

云南大学厨余垃圾碳排放核算与低碳管理策略研究

赵鸿煜^{1*}, 崔维芯¹, 蔡玉晔¹, 曹建玉¹, 赵筱青^{1#}, 李灿锋²

¹云南大学地球科学学院, 云南 昆明

²中国地质调查局昆明自然资源综合调查中心, 云南 昆明

收稿日期: 2025年10月13日; 录用日期: 2025年11月19日; 发布日期: 2025年11月26日

摘要

在“双碳”战略与教育部“节能减排学校行动”推动下, 厨余垃圾处理成为绿色低碳校园建设的关键。本研究以云南大学呈贡校区及厨余垃圾处理地为对象, 通过实地调研与问卷调查, 量化分析其厨余垃圾碳排放。结果显示, 校区厨余垃圾日总碳排放为1163.65 kg CO₂, 其中处理环节排放最高(1073.45 kg CO₂/d), 收集(89.75 kg CO₂/d)与运输(0.45 kg CO₂/d)环节次之; 同时发现师生食物浪费、垃圾分类意识存在差异, 且与校园管理、宣传教育紧密相关。据此提出高校厨余垃圾减排需聚焦管理机制优化与关键技术升级, 为高校系统化推进减排、助力“零碳”校园建设提供实证参考与决策依据。

关键词

厨余垃圾, 碳排放, 低碳路径

Study on Carbon Emission Accounting and Low-Carbon Management Strategies of Kitchen Waste in Yunnan University

Hongyu Zhao^{1*}, Weixin Cui¹, Yuye Cai¹, Jianyu Cao¹, Xiaoqing Zhao^{1#}, Canfeng Li²

¹School of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming Yunnan

²Kunming Comprehensive Natural Resources Survey Center, China Geological Survey, Kunming Yunnan

Received: October 13, 2025; accepted: November 19, 2025; published: November 26, 2025

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 赵鸿煜, 崔维芯, 蔡玉晔, 曹建玉, 赵筱青, 李灿锋. 云南大学厨余垃圾碳排放核算与低碳管理策略研究[J]. 环境保护前沿, 2025, 15(11): 1601-1618. DOI: 10.12677/aep.2025.1511174

Abstract

Driven by the “dual carbon” strategy and the “Energy Conservation and Emission Reduction School Action” initiated by the Ministry of Education, kitchen waste treatment has become a key aspect of green and low-carbon campus construction. This study focuses on the Chenggong Campus of Yunnan University and the kitchen waste treatment site, quantifying the carbon emissions from kitchen waste through field research and questionnaire surveys. The results show that the total daily carbon emissions from kitchen waste in the campus are 1163.65 kg CO₂, with the highest emissions occurring during the treatment process (1073.45 kg CO₂/d), followed by collection (89.75 kg CO₂/d) and transportation (0.45 kg CO₂/d). It was also found that there are differences in food waste and garbage classification awareness among teachers and students, which are closely related to campus management, publicity, and education. Based on this, it is proposed that reducing kitchen waste in universities should focus on optimizing management mechanisms and upgrading key technologies, providing empirical references and decision-making basis for universities to systematically promote emission reduction and contribute to the construction of a “zero carbon” campus.

Keywords

Kitchen Waste, Carbon Emissions, Low-Carbon Path

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

厨余垃圾又称湿垃圾，是居民日常生活、食品加工、餐饮服务及单位供餐等活动产生的废弃物，包括果皮、食物残渣、蛋壳等[1]。据统计，2010年全国城市生活垃圾清运量达1.58亿吨，无害化处理率仅77.9%[2]，而厨余垃圾占我国生活垃圾总量的40%~60%[3]-[5]。当前，厨余垃圾多与其他垃圾混合填埋或焚烧，这种传统模式不仅处理压力大、资源利用率低，还伴随环境风险[6][7]，探索可持续的处置管理模式已成为迫切需求。

厨余垃圾的合理处置是全球性问题，美国、欧盟、日本等已形成适配国情的技术方法与产业链[8]。美国超50%家庭配备厨余垃圾处理器，从源头实现分类，使厨余垃圾占生活垃圾比例仅14%[9][10]；欧盟以立法为核心，20世纪90年代禁止厨余垃圾直接填埋，2003年进一步严禁用厨房泔水饲喂除皮毛类动物外的其他生物[11][12]；日本每年有机垃圾约2000万吨(家庭厨余垃圾占50%)，回收率却高达80%[13]。反观我国，虽随垃圾分类政策推进，逐步重视厨余垃圾单独处置，推动其向减量化、资源化、无害化转型以降低填埋依赖[9]，但尚未建立完善的独立收运体系与系统处置技术方案，亟需科学方法实现高效处理。

在“双碳”愿景下，高校作为公共机构代表肩负可持续发展使命[14]。近十年全国高校在校生规模扩大，校内饮食全链条(原材料生产、运输、加工、处置)均产生温室气体[15]；师生食品消费量大，厨余垃圾及相关碳排放突出，且大学生食品浪费现象普遍[16]。同时，大学生思想活跃、易接受新理念，其低碳生活方式直接影响低碳校园建设[17][18]，是低碳理念传播的核心群体，故高校厨余垃圾管理与碳减排研究具有特殊价值。基于此，本研究以云南大学呈贡校区三个食堂厨余垃圾为对象，通过实地调研、问卷等方法，覆盖“产生-运输-处理”全流程，聚焦全生命周期温室气体排放，核算碳排放量，为优化食物

废弃物及厨余垃圾的低碳管理模式提供政策建议。

2. 数据来源与方法

2.1. 数据来源

本文关于校园厨余垃圾研究的数据来源可分为三类：一是实地调研类，包括线上线下抽样的师生问卷、实地称重/测算、学校后勤记录、运输合作单位运营台账、处理厂日常台账等，用于获取行为、流程的一手数据；二是机构公开类，涵盖云南大学官网、学校校历、《中国产品全生命周期温室气体排放系数集(2022)》等，提供基础信息与行业标准数据；三是文献数据库类，涉及 SimaPro 数据库、徐涛等学者的相关研究、李娜/胡刚等的系数成果，为碳排放核算提供参考参数(见表 1)。多类型来源结合，既保障了数据的真实性，也兼顾了核算的科学性。

Table 1. Research data reference sources
表 1. 研究数据参考来源

数据类型	具体数据内容	数据来源	数据用途
师生问卷调查数据	基础信息、饮食行为、认知态度、改进建议	线上(问卷星)+ 线下(食堂/教学楼定点发放)抽样调查	分析校园厨余垃圾产生的人为影响因素，识别师生认知与行为差异
实地调研数据	校园基础信息数据	学校人员规模	设计抽样方案，评估样本代表性
		全年在校时间分层	学校校历计算分析
	校园厨余垃圾收集环节数据	高密度聚乙烯泔水桶单重 泔水桶日均使用数量、泔水桶使用年限	实地称重测量 实地调查及学校后勤部门统计记录
	校园厨余垃圾运输环节数据	运输车辆油耗、日均运输距离、运输车辆燃油类型	运输合作单位(昆明清缘润通环保科技有限公司)运营记录、实地跟车测算
	校园厨余垃圾处理环节数据	日均厨余垃圾处理总量、预处理后焚烧/厌氧发酵垃圾占比、单位厨余垃圾产干化沼渣污泥量 厌氧发酵产气量、发电量 厌氧发酵阶段能耗	处理厂日常运营台账 处理厂技术参数报告 处理厂设备运行能耗监测数据
	碳排放系数数据	收集环节：高密度聚乙烯碳排放系数 运输环节：柴油油耗 柴油碳排放系数 生活垃圾焚烧系数 处理环节：厌氧发酵系数 工业固废(干化沼渣)处理系数	SimaPro 数据库 徐涛[19] SimaPro 数据库 李娜[20]，徐李娜[21]，胡刚[22] Kim M [23]，Bernstad A [24]，Kim J [25] 《中国产品全生命周期温室气体排放系数集(2022)》
			计算收集阶段容器消耗对应的碳排放量 计算运输阶段燃油燃烧产生的碳排放量 计算处理阶段(预处理、厌氧发酵、干化沼渣焚烧)各子环节碳排放量 作为碳排放核算的核心参数，确保核算结果科学性

