

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.9
第41卷 第9期

目次

2020年天津市两次重污染天气污染特征分析·····	肖致美,徐虹,蔡子颖,李鹏,刘彬,元洁,郑乃源,唐遨,陈魁,邓小文(3879)
基于高分辨率MARGA分析成都市PM _{2.5} 中水溶性离子污染特征·····	尹寒梅,陈军辉,冯小琼,姜涛,钱骏,刘政(3889)
宿迁市PM _{2.5} 中水溶性无机离子的季节特征和来源分析·····	马红璐,赵欣,陆建刚,王辉,许纯领,欧阳琰,朱新胜,殷堂兵,漆丹,陆亚秋,汪玖阳,陆声兴(3899)
鼎湖山大气颗粒物中OC与EC的浓度特征及粒径分布·····	李安娜,温天雪,华维,杨员,孟泽,胡波,辛金元(3908)
鞍山市道路扬尘碳组分特征及来源解析·····	林孜,姬亚芹,林宇,国纪良,马妍,赵静琦(3918)
西安市冬季PM _{2.5} 中WSOC的光谱特性和来源解析·····	杨毅,张亚楠,刘焕武,田萍萍,李亚飞,雷颖,王一博(3924)
长三角地区气溶胶光学性质与新粒子生成观测·····	杜盈盈,陈军,张家洛,甘桂城,刘瑜存,苏明旭,楼晟荣,周敏,陶士康,乔利平(3932)
连云港市挥发性有机化合物的组分特征及来源解析·····	崔金梦,王体健,李秋潼,董立文,黄丛丞,曹云擎(3941)
成都市城区大气VOCs季节污染特征及来源解析·····	王成辉,陈军辉,韩丽,徐晨曦,王波,李英杰,刘政,钱骏(3951)
德州市夏季臭氧敏感性特征及减排方案·····	严茹莎(3961)
超低改造下中国火电排放清单及分布特征·····	屈加豹,王鹏,伯鑫,薛晓达,董广霞,崔磊,康明雄,王彤,汤铃,朱法华,李时蓓(3969)
浙江省人为源氨排放清单建立及分布特征·····	赵睿东,于兴娜,侯新红,沈丽(3976)
垃圾焚烧烟气中二噁英控制技术的评估与筛选·····	赵思岚,奚鹏飞,郭凤艳,邓双,贾建丽(3985)
兰州市两场典型降水事件稳定同位素特征及其水汽来源·····	韩婷婷,张明军,王圣杰,杜勤勤,马转转,郭蓉,曹晏风(3993)
然乌湖流域地表水水化学特征及控制因素·····	张涛,王明国,张智印,刘廷,何锦(4003)
河套灌区地下水化学演变特征及形成机制·····	崔佳琪,李仙岳,史海滨,孙亚楠,安海军,邢进平(4011)
石期河流域地下水化学特征及物质来源分析·····	李笑,于爽,李亮,郭永丽(4021)
长江中下游湖泊水体氮磷时空变化特征及其影响因素·····	季鹏飞,许海,詹旭,朱广伟,邹伟,朱梦圆,康丽娟(4030)
2016~2017年长荡湖流域湖库系统营养盐时空分布机制分析·····	李新艳,李恒鹏,姜三元,马培,赖锡军,邓建才,陈东强,耿建伟(4042)
菹草对湖泊水质及浮游植物群落结构的影响·····	康丽娟,许海,邹伟,朱广伟,朱梦圆,季鹏飞,陈洁(4053)
金泽水库库区细菌群落构建过程与关键驱动因子分析·····	刘明坤,童俊,朱慧峰,白晓慧(4062)
典型氟工业园周边河流沉积物中全(多)氟化合物的分布特征·····	孙琳婷,赵祯,唐建辉(4069)
微塑料对河水抗生素抗性基因的影响·····	周昕原,王言仔,苏建强,黄福义(4076)
莲花水库水体中抗生素污染特征及生态风险评价·····	廖杰,魏晓琴,肖燕琴,李青松,范洪勇,刘学军,庄马展,刘超翔(4081)
拟柱孢藻生长及碱性磷酸酶活性对不同磷浓度和磷形态响应的株系间差异·····	叶金梅,赵莉,罗旭,彭亮,雷腊梅(4088)
奶水河湿地植物作用及调水水质响应模拟·····	李亚娟,杜彦良,毕二平,王亮,陈翠柏(4095)
浅基质层干植草沟运行效果的现场实验·····	张佳炜,李田,张庭秀(4105)
海绵城市地块汇水区颗粒污染物的传输·····	李佳,谢文霞,姜智绘,单溪环,廖云杰,赵洪涛,李叙勇(4113)
天然黄铁矿吸附去除水中Sb(V):性能与机制·····	石松,吴乾元,李新正,黄满红(4124)
过硫酸盐氧化处理含苯磺酸废水·····	章晋门,卢钧,刘晓琛,陈泉源(4133)
温度对城市污水厌氧生物滤池运行效果与菌群结构的影响·····	刘智斌,刘秀红,周桐,章世勇,李健敏,杨庆(4141)
ABR-MBR耦合工艺启动及优化反硝化除磷性能·····	缪新年,汪倩,郭凯成,刘文如,沈耀良(4150)
低温下全自养脱氮颗粒污泥适应低基质效能·····	刘雨馨,王建芳,钱飞跃,陈倩苗,乔伟,沈聪(4161)
雄安新区土壤重金属地球化学监测关键问题探讨·····	郭志娟,周亚龙,杨峥,赵传冬,成杭新,孔牧,彭敏(4169)
基于土壤重金属及PAHs来源的人体健康风险定量评价:以北京某工业污染场地为例·····	吴志远,张丽娜,夏天翔,贾晓洋,李慧颖,王世杰(4180)
基于乡镇尺度的西南重金属高背景区土壤重金属生态风险评价·····	张富贵,彭敏,王惠艳,马宏宏,徐仁廷,成晓梦,侯召雷,陈子万,李括,成杭新(4197)
云南兰坪铅锌矿区优势植物重金属富集特性及应用潜力·····	张龙,张云霞,宋波,吴勇,周子阳(4210)
水培试验下水稻Pb吸收累积关键生育期·····	胡雨丹,周航,辜娇峰,霍洋,邓鹏辉,魏宾纭,刘俊,廖柏寒(4218)
田间条件下养分调控八宝景天Cd修复效率·····	郭俊梅,杨俊兴,杨军,郑国砥,周小勇,陈同斌,卞建林,孟晓飞,李玉峰(4226)
桉树枝条生物炭输入对桂北桉树人工林酸化土壤的作用效果·····	段春燕,沈育伊,徐广平,滕秋梅,张德楠,何成新,张中峰,周龙武,孙英杰(4234)
秸秆直接还田和炭化还田对红壤酸度、养分和交换性能的动态影响·····	杨彩迪,卢升高(4246)
土壤微生物群落结构对生活源和工业源再生水灌溉的差异化响应·····	王燕,程东会,檀文炳,余红,席北斗,姜永海,党秋玲(4253)
粪肥和有机肥施用对稻田土壤微生物群落多样性影响·····	理鹏,吴建强,沙晨燕,叶春梅,黄沈发(4262)
松花江下游沿江湿地土地利用变化对土壤细菌群落多样性的影响·····	张拓,徐飞,怀宝东,杨雪,隋文志(4273)
黄土高原草地土壤细菌群落结构对于降水变化的响应·····	李娜,王宝荣,安韶山,焦峰,黄倩(4284)
土地利用方式对会仙岩溶湿地土壤真菌群落和功能类群的影响·····	程跃扬,靳振江,王晓彤,贾远航,袁武,周军波(4294)
黑土真菌群落互作及其与梯度有机质碳分子结构的关系·····	尚秋彤,黄瑞林,倪浩为,隋跃宇,孙波,梁玉婷(4305)
贵州茂兰喀斯特森林不同演替下土壤真核微生物多样性·····	王显,龙健,李娟,刘灵飞,廖洪凯,李宜蓉,杨睿(4314)
玉米秸秆生物炭固化细菌对镉砷吸附·····	刘玉玲,朱虎成,彭鸥,李丹阳,杨蕊嘉,彭晶,铁柏清(4322)
无机态氮素转化机制及水土体氮源识别方法·····	梁杏,孙立群,张鑫,张洁,付鹏宇(4333)
《环境科学》征订启事(4061)	
《环境科学》征稿简则(4132)	
信息(4233, 4293, 4304)	

