

1979~2016年中国城市生活垃圾产生和处理时空特征

魏潇潇¹,王小铭^{1*},李蕾¹,刘聰²,Nemanja Stanisavljevic³,彭绪亚¹ (1.重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室,重庆 400045; 2.重庆市勘测院,重庆 401121; 3.诺维萨德大学技术科学学院,环境工程系,诺维萨德 21000)

摘要: 改革开放以来,随着我国社会经济发展、居民生活水平提高,城市生活垃圾与日俱增,其妥善处理是我国各级政府面临的重要环境管理问题之一。本文通过系统收集和整理 1979~2016 年我国城市生活垃圾产生和处理的政府统计及相关中英文文献数据,分析了我国城市生活垃圾产生和处理的时空演变特征,建立了全国与各地区城市生活垃圾物理组分数据清单。研究表明:1979~2016 年我国城市生活垃圾产生量显著增长至 2016 年的 2.04 亿 t,以厨余类为主要成分。全国城市生活垃圾无害化处理率达到 96.6%,无害化处理方式逐渐转向为焚烧为主、填埋补充的技术格局。我国各地区城市生活垃圾产生量、产生量增速、物理组分、无害化处理率和处理能力等存在时空差异,各地区应因地制宜,结合国家专项规划,提高生活垃圾减量化和资源化水平,弥补无害化处理缺口。

关键词: 城市生活垃圾; 产生量; 清运量; 物理组分; 数据清单; 时空特征

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2018)10-3833-11

DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2018.0420

Temporal and spatial characteristics of municipal solid waste generation and treatment in China from 1979 to 2016. WEI Xiao-xiao¹, WANG Xiao-ming^{1*}, LI Lei¹, LIU Cong², STANISAVLJEVIC Nemanja³, PENG Xu-ya¹ (1.Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2.Chongqing Survey Institute, Chongqing 401121, China; 3.University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Department of Environmental Engineering, Novi Sad 21000, Serbia). *China Environmental Science*, 2018,38(10): 3833~3843

Abstract: With the social and economic development since China's economic reform back in late 1970s, the generation of municipal solid waste (MSW) in China's urban areas is remarkably increasing along with the rising of living standards of Chinese residents. The proper management of MSW is one of the most important environmental issues faced by all levels of Chinese government. This study collected data of waste generation and treatment between 1979 and 2016 from government statistics and literature, analysed the evolution of temporal and spatial characteristics of MSW discharge and treatment in urban China, and established a national and regional MSW composition inventory. The results showed: (1) the MSW generation in urban China increased significantly to 204 million metric tons in 2016, and the main component was food waste. The national safe treatment rate for urban MSW had reached 96.6% with a transition to use combustion as primary treatment method instead of landfilling. (2) Temporal and spatial differences existed among different regions of China in urban MSW generations, growth rates of generation, MSW composition, safe treatment rates and capacity. Given varied local conditions, governments at different regions need to make effort to raise the levels of MSW reduction and utilization and make up for the safe treatment gap by following the national waste management plan.

Key words: municipal solid waste; generation; collection and transportation; waste composition; data inventory; temporal and spatial characteristics

随着我国经济的快速发展,以及居民生活质量的提升,城市生活垃圾的产生量迅速增长,由 1979 年的 0.25 亿 t 增至 2016 年的 2.04 亿 t(以清运量计)^[1]。全国多数城市面临垃圾围城困局^[2]。据报道,我国城市生活垃圾堆存侵占土地面积累积达 35 亿 m³^[3]。如何妥善管理城市生活垃圾,已成为我国各级政府面临的棘手环境问题之一。

截止 2016 年底,我国城市生活垃圾处理方式以卫生填埋、焚烧为主。填埋处理场是人类活动造成的温室气体 CH₄ 重要排放源^[4-7],而焚烧处理会造成

CO₂ 的排放^[8-10]。随着城市生活垃圾产生量日益增多,垃圾处理过程排放温室气体引起国际社会广泛关注^[11]。1996 年和 2006 年联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)相继发布了《IPCC 国家温室气体清单指南》^[12-14],其中推荐利用生活垃圾产生量、物理组分和处理方式等数据,编制国家和地区尺度垃圾

收稿日期: 2018-06-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51508049);中国与塞尔维亚科技合作委员会第 4 届例会交流项目(4-14);中央高校基本科研业务费专项(106112017CDJQJ218844)

* 责任作者,副教授, wangxiaoming@cqu.edu.cn

处理过程温室气体排放清单.近年来,我国城市生活垃圾管理职能部门逐步完善和定期公布城市生活垃圾产生量、无害化处理量和处理方式等统计数据,但尚未如以美国为代表的发达国家,逐年公布城市生活垃圾物理组分的统计数据.

研究者对我国城市生活垃圾产生和处理研究,主要集中在对城市生活垃圾产生量预测^[15-16]、成分分析^[17-19]、产生特征影响因素辨析^[20-21]、处理现状^[22-23]和管理模式评价等^[24-25].梁广生等^[26]通过多元线性回归和类比分析对北京市 2002~2007 年的生活垃圾产生量进行了预测.陈兰芳等^[27]研究了我国城市生活垃圾产生与处理情况的省际差异,但未研究其随时间变化特征.孔令强等^[3]研究了我国城市生活垃圾产生量的时空演变特征,但未对生活垃圾物理组分进行研究.杜吴鹏等^[28]报道了 20 世纪 90 年代全国多个城市平均生活垃圾物理组分数据.鉴于近 20a 来我国城市社会、经济、生活方式的巨变和水平的提高,关于我国城市生活垃圾物理组分的数据亟需更新.

本研究首先系统收集和整理政府相关职能部门公开发布的 1979~2016 年间关于我国城市生活垃圾产生量、处理量和处理方式的统计数据,通过文献调研与数据甄别获得我国多地区、多城市、多年份的生活垃圾物理组分数据,建立全国与各地区城市生活垃圾数据清单.随后,运用统计学方法对不同时间段、不同地理区域的城市生活垃圾产生、物理组分和无害化处理水平等进行时空特征分析.研究结果对我国城市生活垃圾管理的顶层设计(如管理模式和处理技术路线的选择);全国推行的城市生活垃圾的减量化、资源化、无害化绩效评估(如垃圾分类收集回收率)的计算;以及城市生活垃圾管理对生态环境质量贡献的统计(如温室气体减排和生物碳储存)等方面提供重要的数据支持.

1 数据收集、处理与分析方法

1.1 数据来源

1979~2016 年全国及各地区城市生活垃圾产生量、无害化处理量和处理方式等数据来源于《中国城市建设统计年鉴》^[1].由于统计年鉴中无城市生活垃圾产生量的明确数据,因此,采用城市生活垃圾清运量代替城市生活垃圾产生量.1979~2016 年我国城

市生活垃圾产生人口,确定为《中国城市建设统计年鉴》中历年城区人口与暂住人口数据之和.

