情报工程　ISSN 2095-915X
第2卷 第5期 104-111 2016年10月

TECHNOLOGY INTELLIGENCE ENGINEERING
ISSN 2095-915X Vol.2 No.5 104-111 Oct 2016

doi:10.3772/j.issn.2095-915x.2016.05.012

基于系统动力学模型的中国城市生活垃圾回收过程中的就业问题研究

佟贺丰，杨岩

（中国科学技术信息研究所 北京 100038）

摘要：城市生活垃圾的生产、收集、处理、处置过程涉及多个环节，是一个复杂系统。本研究使用系统动力学的方法对城市生活垃圾处理的整个流程进行梳理并建模，从经济、社会和环境的大视角出发，分析和解决城市生活垃圾问题，特别是对回收过程中的非正式就业问题进行研究。模型把城市生活垃圾回收分为三个环节，其中前两个环节存在大量的非正式就业，这个问题急需重视，政府需要逐步有序地取代或整改不正规的垃圾回收环节，改善垃圾回收从业人员工作条件。

关键词：城市生活垃圾，分类收集，系统动力学，就业，模型

中图分类号：X799，N941.3

Employment of Municipal Solid Waste Sorting Collection in China Cities Based on System Dynamics Model

TONG HeFeng，YANG Yan

(Institute of Scientific and Technical Information of China, Beijing 100038, China)

Abstract: The municipal solid waste (MSW) is a complex system that included four aspects: generation, collection, treatment and disposal. This paper builded a system dynamics model to simulate the system

基金项目：本文受 SMALL SCALE FUNDING AGREEMENT of United Nations Environment Program (CP/4050−10−68), 中国科学技术信息研究所预研基金项目（YY2016−12）的资助。

作者简介：佟贺丰（1977−），男，锡伯族，辽宁沈阳人，研究员，研究方向：系统动力学模型、科技政策，email: thf2003@istic.ac.cn；杨岩（1986−），助理研究员，研究方向：系统动力学模型。

of municipal solid waste from the perspective of economy, society and environment. The model focused on the informal employment in the process of MSW sorting collection. The MSW recycling includes three steps, and there are large numbers of informal employment in the first two steps. According to the results, the government should pay more attention to the MSW problem, gradually and orderly to replace MSW collection or rectification of informal steps, improve the working conditions of employees in MSW collection.

KeyWords: Municipal solid waste, sorting collection, system dynamics, employment, model

1 引言

现有研究对城市生活垃圾回收及其造成的问题关注较多。因人类社会快速发展，全球人口和生产总值不断攀升，生活垃圾作为人类生产生活的必然产物产量也随之快速增长。目前，每年全球的垃圾清运量约达 112 亿吨，且此数字维持每年 8–10% 的增速 [1]。中国的城市生活垃圾清运量也不断提高，2015 年达到 1.91 亿吨 [2]。

但对城市生活垃圾回收过程中的就业问题特别是非正式就业问题关注较少。在中国城市生活垃圾的回收过程中，到底存在多大的就业量，各类学术期刊的文章涉及较少，只有一些媒体不时有一些相关报道，但数据相对不够严谨。城市生活垃圾问题是一个复杂的多层次耦合系统，本研究使用系统动力学的方法对城市生活垃圾处理的整个流程进行梳理并建模，从经济、社会和环境的大视角出发，分析和解决城市生活垃圾问题，特别是对回收过程中的非正式就业问题进行研究。

2 研究综述

利用系统动力学方法研究生活垃圾管理系统的成果最初出现于国外。罗马俱乐部在《增长的极限》研究中所依据的 World III 模型中就包括了生活垃圾的相关模块 [3]。Mashayekhi 在 1993 年开发了一个分析纽约州生活垃圾管理从以填埋为主转变为其他处理方式如焚烧及回收方式等处理方法时的所需资金和处理容量的系统动力学模型 [4]。Sudhir（1997）等对以系统动力学模型来获取城市生活垃圾中不同组成部分之间的动态本质的问题展开研究，此模型提供了一个可以在模型上针对不同管理方案和政策进行可持续生活垃圾管理的深入讨论的平台 [5]。Dyson 与 Chang（2004）应用系统动力学理论对快速发展情形下城市生活垃圾产生量进行预测 [6]。Sufian 和 Bala（2007）提出了一个预测废弃物的产生量、所需收集容量和生活垃圾发电量的系统动力学模型，对加强城市生活垃圾管理的必要性进行评估 [7]。

