

doi:10.19920/j.cnki.jmsc.2025.07.003

消费低碳化策略选择：线上还是线下？^①

杨 弦¹, 史锟洋², 林志杰^{3*}, 段宏波⁴

(1. 中国石油大学(北京)经济管理学院, 北京 102249; 2. 东北财经大学管理科学与工程学院, 大连 116024;
3. 清华大学经济管理学院, 北京 100084; 4. 中国科学院大学经济与管理学院, 北京 100190)

摘要: 促进绿色低碳转型是消费领域的一场深刻变革, 低碳行为选择对减少消费端温室气体(GHG)排放、实现碳中和愿景意义重大。本研究建立了系统估计线上与线下商品零售和餐饮消费的GHG排放的方法, 以北京为例, 通过16万次蒙特卡洛模拟仿真实验, 评估了不同消费模式下的GHG排放量, 并深入分析了低碳消费的减排策略选择。平均来看, 线上商品零售和餐饮外卖方式的GHG排放量要高于传统线下方式, 线上消费的高排放主要来源于包裹的运输和包装, 而线下消费的排放则很大程度归因于消费者购物和餐饮途中的交通方式。研究构建了距离-排放曲线, 揭示了线上线下消费选择应遵循的临界点, 即线上或线下消费方式的低碳程度与消费者距商店或餐厅的距离及其出行的交通方式有关。若消费者步行或者公共交通出行, 线下消费的方式一般更为低碳; 而若距商店或餐厅离较远, 消费者自驾出行时, 则线上的方式更加低碳。包装、运输、配送、出行方式以及消费行为等的低碳化是有效的GHG减排策略, 研究结果显示, 不同的策略选择可将商品或餐饮消费的GHG排放最高降低94%。

关键词: 绿色经济; 低碳消费; 电子商务; 餐饮外卖; 减排策略

中图分类号: F204 文献标识码: A 文章编号: 1007-9807(2025)07-0039-14

0 引言

电子商务已深度融入了生产生活的各个方面, 在经济社会数字化转型方面发挥了举足轻重的作用。根据中国互联网络信息中心(CNNIC)发布的报告^[1], 截止2024年6月, 我国网络购物用户规模达到了9.05亿, 全国网上零售额达到了7.1万亿元。同时, 2023年中国快递服务企业的包裹量为1320.7亿件, 其中网络购物产生的包裹量已占80%左右^[2], 同年外卖订单的数量也超过了200亿单。这些包裹和外卖的包装、运输和配送带来了大量的温室气体排放和潜在的环境影响^[3, 4]。为深入践行绿色经济发展理念, 贯彻落实碳达峰、碳中和(双碳)目标也成为了电子商务高

质量发展的重要内容。2021年1月, 商务部办公厅发布《关于推动电子商务企业绿色发展工作的通知》, 首次从企业层面提出了电商绿色发展的行动措施^[5]。2022年1月, 国家发展改革委等八部门印发了《促进绿色消费实施方案》指出, 要推进消费结构绿色转型升级, 加快形成简约适度、绿色低碳、文明健康的生活方式和消费模式, 全面促进绿色消费^[6]。这意味着低碳化将成为未来电子商务发展的重要方向。

消费者在购物和餐饮消费时面临线上和线下等多种选择, 据调查, 20.6%的受访者在网上购物的消费额超过日常购物总消费额的一半^[1], 而实物商品网上零售占社会消费品零售总额的比重达到24.5%^[7]; 对于餐饮消费, 艾媒咨询的一项数

① 收稿日期: 2023-01-10; 修订日期: 2024-10-06.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(72101051; 72325002; 72325008; 72022007).

通讯作者: 林志杰(1986—), 男, 广东揭阳人, 博士, 长聘副教授, 博士生导师。Email: linzhj@sem.tsinghua.edu.cn

据调查显示中国 45.7% 消费者偏好的单人就餐方式为点外卖, 32.8% 消费者喜欢到餐厅就餐^[8]; 这意味着对购物和餐饮消费而言越来越多的消费者倾向选择线上方式。值得指出的是, 无论是线上电商消费还是传统的线下实体店消费, 都会带来温室气体排放的增加。那么, 当消费者面对多种购物方式的选择时, 如何评估不同消费行为的低碳程度? 又应该采取哪些减排策略或行为调整来减少相应的排放呢? 显然, 这些问题的研究对推动电子商务的绿色低碳发展, 从消费侧助力温室气体减排和碳中和目标具有重要意义。

已有一些研究从供应链角度分析了线上购物中的包装、运输和配送等因素对温室气体排放的影响。例如, 有文献通过估计包裹运输中瓦楞纸箱和塑料袋的消耗^[9-11], 以及外卖中一次性餐具和外包装的使用估算了其对温室气体排放的影响^[4]; 相关研究也强调了包裹运输产生的 GHG 排放量的较大贡献^[12, 13], 而公路运输的排放占了所有运输方式的 80%^[3]。特别地, 商品配送时最后 1 km 的交付方式不同, 其产生的 GHG 排放也存在着显著差异^[14]。此外, Zhao 等通过同时考虑多个因素, 对比分析了某城市的商品线上零售和线下零售的碳排放情况, 认为商品线上零售的碳排放要低于线下^[15], 而 Shahmohammadi 等的研究则认为快消品线上零售的温室气体排放要高于线下零售^[16]。由此看, 当前关于电子商务低碳发展的研究整体上较少, 且多局限于供应链排放的估算; 少量研究对比分析了线上线下商品零售的排放情况, 但却给出了不一致的结论, 线上线下商品零售在某种条件下是否存在临界值还尚不清楚。此外, 除了零售商品, 对餐饮而言, 消费者也可选择线上或线下的方式进行消费, 而目前尚没有研究对比分析餐饮这种有形消费的线上/线下排放情况。

行为转变和低碳策略选择是推进消费侧 GHG 减排的关键途径, 而当前有关低碳策略选择的研究主要集中在企业和商家层面。如徐春秋和

朱庆华等^[17, 18]从供应链低碳化的管理角度分析了政府、生厂商和企业的最优决策问题。He 等^[19]和 Shen 等^[20]估计了产品供应链阶段的碳足迹, 并分析了企业在供应链阶段可能采取的减排策略, Blanco 和 Sheffi^[21]从物流公司的角度探索了绿色物流实现方式。此外, 还有一些研究从供应链角度核算了快递中包装和运输的温室气体排放^[3], 或研究了外卖包装的环境影响^[4], 并从企业层面提出了运输工具电气化和共享包装推广的策略。总体上看, 鲜有文献从消费者行为调整角度研究其低碳消费策略对 GHG 减排的影响和效果。

基于此, 本研究将从消费者决策角度, 对比分析线上线下不同消费模式的 GHG 排放, 并提出有效的减排策略。具体而言, 本研究的贡献主要有: 1) 将消费者的两类消费(商品消费和服务性消费)纳入统一框架中, 系统地提出了 B2C/C2C 商品零售和传统零售、O2O 餐饮外卖和传统餐饮消费的 GHG 排放定量方法; 2) 以北京为例, 通过 16 万次蒙特卡洛仿真模拟实验, 对比分析了该地区不同消费模式下的 GHG 排放情况, 揭示了消费者线上线下消费选择应遵循的临界点; 3) 基于分析结果设计了多个低碳减排情景, 并评估了不同策略选择的 GHG 减排效果, 给出相应消费行为低碳调整的建议。

1 研究方法

本研究将消费者的商品消费和服务性消费纳入统一框架中, 同时考虑商品零售和餐饮消费的线上和线下两种消费模式, 并分析了不同消费模式下商品或餐饮从商家到消费过程中的各项活动。具体地, B2C/C2C 电商零售和传统零售, 以及 O2O 餐饮外卖和传统餐饮消费四种消费模式下的活动流程如图 1 所示。最后, 本研究利用生命周期评估(LCA)方法对各模式下各项活动中材料和能源消耗所产生的 GHG 排放(kg/CO₂ eq)进行了详细核算。