由于无官方公布统计数据,我国城市生活垃圾物理组分数据来源于已公开发表的中英文科技文献.首先分别通过 Web of Science 和中国知网 CNKI 检索包含我国城市生活垃圾物理组分信息的中英文科技文献,检索关键词及其组合包括:城市生活垃圾、成分、组分、理化性质、municipal solid waste、China、category、generation and composition.随后,以采样数据代表性、完整性和规范性 3 条标准对 147 篇检索获得的相关文献和数据进行甄别,从而获得有效文献和数据如表 1 所示.数据代表性标准是要求文献报道的采样结果代表城市地区生活垃圾物理组分;数据完整性标准是要求文献中列明垃圾物理组分定量数值;数据规范性标准是要求垃圾物理组分数值加和处于(100±5)%范围.最终,本研究获得关于我国 22 个省(市)城市生活垃圾物理组分有效文献 55 篇,包含有效数据 111 个,采样时间跨度为 1991~2016 年.

1.2 数据处理

1.2.1 城市生活垃圾产生量复合增长率 一定年限内,城市生活垃圾产生量平均每年增长的速率,其计算公式为^[29]:

$$r_1 = \sqrt[t]{\frac{N_t}{N_1}} - 1 \quad (1)$$

式中: r_1 为年内城市生活垃圾产生量年均增长率,%; N_t 为第 t 年城市生活垃圾产生量, t ; N_1 为第 1 年城市生活垃圾产生量, t .

1.2.2 城市生活垃圾人均日产生量 生活垃圾产生人口每人每天的产生量,其计算公式为^[30]:

$$X_i = \frac{N_i}{P_i \times 365d} \quad (2)$$

式中: X_i 为第 i 年城市生活垃圾人均日产生量,kg/(人·d); N_i 为第 i 年城市生活垃圾产生量, t ; P_i 为第 i 年城市生活垃圾产生人口,人.产生人口为《中国城市建设统计年鉴》历年城区人口与暂住人口之和.

1.2.3 城市生活垃圾物理组分类别统一化处理 由于不同来源文献中城市生活垃圾物理组分分类与命名方法存在差异,为便于后续数据分析,需要进行必要的垃圾物理组分原始数据统一化处理.文献中城市生活垃圾物理组分的采样分

类与命名方法多数参考中国城镇建设行业标准《生活垃圾采样和物理分析方法》的 2 个版本(表 2),其中采用的生活垃圾物理组分分类和命名方法存在明显差异.此外,部分文献根据调研现场实际情况,对垃圾物理组分的分类和命名有进一步

的改动^[31-32].因此,本研究将文献报道的原始城市生活垃圾物理组分,根据其理化性质统一为 9 类:厨余类、纸类、橡塑类、纺织类、木竹类、金属类、玻璃类、灰渣类和其他类,具体归类方法如表 3 所示.

表 1 有效文献与数据时空分布
Table 1 Overview of valid literature and data

地区	省(市)	城市	样本数	采样年份	参考文献
全国		多个城市 ^a	8	1991~1996,1999,2000	[28]
东北	吉林	长春	1	2002	[33]
	辽宁	沈阳	9	1998~2000、2002~2003、2006~2008、2011	[34-38]
		大连	1	2004	[39]
	黑龙江	哈尔滨	1	2007	[40]
华北	北京	北京	12	1995、1998 ^b 、2000、2002、2004~2008、2010、2012	[41-50]
	天津	天津	1	2009	[51]
	河北	唐山	2	2004~2005	[52]
华东	浙江	杭州	2	2004、2008	[53-54]
	上海	上海	22	1991~2000、2002、2008~2016 ^c	[55-59]
	山东	济南	5	2008~2012	[60]
		青岛	1	2009	[61]
	安徽	合肥	4	1997、2002、2005、2007	[62]
	江苏	南京	1	2007	[63]
		苏州	1	2007	[64]
江西	九江	1	2008	[65]	
华中	湖南	长沙	1	2011	[66]
	湖北	武汉	1	2008	[67]
		荆州	1	2010	[68]
华南	深圳	深圳	6	2000、2002、2005、2006、2008、2010	[69]
	广西	南宁	5	2008~2012	[70]
西南	重庆	重庆	5	1998、2002~2003、2006、2011	[71-75]
		成都	9	2001~2007、2012、2013	[76-78]
	四川	攀枝花	1	2010	[79]
		绵阳	1	2010	[79]
		内江	1	2010	[79]
		遂宁	1	2010	[79]
		都江堰	1	2014	[80]
	贵州	贵阳	1	2004	[81]
西藏	拉萨	1	2012	[82]	
西北	甘肃	兰州	2	2006、2012	[83-84]
	新疆	石河子	1	2009	[85]
		乌鲁木齐	1	2007	[86]

注:a.杜吴鹏等^[28]报道全国70余个城市8个年份城市生活垃圾物理组分的平均值,未给出具体调研城市数据;b.北京:1998年数据来自于2篇不同的文献,其中垃圾物理组分数据不同;c.上海:2008年与2013年各有2组来源于不同文献的数据.

表 2 《生活垃圾采样和物理分析方法》标准对比
Table 2 Comparison of waste sampling and categorization methods

标准号	生活垃圾组分类别
CJ/T3039-1995 ^[87]	有机物(动物、植物)、无机物(灰土、砖瓦陶瓷)、可回收物(纸类、塑料橡胶、纺织物、玻璃、金属、木竹)
CJ/313-2009 ^[88]	厨余类、纸类、橡塑类、纺织类、木竹类、灰土类、砖瓦陶瓷类、玻璃类、金属类、其他(各种废弃的电池、油漆、杀虫剂等)、混合类(粒径小于 10mm 的,分类较困难的)

表3 本文与原始文献采用生活垃圾组别对比

Table 3 Comparison of MSW categorizations used in this study and in literature

本文类别	原始文献类别
厨余类	厨余、果类、动物、植物、果皮、骨头、贝壳、瓜果、动物残体
纸类	纸、卫生纸、废纸
橡塑类	塑料、橡胶、橡塑
纺织类	纺织品、纺织物、布类、织物
木竹类	木竹、草木
金属类	金属
玻璃类	玻璃
灰渣类	灰土、砖瓦陶瓷、渣石、渣土、矿物质、砖瓦、残土、煤渣
其他类	其他、复合材料、混合类、人畜粪便、电池、有毒有害、危险性废物、惰性物质、家庭危险废物、细颗粒

1.2.4 城市生活垃圾无害化处理率 第*i*年城市生活垃圾无害化处理量占产生量的百分比,其计算公式为^[3]:

$$\eta_i = \frac{M_i}{N_i} \times 100\% \quad (3)$$

式中: η_i 为第*i*年城市生活垃圾无害化处理率,%; M_i 为第*i*年城市生活垃圾无害化处理量,t; N_i 为第*i*年内城市生活垃圾产生量,t.

1.2.5 城市生活垃圾无害化处理率复合增长率 一定年限内,城市生活垃圾无害化处理率平均每年增长的速率,其计算公式为^[30]:

$$r^2 = \sqrt[i-1]{\frac{\eta_i}{\eta_1}} - 1 \quad (4)$$

式中: r_2 为年内城市生活垃圾无害化处理率增长率,%; η_i 为第*i*年城市生活垃圾无害化处理率,%; η_1 为第一年城市生活垃圾无害化处理率,%.

1.3 我国城市生活垃圾产生和处理时空特征分析

本研究挖掘获得的城生活垃圾产生和处理数据,涉及时间跨度长、空间覆盖广,因此分别从时间和空间角度分析我国城市生活垃圾产生和处理特征.

