

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

伍 弘¹, 郝金鹏¹, 杨 凯¹, 房子祎¹, 杨国华²

(1. 国网宁夏电力有限公司电力科学研究院, 宁夏 银川 750011;

2. 宁夏大学 物理与电子电气工程学院, 宁夏 银川 750021)

摘 要:针对宁夏引黄灌区输电线路绝缘子污秽成分不清、受环境影响程度不明等问题,将宁夏引黄灌区环境细分为5类,分别为工业、农业、城镇居民区、荒漠、草场,并取对应环境下的绝缘子污秽样品进行微观形貌、元素含量、晶体成分及阴阳离子成分及含量检测分析,同时对比分析引黄灌区与非灌区绝缘子的积污特性差异。结果表明:引黄灌区土壤成分决定了绝缘子污秽的基础成分;工业、农业环境对污秽微观结构及不同成分含量影响较大,城镇居民区环境次之;引黄灌区绝缘子积污程度明显高于非灌区。为进一步提高宁夏引黄灌区输电线路的运行可靠性,提出了防污闪运维建议,以供相关运维单位参考。

关键词:引黄灌区;输电线路;绝缘子;污秽;防污闪

中图分类号:TM852 文献标志码:A 文章编号:1009-9239(2022)08-0082-08

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2022.08.014

Analysis on Contaminants of Insulators for Transmission Line in Ningxia Yellow River Irrigation Area and Suggestions on Anti-pollution Flashover Operations

WU Hong¹, HAO Jinpeng¹, YANG Kai¹, FANG Ziyi¹, YANG Guohua²

(1. Power Research Institute of State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750011, China;

2. School of Physics and Electronic-Electrical Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: Aiming at the contaminant composition of transmission line insulator in Ningxia Yellow River irrigation area are not clear, and the degree of environmental impact is unknown, we subdivided the environment of Ningxia Yellow River irrigation area into 5 categories: industry, agriculture, urban residential area, desert, and grassland, and insulator contaminants samples in the corresponding environments were taken to conduct microscopic morphology, element content, crystal composition, anion and cation composition and content detection and analysis. Meanwhile, the pollution accumulation characteristics of insulators in irrigated and non-irrigated areas were compared and analyzed. The results show that the soil composition in the Yellow River irrigation area determines the basic composition of insulator contaminants. The industrial and agricultural environment have bigger influence on the micro-structure and different ingredients content of the insulator contaminants, and the urban residential area is followed. The pollution accumulation degree of insulators in irrigated areas was obviously higher than that in non-irrigated areas. In order to further improve the operation reliability of the transmission lines in Ningxia Yellow River irrigation area, some suggestions for anti-pollution flashover operation and maintenance are put forward, which can be use as reference for relate operation and maintenance units.

收稿日期:2022-01-11 修回日期:2022-02-27

基金项目:宁夏回族自治区重点研发计划重点项目(2021BDE931026);国网宁夏电力有限公司科技项目(5229DK20004M)

作者简介:伍弘(1990-),男(汉族),陕西安康人,工程师,主要从事输电线路及外绝缘技术的研究;郝金鹏(1985-),男(汉族),黑龙江尚志人,高级工程师,主要从事高电压与绝缘技术的研究。

Key words: yellow river irrigation area; transmission line; insulator; contaminants; anti-pollution flashover

0 引言

宁夏引黄灌区不仅是宁夏重要的农牧业产区,同时也是重工业厂区的集中地,各类金属冶炼厂、火电厂、氯碱厂等在引黄灌区沿途的各个工业园区内快速发展。这些厂区排放的各类粉尘在自身重力、空气曳力以及电场力的作用下积落到输电线路绝缘子上,严重影响绝缘子的绝缘性能^[1-4]。同时,宁夏引黄灌区地处中温带干旱区,整体气候干旱少雨,水分蒸发强烈,土壤盐渍化问题较严重^[5],富含氯化物、硫酸盐或硫酸盐氯化物的盐渍土在大风条件下也会积落到绝缘子上。而引黄灌区大量的农田因施加化肥产生的富含 K^+ 尘土、人们日常生活中产生的各类细小颗粒类废弃物在一定环境作用下都可能成为影响绝缘子绝缘性能的污秽物质。在相同等值盐密的情况下,绝缘子污秽成分不同,引发污秽闪络的概率不同^[6-9],因此,有必要对宁夏引黄灌区不同环境条件下的输电线路绝缘子污秽成分进行分析,评估不同环境的污秽对输电线路安全运行的影响程度,从而采取针对性的预防措施。

