

城市地下垃圾中转站选址及两级转运联合最优方案研究^{*}

徐东洋^{1,2}, 李航², 王利娟³

(1. 河南大学 现代物流研究院; 2. 河南大学 商学院; 3. 河南大学 教育科学学院, 河南 开封 475004)

摘要:【目的】城市垃圾收运系统作为垃圾回收处理的重要环节,研究这一系统的合理规划对城市垃圾有效治理意义重大。【方法】结合城市垃圾收运模式、地下物流系统与选址-分配理论,建立以地下垃圾中转站建设成本、垃圾转运成本和管理成本之和最小为目标的选址及转运数学规划模型。借助36组大规模算例和优化软件CPLEX进行仿真实验及实例演练分析。【结果】实验结果表明:1)建立的模型可快速求解所有的算例;2)所研究问题复杂度随着问题规模的增加急剧增加;3)考虑需求的可拆分相对于不可拆分的方案可节约22%的运营成本。【结论】研究成果不仅可拓展垃圾中转站选址及转运问题现有理论,而且可为城市垃圾收运系统的合理规划提供科学指导,以期缓解城市垃圾收运压力、改善城市居住环境。

关键词:地下物流系统;城市垃圾;选址规划;二级转运;数学规划;实验仿真

中图分类号:O224;X705

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2021)01-0096-09

随着中国城市化进程加速,各大城市正面临着垃圾量成倍增加、垃圾中转站收运压力大、垃圾收运处理成本高等问题,合理解决垃圾问题已成为城市工作的一个重点。目前,城市垃圾回收处理的主要模式如图1所示,即环卫部门先从收集点将垃圾集中到中转站进行分类整理,然后将垃圾送往处理站进行焚烧、填埋、回炉精炼等处理^[1]。垃圾中转站作为城市垃圾收运系统的重要中间设施,它们的选址定位问题以及如何有效服务垃圾收集点对解决城市垃圾问题至关重要^[2]。地下物流系统作为具有革新意义的绿色物流模式,可有效改善城市环境恶化、土地资源枯竭、交通拥堵等现象,目前正逐步引起学者们的关注^[3-5]。近些年来,国内知名学者钱七虎院士^[6]率先提出将地下物流理论引入城市建设,通过构建地下垃圾收运系统来应对垃圾回收问题。在地面资源有限的条件下,充分、科学地开发利用地下空间成为解决“城市病”的主要着力点^[6]。基于此,本文对地下垃圾中转站的选址及转运问题进行研究,以期有效解决城市垃圾危机、改善城市生态环境,同时促进地下物流系统与其他领域的融合、提高综合效益。

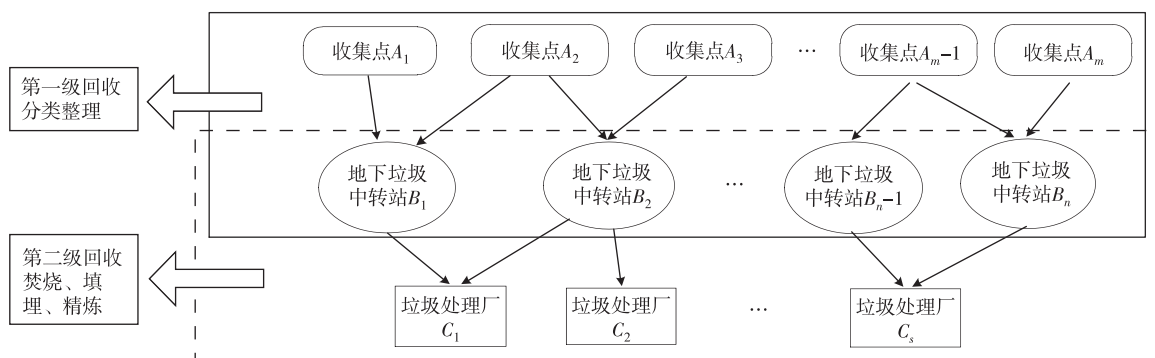


图1 城市垃圾回收处理模式示意图

Fig. 1 Model of urban waste recycling and treatment

^{*} 收稿日期:2020-07-09 修回日期:2020-09-17 网络出版时间:2021-03-10 16:47

资助项目:国家自然科学基金青年项目(No. 71902504);中国博士后科学基金面上项目(No. 2020M672215);2020年度河南省重点研发与推广专项(软科学)项目(No. 202400410159)

第一作者简介:徐东洋,男,副教授,博士,研究方向为运筹优化、物流与供应链管理,E-mail:xdy_hust@163.com;通信作者:王利娟,女,E-mail:henulj@163.com

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20210310.1309.018.html

选址及转运问题广泛应用于物流、交通、环境等领域,目前已有带服务半径的选址及转运问题^[7-8]、多需求多类型选址及转运问题^[9-10]、多种节点属性的选址及转运问题^[11-12]等。但这些研究均属于单级选址及转运问题。本文研究的城市地下垃圾中转站选址及转运问题属于两级转运(第一级为各收集点向中转站转运垃圾进行分类整理,第二级为中转站向处理厂转运垃圾进行填埋、焚烧、精炼等处理)问题。关于垃圾中转站选址及转运问题相关研究中,贾传兴等人^[13]、王雪峰等人^[14]建立了选址规划模型,曹勇锋等人^[15]提出了重心法和层次分析法(AHP)对该问题进行求解。朱超平等^[16]基于 GIS 和 AHP 对垃圾中转站选址进行评估与优化。但是,这些研究只考虑地上选址的情况,多基于运距来衡量转运成本(对运量的影响相对忽略),且较少考虑垃圾分类管理成本。最近,王利娟等人^[17]对地下垃圾中转站的选址及两级转运问题进行了研究,但仅考虑需求一次性满足的情况,与实际应用需求(中转站和收集点的垃圾量大于车辆最大装载能力)存在差异,且容易造成转运成本及效率浪费。

