

深圳市生活垃圾处理社会总成本的核算和预测

高健聪 蒋沁芝 聂正同
数模教练组
复旦大学数学科学学院

摘要

深圳市作为高速发展的大型城市，垃圾产生量也在不断的逐年上升。为处理体量庞大的生活垃圾，深圳市每年都斥巨资对其进行处理。同时，垃圾的处理过程还会造成大气污染、地下水污染等环境污染，间接增加了治理污染的环境成本。因此，如何核算社会总成本（经济成本加环境成本）并对其增长趋势做出合理的预测，成为了一个重要的问题。

首先，计算了处理每吨垃圾的经济成本，将经济成本按照垃圾的处理环节进行分类，分别计算收运成本、分类成本和填埋、焚烧、生物处理三种方式下的末端处理成本，再对每一个处理环节从可变成本、固定成本、获得收益三个方面进行考虑。其次，计算了在不同处理方式下，每吨垃圾所造成环境污染的成本。通过对流扩散模型和高斯烟羽扩散模型，分别计算填埋场渗透液泄漏和焚烧厂排放烟气所造成的环境成本。综合考虑经济成本和环境成本，得到了垃圾分类、生物处理、垃圾焚烧是三种较优的垃圾处理方案。

然后，计算了垃圾清运量及垃圾成分随时间变化的趋势。通过多元线性回归，以常住人口、生产总值、过夜游客总量作为解释变量，计算了垃圾清运量与各解释变量之间的关系。通过二次移动平均法，计算各解释变量随时间的变化。将结果代回回归方程，发现深圳市生活垃圾清运量在未来十年内将大幅增长，在 2026 年预计将突破 850 万吨。

最后考虑到深圳市正在大力推广“厨余垃圾处理器”，本文计算了在不同情况下，推广厨余垃圾处理器所能节约的成本。厨余垃圾处理器是一种安装在家庭中，可以将固态的厨余垃圾直接处理为液态污水的装置。经过研究，推广垃圾处理器对厨余垃圾的源头减量效果尤其明显，十年共能减量厨余垃圾 150.73 万吨。

根据本文的模型与计算出的不同情况，我们对深圳市政府给出了一些相关的建议和意见。推行垃圾分类、生物处理、垃圾焚烧并且大力推广厨余垃圾处理器是解决深圳市“垃圾围城”问题的最优方案。

关键词：垃圾处理，环境成本，微分方程，二次移动平均法，厨余垃圾处理器

目录

1. 问题的背景与分析	4
1.1. 问题背景	4
1.2. 问题分析	4
2. 经济成本	4
2.1 收运成本	4
2.1.1 中转站成本	4
2.1.2 运输成本	5
2.2 分类成本	5
2.3 填埋成本	6
2.3.1 填埋总成本	6
2.3.2 填埋总收益	6
2.3.3 填埋总成本计算	7
2.4 焚烧成本	7
2.4.1 土地机会成本	7
2.4.2 建设成本	8
2.4.3 运营成本	8
2.4.4 灰渣填埋成本	8
2.4.5 社会价值	8
2.4.6 焚烧成本计算	8
2.5 生物处理成本	8
2.6 经济成本汇总	9
3. 环境成本	10
3.1 填埋城市垃圾所造成的地下水污染成本	10
3.1.1 背景介绍	10
3.1.2 模型假设	11
3.1.3 对流-扩散模型	11
3.1.4 模型系数确定	11
3.1.5 水污染治理成本	13
3.2 焚烧厂排放气体所造成的大气污染成本	14
3.2.1 基于高斯烟羽扩散模型估算大气污染物浓度	14
3.2.2 大气污染物带来的环境成本	18
3.2.3 大气污染物环境成本的影响因素分析	18
4. 单位社会总成本核算	19
4.1 现行模式：混合收集+部分焚烧+部分填埋	20
4.2 模式一：混合收集+全量焚烧+灰渣填埋	21
4.3 模式二：源头分类收集+厨余垃圾生物处理+干垃圾焚烧	21
4.4 模式三：混合收集+末端分类+湿垃圾生物处理+干垃圾焚烧	22
4.5 四种模式的比较及总结	23
5. 2017-2026 垃圾清运量预测	23
5.1 相关系数与相关系数矩阵	23
5.2 相关性比较	24
5.3 多元线性回归分析	24

5.4 对各个因素进行趋势移动平均法时间序列分析	24
6. 垃圾成分变化趋势预测	26
7. 社会总成本预测	26
7.1 现行模式：混合收集+部分焚烧+部分填埋.....	27
7.2 模式一：混合收集+全量焚烧+灰渣填埋	27
7.3 模式二：源头分类收集+厨余垃圾生物处理+干垃圾焚烧	27
7.4 模式三：混合收集+末端分类+湿垃圾生物处理+干垃圾焚烧	28
7.5 四种模式的比较及总结	28
8. 远期成本效益分析	30
8.1 远期成本效益模型应考虑“厨余垃圾处理器”的影响	30
8.2 基本假设	30
8.3 变量声明	30
8.4 建立厨余垃圾处理器减少社会总成本的模型	31
8.5 考虑垃圾处理器之后的社会总成本	32
8.6 远期成本效益模型.....	35
9. 给政府的建议	35
10. 总结	36
11. 需要的数据	37

1. 问题的背景与分析

1. 1. 问题背景

随着经济的发展，人们每天产生的垃圾也越来越多。如何环保且高效地处理大量的城市生活垃圾成为困扰全社会的一项难题。为了解决这项难题，许多专家提出了不同的垃圾处理模式，而要比较各项垃圾处理模式的好坏，最直接的方法就是比较采用不同处理方法时所需要的社会总成本。

本次“深圳杯”数学建模挑战赛的题目就是要我们建立处理垃圾的社会总成本分析模型，并用我们的模型对《深圳市生活垃圾处理工作志愿者调研笔记》中提出来的几种垃圾处理模式进行成本计算，以及预测未来垃圾处理成本并且提出我们的垃圾处理的优选方案。

1. 2. 问题分析

垃圾处理总成本包含了垃圾处理的各个环节中产生的成本和污染环境带来的社会环境成本。因此我们首先将社会总成本定义为经济成本和环境成本之和。而由于垃圾处理需要巨大的初期建设成本需要考虑，因此我们的思路是先通过目前的数据将各项成本平摊到单位质量垃圾上，再通过时间序列分析来预测未来垃圾产生量，相乘以求得总成本。

对于经济成本，我们按照垃圾处理的流程——垃圾（源头分类）→ 收集 → 转运 →（末端分类）→ 处理——将其进行细分。因为垃圾的最终处理又可以分为填埋、焚烧、生物处理三种形式，所以我们将经济成本分为五个部分：收运成本、分类成本、填埋成本、焚烧成本和生物处理成本。

对于环境成本，我们将其分为了焚烧垃圾对大气的污染成本，和填埋垃圾对地下水及河道的污染成本。

2. 经济成本

2. 1 收运成本

现行深圳市采取的是混合收集运输的模式，也就是垃圾从垃圾箱经过转运车先集中运至中转站。经过压缩处理后，垃圾再由专门的垃圾车运到垃圾处理厂进行最终处理，如填埋厂、焚烧厂等。因此垃圾收运成本可由下述公式表示：

$$\text{生活垃圾收运成本} = \text{中转站成本} + \text{运输成本}$$

$$\text{中转站成本} = \text{中转站建设费} + \text{中转站运营费, 与转运路程无关}$$

$$\text{运输成本} = \text{中转箱维护费用} + \text{油费} + \text{车辆维保及保险, 与转运路程相关}$$

2. 1. 1 中转站成本

根据《东县生活垃圾压缩式中转站工程建设与运行管理实施方案》^[1]，一座日设计转运能力为250t的转运站，占地3000m²，工程投资（包括建安工程、设备采购等）为405.04万元。根据2015年上半年年深圳市土地出让均价4830元/m²，

以中转站设计运营 20 年, 每年运营 330 天计, 每吨垃圾的中转站建设费为

$$\frac{405.04 \times 10^4 + 4830 \times 3000}{250 \times 330 \times 20} = 11.2 \text{ 元/t}.$$

中转站运营成本包括了人员工资、水电费、维护费用、污水处理和渗透液处理。根据《大型垃圾中转站人员配置及运行费用》^[2], 每吨垃圾的中转站运营成本为 26 元/t。

因此总计中转站成本 = 37.2 元/t。

2.1.2 运输成本

运输费用包含中转箱维护、油费、车辆维保及保险, 根据《大型垃圾中转站人员配置及运行费用》, 运输成本为 1.4 元/(t·km)。根据附件一的信息, 我们取平均运输距离为 40km, 得到平均每吨垃圾的运输成本为 56 元/t。

2.2 分类成本

分类收集迟迟未能成功推广, 深圳市目前对于生活垃圾仍然采用混合收集、混合处理的方式。但是垃圾干湿分类能够使焚烧效益提升、填埋减少渗透液, 对于环境保护和垃圾处理都有着重大意义, 始终是未来的发展方向。

垃圾分类方式可以分为两种, 一种是源头分类收集, 通过补贴的方式引导民众在初端即收集时就进行垃圾分类。另一种是混合收集末端分类, 保留混合收集的形式, 在垃圾处理厂通过采用超高压分质分离等技术快速将混合垃圾分为干、湿两类, 能有效实现生活垃圾的末端集中分类。

源头分类的成本即为政府的补贴, 用于新建集中处理设施、购置小型设备、宣传工作和奖励等。深圳市对于示范小区的全年巩固补贴费用财政核拨标准为 10 万元/1000 户, 低于 1000 户, 每减少 100 户, 费用减少 6%; 高于 1000 户, 每增加 100 户, 费用增加 8%。示范小区巩固补贴费用的实际拨付与巩固工作实效相结合, 见表 2-1。2016 年深圳常住人口为 1137 万人, 年均垃圾产生量为 572.28 万吨, 因此每年人均产生垃圾 $\frac{572.28}{1137} = 0.503$ 吨/人。假设平均每小区实际拨付 80% 巩固补贴费用, 每小区 1000 户, 建筑上以每户按 3.2~3.5 人/户计算住宅区人口, 在此按 3.2 人/户计算。因此人均费用 $\frac{100000 \times 80\%}{1000 \times 3.2} = 25$ 元/人, 则每吨垃圾的分类成本为 49.7 元/t。

因为数据的缺失, 我们无法得到末端分类垃圾的准确成本。因为末端垃圾分类需要大量的人力以及一些专门的设备, 末端分类的成本应高于源头分类的成本。我们先暂时假设末端分类成本为 30 元/t, 更精确的计算需要进一步寻找数据。

表 2-1 深圳市垃圾减量分类示范小区巩固经费实际发放

评价得分	巩固补贴费用实际拨付
85 分及以上	给予当季度全额巩固补贴
75~84 分	给予当季度 80% 巩固补贴
60~74 分	给予当季度 60% 巩固补贴

2.3 填埋成本

生活垃圾填埋成本是指社会因生活垃圾填埋处置而承担的以市场价为准的全部成本。在计算填埋成本时，考虑到垃圾填埋可以产生填埋气，并用以发电或者提纯天然气，从而带来经济效益，这样就相当于降低了垃圾填埋的社会成本。因此我们对垃圾的填埋成本的定义为其总成本与总盈利之差，其中总盈利为销售净化后的甲烷气体的收益，即

$$\text{填埋成本} = \text{总成本} - \text{总盈利}$$

2.3.1 填埋总成本

垃圾填埋的成本可以分为固定成本和可变成本，其中固定成本来自填埋场的建造，包括填埋站的土地机会成本以及填埋场的建设花费。其中，土地机会成本指土地用于填埋时所放弃的作为他用的利益；而可变成本为填埋场的日常运营支出。因此，我们将总成本定义为填埋场的土地机会成本、建设成本以及运营成本之和，即

$$\text{总成本} = \text{土地机会成本} + \text{建设成本} + \text{运营成本}$$

由于第二题要求计算当期成本以及预期未来的成本，我们的解题思路是预期未来垃圾产生量，再乘以单位重量垃圾的处理成本，以求得总成本。所以在计算填埋成本时，我们计算的是填埋单位重量垃圾（1吨）带来的成本。

根据《深圳市生活垃圾分类成本效益分析初探》^[3]，我们查得填埋场的运营成本为60元/吨，土地机会成本为71.3元/吨，建设成本为84.1元/吨。

$$\text{所以，总成本} = 60 + 71.3 + 84.1 = 215.4 \text{ (元/吨)}$$

2.3.2 填埋总收益

垃圾填埋场盈利的方式有两个：一是通过产生的填埋气发电，二是提纯产生的填埋气制取甲烷。其中下坪、宝安老虎坑、龙岗坪西垃圾填埋场均建设有填埋气发电工程，下坪场还建设有填埋气提纯制取天然气工程。^[4]所以填埋总收益为填埋气发电收益与填埋气提纯天然气收益的加权平均，即：

$$\begin{aligned} \text{填埋总收益} &= \text{填埋气发电收益} \times \text{填埋气发电比例} + \text{填埋气提纯天然气收益} \\ &\quad \times \text{填埋气提纯比例} \end{aligned}$$

首先计算填埋气发电收益。通过查阅资料，每吨垃圾可以产生每吨垃圾产生填埋气的量为110到140立方米^[5]，每立方米填埋气能发电1.8到2度^[6]。我们取每吨垃圾产生填埋气的量仍为120立方米，每立方米填埋气能发电1.8度，假定发电量的90%能转化为上网电量，每吨电价按0.68元/kW·h计算，得到每吨垃圾通过填埋发电可获得收益 $120 \times 2 \times 0.68 = 132.2$ 元。

