

文章编号: 2097-5899(2026)09-0028-09 中图分类号: U231 文献标识码: A

DOI: 10.16669/j.cnki.issn.2097-5899.202507230001

引用格式: 王镇豪. 基于综合评价云模型的“三网融合”城市公共配送中心布局研究[J]. 铁路物流, 2026, 44(9): 28-36.

WANG Zhenhao. Research on Layout of Urban Public Delivery Centers for “Three Network Integration” Based on Comprehensive Evaluation Cloud Model[J]. Railway Logistics, 2026, 44(9): 28-36.

基于综合评价云模型的“三网融合”城市公共配送中心布局研究

王镇豪

(济南市规划设计研究院 交通规划研究中心, 山东 济南 250101)

摘要: 在分析低空、道路、轨道等不同配送方式特征的基础上, 提出了“分类、分层、分区”的“三网融合”城市配送体系规划策略, 构建了以公共配送中心为核心纽带的“三网融合”城市配送节点体系。基于地理、经济、交通、社会等主要因素分析, 建立“三网融合”城市公共配送中心布局规划评价指标体系和基于博弈论的综合评价云模型。以济南市公共配送中心选址为分析案例, 证明“三网融合”城市公共配送中心综合评价云模型及求解方法具有可行性, 可降低物流成本约5%。

关键词: 低空配送; 城市陆运配送; 三网融合; 公共配送中心; 博弈论; 云模型; 布局规划

0 引言

传统道路配送存在占用城市道路资源、在道路交通可达性差的区域配送服务覆盖不足等缺陷。当前我国城市轨道交通网络发达, 低空经济是各大城市争先抢占的产业蓝海和新质生产力, 两者均为城市配送发展变革提供了良好的机遇。低空配送和城市轨道配送是填补传统道路配送服务盲区、改变未来城市配送体系格局的重要引擎。低空配送、城市轨道配送与传统道路配送分工协作, 最大化利用城市陆、空配送资源, 引导重构城市配送生态体系。

Martín等^[1]建立了博弈模型, 分析机场选址与周边机场关系。Shahparvari等^[2]采用多准则决策等方法, 分析了配送物流网络结构及功能要求, 研究了物流枢纽选址问题。钱欣悦^[3]分析了无人机配送选址影响因素, 建立了无人机起降场点选址模型及求解算法设计。石鹏^[4]分析了低空开放制约因素和管理机制思路与对策。郝铭佟^[5]分析了通用机场布局评价指标体系并建立了评价模型。潘会红等^[6]提出搭建航空—铁路—公路—船舶的立

体交通体系, 为物流枢纽之间货物周转、物流配送等提供一体化便捷服务。吴雨遥^[7]考虑快速性、经济性、环境性、便捷性因素, 综合考虑轨道交通运输成本以及当货运量超过城市轨道交通线路容量时通过城市道路运输的成本, 以成本最小为目标建立转运点选址模型。王寅^[8]对轨道运输作用于城市配送的优劣势进行分析, 研究当下城市配送体系中引入轨道运输方式的可行性与实践对策。黎海浪^[9]从产业结构、交通环境和物流业发展状况等方面分析徐州铁路物流中心的基本条件, 构建徐州铁路物流中心布局规划模型。郭小琳^[10]通过合理预测与有效评价, 为铁路货场升级转型提供了理论支撑, 保证了货运场站转型在科学方法指导下, 达到升级转型最优化目标。郭军华等^[11]考虑高铁运行时刻、车辆线路容量、配送时长等约束, 以运输总成本和时间为目标, 构建高铁快运末端配送路径优化模型。张苏波^[12]研究了钢铁物流中心的功能分区和作业流程, 提出适合钢铁物流中心平面布局的原则。吕星皓等^[13]根据现阶段长三角地区的交通网络布局, 建立基于公路、铁路、航空3种运输方式的物流网络, 结合区位优势理论构建评价指标体

收稿日期: 2025-07-23

系，确定评价指标权重并计算各备选区县的重要度，获得应急物流二级配送中心最优布局方案。

在既有国内外城市配送研究中，大多研究成果集中于低空配送、城市轨道配送、传统道路配送等各自配送领域或两两结合研究。将低空配送、城市轨道配送、传统道路配送三者融合研究的城市配送成果较少。本研究提出了基于低空配送网、城市轨道配送网、传统道路配送网的“三网融合”城市配送体系，建立了城市公共配送中心布局规划评价指标体系和综合评价模型，为未来构建城市配送体系新格局提供了研究参考。

