

常蕊,周宁,王欣雯,等. 2016. 河南电网“污闪”故障的综合气象因素分析. 气象, 42(11):1387-1394.

河南电网“污闪”故障的综合气象因素分析^{* 1}

常蕊¹ 周宁² 王欣雯¹ 郭鹏¹ 宋丽莉¹ 梁允²

¹ 中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081

² 国家电网河南省电力公司电力科学研究院, 郑州 450052

提 要: 综合考虑河南省范围内电网污闪故障的时空分布特征及地理地貌特征, 利用河南省电网污闪故障数据及地面气象观测数据, 研究首先确定了与该地区电网污闪故障密切相关的积污持续时间、近地层逆温、相对湿度、风速风向等环境气象特征参数, 然后采用时空匹配、统计阈值分析和综合气象指标调整优化等手段, 对各特征参数的综合阈值进行了初步评定, 最终建立了河南省电网污闪故障的可量化综合气象分析指标及对应气象条件: 高湿、弱风、前期少雨、近地面大气层结稳定。该指标较好地拟合了气象环境条件与污闪故障之间的关系, 检验结果显示指标无漏报, 且空报率低于 10%; 基于该指标计算的多年平均条件下, 河南地区污闪故障多发生在冬季, 且河南东北部为电网污闪故障高发区。研究成果为河南地区的电网污闪故障防御提供了技术支持。

关键词: 电网污闪, 综合气象因素, 风险

中图分类号: P49

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.11.011

Analysis of the Integrated Meteorological Factors of Power Equipment Pollution Flashover in Henan

CHANG Rui¹ ZHOU Ning² WANG Xinwen¹ GUO Peng¹ SONG Lili¹ LIANG Yun²

¹ Public Meteorological Service Centre, CMA, Beijing 100081

² State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052

Abstract: According to the spatio-temporal distribution characteristics of the power equipment pollution flashover and the geographic features in Henan, duration of the contamination, temperature inversion near the ground surface, relative humidity and wind are firstly identified as import contributions to pollution flashover disaster. Then the composite thresholds of these factors are respectively assessed using the methods of spatio-temporal matching, statistical analysis of threshold and model based on the flashover hazard data and meteorological observations. The comprehensive meteorological model for pollution flashover established here considers well the atmospheric conditions that breed the disaster, including high humidity, weak wind, less rain in the early period and stable atmospheric stratification near the surface. The model established here fits the relationship between the meteorological environmental conditions and the pollution flashover events well. The validation results indicate that the model can capture the disaster events with the false alarm rate less than 10%. The spatio-temporal characteristics of the annual mean power flashover events calculated from the 30-year historical observations show high frequency over the northeast of Henan during wintertime. Thus, the findings in this paper would provide a scientific support for the early warning of power equipment pollution flashover in this region.

Key words: power equipment pollution flashover, composite meteorological factors, risk

* 国家电网公司重大基础前瞻科技项目(SG20141187)资助

2016 年 3 月 1 日收稿; 2016 年 7 月 17 日收修定稿

第一作者: 常蕊, 主要从事可再生能源及电网灾害事件的评估和预报方法研究. Email: changrui@cma.gov.cn

引 言

电网“污闪”故障是输电线路上的绝缘子或电站外绝缘上面,由于空气中的污染物使绝缘子积污,当气象条件适宜时,输电线路便不断发生“闪络跳闸”,从而造成大面积停电或击坏电器设备等的事故。尽管研究发现污闪故障发生的每一个阶段都与气象因素密切相关(刁平等,2002;高航,2001;李伟,1984;董新胜等,2005),但已有的研究主要集中在从电磁学的角度讨论气象要素(如雾-霾等)对空间间隙绝缘水平、复合绝缘子绝缘水平和电磁环境等的影响过程,论证了雾霾天气的持续时间、湿度、温度、颗粒物浓度、粒径、酸碱性等对电网线路的影响较明显(邓鹤鸣等,2009;谷琛等,2011)。

大量的污闪故障表明,电网污闪故障实质是一种与电、热、化学因素有关的污秽表面气体电离及局部电弧发展的热平衡过程(李东,2006),该类故障的发生与绝缘装置的类型、绝缘配置比距、劣质绝缘子的应用、绝缘子运行维护水平等电网设备本身的设计、建设和维护等有密切关系(刘智勇等,2001),同时需要一定的气象条件配合,才会出现污闪跳闸事故(刘其顺等,1997;王运禄等,2003;Ghosh et al, 1995;Ahmad et al,2002;Guan et al,1996;刘平原等,2008)。因此,从气象学的角度研究气象条件与电网污闪的关系逐渐成为交叉学科发展及防灾减灾应用的重要内容之一。

