交通碰撞事故：时间模式与严重程度加权热点分析

Nael Alsaleh[a,*], Noura Falis[a], Tareq Alsaleh[b], Farah Ba Fakih[a]

[a]建筑与土木工程系，哈伊马角美国大学，阿联酋哈伊马角 *72603*[b]交通创新实验室（*LiTrans*），多伦多都会大学，加拿大

arXiv:2601.12548v1 [cs.CE] 18 Jan 2026

摘要

深入了解交通碰撞模式，对于在快速发展的城市环境中有效规划道路安全至关重要。本研究考察了阿联酋迪拜交通碰撞事故的时间和空间模式，尤其关注碰撞严重程度。为此，研究分析了2024年11月至2025年6月的交通碰撞记录，考察总体交通碰撞事故和涉行人事故在每小时、每日及每月碰撞频率和严重程度方面的变化。研究采用卡方检验和克拉默V系数评估时间因素与严重程度之间的关联；空间模式则通过基于Getis–Ord Gi*统计量的严重程度加权热点分析进行研究，并辅以反距离加权（IDW）插值。结果显示，总体碰撞频率和严重程度存在明显的时间变化：傍晚和夜间时段的碰撞频率较高，夜间发生高严重程度结果的概率比下午高44%。另一方面，涉行人事故呈现出不同的时间分布特征，其特点是深夜时段发生率较高，而在星期几和月份之间的变化相对有限。空间分析发现，迪拜北部和西北部以及艾因—迪拜高速公路沿线存在统计显著的总体碰撞严重程度热点；涉行人事故严重程度热点则集中在西南部地区的工业区附近。根据研究结果，本文提出了多项政策措施，包括降低夜间限速、加强自动化执法、改善道路照明，以及在统计显著热点区域实施行人优先措施。

关键词： 事故热点识别、道路交通事故、事故严重程度、Getis–Ord Gi*统计量、时空分析。

1. 引言

道路交通事故仍是一个重大的公共安全问题，在快速发展的城市环境中尤为突出。从全球来看，问题规模十分严峻：据报告，2021年道路交通事故造成119万人死亡，其中约21%涉及行人（世界卫生组织，2023年）。在阿拉伯联合酋长国（阿联酋），2023年的交通事故总数估计为4,391起，其中近一半（49.56%）发生在迪拜酋长国（联邦竞争力与统计中心，2025年）。尽管该国多年来报告称道路安全状况有所改善，但近期数据显示，交通事故死亡人数略有上升，从2022年的343人增至2024年的384人，增幅约为11%。这一增长主要归因于人口持续增长、汽车保有量上升以及出行需求增加（Al Amir，2025年）。

*通讯作者。电子邮箱： nael.alsaleh@aurak.ac.ae (Nael Alsaleh), 2023006419@aurak.ac.ae (Noura Falis), talsaleh@torontomu.ca (Tareq Alsaleh), farah.bafakih@aurak.ac.ae (Farah Ba Fakih)

了解交通事故的时间和空间分布规律，对于基于证据的规划和实施针对性干预至关重要。这些见解有助于实现全球道路安全目标，包括可持续发展目标（SDG）3.6，即到2030年将交通事故死亡和受伤人数减少50%。世界卫生组织的2021—2030年道路安全行动十年呼吁持续改进道路和车辆设计、建设更安全的基础设施，并加强事故后响应系统（世界卫生组织，2021年）。时间和空间分析有助于识别高风险时段、热点和弱势道路使用者群体，从而推动实施针对性干预并优化资源分配。

先前研究指出，影响各地区交通事故的因素种类繁多。最近一项研究对加利福尼亚州四座主要城市——洛杉矶、萨克拉门托、圣迭戈和圣何塞——的交通事故进行了时空分析，结果显示，在为期五年的分析期间记录的大多数事故发生在洛杉矶（Alsahfi，2024年）。另一项研究表明，在日本京都市等发达城市中心，事故聚集受城市密度、土地利用特征和交叉路口设计的影响；公园附近的事故发生概率较低，而餐馆、超市和便利店等商业设施附近的事故发生概率较高（Nakao 等人，2025年）。

在阿联酋，粗心驾驶往往是导致交通事故的首要因素。阿布扎比最近的一项研究报告称，事故强度较高，且多个热点集中在中央商务区（Alkaabi，2023年）。另一项研究发现，在外部道路（包括高速公路）上，40岁以下驾驶员卷入事故的可能性比年长驾驶员高出18%（Imreizeeq 等人，2023年）。此外，一项针对阿联酋458名驾驶员开展的调查显示，事故发生率与驾驶员年龄呈负相关，与驾驶频率呈正相关（Abuzaid 等人，2024年）。

既有研究还表明，基础设施不足以及交通法规执法不力会加剧事故的严重程度。例如，伊尔比德（约旦）的研究（Al-Omari 等人，2025年）和拉瓦尔品第（巴基斯坦）的研究（Aati 等人，2024年）指出，车辆速度会导致事故严重程度上升，因此，有效实施交通法规与执法对于减少伤亡至关重要。此外，尼泊尔阿拉尼科公路的车道狭窄，且缺少道路标线或交通信号灯，这些因素与14.9%的死亡率相关，凸显了道路设计对交通安全的影响（Bhele 等人，2024年）。

交通事故研究采用了多种分析方法，反映出事故发生具有多维特征。机器学习技术因能够捕捉风险因素之间的非线性关系，已被广泛用于构建事故发生可能性和严重程度的预测模型（例如（Al-Omari 等人，2025年；Augustine 和 Shukla，2022年））。文本挖掘也已成为分析叙述性事故报告、提取难以通过结构化数据源捕捉的潜在模式的有效工具（例如（Jaradat 等人，2025年））。在空间热点分析方面，研究采用了逻辑回归、核密度估计以及多种地理空间统计技术。其中，Getis-Ord Gi* 统计量和反距离加权（IDW）插值已得到广泛应用，并被证明能有效检测具有统计显著性的聚类并呈现事故集中区域的强度，为识别局部高风险区域提供了可靠工具（例如（Alkaabi，2023年；Hovenden 和 Liu，2020年；Berhanu 等人，2023年；Hazaymeh 等人，2022年））。

鉴于交通事故模式在地理、社会经济和基础设施环境方面存在显著差异，因此有必要开展情境特定调查，以支持针对性干预。本研究调查了阿联酋迪拜交通碰撞事故的时间模式和空间分布，重点关注碰撞严重程度。研究采用 Getis-Ord Gi* 统计量和反距离加权插值开展严重程度加权空间热点分析，以识别高风险地点。研究还通过时间分析评估按小时、每日和每月划分的

碰撞发生和严重程度的变化。所有分析均分别针对总体碰撞事故和涉行人事件开展。本研究旨在全面了解事故动态，并为数据驱动的道路安全规划和针对性干预提供支持。

本文其余部分的组织结构如下。第2 节介绍用于分析交通碰撞模式的分析框架，包括数据收集、预处理、时间分析和空间热点分析。第3节呈现时空分析结果。第4节讨论研究发现，并提出基于结果得出的关键建议；第5 节总结全文，并说明未来研究方向。