1.3.1 时空划分 我国自1953年开始制定国民经济和社会发展五年计划纲要,简称五年计划(后改为五年规划),其主要是对国民经济和生产力发展,以及国家重大建设项目等作出规划,为特定的五年时期我国国民经济发展规定目标和方向.五年计划(规划)也逐步重视,并为城市生活垃圾无害化处理设施建设和安排投资提供重要指引和依据^[89].因此,

本研究以五年计划(规划)的执行期作为特征时间尺度,研究我国城市生活垃圾产生和处理特征随时间演变过程.

我国地域辽阔,南、北气候差异显著,东、西经济发展水平不均,各地区居民生活习惯差异明显^[90],城市生活垃圾产生和处理特征可能存在区域差异.为了揭示区域特征,本研究将全国除港澳台以外31个省(市)、自治区分为7大地理区域^[1,91](表4),研究城市生活垃圾产生和处理特征的空间差异.

表4 我国7大地理区域划分

Table 4 The geographical divisions in China

地区划分	包含省(市)和自治区
东北	黑龙江省、吉林省、辽宁省
华北	北京市、天津市、山西省、河北省、内蒙古自治区
华东	上海市、江苏省、浙江省、安徽省、福建省、江西省、山东省
华中	河南省、湖北省、湖南省
华南	广东省、广西壮族自治区、海南省
西南	四川省、贵州省、云南省、重庆市、西藏自治区
西北	陕西省、甘肃省、青海省、宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区

1.3.2 城市生活垃圾产生量时空特征 本研究基于上述时间与空间划分,对1979~2016年全国城市生活垃圾年度产生量和人均日产生量演变趋势进行分析.由于公开发布的各省(市)城市生活垃圾产生量统计数据有限,仅对2002~2016年各地区城市生活垃圾产生量数据进行时空特征分析.

1.3.3 城市生活垃圾物理组分时空特征 如表1所示,本研究获得城市生活垃圾物理组分有效数据采集的时间跨度为1991~2016年.首先,将多年份、多地区数据汇总,制成统计箱线图分析我国城市生活垃圾物理组分数据分布与变异.随后,基于时间与空间划分,分别对“八五”至“十二五”期间,以及地区间生活垃圾物理组分的差异进行分析,采用统计软件Statistical Product and Service Solutions 24(SPSS 24) *K*个独立样本非参数Kruskal-Wallis检验,判断城市生活垃圾物理组分是否存在显著性时空差异^[92].

1.3.4 城市生活垃圾处理(置)时空特征分析 我国城市生活垃圾处理和处置方式包括卫生填埋、焚烧和以堆肥为主的其他方式.本研究首先分析全国城市生活垃圾无害化处理率时空变异特征,随后通过对自2002年开始公布的各种处理(置)方式统计数

据进行分析,明确我国城市生活垃圾无害化处理(置)技术格局随时间变化趋势.最后通过对近期(2016 年)各地区生活垃圾处理场(厂)和处理量的统计数据整理,阐明我国现状地区间生活垃圾无害化处理(置)方式和能力差异.

2 结果与讨论

2.1 我国城市生活垃圾产生量时空演变特征

2.1.1 时间演变特征 改革开放后,我国社会和经济的快速发展致使城市生活垃圾产生量迅速增加,年度产生量由 1979 年的 0.25 亿 t 增长到 2016 年的 2.04 亿 t,增长了 7.12 倍^[1](图 1).研究表明影响我国城市生活垃圾产生量的因素包括城市数量、城市人口数量、城市建设水平、居民收入和消费水平等^[3,28].

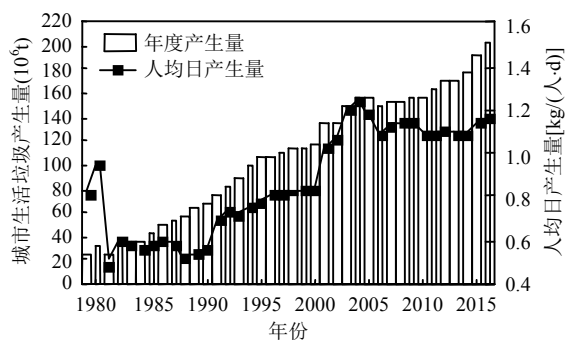


图1 1979~2016 年全国城市生活垃圾产生量和人均日产生量
Fig.1 MSW generation and generation rate per capita in urban China from 1979 to 2016

我国城市生活垃圾产生量在过去近 40a 时间持续增长,1979~2016 年产生量年度复合增长率为 5.82%.若以 1995 年作为分割时间点,可以发现我国城市生活垃圾产生量的增长存在 2 个阶段:1979~1995 年,年度复合增长率为 9.47%;而 1996~2016 年,年度复合增长率为 3.21%.这一现象可能一方面与我国城市建设进程有关,1995 年我国城市数量基本趋于稳定,达到 640 个^[1,93-94].另一方面,随着近 20a 我国城市生活垃圾清运系统的逐步完善,甚至部分城市接近达到全覆盖^[95],垃圾产生量增长速度相比于改革开放初期必然放缓.此外,统计年鉴^[1]显示我国 1979~1995 年生活垃圾产生和无害化处理量数据实际为生活垃圾与粪便的合计量.因此,1995 年前后产生量数据的可比性也受到一定的影响.

图 1 显示 1979~2016 年间,我国城市居民人均生

活垃圾日产生量呈波动上升趋势,由 1979 年的 0.81kg/(人·d)增至 2016 年的 1.17kg/(人·d),增长了 44.44%,但总体上升趋势与年度产生量增长一致.由于 1980~1981 年产生人口数由 8940.5 万人激增至 14400.5 万人;城市生活垃圾产生量反而略微下降,由 0.31 亿 t 降至 0.26 亿 t,故 1981 年城市生活垃圾人均日产生量下降至自 1979 年以来的历史低点 (0.50kg/(人·d))^[1].此后,人均日产生量逐步上升并在 2001~2005 年间达到高点(1.24kg/(人·d)).这一时期,一方面我国加入世贸组织(2001 年),经济迅猛发展,另一方面国家对于城市生活垃圾清运要求与投入水平明显提高,使得以清运量计的的产生量显著增长,可能是造成人均日产生量迅速攀升的重要原因.近年来我国城市生活垃圾人均日产生量有所回落并趋于稳定,这可能与一系列固体废物管控的法规出台有关,例如:《中华人民共和国固体废物污染防治法》(2005 年)^[96]和《中华人民共和国循环经济促进法》(2008 年)^[97].2007~2016 年,我国城市生活垃圾人均日产生量维持在 1.09~1.17kg/(人·d)范围,已超过亚洲地区周边国家,例如韩国(2015 年 1.01kg/(人·d))和日本(2015 年 0.94kg/(人·d)),但仍远低于美国人均水平 2.02kg/(人·d)(2014 年)^[98].