垃圾焚烧烟气中二噁英控制技术的评估与筛选

赵思岚^{1,2}, 奚鹏飞³, 郭凤艳², 邓双^{2*}, 贾建丽¹

(1. 中国矿业大学化学与环境工程学院, 北京 100083; 2. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 3. 重庆紫光化工股份有限公司, 重庆 401121)

摘要: 采用模糊综合评价法与层次分析法(AHP)相结合, 建立以环境、经济和技术为一级指标的3层综合评价指标体系, 对初步筛选出的双布袋活性炭吸附技术、硫及硫化物抑制技术和硫及硫化物抑制技术+活性炭固定床反应器技术等10项垃圾焚烧烟气中二噁英控制技术或技术组合进行了综合评估。结果表明, 硫及硫化物抑制技术+活性炭固定床反应器技术组合综合得分最高(0.4831), 为目前垃圾焚烧烟气中二噁英最佳控制技术。鉴于目前我国部分农村生活垃圾焚烧炉烟气中二噁英排放不达标的情况, 建议分布于农村的小型垃圾焚烧炉优先考虑采用此技术组合。我国各地区的垃圾焚烧企业可根据本地的经济发展水平、企业规模、炉型和工艺等实际情况, 采用本文建立的指标评价体系和评估方法进行控制技术评估, 筛选出适合本企业的最佳二噁英控制技术, 以有效控制我国垃圾焚烧二噁英排放。

关键词: 垃圾焚烧; 二噁英; 技术评估; 模糊综合评价; 层次分析法(AHP)

中图分类号: X701 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)09-3985-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.202002170

Evaluation and Screening of Dioxin Control Technology in Waste Incineration Flue Gas

ZHAO Si-lan^{1,2}, XI Peng-fei³, GUO Feng-yan², DENG Shuang^{2*}, JIA Jian-li¹

(1. School of Chemistry and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China; 2. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. Chongqing Purple Light Chemical Co., Chongqing 401121, China)

Abstract: To determine the best control technology for dioxin in waste incineration flue gas, a three-level comprehensive evaluation index system with environment, economy, and technology as the first-level indexes was constructed. The fuzzy comprehensive evaluation method and the analytic hierarchy process (AHP) were used to evaluate ten dioxin pollution control technologies or technology groups including “double bag activated carbon adsorption technology,” “sulfur and sulfide inhibition technology,” and “sulfur and sulfide inhibition technology + activated carbon fixed bed reactor technology”. The “sulfur and sulfur compound inhibition technology + activated carbon fixed bed technology” scored the highest, and thus is currently the best control technology for dioxin pollution in waste incineration exhaust gas. This technology is suitable for small rural waste incinerators to ensure that dioxin emissions meet the standards. Depending on the local economic development level, enterprise scale, furnace profile, and technological process, waste incineration enterprises in various regions of China can adopt this index evaluation system and method to evaluate the dioxin control technologies and select the best one suitable for the enterprise so that dioxin emissions in the waste incineration flue gas can be effectively controlled.

Key words: waste incineration; dioxins; technology evaluation; fuzzy comprehensive evaluation; analytic hierarchy process (AHP)

随着城镇化进程的推进和人民生活水平的提高,我国城市生活垃圾的产生量也在不断增加。据国家统计局年鉴显示^[1],从2009~2018年,我国城市生活垃圾清运量从15 734万t猛增至22 802万t,“垃圾围城”的现象引发社会关注。目前我国生活垃圾的无害化处理方式主要有填埋、堆肥和焚烧等,其中垃圾焚烧因其无害化、资源化和减量化处理程度较高,逐渐成为我国生活垃圾无害化处理的主流技术。截至2018年,我国城市生活垃圾处理方式中焚烧占比高达47.6%,垃圾焚烧厂数量已经高达331个,此外广大的农村地区还建有大量的小型焚烧炉分散处理生活垃圾。然而垃圾焚烧在解决垃圾围城问题的同时,也带来大气污染等环境问题,其中垃圾焚烧产生的二噁英因具有极强的毒性而备受关注^[2~4]。自

2002年1月起,我国对生活垃圾焚烧烟气执行《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB 18485-2001)^[5],规定二噁英的排放限值(以I-TEQ计,下同)为1.0 ng·m⁻³;2014年第二次修订,加严了二噁英排放限值为0.1 ng·m⁻³。雷鸣等^[6]现场采样分析4个农村生活垃圾焚烧炉烟气中二噁英毒性浓度为1.15~24.88 ng·m⁻³,明显高于国家标准。因此,如何确保我国垃圾焚烧烟气中二噁英的达标排放是目前生活垃圾焚烧处理面临的重要问题。

垃圾焚烧烟气中二噁英控制技术较多,但处理

收稿日期: 2020-02-23; 修订日期: 2020-03-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0209201)

作者简介: 赵思岚(1996~),女,硕士研究生,主要研究方向为大气污染防治,E-mail:823166010@qq.com

* 通信作者,E-mail:dengshuang@craes.org.cn

能力与处理效果却参差不齐,因此需对现有的二噁英控制技术进行评估,以筛选出综合考虑环境、经济和技术因素的最佳控制技术.近年来,国内外学者对大气污染物控制技术评估研究主要集中在火电厂排放的二氧化硫、氮氧化物和颗粒物^[7~10]等常规大气污染物,而对于二噁英这种非常规污染物还未开展控制技术的评估.因此,本文拟采用模糊综合评价法及层次分析法对现有的垃圾焚烧烟气中二噁英控制技术进行评估,以期为我国不同规模、炉型和工艺等条件下垃圾焚烧烟气中二噁英控制技术的选择提供有力支撑,从而有效控制我国垃圾焚烧二噁英排放.

1 方法与路线

技术评估的步骤一般包括^[11]:①初步筛选参评技术;②确定评估方法及模型;③构建评估指标体系;④确定指标权重并量化;⑤计算待评技术综合得分;⑥得出综合评价结果(评估流程如图1所示).其中确定评估方法及模型是整个评估流程的关键一步,技术评估方法目前主要有模糊综合评价法、多目标规划法和灰色关联分析法等.其中模糊综合评价法应用最为广泛,是一种以模糊数学理论为基础的评价方法,具有结果清晰,系统性强的特点,能较好地解决模糊的、难以量化的问题^[12~14].层次

分析法(analytic hierarchy process, AHP)是美国运筹学家 Satty 提出的一种定性与定量相结合的多目标决策方法,适用于具有分层交错评价指标的目标系统,且目标值又难于定量描述的决策问题^[15~17],可用于指标权重的确定.考虑到二噁英控制技术评估指标具有多元化、多层次和模糊因素较多等特点,本文拟采用模糊综合评价法与 AHP 相结合对现有的垃圾焚烧烟气中二噁英控制技术进行评估.

