基于复杂地形-气象场的二噁英污染物沉降研究

田 飞[1],伯 鑫[2,3*],薛晓达[4],贾瑜玲[5],唐千红[6],孙洪涛[1],李时蓓[2](1.山东省环境保护科学研究设计院有限公司,山东 济南 250013；2.环境保护部环境工程评估中心,北京 100012；3.国家环境保护环境影响评价数值模拟重点实验室,北京 100012；4.北京航空航天大学,北京 100083；5.四川省环境工程评估中心,四川 成都 610041；6.中国气象局公共气象服务中心,北京 100081)

摘要：为了解复杂地形-气象场条件下二噁英类污染物环境影响,选取我国西南某代表性山地,利用 CALPUFF 预测区域垃圾焚烧、医废与危废项目二噁英类污染物的环境影响,并通过土壤实测数据进行模型分析验证.结果显示:复杂地形-气象场条件下,同一区域不同空间下的风向与风速将会出现明显差异,CALMET 气象模块可结合相关资料,模拟计算出可信较高的复杂气象场文件;模型预测显示,在复杂地形-气象场条件下,项目排放的二噁英在土壤中的沉降位置、方向与全年主导风向不完全一致.研究区域土壤沉降量为 0.86×10^{-3}~9.84×10^{-1}ngTEQ/m^2;模型模拟医废与垃圾焚烧、危废项目沉降数据与监测数据相关性 *R* 分别为 0.854,0.287,说明 CALPUFF 模式在复杂地形-气象场条件下模拟周边土壤二噁英空间分布有一定可信度.

关键词：二噁英；CALPUFF；垃圾焚烧；危废项目；复杂气象场

中图分类号：X512 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2019)04-1678-09

DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2019.0203

Study on settlement of dioxin pollutants under complex terrain-weather conditions. TIAN Fei[1], BO Xin[2,3*], XUE Xiao-da[4], JIA Yu-ling[5], TANG Qian-hong[6], SUN Hong-tao[1], LI Shi-bei[2] (1.Shandong Academy of Environmental Science Co., Ltd., Jinan 250013, China；2.Appraisal Center for Environment and Engineering, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100012, China；3.State Environmental Protection Key Laboratory of Numerical Modeling for Environment Impact Assessment, Beijing 100012, China；4.Beihang University, Beijing 100083, China；5.Sichuan Environment and Engineering Appraisal Center, Chengdu 610041, China；6.CMA Public Meteorological Service Center, Beijing 100081, China). *China Environmental Science*, 2019,39(4)：1678~1686

Abstract：In order to understand the environmental impact of dioxin pollutants under complex terrain-weather conditions, a representative mountainous area in southwestern China was selected to predict the environmental impact of dioxin pollutants in regional waste incineration, medical waste and hazardous waste disposal projects using CALPUFF, and the modeling was analyzed and verified by soil measured data. The results showed that under the condition of complex terrain-weather field, the wind direction and wind speed in different spaces in the same region were significantly different. The CALMET module can be combined with relevant data to simulate a meteorological field file close to reality. The model prediction showed that under the complex terrain-weather field, the settlement position and direction of dioxins from the project were not completely consistent with the prevailing wind direction throughout the year. The annual average concentration contribution of dioxins to the soil sedimentation of dioxins was 0.86×10^{-3}~9.84×10^{-1}ngTEQ/m^2. The correlation between the monitoring data and model-simulated settlement data of medical waste and municipal waste incineration, hazardous waste projects was 0.854 and 0.287, respectively, indicating that the CALPUFF model has a certain degree of confidence in simulating the spatial distribution of dioxin in the surrounding soil under complex terrain-weather conditions.

Key words：dioxin；CALPUFF；waste incineration；hazardous waste disposal；complex weather field

环境中二噁英的来源分为自然源与人为源,自然源包括火山爆发、森林火灾和氯酚类化合物的微生物合成等[1].人为源是二噁英主要来源,主要包括生活垃圾、危险废物等的焚烧处置,金属冶炼、造纸与漂洗等工业生产等[2-3].

国内外一些学者,利用不同的空气质量模型、针对不同行业排放二噁英对环境影响展开研究.部分学者采用 ISCST3 或 AERMOD 模型分别对危废及垃圾焚烧项目二噁英排放进行模拟,ISCST3 模拟结果显示二噁英沉降主要集中于项目周围 500m 范围内[4].AERMOD 模拟结果显示二噁英的浓度分布主要集中在项目周边土壤[5-7].孙博飞等[8]利用 CALPUFF 模型研究了河北某钢铁厂烧结机烟气排放对土壤中二噁英浓度的影响.刘淑芬等[9]和齐

收稿日期：2018-09-26

基金项目：2018 年度四川省环境保护科技计划项目(2018HB22);国家自然科学基金资助项目(71673107)

* 责任作者，高工, 188672200@qq.com

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

丽等[10]均利用 Level Ⅲ 逸度模型分别研究了我国和北京地区环境介质中二噁英的平均浓度水平和迁移规律.除此之外,部分学者针对模型参数变化对二噁英迁移转化规律进行研究,刘鹤欣等[11]采用高斯模型对不同地形地貌、气象条件下的垃圾焚烧进行监测布点研究.王超等[12]使用 AERMOD 模型,人为设置风速、风向来研究复杂地形条件危废项目二噁英的污染扩散.张珏等[13]在输送模式(CMAQ)物理化学模块基础上增加气相-颗粒相间分配机制,模拟了长三角地区二噁英在大气中的输送、转化和沉降等演变过程.

