

考虑级联失效与恢复策略的中欧班列网络恢复研究

周文路

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2025年1月28日; 录用日期: 2025年2月21日; 发布日期: 2025年2月28日

摘要

本研究聚焦于中欧班列网络在级联失效情境下的恢复性, 系统评估了不同恢复策略对网络恢复效果的影响。鉴于中欧班列网络规模庞大且节点与边的高度依赖性, 其在外部冲击或内部故障时易发生级联失效, 对网络稳定运行构成重大威胁。为此, 本文基于中欧班列拓扑结构构建了恢复性模型, 结合仿真分析, 探讨了恢复时间步、恢复节点比例与失效节点扩展之间的交互作用。研究结果表明, 不同恢复策略在应对特定突发事件时具有显著差异, 合理的恢复时机与策略选择可显著提升网络的稳定性和恢复效率。本文为优化恢复策略、提升中欧班列网络在突发事件中的韧性提供了理论支持和实践指导。

关键词

级联失效, 中欧班列, 恢复性

Research on the Recovery of the China Railway Express Network Considering Cascading Failures and Recovery Strategies

Wenlu Zhou

School of Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Jan. 28th, 2025; accepted: Feb. 21st, 2025; published: Feb. 28th, 2025

Abstract

This study focuses on the resilience of the China Railway Express (CR Express) network under

cascading failure scenarios, systematically evaluating the impact of different recovery strategies on network recovery performance. Given the large scale of the CR Express network and the high interdependence between nodes and edges, it is prone to cascading failures during external shocks or internal faults, posing a significant threat to the network's stable operation. To address this, a resilience model based on the CR Express topology was developed, and combined with simulation analysis, the interactions between recovery time steps, the proportion of recovered nodes, and the expansion of failed nodes were explored. The results show that different recovery strategies exhibit significant differences in responding to specific emergencies. Proper timing and strategy selection for recovery can significantly enhance the network's stability and recovery efficiency. This study provides theoretical support and practical guidance for optimizing recovery strategies and improving the resilience of the CR Express network in the face of emergencies.

Keywords

Cascading Failure, China Railway Express, Resilience

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在当前全球物流和供应链网络中，中欧班列作为连接中国与欧洲的主要国际运输通道，承担着至关重要的运输功能。随着全球经济一体化进程的加快，跨境物流需求日益增长，中欧班列的作用愈加突出[1]。它不仅为中欧之间的贸易提供了高效、稳定的运输支持，还在促进地区经济合作、推动“一带一路”倡议的实施中发挥了关键作用[2]。然而，由于中欧班列网络的规模庞大、复杂性高、以及节点和边之间的高度依赖性，这使得网络在遭遇外部冲击或内部故障时，容易发生级联失效，造成整个系统的严重影响[3]。例如，单一节点或边的失效可能迅速扩展，导致更多节点和边相继失效，形成灾难性的后果，影响整个网络的运营效率[4]。因此，如何评估和提升中欧班列网络在面临突发事件时的恢复能力，已成为保障其长期稳定运行的关键问题。

恢复性研究关注的不仅是网络在遭遇突发事件后的恢复速度和能力，还涵盖了如何在恢复过程中有效配置资源、制定合适的恢复策略，以及选择恰当的恢复时机[5]。特别是针对中欧班列这一复杂的跨境物流网络，研究其在面对节点失效、货流中断等突发事件时，不同恢复策略的效果，对于提升网络的韧性和抗风险能力具有重要意义[6]。恢复性研究的核心问题之一是如何在网络遭遇级联失效时，及时恢复关键节点和边，以防止故障蔓延，并保障网络的快速恢复[7]。通过深入探讨不同恢复策略对中欧班列网络的恢复效果，不仅可以帮助识别系统中关键的薄弱环节，还能为制定切实可行的应急预案和恢复措施提供理论支持。

