

基于复杂网络的大件运输安全风险耦合分析

李卓然, 赵婉如, 曾传华*

西华大学汽车与交通学院, 四川 成都

收稿日期: 2026年7月10日; 录用日期: 2026年9月7日; 发布日期: 2026年9月16日

摘要

随着我国经济发展, 大件运输需求快速增加, 运输涉及超重、超大、超长等特殊要求, 为从根源上厘清风险因素的动态交互性, 本文运用复杂网络理论和耦合模型对大件运输安全事故风险展开量化分析。通过收集国内大件运输事故数据, 运用扎根理论编码, 结合24Model识别出84个致因因素、8个事故类型及254条致因链条。引入复杂网络理论建立风险耦合网络, 分析得出该网络具有无标度与小世界特性。选择N-K模型定量分析风险耦合, 发现参与耦合风险的因素越多, 耦合值越大, 且“人的不安全行为-物的不安全状态”子系统联系紧密, 应重点防范两者耦合效应。基于风险解耦思想, 结合耦合过程提出风险解耦策略, 为大件运输安全风险提供管理参考。

关键词

大件运输, 复杂网络, 风险耦合, N-K模型

Coupling Analysis of Highway Heavy Cargo Transportation Safety Risk Based on Complex Network Theory

Zhuoran Li, Wanru Zhao, Chuanhua Zeng*

School of Automotive and Transportation Engineering, Xihua University, Chengdu Sichuan

Received: July 10, 2026; accepted: September 7, 2026; published: September 16, 2026

Abstract

With the development of China's economy, the demand for highway heavy cargo transportation has increased rapidly. Such transportation activities involve special requirements, including overweight, oversized, and overlength cargoes. To clarify the dynamic interactions among risk factors from a

*通讯作者。

文章引用: 李卓然, 赵婉如, 曾传华. 基于复杂网络的大件运输安全风险耦合分析[J]. 交通技术, 2026, 15(5): 614-627.
DOI: 10.12677/ojtt.2026.155053

fundamental perspective, this study applies complex network theory and a coupling model to conduct a quantitative analysis of highway heavy cargo transportation safety risks. Based on collected data on domestic highway heavy cargo transportation accidents, grounded theory coding was employed, and the 24Model was integrated to identify 84 causal factors, 8 accident types, and 254 causal chains. Complex network theory was then introduced to construct a risk coupling network, and the results indicate that the network exhibits both scale-free and small-world characteristics. The N-K model was further adopted to quantitatively analyze risk coupling. The findings show that the coupling value increases as more risk factors participate in the coupling process. Moreover, the subsystem composed of “unsafe human behaviors” and “unsafe conditions of objects” demonstrates particularly strong interactions, suggesting that the coupling effects between these two dimensions should be prioritized in risk prevention. Based on the concept of risk decoupling and the identified coupling process, this study proposes corresponding risk decoupling strategies, providing a reference for safety risk management in highway heavy cargo transportation.

Keywords

Heavy Cargo Transportation, Complex Network, Risk Coupling, N-K Model

Copyright © 2026 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

随着重大装备制造、能源工程和基础设施建设持续推进，公路大件运输需求快速增长[1]，运输对象逐渐呈现超重、超宽、超长以及组织协同要求高等特点。与普通货物运输相比，公路大件运输涉及路线勘察、车辆选型、货物装载加固、桥梁通行、交通组织、现场指挥和应急处置等多个环节，任何环节出现偏差都可能诱发安全事故，运输线路障碍及通行条件复杂等问题也会进一步增加运输安全风险[2]。近年来，公路大件运输事故时有发生，其致因往往并非单一因素直接作用的结果，而是人员行为、车辆与货物状态、道路环境及安全管理缺陷等多类因素相互影响、共同作用的结果。风险因素之间一旦形成耦合关系，可能进一步推动风险在系统中传播、叠加和放大，最终导致事故发生。因此，厘清公路大件运输风险因素之间的关联关系和耦合机制，对于从关键节点和传播路径入手提升运输安全管理水平具有重要意义。

目前，国内外学者已围绕大件运输安全问题开展了较多研究，主要集中在运输组织、安全管理、事故致因分析、风险评价及运输方案优化等方面[3]-[5]。在研究方法上，层次分析法、模糊综合评价法等被广泛用于大件运输风险分析，较好揭示了人员、车辆、货物等因素对运输安全的影响。部分研究为大件运输安全评价和风险管控提供了重要参考，但多数成果仍偏重于单一风险因素识别或静态风险评价，对事故致因链条、风险因素关联强度以及多因素耦合效应的刻画相对不足，难以反映风险在复杂运输系统中的传播、叠加与放大过程。

基于此，本文以公路大件运输事故为研究对象，结合扎根理论和 24Model 识别事故致因因素及致因链条，并引入复杂网络理论构建安全风险耦合网络，将事故致因因素和事故类型抽象为网络节点，将因素之间的因果作用关系转化为有向边，从整体结构层面刻画风险因素之间的关联关系和传播特征。在此基础上，利用节点度、中介中心性、聚类系数等拓扑指标识别核心风险节点和关键传播路径，并结合 N-K 模型定量计算不同风险组合的耦合值，识别高耦合风险组合。最后，基于关键节点和高耦合路径提出风险解耦策略，为大件运输企业和监管部门在路线审批、设备选型、运输组织和应急预案制定等方面提

