

# 基于 GIS 和 MDVRP 的成都市城乡 配送网络仿真<sup>1</sup>

王坤<sup>1,2</sup>, 王广翔<sup>\*3</sup>

(1. 西南交通大学交通运输与物流学院, 四川 成都 610031;

2. 综合交通运输智能化国家地方联合工程实验室, 四川 成都 610031;

3. 上海交通大学中美物流研究院, 上海 200030)

**【摘要】**本文应用 ArcGIS 构建了包含 4 个物流中心和 151 个乡镇需求点的成都市二级城乡配送网络, 并利用 ArcMap 分析工具得到了 155×155 的最短距离对称矩阵; 以配送总距离最小化为目标函数, 考虑车容量限制、车辆数限制、车流量限制等约束条件, 建立了多车场车辆路径问题 (MDVRP) 的 0-1 整数规划模型; 采用基于客户编码方式, 应用稳态繁殖选择策略, 设计了遗传算法进行求解。在不同需求分布和不同车容量的条件下对算法收敛效果、配送行驶总距离、配送使用车辆数、平均车辆满载率进行了对比分析。结果表明: 配送距离、配送车辆数与需求规模成正比; 平均车辆满载率差异较大, 20t 车型满载率较稳定, 适合小批量需求配送; 建议成都市城乡配送以 20t 和 25t 车辆为主力车型, 并重点关注崇州物流中心的建设。

**【关键词】**城乡配送; 多车场车辆路径问题; 地理信息系统; 遗传算法; 稳态繁殖策略

**【文章编号】**1000-713X (2019) 03-0099-06 **【中图分类号】**F259.27 **【文献标识码】**A

## 引言

2009 年 10 月, 成都市发布了《成都市现代物流业发展规划修编(2009—2020)》<sup>[1]</sup>, 随着社会经济的快速发展和城市功能布局的逐渐完善, 目前成都市已经形成了“四园区、四中心”的物流节点设施体系空间布局。2017 年 5 月, 为贯彻落实国务院《物流业发展中长期规划(2014—2020 年)》, 成都市口岸与物流办编制并发布了《成都市现代物流业发展“十三五”规划》<sup>[2]</sup>, 在“十三五”期间成都市将着力构建“五园区、六中心”的物流节点设施空间布局体系。2017 年 8 月, 国务院办公厅发布了《关于进一步推进物流降本增效促进实体经济发展的意见》(国办发〔2017〕73 号), 指出支持地方建设城市共同配送中心, 完善城乡物流网络节点。成都市在由“四园区、四中心”向“五园区、六中心”发展的过程中, 根据重点承接城乡配送功能的需要, 面向城乡配送网络的路径优化对于各物流中心建设与运营非常重要<sup>[3]</sup>。

<sup>1</sup>收稿日期: 2018-10-31 录用日期: 2019-02-15

基金项目: 2018 国家哲学社会科学基金(16CGL018)。

作者简介: 王坤(1982—), 男, 河北邢台人, 讲师, 硕士生导师。

\*通讯作者: wanggx@sjtu.edu.cn

城乡配送网络优化问题是典型的“最后一公里”<sup>[4]</sup>问题之一。在城乡配送网络体系构建的方法上主要包括基于 TSP 的城乡配送体系<sup>[5]</sup>、基于供需匹配的城乡配送超网络体系<sup>[6,7]</sup>等。而基于地理信息系统(Geographic Information System, GIS)进行城乡配送网络体系的构建,可视化效果好,且其直观的数据模型处理和网络分析功能能够在真实路网环境下研究车辆路径问题(Vehicle Routing Problem, VRP)<sup>[8,9]</sup>。借助于 GIS 平台和调用在线地图 API 已成为解决 VRP 的两大趋势。

本文利用 ArcGIS 软件,以成都市城乡配送的实际路网数据为基础,考虑多个物流中心建立多车场的车辆路径优化模型,并利用遗传算法进行求解,构建成都市城乡配送网络体系。

## 1 基于 GE 的成都市城乡配送网络构建

以成都市行政区划为基础,各区、市、县的经济发展水平、人口分布、交通设施等方面均存在显著差异,本文重点考虑区域物流需求的方向性,将成都市城乡配送定义为都市区与非都市区之间的物流配送。