2. 数据与方法

本节介绍本研究采用的分析框架（见图 1），用于考察迪拜的交通碰撞模式，包括数据收集、预处理、时间分析和空间热点分析。

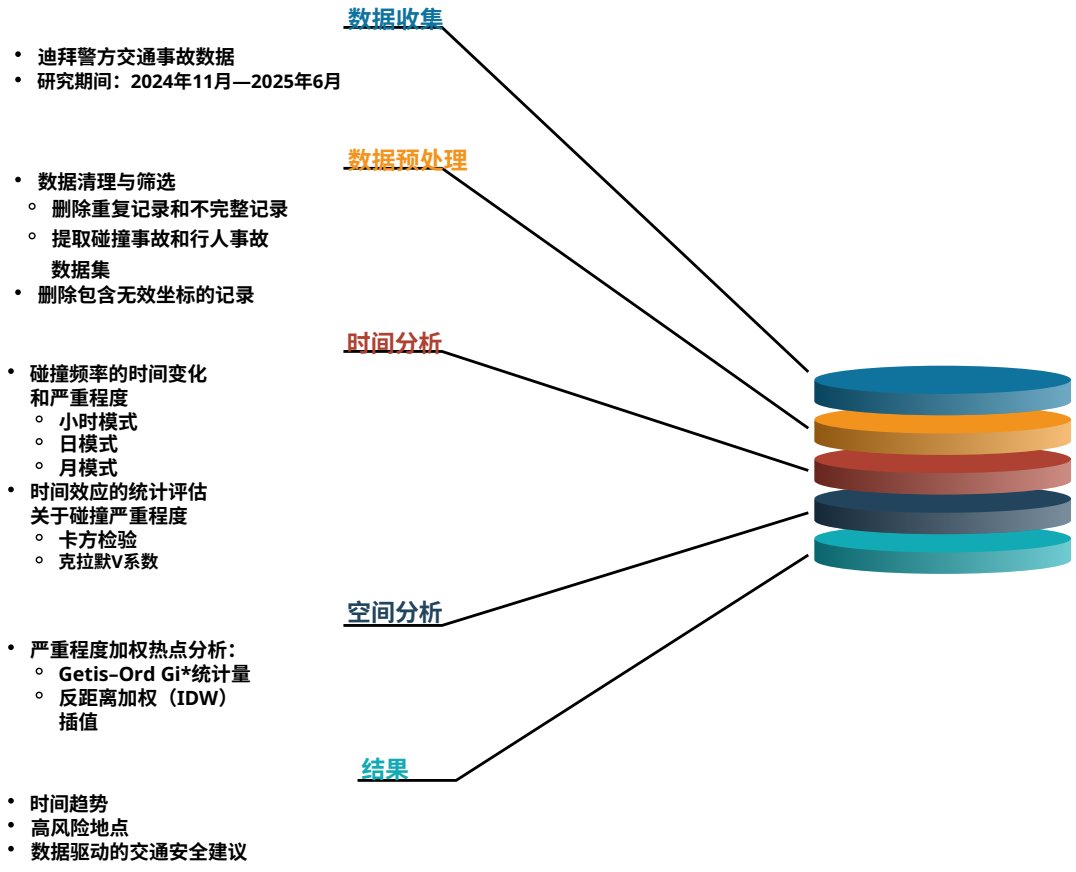


图 1：交通碰撞分析框架。

2.1. 数据集描述

交通事故记录取自 Dubai Pulse 开放数据平台（迪拜警察局，2025年），该平台是由迪拜政府维护的官方开放数据存储库。该数据集由迪拜警察局发布，包含已报告的交通事件

以及相关的时间和空间属性。本研究分析了2024年11月5日至2025年6月2日期间的交通事故记录。

该数据集包含事故识别编号（ID）、发生日期和时间、描述信息以及地理坐标（经度和纬度）。描述字段以阿拉伯语提供，包含与事故类型和严重程度等级相关的详细信息。事故严重程度分为两个等级：低和高。研究期间共记录了71,375起交通事件。根据报告的事故类型，这些记录被分为碰撞事故和非碰撞事件。

碰撞事故约占全部记录的47%（共33,604起）。此类事故包括车辆与物体碰撞、车辆间碰撞、涉及行人的事故、摩托车与自行车碰撞、车辆翻覆事故、动物相关碰撞、特殊车辆碰撞以及肇事逃逸事故。表1 详细列出了碰撞事故子类别及其相应的发生次数和百分比。

表1：碰撞事故的类别分类和频次子

碰撞事故子类别	简要描述	数量	(%)
车辆与物体碰撞	车辆与固定物体发生碰撞	17,149	51.03
车辆间碰撞	两辆或多辆车辆之间的碰撞事故	6,901	20.54
摩托车碰撞	涉及摩托车的碰撞事故	3,555	10.58
车辆翻车事故	车辆翻车事故	2,271	6.76
肇事逃逸	与逃逸方发生碰撞	1,423	4.23
行人碰撞	机动车与行人碰撞	1,367	4.07
自行车碰撞事故	涉及自行车的碰撞	719	2.14
动物碰撞事故	涉及动物的碰撞	158	0.47
特种车辆碰撞事故	与特种车辆碰撞（例如，有轨电车／火车或军用车辆）	61	0.18
总计		**33,604**	**100.00**

非碰撞事件约占数据集的53%，包括驾驶员行为违规（例如双排停车、街头赛车、禁止驶入违规）、行人行为违规（例如不安全或不当横穿道路）、基础设施相关问题（例如道路上的物体、交通信号故障、油液泄漏）、机械故障（例如车辆故障、车辆行驶中起火、电气或机械故障），以及交通拥堵、飞来物撞击和流浪动物出现在道路上等其他事件。

本研究采用相同的分析框架，对所有碰撞事故和涉行人事故进行了时间模式分析和空间热点分析。之所以选择碰撞事故和涉行人事故进行分析，是因为它们直接影响道路使用者安全，并导致交通伤亡。这些分析旨在识别时间趋势和高风险地点，为数据驱动的道路安全规划及有针对性的干预策略提供支持。

2.2. 数据预处理

在分析之前，对交通事故数据集进行了预处理，以确保时间和空间的一致性。首先对记录进行筛选，仅保留研究期间（2024年11月5日至2025年6月2日）内发生的事故。随后检查数据集中的重复条目和缺失值。未发现重复记录，但研究期间有两天缺少事故数据，具体为2024年11月9日和10日。

随后提取了两个分析数据集：所有碰撞事故和行人相关碰撞事故。通过在 ArcMap 中可视化事故位置，核实其是否位于迪拜酋长国的行政边界内，并剔除地理坐标无效的记录，完成空间验证。最初，碰撞数据集包含

33,604 条记录，行人子集包含 1,367 条记录。经过空间验证后，记录数分别减少至 33,480 条和 1,365 条。所得数据集用于后续的时间和空间分析。

2.3. 时间分析

我们开展了时间分析，以考察交通碰撞事故在不同时间尺度上的模式。研究期间，我们按小时、天和月份分辨率分析了碰撞记录，以识别一天中的时段、星期几和月份所对应的碰撞频率与严重程度变化。我们分别针对（i）所有碰撞事故和（ii）涉行人碰撞开展分析，以捕捉不同事故类型相关的时间趋势。我们采用卡方独立性检验评估时间特征（时段、星期几和月份）与碰撞严重程度之间的关联，并将 Cramér's V作为效应量指标报告（McHugh，2013年）。统计公式如下。

将每条碰撞记录编为索引 $n = 1, \ldots, N$，并根据所关注的时间因素（一天中的时段、星期几或月份）定义时间类别 $T_n \in \{1, \ldots, r\}$；严重程度标签 $S_n \in \{H, L\}$ 表示高（H）或低（L）严重程度。针对每个时间因素，我们构建了一个 $r \times 2$观察频数列联表 O_{ij}，其中 $i \in \{1, \ldots, r\}$ 表示时间类别，$j \in \{H, L\}$ 表示严重程度：

$$O_{ij} \;=\; \sum_{n=1}^{N} \mathbb{I}(T_n = i)\, \mathbb{I}(S_n = j). \tag{1}$$

在 T 和 S 相互独立的零假设下，期望频数计算如下

$$E_{ij} \;=\; \frac{\left(\sum_j O_{ij}\right)\left(\sum_i O_{ij}\right)}{N}. \tag{2}$$

随后计算卡方统计量如下

$$\chi^2 \;=\; \sum_{i=1}^{r} \sum_{j \in \{H,L\}} \frac{(O_{ij} - E_{ij})^2}{E_{ij}}, \tag{3}$$

自由度为

$$\mathrm{df} \;=\; (r-1)(2-1) \;=\; r-1. \tag{4}$$

所有检验的统计显著性均在 $\alpha = 0.05$水平下进行评估。

效应量使用克莱姆的 V进行量化：

$$V \;=\; \sqrt{\frac{\chi^2}{N\,(k-1)}}, \qquad k = \min(r, 2) = 2, \tag{5}$$

对于二元严重程度结果，该公式可简化为

$$V \;=\; \sqrt{\frac{\chi^2}{N}}. \tag{6}$$

对于一天中不同时段的分析，将时间划分为四个时段：上午（06:00–11:59）、下午（12:00–17:59）、傍晚（18:00–23:59）和夜间（00:00–05:59）。星期几和月份的分析也采用相同的检验流程，并使用各自对应的类别集合。

2.4. 空间热点分析

通过空间热点分析，综合考虑事故频率和严重程度，识别交通碰撞事故的高风险地点。每起碰撞事故的权重根据其严重程度等级确定

：低严重程度事故的权重为 1，高严重程度事故的权重为 2。这种加权方案可表示为

$$w_n = \begin{cases} 1, & \text{Low severity}, \\ 2, & \text{High severity}, \end{cases} \tag{7}$$

其中，w_n 表示分配给碰撞事故 n的严重程度权重。热点分析分别针对所有碰撞事故和涉行人事故进行。随后，使用 Getis–Ord Gi*统计量对所得的加权事故数据集进行分析，并结合反距离加权（IDW）插值评估碰撞风险的空间模式。

Getis–Ord Gi*统计量最初由 Getis 和 Ord（Getis 和 Ord，1992）提出，用于识别在 90%、95% 和 99% 置信水平下具有统计显著性的空间聚类模式。该局部空间关联指标用于评估高值或低值相对于随机空间分布是否在空间上集中。具有统计显著性的正 Gi* 值表示热点，而显著的负值表示冷点。形式上，设 x_j 表示空间要素 j 处的加权值（例如，与该要素相关的按严重程度加权的碰撞次数），并设w_{ij} 表示定义要素 i 和 j之间邻域影响的空间权重。对于要素 i，标准化 Getis–Ord 统计量表示为

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^{N} w_{ij}x_j - \bar{x}\sum_{j=1}^{N} w_{ij}}{S\sqrt{\frac{N\sum_{j=1}^{N} w_{ij}^2 - \left(\sum_{j=1}^{N} w_{ij}\right)^2}{N-1}}}, \tag{8}$$