根据不同的气象条件,我国的污闪事故大致可以分干燥少雨污秽闪络型、近海重污地区污闪型和潮湿多雨地区污闪型三类,而研究中关注的河南省电网污闪类型属于干燥少雨污秽闪络型,这类污闪有它自身的规律性:90%以上的污闪事故发生在秋季的后期或冬季,即11—3月,其主要原因是这个季节降水以微量过程为主,浓雾发生频率高;冬季污源增加,造成长时间污秽积累。污闪事故多发生在夜间和凌晨,即00—07时,此时相对湿度较大,是浓雾和微量降水的多发时段(王运禄等,2003;王正旺等,2005;陈祺等,2012)。

如前文所述,电网污闪故障与气象条件有着密切复杂的联系,致灾机理比较复杂。如绝缘表面的湿润成灾机理,湿润强度从最小值逐渐增加时,积污层的受潮程度和电导率逐渐增大,引起闪络电压降低(易导致闪络跳闸);但当湿润强度到达临界值后,

继续增加湿润强度时,电导率不会再增大,反而会出现污秽物被冲洗的现象。因此,致灾气象临界值的研究成为关键。

20世纪末以来,致力于满足防灾减灾的实际需求,相关学者从气象要素与电网灾害关联关系的角度出发,开展了大量的研究工作(陈百炼等,2014;甘露等,2012;付桂琴等,2012;夏智宏等,2012;温华洋等,2011;吴素良等,2010;顾骏强等,2010;庞文保等,2012),其中诱发电力污闪事故的气象条件综合判别指标成为研究热点之一。研究首先指出,电网污闪形成的气象条件首先是要有一定的积污期,使得绝缘子表面的积污,即污闪事故前长时间累计雨量较小(刁平等,2002;袁贵中等,2011)。而诱发盆地电网污闪的气象因子是雾、雾和雨、雾和毛毛雨等,其中以雾为主要气象因子(王运禄,1998)。初步统计结果表明,全国大多数污闪是由污闪雾引发的,其中北方地区污闪雾引发的污闪故障占总数的99%(王运禄等,2003)。利用乌鲁木齐市1989—2000年的污闪和气象资料,刁平等(2002)初步建立了年污闪次数与年降水量和年平均气温的回归模型;普查广东地区污闪事故的气象要素发现累计30、40和60d雨量小于10mm是发生污闪的前提条件,污闪前1~3d以下气象要素为诱发条件:地面有轻雾、雾或浓雾,平均相对湿度高于80%,平均气温18~20℃,温度在10~24℃之间(袁贵中等,2011);大量收集1961—2003年电网污闪、大气污染资料和气象资料后,王运禄等(2003)发现污闪前,低空大气层结期稳定日数多,降水少,有积污产生,北方地区代表站污闪日和前的60d内无降水日数可达45~57d;诱发污闪的气象因子有污闪雾(浓度特大、含水量多、出现时能见度 ≤ 5 m、一般持续时间在10h以上)、小雨和毛毛雨等,同时指出高湿(污闪日的日平均值72%~97%,污闪时91%~98%,污闪前6h91%~98%)、小风(污闪日0.5~1.5m·s⁻¹,前3d0.5~2.3m·s⁻¹,污闪时和前6h的风速0.0~2.0m·s⁻¹)、低空逆温(污闪日和前1~3d低空逆温层厚度100m以上)、无降水是污闪雾生成的最佳条件;王正旺等(2005)基于1980—2003年长治市发生的26次严重电力污闪事故数据,初步给出了长治地区污闪事故发生的气象条件综合判别指标及事故发生的可能性分级预测标准。综上所述,已有的研究从气象学的角度勾勒了污闪事故发生的气象条件轮廓,对进一步开展这方面的深入

研究奠定了坚实的基础。但研究未针对河南地区电网污闪事故的局地气象条件建立量化的综合气象指标。因此,有必要基于河南局地电网污闪相关资料,开展具有地区针对性的污闪综合气象模型研究。

如前文所述,导致电网污闪故障发生的要素比较复杂,不仅与其自身的抗污闪性能有关,还与外部环境下积聚的污秽程度有关。本文仅以地面气象要素为研究对象,通过河南省有限的污闪故障历史数据及地面气象观测数据的综合统计分析,建立河南省电力污闪事件的定量综合气象分析指标,为该地区面向电力生产的电网防灾减灾服务提供技术支持。

