

Hazard Identification in Metro Construction

—Case Study of Ningbo Metro Line 3

Zongbao Luo¹, Zhongwu Liu², Yinqi Chen^{3,4}, Shengpo Zheng³, PingWu³, Yidong Xu^{3*}

¹Ningbo Urban Construction Design Institute Co., Ltd., Ningbo Zhejiang

²Urban Rail Transit Center of CARS, Beijing

³Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo Zhejiang

⁴School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing

Email: *xyd@nit.zju.edu.cn

Received: Apr. 14th, 2019; accepted: Apr. 29th, 2019; published: May 6th, 2019

Abstract

Ningbo plans to operate five metro lines in 2021, hence entering the era of Big Metro. However, as a coastal city, Ningbo's special soft soil feature plus the high groundwater level bring various safety hazards to the construction of the metro system. Therefore, it is particularly important to reduce the occurrence of construction hazards by identifying sources of danger. This study compiles and improves the existing research results to form a dangerous source identification library for metro construction in Ningbo. Starting from Ningbo Metro Line 3, through the analysis of its innate conditions, construction technology and related safety management structure, a construction hazard source checklist was initially formed. Then, experts are interviewed such as the construction and supervision parties of Ningbo Metro Line 3; several construction hazards relatively important for the project were discussed. Finally, the LEC evaluation method and risk acceptance criteria were introduced to semi-quantitatively identify the construction hazard sources to identify major hazards of the project. Through this research method, it is possible to determine the hazard source with a large degree of hazard for different construction projects, in order to take corresponding preventive management and control measures before the start of construction to reduce the occurrence of engineering accidents.

Keywords

Hazard Identification, Metro Construction, LEC Evaluation Method, Risk Acceptance Criteria, Ningbo

地铁施工危险源辨识研究

——以宁波地铁三号线为例

罗宗保¹, 刘仲武², 陈音圻^{3,4}, 郑圣坡³, 吴萍³, 徐亦冬^{3*}

*通讯作者。

¹宁波市城建设计研究院有限公司, 浙江 宁波

²中国铁道科学研究院集团有限公司城市轨道交通中心, 北京

³浙江大学宁波理工学院, 浙江 宁波

⁴重庆交通大学土木工程学院, 重庆

Email: xyd@nit.zju.edu.cn

收稿日期: 2019年4月14日; 录用日期: 2019年4月29日; 发布日期: 2019年5月6日

摘要

宁波计划于2021年前开通5条地铁, 将进入大地铁时代。但宁波作为沿海城市, 其特殊的软土地质加上高地下水位, 也给地铁的建设带来各种安全隐患。因此, 通过辨识危险源来减少施工危险事故的发生就变得尤为重要。本研究通过整理和完善已有研究成果, 形成适用于宁波地区的地铁施工危险源辨识库。从宁波地铁三号线着手, 通过分析其先天条件、施工工艺以及相关安全管理架构等, 初步形成施工危险源检查表。再通过与宁波地铁三号线施工方、监理方等有多年管理经验的专家讨论议定该项目相对重要的几项施工危险源。最后引入LEC评价法和风险接受准则, 对于施工危险源进行半定量的打分, 从而辨识出项目的重大危险源。通过本研究方法, 可以针对不同的施工项目确定其存在的危害程度大的危险源, 从而在开工前采取相应的预防管控措施, 来减少工程事故的发生。

关键词

危险源辨识, 地铁施工, LEC评价法, 风险接受准则, 宁波

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

随着我国经济的高速发展, 城镇化率的不断提高, 现代城市交通已经基本进入了全方位立体运输时代。如今, 中国已有 42 个城市开始修建地铁, 隧道总里程 7000 km 以上, 每年以 450 km 以上的速度增长, 城市轨道交通建设已经进入一个高速发展的时期[1], 但同时地铁施工事故的频繁发生同样引起了人们的关注。由于地铁的建设选址大多为城市经济贸易繁荣的区域, 因此其事故带来的后果将是灾难性的。例如西安地铁开始建设 7 个月发生四起事故, 杭州地铁湘湖站坍塌事故造成 21 人死亡[2]。施工技术的不成熟以及对危险源的不明确势必会导致施工事故的高发, 而地铁事故造成灾难性后果也突出了施工危险源辨识的必要性。