其中，N 为空间要素的数量，$\bar{x}$为x_j的均值，并且

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{N} x_j^2}{N} - \bar{x}^2}. \tag{9}$$

采用反距离加权插值生成表示碰撞强度空间变化的连续表面。为连续表示空间风险强度，将反距离加权插值应用于 Gi* 输出结果。该方法将未采样位置的值估计为邻近观测值的距离加权平均值，权重与距离成反比。对于未采样位置 s_0，反距离加权估计值可表示为

$$\hat{z}(s_0) = \frac{\sum_{k=1}^{m} z(s_k)\, d(s_0, s_k)^{-p}}{\sum_{k=1}^{m} d(s_0, s_k)^{-p}}, \tag{10}$$

其中，$z(s_k)$ 是采样位置 s_k 处的输入值（此处为相应的 G_i^* 输出值），$d(s_0, s_k)$ 是 s_0 与 s_k 之间的距离，m 是所使用的邻近点数量，$p > 0$ 是距离衰减幂参数。Getis–Ord Gi* 和反距离加权插值分析均使用 ArcMap 中的 Spatial Analyst 扩展完成；ArcMap 是一个用于空间数据管理、分析和可视化的桌面 GIS 平台。

3. 结果

本节介绍并讨论交通碰撞事故的时间分析，随后分析其空间热点。

3.1. 时间分析

本小节考察所有碰撞事故和涉及行人的碰撞事故的时间特征。

3.1.1. 所有碰撞事故

清理后的碰撞数据集在研究期间共包含33,480条记录，迪拜日均发生160.96起碰撞事故。单日碰撞事故数量最高的日期为2025年4月16日，共252起；最低的日期为2024年11月8日，共52起。单小时碰撞频率峰值出现在2025年2月18日晚上9:00至10:00之间，该时段记录了26起碰撞事故。就碰撞严重程度而言，单日高严重程度碰撞数量最多的日期为2024年11月18日，共发生46起严重事故。为进一步描述交通碰撞事故的时间分布及其严重程度等级，图2展示了小时、每周和4月份模式。

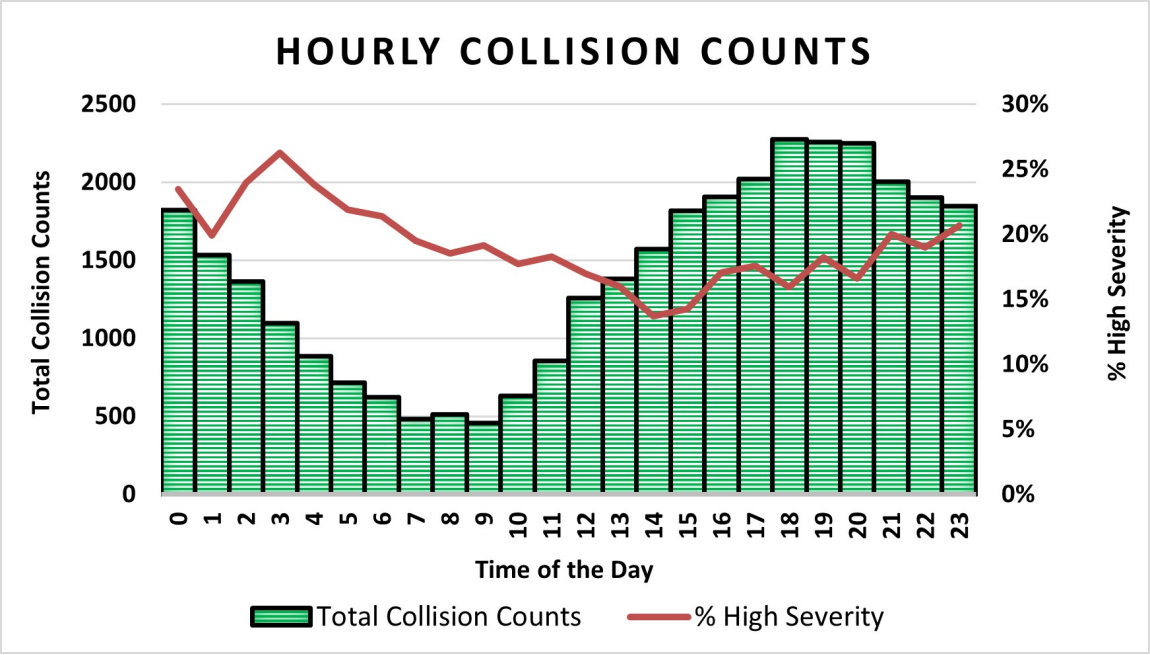


图2：碰撞事故的每小时分布。

图2 展示了交通碰撞事故总数及高严重程度碰撞所占比例的每小时分布。碰撞事故数量呈现出明显的昼夜变化规律：清晨时段（上午 07:00 至 09:00）数量较少，随后全天稳步增加，并在傍晚时段（下午 6:00 至晚上 9:00）达到峰值。这一规律与交通需求和活动较为旺盛的时段相对应，也与其他城市环境中的既有研究结果一致（Al-Omari 等人，2025年；Shin 和 Lee，2020年）。

相比之下，高严重程度碰撞的占比呈现出不同的时间模式。尽管碰撞事故数量相对较少，但深夜和清晨时段严重碰撞的百分比较高，而下午的严重程度占比最低。如表 2所示，卡方检验结果表明，碰撞严重程度与一天中的时段之间存在统计学上的显著关联，但效应量较小（克拉默V系数 $= 0.066$），这表明一天中的时段只能解释严重程度变化中有限但有意义的一部分。此外，对比各时段的严重程度百分比可见，夜间发生的碰撞事故导致高严重程度结果的风险比下午高44%。这一模式可能部分与交通状况有关。下午和傍晚时段发生的碰撞事故往往严重程度较低，这可能是因为拥堵交通状况和较低的车辆速度限制了冲击力，因此大多只造成财产损失或轻伤碰撞。另一方面，尽管夜间交通流量较低，夜间碰撞事故的严重程度通常更高，因为畅通的交通状况允许车辆以更高的行驶速度行驶，从而增加了发生

