

# 2017 年深圳杯数学建模竞赛

## ——深圳市垃圾处理成本核算方法与应用

姓名：谭植耀

学校专业：西南财经大学 15 级经济数学学院金融数学实验班

学号：41534045

联系方式：18223777155

电子邮箱：[403899237@qq.com](mailto:403899237@qq.com)

姓名：于坤

学校专业：西南财经大学 15 级经济数学学院金融数学

学号：41534052

联系方式：17780639526

电子邮箱：[763643483@qq.com](mailto:763643483@qq.com)

姓名：伍秋晓

学校专业：西南财经大学 15 级保险学院保险学

学号：41523032

联系方式：15108231045

电子邮箱：[416482386@qq.com](mailto:416482386@qq.com)

## 摘要

本文根据深圳市现有生活垃圾的处理模式，建立深圳市生活垃圾社会成本全面核算模型，并以此为基础预测深圳市未来几年的垃圾清运量以及处理成本，最终根据所得结果为深圳市政府提出可行性建议。

对于问题一，我们在附件一附件二基础之上，在分析筛选后选取土地成本、基建成本、运输车成本、垃圾分类费、垃圾收集费、垃圾运输费、垃圾处理费、其他社会成本等核算指标。利用分类成本核算方法，对附件一中四种模式进行改良完善，建立出深圳市城市垃圾清除处理成本全面核算模型。

对于问题二，首先，我们阅读大量文献，经过相关性分析，将深圳市 GDP、常住人口、第三产业产值、建成区绿化覆盖面积四个指标作为影响深圳市垃圾清运量的主要因素。随后，将该组指标数据与垃圾清运量数据进行多元线性回归，拟合得出垃圾清运量  $y$  与该组指标回归方程为： $y = -201.811 - 10.899\sqrt{x_1} + 0.531x_2 + 14.239\sqrt{x_3} + 0.0122x_4 - 1.9495 \times 10^{-7}x_4^2$ 。其次，我们作出该组指标的时间序列曲线，并使用线性回归预测未来垃圾清运量。在之后的年里，我们以无害化 100%进行计算，根据未来清运量预测值，估算出垃圾的填埋量和焚烧量以及物理组成成分。最后，根据问题一所建模型，我们将附件一的四个模式代入其中，根据所收集的数据得出当期及未来十年的社会垃圾清运所需总成本数量，并计算各分项成本所占比例，最后分析不同模式下成本所占比例趋势。

对于问题三，由垃圾处理的成本收益分析，我们计算出每种处理方式的成本与收益，并建立规划模型，找出在成本一定的情况下，最优收益的情况。根据所得结果提出垃圾分类的方法，我们认为垃圾最优的分类方法为家庭粗分类，社区细分类，家庭分类最优程度由宣传教育效果系数与社区分类收益系数决定。最后由成本效益的结果，我们提出一下建议：①政府应减少对焚烧处理厂的依赖。②加大垃圾生物处理的程度，积极采取措施促进源头分类。③政府加大物业管理的建设，使物业管理在社区回收垃圾的过程中发挥作用。④政府加大新技术的开发，寻找新型的环保的垃圾处理方式。⑤政府可将家庭垃圾回收率和再利用率，各种处理方式的垃圾量，干湿垃圾量，城市环保系统的工作人员、垃圾车、中转站，城市各个垃圾处理厂的基本情况，包括人员、设施处理、规模后期处理等计入其中。

关键词：分类汇总模型 多元回归 成本收益分析

## 一、问题的重述

2017年3月18日，国务院向全国发布了《生活垃圾分类制度实施方案》，这标志着中国垃圾分类制度建设开始了一个全新阶段，垃圾分类已成为推进社会经济绿色发展、提升城市管理和服务水平、优化人居环境的重要举措。为了保证这一目标能够顺利实现，必须对城市生活垃圾分类处理（包括但不限于分类投放、分类收集、分类运输、分类处理）的全过程总成本，进行科学计算及动态监测。科学计算垃圾处理总成本的能力，直接反映了城市管理、社会治理水平的高低，目前我国在这方面的欠缺较大。2017年3月22日中国人民大学国家发展与战略研究院公布了《北京市城市生活垃圾焚烧社会成本评估报告》，虽然各方面对该报告有一些不同的意见和观点，但对于生活垃圾处理社会总成本（应包括直接的业务、经济技术成本以及间接的当下和远期社会成本）的分析估算，确实是一次有意义的探索实践。

请收集相关资料、参考附件材料，完成下述工作：

1. 建立深圳市城市垃圾处理社会总成本分析模型；
2. 基于你的模型，完善附件1中提及的深圳市生活垃圾处理诸模式的直接成本估算方法，并估算各模式的当期社会总成本以及未来十年的总成本数量、及诸模式下各分项成本比例的变化趋势；
3. 基于你的模型，通过远期成本效益分析设计深圳生活垃圾分类制度建设的优选模式，并根据你的模型和分析结果给政府提出相应的决策建议（包括对深圳生活垃圾基础数据调查统计内容的评价和改进建议）。

## 二、问题的分析

### 2.1 问题一的分析

问题一要求对附件一中四种模型进行改良完善，建立深圳市城市垃圾清除处理成本全面核算模型。我们认为，垃圾清除的社会总成本是处理垃圾所消耗的资源以及其他社会成本之和。根据附件一附件二及成本核算相关项目，我们认为，生活垃圾处理成本可分为三部分：一是固定成本，即成本总额在一定时期和一定业务量范围内，不受业务量增减变动影响而能保持不变的成分；二是可变成本，即在总成本中随产量的变化而变动的成本项目；三是废弃物排入环境中造成的公众健康损失、生产成本、材料损伤、生态成本等。

综合考虑现实因素，在核算一些指标时将采用理想化假设。

我们将采用分类成本核算方法，对各指标所需费用进行分类汇总，建立城市垃圾清除处理成本全面核算模型。

### 2.2 问题二的分析

问题二要求在问题一模型的基础上，预测各模式的当期社会总成本以及未来十年的总成本数量。因此，该问题要求我们建立生活垃圾清运量相关模型，并据此模型预测未来10年垃圾清运量及相关指标数据。

由于垃圾清理相关的指标多种多样，范围较为广泛。因此，我们首先需要通

过大量的经济、社科类文献阅读以及深圳市生活垃圾相关历史数据，分析得出生活垃圾清运量的影响因素，确定一组可能与垃圾清运量相关的指标，并收集该组指标时间序列数据，计算各个指标与垃圾清运量数据的相关系数，筛选出一组相关度最高的指标。随后，对该组指标数据与垃圾清运量数据进行多元线性回归分析，拟合得出回归方程。最后通过该组指标的时间序列拟合方程与回归方程计算未来垃圾清运量，为后续计算总成本打下基础。

对垃圾处理量各分项相关数据（如无害化处理量、焚烧处理量）等的预测，我们首先收集整理该指标的时间序列数据，采取平均法，通过该因素占垃圾清运量比例及未来垃圾清运量预测值，来计算该分项指标未来预测值。

在上述工作完成后，我们可以通过大量文献、统计年鉴等资料，收集模型所需各类数据；再者，在问题一所建模型基础上根据四种模式分别核算四种不同的垃圾清除成本；最后，将各类数据分别代入四种模型，计算出各模式所需总成本及各分项成本比例，并描绘出分项成本比例变化趋势。

2.3 问题三的分析

问题三要求我们在所建模型基础上，通过远期成本效益分析，设计深圳生活垃圾分类制度建设的优选模式，并根据模型和分析结果给政府提出相应的决策建议。因此，该问题要求我们建立一成本-收益最大化垃圾分类处理制度建设模式，并提出有针对性的决策建议。

我们通过研究发现，不同垃圾处理方式，所需的成本及收益均不同。经过全面分析后我们得出各种处理方式的成本与收益，并以 2025 年作为远期建立成本一定下，收益最大化的规划模型，并描绘出最大收益值随成本变化的曲线，得出最大收益点与对应成本值。根据处理方式我们来设计分类方法。

三、模型的假设

- 1. 垃圾处理设施能在预测年限内能良好运行。
- 2. 不考虑其他客观因素如天气、断电产生的影响。
- 3. 不考虑未来的通货膨胀。

四、符号的说明

| 序号 | 符号       | 符号说明     | 序号 | 符号       | 符号说明           |
|----|----------|----------|----|----------|----------------|
| 1  | C        | 总成本      | 31 | $X_2$    | 当年垃圾焚烧量        |
| 2  | $V_1$    | 固定成本     | 32 | $X_3$    | 当年垃圾生物处理量      |
| 3  | $V_2$    | 可变成本     | 33 | $\rho$   | 垃圾密度           |
| 4  | $V_3$    | 社会成本     | 34 | b        | 生物处理厂日单位重量处理面积 |
| 5  | $C_1$    | 土地成本     | 35 | h        | 填埋场平均垃圾高度      |
| 6  | $C_{11}$ | 转运站土地费用  | 36 | p        | 湿垃圾所占比重        |
| 7  | $C_{12}$ | 填埋场土地费用  | 37 | q        | 干垃圾所占比重        |
| 8  | $C_{13}$ | 生物处理厂土地费 | 38 | $P_{11}$ | 转运站所用土地年平均价    |

|    |                 |             |    |                  |                   |
|----|-----------------|-------------|----|------------------|-------------------|
|    |                 |             |    |                  | 格                 |
| 9  | C <sub>2</sub>  | 基建成本        | 39 | S <sub>11</sub>  | 转运站的平均占地面积        |
| 10 | C <sub>21</sub> | 转运站基建费用     | 40 | N <sub>1</sub>   | 转运站的数量            |
| 11 | C <sub>22</sub> | 填埋场基建费用     | 41 | P <sub>12</sub>  | 填埋场用地年平均价格        |
| 12 | C <sub>3</sub>  | 运输车购买费用     | 42 | P <sub>21</sub>  | 转运站的年平均基建费用       |
| 13 | C <sub>4</sub>  | 收集成本        | 43 | P <sub>22</sub>  | 填埋场的单位投资规模价格      |
| 14 | C <sub>41</sub> | 公用垃圾桶费用     | 44 | P <sub>3</sub>   | 垃圾运输车的年平均价格       |
| 15 | C <sub>42</sub> | 环卫工人工资      | 45 | N <sub>3</sub>   | 垃圾运输车的数量          |
| 16 | C <sub>5</sub>  | 分类成本        | 46 | P <sub>41</sub>  | 公用垃圾桶的价格          |
| 17 | C <sub>51</sub> | 垃圾分离（干、湿）费用 | 47 | N <sub>41</sub>  | 公用垃圾桶个数           |
| 18 | C <sub>52</sub> | 政府鼓励分类补贴    | 48 | P <sub>42</sub>  | 环卫工人的平均年工资        |
| 19 | C <sub>6</sub>  | 转运成本        | 49 | N <sub>42</sub>  | 环卫工人数量            |
| 20 | C <sub>61</sub> | 中转站维护费用     | 50 | P <sub>511</sub> | 湿垃圾的源头分类单位补贴费用    |
| 21 | C <sub>62</sub> | 运输费用        | 51 | P <sub>512</sub> | 湿垃圾末端分类单位处理费用     |
| 22 | C <sub>7</sub>  | 处理成本        | 52 | P <sub>61</sub>  | 转运站平均年维护费用        |
| 23 | C <sub>71</sub> | 填埋处理费用      | 53 | P <sub>621</sub> | 市区到填埋场的平均单位运费     |
| 24 | C <sub>72</sub> | 焚烧处理费用      | 54 | P <sub>622</sub> | 市区到焚烧厂的平均单位运费     |
| 25 | C <sub>73</sub> | 生物处理费用      | 55 | P <sub>623</sub> | 市区到生物质处理厂的平均单位运费  |
| 26 | C <sub>74</sub> | 政府补贴        | 56 | P <sub>71</sub>  | 填埋的单位运行价格         |
| 27 | C <sub>8</sub>  | 焚烧产生的污染     | 57 | P <sub>72</sub>  | 焚烧的单位运行价格         |
| 28 | C <sub>9</sub>  | 填埋产生的污染     | 58 | P <sub>73</sub>  | 生物处理的单位运行价格       |
| 29 | X               | 当年垃圾清运量     | 59 | P <sub>74</sub>  | 垃圾处理过程中政府单位各项补贴之和 |
| 30 | X <sub>1</sub>  | 当年垃圾填埋量     | 60 | P <sub>8</sub>   | 二噁英造成的单位健康损失      |

## 五、模型的建立与求解

### 5.1 问题一模型的建立与求解

Step1: 了解垃圾清除处理流程, 选取与垃圾回收处理费用相关指标, 目的能够真实反映深圳市生活垃圾处理成本相关情况;

Step2: 按照指标体系构建原则, 对现有指标进行筛选, 剩余三种不同类型指标。目的突出研究重点, 贴合实际情况;

Step3: 利用分类成本核算方法, 将总成本分为固定成本、可变成本、其他社会成本, 建立常态下垃圾清除处理成本全面核算模型。

5.1.1 核算指标选取

首先, 我们阅读大量相关文献, 将垃圾清除处理流程整理如下图 5-1-1 所示:

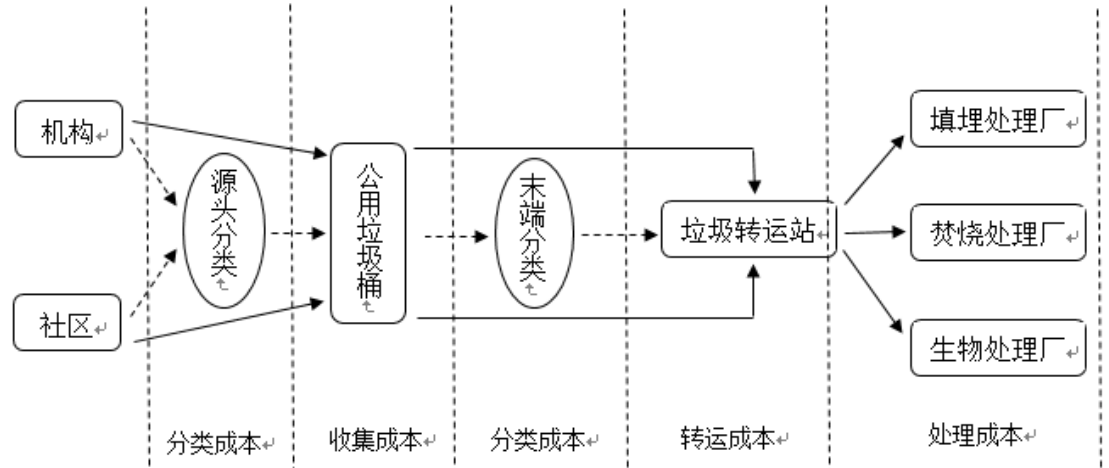


图 5-1-1 垃圾清除处理流程图

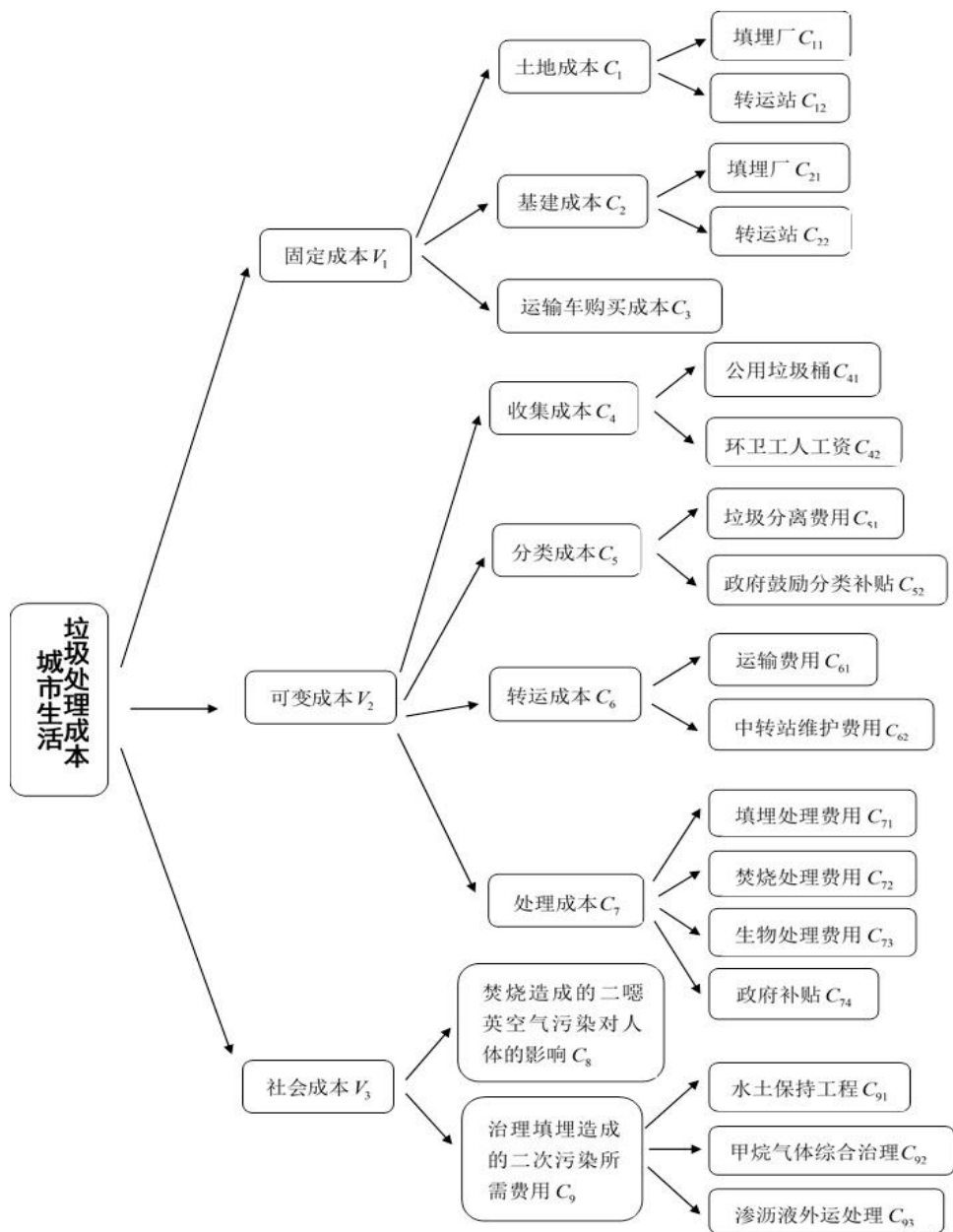
对于一些数据的核算方式, 结合现实因素我们认为:

1. 各个垃圾处理设施的运输距离为至市区的平均运距, 包括运输至转运站的距离。
2. 固定成本的年平均成本为建造（购买）价格与使用年限的比值。
3. 各种处理方式的处理费用中包含一切资源消耗如人力资源、能源（水电气）消耗以及处理废物的成本等。
4. 焚烧厂等垃圾处理企业将获得的所有资金都用于处理垃圾。
5. 垃圾焚烧厂采用 BOT 方式建设, 初期政府投资成本视为 0, 全过程成本在处理成本中反映。

首先, 我们将生活垃圾处理成本  $C$  分为三部分:

1. 固定成本  $V_1$  , 即成本总额在一定时期和一定业务量范围内, 不受业务量增减变动影响而能保持不变的, 包括土地成本、基建成本、运输车成本。
2. 运行成本  $V_2$  , 即在总成本中随产量的变化而变动的成本项目, 包括收集成本、分类成本、转运成本、处理成本。
3. 社会成本  $V_3$  , 即废弃物排入环境中造成的公众健康损失、生产成本、材料损伤、生态成本等。如焚烧治理造成的二噁英空气污染、填埋治理造成的二次污染等。

具体分类如图 5-1-2 所示：



### 5.1.2 核算模型建立

我们根据以上分类建立深圳市城市垃圾清除处理成本全面核算模型。计算公式为：

$$\begin{cases} C = V_1 + V_2 + V_3 \\ V_1 = C_1 + C_2 + C_3 = C_{11} + C_{12} + C_{21} + C_{22} + C_3 \\ V_2 = C_4 + C_5 + C_6 + C_7 = C_{41} + C_{42} + C_{51} + C_{52} + C_{61} + C_{62} + C_{71} + C_{72} + C_{73} \\ V_3 = C_8 + C_9 = C_8 + C_{91} + C_{92} + C_{93} \end{cases}$$

其次，我们对公式进行进一步展开及核算。方法如表 5-1-2 所示。

表 5-1-2 生活垃圾焚烧社会成本核算方法

| 类别   | 项目          | 具体项目                          | 公式  |
|------|-------------|-------------------------------|---|
| 固定成本 | 土地成本        | 填埋厂                           | $C_{11} = P_{11} \times S_{11} \times N_1$                        |
|      |             | 转运站                           | $C_{12} = (P_{12} \times X_1) / (\rho \cdot h)$                   |
|      |             | 生物处理厂                         | $C_{13} = P_{13} \times p \times X \times b / 300$                |
|      | 基建成本        | 填埋厂                           | $C_{21} = P_{21} \times N_1$                                      |
|      |             | 转运站                           | $C_{22} = (P_{22} \times X_1) / \rho$                             |
|      |             | 运输车购买成本                       | $C_3 = P_3 \times N_3$  |
| 可变成本 | 收集成本        | 公用垃圾桶                         | $C_{41} = P_{41} \times N_{41}$                                   |
|      | 分类成本        | 环卫工人工资                        | $C_{42} = P_{42} \times N_{42}$                                   |
|      |             | 垃圾分离费用                        | $C_{51} = P_{511} \times p \times X + P_{512} \times X$           |
|      |             | 政府鼓励分类补贴                      | $C_{52}$  |
|      | 转运成本        | 中转站维护费用                       | $C_{61} = P_{61} \times N_1$                                      |
|      |             | 运输费用                          | $C_{62} = \sum X_1 P_{621} + \sum X_2 P_{622} + \sum X_3 P_{623}$ |
|      | 处理成本        | 填埋处理费用                        | $C_{71} = P_{71} \times X_1$                                      |
|      |             | 焚烧处理费用                        | $C_{72} = P_{72} \times X_2$                                      |
|      |             | 生物处理费用                        | $C_{73} = P_{73} \times X_3$                                      |
|      |             | 政府补贴                          | $C_{74} = P_{74} \times X_2$                                      |
| 社会成本 | 焚烧治理造成的空气污染 | 二噁英空气污染对人体损害                  | $C_8 = P_8 \times X_2$  |
|      | 填埋治理造成的二次污染 | 水土保持工程<br>甲烷气体综合治理<br>渗沥液外运处理 | $C_9 = C_{91} + C_{92} + C_{93}$                                  |

说明： $P_{74}$  中的政府各项补贴费用通常包括焚烧厂的电价补贴、渗沥液补贴、底灰处理补贴、飞灰处理补贴以及清洁生产补贴等其他补贴，视深圳市实际情况决定。对于垃圾处理过程中产生的其他社会成本（外部性），仅在模型中作为参考值，考虑中国实际情况在实际成本核算中可忽略。 $C_9$  中的各项填埋二次污染治理成本，计入填埋处理成本中核算。



## 5.2 问题二模型的建立与求解

问题二要求估算各模式的当期社会总成本以及未来十年的总成本数量、及诸模式下各分项成本比例的变化趋势。考虑到生活垃圾处理总成本与垃圾清运总量以及垃圾清运量各分项数量情况密切相关，我们的工作主要分为以下两大方面：

（1）确定当期以及未来十年的垃圾清运总量的相关因素以及各分项垃圾清运量占比，该工作涉及下述五个步骤：

Step1：大量阅读、收集资料，将可能对垃圾清运量产生影响的因素及其数据列表；

Step2：考虑通货膨胀带来的物价上涨，对各因素进行购买力评价调整；

Step3：用 matlab 软件计算各个变量与垃圾清运量之间的相关系数，验证猜想时列出的变量是否与垃圾清运量有关，筛选出相关系数大于 0.9 的指标；

Step4：通过 matlab 进行多元线性回归检验，得出回归方程；并作出实际值与估计值拟合图像，对模型进行检验。

Step5：作出与垃圾清运量相关系数高的指标的时间序列拟合曲线，得出拟合方程，并据此预测 10 年内垃圾清运量及相关指标的值。

Step6：使用归纳法对无害化处理率进行预测，使用移动平均法对垃圾焚烧量与填埋量、干湿垃圾比例进行预测。

（2）基于上一部分预测结果，带入具体数值计算不同模式下总成本以及各分项成本比例。我们认为估算各模式的总成本为各模式均完全实行时的总成本且源头分类与末端分类都能将干湿垃圾完全分离，且各费用在近期与远期中不发生改变（不考虑通货膨胀）。因此，该工作从以下三个步骤进行：

Step1：大量阅读文献、统计年鉴等资料，收集模型所需各类数据。

Step2：在问题一所建模型和垃圾清运总量及其分项预测基础上根据四种模式分别核算四种不同的垃圾清除成本模型。

Step3：将各类数据分别代入四种模型，计算出各模式所需总成本及各分项成本比例，并描绘出分项成本比例变化趋势。

### 5.2.1 对城市生活垃圾清运量影响因素的研究

#### （1）将可能对垃圾清运量产生影响的因素列表

经过资料搜集及统计数据整理，我们将可能对垃圾清运量产生影响的因素及其数据列表，如表 5-2-1 所示：

表 5-2-1 深圳市 2000-2015 年城市生活垃圾清运量及其影响因素统计表

| 年份   | 城市生活垃圾清运量<br>(万吨) | 本市生产总值<br>(GDP)<br>/亿元 | 年末全市常住人口/<br>万人 | 城市家庭年人均消费性支出<br>/元 | 社会消费品零售总额<br>/亿元 | 第三产业/<br>亿元 | 环保投资/<br>亿元 | 全社会固定资产投资<br>/亿元 | 人均公共绿地面积<br>/㎡ | 建成区绿化覆盖面积<br>/公顷 |
|------|-------------------|------------------------|-----------------|--------------------|------------------|-------------|-------------|------------------|----------------|------------------|
| 2000 | 201.9             | 2187.45                | 701.24          | 16306.68           | 735.02           | 1085.8      | 30.68       | 619.7            | 13.5           | 6140             |
| 2001 | 219               | 2482.49                | 724.57          | 17024.76           | 832.04           | 1236.68     | 42.86       | 686.37           | 13.8           | 6633.1           |
| 2002 | 221.1             | 2969.52                | 746.62          | 18925.92           | 941.94           | 1488.14     | 47.44       | 788.15           | 14.1           | 7579             |

|      |        |         |        |          |         |         |        |         |       |       |
|------|--------|---------|--------|----------|---------|---------|--------|---------|-------|-------|
| 2003 | 324.5  | 3585.72 | 778.27 | 19960.32 | 1095.13 | 1754.1  | 61.87  | 949.1   | 15.1  | 22291 |
| 2004 | 346.97 | 4282.14 | 800.8  | 19569.6  | 1250.64 | 2058.58 | 79.5   | 1092.56 | 16.01 | 23220 |
| 2005 | 332.9  | 4950.91 | 827.75 | 15911.88 | 1441.61 | 2298.64 | 115.7  | 1181.05 | 16.1  | 32086 |
| 2006 | 359.53 | 5813.56 | 871.1  | 16628.16 | 1680.46 | 2746.51 | 156.6  | 1273.67 | 16.1  | 32395 |
| 2007 | 406.98 | 6801.57 | 912.37 | 18474.49 | 1930.81 | 3378.06 | 193.5  | 1345    | 16.1  | 34380 |
| 2008 | 440.69 | 7786.79 | 954.28 | 19779.09 | 2276.59 | 3918.03 | 218.58 | 1467.6  | 16.2  | 35471 |
| 2009 | 475.96 | 8290.28 | 995.01 | 21526.1  | 2567.94 | 4457.13 | 237.84 | 1709.15 | 16.3  | 36609 |
| 2010 | 479.25 | 9773.3  | 1037.2 | 22806.6  | 3000.76 | 5246.33 | 272.96 | 1944.7  | 16.4  | 37384 |
| 2011 | 482    | 11515.9 | 1046.7 | 24080.04 | 3520.87 | 6170.2  | 298.65 | 2060.9  | 16.5  | 37918 |
| 2012 | 505.93 | 12974.5 | 1054.7 | 26727.72 | 4008.78 | 7240    | 350.31 | 21944.3 | 16.6  | 38906 |
| 2013 | 521.69 | 14572.7 | 1062.9 | 28812.48 | 4500.46 | 8280.11 | 393.46 | 23914.6 | 16.7  | 39267 |
| 2014 | 541.14 | 16001.8 | 1077.9 | 28852.8  | 4919    | 9184.22 | 432.05 | 27174.2 | 16.8  | 40123 |
| 2015 | 575    | 17502.9 | 1137.9 | 32359.2  | 5017.84 | 10288.3 | 472.58 | 32953.1 | 16.9  | 40590 |

资料来源：资料参考 2016 年深圳市统计年鉴，需要说明的是 2012~2015 年环保投资的数据不全，根据 2005 年~2011 年环保投资占 GDP 的比重平均在 2.7% 左右，故取 2012~2015 年的环保投资占 GDP 的比重为 2.7%。