2 技术评估

2.1 技术初选

目前垃圾焚烧烟气二噁英的控制技术可分为3类:焚烧前源头控制、焚烧中过程控制和焚烧后末端控制^[18].焚烧前可通过调节垃圾中氯元素及水分含量遏制二噁英的源头合成.焚烧过程中可通过控制燃烧条件,尽量保证垃圾充分燃烧以减少二噁英的炉内合成^[19];也可通过向炉内投加无机抑制剂来抑制二噁英的产生.目前能对二噁英起抑制作用的无机抑制剂主要有硫及硫化合物、氮化合物和碱性化合物^[20],有研究表明硫及硫化合物对二噁英的抑制能力明显高于其它两类化合物^[21,22].焚烧后烟气温度降到200~500℃时^[23],很容易在炉外再次合成二噁英,此阶段为主要产生阶段.

传统末端烟气控制技术主要包括:活性炭吸附工艺、新型布袋除尘工艺和催化还原工艺等.常见的活性炭吸附工艺有移动床反应器、固定床反应器及活性炭喷射技术3种类型,其中移动床和固定床一般安装在布袋除尘器之后,而活性炭喷射通常与布袋除尘配套使用^[24,25].新型布袋除尘工艺主要包括双布袋活性炭吸附技术和催化滤布技术:双布袋活性炭吸附技术是在第一个布袋除尘器之后喷入活性炭吸附气相二噁英,随之被第二个布袋除尘器捕集,通过气力输送重新喷入管道中^[26];催化滤布技术是一种将催化分解与布袋除尘相结合的技术,即把催化剂附着在过滤膜上,实现烟气中二噁英的捕集与分解^[27].选择性催化还原(SCR)技术在脱硝同时去除二噁英^[28].此外,还有光催化氧化降解技术^[29]和低温等离子体技术^[30].目前垃圾焚烧烟气中二噁英控制技术的基本情况如表1所示.

根据二噁英去除效率是否达到90%以上以及应用前景等因素,初步筛选出:双布袋活性炭吸附技术(T1)、硫及硫化合物抑制技术(T2)、催化滤布技术(T3)、活性炭固定床反应器技术(T4)、光催化氧化降解技术(T5)、硫及硫化合物抑制技术+双布袋活性炭吸附技术(T6)、硫及硫化合物抑制技术+光催化氧化降解技术(T7)、硫及硫化合物抑制技术+

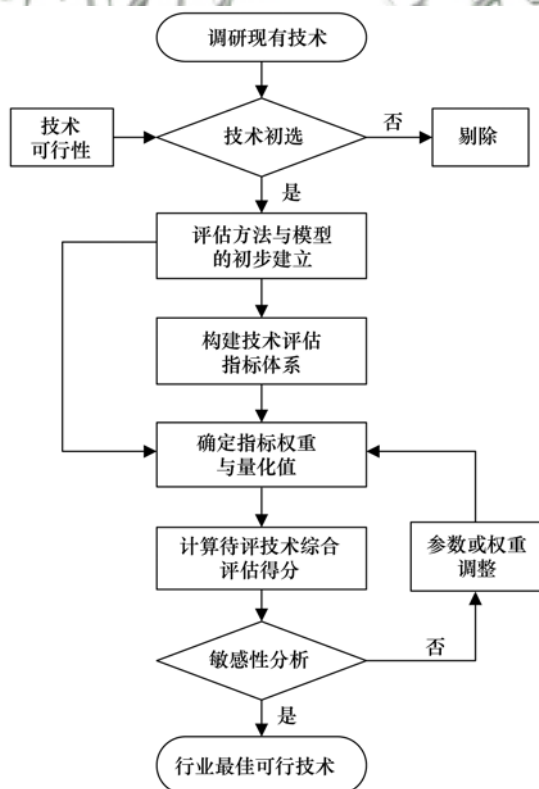


图1 技术评估流程示意

Fig. 1 Flow chart of technical assessment

活性炭喷射技术(T8)、硫及硫化物抑制技术+催化滤布技术(T9)和硫及硫化物抑制技术+活性炭固定床反应器技术(T10)共 10 项技术或技术组合进行评估。

表 1 垃圾焚烧烟气中二噁英控制技术
Table 1 Dioxin control technology in waste incineration flue gas

类型	名称	去除效率/%	应用前景	文献
无机抑制剂工艺	硫及硫化物抑制技术	98	现行	[31,32]
	移动床反应器	90.4	较少	[20]
活性炭吸附工艺	固定床反应器	98	现行	[20]
	活性炭喷射	99	现行	[20,33]
新型布袋除尘工艺	双布袋活性炭吸附技术	98	现行	[26]
	催化滤布技术	99.5	现行	[27]
催化还原工艺	SCR	>80	现行	[34]
其它	光催化氧化降解技术	99.5	技术成熟度较低	[29]
	低温等离子体技术	>90	实验研究阶段	[30]

2.2 评价指标体系的构建
并结合二噁英控制技术的特点,构建了由环境、经济和技术组成的 3 层综合评价指标体系,如图 2 所示。

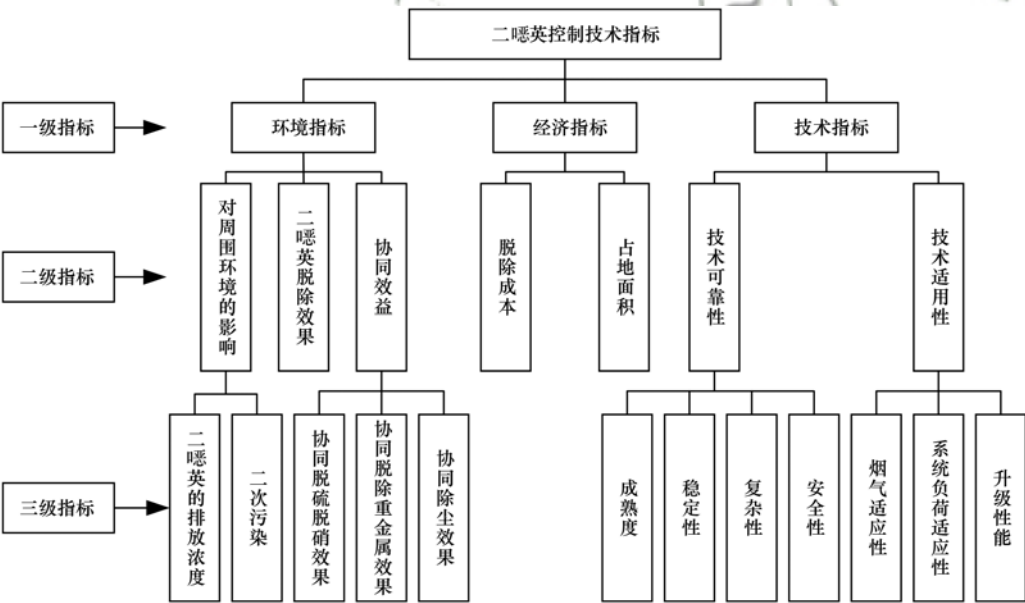


图 2 二噁英控制技术评估指标体系
Fig. 2 Dioxin control technology evaluation index system

2.3 评价指标的量化
指标量化的目的是为了消除各指标评估等级和量纲的差异,从而便于对不同待评技术进行综合比较. 量化方法采用等级赋值法,通过文献调研和 20 位专家(涉及二噁英控制技术研发、技术评估、能源和工程设备制造等领域)评分的方式,对不同控制技术的某项指标进行分级和原始赋值. 以二噁英的排放浓度为例,分为低、较低、中、较高和高 5 个等级,原始赋值分别对应 4~5、3~4、2~3、1~2 和 0~1. 然后将各指标量化值按照式(1)计算得分,待评技术的各指标量化结果如表 2 所示.

$$u_i = x_i/5 \tag{1}$$

式中, u_i 表示经过等级赋值法变换后第 i 项指标的

分值,取值范围为[0, 1]; x_i 表示第 i 项指标的原始赋值. 指标分值越大,性能越好.

