

基于 DEA 方法的公路工程施工现场安全管理绩效评价研究

陈钊¹, 孙景楠², 周子龙², 黄鹏宇¹

(1. 广西北投公路建设投资集团有限公司, 广西 南宁 530029; 2. 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要:【目的】研究公路工程施工现场安全影响因素多、安全管理难度大的问题。【方法】基于数据包络分析(data envelopment analysis, DEA)方法, 建立公路工程施工现场安全管理绩效评价体系。以广西某公路工程为研究对象, 从安全资产、安全检查和安全培训等方面选取 6 个因素作为评价指标, 利用数据包络分析中的非径向松弛测度模型(slack-based model, SBM)进行评价。【结果】该公路工程两个标段 1—5 月的安全管理水平存在两极分化现象, 对于两个标段安全管理效率低的月份, 普遍存在投入冗余和产出不足的情况, 这主要是因为安全生产教育培训人数较少, 安全资产完成产值的产出率较低。此外, 安全资产实际投入和安全资产完成产值对该公路工程两个标段 1—5 月的安全管理效率更灵敏。【结论】将所建评价体系应用于公路工程施工现场安全管理绩效评价能够找出公路工程施工现场安全管理存在的问题、原因和影响安全管理绩效的主要因素, 这为施工现场的安全管理提供了改进的方向。

关键词: 安全管理绩效评价; 施工现场; 数据包络分析

中图分类号: TU714

文献标志码: A

Research on performance evaluation of safety management in road engineering construction site based on DEA method

CHEN Zhao¹, SUN Jing-nan², ZHOU Zi-long², HUANG Peng-yu¹

(1. Guangxi Beitou Highway Construction and Investment Group Co., Ltd., Nanning 530029, China;

2. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: [Purposes] The paper aims to study the problems of many influencing factors and difficult safety management in highway construction site. [Methods] Based on data envelopment analysis(DEA) method, a safety management performance evaluation system of highway engineering construction site was established. Taking a highway project in Guangxi Province as the research object, six factors were selected as evaluation indexes from safety assets, safety inspection and safety training, and then the project was evaluated by using the non-radial slack-based model(SBM) in data envelopment analysis. [Findings] The safety management levels of the two bid sections of the highway project from January to May are polarized. For the months with low safety management efficiency of the two bid sections, there are generally redundant input and insufficient output, which is mainly because

收稿日期: 2021-08-29

基金项目: 广西交通运输行业重点科技项目“山地高速公路隧道精细爆破及其灾害控制技术研究”

通信作者: 陈钊(1979—), 男, 高级工程师, 主要从事公路工程勘察、设计、施工与投资建设管理等方面的研究。

E-mail: 15238328461@163.com

投稿网址: <http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxzbzk/home>

the number of safety production education and training personnel is small, and the output rate of completed output value of safety assets is low. Moreover, the actual input and completed output value of safety assets are more sensitive to the safety management efficiency of the two bid sections of the highway project from January to May. [Conclusions] Applying the established evaluation system to the safety management performance evaluation of highway engineering construction site can find out the problems, causes and main factors affecting the safety management performance of highway engineering construction site, which provides the direction for improving safety management in construction site.

Key words: performance evaluation of safety management; construction site; data envelopment analysis

公路工程作为重要的基础建设工程,在我国交通运输及国民日常生活中发挥着重要作用。近年来,随着我国经济的快速发展,公路建设也进入了新的发展时期。根据国家统计年鉴和交通运输部的统计数据,2016—2019年我国的公路建设固定资产投资、公路里程、公路工程的企业单位和从业人数均处于快速增长期,其中,公路建设投入资金和从业人数增长得尤其迅速。但根据广西壮族自治区应急管理厅的统计数据,2020年1—10月交通建设工程的事故起数和死亡人数同比增长了106.3%和111.8%,可见,广西交通建设工程的安全形势十分严峻。此外,公路工程的规模庞大,参与施工的人员众多,设备种类也多种多样,多项任务需要人机协同完成且可能存在交叉作业,这就使得公路工程施工过程中的安全管理工作量大且内容复杂,难以用一个简单有效的方法来衡量其安全管理水平的高低并依此对安全管理工作适时调整。因此,科学、合理、有效地评估公路工程施工过程中的安全管理绩效,并在此基础上提高其安全管理水平对公路工程的建设施工和服务国家发展大局有着至关重要的意义^[1]。

目前,对于施工现场安全管理绩效的研究大多集中在建筑领域。其中,龙彦江等^[2]采用系统动力学模型从项目整体角度对安全管理绩效进行了分析。吴秀宇等^[3]运用系统动力学理论对建筑领域施工企业的安全投资与安全绩效进行了关系分析和动态仿真研究。王亦虹等^[4]基于关键绩效指标的绩效考核理论得到建筑施工企业安全绩效评价的5个影响因素。彭鹏^[5]通过分析建设单位、监理单位和施工单位的安全管理行为对安全

