

DOI: 10.16369/j.oh.er.issn.1007-1326.2023.06.020

· 监管与实践 ·

职业卫生检测与评价数字化信息系统的开发与应用

Development and application of a digital information system for occupational health inspection and evaluation

陈会祥¹, 邢立伟¹, 李乾龙², 饶宝珍², 李敏嫣¹, 孙倩¹, 薄亚莉¹CHEN Huixiang¹, XING Liwei¹, LI Qianlong², RAO Baozhen², LI Minyan¹, SU Qian¹, BO Yali¹

1. 天津渤海化工集团有限责任公司劳动卫生研究所, 天津 300051; 2. 天津大沽化工股份有限公司, 天津 300452

摘要: 为了提高职业卫生检测与评价的规范性、准确性和高效性, 依据职业卫生检测与评价的标准规范, 设计开发了一套数字化的职业卫生检测与评价信息系统, 以建立标准化的现场调查、检测与评价信息系统框架。该系统采用 Access 2019 软件作为开发工具, 采用 Microsoft office 办公软件中的 Excel 2019 和 Word 2019 作为信息输出工具和载体, 实现了在检测方案生成、检测结果计算、检测报告生成以及数据录入、处理、输出等方面的全流程数字化和自动化, 输出的结果规范、准确, 提高了工作流程的规范性和统一性。

关键词: 职业卫生; 检测; 数字化; 信息系统; Access 2019; 系统开发

中图分类号: R132 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-1326(2023)06-0757-06

引用: 陈会祥, 邢立伟, 李乾龙, 等. 职业卫生检测与评价数字化信息系统的开发与应用[J]. 职业卫生与应急救援, 2023, 41(6): 757-761; 790.

当前, 以人工智能、大数据为代表的数字化信息技术已经产生新一轮的科技革命, 数字化转型是医疗卫生行业发展的必然趋势^[1-2]。数字化技术在职业卫生的应用前景也是一个很有意义的研究方向。职业卫生检测与评价是职业卫生工作中的核心部分, 涉及现场调查、检测方案、现场采样、结果计算、编制报告等众多环节和流程。由于环节多、流程冗长、现场变化大等原因, 职业卫生检测与评价工作质量难以保证。加之, 数据格式不统一、重复性录入等因素, 造成整个工作耗时耗力。国内目前关于职业卫生检测信息系统的研究主要集中在实验室以及检测报告出具等环节, 这部分内容相对容易标准化和信息化。但目前还未出现全流程的信息化系统, 尤其是现场调查、检测方案等前期的工作流程。为解决这一问题, 本研究尝试采用 Access 2019 软件作为数字化系统的开发工具, 设计开发一套数字化的职业卫生检测与评价信息系统^[3], 拟通过该系统的建立, 实现部分环节自动化, 以提高整块工作流程的工作效率及其规范性和结果的准确性。

1 材料与方法

1.1 架构设计

基金项目: 中央引导地方科技发展专项(19ZYPTYS00010)

作者简介: 陈会祥(1981—), 男, 大学本科, 副主任医师

数字化是指将信息、知识、文化和经济活动等领域的内容转化为数字形式, 并利用数字技术进行存储、处理、传输、分发和利用的过程^[4-5]。数字化技术可以将职业卫生标准、调查数据、检测结果等内容进行数字化存储和传输, 实现各个职业卫生数据的联通和交互, 减少重复性工作, 提高职业卫生工作的效率和质量。本研究主要从标准规范的数字化、现场调查的数字化、检测方案的数字化、检测结果的数字化等 4 个方面进行数字化系统的设计。本研究的核心思路就是把职业卫生检测与评价实际工作流程中的各种信息转换为数字, 将各种标准规范的规则和要求转换为程序, 从根本上解决重复性、易出错、低效率等问题, 由依靠“人工”转变为凭借“机器”来进行质控。本文研究的内容限定为针对职业卫生技术服务机构的专业技术人员开展职业病危害因素检测与评价而设计开发的信息系统。本文开发的系统是将信息化技术应用于职业卫生检测与评价工作的一次尝试性探索。本系统还开发了采样仪器和采样人员安排、建筑卫生学、个体防护用品、职业健康监护方案等多个模块, 考虑到论文的篇幅限制, 本文只介绍其中的主要功能模块。

