

城市电动自行车违规充电隐患的空间分布及其影响因素

廖聪^{1,2} 邬伦^{1,2} 蔡恒^{1,2} 陈跃毅^{1,2} 田原^{1,2,†}

1. 北京大学遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871; 2. 空间信息集成与3S工程应用北京市重点实验室, 北京 100871; †通信作者, E-mail: tianyuanpku@pku.edu.cn

摘要 利用深圳市光明区网格化城市管理系统上报的电动自行车违规充电隐患数据, 采用空间热点分析和空间误差回归模型, 分析违规充电隐患的空间分布规律及其影响因素。结果表明, 用地类型、就业情况、生活设施和交通条件等城市空间要素与电动自行车违规充电行为有不同程度的相关性: 1) 电动自行车违规充电行为存在一定程度的空间自相关, 大多数违规充电行为集中在少数网格中, 案例区9.2%的网格囊括84.94%的总违规充电隐患数量; 2) 与出行需求和交通条件相关的变量对电动自行车违规充电行为具有正向刺激作用, 住宅用地比例、企业数量和道路密度等指标的标准化回归系数分别为0.09, 0.03和0.02; 3) 城市网格中公用设施、公用建筑用地比例以及到小学的距离与电动车违规充电行为负相关, 标准化相关系数为-0.02和-0.01; 4) 更高的公交站点覆盖率会减少电动自行车的使用行为, 相应地, 也导致违规充电行为减少。研究结果可以指导网格化管理中的巡查路线优化, 提升城市火灾隐患的事前感知和精细化防控能力。

关键词 火灾隐患; 短距离出行; 城市空间要素; 空间自相关; 网格化管理

Spatial Distribution and Influencing Factors of Unsafe Charging for Electric Bicycles in Urban Areas

LIAO Cong^{1,2}, WU Lun^{1,2}, CAI Heng^{1,2}, CHEN Yueyi^{1,2}, TIAN Yuan^{1,2,†}

1. Institute of Remote Sensing and Geographical Information Systems, Peking University, Beijing 100871; 2. Beijing Key Laboratory of Spatial Information Integration and Its Applications, Beijing 100871; † Corresponding author, E-mail: tianyuanpku@pku.edu.cn

Abstract By using spatial hot spot analysis and spatial error regression model, the authors analyzed the spatial distribution pattern and the influencing factors of unsafe charging behavior for e-bikes in Guangming district of Shenzhen, with the daily inspection data collected in urban grid management. Urban spatial features, such as land use types, employment opportunities, facility and traffic conditions were found to have a close correlation with unsafe charging behaviors at different significance levels. There was a certain spatial autocorrelation of the unsafe charging behavior of e-bikes. Most of the unsafe charging concentrated in a few grids, and 9.2% of the grids in the case area covered 84.94% of the total number of unsafe charging behaviors. Variables related to travel demand and traffic conditions have a stimulating effect on people's behavior of illegal charging of e-bikes. There was a positive correlation between the proportion of residential land, the number of enterprises and the road density within the urban grid and the unsafe charging behaviors of e-bikes. The standardized regression coefficients were 0.09, 0.03 and 0.02 respectively. There was a negative correlation between the proportion of public facilities and public building land in urban grid, the distance from home to primary schools and the unsafe charging behaviors of e-bikes, and the standardized regression coefficients were -0.02 and -0.01. Higher coverage rate of bus stop would reduce the use of e-bikes, and lead to less unsafe charging behaviors. The results can be used to direct the optimization of patrol routes in grid management and improve the ability of pre-perception and fine prevention of urban fire accidents.

Key words fire hazard; short-distance travel; urban spatial feature; spatial autocorrelation; grid management

电动自行车是城市短距离通勤的重要交通工具。据工业和信息化部公布的数据,2018年中国电动自行车全社会保有量超两亿辆。在方便出行的同时,电动自行车暗藏许多安全隐患,不规范的充电行为是其中的典型,极易造成火灾。2013—2017年,全国共接报由电动自行车不规范充电行为引发的火灾一万余起,比前一个5年增长33.3%^[1]。识别这些违规充电行为的空间分布规律和影响因素对城市火灾事故预防具有重要意义,可以为隐患排查提供参考依据,降低事故发生几率和成灾损失^[2]。

地理环境对电动自行车违规充电行为具有显著的影响。一方面,电动自行车的使用受到出行需求和交通条件等因素的影响;另一方面,电动自行车充电行为的规范性受到城市充电桩设施空间分布位置的影响。对于地理环境与其他类型公共安全事件之间的关系,已有不少研究成果。例如,商业繁华地带和对外交通运输区域存在更明显的城市犯罪行为^[3-4],不同住房类型对入室盗窃犯罪行为的影响有差异^[5],城市商业设施的布局对交通事故有重要影响^[6],职住分离现象导致城市交通事故频发^[7],城市人口分布和城市应急避难场所的相互匹配可以更好地应对灾害和事故^[8]。然而,针对火灾隐患与地理环境之间关系的研究目前较少。