本研究通过构建一个基于中欧班列网络拓扑结构的恢复性模型，探讨在级联失效及恢复过程中的不同节点恢复策略对网络恢复能力的影响。研究将重点分析不同恢复时间步的选择对网络恢复效果的影响，进一步研究恢复节点的比例、失效节点的扩展以及它们之间的相互作用。通过仿真分析，评估各种恢复策略在实际场景中的效果，结合中欧班列的具体运作模式，提出优化的恢复策略。最终，本研究旨在为中欧班列在面对突发事件时提供系统性、有效的恢复性优化建议，从而提升其在复杂、动态环境下的恢复能力和整体系统的稳定性，为保障中欧班列网络的可持续发展提供科学依据和实践指导。

2. 模型

2.1. 网络节点指标

2.1.1. 度与度分布

为了描述 CRN, 节点度(k)是指直接连接到节点的其他边的数量。度分布 $p(k)$ 是所有节点中度为 k 的节点的概率[8]。

$$p(k) = \frac{n(k)}{\sum_{j=1}^{\infty} n(j)} \quad (1)$$

其中 $n(k)$ 表示度为 k 的节点数, $n(j)$ 表示度为 j 的节点数。在复杂网络模型中, 如果网络中的节点度 k 和度分布 $p(k)$ 满足幂律分布, 则网络具有无标度特性[9]。

2.1.2. 主要节点评价指标

(1) 节点度

节点度(k_i)是指连接到节点 i 的边的数量, 表示节点 i 的位置属性。

$$k_i = \sum_{j \in N} a_{ij} \quad (2)$$

其中 a_{ij} 表示网络的邻接矩阵。如果在节点 i 和节点 j 之间存在直接边, 则 $a_{ij} = 1$; 否则, $a_{ij} = 0$ 。

(2) 节点介数

节点介数是网络中最短路径通过给定节点的比例, 是基于路径的重要评价指标。

$$B_i = \sum_{s \neq i \neq t} \left(\frac{\sigma_{st}(i)}{\sigma_{st}} \right) \quad (3)$$

其中 B_i 是节点介数, σ_{st} 是节点 s 和节点 t 之间的所有最短路径的数量, $\sigma_{st}(i)$ 是节点 s 和节点 t 之间通过节点 i 的最短路径的数量。

(3) 节点强度

节点强度表示与给定节点相连的边中的流量之和。

$$s_i = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^n w_{ij}}{n} \quad (4)$$

其中 s_i 为节点 i 的强度, n 为节点个数, w_{ij} 为相邻两个 i 之间的货流量。

2.2. 级联失效模型

CML 是一个时间和空间为离散变量, 状态为连续变量的动力学系统, 传统的 CML 模型只考虑了一个拓扑耦合因素[10]。但是在中欧班列运营网络中, 级联失效的原因不仅与网络拓扑结构有关, 还与网络中的货流量有关。现有的研究中, 因此, 本文构建了一个考虑货流的 CML 模型来分析中欧班列运营网络的级联失效。该模型为中欧班列运营网络的分析提供了理论基础。下面的公式(5)表示了该模型:

$$x_i(t+1) = \left| (1 - \varepsilon_1 - \varepsilon_2) f(x_i(t)) + \frac{\varepsilon_1 \sum_{j=1, j \neq i}^N a_{ij} f(x_j(t))}{k_i} + \frac{\varepsilon_2 \sum_{j=1, j \neq i}^N w_{ij} f(x_j(t))}{s(i)} \right|, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

其中, $x_i(t+1)$ 表示节点 i 在 $t+1$ 时刻的状态值。当 $x_i(t+1)$ 在 $(0, 1)$ 范围内时, 表示节点处于正常运行状态; 如果 $x_i(t+1) \geq 1$, 节点 i 将会失效。 ε_1 表示节点间的拓扑耦合强度系数, 表示相邻城市间的相关性; ε_2 表示节点间的货流耦合强度系数, 通过城市间的实际货流来衡量网络货流合强度。对于 $\varepsilon_1, \varepsilon_2 \in (0, 1)$,

