文章编号：1003-1421(2026)04-0011-15
引用格式：张弘锴，杨亚茹，高香莹，等.天气条件变化下考虑顾客异质性的低空物流供应链博弈[J].铁道运输与经济，2026，48(4)：11-25.
ZHANG Hongkai，YANG Yaru，GAO Xiangying，et al. Low-Altitude Logistics Supply Chain Game Considering Customer Heterogeneity under Changing Weather Conditions[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(4)：11-25.

天气条件变化下考虑顾客异质性的低空物流供应链博弈

张弘锴[1,2]，杨亚茹[1,2]，高香莹[1,2]，李永飞[3]

(1.广东理工学院 智能制造学院，广东 肇庆 526100；2.广东理工学院 肇庆市先进制造技术与装备重点实验室，广东 肇庆 526100；3.西安邮电大学 现代邮政学院，陕西 西安 710061)

摘 要：针对天气变化与顾客异质性共同作用下的低空物流供应链运作问题，以制造商与无人机运输商组成的二级供应链为研究对象，设计了长期与短期2类天气机制并引入顾客异质性，对比分析了集中决策、Stackelberg博弈与Nash博弈3种情形下的模型均衡解并进行数值分析。研究表明：集中决策在长期天气环境下能够实现最高的服务质量和收益水平，但对短期天气扰动反而最为敏感，Nash博弈的服务质量与收益最低，但稳定性较强，Stackelberg博弈介于两者之间；顾客异质性能够显著调节供应链对天气变化的响应，高异质性市场在天气改善时供应链的收益水平提升明显，但在恶劣天气下承受的冲击也更大，而低异质性市场对天气变化的响应则相对平缓；供应链各方投入呈现非对称性，极端恶劣天气下运输商不会进行投入，而制造商由于直接需求驱动仍能保持一定的投入水平。高异质性情况下双方的投入努力并不总是优于低异质性的，这与高敏感度顾客在市场中所占的比例有关。研究为低空物流供应链在天气变化环境下的高效运行与风险管理提供理论支撑。

关键词：低空物流；随机微分博弈；供应链决策；顾客异质性；天气变化
中图分类号：U294.1；V279.3 **文献标识码**：A **DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250921001

Low-Altitude Logistics Supply Chain Game Considering Customer Heterogeneity under Changing Weather Conditions

ZHANG Hongkai[1,2]，YANG Yaru[1,2]，GAO Xiangying[1,2]，LI Yongfei[3]

(1. School of Intelligent Manufacturing, Guangdong Technology College, Zhaoqing 526100, Guangdong, China; 2. Zhaoqing Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology and Equipment, Guangdong Technology College, Zhaoqing 526100, Guangdong, China; 3. School of Modern Post, Xi'an University of Posts & Telecommunications, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract: To address the operation problem of a low-altitude logistics supply chain under the joint effects of weather changes and customer heterogeneity, a two-tier supply chain composed of a manufacturer and a drone transport provider was taken as the research object. Two types of weather mechanisms, long-term and short-term, were designed, and customer heterogeneity was introduced. The model equilibrium solutions under three scenarios of centralized decision-making, Stackelberg game, and Nash game were

收稿日期：2025-09-21 **修订日期**：2026-03-06
通信作者：李永飞(1977—)，男，河南临颍人，西安邮电大学现代邮政学院教授。
基金项目：陕西省社会科学基金项目(2024R070)；广东理工学院质量工程项目(JXGG2025017，YLZY202502)

comparatively analyzed, and a numerical analysis was conducted. The results show that centralized decision-making achieves the highest service quality and profit levels under long-term weather environments, but it is conversely the most sensitive to short-term weather disturbances; the Nash game has the lowest service quality and profit but exhibits relatively strong stability, and the Stackelberg game lies between the two. Customer heterogeneity can significantly regulate the response of the supply chain to weather changes. In a high-heterogeneity market, the profit level of the supply chain increases significantly when the weather improves, but it suffers a greater impact under severe weather, while the response of a low-heterogeneity market to weather changes is relatively gentle. The effort investment of all parties in the supply chain presents asymmetry; under extremely severe weather, the transport provider does not invest effort, while the manufacturer can still maintain a certain effort level driven by direct demand. Under high heterogeneity, the effort levels of both parties are not always better than those under low heterogeneity, which is related to the proportion of highly sensitive customers in the market. The research provides theoretical support for the efficient operation and risk management of the low-altitude logistics supply chain under weather change environments.

Keywords: Low-Altitude Logistics; Stochastic Differential Game; Supply Chain Decision-Making; Customer Heterogeneity; Weather Change

0　引言

随着无人机在“最后一公里”配送中的加速普及，低空物流正在快递、外卖等行业展现出前所未有的发展潜力，这一模式以更低的成本实现了更高的配送效率，正在成为推动新型物流发展的重要力量。“十四五”系列规划明确提出，要促进通用航空与无人机技术在物流和交通等领域的深度融合，推动无人机驱动的低空新经济发展[1]。低空物流具有智能化、信息化、高频率、小批量等显著特征[2]，其高效运作不仅依赖于无人机运输商的运营与维护，还需要上游制造商和下游客户的协同配合与积极投入，由此逐步形成了以无人机运输商为核心的低空物流供应链。

然而，这一供应链的运行高度依赖外部天气条件。降雨、大风等不利天气往往会降低供应链服务质量，造成运输环节延误或中断，影响交付的及时性与完整性，增加包裹损坏和丢失风险，波及上游制造商和供应商的生产计划与库存管理，以及下游客户的满意度和支付意愿，从而削弱系统的可靠性，威胁供应链整体稳定性。相较之下，晴天、无风等好天气则有助于提升运输效率，改善顾客体验。同时，需求侧并非同质存在，顾客对服务质量的敏感度存在显著差异：一部分顾客对延迟和损坏极为敏感，在服务质量下降时支付意愿显著降低；另一部分顾客则相对宽容，其购买行为和支付意愿较为稳定。当天气变化导致服务质量波动时，这种顾客异质性还会进一步放大不同顾客的反应差异。

因此，研究天气条件与顾客异质性共同作用下的低空物流供应链运行机制，能够揭示这2类因素对供应链服务质量与绩效的作用机理，并探讨供应链成员在应对天气变化时如何保持高效运作与收益最大化，有助于提升供应链的运行效率，为低空物流新业态的发展提供理论参考。

1　国内外研究现状

1.1　顾客异质性视角下的供应链博弈

顾客异质性已成为供应链博弈研究的重要因素。绿色供应链中，顾客异质性主要表现在绿色偏好和支付意愿的差异。已有研究表明，不同顾客对传统与新能源产品[3]、有机食品绿色品质[4]以及农产品绿色度的接受程度[5]存在显著分化，这种异质性不仅影响企业产品结构和渠道选择，还会对供应链协调、政府补贴效果及市场结构产生重要影响。此外，顾客对产品碳足迹的偏好差异同样会改变市场竞争格局[6]。

在多渠道与混合渠道供应链中，相关研究发现，顾客在产品认知、价值评估、渠道偏好以及购买时机决策等方面均存在显著异质性，这些差异直接影响企业的定价策略、渠道结构及利润分配[7-9]。在闭环供应链与促销情境下，顾客在支付意愿、回收特征及折扣敏感度方面的异质性也被证明会影响市场规模及不同供应链结构的有效性[10]，但当异质性程度较低时，细分策略带来的收益可能有限[11]。

此外，既有研究普遍指出顾客对物流服务质量变化具有显著敏感性。在电商[12]、绿色农产品[13]及智能服务[14]场景中，顾客对物流服务水平、冷链完好度、准时性及服务响应质量的敏感度，直接影响企业在物流模式选择、服务组织方式及质量投入方面的决策。由此可见，服务质量敏感度已逐渐成为刻画顾客异质性的重要维度，其应用范围正从传统零售拓展至智能物流与服务系统。

相比之下，本研究未将顾客异质性聚焦于价格敏感度、绿色偏好或产品质量差异等传统维度，而是将其刻画为顾客对低空物流供应链服务质量的敏感度差异。具体而言，一部分顾客对交付时效高度敏感，其支付意愿会随服务质量变化显著波动；另一部分顾客对短期延误则具有较高容忍度。现有研究对此关注较少，本研究基于这一现实特征，将顾客异质性纳入低空物流供应链博弈分析，拓展相关研究的应用场景。

1.2　随机微分博弈在供应链管理中的应用

随机微分博弈(Stochastic Differential Game，SDG)能够同时刻画系统动态性、不确定性与多方博弈关系，已成为供应链管理研究中的重要建模工具。在低碳与绿色供应链领域，相关研究表明[15-16]，基于SDG的减排与成本分担机制能够在不确定环境下改善系统绩效，不同权力结构会显著影响努力投入、利润分配及系统韧性。

在闭环供应链研究中，SDG被用于分析动态不确定性与政策干预对回收决策的影响，研究发现不确定性可能改变回收渠道的最优性，而政府奖惩机制虽能提升回收率，但亦可能加剧双重边际效应[17-18]。总体而言，现有SDG研究主要集中于绿色与闭环供应链场景，而本研究将SDG引入低空物流供应链，以拓展其在供应链管理问题中的应用范围。

1.3　低空物流场景下的无人机配送研究

无人机配送作为低空经济的重要应用场景，逐渐成为低空物流领域的研究热点。现有研究主要集中在路径规划与算法优化以及无人机协作与系统集成2个方面。

在路径规划与算法优化方面，已有研究通过多智能体协同、实时航迹规划及智能搜索算法等方法，提高了无人机在复杂环境下的感知、决策效率与路径鲁棒性，兼顾了飞行效率与安全约束[19-21]。在无人机协作与系统集成方面，相关研究从人机协同、空域管理及多式联运等角度，分析了无人机在铁路作业、城市配送及应急物资运输中的应用潜力，表明合理的系统协同能够显著提升效率并降低综合成本[22-24]。进一步地，部分研究开始将外部环境因素引入无人机配送系统建模，探讨天气变化对无人机安全性、续航能力、配送时间及成本结构的影响，指出复杂天气条件是制约无人机配送系统性能的重要因素[25-26]。

综上，尽管现有研究在顾客异质性和无人机配送路径及协作机制方面已有成果，但二者如何共同影响低空物流供应链仍缺乏系统分析：其一，顾客对服务质量的异质性尚未纳入整体供应链决策；其二，天气变化对低空物流的系统性影响尚未充分研究。鉴于天气不仅直接影响无人机运输，也会放大或削弱顾客异质性，本研究设计长期与短期天气机制，引入顾客异质性，构建低空物流供应链随机微分博弈模型，系统分析集中决策、Stackelberg博弈与Nash博弈3种决策结构的均衡解及绩效表现，为供应链在天气变化环境下的高效运行与风险管理提供理论支撑。

2　模型假设

考虑一个由制造商与无人机运输商组成的二级低空物流供应链，制造商委托运输商将产品配送至终端顾客。为保障供应链的服务质量水平，供应链各成员会做出一定投入努力，假设如下。

