

中文引用格式:王佩,李小婷,杨睿,等.基于SIF与社会网络的化工火灾事故致因分析[J].中国安全科学学报,2025,35(8):48-53.
英文引用格式:WANG Pei, LI Xiaoting, YANG Rui, et al. Analysis of causes of chemical fire accidents based on SIF and social network[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(8): 48-53.

基于 SIF 与社会网络的化工火灾 事故致因分析*

王佩¹讲师, 李小婷², 杨睿², 郑丽娜^{**2}教授

(1 首都经济贸易大学 管理工程学院, 北京 100070;

2 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116)

中图分类号: X928.5

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.08.0164

资助项目: 北京市教育委员会科研计划项目(KM202310038002)。

【摘要】 为有效识别和防控化工火灾事故风险,遏制化工火灾事故频发,基于数字化技术的深度案例分析,提出一种融合文本挖掘、安全信息流(SIF)模型层次分析与社会网络分析的多维度综合研究框架。首先,对2000—2024年75起化工火灾事故调查报告进行词频-逆文档频率(TF-IDF)关键词提取与潜在狄利克雷分配(LDA)主题建模;然后,基于SIF模型,将提取出的致因按微观、中观和宏观层次进行分类;最后,借助社会网络分析方法构建事故致因网络,通过频数统计、中心性分析及关键关系挖掘,识别出事故致因网络中的核心节点和关键影响路径。结果表明:微观致因占比为56.3%,是导致化工火灾事故的最关键致因因素,其中,个体因素和环境设备风险在化工火灾事故中占据主导地位;中观致因中“安全监督不充分”度数中心度最高,组织管理不到位→安全监督不充分→个人准备不足→违反规章制度是化工火灾关键致因路径。

【关键词】 安全信息流(SIF)模型; 社会网络; 化工火灾; 事故致因; 安全管理

Analysis of causes of chemical fire accidents based on SIF and social network

WANG Pei¹, LI Xiaoting², YANG Rui², ZHENG Lina²

(1 School of Management Engineering, Capital University of Economics and Business,

Beijing 100070, China; 2 School of Safety Engineering, China University of Mining

and Technology, Xuzhou Jiangsu 221116, China)

Abstract: To effectively identify and prevent the risks of chemical fire accidents, a comprehensive research framework was proposed, integrating text mining, SIF model hierarchical analysis, and social network analysis based on rich accident investigation reports in the era of big data. Firstly, the key causes of the accidents were systematically extracted through text preprocessing, term frequency-inverse document frequency (TF-IDF) keyword extraction, and latent dirichlet allocation (LDA) topic modeling, combined

* 文章编号:1003-3033(2025)08-0048-06; 收稿日期:2025-03-24; 修稿日期:2025-06-29

** 通信作者:郑丽娜(1986—),女,山东德州人,博士,教授,博士生导师,主要从事工作场所粉尘暴露监测、气溶胶采样技术、气溶胶化学组分在线监测技术和仪器研发、微等离子体光谱和拉曼光谱定量分析技术方面的研究。E-mail:zhenglina@cumt.edu.cn。

with 75 representative chemical fire accident investigation reports from 2000 to 2024. Then, based on the SIF model, the extracted causes were classified into the micro, meso, and macro levels. Subsequently, the accident cause network was constructed using social network analysis methods. Core nodes and key influence paths in the accident cause network were identified through frequency statistics, centrality analysis, and key relationship mining. The research results show that the micro-causes accounted for 56.3%, representing the most crucial factors contributing to chemical fire accidents, with individual factors and environmental equipment risks being dominant. At the meso level, insufficient safety supervision has the highest degree centrality. The key cause path for chemical fire accidents is: inadequate organizational management → insufficient safety supervision → insufficient personal preparation → violation of regulations.

