

沙戈荒环境对风电设施的腐蚀规律 及防护方法研究

李鑫¹, 张晓雷¹, 张敬祎¹, 向利^{2*}, 陈川², 杨阳²

(1.金风科技股份有限公司, 乌鲁木齐 830026;

2.中国电器科学研究院股份有限公司 工业产品环境适应性全国重点实验室, 广州 510663)

摘要: 主要阐述了沙尘环境的分布特征、主要的监测技术、沙尘环境分等分级方法以及相应的防治方法。其中, 沙尘的分布特征主要包括沙尘来源、沙尘分布规律以及沙尘的运动轨迹。主要监测方法主要包括离线和在线监测, 离线监测数据直观可靠但却难以获得连续的数据, 而在线监测可实时获得沙尘数据, 但是数据精度、设备可靠性还需进一步验证。掌握沙尘分布特征, 可指导用户提出针对性的防控方法。归纳现有沙尘分级方法, 可反馈用户掌握当前环境严酷程度, 提出风机主要部件(结构功能件、电气设备功能件和转动结构等)的防护建议, 可为沙戈荒环境服役的风电设备运维及防护措施提供一定的参考依据。

关键词: 沙戈荒; 风电; 沙尘浓度; 防护方法; 沙尘分布; 沙尘环境分级

中图分类号: P425.55

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)12-0163-10

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.12.020

Trend of Corrosion and Prevention Methods of the Dust Environment on Wind Power Facilities

LI Xin¹, ZHANG Xiaolei¹, ZHANG Jingyi¹, XIANG Li^{2*}, CHEN Chuan², YANG Yang²

(1. Goldwind Science & Technology Co., Ltd., Urumqi 830026, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Adaptability of Industrial Products, China National Electric Apparatus Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

ABSTRACT: The work aims to focus on expounding the distribution characteristics of the dust environment, the major monitoring method, the classification and the corresponding prevention methods for dust environment. Among them, the distribution characteristics of the dust include the source, distribution rules and moving trajectory of the dust. The major monitoring methods include offline method by which intuitive and reliable but discontinuous data can be obtained and the online method by which real-time data can be provided but the accuracy of data and reliability of equipment need to be verified. Grasping the distribution of the dust can guide users to take targeted steps. Summarizing the classification of the dust can guide users to know the current environmental severity. Meantime, putting forward prevention suggestion for main components of wind power facilities (structural functional parts, functional parts of electrical equipment and rotating structures, etc.) can help users to take some measures, which is helpful to provide reference basis for the operation, maintenance and protection measures of wind power

收稿日期: 2024-07-10; 修订日期: 2024-08-26

Received: 2024-07-10; Revised: 2024-08-26

引文格式: 李鑫, 张晓雷, 张敬祎, 等. 沙戈荒环境对风电设施的腐蚀规律及防护方法研究[J]. 装备环境工程, 2024, 21(12): 163-172.

LI Xin, ZHANG Xiaolei, ZHANG Jingyi, et al. Trend of Corrosion and Prevention Methods of the Dust Environment on Wind Power Facilities[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(12): 163-172

*通信作者 (Corresponding author)

equipment in the desert environment.

KEY WORDS: desertification; wind power; dust concentration; prevention methods; dust distribution; classification of dust environment

“沙戈荒”是沙漠、戈壁和荒漠地带的统称，这些地区地貌广阔，风能、太阳能等资源丰富，成为当前新能源发展的“新战场”。然而，由于特殊的环境特征和复杂的地质条件，服役于沙戈荒环境的风电机组也面临着诸多特殊挑战。主要影响塔筒、叶片等基础功能结构以及发电机、电气设备、齿轮等精密仪器设施。

沙尘对风电基础功能结构影响较大。如塔筒、风机叶片等，这些部位主要采取涂层保护措施，由于沙尘通常形状不规则，坚硬且边缘锋利，在风作用下对涂层、金属材料等具有较大的磨损作用，影响结构材料的安全性。叶片作为风机吸收风能的主要零部件，受沙尘颗粒冲蚀磨损和卡涩导致的问题也是各大风电企业面临的主要难点之一。张永等^[1]研究发现，长期暴露于沙尘环境中的叶片表面涂层受到沙尘冲蚀磨损较为严重，易出现涂层破损，甚至是产生裂纹等缺陷，严重影响叶片的寿命。徐梦飞^[2]的研究表明，沙尘颗粒对叶片的磨损从叶片前端开始逐渐向尾部扩展，使原本光滑的表面产生凹坑、裂纹等缺陷，会严重影响叶片的性能。据统计，叶片磨损导致兆瓦级风电机组每年损失的年发电量可高达25%，甚至可能超过50%。塔筒结构相对较为简单，在涂层的保护下可有效避免沙尘颗粒对金属基体的磨损，但是在沙尘频繁的沙戈荒环境，尤其是接近地面区域，如地面1 m以下的部位，极易发生严重的风蚀损伤。当涂层被冲蚀脱落后，基体逐渐被磨损，在风轮周期性转动载荷下会加剧塔筒的损伤，风机安全性和耐久性逐渐下降，严重的将导致坍塌等事故。对于机舱外部结构而言，张朋等^[3]分析发现，通常仅细小的沙尘才可飞越至离地面50 m以上高度，而细小颗粒对设备的磨损能力大幅下降，因此磨损对机舱外部结构影响相对较小。

机舱内部主要包括发电机、齿轮箱、控制系统以及电器柜等，这些部位的主要防护措施是密封和沙尘过滤，沙尘粒径分布影响防护效果。若选择的防护措施不当，沙尘颗粒会渗透到关键电气部位处，造成接触不良、短路等，影响电气控制系统的稳定性和可靠性。同时，由于沙尘颗粒坚硬且边缘锋利，能造成运动部件磨损或卡涩，导致设备运行效率下降甚至损坏。冯凯等^[4]研究发现，沙尘对发动机轴承偏心率和摩擦功率损失具有很大的影响，一旦风机轴承偏移，严重的甚至会发生风机坍塌等事故。此外，沙尘还可能堵塞设备的过滤系统、散热孔等，影响空气流通和散热效果。