1.1.1 标准规范的数字化

职业卫生检测与评价涉及的主要标准规范的

数据信息涵盖职业病危害因素名称、职业接触限值、检测或测量方法等。同一种职业病危害因素往往涉及多个标准规范。由于名称和格式不统一、文件存储格式多种多样,造成了信息查询耗时耗力并且容易出错。本研究将上述信息输入到数据库,以结构化的数字化格式存储。标准规范主要包括 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]、GBZ 2.2—2007《工作场所有害因素职业接触限值 第 2 部分:物理因素》^[7]、GBZ/T 189 工作场所物理因素测量系列标准^[8]。标准规范的数字化就是给每一种职业病危害因素都赋予唯一的 ID 和统一的名称、数据格式等,便于使用者利用编程语言进行快速的查询和数据处理,从而提高效率和数据的规范性。该模块的自动查询功能避免了专业技术人员的重复性操作,可实现准确快速的数据查询。

1.1.2 现场调查数字化

职业卫生现场调查包括车间、工种、岗位、作业场所、作业频次、作业时间、作业方式、原辅料、设备、职业病危害因素等信息,而这些信息之间是存在内在联系的。因此,采用关系型数据库非常适合职业卫生现场调查的数字化架构设计。现场调查的数字化主要包括两方面内容,第一,通过信息架构图可以看出,以“工作场所”为中心,将各种现场调查信息相互关联起来,从而确保现场调查信息的完整性,改变了之前各种信息孤立存在的现象。第二,对各种数据进行标准化和量化。比如对各种生产班制的名称、工作时间、班次信息等进行明确;对作业频次、每次作业时间、累计作业时间等进行规范性量化,作业时间统一以“分”为单位;原辅料、中间产物和副产物等涉及的信息较多,包括 CAS 号、化学成分、含量、使用量、储存方式、输送方式等信息,都进行统一的格式限定。现场调查模块的信息架构见图 1。

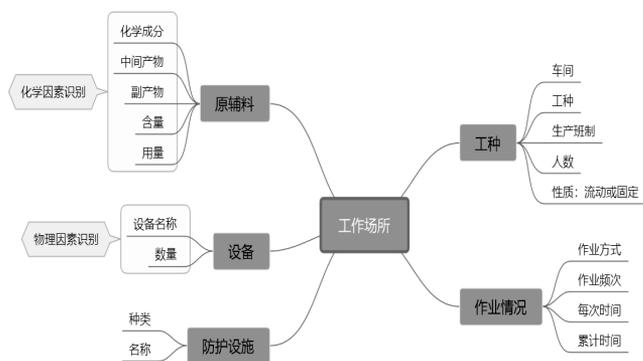


图 1 现场调查模块的信息架构

1.1.3 检测方案数字化

职业卫生检测方案包括职业病危害因素的识别、现场采样方案、采样人员分工、采样仪器和样品准备等方面。利用数字化系统可以实现上述过程的标准化和自动化,提高工作质量和效率。利用数据库软件的 SQL(structured query language)语言查询功能,可以对数据库中的《职业病危害因素分类目录》、GBZ 2.1—2019、GBZ 2.2—2007、GBZ/T 189 等进行快速自动检索,从而实现职业病危害因素是否需要检测的自动判定。本系统所谓的自动识别并非完全取代人工的自动识别,而是针对原辅料化学成分中的化学物质名称或者 CAS 号进行自动的检索和查询,一般情况下都需要识别的,并且已经列入相关标准规范的,系统将先行自动识别为危害因素。而对于某些因特殊工况条件不予识别的,系统设置了条件字段,需要人工标注。系统中的危害因素识别程序对不予识别的危害因素,会自动剔除。