从以上成果可知,二噁英扩散研究多集中在生活垃圾与危废焚烧等项目,因该类项目邻避效应明显,为避免引起群体性事件,在我国西南多山地区,项目选址一般为人口稀少的丘陵与山地.而基于这种复杂地形-气象场的二噁英扩散研究较少,少量研究多以 ISCST3、AERMOD 稳态烟羽模式为主,但是 AREMOD 只能输入单点地面气象站和单点高空站点气象数据,计算得到尺度数据和边界层廓线数据后,再进行内插处理得到模拟区域网格点上的气象场数据,不能详尽反应复杂地形区域的气象情况,直接影响污染物扩散模拟.国内外学者对复杂地形污染物扩散也开展了大量研究,Brown 等[14]指出复杂地形条件下采用拉格朗日随机游走模式更适于污染物扩散模拟,魏杰等[15]在此基础上结合风场诊断模式 CALMET 提供的逐时三维风场,发现能够更好的模拟烟流轨迹和地表浓度分布.朱好等[16]与赖锡柳等[17]通过模拟发现,非稳态三维拉格朗日烟团模式 CALPUFF 适用于复杂地形近地场大气模拟.但基于此模型在复杂地形-气象场的二噁英扩散、沉降研究较少,无法为垃圾焚烧等项目的监测布点及环境影响分析提供技术支持.

为了解决此问题,本研究基于我国西南一处山地区域,针对现有运行多年的垃圾焚烧、医废与危废项目,利用 CALMET 气象模式生成区域三维气象场,通过 CALPUFF 定量预测二噁英的区域分布.然后据此设置二噁英土壤监测点,通过预测数据与监测数据的相关性分析,研究复杂地形-气象场条件下模型模拟污染物扩散的可信性,最终为《环境影响评价技术导则-土壤环境(试行)》(HJ964-2018)[18]的环境监测布点提供技术支撑.

1　材料与方法

1.1　研究区域与对象

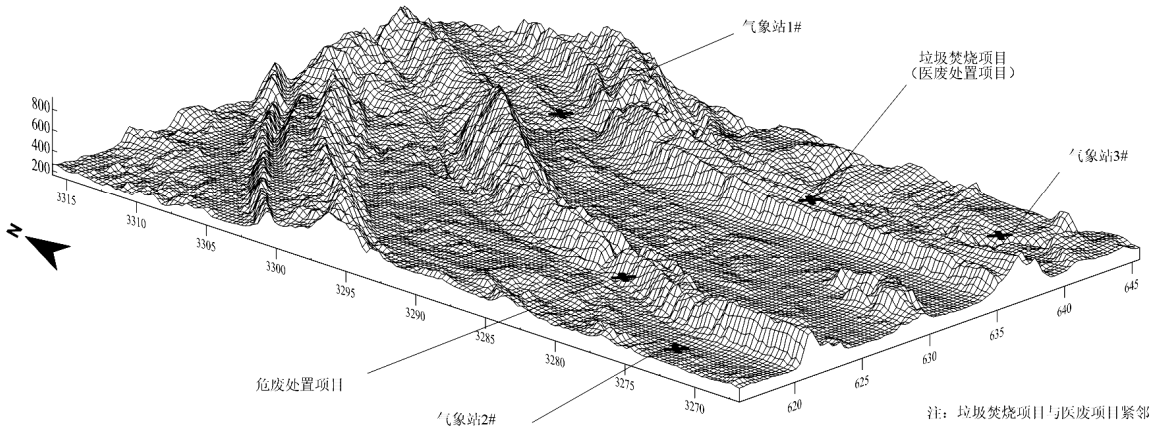


图 1　研究区域地形

Fig.1　Topographic map of the study area

UTM 坐标系,单位 km,下同

本研究区域为我国西南部的某代表性山地,地势北高南低,海拔高度范围为 150~900m,整个区域被 2 座山体分割为东、中与西 3 个部分(图 1),预测范围为 30×30km,即图 1 中南侧部分,气象站 1#不在预测范围内;该范围分别建有垃圾焚烧、医废与危废项目,其中前 2 个项目紧邻,分布于山脊坡面,海拔较高.危废项目位于生活垃圾焚烧项目西侧 15km,建于山脚凹地;医废项目建有处理量约

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

11000t/a 的焚烧炉,焚烧炉于 2004 年投产,2016 年年底停产,共运行 13a,本研究主要考虑它正常生产过程中的土壤沉积.垃圾焚烧项目为机械炉排炉,于 2005 年投产,目前生活垃圾处理量为 43.8 万 t/a.危废项目焚烧炉于 2008 年投产,目前处理能力为 1095t/a.现有垃圾焚烧、医废与危废项目主要采用“3T+1E”及末端处理(活性炭喷射)控制二噁英的产生与排放,经烟囱外排二噁英浓度能够满足行业对应标准要求.

