

城市绿色物流配送调度的时变异质车队优化模型

摘要

本文研究混合动力车队在时变城市路网与绿色配送区限行政策下的配送调度问题，建立并求解了三个相互衔接的模型，全部结论由可复现的实际运行给出。

数据修复是建模的前提。我们发现附件距离矩阵存在 93,786 例三角不等式违反（最大超出 63.558 km）——若直接使用，优化算法会靠插入无意义中转点套利数据缺陷；故以 Floyd–Warshall 求度量闭包修复，平均距离由 46.956 km 降至 36.419 km。另按客户特异密度插补 14/16 条缺失重量/体积，并指出题述“30 个客户位于半径 10 km 区内”与坐标不自洽（实测 15 个），故以可验证的几何定义为基准口径。

问题一建立时变异质车队订单可拆分软时间窗车辆路径模型（TD-SDHF VRPSTW）：行程时间用分段常速、位置连续的先入先出积分，保证“晚出发不会早到”；能耗按 U 型曲线与载重率修正，与行程时间共用同一速度剖面。诊断表明载重利用率 99.5% 而容积仅 40.0%，且单客户平均需求 3,252.34 kg 已超最大车型载重，故拆分配送是可行性前提而非优化技巧，问题重心在“装载—指派—择时”。求得总成本 78,615.84 元、124 辆车、碳排放 7,833.4 kg、按时率 79.0%。为客观评价解质量，另建组合下界，其中里程界用自行推导的径向力矩界 $\sum_r \text{dist}(r) \geq 2M_W/Q_{\max}$ ，较常规访问度界从 1,911.0 km 收紧到 8,462.3 km，最终间隙 22.6%。三个基准显示：禁止拼载在现有车队下不可行（需 3000 kg 车 89 辆 > 可用 70 辆）；不出发时刻优化成本上升 17.3%。

问题二把限行建模为时空耦合的网络约束。关键发现是一个易被忽略的陷阱：度量闭包距离由多跳折线实现，实测 582/3,486 个区外节点对的最短路实际穿越区内节点，其中 78 对的直线段并不穿盘——故“对距离乘绕行系数”的常见做法会使政策约束失效。我们以“先几何绕行、后区外闭包”两步重建受限度量 D^F ，并证明其仍为度量且区内不可达。政策使成本上升至 80,603.87 元（+2.1%）、碳排放上升（+4.7%）、新能源承运份额下降至 14.0%。成本增量按车辆数、绕行、车队结构、时间窗四通道可加分解；并给出最优增购规模 Δ^{E*} 对摊销成本的依赖曲线。

问题三建立事件驱动滚动时域重优化框架，以承诺点区分不可改与可调决策，目标含方案扰动惩罚 $\beta \cdot \text{Dist}$ ，扫描 β 得成本–稳定性前沿。五情景平均，本策略相对硬执行节省 17.3%，单次重优化耗时 10.27 s 量级；与放开全部承诺的离线参照仍差 +1.6%——该差距量化的不是算法不足，而是柔性因承诺而损失的代价，据此提出“推迟承诺”这一有别于算法改进的运营建议。

关键词：绿色物流；时变车辆路径；拆分配送；异质车队；低排放区；滚动时域重优化；自适应大邻域搜索

1 问题重述

1.1 问题背景

在“双碳”目标下，多个城市设立“绿色配送区”，对燃油车通行实施时段限制。某物流公司拥有燃油车与新能源车组成的混合动力车队，需在车速随交通流时变的城市路网中，统筹客户满意度、运营成本与环保要求制定调度方案。

当日配送任务涉及 98 个客户点，需求由 2169 个订单汇总；每个客户有确定的需求重量与体积，以及软时间窗（早到 20 元/h 等待成本，晚到 50 元/h 惩罚，服务时间 20 min）。车队含三种燃油车与两种新能源车共 185 辆，启动成本均为 400 元/辆。全天分顺畅、一般、拥堵三个时段，车速服从相应正态分布 [1]；油耗与电耗随车速呈 U 型关系，满载能耗比空载分别高 40% 与 35%。

1.2 待求解的问题

- **问题一：**无政策限制下，建立考虑车辆类型、载重体积约束、时间窗约束与速度时变特性的调度模型，以总配送成本最低为目标，给出车辆使用方案、行驶路径、到达时间及成本构成。
- **问题二：**加入 8:00–16:00 禁止燃油车进入绿色配送区（以市中心为圆心、半径 10 km）的政策，重新规划路径，并给出政策对总成本、车辆使用结构与碳排放总量的影响。
- **问题三：**设计能实时响应订单取消、新增订单、地址变更、时间窗调整等突发事件的动态调度策略，并给出若干突发事件下的调度方案。

2 问题分析

2.1 供需张力决定了模型的结构重心

对附件数据的定量诊断给出四条决定建模方向的事实（详见第 5 节）：

1. **载重是唯一紧约束。**总需求 286,205.72 kg 占车队总载重 366,250 kg 的 78.1%，而总体积 780.964 m³ 仅占总容积 1,952.5 m³ 的 40.0%。容积约束必须写入模型并校验，但不会主导解结构。
2. **拆分配送是必需的。**单客户平均需求 3,252.34 kg 已超过最大车型载重 3000 kg，最大者达 12,197.65 kg，至少需 5 辆车。故“一个客户由一辆车服务”的经典 VRP 假设在本题根本不成立，问题属于拆分配送车辆路径问题（SDVRP）[8]。

3. **问题重心不在路径而在装载、指派与择时。**由于单客户需求普遍超过整车载重，最优解以近满载直送为主体，真正的多点拼载只发生在残量层。这解释了为什么经典路径邻域算子收效有限，而车型指派、载重再分配与出发时刻才是成本杠杆。
4. **车辆数举足轻重。**启动成本占最优解总成本的 63.1%，是第一大成本项。禁止跨客户拼载会使车辆需求从下界的 121 辆膨胀到 149 辆，且其中 3000 kg 车型需 89 辆而实际仅 70 辆——在现有车队下不可行。

2.2 时变速度的双重经济含义

把三时段速度代入能耗公式可知，FPK 的最优速度为 51.08 km/h、EPK 为 42.857 km/h；顺畅与一般时段都接近各自 U 型底部，而拥堵时段单位里程能耗成本比顺畅时段高约 16.7%。更关键的是时间维度：修复后配送中心到客户的平均最短里程 44.46 km，在拥堵时段有效速度 9.896 km/h 下单程需 4.5 h 以上，几乎无法满足任何时间窗。而等待成本仅 20 元/h，远低于拥堵行驶的额外能耗与迟到惩罚。因此**最优策略必然是“把行程压进顺畅与一般时段、必要时在场站或客户处等待”**，这使出发时刻成为与路径同等重要的决策维度——这是本题区别于常规带时间窗车辆路径问题的核心结构特征（时变路径问题的系统综述见文献 [3]）。

2.3 新能源车的稀缺性与政策的耦合

新能源车单位里程等效能源成本仅为燃油车的 1/3.52（异质车队下的车型一排放联合优化见文献 [6]），碳排放为 1/3.80，因此在能源成本口径下新能源车严格占优，最优解应尽可能用满新能源运力；我们把新能源车的运力使用率（启用 24/25 辆，承运份额 16.5% 对运力上限 17.0%）作为解质量的诊断指标。但其总载重上限 48,750 kg 仅占总需求的 17.0%，这一稀缺性正是问题二政策效应的关键前提。问题二的限行政策把新能源车从“跑高里程省油钱”的用途，强行转向“进区服务”的用途，这正是政策成本的主要来源之一，也是问题二必须做归因分解而非只报一个差值的原因。

3 模型假设

- (A1) 所有需求由编号 0 的单一配送中心供给，车辆当日从该点出发并返回该点。
- (A2) 10 个无订单客户不产生配送任务、不作为访问点进入路径；但它们作为路网节点仍参与度量闭包，即“中转”已隐含于修复后的距离中。
- (A3) 订单为不可拆分的最小配送单位。超过最大车型载重的 2 张订单按 $\lceil w_o/Q_{\max} \rceil$ 等分，拆分后共 2171 张。
- (A4) 每辆车当日最多执行一条路线（单行程），不回场重装。车队 185 辆多于需求下界 121 辆，故该假设可行；它会高估启动成本，其代价在第 9 节量化。
- (A5) 装卸货时间固定 20 min，与配送量无关（题面明示）。

- (A6) 题面速度表覆盖 8:00–17:00, 而时间窗延伸至 20:58, 故假设 17:00–22:00 延续“一般时段”、22:00 后与 8:00 前为“顺畅时段”。该假设的影响在灵敏度分析中界定。
- (A7) 速度分布表 $\mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$ 的第二参数按方差解释, 即 σ_h 分别为 0.1、5.2、4.7 km/h。依据是: 按此解释三时段变异系数为 0.0018、0.147、0.480, 随拥堵程度单调递增, 符合交通流规律; 若按字面值解释则拥堵时段相对波动反而小于常识。
- (A8) 同一时段内车速视为常数 (分段常速), 随机性通过蒙特卡洛单独评估。
- (A9) 能耗的载重修正为载重率的线性函数——题面只给空载与满载两点, 线性插值是最小充分假设。
- (A10) 距离矩阵经度量闭包修复后使用。
- (A11) 绿色配送区按半径 $R = 10$ km 的圆盘判定 (基准口径 A), 并以“最近 30 个客户”为对照口径 B。
- (A12) 燃油车在限行时段既不服务区内客户, 也不穿越该区域; 其可行里程由受限度量 D^F 给出。
- (A13) 时间窗成本按每次访问计入; 同一客户被多车服务时各次分别计算。
- (A14) 车辆最早 8:00 出场、24:00 前返场, 不设司机工时上限。
- (A15) 新能源车续航充足, 当日无需补电 (按单车里程量级估算所需电量处于当前电动轻卡可达范围; 若需考虑补电, 问题将变为带充电站的电动车辆路径问题 [11])。
- (A16) 问题三的事件到达强度等参数无题给数据, 一律以情景形式给出并明确标注。

4 符号说明

5 数据理解与预处理

本节的三项修复都不是常规清洗, 而是直接决定模型是否成立。

5.1 缺失值插补

订单表有 14 条重量缺失、16 条体积缺失。完整记录上重量与体积的 Pearson 相关系数为 0.9667, 但密度 u_o/w_o 具有客户特异性 (客户间中位密度跨度 0.00195–0.00790 m^3/kg), 故按客户中位密度插补:

$$\hat{u}_o = w_o \cdot \bar{\kappa}_{c(o)}, \quad \hat{w}_o = u_o / \bar{\kappa}_{c(o)}, \quad \bar{\kappa}_i = \underset{o \in O_i, \text{完整}}{\text{med}} \frac{u_o}{w_o}. \quad (1)$$

插补后总重由 285,122.65 kg 增至 286,205.72 kg (+0.38%), 总体积由 772.431 增至 780.964 m^3 (+1.10%), 影响不超过 1.2%。

表 1 主要符号说明（完整符号表见附录）

符号	单位	含义
$N = \{0\} \cup C$	—	节点集, 0 为配送中心, C 为 98 个客户
C^+	—	有需求客户集, $ C^+ = 88$
Z	—	绿色配送区内客户集
K, K_F, K_E	—	车型集、燃油车型集、新能源车型集
Q_k, Λ_k, m_k	kg, m ³ , 辆	k 型车载重上限、容积上限、可用台数
O, O_i	—	订单集、客户 i 的订单集
w_o, u_o	kg, m ³	订单 o 的重量与体积
d_{ij}, d_{ij}^F	km	度量闭包修复后的路网距离、限行时段燃油车的受限距离
$[a_i, b_i], s$	h	客户 i 的软时间窗、服务时间
$\tilde{v}_h, \theta_h$	km/h, h	时段 h 的有效速度、时段断点
$\Phi_k(v)$	L 或 kW·h / (100 km)	能耗率函数 (FPK 或 EPK)
λ_k	—	满载相对空载的能耗增幅 (0.40 / 0.35)
p_k, χ_k, p^c	—	动力相关单价、碳因子、碳成本单价
x_{ij}^v, y^v, z_o^v	—	弧选择、车辆启用、订单指派 0-1 变量
$\tau^v, t_i^v, \hat{t}_i^v$	h	出场时刻、到达时刻、服务开始时刻
$T_{ij}(t), \delta_{ij}^h(t)$	h, km	时变行程时间、落在时段 h 内的里程
$G_{ij}^v(t, q)$	L 或 kW·h	弧能耗量
$\mathcal{C}$	元	总配送成本 (启动 + 能源 + 碳排放 + 时间窗四项)
$\mathcal{E}$	kg CO ₂	碳排放总量
$\underline{\mathcal{C}}, \underline{D}$	元, km	组合成本下界、里程下界
ζ, π	—	新能源车承运份额、按时到达率
$\beta, \mathcal{K}$	元/次, —	方案扰动惩罚权重、运力预留量

5.2 距离矩阵的度量性修复

对附件矩阵检验发现：对称性成立、对角为零，但三角不等式被 93,786 例违反，最大超出 63.558 km。直接使用会产生“ $i \rightarrow k \rightarrow j$ 比 $i \rightarrow j$ 更短”的物理悖论，导致路径优化算法系统性插入无意义中转点以套利数据不一致——得到的“低成本”是数据缺陷而非调度改进。故以原矩阵为边权做 Floyd-Warshall 全源最短路，取度量闭包

$$d_{ij} = \min_{\text{path } i \rightsquigarrow j} \sum d^{\text{raw}}. \quad (2)$$

