2015 年海南省火电行业大气环境影响研究

阚 慧[1],伯 鑫[2*],屈加豹[2,3],杨朝旭[4],伍鹏程[5],田 飞[6],莫 华[2],赵晓宏[2],周学双[7] (1.南京大学环境规划设计研究院股份公司,江苏 南京 210093；2.环境保护部环境工程评估中心,北京 100012；3.河北科技大学环境科学与工程学院,河北 石家庄 050000；4.吉林化工学院资源与环境工程学院,吉林 吉林 132022；5.环境保护部环境规划院,北京 100012；6.山东省环境保护科学研究设计院,山东 济南 250013；7.海南省生态环境保护厅,海南 海口 570100)

摘要：基于火电企业在线监测数据、环境统计数据、排污许可及火电排放清单等,分析各统计口径下的海南火电大气污染物排放量差异,并基于在线监测数据分析海南省火电排放时间变化规律.分别设置现状、排污许可及超低排放 3 种情景,采用 CALPUFF 模型分析 3 种情景下火电厂对海南大气环境的影响.结果显示,不同统计口径下火电厂各污染物排放量差异较大,最大差值可达到 5.65 倍;在时间维度上,海南省火电行业污染物排放量月际分布较平稳,每月污染物排放量约占全年的 7%~10%,24h 变化呈现明显“两峰两谷”特征.在大气环境影响方面,火电企业大气 SO_2、NO_x、$PM_{2.5}$、PM_{10} 浓度分布总体呈现西部高东部低的趋势.现状情景下火电企业对各城市年均浓度影响范围为 SO_2 0.001~0.015μg/m^3、NO_x 0~0.01μg/m^3、PM_{10} 0.001~0.006μg/m^3、$PM_{2.5}$ 0~0.003μg/m^3,最高浓度基本出现在东方市、临高县.火电厂对大气环境的影响程度为许可情景>现状情景>超低情景,执行排污许可时火电厂排放 PM_{10} 和 NO_x 对各城市均值年均浓度较现状情景分别增加 50%和 38%;全面实施超低排放后,火电厂对大气环境影响有明显改善, SO_2 和 $PM_{2.5}$ 对各城市均值年均浓度较现状情景分别降低 57%和 69%.

关键词：排污许可；火电；在线监测；CALPUFF；排放清单

中图分类号：X51,X823 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2019)01-0428-12

DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2019.0053

Air quality impacts of power plant emissions in Hainan Province, 2015. KAN Hui[1], BO Xin[2*], QU Jia-Bao[2,3], YANG Chao-Xu[4], WU Peng-Cheng[5], TIAN Fei[6], MO Hua[2], ZHAO Xiao-Hong[2], ZHOU Xue-Shuang[7] (1.Academy of Environmental Planning & Design, Co., Ltd., Nanjing University, Nanjing 210093, China；2.The Appraisal Center for Environment and Engineering, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100012, China；3.School of Science and Technology of Environmental, HeBei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050000, China；4.College of Resources and Environmental Engineering, Jilin Institute of Chemical Technology, Jilin 132022, China；5.Chinese Academy for Environmental Planning, Beijing 100012, China；6.Shandong Academy of Enviromental Science, Jinan 250013, China；7.Department of Ecology and Environmental Protection of Hainan Province, Haikou 570100, China). *China Environmental Science*, 2019,39(1)：428~439

Abstract：Based on the continuous emission monitoring systems (CEMS), environmental statistics, pollutant discharge permit and emission inventory of power plants in Hainan Province in 2015, the difference of pollutant emissions from power plants in Hainan under different methods was analyzed, and the variation rule of power plants emissions was acquired. In this paper, three situations including current situation, pollutant discharge permit situation and ultra-low emission situation were considered, and impacts of power plants on the air quality of Hainan province under three situations were simulated using CALPUFF model. The results showed that the emissions of various pollutants from power plants vary greatly under different statistical methods, and the maximum difference can reach 5.65times. In the time dimension, the monthly distribution of pollutant emissions from thermal power industry was relatively stable ranging from 7% to 10% and 24-hour fluctuation was characterized by “two peaks and two valleys” . In terms of air quality, the concentration distribution of SO_2, NO_x, $PM_{2.5}$ and PM_{10} generally showed a trend of high in west and low in east. Under current situation, the impacts of power plants on the average of annual concentration of each pollutant were SO_2 0.001~0.015μg/m^3、NO_x 0~0.01μg/m^3、PM_{10} 0.001~0.006μg/m^3、$PM_{2.5}$ 0~0.003μg/m^3, and most of the highest concentration occurred in Dongfang and Lingao. The degree of impact of power plants on the atmospheric environment was permit > current > ultra-low. When the pollutant discharge permit is implemented, the annual average concentration of PM_{10} and NO_x emitted from power plants increases by 50% and 38%, respectively, compared with the current situation. After the full implementation of ultra-low emission, there is a significant improvement in the air quality, with the annual average concentration of SO_2 and $PM_{2.5}$ for each city

收稿日期：2018-05-30

基金项目：清华大学环境学院重点学术机构 2015 年度开放基金课题;国家重点研发计划项目(2016YFC0208101);国家自然科学基金资助项目(71673107)

* 责任作者, 高工, 188672200@qq.com

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

reduced by 57% and 69%, respectively, compared with the current situation.

Key words：environmental permitting；power plants；CEMS (continuous emission monitoring systems)；CALPUFF；emission inventory

根据海南统计年鉴,2015 年全省火力发电量约为 228.22 亿 kWh,占全省总发电量的 93.25%,能源消耗量占总消耗量的 34.80%.火电行业对海南电力保障事关重要,也是大气环境中 SO_2、NO_x、颗粒物重要排放源之一,开展海南火电行业对海南国际旅游岛空气质量贡献的研究意义重大.

近年来国内外针对火电行业大气污染物排放的研究主要集中在节能减排工艺技术研究、减排潜力分析、大气污染物排放清单及环境影响研究等方向.超低排放技术是目前主流的火电行业节能减排工艺,国内学者对其实施技术[1-2]、减排潜力[3-4]等开展了广泛研究; Xue 等[5-7]分别测算了我国火电行业在"十二五"、"十三五"期间和更远期的减排潜力;在排放清单的建立方面,诸多学者运用物料衡算法、排放因子法、在线监测法等多种方法建立了不同层面和不同时间跨度的火电行业大气污染物排放清单[8-13],而 Hao 等[13-17]在排放清单的基础上分别从城市、区域、全国层面研究了火电行业大气污染物对空气质量的影响.现有研究成果表明,我国火电行业大气污染物排放对 SO_2、NO_x、$PM_{2.5}$ 等大气污染物贡献较大[4,16],但针对海南省火电行业大气环境影响的研究仍少见报道.此外,海南省是火电排污许可制度试点较早的几个省份之一,已有 6 家火电厂均取得排污许可证.目前火电企业排污许可限值(包括短时排放量限值和年排放量限值),考虑了污染源的设备类型、燃料消耗量、污染物控制技术等,尚未考虑大气污染物排放造成的环境影响是否能够接受.

本研究基于 2015 年海南省火电排放清单、火电在线监测、环境统计、排污许可等,分析了火电企业大气污染物排放量在各统计口径下的差异,建立高时空分辨率的海南省火电大气污染物排放清单,采用 WRF 中尺度气象模式、CALPUFF 空气质量模型,分析了现状排放、排污许可、超低排放 3 种情景下火电企业对海南省各城市的大气污染贡献,为海南省环境空气质量进一步优化提供数据和技术支撑.

1　材料与方法

1.1　研究对象及数据来源

研究区域为海南岛,包括海南省除三沙市以外的 3 个地级市、5 个县级市、4 个县及 6 个自治县,基准年为 2015 年.海南省位于我国最南端,全省陆地总面积 3.54 万 km^2,其中海南岛面积约 3.39 万 km^2.根据海南统计年鉴,2015 年海南省火力发电主要分布在东方市、澄迈县及儋州市,发电量在全省火力发电中占比分别为 40%、31%和 20%.

海南省大气环境较为清洁,环境空气质量在全国各省份中排名靠前.海南省环境质量状况公报显示,2015 年全省优良天数比例为 97.9%,轻度污染天数 2.0%,中度污染天数 0.1%,全省 SO_2、NO_2、PM_{10}、$PM_{2.5}$ 年均质量浓度分别为 5, 9, 35, 20μg/m^3, SO_2、NO_2、PM_{10} 浓度符合一级标准, $PM_{2.5}$ 浓度符合二级标准.

本研究以 6 家独立火电厂(燃煤电厂 3 家、燃气电厂 3 家)为研究对象(表 1、图 1),共计 16 个机组,装机容量 375.8 万 kW, 2015 年发电量 196.8 亿 kwh,占全省 2015 年火力发电量的 86.2%.除清澜电厂距离海岸线约 6km 外,其他 5 家火电厂距离海岸线均在 1.2km 以内(存在海岸熏烟影响)[18].