假设1：低空物流供应链系统服务质量水平$Q(t)$受制造商投入努力$E_1(t)$、运输商投入努力$E_2(t)$及天气因素的共同影响，则将服务质量水平的演化模型刻画为[27]

$$\mathrm{d}Q(t)=\left[\lambda\left(\alpha E_1(t)+\beta E_2(t)\right)-\gamma Q(t)\right]\mathrm{d}t+\sigma\sqrt{Q(t)}\,\mathrm{d}W(t) \tag{1}$$

式中：α，$\beta>0$表示双方投入努力对$Q(t)$的提升系数；$\gamma>0$表示服务质量水平因运输设备老化等的自然衰减系数。

此外，研究设计了2类天气影响机制。

（1）长期天气机制，引入长期天气影响因子

$\lambda \in [0, 1]$，代表长期季节与气候条件的平均水平对努力转化效率的调节。根据天气条件优劣，可将其划分为2类典型情境：一类为强降水、雷暴、台风等影响飞行安全的恶劣天气情境；另一类为能见度良好、风速较低且风向稳定的好天气情境[28]。因此对于$\lambda\left(\alpha E_1(t)+\beta E_2(t)\right)$，当$\lambda \to 0$时，即使双方持续增加投入，服务质量水平亦难以提升；而当$\lambda \to 1$时，天气状况理想，双方的投入努力才能得到充分发挥。

（2）扩散项$\sigma\sqrt{Q(t)}\,\mathrm{d}W(t)$，表示小范围内短期天气的随机波动，例如无人机在具体配送路径中可能遭遇的突发性微风，描述服务质量的实时波动性；$\sigma>0$表示扩散项对服务水平的影响系数；$W(t)$为标准维纳过程；$\sqrt{Q(t)}$保证了服务质量水平不可为负。

假设2：产品市场需求受制造商投入努力、服务质量水平以及顾客异质性的共同影响。假定市场中存在高敏感类型与低敏感类型2类客户，则将需求函数表示为

$$D(t)=D_0+\varphi E_1(t)+\theta\delta_H Q(t)+(1-\theta)\delta_L Q(t) \tag{2}$$

式中：$D_0>0$表示市场的基本需求；$\varphi>0$表示制造商投入努力市场需求的提升系数；$\delta_H>\delta_L>0$分别为高敏感型与低敏感型客户对服务质量水平的敏感程度，其中高敏感型顾客的支付意愿对服务质量变化反应更为强烈，而低敏感型顾客的响应相对平缓；以$\delta_H-\delta_L$刻画顾客异质性，差值越大表示两类顾客对服务质量调整的反应差异越显著，差值越小则表明顾客间的敏感性趋于一致；$\theta \in [0, 1]$表示高敏感客户在市场中的占比。

假设3：制造商与运输商投入努力的成本函数c_1，c_2均具有凸性特征[29]，则将t时刻双方努力成本函数刻画为

$$\begin{cases} c_1=\dfrac{1}{2}k_1E_1^2(t) \\ c_2=\dfrac{1}{2}k_2E_2^2(t) \end{cases} \tag{3}$$

式中：k_1，$k_2>0$分别表示制造商、运输商的努力成本系数。

假设4：制造商与运输商在无限期博弈过程中采用相同的贴现率ρ，即在任意时刻对未来收益的贴现程度相同。π_1，$\pi_2>0$分别表示制造商与运输商的边际收益。

3　模型建立及求解

3.1　集中决策(C模型)

在该情形下，双方以最大化供应链系统利润为目标，联合决策双方的投入努力。利润函数为

$$J_C=\max_{E_1,\,E_2}\mathbb{E}\left\{\int_0^{\infty}\mathrm{e}^{-\rho t}\left[(\pi_1+\pi_2)(D_0+\varphi E_1+\theta\delta_H Q+(1-\theta)\delta_L Q)-\frac{1}{2}k_1E_1^2-\frac{1}{2}k_2E_2^2\right]\mathrm{d}t\right\} \tag{4}$$

命题1：（1）制造商最优投入努力E_{1C}^*，运输商最优投入努力E_{2C}^*分别为

$$E_{1C}^*=\frac{(\pi_1+\pi_2)B}{k_1(\rho+\gamma)} \tag{5}$$

$$E_{2C}^*=\frac{(\pi_1+\pi_2)\lambda\beta A}{k_2(\rho+\gamma)} \tag{6}$$

其中，$A=\theta\delta_H+(1-\theta)\delta_L$，$B=\varphi(\rho+\gamma)+\lambda\alpha\theta\delta_H+\lambda\alpha(1-\theta)\delta_L$。

（2）供应链的最优值函数为

$$V_C^*(Q_C^*)=\frac{(\pi_1+\pi_2)A}{\rho+\gamma}Q_C^*+\frac{D_0(\pi_1+\pi_2)}{\rho}+\frac{(\pi_1+\pi_2)^2B^2}{2\rho k_1(\rho+\gamma)^2}+\frac{\lambda^2\beta^2(\pi_1+\pi_2)^2A^2}{2\rho k_2(\rho+\gamma)^2} \tag{7}$$

（3）服务质量水平$Q_C^*(t)$的期望$\mathbb{E}\left[Q_C^*(t)\right]$、方差$\mathrm{Var}\left[Q_C^*(t)\right]$及其相应的稳定值为

$$\mathbb{E}\left[Q_C^*(t)\right]=Q_0\mathrm{e}^{-\gamma t}+\frac{X}{\gamma}\left(1-\mathrm{e}^{-\gamma t}\right) \tag{8}$$

$$\mathrm{Var}\left[Q_C^*(t)\right]=\frac{\sigma^2}{\gamma}Q_0\left(\mathrm{e}^{-\gamma t}-\mathrm{e}^{-2\gamma t}\right)+\frac{X\sigma^2}{2\gamma^2}\left(1-2\mathrm{e}^{-\gamma t}+\mathrm{e}^{-2\gamma t}\right) \tag{9}$$

$$\begin{cases} \lim\limits_{t\to\infty}\mathbb{E}\left[Q_C^*(t)\right]=\dfrac{X}{\gamma} \\ \lim\limits_{t\to\infty}\mathrm{Var}\left[Q_C^*(t)\right]=\dfrac{X\sigma^2}{2\gamma^2} \end{cases} \tag{10}$$

式中：$X=\lambda\left(\alpha E_{1C}^*+\beta E_{2C}^*\right)$。

证明：首先构建哈密顿-雅克比-贝尔曼(Hamilton-Jacobi-Bellman，HJB)方程

$$\rho V_C(Q)=\max_{E_1,\,E_2}\left\{\begin{array}{l}(\pi_1+\pi_2)(D_0+\varphi E_1+\theta\delta_H Q+(1-\theta)\delta_L Q)-\dfrac{1}{2}k_1E_1^2-\dfrac{1}{2}k_2E_2^2+\\ V_C'(Q)\left[\lambda\left(\alpha E_1+\beta E_2\right)-\gamma Q\right]+\dfrac{1}{2}\sigma^2QV_C''(Q)\end{array}\right\} \tag{11}$$

对公式(11)求关于E_1，E_2的一阶偏导，得到最大化右端的一阶条件为

$$E_{1C}=\frac{\varphi(\pi_1+\pi_2)+\lambda\alpha V_C'(Q)}{k_1},\quad E_{2C}=\frac{\lambda\beta V_C'(Q)}{k_2}$$

将E_{1C}，E_{2C}代入HJB方程整理得

$$\rho V_C(Q)=\left\{\left((\pi_1+\pi_2)(\theta\delta_H+(1-\theta)\delta_L)-A\gamma+\frac{1}{2}\sigma^2V_C''(Q)\right)Q+D_0(\pi_1+\pi_2)+\frac{(V_C'(Q))^2\beta^2\lambda^2}{2k_2}+\frac{\left(V_C'(Q)\alpha\lambda+\varphi(\pi_1+\pi_2)\right)^2}{2k_1}\right\} \tag{12}$$

可知最优值函数形式为$V_C(Q)=\mu Q+\upsilon$；其中，μ，υ为待定系数，则有$V_C'(Q)=\mu$，$V_C''(Q)=0$，得方程组

$$\begin{cases}\rho\mu=(\pi_1+\pi_2)(\theta\delta_H+(1-\theta)\delta_L)-V_C'(Q)\gamma\\ \rho\upsilon=D_0(\pi_1+\pi_2)+\dfrac{(V_C'(Q))^2\beta^2\lambda^2}{2k_2}+\dfrac{\left(V_C'(Q)\alpha\lambda+\varphi(\pi_1+\pi_2)\right)^2}{2k_1}\end{cases} \tag{13}$$

解得$\mu=\dfrac{(\pi_1+\pi_2)A}{\rho+\gamma}$，$\upsilon=\dfrac{D_0(\pi_1+\pi_2)}{\rho}+\dfrac{(\pi_1+\pi_2)^2B^2}{2\rho k_1(\rho+\gamma)^2}+\dfrac{\lambda^2\beta^2(\pi_1+\pi_2)^2A^2}{2\rho k_2(\rho+\gamma)^2}$。

将公式(5)—(6)代入公式(1)，得到服务质量水平满足

$$\begin{cases}\mathrm{d}Q(t)=\left(X-\gamma Q(t)\right)\mathrm{d}t+\sigma\sqrt{Q(t)}\,\mathrm{d}W(t)\\ Q(0)=Q_0>0\end{cases} \tag{14}$$

由伊藤引理得

$$\begin{aligned}\mathrm{d}\left(\mathrm{e}^{\gamma t}Q(t)\right)&=\mathrm{e}^{\gamma t}\mathrm{d}Q(t)+Q(t)\mathrm{d}\mathrm{e}^{\gamma t}+\mathrm{d}\mathrm{e}^{\gamma t}\mathrm{d}Q(t)=\\ &\left(\mathrm{e}^{\gamma t}+\gamma\mathrm{e}^{\gamma t}\mathrm{d}t\right)\left(\left[X-\gamma Q(t)\right]\mathrm{d}t+\sigma\sqrt{Q(t)}\,\mathrm{d}W(t)\right)+\\ &Q(t)\gamma\mathrm{e}^{\gamma t}\mathrm{d}t=\mathrm{e}^{\gamma t}\left[X-\gamma Q(t)\right]\mathrm{d}t+\mathrm{e}^{\gamma t}\sigma\sqrt{Q(t)}\,\mathrm{d}W(t)+\\ &Q(t)\gamma\mathrm{e}^{\gamma t}\mathrm{d}t=X\mathrm{e}^{\gamma t}\mathrm{d}t+\mathrm{e}^{\gamma t}\sigma\sqrt{Q(t)}\,\mathrm{d}W(t)\end{aligned} \tag{15}$$

