

# 基于案例统计-层次分析法的地铁重大 公共安全风险评估指标体系<sup>\*</sup>

马彪

(铁道警察学院, 450053, 郑州//讲师)

**摘要** 为定量描述地铁重大公共安全风险,提高风险管理水平,统计了近年来全球范围内发生在地铁区域的重大公共安全事件,并从袭击方式、事发时间和事发部位三个维度分析了事件的特征。构建了地铁重大公共安全风险评估指标体系,并以风险减缓因子指标为例,运用层次分析法得出各级指标的权重值。结果表明,安全操作规程、安全检查、应急响应能力在防范地铁重大公共安全风险中作用突出;指标体系符合实际,能够客观评价地铁面临的总体风险。

**关键词** 地铁;重大公共安全风险;评估指标体系;层次分析法

**中图分类号** F530.7

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2021.08.020

## Assessment Indicator System of Major Public Safety Risks in Metro Based on Case Statistics-Analytic Hierarchy Process

MA Biao

**Abstract** In order to quantitatively describe major public safety risks in metro and to elevate risk management level, major public safety incidents that have occurred in metro areas in recent years worldwide are counted, and characteristics of the incidents are analyzed from three dimensions: attack format, the time of incident, and the location of incident. Major public safety risk assessment indicator system for metro is constructed, and with the risk mitigation factor indicator as an example, the weight value of indicators at each level is obtained using the AHP (analytic hierarchy process). The results show that safe operation procedure, safety inspections and emergency response capabilities contribute prominently in preventing major public safety risks in metro. The indicator system is practical and is capable of objectively evaluating the overall risks faced in metro.

**Key words** metro; major public safety risk; assessment indicator system; AHP (analytic hierarchy process)

**Author's address** Railway Police College, 450053, Zhengzhou, China

习近平总书记多次就公共安全工作作出重要指示,他强调:当前公共安全事件易发多发,维护公共安全任务繁重,要求增强风险意识,有效防范、化解、管控各类风险,努力建设平安中国。党的十九大报告也将防范化解重大风险作为决胜全面建成小康社会的三大攻坚战之一。国办发[2018]13号《关于保障城市轨道交通安全的意见》(以下简称“13号文”)提出城市轨道交通运行遵循“预防为主,防处并举”的基本原则,明确要求构建风险分级管控和隐患排查治理双重预防制度。地铁公共安全关乎国家安全。近年来,全球范围内发生在地铁区域的重大公共安全事件屡见不鲜,造成了重大的人员伤亡、财产损失和社会影响。引入风险管理可以使得有关部门提前掌握地铁重大公共安全风险信息,使系统的风险水平处于可控状态,确保地铁安全运行。但是受限于当前地铁公共安全风险评估理论还未成熟,其风险管理工作仍停留在表面。基于此,开展风险评估指标体系构建方面的研究对于加强地铁公共安全风险管理,提高安全管理水平具有一定的参考意义。

## 1 地铁重大公共安全事件

### 1.1 事件统计

近年来,我国地铁建设飞速发展,与此同时,安全问题也日益严峻。地铁具有空间封闭、客流集中、逃生困难、救援难度大等特点,已经成为犯罪分子实施犯罪活动的重要目标<sup>[1]</sup>。本文对近年来全球范围内在地铁区域内的恐怖袭击及个人极端犯罪等重大公共安全事件进行了统计,结果如表1所示。

<sup>\*</sup> 河南省软科学研究计划项目(212400410347)