2.1.2 空间演变特征 各省(市)城市生活垃圾产生量统计数据覆盖时间 2002~2016 年,我国不同地区城市生活垃圾年度产生量差别较大^[1],且增速不一.在此期间,全国城市生活垃圾产生量每年复合增长 2.90%,而西南、华东、华南、华中、西北和华北地区每年依次增长 5.40%、5.00%、3.59%、2.20%、2.17%和 0.74%;与这些地区相反,东北地区在此期间出现负增长(-1.27%)(图 2).西南地区增速最快,其原因可能在于西部大开发以来,西南地区城市化水平显著提高,城市居民生活和消费水平明显提高,造成城市生活垃圾产生量迅速增长.华东地区的增速仅次于西南地区,造成这一现象的原因:华东地区拥有经济发达、人口众多的上海市、江苏省、浙江省和山东省等;这些省(市)也是 2002~2016 年城市生活垃圾产生量较多的省份.与之相反,近年来东北地区经济下行、人口外流,且冬季采暖方式向清洁能源转变^[40],可能造成东北地区在近 10 余年城市生活垃圾产生量处于负增长态势.十五(2002~2005 年)和十一五(2006~2010 年)期间,华北地区城市生活垃圾产生量

平均每年分别减少 2.68%和 0.82%,华中地区在十一五期间也出现了轻微负增长(-0.22%).由于这些地区包含部分冬季集中供暖的城市,其城市生活垃圾产生量在部分时期出现负增长可能与这些城市冬季取暖方式发生转变有关.

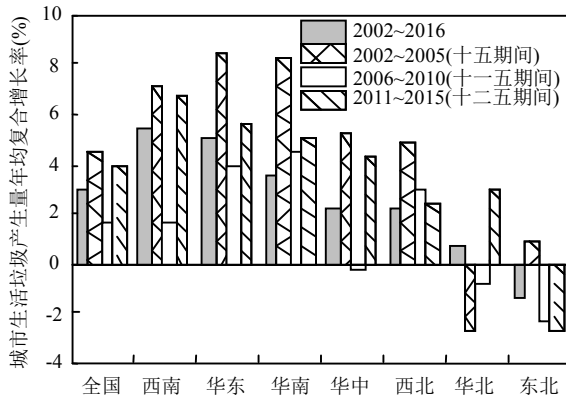


图2 2002~2016年全国和各区域城市生活垃圾产生量年均复合增长率

Fig.2 The compound annual growth rate of MSW generations in China and different regions from 2002 to 2016

2.2 我国城市生活垃圾物理组分时空演变特征

2.2.1 总体特征

通过对 1991~2016 年数据进行汇总,制得我国城市生活垃圾物理组分箱线图(图 3),反映数值分布统计结果.总体来看,垃圾物理组分厨余类和灰渣类数据箱体较长,表明这 2 类组分数据分布较离散,不确定性较高.造成这一现象的原因:(1)这 2 类组分所占生活垃圾湿重比例较高.(2)图中数据源自采样时间跨度 26a 的全国多个地区城市,时空因素(如生活水平、饮食习惯和能源结构等)差异必然影响这 2 类组分数据的离散程度.(3)如前文所述,调研垃圾物理组分文献中采样和命名方法的不统一,以及垃圾的高度异质性,均可能导致上述数据的离散性.

尽管生活垃圾各个物理组分数据存在不同程度的离散性,图 3 仍清晰表明我国多年来多地区城市生活垃圾主要组分为厨余类垃圾,其占生活垃圾湿基质量的百分比平均值和中位值分别为 57%和 59%(表 5).这些比例远高于欧美发达国家厨余垃圾占据生活垃圾的比重^[99-100].以厨余垃圾为主构成的我国城市生活垃圾,具有含水率高、有机质含量高和易腐烂降解等理化特性.这些特性正是造成我国城市生活垃圾收运和填埋处理过程二次污染(恶臭和

渗滤液),以及影响焚烧处理工艺效率的重要原因.

此外,相比于发达国家,我国产生的城市生活垃圾中可回收利用的纸类、金属类和橡塑类物料含量较低.这与我国经济社会发展水平仍落后于发达国家,以及众多城市长期存在的正规和非正规物资回收社会力量有关.

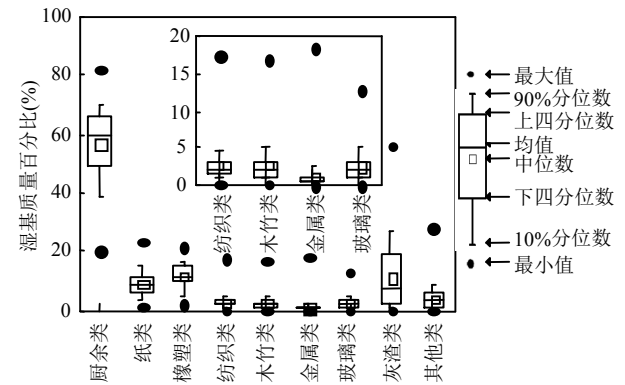


图3 1991~2016年全国调研城市生活垃圾物理组分占比的箱线图(样本数=111)

Fig.3 Boxplot of MSW component fractions in surveyed cities of China(Simple size=111)

90%、10%分位数:样本中所有数值由小到大排列后第 90%和 10%的数值;
上、下四分位数:样本中所有数值由小到大排列后第 75%和 25%的数值;
中位数:样本中所有数值由小到大排列后第 50%的数值

2.2.2 时间演变特征

以五年计划(规划)执行期为数据汇总时间尺度,八五~十二五期间我国城市生活垃圾物理组分分布情况如图 4 所示.

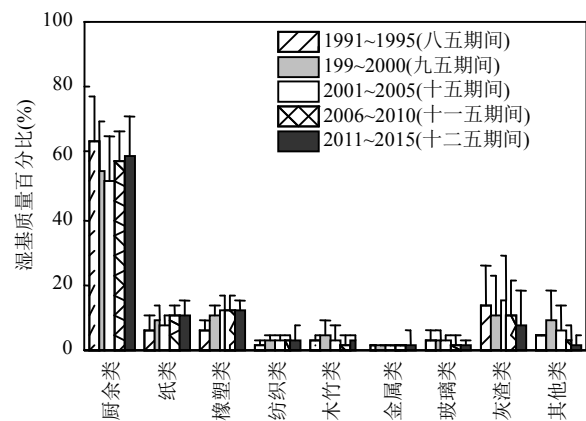


图4 1991~2015年(八五~十二五期间)全国城市生活垃圾物理组分

Fig.4 MSW component fractions in surveyed cities of China from 1991 to 2015
误差棒为数据的标准差

对各时间段之间的垃圾物理组分数据进行 Kruskal-Wallis 检验,结果表明 5 个组分类别数据:纸类、橡塑类、金属类、玻璃类和其他类,在多个五年计划(规划)执行期之间存在显著性差异(显著性判别水平取 0.05)。尽管如此,鉴于前文所述的垃圾物理组分数据存在不同程度的离散性,多年来我国城市生活垃圾物理组分构成总体处于较稳定状态。需要注意的是即使垃圾物理组分构成稳定,这些组分的化学组分可能发生变化。例如 Wang 等^[101]发现不同年代取样的办公打印纸,其化学组分与生物可降解性随时间发生明显变化,这对于该类组分填埋过程的温室气体排放统计结果存在直接影响^[102-104]。

