环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2019
Vol.40 No.12
第40卷 第12期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第40卷 第12期
2019年12月15日

目 次(卷终)

研究报告

粤港澳大湾区场地污染特征、治理修复与环境管理研究专辑

Eco-Environmental Knowledge Web

环 境 科 学
Environmental Science

第40卷 第12期 2019年12月
Vol. 40, No. 12 Dec., 2019

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

马仕君[1,2],周传斌[1,2*],杨光[1,2],赵志岚[1],刘懿颉[1]

(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,北京 100049)

摘要: 填埋场中的生活垃圾成分复杂,即使在封场后其存量垃圾仍将持续产生温室气体、恶臭、地下水污染等环境问题,是城市生态环境修复的重点领域之一. 生活垃圾填埋场物质存量、组成成分和理化特征是掌握其潜在环境影响的关键. 但是目前关于填埋场物质存量及其环境影响的研究还不多见. 本研究以我国城市化程度最高、人口最为密集的粤港澳大湾区城市群为例,基于国内外报道的科技信息和统计数据,对11个城市的生活垃圾产生量、处理量、组成成分、填埋场存量及关键元素碳存量进行分析. 结果表明:①粤港澳大湾区2017年生活垃圾产生量为26.4 Tg,平均每年增长0.8 Tg,其中卫生填埋处置占58.9%;②总生活垃圾填埋处置量为230.1 Tg,其中食物、塑料和纸类垃圾的累计填埋处置量最多,分别为109.6、38.9和29.6 Tg;③2001~2017年,大湾区城市生活垃圾填埋场总碳输入量为50.0 Tg,通过填埋气排放的碳为7.1 Tg,通过渗滤液排放的碳为1.5 Tg,累积碳存量为41.4 Tg. 本研究可为研究城市生活垃圾填埋场的环境影响提供基础数据,为大湾区城市生态环境修复提供科学依据.

关键词:城市生活垃圾;填埋场;物质存量;组成组分;环境影响;粤港澳大湾区

中图分类号: X705 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2019)12-5593-11 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201907030

Characteristics and Environmental Impacts of Materials Stored in Municipal Solid Waste Landfills: A Case Study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

MA Shi-jun[1,2], ZHOU Chuan-bin[1,2*], YANG Guang[1,2], ZHAO Zhi-lan[1], LIU Yi-jie[1]

(1. State Key Laboratory for Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The composition of municipal solid waste (MSW) in landfills is complex; additionally, the waste stored in landfills continues to generate greenhouse gases, odors, and ground water pollutants even during the post-closure stage. Therefore, landfills are considered key fields of urban eco-environmental remediation. In this context, it is crucial to understand the storage, composition, physical, and chemical characteristics of waste, as well as its potential environmental impacts. However, very few studies have discussed these topics in detail. In this work, we focused on the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area (GBA), which has the highest urbanization rate and population density of all China. The generation, stock, physical components, and key elements of MSW in eleven cities of the GBA were analyzed based on both the scientific literature and statistical data. The main results are as follows: ① the total amount of MSW produced by the cities was of 26.4 Tg in 2017, with an average annual increment of 0.8 Tg; moreover, the most used disposal method was the sanitary landfill (58.9% of the total); ② the total amount of MSW disposed in the landfills was equal to 230.1 Tg [including mainly food waste (109.6 Tg), plastic (38.9 Tg), and paper (29.6 Tg)]; ③ between 2001-2017, a total of 50.0 Tg of carbon were input in the landfills in the form MSW, of which 7.1 Tg of carbon were emitted as gas and 1.5 Tg were discharged as leachate; moreover, the total landfill carbon stock was equal to 41.4 Tg. Overall, this study provides fundamental data that can be used to determine the environmental impacts of MSW landfills and implement the eco-environmental remediation of urban landfill sites in the GBA.

Key words: municipal solid waste; landfill; material stock; physical components; environmental impacts; Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

生活垃圾填埋场是人类历史上出现最早,也是一直沿用至今的城市环境基础设施. 2017年,我国各地级市共有生活垃圾卫生填埋场654座,生活垃圾年填埋处置量2.15亿t[1]. 据统计,2001~2017年我国进入填埋场的生活垃圾总量高达14.8亿吨[1]. 填埋场中的垃圾成分复杂,即使在填埋场封场后其存量垃圾仍将持续产生温室气体,出现恶臭排放、地下水污染、蚊蝇滋生、土地占用等环境问题[2]. 全球气候变化政府间合作组织(IPCC)研究表明,填埋场是全球最主要的温室气体排放源之一,年排放量可能高达14.5亿t[3]. 基于点源GIS和微博大数据的研究表

收稿日期: 2019-07-02; **修订日期**: 2019-08-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41871206);国家重点研发计划项目(2018YFC1903601);中国科学院青年创新促进会项目(2017061)

作者简介: 马仕君(1996~),男,硕士,主要研究方向为城市生活垃圾填埋场物质存量,E-mail:1309479657@qq.com

* 通信作者,E-mail:cbzhou@rcees.ac.cn

明,我国垃圾填埋场排放恶臭气体的影响人口可能达到1 227万人[4]. 填埋场中垃圾的存量、组分和理化特征是掌握其潜在环境影响的关键.

物质存量可以反映人类社会的物质资源积累程度、流动趋势、资源化潜力和环境影响,是城市代谢研究领域中的前沿议题[5~7]. 目前物质存量的研究主要集中在建筑、基础设施、生物质和典型金属元素等方面,尺度包括全球、区域、国家和城市等[5,8,9]. 垃圾填埋场作为社会物质产品生产、加工制造、消费、废物管理全过程的最终归宿,其大尺度的物质存量研究较少. 有研究表明,美国 1960 ~ 2013 年间生活垃圾填埋场存量垃圾总量约为 85 亿 t,但该研究并未对存量垃圾的类型、组分及其关键元素进行进一步的分析[10]. Gu 等[11]研究了我国城市生活垃圾填埋场的有机碳存量,其研究表明近 40 年我国垃圾填埋场中的有机碳存量增加了近 68 倍.

粤港澳大湾区是我国社会经济发展最快、人口密度最大和城市化水平最高的城市群之一. 随着经济的增长和城市化进程的加快,生活垃圾产生量将持续增加. 20 世纪 90 年代以来,卫生填埋一直是大湾区各城市主要的生活垃圾处置方式之一. 粤港澳大湾区属亚热带季风气候,降雨充足,气温较高,地表水和地下水系发达. 相比于其他地区,粤港澳地区的垃圾填埋场内有机物腐化周期更短,渗滤液和填埋气产生量更大,更容易对周围水土气环境造成污染,影响人类健康与生态环境安全. 广州市两个垃圾填埋场周围水体中检测出多环芳烃类等有机化合物[12];增城区填埋场表面覆土的 Cd 含量超过珠三角地区土壤环境背景值[13]. 本文选择粤港澳大湾区城市群为研究对象,结合已有资料和统计数据,分析大湾区 11 个城市 2001 ~ 2017 年的城市生活垃圾填埋场中的物质存量、组分、碳元素流动的时间变化趋势和分布特征,以期为评估粤港澳大湾区城市群填埋场生态环境修复需求提供基础数据支撑.

1 材料与方法

1.1 研究案例

粤港澳大湾区包含广东省珠三角地区的广州、深圳、佛山、珠海、中山、惠州、江门和肇庆这 9 个市以及香港、澳门 2 个特别行政区,共 11 个城市,总人口约 6500 万人. 2018 年粤港澳大湾区经济总量已达到 1.6 万亿美元,对我国新型城镇化发展具有重要战略地位[14~15]. 卫生填埋是粤港澳大湾区的主要垃圾处置方式,2017 年粤港澳大湾区共有 47 个无害化垃圾处理厂,其中有 23 个是卫生填埋场,日垃圾填埋总量达 3.88 万 t. 大湾区的城市生活垃圾产生量自 2001 年开始呈现快速增长态势,且考虑到数据的可获得性,本研究的时间范围为 2001 ~ 2017 年. 填埋场中的高有机浓度渗滤液和温室气体排放是其主要污染形式,因此本研究重点分析了填埋场中碳元素的存量和流动.

