□环境监测与评价

DOI：10.19478/j.cnki.2096-2347.2025.02.01

环境影响评价中空气质量模型综述及其效果评估

王昭桐[1,2]，刘子伊[3]，张心钰[4]，王 刚[5]，徐 鑫[1,2]，伯 鑫[1,2*]

（1.北京化工大学 化学工程学院，北京 100029；2.北京化工大学 北化中国工业碳中和研究院，北京 100029；
3.北京国环清华环境工程设计研究院有限公司，北京 100084；4.北京市污染源管理事务中心，北京 100089；
5.三捷环境工程咨询（杭州）有限公司，杭州 310012）

摘 要： 生态环境部发布了《环境影响评价技术导则 大气环境》（HJ 2.2—2018），推荐了AERMOD（American Meteorological Society-Environmental Protection Agency Regulatory Model）、CALPUFF（California PUFF Model）、ADMS（Atmospheric Dispersion Modelling System）、CMAQ（Community Multiscale Air Quality）等空气质量模型，但目前国内尚无空气质量模型在环境影响评价（environmental impact assessment，EIA，以下简称为环评）中的应用效果评估研究。本研究系统介绍了AERMOD、CALPUFF、ADMS、CMAQ等空气质量模型在国内外应用情况，并分析了这些模型的优缺点及适用范围；分析了369本建设项目环评报告数据，结果显示AERMOD应用较多，CALPUFF次之，ADMS最少（仅1本）。建议我国环评体系补充适于建设项目环评的局地尺度臭氧模拟模型，环评体系仅保留1个局地模型为局地尺度法规模型。

关键词： AERMOD；CALPUFF；ADMS；CMAQ；环境影响评价

中图分类号：X51 **文献标志码：**A **文章编号：**2096-2347(2025)02-0001-14

A Review of Air Quality Models and Their Effects in Environmental Impact Assessment

WANG Zhaotong[1,2], LIU Ziyi[3], ZHANG Xinyu[4], WANG Gang[5], XU Xin[1,2], BO Xin[1,2*]

(*1.College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 2.BUCT Institute for Carbon-neutrality of Chinese Industries, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 3.Beijing Guohuan Tsinghua Environmental Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing 100084, China; 4.Beijing Municipal Pollution Source Management Center, Beijing 100089, China; 5.Trinity Consultants Inc., Hangzhou 310012, China*)

Abstract: The Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China issued the "Technical guidelines for environmental impact assessment—Atmospheric environment" (HJ 2.2-2018), which recommended AERMOD (American Meteorological Society-Environmental Protection Agency Regulatory Model)、CALPUFF (California PUFF Model)、ADMS (Atmospheric Dispersion Modelling System)、CMAQ(Community Multiscale Air Quality), and other air quality models. However, there is currently no study on the evaluation of the application effect of air quality models in China's environmental impact assessment. This study systematically introduced the application of AERMOD, CALPUFF, ADMS, CMAQ, and other air quality models both domestically and internationally, and analyzed the advantages and disadvantages of these models and their applicable scope. The study analyzed the

收稿日期： 2024-02-04

基金项目： 国家自然科学基金（No.72174125）；中央高校基本科研业务费资助项目（No.buctrc202133）；校企合作项目（WRYZX-2024-0014）。

作者简介： 王昭桐，硕士研究生，主要从事空气质量模型研究。E-mail:wangzt@buct.edu.cn

***通信作者：** 伯鑫，教授，博士，主要从事排放清单、空气质量模型研究。E-mail:boxin@buct.edu.cn

引用格式： 王昭桐，刘子伊，张心钰，等.环境影响评价中空气质量模型综述及其效果评估[J].三峡生态环境监测,2025,10(2):1-14.

Citation format: WANG Z T, LIU Z Y, ZHANG X Y, et al. A review of air quality models and their effectsin environmental impact assessment[J]. Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges,2025,10(2):1-14.

中国知网 https://www.cnki.net

data from 369 EIA (Environmental Impact Assessment) reports of construction projects, and the results show that AERMOD is the most used, followed by CALPUFF, and ADMS is the least (only one report). It is suggested that China's EIA system should supplement the local scale ozone simulation model suitable for construction project EIA, and only retain one localized model as the local scale regulation model in the EIA system.

Key words: AERMOD; CALPUFF; ADMS; CMAQ; environmental impact assessment

空气质量模型运用气象学原理及数学方法，模拟污染物在大气中的输送、扩散、沉降、化学反应等过程，能够反映污染物在大气中的扩散及空间分布情况，是大气污染研究和环境管理应用中的重要工具之一[1-2]。

1970年至今，空气质量模型的发展历程可分为三代[3]。第一代空气质量模型以质量守恒、湍流扩散统计理论为主要原理，考虑了简单的化学反应机制，代表模型包括ISC（Industrial source complex）、AERMOD（AMS/EPA regulatory model）、CALPUFF（California puff model）模型等。值得注意的是，第一代空气质量模型的划分并不是非常明确，例如AERMOD、CALPUFF模型应用了大气研究最新成果，与传统的第一代模型已有很大不同。第二代空气质量模型在第一代空气质量模型的基础上增加了复杂的气象机制及非线性反应机制，代表模型包括光化学污染模式（例如Urban airshed model，UAM等）、区域尺度光化学模型（例如Regional oxidant model，ROM），酸沉降模式（例如Regional acid deposition model，RADM等）。第三代空气质量模型考虑了气象和大气污染物之间的双向反馈，代表模型包括CMAQ（The community multiscale air quality modeling system）、CAMx（Comprehensive air quality model with extensions）、WRF－CHEM（Weather research and forecasting model coupled to chemistry）等[4]。美国规定了多种空气质量模型为法规模型，包括AERMOD、CMAQ等多种模型[5]。欧盟、英国环保局等为推进空气质量模型的规范化使用同样提供了多种指南[6]。2018年中国生态环境部发布了《环境影响评价技术导则　大气环境》（HJ 2.2—2018）[7]（以下简称“大气导则”），推荐了AERMOD、CALPUFF、ADMS（Atmospheric dispersion modeling system）、CMAQ等空气质量模型。目前，针对我国一些环境影响评价（environmental impact assessment，EIA，简称环评）报告存在空气质量模型应用不规范等问题[8]，研究人员开展了CALPUFF、AERMOD在我国环境影响评价应用中的标准化研究[9-12]。目前，尚无空气质量模型在我国环评中的应用效果评估研究。

本研究系统介绍了我国环评中AERMOD、CALPUFF、ADMS、CMAQ等空气质量模型发展情况，并基于全国2018—2021年的369本环评报告书的数据，开展了空气质量模型在我国环评中的应用效果评估，为我国环评大气导则修订提供支撑。

1　空气质量模型综述

按模拟尺度分类，可将模型划分为适用于局地尺度（五十千米以下）、城市尺度（几十千米到几百千米）、区域尺度（几百千米以上）等[13]。本研究介绍了大气导则中推荐的几种不同空间尺度的空气质量模型的基本特征、适用条件及其应用等。其中AERMOD、CMAQ空气质量模型均为美国环保署和中国生态环境部推荐的法规模型。

1.1　局地尺度模型

1.1.1　AERMOD模型

AERMOD模型为稳态高斯烟羽扩散模式[14]，主要以行星边界层湍流结构和尺度概念为基础来模拟污染物。在污染物大气扩散模拟过程中，包含了对地面源和高架源以及简单和复杂地形的处理[14]。AERMOD模拟范围一般为50 km以内[7]，其最新版本为2023年发布的23132版本，由美国环保署维护。

AERMOD模型系统由AERMOD（扩散模型）、AERMET（气象数据预处理器）和AERMAP（地形数据预处理器）3个模块构成[14-15]。AERMET（气象数据预处理器）为气象数据处理模块，将气象数据转化为AERMOD所能识别的地面气象数据文件（SFC文件）和垂直廓线文件（PFL文件）。AERMAP（地形数据预处理器）为地形数据处理模块，从USGS（United States Geological Survey，美国地质勘探局）高程数据中提取受体点及排放源