管理绩效的影响,得出了建设单位各类安全管理工作对提高安全管理绩效的影响程度。王首绪等^[6]通过研究子项目对项目群管理绩效的影响,发现业主的协调能力、地方协调与支持以及自然环境对项目群管理绩效的影响最为显著。于沛鑫^[7]通过对建筑施工企业安全绩效模型进行仿真模拟分析,找到了影响建筑施工企业安全绩效的5个关键因素。KANG等^[8]通过构建非参数两层次前沿数据包络分析(data envelopment analysis, DEA)模型,从技术差距和管理效率两方面分析了2017年中国省级建筑业的安全绩效。KANG等^[9]还以建筑从业人员、建筑机械设备和建筑面积为投入,以建筑增加值和死亡人数为产出,比较分析了2009—2017年中国省级建筑业的安全绩效。NAHANGI等^[10]建立了基于DEA的安全性分析框架,研究了建筑工地的效率及其与安全测量关键指标的关系,发现建筑工地事故发生次数是与建筑工地效率相关的主导因素。

截至目前,对公路工程施工现场安全管理绩效的研究还十分有限。近年来,只有李晓娟等^[11]对公路项目的安全管理绩效进行了尝试性研究,其利用物元分析法和模糊数学法建立了山区公路项目的安全管理绩效评价模型,最终给出了公路施工安全绩效管理等级。本研究采用DEA方法对公路工程施工现场的安全管理绩效进行了进一步的研究,不仅得到了施工现场每个月的安全管理绩效,而且找出了该公路工程在安全管理上存在的问题,在此基础上分析了各评价指标对安全管理效率的灵敏度,为公路工程施工现场的安全管理工作提供了理论依据和改进方向。

1 评价指标选取和体系建立

1.1 DEA 方法

数据包络分析是数学、运筹学、数理经济学和管理科学的一个新的交叉领域,是一种使用数学规划模型评价多个输入和多个输出“单元”间相对有效性的方法,在避免主观因素、简化运算、获得更合理的评价结论和更丰富的评价信息等方面具有独特的优势^[12]。目前,使用 DEA 方法对安全绩效进行评价已经在多个领域得到了广泛应用,如城市公共图书馆的效率^[13]、城市生活质量的水平^[14]和建筑领域安全绩效的评价^[8-9]等。但 DEA 方法中两种主要的评价模型(CCR 和 BCC 模型)是径向的,即投入和产出的评价指标同比例变化,但在实际施工过程中公路工程各标段每月的投入和产出评价指标数据经常会非等比例变化。因此,基于松弛变量且可以使投入和产出评价指标数据非等比例变化的非径向松弛测度模型(slack-based model,SBM)更适用于公路工程施工现场的安全生产绩效评价^[15-17]。

假设有 n 个决策单元, $\mathbf{x}$ 为 m 个投入评价指标组成的向量, $\mathbf{y}$ 为 s 个产出评价指标组成的向量, $\mathbf{x} = (x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj})^T$, $\mathbf{y} = (y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{sj})^T$,且各投入产出评价指标值均大于 0,则 DEA 方法中的 SBM 模型为:

$$\begin{cases} \min \rho = \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{S_i^-}{x_{ik}}}{1 + \frac{1}{s} \sum_{r=1}^s \frac{S_r^+}{y_{rk}}} \\ x_{ik} = \sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j + S_i^- \\ y_{rk} = \sum_{j=1}^n y_{rj} \lambda_j - S_r^+ \\ S_i^- \geq 0, S_r^+ \geq 0, \lambda_j \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: ρ 为决策单元的效率值; x_{ij} 和 y_{rj} 分别为第 j 个决策单元的第 i 个投入评价指标和第 r 个产出评价指标; S_i^- ($i=1,2,\dots,m$) 为第 i 个投入评价指标产出不足的松弛变量; S_r^+ ($r=1,2,\dots,s$) 为第 r 个产出评价指标投入过剩的松弛变量; λ_j ($j=1,2,\dots,n$) 为调整系数。

1.2 评价指标选取和体系建立

公路工程具有点多线长面广、户外作业环境复杂且不可控因素多、作业人员安全意识差且流动性强、设备种类多、施工环境差等特点,且在施工过程中多种危险因素之间会相互作用,这均使得公路工程施工安全事故频发,并造成大量的财产损失和人员伤亡^[18]。为了减少公路工程施工现场安全事故的发生,科学合理地选取安全管理绩效的评价指标就显得尤为重要。而公路工程本身就是一个复杂的系统工程,施工现场安全事故的原因多且复杂,所以选择合理的公路工程施工现场安全管理绩效评价指标十分困难。

