



餐饮品类与城市空间差异下的餐饮外卖行业塑料垃圾产生特征分析

方静竹^{1,2}, 杨光^{2,3}, 龚洁^{1,✉}, 周传斌^{2,3,✉}

1. 武汉科技大学资源与环境工程学院, 武汉 430081; 2. 中国科学院生态环境研究中心区域与城市生态安全国家重点实验室, 北京 100085; 3. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100085

摘 要 近年来我国餐饮外卖行业迅速发展, 该行业的塑料污染问题受到广泛关注。掌握餐饮外卖塑料垃圾产排的类型和空间特征, 是精准控制其塑料垃圾的前提, 然而目前尚缺乏相关的探讨。以北京市 4 类典型城市功能区中的 5 456 家餐厅为研究对象, 探讨餐饮外卖行业塑料垃圾产生的空间和类型差异, 主要研究结果如下: 1) 单次订单塑料垃圾产生量的范围为 3.05~1 120.10 g·单⁻¹, 其中火锅类外卖的塑料垃圾产生量最大, 西餐类最小; 2) 餐饮外卖塑料垃圾的主要组成为聚丙烯, 占塑料包装的 76.27%±6.17%; 其次是复合包装材料 (包括聚乙烯、铝箔、珍珠棉), 占 15.96%±4.37%; 3) 餐饮外卖行业塑料垃圾单位面积产生量和人均产生量在不同城市功能区存在空间差异, 表现为高校区>商业区>居民区>工业区; 其中, 高校区的外卖塑料垃圾产生量是工业区的 3.29 倍。研究基于餐饮外卖塑料垃圾产排空间差异的对策建议, 以提升该行业塑料垃圾治理水平。

关键词 餐饮外卖; 塑料垃圾; 餐饮品类; 城市空间; 产生量; 产生特征

塑料污染已遍布不同生态系统和生物种群, 引起全球普遍关注^[1-2]。由联合国环境规划署 (UNEP) 发起的《终结塑料污染决议》计划形成具有约束力的全球行动计划^[3-4]。美国、欧盟等诸多国家和地区积极响应塑料污染的防治工作, 已出台了专门的行动计划和法律法规^[5-8]。餐饮外卖行业因其快速增长趋势和高强度的塑料包装使用, 已成为塑料污染治理的重要领域^[9]。近年来, 国外 UberEats (109×10⁸ 美元)、DoorDash (66×10⁸ 美元)、Grubhub (19×10⁸ 美元)、Zomato (28×10⁸ 美元) 和 Swiggy (23×10⁸ 美元) 等在线外卖平台的交易总额快速增加^[10-11]。我国 2020 年外卖订单量已达到 171×10⁸ 单, 销售收入超过 6 650×10⁸ 元人民币, 相较于 2015 年分别增长了 10 和 5 倍^[12]。据估算, 中国餐饮外卖行业的塑料包装使用量从 2010 年的 30 t 增长到 2020 年的 101×10⁴ t, 其碳足迹约为 144×10⁴ tCO₂e (CO₂ 当量)^[13]。为此, 我国《“十四五”塑料污染治理行动计划》强调了餐饮外卖行业的塑料污染问题, 要求在线外卖平台应尽可能减少一次性塑料包装的使用^[14-15]。2024 年, 中国首次在年度中央政府工作报告中提出加强塑料垃圾管理^[16]。

塑料垃圾产生的数量、组成和分布特征是制定餐饮外卖行业塑料污染防治对策的基础信息。现有研究采用抽样调查和数据挖掘等方法分析了餐饮外卖塑料垃圾产排特征, 提供了有价值的数据集。LIU 等^[17]采用抽样调查法研究了北京市及京津冀地区餐饮外卖废弃物的总量和比例, 发现食物包装废弃物已占城市生活垃圾的 15.7%, 其中塑料袋和塑料食品容器分别占食品包装的 35.08% 和 27.43%。ZHANG 等^[18]通过称重和问卷调查等方法估算了 2019 年武汉市的外卖废弃物总量, 发现“白领”群体贡献了最多的外卖订单。JANG 等^[19]通过抽样调查法测算 2020 年韩国外卖行业的塑料垃圾产生总量为 7.30×10⁴ t, 聚丙烯 (PP) 和聚对二苯甲酸乙二醇酯 (PET) 占包装材料的 81.48%。ARUNAN 和 CRAWFORD^[20]根据不同餐饮品类订单的平均塑料包装重量计算了澳大利亚食品配送行业的塑料垃圾总量, 发现外卖塑料垃圾产生量存在餐饮类型的差异。

收稿日期: 2024-12-25 录用日期: 2025-02-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (72361147524)

第一作者: 方静竹 (2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为固废资源化, 202201704118@wust.edu.cn ✉通信作者: 龚洁 (1981—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为污水处理、环境功能材料的研究与开发, gongjie@wust.edu.cn; 周传斌 (1981—), 男, 博士, 研究员, 研究方向为城市代谢与固废信息学、厨余垃圾与塑料垃圾资源化, cbzhou@rcees.ac.cn

SONG 等^[21] 通过外卖平台的数据挖掘方法, 估算了中国外卖行业塑料垃圾的产生量, 发现从 2015 年到 2017 年, 外卖塑料垃圾增加了 7.5 倍, 总量约为 150×10^4 t。目前关于外卖塑料垃圾的研究主要集中在塑料垃圾的产生总量以及环境影响等方面^[18-23], 对塑料垃圾组成、塑料垃圾产排的餐饮类型及城市空间差异的讨论较少, 而这些信息对于制定针对性地减少塑料使用和回收政策至关重要。此外, 餐饮类型、订单行为与外卖塑料垃圾的产生量可以为探究城市地理科学提供新的视角, 为不同城市空间的外卖塑料垃圾回收设施及服务的布局等提供数据支持。已有研究表明, 城市居民的“觅食”(Food forage) 行为与餐饮类型和城市空间特征(如人口、收入、交通等)密切相关^[24-26]。WANG 和 HE^[27] 从城市地理学的角度探索了外卖的空间特征, 提出外卖订单集中在城市中心和次中心等高度城市化区域。还有研究指出人口密度、土地类型和交通条件等地理因素对外卖订单有影响^[28-31]。不同城市功能区的餐饮外卖类型的差异也可能影响餐饮外卖塑料垃圾的产排特征, 这是因为不同类型外卖食物的油、水含量和温度存在差异, 在塑料包装的材质和数量要求也会不同^[32]。由于食材和烹饪技术的差异, 不同餐饮类型具有差异化的环境影响, YANG 等^[33] 分析了不同餐饮类型的碳足迹, 餐饮类型的变化可以减少 38%~69% 的食品消费温室气体排放。目前的研究初步探讨了城市餐饮行为的地理空间和餐饮类型差异, 但对于餐饮外卖行业塑料垃圾产生的空间和餐饮类型差异还缺乏相关研究。而这对理解城市地理视角下新的“城市觅食”模式至关重要, 并可为城市塑料污染控制提供新的思路。