与地上施工不同, 地下工程施工环境差距巨大。地下施工具有其特有的施工问题, 例如照明、通风、地下水、塌方、防尘等问题。综合以上事故发生的原因, 相较于一般地上工程, 归纳地铁工程施工事故的发生主要包含以下几个特征: ①工程地质和水文条件对施工的影响大; ②危险的突发性强, 反应时间短; ③地铁施工事故发生的随时性和不确定性; ④地铁施工致灾性严重。

对于地铁施工风险的分析历经了长久的发展。许志国对地铁车站土建工程施工管理中的风险和对策进行了分析, 了解到地铁车站土建工程施工中存在着一定的风险因素并提出对策[3]。郭健采用层次分析法和专家调查法, 分析深基坑施工风险因素, 估计风险发生概率与风险损失, 且采用梯形隶属函数计算

风险事件的隶属度,运用模糊综合评价法进行风险评估,确定施工的风险等级[4]。苟敏选取了 18 个影响盾构施工的风险因素,构建了地铁盾构施工风险的解释结构模型(ISM),并分别从施工工艺、管理、环境三个方面进行了风险分析[5]。

危险源风险评价涉及众多因素,是因素交互作用的动态系统。因此,评价指标集的建立必须科学、合理和全面。赵艳莉从建筑施工安全管理角度入手,重点研究工程危险源的评价方法(LEC 法),在危险源评价中引入对作业条件危险性评价方法的灵活应用,对各类危险源的危险程度进行等级划分[6]。张思戡建立了一种基于熵权法和 LEC 评价法的综合评价模型,并将其运用于地铁施工安全评价中[7]。

针对地下工程施工的危险源辨识方法还未形成系统体系,重大危险源评价的相关研究还处于起步阶段,对于其的研究几乎是在近年内才开始的,且针对地下工程施工的相关研究较欠缺。

2. 危险源评价理论模型

2.1. LEC 评价法

本研究预采用半定量的 LEC 评价法,专家根据以往的工作经验和评估,分别对不同危险源进行考量打分,将打分结果再代入公式,去掉最高值和最低值,取大于三组的平均值为有效数据,从而可以得出该项工作的危险程度,继而判断评价危险性大小。

计算公式: $D = L \times E \times C$ 。

L ——事故发生的可能性;

E ——工人身处于危险环境的时间;

C ——发生事故的严重程度;

D ——危险性。

D 值越大,说明工作的危险性越大,需要采取相应措施避免或减轻该项工作的危险性。

2.2. 风险接受准则理论

通过 LEC 评价法对危险源进行风险等级评价后,能对初定的危险源按危险的程度进行区分。但是,以往有些研究中认为风险越小越好,实际上这个思想不够严谨,风险的控制需要付出代价。风险接受准则理论通常是将风险限定在一个合理的、可接受的区间内,寻找风险和利益的平衡点,从而得出可接受的风险,便无须耗费大量精力和财力。风险等级标准包括了风险发生概率的等级标准和风险发生后造成损失的严重性等级标准[8]。

3. 宁波地铁三号线施工危险源辨识过程

3.1. 工程特点

①地质条件较差,对施工质量的要求高

本工程基坑范围内有较厚的淤泥与淤泥质粉质粘土,稳定性差,变形大,在地连墙成槽过程中易产生变形,引起露筋、夹泥、尺寸偏差等影响。其次,是在基坑施工过程中,由于地基承受能力差,机械设备行走困难,易产生下陷。所以工程对水泥搅拌桩的施工质量要求高。

②填河、临河段对于地质的影响

本工程大部分施工段需进行河流改迁和填河处理,填河区域施工的质量情况将影响地下连续墙成槽及施工的质量。

③结构防渗漏控制

河道改迁后位于施工区域西侧,其布局基本与基坑平行,距离基边约 20 m,该工程所处地势较低,

对于地下连续墙、高压旋喷桩结构的防渗漏控制要求高。

④防汛措施

本工程使用明挖顺筑法，对降水的抵御能力较差，由于宁波台风季节易产生洪涝灾害，防汛成为本工程一大难点。

3.2. 项目针对性施工危险源辨识清单

3.2.1. 危险源因素分类罗列

为保证危险源辨识的全面性，本研究拟以工程进度为逻辑思路，从施工准备阶段、施工期间、竣工检查阶段三个阶段进行全方位分析，再从这三方面展开细化到各种风险子项目，从各个方面对整个施工过程进行安全检查，以找出危险源，由于在施工准备阶段和竣工检查阶段的危险源易早发现且容易控制，不作为本文研究重点，故省略，危险源辨识分类如图 1 所示。

