

# 第 1 章



## 概 论

2023 年,我国全年社会物流总费用为 18.2 万亿元,标志着我国连续七年成为全球最大物流市场。然而我国物流总费用占 GDP 比重 14.4%,同一时期美国的占比指标仅为 9.1%,表明我国尚未达到“物流强国”水平,整体物流效率仍待提升。近年来,人工智能、大数据分析等技术快速发展,为推进物流行业数字化转型,实现精细化、智能化管理奠定了坚实基础。2017 年 7 月,国务院印发《新一代人工智能发展规划》,指出必须推动人工智能与各行业融合创新,在制造、农业、物流、金融、商务、家居等重点行业和领域开展人工智能应用试点示范,推动人工智能规模化应用,全面提升产业发展智能化水平。规划明确提出完善智能物流公共信息平台和指挥系统、产品质量认证及追溯系统、智能配货调度体系,为我国经济发展注入新动能。2021 年,《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》将数字化转型作为我国发展的重要战略,明确提出培育智慧物流等新增长点。

O2O 即时配送模式是在这一背景下应运而生的一种新型配送模式,即基于 AI 和大数据分析等技术,实现一小时内配送到家的超高时效配送。近年来,我国即时配送市场订单数量持续增长。据商务部数据显示,2023 年我国即时配送订单超过 400 亿单,同比增长 30%左右(商务部国际贸易经济合作研究院,2023),市场规模约 3410 亿元,用户规模破 7.5 亿。相比之下,美国头部的即时配送服务商 Instacart 年订单量仅约 2.6 亿单,比中国少了两个数量级。O2O 即时零售逐渐被消费者熟悉和应用,已经成为当今社会重要的消费模式之一(中国连锁经营协会,2022)。

## 1.1 即时物流简介

美国支付与推广平台 TrialPay 公司的创始人 Alex Rampell 在 2010 年 8 月首次将可以促进线上到线下商务发展的模式定义为“Online-to-Offline”商务,简称为 O2O 模式。目前学界大部分学者沿用了 Rampell 的说法,认为 O2O 模式核心即为线上交易,线下体验(Pan et al.,2017;Shi et al.,2019)。根据消费者体验方式的不同,O2O 模式可以分为到家和到店两种(孔栋等,2016)。这两种模式的主要区别在于,客户在 O2O 平台上下单后,到家 O2O 模式是由配送员将商品送到顾客手中,而到店 O2O 模式是顾客到商店自取商品或享受服务。O2O 即时服务模式属于到家 O2O 服务模式的一种,消费者线上下单,线下接收订购的服务或产品。这种服务模式为买卖双方都带来了便利(Dai et al.,2021)。图 1-1-1 展示了 O2O 模式的运作流程:消费者在 O2O 平台下单;随后订单被传送给商家等待确认;商家在确认后开始准备订单;同时订单信息被交付给配送平台并分派给配送员;最后,指定的配送员待订单准备完成后从商家拣取订单并将其配送给消费者。

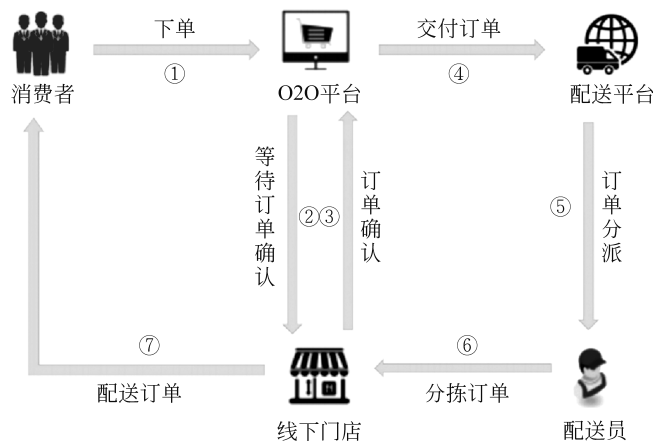


图 1-1-1 O2O 模式运作流程

O2O 即时物流是 O2O 模式下一种新兴的物流形态,指 O2O 企业满足一小时内送达要求的配送方式。由于平台经济的普及和消费者的接受度不断提高,O2O 即时零售产业也渐成规模,行业巨头纷纷入局,力求在 O2O 即时零售市场规模快速增长趋势下获取更有利的市场地位。众多互联网企业争先搭建 O2O 平台,抢夺