Keywords: safety information flow(SIF) model; social network; chemical fire; accident causes; safety management

0 引言

化工行业因其高温、高压、易燃易爆等危险性,成为火灾事故高发领域,一旦发生事故往往造成严重的人员伤亡和环境污染^[1]。火灾事故是化工企业发生次数最多、危险性最大、后果最为严重的事故类型^[2]。面对增长的化工火灾防控压力和难度,找出化工火灾的关键致因路径至关重要^[3]。

近年来,网络分析方法在事故致因研究中取得显著进展。CHARALAMPOS 等^[4]使用网络分析方法对化工站点建模,提高了对站点内能量和物质相互作用的理解。KHAKZAD 等^[5]采用动态贝叶斯网络研究了化工厂火灾的蔓延。LONG Ding 等^[6]采用动态贝叶斯网络评估化工厂内装置的火灾事故概率。陈文瑛等^[7]基于复杂网络,研究了生产安全事故致因,确定主要致灾因素。刘丹等^[8]利用网络分析研究了关键致因,从整体网络密度和聚类系数方面检测管控后的风险网络效果。同时,随着文本挖掘^[9]与自然语言处理技术^[10]的发展,大数据在安全科学领域的应用逐渐兴起,现有研究通过关键词抽取、主题建模^[11]等手段,从文本中提取风险信息,推进事故数据驱动的智能分析。尽管现有文献在化工火灾事故风险评估、事故扩散及其多米诺骨牌效应等方面取得了不少进展,但对非结构化文本数据的深入挖掘以及事故致因的层次性分类研究仍显不足。

鉴于此,笔者拟提出结合文本挖掘、安全信息流(Safety Information Flow, SIF)事故致因模型和社会网络分析的综合研究框架,基于 SIF 模型对文本挖掘提取的事故致因进行层次化分类,构建事故致因网络,探讨各致因之间的相互关系与作用机制,以期

为复杂事故致因机制的精准建模与制定多尺度风险控制策略提供坚实的理论与方法支撑。

1 事故致因模型构建

1.1 事故数据库构建

数据库中的案例信息对于分析事故发生原因以及事故发生逻辑链条是十分重要的,因此,需保证调查报告对于事故致因的基本组成以及关联因素等信息具有详细的描述与分析。通过应急管理部门和安全管理网等互联网,收集我国 2000—2024 年发生的化工火灾事故调查报告^[12-13],选择事故调查原因及结果清晰且明确的事故报告,删除部分重复报告,依据内容完整性及文本规范性等标准筛选,获取 75 起完整且具有一定代表性的化工火灾事故调查报告,并构建化工火灾事故数据库。

1.2 事故致因关键致因提取

文本挖掘作为一种从非结构化文本中提取有价值信息的方法,能够有效识别并提取事故报告中的核心致因,为事故预防和安全管理提供数据支持。为确保分析结果的准确性,采用文本预处理、关键词提取、主题建模和频率统计等步骤,提取事故报告中的主要致因因素。

数据预处理是文本挖掘的关键步骤,旨在将原始文本数据转化为适合后续分析的结构化信息。具体而言,剔除报告中的无关信息,采用 jieba 中文分词工具处理事故调查报告文本,结合哈尔滨工业大学停用词表针对化工行业特点增补自定义停用词。分词过程中重点保留名词和动词,以提取与事故实体和行为相关的关键信息。

在数据预处理的基础上,采用词频-逆文档频

率(Term Frequency-Inverse Document Frequency, TF-IDF)^[14]方法进行关键词提取。通过计算文档中的词语出现频率和稀有程度,识别出具有高信息量、能有效区分事故报告的关键词,公式如下:

$$TF-IDF(w,d)=TF(w,d)\times\lg\frac{N}{DF(w)}\quad(1)$$

式中:TF(*w*,*d*)为词*w*在文档*d*中的出现频率;DF(*w*)为包含该词的文档数;*N*为文档综述。设置最小词频阈值(min_df)为2,最大词频阈值(max_df)为0.9,每篇文档提取前30个关键词,保证关键词的代表性与区分性,筛选出报告中反复出现且有效描述事故致因的关键词。

为识别报告中的潜在主题,采用潜在狄利克雷分配(Latent Dirichlet Allocation, LDA)主题建模方法^[15]揭示报告中的核心致因类别。基于主题一致性分析确定主题数为8,每个主题提取10个高权重关键词,采用Gibbs采样方法进行推断,设置迭代次数为30,确保模型收敛性与主题稳定性。