1 资料来源和研究方法

1.1 资料来源

本文所使用的河南省电力公司收集的 2001 和 2006 年的电力污闪灾害事件相关资料的基本概况如下:

(1)2001 年第一季度,由于气象条件恶劣,持续出现冻雨、冰雪和浓雾,造成了河南省电网输电线路大面积的跳闸,比较集中的有 1 月 16—26 日、2 月 9—10 日、21—22 日三个阶段。2001 年第一季度由此引起的事故共造成 110 kV 及以上 67 条线路跳闸 201 次,220 kV 及以上变电站跳闸 13 次,电量损失 66.027 万 kW 时。

(2)2006 年 1 月 28 日以来,河南省大部分地区多次发生罕见浓雾天气。1 月 28 日至 2 月 12 日,河南电网 500 kV 4 条线路跳闸 17 条次,其中 15 次重合成功,2 次重合不成功;2 月 12—14 日期间,牡丹变、仓颉变和郑州变 3 座 500 kV 变电站 500 kV 母线停运。

2001 年之前,河南省电力公司未分类收集相应的电网污闪灾害数据,而 2006 年起电网公司陆续对河南电网重点地段、区域,采取涂抹防污闪材料、增加绝缘子片数、更换复合绝缘子、更换防污绝缘子、加装绝缘子辅助伞裙、缩短绝缘子清扫间隔等手段,提高设备绝缘水平,有效降低电网设备污闪事件的发生。因此,自 2006 年以后,河南电网范围内未收集到相关污闪故障。由此可见,研究中收集到的上述两年的污闪故障资料是在河南省范围内非常宝贵且有限的可用资料集,该资料包括,包括 2001 和

2006 年污闪发生的位置、时间等,资料具体情况见图 1 和表 1。

同时,研究中使用了覆盖河南全省的 121 个国家自动气象站近 30 年(1985—2014 年)定时地面观测资料(包括气温、湿度、风速、风向和降水量等)及同时段的探空气象观测资料,该资料来源于国家气象信息中心。上述自动气象观测站的观测仪器配置、设备安装和维护、仪器校准、数据记录和传输等须遵照《地面气象观测规范》中所列要求进行;观测资料按照 QX/T118-2010(地面气象观测资料质量控制)中的规定进行了严格质量控制。

由于缺乏污闪故障发生地所在位置的气象观测资料,研究中选择距离污闪发生位置较近且海拔高度相近的自动气象站的地面气象观测资料作为定量综合气象分析指标研究的基础,污闪发生地与邻近气象站的对应信息如图 1 和表 1 所示。



图 1 河南省历史污闪故障分布图
(蓝色三角型,来自 Google-earth)

Fig. 1 Distribution of the historical power equipment pollution flashover in Henan (blue triangle)

1.2 研究方法概述

当故障数据样本量足够大时,可采用智能模糊学习方法实现对温度、湿度、雨、风速及气压等综合作用下的污秽闪络电压进行拟合建模(张寒等,2003;杨庆等,2005)。而本研究收集到的污闪故障数据有限,这里结合文献调研资料,主要采取统计分析法同时兼顾电网污闪故障发生的气象环境机理来提取特征参数;在特征参数临界值的选择方面,综合采用故障直方图和百分位法将电网污闪故障事件与气象特征指标关联起来。具体分析中,延续王正旺等(2005)的研究成果,即统计综合分析电网污闪发生前和发生时各类气象要素的阈值变化特征,确定污闪事件发生的综合阈值指标,并通过历史资料的回算检验,对上述指标进行优化调整,最终得到河南

表 1 河南省污闪故障及其对应的地面气象观测综合信息表

Table 1 Overviews of the historical power equipment pollution flashover and the meteorological stations near the pollution flashover points

污闪事件发生时间/年.月.日	污闪发生位置/ $^{\circ}\text{N},^{\circ}\text{E}$	海拔高度/m	附近气象站	海拔高度/m	气象站距污闪发生地的距离/km
2001.1.24	34.6539,113.5155	175	57083(郑州)	110	15.0
2001.2.9	35.1208,113.0531	118	53979(博爱)	120	2.8
2006.1.28	35.1433,113.5275	80	53984(修武)	83	6.8
2006.1.28	34.7273,113.3282	200	57081(荥阳)	140	5.0
2006.1.28	34.7322,112.9855	170	57080(巩义)	165	1.5
2006.1.28	34.6588,114.2664	73	57091(开封)	74	9.8
2006.1.28	34.6616,114.2820	78	57083(郑州)	110	50
2006.2.12	34.6473,113.6622	128	57083(郑州)	110	2.0
2006.2.12	35.2057,113.5325	83	53984(修武)	83	7.1
2006.2.12	34.8334,112.3302	330	57071(孟津)	333	11.5