对公式(15)两边同时取积分可得

$$\begin{aligned}\mathrm{e}^{\gamma t}Q(t)&=Q(0)+\int_0^t X\mathrm{e}^{\gamma u}\mathrm{d}u+\\ &\int_0^t\mathrm{e}^{\gamma u}\sigma\sqrt{Q(u)}\,\mathrm{d}W(u)=Q_0+\frac{X}{\gamma}\left(\mathrm{e}^{\gamma t}-1\right)+\\ &\int_0^t\mathrm{e}^{\gamma u}\sigma\sqrt{Q(u)}\,\mathrm{d}W(u)\end{aligned} \tag{16}$$

计算公式(16)两侧的数学期望，由$\mathbb{E}\left[\int_0^t\mathrm{e}^{\gamma u}\sigma\sqrt{Q(u)}\,\mathrm{d}W(u)\right]=0$，可得

$$\mathbb{E}\left[Q(t)\right]=Q_0\mathrm{e}^{-\gamma t}+\frac{X}{\gamma}\left(1-\mathrm{e}^{-\gamma t}\right),\ \lim_{t\to\infty}\mathbb{E}\left[Q(t)\right]=\frac{X}{\gamma} \tag{17}$$

为了得到$\mathrm{Var}\left[Q(t)\right]$，需要求解$\mathbb{E}\left[Q^2(t)\right]$，则由伊藤引理有

$$\mathrm{d}\left(Q^2(t)\right)=2Q(t)\mathrm{d}Q(t)+\mathrm{d}Q(t)\mathrm{d}Q(t)=\left[\left(2X+\sigma^2\right)Q(t)-2\gamma Q^2(t)\right]\mathrm{d}t+\sigma\sqrt{Q(t)}\,\mathrm{d}W(t) \tag{18}$$

对两边同时积分并求其数学期望可得

$$\mathbb{E}\left[Q^2(t)\right]=\mathbb{E}\left[Q^2(0)+\int_0^t\left[\left(2X+\sigma^2\right)Q(u)-2\gamma Q^2(u)\right]\mathrm{d}u\right] \tag{19}$$

对公式(19)求导得到以下微分方程

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}\mathbb{E}\left[Q^2(t)\right]}{\mathrm{d}t}=\left(2X+\sigma^2\right)\left(Q_0\mathrm{e}^{-\gamma t}+\dfrac{X}{\gamma}\left(1-\mathrm{e}^{-\gamma t}\right)\right)-2\gamma\mathbb{E}\left[Q^2(t)\right]\\ \mathbb{E}\left[Q^2(0)\right]=Q_0^2\end{cases} \tag{20}$$

解得

$$\mathbb{E}\left[Q^2(t)\right]=Q_0^2\mathrm{e}^{-2\gamma t}+\frac{\left(2X+\sigma^2\right)}{\gamma}\left(Q_0-\frac{X}{\gamma}\right)\left(\mathrm{e}^{-\gamma t}-\mathrm{e}^{-2\gamma t}\right)+\frac{X\left(2X+\sigma^2\right)}{2\gamma^2}\left(1-\mathrm{e}^{-2\gamma t}\right) \tag{21}$$

将公式(19)、(21)代入$\mathrm{Var}\left[Q(t)\right]=\mathbb{E}\left[Q^2(t)\right]-\left[\mathbb{E}\left[Q(t)\right]\right]^2$，证毕。

集中决策下最优决策关于各关键参数的比较静态分析如表1所示，命题1及表1表明，制造商的最优投入努力E_{1C}^*由3部分构成：一是$\varphi(\rho+\gamma)$，反映制造商努力对基本需求的刺激作用，需求响应越强，其投入水平越高；二是$\lambda\alpha\theta\delta_H$，表明高敏感型顾客占比或敏感程度越高，制造商越倾向增加努力投入；三是$\lambda\alpha(1-\theta)\delta_L$，体现低敏感型顾客的规模

表1　集中决策下最优决策关于各关键参数的比较静态分析

Tab.1　Comparative static analysis of optimal decisions with respect to various key parameters under centralized decision-making

	π_1	π_2	γ	ρ	φ	λ	δ_H	δ_L	θ	α	k_1	β	k_2
E_{1C}^*	↗	↗	↘	↘	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↘	—	—
E_{2C}^*	↗	↗	↘	↘	—	↗	↗	↗	↗	—	—	↗	↘

注：↗表示正相关，↘表示负相关，—表示不相关。

效应，尽管其需求反应较弱，但仍对制造商努力形成支撑。运输商的最优投入努力 E_{2C}^{*} 则主要取决于 $\lambda\beta(\theta\delta_H+(1-\theta)\delta_L)$，表明其决策更关注服务质量对整体顾客群体的平均响应，并直接受到天气因子 λ 的直接影响。无论是制造商还是运输商，其努力水平均与各自努力成本系数、衰减系数与贴现率负相关，反映出当服务质量衰减速度更快或未来收益折现更高时，双方的努力意愿都会下降。此外，服务质量水平 $Q_C^{*}(t)$ 收敛于稳定值，该稳定值与双方努力的综合作用 X 成正比，而方差主要受短期天气波动影响。

3.2　成本分担的 Stackelberg 博弈(S 模型)

在该情形下，无人机运输商作为供应链核心企业，为 Stackelberg 博弈的主导者，首先决定其投入努力 E_1 及成本分担比例 ξ；制造商为跟随者，会根据运输商的决策决定自身投入努力 E_2。双方的利润函数 J_{1S}，J_{2S} 为

$$J_{1S}=\max_{E_1}\left\{\mathbb{E}\int_0^{\infty}\mathrm{e}^{-\rho t}\left[\pi_1(D_0+\varphi E_1+\theta\delta_H Q+(1-\theta)\delta_L Q)-\frac{1}{2}(1-\xi)k_1E_1^2\right]\mathrm{d}t\right\} \tag{22}$$

$$J_{2S}=\max_{E_2,\ \xi}\left\{\mathbb{E}\int_0^{\infty}\mathrm{e}^{-\rho t}\left[\pi_2(D_0+\varphi E_1+\theta\delta_H Q+(1-\theta)\delta_L Q)-\frac{1}{2}k_2E_2^2-\frac{1}{2}\xi k_1E_1^2\right]\mathrm{d}t\right\} \tag{23}$$

命题 2：（1）制造商最优投入努力 E_{1S}^{*}，运输商最优投入努力 E_{2S}^{*} 及最优分担比例 ξ^{*} 分别为

$$E_{1S}^{*}=\frac{(\pi_1+2\pi_2)B}{2k_1(\rho+\gamma)} \tag{24}$$

$$E_{2S}^{*}=\frac{\lambda\beta\pi_2A}{k_2(\rho+\gamma)} \tag{25}$$

$$\xi^{*}=\frac{2\pi_2-\pi_1}{2\pi_2+\pi_1} \tag{26}$$

（2）制造商与运输商的最优值函数分别为

$$V_{1S}^{*}(Q_S^{*})=\left\{\frac{\pi_1A}{\rho+\gamma}Q_S^{*}+\frac{D_0\pi_1}{\rho}+\frac{\pi_1(\pi_1+2\pi_2)B^2}{4\rho k_1(\rho+\gamma)^2}+\frac{\beta^2\lambda^2\pi_1\pi_2A^2}{\rho k_2(\rho+\gamma)^2}\right\} \tag{27}$$

$$V_{2S}^{*}(Q_S^{*})=\left\{\frac{\pi_2A}{\rho+\gamma}Q_S^{*}+\frac{D_0\pi_2}{\rho}+\frac{(\pi_1+2\pi_2)^2B^2}{8\rho k_1(\rho+\gamma)^2}+\frac{\beta^2\lambda^2\pi_2^2A^2}{2\rho k_2(\rho+\gamma)^2}\right\} \tag{28}$$

（3）服务质量水平 $Q_S^{*}(t)$ 的期望 $\mathbb{E}\left[Q_S^{*}(t)\right]$、方差 $\mathrm{Var}\left[Q_S^{*}(t)\right]$ 及其相应的稳定值为

$$\mathbb{E}\left[Q_S^{*}(t)\right]=Q_0\mathrm{e}^{-\gamma t}+\frac{Y}{\gamma}(1-\mathrm{e}^{-\gamma t}) \tag{29}$$

$$\mathrm{Var}\left[Q_S^{*}(t)\right]=\frac{\sigma^2}{\gamma}Q_0(\mathrm{e}^{-\gamma t}-\mathrm{e}^{-2\gamma t})+\frac{Y\sigma^2}{2\gamma^2}(1-2\mathrm{e}^{-\gamma t}+\mathrm{e}^{-2\gamma t}) \tag{30}$$

$$\lim_{t\to\infty}\mathbb{E}\left[Q_S^{*}(t)\right]=\frac{Y}{\gamma},\quad\lim_{t\to\infty}\mathrm{Var}\left[Q_S^{*}(t)\right]=\frac{Y\sigma^2}{2\gamma^2} \tag{31}$$

式中：$Y=\lambda(\alpha E_{1S}^{*}+\beta E_{2S}^{*})$。

证明：同命题 1。

在成本分担的 Stackelberg 博弈中，双方的最优投入努力结构上与集中决策一致，其比较静态特征基本相同，但对关键参数的敏感性存在差异，这将在数值分析中详细讨论。最优分担比例 ξ^{*} 与运输商的边际利润 π_2 正相关，而与制造商的边际利润 π_1 负相关。表明运输商的边际利润水平较高时，其更倾向于分担较大比例的制造商努力成本，从而激励制造商在服务质量上投入更多。进一步来看，由于 $Y=\lambda(\alpha E_{1S}^{*}+\beta E_{2S}^{*})$ 会随 ξ^{*} 的调整而发生变化，因此运输商在确定成本分担比例 ξ 的过程中，不仅影响双方的成本负担格局，也间接作用于服务质量的长期均值及波动水平。

3.3　Nash 博弈(N 模型)

在该情形下，双方独立同时进行决策，以最大化自身利益为目标。双方的利润函数 J_{1N}，J_{2N} 为

$$J_{1N}=\max_{E_1}\left\{\mathbb{E}\int_0^{\infty}\mathrm{e}^{-\rho t}\left[\pi_1(D_0+\varphi E_1+\theta\delta_H Q+(1-\theta)\delta_L Q)-\frac{1}{2}k_1E_1^2\right]\mathrm{d}t\right\} \tag{32}$$

$$J_{2N}=\max_{E_2}\left\{\mathbb{E}\int_0^{\infty}\mathrm{e}^{-\rho t}\left[\pi_2(D_0+\varphi E_1+\theta\delta_H Q+(1-\theta)\delta_L Q)-\frac{1}{2}k_2E_2^2\right]\mathrm{d}t\right\} \tag{33}$$

