

# 基于SEM的沙漠公路路基工程施工风险研究

王首绪,韩凌云\*

(长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南 长沙 410114)

**摘要:**在沙漠地区进行公路建设对完善交通网络节点、发展偏远地区经济具有重要意义。为有效探究沙漠公路路基工程施工风险,该文从人员风险、技术风险、材料风险、机械风险和环境风险5个方面出发,通过文献研究法筛选出影响沙漠公路路基工程施工风险的23项指标;基于问卷调查收集到的有效数据,构建沙漠公路路基工程施工风险的结构方程模型(Structural Equation Modeling,简称SEM);分析施工风险关键影响因素。结果表明:沙漠公路路基工程施工风险受恶劣气候、人员三违行为、风积沙质量、机械维修与保养、技术交底完整性的影响较大。提出具有针对性的控制措施,可为沙漠公路可持续发展提供参考。

**关键词:**路基工程;施工风险;结构方程模型(SEM);沙漠公路

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

## Research on Construction Risk of Desert Highway Subgrade Engineering Based on SEM

WANG Shouxu, HAN Lingyun\*

(School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China)

**Abstract:** Highway construction in desert areas is of great significance to improving the nodes of transportation networks and developing the economy of remote areas. In order to effectively explore the construction risks of desert highway subgrade engineering, the five aspects of personnel risk, technical risk, material risk, mechanical risk, and environmental risk were analyzed, and 23 indicators affecting the construction risk of desert highway subgrade engineering were screened out by literature research method. Based on the effective data collected by questionnaire survey, a structural equation model (SEM) of the construction risk of desert highway subgrade engineering was constructed, and the key influencing factors of the construction risk were analyzed. The results show that the construction risk of desert highway subgrade engineering is mainly affected by bad weather, violations of personnel in three aspects, quality of aeolian sand, mechanical repair and maintenance, and technical integrity. Targeted control measures are also proposed to provide a reference for the sustainable development of desert highways.

**Keywords:** subgrade engineering; construction risk; Structural Equation Model(SEM); desert highway

## 0 引言

路基是沙漠公路重要的组成部分,既承担从路面向下传递的荷载,又能减少在自然环境作用下的基床下沉<sup>[1-2]</sup>。沙漠公路路基工程建设是在错综复杂

的自然条件、多方合作的情况下进行的,在整个道路施工过程中所需的时间长、难度大、附属设施多,存在许多潜在风险因素,这些风险因素一旦“时机成熟”很可能给公路项目带来巨大的损失。做好路基工程的施工风险管理工作,降低风险发生的概率,能

收稿日期:2023-11-22

基金项目:湖南交通科技进步与创新项目(编号:201330);湖南省应急管理厅2018年安全生产科技研究项目(编号:201330)

作者简介:王首绪,男,大学本科,教授.E-mail:1315522132@qq.com

\*通信作者:韩凌云,女,硕士研究生.E-mail:1425230758@qq.com

够确保沙漠公路施工计划顺利开展。

目前,大多学者从不同方面对沙漠公路施工进行研究。魏建慧<sup>[3]</sup>、李海<sup>[4]</sup>和张冰冰等<sup>[5]</sup>针对风积沙作为路基填料时出现的各种问题进行了具体讨论;范伟岩<sup>[6]</sup>发现推土机在沙漠地区作业时,空气中存在的大量沙尘极易造成进气系统的磨损;孙雨潼等<sup>[7]</sup>提出草方格沙障技术在固沙方面的独特优势及存在机械化铺设的困难;金可等<sup>[8]</sup>指出水资源在干旱沙漠区对改善生态环境、促进动植物生存起关键作用;郅林<sup>[9]</sup>基于路基原材料的选择,为荒漠化地区高速公路的低路基设计提供新思路;Reynolds等<sup>[10]</sup>和王睿<sup>[11]</sup>基于沙漠的自然环境特点,从防风固沙、植被恢复、水土承载能力、光伏发电等方面对沙漠治理进行研究。

