燃料按天然气计,热源按 $8\text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的饱和蒸汽计。电费按 $0.8\text{元}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$,天然气按 $3.5\text{元}\cdot\text{m}^{-3}$,蒸汽按 $0.3\text{元}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。人工费用按3班制,每人日均费用200元。备品备件部分,催化剂空速按 $15\,000\text{ h}^{-1}$ 计,设计使用寿命20 000 h,按 $400\text{元}\cdot\text{L}^{-1}$ 计。活性炭寿命按2 a计, $15\,000\text{元}\cdot\text{t}^{-1}$,过滤风速 $0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。蜂窝蓄热陶瓷40 000 h寿命计。

对于RTO而言,系统的压差按3 500 Pa计,RCO压差按2 500 Pa计,催化燃烧CO暂按1 200 Pa计,颗粒炭吸附装置系统的压差按1 500 Pa计,沸石转轮浓缩装置考虑到去除颗粒物等预处理的压差合计按1 200 Pa计,纤维活性炭压差按3 500 Pa计。RTO的平均进出口温差按 40°C 计(热利用率在90%~95%)。换向周期按90 s计。RTO启动升温时间3小时,升温速率设为约 $4^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 。旋转吸附浓缩装置的主体气体进、出口温差按 8°C 计,浓缩后再生气流与主体气流的温差按 30°C 计。浓缩装置的浓缩比按10倍计。CO的床层温度设定为 350°C ,进、出口气流的温差设为 140°C 。

吸附设备按8 h保护作用时间计,水蒸汽再生考虑到除水及冷却工序,氮气保护再生按4 h再生周期计。

风机、水泵功率按设备系统压差可得到单位流体流量的功率,天然气和蒸汽按系统热平衡和惯例计算。净化过程产生废水处理费用按高浓度废水 $100\text{元}\cdot\text{t}^{-1}$ 计,净化过程产生有机液体在无法回收回用时,须支付 $6\text{元}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的危废处置费用;当有机液体可以回收回用时按品质(含水率等)可获得 $3\sim 4\text{元}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的收益。

2 不同情景的评价结果及讨论

2.1 低浓度大风量连续排放情景

低浓度(约 $300\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$)大风量连续排放情景不同减排方案的UAC如图2所示。由图2(a)可见,对于低浓度连续排放的有机气体净化方案,在治理过程产生废液需要外委处理的情况下,旋转浓缩加RTO的处理费用最小,但也需要 $7.9\text{元}\cdot\text{kg}^{-1}$,最高的直接催化氧化法CO达 $57.5\text{元}\cdot\text{kg}^{-1}$,直接采用RTO法的费用为 $17.4\text{元}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。由图3可见,由于来

气中有机物浓度低,因此各类热氧化法的辅助燃料费用的UAC占比在37%~86%。RCO与RTO相比,因需要使用催化剂,且对通常应用的三床RCO而言是三份催化剂,尽管电和天然气的费用略低于RTO,但折算的总体UAC要较RTO高30%。采用前置旋转浓缩后,总体UAC下降43%~523%,低浓度气体净化系统前置浓缩工艺可有效地减少运行过程的总体能耗。对于吸附回收类方案,在净化过程中得到的有机液体不可回收回用的情况下,总体UAC在 $11.9\sim 14.7\text{元}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,其废液外委处置的费用将运行费用提高了近1倍,此时吸附回收类方案的运行费用均高于热氧化方案中旋转浓缩加RTO。但从图2(b)可见,当得到的有机液体可以回收回用时,回收类方案的UAC将下降到 $1.97\sim 5.7\text{元}\cdot\text{kg}^{-1}$,均远低于氧化类方案的费用。因此强化VOCs排放过程的分类收集以提高得到VOCs液体的资源化属性,是今后提高VOCs控制费用效能比

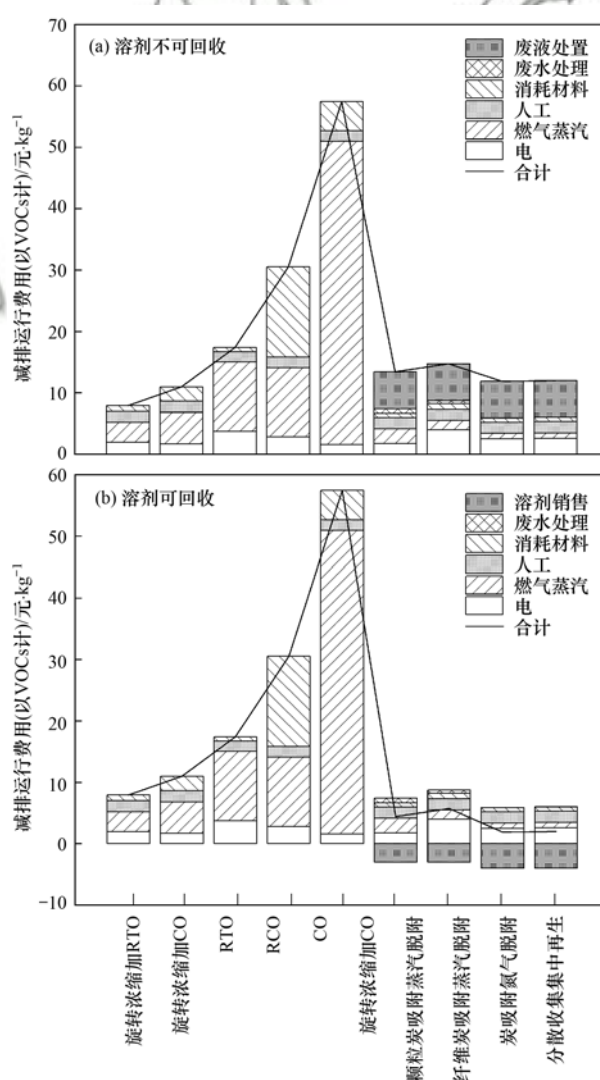


图2 连续大风量 $300\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 情景不同减排方案的UAC

Fig. 2 UAC scenario for different abatement alternatives under continuous large airflow volume of $300\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$