命题 3：（1）制造商最优投入努力 E_{1N}^{*}，运输商最优投入努力 E_{2N}^{*} 为

$$E_{1N}^{*}=\frac{\pi_1B}{k_1(\rho+\gamma)} \tag{34}$$

$$E_{2N}^{*}=\frac{\lambda\beta\pi_2A}{k_2(\rho+\gamma)} \tag{35}$$

（2）制造商与运输商的最优值函数分别为

$$V_{1N}^{*}(Q_N^{*})=\frac{\pi_1 A}{\rho+\gamma}Q_N^{*}+\frac{D_0\pi_1}{\rho}+\frac{\pi_1^2B^2}{2\rho k_1(\rho+\gamma)^2}+\frac{\beta^2\lambda^2\pi_1\pi_2A^2}{\rho k_2(\rho+\gamma)^2} \tag{36}$$

$$V_{2N}^{*}(Q_N^{*})=\frac{\pi_2 A}{\rho+\gamma}Q_N^{*}+\frac{D_0\pi_2}{\rho}+\frac{\pi_1\pi_2B^2}{\rho k_1(\rho+\gamma)^2}+\frac{\beta^2\lambda^2\pi_2^2A^2}{2\rho k_2(\rho+\gamma)^2} \tag{37}$$

（3）服务质量水平 $Q_N^{*}(t)$ 的期望 $\mathbb{E}\left[Q_N^{*}(t)\right]$、方差 $\mathrm{Var}\left[Q_N^{*}(t)\right]$ 及其相应的稳定值为

$$\mathbb{E}\left[Q_N^{*}(t)\right]=Q_0\mathrm{e}^{-\gamma t}+\frac{Z}{\gamma}\left(1-\mathrm{e}^{-\gamma t}\right) \tag{38}$$

$$\mathrm{Var}\left[Q_N^{*}(t)\right]=\frac{\sigma^2}{\gamma}Q_0\left(\mathrm{e}^{-\gamma t}-\mathrm{e}^{-2\gamma t}\right)+\frac{Z\sigma^2}{2\gamma^2}\left(1-2\mathrm{e}^{-\gamma t}+\mathrm{e}^{-2\gamma t}\right) \tag{39}$$

$$\lim_{t\to\infty}\mathbb{E}\left[Q_N^{*}(t)\right]=\frac{Z}{\gamma},\ \lim_{t\to\infty}\mathrm{Var}\left[Q_N^{*}(t)\right]=\frac{Z\sigma^2}{2\gamma^2} \tag{40}$$

式中：$Z=\lambda\left(\alpha E_{1N}^{*}+\beta E_{2N}^{*}\right)$。

证明：同命题1。

在Nash均衡下，制造商与运输商独立决策，其努力投入水平均低于集中决策和成本分担情形。制造商的最优努力仍可分解为市场需求驱动、高敏感型顾客质量需求以及低敏感型顾客规模效应3部分，但这些投入仅与制造商自身边际利润 π_1 相关。运输商的最优努力同样与制造商利润无关，仅依赖于自身收益及顾客敏感度，因此整体投入水平偏低。由此可见，在缺乏协调机制或外部激励的条件下，低空物流供应链往往会停留在次优均衡，难以实现系统整体效率。

4　对比分析

对比上述3种情形下的模型均衡解并作差可得，3种情形在投入努力、长期服务质量及最优值函数上呈现一致性排序。

$$E_{1C}^{*}>E_{1S}^{*}>E_{1N}^{*},\ E_{2C}^{*}>E_{2S}^{*}=E_{2N}^{*}$$

$$\lim_{t\to\infty}\mathbb{E}\left[Q_C^{*}(t)\right]=\frac{X}{\gamma}>\lim_{t\to\infty}\mathbb{E}\left[Q_S^{*}(t)\right]=\frac{Y}{\gamma}>\lim_{t\to\infty}\mathbb{E}\left[Q_N^{*}(t)\right]=\frac{Z}{\gamma}$$

$$\lim_{t\to\infty}\mathrm{Var}\left[Q_C^{*}(t)\right]=\frac{X\sigma^2}{2\gamma^2}>\lim_{t\to\infty}\mathrm{Var}\left[Q_S^{*}(t)\right]=\frac{Y\sigma^2}{2\gamma^2}>\lim_{t\to\infty}\mathrm{Var}\left[Q_N^{*}(t)\right]=\frac{Z\sigma^2}{2\gamma^2}$$

$$V_{1S}^{*}>V_{1N}^{*},\ V_{2S}^{*}>V_{2N}^{*},\ V_C>V_{1S}^{*}+V_{2S}^{*}>V_{1N}^{*}+V_{2N}^{*}$$

集中决策下，双方投入最大，长期服务质量最高，但对短期外部扰动最敏感，波动幅度显著；Stackelberg博弈中，制造商受成本分担契约激励增加努力，运输商投入与Nash博弈相同，服务质量与波动介于两者之间；Nash均衡下双方投入最低，波动最小但长期质量偏低，属于低效均衡。整体来看，Stackelberg机制通过部分协调可提升双方利润，而集中决策在理论上能实现系统最优，但受收益分配与激励约束限制，Nash均衡因缺乏协调导致整体收益最低。

5　数值分析

利用数学软件对上述最优模型解进行数值分析。为刻画顾客异质性的相对水平，即高、低敏感度顾客对服务质量水平反应的差异程度，仿真参考了既有研究中的参数设定[11]，其余参数结合低空物流供应链的现实特征进行了适当调整。具体而言，顾客异质性通过服务质量敏感差异体现，使运输商的投入对整体服务质量边际贡献较大，因此 β 相对 α 设置较高；同时，考虑到低空物流服务的技术迭代速度较快，由设备老化等因素导致的服务质量自然衰减速率 γ 取值较低。鉴于低空物流尚处于发展阶段，初始服务质量水平 Q_0 设定较低。由于低空运输易受短期天气扰动影响，天气波动系数 σ 设置较大。具体基准参数设置如表2所示。

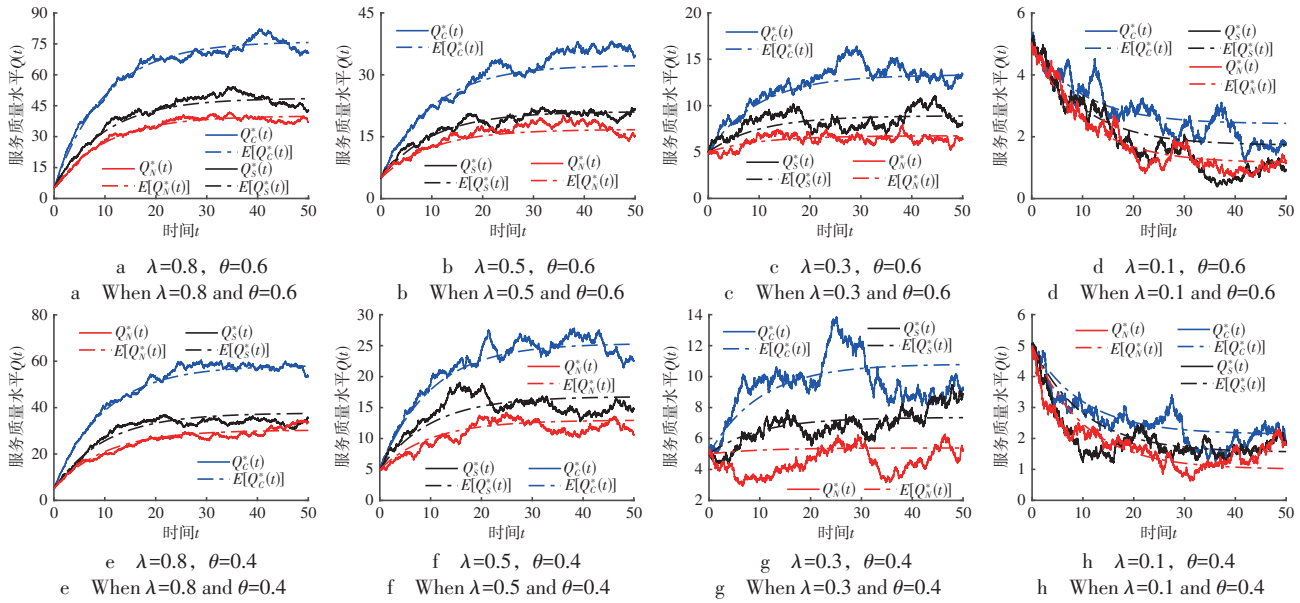
表2　基准参数设置

Tab.2　Baseline parameter settings

参数	ρ	D_0	π_1	π_2	δ_H	δ_L	γ	φ	α	β	θ	k_1	k_2	Q_0	σ
赋值	0.9	30	3	4	0.9	0.1	0.1	0.4	1	2	0.6	2	2	5	0.5

5.1　天气条件对模型均衡解的影响

不同长期天气环境下的服务质量水平变化曲线如图1所示，高敏感顾客占比较高时，3种决策模式的服务质量均随天气恶化下降，集中决策始终最高，其次为Stackelberg，Nash最低；集中决策对短期天气扰动最敏感，波动幅度最大，Stackelberg次之，Nash最小。当长期天气进一步恶化时，即使双方增加努力投入，服务质量仍呈下降趋势，但集中决策下降幅度最小。在高敏感顾客占比较低的情形下，模式排序与上述结论一致。说明在长期气候恶



a　λ=0.8，θ=0.6　b　λ=0.5，θ=0.6　c　λ=0.3，θ=0.6　d　λ=0.1，θ=0.6

a　When λ=0.8 and θ=0.6　b　When λ=0.5 and θ=0.6　c　When λ=0.3 and θ=0.6　d　When λ=0.1 and θ=0.6

e　λ=0.8，θ=0.4　f　λ=0.5，θ=0.4　g　λ=0.3，θ=0.4　h　λ=0.1，θ=0.4

e　When λ=0.8 and θ=0.4　f　When λ=0.5 and θ=0.4　g　When λ=0.3 and θ=0.4　h　When λ=0.1 and θ=0.4

图1　不同长期天气环境下的服务质量水平变化曲线

Fig.1　Service quality level variation curves under different long-term weather environments

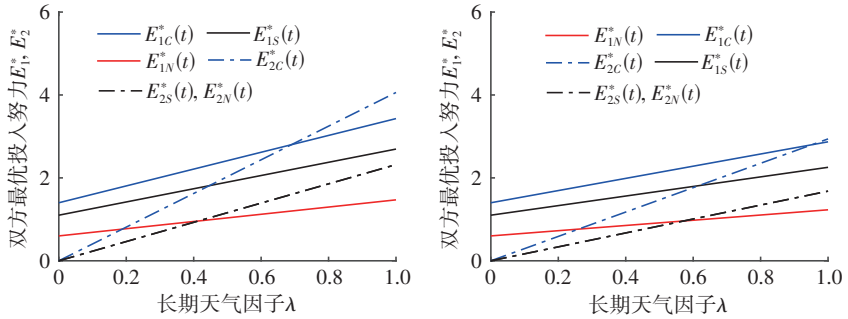
化趋势下，引入协调机制可提升服务质量并增强系统稳健性。

不同长期天气环境下双方最优投入努力的变化曲线如图2所示。随着天气条件改善，3种模式下的投入均呈上升趋势，制造商与运输商积极提高努力以提升服务质量并获取需求弹性收益，其中集中决策增长最快，Stackelberg次之，Nash最缓。当长期天气恶化至极端时($\lambda \to 0$)，制造商仍保有一定努力，而运输商投入降为零，表明运输环节在极端天气下几乎无法运行，而制造商因直接需求驱动$(\pi_1+\pi_2)\varphi/k_1$仍会保持一定投入。总体来看，集中决策虽在恶劣天气下投入下降幅度较大，但仍优于其他模式，服务质量与投入下降幅度均更小。

