

基于职住分离的超大特大城市交通拥堵碳排放机理研究*——以天津市“郊住城职”现象为例

The Carbon Emission Mechanism of Traffic Congestion in Mega Cities Caused by Job-housing Imbalance: A Case Study of Commuting Behavior from Suburban Housing to Urban Workplaces in Tianjin

王睿 柯嘉 张赫 WANG Rui, KE Jia, ZHANG He

摘要 以天津市为例,采用早晚高峰OD数据、百度地图实时拥堵数据及POI数据等多元数据,运用核密度分析方法提取天津市早晚高峰时段“郊住城职”典型通勤行为线路,分析职住分离、道路拥堵对碳排放的影响机理。研究发现,职住分离下的通勤路线主要集中于城郊“住”空间与6—8 km外的中心城区“职”空间之间。职住空间各自高聚集且在一定距离下相对分离会造成通勤路线重叠短时集聚,从而产生拥堵碳排放,但早晚高峰拥堵碳排放特征及形成机制有所差异。“郊住”周边土地功能、交通组织和公共交通设施在早晚高峰对拥堵碳排放产生差异化影响,如果增加道路网密度及公共交通站点可达性,那么无论早晚通勤均可有效降低拥堵碳排放。以期为大城市功能疏解和交通改善提供决策参考。

Abstract Using multiple data such as OD data, Baidu Map real-time congestion data and POI data, typical commuting behavior routes from suburban housing to urban workplaces in Tianjin during morning and evening peak hours are proposed with kernel density analysis method. Furthermore, regression analysis is used to analyze the characteristics and influencing factors of total carbon emissions from congestion. The research results show that the typical commute routes are mainly concentrated between large residential areas in the suburbs and the workplaces in the adjacent central urban area. There are differences in the characteristics and formation mechanisms of carbon emissions from morning and evening peak congestion. Land use, transportation organization, and public transportation facilities around suburban residential spaces have a differentiated impact on congestion carbon emissions during morning and evening peak hours. Increasing the density of the road network and reducing the distance between public transportation stations can effectively reduce the carbon emissions caused by congestion.

关键词 交通碳排放;交通拥堵;超大特大城市;职住分离

Key words traffic carbon emissions; traffic congestion; mega cities; job-housing imbalance

文章编号 1673-8985 (2023) 06-0033-07 中图分类号 TU984 文献标志码 A

DOI 10.11982/j. supr. 20230604

作者简介

王睿

天津大学建筑学院

副研究员

柯嘉

新加坡国立大学设计与工程学院

硕士研究生

张赫 (通信作者)

天津大学建筑学院

教授,博士生导师, 147792505@qq.com

0 引言

交通运输部门的温室气体排放量占全球总温室气体排放量的23%,是全球第3大温室气体排放源。根据国际交通论坛(ITF)数据,通勤交通在一些大城市中所占的比重可以达到30%以上^[1]。职住分离会通过长距离通勤直

接导致碳排放增加,同时也有研究表明大城市职住分离导致的交通拥堵问题更不容忽视。我国交通高峰期城市机动车年CO₂排放总量是畅通状态下的4.51倍^{[2][167]},可见职住分离会通过增加交通拥堵而加剧碳排放增长。这种现象在我国如北京、上海、香港、广州、天津等超大

*基金项目:国家自然科学基金“基于碳排放强度约束的城市建成区典型功能组团空间布局优化方法”(编号52208073)资助。

特大城市具有普遍性,也是交通碳减排的关键性问题之一^[3]。然而,随着超大特大城市整体结构日益稳定,职住分离成为普遍且难以逆转的空间治理难题。针对某类职住分离典型行为的功能疏解和交通改善,对于减少交通碳排放、优化城市结构具有重要意义。

在既有研究中,不同领域关注职住分离、交通拥堵和碳排放三者之间关联问题的切入点有所差异^[4-5]。从城市结构性调控角度,长久以来职住空间结构与城市交通拥堵的影响关系是规划学界的研究热点。通过职住均衡化布局减少长距离通勤、改善拥堵是普遍共识性的空间规划解决方案^[6-8]。在此基础上,大量研究成果关注于职住分离的测度方式^[9-10]、职住空间的特征与影响因素^[11]、职住分离下的通勤模式^[12-13]、^[14]^[28]等,但多通过统计或调研数据,以城市、区或街道为研究单元进行职住分离测度^[15-16],更精细的研究尺度较少涉及。而从交通碳排放降低的角度,由于拥堵造成碳排放增长剧烈,交通拥堵碳排放的核算方法近年成为研究热点^[17-20],其中采用大数据方法测度实时拥堵碳排放很好地解决了拥堵碳排放测度的准确性与精细度^[21]^[69]。

以上两个研究方向均针对交通拥堵这一共同焦点,但仍从成因与结果不同角度分别解析,少有将职住分离、交通拥堵和拥堵碳排放三者相结合的研究成果。这是由于三者的关联性研究多涉及人的出行行为路径,需要较为精细的数据和方法支撑。但现有研究多停留在1 km×1 km左右的街道及以上的行政区域尺度,较少涉及300—500 m范围所对应的典型社区或街区尺度,导致跨行政区域的典型职住集中区的识别度较差。而实时拥堵数据虽然可较好地解决某条道路碳排放的实时核算,但其仍较少考量与人的出行行为路径的关联性。

因此,本文以超大特大城市的典型职住分离现象之一——“郊住城职”现象为切入点,以初步揭示该现象下的交通拥堵碳排放机理为研究目标。采用天津市早晚高峰500 m×500 m精度的交通起止点调查数据