1.2 填埋场进场垃圾的组成成分分析

广东省珠三角地区地区 9 个城市的生活垃圾产生量、无害化处理量、填埋量、焚烧量和简易填埋量来源于文献[1]. 采用城市生活垃圾清运量代替城市生活垃圾产生量,简易填埋量为城市生活垃圾清运量减去无害化处理量. 为获得珠三角地区城市生活垃圾组成成分数据,本文搜索了中国知网(CNKI)、Web of Science 和百度学术文库,采用生活垃圾组成、生活垃圾处理现状、城市名称等关键词搜索科技文献,共筛选出 33 篇有效文献. 上述垃圾组成成分数据为湿基数据,是在社区、转运站或者垃圾填埋场实地采样,采用人工分拣分析获得[2,16]. 基于我国城市规模划分标准[17],本研究采用算数平均法计算不同规模城市的生活垃圾组成成分(见表 1). 香港、澳门特别行政区的垃圾产生量、填埋量、焚烧量以及生活垃圾组成成分数据分别来源于当地的环境统计年鉴等资料[18,19].

表 1 粤港澳大湾区不同规模城市的生活垃圾组成成分

Table 1 Composition of the MSW collected from cities of different sizes within the Greater Bay Area

垃圾组成	超大城市[20~25]	特大城市[20,23,26~30]	大城市[20,31~43]	中等城市[37,44~46]	小城市[31,37,47~52]
食物垃圾	0.51	0.51	0.48	0.47	0.53
灰分和石块	0.04	0.09	0.22	0.32	0.17
纸类	0.13	0.07	0.06	0.02	0.06
织物	0.08	0.07	0.04	0.02	0.04
塑料	0.18	0.18	0.12	0.07	0.10
木竹	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04
金属	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
玻璃	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03
其他	0.01	0.01	0.02	0.04	0.00

1.3 垃圾填埋场中的物质代谢测算方法

1.3.1 垃圾填埋气产生量分析模型

粤港澳大湾区垃圾填埋气排放基于 IPCC 推荐的一级降解模型(FOD)[53]，见公式(1)～(4).

$$E(\mathrm{CH_4}) = \sum_T \left[\mathrm{e}^{-(T-1)k} - \mathrm{e}^{-Tk}\right] \times \mathrm{MSW}_i \times \mathrm{MCF} \times \mathrm{DOC} \times \mathrm{DOC_f} \times F \times \left(\frac{16}{12} - R\right) \times (1 - \mathrm{OX}) \quad (1)$$

式中，$E(\mathrm{CH_4})$为填埋气产生量，$\mathrm{Tg \cdot a^{-1}}$；k 为甲烷产生率常数，采用公式(2)计算；MSW_i 为每年进入垃圾填埋场的城市生活垃圾量，$\mathrm{Tg \cdot a^{-1}}$，包括简易填埋和卫生填埋两类；MCF 为甲烷修正因子，卫生填埋取 1.0，简易填埋取 0.8；DOC 为垃圾中的可降解有机碳含量，采用公式(3)计算；$\mathrm{DOC_f}$ 为可以氧化的 DOC 比例，用公式(4)计算. F 为甲烷在产生的填埋气中的体积分数，取 0.5；R 甲烷气体回收比例，因本研究重点计算填埋场物质存量特征，未考虑甲烷气资源化利用，该值设置为 0；OX 为氧化因子，取 0.

$$k = 0.40A + 0.07B + 0.07C + 0.035D \quad (2)$$

$$\mathrm{DOC} = 7.23A + 25.94B + 30.2C + 28.29D \quad (3)$$

$$\mathrm{DOC_f} = 0.8A + 0.5B + 0.2C + 0.5D \quad (4)$$

式中，A 是食物垃圾占生活垃圾比例；B 是纸类垃圾比例；C 是织物比例；D 是竹木比例；各组分的甲烷产生率系数详见文献[53]；各组分的可降解有机碳含量详见文献[54]；各组分的可异化的 DOC 比例详见文献[55].

1.3.2 垃圾渗滤液产生量分析

水平衡模型是用于垃圾填埋场渗滤液定量化的常用模型[56]，该模型在水量守恒的前提下综合考虑垃圾填埋场的输入和输出[57,58]. 对每个作业单元的填埋作业计划作以下假设[57]：①填埋当年按日覆盖计算；②填埋第 2～4 年按中间覆盖计算；③累计填埋 3 层即 12 a 之后，该作业单元进行终场覆盖. 新进场垃圾覆盖原有作业单元，覆盖部分只计算当年进场垃圾的占地面积. 本文利用公式(5)和(6)计算粤港澳大湾区的垃圾渗滤液排放量[55,57,58].

$$L_n = \begin{cases} I_n \times C_1 \times A_n, & (n = 1) \\ I_n \times \left(C_1 \times A_n + \sum_{i=1}^{n-1} C_2 \times A_i\right), & (1 < n \leqslant 4) \\ I_n \times \left(C_1 \times A_n + \sum_{i=n-3}^{n-1} C_2 \times A_i\right), & (4 < n \leqslant 12) \\ I_n \times \left(C_1 \times A_n + \sum_{i=n-3}^{n-1} C_2 \times A_i + \sum_{i=9}^{n-4} C_3 \times A_i\right), & (13 < n \leqslant 16) \\ I_n \times \left(C_1 \times A_n + \sum_{i=n-3}^{n-1} C_2 \times A_i + \sum_{i=9}^{n=12} C_3 \times A_i\right), & (n \leqslant 17) \end{cases} \quad (5)$$

$$A_i = \frac{\mathrm{MSW}_i}{h \times \rho} \quad (6)$$

式中，L_n 为每年渗滤液总产生量，$\mathrm{m^3 \cdot a^{-1}}$；$I_n$ 为年降水量，$\mathrm{m \cdot a^{-1}}$；C_1 为作业单元的渗出系数，取 0.58；C_2 为中间覆盖的渗出系数，取 0.50；C_3 为终场覆盖的渗出系数，取 0.026[57]；n 为年份，本研究的时间范围为 2001～2017 年，因此 n 取值为 1～17；A_i 为第 i 年的进场垃圾填埋面积，$\mathrm{m^2}$；MSW_i 为每一年进入填埋场的垃圾量，$\mathrm{t \cdot a^{-1}}$；ρ 为填埋场内垃圾密度，取 0.8 $\mathrm{t \cdot m^{-3}}$[58]；h 为填埋场的作业高度，假设每年进场垃圾填埋作业高度为 3 m.

1.3.3 垃圾填埋场碳存量计算

垃圾填埋场碳存量使用公式(7)进行计算. 每年进场生活垃圾碳存量以及填埋气和渗滤液的碳存量使用公式(8)和(9)进行计算.

$$S_{\mathrm{sum}} = S_{\mathrm{input}} - S_{\mathrm{gas}} - S_{\mathrm{leachate}} \quad (7)$$

式中，S_{sum}为每年垃圾填埋场的碳存量，$\mathrm{Tg \cdot a^{-1}}$；S_{input}为每年进入到垃圾填埋场的城市生活垃圾的碳元素总量，$\mathrm{Tg \cdot a^{-1}}$；S_{gas}为每年垃圾填埋气中碳排放量，$\mathrm{Tg \cdot a^{-1}}$；S_{leachate}为每年垃圾渗滤液碳排放量，$\mathrm{Tg \cdot a^{-1}}$.

$$S_{\mathrm{input}} = \mathrm{MSW}_i \times \sum_{i=1}^{m=9} c_i \times a_i \quad (8)$$

式中，MSW_i 为每年进入垃圾填埋场的城市生活垃圾量，$\mathrm{Tg \cdot a^{-1}}$；c_i 为城市生活垃圾各组分所占比例；a_i 为城市生活垃圾各组分的碳含量[2]；m 为不同的垃圾组分，共 9 类.

$$S_{\mathrm{gas}} + S_{\mathrm{leachate}} = E(\mathrm{CH_4}) \times \frac{12}{16} \times 2 + \frac{L_n \times (\mathrm{COD} + 0.0582)}{3 \times 10^9} \quad (9)$$

式中，甲烷和二氧化碳在产生的填埋气中的体积分数均为 50%；COD 为化学需氧量；作业单元填埋期渗滤液的 COD 范围为 6.0～20.0 $\mathrm{kg \cdot m^{-3}}$，平均值 13.0 $\mathrm{kg \cdot m^{-3}}$；终场覆盖后渗滤液的 COD 范围为 1.0～5.0 $\mathrm{kg \cdot m^{-3}}$，平均值 3.0 $\mathrm{kg \cdot m^{-3}}$[55]，COD 和 TOC

的转换公式[59]为：TOC = (COD + 0.0582)/3.