效果：非对角均值由 46.956 km 降至 36.419 km (-22.4%)，7,396/9,702 个有序对被改进，单对最大缩短 68.570 km；绕行系数 d/e 均值由 1.454 收敛至 1.161。修复后的距离仍可由原始附件完全复现，不引入外部数据。图 1 给出诊断。

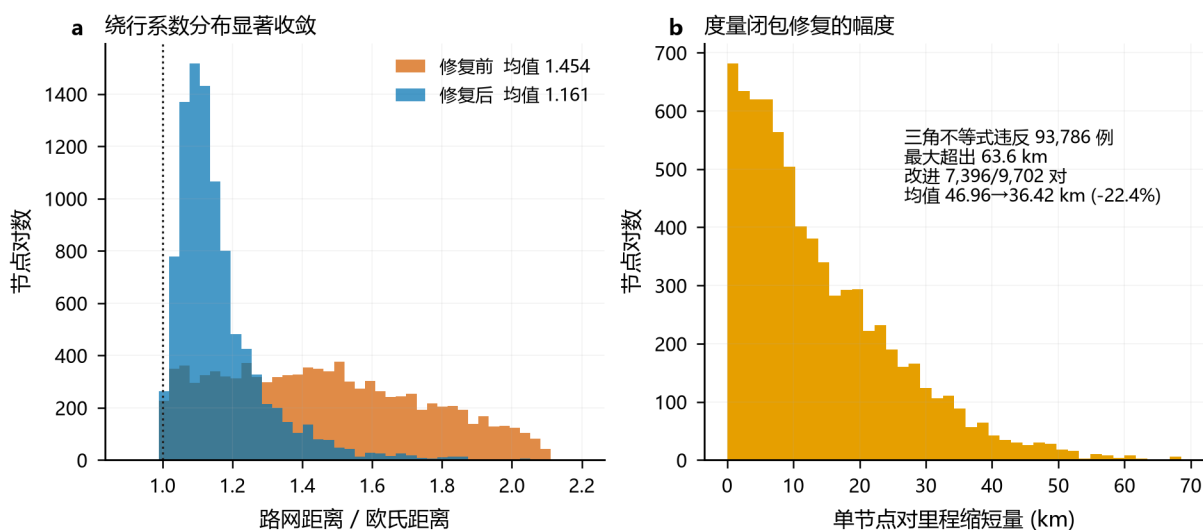


图 1 距离矩阵的度量性诊断。(a) 绕行系数 d/e 的分布在修复后显著收敛；(b) 单节点对里程缩短量的分布，共 93,786 例三角不等式违反被消除。

5.3 绿色配送区的口径冲突

题面称“其中 30 个客户位于绿色配送区内（半径 10 公里）”。按坐标计算，市中心距不超过 10 km 的客户只有 15 个（恰为编号 1–15，且它们确为市中心距最小的 15 个）；使区内客户达到 30 个的最小半径为 $R \approx 17.07$ km，且对应集合并非编号 1–30。两个描述无法同时成立。

我们不回避该冲突，而是采用双口径：**基准口径 A** 取题面给出的、可由坐标唯一验证的几何定义 $R = 10$ km（15 个客户、其中 12 个有需求、需求 36,099.50 kg 占 12.6%）；**对照口径 B** 取“最近 30 个客户”（ $R \approx 17.07$ km）。口径 B 同时具有独立的政策含义——它回答“政策覆盖范围扩大一倍会怎样”。图 2 显示两口径的位置，并揭示了一个关键临界关系：当区内需求份额超过新能源车队载重上限 17.0% 时，必然出现部分区内客户只能在 16:00 后由燃油车服务的结构性拥塞。

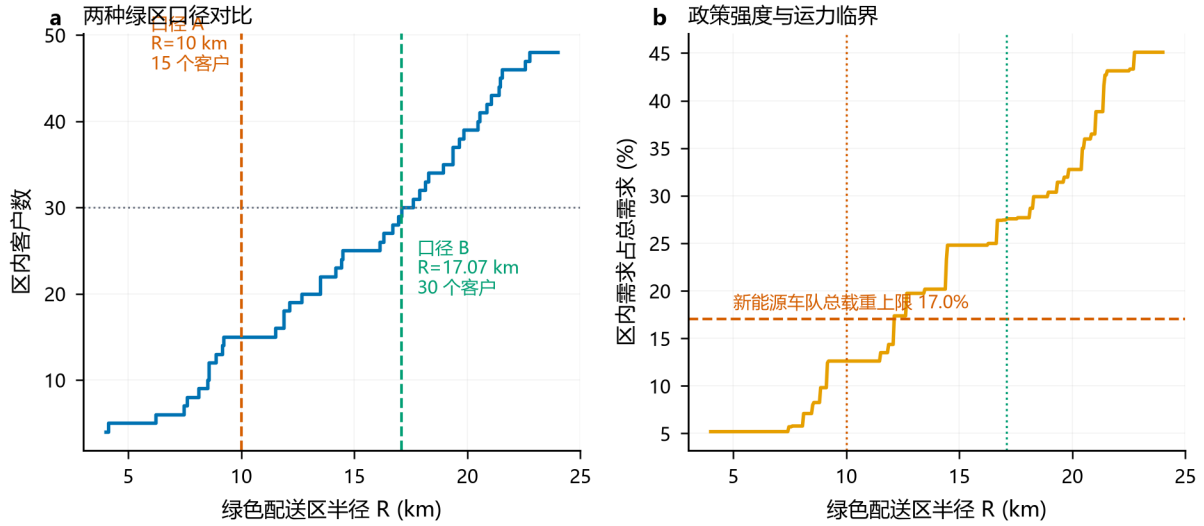


图 2 绿色配送区的两种口径。(a) 区内客户数随半径的阶梯，题述“30 个客户”与“ $R = 10$ km”不自洽；(b) 区内需求份额与新能源车队载重上限的临界关系。

5.4 客户与时间窗的空间时间结构

图 3 给出客户分布与需求规模，图 4 给出全部时间窗与三个交通时段的叠合。时间窗左端分布在 09:09–20:09、右端 10:23–20:58，窗宽 48–90 min；时间窗跨度显著超出题给速度表的 8:00–17:00 覆盖范围，这正是假设 (A6) 的由来。

6 问题一：静态时变环境下的调度模型

6.1 模型体系

问题一使用两个模型体系：**M1**-主为 TD-SDHFVRPSTW 混合整数非线性规划模型，配分层需求分解与自适应大邻域搜索矩阵启发式求解；**M1**-界为组合下界模型，独立评估解质量。灵敏度分析、蒙特卡洛检验与可行性校验器是验证手段，不计作独立模型。

6.2 决策变量与约束

决策变量为弧选择 x_{ij}^v 、车辆启用 y^v 、订单指派 z_o^v 、出场时刻 τ^v 与到达时刻 t_i^v 。其中以订单为拆分粒度是本模型的一个刻意选择：附件提供订单级明细，以订单为不可拆分单位既实现了拆分配送，又天然保证整数可行性，比“按任意实数拆分”更贴近实务。

需求完全配送、载重与容积、指派与访问耦合、流平衡与单次出场、车型台数约束

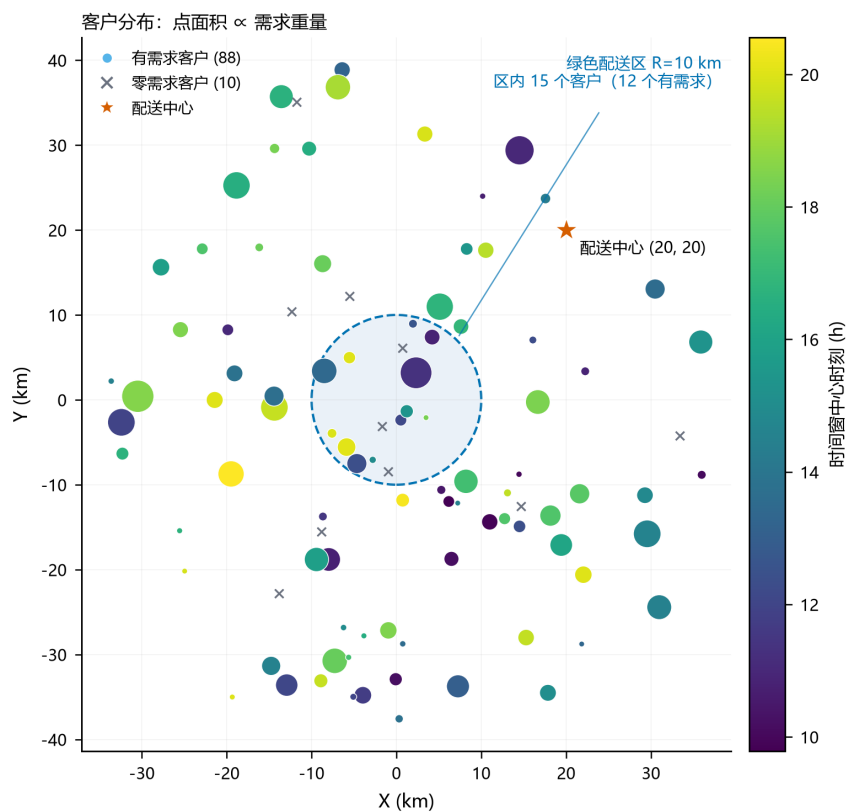


图 3 客户空间分布。点面积正比于需求重量，颜色为时间窗中心时刻；虚线圆为半径 10 km 的绿色配送区；配送中心位于 (20,20)，在区外。

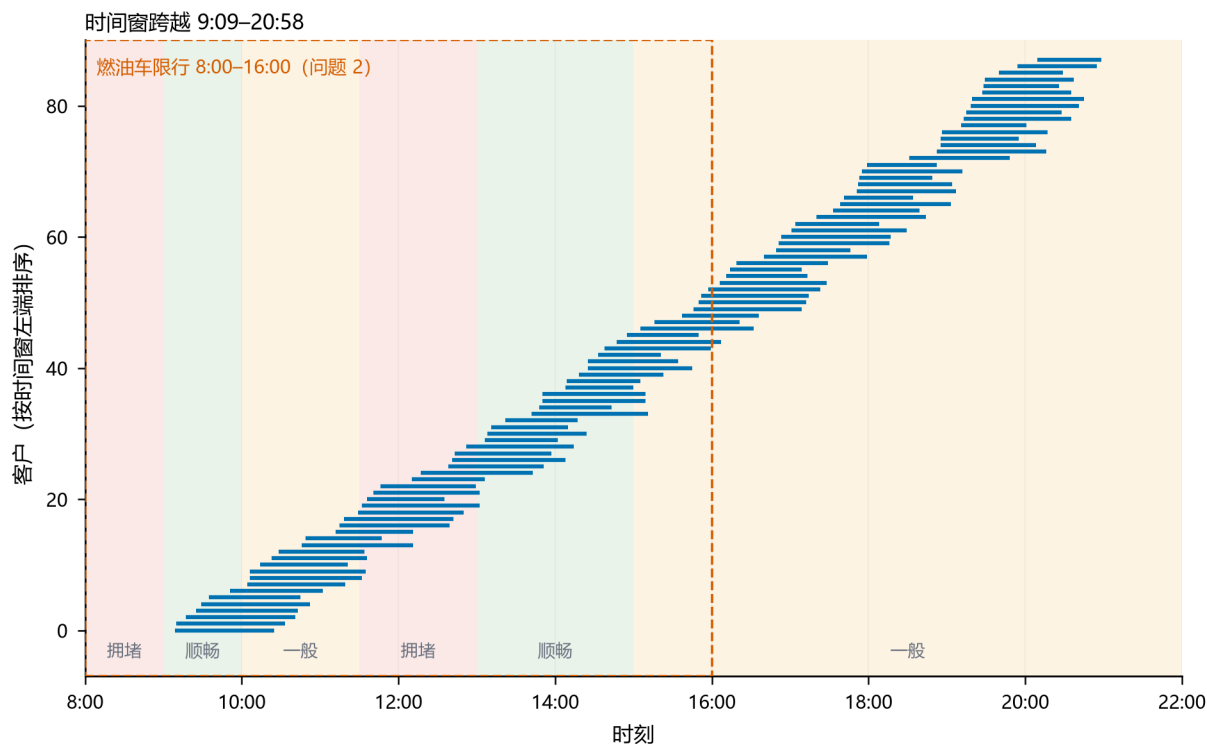


图 4 88 个有需求客户的软时间窗，底色为交通时段（顺畅/一般/拥堵），虚线框为问题二的燃油车限行时段。时间窗延伸至 20:58，超出题给速度表范围。

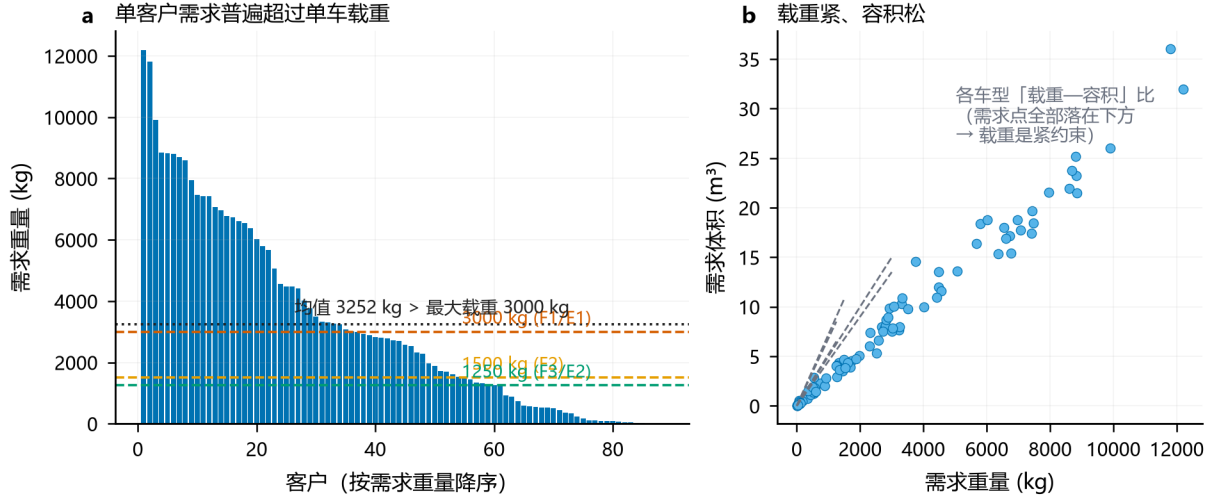


图 5 需求规模与车型容量的关系。(a) 单客户需求普遍超过单车载重（均值 3,252.34 kg > 最大载重 3000 kg）；(b) 全部需求点落在各车型“载重-容积”射线下方，说明载重是紧约束。

