

基于LIBS技术进行多元素污秽配比定级的检测方法研究

胡 聪, 吴慧峰, 石 俏*, 姜大军, 何文峰

广东电网有限责任公司佛山供电局, 广东 佛山

收稿日期: 2025年7月7日; 录用日期: 2025年8月9日; 发布日期: 2025年9月4日

摘 要

当前电力行业以等值附盐密度(ESDD)和灰密(NSDD)作为绝缘子表面污秽等级的表征参数, 但传统人工污秽配置方法因忽略实际污秽中多元素组成, 导致污秽度评估和污闪机制研究存在缺陷。激光诱导击穿光谱(LIBS)技术虽具备快速分析污秽元素成分的能力, 但现有人工污秽配置方法无法满足LIBS多元素检测需求。为此, 本研究提出基于LIBS技术的多元素污秽配比定级检测方法, 通过混合氯化钠、氯化钾、氯化钙、氯化镁等可溶性盐与高岭土、硅藻土等不溶物制备人工污秽, 并结合等值盐密法与LIBS技术进行验证。实验表明, 该方法可通过调控可溶性盐质量精准控制电导率, 且LIBS技术能快速识别污秽中的镁、钠、钙、钾等可溶性盐组分及铝、硅等不溶性物质, 其检测结果与传统方法一致。该研究为绝缘子污秽等级划分及防污闪策略制定提供了新的多元素检测方案。

关键词

激光诱导击穿光谱, 人工污秽, 多元素分析, 绝缘子污秽等级

Research on the Detection Method for Multi-Element Contamination Ratio Grading Based on LIBS Technology

Cong Hu, Huifeng Wu, Qiao Shi*, Dajun Jiang, Wenfeng He

Foshan Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Foshan Guangdong

Received: Jul. 7th, 2025; accepted: Aug. 9th, 2025; published: Sep. 4th, 2025

Abstract

Currently, the power industry uses equivalent attached salt density (ESDD) and ash density (NSDD)

*通讯作者。

文章引用: 胡聪, 吴慧峰, 石俏, 姜大军, 何文峰. 基于 LIBS 技术进行多元素污秽配比定级的检测方法研究[J]. 仪器与设备, 2025, 13(3): 391-398. DOI: 10.12677/iae.2025.133048

as parameters to characterize the contamination level of insulator surfaces. However, traditional artificial contamination configuration methods ignore the multi-element composition of actual contamination, resulting in deficiencies in contamination assessment and flashover mechanism research. While laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) technology offers the ability to rapidly analyze contamination elemental composition, existing artificial contamination configuration methods cannot meet the requirements of LIBS multi-element detection. Therefore, this study proposes a LIBS-based multi-element contamination ratio classification method. Artificial contamination is prepared by mixing soluble salts (such as sodium chloride, potassium chloride, calcium chloride, and magnesium chloride) with insoluble materials (such as kaolin and diatomaceous earth). The artificial contamination is then validated using the equivalent salt density method and LIBS. Experiments have shown that this method can precisely control conductivity by regulating the mass of soluble salts. LIBS technology can also rapidly identify soluble salt components such as magnesium, sodium, calcium, and potassium, as well as insoluble substances such as aluminum and silicon, in contamination, with results consistent with those of traditional methods. This research provides a new multi-element detection solution for insulator contamination classification and the development of pollution flashover prevention strategies.