应用 ArcGIS 软件,将成都市电子地图的矢量数据进行拓扑处理,建立成都市路网模型,如图 1 所示。

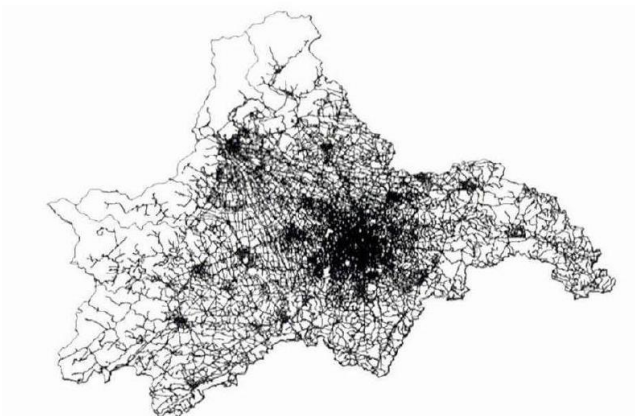


图 1 基于 ArcGIS 的成都市路网模型

利用高德地图 API,将成都市承担城乡配送功能的新都、双流、龙泉驿、崇州(新建)等 4 个物流中心和 151 个非都市区乡镇的经纬度坐标导入 ArcGIS。以实际路网为基础,利用 ArcGIS 的网络分析功能,计算任意两点间的最短路径。首先创建网络数据集;然后将网络数据集图层和点层加载到 ArcMap 中,分别进行 OD 成本矩阵分析和路径分析后,计算任意两点间的最短路径。成都市二级城乡配送网络包含了任意两点的最短距离与路径信息,是一个 155x155 的对称矩阵,共计 24025 条。任意两点最短距离的路径如图 2 所示。



图 2 基于 GIS 的成都市城乡配送最短路径网络

## 2 基于 MDVRP 的二级城乡配送网络建模

对于包含了 4 个物流中心和 151 个需求点的配送网络，很明显其路径优化问题是一个多车场车辆路径问题，包含了两个需要优化的问题：一是确定各物流中心所服务的末端需求点；二是针对被同一物流中心服务的需求点，合理组织行车路线。

假设在一次配送活动中，各需求点的需求量已固定，每次仿真出的需求量只表示一次配送活动；物流中心不会出现缺货现象且对配送车辆无中途指派；整个配送系统中运输的货物为常规货物，不包含生鲜易腐货物、危险品货物等特殊货物，且在配送过程中无品类的差别。

### 2.1 符号说明

相关符号说明如表 1 所示。

表 1 城乡配送 MDVRP 模型符号说明

| 序号 | 符号            | 说明                                                   |
|----|---------------|------------------------------------------------------|
| 1  | $N$           | 配送网络中末端需求点的数量                                        |
| 2  | $M$           | 配送网络中车场(物流中心)的数量                                     |
| 3  | $q$           | 车辆的车容量                                               |
| 4  | $K_m$         | 第 $m$ 个车场的车辆数                                        |
| 5  | $g_i$         | 第 $i$ 个需求点的货物需求量                                     |
| 6  | $d_{ij}$      | 配送网络中第 $i$ 个点和第 $j$ 个点间的最短距离                         |
| 7  | $x_{ij}^{mk}$ | 若车场编号为 $m$ 的车辆 $k$ 从用户 $i$ 行驶到用户 $j$ ，则为 1；<br>否则为 0 |

### 2.2 数学模型

建立 0-1 整数规模模型如下所示。

$$\min \sum_{i=1}^{N+M} \sum_{j=1}^{N+M} \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{K_m} d_{ij} x_{ij}^{mk} \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{K_m} x_{ij}^{mk} \leq K_m, \quad i=m \in \{N+1, N+2, \dots, N+M\} \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^N x_{ij}^{mk} = \sum_{j=1}^N x_{ij}^{mk} \leq 1, \quad i=m \in \{N+1, N+2, \dots, N+M\}, \quad k \in \{1, 2, \dots, K_m\} \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^{N+M} \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{K_m} x_{ij}^{mk} = 1 \quad i \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^{N+M} \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{K_m} x_{ij}^{mk} = 1 \quad j \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^M g_i \sum_{j=1}^{N+M} x_{ij}^{mk} \leq q, \quad m \in \{N+1, N+2, \dots, N+M\}, \quad k \in \{1, 2, \dots, K_m\} \quad (6)$$