2.4 指标权重的确定
各指标权重数值直接影响评价结果的合理性,本文通过专家调查问卷的方法得到各指标权重如表 3 所示,在此基础上利用 AHP 确定各评价指标的权重.

判断矩阵反映了本层次有关因素对上一层次某个相关因素的重要性,是决策的基本依据. 参考专家调查问卷得到的指标权重值,构造每个指标层的两两判断矩阵,计算特征向量,并对其进行一致性检验. 根据判别矩阵运算结果,可计算各个指标的权重值.

表 2 指标量化结果¹⁾

Table 2 Quantitative values of indicators

指标	待评技术									
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
二噁英的排放浓度	中(0.6)	较高(0.4)	中(0.6)	中(0.6)	较高(0.4)	较低(0.8)	中(0.6)	较低(0.7)	较低(0.7)	较低(0.8)
二次污染	较高(0.4)	中(0.5)	中(0.5)	中(0.5)	较低(0.7)	较高(0.3)	中(0.6)	较高(0.4)	中(0.5)	较高(0.4)
协同脱硫脱硝效果	较差(0.4)	较差(0.4)	较差(0.4)	中(0.5)	中(0.5)	较差(0.4)	中(0.50)	较差(0.4)	较差(0.4)	中(0.5)
协同脱除重金属效果	中(0.5)	较差(0.4)	较差(0.4)	中(0.5)	较差(0.4)	中(0.6)	中(0.5)	较差(0.4)	中(0.5)	中(0.5)
协同除尘效果	中(0.6)	较差(0.3)	中(0.5)	中(0.5)	较差(0.3)	中(0.6)	较差(0.4)	较差(0.4)	中(0.5)	中(0.6)
二噁英脱除效果	较低(0.4)	中(0.5)	中(0.5)	中(0.5)	较差(0.4)	中(0.5)	中(0.6)	中(0.6)	较好(0.7)	较好(0.7)
脱除成本	较高(0.4)	中(0.5)	较高(0.4)	较高(0.4)	较高(0.4)	高(0.2)	高(0.2)	较高(0.3)	高(0.2)	较高(0.3)
占地面积	中(0.5)	中(0.6)	中(0.5)	较大(0.4)	中(0.5)	较大(0.4)	较大(0.4)	较大(0.4)	较大(0.4)	大(0.2)
成熟度	中(0.5)	较低(0.4)	较低(0.4)	中(0.5)	较低(0.3)	较低(0.4)	较低(0.3)	较低(0.4)	较低(0.3)	较低(0.4)
稳定性	中(0.5)	较差(0.4)	较差(0.4)	较差(0.4)	较差(0.3)	较差(0.4)	较差(0.3)	较差(0.3)	较差(0.3)	较差(0.3)
复杂性	中(0.5)	中(0.5)	中(0.5)	较大(0.4)	较大(0.4)	较大(0.3)	较大(0.3)	较大(0.3)	较大(0.3)	较大(0.3)
安全性	中(0.5)	中(0.5)	中(0.5)	中(0.5)	较低(0.4)	较低(0.4)	较低(0.4)	较低(0.4)	较低(0.3)	较低(0.3)
烟气适应性	较差(0.4)	中(0.5)	中(0.5)	较差(0.3)	中(0.5)	较差(0.3)	中(0.5)	较差(0.3)	较差(0.4)	较差(0.3)
系统负荷适应性	较差(0.4)	较差(0.4)	较差(0.4)	较差(0.4)	中(0.5)	较差(0.4)	中(0.5)	较差(0.4)	较差(0.4)	较差(0.3)
升级性能	中(0.5)	中(0.5)	中(0.5)	较差(0.4)	较差(0.3)	较差(0.3)	较差(0.3)	较差(0.3)	较差(0.3)	较差(0.3)

1) 括号内数据为量化后分值

表 3 垃圾焚烧烟气中二噁英控制技术指标权重专家问卷调查结果

Table 3 Results of questionnaire survey on the index weight of dioxin control technology in waste incineration flue gas

一级指标	权重	二级指标	权重	三级指标	权重
环境指标	0.416 7	对周围环境的影响	0.138 7	二噁英的排放浓度	0.081 0
				二次污染	0.057 9
		协同效益	0.104 2	协同脱硫脱硝效果	0.034 7
				协同脱除重金属效果	0.034 7
				协同除尘效果	0.034 7
经济指标	0.333 3	二噁英脱除效果	0.173 6		
		脱除成本	0.222 2		
		占地面积	0.111 1		
技术指标	0.250 0			成熟度	0.036 5
				稳定性	0.036 5
		技术可靠性	0.145 8	复杂性	0.036 5
				安全性	0.036 5
				烟气适应性	0.043 4
				系统负荷适应性	0.043 4
		技术适用性	0.104 2	升级性能	0.017 4

以环境、经济和技术三个一级指标为例,设环境、经济和技术的关系矩阵:

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1/2 & 1 & 2 \\ 1/3 & 1/2 & 1 \end{pmatrix}$$

将矩阵归一化:

$$\begin{pmatrix} 0.545 5 & 0.571 4 & 0.500 0 \\ 0.272 7 & 0.285 7 & 0.333 3 \\ 0.181 8 & 0.181 8 & 0.166 7 \end{pmatrix}$$

计算可得最大特征根 $\lambda_{\max} = 3.094$, 单位向量为 $[0.540 0, 0.300 0, 0.160 0]^T$, 验证 $CR = 0.007 9 < 0.1$, 故满足一致性, 判断矩阵构建合理, 其中环境、经济及技术的 3 个一级指标权重分别为 0.540 0、0.300 0 和 0.160 0。

设环境指标下的二级指标“对周围环境的影响、协同效益和二噁英脱除效果关系矩阵”为:

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 1/2 \\ 1/2 & 1 & 1/3 \\ 2 & 3 & 1 \end{pmatrix}$$

将矩阵归一化:

$$\begin{pmatrix} 0.285 7 & 0.333 3 & 0.272 7 \\ 0.142 8 & 0.166 7 & 0.181 8 \\ 0.571 4 & 0.500 0 & 0.545 5 \end{pmatrix}$$

计算可得最大特征根 $\lambda_{\max} = 3.094$, 单位向量为 $[0.300 0, 0.160 0, 0.540 0]^T$, 验证 $CR = 0.007 9 < 0.1$, 故满足一致性, 判断矩阵构建合理, 该指标层占上一层指标的权重分别为 0.300 0、0.160 0 和 0.540 0。其最终权重值需用上一层的指标权重(环

境指标)乘以该指标在该层所占权重值,即 0.162 0、0.086 4 和 0.291 6。其余矩阵构造及判别方法依次类推,参考专家评判通过 AHP 法构建矩阵所计算的权重值如表 4 所示。