在国内，曲格平最早利用系统动力学的思想，主持了《2000 年中国的环境》研究，该研究借鉴了系统动力学创始人福瑞斯特教授的 World II 模型，运用系统科学原理提出了经济建设与环境保护协调发展的理论 [8]。中国科学技术信息研究所开发的“中国可持续发展模型”包含了生活垃圾子模块 [9]，作为模型环境模块的重要组成部分。蔡林建立了北京市人口、经济与垃圾处理协调发展的系统动力学模型，探讨了人口随经济发展的交化、垃圾排放污染及占地损失、绿色 GDP 核算、居民家庭、企事业单位生活垃圾与建筑垃圾组合收费方案等问题 [10]。韩苗苗针对城市生活垃圾产生系统模型的构建、产生因素等进行了分析，认

为有效控制人口将对垃圾的总量控制产生重要的作用[11]。张蕾等建立了深圳市城市生活垃圾产生系统动力学模型，在垃圾产生量预测的基础上进行不同政策下系统的行为模拟，发现在经济发展水平较低时，经济的发展速度会在很大程度上影响居民人均垃圾产生量和商业垃圾产生量，但当经济发展到一定程度后，这种影响将逐渐减弱[12]。侯燕和王华建立的固体废弃物管理系统动力学模型，关注了技术的进步可以提高自然资源的利用率，减少生产过程中垃圾的产生量，产品寿命的延长可以减少整个系统中投入的原材料等其他模型关注较少的因素[13]。

从国内外现有研究看，研究者对城市生活垃圾处理过程的认识是一致的，基本上是按照生产、收集、处理、处置的过程进行建模，一般包括人口子系统、经济子系统、垃圾生产与处理子系统、投资子系统等模块，大部分研究只包含其中一两个子系统，有的则建成了全部子系统，本研究根据实际模拟需要将系统集中于垃圾生产与处理系统，系统模块将在模型设计中做说明。

3 模型设计

目前国内外对垃圾回收过程中的就业问题从系统动力学的角度进行研究的都相对较少，特别是缺乏定量的认识。一些研究垃圾回收和就业的文章，多是从政策角度进行探讨[14-15]。我国目前各城市的垃圾分类回收并未真正有效推行，非正式的废品回收是资源回收的主流。中国垃圾处理处置过程中存在三次回收环节。

第一个环节是在垃圾清运前的废品回收过程。此过程中居民将自家产生的垃圾进行分类并卖给废品回收者，或者是拾荒者在垃圾箱收集废品后卖给废品回收者，废品回收者再进行分类并卖给上一级的回收者或处理商，模型中设计每天 50 公斤回收量造就一个就业岗位。

第二个环节是清运后的暂时存放垃圾的垃圾场进行再一次垃圾分拣回收的过程，目前第二个环节因为政府对垃圾场的管理越来越严格，在大城市的生存空间越来越小，模型中设计每天 200 公斤回收量造就一个就业岗位。

