

霾污染对输变电设备外绝缘影响的研究进展

郝敬亮¹, 赵天良¹, 高嵩², 李杰², 王咏薇¹

(1. 南京信息工程大学中国气象局气溶胶-云-降水重点开放实验室, 江苏 南京 210044; 2. 江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要:为了研究霾污染对电力安全的影响,综述了近年来国内外针对霾污染对输变电设备外绝缘影响的研究进展,总结了影响输变电设备外绝缘的霾天气指标,霾对外绝缘运行状态的危害和绝缘子沉积吸附的研究。展望了大气颗粒物在绝缘子沉积的外场综合观测,霾颗粒沉积物的实验室物理化学分析以及沉降过程的数值模型等亟待解决的问题。

关键词:霾;输变电设备;外绝缘;气溶胶沉积

中图分类号:X51;TM721.1

文献标志码:A

文章编号:1674-6732(2017)04-0005-05

Research Progress on the Effects of Haze Pollution on Power Transmission Equipment External Insulation

HAO Jing-liang¹, ZHAO Tian-liang¹, GAO Song², LI Jie², WANG Yong-wei¹

(1. Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China; 2. Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing, Jiangsu 211103, China)

Abstract: Haze pollution mostly happens in the areas where demand a lot of electricity energy in China. The impact of haze on electric power security is an important issue on the harm of air pollution on the social economy. This paper reviewed the research process about effects of haze on power transmission equipment insulation. It focused on the summary of the index of haze's effect on power transmission equipment external insulation, the harm on the external insulation and the study of deposition and adsorption on external insulation. It is pointed out that the comprehensive field observation of deposition of atmospheric particles on external insulation, the laboratory analysis of physical and chemical properties of sediments and numerical model development of deposition process are the urgent problems for future research.

Key words: Haze; Power transmission equipment; Insulation; Aerosol depositions

随着我国经济的快速增长和城市化进程的加快,近几年引发了大气颗粒物污染的大气环境问题,其主要集中发生在京津冀、长三角和珠三角区域。作为我国经济发达地区,这些区域也是我国电力能源主要消耗地区。我国大气环境污染已由传统的煤烟型污染转向以PM_{2.5}和污染气体(O₃、SO₂、NO_x)形成的复合型污染,而大气环境中PM_{2.5}和PM₁₀等颗粒物浓度的增加是引起霾污染的主要原因。霾污染不仅危害人体健康,还导致能见度降低,进而影响交通、城市景观和人民生活。

输电线路绝缘子在运行过程中,受人为排放物以及自然扬尘等环境因素的影响,会减弱输电的效率以及发生污闪事故,而霾多发地区大多与输电走

廊或用电高负荷密度地区重合^[1]。霾污染过程中颗粒物沉降的积污对输变电设备外绝缘造成影响,有可能诱发并加剧这一过程,其加剧作用与霾污染特征存在密切关系。数据显示,2013年12月上旬,全国中东部地区20个省份共104个城市空气质量达到了重霾污染^[2-6],直接导致京津冀、长三角和珠三角地区的城市发生变电设备污闪而出现故障。

现针对霾对输变电设备外绝缘影响的研究,综述了雾霾影响指标、影响危害和沉积吸附几个方

收稿日期:2016-11-28;修订日期:2017-01-09

作者简介:郝敬亮(1994—),男,本科,从事大气物理研究工作。

面,并指出目前面临的问题和研究展望。

1 主要研究进展

1.1 影响外绝缘的霾污染主要指标

近几年来,霾污染事件频发,环境气象的影响因素得到密切关注^[7-10],然而一些霾的特征参数,如能见度、PM_{2.5}质量浓度、温度、pH值等与输变电设备外绝缘积污特性相关性小,霾天气条件下的外绝缘积污的评估需要考虑其他合适的指标。我国不同地区在工业密集区形成的霾中主要阴离子为SO₄²⁻和NO₃⁻,主要阳离子为NH₄⁺和Ca²⁺^[11]。在研究大气环境对高压绝缘的影响时,表征雾脏污程度的参数应使用雾水电导率。现场监测与模拟试验都证实,在霾污染的持续作用下,绝缘子表面污秽度(积污程度)逐渐增大。根据以上结果,当分析霾对输变电设备外绝缘造成影响时,雾水电导率及其作用时间应作为一个关键因素,其作用结果将导致绝缘子表面污秽度的增长以及绝缘子表面电导率的升高,这两个指标直接决定了霾对绝缘子运行状态的影响程度^[12-15]。