在关键词提取和主题建模的基础上,对初步提取的关键词进行归并与归类。通过统计各个关键词和主题的出现频率,识别出事故发生的主要致因,并采用词云可视化事故报告中的高频致因,如图1所示。由图1可知:化工火灾致因共计40项,其中,个人准备不足,技能差错,员工资源管理不当等是造成化工火灾事故最常见的致因。



图1 事故致因关键词词云图

Fig.1 Word cloud chart of keywords for accident causes

1.3 事故致因 SIF 模型

SIF模型是一种多层次的安全管理框架,旨在从微观、中观和宏观不同层面识别事故发生的根本原因。

在微观层次,致因因素直接作用于事故发生的一线作业界面。个体因素包括操作人员的行为决策、技能水平等,这些因素直接决定作业执行的正确

性与事故防范能力。微观层次致因是事故链条中最接近失控源头的因素,其失效常常是事故发生的直接触点。

中观层次的致因与化工企业内部的安全管理体系、当班管理人员的职责密切相关。企业的安全管理体系直接影响事故发生的概率和后果。中观层次的致因间接削弱了作业现场的风险防控能力,增加了基层操作错误和系统失效的可能性。

宏观层次的致因涉及到地方政府和安监部门的管理职能。地方政府的职责履行直接影响企业的安全管理环境 and 安全文化建设。依据致因因素的作用对象、控制路径与系统层级,结合系统安全理论与复杂事故演化机制,系统将提取的事故致因划分为微观、中观和宏观3个层次,为便于直观展示事故致因在不同层次上的分布及其归属,基于SIF模型系统整理致因分类,见表1。

表1 75起化工火灾事故致因的频数统计
Table 1 Frequency statistics of causes from 75 chemical fire accidents

类别	层次	内容	频数
微观	个体	个人准备不足 <i>S</i> ₁	55
		精神状态差 <i>S</i> ₂	9
		生理状态不佳 <i>S</i> ₃	15
		身体智力局限 <i>S</i> ₄	6
		技能差错 <i>S</i> ₅	47
		决策差错 <i>S</i> ₆	15
		认知差错 <i>S</i> ₇	21
		违反规章制度 <i>S</i> ₈	53
	环境、设备等风险	监测设备缺乏 <i>E</i> ₁	25
		报警设备缺乏 <i>E</i> ₂	27
		反应设备隐患 <i>E</i> ₃	15
		设备功能缺陷 <i>E</i> ₄	7
		设备可靠性低 <i>E</i> ₅	12
		更替设备缺乏 <i>E</i> ₆	3
		冷却设备缺乏 <i>E</i> ₇	11
		安全附件失灵 <i>E</i> ₈	19
		保护设备缺乏 <i>E</i> ₉	19
		紧急停止设备缺乏 <i>E</i> ₁₀	16
		消防设施缺乏 <i>E</i> ₁₁	8
		阀门密封不严 <i>E</i> ₁₂	14
		罐体破损 <i>E</i> ₁₃	8
		通风条件恶劣 <i>E</i> ₁₄	11
		氧气含量超限 <i>E</i> ₁₅	5
		储区温度超限 <i>E</i> ₁₆	12
		厂房湿度超限 <i>E</i> ₁₇	3
		空间布局不合理 <i>E</i> ₁₈	17
		防火间距不足 <i>E</i> ₁₉	18
		耐火等级不足 <i>E</i> ₂₀	11

续表 1

类别	层次	内容	频数
中观	化工企业安全管理体系	安全文化缺失 M_1	35
		资源管理不到位 M_2	20
		员工资源管理不当 M_3	60
	当班管理人员	安全监督不充分 D_1	58
		对现场作业指导性差 D_2	55
		监督违规 D_3	19
		组织管理不到位 D_4	61
宏观	地方安全监察局等主管部门	风险管控不到位 L_1	12
		日常安全检查不到位 L_2	20
		监管力量薄弱 L_3	5
	地方政府	地方政府履职不到位 G_1	5
		安全管理及安全监督检查不到位 G_2	24