用户和商家资源,也有越来越多的零售企业进驻 O2O 即时零售平台,以扩张自身销售渠道。以“达达”“点我达”“美团配送”为代表性的 O2O 即时物流平台已经成为人们快节奏生活中不可缺少的一部分。O2O 线上交易平台与 O2O 即时物流平台二者相互合作,彼此依托。O2O 线上交易平台可以充分发挥线上销售平台优势,减少对消费者购物时空条件的约束,通过线上平台展示待售商品的基本信息,对商品进行在线广告宣传(吴晓志等,2014;Chen et al.,2013;Xiao and Dong,2015;Tsai et al.,2013)。O2O 即时物流平台则为消费者提供更高便利性、更高时效性的配送到家服务,成为连接消费者和 O2O 商家的桥梁,实现与 O2O 线上交易平台的功能性互补。在“新玩家”不断入局的情况下,O2O 即时零售各大平台的市场总规模也从 2017 年的 365.71 亿元快速增长至 2022 年的 5042.86 亿元(商务部国际贸易经济合作研究院,2023),见图 1-1-2。O2O 即时零售在线销售品类不断丰富。按照是否适合开展即时零售业务为标准,社会消费品零售总额所统计的 16 个限额以上商品零售类型中,金银珠宝、汽车、石油及制品、家具、建筑及装潢材料 5 个类型在现阶段开展即时零售的难度较大。适宜开展即时零售业务的零售品类大致包括除上述 5 个类型以及餐饮业之外的粮油食品、饮料、烟酒、日用品等 11 个类型<sup>①</sup>。

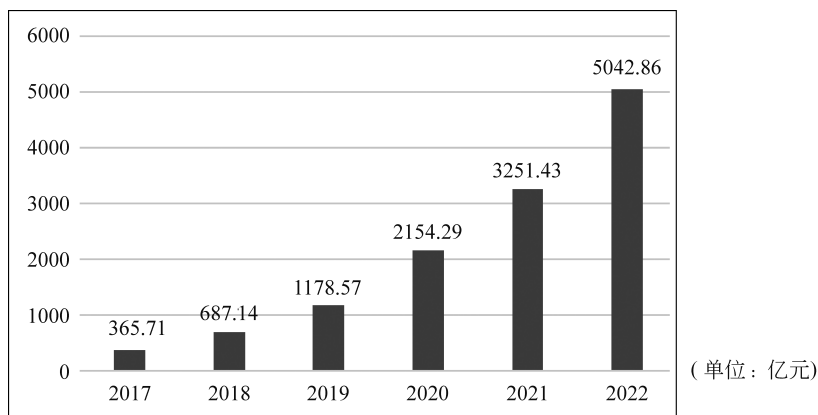


图 1-1-2 2017—2022 年我国 O2O 即时零售市场规模

<sup>①</sup> 国家统计局公布的社会消费品零售总额按消费类型分,可以划分为餐饮收入和商品零售。其中,商品零售的限额以上单位商品零售包含了 16 个类型,分别是:粮油、食品类,饮料类,烟酒类,服装、鞋帽、针纺织品类,化妆品类,金银珠宝类,日用品类,体育、娱乐用品类,家用电器和音像器材类,中西药品类,文化办公用品类,家具类,通信器材类,石油及制品类,汽车类以及建筑和装潢材料类。

## 1.2 即时物流管理和决策的特点

### 1.2.1 需求侧特点

O2O 即时服务作为整合线上与线下的新型商业模式,消费者需求也受到线上线下等多方面因素影响。O2O 消费者与传统电商消费者在需求特点、消费习惯、关注因素等方面均有所不同。综合现有文献研究,与传统电子商务相比,O2O 即时服务模式下的消费者需求主要有以下特点。