(Origin-Destination Data, OD)、百度地图实时拥堵数据及地图兴趣点数据(Point of Interest, POI)等多元大数据,识别“郊住城职”典型区域,建立职住分离典型通勤路径的识别方法。重点探索超大特大城市近郊区居住空间向城市中心区远距离通勤的集中路线特征、典型路线产生的拥堵碳排放空间分布及其空间影响因素,由此为超大特大城市功能疏解和交通改善提供方法及理论支撑。

1 研究方法

1.1 “郊住城职”典型通勤路线提取方法

(1) 早晚高峰典型O点、D点选取

首先,获取2023年3月某个工作日(非疫情期间)全天OD数据,OD矩阵为500 m×500 m。根据天津市公安交通管理局发布的规定可知,早高峰时间段为7:00—9:00,晚高峰时间段为17:00—19:00。选取7:00、8:00、9:00,以及17:00、18:00、19:00的OD数据。其次,在ArcGIS中导入天津市土地利用现状shp文件及OD数据表,将O点(早高峰)或D点(晚高峰)经纬度设置为要素的经纬度坐标,选择近郊环城四区所有居住用地要素作为裁剪要素,裁剪后获得可能存在的所有早高峰起始点(O点)和晚高峰到达点(D点)位于环城四区居住用地的OD链条,可初步设定为早高峰时段或晚高峰时段“郊住城职”OD数据筛选集,从而选取典型通勤线路。最后,对具有早晚高峰相同O点和D点的坐标进行融合作为早晚高峰典型O点、D点。

(2) 典型通勤路线提取

由于OD数据中有较多冗余数据以及时点切割问题,会存在大量非确定职住点位问题。因此,首先筛选典型通勤路线。根据职住分离的研究,职住分离度一般最小达到2 km^[21],本文将此限度称为职住分离阈值。将OD距离小于2 km的典型链条进行剔除,剩余典型OD链条按照出行人次由高到低排序,采用自然断点法将链条分为5类。我们将OD链条具有最高重叠度的一类链条且D点(晚高峰O点)落在中心城区非大型居住区域范围内的OD链条

定义为典型职住分离链条。而在数据处理过程中发现,第一等级即出行人次最高的类别与其他4等级的出行人次具有较大的数量级差别,首位度较高。一定程度上证实了“郊住城职”典型通勤链条的存在。因此,可将该类别中的数据设定为“郊住城职”典型通勤路线。随后,将链条两端OD点坐标进行坐标转换,基于Python导入OD点坐标,向高德开放平台查询驾车路径规划,并要求返回距离优先路径,由此得到典型通勤线路的私家车驾驶路线。

1.2 通勤拥堵碳排放系数计算方法及数据获取方式

(1) 通勤拥堵碳排放系数计算方法

结合既有研究中对拥堵碳排放的计算方法^[23]、^[24]^[46]和所采用的数据基础特征,本文不考虑通勤碳排放中私家车型号、汽油标号等因素的影响作用,仅考虑拥堵本身造成的通勤碳排放影响,因此采用拥堵碳排放系数,即通勤路线全程实际出行碳排放总量与非拥堵情况下出行碳排放量的比例作为衡量通勤拥堵碳排放的数值。因此拥堵碳排放系数可由通勤路线中不同拥堵等级碳排放系数进行计算转化。具体计算公式如下:

$$CCE_n = \frac{\sum_i^* l_i \times F_i}{L_n \times F_1} \quad (1)$$

式中:CCE_n为第n条路径链条的通勤交通拥堵碳排放指数;l_i为该路线上拥堵数值为i的道路长度;F_i为拥堵数值为i的拥堵指数;L_n为规划路径总长度,即l_i的总和。结合百度地图拥堵碳排放指数标准,并参照冯海霞等^[21]^[72]研究成果中对不同拥堵状态下CDI数值,分别取F₁=1(通畅),F₂=1.5(轻度拥堵),F₃=2(中度拥堵),F₄=4(严重拥堵),作为拥堵碳排放指数纳入公式计算。

(2) 通勤拥堵指数的数据获取方式

创建50 m×50 m的渔网,运用渔网对线要素进行标识分割,并获取中点坐标。基于Python,以每个中心点坐标为查询点,查询范围半径设置为30 m,运用百度开放平台进行拥堵状况获取,返还结果为csv文件,内容包括

路况拥堵数值 (1—4)(1为畅通, 2为缓行, 3为拥堵, 4为严重拥堵)。在ArcGIS中, 将不同拥堵数值的路况与标识路径相连接, 按拥堵数值1、2、3、4分为4类路径; 将4类路径分别与规划路径进行相交, 融合ID相同的拥堵路段, 计算不同拥堵指数的长度总和, 由此可以得出单条路径下不同拥堵数值的长度, 即可通过公式 (1) 进行计算。

1.3 拥堵碳排放特征分析方法

核密度估计 (Kernel Density Estimation, KDE) 认为在一定的空间范围内, 不同的地理位置上发生的概率是不一样的, 如果在某一区域内其事件发生的次数较多则认为此区域内此事件发生的频率高, 反之则低。核密度估计可有效反馈典型通勤路线中拥堵碳排放的空间聚集特征及分布情况。根据百度慧眼大数据平台对天津城市近郊16个不同区位居住区样本进行私家车交通方式数据分析可知, 不同地区私家车出行比例总体接近17%—21%, 不存在地区间差异^{[24]51}。因此, 本文假设典型出行路线的人次相对比值可代表私家车出行路线选择的相对比例不做差异化处理。具体计算公式如下:

$$f_n(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n k\left(\frac{x-x_i}{h}\right) \quad (2)$$