1.4 不确定性分析方法

d-factor 法常用于模型估算的不确定性分析，一般该值越大说明某参数设置对模型测算结果的影响越大[60]. 以简易填埋和卫生填埋的有机碳存量估算为例，采用 d-factor 指数对由各个因子引起的不确定性进行定量分析. 假设变量的不确定性遵循正态分布，在增加与减少 10% 的范围内，生成1 000个随机数，将生成的随机数集组作为新的输入导入已有的模型进行预测，计算不确定系数 d-factor[60].

$$\overline{d_Y} = \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}(Y_{Ui} - Y_{Li}) \tag{10}$$

$$\text{d-factor} = \frac{\overline{d_Y}}{\sigma_Y} \tag{11}$$

式中，$\overline{d_Y}$ 为城市垃圾组成预测的各组分的最大值(Y_{Ui})与最小值(Y_{Li})之差，σ_Y 为各组分真实值的标准差.

2 结果与分析

2.1 城市生活垃圾处理处置量

粤港澳大湾区各城市的生活垃圾年产生量从 2001 年的 12.5 $Tg \cdot a^{-1}$ 增长到了 2017 年的 26.4 $Tg \cdot a^{-1}$，平均每年增长 0.8 Tg（见图 1）. 无害化处置量(卫生填埋、焚烧和其他)也呈现增长的趋势，从 2001 年的 12.4 $Tg \cdot a^{-1}$ 增长到了 26.2 $Tg \cdot a^{-1}$. 大湾区的生活垃圾无害化处理率呈逐年上升趋势，从 2002 年的 84.0% 上升为 2017 年的 99.3%. 大湾区各城市的简易填埋比例曾经较高，2002 ~ 2010 年为 16.0% ~ 13.2%，之后随着城市生活垃圾无害化处理基础设施建设的加强，到 2017 年仅为 0.7%. 卫生填埋仍然是该大湾区城市的主要垃圾处置方式，大约 59% 的城市生活垃圾进入到卫生垃圾填埋场中. 卫生填埋和简易填埋处置垃圾给大湾区各城市带来较大的垃圾存量，近 17 年总生活垃圾填埋处置量为 230.1 Tg，其中卫生填埋 182.6 Tg，简易填埋 47.5 Tg. 大湾区的城市生活垃圾焚烧处理比例也大幅提升，由 4.1%（2001 年）提高到 32.9%（2017 年），焚烧处理量约增加了 17.1 倍.

2.2 填埋场的物质存量及其组成

2001 ~ 2017 年粤港澳大湾区城市生活垃圾填埋处置量见图 2. 2001 ~ 2005 年，大湾区生活垃圾填埋处置量从 8.9 $Tg \cdot a^{-1}$ 迅速上升至 14.4 $Tg \cdot a^{-1}$，5 年增加了 1.6 倍. 2005 年以后，虽然城市生活垃圾产生量在逐年增加，但是由于垃圾焚烧处理设施建设不断加快，大湾区每年的垃圾填埋量并没有显著上升，在 13.8 ~ 15.7 $Tg \cdot a^{-1}$ 波动. 从进场垃圾的组成成分看，2017 年占比较大的组成成分为食物、塑料、纸类和灰分，分别占 47.8%、16.8%、13.8% 和 7.0%. 食物、灰分、纸类和塑料各组分比例的波动相对较小，分别为 ± 6.2%、± 6.2%、± 2.5% 和 ±3.1%. 食物、废纸、废塑料等垃圾都是高含碳量的垃圾，对于垃圾处置系统的温室气体排放核算影响较大. 相比于其他 6 类垃圾，这 3 类垃圾累计处置量较多，且增长速度较快. 2017 年，食物、塑料和纸类垃圾的总填埋处置量分别为 109.6、38.9 和 29.6 Tg，是 2001 年的 27.4、15.0 和 13.5 倍. 其中广州的食物垃圾存量最多，为 2.8 Tg，香港的纸类和塑料垃圾存量最多，分别为 1.4 Tg 和 1.1 Tg.

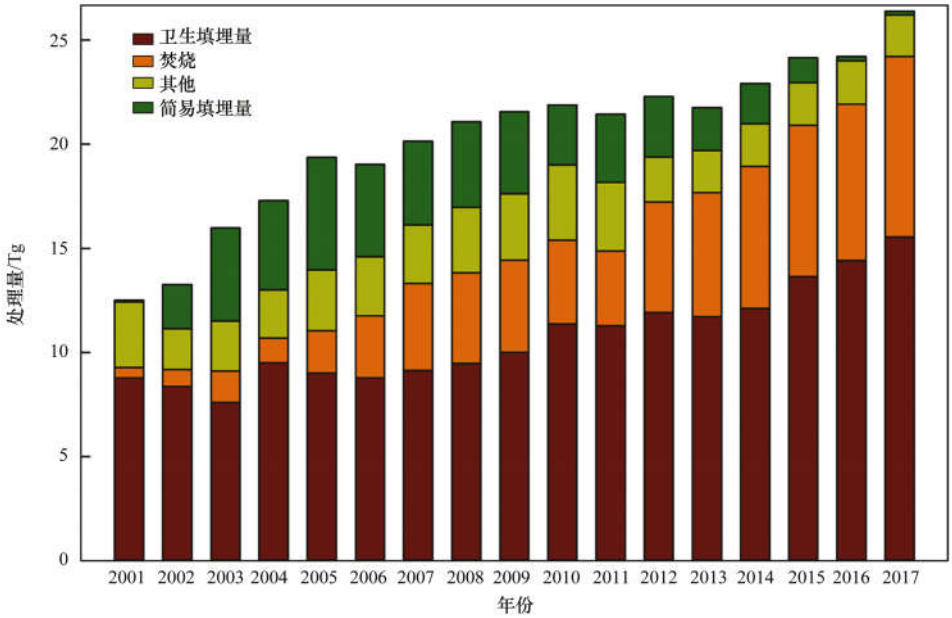

图 1 粤港澳大湾区生活垃圾产生量与处理处置方式(2001 ~ 2017 年)

Fig. 1 MSW generation and treatment in the Greater Bay Area (between 2001-2017)

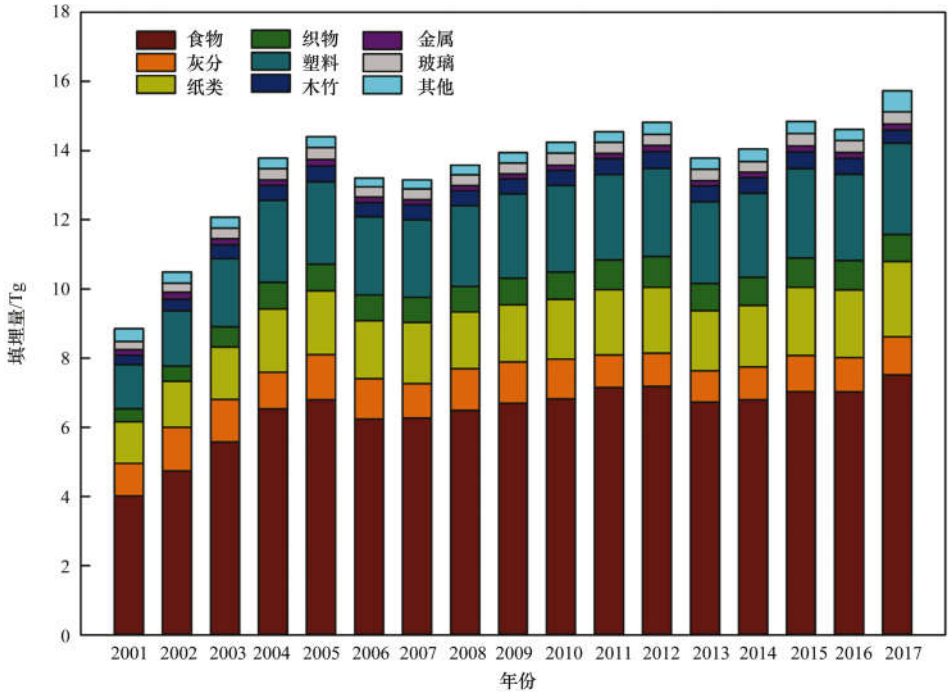

图 2　粤港澳大湾区填埋场的物质存量及其组成(2001 ~ 2017 年)