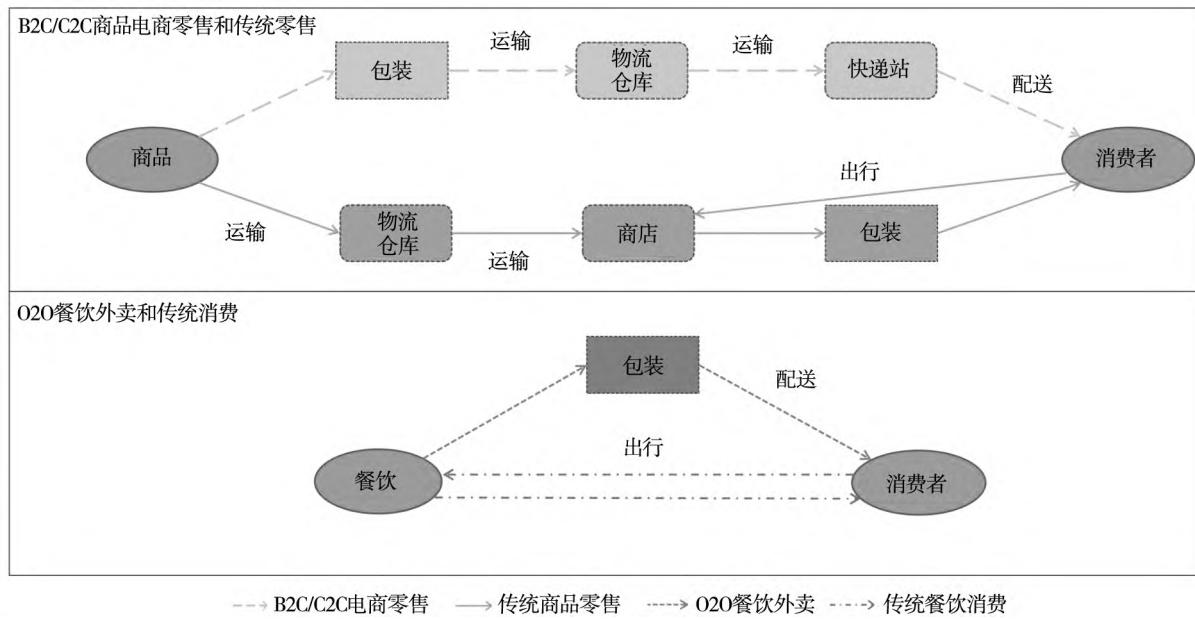


图1 不同消费模式下的活动流程图

Fig. 1 Activity flowcharts under different consumption modes

1.1 B2C/C2C 电商与传统零售的 GHG 排放估计

1.1.1 B2C/C2C 电商零售的 GHG 排放估计

B2C/C2C 电商零售的 GHG 排放是指消费者在 B2C/C2C 平台上下单,商品从商家到消费者手中的各个活动产生的排放总和,包括包装、仓储、运输和配送四个过程所产生的排放,计算公式为

$$\begin{aligned} GHG_{BCC_i}^{Goods} = & GHG_{BCC_i}^{Pac} + GHG_{BCC_i}^{Bui} + \\ & GHG_{BCC_i}^{Tra} + GHG_{BCC_i}^{Del} \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $GHG_{BCC_i}^{Goods}$ 为商品 i 在 B2C/C2C 电商销售模式下的总 GHG 排放; $GHG_{BCC_i}^{Pac}$ 为商品 i 包装所产生的 GHG 排放; $GHG_{BCC_i}^{Bui}$ 为商品 i 仓储所产生的 GHG 排放; $GHG_{BCC_i}^{Tra}$ 为商品 i 运输过程中所产生的 GHG 排放; $GHG_{BCC_i}^{Del}$ 为商品 i 最后 1 km 配送过程中所产生的 GHG 排放。具体的,每项活动的 GHG 排放估计分析如下。

电商零售中包装的排放,主要是指商品在打包过程中所用到的包装材料所产生的 GHG 排放。在 B2C/C2C 电商销售模式下目前商品的包装主要有瓦楞纸盒箱和塑料袋两种类型^[3, 10],因此本研究同时考虑这两种类型包装所产生的 GHG 排

放。包装大小主要参考顺丰快递公司提供的 6 种尺寸^②,各包装的具体计算公式如下

$$GHG_{BCC_i}^{Pac} = \begin{cases} S_i \times \alpha \times EF_{Cor}, & \text{如果包装 } i \text{ 是纸盒箱} \\ S_i \times \beta \times EF_{Pla}, & \text{如果包装 } i \text{ 是塑料袋} \end{cases} \quad (2)$$

其中 S_i 为包装的面积 (m^2); α 是纸盒箱面积与重量的折算系数 (kg/m^2); β 为塑料袋面积与重量的折算系数 (kg/m^2); EF_{Cor} 为纸盒的排放因子; EF_{Pla} 为塑料袋的排放因子; 纸盒箱和塑料袋的 GHG 排放因子主要参考了现有文献基于生命周期评估方法 (LCA) 的结果^[22]。

电商零售中仓储的排放,主要是指商品在仓库和配送中心照明所耗电能的 GHG 排放。具体计算公式如下

$$GHG_{BCC_i}^{Bui} = t_{BCC_i} \times V_i \times LIG \times EF_{Ele} \quad (3)$$

其中 t_{BCC_i} 为商品 i 在仓库中的停留时间 (h); V_i 为商品 i 的体积 (m^3); LIG 为每平方米空间的照明功率 ($KW/h \cdot m^3$); EF_{Ele} 为电力的排放因子。

电商零售中运输的排放,主要是指商品在运输过程中所耗能源的 GHG 排放,B2C/C2C 电商

② <https://www.sf-express.com/we/ow/chn/sc/index>

模式下商品运输包括从商家运输到市级仓库和仓库运输到快递站两个阶段的排放。运输方式选取快递占比最大的公路运输^[3], 则运输排放的计算公式如下

$$GHG_{BCC_i}^{Tra} = DSK_i \times TRU \times EF_{Die} \times \frac{V_i}{V_{Tru}} \quad (4)$$

其中 DSK_i 为商品 i 从始发地到快递站之间的运输距离(km); TRU 为货车每 km 的柴油消耗量(L/km); EF_{Die} 为柴油的排放因子; V_i 为商品 i 的体积(m^3); V_{Tru} 为货车的容量(m^3)。

电商零售中配送的排放,主要是指商品从快递站到消费者手中最后 1 km 配送过程中产生的 GHG 排放。最后 1 km 配送的交通工具具有电动三轮车和汽油面包车两类,则具体的配送排放计算公式如下

$$GHG_{BCC_i}^{Del} = \begin{cases} DKC_i \times MBU \times EF_{Gas} \times \frac{V_i}{V_{MBU}} & \text{如果用面包车配送} \\ DKC_i \times TRI \times EF_{Ele} \times \frac{V_i}{V_{TRI}} & \text{如果用三轮车配送} \end{cases} \quad (5)$$

其中 DKC_i 为商品 i 从快递站到消费者地址之间的运输距离(< 1 km); MBU 为面包车每 km 的汽油消耗量(L/km); TRI 为电动三轮车每 km 的耗电量(kwh/km); V_{MBU} 和 V_{TRI} 分别为面包车和三轮车的容量; EF_{Ele} 和 EF_{Gas} 分别为电力和汽油的排放因子。

1.1.2 传统零售的 GHG 排放估计

传统零售的 GHG 排放是指商品运输到商店,消费者线下去商店购买商品过程中的各个活动产生的排放总和,包括包装、仓储、运输和购物四个过程所产生的排放,计算公式为

$$GHG_{OFFR_i}^{Goods} = GHG_{OFFR_i}^{Pac} + GHG_{OFFR_i}^{Bui} + GHG_{OFFR_i}^{Tra} + GHG_{OFFR_i}^{Tri} \quad (6)$$