地理空间分析技术在揭示火灾事故与地理环境的关系方面可以发挥重要作用^[9-10]。既有研究在城市火灾的时空分布特征和影响因素方面取得丰富的成果。借助多样化的空间分析方法,相关研究揭示出火灾事故的聚集性特征及空间分布格局,并证明其在季节、日间及时刻等不同时间尺度上具有规律性^[11-14]。收入、就业、家庭结构和人口特征等社会经济因素与火灾的发生密切相关^[15-17],安全知识、住房条件、天气条件和重大节日等多种因素也对火灾事故的发生有显著影响^[18-19]。但是,由于精细化的火灾数据难于获取,面向火灾事故的研究多以年为时间尺度,以大区域为空间尺度来开展^[20],更精细时空分辨率的研究有待发展。此外,既有研究中较少对火灾隐患进行分析,难以支持城镇公共安全管理中关口前移的实际需求。

城市网格化管理为分析更精细分辨率的火灾隐患空间分布规律提供了数据支持。按照一定的标准,将管理辖区划分为单元网格,明确辖区网格管

理责任人,可以主动排查单元网格中的隐患事件,实现对不安全事件的早期介入和提前处置。在城市网格化管理的背景下,累积了大量城市事故隐患的日常巡查数据。基于这些巡查数据,可以在单元网格尺度对城市火灾隐患进行分析,时间分辨率可以到每日,甚至小时,大大扩展研究的时空尺度,也加强了火灾隐患防范的针对性。

根据事故致因论,事故发生前通常伴随“物的不安全状态”和“人的不安全行为”两类隐患^[21]。本文选取城市电动自行车违规充电这一典型“人的不安全行为”导致的火灾隐患为研究对象,以深圳市光明区网格化管理实践中的电动自行车违规充电隐患排查数据为基础,探究电动自行车违规充电隐患的空间分布规律及其影响因素,以便更好地进行火灾的精细化防控。

1 数据与研究方法

1.1 研究区域与数据来源

光明区是深圳市第一个功能区,位于深圳市西北部,辖区面积约为156 km²,地势东北高、西南低。2018年,光明区常驻人口为56.08万,其中户籍人口为6.79万,非户籍人口为49.29万,实际管理人口为138万。2018年的全年本地生产总值为920.59亿元,其中第一产业增加值为1.74亿元,第二产业增加值为588.51亿元,第三产业增加值为330.34亿元。近十年来,光明区发生火灾几千起,造成严重的生命伤亡和财产损失。其中,因电气事故导致的火灾占总火灾数量的近30%,电动自行车违规充电是电气火灾的重要原因^①。光明区可以作为快速发展中小城市的典型代表,其电动自行车违规充电隐患的研究结果对其他类似城市有较强的借鉴意义。

本文对深圳市光明区2019年10月违规充电事件的网格巡查数据进行分析,数据来自光明区数字化城市管理系统。违规充电隐患包括在居住建筑物的公共走道、楼梯间、前室及房间内充电,乱接乱拉电源线充电,或将电池拆卸后置于室内充电等不安全行为。光明区数字化城市管理系统将辖区划分为一千五百多个网格(非规则网格),每个网格都配置网格员进行日常管理和巡查,并将日常隐患、突发事件及市容环境问题等上报数字化系统。经过地址匹配和人工校核排除错误信息,得到电动车违规

① 根据深圳市城市公共安全技术研究院2018年11月发布的《光明区安全风险评估报告》。

充电隐患数据 14043 条, 包含巡查时间、位置、所属网格和隐患明细等属性信息。

为方便建模分析, 结合实际网格的数量和平均面积, 本文用 300 m×300 m 的均匀网格, 将光明区重新划分成 1587 个网格(图 1)。按照空间位置, 将隐患数据投射到均匀网格中, 将每个网格覆盖的违规充电隐患数量作为因变量。单个网格中最少隐患数量为 0 个, 最大隐患数量为 852 个, 平均每个网格的违规充电隐患数量约为 9 起, 标准差为 39.27。

参照文献[18,22–24]确定自变量, 选取用地类型、人口及就业情况、生活设施分布和交通条件作为违规充电隐患事件的影响因素, 涉及土地类型、人口密度、设施要素、企业数量、道路密度及公交站点数量等。其中, 用地类型数据为土地利用变更调查数据, 人口密度数据来源于 WorldPop 开放数据, 其他数据(如设施分布、企业和道路等)来源于高德 POI(point of Interest)和 OpenStreetMap 等多源数据平台。主要变量的空间分布见图 2, 变量的解释及描述性统计见表 1。通过自变量间的相关系数, 检验变量间的共线性, 结果显示各变量间的相关系数均小于 0.75(表 2), 不存在明显的共线性问题。