综上所述,大多以单一因素对沙漠公路路基工程施工进行研究,很少考虑到路基工程施工阶段各影响因素之间的耦合作用。鉴于此,本文基于4M1E理论构建沙漠公路路基工程施工风险结构方程模型,通过发放调查问卷,收集到人员、技术、材料、机械和环境风险的相关数据,并对调查问卷数据进行

信效度检验,根据路径系数验证了人员、技术、材料、机械和环境风险均对施工风险有显著影响,进一步计算得到沙漠公路路基工程施工风险影响因素的权重;并根据构建的指标体系和分析结果,给出了对应的控制措施,可为中国沙漠公路路基工程建设的良好发展提供参考。

## 1 沙漠公路路基工程施工风险因素识别

构建完备且科学的指标体系是沙漠公路路基工程施工风险管理的基础和关键,应遵循全面性、针对性、可操作性、简明性的原则选取影响指标。在中国知网知识库输入“公路”“沙漠路基”“施工”等关键词,去除重复数据并剔除无参考价值文献,共获得近10年内的163篇文章。识别出这些文献中影响沙漠公路路基工程施工风险因素,选取关于沙漠公路路基工程的相关规定和技术规范等作为补充,将提取出的沙漠公路路基工程施工风险影响因素按照4M1E理论进行整合,构建出沙漠公路路基工程施工风险清单,如表1所示。

表1 风险指标清单  
Table 1 Risk indicators

一级指标	二级指标	指标描述	指标来源文献
人员风险	A <sub>1</sub> 文化素质	现场施工人员多为农民工,受教育程度低	[12]
	A <sub>2</sub> 疲劳程度	施工人员的劳动强度	[7]、[12]
	A <sub>3</sub> 安全意识薄弱	对于安全隐患的认知不足,无法确保工程安全施工	[12]、[13]
	A <sub>4</sub> 三违行为	施工人员违章作业、管理人员违章指挥、现场人员违反劳动纪律的行为	[12]
	A <sub>5</sub> 操作水平	施工人员的技术经验高低影响路基施工风险管理及质量水平	[12]、[13]
技术风险	B <sub>1</sub> 干湿压法选择	根据施工路段的具体情况选择风积沙的碾压法	[14]、[15]
	B <sub>2</sub> 固沙方法的选择	根据不同需求选择防风固沙方法	[7]、[10]
	B <sub>3</sub> 类似工程情况	是否有相似工程提供参考	[5]、[9]
	B <sub>4</sub> 专项施工方案合理性	技术方案是否由专业人员多次讨论分析决定	[9]、[15]、[16]
	B <sub>5</sub> 技术交底完整性	是否进行深入细致的技术交底工作	[5]、[9]
材料风险	C <sub>1</sub> 材料供应及时性	避免因材料供应不及时导致的停工	[15]
	C <sub>2</sub> 材料浪费程度	对存放的材料没有进行及时处理,导致材料变质造成浪费	[15]
	C <sub>3</sub> 风积沙质量	风积沙压实度、含水量、承载比是否符合标准	[5]、[15]
	C <sub>4</sub> 土工布质量	土工布是否具有足够的强度和一定的抗老化能力	[1]、[14]、[15]、[16]
机械风险	D <sub>1</sub> 维修与保养	机械设备的维护、保养措施欠缺,会提高安全事故发生频率	[12]、[16]
	D <sub>2</sub> 机械设备选型	机械设备选型应符合现场施工的实际需求	[2]、[6]、[12]、[15]
	D <sub>3</sub> 机械设备操作流程	按照机械设备的操作流程进行施工	[12]、[14]、[15]
	D <sub>4</sub> 机械设备数量	机械设备数量要按照施工方案进行准备,不能过多也不能过少	[15]
环境风险	E <sub>1</sub> 行业政策环境	公路行业现状、最新政策和发展趋势	[12]、[15]、[13]
	E <sub>2</sub> 恶劣气候	沙尘暴、风吹雪等极端天气对施工现场的影响	[8]、[9]、[12]、[13]、[15]、[17]
	E <sub>3</sub> 不良地质条件	风沙、盐渍土等不良地质给施工造成的困难	[8]、[9]、[12]、[13]、[15]、[18]
	E <sub>4</sub> 人文环境	沿线途经少数民族聚居区,路地关系较为复杂	[13]、[15]
	E <sub>5</sub> 水文风险	根据水文地质情况采取的施工方案是否合理	[8]、[9]、[13]、[15]