按照 GBZ 159—2014《工作场所空气中有毒物质监测的采样规范》^[9]、GBZ/T 189 系列采样规范的要求,根据岗位性质(流动还是固定)、作业时间、作业频次等量化数据,设计一套数字化的量化采样方案生成系统,自动选择采样方式、计算样品数量、匹配采样仪器、流量、采样人员等信息。该模块的设计思路是将标准规范的要求、业务流程、评价经验等固定的规则设计为程序,让系统自动运行。比如采样点数、样品量、采样方式、采样仪器等信息的选择和设置,都是有规则的。由于前期对现场调查进行了数字化处理,系统调取现场调查数据后,可以根据已经设定的程序(规则)自动生成检测方案。例如,某一工种对某种化学因素的接触频次非常多或者暴露时间很长,对于这种情况系统会自动采用个体采样方式和短时间采样相结合。但如果接触频次很低,或者接触时间非常短暂,系统就会自动采用短时间定点采样方式。当然,系统还设置了强制采取个体采样的程序,可以通过该程序强制性实施个体采样方式。系统的另外一个功能在于,如果该工种现场调查的接触频次和时间发生了变化,点击“更新”即可自动完成上述流程。该模块的作用在于解决了每次制定检测方案都要重复性思考的问题。检测方案模块的信息架构见图 2。

1.1.4 检测结果数字化

该模块通过调取检测方案的数据可以自动生成便捷的数据录入界面,便于将样品的实验室分析结果快速录入。将标准规范的检测结果计算公式编写为程序,对检测结果进行自动计算。化学因素的

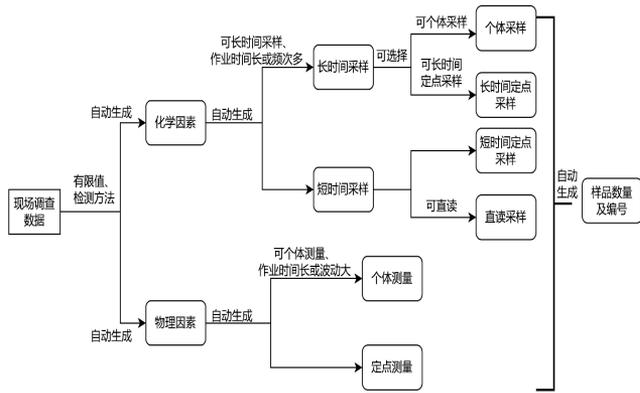


图2 检测方案模块的信息架构

计算包括时间加权平均浓度 (exposure concentration of time weighted average, C_{TWA})、短间接接触浓度 (exposure concentration of short term, C_{STE})等, 物理因素的计算包括等效声级、加权湿球黑球温度 (wet-bulb globe temperature index, WBGT)指数等。本系统的另一个重要功能是自动生成检测报告。将检测数据导出为 word 文档, 再使用 VBA 程序进行批处理, 自动生成标准格式的检测报告。该模块既可以确保检测数据的完整性, 又可以确保检测结果的准确性, 从而替代人工操作, 提高工作效率。检测结果模块的信息架构见图 3。