1 “三网融合”城市配送体系

1.1 城市配送方式特征分析

在主要服务区域方面，低空配送在重要交通线沿线、军事区及其他低空空域管控的区域存在服务盲区，城市轨道配送无法服务城市外围无轨道交通覆盖区域，传统道路配送在山地、岛屿等配送车辆可达性差的区域无法提供良好服务。在配送速度方面，低空配送最快，城市轨道配送次之。在时效性、安全性、节能环保、受城市交通拥堵影响等方面，低空配送和城市轨道配送均具有一定优势。在建设和维护成本等方面，城市轨道配送存在劣势。在大运量配送方面，低空配送、传统道路配送则存在劣势，但城市轨道配送具有极大优势。在人工成本、时效性、安全性、节能环保、受城市交通拥堵影响等指标等方面，传统道路配送存在劣势，但在灵活性等指标上具有良好优势。低空配送、城市轨道配送、传统道路配送等不同城市配送方式主要特征指标对比分析如表1所示。

1.2 “三网融合”城市配送体系规划策略

研究提出了“分类、分层、分区”的“三网融合”城市配送体系规划策略，实现方式协同、空间协同、管理协同，促进城市配送降本增效。

(1) 基于功能协同的分类策略。以配送方式的功能特点为配送体系建构依据，实现配送体系中各配送方式的分工协同。低空配送侧重应急配送、偏远地区等陆地配送服务盲区配送，城市轨道配送应聚焦其大运量、高时效性、低能耗等特征，传统道路配送则在“门到门”服务、灵活性及人工需求等场景中不可替代。通过梳理城市配送货物品类、配送时效等服务要求，利用智慧化手段，清单化落实到3种配送方式，方式错位协同，构建高效的城市配送体系。

(2) 基于空间协同的分层策略。充分利用城市立体空间资源，规划布局低空、地面、地下3层城市立体

表1 城市配送方式主要特征指标对比分析

Tab.1 Comparative analysis of main characteristic indicators of urban delivery modes

主要指标	低空配送	城市轨道配送	传统道路配送
主要服务区域	低空空域开放或经申请后可开放的区域	城区	配送车辆可达的区域
服务盲区	重要交通线沿线、军事区及其他低空空域管控的区域	城市外围	山地、岛屿等配送车辆可达性差的区域
配送速度/(km/h)	40~70	40~60	30~40
货物重量	轻	中	中、重
货物价值	高	高、中	高、中、低
时效性	高	中	低
安全性	中	高	低
灵活性	中	差	高
建设和维护成本	低	高	中
人工成本	低	中	高
受城市交通拥堵影响	无影响	小	大
节能环保	高	高	低

配送网络，注重城市配套协同，一体化制定多式联运节点衔接方案。低空层，在城市拥堵中心区，发挥低空配送不受地面交通干扰的优势，兼顾应急配送需求。地面层，利用传统道路配送“门到门”灵活性优势，在非交通拥堵时段发挥其主体功能和个性化服务功能。地下层，充分发挥城市轨道大运量骨干配送功能，实现城市客流集中区的高频、中长距离大中运量配送。

(3) 基于管理协同的分区策略。明确陆空管理禁区，合理划分空间资源，进行陆空分区协同管理。明确不同类型低空空域的上位管理要求，最大化争取城市低空配送政策，划定低空配送、城市轨道配送和传统道路配送分区，三者叠合确定城市公共配送中心选址方案，通过城市公共配送中心链接低空配送、城市轨道配送、传统道路配送节点体系。

1.3 “三网融合”城市配送节点体系构建

研究基于“对外—转运—集散”三大城市配送节点功能层次，以城市公共配送中心为低空配送、城市轨道配送、传统道路配送“三网”核心纽带，以“物

流园区/端头站或枢纽站—城市公共配送中心—末端节点”的城市陆配(城市轨道配送+传统道路配送)三级节点为主体,链接“通用机场一起降中心一起降点”的低空配送三级节点,构建“三网融合”城市配送节点体系示意图如图1所示。

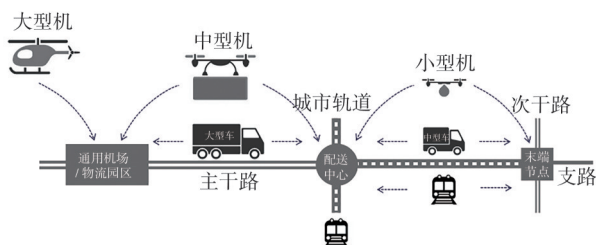


图1 “三网融合”城市配送节点体系示意图

Fig.1 Schematic diagram of “three network integration” urban delivery node system

一级节点为对外枢纽。作为城市配送对外门户,主要发挥城市外部货物与城市内部货物的交换功能,服务半径10~20 km。根据低空配送和城市陆配需求,可结合通用机场、物流园区或轨道交通枢纽站、端头站设置,也可三者聚合布置。

