

DOI: 10.5846/stxb201305020897

周传斌, 徐琬莹, 曹爱新. 城市生活垃圾代谢的研究进展. 生态学报 2014, 34(1): 33–40.

Zhou C B, Xu W Y, Cao A X. Urban ecological metabolism of municipal solid waste: a review. Acta Ecologica Sinica 2014, 34(1): 33–40.

城市生活垃圾代谢的研究进展

周传斌*, 徐琬莹, 曹爱新

(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)

摘要: 城市代谢是导致城市发展、能量生产和废物排放的社会、经济和技术过程的总和。生活垃圾管理系统是一类典型的、具备社会、经济、自然要素的复杂系统, 它不仅同管理体制、技术水平和居民素质有关, 也贯穿生产、消费、流通、还原过程, 更和水体、土壤、大气、生物、矿产等自然环境紧密联系。综述了近年来基于城市生态系统代谢思路, 在生活垃圾碳、重金属、营养元素和能量的城市代谢等方面的研究进展, 分析了未来该领域研究需重点关注的方向。生活垃圾在城市生态系统中的能量流动、物质循环、代谢效率等方面的研究, 可为生活垃圾管理系统的评价、规划、工程、管理研究提供科学基础。

关键词: 生活垃圾; 城市代谢; 碳排放; 重金属

Urban ecological metabolism of municipal solid waste: a review

ZHOU Chuanbin*, XU Wanying, CAO Aixun

State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract: Urban ecological metabolism is the sum of society, economy and technology during the city development, energy production and waste emissions. Municipal solid waste management was a typical complex system combines social-economic-natural factors. Municipal solid waste management was effected by managing mechanism, technical level and environmental conscious of inhabitants. Municipal solid waste run through the urban metabolism processes of production, consumption, logistics and recycling, and even more, waste has a close relationship of natural environmental such as water body, soil, air, biology and mines. In this paper, we reviewed the literatures about municipal solid waste emission, transfer, and dump of carbon, heavy metal, energy and nutrients in the framework of urban ecological metabolism, and gave the important researching directions and contents in this area. Main findings were: 1) Carbon metabolism of municipal solid waste was important in the researches of urban carbon cycle, current researches were focus on the carbon emission regulation of waste treatment, comparison studies on carbon emission between different cities, carbon emission and transfer inside the cities, carbon detecting and accounting of solid waste and waste management for low carbon emissions. 2) Heavy metal metabolism was paid attentions by researchers, current researches were focus on the inputs and outputs of heavy metals through urban metabolism, source analysis of heavy metals in different municipal solid wastes, transferring and migrating of different heavy metals through different treating and disposing processes, migrating of heavy metal in soil-plant system brought from waste compost, and impacts to heavy metal metabolism by different collection separating and transporting system. 3) Nutrients and energy metabolism of municipal solid waste were reported less than carbon and heavy metals. Inputs, output and the balance of typical nutrients, such as nitrogen and phosphorus, were studied, and nutrients metabolism from municipal solid waste were important substrate flows in the process of urban metabolism. Energy indicators such as emergy and exergy were introduced to analyze the systemic metabolism efficiency of different municipal solid waste treatment and management.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(41201579); 国家“十二五”科技支撑计划课题资助项目(2012BAC13B04)

收稿日期: 2013-05-02; 修订日期: 2013-09-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: cbzhou@cees.ac.cn

<http://www.ecologica.cn>

systems. Based on the review of current researches, some important researching areas has been putting forward: 1) metabolism of municipal solid waste based on the rural-urban geographic and season differences, these researches could promote the progress on researching geography-ecology processes of urban ecological systems; 2) producing, transferring and fate models of carbon, heavy metals, nutrients and energy metabolism, and typical Chinese parameters for accounting and simulating the urban metabolism of municipal solid waste, these researches could promote the systemic and comparing studies of different waste metabolism systems; 3) experimental researches on key processes for carbon, heavy metals, nutrients and energy metabolism of municipal solid waste, for example, the deposit, transfer and emission processes of carbon cycle through collecting, separating, transporting and treating of municipal solid waste; and the quantitative studies on the heavy metals transferring processes impacting by different waste components, environmental temperature, pH value. The researches of energy transfer, material cycling and metabolism efficiency of municipal solid waste managing system could give scientific basis of assessment, planning, engineering and management of urban municipal solid waste management systems.

Key Words: municipal solid waste; urban metabolism; carbon emission; heavy metals

“城市代谢”的概念最早由 Wolman 于 1965 年提出, Kennedy 进一步将城市代谢定义为“导致城市发展、能量生产和废物排放的社会、经济和技术过程的总和”。生活垃圾管理系统是一类典型的、具备社会、经济、自然要素的复杂系统,它不仅同管理体制、技术水平和居民素质有关,也贯穿生产、消费、流通、还原过程,更和水体、土壤、大气、生物、矿产等自然环境紧密联系。生活垃圾的直接和间接代谢产物成为影响城市生态系统健康的重要因素,成为影响地表水、地下水、大气、土壤的污染源^[1]。近年来,基于城市生态系统代谢的思路,碳、重金属、能量和营养元素的生态代谢研究逐步成为生活垃圾研究领域的前沿议题;生活垃圾在城市生态系统中的能量流动、物质循环、代谢效率等方面的研究,也可为生活垃圾管理系统的评价、规划、工程、管理研究提供科学基础。