其中 $GHG_{OFFR_i}^{Goods}$ 为商品 i 在传统零售模式下的总 GHG 排放; $GHG_{OFFR_i}^{Pac}$ 为商品 i 包装所产生的 GHG 排放; $GHG_{OFFR_i}^{Bui}$ 为商品 i 仓储所产生的 GHG 排放; $GHG_{OFFR_i}^{Tra}$ 为商品 i 运输过程中所产生的 GHG 排放; $GHG_{OFFR_i}^{Tri}$ 为消费者去商店购买商品 i 并带

回家的过程中交通所产生的 GHG 排放。

传统零售中包装的排放,是指商品在商店打包所用到的材料所产生的 GHG 排放。目前传统零售中商家提供的商品包装主要是塑料购物袋,其 GHG 排放计算公式如下

$$GHG_{OFFR_i}^{Pac} = S_i \times \gamma \times EF_{Pla} \quad (7)$$

其中 S_i 为塑料购物袋的面积; γ 为塑料购物袋面积与重量的折算系数(kg/m²)。

传统零售中仓储的排放,是指商品在仓库和商店照明所耗电能的 GHG 排放,具体计算公式如下

$$GHG_{OFFR_i}^{Bui} = t_{OFFR_i} \times V_i \times LIG \times EF_{Ele} \quad (8)$$

其中 t_{OFFR_i} 为商品 i 在仓库和商店的停留时间(h)。

传统零售中运输的排放,是指商品从商家运输到市级仓库和仓库运输到商店两个阶段的排放。

$$GHG_{OFFR_i}^{Tra} = DSS_i \times TRU \times EF_{Die} \times \frac{V_i}{V_{Tru}} \quad (9)$$

其中 DSS_i 为商品 i 从始发地到商店之间的运输距离(km)。

传统零售中出行的排放,主要是指消费者去商店购买商品并带回家的过程中私家车、公共交通或者步行所产生的 GHG 排放,计算如下

$$GHG_{OFFR_i}^{Tri} = \begin{cases} DSC_i \times CAR \times EF_{Gas} \times 2, & \text{当 } DSC_i > 1\text{km} \text{ 时且自驾} \\ DSC_i \times BUS \times EF_{Ele} \times 2, & \text{当 } DSC_i > 1\text{km} \text{ 时且公共交通} \\ 0 & \text{当 } DSC_i \leq 1\text{km} \text{ 时,步行} \end{cases} \quad (10)$$

其中 DSC_i 为商店到消费者家中的距离(km); CAR 为家用汽油车每公里的油耗(L/km); BUS 为电动公交车每公里耗电量(kwh/km)。

1.1.3 B2C/C2C 电商零售和传统零售的临界值估算

根据 B2C/C2C 电商零售和传统零售的 GHG 排放计算公式可知,消费者通过两种方式购买商品时,哪种方式的排放较低,主要取决于商店的距离和消费者线下购物的交通方式。具体计算公式如下

$$\begin{aligned} \text{当 } DSC_i > DSC^* \text{ 时}, GHG_{BCC_i}^{Goods} < GHG_{OFFR_i}^{Goods} \\ \text{当 } DSC_i \leq DSC^* \text{ 时}, GHG_{BCC_i}^{Goods} \geq GHG_{OFFR_i}^{Goods} \end{aligned} \quad (11)$$

$$DSC_i^* = \begin{cases} \frac{GHG_{BCC_i}^{Good} - GHG_{OFFR_i}^{Pac} - GHG_{OFFR_i}^{Bui} - GHG_{OFFR_i}^{Tra}}{2 \times EF_{Gas} \times CAR}, & \text{当 } DSC_i > 1\text{km} \text{ 时且自驾} \\ \frac{GHG_{BCC_i}^{Good} - GHG_{OFFR_i}^{Pac} - GHG_{OFFR_i}^{Bui} - GHG_{OFFR_i}^{Tra}}{2 \times EF_{Ele} \times BUS}, & \text{当 } DSC_i > 1\text{km} \text{ 时且公共交通} \\ \text{当 } DSC_i \leq 1\text{km} \text{ 时且步行} \end{cases} \quad (12)$$

其中各活动的 GHG 排放取多个商品的平均值.

1.2 O2O 餐饮外卖和传统消费的 GHG 排放估计

1.2.1 O2O 餐饮外卖的 GHG 排放估计

O2O 餐饮外卖的 GHG 排放是指烹饪后的餐饮从商家到消费者手中的活动产生的 GHG 排放, 包括包装和配送两个过程, 计算公式为

$$GHG_{020_j}^{Dish} = GHG_{020_j}^{Pac} + GHG_{020_j}^{Del} \quad (13)$$

其中 $GHG_{020_j}^{Pac}$ 和 $GHG_{020_j}^{Del}$ 分别表示餐饮 j 的包装和配送排放.

O2O 餐饮外卖的包装排放主要来自餐饮在打包过程中使用的餐盒和手提袋, 其中手提袋一般分为三种材质, 包括纸袋、塑料袋和无纺布袋. 包装排放的具体计算公式为

$$GHG_{020_j}^{Pac} = BOXS_j \times \theta \times EF_{Las} + BAGS_j \times \omega_{Bag} \times EF_{Bag} \quad (14)$$

$$\omega_{Bag} \times EF_{Bag} = \begin{cases} \omega_{Pap} \times EF_{Pap}, & \text{如果包装袋是纸袋} \\ \omega_{Fla} \times EF_{Fla}, & \text{如果包装袋是塑料袋} \\ \omega_{Clo} \times EF_{Clo}, & \text{如果包装袋是无纺布袋} \end{cases} \quad (15)$$

其中 $BOXS_j$ 为塑料餐盒的面积(m^2) ; θ 为塑料餐盒面积与重量的折算系数(kg/m^2) ; $BAGS_j$ 为包装袋的面积(m^2) ; ω_{Bag} 为包装袋面积与重量的折算系数; EF_{Bag} 为包装袋的排放因子. 塑料餐盒、纸袋、塑料袋和无纺布袋的 GHG 排放因子主要参考现有文献基于生命周期评估方法(LCA) 的结果^[22, 26, 27].

O2O 餐饮外卖配送排放, 是指骑手骑电动车将餐饮从商家送到消费者手中产生的 GHG 排放, 计算公式如下

$$GHG_{020_j}^{Del} = DSC_j \times MOB \times EF_{Ele} \quad (16)$$

其中 DSC_j 为餐饮 j 从商家与消费者的距离(m^2) ; MOB 为电动车的功率(kwh/km).

1.2.2 餐饮传统消费的 GHG 排放估计

餐饮传统消费的 GHG 排放, 是指消费者去餐厅堂食中交通产生的排放, 计算公式如下

$$GHG_{OFFD_j}^{Dish} = \begin{cases} DSC_i \times CAR \times EF_{Gas} \times 2, & \text{当 } DSC_i > 1\text{km} \text{ 时且自驾} \\ DSC_i \times BUS \times EF_{Ele} \times 2, & \text{当 } DSC_i > 1\text{km} \text{ 时且公共交通} \\ 0 & \text{当 } DSC_i \leq 1\text{km} \text{ 时, 步行} \end{cases} \quad (17)$$

1.2.3 O2O 餐饮外卖和传统消费的临界值估算

根据 O2O 餐饮外卖和传统消费的 GHG 排放计算公式, 可知消费者就餐时, 比较外卖还是线下就餐方式的 GHG 排放大小, 主要取决于商家的距离和消费者线下就餐的交通方式. 具体计算公式如下

$$\begin{aligned} \text{当 } DSC_i \leq DSC^* \leq 1\text{km} \text{ 时}, GHG_{020_j}^{Dish} &> GHG_{OFFD_j}^{Dish} \\ \text{当 } DSC^* \geq DSC > 1\text{km} \text{ 时}, GHG_{020_j}^{Dish} &\geq GHG_{OFFD_j}^{Dish} \\ \text{当 } DSC_i > DSC^* > 1\text{km} \text{ 时}, GHG_{020_j}^{Dish} &< GHG_{OFFD_j}^{Dish} \end{aligned} \quad (18)$$

其中

$$DSC^* = \begin{cases} \frac{GHG_{020_j}^{Pac}}{|2 \times CAR \times EF_{Gas} - MOB \times EF_{Ele}|}, & \text{当自驾} \\ \frac{GHG_{020_j}^{Pac}}{|2 \times BUS \times EF_{Gas} - MOB \times EF_{Ele}|}, & \text{当公共交通} \end{cases} \quad (19)$$

其中包装环节的 GHG 排放取多种类型包装排放的平均值.