Fig. 2　Material stock and composition in the MSW landfills of the Greater Bay Area (between 2001-2017)

2.3　生活垃圾填埋场的碳存量分析

碳元素是影响全球气候变化和局地环境污染的关键因子. 本研究以碳为关键元素,分析其在生活垃圾填埋场中的物质流动和物质存量. 粤港澳大湾区卫生填埋场和简易填埋场 2001 ~ 2017 年的累积碳存量分别见图 3. 2001 ~ 2017 年,大湾区城市生活垃圾填埋场总碳输入量为 50.0 Tg,通过填埋气排放的碳为 7.1 Tg,通过渗滤液排放的碳为 1.5 Tg. 至 2017 年,卫生填埋场和简易填埋场的累积碳存量为 41.4 Tg,其中卫生填埋占 79.6%,简易填埋场占 20.4%. 卫生填埋场中,有机碳存量为 20.0 Tg,占总碳存量的 60.6%. 卫生填埋场中的累积碳存量呈线性增加的趋势[见图 3(a)],每年净碳存量从 2001 年的 1.8 $Tg \cdot a^{-1}$ 增长到了 33.0 $Tg \cdot a^{-1}$. 2001 ~ 2017 年,从卫生填埋场中以气体形式(CH_4 和 CO_2)流出的总碳量为 5.8 Tg,约占进入垃圾填埋场中城市生活垃圾的 14.4%. 由于我国城市生活垃圾无害化处理设施建设力度不断加大,简易填埋比例大幅下降,因此简易填埋场中的累积碳存量增长较为缓慢[见图 3(b)]. 2015 年之后简易填埋场中累积碳存量基本不再增加,为 8.6 Tg. 2001 年至 2017 年,简易填埋中以渗滤液形式流失的碳为 0.4 Tg,由于缺乏基本的渗滤液处理设施,流失的碳元素可能进入地表水、地下水和土壤. 因此,虽然简易填埋场处置垃圾的总量近年来大幅下降,但是由于缺乏规范化的填埋气和渗滤液处理系统,排放的温室气体和有机污染物仍然可能带来一定的环境污染风险.

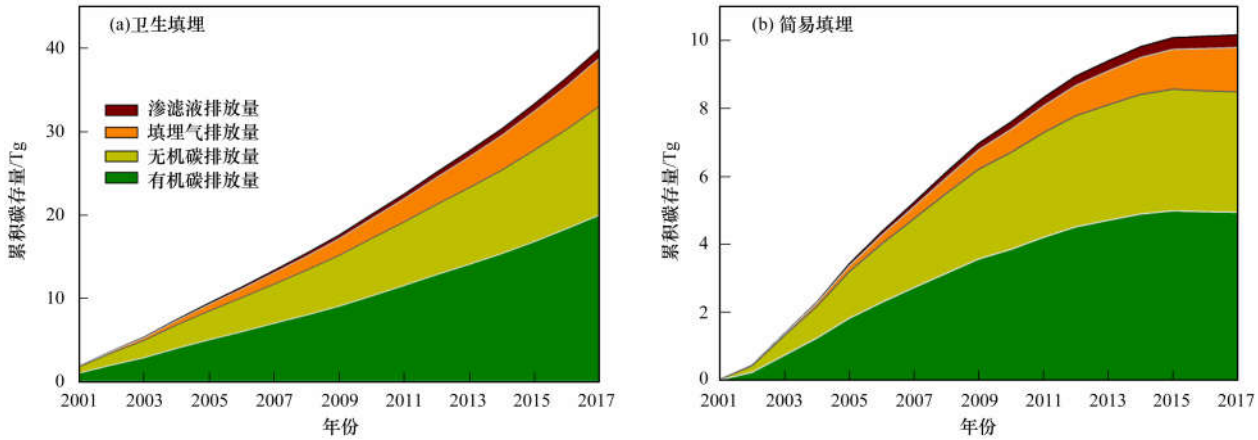

图 3　粤港澳大湾区卫生填埋场和简易填埋场中生活垃圾的累积碳存量(2001 ~ 2017 年)

Fig. 3　Accumulated carbon stocks of MSW in the sanitary landfills and open dumps of the Greater Bay Area (between 2001-2017)

粤港澳大湾区城市生活垃圾填埋场碳存量分布情况见图 4. 大湾区各城市中,生活垃圾填埋场累积碳存量较多的城市是香港、广州、深圳和东莞,分别为 11.0、9.9、8.0 和 6.2 Tg. 江门、佛山、珠海、中山、惠州、肇庆和澳门的垃圾填埋场碳存量相对较低,其碳存量范围在 0.0 ~ 2.0 Tg 之间. 澳门垃圾填埋场中累积碳存量最低,2001 年以来澳门的生活垃圾主要处理方式为焚烧[19].

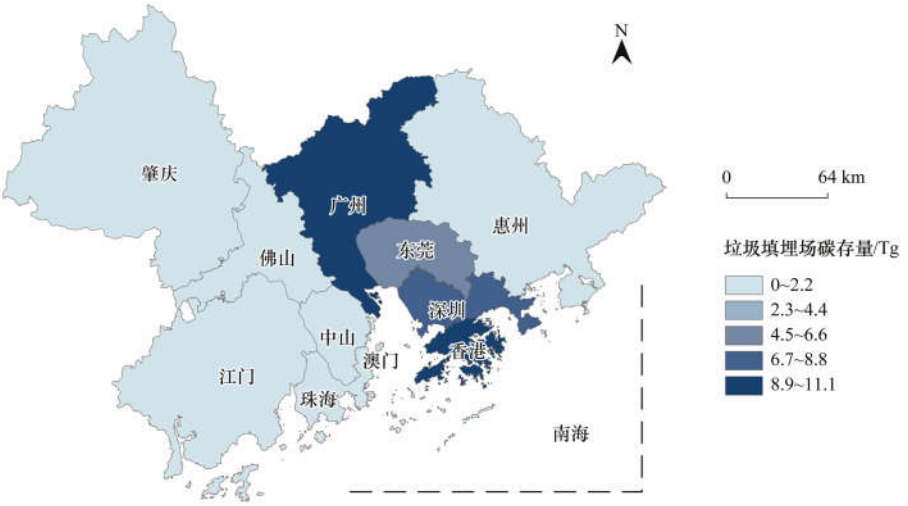

图 4 粤港澳大湾区城市生活垃圾填埋场累积碳存量的空间分布(2001 ~ 2017 年)

Fig. 4 Spatial distribution of the accumulated carbon stocks in the MSW landfills of the Greater Bay Area (between 2001-2017)

2.4 老垃圾填埋场的环境影响分析

2.4.1 温室气体排放

城市生活垃圾填埋场排放的主要温室气体是甲烷(CH_4),其全球气候变暖潜值是 CO_2 的 25 倍[2],而垃圾填埋场是中国 CH_4 排放的第三大排放源[61]. 粤港澳大湾区的甲烷气体排放呈现逐年增加的趋势,从 2001 年的 0.04 $Tg \cdot a^{-1}$ 增长到了 2017 年的 0.4 $Tg \cdot a^{-1}$(见图 5). 2017 年,卫生填埋产生的甲烷气体大约占垃圾填埋的 90.6%. 由于简易填埋量的减少,从 2011 年开始,简易填埋的甲烷气体排放量逐年递减,2017 年为 0.04 $Tg \cdot a^{-1}$. 目前大湾区卫生填埋场的甲烷排放普遍采用火炬法就地燃烧,或收集后作为可燃气发电利用,填埋场场区的温室气体控制较好. 而简易填埋场由于缺乏完善的填埋气收集设施,甲烷基本处于无组织排放状态. 虽然随着大湾区简易填埋场数量和处理量的不断减少,甲烷产率将趋向于减少,但是填埋场存量垃圾的有机碳分解需要较长时间,因此其温室气体排放仍将持续较长时间.