1.2 模型方法

CALPUFF 模式系统是用于模拟污染物输送、转化的预测模式.模式为非稳态三维拉格朗日烟团模式,考虑了时空变化气象场、复杂地形动力学效应以及静风等非稳态条件[19-20].CALPUFF 模式系统主要包括 CALMET 气象模式、CALPUFF 扩散模式以及一系列前/后处理程序[21].CALMET 气象模式可将气象(包括地面与高空气象数据)、地形与土地利用等文件数据,通过地形动力学、坡面流、阻塞与质量守恒等作用,分析加权生成三维气象场文件(CALMET.DAT)[22-23].CALMET 气象模式能较好反应海风环流、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.

本研究搜集了 2016 年模拟区域内或周围的 3 处地面气象站数据,气象因子包括:风速、风向、相对湿度、降水量、温度与气压等.2016 年各气象站主导风向、风速等与 20 年气象资料相似,可作为地区代表性气象数据;高空气象数据为中尺度数据大气模式 WRF 模拟提供的三维气象场数据;区域地形资料来自美国地质勘探局(USGS),地形数据精度为 90m,土地利用类型数据精度为 30m[24].本研究建模考虑项目坐标及排放高度、烟气温度与流速、二噁英排放量等信息,网格分辨率 300m,东西向 100 个格点,南北向 100 个格点.

本研究定量模拟各项目排放二噁英类污染物对周边环境贡献情况,包括年均浓度(ngTEQ/m^3)、沉降通量(ngTEQ/(m^2·s)).由于二噁英类物质化学性质稳定,模拟不考虑它的衰变与化学转化,通过项目投产与关停时间,计算项目周围土壤环境中二噁英类物质的多年富集量(ngTEQ/m^2),分析污染场地空间分布范围.

1.3 土壤中二噁英监测布点及监测方法

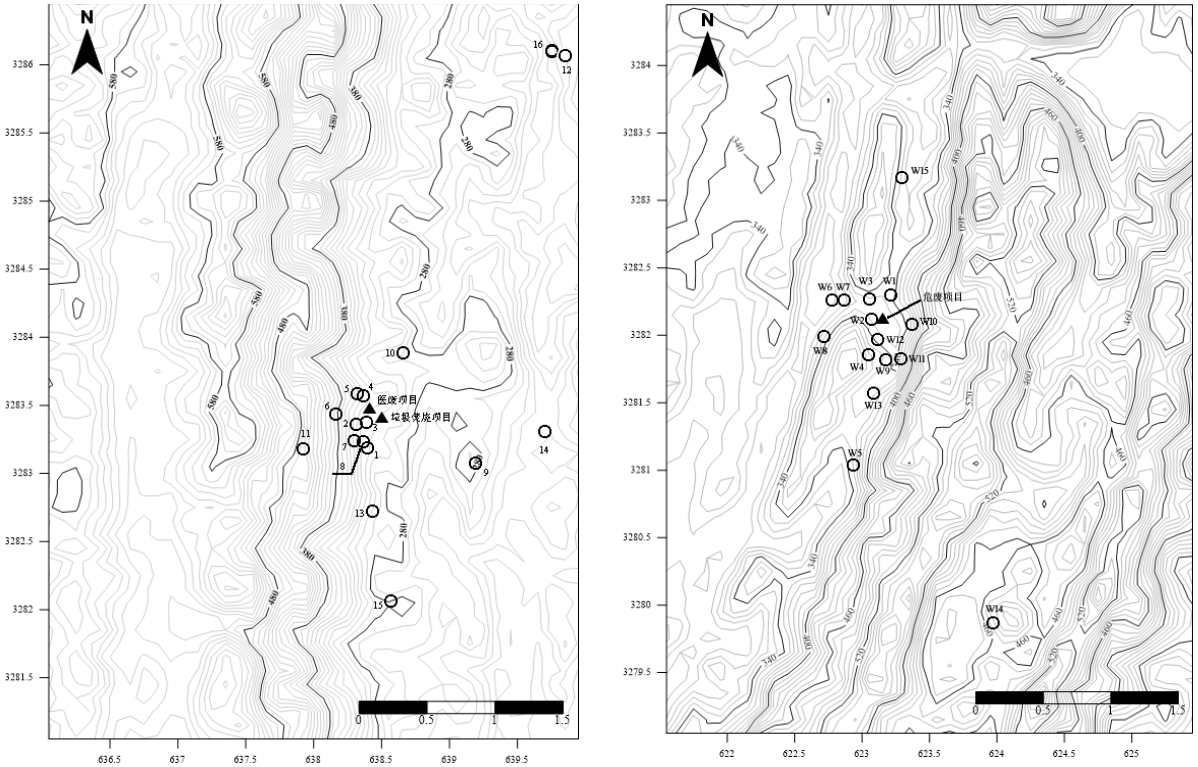


图 2 项目周边土壤二噁英监测布点

Fig.2 Soil dioxin monitoring site map

本次土壤布点采用 CALPUFF 模式进行优化布点,即根据研究对象的污染物排放清单,结合地形、

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

土地利用与气象等资料,采用CALPUFF预测二噁英土壤的干、湿沉降范围,据此进行选择性的监测布点,点位既考虑预测范围内代表性的大值区,也考虑受影响较小的背景值.