本研究旨在研究不同餐饮类型和城市空间下外卖行业塑料垃圾产生的数量、组成和空间特征, 为制定更有针对性的塑料污染治理政策提供科学依据。首先, 对外卖订单进行问卷调查, 得到不同餐饮类型中塑料垃圾产生数量和成分的特征系数。进而, 利用美团 APP(应用程序)的在线数据, 分析外卖订单数量、类型及其塑料垃圾产生的空间差异。本研究以北京这一典型超大城市为研究对象, 选取商业区、高校区、居民区和工业区 4 个典型城市空间作为研究案例, 分析不同类型功能区、不同餐饮类型的外卖塑料垃圾产排特征。最后, 提出了针对不同餐饮外卖类型和城市空间的差异化对策建议。

1 材料与方法

1.1 问卷调查

本研究通过问卷调查获取不同餐饮类型下餐饮外卖行业塑料垃圾产生特征。问卷设计覆盖所有在线外卖餐饮类型, 收集的信息包括就餐人数、消费金额、餐饮类型以及塑料包装的种类和数量。其中, 塑料垃圾类型包括塑料食品容器(大、中、圆形)、塑料包装袋(餐具袋、外卖配送袋)以及塑料餐具。餐饮类型依据“美团”和“饿了么”等外卖平台分类, 包括快餐小吃、西餐、地方菜、香锅/烤鱼、海鲜/烧烤、火锅、特色菜、日韩料理、甜点饮品及其它。

调查问卷通过线上和线下方式收集, 最后在问卷星平台进行整理。根据以下标准剔除无效问卷: 1) 总答题时间少于 120 s; 2) 所有问题的回答均为最小值或最大值; 3) 受访者答案与问题之间存在不一致性。最终筛选出 428 份有效问卷。

基于公式 (1), 计算不同餐饮类型每单外卖的平均消费金额 (W_i)。

$$W_i = \frac{\sum_i w}{O_i} \quad (1)$$

式中: W_i 为不同餐饮类型的平均每单消费金额, 元·单⁻¹; w 为每单消费金额, 元; i 表示 10 种餐饮类型; O_i 为该餐饮类型的订单数量。

基于公式 (2), 计算不同餐饮类型每单产生的平均塑料垃圾重量 (M_i)。

$$M_i = \frac{\sum_i (Q_a \times M_x + Q_b \times M_b + Q_l \times M_l)}{O_i} \quad (2)$$

式中: M_i 为不同餐饮类型每单产生的平均塑料垃圾重量, g·单⁻¹; Q_a 为塑料外卖袋数量; M_x 为塑料外卖袋重量, g; Q_b 为不同类型食品容器数量; M_b 为相应食品容器的重量, g; Q_l 为餐具包装袋数量; M_l 为餐具包装袋的重量, g。

塑料垃圾重量系数依据课题组前期研究结果确定, 大型食品容器、中型食品容器、圆形食品容器和塑料餐具包装袋的重量分别为 58.70、31.05、26.15、3.05 g^[34]。另外, 实验室测量了 18 个塑料外卖袋样本, 平均重量为 8.57 g。通过对 90 个样本的回收标签分析, 塑料包装被分类为聚丙烯 (PP)、聚对二苯甲酸乙二

醇酯 (PET)、聚乙烯 (PE) 以及未标识塑料。

基于公式 (3), 计算不同餐饮类型每 100 元消费的平均塑料垃圾重量 (M_{100i})。

$$M_{100i} = \frac{100 \times \sum_i \frac{M_i}{W_i}}{O_i} \quad (3)$$

式中: M_{100i} 为不同餐饮类型每 100 元消费产生的平均塑料垃圾重量, $\text{g} \cdot 100 \text{元}^{-1}$ 。

问卷分析得出不同餐饮类型的平均每单消费金额、每单塑料垃圾产生量及每 100 元消费的塑料垃圾产生量。利用 SPSS27 软件进行统计分析, 采用单因素相关性分析和方差齐性检验, 分析不同餐饮类型之间的显著性差异 (显著性差异在图中用 a、b、c、d 表示)。

1.2 不同城市功能区的外卖点调查

本研究选择北京市作为案例, 分析餐饮外卖行业在不同城市功能区的塑料垃圾产生的差异性。根据美团网统计, 北京市拥有较多的外卖订单量和较完整的餐饮类型, 是揭示餐饮外卖行业与城市功能区关系的适宜研究对象。根据《北京市城市总体规划 (2004—2020 年)》, 北京市城市空间被分为居民区、商业区、高校区和工业区^[35]。在北京市选取每类功能区的 2~3 个典型地点 (商圈) 进一步分析, 居民区、商业区和高校区各选取 3 个地点, 工业区选取 2 个地点 (北京市具有一定的规模的工业集聚区仅有 2 个)。选取的案例位于北京市的核心城区 (东城区和西城区)、次中心 (朝阳区、海淀区、丰台区和石景山区) 和郊区 (昌平区、大兴区和顺义区), 构成本研究的空間梯度。选定功能区的位置和描述如图 1 所示。选择的城市功能区在北京具有较强的代表性, 且在北京市城市总体规划中被列为重点功能区。

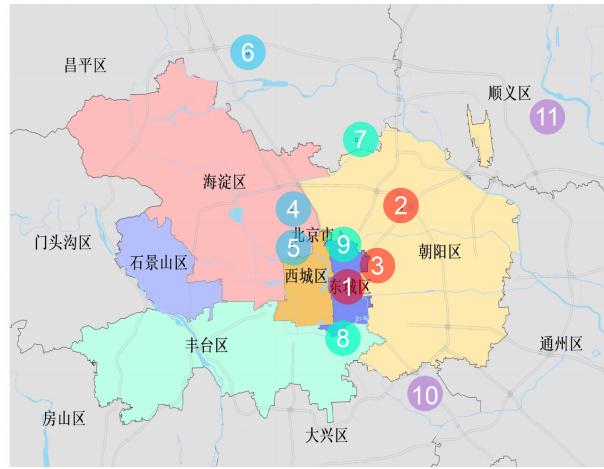


图 1 所选城市功能区的分布

Fig. 1 Distribution of selected urban functional zones

进而, 在美团 App 中找到每个功能区内提供外卖服务的餐厅。根据已有研究, 外卖骑手的平均配送服务范围 3 km^[36]。将功能区的代表性建筑确定为中心点 (详见表 1), 收集中心点 3 km 半径范围内的餐厅信息 (不包括超市和农贸市场的外卖数据), 包括餐厅名称、餐饮类型和每月订单数量。本研究于 2024 年 5 月至 6 月收集了 5 456 家餐厅共 820×10^4 份订单的相关数据, 详情见表 1。