$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 < 1$; 例如 $\varepsilon_1 = 0.3$ 表示该节点有 30% 的状态变化来自其相邻节点拓扑结构改变的状态影响, $\varepsilon_2 = 0.3$ 表示该节点有 30% 的状态变化来自其相邻节点货流量改变的状态影响; 表示 a_{ij} 表示节点 i 和节点 j 间的连接, 如果存在连接则 $a_{ij} = 1$, 否则 $a_{ij} = 0$; k_i 表示节点 i 的度。 w_{ij} 表点 i 到节点 j 的货流量, $s(i)$ 表示直接连接到节点 i 的货流总和。 $f(x)$ 表示映射函数, 建立了 t 时刻和 $t+1$ 时刻节点状态值的联系, $f(x) = 4x(1-x)$, 当 $0 < 1$, $0 < f(x) < 1$ 。如果此时网络不受外部干扰, 则所有节点都将永远保持正常状态, 反之, 如果节点 i 在第 l 个时刻发生突发事件, ($x_i(l) \geq 1, l > 1$), 则节点 i 在此时失效, 并且失效节点的状态在后续的时刻被假定为 $x_i(t) = 0$ 。

$$x_i(t) = \left| (1 - \varepsilon_1 - \varepsilon_2) f(x_i(t-1)) + \frac{\varepsilon_1 \sum_{j=1, j \neq i}^N a_{ij} f(x_j(t-1))}{k_i} + \frac{\varepsilon_2 \sum_{j=1, j \neq i}^N w_{ij} f(x_j(t-1))}{s(i)} \right| + R \quad (6)$$

在第 t 个时刻, 中欧班列运营网络由于突发事件导致节点 i 无法运行, 导致节点状态为 0, 向节点 i 添加一个恢复力 $R(0 < R < 1)$ 来表示使节点正常运行, 增加恢复后的模型如公式(6)所示。在节点开始失效时(例如节点状态变为 0 后的一定时间内)触发恢复过程。恢复的强度或优先级基于网络中的其他未失效节点与失效节点的连接关系调整, 从而阻止失效的进一步扩散。基于节点强度、度和介数, 按照重要性设定恢复顺序, 优先恢复对货物流通影响最大的节点。

本研究所使用的模型已在先前研究中得到充分验证。例如, [11]构建了考虑货流和转运耦合的 CML 模型, 研究了中欧班列双层网络在遭遇突发事件时的脆弱性, 验证了其在模拟复杂网络级联失效方面的准确性。此外, [12]对模型的关键参数进行了敏感性分析, 结果表明模型对参数变化具有较高的鲁棒性, 能够确保研究结果的可靠性。

3. 中欧班列网络构建与特征分析

基于中欧班列网, 铁路 12306 网和一带一路门户网站的真实的数据, 用 Space L 法构建中欧班列运营网络拓扑模型, 节点表示城市, 并且如果两个城市之间有铁路连接, 则存在两个站之间的链路。链路的长度是城市之间的实际铁路距离。由于铁路运输线路具有双向交通特性, 拓扑模型被视为无向图 $G = \langle V, E \rangle$, V 是城市的集合, E 是 V 元素的边。此外, 网络的邻接矩阵为 $A = (a_{ij})_{n \times n}$, 表示城市 i 和 j 之间的连接, 定义为 $a_{ij} = \begin{cases} 1, & (i, j) \in E \\ 0, & (i, j) \notin E \end{cases}$ 。同样, 距离矩阵也可以表示为 $d_{ij} = \begin{cases} d_{ij}, & (i, j) \in E \\ 0, & (i, j) \notin E \end{cases}$, 其中 d_{ij} 表示城市的实际铁路距离。

