

Design of Collection and Transportation for Rural Solid Waste*

Weiwei Jiang, Shujun Lian

College of Management, Qufu Normal University, Rizhao
Email: qiangwe.i.1988@163.com

Received: Jul. 31st, 2013; revised: Oct. 19th, 2013; accepted: Oct. 22nd, 2013

Copyright © 2013 Weiwei Jiang, Shujun Lian. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: In this paper, the collection and transportation system for the solid waste produced in the rural area is studied. Using the knowledge on linear programming, an optimization model is developed for the location of transfer stations under certain conditions. Based on this location selection plan, the author provides the waste transportation scheme: waste landfill site—transfer stations—waste landfill site. This scheme is the optimal one with the lowest cost.

Keywords: Transfer Station; Linear Programming; Optimal Transport Routes

农村生活固体垃圾的收集与运输方案设计*

姜薇薇, 连淑君

曲阜师范大学管理学院, 日照
Email: qiangwe.i.1988@163.com

收稿日期: 2013年7月31日; 修回日期: 2013年10月19日; 录用日期: 2013年10月22日

摘要: 针对农村生活产生的固体垃圾的收集与运输问题进行研究, 运用线性规划的知识, 给出在一定条件下建立投资成本最小的垃圾中转站的选址方案, 并在此基础上设计“垃圾处理场-中转站-垃圾处理场”模式的费用最低的最优运输方案。

关键词: 中转站; 线性规划; 最优运输路线

1. 引言

我国是一个农村人口占多数的农业型国家, 长期以来, 由于农村传统的社会结构形态和生产生活方式, 农村生活垃圾因其数量少, 成分单一和易于分解, 一直依靠堆积化肥、简易填埋或自然腐烂等方式维系着垃圾总量与生态平衡。近年来, 随着我国农村经济的迅猛发展, 人们生活水平有了大幅提升, 特别是在农村, 生活水平有了很大的提高, 但是随之产生的垃圾也越来越多, 污染也越来越严重, 农村环境受到了很大的影响。长期以来, 这些垃圾随意散乱堆放在村庄的周围, 污染面广量大, 导致农村生态环境日益恶化。如果不加以及时整治, 由这些垃圾引起的环境问题将严重影响农村居民的生存健康, 同时还将对农村的生态环境构成严重的威胁, 进而影响农产品的安全。然而, 一直以来, 环境保护的重点是城市, 对农村的环境保护没有得到充分的重视, 环境保护教育也未普及到农村, 再加上由于我国农村经济起步晚、底子薄、来源单一, 多数集体经济的收入仅够维持村级组织的日常运转, 无力顾及基础设施建设, 既没有垃圾收集容器, 也没有垃圾收集车等垃圾处理设施, 成为了环境管理的盲区^[1]。因此, 制定一套科学、合理、节约型的农村垃圾收集与运输系统势在必行。

*本文由国家自然科学基金(编号: 71371107)及山东省自然科学基金(编号: ZR2012AL07)资助。

垃圾的收集、运输、转运等一系列过程的总和构成了垃圾收运系统。合理的中转站选址和优化的垃圾收集路线、运输路线可以使车辆的调度更加高效, 车辆的行驶距离减少, 从而有效地节约了时间和投资成本, 也使得人力物力资源得到了更高效的发挥。

在对生活垃圾收集与运输路线优化问题的研究上, 国外较早开始研究, 主要研究内容是车辆路径问题、邮递员问题和旅行商问题。近年来, 我国学者在国外研究的基础上, 结合国内的实际情况, 对生活垃圾收集与运输路线优化问题进行了大量的研究, 优化方法也日趋成熟。在文献[2]-[4]中, 盛金良等人主要对中转站选址的限制因素、选址理论、选址模型及收运路线的优化等进行了理论分析。在文献[5]中, 贾传兴等人引入逆向物流系统选址规划的理念, 对中转站选址分阶段地 2 次优化, 运用整数规划构建整个城市垃圾收运系统费用最小模型。在文献[6]中, 吕新福等人同时研究了带有时间周期的固体废弃物回收中转站的选址和废弃物运输路线的安排, 建立了选址-路径规划问题的模型。在文献[7,8]中, 路玉龙等人建立了在中转站已知的情况下, 以收运总路线最短为目标函数的优化模型。