本研究中使用原始数据主要来源于全国排污许可证管理信息平台公开端(http://permit.mep.gov.cn/)、环境统计数据、火电企业在线监测数据.在线监测数据为 2015 年华能海南发电股份有限公司东方电厂及海口电厂 2 家火电厂烟气排口烟尘、SO_2、NO_x 等大气污染物在线监测小时数据. 原始在线监测数据共计约 18.33 万条,去除火电机组停运维护、检修等数据无效情况,共计有效在线监测数据约 17.55 万条.

海南省火电排放清单数据来自研究团队的 2015 年全国高分率火电排放清单(HPEC,2015),该清单是结合基于在线监测数据计算的污染物年均排放浓度和根据各企业燃煤低位发热值计算的单位燃煤理论干烟气量,采用排放因子法自下而上建立的,区别于在线监测数据法(将各小时在线监测数据加和)[13].

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 1 海南省 6 家独立火电厂基本情况

Table 1 Basic information of six power plants in Hainan province

企业名称	所在城市	燃料类型	机组个数	装机容量(万 kW)	2015 年发电量(万 kWh)	年正常生产时间(h)
华能东方电厂	东方市	燃煤	4	140	908088.0	8760
华能海口电厂	澄迈县	燃煤	4	93.6	704718.5	8760
国电乐东	乐东黎族自治县	燃煤	2	70	150007.0	5188
华能南山电厂	三亚市	天然气	2	13.2	20839.8	4820
中海发电	儋州市	天然气	2	44	165840.4	8760
清澜电厂	文昌市	天然气	4	15	18526.0	6666
总计	/	/	16	375.8	1968019.7	/

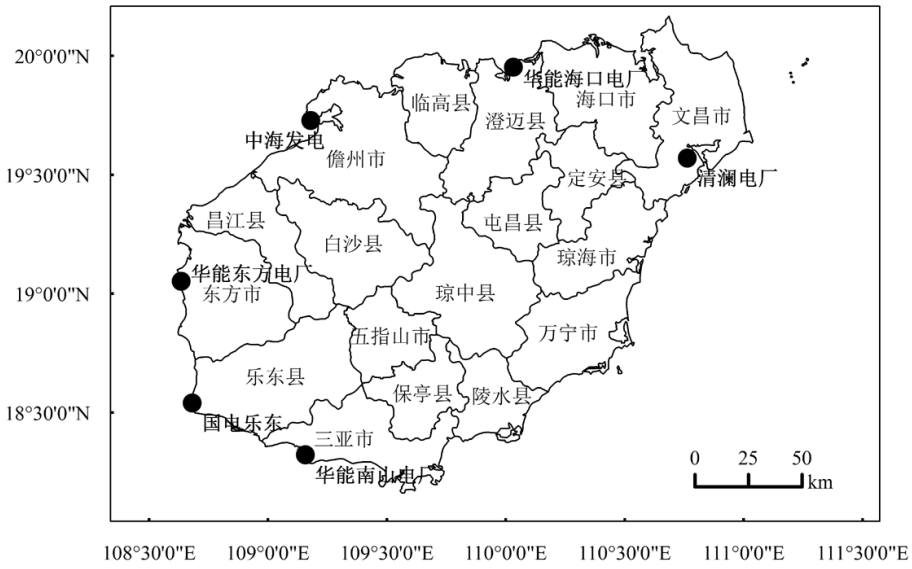


图 1 海南省 6 家独立火电厂分布

Fig.1 Distribution of 6power plants in Hainan province

1.2 空气质量模型参数设置

CALPUFF 是三维非稳态拉格朗日扩散模式,是我国环保部推荐的大气环境影响评价法规模型之一,适用于几十米到几百公里的模拟范围、复杂条件[19-21],在国内外大气环境影响研究中应用普遍[22-24].CALPUFF 主要包括 CALMET 气象模式、CALPUFF 扩散模式等[19,21].

海南岛属于热带季风海洋性气候,四面环海,大气污染物扩散具有特殊性[25],海边火电企业需要考虑海岸熏烟影响.已有研究结果显示[26-27],沿海区域重大污染源大气环境模拟采用 CALPUFF 模式较为准确.因内置简单的二次化学转化机制,CALPUFF 模型在国内外火电企业大气环境影响研究方面有较广泛的应用,包括北京、美国华盛顿州等地区火电厂排放一次和二次颗粒物的大气环境影响及人体健康风险[14,28-29].

本研究使用 CALPUFF 模型 6.42 版本,地面气象数据、高空数据、降水资料等均来自气象模式 WRF(ARW3.9.1.1),WRF 模式详细设置参数见表 1,通过 CALWRF 提取 WRFOUT 文件,并输出 3d.dat 用于运行 CALMET.坐标系统采用 UTM 投影(49 分区),区域内地形高度资料分辨率为 90m(USGS),土地利用类型数据精度为 30m[30],模拟区域总范围为 328km×248km,水平网格分辨率为 4km×4km,网格点数设置为 82×62.

CALPUFF 输入了火电烟囱高度、直径、坐标等信息,参数设置考虑硫酸盐、硝酸盐的二次化学反应(MESOPUFF Ⅱ),O_3 和 NH_3 月均浓度默认为 80×10^{-9} 和 10×10^{-9},燃煤、燃气电厂烟尘中的 $PM_{2.5}$ 含量分别按烟尘总量的 50%和 82%计算[31-32],并考

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

虑火电排放的时间变化规律,计算时间步长按 1h 考虑.

表 1　WRF 模式参数设置

Table 1　Parameter settings of WRF

微物理	长波辐射	短波辐射	陆面过程	积云对流	边界层	近地层
WSM6	RRTM	Dudhia	热量扩散方案	Kain−Fritsch	YSU 方案	Monin−Obukhov

1.3　情景设计

本研究共设置 3 个污染物排放情景:情景 1 为 2015 年海南省火电企业排放现状,情景 2 为海南省现有火电厂全部按照已核发排污许可的许可排放量运行,情景 3 为海南省现有火电厂全部按照超低排放要求达标运行.

2　结果与讨论

2.1　海南省火电排放量分析

2.1.1　火电排放量分析　海南省火电排放清单数据显示(HPEC,2015), 2015 年海南省 6 家火电厂 SO_2、NO_x、烟尘排放量分别为 7751.18, 6055.56, 972.54t/a;根据排污许可数据 6 家火电厂 SO_2、NO_x、烟尘排放量分别为 8643.20, 7522.29, 1625.53t/a;而根据海南省环境统计数据核算 6 家火电厂 SO_2、NO_x、烟尘的排放量分别为 10332.69, 22856.85, 804.63t/a.由图 2 可见,不同统计口径下海南省 6 家火电厂主要大气污染物排放量有所差异,且不具备明显规律,但总体呈现为在线监测数据统计量与排放清单计算排放量基本相当,小于许可排放量和环境统计排放量.相对 SO_2 和烟尘排放量,不同统计口径下 NO_x 排放量差异较大,最大差值出现在华能海口电厂, NO_x 环境统计排放量为许可排放量的 6.65 倍.

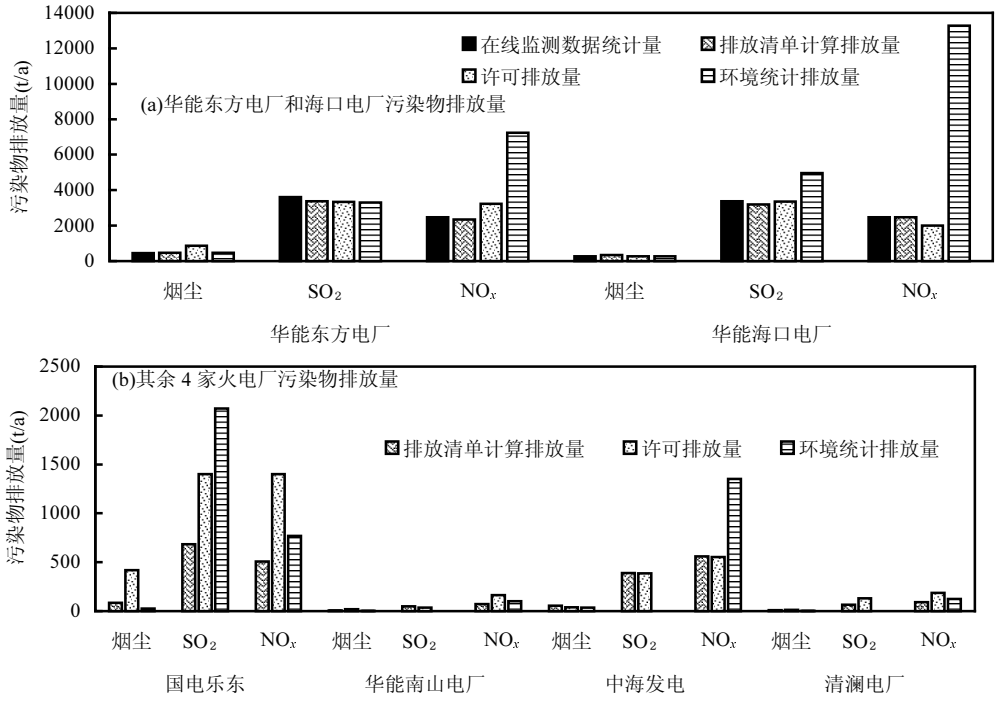


图 2　不同统计口径下火电厂大气污染物排放量

Fig.2　Air pollutants emissions of power plants under different methods

有研究表明在线监测法核算火电厂污染物排放量相对更为准确[33],且能够较好的体现污染源排放的实时动态变化情况[34],伯鑫和崔建升等[13,15,35]的研究也表明使用在线监测数据核算火电厂大气污染物排放能够提高清单的时间分辨率并降低不确定性.因此本研究以在线监测数据统计量为火电厂大气污染物排放量的假定真实量.由华能东方电厂和华能海口电厂的排放量分析可见,通过排放清

