论 著　DOI:10.16369/j.oher.issn.1007-1326.2026.260088

·调查研究·

四种职业健康风险评估方法对矽尘防护措施改进效能的动态评价与比较

Dynamic evaluation and comparison of improving effectiveness of protective measures against silica using four occupational health risk assessment methods

张慧，刘武忠，孙原，赵乾魁，张超

ZHANG Hui，LIU Wuzhong，SUN Yuan，ZHAO Qiankui，ZHANG Chao

上海市化工职业病防治院，上海　200041

摘要：目的　采用4种常用的职业健康风险评估方法对某企业铸造车间职业病防护措施改进前后矽尘接触岗位的职业健康风险进行纵向对比评估，探讨不同评估方法的适用性。**方法**　以上海市某企业铸造车间矽尘接触岗位作为研究对象，开展职业卫生调查，收集2018年和2024年矽尘接触浓度检测结果，采用职业危害风险指数法、接触比值法、综合指数法以及职业病危害作业分级法评估矽尘接触岗位的职业健康风险，比较4种方法在职业病防护措施改进前后纵向对比评估的适用性。**结果**　2018年，砂混炼、地面造型、开箱落砂和清砂岗位均超标，矽尘接触浓度分别为0.56 mg/m^3、0.68 mg/m^3、0.95 mg/m^{3}和0.49 mg/m^3；地坑造型岗位矽尘接触浓度合格，为0.23 mg/m^3。风险指数法和综合指数法的评估结果主要为高度危害/风险，接触比值法评估结果主要为极高风险和高风险，职业病危害作业分级法评估结果主要为高度危害作业。经过职业病防护措施系统升级改进后，2024年各作业岗位矽尘接触浓度分别为0.21 mg/m^3、0.45 mg/m^3、0.27 mg/m^3、0.20 mg/m^{3}和0.14 mg/m^3，均合格。与2018年的评估结果相比，4种评估方法所得的风险比值（RR）风险等级在2024年均下降（$P<0.05$）。**结论**　接触比值法在评估时存在风险“高估”情况；风险指数法和职业病危害作业分级法均能反映职业病防护措施改进的有效性，对防护措施改进前后矽尘职业健康风险的纵向对比评估具有较好的适用性，可应用于矽尘职业健康风险的纵向评估工作。综合指数法因涵盖的影响因素较为全面，在无需进行两个时间点纵向对比评估的情况下可作为优先选用的方法。

关键词：职业病防护措施；职业健康；风险评估；矽尘；铸造车间；动态评估；GBZ/T 229.1—2025；风险高估

中图分类号：R135.2；R134.2　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1007-1326（2026）03-0361-07

引用：张慧，刘武忠，孙原，等. 四种职业健康风险评估方法对矽尘防护措施改进效能的动态评价与比较[J]. 职业卫生与应急救援，2026，44（3）：361-366；413.

矽尘是我国采矿、陶瓷、铸造等多个行业普遍存在的职业病危害因素，也是目前上海市重点职业危害行业中危害最为严重的粉尘类型[1]。前期国内外学者已运用多种风险评估方法，针对不同行业开展矽尘接触岗位职业健康风险评估，并对各类方法的适用性进行验证和比较。但这些研究多基于单次检测数据开展职业健康风险评估，难以反映职业病危害因素及其职业病防护措施发生改变时对风险评估结果的影响。国内有学者针对化学毒物（汞、苯系物等）的职业健康风险开展了2个时间点的纵向动态评估[2-3]，但针对矽尘在不同时间点的纵向风险评估，尚未开展对其应用实践和适用性程度的系统性分析。本研究拟采用职业危害风险指数法、GBZ/T 298—2017《工作场所化学有害因素职业健康风险评估技术导则》[4]中的接触比值法、综合指数法以及GBZ/T 229.1—2025《职业病危害作业分级标准 第1部分：生产性粉尘》中的分级标准[5]，对某企业铸造车间中矽尘接触岗位，开展职业病防护措施改进前后矽尘职业健康风险的纵向对比评估工作，旨在筛选出适用于矽尘接触岗位在2个不