但是, 他们的研究着重点是中转站的选址和垃圾从收集点到中转站的收集路线的优化, 对垃圾从中转站到垃圾处理场的运输, 都是预先假定了中转站的垃圾是直接被运送垃圾处理场, 通过构建一个整体模型来解决中转站的选址到垃圾的收集路线与运输路线的优化问题。而本文则是将中转站的选址问题与垃圾从中转站到垃圾处理场的运输路线的优化问题分开考虑: 对中转站的选址, 给出的是一个最基本的选址方案模型, 根据不同的情况还可以进行适当的调整; 重点对从中转站到垃圾处理场的运输路线优化问题进行了研究。另外, 本文在建立中转站的选址模型时, 考虑到我国农村人口居住比较分散的特点, 垃圾中转站一般建立在村庄当中, 垃圾收集车每村均有(设立中转站的村庄除外), 垃圾运输车由停放在垃圾处理场负责, 略去了车库, 可以减少从车库到收集点的费用, 从而减少了总成本。

基于投资成本和农村实际情况考虑, 本文将垃圾的收集与运输分开考虑, 即首先每天由每个村庄运送本村垃圾到某些固定的中转站, 再由这些中转站定时将运送垃圾到该地区的垃圾处理场进行集中处理。在第 2 节, 主要讨论两类数学问题:

一是中转站的选址问题^[9,10];

二是垃圾运输车从处理场出发以后, 经过中转站再回到处理场的运输问题。分别设定参数, 建立完整的线性规划模型。

2. 模型建立

2.1. 由村庄到中转站的模型建立

2.1.1. 问题描述

将垃圾从村庄运到中转站的路线可描述为: 每个村庄均有垃圾收集车。每天由垃圾收集车把本村垃圾运到对应的中转站后, 再返回村庄。

每个村庄向中转站的垃圾运送都是互相独立的。

运往中转站的垃圾累积量不能超过中转站的最大容量。

本文建立的是一个最基本的中转站选址模型。

已知条件:

- (1)村庄与村庄之间。
- (2)各个村庄每天产生的垃圾量。
- (3)每辆垃圾收集车的载重量。

2.1.2. 基本假设和符号说明

基本假设:

该地区短时间内人口不会有太大出入;
 每个村的平均日产垃圾量相等;
 任意两村之间的道路都是畅通无阻的;
 每个村的垃圾桶的放置由该村的人口居住密度等因素自行决定;
 每个村的垃圾都是每天清理一次, 并由清洁工运往中转站, 没有积累;
 垃圾中转站一般设在该地区的某些村当中;
 垃圾收集车由每个村庄自行配置管理, 每天从该村运送垃圾到中转站后再回到该村;
 垃圾收集车的费用与它的路程成正比关系;
 路线设计不考虑除运输成本之外的其他因素, 如: 环保因素等。

符号说明:

该地区共有 N 个村庄

M_i 表示村 i 在一天产生的垃圾总量(这个数据可由该村的个人日平均产量乘以该村总人口获得), 单位吨

M_0 表示中转站的最大垃圾容量, 单位吨

M 表示垃圾收集车的载重量, 单位吨

K_i 表示将垃圾从村 i 运往中转站所需要的车辆 $\left(K_i = \left[\frac{M_i}{M} \right] + 1 \right)$

p 表示建立的中转站的最小个数

q 表示建立的中转站的最大个数

d_{ij} 表示村 i 到村 j 的距离 $d_{jj} = 0$, 单位: km

c 表示表示单位距离单位垃圾量的费用, 单位: 元/km/t

$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{分配村 } i \text{ 的垃圾运往 } j \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$

$x_{jj} = \begin{cases} 1, & \text{为中转站设置点} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$

2.1.3 模型建立

数学模型可表示为

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N c \cdot M_i \cdot d_{ij} \cdot x_{ij}$$

s.t

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} = 1 \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (\text{村 } i \text{ 只将垃圾运往村 } j)$$

$$p \leq \sum_{j=1}^N x_{jj} \leq q \quad (\text{所设中转站的个数限制})$$

$$\sum_{i=1}^N x_{ij} \cdot M_i \leq M_0 \quad (\text{中转站的规模限制})$$

$$x_{ij} \leq x_{jj} \quad (i=1, 2, \dots, N; j=1, 2, \dots, N) \quad (\text{只往有中转站的村庄运垃圾})$$

$$x_{ij} = 0 \text{ 或 } 1 \quad (i=1, 2, \dots, N; j=1, 2, \dots, N)$$

2.1.4. 案例分析

Lingo11.0 是一种能够求解大规模线性规划、整数规划和非线性规划的优化软件。本文所建的上述模型是线性规划模型, 故可直接用现成软件 Lingo 来求解。

本案例的垃圾收集方式为: 在此垃圾收集区域内, 居民自行将垃圾送往本村的垃圾收集点。每个村庄都有垃圾收集车(设有中转站的村庄除外), 负责本村的垃圾运送, 每天一次, 将垃圾运往中转站后, 返回村庄。