不同长期天气环境下的双方最优值函数变化曲线如图3所示，制造商与运输商利润随天气改善而上升，与文献[23]一致。当高敏感顾客占比较高时，Stackelberg博弈利润高于Nash，表明其更有效地将努力与质量改善转化为利润；Nash模式因投入分散、协调性弱，利润增长较慢。高敏感顾客占比较低时，利润虽随天气改善仍上升，但总体水平较低。不同长期天气环境下供应链最优值函数的变化曲线如图4所示，不同高敏感顾客占比下，3种模式的整体供应链最优值函数差异明显，高敏感占比市场值函数普遍高于低占比市场，而集中决策始终保持最高，即使在极端恶劣天气下，其值函数虽下降，但仍优于Stackelberg与Nash。

5.2　顾客异质性对模型均衡解的影响

不同顾客异质性下服务质量水平的变化曲线

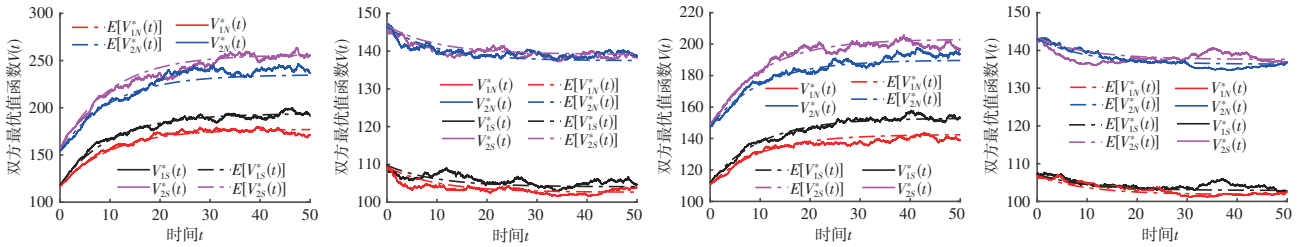


a　θ=0.6　b　θ=0.4

a　When θ=0.6　b　When θ=0.4

图2　不同长期天气环境下双方最优投入努力的变化曲线

Fig.2　Variation curves of optimal effort levels of both parties under different long-term weather environments

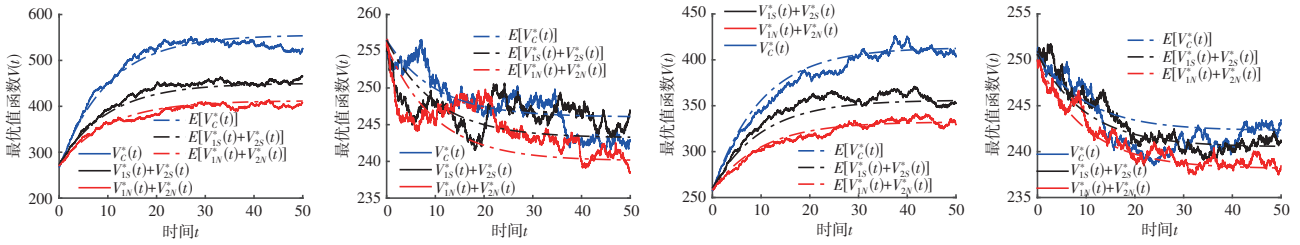


a　λ=0.8，θ=0.6　b　λ=0.1，θ=0.6　c　λ=0.8，θ=0.4　d　λ=0.1，θ=0.4

a　When λ=0.8 and θ=0.6　b　When λ=0.1 and θ=0.6　c　When λ=0.8 and θ=0.4　d　When λ=0.1 and θ=0.4

图3　不同长期天气环境下的双方最优值函数变化曲线

Fig.3　Variation curves of optimal value functions of both parties under different long-term weather environments



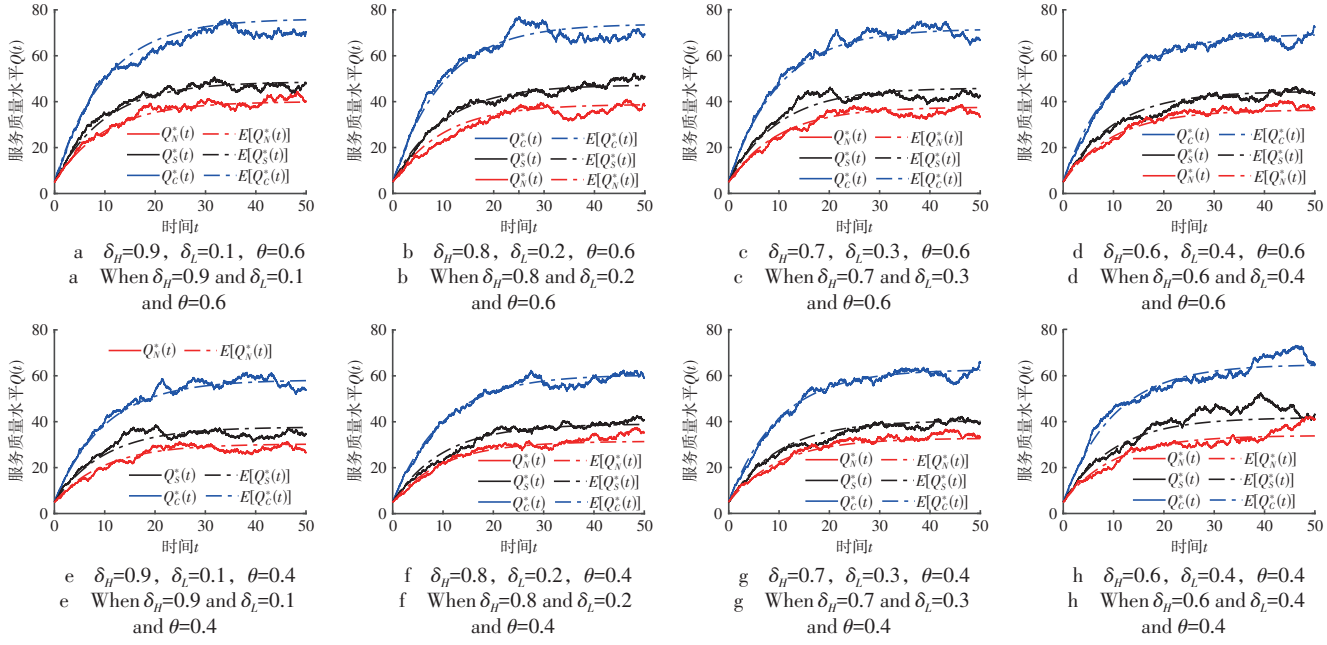
a　λ=0.8，θ=0.6　b　λ=0.1，θ=0.6　c　λ=0.8，θ=0.4　d　λ=0.1，θ=0.4

a　When λ=0.8 and θ=0.6　b　When λ=0.1 and θ=0.6　c　When λ=0.8 and θ=0.4　d　When λ=0.1 and θ=0.4

图4　不同长期天气环境下供应链最优值函数的变化曲线

Fig.4　Variation curves of optimal value function of supply chain under different long-term weather environments

(λ = 0.8)如图5所示，不同顾客异质性下服务质量水平的变化曲线(λ = 0.1)如图6所示。如图5a—图5d与图6a—图6d所示，高敏感顾客占比较高时，顾客异质性下降导致3种模式的服务质量明显下降，且在天气良好时下降尤为显著，说明质量提升的边际回报高度依赖异质性；在恶劣天气下下降幅度较小，表明异质性还能调节服务质量对天气的响应弹性。高敏感顾客占比较低(图5e—图5f与图6e—图6f)时，趋势反转：异质性下降反而略微提高服务质量，表明系统对顾客异质性的依赖减弱，服务质量改善主要受外部环境驱动，且天气良好时水平始终高于恶劣天气。



a　δ_H=0.9，δ_L=0.1，θ=0.6　b　δ_H=0.8，δ_L=0.2，θ=0.6　c　δ_H=0.7，δ_L=0.3，θ=0.6　d　δ_H=0.6，δ_L=0.4，θ=0.6

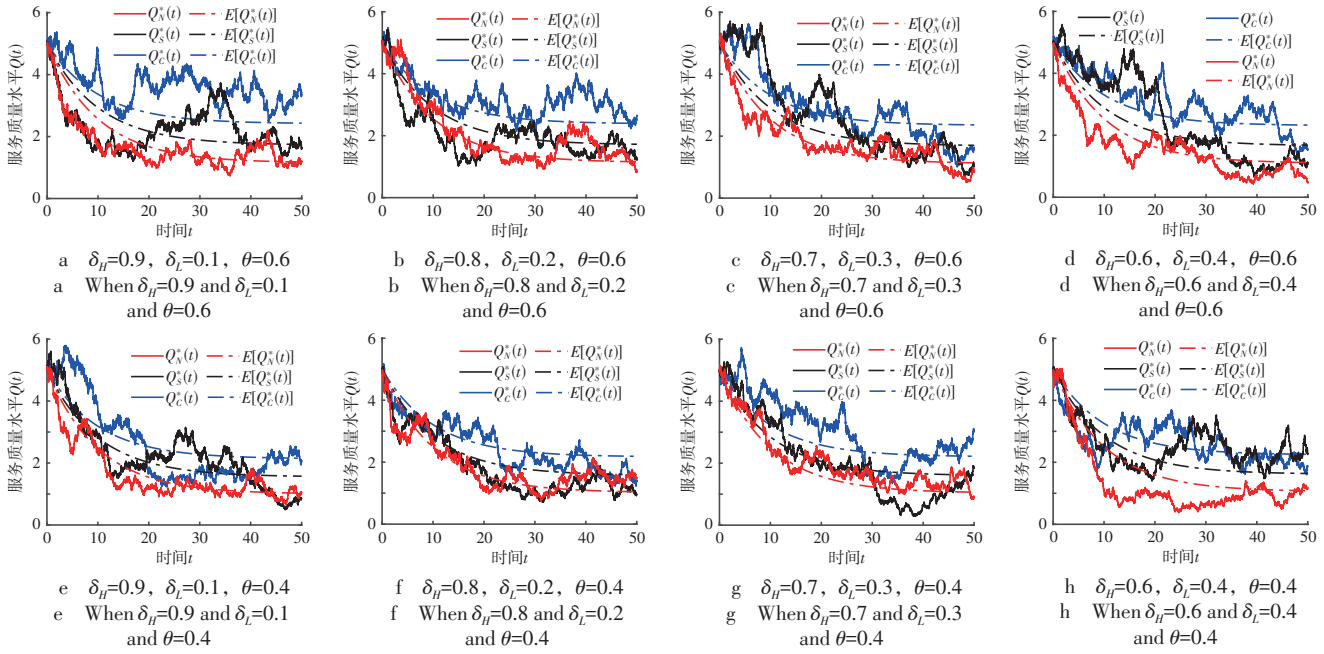
a　When δ_H=0.9 and δ_L=0.1 and θ=0.6　b　When δ_H=0.8 and δ_L=0.2 and θ=0.6　c　When δ_H=0.7 and δ_L=0.3 and θ=0.6　d　When δ_H=0.6 and δ_L=0.4 and θ=0.6

e　δ_H=0.9，δ_L=0.1，θ=0.4　f　δ_H=0.8，δ_L=0.2，θ=0.4　g　δ_H=0.7，δ_L=0.3，θ=0.4　h　δ_H=0.6，δ_L=0.4，θ=0.4

e　When δ_H=0.9 and δ_L=0.1 and θ=0.4　f　When δ_H=0.8 and δ_L=0.2 and θ=0.4　g　When δ_H=0.7 and δ_L=0.3 and θ=0.4　h　When δ_H=0.6 and δ_L=0.4 and θ=0.4