为有效测试和研究输变电设备外绝缘表面的污秽成分,文献[10]采用离子交换色谱法对重庆地区的不同类型绝缘子进行了自然污秽离子成分分析,得出其主要污秽成分为 $CaSO_4$;文献[11]利用离子色谱仪与质谱仪检测了沿海地区输电线路绝缘子的离子成分,得出绝缘子表面污秽与海洋盐雾具有显著相关性;文献[12]通过离子色谱、电感耦合等离子体发射光谱仪和X射线光电子能谱分析等手段分析了复合绝缘子表面污秽的可溶盐及惰性污秽颗粒成分,为评估特殊地区复合绝缘子的积污特性奠定了基础。上述研究对不同环境下的绝缘子污秽成分进行了分析,但大多针对离子成分、元素含量等方面,对污秽整体的微观形貌、晶体成分等研究较少。而污秽的微观形貌不同,除了会造成污秽层吸收水分子的概率差异外,一定程度上也会影响污秽所附着的绝缘子表面电场分布差异,进而影响闪络电压^[13];污秽不溶物的晶体成分不同,其吸水性和保水作用也不同,而环境湿度及吸水作用是不溶物影响绝缘子污闪特性的主要因素^[14]。因此,在研究绝缘子污秽成分的同时对其微观形貌、晶体成分等进行分析研究十分必要。

宁夏引黄灌区因其地理、气候等造就了电力设

备特殊的运行环境。为全面掌握宁夏引黄灌区输电线路绝缘子污秽成分及其分布特点,研究绝缘子在不同环境下的积污规律,从而更好地指导相关单位开展电力设备防污闪运维工作,本文将引黄灌区总体环境细分为5类,对各类典型环境下的输电线路绝缘子污秽进行取样;采用X射线衍射仪、扫描电镜和电子能谱仪测试污秽样品的晶体成分、微观形貌和元素成分,采用原子吸收光谱、离子交换色谱测试污秽样品的离子成分;分析测试结果,总结污秽对环境的影响程度,从而提出针对性的防污闪运维建议。

1 引黄灌区环境分析

宁夏回族自治区全境属于黄河流域,黄河由中卫市南长滩入境到石嘴山市麻黄沟出境,流经宁夏4市10个县区,孕育出有“塞上江南”美誉的宁夏平原。宁夏整体属温带大陆性气候,根据其地理自然环境又可分为北部引黄灌区,中部干旱区和南部山区^[15],其中引黄灌区位于宁夏中北部沿黄河流域,平均海拔约为1 000 m,整体气候干旱少雨、风大沙多,但矿产资源富集、黄河灌溉使其成为宁夏主要的工业、农业和人口聚居区。为明确引黄灌区不同环境对输电线路的影响,首先对其土壤成分、工农业环境及人居环境进行分析。

1.1 土壤成分

宁夏年降水量少,水分蒸发强烈,土壤盐渍化尤为严重。尤其是银川北部地区,盐碱地已占总耕地面积的49%以上。宁夏引黄灌区盐渍化土壤的主要成份为硫酸盐,氯化物次之,硝酸盐、碳酸盐较少;按金属离子划分,以钠盐和钙盐为主,也有少量钾盐和镁盐。宁夏引黄灌区典型盐化土壤含盐量及离子组成情况如图1所示^[5]。由图1可以看出,土壤中的主要离子集中在0~20 cm这一土层(土壤表层)内,随着土层厚度增加,各离子含量明显降低。土层厚度为40 cm以上时,各离子含量基本保持不变;表层土壤中 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 含量较高,根据成分分配比原则,主要由 $CaSO_4$ 和 $NaCl$ 两类盐析出,而当大风或局部地区龙卷风等其他极端天气发生时,土壤表层的这两类盐可能会积落到输电线路绝缘子上。其中 $NaCl$ 颗粒污秽是影响绝缘子绝缘性能的主要物质, $CaSO_4$ 颗粒微溶(不同温度下在水中溶解度不同),是造成污秽度测量值与实际情况偏差

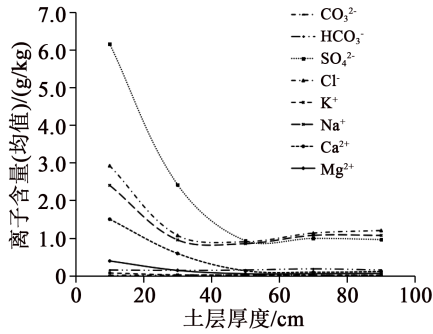


图1 宁夏引黄灌区典型盐化土壤含盐量及离子组成情况
Fig.1 Salt content and ion composition of typical salinized soils in the Yellow River irrigation area of Ningxia