第三个环节是垃圾处理前进行的正规分拣，以人工分拣或机械与人工分拣结合的方式进行，模型中设计每天 1000-3000 公斤回收量造就一个就业岗位[16]。

前两个环节所涉及的垃圾回收工作者都是非正式的自发从业者。目前政府运营的垃圾回收站非常少，以北京为例，1965 年，北京二环路以内的国营废品回收站就有 2000 多个。但进入 80 年代后，计划经济下的废品回收已不能适应市场经济的要求，由于管理、税收、离退休负担等矛盾，这个行业也严重地萎缩了。到了 1997 年，三环路以内的国营废品回收站仅仅剩下了 16 个。目前国内很少针对该环节进行研究。对三个环节，存在一个比例关系问题。如果只加强第三个环节回收的投资，因为在前两个环节，很多可回收组分已经被利用，造成第三环节的可利用资源量非常有限，会造成投资的浪费。如何处理好相关环节上的非正式就业，也是政府部门急需考虑的问题。在垃圾管理系统中垃圾的产生、清运、处理处置、回收各环节构成主要的物质流 (如图 1 所示)。其在系统动力学中的表达如图 2 所示。

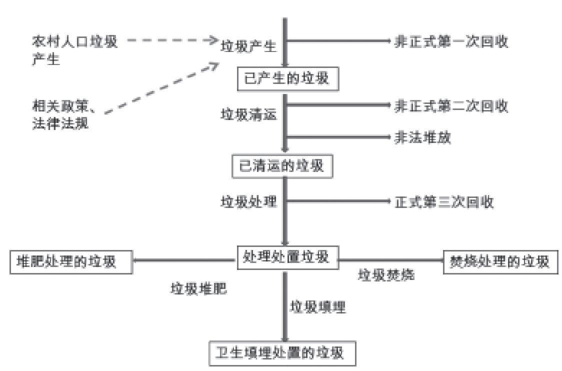

图 1 城市生活垃圾管理系统

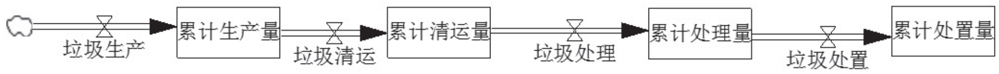

图 2 系统动力学模型中垃圾处理流程

各个环节所涉及的变量及其之间的作用关系可以用因果关系回路图阐明（如图 3 所示）。这些连接组成的正负反馈环代表了整个系统动态结构，其中任何一个变量的增加将导致最终结果的进一步增加或减少。城市生活垃圾管理系统因果关系流图见图 3。本研究把垃圾管理系统分为垃圾产生与清运、垃圾回收、垃圾处理、政策法规四个子系统。这里主要描述垃圾回收子系统（图 4）。

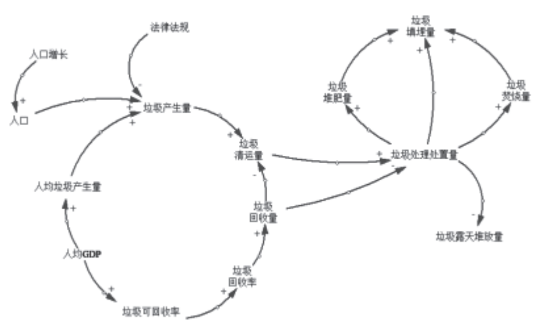

图 3 城市生活垃圾管理系统主要因果关系流图

垃圾的回收量受垃圾的产生量和垃圾的回收率影响（图 4）。而垃圾的回收率主要受到垃圾组分的可回收率和垃圾回收市场状况的影响。垃圾的可回收率受社会经济状况影响，即随人均 GDP 而变化，在经济状况良好、人均 GDP 较高的地区或时期，居民生活条件较高，生活过程中产生的垃圾趋于更大型和低密度，其中可回收组分增多，有机物质减少，更难堆肥处理，可回收率升高 [17]。反之亦成立。所以，一般发达国家垃圾的可回收率高于发展中国家。模型中设置了回收指数，模型中，根据中国市政垃圾的组分可回收量和实地调研情况，假设 2050 年第一次回收率设置为 20%，2050 年第二次回收率设置为 35%，2050 年第三次回收率设置为 20%。

