

DOI: 10.16369/j.ohcr.issn.1007-1326.2025.240458

· 综述 ·

# 海上风电行业的职业危害

Occupational hazards in the offshore wind power industry

刘超<sup>1</sup>, 许乐谊<sup>2,3</sup>, 刘羽中<sup>1</sup>, 陈娃宜<sup>2,4</sup>, 王亚楠<sup>2,5</sup>, 黄瑞妍<sup>2</sup>, 王恰<sup>2</sup>, 严茂胜<sup>2</sup>, 温翠菊<sup>2</sup>, 陈嘉斌<sup>2</sup>

LIU Chao<sup>1</sup>, XU Leyi<sup>2,3</sup>, LIU Yuzhong<sup>1</sup>, CHEN Wayi<sup>2,4</sup>, WANG Yanan<sup>2,5</sup>, HUANG Ruiyan<sup>2</sup>,

WANG Qia<sup>2</sup>, YAN Maosheng<sup>2</sup>, WEN Cuiju<sup>2</sup>, CHEN Jiabin<sup>2</sup>

1. 中国南方电网有限责任公司共享运营公司, 广东 广州 510530; 2. 广东省职业病防治院, 广东 广州 510300;

3. 广州医科大学公共卫生学院, 广东 广州 511436; 4. 中山大学公共卫生学院, 广东 广州 510080; 5. 广东医科大学  
公共卫生学院, 广东 东莞 523808

**摘要:**海上风电作为一种新型、可再生的清洁能源, 在风电产业发展中具有广阔前景。随着海上风电生产和使用规模的扩大, 海上风电工面临复杂多样的职业危害。通过回顾海上风电相关报道, 对其在生产工艺过程、劳动过程和生产环境中存在的职业性有害因素及其可能导致的危害和安全问题进行综述, 分析海上风电制造、运输、安装、操作、维护、回收等全生命周期中工人可能面临的职业危害, 为管理和保护海上风电工人的职业健康提供依据。

**关键词:**海上风电; 职业性有害因素; 清洁能源; 职业危害

**中图分类号:** R134; R135      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1007-1326(2025)02-0274-05

**引用:** 刘超, 许乐谊, 刘羽中, 等. 海上风电行业的职业危害[J]. 职业卫生与应急救援, 2025, 43(2): 274-278.

风力发电主要分为陆上风电和海上风电, 两者均能将风能转换为机械能, 再由机械能转换为电能进行储存, 以供给用户使用<sup>[1]</sup>。近年来, 海上风电作为新型清洁能源正蓬勃发展, 其生产和使用的规模不断扩大。除具有可再生、无污染等优点外, 与陆上风电相比, 海上风电风速更大且更稳定, 使用区域气候稳定、不占用耕地、无明显视觉冲击, 是全球范围内风电产业发展的新趋势<sup>[2]</sup>。据中国风能协会估计, 2024 年中国新增风电装机容量至少达到 75 GW, 2030 年将达到 150 GW 以上, 其中海上风电新增装机容量可能超过 10 GW<sup>[3]</sup>。

Wandzich 等<sup>[4]</sup>研究显示, 在所有以环境可持续发展为目标的新技术中, 海上和陆上风电技术可能成为第二大影响职业健康的因素, 仅次于纳米材料和纳米技术带来的职业健康危害风险。目前尚无海上风电全生命周期(主要包括制造、运输、安装、操作、维护、回收等阶段)的职业危害报告<sup>[5]</sup>。海上风电工普遍年轻, 海上作业经验不足<sup>[6]</sup>, 可能接触各种职业性有害因素, 如噪声、振动、高温、低

温、有毒有害化学物质, 以及从事搬运重物、受限空间作业、攀爬等职业安全风险较高的工作<sup>[7]</sup>, 且风力涡轮机的物理尺寸较大、内部机械结构十分复杂, 对运检工人的要求较高<sup>[8]</sup>。因此, 海上风电工面临的职业危害不容小觑。本研究拟对海上风电工人在生产工艺过程中、劳动过程中和生产环境中接触的职业性有害因素及其可能导致的危害和安全问题进行综述, 旨在为保护海上风电工人的职业健康, 完善职业健康管理相关制度和标准提供科学依据。