2.4.2 渗滤液排放

2001 ~ 2017 年城市生活垃圾填埋场的渗滤液排放量见图 6. 生活垃圾渗滤液对周围地区地下水、

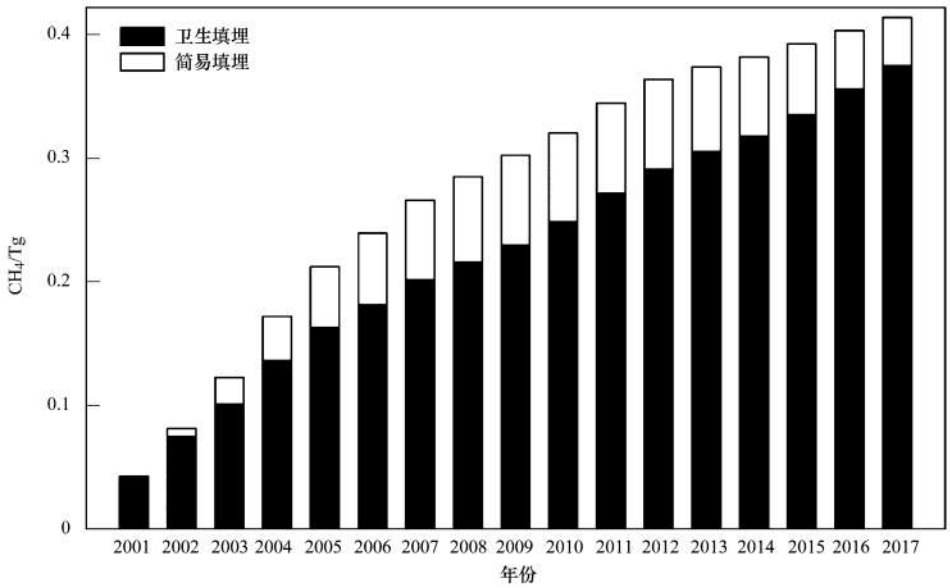

图 5 粤港澳大湾区城市生活垃圾填埋场的甲烷产生量(2001 ~ 2017 年)

Fig. 5 Methane generation from the MSW landfills of the Greater Bay Area (between 2001-2017)

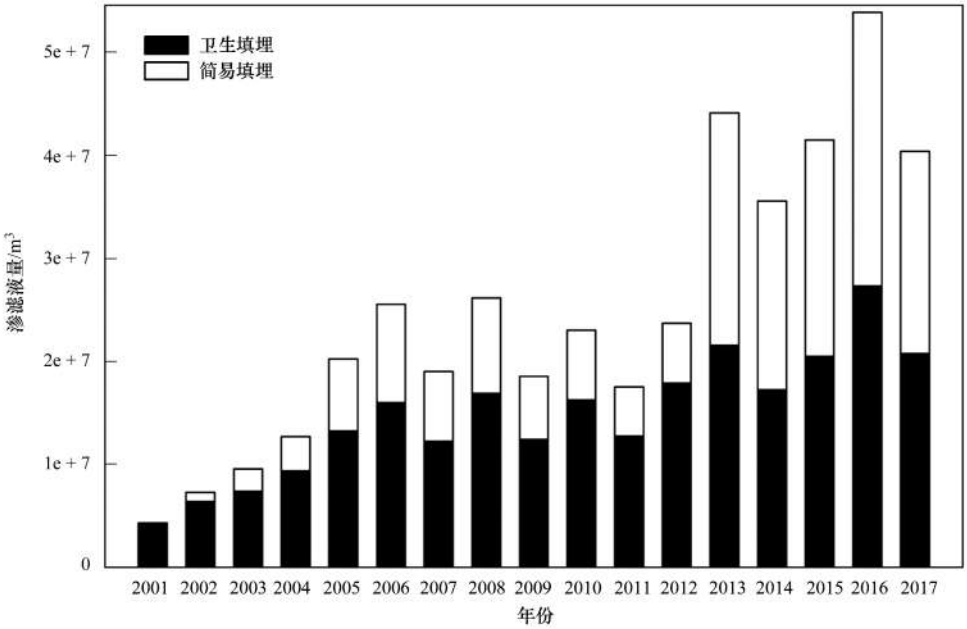

图 6　粤港澳大湾区城市生活垃圾填埋场的渗滤液产生量(2001 ~ 2017 年)

Fig. 6　Leachate generation from the MSW landfills of the Greater Bay Area (between 2001-2017)

地表水质以及土壤环境带来一定污染风险. 2017 年渗滤液产量为 4038.5 万 m^3,其中简易填埋产生的渗滤液量占 48.6%. 渗滤液每年产生量波动较大,主要跟年降水量、填埋量以及填埋场的作业阶段有关,如日覆盖作业、中间覆盖作业和封场作业等(见图 6). 由于无地表径流控制系统和作业面覆盖系统等,简易填埋产生的渗滤液量要高于卫生填埋. 虽然简易填埋的生活垃圾量正在逐年减少,但是简易填埋的存量垃圾仍在产生大量渗滤液.

渗滤液水质十分复杂,有机污染物浓度较高,同时还含有大量氨氮和重金属离子. 填埋期渗滤液的 NH_3-N 的范围为 0.6 ~ 2.5 $kg \cdot m^{-3}$,平均值 1.6 $kg \cdot m^{-3}$;封场后渗滤液的 NH_3-N 范围为 1.0 ~ 3.0 $kg \cdot m^{-3}$,平均值 2.0 $kg \cdot m^{-3}$ [55]. 根据不同时期 NH_3-N 和 1.3.3 节中 COD 浓度范围可知,2001 ~ 2017 年,粤港澳垃圾填埋场 COD 和 NH_3-N 产生量分别为 4.6 Tg 和 0.7 Tg. 香港、广州、深圳和东莞这 4 个城市渗滤液 COD 和 NH_3-N 产生量最多,占整个大湾区的 84.3% 和 84.1%. 妥善处理渗滤液和有效控制垃圾填埋场渗滤液污染是填埋场运行的关键环节.

3　讨论

3.1　填埋场物质存量研究的比较分析

尽管近些年来,采取了一系列措施(例如焚烧、堆肥和回收等)来减少和转移填埋垃圾,但是在中国,填埋仍然是主要的垃圾处置方式[1,10,62]. 2001 ~ 2017 年粤港澳大湾区填埋场城市生活垃圾的总填埋处置量为 230.1Tg,占全国的 15.5%. 2014 年,塑料、纸类、织物和木竹分别占当年填埋量的 17.3%、12.7%、5.8% 和 3.1%. Gu 等[11]研究了中国城市生活垃圾的特征,估算 2014 年塑料、纸类、织物和木竹分别占 9.6%、9.8%、3.1% 和 1.8%. 纸类和塑料等可回收垃圾成分高于当年全国平均水平,可能是因为粤港澳大湾区是中国经济最发达的地区之一,对于塑料和纸类等产品包装的使用量要更大,因此此类垃圾的产生量也更多[37].

城市垃圾填埋场中存储着大量的有机碳. Churkina 等[63]估算 1950 ~ 2000 年美国填埋场的碳存量为2 100 Tg,占城市生态系统的 11%. Ge 等[64]估算我国城市生活垃圾填埋场有机碳存量为(75.9 ± 3.8) Tg,固碳量占城市生态系统的 11.2% ~ 12.2%,但远远低于美国填埋场的总有机碳存量. 这说明,生活垃圾填埋场是城市重要的人工碳库. 采用不同方法测算的填埋场碳存量结果可能存在一定差异. 本研究估算的 2001 ~ 2014 年粤港澳大湾区的广州、深圳、佛山、珠海、中山、惠州、江门和肇庆这 9 个城市的卫生填埋场有机碳存量为 9.9 Tg,以 2014 年 9 个城市市区总人口进行折算,人均城市垃圾填埋场碳存量为 206.7 kg. Ge 等[64]估算的 1978 ~ 2014 年广东省卫生填埋场内的有机碳存量为 15.6 Tg,相当于人均填埋场碳存量为 162.9 kg. 本研究人均垃圾填埋碳存量强度计算结果略高于该研究. 计算结果的差异可能是以下原因导致:①本研究采用的物质流分析方法计算的填埋场碳存量研究结果可能高于采用生物降解系数法. 物质流分析方法可反映不同城市的垃圾特性和气候特征差异(温度和降雨量

等),在一定程度上提高了计算的精度;②本研究对粤港澳大湾区不同城市的垃圾组成成分进行了差异化计算,部分城市的生活垃圾中含有食物、纸类、织物、竹木等高含碳量组分;③本研究选择的珠三角9个城市,其社会经济发展水平高于广东省其它城市,其生活垃圾产生量可能高于全省平均水平.