Keywords

Laser-Induced Breakdown Spectroscopy, Artificial Contamination, Multi-Element Analysis, Insulator Contamination Classification

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

当前, 电力行业以等值附盐密度(ESDD)和灰密(NSDD)作为绝缘子表面污秽等级的核心表征参数[1]-[3], 其中, ESDD 被定义为污秽溶解液电导率与 NaCl 溶液电导率的等效性数值。对 ESDD 的检测, 行业中普遍采用取样后溶解, 然后实验室进行电导率测量及等效计算的标准化流程进行污秽等级的量化分析。在该实验室分析过程中, 为模拟实际污秽环境, 通常采用 NaCl 模拟可溶性污秽、硅藻土/高岭土模拟不溶性污秽的标准配置方法[4]-[6]。该标准配置方法推动了绝缘子污秽相关研究的发展, 为污闪机理探索、防污闪材料研发等提供了基础研究条件, 是当前行业中普遍采用的标准方法。

然而, 这一标准配置方法在实际应用中逐渐暴露出诸多局限性, 其中最明显的是各类污秽颗粒物在绝缘子表面沉积的化学成分因地域、环境及污染源的不同而存在较大差异, 致使实际环境下绝缘子表面污秽成分往往多种多样, 并不是实验室单一物质可模拟的。而不同地域环境差异巨大, 如在内陆的工业污染区, 化工排放物中含有丰富的钾盐、硫酸盐等多种复杂盐类[7]-[9]; 在农业灌溉区域, 还可能含有氮、磷等元素的可溶性化合物[10][11]。前期相关研究成果显示了不同区域的污秽来源及组成呈现较大的差异性, 如沿海地区污秽以钠盐, 钾盐为主, 工业生产密集区域以钙盐、镁盐、二氧化硅、氧化铝为主, 因此, 在差异明显的情况下, 以氯化钠、高岭土为基底的污秽配置方法, 未充分考虑各种污秽成分电导率影响, 忽略了这些复杂多样的实际成分, 极大地简化了真实的污秽环境, 致使污秽度评估和污闪机制的研究仍然存在缺陷, 防污闪策略的制定缺乏科学依据。因此, 开展多元素来源的污秽配比研究, 针对性地建立符合地域特点的人工污秽样本, 对更好的开展污秽等级的检测意义重大。

激光诱导击穿光谱(LIBS)是一种快速检测元素成分的光谱分析技术, 当前在绝缘子污秽检测领域逐步开始得到关注。利用该技术可以实现对污秽中组成元素进行定性分析, 根据元素的种类判断污染物的

来源, 通过将光谱强度与绝缘子性能(等值盐密, 等值灰密)关联起来, 可以实现对绝缘子表面污秽等级的初步判别, 具备卓越的原位分析能力[12]-[17]。然而, 当前人工污秽的配置方法中只包含单一的氯化钠, 而利用此类人工污秽进行 LIBS 分析时, 与实际污秽的多元素组成相距甚远, 相关人工污秽配置的方法不具备多元素的基本要求。针对上述问题, 本研究致力于探索适用于 LIBS 技术的绝缘子污秽检测方法。结合 LIBS 技术的检测原理与特性, 提出一种多元素配比的人工污秽配置方案。

2. 实验材料与方法

2.1. LIBS 实验装置

本研究使用 Nd:YAG 脉冲激光器为激发源, 波长为 1064 nm, 采用非线性晶体完成倍频转换输出可输出倍频光, 脉冲能量 100 mJ。采用海洋光学 HR2000 多通道光谱仪收集产生等离子体发出的光谱信号, 光谱覆盖范围为 200 nm~800 nm, 分辨率为 0.2 nm。采用脉冲延时器(DG535)控制系统的触发时序, 采用显微聚焦物镜实现对脉冲激光的聚焦(LMH-5X-1064), 在污秽表面获得足够的峰值功率。实验过程中采用多点平均的方式, 实现统计学分析。