2 事故致因社会网络分析

2.1 频数统计

构建化工火灾事故 SIF 模型,分析 75 起化工火灾事故的致因因素,致因因素总频数为 856,其中,微观因素最高为 482,占比为 56.3%;中观因素为 308,占比为 36.0%;宏观因素为 66,占比为 7.7%。对于每一起化工火灾事故,若其发生原因符合某一关键致因因素,则标注为 1;否则标注为 0。基于此,统计所有致因因素的频数,统计结果见表 1。

2.2 共现网络构建

通过频数统计了解各个致因因素的分布情况,从而为后续分析致因因素相互关系提供基础数据,并通过构建基于社会网络的致因网络探索各因素之间的内在联系与相互作用。

为分析化工火灾事故致因之间的作用关系,采用 Ucinet-netdraw 软件分析该 75 起化工火灾事故调查报告中致因结果的事故致因网络。根据化工火灾事故调查报告的分析结果建立事故致因的共现矩阵,在进行二值化处理的基础上,绘制基于社会网络的事故致因网络关系,二值化处理的结果见表 2。基于二值化共现矩阵构建化工火灾事故致因网络,为突出核心关系,可视化仅显示 31 个核心节点,如图 2 所示。

表 2 化工火灾事故致因共现矩阵二值化(部分)

Table 2 Binary co-occurrence matrix of causes of

chemical fire accidents (part)

因素	S_1	S_2	S_3	...	G_1	G_2
S_1	1	0	1	...	1	0
S_2	0	1	0	...	0	0
S_3	1	0	1	...	1	1
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$
G_1	1	0	1	...	1	1
G_2	0	0	1	...	1	1

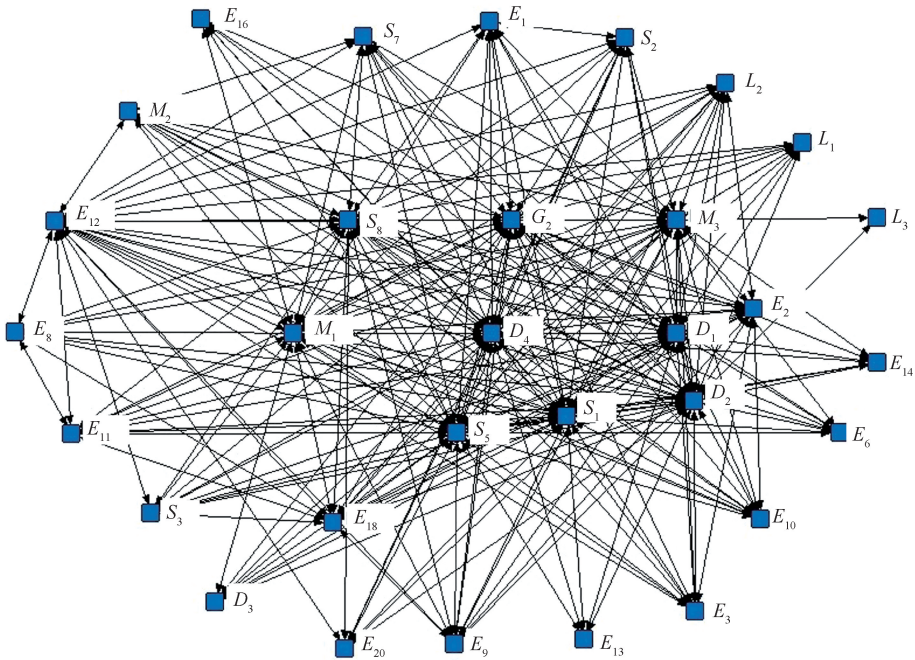


图 2 化工火灾事故致因网络关系

Fig. 2 Network relationship diagram of causes of chemical fire accidents

2.3 网络中心性分析

运用 Ucinet 分析化工火灾事故致因网络的中心性,得到节点的度数中心性,见表 3。节点的度数中心性衡量直接与其相连的相邻节点数量,这一指标越高,表明该节点在网络结构中的重要性和影响力越大。通过分析度数中心性,可明确事故的关键致因。

由表 3 可知:导致化工火灾事故发生的 D_1 、 M_3 、 D_2 、 D_4 、 S_1 等前 10 项致因因素的度数中心度占比均在 0.034 以上,位于事故致因网络核心区域,与其他事故致因存在复杂的因果关系,是化工火灾事故致因中应引起重视的关键致因。