$$\sum_{j=N+1}^{N+M} x_{ij}^{mk} = \sum_{j=N+1}^{N+M} x_{ij}^{mk} = 0, \quad i=m \in \{N+1, N+2, \dots, N+M\}, \quad k \in \{1, 2, \dots, K_m\} \quad (7)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{K_m} x_{ij}^{mk} \cdot x_{ji}^{mk} = 0, \quad i, j \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (8)$$

$$x_{ij}^{mk} \in \{0, 1\} \quad (9)$$

式(1)表示目标函数,即配送总距离最小化。式(2)-(9)为约束条件,其中,式(2)表示车辆数限制,即从物流中心派出的车辆数不能超过拥有车辆数  $K_m$ ;式(3)表示起止点限制,即配送车辆经过若干个需求点后需返回原车场;式(4)和式(5)表示车流量限制,即每个需求点被同一辆车流入和流出各一次;式(6)表示车容量限制,即每辆车所服务需求点的需求量之和不得超过车容量,式(7)表示车场间车辆流动限制,即不允许车辆在不同车场之间流动,起止点必须一致。式(8)表示子环路径消除约束,即避免有可能出现需求点间的任意两个点连通成圈的情况;式(9)为决策变量为0-1变量的说明。

### 3 数值仿真基础数据

#### 3.1 配送车辆车型选择

根据《城市物流配送汽车选型技术要求》(GB/T29912-2013)<sup>[10]</sup>对城市物流配送使用车型的技术要求,考虑城乡配送的中短途运输需求与时效要求,避免选择用于城市配送的小载重量车型和用于长途干线运输的大载重量车型,本文选用的三种车型为:12t、20t 和 25t,将分别使用这三种车容量限制求解,并作对比分析。

#### 3.2 需求分布特征

本文选择正态分布作为成都市城乡配送网络需求数据产生的仿真函数。通过对成都市非都市区内以化肥为代表的农资需求、以糖果糕点为代表的食用消费需求、以服装家电为代表的耐用消费需求<sup>[11]</sup>等的统计分析,成都市非都市区各乡镇(需求点)需由物流中心进行中转配送的日均城乡配送物流需求约为 4.885t。因此,本文采用正态分布仿真生成数据的规模参数如表 2 所示。

表 2 需求仿真参数

| 规模   | 均值 (t) | 正态分布      |
|------|--------|-----------|
| 小规模  | 3      | $N(3, 1)$ |
| 中等规模 | 5      | $N(5, 1)$ |
| 大规模  | 7      | $N(7, 1)$ |

#### 3.3 随机需求生成

由于社会经济发展的差异,不同县市需求点的需求量会呈现出不同的分布规律,不能单纯使用正态分布仿真数据进行分析。本文通过县市的地区生产总值来体现它们的需求差异。成都市非都市区县市的地区生产总值如表 3 所示。

表 3 成都市非都市区县市的地区生产总值与转换系数

| 县市名称 | 地区生产总值(万元)  | 系数     |
|------|-------------|--------|
| 都江堰市 | 2753768     | 1.1951 |
| 彭州市  | 3335497     | 1.4475 |
| 邛崃市  | 2042066     | 0.8862 |
| 崇州市  | 2260951     | 0.9812 |
| 金堂县  | 2850974     | 1.2372 |
| 大邑县  | 1830048     | 0.7942 |
| 浦江县  | 1059271     | 0.4597 |
| 新津县  | 2301816     | 0.9989 |
| 平均   | 2304298.875 | —      |

表 3 中,系数列为各县市的地区生产总值与平均值的比值,它反映了 8 个县市之间经济发展水平的差异。各县市的需求分布为  $M(3, 1)$ 、 $N(5, 1)$ 、 $N(7, 1)$  与相应系数的乘积,使用变换后的分布函数随机产生符合县市需求分布的各乡镇的需求量。

### 3.4 遗传算法参数

本文应用考虑稳态繁殖策略的遗传算法<sup>[12]</sup>进行求解，经多次参数测试后，选择遗传算法参数如表 4 所示。

表 4 遗传算法参数值设定

| 序号 | 参数     | 参数值   |
|----|--------|-------|
| 1  | 染色体长度  | 151   |
| 2  | 种群规模   | 100   |
| 3  | 交叉概率   | 1     |
| 4  | 变异概率   | 0.2   |
| 5  | 种群进化代数 | 20000 |