2 仿真实验设计

本研究通过蒙特卡洛模拟方法, 以北京市为例, 对 B2C/C2C 电商零售、传统零售、O2O 餐饮

外卖和传统餐饮消费模式下的 GHG 排放进行量化,具体流程图如图 2 所示。步骤如下:1)识别输入参数,根据文献设置固定参数,根据假设条件和参考文献设置不确定参数的概率分布;2)执行蒙特卡洛,根据不确定参数服从的分布生成随机数,利用检验方法对参数进行校正;3)计算 GHG 排放,基于方法部分的公式计算不同场景下的 GHG 排放并输出结果。

对 12 种场景进行模拟,总共执行了 16 万次仿真实验,具体各确定参数和不确定参数的设置如表 1 和表 2 所示。具体地,本研究首先对不同消费模式的 GHG 排放 4 种场景进行了模拟实验,并分析了不同场景下的 GHG 排放情况,以及线上线下消费选择应遵循的临界点;进一步,本研究根据排放情况设置了几种减排情景,并对情景进行模拟实验,分析减排策略的有效性。

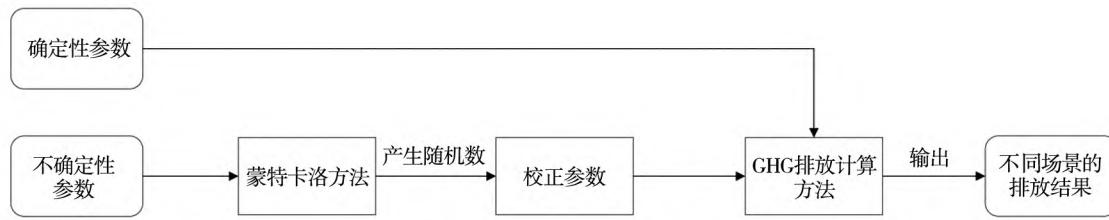


图 2 蒙特卡洛模拟计算 GHG 排放流程

Fig. 2 Monte Carlo simulation of GHG emission process

表 1 确定性参数表

Table 1 Deterministic parameters

输入参数	说明	数值	确定依据	单位
EF_{Cor}	纸盒的排放因子	1.14	文献[22]	$\text{kgCO}_2\text{eq/kg}$
EF_{Pla}	塑料袋的排放因子	3.24	文献[22]	$\text{kgCO}_2\text{eq/kg}$
α	纸盒箱面积与重量的折算系数	0.2	文献[23]	kg/m^2
LIG	每 m^3 空间的照明功率	0.0025	2004GB 建筑照明设计标准	$\text{KW/h} \cdot \text{m}^3$
EF_{Ele}	电力的排放因子	0.8843	国家发展改革委	$\text{kgCO}_2\text{eq/kwh}$
β	塑料袋面积与重量的折算系数	0.08	文献[24]	kg/m^2
TRU	货车每公里的柴油消耗量	0.15	福田奥铃货车参数	L/km
EF_{Die}	柴油的排放因子	3.15	文献[25]	$\text{kgCO}_2\text{eq/kg}$
V_{Tru}	货车车厢车的容量	13	福田奥铃货车参数	m^3
MBU	面包车每 km 的汽油消耗量	0.006	五菱面包车参数	L/km
TRI	三轮车每 km 的耗电量	0.03	雅迪三轮车参数	kwh/km
γ	塑料购物袋面积与重量的折算系数	0.08	文献[24]	kg/m^2
CAR	家用汽油车每 km 的油耗	0.006	轩逸经典参数	L/km
BUS	电动公交车每 km 耗电量	0.442	比亚迪 K8 参数	kwh/km
θ	塑料餐盒面积与重量的折算系数	0.08	文献[24]	kg/m^2
ω_{Pap}	纸包装袋面积与重量的折算系数	0.2	2003GB 纸板箱标准	kg/m^2
ω_{Fla}	塑料折算系数	0.08	文献[24]	kg/m^2
ω_{Clo}	无纺布折算系数	0.1	1997GB 纺织品非织造布	kg/m^2
EF_{Pap}	纸袋排放因子	0.14	文献[26]	$\text{kgCO}_2\text{eq/kg}$
EF_{Clo}	无纺布排放因子	3.82	文献[27]	$\text{kgCO}_2\text{eq/kg}$
EF_{Las}	塑料餐盒排放因子	3.24	文献[22]	$\text{kgCO}_2\text{eq/kg}$
EF_{Gas}	汽油排放因子	3.04	文献[28,29]	$\text{kgCO}_2\text{eq/kg}$
MOB	电动车的功率	0.03	雅迪电动车参数	kwh/km

表2 不确定性参数

Table 2 Uncertainty parameters

变量	说明	分布	最小值	最大值	数值	确定依据	单位
S_i	B2C/C2C 包装的面积	等比例抽样	0.148	1.264	0.148/0.262/0.37/0.546 /0.730 2/1.264	顺丰官网	m^2
t_{BCC_i}	B2C/C2C 商品 i 在仓库中的停留时间	正态分布		12		文献[30]	h
V_i	为商品 i 的体积	等比例抽样	0.000 4	0.089 6	0.003 6/0.009/0.015/ 0.027/0.039/0.089 6	顺丰官网	m^3
DSK_i	B2C/C2C 商品 i 从始发地到快递站之间的运输距离	幂律分布	0	2 778	34 个省会,直辖市港澳台,到北京距离	高德地图数据库	km
DKC_i	B2C/C2C 商品 i 从快递站到消费者地址之间的运输距离	等比例抽样	0	1		最后一公里配送	km
t_{OFFR_i}	商品 i 在仓库和商店中的停留时间	均匀分布	672	720		文献[30]	h
DSS_i	线下购物商品 i 从始发地到商店之间的运输距离	幂律分布	0	2 778	34 个省会,直辖市港澳台到北京距离	高德地图数据库	km
DSC_i	线下购物商店到消费者家中的距离	幂律分布			(0,1)/[1,3)/[3,5)/ [5, + ∞)	高德地图数据库	km
DSC_j	O2O 外卖商店到消费者家中的距离	幂律分布			(0,1)/[1,3)/[3,5)/ [5, + ∞)	文献[31]	km
$BOXS_j$	塑料餐盒的面积	等比例抽样	0.05	0.08	0.05/0.065/0.08	商家提供	m^2
$BAGS_j$	包装袋面积	等比例抽样	0.195	0.239	0.195/0.148/0.239	商家提供	m^2
S_i	塑料购物袋的面积	等比例抽样	0.089	0.151	0.151/0.104/0.089	商家提供	m^2

外卖是传统消费的 1.44 倍.