的主要原因^[16-17]。

1.2 工农业环境

宁夏引黄灌区内的中宁县、青铜峡市、灵武市(宁东镇)、贺兰县、平罗县、惠农区是宁夏主要的重工业区,工业产值占全区比重的90%以上。不同的工业类型排放的废气不同,总的来说,其成分包含各类金属单质或金属氧化物,C和SiO₂,含N、S、Cl化合物及其他有机物等。这些物质轻则造成电力设备外绝缘严重积污甚至腐蚀、磨损,重则造成设备污闪跳闸、导线断线等一系列严重事故^[18-19]。

宁夏引黄灌区以全区约1/3的耕地面积生产了3/4的粮食,农业产值占全区的80%以上。但随着灌区农业和农村经济的快速发展,化肥、农药、地膜等农用化学品的大量使用,造成灌区部分农田氨氮、总磷(钾)、化学需氧量等污染物超标^[20]。农田土壤在盐碱化的同时可能还富含铵盐、钾盐等,一旦受天气影响会附着在输电线路绝缘子上,无疑会增加其污秽闪络的可能性。

1.3 人居环境

宁夏引黄灌区是宁夏工农业和经济发展的精华地带,也是主要的人口聚居区。随着城镇化进程加快,不少架空输电线路都进行了入地电缆改造,但仍有不少运行于城镇居民区,不可避免地受到人类生产生活的影响(取暖密集点、垃圾堆等)。同时,随着汽车保有量的不断攀升,大量的汽车尾气(固体悬浮颗粒、碳氢化合物等)在给城市大气环境带来影响的同时,也可能会加重绝缘子积污。

宁夏引黄灌区逆温天气较为频繁,尤其秋冬季节最为严重,而秋冬季节也是各类大气污染物排放量最大的时期,从而造成逆温层持续期间污染物长时间积累且不易扩散,运行于逆温层内的输电线路绝缘子积污速率更快。

宁夏中部干旱带主要以沙漠、戈壁地形为主,南部山区则是以高原、山地地形为主,其土壤成分与引黄灌区有明显不同;工农业产值占比较低的中、南部地区各类重工业厂区数量及机械化耕地面积较少,对环境污染程度低;中、南部地区是传统的经济发展相对较慢地区,人居环境相对简单,与工农业环境交互的复杂程度也较低。因此,在不同的土壤、工农业及人居环境相互作用下,宁夏引黄灌区输电线路外绝缘运维环境与其他地区具有显著差异。通过对宁夏电网近20年发生的输变电设备污闪事故进行分析,发现故障点均位于引黄灌区的几个大型重工业园区附近,而宁夏电网的d、e级污区也主要分布在引黄灌区内。

2 绝缘子污秽取样

参考相关标准^[21-23]及宁夏引黄灌区实际地理环境,将输电线路运行环境分为工业、农业、城镇居民区、荒漠、草场5类,考虑实际检测分析需要,每串绝缘子(测污专用,不带电)取污秽样品不少于5g。现场取样用细毛刷子将绝缘子串上、下表面的污秽刷至干净的A4纸上,再倒入专用样品袋做好标记。细毛刷子和A4纸均一样一换,避免样品交叉污染。

各地区实际取样环境类型及数量如图2所示。由图2可以看出,各地区工业环境和农业环境样品数较多,草场环境样品数最少(石嘴山地区未取到合适的草场环境绝缘子污秽样品),这与引黄灌区产业类型及所在地区地理环境密切相关。

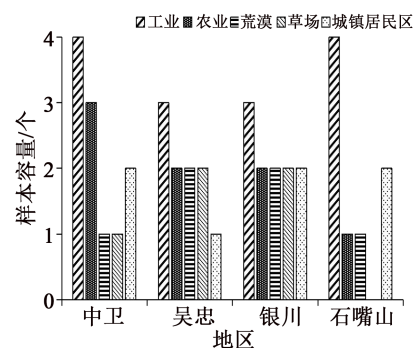


图2 各地区实际取样环境类型及数量
Fig.2 Actual sampling environment type and quantity in each region

3 污秽分析

3.1 微观形貌

通过扫描电子显微镜(SEM)对固体物质的微区形貌特征进行直观、精确、无损的观测分析。取

每组污秽样品 10 mg 做成扫描电镜试品,电子枪施加电压为 30 kV,放大倍数取 200 倍。为使分析结果更具科学性,同步取绝缘子下方的地面土进行对比分析,不同环境下的输电线路绝缘子污秽及地面土典型微观形貌如图 3 所示。