式中: k 为核的权重函数, h 为带宽, 即以 x 为原点的曲面在空间上延展的宽度, h 的取值会影响到图形的光滑程度; $x-x_i$ 是密度估值点 x 到 x_i 之间的距离。

1.4 典型影响因素分析方法

(1) 影响因素指标体系

“郊住城职”现象是由于城镇化向郊区蔓延聚集, 近郊居住用地被大量开发所致。而相对于设施较为完备、土地集约开发的“城职”区域, “郊住”区域开发相对更为粗放, 其周边的土地利用、交通组织和公共交通设施等建成环境仍具有较大的可更新潜力, 也是影响通勤选择方式和通勤路径的主要因素。因此, 本文主要研究“郊住”空间周边对通勤拥堵碳排放的影

响。选取早晚高峰O点所在地区周边1 000 m半径的道路组织、交通设施、土地利用3大类影响因素, 根据相关文献^{[14]31, [24]65, [25-27]}提取具有共识性的6个影响指标建立评估指标体系(见表1)。

(2) 影响关系模型

本文采用普通最小二乘法 (Ordinary Least Squares, OLS) 作为线性回归模型的参数, 并验证空间影响因素指标对通勤拥堵碳排放系数的影响关系和影响程度。回归模型的基本形式可以表示为:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (3)$$

式中: Y 表示因变量; X_1, X_2, \dots, X_n 表示自变量; $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ 表示模型的系数; ε 表示误差项。将早/晚高峰时段典型OD链条中郊区住所一侧典型端点周边的土地混合度、城市功能密度、路网密度、道路交叉口数量、公交站点数量、距离最近轨道交通站点距离作为自变量, 通勤路径长度作为控制变量; 对所有变量进行归一化处理后进行多元线性回归分析, 以此验证空间建成环境要素是否对拥堵碳排放有重要影响。

2 研究结果

2.1 天津市“郊住城职”典型通勤线路及拥堵碳排放特征

2.1.1 通勤碳排放指数分布特征

对天津市北辰区、西青区、东丽区、津南区4个近郊区的典型居住空间进行OD数据提取与分析, 最终共提取早高峰典型通勤路线235条, 晚高峰典型通勤路线107条。从典型OD链条提取结果分析, 基于自然断点法, 位于第一数量级的早高峰典型OD通勤链条集聚程度较高。这说明早高峰大家出行的目的地较明确即工作地, 因此典型职住空间的关联性更强。而位于第一数量级的晚高峰典型OD通勤链条目的地O点更为分散, 并出现很多非居住地的情况。这说明晚高峰人们出行目的性更为分散, 社交、采购、休闲等其他非居住地交通行为增多。

进一步计算每条典型通勤线路的拥堵碳排放指数, 并进行统计学分析。分析结果显示, 早晚高峰通勤拥堵碳排放均呈现较为普遍的微拥堵现象, 75% (CCE \geq 1.02) 以上通勤线路都有一定的拥堵现象出现, 但平均拥堵指

表1 “郊住”地区典型影响因素及指标体系

Tab.1 Typical influencing factors and indicator system of suburban residential areas

类型	指标	计算方法
土地利用	土地混合度	$T = (-1) \sum_{i=1}^n \left(\frac{b_i}{a}\right) \ln\left(\frac{b_i}{a}\right)$ 式中: T 为土地混合度; a 为缓冲区内对居民出行存在影响的所有用地类型的总面积; b_i 为缓冲区内 i 类对居民出行存在影响的用地类型的面积
	城市功能密度	$M = n/a$ 式中: M 为城市功能密度; n 为研究范围内POI数量; a 为研究范围面积。在ArcGIS中以O点坐标为圆心, 绘制1 km为半径的缓冲区, 相交后结合公式计算该范围内的城市功能密度
道路组织	路网密度	$N = \sum_{i=1}^n l_i/a$ 式中: N 为路网密度; l_i 为研究范围内第 i 条道路的长度; n 为研究范围内的道路数量; a 为研究范围面积, 划定范围同城市功能密度中的方法
	交叉口密度	$T = t/a$ 式中: T 为交叉口密度; t 为研究范围内交叉口数量; a 为研究范围面积, 划定范围同城市功能密度中的方法
公共交通设施	1 000 m范围公共交通站点密度	$S = s/a$ 式中: S 为公交车站点和地铁站点密度; s 为研究范围内公交车站点和地铁站点总数量; a 为研究范围面积, 划定范围同城市功能密度中的方法
	最近公共交通站点距离	在ArcGIS中以O点坐标为输入要素, 利用邻域分析中的近邻分析寻找距离O点最近的公共交通站点(包括公交车站点和地铁站点), 并计算二者之间的距离

资料来源: 笔者自制。

数最高不超过1.5,离散程度较低。这说明较高值拥堵路段仍然不长,多出现在整个通勤线路的一小部分,天津市早晚高峰并未呈现大面积长时拥堵特征。其中,早高峰时段通勤拥堵碳排放指数范围在1.000—1.319之间,平均值为1.059,中位数为1.045;晚高峰通勤拥堵碳排放指数范围在1.005—1.299之间,平均值为1.074,中位数为1.062。早晚高峰比较来看,天津市晚高峰整体拥堵特征更为普遍,平均值偏高。且交通数据提取中发现晚高峰拥堵时间也较早高峰更长一些。这与晚间人群下班时间差异且外出活动增多的出行行为有密切关联。从大于1.100的显著拥堵路线空间分布看,早高峰主要分布于城市中心区东西向交通干线周边,北部有少量典型通勤拥堵线路位于京津公路沿线,南部则主要为东南方向的津沽公路沿线;晚高峰与早高峰空间分布总体相似,但北部拥堵现象减少,而主要集中于中心城区东西向交通干线(见图1)。