图5　不同顾客异质性下服务质量水平的变化曲线(λ = 0.8)

Fig.5　Variation curves of service quality level under different customer heterogeneity conditions (λ = 0.8)



a　δ_H=0.9，δ_L=0.1，θ=0.6
a　When δ_H=0.9 and δ_L=0.1 and θ=0.6

b　δ_H=0.8，δ_L=0.2，θ=0.6
b　When δ_H=0.8 and δ_L=0.2 and θ=0.6

c　δ_H=0.7，δ_L=0.3，θ=0.6
c　When δ_H=0.7 and δ_L=0.3 and θ=0.6

d　δ_H=0.6，δ_L=0.4，θ=0.6
d　When δ_H=0.6 and δ_L=0.4 and θ=0.6

e　δ_H=0.9，δ_L=0.1，θ=0.4
e　When δ_H=0.9 and δ_L=0.1 and θ=0.4

f　δ_H=0.8，δ_L=0.2，θ=0.4
f　When δ_H=0.8 and δ_L=0.2 and θ=0.4

g　δ_H=0.7，δ_L=0.3，θ=0.4
g　When δ_H=0.7 and δ_L=0.3 and θ=0.4

h　δ_H=0.6，δ_L=0.4，θ=0.4
h　When δ_H=0.6 and δ_L=0.4 and θ=0.4

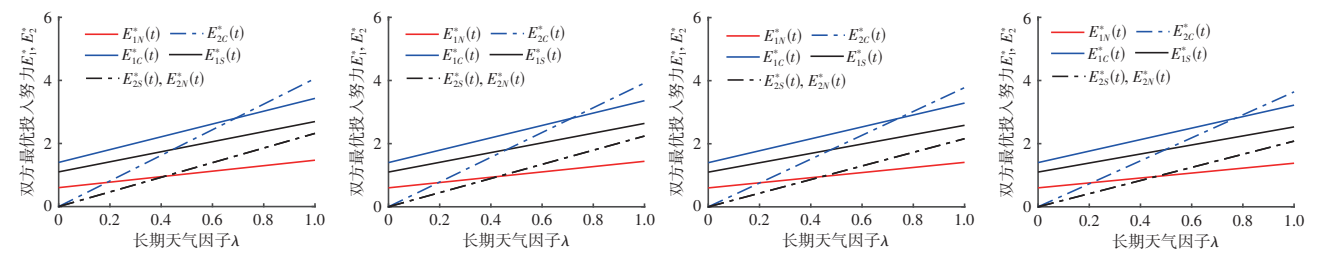
图6　不同顾客异质性下服务质量水平的变化曲线(λ = 0.1)

Fig.6　Variation curves of service quality level under different customer heterogeneity conditions (λ = 0.1)

不同顾客异质性下双方最优投入努力的变化曲线如图7所示，顾客异质性显著影响投入努力与供应链价值函数。随着天气改善，制造商与运输商的最优投入均增加，但异质性高时增长更快，表明高敏感度差异增强了天气对努力投入的弹性，供应链成员更倾向增加投入以提升服务质量并获取需求与利润增益。异质性低时，尽管天气改善仍提供投入机会，Stackelberg和Nash博弈下的投入增长较为温和。

不同顾客异质性下供应链最优值函数的变化曲线(λ = 0.8)如图8所示，不同顾客异质性下供应链最优值函数的变化曲线(λ = 0.1)如图9所示。如图8a—图8d与图9a—图9d所示，高敏感顾客占比较高时，供应链最优值函数随顾客异质性降低整体下降，且好天气下下降幅度大于恶劣天气，与文献[11]趋势一致，表明良好天气条件下值函数对异质性更敏感，缺乏高异质性会导致需求拉动不足，利润提升滞后。高敏感顾客占比较低(图8e—图8f与图9e—图9f)时，趋势反转：异质性下降反而提升最优值函数。总体来看，3种模式下值函数随异质性变化的差距在好天气被放大，在恶劣天气下差距缩小但仍存在。说明顾客异质性不仅影响服务质量和投入努力，也决定系统价值与利润释放，因此供应链在提升价值与设计协调机制时需充分考虑异质性[9, 11, 30]。

不同顾客异质性下双方最优投入努力随θ的变化曲线(λ = 0.8)如图10所示，不同顾客异质性下双方最优投入努力随θ的变化曲线(λ = 0.3)如图11所示，在天气良好时，投入努力随高敏感顾客比例θ增加而显著上升，高异质性市场增幅更大；低异质性



a　δ_H=0.9，δ_L=0.1
a　When δ_H=0.9 and δ_L=0.1

a　δ_H=0.8，δ_L=0.2
a　When δ_H=0.8 and δ_L=0.2

c　δ_H=0.7，δ_L=0.3
c　When δ_H=0.7 and δ_L=0.3

d　δ_H=0.6，δ_L=0.4
d　When δ_H=0.6 and δ_L=0.4

图7　不同顾客异质性下双方最优投入努力的变化曲线

Fig.7　Variation curves of optimal effort levels of both parties under different customer heterogeneity conditions

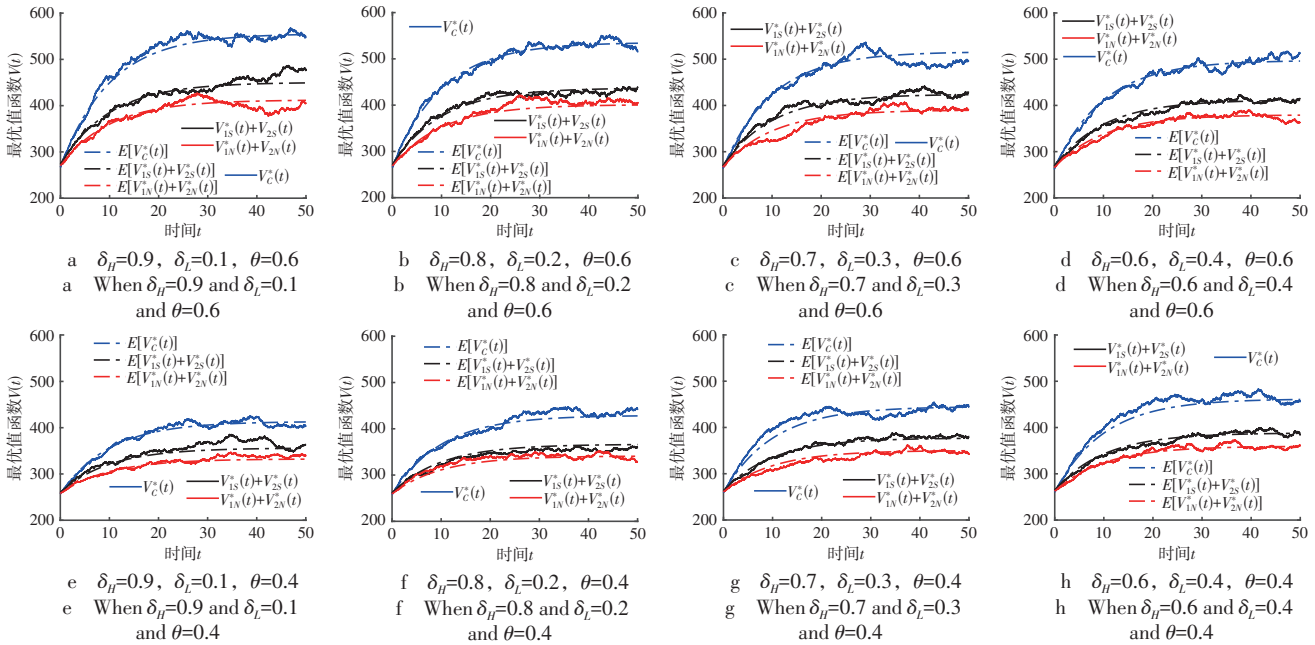


图8　不同顾客异质性下供应链最优值函数的变化曲线(λ = 0.8)

Fig.8　Variation curves of optimal value function of supply chain under different customer heterogeneity conditions (λ = 0.8)

