

文章编号:1000-1638(2025)03-0325-12

DOI:10.13484/j.nmgdxzbk.20250311

基于区域攻击策略的 城市群综合客运网络抗毁性仿真*

李飞跃,李成兵,聂士达,赵雅宁
(内蒙古大学交通学院,呼和浩特 010070)

摘要:城市群综合客运网络的稳定是城市群发展的关键。为探究该网络在灾害和事故中的抗风险能力,提出一种基于 Multi-layer Louvain 算法的多层社区划分模型,在考虑各交通网络层层间连接权重信息的基础上,构建了城市群多层加权客运网络模型,细化了多层模块度公式,并提出了基于社区内连接强度的多节点失效区域攻击策略与基于社区间连接强度的多边失效区域攻击策略模拟范围性灾害的影响。以呼包鄂乌城市群为例,分析多层客运网络的结构特性及抗毁性。研究表明,在蓄意攻击下,多层加权客运网络的抗毁性低于随机区域攻击策略,且关键区域失效时,城市群客运网络可能面临中断风险。此外,多节点失效区域攻击策略对多层客运网络的影响大于多边失效区域攻击策略。所提方法有助于理解城市群综合客运网络的结构和性能,能更好地应对潜在的风险和挑战,促进城市群的可持续发展。

关键词:城市群综合客运网络;多层社区检测算法;网络结构;区域攻击策略;抗毁性

中图分类号:U113 **文献标志码:**A

城市群综合客运网络是城市群内外人员流动和资源共享的重要支撑,同时也是城市群安全稳定的重要保障。然而,随着城市群规模的不断扩大和客运需求的快速增长,该网络日益复杂。受政策、地理限制等因素影响,客运网络呈现出高度模块化特征,这种结构在提高局部效率的同时,也使城市群面临自然灾害、人为事故和恐怖袭击等潜在威胁,尤其在应对范围性灾害时,易引发连锁效应,导致系统性的大规模功能失效。因此,研究城市群综合客运网络的抵抗损毁能力对于提升其韧性和抗毁性具有重要意义。

近年来,自然灾害或设施故障导致客运网络受损的案例屡见不鲜,并呈现出高频化和多样化的趋势。例如,2022年8月17日,青海省因持续强降雨引发暴雨洪涝灾害,西宁市大通县青林乡、青山乡等地出现瞬时强降雨引发山洪,致使道路、桥梁和水利等基础设施损毁严重,交通运输一度中断。又如,2022年1月8日,青海省海北州门源县发生6.9级地震(震源深度10 km),局部地区交通和市政设施严重受损,极大地影响了当地居民的日常出行和生活。此外,2023年全国多地因降雨引发暴雨预警,铁路部门为确保列车运行安全,不得不对途经暴雨预警区域的部分列车采取停运或路线区段临时降速等措施。同时,系统故障或突发事件频发也进一步削弱了城市群客运网络的运行效率与稳定性。

* 收稿日期:2024-11-03; 修回日期:2024-12-26

基金项目:国家自然科学基金项目(62063023);内蒙古自然科学基金项目(2023MS05036);内蒙古自治区高等学校青年科技英才支持计划项目(NJYT22099)

作者简介:李飞跃(1997-),男,安徽亳州人,2022级硕士研究生。E-mail:921534155@qq.com

通信作者:李成兵(1982-),男,安徽安庆人,教授,博士。主要从事交通运输系统仿真与优化研究。E-mail:bingbingnihao2008@126.com

上述案例充分暴露了当前客运网络在面对范围性灾害时的脆弱性,凸显了提升交通基础设施抗毁性和综合应急管理能力的必要性与紧迫性。未来,加强对城市群综合客运网络抵抗损毁能力的系统性研究,不仅有助于应对各类潜在威胁,也将为保障城市群的可持续发展提供重要支撑。

目前,国内外学者在交通网络抗毁性方面的研究多聚焦于单一交通方式或城市内部公交、地铁的组合。冯树民等^[1]基于网络遭受攻击的严重程度分析上海市轨道交通网络抗毁性,得出交通网络在遭受较强攻击时抗毁性较差;牟能冶等^[2]对城市快递网络进行脆弱性分析,得出节点遭受连续蓄意攻击会使网络迅速崩溃;曲迎春等^[3]根据地铁刷卡数据建立北京市和深圳市的公共交通双层网络模型,对城市轨道交通网络脆弱性进行深层次分析,得出常规公交网络会降低整体网络的脆弱性;沈犁等^[4]采用不同的攻击策略对公交-地铁复合网络级联失效进行研究,得出复合网络整体效能优于各单一网络;马敏等^[5]通过构建基于客流加权的城市轨道交通网络模型并改进抗毁性评价指标对西安市轨道交通网络进行分析;Jo等^[6]综合考虑了公交和地铁两种模式的耦合网络模型,分析交通网络的拓扑性和鲁棒性。然而,对城市群综合客运网络方面的研究相对较少。胡斐等^[7]分析关中平原城市群在单点攻击模式下的网络性能变化,得出小城市更具脆弱性;李成兵等^[8]将不同交通子网进行复合,构建城市群综合客运交通网络模型,研究复合网络的级联抗毁性;马书红等^[9]考虑吸收能力、缓冲能力和可恢复能力,借助空间网络分析工具对关中平原城市群进行韧性分析;Chen等^[10]构建脆弱性与韧性评估模型,研究粤港澳大湾区在遭受多情景攻击时网络性能的变化;刘寅等^[11]通过构建空中交通系统多层网络,得出多层网络较单层网络的抗毁性更强;Liu等^[12]通过构建成渝城市群铁路网络级联故障模型,研究融合铁路网络和单一网络的级联故障。聂士达等^[13]基于MATSim对城市群综合客运网络在突发事件下的应急疏散模型进行了仿真研究,结果表明旅客在疏散路径的选择时更偏向于火车站点。然而,这些研究通常对交通网络进行简单地映射聚合,多侧重于研究交通网络物理结构,没有充分考虑网络层异质性及层间关系对抗毁性的影响。