为了简化计算规模, 本文以 8({1,2,3,4,5,6,7,8})个村庄的一天的垃圾收集为例, 每个村平均垃圾日产量为 2 t。其余参数为: 单位距离(km)单位垃圾量的费用 10 元/t, 垃圾收集车的载重量为 5 t, 中转站的最大垃圾容量为 10 t, 建立的中转站的个数最少不能小于 1 个, 最多不能超过 2 个。各个村庄之间的距离(km)如下表 1:

Table 1. The distance between the villages
表 1. 村庄之间的距离

d_{ij} (km)	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	3	1	12	7	5	6	3
2	3	0	7	4	1	8	1	2
3	1	7	0	3	1	6	4	9
4	12	4	3	0	7	8	9	5
5	7	1	1	7	0	13	5	1
6	5	8	6	8	13	0	5	2
7	6	1	4	9	5	5	0	1
8	3	2	9	5	1	2	1	0

据此可求得建立的中转站的个数以及中转站位置, 如下表 2:

Table 2. The calculation results
表 2. 计算结果

建立的中转站	由其负责的村庄
3	1、3、4
8	2、5、6、7、8

目标函数的最优值为: 200(元/天)。

2.1.5. 结论

在对中转站选址问题的研究上, 本文建立的是一个基本的选址模型, 目标函数仅考虑了垃圾的收集费用。在实际运作时, 可以把中转站的建设费用和运行成本等也加到目标函数中去。模型的灵活性更高, 实用性更强。

2.2. 由中转站到处理场的模型建立

2.2.1. 问题描述

将垃圾从中转站运往垃圾处理场的垃圾运输车的运输路线可描述为: 垃圾运输车从处理场出发, 去各个中转站收集垃圾, 待中转站的垃圾收集完毕以后回到处理场。

每个中转站的垃圾可分量由多辆垃圾运输车收集。

每辆垃圾运输车可以去多个中转站, 且从一个中转站收集完垃圾后只能去下一个中转站或返回处理场。

垃圾运输车所装载的垃圾量不能超过它的容量。

每次垃圾运输车从处理场出发去中转站收集垃圾, 最后回到垃圾处理场之后将不再去收集垃圾。

已知条件:

1) 村庄与处理场之间的距离。

- 2) 中转站每天的垃圾量。
- 3) 每辆垃圾运输车的载重量。

2.2.2 基本假设和符号说明

基本假设:

该地区短时间内人口不会有太大出入;

该地区只有一个垃圾处理场, 所有中转站的垃圾都将运往这个处理场;

垃圾运输车从处理场出发, 到中转站装完垃圾后回再到处理场;

中转站的建设费用不在我们的考虑范围之内;

中转站的建设规模为每天由村庄运往中转站的所有垃圾的3倍, 每两天被清理一次(这里也可以根据当地的情况, 把中转站的规模建为每天由村庄运往中转站的所有垃圾的2倍、4倍、5倍...);

垃圾运输车的费用与它的路程成正比关系;

路线设计不考虑除运输成本之外的其他因素, 如: 环保因素等;

符号说明:

共有 H 个中转站

每天由村庄运往中转站 j 的垃圾总量为 m_j , 单位吨

$2m_j$ 表示中转站 j 每次需要清理的垃圾量, 单位吨

m_{ij} 表示垃圾运输车 t 在中转站 j 装载的垃圾量, 单位吨

M 表示垃圾运输车的载重量, 单位吨

$$K \text{ 表示垃圾运输车所需要的数量 } \left(K = \left\lceil \frac{\sum_{j=1}^H (2m_j)}{M} \right\rceil + 1 \right)$$

S 表示一辆垃圾运输车平均一次的出车费(包括工人工资+车辆损耗费)