供量化依据，推动大件运输安全管理由经验判断向数据支撑和精准防控转变。

2. 大件运输事故致因分析

2.1. 事故数据收集与事故特征

本文通过应急管理部门公开资料、新闻报道、事故调查报告、相关文献以及企业提供内部事故记录等渠道，收集 2015~2023 年国内 94 起公路大件运输事故案例。案例信息主要包括事故时间、地点、货物特征、车辆状态、道路条件、人员行为、管理措施及事故后果等。经统计，碰撞类事故约占 45%，侧翻类事故约占 28%，无法行驶类事故约占 12%，三者构成主要事故类型；同时，多因素耦合致因的事故占比高达 60%，说明大件运输事故具有明显的链式传导和多因素叠加特征。

2.2. 风险因素识别

为保证事故致因识别的系统性，本文采用扎根理论对事故文本进行编码[6]。编码过程不再展开理论步骤，而是围绕事故经过提取与风险传播有关的关键概念，并将其归纳为主范畴和核心范畴。最终形成“人的不安全行为(P)”“物的不安全状态(C)”“不良环境(E)”“管理缺陷(S)”四类致因核心范畴，以及“事故类型(A)”结果范畴。各核心范畴及主范畴如表 1 所示，事故致因因素详情表见附录表 A1。

Table 1. Core categories of accident causation in highway heavy cargo transportation

表 1. 大件运输事故致因核心范畴

核心范畴	主范畴	典型表现
人的不安全行为(P)	司机操作不当、违规运输、工作人员失责、违规上岗作业、司机失责	未保持安全车速、观察疏忽、未按审批路线行驶、指挥不当、疲劳驾驶等
物的不安全状态(C)	车辆故障、货物不良状态、不良工具	车辆制动失效、货物重心偏移、超载、捆绑工具不可靠、设备不合标准等
不良环境(E)	自然环境、路段环境	长下坡、软路面、弯道、恶劣天气、通行空间受限等
管理缺陷(S)	安全素养欠缺、安全管理不足、应急响应不足、设备设施维护不到位	安全教育不足、监管缺失、运输方案不合理、维护不到位、应急处置不足等
事故类型(A)	碰撞、无法行驶、桥梁损毁、侧翻、装卸事故、货物掉落、起火、行政处罚	事故后果或监管处置结果

2.3. 基于 24Model 的致因链构建

在风险因素识别基础上，本文结合 24Model 的层级逻辑梳理事故因果链[7]。24Model 将事故致因划分为组织文化、管理体系、个体能力和个体动作等层级，适用于追溯事故从深层管理原因到直接行为或物态原因的演化路径[7]。致因关系判定遵循时间先后、逻辑依赖和证据支持三个原则：若因素 A 先于因素 B 出现，且 A 能够直接诱发、强化或为 B 提供必要条件，则建立有向关系 $A \rightarrow B$ ；若两个因素仅在同一事故中共同出现但缺乏直接作用证据，则不建立连边；若多个因素共同作用于同一结果，则分别建立指向该结果的有向边。对于事故材料中明确出现“导致”“造成”“因……而”“未……致使”等表述的关系，依据原始语义确定方向；其余关系按照“组织管理 - 个体能力 - 不安全行为或物态 - 事故结果”的层级顺序进行判断。

从整体特征看，管理缺陷常作为事故链的前端因素，人的不安全行为与物的不安全状态则多表现为事故发生前的直接触发因素。例如，事故中企业安全教育不足、现场监管缺失，驾驶员在运输过程中观

察疏忽且未控制车速，最终发生碰撞，据此构建“S6(安全教育不足)→S9(监管缺失)→P31(观察疏忽)→P2(未保持安全车速)→A1(碰撞)”致因链。相邻节点关系分别作为复杂网络中的有向边；同一关系在不同事故中重复出现时，以累计出现次数作为边权重。从整体特征看，管理缺陷常位于事故链前端，人的不安全行为与物的不安全状态则多表现为事故发生前的直接触发因素(表 2)。

Table 2. Summary of accident causation chains in highway heavy cargo transportation

