



BOSHI WENKU

〔经济学〕

# 城市生活垃圾管理系统动力学模型研究 ——以北京市为例

CHENGSHI SHENGHUO LAJI GUANLI XITONG DONGLIXUE  
MOXING YANJIU  
YI BEIJINGSHI WEILI

蔡 林 著

知识产权出版社



# 城市生活垃圾管理系统动力学模型研究 ——以北京市为例

CHENGSHI SHENGHUO

LAJI GUANLI XITONG DONGLIXUE  
MOXING YANJIU

YI BEIJINGSHI WEILI

知识产权出版社

## 内容提要

城市生活垃圾的排放和污染是严重困扰我国城市可持续发展的难题之一。寻找科学有效的管理方法,解决城市生活垃圾排放所造成的各种问题,对建设资源节约型和环境友好型的宜居城市,促进我国社会经济的可持续发展具有重要的理论意义和现实意义。

本书采用系统动力学方法,以北京市为实例,建立了具有6个子系统的城市生活垃圾管理系统动力学综合协调模型;以2000年为基准,对北京市50年内的人口、经济发展总量(GDP)、垃圾排放量、污染及占地损失、垃圾处理财政补贴、垃圾排放收费等进行了现行趋势和政策调控模拟分析,得到了一些初步的结论和有益的启示。本书为北京市及其他城市的生活垃圾管理政策的制定提供了一种系统化的研究方法。

责任编辑:蔡虹

图书在版编目(CIP)数据

城市生活垃圾管理系统动力学模型研究:以北京市为例/蔡林著. —北京:知识产权出版社,2009.5

ISBN 978-7-80247-696-7

I. 城… II. 蔡… III. 城市—垃圾处理—研究—北京市  
IV. X799.305

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第068910号

## 城市生活垃圾管理系统动力学模型研究——以北京市为例

蔡 林 著

---

出版发行: 知识产权出版社

社 址: 北京海淀区马甸南村1号

邮 编: 100088

网 址: <http://www.ipph.com>

邮 箱: [bjb@cnipr.com](mailto:bjb@cnipr.com)

发行电话: 010-82000893 82000860 转 8101

传 真: 010-82000893

责编电话: 010-82000860 转 8324

责编邮箱: [caihong@cnipr.com](mailto:caihong@cnipr.com)

印 刷: 知识产权出版社电子印制中心

经 销: 新华书店及相关销售网点

开 本: 880mm×1230mm 1/32

印 张: 8.25

版 次: 2009年5月第1版

印 次: 2009年5月第1次印刷

字 数: 192千字

定 价: 22.00元

ISBN 978-7-80247-696-7/X·002

---

版权所有 侵权必究

如有印装质量问题,本社负责调换。



## 前 言

城市生活垃圾是指城市地域内在日常生活中或者为日常生活提供服务的活动中产生的固体废物以及依法律、行政法规规定被视为生活垃圾的固体废物。

按照我国建设部颁布的《城市垃圾产生源分类及垃圾排放标准》(CJ/T 3033—1996),城市垃圾按产生源可以分为九类:居民生活垃圾、清扫垃圾、商业垃圾、工业单位垃圾、事业单位垃圾、交通运输垃圾、建筑垃圾、医疗卫生垃圾和其他垃圾。

2003年“非典”以后,鉴于医疗卫生垃圾的特殊危害性,原国家环保总局和卫生部联合制定了医疗废弃物管理国家法规与标准,将医疗卫生垃圾归入危险废物的管理范畴。

建筑垃圾由于成分简单,污染危害性小,被纳入了生活垃圾管理系统。

因此,城市生活垃圾大致可以分为两大类:居民及企事业单位生活垃圾和市政建筑渣土类垃圾,统称为城市生活垃圾。

伴随着我国社会经济的高速发展、城市化进程的加快,人口向城市的不断迁移和流动,以及人民生活水平的日益提高,城市生活垃圾产生量以大约年均10%的速度增长。城市生活垃圾产生量(以清运量为准)已经由1979年的2508万吨,猛增到2005年的15577万吨。