在以往学者对建筑领域施工现场安全管理绩效的研究中,在选取评价指标时尽可能多地考虑施工现场的各个方面,如制度方案审核、资质管理、安全管理费、技术交底、机械设施验收、日常检查和危险源监控等^[2],但其中的大多数指标需要先经专家打分后再进行评价,而专家打分又存在主观性强的问题。因此,在选取施工现场安全管理绩效评价指标时,不能一味地追求全面,还要考虑能否直接获取各指标的评价数据。有学者在选取建筑领域施工现场安全管理绩效的评价指标时,为了避免评价指标数据的主观性,直接选取可以量化且易统计的评价指标^[19-20],并将其分为投入和输出指标进行安全管理绩效评价,如将安全技术费用、安全设备费用、安全管理费用、建筑从业人员、建筑机械设备和建筑面积等作为投入评价指标,将全年伤亡人数、全年损失总数和全年总产值作为产出评价指标^[8-9]。但是以往学者对安全管理绩效研究的时间周期大多为一年,不能及时地对施工现场的安全管理情况进行合理地评价并提出改进意见。因此,以一个月为时间周期对公路工程施工现场的安全管理绩效进行评价更具有时效性。基于以往学者对建筑领域施工现场安全管理绩效的研究和公路工程施工的自身特点,本研究分别从安全管理费用、安全事故、日常检查、安全教育培训和安全宣传方面选出能够用数据量化且能及时有效地反馈施工现场安全管理水平的指标。但由于短时间内安全事故次数很少或没有,故用日常检查中查出的一般隐患数表征施

工现场的危险程度。因此,本研究选择安全资产实际投入、安全检查派遣人数、安全生产教育培训人数、安全宣传标语数、安全资产完成产值和查出的一般隐患数作为基于 DEA 方法的公路工程施工现场安全管理绩效的评价指标。

公路工程施工现场安全管理绩效评价指标体系的建立应从公路工程的本质特征进行考虑,不仅要体现公路工程施工现场造成安全事故的各个因素,还要体现人能够直接参与的、可提升施工现场安全管理绩效的因素。在确定公路工程施工现场安全管理绩效评价指标体系时,还应遵循以下原则:① 全面原则。评价指标体系要能全面地反映公路工程施工现场安全管理的内容。② 相对独立原则。体系中的各评价指标间相互独立且与安全管理绩效没有较强的相关性。③ 实用性原则。体系中各评价指标的数据可量化,能够直接用于安全管理绩效的评价。根据以上公路工程施工现场安全管理绩效评价指标体系的建立原则和用 DEA 方法

进行安全管理绩效评价的特点,将安全资产实际投入、安全检查派遣人数、安全生产教育培训人数和安全宣传标语数作为投入评价指标,安全资产完成产值和查出的一般隐患数作为产出评价指标,建立公路工程安全管理绩效评价指标体系。

图 1 所示为公路工程安全管理绩效评价流程图。该流程为:首先,确定公路工程安全管理绩效评价的目标,并以公路工程施工过程的每个月为决策单元,根据施工现场安全管理的各影响因素确定评价指标并建立安全管理绩效评价指标体系。然后,完成评价指标数据的收集及评价模型的选取。最后,使用评价模型对评价指标数据进行计算。若对计算结果不满意则调整评价指标体系;若对计算结果满意则得出各决策单元的安全管理效率,并在此基础上,分析并确定对各决策单元安全管理效率影响最大和最灵敏的评价指标,最终针对公路工程施工现场的安全管理给出科学合理的评价及改进方向。

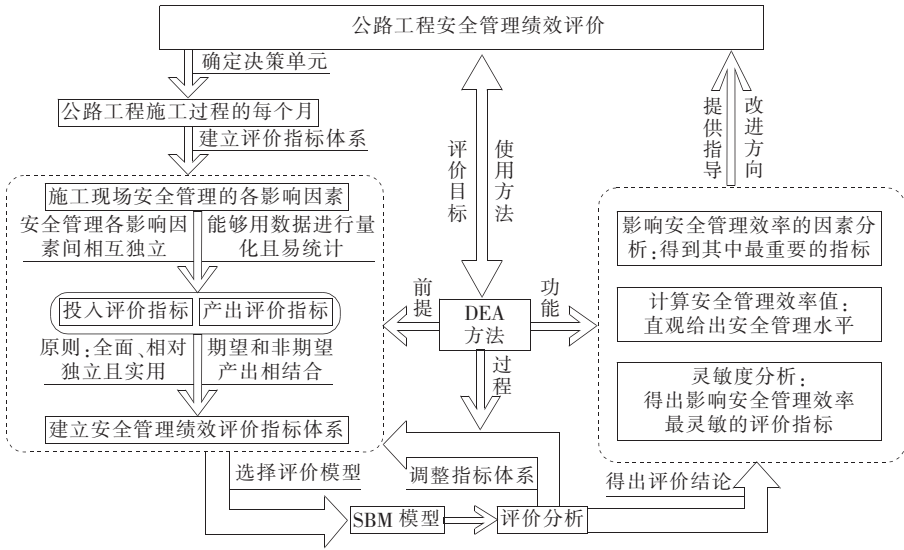


图 1 公路工程安全管理绩效评价流程图

Fig. 1 Flow diagram of performance evaluation of safety management for road engineering