近年来,运用社区检测算法分析交通网络抗毁性的研究越来越多。Sperli^[14]设计了一种基于卷积神经网络和邻接矩阵拓扑特征的自动社区检测模型;Yildirimoglu等^[15]通过在公交路线、乘客轨迹和车辆轨迹上独立运行Louvain算法,分析城市三层交通网络,得出不同实体的城市规模运动模式可以形成地理上紧密连接的社区;刘迪洋等^[16]采用Louvain算法确定网络社区结构,利用模拟退火算法提升单个社区内部鲁棒性,并使用改进的重连边策略提升社区间的鲁棒性,从而在网络鲁棒性优化过程中尽可能保留网络的原始社区结构;林鹏飞等^[17]基于北京市轨道交通实际客流数据构建加权有向网络,采用Infomap算法根据出行需求进行社团划分,可以有效识别网络中的社区结构。以上研究为城市群抗毁性研究提供了新的思路。

在攻击策略的研究上常采用随机攻击与蓄意攻击方式。王永岗等^[18]采用基于节点度和介数的攻击策略对云南省综合客运网络进行脆弱性研究;孔建国等^[19]采用基于节点度、介数和优先删除位于网络几何中心节点的攻击策略对西南管制区域网络进行抗毁性分析;林兆丰等^[20]采用基于度和介数的组合攻击策略分析广州市交通网络的破坏效率;肖明辉^[21]研究交通网络层互补关系在区域攻击下的武汉轨道交通脆弱性;彭小晗^[22]提出基于时刻表的互补系统可达性计算方法,研究高铁和航空系统的区域脆弱性。这些研究多侧重于针对单个节点、连边的累计失效进行抗毁性分析,泛化攻击场景,对范围性灾害引发的区域失效策略研究相对较少且未考虑多层网络结构关系与网络层权重异质性对整体抗毁性的深层次影响。

目前,关于城市群综合客运网络社区结构在区域攻击策略下的抗毁性研究尚有不足。因此,本文提出一种考虑层间关系,以实际出行时间、换乘时间与费用加权的城市群多层加权客运网络模型,结合多层社区检测算法分析网络结构,全面掌握复杂网络全局特性,探索范围性灾害对网络的影响机制。以呼包鄂乌城市群为例,基于社区划分结果制定区域攻击策略进行抗毁性仿真。本文的研究不仅有助于识别网络中脆弱区域,也为提升城市群交通系统的抗灾能力提供重要参考依据。

1 多层加权客运网络社区划分模型

1.1 城市群多层加权客运网络构建

城市群多层客运网络 G 由公路网络层、铁路网络层、航空网络层等城际出行公共交通方式作为层内连边,以及城市内部公共交通网络层作为层间连边组成,采用 SpaceL 模型构建多层客运网络。多层加权客运网络图 $G = (\mathcal{G}, \mathcal{L}, \mathcal{A}, \mathcal{W})$, \mathcal{G} 为各个交通网络层集合, \mathcal{L} 为层间网络集合, \mathcal{A} 表示超邻接矩阵, \mathcal{W} 表示加权邻接矩阵。其中, $\mathcal{G} = \{G_\alpha; \alpha \in \{1, 2, \dots, l\}\}$, l 表示网络的层数, 图 $G_\alpha = (V_\alpha, E_\alpha)$, 其中 V_α, E_α 分别表示第 α 网络层节点集合与连边集合。 $\mathcal{L} = \{E_{\alpha\beta} \subseteq V_\alpha \times V_\beta; \alpha, \beta \in \{1, 2, \dots, l\}, \alpha \neq \beta\}$, 其中 $E_{\alpha\beta}$ 表示第 α 网络层与第 β 网络层层间连边集合。

城市群超邻接矩阵 \mathcal{A} , 其中 $\mathbf{A}^\alpha = [a_{ij}^\alpha]$ 表示第 α 层层内关系邻接矩阵, $\mathbf{A}^{\alpha\beta} = [a_{ij}^{\alpha\beta}]$ 表示第 α 层与第 β 层层间关系邻接矩阵, 表示为

$$\mathcal{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^1 & \mathbf{A}^{12} & \cdots & \mathbf{A}^{1l} \\ \mathbf{A}^{21} & \mathbf{A}^2 & \cdots & \mathbf{A}^{2l} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{A}^{l1} & \mathbf{A}^{l2} & \cdots & \mathbf{A}^l \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{N \times N}, N \text{ 表示节点总数}, N = \sum_{\alpha=1}^l |V_\alpha|, \text{ 邻接矩阵中元素定义为}$$

$$a_{ij}^\alpha = \begin{cases} 1 & (i, j) \in E_\alpha, i \text{ 与 } j \text{ 有连边} \\ 0 & (i, j) \notin E_\alpha, i \text{ 与 } j \text{ 无连边} \end{cases},$$

$$a_{ij}^{\alpha\beta} = \begin{cases} 1 & (i, j) \in E_{\alpha\beta}, i \text{ 与 } j \text{ 有连边} \\ 0 & (i, j) \notin E_{\alpha\beta}, i \text{ 与 } j \text{ 无连边} \end{cases},$$

式中, a_{ij}^α 为 \mathbf{A}^α 中元素, 当节点 i 与节点 j 之间连通时 $a_{ij}^\alpha = 1$, 否则 $a_{ij}^\alpha = 0$; $a_{ij}^{\alpha\beta}$ 为 $\mathbf{A}^{\alpha\beta}$ 中元素, 当节点 i 与节点 j 之间连通时 $a_{ij}^{\alpha\beta} = 1$, 否则 $a_{ij}^{\alpha\beta} = 0$ 。

城市群加权邻接矩阵 \mathcal{W} 形式如 \mathcal{A} , 其中层内边权与层间边权分别定义为如下

(1) 层内边权

$$w_{ij}^\alpha = \frac{a_{ij}^\alpha}{\lambda_T T_{ij} + \lambda_S S_{ij} + \lambda_P P_{ij}},$$

式中, w_{ij}^α 为网络层 α 层内边权, T_{ij} 为网络层 α 层内节点 i 与节点 j 之间的实际行车时间, S_{ij} 为网络层 α 层内节点 i 与节点 j 之间的候车换乘时间, P_{ij} 为网络层 α 层内节点 i 与节点 j 之间出行所需费用, λ_T, λ_S 与 λ_P 为对应权重系数。

(2) 层间边权

$$Z_{ij}^k = \lambda_T T_{ij}^k + \lambda_S S_{ij}^k + \lambda_P P_{ij}^k,$$

$$w_{ij}^{\alpha\beta} = \frac{a_{ij}^{\alpha\beta}}{\min_{k_i \in K} (\lambda_T T_{ij}^k + \lambda_S S_{ij}^k + \lambda_P P_{ij}^k)},$$