## （2）购买力评价调整

考虑到通货膨胀带来的物价上涨，我们以 2000 年为基年对用金钱衡量的因素进行购买力平价调整，调整公式为调整值=实际值/居民消费价格总指数  $CPI(n)$ ，其中  $CPI(n)$  为从起始年至 2015 年每年  $CPI$  的乘积，调整后统计表如表 5-2-2 所示。

表 5-2-2 购买力平价调整后深圳市 2000-2015 年城市生活垃圾清运量及其影响因素统计表

| 年份   | 城市生活垃圾清运量<br>(万吨) | 本市生产总值<br>(GDP)/<br>亿元 | 年末全市常住人口/<br>万人 | 城市家庭年人均消费性支出<br>/元 | 社会消费品零售总额<br>/亿元 | 第三产业/亿元 | 环保投资/亿元 | 全社会固定资产投资/<br>亿元 | 人均公共绿地面积<br>/m <sup>2</sup> | 建成区绿化覆盖面积<br>/公顷 |
|------|-------------------|------------------------|-----------------|--------------------|------------------|---------|---------|------------------|-----------------------------|------------------|
| 2000 | 201.9             | 2187.45                | 701.24          | 16306.7            | 735.02           | 1085.8  | 30.68   | 619.7            | 13.5                        | 6140             |
| 2001 | 219               | 2538.33                | 724.57          | 17407.7            | 850.757          | 1264.5  | 43.8241 | 701.81           | 13.8                        | 6633.1           |
| 2002 | 221.1             | 3000.32                | 746.62          | 19122.2            | 951.708          | 1503.57 | 47.932  | 796.32           | 14.1                        | 7579             |
| 2003 | 324.5             | 3597.72                | 778.27          | 20027.1            | 1098.8           | 1759.97 | 62.0771 | 952.28           | 15.1                        | 22291            |
| 2004 | 346.97            | 4241.34                | 800.8           | 19383.1            | 1238.72          | 2038.96 | 78.7424 | 1082.2           | 16.01                       | 23219.8          |
| 2005 | 332.9             | 4826.51                | 827.75          | 15512.1            | 1405.39          | 2240.88 | 112.793 | 1151.4           | 16.1                        | 32086            |
| 2006 | 359.53            | 5545.48                | 871.1           | 15861.4            | 1602.97          | 2619.86 | 149.379 | 1214.9           | 16.1                        | 32395            |
| 2007 | 406.98            | 6232.4                 | 912.37          | 16928.5            | 1769.24          | 3095.38 | 177.308 | 1232.5           | 16.1                        | 34380            |

|      |        |         |         |         |         |         |         |        |      |         |
|------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|------|---------|
| 2008 | 440.69 | 6737.66 | 954.28  | 17114.2 | 1969.86 | 3390.14 | 189.13  | 1269.9 | 16.2 | 35471   |
| 2009 | 475.96 | 7267.79 | 995.01  | 18871.2 | 2251.22 | 3907.41 | 208.506 | 1498.4 | 16.3 | 36609.4 |
| 2010 | 479.25 | 8278.17 | 1037.2  | 19317.6 | 2541.7  | 4443.74 | 231.202 | 1647.2 | 16.4 | 37384   |
| 2011 | 482    | 9254.41 | 1046.74 | 19351.3 | 2829.45 | 4958.51 | 240.002 | 1656.2 | 16.5 | 37918   |
| 2012 | 505.93 | 10142.6 | 1054.74 | 20894   | 3133.8  | 5659.76 | 273.849 | 17155  | 16.6 | 38906   |
| 2013 | 521.69 | 11092.5 | 1062.89 | 21931.6 | 3425.67 | 6302.67 | 299.495 | 18203  | 16.7 | 39267   |
| 2014 | 541.14 | 11941.5 | 1077.89 | 21531.6 | 3670.84 | 6853.79 | 322.42  | 20279  | 16.8 | 40123   |
| 2015 | 575    | 12780.5 | 1137.87 | 23628.5 | 3663.99 | 7512.43 | 345.075 | 24062  | 16.9 | 40590   |

(3) 计算各变量与垃圾清运量间相关系数

为检验表 5-2 中所列因素垃圾清运量相关度，我们用 matlab 软件分别计算了各个变量与垃圾清运量之间的相关系数，具体情况如下表 5-2-3 所示：

表 5-2-3 各变量与垃圾清运量相关系数统计表

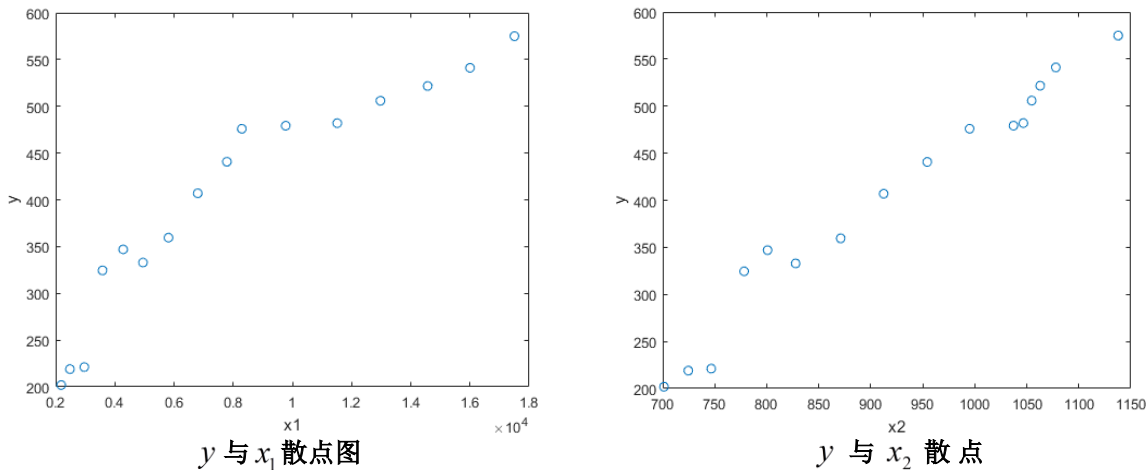
|          | 本市生产<br>总值<br>(GDP)/<br>亿元 | 年末<br>全市<br>常住<br>人口/<br>万人 | 城市家<br>庭年人<br>均消费<br>性支出/<br>元 | 社会消<br>费品零<br>售总额/<br>亿元 | 第三产<br>业/亿<br>元 | 环保投<br>资/亿<br>元 | 全社会<br>固定资<br>产投资<br>/亿元 | 人均公<br>共绿地<br>面积/<br>m² | 建成区<br>绿化覆<br>盖面积<br>/公顷 |
|----------|----------------------------|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|
| 相关<br>系数 | 0.9591                     | 0.9829                      | 0.6559                         | 0.9507                   | 0.9411          | 0.9691          | 0.6988                   | 0.9263                  | 0.9408                   |

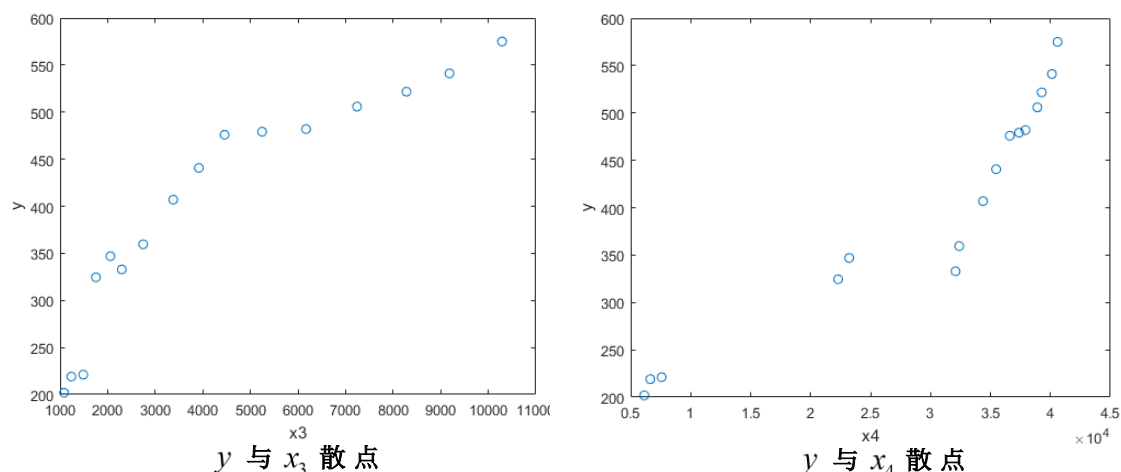
我们认为，相关系数大于 0.9 表示二者相关性显著。在相关性显著的因素中，通过计算发现社会消费品零售总额与GDP 比值稳定在 0.3 左右，故GDP 是社会消费品零售总额的充分统计量，在近 10 年的数据中我们发现环保投资与GDP 的比值稳定在 0.027 附近，人均绿地面积与人口的乘积与绿化覆盖面积的比值稳定在 0.45 附近，综合统计角度以及经济含义，我们认为本市生产总值(GDP)、年末全市常住人口、第三产业以及建成区绿化覆盖面积 4 个因素可以充分反映深圳市生活垃圾清运量的变化趋势。

(4) 构建回归方程

设本市生产总值(GDP)、年末全市常住人口、第三产业以及建成区绿化覆盖面积分别为 $x_1, x_2, x_3, x_4$ ，垃圾清运量为 $y$ 。

画出 $y$  分别与 $x_1, x_2, x_3, x_4$  的散点图如组图 5-2-4 所示：





组图 5-2-4 垃圾清运量与各指标散点图

通过观察认为  $y$  与  $\sqrt{x_1}$ 、 $x_2$ 、 $\sqrt{x_3}$ 、 $x_4^2$  相关性较强，运用 matlab 进行多元线性回归检验，得到回归方程：

$$y = -201.811 - 10.899\sqrt{x_1} + 0.531x_2 + 14.239\sqrt{x_3} + 0.0122x_4 - 1.9495 \times 10^{-7}x_4^2$$

置信区间为：

$$\begin{aligned} &(-429.5216, 25.8997) \\ &(-19.8457, -1.9313) \\ &(0.2217, 0.8404) \\ &(3.9380, 24.5399) \\ &(0.0077, 0.0167) \\ &(-0.0000, -0.0000) \end{aligned}$$

除常数项系数外其余系数均显著。

分析回归模型，得到  $R^2 = 0.9949$  表示因变量的 99.49% 可由模型确定， $F = 386.8551$  远远超过  $F$  检验的临界值， $p = 4.2 \times 10^{-11}$  远远小于  $\alpha$ ，因此回归模型整体显著。

从回归方程各个解释变量的系数可以看出，GDP 的增长与建成区绿化覆盖面积的增加会导致生活垃圾的清运量降低，而年末全市常住人口、第三产业的增加则会造成生活垃圾清运量的增加。这是因为城市 GDP 的增加，意味着整个城市消费水平的提高，比如增加净菜进城量和成品食品量等，使得垃圾减量。在《深圳市生态环境保护与建设“十五”规划》中，就已经明确提出：以净菜进城、材料回收和分类收集为基本手段，减少垃圾产生量。城市人口的增加，将导致社会垃圾清运量增加。第三产业的发展对生活垃圾产量所产生的影响是比较积极的，城市经济的快速增长，会刺激居民对物质产生更多的需求，从而使垃圾产量增加。而建成区绿化覆盖面积对垃圾增长的影响为先增加后减少，我们通过对以往数据的统计，发现在现今深圳市绿化覆盖面积下，新建绿化覆盖面积将导致垃圾清运量降低。

(5) 模型检验

我们利用多元线性回归模型对回归方程进行模拟，模拟结果如表 5-2-5 所示。

表 5-2-5 多元线性回归模型模拟结果

| 年份   | 城市生活垃圾<br>清运量/万吨 | 模拟值      | 残差       | 相对误差/% |
|------|------------------|----------|----------|--------|
| 2000 | 201.9            | 198.0295 | 3.8705   | 1.9545 |
| 2001 | 219              | 213.4855 | 5.5145   | 2.5831 |
| 2002 | 221.1            | 231.8299 | -10.7299 | 4.6284 |
| 2003 | 324.5            | 330.8193 | -6.3193  | 1.9102 |
| 2004 | 346.97           | 335.05   | 11.92    | 3.5577 |
| 2005 | 332.9            | 344.9193 | -12.0193 | 3.4847 |
| 2006 | 359.53           | 367.3038 | -7.7738  | 2.1164 |
| 2007 | 406.98           | 401.1699 | 5.8101   | 1.4483 |
| 2008 | 440.69           | 422.7277 | 17.9623  | 4.2491 |
| 2009 | 475.96           | 471.0089 | 4.9511   | 1.0512 |
| 2010 | 479.25           | 487.39   | -8.14    | 1.6701 |
| 2011 | 482              | 486.2298 | -4.2298  | 0.8699 |
| 2012 | 505.93           | 509.0259 | -3.0959  | 0.6082 |
| 2013 | 521.69           | 522.1935 | -0.5035  | 0.0964 |
| 2014 | 541.14           | 533.3103 | 7.8297   | 1.4681 |
| 2015 | 575              | 580.0466 | -5.0466  | 0.87   |