## 1 海上风电工作业特点

海上风电工需要每天往返陆地与海上风力发电机组, 单程约 60~90 min, 运维时间约 90~120 min, 每班综合转运时间为 2~4 h<sup>[6]</sup>。工作时, 工人须穿戴重约 10 kg 的个人防护设备, 搬运重约 20 kg 的工具, 并通过攀爬几十米梯子的方式进入风力发电机组内部, 其工作内容主要为检查塔楼的外观和完整性、测试电气元件和系统、爬塔修理涡轮机设备、收集涡轮机数据用于测试分析、对风力发电机组进行日常维护、排除电气故障等<sup>[9]</sup>。海洋条件的不断变化可能导致海上风电工往返风力发电机

**基金项目:** 中国南方电网有限责任公司管理创新项目(ZBKJXM20232091)

**作者简介:** 刘超(1970—), 男, 硕士, 高级政工师

**通信作者:** 温翠菊, E-mail: 2591628@qq.com

组的时间增长,难度增加<sup>[10]</sup>。有研究<sup>[6]</sup>发现,工作地点和环境的变化使得海上风电工人的体力要求明显高于陆上风电工人。因此,关注海上风电工人的职业健康与安全十分必要。

## 2 海上风电生产工艺过程中的有害因素及其危害

### 2.1 物理因素

#### 2.1.1 工频电磁场

工频电磁场 (power frequency electromagnetic field, PFEMF) 是海上风电工人最常接触的职业性有害因素。风力发电机组内部 110 kV 主变室、35 kV 配电装置室、接地变压器室、站用电源室、110 kV 型气体绝缘金属封闭开关设备室、中控室、继保室、风机塔筒底等处的电气设备均可产生工频电磁场,工人在海上升压站内也能接触到工频电磁场<sup>[11-12]</sup>。2002 年国际癌症研究机构 (International Agency for Research on Cancer, IARC) 将工频电磁场归类为可能的致癌物 (IARC 2B 级)<sup>[13]</sup>。工频电磁场对职业人群的影响主要集中在免疫和神经系统上,也可能损伤职业人群短时记忆力<sup>[14]</sup>。海上风力发电机组中所有带电的电线或设备都会产生极低频电磁场 (extremely low frequency electromagnetic fields, ELF-EMFs)<sup>[15]</sup>。极低频电磁场的危害主要集中在强电流引发人体神经肌肉异常兴奋、未绝经人群乳腺癌及儿童白血病上,高暴露的职业人群患心电图异常的风险也比普通人群高<sup>[16]</sup>。因此,海上风电工人应减少工频电磁场的接触时间,做好个体防护,并定期进行职业健康检查。

#### 2.1.2 噪声

海上风电行业噪声的主要来源为风力发电机组叶片齿轮系统发出的机械噪声、叶片转动产生的空气动力学噪声、风力发电机组和升压站内部各电气设备发出的电磁性噪声以及其他机械噪声等<sup>[12, 17]</sup>。此外,海上风电工人在转运船舱、乘坐直升机或建设期水下打桩等活动时,还可能接触到额外的噪声<sup>[18]</sup>。目前,海上风电噪声检测报告较少,辽宁、天津等地陆上风电企业存在多个噪声岗位声级超过 85 dB(A) 的情况<sup>[17, 19]</sup>。噪声对工人最直接的危害是听力损伤,工人长期暴露于高强度的噪声会对其神经、心血管系统产生不同程度的影响<sup>[20]</sup>。不断提升海上风电水下打桩噪声的控制技术水平,是目前保护职业人群健康和海洋环境的重要举措。海上风电工程建设期间,应优先选择低噪声设备,通过减小桩管直径、外加驱赶器驱赶等方式降低海上风电打桩噪声<sup>[21-22]</sup>。

### 2.1.3 振动

海上风电工人需要经常乘坐船舶或直升机抵达风机,在陆地和海上风力发电机组间往返。颠簸会使工人处于全身振动 (whole-body vibration, WBV) 的状态中,随着全身振动暴露的持续时间和强度的增加,工人罹患脊柱肌肉骨骼疾患的风险将会增加<sup>[23-24]</sup>,还可能造成认知功能下降、精神疲劳、注意力不集中和嗜睡等<sup>[25]</sup>。除此之外,风力发电机组的内部电气设备在运行期间也会产生振动<sup>[26]</sup>;工人若使用振动工具,还可能产生手臂振动 (hand-arm vibration, HAV),长期暴露于手臂振动可能导致以末梢循环障碍和神经损伤为主的职业性手臂振动病 (occupational hand-arm vibration disease, OHAVD)。目前自动化监控系统在电网行业不断普及<sup>[27]</sup>,这能减少海上风电工人到现场进行巡检的次数,有效降低其职业健康危害的风险。

