

参赛密码 _____
(由组委会填写)



“华为杯”第十四届中国研究生 数学建模竞赛

学 校 长安大学

参赛队号 10710008

队员姓名	1.	杨 菲
	2.	付 耀
	3.	谢宁猛

参赛密码 _____
(由组委会填写)



“华为杯”第十四届中国研究生 数学建模竞赛

题 目 构建地下物流系统网络

摘 要：

本文主要研究了地下物流系统（ULS）的节点选择、通道网络设计、网络改进及建设时序问题，首先基于原始 OD 数据采用重心法和覆盖法确定了各级节点的位置及数目，建立非线性规划模型确定各节点的服务范围并计算其实际货运量和一级节点转运率；然后以总成本最小化为目标优化网络，确定物流园与一级节点间、各一级节点之间、一级与从属二级节点之间的连线方式（即通道位置）和通道形式；再次，建立地下物流网络运输效率分析模型，通过改变通道等方式满足评价指标，提高 ULS 的抗风险能力；最后，建立多目标系统动态规划模型，每个阶段均定制三个过渡方案，确定出各阶段的最优扩容策略。

针对问题一，采用自上而下的方式确定各级节点的位置和数量。首先，为保证交通基本畅通，根据拥堵指数与货运量的比例关系可计算出相应区域地下总的进出货运量；其次，为简化计算和尽可能降低转运率，将整个区域基于货运交易量划分为 4 个子区域（即 4 个一级点的覆盖范围），利用 MATLAB 编程确定各区域边界，采用重心法确定各子区域的一级节点的位置；考虑到部分区域货运量与面积之比过小，对整个区域进行灰度处理，若服务范围内的灰度值较小即可认为覆盖了这个区域；接着建立非线性规划模型，在满足服务半径在 3 公里，且一级节点的地面收发货物总量上限为 4000 吨的条件下，选择货运量最大的服务半径，从而确定了 4 个一级点的的服务范围；然后选取距离一级节点较近的中心点作为二级节点，建立覆盖模型，在满足二级节点地面收发货物总量上限 3000 吨及服务半径的条件下，尽可能覆盖较多的中心点，至此，地下物流网络节

点群已确定完毕，共建立了 27 个节点（包括 4 个一级和 23 个二级）；最后，根据各节点实际的货运量计算一级节点的转运率分别为 44.99%, 59.07%, 41.12%, 64.1%。

针对问题二，采用自下而上的调整方法确定网络的连接形式。通过重心法重新调整二级节点位置（二级节点服务范围不变），使得二级节点与各中心点之间的物流距离最小；然后计算各节点实际的货运量以及总成本（包括运营成本和建设成本）最小化为目标，确定通道形式：物流园与一级节点之间采用双向四轨（10 吨）车辆运输、四个一级节点之间采用六条线呈网状连接，由车辆运输上限得出有两条双向二轨（5 吨）线路以及四条双向四轨（5 吨）线路、一级节点与二级节点之间以星射线的方式连接并采用双向二轨（5 吨）车辆运输；此方案既降低了通道的总长度，同时降低了建设成本与运输成本，计算得到总成本 $M = 407$ 万/天；最后确定各级节点间实际流量。

针对问题三，首先对原有网格系统的运输时间进行优化，从货运量、时间、距离等因素出发，建立地下物流网络运输效率分析模型，采用了三个衡量指标，即可用性、可达性、适度性，其中，可用性分析从路段、路径、O-D 对、网络四个方面分析了其可以正常使用的概率，以平均阻抗表示节点和整体网络的可达性，适应度指标包括节点间路径效率，网络运输能力适应度和收发均衡指数；接着建立风险评估模型，引入网络连通系数，结合评价指标，对第二问的 ULS 作如下改动：各区域二级节点之间建立通道，对于货运量较大的区域优先建立连接，在三区、四区可适当增加通道数；为降低主干道（物流园与一级节点之间的通道）的中断带给网络的致命性影响，因不考虑物流园区的拥堵情况，我们采用路面运输的方式由物流园直接发往临近的二级点，同时考虑此二级点的拥堵情况，此时，二级节点变为新的一级节点，服务于本区域，大大提高了 ULS 的抗风险能力（改进后的网格模型见图 7）。利用上述风险评价指标进行对比验证计算，发现运输网络可达性、运输能力适应度平均降低 15%，网络连通系数和运输网络的可用性显著性提高，达 35%。

针对问题四，根据该市未来 30 年的交通需求，规划分为三个阶段，每个阶段均定制三个过渡方案，建立多目标系统动态规划模型，首先确立各方案的定量和定性评价指标，构成评价目标集，然后根据模糊性和相对性确定定量目标相对优属度。根据语气算子确定定性目标相对优属度，计算出总体相对优属度，因为不同因素对最终优选策略影响程度各异，因此需要给系统指标赋予权重。最后建立多目标系统动态规划模型，确定出各阶段的最优扩容策略为，第一阶段选 B1 方案，第二阶段选 A2 方案，第三阶段选 B3 方案（具体解释见文章第五部分）。

关键词：地下物流系统（ULS），重心法，覆盖模型，网络运输效率分析模型，风险评价指标体系，多目标动态优化

构建地下物流系统网络

一、问题重述

我国人口众多、大城市密集、交通状况不佳已经到了迫切需要改善的程度，而且我国城市地铁网络的建设、高铁公路通道的建造正大规模地进行，地下空间开发利用的规模和速度已居世界前列，地下工程的技术水平也已基本满足需要，ULS 应该提上议事日程。撇开可行性、工程技术问题，构建地下物流系统网络是建设“地下物流系统”必不可少的关键步骤。

已知南京市仙林地区的交通货运区域划分图和相应的货运 OD (Origin Destination) 流量矩阵（只考虑始发地和目的地的货运流量，不考虑在此之间的途径地）、各区域中心点及区域面积、各区域交通拥堵系数（为简化计算，部分数据经过处理）。其他相关数据可以自行查找，收集与建立该区域“地下物流系统”网络有关的数据资料并完成以下几项任务：

发展城市地下物流网络的两个直接目标：一是缓解交通拥堵直至交通畅通，至少基本畅通；二是降低物流成本。

1. 地下物流节点选择；根据你们的观点和该区域的实际情况建立该区域节点选择模型，确定该区域地下物流网络节点群。

计算结果需要但不限于提交：一、二级节点数及位置、各节点的服务范围（经该节点出、入地面货物的起或迄点形成区域）、各节点实际货运量、各一级节点的转运率。

2. 地下通道网络设计；请你们在地下物流网络节点群的基础上选择合适的地下路线以建立该区域的“地下物流系统”网络。在转运率变化不大的情况下，若考虑优化网络，可适当调整一、二级节点位置。除园区至一级节点的地下通道外其他地下通道均采用 5 吨的地下运输车辆。

计算结果需要但不限于提交：网络构成（节点及通道位置）；各节点实际货运量；各级通道的位置和实际流量。

3. 网络改进；以上是分步设计网络，并未从全局出发，根据你们对运行情况的仿真，上面得到的网络有无修改的必要？能否通过增加、减少节点的个数，调整节点的位置或级别，增加、减少、改变路径的方法缩短货物运输总里程（同时节省运输时间），降低运输成本。

进一步从增强 ULS 的抗风险能力（如某通道中断，某方向货运量激增）考虑，需要对第二问的 ULS 作怎样的改动？

4. 建设时序与动态优化；“地下物流系统”造价高，风险大，改建困难，所以应做好顶层设计，如果希望考虑满足该市近 30 年内的交通需求（可以认为需求量每年呈 5% 增长）并根据建设进度分八年完成“地下物流网络系统”的建设（每年可建设道路长度大致相等），请给出该市“地下物流系统”网络各线路的建设时序及演进过程，与你在第三题中设置的网络有什么差别？并比较优劣。

二、问题分析

2.1 问题一的分析

问题一要求在已知数据的基础上，对南京市仙林地区的 110 个区域（不含 4 个物流园）建立节点选择模型，并确定该区域地下物流网络节点群。即已知各区域对应的货运 OD 矩阵、各区域中心点坐标、区域面积、交通拥堵系数来确定各级节点的位置和数量、服务范围、对应实际货运量及各一级节点的转运率。建立 ULS 的直接目标是缓解地面交

通拥堵同时降低物流成本：

(1) 首先对原始 OD 数据进行地下物流量分析，根据拥堵指数跟货运量成正比，为达到基本畅通，需将所有区域的拥堵指数降为 4，根据比例关系可计算出相应区域地下总的进出货运量；

(2) 然后根据 4 个物流园对 110 个区域的货运量不同，将整个区域划分为 4 个子区域（即 4 个一级点的覆盖范围已经确定），利用 MATLAB 编程确定各区域边界；

(3) 不妨采用自上而下的方法确定各级节点的位置和数量，即先确定一级节点的位置及服务范围，再确定二级节点的位置及服务范围，考虑用重心法确定各子区域的重心，即为各子区域的一级节点，这样，我们就确定了 4 个一级点的位置，也满足了转运率低的要求；

(4) 又因部分区域的货运量和面积之比过小，故对整个区域进行灰度处理，每个区域的灰度值代表所在区域单位面积的货运量，若服务范围内的灰度值较小即可认为覆盖了这个区域；

(5) 接着建立非线性规划模型，在满足服务半径在 3 公里，且一级节点的地面收发货物总量上限为 4000 吨的条件下，选择货运量最大的服务半径，从而确定了 4 个一级点的服务范围；

(6) 二级节点选择的时候不妨直接选取距离一级节点较近的中心点，建立覆盖模型，在满足二级节点地面收发货物总量上限 3000 吨及服务半径的条件下，尽可能覆盖较多的中心点，如此，可求出 4 个区域所有一级点下二级点的位置、数目及货运量，最后，根据各节点实际的货运量计算一级节点的转运率。

2.2 问题二的分析

问题二要求在问题一物流节点群的基础上建立合适的“地下物流系统”网络，即通过调整一二级节点位置、选择合适的地下物流通道等方式优化网络，确保地下物流总成本最小：

(1) 采用自下而上的调整方法。因原有二级节点位置直接选取与一级临近的中心点作为节点，未考虑二级区域中心点的货运量，为了降低二级节点服务区域地面交通拥堵系数，通过重心法重新调整二级节点位置，使得二级节点与各中心点之间物流距离减小，进一步降低物流成本同时保持二级节点服务范围不变。