2.2. 研究方法

2.2.1. 问卷调查法

本研究采用线上线下问卷结合方式，针对云南大学呈贡校区本科生、研究生、博士生及教职工开展调查，旨在了解其对厨余垃圾产生、收集与处理的认知、态度及行为。研究共计发放问卷 820 份，回收有效问卷 696 份，有效回收率达 84.9%。抽样方法采用分层抽样与系统抽样相结合，师生抽样层面，对学生先按学院分层，再在各学院内按本科生、研究生、博士生进行简单随机抽样；对教职工按部门类别分层，在各层内随机抽样。最终抽取样本中，本科生 326 人、硕士研究生 307 人、博士研究生 50 人、教职工 55 人(数据参考云南大学官网：学校现有教职员工 3500 余人(不含附属医院)，全日制本科生近 18,000 人、硕士研究生近 17,000 人、博士研究生近 2300 人)。厨余垃圾产生量抽样层面，先按工作日、周末/节假日、寒暑假分层(据校历，学校一年中在校工作日 174 天、周末/节假日 107 天、寒暑假 85 天)，再在各时间段内系统抽样，最终抽取工作日 10 天、周末/节假日 6 天、寒暑假 5 天。对抽取天数，在三个食堂分别统计各时段厨余垃圾产生量，以样本数据估计整体情况。

问卷围绕“认知-态度-行为-消费习惯”四大核心维度设计，题目以客观题为主、主观题为辅，兼顾数据统计效率与信息完整性。根据不同题目测量目标，采用 3 类标准化量表(表 2)，确保数据可量化、可对比。

Table 2. Questionnaire scale

表 2. 问卷量表

量表类型	作用	举例
定类量表	用于无顺序差异的分类信息	如身份(A.本科生/B.硕士等)、专业背景(A.理工科/B.人文社科等)，仅用于群体划分与频次统计。
定序量表	用于有等级差异但无固定间隔的信息	如厨余垃圾分类了解程度(A.非常了解/B.比较了解/C.一般/D.不太了解/E.完全不了解)、剩饭剩菜情况(A.总是/B.经常/C.偶尔/D.从不)，可通过等级编码(如 1~5 分)分析认知与行为的强弱程度。
定距量表	用于有固定间隔的数量信息	如平均每周内就餐次数(A.0 次/B.1~5 次/C.6~10 次/D.11~15 次/E.16 次及以上)，可计算不同群体的就餐频率均值，对比差异。

针对问卷核心的“认知态度”模块，采用以下方法检验内部一致性(信度检验)，如表 3 所示。

Table 3. Tests of validity

表 3. 信度检验

检验系数	方法举例
Cronbach's α 系数	对第 8 题(分类了解程度)、第 10 题(浪费与碳排放关系)、第 11 题(低碳处理方式)等定序量表题目，计算 Cronbach's α 系数，若结果 ≥ 0.7 ，表明模块内题目一致性良好，数据可靠。
KR-20 系数	对第 9 题(厨余垃圾界定多选题)这类二分计分题目(选对计 1 分、选错计 0 分)，采用 KR-20 系数检验，若 ≥ 0.6 ，说明题目区分度与可靠性达标。

通过内容效度与结构效度确保问卷测量目标的准确性(效度检验)，如表 4 所示。

后续则采用三类方法开展数据分析。一是用 SPSS 26.0 做描述性统计，以图表呈现不同群体剩饭频率、分类了解程度等指标；二是通过 t 检验、ANOVA 等做推断统计，分析差异、探究关联并构建回归模型；三是对开放题定性分析，聚类建议提炼核心方向，为校园低碳政策提供依据。

Table 4. Validity test
表 4. 效度检验

检验类型	方法
内容效度	邀请 2 名环境科学领域学者、1 名高校后勤管理负责人，评估题目与“厨余垃圾 - 碳排放认知”研究主题的契合度，删除或修改表述模糊、偏离主题的题目(如优化选项表述，确保无歧义)。
结构效度	通过预调查(选取 50 名师生填写)，对“认知态度”模块数据进行探索性因子分析(EFA)，若各题目因子载荷量 ≥ 0.5 ，且提取的公因子能解释总方差的 60%以上，表明模块结构合理，测量逻辑清晰。

2.2.2. 实地调研及访谈法

我们主要分三个阶段进行调研，在收集阶段，通过统计三个食堂厨余垃圾产生量，记录用餐人数与垃圾量关系，观察垃圾收集流程，记录收集频率、容器规格，观察厨余垃圾的产生情况。在运输阶段，通过跟踪运输车辆，记录运输路线、时长，车型及荷载质量，燃油类型及耗油量，调查运输工具碳排放情况。在处理阶段，详细了解处理厂的位置，厨余垃圾处理工艺，统计不同处理阶段碳排放数据，查看处理厂环保措施。通过以上三个阶段的调研，我们基本掌握了厨余垃圾的相关情况。

针对食堂工作人员，询问日常菜品准备、剩菜原因、对减少厨余垃圾建议。了解食堂运营管理策略、控制厨余垃圾措施及与处理厂合作情况。针对处理厂工作人员，问处理流程细节、常见问题、相关数据的获取及处理厂未来规划。了解处理厂接收垃圾量、成本、碳排放核算方式，以及对高校厨余垃圾处理意见。通过两个环节的访谈，揭示了人类活动对碳排放的影响。

2.2.3. 碳排放核算方法

厨余垃圾全生命周期各环节会对环境产生影响，因此核算其温室气体排放量至关重要[26]。研究先梳理厨余垃圾收集、运输、处理环节的温室气体种类与排放情况，结合云南大学厨余垃圾处理流程(收集方式、运输工具、处理设施等)，核算全生命周期温室气体排放量，重点计算收集(如收集容器消耗)、运输(如车辆燃油 CO₂)、处理(如焚烧 CO₂、电能消耗)三阶段排放量，进而分析排放主环节与影响因素，为校园节能降碳提供支撑。

本次核算严格遵循《IPCC 国家温室气体清单指南(2019)》“废物处理”章节框架，结合《中国产品全生命周期温室气体排放系数集(2022)》(简称《2022 系数集》)本地化数据要求，采用“过程分析法”构建模型，并通过 SimaPro 9.0 软件量化三阶段碳排放，确保逻辑与国际方法论一致、数据可追溯。各阶段核算标准：收集阶段参照《IPCC 指南(2019)》“塑料产品生命周期碳排放”方法，核算高密度聚乙烯泔水桶的生产与消耗碳排放。运输阶段依据《IPCC 指南(2019)》“移动源”核算方法，计算柴油动力运输车辆燃油燃烧的 CO₂ 排放。处理阶段含预处理(焚烧)、厌氧发酵、干化沼渣污泥焚烧三子环节；其中，预处理参照《2022 系数集》“生活垃圾焚烧处理碳排放”方法；厌氧发酵参考《IPCC 指南(2019)》“生物处理过程碳排放”方法，计入沼气碳抵消效应；干化沼渣污泥焚烧按《2022 系数集》“工业固体废物焚烧处理碳排放”要求执行。

