

石潭湘江特大桥水下施工安全风险评估及管控^{*}张艺¹, 刘辉¹, 刘昶¹, 刘耀坤²

(1.长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.湖南理工学院 南湖学院, 湖南 岳阳 414000)

摘要: 为总结桥梁水下施工安全风险,根据近些年文献及类似施工案例,结合相关工程管理办法,设计涵盖 19 个安全风险因素的桥梁水下施工安全评价指标体系;以常祁(常宁—祁东)高速公路石潭湘江特大桥水下施工为依托,采用模糊数学综合评价法开展施工安全风险评估,同时构造 BP 神经网络模型,以线性内插法所得数据为输入及训练数据,预测石潭湘江特大桥水下施工的风险等级。结果表明,石潭湘江特大桥水下施工的模糊数学评价等级得分为 64.686 分,对应风险等级为Ⅲ级;BP 神经网络预测其水下施工风险值为 66.373 8,与模糊综合评价法评价结果的误差为 2.61%。最后总结桥梁水下施工安全风险的主要来源,并提出针对性的管控建议。

关键词: 工程管理;桥梁;水下施工;施工安全风险;模糊数学综合评价;BP 神经网络

中图分类号: U415.12

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2020)06-0161-05

近年来桥梁安全事故频发,其中施工期间的安全事故占比最高,加强施工期间桥梁建设风险评估,将风险防范的关口前移尤为重要。已有许多学者对桥梁建设期间的风险评估进行了研究,如施洲等研究了高速公路铁路两用桥梁的施工风险因素;黎立新等比选了山区桥梁建设采用的受力构件类型,总结了山区桥梁设计安全理念;王飞球等开展了跨既有线高速铁路桥梁的施工安全风险评估。桥梁风险评估方法也趋于多样化、复杂化、综合化,对桥梁各结构的风险评估趋于精细化、具体化。康俊涛等采用 K-means 聚类分析、贝斯网络分析法对武汉某斜拉桥上部结构开展了风险评估;梁晓飞等使用 Delphi 法、AHP(层次分析法)及可信性测度法对某跨江桥梁基础开展了风险评估;王可意等采用 AHP-DEA 法对东洋河大桥桩基础开展了风险评估。

考虑到桥梁水下施工复杂,风险因素多,权重优化尤为重要,上述评价方法很少体现在优化权重方面,而模糊数学综合判断法及 BP 神经网络模型评价方法能够实现权重优化,弱化人为因素。该文借助模糊数学综合评判及 BP 神经网络对桥梁水下施工安全风险进行评价。

1 施工安全风险评估指标体系

依照传统的施工安全风险分类,从人员、机具设备、管理、环境、施工技术 5 个维度划分风险类型。为探讨水下施工风险因素,基于专家调查法及文献查阅法,构建两级指标体系,其中一级指标包括人员风险、安全管理风险、环境风险、材料设备风险、施工技术风险 5 个风险指标,二级指标包括人员基础素质等 19 个风险指标(见表 1)。

表 1 桥梁水下施工安全风险评估指标体系

| 一级指标 | 一级指标权重 | 二级指标 | 二级指标权重 | 总排序组合权重 | 一致性检验 |
|--------|---------|-------------|---------|---------|--------------------------|
| 人员风险 | 0.120 9 | 人员基础素质 | 0.277 2 | 0.033 5 | CI=0.010 3 CR=0.011 5 |
| | | 各工位人员配备 | 0.160 1 | 0.019 4 | |
| | | 人员安全意识及防范 | 0.461 3 | 0.055 8 | |
| | | 技术人员占比 | 0.095 4 | 0.011 5 | |
| 安全管理风险 | 0.073 8 | 水上施工应急救援能力 | 0.327 3 | 0.024 2 | CI=0.021 6 CR=0.024 0 |
| | | 专项施工安全费用 | 0.134 2 | 0.010 0 | |
| | | 施工安全教育与培训 | 0.465 0 | 0.034 3 | |
| | | 安全生产制度及执行程度 | 0.073 6 | 0.005 4 | |

^{*} 基金项目:长沙理工大学专业学位研究生“实践创新与创业能力提升计划”项目(SJCX201926)