(2) 重新调整各节点位置后，通过计算各节点实际的货运量及以总成本（包括运营成本和建设成本）最小化为目标，确定物流园与一级节点间、各一级节点之间、一级与从属二级节点之间的连线方式（即通道位置）和通道形式。

(3) 已知物流园和各个优化后的节点坐标，以及各节点通道距离，然后根据各通道的实际流量与通道长度确定运输成本，根据确定的节点位置级通道形式选取方案确定建设成本。最终得到总成本。

2.3 问题三的分析

问题三要求从全局出发，判断在问题二中的网络模型有无修改的必要，并采用一些方法缩短货物运输总里程，同时节省运输时间，降低运输成本，这三者相互联系，综合起来就是提高经济性运输效率的问题。然后进一步从增强 ULS 的抗风险能力出发，对第二问构建的物流网格做适当的改动。

(1) 首先对原有网格系统的运输时间进行优化，从货运量、时间、距离等因素出发，确定分析指标，建立地下物流网络运输效率分析模型，

(2) 然后以运输费用最小化为目标，对货运量、时间、距离等进行优化。

(3) 确立物流运输网络的综合评价指标体系。做到物流运输网络风险评价的定量化，并为物流运输网络的规划与优化打下基础。在优化物流运输网络时，至关重要的是强度

大的节点和权重大的边，因此必须加强它们的建设，注重节点和边之间的联系，注重网络层次，在保证安全的前提下提高物流运输网络的整体效率。

2.4 问题四的分析

通过以区域大城市为中心物流节点的物流网络空间扩张,从物流节点的增多和规模的扩大,物流网络的建设,最后向整个腹地,呈网式扩展,促使具有“点一轴一网”空间结构与多重循环机制特征的区域物流网络得以形成和发展。

“地下物流系统”前期投入大，建设周期长，改造灵活性低。根据该市未来 30 年的交通需求，规划分为三个阶段，即第一个阶段为第 1-10 年，第二个阶段为 11-20 年，第三个阶段为 21-30 年。逐步完善该城市物流节点系统，提高城市的交通运输能力。在现有一级节点、二级节点构成的地下物流系统中，假设由于交通需求增加而需要增加的候选一级节点 n_1 个，二级物流节点为 n_2 个。

三、符号说明

符号	含义	符号	含义
$c_i(i=1,2...110)$	各区域的拥堵系数	α	日折旧率
$q_i(i=1,2...110)$	各区域的地下货运量	β_i	路段可用性
$Q_i(i=1,2...110)$	各区域原有的货运量	E	节点间路径效率
φ	转运率	s	收发均衡指数
(x_i, y_i)	中心点的位置坐标	C	网络连通系数
$p_i(i=1,2,3,4)$	四类隧道建设成本单价	R	综合相对优属度矩阵
$p_i(i=5,6)$	两类节点建设成本单价	X	价目标特征矩阵
M	每日总成本	$u(sk)$	决策变量

四、模型假设

- (1) 假设物流配送的货物不分种类；
- (2) 假设在地下物流配送过程中, 车辆都是匀速行驶的；
- (3) 地下物流配送中心的货物数量总可以满足市场需求量；
- (4) 假设不考虑各个区域内部的货运量；
- (5) 假设不考虑 4 个物流园的拥堵情况。

五、模型建立与求解

5.1 问题一

5.1.1 原始数据处理及区域分割模型建立

根据问题一的分析，首先对原始 OD 数据进行处理，根据拥堵指数跟货运量成正比，为达到基本畅通，需将所有区域（不考虑物流园的拥堵情况）的拥堵指数降为 4，根据交通拥堵指数需要下降的比例可计算出相应区域地下总的进出货运量：

$$q_i = Q_i \left(\frac{c_i - 4}{4} \right) \tag{1}$$

计算结果如下表。

表 1 各区域地下进出货量（部分）

区域编号	791	792	793	794	795	796	797	798
原有出货量和（吨）	1596.093	747.995	941.196	648.326	638.16	759.537	865.667	898.812
原有进货量和	1687.7	758.654	944.887	703.088	673.196	853.779	964.361	719.879
进出货量总和	3283.793	1506.649	1886.083	1351.414	1311.356	1613.316	1830.028	1618.691
交通拥堵指数	4.48	6.57	6.79	6.53	5.33	6.35	6.64	6.78
指数的下降百分比	0.107143	0.391172	0.410898	0.387443	0.249531	0.370079	0.397590	0.410029
地下出货量总和	171.010	292.5947	386.7359	251.1891	159.2407	281.0885	344.1809	368.5394
地下进货量总和	180.825	296.7642	388.2525	272.4062	167.9832	315.9655	383.4206	295.1716
地下进出货量总和	351.835	589.3589	774.9885	523.5953	327.2239	597.0539	727.6015	663.7111

注：因数据量太多，这里只列举部分，全部数据见附录，下同。

确定了各区域的地下货运量之后，下一步就要确定一级点选取的位置和数量，考虑到从园区到一级节点采用 10T 的车辆运输，成本较高，故一级点的数目在满足运货需求的条件下越少越好，而又要求每个物流园都至少跟一个一级点相连，故我们假设每个物流园对应一个一级节点，而且二者距离越近越好，分析上述数据，以物流园 1 的运货量为例，发现与之货运量最多的区域大多集中在临近的区域，且呈发散状分布，故我们根据物流园与区域之间的货运量建立区域分离模型，即将原有区域重新划分为四个子区域，每个子区域分属于 1 个物流园，利用 MATLAB 求出区域之间的边界线（以下所说的区域均值重新划分后的子区域）作图如下（其中白色区域因交通拥堵系数较小，视为畅通区域，不纳入划分区域）：

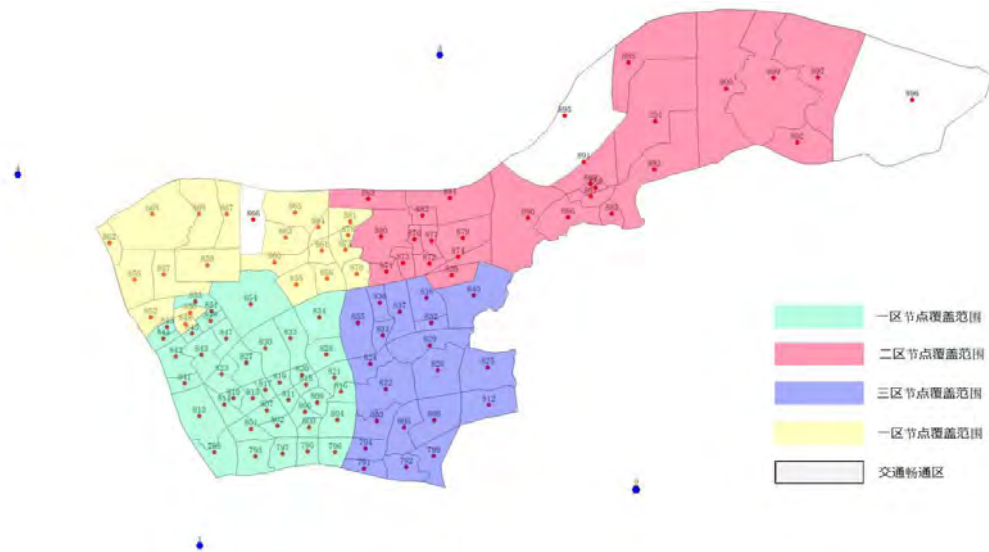


图 1 区域分离模型

如此，经过定性分析，我们只需要在 4 个子区域中各自确定一个一级节点，接下来采用自上而下的方法确定各级节点的位置和数量，即先确定一级节点的位置及服务范围，再确定二级节点的位置及服务范围，首先需要定量确定一级点的位置坐标。

5.1.2 各级节点坐标及服务范围的确定

重心法是一种常用的单个设施选址方法，属于静态选址方法。这里应用重心法时将货运量作为唯一的选址决策因素，模型的目标是使单个设施选址的货运量最大。重心法的计算原理是将物流节点看成某一区域内的系统，将节点供应量和需求量看成物体的重量，计算出区域的重心并将其作为最佳选址点。首先针对物流园 1 所对的子区域，求它的一级节点位置，模型的建立如下：假设有 i 个中心点，坐标为 (x_i, y_i) ，各区域的地下

货运量为 $q_i (i=1,2,\dots,110)$

目标函数为：
$$\max f = \sum_{i=1}^n q_i [(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2]^{1/2} \quad (2)$$

则系统的重心可由下式求得：

$$\sum_{i=1}^n x_i q_i = x \sum_{i=1}^n q_i \quad \sum_{i=1}^n y_i q_i = y \sum_{i=1}^n q_i \quad (3)$$

其中， (x,y) 表示要计算出的一级节点的位置，由以上公式可求解出：

$$x_n = \frac{\sum_{i=1}^n x_i q_i}{\sum_{i=1}^n q_i}, \quad y_n = \frac{\sum_{i=1}^n y_i q_i}{\sum_{i=1}^n q_i} \quad (4)$$

同理，可得出四个区域点的重心坐标（即一级节点位置）如下：

表 2 四个区域的一级节点坐标

位置	一区	二区	三区	四区
一级节点	(141.740,153.423)	(148.731,153.280)	(154.631,161.550)	(141.263,158.775)

之后求解一级节点的服务范围，这里建立非线性规划模型，由于服务区域在半径不超过 3 公里的范围内，且一级节点覆盖区域的货运量总和不超过 4000 吨，故在满足这两个约束的条件下利用 LINGO 求解满足目标函数的中心点：

目标函数：
$$U: \max \sum_{i=1}^n q_i \quad (5)$$

（其中 q_i 代表每个中心点的货运量，一区共包括 42 个中心点，目的就是使得一级区域所覆盖的货运量最大）

约束条件：
$$\begin{cases} (x_i - 141.7402)^2 + (y_i - 153.4236)^2 < 9 \\ \sum_{i=1}^{42} q_i < 4000 \end{cases} \quad (6)$$