表 4 垃圾焚烧烟气中二噁英控制技术指标权重结果

Table 4 Indicators of dioxin control technology in waste incineration flue gas					
一级指标	权重	二级指标	权重	三级指标	权重
环境指标	0.540 0	对周围环境的影响	0.1620	二噁英的排放浓度	0.094 5
				二次污染	0.067 5
		协同效益	0.086 4	协同脱硫脱硝效果	0.028 8
				协同脱除重金属效果	0.028 8
				协同除尘效果	0.028 8
经济指标	0.300 0	二噁英脱除效果	0.291 6		
		脱除成本	0.200 0		
		占地面积	0.100 0		
技术指标	0.160 0	技术可靠性	0.093 3	成熟度	0.023 3
				稳定性	0.023 3
				复杂性	0.023 3
				安全性	0.023 3
		技术适用性	0.066 7	烟气适应性	0.029 3
				系统负荷适应性	0.029 3
				升级性能	0.008 0

3 评估结果与讨论

3.1 综合评价结果

将表 2 中的各指标最终得分和表 4 中权重值代入公式(2)计算得到各技术综合得分 E_j ,如表 5 所示。

表 5 垃圾焚烧烟气中二噁英污染控制技术综合评估结果

Table 5 Comprehensive assessment results of dioxin pollution control technology for waste incineration flue gas					
待评技术	环境指标	经济指标	技术指标	综合结果	排序
T1	0.243 5	0.130 0	0.074 0	0.447 5	8
T2	0.249 0	0.160 0	0.072 3	0.481 3	2
T3	0.273 7	0.130 0	0.072 3	0.476 0	4
T4	0.279 5	0.120 0	0.065 7	0.465 2	5
T5	0.236 3	0.130 0	0.064 3	0.430 6	9
T6	0.287 7	0.080 0	0.057 9	0.425 6	10
T7	0.312 5	0.080 0	0.062 0	0.454 5	7
T8	0.302 7	0.100 0	0.055 5	0.458 2	6
T9	0.344 3	0.080 0	0.053 8	0.478 1	3
T10	0.352 8	0.080 0	0.050 3	0.483 1	1

由表 5 可见,各技术综合得分由高到低的顺序为:T10>T2>T9>T3>T4>T8>T7>T1>T5>T6。T10 的综合评分为0.483 1,是最高的,为目前垃圾焚烧烟气中二噁英最佳控制技术。

3.2 权重敏感性分析

权重敏感性分析是指从定量分析的角度调整指标权重对评价结果的影响,从而做出更高层次的决策^[15]。本文在采用 AHP 法确定权重时,当分别强调环境、经济和技术指标时,将 3 项一级指标的相对权重对应调整为 $w_1=(0.6,0.2,0.2)$ 、 $w_2=(0.2,0.6,0.2)$ 和 $w_3=(0.2,0.2,0.6)$,各二层及三层指标权重按比例随之变化,评价结果分别如图 3~5 所示。

由图 3 可见,当优先考虑环境因素时,T10 对

环境最为友好,且综合得分最高,与综合评估时得出的结果一致,这主要是因为目前人们生活水平提高了,对环境的要求越来越高,在综合评估时设置的环境指标权重较高(0.54)与优先考虑环境性能时设置的环境指标权重(0.60)接近。当优先考虑经济因素时,T2 为经济性最佳控制技术(如图 4),而 T6、T7、T9 和 T10 技术组合经济成本较高,所以得分较低,与实际情况相符。当优先考虑技术因素时,T1、T2 和 T3 综合得分比较接近,都比较高(如图 5)。总体来说,单一技术比技术组合的综合得分高,表明技术越复杂其稳定性、成熟度和可升级性降低,导致综合得分降低。综上所述,这些评估结果符合我国现阶段的实际情况,表明本文建立的评价指标体系及评

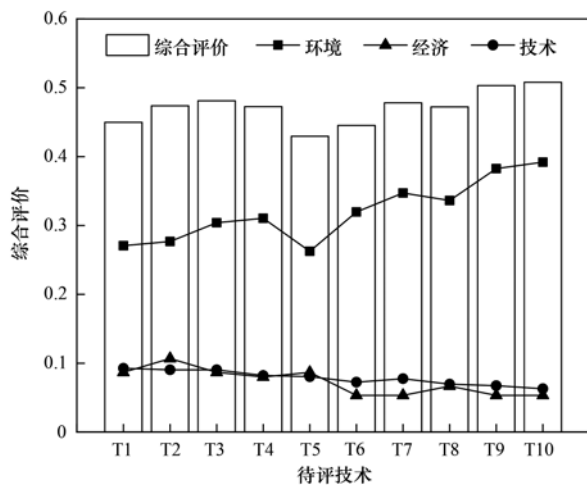


图3 强调环境因素的综合评价结果

Fig. 3 Technology assessment results emphasizing environment performance

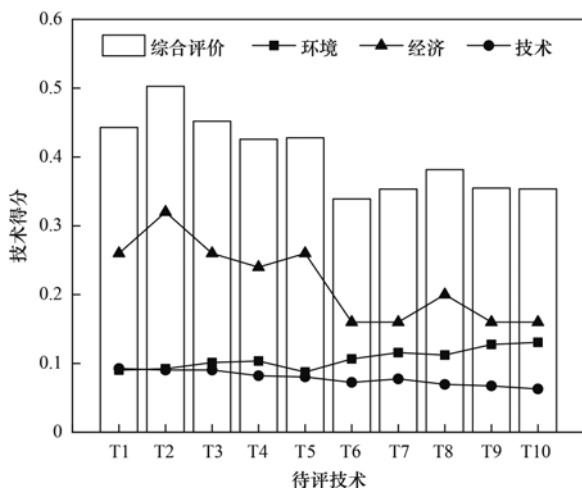


图4 强调经济因素的综合评价结果

Fig. 4 Technology assessment results emphasizing economic performance

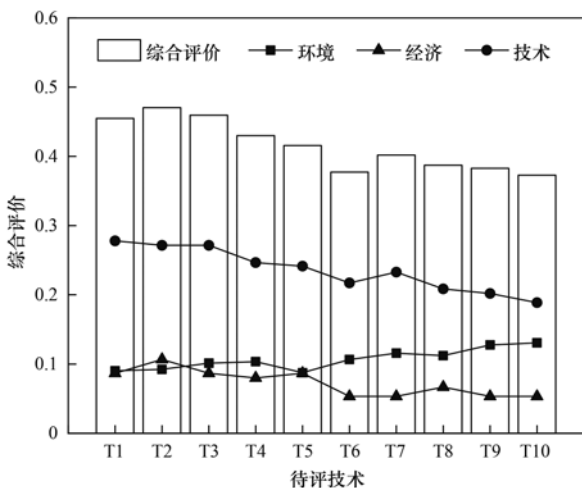


图5 强调技术因素的综合评价结果

Fig. 5 Technology assessment results emphasizing technological performance

价方法具有较强的科学性和合理性。

硫及硫化物抑制技术 + 活性炭固定床反应器技术组合广泛应用于危险废物焚烧处置设施,尤其是比利时、德国和荷兰应用较多^[35]。虽然目前国内广泛使用的二噁英控制技术为活性炭喷射技术 + 布袋除尘技术^[25],但固定床反应器比活性炭喷射技术的接触时间长,且结合硫及硫化物抑制技术可进一步提高了二噁英去除效率。鉴于目前我国部分农村生活垃圾焚烧炉烟气中二噁英不达标排放的情况^[6,24],建议分布于农村的小型垃圾焚烧炉优先考虑采用此技术组合。