表 1 近年来全球范围内发生在地铁区域的重大公共安全事件统计表

序号	事件名称	事发时间	袭击方式	国家	伤亡情况
1	巴库地铁爆炸案	1994-03-19	爆炸	阿塞拜疆	14 人死亡,49 人受伤
2	巴库地铁爆炸案	1994-07-03	爆炸	阿塞拜疆	13 人死亡,58 人受伤
3	东京地铁沙林毒气案	1995-03-20	生化	日本	13 人死亡,5 500 多人受伤
4	巴黎地铁爆炸案	1995-07-25	爆炸	法国	4 人死亡,62 人受伤
5	巴黎地铁爆炸案	1996-12-03	爆炸	法国	2 人死亡,83 人受伤
6	莫斯科地铁爆炸案	2001-02-05	爆炸	俄罗斯	15 人受伤
7	大邱地铁纵火案	2003-02-18	纵火	韩国	198 人死亡,147 人受伤
8	莫斯科地铁爆炸案	2004-02-06	爆炸	俄罗斯	40 人死亡,134 人受伤
9	马德里地铁爆炸案	2004-03-11	爆炸	西班牙	191 人死亡,1 800 多人受伤
10	莫斯科地铁爆炸案	2004-08-31	爆炸	俄罗斯	10 人死亡,50 多人受伤
11	伦敦地铁爆炸案	2005-07-07	爆炸	英国	52 人死亡,700 多人受伤
12	莫斯科地铁连环爆炸案	2010-03-29	爆炸	俄罗斯	39 人死亡,95 人受伤
13	明斯克地铁站爆炸案	2011-04-11	爆炸	白俄罗斯	12 人死亡,204 人受伤
14	开罗地铁站爆炸案	2014-06-25	爆炸	埃及	5 人受伤
15	伊斯坦布尔地铁站爆炸案	2015-12-01	爆炸	土耳其	1 人死亡,1 人受伤
16	布鲁塞尔地铁站爆炸案	2016-03-22	爆炸	比利时	20 人死亡,106 人受伤
17	香港地铁纵火案	2017-02-10	纵火	中国	18 人受伤
18	圣彼得堡地铁爆炸案	2017-04-03	爆炸	俄罗斯	14 人死亡,49 人受伤
19	伦敦地铁爆炸案	2017-09-15	爆炸	英国	29 人受伤
20	纽约地铁爆炸案	2017-12-11	爆炸	美国	4 人受伤

1.2 事件特征分析

1.2.1 袭击方式

重大公共安全事件的袭击方式主要有爆炸、生化及纵火袭击。由表 1,近年的重大公共安全事件中,爆炸类占 85%,生化类占 5%,纵火类占 10%。爆炸类和生化类事件性质为恐怖袭击,纵火类事件性质为个人极端犯罪。

由此可见,采取大规模杀伤力的爆炸袭击是地铁受袭的主要方式,纵火和生化袭击次之。危险物品携入站内是导致地铁发生重大公共安全事件的重要原因。因此,地铁运营单位应严格按照《中华人民共和国反恐怖主义法》第三十四条的规定,对进入地铁站的人员及物品实施安全检查,落实主体责任。公安机关城市轨道交通安保部门应做好指导监督工作。

1.2.2 事发时间

事发时间集中于早晚高峰时段(07:00—09:00,17:00—19:00),如图 1 所示。由图 1 可知,重大公共安全事件主要发生在早高峰时段,占比高达 60%,早晚高峰时段合计占比达 85%。由于高峰时

段客流量大,人员密集,一旦发生恐怖袭击、纵火等重大公共安全事件,一方面犯罪行为本身会导致大面积人员伤亡,另一方面乘客由于恐慌,可能会引发客流对冲、拥挤踩踏等二次伤害事件,从而造成群死群伤的严重后果。这也符合犯罪人员实施犯罪活动的意图。因此,应加强地铁车站早晚高峰时段的安全保卫工作:①地铁民警增加站区的巡逻频次,提高见警率,必要时可以挟犬巡逻,起到威慑作用;②地铁员工做好站内客流疏导工作,优化安全检查路径,在条件允许情况下采取站外安检的措施,避免乘客大面积聚集及危险物品进入站内;③增加早晚高峰时段的列车发车频次,缩短发车间隔,提高地铁运力,快速消化站内客流。

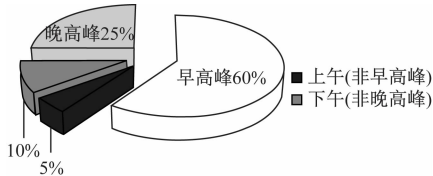


图 1 事发时间比例

1.2.3 事发部位

分析相关数据可知,犯罪分子实施犯罪行为的

部位有列车车厢、区间线路、站厅、站台和站外,且更倾向于选择在列车车厢内实施犯罪行为。此类事件占比高达75%。其中,待地铁列车停靠站台时实施犯罪行为的占55%,在线路区间实施犯罪行为的占20%。此外在地铁站内和站外实施爆炸袭击的数量占比分别为15%和10%。

事发部位不同,事件造成的严重后果程度差距很大,对应急处置能力的要求也不尽相同。

2017年发生的“4·3圣彼得堡地铁爆炸案”和“2·10香港地铁纵火案”,都是非常典型的应急处置比较成功的案例<sup>[2-3]</sup>。在这两起事件中,司机、站务人员和行车指挥人员等地铁员工临危不乱,警察、消防及特勤队等专业力量快速反应,支援力量和应急物资等应急保障高效有力。此外,成功的应急处置也离不开乘客牢固的安全意识。事发后乘客们第一时间开展互帮互救,避免了事件的进一步恶化,最大程度降低了人员伤亡和经济损失。