（满足服务范围不超过三公里，同时地面运输量不能超过 4000 吨）

又因部分区域的货运量和面积之比过小，故对整个区域进行灰度处理，每个区域的灰度值代表所在区域单位面积的货运量，若服务范围内的灰度值较小即认为覆盖了这个区域，运用 MATLAB 对图像进行二值化处理获得货运量灰度图如下：

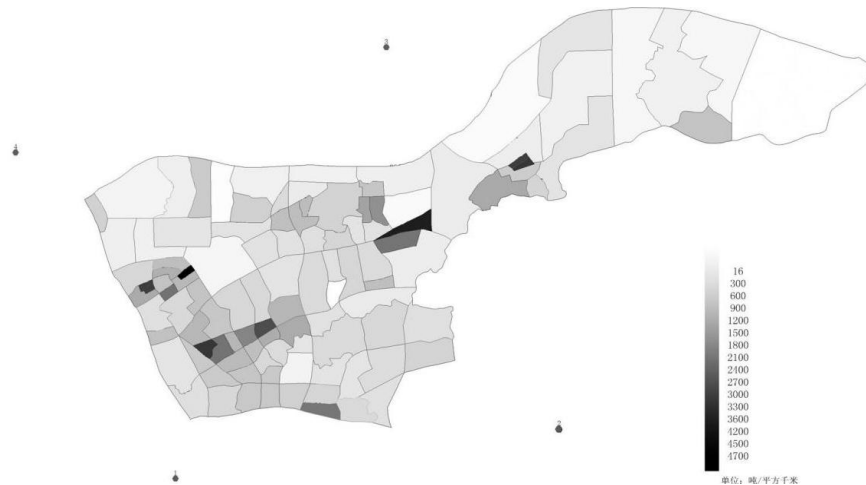


图 2 区域货运比例灰度图

如此可求出 4 个子区域的一级节点的服务半径，货运量总和及对应的服务区域：

表 3 各区域一级节点的服务范围

一级节点	一区	二区	三区	四区
服务半径	1.0446671	1.608652	1.310545	1.835571983
货运量总和	3812.2790	3113.449	3421.424	3632.979024
服务区域 (编号)	827、817、 815、819	822、826、 829	889、 887、886	860、859、 863、867

采用自上而下的方法，接下来选择二级节点，为简化计算，不妨直接选取距离一级节点较近的中心点，建立覆盖模型，覆盖法是一种贪心算法，它的基本思想是尽可能侦察覆盖周围目标点数多的目标点。

在满足二级节点地面收发货物总量上限 3000 吨及服务半径的条件下，尽可能覆盖较多的中心点，步骤如下：

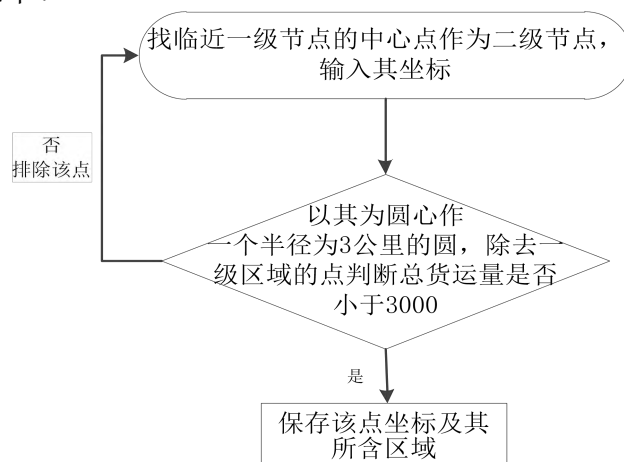


图 3 覆盖模型算法

得到四个区域的二级点坐标及其服务范围如下：

表 4 各区域二级节点的位置及服务范围

二级 节点	节点位置 (中心点编号 (坐	服务区域 (编号)	货运 量总和
一区	807(142.19994,	801、802、800、806、807、811	2758.884
	833 (143.19186,	833、830、834、828	2986.235
	820 (143.67806,	820、818、821	2975.733
	806 (143.8001,	804、806、809、795、796、797、816	2609.096
	823 (140.30915,	823、843、814、841	2920.246
	845 (139.06412,	846、842、844、845、848	2998.908
	847 (140.50084,	847、848、849、851、853	2998.908
	810 (140.8082,	793、810、798、813	2982.275
二区	803 (146.81338,	805、803、799、794、792、791	2989.237
	812 (151.50072,	812、808、825	2999.342
	832 (149.08816,	840、832、837、838	2686.287
	831 (147.0664,	835、836、831、824	2674.952
三区	876 (148.37572,	876、880	2971.184
	882 (148.72384,	874、877、883、882、884、879	2668.947
	839 (149.9519, 157.73828)	873、872、871、839	2974.673
	886 (154.83009,	2782.90289	2782.902
	(157.892975,	898、893	2952.035
	(160.95768, 165.353365)	900、899、894	2999.329

	(163.43456,165.353365)	892、897、899	2169.083
四区	868 (137.4048,	868、869、862	1705.886
	857 (137.88968, 157.78166)	857、858、852、850	2036.955
	864 (144.34886, 159.82882)	861、875、864、865、878、881	2640.633
	855 (143.42575, 157.3394)	855、856、870、854	1729.10

至此，地下物流网络节点群已确定完毕，即共建立 27 个节点，其中 4 个一级节点，23 个二级节点，各级节点的位置坐标、服务范围及货运量见上表。

5.1.3 一级节点转运率及节点分布图

由题设可知，一级节点的转运率（ φ ）为从物流园区经由最近的一级节点转运至其他所有一级节点的货物量占该物流园区总出货量的百分比，且在满足运输要求前提下，转运率越低越好。

$$\varphi = 1 - \frac{q_{\text{一级节点}}}{Q_{\text{物流园}}} \times 100\% \quad (7)$$

其中， $q_{\text{一级节点}}$ 表示一级节点自身的货物消化量（包括发给地面及同区域二级的货运量）， $Q_{\text{物流园}}$ 表示物流园区的总出货量，计算结果如下：

表 5 各区一级节点的转运率

消化量（吨）	1 物流园	2 物流园	3 物流园	4 物流园	转运率
节点 A	7921.485	3947.708	3110.900	1359.942	0.450
节点 B	1998.745	5520.335	1407.326	929.061	0.591
节点 C	2798.319	3061.463	7570.945	1928.869	0.411
节点 D	1681.452	957.205	769.780	2362.671	0.641

可见，四个子区域的一级节点转运率分别为 44.99%, 59.07%, 41.12%, 64.1%
至此，第一问的求解问题结束，综上所述，各级节点分布图如下：

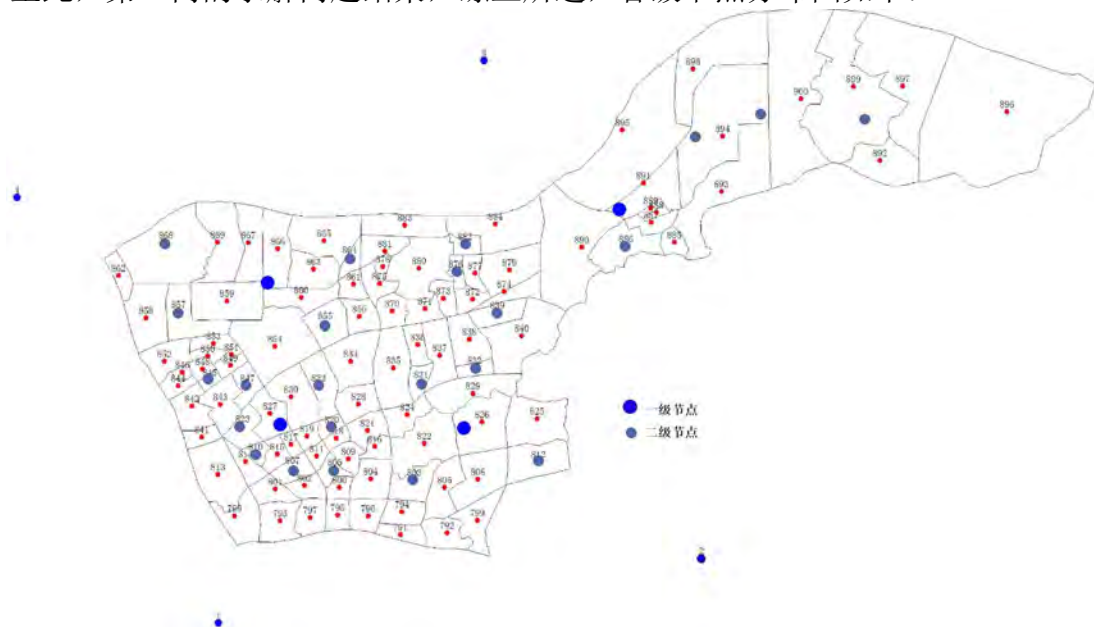


图 4 物流网络节点群分布图

5.2 问题二

5.2.1 基于运输成本的各级节点优化

问题一选取的二级节点位置仅根据限定的服务范围和收发货物总量上限做初步选择，未考虑二级节点与其中中心点的地面交通拥堵情况以及成本费用。从这两个角度出发

优化模型，首先保持二级节点的服务范围不变，通过重心法重新调整二级节点的位置，使得二级节点与各中心点之间的运输距离最小，同时降低物流成本，减少交通拥堵。

表 6 调整后的二级节点坐标

二级节点	a1	a2	a3	a4	a5	a6
横坐标	142.331	145.335	142.927	145.800	141.176	140.352
纵坐标	153.430	156.017	152.985	153.430	152.855	151.600
二级节点	a7	a8	b1	b2	b3	b4
横坐标	145.133	142.947	146.477	149.013	148.026	146.973
纵坐标	155.677	151.500	150.446	151.365	156.017	153.585
二级节点	c1	c2	c3	c4	c5	c6
横坐标	149.589	151.065	146.778	149.565	157.888	163.023
纵坐标	160.048	158.716	155.995	160.130	157.973	172.010
二级节点	c7	d1	d2	d3	d4	
横坐标	160.975	141.685	139.625	142.126	142.451	
纵坐标	165.146	159.550	157.449	158.045	156.129	