活性炭吸附技术只是将烟气中的二噁英从气相中转移到固相吸附剂中,并没有实现真正降解,经过布袋捕集后的活性炭还需要进一步按危废进行处置,增加了污染控制成本。而催化降解技术可以克服这一弊端使二噁英实现彻底降解,具有一定的市场应用潜力。硫及硫化物抑制技术 + 催化滤布技术组合综合评估得分也较高,仅次于硫及硫化物抑制技术 + 活性炭固定床反应器技术组合,表明通过控制燃烧过程从源头抑制二噁英合成,结合末端烟气催化分解实现二噁英的彻底去除将成为未来二噁英控制技术的发展趋势。由此可见,我国各地区的垃圾焚烧企业可根据本地的经济发展水平、企业规模、炉型和工艺等实际情况,采用本文建立的指标评价体系和评价方法进行控制技术评估,筛选出适合本企业的最佳二噁英控制技术,以有效控制我国垃圾焚烧烟气二噁英排放。

4 结论

(1)建立了包括环境、经济和技术一级评价指标和二噁英排放浓度、二次污染等3层共22项评价指标体系;敏感性分析结果表明指标体系和评价方法具有科学性和合理性。

(2)硫及硫化物抑制技术 + 活性炭固定床反应器技术综合得分最高(0.4831),为目前垃圾焚烧烟气中二噁英污染最佳控制技术。优先考虑技术和经济因素时,硫及硫化物抑制技术为最佳技术;而优先考虑环境因素时,硫及硫化物抑制技术 + 活性炭固定床反应器技术为垃圾焚烧烟气二噁英最佳控制技术。

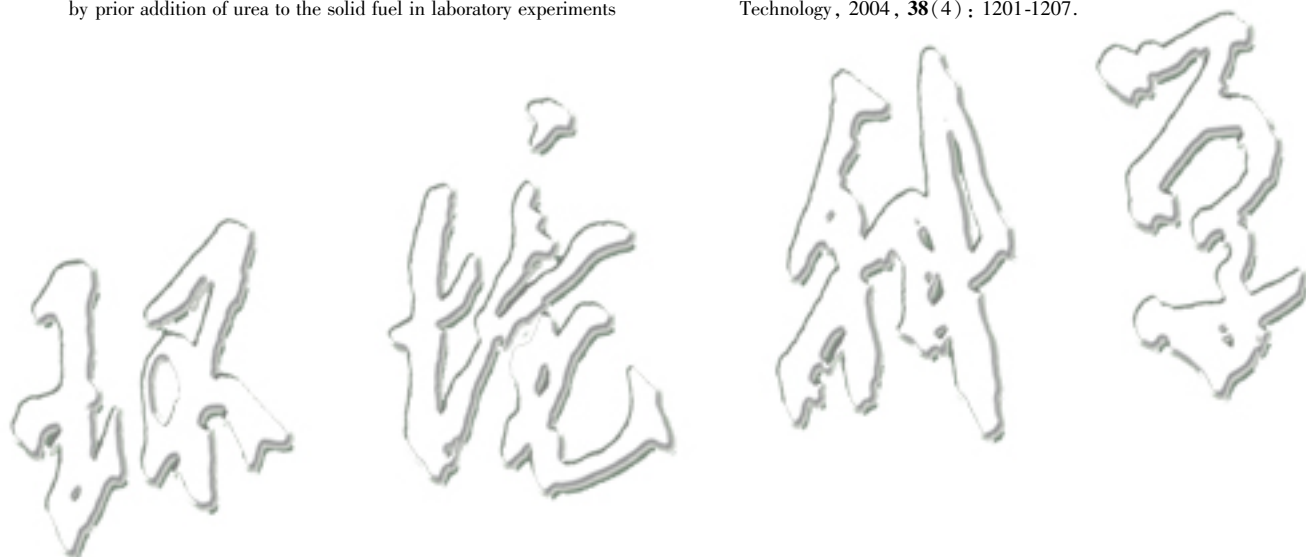
(3)鉴于目前我国部分农村生活垃圾焚烧炉烟气中二噁英不达标排放的情况,建议分布于农村的小型垃圾焚烧炉优先考虑采用硫及硫化物抑制技术 + 活性炭固定床反应器技术组合。

参考文献:

[1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴2018[M]. 北

- 京: 中国统计出版社, 2019.
- National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China statistical yearbook 2018 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2019.
- [2] Wang P, Hu Y N, Cheng H F. Municipal solid waste (MSW) incineration fly ash as an important source of heavy metal pollution in China [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **252**: 461-475.
- [3] 齐丽, 任玥, 刘爱民, 等. 北京市某垃圾焚烧厂周边大气二噁英污染特征及暴露风险[J]. *环境科学*, 2017, **38**(4): 1317-1326.
- Qi L, Ren Y, Liu A M, *et al.* Pollution characteristics of PCDD/Fs in ambient air and exposure risk assessment around a municipal solid waste incinerator in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(4): 1317-1326.
- [4] Tuomisto J. Dioxins and dioxin-like compounds: toxicity in humans and animals, sources, and behaviour in the environment [J]. *WikiJournal of Medicine*, 2019, **6**(1): 8.
- [5] GB 18485-2001, 生活垃圾焚烧污染控制标准[S]. GB 18485-2001, Standard for pollution control on the municipal solid waste incineration[S].
- [6] 雷鸣, 谢冰, 海景, 等. 生活垃圾焚烧炉湿法洗涤后烟气二噁英的排放特征[J]. *环境工程*, 2019, **37**(7): 153-158.
- [7] 王书肖, 郝吉明, 陆永琪, 等. 火电厂烟气脱硫技术的模糊综合评价[J]. *中国电力*, 2001, **34**(12): 58-62.
- Wang S X, Hao J M, Lu Y Q, *et al.* Comprehensive fuzzy evaluation of flue gas desulfurization technologies for thermal power plant [J]. *Electric Power*, 2001, **34**(12): 58-62.
- [8] 于超, 王书肖, 郝吉明. 基于模糊评价方法的燃煤电厂氮氧化物控制技术评价[J]. *环境科学*, 2010, **31**(7): 1464-1469.
- Yu C, Wang S X, Hao J M. Comprehensive fuzzy evaluation of nitrogen oxide control technologies for coal-fired power plants [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(7): 1464-1469.
- [9] 李楠. 火力发电厂超低排放改造项目综合评估研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2017.
- Li N. Research on the comprehensive evaluation of the ultra low emission reconstruction project of thermal power plant [D]. Beijing: North China Electric Power University(Beijing), 2017.
- [10] 邓双, 孙现伟, 束疆, 等. 燃煤电厂烟气一次PM_{2.5}控制技术的综合评估[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(3): 1157-1164.
- Deng S, Sun X W, Shu Y, *et al.* Comprehensive assessment of primary PM_{2.5} control technologies for coal-fired power plants [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(3): 1157-1164.
- [11] 任岩军, 张铮, 何京东, 等. 我国燃煤电厂大气汞控制技术综合评估与对策探讨[J]. *环境科学研究*, 2020, **33**(4): 841-848.
- Ren Y J, Zhang Z, He J D, *et al.* Comprehensive evaluation and countermeasures of atmospheric mercury pollution control technology in coal-fired power plants [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(4): 841-848.
- [12] Zhao J C, Tian F W, Yan S, *et al.* Evaluation of antioxidative effects of lactobacillus plantarum with fuzzy synthetic models[J]. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2018, **28**(7): 1052-1060.
- [13] 李春芳, 王菲, 曹文涛, 等. 龙口市污水灌溉区农田重金属来源、空间分布及污染评价[J]. *环境科学*, 2017, **38**(3): 1018-1027.
- Li C F, Wang F, Cao W T, *et al.* Source analysis, spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in sewage irrigation area farmland soils of Longkou city [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(3): 1018-1027.
- [14] Akter M, Jahan M, Kabir R, *et al.* Risk assessment based on fuzzy synthetic evaluation method [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **658**: 818-829.
- [15] 许晓芳, 谭全银, 刘丽丽, 等. 基于层次分析法的医疗废物处置技术评价[J]. *环境科学*, 2018, **39**(12): 5717-5722.
- Xu X F, Tan Q Y, Liu L L, *et al.* Assessment of medical waste disposal technologies based on the AHP [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(12): 5717-5722.
- [16] Wu G L, Sun Y Z, Xie J H, *et al.* Research on pollution prevention and control BAT of PCDD/Fs in secondary copper industry [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **181**: 308-311.
- [17] 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 H, *et al.* Evaluation and Selection of VOCs treatment technologies in packaging and printing industry [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(7): 2503-2507.
- [18] 刘惠, 孔丝纺, 刘阳生, 等. 垃圾焚烧过程中二噁英污染的控制技术[J]. *环境工程*, 2013, **31**(S1): 487-492.
- Liu H, Kong S F, Liu Y S, *et al.* Control technology of dioxins pollution in waste incinerator [J]. *Environmental Engineering*, 2013, **31**(S1): 487-492.
- [19] Vehlow J. Reduction of dioxin emissions from thermal waste treatment plants: a brief survey [J]. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2012, **11**(4): 393-405.
- [20] 陆胜勇. 垃圾和煤燃烧过程中二噁英的生成、排放和控制机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- Liu S Y. Mechanism and experimental study on PCDD/Fs formation, emission and control during solid waste and coal combustion processes [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004.
- [21] 严密, 杨杰, 李晓东, 等. 含硫化物对氯苯和二噁英的抑制作用[J]. *环境污染与防治*, 2014, **36**(5): 5-8.
- Yan M, Yang J, Li X D, *et al.* Inhibition of sulfur containing compounds on formation of chlorobenzenes and PCDD/Fs [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2014, **36**(5): 5-8.
- [22] Ruokojärvi P H, Asikainen A H, Tuppurainen K A, *et al.* Chemical inhibition of PCDD/F formation in incineration processes [J]. *Science of the Total Environment*, 2004, **325**(1-3): 83-94.
- [23] Pandelova M, Lenoir D, Schramm K W. Inhibition of PCDD/F and PCB formation in co-combustion [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, **149**(3): 615-618.
- [24] 雷鸣. 小型农村生活垃圾热处理炉二噁英及重金属的排放特性及控制研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- Lei M. Emission characteristics and control of PCDD/Fs and heavy metals from small-scale thermal treatment furnace for disposing rural domestic solid waste [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [25] 陈宋璇, 黎小保. 生活垃圾焚烧发电中二噁英控制技术研究进展[J]. *环境科学与管理*, 2012, **37**(5): 89-93.
- Chen S X, Li X B. Research progress on dioxin control solution in waste incineration power plants [J]. *Environmental Science and Management*, 2012, **37**(5): 89-93.
- [26] 张刚. 城市固体废物焚烧过程二噁英与重金属排放特征及控制技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- Zhang G. Study on PCDD/F and heavy metal emission characteristics and control technology during municipal solid