## 2 问卷设计及数据分析

### 2.1 数据来源

基于表1设计调查问卷,结合李斯特五级量表,通过邮件、微信、QQ等多种渠道向沙漠公路相关工作人员、高校科研者及行业专家共发放340份调查问卷,对问卷所列23项影响指标进行1~5分打分。收回321份问卷,删除内容填写不合格的10份无效问卷,最终共收回311份有效问卷。对311位受访者特征进行汇总整理,如图1所示。

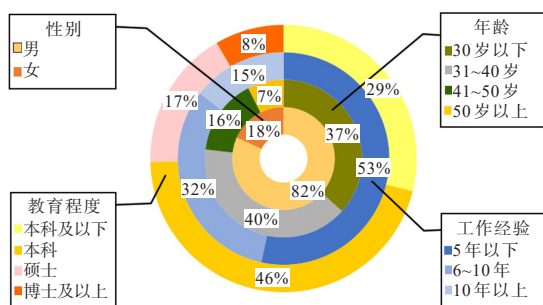


图1 受访者相关特征

Figure 1 Relevant characteristics of respondents

### 2.2 信效度检验

信度分析是在测量方法、对象保持不变的情况下,经过重复测量分析结果的一致性程度。本文利用SPSS 24.0对潜变量和总量表进行信度检验,分析Cronbach  $\alpha$ 系数,结果如表2所示。Cronbach  $\alpha$ 系数越大,说明本研究收集到的问卷数据信度质量越高。效度是用来检验量表能够测量出所要测量的事物的准确程度,分析研究项是否具有意义,主要分析 $C_{KMO}$ 值与Bartlett。该量表 $C_{KMO}$ 值为0.924( $C_{KMO} > 0.8$ ),显著性 $P$ 值(Sig.)为0.000( $P < 0.001$ ),表明数据效度得到保证,可以进行下一步因子分析。

表2 信度检验  
Table 2 Reliability test

潜变量	测变量个数	Cronbach $\alpha$ 系数	总 Cronbach $\alpha$
人员风险	5	0.866	0.942
技术风险	5	0.877	
材料风险	4	0.864	
机械风险	4	0.883	
环境风险	5	0.902	

## 3 结构方程模型构建与检验

### 3.1 结构方程模型

结构方程模型(SEM)是基于变量的协方差矩阵

来分析变量间关系的一种统计方法。在分析过程中可以同时处理多个因变量,允许自变量和因变量出现测量误差,最终探究出所建模型的因子关系与多因素间路径关系。结构方程模型中的变量包括潜变量和显变量,关系如图2所示。

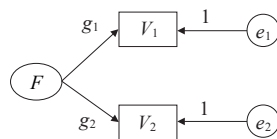


图2 潜变量与显变量关系

Figure 2 Relationship between latent variables and explicit variables

在图2中,椭圆形 $F$ 表示潜变量,长方形 $V_1$ 、 $V_2$ 表示显变量;圆形 $e_1$ 、 $e_2$ 表示残差变量。

### 3.2 模型假设与构建

根据表1风险指标清单进行结构方程建模,对沙漠公路路基工程施工风险提出以下假设:

- 假设1:人员风险对施工风险有显著影响;
- 假设2:技术风险对施工风险有显著影响;
- 假设3:材料风险对施工风险有显著影响;
- 假设4:机械风险对施工风险有显著影响;
- 假设5:环境风险对施工风险有显著影响。

