

目次

持久性、迁移性和潜在毒性化学品环境健康风险与控制研究现状及趋势分析	张少轩, 陈安娜, 陈成康, 景侨楠, 刘建国 (3017)
我国厨余垃圾资源化技术的多维绩效评价	杨光, 史波芬, 周传斌 (3024)
基于 MSPA 和电路理论的京津冀城市群热环境空间网络	乔治, 陈嘉悦, 王楠, 卢应爽, 贺瞳, 孙宗耀, 徐新良, 杨浩, 李莹, 王方 (3034)
城市空间格局与热环境响应关系:以合肥市为例	陈媛媛, 姚侠妹, 偶春, 张清怡, 姚晓洁 (3043)
天津市“十三五”期间 PM _{2.5} 减排效果评估	肖致美, 徐虹, 蔡子颖, 张裕芬, 刘茂辉, 孙猛, 李鹏, 杨宁, 戴运峰 (3054)
清洁取暖对保定市采暖期 PM _{2.5} 中碳质气溶胶的影响	罗宇睿, 张凯, 赵好希, 任家豪, 段菁春, 李欢欢, 关键, 郭志强, 李博文 (3063)
南京地区细颗粒物污染输送影响及潜在源区	谢放尖, 郑新梅, 窦焱焱, 杨峰, 刘春蕾, 李洁, 谢轶嵩, 王艳, 胡建林, 陈长虹 (3071)
大气环流型对珠三角 2015~2020 年臭氧变化的影响	汪瑶, 刘润, 辛繁 (3080)
热带气旋对海南岛臭氧污染的影响分析	符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文师 (3089)
基于 CMAQ 和 HYSPLIT 模式的日照市夏季臭氧污染成因和来源分析	林鑫, 全纪龙, 王伊凡, 陈羽翔, 刘永乐, 张鑫, 敖丛杰, 刘浩天 (3098)
2016~2020 年成都市控制 PM _{2.5} 和 O ₃ 污染的健康效益评价	张莹, 田琪琪, 魏晓钰, 张少波, 胡文东, 李明刚 (3108)
深圳市 2022 年春季新冠疫情管控期间空气质量分析	刘婵芳, 张傲星, 房庆, 叶毓婧, 杨红龙, 陈炯恺, 吴雯潞, 侯岳, 莫佳佳, 傅宗玖 (3117)
贵州省生物质燃烧源大气污染物排放清单	王艳妮, 杨敬婷, 黄贤峰, 程燕, 陆标, 顾兆林 (3130)
西安市大气降水的主要化学组分及其来源	周东, 黄智浦, 李思敏, 王森, 牛振川, 熊晓虎, 冯雪 (3142)
宜昌市大气微塑料的分布、呼吸暴露及溯源	刘立明, 王超, 巩文雯, 陆安祥, 任东, 涂清, 贾漫珂 (3152)
雅鲁藏布江水化学演变规律	江平, 张全发, 李思悦 (3165)
无定河流域地表水硝酸盐浓度的时空分布特征及来源解析	徐奇峰, 夏云, 李书鉴, 王万洲, 李志 (3174)
太浦河水体与沉积物中重金属的季节变化特征与污染评价	罗鹏程, 涂耀仁, 孙婷婷, 刘生辉, 高佳欣, 寇佳怡, 顾心彤, 段艳平 (3184)
北京市北运河水体中抗生素污染特征及风险评估	蒋宝, 隋珊珊, 孙成一, 王亚玲, 荆降龙, 凌文翠, 李珊珊, 李国傲 (3198)
氮和氧同位素示踪伊洛河河水硝酸盐来源及转化过程	郭文静, 张东, 蒋浩, 吴洋洋, 张郭妙, 段慧真, 许梦军, 麻冰涓, 陈昊, 黄兴宇 (3206)
淮河下游湖泊表层水和沉积物中 PPCPs 分布特征及风险评估	武宇圣, 黄天寅, 张家根, 田永静, 庞燕, 许秋瑾 (3217)
西宁市浅层地下水化学特征及形成机制	刘春燕, 于开宁, 张英, 荆继红, 刘景涛 (3228)
叶尔羌河流域平原区地下水污染风险评价	闫志云, 曾妍妍, 周金龙, 孙英, 马常莲 (3237)
密云水库细菌群落组成结构及影响因素	陈颖, 王佳文, 梁思航, 陈倩 (3247)
可见光激发下模拟海水中四环素光降解的机制和路径	许恒韬, 付小航, 丰卫华, 王挺 (3260)
纳米零价铁改性生物炭对水中氨氮的吸附特性及机制	陈文静, 石峻岭, 李雪婷, 张李金, 刘富强, 陈正祝, 庞维海, 杨殿海 (3270)
高锰酸钾改性椰壳生物炭对水中 Cd(II)和 Ni(II)的去除性能及机制	张凤智, 王敦球, 曹星洋, 刘桥京, 岳甜甜, 刘立恒 (3278)
铜改性净水污泥水热炭对水体中磷的吸附特性及底泥内源磷的固定	何李文泽, 陈钰, 孙飞, 李艳君, 杨顺生, 张志鹏 (3288)
城镇生活污水处理厂出水硝酸盐浓度及同位素组成的影响因素	张东, 葛文彪, 赵爱萍, 高振朋, 陈昊, 张琮, 蒋浩, 吴文阳, 廖琪, 李成杰, 黄兴宇, 麻冰涓 (3301)
基于 Meta 分析的污水处理工艺对微塑料去除效果影响	符立松, 侯磊, 王艳霞, 李晓琳, 王万宾, 梁启斌 (3309)
我国自然生态系统氮沉降临界负荷评估	黄静文, 刘磊, 颜晓元, 迺超普 (3321)
气候变化和人类活动对东部沿海地区 NDVI 变化的影响分析	金岩松, 金凯, 王飞, 刘春霞, 秦鹏, 宗全利, 刘佩莉, 陈明利 (3329)
基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的环杭州湾生态系统碳储量	丁岳, 王柳柱, 桂峰, 赵晨, 朱望远 (3343)
河西走廊中段荒漠绿洲土壤生态化学计量特征	孙雪, 龙永丽, 刘乐, 刘继亮, 金丽琼, 杜海峰, 陈凌云 (3353)
乌梁素海东部流域非生季草地土壤细菌群落结构的垂向差异	李文宝, 张博尧, 史玉娇, 郭鑫, 李兴月 (3364)
芦芽山华北落叶松林土壤剖面细菌群落分布格局	毛晓雅, 刘晋仙, 贾彤, 吴铁航, 柴宝峰 (3376)
植被类型对黄土高原露天矿山复垦土壤碳循环功能基因的影响	赵姣, 马静, 朱燕峰, 于昊辰, 张琦, 陈浮 (3386)
施用生物炭对麦田土壤细菌群落多样性和冬小麦生长的影响	姚丽茹, 李伟, 朱良正, 曹布仓, 韩娟 (3396)
甜龙竹不同种植年限对土壤真菌群落的影响	朱书红, 辉朝茂, 赵秀婷, 刘蔚漪, 张仲富, 刘会会, 张文君, 朱礼月, 涂丹丹 (3408)
生物炭对热带地区辣椒种植土壤 N ₂ O 排放及其功能基因的影响	陈琦琦, 王紫君, 陈云忠, 王誉琴, 朱启林, 胡天怡, 胡煜杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3418)
覆膜和有机无机配施对夏玉米农田温室气体排放及水氮利用的影响	蒋洪利, 雷琪, 张彪, 吴淑芳 (3426)
不同类型地膜覆盖对土壤质量、根系生长和产量的影响	穆晓国, 高虎, 李梅花, 赵欣茹, 郭宁, 靳磊, 李建设, 叶林 (3439)
基于 PMF 模型的某铅锌冶炼城市降尘重金属污染评价及来源解析	陈明, 王琳玲, 曹柳, 李名闯, 申哲民 (3450)
云南 5 城市道路扬尘 PM _{2.5} 中重金属含量表征及健康风险	韩新宇, 郭晋源, 史建武, 李定霜, 王怡明, 宁平 (3463)
兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属污染特征及风险评价	李军, 李开明, 王晓槐, 焦亮, 臧飞, 毛潇萱, 杨云钦, 台喜生 (3475)
PMF 和 RF 模型联用的土壤重金属污染来源解析与污染评价:以西北某典型工业园区为例	高越, 吕童, 张鑫凯, 张博哈, 毕思琪, 周旭, 张炜, 曹红斌, 韩增玉 (3488)
基于 APCS-MLR 受体模型和地统计法的矿区周边农用地土壤重金属来源解析	张传华, 王钟书, 刘力, 刘燕 (3500)
PCA-APCS-MLR 和地统计学的典型农田土壤重金属来源解析	王美华 (3509)
三峡库区稻田土壤重金属污染特征及风险评价	刘娅君, 李彩霞, 梅楠, 张美平, 张成, 王定勇 (3520)
皖江经济带耕地重金属健康风险评价及环境基准	刘海, 魏伟, 宋阳, 潘杨, 黄健敏 (3531)
张家口市万全区某种植区土壤重金属污染评价与来源分析	安永龙, 殷秀兰, 李文娟, 金爱芳, 鲁青原 (3544)
滁州市表层土壤重金属含量特征、源解析及污染评价	汤金来, 赵宽, 胡睿鑫, 徐涛, 王宜萱, 杨扬, 周葆华 (3562)
矿业废弃地重金属形态分布特征与迁移转化影响机制分析	魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思, 杨慧丽 (3573)
基于成土母质的矿产资源基地土壤重金属生态风险评价与来源解析	卫晓峰, 孙紫坚, 陈自然, 魏浩, 孙厚云, 刘卫, 傅大庆 (3585)
不同种类蔬菜重金属富集特征及健康风险	祁浩, 庄坚, 庄重, 王琪, 万亚男, 李花粉 (3600)
山东省典型灌区土壤-小麦重金属健康风险评估	王菲, 费敏, 韩冬锐, 李春芳, 曹文涛, 姚磊, 曹见飞, 吴泉源 (3609)
基于机器学习方法的小麦镉富集因子预测	牛硕, 李艳玲, 杨阳, 商艳萍, 王天齐, 陈卫平 (3619)
《环境科学》征订启事(3062) 《环境科学》征稿简则(3116) 信息(3164, 3259, 3572)	