依次为

$$\sum_{v \in V} z_o^v = 1, \quad \forall o \in O; \quad (3)$$

$$\sum_{o \in O} w_o z_o^v \leq Q_{k(v)} y^v, \quad \sum_{o \in O} u_o z_o^v \leq \Lambda_{k(v)} y^v, \quad \forall v \in V; \quad (4)$$

$$z_o^v \leq \sum_{j \in N} x_{c(o)j}^v, \quad \sum_{j \in N} x_{ij}^v \leq \sum_{o \in O_i} z_o^v, \quad \forall v, \forall o, \forall i \in C; \quad (5)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ij}^v = \sum_{j \in N} x_{ji}^v \quad \forall i \in N, \quad \sum_{j \in C} x_{0j}^v = \sum_{i \in C} x_{i0}^v = y^v, \quad \sum_{v \in V_k} y^v \leq m_k. \quad (6)$$

时序递推采用时变行程时间，并以时间严格递增隐式排除子回路：

$$t_j^v \geq \hat{t}_i^v + s \mathbb{I}[i \in C] + T_{ij}(\hat{t}_i^v + s \mathbb{I}[i \in C]) - \mathcal{M}(1 - x_{ij}^v), \quad \hat{t}_i^v = \max(t_i^v, a_i), \quad (7)$$

其中 $\hat{t}_i^v$ 体现软时间窗允许早到等待， $t_0^v = \tau^v$ ， $\mathcal{M}$ 为足够大的常数。

6.3 FIFO 一致的时变行程时间

设时段断点 $0 = \theta_0 < \dots < \theta_{|H|} = 24$ ，第 h 段有效速度为常数 $\tilde{v}_h$ 。定义累积行驶距离 $\Psi(t) = \int_0^t v(s) ds$ ，它严格单调递增且分段线性，于是

$$T_{ij}(t) = \Psi^{-1}(\Psi(t) + d_{ij}) - t. \quad (8)$$

该形式即 Ichoua 等提出的时变行程时间模型 [2]，等价于“分段常速、位置连续”的推进过程，满足先入先出（不越车）性质： $t_1 < t_2 \Rightarrow t_1 + T_{ij}(t_1) \leq t_2 + T_{ij}(t_2)$ 。若改用“按出发时刻所在时段的速度走完全程”的简化算法，该性质被破坏，会出现“晚出发反而早到”的悖论并使邻域搜索的评估不一致。我们对 2×10^4 组随机 $(i, j, t_1 < t_2)$ 做了数

值检验，违反数为 0；分段里程之和与总里程的最大偏差为 6.9×10^{-11} km。图 6 给出验证。

有效速度的取法：行程时间 $\propto 1/v$ 是 v 的凸函数，用 $\mathbb{E}[v]$ 会系统低估行程时间。故取

$$\tilde{v}_h = \left(\mathbb{E}[1/v \mid v \in [v_{\min}, v_{\max}]] \right)^{-1}, \quad [v_{\min}, v_{\max}] = [5, 80] \text{ km/h}, \quad (9)$$

实测 $\tilde{v} = 55.300/34.599/9.896$ km/h，与均值速度相差均在 2.3% 以内——说明确定性基准不会因口径改变结论方向，采用有效速度的意义在于与蒙特卡洛分析共用同一分布假设。

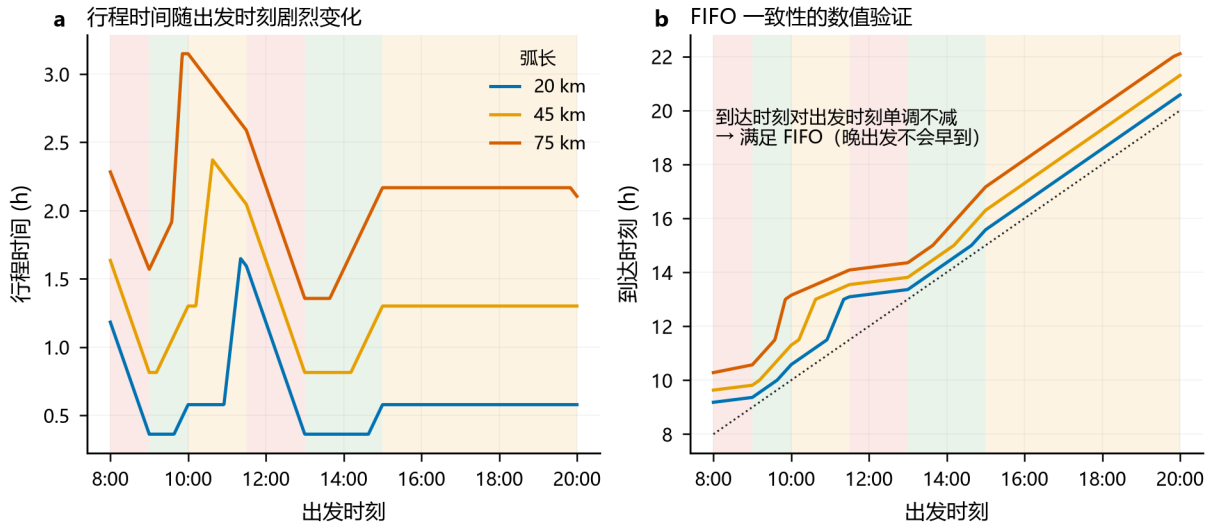


图 6 时变行程时间及其 FIFO 一致性。(a) 同一弧在不同出发时刻的行程时间随交通时段剧烈变化；(b) 到达时刻关于出发时刻单调不减，即晚出发不会早到。

6.4 能耗、碳排放与目标函数

车辆 v 以载重 q 于 t 时刻通过弧 (i, j) 的能耗为

$$G_{ij}^v(t, q) = \left(1 + \lambda_{k(v)} \frac{q}{Q_{k(v)}} \right) \sum_{h \in H} \frac{\delta_{ij}^h(t)}{100} \Phi_{k(v)}(\tilde{v}_h), \quad (10)$$

该式的载重线性修正与排放路径问题 (pollution-routing) 中“燃料消耗率随总质量近似线性增长”的处理一致 [4, 5]。其中 $\delta_{ij}^h(t)$ 是该次行驶落在时段 h 内的里程，与式 (8) 共用同一速度剖面，保证能耗与时间口径一致。由于载重沿路径逐点递减，能耗必须按弧分段计算，不能用平均载重近似。

记 p_k, χ_k 为动力相关单价与碳因子，目标函数为

$$\min C = \underbrace{c^E \sum_v y^v}_{\text{启动 } C^E} + \underbrace{\sum_v p_{k(v)} G^v}_{\text{能源 } C^F} + \underbrace{p^c \sum_v \chi_{k(v)} G^v}_{\text{碳排放 } C^C} + \underbrace{\sum_v \sum_{i \in C} (c^W E_i^v + c^L L_i^v)}_{\text{时间窗 } C^T}, \quad (11)$$

其中 $E_i^v = (a_i - t_i^v)^+$ 、 $L_i^v = (t_i^v - b_i)^+$ 。碳排放总量 $\mathcal{E} = \sum_v \chi_{k(v)} G^v$ 作为独立指标报告。图 7 给出能耗曲线与三时段工作点。

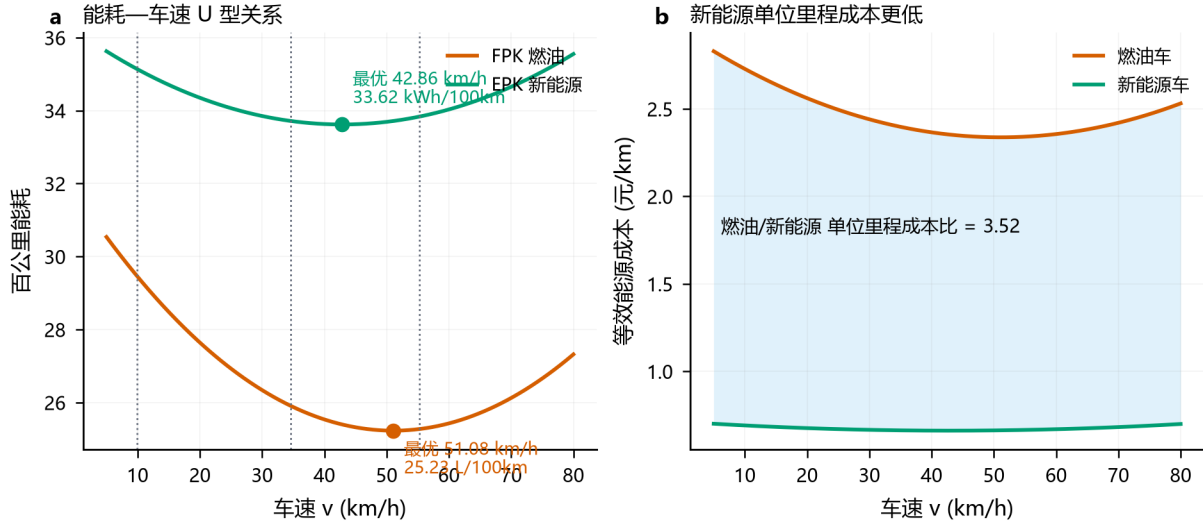


图 7 能耗与成本的车速依赖。(a) FPK 与 EPK 的 U 型曲线、极小点 (51.08 与 42.857 km/h) 及三时段工作点；(b) 单位里程等效能源成本，新能源车约为燃油车的 1/3.5。

6.5 求解算法

五阶段矩阵启发式，每一阶段对应前文诊断出的一个成本杠杆：

阶段 A 数据修复；**阶段 B 分层需求分解**：按容量降序开车、以剩余需求最大客户播种、订单级首次适应递减装载，把“必然独占整车”的近满载批次剥离；**阶段 C 拼载插入**：对剩余容量按单位重量边际成本 $\Delta C/\Delta w$ 贪心补位，用真实成本评估而非闭式近似；**阶段 D 自适应大邻域搜索**：6 个破坏算子与 3 个修复算子，权重按 Ropke–Pisinger 的自适应机制更新 [9]，其中相关性移除算子源自 Shaw 的思想 [10]，模拟退火接受；**阶段 E 后优化**：迁移、互换、重排、车型置换、路线消除与精细出发时刻优化。

四个本题专用算子是算法的关键：

- **出发时刻优化 (DTO)**：路径固定时 C 关于 τ^v 是分段可微单变量函数，用粗网格加逐级细化最小化。图 8 给出典型成本景观——最优出场时刻明显避开拥堵时段。
- **车型置换**：按路线里程降序处理，使仅 25 辆的新能源车被指派到里程最高的路线。
- **访问迁移与互换**：跨路线搬移或交换整个客户访问。本实例已启用车辆的载重利用率高达 99.5%（全车队口径为 78.1%），属容量紧问题，大幅破坏后常因装不回既有路线而被迫开新车（每辆 +400 元），故保持装载可行的小步邻域比大邻域更关键。
- **订单迁移**：在同时服务某客户的两条路线间转移单张订单，微调载重分布以腾出整车容量。