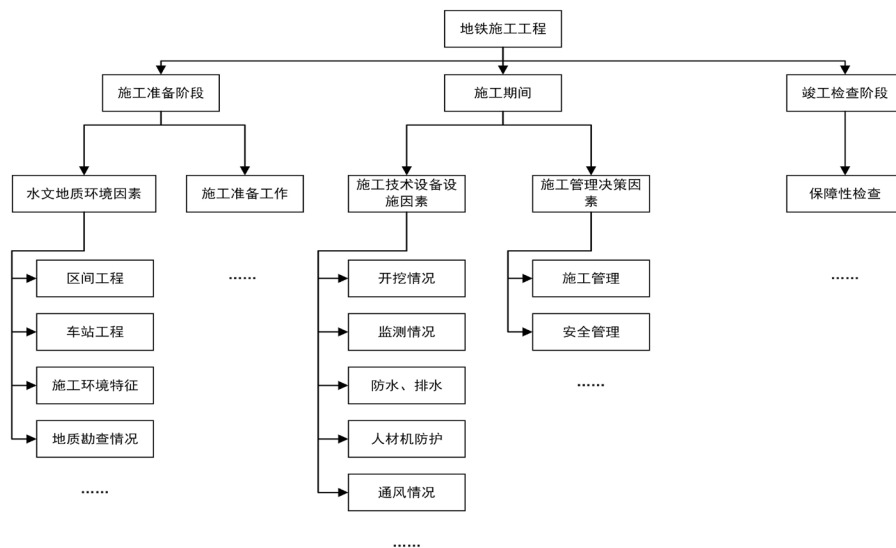


Figure 1. Classification of hazard source identification in metro construction
图 1. 地铁施工危险源辨识分类

3.2.2. 检查表针对性修改

在已有对地铁施工危险源检查表的研究基础上，结合宁波地铁三号线的现实状况，以图 1 为整体思路，整理建立成地铁施工风险因素检查表，对地铁施工危险源检查表进行修改，得出潜在风险检查事项，如表 1 所示。

Table 1. Basic conditions of Chenpodu Station - Huangjiacun Station
表 1. 地铁施工危险源检查表针对性修改

工程进度阶段	风险因素	风险因素细分	危险源检查事项
施工准备阶段	水文地质环境因素	区间工程或车站工程特征	各种地下管线分布；废弃结构物、构筑物，如孤石等；
		施工环境条件	地震、滑坡、台风、雨季； 周边建(构)筑物与基坑空间关系、使用年限、结构类型等
		工程地质因素	地下土质的层次分布、深度范围以及是否不良地质的情况；

Continued

	地下水	地下水位、水压力及水的腐蚀性；地下水的来源；土质的渗透性、含水量
施工准备因素	施工准备工作落实情况	地质资料的准确度；现场安全措施落地
	施工技术风险因素	新技术方法的使用；施工方案的合理性；施工技术落实问题；管理人员的技术水平；
施工技术设备设施因素	材料	材料供应的影响；运输、存储和施工损耗等因素；
施工期间	施工机械及其他设备	机械设备老旧折损影响；机械安装、调试的偏差；机械检修的不及时；
	施工管理	技术人员、管理人员工作不到位；施工用电管理不当；基坑临边防护不到位；起重吊装、垂直运输违规作业等；
施工管理决策因素	安全知识预警	火灾、坍塌、机械伤害、洪涝灾害及交通事故等；

3.2.3. 危险源辨识清单

依据施工危险源检查表，结合本工程各站点基本情况及专家咨询确认，汇总本项目危险源辨识清单，汇总结果如表 2 所示。

Table 2. Hazard identification list

表 2. 危险源辨识清单

序号	危险源检查事项	序号	危险源检查事项
1	地质勘察准确度	8	支撑体系稳定性
2	地连墙槽壁稳定性	9	降水引起周围地表沉降
3	地连墙及其接头漏水	10	起重吊装
4	地下连续墙钢筋笼吊装	11	高支模
5	围护结构变形过大	12	汛期临近河水水位上升
6	基坑开挖纵坡稳定性	13	安全教育
7	基底隆起		