再计算填埋气提纯天然气的收益。通过查阅资料，下坪每年提纯填埋气可以生产天然气2200万立方米^[4]。下坪垃圾填埋场的设计处理规模能力分别为3500吨/日，而下坪填埋气发电和提纯的每小时处理量相同^[4]，所以用于填埋气提纯的

垃圾为 1750 吨/日。我们假定垃圾填埋厂每年工作时间为 330 天, 天然气价格为 3 元/ m^3 , 得到垃圾填埋提纯收益为 $120 \times \frac{22000000}{5000 \times 24 \times 330} \times 3 = 200$ 元/吨。

由于下坪、宝安老虎坑、龙岗坪西垃圾填埋场的设计处理规模能力分别为 3500、1500、400 吨/日^[7], 而下坪填埋气发电和提纯的每小时处理量相同, 所以填埋气发电比例为 $\frac{3500 \times 0.5 + 1500 + 400}{3500 + 1500 + 400} \approx 0.676$, 填埋气提纯比例为 $\frac{3500 \times 0.5}{3500 + 1500 + 400} \approx 0.324$ 。按比例得到填埋总收益为 $132.2 \times 0.676 + 200 \times 0.324 \approx 126.4$ 元/吨。

2.3.3 填埋总成本计算

总成本减去总收益, 得到深圳市生活垃圾填埋经济成本为 $215.4 - 126.4 = 89$ (元/吨)。即填埋每吨垃圾需要花费 89 元。

2.4 焚烧成本

相比于垃圾填埋, 垃圾焚烧因为其减少占地、避免了对土地与水体的污染和可以发电的优点被视为快速解决垃圾围城的曙光。生活垃圾焚烧的经济成本是指社会因生活垃圾焚烧处置而承担的以市场价为准的全部成本, 包括焚烧厂的土地机会成本、建设成本以及运营成本, 并减去垃圾焚烧发电所创造的社会价值。

2.4.1 土地机会成本

根据《生活垃圾焚烧处理工程项目建设标准(建标 142-2010)》, 垃圾焚烧的用地需求约为 30~50 平方米/吨日处理规模。

而根据深圳市 2016 在运营的 6 座垃圾焚烧厂, 见表 2-2, 得到平均焚烧厂用地需求为 $\frac{130799}{7425} = 17.6$ 平方米/吨日处理规模。所以, 1 平方米的焚烧厂用地日处理规模约为 0.0568 吨。

表 2-2 深圳市生活垃圾焚烧发电厂一览表

序号	处理设施名称	所在区域	设计处理能力 (吨/日)	占地面积 (平方米)
1	南山垃圾焚烧发电厂	南山区港湾大道	800	23710
2	盐田垃圾焚烧发电厂	盐田坳青麟坑	450	13222
3	中心城垃圾焚烧发电厂	龙岗区坪地坪西村	300	5746
4	老虎坑垃圾焚烧发电厂	宝安区老虎坑	4200	53881
5	平湖垃圾焚烧发电厂一期	龙岗区平湖辅城坳	675	14644
6	平湖垃圾焚烧发电厂二期	龙岗区平湖辅城坳	1000	19596
总计			7425	130799

垃圾焚烧厂的设计使用年限一般为 50 年，由于平时的超负荷使用，垃圾焚烧厂的实际使用年限一般为 20 到 25 年，这里取 22.5 年为垃圾焚烧厂的实际使用年限。垃圾焚烧厂每年工作时间按 330 天计算。

根据公式：

$$\text{土地机会成本} = \frac{\text{地价}}{\text{每平方米每日处理垃圾量} \times \text{实际使用时间}}$$

就可以算出焚烧每吨垃圾造成的土地机会成本。

我们查阅资料得到，深圳市的垃圾焚烧厂所在地段，平均地价为 539 元/平方米。代入公式，得到土地机会成本为 1.28 元/t。

2.4.2 建设成本

根据我们查到的资料^[3]，深圳市垃圾焚烧建设成本约为 58 元/t。该焚烧建设成本包括建筑成本、设备成本等建设垃圾焚烧厂时产生的费用。

2.4.3 运营成本

根据我们查到的资料^[3]，深圳市垃圾焚烧厂运营成本约为 120 元/t。该运营成本包括垃圾焚烧厂日常运营时产生的人员、耗材、物资等费用。

2.4.4 灰渣填埋成本

1 吨生活垃圾经焚烧可产生灰渣约 100kg，但灰渣无法产生填埋气创造收益。参考生活垃圾的填埋成本，1 吨生活垃圾经焚烧后的填埋成本约为 $0.1 * (60 + 71.3 + 84.1) = 21.54$ (元)。

2.4.5 社会价值

每吨垃圾可发电 250~350 度^[8]，我们取 300 度/t 作为每吨垃圾的发电量。上网电价按 0.68 元/kW·h 计算，每吨垃圾通过焚烧发电可获得收益 204 元。

2.4.6 焚烧成本计算

用总成本减去净利润，得到深圳市生活垃圾焚烧经济成本为 $1.28 + 58 + 120 + 21.54 - 204 = -3.18$ (元/t)。经济成本为负值，说明在不考虑环境成本的条件下，每焚烧 1 吨垃圾能够带来经济收益 3.18 元。

2.5 生物处理成本

生物处理是一种能够有效实现垃圾减量化、无害化、资源化的一种垃圾处理方法。生物处理又分为好氧技术和厌氧技术。好氧技术以堆肥为代表，最终获得有机肥料；厌氧技术以厌氧消化处理为主以获得沼气等高值产品，用来发电或代替天然气、燃油使用。由于生活垃圾中的主要部分，厨余垃圾，含有高成分的盐、油，生活垃圾产生的堆肥容易造成土壤的盐碱化，肥料使用效果并不好。因此，厌氧技术在生物处理技术中应用更为广泛。在深圳的老虎坑环境园不进行垃圾的堆肥工作，生物处理技术主要用来制取沼气。在我们接下来的计算中，按厌氧技术的经济成本计算。

厌氧技术的经济成本等于设备费用，运营费用减去社会价值。由于生物处理

技术设备一般占地较小，且找不到相关的数据，在这里我们先不予考虑土地机会成本。

生活垃圾的生物处理经济成本等于生物处理过程中造成的设备费用、场地费用、管理费用等。我们通过查阅资料^[9]获得生物处理技术处理1吨垃圾的总成本为165元，这个数据包括了设备费用、场地费用、管理费用等费用。

1吨垃圾经过厌氧发酵可以产生沼气100~130m³，这些沼气如转化成电能约为200KW·h。^[10]上网电价按0.68元/kW·h计算，每吨垃圾经过生物处理产生沼气发电可收益136元。

综合以上的处理成本及社会收益，生物处理每吨垃圾总经济成本为29元/t。

2.6 经济成本汇总

对2.1至2.5的生活垃圾各项经济成本进行汇总，我们得到如下的经济成本汇总表。

表2-3 生活垃圾经济成本汇总表

类别	项目	公式	说明
生活垃圾收运成本 (f _c)	中转站成本 (S)	$S = B_S + O_S = \frac{I + P_l \cdot A}{V_S \cdot D_S \cdot Y_S} + O_S$	B_S : 中转站建设费 O_S : 中转站运营费 I : 工程投资 P_l : 深圳市土地平均出让价 A : 中转站占地面积 V_S : 中转站容量 D_S : 中转站每年运营天数 Y_S : 中转站运营年限
	$f_c = S + T$		
	运输成本 (T)	$T = t \cdot l$	t : 单位距离运输成本 l : 平均运输距离
生活垃圾分类成本 (f _a)	源头分类成本 (AO)	$AO = \frac{s}{g} = \frac{S \cdot r/p}{P/G}$	s : 人均垃圾分类补贴费 g : 人均垃圾产生量 S : 平均每户垃圾分类补贴费 r : 补贴费实际发放比例 p : 平均每户人口数 P : 常住人口数 G : 年均垃圾产生量
	$f_a = AO$ 或者 $f_a = AT$		
	末端分类成本 (AT)	$AT = 30$	
填埋成本 (f _b)	填埋总成本 (C _b)	$C_b = L_b + B_b + O_b$	L_b : 填埋场土地机会成本 B_b : 填埋场建设成本 O_b : 填埋场运营成本
	$f_b = C_b - R_b$		
	填埋总收益 (R _b)	$R_b = R_e \cdot p_e + R_g \cdot p_g$ $= G_b \cdot E_e \cdot P_E \cdot p_e +$ $G_b \cdot \frac{V_{NG}}{H_g \cdot D_b} \cdot P_{NG} \cdot p_g$	R_e : 填埋气发电收益 p_e : 填埋气发电比例 R_g : 填埋气提纯天然气收益 p_g : 填埋气提纯天然气比例 G_b : 单位质量垃圾产生填埋气体积 E_e : 单位体积填埋气上网电量

P_E : 上网电价					
V_{NG} : 年度天然气产量					
H_g : 每日垃圾处理量					
D_b : 填埋场每年工作天数					
H_b : 填埋场每天工作时长					
P_{NG} : 天然气价格					
	L_f : 焚烧厂土地机会成本				
	B_f : 焚烧厂建设成本				
	O_f : 焚烧厂运营成本				
	B_f : 灰渣填埋成本				
	P_f : 焚烧厂平均地价				
焚烧成本 (f_f)	$C_f = L_f + B_f + O_f + B_f$				
$f_f = C_f - R_f$	$= \frac{P_f}{V_f \cdot D_f \cdot Y_f} + B_f + O_f + B_f$				
	V_f : 每平方米每日处理垃圾量				
	D_f : 焚烧厂每年运营天数				
	Y_f : 焚烧厂运营年限				
焚烧总成本 (C_f)					
焚烧总收益 (R_f)	$R_f = E_f \cdot P_E$				
	E_f : 单位质量垃圾发电量				
	P_E : 上网电价				
	C_B : 生物处理总成本				
生物处理成本 (f_{Bio})	$f_{Bio} = C_B - R_B = C_B - E_B \cdot P_E$				
	R_B : 生物处理总收益				
	E_B : 每吨垃圾发电量				
	P_E : 上网电价				

代入数据计算后得到的各项经济成本的实际值如下表所示：

表 2-4 生活垃圾经济成本数值汇总表

收运成本	分类成本		填埋成本	焚烧成本	生物处理成本
	源头分类	末端分类			
93.2 元/t	49.7 元/t	30 元/t	89 元/t	-3.18 元/t	29 元/t

3. 环境成本

3.1 填埋城市垃圾所造成的地下水污染成本

3.1.1 背景介绍

垃圾处理过程中会产生大量垃圾渗透液，主要来源于降雨和垃圾本身内含水。张兰英等鉴定出垃圾渗透液中的 93 种有机化合物，其中有 22 种被列入我国和美国环保局环境优先控制污染物的“黑名单”中。可见垃圾渗滤液的环境危害性极强。^[11]

如今，深圳市在垃圾转运、处理的各个流程都非常注重减少垃圾渗滤液对环境的污染。深圳市 4 座垃圾填埋场都采用卫生填埋的方法，具体是指在填埋场底部铺有一定厚度的黏土层或高密度聚乙烯材料的衬层，并具有地表径流控制、浸出液的收集和处理、沼气的收集和处理、监测井及适当的最终覆盖层的设计，以达到被处置废物与环境生态系统最大限度的隔绝。^[12]且根据国家规定，现有全部

生活垃圾填埋场应设置污水处理装置并自行处理生活垃圾渗滤液。生活垃圾渗滤液(含调节池废水)等污水经处理并符合标准规定的污染物排放控制要求后可直接排放。^[13]

但仍然,现行处理办法无法将百分之百的垃圾渗透液收集并进行无害化处理。由于垃圾渗透液有水质复杂、CODcr浓度高、氨氮含量高、金属含量较高等特点,少量未经处理的垃圾渗透液外渗也会对环境生态和居民健康造成非常严重的影响。

因此,我们考虑这一部分未经处理的垃圾渗滤液下渗导致的地下水污染。我们利用扩散模型,计算污水的扩散面积,并通过恢复费用法来近似计算污水造成的经济损失,即作为处理垃圾的社会成本的一部分。

3.1.2 模型假设

1. 假设地下水均为地下河,且河流截面积大小不变;
2. 假设污染源在地下河河道上长度S范围为远小于污染区域长度,近似为点源
3. 假设地下水平均渗透流速 \bar{V} 是不变的,并沿河流方向建立一维坐标轴,将地下水视为半无限的均匀介质;
4. 假设各个垃圾场下的地下河深度相同,土壤环境相同;
5. 假设污染源浓度保持不变。

3.1.3 对流-扩散模型

我们根据假设,将地下水的情况简化为一维均匀水流,设沿水流方向为 x 轴正方向,则地下河污染物的传播满足一维对流-扩散方程^[14]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \bar{V} \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (1)$$

式中, C 为污染物浓度; \bar{V} 为平均渗透流速; D_x 为纵向水动力弥散系数,与土层的岩性、孔隙度、颗粒均匀度等有关,是多孔介质的内在参数。

由于污染扩散时间长,区域大,污染源在地下河河道上长度 S 范围为远小于污染区域长度。因此根据假设,污染源可以视为点源。而为了简化计算,我们假设污染源浓度为常数 C_0 。因此方程的边界条件为

$$\begin{aligned} C(x, 0) &= 0 \\ C(0, t) &= C_0 \\ C(+\infty, t) &= 0 \end{aligned}$$