随后，我们通过 matlab 作出垃圾清运量真实值与估计值  $\hat{y}$  的拟合图像。如图 5-2-6 所示：

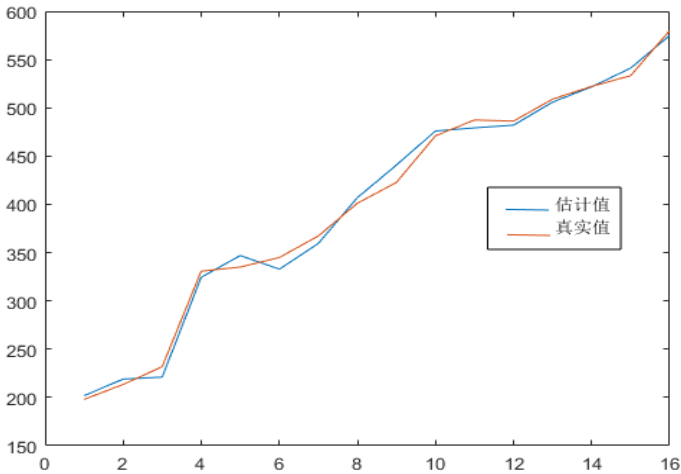


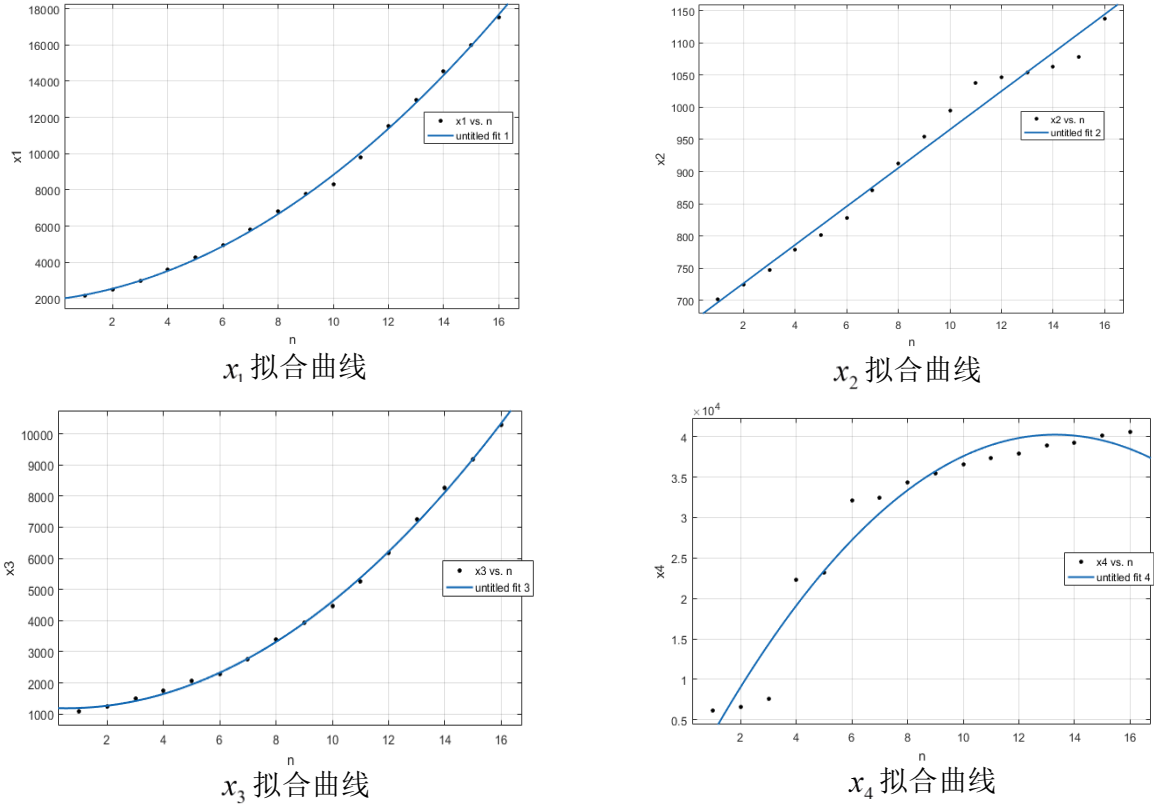
表 5-2-6 垃圾清运量真实值与估计值拟合图像

由此可见，真实值与估计值模型拟合程度较高。

### 5.2.2 深圳市生活垃圾相关数据的未来变化趋势预测

#### 5.2.2.1 垃圾清运量预测

假设 2000 年为第一年,运用 matlab curvefitting 工具箱画出  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$  的时间序列拟合曲线图如组图 5-2-7 所示:



组图 5-2-7  $x_1, x_2, x_3, x_4$  各自拟合曲线

其中  $x_4$  为建成区绿化覆盖面积,可以看出前五年  $x_4$  的值与后 10 年的值偏差较大,综合考虑现实因素认为前五年  $x_4$  的值对预测无实际意义,因此舍去前五年  $x_4$  的值重新拟合,如图 5-2-8 所示:

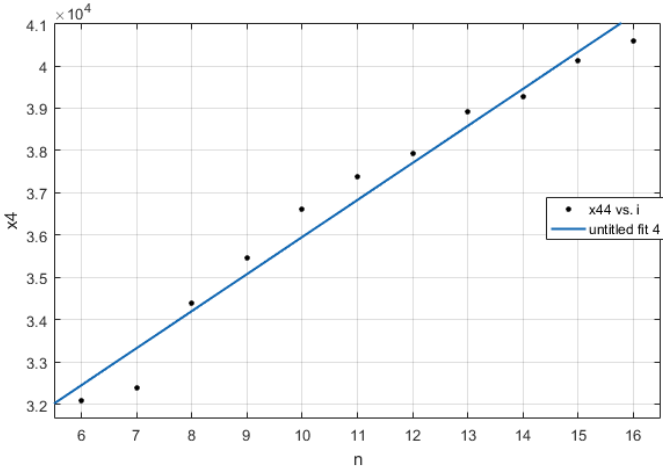


图 5-2-8  $x_4$  舍弃部分值后二次拟合曲线

观察图像发现  $x_1, x_2, x_3$  与修正后的  $x_4$  拟合程度均较好, 得到  $x_1, x_2, x_3, x_4$  的时间序列拟合曲线为:

$$\begin{cases} x_1 = 49.24n^2 + 193.4n + 1970 \\ x_2 = 29.84n + 666.9 \\ x_3 = 38.26n^2 - 40.64n + 1195 \\ x_4 = 875.2n + 27200 \end{cases}$$

据此预测  $x_1, x_2, x_3, x_4$  当期及未来 10 年的值为表 5-2-9 所示:

表 5-2-9  $x_1, x_2, x_3, x_4$  未来 10 年预测值

| 年份   | $x_1$    | $x_2$   | $x_3$    | $x_4$   |
|------|----------|---------|----------|---------|
| 2016 | 19488.16 | 1174.18 | 11561.26 | 42078.4 |
| 2017 | 21404.96 | 1204.02 | 12859.72 | 42953.6 |
| 2018 | 23420.24 | 1233.86 | 14234.7  | 43828.8 |
| 2019 | 25534    | 1263.7  | 15686.2  | 44704   |
| 2020 | 27746.24 | 1293.54 | 17214.22 | 45579.2 |
| 2021 | 30056.96 | 1323.38 | 18818.76 | 46454.4 |
| 2022 | 32466.16 | 1353.22 | 20499.82 | 47329.6 |
| 2023 | 34973.84 | 1383.06 | 22257.4  | 48204.8 |
| 2024 | 37580    | 1412.9  | 24091.5  | 49080   |
| 2025 | 40284.64 | 1442.74 | 26002.12 | 49955.2 |
| 2026 | 43087.76 | 1472.58 | 27989.26 | 50830.4 |

根据  $x_1, x_2, x_3, x_4$  的预测值以及  $y$  与  $x_1, x_2, x_3, x_4$  的回归方程, 得到垃圾清运量  $y$  的当期以及未来 10 年的预测值如表 5-2-10 所示:

表 5-2-10 垃圾清运量未来 10 年预测值

| 年份           | 2016     | 2017     | 2018     | 2019     | 2020     | 2021     |
|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 清运量 $y$ / 万吨 | 600.7364 | 623.4363 | 645.9758 | 668.3305 | 690.4815 | 712.4131 |
| 年份           | 2022     | 2023     | 2024     | 2025     | 2026     | 2027     |
| 清运量 $y$ / 万吨 | 734.113  | 755.5711 | 776.779  | 797.7298 | 818.4179 |          |

折线图如图 5-2-11 所示：

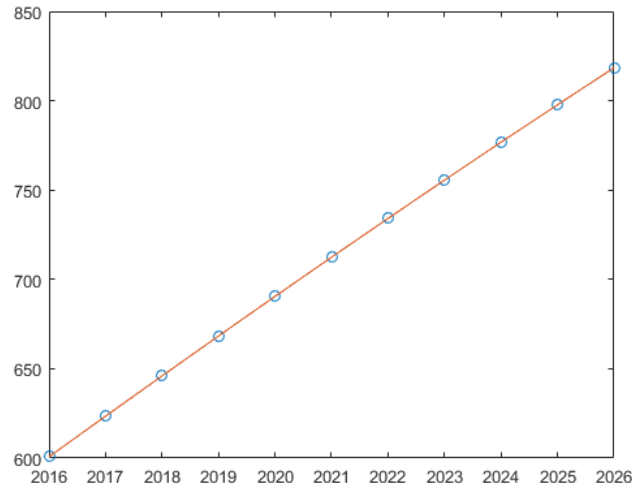


图 5-2-11 垃圾清运量未来 10 年预测值折线图

由图可知，垃圾清运量在未来 11 年中呈稳定线性增长趋势。

#### 5.2.2.2 生活垃圾相关数据预测

##### (1) 无害化处理率预测

通过查阅深圳市 2001-2016 年年鉴，我们将深圳市垃圾无害化处理率整理如下表 5-2-12 所示：

表 5-2-12 2001-2015 深圳市垃圾无害化处理率

| 年份       | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 无害化处理率/% | 55.7 | 58.3 | 69.2 | 81   | 90   | 93.7 | 94.1 | 100  |
| 年份       | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 |
| 无害化处理率/% | 94.3 | 94.6 | 95   | 95.1 | 98.4 | 100  | 100  | 100  |

由表可知，2014 年深圳市垃圾无害化处理率已达到 100%，且 2015、2016 年均无变化。因此，我们认为未来任意一年的无害化处理率都可达到 100%。

##### (2) 焚烧垃圾量 $x_1$ 与填埋量 $x_2$ 的预测

通过查阅深圳市 2001-2016 年年鉴，我们将近几年深圳市垃圾焚烧量与垃圾填埋量的统计表格整理如表 5-2-13 所示：

表 5-2-13 2001-2015 深圳市垃圾焚烧量与垃圾填埋量（万吨）

| 年份   | 垃圾清运量  | 焚烧处理量  | 焚烧处理量占清运量的比重 | 卫生填埋量  | 卫生填埋量占清运量的比重 |
|------|--------|--------|--------------|--------|--------------|
| 2015 | 575    | 269    | 0.47         | 306    | 0.53         |
| 2014 | 541.14 | 263    | 0.49         | 278    | 0.51         |
| 2013 | 521.69 | 255.34 | 0.49         | 257.78 | 0.49         |



由表可见，近几年焚烧量与填埋量占垃圾总清运量的比例相差不大，因此我们取焚烧量占清运量比的均值作为未来预测垃圾焚烧量的比例，填埋量做相同处理。

经计算，焚烧量平均占比为 0.49；填埋量平均占比为 0.51。

据此，我们根据未来十年垃圾清运量的预测得到未来十年焚烧量与填埋量，如表 5-14 所示：

表 5-2-14 2016-2026 年深圳市垃圾焚烧量与垃圾填埋量预测值（万吨）

| 年份   | 清运量      | 焚烧量        | 填埋量        |
|------|----------|------------|------------|
| 2016 | 600.7364 | 294.360836 | 306.375564 |
| 2017 | 623.4363 | 305.483787 | 317.952513 |
| 2018 | 645.9758 | 316.528142 | 329.447658 |
| 2019 | 668.3305 | 327.481945 | 340.848555 |
| 2020 | 690.4815 | 338.335935 | 352.145565 |
| 2021 | 712.4131 | 349.082419 | 363.330681 |
| 2022 | 734.113  | 359.71537  | 374.39763  |
| 2023 | 755.5711 | 370.229839 | 385.341261 |
| 2024 | 776.779  | 380.62171  | 396.15729  |
| 2025 | 797.7298 | 390.887602 | 406.842198 |
| 2026 | 818.4179 | 401.024771 | 417.393129 |

### （3）干垃圾与湿垃圾的比重 $q$ 、 $p$ 的预测

通过查阅附件 4-附件 9，我们将 2010-2015 年深圳市生活垃圾物理组成成分归纳整理，如表 5-2-15 所示：

表 5-2-15 2011-2015 年深圳市生活垃圾物理组成成分（%）

| 年份   | 厨余    | 纸类    | 橡塑    | 纺织   | 木竹   | 灰土   | 砖瓦   | 玻璃   | 金属   |
|------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|
| 2010 | 50.54 | 15.13 | 20.82 | 7.13 | 1.31 | 0.22 | 2.02 | 2.3  | 0.43 |
| 2011 | 53.10 | 17.1  | 19.91 | 3.43 | 3.21 | 0.00 | 1.09 | 1.68 | 0.35 |
| 2012 | 50.42 | 15.54 | 19.86 | 4.74 | 3.77 | 1.10 | 0.85 | 1.53 | 0.49 |
| 2013 | 56.35 | 14.08 | 15.05 | 8.94 | 0.92 | 0.03 | 1.64 | 2.31 | 0.57 |
| 2014 | 57.90 | 14.08 | 15.24 | 6.43 | 0.93 | 0.19 | 1.01 | 3.31 | 0.67 |
| 2015 | 58.12 | 13.3  | 15.4  | 7.12 | 0.95 | 0.17 | 1.43 | 2.33 | 0.77 |

厨余垃圾即为湿垃圾，其余为干垃圾，考虑到现实意义，我们采用最近三年厨余垃圾比重的平均值来作为未来湿垃圾的比重  $p$  和干垃圾的比重  $q$ 。

经过计算，得到  $p = 57.46\%$ ， $q = 42.44\%$ 。

综上所述，我们运用回归方法完成对垃圾清运量以及生活垃圾相关数据的预测，整理数据如表 5-2-16 所示：

表 5-2-16 2016-2026 年深圳市生活垃圾清运量及相关数据预测值（万吨）

| 年份   | 清运量 $y$  | 焚烧量 $X_2$  | 填埋量 $X_1$  | 湿垃圾量        | 干垃圾量        |
|------|----------|------------|------------|-------------|-------------|
| 2016 | 600.7364 | 294.360836 | 306.375564 | 345.1831354 | 254.9525282 |
| 2017 | 623.4363 | 305.483787 | 317.952513 | 358.226498  | 264.5863657 |
| 2018 | 645.9758 | 316.528142 | 329.447658 | 371.1776947 | 274.1521295 |
| 2019 | 668.3305 | 327.481945 | 340.848555 | 384.0227053 | 283.6394642 |
| 2020 | 690.4815 | 338.335935 | 352.145565 | 396.7506699 | 293.0403486 |
| 2021 | 712.4131 | 349.082419 | 363.330681 | 409.3525673 | 302.3481196 |
| 2022 | 734.113  | 359.71537  | 374.39763  | 421.8213298 | 311.5575572 |
| 2023 | 755.5711 | 370.229839 | 385.341261 | 434.1511541 | 320.6643748 |
| 2024 | 776.779  | 380.62171  | 396.15729  | 446.3372134 | 329.6650076 |
| 2025 | 797.7298 | 390.887602 | 406.842198 | 458.3755431 | 338.5565271 |
| 2026 | 818.4179 | 401.024771 | 417.393129 | 470.2629253 | 347.3365568 |