基金项目：上海市化工职业病防治院2024年度学科人才培养计划科研基金（2024ZFY10）

作者简介：张慧（1988—），女，硕士，工程师

同时间点纵向对比的评估方法。

1 对象与方法

1.1 对象

选取上海市某专用设备制造企业的铸造车间作为研究现场，以该企业铸造车间接触矽尘的作业岗位作为本次研究的主要调查对象。该企业铸造车间拥有典型的铸造工艺流程，具有一定的代表性，其主要生产工艺流程包括砂混炼、造型、熔炼、浇注、开箱落砂、砂处理、打磨和抛丸等。其中，涉及矽尘接触的作业岗位包括砂混炼、地面造型、地坑造型、开箱落砂和清砂岗位。上述岗位均为一班制，每班工作8 h，每周工作5 d。2018年铸造件的产量约8 500 t，矽尘接触人数为43人；2024年铸造件的产量约9 400 t，矽尘接触人数为38人。

1.2 方法

1.2.1 职业卫生调查与检测

本研究根据风险评估涉及的各项要素，对企业生产现场开展职业卫生调查，调查内容涵盖企业概况、生产工艺、劳动定员及工作班制、作业方式、职业病防护措施以及职业卫生管理情况等。查阅该企业2018—2024年的职业卫生档案资料，从中选取2018年和2024年2个时间节点的职业病危害因素检测结果（相关数据来自具有职业卫生技术服务资质的第三方检测机构出具的职业病危害现状评价报告）。检测结果按照GBZ 2.1—2019《工作场所有害因素职业接触限值 第1部分：化学有害因素》[6]判定矽尘接触浓度是否超出限值要求。

1.2.2 职业健康风险评估方法

1.2.2.1 职业危害风险指数法（以下简称“风险指数法”）

风险指数法计算公式[7]如下：

$$\text{风险指数} = 2^{\text{健康效应等级}} \times 2^{\text{暴露比值}} \times \text{作业条件等级} \quad (式1)$$

$$\text{作业条件等级} = \sqrt[4]{\text{暴露时间等级} \times \text{暴露人数等级} \times \text{工程防护措施等级} \times \text{个体防护措施等级}} \quad (式2)$$

式中，健康效应等级参考GBZ/T 229.1—2025游离二氧化硅含量（以质量分数计）的分级，分为0～3级；暴露比值为矽尘接触浓度与对应职业接触限值的比值；风险等级由低到高划分为无、轻度危害、中度危害、高度危害和极度危害5个等级。

1.2.2.2 接触比值法

根据GBZ/T 298—2017，接触比值法的风险指数（R）的计算公式如下：

$$R=\sqrt{\text{HR} \times \text{ER}} \quad (式3)$$

式中，HR为危害等级，矽尘为确认人类致癌物（G1），HR为5；ER为接触等级，其值为矽尘接触浓度（E）与对应职业接触限值（OEL）的比值。风险等级由低到高划分为可忽略、低风险、中等风险、高风险和极高风险5个等级。

1.2.2.3 综合指数法

根据GBZ/T 298—2017，综合指数法的风险指数（R）的计算方法同式3。HR为危害等级，判定同1.2.2.2节的方法。ER为接触等级，参考GBZ/T 298—2017附录F中表F.5，ER的计算公式如下：

$$\text{ER} = \left[\text{EI}_1 \times \text{EI}_2 \times \cdots \text{EI}_n\right]^{1/n} \quad (式4)$$

式中，EI为接触指数，n为接触因素的个数。游离二氧化硅含量是衡量矽尘危害程度的重要指标[1]。本研究对该方法进行改进，将游离二氧化硅含量引入GBZ/T 298—2017附录F中表F.5，根据国内相关学者[7-8]和GBZ/T 229.1—2025的游离二氧化硅含量分级综合考虑，分为5级（1级：< 10%；2级：10% ~ 40%；3级：40% ~ 50%；4级：50% ~ 80%；5级：≥ 80%）。风险等级划分同1.2.2.2节的方法。

1.2.2.4 职业病危害作业分级标准

根据GBZ/T 229.1—2025，分级指数（G）计算公式如下：

$$G = W_M \times W_B \times W_L \quad (式5)$$

式中，W_M为生产性粉尘中游离二氧化硅含量（M）的权重数。$M < 10\%$，$W_M = 1$；$10\% \leqslant M \leqslant 50\%$，$W_M = 2$；$50 < M \leqslant 80\%$，$W_M = 4$；$M > 80\%$，$W_M = 6$。$W_B$为矽尘职业接触限值比值（B）的权重数。$B \leqslant 1$，$W_B = 0$；$B > 1$，$W_B = B$。$W_L$为劳动者体力劳动强度的权重数。体力劳动强度等级分为Ⅰ（轻）、Ⅱ（中）、Ⅲ（重）和Ⅳ（极重），对应的W_L取值分别为1.0、1.5、2.0和2.5。