拆分配送带来一个必须注意的实现陷阱：同一客户常同时出现在多条路线上，若目标路线已访问该客户，必须并入既有访问而非新插停靠点，否则会覆盖原有订单集合造

成订单丢失。为此我们在每个算子之后执行不变量检查（订单不丢不重、停靠点不重复、订单键与停靠点一致）。图 9 给出收敛过程与多起点稳定性。

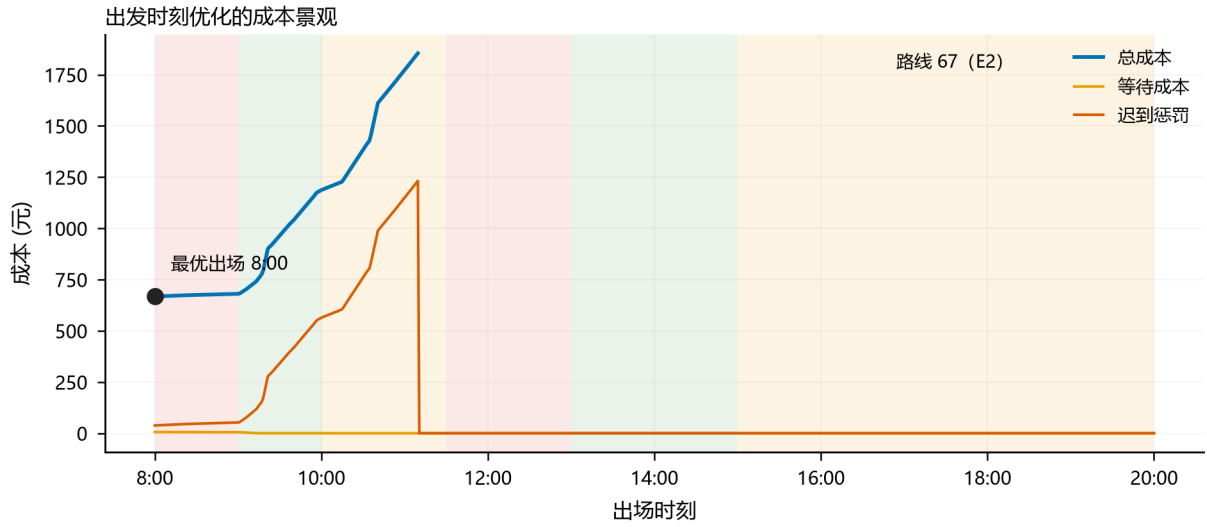


图 8 出发时刻优化的成本景观。总成本关于出场时刻分段可微，等待成本与迟到惩罚此消彼长；最优出场时刻避开拥堵时段（底色）。

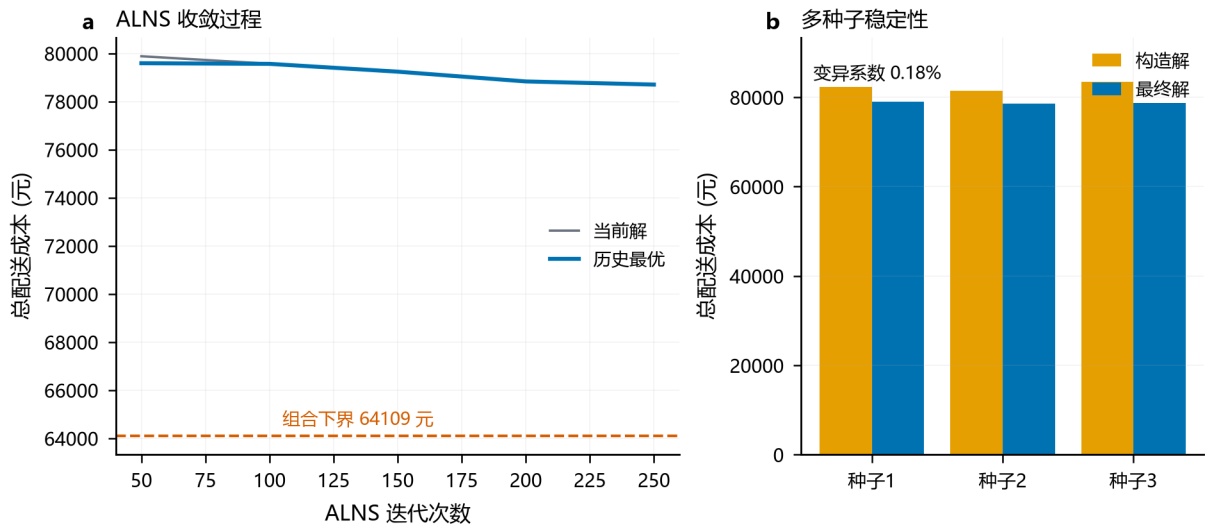


图 9 算法收敛与稳定性。(a) 自适应大邻域搜索的当前解与历史最优，虚线为组合下界；(b) 3 个随机起点的构造解与最终解，成本变异系数 0.18%。

6.6 组合下界模型 M1-界

为客观评价启发式解，我们构造不依赖启发式的组合下界。

(L1) 车辆数下界：解装箱线性松弛并上取整，

$$\underline{n} = \left\lceil \min \left\{ \sum_k n_k : \sum_k n_k Q_k \geq W, \sum_k n_k \Lambda_k \geq U, 0 \leq n_k \leq m_k \right\} \right\rceil = 121. \quad (12)$$

需强调：单客户最少车辆数之和 $\sum_i \nu_i = 149$ 不是车辆数下界（一辆车可服务多个客户），它只是禁止拼载时的车辆数。

(L2) 里程下界。除常规访问度界外，我们推导了一个更紧的径向力矩界：设路线 r 所达最远客户的场站距离为 $\rho_r = \max_{i \in r} d_{0i}$ 、装载量 $q_r \leq Q_{\max}$ 。由三角不等式 $\text{dist}(r) \geq 2\rho_r$ ；而该路线所能覆盖的“重量-半径力矩”不超过 $\sum_{i \in r} g_{ri} d_{0i} \leq q_r \rho_r \leq Q_{\max} \rho_r$ 。全部客户的力矩 $M_W = \sum_i W_i d_{0i}$ 必须被完全覆盖（注意该论证按“卸货量 $\times$ 半径”聚合，故在拆分配送下依然成立），于是

$$\sum_r \text{dist}(r) \geq 2 \sum_r \rho_r \geq \frac{2M_W}{Q_{\max}}. \quad (13)$$

实测 $M_W = 1.2693 \times 10^7 \text{ kg} \cdot \text{km}$ ，径向界 8,462.3 km 远紧于访问度界 1,911.0 km，取 $\underline{D} = 8,462.3 \text{ km}$ 。

(L3) 能耗成本下界：单位里程等效能源成本以 U 型底部、空载为最优（ $\varrho_F = 2.3374$ 、 $\varrho_E = 0.6608 \text{ 元/km}$ ）。新能源车总载重上限 $\Omega_E = 48,750 \text{ kg}$ ，可覆盖力矩不超过 $\Omega_E \rho_{\max}$ ，故燃油车必须覆盖力矩 $\geq M_W - \Omega_E \rho_{\max}$ ，对应最少燃油里程 $\underline{D}_F = 6,034.4 \text{ km}$ ；由 $\varrho_E < \varrho_F$ ，最省分配是让新能源车尽量多跑，得 $\underline{C}^{F+C} = \underline{D}_F \varrho_F + (\underline{D} - \underline{D}_F) \varrho_E = 15,709.3 \text{ 元}$ 。时间窗成本下界取 0。

合计 $\underline{C} = 64,109.35 \text{ 元}$ 。

6.7 求解结果

最优方案总成本 78,615.84 元，启用 124 辆车（仅超车辆数下界 3 辆），完成 214 次访问，总里程 12,140.5 km，油耗 2,850.4 L、电耗 1,144.6 kW·h，碳排放 7,833.4 kg，按时到达率 79.0%，相对组合下界的间隙 22.6%。成本构成见表 2 与图 11。

完整的车辆使用方案、每辆车的行驶路径、每次访问的到达时刻与配送量见附件结果文件 results/q1_routes.csv 与 results/q1_route_cost.csv；路径的空间形态见图 10，到达时刻与时间窗的关系见图 12，各车型的启用与利用率见图 13。

7 问题二：绿色配送区限行政策下的调度

7.1 政策约束的数学表述

政策含两条约束。**(P1) 禁止服务：**燃油车不得在 $[T_a, T_b] = [8:00, 16:00]$ 期间处于区内，即对 $v \in V_F$ 、 $i \in Z$ ，若该车访问 i 则须 $\hat{t}_i^v + s \leq T_a$ 或 $t_i^v \geq T_b$ 。由于最早时间窗左端为 09:09，实际有效约束是燃油车只能在 16:00 后进区。**(P2) 禁止过境：**燃油车在限行时段行驶时路径不得穿越该圆盘。城市货运通行限制对配送成本与排放的实证影响可参见文献 [7]。

表 2 问题一最优方案的成本构成与关键指标

项目	数值	占总成本
启动成本 C^E	49,600.00 元	63.1%
能源成本 C^F	23,568.51 元	36.5%
碳排放成本 C^C	5,091.68 元	
等待成本	167.44 元	0.5%
迟到惩罚	188.21 元	
总配送成本 C	78,615.84 元	100%
启用车辆数	124 辆	下界 121 辆
总行驶里程	12,140.5 km	下界 8,462.3 km
碳排放总量 $\mathcal{E}$	7,833.4 kg CO ₂	—
按时到达率 π	79.0%	—
新能源车承运份额 ζ	16.5%	运力上限 17.0%
组合下界 $\underline{C}$ / 间隙	64,109.35 元 / 22.6%	—

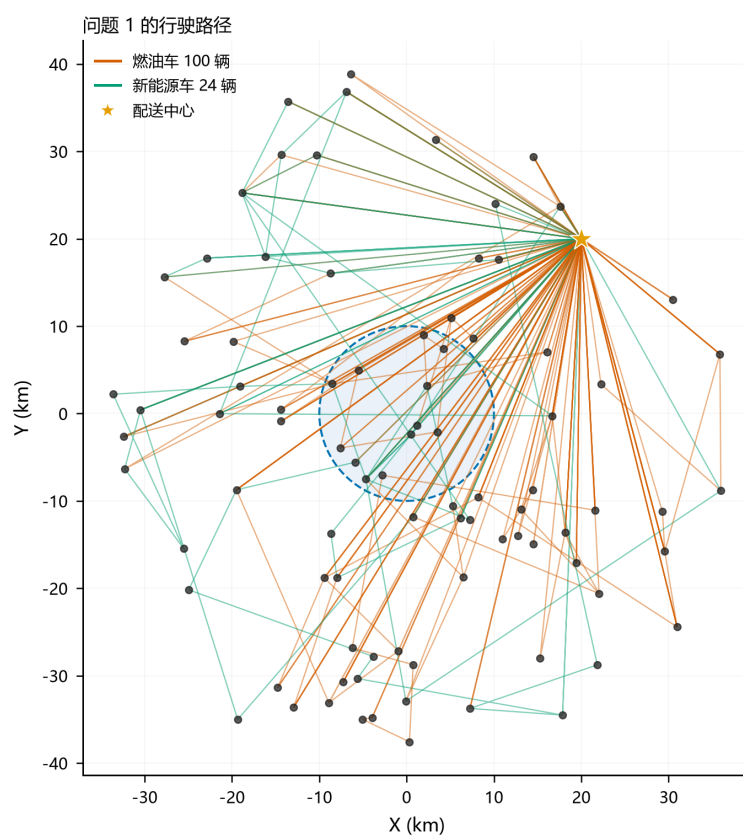


图 10 问题一最优方案的行驶路径,按动力类型着色。平均每条路线仅 1.726 个停靠点 (115/124 条不超过 3 个, 最多 11 个), 反映出“单客户需求超过整车载重”的结构。