总而言之，沙尘对风电机组的危害极大。因此，

摸清沙尘分布特征、运动特征、影响因素以及环境分级与防护措施等，可为风电、光伏等新能源建设提供与运维提供一定的支持。

1 沙尘的分布特征

1.1 沙尘的来源

通常沙尘产生有3个因素，沙尘源、强风力和不稳定的大气环流。沙尘的来源主要分为自然来源和人为来源，本文主要描述自然来源。自然来源包括国内来源和国外来源。对于国内沙尘来源的研究，我国最大的沙漠——塔克拉玛干沙漠较为热门^[5]。马明杰等^[6]通过起沙估算模型分析发现，在沙尘暴作用下，塔克拉玛干沙漠年均起沙量高达13.1 t/km²，巨大的起沙量使其成为国内沙尘天气的主要来源。陈思宇^[7]研究了2007—2011年塔克拉玛干沙漠起沙情况，发现年平均起沙量为187.3 Tg/a，占东亚地区沙尘排放总量的42%。Meng等^[8]研究发现，塔克拉玛干沙漠可向高空输送2.98 Mt的沙尘气溶胶，其中52%通过气流传输至盆地外其他区域。Wang等^[9]分析发现，除了塔克拉玛干沙漠高达45.07 kg/(m²·d)的排沙量外，河西走廊西部地区排沙量也很大，约为39.16 kg/(m²·d)，而柴达木盆地、毛乌素沙地、阴山山脉、浑善达克沙地和科尔沁沙地则相对排沙量较低，均在12 kg/(m²·d)以下。袁瑞瑞等^[10]探究了宁夏沙尘重污染天气的特征，表明沙尘源地主要来自额济纳旗周边戈壁、巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠。成天涛等^[11]研究了北京一次沙尘天气，分析发现，近地面沙尘中来自浑善达克沙地的最多，占到20.9%。徐传奇^[12]研究了1960—2007年塔克拉玛干沙漠（西）、巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠（中）以及浑善达克沙地（东）3个主要沙尘源对我国沙尘天气的贡献水平，发现虽然塔克拉玛干沙漠起沙量大、暴发频率高，但其沙尘贡献水平远不及与离河西地区距离更近的巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠。另外，沙尘严酷程度从西到东呈上旬到下旬的过渡趋势，其中西部上旬和东部下旬沙尘严酷程度最显著，占比均超过了72%，而中部三旬沙尘无明显差异。

国外来源主要以蒙古国为主。Yin等^[13]分析了我国2021年春季的一次严重沙尘暴事件，结果表明，此次沙尘事件源于蒙古国，由极端气候、超强蒙古气旋和环境热不稳定作用下等因素共同作用诱发沙尘天气，并输送至我国华北及周边地区，进而诱发我国北方最强的春季沙尘。张凯等^[14]对我国2000—2002年沙尘统计分析发现，我国沙尘粒子中来自蒙古国的

来源占比甚至超过了 70%。Liang 等^[15]针对 2021 年一场特大沙尘事件进行了分析, 数据显示, 沙尘路线主要从蒙古中部到中国北部, 在沙暴期间, 分析表明, 中国北部的沙尘中大量的细尘均来源于蒙古。通常, 引起我国沙尘天气的来源并非单一来源, 往往是国内外来源共同作用的^[16-19]。杨晓军等^[20]分析了 2021 年我国西北地区一次持续重沙尘天气的成因, 发现沙尘天气首先出现在蒙古国南部和我国内蒙古中部, 随后在强烈蒙古气旋作用下, 持续性传输至我国西北地区。Chen 等^[21]分析了我国北方某次沙尘浓度主要贡献情况, 结果显示, 蒙古国和塔克拉玛干沙漠是引起我国北方发生沙尘天气的主要沙尘源, 对我国沙尘浓度贡献分别为 42%和 26%。吴芷瑜等^[22]研究西北一次沙尘天气, 经分析表明, 沙尘物质可能来源于准噶尔盆地内部古尔班通古特沙漠以及境外哈萨克斯坦等地区。

由此可见, 国内来源主要是塔克拉玛干沙漠、河西走廊西部地区、柴达木盆地沙漠、浑善达克沙地等, 起沙量虽然是衡量沙尘来源的重要指标, 但是沙尘浓度还与研究区域地理位置密切相关, 即沙源地距离。另外, 不同沙源地沙尘天气规律也存在较大差异。国外来源主要是蒙古国和哈萨克斯坦, 是我国沙尘事件的主要源头, 由于蒙古气旋、不稳定气流、西伯利亚高压西北风^[17]、地面冷锋等多种因素共同作用下形成了沙尘天气。据统计, 我国 2000—2009 年间 151 次沙尘天气中, 受到了冷锋的影响 147 次, 蒙古气旋影响 106 次, 且 2 种通常是伴随出现的, 其他因素合计不超过 15 次。我国受沙尘影响最大的区域就是离国内外沙尘源较近的内蒙古和新疆南部。对于风机发电机组不仅需关注国内沙尘源动态, 也需关注国外沙尘源及沙尘天气情况, 时刻关注国内外沙尘预警提示。同时, 分析沙尘引起的风蚀机理, 及时做好相应防控。

1.2 沙尘的分布规律

沙尘的分布规律受地理位置、季节、空间高度、沙尘粒径、气流等多种因素有关。薛一波等^[23]分析了新疆 2020 年沙尘天气数据, 分析沙尘天数发现, 南疆高达 180 d, 沙尘天气数超过了北疆和东疆总和的 4 倍, 南疆对 PM10 贡献率高达 67%, 大气能见度远远低于北疆和东疆。可能是由于南疆距离塔克拉玛干沙尘源更近, 另外, 沙尘天气具有明显的季节特征^[24], 主要集中在春季和夏季, 以浮尘天气为主。有学者统计分析历史数据发现, 我国 2000—2021 年间出现沙尘天气共 297 次, 春季约占 77.8%。玛依拉·热西丁^[25]计算了新疆不同季节平均沙尘排放量, 结果表明, 沙尘排放量春季和冬季显著高于夏季和秋季。余永江等^[26]根据 2005—2009 天气年鉴、空气质量等资料对福建沙尘气候进行了研究, 沙尘高值区出现在春季和初夏 (3—6 月)。邓萌杰等^[27]以 2018 年 3 次沙尘天气为

