

潘玲阳, 吝涛, 崔胜辉, 等. 2011. 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 [J]. 环境科学学报 31(10): 2319-2328
Pan L Y, Lin T, Cui S H, et al. 2011. Characteristics of generation and low-carbon management strategies for household waste in peri-urban area: A case study of Jimei District, Xiamen [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 31(10): 2319-2328

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

潘玲阳^{1 2 3}, 吝涛^{1 2}, 崔胜辉^{1 2 *}, 肖黎姗^{1 2}, 赵煜^{1 2 3}, 何刚⁴

1. 中国科学院城市环境与健康重点实验室, 中国科学院城市环境研究所, 厦门 361021
2. 厦门市城市代谢重点实验室, 厦门 361021
3. 中国科学院研究生院, 北京 100039
4. 安徽省宣城市环境保护科学研究所, 宣城 242000

收稿日期: 2010-12-05 修回日期: 2011-01-31 录用日期: 2011-03-17

摘要: 半城市化地区已成为城市化研究的热点, 但其生活垃圾管理问题常被忽视。以典型半城市化地区——厦门市集美区为例, 通过问卷调查与实地采样两种方法, 分析不同住区家庭生活垃圾产生的特征, 并通过生命周期分析法, 对比混合填埋、混合堆肥、混合焚烧以及分类处理 4 种垃圾处理方案的温室气体排放, 提出相应的垃圾管理对策。结果表明: 半城市化地区可回收物和可堆肥物的回收利用率有待提高; 农村居民点和城市型住区应作为垃圾减量化的重点; 小城镇和城郊村的垃圾回收率低, 应多布设正规的垃圾收购站点; 农村居民点的可堆肥物较多, 应布设生物处理机或将可堆肥物分类收集后集中处理; 城市型住区应注重有害垃圾的分类收集与安全处置; 垃圾分类处理的碳排放总量低于混合处理; 垃圾混合焚烧时电力消耗的碳排放最多, 但碳排放总量低于混合堆肥或填埋。

关键词: 半城市化地区; 集美区; 家庭生活垃圾; 碳排放当量; 资源化利用

文章编号: 0253-2468(2011)10-2319-10 中图分类号: X32 文献标识码: A

Characteristics of generation and low-carbon management strategies for household waste in peri-urban area: A case study of Jimei District, Xiamen

PAN Lingyang^{1 2 3}, LIN Tao^{1 2}, CUI Shenghui^{1 2 *}, XIAO Lishan^{1 2}, ZHAO Yu^{1 2 3}, HE Gang⁴

1. Key Lab of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021
2. Xiamen Key Lab of Urban Metabolism, Xiamen 361021
3. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039
4. Xuancheng Research Institute of Environmental Protection in Anhui Province, Xuancheng 242000

Received 5 December 2010; received in revised form 31 January 2011; accepted 17 March 2011

Abstract: Peri-urban areas have become the research focus of urbanization process. However, the waste management problems were often ignored in peri-urban areas. In this paper, Jimei District of Xiamen City, a typical peri-urban area was chosen as a case study site. Through the questionnaire together with the field investigation, the characteristics of household waste discarded from different types of settlement were analysed. By using the life cycle analysis (LCA), the greenhouse gas emissions from the four household waste treatment scenarios, mixed HW landfill, mixed HW composting, mixed HW incineration and sorted HW management, were calculated and compared. The results showed that in peri-urban area, the rates of resource recycling and utilization of the recyclable and compostable waste were to be improved. Both of rural and urban settlements should be targeted in waste reduction. More standard collection points were suggested to set up in small town and suburban settlements where the recycling rates were lower. Due to the large quantity of compostable waste in rural settlement, biological processors can be introduced into the communities. Construction of centralized fermentation plant to treat the sorted compostable waste can act as an alternative. The sorted collection and secured disposal for harmful waste should be emphasized in the

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (No. KZCX2-YW-450); 福建省科技计划项目 (No. 2010I0014); 厦门市科技计划项目 (No. 3502Z20101015); 科技部国际合作项目 (No. 2009DFB90120)

Supported by the Key Project of Knowledge Innovation of the Chinese Academy of Sciences (No. KZCX2-YW-450), the Science and Technology Project of Fujian Province (No. 2010I0014), the Science and Technology Project of Xiamen City (No. 3502Z20101015) and the China International Science and Technology Cooperation Program (No. 2009DFB90120)

作者简介: 潘玲阳 (1982—) 女, E-mail: lingyangpan@yahoo.cn; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: shcui@iue.ac.cn

Biography: PAN Lingyang (1982—), female, E-mail: lingyangpan@yahoo.cn; * Corresponding author, E-mail: shcui@iue.ac.cn

urban settlement of peri-urban area. It is discovered that the sum of the greenhouse gas emissions from the integrated management system for classified HW was less than the emissions from the system for mixed HW in peri-urban area. The total emissions from incineration were less than the emissions from landfill or composting, although the emissions from power consumption in incineration plant were the most significant.

Keywords: peri-urban area; Jimei District; household waste; carbon dioxide equivalent emissions; recycling and utilization

1 引言(Introduction)

在快速城市化与工业化的双重作用下,城市和乡村之间相互渗透,互动发展的态势非常明显,两者的界限日趋模糊,在城市边缘逐渐形成一种具有明显过渡性和动态性特征的地域类型,传统的城乡二元论已经无法对于这种新形势进行准确诠释,于是国际上有学者提出了半城市化地区的概念(Iaquinta *et al.*, 2000; Webster, 2002). 总结出区域内城乡土地利用混杂交错、社会经济结构急剧变化、产业与就业结构非农化水平高但产业与人口空间集聚度低等显著特点(花利忠等, 2009; Makita *et al.*, 2010). 半城市化地区的经济增长最迅速且最具有活力,我国在进入快速城市化阶段之后,该区域类型日渐成为城市发展的重点以及城市化研究的热点(Ginsburg *et al.*, 1991; Zhao *et al.*, 2009; 黄云凤, 2009). 对半城市化地区展开研究有利于正确引导该区域在城市化进程中的发展方向,通过合理规划与管理,可以减少或避免在城市化过程中可能出现的各种负面影响. 目前国内外对于半城市化地区的研究多集中于特征判别指标体系(郑艳婷等, 2003)、驱动因素分析(Bürge *et al.*, 2004; 刘盛和等, 2004; 刘盛和等, 2005)、区域边界及空间分布特征(刘盛和等, 2008; Makita *et al.*, 2010; 刘江等, 2010)、土地利用变化(Pearson *et al.*, 2010)与景观格局演变(Huang *et al.*, 2009; 刘江等, 2010)、资源保护与管理(Phillips *et al.*, 1999; Vejre *et al.*, 2010)等诸多方面,也有学者对住区形态与居民意识水平关系(Lin *et al.*, 2010; 赵煜等, 2010)以及城市化进程中面临的种种环境问题(Aguilar, 2008; Simon, 2008)进行研究,但针对半城市化地区特点的生活垃圾管理对策的研究较少. 我国的半城市化地区仍然以低收入人群为主体,公共基础设施与服务相对不足,而生活垃圾的安全处置与优化管理更是其中的一个代表性问题(傅小锋等, 2005; 季小妹等, 2009; 黄云凤, 2009).