3 实验结果与分析

3.1 不同消费模式下的 GHG 排放分析

对模拟实验的结果进行统计分析, 估算出不同电商模式下的 GHG 排放, 结果如图 3 所示. 该图展示了四种消费模式下分别进行 1 万次仿真实验的 GHG 排放结果, 从图中可以看出, 购买一件商品, 在 B2C/C2C 电商零售模式下的平均 GHG 排放量为 0.543 kgCO₂ eq, 在传统零售模式下的平均 GHG 排放量为 0.461 kgCO₂ eq; 消费一份餐饮, 在 O2O 餐饮外卖模式下的平均 GHG 排放量为 0.24 kgCO₂ eq, 在传统消费模式下的平均 GHG 排放量为 0.167 kgCO₂ eq. 由此可见, 线上购物和餐饮消费方式总体上 GHG 排放量要高于传统线下的方式, 电商零售是传统零售的 1.18 倍, 而餐饮

不同模式平均排放的差异主要是由于不同活动方式的排放强度不同, 如图 4 所示. 电商零售中, 包装的排放占比最大, 占总排放的 48.67%, 其次是运输的排放, 占总排放的 47.75%; 而在传统零售中, 运输的排放占比最大, 占总排放的 56.09%, 其次是消费者购物途中由交通产生的排放, 占总排放的 37.39%. 餐饮外卖中, 包装的排放占比最大, 占总排放的 80%, 而传统餐饮消费的排放则全部来自就餐途中的交通活动.

不难看出, 不同消费模式下的 GHG 排放存在显著差异, 低碳购物方式在 GHG 减排中扮演了重要角色. 此外, 运输、包装、购物和就餐路上交通的排放是主要的高排放因素, 选择低碳运输方式、低碳包装材料、低碳交通出行方式对减排也至关重要.

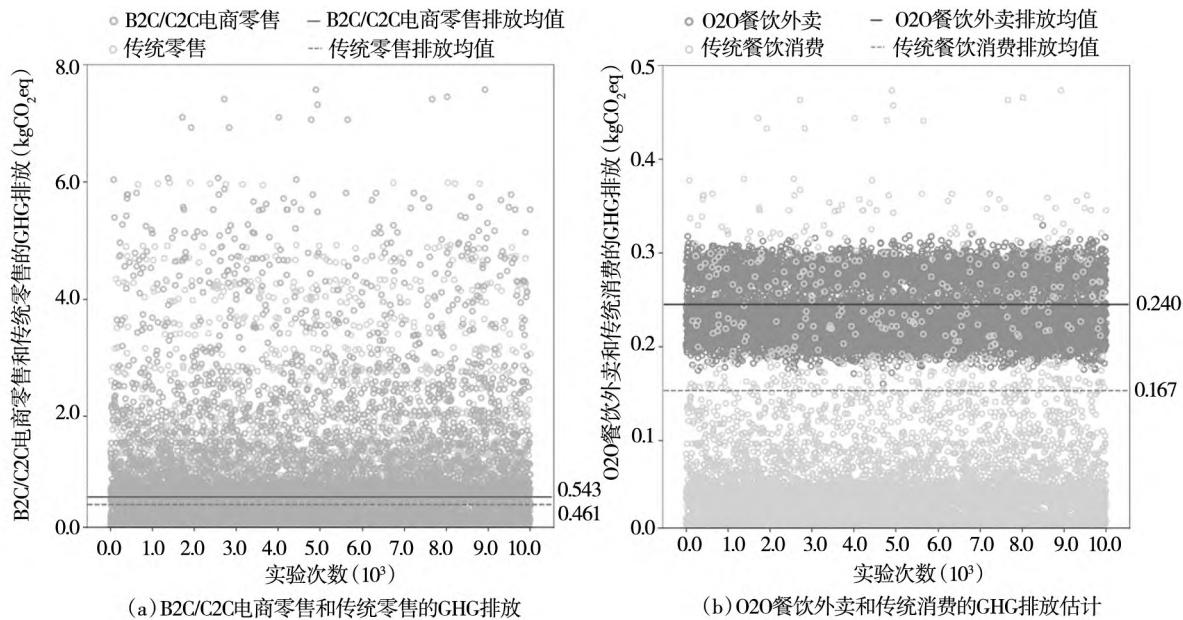


图 3 不同消费模式下的 GHG 排放估算

Fig. 3 Estimation of GHG emissions under different consumption modes

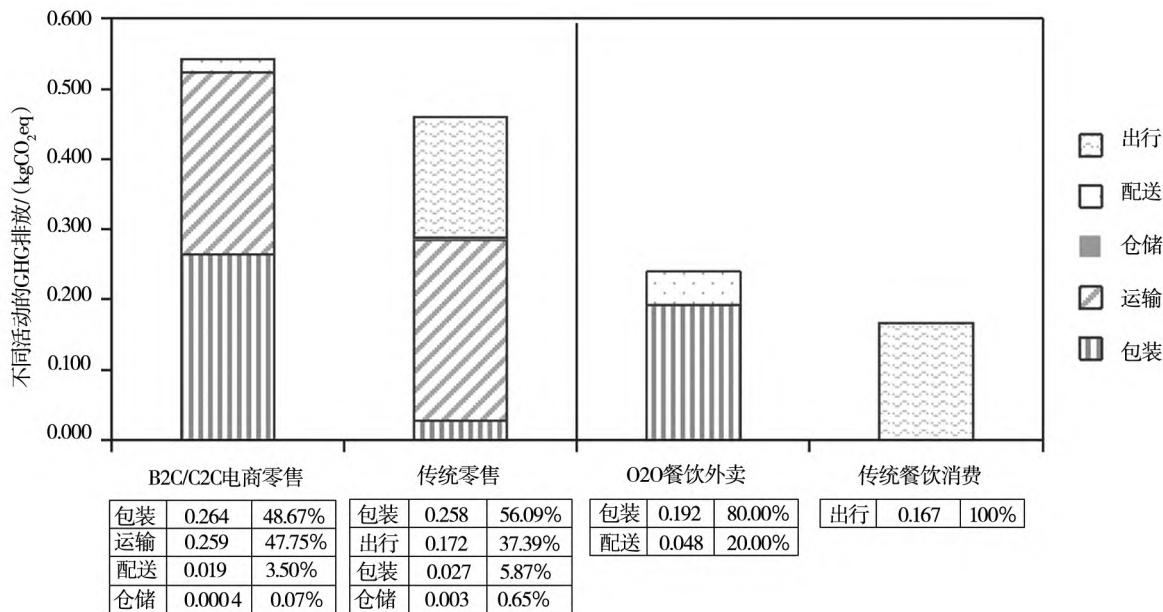


图 4 不同活动的 GHG 排放分布

Fig. 4 The GHG emission results from different activities

3.2 线上线下消费方式选择的临界值分析

通过临界值分析,本研究发现消费者在购物和餐饮消费时,线上还是线下的方式何者更低碳很大程度取决于消费者距离商店或餐厅的距离以及消费者的出行方式. 构建的商品零售和餐饮消费的距离 - 排放曲线如图 5 所示. 由如图 5(a)可知,当消费者发生采购行为时,若其到商店的距离

小于 1.3km 时,则通过自驾、公共交通和步行的方式去线下采购比在 B2C/C2C 电商平台上采购更低碳;若这一距离小于 8.4km,则通过公共交通去线下采购比在 B2C/C2C 电商平台上更低碳;而当相应距离大于 8.4km 时,线上消费方式更低碳. 餐饮消费的情况如图 5(b),当消费者到餐厅的距离小于 1.1km 时,则通过自驾、公共交通和