2.2. 人工污秽配置

在人工污秽配置过程中, 为更接近地模拟复杂实际污秽组成, 取氯化钠 90.0 g、氯化钾 30.0 g、氯化钙 40.0 g、氯化镁 30.0 g, 将这些可溶性盐置于另一容器中充分混合, 并加入 2.0 L 去离子水, 搅拌至完全溶解, 形成均匀的盐溶液。将高岭土、硅藻土及炭黑混合充分的基底粉末材料 120.0 g 缓慢加入到上述盐溶液中, 同时使用磁力搅拌器进行充分搅拌, 搅拌速度控制在 200 转/分钟, 搅拌时间为 45 分钟, 使可溶性盐充分吸附在不溶物基底颗粒表面, 进而形成均匀的人工污秽悬浮液, 将该人工污秽悬浮液放置在超声波清洗器中, 超声处理 15 分钟, 进一步促进可溶性盐的均匀分布和与不溶物的紧密结合, 将干净的绝缘子浸泡在悬浮液中旋转涂敷, 在实验室标准环境条件下干燥作为人工污秽绝缘子样品, 操作流程示意图如图 1 所示。



Figure 1. Schematic diagram of the artificial contamination process of insulators
图 1. 人工污秽绝缘子染污过程示意图

2.3. 污秽等值盐密法测试

对于上述方法配置成的绝缘子污秽样品, 为了获取真实盐密和灰密值, 采用等值盐密法对其进行检测, 具体操作步骤如下:

- ① 清洗烧杯和漏斗, 烘干备用。

- ② 在烧杯中加入纯净水 250 mL，测试其电导率，记录。
 - ③ 使用取样布在整个绝缘子表面进行擦拭，收集表面的污秽，将取样布展开放入步骤②中的烧杯中，搅拌，将污秽溶解干净，将取样布上的水全部挤出，并从烧杯中取出。
 - ④ 测试污秽液的电导率，记录。
 - ⑤ 对过滤使用的滤纸进行称重，放在漏斗，对污秽液进行过滤操作。
 - ⑥ 过滤完成后，将滤纸取出，平铺在盘子中，放入干燥箱内进行干燥。
 - ⑦ 将烘干好的滤纸取出进行称重，记录。
- 上述操作流程如图 2 所示。

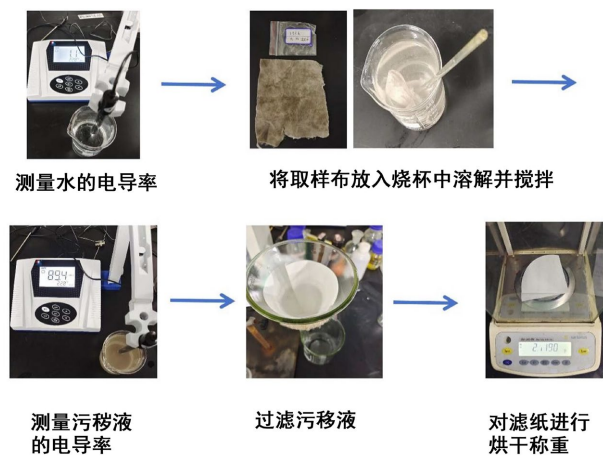


Figure 2. Equivalent salt density method operation flow
图 2. 等值盐密法操作流程

3. 结果与讨论

3.1. 可溶性盐添加质量的电导率变化

在绝缘子污秽分析中，影响电导率的可溶性盐种类多样，常见有氯化钠(NaCl)、氯化钾(KCl)等，不同盐类对电导率影响存在差异。在配置不同比例的人工污秽时，对污秽液进行电导率的测量，结果如图 3 所示，NaCl、KCl 和 CaCl₂ 三种盐类，在 0~12 g 质量变化范围内，电导率随盐质量增加呈现不同增长趋势，两者之间呈现一定的线性增加趋势，在高质量的可溶性盐存在的情况下，电导率数值增长趋势减缓。该部分的实验结果显示，通过在污秽液中加入对应质量的指定盐，即可实现对电导率的调控。因此，明确不同盐类化合物在污秽配置时对电导率的影响规律，进而通过建立 LIBS 光谱数据与污秽盐密的对应关系，为进一步绝缘子污秽检测与研究提供支撑。