3.3. 危险源数据打分以及整理

本研究共邀请了 12 位地铁界的专家，引入 LEC 评价法，对确定的施工危险源检查事项进行评价，12 位专家根据附录表 A-1、表 A-2、表 A-3 的打分标准，对施工危险源辨识清单打分表 A-4 进行打分。将所获数据根据公式 $D = L \times E \times C$ ，计算得出各项危险源的 D 值(危险性)，去掉最高值和最低值，取 10 份有效数据取平均值作为最终结果，对照附录表 A-5，可以得出各项危险源的危险等级，数据整理结果如表 3 所示。

Table 3. Danger source evaluation data according to LEC evaluation method

表 3. 依照 LEC 评价法得出的危险源评价数据整理

D 值	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	均值	危险等级
1	4.5	0.5	0.25	3.5	0.5	1.5	3.5	0.5	0.5	210	22.525	D
2	0.6	3.5	18	9	42	2.8	9	3.5	42	700	83.04	C
3	70	10	3	60	10	700	60	10	42	18	98.3	C

Continued

4	45	3.5	126	126	420	420	84	21	252	4.5	150.2	C
5	42	21	126	36	126	252	36	21	126	42	82.8	C
6	180	14	252	126	6	180	126	14	18	36	95.2	C
7	42	42	126	210	0.5	3	18	84	1.5	84	61.1	D
8	36	6	126	210	10	1500	270	6	30	84	227.8	B
9	18	9	100	420	420	700	126	18	420	18	224.9	B
10	420	210	126	210	150	1500	126	420	150	70	338.2	A
11	180	90	18	27	450	900	210	180	450	30	253.5	B
12	6	1	60	30	21	18	12	1	21	3	17.3	E
13	3	0.5	3	6	0.5	42	126	0.5	0.5	6	18.8	E

引入风险接受准则理论，在姓名下方放置作者的单位，专家对确定的施工危险源检查事项根据附录表 A-6、表 A-7 的标准，对风险接受程度打分表 A-8 进行打分。所获得的数据，根据附录表 A-9、表 A-10 可以确定其风险级别。考虑到不同人对于各项危险源的自身考量标准不同，故本研究采取少数服从多数的原则，根据 10 份有效数据得出的各项危险源的风险等级专家认可度，认可度最高的风险等级即为既定风险等级。数据结果如图 2 所示，横轴表示 13 项危险源，竖轴表示不同等级的专家人数。