我国厨余垃圾资源化技术的多维绩效评价

杨光^{1,2}, 史波芬³, 周传斌^{1,2*}

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 101408; 3. 中国城市建设研究院有限公司, 北京 100032)

摘要: 随着我国大力推动生活垃圾分类管理工作, 厨余垃圾的资源化利用受到越来越多关注。厨余垃圾资源化技术已有包括厌氧消化处理、好氧生物处理和昆虫饲料转化等类型, 但在已有应用案例中存在资源化程度低、环境影响显著和经济效益差等诸多问题, 缺乏技术绩效的系统化分析和综合性评价。为此, 研究面向厨余垃圾资源化技术应用的全生命周期过程, 构建了资源效率、环境影响、经济可行和社会效应的多维绩效评价指标体系(包括 21 项指标), 以我国的 14 项典型技术应用项目为案例开展量化综合评价研究。结果表明, 厌氧消化和昆虫饲料转化处理技术的得分分别为 58.39 分和 59.65 分, 高于好氧生物处理(49.16 分); 按细分技术类型, 集中式黑水虻转化和中温湿式厌氧工艺得分较高, 分别为 67.14 分和 60.82 分。按技术的处理规模和设施分布方式, 集中式处理技术在资源效率和经济效益维度上分别比分散式技术高出 13% 和 62%; 分散式处理技术在环境影响和社会效应维度上比集中式高出 8% 和 34%。在厨余垃圾资源化实践中, 应结合当地的厨余垃圾理化性质、生活垃圾分类收集工作推进情况、财政承担能力和收运距离等多因素综合考量, 因地制宜的选择适宜技术路线。

关键词: 厨余垃圾; 技术; 多维绩效评价; 厌氧消化; 好氧生物处理; 昆虫饲料转化

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)06-3024-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202206325

Assessment of the Multidimensional Performances of Food Waste Utilization Technologies in China

YANG Guang^{1,2}, SHI Bo-fen³, ZHOU Chuan-bin^{1,2*}

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China; 3. China Construction Technology Consulting Co., Ltd., Beijing 100032, China)

Abstract: In recent years, China has made great efforts to carry out source-separation in municipal solid waste management; in particular, the utilization of food waste has received increasing attention. Food waste-utilizing technologies, including anaerobic digestion, aerobic biological treatment, and insect feed conversion, are currently applied in China. However, in the existing cases, there were several disadvantages, such as a low rate of utilization, significant environmental impacts, poor economic benefits, etc., as well as a lack of systematic analysis and comprehensive assessment of the performances of food waste utilization technologies. In this study, a four-dimensional performance assessment method (resource efficiency, environmental impact, economic feasibility, and social effect, with 21 indicators) was established for assessing the life cycle process of food waste utilization technologies. We collected detailed information of 14 typical food waste utilization cases in China, and the results showed that the average scores of anaerobic digestion and insect feed conversion were 58.39 and 59.65, higher than those of the aerobic biological treatment (49.16). The highest scores among all subdivision technologies were centralized black soldier fly conversion and mesophilic wet anaerobic digestion, which were 67.14 and 60.82, respectively. With respect to the technologies of different treatment capacities and distribution modes, i.e., centralized and decentralized technologies, the resource efficiency and economic benefit scores of the former were 13% and 62% higher than those of the latter, whereas the environmental impacts and social effect scores of the latter were 8% and 34% greater than those of the former, respectively. In practice, the utilization technology of food waste should be chosen according to local conditions, such as the physical and chemical properties of food waste, the classification of municipal solid waste, financial affordability, collection and transportation distance, etc.

Key words: food waste; technology; multidimensional performance assessment; anaerobic digestion; aerobic biological treatment; insect feed conversion

近年来,我国大力推进生活垃圾源头分类管理,旨在提高生活垃圾的资源化利用水平^[1],其中源头单独分类收集的厨余垃圾处理和利用尤其受到关注^[2,3]。厨余垃圾指居民日常生活及食品加工、饮食服务和单位供餐等活动中产生的有机垃圾,可分为家庭厨余垃圾、餐厨垃圾和其他厨余垃圾^[4]。据测算,我国生活垃圾清运量中的厨余垃圾占比约为 53.7%,总量约为 1.15 亿 t·a⁻¹^[5];而餐馆和食堂等单元产生的餐厨垃圾可能达到 0.6 亿 t·a⁻¹^[6]。厨余垃圾的总有机质含量一般在 10%~20% (湿基),干基有机碳含量达 50%^[7,8],氮、磷和钾等营养元素

含量约为 2.9%、2.8% 和 2.1% (湿基)^[8,9],具有一定资源化利用潜力^[10,11]。在全面实行垃圾分类管理制度之后,虽有部分城市已在规划建设专门的厨余垃圾处理设施,但是目前我国主要的厨余垃圾处理方式仍是卫生填埋或焚烧^[12],厨余垃圾中生物质资源的利用水平还较低^[13,14]。

厨余垃圾的资源化利用是垃圾分类管理和“无

收稿日期: 2022-06-30; 修订日期: 2022-08-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1903601); 万科公益基金会项目

作者简介: 杨光(1995~),男,博士研究生,主要研究方向为厨余垃圾资源化, E-mail: 2961683794@qq.com

* 通信作者, E-mail: chzhou@rcees.ac.cn

废城市”建设下的必然趋势,目前已有厌氧消化、好氧生物处理和昆虫饲料转化等技术工艺投入应用实践^[15~17].厌氧消化处理技术指在无氧或缺氧环境下对有机物进行转化,最终生成沼气、沼液和沼渣的过程^[18],是当前主流的集中式厨余垃圾处理技术,应用规模一般在 $100 \sim 400 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$.按照反应温度可分为高温(发酵温度 $50 \sim 60^\circ\text{C}$)、中温($30 \sim 35^\circ\text{C}$)和常温(与自然环境温度相同)厌氧消化;按照原料含固率(TS)可分为干式(TS在 $20\% \sim 35\%$ 之间)和湿式($\text{TS} < 15\%$)厌氧消化^[19].好氧生物处理技术是指在供氧条件下,借助好氧微生物(如细菌和真菌等)降解有机物的过程^[20],可应用于集中式工业堆肥($50 \sim 500 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$),也可应用于分散式堆肥($0.1 \sim 20 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$),有生化处理机、条垛堆肥、阳光房和简易堆肥等形式.昆虫饲料转化是将厨余垃圾作为昆虫食物,进而生产高品质生物蛋白质,已有蚯蚓、黑水虻、蝇类和黄粉虫等昆虫类型,产物包括虫体和虫粪^[21].昆虫饲料转化即可应用于集中式生产($50 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ 左右),也可应用于社区分散处理(约 $1 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$).此外,还有热解、气化和催化产氢等技术用于厨余垃圾处理^[19,22],但尚未投入大规模生产应用.厨余垃圾资源化技术种类众多,在原理、规模和适用性等方面存在差异,系统全面地认识不同类型的技术的绩效优缺点,是规划、设计、运维和管理厨余垃圾资源化设施的关键^[23].有研究关注厌氧消化和好氧生物处理技术的碳排放等环境影响指标^[24,25]和经济效益指标^[23],但已有技术评价在综合性指标、系统化分析和数据全面性等方面还有待改进.

目前已有技术经济分析(technology economy analysis, TEA)、生命周期评价(life cycle assessment, LCA)和专家评估法等方法应用于技术绩效评价^[26,27].LCA常用于产品或服务“从摇篮到坟墓”全过程的环境影响,已有研究将其用于垃圾处理和资源化技术评价^[28].Levis等^[26]将LCA应用于厨余垃圾不同处理方式的环境影响比较,认为厌氧消化技术的温室气体、 NO_x 和 SO_2 等排放量相对较低.TEA通过分析比较不同技术方案的经济可行性水平,寻求经济效益的最大化^[29].有研究应用TEA比较了利用厨余垃圾厌氧消化生产5种资源化产物的经济效益^[30],认为从投资回报率上看,生产聚乳酸>生产氢气甲烷混合物>生产乙酸丁酸>生产乳酸>生产甲烷.技术绩效评价一般通过文献查阅、实地考察、实验测定和专家评定等手段,收集兼具时效性和全面性的本土化数据^[31,32].由于厨余垃圾资源化利用技术应用(特别是规模化应用)在

我国还刚起步,厨余垃圾资源化技术的应用案例还不多见,研究视角也仅落在对个别案例的评估,缺乏全面性的数据参数和标准化的多维绩效评价框架.本研究基于全生命周期思想,从资源效率、环境影响、经济可行和社会效应这4个维度(REES),筛选了适宜厨余垃圾资源化技术评价的21项指标,构建了厨余垃圾资源化技术的综合评价方法,对厌氧消化、好氧生物处理和昆虫饲料转化等典型技术路线进行绩效评价和短板诊断,旨在为我国厨余垃圾处理技术的工艺选择、规划设计和运维管理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 系统边界和功能单元

基于全生命周期思想,技术评价边界包括厨余垃圾输入(进场)到资源化产品及各类废弃物输出的全过程(见图1).厨余垃圾资源化技术评价的功能单元为1t厨余垃圾(含难生化降解的杂质).其中,输入包括厨余垃圾、能源、辅料、水和土地资源等,输出包括资源化产品和废气、废水和废渣等废弃物.在技术评价过程中,环境影响追溯到每一项投入辅料或能量的“摇篮”阶段;每一项资源化产品的环境效益,以对应的等量替代资源开采量计算.其中,堆肥产品如有机肥和土壤调理剂可认为等量替代了化肥的生产^[33~35],本研究中将堆肥产品中磷和钾元素分别按照替代矿物开采过程计算环境效益;沼气和油脂等资源化产品按照等量替代的原则分别替代天然气和柴油的生产过程,其中沼气中甲烷含量采取55%计算,天然气中甲烷含量按照85%计算,油脂转化生物柴油的效率按照80%计算.技术应用案例中包含污水处理设施的,按照《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918)二级排放标准计算污染物排放量;污水外排至厂界外的污水处理厂的,按照排出厂界时的总量与浓度计算,对于废水处理过程中的物质投入和产生的废弃物不做考虑.废气排放按照环评报告数据计算;厨余垃圾处理过程产生的废渣由于理化性质和后续处理途径难以确定,在本文中不考虑其产热产电效益和废气等环境排放.