表 2. 大件运输事故致因链汇总

序号	新事故链(节点表达)	发生频次	序号	新事故链(节点表达)	发生频次
1	S6 → S8 → S9 → S2 → P36 → P28 → P43 → C20 → C5 → A3	1	43	P19 → P43 → C22 → A2	1
2	S6 → S8 → S9 → S10 → S4 → P4 → A1	1	44	C11 → A2	1
3	S6 → S8 → S9 → S12 → S11 → P24 → P39 → P10/P9/P13 → P15 → P41/P42 → P2 → P25 → P1 → A1	1	45	S13 → C14 → A1	1
4	S6 → S8 → S10 → S1 → C1 → A2	1	46	E1 → P7 → A1	1
5	S6 → S8 → C20 → P1 → C17 → P18 → A3	1	47	C18 → A4	1
6	S6 → S8 → S10 → C9 → P50 → P20 → A1	1	48	S2 → E5 → P34 → P22 → A4	1
7	S6 → S8 → S11 → P39 → S13 → C13 → P51 → P21 → A5/A1	1	49	P34 → E5 → C16 → A4	1
8	S6 → S8 → S12 → C23 → P34 → A5	1	50	P31 → P8 → P21 → A6	1
9	S8 → P39 → P15 → C22 → P45 → P17 → A3	1	51	P31 → P29 → A1	1
10	S8 → S11 → P32 → A5	1	52	P31 → P8 → A6	1
11	S8 → S11 → C15 → P38 → P22 → P37 → A5	1	53	P31 → A1	2
12	S8 → P5 → P18 → C25 → P21 → A1	1	54	P31 → P3 → A1	1
13	S8 → S7 → S9 → P42/P11/P12 → C20 → P6 → P4 → A1	1	55	P49 → P41 → C21 → A2	1
14	S6 → S7 → S9 → S11 → C20 → C13 → P2 → A1	1	56	P8 → C25 → P21 → C16 → A1	1
15	S6 → S7 → S12 → S11 → P39 → P33 → E5 → A4	1	57	S4 → P23 → P20 → P17 → P46 → A4	1
16	S6 → S7 → P44 → S10 → P25 → A1	1	58	C24 → A2	1
17	S7 → S2 → P33 → C22 → C10 → A2	1	59	E7 → C16 → C8 → A4	1
18	S9 → S2 → S3 → P34 → C25 → P21 → A5	1	60	E7 → C16 → A4	1
19	S6 → S2 → P48 → A8	1	61	E6 → C28 → A2	1
20	S6 → S2 → P47 → P2 → P46 → P4 → C14 → A1	1	62	C6 → P26 → P27 → A6	1
21	S6 → S11 → S2 → P31 → P7 → A1	1	63	P29 → A1	1
22	S6 → S11 → C20 → P21 → E3 → P2 → C12 → S13 → C13 → A1	1	64	C3 → A2	1
23	S6 → S13 → P35 → C9 → A5	1	65	P4 → A1	1
24	S3 → P43 → A8	3	66	E4 → P2 → P20 → P34 → A4	1
25	S3 → P16 → A8	1	67	P18 → P21 → P4 → A6	1
26	S3 → P15 → A8	1	68	S10 → P44 → P31 → P4 → A1	1
27	S2 → P32 → P31 → P46 → P1 → A5	1	69	P16 → P19 → C20/C19/C21/C22 → A8	1

续表

28	S2 → P28 → A8	1	70	P41 → A8	2
29	P21 → P23 → C16 → A6	1	71	P15 → A8	2
30	P21 → A6	1	72	P15 → C19/C22/C21/C20 → P2 → C9/C10 → A1	1
31	P21 → A6/A1	1	73	P2 → A3	1
32	P21 → P8 → A6	1	74	P40 → P17 → A2	1
33	E2 → C4 → A2	1	75	P12 → A8	2
34	P43 → C16 → A1	1	76	P10/P13 → P46 → C22 → A2	1
35	C22 → A3	1	77	C2 → A4	1
36	C20 → A3	1	78	E8 → C20 → P31 → P5 → A1	1
37	C22 → A2	1	79	E1 → P5 → A2	1
38	C21 → A2	5	80	S6 → S5 → S7 → S11/S9 → S13 → P39 → C26 → A5	1
39	C20 → A3	1	81	P36 → P23 → A4	1
40	C20 → E3 → P88 → C12 → A4	1	82	C27 → A6/A2	1
41	P19 → C20 → A8	1	83	C27 → A6	1
42	P19 → P12 → P11 → A8	1	84	C16 → P31 → A7	1

3. 安全风险耦合网络构建与拓扑分析

3.1. 复杂网络理论基础

复杂网络理论是研究复杂系统结构及其相互作用关系的重要方法,可通过节点与边描述系统中不同个体及其关联关系。在网络模型中,通常用 $G=(V,E)$ 表示网络,其中 V 为节点集合, E 为边集合。根据边是否具有方向和权重,网络可分为有向网络、无向网络、加权网络等类型[6] [8]。

公路大件运输安全风险系统由人员、车辆、货物、道路环境和管理措施等多要素构成,各要素之间存在因果传导和耦合关系,具有非线性、链式传播和局部集聚等复杂系统特征。因此,本文将风险因素和事故类型抽象为节点,将风险因素之间的因果作用关系抽象为有向边,通过复杂网络指标识别关键风险节点和风险传播规律。

在网络结构特征中,无标度特性表明少数节点具有较高连接能力,对系统传播过程具有主导作用;小世界特性则表明网络具有较高聚集程度和较短平均路径,风险可在较少中间环节内快速传播[7] [8]。这两类特征能够为大件运输风险“关键节点管控”和“传播路径阻断”提供理论依据。

3.2. 风险耦合网络模型构建

本文将事故致因网络设定为有向加权网络。节点包括风险因素节点和事故类型节点,其中有向边表示风险因素之间或风险因素与事故类型之间的因果传导关系,边的方向代表风险传播方向,边的权重表示对应关系在事故案例中发生的频次。

图中节点颜色用于区分人的不安全行为、物的不安全状态、不良环境、管理缺陷和事故类型,节点大小按照度值进行映射,连边粗细表示对应因果关系在事故样本中的出现频次。为提高可读性,对权重较低且不涉及关键节点的次要连边进行弱化显示,重点突出高影响力节点、主要传播路径及局部集聚结