1.2 研究方法

电动自行车违规充电隐患的空间分布具有聚集性特征。一方面, 电动自行车主要用于日常生活中的短距离出行, 部分违规充电行为容易在重要的生活区域周边聚集; 另一方面, 在对电动自行车出行具有较大需求的部分区域, 住宅建筑年代较早及不完备的电动充电设施等因素会刺激该区域违规充电行为的发生。本文采用空间热点分析法揭示电动自行车的空间聚集现象, 并采用考虑变量间空间相关性的空间误差模型分析其影响因素。

1) 空间热点分析。采用 Getis-Ord General G 和 Getis-Ord G_i^* 指数^[25], 揭示违规充电事件的全局和局部空间聚集规律。Getis-Ord General G 统计的零假设规定不存在要素值的空间聚类, 如果统计值返回的 p 值较小且在统计学上显著, 则可以拒绝零假设。如果零假设被拒绝, z 值得分为正数, 表明高值在研究区聚集; 如果 z 值得分为负数, 表明低值在研究区聚集, 计算公式如下:

$$G = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} x_i x_j}{\sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n x_i x_j},$$

其中, n 表示空间要素总数; i 和 j 表示要素序号; W_{ij} 表示 i 与 j 的空间关系, 本研究中采用 Q 邻接矩阵表示, 即如果两个多边形要素之间“共享边或角”, 则其值为 1, 否则为 0; x_i 和 x_j 分别表示多边形要素对象。Getis-Ord G_i^* 指数的计算公式如下:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n W_{ij} x_j}{\sum_{j \neq i}^n W_j}.$$

空间热点分析采用 ArcGIS 空间统计工具, 空间邻接关系基于“共享边或角”。

2) 空间误差模型。对违规充电隐患进行空间自相关分析, 得到全局莫兰指数(Moran's I)为 0.6, 且通过显著性检验, 说明隐患数据存在显著的空间自相关性, 不能满足最小二乘回归模型对变量独立正态分布的要求。在此情况下, 采用空间误差模型可以更好地应对具有空间相关性的统计分析。空间误差模型认为误差项在空间上相关, 在误差项中考虑了空间效应^[26]。模型表达式如下:

$$y = X\beta + \mu,$$

$$\mu = \lambda W\mu + \epsilon,$$

y 表示隐患数据数量; X 表示影响因素; β 反映自变量 X 对因变量 y 的影响; μ 表示误差项; λ 为空间回归系数, 反映样本观测值中的空间依赖作用; ϵ 表示符合正态分布的随机误差; W 表示网格间的空间关系。本文中空间误差模型采用 GeoDa 软件完成。

2 空间分布特征

基于网格的隐患数量统计结果显示, 违规充电隐患数量在空间网格中分布不均匀。图 3 是采用 ArcGIS 中的自然断裂法(Jenks)对网格隐患数量进行 5 级分级的结果, 案例区 9.2% 的网格贡献 84.94% 的违规充电隐患数量。这种网格聚类特征也为空间自相关分析提供了基础。第一级分类的违规充电数量为 2115 次, 占总隐患事故的 15.06%。1441 个网格的隐患数量小于 18 次, 占总网格的 90.80%; 93 个网格的隐患数量在 18~64 之间, 占比为 6.18%; 29 个网格的隐患数量在 64~136 之间, 占比为 1.83%; 19 个网格的隐患数量在 136~322 之间, 占比 1.20%; 5 个网格的隐患数量在 322~852 之间, 占比为 0.32%。