2.2.3 空间演变特征 表 5 列出全国和 7 个地区多年来城市生活垃圾物理组成。对全国和地区间城市生活垃圾物理组分数据进行 Kruskal-Wallis 检验,发现 6 类组分数据存在地区性差异:厨余类、纸类、木竹类、玻璃类、灰渣类和其他类,该 6 类组分地区间数据统计检验发现渐进显著性小于 0.05。由表 5 可以看出,我国城市生活垃圾中厨余类含量呈现由东向西递减的趋势;纸类和玻璃类含量呈现由南向北递减的趋势;灰渣类含量则呈现由北向南逐渐递减的趋势。这些现象均与我国东部地区经济发达、北方地区冬季采暖多以燃煤为主有关。这些结果与杜吴鹏等^[28]研究的 2000 年前后变化趋势接近。

表 5 1991~2016 年全国和各地区城市生活垃圾物理组分(%湿基)

Table 5 MSW component fractions of whole country and different regions of China from 1991 to 2016

区域	样本数		组分类别								
			厨余类	纸类	橡塑类	纺织类	木竹类	金属类	玻璃类	灰渣类	其他类
全国	111 ^a	均值	56.79	8.94	11.54	2.86	2.74	1.15	2.60	11.58	4.31
		中位数	58.82	8.68	11.49	2.21	1.70	0.76	2.04	8.57	3.26
		标准差	12.55	4.37	4.30	2.27	3.06	2.00	2.19	11.26	5.79
华东	37	均值	64.50	8.65	12.45	2.30	1.77	0.65	2.92	6.27	2.02
		中位数	64.97	9.01	13.01	2.14	1.37	0.53	2.69	1.84	1.36
		标准差	6.62	3.08	3.98	0.89	2.02	0.64	1.66	9.59	2.05
华南	11	均值	51.18	11.81	13.49	3.71	2.03	0.74	1.86	11.64	5.85
		中位数	47.74	10.74	12.43	2.19	1.36	0.70	1.46	9.46	6.47
		标准差	8.49	3.69	4.11	3.39	1.41	0.53	1.15	7.47	1.08
西南	21	均值	52.22	9.98	12.61	2.81	2.50	1.16	1.62	13.32	7.11
		中位数	58.20	10.10	12.47	2.84	2.50	1.06	1.40	8.49	4.17
		标准差	15.22	4.49	4.04	1.63	1.21	1.16	1.19	13.05	8.46
西北	4	均值	51.93	6.85	9.41	2.72	1.75	1.21	2.89	27.22	4.25
		中位数	47.69	7.65	10.47	2.30	1.36	0.51	1.67	37.64	0.17
		标准差	19.24	3.54	2.82	1.00	0.68	1.61	3.02	18.04	7.06
华北	15	均值	50.76	11.57	11.77	4.18	4.29	2.75	3.92	10.79	0.92
		中位数	53.96	11.07	11.76	2.90	4.25	1.40	1.70	8.57	0.50
		标准差	11.23	5.77	3.48	4.24	2.97	4.59	4.06	8.14	0.89
东北	12	均值	58.87	7.24	11.14	2.69	5.94	1.08	3.00	7.33	6.31
		中位数	63.49	7.60	10.80	2.70	2.52	0.56	2.55	3.39	4.10
		标准差	14.94	2.69	4.18	0.90	6.76	0.82	1.71	8.52	7.78
华中	3	均值	49.42	3.12	8.61	4.04	4.75	0.76	0.81	26.39	8.30
		中位数	47.53	3.12	7.25	4.04	4.75	1.10	0.23	27.30	8.30
		标准差	5.20	2.28	4.93	4.59	1.67	0.64	1.03	9.73	- ^b

注:a.含杜吴鹏^[28]等报道的全国70个城市8个年份城市生活垃圾物理组分的平均值,以及103个调研城市生活垃圾物理组分数据。b.华中地区,文献中湖北荆州和湖南长沙2城市均未报道其他类数据,因而无法计算该类组分数据标准差。

2.3 我国城市生活垃圾无害化处理(置)时空演变特征分析

2.3.1 无害化处理率时空演变特征 1979~2016 年间,随着我国不断加强对城市生活垃圾管理的要求投入,我国城市生活垃圾无害处理率不断攀升(图

5)。2016 年全国城市生活垃圾无害化处理率已达到 96.62%^[1],相比改革开放之初(1980 年 6.86%)提高了 90 个百分点,年均复合增长率为 7.62%(公式 2)。2016 年全国多数城市生活垃圾已得到有效处理(置),部分地区如上海、山东、重庆等无害化处理率已接近

100%(图6).与之相比,新疆、黑龙江和甘肃等地城市生活垃圾无害化处理发展相对滞后,3省无害化处理率接近或略高于80%,尚有较大的提高空间.

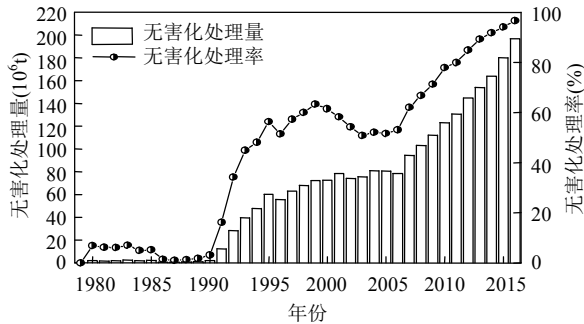


图5 1979~2016 全国城市生活垃圾无害化量和无害化处理率
Fig.5 MSW harmless treatment amounts and harmless treatment ratio in China from 1979 to 2016

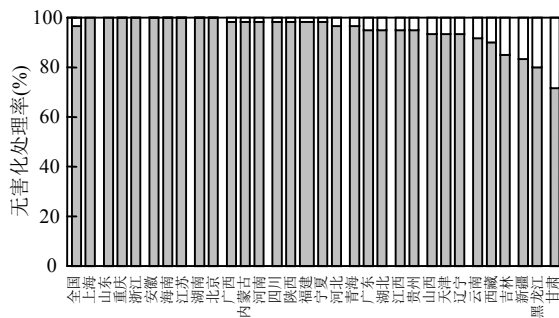


图6 2016年全国和各省(市)城市生活垃圾无害化处理率
Fig.6 National and provincial (city) MSW harmless treatment ratio in 2016

2.3.2 无害化处理(置)时空演变特征 长期以来,卫生填埋是我国生活垃圾处理(置)的主要方式,尽管其处理量占无害化处理量比例由2002年的89.30%,逐步下降至2016年的60.32%(图7).与之相反,城市生活垃圾焚烧处理在过去的15a得到快速的发展,其处理量占无害化处理量比例由2002年的不足4%,增长到2016年的接近40%.2016年底我国发布了《“十三五”全国城镇生活垃圾无害化处理设施建设规划》^[105],其中明确要求到2020年底,全国城市生活垃圾焚烧处理能力达到无害化处理总能力的50%以上,其中东部地区达到60%以上,并继续减少原生垃圾填埋量.由此可见,我国城市生活垃圾处理技术格局将逐步由过去的以填埋为主、焚烧为辅,转变为以焚烧为主、填埋补充的技术格局.堆肥作为其它处理方式的代表,尽管一度得到重视和

发展(2002~2006年),但已被证明无法从技术和经济可行的角度,满足我国主要以混合收集为主的城镇生活垃圾无害化处理要求,因此逐渐被大多数城市摒弃.