各项厨余垃圾资源化技术投入的物料、资源化产品和污染物的环境影响分析采用EcoInvent数据库(<https://v35.ecoquery.ecoinvent.org/>),优先选择中国本地化数据,其次为全球平均数据,评价方法为ReCiPe 2016 Midpoint(H).除能源、水资源和环境污染物等共性投入-产出物外,厨余垃圾厌氧消化工艺考虑沼气脱硫剂、混凝剂和酸碱投入,以及沼气

和油脂等资源化产品产出;好氧生物处理过程考虑添加剂和絮凝剂等投入和有机肥和土壤改良剂等资

源化产品产出;昆虫饲料转化考虑蛋白质和脂肪等资源化产品产出(图1).

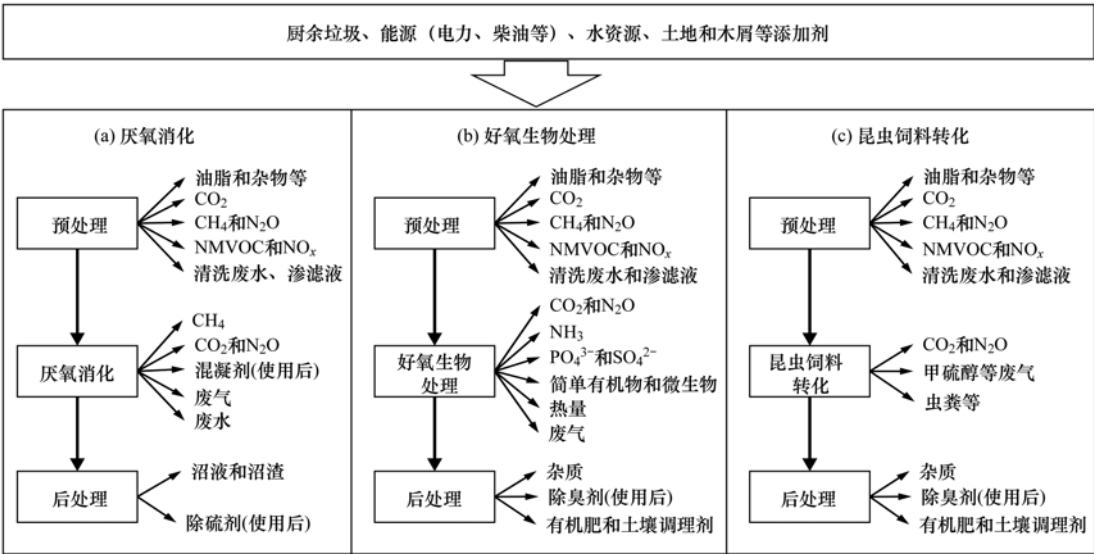


图1 厨余垃圾资源化技术多维绩效评价的系统边界与物质及能量输入-输出类型

Fig. 1 System boundary and the material energy input-output for the multidimension performance assessment of food waste utilization technologies

1.2 数据收集方法

本研究筛选了全国范围内已建成或在建的典型厨余垃圾处理项目,按照技术应用的规模和应用方式分为集中式和分散式两类.集中式处理技术的处理能力>50 t·d⁻¹,其环境影响评价报告书或可行性研究报告作为技术工艺参数的数据来源.分散式处理技术是在乡镇(街道)或城乡社区尺度应用的厨余垃圾资源化技术,本研究采用实地调研的方式

获得厨余垃圾社区堆肥的技术参数.本研究共获得了6个厌氧消化处理、6个好氧生物处理和2个昆虫饲料转化处理案例的基础数据,其基本信息见表1.在实际技术应用过程中,厨余垃圾的杂质含量和含水率等理化性质随城市、分类纯度和季节等因素会呈现明显变化,按该应用案例的可行性研究报告或环境影响评价报告中设定的厨余垃圾原始物料特征计算.

表1 厨余垃圾资源化技术研究案例的基本信息¹⁾

Table 1 Detailed information of the studied cases of food waste utilization technologies						
编号	分类	技术分类	处理对象	所在地	投产时间	规模/t·d ⁻¹
厌氧 A	集中式	中温干式厌氧	厨余垃圾	宁波市	2019	400
厌氧 B	集中式	中温干式厌氧	厨余垃圾	宁波市	2019	400
厌氧 C	集中式	中温湿式厌氧	厨余垃圾	广州市	2021	400
厌氧 D	集中式	中温湿式厌氧	厨余垃圾	长春市	在建	500
厌氧 E	集中式	高温湿式厌氧	餐厨垃圾	青岛市	2013	200
厌氧 F	集中式	高温湿式厌氧	餐厨垃圾	黄石市	2019	100
好氧 A	集中式	生化处理机	厨余垃圾	上海市	2018	400
好氧 B	集中式	生化处理机	厨余垃圾	台州市	2020	50
好氧 C	分散式	生化处理机	厨余垃圾	扬州市	2018	5
好氧 D	分散式	社区简易堆肥	厨余垃圾	成都市	2019	0.3
好氧 E	分散式	社区简易堆肥	厨余垃圾	西安市	2019	0.1
好氧 F	分散式	社区简易堆肥	厨余垃圾	成都市	2020	0.5
昆虫 A	集中式	黑水虻饲料转化	厨余垃圾	绍兴市	2020	50
昆虫 B	分散式	黑水虻饲料转化	厨余垃圾	北京市	2018	0.1

1) 厌氧 A 和厌氧 B 的技术参数来源同一案例;厌氧 A 按项目可研文件,考虑了沼渣和沼液资源化利用,而厌氧 B 则是在项目实际试运行阶段,沼液按废水处理,沼渣送垃圾焚烧厂处置

1.3 多维绩效评价指标体系

本研究采用的评价方法和指标体系基于中国循环经济协会团体标准《固体废物资源化技术多维绩效评价技术规范》(T/CACE 050-2022)中的推荐指

标,指标说明参见该标准.本研究根据厨余垃圾资源化技术特点对推荐指标进行了调整,表2列出了不同技术应用案例的指标计算数值.对主要指标的调整说明如下.

(1)战略资源回收的稀缺性贡献指标中,结合厨余垃圾处理技术的特点,只考虑磷、钾和天然气这3类战略资源,仍按铜当量计算(Cu_{eq}),其储量按照国家统计局统计数据(<https://data.stats.gov.cn/>)计算。

(2)由于社区分散式处理案例基本无直接经济效益,故而选择将净现值指标作为衡量经济可行维度的指标之一。根据技术规模的不同,集中式处理技术的服务期按20 a计算,社区分散式处理技术的服务期按10 a计算。

1.4 指标无量纲化

采用以下方法对正负向定量指标和定性指标的具体数值进行无量纲化处理。

1.4.1 定量指标的无量纲化

对于正向指标,其具体数值的无量纲化按照公式(1)进行:

$$y = \begin{cases} 1, & a_2 \leq x \\ \frac{x - a_1}{a_2 - a_1}, & a_1 < x < a_2 \\ 0, & 0 \leq x \leq a_1 \end{cases} \quad (1)$$

对于负向指标,其具体数值的无量纲化按照公式(2)进行:

$$y = \begin{cases} 1, & 0 \leq x \leq a_1 \\ \frac{a_2 - x}{a_2 - a_1}, & a_1 < x < a_2 \\ 0, & a_2 \leq x \end{cases} \quad (2)$$

式中, a_1 为指标的上限值; a_2 为指标的下限值; x 为原始指标值; y 为无量纲化后的指标值。

1.4.2 定性指标的无量纲化

S_2 和 S_3 为定性指标,取值在 $[0,1]$ 之间,无需再进行无量纲化,即 $y = x$ 。

1.5 权重分配和绩效得分计算

1.5.1 权重分配

采用均一权重法计算4个维度下的得分,各维度满分为25分,各维度下的指标也均一赋分,总分为100分。

1.5.2 绩效得分

对各个维度的值求和后可得到评价对象的绩效表现总分 P ,按照公式(3)计算。

$$P = \sum_{i=1}^8 \frac{25}{8} \times R_i + \sum_{i=1}^6 \frac{25}{6} \times E_{\text{mi}} + \sum_{i=1}^4 \frac{25}{4} \times E_{\text{ci}} + \sum_{i=1}^3 \frac{25}{3} \times S_i \quad (3)$$

式中, R_i 为资源效率指标 i 在无量纲化后的数值; E_{mi} 为环境影响指标 i 在无量纲化后的数值; E_{ci} 为经济可行指标 i 在无量纲化后的数值; S_i 为社会效应