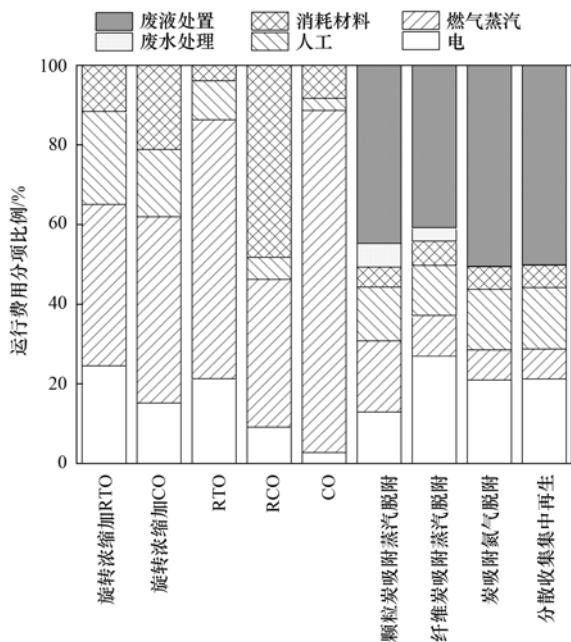


图3 连续大风量 $300 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 浓度不同方案 (溶剂不可回收回用) UAC 分项比例

Fig. 3 Fractional proportion of UAC for different alternatives (solvent non-recyclable) with continuous high airflow volume of $300 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$

的有效途径之一。

2.2 连续排放不同浓度对 UAC 的影响

2.2.1 热氧化方案

热氧化方案对不同浓度连续排放气体的 UAC 如图4所示。从中可见,排气中 VOCs 的浓度越低,各类热氧化方案的 UAC 越高。 $300 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 浓度时,参照图2可知,旋转浓缩加 RTO 的组合方案 UAC 达 $7.9 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$;而不采用预浓缩的催化燃烧在热回收率 60% 时,在辅助燃料和催化剂费用因素的共同作用下, UAC 高达 $57.4 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$; RTO 尽管热回收效率达 90% 以上,但因入口浓度低,运行费用也需 $17.4 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$,而 RCO 加上催化剂的费用因素其 UAC 也达 $30.5 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。由此可见,低浓度时维持热氧化过程所需的辅助燃料量是决定运行成本的关键因素。 $1000 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 浓度时,旋转浓缩加 RTO 的组合方案费用降到 $1.53 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$,纯 RTO 方案的费用降到 $2.86 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$, RCO 和 CO 方案的费用分别下降到 $6.9 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $14.9 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。 $2000 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 浓度时,旋转浓缩的意义已不大,且一级浓缩装置的排气已较难达标,此时 RTO 方案的费用为 $0.91 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$, RCO 和 CO 的 UAC 分别 $2.88 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $5.63 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。总体而言,中低浓度时不建议采用 CO 方案。当浓度为 $6000 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, RTO 方案的费用为 $0.71 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$, RCO 为 $1.35 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$, CO 为 $0.755 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。与 RTO 相比, CO 的占地少且荷载

轻,便于设施的布置,因此高浓度时,由于气体本身有机物的热值够高,且气体中不含对催化剂不利成分时, CO 总体上更具优势。此外,如果前期旋转浓缩可将污染物浓度浓缩到 $6000 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上,旋转浓缩加 CO 也是较佳的方案之一。

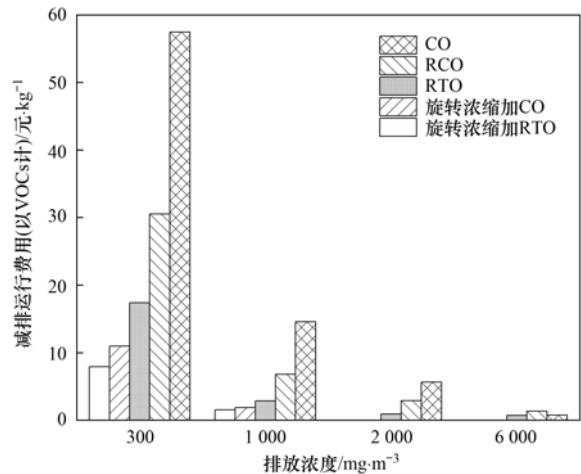


图4 不同浓度对热氧化类方案 UAC 的比较

Fig. 4 Comparison of UAC for thermal oxidation options with different concentrations