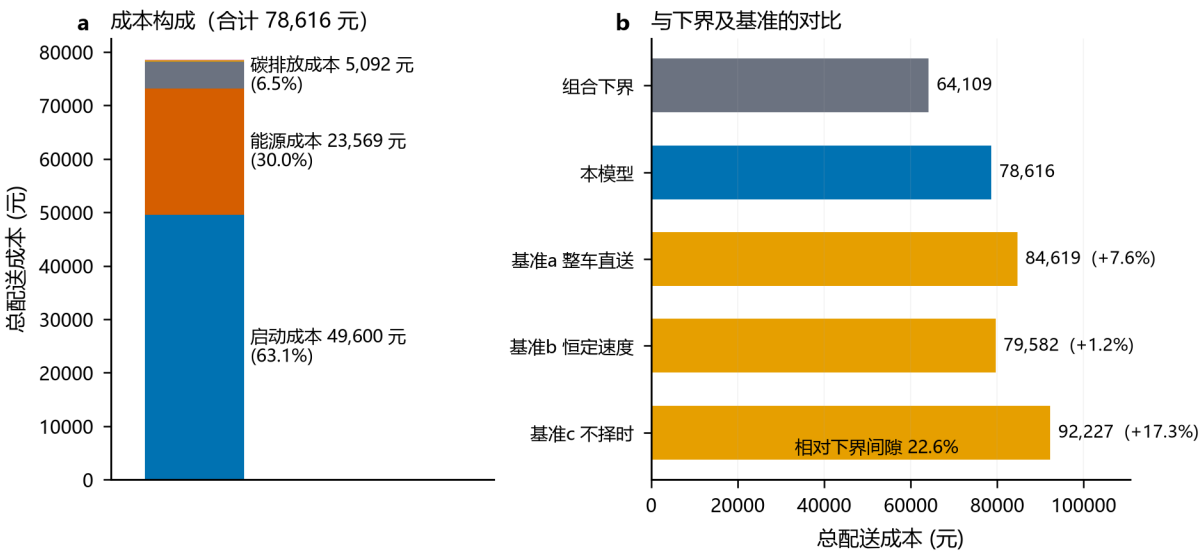


图 11 成本构成与对照。(a) 四项成本的堆叠构成；(b) 与组合下界及三个基准方案的对比，量化了各建模要素的价值。

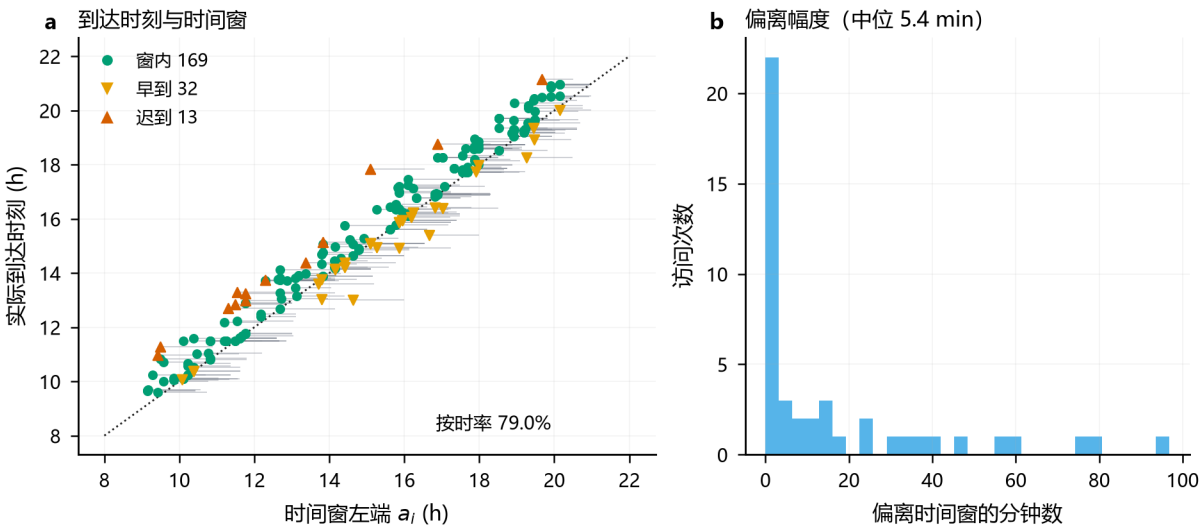


图 12 到达时刻与软时间窗。(a) 每次访问的到达时刻相对时间窗左端的位置；(b) 偏离时间窗的分钟数分布。

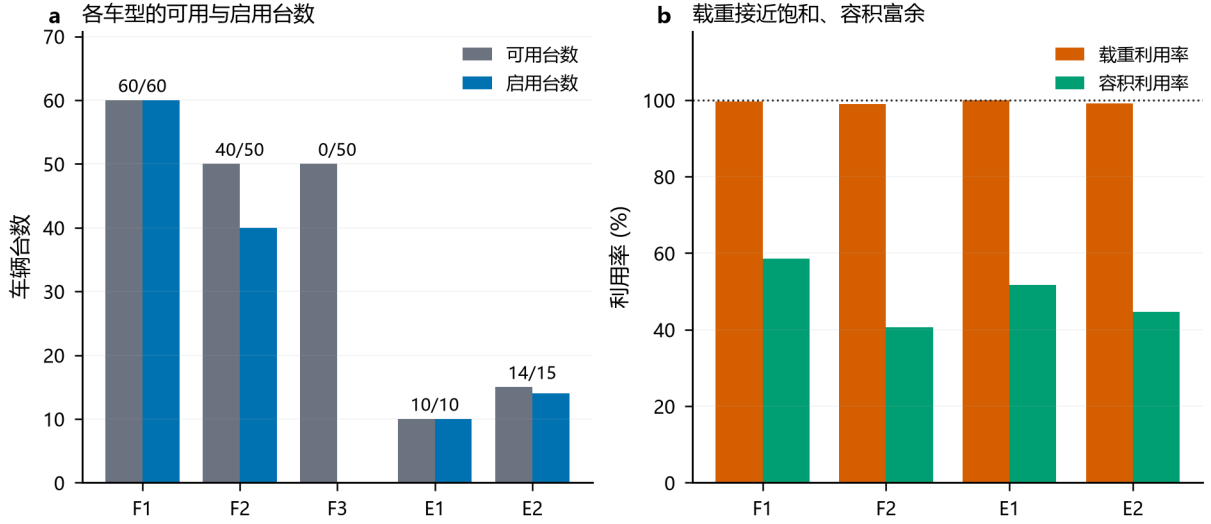


图 13 车辆使用结构。(a) 各车型可用与启用台数；(b) 载重利用率接近饱和而容积利用率富余，验证了“载重是唯一紧约束”的诊断。

7.2 为什么不能对距离乘绕行系数

一个自然但错误的做法是：用直线段判定弧是否穿盘，再令 $d_{ij}^F = d_{ij} \cdot \hat{e}_{ij}/e_{ij}$ 。它与第 5 节的度量闭包修复不相容—— d_{ij} 的取值往往由多跳折线实现，而折线的中间节点可能位于区内。实测在 3,486 个区外节点对中：

- 582 对的闭包最短路折线实际经过区内客户节点；
- 其中 78 对的两端直线段根本不穿盘，直线判定对它们完全不报警。

若采用比例缩放口径，燃油车就能在限行时段沿这 78 条“合法”弧真实驶入绿色配送区而模型毫无察觉——而 (P2) 是全题唯一的政策机制。图 14 直观展示了这一冲突。

7.3 受限量度 D^F 的两步构造

正确做法是在受限网络上重建度量而非修补已有度量。

步骤 1 (几何绕行，作用于原始边)：删除任一端点在区内的边；对两端在区外而直线段穿盘的边，按圆域外最短路放大边长。绕开圆盘 $\mathcal{D}$ 的最短平面路径由两段切线与一段圆弧构成，有闭式解

$$\hat{e}_{ij} = \sqrt{r_i^2 - R^2} + \sqrt{r_j^2 - R^2} + R \left(\angle(p_i, p_j) - \arccos \frac{R}{r_i} - \arccos \frac{R}{r_j} \right)^+, \quad (14)$$

其中 $\angle(p_i, p_j) = \arccos \frac{p_i \cdot p_j}{r_i r_j}$ 。该式已用受约束可见图数值暴力搜索独立校验，最大偏差为 0。

步骤 2 (受限闭包)：在仅保留区外节点的图上重做 Floyd-Warshall，得

$$d_{ij}^F = \min_{\substack{i \rightsquigarrow j \\ \text{中间节点全在区外}}} \sum \tilde{d}^F. \quad (15)$$

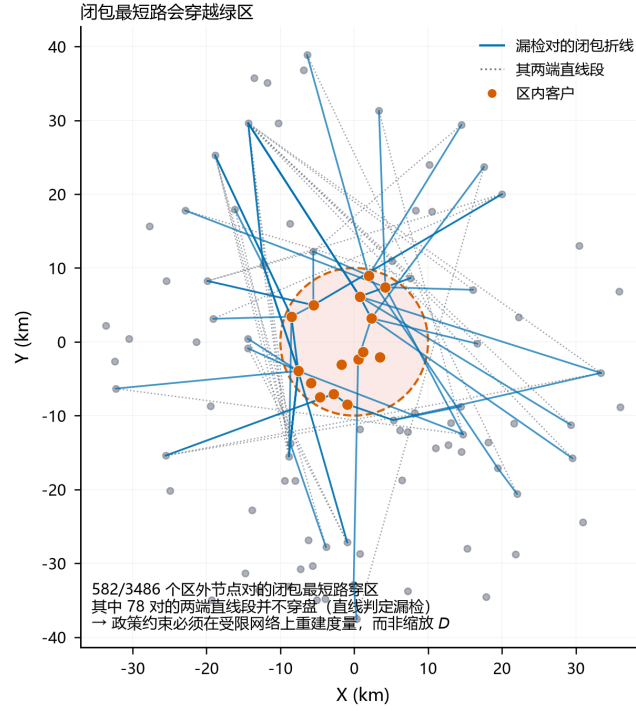


图 14 度量闭包与政策约束的冲突。实线为闭包最短路折线（穿越绿色配送区），点线为其两端直线段（不穿盘，故直线判定漏检）。共 582/3,486 对穿区，其中 78 对被漏检。

如此构造的 D^F 与 D 同为度量，且任意有限最短路都不进入绿色配送区——两条性质均在代码中对全部节点对穷尽校验通过。

实测绕行代价“总体温和、局部剧烈”： d_{ij}^F/d_{ij} 的中位数恰为 1.0000（过半区外节点对能找到不劣的替代路径），均值 1.0186，但最大达 1.4914，且 1,082 对被实际抬高。因此必须逐弧建模而非按平均系数折算。图 15 给出几何构造与放大比分布。

燃油车的弧距离由此成为时变量：只要一条弧的行驶时间区间与限行时段有交，燃油车整段使用 D^F 。这是保守（安全）侧处理，不会产生违规解。

7.4 政策影响与四通道归因

在受限度量下重新求解（并让稀缺的新能源车优先播种到区内客户），结果见表 3。

基线口径的说明：表 3 的“无政策”列并非表 2 报告的 78,615.84 元，而是与政策情形采用同一随机种子、同一迭代预算重解得到的方案（78,954.56 元、124 辆）。这样做是为了让政策增量成为配对比较的结果，从而剥离启发式的种子噪声；两者的差异即反映该噪声量级，不影响增量结论。为便于判读，表中同时给出新能源车的承运份额——若基线本身未用满新能源运力，份额变化就可能来自解质量而非政策效应，需要一并核对。为使“影响”成为可解释的结构性结论而非一个差值，我们把成本增量按四个可加通道分解：

$$\Delta C = \underbrace{\Delta C^E}_{\text{车辆数}} + \underbrace{\Delta C^F}_{\text{过境绕行里程}} + \underbrace{\Delta C^F}_{\text{车队结构改变}} + \underbrace{\Delta C^T}_{\text{时间窗}}, \quad (16)$$

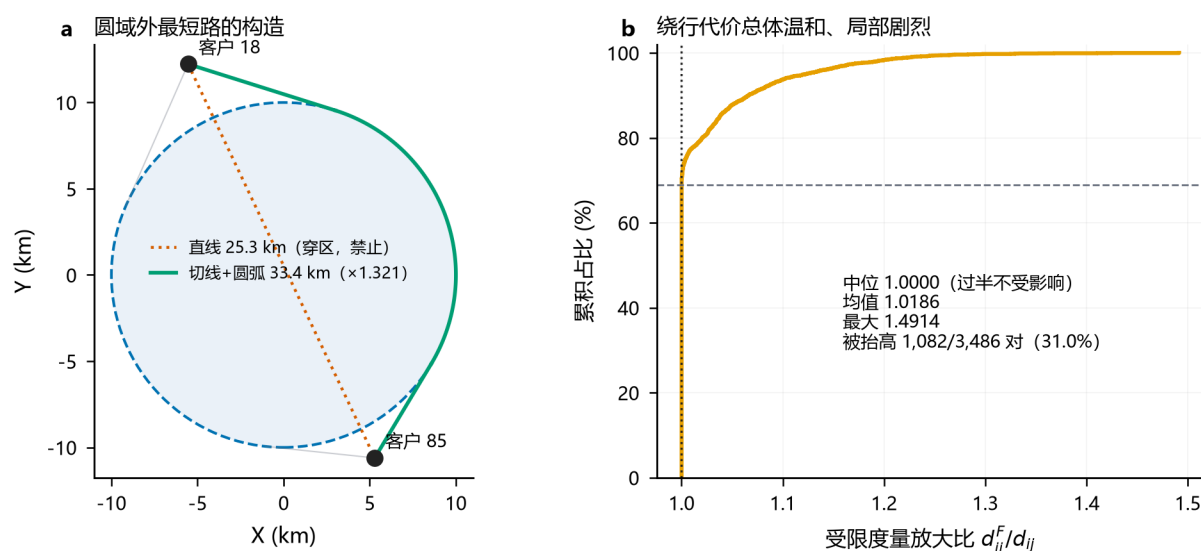


图 15 受限量度的构造与代价。(a) 圆域外最短路由两段切线与一段圆弧构成；(b) 放大比 d_{ij}^F/d_{ij} 的经验分布，中位数为 1.0000 而最大 1.4914。

其中“绕行”通道由同一组政策后路线在无政策距离下重算得到，“结构”通道则是政策后路线（按无政策计价）相对政策前路线的能耗差。

值得强调的是**政策的隐性代价**：区内客户的按时到达率（68.2%）与区外（77.1%）的差异，反映了“燃油车只能在 16:00 后进区”对区内服务质量的挤压。只看总成本的分析会遗漏这一项。口径 A 下仍有 9 次区内访问由燃油车在 16:00 后完成，口径 B 下增至 38 次——这正是新能源运力不足时被迫出现的结构性延后。图 16 与图 17 给出归因瀑布与政策后路径。

7.5 一个值得警惕的政策悖论

表 3 给出一个值得展开的结果：**限行政策下碳排放总量不降反升**（口径 A 为 +4.7%），同时新能源车承运份额由 15.7% 下降到 14.0%（相差 1.7 个百分点）。

机理在于新能源车的稀缺性与其“最佳用途”被政策改变。无政策时，调度器会把仅有的 25 辆新能源车分配给里程最高的路线，因为那里每公里替代掉的燃油最多；限行政策生效后，这些车被优先征调去服务绿色配送区内的客户，而区内客户距市中心不超过 10 km、路线里程普遍偏短。于是同样 25 辆新能源车所替代的燃油里程反而减少，其减排杠杆被削弱；与此同时燃油车还要承担绕行增加的里程。两项叠加，超过了“区内不再有燃油行驶”带来的收益。

这一结果的政策含义是明确的：**在新能源运力受限时，单纯的区域限行可能与减排目标背道而驰**。要让限行真正减排，必须同时扩充新能源运力——这正是第 7.6 小节增购决策模型要回答的问题；口径 B 下碳排放增幅回落到 +1.8%，也侧面印证了运力约束才是关键变量。需要说明的是，该结论建立在“新能源车总载重仅覆盖 17.0% 需求”这一本题特定的车队结构上，不应外推为对低排放区政策的一般性否定。