3.2. 多元素人工污秽的 LIBS 测试

通过 LIBS 技术对所制备的绝缘子人工污秽样本进行测试分析，结果验证了多元素人工污秽配置方法的有效性与 LIBS 技术检测的可靠性，所配置的污秽元素激发光谱如图 4 所示。实验数据表明，LIBS 技术能够实现对人工污秽样本中可溶性盐组分(镁、钠、钙、钾)及不溶性物质(铝、硅)的快速、精准识别，LIBS 技术可以检测出 Mg、Si、Al、Ca、Na 及 K 元素。所获得的谱线信息有 Mg (II) 279.55 nm, Si (I) 288.15 nm, Ca (I) 422.67 nm, Na (I) 589.59 nm, K (I) 766.31 nm。LIBS 光谱分析结果不仅证实了该配置方法可有效模拟实际污秽的多元素组成，并且凭借 LIBS 技术的多元素分析能力，能获得盐类成分、含量

的信息, 进而分析盐密变化, 在复杂污秽体系下, 通过光谱信息能判断污秽等级及盐密情况, 提供科学检测与分析手段。

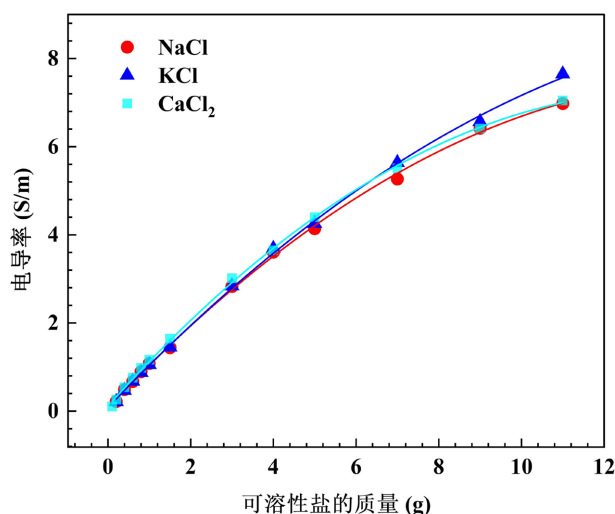


Figure 3. Changes in conductivity of sewage liquid with different soluble salt contents

图 3. 添加不同的可溶性盐质量下污秽液的电导率变化

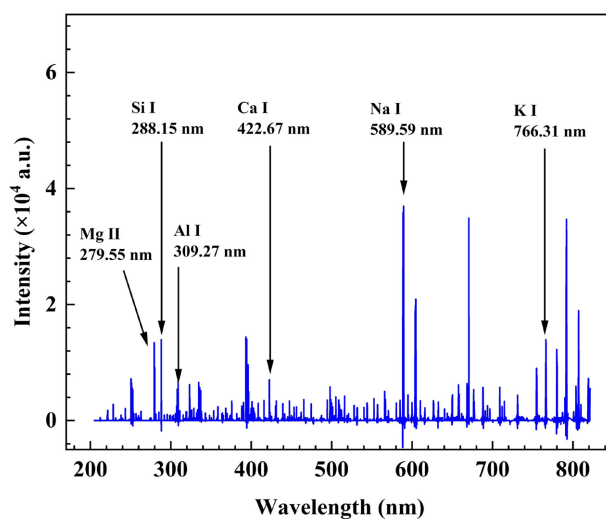


Figure 4. Spectrum of artificial pollution

图 4. 人工污秽光谱图

3.3. 实际污秽的验证

在广东佛山地区采集实际污秽, 利用 LIBS 技术对绝缘子表面污秽进行成分分析时, 通过高能脉冲激光烧蚀污秽层产生等离子体, 同步采集等离子体冷却过程中释放的特征光谱。获得的光谱图中可观察到 Na、Ca、Si、Al、Mg、K 等元素的特征峰。结果如图 5 所示。所激发出的谱线主要有: Mg (II) 279.55 nm, Mg (II) 280.27 nm, Mg (I) 285.21 nm, Si (I) 288.15 nm, Al (I) 308.21 nm, Al (I) 309.27 nm, Ca (II) 393.36 nm, Al (I) 394.40 nm, Al (I) 396.15 nm, Ca (II) 396.84 nm, Ca (I) 422.67 nm, Na (I) 588.99 nm, Na (I) 589.59 nm 以及 K (I) 766.48 nm 的共 14 条发射谱线。对实际污秽所激发的谱线如表 1 所示。