二级节点为转运枢纽,即城市公共配送中心。作为城市配送中转枢纽,主要发挥城市内部货物的转运功能,低空配送可拓展该层级服务半径,在均衡考虑各项成本后,最大化覆盖配送需求点,服务半径5~10 km。低空配送起降中心可结合人流集中区域或轨道交通中心站(城市中心或组团中心的换乘站)附近的空旷区域设置城市公共配送中心。鉴于地铁站口5~10 m的特别保护区范围内低空空域管控,宜在特别保护区范围外临近区域,设置将低空配送和城市陆配货物立体衔接的垂直通道。

三级节点为集散枢纽,即末端节点。主要链接城市公共配送中心和客户,可结合社区服务中心、轨道交通一般站布置,服务半径0.5~5 km。低空配送型末端节点应设置起降需求场地,场地的边长或直径应至少为12 m。

2 “三网融合”城市公共配送中心布局规划综合评价指标体系

2.1 主要影响因素分析

“三网融合”城市公共配送中心布局的影响因素,主要体现在地理、经济、交通和社会等4个方面。

2.1.1 地理因素

(1) 地形地貌。场地周边的建筑物、市政设施、

绿化是影响低空配送的重要影响因素。大坡度对于配送车辆也有一定的影响,宜地势平坦。

(2) 波环境。包括无人机、配送车辆的噪音污染,以及无人机与周边环境会存在相互电磁干扰,因此需要考虑噪音分贝、电磁抗扰度、电磁发射等指标。

(3) 设施环境。因无人机需频繁续航,需考虑无人机充电站和维修站布局,以确保无人机的正常运行。

2.1.2 经济因素

(1) 土地与房屋价格或租金。距离城市中心区或组团中心越近,土地与房屋的价格或租金越高,但远离中心区会造成服务效率不高等问题,需要进行综合平衡。

(2) 配送成本。包括城市公共配送中心上、下游运输成本,涉及电费、油费等。

(3) 人工成本。包括管理和配送等工作人员的工资、福利等。

(4) 设施成本。包括轨道站点改造为公共配送中心的建设成本,无人机、配送车辆等的购置费、轨道车辆等设备的折旧费等设备成本。

(5) 其他成本。包括物业、水电、停车等费用。

(6) 所在区域整体经济水平。服务区域的整体经济发展水平是配送节点可持续稳定发展的基础,经济水平高低一般与配送需求成正比。

2.1.3 交通因素

(1) 可达性。宜选择低空配送空域条件良好,可设置与城市轨道交通、城市道路衔接的垂直联系通道,以城市道路网络结构合理和路网密度达标、道路配送组织顺畅为宜。

(2) 通道容量。宜选择低空空域资源充足的区域,客流量相对较少的城市轨道交通中心站附近,避免周边道路长时间交通拥堵。

(3) 节点空间。开展多式联运枢纽一体化前期研究,研判节点综合衔接条件。节点应具有无人机起降的作业空间,宜具有充足的配送车辆停车、货物装卸空间。

2.1.4 社会因素

(1) 规划环境。考虑选址与既有规划用地、功能的协调性等。

(2) 政策环境。包括无人机的飞行区域、飞行高度、飞行时间等应符合政策法规要求,确保合法运营,同时考虑城市配送的政府支持和补贴政策、交通部门对货车通行管控政策等。

(3) 人口密度与特征。宜贴近人口和岗位密集区域,最大化提高配送服务效率。考虑年龄结构和消费

水平分布，宜靠近非老龄化、购物量大、消费水平高的居住、办公等区域。

2.2 综合评价指标体系构建

以科学性、系统性、目标性、可操作性、独立性为原则，从地理适应性、经济节约性、交通便利性、社会适宜性等方面，建立“三网融合”城市公共配送中心布局规划评价指标体系，共包含4大类15项评价指标，其中既有指标10个，创新指标5个，综合评价指标体系如表2所示。

表2 综合评价指标体系

Tab.2 Comprehensive evaluation index system

目标层	一级指标	二级指标	指标类型
“三网融合”城市公共配送中心布局规划评价指标体系	地理适应性	地形地貌	既有指标
		波环境	既有指标
		设施环境	创新指标
	经济节约性	土地与房屋价格或租金	既有指标
		配送成本	既有指标
		人工成本	既有指标
		设施成本	既有指标
		其他成本	既有指标
		所在区域整体经济水平	创新指标
	交通便利性	可达性	既有指标
		通道容量	既有指标
		节点空间	既有指标
	社会适宜性	规划环境	创新指标
		政策环境	创新指标
		人口密度与特征	创新指标

3 “三网融合”城市公共配送中心布局规划综合评价模型

在国内一、二线城市中选取长期在各自专业领域工作、经验丰富的专家共10位，其中城市规划专业3位、配送物流专业4位、交通运输专业3位。基于专家经验判断，采用AHP法和G1法分别进行指标权重计算。综合运用熵权法，以及基于博弈论的组合赋权法，构建“三网融合”城市公共配送中心布局规划综合评价云模型。