续表 1

| 一级 指标 | 一级 指标权重 | 二级指标 | 二级 指标权重 | 总排序 组合权重 | 一致性检验 |
|----------------|------------|-----------|------------|-------------|--------------------------------|
| 环境 风险 | 0.214 7 | 汛期施工 | 0.117 0 | 0.025 1 | $CI=0.032\ 3$ $CR=0.035\ 9$ |
| | | 河床地质 | 0.154 7 | 0.033 2 | |
| | | 水上交通环境 | 0.252 3 | 0.054 2 | |
| | | 浓雾等极端天气 | 0.476 1 | 0.102 2 | |
| 材料 设备 风险 | 0.214 7 | 新设备适应性 | 0.088 2 | 0.019 0 | $CI=0.004\ 8$ $CR=0.005\ 4$ |
| | | 材料质量 | 0.482 9 | 0.103 7 | |
| | | 设备机具工作状态 | 0.157 0 | 0.033 7 | |
| | | 设备机具安全防护 | 0.272 0 | 0.058 4 | |
| 施工 技术 风险 | 0.376 0 | 施工质量控制 | 0.625 0 | 0.235 0 | $CI=0.009\ 1$ $CR=0.015\ 8$ |
| | | 施工技术交底程度 | 0.238 5 | 0.090 7 | |
| | | “四新”技术成熟度 | 0.136 5 | 0.051 3 | |

注: CI 为一致性检验指标; CR 为一致性比率。

2 施工风险评估模型的建立

2.1 基于 AHP 的评价指标权重确定

为定性与定量分析桥梁水下施工过程的安全风险,采用经典的 AHP 法,依照 9 标度的 AHP 要素比较标准构造矩阵 A ,得:

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

对矩阵 A 进行一致性检验,结果见表 1。 $CR < 0.1$,矩阵 A 满足一致性要求。

2.2 模糊综合评价模型的构建与分析

多级模糊综合评价模型可反映评价对象的层次性及各层次因素的权重,避免因素过多造成难以分配权重。步骤如下:

(1) 将因素 U 分为几个子集,记为 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_n\}$ 。设第 i 个子集为 $U_i = \{U_{i1}, U_{i2}, \dots, U_{in}\} (i=1, 2, \dots, p)$, 则 $\sum_{i=1}^p i_k = n$ 。

(2) 对每个 U_i 按照一级模型分别进行综合评价。设因素权重分配为 \underline{A}_i , U_i 的模糊评价矩阵为

R , 得到:

$$B_i = A_i \circ R_i = (B_{i1}, B_{i2}, \dots, B_{im}) (i=1, 2, \dots, p)$$

(3) 把 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_n\}$ 中 U_i 的综合评判 B_i 看作 U 中的 p 个单因素评价,并设新的权重分配为 \underline{A} , 则总模糊评价矩阵为:

$$\underline{R} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_p \end{bmatrix} = (b_{ij})_{p \times m} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1m} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2m} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ b_{p1} & b_{p2} & \cdots & b_{pm} \end{bmatrix} \quad (2)$$

(4) 经过模糊合成运算,得二级综合评价结果如下:

$$B^* = \underline{A} \circ R \quad (3)$$

2.3 BP 神经网络风险评价模型的建立及训练

2.3.1 风险评价等级的确定

鉴于 BP 神经网络具有容错能力强、计算快、图像简单易懂等优点,采用 BP 神经网络作为桥梁建设风险评估模型。参照相关规范和文献[11]、[12]及专家问卷调查结果构建统一的桥梁水下施工安全指标体系分类标准参考值,作为 BP 神经网络数据训练及检验的基础。将表 1 中施工风险因素细化后,得到更具体的特征描述及相关数据标准或参考值(见表 2,因篇幅有限,表格中只列举部分内容)。

表 2 指标体系分类标准参考值

| 风险分类 | 评价指标 | 各风险等级的特征及评分值 | | | | |
|------|---------|--------------|--------|--------|-------|--------|
| | | I 级 | II 级 | III 级 | IV 级 | V 级 |
| 人员风险 | 人员基础素质 | 优秀 | 良好 | 一般 | 及格 | 低下 |
| | | >90 | 80~90 | 70~80 | 60~70 | <60 |
| | 各工位人员配备 | 人员非常充足 | 人员较为充足 | 人员基本满足 | 人员有缺失 | 人员严重缺失 |
| | | >95 | 80~95 | 70~80 | 60~70 | <60 |
| | ... | ... | ... | ... | ... | ... |