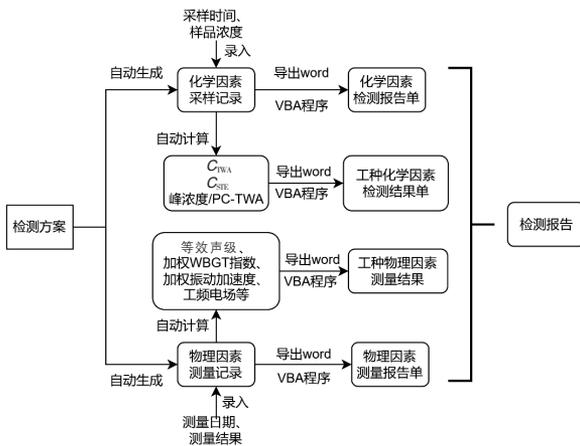


图3 检测结果模块的信息架构

1.2 开发工具

本研究采用 Access 2019 软件作为数字化系统的开发工具, 设计开发一套数字化的职业卫生检测与评价信息系统。Access 2019 是 Microsoft Office 套件中的一个应用程序, 主要用于关系数据库管理系统的开发。在数字化开发方面, Access 2019 具有以下优势: (1) 图形用户界面(GUI)友好、直观, 可以让开发人员快速创建表、查询、表单和报表等对象。(2) 提供了一系列数据处理功能, 例如数据校验、数据过滤、数据排序、数据汇总和数据计算等。(3) 提供了丰富的报表生成工具, 可以通过图表、图像、

表格、文本框等元素生成美观的报表。它还支持多种导出格式, 如 Word、PDF、Excel、HTML 等。开发本系统的编程语言采用 SQL 和 VBA。SQL 是一种用于管理关系型数据库的编程语言。它是访问和操作数据库的标准语言, 可以用于创建、修改和查询数据库中存储的数据。VBA 是一种强大的编程语言, 它可以用于创建自定义的功能和自动化过程, 它可以与 Microsoft Excel、Word、Access、PowerPoint 等 Office 应用程序无缝集成, 使用户能够通过编写代码来实现自动化操作。检测方案的报表采用 Excel2019 的数据透视表作为前端工具。检测报告的导出采用 Word 文档作为导出格式。

1.3 研究实例

本研究以某机械加工企业为研究实例。对该企业进行现场调查, 收集相关的数据资料。利用本数字化信息系统进行数据录入、分析、处理。现场调查的内容主要包括车间、工种、作业场所、作业频次、作业时间等信息。原辅料信息主要包括化学成分、含量、用量以及可能产生的副产物等信息。设备信息主要包括设备名称、设备数量等。采样记录信息包括采样时间、采样日期等。检测结果信息包括化学因素的样品浓度、物理因素测量结果等数据。

2 结果

2.1 系统导航界面

本系统主窗体为系统导航。主要包括现场调查、危害识别、检测方案、检测结果、个体防护、数据汇总等模块。点击相应的图标, 可以切换到不同的子窗体。本文将主要从现场调查、危害识别、检测方案、检测结果等模块进行研究结果的展示。见图 4。



图4 系统导航界面

2.2 现场调查模块

工作场所调查窗体主要包括车间、工种、工作场所等子窗体。该窗体不仅可以快速查询现场调查记录, 还可以十分便捷对记录进行增、删、改等操

作。例如,点击“A 车间”,就自动显示 A 车间的所有工种,点击“TCS 操作工”会自动显示该工种的所有工作场所。工种窗体中的岗位类别包括流动岗和固定岗,有多个工作场所的视为流动岗,1~2 个工作场所的视为固定岗。对工作场所的信息进行了量化处理。点位数量代表同类工作场所的点位数量,运行点位数量代表实际运行的工作场所数量,每人点位数量表示每人负责的工作场所数量。本系统还对作业频次、作业时间(min)均进行了量化处理。上述数据信息将用于检测方案生成的数据源。见图 5。

车间	工种	生产班制类型	岗位类别	每班人数
A 车间	TCS 操作工	两班 8h/班	流动岗	1
B 车间	TCS 模具打磨工	两班 8h/班	流动岗	1
C 车间	铝转子车床工	两班 8h/班	固定岗	1
C 车间	铝转子手动磨床工	两班 8h/班	固定岗	1

工作场所	点位数量	运行点位数量	每人点位数量	作业方式	作业频次	每次时间	累计时间
TCS 熔铝炉除渣工位	1	1	1	除渣	1	20	20
铝转子打磨工位	1	1	1	人工打磨	4	30	120
铸造机工位	1	1	1	设备操控	4	40	160
双转子焊接工位	1	1	1	取放工件	1	120	120