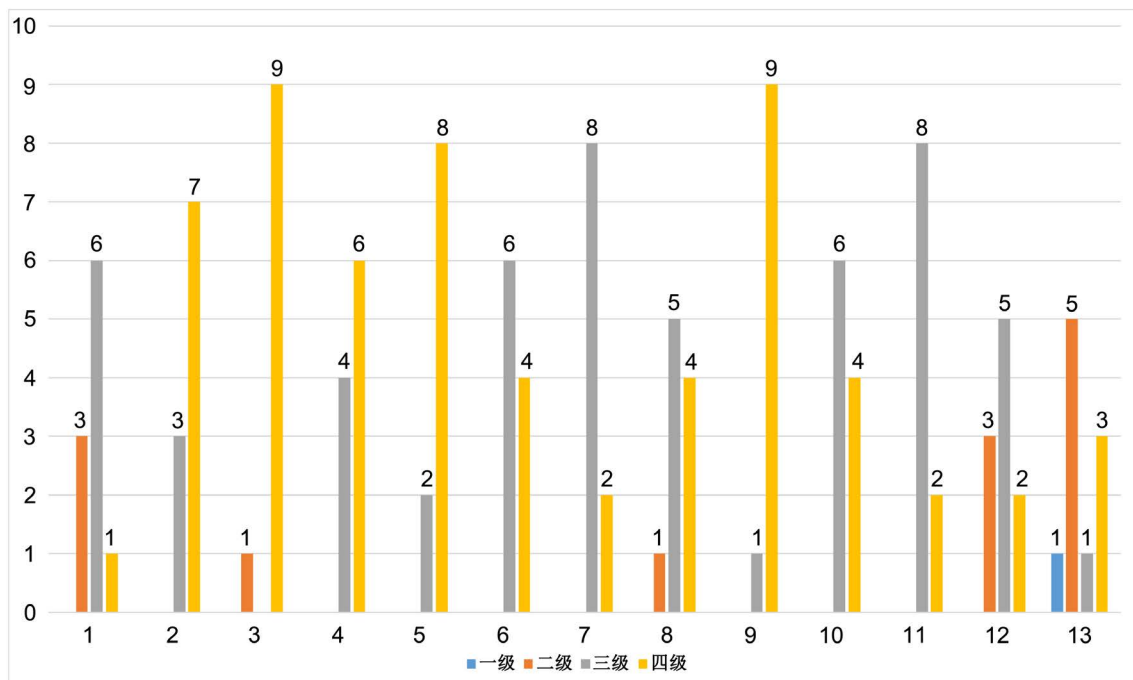


Figure 2. Risk level data distribution map
图 2. 风险等级数据分布图

3.4. 施工危险源评估结果

根据 LEC 评价法确定危险源危险等级，风险接受准则确定风险源接受度的先后原则，确定 1-12 为必须提前制定严格的预控措施，施工危险源评估结果如表 4 所示。

Table 4. Construction hazard assessment results
表 4. 施工危险源评估结果

序号	危险源检查事项	危险等级	风险接受等级	是否提前制定预控措施
1	地质勘察准确度	D	三级	是
2	地连墙槽壁稳定性	C	四级	是
3	地连墙及其接头漏水	C	四级	是
4	地下连续墙钢筋笼吊装	C	四级	是
5	围护结构变形过大	C	四级	是
6	基坑开挖纵坡稳定性	C	三级	是
7	基底隆起	D	三级	是
8	支撑体系稳定性	B	三级	是
9	降水引起周围地表沉降	B	四级	是
10	起重吊装	A	三级	是
11	高支模	B	三级	是
12	汛期临近河水水位上升	E	三级	是
13	安全教育	E	二级	否

4. 结论

1) 地铁施工危险源的辨识过程绝不可能简单地制定出一套万能的模版或者体系, 针对不同工程需要从工程实际情况出发, 根据工程自身特点制定方案, 进而进行辨识过程;

2) 在现有的施工技术上, 地铁施工危险源的辨识一定要站在对地铁施工有大量经验和见识的基础上, 再借助一些理论方法, 如 LEC 评价法和风险接受准则, 才能达到辨识危险源的最优效果;

3) 在对地铁施工危险源辨识过程中, 可以在确定较为重要的危险源后, 利用 LEC 评价法, 得出施工危险源的危险程度, 再利用风险接受准则, 得出施工危险源带来的风险可接受程度, 将两种方法结合, 可以有效确定危险源的主次程度, 进而利于危险源的控制。

致 谢

本文感谢中国铁道科学研究院基金课题(1851CG6504)的支持。

参考文献

- [1] 钟春玲, 夏彦杰. 地铁施工安全的影响因素分析[J]. 吉林建筑工程学院学报, 2014, 31(2): 11-14.
- [2] 张秋福. 郑州地铁工程项目施工安全管理研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2011.
- [3] 许志国. 地铁车站土建工程施工管理中的风险与对策[J]. 技术研发, 2017(12): 216.
- [4] 郭健, 钱劲斗. 地铁车站深基坑施工风险识别与评价[J]. 土木工程与管理学, 2017(9): 33-37.
- [5] 苟敏, 赵金先. 基于 ISM 模型的地铁盾构施工风险分析[J]. 沈阳建筑大学学报: 社会科学版, 2014(10): 391-393.
- [6] 赵艳莉. 建筑施工安全管理中的危险源评价及管理方法分析[J]. 建筑, 2014(11): 63-64.
- [7] 张思戡. 地铁安全施工风险因素综合评价分析研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- [8] 赵衍发. 浅埋暗挖法下穿既有地铁车站的风险控制[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2013.