2 案例分析

2.1 安全管理效率评价

以广西壮族自治区内某二级公路工程为例进行安全管理绩效评价。该公路工程长约 57.6

km,分为两个施工标段(1 标和 2 标),施工内容主要为土建工程施工,包括路基、路面、桥梁、涵洞和隧道等,计划工期 24 个月。本研究收集整理了该公路工程各标段 2021 年 1—5 月施工现场的安全管理数据,并对该公路工程各标段施工期每个月的安全管理水平进行分析及评价。

表 1 为该公路工程施工现场安全管理人员统计的各评价指标的原始数据。其中,1 标 1 月的安全宣传标语数和 2 标 5 月的安全检查派遣人数均为 0,但在使用 DEA 方法进行计算时要求所有的输入和输出数据均应大于 0,因此将上述两个数据设定为 1 进行安全管理效率的计算。此外,DEA 方法在分析投入和产出评价指标数据的过程中,会默认产出数据越大越好。而在安全管理绩效评价的产出指标中包含有安全资产完成产值的期望产出和查出一般隐患数的非期望产出等这类越小越好的指标,在将这类指标数据代入进行计算时,需要先对其进行反向处理^[8]。最后,需将所有的数据统一进行标准化处理。标准化处理的公式为:

$$\bar{x}_a = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} x_{aj}, a = 1, 2, \dots, 6$$

(2)

$$S_a = \sqrt{\frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} (x_{aj} - \bar{x}_a)^2}, a = 1, 2, \dots, 6$$

(3)

$$Z_{aj} = \frac{x_{aj}}{S_a}, a = 1, 2, \dots, 6$$

(4)

式(2)~(4)中: $\bar{x}_a$ 为各决策单元第 a 个投入产出评价指标的平均值; S_a 为各决策单元第 a 个投入产出评价指标的标准差; Z_{aj} 为标准化处理后决策单元 j 的第 a 个投入产出评价指标。

表 2 为各决策单元评价指标的原始数据经过标准化处理后的结果;表 3 为由 DEA 方法计算得到的各决策单元的安全管理效率。

表 1 安全管理绩效评价指标的原始数据

Table 1 Original data of performance evaluation indicators of safety management

决策单元 <i>j</i>	安全资产实际投入 x_{1j} /万元	安全检查派遣人数 x_{2j} /人	安全生产教育培训人数 x_{3j} /人	安全宣传标语数 x_{4j} /个	安全资产完成产值 x_{5j} /万元	查出一般隐患数 x_{6j} /个
1 标 1 月	8.59	11	63	0	1 065.00	11
1 标 2 月	4.99	10	32	20	900.00	10
1 标 3 月	5.22	25	102	5	700.00	16
1 标 4 月	7.33	15	147	9	1 066.00	19
1 标 5 月	6.78	10	33	10	1 168.50	7
2 标 1 月	33.83	28	179	45	1 191.00	33
2 标 2 月	9.13	24	258	25	637.00	9
2 标 3 月	15.67	22	212	30	1714.00	30
2 标 4 月	13.06	26	56	17	791.00	30
2 标 5 月	18.78	0	106	33	1 102.03	12

表 2 标准化处理后的评价指标值

Table 2 Values of evaluation indexes after standardized treatment

决策单元 <i>j</i>	评价指标值					
	安全资产实际投入	安全检查派遣人数	安全生产教育培训人数	安全宣传标语数	安全资产完成产值	查出一般隐患数
	Z_{1j}	Z_{2j}	Z_{3j}	Z_{4j}	Z_{5j}	Z_{6j}
1 标 1 月	1.026 9	1.256 1	0.850 4	0.076 0	3.636 0	2.512 1
1 标 2 月	0.596 5	1.141 9	0.432 0	1.503 1	3.072 7	2.826 2
1 标 3 月	0.624 3	2.854 8	1.376 9	0.375 8	2.389 9	1.727 0
1 标 4 月	0.875 5	1.712 9	1.984 3	0.676 4	3.639 4	1.454 4
1 标 5 月	0.809 8	1.141 9	0.445 5	0.751 5	3.989 4	3.947 5
2 标 1 月	4.043 4	3.197 3	2.416 2	3.382 0	4.066 2	0.837 4
2 标 2 月	1.091 2	2.740 6	3.482 6	1.878 9	2.174 8	3.070 3
2 标 3 月	1.872 6	2.512 2	2.861 7	2.254 7	5.851 8	0.921 1
2 标 4 月	1.560 6	2.969 0	0.755 9	1.277 7	2.700 6	0.921 1
2 标 5 月	2.244 9	0.116 8	1.430 8	2.480 1	3.762 4	2.302 7

表 3 用 DEA 方法得到的各决策单元的安全管理效率

Table 3 Safety management efficiency of each decision-making unit obtained by DEA method