与产生情况存在地区性差异相对应,我国城市生活垃圾无害化处理水平也存在地区性差异.图8反映2016年我国各地区城市生活垃圾处理场(厂)数量和无害化处理量分布情况.从图8可以看出,地区间垃圾处理场(厂)数量和无害化处理量分布情况大体一致.我国经济发展和城市垃圾产生量较高的华东地区,拥有高于全国其它地区的城市生活垃圾处理能力,即生活垃圾处理场(厂)数量和无害化处理量高于全国其它地区.此外,对经济承受能力要求较高的焚烧处理也在华东地区得到更多的应用,焚烧处理量已超过无害化处理量的50%.全国其它地区则仍以卫生填埋作为其城市生活垃圾主要的处理(置)方式.

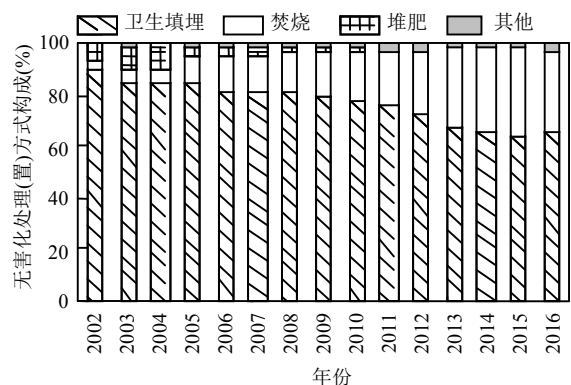


图7 2002~2016年我国城市生活垃圾无害化处理(置)方式构成
Fig.7 Fractions of MSW treatment and disposal methods used in urban China between 2002 and 2016

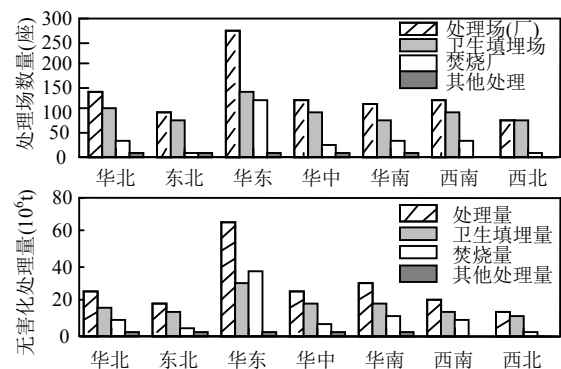


图8 2016年我国各地区城市生活垃圾无害化处理能力^[1]
Fig.8 The comparison of the treatment amounts of MSW in each region of China in 2016

3 结论

3.1 本研究通过系统收集和整理公开发表的 1979~2016 年关于我国城市生活垃圾产生和处理的政府统计数据和中英文文献结果,分析了我国城市生活垃圾产生和处理的时空演变特征.建立了我国长期以来统计数据缺失的全国和各地区城市生活垃圾物理组分数据清单.

3.2 1979~2016 年,我国城市生活垃圾产生量显著增长.与此同时,我国城市生活垃圾无害化处理水平也相应得到明显发展和提升.全国主要省(市)城市生活垃圾无害化处理率已接近 100%.我国城市生活垃圾无害化处理方式正逐步由持续多年的以填埋为主、焚烧为辅,转变为以焚烧为主、填埋补充的技术格局.

3.3 我国城市生活垃圾以含水率高、有机质含量高、易降解的厨余类组分为主.相比于发达国家,我国产生的城市生活垃圾中可回收利用的纸类、金属类和橡塑类物料含量较低.随着我国近年来连续出台关于生活垃圾分类收集的政策与举措,建议首先采用干湿分离,即将厨余垃圾与其它垃圾分流,其次是在技术经济可行的前提下,加大可回收垃圾资源回收力度,以实现城市生活垃圾的源头减量化和利用最优化.

3.4 全国各地区城市生活垃圾产生量、产生量增速、物理组成、无害化处理率和处理方式等,存在一定的时空差异.各地区应因地制宜,结合国家专项规划,进一步提高城市生活垃圾减量化和资源化水平,弥补无害化处理缺口,并从全生命周期角度减少和控制城市生活垃圾产生、收运和处理(置)过程生态环境影响.

参考文献:

[1] 住房和城乡建设部.中国城市建设统计年鉴 [M]. 北京:中国统计出版社, 2002-2016.

[2] 肖黎姍, 吝涛, 潘玲阳, 等. 半城市化地区生活垃圾产生及其影响因素分析 [J]. 环境污染与防治, 2011,33(2):105-110.

[3] 孔令强, 田光进, 柳晓娟. 中国城市生活固体垃圾排放时空特征 [J]. 中国环境科学, 2017,37(4):1408-1417.

[4] Zhang H, Shao H L. Methane emissions from MSW landfill with sandy soil covers under leachate recirculation and subsurface irrigation [J]. Atmospheric Environment, 2008,42(22):5579-5588.

[5] 李欢, 金宜英, 李洋洋. 生活垃圾处理的碳排放和减排策略 [J]. 中

国环境科学, 2011,31(2):259-264.

[6] 岳波, 晏卓逸, 黄启飞, 等. 准好氧填埋场中间覆盖层 CH_4 释放及减排潜力 [J]. 中国环境科学, 2017,37(2):636-645.

[7] 瞿贤, 何晶晶, 邵立明, 等. 生物质组成差异对生活垃圾厌氧产甲烷化的影响 [J]. 中国环境科学, 2008,28(8):730-735.

[8] 李崇, 任国玉, 高庆先, 等. 固体废物焚烧处置及其清洁发展机制 [J]. 环境科学研究, 2011,24(7):819-827.

[9] 何晶晶, 陈淼, 杨娜, 等. 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 [J]. 中国环境科学, 2011,31(3):402-407.

[10] 李文涛, 高庆先, 王立, 等. 我国城市生活垃圾处理温室气体排放特征 [J]. 环境科学研究, 2015,28(7):1031-1038.

[11] Bodansky D. United Nations Framework Convention on Climate Change: A Commentary [J]. Yale Journal of International, 1993,31(3):5-18.

[12] Pattharathanon T, Towprayoon S, Wangyao K. Greenhouse gas emission and economic evaluation from municipal solid waste landfill in Thailand [J]. International Proceedings of Chemical Biological & Environmenta, 2012,9(5):79-85.

[13] 联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC). <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs1.html> [EB/OL], 1996-09-10.

[14] Paustian K, Ravindranath N H, Amstel A R V. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [EB/OL]. 2007-04.

[15] 路玉龙, 韩靖, 余思婧, 等. BP 神经网络组合预测在城市生活垃圾产量预测中应用 [J]. 环境科学与技术, 2010,33(5):186-190.

[16] 陈义忠, 何理, 卢宏伟, 等. 基于双层规划模型的城市固体废物管理系统优化研究 [J]. 环境科学学报, 2015,35(10):3367-3376.

[17] 张海龙, 李祥平, 齐剑英, 等. 华南某市生活垃圾组成特征分析 [J]. 环境科学, 2015,36(1):325-332.