基于此,本文结合城市垃圾两级回收处理模式和地下物流特征,考虑垃圾回收服务需求可拆分满足,探讨地下垃圾中转站选址及两级转运最优方案。首先建立以地下垃圾中转站的建设成本(包含固定建设成本和基于容量的变动建设成本)、基于“运距×运量”的两级转运成本和基于垃圾总量的分类管理成本之和最小为目标的选址及两级转运优化模型,然后基于城市空间布局特征及相关文献中的算例,随机生成 36 组大规模算例进行仿真实验。研究成果不仅对选址及转运问题的现有理论进行补充,而且可为城市环卫规划部门提供更有价值的指导建议。

1 模型建立

1.1 问题描述及假设

基于城市垃圾收运模式和地下物流系统特征,首先对城市地下垃圾中转站的选址及两级转运问题进行描述:城市垃圾收运网络中有一系列垃圾收集点、候选地下垃圾中转站、垃圾处理厂。已知每个垃圾收集点的位置及垃圾量,每个候选地下垃圾中转站的位置、容量、固定建设成本、单位变动建设成本及单位垃圾分类管理成本,每个垃圾处理厂的位置及处理能力,中转站的总投资预算。目标是设计总成本(包括地下垃圾中转站建设成本、垃圾两级转运成本、垃圾分类管理成本)最小的选址-分配方案以满足城市垃圾回收处理需求。在该方案中需对候选垃圾中转站的选址定位、每个垃圾中转站所分配服务的垃圾收集点、每个处理厂所分配服务的垃圾中转站进行联合决策。在文献[17]的基础上,为方便建模,本文考虑以下假设:

- 1) 相对地上,地下中转站选址几乎不受土地资源限制且转运所受障碍物的影响较小,因此垃圾收集点到地下垃圾中转站的距离及地下垃圾中转站到垃圾处理厂的距离均可用欧氏距离表示;
- 2) 不同于地上转运,因交通堵塞引起的成本可忽略;
- 3) 收集点处垃圾只能经地下中转站分类后运往处理厂,不能直接运往处理厂;
- 4) 每个收集点可由多个中转站服务,每个垃圾中转站也可由多个垃圾处理厂服务,即垃圾收集点和中转站的垃圾回收处理需求均可拆分满足。

1.2 数学模型

本文所使用的符号及变量定义如下。 A_m 表示垃圾收集点集合, $A_m = \{1, 2, \dots, m\}$; B_n 表示候选地下垃圾中转站集合, $B_n = \{1, 2, \dots, n\}$; C_s 表示垃圾处理厂集合, $C_s = \{1, 2, \dots, s\}$; i 表示垃圾收集点的标号; j 表示候选地下垃圾中转站的标号; k 为垃圾处理厂的标号; a_i 表示收集点 i 的垃圾数量; b_j 表示候选地下中转站 j 的垃圾收集容量; c_k 表示处理厂 k 的垃圾处理容量; d_{ij} 表示收集点 i 到中转站 j 的转运距离; e_{ij} 表示收集点 i 到垃圾中转站 j 的单位转运成本; d_{jk} 表示垃圾中转站 j 到垃圾处理厂 k 的转运距离; e_{jk} 表示垃圾中转站 j 到垃圾处理厂 k 单位转运成本; f_j 表示候选垃圾中转站 j 的固定建设成本; g_j 表示候选垃圾中转站 j 的单位变动建设成本; h_j 表示候选垃圾中转站 j 的单位分类管理成本; Ω 表示地下垃圾中转站的总投资预算; x_j 为 0-1 型变量,若垃圾中转站 j 被选中,值为 1,否则为 0; y_{ij} 为 0-1 型变量,若收集点 i 由中转站 j 服务,值为 1,否则为 0; z_{jk} 为 0-1 型变量,若中转站 j 由处理厂 k 服务,值为 1,否则为 0; u_{ij} 为整数变量,表示收集点 i 到中转站 j 的垃圾转运量; v_j 为整数变量,表示中转站 j 收集的垃圾量; w_{jk} 为整数变量,表示中转站 j 到处理厂 k 的垃圾转运量。