研究对象, 发现不同季节的沙尘空间分布特征也存在差异, 冬季沙尘为近地面扩散传输, 而春夏季沙尘为高空沉降传输。白冰等^[28]研究发现, 沙尘中较大颗粒的主要分布在地面附近, 以沉降为主, 而相对较小的粒子在对流层中混合, 垂直方向分布较为均匀, 主要分布在 4 km 以上, 有的甚至超过了 8 km。叶洽等^[17]研究表明, 沙尘的输送高度主要为对流层低层 (1~3 km) 与对流层中高层 (3~10 km)。

影响我国沙尘分布的主要因素包括研究区地理位置、季节、沙尘粒径和空间高度等, 由于沙尘源分布影响, 我国沙尘主要分布在内蒙古、新疆、宁夏等北方区域, 沙尘呈现明显的季节性特征。受地理位置、季节、风速风向等影响, 如南疆沙尘天气频繁主要是因为其临近我国最大沙尘源卡塔拉马干沙漠, 而夏季较冬季沙尘低的原因可能是夏季通常为西南、东南季风 (背沙尘源风), 而冬季盛行东北、西北季风 (迎沙尘源风)。同时, 由于冬季空气湿度低、植被稀疏等多重因素影响, 导致冬季更易发生沙尘天气。通常, 大粒径的沙尘主要分布在近地面区域, 而小粒径更容易随气流扩散至高空或远处, 对于近地面区域的风机结构部件, 应着重考虑提升涂层耐磨损性能, 并可采用外围阻隔等措施减少近地面风机部件的损伤。对于高空区域, 加强机舱内外部密封水平的同时, 可采用除尘措施, 减少渗漏的风沙对电气部件的腐蚀, 配合沙尘在线监测传感器, 实时反馈机舱内部沙尘浓度水平, 及时调整沙尘控制方案。另外, 风力发电机组应加强多沙尘天气风机检修频次, 减少沙尘影响。着关注沙尘迎风面设备表面磨损状态, 及时修补。

1.3 沙尘的运动轨迹

我国沙尘天气传输路径研究颇多, 白冰等^[28]、柳丹等^[16]研究表明, 我国西北地区沙尘天气传输路径均是西北路径, 西北路径型沙尘天气一般起源于蒙古国或我国内蒙古西部, 受西北气流引导。刘志丽等^[29]、吴芷瑜等^[22]研究发现, 偏西路径也是沙尘常见的运行轨迹。偏西路径型沙尘天气起源于蒙古国、我国内蒙古西部或新疆南部, 受偏西气流引导。通常, 沙尘并非单一运行轨迹^[30-33]。邓萌杰等^[27]分析表明, 2018 年长治市的 3 次沙尘传输路径主要为西北路径和北路径。其中, 西北路径包含 2 条, 一条源于哈萨克斯坦, 另一条来源于新疆中北部, 而正北路径起源于蒙古国。王含月等^[34]、余永江等^[26]研究表明, 安徽省沙尘传输轨迹也主要为西北路径和偏北路径。其中, 西北路径引起的沙尘浓度最高, 而偏北路径引起的沙尘传输距离及范围较广。张钦仁等^[35]分析北京地区 1960 年沙尘天气移动路径表明, 其主要为偏西路径、偏北路径以及西北路径, 其中偏西路径和北方路径发生重叠, 而西北路径处于 2 条路径之间。徐冉等^[36]分析了 2000—2021 年中国北方沙尘传输路径包括西

北路径、偏西路径和偏北路,分别占比 38.5%、32.9%、18.2%,且春季沙尘的输送路径具有一定的阶段性分布,不同季节阵风和气流方向是引导沙尘路径的主要因素。周成等^[37]分析了不同类型沙尘天气的运输轨迹,研究表明,浮尘天气由气流带入高空并向东部传输,随后在华北地区沉降,而扬沙天气由大风天气吹向空中随冷锋向华北输送。刘尊驰等^[38]研究发现,不同高度气流轨迹相差较大,但传输路径却一致,主要有西北、北部和东北路径。

综合而言,沙尘的路径方向受气流方向引导,沙尘通常并非单一路径,由多种路径综合引发,且路径间可能存在重叠现象,主要移动路径为偏北、偏西以及西北 3 种路径。移动路径具有明显的季节性特性,不同类型沙尘天气在大气上空传输路径不同,而不同高度沙尘运行轨迹存在差异,但传输路径一致。另外,沙尘的移动路径还会影响沙尘浓度分布以及扩散距离。对于风力发电机组,沙尘的运动轨迹观测也极为重要,掌握沙尘的运行轨迹,可提出针对性的防护措施,如处于移动风向上设备会面临更严重的磨损,日常维护过程应着重关注这些区域的磨损情况,通过监测沙尘颗粒度、风向、风速以及沙尘程度等,结合仿真模拟技术等做出相应的防护措施。

2 沙尘含量的主要检测技术

沙尘含量的检测技术主要包括离线监测方法和在线监测方法。离线监测方法主要包括沉降缸、滤膜法和抽气采样法等。如 GB/T 15265 规定了采用沉降缸收集大气中的沙尘,再利用称量方式测定沙尘量。GB/T 23573 记录了利用大气采样法采集金属切削床环境粉尘,再利用称量方法获得粉尘质量,可应用于野外短时间沙尘收集。MT 79 记录了滤膜和采样器辅助收集沙尘,再利用称量计算出沙尘量。GB/T 15432 利用滤膜和有切割特性的采样器,记录 100 μm 以内沙尘的总质重量。对于质量法而言,优势在于数据直观、可靠,但是称量法精度有限,自然沉降采集周期久,可能存在收集的灰尘又循环回大气中的问题,配合采气法的收集方法可以短时间收集,但可能存在堵塞管道情况。该数据短时间的累积,受风速、风向、沙尘粒径等影响较大。另外,称量法无法提供沙尘粒径分布水平,难以指导诸如沙尘过滤等防治方法。因此,GB/T 20966 还提供了一种利用重力沉降衰减来计算颗粒物粒径分布水平的方法,主要是将收集到的沙尘分散在适宜的分散剂中,根据特定部位不同粒径衰减情况,换算出沙尘粒径分布情况。HJ/T 618 描述了大气 PM10 和 PM2.5 测定方法,主要通过滤膜和具有切割特性采样器结合可以测定出粒径为 10 μm 和 2.5 μm 的浓度。这些方法可以获得粒径分布信息,但是利用衰减情况判定粒径分布的方法,其测