电网污闪发生的定量综合气象分析指标,研究技术流程如图 2 所示。

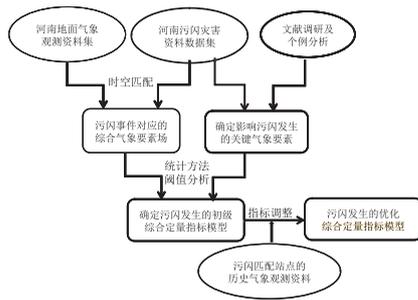


图 2 河南电网污闪综合气象要素分析技术流程图

Fig. 2 Technical process of the integrated meteorological factors of power equipment pollution flashover in Henan

2 电网污闪故障综合气象要素分析

2.1 历史污闪故障及附近自动气象站资料情况分析

图 1 和表 1 给出了研究中收集到的河南省历史污闪故障情况,由该资料分析可见,河南地区污闪故障主要发生在中北部地区,该地区三面环山,污染物易累积;同时,该地区污闪发生的时间主要集中在 1—2 月期间,气温较低、浓雾易发、且春节期间燃放烟花易加重污染程度。

如前文所述,由于缺乏电网污闪事故发生地所在位置的气象观测资料,研究中将收集到的河南省电网污闪灾害事件发生时间、地点与附近气象站进

行时空匹配,挑选距离污闪事件发生位置较近(一般不超过 15 km),且海拔高度接近的气象站地面观测资料作为电网污闪综合气象分析指标研究的基础,对该地区电网污闪故障发生的地面气象条件进行综合统计分析。

2.2 污闪故障发生的综合气象条件分析

研究结合电网公司和气象观测台站能够提供数据的实际情况,选择表 1 中 10 个不同时间(位置)的地面气象站定时观测资料,主要采取统计分析法同时兼顾电网污闪故障发生的气象环境机理来提取特征参数,即通过前期降水量分析积污特征;通过湿度、风速、气温和近地层逆温等气象参数分析电网污闪发生时的综合气象条件特征。尽管研究中收集到的污闪个例非常有限,但基于此类个例刻画的污闪-气象关联模型仍在一定程度上具有代表性,也可在后续的应用实践中不断优化完善。

2.2.1 前期积污特征

图 3 通过故障直方图给出了 10 个不同时间(位置)的气象站资料统计分析的污闪发生前期日降水量的变化特征。图中可见,污闪故障发生前一周基本无降水,且无显著大风过程(图略),利于污染物的累积,尤其在冬季,积污效率更高。

2.2.2 污闪发生时的小时风速风向特征

图 4 给出了污闪发生时小时风速的变化特征。由该故障直方图可见污闪发生时,小时平均风速较弱,一般低于 $2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,最大不超过 $3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;且当弱风速介于 $2.0 \sim 3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间时,其风向为偏东南风(图略),与该地区的西边和北边的高山地形相结合,利于污染物在低空积聚,为污闪雾的形

成提供了大量的凝结核,低空空气能均匀混合,利于污闪雾的形成,使其不至于因风大而被吹散,对污闪故障的发生有正效应。

同时,如表 1 所示,57071(孟津)气象站所在海拔高度为 333 m,而其他站点海拔基本低于 140 m,在此个例事件中,污闪发生时平均风速比其他站点

的风速偏高约 $1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右(图 4)。

2.2.3 污闪发生时的平均气温和相对湿度特征

如前文所述,本研究中收集到的污闪故障集中发生在冬季,气温曲线图也显示污闪发生时,气温低且波动较小(图 5a);同时,分析表明污闪发生时,近地层大气相对湿度较大,一般高于 90%(图 5b)。持

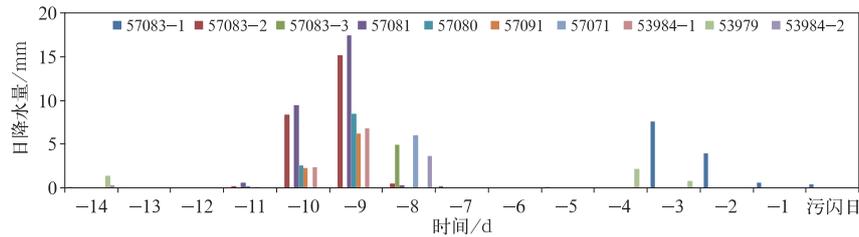


图 3 河南省历史污闪故障发生前期日降水量的特征

Fig. 3 Daily precipitation features in the 14 days before the occurrence of pollution flashover in Henan