式中, Z_{ij}^k 为非同层节点 i 与节点 j 之间出行的第 k_i 种换乘方式的综合成本, K 为换乘方式总数, T_{ij}^k 为非同层节点 i 与节点 j 之间的实际行车时间, S_{ij}^k 为非同层节点 i 与节点 j 之间的候车换乘时间, P_{ij}^k 为非同层节点 i 与节点 j 之间的换乘费用, $w_{ij}^{\alpha\beta}$ 为第 α 网络层与第 β 网络层层间边权。

图 1 为城市群多层加权客运网络模型, 其中 α, β 与 γ 分别表示城际出行中存在的任意网络层, 当同一城市内两种城际出行站点间可以通过公交、地铁、出租车、共享单车以及步行等 K 种换乘方式通达时, 则根据目标函数 Z_{ij}^k 的最小值在这两个站点之间构建层间连边并赋予权重 $w_{ij}^{\alpha\beta}$ 。

1.2 基于 Multi-layer Louvain 算法的多层社区划分模型

多层社区检测算法用于识别多层网络中的社区结构, 其目标是将节点分配到每个社区, 以增强社区内节点的相似性并降低不同社区之间的相似性。Multi-layer Louvain 算法是一种基于多层模块度的社区检测算法, 能够在不同网络层之间进行社区层次传递与优化。该算法可以处理多个层次构成

的网络数据,通过将不同层次的节点在不同社区间进行转移,并计算节点移动的模块度增益,直到无法进一步提高模块度为止,从而揭示出多层网络中的最佳社区结构,多层网络社区划分可视化如图 2 所示。

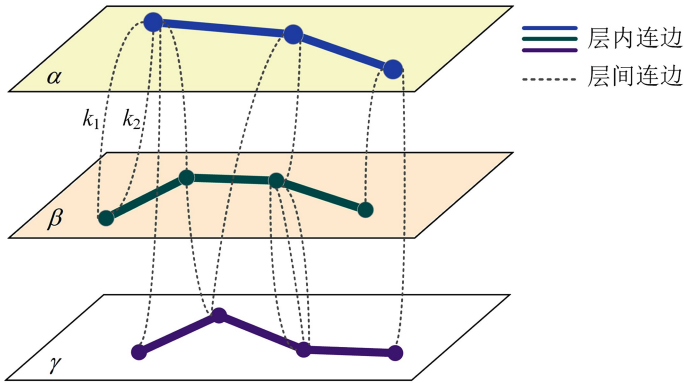


图 1 城市群多层加权客运网络模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of multi-layer weighted passenger transport network model of urban agglomerations

1.2.1 多层模块度得分

在 Multi-layer Louvain 算法中,模块度被用来衡量社区内部联系相对于外部联系的强弱,较高的模块度值可以更好地区分社区划分结果,其物理含义是社区内节点的边权之和与随机情况下边权之和的差异。

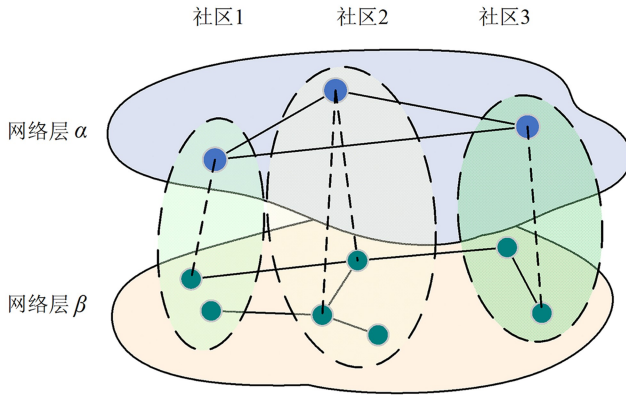


图 2 多层网络社区划分示意图

Fig. 2 Schematic diagram of multi-layer network community division

(1) 社区内连接强度 A_{ij}

在进行社区划分时,准确描述社区的内部结构至关重要。社区内连接强度 A_{ij} 是度量社区内部节点之间连接紧密程度和连接质量的重要指标,可用于判断节点是否归属同一个社区,进而识别相互连接紧密的节点。对于包含 n 个节点的社区 c 中的每一对节点 i 和 j , A_{ij} 公式为

$$A_{ij} = \sum_{i=j=1, i \neq j}^n a_{ij}。$$

(2) 社区内总节点度之积 H_c

节点度是指一个节点与其他节点之间的连接数量大小,通常用于度量节点在网络中的重要程度。在多层社区检测中,节点度之积可以体现社区内部结构信息,表示社区内节点对度之积的总和。对于社区 c 中的每一对节点 i 和 j ,社区内总节点度之积 H_c 公式为

$$Hc = \sum_{i,j} h_i h_j,$$

式中, h_i, h_j 分别表示节点 i, j 的权重。社区内总节点度之积 Hc 用于衡量社区内节点对之间的连接强度。如果社区内的两个节点 i 和 j 之间存在连接, 那么它们的节点度之积 $h_i h_j$ 将被考虑。因此, Hc 是社区内所有节点对权重之积的总和。

(3) 多层社区模块度 Q

多层社区模块度分为单层社区内部模块度 Q_L 、跨层模块度 Q_C 和总模块度 Q_M , 都是用于评估社区结构质量的指标。单层社区内部模块度表示社区内连接强度与社区内总节点度之积的差异, 用来衡量社区内节点之间是否紧密连接; 跨层模块度是针对多层网络的一种模块度计算指标, 考虑不同层次的社区内部连接和社区之间连接的部分, 以综合评估社区划分的质量。总模块度是将单层社区内部模块度和跨层模块度综合在一起的指标, 它表示整个网络的社区划分质量, 综合考虑了社区内部的连接强度以及跨层次社区之间的连接情况。 Q_L, Q_C, Q_M 具体公式为

$$Q_L = \frac{1}{2E_l} \left(A_{ij} - \frac{Hc}{2E_l} \right),$$

$$Q_C = \frac{1}{2E_l + E_{c_{ij}}} \left(A_{ij} - \frac{Hc}{2E_l + E_{c_{ij}}} \right),$$

$$Q_M = 2(1 - \mu) \left(\frac{1}{2 \sum E_l + E_{c_{ij}}} \left(A_{ij} - \frac{Hc}{2 \sum E_l + E_{c_{ij}}} \right) \right),$$