指标 i 在无量纲化后的数值。

1.5.3 结果展示和比较

通过Origin 2021绘制不同处理技术的多维绩效结果(图2)和不同类别处理技术的整体分布情况(图3)。

2 结果与分析

2.1 厌氧消化处理技术

厨余垃圾厌氧消化处理技术的REES四维绩效得分均值依次为16.70、16.09、17.26和8.34分[图2(a)],总分均值为58.39分。中温干式厌氧工艺在战略资源回收的稀缺性贡献($0.10 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$,以 Cu_{eq} 计,下同)、净现值(31 349.70万元)和吨均运行成本($170.07 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$)指标上,比厌氧消化技术应用案例的平均值分别高 $0.05 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 、10 976.00万元和 $-75.41 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$ (“-”表示低于平均值,对于负向指标而言,取值越低绩效越优,下同)。中温湿式厌氧工艺在辅料消耗($0.03 \text{ t} \cdot \text{t}^{-1}$)、吨均水消耗量($0.10 \text{ t} \cdot \text{t}^{-1}$)、吨均土地占用($38.41 \text{ m}^2 \cdot \text{t}^{-1}$)、余热利用率(25.25%)、酸化($0.04 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$,以 $\text{SO}_{2\text{eq}}$ 计,下同)和光化学污染($0.03 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$,以 NMVOC_{eq} 计,下同)方面的绩效更好,分别高于平均值的 $-0.10 \text{ t} \cdot \text{t}^{-1}$ 、 $-0.33 \text{ t} \cdot \text{t}^{-1}$ 、 $-22.49 \text{ m}^2 \cdot \text{t}^{-1}$ 、12.58%、 $-0.32 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 和 $-0.14 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 。高温湿式厌氧工艺在吨均能耗($0.002 \text{ tce} \cdot \text{t}^{-1}$)、厨余垃圾资源化率(91.96%)、气候变化($7.00 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$,以 $\text{CO}_{2\text{eq}}$ 计,下同)、人体毒性($-5.30 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$,以1,4-DCB_{eq}计,下同)、生态毒性($-14.82 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$,以1,4-DCB_{eq}计,下同)、销售净利润率(31.81%)和就业效益($0.005 \text{ 个} \cdot \text{万元}^{-1}$)上处于优势,分别高出平均值 $-0.01 \text{ tce} \cdot \text{t}^{-1}$ 、11.10%、 $-40.82 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 、 $-3.53 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 、 $-9.86 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 、3.85%和 $0.002 \text{ 个} \cdot \text{万元}^{-1}$ 。

除水循环利用率、富营养化、吨均投资成本、就业效益、循环经济示范性和职业暴露风险等指标外,厨余垃圾厌氧消化处理技术的各应用案例间呈现较大的波动(表2)。例如,厨余垃圾资源化率分布在62.95%~98.50%之间,这与厨余垃圾原料的杂质含量、纯度和预处理工艺相关。同一技术类型下的部分指标差异也较大,如中温湿式厌氧消化处理的水循环利用率为 $0.04 \text{ t} \cdot \text{t}^{-1}$ 和 $0.84 \text{ t} \cdot \text{t}^{-1}$,高温湿式厌氧消化处理为 $0.13 \text{ t} \cdot \text{t}^{-1}$ 和 $0.77 \text{ t} \cdot \text{t}^{-1}$,这说明同一技术路线下不同的辅助工艺流程也可能存在较大差异。此外,干式厌氧消化A和B的对比结果表明,沼渣和沼液的处理方式和物质流向将显著影响其环境影响指标,如光化学污染影响可从 $7.27 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 下降到 $-1.23 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 。

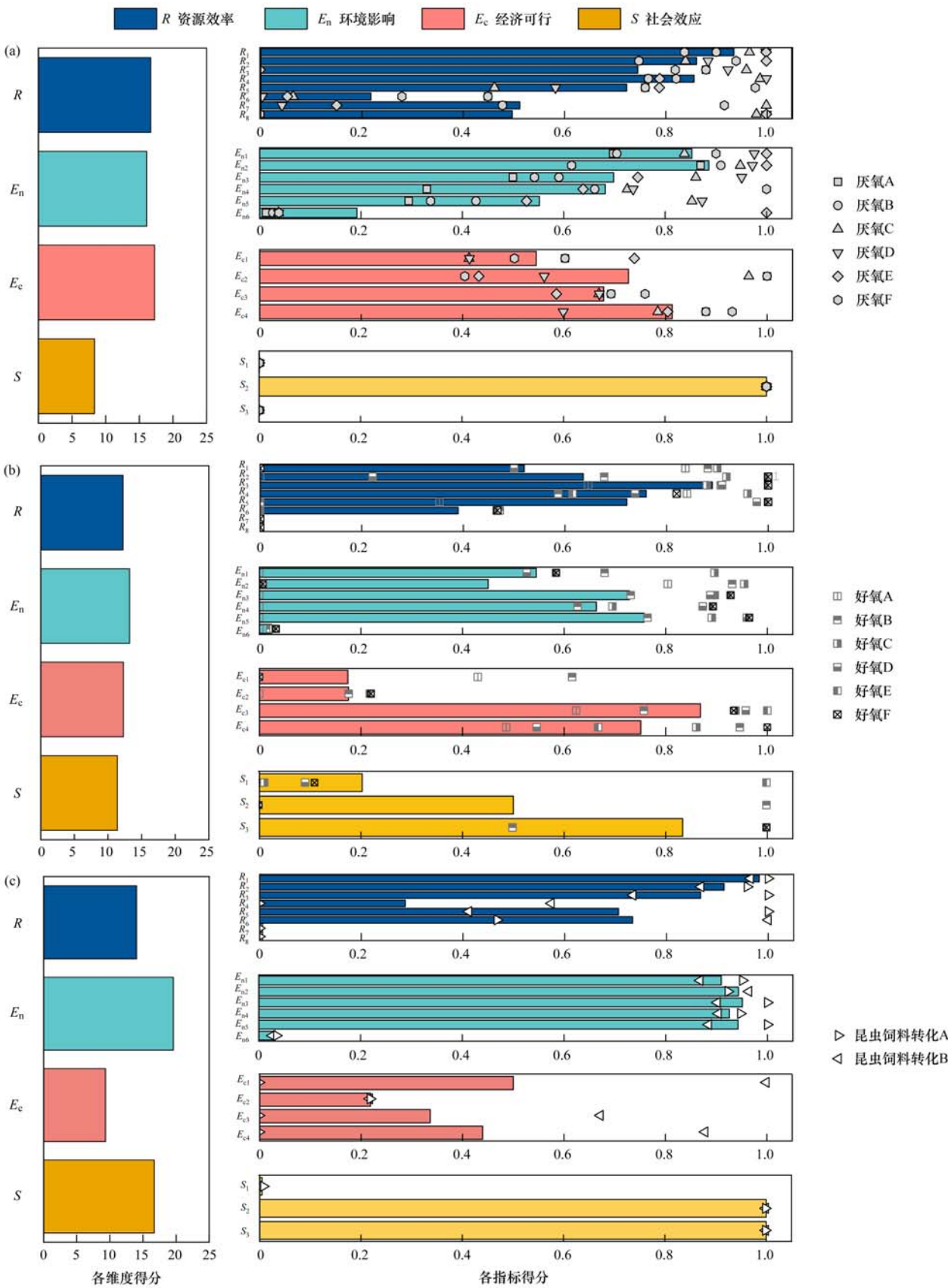


图2 厨余垃圾资源化技术的多维绩效评价结果

Fig. 2 Multidimensional performance assessment of the food waste treatment technologies

2.2 好氧生物处理技术

好氧生物处理技术的 REES 四维绩效得分均值为 12.24、13.21、12.30 和 11.41 分,总分均值为

49.16 分[图 2(b)]. 分散式好氧堆肥无资源化产品销售收益,因此集中式过程在净利润率上占据优势,高出约 27%. 除在吨均土地占用、战略资源回收的

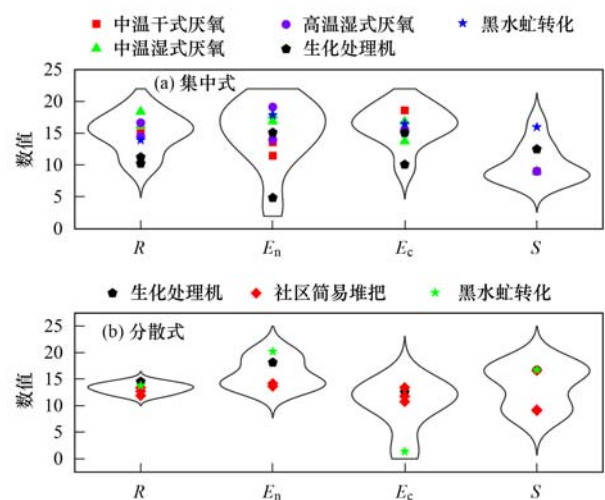


图3 集中式与分散式厨余垃圾资源化技术四维绩效表现比较
Fig. 3 Distribution of four-dimensional performance of centralized and decentralized food waste utilization technologies

稀缺性贡献和富营养化上没有明显差别外,集中式相对于分散式技术在吨均原辅料消耗、酸化效应、销售净利润率和循环经济示范性等方面具较优,分别高出 $-1.02 \text{ t}\cdot\text{t}^{-1}$ 、 $-2.73 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ 、 26.82% 和 0.75 分;后者在新鲜水消耗、资源化率、气候变化、光化学污染、人体毒性、生态毒性、净现值、吨均投资、就业效益和职业暴露风险等方面具有优势,分别高出 $-0.03 \text{ tce}\cdot\text{t}^{-1}$ 、 $-0.28 \text{ m}^3\cdot\text{t}^{-1}$ 、 56.44% 、 $-128.96 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ 、 $-0.37 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ 、 $-13.49 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ 、 $-0.61 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ 、 5270.24 万元、 -52.40 万元 $\cdot(\text{t}\cdot\text{d})^{-1}$ 、 $-59.15 \text{ 元}\cdot\text{t}^{-1}$ 、 1.65 个 $\cdot$ 万元 $^{-1}$ 和 0.13 分。