中国知网 https://www.cnki.net

海拔高度和山高尺度等数据。AERMOD（扩散模型）为扩散模块，主要计算在简单或复杂地形条件下的污染物扩散[15]。

AERMOD优点体现在：（1）该模型操作较为简单；（2）计算速度快；（3）代码公开。但由于其化学机制较为简单及计算原理要求有效风速不能为零，其缺点有：（1）无法模拟空气中O_3和二次$PM_{2.5}$的浓度情况；（2）风场只能输入单个气象场；（3）无法模拟静风的情况[16-17]。

AERMOD广泛应用于局地尺度下空气质量影响评估，包括工业源、交通源、工业园区排放等对周边空气质量的影响。

（1）工业污染源模拟

历年来，AERMOD模型被广泛用于分析不同工业污染源对周边空气质量的影响，涉及焦化、火电、垃圾焚烧、钢铁等众多行业。李冰晶等[18]利用AERMOD模型模拟了2010年甘肃省某焦化项目对周边大气环境中SO_2浓度的影响，结果表明该项目的运行排放未使区域内SO_2浓度超标。Mokhtar等[19]利用AERMOD模型模拟了2008—2012年马来西亚某燃煤电厂排放情况，评估了其对周边大气中Hg与SO_2等污染物的影响。模拟结果显示SO_2扩散对周边10 km范围内居民可能造成健康风险影响，Hg不造成健康风险影响。刘文博[20]利用AERMOD模型模拟了2018年陕西省某石化企业VOCs排放对厂区及周边范围VOCs浓度分布的影响，进一步依据模拟VOCs最大落地浓度划分VOCs浓度高值区。陈雷等[21]利用AERMOD模型模拟了2020年河北省某钢铁厂在新冠时期前后对周边空气质量的影响，模拟污染物包括SO_2、NO_x、PM_{10}，结果显示在疫情管控期间各污染物平均浓度贡献占比及模拟值与实测值的相关性更高。伯鑫等[22]利用AERMOD模型模拟了2017年河南省七家钢铁厂在不同规划方案下对周边空气质量的影响，模拟污染物包括SO_2、NO_2、$PM_{2.5}$，根据不同规划情境下钢铁厂贡献浓度评估出最优整合方案。

（2）交通源模拟

AERMOD模型在道路源模拟方面应用也较为广泛，涉及多种机动车排放污染物（如NO_x、黑碳、CO等）等。薛佳平等[23]利用AERMOD模型模拟了2004年杭州机动车源NO_x年均质量浓度与空间分布情况，模拟结果显示NO_x浓度高值区集中在市中心区域，主城区机动车源NO_x排放对总NO_x年均质量浓度贡献率为40.91%。严晗等[24]应用AERMOD模型模拟了2009年北京典型道路交通环境机动车黑碳排放扩散情况，模拟结果显示道路黑炭排放对监测点的平均贡献浓度为（2.8±3.5）$\mu g/m^3$，黑炭日间与夜间模拟结果存在显著差异。Zhang等[25]利用AERMOD模型模拟了2010年澳门地区车辆排放CO和一次$PM_{2.5}$浓度的空间分布。王珮玮等[26]利用AERMOD模型模拟了2013年北京市六环内机动车源一次$PM_{2.5}$扩散浓度的排放特征与时空变化规律，模拟结果显示夏季机动车源一次$PM_{2.5}$集中在各环路快速路、易拥堵主干道及省道等。伯鑫等[27]利用AERMOD模型模拟了2012年首都机场周边污染物空间分布，模拟污染物包括CO、NO_x、VOCs、PM_{10}、SO_2，模拟结果显示除NO_x外，其他污染物对周围环境年均贡献影响较小，污染物影响主要集中于机场内部。

（3）工业园区模拟

在工业园区模拟应用中，AERMOD模型主要通过模拟多个点源或面源来实现对工业园区排放的污染物扩散情况和空间分布的预测。杨志森等[28]利用AERMOD模型模拟了2011年某石化园区在不同规划下对周边空气的影响，模拟污染物包括SO_2、NO_2、PM_{10}，通过计算不同规划方案下各污染物的占标率及贡献浓度，为石化园区规划提供依据。Jittra等[29]利用AERMOD模型模拟泰国Maptaphut工业园区NO_2和SO_2的扩散情况，模拟过程中考虑园区中292个点源排放，计算了NO_2和SO_2最大浓度落地点，为工业园区空气质量管理提供依据。

综上，AERMOD模型被广泛应用于不同污染源（不同行业、道路、工业园区等），模拟的范围均在50 km以内，模拟污染物包括SO_2、NO_2、PM_{10}、VOCs等，无法模拟O_3和二次$PM_{2.5}$等二次污染物。

1.1.2 ADMS模型

ADMS是由英国剑桥环境研究公司开发研制的大气扩散模型，应用了基于Monin-Obukhov长度和边界层高度结构的参数的大气物理理论。ADMS模型采用三维高斯模式，利用常规气象数据定义边界层，考虑建筑物下洗、干湿沉降及简单化学反

中国知网 https://www.cnki.net

应等，模拟污染物在大气中的迁移扩散[30]。ADMS模型的模拟范围一般为50 km以内[7]。其最新版本为2024年发布的6.0.2版本。

ADMS优点有：对气象数据要求较低，没有探空数据时，模型依旧可以运行[31]。但由于模型化学机制限制及软件版权等，其缺点有：（1）无法模拟O_3和二次$PM_{2.5}$；（2）商业化软件，源码不公开；（3）风场只能输入单个气象场。

ADMS应用主要涉及局地尺度下的空气质量影响评估，包括工业污染源、交通源、工业园区排放等对周边空气质量的影响评估。

（1）工业污染源模拟

ADMS模型广泛应用于不同工业污染源排放模拟研究，包括水泥、火电等多个行业。薛亦峰等[32]利用ADMS模型模拟了2010年北京市水泥厂污染物排放对周边环境的影响，模拟的污染物有TSP、SO_2、NO_x，模拟结果表明水泥工业NO_x对环境空气质量影响较大。裴旭倩[33]利用ADMS模型模拟了2012年太原市第一热电厂排放对周边空气质量的影响，模拟结果显示SO_2浓度的时空分布总体与风向分布一致，各季节SO_2浓度高值区分布相似。

（2）交通源模拟

在道路源模拟方面，边博文[34]通过在ADMS模型中输入道路源交通量、车速等信息，模拟得到了各机动车污染物排放速率及单位残留量，分析了深州市典型片区机动车尾气污染情况，模拟污染物包括NO_x、$PM_{2.5}$、VOCs。卞吉玮[35]利用ADMS模型模拟了2014年上海市典型交通道路NO_x浓度扩散与空间分布情况，模拟结果表明交通状况对NO_x浓度影响明显，交通量大且严重拥堵区域NO_x浓度较高。吕改艳等[36]利用ADMS模型对重庆市主城区各类道路NO_x扩散及空间分布情况进行了模拟，模拟结果显示机动车NO_x排放对重庆市主城区贡献显著。Wang等[37]利用ADMS模型模拟了2020—2021年北京大兴国际机场排放对周边空气质量的影响，模拟污染物包括CO、SO_2、NO_x、HC、PM等，模拟结果显示机场对周边地区污染物贡献并不明显，污染主要集中在机场及周边15 km范围内。

（3）工业园区模拟

在工业园区模拟方面，燕鸥等[38]建立了一种基于ADMS和走航观测数据为基础的VOCs溯源方法，利用ADMS进一步模拟溯源反演结果中园区内企业VOCs排放对周边区域的影响，得到工业园区中逐小时排放前10的企业。Gao等[39]利用ADMS模拟了2020年天津市某工业地区VOCs排放对周边空气质量的影响，模拟结果显示该地区主要道路与工业集中区排放VOCs对周边地区影响明显。