[18] 刘克锋, 石爱平, 王红利, 等. 北京市城区近郊区生活垃圾成分调查及可农性分析 [J]. 农业环境科学学报, 2002,21(3):222-236.

[19] 刘齐, 孙玉辉, 寇巍, 等. 季节性城市生活垃圾成分分析及厌氧消化特性研究 [J]. 环境工程学报, 2013,7(11):4507-4512.

[20] 徐礼来. 厦门市生活垃圾产生影响因素及预测研究 [D]. 北京:中国科学院大学, 2013.

[21] 何德文, 金艳, 柴立元, 等. 国内大中城市生活垃圾产生量与成分的影响因素分析 [J]. 环境卫生工程, 2005,13(4):7-10.

[22] 张宪生, 沈吉敏, 厉伟, 等. 城市生活垃圾处理处置现状分析 [J]. 安全与环境学报, 2003,3(4):60-64.

[23] 张英民, 尚晓博, 李开明, 等. 城市生活垃圾处理技术现状与管理对策 [J]. 生态环境学报, 2011,20(2):389-396.

[24] 周靖承, 陈海滨. 基于 DEA 模型的我国城市生活垃圾管理效率评价 [J]. 中国环境科学, 2012,32(7):1332-1338.

[25] 苏婧, 席北斗, 刘鸿亮, 等. 北京市生活垃圾管理的多重不确定性长期规划模型 [J]. 中国环境科学, 2009,29(10):1105-1110.

[26] 梁广生, 吴文伟, 赵桂瑜, 等. 北京市 2002-2007 年生活垃圾产生量预测分析 [J]. 环境科学研究, 2003,16(5):48-51.

[27] 陈兰芳, 吴刚, 张燕, 等. 我国城市生活垃圾生成及处理投入的省际分布研究 [J]. 武汉理工大学学报(社会科学版), 2012,25(6):868-872.

[28] 杜吴鹏, 高庆先, 张恩琛, 等. 中国城市生活垃圾排放现状及成分分析 [J]. 环境科学研究, 2006,19(5):85-90.

[29] 亨利·马尔科姆·斯坦纳. 工程经济学原理: 第二版 [M]. 经济科学出

- 版社, 2000:45-68.
- [30] 宋国君.《中国城市生活垃圾管理状况评估报告》[R]. 北京:中国人民大学国家发展与战略研究院, 2015:5.
- [31] 杨娜.基于全生命周期分析的中国城市生活垃圾填埋过程环境影响[D]. 同济大学, 2014.
- [32] 欧俊宏.浅谈《生活垃圾采样和分析方法》的存在问题和改进对策[J]. 大科技, 2017,(32):297-298.
- [33] 段丽杰,盛连喜,王志平.长春市生活垃圾处理现状分析与对策探讨[J]. 环境卫生工程, 2004,12(3):168-170.
- [34] 任婉侠,耿涌,薛冰.沈阳市生活垃圾排放现状及产生量预测[J]. 环境科学与技术, 2011,34(9):105-110.
- [35] 孙大鹏,马溪平.沈阳城市垃圾资源化回收利用研究[C]//中国环境科学学会2004年学术年会, 2004.
- [36] 隋儒楠,于东升,马春蕾.等.沈阳市生活垃圾资源化利用工艺方案研究[J]. 环境卫生工程, 2007,15(2):44-46.
- [37] 周晓强.沈阳市生活垃圾能源化利用模式研究[D]. 沈阳:沈阳航空航天大学, 2013.
- [38] 马铮铮.沈阳市生活垃圾调查及处置方式研究[J]. 环境卫生工程, 2010,18(2):13-14.
- [39] 赵蔚蔚.大连市城市中心区生活垃圾调查与分析[J]. 环境卫生工程, 2006,14(6):29-31.
- [40] 谢冰.东北地区垃圾堆场的垃圾降解行为及稳定化研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2010.
- [41] 王维平,吴玉萍.论城市垃圾对策的演进与垃圾产业的产生[J]. 生态经济, 2001,(10):34-37.
- [42] 裴成虎.北京市城市生活垃圾管理对策研究[J]. 城市管理与科技, 2003,5(2):47-50.
- [43] 荣波,卫潘明,李彦富.等.北京市生活垃圾成分分析及对应处理方式对策研究[J]. 环境保护, 2004,(10):30-33.
- [44] 黄凯,刘克锋,王红利.等.北京城市垃圾处理与管理对策[J]. 北京农学院学报, 2002,17(1):54-59.
- [45] 刘竞.北京市生活垃圾全程管理体系研究[J]. 环境卫生工程, 2006,14(1):36-39.
- [46] 姜薇.2007年北京市生活垃圾理化特性调查[C]//中国城市环境卫生协会2009年会, 2009.
- [47] 王伟,吴世新.北京市的垃圾量与减量处理方式探究[J]. 城市管理与科技, 2009,11(3):56-58.
- [48] 贾子利.北京市垃圾分类及处置方式研究[D]. 北京:北京林业大学, 2011.
- [49] 李春芸.北京市城区生活垃圾理化特性调查研究[D]. 北京工业大学, 2015.
- [50] Li Z S, Lei Y, Qu X Y, et al. Municipal solid waste management in Beijing City. [J]. Waste Management, 2009,29(9):2596-2599.
- [51] 何俊宝,姚庆军,韩志梅.等.天津滨海新区(海河以南)生活垃圾调查及分析[J]. 环境卫生工程, 2010,18(2):7-10.
- [52] 王益民,董秀珍,张云霞.等.唐山市城市生活垃圾特性分析[J]. 唐山学院学报, 2007,20(6):62-63.
- [53] 倪娜,洪国才.杭州市城市生活垃圾物理化学特性及处置对策[J]. 环境卫生工程, 2005,13(5):31-32.
- [54] 周菲.杭州城市生活垃圾处理体系综合评价方法研究[D]. 长沙:中南大学, 2010.
- [55] 张益,杨承休.上海市区生活垃圾产生量及成分分析[J]. 环境卫生工程, 2000,(3):104-106.
- [56] 上海市市容环境卫生管理局.上海市固体废弃物处置发展规划[R]. 2001.
- [57] 贾悦,董晓丹,夏苏湘.等.上海市分类垃圾理化特性分析及处置方式探讨[J]. 绿色科技, 2013,(8):236-238+244.
- [58] 董晓丹,张玉林.上海市生活垃圾理化特性调查分析[J]. 环境卫生工程, 2016,24(6):18-21.
- [59] 程炬,董晓丹.上海市生活垃圾理化特性浅析[J]. 环境卫生工程, 2017,25(4):36-40.
- [60] 李美叶,郑振涛.济南市生活垃圾性状变化趋势及处理技术多元化转型分析[J]. 环境卫生工程, 2014,22(4):62-64.
- [61] 姜震,张文霞,齐文静.青岛市生活垃圾物理特性分析及变化趋势研究[J]. 环境卫生工程, 2011,19(3):36-37.
- [62] 吴克,俞志敏,金杰.等.合肥城市生活垃圾处理方案选择探讨[J]. 合肥学院学报(综合版), 2008,18(3):56-58.
- [63] 康晓鸥,王世和.南京市居民生活垃圾调查及减量化分析[J]. 环境科学与管理, 2009,34(2):46-48.
- [64] 何晟,朱水元,郁莉强.苏州市生活垃圾特性分析及处理对策[J]. 环境卫生工程, 2008,16(6):62-64.
- [65] 肖萌芳,周劲初.九江市城市生活垃圾现状调查与分析[J]. 江西能源, 2008,(1):51-53.
- [66] 汤钟明.长沙市城市生活垃圾管理系统温室气体排放及其减排策略研究[D]. 长沙:湖南大学, 2014.
- [67] 李立.武汉市城乡生活垃圾处理可持续发展研究[J]. 生态经济, 2010,(5):156-158.
- [68] 戴捷,陈丽雯,白建生.等.荆州市城区生活垃圾性质调查与分析[J]. 环境卫生工程, 2013,21(1):24-26.
- [69] 黄昌付.深圳市生活垃圾理化组分的统计学研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2012.
- [70] 郭桂璞,韦卫艳,何秀萍.南宁市生活垃圾性状变化趋势及处理技术多元化转型分析[J]. 广西城镇建设, 2013,(9):124-127.
- [71] 杨运华,郭绪元.重庆主城区生活垃圾处理及长生桥卫生填埋场设计小结[J]. 有色金属工程, 2003,55(s1):99-103.
- [72] 张鹏,彭莉,张向和.重庆市城市生活垃圾成分及物理特性分析研究[J]. 环境科学与管理, 2014,39(2):14-17.
- [73] Hui Y, Li'ao W, Fenwei S, et al. Urban solid waste management in Chongqing: challenges and opportunities. [J]. Waste Management, 2006,26(9):1052-62.
- [74] 李东,顾恒岳.重庆市主城区生活垃圾现状调查与分析[J]. 重庆环境科学, 2001,23(1):67-69.
- [75] 黄本生,李晓红,王里奥.等.重庆市主城区生活垃圾理化性质分析及处理技术[J]. 重庆大学学报, 2003,26(9):9-13.
- [76] 陶雪峰,黄涛,杨海静.等.成都市中心城区生活垃圾调查与分析[J]. 广东农业科学, 2009,(1):94-96.
- [77] 林祖翔,吴香尧.成都市市区固体生活垃圾现状分析和对策初探[J]. 四川环境, 1999,18(1):53-57.
- [78] 黄明星,刘丹.四川省城市生活垃圾的组成及特性[J]. 中国环境监测, 2012,28(5):121-123.
- [79] 银燕春,刘育辰,王莉淋.等.成都城镇生活垃圾特性及处理方案[J]. 环境工程学报, 2016,10(10):5964-5970.
- [80] 杜成松.都江堰市城市生活垃圾调查与分析[J]. 环境卫生工程, 2016,24(4):8-9.
- [81] 姜平,刘永霞.贵州省城市生活垃圾处理现状与对策[J]. 环保科技, 2004,10(4):1-6.