(1) 消费者需求对时效性要求极高。不同于以往的电子商务模式,O2O 模式下消费者大部分订单从下单到送达的时间要求不超过一小时,某些 O2O 平台甚至推出半小时送达服务,例如阿里巴巴的生鲜平台——盒马鲜生。在 O2O 即时服务中,顾客对即时性要求高,对订单的延迟较为敏感(Taylor,2018)。

(2) 消费者需求的动态变化性极强(Tao et al.,2021)。订单数量不仅按天统计具有较高的波动水平,日订单量需求分布如图 1-2-1(a)所示,而且在一天内也会发生较大变化,每小时订单量需求分布如图 1-2-1(b)所示。如果需求预测不精准,就无法有效匹配配送员和接单起点。高峰时间段或订单密集地点很可能出现运力不足的情况,波谷时间段或订单稀疏地点则会产生运力过剩问题,严重影响配送效率,同时造成资源浪费(Dai and Liu,2020)。

(3) 受线上线下多重因素影响。在线上渠道,平台通常通过推出多样的促销活动,如限时折扣、优惠券等,吸引消费者,造成需求的显著波动。这些促销活动虽能短期内刺激销量,却也带来需求的不确定性,因为消费者可能由于价格敏感性做出非计划性购买,导致需求变化更加复杂。同时,线下店铺的地理位置、服务质量和产品多样性等也对需求产生影响,使得 O2O 平台需求更加不稳定。

### 1.2.2 供给侧特点

鉴于 O2O 平台的即时性和订单量的高波动性,传统物流模式已经无法适应 O2O 即时且高度波动的配送需求,学界和业界都迫切寻求创新性解决方案,以平衡供需双方需求,降低配送成本。随着移动互联网和物联网技术的快速发展,众包配送这种新的物流模式为 O2O 服务提供了有力支持,给配送供给侧带来以下两个特点。

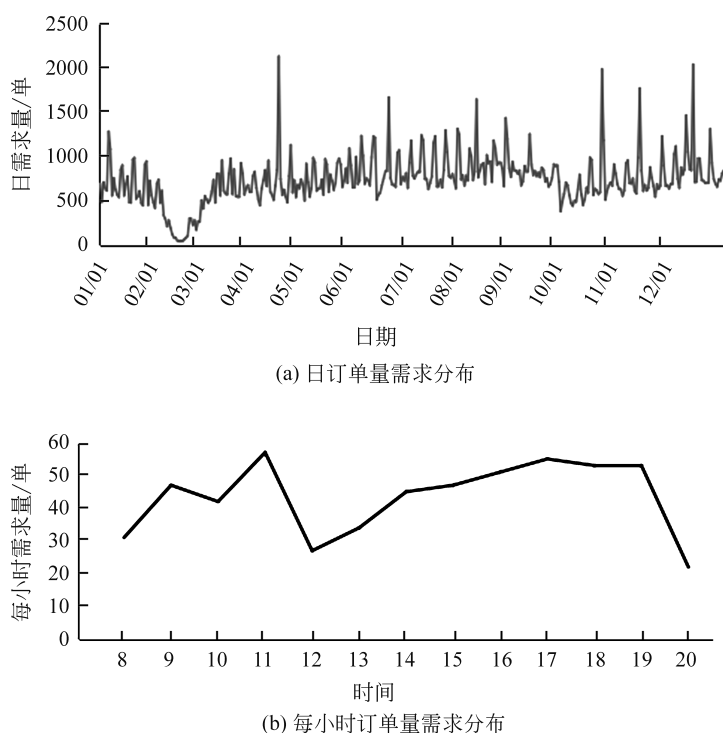


图 1-2-1 O2O 即时物流平台的日订单量分布和每小时订单量分布

(1) 众包配送与平台是合作伙伴关系,而非传统的雇佣关系。众包配送将原来由企业自建配送队伍所承担的配送任务分派给大众群体完成,实现物流配送运力的社会化。在众包配送中,社会公众可以作为自由配送人,通过众包配送平台获取任务信息,根据自己的时间与行程安排选择合适的任务,完成配送(刘雅儒, 2016)。众包配送员不需要与平台签订长期的雇佣合同,他们利用自己的空闲时间为平台配送订单,并赚取额外的收入。与传统物流问题中的自建配送员不同,众包配送员根据自己配送的每一份订单获取收入。当他们没有获取订单时,平台不需要补偿他们的空闲时间损失,也不需要考虑其他福利成本,因此众包配送员与平台是合作伙伴关系,是一个更灵活、更低成本的运力提供方案。