对比来看,2003年2月18日发生在韩国大邱的地铁纵火案,正是由于列车司机、行车指挥等人员一系列的处置失误,最终造成了198人死亡、147人受伤的惨重后果。

## 2 地铁重大公共安全风险评估指标体系

### 2.1 指标体系的构建原则

构建地铁重大公共安全风险评估指标体系(以下简为“指标体系”)的关键不在于选取的评价指标数量,而在于所选指标在风险评估中所起的作用。指标体系的构建需遵循以下原则:

1) 科学性。这是指标体系构建应遵循的最基本原则。指标选取应有一定的科学理论依据作指引,能客观反映评估对象的实际情况。地铁重大公共安全风险评估是由许多要素构成的复杂系统,涉及较多指标,在实际构建过程中,应当基于科学的理论,合理选取相关指标,指标既不能过多,失去其可行性,又不能遗漏重要指标,缺乏适用性。

2) 协调性。指标体系的构建要与现行法律法规及标准规范等规范性文件相协调,避免相互冲突、脱节。协调性原则既便于指标的选取,也使指标的评判更有依据。

3) 特殊性。地铁重大公共安全风险评估与一般公共安全风险评估不同,指标体系构建具有明显的特殊性:①关注的风险类型特殊,同防火防盗等

一般公共安全风险相比,地铁重大公共安全风险主要指恐怖袭击风险及个人极端犯罪风险等非传统安全风险;②管控主体不同,一般公共安全风险管控主体主要是公安机关,地铁重大公共安全风险评估是多方参与的管理体制,要具体做到政府主导、行业主管、部门监管、企业主责、公民参与;③管控风险的方式不同,一般公共安全风险管控侧重于事后处置,地铁重大公共安全风险管控侧重于预防为主,同时要做到突发情况下的快速处置。

4) 可操作性。指标体系的合理构建是开展地铁重大公共安全风险评估工作的关键,指标的合理性直接影响风险评估的可行性和可操作性。由于公共安全涉及的指标庞杂,需进行合理筛选。指标的选取既要全面科学,又要尽可能简化;选取的指标既要能够反映地铁遭受重大破坏的风险程度,还要可以量化。只有过滤掉复杂指标、不能量化指标及对评估结果影响甚微的指标,才能确保指标体系在后期的应用中具有可操作性。

### 2.2 指标体系的构建

#### 2.2.1 一级指标

构建的指标体系主要用来量化测评地铁发生重大公共安全事件的可能性或事件发生带来后果的影响程度,从而确定风险等级。指标体系的一级指标可参照JT/T 961—2015《交通运输行业反恐怖防范基本要求》<sup>[4]</sup>对恐怖袭击风险等级确定的方法。文献[4]规定,城市轨道交通反恐怖防范等级分为一级(日常状态)、二级(戒备状态)和三级(紧急状态),具体等级由恐怖威胁发生的可能性和潜在后果的严重性等两方面确定。据此,地铁重大公共安全风险可以表述为重大公共安全事件发生的可能性与后果的严重性的综合度量。

一般衡量风险大小的指标是风险率 $R$ ,其值为事件发生的可能性概率 $P$ 与事件发生后果的严重性 $C$ 的乘积<sup>[5]</sup>,即:

$$R = PC \quad (1)$$

重大公共安全事件的 $P$ 无法确定,常用事件的发生频率来代替 $P$ 。兰德公司于2004年提出,恐怖袭击概率可由威胁性指标 $T$ (Threat)和脆弱性指标 $V$ (Vulnerability)表示<sup>[6]</sup>。鉴于此,地铁重大公共安全风险 $R_T$ 可表示为:

$$R_T = TVC \quad (2)$$

相应的,本文构建的指标体系一级指标分为威

胁性、脆弱性和严重性等3个方面,并采用层级结构来确定其下各层级的指标。

### 2.2.2 威胁性指标

威胁性指标表示地铁作为袭击目标以特定方式被犯罪分子袭击的频率。根据地铁重大公共安全事件特征可知,不同的袭击方式、事发时间和事发部位,对于地铁的威胁程度大为不同。对此,将威胁性指标划分为袭击方式、事发时间和事发地点等3个二级指标。其中,袭击方式包括爆炸袭击、纵火和生化袭击等3个三级指标;事发时间包括早高峰、上午(非早高峰)、下午(非晚高峰)和晚高峰等4个三级指标;事发地点包括列车车厢(区间)、列车车厢(站台)、站厅或站台和站外等4个三级指标。