根据上述边界条件,一维对流-扩散方程 $\frac{\partial C}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \bar{V} \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right)$ 的解为^[14]

$$C(x, t) = \frac{C_0}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x - \bar{V}t}{\sqrt{4D_x t}} \right) + e^{\frac{\bar{V}x}{D_x}} \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{x + \bar{V}t}{\sqrt{4D_x t}} \right) \right]$$

其中余误差函数

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\xi^2} d\xi$$

3.1.4 模型系数确定

通过参考现有资料,我们得到弥散系数的经验系数(见表3-1),因此我们

可以取 $D_x = 0.5 \text{m}^2/\text{day}$ 。

表 3-1 弥散系数参考表^[15]

含水层类型	纵向弥散系数 $D_x(\text{m}^2/\text{day})$	横向弥散系数 $D_y(\text{m}^2/\text{day})$
细砂	0.05 – 0.5	0.005 – 0.01
中粗砂	0.2 – 1	0.05 – 0.1
砂砾	1 – 5	0.2 – 1

而地下水平均渗透速率与当地的水文地质条件关系很大。孔隙水流速在 $0.01\sim 1 \text{m/day}$ 范围内, 裂隙水流速一般在 $0.1\sim 10 \text{m/day}$, 而岩溶水流速则与地表水近似。最高甚至可以达到 1m/s 。在研究中我们发现不同的地下水水流速会对污染物扩散范围和治理费用有着很大影响(见图 3-1)。由于数据的缺失, 我们取 $\bar{V} = 10 \text{m/day}$ 开展研究。

垃圾渗滤液的主要成份是有机物降解过程中的中间有机化合物和溶解性营养盐类, 另外还含有大量的重金属元素及其它有害物质, 如有害微生物等。

我们主要分析去除垃圾渗透液中 COD(化学耗氧量)和氨氮的浓度。COD 表示在一定条件下氧化 1 升水样中还原性物质所消耗的氧化剂的量, 反映了水中受还原性物质污染的程度。也作为衡量污水中有机物多少的一个综合指标。而根据研究, 氨氮的治理成本与 COD 治理成本近似成正比, 因此我们先考虑 COD 的治理, 再考虑氨氮的治理。

根据刘桂军的调查测验, 渗滤液中 COD 含量范围为 $3000\sim 45000 \text{mg/L}$, 浓度一般值为 $\rho = 18000 \text{mg/L}$ 。

现对 C_0 进行计算。假设每吨垃圾在填埋后总计会产生 m_0 吨垃圾渗透液, 每天有 P 吨垃圾, 则平均每天产生 Pm_0 吨垃圾渗透液。由于现在均采用卫生填埋的方式处理垃圾渗滤液, 只有小部分渗滤液会直接泄露, 设泄露比例为 η 。由稀释模型和污染点浓度不变的假设, 污染点地下水 COD 浓度 $C_0 = \frac{\eta P m_0}{\eta P m_0 + S m_1} \rho$ 。其中 m_1 为单位长度上地下河水的质量, S 为污染源在地下河河道上长度。

目前运行的两座填埋场设计日处理垃圾平均为 2000 吨, 因此设 $P = 2000 \text{t}$ 。根据我们所查到数据, m_0 与垃圾含水量和气候因素有关, 范围为 $0.01\sim 0.15 \text{t}$, 我们取 $m_0 = 0.07 \text{t}$ 。假设地下河平均宽度 20m, 平均深度 1m, 则 m_1 约为 0.02t 。根据估计, η 范围在 $0.01\%\sim 1\%$, S 范围在 $50\text{m} - 1000\text{m}$ 我们取 $\eta = 0.001, S = 20\text{m}$ 。

$$\text{因此得到 } C_0 = \frac{0.001 \times 2000 \times 0.07}{0.001 \times 2000 \times 0.07 + 20 \times 0.02} \times 18000 = 4667 \text{mg/L}.$$

通过 Matlab 计算, $\bar{V} = 1,10,100 \text{m/day}$ 情况下, 一年后垃圾处理厂附近的 COD 浓度如图 3-1 所示, 得到 \bar{V} 较大时扩散范围与 \bar{V} 近似成正比, 我们取 $\bar{V} = 50 \text{m/day}$ 。

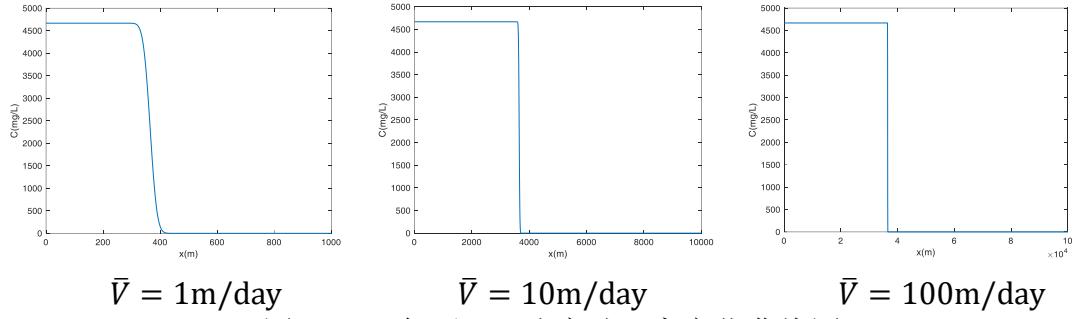


图 3-1 一年后 COD 浓度随距离变化曲线图

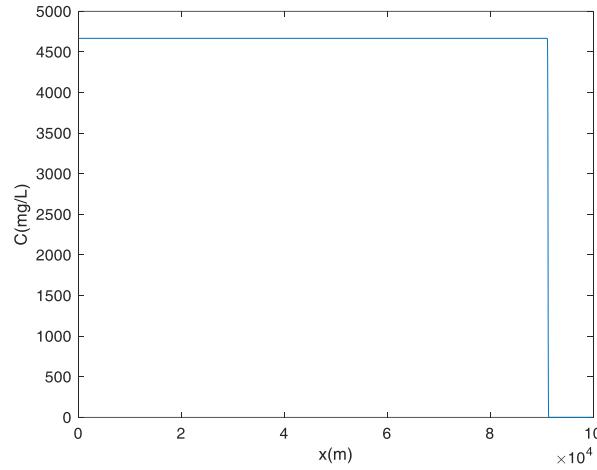


图 3-2 5年后 COD 浓度随距离变化曲线图

3.1.5 水污染治理成本

恢复费用是指将环境由现有状态恢复至某一期望水平所需的费用(如治理水土流失的费用,提高森林覆盖率的费用等)或可防止某种环境损失所需的环境投资。它是通过计算修复由于污染造成的破坏所需要的的整体费用来避免分类计算中容易出现的重复计算问题。^[16]在探究深圳垃圾处理中的水污染成本时,可以将治理污染的地下水所需费用作为经济损失,也就是环境成本。

根据于鲁冀,王燕鹏,梁亦欣^[17]的研究,治理流域水COD污染的单位费用与COD浓度 C 相关,针对 $C \leq 500$ mg/L范围内,根据回归分析得到^[17]:

$$VC' = 0.0084 \times e^{-0.003C}, C \leq 500$$

其中, VC' 为1t流域水中COD浓度降低1mg/L的成本。考虑到地下水治理难度和成本都大于地表流域水,可估计为10倍左右。则1t地下水中COD浓度降低1mg/L的成本 VC 为:

$$VC(C) = 10 \cdot VC' = 0.084 \times e^{-0.003C}, C \leq 500$$

设 $C > 500$ 时,单位治理费用不再降低,则

$$VC(C) = \begin{cases} 0.084 \times e^{-0.003C}, & C \leq 500 \\ 0.084 \times e^{-0.003 \times 500} = 0.0187, & C > 500 \end{cases}$$

根据国家标准, COD 浓度 ≤ 10 mg/L为 V 类水质,设 $0 \leq x \leq x_0$ 时 $C \leq 10$ 。

考虑治理周期为5年,根据上述数据,得到 $x_0 = 91374$ m,即5年后污染范围

为91.3km。我们计算治理5年后将地下水治理到V类水质的成本：

$$I_{COD\text{治理成本}} = \int_0^{x_0} m_1 \cdot \left(\int_{10}^{C(x)} VC(C) dC \right) dx$$

根据上述数据, $I_{COD\text{治理成本}} = 7.11 \times 10^6$ 元。

根据于鲁冀, 王燕鹏, 梁亦欣的研究^[17], 氨氮治理成本约为 COD 治理成本的 7.7 倍。则

$$I_{COD+\text{氨氮}} = (1 + 7.7) \times 7.11 \times 10^6 = 6.19 \times 10^7 \text{元}$$

考虑 $P = 2000$ 吨, 每年工作 330 天, 因此填埋场 5 年内总垃圾处理量 $V_{\text{总}} = 330 \times 5 \times P = 3.3 \times 10^6$ 吨。则换算到每吨垃圾的环境成本为:

$$I_{\text{每吨垃圾水污染成本}} = \frac{I_{COD+\text{氨氮}}}{V_{\text{总}}} = 18.7 \text{ 元/吨}$$

3.2 焚烧厂排放气体所造成的大气污染成本

3.2.1 基于高斯烟羽扩散模型估算大气污染物浓度

(1.1) 符号说明:

$C(x, y, z; H)$: 污染物排放的有效高度为 H 时, 位于 (x, y, z) 处的污染物浓度, 单位 kg/m^3

Q : 污染物的排放速率, 单位 g/s

x : 顺风方向距离, 单位 m

y : 距离烟羽中心线的水平距离, 单位 m

z : 距离地面的高度, 单位 m

H : 有效烟囱高度, 单位 m

h : 烟囱实际高度, 单位 m

Δh : 烟云抬升高度, 单位 m

u : 烟囱高度处的平均风速, 单位 m

σ_y, σ_z : 水平方向和垂直方向上的扩散参数

(1.2) 模型假设^[18]

- 假设全部高度风速均匀稳定
- 假设污染物在扩散中不会相互转化
- 假设源强是连续均匀稳定的
- 地面对污染物起全反射作用, 不发生吸收或吸附作用
- 大气污染物只考虑烟尘、 SO_2 、 NO_x 的影响, 且视其危害相同
- 大气污染物的环境成本正比于污染物浓度

(1.3) 模型的建立^[18]

(a) 点源扩散模式

高斯烟羽模型是用于计算大气污染物浓度的基本模型, 由于无论是焚烧厂还是填埋场, 均为一静止的、大小有限的排放产所, 可以视为点源排放, 故本文采

用高斯烟羽模型的点源扩散模式，其污染物浓度公式如下：

$$C_1(x, y, z; H) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \cdot e^{-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}} \quad (3.1)$$

其中 σ_y, σ_z 是顺风方向距离 x 与大气稳定度的函数。

(b) 高架连续点源扩散模式

考虑到地面可能会吸收或者反射大气中的污染物，从而对大气中污染物浓度产生影响，我们假定地面能够反射所有的污染物颗粒，采用高架连续点源扩散模式。我们将地面视为一个镜面，采用像源法进行处理，即将空间中任意一点污染物浓度看成实源和像源产生的污染物浓度之和，记为 $C(x, y, z; H)$ 。其中实源产生的污染物浓度为假设地面不存在时，实源排放污染物在大气中的浓度，即为式(3.1)中的浓度 $C_1(x, y, z; H)$ ；像源为实源关于地面的对称点产生的污染物浓度，记为 $C_2(x, y, z; H)$ 。那么可以得到：

$$C_1(x, y, z; H) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \cdot e^{-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}} \quad (3.2)$$

$$C_2(x, y, z; H) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \cdot e^{-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}} \quad (3.3)$$

又 $C(x, y, z; H) = C_1(x, y, z; H) + C_2(x, y, z; H)$ ，所以实际浓度为：

$$C(x, y, z; H) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \left[e^{-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}} \right] \quad (3.4)$$

(c) 大气污染物的地面浓度

由于我们主要考虑大气污染物对人们生活造成的影响，因此在考虑大气污染物浓度时我们仅考虑地面处污染物浓度。所以在式(3.4)中令 $z = 0$ ，得到焚烧厂污染物的地面浓度为：

$$C(x, y, 0; H) = \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_z u} e^{-\frac{1}{2}(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{H^2}{\sigma_z^2})} \quad (3.5)$$

(1. 4) 模型的求解

(a) 扩散系数 σ_y, σ_z 的确定

扩散系数 σ_y, σ_z 分别为 y 轴和 z 轴正态分布的标准差。本文采用 D. O. Martin 在《浓度标准差随距离的变化》(“The Change of Concentration Standard Deviations with Distance”)一文中提出的公式进行计算^[19]。在该公式中，

σ_y, σ_z 是顺风方向距离 x 与大气稳定度的函数，表达式如下：

$$\sigma_y = ax^b \quad (3.6)$$

$$\sigma_z = cx^d + f \quad (3.7)$$

其中参数 a, c, d, f 可以通过表 3-2 确定，参数 $b = 0.894$ 。

表 3-2 扩散系数参数与大气稳定度的关系

大气 稳定度	$x < 1\text{km}$				$x > 1\text{km}$		
	a	c	d	f	c	d	f
A	213	440.8	1.041	9.27	459.7	2.094	-9.6
B	156	106.6	1.149	3.3	108.2	1.098	2.0
C	104	61.0	0.911	0.0	61.0	0.911	0.0
D	68	33.2	0.725	-1.7	44.5	0.516	-13.0
E	50.5	22.8	0.675	-1.3	55.4	0.305	-34.0
F	34	14.35	0.740	-0.35	62.6	0.180	-48.6