2.1.2 典型通勤线路核密度分析

典型通勤线路核密度是通勤典型路线的聚集程度,以此表征是否会出现大量通勤线路重叠现象而引发拥堵。通过典型通勤线路核密度分析(见图2),中心城区与近郊居住区交界的两处位置有可能出现典型的通勤聚集现象,但早晚高峰的空间分布特征有所差异。在早高峰时段,通勤路径呈现1个主中心、多个副中心的特征。1个主中心主要位于河东区、河西区、东丽区和津南区四区交界的津塘路周边,呈现4—5 km长的带状通勤聚集带。多个副中心出现在沿东西向贯穿城市主干道附近:(1)中心商务区,位于和平区和南开区沿南京路沿线;(2)城市向东对外发展主轴区域,位于和平区与河东区交界的沿海河向东南区域;(3)西部邻近郊快速路周边,位于南开区通往西青中北镇的芥园西道与快速路周边。整体呈现东南向西北递减的趋势。而晚高峰时段通勤线路的聚集区域则将上述前3个中心联成带状区域,且聚集程度更高,位于整个城市的东南方向。主要聚集在城市向东对外发展主轴区域的快速路周边。西部

邻近郊快速路周边区域,也呈现次高的聚集态势。

2.1.3 典型通勤拥堵碳排放的空间分布特征

在典型通勤线路核密度分析的基础上,叠加不同路段道路拥堵的碳排放系数,计算

典型通勤线路拥堵碳排放的核密度(见图2),以此分析典型通勤线路高度重叠聚集是否会引发拥堵而增加交通碳排放。本文对早晚高峰时段的典型通勤路径计算不同区段的拥堵碳排放指数,并进行核密度分析,以此获

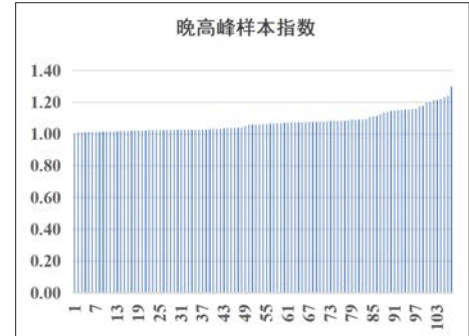
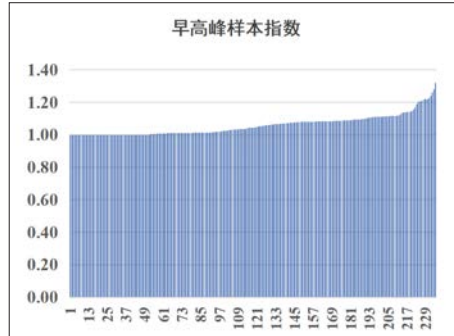
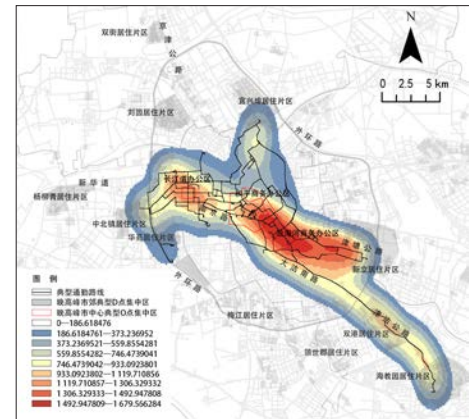
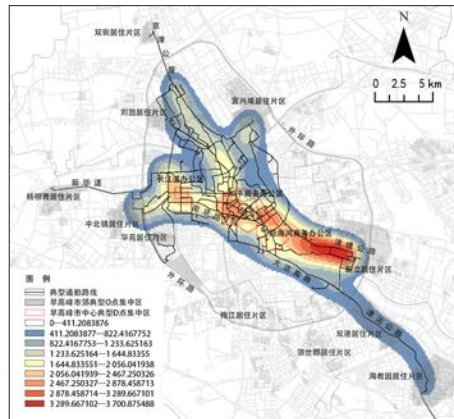


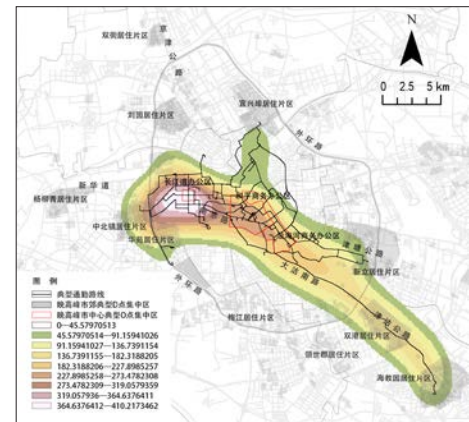
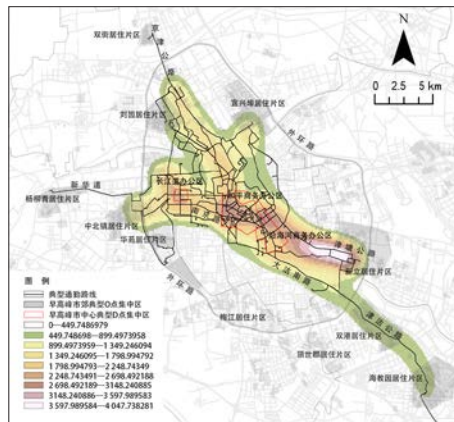
图1 早晚高峰时段通勤拥堵碳排放指数序位分布