### 2.2 化学因素

海上风电工人在安装、维护风机叶片等过程中可接触到环氧树脂、苯乙烯等有毒有害化学原料。苯乙烯是一种具有致敏性和致癌性的毒物,可导致海上风电工人出现皮肤疾病、呼吸系统疾病和眼部不适<sup>[18]</sup>。六氟化硫 (sulfur hexafluoride, SF<sub>6</sub>) 是一种常温常压下无色、无味、无毒、无腐蚀性的惰性气体,被广泛应用于海上风电乃至整个电网行业的气体绝缘开关设备、断路器、变压器等电气设备中,起到电气绝缘、灭弧、散热冷却等作用<sup>[28]</sup>。正常情况下,六氟化硫储存在密闭的容器中,工人不会接触到,但若泄漏,工人吸入高浓度六氟化硫会出现呼吸困难、发绀、全身痉挛等窒息症状<sup>[29]</sup>。在电弧作用下,六氟化硫可分解为毒性更强的氟化亚硫酰、氟化硫酰、四氟化硫等有害气体<sup>[21]</sup>,引发工人出现眼睛、鼻、喉红肿热痛等炎症反应,高浓度吸入这些有害气体时可引发呼吸道出血、肺水肿、胸腔积液等症<sup>[30]</sup>。在可能泄漏六氟化硫气体的作业场所内设置报警装置、建立六氟化硫应急回收装置、设置通风设施是目前最普遍的防护措施。

此外,风力发电机组中的铅酸蓄电池如果破损,海上风电工人也可能接触到硫酸、三氧化硫、铅及其化合物,目前作业场所一般采用免维护蓄电池,接触到硫酸和铅的可能性较小<sup>[21]</sup>。在运行检修期间,海上风电工人进行打磨、焊接、涂漆、叶片修复等过程中还可能接触到金属烟、锰及其化合物、氨、臭氧、丙酮、苯、甲苯、二甲苯、乙苯、乙酸乙酯、异丙醇、正己烷、乙酸丁酯、生产性粉尘等化学危害<sup>[19, 21]</sup>。海上风电及升压站内的柴油发电机在运行过程中,

可能会产生一氧化碳、一氧化氮、二氧化氮、二氧化硫、非甲烷总烃等有害物质<sup>[12]</sup>,工人吸入柴油不完全燃烧产生的废气和柴油雾滴,可引起呛咳、胸闷、恶心呕吐等症状,严重者可增加其毛细血管通透性,引起肺组织损伤,导致吸入性肺炎<sup>[31-32]</sup>。目前柴油发电机组只有在应急状态下才启动,但其对海上风电工人的危害不能忽视,海上风电工人在柴油发电机运行阶段须佩戴好防护口罩、眼镜、手套及耳塞,并缩短在柴油机房停留时间。

### 2.3 生物因素

海上风电工人常暴露在高温、高湿等不良小气候中,而高温、高湿环境容易产生真菌等微生物,可引起过敏和真菌病,影响工人皮肤、呼吸系统、免疫系统及神经系统健康<sup>[33]</sup>。此外,海上风电工人还可能通过潜水完成海底作业,这使其存在被海洋动物(如水母和海蛇等)咬伤的风险<sup>[18]</sup>。