根据 Pasquill 稳定度分类法, 大气稳定度被分为 A-F 六类, 其中 A、B、C 类表示大气不稳定, D 类表示大气处于中性条件, E、F 类表示大气稳定。要计算大气稳定度, 我们需要太阳高度角、总云量、低云量、地表风速等一系列气候条件, 鉴于数据缺乏的原因, 我们参考了 2014 年深圳杯 C 题的多篇论文, 确定深圳市的大气稳定度为 D 类, 故其扩散系数为:

$$\sigma_y = 68x^{0.894} \quad (3.8)$$

$$\sigma_z = \begin{cases} 33.2x^{0.725} - 1.7, & \text{当 } x < 1\text{km} \text{ 时} \\ 44.5x^{0.516} - 13, & \text{当 } x > 1\text{km} \text{ 时} \end{cases} \quad (3.9)$$

(b) 烟云抬升高度 Δh 的确定^[20]

由于排放的烟气温度要远高于周围环境的问题, 排放的烟气会继续上升一定高度, 记为 Δh , 所以实际高度 $H = h + \Delta h$ 。本文采取 Brigg 的计算公式来计算烟云抬升高度 Δh :

①对于不稳定和中性情况 (A-D):

$$\Delta h = \frac{21.42F_b^{0.75}}{u}, \text{ 当 } F_b < 55 \text{ 时} \quad (3.10)$$

$$\Delta h = \frac{38.71F_b^{0.6}}{u}, \text{ 当 } F_b > 55 \text{ 时} \quad (3.11)$$

②对于平静情况 (E):

$$\Delta h = 5F_b^{\frac{1}{4}}s^{-\frac{3}{8}} \quad (3.12)$$

③对于稳定情况 (F):

$$\Delta h = 2.6\left(\frac{F_b}{us}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.13)$$

其中 u 为烟囱高度处的平均风速, 单位为m/s; s 为稳定因子, 取决于环境温度和烟气温度; F_b 为浮力通量, 计算方法如下:

$$F_b = \frac{gvd^2\Delta T}{4T_0} \quad (3.14)$$

其中, g 为重力加速度, 取 9.8m/s^2 ; v 为烟羽排放速度, 单位为m/s; d 为烟囱直径, 单位为m; T_0 为烟囱气体温度, 单位为K; T_a 为环境温度, 单位为K; ΔT 为烟囱气体温度与环境温度之差, 即 $\Delta T = T_0 - T_a$ 。

由于气象资料中的风速大小一般指地面风的大小，即距地面10m高度处的风速大小。而由于接近地面处的气流会受到较大的摩擦力的影响，地面处的风速会较低，且风速随着距地面高度提升而增加。为了求 Δh 计算公式中的 u ，即烟囱高度的平均风速，我们采用 Deacon 幂定律进行计算，即：

$$u(z) = u_r \left(\frac{z}{z_r} \right)^p \quad (3.15)$$

其中 z 为高度，单位为m； z_r 为标的处高度，单位为m； $u(z)$ 为高度为 z 处的风速，单位为m/s； u_r 为 z_r 处风速，单位为m/s； p 为风剖面指数，取决于大气稳定度以及地理位置是乡村还是城市，具体大小见表 3-3。

表 3-3 风剖面指数与大气稳定度的关系

大气稳定度	风剖面指数 p					
	A	B	C	D	E	F
乡村	0.07	0.07	0.10	0.15	0.35	0.55
城市	0.15	0.15	0.20	0.25	0.30	0.30

接下来我们对 Δh 大小进行计算。

我们取烟囱高度 $h = 80m$ 。通过 2014 年深圳杯 C 题的附件，我们得到焚烧厂地面处平均风速为 $2.7m/s$ ，即 $z_r = 10m$ ， $u_r = 2.7m/s$ 。鉴于深圳市大气稳定度为 D 类，焚烧厂均分布在离城市较远的偏远地区，可以将其定为乡村地区，所以其风剖面指数 $p = 0.25$ 。代入式 (3.15) 得到 $u = u(80) = u_r \left(\frac{z}{z_r} \right)^p = 2.7 \times$

$$\left(\frac{80}{10} \right)^{0.25} m/s \approx 4.54 m/s。$$

通过查询数据，我们得到深圳市平均气温 $T_0 = 23^\circ C = 296K$ ^[21]，烟气温度为 $130^\circ C = 403K$ ，当烟囱高度 $h = 80m$ 时^[22]，烟囱直径 $d = 4m$ ，烟羽排放速度 $v = 15m/s$ 。经计算， $F_b = \frac{gvd^2 \Delta T}{4T_0} = \frac{9.8 \times 15 \times 4^2 \times 107}{4 \times 296} \approx 212.55 > 55$ 。

又由于深圳市大气稳定度为 D 类，其烟气抬升高度 $\Delta h = \frac{38.71 F_b^{0.6}}{u} = \frac{38.71 \times 212.55^{0.6}}{4.54} m \approx 212.44 m$ 。

(c) 污染物的排放速率 Q 的确定

在计算污染物的排放速率 Q 时，我们考虑的是处理单位质量垃圾时，产生的污染物的排放速率。

通过 2014 年深圳杯 C 题的附件，我们查得处理垃圾速率为 $350t/d$ 的垃圾焚烧厂的各项污染物排放水平如下：烟尘的排放速率 $Q_{烟尘} = \frac{0.14t}{d} = \frac{0.14 \times 10^6}{24 \times 3600} g/s \approx 1.62 g/s$ ； SO_2 的排放速率 $Q_{SO_2} = \frac{0.23t}{d} = \frac{0.23 \times 10^6}{24 \times 3600} g/s \approx 2.66 g/s$ ； NO_x 的排放速率 $Q_{NO_x} = \frac{0.3t}{d} = \frac{0.3 \times 10^6}{24 \times 3600} g/s \approx 3.47 g/s$ 。

我们假定大气污染物只考虑烟尘、 SO_2 、 NO_x 的影响，且视其危害相同，故污

染物的排放总速率 $Q_{\text{总}}$ 为烟尘、 SO_2 、 NO_x 的排放速率的算术平均值，即 $Q_{\text{总}} =$

$$\frac{Q_{\text{烟尘}} + Q_{\text{SO}_2} + Q_{\text{NO}_x}}{3} \approx 2.58 \text{g/s}.$$

所以处理单位质量 (1t) 垃圾时，产生的污染物的排放速率 $Q = \frac{Q_{\text{总}}}{350} \approx 0.0074 \text{g/s}$ 。

3.2.2 大气污染物带来的环境成本

(2.1) 大气污染环境成本模型的建立

大气污染物对人体的健康会造成伤害，容易导致呼吸道疾病，一些污染物颗粒还有致癌作用。大气污染物也会影响动物和植物的生存，当人们食用被污染的动植物时也会对人体健康造成间接影响。此外，当空气中污染物被雨水沉降后，会形成酸雨污染土壤。由于污染物的危害极多，难以逐项考虑，故本文假设大气污染物的环境成本正比于其浓度，并设单位浓度的环境成本为 α 元，故单位浓度的环境成本 $I_0 = \alpha C(x, y, 0; H)$ 。

而单位质量 (1t) 污染物导致的环境总成本为 $I = \alpha \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} C(x, y, 0; H) \, dx \, dy$ (元)。

设政府每年用于治理大气污染的经费为 W_1 元，政府对焚烧厂附近居民的总补贴为 W_2 元，全年污染物累计浓度为 $P \text{g/m}^3$ ，则取 $\alpha = \frac{W_1 + W_2}{P}$ 。

所以环境成本 $I = \frac{W_1 + W_2}{P} \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} C(x, y, 0; H) \, dx \, dy$ 。

(2.2) 大气污染环境成本的估算

由于处理单位质量的垃圾的环境成本为 $I = \alpha \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} C(x, y, 0; H) \, dx \, dy$ 。我们用 Matlab 的 `integral2` 函数对 $C(x, y, 0; H)$ 进行积分，得到 $I = \alpha(0.0063 + 6.6150 \times 10^{-4}) \approx 6.9 \times 10^{-3} \alpha$ 元。

由于缺乏治理大气污染的经费 W_1 与政府对焚烧厂附近居民的总补贴为 W_2 ，以及全年污染物累计浓度为 P 的具体数值，我们通过查询进行粗略的估计，暂时令 $\alpha = 10000$ 。故焚烧垃圾的大气污染成本约为 69 元/t。

3.2.3 大气污染物环境成本的影响因素分析

通过 3.2.1 以及 3.2.2 关于大气污染物环境成本的推导，我们发现影响大气污染物环境成本的主要因素中，可人为控制的变量有如下这些：污染物排放速率 Q 、烟囱气体温度 T_0 、烟囱高度 h 、烟囱直径 d 以及烟羽排放速度 v 。由于已建成的焚烧厂的烟囱高度和烟囱直径无法改变，烟羽排放速度也相对难以控制，我们只对污染物排放速率 Q 和烟囱气体温度 T_0 对环境成本的影响做进一步探究。

(3.1) 污染物排放速率 Q 对环境成本的影响

因为大气污染物地面浓度 $C(x, y, 0; H) = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z u} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{H^2}{\sigma_z^2} \right)}$ ，且单位质量的垃圾的环境成本为 $I = \alpha \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} C(x, y, 0; H) \, dx \, dy$ ，所以 I 是 Q 的线性函数。

下面通过 MATLAB 做图进行直观展示。我们已知目前污染物排放速率 $Q \approx$

0.0074g/s, 令 $\alpha = 10000$, 得到的大气污染成本为69元/t。所以在做图时我们令 Q 取从0.003g/s到0.01g/s的范围, 得到单位浓度大气污染物的环境成本 I 与污染物排放速率 Q 的图像如下:

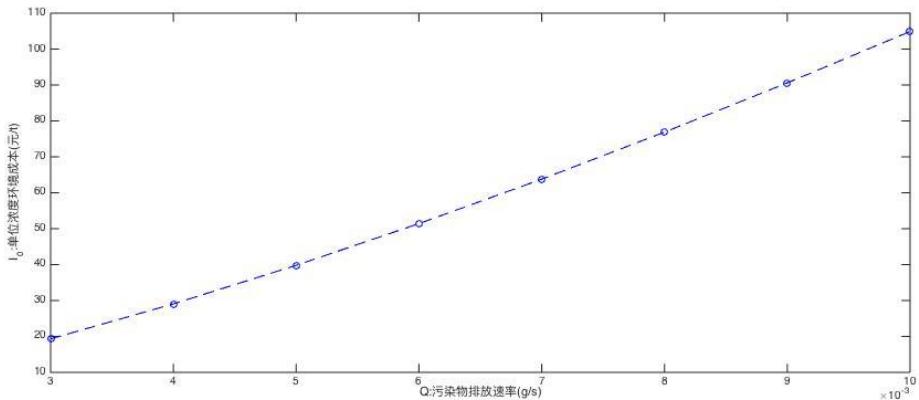


图 3-3 单位浓度的环境成本 I 与污染物排放速率 Q 的函数关系图像

(3.2) 烟囱气体温度 T_0 对环境成本的影响

接下来我们探究烟囱气体温度 T_0 对环境成本的影响。我们在 $T_0 = 130^\circ\text{C}$ 时, 令 $\alpha = 10000$, 得到的大气污染成本为69元/t。所以在做图时我们令 T_0 取从100°C到160°C的范围, 得到单位浓度大气污染物的环境成本 I 与烟囱气体温度 T_0 的图像如下:

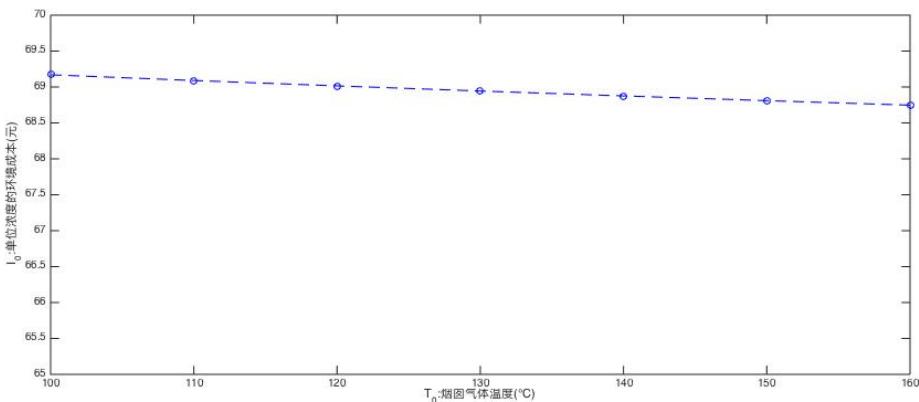


图 3-4 单位浓度的环境成本 I 与烟囱气体温度 T_0 的函数关系图像

通过图像我们可以发现, 当烟囱气体温度从100°C到160°C时, 单位浓度的环境成本 I 均保持在68至70元/t之间, 因此调控烟囱气体温度对降低环境成本并没有太大帮助。

(3.3) 影响因素分析结论

通过上述污染物排放速率 Q 和烟囱气体温度 T_0 对环境成本的影响的分析, 我们发现烟囱气体温度 T_0 对单位浓度环境成本的影响甚小, 而单位浓度环境成本 I 与污染物排放速率 Q 成线性关系。因此降低污染物排放速率才是降低环境成本的最佳方法。