Fig.1 Sequential distribution of commuting congestion carbon emissions index during morning and evening peak hours
资料来源:笔者自绘。



a 早高峰典型通勤路线核密度分析

b 晚高峰典型通勤路线核密度分析



c 早高峰典型通勤路线拥堵碳排放核密度分析

d 晚高峰典型通勤路线拥堵碳排放核密度分析

图2 早晚高峰时段通勤路线和通勤拥堵碳排放核密度分析结果

Fig.2 Analysis results of kernel density of commuting routes and carbon emissions caused by commuting congestion during morning and evening peak hours

资料来源:笔者自绘。

得典型通勤拥堵碳排放的空间分布特征。结果显示,早高峰典型通勤拥堵碳排放的空间聚集区域与通勤线路的密集区域相一致。大量通勤交通聚集确实产生了较为明显的拥堵碳排放。但晚高峰则出现了通勤线路聚集区域与拥堵碳排放聚集区域明显不同的典型差异,并呈现强烈的单中心聚集现象,即西部邻近城郊快速路周边区域呈现了更高度聚集的拥堵碳排放特征,而城市向东对外发展主轴区域方向的强通勤聚集区域却未出现较多的拥堵碳排放聚集现象。

2.1.4 早晚高峰通勤拥堵碳排放的共性特征与差异性分析

基于天津市典型“郊住城职”通勤路径和拥堵碳排放分布特征,有两处明显拥堵核心区域值得进一步研究分析。这两处通勤拥堵核心区域均呈现较为明显的东西走向特征,且“钟摆式”交通最强的区域位于城市向东对外发展主轴区域的津沽公路和津塘公路周边,也是沿海河向中游发展的区域。这与天津市“双城双港”相向发展的长期规划格局有较大关联,向东沿海河向外疏导的人群仍存在较强的中心区就业趋势。同时,两处拥堵碳排放核心区域均发生在城市外环以外大规模居住区与外环以内商务中心工作集中区之间。两处核心具有2个共同特征:(1)“城职”区域办公用地比例较大且集中布局,“郊住”区域居住用地比例较大且区域内及周边缺少较大规模的办公用地;(2)“城职”“郊住”空间间距在6—8 km,属于超过2 km职住均衡界线后私家车通勤的平均舒适距离尺度。这样的职住结构易产生相同的购房选择机制和较强的通勤线路重叠,从而引发拥堵并增加碳排放。与此相对的城市北部、南部市郊地区也具有大型居住区聚集现象,但并未形成典型向市中心通勤的现象。这是由于其与中心城区集中商务办公区相对较远,居民通勤的目的地较为分散所致,也和南北市郊本身具有较多的就业空间而分流部分人群相关。

此外,早晚高峰拥堵碳排放特征存在一定差异。从早晚高峰典型通勤线路核密度和

拥堵碳排放核密度比较分析,早高峰两者集中区域几乎一致。这说明通勤线路大量重叠的路段会造成较为明显的拥堵现象而增加碳排放。这与早高峰人群集中出行时间较为一致,目的地均与就业场所有关。而晚高峰通勤线路大量重叠的路段与拥堵碳排放集中区域差异较大。具有大量通勤出行的路线并未造成较高指数的拥堵,而另一个次级核心的拥堵碳排放指数更高。通过对两区域实际功能、拥堵时长等数据的分析,可知晚高峰人群通勤时间较为分散,拥堵时间更长,但人群在下班后的活动行为也更为多样。可能会呈现OD点位一致,但路径有更多选择且并非按照通勤最优来选择。同时,城市向东对外发展主轴区域是城市规划中的主要发展轴,快速路、轻轨、地铁等多种交通方式叠加,方式选择更多样,相对于城市西侧以几条城市干道为主通道的区域,疏散能力更强。

2.2 天津市“郊住城职”拥堵碳排放的影响因素分析

将“郊住”空间因素的6个指标和控制变量路径长度这7个指标与拥堵碳排放进行线性回归分析,分别将早晚高峰全样本及早晚高峰分类样本纳入回归模型,可知早晚高峰“郊住城职”拥堵碳排放影响机理差异较大。首先,早晚高峰全样本回归分析拟合度调整后 R^2 仅为0.11,且仅最近公共交通站点距离和总路线长度2项指标与拥堵碳排放呈现正相关影响关联。而对早晚高峰样本分别进行回归分析,则拟合度调整后 R^2 可分别达到0.65和0.33,由此说明早晚高峰影响因素产生了较大差异。

根据早高峰样本分析,全部6个影响因素指标均呈现与交通拥堵碳排放的显著相关性(见表2)。影响系数绝对值从大到小依次为:1 000 m范围内公共交通站点密度(4.663) > 最近公共交通站点距离(2.598) > 城市功能密度(-2.536) > 道路交叉口密度(-1.390) > 路网密度(-1.073) > 用地混合度(0.482)。6项影响因素均通过P值检验,具有显著性。从减碳机理角度分析,增加最近公共交通站点距离和城郊地区道路网密度及改善城市功能单一性,可有效降低通勤拥堵碳排放。但在公共交通站点密度和最近公共交通站点距离、城市功能密度和用地混合度指标方面也看出交通设施和土地利用布局的复杂性。一方面,高混合度的功能街区和良好的公交设施可达性可增加人们选择步行或公共交通频次而减少私家车出行的聚集性拥堵;另一方面,大型公交车停靠过多与过多私家车在商业型街区吸引停留也会造成对道路通畅性的干扰。