### 5.2.3 各模式下垃圾清理成本核算

首先，经过查阅深圳市相关统计资料，我们将相关数据整理如表 5-3-1 所示：

表 5-2-3-1 深圳市垃圾回收处理相关数据

| 相关数据                                | 数值  | 说明                               |
|-------------------------------------|-----|----------------------------------|
| 垃圾密度 $\rho$ （吨/立方米）                 | 0.8 |                                  |
| 填埋场垃圾平均高度 $h$ （米）                   | 20  |                                  |
| 生物处理厂日单位重量处理面积 $b$<br>（平方米/吨 $g$ 日） | 70  |                                  |
| 转运站平均占地面积 $S_{11}$ （平方米）            | 200 | 按垃圾中转站双厢型规模估算                    |
| 转运站数量 $N_1$ （座）                     | 895 |                                  |
| 转运站所用土地价格年平均成本 $P_{11}$<br>（元/平方米）  | 100 | 按照深圳市区住宅用地标准估算，期限 50 年           |
| 填埋场土地价格年平均成本 $P_{12}$ （元/<br>平方米）   | 10  | 按照福田区和宝岗区工业用地标准估算，工业用地期限按 50 年计算 |

|                               |                |         |   |
|-------------------------------|----------------|---------|---|
| 生物处理厂土地价格年平均成本 P13<br>(元/平方米) |                | 10      | 按照福田区和宝岗区工业用地标准估算，工业用地期限按 50 年计算                |
| 转运站的年平均基建费用 P21 (元)           |                | 20000   | 按照中转站平均基建费用 40 万，使用年限 20 年估算                    |
| 填埋场的单位投资规模价格 P22 (元/立方米)      |                | 20      |   |
| 垃圾车的年平均价格 P3 (元)              |                | 5000    | 按照中等垃圾车型 5 万元一辆，使用年限 10 年估算                     |
| 垃圾车的数量 N3 (辆)                 |                | 2456    | 2456 为 2016 年深圳市垃圾车数量，之后每年根据以往增长水平按每年增长 200 辆计算 |
| 公用垃圾桶的平均价格 P41 (元)            |                | 280     |   |
| 公用垃圾桶个数 N41 (个)               |                | 80000   | 按照 150 人/个标准根据深圳市年末常住人口估算                       |
| 环卫工人的平均年工资 P42 (元)            |                | 36000   | 按平均每月 3000 元计算                                  |
| 环卫工人的数量 N42 (人)               |                | 35332   |   |
| 湿垃圾源头分离费用 P511 (元/吨)          |                | 423     |   |
| 湿垃圾末端分离费用 P512 (元/吨)          |                | 0       | 费用计入处理费用之中                                      |
| 转运站平均年维护费用 P61(元)             |                | 200000  | 以小型垃圾中转站规模估算                                    |
| 市区到填埋场的平均运距<br>(千米)           | 下坪固体废弃物填埋场     | 10      | 综合百度地图、高德地图推荐路线经过简单估算得到                         |
|                               | 宝安老虎坑垃圾填埋场     | 20      |   |
| 市区到焚烧厂的平均运距<br>(千米)           | 南山垃圾焚烧厂        | 15      |   |
|                               | 盐田垃圾焚烧厂        | 20      |   |
|                               | 宝安垃圾焚烧厂        | 20      |   |
|                               | 平湖垃圾焚烧厂（一期、二期） | 30      |   |
| 生物处理运距（千米）                    |                | 10      | 考虑就近处理，一般运距不超过 10 千米                            |
| 填埋的单位运行价格 P71 (元/吨)           |                | 60      |   |
| 焚烧的单位运行价格 P72 (元/吨)           |                | 100     | 按目前收费标准 80~120 元/吨取中间值，将来可能提高                   |
| 生物处理的运行价格 P73 (元/吨)           |                | 150/200 | 模式二取 150，模式三由于含有湿垃圾末端分类费用取 200                  |

|                              |      |   |
|------------------------------|------|---|
| 焚烧垃圾处理过程中政府单位各项补贴之和 P74（元/吨） | 325  | 参考北京市 2017 年补贴标准，包括处理费 163 元，电价补贴 60 元，底灰处理补贴 43 元，税收优惠 32 元，建设费用 20 元，土地费用 4.9 元，渗沥液处理补贴 0.4 元 |
| 焚烧产生的二噁英致癌健康损失 P8（元/吨）       | 2000 | 参考北京市二噁英损害成本以及深圳市人口密度估算   |

说明：以上数据来源于 2016 年深圳市统计年鉴、深圳市城市管理局、深圳市生活垃圾处理工作志愿者调研笔记（2015 年）、中国经济导报、互联网等。

查阅到深圳市填埋场共有下坪固体废弃物填埋场、宝安老虎坑垃圾填埋场、龙岗坪西垃圾卫生填埋场、坪山鸭湖垃圾填埋场 4 座，由于坪山鸭湖垃圾填埋场已停产，龙岗坪西垃圾卫生填埋场规模远小于前两者，故将该两垃圾填埋厂忽略不计。

根据城市管理部门的统计数据，深圳市生活垃圾目前的基本收运成本大约为 60 元/吨（10 公里以内），10 公里以外的增量收运成本为 1 元/吨公里，20 公里以外的增量收运成本为 1.5 元/吨公里。计算得到各运费  $P_{6211} = 60$ ， $P_{6212} = 70$ ， $P_{6221} = 65$ ， $P_{6222} = 70$ ， $P_{6223} = 70$ ， $P_{6224} = 85$ ， $P_{623} = 60$ 。

### （1） 现行模式下的预测

在现行模式下，城市垃圾处理采用混合收集+部分卫生填埋+部分焚烧+部分简易堆填方式。该模式各部分成本计算公式如下表 5-3-2 所示：

表 5-2-3-2 现行模式下各部分成本计算公式

| 项目   | 具体公式   |
|------|--|
| 固定成本 | $C_1 = C_{11} + C_{12} + C_{13} + C_{14}$ $= P_{11} \times S_{11} \times N_1 + (P_{12} \times X_1) / (\rho \cdot h) + P_{21} \times N_1 + (P_{22} \times X_1) / \rho + P_3 \times N_3$   |
| 可变成本 | $C_2 = C_{41} + C_{42} + C_{51} + C_{52} + C_{61} + C_{62} + C_{71} + C_{72} + C_{73} + C_{74}$ $= P_{41} \times N_{41} + P_{42} \times N_{42} + P_{61} \times N_1$ $+ 0.5 X_1 (P_{6211} + P_{6212}) + 0.25 X_2 (P_{6221} + P_{6222} + P_{6223} + P_{6224})$ $+ P_{71} \times X_1 + P_{72} \times X_2 + P_{74} \times X_2$ |
| 社会成本 | $C_3 = C_8 + C_9 = P_8 \times X_2$   |

将表 5-2-3-1 数据代入其中，得到当期及未来十年社会垃圾治理总成本，以及各分项成本比例预测如下表 5-2-3-3 所示：

表 5-2-3-3 现行模式下当期及未来 10 年社会垃圾治理总成本与各分项成本比例预测(%)

| 年份   | 社会总成本   | 固定成本 |       |         | 固定成本 | 可变成本  |      |      |       | 可变成本  | 其他社会成本 | 其他社会成本 |
|------|---------|------|-------|---------|------|-------|------|------|-------|-------|--------|--------|
|      |         | 土地成本 | 基建成本  | 运输车购买成本 |      | 收集成本  | 分类成本 | 转运成本 | 处理成本  |       | 健康损失成本 |        |
| 2016 | 786276  | 0.25 | 1.202 | 0.16    | 1.61 | 16.46 | 0    | 7.52 | 18.25 | 42.23 | 56.16  | 56.16  |
| 2017 | 810338  | 0.25 | 1.202 | 0.16    | 1.61 | 15.97 | 0    | 7.49 | 18.38 | 41.84 | 56.55  | 56.55  |
| 2018 | 834231  | 0.24 | 1.202 | 0.17    | 1.61 | 15.52 | 0    | 7.46 | 18.49 | 41.47 | 56.91  | 56.91  |
| 2019 | 857928  | 0.23 | 1.202 | 0.18    | 1.61 | 15.09 | 0    | 7.44 | 18.61 | 41.13 | 57.26  | 57.26  |
| 2020 | 881411  | 0.23 | 1.202 | 0.18    | 1.61 | 14.68 | 0    | 7.41 | 18.71 | 40.81 | 57.58  | 57.58  |
| 2021 | 904662  | 0.22 | 1.202 | 0.19    | 1.62 | 14.31 | 0    | 7.39 | 18.81 | 40.5  | 57.88  | 57.88  |
| 2022 | 927668  | 0.22 | 1.202 | 0.2     | 1.62 | 13.95 | 0    | 7.36 | 18.9  | 40.22 | 58.16  | 58.16  |
| 2023 | 950419  | 0.21 | 1.202 | 0.2     | 1.62 | 13.62 | 0    | 7.34 | 18.99 | 39.95 | 58.43  | 58.43  |
| 2024 | 972906  | 0.21 | 1.202 | 0.21    | 1.62 | 13.3  | 0    | 7.32 | 19.07 | 39.7  | 58.68  | 58.68  |
| 2025 | 995121  | 0.21 | 1.202 | 0.21    | 1.62 | 13.01 | 0    | 7.3  | 19.15 | 39.46 | 58.92  | 58.92  |
| 2026 | 1017060 | 0.2  | 1.202 | 0.22    | 1.62 | 12.73 | 0    | 7.29 | 19.22 | 39.23 | 59.14  | 59.14  |

由表 5-2-3-3 可知，固定成本所占比例较低，增长幅度也较低。其中，土地成本占比下降，基建成本与运输车购买成本占比升高。可变成本占比较大，在未来 10 年内缓慢降低。其中，收集成本下降幅度较大，转运成本占比小幅度下降，处理成本占比小幅度上升。其他社会成本占比较大且缓慢上升，其中主要部分为健康损失成本。

## (2) 模式一背景下预测

在模式一背景下，城市垃圾处理采用混合收集+全量焚烧+灰渣填埋+中心城区垃圾全量转运方式。该模式各部分成本计算公式如下表 5-2-3-4 所示：

表 5-2-3-4 模式一背景下各部分成本计算公式

| 项目   | 具体公式   |
|------|--|
| 固定成本 | $C_1 = C_{11} + C_{12} + C_{13} + C_{14}$ $= P_{11} \times S_{11} \times N_1 + P_{21} \times N_1 + P_3 \times N_3$   |
| 可变成本 | $C_2 = C_{41} + C_{42} + C_{51} + C_{52} + C_{61} + C_{62} + C_{71} + C_{72} + C_{73} + C_{74}$ $= P_{41} \times N_{41} + P_{42} \times N_{42} + P_{61} \times N_1 + 0.25 X_2 (P_{6221} + P_{6222} + P_{6223} + P_{6224})$ $+ P_{71} \times X + P_{74} \times X$ |
| 社会成本 | $C_3 = C_8 + C_9 = P_8 \times X$   |

将表 5-2-3-1 数据代入其中，得到当期社会总成本、未来十年社会总成本及各分项成本比例如下表 5-2-3-5 所示：

表 5-2-3-5 模式一背景下当期、未来 10 年社会垃圾治理总成本及各分项成本比例预测(%)

| 年份   | 社会总成本   | 固定成本 |      |         | 固定成本 | 可变成本 |      |      |       | 可变成本  | 其他社会成本 | 其他社会成本 |
|------|---------|------|------|---------|------|------|------|------|-------|-------|--------|--------|
|      |         | 土地成本 | 基建成本 | 运输车购买成本 |      | 收集成本 | 分类成本 | 转运成本 | 处理成本  |       | 健康损失成本 |        |
| 2016 | 1352114 | 0.13 | 0.13 | 0.09    | 0.36 | 9.57 | 0    | 4.54 | 18.88 | 33    | 66.64  | 66.64  |
| 2017 | 1397557 | 0.13 | 0.13 | 0.1     | 0.35 | 9.26 | 0    | 4.51 | 18.96 | 32.74 | 66.91  | 66.91  |
| 2018 | 1442679 | 0.12 | 0.12 | 0.1     | 0.35 | 8.97 | 0    | 4.49 | 19.03 | 32.49 | 67.16  | 67.16  |
| 2019 | 1487433 | 0.12 | 0.12 | 0.1     | 0.34 | 8.7  | 0    | 4.46 | 19.1  | 32.26 | 67.4   | 67.4   |
| 2020 | 1531779 | 0.12 | 0.12 | 0.11    | 0.34 | 8.45 | 0    | 4.44 | 19.16 | 32.04 | 67.62  | 67.62  |
| 2021 | 1575688 | 0.11 | 0.11 | 0.11    | 0.34 | 8.21 | 0    | 4.41 | 19.22 | 31.84 | 67.82  | 67.82  |
| 2022 | 1619133 | 0.11 | 0.11 | 0.11    | 0.33 | 7.99 | 0    | 4.39 | 19.27 | 31.66 | 68.01  | 68.01  |
| 2023 | 1662096 | 0.11 | 0.11 | 0.12    | 0.33 | 7.79 | 0    | 4.37 | 19.32 | 31.48 | 68.19  | 68.19  |
| 2024 | 1704559 | 0.11 | 0.11 | 0.12    | 0.33 | 7.59 | 0    | 4.35 | 19.37 | 31.31 | 68.36  | 68.36  |
| 2025 | 1746508 | 0.1  | 0.1  | 0.12    | 0.33 | 7.41 | 0    | 4.34 | 19.41 | 31.16 | 68.51  | 68.51  |
| 2026 | 1787932 | 0.1  | 0.1  | 0.12    | 0.32 | 7.24 | 0    | 4.32 | 19.45 | 31.01 | 68.66  | 68.66  |

### (3) 模式二背景下预测

在模式二背景下，城市垃圾处理采用源头分类收集+湿垃圾生物处理+干垃圾焚烧+中心城区干垃圾转运方式。该模式各部分成本计算公式如下表 5-2-3-6 所示：

表 5-2-3-6 模式二背景下各部分成本计算公式

| 项目   | 具体公式   |
|------|--|
| 固定成本 | $C_1 = C_{11} + C_{12} + C_{13} + C_{14}$ $= P_{11} \times S_{11} \times N_1 + (P_{13} \times p \times X \times b) / 300 + P_{21} \times N_1 + P_3 \times N_3$   |
| 可变成本 | $C_2 = C_{41} + C_{42} + C_{51} + C_{52} + C_{61} + C_{62} + C_{71} + C_{72} + C_{73} + C_{74}$ $= P_{41} \times N_{41} + P_{42} \times N_{42} + P_{51} \times p \times X + P_{61} \times N_1$ $+ 0.25qX (P_{6221} + P_{6222} + P_{6223} + P_{6224})$ $+ P_{72} \times q \times X + P_{73} \times p \times X + P_{74} \times q \times X$ |
| 社会成本 | $C_3 = C_8 + C_9 = P_8 \times q \times X$  |