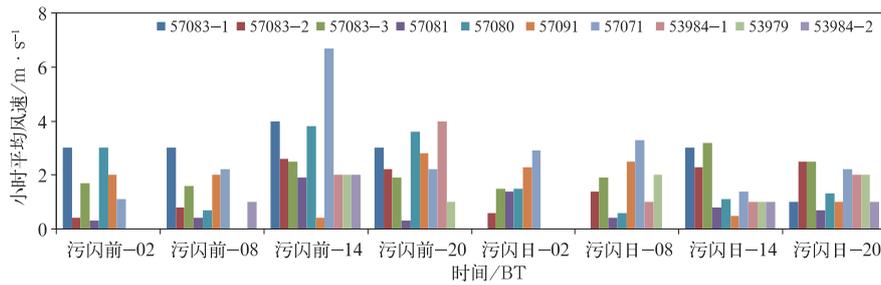


图 4 河南省历史污闪故障发生时的逐时风速特征

Fig. 4 Hourly wind speed during the day with the occurrence pollution flashover in Henan

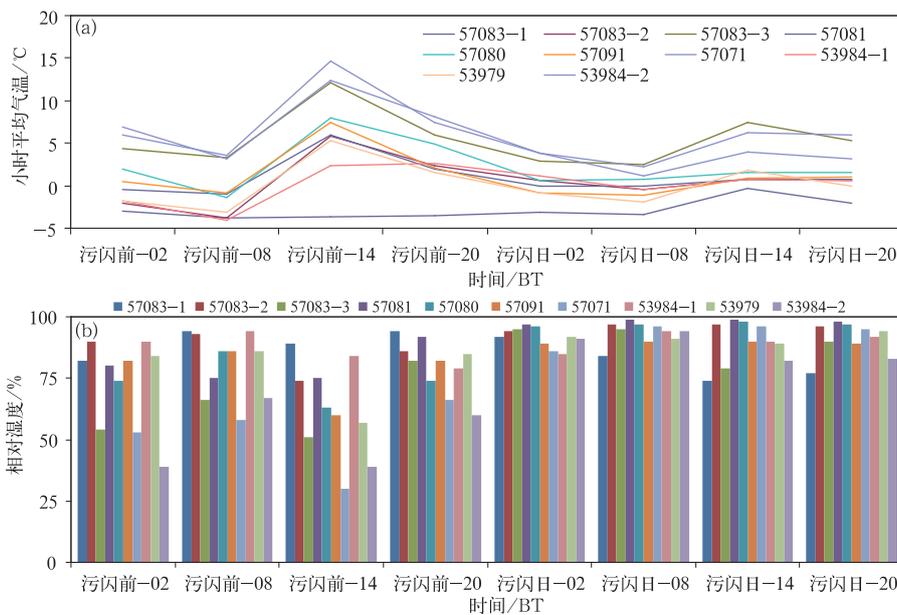


图 5 河南省历史污闪故障发生时的平均气温(a)和相对湿度(b)特征

Fig. 5 Hourly temperature (a) and relative humidity (b) during the day before and the day with the occurrence of pollution flashover in Henan

续低气温及高湿度,有利于水汽凝结成含水量较大的污闪雾。

2.2.4 污闪发生时近地层逆温特征

利用污闪发生时附近探空气象站的高空观测资料,给出了污闪发生时气温的垂直变化曲线(图 6)。图中可见,污闪故障发生时,低空 850 hPa 以下存在明显的逆温层,即高层暖,底层冷,大气状态静稳。逆温层的作用是利于水汽和污染物积聚在近地层,为污闪雾的形成和持续提供了有利条件。

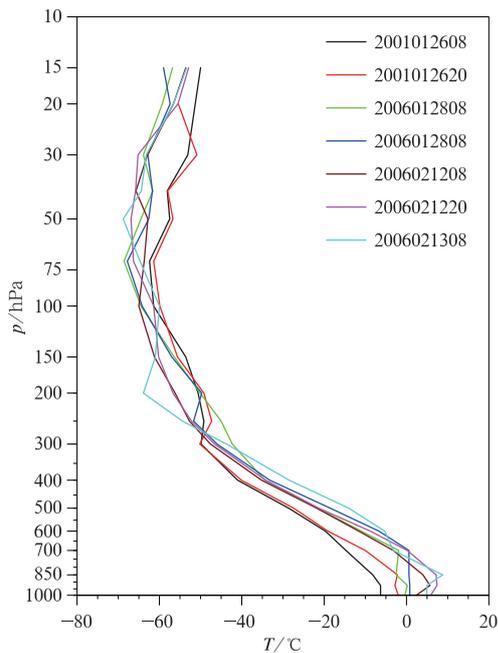


图 6 河南省历史污闪故障发生时的气温垂直变化特征

Fig. 6 Vertical variation of temperatures during the day with the occurrence of pollution flashover in Henan