霾污染中大气颗粒物在绝缘子表面沉积也会直接造成积污。不同污染排放源产生的颗粒物在绝缘子表面上的沉积量与其粒径有一定关系,粒径大的工业颗粒物会更多地沉积在绝缘子上表面^[16]。可以通过一些特征粒径来直接了解和比较颗粒物的沉积特点和差异。对于沉积在绝缘子表面的颗粒物,以及以TSP和降尘方式存在于大气中的颗粒物,都可以通过统计方法得到它们的特征粒径^[17-18]。在自然扬尘,燃煤、钢铁、石化、水泥等各类工业污染排放和农业地区焚烧秸秆过程中,会产生大量不同粒径的大气颗粒物。在严重霾污染环境中,高导电率雾与不同排放源类型的颗粒物相结合,通过自然和静电作用力吸附、沉积在绝缘子表面,由此引起的绝缘子积污量增加、表面电导率变化会使绝缘子的污闪电压出现不同程度的下降^[11,19-20]。

1.2 霾对外绝缘设备运行状态的影响

霾对输变电设备绝缘子的沿面放电特性有很大影响,容易导致绝缘子发生污闪。对于霾污染环境中输变电设备外绝缘的污闪特性,国内外开展过一些初步研究和机理研究。一般情况下,污闪事件在霾初发期不会出现,但持续长时间的霾天气则不然^[20]。霾天气下,空气中携带大量粉尘等悬浮颗

粒,累积在大气边界层内无法扩散,极易导致绝缘子表面快速积污;并且大气湿度普遍较高,不利于污层获得优良的憎水性能^[21-22]。此外,空气污染物还会降低复合绝缘子污闪电压^[11,19-20],加速硅橡胶复合材料的老化。其具体表现为:(1)霾增大伞裙之间气隙发生击穿的概率^[23]。霾发生时,大气中悬浮大量颗粒物,如PM_{2.5}、PM₁₀等,这些微粒子会对伞裙之间气隙的电场分布产生较大影响,使得电场发生严重畸变,使得空气的击穿场强大幅度降低,增大了伞群气隙击穿的可能性,降低闪络电压;(2)霾产生的污秽物会加速硅橡胶材料的老化^[23]。霾污染物中含有的酸、碱性污秽物通过湿沉降附着于硅橡胶表面,会产生一定的化学腐蚀作用,破坏硅橡胶的分子结构,导致硅橡胶伞裙表面松动、陷阱密度增大,加速老化,降低其使用寿命。

1.3 霾颗粒物在绝缘子沉积吸附过程的研究

霾对绝缘子的影响还主要体现在以下两方面:(1)各种霾污染微粒会使绝缘子表面的积污量增加^[20];(2)霾引起绝缘子表面潮湿会增大泄漏电流,降低闪络电压^[11,19-20]。其中,绝缘子表面的积污量增加与颗粒物在绝缘子表面的沉积吸附特性密切相关^[17-18],可分为3个步骤:(1)污秽颗粒从空气中自由沉降到绝缘子表面的边界层;(2)污秽颗粒从进入边界层到碰撞绝缘子表面;(3)污秽颗粒从碰撞绝缘子表面到吸附在绝缘子表面,此步骤决定颗粒物能否附着在绝缘子表面上。

上述对绝缘子沉积吸附过程的理解依然是针对较为理想的大气环境,全面地理解霾污染物在绝缘子上的沉积吸附过程,将有利于霾污染对输变电设备外绝缘影响的环境气象外场监测,尤其是绝缘子表面的边界层及其变化影响因子的综合观测。

1.3.1 综合构建人工霾污染环境和自然积污试验

综合构建人工霾污染环境和自然积污实验,运用等值盐密、等值灰密、积污量测定及原子力显微镜(AFM)、场发射扫描电镜-能谱分析(FSEM-EDX)、光电子能谱(XPS)、X射线衍射(XRD)、空气颗粒物粒度谱仪等测试手段,选取代表性绝缘子,研究分析颗粒物与绝缘子表面的相互作用力、颗粒物由气相主体向绝缘子表面的迁移运动及其在绝缘子表面的吸附沉积过程。有研究表明,不同大气悬浮颗粒物在不同绝缘材料(硅橡胶、瓷和钢化玻璃)表面以及材料表面带有不同荷电的情况下,绝缘子的积污效果不一样^[24-25]。