式中, A_{ij} 表示社区内连接强度; E_l 表示层 l 中的社区内连接的总权重; $E_{c_{ij}}$ 表示跨越不同层次的社区间的连接总权重; μ 用于调整社区内部模块度与社区之间模块度的相对重要性, 取值范围为 $[0, 1]$ 。

1.2.2 Multi-layer Louvain 算法的社区发现步骤

步骤 1: 初始化。输入城市群多层加权客运网络数据。

步骤 2: 分配社区标签。将城市群多层加权客运网络中的每个节点视为一个单独的社区, 为每个交通网络层上的每一个节点分配一个社区标签 c_i , 并计算每个节点在每个层次上的初始模块度得分 Q_L 。

步骤 3: 进行社区优化。对城市群综合客运网络中每个层次 l , 迭代执行以下步骤: (1) 遍历每个节点, 将节点移动到与其相邻节点中的某一社区 c , 以最大化 Q_L 。(2) 如果通过移动节点可以提高 Q_L , 则保留此移动, 并继续迭代。(3) 继续迭代, 直到没有进一步提高 Q_L 为止。

步骤 4: 进行层次间优化。在现有社区的基础上, 在不同交通网络层之间进行社区优化, 尝试将社区从只包含单个交通网络层次的社区转化为包含多个交通网络层次的多层社区, 以最大化总模块度得分 Q_M 。如果社区包含多个层次, 则还会考虑参数 μ 。

步骤 5: 合并相同层次或不同层次上相似的社区, 以提高总模块度得分 Q_M 。

步骤 6: 重复迭代执行社区优化、层次间优化和合并社区的步骤, 直到 Q_M 不再提高。

步骤 7: 输出最终的社区划分结果 $\delta = \{c_1, c_2, \dots, c_{N_c}\}$ 。

2 城市群综合客运网络抗毁性评价

2.1 社区划分图视角下的城市群综合客运网络抗毁性攻击策略

公共交通网络抗毁性一般通过改变网络结构来影响网络整体性能, 网络分解是城市群综合交通网络抗毁性研究的关键, 而网络凝聚与网络分解具有相同的目标, 即寻找整个网络中薄弱、连接松散的部分, 城市群多层加权客运网络社区划分如图 3 所示。本部分在多层社区检测算法的基础上将城市群综合交通网络进一步简化, 将每一个独立的社区看成超节点重新构造网络, 超边权重 $w_{c_i c_j}$ 表示社区间的连接强度, 其值为两个社区之间所有初始连边权重之和, 从而在社区划分图的视角下采取不同的攻击策略进行抗毁性分析。

网络抗毁性研究可分为随机攻击与蓄意攻击两种攻击模式。随机攻击是指节点或连边在不受人为影响的情况下被破坏,例如沙尘暴、暴雪、暴雨、城市内涝、严寒等极端天气事件;蓄意攻击是指交通网络中的节点或连边按照一定的次序进行有目的地移除,例如城市工程施工、公共安全事件和外部攻击等。这些事故属于区域攻击,具有范围性,所以运用 Python 中的 NetworkX 库在社区划分图视角下进行复杂网络分析,并对社区内部网络和社区间网络进行攻击。本文提出的区域攻击策略分为以下两种,抗毁性仿真流程如图 4 所示。

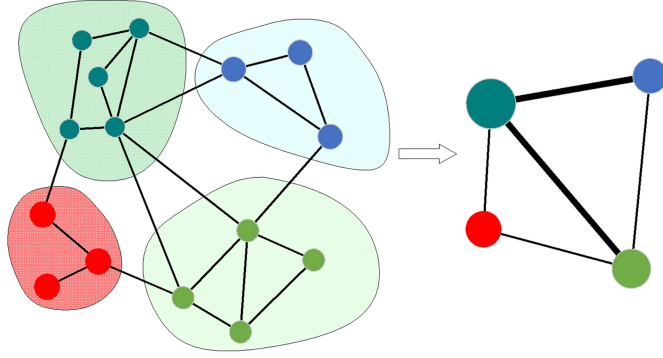


图 3 城市群多层加权客运网络社区划分图

Fig. 3 Community division diagram of multi-layer weighted passenger transport network of urban agglomerations

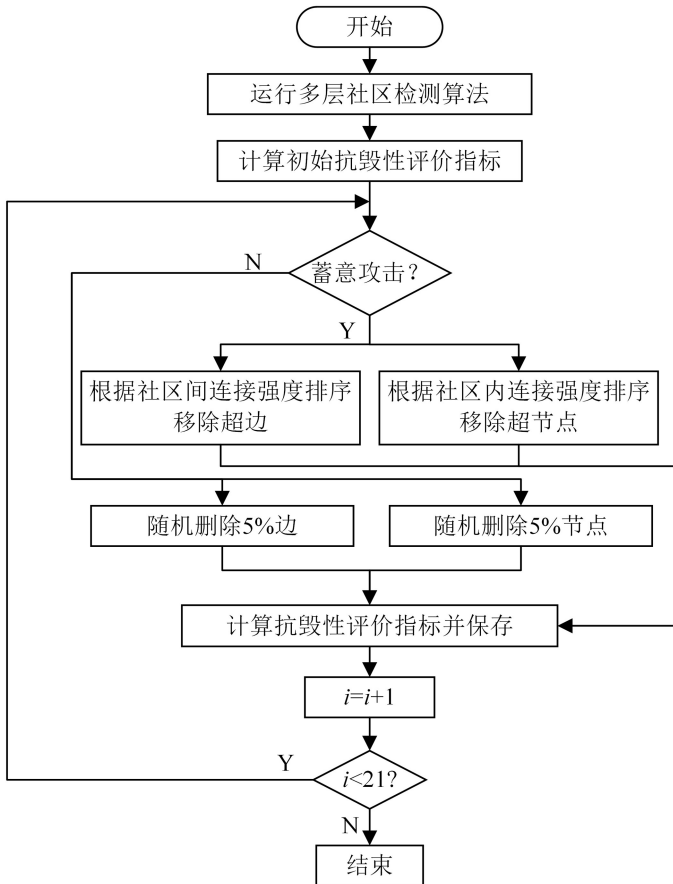


图 4 抗毁性仿真流程图

Fig. 4 Invulnerability simulation flow chart

(1) 多节点失效区域攻击策略

随机攻击下,根据 Python 中 `random.sample()` 函数从给定的基于社区内连接强度排序的节点集合中随机选取一定比例的节点进行移除,当社区内的节点全部失效时则移除该超节点,同时删除与之相连的边;蓄意攻击下,按照社区内连接强度进行排序,不断迭代,移除当前网络中社区内连接强度最高的超节点集合并删除与之相连的边,计算抗毁性评价指标并保存,迭代攻击遍历全部超节点直至该网络中节点的失效率达到 100%。