## 3 海上风电劳动过程中的有害因素及其危害

### 3.1 劳动作息制度及轮班作业

特殊的劳动作息制度和轮班作业会影响海上风电工人的睡眠质量、身体和心理健康,对其健康造成损害。海上风电工人的劳动作息制度与普通工人有所不同,多数海上风电作业采用 12 h 轮班<sup>[34]</sup>,德国某海上风电的工人采取上 14 d 休 14 d 的工作制度(即 14/14 工作制,每天工作 12 h)<sup>[35]</sup>。国内外海上风电工人均无需长时间驻扎在海上风力发电机组,每天陆地、平台间往返的特殊工作方式、劳动作息制度以及轮班制度对海上风电工人身体、心理会产生一定的影响。德国的一项横断面研究<sup>[36]</sup>表明,海上风电工人在海上作业期间的睡眠质量比在陆地休息时差,轮班作业是其中突出的危险因素。长时间的轮班和加班( $\geq 12$  h)对工人的睡眠质量产生了负面影响<sup>[37]</sup>。Waage 等<sup>[38]</sup>对北海某石油钻井平台 103 名轮班工人(工作 2 周,12 h 轮班,休息 4 周)的调查发现,工人轮班工作障碍(shift work disorder, SWD)检出率为 23.3%,SWD 工人肌肉骨骼疼痛(90.9%)、假性神经系统不适(87%)和胃肠道不适(87%)的发生率均高于非 SWD 工人(均  $P < 0.05$ )。此外,运检工人常常在海上平台连续工作 1~2 周才能回家休息,长时间远离家人和朋友容易造成人际交往受限,对其心理健康造成不良影响。

### 3.2 职业紧张

职业紧张、压力等心理问题是当前职业卫生研究的热点之一。职业压力可能导致工人旷工,影响企业的生产力。海上风电工人经常在风力发电机组

和陆地间往返,不稳定的天气条件会增加事故风险,导致其产生精神压力和紧张。Mette 等<sup>[34]</sup>对德国海上风电行业工人开展的定性访谈结果显示,天气突然变化或紧急情况出现可能导致工作中断以及船员转移延迟,时间压力会使工人们产生负面情绪。海上风电工人需要长期处于“人-船-平台-陆地”环境中,且工作受气候影响较大,需要经受各种恶劣天气的影响,职业心理会有其不同的特点,需要进一步地探索。

### 3.3 不良作业姿势

海上风电工人由于工作环境的特殊性,常进行攀登风机塔等攀爬和高处作业<sup>[17]</sup>。由于空间限制,工人常以各种不良姿势作业,这些均会提升工作相关肌肉骨骼疾患(work-related musculoskeletal disorders, WMSDs)的发生率,导致骨关节和肌肉疼痛<sup>[9]</sup>。膝关节、颈部、下背部和肩部是海上风电工人 WMSDs 常见的发生部位<sup>[39-40]</sup>。Velasco 等<sup>[7]</sup>对德国某海上风电工人进行半结构式访谈发现,海上风电工人主要在密闭的风机内以及高处或平台的甲板上作业,有 63.8% 的受访者表示在风机工作时,经常需要爬楼梯,因而增加了意外或受伤的风险。一项横断面研究<sup>[40]</sup>发现,某海上风电企业的工人背部、颈部、下背部 WMSDs 的发生率分别为 54.0%、50.4%、40.3%。下背部 WMSDs 高检出率是海上风电工人的突出表现,这与海上风电工人负重作业、不良姿势作业有着密切的关系<sup>[41]</sup>。研究<sup>[42]</sup>表明,穿戴式外骨骼可以降低作业工人上肢肌肉、肩部等负荷,减少其体力消耗,且不会增加腰背负荷,也不会影响作业工人平衡,在海上风电乃至整个电网行业具有较好的应用前景。因此,用人单位应优化组织与管理,增加人文关怀、定期开展健康教育,合理调整工作制度,以降低工人 WMSDs 的发生率。

### 3.4 其他

海上风电工人在作业过程中还涉及多种特殊作业。(1)工人从事电工作业<sup>[21]</sup>时存在触电风险。(2)工人巡检结束后须进行长时间的监盘,长期视屏作业(video display terminal, VDT)会导致眼部不适<sup>[43]</sup>。有研究<sup>[44]</sup>表明,VDT 会降低眨眼率,导致泪膜不稳定和眼部炎症,促进了干眼症的发生。日本一项研究<sup>[45]</sup>表明,VDT 时间会影响颞下颌关节紊乱的发展及颞下颌关节疾病相关症状的患病率。(3)海上风电工人常常需要乘坐船舶前往风力发电机组进行巡检,船舶受海浪影响导致工人出现的头晕、恶心呕吐等晕动症表现,工人可以通过习服缓解晕动症的不适<sup>[46]</sup>。(4)光影闪烁是一种风力涡轮机转动的

叶片在相邻区域投射阴影的现象<sup>[47]</sup>。英国学者 Hardling 等<sup>[48]</sup>研究发现,以>3 Hz 的频率中断或反射太阳光的涡轮机发出的闪烁会诱发光敏性癫痫发作的风险。虽然目前大型风力涡轮机叶片转速设计远低于该数据,但这也是一种潜在的职业健康危害。