## 4 数值仿真分析

在  $N(3, 1)$ 、 $N(5, 1)$  及  $N(7, 1)$  三种不同需求分布和 12t、20t 及 25t 三种不同车容量下，对成都市城乡配送网络路径优化问题分别进行求解，其求解过程与结果对比如下所示。

### 4.1 算法收敛效果分析

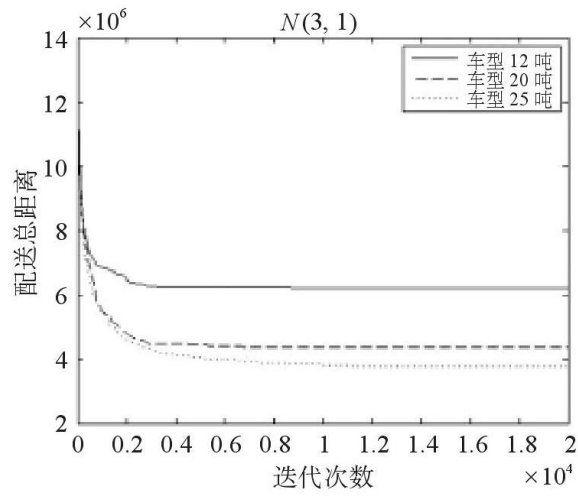
本文采用的遗传算法求解收敛效果如图 3 所示。12t 和 20t 载重车型计算得到的收敛性较好，大多在经过 6000 次以内迭代就能够达到最优解；而对于 25t 载重车型则需要在 10000 次迭代时才能达到最优解或近似最优解。总体上，本文设计的遗传算法在解决该 MDVRP 时的适用性好，构建的路径优化模型合理可行。

### 4.2 配送行驶总距离对比分析

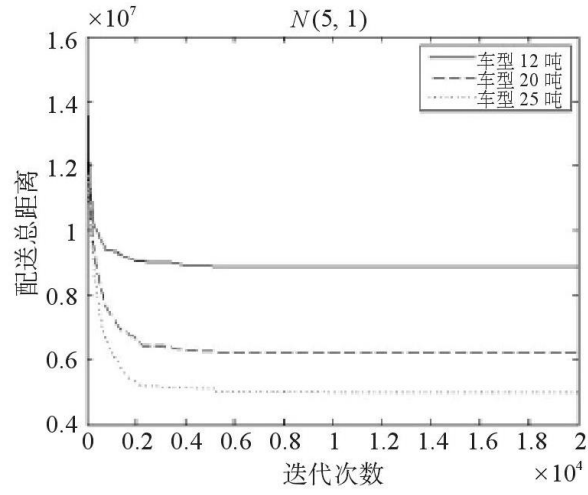
不同需求分布、不同车型条件的配送行驶总距离对比分析如图 4 所示。在需求不变的前提下，随着配送网络中车容量限制的增大，路径优化后的行驶总距离越来越小；在配送网络中所选车型车容量不变的前提下，随着需求的增加，路径优化后的行驶总距离越来越大。

### 4.3 配送使用车辆数对比分析

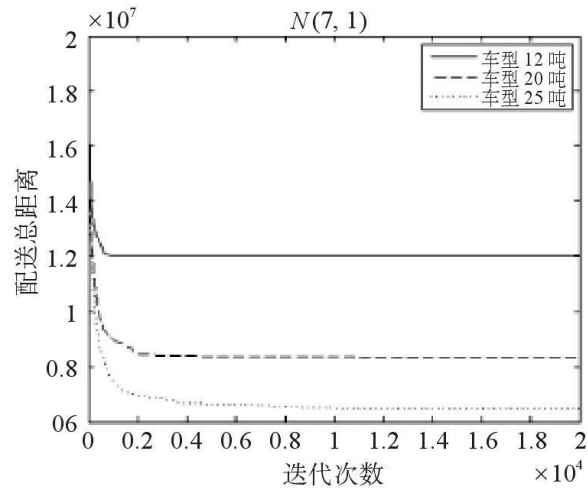
不同需求分布、不同车型条件的配送车辆数对比分析如图 5 所示。在需求不变的前提下，随着车容量的增加，路径优化后使用总车辆数越来越少；在车容量不变的前提下，随着需求的增加，路径优化后的使用总车辆数越来越多。由于模型中有车容量约束，故求解结果中的路径数与车辆数相同。当车辆数增加时，路径数相应地增加，因此行驶总距离增加，故图 4 和图 5 呈现出了相同的趋势，但由于其表征了不同的量，图线的走势并不完全重合。