根据 CALPUFF 对二噁英沉降的预测结果,本研究分散设置 31 个土壤监测点,其中垃圾焚烧与医废项目周边设置 16 个监测点(图 2 中的 1~16 点位),危废项目周边设置15个监测点(图2中W1~W15点位).

为提高样品代表性,土壤采用五点法采样,取0~20cm 表层土进行样品采集,然后对土壤进行混合预处理,采用四分法取得检测样品.土壤中二噁英类物质的检测分析采用国家标准“土壤和沉积物 二噁英类的测定同位素稀释高分辨气相色谱-高分辨质谱法”(HJ77.4-2008)[25],本次分析仪器选取 JMS-800D 高分辨磁质谱系统.

1.4　模型验证方法

模型验证分 2 部分,一是对 CALMET 模式生成的风场进行分析,二是对模拟和监测数据相关性进行分析.前者主要是结合地形等资料,对风场的合理性进行分析,后者主要是通过皮尔逊相关系数的 R 值进行分析说明.

2　结果与讨论

2.1　复杂地形-气象场分析

污染物扩散主要与项目排放方式、区域地形与气象条件等因素有关,在其它条件确定的前提下,给出合理气象条件将成为模型模拟污染物扩散准确与否的关键.在复杂地形条件下,同一区域不同空间下的风向与风速等气象参数会有明显差异,如果模型不能合理模拟复杂地形-气象场,将会影响污染物的预测结果.

本研究搜集了项目附近 3 个地面气象站(图 2 中1#、2#与3#气象站)2016年的气象资料,采用CALView画出全年的风玫瑰图(图 3),说明复杂地形-气象场的特殊性.根据风速对比分析,相比 2#与 3#气象站,1#气象站因地处两山之间的凹地,地势对两侧气流阻隔效应明显,导致风速偏小,且 1#气象站静风频率也明显大于 3#与 2#气象站,即 8.866%(1#)>3.009%(3#)>2.845%(2#);根据风向对比分析,1#气象站全年主导风向不明显,主要风向以东北风(NE)为主,2#气象站全年主导风向为北风,这主要与 2#气象站周围地势平坦,东西两侧高地迫使地表气流南北方向流动(2#气象站西侧高地未在图中显示),加之北侧山地地势较高,人为活动较少,在热通量与地势的共同作用下,形成了由北向南的风场;3#气象站全年主导风向为西北风,风向最为明显,通过地势分析,3#气象站自身地势较高,南部有低矮山丘阻隔,而西南侧地势较低,导致坡面流作用明显,从而形成以西南风为主的风场.对比 3 个气象站气象数据可知,复杂地形条件下同一区域不同地点的风速与风向存在明显差异.

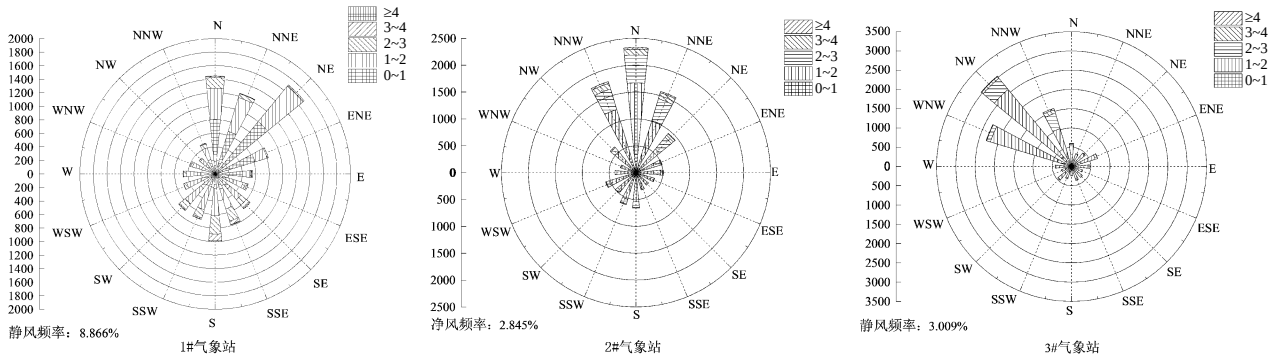


图 3　地面气象站 2016 年风玫瑰

Fig.3　2016 wind rose map based on ground weather station data

CALMET.DAT 文件是 CALMET 气象模式综合地形、土地利用、地面气象资料等数据计算生成的气象场文件,能较为准确的反应复杂气象场特点.本次研究以 2016 年 3 月 21 日 23:00 的短时风场(图 4)为例,说明 CALMET 气象模式计算生产的复杂地形条件下区域风场图.