### 2.2.3 脆弱性指标

脆弱性指标表示地铁作为袭击目标对特定类型袭击方式的敏感性和承受能力,包括固有脆弱性和风险减缓因子2个二级指标<sup>[7]</sup>。固有脆弱性表示地铁的易受攻击性,包括车站类型(如枢纽站、换乘站及一般站等)、车站位置的重要性及客流量等3个三级指标。风险减缓因子表示地铁采取的安全管理和安全防范措施对固有脆弱性的补偿。

安全管理方面涵盖的下级指标参照 GB 51151—2016<sup>[8]</sup>中对于公共安全风险评估内容的规定,分为日常管理、应急处置和应急保障。其中:日常管理主要包括安全操作规程和信息管理与发布等两大重要指标;应急处置包括事故应急培训、应急响应、应急预案和应急演练等4个指标;应急保障表示突发重大公共安全事件后所能提供的人、财、物的支持能力,分别对应支援力量、资金保障和应急设备等指标。

安全防范指标指的是为防范重大公共安全事件采取的措施,可从传统的技防、物防和人防等维度进行研究。影响地铁公共安全因素很多,具有较强的不确定性和复杂性,使各方面评估指标的选取具有一定的难度。指标选取的合理程度势必影响风险评估结果的准确性和科学性。基于此,该层次指标的选取分2个步骤进行:一是以案例统计为基础,总结出地铁重大公共安全事件事发部位主要集中于列车车厢和地铁车站;二是以现行城市轨道交通安防标准为参考,梳理相关标准规范<sup>[9-10]</sup>,总结列车车厢和地铁车站应采取的技防、物防和人防措施。以此建立一个风险减缓因子下的以安全防范为二级指标,技防、物防、人防为三级指标和视频监控系统等为四级指标的评估指标体系(见图2)。

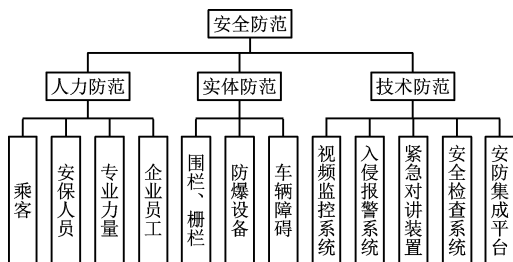


图2 地铁公共安全防范指标体系

### 2.2.4 严重性指标

严重性指标表示地铁遭受重大公共安全事件造成的损失程度。根据 GB 51151—2016,结合地铁实际情况,严重性指标包括人员伤亡、经济损失、环境影响、线路服务中断等4个二级指标。