1.3.2 霾污染物在绝缘子表面快速沉积的数值模拟

在大气环境条件下,绝缘子积污过程受到众多因素的影响,如天气条件(空气湿度、温度、风向与风速、降雨)^[26-27],颗粒物成分及绝缘子所在地域粉尘种类、大小、浓度、黏度等^[28-29],绝缘子表面形状(不同种类绝缘子几何形状、凹凸面、迎风面、正反面等)^[30-31]。如果完全依靠实验的方法进行积污规律的研究,难以完成大量不同条件的综合影响实验,也难以深入研究和揭示绝缘子表面积污机理。因此在开展现场实地研究和实验室研究的同时,平行开展绝缘子在大气环境条件下积污过程的数值模拟研究^[32-34],其中包括积污过程数学模型的建立与求解,利用计算模拟对不同条件下绝缘子积污过程的机理进行研究与分析,深入地揭示绝缘子的积污规律,使之成为研究、分析绝缘子表面积污过程和预报绝缘子积污状况的有效工具。

国外也在尝试着建立经验模型(AMICO)来预报绝缘子积污^[35],ILCMS系统可测量绝缘子的泄漏电流^[36]。AMICO和ILCMS系统一起使用,配合测量气象因素得到的结果与实验室结果对比,最终得到选样地点的绝缘子积污规律。为了检测所有地域的绝缘子积污状况,用有限的积污规律尝试研究建立了一个经验模型。

当前,主流的第三代空气质量模式考虑了大气动力学与大气化学间的双向耦合,实现了多种污染物、多尺度的大气污染模拟预报^[37-39]。在现代三维空气质量模式中引入霾颗粒在绝缘子表面的沉积过程的参数化方案,更真实合理地模拟霾污染物在绝缘子表面的沉积变化,是一个具有挑战性且对能源安全具有极大应用价值的研究。

1.4 大气颗粒物电学特性研究

霾污染颗粒在空气中混合的过程,一部分受重力作用沉降到输变电设备外绝缘设备上;还有一部分带电粒子受到输变电设备静电场的吸引力而沉降到外绝缘设备上,这部分带电粒子也是影响外绝缘设备运行状态的一个重要因素,很大程度上影响了输变电设备的污闪和损坏以及电磁波传播^[40]。目前,大气颗粒物物理化学特性研究主要集中在其云凝结核(冰核)活化性,散射和吸收光学特性及危害人体健康的化学特性。此外,考虑大气污染物危及电网安全,大气颗粒物电学特性的研究也已起步。

自然和人为的因素可以改变大气颗粒物的电性,比如空间里的宇宙射线、来自空气和地表辐射性物质的辐射、闪电、电磁辐射、高温放电和颗粒物间碰撞^[41],研究发现颗粒物的极性依赖于粒子粒径分布,大粒子比小粒子更容易带电^[42],有实验用过滤介质测量PM_{2.5}的带电量^[43]。当大气颗粒物带有电性时,粒子间的相互作用和粒子表面化学反应都会被影响,因此改变了凝聚、黏附、稳定性这些物理属性^[41-42]。根据大气颗粒物在风沙通量方面的研究,发现颗粒物的静电力与重力相比后已经不可忽略,静电力明显地改变着颗粒物的运送^[42]。粒子的荷质比是一个描述带电颗粒物属性的重要参数,研究发现粒子的荷质比随着高度呈指数性增长,荷质比由粒子碰撞数量、碰撞速度和直径决定^[40]。

2 问题与展望

目前,国内外已经有许多关于绝缘子在常规天气条件下积污及污闪特性的研究,大多关注传统气象条件、环境参数和绝缘子外形对积污特性的影响^[44-46],绝缘子在霾污染条件下的沉积吸附特性及其数值模型建立和模拟依然是大气环境影响评估研究的难题。基于我国中东部霾污染的大气环境研究现状,针对霾污染对输变电设备外绝缘影响,亟待从以下3个方面开展研究。