图 4 显示,研究范围主要被 2 座山体分割为东、中与西 3 个区域,不同区域的风速、风向不尽相同.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

对比风速、风向可知,由于中部山谷区域受两侧山体阻隔,风速较小,风向也因地势的起伏而变化;东部区域北侧海拔较高,南侧有明显谷地风口,风速较大,中间地区因山体环绕,风速较小.风向也因地势差异,体现明显的反差;西部地区地形由北向南逐渐由开阔平坦变为狭窄,在热通量与地势作用下,风向以北风为主(N),风速也随着地势的狭管效应,逐渐变大.危废项目紧邻山体,地势起伏剧烈,对风速与风向形成阻隔,从而出现沿山体方向风速较小的坡面流(WNN);垃圾焚烧与医废项目由于海拔较高,且地势变化缓慢,地面气流能缓慢跨过山体,风向为东南(SE).由此可见,CALMET.DAT 中风场文件能够较好的体现区域风向、风速特点,与图 3 中 3 个气象站盛行风向有比较高的匹配度,因此有较高可信度.

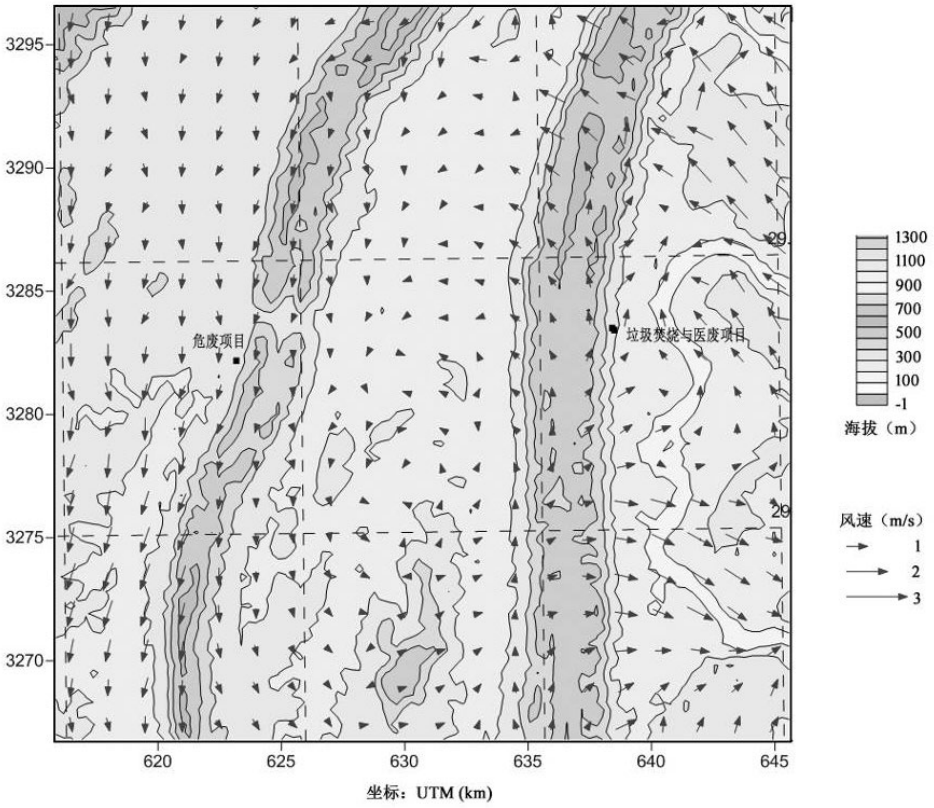


图 4 研究区域短时风场

Fig.4 Short-term wind field map of the study area

2.2 排放二噁英对土壤污染影响分析

本研究区域二噁英排放源主要为垃圾焚烧、医废与危废项目,均以有组织形式排放,烟囱高度分别为 60,45 与 50m.根据企业统计资料,垃圾焚烧、医废与危废项目的二噁英排放量分别为 2.84×10^{-7}, 4.55×10^{-8},4.41×10^{-8}tTEQ/a.研究通过 CALPUFF 模式预测二噁英在周围土壤的沉降累积(图 5).

根据研究区域预测的土壤二噁英年均沉降通量以及项目实际生产时间,计算得到项目对土壤环境的总沉降量.根据二噁英沉降量预测,区域土壤沉降量为 0.86×10^{-3}~9.84×10^{-1}ngTEQ/m^2,高值区主要集中于厂区四周.危废项目最大沉降量出现在西厂界外,单位区域最大沉降量为 3.52×10^{-1}ngTEQ/m^2(10a);垃圾焚烧与医废项目紧邻,两者共同对周围土壤造成影响,最大沉降量出现在两厂区的西南侧(医废项目厂界南,垃圾焚烧项目西厂界),单位区域最大沉降量为 9.83×10^{-1}ngTEQ/m^2(两项目运行时间都为 13a).对比地面气象站风玫瑰图,土壤二噁英总沉降量(图 5)分布趋势与全年主导风向(图 3)并不完全一致,主要原因为项目所在区域气象场复杂,大气湍流活动明显,影响颗粒态二噁英在大气中扩散方向[26].由此可见,二噁英在土壤中沉降量不仅与项目二噁英排放量与运行时间有关,还与项目所在地形、气象等因素有关.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