图 5 工作场所调查界面

原辅料调查窗体主要包括原辅料、使用原辅料的工作场所、原辅料的危害识别、次生物料的危害识别等子窗体。点击数据记录可自动显示对应的数据记录、数据之间关联并自动更新。系统还设有“原辅料-工作场所”子窗体,用于原辅料和工作场所的数据关联。例如,点击“铝锭”自动显示该原辅料的化学成分以及使用该原辅料的工作场所。双击“原辅料危害识别”,系统将会自动识别化学因素和检测化学因素。点击“铝焊丝”,通过工艺分析,铝焊丝在焊接过程产生了副产物“氧化铝”,我们称之为“次生化学成分”。将“氧化铝”人工输入次生化学物质字段,系统会在次生化学因素识别窗体进行危害识别。系统会自动将“氧化铝”先行识别为“氧化铝粉尘”和“氧化铝粉尘(总尘)”。而对于某些因特殊工况条件不予识别的,系统设置了条件字段,这个需要人工进行标注。系统自动更新后,会自动剔除这些危害因素。例如某刷漆工作场所,涂料中含有炭黑,由于是液体,不会产生炭黑粉尘,故不识别为炭黑粉尘。该模块有一个标注字段,标注为“不识别”,原因为“不逸散”。系统解决的是繁琐的重复性工作,而非特殊性工作。上述数据可以用于生成工种以及工作场所存在的化学因素的识别。原辅料调查界面见图 6。

设备调查窗体主要包括设备、使用设备的工作场所、设备的物理因素危害识别等子窗体。物理因素识别的程序设计思路和化学因素识别的设计思路类似。系统设有物理因素批量识别子窗体,例如,专业技术人员根据工程分析,全选或者多选设备

原辅料名称	形态	储存	类别	年用量	单位	说明	使用状态
铝锭	固体	散装	原料	100 t			
铝转子	固体	瓶装	中间产物	100 t			
铝渣	颗粒	桶装	副产物	0.5 t			
铝焊丝	固体	桶装	辅料	140 kg			
喷砂颗粒	颗粒	桶装	原料	2 t			
天然气	气体	管道	辅料	1 万 m ³			

原辅料名称	工作场所	工种	车间
铝焊丝	双转子焊接工位	TCS 操作工	A 车间

化学物质名称	最低含量	最高含量	化学因素	检测化学因素	CAS 号
铝	100.00%	100.00%			

次生化学成分 子窗体:

化学物质名称	化学因素	检测化学因素	CAS 号
氧化铝	氧化铝粉尘	氧化铝粉尘(总尘)	

图 6 原辅料调查界面

后,选择“噪声”,系统会将这些设备自动识别为“产生噪声”。但根据工艺条件某些不予识别的情况,系统设有标注字段,系统更新后会自动剔除这些先前识别的物理因素。工程分析过程主要还是专业技术人员的技术分析和评价经验,由于规则不统一,这一过程还不能实现完全的自动化。点击数据记录可自动显示对应的数据记录、数据之间关联并自动更新。系统还设有“设备-工作场所”子窗体,用于设备和工作场所的数据关联。例如,点击“二氧化碳保护焊机”自动显示该设备产生的物理因素以及使用该设备的工作场所。上述数据可以用于生成工种以及工作场所存在的物理因素的识别。

2.3 检测方案模块

根据现场调查数据,系统将自动生成采样点,以及采样点的职业病危害因素、接触时间、采样方式等。系统还将按照 GBZ 159、GBZ/T 189 采样规范的要求自动选择适合的采样策略,自动生成空气收集器、采样流量、样品数量及样品编号。在实际操作过程,依次双击下图中的控制按钮,将自动生成检测方案。当现场调查数据发生变化时,再次刷新上述流程,采样方案将自动进行调整和动态更新。将系统的采样方案数据源与 EXCEL 软件进行连接,利用 EXCEL 数据透视表的功能进行报表输出。数据透视表具有自动合并单元格、自动调整格式、自动更新数据等功能,大幅度提高了生成检测方案的工作效率。见图 7。