(2) 多边失效区域攻击策略

随机攻击下,根据 Python 中 `random.sample()` 函数从给定的基于社区间连接强度排序的连边集合中随机选取一定比例的连边进行移除,然后遍历每个节点,判断其是否已经成为孤立节点(即与其他节点没有连边),如果是则移除该孤立节点;蓄意攻击下,按照社区间连接强度进行排序,不断迭代,移除当前网络中社区间连接强度最高的超边集合,遍历每个超节点,判断其是否成为孤立节点,如果是则移除该节点,计算抗毁性评价指标并保存,迭代攻击遍历全部超边直至该网络中边的失效率达到 100%。

2.2 抗毁性评价指标

城市群综合交通网络抗毁性常用的评价指标为最大连通子图的相对大小和网络效率,在城市群多层加权客运网络社区检测模型的框架下,进一步改进最大连通子图的相对大小与网络效率,并加入圈数率^[23]作为抗毁性评价指标。

(1) 传统最大连通子图的相对大小只是简单考虑节点数量的变化,并未考虑节点本身强度的差异,故定义加权最大连通子图的相对大小为 $S = s'/s$, 式中, s' 表示最大连通子图中节点权重之和, s 表示整个网络中所有节点权重之和。

(2) 加权网络效率 R 的计算公式为

$$R = \frac{2}{|\delta| (|\delta| - 1)} \sum_{c_i, c_j \in V, i < j} \frac{w_{c_i c_j}}{d_{c_i c_j}}$$

式中, $|\delta|$ 为网络中超节点数目, $d_{c_i c_j}$ 为网络中超节点 c_i 与超节点 c_j 之间的最短距离。

(3) 在城市群客运网络中,圈数 γ 是指网络在遭受攻击时,可以提供给出行者备选通行方案的数目,公式为 $\gamma = D - |\delta| + 1$, D 为网络中超边的数。圈数率 γ^T 是圈数与超节点总数的比值, $\gamma^T = \gamma/|\delta|$,它能够代表提供备用道路的能力。

3 实例分析

3.1 研究区域及综合客运网络模型构建

以呼和浩特市、包头市、鄂尔多斯市和乌兰察布市为例,进行城市群多层客运网络的特性及抗毁性分析。实验数据来自各个城市交通网络,覆盖 12 个区、1 个县级市、1 个矿区、10 个县和 14 个旗,包含 4 个机场、30 个客运火车站和 63 个汽车站,使用 QGIS 软件构建呼包鄂乌城市群拓扑网络,如图 5 所示。

本文所需数据与参数取值如下:

(1) 建模所需路线运营数据来源于铁路 12306APP,地铁运营信息来源于呼和浩特市地铁官网。

(2) 关于 S_{ij} 的取值,航空层取 120 min,铁路层取 25 min,公路层取 20 min。关于 S_{ij}^k 的取值,经测算呼包鄂乌城市群内部公共交通平均发车间隔为 10 min(假设客流均匀到站,故取 5 min);步行出行换乘时间和共享单车出行换乘时间来源于高德地图;出租车换乘花费时间与费用来源于高德打车。

(3) 分别采用层次分析法(AHP)和熵值法计算乘客实际行车时间、候车换乘时间和出行费用的主客观权重系数,主观和客观结合可以更好地反映实际情况,综合权重 λ_T 、 λ_S 和 λ_P 的值分别为 0.42、0.32 和 0.26。

根据呼包鄂乌城市群综合客运网络节点的分布信息,如表 1 所示,少部分节点具有较高的权重,而大部分节点具有较低的权重,这种连接极度不均匀的网络结构使得呼包鄂乌城市群综合客运网络具有高度的抗毁性。

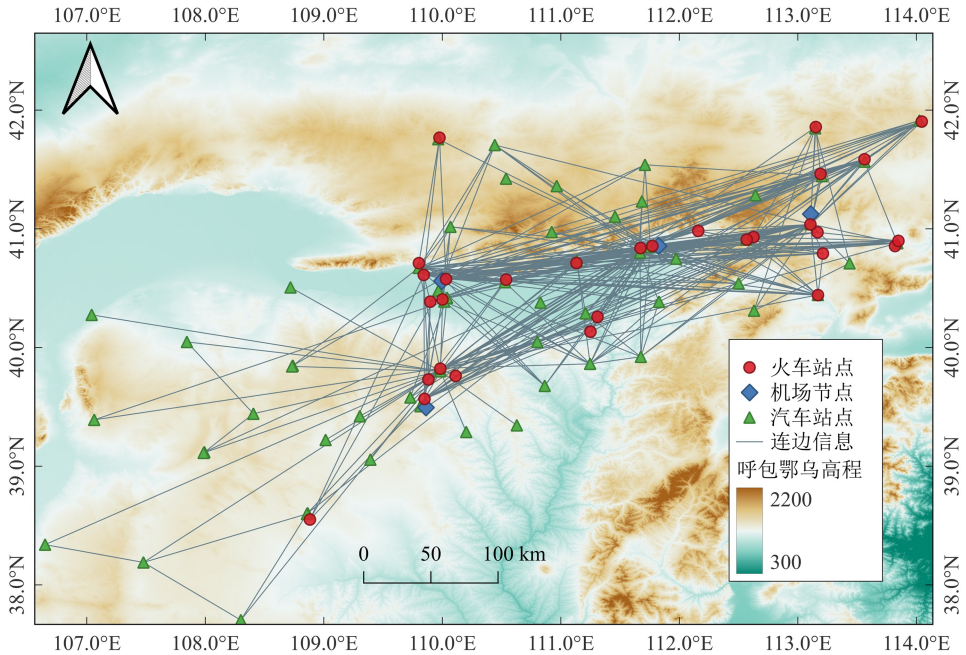


图 5 呼包鄂乌客运拓扑网络

Fig. 5 Passenger transportation topology network in Hohhot-Baotou-Ordos-Ulanqab urban agglomeration