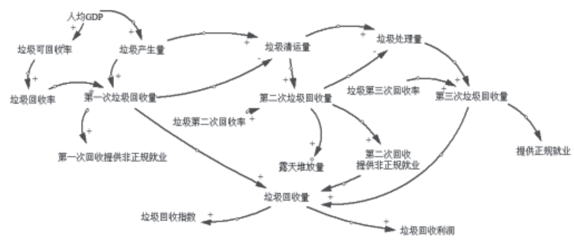

图 4 城市生活垃圾回收管理系统主要因果关系流图

4 模拟分析

4.1 模型数据与构建工具

本研究采用 Vensim DSS 系统动力学软件平台， Vensim 软件可为模型构建者提供一种简易易用的模型构建平台，用以建立包括系统动力学中的因果循环 (casual loop)、存量 (stock) 与系统流程图。本模型中人口数据来自 19990–2011 年的《中国统计年鉴》，从中可以获得城市人口、人均 GDP、垃圾产生量等数据，将上述历史数据进行分析，即可得到未来情景下的入数据，便如得到人口增长率可按照历史数据进行回归分析得到，人均 GDP 等数据的平均增长率也可以通过上述方式核算得到，后续情景模拟中人口的增长及人均 GDP 的增长均按照上述得到的增长率进行计算，即可为垃圾产生量的计算提供相应的输入数据。

4.2 基准情景的主要结果

在图 5 中，线条 1 是中国城市生活垃圾清运量的模型模拟值，线条 2 是历史值，可以看出，两者具有较高的重合度，其他主要模拟值如表 1 所示。在未来，中国的垃圾清运量还将持续上升，2050 年将达到 3 亿吨左右。如果从生产量来看，

2050年中国人均生活垃圾日产生量约为1.07公斤，仍然属于世界上较低的水平。

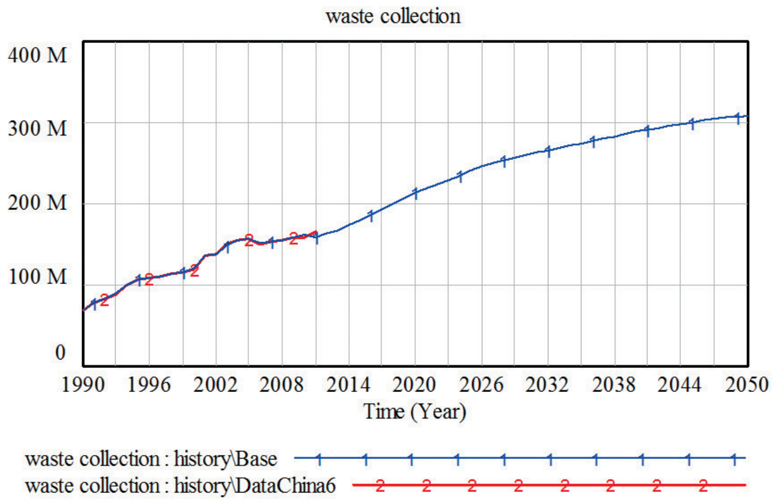

图5 中国城市年垃圾清运量的历史数据与模拟数据对比

保持现有垃圾循环回收模式情景下，非正式的垃圾回收仍是垃圾回收产业的主流。从垃圾回收三个环节的就业量看，第一环节的就业量远超过后两个环节，第二环节因为受政策影响，在2005年政府逐步取缔临时垃圾堆放场后就业量急剧下降，第三环节因为处理效率高，也不会容纳很高的就业量。但随着对垃圾集中回收处理，在第三环节的投资需求在逐年增加。前两个环节的非正式就业人口大多由城市流动人口构成，难于管理，需要出台相关政策提前规划解决。目前正规垃圾分选回收量与非正规回收量规模相比存在数量级差异。若不采取有效政策措施干预，正规回收就业提供数量有限，且采用人工与机械混合分拣方法，正规就业数量增幅不大。

表1 模型中主要指标模拟值

指标	单位	2020	2030	2050
总人口	亿人	14.09	14.43	13.69
垃圾生产总量	亿吨	2.54	3.14	3.85
第一环节就业量	万人	275.27	366.70	513.09
第二环节就业量	万人	11.08	11.24	7.18
第三环节就业量	万人	2.27	4.35	8.21
第三环节投资额	亿元	11.03	31.95	110.83