1 生活垃圾的碳代谢

1.1 城市生活垃圾的碳排放量及其生态学意义

城市生活垃圾作为影响全球气候变化的重要碳源,近年来受到越来越多的关注。生活垃圾运输、焚烧、堆肥、发酵和填埋处理都会产生 CH_4 和 CO_2 排放^[2],其中垃圾填埋排放的甲烷占人类活动引起的排放量的 12%,是全球第三大甲烷排放源^[3-4]。IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)明确的将废弃物作为温室气体核查五大专题之一^[5],而同生活垃圾相关的国际碳交易也是非常活跃的清

洁发展机制项目 CDM(Clean Development Mechanism)项目类型。我国每年生活垃圾处理过程将形成甲烷排放超过 600 万 t,总碳排放约 1.5 亿 t^[6]。

随着全球气候变化问题受到越来越广泛的关注,城市碳循环的研究也正在逐步深入,如城市碳循环模拟^[7-8]、城市扩展和地类变化的碳循环^[9]、城市碳管理^[10]等方面。全球碳计划(GCP, Global Carbon Plan)于 2005 年发起了城市与区域碳管理研究计划,该计划对推动城市碳过程的研究起到了重要作用。在城市生态系统中,碳以食物、能源、产品等物质形态输入,经过各种转化过程,一部分储存在城市生态系统碳库中,一部分以产品的形态输出,另一部分以废气、废水和固体废弃物的形式输出^[11]。生活垃圾处理和处置的碳排放是城市足迹区水平和垂直碳通量的重要部分^[12]。城市生活垃圾的碳排放过程及其空间环境效益研究正在成为城市系统地理—生态过程研究领域的前沿议题^[13]。

1.2 城市生活垃圾处理和处置环节的碳排放规律

由于生活垃圾填埋场被认为是最为重要的甲烷排放源,因此关于生活垃圾碳排放问题最早集中在垃圾填埋场的温室气体释放。研究表明,垃圾组成、含水量、可利用养分、温度和 pH 值均是影响甲烷产生的重要因素^[14]。填埋场释放甲烷是长期过程,填埋场封场后甲烷释放速率在逐步增长达到峰值后会呈现出下降趋势,覆盖土壤中的甲烷和二氧化碳浓度会随着封场年数的增加而减少^[15]。减少原生生物垃圾填埋量、采用填埋覆盖土壤的碳捕捉技术和

进行好氧、半好氧填埋技术的改进都可以削减填埋场的碳排放^[16-17]。生活垃圾焚烧及其它垃圾热转化技术也是生活垃圾碳减排技术探讨的重要问题。由于各城市生活垃圾焚烧发电效率和本地基准的燃煤发电参照值(EF)的不同,生活垃圾焚烧最终是碳源还是碳汇仍然是个不确定的问题。由于我国垃圾含水率高、热值相对较低,对比研究表明我国的垃圾焚烧基本应该归为城市碳源^[18]。而欧洲的研究表明,单纯的垃圾焚烧是碳源,而采用机械-生物预处理的垃圾焚烧发电可认为是城市的碳汇^[19]。

1.3 城市生活垃圾管理系统的碳排放及其不同技术碳排放的比较

城市生活垃圾的收集、运输以及终端处理技术的决策等管理措施都会影响到垃圾的碳排放过程。Calabrò 等人研究了意大利生活垃圾分类收集不同情景下的碳排放,认为分类收集方式可以有效的削减碳排放并将垃圾焚烧发电厂变成城市碳汇^[20]。Couth 等人总结了非洲国家废弃物低碳管理措施,也认为有机垃圾的源分类收集是非洲实现垃圾碳减排的关键^[21]。Bastin 等人研究了英国两个小城镇垃圾收运系统后发现,垃圾集中收运处理的碳排放分别是分散收运处理碳排放的 1.8 和 5.5 倍,垃圾运输车辆的能源选择也是影响碳排放的关键因子^[22]。生活垃圾碳排放也经常用于终端处理技术的选择研究上。Khoo 等人采用生命周期分析方法研究了新加坡有机垃圾的处理技术的碳排放,认为厌氧发酵是生命周期碳排放较小的处理技术^[23]。韩树丽等人研究了我国填埋、焚烧、堆肥等技术的温室气体排放,认为多技术关联的综合处理是较好的减碳方式^[24]。

1.4 城市尺度生活垃圾的碳循环规律以及低碳管理方法研究

碳排放分析被用于城市之间的生活垃圾管理系统的比较,以借鉴垃圾低碳管理城市的经验。Mühle 等人比较了英国和德国城市生活垃圾管理系统的碳排放,研究表明,英国垃圾管理系统的碳排放是德国的 5 倍,其主要原因是德国的垃圾管理系统更强调资源回收和能源再生^[25]。台北的研究也表明资源回收是最好的减碳措施,而缺乏有效管理的厨余垃圾发酵是垃圾碳排放的重要来源^[26]。赵胜男研究省域的有机废弃物资源化利用策略,并分析了各类