其中：a1— a8 表示一区的二级节点，b1— b4 表示二区的二级节点，c1— c7 表示三区的二级节点，d1— d4 表示四区的二级节点。

问题一对一级节点依据服务范围以及各中心点货运量选取，这里将成本考虑进去，因问题一运用的重心法实际已经将通道路程和优化到最小，因此保留一级节点原有坐标。

5.2.2 地下物流网络建立

重新调整各节点位置后，已经确保节点的服务范围、运货量以及建设总成本均达到最优值，然后确定物流园与一级节点、各一级节点之间、一级与二级节点间的连线方式和通道形式。因为物流园与一级节点间一一对应，并且货运量很大，采用双向四轨（10 吨）车辆运输；各一级节点之间要求具有遍历性，且经过数据处理得到各节点之间物流量也较大，因此采用六条线将四个一级节点相互连接，由车辆运输上限得出有两条双向二轨（5 吨）线路以及四条双向四轨（5 吨）线路；如果一级与二级节点采用间接连接方式，虽然能够减少通道总长度，但必然导致中转二级节点通货量增加，中转二级节点与一级节点被迫采用双向四轨通道运输，建设成本反而会升高，考虑到各二级节点均与一级节点有直接的货运量关系，因此直接连接一级节点与二级节点，即采用星射线的方式连接，依据二级节点实际流量均在 3000 吨以下，一二级节点之间均采用双向二轨（5 吨）车辆运输。依据此方法确定的方案既降低了通道的总长度，同时降低了建设成本与运输成本，将总成本控制到最小。重新调整好各级节点位置后，确定各级节点间实际流量。

a) 物流园与一级节点间

首先由原始数据可确定物流园发往各一级节点的货运总量，如下表：

表 7 物流园对各一级节点的发货量

发货量(吨)	1 物流园	2 物流园	3 物流园	4 物流园
一级节点 A	7921.485	3947.708	3110.900	1359.942
一级节点 B	1998.745	5520.335	1407.326	929.061
一级节点 C	2798.319	3061.463	7570.945	1928.869
一级节点 D	1681.452	957.205	769.780	2362.671

因为从物流园出来的发货量很大，根据车辆参数，采用 10 吨车，一班车 8 节车辆，

每小时 5 班，每天运营 18 小时，则单向流量最大为 7200 吨，并且由上表得出物流园与一级节点之间单项最大货流量，进而确定各物流园与一级节点的通道形式。由节点坐标与物流园坐标算得节点与物流园距离。

表 8 物流园与一级节点间的通道形式

	1-A	2-B	3-C	4-D
距离（公里）	7.744	10.159	7.730	10.065
实际流量（吨）	14400.000	13486.710	12858.950	6580.543
通道形式	双向四轨	双向四轨	双向四轨	双向二轨

b) 各一级节点之间

一级节点给其他一级节点的货物的来源主要有两个，一个是物流园发来的，一个是本区域一级节点服务区中心点收发上来的，如下表：

表 9 各区域对各一级节点的发货量

发货量（吨）	1 区	2 区	3 区	4 区
一级节点 A	6423.099	1117.643	2412.801	2959.047
一级节点 B	1117.643	494.046	1920.077	369.982
一级节点 C	2412.801	1920.077	3187.264	590.851
一级节点 D	2959.047	369.982	590.851	2079.020

表 10 各一级节点之间货运量

货运量（吨）	节点 A	节点 B	节点 C	节点 D
节点 A	0.000	5065.352	5523.701	4318.989
节点 B	3116.388	0.000	3327.402	1299.043
节点 C	5211.119	4981.539	0.000	2519.721
节点 D	4640.499	1327.187	1360.631	0.000

根据实际流量及计算出的各一级节点间距离确定一级节点之间的通道形式。

表 11 各一级节点之间连接方式

	A-B	A-C	A-D	B-C	B-D	C-D
节点距离	6.992	15.29	5.373	10.159	9.271	13.653
单向最大货流量	5065.352	5523.701	4640.499	4981.539	1327.187	2519.721
通道形式	双向四轨	双向四轨	双向四轨	双向四轨	双向二轨	双向二轨

c) 一级与二级节点之间

由于二级节点的货物与地面货物有直接对应关系，二级节点与一级节点实际流量等于二级节点从地面收发货物总量，由优化后的各二级节点坐标得出二级节点与对应一级节点距离。

表 12 二级点与一级点间信息

二级节点	a1	a2	a3	a4	a5	a6
与对应一级节点距离	0.591	4.432	1.266	4.060	0.801	2.292
实际流量	2758.884	2986.235	2975.733	2609.096	2920.247	2998.908
二级节点	a7	a8	b1	b2	b3	b4
与对应一级节点距离	4.073	2.271	3.621	1.936	2.825	1.785
实际流量	2998.908	2982.275	2989.237	3000.000	2686.288	2674.952
二级节点	c1	c2	c3	c4	c5	c6
与对应一级节点距离	5.261	4.555	9.620	5.262	4.838	13.410
实际流量	2971.184	2668.948	2974.673	2782.903	2952.035	3000.000
二级节点	c7	d1	d2	d3	d4	
与对应一级节点距离	7.292	0.881	2.108	1.130	2.901	
实际流量	2169.084	1705.886	2036.955	2640.634	1729.104	

综上所述，最终构建的 ULS 网格图如下：

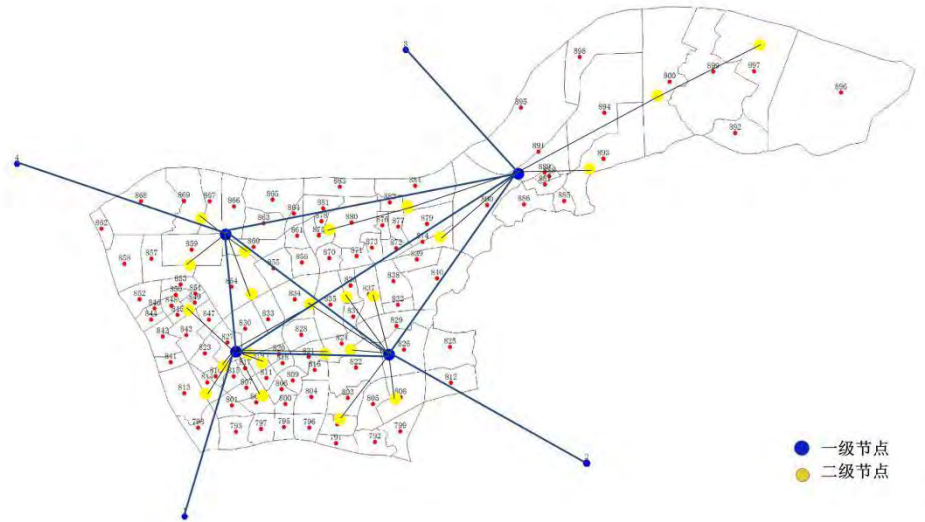


图 5 ULS 网格图

5.2.3 总成本预算

地下物流系统每天的总成本由三部分构成，节点成本的折旧、通道成本折旧与每天的运输成本。物流园与一级节点的交互为上层，一级节点之间的交互为中层，一级与二级节点之间的交互为下层。则该物流系统每天总成本 M 为

$$M = \alpha M_1 + \alpha M_2 + M_3 \quad (\alpha \text{ 为日折旧率, } \alpha = 1\% / 365) \quad (8)$$

(1) 节点建设成本

$$M_1 = p_5 n_1 + p_6 n_2 \quad (9)$$

解得 $M_1 = 29e + 5$

(2) 隧道建设成本

$$M_2 = M_{21} + M_{22} + M_{23} \quad (10)$$

其中 M_{21} 为上层隧道建设成本 $M_{21} = p_1(l_{1A} + l_{2B} + l_{3C}) + p_2 l_{4D}$

M_{22} 为中层隧道建设成本 $M_{22} = p_3(l_{AB} + l_{AC} + l_{AD} + l_{BC}) + p_4(l_{BD} + l_{CD})$

M_{23} 为下层隧道建设成本 $M_{23} = p_4(\sum_{i=1}^8 l_{ai} + \sum_{i=1}^4 l_{bi} + \sum_{i=1}^7 l_{ci} + \sum_{i=1}^4 l_{di})$

解得 $M_{21} = 1684219$ $M_{22} = 2009404$ $M_{23} = 2616327$

各层隧道总建设成本为 $M_2 = 6309950$

(3) 运输成本

$$M_3 = M_{31} + M_{32} + M_{33} \quad (11)$$

其中 M_{31} 为上层运输成本 $M_{31} = 2 \times 1 \times \sum (l_i q_i)$ ($i = 1A, 2B, 3C, 4D$)

M_{32} 为中层运输成本 $M_{32} = 2 \times 1 \times \sum (l_{ij} q_{ij})$ ($i, j = A, B, C, D, i \neq j$)

M_{33} 为下层运输成本 $M_{33} = 1 \times (\sum_{i=1}^8 l_{ai} q_{ai} + \sum_{i=1}^4 l_{bi} q_{bi} + \sum_{i=1}^7 l_{ci} q_{ci} + \sum_{i=1}^4 l_{di} q_{di})$

$M_{31} = 82.83$ $M_{32} = 48.36$ $M_{33} = 24.15$ $M_3 = 155.34$

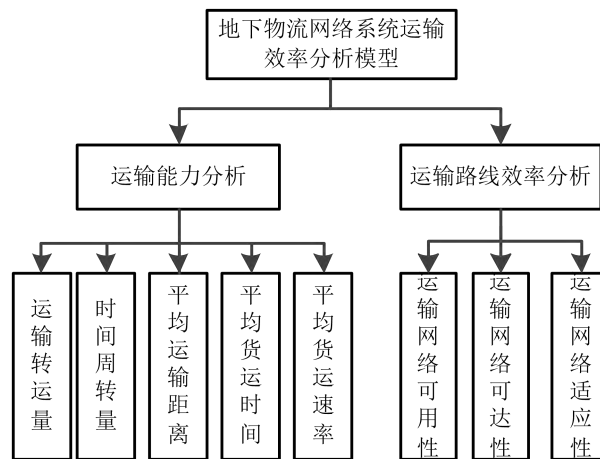
各层运输成本总和为 $M = 407$ 万

经过成本验证, 优化的物流网络结构使得每日运营成本控制在合理范围内。

5.3 问题三

5.3.1 物流运输网络效率分析模型的建立

根据问题分析, 上述物流网络的构建只是分布设计的, 并未考虑全局, 衡量总的收发效益, 故需要重新优化该网络, 首先从运输方式和运输路径两个方面对物流运输网络效率进行分析, 过程如下:



首先对运输方式, 这里采用运输能力来反映运输效率, 其中:

(1) 运输转运量 M_0 = 货运量 \times 运输距离 (单位: 吨·公里), 表征空间位移强度。

(2) 时间周转量 T_0 = 货运量 \times 运输时间 (单位: 吨·天), 表征时间位移强度。

(3) 平均运输距离 L_v ，反映了物流运输网络的空间连续性。

(4) 平均货运时间 $t_a = T_0 / \text{货运量}$ ， t_a 越长，服务效率越低。

(5) 平均货运速率 $V_a = t_a / L_v$ ，它反映了运输网络的综合服务水平。

其次考虑运输路径对网络运输效率的影响：

(1) 运输网络可用性：指路段、路径、OD 流量对以及网络等正常使用的概率

a) 路段可用性 β_i ，用来衡量路段的承载能力

$$\beta_i = \frac{q_{\max} - \mu_i}{q_{\max}}, \quad \forall i, \mu_i \leq q_{\max} \quad (12)$$

其中， q_{\max} ：路段 i 的最大货运承载量， μ_i ：路段 i 上的实际货运量，当 $\mu_i \geq q_{\max}$ 时，令 $\beta_i = 0$

b) 路径可用性：路径由几条路段串联而成，用来衡量节点间的路线连通能力

$$R_{a-b,k} = \prod_i \beta_i \sigma_{i,k}^{a,b}, \quad \forall a, b, k \quad (13)$$

其中， $R_{a-b,k}$ 表示从节点 a 到节点 b 之间的第 k 条路径的可用性；

$\sigma_{i,k}^{a,b}$ 为判定值，若路段 i 在连接 OD 对 a, b 之间的第 k 条路径上，则为 1，否则为 0。

c) OD 路段可用性，OD 流量对间的所有路径采用并联的方式连接，表征 OD 对的两节点间第 k 条路径的可用性

$$R_{a-b} = 1 - \prod_k (1 - R_{a-b,k}) \quad (14)$$

(2) 运输网络可达性：表征各节点之间连通的便捷性和流量流通的畅通程度，这里采用平均抗阻^[6]的概念来表示节点和整体网络的可达性。

a) 节点的可达性：从该节点出发到其他各个节点的最短距离的算术平均值

$$D_a = \frac{\sum_{\substack{b=1 \\ b \neq a}}^m l_{ab}}{n}, \quad (b = 1, 2, \dots, m) \quad (15)$$

其中， m 为网络中的节点个数， n 为网络中可达节点的个数， $l_{a,b}$ 为节点 a 到节点 b 的最短距离。

b) 网络可达性：为所有节点加和的平均值

$$\bar{D} = \frac{\sum_{a=1}^m D_a}{M} \quad (\text{其中 } M \text{ 为网络中起始点的个数}) \quad (16)$$

(3) 运输网络适应性：也叫饱和度，表征网络的鲁棒性，用以下三个指标衡量：

a) 节点间路径效率 E ：表征节点间的交通状况与最佳状况的差距， E 越接近于 1 说明路径利用效率越高，用最短路径的运输距离（或时间）与实际运输距离（或时间）的比值来衡量：

$$E = \frac{l \sum_{k=1}^n q_k}{\sum_{k=1}^n l_k q_k} \quad (\text{其中 } q_k \text{ 为路径 } k \text{ 上的实际货运量}) \quad (17)$$

b) 网络运输能力适应度 q/Q ：网络中所有线路的实际货运量之和与设计运输量之和的比值，反映了网络的拥堵情况及对物流供给需求的适应程度：

$$q/Q = \frac{\sum_{i=1}^n q_i l_i}{\sum_{i=1}^n Q_i l_i} \quad (18)$$

查阅交通部的资料^[7]，将运输能力适应值划定标准如下：

表 13 网络运输状况评价标准

q/Q	(0, 0.7]	(0.7, 0.85]	(0.85, 1.0,]	(1.0, 1.5]	>1.5
适应能力	很适应	适应	基本适应	不适应	很不适应

c)收发均衡指数 s :反映总运货量的分配情况及各种运输资源的使用率， s 越小，说明货运量分配越合理。

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (q_i / Q_i - q / Q)^2} \quad (19)$$

运用上述评价指标，对原有网格的计算结果如下：

表 14 一区可用性分析

路径	货运量(吨)	路段可用性	路径可用性	OD 路段可用性
1-A	7921.485	0.450	0.450	0.450
A—a1	2758.884	0.617	0.278	0.603
A—a2	2986.235	0.585	0.263	0.595
A—a3	2975.733	0.587	0.264	0.595
A—a4	2609.096	0.638	0.287	0.608
A—a5	2920.247	0.594	0.267	0.597
A—a6	2998.908	0.583	0.263	0.594
A—a7	2998.908	0.583	0.263	0.594
A—a8	2982.275	0.586	0.264	0.595

由表可知，在一区的 8 条路段中，有 7 条路段的可用性都达到了 50%以上，路段可用性为路段上可承载的剩余运量与路段最大运量的比值，故可用性越高说明该路段的使用效率越低，而且该路段因货运量激增而产生的拥堵几率小。从路径可用性来看，大部分在 25%左右，说明该区的物流网络结构化程度不高。OD 路段可用性综合反映了网络路段可用性较高。

表 15 一区可达性分析

路径	节点的可达性	节点间路径效率	运输能力适应度
1-A	7.744	1.000	0.550
A—a1	1.594	0.695	0.535
A—a2	2.162	0.985	0.534
A—a3	1.938	0.884	0.535
A—a4	2.599	0.704	0.523
A—a5	1.432	0.816	0.538
A—a6	3.222	0.837	0.527
A—a7	2.011	0.926	0.535
A—a8	1.361	0.719	0.539

根据计算公式，此物流网络的可达性为：

$$\bar{D} = \frac{\sum_{a=1}^m D_a}{M} = \frac{24.06198615}{9} = 2.673554017 \quad (20)$$

网络节点间的平均运输距离为 2.673554017 千米，说明属于短距离运输，一般不会受外界因素太大影响。

分析节点间路径效率的计算结果，基本都在 70% 以上，其中一个路段高达 98.45%，说明在单个路段上，实际交通状况与最佳网络状况接近，该路段上的线路使用率较高。再分析运输网络适应程度，均在 0.7 以下，说明与需求比较适应。

同理，可计算出其他 3 个区的指标值

表 16 二区可用性分析

路径	路段可用性	路径可用性	OD 路段可用性	货运量（吨）
2-B	0.617	0.617	0.617	5520.335
B—b1	0.585	0.361	0.755	2989.237
B—b2	0.583	0.360	0.755	2999.343
B—b3	0.627	0.387	0.765	2686.288
B—b4	0.628	0.388	0.765	2674.952

表 17 二区可达性分析

路径	节点的可达性	节点间路径效率	运输能力适应度
2-B	10.159	1.000	0.383
B—b1	2.661	0.879	0.490
B—b2	3.000	0.546	0.489
B—b3	2.424	0.891	0.485
B—b4	2.503	0.990	0.485

表 18 三区可用性分析

路径	货运量（吨）	路段可用性	路径可用性	OD 路段可用性
3-C	7570.945	0.474	0.474	0.474
C—c1	2971.184	0.587	0.279	0.621
C—c2	2668.948	0.629	0.298	0.631
C—c3	2974.673	0.587	0.278	0.621
C—c4	2782.903	0.613	0.291	0.627
C—c5	2952.035	0.590	0.280	0.621
C—c6	2999.330	0.583	0.277	0.620
C—c7	2169.084	0.699	0.331	0.648

表 19 三区可达性分析

路径	节点的可达性	节点间路径效率	运输能力适应度
3-C	7.730	1.000	0.526
C—c1	6.650	0.560	0.491
C—c2	6.031	0.507	0.482
C—c3	6.035	0.694	0.493

C—c4	1.311	0.979	0.514
C—c5	4.492	0.724	0.499
C—c6	7.382	0.773	0.490
C—c7	9.590	0.816	0.439

表 20 四区可用性分析

路径	货运量（吨）	路段可用性	路径可用性	OD 路段可用性
4—D	2362.671	0.836	0.836	0.836
D—d1	1705.886	0.763	0.638	0.941
D—d2	2036.955	0.717	0.599	0.934
D—d3	2640.634	0.633	0.529	0.923
D—d4	1729.104	0.760	0.635	0.940

表 21 四区可达性分析

路径	节点的可达性	节点间路径效率	运输能力适应度
4—D	22.873	1.000	0.164
D—d1	17.265	0.147	0.354
D—d2	17.160	0.187	0.379
D—d3	10.425	0.384	0.437
D—d4	11.970	0.362	0.378

其中可达性分别为：二区——3.46、三区——5.47、四区——13.28。

5.3.2 抗风险能力评估及网络模型优化

依据上述评价指标体系的构建原则，为评估 ULS 的抗风险能力，需要确立相应的风险评价指标体系。实现物流运输网络风险评估的定量化，进一步为物流运输网络的规划和优化打下基础。在优化物流运输网络时，至关重要是强度大的节点和权重大的边，因此必须加强它们的建设，注重节点和边之间的联系，注重网络层次，在保证安全的前提下提高物流运输网络的整体效率。

结合 5.3.1 节中的分析指标，发现网络可用性、可达性、及适应度均能在一定程度上反映系统的抗风险能力：

（1）运输网络的可用性是指任何一个时间点运输系统正常运行的概率，即物流网络可以正常使用的概率，其运算方法按照串并联系统的可用性方法来计算，可用性越强，ULS 的风险越小。分析上节表中的数据，则根据可用性四个区的抗风险能力排序为：二区>四区>三区>一区；

（2）运输网络可达性是指从区域内某一点出发抵达任意目的地的运输距离、运输时间或成本的大小。它反映了各节点间交通的便捷程度。可达性越小表示交通越便捷，物流运输网络的风险也就越小，则根据可达性四个区的抗风险能力排序为：一区>二区>三区>四区；