决策单元 j	安全管 理效率 ρ_j	松弛变量					
		安全资产	安全检查	安全生产教	安全宣传	安全资产	查出一般
		实际投入 S_1^-	派遣人数 S_2^-	育培训人数 S_3^-	标语数 S_4^-	完成产值 S_1^+	隐患数 S_2^+
1 标 1 月	1.000 0	0	0	0	0	0	0
1 标 2 月	1.000 0	0	0	0	0	0	0
1 标 3 月	0.632 8	0	1.417 5	0.664 2	0	0.244 2	0.506 6
1 标 4 月	0.384 9	0.132 3	0.682 9	1.571 2	0	0	2.130 5
1 标 5 月	1.000 0	0	0	0	0	0	0
2 标 1 月	0.084 6	3.071 6	1.868 1	1.881 7	2.507 1	0.721 1	3.899 7
2 标 2 月	0.270 3	0.119 4	1.401 0	2.948 1	0.987 7	2.612 5	1.666 7
2 标 3 月	0.369 4	0.293 4	0.366 7	0.946 1	0.499 0	0	2.086 1
2 标 4 月	0.180 6	0.912 7	2.101 6	0.399 6	0.683 8	0.490 9	2.236 9
2 标 5 月	1.000 0	0	0	0	0	0	0

由表 3 中各标段 1—5 月的安全管理效率可以看出,该公路工程决策单元的安全管理效率高的可以达到 1.000,低的只有 0.084 6,说明该公路工程安全管理水平参差不齐,两极分化比较严重。通过对比该公路工程 1 标和 2 标安全管理效率为 1.000 的月份的数量和安全管理效率小于 1.000 的月份的安全管理效率值,发现 1 标的安全管理水平明显高于 2 标。此外,通过各评价指标的松弛变量可以看出,安全管理效率小于 1.000 的 6 个决策单元普遍存在安全投入冗余和产出不足的情况。

2.2 安全管理效率影响因素分析

在得到该公路工程各标段 1—5 月的安全管理绩效评价指标的安全管理效率后,如何调整现有资源来提升安全管理水平就变得十分重要。有学者认为将去除某一评价指标后的效率值与原效率值进行对比分析可找出被评价企业与同行企业之间存在差距的原因。本研究按照这个思路找出影响该公路工程施工过程中各标段安全管理效率的主要评价指标,为施工现场管理人员提高安全管理水平提供指导。首先,计算出各决策单元去除某一评价指标后的安全管理效率;然后,计算其与原安全管理效率的偏离程度。最小偏离程度所

对应的被去除的评价指标即为影响安全管理效率的主要因素。偏离程度可用下式计算:

$$p_a = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} (\rho_{aj} - \rho_j)^2$$

(5)

式中: p_a 为决策单元 j 去除投入产出评价指标 a 后的安全管理效率与原安全管理效率的偏离程度; ρ_j 为决策单元 j 的原安全管理效率; ρ_{aj} 为决策单元 j 去除投入产出评价指标 a 后的安全管理效率。

表 4 为各决策单元去除某一评价指标后的安全管理效率与原安全管理效率偏离程度的计算结果。从表 4 可以看出,在投入评价指标中,各决策单元去除安全生产教育培训人数后的安全管理效率与原安全管理效率的偏离程度最小;在产出评价指标中,各决策单元去除安全资产完成产值后的安全管理效率与原安全管理效率的偏离程度最小。这说明在该公路工程的施工过程中,安全生产教育培训人数和安全资产完成产值是影响安全管理效率的主要投入产出指标。因此,在公路工程施工的日常安全管理活动中,要关注安全生产教育培训的人数与效果,以及安全资产产值的完成情况。

表 4 安全管理效率偏离程度的计算结果

Table 4 Calculation results of deviation degree of safety management efficiency

决策单元 j	原安全管 理效率 ρ_j	去除下列各评价指标后的安全管理效率					
		安全资产	安全检查	安全生产教	安全宣传	安全资产	查出一般
		实际投入	派遣人数	育培训人数	标语数	完成产值	隐患数
		ρ_{1j}	ρ_{2j}	ρ_{3j}	ρ_{4j}	ρ_{5j}	ρ_{6j}
1 标 1 月	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.555 0	1.000 0	1.000 0
1 标 2 月	1.000 0	0.626 1	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.767 6	1.000 0
1 标 3 月	0.632 8	0.281 7	0.700 6	0.699 7	0.344 9	0.586 1	0.687 7
1 标 4 月	0.384 9	0.311 3	0.395 8	0.473 1	0.317 8	0.269 6	0.641 4
1 标 5 月	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
2 标 1 月	0.084 6	0.089 4	0.071 0	0.091 3	0.086 8	0.051 1	0.245 6
2 标 2 月	0.270 3	0.198 9	0.271 4	0.333 1	0.274 9	0.328 0	0.229 9
2 标 3 月	0.369 4	0.360 7	0.358 6	0.387 9	0.370 5	0.080 3	0.787 8
2 标 4 月	0.180 6	0.180 7	0.196 2	0.172 6	0.172 7	0.121 4	0.352 2
2 标 5 月	1.000 0	1.000 0	0.234 3	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
偏离程度 S_i	—	0.027 4	0.059 2	0.001 7	0.028 6	0.016 1	0.030 1