2.4 检测结果模块

在完成现场采样以及实验室样品分析之后,需要将采样时间、样品浓度或物理因素强度录入系统。本系统设置了便捷的数据录入界面,可以进行数据筛选、排序等。

在完成样品检测结果录入之后,将计算各种检

测结果。系统设置了相应的计算程序,点击相应的按钮即可完成自动计算。当数据发生变化时,可以点击按钮再次计算进行更新。见图8。

采样点化学因素 → 岗位化学因素采样点数 → 个体采样方案 → 长时间定点采样方案 → 短时间定点采样方案 → 样品编号

车间	岗位/工种	采样对象	检测/测量项目	接触时间/工作周期	采样/测量方式	采样/测量时机	空气收集器	采样流量 (L/min)	样品数量/测量次数	样品编号	
A车间	TCS操作工	TCS熔炉除渣工位	噪声	8h/5天/周	个体测量	正常生产	—	—	—	1×1	—
			氮氧化物	20min/次,累计20min	短时间定点	除渣	多孔玻板吸收管	0.5	1×1	202	—
			一氧化碳	20min/次,累计20min	短时间定点	除渣	红外线分析仪	—	1×1	—	—
			氧化铅粉尘(总尘)	20min/次,累计20min	短时间定点	除渣	测尘滤膜	20.0	1×1	201	—
			噪声(测速)	20min/5天/周	定点测量	除渣	—	—	—	3×1	—
			噪声(测声)	20min/5天/周	定点测量	除渣	—	—	—	3×1	—
	双转子碾磨工位	氮氧化物	120min/次,累计120min	短时间定点	除渣工件	多孔玻板吸收管	0.5	2×1	208、209	—	
			120min/次,累计120min	短时间定点	除渣工件	重载大型电焊机	—	—	—	—	
			120min/次,累计120min	短时间定点	除渣工件	收音	2.0	2×1	210、211	—	
			120min/次,累计120min	短时间定点	除渣工件	红外线分析仪	—	—	2×1	—	
			120min/次,累计120min	短时间定点	除渣工件	测尘滤膜	20.0	2×1	206、207	—	
			120min/5天/周	定点测量	除渣工件	—	—	—	3×1	—	
—	紫外辐射(电焊弧光)	120min	定点测量	除渣工件	—	—	—	—			

图7 检测方案生成界面

工种化学因素检测结果		检测结果报表				
工种	检测化学因素	C-TWA	C-STEL	C-PE/PC-TWA	C-ME	结果判定
TCS操作工	氮氧化物	0.04	0.2	—	—	符合
TCS操作工	臭氧	—	—	—	0.08	符合
TCS操作工	一氧化碳	0.4	1.5	—	—	符合
TCS操作工	铝金属粉尘(总尘)	0.2	—	0.3	—	符合
TCS操作工	氧化铅粉尘(总尘)	0.2	—	0.2	—	符合

工种噪声结果		岗位	Lex8h声级	噪声作业判	结果判定
TCS操作工	87.6	噪声作业	不符合	不符合	
TCS模具打磨工	88.5	噪声作业	不符合	不符合	

工种	体力劳动强度	物理因素	加权WBGT指数	高温作业判定	高温检测结果判定
TCS操作工	II	高温	25.7	非高温作业	符合

图8 职业病危害因素检测结果计算界面

2.5 检测报告模块

本系统将检测结果数据导出为 word 文档。根据检测报告的模版,采用 VBA 语言程序对导出的 Word 文档进行批处理操作,自动生成模版格式的各种报表。最后,将各个部分组合为检测报告。见图9。