#### 4 海上风电生产环境中高温和低温导致的危害

海上风电工人夏季巡检常接触高温,冬季巡检常接触低温<sup>[17]</sup>。为了避免海水和潮湿气体对内部机器的腐蚀,海上风力发电机组与外界的通风有限,风力发电机组内部炎热的环境会使工人精神疲劳,工作能力下降<sup>[18]</sup>。巡检时,工人暴露在热环境中,不良小气候(高湿度、太阳辐射、空气温度和空气流动)严重影响作业工人的工作效率和身体健康<sup>[33]</sup>。在夏季,风机内部温度、湿度升高,环境温度过高导致机体体温快速升高,当身体的体温调节中枢受损时可能发生热衰竭,严重者可危及生命;在冬季低温条件下,机体热量快速散失,增加了工人对疾病的易感性,给循环系统带来压力。

#### 5 海上风电作业中的职业安全问题

海上风电行业不断发展,除了上述常见的职业健康危害外,还存在许多影响工人职业安全的隐患。研究<sup>[49]</sup>指出海上风电行业中可能发生的意外事故场景,包括风机结构故障、极端天气、船舶在海上行驶时发生碰撞侧翻、人员落水、锚固失效、(动态)定位失效、触电、高处坠落、挤压或者切割、潜水事故、火灾、直升机坠毁等。近年来,此类意外事故仍时有发生,如,2008年台中港岸边的2号风力发电机受台风影响倒塌<sup>[50]</sup>;2013年台风“天兔”导致红海湾风电场8台风力涡轮机倒塌,9台叶片断裂;2014年7月,最强台风“威尔梅森”导致湛江徐闻勇士风电场13台风力涡轮机倒塌,5个叶片断裂,发电机坠落<sup>[51]</sup>。因此,工人在风电场巡检时,存在被倒塌的风机砸伤的风险。此外,雷雨天气时,海上风力发电机组、海上升压站平台、运输过程中的船舶等都存在被雷击的风险<sup>[33]</sup>,提高防雷系统和接地系统的保障水平也十分必要。

#### 6 小结与展望

海上风电行业属于新兴行业,除了传统的职业性有害因素外,不合理的劳动作息制度及轮班作业、职业紧张、不良姿势作业、各种职业安全隐患以及“人-船-平台-陆地”新工作模式等都可能对工人的身心健康造成影响,均需引起电网企业管理人员

的重视。目前,智能监控系统的普及对于降低海上风电工人接触传统的职业危害、减少出海巡检可能发生的各种隐患、降低 WMSDs 发生率等问题发挥了关键作用。但是,随着智能监控的普及,高度职业紧张、久坐监盘以及视屏作业的时间增长等问题也日益凸显。此外,海上风力发电机组全生命周期的后期阶段(退役、回收和废物管理)暂无相关研究,这可能与海上风电是一个相对年轻的行业有关<sup>[5]</sup>,这部分可能产生的危害需要持续关注。