### 2.2.5 指标体系

综上,构建地铁重大公共安全风险评估指标体系如图3所示。

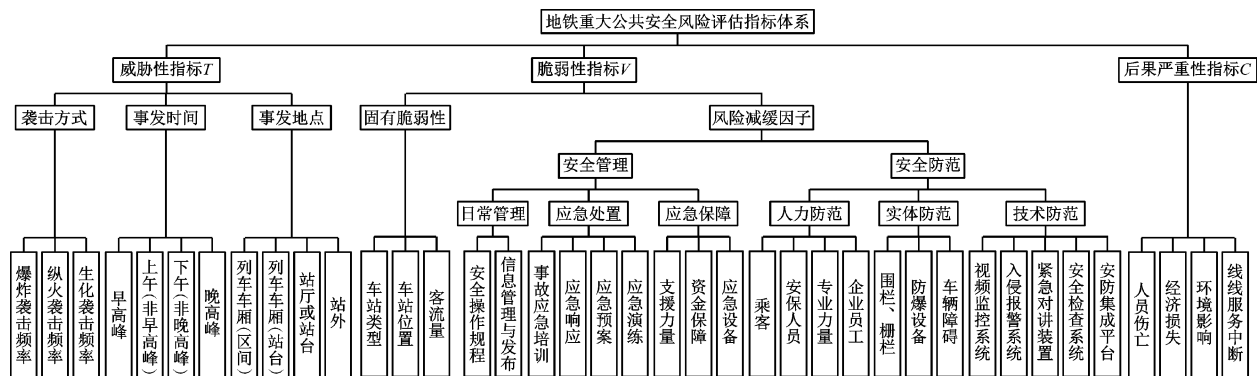


图3 地铁重大公共安全风险评估指标体系

3 指标权重赋值

3.1 AHP(层次分析法)

由图 3 可以看出,地铁重大公共安全风险指标呈现出承接和并列关系,但是各层次指标对于风险总指标的重要性不同。因此,要得到最终风险评估的风险值,就要对各指标的权重进行计算,指标权重赋值的合理程度将决定最终风险评估结果的科学性。AHP 是应用较广、理论研究相对成熟的一种指标赋值方法<sup>[11]</sup>。近年来,AHP 在社会系统的权重分析运用方面同样取得了较好的效果<sup>[12]</sup>。因此,本文采用 AHP 计算各指标的权重,进而对地铁重大公共安全风险进行量化评估和等级排序。AHP 具体步骤流程如图 4 所示。

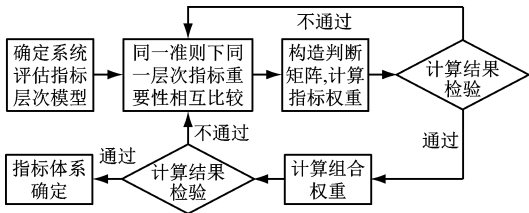


图 4 AHP 的步骤流程

3.1.1 构造判断矩阵

对同一层次的各元素关于上一层中同一准则的重要性进行两两比较,并对其重要性进行打分;利用 1-9 比较尺度法将重要性量化,构造判断矩阵  $A$ 。

$$A = (a_{ij})_{n \times n} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:

$a_{ij}$ ——第  $i$  个元素与第  $j$  个元素的重要性比较结果,且  $a_{ji} = 1/a_{ij}; i, j = 1, 2, \dots, n$ 。

3.1.2 层次单排序及其一致性检验

计算上述各个判断矩阵的最大特征值  $\lambda_{\max}$  及其特征向量  $W$ ,同时对特征向量进行归一化处理,即可得出同层次各个元素对于上一层同一目标的重要性权重值。进行一致性检验,计算一致性指标  $C_1$ :

$$C_1 = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1) \quad (4)$$

其中  $n$  表示判断矩阵  $A$  的阶数。

计算一致性比率  $C_R = C_1/R_1$ ,其中  $R_1$  为随机一

致性指标(见表 2)。 $C_R \leq 0.1$ ,表示结果具有满意的一致性; $C_R > 0.1$ ,则需对判断矩阵进行修正直至满足条件。

表 2 1~9 阶判断矩阵的  $R_1$  取值

阶数 $n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$R_1$	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

3.1.3 层次总排序及一致性检验

根据指标体系,由上而下逐层计算得出指标层相对于目标层的组合权重,并进行一致性检验。若通过一致性检验,则表示该组合权重可作为决策的定量依据。

3.2 指标的权重计算

本文以脆弱性指标模块下的风险减缓因子指标为例,阐述权重计算的过程。

根据图 3 中风险减缓因子指标的构成,构建 1 个以安全管理和安全防范为一级指标,以日常管理、应急处置、应急保障、人力防范、实体防范及技术防范为二级指标,包含安全操作规程、应急响应及视频监控系统等 21 个三级指标的风险减缓因子指标评估体系(以下称为“子指标体系”)。

邀请市级反恐部门及公安机关城市轨道交通安保部门的相关专家,对子指标体系中的各级指标重要性进行打分。综合打分结果,得出风险减缓因子指标的判断矩阵。例如,一级指标的判断矩阵为:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 1/2 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

利用 Matlab 软件工具计算可得, $A$  的最大特征值  $\lambda_{\max,A} = 2$ 。由于  $A$  为二阶矩阵,本身就具有完全一致性,故不需对其进行一致性检验。

随后运用层次分析法确定各级指标的权重。计算  $A$  的特征向量并进行归一化处理,得到特征向量  $W_A = (0.666\ 7, 0.333\ 3)^T$ ,则  $A_1$ 、 $A_2$  的权重分别为 0.666 7 和 0.333 3。

同样的方法,得出第  $i$  个二级指标判断矩阵  $B_i$  并进行计算,得到特征向量  $W_{B_i}$ 、最大特征值  $\lambda_{\max,B_i}$  和一致性比率  $C_{R,B_i}$ 。其中:

$$\begin{aligned} W_{B_1} &= (0.558\ 4, 0.319\ 6, 0.122)^T, \\ \lambda_{\max,B_1} &= 3.018\ 3, C_{R,B_1} = 0.015\ 8 < 0.1; \\ W_{B_2} &= (0.194\ 7, 0.088\ 1, 0.717\ 2)^T, \\ \lambda_{\max,B_2} &= 3.094, C_{R,B_1} = 0.081 < 0.1. \end{aligned}$$