GBZ/T 229.1—2025依据分级指数G和行动水平浓度，对矽尘接触岗位开展作业分级，由低到高共划分为5个等级：0级（相对无害作业，$G = 0$且$B \leqslant 0.5$）、Ⅰ级（行动水平作业，$G = 0$且$B > 0.5$）、Ⅱ级（轻度危害作业，$0 < G \leqslant 6$）、Ⅲ级（中度危害作业，$6 < G \leqslant 16$）、Ⅳ级（高度危害作业，$G > 16$）。

1.2.3 不同风险评估方法结果比较

为方便后续的比较分析，引入风险比值（RR）

对评估结果进行标准化[9]。RR = 风险等级赋值/风险等级总数，标化后的风险等级由低到高可划分为可忽略（RR ≤ 0.2）、低（0.2 < RR ≤ 0.4）、中等（0.4 < RR ≤ 0.6）、高（0.6 < RR ≤ 0.8）和极高风险（0.8 < RR ≤ 1.0）5个风险等级。RR标准化旨在便于跨方法间的横向比较以及2个时间点的纵向对比，但不代表不同方法各等级间的风险量值存在完全等比关系。

1.2.4　统计学分析

运用SPSS 27.0软件进行数据统计学分析，职业病防护设施改造前后2个时间点风险比值的差异性比较采用Wilcoxon配对符号秩和检验。检验水准 $\alpha = 0.05$。

2　结果

2.1　职业卫生现场调查和检测结果

2.1.1　2018年职业卫生现场调查和检测结果情况

（1）职业病防护设施情况：2018年，铸造车间主要采用自然通风，通过铸造车间南侧和北侧的门窗以及车间顶部设置的气楼进行通风换气。造型所用物料具有一定的湿度，有一定的抑尘效果。地坑造型区域设有机械通排风，换气次数达15次/h。但地面造型作业未设置工程防护设施；砂混炼为密闭、自动化作业，砂混炼投料机械化程度较高，作业人员以远程操控为主，但下料口未设置局部吸风罩。振动落砂机四周设置2.3 m高的金属密闭罩，侧方设有吸尘口和吸风管道，但地面以及砂坑抓砂过程中逸散的粉尘不能完全被吸附；型砂袋经铁铲铲破后，直接倒入再生砂生产线投料口，投料口侧方设置的吸风罩安装形式不适宜（过小、过低）。清砂打磨操作位未设置防尘设施，清砂抛丸设备间密闭，但未设置排风装置。

（2）职业卫生管理情况：建立了职业卫生管理制度，但在职业病防护设施“三同时”管理、工作场所职业病危害因素定期检测、职业健康检查、应急救援、职业卫生档案管理等制度方面未完全落实。

（3）职业病危害因素检测结果：铸造车间岗位矽尘接触浓度超标率达80%，砂混炼、地面造型、开箱落砂和清砂岗位均超标，接触浓度[E，呼尘时间加权平均浓度（C_{TWA}）最大值]分别为0.56 mg/m³、0.68 mg/m³、0.95 mg/m³和0.49 mg/m³，对应的暴露比值分别为1.87、2.27、3.17和1.63。地坑造型岗位的矽尘接触浓度合格，接触浓度为0.23 mg/m³，其对应的暴露比值为0.77。见表1。