统计结果表明, 中欧班列网络中有 20 个节点的度值为 3, 图 2(a)和图 2(b)验证了中欧班列运营网络是 L 空间中的无标度网络。此外, 在双对数坐标系下拟合了中欧班列运营网络的节点度和累积度分布, 如图 2(b)所示。中欧班列网络的累积度分布遵循幂律分布 $p(k) \sim 0.4058x^{-1.123}$ 。幂律指数为 0.4058, 表明中欧班列运营网络是一个无标度网络, 具有异质性。有几个站点被称为“致命”节点, 它们在整个网络中起着主导作用。这种异质性使得无标度网络更容易受到蓄意攻击。

计算 CRN 中各站点的节点度、介数和强度, 截取部分节点作为计算结果展示, 以三种计算指标结果对后续网络恢复性分析提供不同指标。

4. 网络恢复性分析

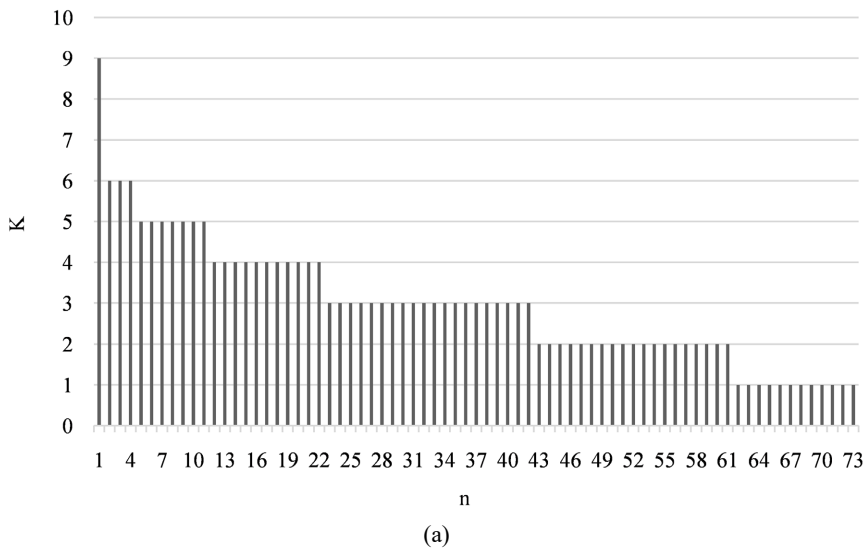
基于三种重要节点排名指标对网络进行恢复, 将网络分为重要节点和非重要节点两种类型, 重要节点在节点失效后的下一个时间立即恢复, 非重要节点在节点失效后的两个时间步后恢复。由第三章网络特征分析可以得出(图 1), 中欧班列网络容易遭受蓄意攻击的影响, 因此本节主要分析中欧班列网络在遭

受基于节点强度攻击、基于节点度攻击、基于节点介数攻击、基于边强度攻击、基于边介数攻击五种蓄意攻击的情况下网络的恢复性。选用级联失效规模(最大失效节点比例)和级联失效持续时间来分析不同策略下的网络恢复性，见表 1。



注：该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为(2019)1822 号的标准地图制作，底图无修改。

Figure 1. Schematic diagram of China Railway Express network topology
图 1. 中欧班列网络拓扑示意图



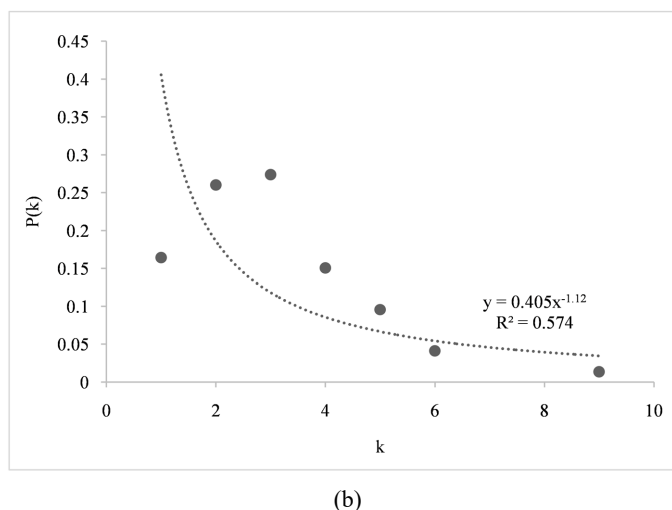


Figure 2. China Railway Express network topology feature analysis. (a) All node degree; (b) Degrees and degrees distribution