3.1 基于AHP法的指标权重计算

专家分别对一级指标和二级指标，按照九级标度法进行打分，统计众数得到判断矩阵。各级指标的判断矩阵CR值小于0.1。基于AHP法指标权重如表3所示。

表3 AHP法指标权重

Tab.3 Index weights of AHP method

一级指标	一级指标权重	二级指标	二级指标权重	组合权重
地理适应性	0.350 7	地形地貌	0.428 6	0.150 3
		波环境	0.428 6	0.150 3
		设施环境	0.142 9	0.050 1
经济节约性	0.350 7	土地与房屋价格或租金	0.318 5	0.111 7
		配送成本	0.318 5	0.111 7
		人工成本	0.118 2	0.041 5
		设施成本	0.076 8	0.026 9
		其他成本	0.062 7	0.022 0
		所在区域整体经济水平	0.105 4	0.037 0
交通便利性	0.189 2	可达性	0.333 3	0.063 1
		通道容量	0.333 3	0.063 1
		节点空间	0.333 3	0.063 1
社会适宜性	0.109 3	规划环境	0.400 0	0.043 7
		政策环境	0.400 0	0.043 7
		人口密度与特征	0.200 0	0.021 9

由表3数据可见，在一级指标中，地理适应性与经济节约性权重较高，具有较强布局决定性，是AHP法计算得到的最重要影响因素，交通便利性其次，社会适宜性对广义成本的影响力相对较低。在二级指标中，地形地貌、波环境是城市公共配送中心布局重要制约因素，土地与房屋价格或租金、配送成本等指标是总成本的主要部分，因此，以上二级指标的权重相对较高；而人工成本、设施成本等因素非主要成本，所在区域整体经济水平、规划环境、政策环境等指标在现实布局备选方案中往往为非制约性因素，其指标权重相对较低。

3.2 基于G1法的指标权重计算

- (1) 每位专家从 m 个指标中找出最不重要的指标记为 z_a 。
- (2) 从剩余指标中找出最不重要的指标记为 z_b 。

(3) 以此类推, 将 m 个指标排序得到

$$z_c > \cdots > z_b > z_a \quad a, b, c \in 1, 2, \cdots, m \quad (1)$$

(4) 相邻指标间权重的相对重要程度之比为

$$\frac{w_b^l}{w_a^l} = r_a^l \quad l = 1, 2, \cdots, n \quad (2)$$

式中: r_a^l 为第 l 位专家判断相邻指标 z_a 和 z_b 间的权重比值, 取值为 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 分别表示同样重要、稍微重要、明显重要、强烈重要、极端重要。

(5) 计算排序在最后的指标 z_m 的权重为

$$w_m^l = (1 + \sum_{k=2}^m \prod_{a=k}^m r_a^l)^{-1} \quad (3)$$

(6) 如果有 n 位专家参与主观权重判断, 结果加权平均得到指标 z_n 最终权重为

$$\bar{w}_m = \frac{\sum_{l=1}^n w_m^l}{n} \quad (4)$$

基于 G1 法指标权重如表 4 所示。

表 4 G1 法指标权重

Tab.4 Index weights of G1 method

一级指标	二级指标	二级指标权重
地理适应性	地形地貌	0.155 1
	波环境	0.119 3
	设施环境	0.047 9
经济节约性	土地与房屋价格或租金	0.091 8
	配送成本	0.076 5
	人工成本	0.047 9
	设施成本	0.047 9
	其他成本	0.047 9
交通便利性	所在区域整体经济水平	0.047 9
	可达性	0.063 7
	通道容量	0.057 9
社会适宜性	节点空间	0.052 7
	规划环境	0.047 9
	政策环境	0.047 9
	人口密度与特征	0.047 9

3.3 基于熵权法的指标权重计算

熵权法确定指标权重的主要步骤如下。

(1) 计算第 i 个城市公共配送中心备选方案的第 j 项指标权重。

$$Z_{ij} = \frac{z_{ij}}{\sum_{i=1}^m z_{ij}} \quad (5)$$

式中: z_{ij} 为第 i 个城市公共配送中心备选方案在第 j 项指标下的分值; m 为备选方案总数, 个。

(2) 计算第 j 项指标的熵。

$$Q_j = -U \sum_{i=1}^m Z_{ij} \ln Z_{ij} \quad (6)$$

$$U = 1/\ln m > 0 \quad (7)$$

(3) 计算差异系数。

$$Y_j = 1 - Q_j \quad (8)$$

(4) 计算各指标权重。

$$\partial_j = \frac{Y_j}{\sum_{j=1}^n Y_j} \quad (9)$$

式中: n 为指标总数, 个。

3.4 基于博弈论的组合赋权法

(1) 采用 k 种方法确定的 h 个指标权重表示为

$$\mathbf{r}_k = (r_{k1}, r_{k2}, \cdots, r_{kh}) \quad k = 1, 2, \cdots, K \quad (10)$$