2.1.2　职业病防护措施改进情况

该企业在2018年后，逐步对职业病防护措施（主要包括原辅物料和工程防护设施）以及职业卫生管理制度等进行了优化升级和改进，具体情况如下。

（1）原辅物料方面，对铸造车间造型工艺使用的型砂进行了替换，采用游离二氧化硅含量低的型砂替代原有游离二氧化硅含量高的型砂。

（2）工程防护设施方面，针对2018年矽尘超标岗位（地面造型、砂混炼、开箱落砂和清砂岗位）进行了职业病防护设施的改造：① 在铸造车间电炉区域上方设置一套除尘净化装置（总风量200 000 m³/h），并在造型和浇注区域上方设置一套脉冲式布袋除尘净化装置（总风量300 000 m³/h），铸造车间的全室通风换气次数可达6.6次/h。地面造型岗位因工艺条件限制，不易设置局部除尘装置，故以全室机械通风为主。② 在混砂机下料口旁及混砂机上方设置吸尘罩和吸风管道，粉尘经吸尘口和管道进入脉冲式布袋除尘净化装置（风机风量为25 000 ~ 30 000 m³/h）处理后高空排放。③ 对振动落砂机的防护设施进行改造，将原有的金属密闭罩加装轨道，可通过轨道进行密闭罩的开合，并在密闭罩下方设置3个缓冲斗吸尘口和1个传送带吸尘口，该套除尘净化装置的风机风量由原先的20 000 m³/h加大到53 400 m³/h。④ 对型砂投料岗位设置的吸风罩进行改造，使投料岗位的矽尘逸散区域和吸风罩的吸风范围相适应，将吸风罩的吸风形式改为侧上吸式，加大吸风罩的罩口尺寸，并加大风机风量。清砂打磨操作位设置局部吸风罩，清砂抛丸设备间加装局部排风装置，投料、打磨和抛丸作业产生的粉尘经管道收集进入滤筒除尘净化装置（风机风量为65 000 m³/h）处理后高空排放。

（3）职业卫生管理情况方面，逐步完善和落实各项职业卫生管理制度，并重视职业健康管理体系的建设和实施，尤其在职业健康监护、职业健康培训和个体防护用品发放和佩戴情况方面，实现全方位管理。

2.1.3　2024年职业卫生现场调查和检测结果情况

2024年各作业岗位矽尘接触浓度分别为0.21、0.45、0.27、0.20和0.14 mg/m³，对应的暴露比值分别为0.30、0.64、0.39、0.29和0.20，均 < 1，符合GBZ 2.1—2019标准限值的要求。见表1。

2.2　风险评估情况

2.2.1　2018年风险评估结果

根据2018年的调查资料，采用风险指数法和综

表1　铸造车间矽尘接触岗位防护调查情况和浓度检测结果

年份	岗位	作业方式	接触人数	接触时间/（h/d，d/周）	游离二氧化硅含量/%	呼尘C_{TWA}/（mg/m³）	E/OEL	工程防护设施	个体防护措施
2018年	砂混炼	机械结合手工作业	5	5，5	51.2	0.54 ~ 0.56	1.87	砂混炼设备密闭，下料口未设局部防护设施	防尘毒口罩（3M9042）
	地面造型	手工作业	18	8，5	51.2	0.55 ~ 0.68	2.27	未设置工程防护设施	防尘毒口罩（3M9042）
	地坑造型	机械结合手工作业	8	8，5	51.2	0.20 ~ 0.23	0.77	整体通排风	防尘毒口罩（3M9042）
	开箱落砂	机械结合手工作业	6	5，5	74.0	0.86 ~ 0.95	3.17	密闭罩+局部排风（风量偏小），防护设施有运转但效果差	防尘毒口罩（3M9042）
	清砂	机械结合手工作业	6	4，5	74.0	0.46 ~ 0.49	1.63	砂再生设备密闭，型砂手工投料口设置侧吸风装置（罩口偏小，风量偏小），防护设施有运转但效果差；清砂打磨操作位未设置防尘设施，清砂抛丸设备密闭，但未设排风装置	防尘毒口罩（3M9042）
2024年	砂混炼	机械结合手工作业	5	5，5	34.1	0.19 ~ 0.21	0.30	砂混炼设备密闭+局部排风，下料口处设局部排风罩，防护设施效果良好	防尘毒口罩（3M9042）
	地面造型	手工作业	9	8，5	34.1	0.30 ~ 0.45	0.64	全室机械排风	防尘毒口罩（3M9042）
	地坑造型	机械结合手工作业	13	8，5	34.1	0.22 ~ 0.27	0.39	整体通排风	防尘毒口罩（3M9042）
	开箱落砂	机械结合手工作业	5	5，5	40.8	0.14 ~ 0.20	0.29	密闭罩+局部排风（增加下吸式排风口，并增大风量），防护设施效果良好	防尘毒口罩（3M9042）
	清砂	机械结合手工作业	6	4，5	40.8	0.10 ~ 0.14	0.20	砂再生处理设备密闭，型砂手工投料口设适宜的侧吸风装置，防护设施效果良好；清砂打磨操作位设置防尘设施，清砂抛丸设备密闭+局部排风	防尘毒口罩（3M9042）

注：矽尘（50% < 游离二氧化硅含量 ≤ 80%）呼尘的OEL为0.3 mg/m³，矽尘（10% < 游离二氧化硅含量 ≤ 50%）呼尘的OEL为0.7 mg/m³；以各岗检测结果的最大值作为矽尘接触浓度（E），用于计算E/OEL。