统计结果显示, 违规充电行为在空间上具有相关性。根据空间自相关指数计算结果, Getis-Ord G

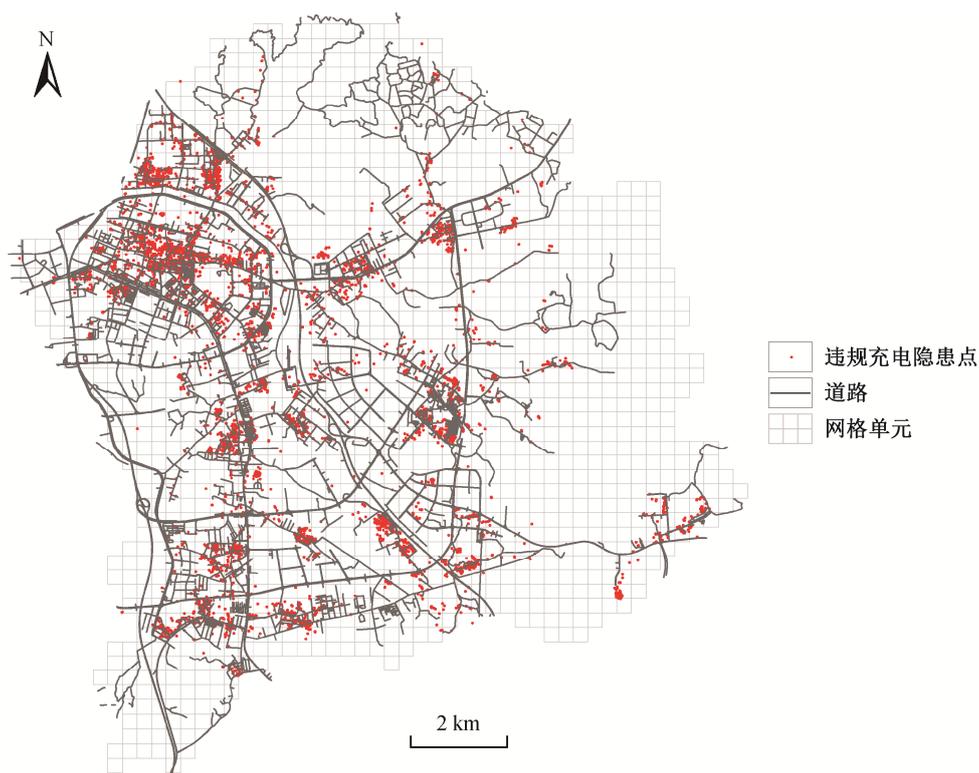


图 1 案例区概况

Fig. 1 Overview of the study area

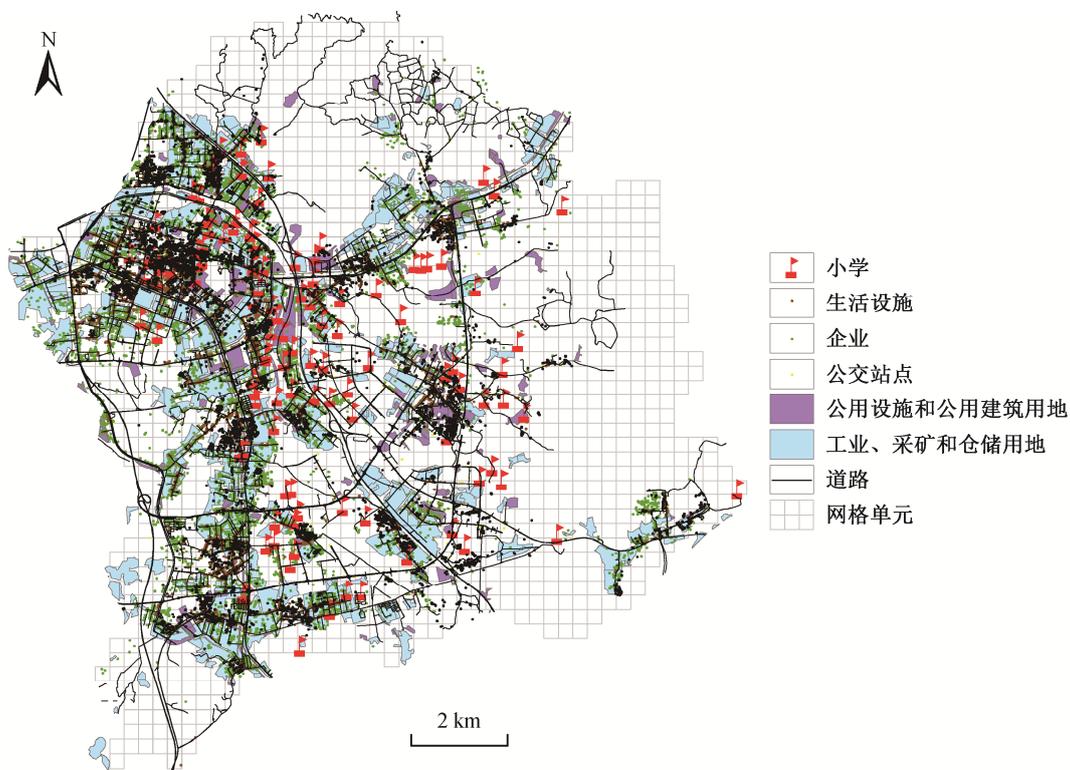


图 2 主要解释变量的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of explanatory variables