则 K 个权重向量的线性组合可表示为

$$\mathbf{r} = \sum_{k=1}^K \beta_k \mathbf{r}_k^T \quad \beta_k > 0 \quad (11)$$

式中: $\mathbf{r}$ 为组合权重向量; β_k 为线性组合系数。

(2) 一致性校验。通过计算 Spearman 相关系数, 进行主客观指标权重一致性分析, Spearman 相关系数 σ 计算公式为

$$\sigma = \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (12)$$

式中: d_i 为 2 个变量的秩次之差; n 为样本数量, 个。

基于分析结论校验各方法的合理性, 若出现低相关性, 进一步分析是否为“有益分歧”, 判断是否具备进行组合赋权的条件。

(3) 基于博弈论组合原理, 使 $\mathbf{r}$ 与 β_k 离差最小化, 目标函数为

$$\min \sum_{k=1}^K \beta_k \mathbf{r}_k^T - \mathbf{r}_p^T \quad p = 1, 2, \cdots, K \quad (13)$$

(4) 式(13)的最优化一阶导数条件为

$$\sum_{k=1}^K \beta_k \mathbf{r}_p \mathbf{r}_k^T = \mathbf{r}_p \mathbf{r}_p^T \quad p = 1, 2, \cdots, K \quad (14)$$

与式(14)等价的线性方程组为

$$\begin{bmatrix} r_1 r_1^T & r_1 r_2^T & \cdots & r_1 r_K^T \\ r_2 r_1^T & r_2 r_2^T & \cdots & r_2 r_K^T \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_K r_1^T & r_K r_2^T & \cdots & r_K r_K^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 r_1^T \\ r_2 r_2^T \\ \vdots \\ r_K r_K^T \end{bmatrix} \quad (15)$$

(5) 解式(15)的线性方程组, 得到优化组合系数 $(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_K)$ 。考虑到优化组合系数中可能存在负数, 归一化前需先对系数求绝对值^[14]。

$$\beta_k^* = |\beta_k| / \sum_{k=1}^K |\beta_k| \quad (16)$$

(6) 计算得到基于博弈论的组合赋权重。

$$r^* = \sum_{k=1}^K \beta_k^* r_k^T \quad k=1, 2, \dots, K \quad (17)$$

3.5 云模型构建

(1) 确定评语集。评价等级与等级取值区间如表5所示。

表5 评价等级与等级取值区间
Tab.5 Evaluation level and level value range

评价等级	等级取值区间
不适宜	[0, 60)
一般	[60, 80)
适宜	[80, 90)
很适宜	[90, 100]

(2) 确定评价标准云。第 i 个评语区间 $[x_i^{\min}, x_i^{\max}]$ 对应的标准云数字特征值为 (Ex_i, En_i, He) , 计算公式为

$$\begin{cases} Ex_i = (x_i^{\max} + x_i^{\min}) / 2 \\ En_i = (x_i^{\max} - x_i^{\min}) / 6 \\ He = k \end{cases} \quad (18)$$

式中: k 为常数, 取0.5。

(3) 假设有 m 个专家, n 个指标, 则评价矩阵表示如下, 其中 z_{ij} 表示专家 i 对指标 j 的评价值。

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & \cdots & z_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ z_{m1} & \cdots & z_{mn} \end{bmatrix} \quad (19)$$

采用 SBCT-1stM 算法, 计算每个指标所有专家的评分结果数字特征 $C_j(Ex_j, En_j, He_j)$ 。

$$\begin{cases} Ex_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_{ij} \\ En_j = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \times \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |z_{ij} - Ex_j| \\ S_j^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (z_{ij} - Ex_j)^2 \\ He_j = \sqrt{|S_j^2 - En_j^2|} \end{cases} \quad (20)$$

(4) 计算综合评价云。计算综合评价云的数字特征, 公式如下。

$$\begin{cases} Ex = \sum_{j=1}^n (Ex_j \cdot w_j) \\ En = \sqrt{\sum_{j=1}^n (En_j^2 \cdot w_j)} \\ He = \sum_{j=1}^n (He_j \cdot w_j) \end{cases} \quad (21)$$

(5) 绘制综合评价云图, 根据参数进行综合评价。

4 实例分析

4.1 基础数据

结合济南市城市建设、低空配送、城市轨道交通配送、传统道路配送等发展情况, 以城市轨道交通站点中的东仓站、历下广场站、八涧堡站、凤凰路站、王府庄站、安莉芳路站为中心制定6个“三网融合”城市公共配送中心的备选方案。其中东仓站位于老城区核心区, 历下广场站位于新城区核心区换乘站, 八涧堡站是新城区外围轨道交通换乘站, 凤凰路站是新城区外围区一般站, 王府庄站位于城乡过渡带, 安莉芳路站邻近工业园区。除编号为4—8的评价指标外, 其余指标采用专家打分法赋值, 备选站点指标初始数据如表6所示。