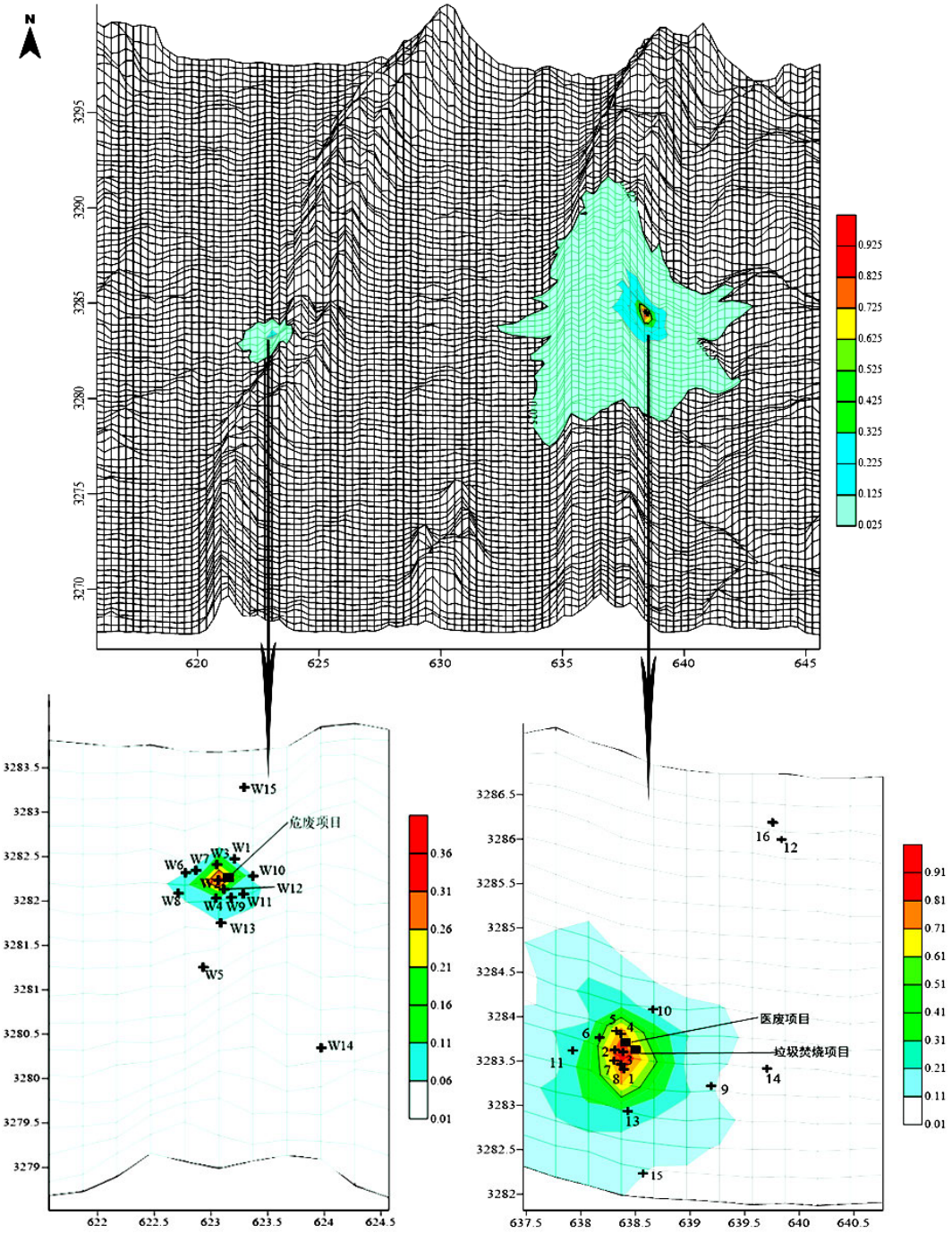


图 5　预测二噁英沉降量分布及监测布点

Fig.5　Predicted distribution of dioxin settlement and monitoring layout

2.3　模型验证

为验证模型模拟二噁英土壤沉降数据的准确性,本研究根据模拟的结果设置二噁英土壤监测点,通过相同点的预测数据与实际监测数据相关性对比,说明模型模拟的可靠性.

土壤中二噁英(PCDD/Fs)检测组分分析结果显示(图 6),除距离较远的 12 号监测点外,医废与垃圾焚烧项目周边土壤中八氯二苯并二噁英(OCDD)是主要贡献单体,占土壤二噁英检测总量的 25%~95%,其次为 1,2,3,4,6,7,8−HpCDD 和 1,2,3,4,6,7,8−HpCDF,占检测总量的 2%~34%;危废项目八氯二苯并二噁英(OCDD)也为主要贡献单体,占土壤二噁英检测总量的 43%~97%,其次为 1,2,3,4,6,7,8−HpCDD 和 1,2,3,4,6,7,8−HpCDF(W4、W7 除外),占检测总量的 1%~24%,说明两项目周边土壤中二噁英 17 种有毒异构体显示出相似的指纹特征,并与雷鸣等[27]研究

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

的焚烧炉烟气中 OCDD 比例最高,其次为 1,2,3,4,6,7,8-HpCDF 的结果相近.