合指数法进行风险评估，结果显示仅地坑造型岗位为中度危害/中等风险，其他岗位均判定为高度危害/高风险；采用接触比值法评估，结果显示地面造型和开箱落砂岗位为极高风险，砂混炼、地坑造型和清砂岗位均为高风险；按照职业病危害作业分级标准评定，开箱落砂岗位为高度危害作业，砂混炼、地面造型和清砂岗位均为中度危害作业，地坑造型岗位为行动水平作业。见表2。

2.2.2　2024年风险评估结果

根据2024年的调查资料，采用风险指数法和职业病危害作业分级标准进行风险评估，结果显示仅地面造型岗位为轻度危害/行动水平作业，其他岗位均为无危害或相对无害作业；采用接触比值法评估，结果显示地面造型岗位为高风险，其他岗位均为中等风险；采用综合指数法评估，结果显示所有岗位均为中等风险。见表2。

表2　2018年和2024年各岗位接触矽尘的职业健康风险评估结果

年份	岗位	职业危害风险指数法					接触比值法				综合指数法				职业病危害作业分级标准				
		健康效应等级	暴露比值	作业条件等级	风险指数	风险等级	HR	ER	R	风险等级	HR	ER	R	风险等级	W_M	W_B	W_L	G	作业分级
2018年	砂混炼	2	1.87	1.78	26.00	4	5	4	4	4	5	3.67	4	4	4	1.87	1.5	11.22	Ⅲ
	地面造型	2	2.27	2.59	49.97	4	5	5	5	5	5	2.68	4	4	4	2.27	1.5	13.62	Ⅲ
	地坑造型	2	0.77	2.21	15.10	3	5	3	4	4	5	2.19	3	3	4	0	1.5	0且$B>0.5$	I
	开箱落砂	2	3.17	1.57	67.01	4	5	5	5	5	5	2.94	4	4	4	3.17	1.5	19.02	IV
	清砂	2	1.63	1.86	23.04	4	5	4	4	4	5	2.85	4	4	4	1.63	1.5	9.78	Ⅲ
2024年	砂混炼	1	0.30	1.41	3.48	1	5	2	3	3	5	1.49	3	3	2	0	1.5	0且$B<0.5$	0
	地面造型	1	0.64	2.21	6.90	2	5	3	4	4	5	1.63	3	3	2	0	1.5	0且$B>0.5$	I
	地坑造型	1	0.39	2.21	5.80	1	5	2	3	3	5	1.69	3	3	2	0	1.5	0且$B<0.5$	0
	开箱落砂	1	0.29	1.41	3.46	1	5	2	3	3	5	1.84	3	3	2	0	1.5	0且$B<0.5$	0
	清砂	1	0.2	1.68	3.86	1	5	2	3	3	5	1.84	3	3	2	0	1.5	0且$B<0.5$	0

2.2.3　两次风险评估的变化情况

为了进一步量化比较不同评估方法的评估效果及风险变化情况，将各方法所得的风险等级换算为风险比值（RR）。以各岗位为样本点，采用Wilcoxon配对符号秩和检验，对2018年与2024年各评估方法的风险比值进行差异性分析。结果显示：与2018年的评估结果相比，4种评估方法所得的RR在2024年均出现明显下降趋势，差异具有统计学意义（$P < 0.05$）。见表3。

表3　2018年与2024年4种风险评估方法的风险比值比较

岗位	职业危害风险指数法		接触比值法		综合指数法		职业病危害作业分级标准	
	2018年	2024年	2018年	2024年	2018年	2024年	2018年	2024年
砂混炼	0.8	0.2	0.8	0.6	0.8	0.6	0.8	0.2
地面造型	0.8	0.4	1.0	0.8	0.8	0.6	0.8	0.4
地坑造型	0.6	0.2	0.8	0.6	0.6	0.6	0.4	0.2
开箱落砂	0.8	0.2	1.0	0.6	0.8	0.6	1.0	0.2
清砂	0.8	0.2	0.8	0.6	0.8	0.6	0.8	0.2
*Z*值	−2.070		−2.121		−2.000		−2.032	
*P*值	0.038		0.034		0.046		0.042	