2.2.2 吸附回收方案

不同浓度吸附回收类方案的运行费用如图5所示。

由图5(a)可见,在产生的液体无法回收回用需要外委处置时,吸附回收类方案的 UAC 均在 $7 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上,且随入口浓度增加导致的运行费用下降的变化程度要远小于热氧化类,主要是 $6000 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$ 的危废处置费用在运行费用中占了很大的比例。而当产生的液体可回收回用并产生经济效益时,从图5(b)可见,当浓度超过 $1000 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时,回收工艺 $4 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的溶剂效益可抵消掉电、蒸汽、人工、消耗材料及废水处理等的费用,并产生盈余;达到 $2000 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的浓度时,净化回收 1t 有机液体的直接运行成本在 $1.38 \sim 1.84 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$,如不考虑精制费用,均可实现 $1 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上的收益。从提高 VOCs 的控制费用效能比的角度,分类分质收集以提高回收液的可用性具有非常重要的意义。

2.3 低浓度不同排放特征的影响

低浓度 (约 $300 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$) 不同排放特征排气净化的 UAC 情况如图6所示。从图6(a)可见不同排放特征对热氧化类方案的运行费用影响较大。

相对于稳定排放过程的旋转浓缩加 RTO 方案,不稳定排放工况情景下的 UAC 将增加 16% ~ 38% 不等,每天启动且运行时间最短情景的 UAC 增加最多,浓度波动因素对该方案的 UAC 影响要小于非连续运行因素;与稳定排放的旋转浓缩加 CO 方案相

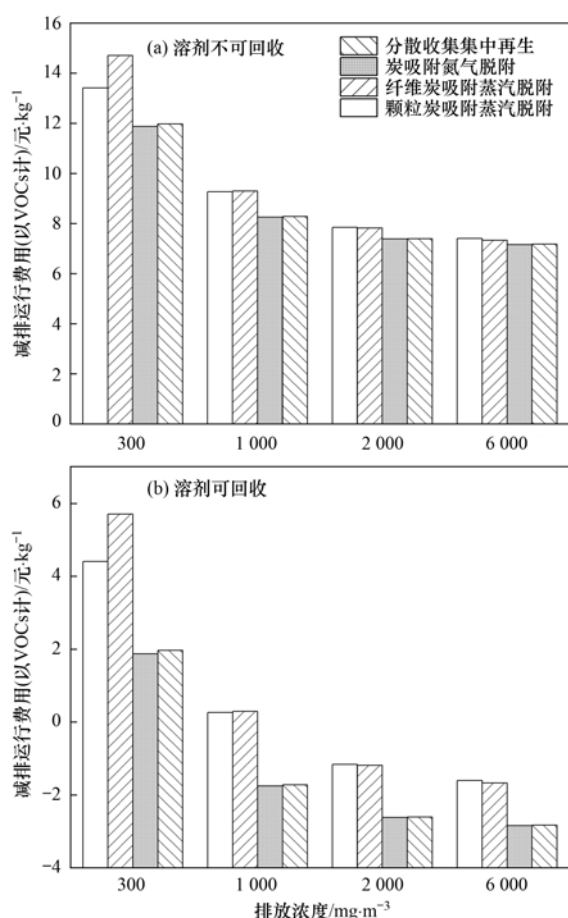


图5 不同浓度对吸附回收类方案UAC的比较

Fig. 5 Comparison of UAC for adsorption recovery options with different concentrations

比,不稳定排放情景下的UAC将增加10%~40%不等,且浓度波动因素对该方案的UAC的影响要大于非连续运行因素,原因是CO的UAC对入口浓度比较敏感;非稳定排放情景RTO方案的UAC将较稳定排放增加3%~69%不等,也是以每天启动且运行时间最短的工况为最甚,启动能耗对RTO的UAC影响较大。

由于吸附段的缓存和蓄积能力、设备的启停和来气浓度波动对吸附类方案的运行影响较小,因此UAC基本没有变化。“分散收集、集中再生”方案,因吸附装置需要移动,其UAC要略高于在线就地吸附、脱附装置,其优势是可用一套再生装置伺候多套吸附装置,提高再生装置的利用率从而节约总体投资费用。与连续排放情景一样,对于非连续和非稳定排放而言,当吸附回收产生的液体不能回收回用时,吸附回收类方案的UAC因废液处置费用的缘故仍然要略高于浓缩加热氧化类方案中的旋转浓缩加RTO,但远低于不带浓缩的热氧化方案的UAC。从图6(b)可见,如果产生的有机液体能够回收回用,吸附回收类方案的UAC将远低于各类热氧化方案。