4. 单位社会总成本核算

在《深圳市生活垃圾处理工作志愿者调研笔记 (2015 年)》中列出了垃圾处

理的四种不同的模式，有现行模式，也有设想中的三种其他模式。我们通过前文中经济成本和环境成本的结果来对四种垃圾处理模式的社会总成本进行核算。与前文相同，我们先考虑单位质量垃圾的社会总成本。

4.1 现行模式：混合收集+部分焚烧+部分填埋

目前，深圳市绝大部分地区都采用这种模式处理生活垃圾。垃圾在混合收集之后，部分运送到垃圾填埋场进行填埋，部分运到焚烧厂进行焚烧处理。因此总成本包括转运成本、焚烧部分的焚烧成本和填埋部分的填埋成本。设填埋比例为 μ 。

单位社会总成本

$$= \text{收运成本} + \mu \cdot (\text{填埋经济成本} + \text{填埋环境成本}) + (1 - \mu) \cdot (\text{焚烧经济成本} + \text{焚烧环境成本})$$

表 4-1 现行模式的单位社会总成本核算

成本项目	指标	单位成本(元/吨)
转运成本	中转站成本	37.2
	运输成本	56
	运营成本	60μ
	土地机会成本	71.3μ
填埋成本	建设成本	84.1μ
	填埋收益	-126.4μ
	环境成本	18.7μ
	土地机会成本	$1.28 \cdot (1 - \mu)$
	建设成本	$58 \cdot (1 - \mu)$
焚烧成本	运营成本	$120 \cdot (1 - \mu)$
	灰渣填埋成本	$21.54 \cdot (1 - \mu)$
	焚烧收益	$-204 \cdot (1 - \mu)$
	环境成本	$69 \cdot (1 - \mu)$
计算结果	单位社会总成本	$159.02 - 41.88\mu$

根据 2014 年深圳市生活垃圾基本数据调查，得到生活垃圾焚烧比例为 48.6%，生活垃圾填埋比例为 51.4%。则 2014 年在现行模式下，生活垃圾单位社会总成

本为180.54 元/吨。

4.2 模式一：混合收集+全量焚烧+灰渣填埋

模式一采用混合收集的方法，并将所有垃圾进行焚烧处理，而将灰渣进行填埋。因此得到公式：

$$\text{单位社会总成本} = \text{转运成本} + \text{焚烧经济成本} + \text{焚烧环境成本}$$

表 4-2 模式一的单位社会总成本核算

成本项目	指标	单位成本(元/吨)
转运成本	中转站成本	37.2
	运输成本	56
焚烧成本	土地机会成本	1.28
	建设成本	58
	运营成本	120
	灰渣填埋成本	21.54
	焚烧收益	-204
计算结果	环境成本	69
	单位社会总成本	159.02

因此，在模式一下，生活垃圾单位社会总成本为159.02 元/吨。

4.3 模式二：源头分类收集+厨余垃圾生物处理+干垃圾焚烧

深圳市正在部分地区的小区中推广垃圾源头分类，主要将垃圾分为厨余垃圾和干垃圾。两种垃圾分别运输处理，因此需要更多的中转站设备和转运车辆，假定转运费用以 180% 的系数进行调整^[3] 错误! 未定义书签。]。厨余垃圾被送往生物处理厂进行厌氧发酵制取沼气，干垃圾进行焚烧，灰渣进行填埋处理。分类后干垃圾热值更高，单位质量焚烧发电收益更高，根据资料^[3]，假定单位干组分的发电量提高 20%，从而单位收益为 $204 \times 120\% = 244.8$ 元/t。

设厨余垃圾比例为 θ ，其他垃圾比例为 $1 - \theta$ 。因此得到公式：

$$\begin{aligned} \text{单位社会总成本} &= \text{源头分类成本} + \text{收运成本} + \theta \cdot \text{生物处理成本} + (1 - \theta) \cdot \\ &(\text{干垃圾焚烧经济成本} + \text{干垃圾焚烧环境成本}) \end{aligned}$$

表 4-3 模式二的单位社会总成本核算

成本项目	指标	单位成本(元/吨)	计算说明
------	----	-----------	------

分类成本	源头分类成本	49.7	
转运成本	中转站成本	66.96	$37.2 \times 180\% = 66.96$
	运输成本	108	$56 \times 180\% = 100.8$
生物处理成本	处理成本	1659	
	处理收益	-1369	
焚烧成本	土地机会成本	$1.28 \cdot (1 - \vartheta)$	
	建设成本	$58 \cdot (1 - \vartheta)$	
	运营成本	$120 \cdot (1 - \vartheta)$	
	灰渣填埋成本	$21.54 \cdot (1 - \vartheta)$	
环境成本	焚烧收益	$-244.8 \cdot (1 - \vartheta)$	假设干垃圾焚烧收益提高20%
	环境成本	$69 \cdot (1 - \vartheta)$	
计算结果	单位社会总成本	$242.48 + 3.98 \cdot \vartheta$	

根据 2014 年深圳市生活垃圾基本数据调查, 得到生活垃圾中厨余垃圾比例为 56.35%, 其他垃圾比例为 43.65%。则 2014 年在模式二下, 生活垃圾单位社会总成本为 244.72 元/吨。

4.4 模式三: 混合收集+末端分类+湿垃圾生物处理+干垃圾焚烧

考虑到前端分类推广难度巨大, 而且对垃圾转运工作造成很大压力, 模式四采用了混合收集 (同时混合转运), 在垃圾处理综合园区进行末端分类, 分为厨余垃圾 (俗称湿垃圾) 和其他垃圾 (俗称干垃圾), 并且在园区内将厨余垃圾进行生物处理, 其他垃圾进行焚烧。

设厨余垃圾比例为 ϑ , 其他垃圾比例为 $1 - \vartheta$ 。因此得到公式:

单位社会总成本 = 末端分类成本 + 收运成本 + $\vartheta \cdot$ 生物处理成本 + $(1 - \vartheta) \cdot$
(干垃圾焚烧经济成本 + 干垃圾焚烧环境成本)

表 4-4 模式三的单位社会总成本核算

成本项目	指标	单位成本(元/吨)	计算说明
分类成本	末端分类成本	30	
	中转站成本	37.2	
转运成本	运输成本	56	
	处理成本	1659	

生物处理成本	处理收益	-1369
	土地机会成本	$1.28 \cdot (1 - \vartheta)$
	建设成本	$58 \cdot (1 - \vartheta)$
	运营成本	$120 \cdot (1 - \vartheta)$
焚烧成本	灰渣填埋成本	$21.54 \cdot (1 - \vartheta)$
	焚烧收益	$-244.8 \cdot (1 - \vartheta)$ 假设干垃圾焚烧收益提高20%
	环境成本	$69 \cdot (1 - \vartheta)$
计算结果	单位社会总成本	$148.22 + 3.98 \cdot \vartheta$

根据 2014 年深圳市生活垃圾基本数据调查, 得到生活垃圾中厨余垃圾比例为 56.35%, 其他垃圾比例为 43.65%。则 2014 年在模式二下, 生活垃圾单位社会总成本为 150.46 元/吨。

4.5 四种模式的比较及总结

根据 2014 年深圳市生活垃圾基本数据调查, 四种模式下的生活垃圾处理单位社会总成本分别为: 现行模式 180.54 元/吨, 模式一 159.02 元/吨, 模式二 244.72 元/吨, 模式三 150.46 元/吨。

5. 2017-2026 垃圾清运量预测

在附件 4-9 中, 研究人员运用时间序列预测了垃圾清运量随月份的变化, 文中也提到了该方法的弊端是不能体现各个具体的因素对于垃圾清运量 (记为 V_{trash}) 变化的影响。我们选取了 2000-2013 年的常住人口 ($x_{\text{常住}}$)、户籍人口 ($x_{\text{户籍}}$)、人均消费性支出 ($x_{\text{消费}}$)、生产总值 ($x_{\text{生产}}$)、过夜游客总量 ($x_{\text{游客}}$) 六个指标, 通过相关系数矩阵比较相关性, 选出相关性较高的指标。

5.1 相关系数与相关系数矩阵

相关系数计算公式为 $\rho_{ij} = \frac{cov(x_i, x_j)}{\sqrt{D_{xi}} \sqrt{D_{xj}}}$ ($i, j = 1, 2$), 其中 $cov(x_i, x_j)$ 是 x_i 与 x_j 的协方差, D_{xi} 是 x_i 的方差。通过比较相关系数的大小, 我们可以比较垃圾清运量与各个因素间的相关性。

相关系数矩阵是由矩阵各列间的相关系数构成的。如, 垃圾清运量与常住人口的相关系数矩阵表达式为 $R_{trash-\text{常住}} = \begin{pmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} \\ \rho_{21} & \rho_{22} \end{pmatrix}$ 。我们也可以通过相关系数

矩阵来判断，各个因素之间的相关程度，删去相关程度很高的重复因素。

5.2 相关性比较

计算 V_{trash} 与 $x_{\text{常住}}$ 、 $x_{\text{户籍}}$ 、 $x_{\text{消费}}$ 、 $x_{\text{生产}}$ 、 $x_{\text{游客}}$ 的相关系数矩阵，结果为：

表 4-5 $x_{\text{常住}}$ 、 $x_{\text{户籍}}$ 、 $x_{\text{消费}}$ 、 $x_{\text{生产}}$ 、 $x_{\text{游客}}$ 与 V_{trash} 的相关系数

	$x_{\text{常住}}$	$x_{\text{户籍}}$	$x_{\text{消费}}$	$x_{\text{生产}}$	$x_{\text{游客}}$
与 V_{trash} 的相关系数	0.9752	0.9594	0.7807	0.9354	0.9094

$x_{\text{户籍}}$ 与 $x_{\text{常住}}$ 属于都是描述深圳市本地居民人口的因素，相关性也较高。 $\rho_{\text{户籍}} = 0.9594$, $\rho_{\text{常住}} = 0.9752$, 常住人口与垃圾清运量相关性较高，在接下来的处理中，我们选取 $x_{\text{常住}}$ 作为一个考虑因素。同时， $\rho_{\text{消费}} = 0.7807$, 与其他 5 个因素相比，相关性较低，在接下来的处理中不予考虑。最终，我们选取 $x_{\text{常住}}$ 、 $x_{\text{生产}}$ 、 $x_{\text{游客}}$ 三个因素对 V_{trash} 进行处理。

5.3 多元线性回归分析

对 $x_{\text{常住}}$ 、 $x_{\text{生产}}$ 、 $x_{\text{游客}}$ 关于 V_{trash} 通过进行多元线性回归分析，得到回归方程为：

$$V_{trash} = -542.9107 + 1.1068x_{\text{常住}} - 0.0135x_{\text{生产}} + 0.00997x_{\text{游客}}$$

经计算， $p = 0$ ，回归显著。回归方程的 $r^2 = 0.9567$ ，说明 $x_{\text{常住}}$ 、 $x_{\text{生产}}$ 、 $x_{\text{游客}}$ 三个解释变量可以解释垃圾清运量变化 95% 以上。此外，我们通过 F 检验，探究三个变量的联合显著性。得到 F 值为 73.6948。在 95% 的显著水平上，可以拒绝零假设，即 $x_{\text{常住}}$ 、 $x_{\text{生产}}$ 、 $x_{\text{游客}}$ 三个解释变量的系数是同时显著异于 0 的。

我们注意到常住人口的系数远大于生产总值与游客人口的系数，这说明垃圾清运量主要与常住人口有关。生产总值的系数为负值，这有可能是因为生产总值的提升也代表着经济水平的上升，而经济水平的上升从某种程度上（例如科技水平提高、管理水平提高）会导致垃圾清运量的减少，这是可以理解的。最重要的是，我们得出垃圾清运量主要与常住人口数有关，这是符合实际情况的。

总的来说，这个回归方程的拟合结果是不错的，可以在本文接下来的讨论中继续使用。当然，如果想要得到更加准确的关系，我们需要用更多的数据来进行拟合。寻找数据的工作在这里不作为重点。

5.4 对各个因素进行趋势移动平均法时间序列分析

时间序列是按时间顺序排列的、随时间变化且相互关联的数据序列。分析时间序列的方法构成数据分析的一个重要领域，即时间序列分析。我们选取的

$x_{\text{常住}}$ 、 $x_{\text{生产}}$ 、 $x_{\text{游客}}$ 都可以被称为时间序列。通过绘图，我们发现这三个因素都大体呈直线增长趋势。