表 1 变量说明及描述性统计
Table 1 Variable description and descriptive statistics

变量类型	变量名称	变量解释	最小值	最大值	平均值	标准差
用地类型	住宅用地(RE)/%	住宅用地占网格单元的比例	0	1	0.06	0.17
	工矿用地(IN)/%	工业、采矿和仓储用地占网格单元的比例	0	1	0.18	0.28
	公用建筑(PB)/%	公用设施和公用建筑用地占网格单元的比例	0	1	0.05	0.12
人口就业情况	人口密度(PO)/(人·km ⁻²)	人口数量与网格单元数的比值	19.65	898.15	416.70	220.09
	企业数量(FI)/个	公司和工厂数量	0	101	5.98	11.33
生活设施	生活设施数量(LI)/个	专卖店、邮局、洗衣店、维修店和美发店等的位置	0	80	2.84	8.00
	距离小学距离(DIS)/m	到最近的小学的网络距离	0	10638.60	2212.08	1669.84
	体育休闲设施数量(SP)/个	运动场馆、体育休闲服务场所和娱乐场所的数量	0	19	0.55	1.63
交通条件	道路密度(ROD)	道路长度除以网格面积	0	37	6	6.60
	公交站点数量(BUS)/个	网格内公交站点的数量	0	5	0.27	0.62

表 2 自变量间的相关性
Table 2 Correlation between independent variables

自变量	FI	ROD	BUS	LI	SP	PO	IN	PB	RE	DIS
FI	1									
ROD	0.39*	1								
BUS	0.24*	0.44*	1							
LI	0.36*	0.47*	0.29*	1						
SP	0.20*	0.39*	0.27*	0.74*	1					
PO	0.45*	0.54*	0.27*	0.34*	0.31*	1				
IN	0.52*	0.30*	0.20*	0.23*	0.16*	0.48*	1			
PB	0.08*	0.21*	0.12*	0.09*	0.07*	0.12*	0.01	1		
RE	0.16*	0.38*	0.22*	0.40*	0.50*	0.29*	0.01	0.08*	1	
DIS	0.25*	0.28*	0.20*	0.20*	0.18*	0.30*	0.26*	0.20*	0.18*	1

注: *表示通过 0.01 的显著性检验。

的观察值大于其数学期望, z 值为正数值 15.41, 通过显著性水平为 0.001 的统计检验, 反映违规充电行为具有全局空间聚集特征。基于局部自相关指数 Getis-Ord G_i^* 的违规充电空间聚集特征如图 4 所示, 在网格尺度上呈现 10 余个热点。

同时, 违规充电热点区域的空间分布与道路密度具有耦合性, 违规充电隐患高发地区分布于松白路、光侨路和公常路等光明区主干道附近的居民区, 该地区居民出行的主要交通方式以电动车为主, 这也为后续优化该地区消防通道提供一定的参考。

3 违规充电隐患的影响因素分析

模型分析结果显示, 城市空间要素对电动自行车违规充电隐患存在显著的影响, 决定系数为 0.22, 通过 0.01 的显著性水平检验, 说明回归分析结果在统计学意义上有效。因 1587 个网格中有许多网格

的因变量值为 0, 故这一决定系数值符合预期。

表 3 显示, 土地利用类型对电动自行车违规充电有显著影响。其中, 住宅用地占比对违规充电有正向作用, 标准化系数为 0.09。大多数电动车违规充电是在非工作时间和住宅区域完成的, 公用设施用地占比与违规充电行为负相关, 标准化相关系数为 -0.02。通常, 市政管理的加强对公共场所违规充电行为会起到抑制作用。工矿和商贸用地占比与违规充电行为的关系不显著。不同用地类型对违规充电行为的差异化影响反映违规充电行为潜在的空间分布特点, 可以为电动自行车充电桩的布设和隐患巡查的优化提供一定的参考。

就业情况对违规充电行为有正面影响, 企业数量这一指标的统计结果呈现显著性, 标准化相关系数为 0.03。由于电动车较短的续航里程, 企业员工在居住地和工作地都有大量的充电需求。根据走访