S_{ii} 表示垃圾运输车 t 从处理场出发到中转站 i 的费用

S_{ij} 表示垃圾运输车从中转站 i 到中转站 j 的费用

S_{jt} 表示垃圾运输车 t 从中转站 j 回到处理场的费用

$$y_{ii} = \begin{cases} 1, & \text{垃圾车 } t \text{ 从处理场出发到第一个中转站是中转站 } i \text{ (垃圾车 } t \text{ 从中转站 } i \text{ 开始装载垃圾)} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

$$z_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{中转站 } i \text{ 到中转站 } j \text{ (垃圾车在中转站 } i, j \text{ 都装载垃圾)} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

$$r_{jt} = \begin{cases} 1, & \text{垃圾车 } t \text{ 由中转站 } j \text{ 回到处理场 (垃圾车 } t \text{ 从中转站 } j \text{ 出发以后不再装载垃圾)} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

$$w_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{垃圾运输车 } t \text{ 到过中转站 } j \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

2.2.3 模型建立

数学模型可表示为:

$$\min \sum_{t=1}^K \sum_{i=1}^H y_{ii} s_{ii} + \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^H z_{ij} s_{ij} + \sum_{j=1}^H \sum_{t=1}^K r_{jt} s_{jt} + K \cdot S$$

s.t

$$\sum_{i=1}^H y_{ti} = 1 (t=1,2,\dots,K) \text{ (垃圾运输车 } t \text{ 从处理场出发后只能去一个中转站)}$$

$$\sum_{i=1}^K \sum_{i=1}^H y_{ti} = K \text{ (从处理场共开出 } K \text{ 辆车到中转站, 这里不同的车可到同一个中转站)}$$

$$\sum_{j=1}^H r_{jt} = 1 (t=1,2,\dots,K) \text{ (垃圾运输车 } t \text{ 只能从一个中转站回到处理场)}$$

$$\sum_{t=1}^K \sum_{j=1}^H r_{jt} = K$$

$$\sum_{t=1}^K y_{tj} + \sum_{i=1}^H z_{ij} \geq 1 (j=1,2,\dots,H) \text{ (保证中转站 } j \text{ 有垃圾运输车经过)}$$

$$\left(\sum_{t=1}^K y_{tj} + \sum_{i=1}^H z_{ij} \right) \cdot M \geq (2m_j) (j=1,2,\dots,H) \text{ (保证中转站 } j \text{ 的垃圾被运完)}$$

$$z_{ii} = 0 (i=1,2,\dots,H)$$

$$z_{ij} \neq z_{ji} (i=1,2,\dots,H; j=1,2,\dots,H) \text{ (保证运输车的单向性)}$$

$$\sum_{j=1}^H z_{ij} \leq 1 (i=1,2,\dots,H) \text{ (一辆垃圾运输车从中转站 } i \text{ 出发后至多能到一个中转站)}$$

$$\sum_{t=1}^K m_{tj} = (2m_j) (j=1,2,\dots,H)$$

$$\sum_{j=1}^H m_{tj} \cdot w_{tj} \leq M (t=1,2,\dots,K) \text{ (垃圾运输车 } t \text{ 所装垃圾小于车的载重量)}$$

$$\sum_{t=1}^K y_{tj} + \sum_{i=1}^H z_{ij} = \sum_{t=1}^K w_{tj} (j=1,2,\dots,H) \text{ (到中转站 } j \text{ 的所有垃圾运输车)}$$

$$\sum_{t=1}^K M \cdot w_{tj} \geq (2m_j) (j=1,2,\dots,H) \text{ (保证中转站 } j \text{ 的所有垃圾被运完)}$$

$$0 \leq m_{tj} \leq (2m_j) (j=1,2,\dots,H; t=1,2,\dots,K)$$

$$y_{ti} = 0 \text{ 或 } 1 (t=1,2,\dots,K; i=1,2,\dots,H)$$

$$z_{ij} = 0 \text{ 或 } 1 (i=1,2,\dots,H; j=1,2,\dots,H)$$

$$r_{jt} = 0 \text{ 或 } 1 (j=1,2,\dots,H; t=1,2,\dots,K)$$

$$w_{tj} = 0 \text{ 或 } 1 (t=1,2,\dots,K; j=1,2,\dots,H)$$

2.2.4 案例分析

Lingo11.0是一种能够求解大规模线性规划、整数规划和非线性规划的优化软件。本文所建的上述模型是线性规划模型,故可直接用现成软件 Lingo 来求解。

本案例的垃圾从中转站到垃圾处理场的运输方式为:在此区域内,垃圾运输车从处理场出发,去各个中转站收集垃圾,待中转站的垃圾收集完毕以后回到处理场。中转站的垃圾每两天被收集一次。