基于公式 (4), 计算每个功能区的每月总订单量。

$$Q_n = \frac{q_n}{\alpha} \quad (4)$$

式中: Q_n 表示每个功能区的每月总订单量; n 为每个地理位置的编号 (见表 1); q_n 为美团平台内分析区域的每月订单量; α 为美团的市场份额 (67.3%)^[37]。

基于公式 (5), 计算每个功能区的人均月订单量。

$$\bar{A}_n = \frac{\bar{Q}_z}{D_z \times S} \quad (5)$$

式中: A_n 表示每个功能区的人均月订单量; Q_z 表示商业区、高校区、居民区和工业区 ($z=1,2,3,4$) 的平均月订单量; D_z 表示功能区内的平均人口密度, $\text{人} \cdot \text{km}^{-2}$, 数据来自第七次全国人口普查^[38]; S 为 3 km 半径的区域面积, km^2 。

基于公式 (6), 计算每个功能区的外卖塑料垃圾总量。

$$W_n = \frac{\bar{Q}_z \times \sum_i \eta_i \times M_i}{10^6} \quad (6)$$

式中： W_n 为不同功能区每月交付产生的塑料垃圾， $t \cdot \text{月}^{-1}$ ； Q_z 表示商业区、高校区、居民区和工业区（ $z=1,2,3,4$ ）的平均月订单数量； η_i 表示功能区内各餐饮类型的订单比例； M_i 表示不同餐饮类型产生的每份订单的平均塑料垃圾重量， $\text{g} \cdot \text{单}^{-1}$ ；计算数据见表 1。

表 1 各城市功能区内餐厅及其外卖订单的详细信息
Table 1 Detailed information of the examined restaurants in different urban zones

功能区	ID	功能区名	区域中心（代表性建筑）		人口密度/ ($10^3 \text{ 人} \cdot \text{km}^{-2}$)	外卖商家数量/个	订单数量/ ($10^3 \text{ 单} \cdot \text{月}^{-1}$)
			经度	纬度			
商业区	#1	王府井	116.41401	39.91292	7.1	334	426
	#2	望京	116.48156	39.99648	14.9	594	1 033
	#3	三里屯	116.45432	39.93481	10.2	814	1 263
高校区	#4	五道口	116.33776	39.99290	26.6	499	1 240
	#5	中国铁道科学研究院	116.33789	39.95536	24.2	638	1 138
	#6	沙河大学城	116.28041	40.16499	5.5	351	382
居民区	#7	天通苑	116.42326	40.07086	25.5	618	706
	#8	木樨园	116.40649	39.85517	27.0	510	748
	#9	青年湖社区	116.40716	39.95650	24.5	610	702
工业区	#10	亦庄工业园	116.50967	39.79266	7.4	365	491
	#11	顺义工业园	116.67158	40.09140	1.8	120	90

2 结果与讨论

2.1 餐饮外卖行业的塑料垃圾产生特征

1) 塑料垃圾的产生量特征。不同餐饮类型的平均每单消费金额如图 2(a) 所示。每单外卖的平均消费金额从 15.80 到 513.00 元不等（中位数为 26.15 元·单⁻¹）。火锅类的中位消费金额最高，为 432.50 元·单⁻¹，其次是香锅/烤鱼（44.50 元·单⁻¹）和海鲜/烧烤（70.00 元·单⁻¹）。平均塑料垃圾产生量如图 2(b) 所示。不同餐饮类型的每单塑料垃圾产生量存在显著差异，范围为 3.05~1 120.10 g·单⁻¹（中位数为 57.20 g·单⁻¹）。其中，火锅的塑料垃圾产生量中位数最高，为 930.13 g·单⁻¹，其次是香锅/烤鱼（76.77 g·单⁻¹）和特色菜（68.05 g·单⁻¹）（显著性 $P<0.05$ ）。火锅类存在显著性差异主要是因为每单外卖服务的人数通常为 4~6 人，而其他餐饮类型通常仅服务 1~2 人。每 100 元外卖订单消费的塑料垃圾产生量如图 2(c) 所示。在不同餐饮类型中，每 100 元消费的塑料垃圾产生量范围为 14.86~416.52 g·100 元⁻¹。快餐小吃（283.56 g·100 元⁻¹）、日韩料理（254.01 g·100 元⁻¹）和特色菜（251.42 g·100 元⁻¹）的塑料垃圾产生量显著高于甜点饮品（128.73 g·100 元⁻¹）、西餐（37.74 g·100 元⁻¹）和海鲜/烧烤（105.09 g·100 元⁻¹）。

2) 塑料垃圾的组成特征。不同餐饮类别所产生塑料垃圾的组成见图 2(d)。在餐盒（食品容器）中，PP、PET 和其他未标识材料分别占 91.76%、3.52% 和 4.71%。包装袋中 PE 和未标识材料的比例分别为 40.59% 和 59.41%。餐具和包装袋使用的塑料材料均未标明。如图 2(d) 所示，在已识别的塑料包装类型中，大部分塑料垃圾由 PP 组成，范围从 67.47%~90.26%。其中，火锅、快餐小吃、日韩料理、特色菜、香锅/烤鱼、地方菜、海鲜/烧烤、西餐、其它菜系、甜点饮品的 PP 比例分别为 90.26%、82.18%、78.09%、77.76%、76.45%、73.97%、73.69%、73.33%、69.47%、67.47%。PET 瓶在所有外卖塑料包装中只占 2.69%~3.17%。未标识塑料占 6.27%~22.45%，其中火锅、快餐小吃、日韩料理、特色菜、香锅/烤鱼、地方菜、海鲜/烧烤、西餐、其它菜系、甜点饮品中未标识塑料的比例分别为 6.27%、11.88%、14.60%、14.55%、15.90%、17.39%、17.71%、17.76%、21.04% 和 22.45%。未标识的部分包括外卖配送袋、餐具包装袋和其他塑料容器。根据对塑料包装供应商的调查，餐饮外卖配送袋主要由 PE、铝箔、珍珠棉制成，以保持配送食物的温度。餐具及其包装袋上的塑料成分基本没有标记，但其占比也比较小。