试精度与分散剂的选择和设备自身分辨率相关,且难以测定可溶性沙尘。沙尘分布粒径广泛,利用 PM2.5 和 PM10 统计粒径,数据局限性较大,难以为沙尘防控提供精准的数据参数。总之,离线监测虽然测试装置和操作方法简单,数据直观性、可靠性高,但人工成本高,且难以获得连续数据。

对于在线监测方法,目前比较成熟的方法为粒子计数法、基于遥感技术的沙尘监测仪、 β 射线大气气溶胶监测仪等。GB/T 29024.4 和 GB/T 6167 描述了利用粒子计数器测定颗粒物分布浓度的方法,与离线方法相比,该方法可以实时获得沙尘粒径分布数据,但更适用于粒径小于 10 μm 的灰尘的监测。GB/T 20479 中推荐了粒径不大于 30 μm 的沙尘可采样激光 90° 散射大气颗粒监测仪,而不大于 10 μm 的用 β 射线大气气溶胶监测仪,测定降尘负荷则采用沉降缸。QX/T 141、DB63/T 2232、GB/T 28419 记录了基于遥感技术的沙尘检测方法。另外,也有一些新的测定方法^[39-43],如马淑红等^[44]研制了一种多功能野外风沙监测仪,通过风洞试验表明其集沙量有效率为 98%。刘方伟等^[45]提出了中红外和热红外通道亮度温度差值的组合阈值法,并进行了沙尘遥感监测,与其他成熟产品结果进行对比验证,测定数据空间分布基本一致。丁志豪等^[46]设计了一款以树莓派为主控板的智能风沙监测设备,还兼具天气识别、温湿度记录等功能。综合分析发现,现有成熟的沙尘监测方法粒径分布区间较为粗略,对于沙尘精细过滤指导存在一定的不足,而新的监测技术大多以室内沙尘试验,而实际沙尘环境条件多变,在线监测设备可靠性、耐久性等还有待进一步研究。

沙尘天气监测包括离线和在线 2 种方式,对于沙尘环境服役的风电机组设备,在选择监测方法时,应选择精度高、可测粒径分布范围广、可实现在线监测的方法,集成智能系统,实现及时风险预警。同时,也可配合离线监测方法,更直观获得沙尘水平,结合环境分级,提出适宜的防控措施。未来沙尘预测也可应用于风电机组的日常维护,提早采取措施,减少沙尘影响。

3 沙尘含量对应的环境分等分级方法

沙尘天气分类方法主要包括以下几种:

1) HJ 633 作为空气质量评价方法,主要针对 PM10 和 PM2.5 进行分级,分为 1~6 级,描述及环境分级见表 1。

2) GB/T 3095 以 PM10 和 PM2.5 的年平均浓度和日平均浓度细分为 HJ/T 633 的一级和二级,见表 2。

3) GB/T 20480 和世界气象组织按能见度和风力对沙尘水平进行了分等分级,分为浮尘、扬尘、沙尘暴等 5 个级别,见表 3。

表 1 按环境质量的沙尘天气分级

Tab.1 Classification of dust environment according to environmental quality

序号	描述				等级
	环境质量	颗粒粒径 ≤ 10 μm	颗粒粒径 ≤ 2.5 μm	空气指数	
1	优	颗粒浓度 < 50 μg/m ³	颗粒浓度 < 35 μg/m ³	0~50	一级
2	良	颗粒浓度 < 150 μg/m ³	颗粒浓度 < 75 μg/m ³	51~100	二级
3	轻度污染	颗粒浓度 < 250 μg/m ³	颗粒浓度 < 115 μg/m ³	101~150	三级
4	重度污染	颗粒浓度 < 350 μg/m ³	颗粒浓度 < 150 μg/m ³	151~200	四级
5	重度污染	颗粒浓度 < 420 μg/m ³	颗粒浓度 < 250 μg/m ³	201~300	五级
6	严重污染	颗粒浓度 > 420 μg/m ³	颗粒浓度 > 250 μg/m ³	300 以上	六级

表 2 按环境质量的沙尘天气分级

Tab.2 Classification of dust environment according to environmental quality

序号	描述		分级
	颗粒物粒径 ≤ 10 μm	颗粒物粒径 < 2.5 μm	
1	年平均浓度 < 40 μg/m ³ , 24 h 内 < 50 μg/m ³	年平均浓度 < 15 μg/m ³ , 24 h 内 < 35 μg/m ³	一级
2	年平均浓度 < 70 μg/m ³ , 24 h 内 < 150 μg/m ³	年平均浓度 < 35 μg/m ³ , 24 h 内 < 75 μg/m ³	二级

表 3 按能见度与风力分级

Tab.3 Classification according to the visibility and wind force

序号	描述	等级
1	无风或风力 ≤ 3 级, 空气浑浊	水平能见度 < 10 km 浮尘
2	空气相当浑浊	水平能见度 1~10 km 扬沙
3	空气很浑浊	水平能见度 < 1 km 沙尘暴
4	空气非常浑浊	水平能见度 < 500 m 强沙尘暴
5	空气特别浑浊	水平能见度 < 50 m 特强沙尘暴

4) 张广兴等^[47]根据瞬间级大风速或风的级别结合能见度,对沙尘暴天气强度划分了等级,分为特强、强、中和弱 4 个等级。

5) GB/T 20480 以相邻观测站点数量以及观测沙尘类型划分了区域性沙尘天气等级。

6) 刘克利等^[48]统计分析了内蒙古 6 个站点 2004—2007 年沙尘数据发现,能见度与 PM10 存在非线性关系,为幂函数反相关。他们以此对天气进行分级,见表 6。该分级有一定的参考价值,历史数据拟合率 84.6%,但样本数量相对有限,还需更多数据进行精准划分。中国气象局根据风力、风速、能见度和持续时长,将沙尘天气分为浮尘天气、扬沙天气、沙尘暴天气、强沙尘暴天气以及特强沙尘暴天气,主要用于指导空气质量评价、灾害性评价,见表 7。