3. 结果分析

3.1. 厨余垃圾产生与管理现状

3.1.1. 厨余垃圾产生量

项目主要通过实地调研云南大学呈贡校区三个食堂(知味堂，余味堂，品味堂)及访问食堂相关工作人员，发现食堂所产生的厨余垃圾中 20%是菜渣，80%是用餐时的剩饭剩菜(菜和汤浪费量多，米饭少)。且

在收集阶段使用的泔水桶容量为 80 L。通过统计分析发现，云南大学呈贡校区厨余垃圾每天的产生量为 2404 kg~4708 kg (表 5)，产生量变化图见图 1。

Table 5. Kitchen waste production
表 5. 厨余垃圾产生量

餐厅名称	泔水桶数(桶/d)			厨余垃圾质量(kg/d)		
	工作日	周末/节假日	寒暑假	工作日	周末/节假日	寒暑假
楠苑食堂	22.5	17.5	9	1980	1540	792
楸苑食堂	13.5	11.5	6	1188	1012	528
梓苑食堂	17.5	13.5	8	1540	1188	704

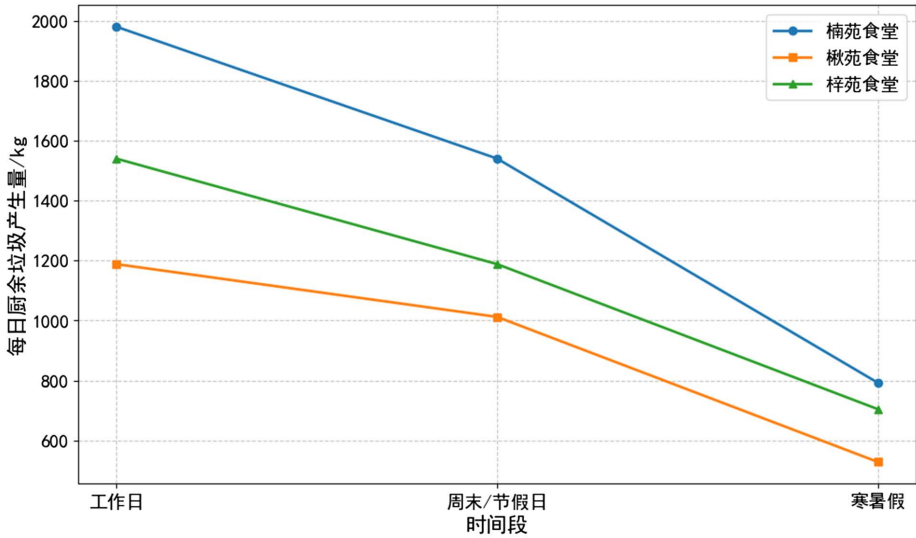


Figure 1. Chart of kitchen waste generation in Chenggong Campus, Yunnan University
图 1. 云南大学呈贡校区厨余垃圾产生量变化图

3.1.2. 厨余垃圾运输方式及路线

1) 运输方式

通过实地访谈及跟踪调查，我们发现云南大学及其周围乃至整个昆明绝大部分地区(五个主城区：五华区，西山区，呈贡区，盘龙区，官渡区)的厨余垃圾的运输及处理都是由昆明清缘润通环保科技有限公司负责。公司每天会指派专门车辆于 9:00~10:00 到云南大学呈贡校区运输厨余垃圾至公司处理厂。所派车辆总质量为 11,990 kg，荷载质量为 6035 kg，燃柴油。

2) 运输路线

昆明清缘润通环保科技有限公司 - 云南大学 - 白云村 - 昆明清缘润通环保科技有限公司，总路程为 69.1 千米(如图 2、图 3)，车辆密封运输，避免了运输环节的污染。

3.1.3. 厨余垃圾处理

运输环节采用车辆密封运输，全程避免污染；公司占地 65 亩，位于昆明市官渡区昆明餐厨垃圾处理厂，因地势较高且远离城区，进一步降低污染影响。其核心处理工艺为“全自动综合预处理 + 高温厌氧杀菌产沼 + 油气肥资源化处理”(如图 4)，搭配先进设备实现模块化流水线处理，分室内(分车间)与室外两大场景作业，保障餐厨废弃物无害化与资源化。