2.2.5 电网污闪灾害综合气象指标的建立及检验

基于已有污闪故障资料的综合分析可见,河南地区污闪故障发生的综合气象条件有如下几个显著特征:高湿、弱风、前期少雨、气温接近 0°C、天气静稳。为定量描述这一综合气象特征,以期达到电网防灾减灾的最终目标,研究综合上述故障直方图的峰谷值及有限样本百分位法,首先给出各气象要素的初猜临界值;利用该初猜临界值构成的综合分析指标和 2001、2006 年两年的地面气象观测资料进行反复回算,对初猜临界值进行调整优化,在不漏报的前提下,使得污闪故障的空报率限制在工程可接受范围内,最终得到表 2 所示的最优气象综合分析指标。

这里需要指出,表 2 中的综合分析指标以电网污闪故障是否发生为预报目标,不涉及污闪故障的强度分析,因此预报结果仅存在准确、空报和漏报三种情况。图 7 给出了基于上述综合分析指标回算的 2001 和 2006 年污闪故障与电网实际收集到的污闪故障的对比检验结果,图中圆点大小代表空报率的大小。可见,表 2 中的综合分析指标对该地区污闪故障的空报率不超过 10%,即 100 次回算中的空报次数不超过 10 次;尤其在河南西北部实际污闪故障高发地区的空报率甚至低于 5% (图 7)。这里的空

表 2 河南省电网污闪故障发生的地面气象综合分析指标
Table 2 Integrated meteorological factors of power equipment pollution flashover in Henan

要素	临界值或定量指标
前期降水	污闪前 7 天连续无降水
风速风向	平均风速 $< 2.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 或 $2.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ $< \text{风速} < 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,偏东风
相对湿度	$> 90\%$
地面气温	$-4 \sim 4^\circ\text{C}$,且平原变温 $> 0.7^\circ\text{C}$,山区变温 $> 2.0^\circ\text{C}$
气温垂直变化	850 hPa 以下存在逆温

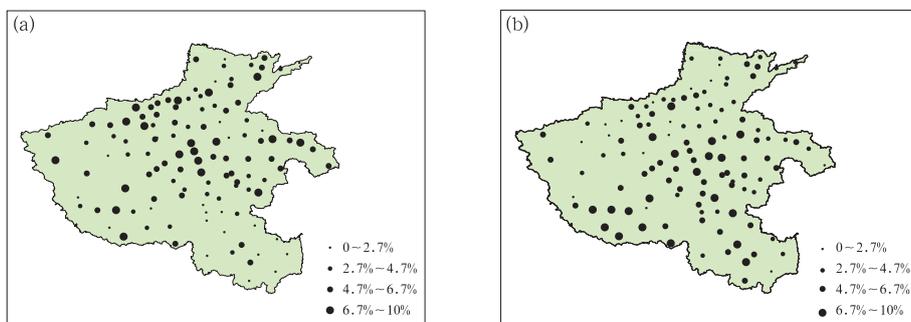


图 7 2001 年(a)和 2006 年(b)河南省污闪地面气象综合指标的回算检验结果
(图中黑色圆点大小代表空报率大小,最大值为 10%)

Fig. 7 Validation results of the integrated meteorological factors for power flashover in Henan during 2001(a) and 2006 (b)
(Black dots indicate the false alarm rate and the maximum rate is 10% over Henan)

报是指污闪故障预警期间无污闪故障的实际记录信息,并不意味着实际中肯定无污闪故障发生;同时由于河南区域内的探空气象资料非常有限,在空间上代表性不够丰富,也给回算检验的信号带来了一定噪音。尽管如此,研究中建立的河南省污闪故障发生的地面综合分析指标仍能够较好地反映污闪故障发生的综合气象条件特征,且历史资料回算检验的结果基本可接受,因此,该综合气象指标是值得在河南地区电网减灾的实际中推广应用并不断完善的指标之一。