(2) 众包配送员可分为不同类型,多种运力模式共存。随着众包模式的发展,众包配送员被划分为两类。一类是全职众包配送员,他们参与配送的主要动力是赚取收入,且他们没有其他工作(Bai et al., 2019)。这些配送员在某段时间内(如几个月)为一个平台工作,且他们每天的工作会持续一整天。另一类是兼职众包配送员,他们通常会在自己出行时选择顺路的订单进行配送(Lee and Savelsbergh,

2015; Archetti et al., 2016; Arslan et al., 2019)。不同于全职配送员, 兼职配送员通常在考虑自己行程安排的情况下顺路完成订单配送。

### 1.2.3 决策的特点

上述供给侧和需求侧的特点给 O2O 物流系统的管理和决策提出了新的挑战。目前基于现有配送算法的 O2O 即时物流的精细化管理水平还有待提升, 物流配送成本较高。比如美团外卖 2021 年的物流费用占平台年收入的 70.79%, 高达 682 亿元(美团点评, 2021)。目前业界 O2O 即时物流精细化管理水平较低的瓶颈主要体现为供需之间在空间和时间上的不匹配, 具体表现在以下两个方面。

(1) 在供给端, 现有调度系统对于数据维度的使用不充分, 只利用了订单维度数据, 没有充分利用配送员维度的数据, 从而导致决策不精准。

现有调度系统在优化订单分派时, 多从订单这一单一维度出发进行优化, 而没有充分考虑配送员差异化配送速度的影响。Xu 等(2023)研究发现, 在 O2O 即时物流场景中, 众包配送员个人的能力、经验、行为不同, 对于外部环境、平台激励机制的反应也不同, 例如评分较高的配送员对于收入激励的敏感性较低, 评分较低的配送员对于收入激励的敏感性较高。不考虑配送员和环境差异化的决策会导致供需匹配不准确, 一方面未能充分利用高能力配送员的潜力, 降低整体效率; 另一方面则加重了低能力配送员的配送压力, 增加延误风险。因此建模时有必要同时考虑订单和配送员两个维度。然而现有研究通常假设将同一订单分配给不同配送员时, 其需要的配送时间是一样的, 忽略了配送员和环境的差异(慕静等, 2018; 杨东林和荣鹰, 2019; Archetti et al., 2016; Arslan et al., 2019; Voccia et al., 2019; 陈萍和李航, 2016; 丁秋雷等, 2014; 饶卫振等, 2019; 余海燕等, 2021; Dong and Ibrahim, 2020)。尽管已有研究关注时间、路况、天气或配送员类型对配送速度的影响, 以及由此带来了订单分派决策的挑战(周鲜成等, 2019; Tao et al., 2021; Huang et al., 2017), 但这些研究仍没有充分考虑人的维度的影响。例如, 考虑车辆不同出发时刻对行驶时间的影响, 分析车辆时变速度、载重与碳排放率之间的关系, 但仍假设不同配送员(或车辆)的速度是一致的, 即不同配送员(或车辆)配送同一订单所花费的时间是一致的(周鲜成等, 2019)。因此, O2O 即时物流决策需要新的算法将配送员维度的特点也纳入建模考量, 以实现精准匹配配送员和订单, 提升决策精准度, 优化系统成本。