综上，ADMS模型适用于工业污染源、交通源等多种污染源的排放模拟，模拟的范围均在50 km以内，模拟污染物包括SO_2、NO_2、PM_{10}、VOCs等，无法模拟O_3和二次$PM_{2.5}$等二次污染物。

1.2 城市尺度模型

1.2.1 CALPUFF模型

CALPUFF为三维非稳态拉格朗日扩散模式系统，既可以模拟局地尺度，也可以模拟城市尺度[40]。模式结合时空变化的气象场条件，考虑了复杂地形动力学效应以及静风等非稳态条件[40-41]。模拟的范围为从几千米到几百千米[38]。其最新版本为2019年发布的7.3.1版本。

CALPUFF模式系统主要包括CALMET气象模块、CALPUFF扩散模块以及一系列前/后处理程序。CALMET气象模块包含诊断风场模块和微气象模块，诊断风场模块考虑了地形动力学效应、地形阻塞效应、坡面流等，对初始预测风场进行调整生成第一步风场，并结合地面观测气象数据和高空气象数据，通过客观加权的方法生成最终风场。微气象模块利用参数化方法定义地表热通量、边界层高度、摩擦速度、对流速度、Monin-Obukhov长度等来描述边界层[41]。CALMET气象模式能较好反映海风环流、山谷风环流等复杂气象条件，适用于复杂地形-气象场条件下的大气预测。CALPUFF模块是非稳态三维拉格朗日烟团输送模型，包含用于处理复杂地形效应、建筑下洗、干沉降、湿沉降及简单化学的模块，利用CALMET所生成的研究区域的气象场文件，模拟输送污染源排放的污染物烟团，模拟扩散和转化过程[40]。

CALPUFF优点主要体现在[40]：（1）能模拟从几十米到几百千米的中等尺度范围；（2）能模拟一些非稳态情况（如静小风、熏烟、环流、地形和海岸效应），采用地形动力学、坡面流参数方法对初始猜测风场进行分析，适合于粗糙、复杂地

中国知网 https://www.cnki.net

形条件下的模拟；（3）化学机制为简单的线性的化学反应机制，可模拟简单的二次污染颗粒浓度（如$PM_{2.5}$）；（4）代码公开。但由于模型无法考虑非线性反应机制，其缺点主要体现在：无法模拟O_3。

CALPUFF模型广泛应用于从局地尺度到城市尺度的空气质量影响评估，涵盖了火电、钢铁、水泥等工业污染源及工业园区排放对周边空气质量的影响评估。

（1）在局地尺度模拟方面，CALPUFF模型可通过模拟污染物在大气中的干、湿沉降过程计算污染物在土壤中的沉降情况。孙博飞等[42]利用CALPUFF模型分析了2016年河北某钢铁厂钢铁烧结机排放对周边大气与土壤中的二噁英类污染物的贡献。

CALPUFF模型通过模拟污染物的空间分布情况，评估不同污染源对周边的空气质量影响及健康风险影响。袁文燕等[43]利用CALPUFF模型模拟了中牧兰州生物药厂布鲁氏杆菌气溶胶在大气中的扩散、浓度空间分布，并计算了对人群潜在的健康风险。Xu等[44]利用CALPUFF模拟了疫苗企业泄漏后的不同情景，进而筛选出疫苗企业最优布局点。Abdul-Wahab等[45]利用CALPUFF模型模拟了马斯喀特地区某钢铁厂夏季和冬季两个季节排放SO_2、CO、NO_x、PM_{10}对周边空气质量的影响，结果表明冬季NO_x浓度超过标准限值。Otero-Pregigueiro等[46]利用CALPUFF模拟2015—2016年西班牙某锰合金工厂排放的锰在周边空气中的扩散浓度和空间分布，采用PM代替锰进行模拟，依据模拟结果提出可能的管控措施。Lonati等[47]利用CALPUFF模型对2018—2019年意大利某城市垃圾焚烧发电厂排放对周边空气质量影响情况进行模拟，模拟污染物包括PM_{10}、NO_x、二噁英类等污染物，模拟结果显示垃圾焚烧发电厂对周边贡献较小。竹涛等[48]利用CALPUFF模型模拟了2015年石家庄某抗生素企业VOCs排放对周边空气质量的影响。

（2）在城市尺度方面，马岩等[49]、高爽等[50]、雷团团等[51]分别利用CALPUFF模型对沧州市2017年重点企业排放进行了研究。马岩等[49]模拟了沧州市主城区四大重点企业秋冬季和一次重污染过程的各污染物贡献情况，模拟污染物包括SO_2、NO_x、PM_{10}、$PM_{2.5}$。高爽等[50]扩大了研究范围，模拟了沧州市秋冬季节120家重点企业污染物排放及空间分布情况，并进一步对重点企业$PM_{2.5}$贡献进行了排名，模拟污染物包括$PM_{2.5}$、PM_{10}、SO_2、NO_2及二次生成硫酸盐、硝酸盐、二次有机气溶胶（SOA），模型考虑了VOCs转化为SOA。雷团团等[51]针对沧州市铸造行业，模拟了2017年沧州965家铸造行业在不同情景下的减排效果，模拟污染物包括SO_2、NO_x、$PM_{2.5}$、VOCs，模拟结果显示优化情景下减排潜力最大的污染物为$PM_{2.5}$，可下降74.68%。Akyuz等[52]利用CALPUFF模拟了土耳其某地区十家拟建和两家投产工厂SO_2排放对周边空气质量的影响，根据不同情景下的SO_2空间分布情况评估出最佳情景。Yang等[53]利用CALPUFF模型模拟了2004年重庆市高架点源排放SO_2对空气质量的影响。He等[54]利用CALPUFF模型模拟了上海某化工园区某石化企业SO_2、NO_x、PM、VOCs排放对周边空气质量的影响及空间分布情况。模拟结果显示NO_x和VOCs浓度超限值的区域位于企业西北部，春季的气象条件不利于污染物的扩散。

当研究区域进一步扩大时，CALPUFF一般应用于不同行业在多种情景下的大气环境影响评估。阚慧等[55]利用CALPUFF模型分析了2015年海南省6家独立电厂在现状排放、排污许可、超低排放三种情景下对各城市大气污染贡献。模拟的污染物包括SO_2、NO_x、PM_{10}、$PM_{2.5}$。模拟结果显示排污许可情景下火电厂对大气环境影响最大，超低排放情景下影响最小。伯鑫等[56]利用CALPUFF模型评估了2011年京津冀地区火电厂在不同情景下的贡献，模拟污染物包括SO_2、NO_x、SO_4^{2-}(硫酸盐)、NO_3^-(硝酸盐)，模拟结果显示减排情景下，火电行业对各城市SO_2、NO_x、一次PM_{10}、SO_4^{2-}、NO_3^-贡献浓度均大幅度减少。单皖粤等[57]利用CALPUFF模型定量模拟了虚拟核电站在山东省不同沿海网格内的放射性核素（I-131）泄漏扩散情况，结合人口数据计算不同情景下的环境风险，评估最优和最不利的厂址布局点。陈晓春等[58]采用CALPUFF模型模拟了不同情景下山东省焦化行业SO_2、NOx、PM_{10}及$PM_{2.5}$的污染情况，模拟结果显示最优化情景下减排潜力最大的污染物为NO_x，可下降78.56%。