根据我国市容环境卫生管理部门的工作范围,城市生活垃圾包括居民家庭生活垃圾、园林废弃物、街道清扫物以及机关单位排放的办公垃圾等

(汪群慧等, 2003). 其中以家庭生活垃圾的成分最为复杂,也最难以管理和控制. 半城市化地区具有动态性和多元化等特点,来自不同形态社区的家庭生活垃圾混合,使得垃圾的成分更复杂,对其研究不仅有助于完善生活垃圾管理,改善居民的生活环境质量,同时也有助于掌握城市化演变过程中生活垃圾的变化特征,从而科学规划功能区分布及配套基础设施建设,引导区域的快速健康发展. 另外,随着国家节能减排目标的出台(人民网, 2009),低碳已经成为各地区的未来发展方向,如何减少生活垃圾引起的碳排放,也应成为实现节能减排、发展低碳经济的一个重要方面(IPCC, 2000; 刘志澄, 2007; EPA, 2008; 潘玲阳等, 2010). 在国内已有的研究中,较少从转运站(清洁楼)之前的家庭环节分析垃圾产量与组成,也较少将碳排放作为优化垃圾末端处理技术的依据(田文栋等, 2000; 张宪生等, 2003; 吴克明等, 2004; 高培卿, 2007; 陈移峰等, 2007). 因此,本研究以典型半城市化地区——厦门市集美区为例,通过问卷调查与实地采样测定,分析不同形态的住区中,居民家庭日常生活产生垃圾的特点,目的是从住区这一微观尺度引导居民(垃圾产生源)将生活垃圾分类与减量化. 沿着垃圾物流的过程,采用生命周期分析法(LCA)对不同末端处理技术的碳排放量进行计算和对比,目的是从全区的尺度筛选出最符合低碳发展趋势和要求的家庭生活垃圾末端处理方法,减少垃圾处理过程的碳排放,为其他半城市化地区的垃圾管理提供借鉴.

2 研究区域概况(Introduction to the study area)

集美区是厦门市的6个行政区之一,位于福建东南沿海闽南金三角的中心地段,通过厦门大桥、集美大桥和高集海堤与厦门岛相连,是进出经济特区的一个重要门户. 集美区总面积 276 km²,辖区有 21 个行政村, 35 个社区,总人口约 41 万(厦门市集美区政务信息中心, 2009). 目前集美区正处于城市化高速发展阶段,在城市扩张、乡镇企业发展和外商投资等全球化与地方化作用的共同驱动下,集美区表现出混杂性、过渡性和动态性等典型的半城市化地区特征,可以作为我国沿海半城市化研究的典

型区域(花利忠等, 2009; 黄云凤, 2009; Lin *et al.*, 2010; 刘江等, 2010; 刘江等, 2010; 赵煜等, 2010)。

集美区的住区形态大致可划分为 5 种类型(Thomas *et al.*, 2008; 刘江等, 2010): 农村居民点、小城镇、城郊村、城中村、城市型住区。农村居民点与城市建成区的距离较远, 受城市化影响最小; 小城镇是城市建成区外围农村的政治、经济中心,

是农村城市化的重点; 城郊村位于城市建成区外围, 是城市与农村相互作用最激烈的住区形态类型; 城中村是城市建成区内部的“农村”, 是我国独有的住区形态类型; 城市型住区大部分位于城市建成区内部, 住区内的建筑以城市商品住宅为主, 环境好、配套设施齐全。本研究在每种住区形态类型中各选取 1~3 个典型社区进行分析(具体见图 1、表 1)。

表 1 不同住区形态对应的典型社区

Table 1 Typical communities for different settlements

住区类型	社区名称	住区类型	社区名称
农村居民点 1	杏林村 XL	城郊村 2	马銮社区 ML
农村居民点 2	崎沟村 QG	城中村	叶厝社区 YC
小城镇 1	比华丽 BHL	城市型住区 1	集美大学 JMU
小城镇 2	灌口镇第二社区 GK	城市型住区 2	日东社区 RD
城郊村 1	大社村 DS	城市型住区 3	银亭社区 YT



图 1 典型社区名称及其分布

Fig. 1 Typical communities and their locations

3 数据与方法(Data and methods)

本研究选取家庭生活垃圾进行分析, 是因为不论街道垃圾还是机关单位垃圾, 均由居民产生, 并且家庭垃圾占了城市生活垃圾的很大比例, 成分也最复杂, 因此通过问卷调查的方式对家庭生活垃圾进行研究, 一方面有助于从源头掌握居民产生垃圾

的特点, 另一方面有助于理解居民意识与行为的差异性及统一性, 为生活垃圾管理工作提供社会学方面的参考。结合实地采样测定的方法, 为问卷调查法提供比对, 目的是增强结论的可信度及可行性。研究所需的数据与资料主要来源于调查小组现场走访、发放调查问卷、实地采样分析, 以及厦门市市容环境卫生管理处提供资料等。

3.1 问卷调查法

调查小组于 2009 年 4 月 28 日至 5 月 7 日在选取的 10 个典型社区内, 对居民进行现场随机抽样调查。问卷调查的主要内容是每户家庭日产生生活垃圾的总量与物理组分。根据建设部《城市生活垃圾分类及其评价标准 CJJ/T102—2004》, 家庭生活垃圾可划分为六大类: 可回收物(可卖出的塑料、纸类、金属、织物和玻璃)、大件垃圾(废弃的家电和家具等)、可堆肥垃圾(剩饭菜、食物和树枝花草等易腐烂的有机物)、可燃垃圾(不宜回收的废塑料、废纸、旧织物和废木片等)、有害垃圾(废弃的小电子产品、灯管、油漆、化妆品和化学药品等)和其他垃圾(渣土、灰尘、砖瓦等惰性物质)(中华人民共和国建设部, 2004)。本研究共发放调查问卷 250 份, 收回 236 份, 其中有效问卷 220 份。

3.2 实地采样法

在每个典型社区选取主要垃圾堆放点, 与问卷调查法同步进行实地采样以测定垃圾物理组成。在布设垃圾桶的社区, 采集若干垃圾桶中的等量生活垃圾混合, 采样总量为 200 kg 左右; 在露天的垃圾