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

单法(HPEC)与在线监测数据法得到的各大气污染排放量基本相当,采用排放清单法计算结果作为现状排放量用于大气环境影响研究具有较高的真实性和可靠性.

2.1.2 火电时间谱分析 图 3 为海南省火电行业大气污染物排放的月变化及 24h 变化特征谱.从结果来看, 华能东方电厂和华能海口电厂两家火电厂大气污染物排放量在各月变化幅度不大,污染物排放分布曲线较为平稳.污染物排放量自 1 月逐渐增加,至 5 月份污染物排放量达到全年最高值,烟尘、SO_2、NO_x 3 种污染物排放量分别占全年排放量的 9.3%、9.7%和 9.7%,6~10 月污染物排放量基本保持稳定,占全年排放量的比重在 8%以上,11~12 月污染物排放量逐渐降低至与 1 月持平,约占全年排放量的 7%~8%.海南岛属热带季风海洋性气候,四季不分明,每年 5~10 月气温较高,两家火电厂大气污染物排放月度分布情况与气温变化情况基本一致,污染物排放量受气温影响较大,这与李琳玮等[36]研究得出的海南电网日最大负荷与日最高气温曲线拟合度较高的研究结论吻合.

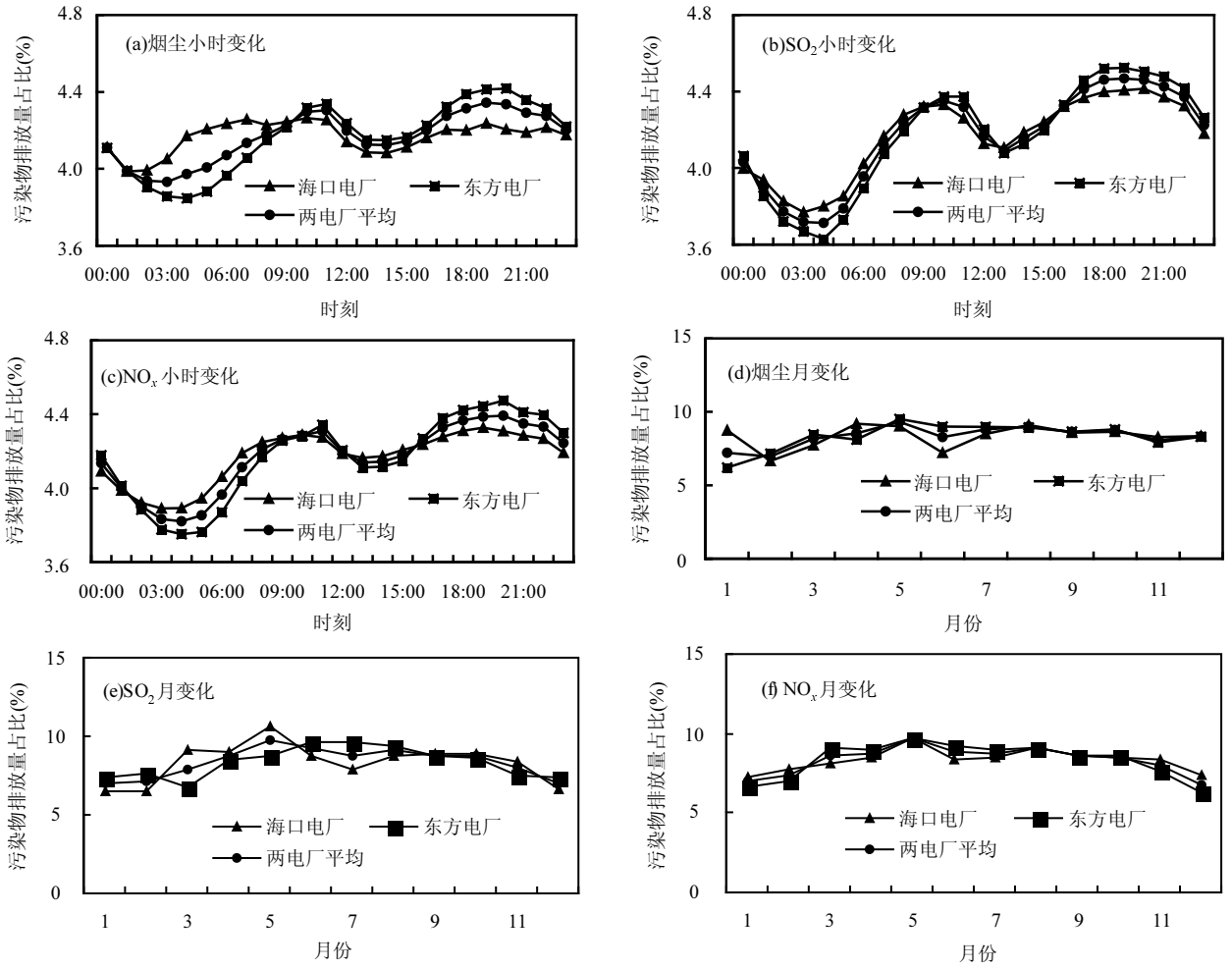


图 3 海南省火电厂大气污染物排放量小时及月均变化情况

Fig.3 Air pollutants emissions of power plants varies by hours and months in Hainan

两家火电厂大气污染物排放量 24h 变化呈现明显的“两峰两谷”特征,污染物排放在凌晨 4:00 左右出现最低值(烟尘、SO_2、NO_x 分别为 3.93%、3.71%、3.82%),随后逐渐增加至上午 11:00 左右出现峰值(烟尘、SO_2、NO_x 分别为 4.31%、4.35%、4.31%), 14:00 左右出现全天第二个低谷(烟尘、SO_2、NO_x 分别为 4.12%、4.09%、4.14%),午后污染物排放再次逐渐上升至下午 19:00 左右出现全天最大值(烟尘、SO_2、NO_x 分别为 4.34%、4.47%、4.39%),随后污染物排放量再次逐渐降低.污染物排放日间变化曲线与社会生产和居民生活规律吻合,与现有研究成果[9,37-38]相一致.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2.2　海南省火电大气环境影响分析

2.2.1　气象模拟结果验证　结合海南省火电厂分布,选取地面气象监测站东方站的气象资料作为气象验证数据,该站点坐标为(108.617°E,19.100°N),利用 CALPUFF 后处理模块的 PRTMET 功能提取 CALMET 文件中与东方站坐标一致的气象数据(温度、风速等),评估模拟值与监测值的准确度和可信度.图 4 给出了东方站 2015 年 343d CALMET 模拟结果与气象监测值的比对(东方站 2015 年 4 月部分天数地面气象监测数据缺失),可见风速模拟值和温度模拟值与气象监测值均吻合较好,相关系数分别达到 0.82 和 0.95,CALMET 模拟的气象场具有一定的准确性,能够反映研究区域气象场变化情况.