将表 5-2-3-1 数据代入其中，得到当期社会总成本、未来十年社会总成本及各分项成本比例如下表 5-2-3-7 所示：

表 5-2-3-7 模式二背景下当期、未来 10 年社会垃圾治理总成本及各分项成本比例预测(%)

| 年份   | 社会总成本   | 固定成本 |      |         | 固定成本 | 可变成本 |       |      |       | 可变成本  | 其他社会成本 | 其他社会成本 |
|------|---------|------|------|---------|------|------|-------|------|-------|-------|--------|--------|
|      |         | 土地成本 | 基建成本 | 运输车购买成本 |      | 收集成本 | 分类成本  | 转运成本 | 处理成本  |       | 健康损失成本 |        |
| 2016 | 880717  | 0.29 | 0.2  | 0.14    | 0.64 | 14.7 | 16.58 | 6.48 | 18.18 | 55.94 | 43.42  | 43.42  |
| 2017 | 908347  | 0.29 | 0.2  | 0.15    | 0.63 | 14.2 | 16.68 | 6.45 | 18.3  | 55.68 | 43.69  | 43.69  |
| 2018 | 935783  | 0.28 | 0.19 | 0.15    | 0.63 | 13.8 | 16.78 | 6.42 | 18.4  | 55.43 | 43.94  | 43.94  |
| 2019 | 962995  | 0.28 | 0.19 | 0.16    | 0.62 | 13.4 | 16.87 | 6.39 | 18.5  | 55.2  | 44.18  | 44.18  |
| 2020 | 989960  | 0.27 | 0.18 | 0.16    | 0.62 | 13.1 | 16.95 | 6.36 | 18.59 | 54.98 | 44.4   | 44.4   |
| 2021 | 1016658 | 0.27 | 0.18 | 0.17    | 0.62 | 12.7 | 17.03 | 6.33 | 18.68 | 54.77 | 44.61  | 44.61  |
| 2022 | 1043076 | 0.27 | 0.17 | 0.18    | 0.61 | 12.4 | 17.11 | 6.31 | 18.76 | 54.58 | 44.8   | 44.8   |
| 2023 | 1069200 | 0.26 | 0.17 | 0.18    | 0.61 | 12.1 | 17.18 | 6.28 | 18.84 | 54.4  | 44.99  | 44.99  |
| 2024 | 1095021 | 0.26 | 0.16 | 0.19    | 0.61 | 11.8 | 17.24 | 6.26 | 18.91 | 54.23 | 45.16  | 45.16  |
| 2025 | 1120531 | 0.26 | 0.16 | 0.19    | 0.6  | 11.6 | 17.3  | 6.24 | 18.98 | 54.07 | 45.32  | 45.32  |
| 2026 | 1145721 | 0.25 | 0.16 | 0.19    | 0.6  | 11.3 | 17.36 | 6.22 | 19.04 | 53.92 | 45.47  | 45.47  |

#### (4) 模式三背景下预测

在模式三背景下，城市垃圾处理采用源头分类收集+湿垃圾生物处理+干垃圾焚烧+中心城区干垃圾转运方式。该模式各部分成本计算公式如下表 5-3-8 所示：

表 5-2-3-8 模式三背景下各部分成本计算公式

| 项目   | 具体公式  |
|------|---|
| 固定成本 | $C_1 = C_{11} + C_{12} + C_{13} + C_{14}$ $= P_{11} \times S_{11} \times N_1 + (P_{13} \times p \times X \times b) / 300 + P_{21} \times N_1 + P_3 \times N_3$  |
| 可变成本 | $C_2 = C_{41} + C_{42} + C_{51} + C_{52} + C_{61} + C_{62} + C_{71} + C_{72} + C_{73} + C_{74}$ $= P_{41} \times N_{41} + P_{42} \times N_{42} + P_{61} \times N_1 + 0.25qX (P_{6221} + P_{6222} + P_{6223} + P_{6224})$ $+ P_{623} \times X \times p + P_{72} \times q \times X + P_{73} \times p \times X + P_{74} \times q \times X$ |
| 社会成本 | $C_3 = C_8 + C_9 = P_8 \times q \times X$   |

将表 5-2-3-1 数据代入其中，得到当期社会总成本、未来十年社会总成本及各分项成本比例如下表 5-2-3-9 所示：

表 5-2-3-9 模式三背景下当期、未来 10 年社会垃圾治理总成本及各分项成本比例预测(%)

| 年份   | 社会总成本  | 固定成本 |      |         | 固定成本 | 可变成本 |      |       |       | 可变成本  | 其他社会成本 | 其他社会成本 |
|------|--------|------|------|---------|------|------|------|-------|-------|-------|--------|--------|
|      |        | 土地成本 | 基建成本 | 运输车购买成本 |      | 收集成本 | 分类成本 | 转运成本  | 处理成本  |       | 健康损失成本 |        |
| 2016 | 751963 | 0.35 | 0.24 | 0.16    | 0.75 | 0.00 | 7.59 | 23.59 | 23.59 | 48.40 | 50.86  | 50.86  |
| 2017 | 774729 | 0.34 | 0.23 | 0.17    | 0.74 | 0.00 | 7.56 | 23.76 | 23.76 | 48.03 | 51.23  | 51.23  |
| 2018 | 797334 | 0.33 | 0.22 | 0.18    | 0.74 | 0.00 | 7.53 | 23.92 | 23.92 | 47.69 | 51.58  | 51.58  |
| 2019 | 819755 | 0.33 | 0.22 | 0.19    | 0.73 | 0.00 | 7.50 | 24.07 | 24.07 | 47.37 | 51.90  | 51.90  |
| 2020 | 841972 | 0.32 | 0.21 | 0.19    | 0.73 | 0.00 | 7.48 | 24.22 | 24.22 | 47.07 | 52.21  | 52.21  |
| 2021 | 863970 | 0.32 | 0.21 | 0.20    | 0.72 | 0.00 | 7.45 | 24.35 | 24.35 | 46.78 | 52.49  | 52.49  |
| 2022 | 885737 | 0.31 | 0.20 | 0.21    | 0.72 | 0.00 | 7.43 | 24.47 | 24.47 | 46.52 | 52.76  | 52.76  |
| 2023 | 907262 | 0.31 | 0.20 | 0.21    | 0.72 | 0.00 | 7.41 | 24.59 | 24.59 | 46.26 | 53.02  | 53.02  |
| 2024 | 928538 | 0.30 | 0.19 | 0.22    | 0.72 | 0.00 | 7.39 | 24.70 | 24.70 | 46.03 | 53.26  | 53.26  |
| 2025 | 949557 | 0.30 | 0.19 | 0.22    | 0.71 | 0.00 | 7.37 | 24.81 | 24.81 | 45.80 | 53.48  | 53.48  |
| 2026 | 970313 | 0.30 | 0.18 | 0.23    | 0.71 | 0.00 | 7.35 | 24.91 | 24.91 | 45.59 | 53.69  | 53.69  |



#### 5.2.4 各模式成本变化趋势图

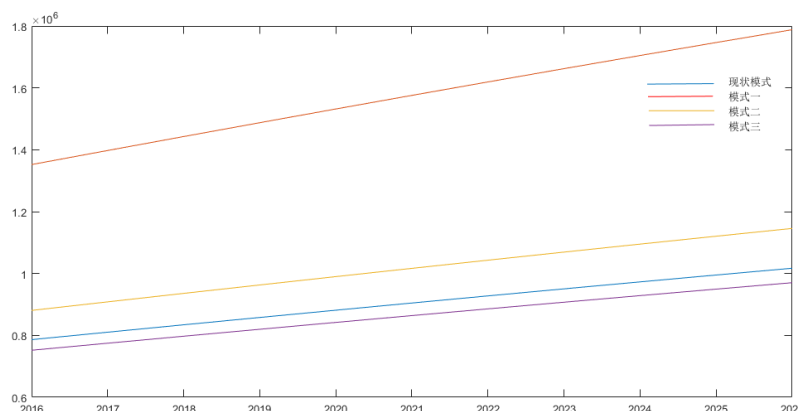


图 5-2-3-10 各模式总成本变化趋势图

通过图 5-2-3-10 可以看出，在各模式完全实行的情况下，模式一的总成本远高于其余模式的社会总成本，表明焚烧的成本由于包括污染造成的健康损失相对于其余两种垃圾处理方式成本较高，在垃圾清运量一定的情况下应尽量避免焚烧。

四种模式的固定成本基本保持不变，考虑填埋场的土地成本比例较大，现状模式的固定成本比例高于其他三种模式，因此若把用地面积作为衡量成本的一种指标时，现状模式劣于其余三种模式。

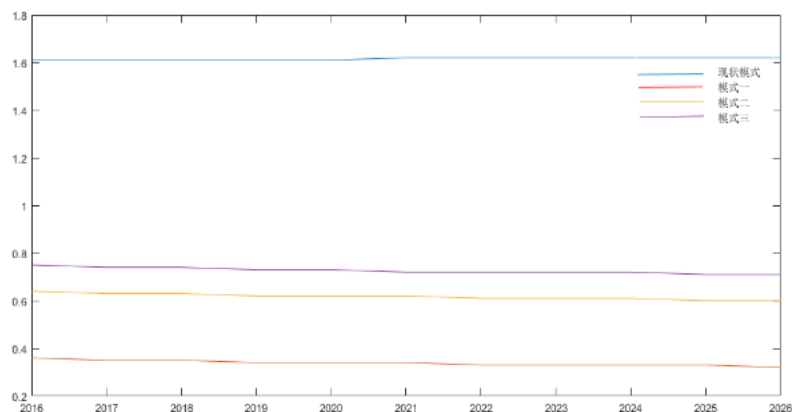


图 5-2-3-11 各模式固定成本变化趋势图

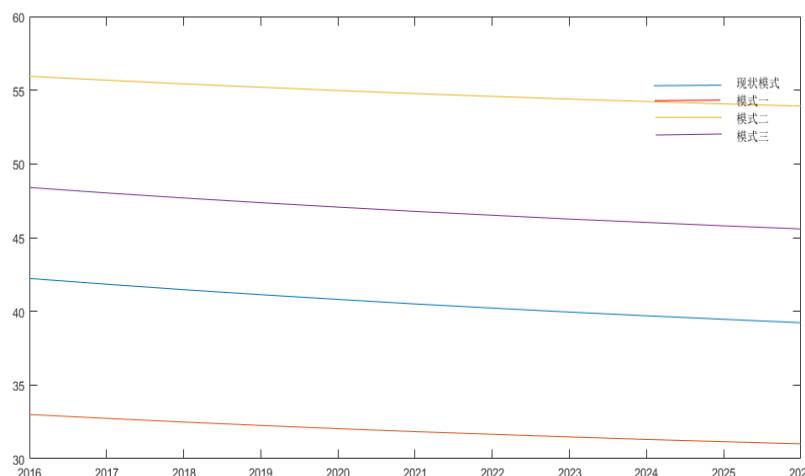


图 5-2-3-12 各模式可变成本变化趋势图

由图可以看出相比于模式二和模式三，现状模式与模式一的可变成本比例较低，由于模式二与模式三部分垃圾采用生物处理方式且模式二采用源头分类补贴费用较高，模式三采用末端分类费用较低，故模式二的可变成本比例远高于模式三，若只从成本的角度考虑末端分类好于垃圾分类。

与总成本趋势类似,因其他社会成本主要为焚烧带来的库然所造成的健康损失,因此焚烧垃圾量越多的模式其他社会成本所占比例越高。

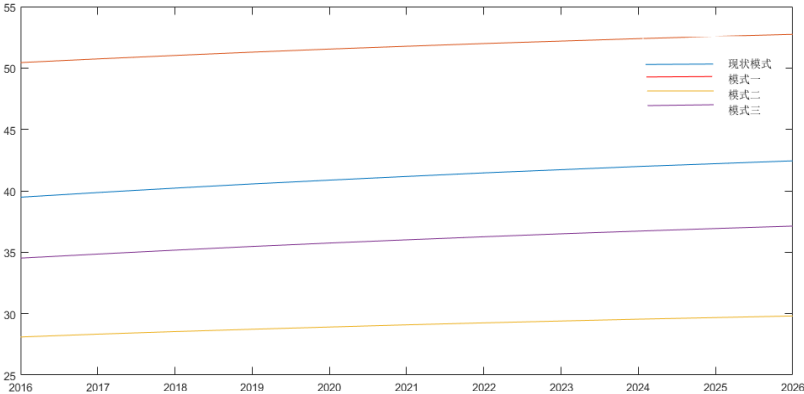


图 5-2-3-13 各模式其他社会成本变化趋势图

5.3 问题三模型的建立与求解

5.3.1 问题分析与模型建立

在考虑远期垃圾回收的方式时，我们考虑四种回收方式：超高压干湿分类减量资源化处理、焚烧处理、卫生填埋处理、生物堆肥处理。

考虑垃圾处理的远期成本与效益，综合现实因素除垃圾清理所带来的固定收益外，我们认为超高压干湿分类减量资源化处理能进行沼气发电、其中一部分能用于焚烧发电以及产生优质碳质物，填埋垃圾不产生额外收益，焚烧垃圾可用于发电产生收益，生物处理的垃圾仅用于堆肥产生额外收益。由于深圳本地因素，平均焚烧一吨垃圾，可发300度电，按深圳家用电价0.7元/度，可计算得焚烧一吨垃圾可发210元电。超高压干湿分类减量资源化处理发电量按照比焚烧发电量高15%计算，处理一吨垃圾，收益为241.5元，生物处理湿垃圾可用于堆肥，平均一吨湿垃圾可产生0.9吨生物肥，按一吨500元计算，处理1吨湿垃圾可产生450元化肥。