沙尘环境分等分级方法繁多,其中表 1、表 2 可

应用于室内环境沙尘评估,主要以 PM2.5 和 PM10 评价分级,但对于精密设施服役环境,这种分级方法不足以指导环境控制,更小粒径的沙尘渗透至设施内部,腐蚀与磨损带来不可估量的后果。因此,分级应有更加细致的划分,补充颗粒度水平更具有指导

表 4 按能见度和风速分级

Tab.4 Classification according to the visibility and wind speed

序号	描述		分级
	瞬间极大风速/(m·s ⁻¹)	最小能见度/m	
1	≥ 10 级别或大于等于 25	0 级: < 50	特强
2	≥ 8 级或 ≥ 20	1 级: < 200	强
3	6~8 级或 ≥ 17	2 级: 200~500	中
4	4~6 级或 ≥ 10	3 级: 500~1 000	弱

表 5 按区域观测点数量和沙尘类型分级

Tab.5 Classification according to the number of regional observation points and the dust type

序号	描述	等级
1	同一次天气中,相邻 5 个及以上站点同一观测时次出现成片的浮尘	区域性浮尘天气
2	同一次天气中,相邻 5 个及以上站点同一观测时次出现成片的扬沙或沙尘暴	区域性扬沙天气
3	同一次天气中,相邻 3 个及以上站点同一观测时次出现成片的沙尘暴	区域性沙尘暴天气
4	同一次天气中,相邻 3 个及以上站点同一观测时次出现成片的强沙尘暴	区域性强沙尘暴天气
5	同一次天气中,相邻 3 个及以上站点同一观测时次出现成片的特强沙尘暴	区域性特强沙尘暴天气

表6 按PM10颗粒浓度分级
Tab.6 Classification according to the concentration of PM10 particles

序号	描述	等级
1	PM10 \geq 7 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	沙尘暴
2	PM10 介于 29~7 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	扬尘

表7 按风速、能见度等分级^[49]
Tab.7 Classification according to the wind speed and visibility^[49]

序号	描述				等级
	风力(级)	风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	水平能见度/km	时长/h	
1	4~5	5.5~10.7	>10	>2	浮尘
2	6~7	10.8~17.1	1~10	>2	扬尘
3	8	17.2~20.7	<1	>1	沙尘暴
4	9	20.8~24.4	<0.5	>1	强沙尘暴
5	>10	>24.5	<0.05	—	特强沙尘暴

4 沙尘环境的防治方法

对于风电机组在沙尘环境的防治方法包括结构功能件、电气设备功能件以及转动结构等,相应的防治方法如下:

1) 结构功能件。结构功能部件主要包括塔筒、风机叶片、机舱等直接暴露在沙尘环境的部件。对于塔筒,主要防护措施在于涂层保护、基材强化处理以及加强密封系统,选择耐老化、耐磨损的涂层。也可在塔筒周围加强绿化,如小灌木等,既可以阻挡低空大颗粒沙尘对塔筒底部的磨损与冲蚀,也具有一定的防沙固土效果。同时,在不影响风机运行的情况下,也可考虑塔筒磨损严重区域增加纱网阻隔等措施,阻碍一部分风沙对表面涂层的冲蚀。对于风机叶片,合理的结构设计及表面优化处理可有效降低因风机叶片引起的事故。如涂敷抗冲蚀的涂层,由于分析发现风机叶片磨损总是从前端向尾端扩散的,因此可适当对前端加重防护,如在不影响或者影响微小的情况下,在叶片前端增加保护带。此外,可选择具有憎尘性、防腐、防老化的漆材,同时,选择耐磨、防腐性能优异的基体材料,达到双重防护效果。除了日常检修外,着重关注沙尘频繁时段,增加检修频次,有风险区域及时修补或更换。配合远程智能监测,及时排查风险情况。

2) 电气功能件。包括发电机组、控制柜、电器柜等处于内部的精密电气设备。对于电气功能部件,首要防护在于加强密封,选择耐老化、密封效果好的密封材料,尽可能减少外部沙尘入侵内部,从根源上减少沙尘。减少开门频次也能一定程度减少沙尘进入内部。另外,优化内外连接部位的设计,如设计多道门,弯道多阻拦通道等。在设计上可考虑单独防护罩,即关键部件采用单独的防护罩进行保护。除了加强密

意义。表3~7主要以能见度对沙尘类型分类,这种分级对于风机设备内部环境防控指导意义相对较低。综合而言,现有分等分级较为粗略,对于环境分级具有一定的指导意义,但是对于风电机组的指导价值还需更进一步细分,更精细指导室内外风机设施防护防控。

封外,使用沙尘过滤系统也可达到良好的防控效果,如MT/T 158、MT/T 712、TB/T 3210.2中描述了沙尘过滤器相关规范,选用适宜的过滤器能达到良好的防沙尘效果。

3) 转动结构件。如风机叶片转轴,应时刻关注,一旦存在风险情况,应及时清理,对于叶片转动轴密封防护,同时在连接处涂抹密封胶,尽可能减少沙尘进入轴承内部。

5 结语

沙戈荒环境沙尘情况的研究可为服役在该环境的风电机组安全稳定运行提供一定的数据和技术支持,由于沙尘来源广泛,受季节、地理位置、气流等影响较大,因此,对于沙尘环境的研究尤为重要。

我国沙尘来源主要为国内来源和国外来源,通常,沙尘天气受国内外来源共同作用影响,沙尘移动路线主要在偏北路、偏西路以及西北路线,主要分布在内蒙古、新疆等北方区域,不同类型沙尘运行轨迹存在差异,但是不同高度沙尘运行轨迹基本一致。沙尘的分布水平具有一定的季节特征,冬季、春季以及初夏相对更高。目前,沙尘天气监测包括离线和在线两种方式,离线方法数据直观可靠,但耗费人力物力且无法实现在线监测,在线方法可实现在线监测,但成本相对更高,部分精度有限或测试范围较窄,且很多新技术实际应用可靠性还需进一步研究。现有的沙尘环境分级方法主要是针对沙尘类型分级,或以环境质量评价为基础的分级,对于风机设备而言,应根据沙尘环境监测数据以及风机主要部件腐蚀、磨损情况提出适用于风机内外沙尘的精细划分方法,实现针对性、精细化指导室内外风机设施防护防控。对于设施防护防控主要在于结构优化、涂层性能提升、沙尘过