表 1 部分节点信息

Table 1 Partial node information

节点序号	节点名称	节点类型	经度/(°)	纬度/(°)	节点权重
1	呼和浩特站	火车站	111.672210	40.83702	1.712156
8	白云鄂博站	火车站	109.976112	41.76731	0.038232
13	东胜东站	火车站	110.112240	39.75991	0.256195
19	集宁南站	火车站	113.106047	41.03649	0.907117
30	呼和浩特长途客运站	汽车站	111.755509	40.84842	1.794683
40	包头长途客运总站	汽车站	110.008685	40.58573	0.635734
58	沙圪堵汽车站	汽车站	110.864181	39.67672	0.038325
78	集宁长途汽车站	汽车站	113.107070	41.03959	0.425484
92	白塔国际机场	机场	111.826401	40.85556	0.329478
93	东河机场	机场	109.996667	40.55972	0.375361

3.2 网络结构分析

使用 Multi-layer Louvain 算法对呼包鄂乌城市群客运站进行划分,如图 6 可知,呼包鄂乌城市群交通节点被分为 4 个社区,且社区存在显著的地域分布特征,最优社区划分结果中,社区 1 包括乌兰察布站、兴和北站、集宁南站、丰镇站、商都站、化德站、卓资东站、集宁长途汽车站、凉城汽车站等 24 个节点;社区 2 包含呼和浩特站、呼和浩特东站、察素齐站、托克托东站、呼和浩特长途汽车站、

呼和浩特通达汽车南站、清水河汽车站等 21 个节点；社区 3 包括包头站、包头东站、萨拉齐站、白云鄂博站、昆都仑召站、达拉特旗西站、包头长途客运总站、包头昆区长途客运站等 18 个节点；社区 4 包括鄂尔多斯站、东胜站、东胜西站、东胜东站、乌审旗站、东胜客运中心站、达布察克汽车站、棋盘井汽车站等 31 个节点。

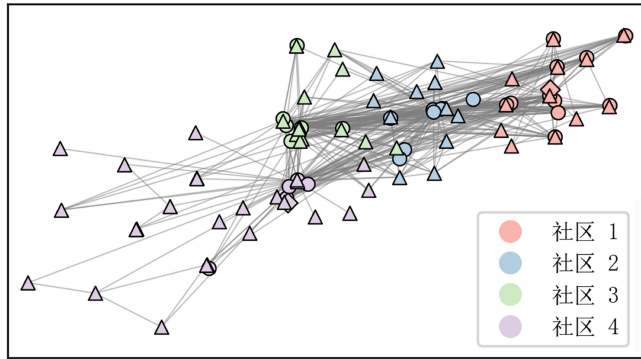


图 6 多层社区检测划分结果

Fig. 6 Results of multi-layer community detection division

对 4 个社区内的节点权重进行统计分析,各社区内连接强度分别为 4.299、6.967、4.643、3.014；各社区间连接强度分别为 0.462、0.333、0.149、0.503、0.549、0.348。如图 7 所示,4 个社区内的节点权重差异较为明显。其中社区 1 的权重中位数较低,表示社区 1 的节点权重大部分集中在较低范围,箱体相对较长,表明数据较分散,并且异常值较少,表明只有少数高权重节点；社区 2 的权重中位数较高,表明节点权重较高,异常值显著高于其他节点,具有较高的影响力；社区 3 的中位数与社区 1、社区 2 差别不大,节点权重仍集中在较低范围,并且异常值较少,数据偏斜,分布离散程度较大；社区 4 的中位数最低,表明节点权重较低,箱体最短,表明数据更为集中,且有多个节点权重显著高于其他节点。4 个社区的节点权重整体较低,绝大部分数据集中在箱体内,社区 1、2、3 的中位数和权重分布较为相似,社区 4 的节点权重明显较低,社区 2 的异常值较高,显示了更大的权重波动范围,这些少数节点对社区内部起主导作用。

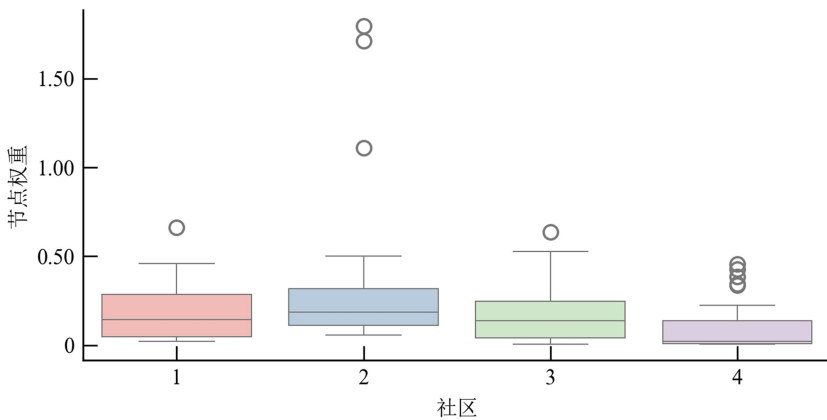


图 7 社区网络节点权重分布

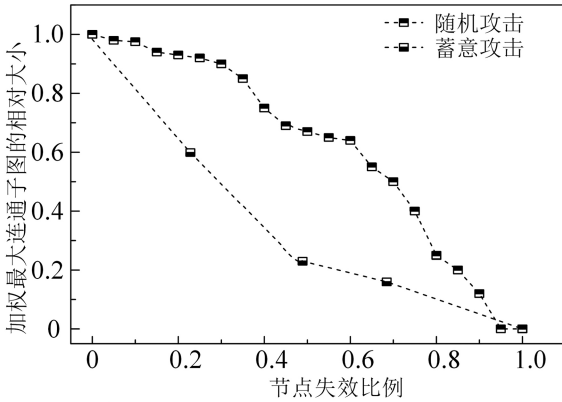
Fig. 7 Node weight distribution in community network