4.3 取消非正规垃圾回收就业情景分析

非正式的垃圾回收就业人员大多是城市流动人口，大多缺少社会、医疗保障，从业环境恶劣，是呼吸道、肠道等传染性疾病的易感人群。此情景假设政府采取相关措施，将前两个环节的回收率都设置为0，取而代之采取类似美国、日本等

国家的垃圾分类回收政策，集中在第三环节进行循环回收。模拟结果显示，完全取消非正式垃圾回收环节尚存在诸多问题，一方面增加了政府投资成本，另一方面大批非正式垃圾回收者将面临失业。模拟结果显示，2050 年不计垃圾分类回收运输所产生的额外成本，仅第三次回收过程成本较未取消非正规回收之前增加了 25%，达 147 亿元。正规就业数量增长至约 11 万，虽然可以解决一部分非正规回收从业者，但难以解决全部问题。如果采取高收费措施，投入成本随有所下降，但降幅较小没有解决根本问题。

通过模拟发现，同时实施多项控制措施对非

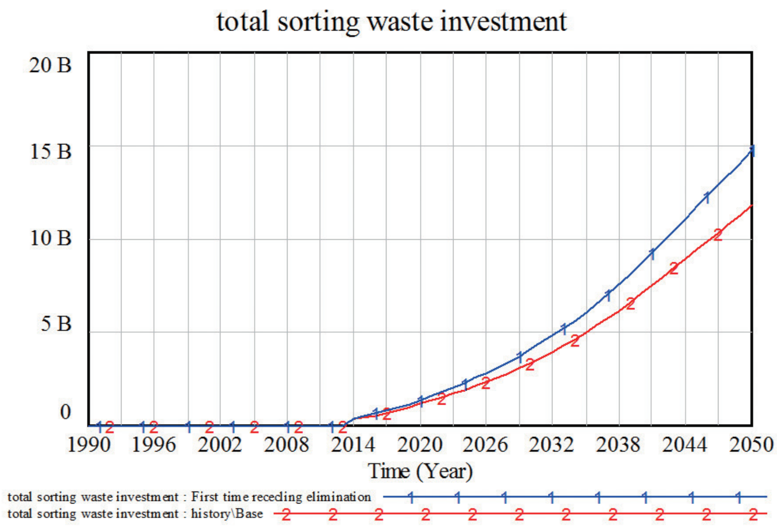

图 6 取消非正规垃圾回收就业情景分析

正式回收的控制有较好效果。例如，假设政府既要提高垃圾回收率，又要控制非正规从业人员，所以将非正规回收规模减小，同时将垃圾处理费用提高 100%，并将处理费用完全投入到垃圾回收成本中。通过模拟发现，将非正规回收规模减小 50% 可维持正规回收环节具有相当的规模，尽可能的降低了非正规从业人员数量，且成本投资仅增加 5%。