3　讨论

本研究基于2018年和2024年2个时间段的现状评价检测数据，并结合这2个时间段内矽尘的危害性质指标及其职业卫生防护措施的调整与变化情况，对上海市某专用设备制造企业铸造车间矽尘接触岗位，开展2个时间点的动态职业健康风险评估工作。两次调查资料和分析结果的对比显示，2024年工程防护设施（如全室机械通风、局部通风设施等）升级改造后，4种职业健康风险评估方法对矽尘接触岗位职业健康风险等级的评估结果较2018年明显降低。地面造型、砂混炼、开箱落砂和清砂岗位的矽尘检测浓度较2018年均明显降低。而地坑造型岗位因未实施工程防护设施改造，其矽尘检测浓度无明显变化，但除综合指数法外，风险指数法、接触比值法和职业病危害作业分级法均显示2024年该岗位的风险等级比2018年低，其主要原因在于原辅物料（型砂）替换后游离二氧化硅含量降低，矽尘职业接触限值比值和游离二氧化硅含量在风险评估体系中的权重等级均相应地下降。矽尘的职业健康风险评估结果的动态变化，反映了企业职业病防护措施改进的有效性。

风险指数法的评估结果显示，未实施工程防护设施改造的地坑造型岗位的风险等级从2018年的中度危害降至2024年的无危害等级，下降2个等级。这主要与风险指数法在风险等级划分时所采用的关键因素和权重设置有关。风险指数法综合考虑了游离二氧化硅含量、暴露比值、工程防护、个体防护及接触情况等因素，且重点体现了矽尘的危害特性指标以及矽尘的暴露比值对职业健康风险的影响。在矽尘浓度和作业条件等级不变的情况下，其评估结果主要取决于健康效应等级（即游离二氧化硅含量）和矽尘接触限值，健康风险呈2的指数倍上升或下降[10]。地面造型、砂混炼、开箱落砂和清砂岗位的风险等级从2018年的高度危害降至2024年的轻度危害和无危害，下降2～3个等级，直观地反映了游离二氧化硅含量变化和工程防护设施改造所致风险等级变化的显著性，体现了两者在降低职业健康风险方面的有效性。

接触比值法的评估结果显示，地坑造型岗位的风险等级从2018年的高风险降至2024年的中等风险，下降1个等级。接触比值法虽未将游离二氧化硅含量直接进行赋值，但游离二氧化硅含量降低，矽尘职业接触限值则相应提高（限值数值变大）。在矽尘检测浓度不变的情况下，矽尘职业接触限值比值降低，间接影响了接触比值法的评估结果。地面造型、砂混炼、开箱落砂和清砂岗位的风险等级从极高风险或高风险降为高风险或中等风险，反映了防护措施改进后职业健康风险等级降低的变化情况。但当$0.5 < E/\mathrm{OEL} \leqslant 1$时，接触比值法的评估结果为高风险，评估结果偏严重，与刘晓晓等[11]、边洪英等[12]的结论一致。接触比值法中矽尘健康危害等级（HR = 5）赋值权重较大，且与综合指数法相比，由于未综合考虑工程防护、个体防护及接触时间等接触因素，导致在矽尘浓度较低时，其评估风

险等级偏高。

综合指数法的评估结果表明，地坑造型岗位的风险等级未发生变化。其游离二氧化硅含量的接触等级虽较2018年下降2级，且原有纳入的*E*/OEL和职业卫生管理制度2项接触因素的接触等级较2018年均下降1级，但因矽尘粒径大小、工程防护、个体防护、接触时间等接触因素的接触等级未发生变化，且矽尘健康危害等级（HR = 5）赋值权重较大，导致该岗位风险等级未出现明显变化。地面造型、砂混炼、开箱落砂和清砂岗位经职业病防护设施改造后，风险等级从2018年的高风险降到2024年的中等风险，下降1个等级。这表明综合指数法能够较准确地反映防护措施改进前后的风险变化，体现职业病防护措施改进的有效性。但由于该方法评估使用的因素较多，各因素之间相互影响，在一定程度上弱化了各单项因素的实际贡献和影响程度。该评估法存在灵敏度不足的问题，易导致评估结果趋于平均化[13]，难以捕捉关键因素的变化对风险等级的实际影响。

职业病危害作业分级法以游离二氧化硅含量和职业接触限值比值为主要评估依据。因此，原辅材料（型砂）的替换导致游离二氧化硅含量降低，使得地坑造型岗位的作业分级从2018年的Ⅰ级（行动水平作业）降到2024年的0级（相对无害作业）。地面造型、砂混炼、开箱落砂和清砂岗位在防护措施综合改进后，作业分级从Ⅳ级（高度危害作业）或Ⅲ级（中度危害作业）降为Ⅰ级（行动水平作业）或0级（相对无害作业），这一变化直观地反映出游离二氧化硅含量下降和工程防护设施改造在降低作业分级方面的显著成效，同时也表明该分级标准在矽尘职业健康风险的纵向对比评估中具有较高的适用性。