（3）运输能力适应度用来综合描述交通运输网络的拥挤程度。结果越大表示交通越拥挤，运输网络的能力与需求越不适应，物流运输网络的风险越大。则根据运输能力适应度四个区的抗风险能力排序为：四区>二区>三区>一区；

（4）为进一步反映区域的抗风险能力，引入网络连通系数，即：

$$C = \frac{1}{m \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{n} l_i} \quad (21)$$

其中, m 为网络连通分支数, n_i 为第 i 个连通分支中节点的数目, n 为网络节点总数目, l_i 为第 i 个连通分支的平均最短路径。连通系数的实质就是各连通分支平均最短距离加权平均与连通分支数乘积的倒数。连通分支数越少、各分支的平均最短路径越小, 网络的连通性越好, 即网络连通系数 C 越大, 网络抗毁性越强。当全网连通 ($m=1$) 并且 $L=1$ 时, C 取最大值 1。

故我们采取以下改动对原有网络模型进行优化:

(1) 各区域二级节点之间建立通道, 对于货运量较大的区域优先建立连接, 在三区、四区可适当增加通道数;

(2) 为降低主干道 (物流园与一级节点之间的通道) 的中断带给网络的致命性影响, 因不考虑物流园区的拥堵情况, 我们采用路面运输的方式由物流园直接发往临近的二级点, 同时考虑此二级点的拥堵情况, 此时, 二级节点变为新的一级节点, 服务于本区域, 大大提高了 ULS 的抗风险能力。

(3) 利用上述风险评价指标进行对比验证计算, 发现运输网络可达性、运输能力适应度平均降低 15%, 网络连通系数和运输网络的可用性显著性提高, 达 35%。因篇幅限制, 这里不再列举, 相关计算结果见附录。

重新优化后的节点分布图如下:

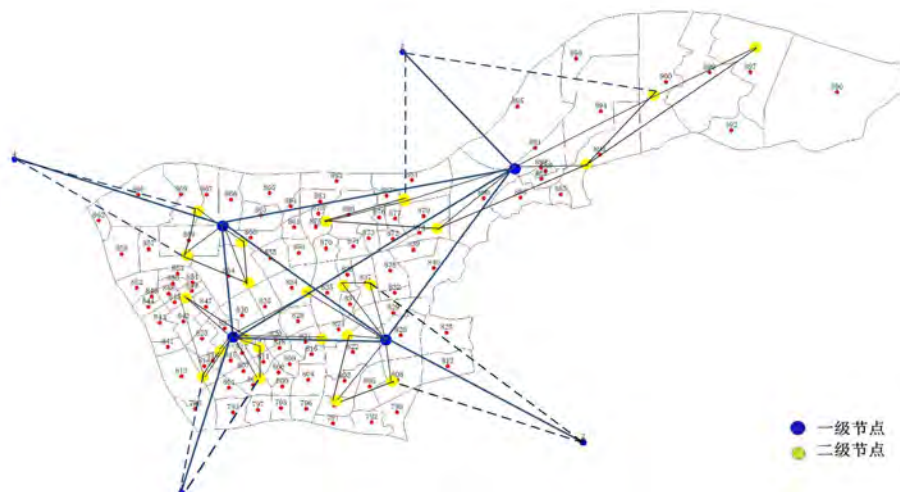


图 7 基于风险评估的物流网络模型改进

5.4 问题四

随着需求量逐年增长, 十年后交通需求是当前的 1.6 倍, 二十年后交通需求是现在的 2.6 倍, 三十年后则是 4.3 倍, 以现在网络设计容量是难满足如此快速的增长, 必须对现有网络进行扩容处理。

由于每年建设的道路长度大体相等, 扩容不仅需要满足各个阶段需求量而且还要考虑换算费用、扩容能力、设施折损率 这些定量目标和施工难易、环境污染这类定性目标。所以尝试应用多目标模糊优选动态规划分析法求解这一类有限资源分配问题。

5.4.1 多目标动态规划方法与模型

给定一个方案集 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ 对每一个方案进行评价的 m 个定量和定性评价指标, 构成评价目标集, 则构成的评价目标特征矩阵为:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} = (x_{ij}) \quad (22)$$

式中: $i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, m$ 。

之后确定定量目标的相对优属度, 设 r_{ij} 为样本 j 指标 i 特征特征值对模糊概念优的相对隶属度, 简称相对优属度。根据模糊性和相对性, 由公式:

越大越优型指标:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_{i,j} x_{ij}}{\max_{i,j} x_{ij} - \min_{i,j} x_{ij}} \quad (23)$$

越小越优型指标:

$$r_{ij} = \frac{\max_{i,j} x_{ij} - x_{ij}}{\max_{i,j} x_{ij} - \min_{i,j} x_{ij}} \quad (24)$$

得到定量目标的无量纲相对优属度矩阵:

$$R_1 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} = (r_{ij}) \quad (25)$$

式中: $i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$ 。

接着确定定性目标的相对优属度, 采用二元对比并结合语气算子(表 1) 的方法确定其相对优属度, 得到关于定性目标的相对优属度矩阵见式(20)。利用二元对比所得优越性的定性排序标度 e_{ij} 在 0, 0.5, 1.0 中取值, 见式(21)。

$$R_2 = \begin{bmatrix} r_{(q+1)1} & r_{(q+1)2} & \cdots & r_{(q+1)n} \\ r_{(q+2)1} & r_{(q+2)2} & \cdots & r_{(q+2)n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} = (r_{ij}) \quad (26)$$

式中: $i=q+1, q+2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$ 。

$$e_{ij} = \begin{cases} 1 & c_i \text{ 优于 } c_j \\ 0.5 & c_i \text{ 优等于 } c_j \\ 0 & c_j \text{ 优于 } c_i \end{cases} \quad (27)$$

表 22 语气算子与定量标度相对优属度对应关系

语气算子	μ_j	φ_j	语气算子	μ_j	φ_j
同样	0.5	1	十分	0.8	0.25
	0.525	0.905		0.825	0.212
稍微	0.55	0.818	非常	0.85	0.176
	0.575	0.739		0.875	0.143
略微	0.6	0.667	极其	0.9	0.111
	0.625	0.6		0.925	0.081
较为	0.65	0.538	极端	0.95	0.053
	0.675	0.481		0.975	0.026

明显	0.7	0.429	无可比拟	1	0
	0.725	0.379			
显著	0.75	0.333			
	0.775	0.29			

注: μ_{1j} 为排序第一位的决策与排序第 j 位的决策对比关于优越性的定量模糊标度值;
 ϕ_{1j} 为排序第一位的决策与排序第 j 位的决策对比关于优越性的相对优属度.

5.4.2 建立综合相对优属度矩阵

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} = (r_{ij}) \quad (28)$$

式中: $i=1, 2, \cdots, m$; $j=1, 2, \cdots, n$. $0 \leq r_{ij} \leq 1$.

5.4.3 确定指标权重

由于不同因素对最终优选决策影响不同, 需要确定系统指标的权重. 得权重向量为:

$$W = \{w_1, w_2, \cdots, w_m\}^T \quad (29)$$

满足:

$$\sum_{i=1}^m w_i = 1$$

5.4.4 动态规划模型

将设计规划年度划分为 K 个阶段. 以 k 表示, $k=1, 2, \cdots, K$. 给出以下定义:

S_k 为状态变量, 表示第 k 阶段方案的集合. 每一个阶段有若干个状态 $u(sk)$;

$D_k(sk)$ 为决策变量, 以采取该决策所达到的下一阶段的状态表示;

$D_k(u(sk)) = \{u(sk) / u(sk) \in \{U(Sk)\}\}$ 为允许决策集合

状态转移方程:

$$S_{k+1} = u(sk) \quad (30)$$

$V_k(u(sk))$ 为阶段指标, 表示为所选择的分配方案对应的综合指标相对优属度.

根据模糊集关于优属度最大原则, 模糊优化动态规划目标函数 F 为:

$$F = \max \sum_{k=1}^K V_k(u(sk)) \quad (31)$$

指标转移方程:

$$\begin{cases} f_k(sk) = \max \{V_k(u(sk)) + f_{k+1}(sk+1)\} \times u(sk) \in U(Sk), k=1, 2, \cdots, K-1; \\ f_K(sk) = \max V_K(u(sk)), u(sk) = sk \end{cases} \quad (32)$$

式(27)即为本文提出的模糊优化动态规划模型。

5.5 各阶段方案选择

各阶段具体方案根据保证路面交通通畅的情况下, 类似问题 1, 通过计算地下货运量来拟定方案, 具体选取见附件 1。

表 23 第 1 阶段扩容方案主要影响因素

方案	换算费用/亿元	扩容能力/吨·日 ⁻¹	设施折损率	施工难易	环境污染
----	---------	------------------------	-------	------	------

A1	12.5	39180	较小	小	较低
B1	10.3	42380	小	较小	低
C1	13.2	41360	较大	较大	较高

这里只有扩容能力、换算费用是定量指标，扩容能力为越大越优型指标，换算费用为越小越优型指标。

表 24 第 1 阶段目标综合相对优属度

方案	换算费用	扩容能力	设施折损率	施工难易	环境污染
A1	0.85	0.924	0.73	1	0.92
B1	1	1	1	0.83	1
C1	0.73	0.976	0.85	0.73	0.83

各指标的权重 $w=(w_1,w_2,w_3,w_4,w_5)=(0.30,0.26,0.17,0.13,0.14)$ 。根据（6-8）计算出第一阶段方案相对优属度。