本文所建模型如下:

$$\min \sum_{j \in B_n} (f_j + g_j b_j) x_j + \sum_{i \in A_m} \sum_{j \in B_n} e_{ij} d_{ij} u_{ij} + \sum_{j \in B_n} \sum_{k \in C_s} e_{jk} d_{jk} w_{jk} + \sum_{j \in B_n} h_j v_j, \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j \in B_n} (f_j + g_j b_j) x_j \leq \Omega, \quad (2)$$

$$u_{ij} \leq a_i y_{ij}, \quad \forall i \in A_m, j \in B_n, \quad (3)$$

$$\sum_{j \in B_n} u_{ij} = a_i, \quad \forall i \in A_m, \quad (4)$$

$$\sum_{i \in A_m} u_{ij} \leq b_j x_j, \quad \forall j \in B_n, \quad (5)$$

$$x_j \leq \sum_{i \in A_m} q_{ij}, \quad \forall j \in B_n, \quad (6)$$

$$v_j = \sum_{i \in A_m} q_{ij}, \quad \forall j \in B_n, \quad (7)$$

$$w_{jk} \leq v_j z_{jk}, \quad \forall j \in B_n, k \in C_s, \quad (8)$$

$$\sum_{k \in C_s} w_{jk} = v_j, \quad \forall j \in B_n, \quad (9)$$

$$\sum_{j \in B_n} w_{jk} \leq c_k, \quad \forall k \in C_s, \quad (10)$$

$$y_{ij} \leq x_j, \quad \forall i \in A_m, j \in B_n, \quad (11)$$

$$z_{jk} \leq x_j, \quad \forall j \in B_n, k \in C_s, \quad (12)$$

$$x_j \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in B_n, \quad (13)$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in A_m, j \in B_n, \quad (14)$$

$$z_{jk} \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in B_n, k \in C_s, \quad (15)$$

$$u_{ij} \geq 0, \quad \forall i \in A_m, j \in B_n, \quad (16)$$

$$v_j \geq 0, \quad \forall j \in B_n, \quad (17)$$

$$w_{jk} \geq 0, \quad \forall j \in B_n, k \in C_s. \quad (18)$$

其中:(1)式为目标函数,表示地下垃圾中转站建设成本(包括固定和变动建设成本)、基于“运距×运量”的第一级垃圾转运成本(从收集点到中转站)、基于“运距×运量”的第二级垃圾转运成本(从中转站到处理厂)和中转站垃圾分类管理成本之和最小。(2)式表示地下垃圾中转站的建设成本不超过总投资预算。(3)~(7)式表示第一级垃圾转运相关约束:(3)式表示若中转站 j 服务收集点 i ,则收集点 i 运往中转站 j 的垃圾量不能超过该收集点处的垃圾总量,若中转站 j 不服务收集点 i ,则收集点 i 运往中转站 j 的垃圾量应为 0;(4)式表示每个收集点的垃圾全部运往中转站,即收集点的垃圾回收需求充分满足;(5)式表示若候选中转站 j 启用,则从收集点运往到中转站 j 的垃圾总量不能超过其容量,若中转站 j 不启用,则运往该处的垃圾量应为 0;(6)式表示若收集点运往中转站 j 的垃圾总量为 0,则该中转站不启用;(7)式表示每个中转站回收的垃圾量等于所有收集点运往该中转站的垃圾量之和。(8)~(10)式表示第二级垃圾转运相关约束:(8)式表示若处理厂 k 启用,则从中转站 j 运往处理厂 k 的垃圾量不超过 j 收集的垃圾量,表示若处理厂 k 不启用,则从中转站 j 运往处理厂 k 的垃圾量应为 0;(9)式每个中转站收集的垃圾全部运往处理厂,即中转站垃圾处理需求充分满足;(10)式表示若处理厂 k 启用,则从中转站运往处理厂 k 的垃圾总量不能超过处理厂 k 的容量,若处理厂 k 不启用,运往该处理厂的垃圾量应为 0。(11)~(12)式表示 0-1 决策变量之间的关系约束,其中(11)式表示若中转站 j 不启用,则该中转站不服务任何收集点;同理,(12)式表示若中转站 j 不启用,则任何处理厂不服务该中转站。(13)~(15)式表示 0-1 变量,(16)~(18)式表示整数变量。

2 实验仿真

本部分对本文所建立的垃圾中转站选址及转运模型求解能力及效率进行验证,并进行实例演练分析。所有测试在一个 CPU 主频 1.8 Hz,内存 12 GB 的计算机上进行,采用版本号为 12.8 的 CPLEX 软件作为求解器。

2.1 实验算例描述

鉴于目前尚无地下垃圾回收相关的实践案例,文献[17]也仅从需求不可拆分视角研究了地下垃圾中转站选址及两级转运问题,为验证本文模型的求解效果,本文结合中国东部某个城市的空间特征及文献[17]中的算例

生成方式,随机生成 36 组($m \in \{200, 400, 600, 800, 1\ 000, 1\ 200\}$, $n \in \{40, 80, 120\}$, $k \in \{3, 4\}$)不同规模的算例,生成算例的具体参数见表 1。