池中采用立体对角线法等距离布设 5 个采样点,分别取等量的垃圾混合,采样总量约 200 kg(中华人民共和国建设部,2009)。将采得的生活垃圾样品平摊于铺有塑料薄膜的地面,手工分拣后称重并计算各类成分的湿重百分比。

3.3 生命周期法计算垃圾处理的碳排放

3.3.1 垃圾处理方案 结合厦门市未来的环卫设施规划,设置以下 4 种家庭生活垃圾的末端处理方案: S1: 混合垃圾填埋; S2: 混合垃圾堆肥; S3: 混合垃圾焚烧; S4: 分类垃圾综合处理,包括将剩余的可回收垃圾 100% 收集再利用,将可堆肥垃圾、可燃垃圾和无机物分别送往堆肥厂、焚烧厂和填埋场处理处置。有害垃圾进入工业垃圾处理流程,而大件垃圾由专门物资回收公司收购,几乎都不经过城市生活垃圾管理系统,因此不算入生活垃圾处理的碳排放。生活垃圾填埋和堆肥排放的 CO_2 由于生物成因,并且堆肥排放的大量 CO_2 难以收集利用,因此一般不算入垃圾的排放清单中,但 CH_4 的提纯利用价值大、增温潜势大,在大气中滞留时间约 12 年,相比较而言, CH_4 的减排效果更加立竿见影,因此是碳排放计算的重要内容(Zhao *et al.*, 2009)。

3.3.2 系统边界 从系统的角度,采用生命周期分析法定义研究的边界,确定家庭生活垃圾从产生到处理的整个过程中各项碳输入与输出的内容,见图 2 所示。

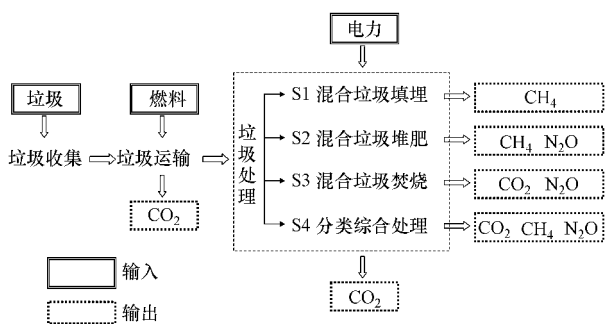


图 2 垃圾处理碳排放研究的系统边界

Fig. 2 Systematic boundary of the study on the carbon dioxide equivalent emissions from HW management

3.3.3 碳排放计算方法

(1) 碳排放总量:

$$E = E_{tr} + E_e + EL_{\text{CH}_4} + \sum_i EC_i + \sum_k EI_k \quad (1)$$

式中 E 为系统边界内的碳排放总量(t,以 CO_2 当量计,下同); E_{tr} 为运输过程车辆燃料消耗的碳排放量(t); E_e 为电力消耗的碳排放量(t); EL_{CH_4} 为垃圾填

埋场 CH_4 的排放量(t); EC_i 为堆肥过程中 CH_4 (或 N_2O) 的排放量(t); EI_k 为垃圾焚烧时 CO_2 (或 N_2O) 的排放量(t)。

(2) 运输车辆的燃料消耗:

$$E_{tr} = C_{\text{diesel}} \times \rho \times Q \times EF_{\text{diesel}} \times 10^{-6} \quad (2)$$

式中 C_{diesel} 为垃圾车的柴油消耗(L); ρ 为柴油的密度($0.84 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$); Q 为柴油的平均低位发热量($42.652 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$); EF_{diesel} 为柴油的 CO_2 排放因子,取 $74.100 \text{ g} \cdot \text{MJ}^{-1}$ (IPCC, 2006a)。

(3) 电力消耗:

$$E_e = C_e \times (\omega_{\text{OM}} \times EF_{\text{OM},y} + \omega_{\text{BM}} \times EF_{\text{BM},y}) \times 10^{-3} \quad (3)$$

式中 C_e 为用电量(kWh); ω_{OM} ω_{BM} 为边际排放因子的权重值,均取 0.5; $EF_{\text{OM},y}$ 为 y 年的电量边际排放因子(t/MWh); $EF_{\text{BM},y}$ 为 y 年的容量边际排放因子(t/MWh) (崔素萍等, 2008; 马智杰等, 2008)。

(4) 垃圾填埋:

在卫生填埋场生活垃圾产生的填埋气中 CH_4 占 50% 左右(Ngnikam *et al.*, 2001; EPA, 2006; 阳晶等, 2006):

$$EL_{\text{CH}_4} = \left[HW \times \alpha \times \sum_j (\text{DOC}_j \times W_j) \times r \times 50\% \times \frac{16}{12} - R \right] \times (1 - \text{OX}) \times \text{GWP}_{\text{CH}_4} \quad (4)$$

式中 HW 为家庭生活垃圾总量(t); α 为生活垃圾填埋率; DOC_j 为可降解组分 j 中可降解有机碳的百分比; W_j 为可降解组分 j 的百分比; r 为垃圾中可降解有机碳的分解率; 50% 为 CH_4 在填埋气中的体积比例; $16/12$ 为 CH_4 与 C 的分子量比值; R 为 CH_4 的回收量,目前东部填埋场还未回收 CH_4 ; OX 为 CH_4 的氧化比例,除了覆盖有氧化材料的填埋场,其他管理或未管理的填埋场的 OX 缺省值都是 0 (IPCC, 2006c); GWP_{CH_4} 为 CH_4 相对于 CO_2 的 100 年全球增温潜势,取 21 (EPA, 2001)。

(5) 垃圾堆肥:

生活垃圾堆肥产生的 CH_4 和 N_2O 可根据公式 (2) 计算 (IPCC, 2006d):

$$EC_i = (HW \times \beta \times EF_i \times 10^{-3} - R_i) \times \text{GWP}_i \quad (5)$$

式中 β 为堆肥垃圾的比例; EF_i 为堆肥处理的排放因子, IPCC 推荐为 $EF_{\text{CH}_4} 4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $EF_{\text{N}_2\text{O}} 0.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Ngnikam *et al.*, 2001); R_i 为 CH_4 (或 N_2O) 的回收量(t); GWP_i 为 CH_4 (或 N_2O) 相对于 CO_2 的 100 年全球增

温潜势 GWP_{CH_4} 为 21 (GWP_{N_2O} 为 310) (EPA, 2001) .