表 25 第 1 阶段各方案相对优属度

优属度	A1	B1	C1
u_j	0.542	0.823	0.687

依次类推，计算各个阶段的相对优属度，结果如下图所示。

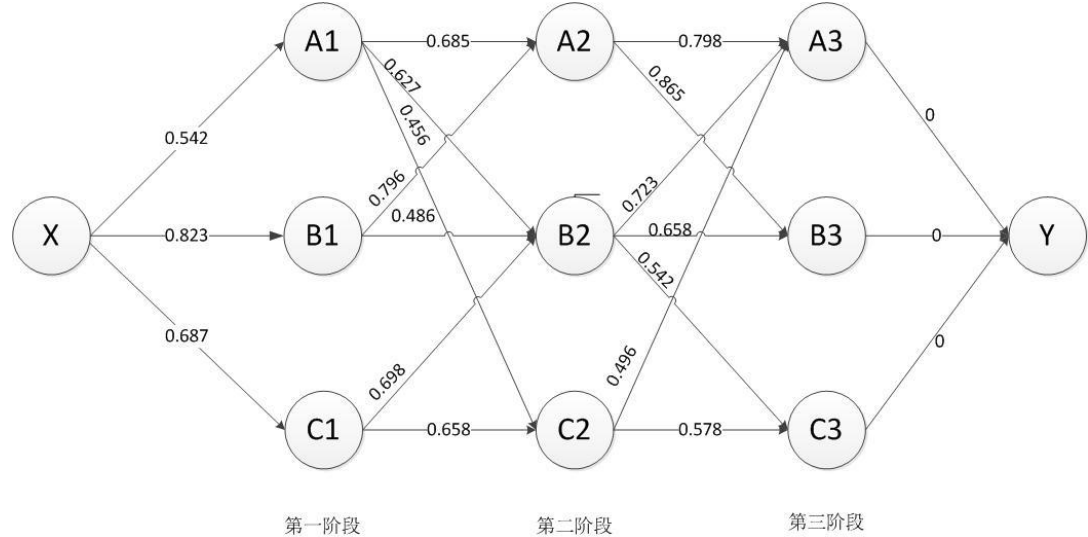


图 8 各阶段方案动态决策网络图

扩容策略为，第一阶段选 B1 方案，第二阶段选 A2 方案，第三阶段选 B3 方案，如下表所示。

表 26 最终决策扩容方案

节点类型	B1		节点类型	B3	
	节点横坐标 (Km)	节点横坐标 (Km)		节点横坐标 (Km)	节点横坐标 (Km)
一级	139.536	154.856	一级	142.795	154.043
一级	147.689	152.985	一级	145.145	153.658
二级	154.126	161.431	一级	149.569	155.152
二级	156.788	163.823	二级	150.494	156.483
二级	142.796	155.583	二级	158.579	160.818

	A2		二级	157. 591	160. 365
节点类型	节点横坐标 (Km)	节点横坐标 (Km)	二级	141. 471	157. 793
一级	140. 638	154. 140	二级	149. 304	155. 231
一级	148. 210	153. 133	二级	149. 525	155. 025
一级	152. 808	159. 338	二级	149. 304	155. 231
一级	141. 8901	158. 071			
一级	146. 591	156. 757			

第三题和第四题设置地下物流网络分别采用的是静态规划和动态规划。两种规划方法各有利弊，适用条件有差别。

动态规划最优化原理可以这样阐述：一个最优化策略不论过去状态和决策如何，对前面的决策所形成的状态而言，余下的决策必须构成最优策略，即其子策略总是最优的。任何思想方法都有一定的局限性，动态规划也有其适用的条件。如果某阶段的状态给定后，则在这阶段以后过程的发展不受这阶段以前各段状态的影响。

动态规划方法是既把当前一段和后来各阶段分开，又把当前效益和未来效益结合起来考虑的一种多阶段决策的最优化方法。每阶段决策和选取是从全局来考虑的，与该段的最优选择的答案一般是不同的；在求整个问题的最优策略时，由于初始状态是已知的，而每阶段的决策又都是该阶段状态的函数，因而最优策略所经过的各阶段状态便可逐次变换得到，从而确定最优路线。简言之，动态规划的基本思想就是把全局的问题化为局部的问题，为了全局最优必须局部最优。

而第三问采用的静态规划，静态规划是想整体考虑最优解，之后再考虑局部，局部解服从于整体，这样的设计思路可以实现整体在条件不发生改变的情况下实现目标函数的最优策略，但是如果条件是动态的，静态规划将不再使用。

六、模型的评价

1.模型的优点

本文建立的数学模型理论依据充分，考虑的因素较全面，逻辑性严密。基于重心法的模型确立的各级节点位置最佳，建立的地下物流系统模型可靠性强，采用的研究方法贴近实际，参考价值较高。整个系统模型，构思严谨层层递进，且针对引用多种数学模型同步校验，在数据处理方面运用多种形式，确保了数据的准确性与合理性，本文建立的模型同样适用于如地铁站等其他物流网络建立，推广性较强。

2.模型的缺点

由于实际情况中复杂因素较多，需处理的数据量很大，因此我们对模型进行了简化，造成了与实际有一定的不符。数据处理时的运算过程繁琐，编程以及程序运行耗时比较多。由于考虑的约束较少，与理想的结果肯定有一定的差距，并且在选取评价指标时，大多数依据易分析的评价指标，避开了可靠性更强但模型复杂的指标。

七、模型的改进和推广

1.模型的改进

问题一中主要考虑到降低一级节点转运率以及确保各级节点的服务范围合理，因此问题一的模型确定的一级节点数目较少，网络稳定性不足，可以尝试采用更多的一级节点来增加地下网络结构的稳定性与合理性。问题二中在考虑到成本的前提下，优化了节点位置，但未优化各级节点间的连接方式，可以采用更有效的模型达到更加优化的目的。

2.模型的推广

本文构建的基于重心法的节点位置选取,降低了各级节点之间的隧道总长度,也对减缓地面交通拥堵系数有很大帮助,同样适用于类似的网络结构设计。

参考文献

- [1] 闫文涛. 城市地下物流系统节点选址研究[D]. 重庆交通大学, 21-25. 2015.
- [2] 郭延永, 刘攀, 吴瑶. 基于累计前景理论的城市轨道交通建设时序[J]. 交通运输系统工程与信息:29-35, 2013, 13(04)。
- [3] 李艳红. 综合运输通道客运结构优化理论与方法研究[D]. 北京交通大学, 35-36, 2010。
- [4] 徐晶, 王喜富. 物流运输网络风险评价指标体系分析研究[J]. 物流技术:80-82, 2010, 29(09)。
- [5] 范文博. 停车换乘系统分析、评价与优化研究[D]. 西南交通大学, 16-18, 2009。
- [6] 张春民, 李引珍, 杨涛. 多目标模糊优选动态规划在方案优选中的应用[J]. 兰州交通大学学报:108-111., 2007, (01)。
- [7] Mackiewicz, Andrzej, Ratajczak, Waldemar. Towards a new definition of topological accessibility[J]. Transportation Research Part B:47-79, 1996, 30(1)
- [8] 徐晶, 王喜富. 物流运输网络风险评价指标体系分析研究. 物流技术[J]. :80-82, 2010. 29(5)
- [9] 陈守煜, 马建琴, 邱林. 多维多目标模糊优选动态规划及其在农业灌溉中的应用[J]. 水利学报:33-38, 2002, (04)。
- [10] 张得志. 物流园区演化机理与布局优化方法的研究[D]. 中南大学, 2006.
- [11] 蒋长兵, 王姗姗. 精确重心算法在物流节点选址中的应用[J]. 物流技术:65-67., 2005, (09)。
- [12] 龚延成, 郭晓汾, 蔡团结, 李卫江. 物流配送点选址模型及其算法研究[J]. 中国公路学报:124-127, 2003, (02)。
- [13] 陈守煜, 马建琴, 邱林. 多维多目标模糊优选动态规划及其在农业灌溉中的应用[J]. 水利学报:33-38, 2002, (04)。

附录 1

一、各阶段方案具体安排：

A 1			
节点类型	横坐标	纵坐标	分担货物总量
一级	139.5368	154.8569	11520
一级	147.6895	152.9857	10800
一级	150.9856	157.1258	10287
一级	142.5167	157.3684	6580
B1			
节点符号	横坐标	纵坐标	增加货物总量
一级	139.5368	154.8569	11520
一级	147.6895	152.9857	10800
二级	154.1262286	161.431	7200
二级	156.788	163.823	7200
二级	142.796	155.583	7200
C1			
节点符号	横坐标	纵坐标	增加货物总量
二级	144.0983	153.965575	7200
二级	142.401875	152.9078	7200
二级	147.7449	150.90565	7200
二级	147.4991	154.80075	7200
二级	149.2493	158.72205	7200
二级	160.6288	165.0429333	7200
二级	149.5352	158.274	7200

	071	025	
--	-----	-----	--

A 2			
节点类型	横坐标	纵坐标	分担货物总量
一级	140.6385	154.14025	12586
一级	148.21025	153.1332	13486
一级	152.80835	159.3381	10286
一级	141.8901	158.07185	13478
一级	146.59145	156.7575	12956
B2			
节点类型	横坐标	纵坐标	分担货物总量
一级	140.6385	154.14025	6892
一级	148.21025	153.1332	6756
一级	152.80835	159.3381	5942
二级	143.2500875	153.436687	6459
二级	147.622	152.8532	6923
二级	154.126286	161.431	6820
C2			
节点类型	横坐标	纵坐标	分担货物总量
二级	143.5309333	154.143966	6478
二级	143.3012333	153.0901	6589
二级	142.2201	153.377133	6879
二级	144.04005	153.58835	6594

二级	150.2238 667	151.77 625	6429
二级	150.8295 833	152.94 9045	7182
二级	153.6984 5	156.63 5636	7145
二级	154.7214 333	158.33 1	7045
二级	162.8358 667	164.20 5003	7069
二级	163.0603 5	164.10 3175	6958

A 3			
节点 类型	横坐标	纵坐标	分担货物总 量
一级	142.7951 833	154.043 45	13568
一级	145.1455 167	153.658 6	13456
一级	149.5693 667	155.152 3333	12569
一级	150.4944 833	156.483 2	13896
一级	148.5613 5	158.178 5833	14320
一级	145.1308	157.522 0167	14333
一级	143.6660 833	157.399 25	14852
一级	144.5540 75	157.062 95	14569
B3			
节点 类型	横坐标	纵坐标	分担货物总 量
一级	142.7951 833	154.043 45	6905
一级	145.1455 167	153.658 6	6769
一级	149.5693 667	155.152 3333	5955