续表 2

| 风险分类 | 评价指标 | 各风险等级的特征及评分值 | | | | |
|--------|------------|---------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------|
| | | I 级 | Ⅱ 级 | Ⅲ 级 | Ⅳ 级 | V 级 |
| 安全管理风险 | 水上施工应急救援能力 | 救援设备完善,可正常使用 >95 | 救援设备较完善,基本满足 80~95 | 救援设备一般,多数情况满足使用 70~80 | 救援设备较欠缺,很难满足 60~70 | 救援设备欠缺,不能满足 <60 |
| | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| | ... | ... | ... | ... | ... | ... |

采用模糊数学法,依照表 2 中的参考值,得出风险等级的分级区间(见表 3)。

2.3.2 数据来源及训练成果分析

采用 19-6-4-1 网络结构,训练函数为 Traingd,训练次数设为 1 000 次,学习速率为 0.002,目标误差为 0.000 1。结合表 2 中评价指标的标准参考值,为加大训练数据量,采用线性内插的方式生成 21 组数据作为输入,并按下式进行归一化:

$$\bar{x}_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \tag{4}$$

式中: x_i 为变量的值; x_{\min} 和 x_{\max} 分别为变量的最小值、最大值。

表 3 风险等级的分级区间

| 总分 | 风险等级 | 总分 | 风险等级 |
|-------|----------|-------|----------|
| >85 | I 级(安全) | 50~59 | Ⅳ(危险) |
| 70~84 | Ⅱ 级(较安全) | <50 | V 级(很危险) |
| 60~69 | Ⅲ 级(一般) | | |