构。网络拓扑图如图 1 所示。

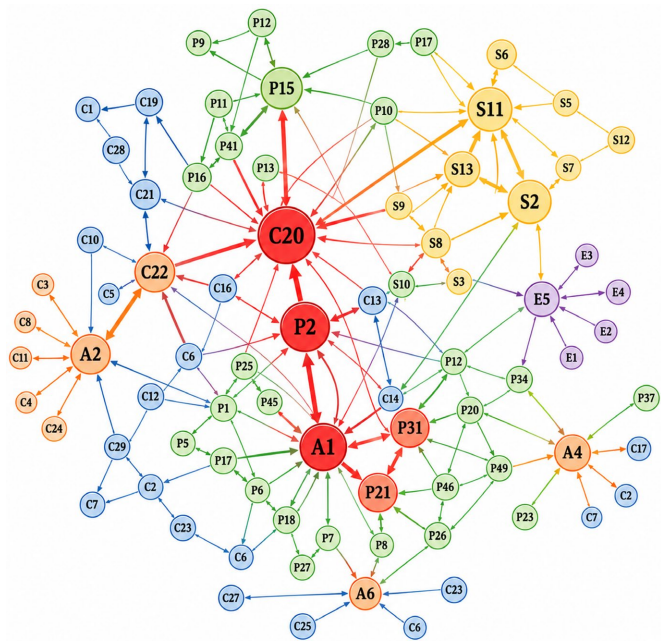


Figure 1. Topology diagram of safety risk coupling network
图 1. 安全风险耦合网络拓扑图

3.3. 拓扑特征分析

为分析公路大件运输安全风险耦合网络的结构特征，本文选取网络密度、节点度、点权、中介中心性、加权聚类系数、平均路径长度、无标度特性和小世界特性等指标进行拓扑分析。根据事故致因链构建风险耦合网络邻接矩阵，并将其导入 Gephi 软件，设置为有向加权网络，利用软件统计功能计算相关指标。主要结果见表 3。

Table 3. Result of topological characteristics of the risk coupling network
表 3. 风险耦合网络拓扑特征结果

指标	结果	说明
网络密度	0.0204	网络整体连接较稀疏，风险传播依赖少数关键路径
节点度	平均度 4.9；TOP3：P2 (18)、C20 (18)、P31 (14)	P2、C20、P31 具有较强综合影响力
节点出度	TOP3：C20 (10), P31 (9), S2 (9)	这些节点具有较强风险外溢能力
节点入度	TOP3：A1 (16), A2 (12), A4 (10)	碰撞、无法行驶、侧翻是主要风险结果
点权	平均值 6.1；高权节点：A1 (28)、C20 (25)、P21 (22)	高权节点与多条高频风险链相关
加权聚类系数	平均值 0.0974；高聚类节点：P3 (0.5)、P9 (0.5)	局部风险因素容易形成集群效应
中介中心性	TOP3：P2 (0.18), S13 (0.15), C12 (0.12)	这些节点在风险传播中具有桥梁作用
平均路径长度	4.304	风险可通过较短路径完成跨子系统传播
无标度特性	幂律拟合 $R^2 = 0.7315$	少数关键节点主导传播过程
小世界特性	聚类系数高于随机网络，路径长度接近随机网络	风险具有局部集聚和快速扩散特征

由表 3 可知, 风险耦合网络密度为 0.0204, 说明网络整体连接较为稀疏, 风险传播主要依赖少数关键节点和关键路径完成。节点度、点权和中介中心性结果显示, P2、C20、P31、S13 等节点在网络中具有较强影响力和桥梁作用, 是后续风险防控应重点关注的核心节点。其中, P 类和 C 类节点表现突出, 说明人的不安全行为与物的不安全状态是大件运输事故风险传播中的主要触发因素。

同时, 网络平均路径长度为 4.304, 且具有一定无标度特性和小世界特性, 表明风险虽然整体连接不密集, 但可通过较短路径实现传播, 少数关键节点对整体风险扩散具有较强控制作用。因此, 后续风险耦合分析应重点关注高连接、高权重和高中介节点及其组合关系, 为识别高耦合风险组合提供依据。

4. 基于 N-K 模型的风险耦合定量分析

N-K 模型适用于分析复杂系统中多个因素之间的非线性交互关系, 已被用于道路危险品运输等交通运输安全风险耦合研究[9]。本文将大件运输安全风险划分为人的不安全行为(P)、物的不安全状态(C)、不良环境(E)和管理缺陷(S)四类子系统, 并将每起事故是否涉及相应风险因素编码为四位二进制状态。例如, 1100 表示事故同时涉及 P 和 C, 1101 表示事故同时涉及 P、C 和 S。

在此基础上, 统计不同耦合形式出现的次数和频率, 并依据 N-K 模型中的交互信息思想计算不同风险组合的耦合值。耦合值越大, 说明该风险组合之间的交互作用越强, 越需要在风险防控中重点关注; 当耦合值为负时, 说明该组合在样本中未形成明显的正向增强效应。

风险耦合频率统计

设 P_i 为第 i 类风险组合的发生频率; n_i 为该组合在事故样本中的出现次数; N 为事故样本总数。某种风险组合的发生概率为:

$$P_i = n_i / N \quad (1)$$

本文共收集 94 起公路大件运输事故, 因此 $N=94$ 。例如人的不安全行为单独参与事故致因的次数为 22 次, 则: $P_{1000} = 22/94 = 0.2340$, 按照上述方法统计不同风险组合的发生次数和频率, 结果见表 4。

Table 4. Number and frequency of the occurrence of different coupling forms of risk factors in accidents