新颁布实施的GBZ/T 229.1—2025《职业病危害作业分级标准 第1部分：生产性粉尘》[5]新增了行动水平作业分级管理要求。当0.5 < *E*/OEL ≤ 1时，作业分级划分为Ⅰ级，即行动水平作业，其对应的管理要求：在目前的作业条件下，劳动者明确接触粉尘，企业应进行危害告知，密切关注工作场所粉尘浓度，加强作业场所日常监测、开展职业健康监护[5]。该等级与*E*/OEL ≤ 0.5的0级（相对无害作业）进行明确区分，有效解决了以往在*E*/OEL ≤ 1这个范围内风险划分不够精准的问题，避免了因风险等级划分过粗导致评估结果偏保守的情况，有助于企业更科学、合理地制定和实施职业病防治措施，采取差异化分级管控，避免管理措施“一刀切”。职业病危害作业分级标准受主观判断影响较小，具有评估结果可信度高、可操作性强、方法简单易行等优点，便于企业和监管机构在实际工作中的应用。但该分级标准未考虑工程防护、个体防护等相关因素，在评估维度上仍存在一定欠缺[14]。

综上可知，接触比值法在评估时存在风险“高估”情况，而风险指数法和职业病危害作业分级法体现了职业病防护措施综合改进的有效性，对防护措施改进前后矽尘职业健康风险的纵向评估具有较好的适用性。综合指数法因涵盖的影响因素较为全面，在无需进行两个时间点纵向对比评估的情况下可作为优先选用的方法。

本研究有以下不足之处：①尚未结合企业劳动者职业健康检查结果（如肺功能、胸片检查等指标）验证风险评估结果的预测效度。后续将对该企业矽尘接触情况进行持续跟踪与动态监测，全面收集企业职业健康监护资料，并基于这些数据开展岗位风险的动态监控工作。②本研究样本量少，Wilcoxon检验统计效能有限，结论的外推性存在局限性。今后可增加纳入企业数量，扩大目标岗位和研究对象范围，进一步深入开展矽尘职业健康动态风险评估研究。

作者声明 本文无实际或潜在的利益冲突

参考文献

[1] 蒲立力，高童宁，尹艳. 2024年上海市重点行业粉尘危害现状及职业健康风险评估[J]. 中国工业医学杂志，2025，38（5）：551-555.

[2] 吴培红，刘灿，高玥，等. 常用职业健康风险评估模型在体温计生产企业中的应用[J]. 职业卫生与应急救援，2023，41（6）：699-703.

[3] 秦汝男，刘保峰，李旭东，等. 不同风险评估法在化工企业苯系物健康风险评估中的应用及比较[J]. 工业卫生与职业病，2025，51（6）：547-550.

[4] 国家卫生与计划生育委员会. 工作场所化学有害因素职业健康风险评估技术导则：GBZ/T 298—2017[S]. 北京：人民卫生出版社，2017.

[5] 国家卫生健康委员会. 职业病危害作业分级标准 第1部分：生产性粉尘：GBZ/T 229.1—2025[S]. 北京：人民卫生出版社，2025.

[6] 国家卫生健康委员会. 工作场所有害因素职业接触限值 第1部分：化学有害因素：GBZ 2.1—2019[S]. 北京：人民卫生出版社，2019.

[7] 林嗣豪，王治明，唐文娟，等. 职业危害风险指数评估方法的初步研究[J]. 中华劳动卫生职业病杂志，2006，24（12）：769-771.