Table 1. Emission lines of major elements
表 1. 主要元素的发射谱线

元素种类	波长(nm)			
Mg (II)	279.55	280.27		
Mg (I)	285.21			
Si (I)	288.15			
Al (I)	308.21	309.27	394.40	396.15
Ca (II)	393.36	396.84		
Ca (I)	422.67			
Na (I)	588.99	589.59		
K (I)	766.48			

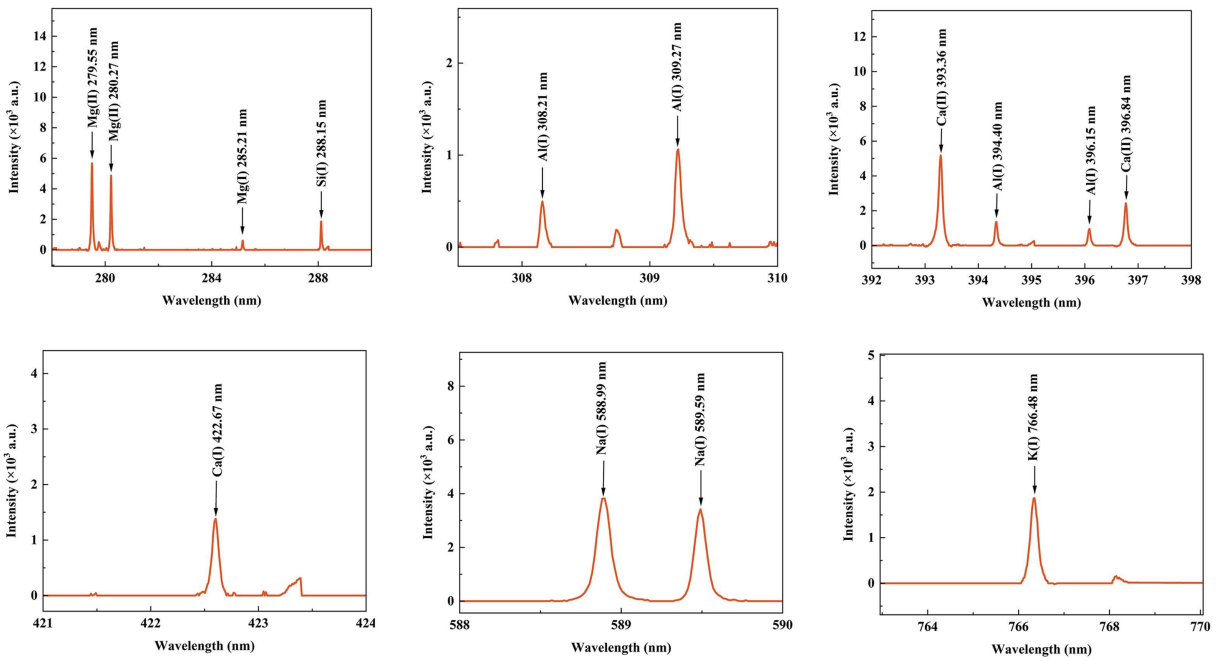


Figure 5. LIBS spectrum of natural pollution
图 5. 自然污秽的 LIBS 光谱

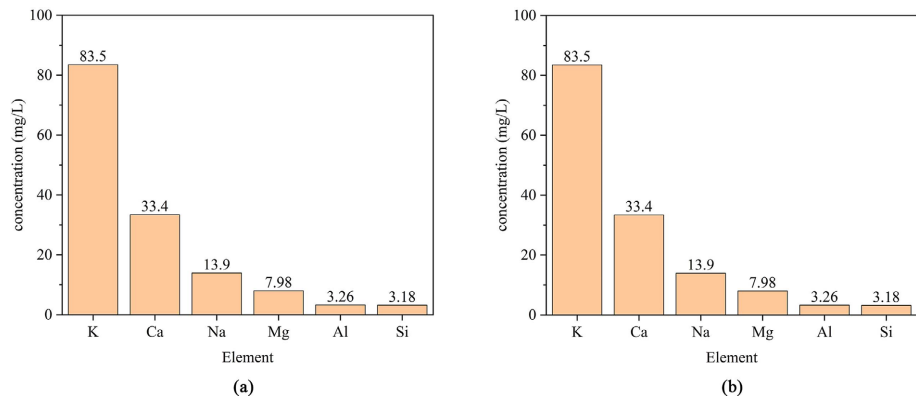


Figure 6. ICP-OES (a) and XRF (b) analysis results of insulator contamination
图 6. 绝缘子污秽 ICP-OES (a)和 XRF (b)的分析结果

进一步地,分别通过 ICP-OES 及 XRF 对实际污秽的溶解液及不溶物进行元素成分及含量的检测,结果如图 6 所示。结果显示,实际污秽中可溶性盐主要以 K, Ca, Na, Mg 为主,而不溶物中的元素主要以 Si, Fe, Al 为主,其中 O 及 C 元素的含量高,说明不溶物多以氧化物或碳酸根组成的化合物为主。