表 4. 事故中风险因素不同耦合形式发生的次数及频率

耦合类型	耦合方式	次数	频率
单因素耦合	1000 (P)	22	0.2340
	0100 (C)	16	0.1702
	0010 (E)	0	0.0000
	0001 (S)	0	0.0000
双因素耦合	1100 (P-C)	11	0.1170
	1010 (P-E)	3	0.0319
	1001 (P-S)	16	0.1702
	0110 (C-E)	4	0.0426
	0101 (C-S)	2	0.0213
	0011 (E-S)	0	0.0000

续表

多因素耦合	1110 (P-C-E)	3	0.0319
	1101 (P-C-S)	13	0.1383
	1011 (P-E-S)	3	0.0319
	0111 (C-E-S)	0	0.0000
	1111 (P-C-E-S)	1	0.0106

仅通过发生频率可以判断某类风险组合出现的多少,但难以说明各风险因素之间是否存在明显耦合作用。因此,进一步采用 N-K 模型中的信息交互思想计算风险耦合值。风险耦合值越大,说明该类风险因素组合之间的相互作用越强,对事故发生的推动作用越明显。双因素、三因素和四因素风险耦合值计算公式分别为:

$$T_2(X, Y) = \sum_{x=0}^1 \sum_{y=0}^1 P_{xy} \log_2 \left(\frac{P_{xy}}{P_x P_y} \right) \quad (2)$$

$$T_3(X, Y, Z) = \sum_{x=0}^1 \sum_{y=0}^1 \sum_{z=0}^1 P_{xyz} \log_2 \left(\frac{P_{xyz}}{P_x P_y P_z} \right) \quad (3)$$

$$T_4(p, c, s, e) = \sum_{p=0}^1 \sum_{c=0}^1 \sum_{s=0}^1 \sum_{e=0}^1 P_{pces} \log_2 \left(\frac{P_{h,i,j,k}}{P_{h...} P_{i...} P_{j...} P_{k...}} \right) \quad (4)$$

式中, X 、 Y 、 Z 表示参与耦合的风险因素,可分别取人的不安全行为 P 、物的不安全状态 C 、不良环境 E 和管理缺陷 S ; x 、 y 、 z 、 p 、 c 、 e 、 s 表示对应风险因素是否出现,取值为 0 或 1; P_x 、 P_y 、 P_z 为单类风险因素出现的边际概率; P_{xy} 、 P_{xyz} 、 P_{pces} 分别为双因素、三因素和四因素风险组合的联合概率; T_2 、 T_3 、 T_4 分别表示双因素、三因素和四因素风险耦合值。根据表 4 中的风险组合频率,并结合上述公式计算得到不同风险组合的耦合值,结果如表 5 所示。

Table 5. Safety risk coupling values for highway heavy cargo transportation accidents

表 5. 大件运输事故安全风险耦合值

耦合类型	耦合组合	耦合值	排序
双因素	$T_2(p, c)$	0.1536	3
双因素	$T_2(p, s)$	-0.0125	9
双因素	$T_2(p, e)$	0.0862	4
双因素	$T_2(c, s)$	0.0350	6
双因素	$T_2(c, e)$	-0.0185	11
双因素	$T_2(s, e)$	0.0043	7
三因素	$T_3(p, c, s)$	0.2992	2
三因素	$T_3(p, c, e)$	0.0355	5
三因素	$T_3(p, s, e)$	0.0015	8
三因素	$T_3(c, s, e)$	-0.0183	10
四因素	$T_4(p, c, s, e)$	0.3897	1

其中，四因素耦合值最高，为 0.3897，说明当人的不安全行为、物的不安全状态、不良环境和管理缺陷同时存在时，系统风险会明显放大。但该组合仅出现 1 次，表明其虽然耦合强度高，但在事故样本中并不常见。相比之下， $T_3(p, c, s)$ 三因素耦合发生 13 次，频率为 0.1383，耦合值为 0.2992，是更具代表性的高风险组合，说明管理缺陷可能通过影响人员操作和设备状态进一步推动事故发生。

在双因素耦合中， $T_2(p, c)$ 的耦合值最高，为 0.1536，表明人的不安全行为与物的不安全状态之间联系最为紧密。大件运输过程中，驾驶员操作不当、观察疏忽、速度控制不合理等行为风险，往往会与车辆制动失效、货物捆绑不牢、车辆超限超载等物态风险共同作用，进而诱发碰撞、侧翻等事故。综合来看，人的不安全行为是事故发生的重要直接触发因素，物的不安全状态是与其耦合最紧密的关键因素，管理缺陷则常作为深层原因影响人员行为和设备状态。

结合复杂网络结果可知，P-C 和 P-C-S 的高耦合值并非风险类别的简单共现，而是由 P2、P31、C20、S13 等关键节点及其相互连接共同推动。复杂网络为 N-K 模型的高耦合结果提供了具体节点和传播路径解释，N-K 模型则从类别层面验证了人员、物态和管理因素之间的协同放大效应。

5. 风险防控策略

复杂网络分析结果表明，公路大件运输安全风险网络中存在少数高影响力节点，风险传播具有一定的关键节点依赖特征；N-K 模型计算结果进一步表明，“人的不安全行为 - 物的不安全状态”以及“人的不安全行为 - 物的不安全状态 - 管理缺陷”等组合具有较高耦合风险。因此，风险防控应从降低关键风险因素出现概率、阻断高耦合风险路径和提升系统应急恢复能力三个方面展开，形成覆盖风险耦合前、耦合中和耦合后的全过程防控思路。具体策略见表 6。