根据晚高峰样本分析,4个影响因素指标均呈现与交通拥堵碳排放的显著相关性(见表3)。影响系数绝对值从大到小依次为:路网密度(-0.486) > 最近公共交通站点距离(0.483) > 城市功能密度(0.393) > 交叉口密度(0.337)。以上4项指标通过检验且标准化系数结果较为接近。可以看出,晚高峰影响因素对通勤拥堵碳排放的影响作用明显低于早高峰,且拟合度也相对较低。以上4个指标仅可解释33%的通勤拥堵碳排放结果。同时,城市功能密度和交叉口密度2项指标表现出与早高峰相反的影响关系。研究结果进

表2 早高峰回归模型影响系数结果

Tab.2 Regression model impact coefficient results of carbon emissions from congestion during morning peak hours

显著影响指标	标准化系数	标准误差	t	显著性
用地混合度	0.482	0.029	4.313	0.000
城市功能密度	-2.536	0.000	-8.997	0.000
路网密度	-1.073	0.000	-3.885	0.000
交叉口密度	-1.390	0.000	-9.886	0.000
最近公共交通站点距离	2.598	0.000	12.659	0.000
1 000 m范围内公共交通站点密度	4.663	0.005	12.765	0.000
路径长度(控制变量)	1.221	0.000	9.140	0.000

资料来源:笔者自制。

表3 晚高峰拥堵碳排放回归模型影响系数结果

Tab.3 Regression model impact coefficient results of carbon emissions from congestion during evening peak hours

显著影响指标	标准化系数	标准误差	t	显著性
城市功能密度	0.393	0.000	4.524	0.000
路网密度	-0.486	0.000	-4.554	0.000
交叉口密度	0.337	0.000	3.799	0.000
最近公共交通站点距离	0.483	0.000	8.245	0.000
路径长度(控制变量)	0.438	0.000	7.128	0.000

资料来源:笔者自制。

一步证实,晚间通勤交通拥堵碳排放影响机理的复杂性与多样性。但提高道路网密度与增加居住区到公共交通站点的可达性表现出与早高峰一致的减碳作用,是行之有效的规划减碳措施。

3 基于“郊住城职”现象的天津市交通拥堵碳排放影响机理初探

规划建设者较为注重近郊空间的职住均衡设计,但由于人群在考虑住房和工作空间的选择时有更多维的考虑因素,因此“郊住城职”的职住分离行为仍无法避免地散布于超大特大城市近郊与中心城区之间。其中,当“城职”和“郊住”空间之间产生大量通勤行为重叠时,会引发更多的拥堵碳排放。本文通过对天津市“郊住城职”通勤路线、拥堵碳排放的典型空间特征及影响因素分析,得到易产生拥堵且增加交通碳排放的“郊住”和“城职”空间位置关系特征和近郊建成环境影响因素。以此进一步分析其主要影响机理。

一是“郊住”和“城职”空间各自功能聚集且相距中等时,在其联系主干道沿线易产生通勤拥堵现象,并造成交通碳排放增加。本文进一步分析了天津市规划的近郊组团的职住比和分类可知(见图3),天津市两大拥堵板块的城郊居住组团(图3中编号1—4区域、8—9区域)为典型的居住主导型和职住平衡型社区。和平商务办公区、沿海河商务办公区和长江道办公区作为中心城区主要“城职”空间,对这6个主要社区产生极大的就业吸引力,而6—8 km正是机动车通勤的舒适感受距离。北部、南部城郊虽然也具有大型居住片区(图3中编号14—16区域、5—7区域),但由于周边具有较多的就业主导型组团且离“城职”集

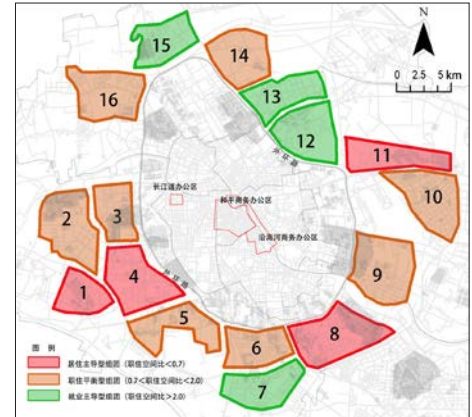
中的中心城区较远,因此通勤目的地相对较为分散,未产生较明显的通勤路径重叠现象。可见,城郊区域的就业空间增加有助于减缓“郊住城职”现象中的拥堵碳排放。

二是早晚高峰“郊住城职”产生的拥堵碳排放的特征和影响机制具有较大差异,“郊住城职”现象对早高峰拥堵碳排放的影响更为强烈。由于早高峰人群上班时间和出行行为规律较统一,以“上班”为目标的直接到达行为占主体。因此通勤路径的高重叠确会造成相应的拥堵碳排放增加,而晚间下班人群下班时间分散、目的地也非回家一种,因此拥堵碳排放的影响因素较为复杂。通勤路径的高重叠可能会因为通勤时间、方式等差异,而产生高聚集但拥堵碳排放不突出的现象,值得进一步探究。