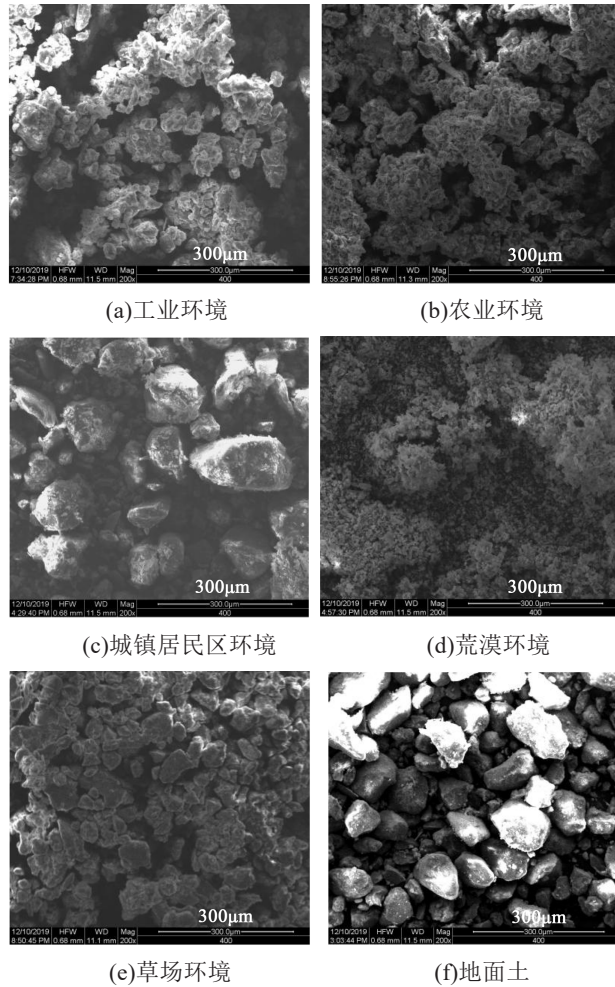


图 3 不同环境下输电线路绝缘子污秽及地面上典型微观形貌

Fig.3 Typical microtopography of insulator contaminants on transmission lines and ground soil in different environments

不同地区相同环境下的绝缘子污秽形貌存在一定差异,其中工业环境污秽颗粒存在较多棱角,且多数存在粘连现象,即小颗粒粘接成大颗粒,大颗粒之间存在较多孔洞(如图 3(a)所示);农业环境的污秽颗粒度较草场环境小,分布也比较分散(如图 3(b)所示);城镇居民区环境的绝缘子污秽更易受道路扬尘影响,污秽颗粒度相对较大(如图 3(c)所示);荒漠环境的污秽颗粒度小,分布较为均匀(如图 3(d)所示),草场环境的绝缘子污秽颗粒度较大且

相对分散(如图 3(e)所示)。地面土虽也受外部环境影响,但主要成分是地面沙土,粒径比一般的绝缘子污秽要大数倍,且颗粒分布较为分散(如图 3(f)所示)。

当污秽颗粒较大且存在较多孔洞时(工业环境),会增大污秽颗粒与外界的接触面积,在湿度相同情况下吸收水分子概率更大,同一盐密值时此类污秽颗粒形成的表面污秽层会具有更大的电导率,闪络电压更低;对于复合绝缘子而言,污秽颗粒之间的孔隙会吸附大量的硅氧烷小分子,从而减少能够迁移到表面的硅氧烷分子数量,进而影响复合绝缘子的憎水迁移性。而当污秽颗粒度较小且相对致密时(荒漠环境),吸水率较低,污秽层表面电导率较小,对硅氧烷分子迁移的影响程度也较弱,从而闪络电压更高。因此,从微观形貌分析,相同条件工业环境下的污秽引起污闪的起始电压相较于其他环境污秽要低。

3.2 元素含量

采用带有能谱仪的 Quanta200 型扫描电镜对微观形貌观察范围内样品表面的元素含量进行检测,可得到不同环境下绝缘子污秽的典型元素含量。考虑不同地区相同环境污秽样品存在的差异性,对相同环境不同污秽样品元素含量检测值进行分析,剔除差异性较大的检测值,将余下样品元素含量求平均值,结果如表 1 所示。

表 1 不同环境下绝缘子污秽典型元素含量

Tab.1 Typical elements content of insulator contaminants in different environments

环境类型	元素含量/%									
	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe
工业	23.87	41.50	1.18	1.11	3.70	10.57	6.29	1.07	7.54	3.18
农业	15.37	45.01	1.34	1.49	4.58	12.99	6.55	1.48	8.06	3.14
荒漠	15.17	44.44	1.30	1.49	5.07	13.69	6.37	1.56	7.61	3.31
草场	15.97	44.43	1.45	1.65	4.40	11.92	6.72	1.41	8.95	3.11
城镇居民区	17.34	43.70	1.35	1.42	5.55	16.12	3.50	1.75	5.86	3.41