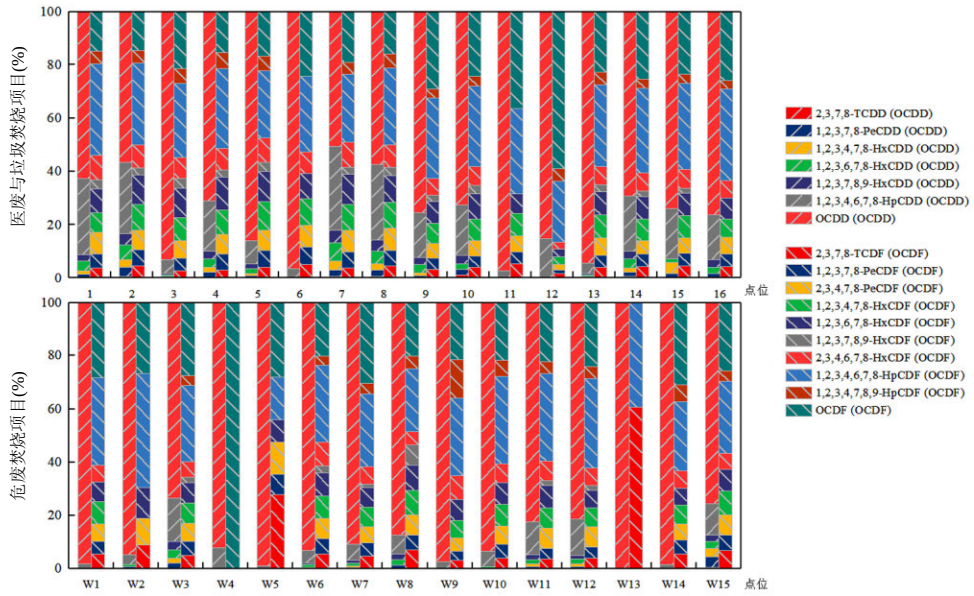


图 6 土壤中二噁英监测成分分析

Fig.6 Analysis chart of monitored dioxincomponents in soil

2,3,7,8-TCDD 为 2,3,7,8-四氯二苯并二噁英;1,2,3,7,8-PeCDD 为 1,2,3,7,8-五氯二苯并二噁英;1,2,3,4,7,8-HxCDD 为 1,2,3,4,7,8-六氯二苯并二噁英;1,2,3,6,7,8-HxCDD 为 1,2,3,7,8,9-六氯二苯并二噁英;1,2,3,7,8,9-HxCDD 为 1,2,3,7,8,9-六氯二苯并二英;1,2,3,4,6,7,8-HpCDD 为 1,2,3,4,6,7,8-七氯二苯并二噁英;OCDD 为八氯二苯并二噁英;2,3,7,8-TCDF 为 2,3,7,8-四氯二苯并呋喃;1,2,3,7,8-PeCDF 为 1,2,3,7,8-五氯二苯并呋喃;2,3,4,7,8-PeCDF 为 2,3,4,7,8-五氯二苯并呋喃;1,2,3,4,7,8-HxCDF 为 1,2,3,4,7,8-六氯二苯并呋喃;1,2,3,6,7,8-HxCDF 为 1,2,3,7,8,9-六氯二苯并呋喃;1,2,3,7,8,9-HxCDF 为 1,2,3,7,8,9-六氯二苯并呋喃;2,3,4,6,7,8-HxCDF 为 2,3,4,6,7,8-六氯二苯并呋喃;1,2,3,4,6,7,8-HpCDF 为 1,2,3,4,6,7,8-七氯二苯并呋喃;1,2,3,4,7,8,9-HpCDF 为 1,2,3,4,7,8,9-七氯二苯并呋喃;OCDF 为八氯二苯并呋喃