(6) 垃圾焚烧:

生活垃圾焚烧产生的 CO_2 主要来自化石碳, 而 N_2O 主要来源 500 ~ 950 °C 的燃烧过程 (Löffler *et al.*, 2002) .

$$EI_k = EI_{CO_2} + EI_{N_2O} \quad (6)$$

式中 EI_{CO_2} 为垃圾焚烧的 CO_2 排放量 (t); EI_{N_2O} 为垃圾焚烧的 N_2O 排放量 (t) .

$$EI_{CO_2} = HW \times \gamma \times \sum_{\varphi} (WF_{\varphi} \times FC_{\varphi} \times OF_{\varphi}) \times \frac{44}{12} \quad (7)$$

式中 γ 为焚烧垃圾的比例; WF_{φ} 为垃圾中可燃组分 φ 的比重; FC_{φ} 为可燃组分 φ 的化石源碳的比例; OF_{φ} 为氧化因子; 44/12 为 CO_2 与 C 的分子量比值.

$$EI_{N_2O} = HW \times \gamma \times EF \times 10^{-3} \times GWP_{N_2O} \quad (8)$$

式中 EF 为 N_2O 的排放因子, 取 IPCC 推荐值 $0.05 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; GWP_{N_2O} 为 N_2O 相对于 CO_2 的 100 年全球增温潜势.

4 结果与分析 (Results and analysis)

4.1 不同住区产生家庭生活垃圾的特点及其管理

根据调查问卷计算平均每户家庭日产生生活垃圾量的结果如图 3 所示. 不同形态的住区产生生活垃圾的总量存在明显差异. 农村居民点和城市型住区的产生量较多 (杏林村最多 2.5 kg), 而城郊村的垃圾产量较少. 因此, 要实现生活垃圾的源头减量化 (陈海滨等, 2006), 应以农村居民点和城市型住区为重点.

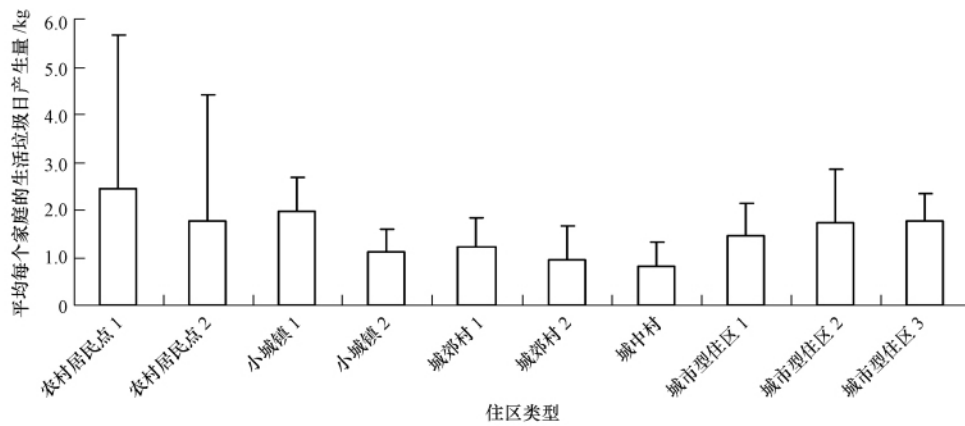


图 3 不同形态住区平均每户家庭的生活垃圾日产生量

Fig. 3 Average daily amount of waste generation per household in different settlements

将调查问卷中各种垃圾组分的数量进行归一化处理, 得出每种垃圾成分的百分比, 见图 4. 在六

大类垃圾组成中, 可回收物和可堆肥垃圾的比重较高, 说明集美区家庭生活垃圾的资源化利用的潜力

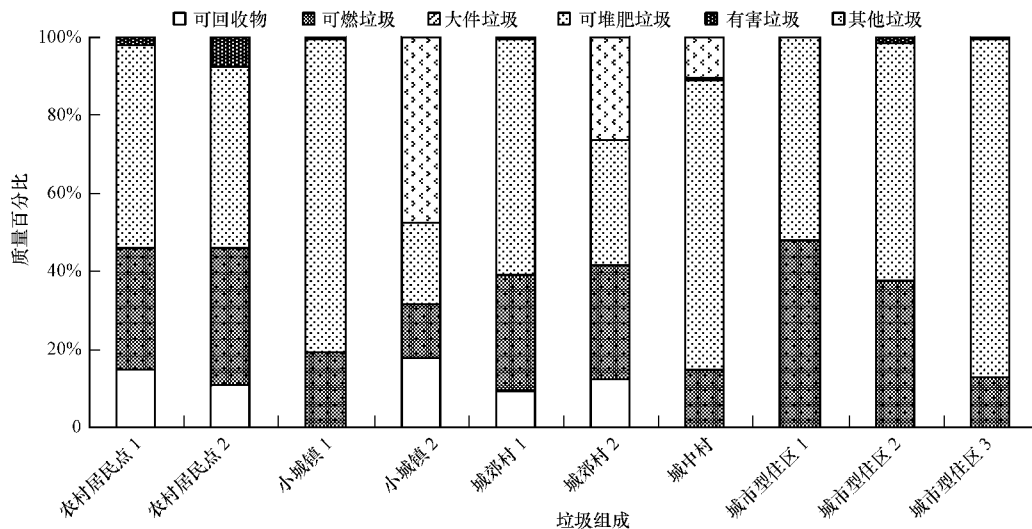


图 4 问卷调查集美区家庭生活垃圾的物理组成

Fig. 4 Physical components of household waste in Jimei District by questionnaire

巨大,应在分类收集的基础上提高垃圾的回收利用率 and 资源化效率.在 5 种形态的住区中,农村居民点的可堆肥垃圾最多,可回收物和可燃物较少,渣土等无机垃圾较多;小城镇产生的可回收物最多,与其他形态的住区家庭相比,可堆肥物稍多,其他类垃圾最少;城郊村和城中村产生的家庭生活垃圾中,可回收物的比重最多,有害垃圾最少,两种形态住区相比,城郊村的可燃垃圾稍多,而城中村的其他类垃圾稍多;城市型住区家庭产生可回收物的比重明显高于其他垃圾组成,与其他形态住区相比,有害垃圾较多.因此在 5 种形态的住区中,可将农村居民点作为可堆肥垃圾资源化的重点,将小城镇作为垃圾回收利用的重点,而在城市型住区应注意有害垃圾的分类收运,避免与生活垃圾混合处理.

由各社区垃圾堆放点采样的结果(图 5),对照问卷调查的结果可以发现:虽然可回收物在居民家中经过分拣,但一些市价稍低,以及零碎难以收集的可回收物仍然进入社区垃圾箱或堆放点,这部分可回收物所占的比重大约为 10%~20%.城中村和城市型住区家庭的垃圾回收率较高,在社区的垃圾堆放点几乎未见可回收物.农村居民点、城郊村和城市型住区采样点的可燃垃圾较多.可堆肥物在各形态住区采样点的比例均较高,平均含量高达 56.5%,尤其是城中村和城市型住区的可堆肥物明显高于其他住区,表明在集美区可堆肥垃圾的资源化效率有待提高.大件垃圾一部分被专门企业上门收购,另一部分由于体积大、重量大被弃置家中,因此在社区采样点一般不会发现大件垃圾.