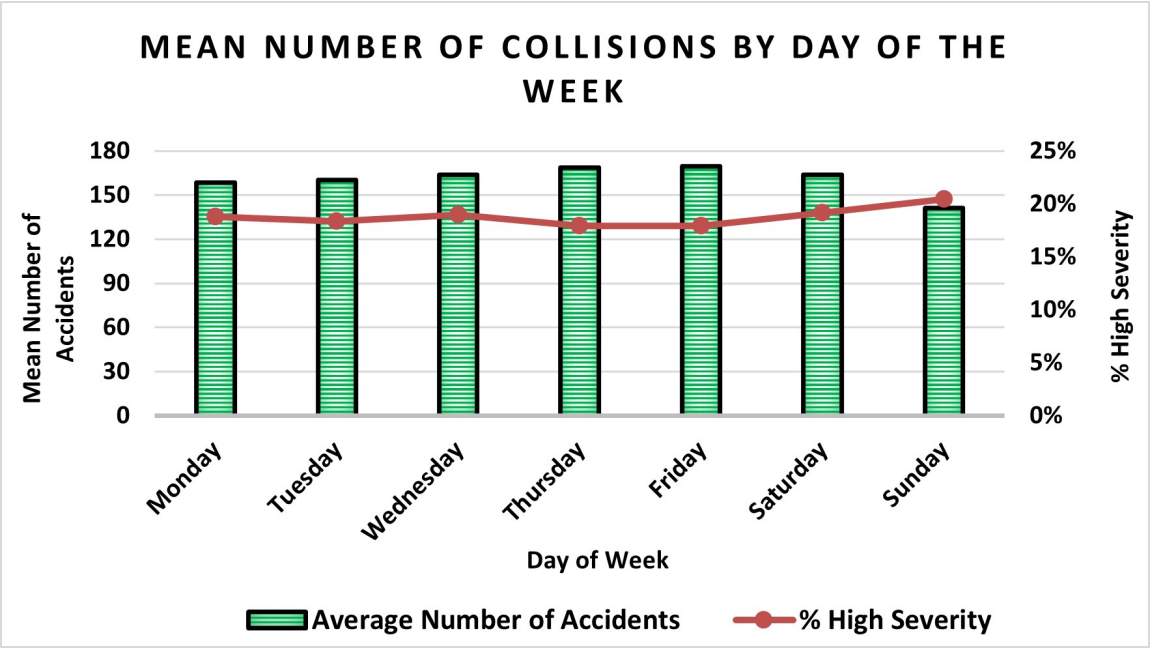


图3：碰撞事故的每周分布。

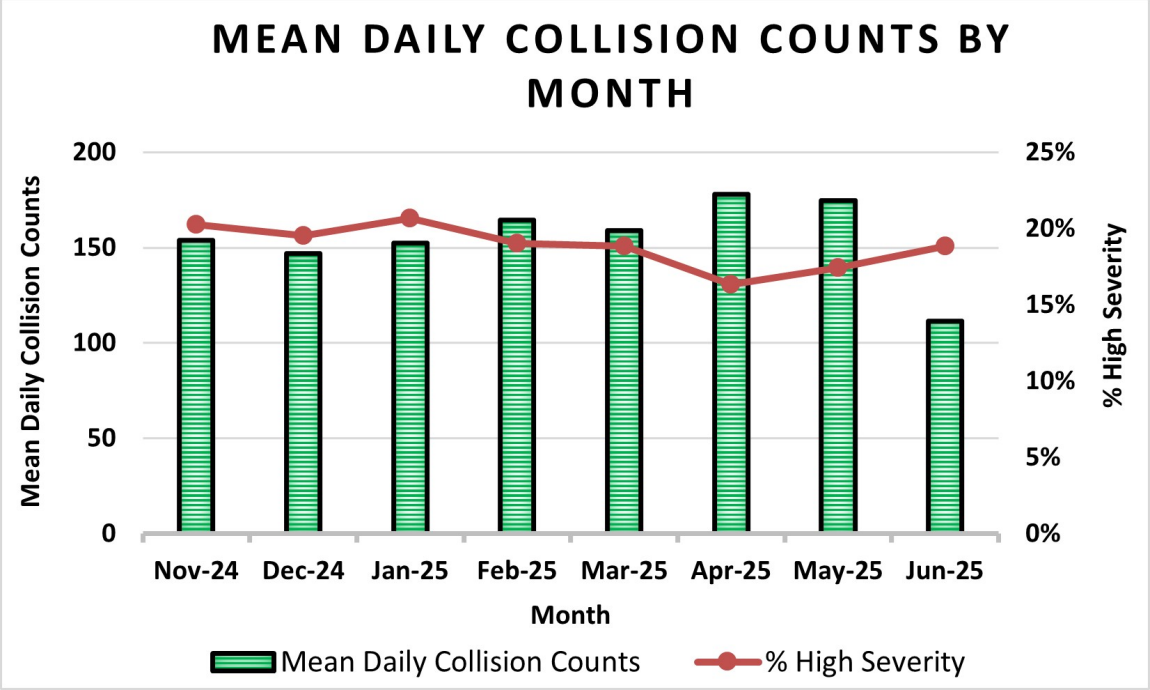


图4：碰撞事故的月份分布。

重伤或死亡的可能性。此外，深夜时段能见度降低、驾驶员疲劳以及危险驾驶行为更为普遍，也可能进一步加剧夜间观察到的严重程度上升。

图3 展示了一周中各星期的平均碰撞事故数量，以及高严重程度碰撞所占的百分比。整周的碰撞频率相对稳定，星期三至星期五的平均碰撞事故数量略高。周末的平均碰撞事故数量略有减少，其中星期日的平均数量最低。尽管如此，周末高严重程度碰撞所占的百分比略高，尤其是星期日。对碰撞严重程度的分析显示，两者之间存在统计学上显著的关联——

表2：时间特征与碰撞严重程度之间的统计关联

时间因素	统计结果[a]		
	χ^2 (df)	p值	克拉默V系数
一天中的时段	146.29 (3)	< 0.001	0.066
星期几	13.34 (6)	0.038	0.020
月份	45.89 (7)	< 0.001	0.037

[a]统计检验仅针对碰撞严重程度（高与低）进行。

（如表2所示），即星期几与碰撞严重程度相关。卡方检验结果表明，高严重程度碰撞所占百分比在不同工作日之间存在差异，但相关效应量可忽略不计（克拉默V系数 = 0.020）。这一发现表明，虽然不同日期之间的严重程度存在细微差异，但星期几对碰撞严重程度的解释力极小。周末观察到的严重程度升高，可能部分归因于交通拥堵减少，从而使行驶速度提高，并增加碰撞发生时造成严重后果的概率。此外，迪拜的周末出行通常涉及更多休闲出行、深夜活动，以及在高速公路上进行的长距离行程，这些因素也可能进一步加剧碰撞严重程度。

图4 展示了各月份交通碰撞事故的日均数量，以及高严重程度碰撞所占的百分比。碰撞频率呈现中等程度的季节性变化：2025年2月至5月的日均数量较高，2025年6月则明显减少。不过，6月的日均碰撞事故数仅基于两次观测；因此，如果纳入所有日期，可能无法准确代表该月的平均水平。就碰撞严重程度而言，统计结果显示碰撞严重程度与月份之间存在显著关联。不过，相应的效应量较小（克拉默V系数 = 0.037），表明月份变化只能解释所观察到的严重程度差异中的一小部分。本研究观察到的月份变化边际效应，与许多其他地区的研究结果形成对比；在这些地区，季节和天气相关的变异已被证明会显著影响碰撞严重程度。在温带和寒冷气候环境中，降雪、雾以及道路摩擦力降低等不利条件与更高的死亡风险和更严重的伤害后果相关联（Gorzelanczyk，2025年）。相比之下，迪拜全年气候条件相对稳定，降水、温度和能见度的季节性变化有限。这种气候稳定性可能降低月份变化对碰撞严重程度的影响，与本分析中观察到的较小效应量相符。

3.1.2. 行人相关碰撞事故

经过处理的行人事故数据集在研究期间包含1,365条记录，迪拜平均每天发生6.56起涉行人碰撞。每日行人事故数量的最大值出现在2025年3月28日，共16起事故。从严重程度来看，单日高严重程度行人事故数量的最高值记录于2025年1月16日，共10起严重事故。小时、周和月份尺度上的时间模式如图5–7所示。

图5 展示了行人事故的小时分布，呈现出明显的时间模式。行人事故数量在深夜时段最高，尤其是在23:00至00:00之间；随后在夜间持续稳步下降，并在清晨时段（约07:00–11:00）降至最低水平。此后，事故数量在白天逐渐增加，并达到傍晚时段的峰值。

行人事故严重程度呈现出不同的时间分布特征。严重行人事故比例最低的时段为清晨 6:00 至 7:00（40%）以及下午 15:00 至 16:00；比例最高的时段则为上午晚些时候