3.2 不确定性分析

选择填埋场存量研究中关注度较高的有机碳存量,进行模型计算的不确定性分析(图7). 图7(a)为卫生填埋场有机碳存量的不确定性分析,d-factor越大说明某计算参数对垃圾填埋场有机碳核算结果的影响越大. 影响卫生填埋场有机碳存量估算较大的因素是卫生填埋量、食物垃圾组分、食物垃圾含水率和食物垃圾碳含量,d-factor 值分别为 0.06、0.05、0.13、0.06. 图7(b)为简易填埋有机碳存量的不确定性分析. 影响简易填埋场有机碳存量估算较大的因素是简易填埋量、食物垃圾组分、食物垃圾含水率和食物垃圾碳含量,d-factor 值分别为 0.06、0.05、0.13 和 0.06. 不管是简易填埋场还是卫生填埋场,食物垃圾组分、食物垃圾含水率、食物垃圾碳含量等参数选择对粤港澳地区估算的填埋场有机碳存量不确定性的影响都较大. 在未来的研究中建议获得精度更高的本地数据,是降低填埋场有机碳存量测算不确定性的关键.

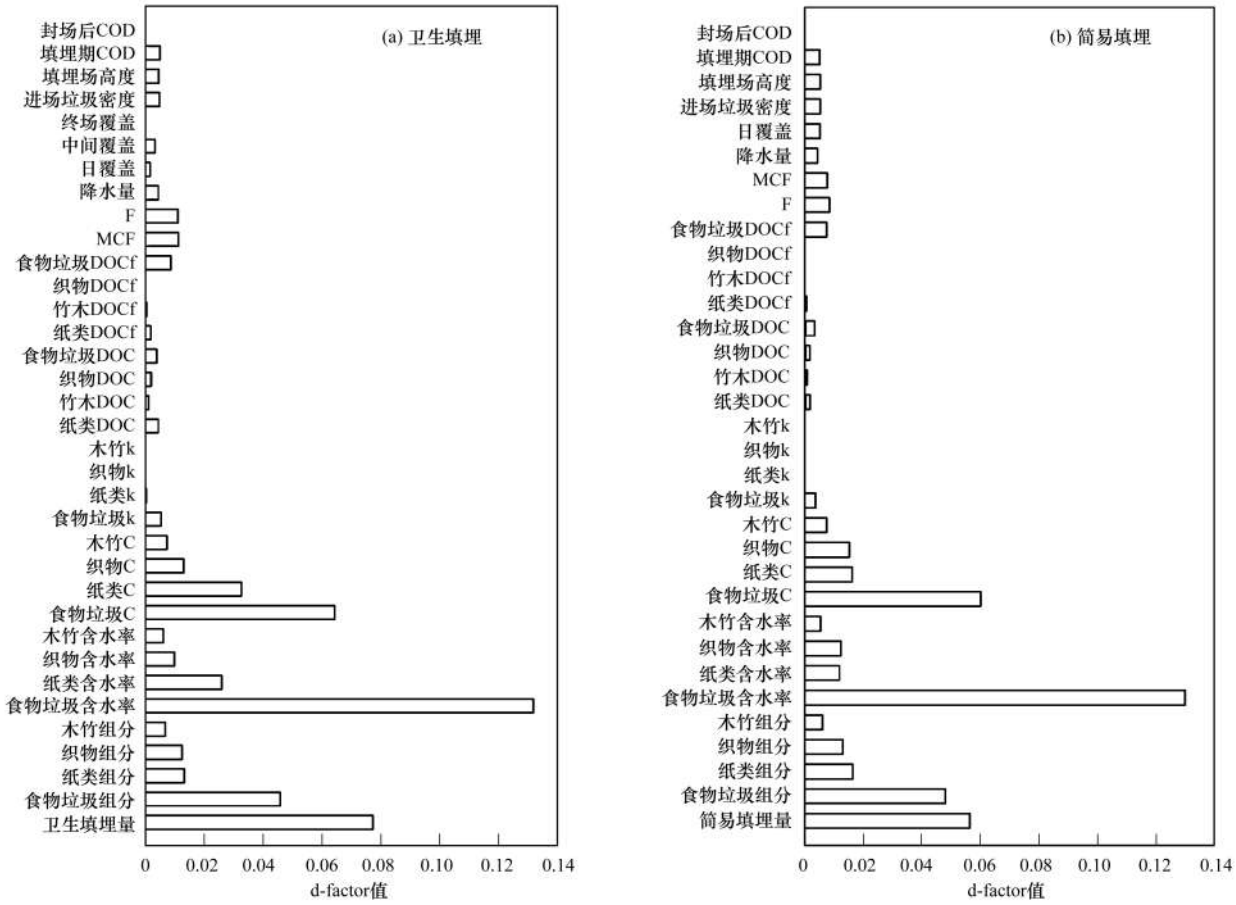

图7 卫生填埋和简易填埋有机碳存量不确定性分析的 d-factor 值

Fig. 7 The D-factor values applied to the uncertainty analysis of the organic carbon stocks in sanitary and simple landfills

3.3 填埋场物质存量的环境影响与资源利用潜力

粤港澳大湾区的填埋场物质存量具有环境污染和资源利用双重属性. 本研究估算 2001 ~ 2017 年,粤港澳大湾区城市生活垃圾卫生填埋场和简易填埋场的累积碳存量为 41.4 Tg, 60.1% 以有机碳形态储存,其余以塑料、灰土等无机碳存量的形式存在. 目前填埋场存量垃圾资源化利用成为研究和工程实践的热点议题. 填埋场中的有机碳存量开采后不仅可以作为腐殖土资源进行综合利用,而且还有助于减少填埋场的温室气体和渗滤液的排放[65]. 其中的化石碳存量(如塑料)具有较高的热值,可以进行能源回收利用. 一些有回收价值的废物(如金属、玻璃等)有助于经济增长和绿色技术的发展[66]. 对于填埋场物质存量的开采不仅可以减少相关的环境影响,还可以延长垃圾填埋场的使用寿命[67].

从环境污染影响角度来看,由于卫生填埋场具有一定的防渗、填埋气收集处理和渗滤液处理工程技术措施,因此其温室气体、有机污染物等能够得到一定程度的控制. 但是由于我国生活垃圾的组成、填埋场的运行条件、填埋技术的适用性等问题,许多卫

生填埋场收集的填埋气量远远低于预测值[68]. 2017 年，粤港澳地区卫生填埋产生的甲烷排放量为 0.4 Tg，是简易填埋的 9.6 倍. 提高甲烷回收效率，对于加快垃圾填埋场利用具有促进作用. 尽管近年来粤港澳大湾区的简易填埋比例逐年下降，至 2017 年仅有 0.7%，但是该区域的老简易填埋场的环境污染治理和风险防控仍然较为艰巨. 根据本研究测算，2017 年简易填埋场渗滤液排放量高达 1 963.7 万 $m^3 \cdot a^{-1}$，甲烷排放量为 0.04 $Tg \cdot a^{-1}$，温室气体和渗滤液都缺乏有效地工程控制手段. 由于粤港澳地区降雨充足，简易填埋场中的大量降水可能会促进有机物向渗滤液中迁移，从而减少填埋气排放[58]. 有机碳以渗滤液的形式流出，这会加重污染负荷，限制回收潜力. 因此粤港澳大湾区的老简易填埋场修复治理可能成为该区域城市生态环境修复的重点领域之一.

4　结论

(1) 研究表明，填埋仍是粤港澳大湾区主要的垃圾处置方式，虽然近年来垃圾焚烧处理量逐年增加，但是历史上的卫生填埋、简易填埋处置都带来大量的存量垃圾问题.