由表 1 可知,工业和城镇居民区含 C 化合物含量较高,城镇居民区含 S 化合物含量最少,农业和草场环境含 Ca、S 化合物含量较高。表明绝缘子污秽

在宏观上表现出的成分含量不同,是由各个微小差异不断累积而成的。

3.3 晶体成分

采用 XPert Pro 型 X 射线衍射仪对污秽晶体成分进行分析,每组污秽试品取 50 mg,对试品在 $10^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 的广角物相进行测试。通过与标准衍射谱进行对比,可得到试品的晶体成分。不同环境下绝缘子污秽典型晶体成分如表 2 所示。

表 2 不同环境下绝缘子污秽典型晶体成分

Tab.2 Typical crystal composition of insulator contaminants in different environments

环境类型	主要晶体成分	备注
工业	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}, \text{SiO}_2$	结晶度较低
农业	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}, \text{SiO}_2,$ CaCO_3	结晶度较低
荒漠	SiO_2	衍射峰较少,结晶度较高
草场	SiO_2	衍射峰较少,结晶度较高
城镇居民区	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}, \text{SiO}_2,$ 斜方钙沸石	衍射峰值较高,非晶和晶体结构共同存在
地面土	SiO_2	衍射峰较少,结晶度较高

由表 2 可知,地面土污秽的主要成分为二氧化硅,存在形式为石英晶体,结晶度较高,表明取样点的土壤主要为沙土;绝缘子污秽中也含有二氧化硅晶体,表明地面沙土受风力作用逐渐沉积在绝缘子表面,尤其是荒漠、草场环境下的绝缘子受大风扬尘影响较大,其污秽成分中的二氧化硅含量相较于其他环境要高。城镇居民区环境的绝缘子污秽晶体除二氧化硅外,还含有水合硫酸钙、斜方钙沸石等钙铝氧化物,其衍射峰值较高,表明绝缘子污秽主要来自于城市交通或建筑物粉尘。工业和农业环境下的绝缘子污秽衍射谱含有较多半峰宽较大的峰,表明其结晶度较低,非晶物质含量较多。此外,工业和农业环境下绝缘子污秽的衍射谱中小峰相对较多,表明其晶体结构较复杂,晶体排列较杂乱,存在较多错位和缺陷。由此可知,工业和农业环境下的绝缘子污秽中晶体物质含量相对其他环境较少,且晶体结构稳定性较差,易受外界其他因素影响。如外界潮气或水分较大时,工业和农业环境的绝缘子污秽溶于水后易形成具有较高电导率的溶液,从而增加绝缘子的闪络概率。

3.4 阳离子成分及含量

每组污秽样品取 1 mg,用 10 mL 去离子水溶

解,取上层清液 2 mL,再将溶液稀释至 10 mL,使离子浓度处于标准溶液浓度范围内,采用原子吸收光谱法测试溶液的离子成分浓度。经检测,发现绝缘子污秽主要的阳离子为 $\text{Na}^+, \text{K}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Mg}^{2+}$,因此重点对这 4 种阳离子进行检测分析。考虑不同地区相同环境污秽样品存在的差异性,对相同环境下的不同污秽样品阳离子相对含量进行分析,剔除差异性较大的样品,将余下样品阳离子质量分数求平均值,结果如表 3 所示。

表 3 不同环境下绝缘子污秽典型阳离子相对含量

Tab.3 Typical cation relative content of insulator contaminants in different environments

环境类型	离子质量分数/%			
	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}
工业	59.85	15.68	2.52	21.95
农业	68.28	17.45	2.27	11.99
荒漠	67.23	14.46	3.33	14.98
草场	63.16	16.34	3.06	17.43
城镇居民区	65.64	12.05	3.24	19.07

由表 3 可知,所有污秽样品的 Ca^{2+} 含量较低,这与钙盐普遍溶解度较小有关;所有污秽样品的 Na^+ 含量最高,大部分污秽样品的 Na^+ 相对含量在 50% 以上。其中工业环境下绝缘子污秽中 Na^+ 含量相对其他环境低,但 Mg^{2+} 含量相对其他环境高,表明工业区排放的颗粒污染物中有较多的含镁元素可溶物质;农业环境下绝缘子污秽中 K^+ 含量相对其他环境较高,这与农田土壤含有钾肥等化学肥料有关;其他环境条件下的绝缘子污秽阳离子含量大小无明显差异性,阳离子相对含量从大到小依次为 $\text{Na}^+, \text{Mg}^{2+}, \text{K}^+, \text{Ca}^{2+}$,这与 1.1 节典型盐碱化土壤中的阳离子含量有所不同,表明绝缘子污秽受土壤成分影响程度有限,与所处空间环境密切相关。