2.1 完善影响输变电设备外绝缘的霾污染环境气象综合外场观测

由于缺少系统的绝缘子积污观测,导致防污闪领域现有研究成果难以定量表征霾污染特征参数与积污增长的关系,从而限制了霾影响下的输变电设备外绝缘性能评估方法的深入研究和应用。霾污染的形成需要考虑大气气溶胶及其前体物的排放、气粒转化过程、气溶胶的输送、沉降等物理化学过程以及水汽的影响,因而需要在输电线路沿路关键区域的雾霾污染中,对大气污染化学成分、大气颗粒物物理性质、电学和光学特征、气象参数等进行综合立体监测,进而为霾污染对输变电设备外绝缘影响机理和电力行业霾天气预测预警提供基础数据。

2.2 加强危及电网安全污染物大气化学组分及电学特征的分析

在线与离线颗粒物和气体分析技术能够确定典型霾污染事件中危及电网设备安全的颗粒污染

物(如酸性气溶胶)与污染气体(如 SO_2 和 NO_x) 的消过程及其时空变化规律。并利用同位素和分子标志物示踪技术结合多元统计模型源解析方法解析不同污染物来源^[47-48]及大气细颗粒物和污染气体的时空演变特征^[49-50]。加深对霾污染对绝缘材料影响与绝缘材料种类的研究,制定针对霾的材料设计标准,采用更有利于抵抗霾负面影响的绝缘材料。

2.3 发展针对输变电设备外绝缘子的大气污染物干湿沉降模型

以大气动力学理论为基础,基于对大气物理和化学过程的理解,建立大气污染物的排放、干湿沉降、化学转换和动力输送扩散数值模型^[51],借助计算机来模拟大气污染物动态分布变化。由于数值模式的优越性,这一空气质量模式研发取得一系列显著进展^[52-61]。但其中的干湿沉降模型主要针对自然的下垫面,没有考虑输变电设备的大气污染物沉降过程,限制了外绝缘子积污特性的模拟能力。基于大气污染物的系统外场观测和实验室物理化学分析,建立考虑了输变电设备静电吸附作用、污染物电学特性和大气湿度变化的大气颗粒物沉降参数化,发展针对输变电设备外绝缘子的大气污染物干湿沉降模型,将会改善空气质量模式对外绝缘子积污模拟预测能力,极大地提升针对电网设备安全的霾污染预警预报水平。

[参考文献]

[1] 杨帆,代锋,罗汉武,等. 雾霾天气下的直流输电线路离子流场分布特性及其影响因素[J]. 电工技术学报,2016,31(12):49-57.

[2] 孙燕,严文莲,谢真珍. 2013年12月上旬江苏大范围持续性雾霾成因分析[J]. 环境科学与技术,2016(1):147-152.

[3] 蒋伊蓉,朱蓉,朱克云,等. 京津冀地区重污染天气过程的污染气象条件数值模拟研究[J]. 环境科学学报,2015,35(9):2681-2692.

[4] 岳珂利,钟流举,曾立民,等. 珠三角地区冬季大气细颗粒物理化特性与成因[J]. 环境科学与技术,2015,38(2):105-109.

[5] 吴剑斌,王茜,伏晴艳. 2013年12月上海市 $\text{PM}_{2.5}$ 重污染过程数值模拟研究[J]. 环境科学学报,2016,36(6):2152-2159.

[6] 李展,陈建文,杜云松,等. 成都及周边城市一次区域性空气污染过程特征分析[J]. 环境科学与技术,2015,38(3):125-130.

[7] DUBUS L. Practices, needs and impediments in the use of weather/climate information in the electricity energy sector[J].

Management of weather and Climate Risk in the Energy Industry, 2010(6):175-188.

[8] DUBUS L. Weather and climate and the power sector: needs, recent developments and challenges [J]. Weather Matters for Energy,2013(1):379-398.

[9] DUTTON J A, JAMES R P, ROSS J D. A probabilistic view of weather, climate and the energy industry [J]. Weather Matters for Energy,2013(1):353-378.

[10] JOHNSTON P C, GOMEZ J F, LAPLANTE B. Climate risk and adaptation in the electric power sector [M]. Asian Development Bank Publication, 2012.

[11] 宿志一. 雾霾天气对输变电设备外绝缘的影响[J]. 电网技术,2013,37(8):2284-2290.

[12] 焦尚彬. 交流电压下染污绝缘子表面污秽智能检测方法研究[D]. 西安:西安理工大学,2006.