### 3.3 验证性因素分析

#### 3.3.1 1阶结构方程模型分析

本文采用Amos 24.0构建沙漠公路路基工程施工风险结构方程模型,如图3所示。所建模型的估计误差全为正,23项指标的因子载荷量在0.71~0.90,符合0.60~0.95的适配标准,标准化残差变量 $e_1 \sim e_{23}$ 为0.51~0.82,符合0.36~0.90的适配标准,该模型通过“违规估计”检验。对模型进行拟合度检验, $\chi^2/df$ (卡方自由度比)=2.580<3,  $G_{GFI}$ (拟合优度指数)=0.857>0.8,  $A_{GFI}$ (调整的拟合优度指数)=0.820>0.8,  $C_{CFI}$ (比较拟合指数)=0.924>0.9,  $I_{IFI}$ (增值拟合指数)=0.925>0.9,  $T_{TLI}$ (Tucker-Lewis指数)=0.913>0.9,  $R_{RMSEA}$ (近似误差均方根)=0.071<0.08。所建模型拟合度指标较为理想,模型拟合度高,不须进行修正。

#### 3.3.2 2阶结构方程模型分析

从1阶结构方程模型分析中可以发现:沙漠路基施工风险中5个潜变量之间的关联性较强,均大于0.5。本文将沙漠公路路基工程施工风险作为2阶内生潜变量,人员、技术、材料、机械、环境作为2阶外生

潜变量,进行2阶验证性因素分析,如图4所示。对模型进行拟合度检验: $\chi^2/df=2.555<3$ , $G_{GFI}=0.856>0.8$ , $A_{GFI}=0.823>0.8$ , $C_{CFI}=0.924>0.9$ , $I_{IFI}=0.924>0.9$ , $T_{TLI}=0.914>0.9$ , $R_{RMSEA}=0.071<0.08$ 。说明2阶验证性因素分析模型整体适配良好。

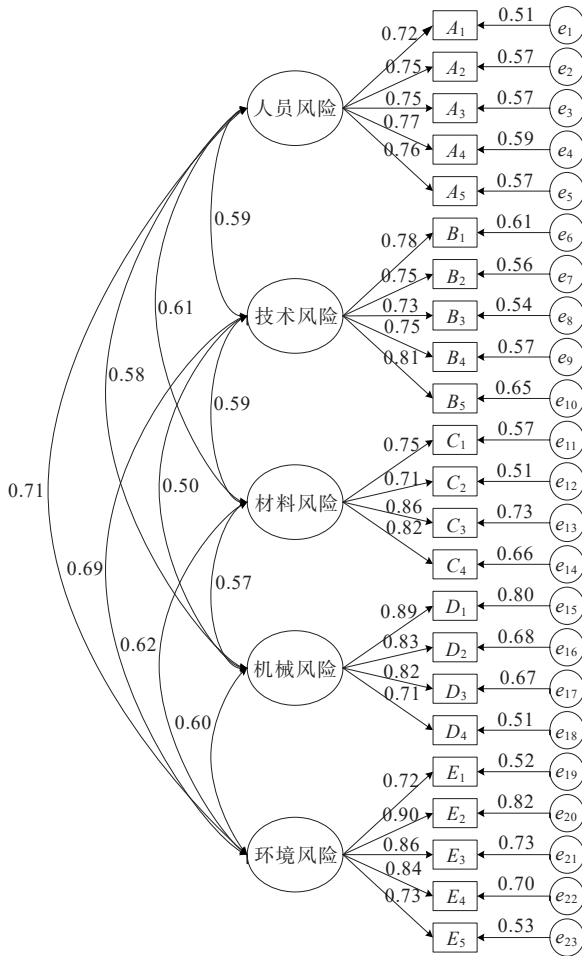


图3 沙漠公路路基施工风险1阶结构方程模型

Figure 3 First-order SEM of desert highway subgrade construction risk

### 3.3.3 指标权重分析

沙漠公路路基工程施工风险影响指标的重要程度可以用标准化路径系数表示<sup>[19]</sup>,计算权重 $P_i$ :