3) 餐饮外卖行业塑料垃圾产生特征研究的比较分析。不同餐饮类型的外卖订单及其塑料包装使用之间

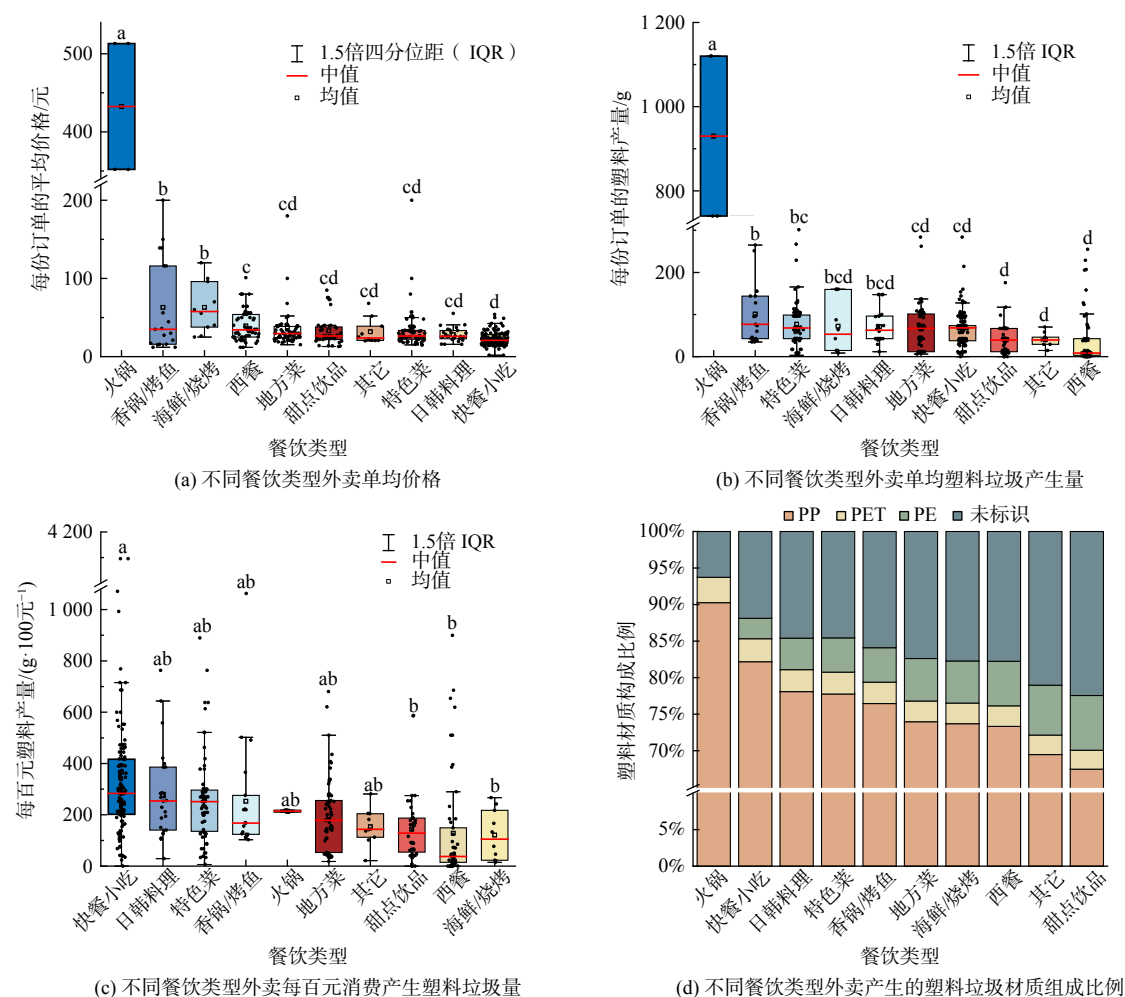


图2 不同餐饮类型外卖塑料垃圾产生特征 (图中符号 a-d 代表统计显著性 $P < 0.05$)

Fig. 2 Characteristics of plastic waste generation from food delivery across different catering types (The symbol a-d in the figure represents statistical significance with $P < 0.05$).

存在显著差异,通过采用餐饮类型的差异化系数,可以提高预测餐饮外卖行业塑料垃圾产生量的准确性。比较本研究 and 已有研究在 2020 年的外卖塑料垃圾产生量数据及其计算方法,发现采用本研究建立的外卖包装塑料垃圾产生量及其组成特征测算方法,可提高垃圾产排特征数据的分辨率。基于本系数,估算 2020 年我国餐饮外卖行业的塑料包装垃圾产生量约为 120×10^4 t,其中 PP 塑料占主要比例,约为 90×10^4 t,其次是由聚乙烯、铝箔和珍珠棉构成的复合包装,约为 20×10^4 t。ZHANG 和 WEN^[39]应用美团网 APP 数据集,并结合现场调查数据,估算 2020 年中国外卖行业塑料垃圾产生量约为 160×10^4 t。该研究从 229 个城市中选择 8 个样本城市代表全国的外卖订单数据且具有较高的覆盖率,但是采用平均化的塑料包装系数分析全国餐饮外卖塑料垃圾产生量(即每份订单 3.44 个塑料容器和 1 个塑料袋;单个重量为每件 24 g 和每件 5 g),这可能会降低估计的准确性。此外,ZHANG 等^[34]的研究指出 2020 年我国外卖塑料垃圾产生量约为 697×10^4 t,也高于本研究结果,这是因为该研究范围包括了超市生鲜食品等其他外卖塑料包装垃圾。

本研究发现,餐饮外卖塑料垃圾的主要成分为 PP 塑料,占 $76.27\% \pm 6.17\%$,略高于前期调查结果(60%)^[35],这也可能是因为餐饮类型差异带来的。外卖包装用的 PP 塑料主要用于餐盒,而质量和颜色(透明或单色)则是废品回收者的主要考虑因素。PP 塑料垃圾本身具有较高的回收价值,但餐饮外卖的餐盒容易受到食品残留的污染,使其可回收性降低^[40]。研究分析消费后的食品配送订单,发现食品残留(包括生物物质、水和油)约占总外卖废弃物产生量的 28%。因此,对消费后餐饮外卖行业产生的 PP 塑料垃圾进行洗涤、干燥等预处理,将有效提升其回收利用率。此外,未标识塑料废物占塑料包装总额的 $15.96\% \pm 4.37\%$,