基于第一问的模型，不计入土地的机会成本与处理厂初期建筑费用，假设四种处理方式环卫工人、中转站、运输车费用等需求一致，仅考虑平均运输费用与处理费用，填埋处理费用为125元/吨，焚烧处理（包括政府补贴）不考虑社会成本费用为500元/吨，堆肥处理（考虑前端分类）的费用为633元/吨。根据成本收益，得到下表：

| 方式   | 超高压干湿分类减量资源化       | 焚烧                            | 卫生填埋                 | 堆肥                |
|------|--------------------|-------------------------------|----------------------|-------------------|
| 效果   | 技术可靠，效果较好，无害化处理较彻底 | 技术可靠，效果较好，需要较高专业水平控制，无害化处理较彻底 | 技术可靠，无害化处理一般，操作时注意防爆 | 技术可靠，效果较好，无害化处理彻底 |
| 使用条件 | 适用范围大，对垃圾组成要求不严格   | 垃圾热值不低于5000kJ/kg              | 适用范围大，对垃圾组成要求不严格     | 垃圾中生物可降解有机物40%以上  |

|      |  |  |  |                          |
|------|--|--|--|--------------------------|
| 资源回收 | 回收利用沼气发电, 干组分和炭质物可作为燃料回收利用                         | 利用焚烧产热发电   | 回收利用沼气发电 (效果较差, 可忽略不计)   | 产生有机肥                    |
| 收益   | 241.5  | 210  | 0  | 450                      |
| 占地   | 较小   | 主体占地中等, 可以恢复; 炉渣、飞灰处置和综合利用占地较大, 难以恢复             | 很大, 且难以恢复  | 中等, 可以恢复                 |
| 环境影响 | 有轻微气味; 对地面水及地下水无污染, 以1吨中40%为干成分焚烧处理, 因此健康成本为600元/吨 | 烟气需要净化, 费用较高; 对土壤无污染, 焚烧残渣填埋时对土壤无污染, 健康成本1500元/吨 | 沼气需引导, 控制大气污染; 应采取防渗措施防止地面污染; 导引渗滤液处理达标排放, 防止地下水污染, 以2000元/吨估算 | 有气味, 对地面水无污染; 对地下水污染可能性小 |
| 投资成本 | 25-40 万元/吨   | 35-45 万元/吨                                       | 10-15 万元/吨   | 15-23 万元/吨               |
| 处理成本 | 250 元/吨  | 500 元/吨  | 125 元/吨  | 633 元/吨                  |

注: 数据来源于2016年深圳市统计年鉴、深圳市城市管理局、深圳市生活垃圾处理工作志愿者调研笔记 (2015年)、中国经济导报、互联网等。

在远期中我们认为各种垃圾处理设施已较为完善, 各种垃圾处理方式都可负荷所有垃圾清运量。

我们采用规划模型, 设一年中超高压处理量、焚烧量、卫生填埋量、生物处理量为  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ ,  $X_4$ 、 $C_i(X_i)$  为第  $i$  种模式的成本,  $B_i(X_i)$  为第  $i$  种模式的收益, 在成本一定时最大化效益, 则我们建立以下最优化模型:

$$\begin{aligned}
 \text{Max} Y &= \sum_{i=1}^4 B_i(X_i) \\
 \text{s.t.} \quad &\begin{cases} Z \leq a \\ X_1 + X_2 + X_3 + X_4 = X \\ X_4 \leq p \cdot X \\ X_i \geq 0 \end{cases}
 \end{aligned}$$

$$\text{其中 } Z = \sum_{i=1}^4 C_i(X_i)$$

我们以 2025 年为例进行远期成本效益分析，部分数据如干湿垃圾的比例来源于第 2 问所预测数据。

由于  $a$  是任意给定的目标成本量，故从  $a=10$  亿开始以 5 千万为步长进行优化，得到效益  $a$  与成本  $Z$  之间的关系如图 5-4-1 所示：

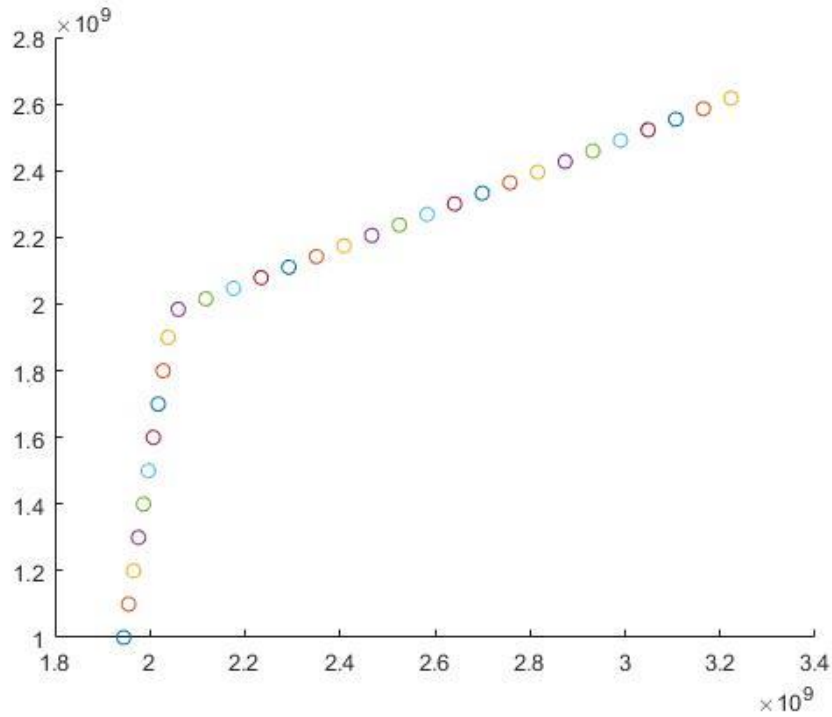


图 5-3-1 成本-效益关系图

各成本效益水平下每种处理方式所占比例：

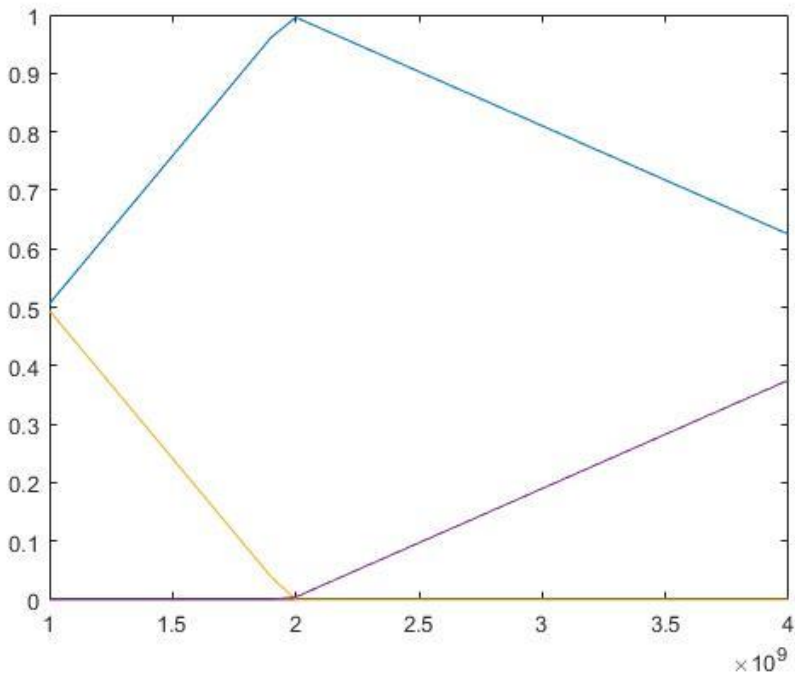


图 5-3-2 各成本效益水平下每种处理方式所占比例图

从图中可以看出：

1. 成本越高，效益也越大。

2. 在  $Z=21$  亿附近有一个转折点，在这一点左边，焚烧与堆肥量为 0，随着成本增加，填埋量减少，超高压处理量增加，效用与成本基本成正相关线性关系，在这一点右边，为了提高收益，将采用堆肥方式处理垃圾，但是堆肥量有上限，因此堆肥量增加，超高压处理量减少。

3. 由于焚烧方式与超高压处理方式对比下，成本高，效益低，因此不会单独将垃圾进行焚烧。

因此，在成本收益分析下，在同样的条件下，与焚烧垃圾相比，我们将选择超高压干湿分类减量资源化处理方式处理垃圾，这种方式成本低，效益高，且环境污染较小，占地面积小，是一种更优的选择。

与卫生填埋相比，虽然卫生填埋处理成本较低，但是土地浪费严重，对环境污染巨大，对于餐余垃圾而言，生物堆肥处理是一种更加环保且效益高的处理方式。但在现有的技术条件下，生物处理由于前段分离费用较高，成本较高，在前端处理中应进行成本的控制。

所以，我们认为在远期各种技术水平已经成熟的条件下，对于生活垃圾的处理，应该尽量减少焚烧与卫生填埋的量，因此垃圾的减量化是相当有必要的。由此对于前端垃圾分类是相当有必要的。

首先是餐余垃圾，餐余垃圾的来源有两种，一是家庭，二是餐馆，垃圾生物堆肥处理方式也有两种方案，一是小型垃圾堆肥器，适用于小区，可将厨余垃圾生化处理后供居住区绿化和住户家庭绿化，这种方法处理方便，但成本偏高；二是集中堆肥厂，可将餐馆大量的餐余垃圾进行集中处理，生产肥料，这种方法处理偏复杂，但可起到规模经济的效果。因此我们认为在垃圾分类中，厨余垃圾应该首先分离出来，由于厨余垃圾本身的性质，我们认为在源头就应将厨余垃圾分离，即家庭分类。

针对其他垃圾，从后端垃圾处理量来看，垃圾应越少越好，因此垃圾前端的分类回收就非常有必要。针对垃圾性质，将生活垃圾分为资源回收类垃圾，包括：电池类、纸类、塑料、玻璃、钢铁、铜、铝等，大件物品，植物树木，纺织物与其他垃圾。对于资源类垃圾我们认为应该采用家庭粗分类，社区细分类，分类运输回收的方式进行回收，大件垃圾社区也应有单独的存放空间由专人进行处理，植物树木，纺织物如衣服类应在社区内处理好，比如植物树木进行再耕种，纺织衣物进行捐赠等。对于不能回收的垃圾社区进行集中收集，再运输处理。

针对前端分类方式，我们将之分为家庭分类和专业分类，家庭分类无成本，但需要前期投资进行教育宣传，教育宣传的效用边际递减，专业分类需要成本。

设完全分类为程度 1，家庭分类程度为  $x$ ，专业分类程度为  $1-x$ ，为便于分析，

设宣传教育投资效益为  $y_1 = a\sqrt{x}$ ；专业分类效益为  $y_2 = b(1-x)$ ，

则总效益为  $y = a\sqrt{x} + b(1-x), 0 \leq x \leq 1, a > 0, b > 0$

一般认为  $b > a$ ，由此，当  $x = (\frac{a}{2b})^2$  时，效益最大，此时是家庭分类程度最

佳的状态。因此，最优家庭分类程度与宣传教育效果系数以及社区分类效率系数有关。为了更直观的看到系数  $a$  与  $b$  是如何影响最优值的，我们运用 matlab 作图，画出了分别固定  $a$ 、 $b$ ，当另一个系数和  $x$  变化时，最优值  $y$  是如何变化的。结果如下图所示：

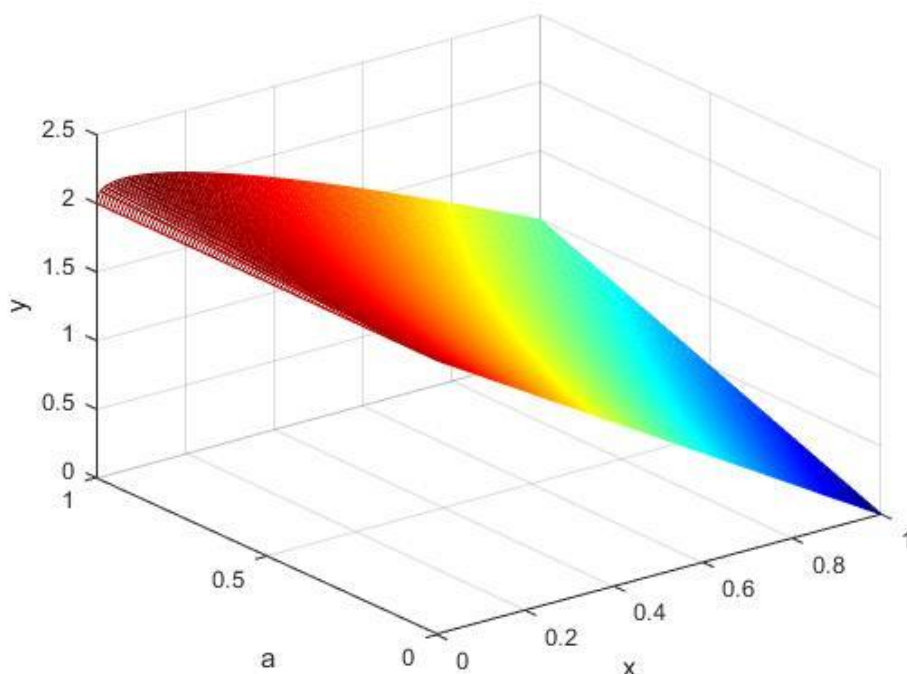


图 5-3-3 固定  $b$ ，当  $a$  与  $x$  变化时最优值的变化情况

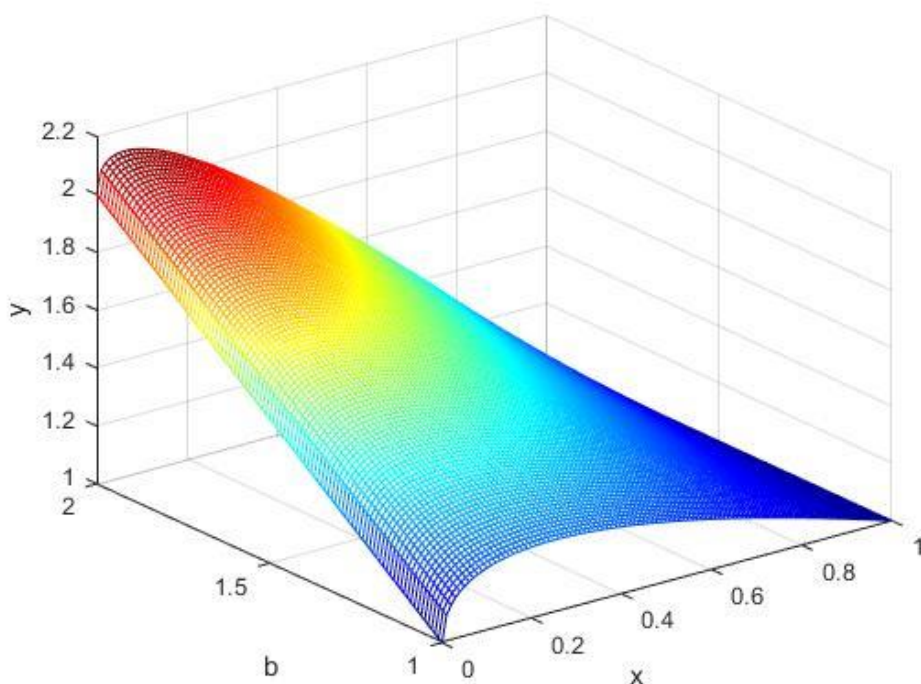


图 5-3-4 固定  $a$ ，当  $b$  与  $x$  变化时最优值的变化情况

由图所示，当  $a$  增加的时候，最优点  $x$  增大，此时家庭分类程度应该更高，宣传教育投资应更多；当  $b$  增加时，最优点  $x$  减少，专业分类效果更好，应加大专业分类的投入。