- waste incineration [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [27] 孙宏. 生活垃圾焚烧过程中二的生成及控制[J]. 环境卫生工程, 2006, **14**(2): 12-14.
- Sun H. Control solution and formation mechanism of dioxin in MSW incineration [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2006, **14**(2): 12-14.
- [28] 潘雪君, 杨国华, 黄三, 等. 焚烧烟气中二英类控制技术研究进展[J]. 环境科学与技术, 2012, **35**(7): 122-125.
- Pan X J, Yang G H, Huang S, *et al.* Advance on dioxins control methods in waste incineration plant [J]. Environmental Science & Technology, 2012, **35**(7): 122-125.
- [29] 黄蕾. 垃圾焚烧过程中二噁英低温热处理及紫外光解试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [30] Hung P C, Chang S H, Chi K H, *et al.* Degradation of gaseous dioxin-like compounds with dielectric barrier discharges [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **182**(1-3): 246-251.
- [31] Samaras P, Blumenstock M, Lenoir D, *et al.* PCDD/F inhibition by prior addition of urea to the solid fuel in laboratory experiments and results statistical evaluation [J]. Chemosphere, 2001, **42**(5-7): 737-743.
- [32] Fu Y J, Li X D, Chen T, *et al.* PCDD/Fs' suppression by sulfur-amine/ammonium compounds [J]. Chemosphere, 2015, **123**: 9-16.
- [33] 邵旋. 活性炭和矿物材料对1,2,3,4-四氯苯的吸附脱除规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
- Shao X. Study on adsorption and removal of 1, 2, 3, 4-Tetrachlorobenzene by activated carbon and mineral materials [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [34] Yang C C, Chang S H, Hong B Z, *et al.* Innovative PCDD/F-containing gas stream generating system applied in catalytic decomposition of gaseous dioxins over V_2O_5 - WO_3 /TiO₂-based catalysts [J]. Chemosphere, 2008, **73**(6): 890-895.
- [35] Karademir A, Bakoglu M, Taspinar F, *et al.* Removal of PCDD/Fs from flue gas by a fixed-bed activated carbon filter in a hazardous waste incinerator [J]. Environmental Science & Technology, 2004, **38**(4): 1201-1207.