3 电网污闪故障综合气象分析指标的应用

利用河南全省近 30 年(1985—2014 年)定时地面气象观测资料及探空资料,依据上述电网污闪故障的综合气象分析指标计算了河南地区近 30 年逐月污闪故障的发生次数,这里假设满足表 2 中的综合气象条件时,即认为发生一次电网污闪故障。图 8 给出了基于气象综合分析指标计算的河南地区多年平均的污闪故障发生个数的月变化情况。图中可见,河南地区电网污闪故障多发生在冬季,尽管这一变化特征与研究建立综合指标所使用的观测资料集中在冬季有密切关系,但该特征与以往相关研究成果较一致(王运禄等,2003;王正旺等,2005),因此,在一定程度上具有科学代表性。

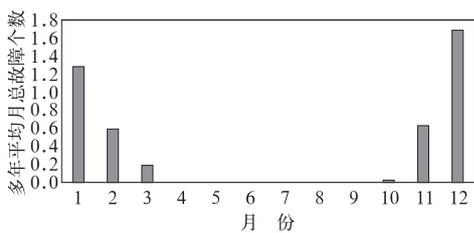


图 8 基于气象综合分析指标计算的河南地区多年平均的污闪故障发生个数的月变化

Fig. 8 Monthly variations of the power flashover events calculated by the integrated meteorological factors averaged over Henan during 1985—2014

空间上,依据上述电网污闪故障综合分析指标进一步逐站点计算河南地区多年平均的污闪事故年

总个数,并按照表 3 的初步对应关系对河南省电力污闪故障发生的风险进行了初步评估,结果如图 9 所示,图中黑色圆点从小到大分别代表发生污闪故障的风险低、一般、较高和高。图中可见,河南地区电网污闪灾害的高风险区位于河南省东北部,其西边为海拔较高的山区,受地形阻挡作用,易于污染物的累积,为电网污闪故障的发生提供了有利条件。同时,王运禄等(2003 年)曾在分析中国电网污闪分布时指出,河南北部是我国电网污闪事故的高发区,与文中计算的河南地区电力污闪高风险区比较吻合,进一步佐证了图 9 中的风险评估结果。

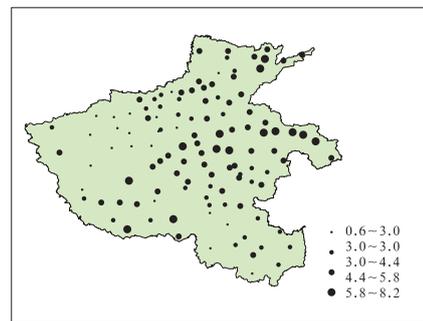


图 9 河南省电力污闪故障发生的风险评估(图中黑色圆点大小代表多年平均的电网污闪故障个数)

Fig. 9 Assessment of the power equipment pollution flashover in Henan (Black dots indicate the annual mean power flashover events over Henan)

表 3 河南省电网污闪故障年总个数与污闪风险等级对应表

污闪故障年总个数	风险等级
<3.0	低风险
3.0—4.4	一般风险
4.4—5.8	较高风险
>5.8	高风险

4 结论与讨论

随着电网的快速发展,对电网污闪防治工作有了更高、更苛刻的要求。建立污闪故障的综合气象分析指标,有效预防和减少污闪对电网的危害,是电网需要解决的难题之一。在河南地面气象站的定时观测资料及有限的电网污闪故障资料基础上,通过本研究可初步得到以下的结论:

(1) 研究中提出的河南电网污闪故障分析指标

合理刻画了电网污闪故障发生的气象环境特征:高湿、弱风、前期少雨、近地面大气层结稳定等。

(2)该综合气象分析指标能够较好地拟合气象环境条件与污闪故障之间的关系,回算检验结果显示污闪故障无漏报,且空报率低于 10%。

(3)基于上述综合气象指标计算的多年平均条件下,河南地区污闪故障多发生在冬季,且河南东北部为电网污闪故障的高风险区。

河南电网污闪故障综合气象分析指标综合考虑了气象要素在时间上的连续性、气象要素的空间三维立体特征及地形的影响。由于电网污闪故障给社会经济带来的损失较大,河南省电力公司从 2006 年起陆续对河南电网重点地段、区域,采取涂抹防污闪材料、增加绝缘子片数、更换复合绝缘子、更换防污绝缘子、加装绝缘子辅助伞裙、缩短绝缘子清扫间隔等手段,提高设备绝缘水平,有效降低电网设备“污闪”事件的发生。因此,自 2006 年以后,河南电网范围内未收集到电网污闪故障。尽管如此,本研究的风险评估结果仍可用于河南地区污闪高发区域的识别,为这类区域的电网污闪风险防范及规划提供决策参考。