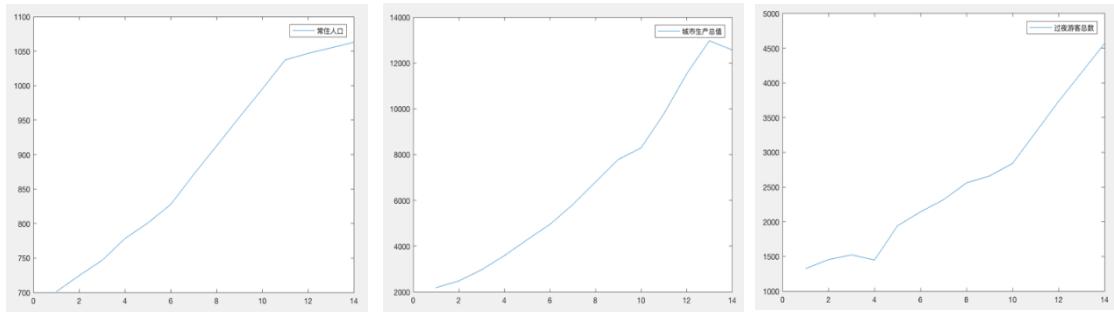


图 4-1 常住人口、生产总值、过夜游客人数在 2000-2013 年的变化

因此，我们选用二次移动平均法来构建我们的预测模型。

二次移动平均法可以利用移动平均滞后偏差的规律来建立直线趋势的预测模型。公式为：

$$M_t^{(1)} = \frac{Y_t + Y_{t-1} + \dots + Y_{t-n+1}}{n}$$

$$M_t^{(2)} = \frac{M_t^{(1)} + M_{t-1}^{(1)} + \dots + M_{t-n+1}^{(1)}}{n}$$

其中 n 为计算移动平均值的跨越期，我们取 $n = 6$ 。

Y_t 为 t 年的常住人口（或生产总值、过夜游客总量）

预测模型为：

$$a_t = 2M_t^{(1)} - M_t^{(2)}$$

$$b_t = \frac{2}{n-1} (M_t^{(1)} - M_t^{(2)})$$

$$Y_{t+T} = a_t + b_t T$$

分别代入常住人口、生产总值、过夜游客总量的数据，我们可以得到以下的三个预测模型：

$$x_{\text{常住}2013+y} = 1103.77 + 31.47y$$

$$x_{\text{生产}2013+y} = 13065 + 1031.8y$$

$$x_{\text{游客}2013+y} = 4266.4 + 291.1y$$

将 4.4 的结果代入 4.3 中得出的公式，我们可以得到：

$$V_{\text{trash}2013+y} = 544.9 + 23.8y$$

这就是我们最终得到的垃圾清运量预测模型。下表是根据该模型，我们对 2017 年至 2026 年十年垃圾清运量做出的预测。（单位：万吨）

2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
640.1	663.2	687.7	711.5	735.3	759.1	782.9	806.7	830.5	854.4

6. 垃圾成分变化趋势预测

因为深圳市的厨余垃圾占垃圾比例很大，而且如何高效无害的处理厨余垃圾是之后深圳市垃圾处理工作的重中之重，所以我们将垃圾分为两类：厨余垃圾、非厨余垃圾。

$\rho_{\text{常住}}$, $\rho_{\text{生产}}$, $\rho_{\text{游客}}$ 与厨余垃圾清运量相关性较高，且为了与之前的计算保持一致，我们仍选用 $\rho_{\text{常住}}$, $\rho_{\text{生产}}$, $\rho_{\text{游客}}$ 作为解释变量。

进行与 5.3 相同的工作，我们得到：

$$V_{\text{厨余}} = -267.7812 + 0.48x_{\text{常住}} - 0.013x_{\text{生产}} + 0.045x_{\text{游客}}$$

经计算， $p = 0$ ，回归显著。回归方程的 $r^2 = 0.9683$ ，说明 $x_{\text{常住}}$, $x_{\text{生产}}$, $x_{\text{游客}}$ 三个解释变量可以解释垃圾清运量变化95%以上。此外，我们通过F检验，探究三个变量的联合显著性。得到F值为71.5515。在95%的显著水平上，可以拒绝零假设，即 $x_{\text{常住}}$, $x_{\text{生产}}$, $x_{\text{游客}}$ 三个解释变量的系数是同时显著异于0的。

再进行与 5.4 相同的工作，将 $x_{\text{常住}2013+y}$, $x_{\text{生产}2013+y}$, $x_{\text{游客}2013+y}$ 代入 $V_{\text{厨余}}$ ，得到：

$$V_{\text{厨余}2013+y} = 284.17 + 14.79y$$

厨余垃圾量占总垃圾清运量的比例（ ϑ ）为：

$$\vartheta = \frac{284.17 + 14.79y}{544.9 + 23.8y} \times 100\%$$

两式相减，得到非厨余垃圾量及占总垃圾清运量的比例随时间变化的关系：

$$V_{\text{其他}2013+y} = 260.73 + 9.01y, \vartheta_{\text{其他}} = \frac{260.73 + 9.01y}{544.9 + 23.8y} \times 100\%$$

下表是我们根据之前的公式得到的厨余垃圾量、厨余垃圾所占所有垃圾的比例、其他垃圾量、其他垃圾所占所有垃圾的比例在 2017–2026 十年间所作的预测。

	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
$V_{\text{厨余}}$	343.34	358.13	372.92	387.71	402.51	417.30	432.09	446.88	461.67	476.46
ϑ	53.63%	54.00%	54.24%	54.49%	54.74%	54.97%	55.19%	55.40%	55.59%	55.77%
$V_{\text{其他}}$	296.76	305.07	338.58	323.79	332.79	341.80	350.81	359.82	368.83	377.94
$\vartheta_{\text{其他}}$	46.37%	46.00%	45.76%	45.51%	45.26%	45.03%	44.81%	44.60%	44.41%	44.23%

7. 社会总成本预测

结合我们计算得到的经济成本、环境成本，及未来十年垃圾清运量的预测，

在不同垃圾清运处理模式下，我们对社会总成本有如下计算。

7.1 现行模式：混合收集+部分焚烧+部分填埋

除去部分试点小区，深圳市现在就在采用这种处理方式。该处理方式下，社会总成本计算公式为：

$$\begin{aligned} \text{社会总成本} = & \text{垃圾清运量} \times (\text{收运成本} + \text{焚烧比例} \times (\text{焚烧经济成本} \\ & + \text{焚烧环境成本}) + \text{填埋比例} \times (\text{填埋经济成本} + \text{填埋环境成本})) \end{aligned}$$

根据 2014 年深圳市生活垃圾处理处置量，可以得到生活垃圾焚烧比例为 48.6%，生活垃圾填埋比例为 51.4%。

将 2017-2026 年的数据代入公式，得到 2017-2026 年社会总成本为：

表 7-1 现行模式社会总成本（单位：亿元）

2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
11.56	11.97	12.42	12.85	13.28	13.71	14.13	14.56	14.99	15.43

表 7-2 现行模式厨余垃圾与其他垃圾造成的社会总成本（单位：亿元）

	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
厨余	6.20	6.47	6.73	7.00	7.27	7.53	7.80	8.07	8.34	8.60
其他	5.36	5.51	6.11	5.85	6.01	6.17	6.33	6.50	6.66	6.82

7.2 模式一：混合收集+全量焚烧+灰渣填埋

该处理方式下，社会总成本计算公式为：

$$\text{社会总成本} = \text{垃圾清运量}$$

$$\times (\text{转运成本} + \text{焚烧经济成本} + \text{焚烧环境成本} + \text{灰渣填埋成本})$$

将 2017-2026 年的数据代入公式，得到 2017-2026 年社会总成本为：

表 7-3 模式一社会总成本（单位：亿元）

2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
10.18	10.55	10.94	11.31	11.69	12.07	12.45	12.83	13.21	13.59

表 7-4 模式一厨余垃圾与其他垃圾造成的社会总成本（单位：亿元）

	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
厨余	5.46	5.69	5.93	6.17	6.40	6.64	6.87	7.11	7.34	7.58
其他	4.72	4.85	5.38	5.15	5.29	5.44	5.58	5.72	5.87	6.01

7.3 模式二：源头分类收集+厨余垃圾生物处理+干垃圾焚烧

$$\begin{aligned} \text{社会总成本} = & \text{垃圾清运量} \times (\text{源头分类成本} + \text{收运成本} + \text{厨余垃圾比例} \times \\ & \text{生物处理成本} + \text{其他垃圾比例} \times (\text{焚烧经济成本} + \text{焚烧环境成本})) \end{aligned}$$

将 2017-2026 年的数据代入公式，得到 2017-2026 年社会总成本为：

表 7-5 模式二社会总成本 (单位: 亿元)

2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
15.66	16.23	16.83	17.41	17.99	18.58	19.16	19.74	20.32	20.91

表 7-6 模式二厨余垃圾与其他垃圾造成的社会总成本 (单位: 亿元)

	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
厨余	8.40	8.76	9.13	9.49	9.85	10.21	10.57	10.94	11.30	11.66
其他	7.26	7.47	8.29	7.92	8.14	8.36	8.59	8.81	9.03	9.25

7.4 模式三: 混合收集+末端分类+湿垃圾生物处理+干垃圾焚烧

$$\begin{aligned}
 \text{社会总成本} = & \text{垃圾清运量} \times (\text{收运成本} + \text{末端分类成本} + \text{厨余垃圾比例} \\
 & \times \text{生物处理成本} + \text{其他垃圾比例} \times (\text{焚烧经济成本} \\
 & + \text{焚烧环境成本}))
 \end{aligned}$$

将 2017-2026 年的数据代入公式, 得到 2017-2026 年社会总成本为:

表 7-7 模式三社会总成本 (单位: 亿元)

2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
9.63	9.98	10.35	10.71	11.06	11.42	11.78	12.14	12.50	12.86

表 7-8 模式三厨余垃圾与其他垃圾造成的社会总成本 (单位: 亿元)

	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
厨余	5.17	5.39	5.61	5.83	6.06	6.28	6.50	6.72	6.95	7.17
其他	4.47	4.59	5.09	4.87	5.01	5.14	5.28	5.41	5.55	5.69

7.5 四种模式的比较及总结

首先, 我们将之前的结果汇总, 得到四种模式下清运所有城市生活垃圾的总成本汇总表。

表 7-9 各模式社会总成本汇总表

	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
现行模式	11.56	11.97	12.42	12.85	13.28	13.71	14.13	14.56	14.99	15.43
模式一	10.18	10.55	10.94	11.31	11.69	12.07	12.45	12.83	13.21	13.59
模式二	15.66	16.23	16.83	17.41	17.99	18.58	19.16	19.74	20.32	20.91
模式三	9.63	9.98	10.35	10.71	11.06	11.42	11.78	12.14	12.50	12.86

按照社会总成本由高到低排列, 四种模式的排序为: 模式三 (混合收集+末端分类+湿垃圾生物处理+干垃圾焚烧)、模式一 (混合收集+全量焚烧+灰渣填埋)、现行模式、模式二 (源头分类收集+厨余垃圾生物处理+干垃圾焚烧)。由于源头分类的成本很高, 所以模式二成为了社会总成本最高的一种模式。模式三结合了

末端分类及湿垃圾生物处理的技术，提出了一个合理的垃圾处理模式，值得政府借鉴。

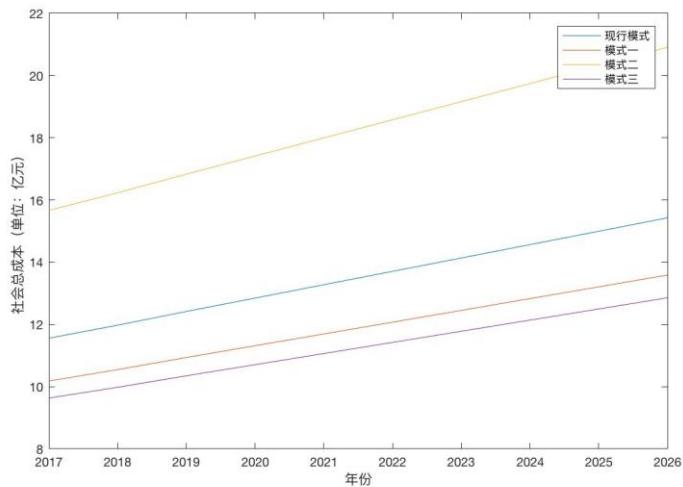


图 7-1 2017-2026 垃圾清运社会总成本分模式比较

表 7-10 各模式厨余垃圾总成本汇总表

	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
现行模式	5.07	5.29	5.50	5.72	5.94	6.16	6.38	6.60	6.81	7.03
模式一	5.44	5.68	5.92	6.15	6.39	6.62	6.86	7.09	7.33	7.56
模式二	8.40	8.76	9.12	9.48	9.84	10.21	10.57	10.93	11.29	11.65
模式三	5.16	5.38	5.61	5.83	6.05	6.27	6.49	6.72	6.94	7.16

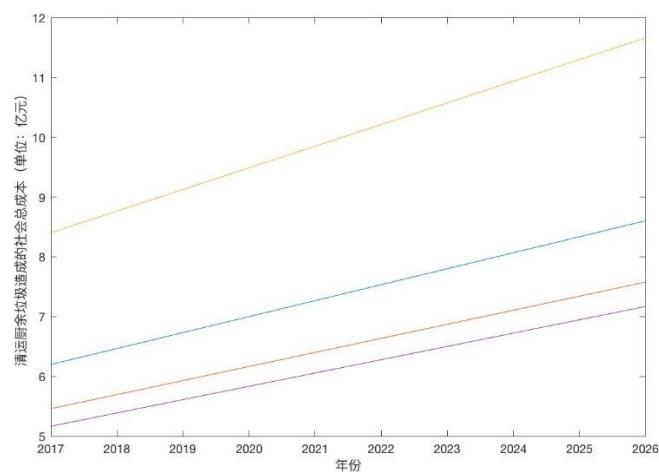


图 7-1 2017-2026 厨余垃圾清运社会总成本分模式比较

8. 远期成本效益分析

根据我们之前的模型，可以大致的刻画深圳市未来十年的垃圾清运量及处理成本的变化。为了更加贴合实际情况，我们将进一步综合政策因素等现实情况进行考虑。

8.1 远期成本效益模型应考虑“厨余垃圾处理器”的影响

早在 2015 年，深圳市就意图出台管理规定，要求新建住宅强制安装厨余垃圾处理器^[23]，同时鼓励已经建成的住宅加装厨余垃圾处理器。该征求意见稿展现了深圳市政府的美好设想。同时，厨余垃圾处理器的线下推广活动也在深圳市的各个小区接连展开。厨余垃圾处理器是一种安装在洗涤盆排水出口的可以将家庭厨余垃圾打碎研磨成细小颗粒随水流沿下水管溜走的用电设备。使用厨余垃圾处理器，不仅帮使用者免除了厨房异味、蚊虫滋生、厨余垃圾丢放等令人头疼的问题，也帮助政府节省了一大笔运输、处理厨余垃圾的经费，同时还减少了环境污染。可谓是一箭三雕。在美国，截至 2009 年，厨余垃圾处理器的覆盖率就已经达到了 50% 以上；然而在中国，截至 2013 年，厨余垃圾处理器的覆盖率仍不过 5%。