表 1 测试算例参数

Tab. 1 The parameters of instances

参数	参数描述	参数的取值范围
m	垃圾收集点数目	200, 400, 600, 800, 1 000, 1 200
n	候选地下垃圾中转站数目	40, 80, 120
s	垃圾处理厂数目	3, 4
a_i	收集点 i 的垃圾数量	$U[30, 50]$
b_j	地下候选垃圾中转站 j 的容量	$U[500, 2\ 500]$
c_k	垃圾处理厂 k 的容量	$U[5\ 000, 20\ 500]$
(p_i, q_i)	收集点 i 的坐标	$U[0, 80]$
(p_j, q_j)	候选地下垃圾中转站 j 的坐标	$U[20, 70]$
(p_k, q_k)	垃圾处理厂 k 的坐标	$U[20, 70]$
d_{ij}	从收集点 i 到中转站 j 的距离	$d_{ij} = \sqrt{(a_i - a_j)^2 + (b_i - b_j)^2}$
e_{ij}	从收集点 i 到中转站 j 的单位转运成本	$U[2, 10]$
d_{jk}	从中转站 j 到处理厂 k 的距离	$d_{jk} = \sqrt{(a_j - a_k)^2 + (b_j - b_k)^2}$
e_{jk}	从中转站 j 到处理厂 k 的单位转运成本	$U[2, 10]$
f_j	中转站 j 的固定建设成本	$U[3\ 000, 4\ 000]$
g_j	中转站 j 的单位变动建设成本	$U[2, 4]$
h_j	中转站 j 的单位垃圾分类管理成本	$U[1, 5]$
Ω	总投资预算	700 000

借鉴王利娟等人^[17]的研究成果,以上数据生成过程考虑如下实际情况:

- 1) 收集点在城市各个范围内均有分布,中转站和垃圾处理厂不建设于城市边缘;
- 2) 收集点的垃圾数量之和小于中转站的容量之和,中转站的容量之和小于处理厂的容量之和;
- 3) 中转站的容量随收集点的数目的增加而增加,处理厂的容量随中转站的数量及容量的增加而增加。

2.2 模型求解与结果分析

借助模型求解器 CPLEX 对以上 36 个大规模算例进行求解,表 2 呈现了模型获得的结果。在表 2 中,第 1 列表示测试算例规模(如“200-40-3”表示 200 个垃圾收集点、40 个候选地下垃圾中转站、3 个垃圾处理厂),前面的“*”号表示该算例可被求解。“LB”和“UB”分别表示 CPLEX 获得的下界和上界。“G”表示下界和上界之间的百分比差距,计算方式为 $G = 100 \times \frac{UB - LB}{LB}$ 。“T”表示 CPLEX 求得相应结果所花费的计算时间。“O”表示该算例的目标值,且等于 CPLEX 获得的“LB”值。“V”和“C”分别表示模型中的决策变量数目和约束数目。

从表 2 可知,本文建立的选址及转运模型在 16 s 内可对所有算例求出最优解,求解效率较高。另外,从“T”的结果可看出,随着算例规模的扩大(垃圾收集点、中转站、处理厂数目增多),问题求解难度急剧增加,这可由模型中决策变量和约束数目的增加来解释。

同时,本文建立的选址及转运模型在 16 秒内可对所有算例求出最优解,求解效率较高。另外,从 T 的结果可看出,随着算例规模的扩大(垃圾收集点、中转站、处理厂数目增多),问题求解难度急剧增加,这可由模型中决策变量和约束数目的增加来解释。

为直观展示本文研究用于指导实践,以算例“200-40-4”为例,进行实例演练,具体见图 2 和表 3。针对该算例的选址-分配决策是建立 17 个地下垃圾中转站(标号分别为 1, 2, 3, 4, 5, 9, 10, 12, 15, 16, 18, 21, 24, 30, 36, 37, 40),4 个处理厂与中转站之间的服务关系如图 2 箭头所示,其中中转站 4 和 17 均由两个处理厂服务。由于收集点较多,在图中显示过于密集,它们与中转站的服务关系很难在图 2 中用箭头清晰展示,现在表 3 中展示出来。