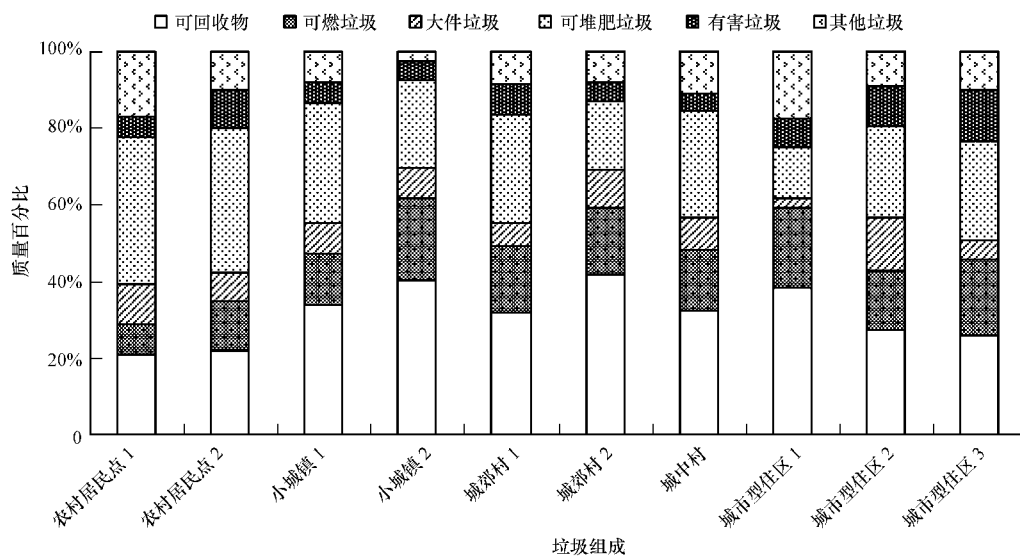


图 5 实地采样测定集美区家庭生活垃圾的物理组成

Fig. 5 Physical components of household waste in Jimei District by field investigation

比较问卷调查与实测采样的结果,问卷法在一定程度上更有利于全面掌握家庭生活垃圾的产生量与物理组成,尤其是在垃圾管理较混乱的半城市化地区,两种方法的结合与对比更有利于了解生活垃圾从居民家庭产生到社区堆放点的过程中垃圾组成的变化,从而找出垃圾管理的着力点,以便因地制宜、有针对性地选择最佳的垃圾管理对策和末端处理技术.

半城市化地区本身的战略性、混杂性、动态性和过渡性决定了区域内不同住区形态并存,各形态住区的城市化程度有所差异,居民的环境保护意识水平也参差不齐(Lin *et al.*, 2010),对家庭生活垃圾的管理应在问卷调查与实地采样相结合的基础

上,根据不同类型住区产生垃圾的特点采用针对性强的宣传手段和管理对策,因地制宜地采取垃圾管理措施,才能更科学地引导居民的生活习惯和消费方式.

4.2 不同垃圾处理方案的碳排放对比

根据厦门市市容环境卫生管理处提供的资料,结合《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》的垃圾组成数据得各项参数值见表 2(IPCC, 2006b).由调查问卷得知集美区每户家庭的生活垃圾平均日产量为 1.4 kg,2008 年全区在籍的住户总数为 55690 户,则全区年产家庭生活垃圾总量约 28458 t.

厦门市东部固体废物处理中心位于翔安区新圩镇,距离集美区约 33 km,占地 207.07 万 m^2 ,总投

资 13.25 亿元, 填埋库容量可达 2000 万 m^3 , 规划建设成垃圾综合处理基地, 包括堆肥、焚烧和卫生填埋等垃圾处理技术, 但目前建成运行的只有卫生填埋场, 厦门市大部分生活垃圾运往该填埋场处理处置。因此集美区家庭生活垃圾处理的四种方案中垃圾车的燃油消耗量相差不多, 据统计全区专用垃圾车 1 年的燃油消耗量约为 144889 L, 由公式(2)算

得碳排放总量为 384.65 t。

2009 年华东区域电网的电量边际排放因子 (EF_{OM}) 和容量边际排放因子 (EF_{BM}) 分别为 0.8825 t/MWh 和 0.6826 t/MWh。以平均每填埋 1 t 垃圾用电 0.5 kWh, 平均每堆肥 1 t 垃圾用电 25 kWh, 平均每焚烧 1 t 垃圾用电不超过 100 kWh 进行估算(潘玲阳等, 2010) 结果如图 6 所示。

表 2 末端处理垃圾的物理组成及其 DOC_j 与 FC_φ 的含量

Table 2 Degradable organic carbon (DOC_j) and fossil carbon (FC_φ) of physical components of household waste in terminal

	可回收物	可燃垃圾	可堆肥垃圾	其他垃圾
各组分的质量百分比	24.9%	16.3%	26.7%	10.1%
可降解组分 j 中可降解有机碳 DOC_j	0.016%	0.939%	10.873%	0.000%
可燃组分 φ 的化石源碳 FC_φ	0.005%	5.363%	0.000%	0.003%

由图 6 可知, 代表现阶段集美区家庭生活垃圾处理的 S1 方案(混合垃圾填埋)碳排放量最多, 高达 10142.4 t 左右, 并且主要来自于垃圾本身的可降解碳。S2(混合垃圾堆肥)的碳排放总量高于 S3(混合垃圾焚烧), 这是由于垃圾中可生物降解的碳高于化石源碳, 并且堆肥易形成局部厌氧环境导致更多 CH_4 的排放。但混合垃圾焚烧时, 电力消耗造成的碳排放量在 4 个方案中最多。S4 代表垃圾分类综合处理的方案, 碳排放总量最低, 仅 1642.7 t, 不到 S1 碳排放量的 1/6。另外, 由于可回收物的再生利用可减少原材料开采和加工过程中能源与材料的消耗以及碳排放, S4 假设生活垃圾在进入末端处理设施之前, 其中的可回收物已经 100% 回收, 因此, 如果按照台北市生命周期清单模型计算所得的 -2.8 t/(t_{可回收物}) 的减排效果(Chen *et al.*, 2008), S4 将有更大的碳减排潜力。