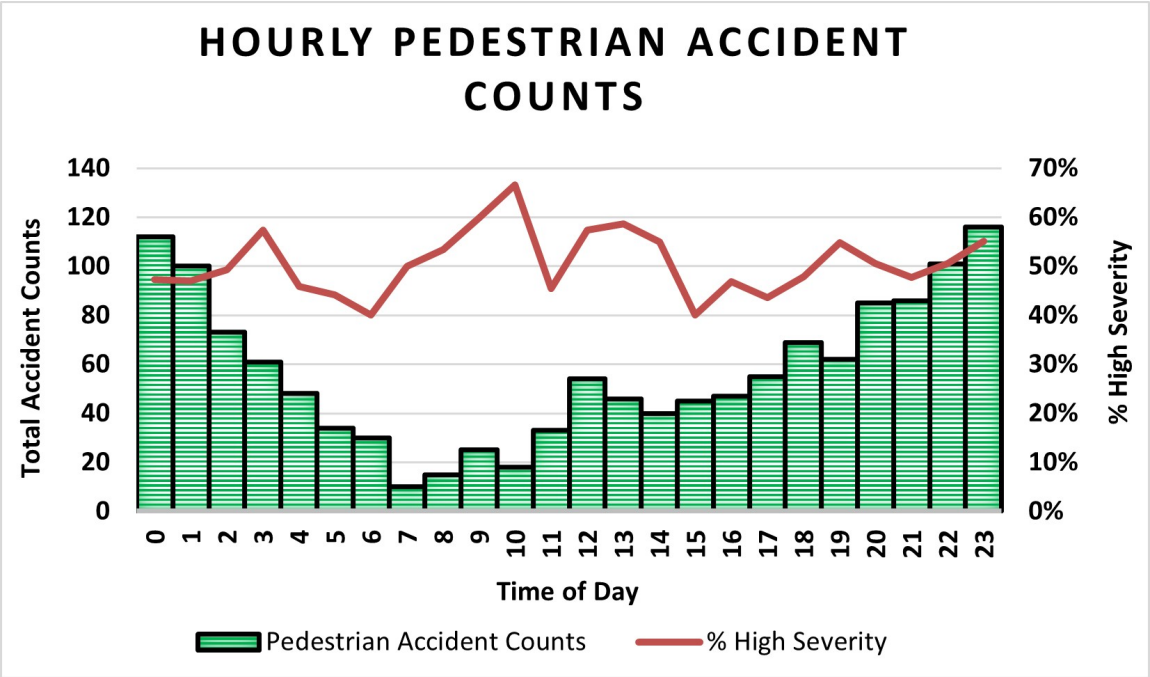


图5：行人事故的每小时分布。

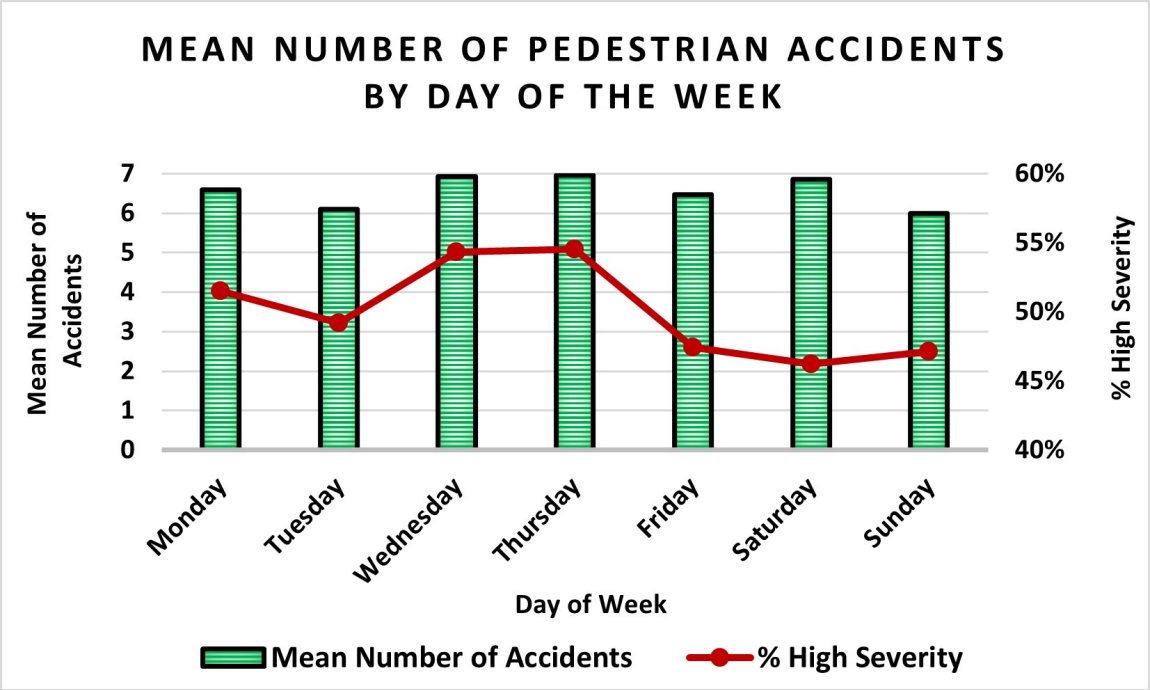


图6：行人事故的每周分布　　起。

（10:00 - 11:00），达到 66.7%。此外，严重事故比例从傍晚逐渐升至深夜，并在夜间总体呈下降趋势。

这些不同的趋势可能反映了全天行人暴露、交通状况和能见度的变化。傍晚较晚时段事故发生率较高，可能与行人活动增加以及驾驶员和行人的能见度降低有关。由Pala等人（2024年）开展的虚拟仿真研究表明，低能见度条件可能会影响行人决策，导致更冒险的过街行为，这或许也能解释本研究观察到的傍晚较晚时段事故发生率较高的现象。

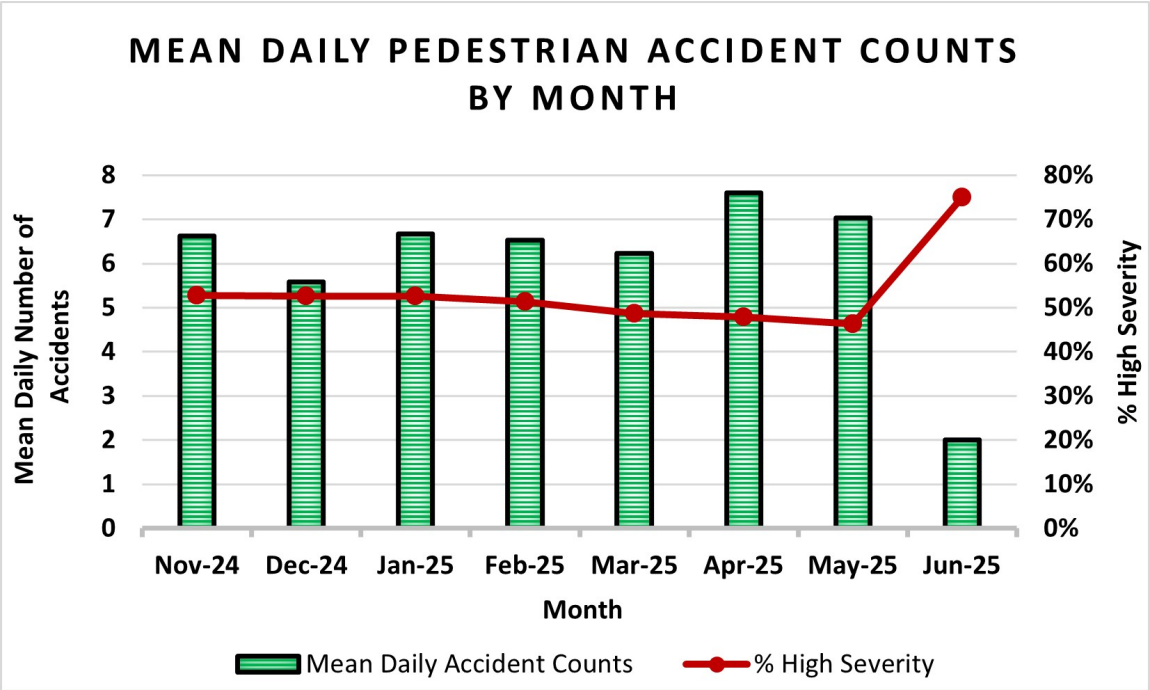


图7：行人事故的月度分布。

上午晚些时候观察到的严重程度较高，可能与交通较不拥堵时车辆速度较快有关；而下午时段严重程度较低，可能反映了人口密集的城市地区交通拥堵的状况，在这些地区，行驶速度降低可减轻高严重程度的事故结果。尽管存在这些时间差异，表3 所示的统计分析表明，行人事故严重程度与按时间聚合的时段类别之间不存在显著关联，且效应量可以忽略不计（克拉默V系数 $= 0.023$），这表明在这一时间聚合层级上的解释力有限。

表3：时间因素与行人事故严重程度之间的统计关联

时间因素	统计结果[a]		
	χ^2 (自由度)	p值	克拉默V系数
一天中的时段	0.72 (3)	0.869	0.023
星期几	5.72 (6)	0.455	0.065
月份	2.96（7）	0.888	0.050

[a]统计检验仅针对行人事故严重程度（高与低）进行。

如图所示6，一周内的行人事故日均数量总体上保持稳定，星期三和星期四的平均值略高，临近周末时有所下降，并在星期日降至最低。高严重程度行人事故的每周分布呈现出相似模式，而统计检验（表3）表明，不同星期几的高严重程度行人事故占比差异无统计学意义。同样，图7显示，从2024年11月至2025年5月，各月行人事故日均数量相对稳定，2025年4月略有峰值，2025年6月则明显下降。高严重程度行人事故占比在各月之间的变化也较小，而2025年6月较高的严重程度占比是基于极少量观测得出的，可能不具代表性。与每周结果一致，统计分析证实，行人事故严重程度的月度变化无统计学意义。

这些 研究结果表明，迪拜行人事故的发生及严重程度受到地点和短期时间因素（即，时段条件）的影 u-

响大于更广泛的每周或每月周期。第 3.2.2 节讨论的行人事故空间分布为这一解释提供了支持：事故高度集中在北部和西部沿海走廊的主要城市中心。这些地区城市活动密集，且一周之中及不同季节的行人暴露始终较高，因此不同星期或月份之间的差异有限。这或许可以解释本研究与 Song等人(2021年) 研究结果的差异；该研究报告称，在行人风险更多受到周末特有行为影响的情况下，例如深夜休闲出行和受酒精或药物影响驾驶，周末的行人伤害严重程度较高。

3.2. 空间热点分析

本小节分析所有碰撞事故和涉及行人的碰撞事故的空间热点分析。

3.2.1. 所有碰撞事故

迪拜碰撞事故的空间分布如图8所示。碰撞事故的分布呈现出明显的空间异质性，主要集中在城市北部、西部和西北部的阿拉伯湾沿海走廊沿线。这些区域包括主要城市中心、高密度住宅和商业开发区以及主要交通走廊，因此交通暴露和交互密度较高。相比之下，东部和南部地区的碰撞点相对较少，这与这些区域较低的交通暴露和城市活动水平相对应。