表 2 模型测试结果
Tab. 2 The test results of Model

算例	<i>LB</i>	<i>UB</i>	<i>G</i>	<i>T</i>	<i>O</i>	<i>V</i>	<i>C</i>
* 200-40-3	806 267. 27	806 267. 27	0	0. 06	806 267. 27	16 281	24 884
* 200-40-4	728 754. 71	728 754. 71	0	0. 06	728 754. 71	16 361	25 005
* 200-80-3	655 235. 03	655 235. 03	0	0. 13	655 235. 03	32 561	49 364
* 200-80-4	682 830. 12	682 830. 12	0	0. 48	682 830. 12	32 721	49 605
* 200-120-3	677 509. 15	677 509. 15	0	0. 19	677 509. 15	48 841	73 844
* 200-120-4	618 480. 50	618 480. 50	0	0. 17	618 480. 50	49 081	74 205
* 400-40-3	1 502 567. 18	1 502 567. 18	0	0. 14	1 502 567. 18	32 281	49 284
* 400-40-4	1 215 306. 33	1 215 306. 33	0	0. 13	1 215 306. 33	32 361	49 405
* 400-80-3	1 261 648. 70	1 261 648. 70	0	0. 25	1 261 648. 70	64 561	97 764
* 400-80-4	1 244 799. 10	1 244 799. 10	0	1. 22	1 244 799. 10	64 721	98 005
* 400-120-3	1 302 638. 64	1 302 638. 64	0	2. 95	1 302 638. 64	96 841	146 244
* 400-120-4	1 228 992. 75	1 228 992. 75	0	2. 06	1 228 992. 75	97 081	146 605
* 600-40-3	2 347 331. 10	2 347 331. 10	0	0. 83	2 347 331. 10	48 281	73 684
* 600-40-4	2 087 089. 00	2 087 089. 00	0	0. 2	2 087 089. 00	48 361	73 805
* 600-80-3	2 005 452. 96	2 005 452. 96	0	2. 72	2 005 452. 96	96 561	146 164
* 600-80-4	1 964 531. 52	1 964 531. 52	0	2. 91	1 964 531. 52	96 721	146 405
* 600-120-3	1 888 319. 11	1 888 319. 11	0	4. 41	1 888 319. 11	144 841	218 644
* 600-120-4	1 878 272. 41	1 878 272. 41	0	4. 08	1 878 272. 41	145 081	219 005
* 800-40-3	3 044 168. 23	3 044 168. 23	0	0. 30	3 044 168. 23	64 281	98 084
* 800-40-4	3 240 380. 51	3 240 380. 51	0	0. 31	3 240 380. 51	64 361	98 205
* 800-80-3	2 930 008. 52	2 930 008. 52	0	0. 70	2 930 008. 52	128 561	194 564
* 800-80-4	2 556 936. 98	2 556 936. 98	0	1. 05	2 556 936. 98	128 721	194 805
* 800-120-3	2 682 863. 46	2 682 863. 46	0	10. 45	2 682 863. 46	192 841	291 044
* 800-120-4	2 518 142. 63	2 518 142. 63	0	3. 31	2 518 142. 63	193 081	291 405
* 1 000-40-3	3 514 134. 89	3 514 134. 89	0	0. 38	3 514 134. 89	80 281	122 484
* 1 000-40-4	3 551 496. 12	3 551 496. 12	0	0. 45	3 551 496. 12	80 361	122 605
* 1 000-80-3	3 306 536. 97	3 306 536. 97	0	4. 50	3 306 536. 97	160 561	242 964
* 1 000-80-4	3 350 617. 11	3 350 617. 11	0	3. 56	3 350 617. 11	160 721	243 205
* 1 000-120-3	3 169 103. 60	3 169 103. 60	0	8. 30	3 169 103. 60	240 841	363 444
* 1 000-120-4	2 811 936. 88	2 811 936. 88	0	9. 38	2 811 936. 88	241 081	363 805
* 1 200-40-3	5 620 975. 63	5 620 975. 63	0	0. 61	5 620 975. 63	96 281	146 684
* 1 200-40-4	4 016 073. 68	4 016 073. 68	0	0. 56	4 016 073. 68	96 361	147 005
* 1 200-80-3	4 345 874. 55	4 345 874. 55	0	4. 87	4 345 874. 55	192 561	291 364
* 1 200-80-4	4 339 905. 72	4 339 905. 72	0	4. 72	4 339 905. 72	192 721	291 605
* 1 200-120-3	4 286 962. 59	4 286 962. 59	0	15. 70	4 286 962. 59	288 841	435 844
* 1 200-120-4	3 739 185. 37	3 739 185. 37	0	7. 86	3 739 185. 37	289 081	436 205

2.3 问题复杂度分析

为探讨垃圾收集点数目对问题求解的影响,本文固定候选地下垃圾中转站和处理厂数目分别为 40 和 4,选取“200-40-4”、“400-40-4”、“600-40-4”、“800-40-4”、“1 000-40-4”、“1 200-40-4”6 个算例,并绘制组合图,比较 CPLEX 求解 6 个算例花费的时间、所需的决策变量和约束数目。结果如图 3 所示。随着垃圾收集点的增多,所

需决策变量和约束数目呈线性增长趋势,同时求解时间也随收集点规模的扩大而明显上升。

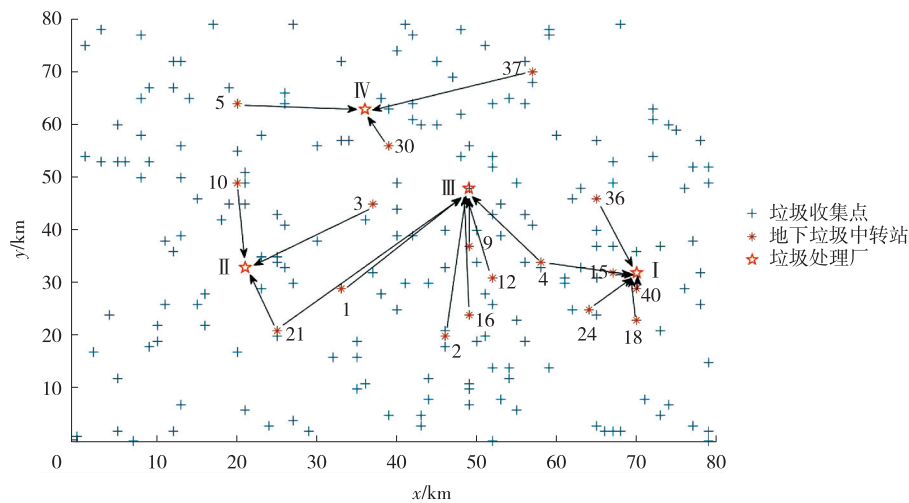


图 2 算例 200-40-4 的选址-分配决策示意

Fig. 2 The location-allocation decisions for instance 200-40-4

表 3 算例 200-40-4 的收集点与中转站服务关系

Tab. 3 The relationship between collection point and transfer station for instance 200-40-4