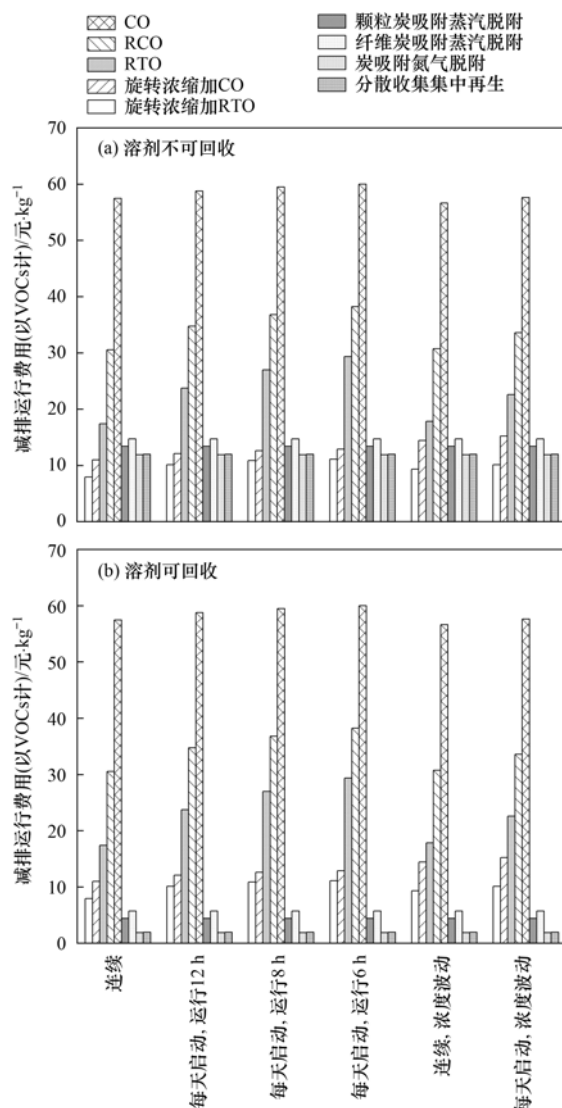


图6 低浓度情景不同排放特征对不同方案UAC的影响情况

Fig. 6 Impact of different emission characteristics on UAC of different options in low concentration scenario

2.4 12种情景总体情况

本节主要讨论按表3排放情景和方案组合得到的UAC总体情况,如图7所示。

由图7可知,不同浓度不同排放特征情景下,不同减排方案VOCs的UAC相差巨大,从近60元·kg⁻¹到回收有价值有机液体产生效益。总体而言,如果净化回收得到的有机物液体不可回收回用,且待处理气体有机物浓度较低时,宜优先采用旋转浓缩加RTO和旋转浓缩加CO,其次为吸附回收类方案,不宜直接采用CO、RCO或RTO;当待处理气体有机物浓度在1 000 mg·m⁻³左右时,宜优先采用旋转浓缩加RTO、旋转浓缩加CO,其次为RTO或RCO,然后是吸附回收类方案,不宜采用CO;当待处理气体有机物浓度在2 000 mg·m⁻³左右时,宜优先采用RTO、RCO及CO,其次是吸附回收类方案,旋转浓缩的意义已不明显;当气体浓度为6 000