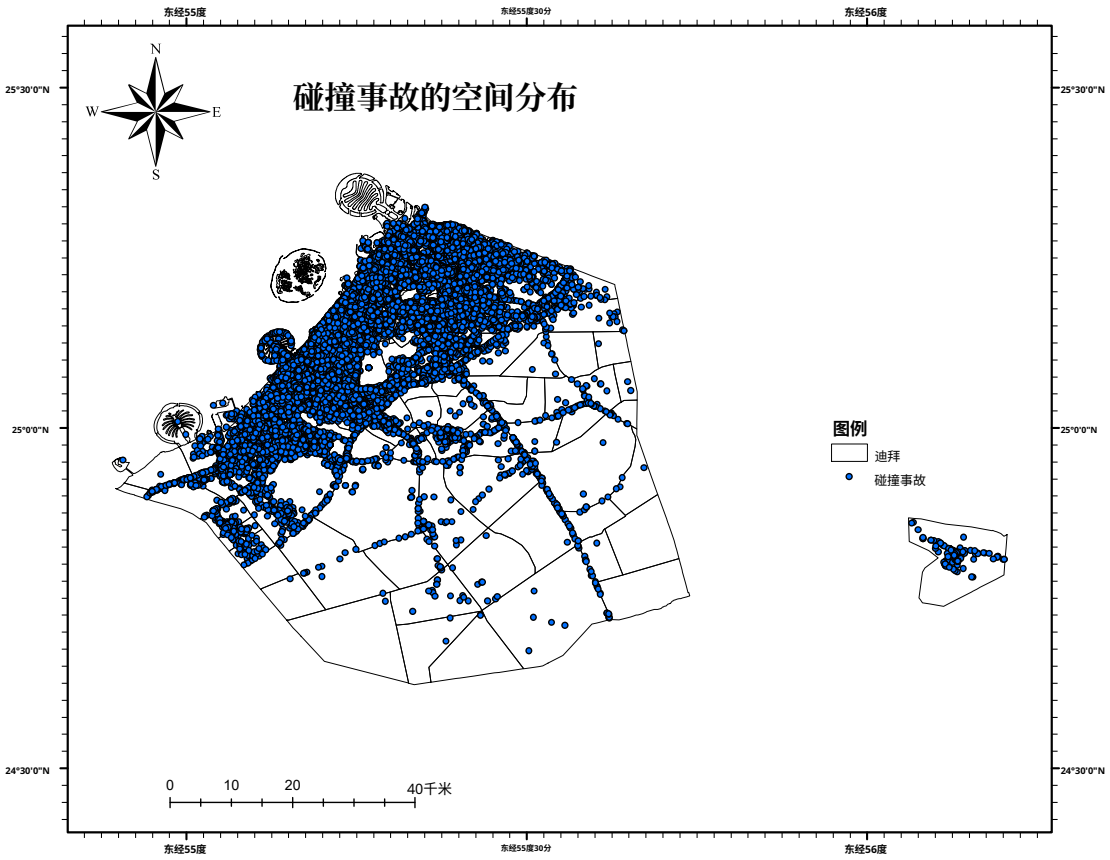


图 8：碰撞事故的空间分布。

为识别高风险地点中具有统计显著性的聚类，我们进行了严重程度加权空间热点分析，结果如图 9 所示。生成的热点

强度图标示了在 90%、95% 和 99% 置信水平下具有统计显著性的热点（红色色阶）和冷点（蓝色色阶）。统计显著热点主要集中在迪拜北部和西北部，以及连接迪拜与艾因的主要高速公路沿线（艾因—迪拜高速公路），表明这些地点的碰撞事故既频繁又严重。

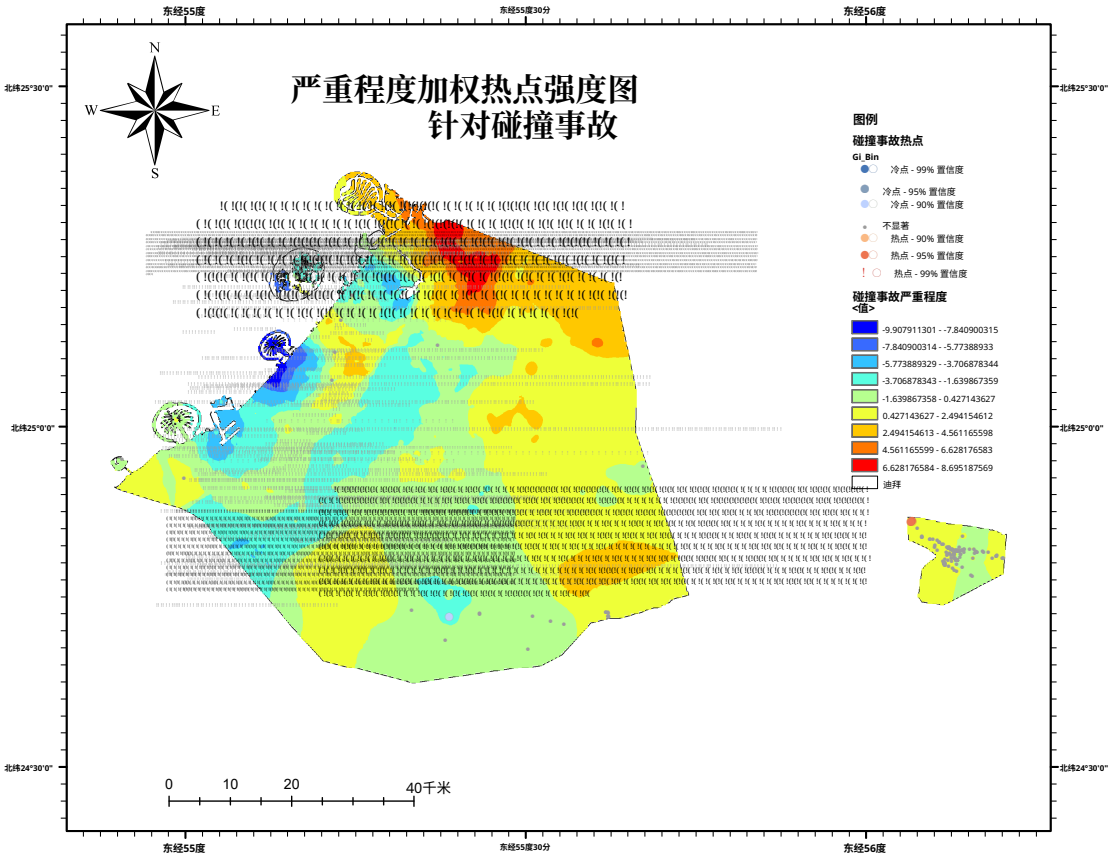


图9：碰撞事故严重程度加权空间热点分析。

北部和西北部地区包括主要城市中心、密集的住宅和商业开发区以及主要交通走廊。这些区域存在显著热点，可能是由于交通流量大、道路布局复杂以及主要主干道走廊集中分布，加之多种车辆类型（例如公交车、卡车、摩托车和乘用车）并存，共同增加了碰撞能量以及事故发生时出现严重结果的概率。此外，艾因—迪拜高速公路是一条主要的城际走廊，其特点是交通流量大、变道操作频繁，并设有多个合流与分流点，这些因素可能促成了该道路沿线观察到的热点模式。

尽管迪拜西部地区的碰撞事故高度集中，但该区域部分地段也观察到统计上显著的冷点，这表明这些区域的碰撞严重程度相对较低。这些地点可能反映了这样的道路环境：交通稳静化措施、交通拥堵或较低的行驶速度在事故频繁发生的情况下减轻了碰撞严重程度。相比之下，东部和南部地区呈现统计上不显著的聚集区，表明碰撞事故呈随机空间分布。

3.2.2. 行人相关碰撞事故

图 10 展示了迪拜行人事故的空间分布。行人事故的分布呈现出与碰撞事故相似的空间模式

，其高发区域集中在城市北部、西部和西北部沿阿拉伯湾沿海走廊的地带。这一模式符合预期，因为这些区域包含主要城市中心，反映了城市活动密集且行人暴露程度高的区域。

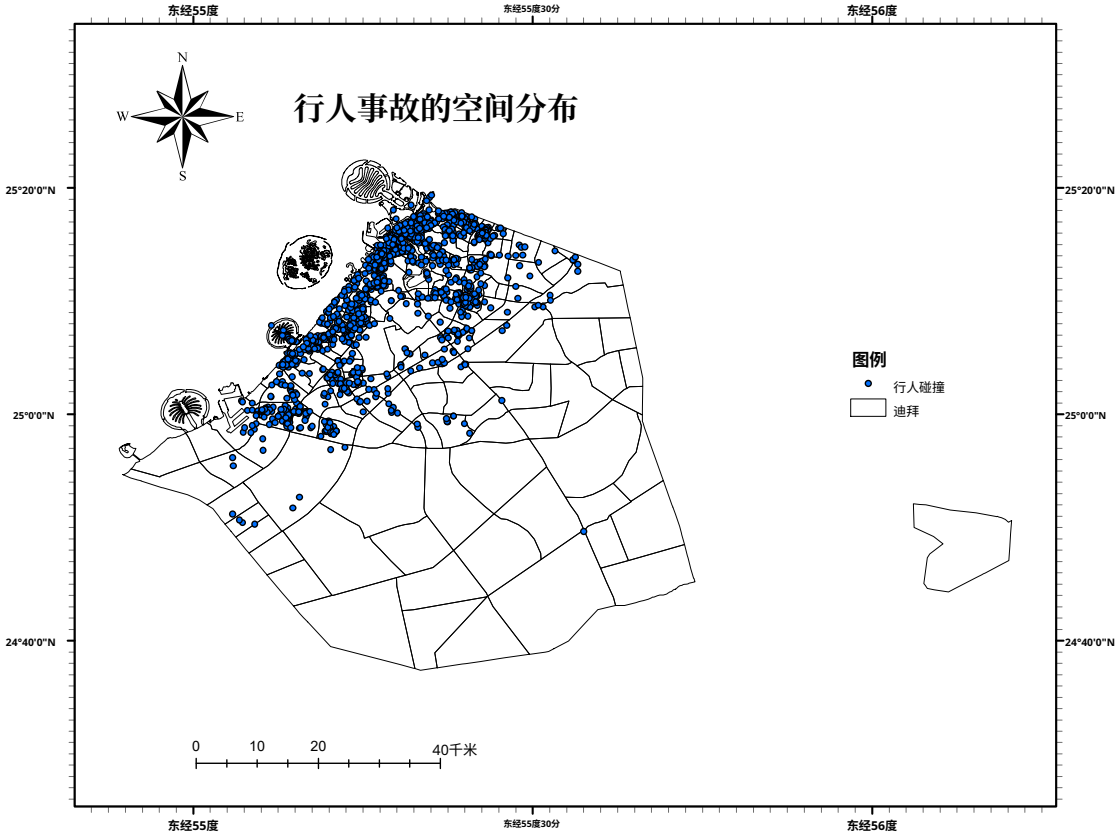


图10：行人事故的空间分布。

图11展示了行人事故的严重程度加权空间热点分析结果。尽管中部和西北部地区的行人事故相对集中，但这些地区仍出现了统计显著冷点。在主要城市中心，行人活动通常伴随着交通稳静化措施、信号交叉口、较低的限速以及周期性拥堵。虽然这些条件下行人碰撞事故可能更频繁，但较低的行驶速度往往会降低伤害严重程度，因此形成了统计显著冷点。