废弃物的减碳潜力^[27]。罗婷文等人研究了海口市的垃圾管理系统后发现,海口每人每天生活垃圾的碳输出量为 0.326 kg,其中 31% 左右的碳在填埋方式下转化成 CH₄、CO₂ 和渗沥水中的有机物排放,而 69% 左右的碳被长期固定^[11]。北京、苏州、天津等地的研究案例表明,我国生活垃圾处理的全生命周期碳排放强度在 650—2372 kg CO₂ eq/t,远低于欧洲发达国家的水平(德国 34 kg CO₂ eq/t 和英国 175 kg CO₂ eq/t)^[25]。潘玲阳等人最早关注了生活垃圾碳循环的城乡梯度问题,并分别以北京市和厦门市集美区为研究案例分析了城市中心区、郊区和农村等不同住区类型的垃圾碳排放特征,并提出了针对性的管理措施建议^[28-29]。

1.5 生活垃圾碳排放实地测定和核算分析的方法学研究

城市生活垃圾碳排放的测定主要是在填埋场地表土壤布置温室气体监测点位,实测通过断面的温室气体的浓度^[15]。IPCC 的垃圾处理技术碳排放模型和生命周期碳排放分析是常用的生活垃圾碳排放核算模型,而采用 LCA(Life Cycle Analysis) 分析的碳排放数据更为可靠,而 IPCC 忽略了部分间接的碳排放^[30],但是两类模型都需要本地数据的支撑,否则将不能获得比较精确的碳排放数据。Kumar 等人分析了填埋场碳排放实测数据和 IPCC 模型、FOD (First-Order Decay) 模型和 MTM(Modified Triangular Method) 模型之间的差异,研究发现核算模型之间以及模型和实测数据之间均存在较大的差异,采用工业元素分析获得的初始碳含量、化石碳含量和生物碳含量等参数均是进行精确模型分析的必要参数^[31]。

2 生活垃圾的重金属代谢

2.1 生活垃圾的重金属代谢量及其生态学意义

随着重金属污染问题越来越受到重视,也逐渐有学者开展了城市重金属的代谢研究,主要关注的热点在于重金属在城市中的储存和以垃圾为载体的排放^[32]。Sörme 等人研究了瑞典 Stockholm 的重金属城市代谢后发现,通过垃圾代谢的重金属占城市总输入量的 15%—45%^[33]。城市生活垃圾产生量巨大、成分复杂,生活垃圾中电池、灯管、电器、纸张、油漆、油墨、染料、灰尘以及源自食物链富集的食物

均是生活垃圾中重金属污染的来源^[34]。城市生活垃圾中的累积的重金属对人类健康影响的风险巨大。例如,广东贵屿儿童铅中毒事件就与垃圾处理有关。生活垃圾收集和处理的从业人员长期接触重金属污染的垃圾和渗滤液也可能会对健康带来威胁。

城市生活垃圾中的重金属分散在家庭和社区产生源头各类组分中,并在社区收集、转运和多级处理中不断混合和迁移,在垃圾处理的终端环节呈现出高浓度富集的特征。填埋场作为生活垃圾的最终处置地,垃圾堆体中往往具有高于土壤背景值数倍到数十倍的重金属^[35]。没有防渗措施的简易垃圾填埋场周边的地下水中能检出高浓度的重金属^[36]。生活垃圾焚烧过程中以铅为代表的重金属在粒径小于1 μm 的飞灰颗粒物中高度富集了50%—80%,是重点防控的危险废弃物之一^[37]。有机垃圾堆肥和机械-生物处理技术,也因为从混合垃圾中分选出的堆肥原料中含有超出农用标准允许的重金属限值范围,而导致技术的推广和应用受限^[38-40]。生活垃圾中含有高浓度重金属的组分本来是有限的若干种,正是由于生活垃圾收运和处理过程中的重金属物理破碎、混合、化学反应和生物富集等过程防控措施的忽视,导致进入填埋、焚烧、堆肥等末端处理环节的生活垃圾中的重金属已呈现出浓度较高、交叉污染和难以控制的特征^[41-42]。立足于生活垃圾城市代谢的全过程研究生活垃圾中重金属的迁移、转化和归趋规律,是全过程防控生活垃圾重金属问题的关键。

2.2 城市生活垃圾不同组分中重金属的源解析及迁移特征

生活垃圾成分复杂,重金属含量较高的组成成分有废金属、废塑料、废纸、尘土、废玻璃和电子废弃物。各类组分中比较典型的重金属类型分别是:废金属(Cu, Ni)、废塑料(Cr, Pb)、废纸(Pb, Cr)、尘土(Pb, Zn)、废玻璃(Cd, Cr, Cu, Pb)、电子废弃物(电池、显示屏碎片、小电器等)中的重金属成分就更为复杂^[43-44]。包装生活垃圾的塑料袋甚至都有可能成为重金属污染的来源^[45]。以上海为案例的城市生活垃圾重金属源解析研究表明,80%以上的重金属和砷均来源于伴随有机废弃物的尘土类无机物质^[43]。按颗粒物的粒径分级来分析重金属在垃圾中分布规律的结果表明,表明粒径小于15 mm 的厨