[13] 张志劲,蒋兴良,孙才新. 污秽绝缘子闪络特性研究现状及展望[J]. 电网技术,2006,30(2):35-40.

[14] 刘刚,胡情楠,陈锡阳. 由表面电导实现绝缘子污秽程度监测的可行性分析[J]. 高电压技术,2012,38(6):1321-1326.

[15] 宋毅. 绝缘子表面污层电导率的影响因素研究[J]. 高压电器,2014(10):102-106.

[16] 蒋兴良,李海波. 计算流体力学在绝缘子积污特性分析中的应用[J]. 高电压技术,2010,36(2):329-334.

[17] 屠幼萍,孙佑飞,彭庆军,等. 雾霾环境下自然积污绝缘子的污秽颗粒粒径分布特性[J]. 高电压技术,2014,40(11):3318-3326.

[18] 高高,周志成,朱明曦,等. 基于闪络电压预测的污闪预警系统[J]. 高电压技术,2014,40(11):3365-3369.

[19] 张东坡,刘瑶林. 雾霾天气对输变电设备外绝缘的影响[J]. 今日科苑,2014(2):91-92.

[20] 胡长猛,谢从珍,袁超,等. 雾霾对输变电设备外绝缘特性影响机理综述[J]. 电力系统保护与控制,2015(16):147-154.

[21] 赵莹. 雾霾天气对复合绝缘子憎水性的影响[J]. 电瓷避雷器,2015(1):45-48,53.

[22] 魏远航,武利会,王成华. 大气环境对合成绝缘子的憎水性影响分析[J]. 高电压技术,2006,32(5):31-34.

[23] 李永刚,黄成才,汪佛池,等. 雾霾天气对复合绝缘子运行性能的影响[J]. 电网技术,2014,38(7):1792-1797.

[24] 刘瑛岩,李燕,王晶,等. 绝缘子表面对污秽颗粒的粘附力及长程吸引力[J]. 高电压技术,2014,40(4):1010-1016.

[25] 王晶,李燕,梁曦东,等. 利用原子力显微镜探究污秽颗粒在绝缘子表面的粘附力[J]. 高电压技术,2013,39(6):1352-1359.

[26] 李清,胡文,李黎,等. 绝缘子自然积污饱和趋势及气象因素影响分析[J]. 高电压技术,2014,40(11):3336-3342.

[27] 蒋兴良,李海波. 计算流体力学在绝缘子积污特性分析中的应用[J]. 高电压技术,2010,36(2):329-334.

[28] 张开贤. 悬式绝缘子串自然积污规律的探讨[J]. 电网技术,1997(3):39-43.