2.3 灵敏度分析

为预防该公路工程施工过程中各标段安全管理效率出现大幅度波动,分别对各标段安全管理效率小于 1 的 6 个月份的评价指标进行灵敏度分析。首先,将各投入评价指标值减小为原来的 90%、80%、70%、60%和 50%,各产出评价指标值增加为原来的 110%、120%、130%、140% 和 150%;然后,使用超效率模型计算各评价指标改变后各决策单元的安全管理效率;最后,按式(6)~(8)计算各投入产出评价指标各标段所有月份安全管理效率的平均变异系数(见图 2),对比分析各评价指标的灵敏度。

$$\mu_{aj} = \frac{1}{6} \sum_{b=1}^6 e_{baj} \tag{6}$$

$$\sigma_{aj} = \sqrt{\frac{1}{6} \sum_{b=1}^6 (e_{baj} - \mu_{aj})^2} \tag{7}$$

$$\overline{v}_a = \frac{1}{6} \sum_{j=1}^6 \left(\frac{\sigma_{aj}}{\mu_{aj}} \times 100\% \right) \tag{8}$$

式(6)~(8)中: e_{baj} 为各决策单元 j 的投入产出指标 a 改变相应倍数后的安全管理效率; μ_{aj} 为各决策单元 j 的投入产出指标 a 改变相应倍数后所有安全管理效率的平均值; σ_{aj} 为各决策单元 j 的投入产出指标 a 改变相应倍数后所有安全管理效率的标准差; $\overline{v}_a$ 为所有决策单元投入产出指标 a 的

平均变异系数。

由图 2 可知,在投入评价指标中,安全资产实际投入各标段所有月份的安全管理效率的平均变异系数最大;在产出评价指标中,安全资产完成产值各标段所有月份的安全管理效率的平均变异系数最大。这说明在投入产出评价指标中,安全资产实际投入和安全资产完成产值对决策单元的安全管理效率最灵敏。

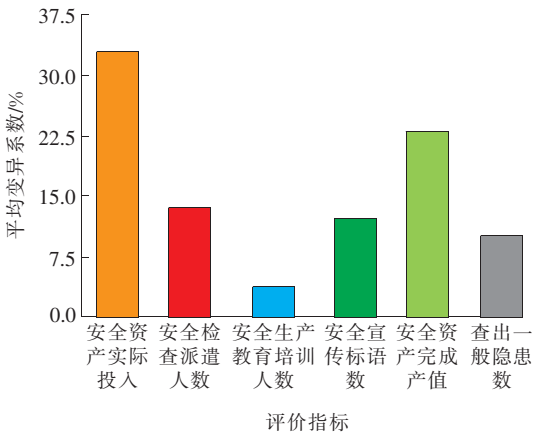


图 2 安全管理效率的平均变异系数

Fig. 2 Average variation coefficient of safety management efficiency

图 3 所示为 1 标 3 月份各投入产出评价指标值减少或增加相应倍数后的安全管理效率;表 5

为各评价指标值减少或增加相应倍数后安全管理效率的统计值。从图 3 及表 5 可以看出,在 1 标 3 月的投入评价指标值从原指标值的 90%减小到 50%的过程中,安全资产实际投入的安全管理效率比其他 3 个投入评价指标的变化大,且其变化后的安全管理效率的均值、标准差和变异系数均明显大于其他 3 个投入评价指标;当 1 标 3 月的产出评价指标值从原指标值的 110%增大到 150%的过程中,安全资产完成产值变化后的安全管理效率比查出一般隐患数变化后的更大,且安全资产完成产值变化后的安全管理效率的均值、标准差和变异系数均稍大于查出一般隐患数的。这说明在投入产出评价指标中,安全资产实际投入和安全资产完成产值对决策单元的安全管理效率更灵敏。因此,在后续的施工过程中,为避免各决策单元的安全管理绩效出现大幅度的波动,需要加强对各决策单元安全管理效率最敏感评价指标的控制。

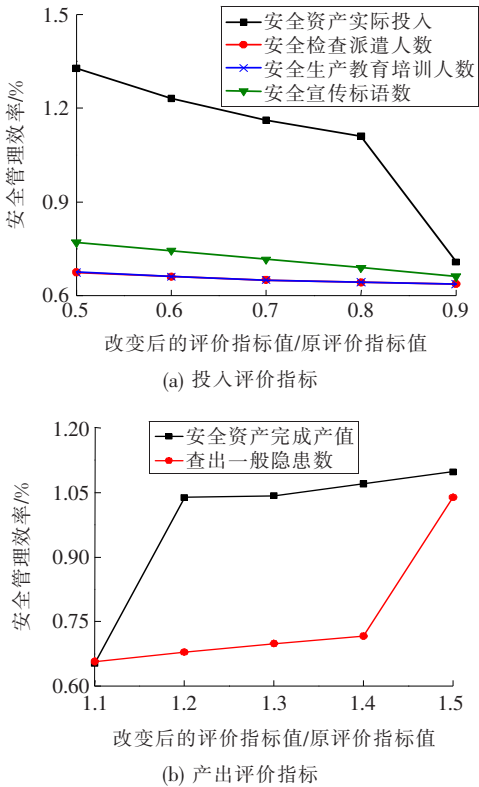


图 3 改变 1 标 3 月各评价指标值后的安全管理效率

Fig. 3 Safety management efficiency after change of each evaluation index value of bid 1 in March