滤等技术。

本文通过对沙尘分布特征、运动轨迹、主要监测方法以及环境分级与防护措施等进行简单综述,对风电企业运维具有一定的指导价值。如国外来源对我国沙尘天气贡献占比较大,企业不仅需要关注国内沙尘源沙尘动态情况,还需关注国外沙尘情况。沙尘移动路线的研究帮助企业掌握了沙尘主要运行轨迹,可对不同沙尘轨迹方向上的风机设备采取针对性的防护措施。对于沙尘环境的监测,采用在线监测方法与离线监测方法配合使用,结合来源、沙尘粒径分布等,集成智能系统,实现沙尘风险预警。提出了风机设备沙尘环境分级建议,企业可关注实际环境沙尘浓度、粒径分布等相关设备的影响情况建立适用于风机设备的分级方法,指导后期运维与防控。同时,提出了风机结构功能件、电气设备功能件和转动结构等的防护建议,可为沙戈荒环境服役的风电设备安全运维提供一定的参考价值。另外,应尽快研落实沙戈荒环境下服役的风机相关技术标准和创新解决方案的制定,确保风电设施的长期稳定运行。

参考文献:

- [1] 张永, 黄超, 刘召, 等. 挟沙风作用下风力机叶片涂层冲蚀特性研究[J]. 材料导报, 2016, 30(10): 95-99.
ZHANG Y, HUANG C, LIU Z, et al. Research on Erosion Properties of Wind Turbine Blade Coating under the Wind-Carrying Action[J]. Materials Review, 2016, 30(10): 95-99.
- [2] 徐梦飞. 风力机叶片涂层的沙尘冲蚀模型试验研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2022.
XU M F. Experimental Study on Dust Erosion Model of Wind Turbine Blade Coating[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2022.
- [3] 张朋, 杨孝庆. 风电叶片面漆的风场暴露环境和应用损伤分析[J]. 涂料工业, 2023, 53(5): 48-52.
ZHANG P, YANG X Q. The Wind Farm Exposure Environment and Damage Analysis of the Wind Turbine Blade Topcoats[J]. Paint & Coatings Industry, 2023, 53(5): 48-52.
- [4] 冯凯, 张优云, 朱永生. 沙尘和低气压对发动机轴承性能的耦合影响[J]. 润滑与密封, 2007, 32(4): 72-75.
FENG K, ZHANG Y Y, ZHU Y S. Study of the Coupling Influent of Sand & Dust and Low Environment Pressure on the Bearings in Internal Combustion Engine[J]. Lubrication Engineering, 2007, 32(4): 72-75.
- [5] 毛东雷, 蔡富艳, 赵枫, 等. 塔克拉玛干沙漠南缘近 4 年沙尘天气下的气象要素相关性分析[J]. 高原气象, 2018, 37(4): 1120-1128.
MAO D L, CAI F Y, ZHAO F, et al. The Correlation Analysis with Meteorological Parameters during Sand and Dust Weather Conditions in Recent Four Years in the Southern Margin of Taklimakan Desert[J]. Plateau Meteorology, 2018, 37(4): 1120-1128.
- [6] 马明杰, 何清, 杨兴华, 等. 塔克拉玛干沙漠北缘沙尘天气起沙量的贡献研究[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(7): 133-138.
MA M J, HE Q, YANG X H, et al. Contributions of Dusty Weather to Dust Emission Amounts at the Northern Margin of the Taklimakan Desert[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(7): 133-138.
- [7] 陈思宇, 黄建平, 李景鑫, 等. 塔克拉玛干沙漠和戈壁沙尘起沙、传输和沉降的对比研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2017, 47(8): 939-957.
CHEN S Y, HUANG J P, LI J X, et al. Comparison of Dust Emissions, Transport, and Deposition between the Taklimakan Desert and Gobi Desert from 2007 to 2011[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2017, 47(8): 939-957.
- [8] MENG L, YANG X H, ZHAO T L, et al. Simulated Regional Transport Structures and Budgets of Dust Aerosols during a Typical Springtime Dust Storm in the Tarim Basin, Northwest China[J]. Atmospheric Research, 2020, 238: 104892.
- [9] WANG H B, JIA X P, LI K, et al. Horizontal Wind Erosion Flux and Potential Dust Emission in Arid and Semi-arid Regions of China: A Major Source Area for East Asia Dust Storms[J]. CATENA, 2015, 133: 373-384.
- [10] 袁瑞瑞, 王建英, 张卫红, 等. 不同路径冷空气导致的宁夏沙尘重污染天气特征及传输规律[J]. 中国沙漠, 2024, 44(1): 209-217.
YUAN R R, WANG J Y, ZHANG W H, et al. Characteristics of Heavy Dust Pollution Weather Coused by Cold Air with Different Routes in Ningxia, China[J]. Journal of Desert Research, 2024, 44(1): 209-217.
- [11] 成天涛, 吕达仁, 章文星, 等. 浑善达克沙地对北京春季沙尘天气的贡献[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2005, 27(S2): 245-251.
CHENG T T, LYU D R, ZHANG W X, et al. Contribution of Hunshandake Sandy Land to Spring Dust Weather in Beijing[J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2005, 27(S2): 245-251.
- [12] 徐传奇. 中国北方沙尘暴时空演化特征及源贡献[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
XU C Q. Temporal and Spatial Evolution Characteristics and Source Contribution of Sandstorms in Northern China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020.
- [13] YIN Z C, WAN Y, ZHANG Y J, et al. Why Super Sandstorm 2021 in North China?[J]. National Science Review, 2022, 9(3): 1-9.
- [14] 张凯, 高会旺, 张仁健, 等. 我国沙尘的来源、移动路径及对东部海域的影响[J]. 地球科学进展, 2005, 20(6): 627-636.
ZHANG K, GAO H W, ZHANG R J, et al. Sources and