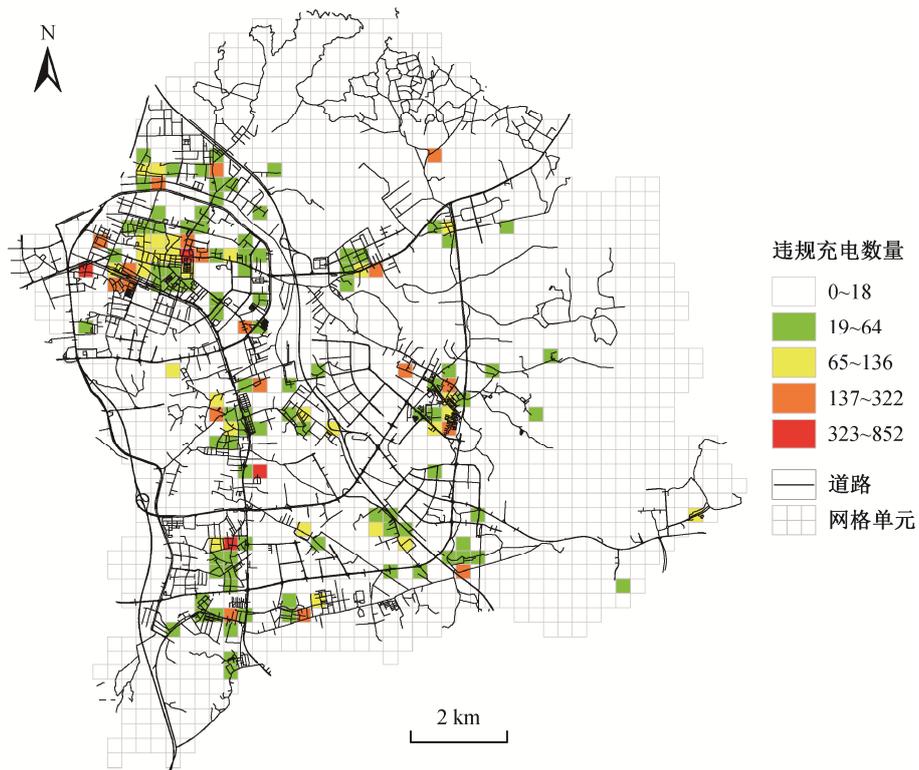


图 3 基于 ArcGIS 中自然断裂法的网格隐患数量分级

Fig. 3 Quantitative grades of hidden danger of grid based on Jenks in ArcGIS

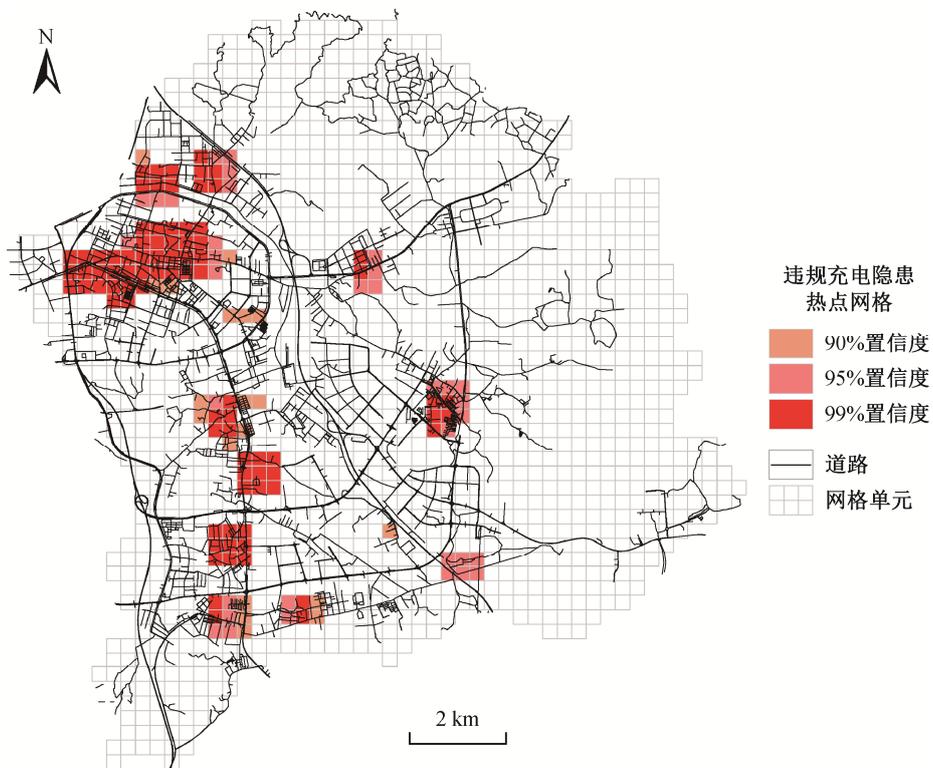


图 4 违规充电隐患热点与主要道路分布

Fig. 4 Hot spot of hidden danger of unsafe charging behavior of electric bicycle

表3 空间误差模型回归分析结果
Table 3 Regression results of spatial error model

变量类型	影响因素	标准化系数
用地类型	住宅用地比例	0.09***
	公用设施用地比例	-0.02*
	工矿商贸用地比例	-0.00
人口就业情况	企业数量	0.03**
	人口密度	-0.00
生活设施分布	生活设施数量	0.07***
	体育设施数量	-0.01
	到最近的小学距离	-0.01*
交通条件	道路密度	0.02**
	公交站点数量	-0.02*