余垃圾尘土中重金属含量显著高于大于15 mm 的组分^[46]。

2.3 重金属在城市生活垃圾填埋和焚烧处理环节中的迁移及形态转化

生活垃圾填埋场中重金属的储存、迁移和转化一直是研究的热点之一。垃圾填埋堆体中的重金属形态可分为可交换态(吸附在粘土和腐殖酸表面)、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、硫化物及有机结合态、矿物晶格残渣态,其存在的主要形态是残渣态^[34]。填埋堆体重金属含量呈现垂直分布的特征,上层填埋垃圾因为酸化或氧化作用释放出的重金属能被下层填埋垃圾所固定,而下层具有较高的吸附容量^[35]。最容易导致重金属渗出的垃圾组分分别是:尘土(街道清扫和家庭吸尘器收集的尘土)、电池、纸张和金属^[44]。电子废弃物具有非常复杂和相对浓度较高的重金属含量,电子废弃物与混合垃圾填埋共处置研究也是受到不少关注。生活垃圾焚烧处理后重金属的迁移特征则根据重金属类别的不同而有所差异,95%的Cu、Cr存在于炉渣中,而80%以上的Cd、Hg存在于飞灰中^[46]。

2.4 城市生活垃圾堆肥施用的重金属累积风险及其在土壤-植物中的迁移

据调查欧洲、北美和澳大利亚等国家100个样本的堆肥中重金属的平均含量为318 mg/kg,远超英国堆肥利用的标准值200 mg/kg^[38]。市政垃圾堆肥的重金属含量较高的原因主要是源头未分类的厨余垃圾在收集、运输和机械分选过程中受到各种交叉污染^[39-40]。长期和高强度施用垃圾堆肥均存在重金属累积的风险,分别施用市政垃圾堆肥和畜禽粪便堆肥5a的长期试验表明,市政垃圾堆肥具有明显的累积风险,土壤中重金属铅的存在形态排序:残渣态(50%以上)、铁锰氧化物(20%左右)^[47-48]。垃圾堆肥中的铜、铅、锌会随着堆肥原料的逐步矿化而呈现出浓度显著变高的趋势,垃圾堆肥的所有重金属中,铅在长期堆肥过程中的释放量最大。一系列的植物生长实验表明,植物中的重金属浓度并没有累积,这说明堆肥中的重金属形态不是植物容易吸收的形态^[49]。

2.5 不同收集和分类方式对生活垃圾中的重金属的影响及城市迁移过程

目前在城市尺度的生活垃圾重金属迁移主要集

中在源头和末端两个节点的重金属含量分析比较上,特别是不同的垃圾分类或分选方式对垃圾中重金属含量的影响。生活垃圾收集过程对有机垃圾中的重金属含量影响非常大,末端机械分选出的有机垃圾中的重金属含量通常是源头分类收集的几倍到几十倍^[42-43]。Rotter 等人认为机械分类对于控制垃圾燃料(RDF, Refuse Derived Fuel)中重金属含量的作用是有限的,因为不同组分中的重金属已经在生活垃圾物流中充分扩散了,在垃圾的收集、转化、运输、储存等过程导致了垃圾重金属的交叉污染^[50]。采用物质流分析方法研究城市生活垃圾重金属含量可以掌握其在城市尺度的迁移规律,进而发现和诊断垃圾重金属控制的关键环节。Zhang 等人采用物质流分析方法研究了特大城市上海的生活垃圾重金属从垃圾收集站点到末端处理设施的迁移规律,以及以危险废物、有害气体和残渣等载体排放的归趋规律^[41]。Long 等人研究了浙江省 8 个城市的生活垃圾样本中的 Cu 和 Zn 含量,垃圾中的重金属数量却均呈现随季节变化的动态差异,夏季的重金属含量高于冬季^[51]。

3 生活垃圾的城市生态代谢研究

3.1 生活垃圾营养元素代谢

生活垃圾的营养元素代谢目前研究的较少,研究主要集中在氮元素和磷元素。Forkes 等人研究了加拿大多伦多的氮元素城市代谢过程,研究表明 1990 年氮元素中有 40.4% 被填埋和焚烧,而 2001 年和 2004 年分别下降到 18.4% 和 16.1%^[52]。Barles 研究了法国巴黎 1801—1914 年的城市氮元素代谢,发现其中有 12.6% 的氮元素被城市系统直接排放^[53]。Matsubae 系统研究了日本的工业、农业和社会生活等领域的磷代谢过程,其中生活垃圾、污泥、畜禽粪便等不同有机废弃物填埋处置占总输入磷元素的 12.26%^[54]。Liu 等人研究了我国国家尺度和典型区域尺度(滇池流域)的磷元素代谢^[55]。Qiao 以北京和天津为例研究了食物消费中磷的城市物质流,研究结果表明北京市、天津市的磷代谢过程中,分别有 54.4% 和 56.3% 的磷以固体废弃物(含污泥和家庭有机废物)形式进入垃圾处置终端^[56]。目前未见有城市垃圾钾元素的城市代谢研究。