$$P_i = \frac{t_i}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad (1)$$

式中: $t_i$ 为指标 $i$ 的标准化路径系数。

根据图4各影响指标的标准化路径系数,由式(1)算出权重,结果如表3所示。

将表3中一级指标按权重大小进行排序,结果

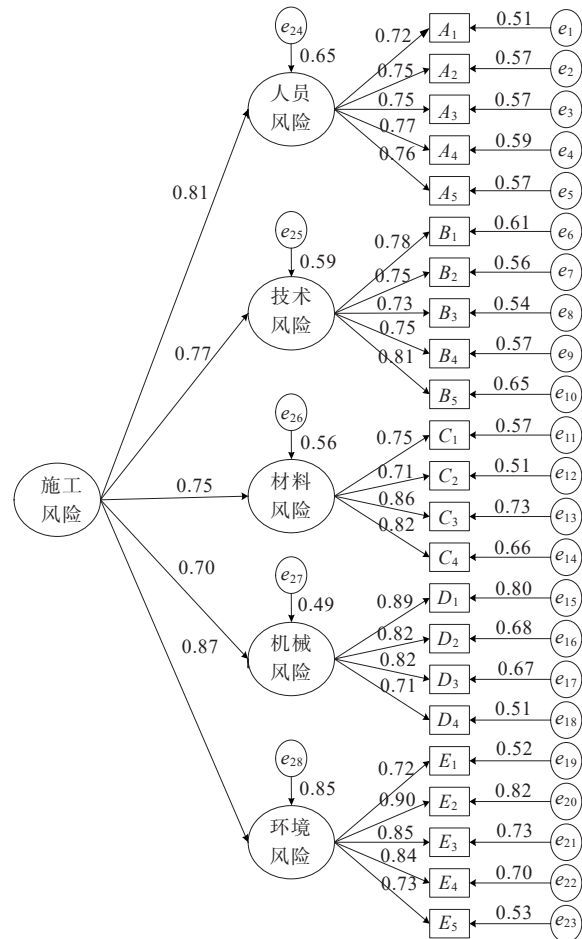


图4 沙漠公路路基施工风险2阶结构方程模型

Figure 4 Second-order SEM of desert highway subgrade construction risk

为:环境风险>人员风险>技术风险>材料风险>机械风险。恶劣气候、人员三违行为、技术交底完整性、风积沙质量、机械维修与保养是沙漠公路在路基工程施工中应重点考虑的因素。进一步对表3分析,得出如下结论:

(1) 环境风险对沙漠公路路基工程施工风险的影响最大。恶劣气候的权重为0.222 8,不良地质条件和水文风险的权重分别为0.210 4和0.180 7。在进行沙漠公路路基施工方案设计时,严格做好现场勘察工作,对工程建设地段的水文地质、气候条件等做好把控,避免因前期现场勘测工作不到位产生重大的设计缺陷。

(2) 人员风险对沙漠公路路基工程施工风险的影响程度很大。人员三违行为和操作水平的权重分别为0.205 3和0.202 7。目前,中国公路工程仍处于粗放式发展阶段,项目相关人员在一定程度上追求经济效益,容易产生违规作业和违章指挥,加大路基

表 3 指标权重及排序

Table 3 Indicator weight and ranking

一级指标	权	排序	二级指标	权重
人员风险	0.207 7	2	A <sub>1</sub> 文化素质	0.192 0
			A <sub>2</sub> 疲劳程度	0.200 0
			A <sub>3</sub> 安全意识薄弱	0.200 0
			A <sub>4</sub> 三违行为	0.205 3
			A <sub>5</sub> 操作水平	0.202 7
技术风险	0.197 4	3	B <sub>1</sub> 干湿压法选择	0.204 1
			B <sub>2</sub> 固沙方法的选择	0.196 3
			B <sub>3</sub> 类似工程情况	0.191 1
			B <sub>4</sub> 专项施工方案合理性	0.196 3
			B <sub>5</sub> 技术交底完整性	0.212 0
材料风险	0.192 3	4	C <sub>1</sub> 材料供应及时性	0.238 9
			C <sub>2</sub> 材料浪费程度	0.223 1
			C <sub>3</sub> 风积沙质量	0.273 9
			C <sub>4</sub> 土工布质量	0.261 2
			D <sub>1</sub> 维修与保养	0.274 7
机械风险	0.179 5	5	D <sub>2</sub> 机械设备选型	0.253 1
			D <sub>3</sub> 机械设备操作流程	0.253 1
			D <sub>4</sub> 机械设备数量	0.219 1
			E <sub>1</sub> 行业政策环境	0.178 2
			E <sub>2</sub> 恶劣气候	0.222 8
环境风险	0.223 1	1	E <sub>3</sub> 不良地质条件	0.210 4
			E <sub>4</sub> 人文环境	0.207 9
			E <sub>5</sub> 水文风险	0.180 7