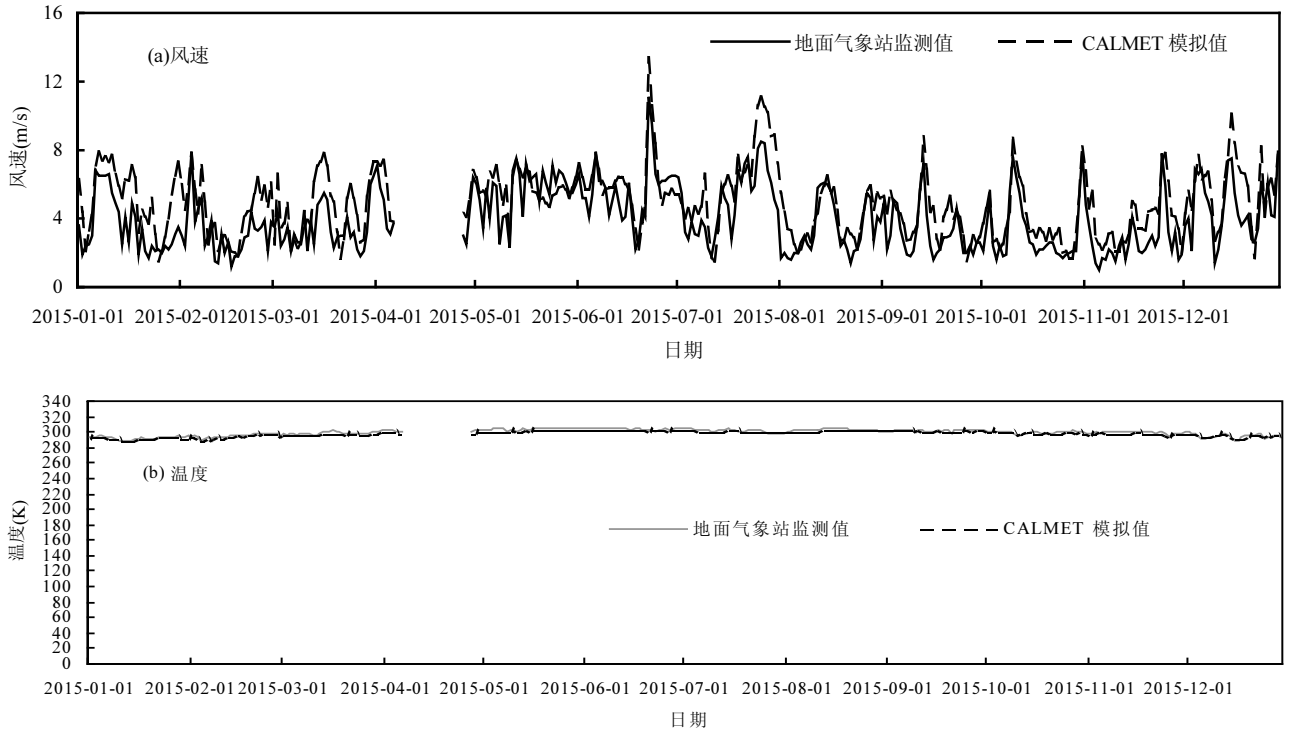


图 4　2015 年海南省气象地面站监测值与 CALMET 气象要素模拟值对比

Fig.4　Comparison of monitored values from meteorological ground stations and CALMET simulated values

2.2.2　3 种情景下大气环境影响分析

(1)现状情景影响分析

基于 2015 年海南火电排放清单数据(HPEC),分析现状情景下海南火电企业对区域内 SO_2、NO_x、$PM_{2.5}$、PM_{10} 年均质量浓度分布(图 5、表 2)和小时质量浓度分布的贡献(图 6),其中小时质量浓度指各污染物全年最大小时浓度平均.从图 5 和图 6、表 2 可以看出,各污染物浓度总体呈现西高东低的趋势,浓度较高地区主要集中在西部的东方市、临高县、昌江县及儋州市等地区,这与污染物排放源的分布有关,且海南岛地形为中高边低,中部山地阻碍污染物扩散.

SO_2、$PM_{2.5}$、PM_{10} 最高年均浓度均出现在东方市,分别为 0.015, 0.006 和 0.003μg/m^3,NO_x 在临高县出现最高值,为 0.01μg/m^3.海口市和三亚市分别是海南省省会和重要旅游城市,现状情景下海口市 SO_2、NO_x、$PM_{2.5}$、PM_{10} 年均浓度分别为 0.004 ,0.002, 0.001 和 0.002μg/m^3, 三亚市 SO_2、NO_x、$PM_{2.5}$、PM_{10} 年均浓度分别为 0.003, 0.003, 0.001 和 0.002μg/m^3.

小时浓度扩散情况更能够体现污染源的分布影响,如表 2 所示, SO_2、NO_x、$PM_{2.5}$、PM_{10} 小时浓度最高值均出现在东方市,分别为 1.466, 0.966 , 0.414 和 0.222μg/m^3.现状情景下海口市 SO_2、NO_x、$PM_{2.5}$、PM_{10} 小时浓度分别为 0.456, 0.340, 0.093 和 0.143μg/m^3,三亚市 SO_2、NO_x、$PM_{2.5}$、PM_{10} 小时浓度分别为 0.373, 0.477,0.148 和 0.093μg/m^3.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

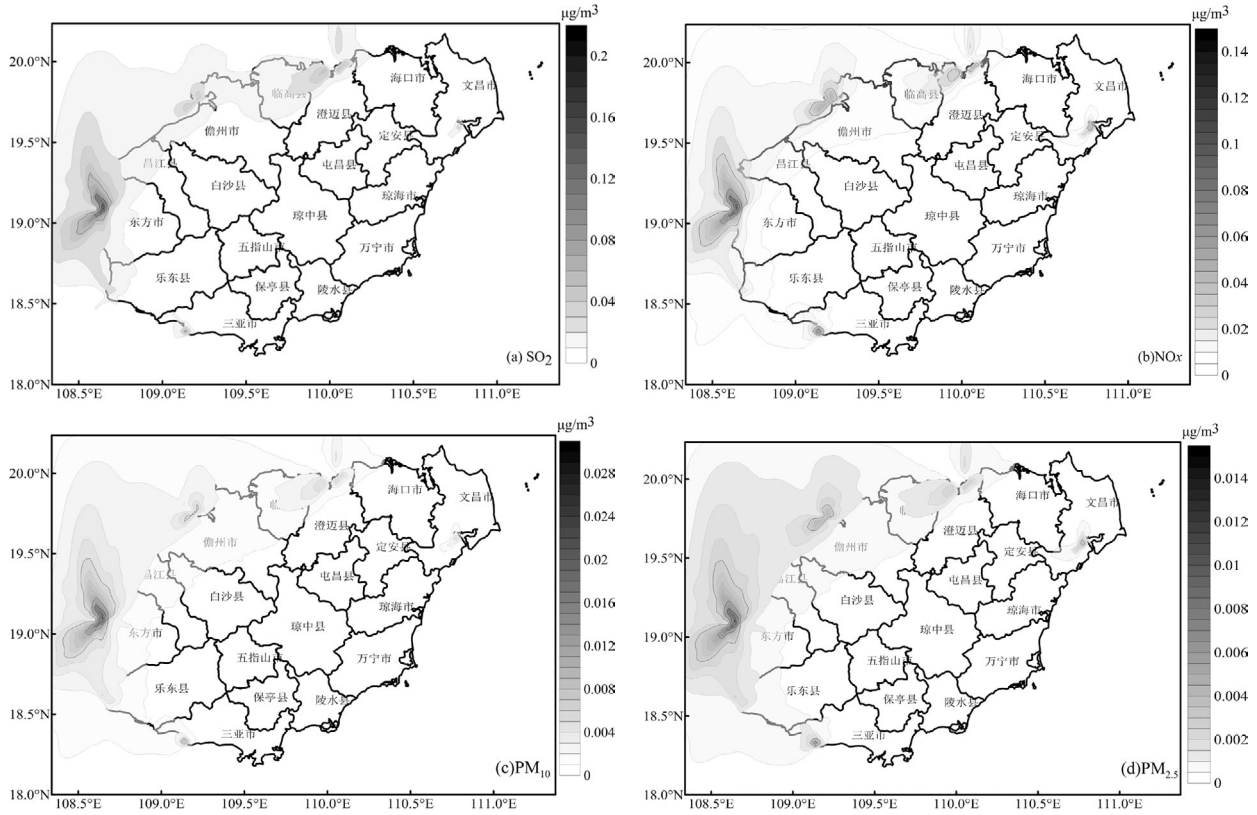


图 5 现状情景下火电厂排放对主要大气污染物年均浓度贡献

Fig.5 Contribution of power plants to air pollutants annual average concentrations under current situation