城市生活垃圾产生量激增,环卫建设资金投入较少,处理设施严重不足,环卫清扫和垃圾处理技术水平提高缓慢,处理

方式单一，管理体制僵化等，使城市垃圾处理系统不堪重负，从而产生了一系列的社会、经济和环境问题。

面对城市生活垃圾的挑战，国家和城市地方政府提出了一系列的应对计划和措施。在《全国城镇环境卫生“十一五”规划》中，建设部提出了：推行分类收集，完善收运体系；因地制宜选择处理方式，提高无害化处理水平；完善专业规划，构建环境卫生治理和管理的政府行政体系、市场运行体系、社会参与体系和突发事件应急体系等四大体系；深化体制改革，加强市场监管；加快设施建设，加大资金投入；从环境卫生产业政策、环境卫生经济政策、环境卫生技术政策等三方面制定政策和保障措施等。

然而，要真正落实这些应对措施却是一项十分艰巨的系统工程。这需要全面协调公众、企事业单位和政府的行为，需要对城市生活垃圾实施全程化和系统化的管理。因此，寻找科学有效的城市生活垃圾管理系统研究方法就显得尤为重要。

纵观各种系统科学研究方法，系统动力学有其独到的优势。

系统动力学（System Dynamics，简称SD），是一种通过结构—功能分析和信息反馈技术来研究解决复杂动态反馈性系统问题的计算机模拟方法。

系统动力学1956年发明于美国，它是一门新兴的交叉学科。至今已经在世界范围的自然科学、人文社会科学和工程技术等领域得到了极为普遍的应用，取得了良好的实效；被誉为“战略与策略实验室”。

在引发了可持续发展新理念的《增长的极限——罗马俱乐部关于人类困境的报告》一书序言中，课题指导者丹尼斯·L. 梅多斯写道：“我们已经建立的模型，像其他每一个模型

一样,是不完备的、过分简化了的和未完成的。我们完全意识到了它的缺点,但我们相信,它是现今适用于处理空间一时间图表上远处出现的各种问题的最有用的模型”。

中国科学院地理科学与资源研究所方创琳研究员,在分析了多种模型的建模基础、基本形式和种类、主要应用领域与功能、模型的局限性以及与其他模型或方法对接的可能性之后指出:系统动力学模型与模糊评判模型一样,在模型体系中拥有最多的“接口”,其不足之处可以通过其他模型来弥补,因而在规划中有着广泛的通用性;系统动力学模型的诸多优越性使其成为解决区域 PRED——人口、资源、环境与可持续发展问题的首选方法之一。

鉴于系统动力学方法在解决复杂系统问题方面所具有的诸多优势,以及城市生活垃圾管理问题研究所具有的重要意义,本人在 2001 年确定博士论文选题时,选择了采用系统动力学方法以北京市为实例,研究城市生活垃圾管理的问题。本书即是在修改 2005 年博士论文的基础上完成的。

本书共为 8 个部分,分为 8 章。

第一章为研究目的。分析了城市生活垃圾产生的各种原因、危害及管理问题;阐述了研究目的;设定了研究框架。

第二章为研究方法。对各种研究方法进行了综述;介绍了系统动力学研究方法的特点、系统动力学的基本原理、建模步骤和模拟软件。

第三章为研究成果述评。对国内外涉及系统动力学生活垃圾处理和管理的研究成果进行了总结。

第四章为城市生活垃圾管理系统分析。从垃圾排放系统、垃圾处理系统、垃圾管理政策体系和垃圾管理行政体系 4 个方面,对城市生活垃圾管理系统进行了全面的分析研究。



第五章为城市生活垃圾管理模型设计。以可持续发展理论和科学发展观为指导思想,设计了包括6个子系统(人口、垃圾排放、垃圾处理、垃圾收费、污染及占地损失和宏观经济与绿色GDP核算)的城市生活垃圾管理系统动力学研究模型。

第六章为参数的选择与界定。首先概述了参数的界定方法,然后按照第五章模型子系统的顺序,对模型中所用的参数进行了分析、筛选和界定。

第七章为模型检验和政策模拟。采用代表模型行为的两个主要变量即人口和生活垃圾产生量作为指标,对模型进行了历史性检验;按照现行不变政策和未来可能采取的政策,利用模型对北京市的人口、垃圾产生量、垃圾排放损失、经济总量GDP和绿色GDP进行了不变趋势和政策组合模拟与分析。

第八章为结论和未来展望。对研究方法、模拟结果作了全面总结、提出了管理政策建议;对模型结构调整及与其他方法的对接提出了设想;从人口和城市化发展趋势的视角对未来城市生活垃圾管理问题进行了展望。

感谢我的导师杜鹏教授对我博士论文的悉心指导;感谢北京市市政管理委员会、北京市环境卫生设计科学研究所有关领导和科研管理人员的大力帮助;感谢本书责任编辑蔡虹女士为本书出版所付出的辛勤工作。

由于本人的学识和水平有限,书中的错误和疏漏在所难免,恳请读者批评指正!