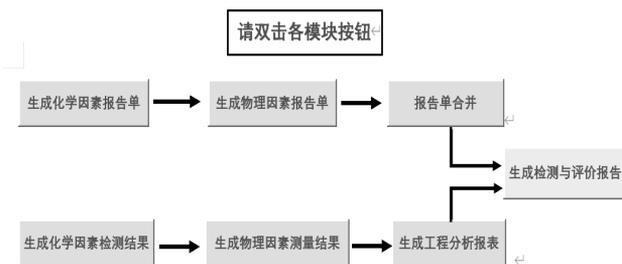


图9 检测报告生成控制面板截图

3 讨论

结合职业卫生检测与评价信息系统的开发过程和实例应用效果的展示,可知该系统本质上是对工作流程的数字化改造,建立了一套数据规范和数据流,使得不同模块之间的数据可以互联互通,有助于快速进行数据查询和分析,解决了工作中各环节之间的脱节问题和不一致的问题。凭借信息系统

强大而且高效的数据处理能力,该系统既提高了工作效率,又提高了结果的准确性,在职业卫生检测与评价行业具有较好的应用前景。目前这一系统初步完成开发,已经应用于近 20 多家企业、十多个项目的职业卫生检测与评价工作,后期将进一步推广应用。

本文研究开发的职业卫生检测与评价数字化信息系统还存在一些不足。系统的稳定性和可扩展性不强,受限于 Access 软件功能的局限,仅支持个人和小团队使用,暂时不支持大规模部署。对行业的适用性和通用性不高,系统的基础数据库和架构还有很大的提升空间。今后,将持续改进和完善系统的功能和架构,使其更具适用性。如果推广应用的效果良好,可以考虑升级为网络云平台数据库,进一步提高系统的性能。

当前,世界正处在数字化的浪潮之中,人工智能、大数据等信息技术正在飞速发展。信息技术最重要的就是数据,数据是开展人工智能和大数据技术的最核心资源^[10]。例如,人工智能可以被用来预测职业病的发生。通过收集大量的医学数据和职业健康数据,利用机器学习算法和统计学方法,可以建立预测模型,识别出不同职业中常见的职业病和疾病风险因素^[11]。然而,我国目前的职业卫生行业尚未形成标准化的数字化和信息化系统,数据孤岛、数据不规范的问题普遍存在,大量的职业卫生数据无法被有效开发和利用。本系统的另外一个价值在于大规模使用可以积累的大量高质量职业卫生数据,为开展职业卫生大数据和人工智能研究提供高质量的数据资源。因此,加强本系统的推广应用以提高职业卫生的数字化和信息化的程度,如何进一步提高行业数据的价值是需要深入研究的方向。

作者声明 本文无实际或潜在的利益冲突

参考文献

[1] 王桂雁, 贺松. 数字化转型下的区域医疗健康信息平台技术架构研究[J]. 中国数字医学, 2021, 16(5): 6.

[2] KLUGE H H P, AZZOPARDI-MUSCAT N, NOVILLO-ORTIZ D. Leveraging digital transformation for better health in Europe[J]. Bull World Health Organ, 2022, 100(12): 751.

[3] Microsoft Official Website. Access help & learning [EB/OL]. [2023-05-11]. <https://support.microsoft.com/en-us/access>.

[4] THENG Y L, FOO S, LIM E T. Digital transformation: What is it? And what does it mean for libraries? [J]. J Librariansh Inf Sci, 2019, 51(4): 990-1002.