尽管指标建立过程中所使用的电力污闪个例有限,且河南地区气象探空资料也较少,但该指标计算的 30 年平均污闪故障发生风险的时空分布特征与前人的研究结果比较吻合,说明研究中建立的河南省污闪故障定量综合气象分析指标具有一定实际应用价值,可以为该地区的电力污闪灾害预警防御提供技术支持。

参考文献

- 陈百炼,吴战平,张艳梅等. 2014. 贵州冬季电线积冰及其天气成因分析. 气象, 40(3): 355-363.
- 陈祺,颜繁武. 2012. 输电线路的污闪及影响因素. 科技论坛, 97.
- 邓鹤鸣,何正浩,许宇航,等. 2009. 雾霾对冲击放电路径影响特性的分析. 高电压技术, 35(11): 2669-2673.
- 刁平,孙新莲,杨秀兰. 2002. 乌鲁木齐市电业污闪的气象因素分析. 新疆气象, 25(5): 26-29.
- 董新胜,李长凯. 2005. 利于基于气象因素的 BP 神经网络对污闪进行预测的探索. 电磁避雷器, 3: 20-23.
- 付桂琴,曹欣. 2012. 雷雨大风与河北电网灾害特征分析. 气象, 38(3): 353-357.
- 甘璐,叶宽,张德山,等. 2012. 北京市电网灾害的时空分布特征及与

- 气象因素的关系. 气象, 38(3): 349-352.
- 高航. 2001. 2001 年初河南电网发生污闪事故的原因与防范措施. 电网技术, 25(10): 76-79.
- 谷琛,张文亮,范建斌. 2011. 超/特高压输电工程典型间隙操作冲击发电特性实验研究综述. 电网技术, 35(1): 11-17.
- 顾骏强,朱持则,姜瑜君,等. 2010. 探空资料在输电线路覆冰事故评估中的应用. 气象, 36(8): 81-86.
- 李伟. 1984. 贵州省电力污闪无限度等级预报初探. 贵州气象, 1: 20-22.
- 刘平原,罗森波,郑晓光,等. 2008. 广东电网防污闪气象预警研究. 南方电网技术, 2(5): 49-52.
- 刘其顺,顾洪年. 1997. 电力设备“污闪”灾害的气象成因. 贵州气象, 21(4): 11-13.
- 刘智勇,杨承矩. 2001. 架空线路污闪机理及防污措施. 高电压技术, 27: 51-52.
- 庞文保,白光弼,李建科,等. 2012. 陕西省电线积冰区划. 气象, 38(6): 733-739.
- 王运禄. 1998. 四川盆地电网污闪灾害和引发它的气象因子的特点. 四川气象, 18(1): 33-36.
- 王运禄,李宏,陈海虹,等. 2003. 对中国电网污闪灾害特征和成因剖析. 四川气象, 23(3): 43-46.
- 王正旺,白绍烈,庞转棠,等. 2005. 电力污闪事故的气象条件分析. 自然灾害学报, 14(5): 136-140.
- 温华洋,田红,唐为安,等. 2011. 安徽省电线积冰标准厚度的气象估算模型. 应用气象学报, 22(6): 747-752.
- 吴素良,蔡新玲,何晓媛,等. 2010. 兰州至关中电线积冰与导线线径及高度关系. 应用气象学报, 21(4): 63-69.
- 夏智宏,周月华,刘敏等. 2012. 湖北省电线积冰微地形因子影响识别研究. 气象, 38(1): 103-106.
- 杨庆,司马文霞,蒋兴良,等. 2005. 复杂环境条件下绝缘子闪络电压预测神经网络模型的建立及应用. 中国电机工程学报, 25(13): 155-159.
- 袁贵中,罗森波,罗秋红. 2011. 广东电网电力污闪事故气象研究. 云南电力技术, 39(4): 82-83.
- 张寒,文习山,丁辉. 2003. 用神经网络预测基于气象因素的绝缘子等值附盐密度. 高压电器, 39(6): 31-32.
- Ahmad S, Ghosh P S. 2002. Modeling of various meteorological effects on contamination level for suspension type of high voltage insulators using ANN. Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Asia Pacific, IEEE/PES, 2002.
- Ghosh P S, Chakravorti S Chatterjee. 1995. Estimation of time-to-flashover characteristics of contaminated electrolytic surfaces using a neural network. IEEE Trans. on Dielectric and Electrical Insulation, 1064-1074.
- Guan L, Cheng S. 1996. Artificial neural network power system stabilizer trained with an improved BP algorithm. IEEE Generation, Transmission and Distribution, 143(2): 135-141.