图 2. 中欧班列网络拓扑特征分析。(a) 所有节点度值；(b) 度与度分布

Table 1. Important nodes of the China Railway Express network (partial)

表 1. 中欧班列网络重要节点(部分)

基于节点度排名			基于节点强度排名			基于节点介数排名		
排名	城市	k	排名	城市	s	排名	城市	B
1	西安	9	1	西安	25341	1	西安	1048
2	武汉	6	2	重庆	14585	2	太原	631
3	乌兰察布	6	3	成都	11091	3	合肥	541
4	合肥	6	4	德阳	10178	4	乌兰察布	537
5	北京	5	5	兰州	8892	5	武汉	507
6	南京	5	6	武汉	7375	6	武威	469
7	齐齐哈尔	5	7	义乌	5645	7	九江	457
8	石家庄	5	8	郑州	5627	8	南昌	426
9	徐州	5	9	南京	5398	9	乌鲁木齐	410
10	郑州	5	10	济南	5181	10	济南	375

4.1. 不同恢复策略下网络恢复性分析

由表 2 可得，基于节点强度的恢复策略在节点强度攻击和节点度攻击中效果最佳。针对节点强度攻击，该策略能够显著降低失效节点比例(0.1757)且持续时间较短(12)，而在节点度攻击中，该策略的失效节点比例最低(0.1351)，显示出良好的恢复效果。然而，对于边相关攻击(边强度和边介数攻击)，该策略表现较弱，失效节点比例较高(分别为 0.1892 和 0.2027)，表明在应对此类攻击时，边相关特性对恢复策略提出了更高的要求。其次，基于节点度的恢复策略在节点强度攻击中的恢复效果较为理想(失效节点比例为 0.1486，持续时间为 10)。然而，该策略在节点度攻击中的表现最差，失效节点比例高达 0.2432，表明其在自适应应对自身相关攻击时存在明显不足。此外，该策略在边强度攻击(0.3649)和边介数攻击(0.3378)中的失效节点比例也较高，显示出对边相关攻击的防控能力有限。基于节点介数的恢复策略在节

点强度和节点度攻击中表现适中，失效节点比例分别为 0.1486 和 0.2432。然而，在节点介数攻击(0.2027)和边强度攻击(0.3649)中，该策略的恢复效果相对较弱，尤其是边强度攻击时的持续时间(10)显示其难以迅速抑制级联失效的扩展。

边相关攻击(边强度和边介数攻击)对所有恢复策略均构成较大威胁，失效节点比例和持续时间均表现为高值，尤其是在基于节点度和节点介数恢复策略中表现尤为明显。这表明边相关攻击的破坏力更强，需要更加综合的策略应对。单一恢复策略在应对多种类型的突发事件时存在局限性。基于节点强度、节点度和节点介数的综合恢复策略能够更好地兼顾不同攻击场景的需求，提高恢复效果和网络韧性。未来研究应重点探索多策略融合以及动态调整的恢复机制，结合网络中关键节点和边的特点，优化资源分配和恢复优先级，进一步提升网络在突发事件中的适应能力和稳定性。