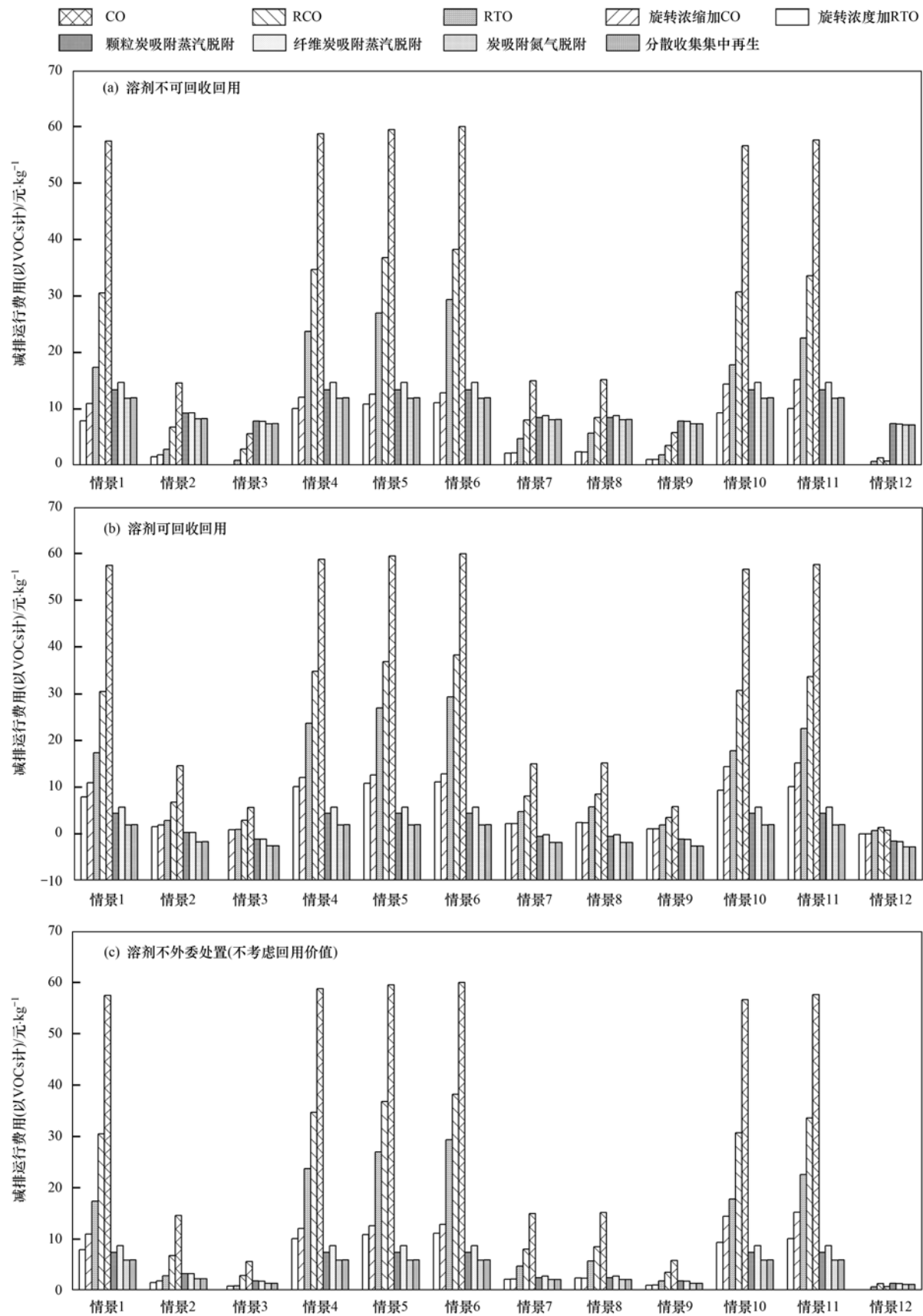


Fig. 7 General comparison of UAC for different emission scenarios and alternatives

$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上的高浓度时,优先采用占地少和自重小的 CO 或带热能回收的 RTO 和 RCO.

当净化回收得到的有机物液体可回收回用时,应优先采用吸附回收类方案,其次是低浓度时旋转

浓缩加热氧化,高浓度时直接热氧化。

当净化回收得到的有机物液体无需外委处理(也不考虑回收利用),在浓度不大于 $1\ 000\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,应优先采用吸附回收类方案,而当浓度大于 $2\ 000\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,应优先采用各类直接热氧化方案。

今后将继续开展不同类型高浓度情景的评估(包括资源回收和能源回收),以及包括投资费用和占地需求安装便利等因素在内的综合费用效能评估。

3 结论

(1)热氧化类方案对于入口 VOCs 浓度 $300\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的 UAC 在 $7.9\sim 57.5\ \text{元}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间;浓缩和蓄热换热效率的提高可有效地降低运行成本。热氧化类方案对于入口 VOCs 浓度 $1\ 000\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的 UAC 在 $1.5\sim 14.6\ \text{元}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, $2\ 000\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时在 $0.7\sim 5.7\ \text{元}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间;入口浓度高将有效降低热氧化类工艺的 UAC。

(2)对于吸附回收类方案,如回收液不能回用时,入口浓度 $300\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的 UAC 在 $11.9\sim 13.4\ \text{元}\cdot\text{kg}^{-1}$, $1\ 000\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时为 $8.2\sim 9.3\ \text{元}\cdot\text{kg}^{-1}$, $2\ 000\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时在 $7.3\sim 7.9\ \text{元}\cdot\text{kg}^{-1}$;如回收液可回用,则入口浓度 $300\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的 UAC 在 $2.0\sim 4.4\ \text{元}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, $1\ 000\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时为 0.26 到盈收 $1.75\ \text{元}\cdot\text{kg}^{-1}$, $2\ 000\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时为盈收 $1.1\sim 2.2\ \text{元}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

(3)对于吸附回收类方案,其回收液是否能回用对 UAC 影响巨大,也是决定选择热氧化法还是回收法的关键依据。

(4)低浓度排放情景中,浓缩加热氧化方案用于非稳定排放时较用于稳定排放时的 UAC 将增加 $10\%\sim 40\%$ 不等,其中旋转浓缩加 RTO 方案 UAC 增加幅度受启动能耗的影响大,旋转浓缩加 CO 方案 UAC 受来气浓度波动的影响大,但吸附回收类方案 UAC 受非稳定排放因素的影响不大。

参考文献:

- [1] 张远航,邵可声,唐孝炎,等. 中国城市光化学烟雾污染研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1998, **34**(2-3): 392-400.
Zhang Y H, Shao K S, Tang X Y, *et al.* The study of urban photochemical smog pollution in China[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 1998, **34**(2-3): 392-400.
- [2] Atkinson R. Atmospheric chemistry of VOCs and NO_x [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(12-14): 2063-2101.
- [3] Dechapanaya W, Eusebi A, Kimura Y, *et al.* Secondary organic aerosol formation from aromatic precursors. 1. Mechanisms for individual hydrocarbons [J]. *Environmental Science and Technology*, 2003, **37**(16): 3662-3670.
- [4] Seinfeld J H, Pandis S N. *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change* [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006. 204-279.
- [5] Chan A W H, Kroll J H, Ng N L, *et al.* Kinetic modeling of secondary organic aerosol formation: effects of particle-and gas-phase reactions of semivolatile products [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007, **7**(15): 4135-4147.
- [6] Ling Z H, Guo H, Cheng H R, *et al.* Sources of ambient volatile organic compounds and their contributions to photochemical ozone formation at a site in the Pearl River Delta, southern China[J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(10): 2310-2319.
- [7] Shao P, An J L, Xin J Y, *et al.* Source apportionment of VOCs and the contribution to photochemical ozone formation during summer in the typical industrial area in the Yangtze River Delta, China[J]. *Atmospheric Research*, 2016, **176-177**: 64-74.
- [8] 郝吉明,吕子峰,楚碧武,等. 大气二次有机气溶胶污染特征及模拟研究[M]. 北京: 科学出版社, 2015. 1-28.
Hao J M, Lv Z F, Chu B W, *et al.* Characterization, experimental study, and modeling of atmospheric secondary organic aerosol[M]. Beijing: Science Press, 2015. 1-28.
- [9] 陈文泰,邵敏,袁斌,等. 大气中挥发性有机物(VOCs)对二次有机气溶胶(SOA)生成贡献的参数化估算[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(1): 163-172.
Chen W T, Shao M, Yuan B, *et al.* Parameterization of contribution to secondary organic aerosol (SOA) formation from ambient volatile organic compounds (VOCs)[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(1): 163-172.
- [10] 陈颖,李丽娜,杨常青,等. 我国 VOC 类有毒空气污染物优先控制对策探讨[J]. 环境科学, 2011, **32**(12): 3469-3475.
Chen Y, Li L N, Yang C Q, *et al.* Countermeasures for priority control of toxic VOC pollution [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(12): 3469-3475.
- [11] 王海林,张国宁,聂磊,等. 我国工业 VOCs 减排控制与管理对策研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(12): 3462-3468.
Wang H L, Zhang G N, Nei L, *et al.* Study on control and management for industrial volatile organic compounds (VOCs) in China[J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(12): 3462-3468.
- [12] 国务院. 国务院关于印发大气污染防治行动计划的通知[EB/OL]. http://www.gov.cn/jzhengce/content/2013-09/13/content_4561.htm, 2013-09-13.
- [13] 环境保护部,发展改革委,财政部,等. 关于印发《“十三五”挥发性有机物污染防治工作方案》的通知[EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201709/t20170919_421835.htm, 2017-09-13.
- [14] 王金南,蒋春来,张文静. 关于“十三五”污染物排放总量控制制度改革的思考[J]. 环境保护, 2015, **43**(21): 21-24.
Wang J N, Jiang C L, Zhang W J. Reform on China's total emission control in the “13th Five-Years Plan” [J]. *Environmental Protection*, 2015, **43**(21): 21-24.
- [15] 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.
- [16] 栾志强,郝郑平,王喜芹. 工业固定源 VOCs 治理技术分析评估[J]. 环境科学, 2011, **32**(12): 3476-3486.
Luan Z Q, Hao Z P, Wang X Q. Evaluation of treatment technology of volatile organic compounds for fixed industrial resources[J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(12): 3476-3486.
- [17] 江梅,张国宁,魏玉霞,等. 工业挥发性有机物排放控制的

- 有效途径研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(12): 3487-3490.
- Jiang M, Zhang G N, Wei Y X, *et al.* Emission control way of volatile organic compounds in industry [J]. Environmental Science, 2011, **32**(12): 3487-3490.
- [18] 王海林, 王俊慧, 祝春蕾, 等. 包装印刷行业挥发性有机物控制技术评估与筛选[J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2503-2507.
- Wang H L, Wang J H, Zhu C L, *et al.* Evaluation and selection of VOCs treatment technologies in packaging and printing industry [J]. Environmental Science, 2014, **35**(7): 2503-2507.
- [19] 王海林, 聂磊, 李靖, 等. 重点行业挥发性有机物排放特征与评估分析[J]. 科学通报, 2012, **57**(19): 1739-1746.
- Wang H L, Nie L, Li J, *et al.* Characterization and assessment of volatile organic compounds (VOCs) emissions from typical industries[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, **58**(7): 724-730.
- [20] 李佳羽, 刘利民, 韩建华, 等. 典型化工园区 VOCs 排放控制技术的评价[J]. 化工进展, 2016, **35**(4): 1250-1256.
- Li J Y, Liu L M, Han J H, *et al.* Evaluation of VOCs emission control technologies in typical chemical industry park [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2016, **35**(4): 1250-1256.
- [21] USEPA. Cost estimation: concepts and methodology[EB/OL]. https://www.epa.gov/sites/production/files/2017-12/documents/epacmcostestimationmethodchapter_7thedition_2017.pdf, 2017-11.
- [22] Johnsen D L, Emamipour H, Guest J S, *et al.* Environmental and economic assessment of electrothermal swing adsorption of air emissions from sheet-foam production compared to conventional abatement techniques[J]. Environmental Science & Technology, 2016, **50**(3): 1465-1472.
- [23] He C, Cheng J, Zhang X, *et al.* Recent advances in the catalytic oxidation of volatile organic compounds: a review based on pollutant sorts and sources[J]. Chemical Reviews, 2019, **119**(7): 4471-4568.
- [24] Kamal M S, Razzak S A, Hossain M M. Catalytic oxidation of volatile organic compounds (VOCs)-a review[J]. Atmospheric Environment, 2016, **140**: 117-134.
- [25] Yang C T, Miao G, Pi Y H, *et al.* Abatement of various types of VOCs by adsorption/catalytic oxidation: a review[J]. Chemical Engineering Journal, 2019, **370**: 1128-1153.
- [26] Debono O, Hequet V, Le Coq L, *et al.* VOC ternary mixture effect on ppb level photocatalytic oxidation: removal kinetic, reaction intermediates and mineralization[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2017, **218**: 359-369.
- [27] Zhang Z X, Jiang Z, Shangguan W F. Low-temperature catalysis for VOCs removal in technology and application: a state-of-the-art review[J]. Catalysis Today, 2016, **264**: 270-278.