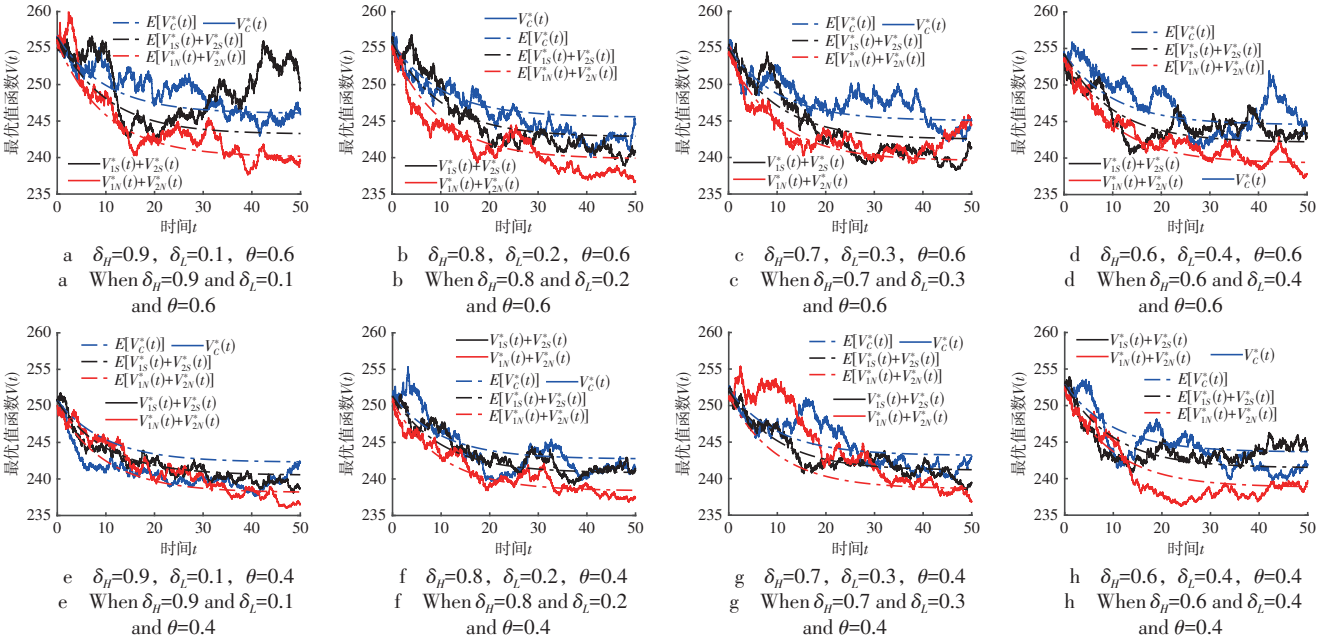
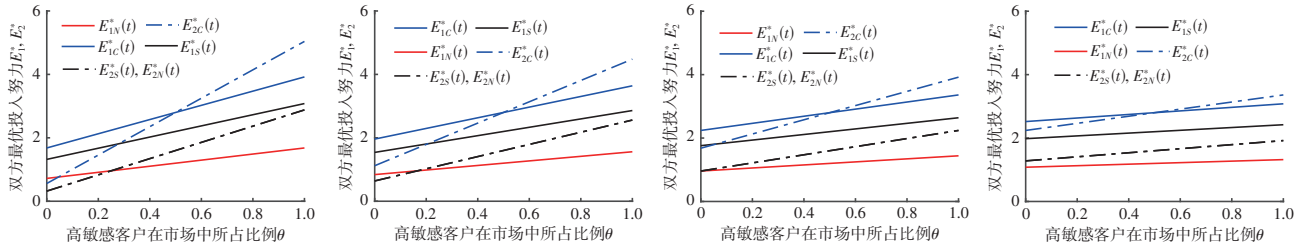


图9　不同顾客异质性下供应链最优值函数的变化曲线(λ = 0.1)

Fig.9　Variation curves of optimal value function of supply chain under different customer heterogeneity conditions (λ = 0.1)

市场虽随θ增加，但增速较缓。恶劣天气下(图11)，投入水平整体下降，高异质性市场仍随θ增加但增幅平缓，低异质性市场几乎保持水平。可见，天气条件的优劣决定努力投入的整体高度，而顾客异质性影响投入随θ的边际变化率。

不同顾客异质性下同一模型的最优投入努力随θ的变化曲线(λ = 0.8)如图12所示，不同顾客异质性下同一模型的最优投入努力随θ的变化曲线(λ = 0.1)如图13所示，高敏感顾客比例θ对投入努力的影响趋势一致，但受市场异质性与天气条件调节。当θ < 0.5时，低敏感顾客占多数，企业难以从服务质量提升获得显著收益，因此倾向维持基本服务水平、控制成本并减少波动。随着θ上升，高异质性市场投入增长更快，并在超过临界值后超越低异质

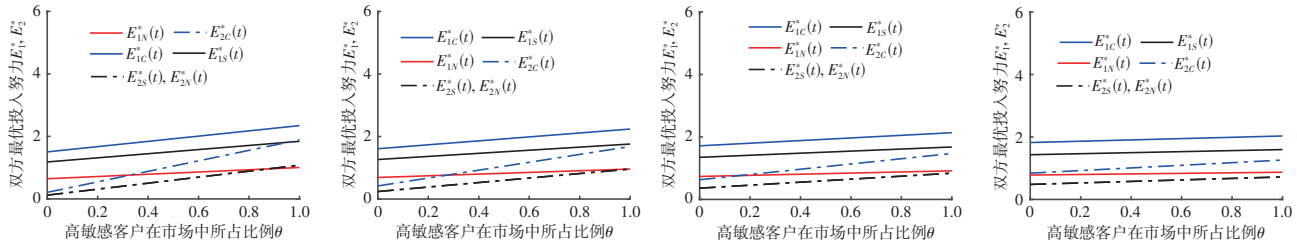


a　δ_H=0.9，δ_L=0.1　　b　δ_H=0.8，δ_L=0.2　　c　δ_H=0.7，δ_L=0.3　　d　δ_H=0.6，δ_L=0.4

a　When δ_H=0.9 and δ_L=0.1　　b　When δ_H=0.8 and δ_L=0.2　　c　When δ_H=0.7 and δ_L=0.3　　d　When δ_H=0.6 and δ_L=0.4

图10　不同顾客异质性下双方最优投入努力随θ的变化曲线(λ = 0.8)

Fig.10　Variation curves of optimal effort levels of both parties with respect to θ under different customer heterogeneity conditions (λ = 0.8)



a　δ_H=0.9，δ_L=0.1　　b　δ_H=0.8，δ_L=0.2　　c　δ_H=0.7，δ_L=0.3　　d　δ_H=0.6，δ_L=0.4

a　When δ_H=0.9 and δ_L=0.1　　b　When δ_H=0.8 and δ_L=0.2　　c　When δ_H=0.7 and δ_L=0.1　　d　When δ_H=0.6 and δ_L=0.4

图11　不同顾客异质性下双方最优投入努力随θ的变化曲线(λ = 0.3)

Fig.11　Variation curves of optimal effort levels of both parties with respect to θ under different customer heterogeneity conditions (λ = 0.3)

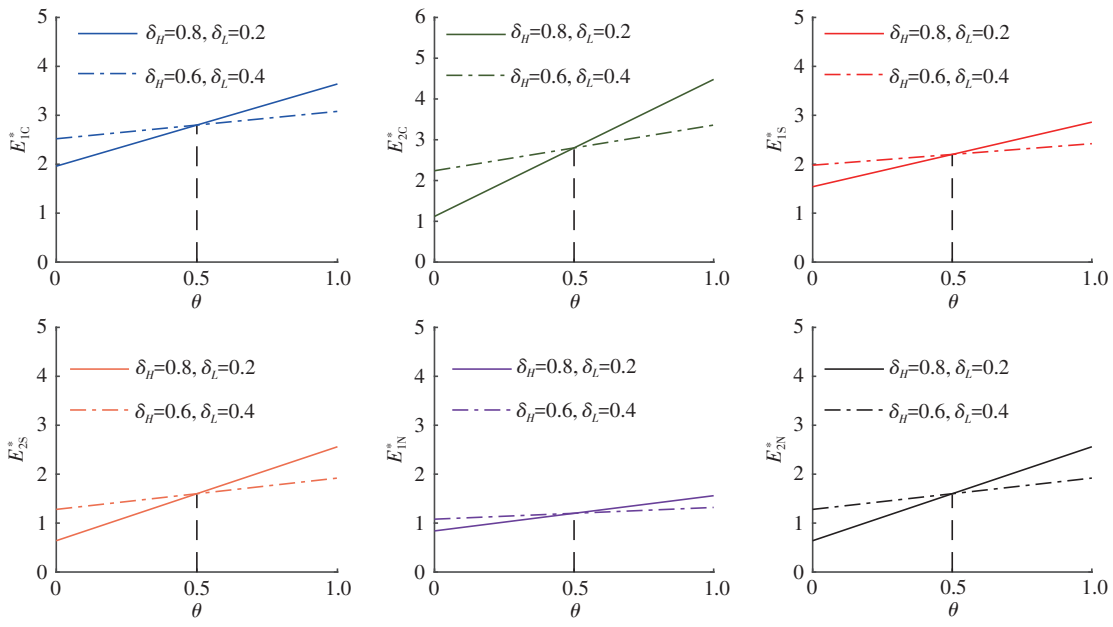


图12　不同顾客异质性下同一模型的最优投入努力随θ的变化曲线(λ = 0.8)

Fig.12　Variation curves of optimal effort levels of same model with respect to θ under different customer heterogeneity conditions (λ = 0.8)

性市场，表明高敏感顾客比例越大，供应链成员越愿加大投入以换取更高服务质量收益，即使波动更大。可见，高异质性市场优势并非绝对，投入努力依赖于高敏感顾客比例θ，异质性设定潜在上限，而θ决定该上限能否充分体现。天气条件对整体投入水平具有放大作用：好天气下，高θ带来的激励效应更明显，使投入高于恶劣天气情形。

6　结论

研究以一个由制造商与无人机运输商组成的低空物流供应链为对象，考虑天气变化与顾客异质性，对比分析集中决策、Stackelberg博弈与Nash博

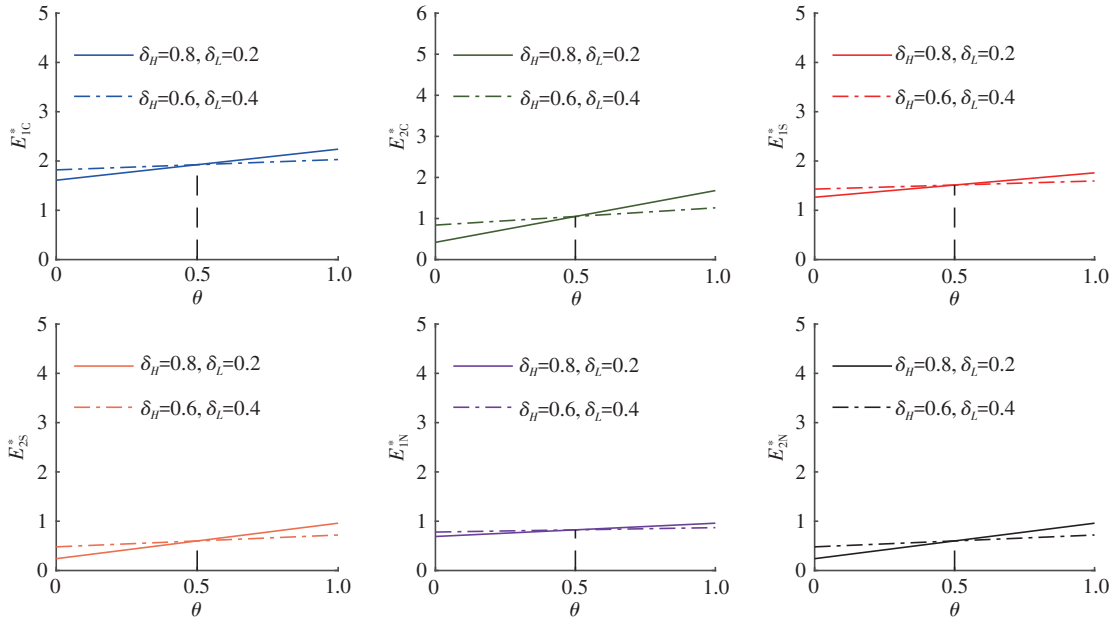


图13　不同顾客异质性下同一模型的最优投入努力随θ的变化曲线(λ = 0.1)

Fig.13　Variation curves of optimal effort levels of same model with respect to θ under different customer heterogeneity conditions (λ = 0.1)