(a)  $N(3, 1)$  需求分布的收敛曲线



(b)  $N(5, 1)$  需求分布的收敛曲线



(c)  $N(7, 1)$  需求分布的收敛曲线

图 3 正态分布下不同车型的优化结果收敛效果

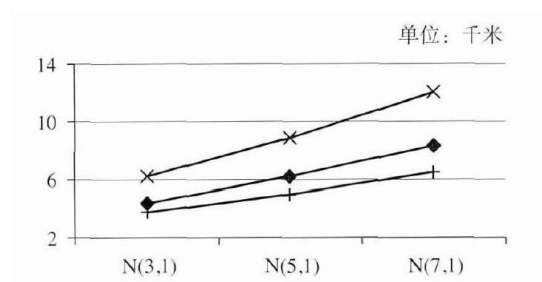


图 4 正态分布需求下最优配送距离对比

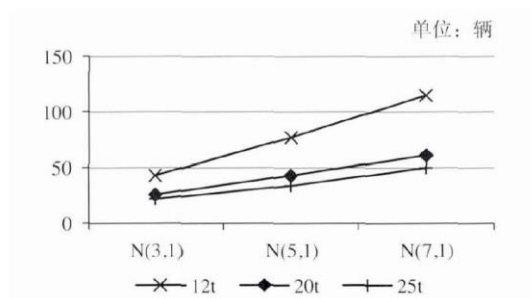


图 5 正态分布需求下的最优配送车辆数对比

#### 4.4 平均车辆满载率对比分析

虽然同一辆车可以服务若干需求点，但在求解结果中，每辆车很难达到满载。而平均满载率代表了车辆的平均利用率，是求解结果的重要指标之一。

不同需求分布、不同车型条件的平均车辆满载率对比分析如图 6 所示。当车容量不变时，随着需求量的增加，平均满载率的变化并无明显规律。当配送网络中的车型载重量为 12t 时，随着需求的增加，满载率降低；当车容量为 20t 时，随着需求的增加，满载率降低，但降低幅度较小；当车容量为 25t 时，随着车容量的增加，满载率先提高后降低。

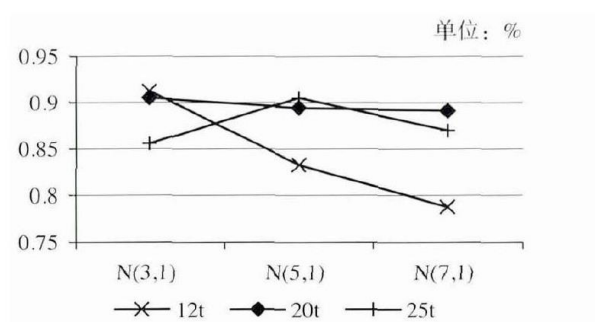


图 6 正态分布需求下的最优配送满载率对比

## 4.5 物流中心分担量对比分析

不同需求分布和不同车型条件下的各物流中心配送量对比分析，如图 7 所示。各物流中心配送量占总需求的比例反映了该物流中心服务的需求点、需求量和配送车辆的数量等。

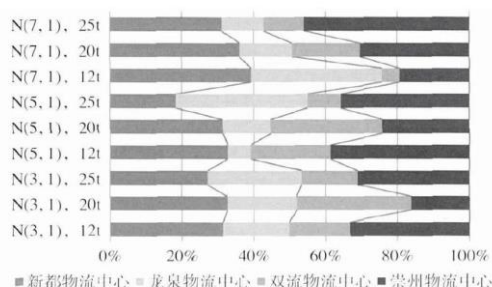


图 7 物流中心分担量对比

结合不同需求分布下的最优车型结果，由图 7 可知，新都物流中心服务了成都市城乡配送的 18.3%至 32.5%的需求；龙泉物流中心服务了成都市城乡配送的 11.8%至 36.8%的需求；双流物流中心服务了成都市城乡配送的 9.2%至 31.7%的需求；崇州物流中心服务了成都市城乡配送的 16.2%至 45.8%的需求。建议各物流中心应配备相应的服务能力，满足成都市城乡配送的需求。