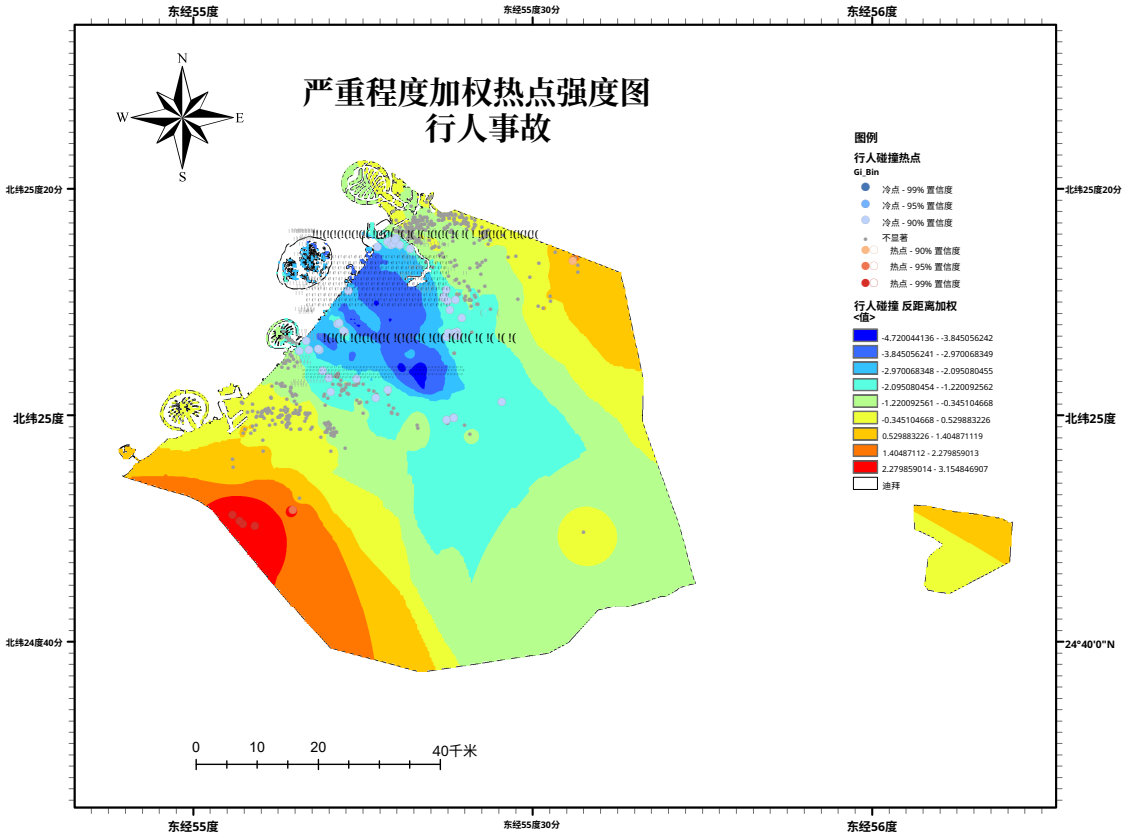


图11：行人事故的严重程度加权空间热点分析。

西南部地区出现了统计显著热点，表明尽管事故发生频率相对较低，仍存在高严重程度行人事故聚集区。这种模式可能与迪拜工业城的存在有关，该区域吸引了员工和访客，周边有多条主要道路，且设有允许交通连续通行、行驶速度较高的无信号交叉口（如环形交叉口）。这些条件可能会增加事故发生时造成严重行人伤害的风险，因此有必要在该地区有针对性地实施交通稳静化和行人安全措施。这一发现与Song等人（2021年）报告的结果一致；该研究指出，工业土地利用区域发生行人致命伤害的概率高出8%。其余地区呈现统计上不显著的聚集区，这表明这些区域的行人事故呈随机空间分布。

4. 讨论与建议

本节讨论研究结果，并概述可从这些结果中得出的主要建议。

4.1. 讨论

本研究观察到的时间模式反映了交通与行人需求、运行条件及用户行为之间的相互作用。对于所有碰撞事故而言，傍晚时段事故频率较高，与交通需求高峰相吻合；而深夜和清晨时段尽管碰撞事故数量较少，却出现了更高的严重程度，这表明交通拥堵减少可能会使行驶速度提高，进而加剧碰撞严重程度。其他促成因素可能包括能见度降低、驾驶员疲劳，以及深夜时段的高风险驾驶行为

。空间热点分析进一步印证了这些发现，在迪拜北部和西北部以及主要城际走廊沿线识别出具有统计显著性的严重程度热点。这些区域具有城市活动密集、道路布局复杂和干道设施通行能力高等特点；在此类区域，异质交通流以及频繁的合流与转向行为会增加发生高能量碰撞的可能性。综合时间和空间分析结果可知，严重碰撞事故集中在交通暴露高且行驶速度高的环境中。

涉行人碰撞事故呈现出不同的模式。尽管行人事故频率在深夜时段达到峰值，但行人伤害严重程度在较大的时间尺度上没有显著变化。相反，行人伤害严重程度更多受到空间背景和道路环境特征的影响。空间分析显示，行人伤害严重程度热点与行人事故频率最高的区域并不重合。在人口稠密的城市中心，交通稳静化、信号控制过街设施和交通拥堵可能会降低伤害严重程度，尽管行人冲突频繁；而在行人基础设施有限、行驶速度较高的环境中，即便事故频率较低，也可能造成严重后果。

总体而言，结果表明，整体碰撞事故和涉行人交通事故的碰撞严重程度由不同机制所致。整体碰撞严重程度反映了时段运行条件与高风险道路环境的共同作用，而行人伤害严重程度则主要受空间因素影响。这些发现凸显了开展因地制宜分析的重要性，有助于制定有针对性且适用于特定地点的交通安全干预措施。

4.2. 建议与启示

结果凸显了采取有针对性、以数据为依据的交通安全政策的重要性；这些政策应体现迪拜碰撞严重程度在时间和空间上的差异。夜间严重碰撞事故比例较高，说明有必要制定针对特定时段的安全管理策略。交通管理机构应考虑在选定路段实施较低的夜间限速，以应对驾驶员警觉性下降、疲劳加重，以及深夜时段交通不拥堵所带来的较高行驶速度。还应辅以强化自动化执法措施，例如设置测速摄像头和采用雷达监测，以遏制夜间更为普遍的高风险驾驶行为。改善道路照明也有助于进一步降低夜间时段观察到的较高严重程度风险。

在城市北部和西北部，以及迪拜—艾因公路沿线识别出的统计显著的严重碰撞事故空间热点，凸显了基于地点的干预优先排序的重要性。这些走廊将受益于全面的道路安全审计、针对高风险交叉口的几何设计改进，以及升级交通控制设施。将干预措施重点投向统计显著热点，而不是在全路网范围内采取一刀切措施，可提高安全投资的效率和成效。

行人事故严重程度呈现出的不同空间模式，进一步凸显了采取以严重程度为重点的行人安全干预措施的必要性。在一些碰撞事故发生频率较低、但结果更为严重的区域，观察到了高严重程度的行人热点；这些区域通常与高速干道和工业用地相关。在此类环境中，应优先考虑设置行人安全岛、在主干道走廊建设立体行人过街设施、局部降低限速、采取实体交通稳静化措施以及改善道路照明，以减轻伤害严重程度，而不应只着眼于降低碰撞事故发生频率。

鉴于碰撞频率与严重程度模式之间存在明显差异，建议交通运输部门采用按严重程度加权的安全管理实践。这包括定期更新按严重程度加权的空间热点分析，并持续监测具有统计显著性的高风险地点和一天中的时段。采用此类实践