注: *, **和***表示显著性水平分别为 10%, 5%和 1%。

调查, 案例区企业具备安全条件的电动自行车充电桩数量相对较少, 电动车充电桩的供需矛盾在一定程度上会加剧居住区的违规充电风险。

人口密度指标的回归分析结果不具显著性。案例区大量外来就业人口的日常出行依赖电动自行车, 这种人口特征难以反映在传统的人口统计数据中, 因此人口密度指标的有效性有待验证。此外, 电动自行车违规充电是客观需求与主观安全意识相结合的行为, 人口密度大并不意味着必然导致更多的违规充电行为。因此, 在日常违规充电巡查过程中, 可以更多地考虑电动自行车的使用需求。

生活设施的分布对电动自行车违规充电行为有显著正面影响, 标准化系数为 0.07, 说明电动自行车在日常生活出行中有重要作用。这也会增加违规充电行为发生的可能性。生活设施数量的标准化系数数值大于企业数量, 说明相较于就业出行, 生活出行与电动自行车的关系更加密切, 这一结论与杨励雅等^[27]的研究结果相符。

到小学的距离与违规充电行为负相关, 说明案例区存在一定的基于电动自行车工具的上学行为。电动自行车通常用于 30 分钟以内的中、短距离交通出行, 到学校距离的负向显著统计结果大体上符合这一规律, 即上学的路程超过一定的距离, 使用电动自行车的行为会相应地减少, 违规充电行为数量随之下降。

道路密度与电动自行车违规充电行为数量显著正相关。电动自行车一般比较轻便, 额定功率受限, 适合在道路条件好的地区骑行, 对道路条件的依赖性十分显著。便捷的道路促进电动自行车的使用,

也带来更多潜在的违规充电行为。

公交车数量对电动自行车的使用有抑制作用, 便捷的公交体系会导致电动自行车出行减少, 从而导致事故隐患减少。对案例区而言, 这也反映公交出行与电动车出行存在一定程度的竞争关系, 二者相互补充或接力转换出行的空间不大。这一结果也为研究不同交通方式之间的竞争提供了一定的观察视角。相比于远距离交通方式之间的竞争^[28-29], 短距离出行交通方式的选择有待进一步研究。

4 结论与讨论

本文响应公共安全管理“措施前置、防患未然”的理念, 对网格化管理模式所积累的精细化数据进行挖掘分析, 开展针对电动自行车充电隐患的研究, 得到如下结论。

1) 城市空间要素与电动自行车违规充电隐患之间存在密切的关系, 不同的城市空间要素从电动自行车需求和对违规充电行为的监管两个方面影响电动自行车使用者的充电习惯, 进而影响违规充电行为的数量。就本研究案例区的而言, 违规充电行为存在一定的空间关联特征, 大多数违规充电行为集中在少数网格中, 且容易发生在主干交通道路周边密集居住区的网格中。通过空间规律分析识别这种违规充电隐患的分布特征, 可以指导针对电动车违规充电隐患的日常巡查和隐患纠正工作, 节省人力投入, 提升城市网格化管理的效能。

2) 反映城市空间要素的用地类型、就业情况、生活设施分布和交通条件与违规充电行为具有不同程度的相关性, 不同要素对违规充电行为的影响具有差异性。与短距离频繁出行需求和道路条件相关的变量通常对电动自行车违规充电行为有正向刺激作用, 而公共场所和更远的通勤距离对电动车违规充电行为有一定程度的抑制作用。此外, 电动自行车出行与公交车出行之间存在一定程度的竞争关系, 较高的公交站点覆盖率会减少电动自行车的使用行为, 相应地导致违规充电行为减少。

后续工作中, 将在以下几个方面进行深入的探讨: 1) 增加对个体主观特征要素的分析, 进一步挖掘不同属性的群体对违规充电行为是否表现出安全意识的趋同; 2) 厘清各种宏观、微观和随机因素对隐患发生的影响及机理; 3) 基于不同地区的网格化管理实践, 进行更多类型的公共安全隐患分析和对比研究。