## 4.6 最优配送路径示例

以 25t 配送车型、大批量需求为例，利用 ArcGIS, 将所求结果可视化，结果如图 8 所示。



图 8 真实路网下的城乡配送路径优化结果

在 ArcGIS 中反映出了从 4 个物流中心分别面向辐射需求点提供城乡配送服务的最优配送路径，图中共包含了 50 条路径，总配送距离为 6484.23km, 平均车辆满载率为 87%。在实际城乡配送活动中可根据 ArcGIS 的路径结果指导实际配送路线的选择。

其它车型与需求分布的结果也可做相同展示，在此不再详述。

由图 8 可以看出，成都市北部的城乡配送需求主要由新都物流中心满足，成都市东部的城乡配送需求主要由新都和龙泉两个物流中心满足，而成都市西部和西南部的城乡配送需求则由龙泉、双流以及崇州三个物流中心满足。由于崇州物流中心距离各需求点较近，又位于成都市南北方向的中间位置，所以其满足的需求量最多，是成都市城乡配送的核心枢纽。崇州物流中心正处于规划建设阶段，应利用其位置优势，规划其更多的处理能力用于成都市城乡配送，重点关注其在城乡配送中的作用。

## 5 结论

本文研究了真实道路网络环境下的成都市城乡配送中的路径优化问题，并使用 GIS 作为手段，通过 ArcGIS 可视化效果好、数据模型处理直观、网络分析功能等优点，打破了传统对 MDVRP 理论研究的限制，使得求解结果更加精确，并可以应用于指导实际的配送活动；本文设计的遗传算法所采用的编码方式从整体的角度求解 MDVRP，使得结果更逼近全局最优，且在本文中 MDVRP 规模较大的前提下，算法测试的结果显示，使用稳态繁殖的选择策略能有效提高收敛速度；对求解结果中关键指标的对比分析是对 MDVRP 求解的延伸，这对成都市城乡配送的发展规划具有重要参考意义。

此外，本文所采用的道路信息是静态的，而在实际的配送过程中道路的拥堵程度等是实时变化的，这导致两点间的最优路径也是动态的，在解决 MDVRP 时如何引入实时的道路信息还有待进一步深入研究。

### 参考文献:

- [1]成都市口岸与物流办. 成都市现代物流业发展规划修编(2009—2020) [S], 2009.
- [2]成都市人民政府关于同意成都市现代物流业发展“十三五”规划的批复[Z]. 成府函[2017]77号.
- [3]王坤, 牛亚男, 张光远, 何芳. 成都市城乡配送网络需求分析与双向渠道构建[J]. 综合运输, 2017, 39(11): 68-73.
- [4]陈义友, 张锦, 曾倩, 等. 最后一公里配送服务选择均衡问题[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(08): 2035-2045.
- [5]朱占峰. 基于 TSP 约束的城乡一体化物流配送体系的构建[J]. 物流技术, 2011, 30(05): 63-66.
- [6]彭永涛, 杜建国, 罗建强. 基于新型城镇化的城乡配送网络优化研究[J]. 软科学, 2016, 30(05): 136-139.
- [7]彭永涛, 罗建强, 张锦. 基于超网络的城乡物流配送网络优化研究[J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(14): 241-249.
- [8]Krichen S, Faiz S, Tlili T, et al. Tabu-based GIS for Solving the Vehicle Routing Problem[J]. Expert Systems with Applications, 2014, 41(14): 6483-6493.
- [9]程亮. 采用基于 GIS 的软件解决物流方案确定问题[J]. 综合运输, 2005(07): 36-39.
- [10]交通运输部公路科学研究院. 《城市物流配送汽车选型技术要求》[S]. 人民交通出版社, 2014.
- [11]成都统计年鉴 2016[M], 中国统计出版社, 2016.

---

[12]郑姣, 杨侃, 郝永怀, 等. 基于稳态繁殖的遗传算法在水库优化调度中的应用[J]. 水电能源科学, 2011, 29(08): 38-41.