## 目 录

|                               |      |
|-------------------------------|------|
| <b>第一章 研究目的</b> .....         | (1)  |
| 一、研究背景.....                   | (1)  |
| 二、研究目的 .....                  | (19) |
| 三、研究框架 .....                  | (21) |
| <b>第二章 研究方法</b> .....         | (24) |
| 一、研究方法的选择 .....               | (24) |
| 二、系统动力学方法的特点 .....            | (27) |
| 三、系统动力学建模方法 .....             | (29) |
| 四、系统动力学建模基本步骤 .....           | (37) |
| 五、系统动力学模拟软件的选择 .....          | (41) |
| <b>第三章 研究进展述评</b> .....       | (42) |
| 一、国外的研究进展 .....               | (42) |
| 二、国内的研究状况 .....               | (48) |
| <b>第四章 城市垃圾管理系统分析</b> .....   | (53) |
| 一、垃圾排放系统 .....                | (53) |
| 二、垃圾管理政策体系 .....              | (59) |
| 三、垃圾管理行政体系 .....              | (65) |
| 四、垃圾处理系统 .....                | (68) |
| 五、北京市垃圾管理与处理的主要问题 .....       | (73) |
| 六、北京市垃圾未来处理与管理总体思路 .....      | (76) |
| <b>第五章 城市生活垃圾管理模型设计</b> ..... | (78) |
| 一、模型研究框架 .....                | (78) |





|                              |              |
|------------------------------|--------------|
| 二、模型设计及子系统结构关系分析 .....       | (81)         |
| 三、模型的合成及应用方法 .....           | (122)        |
| <b>第六章 参数的选择及界定 .....</b>    | <b>(123)</b> |
| 一、参数的界定方法 .....              | (123)        |
| 二、人口子系统的相关参数 .....           | (127)        |
| 三、垃圾排放子系统的相关参数 .....         | (162)        |
| 四、垃圾处理子系统的相关参数 .....         | (167)        |
| 五、垃圾收费子系统的相关参数 .....         | (174)        |
| 六、垃圾占地及污染损失子系统的相关参数 .....    | (177)        |
| 七、宏观经济及绿色 GDP 核算子系统的相关参数 ..  | (183)        |
| <b>第七章 模型检验及政策模拟分析 .....</b> | <b>(187)</b> |
| 一、模型检验 .....                 | (187)        |
| 二、现行趋势模拟分析 .....             | (189)        |
| 三、政策组合模拟分析 .....             | (196)        |
| 四、小结 .....                   | (216)        |
| <b>第八章 结论与展望 .....</b>       | <b>(219)</b> |
| 一、基本的结论 .....                | (219)        |
| 二、几个重要问题的讨论 .....            | (220)        |
| 三、未来的展望 .....                | (232)        |
| <b>参考文献 .....</b>            | <b>(237)</b> |

# 第一章 研究目的

## 一、研究背景

依照《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》附则中对生活垃圾的解释,城市生活垃圾是指城市地域内在日常生活中或者为日常生活提供服务的活动中产生的固体废物以及依法律、行政法规规定被视为生活垃圾的固体废物<sup>①</sup>,它是固体废物的主要组成部分之一。

改革开放以来,我国社会经济高速发展,人民生活水平日益提高,城市化进程不断加快,人口向城市大量迁移和流动,城市垃圾产生量激增。由于建设资金投入较少,基础设施严重不足;环卫清扫和垃圾处理技术水平提高缓慢,处理方式单一;管理体制僵化等,使城市垃圾处理系统不堪重负,从而产生了一系列的社会、经济和环境问题。截止到2005年年底,全国661个城市中,有大约2/3的城市已陷入垃圾围城之中,有大约1/4的城市已到了垃圾无处可填埋的境地。此外,随着未来人口进一步向东部沿海地区的不断迁移和聚集,东部地区城市生活垃圾问题将更为凸现。因此,深入系统地分析生活垃圾产生的原因及影响;预测未来城市生活垃圾问题的变动趋

<sup>①</sup> 中华人民共和国全国人大常委会. 中华人民共和国固体废物污染环境防治法. 2005.