参考文献

- [1] 陈诚. 电动车充电安全难题亟待破解[EB/OL]. (2019-05-14) [2020-06-05]. http://epaper.gmw.cn/gmrb/html/2019-05/14/nw.D110000gmrb_20190514_5-02.htm
- [2] Rosenberg T. Statistics for fire prevention in Sweden. *Fire Safety Journal*, 1999, 33(4): 283-294
- [3] 冯健, 黄琳珊, 董颖, 等. 城市犯罪时空特征与机制——以北京城八区财产类犯罪为例. *地理学报*, 2012, 67(12): 1645-1656
- [4] 冯健, 周一星. 中国城市内部空间结构研究进展与展望. *地理科学进展*, 2003, 22(3): 204-215
- [5] 肖露子, 柳林, 周素红, 等. ZG市工作日地铁站点扒窃案件的时空分布及其影响因素. *地理科学*, 2018, 38(8): 1227-1234
- [6] 柳林, 宋广文, 周素红, 等. 城市空间结构对惠州市中心城区交通事故影响的时间差异分析. *地理科学*, 2015, 35(1): 75-83
- [7] 李云, 翟欣欣, 胡雅丽, 等. 城市道路交通事故的时空特征与规划成因——以深圳市南山区为例. *深圳大学学报(理工版)*, 2018, 35(2): 197-205
- [8] 李晓玲, 修春亮, 程林, 等. 基于防灾目标的城市公园空间结构及合理性评价——邻域法在长春市的应用. *应用生态学报*, 2016, 27(11): 3641-3648
- [9] Wuschke K, Clare J, Garis L. Temporal and geographic clustering of residential structure fires: a theoretical platform for targeted fire prevention. *Fire Safety Journal*, 2013, 62: 3-12
- [10] Corcoran J, Higgs G, Brunson C, et al. The use of Comaps to explore the spatial and temporal dynamics of fire incidents: a case study in South Wales, United Kingdom. *Professional Geographer*, 2007, 59(4): 521-536
- [11] Zhang X X, Jing Y, Katarzyna S N. Exploring spatio-temporal dynamics of urban fires: a case of Nanjing, China. *International Journal of Geo-Information*, 2018, 7(7): 1-14
- [12] Parente J, Pereira M G, Tonini M. Space-time clustering analysis of wildfires: the influence of dataset characteristics, fire prevention policy decisions, weather and climate. *Science of the Total Environment*, 2016, 559: 151-165
- [13] 徐波, 王振波. 时空因素对中国城市火灾态势变化的影响. *地理研究*, 2012, 31(6): 179-192
- [14] 徐波, 何宁, 宫鹏, 等. 中国火灾的时空演变特征——基于GIS的统计分析. *自然灾害学报*, 2012, 21(1): 198-203
- [15] Jennings C R. Socioeconomic characteristics and their relationship to fire incidence: a review of literature. *Fire Technology*, 1999, 35(1): 7-34
- [16] Duncanson M, Woodward A, Reid P. Socioeconomic deprivation and fatal unintentional domestic fire incidents in New Zealand 1993-1998. *Fire Safety Journal*, 2002, 37(2): 165-179
- [17] Jennings C R. Social and economic characteristics as determinants of residential fire risk in urban neighborhoods: a review of the literature. *Fire Safety Journal*, 2013, 62: 13-19
- [18] Hwang V, Duchossois G P, Garcia-Espana J F, et al. Impact of a community based fire prevention intervention on fire safety knowledge and behavior in elementary school children. *Injury Prevention*, 2006, 12: 344-346
- [19] Corcoran J, Higgs G, Rohde D, et al. Investigating the association between weather conditions, calendar events and socio-economic patterns with trends in fire incidence: an Australian case study. *Journal of Geographical Systems*, 2011, 13(2): 193-226
- [20] Chien S W, Wu G Y. The strategies of fire prevention on residential fire in Taipei. *Fire Safety Journal*, 2008, 43(1): 71-76
- [21] Henrich H W, Petersen D, Roose N. *Industrial accident prevention*. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 1980
- [22] 柳林, 纪佳楷, 宋广文, 等. 基于犯罪空间分异和建成环境的公共场所侵财犯罪热点预测. *地球信息科学学报*, 2019, 21(11): 1655-1668
- [23] 李业锦, 朱红. 北京社会治安公共安全空间结构及其影响机制——以城市110警情为例. *地理研究*, 2013, 32(5): 870-880
- [24] 周素红, 闫小培. 广州城市空间结构与交通需求关系. *地理学报*, 2005, 60(1): 130-141
- [25] Ord J K, Getis A. Local spatial autocorrelation statistics: distributional issues and an application. *Geogr Anal*, 1995, 27: 286-306
- [26] Anselin L. *Spatial Econometrics: methods and models*. Dordrecht: Kluwer Academic, 1988
- [27] 杨励雅, 王振波. 城市社区建成环境对居民日常出行行为的影响分析. *经济地理*, 2019, 39(4): 101-108
- [28] 马超群, 王玉萍, 陈宽民. 城市轨道交通与常规公交之竞争模型. *交通运输系统工程与信息*, 2007, 7(3): 140-143
- [29] Wang J, Huang J, Jing Y. Competition between high-speed trains and air travel in China: from a spatial to spatiotemporal perspective. *Transportation Research Part A*, 2020, 133: 62-78