表 5 改变 1 标 3 月各评价指标值后安全管理效率的统计值

Table 5 Statistical values of safety management efficiency after change of each evaluation index value of bid 1 in March			
评价指标 x_{a3}	安全管理效率		
	均值 μ_{a3}	标准差 σ_{a3}	变异系数 v_{a3}
安全资产实际投入	1.028 4	0.262 6	0.255 4
安全检查派遣人数	0.650 0	0.014 3	0.022 0
安全生产教育培训人数	0.650 3	0.014 6	0.022 4
安全宣传标语数	0.702 6	0.047 1	0.067 0
安全资产完成产值	0.922 4	0.198 9	0.215 6
查出一般隐患数	0.737 2	0.137 4	0.186 4

3 结论

- 1) 基于公路工程的施工特点和施工现场导致安全事故的安全管理因素,选取公路工程施工现场安全管理绩效的评价指标,建立了基于 DEA 方法的安全管理绩效评价指标体系。
- 2) 通过使用 DEA 方法对广西某公路工程各标段 1—5 月的安全管理情况进行安全管理绩效评价,发现该公路工程各标段的安全管理水平参差不齐,两极分化明显且普遍存在安全投入冗余和产出不足的情况。但 1 标比 2 标的安全管理水平相对好一些。
- 3) 在得到该公路工程各标段安全管理效率的基础上,对影响各标段安全管理效率的主要评价指标进行了分析,发现在投入和产出评价指标中,安全生产教育培训人数和安全资产完成产值是影响该公路工程各标段安全管理效率的主要因素。
- 4) 为避免各决策单元的安全管理效率出现大幅度波动,分析了该公路工程各标段 1—5 月各评价指标对安全管理效率的灵敏度,发现安全资产实际投入和安全资产完成产值对各决策单元的安全管理效率最灵敏。因此,在以后的安全管理中,需要在这两个评价指标进行合理控制。

〔参考文献〕

- [1] 潘丹,罗帆. 基于结构方程模型的建筑施工项目安全绩效评价[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(2): 602-609.
PAN Dan, LUO Fan. Safety performance evaluation of the construction projects based on the structural equation model[J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18(2): 602-609.
- [2] 龙彦江,彭鹏,马玲,等. 安全管理行为对安全管理绩效影响分析方法[J]. 工程管理学报, 2020, 34(3): 103-108.
LONG Yan-jiang, PENG Peng, MA Ling, et al. Analysis for impact of safety management behaviors on safety management performance[J]. Journal of Engineering Management, 2020, 34(3): 103-108.
- [3] 吴秀宇,范梦,李书全. 安全投资视角下的施工企业安全绩效提升研究[C]//第十九届中国管理科学学术年会论文集. 南京:中国优选法统筹法与经济数学研究会, 2017:189-195.
WU Xiu-yu, FAN Meng, LI Shu-quan. Research on construction enterprise safety performance improvement based on safety investment[C]//Proceedings of the 19th Chinese Academic Conference on Management Science. Nanjing: Chinese Society of Optimization, Overall Planning and Economic Mathematics, 2017:189-195.
- [4] 王亦虹,任晓晨,黄路路,等. 基于 KPI 理论的施工企业安全绩效评价研究[J]. 工程管理学报, 2016, 30(5):153-158.
WANG Yi-hong, REN Xiao-chen, HUANG Lu-lu, et al. Construction enterprise safety performance based on KPI[J]. Journal of Engineering Management, 2016, 30(5):153-158.
- [5] 彭鹏. 基于系统动力学的建设工程项目安全管理绩效研究[D]. 北京:清华大学, 2019:68-69.
PENG Peng. Research on safety management performance of construction project based on system dynamics[J]. Beijing: Tsinghua University, 2019: 68-69.
- [6] 王首绪,刘嘉瑜. 高速公路子项目对项目群管理绩效的影响[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2018, 15(2):37-42.
WANG Shou-xu, LIU Jia-yu. Influence of expressway's subprojects on programme management performance[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2018, 15(2): 37-42.
- [7] 于沛鑫. 基于系统动力学的建筑施工企业安全绩效提升研究[D]. 北京:首都经济贸易大学, 2017:57-58.
YU Pei-xin. Research on improvement of safety performance of construction enterprises based on system dynamics[J]. Beijing: Capital University of Economics and Business, 2017:57-58.
- [8] KANG L G, WU C, LIAO X P, et al. Safety performance and technology heterogeneity in China's provincial construction industry[J]. Safety Science, 2020, 121:83-92.
- [9] KANG L G, WU C. Evaluation the safety performance of China's provincial construction industries from 2009 to 2017[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2020, 26(5):435-446.
- [10] NAHANGI M, CHEN Y T, MCCABE B. Safety-based efficiency evaluation of construction sites using data envelopment analysis (DEA)[J]. Safety Science, 2019, 113:382-388.
- [11] 李晓娟,王勇. 山区公路项目施工安全管理绩效评价研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2018, 43(1):349-356.
LI Xiao-juan, WANG Yong. Study on performance evaluation of safety management in mountain road construction [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2018, 43(1):349-356.
- [12] 马占新. 数据包络分析模型与方法[M]. 北京:科学出版社, 2010:1-3.
MA Zhan-xin. Data envelopment analysis model and method[M]. Beijing: Science Press, 2010:1-3.
- [13] DEL B T, GOMEZ V M, DANIEL G Z, et al. Urban public libraries: performance analysis using dynamic-network-DEA [J]. Socio-Economic Planning Sciences, 2021, 74:100928.
- [14] GONZÁLEZ E, CÁRCABA A, VENTURA J. Weight constrained DEA measurement of the quality of life in Spanish municipalities in 2011[J]. Social Indicators Research, 2018, 136(3):1 157-1 182.
- [15] 杨文婕. 基于 SBM-DEA 模型的我国基本养老保险绩效评价[J]. 社会科学前沿, 2018, 7(1):22-28.
YANG Wen-jie. China's basic pension insurance performance evaluation based on SBM-DEA model[J].