势；找到解决问题的有效途径，全面协调公众、企事业单位和政府的行为；实现城市生活垃圾的全程化和系统化管理对保护环境，实施可持续发展战略，落实科学发展观，提高城乡人民的生活环境质量不仅具有重要的理论意义，而且也具有重大的现实意义。

## （一）生活垃圾排放及影响因素分析

### 1. 生活垃圾的排放

在人们的日常生活中，会产生各种各样的废弃物。这些废弃物包括居民生活废弃物、商业和服务业废弃物、机构与事业单位废弃物、街道清扫垃圾、城市绿化垃圾以及建筑垃圾等。上述垃圾中，有些是可以回收利用的，而大部分则作为固体废物进入自然环境。

我国城市生活垃圾采用集中清运、郊区处理的方式来进行管理。城市中产生的生活垃圾绝大部分都被集中清运和处理了，但也有少部分仍散落在城市的各个角落。现行的生活垃圾统计资料主要是来源于城市生活垃圾的清运量统计结果。

我国城市生活垃圾的清运量在不断增长。改革开放初期，1979年全国生活垃圾的清运量只有2508万吨，到1995年已经突破1亿吨，达到了10671万吨；到2005年，则超过了1.5亿吨，增长了6.6倍，年均增长率大约在10%（表1-1）。

表 1-1 全国城市生活垃圾清运量

| 年份      | 1979 | 1981 | 1986 | 1990 | 1995  | 2000  | 2005  |
|---------|------|------|------|------|-------|-------|-------|
| 清运量（万吨） | 2508 | 2606 | 5009 | 6767 | 10671 | 11819 | 15578 |

资料来源：①国家统计局，中国统计年鉴[M]，北京：中国统计出版社，1985-2005；②国家统计局，中国城市统计年鉴[M]，北京：中国统计出版社，1995-2005。

## 2. 生活垃圾排放量影响因素分析

影响生活垃圾产生量的因素很多,一般可分为四类:第一类为内在因素,是指直接导致垃圾产生量、垃圾成分变化的因素。例如,在其他因素不变的情况下,人口增加,垃圾产生量必然增加;经济的发展和居民生活水平的提高使居民消费品数量与类别增加,相应的垃圾产生量增加和垃圾成分也在发生着变化。第二类为自然因素,主要是指地域(地理位置和气候等)和季节因素。例如夏天瓜果大量上市,产生大量的易腐烂有机垃圾。第三类为个体因素,主要是指人的个体行为习惯、生活方式和受教育程度等因素。第四类为社会因素,是指社会行为准则、道德规范、法律规章制度等<sup>①</sup>。其中,人口数量、居民生活水平和生活方式是最主要的影响因素。

### (1) 人口数量的影响

人只要生活,就会有一定数量的垃圾产生和排放。因此,人口数量的不断增长是导致垃圾排放量不断增加的首要影响因素。

新中国建立初期,1950年我国总人口只有55196万人,到改革开放初期,1980年全国人口增长到98705万人,到2005年,全国人口达到了130756万人(表1-2)。因此,即使人均垃圾排放量不增长,垃圾的产生量及排放总量也会有增无减。

### (2) 居民生活水平的影响

事实上,垃圾的排放量与人均生活水平密切相关。生活水平的提高,伴随着生活用品消费的不断增长,垃圾的产生量也

<sup>①</sup> 何德文,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.