因考虑目前济南各城市轨道交通站均未预留配送节点功能接口, 以上设施成本中暂不含轨道交通站点改造费用, 同时结合既有条件, 暂只考虑各轨道站点需新购置的设备费。因轨道运营主要服务旅客出行, 城市轨道交通配送主要利用轨道车辆剩余容量或闲暇时段进行, 配送成本暂不考虑轨道运营费用, 主要为城市道路运输费用。其他费用暂考虑物业、水电、停车费用。

4.2 指标权重确定

AHP法、G1法的指标权重分别见表3、表4。根据表6中数据, 熵权法指标权重如表7所示。

通过计算 Spearman 相关系数, AHP法与G1法确定权重的相关系数为0.916 1, 表明2种方法确定权重之间的相关性较强。熵权法确定权重与AHP法、G1法确定权重的相关系数分别为-0.234, -0.305 6, 表明熵权法与其他2种方法确定权重之间的相关性低。

经进一步校验各方法确定权重的合理性, 判断AHP法和G1法的专家经验切实反映了大多数决策者在不同城市发展阶段的主观能动性, 熵权法则通过离散性特征反映客观性, 2类方法确定权重的低相关为“有益分歧”, 具备进行组合赋权的条件。

基于博弈论确定的评价指标最终权重如表8所示。

表6 备选站点指标初始数据
Tab.6 Initial data of candidate site indicators

编号	指标	东仓站	历下广场站	八涧堡站	凤凰路站	王府庄站	安莉芳路站
1	地形地貌	3.8	4.1	4.5	4.3	4.7	4.8
2	波环境	4.2	4.3	4.7	4.6	4.8	4.8
3	设施环境	3.9	4.2	4.5	4.5	4.6	4.7
4	土地与房屋价格或租金/(元/(m ² /d))	4.3	4.5	3.8	3.7	3.3	3.3
5	配送成本/(万元/d)	1.2	1.2	1.3	1.3	1.5	1.5
6	人工成本/(万元/月)	36	39	33	33	30	30
7	设施成本/万元	1.8	2.0	2.2	2.1	2.3	2.3
8	其他成本/(万元/月)	7.3	7.5	6.8	6.3	5.5	5.2
9	所在区域整体经济水平	4.7	4.8	4.1	4.3	3.8	3.9
10	可达性	4.6	4.5	4.1	4.3	3.8	3.9
11	通道容量	4.1	4.3	4.5	4.5	4.7	4.8
12	节点空间	3.5	3.8	4.3	4.1	4.2	4.3
13	规划环境	4.3	4.5	4.8	4.8	4.9	4.9
14	政策环境	3.5	3.5	4.0	4.0	4.2	4.2
15	人口密度与特征	4.5	4.3	3.8	3.8	3.3	3.5

表7 熵权法指标权重
Tab.7 Index weights of entropy weight method

编号	指标	熵值	差异系数	权重
1	地形地貌	0.855 7	0.144 3	0.052 5
2	波环境	0.834 9	0.165 1	0.060 1
3	设施环境	0.874 0	0.126 0	0.045 8
4	土地与房屋价格或租金	0.830 0	0.170 0	0.061 9
5	配送成本	0.762 5	0.237 5	0.086 5
6	人工成本	0.863 2	0.136 8	0.049 8
7	设施成本	0.692 4	0.307 6	0.111 9
8	其他成本	0.778 8	0.221 1	0.080 5
9	所在区域整体经济水平	0.780 5	0.219 5	0.079 9
10	可达性	0.806 3	0.193 7	0.070 5
11	通道容量	0.855 8	0.144 2	0.052 5
12	节点空间	0.871 4	0.128 6	0.046 8
13	规划环境	0.867 2	0.132 8	0.048 3
14	政策环境	0.765 9	0.234 1	0.085 2
15	人口密度与特征	0.813 7	0.186 3	0.067 8

表8 评价指标最终权重
Tab.8 Final weight of evaluation indicators

一级指标	二级指标	二级指标权重
地理适应性	地形地貌	0.137 7
	波环境	0.124 1
	设施环境	0.048 6
经济节约性	土地与房屋价格或租金	0.096 1
	配送成本	0.093 4
	人工成本	0.045 4
	设施成本	0.048 2
	其他成本	0.041 4
交通便利性	所在区域整体经济水平	0.047 9
	可达性	0.064 3
	通道容量	0.059 4
社会适宜性	节点空间	0.056 4
	规划环境	0.046 1
	政策环境	0.051 5
	人口密度与特征	0.039 5