二级	150.4944 833	156.483 2	6472
二级	158.5790 25	160.818 7038	6936
二级	157.5910 292	160.364 5229	6833
二级	141.4715 75	157.793 275	6860
二级	149.3042	155.231 9	6793
二级	149.5253 333	155.025 4067	6762
二级	149.3042	155.231 9	7120
C3			
节点 类型	横坐标	纵坐标	分担货物总 量
二级	143.2730 792	153.549 8875	6491
二级	144.9463 125	152.957 9583	6602
二级	146.8284	152.922 6948	6892
二级	149.6979 875	153.737 3206	6607
二级	152.3683 333	154.922 9831	6442
二级	155.5213 333	158.030 1715	7195
二级	158.5790 25	160.818 7038	7158
二级	157.5910 292	160.364 5229	7058
二级	156.2367 208	159.589 7479	7082
二级	154.0370 056	158.051 3294	6971
二级	149.7464 667	154.818 9133	6502
二级	149.3042	155.231 9	6338

二级	149.5253 333	155.025 4067	6875
二级	149.3042	155.231 9	7156

二、

表 优化后一区可用性分析

路径	货运量（吨）	路段可用性	路径可用性	OD 路段可用性
1-A	7921.485	0.540	0.585	0.563
A—a1	2758.884	0.740	0.361	0.754
A—a2	2986.235	0.702	0.342	0.744
A—a3	2975.733	0.704	0.343	0.744
A—a4	2609.096	0.766	0.373	0.760
A—a5	2920.247	0.713	0.347	0.746
A—a6	2998.908	0.700	0.342	0.743
A—a7	2998.908	0.700	0.342	0.743
A—a8	2982.275	0.703	0.343	0.744

表 优化后一区可达性分析

路径	节点的可达性	节点间路径效率	运输能力适应度
1-A	6.195	1.000	0.468
A—a1	1.275	0.695	0.455
A—a2	1.730	0.985	0.454
A—a3	1.550	0.884	0.455
A—a4	2.079	0.704	0.445
A—a5	1.146	0.816	0.457
A—a6	2.578	0.837	0.448
A—a7	1.609	0.926	0.455
A—a8	1.089	0.719	0.458

表 优化后二区可用性分析

路径	路段可用性	路径可用性	OD 路段可用性	货运量（吨）
2-B	0.740	0.802	0.771	5520.335
B—b1	0.702	0.469	0.944	2989.237

B—b2	0.700	0.468	0.944	2999.343
B—b3	0.752	0.503	0.956	2686.288
B—b4	0.754	0.504	0.956	2674.952

表 优化后二区可达性分析

路径	节点的可达性	节点间路径效率	运输能力适应度
2-B	8.127	1.000	0.326
B—b1	2.129	0.879	0.417
B—b2	2.400	0.546	0.416
B—b3	1.939	0.891	0.412
B—b4	2.002	0.990	0.412

表 优化后三区可用性分析

路径	货运量（吨）	路段可用性	路径可用性	OD 路段可用性
3-C	7570.945	0.569	0.616	0.593
C—c1	2971.184	0.704	0.363	0.776
C—c2	2668.948	0.755	0.387	0.789
C—c3	2974.673	0.704	0.361	0.776
C—c4	2782.903	0.736	0.378	0.784
C—c5	2952.035	0.708	0.364	0.776
C—c6	2999.330	0.700	0.360	0.775
C—c7	2169.084	0.839	0.430	0.810

表 优化后三区可达性分析

路径	节点的可达性	节点间路径效率	运输能力适应度
3-C	6.184	1.000	0.447
C—c1	5.320	0.560	0.417

C—c2	4.825	0.507	0.410
C—c3	4.828	0.694	0.419
C—c4	1.049	0.979	0.437
C—c5	3.594	0.724	0.424
C—c6	5.906	0.773	0.417
C—c7	7.672	0.816	0.373

表 优化后四区可用性分析

路径	货运量（吨）	路段可用性	路径可用性	OD 路段可用性
4—D	2362.671	1.003	1.087	1.045
D—d1	1705.886	0.916	0.829	1.176
D—d2	2036.955	0.860	0.779	1.168
D—d3	2640.634	0.760	0.688	1.154
D—d4	1729.104	0.912	0.826	1.175

表 优化后四区可达性分析

路径	节点的可达性	节点间路径效率	运输能力适应度
4—D	18.298	1.000	0.139
D—d1	13.812	0.147	0.301
D—d2	13.728	0.187	0.322
D—d3	8.340	0.384	0.371
D—d4	9.576	0.362	0.321

三、重心法优化级点程序

```

%一 区
%x=[141.73223 143.90327 145.06268 142.86327 139.99881 143.9763
141.54687 142.6466 145.14677 143.8001 142.19994 144.30205 140.8082
143.10667 139.36674 140.41657 141.61202 145.31321 142.14744 143.8398
142.73335 143.67806 145.03599 140.30915 141.33945 144.69098 142.14479
143.19186 144.40329 146.01329 138.76028 138.39368 139.46551 137.87262
139.06412 138.01518 140.50084 138.79352 139.84282 139.88178 139.20245
141.52117];
%y=[149.90802 150.12784 150.09255 150.03094 150.08272 151.15916
151.1079 151.24296 151.48956 151.83839 151.89777 152.2395 152.43247
152.35613 151.65259 152.14608 152.42478 152.71195 152.78809 153.02083
153.09959 153.44464 153.3157 153.47378 153.95972 154.31699 154.59726
155.02521 155.93001 155.68312 153.07401 154.24089 154.30973 155.01621
155.21743 155.51496 155.00768 155.63819 155.7787 156.20028 156.60101
156.5061];
%w=[0.0269446020.0113768380.02075822 0.025297064 0.023075738
0.012476916 0.022310767 0.019854843 0.006901496 0.009323346
0.027950837 0.010973343 0.021076172 0.01332682 0.032590482
0.022252437 0.050642883 0.006082089 0.01264458 0.015989836
0.034713971 0.044943636 0.04252606 0.03536052 0.034542918
0.0077411170.0395421 0.027329685 0.0292117730.043563502 0.018360778
0.018743881 0.025556655 0.023948358 0.022559235 0.028650719
0.025235088 0.039009916 0.014820125 0.016422631 0.019140613
0.016227466]';
%n = sum(m);
%二 区
%x=[146.277 148.03742 146.34398 149.19846 146.81338 147.95168
149.21481 151.50072 147.18879 146.54368 151.44944 149.36689 149.02656
147.0664 149.08816 146.93526 147.77144 148.88618 150.87025];
%y=[149.37705 149.4439 150.23709 149.91892 151.43582 151.17307
151.47223 152.12832 152.82315 153.91378 153.76425 153.64805 154.71668
155.14929 155.67819 156.55527 156.16304 156.75798 156.89084];
%w=[0.0265343570.044447713 0.039488018 0.044393075 0.033716761
0.036859568 0.075830547 0.079955252 0.097579319 0.033190013
0.074135974 0.099393734 0.0378341140.050813991 0.032602575
0.023236503 0.064259199 0.049448802 0.05628134]';
%三 区
%x=[149.9519147.22106 149.00788 147.90064 150.21194 148.37572
149.10078 150.41322 146.98768 148.72384 146.44434 149.87722 156.65053
154.83009 155.78061 155.97369 155.75762 153.14697 155.47737 164.42987
158.43125 158.48734 165.29596 157.3547 163.42802 161.44273];
%y=[157.73828 157.90441 158.25523 158.28367 158.54764 159.29426
159.24167 159.36466 159.41821 160.33669 161.04458 161.09104 160.40273
160.25505 161.15506 161.52081 161.69863 160.21647 162.65113 163.48997

```



```

162.3224 164.41338 166.30748 166.95666 166.29335 165.83317];
    %w=[0.0989476530.0113189440.009843544 0.009560331 0.003602256
0.025009863 0.047316962 0.00490666 0.104508534 0.018822095
0.014244789 0.027450683 0.014459291 0.09993776 0.02319014
0.0300117540.026017131 0.058348335 0.018491542 0.071120945
0.068051823 0.047598642 0.01621607 0.060631835 0.055981252
0.034411235]';
    %四区
    %x=[138.98932 137.34814 143.42575 144.71868 137.88968 136.65623
139.71381 142.52776 144.51267 135.6071 142.99055 144.34886 143.38522
140.52299 137.4048 139.35685 145.96177 145.48859 145.61426
145.69365];
    %y=[156.13145 155.93846 157.3394 157.60256 157.78166 157.55355
158.19805 158.31297 158.82003 159.14892 159.39709 159.82882 160.46348
160.39675 160.39203 160.40517 157.81467 158.83325 159.48068
160.06307];
    %w=[0.04302847 0.0627114440.047296521 0.034123771 0.032725632
0.042134464 0.074891437 0.043608134 0.053712631 0.042141082
0.08831991 0.019286176 0.03790341 0.1152868230.060950216 0.048155575
0.030503186 0.070468232 0.029310076 0.023442719]';
    c(1) = x*w
    c(2) = y*w;
    figure,hold on;
    scatter(x,y,50,'filled') % 站点
    scatter(c(1),c(2),100,'filled') % 重心

```

优化后点在地图长绘图程序

```

I=imshow('C:\Users\Administrator\Desktop\map.jpg')
hold on
impixelinfo
x=[729.7569053 1182.6714891564.922638 698.8728317];
y=[1044.460886 1053.718981 517.948007 697.7390552];
r=[190 180 170 160];
for i=1:length(x);
    circle(x(i),y(i),r(i));
end
hold on
end

```

```
scatter(x,y,'b','filled')
%print('-djpeg','-r500','C:\Users\Administrator\Desktop\123')
```

动态规划程序

```
function [p_opt,fval]=dynprog(x,DecisFun,ObjFun,TransFun)
% 自由始端和终端的动态规划,求指标函数最小值的逆序算法递归计算程序
%输入参数
% x 各阶段状态变量的可能取值, 第 k 列代表第 k 阶段状态变量可能取值
% DecisFun(k,x)决策函数, 由阶段 k 的状态变量 x 求出相应的允许决策变量
% ObjFun(k,x,u)阶段指标函数
% TransFun(k,x,u)状态转移函数, 其中 x 是阶段 k 的某状态变量, u 是相应的决策变
量
%输出参数
% p_opt 动态规划的规划过程, p_opt=[阶段序号, 状态变量, 决策变量, 指标函数]
% fval 总目标函数值, 是一个列向量, 第 i 元素代表第一个状态变量取第 i 个可能
值时的总目标
```