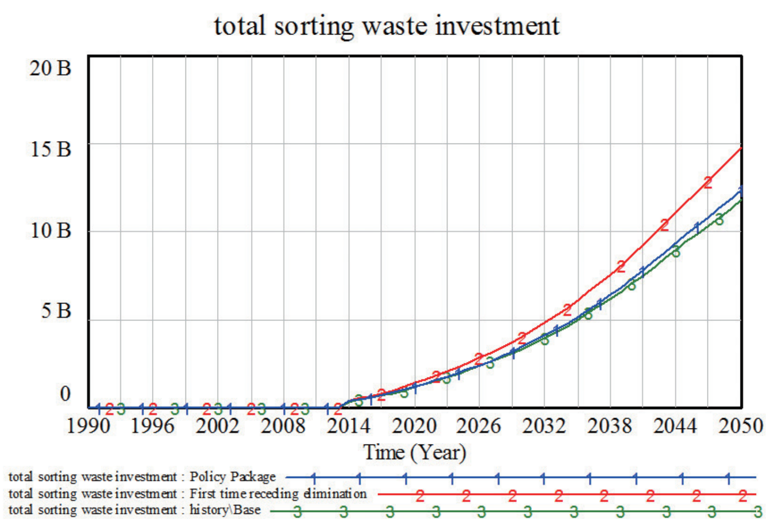

图 7 取消非正规垃圾回收就业情景分析

4.4 垃圾计量高收费政策情景分析

系统解决城市生活垃圾问题要从源头入手。单一使用提高垃圾收费的措施，对垃圾生产量、回收量影响并不显著。在基准情景模拟中，垃圾处理收费状况采用北京市垃圾清运处理收费状况进行模拟，收费对垃圾产生量的影响采用弹性系数的函数关系作用于垃圾产生量。目前的垃圾处理收费标准大多以每年每户为单位收费，而并非定量按照每公斤垃圾产生量进行收费，对居民的垃圾产生量影响不大。如果政府强制出台垃圾处理定量形式高收费政策，城市垃圾产生量将出现下降趋势。由图 8 所示，高收费政策情景下城市垃圾产生量减少。但是单一增长回收费用对垃圾产生量的影响并不显著：假设从 2010 年起垃圾处理费用增长 50%，第一环节和第三环节垃圾回收量减少 4% 左右，政府对垃圾回收过程投资保持不变；假设从 2010 年起垃圾处理费用增长 100%，第一环节和第三环节垃圾回收量减少 6.6% 左右。

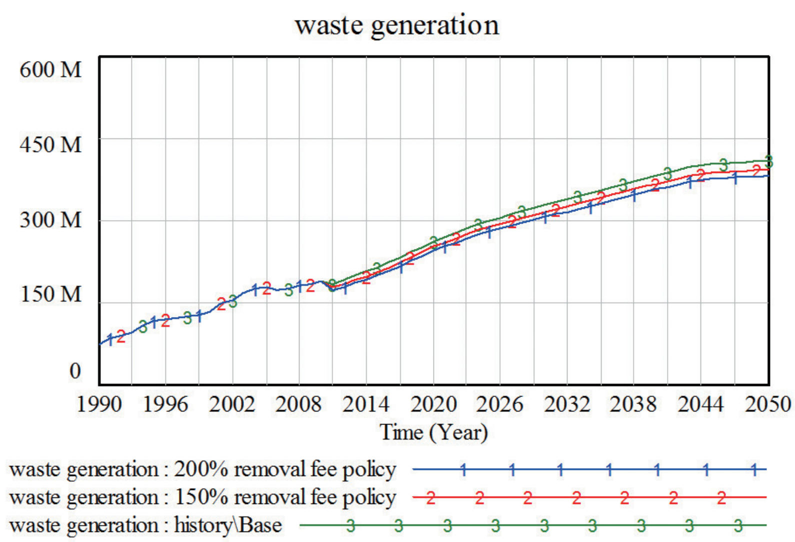

图 8 定量形式高收费政策情景分析

5 结束语

城市垃圾在源头上减量是最重要的基本策略，尤其对于人口基数大、资源消耗高的地区。人口和收入的绝对增长决定了垃圾产生规模难以减小，所以绿化垃圾产业是唯一的出路。经济刺激及法律法规制约可促使企业及居民用户进行垃圾减量，发展相关服务与产业。可行的方式包括发布更严格的环境指标标准，征收垃圾相关税费，居民排放收费，相关企业减免税及补贴，优惠贷款政策等。国内目前已有一些相关政策，建设部、国家环保总局、科技部于 2000 年联合印发了《城市生活垃圾处理及污染防治技术政策》在政策上为社会投资主体进入垃圾处理行业敞开了大门。在居民垃圾排放收费方面，国内目前仍大多采取简单的定额收费的制度，对垃圾产生量控制不具有约束效力。台北市于 2000 年实施了生活垃圾处理费随袋计量收费政策，有效的减少了居民的垃圾产生量。