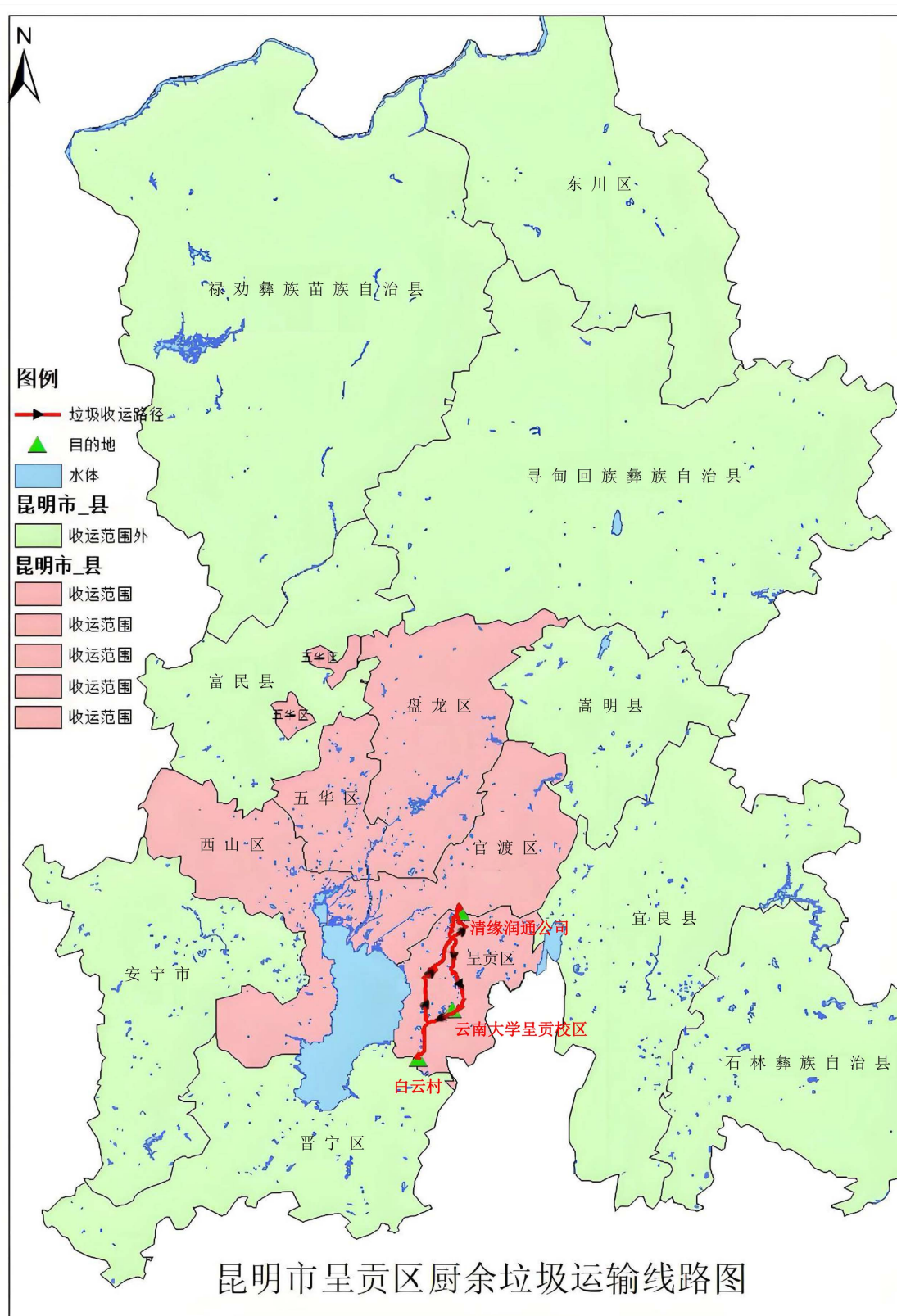


Figure 2. Haulway
图 2. 运输路线

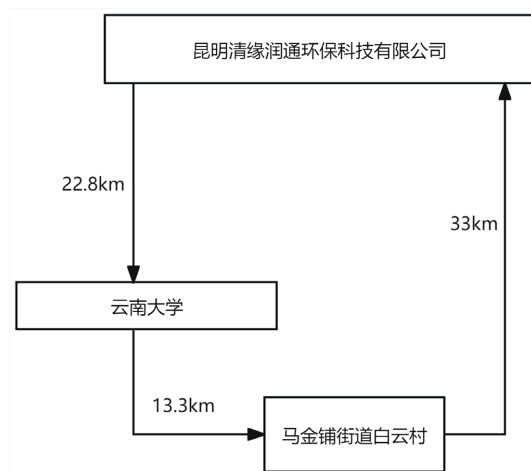


Figure 3. Transport flow chart
图 3. 运输流程图

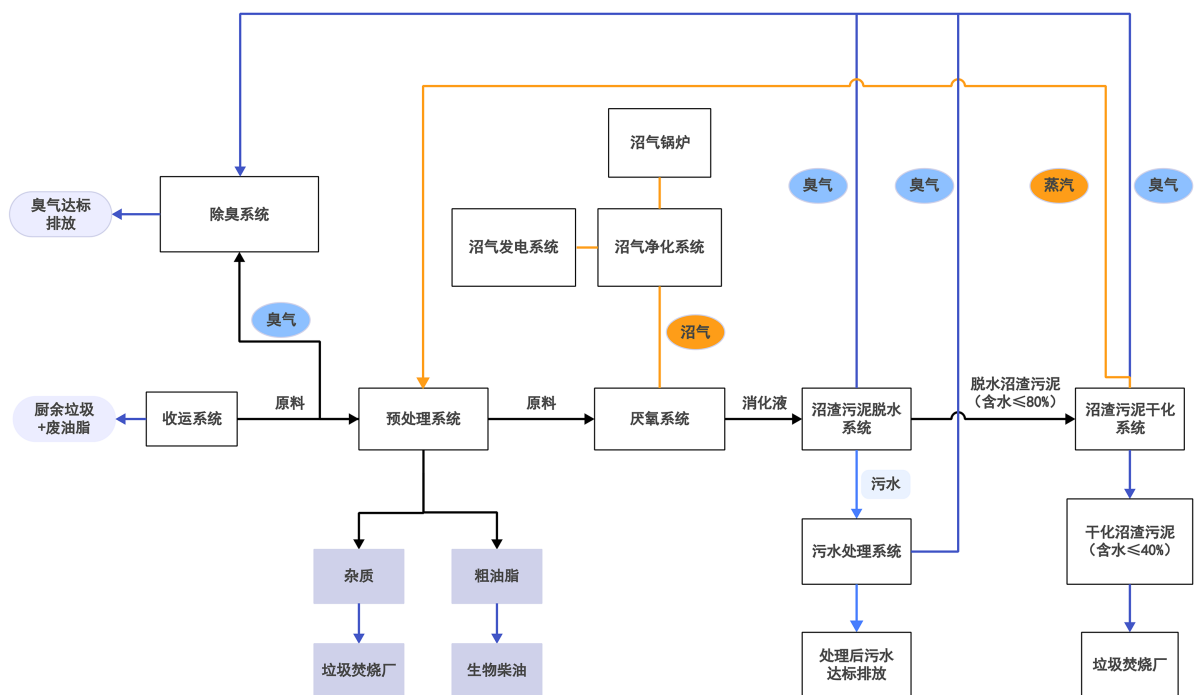


Figure 4. Qingyuan Runtong company kitchen waste disposal process
图 4. 清缘润通公司厨余垃圾处理流程

餐厨废弃物实行集中收运、全程监管，收运数据实时上传至主管部门。进入处置生产线后，经分选、制浆、高温厌氧反应生成沼气、有机沼渣、工业油脂三类半成品，再通过沼气提纯、有机肥生产、生物柴油生产单元，分别转化为天然气、有机肥、生物柴油，既杜绝废弃物非法利用，又产出清洁能源以减少碳排放。目前公司已配备收运监管 DCS 系统、专用收运车辆及废弃物桶，确保所有餐厨废弃物均用于无害化处理与资源化利用，彻底阻断传统养殖投喂、非法提炼食用油等违规途径。

3.2. 全生命周期碳排放核算结果

采用碳排放系数法，基于《中国产品全生命周期温室气体排放系数集(2022)》标准，利用 SimaPro 软

件构建核算模型，结合云南大学呈贡校区的实地调研数据，对厨余垃圾处理全过程的碳排放量进行了系统核算。

3.2.1. 收集阶段

厨余垃圾收集阶段的碳排放主要来源于收集容器——高密度聚乙烯所制成的泔水桶。通过称重得一个泔水桶的质量为 3.64 kg (假设一个泔水桶用两年，则一个泔水桶每天消耗的质量为 0.005 kg)，根据调查结果云南大学一天使用的泔水桶数量为 42.8 个，计算得碳排放系数为 2.09 kg CO₂/kg 高密度聚乙烯(如图 5)。

收集阶段的碳排放量 = 碳排放系数 × 单日单桶消耗质量 × 单日使用桶数

计算得收集阶段的碳排放为 0.45 kg CO₂/d

Se	impact category /	unit	Total	高密度聚乙烯	Diesel, from crude oil,
☒	IPCC GWP 100a	kg CO2 eq	2.09	x	2.09

Figure 5. High density polyethylene carbon emission coefficient
图 5. 高密度聚乙烯碳排放系数

3.2.2. 运输阶段

厨余垃圾运输阶段的碳排放主要来自柴油的燃烧。车量的荷载质量为，油耗为 0.25 L/km，柴油的密度参考徐涛的硕士论文[19]为 0.86 kg/L，厨余垃圾每天运输的总距离为 69.1 km。计算得柴油的碳排放系数(图 6)为 6.04 kg CO₂/kg 油。

单日油耗 = 单日运输距离 × 油耗 × 柴油密度

计算得运输过程中油耗为 14.86 kg 油/d

运输阶段碳排放量 = 柴油碳排放系数 × 单日油耗

计算得运输阶段的碳排放为 89.75 kg CO₂/d

Se	impact category /	unit	Total	柴油碳排放	Diesel, from crude oil,
☒	IPCC GWP 100a	kg CO2 eq	6.04	x	6.04

Figure 6. Diesel carbon emission coefficient
图 6. 柴油碳排放系数

3.2.3. 处理阶段

根据调查研究，处理阶段可分为预处理阶段、厌氧发酵阶段和干化沼渣焚烧阶段，以下为碳排放产生的具体分析。

Table 6. The amount of kitchen waste treated in each treatment stage
表 6. 各处理阶段厨余垃圾处理量