3.2 生活垃圾的能量代谢

生活垃圾的能量代谢研究也受到一定的关注,

采用能量代谢分析方法可以解决垃圾系统的转化效率评价问题。Brown 最先将能值分析法(Emergy Analysis, EA)引入城市生活垃圾系统研究。不同类型的能量、物质资源、劳力服务以及费用都可以通过计算其能值转化率转化为太阳能值焦耳(sej)以便比较分析。能值分析被用于城市生活垃圾及建筑垃圾的回收、处理方案比选,通过计算能值回收率可与评价各种不同方案^[57-59]。能值分析是一个至上而下的系统途径,大多数能值转换率都是基于全球能值平衡核算^[60]。Dewulf 曾将 Exergy(火用)分析应用于废物工业代谢系统,以定量化的评价资源管理系统的可持续性^[61-62]。Zhou 等人采用火用分析模型,研究了北京市南城的生活垃圾处理系统各环节的物质、能量投入产出及火用转化过程,研究表明垃圾分选与焚烧等综合处理技术的应用可以将能量转化效率从 2.91% 提升至 4.57% 和 13.95%^[63]。

4 总结与展望

基于城市生态系统代谢的思路,碳、重金属、能量和营养元素的生态代谢研究逐步成为生活垃圾研究领域的前沿议题,将为生活垃圾在城市生态系统中的能量流动、物质循环、代谢效率等方面的研究,也可为生活垃圾管理系统的评价、规划、工程、管理研究提供科学基础。综上所述,生活垃圾的城市生态代谢研究在以下方面还有待进一步的探索:

(1) 生活垃圾的碳代谢研究

目前生活垃圾碳循环和碳排放的研究主要集中在城市生活垃圾处理技术和管理体系的分析比较上,针对城乡梯度的空间差异和季节变化方面的研究较少。生活垃圾在城市生态系统中的代谢过程具有明显的空间异质性,城市、郊区和农村的垃圾产量、组成成分和理化特征均呈现出城乡差异和随季节差异动态变化的特征,掌握生活垃圾碳循环和碳排放过程随城乡梯度和季节变化的客观规律,对于推进城市系统地理-生态过程的研究意义重大。生活垃圾碳储存、碳转移和碳排放等城市碳循环过程的研究还非常缺乏。目前的生活垃圾城市碳循环研究还主要集中在碳排放,特别是以气体形式释放的甲烷、二氧化碳等温室气体排放方面的研究。城市地理-生态系统碳排放的研究虽然都意识到垃圾产生和处理系统作为碳源和碳汇的重要性,但是围绕

生活垃圾碳循环和碳源、碳汇成因的研究目前还非常少。生活垃圾处理和管理的碳排放清单模型缺乏体现城乡和区域特征的实用参数。我国开展的生活垃圾处理和管理系统的碳排放研究,往往采用国内外学界广泛采用的 IPCC 核算模型和 LCA 分析模型进行研究,但核算碳排放清单时采用的碳含量、碳转化和碳循环参数均借用国外的数据库或国际上推荐的适用参数,关于垃圾碳排放的实测研究不足。

(2) 生活垃圾的重金属代谢研究

生活垃圾各组分中的重金属在不同代谢节点的全过程迁移规律研究比较缺乏。目前的研究大多关注城市尺度的重金属物质流分析和迁移规律研究大多集中在收集和分类方式对垃圾中重金属含量的影响,针对城市生活垃圾在不同代谢节点间的动态过程研究有待加强。季节因素对垃圾重金属含量的影响可能较大。一方面是因为城市生活垃圾的组成成分会随季节发生变化,另一方面不同季节的环境温度和有机垃圾含量的差异可能导致垃圾运输和储存环境的 pH 值发生变化,进而影响垃圾中重金属的溶出和形态变化。针对随季节变化的垃圾成分和环境温度因素同垃圾不同组分中的重金属含量的研究也有一定意义。生活垃圾中的重金属从家庭排放后到末端处置环节中间的迁移规律目前基本处于“黑箱”状态。生活垃圾的不同组分以及垃圾渗滤液中,重金属含量随垃圾成分、环境温度、pH 值等因子变化的定量化模型研究比较薄弱,生活垃圾各组分中的重金属在不同代谢节点间的迁移和归趋的定量化模型也是值得开展的研究之一。

(3) 生活垃圾的能量代谢和营养元素代谢研究

目前,生活垃圾的能量代谢和营养元素代谢的相关研究相对较少。能量生态代谢分析方法在研究生活垃圾焚烧、热解等能源转化技术以及全系统能量转化效率等方面有较广的应用空间。目前的研究缺乏适用我国的能源转化参数库,我国的生活垃圾组成成分、理化特征以及系统管理方法都同欧美发达国家差异巨大,因此开展我国的垃圾能量代谢的系统参数研究,为垃圾系统的能量代谢分析提供基础。另外,我国生活垃圾中厨余垃圾成分较高,其中蕴含大量的氮、磷、钾等营养物质,是营养元素在城市生态系统中滞留的重要组成。我国生活垃圾以填埋和焚烧处理为主,导致大量的营养元素储存在垃

圾填埋场和焚烧炉渣库中,我国农田的氮、磷、钾需求大、施用强度大,磷和钾肥相对缺乏,开展生活垃圾营养元素的代谢研究,对于推动生物质垃圾资源化利用具有较强的现实意义。

References:

- [1] Ngoc U N, Schnitzer H. Sustainable solutions for solid waste management in Southeast Asian countries. *Waste Management*, 2009, 29(6): 1982-1995.
- [2] Zhao T T, Yan N, Zhao Y C. Reducing and controlling of greenhouse gas in the field of environmental engineering. Beijing: Chemistry Industry Press, 2009, 42-53.
- [3] Zhou X P, Wang F, Hu H, Yang L, Guo P, Xiao B. Assessment of sustainable biomass resource for energy use in China. *Biomass and Bioenergy*, 2011, 35(1): 1-11.
- [4] Methane to Market. Global Opportunities of Methane Reduction, 2008.
- [5] IPCC. Guide lines for National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual, 2007.
- [6] Li H, Jin Y Y, Li Y Y. Carbon emission and its reduction strategies during municipal solid waste treatment. *China Environmental Sciences*, 2011, 31(2): 259-264.
- [7] Svirejeva-Hopkins A, Schellnhuber H J, Pomaz V L. Urbanised territories as a specific component of the Global Carbon Cycle. *Ecological Modelling*, 2004, 173(2-3): 295-312.
- [8] Svirejeva-Hopkins A, Schellnhuber H J. Modelling carbon dynamics from urban land conversion: fundamental model of city in relation to a local carbon cycle. *Carbon Balance and Management*, 2006, 1(8): 1-8.
- [9] Svirejeva-Hopkins A, Schellnhuber H J. Urban expansion and its contribution to the regional carbon emissions: Using the model based on the population density distribution. *Ecological Modelling*, 2008, 216(2): 208-216.
- [10] Lebel L. Carbon and water management in urbanization. *Global Environmental Change*, 2005, 15(4): 293-295.
- [11] Luo T W, Ouyang Z Y, Wang X K, Li W F. Carbon output through urban domestic garbage in Haikou. *Environmental Sciences*, 2004, 25(6): 154-158.
- [12] Zhao R Q, Huang X J, Xu H, Gao S. Progress in the research of carbon cycle and management of urban system. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(10): 1847-1859.
- [13] Yang D W, Yang Z Y, Cui S H, Luo T. Urban system research from the perspective of geo-ecological processes. *Progress in Geography*, 2011, 30(2): 164-170.
- [14] Wang M, Wang L A, Liu L. Greenhouse gas control for landfill. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 2001, 24(5): 142-144.
- [15] Xiaoli C, Ziyang L, Shimaoka T, Nakayama H, Ying Z, Xiaoyan C, Komiya T, Ishizaki T, Youcai Z. Characteristics of environmental factors and their effects on CH₄ and CO₂ emissions from a closed landfill: An ecological case study of Shanghai. *Waste Management*, 2010, 30(3): 446-451.