CONTENTS

Influencing Factors of Long-term Variations on Gridded PM _{2.5} of Typical Regions in China Based on GAM Model	NAN Yang, ZHANG Qian-qian, ZHANG Bi-hui (499)
Gridded Atmospheric Emission Inventory of PCDD/Fs in China	CHEN Lu-lu, HUANG Tao, CHEN Kai-jie, <i>et al.</i> (510)
Spatio-Temporal Variations and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM _{2.5} Across Multiple Sampling Locations in the Chengdu Plain	SHI Fang-tian, LUO Bin, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (520)
Diurnal Variations and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter in Nanjing Jiangbei New Area	QIU Chen-chen, YU Xing-na, DING Cheng, <i>et al.</i> (529)
Characterization, Seasonal Variation, and Source Apportionments of Particulate Amines (PM _{2.5}) in Northern Suburb of Nanjing	LI Xu-jie, SHI Xiao-wen, MA Yan, <i>et al.</i> (537)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes and PAHs in Summertime PM _{2.5} at Background Site of Yangtze River Delta	XUE Guo-yan, WANG Ge-hui, WU Can, <i>et al.</i> (554)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} in Changchun City, Autumn of 2017	ZHANG Yi-xuan, CAO Fang, ZHENG Han, <i>et al.</i> (564)
Heavy Pollution Characteristics and Assessment of PM _{2.5} Predicted Model Results in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Surrounding Areas During November 23 to December 4, 2018	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, CHAI Wen-xuan, <i>et al.</i> (574)
Analysis of Characteristics and Meteorological Influence Factors of Ozone Pollution in Henan Province	QI Yan-jie, YU Shi-jie, YANG Jian, <i>et al.</i> (587)
Spatio-Temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Properties in Henan Province	ZHANG Rui-fang, YU Xing-na (600)
Analysis of Water Soluble Organic Aerosol in Spring PM _{2.5} with Soot Particle Aerosol Mass Spectrometry (SP-AMS)	HUANG Wen-qian, CHEN Yan-tong, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (609)
Temporal Evolution and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Nanjing	YANG Xiao-min, SHI Shuang-shuang, ZHANG Chen, <i>et al.</i> (620)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in Summer and Autumn in Different Functional Zones of Lianyungang, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, LI Hui-peng, <i>et al.</i> (630)
Operation and Maintenance of Cost-Effective Volatile Organic Compounds Abatement Alternatives	QIANG Ning, SHI Tian-zhe, MIAO Hai-chao (638)
Pollution and Deposition Characteristics of Precipitation and Its Source Apportionment in Xi'an City	DING Cheng, YU Xing-na, HOU Si-yu (647)
Bacterial Diversity and Community Structure Antibiotic-resistant Bacteria in Bioaerosol of Animal Farms	SHA Yun-fei, SUN Xing-bin, XIN Wen-peng, <i>et al.</i> (656)
Vehicle Emission Inventory and Scenario Analysis in Liaoning from 2000 to 2030	JIN Jia-xin, SUN Shi-da, WANG Peng, <i>et al.</i> (665)
VOCs Emission Characteristics of DPF Regeneration in National VI Diesel Engine	QIAN Feng, XUE Chang-xin, XU Xiao-wei, <i>et al.</i> (674)
Characteristics and Significance of Stable Isotopes and Hydrochemistry in Surface Water and Groundwater in Nanxiaohegou Basin	GUO Ya-wen, TIAN Fu-qiang, HU Hong-chang, <i>et al.</i> (682)
Spatio-Temporal Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Middle and Lower Reaches of Le'an River	YU Yang, LÜ Ya-ning, WANG Wei-jie, <i>et al.</i> (691)
Spatio-temporal Evolution and Relationship of Water Environment Quality and Phytoplankton Community in Wenyu River	ZHU Li-ying, CHEN Yuan-yuan, LIU Jing, <i>et al.</i> (702)
High-Frequency Dynamics of Water Quality and Phytoplankton Community in Inflowing River Mouth of Xin'anjiang Reservoir, China	DA Wen-yi, ZHU Guang-wei, LI Yun-xiang, <i>et al.</i> (713)
Phosphorus Storage Capacity and Loss Risk in Coastal Reed Wetland Surrounding Bohai Sea	SONG Jia-wei, XU Gang, ZHANG Yang, <i>et al.</i> (728)
Spatio-Temporal Variation of Release Flux of Sediment Nitrogen and Phosphorus in High-Risk Period of Algal Bloom in Lake Erhai	LIU Si-ru, ZHAO Ji-dong, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (734)
Fluorescence Characteristics and Source Analysis of DOM in Snowfall of Xi'an	YANG Yi, HAN Li-yuan, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (743)
Performance Assessment of Permeable Interlocking Concrete Pavement Facility Structure	ZHANG Jia-wei, LIU Yong, JIN Jian-rong, <i>et al.</i> (750)
Photocatalytic Degradation of Rhodamine B with Micro-SiC/Graphene Composite Under Visible Light Irradiation	ZHU Hong-qing, YANG Bing, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (756)
Removal of BPA and EE2 from Water by Mn-Fe Embedded in Acicular Mullite	ZHOU Qiu-hong, LONG Tian-yu, HE Jing, <i>et al.</i> (763)