将对应的评价结果作为期望输出数据。在训练

151 次后,达到最优效果(见图 1、图 2)。从图 2 可以看出:训练及检测效果良好。

3 石潭湘江特大桥水下施工安全风险评估

3.1 工程概况

常祁(常宁—祁东)高速公路石潭湘江特大桥横跨湘江河道,位于祁东与常宁交界的湘江河段,泉州渡口上游 634 m 处。桥轴线与湘江河道正交,水流

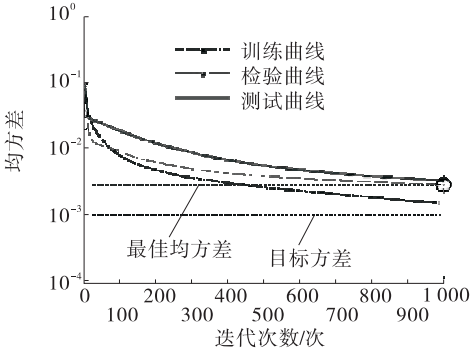


图 1 神经网络训练均方差误差曲线

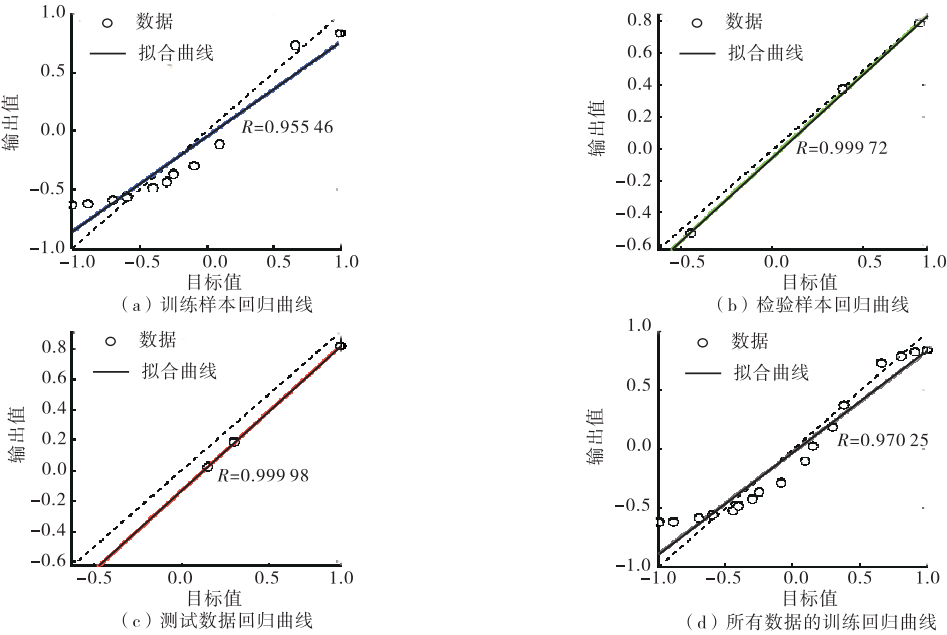


图 2 神经网络训练样本回归曲线

方向与桥轴法线的夹角小于 5° ,桥区河段水深条件良好,河床稳定。主桥跨径组合为 $(67+3\times 110+67)$ m,桥墩支点处梁高为6.9 m。梁底板底面曲线及底板顶面曲线均按照二次抛物线变化。主桥桥墩采用柱式墩,主墩桩基采用单排桩基础,桩基均按嵌岩桩设计并进入微风化泥质粉砂岩层。

该桥为常祁高速公路控制性工程,使用“四新”技术较多,综合创新性强,施工期经历两个汛期(每年6—10月)。该段航道为Ⅲ级,施工期间常有船舶过往,各种复杂因素造成施工安全风险不易掌控,需开展桥梁水下施工风险评估,以防止事故发生。

3.2 基于AHP法的模糊综合评价

对该桥水下施工风险进行评价,采用专家调查问卷的方法确定各风险因素的隶属度。施工过程中涉及的一、二级风险指标评定及一致性检验结果见表1,均满足一致性要求。专家成员主要由项目部经理、项目总工、高校教授、工程安全部人员、施工管理人员组成。10位专家对评价指标中每个因素打分评价,各影响因素的隶属度=每个评价等级的专家数/10,结果见表4。

表4 石潭湘江特大桥水下施工风险各因素专家评价结果

| 一级 评价 指标 | 二级 评价 指标 | 评价结果 | | | | |
|----------------|----------------|------|-----|----|----|-----|
| | | 安全 | 较安全 | 一般 | 危险 | 很危险 |
| 人员 风险 | 人员基础素质 | 1 | 3 | 4 | 2 | 0 |
| | 各工位人员配备 | 1 | 4 | 4 | 1 | 0 |
| | 人员安全意识及防范 | 1 | 2 | 5 | 1 | 1 |
| | 技术人员占比 | 2 | 3 | 4 | 1 | 0 |
| 安全 管理 风险 | 水上施工应急救援能力 | 2 | 2 | 5 | 1 | 0 |
| | 专项施工安全费用拨付 | 3 | 3 | 2 | 1 | 1 |
| | 施工安全教育与培训 | 1 | 1 | 4 | 3 | 1 |
| | 安全生产制度及执行程度 | 2 | 2 | 4 | 2 | 0 |
| 环境 风险 | 汛期施工 | 2 | 2 | 4 | 1 | 1 |
| | 河床地质 | 3 | 4 | 2 | 1 | 0 |
| | 水上交通环境 | 2 | 2 | 4 | 1 | 1 |
| 材料 设备 风险 | 浓雾等极端天气 | 3 | 2 | 3 | 1 | 1 |
| | 新设备适应性 | 2 | 1 | 4 | 2 | 1 |
| | 材料质量 | 2 | 2 | 4 | 1 | 1 |
| | 设备机具工作状态 | 2 | 2 | 3 | 2 | 1 |
| 施工 技术 风险 | 设备机具安全防护 | 1 | 2 | 4 | 2 | 1 |
| | 施工质量控制 | 2 | 3 | 4 | 1 | 0 |
| | 施工技术交底程度 | 2 | 2 | 5 | 1 | 0 |
| 风险 | “四新”技术成熟度 | 1 | 3 | 5 | 1 | 0 |