表 3 化工火灾事故致因网络的中心性分析(前 10 项)
Table 3 Centrality analysis of the cause network of chemical fire accidents (top 10 items)

序号	致因因素	绝对中心度	相对中心度	度数中心度占比
1	D_1	30.000	78.947	0.066
2	M_3	29.000	76.316	0.064
3	D_2	28.000	73.684	0.062
4	D_4	28.000	73.684	0.062
5	S_1	27.000	71.053	0.060
6	S_5	25.000	65.789	0.055
7	G_2	24.000	63.158	0.053
8	S_8	24.000	63.158	0.053
9	M_1	23.000	60.526	0.051
10	E_2	16.000	42.105	0.035

通过线的中间中心度确定事故中的关键影响路径,从而为有效阻断事故发生路径、降低事故发生率提供依据。利用 Ucinet 分析得到事故致因网络线的中间中心度,矩阵中大于 0 的关系有 432 条,为使关键影响路径的结果更加准确,取大于平均值关系的前 10 条作为关键关系,见表 4。

表 4 化工火灾事故致因网络中的关键关系
Table 4 Key relationships in the cause network of chemical fire accidents

序号	影响路径	线的中间中心度
1	$D_1 \leftrightarrow D_4$	15.500
2	$M_3 \leftrightarrow D_4$	14.500
3	$D_1 \leftrightarrow S_1$	8.000
4	$E_2 \leftrightarrow M_3$	7.667
5	$S_1 \leftrightarrow S_8$	7.167
6	$M_3 \leftrightarrow M_1$	6.625
7	$D_1 \leftrightarrow E_{12}$	6.583
8	$E_{12} \leftrightarrow D_2$	5.833
9	$S_2 \leftrightarrow E_{12}$	5.792
10	$M_3 \leftrightarrow E_{14}$	5.592

2.4 关键致因路径

根据得到的前 10 条关键关系,作出人因因素的关键致因路径。化工火灾事故人因的致因结构,如图 3 所示。通过深入分析这些关系,可揭示人因因素与管理因素在事故发生中的重要作用,尤其是人员准备不足、管理疏漏等问题。

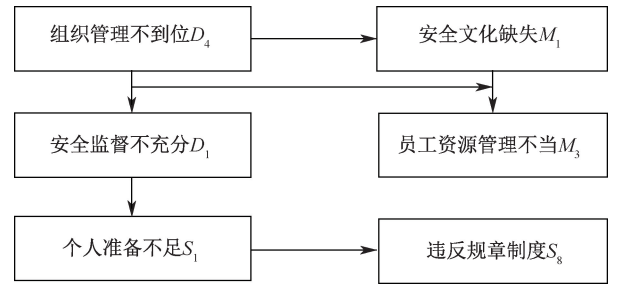


图 3 事故关键致因关系
Fig. 3 Relationship diagram of critical causes of accidents

从图 3 可以看出,化工火灾事故发生的人因关键路径为:组织管理不到位→安全监督不充分→个人准备不足→违反规章制度。上述致因路径的形成机制揭示了管理因素因监督执行薄弱间接诱发个体层失误,从而引发事故链条。该路径反映了化工火灾事故中“组织决策失控—中层监管缺位—一线准备不足”的多级传导模式,可为企业构建闭环式安全管理机制、政府实施精准监管提供明确方向。

3 结 论

1) 微观因素是导致化工火灾事故的最关键致因因素,其中,个人准备不足和违反规章制度是直接触发事故的主要因素;中观层面致因以组织管理不到位和安全监督不充分为核心;宏观层面致因主要表现为安全管理监督检查不到位。

2) 通过社会网络分析发现,度数中心度>0.03 的节点构成事故致因的核心网络,其中,安全监督不充分 D_1 、员工资源管理不当 M_3 等管理因素占据关键位置。

3) 化工火灾事故的关键致因路径为:组织管理不到位→安全监督不充分→个人准备不足→违反规章制度。这一路径揭示了各层级因素间的相互作用,并强调管理与执行层面的问题是化工火灾事故发生的主要驱动因素。