住区内应注重这两类垃圾的分类收集和利用, 尤其是回收率仍然较低的小城镇和城郊村, 建议在住区内或附近布设正规的垃圾收购站点, 通过奖励为主、奖惩结合的方法提高垃圾回收率; 在可堆肥垃圾较多的住区, 例如农村居民点, 可布设生物处理机减少末端处理的垃圾量, 或将可堆肥物集中收集后进行好氧堆肥或厌氧消化处理(李东等, 2009; 张静等, 2010)。在有害垃圾较多的城市型住区, 应注重有害垃圾的分类收集与安全处置, 避免有害垃圾混入生活垃圾造成污染。

5 结论(Conclusions)

本研究以典型半城市化地区——厦门市集美区为例, 结合问卷调查与实地采样两种方法, 结果表明不同形态住区的家庭生活垃圾产量及其组分具有明显不同的特征。从源头调查的结果来看, 农村居民点和城市型住区的家庭生活垃圾日产量较多, 是垃圾减量化的重点; 整体来看, 集美区家庭生活垃圾的可回收物和可堆肥物比重较高, 具有较大的资源化利用潜力; 比较 5 种形态的住区可知, 农村居民点的可堆肥垃圾最多, 小城镇的可回收垃圾最多, 城市型住区的有害垃圾最多。从典型社区内垃圾堆放点采样测定的结果来看, 城中村和城市型住区可堆肥垃圾的回收利用率较低, 应作为垃圾资源化的重点。与实地采样方法相比, 问卷调查法更贴近居民, 更有利于从源头掌握垃圾产生的特点, 尤其是垃圾中可回收物与大件垃圾所占的比例。而两种方法的对比更有利于掌握垃圾在到达堆放点之前物理组成的变化, 从而便于从居民或社区角度有针对性地选择垃圾管理措施, 以实现生活垃圾的源

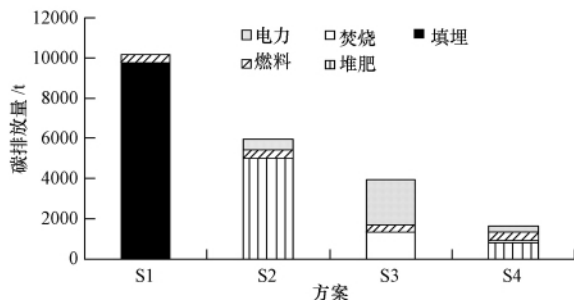


图 6 4 种垃圾处理方案的碳排放量

Fig. 6 Equivalent emissions of carbon dioxide from different household waste management scenarios

半城市化地区的家庭生活垃圾中可回收物和可堆肥物较多, 但资源回收与利用率不高, 因此在

头管理和控制。

基于对垃圾产生源的调查和研究,用生命周期分析法从末端对4种垃圾处理方案进行对比,分别计算垃圾分解的碳排放,专用垃圾车的燃油消耗和处理厂电力消耗的碳排放,结果表明:分类综合处理方式的碳排放总量最少;虽然焚烧厂电力消耗的碳排放最多,但从总量来看,焚烧的碳排放低于堆肥。结合城市低碳发展的趋势和目标,建议集美区大力提高垃圾回收利用率,建立起垃圾产生→分类收集→分类运输→综合利用→最终处置的分类综合管理体系,鉴于厦门市的垃圾堆肥场正在筹建,因此在堆肥场投产运行之前可以采用焚烧为主的低碳处理方式。

半城市化地区具有高度的动态性,随着城市的发展半城市化地区的住区形态将发生变化,该地区的生活垃圾数量与成分也将发生变化,因此随着城市化的发展,应根据其生活垃圾的特征,采用不同的生活垃圾管理对策。不管是垃圾焚烧、堆肥,还是卫生填埋,都无法避免地对环境造成污染,只有从源头减少垃圾产生,提高资源化利用率,配合因地制宜的末端综合处理技术,才能使半城市化地区真正走上低碳环保的经济发展之路。

致谢:感谢中国科学院城市环境研究所郭先华、李旋旗、刘江、高莉洁、曹斌、李方一,以及集美大学黄宁老师与学生在问卷调查过程中给予的帮助,感谢厦门市市容环境卫生管理处提供资料与信息。

责任作者简介:崔胜辉,男(1973—),博士,研究员,主要从事城市生态环境规划与管理研究,已在国内外刊物发表论文30余篇,Tel: 0592-6190957, E-mail: shcui@iue.ac.cn.

参考文献(References):

- Aguilar A G. 2008. Peri-urbanization, illegal settlements and environmental impact in Mexico City[J]. *Cities*, 25: 133-145
- Bürgi M, Hersperger A M, Schneeberger N. 2004. Driving forces of landscape change-Current and new directions [J]. *Landscape Ecology*, 19: 857-868
- 陈海滨,章程,潘绮. 2006. 生活垃圾减量化的综合效益及优先地位分析[J]. *环境科学与技术*, 29(增刊): 84-86
- Chen H B, Zhang C, Pan Q. 2006. Analysis on the integrated benefit and priority position of municipal solid waste reduction [J]. *Environmental Science & Technology*, 29(supplement): 84-86 (in Chinese)
- Chen T C, Lin C F. 2008. Greenhouse gases emissions from waste management practices using life cycle inventory model [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 155: 23-31
- 陈移峰,蒲舸,冉景煜. 2007. 城市生活垃圾处理与温室气体减排[J]. *重庆工学院学报(自然科学版)*, 21(3): 25-29
- Chen Y F, Pu G, Ran J Y. 2007. Urban solid wastes treatment and greenhouse gas emission reduction [J]. *Journal of Chongqing Institute of Technology(Natural Science Edition)*, 21(3): 25-29 (in Chinese)
- 崔素萍,刘伟. 2008. 水泥生产过程 CO₂减排潜力分析[J]. *生产技术*, 57-59
- Cui S P, Liu W. 2008. Analyses of potentialities to reduce CO₂ emission from cement [J]. *Production Technology*, 57-59 (in Chinese)
- EPA. 2001. Non-CO₂ greenhouse gas emissions from developed countries: 1990-2010 [R]. EPA-430-R-01-007. Washington DC: US Environmental Protection Agency. 1.1-1.6
- EPA. 2006. Talking points for landfill gas energy projects [OL]. 2009-10-30. <http://www.epa.gov/landfill/res/pdf/talkingpoints1.pdf>
- EPA. 2008. An overview of landfill gas energy in the United States [OL]. 2008-06-10. <http://www.epa.gov/lmop/docs/overview.pdf>
- 傅小锋,曹卫东,曹有挥,等. 2005. 半城市化地区土地利用变化及其环境效应——以成都新津县为例[J]. *中国人口·资源与环境*, 15(3): 80-83
- Fu X F, Cao W D, Cao Y H, et al. 2005. Change of land-use and environmental effect in peri-urbanization region: A case study of Xinjin County in Chengdu [J]. *China Population, Resources and Environment*, 15(3): 80-83 (in Chinese)
- 高培卿. 2007. 厦门市城市生活垃圾管理与综合治理规划[J]. *环境卫生工程*, 15(5): 8-11
- Gao P Q. 2007. Management and integrated treatment planning of municipal domestic waste in Xiamen city [J]. *Environment Sanitation Engineering*, 15(5): 8-11 (in Chinese)
- Ginsburg N, Koppel B, McGee T G. 1991. The extended metropolis: Settlement transition in Asia [M]. Honolulu: University of Hawaii. 87-210
- 花利忠,崔胜辉,黄云凤,等. 2009. 海湾型城市半城市化地区空间扩展演化——以厦门市为例[J]. *生态学报*, 29(7): 3509-3517
- Hua L Z, Cui S H, Huang Y F, et al. 2009. Analyses of peri-urban landscape dynamics in the rapid urbanizing process: A case study of Xiamen [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 29(7): 3509-3517 (in Chinese)
- Huang S L, Wang S H, Budd W W. 2009. Sprawl in Taipei's peri-urban zone: Responses to spatial planning and implications for adapting global environmental change [J]. *Landscape and Urban Planning*, 90: 20-32
- 黄云凤. 2009. 半城市化地区结构与功能特征及其管理研究——以厦门市集美区为例[D]. 北京: 中国科学院生态环境研究中心. 1-166
- Huang Y F. 2009. The structure and function characteristics of periurban and its management — A case study of Jimei district, Xiamen city, Fujian province, China [D]. Beijing: Research Centre for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences. 1-166 (in Chinese)