由表4得石潭湘江特大桥水下施工风险评价矩

阵,其中人员风险评价矩阵如下:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 1/10 & 3/10 & 4/10 & 2/10 & 0 \\ 1/10 & 4/10 & 4/10 & 1/10 & 0 \\ 1/10 & 2/10 & 5/10 & 1/10 & 1/10 \\ 2/10 & 3/10 & 4/10 & 1/10 & 0 \end{bmatrix}$$

由表1可知人员风险各指标的权重如下:

$$A_1 = (0.277\ 2, 0.160\ 1, 0.461\ 3, 0.095\ 4, 0)$$

人员风险的模糊评价矩阵为:

$$B_1 = A_1 \circ R_1 = (0.108\ 9, 0.268\ 1, 0.443\ 7, 0.127\ 1, 0.046\ 1)$$

同理,得:

$$B_2 = (0.166\ 9, 0.166\ 9, 0.405\ 9, 0.207\ 7, 0.059\ 9)$$

$$B_3 = (0.263\ 1, 0.231\ 0, 0.321\ 5, 0.100\ 0, 0.084\ 5)$$

$$B_4 = (0.172\ 8, 0.191\ 2, 0.384\ 3, 0.151\ 7, 0.100\ 0)$$

$$B_5 = (0.186\ 3, 0.213\ 7, 0.375\ 0, 0.287\ 5, 0.062\ 5)$$

由 B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 、 B_5 构成评价矩阵 R :

$$R = \begin{bmatrix} 0.108\ 9 & 0.160\ 1 & 0.461\ 3 & 0.095\ 4 & 0.046\ 1 \\ 0.166\ 9 & 0.166\ 9 & 0.405\ 9 & 0.207\ 7 & 0.059\ 9 \\ 0.263\ 1 & 0.231\ 0 & 0.321\ 5 & 0.100\ 0 & 0.084\ 5 \\ 0.172\ 8 & 0.191\ 2 & 0.384\ 3 & 0.151\ 7 & 0.100\ 0 \\ 0.186\ 3 & 0.217\ 3 & 0.375\ 0 & 0.287\ 5 & 0.062\ 5 \end{bmatrix}$$

由表1可知水下施工风险各指标的权重为:

$$A = (0.120\ 9, 0.073\ 8, 0.214\ 7, 0.214\ 7, 0.376\ 0)$$

水下施工风险的模糊评价矩阵为:

$$B = A \circ R = (0.189\ 1, 0.204\ 0, 0.378\ 3, 0.189\ 0, 0.073\ 1)$$

依照评价等级划分原则,桥梁施工风险评价各等级的分值见表5。

表5 风险等级划分

| 等级 | 分数 S | 等级 | 分数 S |
|-----|--------|-----|--------|
| 安全 | 85 | 危险 | 50 |
| 较安全 | 70 | 很危险 | 30 |
| 一般 | 60 | | |

风险评价总得分为:

$$F = B \times S^T = 0.189\ 0 \times 85 + 0.204\ 0 \times 70 + 0.378\ 3 \times 60 + 0.189\ 0 \times 50 + 0.073\ 1 \times 30 = 64.686$$

对照表3,石潭湘江特大桥水下施工风险等级属于Ⅲ级,为一般风险。

3.3 基于BP神经网络的石潭湘江特大桥水下施工安全风险评价

为验证基于AHP法的模糊综合评价结果的准

确性和可靠性,运用 BP 神经网络评价模型开展该桥施工安全风险评价。通过查阅该桥地址资料、设计文件、施工组织设计及安全管理文件,得到相关定量指标数据,邀请项目参与者中的专家、管理人员进行评分,结果见表 6。

表 6 石潭湘江特大桥水下施工风险评价指标得分统计

| 风险因素 | 评分 | 风险因素 | 评分 |
|-------------|----|-----------|----|
| 人员基础素质 | 65 | 水上交通环境 | 68 |
| 各工位人员配备 | 75 | 浓雾等极端天气 | 65 |
| 人员安全意识及防范 | 65 | 新设备适应性 | 75 |
| 技术人员占比 | 30 | 材料质量 | 65 |
| 水上施工应急救援能力 | 71 | 设备机具工作状态 | 64 |
| 专项施工安全费用拨付 | 75 | 设备机具安全防护 | 61 |
| 施工安全教育与培训 | 68 | 施工质量控制 | 68 |
| 安全生产制度及执行程度 | 61 | 施工技术交底程度 | 67 |
| 汛期施工 | 61 | “四新”技术成熟度 | 65 |
| 河床地质 | 72 | | |