这种优点众多的设备在中国覆盖率较低有诸多原因，比如排水设施仍不完善、市民不愿购买、宣传力度不到位等等。但在深圳，考虑到“清源截流”的排水设施建设、市民收入水平的大幅提高、政府的支持与大力补助，厨余垃圾处理器的推广时机已经成熟。

在我们的远期成本效益模型中，将加入“厨余垃圾处理器的推广”这一因素进行考虑。

8.2 基本假设

- (1) 政府仅承担已建成住房加装厨余垃圾处理器的补贴费用，不承担新建住房的厨余垃圾处理器的安装，也不承担后续的售后服务。
- (2) 新建住房的入住率为 50%。
- (3) 污水造成的环境成本仅考虑排放到河道所导致的污染，不考虑管道堵塞等其他情况。
- (4) 厨余垃圾处理器的使用年限为 15 年
- (5) 深圳市人均厨余垃圾产量为 0.158kg/人·日^[24]，按照每户三位居民计算，深圳市户均厨余垃圾年产量为 0.183t/户·年
- (6) 厨余垃圾处理器推广速度与政府补贴数值呈反比
- (7) 深圳市 2015 年厨余垃圾处理器安装比例为 5%

8.3 变量声明

用厨余垃圾处理器处理每吨垃圾带来的额外成本 C_e

清源区域占总区域的比例为 r

传统方式处理每吨厨余垃圾的成本 C_0

原有住宅厨余垃圾处理器处理每吨垃圾节约的成本 C_{e1}

新建住宅厨余垃圾处理器处理每吨垃圾节约的成本 C_{e2}

每台厨余垃圾处理器的政府补贴 a

新建住宅速度 j

新建住宅入住率 μ

目标普及率 α (指在原有住宅中推广目标普及率)

当前普及率 $\beta(t)$ (指在原有住宅中 t 时刻垃圾处理器的普及率)
单位污水处理费 k
错接率 p

8.4 建立厨余垃圾处理器减少社会总成本的模型

在这个部分，我们主要计算厨余垃圾处理器处理每吨厨余垃圾节约的成本 (C)，计算方法为处理现在处理等重量厨余垃圾需要的成本减去处理原先等重量厨余垃圾需要的成本 ($C = C_e - C_0$)。 C_0 已经在前面的讨论中计算好， C_e 又可分为固定成本与可变成本，可变成本又可细分为额外水电费，污水处理费，污水污染费这三个部分。

(1) 在进行具体的计算前，我们必须先对深圳市的污水管网现状进行介绍。^[25]

城市污水处理体系的设计理念是雨污分流。但在实际情况中，由于城市发展速度过快，污水处理体系的建设速度赶不上城市的发展速度。这就使城市的很大一部分区域处于雨污混流的状态。

因此，就出现了城市污水的两种收集处理方法：截排、清源。

截排通常出现在雨污混合区域，是指在污水管网末端设置箱涵，把收集起来的雨污混合水送到污水处理厂进行处理。这种方式的好处是不需要对现有的管道进行维修。但由于箱涵的最大截排能力有限，超出截排能力的污水将直接流入河道，造成污染。

清源是指分别设置两套收集管网，污水被送到污水处理厂，雨水直接排入河道。但由于人为因素，污水管道在建设过程中有可能被错接到雨水管道上，这就造成了一部分污水被直接排到了河道中。

深圳市一部分区域已经实现了雨污分流，但雨污分流项目仍在建设当中。接下来，我们将根据雨污分流项目不同的建设情况，分情况进行讨论。

(2) 每台垃圾处理器每年处理厨余垃圾造成的额外成本 (C_e)

首先考虑安装垃圾处理器的固定成本，即安装厨余垃圾处理器的设备费用。垃圾处理器的设计使用年限为 y 年，深圳市平均每户产生垃圾 $0.183t/\text{户}\cdot\text{年}$ ，求得一台厨余垃圾处理器在设计使用年限内，共可处理垃圾 $0.183y$ 吨。

每安装一台平均水平垃圾处理器，设备原价为 a 元，记为 C_{e1} 。

接下来考虑每台垃圾处理器每年带来的可变成本(记为 C_{e2})，包括额外水电费、污水处理费。

因为1吨餐厨垃圾产生5吨废水，所以处理1吨垃圾大约需要4吨水，造成额外水费9.2元。以每户每天使用两次垃圾处理器，每次一分钟，垃圾处理器功率为420W计算，垃圾处理器一年耗费5.11度电，造成额外电费3.06元，平均每吨造成额外电费16.75元。将前两项加总，共造成额外水电费为25.95元/t。

污水处理费等于清源处理费与截排处理费的加总。

深圳市清源区域占总区域的比例为 r 。每处理1吨厨余垃圾，有 $5r$ 吨污水排入清源系统。考虑错接率为 p ，共有 $5r(1-p)$ 吨污水真正进入清源管道，另有 $5rp$ 吨污水进入截排管道。每吨污水的处理费为 k 元，清源处理费为 $5rk(1-p)$ 元。

截排区域的比例为 $(1-r)$ 。每处理1吨厨余垃圾，有 $5(1-r)$ 吨污水排入截排系统。考虑到由于错接流入截排管道清源污水，共有 $5(1-r+rp)$ 吨污水真正排入截排管道。考虑到超过截排系统最大容量的污水都会被直接排入河道，我们不妨令污水直排率为 δ ，用来描述污水直接排入河道的比例。 $5(1-r+rp)$ 吨污水中，有 $5(1-r+rp)\delta$ 吨污水直接排入了河道，每吨污水直接排入河道的环境成本为 z ，共造成环境成本 $5z(1-r+rp)\delta$ 元； $5(1-r+rp)(1-\delta)$ 吨污水进入

污水厂,污水处理费用为 $5k(1-r+rp)(1-\delta)$ 元。综上,截排处理费为 $5(1-r+rp)(k-k\delta+z\delta)$ 元/t。

因为每台垃圾处理器每年可处理 0.183t 垃圾,垃圾处理器每年的可变成本为

$$C_{e2} = [25.95 + 5rk(1-p) + 5(1-r+rp)(k-k\delta+z\delta)] * 0.183 \quad (8.1)$$

(3) 垃圾处理器可以节约的成本 (C_r)

总的垃圾量会由于厨余垃圾量的减少而减少,从而减少一系列的运输、转运、处理成本。

每台垃圾处理器每年可处理垃圾 0.183 吨,我们可以得到

$$C_r = 0.183 * C_0 \quad (8.2)$$

C_0 为不同模式下处理每吨厨余垃圾的社会总成本。

(5) 仅在清源区域推广垃圾处理器

在截排区域大范围推广垃圾处理器,由于管道与处理方式的落后,很容易造成河流污染,并提高相应处理成本。考虑到这一点,如果不进行排水管道的改进的话,深圳市政府应该会首先选择在清源区域推广垃圾处理器。所以,目标覆盖率与清源区域比例有关系 $\alpha \leq r$

每吨垃圾产生的污水中,有 $5(1-p)$ 吨污水流入了清源管道, $5p$ 吨污水流入了截排管道。流入清源管道污水共造成处理费 $5(1-p)k$ 元,流入截排管道污水共造成处理费加河道直排污染治理费 $5p(\delta z + k - k\delta)$ 元。额外水电费为25.95元/t。将固定成本、可变成本进行加总,得到仅在清源区域推广垃圾处理器的情况下,用每台厨余垃圾处理器处理每年带来的额外成本 C_{e2} :

$$C_{e2} = [25.95 + 5(k + pz\delta - pk\delta)] * 0.183 \quad (8.9)$$

因为相关条件没有改变,(7.4)计算出的 t_i 时刻深圳市原有住宅中垃圾处理器的安装率 $\beta(t_i)$,厨余垃圾处理器安装总量 $l(t_i)$,厨余垃圾处理器使用总量 $\tilde{l}(t_i)$ 仍然适用于(5)的情况。

根据上面我们算出的成本公式,可以得到:

t_i 时刻,深圳市处理厨余垃圾处理器节约成本:

$$\beta(t_i) * (C_{r1} + C_{r2} - C_{e2}) - (\beta(t_i) - \beta(t_{i-1})) * C_{e2} \quad (8.10)$$

截至 t_i 时,深圳市推广垃圾处理器节约总成本为

$$\sum_{k=1}^i \beta(t_k) * (C_{r1} + C_{r2} - C_{e2}) - (\beta(t_k) - \beta(t_{k-1})) * C_{e2} \quad (8.11)$$

(7) 推广速度与节约成本计算

在计算中,我们取 $\alpha = 400, v(t) = 4 * 10^4, \mu = 50\%, \alpha = 50\%, k = 1.03, \delta = 20\%, p = 5\%$,厨余垃圾处理器每年处理的垃圾量 $m = 0.183t$ 。

8.5 考虑垃圾处理器之后的社会总成本

将我们之前提到的四个模型与“厨余垃圾处理器”进行结合,我们可以得到最终的社会总成本:

$$\text{社会总成本}' = \text{社会总成本} - \text{推广垃圾处理器节约总成本}$$

在接下来的讨论中,我们将 8.4(5)的情况代入四种模式。因为 8.4(5)不需要深圳市政府展开工程巨大的清源建设,且仅在清源区域推广能够减少污水直排,

较全面推广是更优的方案。

经过 Matlab 计算，我们得到：

2017-2026 年垃圾处理器处理垃圾量（单位：万吨）

2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
5.25	7.44	9.64	11.83	14.03	16.23	18.42	20.62	22.81	24.46

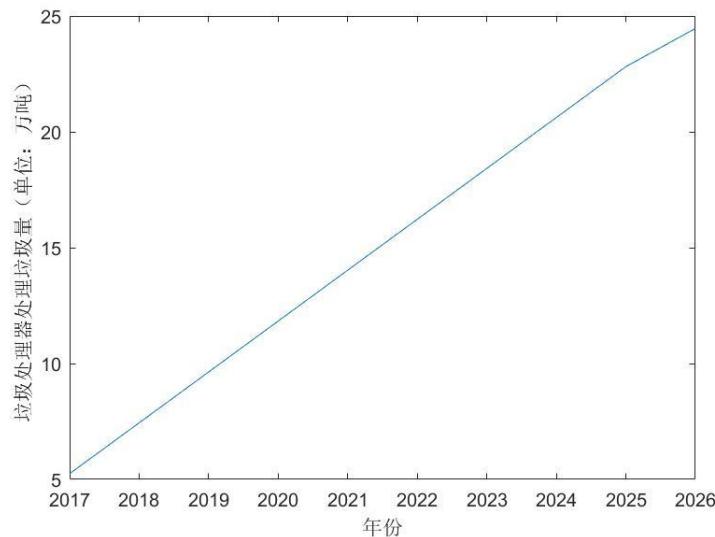


图 8-1 2017-2026 年厨余垃圾处理器处理垃圾量

在清源区域逐步推广的情况下，厨余垃圾处理器的处理量逐年上升。在 2025-2026 年增速放缓，这是因为在 2025 年 9 月时已经完成了清源区域全面安装厨余垃圾处理器的工作，新的增长仅来自于新建住宅中安装的厨余垃圾处理器。

从下图可以看出，推广垃圾处理器对城市生活垃圾的减量效果十分明显。

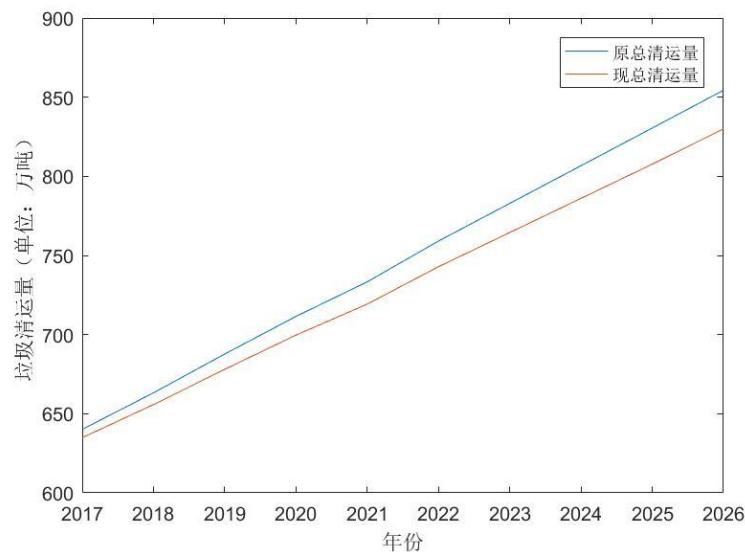


图 8-2 2017-2026 年推广前后垃圾清运量

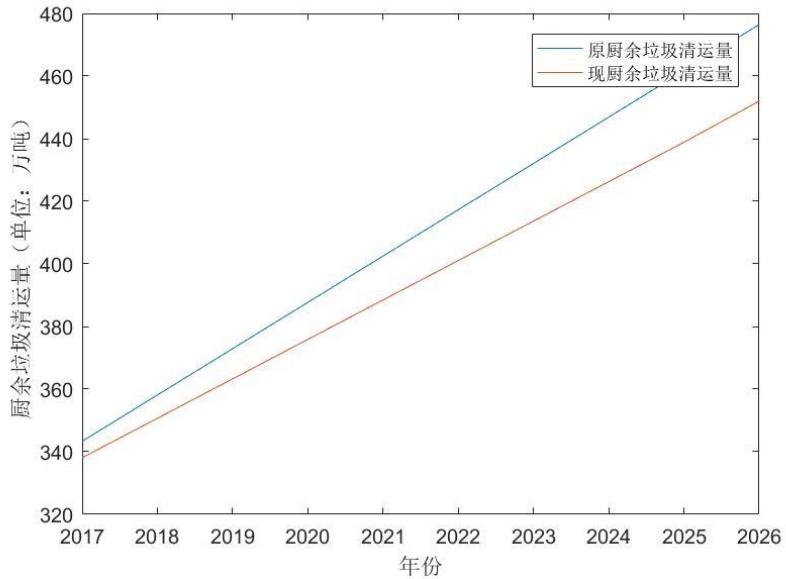


图 8-3 2017-2026 年推广前后厨余垃圾清运量

垃圾处理器处理的都是厨余垃圾, 所以推广垃圾处理器对厨余垃圾的源头减量效果尤其明显, 减量率最高达到了 5.13%。政策推行的十年间, 共减少厨余垃圾清运 150.73 万吨, 效果显著。