为了简化计算规模,本文以9个中转站为例,编号为{1,2,3,4,5,6,7,8,9},垃圾处理场编号为0。计算了某个地区一年内的垃圾从中转站到处理场的运输总费用。每个中转站每天的垃圾量(t)分别为{1,1.5,1,1.5,0.5,1,0.5,2,2},每两天被运往垃圾处理场一次。垃圾运输车的载重量为10 t ,共需要3辆。从中转站到垃圾处理场的运输费用为

10元/km, 垃圾收集车平均一个月的出车费是3,500元。各个中转站之间的距离(km)和中转站与垃圾处理场之间的距离(km)如下表3和表4:

Table 3. The distance between the transfer stations
表 3. 中转站之间的距离

d_{ij} (km)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	15	5	60	35	25	30	15	20
2	15	0	35	20	5	40	5	10	15
3	5	35	0	15	5	30	20	45	5
4	60	20	15	0	35	40	45	25	30
5	35	5	5	35	0	65	25	5	50
6	25	40	30	40	65	0	25	10	45
7	30	5	20	45	25	25	0	5	40
8	15	10	45	25	5	10	5	0	25
9	20	15	5	30	50	45	40	25	0

Table 4. The distance between the transfer station and the garbage
表 4. 中转站与垃圾处理场之间的距离

l_j (km)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
垃圾处理场	30	50	90	70	100	80	30	20	40

据此可求得中转站到垃圾处理场的运输路线, 如下表5:

Table 5. The calculation results
表 5. 计算结果

车辆	运输路线
1	0→1→9→0
2	0→8→6→0
3	0→7→2→5→3→4→0

目标函数的最优值为: 666,000(元/年)

2.2.5 结论

在分析将垃圾从中转站运到垃圾处理场的运输路线问题时, 本文以实际应用为准则, 提出了垃圾从中转站到垃圾处理场的运输路线优化模型, 最后通过算例验证了该模型的有效性。当由于过节、人口增加等因素造成垃圾量增加时, 可以通过计算得到垃圾运输车的数量来相应的增加运输车, 仍是利用上述模型, 得出最优运输路线, 使垃圾能被及时合理的清理。

3. 小结

本文主要研究的是农村生活垃圾的收集与运输问题, 通过分析我国农村人口分布情况以及农村实际环境, 分别对中转站的选址和垃圾的从中转站到垃圾处理场运输建立线性规划的数学模型, 给出了一个系统的解决方案。当给出某一地区本文所需要的具体数据后, 利用 *Lingo* 求解模型, 得到中转站个数和中转站到处理场的最优路线。

本文的所建立的两个数学模型使解决农村生活垃圾问题的效率更高, 针对性更强, 设计合理, 模型易于因地方不同而进行适当的调节, 对一般的农村地区均适用, 且使投资成本最小化, 增加了方案在实际运行过程中的可行性。

参考文献 (References)

- [1] 路明 (2008) 我国农村环境污染现状与防治对策. *农村环境与发展*, **3**, 1-6.
- [2] 盛金良, 曹春华 (2006) 城市生活垃圾收运模式设计. *环境卫生工程*, **2**, 85-87.
- [3] 王金华, 孙可伟, 房镇 (2008) 城市垃圾中转站选址研究. *环境科学与管理*, **5**, 57-59.
- [4] 宋薇, 刘建国, 聂永丰 (2008) 城市生活垃圾收运路线优化研究. *环境卫生工程*, **1**, 11-15.
- [5] 贾传兴, 彭旭亚, 刘国涛, 刘长玮, 伍翔, 邓镓佳 (2006) 城市垃圾中转站选址优化模型的建立及其应用. *环境科学报*, **11**, 1927-1931.
- [6] 吕新福, 蔡临宁, 曲志伟 (2005) 废弃物回收物流中的选址路径问题. *系统工程实践*, **5**, 89-94.
- [7] 路玉龙, 赵扶摇等 (2010) 城市生活垃圾收运路线优化的数学模型与算法. *环境科学与管理*, **6**, 46-50.
- [8] 王亚洁, 贾顺平, 蒋金亮 (2012) 城市生活垃圾收运路线优化模型及算法研究. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, **5**, 1023-1026.
- [9] 胡运权 (2008) 运筹学基础及应用(第五版). 高等教育出版社, 北京.
- [10] 杨启帆 (2005) 数学建模. 高等教育出版社, 北京.
- [11] 何波, 杨超, 杨珺 (2007) 废弃物逆向物流网络设计的多目标优化模型. *工业工程与管理*, **5**, 43-46.
- [12] 刘桐武, 刘兆龙 (1996) 线性规划在城市生活垃圾运输中的应用. *环境卫生工程*, **2**, 22-27.