弈的模型均衡解，最后进行数值分析，主要研究结论如下。

（1）集中决策在长期天气环境变化下始终能够实现最高的服务质量和收益，但其对短期天气随机扰动的敏感度也最大，波动幅度较为显著；相比之下，Nash博弈下的服务质量和收益最低，但受短期天气扰动的影响最小；Stackelberg博弈则介于两者之间。

（2）顾客异质性较高时，长期天气环境改善能够显著提升供应链的服务质量和收益，但在天气恶化时，供应链也会承受更大的冲击；相反，当顾客异质性较低时，供应链对天气改善的响应较为有限，收益提升不明显，同时在恶劣天气下受到的影响也相对较小。

（3）供应链各方投入呈现非对称性：在极端恶劣天气下，运输商不会进行投入，而制造商仍因直接需求能够保持一定投入水平。此外，投入努力随高敏感客户比例增加而上升，但同一天气条件下高异质性并不必然优于低异质性，其相对水平取决于高敏感客户在市场中的占比，并在超过临界比例时发生反转，这种特征同样体现在服务质量水平与供应链最优值函数的变化上。

研究结论表明，低空物流供应链成员应首先建立有效的协调机制，通过协调契约提高整体服务质量水平和供应链收益，同时增强对恶劣天气环境的应对能力，提升运输环节的韧性和供应链的稳定性。其次，企业应充分考虑目标客户群的差异，从而合理配置资源投入，且尽可能地提升顾客异质性，实现供应链价值的最大化。此外，本研究仅考虑二级低空物流供应链，现实中会涉及更多上下游企业，且天气环境突变，未来研究可考虑更多供应链主体，引入随机过程描述天气变化，结合政策干预、与传统供应链多渠道竞争等现实因素，深化天气条件变化下对低空物流供应链的相关研究。

参考文献：

[1] 杜德林，谭文蔚，王姣娥，等. 中国低空经济政策演进及区域差异[J]. 资源科学，2025，47(8)：1651-1662.
DU Delin，TAN Wenwei，WANG Jiaoe，et al. Evolution and Regional Differences of Low-Altitude Economy Policies in China[J]. Resources Science，2025，47(8)：1651-1662.

[2] GUAN X M，SHI H X，XU D S，et al. The Exploration and Practice of Low-Altitude Airspace Flight Service and Traffic Management in China[J]. Green Energy and Intelligent Transportation，2024，3(2)：100149.

[3] 徐　静，黄小芹，罗淑丹. 基于消费者异质性偏好下车企生产决策及政府补贴影响[J]. 管理工程学报，2024，38(5)：190-200.
XU Jing，HUANG Xiaoqin，LUO Shudan. Production Decision-

Making of Vehicle Enterprises and the Impact of Government Subsidies Based on Consumers' Heterogeneous Preferences[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2024, 38(5): 190-200.

[4] PERLMAN Y. Establishing a Dual Food Supply Chain for Organic Products in the Presence of Showrooming: A Game Theoretic Analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 321: 128816.

[5] 周礼南，周根贵，郑健壮，等. 考虑消费者异质性偏好的定制绿色农产品供应链均衡研究[J]. 中国管理科学，2026，34(2)：275-286.
ZHOU Linan, ZHOU Gengui, ZHENG Jianzhuang, et al. Research on Green Agricultural Supply Chain Network Equilibrium with Consumers' Heterogeneous Preferences under Mass Customization[J]. Chinese Journal of Management Science, 2026, 34(2): 275-286.

[6] JIN S, SHEN J L, DABUO F T. Research on Enterprise Production Decision-Making Considering Consumer Heterogeneity under Carbon Labeling System[J]. Managerial and Decision Economics, 2024, 45(5): 2838-2853.

[7] HUANG Y S, HO J W, LEE C L. Group Buying in Multiple Channels with Consideration of Heterogeneous Customers[J]. International Journal of Production Economics, 2024, 270: 109170.

[8] ZHANG X L, LI Y F, ZHU J H, et al. Pricing Game Models of Hybrid Channel Supply Chain: A Strategic Consumer Behavior Perspective[J]. Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research, 2023, 18(3): 1177-1195.

[9] ANDRIANI D P, TSENG F S. Pricing and Investment Decisions when Facing Heterogeneous Customers under Different Supply Chain Power Structures[J]. Alexandria Engineering Journal, 2023, 78: 390-405.

[10] 李晓冰，王煜钧，蒋　炜. 考虑消费者异质性的动力电池回收闭环供应链定价决策[J]. 中国管理科学，2025，33(2)：279-291.
LI Xiaobing, WANG Yujun, JIANG Wei. Pricing Decision of Closed-Loop Supply Chain for Power Battery Recycling Considering Consumer Heterogeneity[J]. Chinese Journal of Management Science, 2025, 33(2): 279-291.

[11] 饶卫振，彭新如，崔　巍. 异质顾客参与协作配送的联盟企业激励策略研究[J/OL]. 中国管理科学，1-22[2026-03-04]. https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2023.0531.
RAO Weizhen, PENG Xinru, CUI Wei. Research on Incentive Strategy of Coalition Enterprises with Heterogeneous Customers Participating in Collaborative Distribution[J/OL]. Chinese Journal of Management Science, 1-22[2026-03-04]. https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2023.0531.

[12] CHEN L, WANG Y L, ZENG L, et al. Logistics Service Decision for E-Commerce Supply Chain with Fairness Concern under Uncertain Environment[J]. International Journal of General Systems, 2025, 54(1): 1-36.

[13] ZHOU C, BAI D Y, LIU Z B, et al. Optimal Logistics Service Strategies in Green Agricultural Product Supply Chains with E-Commerce Platforms[J]. Sustainable Operations and Computers, 2024, 5: 156-166.

[14] YU S, GUO C. Service Design under Asymmetric Service Provider Competition: Applications of AI Services[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2024, 182: 103424.

[15] WANG K, WU P, ZHANG W. Stochastic Differential Game of Joint Emission Reduction in the Supply Chain Based on CSR and Carbon Cap-and-Trade Mechanism[J]. Journal of the Franklin Institute, 2024, 361(6): 106719.

[16] 徒　君，高凤阳，黄　敏. 不同权力结构下供应链减排策略随机微分博弈[J]. 控制与决策，2024，39(1)：291-300.
TU Jun, GAO Fengyang, HUANG Min. Stochastic Differential Game of Supply Chain Emission Reduction Strategies under Different Power Structures[J]. Control and Decision, 2024, 39(1): 291-300.

[17] HUANG Z S, ZHAO Y X, EDWIN CHENG T C, et al. Reverse Channel Selection in a Dynamic Stochastic Closed-Loop Supply Chain[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2024, 192: 103774.

[18] 王道平，张　可，周　玉. 政府奖惩下考虑回收率动态随机的闭环供应链微分博弈[J]. 中国管理科学，2024，32(5)：158-170.
WANG Daoping, ZHANG Ke, ZHOU Yu. Differential Game of Closed-Loop Supply Chain with Dynamic Stochastic Recovery Rate under Reward-Penalty Mechanism of Government[J]. Chinese Journal of Management Science, 2024, 32(5): 158-170.

[19] LI C, FENG Q Z, DING C C, et al. An Improved Multi-Actor Hybrid Attention Critic Algorithm for Cooperative Navigation in Urban Low-Altitude Logistics Environments[J]. Computers,

Materials & Continua，2025，84(2)：3605-3621.

[20] 陈　丹，汤　程，谢　宇，等. 面向城市低空物流配送的无人机实时航迹双层规划[J]. 航空学报，2025，46(16)：229-247.
CHEN Dan，TANG Cheng，XIE Yu，et al. Real Time Dual Layer Path Planning of Unmanned Aerial Vehicles for Urban Low Altitude Logistics Distribution[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica，2025，46(16)：229-247.

[21] DENG M Y，YANG Q Q，PENG Y. A Real-Time Path Planning Method for Urban Low-Altitude Logistics UAVs[J]. Sensors，2023，23(17)：7472.

[22] 赵明丽，马小龙，曹若飞. 基于无人机的铁路非正常接发列车作业方案设计[J]. 铁道运输与经济，2025，47(8)：30-39.
ZHAO Mingli，MA Xiaolong，CAO Ruofei. UAV-Assisted Operation Design for Abnormal Train Reception and Departure in Railway[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(8)：30-39.

[23] 肖作鹏，张伟聪，李祎杨，等. 低空无人机配送的空地协同组织特征及挑战：以深圳市为例[J]. 资源科学，2025，47(8)：1663-1674.
XIAO Zuopeng，ZHANG Weicong，LI Yiyang，et al. Characteristics and Challenges of Air-Ground Coordination for Low-Altitude Drone Delivery：A Case Study of Shenzhen[J]. Resources Science，2025，47(8)：1663-1674.

[24] 钟导峰，尹传忠，梁亚莉，等. 应急物资“火车-卡车-无人机”协同运输优化[J]. 铁道运输与经济，2025，47(8)：40-50，58.
ZHONG Daofeng，YIN Chuanzhong，LIANG Yali，et al. Optimization of Train-Truck-Drone Cooperative Transportation for Emergency Supplies[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(8)：40-50，58.

[25] 李玉龙，苏　涵，吴国滨. “平急两用”无人机食品配送系统运营建模与优化研究[J/OL]. 中国管理科学，1-23[2026-03-04]. https：//doi. org/10. 16381/j. cnki. issn1003-207x. 2024. 1981.
LI Yulong，SU Han，WU Guobin. The Construction and Optimization of a Drone Delivery System for Dual Use of Usual and Emergency Situations[J/OL]. Chinese Journal of Management Science，1-23[2026-03-04]. https：//doi. org/10. 16381/j. cnki. issn1003-207x. 2024. 1981.

[26] FENG L L，CAO H M. Neural Network-Based Air-Ground Collaborative Logistics Delivery Path Planning with Dynamic Weather Adaptation[J]. Mathematics，2025，13(17)：2798.

[27] LI Y，LIU L Z，LI W X. Quality Control Strategies of the Supply Chain Based on Stochastic Differential Game[J]. Evolutionary Intelligence，2024，17(1)：177-188.

[28] 郭建平，张　玮，周博闻，等. 低空经济气象前沿科技问题研究进展与展望[J]. 气象，2025，51(11)：1455-1476.
GUO Jianping，ZHANG Wei，ZHOU Bowen，et al. Progress and Prospect of Research on the Key Frontier Scientific and Technological Issues in Low-Altitude Economy Meteorology[J]. Meteorological Monthly，2025，51(11)：1455-1476.

[29] D'ASPREMONT C，JACQUEMIN A. Cooperative and Noncooperative R&D in Duopoly with Spillovers[J]. The American Economic Review，1988，78(5)：1133-1137.

[30] WEI G X，CHEN X，QIN X H. Product Greenness and Pricing Strategy of Supply Chain Incorporating Asymmetric Heterogeneous Preferences[J]. IEEE Access，2021，9：11563-11584.

(责任编辑　吴文娟)