中国知网 https://www.cnki.net

（3）工业园区模拟

在工业园区模拟方面，包宇斋[59]结合WRF模拟逐时高分辨率气象数据，利用CALPUFF模型模拟长寿工业园区2020年污染物扩散情况，模拟污染物为SO_2、NO_x、PM_{10}，模拟结果显示排放源高度对近地面污染物浓度影响明显，春季气象条件对污染物扩散更不利。王娜[60]利用CALPUFF模型模拟了2018年上虞化工园区在不同季节排放对周边空气质量的影响，模拟污染物为SO_2、NO_x和CO，模拟结果显示SO_2、NO_x和CO呈现出“秋冬浓度高，春夏浓度低”的浓度分布特征。敖丛杰等[61]利用CALPUFF模型模拟了2020年炼化工业集中区排放对周边空气质量的影响，并根据标准浓度限值，进一步计算大气环境防护距离，模拟污染物包括SO_2、NO_x、NO_2、$PM_{2.5}$、PM_{10}、TSP（total suspended particle，总悬浮颗粒物）、NH_3、H_2S和NMHC（non-methame hydrocarbon，非甲烷总烃）。Lee等[62]利用CALPUFF模型模拟了2012年韩国两个典型工业园区PM_{10}和SO_2扩散浓度和空间分布，结果表明PM_{10}与SO_2最大落地浓度位于工业园区附近。

综上，CALPUFF模型适用于不同空间尺度下的污染源评估，进一步可实现健康风险评估、污染物沉降、扩散情况分析、情景模拟等。CALPUFF模型模拟的范围为几千米到几百千米，模拟的污染物包括SO_2、NO_2、PM_{10}、$PM_{2.5}$、SO_4^{2-}、NO_3^-、VOCs及由VOCs二次转化的二次有机气溶胶等，但无法模拟O_3。

1.3 区域尺度模型

1.3.1 CMAQ模型

CMAQ模型是由美国环保署与北卡罗来纳大学环境模拟中心开发的三维欧拉大气化学和传输模拟系统[3, 63]。

它基于“一个大气”的设计理念，使用复杂的数学模型来描述污染物在空气中的大气动力学、化学与物理过程，模型计算过程中保持质量守恒，整个模拟过程通过求解一系列的偏微分方程实现。该模型能够对O_3、颗粒物、有毒化合物、能见度和酸性及多种污染物种类进行模拟，可以在城市尺度至半球尺度的多个空间尺度上解决不同空气质量问题，便于对空气质量进行评估和决策分析[3]。其最新版本为2022年发布的CMAQv5.4版本，由美国环保署维护。该模型可以实现从城市尺度到半球尺度等多个空间尺度上的模拟，模拟范围一般为几百千米。

CMAQ模式系统由五个模块构成[3]：（1）化学传输模块（CMAQ chemical transport model processor，CCTM）为CMAQ模型最主要的模块，读取其他模块得到的气象、污染源、初始条件、边界条件等输入数据，通过一系列的偏微分方程，考虑了排放、化学反应、云和降水吸收以及干沉降等重要过程，模拟污染物在大气中的化学反应与迁移过程，得到污染物的三维网格浓度分布。（2）气相化学接口模块（Meteorology chemistry interface processor，MCIP）可以将WRF模型输出的气象场处理成CCTM和SMOKE兼容的文件，MCIP生成的文件被ICON、BCON等CMAQ程序使用。（3）初始条件模块（Initial conditions processor，ICON）为CCTM模块提供研究区域初始模拟时间所有网格的化学条件。（4）边界条件模块（Boundary conditions processor，BCON）为CCTM模块提供研究区域的边界条件。（5）光解速率反应器（Photolysis rate processor，JPROC）主要负责计算模拟区域的光解反应速率。

CMAQ优点主要体现在：（1）包含详细的化学机制；（2）能够模拟常规污染物、二次污染物（O_3、$PM_{2.5}$等）、气溶胶之间复杂的化学反应；（3）包含多种模块，能够实现源解析、敏感性分析等多种功能[64-66]；（4）能够实现光化学、酸沉降、能见度等多种污染问题的模拟；（5）代码公开。缺点主要体现在：（1）计算机资源需求高；（2）模型复杂度大；（3）模拟耗时长；（4）模拟结果受到分辨率、排放清单、气象场与化学机制等多种因素影响[67]。

CMAQ由于输入污染源格式为网格源，其网格分辨率影响模型模拟精度，网格分辨率一般为几千米到几十千米。其应用多为从城市尺度到半球尺度多个空间尺度上的模拟，模拟范围一般为几百千米，可以模拟O_3、$PM_{2.5}$等二次污染物。

（1）在省尺度模拟中，CMAQ模型一般采用多层嵌套，以提供初始浓度场和边界层条件。白伟超等[68]基于WRF-CMAQ模式，量化评估了2019年京津冀地区与周边省份之间的$PM_{2.5}$传输贡献。模

中国知网 https://www.cnki.net

拟为两层嵌套，其中第一层（分辨率为36 km×36 km）覆盖中国东部和中部大部分地区，第二层（分辨率为12 km×12 km）覆盖京津冀、山西省、河南省以及内蒙古大部分地区。杜亚彬等[69]利用WRF-CMAQ评估了中国东北地区秸秆禁烧管控对东北地区空气质量的影响，模拟为一层嵌套，分辨率为27 km×27 km，模拟污染物包括CO、$PM_{2.5}$、NO_2和O_3。Cheng等[70]基于CMAQ模型定量分析了2013—2017年间北京市各项措施对$PM_{2.5}$减排的贡献，模拟为三层嵌套，第一层（分辨率为36 km×36 km）覆盖中国地区以及南亚和东亚部分地区，第二层（分辨率为12 km×12 km）覆盖中国东部和北部的大部分地区，第三层（4 km×4 km）覆盖北京及周边地区。Zhou等[71]利用CMAQ模型模拟了2012年10月江苏省在不同尺度清单下的SO_2、NO_2、$PM_{2.5}$、O_3空间分布情况，并根据实测值进一步评估模型性能，模拟为三层嵌套，第一层（分辨率为27 km×27 km）覆盖中国、日本、朝鲜和韩国的大部分地区，第二层（分辨率为9 km×9 km）覆盖江苏、浙江、上海、安徽等部分省份，第三层（3 km×3 km）覆盖特大城市上海和江苏南部六个最发达的城市。

（2）在中国尺度模拟中，CMAQ模型通常采用单层嵌套，模拟范围覆盖整个中国。Chen等[72]利用WRF-CMAQ模拟了中国范围内的PVOCs（plant volatile organic compounds，植物挥发性有机化合物）对O_3形成的贡献，模拟为一层嵌套，分辨率为9 km×9 km。Liu等[73]利用WRF-CMAQ模拟了2015年中国范围下O_3的时间分布和暴露水平，模拟为一层嵌套，分辨率为36 km×36 km。Hu等[74]利用WRF-CMAQ对中国范围下O_3和颗粒物进行了一年的模拟，分析O_3与$PM_{2.5}$的空间分布，模拟为一层嵌套，分辨率为36 km×36 km。

综上，CMAQ模型在省尺度到全国尺度上均有广泛应用，模拟污染物包括二次污染物（O_3、$PM_{2.5}$等）和常规污染物等。

1.4　模型对比分析

大气导则中推荐的AERMOD、ADMS、CALPUFF、CMAQ各有其特点和适用范围，表1为各模型的具体情况。

表1　常用空气质量模型对比

Table 1　Comparison of commonly used air quality models

模型名称	适用污染源	推荐预测范围	网格分辨率	是否开源	版本更新状况	官方网站	是否需要背景清单	模拟污染物		
								一次污染物	二次$PM_{2.5}$（SO_4^{2-}、NO_3^-、二次有机气溶胶等）	O_3
AERMOD	点源、面源、线源、体源	局地尺度（≤50千米）	几百米	是	2023年10月更新23132版本	https://www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling-preferred-and-recommended-models	否	是	否	否
ADMS	点源、面源、线源、体源	局地尺度（≤50千米）	几百米	否	2024年5月15日发布ADMS 6.0.2版本	https://www.cerc.co.uk/	否	是	否	否
CALPUFF	点源、面源、线源、体源	局地尺度和城市尺度（几千米到几百千米）	从几百米到几千米	是	2019年10月1日发布CALPUFF 7.3.1版本	https://www.calpuff.org/	否	是	是	否
CMAQ	网格源	区域尺度（几百千米）	一般为几千米到几十千米	是	2022年10月14日发布CMAQv 5.4版本	https://www.epa.gov/cmaq	是	是	是	是