3.5 阴离子成分及含量

每组污秽样品取 1 mg,用 10 mL 去离子水溶解,取上层清液 2 mL,再将溶液稀释至 10 mL,将溶液缓慢注入离子色谱仪的流动相中,根据得到的离子色谱分析试品溶液的离子浓度。经检测,发现绝缘子污秽主要的阴离子为 $\text{Cl}^-, \text{NO}_3^-, \text{SO}_4^{2-}, \text{F}^-$,因此重点对这 4 种阴离子进行检测分析。宁夏引黄灌区是宁夏主要的农业和工业产区,工业废气中的氮氧化物、硫化物、氯化物,农业用肥中的氨氮物质等对绝

缘子污秽影响会体现在阴离子上,因此对于部分阴离子含量差异性较大的样品需单独进行分析。检测到的典型阴离子相对含量如表4所示。

表4 不同环境下绝缘子污秽典型阴离子相对含量

Tab.4 Typical anions relative content of insulator contaminants in different environments

环境类型	离子质量分数/%			
	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	F ⁻
工业1(氯碱厂)	9.66	1.35	88.97	0.02
工业2(火电厂)	0.55	1.59	97.27	0.59
工业3(水泥厂)	0.84	7.89	87.99	3.27
农业	6.84	14.43	75.11	3.62
荒漠	0.49	6.73	92.52	0.26
草场	0.90	9.19	88.85	1.05
城镇居民区	2.37	10.74	86.14	0.75

由表4可以看出,不论何种环境,污秽溶液中SO₄²⁻相对含量最高,这与引黄灌区土壤成分特点相一致,表明污秽的主要成分为硫酸盐。工业环境相对复杂,输电线路周边不同的工业类型对绝缘子污秽造成不同的影响:氯碱厂附近的绝缘子污秽中Cl⁻含量较高,这与氯碱厂主要排放含氯废气、废液有关;火电厂附近的绝缘子污秽中SO₄²⁻含量较高,这与火电厂主要排放含硫废气有关;水泥厂的废气中除含有SO₂、CO等常规化工废气外,还有氮氧化物和氟化物,这是其周边绝缘子污秽中NO₃⁻和F⁻含量相对其他工业环境较高的主要原因。农业环境下绝缘子污秽中NO₃⁻含量较高,这与农业区多使用氮肥(多为硝酸盐)有关,其在外界气流作用下随扬尘向空气中扩散,最终不断沉积在附近输电线路绝缘子表面。荒漠和草场环境下污秽中的阴离子含量相差不大,也无明显特异性,城镇居民区环境下污秽中Cl⁻、NO₃⁻含量相对较高,这与城镇居民区受汽车尾气(氮氧化物)及生活污染物影响较大相关。

3.6 积污特性

为分析宁夏引黄灌区与非灌区输电线路绝缘子的积污差异,选择运行于非灌区的±800 kV直流输电线路(段)瓷绝缘子与相同环境下运行于引黄灌区的750 kV交流输电线路(段)的瓷绝缘子进行积污特性分析,所选取样品信息如表5所示。

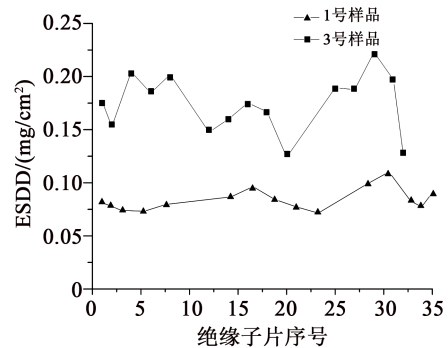
对上述4组样品的等值盐密、灰密进行检测,得到其沿串分布情况(高压侧和低压侧第1片绝缘子

表5 不同绝缘子样品信息

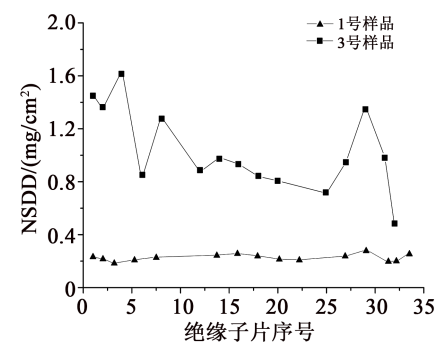
Tab.5 Information on different insulator samples

样品序号	线路及杆塔编号	积污周期	取样位置	周边环境	运行地区
1号	±800 kV 天中线#2687	1年	负极小号侧外侧	草场	非灌区
2号	±800 kV 天中线#2731	1年	负极小号侧外侧	农田	非灌区
3号	750 kV 黄川I线#241	1年	A相小号侧外侧	草场	引黄灌区
4号	750 kV 黄川I线#171	1年	A相小号侧外侧	农田	引黄灌区