逐步有序地取代或整改不正规的垃圾回收环节，改善垃圾回收从业人员工作条件。要处理好垃圾回收过程中正式就业与非正式就业的关系。在中国目前的形势下，把垃圾回收完全通过正式环节进行，对非正式就业有很大的冲击。如果容

忍这种非正式就业的存在，就要加强相关的管理。巴西的拾荒者合作社模式值得借鉴。巴西当地政府为拾荒者合作社免费提供场地，非政府组织赞助设备，企业提供垃圾分类培训，为拾荒者提供就业机会。2010 年，巴西实施一项新法律，要求所有城市和私营企业都必须与拾荒者合作社合作。这么做既给合作社带来更多机会，又为合作社迈向更职业化和规范化道路施加压力。拾荒者联合起来与政府资助、企业规范化管理相结合，不仅使垃圾回收工作更高效，同时也为大量巴西贫民创造了就业机会，有效地提高了拾荒者的收入水平和就业环境。目前，巴西全国有 500 个拾荒者合作社约 6 万名成员。

参考文献：

[1] UNEP. Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication [EB/OL].[2014-11-02]. http:// www.unep.org/greeneconomy，2014.11.2.

[2] 中华人民共和国国家统计局 . 中国统计年鉴 [M]. 北京 : 中国统计出版社 , 2016.

[3] 德内拉 · 梅多斯 , 乔根 · 兰德斯 , 丹尼斯 · 梅多斯 . 增长的极限 [M]. 北京 : 机械工业出版社 , 2013.

[4] Mashayekhi A N. Transition in New York State Solid Waste System：A Dynamic Analysis[J]. System Dynamics Review, 1993(16): 23-48

[5] Sudhir V, Srinivasan G, Muraleedharan V R. Planning for Sustainable Solid Waste Management in Urban India[J]. System Dynamics Review, 1997, 13(3):223-246.

[6] Dyson B, Chang N B. Forecasting Municipal Solid Waste Generation in a Fast-growing Urban Region with System Dynamics mModeling.[J]. Waste Management, 2005, 25(7):669-79.

[7] Sufian M A, Bala B K. Modeling of Urban Solid Waste Management System: The case of Dhaka city[J]. Waste Management, 2007, 27(27):858-68.

[8] 曲格平 . 2000 年中国的环境 [M]. 北京 : 经济日报出版社 , 上海人民出版社 , 中国社会科学出版社 , 1989.

[9] 黄振中 , 王艳 , 李思一 , 等 . 中国可持续发展系统动力学仿真模型 [J]. 计算机仿真 , 1997(4):3-7.

[10] 蔡林 . 北京市垃圾问题的系统动力学模拟分析 [J]. 北京社会科学 , 2006(3):56-61.

[11] 韩苗苗 . 基于城市生活垃圾产生系统中系统动力学方法的作用研究 [J]. 农业与技术 , 2015(2):242-243.

[12] 张蕾 , 席北斗 , 王京刚 , 等 . 系统动力学方法在城市生活垃圾产生系统的应用 [J]. 环境科学研究 , 2007, 20(5):72-78.

[13] 侯燕 , 王华 . 可持续的固体废弃物管理 SD 模型与仿真 [J]. 环境卫生工程 , 2006, 14(6):62-64.

[14] 王祺 . 都市拾荒 : 一项环境福利和就业政策探讨 [D]. 沈阳 : 沈阳师范大学 , 2007.

[15] 郑立 . 中国绿色就业研究 [D]. 石家庄 : 河北师范大学 , 2011.

[16] 冯思静 , 马云东 . 我国城市垃圾分类收集的经济效益分析 [J]. 环境科技 , 2006, 19(1):49-50.

[17] 梁斯敏 , 樊建军 . 中国城市生活垃圾的现状与管理对策探讨 [J]. 环境工程 , 2014, 32(11):123-126.