施工风险,对沙漠公路的发展产生直接影响。此外,沙漠公路的施工工艺和施工机械都区别于普通公路,要求加大施工人员的技术水平培训。

(3) 技术风险和材料风险对沙漠公路路基工程施工风险的影响大致相同。在技术风险中,技术交底完整性的权重为 0.212 0,专业技术人员根据沙漠公路实际情况及有关规范向施工人员进行完整的技术性交代,可有效降低技术质量等事故的发生。在材料风险中,风积沙和土工布质量的权重分别为 0.273 9 和 0.261 2,说明作为路基主要填料的风积沙和提高沙基抗剪强度的土工布对路基施工质量具有关键影响。

(4) 机械风险对沙漠公路路基工程施工风险的影响相对最小。机械维修与保养的权重为 0.274 7,这是因为在沙漠地区施工,施工机械的发动机气缸容易受到空气中粉质沙土的磨损产生串气现象,导致施

工机械工作动力不足、效率降低。因此,机械维修与保养不及时,不仅影响施工进度,不符合条件的机械对工程质量也有一定的影响,会增大沙漠公路路基工程施工风险。

4 控制对策

根据以上分析结果,针对沙漠公路路基工程施工风险的主要影响因素,提出以下控制措施。

(1) 环境因素

做好施工前准备工作,提前搜集整理公路沿线有关气候的历史数据资料,在工程建设中,根据现场天气及时做出调整,减轻或避免由于天气变化引起沙尘暴等自然灾害,给人员健康、施工机械造成的伤害,可有效降低返工或停工所引起的费用损失;做好公路沿线的地质、水文等调查研究,有针对性地制定合理的路基施工方案,并重点预防路基风蚀与沙埋两种病害的发生;沙漠公路大多途经少数民族聚居区,面临复杂的路地关系,项目部要尊重当地文化、风俗习惯,做好沟通工作,减少征地拆迁引起的纠纷,平等、团结、互助、和谐的民族关系在工程建设中占有举足轻重的地位;沙漠公路具有工程量大、工期长的特点,要对行业的最新政策、材料价格具有一定的敏锐度,可有效降低成本。

(2) 人员因素

对于底层施工人员,其承受高强度的施工作业、缺乏文化教育,没有正确的安全意识、技术水平也参差不齐,导致项目、人员本身安全事故的发生,所以在实际操作中应遵守相关章程准则;沙漠公路路基工程施工工艺区别于普通公路,定期邀请专业人员组织技术培训提升施工人员的操作水平;针对相关人员在施工现场存在的侥幸和冒险心理,造成安全意识的薄弱,在新工人进入施工现场前必须做好三级安全教育培训,提高现场人员的安全事故防范意识,增强法制观念;规避高温施工,针对夏季高温制定专项作业劳动方案和休息制度,严格把控施工现场作业时间,降低人员劳动强度。

(3) 技术因素

为了避免不必要的安全隐患,在沙漠公路路基工程施工过程中,总结类似工程经验,采取成熟的施工技术,可以有效从多方面降低损失,在工期上也能

争取到更多的时间;要完善技术交底制度,加强图纸会审,在设计图纸时综合考虑到路基施工时的各方面风险;要根据设计图纸和投标文件的要求,结合现场水料场的运距等问题,对风积沙填筑路基采用干、湿压法施工工艺进行选择;根据边施工边防护的原则选择合适的防风固沙方案;在风积沙干压填筑路段容易发生施工碾压不合格等质量事故,要严格按照专项施工方案进行施工,根据施工特点制定夏季高温施工方案、大风季节施工方案等专项施工方案。