可见,判断矩阵  $B_1$  和  $B_2$  具有满意的一致性,计算结果具有可靠性。

同样,列出第  $j$  个三级指标判断矩阵  $C_j$ ,计算其特征向量  $W_{C_j}$ 、最大特征值  $\lambda_{\max,C_j}$  和一致性比率  $C_{R,C_j}$ 。其中:

$$W_{C_1} = (0.833\ 3, 0.166\ 7)^T,$$
$$\lambda_{\max,C_1} = 2,$$
$$W_{C_2} = (0.123\ 6, 0.538\ 3, 0.256\ 2, 0.082)^T,$$
$$\lambda_{\max,C_2} = 4.107\ 6,$$
$$C_{R,C_2} = 0.039\ 9 < 0.1;$$
$$W_{C_3} = (0.569\ 5, 0.097\ 4, 0.333\ 1)^T,$$
$$\lambda_{\max,C_3} = 3.024\ 6,$$
$$C_{R,C_3} = 0.021\ 2 < 0.1;$$
$$W_{C_4} = (0.045\ 7, 0.202\ 7, 0.654\ 7, 0.094\ 2)^T,$$
$$\lambda_{\max,C_4} = 4.170\ 7,$$

$$C_{R,C_4} = 0.063\ 2 < 0.1;$$
$$W_{C_5} = (0.258\ 3, 0.637, 0.104\ 7)^T,$$
$$\lambda_{\max,C_5} = 3.038\ 5,$$
$$C_{R,C_5} = 0.033\ 2 < 0.1;$$
$$W_{C_6} = (0.261\ 5, 0.033\ 3, 0.063\ 4,$$
$$0.512\ 8, 0.129)^T,$$
$$\lambda_{\max,C_6} = 5.237\ 5,$$
$$C_{R,C_6} = 0.053 < 0.1。$$

其中,  $C_1$  为二阶矩阵,具有完全一致性。经检验,判断矩阵  $C_1 \sim C_6$  同样具有满意的一致性,计算结果具有可靠性。

计算组合权重并进行一致性检验,得出子指标体系的权重如表 3 所示。

表 3 子指标体系的权重

一级指标	一级指标权重	二级指标	二级指标权重	三级指标	三级指标权重
安全管理 $A_1$	0.666 7	日常管理 $B_1$	0.372 3	安全操作规程 $C_{11}$	0.310 2
				信息管理与发布 $C_{12}$	0.062 1
		应急处置 $B_2$	0.213 1	事故应急培训 $C_{21}$	0.026 3
				应急响应 $C_{22}$	0.114 7
				应急预案 $C_{23}$	0.054 6
				应急演练 $C_{24}$	0.017 5
		应急保障 $B_3$	0.081 3	支援力量 $C_{31}$	0.046 3
				资金保障 $C_{32}$	0.007 9
				应急设备 $C_{33}$	0.027 1
		人力防范 $B_4$	0.064 9	乘客 $C_{41}$	0.003 0
				安保人员 $C_{42}$	0.013 2
				专业力量 $C_{43}$	0.042 5
				企业员工 $C_{44}$	0.006 1
安全防范 $A_2$	0.333 3	实体防范 $B_5$	0.029 4	围栏、栅栏 $C_{51}$	0.007 6
				防爆设备 $C_{52}$	0.018 7
				车辆障碍 $C_{53}$	0.003 1
		技术防范 $B_6$	0.239 0	视频监控系统 $C_{61}$	0.062 5
				入侵报警系统 $C_{62}$	0.008 0
				紧急对讲装置 $C_{63}$	0.015 2
				安全检查系统 $C_{64}$	0.122 6
				安防集成平台 $C_{65}$	0.030 8

3.3 指标权重的分析

从表 3 可以看出,各项三级指标的权重差异较大。这说明各指标对防控地铁重大公共安全风险的作用差距很大。

1) 安全操作规程权重最高,达到 0.310 2。依

据 GB 51151—2016,安全操作规程主要包括公共安全岗位责任制、人力和资源配置等。地铁安全不是一家之责,其采用多元治理的管理体制。13 号文明确提出“城市人民政府对辖区内城市轨道交通安全运行负总责,充分发挥自主权和创造性,结合本地