中国知网　https://www.cnki.net

AERMOD和ADMS适用于局地尺度的空气质量模拟，网格分辨率一般为几百米，适用于点源、面源、线源、体源等类型污染源。作为第一代空气质量模型，其较为简单的化学机制不支持模拟二次污染物。作为美国环保署推荐的监管和评估空气质量的法规模型，AERMOD为开源模型，而ADMS模型主要用于商业，模型并不开源。

CALPUFF模型适用于局地尺度和城市尺度的空气质量模拟，网格分辨率和适用污染源类型与AERMOD、ADMS模型相同，但化学反应机制支持模拟简单的二次$PM_{2.5}$，不支持模拟O_3。作为美国环保署推荐的替代模型，模型开源。

CMAQ模型作为第三代空气质量模型，其适用于区域尺度。由于模型输入为网格源，其分辨率一般从几千米到几十千米。CMAQ能够进行多层嵌套模拟，能够模拟出污染物在真实大气中的物理、化学过程，但多层嵌套模拟需要提供背景清单，为嵌套模拟提供必需的初始浓度场和边界层条件。CMAQ模型相较于AERMOD、ADMS、CALPUFF模型，其拥有更为详细的化学反应机制，能够模拟O_3与$PM_{2.5}$等二次污染物。作为美国环保署推荐的监管和评估空气质量的法规模型，CMAQ模型为开源模型。

2 空气质量模型应用效果评估

本研究随机抽取了2018—2021年全国各省市369本公开的建设项目环评报告（涉及47个行业），以确保样本的代表性。其中88本环评报告书项目评价等级为一级，涉及空气质量模型的应用。281本报告项目评价等级为二级或三级，未涉及空气质量模型模拟。

空气质量模型在不同行业环评中的应用情况如表2所示。88本环评报告书中，6本环评报告预测结果保证率日均和年均叠加不达标，可能是由于项目位于不达标区，其背景浓度本底值较高所致，其他82本环评报告均叠加达标。此外，75本环评报告采用空气质量模型计算的大气环境防护距离为0，可能是因为项目污染物排放量较小，对周边环境空气质量不造成显著影响。另有13本环评报告中计算出具体的大气防护距离，涉及火电、焦化、水泥等行业，主要是由于相关行业排放量较大，污染物经迁移、扩散、沉降等过程后可能对周边环境造成影响。空气质量模型在不同行业环评中的应用情况如表2所示。

在所有调查的行业中，火力发电、生活垃圾焚烧、水泥等行业相关环评报告书均应用了空气质量模型。由于电力、水泥等高耗能行业污染物排放量较大，大气导则中对电力、水泥行业的多源项目要求提高一级评价等级。本研究中所调查的火力发电、生活垃圾焚烧、水泥等行业的环评报告评价等级均为一级，采用了空气质量模型开展模拟研究。

由于AERMOD模型具有计算速度快，模型较为简单的优势，模型在局地尺度下各行业周边空气质量评估中得到了广泛应用。在本次抽样的建设项目环评报告中，AERMOD模型应用于22个行业，共涉及80本环评报告。其中，生活垃圾焚烧行业及火力发电（含热电）行业的应用占比均为13.75%，为最主要的两个应用行业；其次是黑色金属冶炼和压延加工业与非金属矿物制品业，应用占比均为8.75%。

CALPUFF在5份环评报告中得到了应用，涉及3个行业，其中生活垃圾焚烧行业为最主要的应用行业（占比60%），黑色金属冶炼和压延加工业与石油加工、炼焦业行业的应用占比均为20%，评价因子中包含二次$PM_{2.5}$。采用了CALPUFF的环评报告主要有以下特点：（1）采用MESOPUF II（一种适用于SO_2、SO_4^{2-}、NO_x、HNO_3和NO_3^-的准一级化学反应机理)机制预测二次$PM_{2.5}$；（2）模拟范围从几千米到几百千米。

仅在一份环评报告中出现ADMS的应用，所应用的行业为垃圾焚烧行业。此外，有2本环评报告同时应用了AERMOD、CALPUFF开展模拟，主要涉及生活垃圾焚烧与水泥行业。CMAQ主要应用于大气污染物排放量大的建设项目环评或者规划环评的光化学模拟（O_3、二次PM），本次抽样建设项目环评报告均未涉及CMAQ模型。

中国知网 https://www.cnki.net

表2　空气质量模型在不同行业环评中的应用情况

Table 2　Application of air quality model in EIA of different industries

序号	行业类别	模型应用情况（本）					
		ADMS	AERMOD	AERMOD、CALPUFF	CALPUFF	未使用模型的报告数量	行业报告总数
1	生活垃圾焚烧	1	11	1	3	0	16
2	火力发电（含热电）	0	11	0	0	0	11
3	黑色金属冶炼和压延加工业	0	7	0	1	1	9
4	非金属矿物制品业	0	7	0	0	6	13
5	水泥	0	6	1	0	0	7
6	化学原料和化学制品制造业	0	6	0	0	7	13
7	石油加工、炼焦业	0	5	0	1	4	10
8	交通运输业、管道运输业和仓储业	0	3	0	0	41	44
9	铁路、船舶、航空航天和其他运输设备制造业	0	3	0	0	16	19
10	其他电力、热力生产供应	0	3	0	0	8	11
11	化学纤维制造业	0	3	0	0	4	7
12	有色金属冶炼和压延加工业	0	3	0	0	3	6
13	木材加工和木、竹、藤、棕、草制品业	0	2	0	0	8	10
14	医药制造业	0	2	0	0	5	7
15	非金属矿采选业	0	1	0	0	11	12
16	石油和天然气开采业	0	1	0	0	9	10
17	环境治理业	0	1	0	0	8	9
18	金属制品业	0	1	0	0	6	7
19	电气机械和器材制造业	0	1	0	0	5	6
20	橡胶和塑料制品业	0	1	0	0	5	6
21	黑色金属矿采选业	0	1	0	0	2	3
22	有色金属矿采选业	0	1	0	0	2	3
23	水利	0	0	0	0	18	18
24	海洋工程	0	0	0	0	11	11
25	核与辐射	0	0	0	0	11	11
26	农副食品加工业	0	0	0	0	9	9
27	社会事业与服务业	0	0	0	0	9	9
28	研究和试验发展	0	0	0	0	7	7
29	废弃资源综合利用业	0	0	0	0	6	6
30	水的生产和供应业	0	0	0	0	6	6
31	卫生	0	0	0	0	6	6
32	纺织服装、服饰业	0	0	0	0	4	4
33	仪器仪表制造业	0	0	0	0	4	4
34	畜牧业	0	0	0	0	3	3
35	纺织业	0	0	0	0	3	3
36	公共设施管理业	0	0	0	0	3	3
37	家具制造业	0	0	0	0	3	3
38	酒、饮料制造业	0	0	0	0	3	3
39	汽车制造业	0	0	0	0	3	3
40	燃气生产和供应业	0	0	0	0	3	3
41	食品制造业	0	0	0	0	3	3
42	通用设备制造业	0	0	0	0	3	3
43	文教、工美、体育和娱乐用品制造业	0	0	0	0	3	3
44	造纸和纸制品业	0	0	0	0	3	3
45	专用设备制造业	0	0	0	0	3	3
46	皮革、毛皮、羽毛及其制品和制鞋业	0	0	0	0	2	2
47	煤炭开采和洗选业	0	0	0	0	1	1
	总计	1	80	2	5	281	369