表 1-2 中国人口及城镇化率

| 年份   | 总人口 (万人) | 城镇人口 (万人) | 城市化率 (%) |
|------|----------|-----------|----------|
| 1950 | 55196    | 6169      | 11.2     |
| 1955 | 61465    | 8249      | 13.7     |
| 1960 | 66207    | 13073     | 19.7     |
| 1965 | 72538    | 13045     | 18.0     |
| 1970 | 82992    | 14424     | 17.4     |
| 1975 | 92420    | 16030     | 17.3     |
| 1980 | 98705    | 19140     | 19.4     |
| 1985 | 104532   | 38244     | 36.6     |
| 1990 | 114333   | 30195     | 26.4     |
| 1995 | 121121   | 35174     | 29.0     |
| 2000 | 126743   | 45906     | 36.2     |
| 2005 | 130756   | 56212     | 43.0     |

资料来源：①国家统计局. 中国统计年鉴 1990 [M]. 北京：中国统计出版社，1990；②国家统计局. 中国统计年鉴 2008 [M]. 北京：中国统计出版社，2008.

会不断增长<sup>①</sup>。上海市的研究表明，人居可支配收入与人均垃圾产生量有着密切的关系（表 1-3）。

改革开放以来，我国的社会经济得到了迅猛的发展，人民生活水平日益提高。城镇居民家庭人均可支配收入从 1978 年的 343.4 元，增长到 2007 年的 13785.8 元，30 年间增长了近 40 倍；农村居民家庭人均纯收入从 133.6 元增长到 4140.4 元，增长了近 30 倍（表 1-4）。

<sup>①</sup> 向盛斌. 城市居民生活垃圾影响因素分析及产量预测 [J]. 环境卫生工程, 1998, 6 (1): 7-12.



表 1-3 上海市人均可支配收入与城市生活垃圾人均产生量

| 年份                      | 1990   | 1991   | 1992   | 1993   | 1994   | 1995   | 1996   | 1997   |
|-------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 人均<br>可支配收入<br>(元/人·年)  | 2050.2 | 2334.4 | 2842.1 | 4057.4 | 5566.1 | 6822.2 | 7721.4 | 8438.9 |
| 人均<br>垃圾产生量<br>(公斤/人·日) | 0.487  | 0.515  | 0.519  | 0.484  | 0.48   | 0.533  | 0.596  | 0.61   |

资料来源：何晶晶，等. 城市固体废物管理 [M]. 北京：科学出版社，2003：66-67.

表 1-4 城乡居民收入

| 年份   | 城镇居民家庭人均可支配收入 |               | 农村居民家庭人均纯收入 |               |
|------|---------------|---------------|-------------|---------------|
|      | 绝对数 (元)       | 指数 (1978=100) | 绝对数 (元)     | 指数 (1978=100) |
| 1978 | 343.4         | 100           | 133.6       | 100           |
| 1980 | 477.6         | 127           | 191.3       | 139           |
| 1985 | 739.1         | 160.4         | 397.6       | 268.9         |
| 1990 | 1510.2        | 198.1         | 686.3       | 311.2         |
| 1995 | 4283          | 290.3         | 1577.7      | 383.6         |
| 2000 | 6280          | 383.7         | 2253.4      | 483.4         |
| 2005 | 10493         | 607.4         | 3254.9      | 624.5         |
| 2007 | 13785.8       | 752.3         | 4140.4      | 734.4         |

资料来源：国家统计局. 中国统计年鉴 2008 [M]. 北京：中国统计出版社，2008.

人均可支配收入的增加，使全国城市人均垃圾产生量不断增长。表 1-5 列举了我国 1981 年~2005 年城市人均垃圾产量。从表 1-5 中可以看出，我国城市人均垃圾产生量已经由 1981 年的 0.50 公斤/人·天，增长到 2005 年的 1.59 公斤/人·天，



25 年间增长了 2.18 倍。

表 1-5 全国人居生活垃圾产生量

| 年份                  | 1981 | 1986 | 1990 | 1995 | 2000 | 2005 |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|
| 人均垃圾产生量<br>(公斤/人·天) | 0.5  | 1.12 | 1.26 | 1.58 | 1.55 | 1.59 |

资料来源：①国家统计局，中国统计年鉴 [M]，北京：中国统计出版社，1985-2005；②国家统计局，中国城市统计年鉴 [M]，北京：中国统计出版社，1995-2005。

### (3) 居民生活方式的影响

生活方式可以归纳为燃料结构、饮食结构和消费用品结构。

我国是以煤为主要燃料的国家，一次能源的 75% 是煤炭。煤炭不仅广泛用于工业生产，同时也是城市居民家庭燃料的重要组成部分。因此，在日常生活中会产生大量的煤渣。煤渣的产生量北方大于南方，平房数量多的城市大于楼房数量多的城市。