中转站	收集点
1	3,19,40,52,93,188
2	21,23,73,189,194
3	78,86*,120,125,128,183,185,193
4	17,34,48,50,61,71,72,83,87,166,172
5	5,30,41,43,68,116,117,123,84,127,129,135,153,170,176,181,182
9	1,6,42,47,49,57,66,69,74,81,89,105,108,111,122,126,130,140*,157,171,173,174
10	4,27,88,114,143,161,192,195
12	22,37,46,70,98,100,102,150,177*
15	15,24,29,35,39,53,65,80,133,136,138,142,145,147,149,198
16	28,36,58,103,106,107,148,156,164,184
18	9,11,12,56,60,104,109,110,144,151,165,177*
21	13,16,32,51,76,91,94,97,101,113,146*,160,187,190
24	10,18,59,77,79,82,90,112,119,146*,155,168,196
30	2,20,26,38,44,63,86*,96,99,115,131,137,159,162,167,178
36	14,31,33,67,85,121,132,134,180,191,197
37	7,25,45,54,55,62,75,92,95,118,124,140*,141,152,158,169,179,186,199,200
40	8,64,139,163,175

注: * 表示该收集点由多个中转站服务

同理,为进一步分析地下垃圾中转站和处理厂数目对求解效率的影响,本文固定垃圾收集点数目为 1 200 个,分别选取“1 200-40-3”、“1 200-80-3”、“1 200-120-3”3 个算例和“1 200-40-3”、“1 200-40-4”两个算例进行分析,绘制的组合图见图 4 和图 5。当固定垃圾处理厂数目为 3 时,所需决策变量和约束数目与中转站数目均呈线性正相关关系,求解时间同样随中转站数目增加而增加;当固定垃圾中转站数目为 40 时,垃圾处理厂从 3 个增至 4 个对所需决策变量、约束数目及求解时间的影响不显著,这是因为处理厂总数目相对垃圾收集点数目和中转站数目级数较少,小范围变化对问题求解效率影响较小。

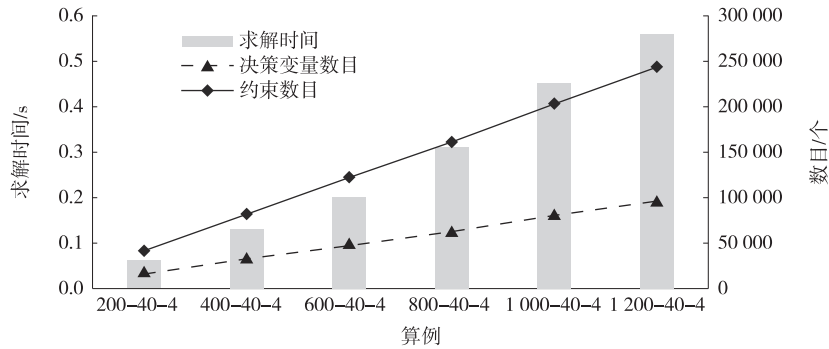


图 3 垃圾收集点数目对问题求解的影响

Fig. 3 The effect of the number of collection points on problem solving

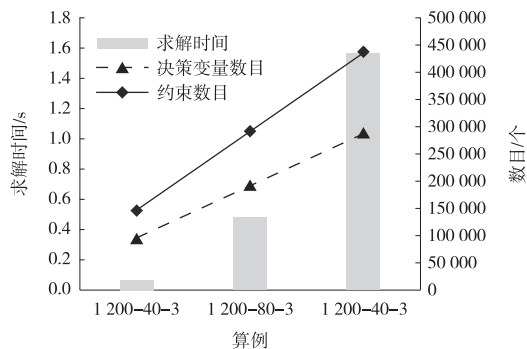


图 4 垃圾中转站数目对问题求解的影响

Fig. 4 The effect of the number of transfer stations on problem solving

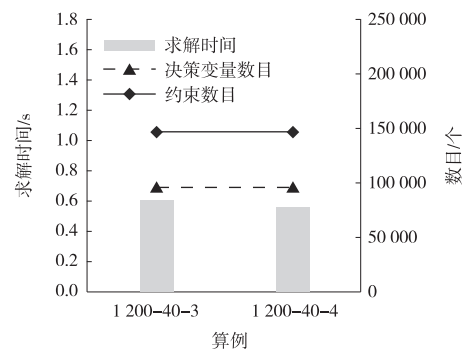


图 5 垃圾处理厂数目对问题求解的影响

Fig. 5 The effect of the number of treatment plants on problem solving

2.4 服务需求可拆分效果分析

为降低运营成本及提高配载效率,本文基于每个收集点的服务需求和每个中转站的服务需求均可拆分满足来建立选址及转运模型。为验证该模型效果,将本文建立的选址及转运模型(记作 M_1)与需求不可拆分条件下文献[17]所建立的选址及转运模型(记作 M_2)进行对比。选取表 2 中的前 18 个算例进行对比实验,这两个模型的测试结果见表 4。其中:“O”、“T”和“C”代表的含义和它们在表 2 中的含义相同,“ Δ_1 ”表示两个模型目标值的百分比差异,“ Δ_2 ”表示两个模型求解时间的百分比差异。

从表 4 的对比结果可知, M_1 和 M_2 均可快速对所有算例求出最优解。由“ Δ_1 ”可知,相较于 M_2 , M_1 平均可节约 22% 的运营成本。另外,由“ Δ_2 ”可知, M_2 需要更短的求解时间,相对 M_1 平均将计算时间节约了 19%,这可由需求不可拆分满足下模型的可行解空间减少来解释。总之,本文考虑需求可拆分建立的模型可快速获得更好的选址及转运方案,能够帮助相关部门节约相当可观的运营成本,进而为城市规划部门提供更有价值的科学决策指导。