中国知网　https://www.cnki.net

3 结论

（1）在我国环评中AERMOD、ADMS及CALPUFF一般用于局地尺度模拟，其中CALPUFF也可用于城市尺度模拟，CMAQ一般用于区域尺度模拟。AERMOD、ADMS可以模拟一次污染物等，无法模拟O_3、二次PM。CALPUFF可以模拟SO_2、NO_x、VOCs转化成二次PM等，无法模拟O_3，无须输入详细的城市背景排放清单；CMAQ可以模拟VOCs转化成二次PM、O_3等，需要输入详细的城市背景排放清单。

（2）在本研究的样本中，AERMOD是应用最广泛的模型，主要用于垃圾焚烧和火力发电行业；CALPUFF主要用于垃圾焚烧行业；仅在一份环评报告中出现ADMS的应用，所应用的行业为垃圾焚烧行业。考虑到不同空气质量模型的特点和功能模块，建议我国环评体系补充适用于建设项目环评的局地尺度O_3模拟模型；由于AERMOD、ADMS的功能类似且模拟结果有一定差异，此外ADMS代码不公开、环评应用较少等，为了方便环评管理，建议中国环评体系仅保留1个局地模型为局地尺度法规模型。

参考文献

[1] 高雅，刘杨，吕佳佩.空气质量模型研究进展综述[J].环境污染与防治，2022，44(7)：939-943.
GAO Y, LIU Y, LV J P. A review of air quality models research progress[J]. Environmental Pollution & Control, 2022, 44(7): 939-943.(in Chinese)

[2] 王自发，谢付莹，王喜全，等. 嵌套网格空气质量预报模式系统的发展与应用[J]. 大气科学，2006，30(5)：778-790.
WANG Z F, XIE F Y, WANG X Q, et al. Development and application of nested air quality prediction modeling system[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2006, 30(5): 778-790.(in Chinese)

[3] 伯鑫.空气质量模型(SMOKE、WRF、CMAQ等)操作指南及案例研究[M].北京：中国环境出版集团，2019.
BO X. Operational guidelines and case studies of air quality models (SMOKE, WRF, CMAQ, etc.)[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2019.(in Chinese)

[4] DAEWON B, KENNETH L, SCHERE. Review of the governing equations, computational algorithms, and other components of the models-3 community multiscale air quality (CMAQ) modeling system[J]. Applied Mechanics Reviews, 2006, 59(2): 51-77.

[5] ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Revision to the guideline on air quality models: Adoption of a preferred general purpose (flat and complex terrain) dispersion model and other revisions[S]. US: Environmental Protection Agency, 2005.

[6] 胡翠娟，丁峰，李时蓓，等. 国内外环境空气质量模型法规化现状与对比研究[J]. 环境工程，2015，33(1)：132-136.
HU C J, DING F, LI S B, et al. A comparative study and the status quo of regulatory air quality model at home and abroad[J]. Environmental Engineering, 2015, 33(1): 132-136.(in Chinese)

[7] 中华人民共和国生态环境部.环境影响评价技术导则 大气环境：HJ 2.2—2018[S].北京：中国环境科学出版社，2018.
MINISTRY OF ECOLOGY AND ENVIRONMENT OF THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA. Technical guidelines for environmental impact assessment—Atmospheric environment: HJ 2.2—2018[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2018. (in Chinese)

[8] 马岩，伯鑫，康明雄，等.2018版大气环评导则技术复核研究——以垃圾焚烧厂为例[J].环境影响评价，2021，43(2)：33-37.
MA Y, BO X, KANG M X, et al. Study on technical review for atmospheric EIA guideline(2018): Take waste incineration plants as cases[J]. Environmental Impact Assessment, 2021, 43(2): 33-37.(in Chinese)

[9] 伯鑫，吴忠祥，王刚，等.CALPUFF模式的标准化应用技术研究[J].环境科学与技术，2014，37(S2)：530-534.
BO X, WU Z X, WANG G, et al. Study on the standardized application of CALPUFF model[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 37(S2): 530-534.(in Chinese)

[10] 张尚宣，伯鑫，周甜，等.AERMOD模式在我国环境影响评价应用中的标准化研究[J].环境影响评价，2018，40(2)：51-55.
ZHANG S X, BO X, ZHOU T, et al. Study on standardization of AERMOD in the application of EIA in China[J]. Environmental Impact Assessment, 2018, 40(2): 51-55.(in Chinese)

[11] 伯鑫，唐千红，王骏，等.基于气象大数据的环评技术复核研究[J].环境与发展，2021，33(2)：31-36.
BO X, TANG Q H, WANG J, et al. Research of environment impact assessment technical reviewing based on meteorological big data[J]. Environment and Development,

中国知网 https://www.cnki.net

2021,33(2):31-36.(in Chinese)

[12] 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. Standard systems of surface parameters in AERMOD[J].China Environmental Science, 2015,35(9):2570-2575.(in Chinese)

[13] 中华人民共和国生态环境部. 环境空气质量模型遴选工作指南(试行)(征求意见稿)[R]. 北京:生态环境部,2015.
MINISTRY OF ENVIRONMENTAL PROTECTION OF THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA. Guidelines for the Selection of Ambient Air Quality Models (Trial, Draft for Comments) [R]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment,2015. (in Chinese)

[14] 伯鑫.空气质量模型:从入门到实践[M].北京:中国环境出版集团,2022.
BO X. Air quality model: From introduction to practice[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2022. (in Chinese)

[15] U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY User's guide for the AMS/EPA regulatory model (AERMOD) [R].Research Triangle Park, NC, United States: Office of Air Quality Planning and Standards, Air Quality Assessment Division,2023.

[16] 杨多兴,杨木水,赵晓宏,等.AERMOD模式系统理论[J].化学工业与工程,2005,22(2):130-135.
YANG D X, YANG M S, ZHAO X H, et al. Theory on AERMOD modeling system[J].Chemical Industry and Engineering,2005,22(2):130-135.(in Chinese)

[17] 关勖,舒璐,杜超,等.AERMOD和CALPUFF对静小风区域热电厂烟气扩散模拟的研究[J].环境保护科学,2019,45(2):27-33.
GUAN X, SHU L, DU C, et al. Comparative study of AERMOD and CALPUFF on smoke diffusion simulation of thermal power plant in quite wind area[J].Environmental Protection Science,2019,45(2):27-33.(in Chinese)

[18] 李冰晶,仝纪龙,潘峰,等.利用AERMOD预测焦化行业大气环境影响实例分析[J].环境工程,2013,31(5):156-160,131.
LI B J, TONG J L, PAN F, et al. Case analysis of forecasting on atmospheric environmental impact of coking industry using AERMOD[J]. Environmental Engineering, 2013,31(5):156-160,131.(in Chinese)

[19] MOKHTAR M M, HASSIM M H, TAIB R M. Health risk assessment of emissions from a coal-fired power plant using AERMOD modelling[J].Process Safety and Environmental Protection,2014,92(5):476-485.