我国居民的饮食结构以热食为主。食物品种繁多多样。随着人民生活水平的不断提高，厨余垃圾的产生量不断增加，这已经成为生活垃圾的一个主要组成部分。

改革开放以来，我国城市居民的消费用品结构也发生了巨大的变化，一次性用品消费数量迅速增长，日常耐用消费品的更新速度也很快，再加上商品的过度包装，使得生活垃圾的产生量不断增长，垃圾成分也发生了巨大的变化。

## (二) 垃圾排放造成的主要问题

城市生活垃圾的排放主要产生三大类问题：一是环境污



染；二是占用土地资源；三是浪费资源。而环境污染则是首要问题。

### 1. 环境污染

我国城市生活垃圾处理起步于 20 世纪 80 年代初期。生活垃圾开始由分散填坑、填沟、堆放向集中处置发展，各城市相继建设了一批生活垃圾集中堆放场，从而改变了生活垃圾随意堆放的状况。在 1990 年前，全国城市垃圾处理率不足 2%。20 世纪 90 年代后，城市生活垃圾处理水平不断提高，但是，生活垃圾的处理并没有全部达到无害化的要求<sup>①</sup>。

2000~2005 年全国 661 个城市的统计表明，全国生活垃圾清运量不断增长，而生活垃圾的无害化处理率却只有 50%~60%（表 1-6）。

表 1-6 全国生活垃圾清运及无害化处理率

| 年份   | 城市个数 (个) | 生活垃圾清运量 (万吨) | 生活垃圾无害化处理率 (%) |
|------|----------|--------------|----------------|
| 2000 | 663      | 11819        | 61.4           |
| 2001 | 662      | 13470        | 58.2           |
| 2002 | 660      | 13650        | 54.2           |
| 2003 | 660      | 14857        | 50.8           |
| 2004 | 661      | 15509        | 52.1           |
| 2005 | 661      | 15578        | 51.7           |

资料来源：国际统计局. 中国统计年鉴 [M]. 北京：中国统计出版社，2001-2006.

① 张益，等. 我国城市生活垃圾处理现状评估及无害化处理率分析[EB/OL]. [http://www.geoenv.cn/lrm\\_article/72/3229.html](http://www.geoenv.cn/lrm_article/72/3229.html).





由于大量的生活垃圾未得到及时有效的处理,因此,造成了严重的大气污染、水体污染、土壤污染和景观环境污染。

### (1) 大气污染

大气污染主要是由生活垃圾中有机污染物分解出来的甲烷、氨气、恶臭性气体和汞蒸汽等所造成的。其中最严重的是恶臭性气体污染和汞蒸汽污染。

恶臭是一种常见的环境污染物。由于城市生活垃圾的集中堆存,导致了各类恶臭物质的集中排放,因其产生量大、持续时间长、影响范围广,已成为城市垃圾处理场周边居民反映越来越强烈的环境问题<sup>①</sup>。

汞是常温下唯一呈液态的重金属元素,同时具有较高的蒸汽压,容易进行远距离传输,它对环境及人体健康极具危害性。因此,汞污染受到了人们的广泛关注和重视。世界许多国家的垃圾填埋场都存在着汞污染的问题。美国哈佛大学研究人员的试验证明,在填埋场区上空汞含量是背景值的10~15倍<sup>②</sup>。

随着我国电子类产品消费量的日益提高,生活中产生的含汞废弃物也越来越多。生活垃圾中常见的含汞物质包括废旧的灯管、电池和电器设备等。由于相应的回收机制和机构还不完善,很多含汞废物被作为生活垃圾处理(填埋或焚烧),绝大部分汞在处理过程中释放到环境中,这造成了汞及其化合物(单甲基汞与二甲基汞等)对环境的二次污染<sup>③</sup>。

① 严方,等.城市生活垃圾填埋场恶臭污染及卫生防护距离的探讨[J].科技创业月刊,2008(4):135-137.

② 朱兰保,等.我国城市生活垃圾处理现状及其对策[J].环境卫生工程,2006,14(3):35-39.

③ 汤顺林,等.城市生活垃圾填埋场释放汞的形态初步研究[J].地球与环境,2004,32(4):6-11.