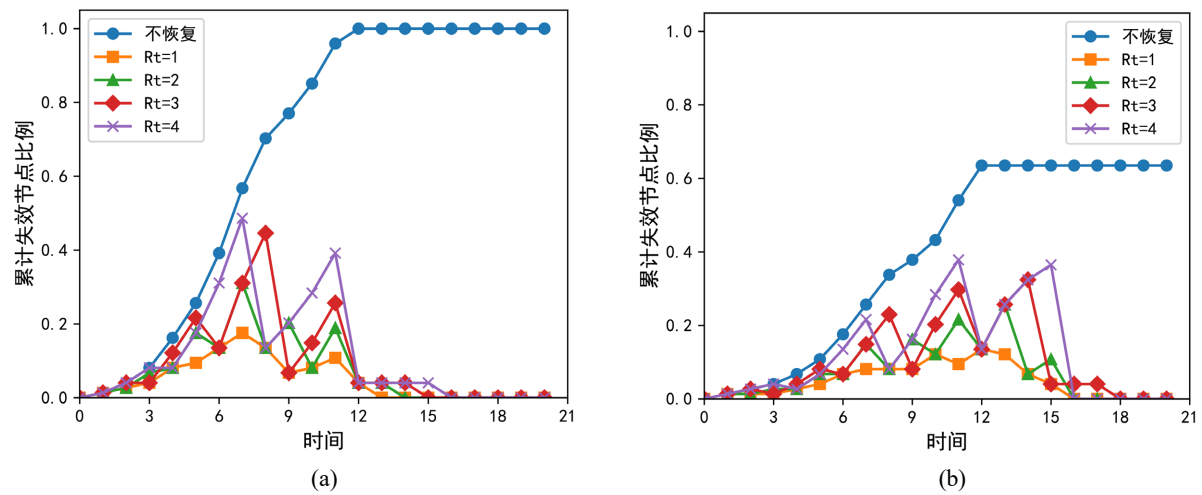
Table 2. Network resiliency under different recovery strategies

表 2. 不同恢复策略下网络恢复性

恢复策略	级联失效	突发事件	基于节点强度	基于节点度	基于节点介数	基于边强度	基于边介数
		攻击	攻击	攻击	攻击	攻击	攻击
基于节点强度恢复	失效节点比例		0.17567	0.1351	0.1081	0.1891	0.2027
	级联失效持续时间		12	15	14	9	10
基于节点度恢复	失效节点比例		0.1486	0.2432	0.2027	0.3648	0.3378
	级联失效持续时间		10	10	15	10	11
基于节点介数恢复	失效节点比例		0.1486	0.2432	0.2027	0.36487	0.3378
	级联失效持续时间		10	10	15	10	11

4.2. 恢复时间分析

在突发事件发生后，节点的恢复时间对网络有着较为重要的影响，较早的恢复时间可能会导致网络点二次级联失效，过长的恢复时间可能会使网络严重受损，本节对节点度不同的恢复时间进行了分析。通过图 3 和图 4 可以清晰看出，不同恢复策略在恢复时机上的选择对网络恢复效果具有显著影响。较早的恢复操作通常能够有效减缓级联失效的扩展，迅速恢复关键节点的连通性，减少失效节点数量，从而显著提升网络的稳定性和恢复效率。



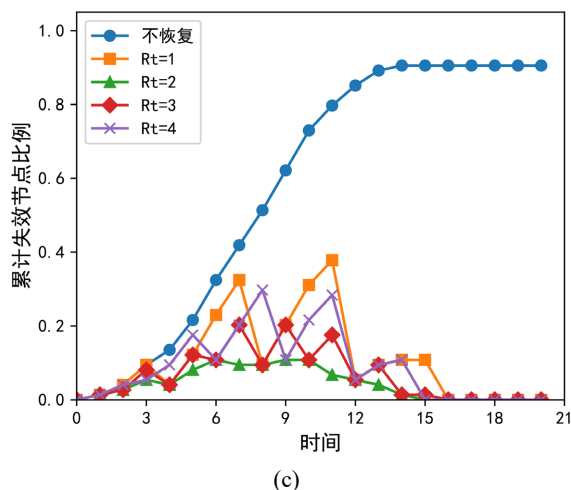


Figure 3. Analysis of network recovery time based on node attacks. (a) Attack based on node strength; (b) Attack based on node degree; (c) Attack based on node betweenness