(2) 在需求端, 现有调度系统大多没有考虑未来订单集的时空属性, 从而无法进行全局优化。

现有调度系统大多只考虑当前已经出现的订单, 没有考虑未来订单。然而在

O2O 即时物流场景中,由于订单的数目和分布随时间波动性高,低估未来的订单数目而将所有运力都分配给当前的订单,可能造成未来的运力不足和更多的延误;反之,高估未来的订单数目而保留部分目前的运力以等待未来的订单,则可能造成运力的浪费和当前订单的延误。因此,在 O2O 即时物流场景中考虑未来的需求非常必要。此外,O2O 即时物流的需求不仅与订单的数目和时间分布有关,也与订单的空间分布强相关。因此建模时有必要同时考虑未来订单集的时间和空间两个维度。然而现有研究大多没有考虑未来需求(慕静等,2018;杨东林和荣鹰,2019;Archetti et al.,2016;Arslan et al.,2019;Voccia et al.,2019;陈萍和李航,2016;丁秋雷等,2014;饶卫振等,2019;余海燕等,2021;Dong and Ibrahim,2020;周鲜成等,2019;Tao et al.,2021;Huang et al.,2017;Liu et al.,2016;Carlsson et al.,2018)。部分研究考虑未来需求时,亦假设未来需求服从特定的先验分布。例如 Dayarian 和 Savelsbergh(2020)考虑未来订单和顾客到达的概率信息对决策的帮助;Voccia 等(2019)通过考虑未来订单的统计信息,给出车辆是否应该继续在商家等待的判断标准;Ulmer 等(2019)通过构建价值函数估计方法预测每个区域产生订单的概率,并将其整合到动态规划模型中。但上述这些基于先验分布假设的研究方法并未考虑需求的空间属性,无法适用 O2O 即时物流场景。因此,O2O 即时物流决策需要新的方法来预测未来订单集的时空分布,否则决策是短视且不精准的。

对于这样一个高度复杂的系统,传统的决策方式已经不能满足其需求,需要构建 AI 技术加持下的数据驱动的新决策模型和范式。这一问题已成为全球学术界和业界关注的研究前沿。

## 1.3 本书主要内容

基于这些研究成果,本书将系统性地介绍 AI 和运筹决策等技术相结合的新决策研究方法,剖析如何利用海量数据和新决策方法应对即时物流面临的挑战。本书共分为 5 章。

第 1 章介绍即时物流行业的基本情况和主要挑战,以及相关领域的最新研究进展。

第 2 章从即时物流的供给侧出发,介绍即时配送的三大特点(超高时效性、高波动性、海量性),由此催生的众包配送这一新模式的管理挑战,以及相应的激励机制和运力规划模型。

第3章从即时物流的需求侧出发,针对即时物流需求具有时空动态分布的特点,介绍基于机器学习的算法来进行精准预测和高效管理,包括自适应分层增量预测算法,基于随机森林的大促需求预测算法等。

第4章聚焦即时物流调度管理系统,针对其涌现出的新挑战——需要个性化、多主体协同决策,介绍AI驱动的调度决策模型,包括考虑多类型运力参与的配送决策模型、基于机器学习的个性化派单模型和考虑预测不确定性的调度模型。

第5章聚焦即时物流的促销管理系统,介绍三边平台下新近涌现的促销相关问题,包括基于机器学习的动态促销策略、手机App展示顺序和价格折扣的交互促销策略,以及平台经济情境下新进入者对平台各方的影响。

本书服务于我国人工智能发展战略和数字化转型战略,聚焦国民经济主战场,系统介绍AI驱动的即时物流决策与管理模型及实践路径。一方面,本书可帮助读者深入理解如何将AI技术与运筹管理理论结合构建新的决策和管理模型,并采用数据驱动的方式进行企业实践问题决策;另一方面,书中提出的可行数据运营解决方案有助于企业实现精细化管理,降低成本,促进物流行业发展和数字化转型升级,巩固全球领先优势。随着我国大力推动经济社会数字化转型,未来将有更多物流和其他行业进行数字化转型。本书所倡导的基于人工智能的前瞻性管理研究能为企业数字化运营提供指导,在国家推动数字化转型战略和人工智能发展战略的背景下,其意义尤为突出。