处理阶段	垃圾处理量(kg/d)
预处理阶段	726.11
厌氧发酵阶段	3080.43
干化沼渣焚烧阶段	770.11
合计	3806.54

1) 预处理阶段

根据表 6 公司平均每天处理云南大学呈贡校区厨余垃圾 3806.54 kg, 通过预处理, 每天有 20% (726.11 kg) 生活垃圾运往焚烧厂处理。查阅相关文献[20]-[22], 得出焚烧生活垃圾的碳排放系数为 0.26 kg CO₂/kg 厨余垃圾。

$$\text{预处理阶段碳排放量} = \text{焚烧垃圾量} \times \text{焚烧碳排放系数}$$

计算得预处理阶段的碳排放为 188.79 kg CO₂/d

2) 厌氧发酵阶段

根据表 6 云南大学呈贡校区每日 80% 的厨余垃圾(即 3080.43 kg 发酵垃圾)进行厌氧发酵处理。因国内该领域研究与实践较少, 参考国外文献[23]-[25], 取其碳排放系数为 157 kg CO₂/t。依据昆明清缘环保科技有限公司数据: 厨余垃圾日均处理 500 t, 对应沼气产量 36527 m³/d (即 0.73 m³/kg)、日均发电量 7 万度(即 140 kWh/t); 厌氧发酵阶段能耗约 5.56 kWh/t, 经发电产能抵消后, 净产能为 134.44 kWh/t。结合生态环境部 2024 年 12 月发布的 2022 年版云南省级电网数据(火电碳排放系数 0.11 kg CO₂/kWh), 核算出抵消 CO₂ 排放系数为 14.79 kg CO₂/t。

$$\text{厌氧发酵厨余垃圾碳排放量} = \text{发酵垃圾量} \times \text{厌氧发酵碳排放系数}$$

$$\text{厌氧发酵发电的碳抵消} = \text{发酵垃圾量} \times \text{抵消的 CO}_2 \text{ 排放系数}$$

$$\text{厌氧发酵阶段的总碳排放} = \text{厌氧发酵厨余垃圾碳排放量} - \text{厌氧发酵发电的碳抵消}$$

计算得厌氧发酵阶段的碳排放为 438 kg CO₂/d

3) 干化沼渣污泥焚烧阶段

根据调查结果, 处理 1 kg 厨余垃圾产生的含水量小于 40%干化沼渣污泥质量为 0.25 kg。根据表干化沼渣焚烧阶段的垃圾处理量为 770.11 kg/d, 而干化沼渣污泥属于工业固体废物, 参照《中国产品全生命周期温室气体排放系数集(2022)》, 工业固废处理的排放当量约为 0.58 kgCO₂/kg。

$$\text{干化沼渣污泥焚烧得碳排放} = \text{焚烧阶段的垃圾处理量} \times \text{干化沼渣碳排放系数}$$

计算得干化沼渣污泥焚烧得碳排放为 446.66 kg CO₂/d

所以, 处理阶段的碳排放为 1073.45 kg CO₂/d

3.3. 师生认知与行为特征分析

我们通过线上线下广泛发放问卷的方式, 了解云南大学呈贡校区全体师生在厨余垃圾产生现状及碳排放方面的认知, 一共收集 696 份有效问卷。参与者涵盖本科生、研究生、博士生及老师等不同身份群体, 其年龄、专业背景各异, 为全面了解校园内厨余垃圾相关情况提供丰富样本。具体分析如下:

1) 年龄层面, 18~25 岁群体占 62.64%, 26~35 岁占 18.1%, 36 岁以上及 18 岁以下占比均不足 8% (图 7), 年轻群体(本科、部分硕士生)的饮食与环保观念对结果影响显著。受访者中本科生占主导(52.3%), 硕士生占 32.04%, 博士生(4.17%)、教师(8.48%)及其他身份(3.02%)占比偏低(图 8), 本科生的观点将主导结果的倾向性。

2) 就餐习惯与食物浪费现状层面, 77.44%受访者主要在学校食堂就餐, 32.04%每周校内就餐 11~15 次, 24.57%为 6~10 次(图 9), 食堂运营直接影响学生饮食行为; 超 67%受访者(“总是” 36.49% + “经常” 31.47%)就餐有剩饭剩菜, 仅 8.19% “从不” 浪费(图 10), 浪费加重厨余垃圾处理负担与碳排放。

3) 认知层面, 52.02%受访者“非常了解”(21.12%)或“比较了解”(31.9%)厨余垃圾分类方法, 但 14.08% “不太了解”、5.89% “完全不了解”(图 11), 需补充分类知识宣传; 53.45%认为食物浪费会增加碳排放, 却有 25.43%认为“会减少”、11.49%认为“无关”(图 12), 公众对二者关系的认知存在明显误区。

4) 处理方式与应对措施层面, 30.75%受访者认可堆肥为最优厨余垃圾减碳处理方式, 厌氧消化(30.46%)、焚烧(29.89%)次之, 填埋(8.91%)最低(图 13), 堆肥可作为校园优先技术; 85.34%认为“加强宣传教育”关键, 80.32%认可“按需取餐”, 76.44%支持“回收利用”与“小份菜”(图 14), 这些措施可多维度减少浪费与碳排放。