- Movement Routes of sand-Dust Aerosols and Their Impact Probabilities on China Seas in 2000-2002[J]. *Advances in Earth Sciences*, 2005, 20(6): 627-636.
- [15] LIANG P, CHEN B, YANG X P, et al. Revealing the Dust Transport Processes of the 2021 Mega Dust Storm Event in Northern China[J]. *Science Bulletin*, 2022, 67(1): 21-24.
- [16] 柳丹, 张武, 陈艳, 等. 基于卫星遥感的中国西北地区沙尘天气发生机理及传输路径分析[J]. *中国沙漠*, 2014, 34(6): 1605-1616.
LIU D, ZHANG W, CHEN Y, et al. Analysis of the Mechanism and Transmission of Dust in Northwest China Based on Satellite Remote-Sensing Data[J]. *Journal of Desert Research*, 2014, 34(6): 1605-1616.
- [17] 叶洽, 郑小慎, 赵尚玉. 2021年中国北部特大沙尘天气的遥感监测与路径分析[J]. *遥感学报*, 2023, 27(8): 1821-1833.
YE Q, ZHENG X S, ZHAO S Y. Remote Sensing Monitoring and Transport Path Analysis of an Intense Dust Weather in Northern China in 2021[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2023, 27(8): 1821-1833.
- [18] 张志刚, 高庆先, 矫梅燕, 等. 影响北京地区沙尘天气的源地和传输路径分析[J]. *环境科学研究*, 2007, 20(4): 21-27.
ZHANG Z G, GAO Q X, JIAO M Y, et al. Analysis on Source Locations and Transportation Paths of Sand-Dusts Affecting Beijing[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2007, 20(4): 21-27.
- [19] 张志刚, 高庆先, 矫梅燕, 等. 影响北京沙尘天气的源地和传输路径分析[C]// 中国气象学会 2006 年年会论文集. 成都: 中国气象学会, 2006.
ZHANG Z G, GAO Q X, JIAO M Y, et al. Analysis of Source Place and Transmission Path Affecting Dust Weather in Beijing[C]// *Proceedings of the 2006 Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society*. Chengdu: Chinese Meteorological Society, 2006.
- [20] 杨晓军, 张强, 叶培龙, 等. 中国北方 2021 年 3 月中旬持续性沙尘天气的特征及其成因[J]. *中国沙漠*, 2021, 41(3): 245-255.
YANG X J, ZHANG Q, YE P L, et al. Characteristics and Causes of Persistent Sand-Dust Weather in Mid-March 2021 over Northern China[J]. *Journal of Desert Research*, 2021, 41(3): 245-255.
- [21] CHEN S Y, ZHAO D, HUANG J P, et al. Mongolia Contributed More than 42% of the Dust Concentrations in Northern China in March and April 2023[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2023, 40(9): 1549-1557.
- [22] 吴芷瑜, 辛智鸣, 姜群鸥, 等. 基于 HYSPLIT 模式的西北干旱区典型沙尘事件沙源地及沙尘传输路径探析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2023, 43(6): 1862-1868.
WU Z Y, XIN Z M, JIANG Q O, et al. Analysis of Dust Source and Dust Transport Path of a Typical Dust Event in Arid Area of Northwest China Based on HYSPLIT Model[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2023, 43(6): 1862-1868.
- [23] 薛一波, 张小啸, 任岗, 等. 风蚀沙尘对新疆绿洲城市大气环境的影响研究[J]. *环境科学学报*, 2024, 44(1): 102-111.
XUE Y B, ZHANG X X, REN G, et al. Study on the influence of wind erosion and dust on urban atmospheric environment in Xinjiang[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2024, 4 (1): 102-111.
- [24] 赵宁. 镜面灰尘沉积特性及其对非涅尔 HCPVT 系统热电性能影响研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2022.
ZHAO N. Study on Characteristics of Mirror Dust Deposition and Its Influence on Thermoelectric Performance of Fresnel HCPVT System[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Tehchnology, 2022.
- [25] 玛依拉·热西丁. 干旱区典型区域气溶胶人为和自然尘源识别及排放率归因[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2020.
MARIRA G. Identification of Artificial and Natural Aerosol Dust Sources and Attribution of Emission Rate in Typical Areas of Arid Areas[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2020.
- [26] 余永江, 王宏, 林长城, 等. 沙尘气溶胶对福建沿海空气质量的影响及输送路径分析[C]// 第 29 届中国气象学会年会. 沈阳: 国气象学会, 2012.
YU Y J, WANG H, LIN C C, et al. Impact of Dust Aerosol on Air Quality in Fujian Coast and Transmission Path Analysis[C]// *The 29th Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society*. Shenyang: Chinese Meteorological Society, 2012.
- [27] 邓萌杰, 闫雨龙, 胡冬梅, 等. 长治市沙尘天气污染特征及传输路径解析[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(10): 4275-4283.
DENG M J, YAN Y L, HU D M, et al. Analysis of Dust Weather Pollution Characteristics and Transmission Paths in Changzhi, China[J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(10): 4275-4283.
- [28] 白冰, 张强, 吕巧谊, 等. 一次区域沙尘过程的垂直结构和传输路径分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(9): 128-133.
BAI B, ZHANG Q, LV Q Y, et al. Analysis of the Vertical Structure and Transmission of the Regional Dust[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, 30(9): 128-133.
- [29] 刘志丽, 马建文, 张仁健, 等. 利用遥感综合分析西风引导气流与地形对沙尘运移路径的影响[J]. *中国沙漠*, 2004, 24(3): 330-334.
LIU Z L, MA J W, ZHANG R J, et al. Impact of Air Current Arose by West Wind and Terrain on Sand-Dust Storm Movement Analyzed with Remote Sensing Technology[J]. *Journal of Desert Research*, 2004, 24(3):