不取,高、中、低压侧各取5片进行污秽度测试),1号与3号样品积污情况对比如图4所示,2号与4号样品积污情况进行对比如图5所示。



(a)等值盐密



(b)灰密

图4 相同环境下1号与3号样品积污特性对比情况
Fig.4 Comparison of pollution accumulation characteristics between No.1 and No.3 samples in the same environment

由图4和图5可知,运行于引黄灌区的3号、4号交流线路绝缘子样品,其等值盐密、灰密值(沿瓷绝缘子串分布)大于运行于非灌区相同环境下的1号、

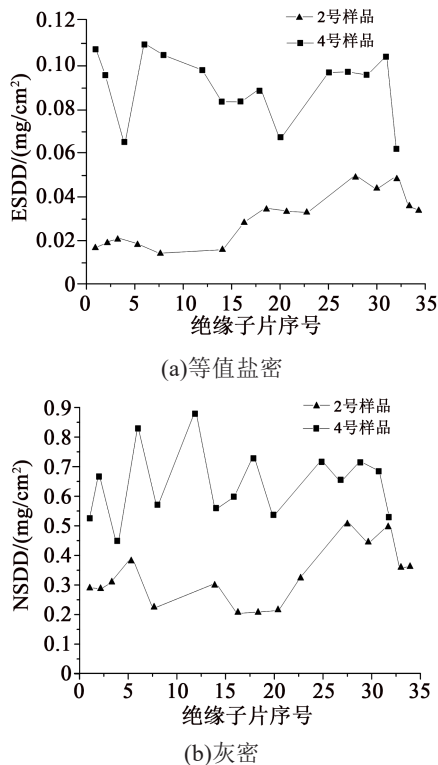


图5 相同环境下2号与4号样品积污特性对比情况

Fig.5 Comparison of pollution accumulation characteristics between No.2 and No.4 samples in the same environment

2号直流线路绝缘子样品。根据已有的研究结果,相同环境下直流输电线路绝缘子的污秽度要高于交流系统^[24],而上述结果与此相反,进一步说明宁夏引黄灌区受土壤条件、工农业及人居环境的交互影响较大,即使线路同在农田或其他类型环境中,这种交互作用也足以使不同线路绝缘子污秽度产生明显差异。

4 防污闪运维建议

通过上述各类检测分析可知,宁夏引黄灌区输电线路绝缘子污秽主要受土壤、工农业环境、人居环境及气候等因素影响,其中土壤成分决定了绝缘子污秽的基础成分,工农业环境使污秽的微观形貌、晶体成分、阴阳离子成分及含量等具有环境特殊性,而人类活动、逆温天气等气候因素则会加剧这种特殊性。此外,积污特性研究表明运行于宁夏引黄灌区的输电线路绝缘子污秽度明显大于非灌区。为进一步提升引黄灌区输电线路运行可靠性,杜绝污秽闪络故障,结合第3节的污秽分析结果,特提出以下防污闪运维建议:

(1)工业和农业环境下绝缘子所积累的污秽颗粒度较大,晶体结晶度低,除 Na^+ 、 Ca^{2+} 外的金属离子、特征阴离子含量高,在潮湿环境或小雨等天气时易形成连续性强、电导率高的污秽溶液。建议对运行于工业、农业环境下的输电线路采取增大绝缘子爬电比距或更换为防污闪能力更强的复合绝缘子或外伞型瓷绝缘子。

(2)对运行于特殊工业地区,如氯碱厂、水泥厂等地的输变电设备,因 Cl^- 、 F^- 可能与RTV发生化学反应,不宜采取喷涂RTV的方式来防污闪。

(3)对重工业高污秽地区的绝缘子采取一般的清扫措施效果不佳,可采用纯水(电导率 $<10 \mu\text{s}/\text{cm}$)、干冰或专门针对工业环境下污秽的清洗剂对绝缘子进行冲洗。如采用表面活性剂、渗透剂和有机羧酸盐等成分组成的清洗剂,可络合溶解绝缘子污秽中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{3+} 等金属离子。

(4)加强绝缘子污秽检测及在线监测。定期或在必要时(如尘卷风、沙尘暴、极端大风等恶劣天气发生时)对绝缘子污秽进行现场污秽度测量及成分检测,如发现污秽度短期内快速升高或污秽成分异常时应立即采取防范措施;安装污秽在线监测装置(如绝缘子泄漏电流在线监测、污秽高光谱成像监测等)实时监测输电线路绝缘子积污情况,如有异常应及时处置。

5 结论

防污闪是输电线路运维保障的重要方向之一,尤其在宁夏引黄灌区,输电线路受各类高污染企业排放的颗粒型废弃物影响严重,加之频繁受大风沙尘天气影响,绝缘子积污速度更快、程度更重,总体防污闪形势严峻。通过对宁夏引黄灌区输电线路绝缘子污秽成分分析,得出污秽的物质组成和成分特点,从而为污秽溯源、污秽针对性防治奠定了基础。