## 第 2 章



### 考虑众包参与的 O2O 运力规划与管理

与传统电商行业相比,O2O 即时服务具有需求高度不确定、时空敏感以及配送需求多样化等诸多特点。若继续采用传统的自建运力,会带来高额成本。为应对该问题,众包配送应运而生。众包配送为 O2O 平台提供了低成本、灵活的解决方案,但也带来了以下两个主要挑战。

(1) 传统的激励机制不再适用。众包配送员和平台没有劳动合同,不是雇佣关系,而是合作关系,按单结算报酬,工作时长灵活自主,具有较大的不确定性。因此,无法简单地将针对传统劳动力的激励措施直接应用于众包配送员,平台运力管理难度加大。平台管理者需要深入研究如何有效激励众包配送员,提升其工作积极性和效率,以确保配送能够满足消费者需求。

(2) 激励策略设计需考虑多运力模式。O2O 即时服务下,多种运力模式共存,需要制定差异化的激励机制。自建和众包配送员的工作时长和经验各不相同,他们面对各种激励措施的反应也不同。这要求管理者针对性地设计激励策略,最大限度地提高配送效率。并在此基础上通过合理配置不同类型的配送员,实现人力资源的有效利用,从而降低人力成本。

本章结合激励相关理论和最新研究成果,从即时物流的供给侧出发,分析众包配送这种新模式的管理挑战,以及相应的激励机制和运力规划模型。本章的结构如下:2.1 节首先对众包激励机制和运力规划的相关研究进行综述;2.2 节介绍 O2O 背景下如何设计众包激励机制;2.3 节比较自建运力和众包运力的效率差别及其影响机制;2.4 节构建一个考虑众包配送的多类型运力规划模型。

## 2.1 文献综述

在 O2O 物流领域,众包配送员的激励机制和运力规划备受关注。激励机制直接影响配送员的行为和态度,适当的激励可以提升他们的积极性和工作效率,改善服务质量。同时,有效的运力规划也影响着激励机制的执行效果。若运力规划不足或不合理,可能导致配送资源的浪费或短缺,进而影响激励机制的效果。本节将介绍相关研究进展,探究 O2O 背景下众包配送员的激励机制与运力规划问题。

### 2.1.1 众包激励机制

在 O2O 模式中,平台管理者需要审慎考量如何激发众包配送员的积极性。本章的研究与两类文献有着密切联系:一是关注收入对众包配送员行为的影响;二是探究收入、绩效反馈和处罚之间的相互影响关系。

目前文献中激励方案设计所涉及的要素主要有收入、评分和处罚。收入为众包配送员提供了有形的报酬和外在的激励(Baker et al.,1988)。已有研究表明,当众包配送员的收入增加时,其工作时长也相应增加(Chen,2016;Allon et al.,2023)。此外,评分和处罚是来自消费者的反馈,反映了配送员的素质与内在动机有关(Butler and Nisan,1986)。一般 O2O 平台上,只有配送员和平台方才能看到评分。近年来,许多 O2O 平台采用评分(例如,优步)和处罚(例如,亚马逊)机制来提供绩效反馈,以此触发配送员的内在动机(Butler and Nisan,1986;Lourenço,2016)。因此,众包配送员对评分和处罚的反应至关重要。同时,当评分、处罚与收入一起使用时,理解三者之间的相互关系也很重要。具体来说,如果收入和评分都能增加众包配送员的工作激励程度,那么二者在激励机制中是相互补偿还是相互替代?此外,如果惩罚降低了配送员的积极性,那么其负面作用是否会削弱收入的积极影响?

尽管许多平台都采用了评分和处罚,但截至目前,关于众包配送员的文献并没有研究过评分和处罚相关的激励方案,以及二者与收入的关系。然而,收入、评分、处罚的共同激励机制是 O2O 平台的基本特征。因此,有必要进一步探究 O2O 平台在收入、评分和处罚方面的激励方案如何影响众包配送员的工作决策。

鉴于收入对人员激励的重要作用,先前研究调查了在不同众包平台上(例如,亚马逊的 Mechanical Turk)收入对众包员工的影响。在 O2O 即时配送情境