4.3 云模型验证

为提高数据精度，清晰绘制云模型图，经对比验

证，取雨滴数量1 500个。备选方案云模型图如图2所示。

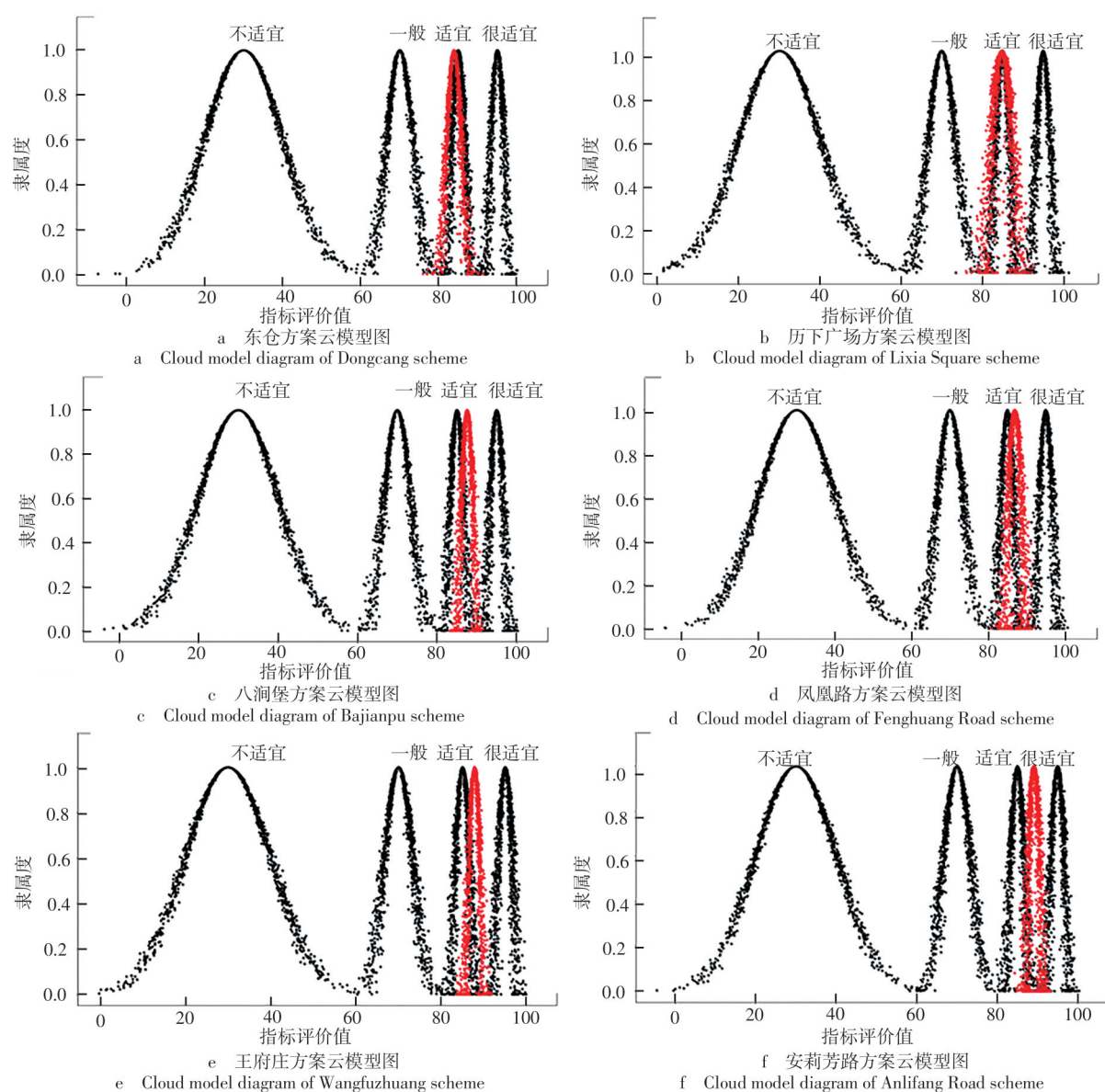


图2 备选方案云模型图

Fig.2 Cloud model diagram of alternative schemes

综合评价云数字特征对比表如表9所示。

由表9中期望值可见，6个方案的期望值都处于适

表9 综合评价云数字特征对比表

Tab.9 Comparison table of digital feature of comprehensive evaluation cloud

方案	期望(Ex)	熵(En)	超熵(He)
东仓	83.891	1.864	0.416
历下广场	84.823	2.471	0.886
八涧堡	87.581	1.400	0.451
凤凰路	86.930	1.666	0.743
王府庄	87.819	1.283	0.411
安莉芳路	89.137	1.339	0.610

宜布局范围，其中安莉芳路方案期望值最优，为89.137，主要体现在地形地貌、波环境、人工成本、通道容量等优势指标方面。王府庄、八涧堡方案期望值次之。东仓方案因位于老城区内，其地形地貌、波环境、人工成本、通道容量等指标不具备优势，方案排名最后。综上所述，推荐安莉芳路方案。最后，从目前6个方案数据分析来看，本研究可降低物流成本约5%。