[20] 刘文博.典型石化企业VOCs网格化监测方法研究[D].东营:中国石油大学(华东),2020.
LIU W B. Study on grid monitoring method of VOCs in typical petrochemical enterprises[D].Dongying: China University of Petroleum (Huadong),2020. (in Chinese)

[21] 陈雷,王鹏,伯鑫,等. 新冠期间河北省典型钢铁企业大气污染影响[J]. 中国环境科学,2021,41(8):3927-3933.
CHEN L, WANG P, BO X, et al. Air quality impacts of emissions from a typical iron and steel plant in Hebei Province during the coronavirus disease (COVID-19) [J]. China Environmental Science, 2021, 41(8): 3927-3933.(in Chinese)

[22] 伯鑫,杨朝旭,马岩,等.基于空气质量模型AERMOD的城市钢铁厂优化布局研究[C]//中国环境科学学会,中国光大国际有限公司.2019中国环境科学学会科学技术年会论文集(第一卷).北京:《中国学术期刊(光业版)》电子杂志社,2019:652-656.
BO X, YANG C X, MA Y, et al. Urban steel plant layout optimization research based on the AERMOD air quality model[C]//Chinese Society for Environmental Sciences, China Everbright International Limited. Proceedings of the 2019 annual conference of the Chinese society for environmental sciences (Volume 1). Beijing: China Academic Journals (CD Edition) Electronic Publishing House, 2019:652-656. (in Chinese)

[23] 薛佳平,田伟利,张清宇.杭州市机动车NO_x排放清单的建立及其对空气质量的影响[J].环境科学研究,2010,23(5):613-618.
XUE J P, TIAN W L, ZHANG Q Y. Development of NO_x emission inventory from motor vehicles in Hangzhou and study on its influence on air quality[J].Research of Environmental Sciences,2010,23(5):613-618.(in Chinese)

[24] 严啥,吴烨,张少君,等. 北京典型道路交通环境机动车黑碳排放与浓度特征研究[J]. 环境科学学报,2014,34(8):1891-1899.
YAN H, WU Y, ZHANG S J, et al. Emission characteristics and concentrations of vehicular black carbon in a typical freeway traffic environment of Beijing[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2014,34(8):1891-1899.(in Chinese)

[25] ZHANG S J, WU Y, HUANG R K, et al. High-resolution simulation of link-level vehicle emissions and concentrations for air pollutants in a traffic-populated eastern Asian city[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, 16(15):9965-9981.

中国知网 https://www.cnki.net

[26] 王珮玮,杨道源,吴潇萌,等.基于AERMOD线源模式的城市路网一次$PM_{2.5}$排放扩散特征研究[J].环境科学学报,2018,38(7):2728-2734.
WANG P W, YANG D Y, WU X M, et al. Analysis of emission dispersion features of primary $PM_{2.5}$ in urban road network based on AERMOD line-source mode[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(7): 2728-2734. (in Chinese)

[27] 伯鑫,段钢,李重阳,等.首都国际机场大气污染模拟研究[J].环境工程,2017,35(3):97-100.
BO X, DUAN G, LI C Y, et al. Air pollution simulation study of Beijing Capital International Airport[J]. Environmental Engineering, 2017, 35(3): 97-100.(in Chinese)

[28] 杨志森,赵东风,熊桂慧,等. AERMOD模型在石化园区大气规划环评中的应用[J].环境科学与技术,2016,39(S1):433-437.
YANG Z S, ZHAO D F, XIONG G H, et al. The application research of AERMOD model in atmospheric environmental impact prediction and assessment of petrochemical industrial park[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 39(S1): 433-437.(in Chinese)

[29] JITTRA N, THEPANONDH S. Performance evaluation of AERMOD air dispersion model in Maptaphut industrial area, Thailand[C]//CHAN D, ed. Proceedings of the 5th International Conference on Environmental Science and Information Application Technology (ESIAT 2014). Hong Kong: Chemical Rubber Company Press, 2014: 225-228.

[30] 丁峰,赵越,伯鑫.ADMS模型参数的敏感性分析[J]. 安全与环境工程,2009,16(5):25-29.
DING F, ZHAO Y, BO X. Parameter sensitivity analysis of air dispersion model ADMS[J].Safety and Environmental Engineering, 2009, 16(5): 25-29.(in Chinese)

[31] 刘迪.ADMS大气扩散模型研究综述[J]. 环境与发展,2014,26(6):17-18.
LIU D. The summarize of atmospheric of dispersion model ADMS[J]. Environment and Development, 2014, 26(6): 17-18.(in Chinese)

[32] 薛亦峰,曲松,闫静,等.北京市水泥工业大气污染物排放清单及污染特征[J].环境科学与技术,2014,37(1):201-204.
XUE Y F, QU S, YAN J, et al. Development of an air pollutant emission inventory of cement industry for Beijing and pollution characteristics analysis[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 37(1): 201-204.(in Chinese)

[33] 裴旭倩.基于ADMS的火电厂高架源排放二氧化硫浓度分布特征研究[D].太原:太原理工大学,2015.
PEI X Q. Study on distribution characteristics of sulfur dioxide concentration emitted from overhead sources in thermal power plants based on ADMS[D].Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015. (in Chinese)

[34] 边博文.深圳典型片区建成环境对机动车尾气污染物扩散影响研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
BIAN B W. Study on the influence of built environment on the diffusion of vehicle exhaust pollutants in typical areas of Shenzhen[D].Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)

[35] 卞吉玮.上海市交通道路路边站环境空气污染特征及来源分析[D].上海:华东理工大学,2021.
BIAN J W. Characteristics and sources of ambient air pollution at roadside stations of Shanghai traffic roads[D]. Shanghai:East China University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)

[36] 吕改艳,张卫东,李振亮,等.重庆市主城区基于动态交通流的机动车污染物排放特征[J].环境污染与防治,2021,43(11):1364-1370.
LYU G Y, ZHANG W D, LI Z L, et al. Emission characteristics of vehicles exhaust in Chongqing urban area based on dynamic traffic flow[J]. Environmental Pollution & Control, 2021, 43(11): 1364-1370.(in Chinese)

[37] WANG Y N, ZOU C, FANG T G, et al. Emissions from international airport and its impact on air quality: A case study of Beijing Daxing International Airport (PKX), China [J].Environmental Pollution, 2023, 336: 122472.

[38] 燕鸥,王体健,阮兆元,等.基于ADMS模型的工业园区VOCs排放源强反演[J].环境科学,2025,46(3):1340-1349.
YAN O, WANG T J, RUAN Z Y, et al. VOCs emission retrieval in industrial parks based on the ADMS model [J]. Environmental Science, 2025, 46(3): 1340-1349. (in Chinese)

[39] GAO X, WANG Y N, WU L, et al. The impact of anthropogenic VOC emissions on atmospheric pollution: A case study of a typical industrialized area in China[J]. Atmosphere, 2023, 14(10): 1586.

[40] 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):9-13,47.
BO X, DING F, XU H, et al. Review of atmospheric diffusion spersion model CALPUFF technology[J].The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2009, 21(3): 9-13, 47.(in Chinese)

[41] 伯鑫.CALPUFF模型技术方法与应用[M].北京:中国环

中国知网 https://www.cnki.net

境出版社，2016.
BO X. Technical method and application of CALPUFF model[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2016.(in Chinese)

[42] 孙博飞，伯鑫，张尚宣，等.钢厂烧结机烟气排放对土壤二噁英浓度的影响[J].中国环境科学，2017，37(11)：4222-4229.
SUN B F, BO X, ZHANG S X, et al. Effect of exhaust gas from sintering machines on the concentration of dioxin in soil around a steel plant[J].China Environmental Science, 2017,37(11):4222-4229.(in Chinese)

[43] 袁文燕，王鹏，伯鑫，等.含菌气溶胶扩散对人群的潜在影响风险[J].中国环境科学，2020，40(7)：3173-3178.
YUAN W Y, WANG P, BO X, et al. The potential impact of bioaerosol emissions on human health threats[J].China Environmental Science, 2020, 40(7): 3173-3178.(in Chinese)

[44] XU X, WANG C X, WANG P, et al. Bioaerosol dispersion and environmental risk simulation: Method and a case study for a biopharmaceutical plant of Gansu Province, China[J]. The Science of the Total Environment, 2023, 860:160506.

[45] ABDUL-WAHAB S, FADLALLAH S, AL-RASHDI M. Evaluation of the impact of ground-level concentrations of SO_2, NO_x, CO, and PM_{10} emitted from a steel melting plant on Muscat, Oman[J].Sustainable Cities and Society, 2018,38:675-683.

[46] OTERO-PREGIGUEIRO D, HERNÁNDEZ-PELLÓN A, BORGE R, et al. Estimation of PM_{10}-bound manganese concentration near a ferromanganese alloy plant by atmospheric dispersion modelling[J].Science of the Total Environment,2018,627:534-543.