步行去线下就餐比在 O2O 平台上点外卖更为低碳; 而当这一距离大于 1.1 km 时, 则通过公共交通线下去就餐比在 O2O 平台上点外卖更低碳。

因此, 无论是线上或线下何种消费方式都将

产生一定的 GHG 排放, 但不同消费方式选择的排放差异较大。消费者购物或餐饮消费前, 评估商店或餐厅的距离、选择低碳的交通出行方式, 都显著影响消费排放。

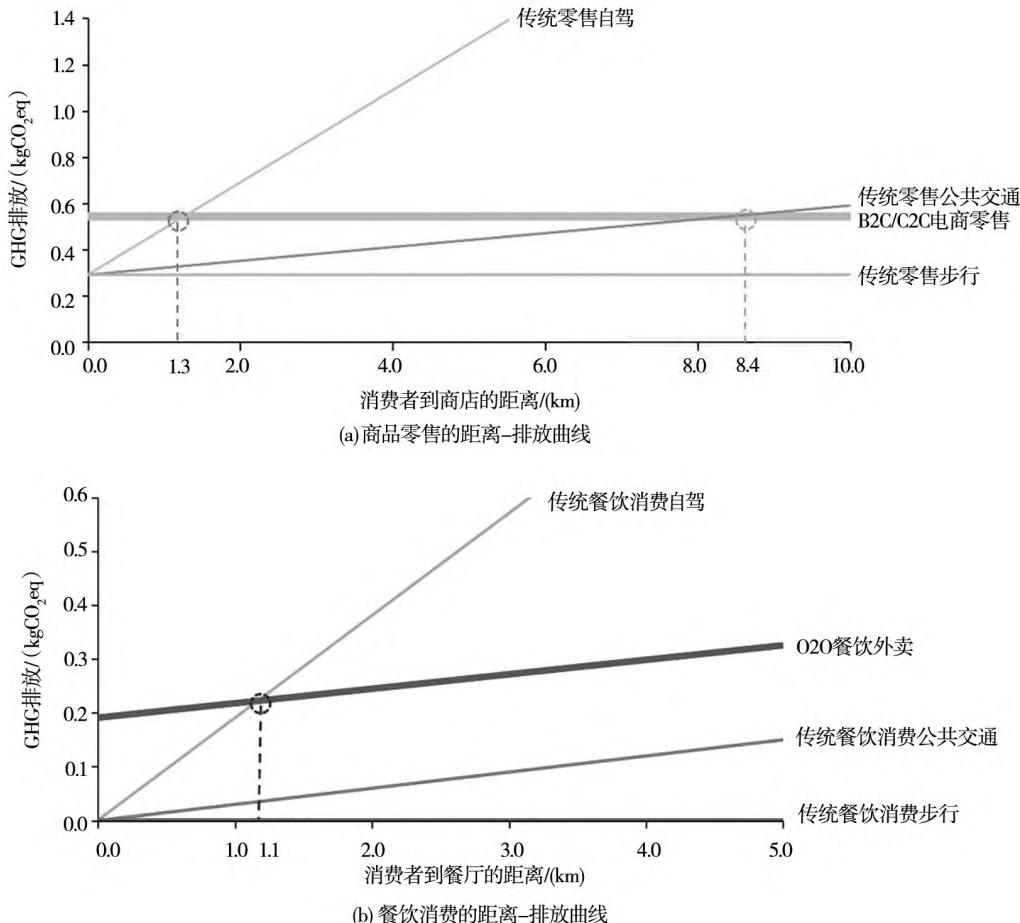


图 5 商品零售和餐饮消费的距离-排放曲线

Fig. 5 The distance-emission curve of retail and catering consumption

3.3 消费行为调整与减排策略分析

近年来,一些新兴技术的开发和应用可以帮助降低温室气体的排放,包括运输和购物过程中的新能源卡车和汽车、快递包装中可循环快递箱、共享外卖餐具的应用等。消费者的购物和就餐习惯调整对减排也至关重要,如选择低碳交通出行方式、打包购物等。基于此,本研究一方面设计了照常情景,以便于进行不同策略的减排量估算;同时,从商家和消费者的角度,针对 B2C/C2C 电商零售和传统零售共设计了 9 种政策情景;针对

O2O 餐饮外卖和传统消费设计了 3 种政策情景,具体的设置细节如表 3 和表 4 所示。

照常情景中,根据国家邮政报告公布的数据 2021 年快递业务量估计为 1 085 亿件^③, 其中 80% 为电商购物的包裹, 可以估算出 2021 年电商零售包裹的 GHG 排放约为 47.13 MtCO₂ eq, 而通过传统零售方式购买同等商品的排放量为 40.01 MtCO₂ eq. 此前, Kang 等估算了 2018 年中国的快递包裹产生了 22.5 MtCO₂ eq 的 GHG 排放^[3], 2021 年中国包裹量是 2018 年(507 亿件)

③ http://www.gov.cn/xinwen/2022-01/07/content_5666837.htm

的两倍,据此本研究估算出的 2021 年电商零售包裹产生的 GHG 排放也约等于文献估算的排放水平的两倍,这也进一步验证了本研究结果的可靠性。对于餐饮消费而言,根据外卖平台的年报数据

和市场份额占比^④,可计算 2021 年外卖的订单量为 209 亿单,最终可估算出 2021 年餐饮外卖的 GHG 排放为 5.01MtCO₂ eq,而这些外卖订单通过传统消费的方式就餐 GHG 排放量为 3.49MtCO₂ eq.

表 3 B2C/C2C 电商零售和传统零售减排情景设置

Table 3 B2C/C2C e-commerce and traditional retail emission reduction scenarios

零售方式	情景名称	相对于照常情景的改变	决策者
B2C/C2C 电商零售	电动卡车替代情景	运输中的卡车都改成电动卡车	商家
	可循环快递箱情景	包装中纸板箱和塑料包装袋替换成可循环快递箱	商家
	无人机和无人车配送情景	配送中电动车和面包车替换成小包装商品用 50% 无人机和 50% 无人车,大包装商品都用无人车	商家
	组合低碳策略情景	同时实施以上三种所有减排措施	
传统零售	电动卡车替代情景	运输中的卡车都改成电动卡车	商家
	新能源出行情景	商品购物交通出行中汽油车替换成 50% 新能源电动汽车和 50% 公交车	消费者
	环保购物袋情景	购物袋用环保袋	消费者
	多商品购物情景	消费者一次购买 5 个商品	消费者
	组合低碳策略情景	同时实施以上所有减排措施	

表 4 O2O 餐饮外卖和传统消费减排情景设置

Table 4 Scenario setting for O2O catering takeout and traditional consumption emission reduction

就餐方式	情景名称	相对于照常情景的改变	决策者
O2O 餐饮外卖	外卖包装替代情景	外卖盒改用共享餐具,手提包装袋替换成可循环织物袋	商家
	无人机和无人车配送情景	配送中电动车替换成 50% 无人机和 50% 无人车	商家
传统餐饮消费	新能源出行情景	传统餐饮消费交通出行中的汽油车替换成 50% 的电动汽车和 50% 的公交车	消费者

不同减排策略下的情景分析结果如图 6 所示。总体上看,减排策略的减排效果显著,不同策略可将购物或餐饮的 GHG 排放最高降低 94% (相较于照常情景)。具体地,1) 对于电商零售而言,无人机和无人车配送、电动卡车替代柴油卡车和可循环快递箱的使用分别可减少 1%、24% 和 49% 的 GHG 排放,而三种策略同时实施的减排比率可高达 73%;2) 对于传统零售而言,消费者使用环保购物袋、使用新能源汽车或公共交通出行和输运中使用电动卡车运输商品分别能减少 6%、22% 和 28% 的 GHG 排放,而一次购买多个商品能减少 35% 的排放,四种策略同时实施减排比率可高达 68%;3) 对于 O2O 餐饮外卖而言,无人机和无人车配送、外卖包装的

替代,包括外卖盒改用共享餐具以及手提包装袋替换成可循环织物袋,两种策略可分别带来 14% 和 80% 的 GHG 减排,而组合策略的使用则可最高减排 94%;4) 对于传统餐饮消费而言,消费者出行时将燃油车替换成新能源汽车或乘公共交通可降低 47% 的 GHG 排放。