**作者声明** 本文无实际或潜在的利益冲突

#### 参考文献

- [1] 毕志远,薛洋,胡金菊,等.新形势下我国海上风电产业发展趋势[J].中国港口,2022,(11):6-8.
- [2] KOU L, LI Y, ZHANG F, et al. Review on monitoring, operation and maintenance of smart offshore wind farms [J]. Sensors (Basel), 2022, 22(8):2822.
- [3] GWEC. Global Wind Report 2024.[EB/OL]. 2024. <https://gwec.net/global-wind-report-2024/>.
- [4] WANDZICH D E, PŁAZA G A. New and emerging risks associated with “green” workplaces [J]. Workplace Health Saf, 2017, 65 (10):493-500.
- [5] FREIBERG A, SCHEFTER C, GIRBIG M, et al. Health effects of wind turbines in working environments—a scoping review [J]. Scand J Work Environ Health, 2018, 44(4):351-369.
- [6] OESTERGAARD A S, GUPTA N, SMIDT T F, et al. The objectively measured physical work demands and physical capacity of offshore wind technicians: an observational field study [J]. Appl Ergon, 2022, 102:103716.
- [7] VELASCO G M, METTE J, MACHE S, et al. A cross-sectional survey of physical strains among offshore wind farm workers in the German exclusive economic zone [J]. BMJ Open, 2018, 8 (3):e20157.
- [8] ANEZIRIS O N, PAPAZOGLU I A, PSINIAS A. Occupational risk for an onshore wind farm [J]. Safety Science, 2016, 88: 188-198.
- [9] MILLIGAN G S, O'HALLORAN J P, TIPTON M J. A Job Task Analysis for Technicians in the Offshore Wind Industry [J]. Work, 2019, 63(4):537-545.
- [10] GINTAUTAS T, SØRENSEN J D. Improved methodology of weather window prediction for offshore operations based on probabilities of operation failure [J]. J Mar Sci Eng, 2017, 5 (2):20.
- [11] 张小会.某风力发电有限公司二期工程项目职业病危害控制效果评价[J].职业卫生与应急救援,2016,34(4):321-322.
- [12] 宁康,曲婵,刘羽,等.某风电场建设项目职业病危害预评价[J].中国卫生工程学,2020,19(3):342-344.
- [13] 边洪英,张尧,王艳,等.50 Hz 工频电磁场致职业暴露人群短时记忆力降低与外周血中 Aβ (1-42) 蛋白浓度关系的研究[J].中华疾病控制杂志,2022,26(11):1326-1331.