(2) 从进场垃圾组成成分看，食物垃圾、塑料、废纸和灰土是该地区生活垃圾中最主要的组成成分，填埋场是一个巨大的人工碳库.

(3) 粤港澳地区垃圾有 17.0% 的碳以温室气体和渗滤液的形式流出填埋堆体，但仍有大量的有机碳储存在填埋场中. 该区域简易填埋场中有机碳分解带来的温室气体和渗滤液污染仍缺乏有效地管控措施，可能成为该区域城市生态环境修复的重点领域.

(4) 城市生活垃圾填埋场物质存量研究目前还存在数据总量和精度不足的问题，也有待建立更符合地方特征的气相和液相物质代谢模型，可为填埋场生态环境修复治理提供科学方法支撑.

参考文献：

[1] 国家统计局城市社会经济调查司. 中国城市统计年鉴[M]. 北京：中国统计出版社，2001-2017.
Department of Urban Socio-Economic Survey, National Bureau of Statistics. China city statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2001-2017.

[2] Zhou C B, Huang H P, Cao A X, *et al*. Modeling the carbon cycle of the municipal solid waste management system for urban metabolism[J]. Ecological Modelling, 2015, **318**: 150-156.

[3] IPCC. Climate Change 2014: mitigation of climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2015.

[4] 蔡博峰，王金南，龙瀛，等. 中国垃圾填埋场恶臭影响人口和人群活动研究[J]. 环境工程，2016，**34**(2)：5-9，32.
Cai B F, Wang J N, Long Y, *et al*. Estimation of population and human activities impacted by the odors of landfills in China[J]. Environmental Engineering, 2016, **34**(2): 5-9, 32.

[5] Müller E, Hilty L M, Widmer R, *et al*. Modeling metal stocks and flows: a review of dynamic material flow analysis methods [J]. Environmental Science & Technology, 2014, **48**(4): 2102-2113.

[6] Zhang L, Yang J M, Cai Z J, *et al*. Understanding the spatial and temporal patterns of copper in-use stocks in China[J]. Environmental Science & Technology, 2015, **49**(11): 6430-6437.

[7] Krausmann F, Wiedenhofer D, Lauk C, *et al*. Global socioeconomic material stocks rise 23-fold over the 20th century and require half of annual resource use[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2017, **114**(8): 1880-1885.

[8] Fishman T, Schandl H, Tanikawa H, *et al*. Accounting for the material stock of nations[J]. Journal of Industrial Ecology, 2014, **18**(3): 407-420.

[9] Tanikawa H, Fishman T, Okuoka K, *et al*. The weight of society over time and space: a comprehensive account of the construction material stock of Japan, 1945-2010[J]. Journal of Industrial Ecology, 2015, **19**(5): 778-791.

[10] Powell J T, Pons J C, Chertow M. Waste informatics: establishing characteristics of contemporary U. S. landfill quantities and practices [J]. Environmental Science & Technology, 2016, **50**(20): 10877-10884.

[11] Gu B X, Jiang S Q, Wang H K, *et al*. Characterization, quantification and management of China's municipal solid waste in spatiotemporal distributions: a review [J]. Waste Management, 2017, **61**: 67-77.

[12] 陈迪云，龚剑，褚红榜. 广州垃圾填埋场周围水体中 PAHs 和 PAEs 的污染特征[J]. 广州大学学报(自然科学版)，2016，**15**(4)：67-72.
Chen D Y, Gong J, Chu H B. The characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons and phthalate esters in the water around landfills of Guangzhou city[J]. Journal of Guangzhou University (Natural Science Edition), 2016, **15**(4): 67-72.

[13] 唐志华，呼和涛力，熊祖鸿，等. 广州市生活垃圾典型重金属污染及生态风险评价[J]. 新能源进展，2018，**6**(2)：130-139.
Tang Z H, Huhe T L, Xiong Z H, *et al*. Typical heavy metal pollution and ecological risk assessment for Guangzhou municipal solid waste[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2018, **6**(2): 130-139.

[14] 孙坚强，缪旖璇，张世泽. 粤港澳大湾区的科技创新与经济增长[J]. 华南理工大学学报(社会科学版)，2019，**21**(3)：1-10.
Sun J Q, Miao Y X, Zhang S Z. Technology innovation and economic growth of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Journal of South China University of Technology (Social Science Edition), 2019, **21**(3): 1-10.

[15] 于凌云，林绅辉，焦学尧，等. 粤港澳大湾区红树林湿地面临的生态问题与保护对策[J]. 北京大学学报(自然科学版)，2019，**55**(4)：782-790.
Yu L Y, Lin S H, Jiao X Y, *et al*. Ecological problems and protection countermeasures of mangrove wetland in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2019, **55**(4): 782-790.

[16] CJ/T 313-2009，生活垃圾采样和分析方法[S].
CJT313-2009, Sampling and analysis methods for domestic waste [S].

[17] 国务院. 国务院关于调整城市规模划分标准的通知[R]. 北京: 国务院, 2014.

[18] 香港环境保护署. 香港废物统计数字[M]. 香港, 2001-2017. 、

[19] 澳门统计暨普查局. 澳门统计年鉴[M]. 澳门: 澳门统计暨普查局, 2001-2017.

[20] 罗涛. 深圳市宝安区城市生活垃圾特性实验研究及分选方案比选[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
Luo T. Experimental research on the MSW properties and selection of separation plan in Bao'an district of Shenzhen[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.

[21] 郭汝阳. 高食物含量垃圾生化与力学行为的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
Guo R Y. Research on the biochemical and mechanical behaviors of high food content MSW[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.

[22] 杨娜, 邵立明, 何品晶. 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.
Yang N, Shao L M, He P J. Study on the moisture content and its features for municipal solid waste fractions in China[J]. China Environmental Science, 2018, **38**(3): 1033-1038.

[23] 陈晓梅. 城市生活垃圾卫生填埋场甲烷利用研究[D]. 广州: 暨南大学, 2011.
Chen X M. Methane utilization in municipal solid waste landfill[D]. Guangzhou: Jinan University, 2011.

[24] 高武. 城市生活垃圾时间相关本构模型及填埋场服役性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
Gao W. Research on time-dependent constitutive models for municipal solid waste and service performance of landfills[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.

[25] 深圳市环境卫生管理处, 华中科技大学环境学院. 2014 年深圳市生活垃圾基础数据统计与分析[R]. 深圳: 深圳市环境卫生管理处, 华中科技大学环境学院, 2014.

[26] 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.
Huang C F. The statistical analysis of characteristics of municipal solid waste for Shenzhen[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.

[27] 罗钰翔, 王伟, 高兴保. 生活垃圾填埋气体产量的现场测试及 IPCC 推荐模型的校验[J]. 环境科学, 2009, **30**(11): 3427-3431.
Luo Y X, Wang W, Gao X B. On-site measurement of landfill gas yield and verification of IPCC model[J]. Environmental Science, 2009, **30**(11): 3427-3431.

[28] 陈必鸣, 李丽桃. 广州市中心城区生活垃圾收集与处置方式[J]. 环境卫生工程, 2005, **13**(6): 48-51.
Chen B M, Li L T. Discussion on collecting transporting and disposal countermeasures of municipal domestic waste in Guangzhou city[J]. Environmental Sanitation Engineering, 2005, **13**(6): 48-51.

[29] 黎桂华. 东莞城市垃圾处理的调研报告[D]. 广州: 华南理工大学, 2008.

[30] 李福全. 东莞市城市生活垃圾灰色预测分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.

[31] 李海滨, 吴创之, 陈勇, 等. 能量自给型城市生活垃圾堆肥系统[J]. 能源工程, 2000, (1): 22-25.
Li H B, Wu C Z, Chen Y, *et al*. Energy self-supported municipal solid waste (MSW) composting system[J]. Energy Engineering, 2000, (1): 22-25.

[32] 刘柏谦, 吾明良, 张勇. 吉林市城市生活垃圾特性研究[J]. 东北电力学院学报, 1999, **19**(3): 16-22.
Liu B Q, Wu M L, Zhang Y. Municipal solid waste characteristics of Jilin city[J]. Journal of Northeast China Institute of Electric Power Engineering, 1999, **19**(3): 16-22.