Table 6. Risk-decoupled prevention and control strategies
表 6. 基于风险解耦的防控策略

阶段	防控重点	具体措施
耦合前	降低关键因素出现概率	将 P2、P31、C20 等节点纳入运输前核查；关联审核通行许可、运输路线、轴载、制动状态和货物固定信息；对车货信息不一致、超载和技术状态异常实施出车前拦截。
耦合中	阻断高耦合路径	围绕 P-C、P-C-S 路径构建电子围栏和车辆动态监测；对超速、偏离审批路线、制动异常、货物偏载等触发分级预警，并联动驾驶员、护送人员和后台管理人员采取限速、停车复核或路线调整。
耦合后	降低事故后果扩散程度	完善应急预案和分级响应机制；事故或险情发生后快速隔离风险源、疏导交通、组织救援；复盘事故链条并更新风险数据库。

在实际管理中，应将关键节点控制与高耦合路径监测结合使用。以“监管缺失→观察疏忽→未保持安全车速→碰撞”为例，可构建“电子围栏 - 车辆动态监测 - 分级预警 - 管理干预”的闭环机制：运输前将审批路线、限速要求和禁行路段写入电子围栏，运输中实时采集车速、位置、连续驾驶时间和路线偏离情况；当车辆进入长下坡、急弯或桥隧等高风险路段时自动触发限速提示，对持续超速或偏离路线行为同步向驾驶员、护送人员和后台管理人员报警。对于 C20“超载”，应关联核验许可申报、轴载检测和车辆实时状态，对车货信息不一致、轴载异常及货物偏载实施运输前拦截和途中复核，从而降低 P-C 及 P-C-S 耦合风险。

本研究仍存在一定局限性。受大件运输事故资料公开程度和企业保密要求限制，样本数量及区域覆盖范围相对有限，部分企业内部案例无法公开企业名称、具体项目和原始记录，降低了数据的外部可复

核性；不同来源资料在信息完整程度和描述方式方面也存在差异，可能对风险因素识别及致因链构建产生一定影响。后续研究可进一步扩展样本来源，并结合车辆运行数据、审批监管数据和现场调查资料，对关键节点及高耦合路径进行持续验证。

6. 结论

本文以 94 起国内公路大件运输事故为研究对象，结合扎根理论和 24Model 对事故致因因素及致因链条进行识别，最终提取出 84 个风险致因因素、8 类事故类型和 254 条事故致因链。在此基础上，构建公路大件运输安全风险耦合网络，并利用复杂网络拓扑指标分析风险因素之间的关联关系和传播特征。结果表明，大件运输事故风险并非由单一因素导致，而是人的不安全行为、物的不安全状态、不良环境和管理缺陷等多类因素共同作用的结果。

复杂网络分析结果显示，风险耦合网络具有一定的无标度特性和小世界特性，说明少数关键节点在风险传播中发挥重要作用。P2、C20、P31 等节点具有较高连接性和影响强度，P2、S13、C12 等节点在风险传播路径中具有较强桥梁作用，表明通过识别并管控关键风险节点，可以有效降低风险扩散和事故发生的可能性。

N-K 模型计算结果进一步表明，大件运输安全风险具有明显的多因素耦合特征。其中，四因素耦合值最高，为 0.3897，说明多类风险因素同时作用时系统风险会显著放大；三因素组合中，P-C-S 耦合值较高，为 0.2992；双因素组合中，P-C 耦合值最高，为 0.1536，说明人的不安全行为与物的不安全状态之间联系最为紧密。基于此，大件运输安全管理应重点围绕关键节点控制和高耦合路径阻断展开，强化人员培训、车辆与货物状态检查、运输方案审核和现场协同管理，从而提升公路大件运输风险防控的针对性和有效性。

基金项目

本课题为四川省大件运输实验室(西华大学，四川省大件运输有限公司)资助课题(课题编号：XHDJ-202504)部分研究成果。

参考文献

- [1] 闫晟煜, 王钊龙, 李兴举. 国家大件运输公路网主通道的规划与思考[J]. 公路, 2025, 70(5): 229-233.
- [2] 周青山. 公路大件运输线路障碍及处理策略研究[J]. 运输经理世界, 2025(7): 62-64.
- [3] 王健, 梁娜. 大件物流运营与组织问题[J]. 中国储运, 2024(8): 51-52.
- [4] 向前前. 危化品道路运输事故致因分析与风险演化研究[D]: [硕士学位论文]. 湘潭: 湖南科技大学, 2025.
- [5] 赵婉如, 赵璐铭, 刘芳, 等. 基于 AHP-DEMATEL 的公路大件运输事故风险因素分析[J]. 物流工程与管理, 2024, 46(6): 87-90.
- [6] 王宇航, 周凌云, 梁川. 基于复杂网络理论的铁路快捷货物运输网络社团特征及脆弱性研究[J]. 铁道运输与经济, 2026, 48(2): 205-216.
- [7] 刘晓露, 梁志星, 吴君安, 等. 24Model 在道路运输事故成因中的应用[J]. 汽车安全与节能学报, 2024, 15(2): 185-192.
- [8] 方曾利, 郑欢欢, 赵亚军. 基于复杂网络理论的多式联运货运枢纽布局优化系统[J]. 电子设计工程, 2025, 33(12): 40-45.
- [9] 杨婷, 帅斌, 黄文成. 基于 N-K 模型的道路危险品运输系统耦合风险分析[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(9): 132-137.