厨余垃圾的分散式好氧生物处理可进一步分为两类:社区简易堆肥和生化处理机,主要差异在于后者配备有专门的机械设备用于粉碎、堆肥和污水处理等过程。分散式生化处理机的绩效表现总得分为 53.74 分,高于简易社区堆肥(均值为 50.39 分)。相对于社区简易堆肥,分散式生化处理机在原辅料消耗、吨均土地占用、气候变化、酸化效应和生态毒性表现更佳,分别高出 $-1.47 \text{ t}\cdot\text{t}^{-1}$ 、 $-0.01 \text{ tce}\cdot\text{t}^{-1}$ 、 $-38.22 \text{ m}^3\cdot(\text{t}\cdot\text{d})^{-1}$ 、 $-138.58 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ 、 $-4.14 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ 和 $-138.97 \text{ 元}\cdot\text{t}^{-1}$ 。而社区简易堆肥在吨均水消耗量、战略资源回收的稀缺性贡献、光化学污染、人体毒性、生态毒性、净现值、吨均投资和就业效益等方面具有一定的优势,分别高出 $-0.15 \text{ m}^3\cdot\text{t}^{-1}$ 、 $0.10 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ 、 $-0.01 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ 、 $-4.91 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ 、 $-0.13 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ 、 76.21 万元、 -5.22 万元 $\cdot(\text{t}\cdot\text{d})^{-1}$ 和 2.12 个 $\cdot$ 万元 $^{-1}$ 。

2.3 昆虫饲料转化

厨余垃圾昆虫饲料转化处理技术的 REES 四维绩效表现均值分别为 14.03 、 19.58 、 9.34 和 16.74

分[图 2(c)],总分均值为 59.65 分。一方面,厨余垃圾的昆虫饲料转化过程需要较少的物资和能源投入,仅需维持生物生长环境的基本条件。集中式技术应用仅需 $0.07 \text{ t}\cdot\text{t}^{-1}$ 的辅料投入和 $0.01 \text{ tce}\cdot\text{t}^{-1}$ 的能源投入(表 2),远低于所有技术应用均值的 $0.47 \text{ t}\cdot\text{t}^{-1}$ 和 $0.02 \text{ tce}\cdot\text{t}^{-1}$ 。同时,转化后的产品如蛋白质和虫卵品质优良,具有较高的经济效益,如销售净利润率为 26% ,显著高于总体均值的 17% 。另一方面,昆虫饲料转化过程基本没有职工暴露风险(如接触有毒有害物质的风险),因此该技术具有较高的经济和社会绩效。

此外,厨余垃圾的昆虫饲料转化工艺在原辅料消耗、吨均综合能耗、战略资源回收的稀缺性贡献、气候变化、酸化效应、光化学污染、人体毒性和循环经济示范性指标上表现更佳,分别高出所有技术应用均值的 $-0.44 \text{ t}\cdot\text{t}^{-1}$ 、 $-0.01 \text{ tce}\cdot\text{t}^{-1}$ 、 $0.08 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ 、 $-75.43 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ 、 $-1.03 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ 、 $-0.14 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ 、 $-5.56 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ 、 6.17% 、 0.21 分和 0.13 分。集中式的昆虫饲料转化相对于分散式的得分更高,二者差异主要在经济效益维度上,分别为 17.3 分和 1.4 分。这主要是因为集中式和规模化的生产摊低了厨余垃圾昆虫饲料转化处理技术应用的设备和运行费用投入。

2.4 集中式与分散式处理技术比较

图 3 显示了不同规模与应用方式下(即集中式和分散式)的厨余垃圾资源化技术在资源效率、环境影响、经济可行和社会效应这 4 个维度上的绩效差异。从已收集的技术应用案例均值看,集中式处理技术在资源效率和经济可行维度上的指标较优,维度分值比分散式处理技术高 13% 和 62% ;分散式处理技术在环境影响和社会效应维度上的指标较优,维度分值比集中式处理技术高 8% 和 34% 。这是因为集中式处理技术具有一定的规模效应,在吨均土地占用、水循环利用和余热利用等方面具有更大的优势;同时其单位投资建设费用和运行成本相对也偏低,资源化产品销售具有一定规模且经济收益较好。而分散式处理技术由于其化学品辅料添加量较少且能耗较低,特别是社区简易堆肥的部分应用案例几乎没有能耗,因此在全生命周期环境影响的角度具有一定优势。此外,分散式处理技术采用的设施和设备较为简单,运行过程中的职业暴露风险较低,提升其社会效应维度的得分。这说明,在不同的技术应用目标约束下,集中式和分散式处理技术具有各自的优劣势,具有不同的适用范围。

图 3 也可说明集中式和分散式处理技术下,不同技术类型的四维绩效得分具有较大幅度的差异。

表 2 厨余垃圾资源化技术的多维绩效评价指标体系和研究案例的指标测算数值¹⁾

Table 2 Indicators and their values for assessing the multidimensional performances of food waste utilization technologies																	
维度	指标层	正/负向	单位	案例评价结果													
				厌氧 A	厌氧 B	厌氧 C	厌氧 D	厌氧 E	厌氧 F	好氧 A	好氧 B	好氧 C	好氧 D	好氧 E	好氧 F	生物 A	生物 B
资源效率 (R)	R ₁ : 处理单位厨余垃圾的原辅料消耗量	负向	t·t ⁻¹	1.98E-01	1.98E-01	6.64E-02	1.79E-03	9.11E-04	3.23E-01	3.26E-01	2.37E-01	2.00E-01	1.00E+00	2.00E+00	2.00E+00	7.00E-02	1.00E-05
	R ₂ : 处理单位厨余垃圾的综合能耗	负向	tce·t ⁻¹	1.88E-02	1.88E-02	1.19E-02	8.62E-03	0.00E+00	4.47E-03	7.49E-02	2.42E-02	6.15E-03	5.83E-02	0.00E+00	0.00E+00	9.91E-03	3.09E-03
	R ₃ : 处理单位厨余垃圾的新鲜水消耗量	负向	m ³ ·t ⁻¹	0.20	0.20	0.07	0.13	1.65	0.30	0.59	0.15	0.20	0.15	0.00	0.00	0.44	0.00
	R ₄ : 处理厨余垃圾的每日吨均土地占用	负向	m ² ·(t·d) ⁻¹	75.29	75.29	39.41	37.40	71.65	66.34	63.38	104.61	44.00	80.00	100.00	66.67	106.77	200.00
	R ₅ : 厨余垃圾资源化率	正向	%	0.84	0.84	0.63	0.71	0.85	0.99	0.55	0.31	1.00	0.98	1.00	1.00	0.59	1.00
	R ₆ : 战略资源回收的稀缺性贡献	正向	kg·t ⁻¹ (以 Cu _{eq} 计)	0.10	0.10	0.02	0.01	0.02	0.07	0.11	0.11	0.01	0.11	0.11	0.11	0.22	0.11
	R ₇ : 水循环利用率	正向	t·t ⁻¹	0.40	0.40	0.84	0.04	0.13	0.77	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	R ₈ : 余热利用率	正向	%	0.00	0.00	0.25	0.26	0.26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
环境影响 (E _n)	E _{n1} : 气候变化	负向	kg·t ⁻¹ (以 CO _{2eq} 计)	112.82	109.82	53.98	-3.69	-13.86	27.85	404.90	120.30	29.70	184.28	160.28	160.28	41.72	6.72
	E _{n2} : 酸化	负向	kg·t ⁻¹ (以 SO _{2eq} 计)	0.44	0.26	0.10	-0.01	-0.13	1.55	0.72	0.17	0.07	4.23	4.20	4.20	0.03	0.21
	E _{n3} : 光化学污染	负向	kg·t ⁻¹ (以 NMVOC _{eq} 计)	0.30	0.24	0.06	-0.01	0.14	0.28	0.65	0.15	0.03	0.04	0.01	0.01	0.03	-0.04
	E _{n4} : 人体毒性	负向	kg·t ⁻¹ (以 1,4-DCB _{eq} 计)	7.27	-1.23	-2.88	-3.17	-0.64	-9.94	15.75	-0.34	-2.10	-6.67	-7.19	-7.19	-7.45	-8.57
	E _{n5} : 富营养化	负向	kg·t ⁻¹ (以 P _{eq} 计)	1.09E-02	8.47E-03	5.15E-04	1.38E-04	6.60E-03	1.01E-02	1.64E-02	2.17E-03	-1.95E-04	-1.48E-03	-1.57E-03	-1.57E-03	-6.71E-05	-2.23E-03
	E _{n6} : 生态毒性	负向	kg·t ⁻¹ (以 1,4-DCB _{eq} 计)	0.45	0.04	-0.30	-0.30	-29.32	-0.32	0.83	0.17	-0.02	-0.14	-0.15	-0.15	0.03	-0.22
经济可行 (E _c)	E _{c1} : 销售净利润率	正向	%	0.31	0.31	0.21	0.21	0.38	0.26	0.22	0.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.51	0.00
	E _{c2} : 净现值	正向	万元	31 349.70	31 349.70	29 899.57	13 703.10	8 520.00	7 419.10	-8 823.87	-1 762.29	-80.00	-6.00	-0.37	-5.00	-76.38	-20.00
	E _{c3} : 每日厨余垃圾的吨均投资建设费用	负向	万元·(t·d) ⁻¹	64.09	64.09	68.78	68.59	85.20	50.89	77.57	51.40	16.00	12.00	3.68	16.67	67.98	200.00
	E _{c4} : 处理单位厨余垃圾的运行成本	负向	元·t ⁻¹	170.07	170.07	277.41	488.62	255.34	111.38	615.75	94.56	191.78	547.95	410.96	33.33	170.49	1 166.67
社会效益 (S)	S ₁ : 就业效益	正向	个·万元 ⁻¹	2.34E-03	2.34E-03	1.45E-03	3.67E-03	5.40E-03	5.10E-03	1.51E-03	7.00E-03	6.25E-02	5.00E-01	5.43E+00	6.00E-01	4.12E-03	5.00E-02
	S ₂ : 循环经济示范性	正向	分	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
	S ₃ : 职业暴露风险得分	正向	分	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.75	0.75	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88