三是提高“郊住”空间的道路网密度与增加交通站点可达性可有效降低“郊住城职”行为的拥堵碳排放。两项措施主要是通过提高人们出行方式和道路选择,减少通勤过程中的拥堵碳排放。但“郊住城职”通勤行为具有一定的复杂性,尤其早晚高峰特征又存在一定差异。增加公共交通站点、城市功能混合布局等一些传统的低碳布局方法,仍可能存在非线性影响关系,过度设置可能会增加更多的交通成本,同时道路通畅性的改变对拥堵碳排放的影响仍存在较多的不确定性,不能一概而论之。

4 结语

本文从超大特大城市典型职住分离现象——“郊住城职”切入,研究职住分离带来的拥堵碳排放影响机理。通过天津市4个市郊区与中心城区早晚高峰OD数据的处理与分析,识别典型的通勤线路和拥堵碳排放的空间



注:职住空间比为该区域内办公用地与工业用地总和与居住用地的比值。

图3 天津市16个近郊组团职住类型分析

Fig.3 Analysis of occupation and residence types in 16 suburban groups in Tianjin

资料来源:笔者自绘。

分布特征,研究近郊区空间规划的影响因素。基于此,初步探析“郊住城职”现象背后的交通拥堵碳排放的产生机理。以期为超大特大城市功能疏解和交通改善提供更利于减碳的规划方案。但本文存在数据的可获取性和案例城市的单一性的局限,未来需要进一步细化探索职住分离现象中不同时段、不同空间区位的拥堵碳排放的差异化机理特征。

参考文献 References

- [1] 政府间气候变化专门委员会. 2006年IPCC国家温室气体清单指南[M]. 神奈川:日本全球环境战略研究所, 2006. Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[M]. Kanagawa: Institute for Global Environmental Strategies, 2006.
- [2] 冯海霞,王兴渝,戚化彩,等. 城市交通运行状况对机动车碳排放的影响研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(4): 167-175. FENG Haixia, WANG Xingyu, QI Huacai, et al. Impact of urban traffic operations on vehicle carbon dioxide emission[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22(4): 167-175.
- [3] GUO S, PEI T, XIE S, et al. Fractal dimension of