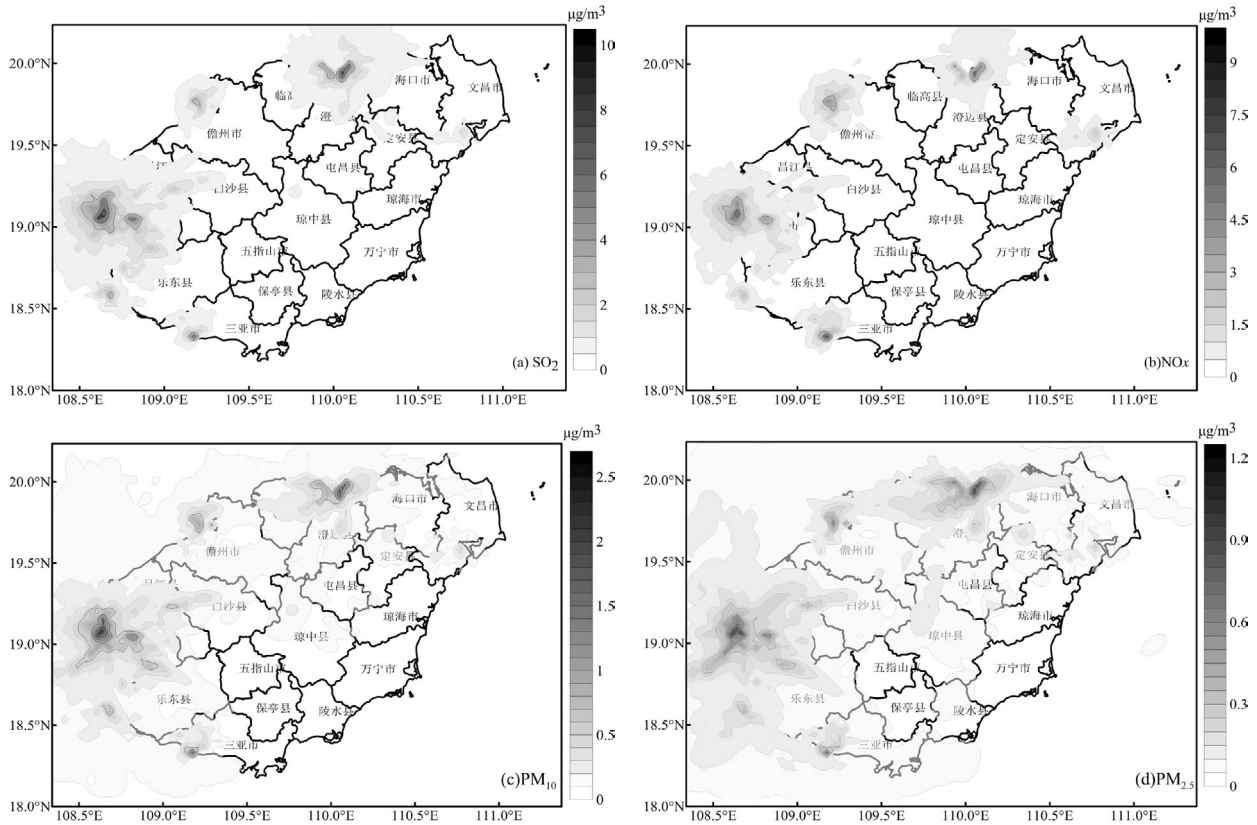


图 6 现状情景下火电厂排放对主要大气污染物小时浓度贡献

Fig.6 Contribution of power plants to air pollutants hourly average concentrations under current situation

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 2　3 种情景下火电厂对各城市大气污染物年均浓度贡献(μg/m^3)

Table 2　average concentration of air pollutants from power plants under 3scenarios (μg/m^3)

城市	SO_2 年均值			NO_x 年均值			PM_{10} 年均值			$PM_{2.5}$ 年均值		
	现状情景	许可情景	超低情景	现状情景	许可情景	超低情景	现状情景	许可情景	超低情景	现状情景	许可情景	超低情景
海口市	0.004	0.004	0.001	0.002	0.003	0.001	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0
三亚市	0.003	0.003	0.002	0.003	0.007	0.003	0.002	0.002	0.001	0.001	0.002	0.001
文昌市	0.003	0.005	0.002	0.003	0.005	0.003	0.001	0.003	0.001	0.001	0.001	0.001
东方市	0.015	0.017	0.004	0.009	0.014	0.007	0.006	0.002	0.004	0.003	0.005	0.002
临高县	0.014	0.015	0.003	0.01	0.008	0.004	0.004	0.01	0.002	0.003	0.003	0.001
澄迈县	0.008	0.008	0.002	0.005	0.004	0.002	0.003	0.005	0.001	0.002	0.002	0.001
定安县	0.002	0.003	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.003	0.001	0.001	0.001	0
琼海市	0.001	0.002	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0
屯昌县	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0
儋州市	0.009	0.01	0.003	0.007	0.007	0.004	0.004	0.002	0.002	0.002	0.003	0.001
万宁市	0.001	0.001	0	0	0.001	0	0.001	0.004	0	0	0.001	0
白沙县	0.005	0.005	0.001	0.003	0.003	0.002	0.002	0.001	0.001	0.002	0.002	0.001
琼中县	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.003	0.001	0.001	0.001	0
昌江县	0.009	0.01	0.003	0.006	0.007	0.004	0.004	0.002	0.002	0.003	0.004	0.001
五指山市	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.006	0.001	0.001	0.001	0
乐东县	0.005	0.007	0.003	0.003	0.007	0.003	0.003	0.002	0.002	0.002	0.003	0.001
保亭县	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0	0.001	0.005	0.001	0.001	0.001	0
陵水县	0.001	0.001	0	0	0.001	0	0.001	0.002	0	0.001	0.001	0

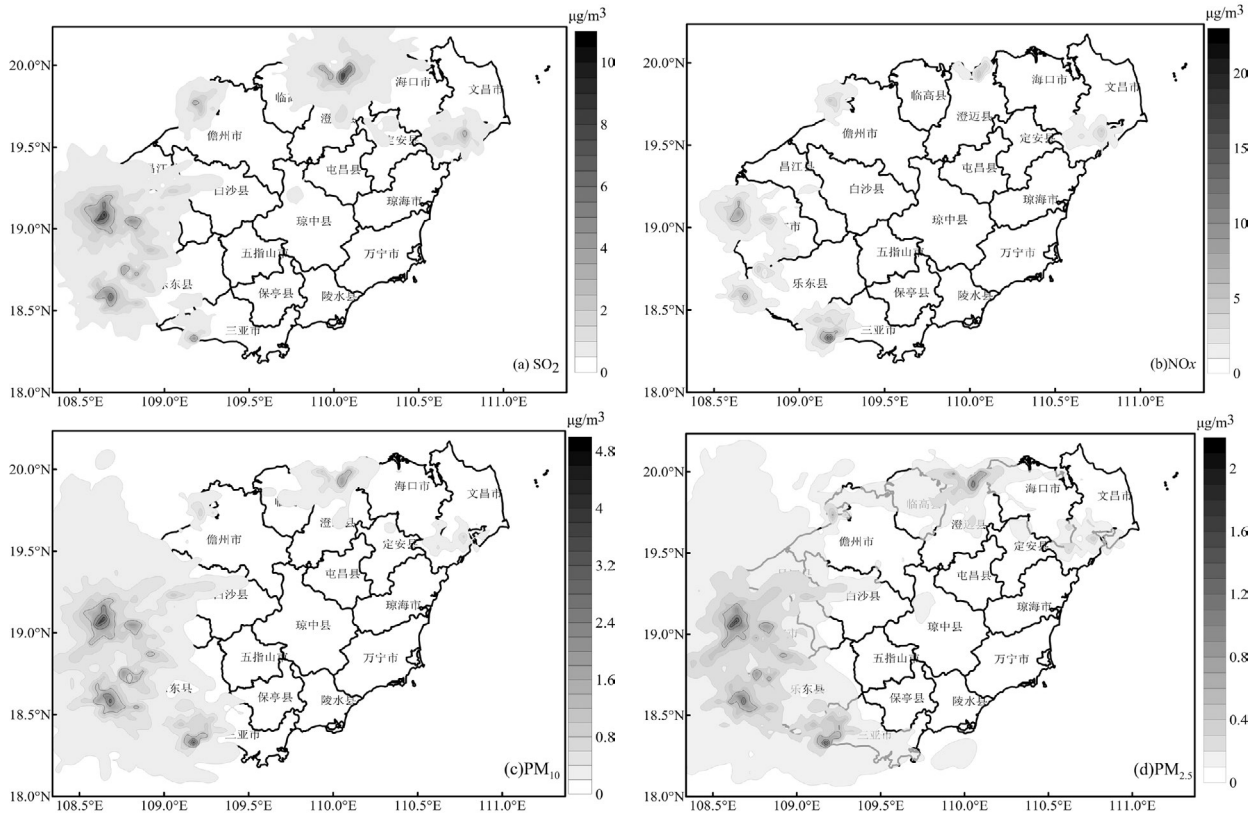


图 7　许可情景下火电厂排放对主要大气污染物小时浓度贡献图

Fig.7　Contribution of power plants to air pollutants hourly average concentrations under permit situation

(2)排污许可情景下影响分析

基于独立火电厂每个排气筒的许可排放量,分析排污许可情景下火电厂对区域大气环境的影响. 许可情景下各污染物浓度分布情况与现状情景基

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

本相同,最高浓度出现在东方市.与现状排放情景相比,东方市 SO_2、NO_x、$PM_{2.5}$、PM_{10} 年均浓度分别增加 0.002, 0.004, 0.004 和 0.002μg/m^3, NO_x、$PM_{2.5}$、PM_{10} 小时浓度分别增加 0.258,0.091 和 0.237μg/m^3, SO_2 小时浓度略降低 0.128μg/m^3(可能是装机容量最大、发电量最多的华能东方电厂 SO_2 许可排放量低于现状排放量导致的).