1) tce 表示综合能耗 (ton of standard coal equivalent), 为各类型能源折算为标煤加和所得; NMVOC (Non-methane volatile organic compounds) 为非甲烷挥发性有机物, 光化学污染的当量单位; 1,4-DCB 为对二氯苯, 毒性的当量单位

除分散式处理技术的资源效率维度指标外,其他绩效指标都呈现不同程度的波动。总体而言,集中式技术的绩效得分呈现更加分散的趋势,即纵向变化幅度更大(上限更高且下限更低),如图 3(a)所示。特别是在集中式处理技术的资源效率维度,得分最高的中温湿式厌氧技术(19.58 分)比得分最低的生化处理机技术(9.82 分)高约 1 倍;同样,在环境影响维度,得分最高的高温湿式厌氧(20.46 分)为得分最低的生化处理机技术(好氧 A, 3.35 分)的 6.1 倍。此外,在所有的技术应用案例中,出现了少数大幅偏离同类规模技术的应用案例,如集中式处理技术中的好氧 A,在环境影响和经济可行维度明显低于其他技术应用;分散式处理技术中的生物 B(黑水虻饲养)在经济可行维度明显低于其他技术应用。在相同处理规模、分布方式和技术原理下,技术应用案例绩效得分存在差异,这说明技术应用案例的工艺设计、装备水平和运行维护等对技术绩效的影响可能较大。

3 讨论

本研究基于《固体废物资源化技术多维绩效评价技术规范》(T/CACE 050-2022),对我国的 14 项典型厨余垃圾资源化技术应用案例进行了量化综合评价。总体而言,不同类型的技术应用均存在得分较高或较低的绩效,对应的有各自需要重点提升和优化的方向。已收集技术应用案例的均一化绩效评价结果显示,在集中式处理技术路线中,昆虫饲料转化和厌氧消化(特别是中温湿式厌氧消化)具有更高的综合绩效得分;在分散式处理技术路线中,分散式生化处理机具有更高的综合绩效得分。厌氧消化技术在资源效率 and 环境影响方面仍有提升的空间,如沼渣和沼液的资源利用和吨均综合能耗降低等方面^[25,36],可大幅提高其综合绩效水平。好氧生物处理技术需要在吨均能耗、温室气体排放和资源化产品的经济可行等方面提升^[24,37]。昆虫饲料转化的提升也可主要关注在经济可行上面,其吨均投资较高,仅在标准化且规模化生产的前提下才会产生较高的经济效益。从处理规模和应用方式看,集中式和分散式技术各有优劣,在实际的技术推广应用,处理技术可结合当地的厨余垃圾理化性质、生活垃圾分类收集工作推进情况、财政承担能力和收运距离等多因素综合考量,因地制宜地选择适宜技术路线^[23]。本研究收集的技术案例几乎均以厨余垃圾为单一原料,在原料含水率和碳氮比调配等预处理过程中会产生较高的资源与能源消耗,进而降低技术的绩效。在未来的技术应用中,尤其是在县城和村镇

等厨余垃圾产量相对较低的场景下,厨余垃圾、园林垃圾和污泥粪污等多源物料的协同处理将是提升技术绩效的有效途径^[38~40]。此外,土地占用和全周期投资建设与运行维护费用是城市管理者 and 厨余垃圾处理项目投资者关注的重点内容^[23]。本研究表明厨余垃圾的昆虫饲料转化需要消耗较大的土地面积,其次为好氧生物处理,厌氧消化技术的吨均占地面积较小。社区简易堆肥技术目前在全国已有一定数量的应用案例,可充分利用社区的闲置用地构建有机质微循环细胞单元。因此,尽管在本研究中社区堆肥在吨均土地占用等指标上高于集中式处理技术,但社区堆肥在弘扬“无废细胞”文化和降低垃圾清运费用等方面同样具有优势。

厨余垃圾是城市重要的碳排放源之一,也是城市节能-减污-降碳协同增效目标实现的重点领域^[41~43]。本研究在分析了 6 类主要的全生命周期环境影响绩效后发现,厌氧消化、好氧处理和昆虫饲养等技术的碳排放(气候变化 E_{cl})、同吨均能耗(R_2)、光化学污染(E_{n3})和人体毒性(E_{n4})之间具有显著的相关性,碳排放可以作为不同类型厨余垃圾资源化技术环境影响比较的重点。有研究认为厨余垃圾厌氧消化处理设施可能成为间接的“碳汇”,即其资源化产品可替代原生资源开采而带来碳减排,如沼气发电和油脂转化为生物柴油等^[23,26]。本文测算的技术碳足迹(气候变化潜值,以 CO_{2eq} 计)的取值在 $-13.86 \sim 112.82 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 之间。其中,高温湿式厌氧工艺的温室气体碳足迹为负值,中温干式厌氧消化工艺和中温湿式厌氧消化工艺的温室气体碳足迹为正值,主要是由于高温湿式厌氧工艺具有更高的甲烷产率,且中温干式厌氧和中温湿式厌氧消化案例的吨均能耗较高^[39]。基于现场实测的研究表明,即使考虑了堆肥产品营养物质的碳减排作用,厨余垃圾堆肥处理仍是净碳排放源^[44,45]。这主要是因为堆肥过程中局部供氧不足可能产生 CH_4 和 N_2O 等温室气体,其排放强度在 $0.034 \sim 4.2 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 和 $0.092 \sim 0.78 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 之间波动^[46~48]。本研究考虑了技术应用过程辅料和能源投入的全生命周期碳排放,以及有机肥等资源化产品的替代作用导致的碳减排。结果表明,在各项技术的应用中应进一步致力于处理过程中的能耗水平降低和甲烷、沼渣和有机肥等有机碳资源的再生利用。

厨余垃圾资源化利用技术的应用在我国刚刚起步,因此不同类型技术的数据积累仍然不足,需要开展更为深入的研究。首先,在技术类型和技术应用案例覆盖度上,本研究仅包括厌氧消化、生化处理机、社区堆肥和黑水虻昆虫饲养转化等技术类型,目前

还有热解、水解、黄粉虫和蚯蚓等其他昆虫饲养转化技术的应用^[49],由于缺乏可靠的技术资料,本研究未开展此类技术的分析比较.第二,厨余垃圾集中式处理技术参数的数据来源基本是项目环境影响评价报告和可行性研究报告,目前仍缺乏实际生产中的运行参数,未来需要开展更多的厨余垃圾技术应用测评研究,以更为客观地反映技术应用的实际绩效.第三,本研究收集的技术应用案例中,原料存在一定差异,部分为单一的餐厨垃圾或家庭厨余垃圾,给分析结果带来不确定性.随着我国更多的厨余垃圾处理技术应用案例投入应用,未来的技术比较可以进一步体现不同处理物料下技术绩效的差异,为多源厨余垃圾物料的资源化利用提供科学依据.

4 结论

(1)本研究收集的厨余垃圾处理技术应用案例显示,厨余垃圾昆虫饲料转化和厌氧消化处理的多维绩效高于好氧生物处理,在细分技术中集中式黑水虻转化和中温湿式厌氧消化处理技术的绩效得分较高,资源效率-环境影响-经济可行-社会效应四维绩效评价方法可为技术优化提供方法学支撑.

(2)厌氧消化技术在资源效率 and 环境影响维度上有改进空间,如沼液沼渣的再利用等;好氧生物处理技术在能耗、废气处理和资源化产品销售等方面有待提升;昆虫生物转化的主要改进方向可侧重于分散式小规模应用的费用-效益比提升.

(3)不同规模的技术具有各自的适用场景.以均一化权重的赋值结果来看,集中式技术在资源效率和经济可行维度上绩效表现更佳;分散式技术在环境影响和社会效应维度上绩效表现更优.在厨余垃圾处理和管理实践中,需要根据当地实际情况筛选适宜的技术路线.