主要用于食品配送的外部包装。本研究调查发现,餐饮外卖的外部包装通常由PE、铝箔和珍珠棉组成的复合材料制成,即使在使用寿命结束阶段,仍然保持较为清洁的状态。然而,由于此类包装材料成分缺乏清晰的标识,以及复合塑料包装材料拆解利用难度较大^[41],均导致了其较低的可回收性。

餐饮外卖行业的塑料垃圾产生量、组成及空间差异可为该行业制定塑料污染防治对策提供基础信息。目前,外卖行业的塑料垃圾通常与其他城市生活垃圾混合,最终在焚烧厂和垃圾填埋场处置。已有研究表明,焚烧塑料垃圾虽然可以回收能源,但其环境影响仍然不容忽视^[42]。例如,塑料垃圾与氯离子(来自食物中的盐分)混合焚烧可能会提高烟气中二噁英浓度^[43]。从资源化利用的视角,本研究估算我国2024年外卖行业产生约 270×10^4 t塑料垃圾,其中PP塑料为 204×10^4 t,占中国初级PP塑料产量的6.8%,塑料垃圾的资源价值约为 136×10^8 元人民币^[44]。因此,有必要为餐饮外卖行业寻求创新的技术路线和运营模式,以提高其塑料垃圾的回收利用率。此外,精确绘制餐饮外卖行业塑料垃圾的数量和组成特征,可为进一步应用塑料垃圾回收技术和规划设计回收设施,如源头分离、高效拆解、清洗等预处理^[45]提供参考依据,也可用于制定空间差异化的激励政策^[46]。

2.2 城市地理学视角下餐饮外卖塑料垃圾产生的空间特征分析

1) 餐饮外卖行业在不同城市空间中的塑料垃圾产生特征。不同城区每月外卖订单总量如图3(a)所示。研究发现,在商业区,王府井、三里屯和望京的送餐订单分别为 63.3×10^4 、 187.6×10^4 、 153.6×10^4 单·月⁻¹;在校园区,五道口、中国铁道科学研究所和沙河大学城的送餐订单分别为 169.1×10^4 、 184.2×10^4 、 56.8×10^4 单·月⁻¹;在居民区,青年湖社区、木樨园和天通苑的送餐订单分别为 104.3×10^4 、 111.1×10^4 、 104.9×10^4 单·月⁻¹;在工业区,亦庄工业园和顺义工业园的送餐订单分别为 73.0×10^4 、 13.3×10^4 单·月⁻¹。餐饮外卖订单数量存在城市空间梯度差异,即城市副中心>城市中心>郊区,即距离城市副中心越远,外卖订单越少。以王府井为例,该商业区位于北京市中心位置,外卖订单数量在所有研究案例中位居第三。造成这一现象的原因可能有2个方面:一是人口密度低;二是由于经营成本高,餐馆数量少。校园区域内的外卖订单数量可能会受到住校学生和工作人员数量的影响。工业区的食品配送订单数量最低,因为人口数量相对较少,且工厂通常为工人提供餐饮服务。

来自不同城市地区的外卖餐饮类型也存在差异。外卖订单在各功能区的占比如图3(b)所示。研究发现,与其他城市区域相比,高校区域的甜点饮品(13.84%)、日韩料理(4.16%)和火锅(1.46%)的外卖订单比例显著高于其他类型。此外,与其他功能区相比,工业区的特色菜品订单(8.83%)和海鲜/烧烤订单(5.45%)相对较高。总体而言,快餐小吃主导了所有类别城区的外卖配送类型,其次是甜点饮品、地方菜和西餐。最后在所有外卖订单中,日韩料理、海鲜/烧烤、火锅、香锅/烤鱼的订单比例相对较低。

通过月度外卖订单和人口密度数据集,可计算不同城市区域的人均月外卖订单(见图3(c))。一般情况下,商业区>工业区>高校区>居住区,人均月外卖订单为4.44、3.10、2.85、1.47 单·人⁻¹。商业区的月人均订单量显著高于居民区($P < 0.05$)。通过分析不同城市功能区外卖的塑料垃圾产生量,结合调查数据得到的外卖订单占比和单均塑料垃圾产生量可知,塑料垃圾产生量依次为高校区>商业区>居民区>工业区,产生量分别为3.39、3.23、2.62、1.03 t·km⁻²·月⁻¹(见图3(d))。其中,商业区、校园区和居民区的月平均塑料垃圾产生量分别是工业区的3.14、3.29和2.54倍。

2) 通过城市地理学解析餐饮外卖行业的新视角。“城市觅食”为理解城市地理学提供了新视角^[44-49]。餐饮外卖行业作为一种新兴的“城市觅食”方式,与城市的地理空间特征密切相关。本研究发现外卖订单数量呈现出城市副中心最高,其次是城市中心,然后是郊区的模式,也可体现城市功能区的人口及其行为特征的差异。具体而言,商业区、高校区和居民区的人口密度与人均订单数量呈反比关系,其中商业区的人口密度最低,但人均订单数量最大。已有研究还强调了不同城市地区,特别是商业和高校地区的外卖塑料垃圾产生的空间差异。城市空间和经济梯度,以及城市之间的差异,会影响人们的饮食行为^[13,17,21,39]。研究发现,个体行为习惯或家庭生活方式也会影响“城市觅食”模式^[17,50-51]。从城市梯度的角度来看,外卖订单和塑料垃圾的产生主要集中在城市副中心(如北京市二环至五环内),这也说明该区域是加强塑料垃圾收集和回收的重要区域。GUO等^[31]研究了南京疫情后外卖订单的状况,发现影响最大的4个变量分别是餐厅数量(24.0%)、高校数量(9.3%)、办公室数量(8.6%)和主干道密度(7.9%)。SHI等^[52]分析了中国上海市外卖订单的影响因素,发现经济水平、“白领”比例、人口特征和交通便利性是在线外卖行业的关键因素。上述研究分析