附 录

Table A1. Nodes of the causal factors for highway heavy cargo transportation accidents
表 A1. 大件运输事故致因因素节点

节点	致因因素	定义与内涵
P1	未保持安全距离；	驾驶员未与前车、侧车或障碍物保持足够安全距离，增加碰撞风险。
P2	未保持安全车速；	未根据路况、天气或交通状况调整车速，导致失控或反应不足。
P3	突然变道；	未经提示或未观察路况情况下突然变道，可能导致事故。
P4	司机采取措施不当；	司机面对突发情况未作出正确反应
P5	未按操作规范安全驾驶；	未遵守操作规范。
P6	驶入对向车道；	因超车或操作失误进入对向车道，增加正面碰撞风险。
P7	刹车不及时；	因反应迟缓或判断失误未能及时刹车。
P8	紧急制动；	在非必要情况下急刹车，导致追尾或货物失控。
P9	无运输路线；	未规划运输路线，可能经过危险或不适合的路段。
P10	无运输方案；	未对运输过程进行详细规划，如路线、方式等。
P11	无护送人员；	特殊货物运输时未配备护送人员，运输安全难以保障。
P12	无护送车辆；	特殊货物运输时未配备护送车辆，容易受外界干扰。
P13	无道路勘测；	运输前未对道路状况进行调查，导致途中遇到难以克服的路段。
P14	未悬挂明显标志；	特殊货物运输时未悬挂警示标志，增加其他车辆安全风险。
P15	未办理《超限运输车辆通行证》；	运输超限车辆时未按规定办理许可证，属违法行为。
P16	伪造《超限运输车辆通行证》；	提交虚假材料获取许可证，属严重违规行为。
P17	违章冒险作业；	无视安全规定进行高风险作业，如恶劣天气强行运输。
P18	违规改装车辆；	车辆未经批准改装，可能导致性能下降或失控。
P19	车货信息与许可证不符	实际运输车货信息与许可证申报内容不符。
P20	轻微事故未撤离；	轻微事故后未及时撤离，导致交通堵塞或次生事故。
P21	绑扎加固不当	货物绑扎不牢，运输过程中货物移动或掉落。
P22	指挥人员失责；	运输指挥人员未履行职责，导致协调失误。
P23	运输方式不当；	所选择的运输方式不符合货物或环境要求。
P24	业务负责人工作失责；	业务负责人未有效监督运输过程，导致管理漏洞。
P25	未设置警示标志；	运输过程中未在危险路段设置警示标志，增加风险。
P26	未检查捆绑情况；	未检查货物捆绑状态，导致途中松脱或掉落。
P27	未关注货物情况；	未对货物状况进行实时监控(如温度、湿度)。
P28	使用虚假材料；	通过虚假材料规避监管，例如伪造许可证。
P29	扫空面积过大；	货物运输间隙过大，导致重心不稳或效率低。
P30	开道人员失责；	护送开道人员未履行职责，增加安全隐患。
P31	观察疏忽；	相关人员未注意潜在危险，如盲点车辆。
P32	工作人员位置不当；	工作人员停留在危险区域或操作位置不当。
P33	运输技术交底不足	运输开始前未明确技术要求或操作注意事项。

续表

P34	工作人员失责(其他);	工作人员未完成货物固定、检查等职责。
P35	专业知识不足;	工作人员缺乏运输或安全知识,无法应对突发情况。
P36	制定运输方案不合理;	运输方案设计存在缺陷,例如未考虑货物特性或路况。
P37	未取得高处作业操作证;	从事高空作业的人员未取得合法资质。
P38	未佩戴安全带;	未佩戴必要安全装备,从事高风险操作。
P39	人员资质不足;	运输或操作人员未满足从业资质要求。
P40	未确认通行状况;	未对通行路况进行检查,贸然通过危险区域。
P41	未按指定时间行驶;	未遵守运输方案中的时间安排。
P42	未按指定路线行驶;	未按照运输方案中指定路线行驶,可能进入高风险区域。
P43	违规停车;	在禁止停车区域停车,影响交通或导致事故。
P44	违反交通标志;	无视交通标志、信号或指示,导致事故或交通违规。
P45	司机经验不足;	驾驶员缺乏必要经验,无法正确判断或应对复杂情况。
P46	疲劳驾驶;	长时间连续驾驶导致注意力下降,反应迟钝。
P47	酒后驾驶;	驾驶员饮酒后驾驶车辆,严重影响安全性。
P48	驾驶员路线不熟;	对运输路线不熟悉,误入危险路段或操作难度增加。
P49	驾驶有故障机动车;	驾驶员在车辆已知存在故障情况下仍行驶,增加事故风险。
P50	驾驶违规车辆;	驾驶员操作不符合相关法律法规要求的车辆,例如车辆未取得合法行驶证、未按规定年检、车辆存在非法改装、超限超载等情况。
C1	性能不合格	车辆的性能未达到安全标准,可能导致运行不稳定或故障。
C2	液压系统故障	液压系统发生故障,影响车辆正常操作功能。
C3	水箱破裂;	水箱损坏导致冷却系统失效,引发发动机故障。
C4	驱动轮打滑	驱动轮因路况或负载问题打滑,导致车辆失控。
C5	偏离桥梁中线;	车辆偏离桥梁中线,导致结构性安全风险。
C6	篷布掉落;	篷布未固定或松动,运输途中掉落可能引发事故。
C7	车辆断裂	车辆部件发生断裂,可能直接导致失控或翻车。
C8	车厢脱节;	车辆车厢与底盘脱节,货物失控或车辆失稳。
C9	车辆制动效能不合格;	车辆的制动系统性能不符合要求,增加刹车失灵风险。
C10	车辆行驶效能不合格	车辆行驶性能不足,例如动力输出或稳定性不达标。
C11	车辆抛锚;	车辆在途中抛锚,影响运输进度和道路安全。
C12	车辆过度使用;	车辆使用过度或超期未维护,性能下降。
C13	车辆不符合技术标准;	车辆未符合技术标准,无法满足运输安全要求。
C14	车辆爆胎;	轮胎发生爆裂,直接威胁行车安全。
C15	受力倾斜;	车辆受力不均匀,导致倾斜和失稳风险。
C16	重心偏移;	货物重心偏移,增加翻车或货物掉落风险。
C17	偏心荷载;	货物载荷偏心,影响车辆行驶稳定性。
C18	负载转移	货物负载发生转移,影响车辆稳定性和制动效果。
C19	超长;	车辆长度超过规定标准,影响行车安全。