Fabrication of La-MHTC Composites for Phosphate Removal; Adsorption Behavior and Mechanism	SONG Xiao-bao, HE Shi-ying, FENG Yan-fang, <i>et al.</i> (773)
Adsorption of Low-Concentration Phosphorus from Water by Composite Metal Modified Biochar	SUN Ting-ting, GAO Fei, LIN Li, <i>et al.</i> (784)
Phosphate Adsorption from Water on CaO ₂ -loaded Magnetic Diatomite	XU Chu-tian, LI Da-peng, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (792)
Phosphorus Forms and Release Risk of Sediments in Urban Sewage Treatment Plant Effluent and Receiving Stream Reach	TANG Ning, LI Ru-zhong, WANG Yu-qing, <i>et al.</i> (801)
Purification Characteristics of Urban Tail Water from Sewage Treatment Plant by Biofilm Ecological Floating Bed	ZHAO Zhi-rui, ZHANG Jia-yao, LI Duo, <i>et al.</i> (809)
Removal Performance of Antibiotic Resistance Genes and Heavy Metal Resistance Genes in Municipal Wastewater by Magnetic-Coagulation Process	YU Wen-chao, ZHENG Li-bing, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (815)
Effect of Tetracycline Antibiotic on Abundance and Transcriptional Expression Level of Tetracycline Resistance Genes in Activated Sludge	RUAN Xiao-hui, QIAN Ya-jie, XUE Gang, <i>et al.</i> (823)
Denitrification Process and N ₂ O Production Characteristics of Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas aeruginosa</i> YL	YANG Lei, CUI Shen, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (831)
Environmental Factors Influence and Microbial Community Structure Analysis of Entrapped Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, <i>et al.</i> (839)
Research on Denitrification Performance of Enhanced Secondary Effluent by Embedded Denitrification Filler and Pilot Application	ZHOU Ya-kun, YANG Hong, WANG Shao-lun, <i>et al.</i> (849)
Temporal Anaerobic Effect on Aerobic Granular Sludge with Intermittent Influent-Intermittent Aeration	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, <i>et al.</i> (856)
Simultaneous Short-Cut Nitrification-Denitrification Phosphorus Removal Granules Induced by Phosphorus Removal Granules	LI Dong, LIU Bo, WANG Wen-qi, <i>et al.</i> (867)
Spatial Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals on Farmland of Geochemical Anomaly Area in Southwest Guangxi	WANG Fo-peng, XIAO Nai-chuan, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (876)
Evaluation and Source of Heavy Metal Pollution in Surface Soil of Qinghai-Tibet Plateau	YANG An, WANG Yi-han, HU Jian, <i>et al.</i> (886)
Characteristics and Factors of Soil Enzyme Activity for Different Plant Communities in Yellow River Delta	MO Xue, CHEN Fei-jie, YOU Chong, <i>et al.</i> (895)
Effects of Management Measures on Soil Water-soluble Carbon and Nitrogen and Their Three-Dimensional Fluorescence Characteristics of <i>Pinus tabulaeformis</i> Plantations on Loess Plateau	SONG Ya-hui, ZHANG Jiao-yang, LIU Hong-fei, <i>et al.</i> (905)
Effects of Biochar Input on Changes of Available Nutrient Elements in Riparian Soils with Different Landuse Types	ZHOU Hui-hua, YUAN Xu-yin, XIONG Yu-ting, <i>et al.</i> (914)
Effect of Applying Hydrochar for Reduction of Ammonia Volatilization and Mechanisms in Paddy Soil	YU Shan, XUE Li-hong, HUA Yun, <i>et al.</i> (922)
Effects of Mycorrhizal Fungi on Nitrification and Denitrification in the Rhizospheric Soil of Aquatic Plants and Its Microbial Mechanism	LIU Duo, WANG Lei, CAO Zhan-bo, <i>et al.</i> (932)
Comparison of Floating Chamber and Diffusion Model Methods for Measuring Methane Emissions from Inland Fish-Aquaculture Ponds	HU Tao, HUANG Jian, DING Ying, <i>et al.</i> (941)
Simultaneous Quantitative Detection of Thirteen Common Antibiotics in Leafy Vegetables by Ultra-High Performance Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry	CHEN Qian, LIU Yang, XIAO Li-jun, <i>et al.</i> (952)
Accumulation and Translocation of Cd in <i>Brassica rapa</i> Under the Influence of Selenium	YU Yao, LUO Li-yun, LIU Zhe, <i>et al.</i> (962)
Tolerance Mechanism and Cadmium Enrichment Abilities in Two <i>Brassica napus</i> L. Cultivars	BIAN Jian-lin, GUO Jun-mei, WANG Xue-dong, <i>et al.</i> (970)
Enhanced Phytoextraction of Cadmium Contaminated Soil by <i>Trifolium Repens</i> with Biodegradable Chelate GLDA	HE Yu-long, YU Jiang, XIE Shi-qian, <i>et al.</i> (979)
Heavy Metal Contents in Animal Manure in China and the Related Soil Accumulation Risks	MU Hong-yu, ZHUANG Zhong, LI Yan-ming, <i>et al.</i> (986)
Microbial Community Succession in Industrial Composting with Livestock Manure and Peach Branches and Relations with Environmental Factors	CAI Han-bing, FENG Wen-wen, DONG Yong-hua, <i>et al.</i> (997)
Degradation Characteristics of Antibiotics During Composting of Four Types of Feces	ZHU Wei-jing, ZHU Feng-xiang, WANG Wei-ping, <i>et al.</i> (1005)