图 3. 基于节点攻击下网络恢复时间分析。(a) 基于节点强度攻击；(b) 基于节点度攻击；(c) 基于节点介数攻击

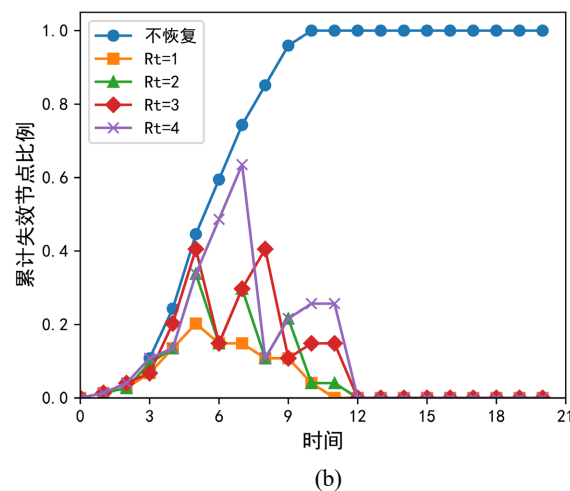
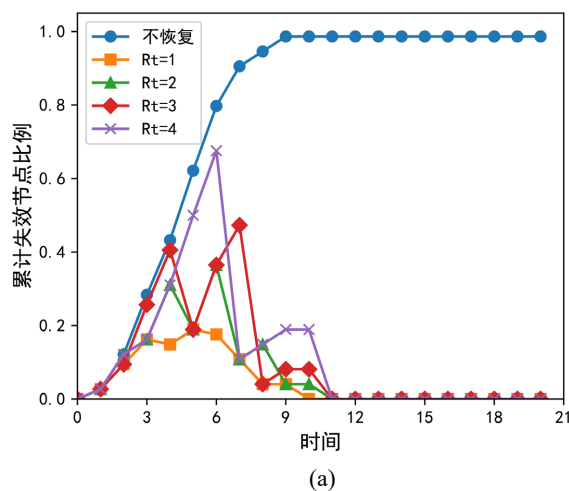


Figure 4. Analysis of network recovery time based on edge attacks. (a) Attacks based on edge strength; (b) Attacks based on edge betweenness

图 4. 基于边攻击下网络恢复时间分析。(a) 基于边强度攻击；(b) 基于边介数攻击

在基于边强度恢复策略(图 3(a))中,较早的恢复操作显著增加了恢复节点比例,有效抑制了级联失效的扩展。然而,随着恢复时机的推迟,失效节点比例的峰值虽有所降低,但恢复效果逐渐滞后,网络稳定性受到更大威胁。同样,基于节点度恢复策略(图 3(b))显示,较早恢复能够快速提升网络连通性,减少失效传播。然而,延迟恢复导致失效节点比例持续增加,恢复效果显著受限。基于节点介数的恢复策略(图 3(c))进一步说明了恢复时机的重要性。较早地恢复能够有效减缓级联失效的蔓延,使恢复节点比例快速提升。但随着恢复时间的延迟,失效节点比例逐渐增加,网络连通性难以有效恢复。类似的趋势也在基于边介数恢复策略(图 4(b))中体现,早期恢复显著减少了失效节点数量和失效比例的峰值,而较晚恢复则表现为进程滞后,效果有限。

总体来看,恢复策略的时机把握至关重要,较早恢复能够显著提高网络的恢复效果,抑制失效蔓延,确保网络的高效恢复;而较晚恢复则可能导致恢复效果受到显著限制,恢复进程缓慢,甚至无法有效恢