排污许可情景下海口市 SO_2、NO_x、$PM_{2.5}$、PM_{10} 年均浓度与现状情景基本保持一致,SO_2、NO_x、$PM_{2.5}$ 小时浓度较现状情景有所增加,分别为 0.518, 0.357,0.096μg/m^3, PM_{10} 小时浓度较现状情景稍有降低,为 0.139μg/m^3.三亚市 SO_2、$PM_{2.5}$、PM_{10} 年均浓度基本与现状情景下相当,NO*x* 年均浓度比现状情景下大幅增加至 0.007μg/m^3;NO_x、$PM_{2.5}$、PM_{10} 小时浓度较现状情景增幅较大,分别为 1.115,0.198 和 0.359μg/m^3, 2 种情景下 SO_2 小时浓度基本相当.

(3)超低情景影响分析

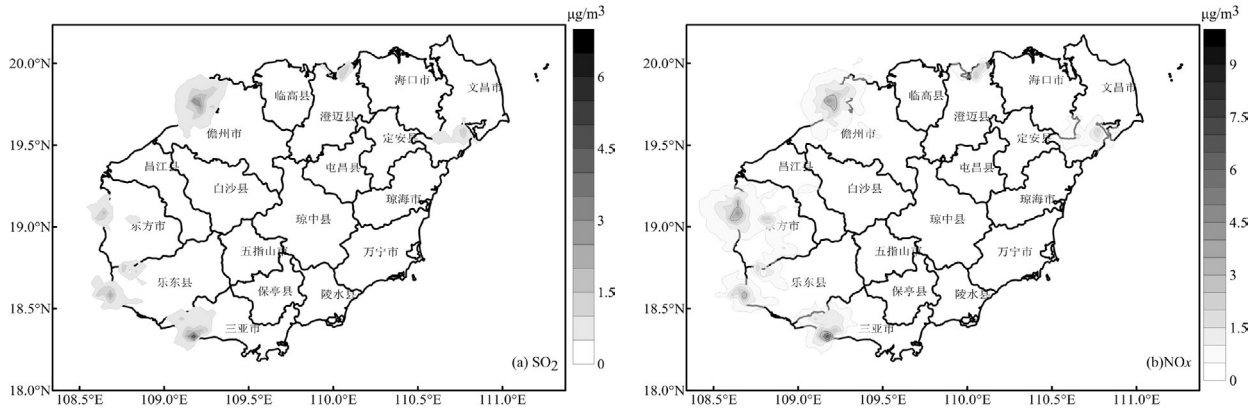
假设海南省 6 家独立电厂均达到超低要求(烟尘 10 ,35,50mg/Nm^3),分析超低排放标准情况下火电企业对大气环境的影响,研究区域内各污染物小时浓度分布如图 8.可见东方市和三亚市受影响较大,与现状情景相比, SO_2、NO_x、$PM_{2.5}$、PM_{10} 浓度分别减少 1.117, 0.356, 0.193 和 0.113μg/m^3,超低排放情景下火电厂对区域大气环境的影响程度和影响范围显著降低.

超低排放情景下,海口市 SO_2、NO_x、PM_{10} 年均浓度均降低至 0.001μg/m^3,$PM_{2.5}$ 年均浓度降至 0μg/m^3;SO_2、NO_x、$PM_{2.5}$、PM_{10} 小时浓度分别降至 0.126, 0.180, 0.036 和 0.054μg/m^3;各污染物在三亚市的小时浓度基本与现状情景下保持一致.

(4)三种情景对比分析

对比现状、许可及超低排放 3 种情景下火电厂对大气环境的影响程度,分别计算许可、超低与现状情景下各污染物的年均浓度以及小时浓度的比值(图 9).由图 9 可见,许可情景下火电厂对大气污染物的浓度贡献在大部分地区高于现状情景(现状情景下对万宁市 NO_x、$PM_{2.5}$ 和陵水县 NO_x 的年均浓度贡献为 0,图 9 中不显示万宁市 NO_x、$PM_{2.5}$ 和陵水县 NO_x 许可、超低情景与现状情景下年均浓度的比值).年均浓度下,许可与现状的比值最高值出现在三亚市和乐东县的 NO_x,为 2.3;比值最低值出现在临高县和澄迈县的 NO*x*,为 0.8. 各城市比值的均值为 SO_2 1.17、NO_x 1.38、PM_{10} 1.50、$PM_{2.5}$ 1.18.小时浓度下,许可与现状的比值最高值为 2.59,出现在乐东县的 PM_{10};比值最低值为 0.76,出现在屯昌县的 NO_x 上,各城市小时浓度比值的均值为 SO_2 1.14、NO_x 1.33、PM_{10} 1.36、$PM_{2.5}$ 1.22.因此,与现状情景相比,执行排污许可限值时火电对大气环境中 PM_{10} 的贡献增量最大,其次为 NO_x.

由超低情景与现状情景的比值可见,全面实施超低排放后,火电对各城市各污染物的浓度贡献将得到较大幅度的降低.从年均浓度看,超低与现状的比值最高值为 1,即两种情景下火电的影响相同;万宁市和陵水县 SO_2、PM_{10}, 保亭县 NO_x,以及海口市、定安县、琼海市、屯昌县、琼中县、五指山市、保亭县及陵水县 $PM_{2.5}$ 的年均浓度均降低至 0.各城市比值的均值为 SO_2 0.43、NO_x 0.75、PM_{10} 0.65、$PM_{2.5}$ 0.31.从小时浓度看,超低与现状的比值最高值为 1,出现在三亚市、乐东县、保亭县的 NO_x 上,最低值出现在东方市的 SO_2,为 0.17,各城市小时浓度比值的均值为 SO_2 0.38、NO_x 0.68、PM_{10} 0.53、$PM_{2.5}$ 0.48.由此可见,全面实施超低排放对大气环境中 SO_2 和 $PM_{2.5}$ 的改善程度最为明显.



(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

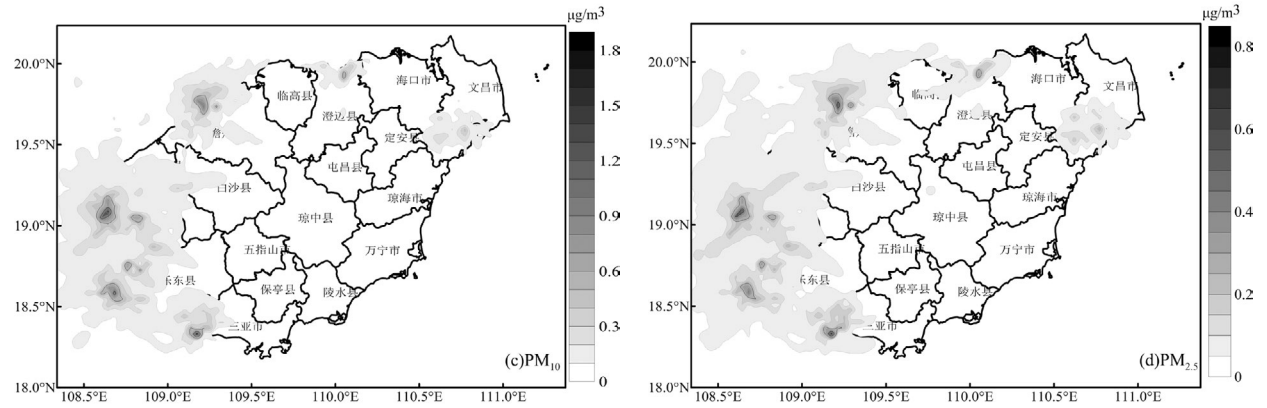


图 8　超低情景下火电厂排放对主要大气污染物小时浓度贡献

Fig.8　Contribution of power plants to air pollutants hourly average concentrations under ultra-low situation