Advances in Social Sciences,2018,7(1):22-28.

[16] PISHDAR M, SHAKID M D, ANTUCHEV-ICIENE J, et al. Interval type-2 fuzzy super SBM network DEA for assessing sustainability performance of third-party logistics service providers considering circular economy strategies in the era of industry 4.0[J]. Sustainability,2021,13(11):6497.

[17] LEE H S. An integrated model for SBM and Super-SBM DEA models[J]. Journal of the Operational Research Society,2021,72(5):1 174-1 182.

[18] 梁健健,李晨新,魏田正,等.公路改、扩建施工区设施与减速特征关系研究[J].交通科学与工程,2020,36(1):93-97.

LIANG Jian-jian, LI Chen-xin, WEI Tian-zheng, et al. Research on deceleration behavior of highway reconstruction and extension work zone[J]. Journal of Transport Science and Engineering,2020,36(1):93-97.

[19] 周文波,郭叶,胡珉,等.基于过程数据的工程项目管理团队绩效评价[J].公路工程,2020,45(1):80-87.

ZHOU Wen-bo, GUO Ye, HU Min, et al. Performance evaluation of project management teams based on process data[J]. Highway Engineering,2020,45(1):80-87.

[20] 卢毅,张欣欣.基于 SEM 和模糊综合评价法的装配式建筑施工安全风险评价[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2021,18(3):38-44.

LU Yi, ZHANG Xin-xin. Risk assessment on construction safety of prefabricated buildings based on SEM and fuzzy comprehensive assessment method[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology(Natural Science),2021,18(3):38-44.

(编辑 石月珍)

(上接第 44 页)

[23] 姬芬,张饮江,王芳,等.组合型生态浮床系统脱氮效果的周年变化[J].上海海洋大学学报,2017,26(2):235-242.

JI Fen, ZHANG Yin-jiang, WANG Fang, et al. Research on the annual changes of nitrogen removal efficiency in a combined ecological floating bed system[J]. Journal of Shanghai Ocean University,2017,26(2):235-242.

[24] 倪洁丽,王微洁,谢国建,等.水生植物在水生态修复中的应用进展[J].环保科技,2016,22(3):43-47.

NI Jie-li, WANG Wei-jie, XIE Guo-jian, et al. The application progress of aquatic plants in water ecological restoration[J]. Environmental Protection and Technology,2016,22(3):43-47.

[25] ZHANG M M, LUO P, LIU F, et al. Nitrogen removal and distribution of ammonia-oxidizing and denitrifying genes in an integrated constructed wetland for swine wastewater treatment[J]. Ecological Engineering, Part A,2017,104:30-38.

[26] 聂海伦.人工湿地生态系统去除污染物机理概述[J].能源与环境,2020(1):77,79.

NIE Hai-lun. An overview of pollutant removal mechanism in constructed wetland ecosystem[J]. Energy and Environment,2020(1):77,79.

[27] LYU T, HE K L, DONG R J, et al. The intensified constructed wetlands are promising for treatment of ammonia stripped effluent: nitrogen transformations and removal pathways [J]. Environmental Pollution,2018,236:273-282.

[28] 丘好华.人工湿地及其在生活污水氮磷去除方面的应用分析[J].节能与环保,2019(6):105-106.

QIU Hao-hua. Constructed wetlands and their application in nitrogen and phosphorus removal from domestic sewage[J]. Energy Conservation and Environmental Protection,2019(6):105-106.

[29] 尹晨阳,李雪娟,陶仕珍,等.不同引种挺水植物组合对水体净化效果的研究[J].绿色科技,2019(10):63-64.

YIN Chen-yang, LI Xue-juan, TAO Shi-zhen, et al. Study on the purification effect of different introduced emergent plant combinations on water body [J]. Journal of Green Science and Technology,2019(10):63-64.

(编辑 石月珍)