(下转第 790 页)

- and delivery[J]. *Heart*, 2015, 101(18):1491-1498.
- [15] GENTILE F R, PRIMI R, BALDI E, et al. Out-of-hospital cardiac arrest and ambient air pollution: a dose-effect relationship and an association with OHCA incidence [J]. *PLoS One*, 2021, 16(8): e0256526.
- [16] RAZA A, DAHLQUIST M, JONSSON M, et al. Ozone and cardiac arrest: the role of previous hospitalizations [J]. *Environ Pollut*, 2019, 245: 1-8.
- [17] CHENG F J, WU K H, HUNG S C, et al. Association between ambient air pollution and out-of-hospital cardiac arrest: are there potentially susceptible groups? [J]. *J Expo Sci Environ Epidemiol*, 2020, 30(4): 641-649.
- [18] ZOSKY G R, IOSIFIDIS T, PERKS K, et al. The concentration of iron in real-world geogenic PM10 is associated with increased inflammation and deficits in lung function in mice [J]. *PLoS One*, 2014, 9(2): e90609.
- [19] PARK H, LIM S, LEE S, et al. High level of real urban air pollution promotes cardiac arrhythmia in healthy mice [J]. *Korean Circ J*, 2021, 51(2): 157.
- [20] HAHAD O, LELIEVELD J, BIRKLEIN F, et al. Ambient air pollution increases the risk of cerebrovascular and neuropsychiatric disorders through induction of inflammation and oxidative stress [J]. *Int J Mol Sci*, 2020, 21(12): 4306.
- [21] WIEGMAN C H, LI F, RYFFEL B, et al. Oxidative stress in ozone-induced chronic lung inflammation and emphysema: a facet of chronic obstructive pulmonary disease [J]. *Front Immunol*, 2020, 11: 1957.
- [22] FRANCHINI M, MANNUCCI P M. Thrombogenicity and cardiovascular effects of ambient air pollution [J]. *Blood*, 2011, 118(9): 2405-2412.
- [23] AN Z, JIN Y, LI J, et al. Impact of particulate air pollution on cardiovascular health [J]. *Curr Allergy Asthma Rep*, 2018, 18(3): 15.
- [24] XU H, WANG T, LIU S, et al. Extreme levels of air pollution associated with changes in biomarkers of atherosclerotic plaque vulnerability and thrombogenicity in healthy adults [J]. *Circ Res*, 2019, 124(5): e30-e43.
- [25] PEREZ C M, HAZARI M S, ARRAJ A K. Role of autonomic reflex arcs in cardiovascular responses to air pollution exposure [J]. *Cardiovasc Toxicol*, 2015, 15(1): 69-78.
- [26] BREITNER S, PETERS A, ZAREBA W, et al. Ambient and controlled exposures to particulate air pollution and acute changes in heart rate variability and repolarization [J]. *Sci Rep*, 2019, 9(1): 1946.
- [27] JIA X, YANG X, HU D, et al. Short-term effects of particulate matter in metro cabin on heart rate variability in young healthy adults: impacts of particle size and source [J]. *Environ Res*, 2018, 167: 292-298.
- [28] HUANG C, TANG M, LI H, et al. Particulate matter air pollution and reduced heart rate variability: how the associations vary by particle size in Shanghai, China [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2021, 208: 111726.

收稿日期: 2023-04-12

(上接第 761 页)

- [5] 黄如意, 井淇. 数字化时代的数字健康: 内涵, 特征, 挑战与治理路径 [J]. *卫生经济研究*, 2022(6): 39.
- [6] 中华人民共和国卫生部. 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: 中国标准出版社, 2019.
- [7] 中华人民共和国卫生部. 工作场所有害因素职业接触限值 第 2 部分: 物理因素: GBZ 2.2-2007 [S]. 北京: 人民卫生出版社, 2007.
- [8] 中华人民共和国卫生部. 工作场所物理因素测量: GBZ/T 189 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [9] 中华人民共和国卫生部. 工作场所空气中有害物质监测的采样规范: GBZ 159-2004 [S]. 北京: 人民卫生出版社, 2004.
- [10] 顾彦. 人工智能赋能医疗数据是核心角色 [J]. *中国战略新兴产业*, 2018, 137(5): 43-45.
- [11] DI NOIA A, MARTINO A, MONTANARI P, et al. Supervised machine learning techniques and genetic optimization for occupational diseases risk prediction [J]. *Soft Computing*, 2020, 24(6): 4393-4406.

收稿日期: 2023-06-13