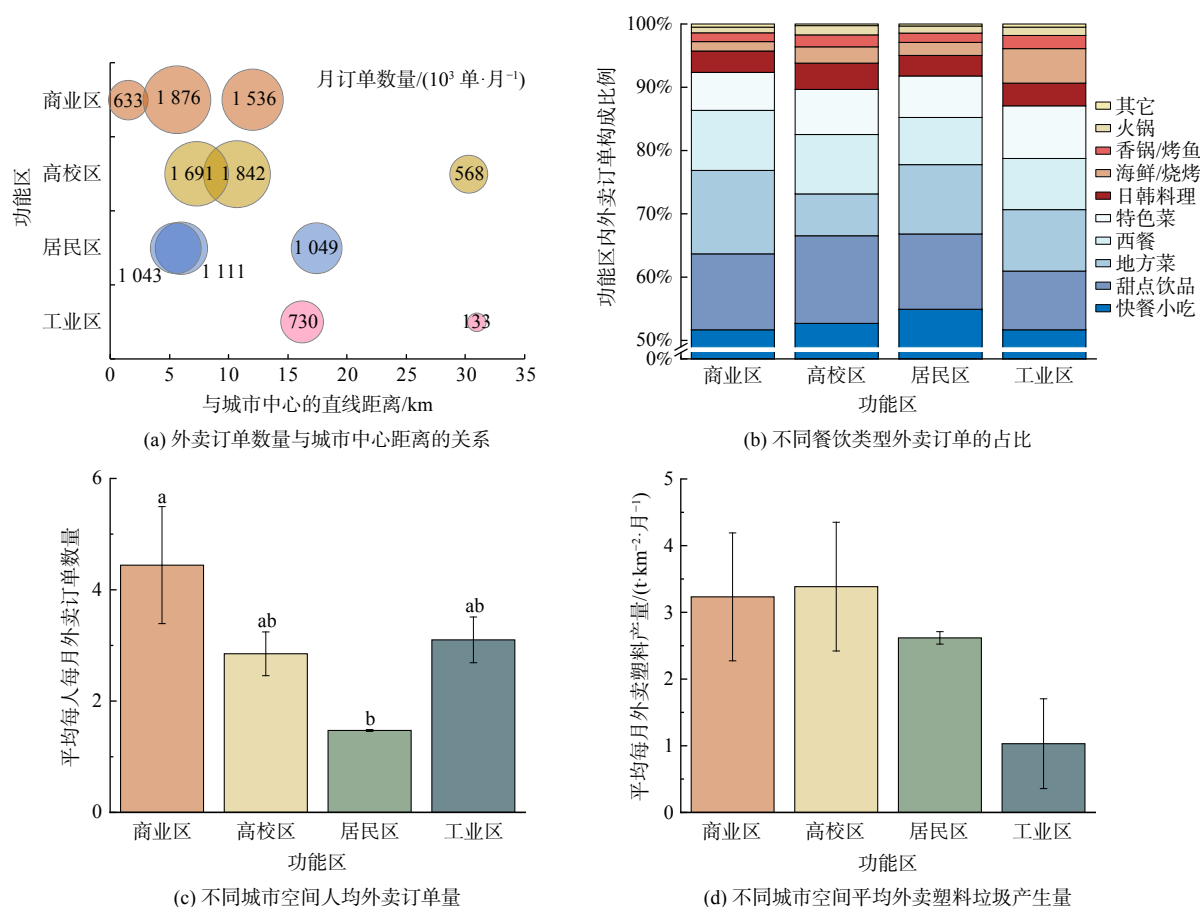


图3 不同城市空间外卖塑料垃圾产生概况 (图中符号 a~b 代表统计显著性 $P < 0.05$)

Fig. 3 Profile of food delivery plastic waste generation across different urban spaces (The symbol a-b in the figure represents statistical significance with $P < 0.05$).

了影响城市外卖行业发展的关键因素,但并未探究不同城市功能区外卖塑料垃圾的产生量,本研究发现城市商业区和高校区产生了更多的塑料包装垃圾,这与相关功能区活动人群的外卖点单行为或消费文化有关。因此,这些城市功能区可以成为布局外卖塑料垃圾回收设施的重点区域。不同的是,居民区的塑料垃圾产生量相较于商业和校园区域呈现出数量偏少且较为分散的特征,其分类回收更具挑战性。

2.3 对策建议

餐饮外卖行业的快速发展趋势对塑料垃圾的治理提出了技术创新和政策干预的需求。为应对外卖行业塑料污染,以往研究提出了多种干预措施,包括使用可重复使用的包装^[53]、设计减塑包装^[50]、使用可降解塑料材料^[54]、引入“无需餐具”选项^[51]、强化生产者责任延伸制度^[55-56],以及建立高效的废弃物终端管理机制^[57-58]。基于本研究的主要发现,提出以下政策建议。

1) 根据餐饮类型特点设计轻量化和可重复使用的外卖包装。火锅类外卖的单次塑料垃圾产生量最高,而快餐小吃每百元消费的塑料垃圾量最大。例如,采用可重复使用的不锈钢或铝制容器替代火锅外卖中的厚重塑料容器;采用纸质容器替代快餐类外卖中的塑料餐盒;可为不同类型的外卖塑料包装设置重量限值,类似于PET瓶的轻量化设计要求,推动外卖包装塑料垃圾减量化。

2) 在重点城市区域实施塑料包装回收系统。商业区和校园区的外卖塑料垃圾产生量显著高于其他功能区。建议开展外卖塑料垃圾产生源分类收集与预处理技术研发,包括塑料垃圾的分离、清洗、干燥、消毒、压缩及洁净储存等多功能。设计基于逆向物流的外卖塑料垃圾回收设备,布置在塑料垃圾产量较高的城市功能区,并研究此类垃圾回收设施的空间分布和商业模式。

3) 强化外卖塑料包装的标准化标识系统。15.96%±4.37%的外卖塑料包装未标识成分,阻碍了未受污染

的外包装的回收利用。建议出台强制性技术标准和法规,规定外卖塑料包装组成成分的标识规则。例如,外卖袋、餐具及其包装应明确标识材料组成,以便于废弃塑料材料的回收与再利用。

4) 鼓励在线外卖平台的数据收集与共享。外卖订单的位置信息、餐饮类型及消费金额等数据对塑料垃圾的收集和回收具有重要意义。根据中国《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》,在线外卖平台应及时向公众报告塑料垃圾的产生数据,以便政府、非营利组织和公众对塑料污染进行监督。开发塑料垃圾产生地图和数据库,掌握外卖塑料垃圾的产生量、类型和位置,助力精细化回收利用。

2.4 不足与展望

本研究以北京市为研究对象,考察了城市塑料垃圾产生的空间差异,而中小城市因餐馆类型和地理分布的不同而存在差异。未来的研究可以进一步整合不同类型城市大规模、连续的外卖订单时间数据,进一步揭示外卖订单及其塑料垃圾产生的城市地理空间特征。其次,用于外卖配送外包装的复合材料包括无纺布、铝箔、珍珠棉、PE热熔胶等,此类复合包装材料的具体构成和可回收性还值得进一步的研究。最后,食物残留的污染是餐饮外卖塑料垃圾回收利用的难题,需要对塑料包装中食物残留的污染程度和高效去除方法进行进一步的研究。