CONTENTS

Characterization of Two Heavy Pollution Episodes in Tianjin in 2020	XIAO Zhi-mei, XU Hong, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (3879)
Analysis of Characteristics of Water-soluble Ions in PM _{2.5} in Chengdu Based on the MARGA	YIN Han-mei, CHEN Jun-hui, FENG Xiao-qiong, <i>et al.</i> (3889)
Seasonal Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} in Suqian City	MA Hong-lu, ZHAO Xin, LU Jian-gang, <i>et al.</i> (3899)
Characterization and Size Distribution of Carbonaceous Aerosols at Mountain Dinghu	LI An-na, WEN Tian-xue, HUA Wei, <i>et al.</i> (3908)
Characteristics and Source Apportionment of Carbon Components in Road Dust in Anshan	LIN Zi, JI Ya-qin, LIN Yu, <i>et al.</i> (3918)
Spectral Characteristics and Source Analysis of WSOC of PM _{2.5} in Winter of Xi'an	YANG Yi, ZHANG Ya-nan, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3924)
Observation of Aerosol Optical Properties and New Particle Formation in the Yangtze River Delta	DU Ying-ying, CHEN Jun, ZHANG Jia-luo, <i>et al.</i> (3932)
Component Characteristics and Source Appointment of Volatile Organic Compounds in Lianyungang City	CUI Jin-meng, WANG Ti-jian, LI Qiu-tong, <i>et al.</i> (3941)
Seasonal Pollution Characteristics and Analysis of the Sources of Atmospheric VOCs in Chengdu Urban Area	WANG Cheng-hui, CHEN Jun-hui, HAN Li, <i>et al.</i> (3951)
Ozone Sensitivity Analysis and Emission Controls in Dezhou in Summer	YAN Ru-sha (3961)
Inventory and Distribution Characteristics of China's Thermal Power Emissions Under Ultra-Low Reconstruction	QU Jia-bao, WANG Peng, BO Xin, <i>et al.</i> (3969)
Establishment and Spatial Distribution of Anthropogenic Ammonia Emission Inventory in Zhejiang Province	ZHAO Rui-dong, YU Xing-na, HOU Xin-hong, <i>et al.</i> (3976)
Evaluation and Screening of Dioxin Control Technology in Waste Incineration Flue Gas	ZHAO Si-lan, XI Peng-fei, GUO Feng-yan, <i>et al.</i> (3985)
Characteristics of Stable Isotopes and Moisture Sources of Two Typical Precipitation Events in Lanzhou City	HAN Ting-ting, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i> (3993)
Hydrochemical Characteristics and Possible Controls of the Surface Water in Ranwu Lake Basin	ZHANG Tao, WANG Ming-guo, ZHANG Zhi-yin, <i>et al.</i> (4003)
Chemical Evolution and Formation Mechanism of Groundwater in Hetao Irrigation Area	CUI Jia-qi, LI Xian-yue, SHI Hai-bin, <i>et al.</i> (4011)
Chemical Characteristics of Groundwater and Material Sources Analysis in Shiqi River Basin	LI Xiao, YU Shi, LI Liang, <i>et al.</i> (4021)
Spatial-temporal Variations and Driving of Nitrogen and Phosphorus Ratios in Lakes in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River	JI Peng-fei, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (4030)
Spatiotemporal Variations in Nutrient Loads in River-lake System of Changdang Lake Catchment in 2016-2017	LI Xin-yan, LI Heng-peng, JIANG San-yuan, <i>et al.</i> (4042)
Influence of <i>Potamogeton crispus</i> on Lake Water Environment and Phytoplankton Community Structure	KANG Li-juan, XU Hai, ZOU Wei, <i>et al.</i> (4053)
Phylogenetic Processes and Key Driving Factors of Bacterial Communities in Jinze Reservoir	LIU Ming-kun, TONG Jun, ZHU Hui-feng, <i>et al.</i> (4062)
Distribution Characteristics of Per-/polyfluoralkyl Substances in River Sediments Around Typical Fluorine Industrial Parks	SUN Lin-ting, ZHAO Zhen, TANG Jian-hui (4069)
Microplastics-Induced Shifts of Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in River Water	ZHOU Xin-yuan, WANG Yan-zi, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4076)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Lianhua Reservoir	LIAO Jie, WEI Xiao-qin, XIAO Yan-qin, <i>et al.</i> (4081)
Intraspecific Variation in Growth and Alkaline Phosphatase Activity of <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i> Strains in Response to Different Phosphorus Concentrations and Sources	YE Jin-mei, ZHAO Li, LUO Xu, <i>et al.</i> (4088)
Simulation of Water Quality Response of Guishui River Wetland Plants and Water Diversion	LI Ya-juan, DU Yan-liang, BI Er-ping, <i>et al.</i> (4095)
Performance Assessment of Field-scale Dry Grass Swale with Shallow Substrate Layer	ZHANG Jia-wei, LI Tian, ZHANG Ting-xiu (4105)
Transition of Particulate Pollutant in the Parcel-based Catchment of Sponge City	LI Jia, XIE Wen-xia, JIANG Zhi-hui, <i>et al.</i> (4113)
Adsorption of Sb(V) in Water by Natural Pyrite: Performance and Mechanism	SHI Song, WU Qian-yuan, LI Xin-zheng, <i>et al.</i> (4124)
Treatment of Wastewater Containing Naphthalene Sulfonic Acid by Persulfate Oxidation	ZHANG Jin-men, LU Jun, LIU Xiao-chen, <i>et al.</i> (4133)
Effect of Temperature on Performance and Microbial Community Structure of Anaerobic Biofilter-Treated Domestic Wastewater	LIU Zhi-bin, LIU Xiu-hong, ZHOU Tong, <i>et al.</i> (4141)
Start-up and Optimization of Denitrifying Phosphorus Removal in ABR-MBR Coupling Process	MIAO Xin-nian, WANG Qian, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (4150)
Adaptability of Completely Autotrophic Nitrogen Removal over Granular Sludge to Low-Strength at Low Temperature	LIU Yu-xin, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4161)
Discussion on Key Issues of Geochemical Monitoring of Soil Heavy Metal in Xiongan New District	GUO Zhi-juan, ZHOU Ya-long, YANG Zheng, <i>et al.</i> (4169)
Quantitative Assessment of Human Health Risks Based on Soil Heavy Metals and PAHs Sources: Take a Polluted Industrial Site of Beijing As an Example	WU Zhi-yuan, ZHANG Li-na, XIA Tian-xiang, <i>et al.</i> (4180)
Ecological Risk Assessment of Heavy Metals at Township Scale in the High Background of Heavy Metals, Southwestern, China	ZHANG Fu-gui, PENG Min, WANG Hui-yan, <i>et al.</i> (4197)
Potential of Accumulation and Application of Dominant Plants in Lanping Lead-zinc Mine, Yunnan Province	ZHANG Long, ZHANG Yun-xia, SONG Bo, <i>et al.</i> (4210)
Key Growth Stage of Pb Accumulation in Rice Through a Hydroponic Experiment with Pb Stress	HU Yu-dan, ZHOU Hang, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (4218)
Effect of Nutrient Regulation and Control on Cd Accumulation Efficiency of <i>Hylotelephium spectabile</i> Under Field Conditions	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i> (4226)
Effects of <i>Eucalyptus</i> Branches Biochar Application on Soil Physicochemical Properties of Acidified Soil in a <i>Eucalyptus</i> plantation in Northern Guangxi	DAUN Chun-yan, SHEN Yu-yi, XU Guang-ping, <i>et al.</i> (4234)
Dynamic Effects of Direct Returning of Straw and Corresponding Biochar on Acidity, Nutrients, and Exchangeable Properties of Red Soil	YANG Cai-di, LU Sheng-gao (4246)
Different Responses of Soil Microbial Community Structure to Irrigation with Treated Wastewater from Domestic and Industrial Sources	WANG Yan, CHENG Dong-hui, TAN Wen-bing, <i>et al.</i> (4253)
Effects of Manure and Organic Fertilizer Application on Soil Microbial Community Diversity in Paddy Fields	LI Peng, WU Jian-qiang, SHA Chen-yan, <i>et al.</i> (4262)
Effects of Land Use Changes on Soil Bacterial Community Diversity in the Riparian Wetland Along the Downstream of Songhua River	ZHANG Tuo, XU Fei, HUAI Bao-dong, <i>et al.</i> (4273)
Response of Soil Bacterial Community Structure to Precipitation Change in Grassland of Loess Plateau	LI Na, WANG Bao-rong, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (4284)
Effect of Land-use on Soil Fungal Community Structure and Associated Functional Group in Huixian Karst Wetland	CHENG Yue-yang, JIN Zhen-jiang, WANG Xiao-tong, <i>et al.</i> (4294)
Interactions of Fungi Community and Relationship with the Carbon Structure in Arable Mollisols with Gradient Organic Matter Content	SHANG Qiu-tong, HUANG Rui-lin, NI Hao-wei, <i>et al.</i> (4305)
Diversity of Soil Eukaryotic Microbes in Different Succession Stages in Maolan Karst Forest of Guizhou	WANG Xian, LONG Jian, LI Juan, <i>et al.</i> (4314)
Adsorption of Cadmium and Arsenic by Corn Stalk Biochar Solidified Microorganism	LIU Yu-ling, ZHU Hu-cheng, PENG Ou, <i>et al.</i> (4322)
Mechanism of Inorganic Nitrogen Transformation and Identification of Nitrogen Sources in Water and Soil	LIANG Xing, SUN Li-qun, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4333)