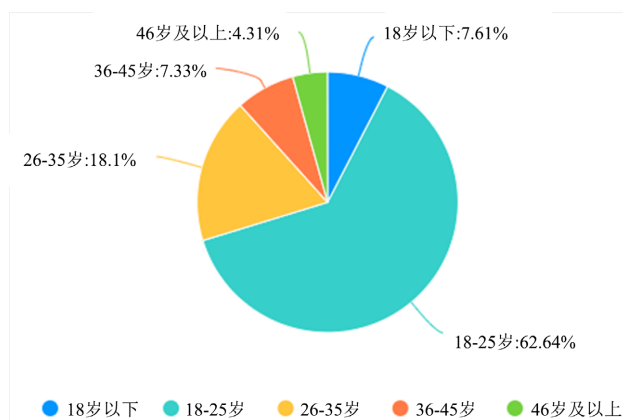


Figure 7. Percentage of survey respondents
图 7. 调查者身份占比

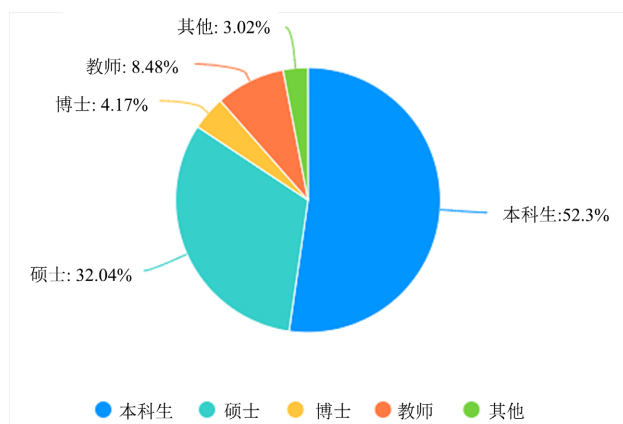


Figure 8. Age distribution of surveyors
图 8. 调查者年龄占比

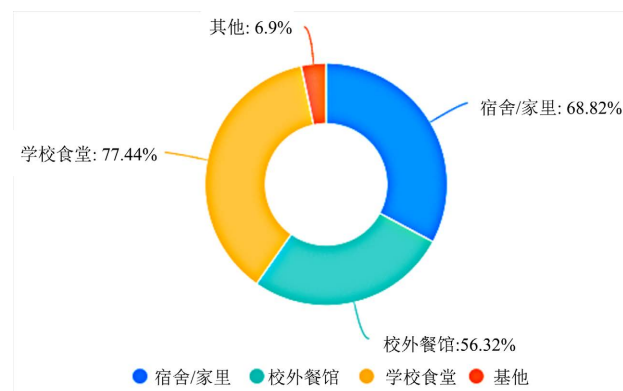


Figure 9. Percentage of dining establishments
图 9. 就餐场所占比

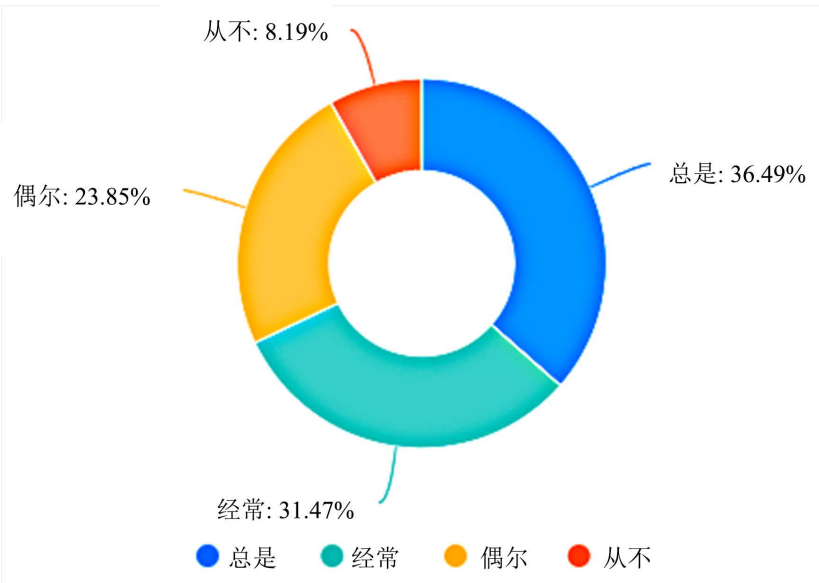


Figure 10. Food waste accounted for
图 10. 食物浪费情况占比

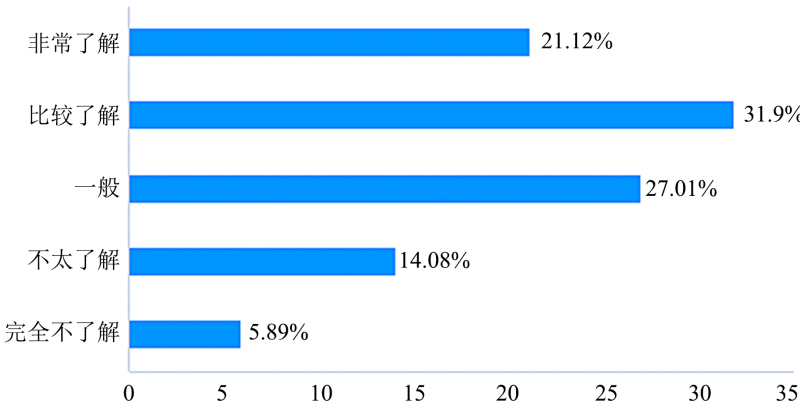


Figure 11. Share of understanding
图 11. 了解情况占比

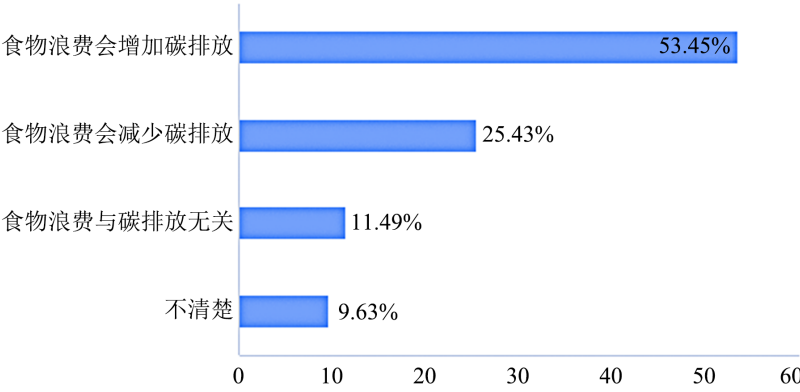


Figure 12. Carbon emission awareness ratio
图 12. 碳排放认知占比

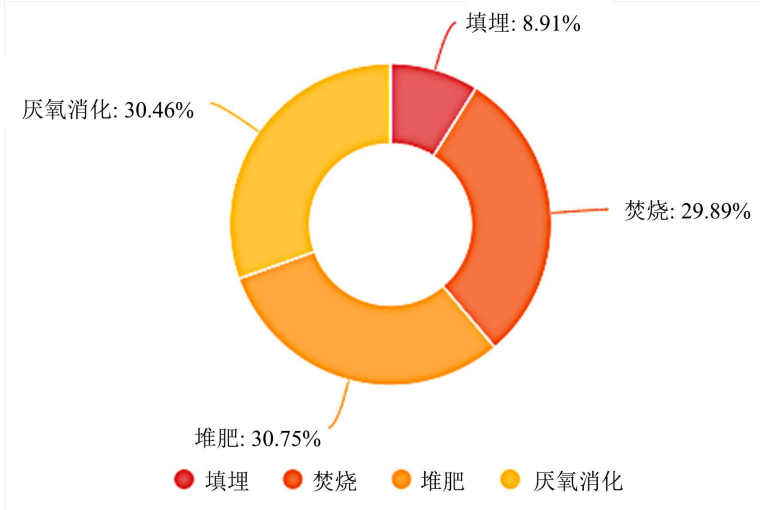


Figure 13. Cognitive proportion of effective treatment methods
图 13. 有效处理方式认知占比

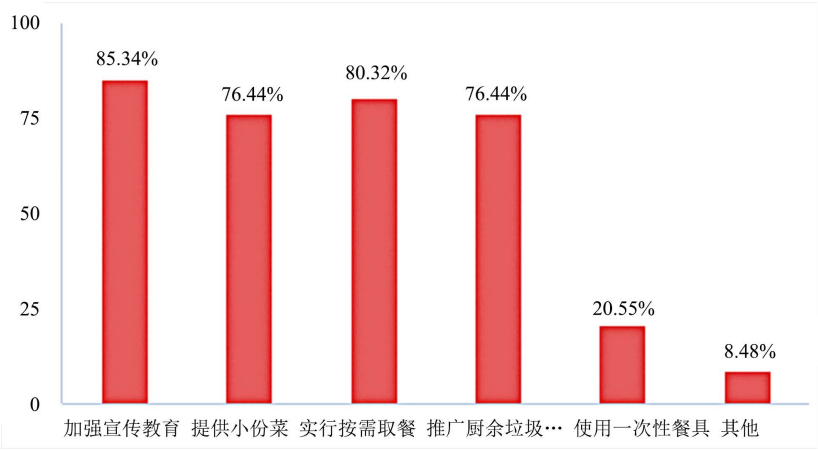


Figure 14. The proportion of carbon reduction measures
图 14. 降碳减排措施占比

4. 高校厨余垃圾低碳管理路径

针对云南大学厨余垃圾管理现状和碳排放情况，提出了以下建议。

- 1) 完善餐厨垃圾分类回收制度。高校需先摸清本校厨余垃圾治理现状，引进先进技术经验，制定适配本校实际的分类回收及全流程治理制度，在提升效率的同时实现食物残渣无害化、资源化处理；并公开全流程信息，接受师生与社会监督。
- 2) 强化餐厨垃圾分类管理。依据食堂人流量、用餐区域分布规划回收点位置与数量，用餐高峰期可临时增点避免拥挤；定期评估使用情况，动态调整布局以保障回收效率。针对当前餐盘中残渣混纸巾、影响厨余垃圾纯度的问题，增设分类回收桶并明确标识，配合宣传引导减少混投，降低后续处理难度，规范分类与标识。并通过定期培训食堂工作人员，使其能正确引导师生分类，并做好回收点清理维护；安排专人监督投放行为，对违规投放以宣传教育纠正为主，必要时辅以惩罚措施。
- 3) 推行小份配餐制度。高校食堂可设置小份主食、小份菜并差异化定价，实现精细化供餐以减少浪费[27]。例如清华大学紫荆公寓区桃李园餐厅，炒菜分标准份与小份，熟食按两称重售卖，主食(米饭、