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中国共产党中央委员会宣传部, 中央精神文明建设指导委员会办公室, 等. 关于进一步推进生活垃圾分类工作的若干意见[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-12/05/content_5567136.htm, 2020-11-27.
- [2] Chen S S, Huang J L, Xiao T T, *et al.* Carbon emissions under different domestic waste treatment modes induced by garbage classification: case study in pilot communities in Shanghai, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **717**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137193.
- [3] 国家发展改革委, 住房和城乡建设部. “十四五”城镇生活垃圾分类和处理设施发展规划[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-05/14/content_5606349.htm, 2021-05-06.
- [4] GB/T 19095-2019, 生活垃圾分类标志[S].
- [5] Ma S J, Zhou C B, Chi C, *et al.* Estimating physical composition of municipal solid waste in China by applying artificial neural network method[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **54**(15): 9609-9617.
- [6] 邱君妍, 罗恩华, 金宜英, 等. 中国餐厨垃圾资源化利用系统建设现状研究[J]. *环境科学与管理*, 2018, **43**(4): 39-43.
- [7] Bing J Y, Luo E H, Jin Y Y, *et al.* Current situation of food waste recycling in China [J]. *Environmental Science and Management*, 2018, **43**(4): 39-43.
- [8] Meng Y, Li S, Yuan H R, *et al.* Evaluating biomethane production from anaerobic mono- and co-digestion of food waste and floatable oil (FO) skimmed from food waste[J]. *Bioresource Technology*, 2015, **185**: 7-13.
- [9] Li Y Y, Jin Y Y, Li J H. Enhanced split-phase resource utilization of kitchen waste by thermal pre-treatment[J]. *Energy*, 2016, **98**: 155-167.
- [10] Zhang C S, Su H J, Tan T W. Batch and semi-continuous anaerobic digestion of food waste in a dual solid-liquid system [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **145**: 10-16.
- [11] 王进, 吝涛. 食物源 CNP 的城市代谢特征——以厦门市为例[J]. *生态学报*, 2014, **34**(21): 6366-6378.
- [12] Wang J, Lin T. Characterizing the urban metabolism of food-sourced carbon, nitrogen, and phosphorus: a case study of Xiamen[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(21): 6366-6378.
- [13] Pan J J, Ding N, Yang J X. Changes of urban nitrogen metabolism in the Beijing megacity of China, 2000-2016[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **666**: 1048-1057.
- [14] 国家统计局. 生活垃圾无害化处理量(卫生填埋量、堆肥无害化处理量和焚烧无害化处理量)[EB/OL]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01&zbs=A0C06&sj=2021,2021-06-10>.
- [15] Bernstad A, laCour Jansen J. Review of comparative LCAs of food waste management systems-Current status and potential improvements[J]. *Waste Management*, 2012, **32**(12): 2439-2455.
- [16] Wang X L, Cao A X, Zhao G Z, *et al.* Microbial community structure and diversity in a municipal solid waste landfill[J]. *Waste Management*, 2017, **66**: 79-87.
- [17] Kiran E U, Trzcinski A P, Ng W J, *et al.* Bioconversion of food waste to energy: a review[J]. *Fuel*, 2014, **134**: 389-399.
- [18] Awasthi S K, Sarsaiya S, Awasthi M K, *et al.* Changes in global trends in food waste composting: research challenges and opportunities[J]. *Bioresource Technology*, 2020, **299**, doi: 10.1016/j.biortech.2019.122555.
- [19] 姜慧敏, 王文霞, 任苗苗, 等. 黑水虻转化厨余垃圾过程中病原菌灭活规律的研究与综合评价[J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(3): 1011-1022.
- [20] Jiang H M, Wang W X, Ren M M, *et al.* An investigation and comprehensive evaluation on the pathogen inactivation process during the degradation of kitchen waste by the larvae of black soldier fly[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(3): 1011-1022.
- [21] 吴云. 餐厨垃圾厌氧消化影响因素及动力学研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- [22] Wu Y. Study on influence factors and kinetics in anaerobic digestion of kitchen wastes [D]. Chongqing: Chongqing University, 2009.
- [23] 赵由才, 牛冬杰, 柴晓利, 等. 固体废物处理与资源化[M]. (第三版). 北京: 化学工业出版社, 2019.
- [24] Cerda A, Artola A, Font X, *et al.* Composting of food wastes: status and challenges[J]. *Bioresource Technology*, 2018, **248**:

- 57-67.
- [21] 张志剑, 刘萌, 朱军. 蚯蚓堆肥及蝇蛆生物转化技术在有机废弃物处理应用中的研究进展[J]. 环境科学, 2013, **34**(5): 1679-1686.
- Zhang Z J, Liu M, Zhu J. Organic waste treatment by earthworm vermicomposting and larvae bioconversion: review and perspective[J]. Environmental Science, 2013, **34**(5): 1679-1686.
- [22] Uekert T, Pichler C M, Schubert T, *et al.* Solar-driven reforming of solid waste for a sustainable future[J]. Nature Sustainability, 2021, **4**(5): 383-391.
- [23] 李欢, 周颖君, 刘建国, 等. 我国厨余垃圾处理模式的综合比较和优化策略[J]. 环境工程学报, 2021, **15**(7): 2398-2408.
- Li H, Zhou Y J, Liu J G, *et al.* Comprehensive comparison and optimal strategies of food waste treatment modes[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, **15**(7): 2398-2408.
- [24] Saer A, Lansing S, Davitt N H, *et al.* Life cycle assessment of a food waste composting system: environmental impact hotspots[J]. Journal of Cleaner Production, 2013, **52**: 234-244.
- [25] Subramanian B, Miot A, Jones B, *et al.* A full-scale study of mixing and foaming in egg-shaped anaerobic digesters[J]. Bioresource Technology, 2015, **192**: 461-470.
- [26] Levis J W, Barlaz M A. What is the most environmentally beneficial way to treat commercial food waste? [J]. Environmental Science & Technology, 2011, **45**(17): 7438-7444.
- [27] Hui Z, Yunjun Y, Liberti F, *et al.* Technical and economic feasibility analysis of an anaerobic digestion plant fed with canteen food waste[J]. Energy Conversion and Management, 2019, **180**: 938-948.
- [28] Bakas I, Laurent A, Clavreul J, *et al.* LCA of solid waste management system[A]. In: Hauschild M Z, Rosenbaum R K, Olsen S I (Eds.). Life Cycle Assessment: Theory and Practice[M]. Cham: Springer, 2018. 887-926.
- [29] Frey H C, Zhu Y. Techno-economic analysis of combined cycle systems[A]. Rao A D (Ed.). Combined Cycle Systems for Near-Zero Emission Power Generation[M]. Oxford: Woodhead Publishing, 2012.
- [30] Bastidas-Oyanedel J R, Schmidt J E. Increasing profits in food waste biorefinery—A techno-economic analysis[J]. Energies, 2018, **11**(6): 1551.
- [31] 潘发存. 餐厨垃圾资源化利用产沼气发电的生命周期评价[D]. 南宁: 广西大学, 2018.
- Pan F C. Life cycle assessment of the utilization of kitchen waste to produce biogas for power generation[D]. Nanning: Guangxi University, 2018.
- [32] 杨帆. 生活垃圾堆肥过程污染气体减排与管理的生命周期评价研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
- Yang F. Reduction technologies of typical pollutional gaseous emissions during kitchen waste composting and life cycle assessment of management[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014.
- [33] Shi L Y, Liu L Y, Yang B, *et al.* Evaluation of industrial urea energy consumption (EC) based on life cycle assessment (LCA)[J]. Sustainability, 2020, **12**(9), doi: 10.3390/su12093793.
- [34] Smol M, Kulczycka J, Lelek Ł, *et al.* Life Cycle Assessment (LCA) of the integrated technology for the phosphorus recovery from sewage sludge ash (SSA) and fertilizers production[J]. Archives of Environmental Protection, 2020, **46**(2): 42-52.
- [35] Chen W, Geng Y, Hong J L, *et al.* Life cycle assessment of potash fertilizer production in China [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018, **138**: 238-245.
- [36] 徐立, 董蕾, 华建敏, 等. 国内厨余垃圾厌氧消化工艺的应用[J]. 环境保护与循环经济, 2020, **40**(11): 33-37, 75.
- [37] Schott A B S, Wenzel H, la Cour Jansen J. Identification of decisive factors for greenhouse gas emissions in comparative life cycle assessments of food waste management-an analytical review [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, **119**: 13-24.
- [38] 李江华. 厨余垃圾混合厌氧消化及动力学模型初探[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- Li J H. The preliminary study on the interfusion anaerobic fermentation of kitchen waste and its dynamic model [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [39] 郭香麟, 左剑恶, 史绪川, 等. 餐厨垃圾与秸秆混合中温和高温厌氧消化对比[J]. 环境科学, 2017, **38**(7): 3070-3077.
- Guo X L, Zuo J E, Shi X C, *et al.* Mesophilic and thermophilic anaerobic co-digestion of food waste and straw [J]. Environmental Science, 2017, **38**(7): 3070-3077.
- [40] 王永江. 猪粪堆肥过程有机质降解动力学模型研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
- Wang Y J. Study on degrading kinetics of organic matter for composting process of swine manure [D]. Beijing: China Agricultural University, 2014.
- [41] 中共中央, 国务院. 关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm, 2021-10-24.
- [42] Wilson D C, Rodic-Wiersma L, Modak P, *et al.* Global waste management outlook[M]. Nairobi, Kenya: UNEP, 2015.
- [43] 马仕君, 周传斌, 杨光, 等. 城市生活垃圾填埋场的物质存量特征及其环境影响: 以粤港澳大湾区为例[J]. 环境科学, 2019, **40**(12): 5593-5603.
- Ma S J, Zhou C B, Yang G, *et al.* Characteristics and environmental impacts of materials stored in municipal solid waste landfills: a case study of the Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay area [J]. Environmental Science, 2019, **40**(12): 5593-5603.
- [44] Amlinger F, Peyr S, Cuhls C. Green house gas emissions from composting and mechanical biological treatment [J]. Waste Management & Research, 2008, **26**(1): 47-60.
- [45] Andersen J K, Boldrin A, Christensen T H, *et al.* Home composting as an alternative treatment option for organic household waste in Denmark: an environmental assessment using life cycle assessment-modelling[J]. Waste Management, 2012, **32**(1): 31-40.
- [46] Andersen J K, Boldrin A, Christensen T H, *et al.* Greenhouse gas emissions from home composting of organic household waste [J]. Waste Management, 2010, **30**(12): 2475-2482.
- [47] Martínez-Blanco J, Colón J, Gabarrell X, *et al.* The use of life cycle assessment for the comparison of biowaste composting at home and full scale[J]. Waste Management, 2010, **30**(6): 983-994.
- [48] Ermolaev E, Sundberg C, Pell M, *et al.* Greenhouse gas emissions from home composting in practice [J]. Bioresource Technology, 2014, **151**: 174-182.
- [49] 黄博. 餐厨垃圾分选有机废物热解特性及示范工程研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2017.
- Huang B. Study on pyrolysis characteristics and demonstration project of the organic waste sorted from food waste[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2017.