3 结论

为缓解城市垃圾收运压力、降低运营成本、改善城市生活环境,本文结合城市垃圾收运模式、地下物流系统与选址-分配理论,深入探讨城市地下垃圾中转站的选址及转运方案。首先,考虑垃圾回收服务需求可拆分满足,建立以地下垃圾中转站建设成本、基于“运距×运量”的收集点到中转站的转运成本、基于“运距×运量”的从中转站到处理厂的转运成本和中转站垃圾分类管理成本之和最小为目标的选址及转运模型。其次,随机生成 36 组大规模算例,借助优化软件 CPLEX 进行实验仿真及实例演练,并对问题复杂度进行分析。最后,将所建立的模型和需求不可拆分条件下的模型进行对比,来验证本文所建立模型的效果。仿真实验结果表明:1) 本文所建立的模型在 16 秒内可对规模为 1 200 个垃圾收集点、120 个地下垃圾中转站和 4 个垃圾处理厂的算例求出最优解;2) 随着算例规模(垃圾收集点、地下垃圾中转站、垃圾处理厂数目)的增大,问题求解难度急剧增加;3) 考虑需求可拆分相对需求不可拆分平均可节约 22% 左右的运营成本。本文研究成果不仅可拓展垃圾中转站选址-分配问题现有理论,而且可丰富地下物流系统理论,为地下物流系统与其他领域的融合提供思路。同时可为合理

规划城市垃圾收运方案提供科学指导,以期节省垃圾回收运营投入、缓解道路资源矛盾、促进城市空间合理利用、助力城市现代化建设,实现城市空间、社会、环境的和谐发展。

表 4 需求可拆分与不可拆分模型测试结果对比

Tab. 4 The comparison of models for split and non-split modes

算例	M ₁			M ₂			Δ_1	Δ_2
	O_1	T_1	C_1	O_2	T_2	C_2		
* 200-40-3	806 267.27	0.06	24 884	884 913.41	0.05	25 044	10%	-17%
* 200-40-4	728 754.71	0.06	25 005	816 608.79	0.05	25 205	12%	-17%
* 200-80-3	655 235.03	0.13	49 364	936 090.60	0.16	49 684	43%	23%
* 200-80-4	682 830.12	0.48	49 605	894 019.28	0.14	50 005	31%	-71%
* 200-120-3	677 509.15	0.19	73 844	1 137 741.77	0.13	74 324	68%	-32%
* 200-120-4	618 480.50	0.17	74 205	1 033 627.48	0.13	74 805	67%	-24%
* 400-40-3	1 502 567.18	0.14	49 284	1 589 433.39	0.14	49 444	6%	0
* 400-40-4	1 215 306.33	0.13	49 405	1 272 774.67	0.08	49 605	5%	-38%
* 400-80-3	1 261 648.70	0.25	97 764	1 457 850.48	0.50	98 084	16%	100%
* 400-80-4	1 244 799.10	1.22	98 005	1 437 817.54	0.41	98 405	16%	-66%
* 400-120-3	1 302 638.64	2.95	146 244	1 708 607.09	0.97	146 724	31%	-67%
* 400-120-4	1 228 992.75	2.06	146 605	1 563 025.71	0.78	147 205	27%	-62%
* 600-40-3	2 347 331.10	0.83	73 684	2 435 376.91	0.34	73 844	4%	-59%
* 600-40-4	2 087 089.00	0.20	73 805	2 309 388.63	0.31	74 005	11%	65%
* 600-80-3	2 005 452.96	2.72	146 164	2 185 198.66	2.63	219 605	9%	-3%
* 600-80-4	1 964 531.52	2.91	146 725	2 114 211.97	2.31	146 805	8%	-21%
* 600-120-3	1 888 319.11	4.41	218 644	2 217 592.83	3.95	219 124	17%	-10%
* 600-120-4	1 878 272.41	4.08	219 005	2 185 198.66	2.53	219 605	16%	-38%
均值	860 868.8	0.17	49 449.5	1 070 651	0.11	49 764.5	22%	-19%

参考文献:

- [1] 杜亚娟,郭强.垃圾中转站最优选址及垃圾最优转运方案研究[J].计算机工程与应用,2015,51(10):252-256.
DU Y J, GUO Q. Studies of optimal location of municipal wastes transfer station and optimal transfer plan of wastes[J]. Computer Engineering and Applications, 2015, 51(10):252-256.
- [2] 席芳娟,张玉斌,秦婷.城市垃圾收运中转站选址分析[J].现代商业,2018(29):177-178.
XI F J, ZHANG Y B, QIN T. The analysis on location of urban garbage collection transfer station[J]. Modern Business, 2018 (29):177-178.
- [3] ZHONG Y H, LUO S M, BAO M, et al. Dynamic network planning of underground logistics system on uncertainty graph[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2019, 2019:1979275.
- [4] REN M, FAN Z W, WU J J, et al. Design and optimization of underground logistics transportation networks[J]. IEEE Access, 2019, 7:83384-83395.
- [5] FAN Y Q. Comparative study of domestic waste transfer method in Shanghai Puxi central downtown district[C]//Conference of International Society on Underground Freight Transport. Shanghai: ISUFT, 2010:95-110.
- [6] 钱七虎.推进城市地下空间规划建设的思考[J].城乡建设,2017(18):60-65.
QIAN Q H. The thinking of promoting the planning and construction of urban underground space[J]. Urban and Rural Development, 2017(18):60-65.
- [7] BERMAN O, FOUSKA N, LARSON R C. Optimal location of discretionary service facilities[J]. Transportation Science, 1992, 26 (3):201-211.
- [8] 杨珺,张敏,陈新.一类带服务半径的服务站截流选址-分配问题[J].系统工程理论与实践,2006(1):117-122.
YANG J, ZHANG M, CHEN X. A class of the flow capturing location model with service radius[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2006(1):117-122.