将得到的数据向量归一化后输入训练好的 BP 神经网络评价模型中,运行后得到石潭湘江特大桥施工风险评价输出值为 66.373 8,与模糊综合评价的误差为 2.61%。

4 水下施工主要安全风险特点及防范建议

4.1 主要风险

桥梁水下施工过程具有不可见的特点,施工完毕也不能开挖验收,任何环节出错都伴随着一定的经济损失及工期延误。石潭湘江特大桥水下施工中的主要安全风险在于水面交通的布设规划、汛期施工时采用的安全防范措施及施工人员所处水面环境的不断变化,易造成溺水、物体打击、触电等风险。

桥梁水下施工的风险包括:1) 各级别航道在施工过程不能完全禁航,施工船只来往运输物料过程中会加大碰撞风险;2) 大型桥梁施工时间长,难以避开汛期,抢险救治洪灾的风险上升;3) 人员处于水上,个人防护措施难以保证到位,溺水、触电等风险陡升;4) 其他如施工技术、管理、材料、人员造成的风险与一般性桥梁架设期间的风险类似。

4.2 安全防范建议

(1) 加强班组级别的三级教育,特别是特种设备施工人员务必持证上岗,从源头上杜绝人员的操作性失误导致的风险。

(2) 开展水上应急演练,培养工人的“四不伤害”(不伤害自己、不伤害他人、不被他人伤害、保护他人不受伤害)意识。

(3) 严防因材料质量原因、结构稳定性原因导致的施工质量问题。

(4) 经常性开展安全隐患排查,将发现的安全隐患及时处理,并定期进行安全隐患分析。

5 结语

在已有桥梁风险评估的基础上,采用文献总结与专家调查问卷的方法,设计了桥梁水下施工风险评价指标体系,将基于 AHP 法的模糊数学综合评价与 BP 神经网络评价相结合构建桥梁水下施工风险模型,对石潭湘江特大桥水下施工安全风险开展评估,得出该桥水下施工风险为一般风险。

参考文献:

- [1] 徐佳昕,游波,施式亮,等.基于层次分析法的桥梁施工风险识别及评估分析[J].矿业工程研究,2020,35(1):59—64.
- [2] 李彦,邹宗民,徐磊,等.决策树分析技术在桥梁施工期的风险评估研究[J].中外公路,2019,39(3):297—302.
- [3] 施洲,纪锋,杨仕力,等.五峰山长江大桥施工阶段风险评估研究[J].铁道标准设计,2020,64(5):71—78.
- [4] 黎立新,何智勇.高速公路山区桥梁选型及安全风险评估[J].公路,2011(7):145—148.
- [5] 王飞球,黄健陵,符竞,等.基于 BP 神经网络的跨既有高速铁路桥梁施工安全风险评估[J].铁道科学与工程报,2019,16(5):1129—1136.
- [6] 康俊涛,刘洋.桥梁施工安全性评价的贝叶斯网络方法研究[J].中国安全科学学报,2016,26(7):157—162.
- [7] 梁晓飞,郑小燕,李忠梅.基于可信性理论的桥梁基础施工风险评估[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2014,37(12):1483—1487.
- [8] 王可意,杨春风.AHP—DEA 在桥梁施工风险评价中的应用研究[J].河北工业大学学报,2014,43(2):102—106.
- [9] WANG Xia, DUAN Qingquan. Improved AHP—TOPSIS model for the comprehensive risk evaluation of oil and gas pipelines[J]. Petroleum Science, 2019, 16(6): 1479—1492.
- [10] 王路杰.浅埋暗挖地铁车站施工风险评价研究[D].青岛:山东科技大学,2017.
- [11] 刘辉,赵清华.高速公路施工安全管理指南[M].北京:人民交通出版社,2010.
- [12] 张锦,徐君翔.川藏铁路桥隧施工安全风险评价[J].安全与环境学报,2020,20(1):39—46.