[33] 赵军. 我国城市生活垃圾的组成及其处理方法[J]. 山西能源与节能, 2003, (4): 32, 34.

[34] 李晓东, 陆胜勇, 徐旭, 等. 中国部分城市生活垃圾热值的分析[J]. 中国环境科学, 2001, **21**(2): 156-160.
Li X D, Lu S Y, Xu X, *et al*. Analysis on caloric value of Chinese cities' municipal solid waste[J]. China Environmental Science, 2001, **21**(2): 156-160.

[35] Wang H T, Nie Y F. Municipal solid waste characteristics and management in China[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2001, **51**(2): 250-263.

[36] 邹莲花. 城市生活垃圾填埋场渗滤液水质影响因素分析及水质预测[J]. 给水排水, 1997, **23**(7): 57-60.

[37] 穆罕默德·马斯理. 城市垃圾管理系统优化的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004.

[38] 黎青松, 郭祥信, 徐文龙, 等. 深圳市玉龙坑垃圾填埋气体成分与产气规律研究[J]. 环境卫生工程, 1999, **7**(1): 6-9.
Li Q S, Guo X X, Xu W L, *et al*. Study on LFG generation law and LFG components of Yulongkeng landfill site in Shenzhen city[J]. Environmental Sanitation Engineering, 1999, **7**(1): 6-9.

[39] 国家气候变化对策协调小组办公室, 国家发展和改革委员会能源研究所. 中国温室气体清单研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.
Office of the National Coordinating Group on Climate Change Responses, Energy Research Institute of the National Development and Reform Commission. The people's republic of China national greenhouse gas inventory[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2007.

[40] 郑曼英, 叶晓玫. 城市垃圾·处理·可持续发展[J]. 环境卫生工程, 1999, **7**(1): 26-28.
Zheng M Y, Ye X M. Urban refuse · treatment · sustainable development[J]. Environmental Sanitation Engineering, 1999, **7**(1): 26-28.

[41] 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.
Ji A M. The analysis of physical characteristics and incinerating feasibility of municipal solid waste in Lanzhou[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2007.

[42] 方冬香, 林冰. 汕头市城市生活垃圾治理对策[J]. 黑龙江环境通报, 2002, **26**(1): 42-43, 97.

[43] 杨瑞君. 不断加快城市生活垃圾处理向产业化方向的发展——关于汕头市城市生活垃圾处理情况的调查报告[J]. 环境, 2008, (S1): 46-48.

[44] 杨建设, 尹爱国, 高华业, 等. 茂名市生活垃圾处理现状与对策[J]. 茂名学院学报, 2004, **14**(1): 21-24.
Yang J S, Yi A G, Gao H Y, *et al*. Current situation and countermeasures of the treatment for household garbage in Maoming city[J]. Journal of Maoming College, 2004, **14**(1): 21-24.

[45] 沈豪祥, 钟华文. 茂名生活垃圾处理现状及处理场扩建设想[J]. 广东石油化工高等专科学校学报, 1997, **7**(2): 41-43.
Shen H X, Zhong H W. Life garbage of Maoming disposal' s situation and disposal - plant rebuilt programme[J]. Journal of Guangdong College of Petrochemical Technology, 1997, **7**(2): 41-43.

[46] 林建人, 黄坚辉. 汕头经济特区固体废弃物综合整治规划[A]. 中国城市建设与环境保护实践——城市建设与环境保护学术研讨会论文集[C]. 北京: 中国环境科学学会, 1997. 4.

[47] 邢益和，余载礼，李丽桃，等. 顺德市 4 镇生活垃圾现状调查和处置方法的研究[J]. 环境卫生工程，1994，(3)：15-16.

[48] 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.
Zhang H L, Li X P, Qi J Y, *et al*. Analysis of composition characteristics of municipal solid waste in South China [J]. Environmental Science, 2015, **36**(1): 325-332.

[49] 秦晓春. 珠海市生活垃圾处理现状及对策[J]. 环境卫生工程，1998，**6**(4)：160-161.
Qin X C. The current situation and effecfive measure of domestic waste treatment in Zhuhai city [J]. Environmental Sanitation Engineering, 1998, **6**(4): 160-161.

[50] 范常忠，张淑娟. 佛山市生活垃圾的灰色预测与构成特征研究[J]. 环境科学研究，1997，**10**(4)：64-67.
Fan C Z, Zhang S J. Study on grey prediction and constitute characteristics of life refuse in Foshan city [J]. Research of Environmental Sciences, 1997, **10**(4): 64-67.

[51] 薛华. 我国小城市群生活垃圾优化管理的技术方法研究[D]. 长春：吉林大学，2004.
Xue H. Study on the technical methods of MSW management of the regional small cities in China [D]. Changchun: Jilin University, 2004.

[52] 陈航. 肇庆市生活垃圾现状及处理对策浅议[J]. 环境，2005，(S1)：109-110.

[53] IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [M]. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies (IGES), 2006.

[54] 高庆先，杜吴鹏，卢士庆，等. 中国典型城市固体废物可降解有机碳含量的测定与研究[J]. 环境科学研究，2007，**20**(3)：10-15.
Gao Q X, Du W P, Lu S Q, *et al*. The measurement and research of degradable organic carbon of municipal solid waste in China[J]. Research of Environmental Sciences, 2007, **20**(3): 10-15.

[55] 陈朱蕾，薛强. 生活垃圾卫生填埋工程实用技术指南[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2013.

[56] Malakahmad A, Abualqumboz M S, Kutty S R M, *et al*. Assessment of carbon footprint emissions and environmental concerns of solid waste treatment and disposal techniques; case study of Malaysia[J]. Waste Management, 2017, **70**: 282-292.

[57] 杨娜，何品晶，吕凡，等. 我国填埋渗滤液产量影响因素分析及估算方法构建[J]. 中国环境科学，2015，**35**(8)：2452-2459.
Yang N, He P J, Lü F, *et al*. Impact factor analysis and quantification method establishment for landfill leachate generation in China [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(8): 2452-2459.

[58] Yang N, Damgaard A, Kjeldsen P, *et al*. Quantification of regional leachate variance from municipal solid waste landfills in China[J]. Waste Management, 2015, **46**: 362-372.

[59] 王芳，常江，李莉，等. 垃圾渗滤液的 COD 与 TOC 相关性研究[J]. 安徽农业科学，2008，**36**(15)：6494-6495.
Wang F, Chang J, Li L, *et al*. Study on the correlation between TOC and COD of landfill leachate [J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2008, **36**(15): 6494-6495.

[60] Pulido-Calvo I, Gutiérrez-Estrada J C. Improved irrigation water demand forecasting using a soft-computing hybrid model [J]. Biosystems Engineering, 2009, **102**(2): 202-218.

[61] Zhang B, Chen G Q. Methane emissions in China 2007 [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, **30**: 886-902.

[62] Zhang H, Duan H B, Andric J M, *et al*. Characterization of household food waste and strategies for its reduction: a Shenzhen City case study[J]. Waste Management, 2018, **78**: 426-433.

[63] Churkina G, Brown D G, Keoleian G. Carbon stored in human settlements: the conterminous United States[J]. Global Change Biology, 2010, **16**(1): 135-143.

[64] Ge S D, Zhao S Q. Organic carbon storage change in China's urban landfills from 1978-2014 [J]. Environmental Research Letters, 2017, **12**(10): 104013.

[65] Weng Y C, Fujiwara T, Houng H J, *et al*. Management of landfill reclamation with regard to biodiversity preservation, global warming mitigation and landfill mining: experiences from the Asia-Pacific region [J]. Journal of Cleaner Production, 2015, **104**: 364-373.

[66] Burlakovs J, Jani Y, Kriipsalu M, *et al*. On the way to 'zero waste' management: recovery potential of elements, including rare earth elements, from fine fraction of waste[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, **186**: 81-90.

[67] Calderón Márquez A J, Cassettari Filho P C, Rutkowski E W, *et al*. Landfill mining as a strategic tool towards global sustainable development[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, **226**: 1102-1115.

[68] Fei F, Wen Z G, de Clercq D. Spatio-temporal estimation of landfill gas energy potential: a case study in China [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, **103**: 217-226.

HUANJING KEXUE Vol. 40 No. 12
Environmental Science (monthly) Dec. 15, 2019

CONTENTS