由以上分析可知,每一种低碳策略都将产生显著的减排效果。对于消费者来说,在决定选择线上或线下购买商品后,减排干预措施实施更多的是在线下购物阶段。消费者每次线下购物时,采用大量订购的方式,增加一次购买商品的数量,步行或使用新能源交通方式出行取货,均将对消费减排做出较大的贡献。

^④ <https://www.chyxx.com/industry/1104147.html>

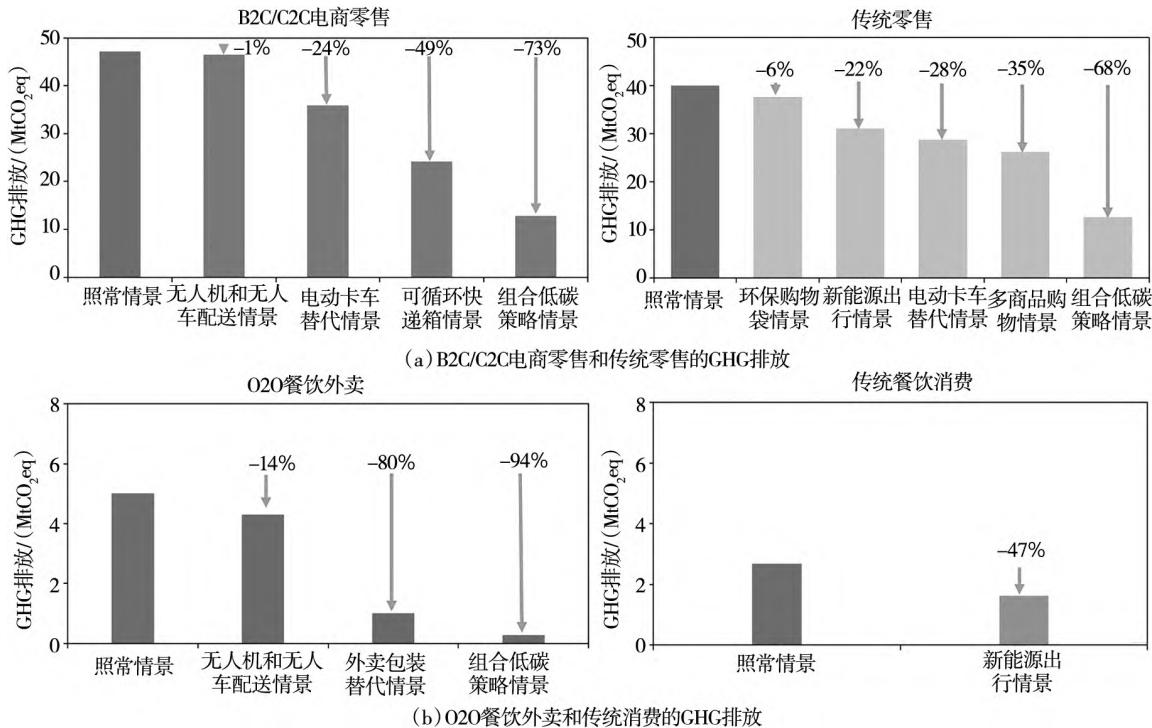


图6 不同策略选择下的GHG减排贡献

Fig. 6 The GHG emission reduction contribution under different strategies

4 结束语

电子商务的发展给消费者提供了多种购物和餐饮模式,但不同模式的选择产生的环境影响存在显著差异,深入分析这些差异并给出低碳策略选择是推动电子商务低碳化发展的关键,同时也密切影响着双碳目标下消费侧减排的效果。本研究同时考虑购物和餐饮两大消费活动,建立了相应的GHG排放测算的一般性框架,并以北京为例,通过蒙特卡洛模拟仿真实验对比分析了线上和线下两类消费模式的温室气体排放差异,并给出了低碳消费转型的策略和选择,具体得出了以下结论。

首先,不同消费模式下的GHG排放确实存在显著差异,平均来看,线上商品零售和餐饮外卖方式GHG排放量要高于传统的线下方式,其中线上消费的高排放主要来源于商品包装和运输、餐饮外卖的餐盒及外包装,而线下消费的排放则主要来自于购物和就餐等消费行为的出行交通方式。

其次,线上或线下消费行为的排碳强度的对比依赖于距离-排放曲线的临界值选择,即具体

何者更为低碳很大程度取决于商店或餐厅距消费者的距离和出行的具体交通方式。一般而言,若消费者步行或者公共交通出行去商店或餐厅,则线下的方式更低碳;若消费者开车出行,且商店或餐厅较远时,则线上的消费方式更低碳。

最后,本研究围绕包装、运输、配送、出行方式和捆绑购物等影响碳排放和消费行为的关键性因素设计了若干低碳转型情景,结果证实了减排方案效果的显著性,不同策略的选择可将购物或餐饮消费的GHG排放最高降低94%。

本研究的结论具有较强的管理意义。政府层面,为从消费侧实现碳中和目标^[32]应建立电子商务绿色管理制度体系,出台低碳转型中长期规划与细则,推动行业标准的研究与发布,同时加强企业绿色转型和低碳消费的宣传和教育,培养消费者的低碳环保意识,利用碳标签等市场化机制提高消费者参与的积极性,促进消费者的自愿减排和交易。从企业层面看,电子商务、餐饮主体和物流企业应该加快快递包装绿色管理、促进资源循环利用,从环境影响和成本最小的双重视角选择运输车辆的类型组合,从而有效降低包装、运输和运营整个链条的GHG排放。消费者层面,应强化

碳中和的主体意识,在消费行为中实现成本、消费体验和低碳的多方兼顾,根据差异化的距离-排放曲线的临界点优化线下/线上的采购和餐饮消费决策,通过自愿减排实现碳交易收益和绿色消费行为的调整。

本研究存在一些局限性。例如:由于研究边界的划分,目前论文没有考虑工作人员的活动产生的 GHG 排放,未来或可在一定程度拓展现

有研究边界。此外,当前研究主要聚焦于不同消费模式下 GHG 排放评估方法的建立,后续工作也可以进一步深入探索不同消费模式下消费者福利的变化,平衡考虑不同消费模式的 GHG 减排与福利最大化。更多地,未来研究也将考虑中国不同城市的地域、居民分布和包裹运输路线的异质性,对比分析不同城市的 GHG 排放特征和减排策略差异。

参 考 文 献:

- [1] 中国互联网络信息中心. 第 54 次《中国互联网络发展状况统计报告》[R]. 2024.
- China Internet Network Information Center. The 54th Statistical Report on China's Internet Development [R]. 2024. (in Chinese)
- [2] 中华人民共和国商务部. 中国电子商务报告[R]. 2023.
- People's Republic of China Ministry of Commerce. E-commerce in China [R]. 2023. (in Chinese)
- [3] Kang P, Song G, Xu M, et al. Low-carbon pathways for the booming express delivery sector in China[J]. Nature Communication, 2021, 12(450). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20738-4>.
- [4] Zhou Y, Shan Y, Guan D, et al. Sharing tableware reduces waste generation, emissions and water consumption in China's takeaway packaging waste dilemma[J]. Nature Food, 2020, 1: 552 – 561.
- [5] 商务部办公厅. 《关于推动电子商务企业绿色发展工作的通知》[R]. 2021.
- General Office of the Ministry of Commerce. Notice on Promoting the Green Development of E-commerce Enterprises [R]. 2021. (in Chinese)
- [6] 国家发展改革委. 《促进绿色消费实施方案》[R]. 2022.
- National Development and Reform Commission. Implementation Plan for Promoting Green Consumption [R]. 2022. (in Chinese)
- [7] 国家统计局. 2021 年社会消费品零售总额增长 12.5%[R]. 2022.
- China National Bureau of Statistics. The Total Retail Sales of Consumer Goods will Increase by 12.5% in 2021 [R]. 2022. (in Chinese)
- [8] 艾媒网. 一人食经济数据分析: 2021 年中国 45.7% 消费者偏好的单人就餐方式为点外卖[N]. 2021.
- Iimedia. Analysis on Economic Data of one Person Meal: In 2021, 45.7% of Consumers in China Prefer to have a Single Meal by Point Delivery [N]. 2021. (in Chinese)
- [9] Duan H, Song G, Qu S, et al. Post-consumer packaging waste from express delivery in China[J]. Resources Conservation & Recycling, 2019, 144: 137 – 143.
- [10] Yi Y, Wang Z, Wennersten R, et al. Life cycle assessment of delivery packages in China[J]. Energy Procedia, 2017, 105: 3711 – 3719.
- [11] Chueamuphan K, Kashyap P, Visvanathan C. Packaging waste from e-commerce: Consumers' awareness and concern [J]. Sustainable Waste Management: Policies and Case Studies, 2019: 27 – 41.
- [12] Weber C, Hendrickson C, Matthews H, et al. Life cycle comparison of traditional retail and e-commerce logistics for electronic products: A case study of buy.com[C]. IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology, 2009.
- [13] Ling S, Jin S, Wang Q, et al. Can smart transportation reduce carbon emission intensity? An empirical study from macro and micro perspectives in China[J]. Journal of Management Science and Engineering, 2024, 9: 490 – 509.
- [14] Siragusa C, Tumino A, Mangiaracina R, et al. Electric vehicles performing last-mile delivery in B2C e-commerce: An economic and environmental assessment[J]. International Journal of Sustainable Transportation, 2022, 16(1): 22 – 33.