#### (4) 材料因素

按照设计施工图纸进行物料选择,严格把控风积沙填料质量,确保风积沙压实度、风积沙含水量、风积沙承载比( $R_{CBR}$ )满足国家规定相关质量检测标准;选择具有足够强度和一定抗老化能力的土工布铺设在沙漠公路路基上,一方面可以避免砾石渗入风积沙中,提高沙漠路基的承载力;另一方面可以减缓沙漠路基在上部荷载作用下发生的变形,起到加固沙基的作用;由于材料成本占整个工程成本的60%~70%,在沙漠路基工程中,除风积沙填料外还需要其他材料,因此对主要材料实行限额领用,避免损失浪费,同时还要根据施工计划提前做好材料采购工作,避免因采购不及时延误工期。

#### (5) 机械因素

机械设备是施工过程中不可或缺的物质因素,它的安全状态对工程安全具有直接影响,所以必须按照相关规定设置专业人员对机械设备定期开展检修和保养;根据沙漠公路施工现场环境条件,对机械设备型号有更高要求,例如选择附着力大、性能好、爬坡能力强的大功率履带式推土机,具有较好压实效果的双驱振动压路机;机械工按照操作要求逐个作业面展开工作,一次向前推进,在施工时做到井然有序;确定施工机械数量时,要遵循单位工作面施工效率最大的原则,避免数量过少,延误工期,数量过多,难以充分开展工作,浪费机械资源。

## 5 结论

本文从人员风险、技术风险、材料风险、机械风险和环境风险5个方面出发,建立沙漠公路路基工程施工风险影响指标体系,基于调查问卷收集到的有效数据,通过结构方程模型探索路基工程施工风险

之间的关系,得出以下结论:

(1) 人员风险、技术风险、材料风险、机械风险、环境风险对沙漠公路路基工程施工风险的因子载荷量分别为0.81、0.77、0.75、0.70和0.87,均超过0.50,验证了5个潜在变量对施工风险有显著影响。将一级指标按权重大小排序依次为环境风险、人员风险、技术风险、材料风险、机械风险。

(2) 恶劣气候、人员三违行为、技术交底完整性、风积沙质量、机械维修与保养是影响沙漠公路路基工程施工风险的关键因素。提出了进一步的控制措施。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 田林,李宁,王宇,等.土工格室形式与填料类型对公路地基承载力的影响[J].中外公路,2022,42(2):15-23.  
TIAN Lin, LI Ning, WANG Yu, et al. Influence of geocell form and filler type on bearing capacity of highway foundation[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(2): 15-23.
- [2] 张晓勇.浅析路基工程施工质量风险识别与控制措施[J].公路交通科技(应用技术版),2016,12(8):150-151.  
ZHANG Xiaoyong. Analysis on risk identification and control measures of subgrade engineering construction quality[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development(Application Technology Edition), 2016, 12(8): 150-151.
- [3] 魏建慧.风积沙路基压实控制及边坡稳定性研究[D].石家庄:河北工业大学,2019.  
WEI Jianhui. Study on compaction control and slope stability of aeolian sand subgrade[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Technology, 2019.
- [4] 李海.沙漠路基施工特点及技术探讨[J].内蒙古公路与运输,2012(5):51-53.  
LI Hai. Discussion on construction characteristics and technology of desert subgrade[J]. Inner Mongolia Highway and Transportation, 2012(5): 51-53.
- [5] 张冰冰,刘杰,阿肯江·托呼提,等.土工格室加固风积沙路基动应力响应现场试验研究[J].公路交通科技,2021,38(12):37-46.  
ZHANG Bingbing, LIU Jie, AKONJIANG · Tuohuti, et al. Field experimental study on dynamic stress response of aeolian sand subgrade strengthened by geocell[J]. Highway Transportation Technology, 2021, 38(12): 37-46.