- [9] 周林,林云,王旭,等. 网购城市配送多容量终端选址与多车型路径集成优化[J]. 计算机集成制造系统,2016,22:1139-1147.
ZHOU L,LIN Y,WANG X,et al. Integrated optimization for multiclass terminal location-heterogeneous vehicle routing of urban distribution under online shopping[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems,2016,22:1139-1147.
- [10] 李珍萍,毛小寸. 多需求多类型自提选址分配[J]. 计算机集成制造系统,2018,24:2889-2897.
LI Z P,MAO X C. Location and assignment problem of pickup points under multiple types of demands[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems,2018,24:2889-2897.
- [11] 肖庆,马士华,唐尧. 存在三重属性节点的物流网络选址分配问题研究[J]. 运筹与管理,2016,25:59-67.
XIAO Q,MA S H,TANG Y. Research on logistics network location and allocation problem with triple-attribute nodes[J]. Operations Research and Management Science,2016,25:59-67.
- [12] LIU Y,CUI N,ZHANG J H. Integrated temporary facility location and casualty allocation planning for post-disaster humanitarian medical service[J]. Transportation Research Part E,2019,128:1-16.
- [13] 贾传兴,彭绪亚,刘国涛,等. 城市垃圾中转站选址优化模型的建立及其应用[J]. 环境科学学报,2006,26(11):1927-1931.
JIA C X,PENG X Y,LIU G T,et al. Establishment of optimization model for location of municipal solid waste-transfer station and its application[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2006,26(11):1927-1931.
- [14] 王雪峰,杨芳. 基于城乡统筹视角的农村生活垃圾二级转运模式研究[J]. 环境卫生工程,2019,27(5):34-40.
WANG X F,YANG F. Study on secondary transfer mode of rural domestic waste in the perspective of urban and rural co-ordination[J]. Environmental Sanitation Engineering,2019,27(5):34-40.
- [15] 曹勇锋,荣宏伟,张可方,等. 结合重心法和层次分析法研究垃圾转运站选址[J]. 环境科学与技术,2012,35(6):118-129.
CAO Y F,RONG H W,ZHANG F K,et al. Location selection of waste transfer station base on combining gravity method and AHP model[J]. Environment Science & Technology,2012,35(6):118-129.
- [16] 朱超平,潘方杰,姚秉伟. 基于 GIS 和 AHP 的垃圾中转站选址评估与优化研究[J]. 安庆师范大学学报(自然科学版),2018,24(1):78-82.
ZHU C P,PAN F J,YAO B W. Evaluation and optimization of garbage transfer station in Anqing city based on GIS and AHP [J]. Journal of Anqing Normal University (Natural Science Edition),2018,24(1):78-82.
- [17] 王利娟,韩雪芳,徐东洋. 城市地下垃圾中转站选址-分配问题研究[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版),2020,37(2):12-21.
WANG L J,HAN X F,XU D Y. The research on the location assignment problem of urban underground garbage transfer station[J]. Journal of Chongqing Normal University(Natural Science),2020,37(2):12-21.

Operations Research and Cybernetics

The Research on the Joint Optimal of the Urban Underground Waste Transfer Station Location and Two-Echelon Transshipment

XU Dongyang^{1,2}, LI Hang², WANG Lijuan³

(1. Institute of Modern Logistics, Henan University; 2. School of Business, Henan University;

3. School of Education Science, Henan University, Kaifeng Henan 475004, China)

Abstract: [Purposes]The urban waste collection and transportation system is an integral part of waste collection and treatment, and its proper planning is of great significance to the effective treatment of urban waste. [Methods]The urban waste collection and transportation pattern is combined, underground logistics system and location-allocation theory to establish a location-allocation mathematical programming model with the objective of minimizing the total costs including the construction costs of transfer station, transshipment costs and management costs. Then, a series of simulation experiments and empirical analysis are executed based on the randomly generated 36 large-sized instances and the optimization software CPLEX. [Findings]The experimental results show that: 1) our proposed model can solve all instances quickly; 2) the complexity of problem increases sharply with its size; 3) the operation costs can be saved by 22% when considering split delivery for demand, compared to non-split case. [Conclusions]This research results can not only expand the existing theory of location-allocation problem of waste transshipment, but also provide scientific guidance for the rational planning of urban waste collection and transshipment system, so as to ease the pressure on the collection and transportation of urban waste and improve the urban living environment.

Keywords: underground logistics; urban waste; location planning; two-echelon transshipment; mathematical programming; experiment simulation

(责任编辑 许 甲)