馒头)分多规格(米饭 150~470 克、馒头切四分)。高校可参考此模式,结合本校就餐情况与学生口味偏好,推行“小份菜”“半份菜”,降低菜品剩余量。

4) 引导师生合理消费意识。一是以日常灌输绿色消费理念为主,建立“劝诫引导优先、惩罚为辅”的机制,降低食品浪费率;二是结合性别、年级差异,通过班级(第二课堂、主题班会等)与网络渠道开展差异化宣传,普及“拒绝浪费”观念;三是利用校园环境引导用餐者树立合理消费意识[28]。

5. 结论与讨论

5.1. 结论

1) 问卷调查(696 份有效问卷)显示,受访者以 18~25 岁本科生为主,超 67%存在剩饭剩菜现象。单因素方差分析(ANOVA)表明,不同身份群体剩饭频率差异显著($F = 8.23, p < 0.01$),本科生剩饭频率(均值 3.24)高于教师(均值 2.15);多元线性回归显示,“饭菜分量感知”($\beta = 0.38, p < 0.001$)和“校内就餐频率”($\beta = 0.25, p < 0.01$)是食物浪费关键影响因素,模型 $R^2 = 0.42$ 。认知层面,独立样本 t 检验显示理工科师生“食物浪费-碳排放”认知得分(均值 4.12)高于人文社科师生(均值 3.56) ($t = 5.37, p < 0.001$);卡方检验表明,18~25 岁群体认知偏差率(28.7%)高于 36 岁以上群体(15.2%) ($\chi^2 = 12.56, p < 0.01$)。

2) 核算结果显示,收集、运输、处理阶段日碳排放分别为 0.45 kg CO₂、89.75 kg CO₂、1073.45 kg CO₂,日总排放 1163.65 kg CO₂,人均日排放 0.068 kg CO₂(以 17,000 名师生计)。处理阶段占比 92.3%(干化沼渣焚烧 41.9%、厌氧发酵 37.7%、预处理焚烧 12.7%),运输阶段占 7.7%,收集阶段占比不足 0.1%。该结果提示,厨余垃圾相关碳排放对环境产生一定影响,如可能加剧温室效应、对生态平衡造成潜在威胁,因此,针对厨余垃圾开展降碳减排工作具有重要意义。

5.2. 讨论

5.2.1. 与国内外同类研究比较

1) 人均碳排放与排放结构:本研究人均日排放(0.068 kg CO₂/人)低于国内太原理工大学(0.092 kg CO₂/人,李婧等,2022),高于日本东京某高校(0.055 kg CO₂/人, Tanaka *et al.*, 2020)。差异源于饮食结构(云南大学蔬菜占比高)与处理技术(日本高校以源头分类+堆肥为主)。处理阶段占比(92.3%)与国内多数高校(85%~95%)一致,高于欧盟高校(60%~70%, EU H2020 Project, 2019),因欧盟高校源头分类回收率超 60%,国内不足 30%。

2) 运输阶段碳排放:本研究运输排放占比 7.7%,高于天津理工大学(4.2%,赵剑颖等,2020),低于广州另一高校(10.5%,钟莉等,2022)。差异源于运输距离(北京 15 km、本研究 69.1 km、昆明另一高校 90 km)与车辆类型(北京用新能源车辆)。

3) 认知与行为关联:本研究“食物浪费-碳排放”认知正确率(53.45%)低于新疆农业大学(68.3%,李佳玲等,2021),高于西部某高校(42.1%,王建武等,2017),因西部资源有限、云南大学宣传缺乏针对性。理工科师生认知得分高,与国际研究结论一致(Bernstad *et al.*, 2012)。

5.2.2. 总结与未来展望

本研究围绕云南大学厨余垃圾碳排放展开深入探究,全面剖析了校园内厨余垃圾从产生到处理各环节的情况。通过对师生认知的调研,以及对收集、运输、处理阶段碳排放数据的分析,揭示了当前校园厨余垃圾管理存在的问题与挑战,明确了减碳减排的紧迫性和重要性。研究发现,师生在食物浪费和垃圾分类意识上参差不齐,这与校园管理措施、宣传教育效果密切相关。在处理环节,技术短板和衔接问题影响了减碳效率。针对这些问题提出的高校引导和技术改善建议,涵盖了制度建设、行为引导、技术

提升等多个层面,具有较强的针对性和可操作性。

未来,希望云南大学能积极践行“零碳”校园理念,将研究成果转化为实际行动,切实推动各项建议的落地实施。也期待其他高校能从中汲取经验,共同探索适合校园场景的厨余垃圾低碳管理模式。此外,随着科技进步和社会发展,后续研究可进一步关注新型处理技术的应用,以及如何利用智能化手段优化管理流程,持续为校园可持续发展贡献力量,助力实现更大范围的绿色发展目标。

基金项目

2024 年云南大学校级大学生科技创新项目(编号: 20247023)。

参考文献

- [1] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/T19095-2019 生活垃圾分类标志[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [2] 国家统计局. 2011 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011.
- [3] Huang, Q., Wang, Q., Dong, L., Xi, B. and Zhou, B. (2006) The Current Situation of Solid Waste Management in China. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, **8**, 63-69. <https://doi.org/10.1007/s10163-005-0137-2>
- [4] Wang, H. and Nie, Y. (2001) Municipal Solid Waste Characteristics and Management in China. *Journal of the Air & Waste Management Association*, **51**, 250-263. <https://doi.org/10.1080/10473289.2001.10464266>
- [5] Zhang, D.Q., Tan, S.K. and Gersberg, R.M. (2010) Municipal Solid Waste Management in China: Status, Problems and Challenges. *Journal of Environmental Management*, **91**, 1623-1633. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.03.012>
- [6] 梁政. 厨余垃圾处理技术及综合利用研究[J]. 中国资源综合利用, 2004(8): 36-38.
- [7] 张振华. 厨余垃圾的现状及其处理技术综述[J]. 再生资源研究, 2007(5): 31-34.
- [8] 张慧. 基于全生命周期的厨余垃圾处置利用技术综合评价研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- [9] 丁瑜. 各国厨余垃圾处理一瞥[J]. 百科知识, 2020(25): 13.
- [10] 张斌, 赵立杰. 国外家用餐厨垃圾处理机对周边环境的影响分析[J]. 环境卫生工程, 2016, 24(5): 86-88.
- [11] Communities, E. (2000) Success Stories on Composting and Separate Collection. European Commission Directorate-General for the Environment.
- [12] 许晓杰, 冯向鹏, 李冀闽, 等. 国内外餐厨垃圾处理现状及技术[J]. 环境卫生工程, 2014, 22(3): 31-33.
- [13] 时睿佳, 宋啸博, 王御霏, 等. 国内外厨余垃圾现状及资源化处理方法[J]. 现代盐化工, 2020, 47(4): 68-69.
- [14] Weber, C.L. and Matthews, H.S. (2008) Food-Miles and the Relative Climate Impacts of Food Choices in the United States. *Environmental Science & Technology*, **42**, 3508-3513. <https://doi.org/10.1021/es702969f>
- [15] 赵剑颖, 何迎, 蔡欣茹, 等. 高校低碳饮食问卷调查——以天津理工大学为例[J]. 价值工程, 2020, 39(36): 71-72.
- [16] 朱强, 李丰, 钱壮. 全国高校食堂食浪费概况及其外卖碳足迹研究——基于 30 省(市)30 所高校的 9660 份问卷调查[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(1): 49-55.
- [17] 王建武, 陈康, 袁晓萍. 绿色发展理念视域下大学生低碳生活研究[J]. 学理论, 2017(9): 129-130.
- [18] 李佳玲, 王志强, 马任杰, 等. 基于碳足迹的大学生低碳生活行为研究——以新疆农业大学为例[J]. 科技风, 2021(24): 153-154.
- [19] 徐涛. 厨余垃圾生命周期评价[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [20] 李娜. 基于模糊数学理论的城市生活垃圾处理生命周期评价[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学图书馆, 2007.
- [21] 徐李娜. 武汉市生活垃圾处理系统生命周期评价[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学图书馆, 2009.
- [22] 胡刚. 城市生活垃圾全过程管理及生命周期3E评价决策研究[D]: [博士学位论文]. 重庆: 重庆大学图书馆, 2009.
- [23] Kin, M.H. and Kin, J.W. (2010) Comparison through a LCA Evaluation Analysis of Food Waste Disposal Options from the Perspective of Global Warming and Resource Recovery. *Science of the Total Environment*, **408**, 3998-4006.
- [24] Bernstad, A. and la Cour Jansen, J. (2012) Review of Comparative LCAs of Food Waste Management Systems—Current Status and Potential Improvements. *Waste Management*, **32**, 2439-2455. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.07.023>
- [25] Kim, J., Park, J., In, B., Kim, D. and Namkoong, W. (2008) Evaluation of Pilot-Scale In-Vessel Composting for Food