- [16] Xu Q Y, Ge J J. Reduction of CO₂ Emission using bioreactor technology for waste management in China. *Energy Procedia*, 2011, 5: 1026-1031.
- [17] Read A D, Hudgins M, Harper S, Phillips P, Morris J. The successful demonstration of aerobic landfilling: The potential for a more sustainable solid waste management approach? *Resources, conservation and recycling*, 2001, 32(2): 115-146.
- [18] He P J, Chen M, Yang N, Shao L M. GHG emissions from Chinese MSW incineration and their influencing factors-Case study of one MSW incineration plant in Shanghai. *China Environmental Sciences*, 2011, 31(3): 402-407.
- [19] Papageorgiou A, Barton J, Karagiannidis A. Assessment of the greenhouse effect impact of technologies used for energy recovery from municipal waste: A case for England. *Journal of environmental management*, 2009, 90(10): 2999-3012.
- [20] Calabrn P S. Greenhouse gases emission from municipal waste management: The role of separate collection. *Waste Management*, 2009, 29(7): 2178-2187.
- [21] Couth R, Trois C. Carbon emissions reduction strategies in Africa from improved waste management: A review. *Waste Management*, 2010, 30(11): 2336-2346.
- [22] Bastin L, Longden D M. Comparing transport emissions and impacts for energy recovery from domestic waste (EfW): Centralised and distributed disposal options for two UK Counties. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2009, 33(6): 492-503.
- [23] Khoo H H, Lim T Z, Tan R B H. Food waste conversion options in Singapore: environmental impacts based on an LCA perspective. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(6): 1367-1373.
- [24] Han S L, Yang T H, Li R D, Ke X, Wei L H. Analysis on the influence of different waste disposal methods on greenhouse gas emissions reduction. *Renewable Energy Resources*, 2011, 29(1): 115-120.
- [25] Mühle S, Balsam I, Cheeseman C. Comparison of carbon emissions associated with municipal solid waste management in Germany and the UK. *Resources, conservation and recycling*, 2010, 54(11): 793-801.
- [26] Chen T C, Lin C F. Greenhouse gases emissions from waste management practices using life cycle inventory model. *Journal of hazardous materials*, 2008, 155(1): 23-31.
- [27] Zhao S N, Cui S H, Lin T, Li X H, Zhang Y J. Research on carbon mitigation potential of organic waste reutilization in Fujian Province. *China Population, Resources and Environment*, 2010, 20(9): 30-35.
- [28] Pan L Y, Ye H, Huang S P, Li G X, Zhang H Y. Greenhouse gas emission from municipal solid waste treatment in Beijing. *Environmental Science & Technology*, 2010, 33(9): 116-124.
- [29] Pan L Y, Lin T, Cui S H, Xiao L S, Zhao Y, He G. Characteristics of generation and low-carbon management strategies for household waste in peri-urban area: A case study of Jimei District, Xiamen. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 31(10): 2319-2328.
- [30] Zhao L, Chen D Z, Liu G Y, Luan J. Two calculation methods for greenhouse gas emissions from municipal solid waste thermo-chemical conversion and utilization processes. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(8): 1634-1641.
- [31] Kumar S, Mondal A, Gaikwad S, Devotta S, Singh R. Qualitative assessment of methane emission inventory from municipal solid waste disposal sites: a case study. *Atmospheric environment*, 2004, 38(29): 4921-4929.
- [32] Obernosterer R, Brunner P. Urban metal management the example of lead. *Water, Air, & Soil Pollution: Focus*, 2001, 1(3): 241-253.
- [33] Sörme L, Bergbäck B, Lohm U. Century perspective of heavy metal use in urban areas. A Case Study in Stockholm. *Water, Air, & Soil Pollution: Focus*, 2001, 1(3): 197-211.
- [34] Long Y Y, Hu L F, Shen D S, Hu H. Research progress of heavy metal pollution in municipal solid waste. *Bulletin of Science and Technology*, 2007, 23(5): 760-764.
- [35] Xiao Z, He P J, Shao L M, Li G J, Yu J Y, Chen Z F, Xu Y E. Effect of the total amount and speciation of heavy metals on its mobility in municipal solid waste landfill. *Environmental Chemistry*, 2005, 24(3): 264-269.
- [36] Biswas A K, Kumar S, Babu S S, Bhattacharyya J K, Chakrabarti T. Studies on environmental quality in and around municipal solid waste dumpsite. *Resources, Conservation and Recycling*, 2010, 55(2): 129-134.
- [37] Yao H, Naruse I. Behavior of lead compounds during municipal solid waste incineration. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32(2): 2685-2691.
- [38] Hogg D, Barth J, Favoino E, Centemero M, Caimi V, Amlinger F, Devliegher W, Brinton W, Antler S. Comparison of compost standards within the EU, North America and Australasia. *Banburg, Oxon*, 2002.
- [39] Farrell M, Jones D. Critical evaluation of municipal solid waste composting and potential compost markets. *Bioresource technology*, 2009, 100(19): 4301-4310.
- [40] Smith S R. A critical review of the bioavailability and impacts of heavy metals in municipal solid waste composts compared to sewage sludge. *Environment International*, 2009, 35(1): 142-156.
- [41] Zhang H, He P J, Shao L M. Implication of heavy metals distribution for a municipal solid waste management system: a case study in Shanghai. *Science of the Total Environment*, 2008, 402(2/3): 257-267.
- [42] Huerta-Pujol O, Gallart M, Soliva M, Martínez-Farré F X, López M. Effect of collection system on mineral content of biowaste. *Resources, Conservation and Recycling*, 2011, 55(11): 1095-1099.
- [43] Zhang H, He P J, Shao L M, Lee D J. Source analysis of heavy metals and arsenic in organic fractions of municipal solid waste in a mega-city (Shanghai). *Environmental science & technology*, 2008, 42(5): 1586-1593.
- [44] Manfredi S, Tonini D, Christensen T H. Contribution of individual waste fractions to the environmental impacts from landfilling of municipal solid waste. *Waste Management*, 2010, 30(3): 433-440.