参考文献:

- [1] 薛兵,牟霖,袁小清,等.双伞瓷绝缘子表面冶金污秽的积污特性及成分研究[J].绝缘材料,2019,52(4):75-80.
- [2] 刘世涛,李秀广,李焕友,等.高污秽度环境中绝缘子积污特性研究[J].绝缘材料,2019,52(1):63-67.
- [3] 毕晓甜,高嵩,刘洋,等.一起重金属粉尘地区复合绝缘子闪络故障分析[J].电瓷避雷器,2020(4):221-227.
- [4] 袁超,唐梦颖,赵凯强,等.可溶物成分对XWP₂-70绝缘子串污秽特性的影响[J].高压电器,2016,52(3):118-122.
- [5] 樊丽琴,杨建国,许兴,等.宁夏引黄灌区盐化土壤盐分特征与相

- 关性分析[J]. 中国土壤与肥料,2012(6):17-23.
- [6] 蒋兴良,李鑫,张东东,等. 可溶性污秽成分对绝缘子交流闪络特性的影响[J]. 高电压技术,2015,41(6):1915-1920.
- [7] 高嵩,刘洋,高超,等. 不同可溶盐成分下的沿面电弧放电特性研究[J]. 电瓷避雷器,2019(6):187-191.
- [8] LAN L, ZHANG G D, WANG Y, et al. The influence of natural contamination on pollution flashover voltage waveform of porcelain insulators in heavily polluted area[J]. IEEE Access, 2019, 7: 121395-121406.
- [9] 王思华,王军军,赵磊,等. 污秽成分对复合绝缘子表面电场的影响[J]. 中国电力,2021,54(7):149-157.
- [10] 黄青丹,杨忠毅,宋浩永,等. 不同材料绝缘子表面的自然污秽成分测量与离子配对分析[J]. 高电压技术,2016,42(12):3917-3923.
- [11] 廖一帆,杨宇轩,张福增,等. 南方电网沿海绝缘子积污成分与海洋盐雾及附近污染源的关联性[J]. 电瓷避雷器,2018(5):191-196.
- [12] 邵仕超,毕晓甜,李明哲,等. 特殊工业粉尘地区复合绝缘子自然积污特性研究[J]. 电力工程技术,2021,40(1):138-141.
- [13] 范超. 绝缘表面污秽颗粒积聚特性及其对闪络电压影响的研究[D]. 成都:西南交通大学,2020.
- [14] 王远东,史文江,杨忠毅,等. 典型不溶污秽染污绝缘子在不同环境湿度下的吸水和闪络特性研究[J]. 绝缘材料,2021,54(5):92-97.
- [15] 中国天气网宁夏站. 宁夏气候概况[EB/OL]. (2010-06-30) [2022-02-25]. <http://nx.weather.com.cn/nxqh/qhgw/06/646177.shtml>.
- [16] 王思华,刘阳. 考虑CaSO₄溶解度的绝缘子闪络电压修正研究[J]. 铁道工程学报,2020,37(7):89-94.
- [17] HUANG D C, XIONG Z T, RUAN J J, et al. Influence of CaSO₄ content in contamination on the leakage current characteristics of porcelain insulator string [C]//2015 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Ann Arbor, USA:IEEE,2015.
- [18] 丰强,匡红刚,田勇,等. 化工污秽区变电站支柱绝缘子带电清洗试验及沿面电场分析研究[J]. 绝缘材料,2019,52(1):78-83.
- [19] 陈保安,徐中凯,郑薇,等. 架空输电导线的腐蚀与防护[J]. 腐蚀与防护,2021,42(5):54-58.
- [20] 潘自林,王永平,鲍子云. 宁夏引黄灌区农田退水现状及治污技术模式研究[J]. 宁夏工程技术,2020,19(4):314-318.
- [21] 全国绝缘子标准化委员会. 污秽条件下使用的高压绝缘子的选择和尺寸确定 第2部分:交流系统用瓷和玻璃绝缘子:GB/T 26218.2—2010[S]. 北京:中国标准出版社,2010.
- [22] 电力行业绝缘子标准化技术委员会. 现场污秽度测量及评定 第3部分:污秽成分测定方法:DL/T 1884.3—2018[S]. 北京:中国电力出版社,2018.
- [23] 电力行业绝缘子标准化技术委员会. 电力系统污区分布图绘制方法 第1部分:交流系统:DL/T 374.1—2019[S]. 北京:中国电力出版社,2019.
- [24] 刘辉,孙家祥,沈庆河,等. ±660kV 银东线瓷绝缘子的积污特性研究[J]. 绝缘材料,2017,50(11):63-68.