5 结束语

本研究以传统道路配送存在的问题为导向，结合国内外既有成果和城市轨道配送、低空配送发展趋势，在分析低空、道路、轨道等不同配送方式特征的基础上，

提出了“分类、分层、分区”的“三网融合”城市配送体系规划策略，构建了以公共配送中心为核心纽带的“三网融合”城市配送节点体系，建立了“三网融合”城市公共配送中心布局规划评价指标体系和基于博弈论的综合评价云模型。最后以济南市公共配送中心选址为分析案例，证明了“三网融合”城市公共配送中心综合评价云模型及求解方法具有可行性，可降低物流成本约5%。本研究可为城市多配送网络融合的城市配送体系构建和城市公共配送中心布局等研究提供参考，对大中城市未来形成完整性、结构化的“三网融合”城市公共配送中心布局体系具有一定推动意义。

参考文献：

[1] MARTÍN J C, ROMÁN C. Analyzing Competition for Hub Location in Intercontinental Aviation Markets. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2024, 40(2), 135 – 150.

[2] SHAHPARVARI S, NASIRIAN A, MOHAMMADI A, et al. A GIS-LP Integrated Approach for the Logistics Hub Location Problem[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2020, 146: 106488.

[3] 钱欣悦. 城区物流无人机起降场点协同选址布局优化模型研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2021.

[4] 石 鹏. 中国民航低空空域开放管理问题研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.

[5] 郝铭佟. 基于云模型的通用机场选址方案评价与优化[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2021.

[6] 潘会红, 张子辰, 刘成浩. 我国物流枢纽布局的研究综述[J]. *物流工程与管理*, 2022, 44(4): 1–4.

PAN Huihong, ZHANG Zichen, LIU Chenghao. A Review of

Logistics Hub Layout in China[J]. *Logistics Engineering and Management*, 2022, 44(4): 1–4.

[7] 吴雨遥. 基于城市轨道交通的城市配送转运点选址研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.

[8] 王 寅. 轨道运输作用于城市配送系统可行性分析[J]. *中国工业经济*, 2012(4): 43–44.

[9] 黎海浪. 徐州铁路物流中心需求预测与功能区布局规划研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.

[10] 郭小琳. 面向物流转型的铜山货场布局设计与评价[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.

[11] 郭军华, 宋星雨. 高铁快运末端配送车辆路径规划研究[J]. *铁道运输与经济*, 2023, 45(12): 74–81.

GUO Junhua, SONG Xingyu. Research on Vehicle Route Planning of Terminal Distribution of High Speed Rail Express[J]. *Railway Transport and Economy*, 2023, 45(12): 74–81.

[12] 张苏波. 钢铁物流中心平面布局研究[J]. *铁道货运*, 2024, 42(3): 23–30.

ZHANG Subo. Research on the Plane Layout of Steel Logistics Center[J]. *Railway Freight Transport*, 2024, 42(3): 23–30.

[13] 吕星皓, 张子昂, 尹传忠, 等. 区域应急物流二级配送中心选址研究[J]. *铁道运输与经济*, 2023, 45(8): 55–61.

LYU Xinghao, ZHANG Ziang, YIN Chuanzhong, et al. Site Selection of Secondary Distribution Center in Regional Emergency Logistics[J]. *Railway Transport and Economy*, 2023, 45(8): 55–61.

[14] 赵国彦, 邱 菊, 赵 源, 等. 金属矿绿色开采评价指标体系及组合赋权法研究[J]. *安全与环境学报*, 2020, 20(6): 2309–2316.

ZHAO Guoyan, QIU Ju, ZHAO Yuan, et al. Study on the Evaluation Index System and Combination Weighting Method of Green Mining of Metal Mine[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2020, 20(6): 2309–2316.

(责任编辑：汪沁萱)

Research on Layout of Urban Public Delivery Centers for “Three Network Integration” Based on Comprehensive Evaluation Cloud Model

WANG Zhenhao

(Transportation Planning Research Center, Jinan City Planning and Design Institute, Jinan 250101, Shandong, China)

Abstract: Based on analysis of characteristics of different delivery modes such as low altitude, road, and rail, an urban delivery system planning strategy of “classification, stratification, and zoning” for “three network integration” was proposed, and a “three network integration” urban delivery node system with public delivery centers as core links was constructed. Based on analysis of major factors such as geography, economy, transportation, and society, an evaluation index system for layout planning of “three network integration” urban public delivery centers was established, and a comprehensive evaluation cloud model based on game theory was constructed. Taking the site selection of Jinan public delivery center as an analysis case, this paper proved that the comprehensive evaluation cloud model and its solution method for “three network integration” urban public delivery centers are feasible and can reduce logistics costs by about 5%.

Keywords: Low-Altitude Delivery; Urban Land Transportation Delivery; Three Network Integration; Public Delivery Center; Game Theory; Cloud Model; Layout Planning