3.3 城市群综合客运网络抗毁性分析

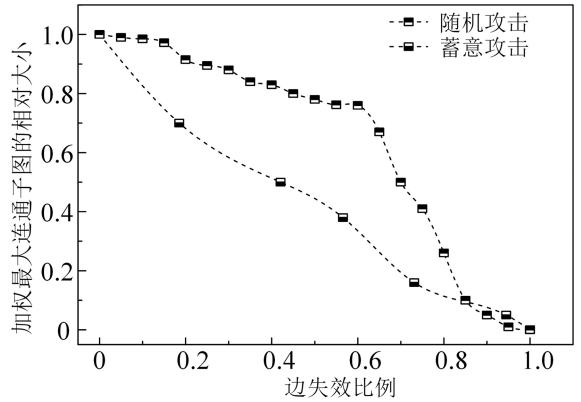
在多个区域受到攻击失效时,各指标变化如图 8 所示。图 8(a)–(f) 分别表示在不同攻击方式下加权最大连通子图的相对大小、加权网络效率以及圈率的变化情况。图 8(a)、(c)、(e) 分别展示了在多节点失效区域攻击策略下各指标的变化情况,特别是当蓄意攻击导致社区 2 和社区 3 同时失效

时,加权最大连通子图的相对大小降至初始网络的 22%,加权网络效率变为初始网络的 13%,圈数率降至 0,显著反映出这两个社区同时失效时,城市群客运网络受损严重,没有能力给旅客提供城际出行的备用路线。相反,当社区 1 和社区 4 同时失效时,加权最大连通子图的相对大小、加权网络效率和圈数率下降趋势较为缓慢,显示出城市群客运网络在承受这些区域失效时具有较强的抗毁能力。

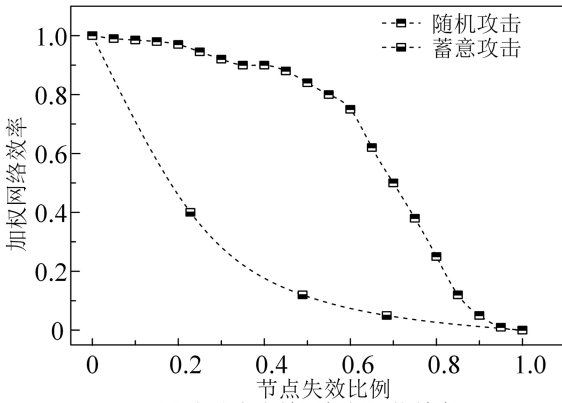
在多边失效区域攻击策略下,如图 8(b)、(d)、(f)所示,蓄意攻击下加权最大连通子图的相对大小和加权网络效率呈现先平缓下降后快速下降的趋势,并且当攻击比例达到 65%左右时趋于平稳。圈数率的下降最为显著,但相较于多节点失效区域攻击策略下圈数率的变化,仍显示出一定的缓和趋势,表明网络对社区 1 和社区 2 失效时具有一定的抗毁性。



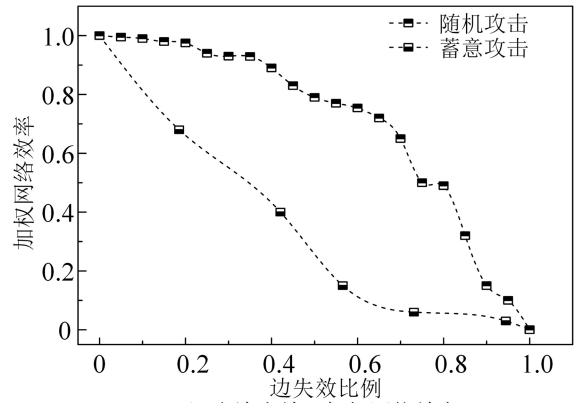
(a) 多节点失效下加权最大连通子图的相对大小



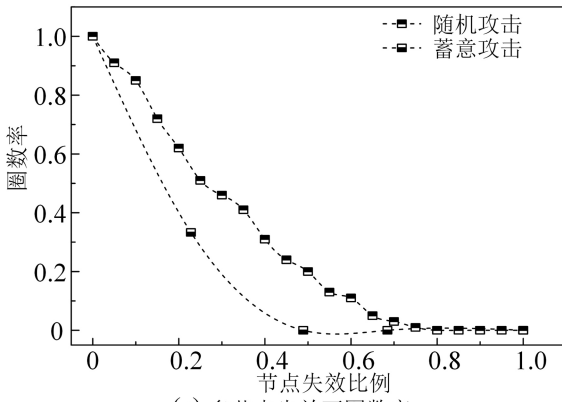
(b) 多边失效下加权最大连通子图的相对大小



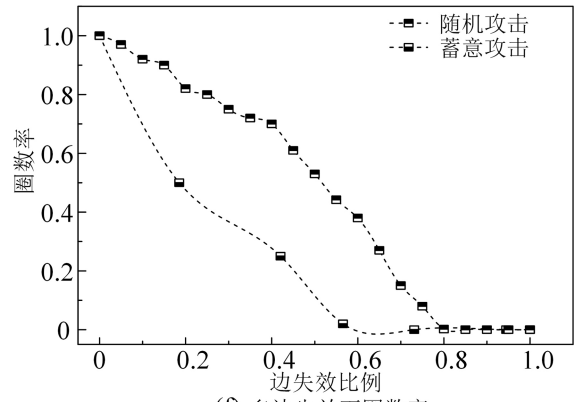
(c) 多节点失效下加权网络效率



(d) 多边失效下加权网络效率



(e) 多节点失效下圈数率



(f) 多边失效下圈数率

图 8 区域失效下网络抗毁性指标变化情况

Fig. 8 Changes for network invulnerability indicators under regional failure

呼包鄂乌城市群综合客运网络的抗毁性仿真表明,蓄意攻击对网络抗毁性的影响显著高于随机攻击。蓄意攻击下当区域失效比例达到10%时,多节点失效下的城市群客运网络抗毁性各项指标下降更为严重,网络呈现出对多边失效区域攻击策略的抗毁性,并且随着攻击范围的扩大,当区域失效达到18%时,各区域出行路线的可供选择方案数量急剧下降,增加了网络各区域之间的中断风险。而随机攻击下各项指标呈现先平缓下降后快速下降的趋势,加权复合网络呈现出对随机攻击具有较强的抗毁性。其中,以呼和浩特市节点为主的社区2和以包头市节点为主的社区3失效将严重影响整体网络性能。