- 330-334.
- [30] 白冰, 张强, 陈旭辉, 等. 东亚三次典型沙尘过程移动路径和特征[J]. 干旱气象, 2018, 36(1): 11-16.
BAI B, ZHANG Q, CHEN X H, et al. Moving Paths and Spatial Characteristics of Three Typical Dust Processes in East Asia[J]. Journal of Arid Meteorology, 2018, 36(1): 11-16.
- [31] 刘娜, 余晔, 陈晋北, 等. 兰州春季沙尘过程 PM₁₀ 输送路径及其潜在源区[J]. 大气科学学报, 2012, 35(4): 477-486.
LIU N, YU Y, CHEN J B, et al. A Study on Potential Sources and Transportation Pathways of PM₁₀ in Spring in Lanzhou[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2012, 35(4): 477-486.
- [32] 张亚妮, 张碧辉, 宗志平, 等. 影响北京的一例沙尘天气过程的起沙沉降及输送路径分析[J]. 气象, 2013, 39(7): 911-922.
ZHANG Y N, ZHANG B H, ZONG Z P, et al. Analysis on Sand Entrainment and Deposition and Transportation Pathways of One Sand-Dust Process in Beijing[J]. Meteorological Monthly, 2013, 39(7): 911-922.
- [33] 延昊, 王长耀, 牛铮, 等. 东亚沙尘源地、沙尘输送路径的遥感研究[J]. 地理科学进展, 2002, 21(1): 90-94.
WANG C Y, NIU Z, et al. Remote Sensing Study of Tracks and Source Areas of Eastern Asian Dust[J]. Progress in Geography, 2002, 21(1): 90-94.
- [34] 王含月, 赵旭辉, 董昊, 等. 影响安徽省沙尘污染状况的主要沙尘路径分析[J]. 皮革制作与环保科技, 2020, 1(7): 69-72.
WANG H Y, ZHAO X H, DONG H, et al. Analysis of Main Paths Affecting the Dust Process in Anhui Province[J]. Leather Manufacture and Environmental Technology, 2020, 1(7): 69-72.
- [35] 张钦仁, 张明伟, 蒋建莹. 近 60 年北京地区沙尘天气变化及路径分析[J]. 高原气象, 2012, 31(2): 487-491.
ZHANG T R, ZHANG M W, JIANG J Y. Analysis on of Sand-Dust Weather Change and Transportation Path in Beijing Region in the Past 60 Years[J]. Plateau Meteorology, 2012, 31(2): 487-491.
- [36] 徐冉, 张碧辉, 安林昌, 等. 2000—2021 年中国沙尘传输路径特征及气象成因分析[J]. 中国环境科学, 2023, 43(9): 4450-4458.
XU R, ZHANG B H, AN L C, et al. Analysis of Sand and Dust Storm Transport Paths Characteristics and Meteorological Causes in China from 2000 to 2021[J]. China Environmental Science, 2023, 43(9): 4450-4458.
- [37] 周成, 王宁, 杨学斌, 等. 德州一次沙尘天气过程成因及气溶胶粒子的输送路径分析[J]. 海洋气象学报, 2018, 38(3): 127-135.
ZHOU C, WANG N, YANG X B, et al. Analysis on the Cause of a Sand and Dust Weather Process and Transportation Pathways of Aerosol Particles in Dezhou[J]. Journal of Marine Meteorology, 2018, 38(3): 127-135.
- [38] 刘尊驰, 刘彤, 韩志全, 等. 新疆和田地区春季气流和沙尘传输路径的时空特征[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(12): 129-134.
LIU Z C, LIU T, HAN Z Q, et al. The Spatial-Temporal Characteristics of Airflow Trajectories and Dust Transport Route during the Spring in Hotian, Xinjiang[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(12): 129-134.
- [39] 薛笋笋, 杨有林, 吴海涛. 基于 FY-2G 静止气象卫星的沙尘监测方法探讨[J]. 宁夏大学学报(自然科学版), 2003(3): 1-4.
XUE Z Z, YANG Y L, WU H T. Discussion of Dust Monitoring Method Based on FY-2G Geostationary Meteorological Satellite[J]. Journal of Ningxia University(Natural Science Edition), 2003(43): 1-4.
- [40] 姚俊. 基于 InSAR 的莫高窟地区风沙运移监测研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2023.
YAO J. Research on Sandstorm Movement Monitoring in Mogao Grottoes based on InSAR [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2023.
- [41] 周瑶. 纤式风沙监测系统设计与关键技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2020.
ZHOU Y. Design and Key Technology of Fiber Sand Monitoring System[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020.
- [42] 高玉宏, 程远, 杨蕾, 等. 基于 VIRR 的齐齐哈尔市沙尘动态监测研究[J]. 黑龙江环境通报, 2018, 31(3): 60-61.
GAO Y H, CHENG YYANG L, et al. Study on Dynamic Monitoring of Sand Dust in Qiqihar City Based on VIRR[J]. Heilongjiang Environmental Journal, 2018, 31(3): 60-61.
- [43] 刘开云. 基于 KD-Tree 的 KNN 沙尘孤立点监测算法的研究与应用[D]. 开封: 河南大学, 2018.
LIU K Y. Research and Application of KNN Dust Isolated Point Monitoring Algorithm Based on KD-Tree[D]. Kaifeng: Henan University, 2018.
- [44] 马淑红, 张立德, 王远超, 等. 风沙野外监测[J]. 新疆气象, 2002(6): 25-28.
MA S H, ZHANG L D, WANG Y C, et al. Monitoring the Sand Blown by the Wind[J]. Bimonthly of Xinjiang Meteorology, 2002(6): 25-28.
- [45] 刘方伟, 苏庆华, 孙林, 等. 基于 Himawari-8 卫星的沙尘监测[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2018, 37(3): 11-19.
LIU F W, SU Q H, SUN L, et al. Dust Monitoring with the Himawari-8 Satellite[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2018, 37(3): 11-19.
- [46] 丁志豪, 徐文理, 刘子宸, 等. 基于树莓派的智能风沙监测设备[J]. 信息技术与信息化, 2022(9): 173-176.

- DING Z H, XU W L, LIU Z C, et al. Intelligent Sandstorm Monitoring Equipment Based on Raspberry Pie[J]. Information Technology and Informatization, 2022(9): 173-176.
- [47] 张广兴, 李霞. 沙尘暴观测及分级标准研究现状[J]. 中国沙漠, 2003, 23(5): 587-588.
- ZHANG G X, LI X. Research Status of Sand-Dust Storm Observation and Classification Standard[J]. Journal of Desert Research, 2003, 23(5): 587-588.
- [48] 刘克利, 陈廷芝, 冯震, 等. PM_{10} 在沙尘天气观测分级中的应用[J]. 内蒙古气象, 2008(5): 8-9.
- LIU K L, CHEN T Z, FENG Z, et al. The Application of PM_{10} in the Observation and Classification of Sand-Dust Weather[J]. Meteorology Journal of Inner Mongolia, 2008(5): 8-9.
- [49] 中国气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社, 2003.
- The China Meteorological Administration. Specification for Ground Meteorological Observation[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2003.