- [14] 王辉,魏明磊,李勇,等. 河北省 19 个变电站电磁环境对人体免疫功能及神经功能的影响及防护措施[J]. 职业与健康, 2020, 36(14):1893-1897.
- [15] ICNIRP. Gaps in knowledge relevant to the “guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz–100 kHz)”[J]. Health Phys, 2020, 118(5):533-542.
- [16] 陈青松. 极低频电磁场职业接触控制水平研究[D]. 北京:中国疾病预防控制中心, 2011.
- [17] 张秋玲,刘源,马起腾. 风电行业职业危害现状调查[J]. 中国工业医学杂志, 2019, 32(6):485-486.
- [18] KARANIKAS N, STEELE S, BRUSCHI K, et al. Occupational health hazards and risks in the wind industry [J]. Energy Reports, 2021, 7:3750-3759.
- [19] 封琳敏,李欣荣,邢维奕,等. 天津市某风电企业职业病危害调查与评价[J]. 职业与健康, 2019, 35(13):1758-1761.
- [20] 张超,郭新峰,赵树卫. 噪声作业人员代谢综合征与听力损失的相关性分析[J]. 职业卫生与应急救援, 2024, 42(1):53-57.
- [21] 戚作秋,白岩,于立友,等. 风力发电场职业性危害风险辨识与防控措施要点[J]. 中国卫生工程学, 2014, 13(5):359-362.
- [22] 裴雨晴,李志超,庞业珍. 海上风电噪声影响、预报、控制及测试研究综述[J]. 水利规划与设计, 2023(7):121-125.
- [23] ISO. ISO 2631 1:1997 Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 1: General requirements[EB/OL]. 1997. <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:2631:-1:ed-2:v2:en>.
- [24] JOHANNING E. Whole-body vibration-related health disorders in occupational medicine—an international comparison [J]. Ergonomics, 2015, 58(7):1239-1252.
- [25] YANG H, GAO J, WANG H, et al. The effects and possible mechanisms of whole-body vibration on cognitive function: A narrative review[J]. Brain Res, 2025, 1850:149392.
- [26] ESCALER X, MEBARKI T. Full-Scale Wind Turbine Vibration Signature Analysis[J]. Machines, 2018, 6(4):63.
- [27] 李帆,姚程亮,董哲,等. 面向新型配电网的地配一体化调度仿真技术研究[J]. 无线互联科技, 2024, 21(7):92-94.
- [28] 李思,向宇,施永飞. 红外成像检漏技术在六氟化硫电气设备检漏工作中的应用[J]. 电工技术, 2023(8):134-137.
- [29] 中国安全生产科学研究院, 国家安全生产应急救援中心, 南方电网调峰调频发电有限公司. 生产经营单位生产安全事故应急预案编制导则[S]. 国家市场监督管理总局; 国家标准化管理委员会, 2020.
- [30] 林奥林,陈展超,林泽炜,等. 一种用于 SF<sub>6</sub> 高压电气设备的防泄露补气装置[J]. 电气开关, 2022, 60(3):36-39.
- [31] 郑鹏超. 柴油发电机房在职业卫生评价中的关键点分析[J]. 安全、健康和环境, 2018, 18(4):25-26.
- [32] 仇忠辉,陈奇,张学森,等. 柴油吸入性肺炎 23 例情况调查及防治建议[J]. 中国伤残医学, 2013, 21(8):446-447.
- [33] PIOTROWSKI P J, ROBAK S, POLEWACZYK M M, et al. Offshore substation workers' exposure to harmful factors—Actions minimizing risk of hazards[J]. Med Pr, 2016, 67(1):51-72.
- [34] METTE J, VELASCO G M, HARTH V, et al. “It's still a great adventure” – exploring offshore employees' working conditions in a qualitative study[J]. J Occup Med Toxicol, 2017, 12(1):35.
- [35] VELASCO G M, METTE J, MACHE S, et al. Sleep quality of offshore wind farm workers in the German exclusive economic zone:a cross-sectional study[J]. BMJ Open, 2018, 8(11):e24006.
- [36] AKERSTEDT T, WRIGHT K J. Sleep Loss and Fatigue in Shift Work and Shift Work Disorder [J]. Sleep Med Clin, 2009, 4(2):257-271.
- [37] FOSSUM I N, BJORVATN B, WAAGE S, et al. Effects of shift and night work in the offshore petroleum industry:a systematic review[J]. Ind Health, 2013, 51(5):530-544.
- [38] WAAGE S, MOEN B E, PALLESEN S, et al. Shift work disorder among oil rig workers in the North Sea[J]. Sleep, 2009, 32(4):558-565.
- [39] 贾宁,李涛,朱新河,等. 风电场运行维护人员下背痛及危险因素研究[J]. 工业卫生与职业病, 2016, 42(1):31-36.
- [40] VELASCO G M, METTE J, MACHE S, et al. Musculoskeletal pain among offshore wind industry workers:a cross-sectional study [J]. Int Arch Occup Environ Health, 2020, 93(7):899-909.
- [41] OESTERGAARD A S, SMIDT T F, SØGAARD K, et al. Musculoskeletal disorders and perceived physical work demands among offshore wind industry technicians across different turbine sizes:a cross-sectional study[J]. Int J of Ind Ergon, 2022, 88:103278.
- [42] KONG Y K, KIM J H, SHIM H H, et al. Efficacy of passive upper-limb exoskeletons in reducing musculoskeletal load associated with overhead tasks[J]. Appl Ergon, 2023, 109:103965.
- [43] LIU B, JIANG S, LI Z, et al. Investigation and Analysis of Eye Discomfort Caused by Video Display Terminal Use Among Medical Students Studying at High-Altitude Regions [J]. Front Public Health, 2022, 10:900539.
- [44] KAMØY B, MAGNO M, NØLAND S T, et al. Video display terminal use and dry eye:preventive measures and future perspectives[J]. Acta Ophthalmol, 2022, 100(7):723-739.
- [45] ZAITSU T, INOUE Y, OSHIRO A, et al. Association of visual display terminal time with prevalence of temporomandibular disorder among Japanese workers [J]. J Occup Health, 2022, 64(1):e12370.
- [46] 张玲燕. 基于适应性规律的晕动习服研究[D]. 大连:辽宁师范大学, 2013.
- [47] 裴焕金,李永亮,杨昆,等. 多因素影响下的风机闪烁光影分析与应用[J]. 水电与新能源, 2022, 36(11):22-26.
- [48] HARDING G, HARDING P, WILKINS A. Wind turbines, flicker, and photosensitive epilepsy:characterizing the flashing that may precipitate seizures and optimizing guidelines to prevent them [J]. Epilepsia, 2008, 49(6):1095-1098.
- [49] TVEITEN C K, ALBRCHTSEN E, HEGGSET J, et al. HSE challenges related to offshore renewable energy [R]. SINTEF Technology and Society, 2011.
- [50] CHOU J, TU W. Failure analysis and risk management of a collapsed large wind turbine tower [J]. Engineering Failure Analysis, 2011, 18(1):295-313.
- [51] 彭泳江,唐程,王呈呈,等. 海上风电现场作业风险管控的难点及对策[J]. 船舶工程, 2023, 45(S1):127-130.

收稿日期:2024-10-22