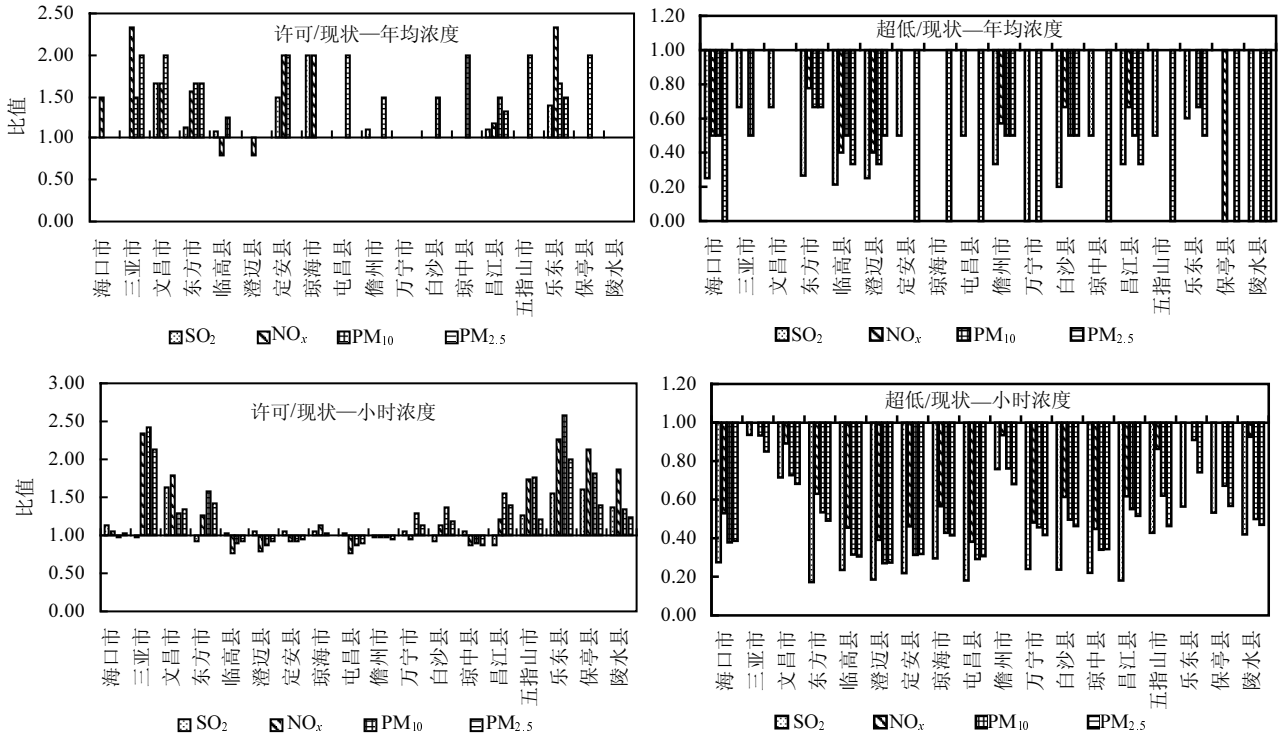


图 9　3 种情景下火电厂对各城市大气污染物浓度贡献对比

Fig.9　Comparison of contribution of power plants to air pollutants concentrations under 3scenarios

可见,海南省火电企业现状排放执行标准严于许可排放标准,未来随着海南省更加严格的大气污染治理要求,火电厂超低排放的推广将对海南当地空气质量的改善作出较可观的贡献.

2.2.3　讨论　基于海南省火电企业总量少的特点,本研究通过对每个火电企业的精准定位,建立了高空间分辨率的海南省火电排放清单,在核算污染物排放量时,采用研究团队的 2015 年全国高分率火电排放清单(HPEC,2015)代替在线监测法,与现状实际情况存在一定的差异.在时间分辨率方面,本研究以华能东方电厂和华能海口电厂的污染物排放月变化和小时变化情况作为全部 6 家火电厂大气污染物排放的时间变化规律具有一定的片面性.此外,火电属于高架源,排放的污染物对中高层大气环境质量的影响高于近地面,本研究主要分析了海南省火电厂大气污染物排放对近地面大气环境的影响,因此,存在对火电厂大气环境影响低估的可能[16].

3　结论

3.1　基于在线监测数据、环境统计数据、排污许

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

可及火电排放清单等不同统计口径的海南省火电厂各大气污染物排放量差异较大,在线监测数据统计量和排放清单计算排放量基本相当,小于许可排放量和环境统计量,且 NO_x 排放量差异大于 SO_2 和烟尘.

3.2 海南省火电厂大气污染物排放量月际分布较平稳,每月污染物排放量约占全年的 7%~10%,污染物排放量主要受气温的间接影响和电厂发电量的直接影响.火电厂大气污染物排放量 24h 变化呈现明显“两峰两谷”特征,与社会生产和居民生活规律吻合.

3.3 现状情景下,2015 年海南省火电厂对大气污染物的浓度贡献呈西高东低的形势,主要受火电厂分布、地形条件等影响.现状情景下海南省火电厂对各城市年均浓度贡献范围为 SO_2 0.001~0.015μg/m^3、NO_x 0~0.01μg/m^3、PM_{10} 0.001~0.006μg/m^3、$PM_{2.5}$ 0~0.003μg/m^3,与 2015 年海南省环境空气质量相比(海南环境空气质量 SO_2、NO_2、PM_{10}、$PM_{2.5}$ 年均浓度为 5, 9, 35, 20μg/m^3),海南省火电行业对当地环境空气污染贡献较小.

3.4 现状、许可、超低 3 种情景下,火电厂对大气环境的影响程度总体表现为许可情景>现状情景>超低情景.与现状情景相比,执行排污许可时火电厂对 PM_{10} 和 NO_x 的贡献增量最大,年均浓度分别增加 50%和 38%.全面实施超低排放后火电厂对大气环境的影响将较大幅度降低,SO_2 和 $PM_{2.5}$ 降低幅度最大,较现状情景可分别降低 57%和 69%.

参考文献:

[1] 史文峥,杨萌萌,张绪辉,等.燃煤电厂超低排放技术路线与协同脱除 [J]. 中国电机工程学报, 2016,36(16):4308-4318.
Shi W Z, Yang M M, Zhang X H, et al. Ultra-low emission technology route and synergistic removal of coal-fired power plants [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2016,36(16):4308-4318.

[2] 朱法华,王 圣.煤电大气污染物超低排放技术集成与建议 [J]. 环境影响评价, 2014,(5):25-29.
Zhu F H, Wang S. Integration and suggestion of ultra-low emission technology for coal-fired power plants air pollutants [J]. Environmental Impact Assessment, 2014,(5):25-29.

[3] 姜鑫民,张嵛斌.广东省燃煤电厂超低排放减排潜力及其经济效益分析 [J]. 中国能源, 2016,38(3):25-28.
Jiang X M, Zhang Y B. Analysis on the potential of ultra-low emission reduction and its economic benefits of coal-fired power plants in Guangdong province [J]. China Energy, 2016,38(3):25-28.

[4] 朱法华,王 圣,孟令媛.燃煤超低排放的减排潜力及其实施的必要性分析 [J]. 环境保护, 2016,44(7):42-46.
Zhu F H, Wang S, Meng L Y. Analysis on the emission reduction potential of coal-fired ultra-low emission and the necessity of its implementation [J]. Environmental Protection, 2016,44(7):42-46.

[5] Xue W B, Wang J N, Niu H, et al. Assessment of air quality improvement effect under the national total emission control program during the twelfth national five-year plan in China [J]. Atmospheric Environment, 2013,68(4):74-81.

[6] 钟悦之,蒋春来,宋晓辉,等.火电行业“十三五”主要大气污染物减排潜力情景分析研究 [J]. 环境科学与管理, 2016,42(12):58-62,136.
Zhong Y Z, Jiang C L, Song X H, et al.Scenario Analysis of major air pollutant emission reduction potentials in the "13th five-year plan" of thermal power industry [J]. Environmental Science and Management, 2016,42(12):58-62,136.

[7] 孙现伟,邓 双,朱 云,等.我国燃煤电厂 $PM_{2.5}$ 减排潜力预测与分析 [J]. 环境科学研究, 2016,29(5):637-645.
Sun X W, Deng S, Zhu Y, et al. Prediction and analysis of $PM_{2.5}$ emission reduction potential of coal-fired power plants in China [J]. Environmental Science Research, 2016,29(5):637-645.

[8] 谢 晔.火电企业二氧化硫排放量核算方法研究——以浙江省为例 [J]. 低碳世界, 2017,(11):14-15.
Xie Y. Study on accounting method of sulfur dioxide emission in thermal power enterprises: taking Zhejiang province as an example [J]. Low Carbon World, 2017(11):14-15.

[9] 朱文波,李 楠,黄志炯,等.广东省火电污染物排放特征及其对大气环境的影响 [J]. 环境科学研究, 2016,29(6):810-818.
Zhu W B, Li N, Huang Z J, et al. Characteristics of thermal power pollutants in Guangdong Province and their impact on atmospheric environment [J]. Environmental Science Research, 2016,29(6):810-818.

[10] Liu F, Zhang Q, Tong D, et al. High-resolution inventory of technologies, activities, and emissions of coal-fired power plants in China from 1990 to 2010 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015,23(15):13299-13317.