4 结语

多层加权客运网络在面对随机区域攻击策略时表现出较强的抗毁性,但在蓄意攻击下,网络维持抗毁性的能力明显下降。尤其是基于多节点失效的区域攻击策略对网络的破坏更为严重,导致网络结构迅速崩溃。相比之下,基于多边失效的区域攻击策略对网络连通性的影响相对较小,但仍会显著降低提供城际出行备选路线的能力,增加中断风险。未来研究可以进一步细化攻击策略,考虑不同攻击强度和多种情景下的区域攻击策略对网络抗毁性的影响,构建考虑决策行为影响的城市群多层加权客运网络韧性评估模型。此外优化算法、降低计算复杂度也是未来的重点研究方向。

参考文献:

- [1] 冯树民,麻海洲,吕天玲,等.考虑攻击程度的城市轨道交通网络抗毁性分析[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2019,43(3):379-384.
- [2] 牟能冶,康秋萍,贾程方.突发事件影响下的城市快递网络脆弱性评估[J].中国安全科学学报,2020,30(12):125-132.
- [3] 曲迎春,徐仲之,龚航,等.城市轨道交通网络脆弱性分析[J].铁道科学与工程学报,2016,13(11):2276-2283.
- [4] 沈犁,张殿业,向阳,等.城市地铁-公交复合网络抗毁性与级联失效仿真[J].西南交通大学学报,2018,53(1):156-163,196.
- [5] 马敏,胡大伟,刘杰,等.基于客流加权的城市轨道交通网络抗毁性分析[J].中国安全科学学报,2022,32(12):141-149.
- [6] JO S,GAO L,LIU F,et al. Cascading failure with preferential redistribution on bus-subway coupled network[J]. International Journal of Modern Physics C,2021,32(8):2150103.
- [7] 胡斐,黄嘉颖.韧性视角下关中城市群客运网络抗毁性研究[C]//面向高质量发展的空间治理:2020中国城市规划年会论文集.成都:中国城市规划学会,2021:1-10.
- [8] 李成兵,李云飞,吴鹏.考虑时间特性的城市群客运网络抗毁性研究[J].系统仿真学报,2022,34(9):2037-2045.
- [9] 马书红,武亚俊,陈西芳.城市群多模式交通网络结构韧性分析:以关中平原城市群为例[J].清华大学学报(自然科学版),2022,62(7):1228-1235.
- [10] CHEN M Y,LU H P. Analysis of transportation network vulnerability and resilience within an urban agglomeration:Case study of the Greater Bay Area,China[J]. Sustainability,2020,12(18):7410.
- [11] 刘寅,马继辉,任广建.基于多层空中交通网络的抗毁性分析[C]//2022世界交通运输大会(WTC2022)论文集(运输规划与交叉学科篇).武汉:中国科学技术协会,2022:363-371.
- [12] LIU S,YIN C S,CHEN D J,et al. Cascading failure in multiple critical infrastructure interdependent networks of syncretic railway system[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,2022,23(6):5740-5753.
- [13] 聂士达,李成兵,贺博威.基于MATSim的城市群客运网络疏散行为分析和策略研究[J].内蒙古大学学报(自然科学版),2023,54(5):491-498.
- [14] SPERLI G. A deep learning based community detection approach[C]//Proceedings of the 34th ACM/SIGAPP Symposium on Applied Computing. New York:ACM,2019:1107-1110.
- [15] YILDIRIMOGLU M,KIM J. Identification of communities in urban mobility networks using multi-layer graphs

- of network traffic[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018, 89: 254-267.
- [16] 刘迪洋,张震,张进. 基于社区结构的复杂网络鲁棒性优化策略[J]. 计算机工程, 2021, 47(8): 84-92.
- [17] 林鹏飞,翁剑成,付宇,等. 基于刷卡数据的轨道交通加权网络结构特征[J]. 吉林大学学报(工学版), 2020, 50(3): 956-962.
- [18] 王永岗,王龙健,刘志岗,等. 多模式复合交通网脆弱性测度[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(1): 195-207.
- [19] 孔建国,卢靖宇,李煜琨,等. 管制空域复杂网络模型构建及抗毁性分析[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(9): 3973-3981.
- [20] 林兆丰,王子鸣,高佩佩,等. 不同攻击策略下轨道交通网络鲁棒性分析[J]. 中国水运, 2024, 24(1): 61-63, 143.
- [21] 肖明辉. 基于区域攻击的城市公共交通互补网络脆弱性分析[J]. 信息通信, 2018(8): 1-5.
- [22] 彭小晗. 互补高铁与航空交通系统的脆弱性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [23] 赵国锋,苑少伟,慈玉生. 城市路网的复杂网络特性和鲁棒性研究[J]. 公路交通科技, 2016, 33(1): 119-124, 146.

Invulnerability Simulation of Urban Agglomeration Comprehensive Passenger Transportation Network Based on Regional Attack Strategies

LI Feiyue, LI Chengbing, NIE Shida, ZHAO Yaning

(*Institute of Transportation, Inner Mongolia University, Hohhot 010070, China*)

Abstract: The stability of comprehensive passenger transportation network is crucial for the development of urban agglomeration. To explore the invulnerability of this network in the events of disasters and accidents, based on the Multi-layer Louvain community detection algorithm, a multi-layer weighted passenger transportation network model is constructed for urban agglomerations, taking into account the inter-layer connection weight information. In order to simulate the impact of large-scale disasters, this method refined multi-layer modularity formula and proposed multi-node failure region attack strategies based on the internal connection strength of communities, as well as multi-edge failure region attack strategies based on inter-community connection strength. Using the Hohhot-Baotou-Ordos-Ulanqab urban agglomeration as a case study, this study analyzed the structural characteristics and invulnerability of multi-layer passenger transportation network. The results show that the invulnerability of multi-layer weighted passenger transportation network is lower under deliberate attacks than that under random region attack strategies. Moreover, when key areas fail, the urban agglomeration passenger transportation network may face the risk of disruption. Additionally, the multi-node failure region attack strategy has a greater impact on multi-layer passenger transportation network than the multi-edge failure region attack strategy. The method proposed helps to better understand network structure and performance of comprehensive passenger transportation network, better deals with potential risks and challenges, and promotes the sustainable development of urban agglomerations.

Key words: urban agglomeration comprehensive passenger transportation network; multi-layer louvain; network structure; region attack strategy; invulnerability