（下转第413页）

[2] 秦汝男，刘保峰，李旭东，等. 一起疑似急性磷化氢中毒事故调查[J]. 中国工业医学杂志，2024，37(5)：542-543.
[3] 中国预防医学科学院劳动卫生与职业病研究所. 职业性急性磷化氢中毒诊断标准及处理原则：GB 7797—1987[S]. 北京：中国标准出版社，1987.
[4] YAN H，CHEN H，LI Z，et al. Phosphine analysis in postmortem specimens following inhalation of phosphine：fatal aluminum phosphide poisoning in children[J]. J Anal Toxicol，2018，42(5)：330-336.
[5] 张美慧，王席娟，王艳，等. 大剂量细胞色素C在抢救儿童急性磷化氢中毒的临床作用[J]. 中国校医，2020，34(1)：9-12.
[6] 张佳丽，林佳曼，强火生，等. 磷化氢中毒症状、急救及毒理学研究进展[J]. 复旦学报(医学版)，2023，50(5)：771-779.
[7] BAGHAEI A，SOLGI R，JAFARI A，et al. Molecular and biochemical evidence on the protection of cardiomyocytes from phosphine-induced oxidative stress，mitochondrial dysfunction and apoptosis by acetyl-L-carnitine[J]. Environ Toxicol Pharmacol，2016，42：30-37.
[8] 罗谢添，李健，杨玉洁，等. 磷化氢中毒法医毒理学研究进展[J]. 现代预防医学，2018，45(18)：3293-3296.
[9] HASHEMI-DOMENEH B，ZAMANI N，HASSANIAN-MOGHADDAM H，et al. A review of aluminium phosphide poisoning and a flowchart to treat it[J]. Arh Hig Rada Toksikol，2016，67(3)：183-193.
[10] SCIUTO A M，WONG B J，MARTENS M E，et al. Phosphine toxicity：a story of disrupted mitochondrial metabolism[J]. Ann NY Acad Sci，2016，1374(1)：41-51.
[11] KALAWAT S，THAKUR V，THAKUR A，et al. Cardiovascular profile of aluminium phosphide poisoning and its clinical significance[J]. Int J Adv Med，2016，3：859-864.
[12] MEENA M C，MITTAL S，RANI Y. Fatal aluminium phosphide poisoning[J]. Interdiscip Toxicol，2015，8(2)：65-67.
[13] AKHTAR S，REHMAN A，BANO S，et al. Accidental phosphine gas poisoning with fatal myocardial dysfunction in two families[J]. J Coll Physicians Surg Pak，2015，25(5)：378-379.
[14] 梁悦，田松平，胡锋钱，等. 磷化氢急性中毒死亡3例[J]. 中国法医学杂志，2017，32(6)：664-665.
[15] LIANG Y，TONG F，HUANG F，et al. Pathological changes induced by phosphine poisoning：a study on 8 children[J]. Int J Legal Med，2020，134(1)：217-228.
[16] WILSON D F. Oxidative phosphorylation：regulation and role in cellular and tissue metabolism[J]. J Physiol，2017，595(23)：7023-7038.
[17] ERECINSKA M，CHERIAN S，SILVER I A. Energy metabolism in mammalian brain during development[J]. Prog Neurobiol，2004，73(6)：397-445.
[18] NIKNAHAD H，HEIDARI R，HASHEMI A，et al. Antidotal effect of dihydroxyacetone against phosphine poisoning in mice[J]. J Biochem Mol Toxicol，2021，35(11)：e22897.
[19] NADDAFI M，EGHBAL M A，GHAZI-KHANSARI M，et al. Study of the cardioprotective effects of crocin on human cardiac myocyte cells and reduction of oxidative stress produced by aluminum phosphide poisoning[J]. J Pharm Pharmacol，2021，73(11)：1539-1546.

收稿日期：2025-12-18

（上接第366页）

[8] 吴宾，汉锋，张思雨，等. 职业危害风险指数法在煤矿煤尘职业健康风险评估中的应用[J]. 中国工业医学杂志，2016，29(4)：311-312.
[9] 张美辨，唐仕川. 职业健康风险评估方法学实践应用[M]. 北京：人民军医出版社，2016：1-29.
[10] 王爱红，冷朋波，李晓海，等. 两种风险评估法在某黑色金属铸造企业职业健康风险评估中的应用[J]. 环境与职业医学，2017，34(10)：909-913.
[11] 刘晓晓，周颖，雷浩昊，等. 不同风险评估方法在某有色金属铸造企业职业健康风险评估中的应用[J]. 上海预防医学，2020，32(11)：895-900.
[12] 边洪英，康宁，董一文，等. 三种半定量风险评估方法在矽尘暴露岗位风险等级划分中的比较[J]. 中国工业医学杂志，2019，32(3)：167-171.
[13] 刘磊，李鹏飞. 职业健康风险评估方法联合应用研究进展[J]. 职业卫生与应急救援，2024，42(4)：551-556.
[14] 孙悦，江泽标，康向涛. 多种职业健康风险评估法在煤矿企业粉尘危害评估中的应用[J]. 煤矿安全，2020，51(6)：158-162.

收稿日期：2026-04-28