[47] LONATI G, CERNUSCHI S, GIANI P. Air quality impact assessment of a waste-to-energy plant: Modelling results *vs.* monitored data[J].Atmosphere,2022,13(4):516.

[48] 竹涛，吕怡蓉，边文璟，等. 抗生素企业VOCs排放清单及影响范围模拟[J].环境科学，2019，40(12)：5250-5257.
ZHU T, LV Y R, BIAN W J, et al. VOCs emission inventory and impact range simulation of antibiotic enterprises [J].Environmental Science, 2019, 40(12): 5250-5257.(in Chinese)

[49] 马岩，伯鑫，高爽，等.沧州主城区重点企业大气环境影响研究[J]. 环境影响评价，2019，41(2)：16-19，23.
MA Y, BO X, GAO S, et al. Study on atmospheric environmental impact of key industries in urban areas of Cangzhou, Hebei Province[J]. Environmental Impact Assessment, 2019, 41(2): 16-19, 23.(in Chinese)

[50] 高爽，伯鑫，马岩，等.基于SOA转化机制的沧州市重点企业秋冬季大气污染模拟[J].环境科学，2019，40(4)：1575-1584.
GAO S, BO X, MA Y, et al. CALPUFF modeling of the influence of typical industrial emissions on $PM_{2.5}$ in an urban area considering the SOA transformation mechanism[J].Environmental Science, 2019, 40(4): 1575-1584.(in Chinese)

[51] 雷团团，李时蓓，伯鑫，等.基于CALPUFF模型模拟沧州市铸造行业减排效果评估[J].环境影响评价，2021，43(5)：68-74.
LEI T T, LI S B, BO X, et al. Evaluation of emission reduction of Cangzhou foundry industry based on CALPUFF [J]. Environmental Impact Assessment, 2021, 43(5): 68-74.(in Chinese)

[52] AKYUZ E, KAYNAK B. Use of dispersion model and satellite SO_2 retrievals for environmental impact assessment of coal-fired power plants[J].Science of the Total Environment,2019,689:808-819.

[53] YANG D X, WANG Z Q, ZHANG R J. Estimating air quality impacts of elevated point source emissions in Chongqing, China[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2008,8(3):279-294.

[54] HE L, JIN H Y, WANG J J, et al. Zero-impact emission limits of enterprise-scale air pollutants-a case study of a typical petrochemical enterprise in Shanghai Chemical Industry Park[J].Journal of the Air & Waste Management Association,2022,72(1):98-115.

[55] 阚慧，伯鑫，屈加豹，等.2015年海南省火电行业大气环境影响研究[J].中国环境科学，2019，39(1)：428-439.
KAN H, BO X, QU J B, et al. Air quality impacts of power plant emissions in Hainan Province, 2015[J].China Environmental Science,2019,39(1):428-439.(in Chinese)

[56] 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. Air pollution effect of the thermal power plants in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. China Environmental Science, 2015, 35(2): 364-373.(in Chinese)

[57] 单皖粤，梁玉函，王刚，等.核泄漏大气扩散与环境风险模拟：以山东半岛为例[J].环境科学学报，2024，44(6)：292-299.
SHAN W Y, LIANG Y H, WANG G, et al. Atmospheric

中国知网 https://www.cnki.net

diffusion and environmental risk simulation of nuclear leakage: A case study of Shandong Peninsula, China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2024, 44(6): 292-299.(in Chinese)

[58] 陈晓春,李建晖,陈少博,等.基于CALPUFF模型的山东省独立焦化行业大气污染物分析与预测[J].工程科学学报,2024,46(7):1311-1323.
CHEN X C, LI J H, CHEN S B, et al. Analysis and prediction of air pollutants in the independent coking industry in Shandong Province based on the CALPUFF model[J]. Chinese Journal of Engineering, 2024, 46(7): 1311-1323.(in Chinese)

[59] 包宇斋.长寿工业园区大气污染物排放特征与扩散模拟研究[D].昆明:昆明理工大学,2022.
BAO Y Z. Study on emission characteristics and diffusion simulation of air pollutants in Changshou industrial park [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)

[60] 王娜.精细化工园区大气污染扩散模拟研究[D].武汉:武汉工程大学,2020.
WANG N. Simulation study on air pollution diffusion in fine chemical industry park[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2020. (in Chinese)

[61] 敖丛杰,刘浩天,仝纪龙,等.炼化工业集中区大气环境防护区域设置的研究[J].环境工程,2023,41(S2):401-405.
AO C J, LIU H T, TONG J L, et al. Study on the setting of atmospheric environment protection zone inrefining and chemical industry concentration area[J]. Environmental Engineering, 2023, 41(S2): 401-405.(in Chinese)

[62] LEE H D, YOO J W, KANG M K, et al. Evaluation of concentrations and source contribution of PM_{10} and SO_2 emitted from industrial complexes in Ulsan, Korea: Interfacing of the WRF-CALPUFF modeling tools[J]. Atmospheric Pollution Research, 2014, 5(4): 664-676.

[63] MATHUR R, XING J, GILLIAM R, et al. Extending the community multiscale air quality (CMAQ) modeling system to hemispheric scales: Overview of process considerations and initial applications[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2017, 17: 12449-12474.

[64] KWOK R H F, BAKER K R, NAPELENOK S L, et al. Photochemical grid model implementation and application of VOC, NO_x, and O_3 source apportionment[J]. Geoscientific Model Development, 2015, 8(1): 99-114.

[65] COHAN D S, NAPELENOK S L. Air quality response modeling for decision support[J]. Atmosphere, 2011, 2(3): 407-425.

[66] NAPELENOK S L, COHAN D S, ODMAN M T, et al. Extension and evaluation of sensitivity analysis capabilities in a photochemical model[J]. Environmental Modelling & Software, 2008, 23(8): 994-999.

[67] GAO Z Q, ZHOU X H. A review of the CAMx, CMAQ, WRF-Chem and NAQPMS models: Application, evaluation and uncertainty factors[J]. Environmental Pollution, 2024, 343: 123183.

[68] 白伟超,王晓琦,程水源,等.2019年秋冬季京津冀与周边地区污染传输特征分析[J].中国环境科学,2022,42(9):4086-4099.
BAI W C, WANG X Q, CHENG S Y, et al. Pollution transport characteristics of Beijing-Tianjin-Hebei region and its surrounding areas in January 2019[J]. China Environmental Science, 2022, 42(9): 4086-4099.(in Chinese)

[69] 杜亚彬,赵红梅,张学磊,等.基于WRF-CMAQ评估秸秆禁烧对区域空气质量的影响[J].中国环境科学,2022,42(12):5578-5588.
DU Y B, ZHAO H M, ZHANG X L, et al. Evaluation of the impacts of straw burning ban on air quality based on WRF-CMAQ[J]. China Environmental Science, 2022, 42(12): 5578-5588.(in Chinese)

[70] CHENG J, SU J P, CUI T, et al. Dominant role of emission reduction in $PM_{2.5}$ air quality improvement in Beijing during 2013-2017: A model-based decomposition analysis [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, 19(9): 6125-6146.

[71] ZHOU Y D, ZHAO Y, MAO P, et al. Development of a high-resolution emission inventory and its evaluation and application through air quality modeling for Jiangsu Province, China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2017, 17(1): 211-233.

[72] CHEN S B, HE Y J, JIANG M Y, et al. Unveiling the importance of VOCs from pesticides applicated in main crops for elevating ozone concentrations in China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2024, 465: 133385.

[73] LIU H, LIU S, XUE B R, et al. Ground-level ozone pollution and its health impacts in China[J]. Atmospheric Environment, 2017, 173: 223-230.

[74] HU J L, CHEN J J, YING Q, et al. One-year simulation of ozone and particulate matter in China using WRF/CMAQ modeling system[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, 16(16): 10333-10350.

中国知网 https://www.cnki.net