3 结论

1) 不同餐饮类型的外卖塑料垃圾产生量存在显著差异,其中火锅类最高,西餐最低。

2) 聚丙烯(PP)是餐饮外卖塑料垃圾的主要成分,其次是由聚乙烯(PE)、铝箔和珍珠棉构成的复合包装。

3) 不同城市功能区的餐饮外卖塑料垃圾产生量存在空间差异,单位面积人均外卖塑料垃圾产生量排序为,高校区>商业区>居民区>工业区,外卖塑料垃圾回收设施可优先设置在产生量较高的功能区。

参考文献

- [1] On the plastics crisis[J]. *Nature Sustainability*, 2023, 6(10): 1137-1137.
- [2] NAPPER I E, THOMPSON R C. Plastics and the environment[J]. *Annual Review of Environment and Resources*, 2023, 48(1): 55-79.
- [3] ISLAM M S, LEE Z, SHALEH A, et al. The United Nations environment assembly resolution to end plastic pollution: Challenges to effective policy interventions[J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2023, 26(5): 10927-10944.
- [4] 刘雪薇, 雷廷宙, 白晶晶, 等. 塑料循环—揽子计划对典型区域塑料污染的影响[J]. *中国环境科学*, 2024, 44(11): 6221-6227.
- [5] WICHAI-UTCHA N, CHAVALPARIT O. 3Rs policy and plastic waste management in Thailand[J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2019, 21(1): 10-22.
- [6] DIGGLE A, WALKER T R. Implementation of harmonized extended producer responsibility strategies to incentivize recovery of single-use plastic packaging waste in Canada[J]. *Waste Management*, 2020, 110: 20-23.
- [7] VOLK R, STALLKAMP C, STEINS J J, et al. Techno-economic assessment and comparison of different plastic recycling pathways: A German case study[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2021, 25(5): 1318-1337.
- [8] WILLIAMS A T, RANGEL-BUITRAGO N. The past, present, and future of plastic pollution[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2022, 176: 113429.
- [9] JANAIRO J I B. Unsustainable plastic consumption associated with online food delivery services in the new normal[J]. *Cleaner and Responsible Consumption*, 2021, 2: 100014.
- [10] SYED ALI S A, ILANKOON I M S K, ZHANG L, et al. Packaging plastic waste from e-commerce sector: The Indian scenario and a multi-faceted cleaner production solution towards waste minimisation[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 447: 141444.
- [11] SHIN J Y, KIM E, JANG Y J, et al. Mindful choices: Unveiling the driving factors behind consumers' intention to reduce single-use plastic utensils[J]. *Sustainability*, 2024, 16(2): 710.
- [12] 艾媒网. 外卖行业数据分析: 2020年中国在线外卖市场规模将达到6642.2亿元[EB/OL]. [2024-08-01]. <https://www.iimedia.cn/c1061/72236.html>, 2020.
- [13] ZHANG Q Q, LAN M Y, LI H R, et al. Plastic pollution from takeaway food industry in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 904: 166933.
- [14] 国家发展改革委, 生态环境部. 国家发展改革委 生态环境部关于印发“十四五”塑料污染治理行动方案的通知[EB/OL]. [2024-08-01]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-09/16/content_5637606.htm, 2021.
- [15] 刘婷婷, 朱坤, 杨一帆. 外卖塑料包装污染治理的形势、挑战与对策[J]. *环境保护*, 2024, 52(13): 58-63.
- [16] 中华人民共和国中央人民政府. 政府工作报告[EB/OL]. [2024-08-01]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202403/content_6939153.htm, 2024.
- [17] LIU G Y, AGOSTINHO F, DUAN H B, et al. Environmental impacts characterization of packaging waste generated by urban food delivery services. A big-data analysis in Jing-Jin-Ji region (China)[J]. *Waste Management*, 2020, 117: 157-169.
- [18] ZHANG H, XUE L, JIANG Y H, et al. Food delivery waste in Wuhan, China: Patterns, drivers, and implications[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 177: 105960.
- [19] JANG Y, NAM KIM K, WOO J. Post-consumer plastic packaging waste from online food delivery services in South Korea[J]. *Waste Management*, 2023,