表 3 限行政策对总成本、车辆使用结构与碳排放的影响

指标	无政策	口径 A ($R = 10 \text{ km}$)	口径 B ($R \approx 17.07 \text{ km}$)
总配送成本 (元)	78,954.56	80,603.87	81,421.78
相对变化	—	+2.1%	+3.1%
启用车辆数 (辆)	124	123	124
总里程 (km)	—	12,101.3	12,473.8
碳排放总量 (kg CO ₂)	7,905.8	8,281.0	8,049.2
碳排放相对变化	—	+4.7%	+1.8%
新能源车承运份额 ζ	15.7%	14.0%	15.7%
按时到达率 (全局)	—	76.2%	71.0%
其中区内	—	68.2%	66.2%
其中区外	—	77.1%	73.3%
成本增量的四通道归因 (元)			
车辆数通道 ΔC^E	—	-400.00	0.00
绕行里程通道	—	52.98	693.74
车队结构通道	—	1,268.72	-162.00
时间窗通道 ΔC^T	—	727.61	1,935.48

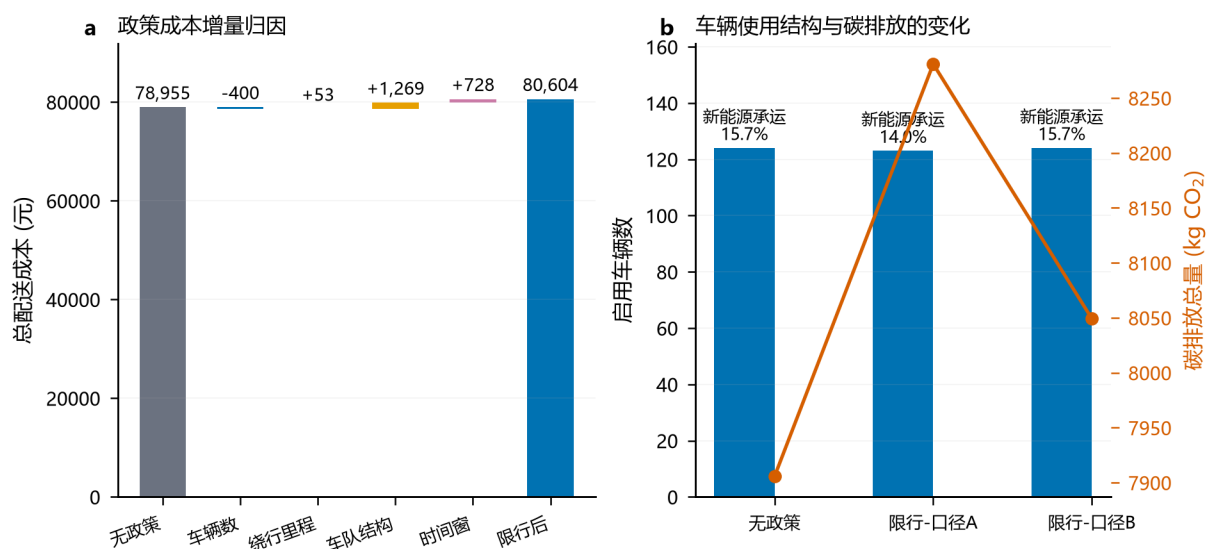


图 16 政策影响。(a) 成本增量的四通道归因瀑布；(b) 三种情形下的启用车辆数、新能源车承运份额与碳排放总量。

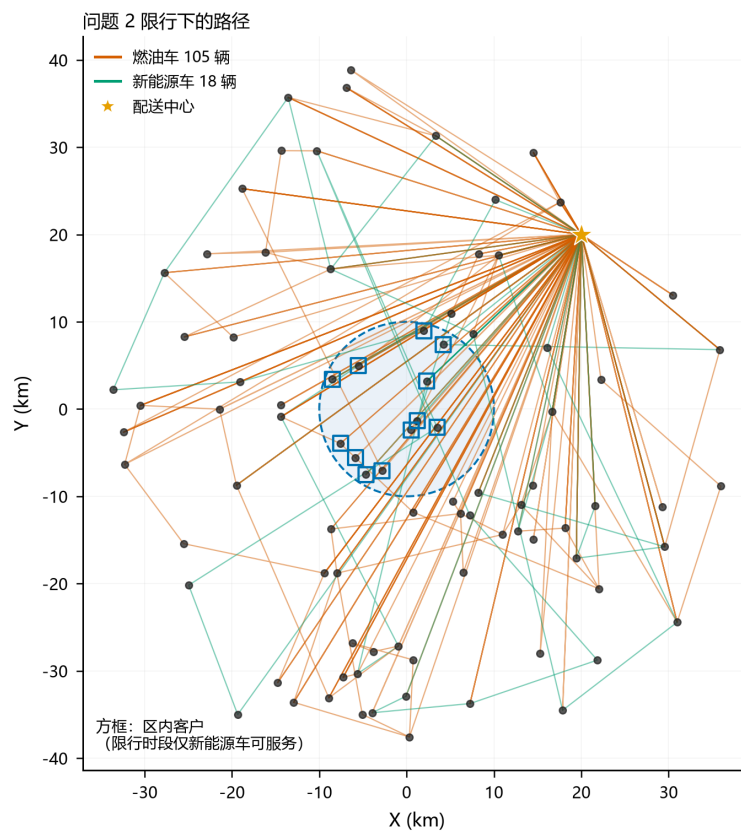


图 17 限行政策下的行驶路径（口径 A）。方框标出区内客户，限行时段仅新能源车可服务；燃油车的区外路径按受限量 D^F 绕行。

7.6 政策强度弹性与车队适配决策

把半径 R 作为政策强度参数扫描，得到成本与碳排放的弹性曲线（图 18）。关键发现是一个**临界现象**：当区内需求份额超过新能源车队载重上限 17.0% 时，新能源车已无法独立承担区内配送，必然出现“部分区内客户只能在 16:00 后由燃油车服务”的结构性拥塞，成本与服务质量同时恶化。

口径提示：为在合理时间内覆盖 6 个半径点，弹性扫描采用了缩减的迭代预算，其成本绝对值系统性高于表 3（后者用完整预算求解）。因此该图仅用于观察趋势与定位临界点，纵轴绝对值不应与表 3 直接比较；相邻半径之间的小幅非单调属启发式噪声，不应从中读出经济规律。

作为长期应对，我们建立车队结构适配模型（M2-配）：设新增 1 辆新能源车的日均摊销成本为 α 元/日，则最优增购量

$$\Delta^{E*} = \arg \min_{\Delta^E} [C^*(\Delta^E) + \alpha \Delta^E]. \quad (17)$$

由于 α 无题给数据，我们不给单点结论，而是报告 $\Delta^{E*}(\alpha)$ 的完整曲线（图 19）；在按整车购置价 25–40 万元、5 年 300 工作日/年折旧得到的合理区间 $\alpha \in [167, 267]$ 元/日内，最优增购量为 40–40 辆。

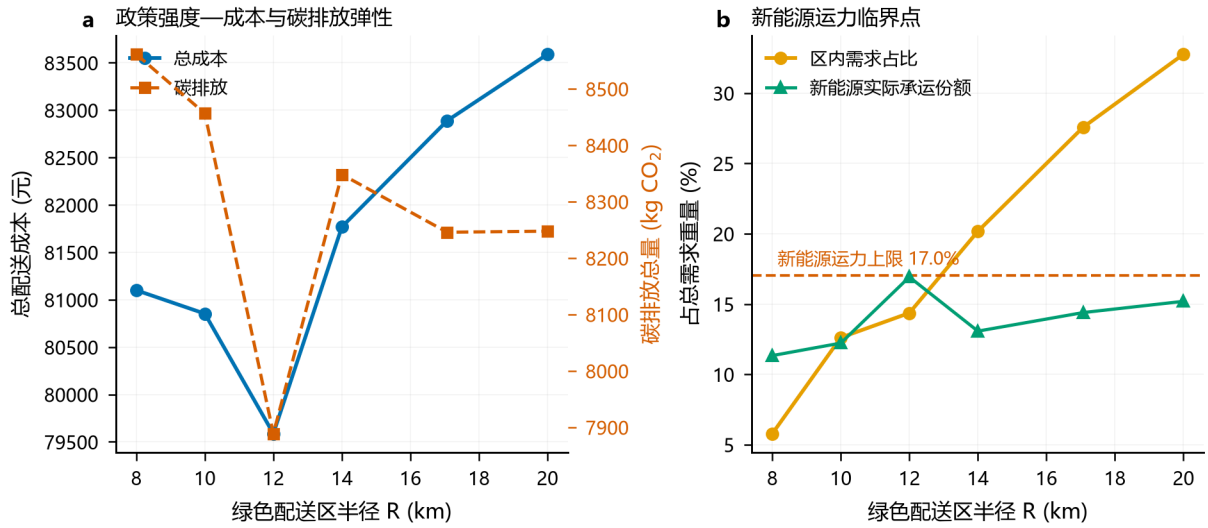


图 18 政策强度弹性。(a) 总成本与碳排放随绿区半径的变化；(b) 区内需求份额与新能源车实际承运份额，虚线为新能源运力上限，交点即临界点。

8 问题三：动态事件下的实时调度策略

8.1 信息结构与承诺点

动态车辆路径问题的框架与分类可参见综述 [12]。定义决策时点序列 $t^{(\ell)}$ 。在 $t^{(\ell)}$ 时刻，**承诺点**是已完成服务、或车辆已驶离上一节点正在前往的访问——它们不可更改；

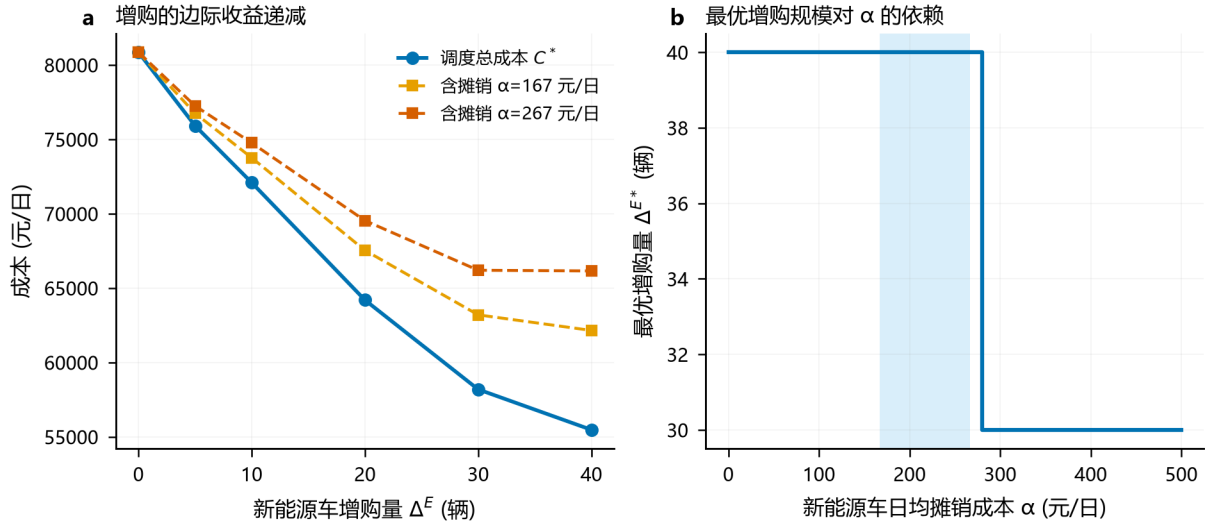


图 19 新能源车增购决策。(a) 调度成本随增购量的边际收益递减，叠加两档摊销成本后出现内点最优；(b) 最优增购量对摊销成本 α 的依赖，阴影为合理区间。

可调集合 $\mathcal{A}^{(\ell)}$ 是尚未开始且车辆尚未驶向的访问，以及未出场车辆的全部决策。图 20 给出这一划分。

8.2 事件驱动滚动时域重优化

触发条件取并集：事件到达；固定周期 $\Delta\tau = 0.5$ h 的定期复核；某车实际到达偏离计划超过 $\epsilon = 0.25$ h。在每个决策时点求解受限重优化子问题：冻结承诺点，仅对 $\mathcal{A}^{(\ell)}$ 重新优化，目标为

$$\min C(\mathcal{A}^{(\ell)}) + \beta \cdot \text{Dist}(\text{新方案}, \text{原方案}), \quad (18)$$

其中 Dist 以“被改变的访问次数 + 被改变的车辆数”度量。加入扰动惩罚项的理由是运营现实：司机已收到任务单，频繁大改带来沟通与执行成本。 β 是可调策略参数， $\beta = 0$ 对应纯成本最优、允许大改， $\beta \rightarrow \infty$ 对应尽量不动原方案。

四类事件各配响应算子：订单取消从承运车辆移除订单，未承诺且已空的访问被摘除，释放的载重进入可用余量池；新增订单优先尝试零启动成本插入（已出场且有余量的车辆），失败再用未出场车辆，最后才启用新车，插入代价用含下游连锁影响的真实 ΔC ；地址变更为移除加重插入，新地址若落入绿区且承运车为燃油车则触发政策检查；时间窗调整先做出发时刻优化与局部修复，仍严重违反则升级为移除重插。此外设降级保障：任何重优化若在预算内未找到不劣于“原方案加最小可行修补”的解，即回退到最小修补，保证动态策略永不劣化。

8.3 情景设计与策略对比

以问题一模型求得的事前计划（总成本 78,938.86 元、124 辆车）为基线，我们设计 4 个单事件情景与 1 个复合情景，并对比四种策略：S0 硬执行（忽略事件）、S1 局部修