续表

C20	超载;	车辆或货物总重超过规定标准, 导致安全隐患。
C21	超宽;	车辆宽度超过标准, 影响道路通行及安全。
C22	超高;	货物高度超标, 导致重心不稳或触碰障碍物。
C23	设备不合标准	设备性能或设计不符合安全标准。
C24	揽绳断裂;	运输用揽绳因质量或固定不当而断裂。
C25	捆绑工具不可靠;	用于捆绑货物的工具质量或性能不可靠。
C26	钢丝绳破断;	钢丝绳因老化或过载而断裂, 导致货物失控。
C27	支撑臂断裂	支撑臂因疲劳或材料问题断裂, 影响设备稳定性。
C28	大梁裂痕	车辆大梁出现裂痕, 降低承载力并增加事故风险。
S1	安全知识不足;	工作人员缺乏必要的安全知识, 无法识别危险。
S2	安全意识淡薄;	工作人员对安全的重要性认识不足, 导致疏忽大意。
S3	安全心理不足;	工作人员在高压环境下心理素质不足, 影响反应能力。
S4	安全经验不足;	缺乏必要的安全操作经验, 无法正确应对危险情况。
S5	员工工作制度不足;	员工工作制度不完善, 缺乏明确的职责和流程。
S6	安全教育培训不足;	员工未接受充分的安全教育和培训, 导致操作失误。
S7	安全管理制度执行不足;	安全管理制度虽有, 但执行不到位, 造成隐患。
S8	安全管理制度不足;	缺乏系统的管理制度, 安全工作无章可循。
S9	安全监管不足;	安全监管缺位, 导致问题未被发现或解决。
S10	应急管理缺失;	应急管理机制缺失, 无法有效应对突发情况。
S11	风险管控不足;	风险管控措施不足, 未能有效减少潜在风险。
S12	风险辨识缺失;	未进行全面的风险辨识, 存在重大安全盲区。
S13	设备设施维护不到位;	设备设施维护不足, 导致运行可靠性下降。
E1	雨天;	雨天路面湿滑, 车辆制动和操控能力下降。
E2	冰雪	冰雪天气导致路面结冰, 车辆打滑风险增加。
E3	长下坡路段;	长下坡路段增加车辆制动和操控的难度。
S2	安全意识淡薄;	工作人员对安全的重要性认识不足, 导致疏忽大意。
E5	软基路面;	软基路面承载力不足, 车辆容易陷入或侧翻。
P34	工作人员失责(其他);	工作人员未完成货物固定、检查等职责。
P22	指挥人员失责;	运输指挥人员未履行职责, 导致协调失误。
A1	碰撞	指大件运输过程中与其他车辆、障碍物或设施发生的碰撞事故, 导致交通事故或物品损坏。
A2	无法行驶	指由于大件运输车辆故障、道路阻碍或其他不可预见因素, 导致运输车辆无法继续行驶。
A3	桥梁损毁	指大件运输过程中, 超重或过大物品对桥梁结构造成损害, 导致桥梁无法正常使用或需进行修复。
A4	侧翻	指运输车辆在行驶过程中, 由于超载、操作不当或其他原因, 车辆发生侧翻, 导致事故发生。
A5	装卸事故	指在大件物品的装卸过程中, 由于操作不当、设备故障或其他原因, 导致事故发生, 可能包括人员受伤、物品损坏等。

续表

A6	货物掉落	指在运输过程中，货物因固定不牢或其他原因从运输车辆上掉落，可能造成交通事故或货物损失。
A7	起火	指运输过程中，由于设备故障、货物自燃或其他原因引发的火灾事故，可能导致运输车辆、货物或周围环境的严重损害。
A8	行政处罚	指由于大件运输过程中的违规行为，如未按规定路线行驶、超限运输等，导致相关部门对运输方实施的行政处罚。