4) 文中仍存在一定局限性,如事故报告来源有限且描述详略不一,文本挖掘与 LDA 主题建模存在参数敏感性与部分主观解释,SIF 模型在层次划分

中未能充分体现事故发展动态特征,后续将通过扩大样本规模、引入动态分析方法和优化模型设置进一步提升研究的系统性与精度。

参 考 文 献

- [1] CUI Yan, LIU Jianghong. Research progress of water mist fire extinguishing technology and its application in battery fires[J]. Process Safety and Environmental Protection: Transactions of the Institution of Chemical Engineers, Part B, 2021, 149: 559–574.
- [2] KAMIL M Z, KHAN F, HALIM S, et al. A methodical approach for knowledge-based fire and explosion accident likelihood analysis[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023, 170: 339–355.
- [3] SAM M. Lees' loss prevention in the process industries: hazard identification, assessment and control[M]. Texas: Butterworth-Heinemann, 2012: 1 075–1 366.
- [4] MICHALAKAKIS C, CULLEN J M, HERNANDEZ A G, et al. Exergy and network analysis of chemical sites[J]. Sustainable Production and Consumption, 2019, 19: 270–288.
- [5] KHAKZAD N, LANDUCCI G, RENIERS G. Application of dynamic Bayesian network to performance assessment of fire protection systems during domino effects[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2017, 167: 232–247.
- [6] LONG Ding, JIE Ji, KHAN F. Combining uncertainty reasoning and deterministic modeling for risk analysis of fire-induced domino effects[J]. Safety Science, 2020, 129: DOI:10.1016/j.ssci.2020.104802.
- [7] 陈文瑛, 李泳瞰, 宋志光. 基于复杂网络的生产安全事故致因研究:以北京市某城区为例[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(7): 7–12.
- CHEN Wenying, LI Yongtun, SONG Zhiguang. Research on causes of work safety accidents based on complex network theory: a case study of a district in Beijing[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(7): 7–12.
- [8] 刘丹, 朱卫昌, 李墨潇, 等. 利益相关者视角下化工安全关键致因网络分析[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(11): 59–66.
- LIU Dan, ZHU Weichang, LI Moxiao, et al. Network analysis of chemical safety critical causation from perspective of stakeholders[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(11): 59–66.
- [9] 郑彬彬, 冯婷婷, 王佳贺, 等. 基于文本挖掘的城镇燃气事故致因及关联分析[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(7): 190–195.
- ZHENG Binbin, FENG Tingting, WANG Jiahe, et al. Causes and correlation analysis of urban gas accidents based on text mining[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(7): 190–195.
- [10] 王涵. 人工智能在炼化领域的应用现状及思考[J]. 炼油技术与工程, 2025, 55(2): 12–15.
- WANG Han. Application status and thinking of artificial intelligence in refining and chemical field[J]. Petroleum Refinery Engineering, 2025, 55(2): 12–15.
- [11] 王亮, 赖佳燕, 张自欣, 等. 基于文本挖掘和改进 DEMATEL 法的化工事故关键因素识别[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(3): 20–28.
- WANG Liang, LAI Jiayan, ZHANG Zixin, et al. Identification of critical factors in chemical accidents based on text mining and improved DEMATEL method[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(3): 20–28.
- [12] 应急管理部. 化工火灾事故[EB/OL]. (2025–03–27). <https://www.mem.gov.cn/gk/sgcc/tbzdsgdcbg/>.
- [13] 安全管理网. 化工火灾事故[EB/OL]. (2025–06–29). <https://www.safehoo.com/Case/Case/Blow/>.
- [14] HAVRLANT L, KREINOVICH V. A simple probabilistic explanation of term frequency-inverse document frequency (TF-IDF) heuristic (and variations motivated by this explanation) [J]. International Journal of General Systems, 2017, 46(1): 27–36.
- [15] JELODAR H, WANG Yongli, YUAN Chi, et al. Latent dirichlet allocation (LDA) and topic modeling: models, applications, a survey [J]. Multimedia Tools and Applications, 2019, 78(11): 15 169–15 211.

作者简介: 王佩 (1987—), 女, 湖北武汉人, 博士, 讲师, 主要从事职业卫生、粉尘治理和人因工效学方面的研究。E-mail: wangpei@cueb.edu.cn。