- Iaquinta D L, Drescher A W. 2000. Defining periurban: Understanding rural-urban linkages and their connection to institutional contexts [A]. The Tenth World Congress of the International Rural Sociology Association [C]. Rio de Janeiro. 1-26
- IPCC. 2000. Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories [R]. ISBN 4-88788-000-6. Japan: Institute for Global Environmental Strategies. 1. 3-1. 6
- IPCC. 2006a. Chapter 1 introduction, Volume 2 energy, 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [R]. ISBN 4-88788-032-4. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies. 1. 19-1. 26
- IPCC. 2006b. Chapter 2 waste generation, composition and management data, Volume 5 waste, 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [R]. ISBN 4-88788-032-4. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies. 2. 1-2. 23
- IPCC. 2006c. Chapter 3 solid waste disposal, Volume 5 waste, 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [R]. ISBN 4-88788-032-4. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies. 3. 6-3. 25
- IPCC. 2006d. Chapter 4 biological treatment of solid waste, Volume 5 waste, 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [R]. ISBN 4-88788-032-4. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies. 4. 1-4. 8
- 季小妹, 陈田, 郑芳. 2009. 半城市化地区生态环境研究进展 [J]. 生态环境学报, 18(4): 1579-1586
- Ji X M, Chen T, Zheng F. 2009. Progress in ecological environment research in peri-urban areas [J]. Ecology and Environmental Sciences, 18(4): 1579-1586 (in Chinese)
- 李东, 孙永明, 郭燕锋, 等. 2009. 作为厌氧发酵原料的水分选有机垃圾特性分析 [J]. 环境科学学报, 29(12): 2538-2544
- Li D, Sun Y M, Guo Y F, et al. 2009. Characterization of water sorted organic fraction of municipal solid waste for anaerobic digestion [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 29(12): 2538-2544 (in Chinese)
- Lin T, Guo X H, Zhao Y, et al. 2010. A study of residents' environmental awareness among communities in a peri-urban area of Xiamen [J]. International Journal of Sustainable Development & World Ecology, 17(4): 285-291
- 刘江, 崔胜辉, 邱全毅, 等. 2010. 滨海半城市化地区景观格局演变——以厦门市集美区为例 [J]. 应用生态学报, 21(4): 856-862
- Liu J, Cui S H, Qiu Q Y, et al. 2010. Evolvement of landscape pattern in coastal peri-urban area: A case study of Jimei District, Xiamen City [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 21(4): 856-862 (in Chinese)
- 刘江, 崔胜辉, 唐立娜, 等. 2010. 半城市化地区住区形态及空间分布特征 [J]. 地理科学进展, 29(5): 579-585
- Liu J, Cui S H, Tang L N, et al. 2010. Settlement morphology and spatial distribution characteristics in peri-urban area: A case study of Jimei District, Xiamen [J]. Progress in Geography, 29(5): 579-585 (in Chinese)
- 刘盛和, 陈田, 蔡建明. 2004. 中国半城市化现象及其研究重点 [J]. 地理学报, 59(增刊): 101-108
- Liu S H, Chen T, Cai J M. 2004. Peri-urbanization in China and its major research issues [J]. Acta Geographica Sinica, 59 (supplement): 101-108 (in Chinese)
- 刘盛和, 叶舜赞, 杜红亮, 等. 2005. 半城市化地区形成的动力机制与发展前景初探——以浙江省绍兴县为例 [J]. 地理研究, 24(4): 601-611
- Liu S H, Ye S Z, Du H L, et al. 2005. A probe into the impetus and mechanisms for the formation of quasi-urbanization area and its development prospect: A sample study on Shaoxing County, Zhejiang Province [J]. Geographical Research, 24(4): 601-611 (in Chinese)
- 刘盛和, 张擎. 2008. 杭州市半城市化地区空间分布变化 [J]. 地理研究, 27(5): 982-992
- Liu S H, Zhang Q. 2008. The change of spatial distribution of peri-urbanization areas in Hangzhou Municipality [J]. Geographical Research, 27(5): 982-992 (in Chinese)
- 刘志澄. 2007. 垃圾处理与气象环境——垃圾对气象环境的影响及对策 [J]. 世纪行, (9): 33-35
- Liu Z C. 2007. Waste disposal and meteorological environment—Effects of waste on meteorological environment and countermeasures [J]. Centurial Trip, (9): 33-35 (in Chinese)
- Löffler G, Wargadalam V J, Winter F. 2002. Catalytic effect of biomass ash on CO, CH₄ and HCN oxidation under fluidised bed combustor conditions [J]. Fuel, 81: 711-717
- Makita K, Fèvre E M, Waiswa C, et al. 2010. Population-dynamics focussed rapid rural mapping and characterisation of the peri-urban interface of Kampala, Uganda [J]. Land Use Policy, 27: 888-897
- 马智杰, Edward W. 2008. 四板沟水电站清洁发展机制额外性原理及 CO₂ 减排量的计算方法 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 6(2): 118-123
- Ma Z J, Edward W. 2008. Theory of CDM additionality and calculation method of CO₂ emission reduction about the Sibangou hydropower station [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 6(2): 118-123 (in Chinese)
- 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2004. CJJ/T102—2004 城市生活垃圾分类及其评价标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. 2004. CJJ/T102—2004 Classification and evaluation standard of Municipal solid waste [S]. Beijing: China Architecture & Building Press (in Chinese)
- 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2009. CJ/T313—2009 生活垃圾采样和分析方法 [S]. 北京: 中国标准出版社
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. 2009. CJ/T313—2009 Sampling and analysis methods for domestic refuse [S]. Beijing: Standards Press of China (in Chinese)
- Ngnikam E, Tanawa E, Rousseaux P. 2001. Evaluation of the potentialities to reduce greenhouse gases (GHG) emissions resulting from various treatments of municipal solid wastes (MSW) in moist tropical climates: application to Yaounde [J]. Waste Management Research, 19: 501-513
- 潘玲阳, 叶红, 黄少鹏, 等. 2010. 北京市生活垃圾处理的温室气体