- [82] 旦增布多. 西藏拉萨市市区生活垃圾物理特性分析 [J]. 西藏大学学报(自然科学版), 2012,27(1):20-27.
- [83] 姬爱民. 兰州市生活垃圾物理特征与焚烧处理可行性分析 [D]. 兰州: 兰州大学, 2007.
- [84] 苟剑锋, 曾正中, 姬爱民, 等. 兰州市生活垃圾物理成分及含水特性分析 [J]. 环境工程, 2012,30(6):101-105.
- [85] 陈浩, 雷坤平, 马春兰, 等. 石河市城市生活垃圾的组成及理化性质分析 [J]. 安徽农业科学, 2010,38(23):12666-12668.
- [86] 邵华伟, 徐万里, 孔江江, 等. 乌鲁木齐市生活垃圾调查及评价 [J]. 环境卫生工程, 2009,17(5):10-12.
- [87] 黄金屏. 标准 CJ/T3039—城市生活垃圾采样和物理分析方法 [J]. 中国城市环境卫生协会会刊, 1995,(4):26-30.
- [88] 住房和城乡建设部. CJ/T313—2009 生活垃圾采样和分析方法 [M]. 中国标准出版社, 2009:1-14.
- [89] 中共中央, 中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要 [M]. 人民出版社, 2016:1-193.
- [90] 岳波, 张志彬, 孙英杰, 等. 我国农村生活垃圾的产生特征研究 [J]. 环境科学与技术, 2014,37(6):129-134.
- [91] 刘君德, 靳润成, 周克瑜. 中国政区地理 [M]. 科学出版社, 1999:10-50.
- [92] 韩智勇, 费勇强, 刘丹, 等. 中国农村生活垃圾的产生量与物理特性分析及处理建议 [J]. 农业工程学报, 2017,33(15):1-14.
- [93] 朱英明, 姚士谋, 李玉见. 我国城市化进程中的城市空间演化研究 [J]. 地理与地理信息科学, 2000,16(2):12-16.
- [94] 刘云, 朱磊. 城市化水平与城市生活垃圾相关性量化分析 [J]. 生态经济(学术版), 2007,(2):321-323+337.
- [95] 李颖, 尹荔莹, 李蔚然. 国内外城市生活垃圾收运系统剖析 [J]. 环境工程, 2010,28(S1):250-253.
- [96] 人大常委会编. 中华人民共和国固体废物污染环境防治法 [M]. 北京: 中国环境保护出版社, 2005:1-22.
- [97] 中华人民共和国循环经济促进法 [J]. 资源再生, 2008,(9):10-14.
- [98] 经济合作与发展组织 (OECD). <https://data.oecd.org/waste/municipal-waste.htm> [EB/OL]. 2017.
- [99] Zhang D Q, Tan S K, Gersberg R M. Municipal solid waste management in China: status, problems and challenges. [J]. Journal of Environmental Management, 2010,91(8):1623-1633.
- [100] 杨娜, 邵立明, 何晶晶. 我国城市生活垃圾组分含水率及其特征分析 [J]. 中国环境科学, 2018,38(3):1033-1038.
- [101] Wang X, Fb D L C, Ximenes F, et al. Decomposition and carbon storage of selected paper products in laboratory-scale landfills. [J]. Science of the Total Environment, 2015,532:70-79.
- [102] Wang X, Padgett J M, Fb D L C, et al. Wood Biodegradation in Laboratory-Scale Landfills [J]. Environmental Science & Technology, 2011,45(16):6864-6871.
- [103] Wang X M, Nagpure A S, Decarolis J F, et al. Using observed data to improve estimated methane collection from select U.S. landfills. [J]. Environmental Science & Technology, 2013,47(7):3251-3257.
- [104] Wang X, Nagpure A S, Decarolis J F, et al. Characterization of Uncertainty in Estimation of Methane Collection from Select U.S. Landfills. [J]. Environmental Science & Technology, 2015,49(3):1545-1551.
- [105] 国家发展和改革委员会、住房和城乡建设部. “十三五”全国城镇生活垃圾无害化处理设施建设规划(发改环资〔2016〕2851号)[R]. 北京: 国家发展改革委、住房和城乡建设部, 2016.

作者简介: 魏潇潇(1994-), 女, 四川遂宁人, 重庆大学城市建设与环境工程学院在读研究生, 主要从事固体废物污染控制与资源化利用研究。