推广厨余垃圾处理器的成本与垃圾清运的模式无关, 接下来我们先计算厨余垃圾处理器每年造成的额外成本。

2017-2026 年厨余垃圾处理器每年额外成本 (单位: 百万元)

2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
2.08	2.96	3.83	4.70	5.57	6.44	7.32	8.19	9.06	9.71

(1) 现行模式:

将现行下的成本 C_0 代入, 得到:

2017-2026 年厨余垃圾处理器每年节约成本 (单位: 百万元)

2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
9.47	13.43	17.40	21.36	25.33	29.30	33.26	37.23	41.18	44.16

(2) 模式一:

将模式一下的成本 C_0 代入, 得到:

2017-2026 年厨余垃圾处理器每年节约成本 (单位: 百万元)

2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
8.35	11.83	15.33	18.81	22.31	25.81	29.29	32.79	36.27	38.90

(3) 模式二:

将模式二下的成本 C_0 代入, 得到:

2017-2026 年厨余垃圾处理器每年节约成本 (单位: 百万元)

2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
12.85	18.21	23.59	28.95	34.33	39.72	45.08	50.46	55.82	59.86

(4) 模式三:

将模式三下的成本 C_0 代入, 得到:

2017-2026 年厨余垃圾处理器每年节约成本 (单位: 百万元)

2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
7.90	11.19	14.50	17.80	21.11	24.42	27.71	31.02	34.32	36.80

8.6 远期成本效益模型

我们认为，在考虑远期成本效益模型时，应满足以下几个条件：1) 垃圾逐年增长量不能过高 2) 废气、渗透液、废水所造成的环境污染成本不能过高 3) 在一定时间段内，社会总成本要达到最低。

提出 1) 的原因是垃圾增长迅速客观上已经造成了“垃圾围城”的现象。虽然在我们的模型计算中没有考虑深圳市总面积与垃圾处理厂建筑面积的关系，但是由于垃圾处理厂的特殊性质，能够建造垃圾处理厂的区域是有限的。而且，在用地如此紧张的情况下，垃圾处理厂占用过多的工业用地也会造成一定程度上的浪费。因此，我们设定 ΔV 来代表垃圾清运量每年的增量，并要求其小于某个值，即有公式 $\Delta V < M_V$ 。

第二，由于深圳市用地情况十分紧张，我们应该控制处理单位垃圾所占用的土地。垃圾填埋处理单位垃圾所占土地最多，所以我们应该尽量减小垃圾填埋的比例。

第三，我们要求在一定时间内，社会总成本最小，不妨取这个时间为 10 年。因此，我们得出最终的远期成本效益模型如下：

$$C = \sum_{i=1}^{10} C_{\text{社会}i} - C_i$$

$$\Delta V < M_V$$

$$\Delta C_{\text{环境}} < M_E$$

其中， $C_{\text{社会}i}$ 为第 6 小节计算得到的每年社会总成本， C_i 为 7.5 计算出的推广厨余垃圾处理器节约的每年的成本。我们可以得到四个模式下，十年的社会总成本总和，并从中选取 C 最小的一个作为我们的优选模式。

经过计算，我们得到：

十年远期成本效益模型表（单位：亿元）

现有模式	模式一	模式二	模式三
132.19	116.41	179.15	110.15

考虑十年的远期成本效益，我们得到四种模式从最优到最差的排序为：模式三、模式一、现有模式、模式二。模式三（混合收集+末端分类+湿垃圾生物处理+干垃圾焚烧+推广厨余垃圾处理器）为最终的优选模式。

9. 给政府的建议

深圳市应积极推行“垃圾减量，末端分类，推广厨余垃圾处理器”的政策。

首先，根据我们的计算，模式三的社会总成本是最小的。这是由于在末端分类之后，干湿垃圾可以分别采用最恰当的方式处理，且提高了处理中的经济效益。而相比于填埋，焚烧是成本更低的垃圾处理方法，因此我们本文提出的模式三（混合收集+末端分类+湿垃圾生物处理+干垃圾焚烧+推广厨余垃圾处理器）是一种值得借鉴的方式。

第二，由于垃圾清运成本直接的与垃圾清运量挂钩，控制垃圾量的增长速度甚至是减少垃圾清运量都能够使垃圾清运成本大幅降低。推广厨余垃圾处理器是一个很好的“源头减量”的方法，不但减少了总的垃圾清运量，还减少了剩余垃圾中的湿垃圾比例，可以说是一举两得。限于深圳市排水系统的现实情况，厨余垃圾处理器的推广无法一步到位，但仍应遵循“快准广”的准则进行推广，要快速推广，要准确的在下水管道为清源的区域推广，要尽可能的广泛推广。厨余垃圾处理器的推广效果越好，垃圾减量的效果越好，节约成本的效应就越明显。

第三，应大力推广深圳市的垃圾末端分类工作，好处有以下三点。第一点，末端分类后可以对部分垃圾进行无害的生物处理，对有可回收利用价值的垃圾进行回收利用。第二点，末端分类可以间接的降低单位垃圾的焚烧、填埋成本。由于不适于焚烧的垃圾会被分类进行其他处理，剩余垃圾的焚烧效率会变高。而大部分湿垃圾会被用于生物处理，间接的使填埋垃圾的渗透液减少，从而减少了填埋垃圾的环境成本。第三，相比于源头分类的高昂推广成本，末端分类的推行成本更低且转运成本也更低，更加适合推广。同时值得注意的是，深圳市大部分垃圾焚烧厂都处于超负荷运行状态，而每年用焚烧方法处理的垃圾量还在不断的上升。这直接导致了深圳市垃圾焚烧厂的使用年限远远低于设计年限，间接地导致了焚烧单位垃圾的固定成本上升。而末端分类可以减少垃圾焚烧厂的负荷，从而延长垃圾焚烧厂的实际使用年限。

最后，深圳市应在拾荒者这一群体上付出努力，为他们寻找其他就业机会或纳入管理体系，理由如下：深圳市的垃圾成分中，厨余垃圾比重很大，这很大一方面是由于金属、玻璃、塑料、纸等可回收物已经被拾荒者拾走。在这种现状下，深圳市开展垃圾分类的工作会出现投入很大，效果并不明显的现象，因为对现有的垃圾进行了分类，也不能得到足够的可回收物。另一方面，拾荒群体缺乏管理，工作效率低，是对劳动力的浪费。垃圾分类回收的工作应有政府主导，但这一工作现在主要由拾荒者完成。因此，对于拾荒者的管理与安置是深圳市要开展垃圾分类的重要一环。

10. 总结

首先，我们在考虑社会总成本的时候不仅考虑了经济成本，还考虑了环境成本。这样的社会总成本的定义无疑是更符合实际的。

然后，我们按照垃圾处理的流程将经济成本分为五个部分：收运成本、分类成本、填埋成本、焚烧成本和生物处理成本。对于环境成本，我们将其分为了焚烧垃圾对大气的污染成本，和填埋垃圾对地下水及河道的污染成本。

接下来，我们对深圳市生活垃圾清运量的变化趋势进行了研究。我们先通过比较相关系数确定了3个影响因素，再通过多元线性回归确定了他们之间的关系。接着，我们还进行了一系列检验，证明该方程是有效的。

通过之前两步算出的单位成本与清运量变化，我们可以初步的得出我们社会总成本模型。我们发现，模式三是四种垃圾清运模式中总成本最低的模式。

然后，我们结合深圳市正在大力推广“厨余垃圾处理器”的政策，以及“清源截排”的方针，计算了在不同情况下，推广厨余垃圾处理器所能节约的成本。我们发现，不管是在哪种模式下，厨余垃圾处理器的推广都能够有效点的从源头减少厨余垃圾的清运量，并且减少该模式的社会总成本。深圳市推广厨余垃圾处理器的想法是完全正确的。

11. 需要的数据

1. 深圳市地下河水流均速 \bar{V} , 深圳市卫生填埋场垃圾渗滤液泄露比例 η , 渗滤液中COD浓度平均值为 ρ , 每吨垃圾在填埋后总计产生的垃圾渗透液体积 V_0 。
2. 政府每年用于治理大气污染的经费 W_1 , 政府对焚烧厂附近居民的总补贴 W_2 , 以及全年污染物累计浓度为 P , 用以求单位浓度的污染物的环境成本 α 。
3. 深圳市新建住房速度 j , 深圳市厨余垃圾处理器补贴 a 与推广速度 v 之间的关系, 截排区域的平均污水直排率 p , 清源截排建设速度 ω, γ 。

参考文献

- [1] 东县生活垃圾压缩式中转站工程建设与运行管理实施方案
<https://wenku.baidu.com/view/2df0eac5ba1aa8114431d9ea.html>
- [2] 大型垃圾中转站人员配置及运行费用
<https://wenku.baidu.com/view/a794a89183d049649b66589c.html?from=search>
- [3] 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[J]. 环境卫生工程, 2012, 20(1):20-23.
- [4] 环卫科技, 深圳市城市管理局,
http://www.sz.gov.cn/szum/xsmh/gahwgrx/hwkj/201611/t20161114_5305342.htm, 2016-11-14
- [5] 垃圾填埋气项目发电简介,
<https://wenku.baidu.com/view/d24197b669dc5022aaea00c4.html>, 2012-5-19
- [6] 中国最大填埋气发电项目投运-年发电量 1.6 亿度,
<http://tech.sina.com/roll/2017-05-27/doc-ifyfqqyh8680645.shtml>, 2017-5-27
- [7] 深圳市生活垃圾填埋场一览表, 深圳市城市管理局,
http://www.sz.gov.cn/szum/xsmh/gahwgrx/hwsj/201606/t20160629_3733167.htm, 2016-6-29
- [8] 生活垃圾焚烧发电的优势
<https://wenku.baidu.com/view/39874a715727a5e9846a611c.html>
- [9] 推广微生物处理 餐厨垃圾变商机 <http://www.h2o-china.com/news/164991.html>
- [10] 吴昊, 张赣道. 生活垃圾生物处理的研究与展望[J]. 中国环保产业, 2004, 17(8):38-40.
- [11] 刘桂军. 城市生活垃圾渗滤液对土壤、地下水的影响研究[D]. 北京工业大学, 2004.
- [12] 百度百科-卫生填埋
<http://baike.baidu.com/item/%E5%8D%AB%E7%94%9F%E5%A1%AB%E5%9F%8B>
- [13] 生活垃圾填埋场污染控制标准 (GB 16889-2008)
- [14] 地下水中溶质迁移扩散理论
<https://wenku.baidu.com/view/33655a07591b6bd97f192279168884868762b8cf.html>
- [15] 宋树林, 林泉. 地下水弥散系数的测定[J]. 海岸工程, 1998 (3):61-65.
- [16] 于航, 陶磊. 水污染经济损失核算方法初探[J]. 2005.
- [17] 于鲁冀, 王燕鹏, 梁亦欣. 基于污水治理成本的流域污染赔偿标准研究[J]. 生态经济(中文版), 2011(9):51-54.
- [18] 文邦彦, 赵晓杰, 谢馨瑶, 污染物扩散模型深圳数学建模,
<https://wenku.baidu.com/view/48bae855cf789eb162dc83f.html?re=view>
- [19] Plume Dispersion Coefficients,
<http://courses.washington.edu/cee490/DISPCOEF4WP.htm>
- [20] Chun-Ho Liu, Dispersion Modeling, The University of Hong Kong
- [21] 市气象局网站, <http://www.szmb.gov.cn/article/QiHouYeWu>
- [22] 2014 深圳杯 c 题垃圾焚烧厂的经济补偿问题, <http://www.docin.com/p-915151225.html?docfrom=rrela>
- [23] 《深圳市新建住宅建筑推广使用家庭厨余垃圾处理技术的管理规定》(征求意见稿)
- [24] 维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/Garbage_disposal_unit
- [25] 王汝韵, 郑逸斐, 张元祚《雨污处理方案的数学模型》