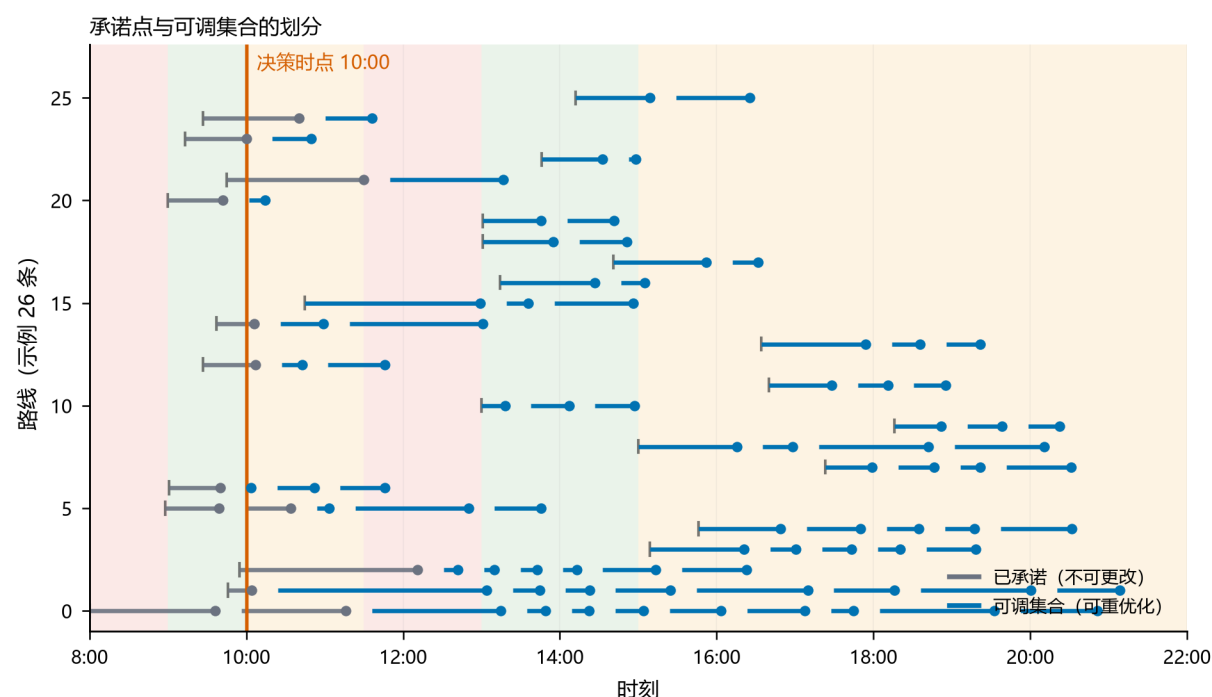


图 20 滚动时域重优化的承诺点划分。灰色段为已承诺（不可更改）部分，彩色段为可重优化的可调集合；竖线为决策时点。

补、S2 本文的滚动重优化、S3 离线全局重优化参照。

S3 的定义需要说明。我们不把它实现为“从零冷启动重解”：本题已启用车辆的载重利用率已达 99.5%，冷启动会丢弃既有装载结构而常常装不下，那衡量的是构造启发式的冷启动能力，而非“拥有完整信息能带来多少收益”这一我们真正关心的量。因此 S3 定义为：拥有事件完整信息、**放开全部承诺约束**（所有已排定访问均可改动）、不施加扰动惩罚、且计算预算远大于实时策略（60 s 对 5 s），给出“若一切都还来得及改”的理想上界。

未能当日配送的订单按“次日专车补送”计价（启动成本 + 往返能源 + 24 h 迟到惩罚）。

情景参数全部由附件数据派生，不引入外部合成数据：地址变更的新地址取自 10 个零需求客户（它们在坐标表与距离矩阵中均有真实数据），新增订单的重量与体积取自附件订单的经验分布。结果见表 4 与图 21。

结果给出两条结论。

第一，**实时重调度的价值很大**：相对硬执行 S0，本文策略 S2 五情景平均节省 17.3% 的成本，差距主要来自新增订单——硬执行下它们只能次日补送，每单都要付出一次专车往返加 24 h 延误的代价。需要说明的是，S2 并非在所有情景下都优于 S0（例外情景：E3）。其中地址变更情景的可比性需特别注意：S0 按定义并未服务变更后的地址，其成本未包含违约代价，与 S1/S2 并非同一口径，表 4 的表注对此有说明。

第二，S2 与离线参照 S3 之间仍有 +1.6% 的差距，而这个差距主要不是算法不足，是**承诺约束本身**。情景事件发生在 10:00–12:00，此时绝大多数车辆已于 8:00–9:00

表 4 四种动态调度策略在五个情景上的平均表现

指标	S0 硬执行	S1 局部修补	S2 滚动重优化	S3 离线参照
总成本（元）	99,495.54	82,322.38	82,298.98	80,976.68
按时到达率	73.5%	70.3%	70.3%	71.0%
被改动访问数	0.0	5.8	5.8	8.2
单次重优化耗时（s）	0.03	3.74	10.27	60.30

出场并在途，其前段访问按定义不可更改；S3 更优正是因为它被允许推翻这些已承诺的决策。因此该差距量化的是**柔性因承诺而损失的代价**，它给运营的启示不是把算法调得更强，而是推迟承诺——例如延后部分车辆的出场时刻、或对高不确定性客户保留柔性，这与下一节的运力预留在方向上一致。S2 的单次重优化耗时仅 10.27 s 量级，远低于 S3 的 60.30 s，满足实时调度的时效要求。

第三，必须如实指出：**S2 相对局部修补 S1 的平均增量仅 0.028%**。原因与第二条同源——事件集中发生于 10:00–12:00，可调集合已被承诺点大幅压缩，局部修补的可行解空间与滚动重优化几乎重合。因此在本实例中，S2 的价值不体现在单点成本上，而体现在两处：一是对**事件类型不敏感**——在时间窗调整情景 E4 中，S1 与硬执行完全相同，而 S2 仍取得 0.09% 的改进；二是它自带降级保障，按构造永不劣于 S1，而 S1 本身不具备这一性质。若事件在更早时刻发生（可调集合更大），S2 的优势会随之扩大。

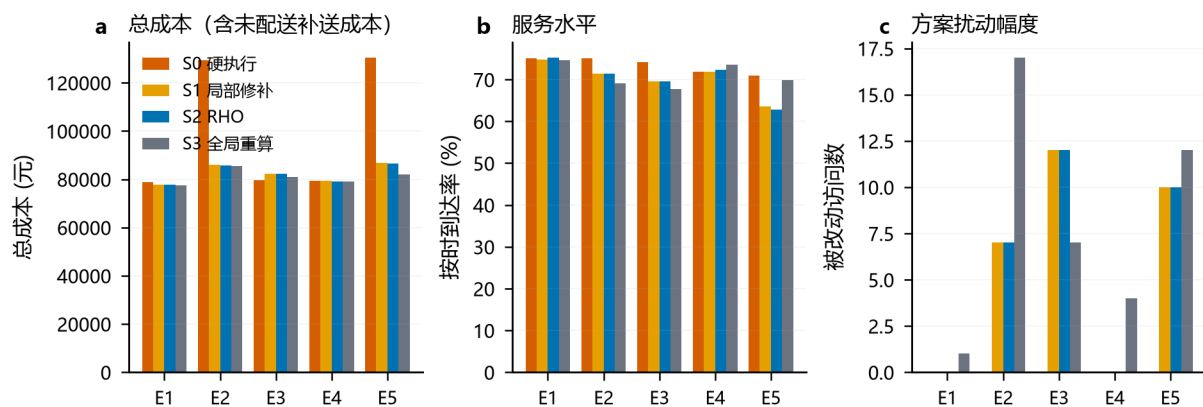


图 21 五个情景下四种策略的对比。(a) 总成本（含未配送订单的补送成本）；(b) 按时到达率；(c) 方案扰动幅度。

8.4 成本—稳定性权衡前沿

扫描扰动惩罚权重 β ，得到成本与方案扰动的非支配前沿（图 22）。这是本问最具操作价值的可交付结论：调度员可据此按当日运营容忍度选择 β ，而不是在“完全不动”与“全部重排”之间二选一。

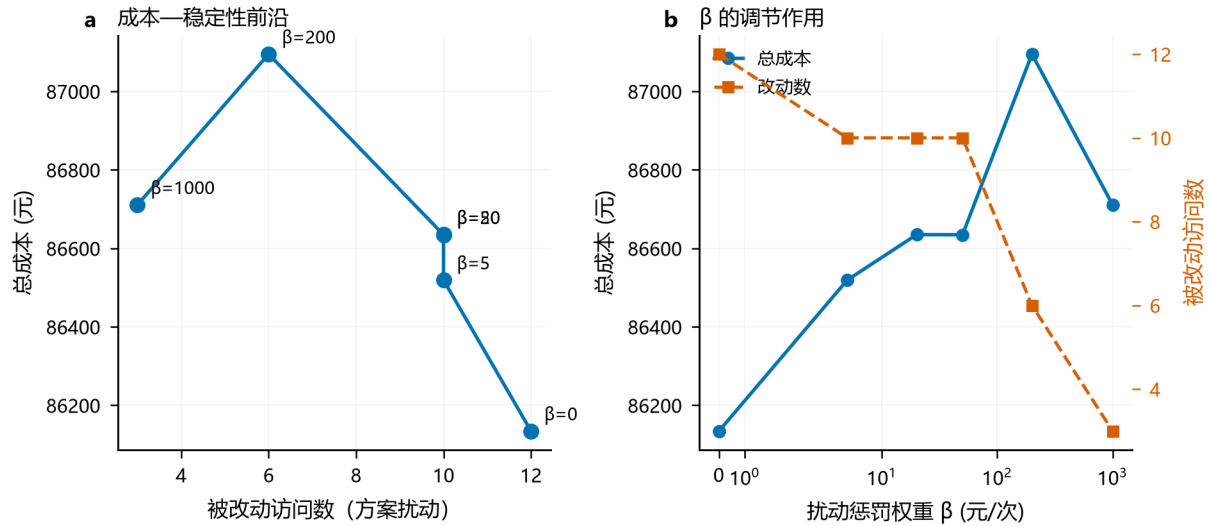


图 22 成本—稳定性权衡前沿（复合情景 E5）。(a) 前沿曲线，标注对应的 β ；(b) 成本与改动数随 β 的变化。

8.5 面向随机新增订单的运力预留

滚动重优化是被动响应。若新增订单存在到达规律，应主动预留。这里有一个容易走偏的地方：本题车队本身有富余（185 辆中仅用 124 辆），预留车辆几乎不产生成本也不产生收益；真正的权衡在于预留载重余量——让出场车辆只装 $(1 - \psi)Q$ ，使新增订单能被就地吸纳而无需加派车辆。于是

$$\min_{\psi \geq 0} \Psi(\psi) = \underbrace{C_{\text{base}}(\psi)}_{\text{预留抬高的基础成本}} + \underbrace{\mathbb{E}[\mathcal{R}(\tilde{N}, \psi)]}_{\text{吸纳新增订单的追偿成本}}, \quad (19)$$

其中 $\tilde{N} \sim \text{Poisson}(\Lambda)$ 。 Λ 无题给数据，故按新增订单占原订单量 2%/5%/10% 三档情景给出结果（图 23）， Ψ 呈典型的凸“报童”形状。以中间档（新增 5%）为例，最优预留比例为 0%——即让出场车辆留出约 0% 的载重余量最为经济。

9 模型检验与灵敏度分析

9.1 可行性与一致性检验

我们用独立校验器（不复用求解器内部函数）重新读取解并逐条核验约束 (3)–(7)：订单覆盖恰为 2171 张、无超重超容、各车型启用不超可用台数、时序自洽、全部车辆在 24:00 前返场，违反数为 0。行程时间的 FIFO 性质与分段里程守恒亦通过数值检验（见前文）。

9.2 与基准方案的对照

表 5 把各建模要素的价值量化为成本差额。

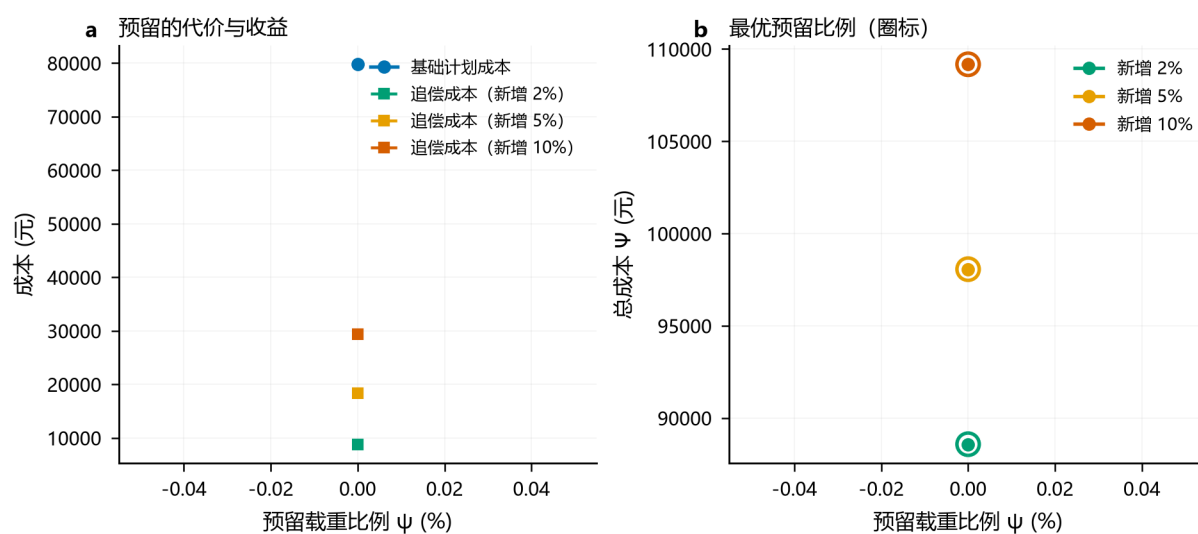


图 23 载重预留模型。(a) 预留比例抬高基础成本、降低追偿成本；(b) 三档到达强度下的总成本曲线与最优预留比例（圈标）。

表 5 与组合下界及三个基准方案的对照

方案	总成本（元）	相对本模型	说明
组合下界 $\underline{C}$	64,109.35	-22.6%	不依赖启发式的客观下界
本模型	78,615.84	—	124 辆
基准 (a) 整车直送独占	84,619.35	+7.6%	禁止跨客户拼载，需 149 辆；其中 3000 kg 车型需 89 辆 > 可用 70 辆，现有车队下不可行
基准 (b) 恒定速度建模	79,581.51	+1.2%	按恒速求解、按真实时变速度结算
基准 (c) 不做择时优化	92,227.31	+17.3%	沿用最优路径但全部 8:00 出场