### 5.3.2 结果与建议

经过以上的分析，我们得出结论如下：

1、垃圾焚烧代价巨大。主要表现为环境污染、健康损失与资源浪费，且成本大收益小。每焚烧一吨生活垃圾，从垃圾的收集到焚烧，不算处理垃圾的固定成本，其社会成本为 1900 元，其中 75% 为焚烧带来的健康损失。因此

2、生物处理收益较高，成本较低，但源头分类花的费用巨大。生物处理由于源头分类存在困难，在整个流程的成本核算中，生物处理的总成本依然不低。

3、填埋虽然成本低，但毫无收益，土地浪费严重。在不考虑填埋带来的二次污染的情况下，填埋的成本相对较低，但是填埋占用大量土地，将造成了严重的土地浪费。

因此，我们的建议为：

1、减少焚烧厂的数量，虽然焚烧垃圾有一定收益，且操作简单，目前来看技术也比较成熟，但由于焚烧垃圾之后产生的二噁英对人体影响太大，其社会成本非常高，因此，我们不建议使用焚烧方式处理垃圾。应逐步减少对焚烧垃圾的依赖。

2、可加大生物堆肥等环保方式处理湿垃圾力度，对源头分类进行补贴或者采取激励措施，加大垃圾分类的宣传教育工作，经常举办一些公益讲座，让居民和企业养成自觉分类垃圾的好习惯，从而降低源头分类的成本。

3、加大物业在生活垃圾回收上的作用。对物业进行垃圾细分类的培训，使物业对大件垃圾的回收与安放，废弃衣物的收集与捐赠，绿化垃圾的再利用，餐余垃圾的堆肥处理上形成专业化管理，让垃圾不出小区就能变废为宝，提高垃圾处理的效率与效果。

4、政府应加强新技术的开发，减少垃圾在处理过程中的环境污染与土地浪费。

5、政府在统计生活垃圾基础数据时，可将家庭垃圾回收率和再利用率，各种处理方式的垃圾量，干湿垃圾量，城市环保系统的工作人员、垃圾车、中转站，城市各个垃圾处理厂的基本情况，包括人员、设施处理、规模后期处理等计入其中。

## 六、参考文献

- 【1】孙云龙等, 数学建模与 matlab 应用, 成都: 西南财经大学出版社, 2016
- 【2】白其铮, 数学建模实例分析, 北京: 海洋出版社, 2002
- 【3】陈理荣等, 数学建模导论, 北京: 北京邮电大学出版社, 1999
- 【4】沈继红等, 数学建模, 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998
- 【5】编写组, 运筹学 (第 4 版), 北京: 清华大学出版社, 2012
- 【6】宋国君, 杜倩倩, 马本, 城市生活垃圾填埋处理社会成本核算方法与应用——以北京市为例, [A], 北京: 中国人民大学环境学院, 2015
- 【7】姜建生, 廖利, 毕珠洁, 深圳市生活垃圾分类成本效益分析初探, [B], 湖北: 华中科技大学环境科学与工程学院, 2012

## 七、模型的评价与推广

### 7.1 模型的改进

- 1、在第三问具体核算各种模式的成本时, 可考虑通货膨胀率的影响。
- 2、第四问评估成本效益方法较为粗糙, 可以考虑更加精准的成本效益核算方法分析。

### 7.2 模型的优缺点

#### (1) 优点:

- 1、垃圾处理核算成本将垃圾处理整个过程所有成本纳入其中, 考虑较完全, 具有科学性。
- 2、针对每道题, 都有较为合理的假设, 在符合情况的条件下, 结果较为真实。
- 3、本文针对每道题都给出了可读性较强的算法

#### (2) 缺点:

- 1、未考虑通货膨胀率带来的影响。
- 2、在具体核算成本时, 一些估计的数据可能有所偏差, 造成结果有一定误差。
- 3、未考虑各种价格近期与远期的变化差异。

### 7.3 模型的推广

第一问模型在核算成本时考虑较为完全, 在其他城市也可复制使用。

## 八、附录

### 第二问代码

```
plot(x4,y,'o') ;plot(x2,y,'o') ;plot(x3,y,'o') ;plot(x4,y,'o');  
[b,bint,r,rint,s]=regress(y,[ones(size(x1)),sqrt(x1),x2,sqrt(x3),x4,x4.^2]);
```



```

b;bint r s
m=b(1)+b(2)*sqrt(x1)+b(3)*x2+b(4)*sqrt(x3)+b(5)*x4+b(6)*x4.^2;
plot(1:16,y);
hold on
plot(1:16,m)
n=17:27;
x11=49.24*(n.^2)+193.4*n+1970;
x22=29.84*n+666.9;
x33=38.26*(n.^2)-40.64*n+1195;
x44=875.2*n+27200;
m=b(1)+b(2)*sqrt(x11)+b(3)*x22+b(4)*sqrt(x33)+b(5)*x44+b(6)*x44.^2;
plot(2016:2026,m,'o',2016:2026,m)

```

```

a=0.8;h=20;s11=200;n1=895;p11=100;p12=10;p21=20000;p22=20;p3=5000;n3=
[2456:200:4456];
p41=280;n41=80000;p42=36000;n42=35332;p51=423;p61=200000;p71=60;p72=1
00;
p73=200;p6211=60;p6212=70;p6221=65;p6222=70;p6223=70;p6224=85;p623=60
;
p=0.5746;q=0.4244;p74=325;p8=1500;
x1=m*0.51*10000;x2=m*0.49*10000;
c11=p11*s11*n1;c12=p12*x1/(a*h);
c1=c11+c12;
c21=p21*n1;c22=p22*x1/a;
c2=c21+c22;
c3=p3*n3;
c41=p41*n41;c42=p42*n42;
c4=c41+c42;
c51=0;c52=0;
c5=c51+c52;
c61=p61*n1;
c62=0.5*x1*(p6211+p6212)+0.25*x2*(p6221+p6222+p6223+p6224);
c6=c61+c62;
c71=p71*x1;c72=p72*x2;c73=0;c74=p74*x2;
c7=c71+c72+c73+c74;
c8=p8*x2;c9=0;
v1=c1+c2+c3;v2=c4+c5+c6+c7;v3=c8+c9;
v=v1+v2+v3

```

```

a=0.8;h=20;s11=200;n1=895;p11=100;p12=10;p21=20000;p22=20;p3=5000;n3=
[2456:200:4456];
p41=280;n41=80000;p42=36000;n42=35332;p51=423;p61=200000;p71=60;p72=1

```

```

00;
p73=200;p6211=60;p6212=70;p6221=65;p6222=70;p6223=70;p6224=85;p623=60
;
p=0.5746;q=0.4244;p74=325;p8=1500;
x1=m*0.51*10000;x2=m*0.49*10000;
c11=p11*s11*n1;c12=0;
c1=c11+c12;
c21=p21*n1;c22=0;
c2=c21+c22;
c3=p3*n3;
c41=p41*n41;c42=p42*n42;
c4=c41+c42;
c51=0;c52=0;
c5=c51+c52;
c61=p61*n1;
c62=0.25*m*10000*(p6221+p6222+p6223+p6224);
c6=c61+c62;
c71=0;c72=p72*m*10000;c73=0;c74=p74*m*10000;
c7=c71+c72+c73+c74;
c8=p8*m*10000;c9=0;
v1=c1+c2+c3;v2=c4+c5+c6+c7;v3=c8+c9;
v=v1+v2+v3

```

```

a=0.8;b=70;h=20;s11=200;n1=895;p11=100;p12=10;p13=10;p21=20000;p22=20
;p3=5000;n3=[2456:200:4456];
p41=280;n41=80000;p42=36000;n42=35332;p51=423;p61=200000;p71=60;p72=1
00;
p73=150;p6211=60;p6212=70;p6221=65;p6222=70;p6223=70;p6224=85;p623=60
;
p=0.5746;q=0.4244;p74=325;p8=1500;
x1=m*0.51*10000;x2=m*0.49*10000;
c11=p11*s11*n1;c12=0;c13=p13*p*m*10000*b/300;
c1=c11+c12+c13;
c21=p21*n1;c22=0;
c2=c21+c22;
c3=p3*n3;
c41=p41*n41;c42=p42*n42;
c4=c41+c42;
c51=p51*p*m*10000;c52=0;
c5=c51+c52;
c61=p61*n1;

```

```

c62=0.25*q*m*10000*(p6221+p6222+p6223+p6224)+p*m*10000*p623;
c6=c61+c62;
c71=0;c72=p72*q*m*10000;c73=p73*p*m*10000;c74=p74*q*m*10000;
c7=c71+c72+c73+c74;
c8=p8*q*m*10000;c9=0;
v1=c1+c2+c3;v2=c4+c5+c6+c7;v3=c8+c9;
v=v1+v2+v3
a=0.8;b=70;h=20;s11=200;n1=895;p11=100;p12=10;p13=10;p21=20000;p22=20
;p3=5000;n3=[2456:200:4456];
p41=280;n41=80000;p42=36000;n42=35332;p51=423;p61=200000;p71=60;p72=1
00;
p73=200;p6211=60;p6212=70;p6221=65;p6222=70;p6223=70;p6224=85;p623=60
;
p=0.5746;q=0.4244;p74=325;p8=1500;
x1=m*0.51*10000;x2=m*0.49*10000;
c11=p11*s11*n1;c12=0;c13=p13*p*m*10000*b/300;
c1=c11+c12+c13;
c21=p21*n1;c22=0;
c2=c21+c22;
c3=p3*n3;
c41=p41*n41;c42=p42*n42;
c4=c41+c42;
c51=0;c52=0;
c5=c51+c52;
c61=p61*n1;
c62=0.25*q*m*10000*(p6221+p6222+p6223+p6224)+p*m*10000*p623;
c6=c61+c62;
c71=0;c72=p72*q*m*10000;c73=p73*p*m*10000;c74=p74*q*m*10000;
c7=c71+c72+c73+c74;
c8=p8*q*m*10000;c9=0;
v1=c1+c2+c3;v2=c4+c5+c6+c7;v3=c8+c9;
v=v1+v2+v3

z0=2016:2026;
z1=[786276
810338
834231
857928
881411
904662
927668

```

```
950419
972906
995121
1017060];
z11=[1.61
1.61
1.61
1.61
1.62
1.62
1.62
1.62
1.62
1.62];
z12=[42.23
41.84
41.47
41.13
40.81
40.50
40.22
39.95
39.70
39.46
39.23];
z13=[56.16
56.55
56.91
57.26
57.58
57.88
58.16
58.43
58.68
58.92
59.14];
z2=[1352114
1397557
1442679
1487433
1531779
```

1575688  
1619133  
1662096  
1704559  
1746508  
1787932];  
z21=[0.36  
0.35  
0.35  
0.34  
0.34  
0.34  
0.33  
0.33  
0.33  
0.33  
0.32];  
z22=[33.00  
32.74  
32.49  
32.26  
32.04  
31.84  
31.66  
31.48  
31.31  
31.16  
31.01];  
z23=[66.64  
66.91  
67.16  
67.40  
67.62  
67.82  
68.01  
68.19  
68.36  
68.51  
68.66];  
z3=[880717  
908347  
935783

962995  
989960  
1016658  
1043076  
1069200  
1095021  
1120531  
1145721];  
z31=[0.64  
0.63  
0.63  
0.62  
0.62  
0.62  
0.61  
0.61  
0.61  
0.60  
0.60];  
z32=[55.94  
55.68  
55.43  
55.20  
54.98  
54.77  
54.58  
54.40  
54.23  
54.07  
53.92];  
z33=[43.42  
43.69  
43.94  
44.18  
44.40  
44.61  
44.80  
44.99  
45.16  
45.32  
45.47];  
z4=[751963

774729  
797334  
819755  
841972  
863970  
885737  
907262  
928538  
949557  
970313];  
z41=[0.75  
0.74  
0.74  
0.73  
0.73  
0.72  
0.72  
0.72  
0.72  
0.71  
0.71];  
z42=[ 48.40  
48.03  
47.69  
47.37  
47.07  
46.78  
46.52  
46.26  
46.03  
45.80  
45.59];  
z43=[50.86  
51.23  
51.58  
51.90  
52.21  
52.49  
52.76  
53.02  
53.26  
53.48

```

53.69];
plot(z0,z13,z0,z23,z0,z33,z0,z43)

p73=150;
for i=10*10^8:1*10^8:40*10^8
d=[p12/(a*h)+p22/a+0.5*p6211+0.5*p6212+p71;
    0.25*(p6221+p6222+p6223+p6224)+p72+p74+p8;
    p13*b/300+p51+p623+p73];
f=[0 -210 -900;0 0 1];g=[-i;p*m(6)*10000];
j=[1 1 1];k=[m(6)*10000];
[t s]=linprog(d,f,g,j,k,[0 0 0]);
t(3)/k
hold on
plot(d(1)*t(1)+d(2)*t(2)+d(3)*t(3),210*t(2)+900*t(3),'o')
end

```

### 第三问代码

```

clc,clear;
m=818.4179;
p=0.5746;
i=[];
b=[];
for i=10*10^8:1*10^8:40*10^8
d=[250;500;225;633];
f=[-241.5 -210 0 -900;0 0 0 1];g=[-i;p*m*10000];
j=[1 1 1 1];k=[m*10000];
[t s]=linprog(d,f,g,j,k,[0 0 0 0]);
b=[b t/k]
hold on ;
plot(d(1)*t(1)+d(2)*t(2)+d(3)*t(3)+d(4)*t(4),241.5*t(1)+210*t(2)+450*
t(4),'o');
end

i=10*10^8:1*10^8:40*10^8;
plot(i,b(1,:),i,b(2,:),i,b(3,:),i,b(4,:));

clc,clear
b=2;
a=0:0.01:1;
x=0:0.01:1;
[x,a]=meshgrid(x,a);
y=a.*sqrt(x)+b.*(1-x);

```



```
mesh(x,a,y)
xlabel('x');
ylabel('a');
zlabel('y');
colormap jet

clc,clear
a=1;
b=1:0.01:2;
x=0:0.01:1;
[x,b]=meshgrid(x,b);
y=a.*sqrt(x)+b.*(1-x);
mesh(x,b,y)
xlabel('x');
ylabel('b');
zlabel('y');
colormap jet
```