- 排放变化分析[J]. 环境科学与技术, 33(9): 116-124, 172
- Pan L Y, Ye H, Huang S P, *et al.* 2010. Greenhouse gas emission from municipal solid waste treatment in Beijing [J]. Environmental Sciences & Technology, 33(9): 116-124, 172(in Chinese)
- Pearson L J, Park S, Harman B, *et al.* 2010. Sustainable land use scenario framework: Framework and outcomes from peri-urban South-East Queensland, Australia [J]. Landscape and Urban Planning, 96: 88-97
- 人民网. 2009. 我国单位 GDP 二氧化碳排放将比 2005 年降 40% 以上 [OL]. <http://finance.people.com.cn/GB/10460486.html>
- People. 2009. The CO₂ emissions per unit GDP will be reduced more than 40% compared with the emissions in 2005 in China [OL]. <http://finance.people.com.cn/GB/10460486.html>(in Chinese)
- Phillips D, Smith D, Williams K, *et al.* 1999. Literature review on peri-urban natural resource conceptualization and management approaches [R]. Peri-urban production systems research natural resources systems programme (R6949). London: University of Nottingham and University of Liverpool. 10-30
- Simon D. 2008. Urban environments: Issues on the periurban fringe [J]. Annual Review of Environment and Resources, 33: 167-185
- Thomas I, Frankhauser P, Biernacki C. 2008. The morphology of built-up landscapes in Wallonia (Belgium): A classification using fractal indices [J]. Landscape and Urban Planning, 84: 99-115
- 田文栋, 魏小林, 黎军, 等. 2000. 北京市城市生活垃圾特性分析 [J]. 环境科学学报, 20(4): 435-438
- Tian W D, Wei X L, Li J, *et al.* 2000. A study on the physical characteristics of MSW in Beijing area [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 20(4): 435-438(in Chinese)
- Vejre H, Jensen F S, Thorsen B J. 2010. Demonstrating the importance of intangible ecosystem services from peri-urban landscapes [J]. Ecological Complexity, 7: 338-348
- Wang F S. 2001. Deterministic and stochastic simulations for solid waste collection systems—A SWIM approach [J]. Environmental Modeling and Assessment, 6: 249-260
- 汪群慧, 叶墩旻, 谷庆宝. 2003. 固体废物处理及资源化 [M]. 北京: 化学工业出版社. 14
- Wang Q H, Ye T M, Gu Q B. 2003. Solid waste disposal and treatment [M]. Beijing: Chemical Industry Press. 14(in Chinese)
- Webster D. 2002. On the edge: Shaping the future of peri-urban East Asia [D]. Stanford (CA): Stanford University, 5-39
- 吴克明, 陈新丽. 2004. 城市生活垃圾处理现状及发展趋势 [J]. 安全与环境学报, 4(增刊): 79-82
- Wu K M, Chen X L. 2004. Review on municipal garbage treatment technology [J]. Journal of Safety and Environment, 4(supplement): 79-82(in Chinese)
- 厦门市集美区政务信息中心. 2009. 集美概况 [OL]. 2009-05-14. <http://www.jimei.gov.cn/myoffice/documentComm.do?docId=D27423&template=/wwwtemplate/367>
- Government communication centre of Jimei, Xiamen. 2009. Jimei summary [EB/OL]. 2009-05-14. <http://www.jimei.gov.cn/myoffice/documentComm.do?docId=D27423&template=/wwwtemplate/367>(in Chinese)
- 阳晶, 马晓茜. 2006. 填埋场沼气发电的温室气体减排效益分析 [J]. 环境污染与防治, 28(6): 461-464
- Yang J, Ma X Q. 2006. The benefit of landfill gas power generation to the reduction of the greenhouse gas emission [J]. Environmental Pollution & Control, 28(6): 461-464(in Chinese)
- 张静, 何品晶, 邵立明, 等. 2010. 分类收集蔬菜垃圾与植物废弃物混合堆肥工艺实例研究 [J]. 环境科学学报, 30(5): 1011-1016
- Zhang J, He P J, Shao L M, *et al.* 2010. Co-composting with sorted vegetable waste and green waste: A case study [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 30(5): 1011-1016(in Chinese)
- 张宪生, 沈吉敏, 厉伟, 等. 2003. 城市生活垃圾处理处置现状分析 [J]. 安全与环境学报, 3(4): 60-64
- Zhang X S, Shen J M, Li W, *et al.* 2003. Disposal and treatment of municipal solid waste: state-of-the-art [J]. Journal of Safety and Environment, 3(4): 60-64(in Chinese)
- Zhao P J, Lü B, Woltjer J. 2009. Conflicts in urban fringe in the transformation era: An examination of performance of the metropolitan growth management in Beijing [J]. Habitat International, 33: 347-356
- Zhao W, van der Voet E, Zhang Y F, *et al.* 2009. Life cycle assessment of municipal solid waste management with regard to greenhouse gas emissions: Case study of Tianjin, China [J]. Science of the Total Environment, 407: 1517-1526
- 赵煜, 齐涛, 肖黎姍, 等. 2010. 半城市化地区居民环境意识调查与对比研究——以厦门市集美区为例 [J]. 生态科学, 29(3): 274-279
- Zhao Y, Lin T, Xiao L S, *et al.* 2010. Survey and comparative study of residents' environment awareness in peri-urbanization area—A case study of Jimei District, Xiamen [J]. Ecologic Science, 29(3): 274-279(in Chinese)
- 郑艳婷, 刘盛和, 陈田. 2003. 试论半城市化现象及其特征——以广东省东莞市为例 [J]. 地理研究, 22(6): 760-768
- Zheng Y T, Liu S H, Chen T. 2003. The characteristics of peri-urbanization region: A case study of Dongguan municipality in Guangdong Province [J]. Geographical Research, 22(6): 760-768(in Chinese)