CONTENTS

Research Status and Trend Analysis of Environmental and Health Risk and Control of Persistent, Mobile, and Toxic Chemicals	ZHANG Shao-xuan, CHEN An-na, CHEN Cheng-kang, <i>et al.</i> (3017)
Assessment of the Multidimensional Performances of Food Waste Utilization Technologies in China	YANG Guang, SHI Bo-fen, ZHOU Chuan-bin (3024)
Spatial Network of Urban Heat Environment in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration Based on MSPA and Circuit Theory	QIAO Zhi, CHEN Jia-yue, WANG Nan, <i>et al.</i> (3034)
Relationship Between Urban Spatial Pattern and Thermal Environment Response in Summer: A Case Study of Hefei City	CHEN Yuan-yuan, YAO Xia-mei, OU Chun, <i>et al.</i> (3043)
Assessment of Emission Reduction Effect of Major Air Pollution Control Measures on PM _{2.5} Concentrations During 13th Five-Year Period in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (3054)
Effect of Clean Heating on Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During the Heating Period in Baoding	LUO Yu-qian, ZHANG Kai, ZHAO Yu-xi, <i>et al.</i> (3063)
Transport Influence and Potential Sources of PM _{2.5} Pollution for Nanjing	XIE Fang-jian, ZHENG Xin-mei, DOU Tao-tao, <i>et al.</i> (3071)
Impact of Atmospheric Circulation Patterns on Ozone Changes in the Pearl River Delta from 2015 to 2020	WANG Yao, LIU Run, XIN Fan (3080)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i> (3089)
Analysis of Causes and Sources of Summer Ozone Pollution in Rizhao Based on CMAQ and HYSPLIT Models	LIN Xin, TONG Ji-long, WANG Yi-fan, <i>et al.</i> (3098)
Health Benefit Evaluation for PM _{2.5} as Well as O ₃ - _{8h} Pollution Control in Chengdu, China from 2016 to 2020	ZHANG Ying, TIAN Qi-qi, WEI Xiao-yu, <i>et al.</i> (3108)
Impacts of COVID-19 Lockdown on Air Quality in Shenzhen in Spring 2022	LIU Chan-fang, ZHANG Ao-xing, FANG Qing, <i>et al.</i> (3117)
Emission Inventory of Airborne Pollutants from Biomass Combustion in Guizhou Province	WANG Yan-ni, YANG Jing-ting, HUANG Xian-feng, <i>et al.</i> (3130)
Main Chemical Components in Atmospheric Precipitation and Their Sources in Xi'an	ZHOU Dong, HUANG Zhi-pu, LI Si-min, <i>et al.</i> (3142)
Distribution, Respiratory Exposure, and Traceability of Atmospheric Microplastics in Yichang City	LIU Li-ming, WANG Chao, GONG Wen-wen, <i>et al.</i> (3152)
Hydrochemical Evolution in the Yarlung Zangbo River Basin	JIANG Ping, ZHANG Quan-fa, LI Si-yue (3165)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Nitrate in Surface Water of Wuding River Basin	XU Qi-feng, XIA Yun, LI Shu-jian, <i>et al.</i> (3174)
Seasonal Variation Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment of Taipu River	LUO Peng-cheng, TU Yao-jen, SUN Ting-ting, <i>et al.</i> (3184)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Beiyun River Basin in Beijing	JIANG Bao, SUI Shan-shan, SUN Cheng-yi, <i>et al.</i> (3198)
Tracking Riverine Nitrate Sources and Transformations in the Yiluo River Basin by Nitrogen and Oxygen Isotopes	GUO Wen-jing, ZHANG Dong, JIANG Hao, <i>et al.</i> (3206)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Sediments of Lakes in the Lower Reaches of the Huaihe River	WU Yu-sheng, HUANG Tian-yin, ZHANG Jia-gen, <i>et al.</i> (3217)
Characteristics and Driving Mechanisms of Shallow Groundwater Chemistry in Xining City	LIU Chun-yan, YU Kai-ning, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3228)
Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of the Yarkant River Basin	YAN Zhi-yun, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i> (3237)
Composition Structure and Influence Factors of Bacterial Communities in the Miyun Reservoir	CHEN Ying, WANG Jia-wen, LIANG En-hang, <i>et al.</i> (3247)
Photo-Degradation Mechanism and Pathway for Tetracycline in Simulated Seawater Under Irradiation of Visible Light	XU Heng-tao, FU Xiao-hang, FENG Wei-hua, <i>et al.</i> (3260)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Ammonia Nitrogen in Water by Nano Zero-valent Iron-modified Biochar	CHEN Wen-jing, SHI Jun-ling, LI Xue-ting, <i>et al.</i> (3270)
Removal Performance and Mechanism of Potassium Permanganate Modified Coconut Shell Biochar for Cd(II) and Ni(II) in Aquatic Environment	ZHANG Feng-zhi, WANG Dun-qiu, CAO Xing-feng, <i>et al.</i> (3278)
Phosphorus Adsorption in Water and Immobilization in Sediments by Lanthanum-modified Water Treatment Sludge Hydrochar	HE Li-wenze, CHEN Yu, SUN Fei, <i>et al.</i> (3288)
Factors Affecting Nitrate Concentrations and Nitrogen and Oxygen Isotope Values of Effluents from Waste Water Treatment Plant	ZHANG Dong, GE Wen-biao, ZHAO Ai-ping, <i>et al.</i> (3301)
Effects of Wastewater Treatment Processes on the Removal Efficiency of Microplastics Based on Meta-analysis	FU Li-song, HOU Lei, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (3309)
Assessment of Critical Loads of Nitrogen Deposition in Natural Ecosystems of China	HUANG Jing-wen, LIU Lei, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (3321)
Impacts of Climate Change and Human Activities on NDVI Change in Eastern Coastal Areas of China	JIN Yan-song, JIN Kai, WANG Fei, <i>et al.</i> (3329)
Ecosystem Carbon Storage in Hangzhou Bay Area Based on InVEST and PLUS Models	DING Xue, WANG Liu-zhu, GUI Feng, <i>et al.</i> (3343)
Soil Stoichiometry Characterization in the Oasis-desert Transition Zone of Linze, Zhangye	SUN Xue, LONG Yong-li, LIU Le, <i>et al.</i> (3353)
Vertical Differences in Grassland Bacterial Community Structure During Non-Growing Season in Eastern Ulansuhai Basin	LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, SHI Yu-jiao, <i>et al.</i> (3364)
Distribution Pattern of Bacterial Community in Soil Profile of <i>Larix principis-rupprechtii</i> Forest in Luya Mountain	MAO Xiao-ya, LIU Jin-xian, JIA Tong, <i>et al.</i> (3376)
Effects of Vegetation Types on Carbon Cycle Functional Genes in Reclaimed Soil from Open Pit Mines in the Loess Plateau	ZHAO Jiao, MA Jing, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i> (3386)
Effects of Biochar Application on Soil Bacterial Community Diversity and Winter Wheat Growth in Wheat Fields	YAO Li-ru, LI Wei, ZHU Yuan-zheng, <i>et al.</i> (3396)
Effects of Different Planting Years of <i>Dendrocalamus brandisii</i> on Soil Fungal Community	ZHU Shu-hong, HUI Chao-mao, ZHAO Xiu-ting, <i>et al.</i> (3408)
Effects of Biochar Amendment on N ₂ O Emission and Its Functional Genes in Pepper Growing Soil in Tropical Areas	CHEN Qi-qi, WANG Zi-jun, CHEN Yun-zhong, <i>et al.</i> (3418)
Effects of Mulching and Application of Organic and Chemical Fertilizer on Greenhouse Gas Emission and Water and Nitrogen Use in Summer Maize Farmland	JIANG Hong-li, LEI Qi, ZHANG Biao, <i>et al.</i> (3426)
Effects of Different Types of Plastic Film Mulching on Soil Quality, Root Growth, and Yield	MU Xiao-guo, GAO Hu, LI Mei-hua, <i>et al.</i> (3439)
Pollution Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Atmospheric Deposition in a Lead-zinc Smelting City Based on PMF Model	CHEN Ming, WANG Lin-ling, CAO Liu, <i>et al.</i> (3450)
Characterization and Health Risk of Heavy Metals in PM _{2.5} from Road Fugitive Dust in Five Cities of Yunnan Province	HAN Xin-yu, GUO Jin-yuan, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (3463)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Dusts and Surrounding Green Land Soils from Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou	LI Jun, LI Kai-ming, WANG Xiao-huai, <i>et al.</i> (3475)
Source Apportionment and Pollution Assessment of Soil Heavy Metal Pollution Using PMF and RF Model: A Case Study of a Typical Industrial Park in Northwest China	GAO Yue, LÜ Tong, ZHANG Yun-kai, <i>et al.</i> (3488)
Source Analysis of Soil Heavy Metals in Agricultural Land Around the Mining Area Based on APCS-MLR Receptor Model and Geostatistical Method	ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (3500)
Source Analysis of Heavy Metals in Typical Farmland Soils Based on PCA-APCS-MLR and Geostatistics	WANG Mei-hua (3509)
Characteristics and Risk Evaluation of Heavy Metal Contamination in Paddy Soils in the Three Gorges Reservoir Area	LIU Ya-jun, LI Cai-xia, MEI Nan, <i>et al.</i> (3520)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Wanjiang Economic Zone	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (3531)
Evaluation and Source Analysis of Soil Heavy Metal Pollution in a Planting Area in Wanquan District, Zhangjiakou City	AN Yong-long, YIN Xiu-lan, LI Wen-juan, <i>et al.</i> (3544)
Heavy Metal Concentration, Source, and Pollution Assessment in Topsoil of Chuzhou City	TANG Jin-lai, ZHAO Kuan, HU Rui-xin, <i>et al.</i> (3562)
Analysis on the Distribution Characteristics and Influence Mechanism of Migration and Transformation of Heavy Metals in Mining Wasteland	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (3573)
Ecological Risk Assessment and Source Apportionment of Heavy Metals in Mineral Resource Base Based on Soil Parent Materials	WEI Xiao-feng, SUN Zi-jian, CHEN Zi-ran, <i>et al.</i> (3585)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals and Health Risk in Different Vegetables	QI Hao, ZHUANG Jian, ZHUANG Zhong, <i>et al.</i> (3600)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Wheat Grain in the Typical Sewage Irrigated Area of Shandong Province	WANG Fei, FEI Min, HAN Dong-nui, <i>et al.</i> (3609)
Prediction of Cadmium Uptake Factor in Wheat Based on Machine Learning	NIU Shuo, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (3619)