- [6] 范伟岩.沙漠型推土机进气系统优化设计[J].建筑机械化,2022,43(3):13-14,65.  
FAN Weiyan. Optimal design of intake system of desert bulldozer[J]. Construction Mechanization, 2022, 43(3): 13-14,65.
- [7] 孙雨瞳,袁杰潮,闫路诚,等.固沙草方格铺设机械技术现状及技术瓶颈[J].林业机械与木工设备,2022,50(3):4-7.  
SUN Yutong, YUAN Jiechao, YAN Lucheng, et al. Technical status and technical bottleneck of sand fixing grass grid laying machinery[J]. Forestry Machinery and Woodworking Equipment, 2022, 50(3): 4-7.
- [8] 金可,卢阳,周火明,等.古尔班通古特沙漠水文研究进展[J].水文,2022,42(1):1-10.  
JIN Ke, LU Yang, ZHOU Huoming, et al. Research progress of hydrology in gurbantunggut desert[J]. Hydrology, 2022, 42(1): 1-10.
- [9] 郗林.荒漠地区高速公路建设中的低路基设计问题研究[J].交通世界,2022(S2):157-158.  
YING Lin. Research on low subgrade design in expressway construction in desert area[J]. Transportation World, 2022(S2): 157-158.
- [10] REYNOLDS J F, SMITH D, LAMBIN E F, et al. Global desertification: Building a science for dryland development [J]. Science, 2007, 316(5826): 847-851.
- [11] 王睿.库布齐沙漠可持续治理典型模式研究[J].西华师范大学学报(自然科学版),2019,40(1):92-97.  
WANG Rui. Study on typical model of sustainable management of Kubuqi desert[J]. Journal of West China Normal University (Natural Science Edition), 2019, 40(1): 92-97.
- [12] 刘芷琦.基于RS-SVR的装配式建筑施工安全风险预测与控制研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2021.  
LIU Zhiqi. Research on safety risk prediction and control of prefabricated building construction based on RS-SVR [D]. Shenyang : Shenyang Architecture University, 2021.
- [13] 何睿华.西察公路XC-2标公路工程施工风险管理研究[D].兰州:兰州交通大学,2021.  
HE Ruihua. Study on construction risk management of Xicha highway XC-2 bid[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2021.
- [14] 孙贻国.沙漠公路施工的控制与管理[J].筑路机械与施工机械化,2018,35(10):108-111,117.  
SUN Yiguo. Control and management of desert highway construction[J]. Road Construction Machinery and Construction Mechanization, 2018, 35(10): 108-111, 117.
- [15] 党建新.重庆云阳南滨路工程项目施工风险管理研究[D].长沙:中南林业科技大学,2012.  
DANG Jianxin. Research on construction risk management of Chongqing Yunyang Nanbin road project[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2012.
- [16] 郑育新.阿和沙漠公路风积沙路基施工工艺研究[J].湖南交通科技,2015,41(1):36-39.  
ZHENG Yuxin. Study on construction technology of aeolian sand subgrade of ahe desert highway[J]. Hunan Communications Technology, 2015, 41(1): 36-39.
- [17] 赵旭东,李伟群,尹文华,等.生物矿化技术在沙漠现场的大规模应用研究[J].中阿科技论坛(中英文),2022(2):52-56.  
ZHAO Xudong, LI Weiqun, YIN Wenhua, et al. Study on large-scale application of biomineralization technology in desert field[J]. China Arab Technology Forum (Chinese and English), 2022(2): 52-56.
- [18] 何丽平,刘志军,王雪刚,等.沙漠浅水湖区风积沙公路路基强夯试验研究[J].中外公路,2023,43(5):14-20.  
HE Liping, LIU Zhijun, WANG Xuegang, et al. Experimental study on highway subgrade of aeolian sand consolidated by strong compaction in desert shallow water lake area[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(5): 14-20.
- [19] 李晓娟,张舟,谢婉君,等.装配式建筑项目施工质量控制影响因素研究[J].工程管理学报,2021,35(6):119-124.  
LI Xiaojuan, ZHANG Zhou, XIE Wanjuan, et al. Study on influencing factors of construction quality control of prefabricated construction project[J]. Journal of Engineering Management, 2021, 35(6): 119-124.