有助于开展主动、以数据为依据的安全干预措施，并促进对其长期有效性进行系统评估。

5. 结论

本研究分析了阿联酋迪拜整体交通碰撞事故及涉行人碰撞事故的时间和空间分布模式，尤其关注碰撞严重程度。时间分析考察了碰撞频率和严重程度在小时、每周及每月层面的变化。研究采用卡方检验和克拉默V系数，评估时间特征（即一天中的时段、星期几和月份）与碰撞严重程度之间的关联。空间模式则通过基于Getis-Ord Gi* 统计量的严重程度加权空间热点分析，以及反距离加权（IDW）插值进行考察。

结果显示，整体交通碰撞事故的频率和严重程度均存在明显的时间差异。傍晚和夜间时段、星期三至星期五，以及二月至五月期间的碰撞频率较高。涉行人事故呈现出独特的时间分布特征，其发生率在深夜时段较高，而在不同星期几和月份之间的变化相对有限；星期三和星期四以及2025年4月的平均值略高。统计分析表明，时间因素与整体碰撞事故严重程度之间存在显著关联，但效应量较小。值得注意的是，与下午发生的碰撞事故相比，夜间时段发生的碰撞事故属于高严重程度的概率高出44%。相比之下，未发现时间因素与行人事故严重程度之间存在统计学上的显著关联。

空间分析显示，迪拜各地的事故严重程度存在明显的空间异质性。总体碰撞事故的严重程度热点分布于城市北部和西北部，以及连接迪拜与艾因的主要高速公路沿线（艾因—迪拜高速公路）。另一方面，行人事故严重程度热点主要分布在西南部地区，这可能受到工业用地以及设有无信号交叉口的高容量道路的影响。这些发现提供了宝贵的数据驱动见解，可用于支持有针对性、因地制宜的交通安全干预措施。

结果支持采取有针对性、数据驱动的交通安全策略。建议实施时间层面的措施，例如降低夜间限速、加强自动化执法以及改善道路照明，以减少夜间严重碰撞事故。在已识别的统计显著热点地区采取地点层面的干预措施，包括开展道路安全审计、改进道路几何设计以及实施行人优先措施，可进一步提高安全投资的成效。

本研究受到若干与数据可用性相关的限制。交通事故记录未包含有关致因因素的详细信息，例如碰撞成因、碰撞时的车速、驾驶员或行人的年龄、车辆类型或道路功能等级，因此难以评估影响碰撞频率和严重程度的潜在行为及道路特征。此外，缺乏全市范围的社会经济数据和建成环境数据，无法将其与碰撞记录整合，因而限制了对这些因素如何影响碰撞结果的评估。

未来研究应将这一框架扩展至更多碰撞类别，例如车辆与车辆碰撞、翻车、自行车事故和涉动物事故，以支持在迪拜采取更全面、以数据为依据的交通安全规划方法。纳入与道路设计、交通流量、速度特征、土地利用和环境条件相关的解释变量，将进一步增强因果解释。

作者贡献声明

作者确认其对论文的贡献如下：**Nael Alsaleh**：概念化、方法论、数据整理、调查、正式分析、软件、可视化、监督、撰写—初稿以及撰写—审阅与编辑。**Noura Falis**：数据整理、软件、可视化、撰写—初稿。**Tareq Alsaleh**：概念化、方法论、正式分析、可视化、撰写—初稿以及撰写—审阅与编辑。**Farah Ba Fakih**：数据整理、撰写—初稿。

致谢

作者谨此感谢迪拜政府和迪拜警察局通过 Dubai Pulse 开放数据平台公开提供交通事故数据。

生成式人工智能使用声明

AI 工具（即 ChatGPT）仅用于语法检查和语言润色，未用于生成任何原创内容。作者根据需要审阅并编辑了内容，并对已发表文章的内容承担全部责任。

参考文献

K. Aati、M. Houda、S. Alotaibi、A. M. Khan、N. Alselami 和 O. Benjeddou。《高密度城市道路交通事故分析：地质技术交通与 ArcGIS》。交通工程，16：100256，2024年。doi：10.1016/j.treng.2024.100256。H. Abuzaid、R. Almashhour 和 G. Abu-Lebdeh。《迈向可持续发展：基于神经网络的阿联酋交通相关影响对道路使用者的预测》。可持续性，16(3)：1092，2024年。doi：10.3390/su16031092。S. Al Amir。《人口激增，阿联酋道路事故不断增加》。《国家报》，2025年2月。网址：
h
t
t
p
s://
w
w
w.
t
h
e
n
ationalnews.com/news/uae/2025/02/26/uae-road-accidents-on-the-rise-as-population-surges/。访问日期：2025年11月23日。A. Al-Omari、M. Alsaleh 和 N. Shatnawi。《交通事故的时空分析与严重程度预测》。*Engineered Science*，34：1472，2025年。doi：10.30919/es1472。K. Alkaabi。《交通事故热点区域识别及驾驶员行为与道路事故分析》。《交通研究跨学科视角》，22：100929，2023年。doi：10.1016/j.trip.2023.100929。T. Alsahfi。《利用地理信息系统对加利福尼亚州主要城市道路交通事故进行时空分析》。*ISPRS*国际地理信息期刊，13（5）：157，2024年。doi：10.3390/ijgi13050157。T. Augustine 和 S. Shukla。《使用机器学习方法预测道路事故》。载于*2022*年第二届先进计算与工程创新技术国际会议（*ICACITE*），第808–811页。IEEE，2022年。Y. Berhanu、D. Schroeder、B. Teklu 和 E. Alemayehu。《道路交通事故空间分析：识别热点以提升埃塞俄比亚亚的斯亚贝巴的道路安全》。*Cogent* 工程，10（2）：2269655，2023年。doi：10.1080/23311916.2023.2269655。R. Bhele、S. Dhungana、D. Chimoriya、A. Sapkota 和 S. Ghorasaini。《利用地理信息系统对道路交通事故进行时空分析》。《国际工程技术期刊》，2(1)：1–18，2024年。doi：10.3126/injet.v2i1.72464。迪拜警察局。《交通事件》，2025年。网址：https://www.dubaipulse.gov.ae/data/dp-traffic/dp_traffic_incidents-open。访问日期：2025年6月4日。联邦竞争力与统计中心。《交通事故——事故类型》。 https://uaestat.fcsc.gov.ae/，2025年。访问日期：2025年11月23日。A. Getis 和 J. K. Ord。《利用距离统计分析空间关联》。《地理分析》，24(3)：189–206，1992年。P. Gorzelanczyk。《天气条件和道路类型对交通安全的影响》。《欧洲交通研究》，2：100042，2025年。K. Hazaymeh、A. Almagbile 和 A. H. Alomari。《基于地理空间技术的交通事故热点时空分析》。*ISPRS*国际地理信息期刊，11（4）：260，2022年。E. Hovenden 和 G.-J. Liu。《运用空间分析技术识别大墨尔本地区具有统计显著性的交通事故热点》。《道路安全期刊》，31(4)：36–58，2020年。

E. Imreizeeq、J. N. Al-Karaki 和 A. Gawanmeh。与近期交通事故数据集相关因素的统计分析：一项实证研究。*International Journal of Quality Engineeringand Technology*，9(1):1–19，2023年。doi: 10.1504/ijqet.2023.10054068。S. Jaradat、T. I. Alhadidi、H. I. Ashqar、A. Hossain 和 M. Elhenawy。约旦高速公路交通事故的模式研究：基于文本挖掘方法的发现。*Results in Engineering*，26:104413，2025年。doi: 10.1016/j.rineng.2025.104413。M. L. McHugh。卡方独立性检验。*Biochemia medica*，23(2):143–149，2013年。doi: 10.11613/BM.2013.018。S. Nakao、K. Sawada、A. Keler 和 J.-D. Schmöcker。对交叉口周边导致交通事故的土地利用和兴趣点进行分析。*IATSS Research*，49(1):42–48，2025年。P. Pala、N. Basilio、V. Cavallo、P. Bifano、F. Bella 和 J.-M. Auberlet。白天、黄昏和夜间视觉条件对行人过街决策的影响。*SSRN Electronic Journal*，2024年。doi: 10.2139/ssrn.4893378。网址：https://ssrn.com/abstract=4893378。H. Shin 和 J. Lee。韩国交通事故的时间冲击。*IEEE Access*，8: 38380–38390，2020年。L. Song、Y. Li、W. Fan 和 P. Liu。运用混合Logit方法分析北卡罗来纳州行人与车辆碰撞事故中的行人伤害严重程度：考虑一天中的时段和星期几。*Trafficinjury prevention*，22(7):524–529，2021年。世界卫生组织。2021—2030年道路安全行动十年。技术报告，世界卫生组织，日内瓦，瑞士，2021年。网址：
h
t
t
p
s://
w
w
w.
who.int/teams/social-determinants-of-health/safety-and-mobility/decade-of-action-for-road-safety-2021-2030。访问日期：2025年11月23日。世界卫生组织。《2023年全球道路安全状况报告》。技术报告，世界卫生组织，2023年。网址：
h
t
t
p
s://
w
w
w.who.int/teams/social-determinants-of-health/safety-and-mobility/global-status-report-on-road-safety-2023。访问日期：2025年11月23日。