将 LIBS 技术对污秽的定性检测得到的元素信息与 ICP-OES 和 XRF 的分析结果进行对比。结果表明,LIBS 技术所获得的元素发射谱线同两种检测技术具有一致性,能够准确检测出多元素污秽样本中的钠、钙、镁、硅、铝、铁等主要元素,与传统分析方法得到的结果吻合。

借助主成分分析方法,对比氯化钠标准污秽及多元素组成污秽在等级分类准确度上的差异,结果如图 7 所示。通过对多元素组成的污秽进行 LIBS 光谱分析,并与常规氯化钠标准污秽进行对比,可以看出多元素污秽在进行不同等级判别分类时,准确度均有提升,其中 d 等级污秽的分类准确度由 85% 提升至 97%。这表面多元素组成的人工污秽样品更符合实际污秽差异性,在利用 LIBS 技术开展污秽等级研究的过程中,采用多元素配比的人工污秽,对方法开发及相关分类模型的建立都有更加积极的作用。

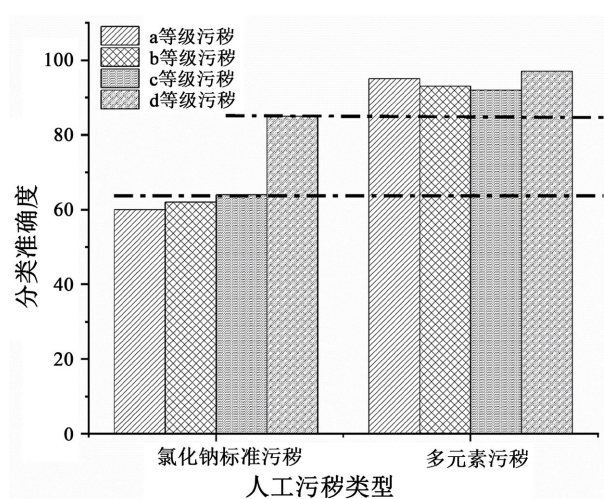


Figure 7. Comparison of pollution classification accuracy of different types of insulators

图 7. 不同类型绝缘子污秽分类准确度对比结果

4. 结论

本研究突破传统单一 NaCl 模拟污秽可溶性盐的局限性,提出多元素(NaCl, KCl, CaCl₂, MgCl₂等)配比的人工污秽配置方案,更贴近实际污秽的多元素组成特征,为 LIBS 技术构建了更具工程代表性的检测样本基础。