- job-housing flows: a comparison between Beijing and Shenzhen[J]. *Cities*, 2021, 112(1): 103120.
- [4] QIN P, WANG L. Job opportunities, institutions, and the jobs-housing spatial relationship: case study of Beijing[J]. *Transport Policy*, 2019, 81: 331-339.
- [5] IBARRA E S, ZHANG X L, XIU A, et al. A comprehensive spatial and temporal vehicular emissions for northeast China[J]. *Atmospheric Environment*, 2020, 244(1): 117952.
- [6] 孙斌栋, 何舟, 李南菲, 等. 职住均衡能够缓解交通拥堵吗?——基于GIS缓冲区方法的上海实证研究[J]. *城市规划学刊*, 2017 (5) :98-104.
- SUN Bindong, HE Zhou, LI Nanfei, et al. Could jobs-housing balance relieve traffic congestion? A case study of Shanghai based on GIS buffer[J]. *Urban Planning Forum*, 2017(5): 98-104.
- [7] QIN P, WANG L. Job opportunities, institutions, and the jobs-housing spatial relationship: case study of Beijing[J]. *Transport Policy*, 2017, 81: 331-339.
- [8] 郭力. 中国大城市职住分离的成因及解决途径——以郑州市为例[J]. *城市问题*, 2016 (6) : 70-74.
- GUO Li. The causes and solutions of the separation of occupancy and residence in Chinese cities[J]. *Urban Problems*, 2016(6): 70-74.
- [9] 宋小冬, 王园园, 杨钰颖, 等. 通勤距离对职住分离的统计验证[J]. *地球信息科学学报*, 2019, 21 (11) :1699-1709.
- SONG Xiaodong, WANG Yuanyuan, YANG Yuying, et al. Statistical verification of home-work separation based on commuting distance[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2019, 21(11): 1699-1709.
- [10] 宋小冬, 王园园, 张开翼, 等. 考虑通勤距离的职住分离测度方法[J]. *城市规划学刊*, 2017 (6) : 25-32.
- SONG Xiaodong, WANG Yuanyuan, ZHANG Kaiyi, et al. Measurement of jobs-housing separation based on commuting distance[J]. *Urban Planning Forum*, 2017(6): 25-32.
- [11] 毕硕本, 王璐焯, 刘少丽, 等. 成都市职住空间分布特征及影响因素研究[J/OL]. *地理与地理信息科学*: 1-8[2023-08-30], <https://link.cnki.net/urlid/13.1330.P.20230810.1509.002>.
- BI Shuoben, WANG Luye, LIU Shaoli, et al. Distribution characteristics and influencing factors of jobs-housing space in Chengdu City[J/OL]. *Geography and Geo-Information Science*: 1-8[2023-08-30], <https://link.cnki.net/urlid/13.1330.P.20230810.1509.002>.
- [12] 杨寓棋, 周澳, 肖青奕, 等. 基于职住分离视角下的香港非常规通勤模式研究[J]. *河北工程大学学报(社会科学版)*, 2018, 35 (4) :40-42.
- YANG Yuqi, ZHOU Ao, XIAO Qingyi, et al. Research on unconventional commuting pattern in Hong Kong from the perspective of jobs-housing separation[J]. *Journal of Hebei University of Engineering (Social Science Edition)*, 2018, 35(4): 40-42.
- [13] 曾德珩, 杨礁, 徐盼盼. 城市空间失配问题研究进展与启示[J]. *现代城市研究*, 2021 (6) :2-9.
- ZENG Deheng, YANG Jiao, XU Panpan. Research progress and enlightenment on urban space mismatch[J]. *Modern Urban Research*, 2021(6): 2-9.
- [14] 程雪洁, 刘志林, 王晓梦, 等. 职住分离背景下社区公共空间对社区融合的影响——以北京市为例[J]. *城市发展研究*, 2019, 26 (12) :28-36.
- CHENG Xuejie, LIU Zhilin, WANG Xiaomeng, et al. Effects of neighborhood-scale public spaces on social cohesion in the context of home-work separation: the case of Beijing[J]. *Urban Development Studies*, 2019, 26(12): 28-36.
- [15] 沈家辉. 合肥市主城区居民职住空间关系及其影响因素研究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2023.
- SHEN Jiahui. Research on the spatial relationship between job and residence of residents in the main urban area of Hefei and its influencing factors[D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2023.
- [16] 张明阳. 成都市高新南区职住平衡测度及影响因素研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
- ZHANG Mingyang. Study on the measurement and influencing factors of job-housing balance in Gaoxin South District of Chengdu[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022.
- [17] 满洲, 赵荣钦, 袁盈超, 等. 城市居住区周边土地混合度对居民通勤碳排放的影响——以南京市江宁区典型居住区为例[J]. *人文地理*, 2018, 33 (1) :70-75.
- MAN Zhou, ZHAO Rongqin, YUAN Yingchao, et al. Impact of land-mixing degree of residential area on carbon emissions of commuting: a case study of typical residential district, Jiangning District, Nanjing[J]. *Human Geography*, 2018, 33(1): 70-75.
- [18] 张振龙, 邱煜卿, 蒋灵德, 等. 基于实时路况的交通拥堵时空特征及其影响因素分析——以苏州古城为例[J]. *现代城市研究*, 2020 (1) :104-112.
- ZHANG Zhenlong, QIU Yuqing, JIANG Lingde, et al. Study on spatio-temporal distribution of traffic congestion and its influencing factors based on real-time traffic data: a case study of ancient city in Suzhou[J]. *Modern Urban Research*, 2020(1): 104-112.
- [19] 程铁信, 李奇, 赵颖. 考虑碳排放的城市交通拥堵定价模型及其仿真分析[J]. *中国管理科学*, 2016, 24(s1): 932-937.
- CHENG Tiexin, LI Qi, ZHAO Ying. A congestion charging model for the urban central area under the consideration of carbon emission and its simulation analysis[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2016, 24(s1): 932-937.
- [20] LI T S, SONG S F, YANG Y M. Driving restrictions, traffic speeds and carbon emissions: evidence from high-frequency data[J]. *China Economic Review*, 2022, 74: 101811.
- [21] 冉江宇, 付凌峰, 阙长城, 等. 基于通勤大数据的城市职住分离度研究——《2020年全国主要城市通勤监测报告》核心指标分析[J]. *城市交通*, 2020, 18 (5) :10-17.
- RAN Jiangyu, FU Lingfeng, KAN Changcheng, et al. Urban job-residence separation based on big commuting data: analysis of core indicators in the 2020 monitoring report on national commuting report for major cities in China[J]. *Urban Transport of China*, 2020, 18(5): 10-17.
- [22] 李振宇, 廖凯, 崔占伟, 等. 缓解城市交通拥堵的CO₂减排效益评估方法研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2020, 20 (2) :8-12.
- LI Zhenyu, LIAO Kai, CUI Zhanwei, et al. An evaluation method of CO₂ emissions reduction in urban traffic congestion mitigation[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2020, 20(2): 8-12.
- [23] 李宾, 周俊. 交通拥堵的碳排放效应——以湘潭市大桥饭店路口为例[J]. *城市问题*, 2017 (6) : 46-51.
- LI Bin, ZHOU Jun. The carbon emission effect of traffic congestion: taking the intersection of Daqiao Hotel in Xiangtan City as an example[J]. *Urban Problems*, 2017(6): 46-51.
- [24] 黄雅哲. 低碳导向下超大城市近郊组团职住空间结构优化研究[D]. 天津: 天津大学, 2022.
- HUANG Yazhe. Research on the optimization of the job-housing spatial structure in suburban cluster of mega-cities under the guidance of low-carbon[D]. Tianjin: Tianjin University, 2022.
- [25] 黄经南, 杜宁馨, 刘沛等. 住家周边土地混合度与家庭日常交通出行碳排放影响研究——以武汉市为例[J]. *国际城市规划*, 2013, 28 (2) : 25-30.
- HUANG Jingnan, DU Ningrui, LIU Pei, et al. An exploration of land use mix around residence and family commuting caused carbon emission: a case study of Wuhan City in China[J]. *Urban Planning International*, 2013, 28(2): 25-30.
- [26] 王博达. 空间形态对城市居住区碳排放的影响研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
- WANG Boda. An study on the influence of city community carbon emissions on space form[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022.
- [27] 荣培君, 张丽君, 秦耀辰, 等. 建成环境对城市居民日常出行碳排放的影响——以开封市248个居住区为例[J]. *地理研究*, 2019, 38 (6) : 1464-1480.
- RONG Peijun, ZHANG Lijun, QIN Yaochen, et al. Impact of built environment on carbon emissions from daily travel of urban residents: a case study of 248 residential areas in Kaifeng[J]. *Geographical Research*, 2019, 38(6): 1464-1480.