[11] Chen L H, Sun Y Y, Wu X C, et al. Unit-based emission inventory and uncertainty assessment of coal-fired power plants [J]. Atmospheric environment, 2014,99(12):527-535.

[12] 丁青青,魏 伟,沈 群,等.长三角地区火电行业主要大气污染物排放估算 [J]. 环境科学, 2015,36(7):2389-2394.
Ding Q Q, Wei W, Shen Q, et al. Estimation of major air pollutant emissions from thermal power industry in the Yangtze River Delta [J]. Environmental Sciences, 2015,36(7):2389-2394.

[13] 崔建升,屈加豹,伯 鑫,等.基于在线监测的 2015 年中国火电排放清单 [J]. 中国环境科学, 2018,38(6):2062-2074.
Cui J S, Qu J B, Bo X, et al. 2015 China thermal power emissions inventory based on online monitoring [J]. Chinese Environmental Science, 2018,38(6):2062-2074.

[14] Hao J M, Wang L T, Shen M J, et al. Air quality impacts of power plant emissions in Beijing [J]. Environmental Pollution, 2007,2(147):401-408.

[15] 伯 鑫,王 刚,温 柔,等.京津冀地区火电企业的大气污染影响 [J]. 中国环境科学, 2015,35(2):364-373.
Bo X, Wang G, Wen R, et al. The impact of thermal power enterprises on the air pollution in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Chinese Environmental Science, 2015,35(2):364-373.

[16] 薛文博,许艳玲,王金南,等.全国火电行业大气污染物排放对空气质量的影响 [J]. 中国环境科学, 2016,36(5):1281-1288.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Xue W B, Xu Y L, Wang J N, et al. The impact of air pollutant emissions from the national thermal power industry on air quality [J]. Chinese Environmental Science, 2016,36(5):1281−1288.

[17] 莫　华,朱法华,王　圣.火电行业大气污染物排放对 $PM_{2.5}$ 的贡献及减排对策 [J]. 中国电力, 2013,46(8):1−6.
Mo H, Zhu F H, Wang S. Contribution of atmospheric pollutant emissions to $PM_{2.5}$ in thermal power industry and countermeasures for reducing emissions [J]. China Power, 2013,46(8):1−6.

[18] HJ2.2−2008　环境影响评价技术导则:大气环境 [S].
HJ2.2−2008　Guidelines for environmental impact assessment: atmospheric environment [S].

[19] 伯　鑫.CALPUFF 模型技术方法与应用[M]. 北京: 中国环境出版社, 2016:1−2.
Bo X. The technology method and application of CALPUFF model [M]. Beijing: China Environment Press, 2016:1−2.

[20] Scire J S, Strimaitis D G, Yamartino R J. A user's guide for CALPUFF dispersion model [M]. Concord, MA: Earth Tech,Inc., 2000.

[21] 伯　鑫,丁　峰,徐　鹤,等.大气扩散 CALPUFF 模型技术综述 [J]. 环境监测管理与技术, 2009,21(3):9−13.
Bo X, Ding F, Xu H, et al. A review of atmospheric diffusion CALPUFF model technology [J]. Environmental Monitoring Management and Technology, 2009,21(3):9−13.

[22] Sabah A W, Ali S, Ali A D. Application of California Puff (CALPUFF) model: a case study for Oman [J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2011,1(13):177−189.

[23] 朱　好,张宏升,蔡旭晖,等.CALPUFF 在复杂地形条件下的近场大气扩散模拟研究 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2013,49(3):452−462.
Zhu H, Zhang H S, Cai X H, et al. Near−field atmospheric diffusion simulation under complex terrain conditions using CALPUFF model [J]. Journal of Peking University (Natural Science Edition), 2013,49(3): 452−462.

[24] Lee H D, Yoo J W, Kang M K, et al. Evaluation of concentrations and source contribution of $PM_{10}$and SO_2emitted from industrial complexes in Ulsan, Korea: Interfacing of the WRF−CALPUFF modeling tools [J]. Atmospheric Pollution Research, 2014,5(4):664−676.

[25] 唐晓兰,程水源.海南岛大气污染物扩散特征 [J]. 环境工程, 2016, 34(7):93−97.
Tang X L, Chen S Y. Diffusion characteristics of atmospheric pollutants in Hainan Island [J]. Environmental Engineering, 2016, 34(7):93−97.

[26] 赵　伟,范绍佳,谢文彰. AERMOD 和 CALPUFF 对沿海电厂烟气扩散模拟对比研究 [J]. 环境科学与技术, 2015,38(3):189−194.
Zhao W, Fan S J, Xie W Z. Comparative study of AERMOD and CALPUFF on simulation of flue gas diffusion in coastal power plants [J]. Environmental Science and Technology, 2016,34(7):93−97.

[27] Fisher A L, Parsons M C, Roberts S E, et al. Long−term SO_2 dispersion modeling over a coastal region [J]. Environmental technology, 2003,24(4):399−409.

[28] Levy J I, Wilson A M, Evans J S, et al. Estimation of primary and secondary particulate matter intake fractions for power plants in Georgia [J]. Environmental Science and Technology, 2003,37(24): 5528−5536.

[29] Levy J I, Greco S I, Spengler J D. The importance of population susceptibility for air pollution risk assessment: s case study of power plants near Washington, DC [J]. Environmental Health Perspectives, 2002,110(12):1253−1260.

[30] 伯　鑫,王　刚,田　军,等.AERMOD 模型地表参数标准化集成系统研究 [J]. 中国环境科学, 2015,35(9):2570−2575.
Bo X, Wang G, Tian J, et al. Research on standardization and integration system of AERMOD model surface parameters [J]. Chinese Environmental Science, 2015,35(9):2570−2575.

[31] 王　芳,李明君,范　清.气象场对 CALPUFF 模式预测某沿海电厂 $PM_{2.5}$ 浓度的影响 [J]. 有色金属工程, 20155,(6):84−88.
Wang F, Li M J, Fan Q. Effect of meteorological field on prediction of $PM_{2.5}$ concentration in a coastal power plant by CALPUFF mode [J]. Non−ferrous Metal Engineering, 20155,(6):84−88.

[32] 胡月琪,邬晓东,王　琛,等.北京市典型燃烧源颗粒物排放水平与特征测试 [J]. 环境科学, 2016,37(5):1653−1661.
Hu Y Q, Wu X D, Wang C, et al. Emission standards and characteristics of typical combustion sources particulates in Beijing [J]. Environmental Sciences, 2016,37(5):1653−1661.

[33] 肖明卫,黄　嵘,仵彦卿.燃煤电厂烟气脱硫设施出口二氧化硫排放量核算方法比较 [J]. 环境研究与监测, 2010,23(3):14−15.
Xiao M W, Huang R, Wu Y Q. Comparison of accounting methods for sulfur dioxide emissions from flue gas desulfurization facilities in coal−fired power plants [J]. Environmental research and monitoring, 2010,23(3):14−15.

[34] 伯　鑫,何友江,商国栋,等.基于 CEMS 全国污染源清单数据库系统开发与应用 [J]. 环境工程, 2014,32(8):105−108+113.
Bo X, He Y J, Shang G D, et al. Development and application of national pollution source inventory database system based on CEMS [J]. Environmental Engineering, 2014,32(8):105−108+113.

[35] 戴佩虹.基于 CEMS 数据的火电厂 SO_2 和 NO_x 排放因子建立与不确定性分析 [D]. 广州:华南理工大学, 2016.
Dai P H. The thermal power plants SO_2 and NO_x emission factor set and uncertainty analysis that based on the CEMS data [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.

[36] 李琳玮,黄　亮.浅析气温对海南电网负荷特性的影响 [J]. 科技经济导刊, 2017,(30):44−45.
Li L W, Huang L. Analysis of the influence of temperature on the load characteristics of Hainan power grid [J]. Science and Technology Economic Guide, 2017(30):44−45.

[37] 王占山,车　飞,潘丽波.火电厂大气污染物排放清单的分配方法研究 [J]. 环境科技, 2014,27(2):45−48.
Wang Z S, Che F, Pan L B. Study on the allocation method of air pollutant emission inventory in thermal power plants [J]. Environmental Technology, 2014,27(2):45−48.

[38] 伯　鑫.中国电力行业大气污染物排放时间特征谱研究 [C]//2017 中国环境科学学会科学与技术年会论文集(第一卷).中国环境科学学会, 2017.
Bo X. Study on time characteristic spectrum of air pollutant emission in China's power industry [C]//Proceedings of the 2017 Chinese Society of Environmental Sciences Science and Technology Annual Conference (Volume I). Chinese Society of Environmental Sciences, 2017.

致谢：感谢环境保护部环境监察局为本研究提供污染源在线监测资料.

作者简介：阚　慧(1990−),女,江苏徐州人,硕士研究生,主要大气排放清单及数值模拟.发表论文 7 篇.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net