LIBS 技术可快速、精准识别污秽中的可溶性盐(Mg, Na, Ca, K)及不溶性物质(Al, Si)的特征光谱,结合电导率与盐密的对应关系,实现了污秽等级与盐密的光谱学判别,检测结果与 ICP-OES、XRF 等方法一致,验证了技术可靠性。

该方法为复杂地域环境下的绝缘子污秽检测提供了多元素分析手段,可通过光谱信息定量评估污秽成分及污染等级,为绝缘子清洗维护和防污闪决策提供关键数据支持,推动污秽检测从“单一盐密表征”向“多元素成分分析”的技术升级。

基金项目

创新科技项目(GDKJXM20230903)资金资助。

参考文献

- [1] 关志成. 绝缘子及输变电设备外绝缘[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [2] 燕宝峰, 车传强, 赵建坤, 等. 绝缘子表面灰密的测量影响因素分析[J]. 电瓷避雷器, 2022(5): 172-177.
- [3] 万康. 浅析输电线路绝缘子污秽监测与防污措施[J]. 机电信息, 2019(35): 97-98.
- [4] 陈吉, 蒋兴良, 陈成瑞, 等. 不同试验方式对绝缘子污闪特性的影响研究[J]. 电瓷避雷器, 2020(6): 241-248.
- [5] 孙瑞筱, 胡玉耀, 蒋兴良, 等. 不同污秽影响下劣化瓷绝缘子发热规律与红外特征分析[J]. 电工技术学报, 2025, 40(11): 3591-3603.
- [6] 敬兴东, 刘灵恺, 黄拥, 等. 不同积污环境下复合绝缘子憎水性影响研究[J]. 大众用电, 2024, 39(4): 34-36.
- [7] 郑建军, 陈浩, 张涛, 等. 蒙西电网典型污秽地区复合绝缘子老化性能研究[J]. 内蒙古电力技术, 2019, 37(5): 33-37.
- [8] 姚磊. 北京地区输电线路绝缘子污秽监测分析与防污措施建议[J]. 电气技术与经济, 2019(3): 38-40.
- [9] 陈磊, 伍弘, 杨粤, 等. 宁夏高污秽地区绝缘子表面污秽的表征与积污特性研究[J]. 电瓷避雷器, 2024(4): 164-172.
- [10] 伍弘, 郝金鹏, 杨凯, 等. 宁夏引黄灌区输电线路绝缘子污秽分析及防污闪运维建议[J]. 绝缘材料, 2022, 55(8): 82-89.
- [11] 王祥祥, 张洪伟, 潘东, 等. 膨胀土地区玻璃绝缘子积污原因分析及防范措施[J]. 农村电气化, 2022(5): 22-25.
- [12] 晋涛, 芦山, 刘星廷, 等. 基于激光诱导击穿光谱的绝缘子污秽度分析[J]. 电力工程技术, 2022, 41(3): 163-170.
- [13] 顾黎强, 钱朝军, 孙明刚, 等. 激光诱导击穿光谱技术在绝缘子污秽快速定量检测中的应用[J]. 绝缘材料, 2024, 57(6): 96-101.
- [14] 芦山, 王希林, 刘星廷, 等. 基于激光诱导击穿光谱的绝缘子污秽自由定标定量分析[J]. 智慧电力, 2021, 49(10): 90-96.
- [15] 王乃啸, 高海翔, 王希林, 等. 基于BP神经网络的绝缘子污秽成分 LIBS 在线检测技术[J]. 广东电力, 2020, 33(9): 49-57.
- [16] 刘文昊, 王楠, 王希林. 激光诱导击穿光谱技术在绝缘子污秽成分分析中的应用研究[J]. 山西电力, 2021(6): 21-24.
- [17] 周志成, 高嵩, 李院生, 等. 基于激光诱导击穿光谱的绝缘子表面污秽研究[J]. 绝缘材料, 2019, 52(4): 70-74.