- Waste Treatment. *Journal of Hazardous Materials*, **154**, 272-277. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.10.023>
- [26] 刘文杰, 刘华. 厨余垃圾全生命周期低碳管理综述[J]. 中华环保联合会, 2021(1): 2-36.
- [27] 李婧. 高校食堂食物浪费的环境、成本影响及驱动因素分析[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2022.
- [28] 钟莉, 朱伟聪, 谢月铭, 等. 光盘行动背景下广州高校餐厨垃圾治理现状调查研究[J]. 中国资源综合利用, 2022, 40(4): 40-44.

附 录：碳排放计算相关说明

1、碳排放相关计算公式

收集阶段：收集阶段碳排放量 = 碳排放系数 × 单日单桶消耗质量 × 单日使用桶数

运输阶段：① 单日油耗柴油 = 单日运输距离 × 油耗 × 柴油密度

② 运输阶段碳排放量 = 柴油碳排放系数 × 单日油耗

处理阶段：① 预处理阶段碳排放量 = 焚烧垃圾量 × 焚烧碳排放系数

② 厌氧发酵阶段

厌氧发酵净产能 = 沼气发电平均发电量 - 厌氧发酵阶段能耗

抵消的 CO₂ 排放系数 = 厌氧发酵净产能 × 火电碳排放系数

厌氧发酵厨余垃圾碳排放量 = 发酵垃圾量 × 厌氧发酵碳排放系数

厌氧发酵发电的碳抵消 = 发酵垃圾量 × 抵消的 CO₂ 排放系数

厌氧发酵阶段的总碳排放 = 厌氧发酵厨余垃圾碳排放量 - 厌氧发酵发电的碳抵消

③ 干化沼渣焚烧阶段碳排放量 = 焚烧沼渣量 × 工业固废焚烧碳排放系数

2、公式参数取值来源及理由、系统边界

碳排放阶段	参数	取值	参数来源及取值理由	系统边界	
收集阶段	单个泔水桶质量	3.64 kg	实际称重数据	仅涵盖泔水桶生产环节的碳排放，不含运输、清洗等环节。	
	泔水桶使用年限	2 年	行业常规使用寿命，参考校园餐厨容器运维标准		
	单日使用泔水桶数量	42.8 个	实地调查统计平均值		
	高密度聚乙烯碳排放系数	2.09 kg CO ₂ /kg	SimaPro 软件计算结果		
运输阶段	车辆油耗	0.25 L/KM	车辆出厂技术参数	仅涵盖运输车辆柴油燃烧的直接碳排放，不含车辆制造、维护的隐含碳。	
	柴油密度	0.86 kg/L	参考徐涛[19]《厨余垃圾生命周期评价》中柴油的标准密度值)		
	单日运输总距离	69.1 km	实际运输路线统计值		
	柴油碳排放系数	6.04 kg CO ₂ /kg	SimaPro 软件计算结果		
处理阶段	预处理阶段		参考李娜[21]、徐李娜[22]、胡刚[23]等文献中城市生活垃圾焚烧的平均排放系数，与本研究厨余垃圾的成分(有机物占比约 60%~70%)匹配度较高	涵盖预处理后分流垃圾的焚烧处理(含垃圾在焚烧厂的燃烧过程)、焚烧尾气处理的直接碳排放(不包含预处理设备运行能耗、分流垃圾的转运能耗、焚烧厂设施建设的隐含碳排放。	
	厌氧发酵阶段	沼气产量	0.73 m ³ /kg 厨余垃圾	厨余垃圾处理地昆明清缘润通环保科技有限公司实测数据；	涵盖厨余垃圾厌氧发酵产沼气、沼气发电及发电过程中的能耗抵消，不包含发酵原料运输及设备建设的隐含碳排放。
		发电效率	140 kWh/t 厨余垃圾(折合 504 MJ/t)	厨余垃圾处理地昆明清缘润通环保科技有限公司实测数据	
		系统能耗	20 MJ/t 厨余垃圾	昆明清缘润通环保科技有限公司设备运行能耗监测数据	

续表

干化沼渣焚烧阶段	厌氧发酵碳排放系数	-98 kg CO ₂ /t	厨余垃圾(负排放代表碳固定) 参考 Kin M.-H. [24]、Bernstad A [25]、Kim J. -D [26]等国外权威研究, 该系数已考虑沼气甲烷回收利用的碳减排效应, 与本研究发酵工艺(中温厌氧 + 沼气发电)一致	
	云南省的火电碳排放系数	0.11 kg CO ₂ /kWh	根据云南省级电网排放因子的最新官方数据(2022 年版, 由生态环境部 2024 年 12 月发布)	
	工业固废焚烧碳排放系数	0.58 kg CO ₂ /kg	依据《中国产品全生命周期温室气体排放系数集(2022)》中“城市固废焚烧”类别标准系数, 符合本研究中沼渣的成分特性(灰分占比约 30%~40%)	涵盖干化沼渣的焚烧燃烧过程、焚烧尾气处理的直接碳排放; 不包含沼渣干化过程的能耗、沼渣转运的能耗、焚烧设备建设的隐含碳排放

3、处理阶段关键排放因子敏感性分析

为验证结果稳健性, 对关键排放因子进行±10%的波动分析:

- 1) 生活垃圾焚烧碳排放系数: 取值为 0.26 kg CO₂/kg, 当系数在 0.234~0.286 kg CO₂/kg 范围内波动时, 处理阶段总碳排放波动范围 1054.68~1092.22, 波动幅度仅 3.50%。
- 2) 厌氧发酵厨余垃圾碳排放系数: 取值为 157 kg CO₂/kg, 当系数在 141.3~172.7 范围内波动时, 处理阶段总碳排放波动范围为 1028.62~1118.28, 波动幅度仅 8.46%。
- 3) 干化沼渣碳排放系数: 取值为 0.58 kg CO₂/kg, 当系数在 0.522~0.638 kg CO₂/kg 范围内波动时, 处理阶段总碳排放波动范围 1032.39~1114.51, 波动幅度仅 7.64%。

结果表明, 本研究中排放因子的选择对最终结论影响较小, 计算结果具有较高的稳健性。