- [29] 王彬, 梁曦东, 张轶博, 等. 交、直流电压下复合绝缘子和瓷绝缘子的自然积污试验[J]. 高电压技术, 2009, 35(9): 2322-2328.
- [30] 宋云海, 刘刚, 李恒真. 公路区与公路农田区绝缘子自然积污成分的对比如分析[J]. 高压电器, 2010, 46(5): 22-25.
- [31] 刘小欢. 典型伞型结构绝缘子积污特性及其交流污闪特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- [32] 吕玉坤, 李国超, 卫少科, 等. 直流复合绝缘子积污特性的数值模拟研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2015, 42(4): 46-51.
- [33] 江云志, 何钢, 张林元. 复合绝缘子表面湿润积污过程的数值模拟方法[J]. 华中电力, 2010, 23(1): 14-18.
- [34] 李海波. 基于流体力学原理的悬垂绝缘子串积污特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- [35] RIZZI G, OMODEO P, PANZERI E, et al. Evaluation of surface pollution as trigger for cleaning operation[J]. CIREDA-Vienna, 2007(21-24): 133-154.
- [36] PIROVANO G, CHIARELLO S, MANNELLI E D, et al. Sistemi di monitoraggio degli isolamenti in aria di linee e stazioni[J]. Convegno Nazionale AEIT Prospettive Economiche e Strategie Industriali, 2011(27-29): 133-154.
- [37] 谭成好, 陈昕, 赵天良, 等. 空气质量数值模型的构建及应用研究进展[J]. 环境监控与预警, 2014, 6(6): 1-7.
- [38] 陆涛. 美国 AIRNow 空气质量动态发布技术在上海的应用[J]. 环境监控与预警, 2011, 3(1): 4-7.
- [39] 黄江平, 王喜全, 王自发, 等. 2008年北京奥运会期间污染控制效果数值模拟——以个例分析为例[J]. 气候与环境研究, 2010(1): 11-20.
- [40] ZHANG H, ZHENG X J, BO T L. Electrification of saltating particles in wind-blown sand; Experiment and theory[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118: 12086-12093.
- [41] ZHANG L Y, GU Z L, YU C, et al. Surface charges on aerosol particles-Accelerating particle growth rate and atmospheric pollution[J]. Indoor and Built Environment, 2016, 25(3): 437-440.
- [42] HU W W, XIE L, ZHENG X J. Simulation of the electrification of wind-blown sand[J]. Eur. Phys. J., 2012, 35(3): 1-8.
- [43] TOMOAKI O, TETSURO Y, YUMA G, et al. Preliminary study on the measurement of the electrostatic charging state of PM_{2.5} collected on filter media[J]. Asian Journal of Atmospheric Environment, 2015, 9(2): 105-113.
- [44] 赵林杰. 硅橡胶复合绝缘子憎水性与污闪特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
- [45] 曾雁. 我国滨海地区绝缘子污闪特性分析[J]. 广东电力, 2010, 23(12): 111-114.
- [46] 刘小欢. 典型伞型结构绝缘子积污特性及其交流污闪特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- [47] 张棕巍, 胡恭任, 于瑞莲, 等. 泉州市大气降尘中金属元素污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2016(8): 2881-2888.
- [48] 常逸, 刘乐君. 大气颗粒物污染源解析技术与发展[J]. 企业技术开发, 2008, 27(4): 114-117.
- [49] 曹玲娟, 耿红, 姚晨婷, 等. 太原市冬季灰霾期间大气细颗粒物化学成分特征[J]. 中国环境科学, 2014, 34(4): 837-843.
- [50] 周敏, 陈长虹, 王红丽, 等. 上海市秋季典型大气高污染过程中颗粒物的化学组成变化特征[J]. 环境科学学报, 2012, 32(1): 81-92.
- [51] DENNIS R L, BYUN D W, NOVAK J H, et al. The next generation of integrated air quality modeling: EPA's models-3[J]. Atmospheric Environment, 1996, 30(12): 1925-1938.
- [52] GARIAZZO C, HANNINEN O, AMICARELLI A, et al. Integrated model for the estimation of annual, seasonal, and episode PM₁₀ exposures of children in Rome, Italy[J]. Air Quality, Atmosphere & Health, 2011, 4(3): 169-178.
- [53] ZHANG L M, GONG S L, JACOB P. A size-segregated particle dry deposition scheme for an atmospheric aerosol module[J]. Atmospheric Environment, 2001, 35: 549-560.
- [54] ZHANG L, BROOK J R, VET R. A revised parameterization for gaseous dry deposition in air-quality models[J]. Atmos. Chem. Phys., 2003(3): 2067-2082.
- [55] ZHANG L, HE Z. Technical Note: An empirical algorithm estimating dry deposition velocity of fine, coarse and giant particles[J]. Atmos. Chem. Phys., 2014(14): 3729-3737.
- [56] NGUYEN K, DABDUB D. Development and analysis of a non-splitting solution for three-dimensional air quality models[J]. Atmospheric Environment, 2003, 37(26): 3741-3748.
- [57] BULLOCK O R, BREHME K A. Atmospheric mercury simulation using the CMAQ model: formulation description and analysis of wet deposition results[J]. Atmospheric Environment, 2002, 36(13): 2135-2146.
- [58] ARNOLD J R, DENNIS R L, TONNESEN G S. Diagnostic evaluation of numerical air quality models with specialized ambient observations: testing the Community Multiscale Air Quality modeling system (CMAQ) at selected SOS 95 ground sites[J]. Atmospheric Environment, 2003, 37(2): 1185-1198.
- [59] GARIAZZO C, SILIBELLO C, FINARDI S, et al. A gas/aerosol air pollutants study over the urban area of Rome using a comprehensive chemical transport mode[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(34): 7286-7303.
- [60] 闫文君, 刘敏, 刘世杰, 等. 基于 CMAQ 模式的中国大气 BaP 迁移转化模拟研究[J]. 中国环境科学, 2016, 36(6): 1681-1689.
- [61] 王颖. 复杂下垫面下空气污染数值模拟研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2010.