- [15] Zhao Y, Wu G, Gong Y, et al. Environmental benefits of electronic commerce over the conventional retail trade? A case study in Shenzhen, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 679: 378–386.
- [16] Shahmohammadi S, Steinmann Z, Tambjerg L, et al. Comparative greenhouse gas footprinting of online versus traditional shopping for fast-moving consumer goods: A stochastic approach[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54: 3499–3509.
- [17] 徐春秋, 赵道致, 原白云, 等. 上下游联合减排与低碳宣传的微分博弈模型[J]. *管理科学学报*, 2016, 19(2): 53–65.
Xu Chunqiu, Zhao Daozhi, Yuan Baiyun, et al. Differential game model on joint carbon emission reduction and low-carbon promotion in supply chains[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2016, 19(2): 53–65. (in Chinese)
- [18] 朱庆华, 窦一杰. 基于政府补贴分析的绿色供应链管理博弈模型[J]. *管理科学学报*, 2011, 14(6): 86–94.
Zhu Qinghua, Dou Yijie. A game model for green supply chain management based on government subsidies[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2011, 14(6): 86–94. (in Chinese)
- [19] He B, Liu Y, Zeng L, et al. Product carbon footprint across sustainable supply chains[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 241(20): 118320.
- [20] Shen L, Wang X, Liu Q, et al. Carbon trading mechanism, low-carbon e-commerce supply chain and sustainable development[J]. *Mathematics*, 2021, 9(15): 1–26.
- [21] Blanco E, Sheffi Y. Green Logistics[R]. 2017.
- [22] 周 洋, 甘陆军, 韩芳芳. 基于生命周期评价的快递碳足迹核算[J]. *物流技术*, 2021, 40(6): 104–109.
Zhou Yang, Gan Lujun, Han Fangfang. Carbon footprint accounting of express delivery based on life cycle evaluation[J]. *Logistics Technology*, 2021, 40(6): 104–109. (in Chinese)
- [23] Delia P. Mechanical design of corrugated packaging box[J]. *Journal of Research and Innovation for Sustainable Society*, 2021, 2(14): 132–139.
- [24] DesBordes C, Welch J. Influence of specific gravity on rumination and passage of indigestible particles[J]. *Journal of Animal Science*, 1984, 59(2): 470–475.
- [25] 吴 明, 姜国强, 贾冯睿, 等. 基于物质流和生命周期分析的石油行业碳排放[J]. *资源科学*, 2018, 40(6): 1287–1296.
Wu Ming, Jiang Guoqiang, Jia Fengrui, et al. Carbon emissions from the petroleum industry based on the analysis of material flow and life cycle[J]. *Resource Science*, 2018, 40(6): 1287–1296. (in Chinese)
- [26] 陈 莎, 杨孝光, 李燚佩, 等. 中国纸产品全生命周期 GHG 排放分析[J]. *北京工业大学学报*, 2014, 40(6): 944–949.
Chen Sha, Yang Xiaoguang, Li Yingpei, et al. Analysis of whole life cycle GHG emissions of paper products in China[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2014, 40(6): 944–949. (in Chinese)
- [27] Muthu S, Li Y, Hu J, et al. Carbon footprint of production processes of polypropylene nonwoven shopping bags[J]. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 2012, 3(92): 12–15.
- [28] 王 陶, 张志智, 孙潇磊. 汽油产品碳足迹研究[J]. *当代化工*, 2020, 7: 1428–1432.
Wang Tao, Zhang Zhizhi, Sun Xiaolei. Study on the carbon footprint of gasoline products[J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2020, 7: 1428–1432. (in Chinese)
- [29] 国家发展改革委办公厅. 中国煤炭生产企业温室气体排放核算方法与报告指南[R]. 2014.
Office of the National Development and Reform Commission. Guidelines for Accounting and Reporting Greenhouse Gas Emissions of Chinese Coal Production Enterprises[R]. 2014. (in Chinese)
- [30] Zhang Y, Lin Z, Tsai P W, et al. General K-anycast on DTN resource for logistics and warehousing[J]. *ICIC Express Letters. Part B, Applications*, 2017, 8(1): 207–214.
- [31] Zhang M, Wu J, Wu X, et al. Hybrid evolutionary optimization for takeaway order selection and delivery path planning utilizing habit data[J]. *Complex & Intelligent Systems*, 2022, 8(6): 4425–4440.
- [32] 段宏波, 汪寿阳. 中国的碳中和: 技术经济路径与政策选择[J]. *管理科学学报*, 2024, (2): 1–17.

Duan Hongbo, Wang Shouyang. China's carbon neutrality: Tech-economic pathways and policy options [J]. Journal of Management Sciences in China, 2024, (2): 1–17. (in Chinese)

Low-carbon consumption strategy choice: Online or offline?

YANG Xian¹, SHI Kun-yang², LIN Zhi-jie^{3*}, DUAN Hong-bo⁴

1. School of Economics and Management, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
2. School of Management Science and Engineering, Dongbei University of Finance and Economics, Dalian 116024, China;
3. School of Economics and Management, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
4. School of Economics and Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract: Low-carbon transformation is a profound change in consumption patterns. Low-carbon behavior choices are of great significance for reducing greenhouse gas (GHG) emissions and achieving carbon neutrality. This paper proposes a method for systematically estimating the GHG emissions of online and offline retail and catering consumption. Taking Beijing as an example, this paper conducts 160 000 Monte Carlo simulation experiments to account for GHG emissions under different consumption styles and then analyzes the emission reduction strategies of low-carbon consumption. On average, the GHG emissions from online retail and food delivery are higher than those from traditional offline consumption. The high emissions of online consumption mainly come from the transportation and packaging of express delivery, while the emissions of offline consumption largely result from consumers' trips during shopping and catering. The study develops a distance-emission curve, revealing the critical point that online and offline consumption choices should follow. The results show that the low-carbon intensity of online or offline consumption is related to the distance between consumers and shops or restaurants, as well as the mode of transportation. If consumers walk or travel by public transportation, offline consumption is generally more low-carbon. However, if the store or restaurant is far away and the consumer drives, online consumption will be more low-carbon. Reducing the GHG emissions from packaging, transportation, delivery, travel, and consumption behavior is an effective reduction strategy. The results show that different strategy choices can reduce GHG emissions from goods or foods consumption by up to 94%.

Key words: green economy; low-carbon consumption; electronic commerce; food delivery; emission reduction strategy