- 156: 177-186.
- [20] ARUNAN I, CRAWFORD R H. Greenhouse gas emissions associated with food packaging for online food delivery services in Australia[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 168: 105299.
- [21] SONG G H, ZHANG H, DUAN H B, et al. Packaging waste from food delivery in China's mega cities[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 130: 226-227.
- [22] 李德祥, 叶蕾, 支朝晖, 等. 三类型一次性外卖餐盒的全生命周期评价[J]. *现代食品科技*, 2022, 38(1): 233-237, 28.
- [23] 温宗国, 张宇婷, 傅岱石. 基于行业全产业链评估一份外卖订单的环境影响[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(9): 4017-4024.
- [24] SETO K C, RAMANKUTTY N. Hidden linkages between urbanization and food systems[J]. *Science*, 2016, 352(6288): 943-945.
- [25] AYATAC H, DOKMECI V. Location patterns of restaurants in Istanbul[J]. *Current Urban Studies*, 2017, 5(2): 202-216.
- [26] ZHANG Y, CUI S H, ZHONG Y Q, et al. Spatial patterns and influencing factors of takeaway consumption in 56 cities in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 465: 142712.
- [27] WANG Z Z, HE S Y. Impacts of food accessibility and built environment on on-demand food delivery usage[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2021, 100: 103017.
- [28] LI L L, WANG D G. Do neighborhood food environments matter for eating through online-to-offline food delivery services?[J]. *Applied Geography*, 2022, 138: 102620.
- [29] ZHANG F, JI Y J, LV H T, et al. Investigating factors influencing takeout shopping demand under COVID-19: Generalized additive mixed models[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2022, 107: 103285.
- [30] TALAMINI G, LI W K, LI X. From brick-and-mortar to location-less restaurant: The spatial fixing of on-demand food delivery platformization[J]. *Cities*, 2022, 128: 103820.
- [31] GUO Z S, ZHANG F, JI Y J. Investigating the nonlinear relationship between takeout order demand and built environment under different periods of COVID-19[J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2023, 2023: 1-16.
- [32] SHRUTI V C, KUTRALAM-MUNIASAMY G. Migration testing of microplastics in plastic food-contact materials: Release, characterization, pollution level, and influencing factors[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2024, 170: 117421.
- [33] YANG X, GAO Q, DUAN H B, et al. GHG mitigation strategies on China's diverse dish consumption are key to meet the Paris Agreement targets[J]. *Nature Food*, 2024, 5(5): 365-377.
- [34] ZHANG L, LIU Y J, ZHAO Z L, et al. Estimating the quantities and compositions of household plastic packaging waste in China by integrating large-sample questionnaires and lab-test methods[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, 198: 107192.
- [35] 北京市规划和自然资源委员会. 北京城市总体规划 (2004 年-2020 年)[EB/OL]. [2024-08-01]. https://ghzrzyw.beijing.gov.cn/zhengwuxinxi/xzxt/bjcszgh2004/202311/20231123_3308128.html, 2022.
- [36] 城市数据团. 分析了百万外卖小哥的配送路线, 我们发现了 4 个送餐流派[EB/OL]. [2024-08-01]. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_2428061, 2018.
- [37] TRUSTDATA. 2020 年 Q2 中国外卖行业发展分析报告[EB/OL]. [2024-08-01]. <https://www.199it.com/archives/1106731.html>, 2020.
- [38] 国家统计局. 中国人口普查年鉴[EB/OL]. [2024-08-01]. <https://www.stats.gov.cn/sj/pcsj/rkpc/7rp/zk/indexch.htm>, 2020.
- [39] ZHANG Y T, WEN Z. Mapping the environmental impacts and policy effectiveness of takeaway food industry in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 808: 152023.
- [40] GRITSCH L, BRESLMAYER G, RAINER R, et al. Critical properties of plastic packaging waste for recycling: A case study on non-beverage plastic bottles in an urban MSW system in Austria[J]. *Waste Management*, 2024, 185: 10-24.
- [41] NOVAKOVIC K, THUMBARATHY D, PEETERS M, et al. Zero-waste circular economy of plastic packaging: The bottlenecks and a way forward[J]. *Sustainable Materials and Technologies*, 2023, 38: e00735.
- [42] CIVANCIK-USLU D, NHU T T, VAN GORP B, et al. Moving from linear to circular household plastic packaging in Belgium: Prospective life cycle assessment of mechanical and thermochemical recycling[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 171: 105633.
- [43] KEDZIERSKI M, FRÈRE D, LE MAGUER G, et al. Why is there plastic packaging in the natural environment? Understanding the roots of our individual plastic waste management behaviours[J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 740: 139985.
- [44] ZHOU C B, YANG G, MA S J, et al. The impact of the COVID-19 pandemic on waste-to-energy and waste-to-material industry in China[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 139: 110693.
- [45] LANGE J P. Managing plastic waste—Sorting, recycling, disposal, and product redesign[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2021, 9(47): 15722-15738.
- [46] LIN G N, YUAN J Y, LI X, et al. Strategic choice of the management of disposable meal boxes from the perspectives of life cycle impact assessment: Recycling fossil plastics or promoting biogenic plastics[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2024, 204: 107477.
- [47] HORNER M W, WOOD B S. Capturing individuals' food environments using flexible space-time accessibility measures[J]. *Applied Geography*, 2014, 51: 99-107.
- [48] LAN T, YU M, XU Z B, et al. Temporal and spatial variation characteristics of catering facilities based on POI data: A case study within 5th Ring Road in Beijing[J]. *Procedia Computer Science*, 2018, 131: 1260-1268.
- [49] ZHANG S Q, LUAN H, ZHEN F, et al. Does online food delivery improve the equity of food accessibility? A case study of Nanjing, China[J]. *Journal of Transport Geography*, 2023, 107: 103516.
- [50] LI Z, ZHOU Y, ZHANG H J, et al. Driving factors and their interactions of takeaway packaging waste generation in China[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 185: 106467.
- [51] HE G J, PAN Y H, PARK A, et al. Reducing single-use cutlery with green nudges: Evidence from China's food-delivery industry[J]. *Science*, 2023, 381(6662): eadd9884.
- [52] SHI Y S, TAO T H, CAO X Y, et al. The association between spatial attributes and neighborhood characteristics based on Meituan take-out data: Evidence

- from shanghai business circles[J]. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 2021, 58: 102302.
- [53] MEEMKEN E M, BELLEMARE M F, REARDON T, et al. Research and policy for the food-delivery revolution[J]. *Science*, 2022, 377(6608): 810-813.
- [54] GUILLAUME S M. Sustainable and degradable plastics[J]. *Nature Chemistry*, 2022, 14(3): 245-246.
- [55] TIAN F, SOŠIĆ G, DEBO L. Stable recycling networks under the Extended Producer Responsibility[J]. *European Journal of Operational Research*, 2020, 287(3): 989-1002.
- [56] 王明远, 陆星瑶. 餐饮外卖平台的环境保护义务与责任研究[J]. *中国政法大学学报*, 2024(3): 5-17.
- [57] GALLEGO-SCHMID A, MENDOZA J M F, AZAPAGIC A. Environmental impacts of takeaway food containers[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 211: 417-427.
- [58] KERDLAP P, PURNAMA A R, LOW J S C, et al. Life cycle cost analysis of distributed versus centralized plastic sorting and recycling[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2023, 27(1): 297-311.

(责任编辑: 陶雪)

Characteristics of plastic waste generation from food delivery industry differentiated by catering types and urban space

FANG Jingzhu^{1,2}, YANG Guang^{2,3}, GONG Jie^{1,*}, ZHOU Chuanbin^{2,3,*}

1. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China; 2. State Key Laboratory for Ecological Security of Regions and Cities, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

*Corresponding author, E-mail: gongjie@wust.edu.cn; E-mail: cbzhou@rcees.ac.cn

Abstract Food delivery industry developed rapidly in recent years, making it a crucial issue for mitigating land-based plastic waste. Profiles of plastic waste generation from food delivery are fundamental for precisely controlling plastic pollution for cities; however, its spatial characteristics remained unclear. In this work, 5 456 food delivery restaurants in four categories of urban functional zones in Beijing, China were studied to find the spatial differences of plastic waste generation. Main results were: 1) The plastic waste generated per order ranges from 3.05 to 1 120.10 g, that of the hot pot was the greatest and western food was the lowest. 2) Polypropylene was the main component of plastic waste generated from food delivery, accounting for 76.27%±6.17% of the plastic packaging, followed by the composite packaging (incl., polyethylene, aluminum foil, and pearl cotton), accounting for 15.96%±4.37% of the plastic packaging. 3) Per unit area and per capita plastic waste generation from the food delivery industry showed spatial differences, i.e., campus zone>commercial zone>residential zone>industrial zone; the campus zones produced 3.29 times plastic waste than the industrial zones. Space-specific policy recommendations were put forward for improving plastic waste management of food delivery industry.

Keywords food delivery; plastic waste; catering type; urban space; generation; characteristics