基准 (a) 的结果本身就是一个结论：拆分配送与跨客户拼载在本题不是优化技巧，而是可行性前提。基准 (b)(c) 的对比还给出一个值得注意的结论：时变速度建模的价值并非直接体现在“按恒速排出的路径有多差”上（基准 (b) 仅高出 1.2%），而是体现在它使择时成为可优化的决策——一旦放弃择时（基准 (c)），成本立刻上升 17.3%。换言之，时变速度模型的主要回报要通过出发时刻优化算子才能兑现，二者是一体的。

9.3 车速随机性下的鲁棒性

把已定方案在随机速度下重放 500 次（各时段按截断正态逐 15 min 子区间独立抽样），得成本均值 78,654.95 元（确定性解为 78,615.84 元），5%–95% 分位区间 78,582.32–78,745.39 元；按时到达率均值 70.9%，5% 分位 64.0%。图 24 给出分布。这说明方案对速度波动具有可接受的稳健性，且确定性解不是“侥幸最优”。

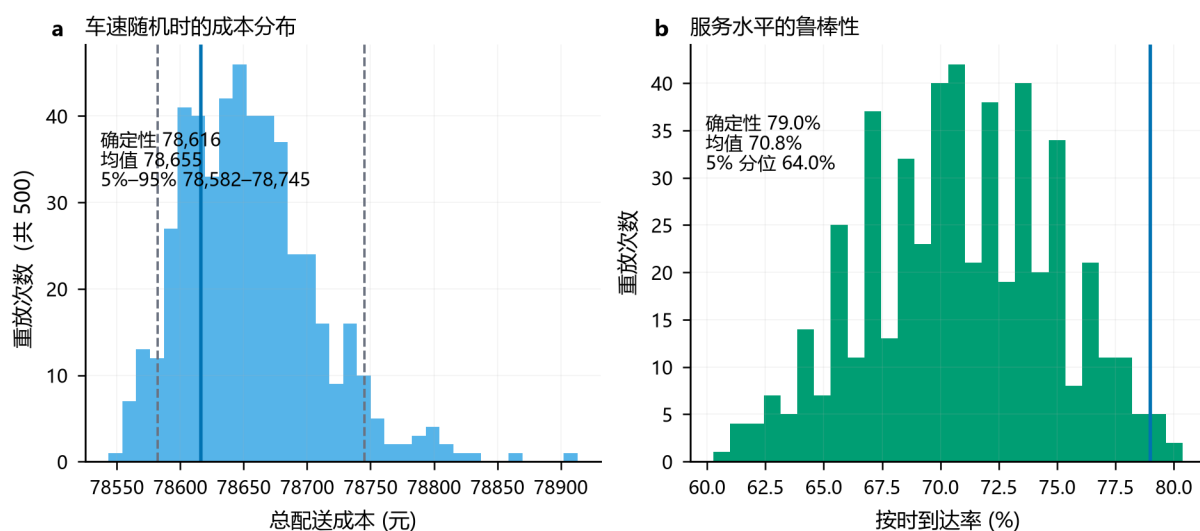


图 24 蒙特卡洛鲁棒性（500 次重放）。(a) 总成本分布，实线为确定性解、虚线为 5%/95% 分位；(b) 按时到达率分布。

9.4 灵敏度分析

我们只对真正影响结论的参数做扰动，共 5 组、21 个配置，结果落盘于 `results/sensitivity.csv`，汇总见表 6。选取依据是各参数对总成本的边际影响量级，而非罗列所有可调参数。

其中 S-A 的临界碳价是本文最具政策含义的量化结果：它把“限行是否值得”从定性争论变成一个可校准的阈值问题——在当前碳价水平下，仅靠限行并不经济，须与新能源运力扩充（见第 7.6 小节）配合；而当碳价上升到 1.78 元/kg 以上时，限行本身即具备经济正当性。

此外，绿区半径与新能源车台数的影响分别见图 18 与图 19。假设 (A4) 的单车单行程限制会高估启动成本；若允许回场重装，由 S-B 可推知启动成本项存在显著压缩空

表 6 灵敏度分析汇总（基准解为无政策情形）

组别	扰动范围	结论
S-A 碳排放单价 p^c	0 ~ 20 元/kg	存在临界碳价 1.78 元/kg ：低于它，限行政策净增成本（题给 $p^c = 0.65$ 时为 349.15 元）；高于它，政策转为净收益（ $p^c = 5$ 时为 -997.01 元）。该阈值约为题给碳价的 2.7 倍。
S-B 车辆启动成本 c^E	200 ~ 800 元/辆	影响最大：成本随之变化 -30.6%~+61.2%，印证启动成本是第一大杠杆，也印证了压低车辆数的建模取向。
S-C 时间窗惩罚 c^W/c^L	半量 ~ 四倍	影响很小（最大 0.9%）。时间窗成本仅占总成本 0.5%，即使大幅加罚也不改变方案结构。
S-D 速度口径	有效速度 vs 均值速度	差异仅 0.03%，说明假设 (A8) 的取法不影响结论方向。
S-E 缺失值插补	中位密度 / 按 0 / 95% 分位	差异不超过 0.55%，界定了 (A3) 数据修复的影响上界。

间，但这会使题面给出的车队规模约束失去约束力，故作为拓展而非基准。

9.5 算法稳定性

3 个随机起点的最优成本为 78,615.84 元、均值 78,782.97 元、标准差 138.32 元，变异系数 0.18%，远低于 2% 的阈值，说明结果对随机种子不敏感。

10 模型评价与推广

10.1 模型优点

1. **数据修复而非数据将就**。我们识别并修复了三个足以颠覆结论的数据问题：三角不等式的大规模违反、缺失值、以及题面与坐标在绿区口径上的不自洽。特别是距离矩阵的度量闭包修复，直接阻断了优化算法“套利数据缺陷”的路径。
2. **政策约束与数据修复的相容性被显式处理**。我们指出并解决了一个隐蔽而致命的矛盾：闭包最短路会穿越限行区，使“乘绕行系数”的常见做法失效。“先几何、后闭包”的受限度量 D^F 兼顾两者，且其度量性与区内不可达性均经穷尽校验。
3. **解质量有客观依据**。自行推导的径向力矩下界把里程界从 1,911.0 km 提升到 8,462.3 km，使 22.6% 的间隙是有意义的，而非与一个平凡下界比较。
4. **算法针对问题结构而非套用模板**。诊断出“载重紧、容积松、单客户超载、启动成本主导”后，我们把计算预算投向车型指派、载重再分配与出发时刻，而非经典路径算

子；并给出了容量紧问题下“小步邻域优于大邻域”的实证理由。

5. **影响可解释**。问题二的四通道归因与问题三的成本-稳定性前沿，把“一个差值”变成可供决策的结构性结论。

10.2 模型不足与改进方向

1. 单车单行程假设 (A4) 高估启动成本。引入多行程（回场重装）会显著降低成本，但需要重新界定车队规模约束的含义。
2. 启发式与下界仍有 22.6% 的间隙，其中相当部分来自下界的松弛而非解的次优（车辆数已仅超下界 3 辆）。若要收紧，需引入集合划分模型的列生成下界。
3. 过境判定依赖坐标几何而非真实路段几何。附件未提供路段线形，我们以“先几何、后闭包”的最少假设处理，该口径的量化对照留待后续工作。
4. 新能源车的续航与补电未建模（假设 A15）。若考虑充电，问题将变为带部分充电的电动车辆路径问题。
5. 问题三的事件到达强度为情景假设。实际部署时应由历史数据估计 λ 与订单量分布。

10.3 推广

本文框架可直接推广到三类场景：一是**其他形态的低排放区**——只需把式 (14) 的圆域替换为多边形，受限闭包的两步构造不变；二是**分时电价与分时限行的联合优化**——出发时刻优化算子天然支持任何分段时变的成本剖面；三是**冷链与时效件配送**——把时间窗惩罚换成货损函数即可，FIFO 行程时间模型与径向力矩下界均不依赖惩罚的具体形式。

参考文献

- [1] 曹庆奎, 杨凯文, 任向阳, 赵丽飞. 基于交通流的多模糊时间窗车辆路径优化 [J]. 运筹与管理, 2018, 27(8): 20–26.
- [2] Ichoua S, Gendreau M, Potvin J-Y. Vehicle dispatching with time-dependent travel times[J]. European Journal of Operational Research, 2003, 144(2): 379–396.
- [3] Gendreau M, Ghiani G, Guerriero E. Time-dependent routing problems: A review[J]. Computers & Operations Research, 2015, 64: 189–197.
- [4] Bektaş T, Laporte G. The pollution-routing problem[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2011, 45(8): 1232–1250.

- [5] Demir E, Bektaş T, Laporte G. A comparative analysis of several vehicle emission models for road freight transportation[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2011, 16(5): 347–357.
- [6] Koç Ç, Bektaş T, Jabali O, Laporte G. The fleet size and mix pollution-routing problem[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2014, 70: 239–254.
- [7] Quak H J, de Koster M B M. Delivering goods in urban areas: How to deal with urban policy restrictions and the environment[J]. *Transportation Science*, 2009, 43(2): 211–227.
- [8] Archetti C, Speranza M G, Hertz A. A tabu search algorithm for the split delivery vehicle routing problem[J]. *Transportation Science*, 2006, 40(1): 64–73.
- [9] Ropke S, Pisinger D. An adaptive large neighborhood search heuristic for the pickup and delivery problem with time windows[J]. *Transportation Science*, 2006, 40(4): 455–472.
- [10] Shaw P. Using constraint programming and local search methods to solve vehicle routing problems[C]. *Principles and Practice of Constraint Programming — CP98*, LNCS 1520. Berlin: Springer, 1998: 417–431.
- [11] Schneider M, Stenger A, Goeke D. The electric vehicle-routing problem with time windows and recharging stations[J]. *Transportation Science*, 2014, 48(4): 500–520.
- [12] Pillac V, Gendreau M, Guéret C, Medaglia A L. A review of dynamic vehicle routing problems[J]. *European Journal of Operational Research*, 2013, 225(1): 1–11.

AI 工具使用声明 本参赛队在完成本论文的过程中使用了 AI 工具，按《参赛注意事项》第 9 条的格式列示如下：

[A1] Claude (Opus 5), Anthropic, 2026 年 7 月。用于代码实现的辅助编写与调试、文字表述的润色，以及对模型与结果的独立复核。全部模型设定、数据处理口径、算法设计与结论判断由参赛队自行确定并逐项验证；论文中的所有数值均由本队代码实际运行产生（复现方式见附录）。

A 附录：程序与结果文件清单

全部计算由 Python 3.14 实现，采用 uv 管理环境，唯一复现命令为 `uv run python code/run_all.py`（从项目根目录执行）。随机种子、输入文件 SHA-256、依赖版本与关键参数记录于 `results/复现清单.json`。

主要结果文件：

表 7 程序文件与职责

文件	职责
<code>code/gl_core.py</code>	数据装载与插补、度量闭包、FIFO 时变行程时间、能耗与成本核算、独立可行性校验器、组合下界、受限度量 D^F
<code>code/gl_solver.py</code>	分层需求分解、拼载插入、自适应大邻域搜索与专用算子、后优化
<code>code/gl_dynamic.py</code>	承诺点计算、四类事件算子、受约束重优化
<code>code/run_q1.py</code>	问题一求解、三个基准、蒙特卡洛鲁棒性
<code>code/run_q2.py</code>	问题二求解、四通道归因、半径弹性、增购决策
<code>code/run_q3.py</code>	问题三情景仿真、四策略对比、 β 前沿、载重预留
<code>code/make_figures.py</code>	三类图表生成（原始数据图/过程图/结果图）
<code>code/make_paper_numbers.py</code>	把运行结果导出为论文数值宏，保证论文与代码一致

- `q1_routes.csv`——每次访问的到达时刻、服务开始时刻、配送量、载重与弧能耗；
- `q1_route_cost.csv`——每辆车的路径、装载、里程与四项成本；
- `q1_vehicle_usage.csv`、`q1_seed_runs.csv`；
- `q1_baselines.csv`、`q1_monte_carlo.csv`；
- `q2_policy_impact.csv`、`q2_radius_elasticity.csv`、`q2_ev_procurement.csv`；
- `q3_strategy_compare.csv`、`q3_beta_frontier.csv`、`q3_reservation.csv`；
- 三份汇总 `q1_summary.json`、`q2_summary.json`、`q3_summary.json`；
- 独立成本复算结果 `v2_independent_cost_check.json`。

完整源程序、原始数据、运行结果与 LaTeX 源文件均置于独立支撑材料中；源码不再逐行嵌入作品 PDF，以保证正文篇幅适合评审阅读。