- [45] Huerta-Pujol O, Soliva M, Giró F, López M. Heavy metal content in rubbish bags used for separate collection of biowaste. *Waste Management*, 2010, 30(8): 1450–1456.
- [46] Zhao Y C. Sustainable municipal solid waste management. Beijing: Chemistry Industry Press, 2007.
- [47] Achiba W B, Gabteni N, Lakhdar A, Laing G D, Verloo M, Jedidi N, Gallali T. Effects of 5-year application of municipal solid waste compost on the distribution and mobility of heavy metals in a Tunisian calcareous soil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, 130(3/4): 156–163.
- [48] Massimo Fagnano P A, Mariavittoria Zampella, Nunzio Fiorentino. Environmental and agronomic impact of fertilization with composted organic fraction from municipal solid waste: A case study in the region of Naples, Italy. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2011, 141(1/2): 100–107.
- [49] Farrell M, Jones D L. Heavy metal contamination of a mixed waste compost: Metal speciation and fate. *Bioresource technology*, 2009, 100(19): 4423–4432.
- [50] Rotter V S, Kost T, Winkler J, Bilitewski B. Material flow analysis of RDF-production processes. *Waste Management*, 2004, 24(10): 1005–1021.
- [51] Long Y Y, Shen D S, Wang H T, Lu W J, Zhao Y. Heavy metal source analysis in municipal solid waste (MSW): Case study on Cu and Zn. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 186(2/3): 1082–1087.
- [52] Forkes J. Nitrogen balance for the urban food metabolism of Toronto, Canada. *Resources, Conservation and Recycling*, 2007, 52(1): 74–94.
- [53] Barles S. Feeding the city: food consumption and flow of nitrogen, Paris, 1801–1914. *Science of The Total Environment*, 2007, 375(1): 48–58.
- [54] Matsubae-Yokoyama K, Kubo H, Nakajima K, Nagasaka T. A material flow analysis of phosphorus in Japan. *Journal of Industrial Ecology*, 2009, 13(5): 687–705.
- [55] Liu Y, Chen J, Mol A P, Ayres R U. Comparative analysis of phosphorus use within national and local economies in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 2007, 51(2): 454–474.
- [56] Qiao M, Zheng Y M, Zhu Y G. Material flow analysis of phosphorus through food consumption in two megacities in northern China. *Chemosphere*, 2011, 84(6): 773–778.
- [57] Brown M T, Buranakarn V. Emergy indices and ratios for sustainable material cycles and recycle options. *Resources, Conservation and Recycling*, 2003, 38(1): 1–22.
- [58] Lei K, Wang Z. Municipal wastes and their solar transformities: An emergy synthesis for Macao. *Waste Management*, 2008, 28(12): 2522–2531.
- [59] Marchettini N, Ridolfi R, Rustici M. An environmental analysis for comparing waste management options and strategies. *Waste Management*, 2007, 27(4): 562–571.
- [60] Sciubba E, Ulgiati S. Emergy and exergy analyses: Complementary methods or irreducible ideological options? *Emergy*, 2005, 30(10): 1953–1988.
- [61] Dewulf J, Van Langenhove H. Integrating industrial ecology principles into a set of environmental sustainability indicators for technology assessment. *Resources, Conservation and Recycling*, 2005, 43(4): 419–432.
- [62] Dewulf J P, Van Langenhove H R. Quantitative assessment of solid waste treatment systems in the industrial ecology perspective by exergy analysis. 2002, *Environmental Science and Technology*, 36(5): 1130–1135.
- [63] Zhou C, Hu D, Wang R, Liu J. Exergetic assessment of municipal solid waste management system in south Beijing. *Ecological Complexity*, 2011, 8(2): 171–176.

参考文献:

- [2] 赵天涛, 阎宁, 赵由才. 环境工程领域温室气体减排与控制技术. 北京: 化学工业出版社, 2009, 42–53.
- [4] 甲烷市场化伙伴计划, 全球甲烷减缓之机会, 2008.
- [6] 李欢, 金宜英, 李洋洋. 生活垃圾处理的碳排放和减排策略. *中国环境科学*, 2011, 31(2): 259–264.
- [11] 罗婷文, 欧阳志云, 王效科, 李伟峰. 海口市生活垃圾碳输出研究. *环境科学*, 2004, 25(6): 154–158.
- [12] 赵荣钦, 黄贤金, 徐慧, 高珊. 城市系统碳循环与碳管理研究进展. *自然资源学报*, 2009, 24(10): 1847–1859.
- [13] 杨德伟, 杨职优, 崔胜辉, 罗涛. 地理-生态过程视角的城市系统研究. *地理科学进展*, 2011, 30(2): 164–170.
- [14] 王敏, 王里奥, 刘莉. 垃圾填埋场的温室气体控制. *重庆大学学报 (自然科学版)*, 2001, 24(5): 142–144.
- [18] 何品晶, 陈森, 杨娜, 邵立明. 我国生活垃圾焚烧发电过程中温室气体排放及影响因素—以上海某城市生活垃圾焚烧发电厂为例. *中国环境科学*, 2011, 31(3): 402–407.
- [23] 刘国辉. 高效生活垃圾焚烧技术与温室气体减排. *环境卫生工程*, 2011, 19(1): 38–40.
- [24] 韩树丽, 杨天华, 李润东, 可欣, 魏砾宏. 垃圾处理方式对温室气体减排作用影响分析. *可再生能源*, 2011, 29(1): 115–120.
- [27] 赵胜男, 崔胜辉, 吝涛, 李新虎, 张雅京. 福建省有机废弃物资源化利用碳减排潜力研究. *中国人口资源与环境*, 2010, 20(9): 30–35.
- [28] 潘玲阳, 叶红, 黄少鹏, 李国学, 张红玉. 北京市生活垃圾处理的温室气体排放变化分析. *环境科学与技术*, 2010, 33(9): 116–124.
- [29] 潘玲阳, 吝涛, 崔胜辉, 肖黎嫻, 赵煜, 何刚. 半城市化地区家庭生活垃圾特征及低碳对策: 以厦门市集美区为例. *环境科学学报*, 2011, 31(10): 2319–2328.
- [30] 赵磊, 陈德珍, 刘光宇, 栾健. 垃圾热化学转化利用过程中碳排放的两种计算方法. *环境科学学报*, 2010, 30(8): 1634–1641.
- [34] 龙於洋, 胡立芳, 沈东升, 胡宏. 城市生活垃圾中重金属污染研究进展. *科技通报*, 2007, 23(5): 760–764.
- [35] 肖正, 何品晶, 邵立明, 李建国, 俞凯麒, 陈增丰, 徐月恩. 填埋场内重金属总量及其形态分布对迁移性的影响. *环境化学*, 2005, 24(3): 264–269.
- [46] 赵由才. 可持续生活垃圾处理与处置. 北京: 化学工业出版社, 2007.