附录

Table A-1. The possibility of an accident (L)

表 A-1. 事故发生的可能性(L)

分数值	事故发生的可能性
10	肯定会发生
6	相当可能
3	可能发生, 但不经常
1	可能性小, 意外情况
0.5	很不可能, 可以假设其存在
0.2	极不可能
0.1	实际不可能

Table A-2. Time when workers are in a dangerous environment (E)

表 A-2. 工人身处于危险环境的时间(E)

分数值	工人身处于危险环境的时间
10	连续暴露
6	每天工作时间内暴露
3	每周一次或偶然暴露
2	每月一次暴露
1	每年几次暴露
0.5	非常罕见暴露

Table A-3. The severity of the accident (C)

表 A-3. 发生事故的严重程度(C)

分数值	发生事故的严重程度
100	10人以上死亡
40	3~9人死亡
15	1~2人死亡
7	严重
3	重大, 伤残
1	引人注意

Table A-4. Hazard identification list**表 A-4.** 危险源辨识清单打分表

序号	危险源检查事项	事故发生的可能性(L)	工人身处于危险环境的时间(E)	发生事故的严重程度(C)
1	地质勘察准确度			
2	地连墙槽壁稳定性			
3	地连墙及其连接处漏水			
4	地下连续墙钢筋笼吊装			
5	围护结构变形过大			
6	基坑开挖纵坡稳定性			
7	基底隆起			
8	支撑体系稳定性			
9	降水引起周围地表沉降			
10	起重吊装			
11	高支模			
12	汛期临近河水水位上升			
13	安全教育			

Table A-5. Hazard rating form**表 A-5.** 危险等级评价表

D 值范围	危险程度	危险等级
>320	极其危险, 不能继续作业	A
160~320	高度危险, 需要马上重视	B
70~160	显著危险, 需要重视	C
20~70	一般危险, 注意即可	D
<20	稍有危险, 可以接受	E

Table A-6. Subway construction risk probability level standard**表 A-6.** 地铁施工风险发生概率等级标准

等级	A 级	B 级	C 级	D 级	E 级
事故发生	不可能	难得发生	偶尔发生	可能发生	频繁发生
概率	$P < 0.01\%$	$0.01\% = P < 0.1\%$	$0.1\% = P < 1\%$	$1\% = P < 10\%$	$P \geq 10\%$

Table A-7. Subway construction risk loss consequence level standard**表 A-7.** 地铁施工风险损失后果等级标准

等级	I 级	II 级	III 级	IV 级
后果损失	可忽略	较轻	严重	灾难性

Table A-8. Risk acceptance score sheet**表 A-8.** 风险接受程度打分表

序号	危险源检查事项	地铁施工风险发生概率等级	地铁施工风险损失后果等级
1	地质勘察准确度		
2	地连墙槽壁稳定性		
3	地连墙及其连接处漏水		
4	地下连续墙钢筋笼吊装		
5	围护结构变形过大		
6	基坑开挖纵坡稳定性		
7	基底隆起		
8	支撑体系稳定性		
9	降水引起周围地表沉降		
10	起重吊装		
11	高支模		
12	汛期临近河水水位上升		
13	安全教育		

Table A-9. Subway construction risk assessment matrix**表 A-9.** 地铁施工风险评价矩阵图

	I(可忽略)	II(较轻)	III(严重)	IV(灾难性)
A 不可能 $P < 0.01\%$	IA	IIA	IIIA	IIVA
B 难得发生 $0.01\% = P < 0.1\%$	IB	IIB	IIIB	IIVB
C 偶尔发生 $0.1\% = P < 1\%$	IC	IIC	IIIC	IIVC
D 可能发生 $1\% = P < 10\%$	ID	IID	IIID	IIVD
E 频繁发生 $P \geq 10\%$	IE	IIIE	IIIE	IIVE

Table A-10. Subway construction risk acceptance criteria**表 A-10.** 地铁施工风险接受准则

后果描述	级别	风险指标	风险决策标准
可忽略	一	一级: IA、IB、IC	可接受, 不必进行重视
较轻	二	二级: ID、IE、IIA、IIB、IIIA、IIVA	可接受, 但要重视起来
严重	三	三级: IIC、IID、IIIB、IIIC、IIVB	不希望发生; 拒绝风险
灾难性	四	四级: IIIE、IIID、IIIE、IIVC、IIVD、IIVE	不可接受; 停止运营和立即整顿

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2326-3458，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：hjce@hanspub.org