复网络的稳定性和功能。因此，合理选择恢复时机，对于提高网络韧性和应对突发事件至关重要。

5. 结论

本研究基于不同恢复策略对网络恢复性的分析，深入探讨了突发事件中恢复时机对网络恢复效果的影响。研究表明，恢复时机是影响网络恢复效果的关键因素。较早的恢复操作能够有效缓解级联失效的扩展，恢复关键节点的连通性，显著降低失效节点比例，从而提升网络的稳定性与恢复效率。具体来说，基于边强度、节点度、节点介数及边介数的恢复策略在早期恢复操作中表现出良好的效果，不仅快速增加了恢复节点比例，还显著降低了失效节点比例的峰值。然而，随着恢复时机的延迟，恢复效果显现出明显的滞后性，导致失效节点比例的峰值增大，恢复节点比例的增长速度减缓，甚至在某些情况下，恢复进程可能陷入停滞。尤其是在恢复操作延迟过长的情况下，网络连通性和稳定性已遭受严重破坏，导致恢复效果受到显著限制。

研究还表明，不同恢复策略在应对特定场景时存在显著差异。例如，基于节点度或节点介数的策略更适用于快速恢复核心节点的连通性，而基于边强度或边介数的策略则更适合强化关键链路的稳定性。然而，每种策略在资源有限的情况下也面临局限性，可能无法满足全局优化需求。针对不同的突发事件类型和网络结构特征，合理选择适用的恢复策略是提升网络韧性的关键。

因此，本文强调了在网络脆弱性分析和恢复策略制定过程中，合理把握恢复时机的重要性，并结合适用的恢复策略，以实现针对性的干预效果。及时开展恢复操作不仅能够有效抑制失效的蔓延，还能最大程度减少失效节点的扩展，帮助网络更快地恢复至稳定状态。未来研究应进一步聚焦不同网络环境和突发事件类型下的恢复优化问题，深入探索恢复策略的适用场景及局限性，分析其对网络其他性能指标(如效率、可靠性)的影响。此外，还应探讨资源分配和调度策略，以更全面地提高网络韧性，增强应对复杂突发事件的能力。

参考文献

- [1] 蒋雪莹, 王晓蕾, 朱道立. “一带一路”战略下的物流基础设施选址问题研究[J]. 上海管理科学, 2015, 37(5): 1-6.
- [2] 秦欢欢, 秦胜, 郑平标. 基于货物价值的中欧班列目标货源分析[J]. 铁道货运, 2016(8): 13-19.
- [3] 孙野. 基于复杂网络的中欧班列运输网络韧性分析[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2022.
- [4] 张琪胜, 汤银英, 陈思. 考虑单一枢纽点失效的中欧班列轴辐网络研究[J]. 铁道经济研究, 2020(3): 24-28+33.
- [5] 朱璋元, 王秋玲. 考虑级联失效与恢复接续性的复杂网络恢复动力学[J]. 计算物理, 2024, 41(2): 258-267.
- [6] 朱蔓. 突发事件下的城市轨道交通网络韧性评估与提升[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2022.
- [7] Ren, F., Zhao, T. and Wang, H. (2015) Risk and Resilience Analysis of Complex Network Systems Considering Cascading Failure and Recovery Strategy Based on Coupled Map Lattices. *Mathematical Problems in Engineering*, **2015**, 1-8. <https://doi.org/10.1155/2015/761818>
- [8] Strogatz, S.H. (2001) Exploring Complex Networks. *Nature*, **410**, 268-276. <https://doi.org/10.1038/35065725>
- [9] Albert, R. and Barabási, A. (2002) Statistical Mechanics of Complex Networks. *Reviews of Modern Physics*, **74**, 47-97. <https://doi.org/10.1103/revmodphys.74.47>
- [10] Kaneko, K. (1992) Overview of Coupled Map Lattices. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, **2**, 279-282. <https://doi.org/10.1063/1.165869>
- [11] Wang, B., Su, Q. and Chin, K.S. (2021) Vulnerability Assessment of China-Europe Railway Express Multimodal Transport Network under Cascading Failures. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, **584**, Article 126359. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2021.126359>
- [12] Sun, L., Huang, Y., Chen, Y. and Yao, L. (2018) Vulnerability Assessment of Urban Rail Transit Based on Multi-Static Weighted Method in Beijing, China. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, **108**, 12-24. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2017.12.008>