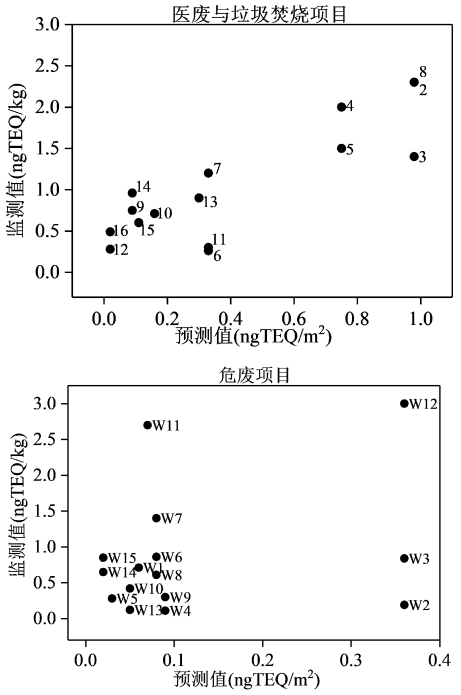


图 7 土壤中二噁英监测值与对应监测点预测数据分布情况

Fig.7 Distribution of dioxin monitoring value and predicted value data in soil

根据二噁英监测值与对应监测点预测数据(图 7),土壤中二噁英含量范围为 0.11~2.3ngTEQ/kg(剔除垃圾焚烧 1#监测点的异常值),预测沉降量为 0.02~0.95ngTEQ/m^2.对比两区域的二噁英监测值,垃圾焚烧与医废项目周边监测平均值为 1.90ngTEQ/kg,大于危废项目的 0.87ngTEQ/kg,这与模型预测趋势一致,即:0.45ngTEQ/m^2(垃圾焚烧)>0.12ngTEQ/m^2(危废项目);垃圾焚烧项目监测较大值为 2,3,4,5,7,8 点位的监测值(大于 1ngTEQ/kg),均分布于厂区周边,这与模型预测结果基本一致.危废项目监测较大值为 W7、W11 与 W12(大于 1ngTEQ/kg),其中 W12 紧邻厂界南侧,另外两点分布于厂界外东南到西北的直线上,与模型预测结果不完全一致.

为进一步对比土壤监测值与模型模拟沉降量的相关性,采用 R(相关系数)统计分析,经计算医废与垃圾焚烧项目 R=0.854,危废项目 R=0.287.鉴于采用土壤监测结果验证模型预测准确性的研究较少,本次引用其他文献中大气监测验证的相关系数(0.55~

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

0.90)[28-31],说明 CALPUFF 模式模拟医废与垃圾焚烧项目周边土壤二噁英污染空间分布有一定可信度,而危废项目周边土壤监测与模拟结果相关性不强,这可能与危废项目设计规模小、投产时间短,二噁英排放总量小,土壤中的二噁英在外环境的干扰下,不能充分体现危废项目影响有关.

2.4　不确定性分析

研究区域多为山地、农田与荒地,部分因素(秸秆焚烧、除草剂使用等)对土壤中二噁英浓度有干扰[32],监测过程土壤吸附导致的提取不充分、容器壁吸附、检出限值等原因,导致二噁英监测值出现异常.

预测模式输入的污染排放源强采用单次实际监测值,不能完全代表危废、医废与垃圾焚烧项目的长期二噁英排放量;模型预测土壤沉降、富集过程中,未考虑二噁英的衰减与其他因素影响,预测结果有一定不确定性.

3　结论

3.1　复杂地形-气象场条件下,同一区域不同空间下的风向与风速将会出现明显差异.CALMET 模块可结合地形数据、土地利用数据与地面气象数据等,计算得到可信度较高的气象场文件,用于预测复杂地形-气象场条件下污染物的传输和扩散.

3.2　模型预测结果显示,在复杂地形-气象场条件下,垃圾焚烧、医废与危废项目排放二噁英在土壤中的沉降位置、方向与全年主导风向不完全一致,沉降高值区主要集中于厂区四周,土壤最大沉降量 9.84×10^{-1}ngTEQ/m^2.

3.3　本研究对比土壤监测值与模型模拟沉降量的相关性,统计计算相关系数分别为 R=0.854(医废与垃圾焚烧项目)与 R=0.287(危废项目),说明在二噁英排放总量较高的医废与垃圾焚烧项目周边,CALPUFF 模型模拟的二噁英类物质沉降量与实际监测数据有较强相关性,而排放总量较小的危废项目模拟值与实测值相关性不强.该模型能够为该类项目在复杂地形-气象场条件下的监测优化布点及环境影响分析提供技术支持.

参考文献:

[1] 张杏丽,周启星.土壤环境多氯二苯并二噁英/呋喃(PCDD/Fs)污染及其修复研究进展 [J]. 生态学杂志, 2013,32(4):1054-1064.
Zhang X L, Zhou Q X. Soil polychlorinated dibenzo-P-dioxins and dibenzofurans contamination and its remediation: Research progress [J]. Chinese Journal of Ecology, 2013,32(4):1054-1064.

[2] 邹　川.典型行业PCDD/Fs排放特征及其控制研究 [D]. 广州:华南理工大学, 2012.
Zou C, Study on emission characteristics and control of PCDD/Fs from typical industries [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.

[3] 苏　青.广州市大气环境中二噁英环境行为研究 [D]. 长沙:湖南师范大学, 2012.
Su Q. Study on environmental behavior of Dibenzo-P- dioxins and dibenzofurans in atmosphere of Guangzhou City [D]. Changsha: Hunan Normal Universit.

[4] 王　坚.基于 ISCST3 模型的危险废物焚烧设施累积性环境影响分析 [J]. 科技创新导报, 2013,(30):38-42.
Wang J. Assessment of accumulative environmental impacts of hazardous waste combustion facilities based on the ISCST3Model [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2013,(30):38-42.

[5] 刘　帅,张　震,宋国君,等.北京某垃圾焚烧厂二噁英多介质扩散风险评估[J].中国公共卫生, 2018,34(9):1224-1228.
Liu S, Zhang Z, Song G J, et al. Pollution characteristics of PCDD/Fs in ambient air and exposure risk assessment around a municipal solid waste incinerator in Beijing [J]. China Public Health, 2018,34(9): 1224-1228.

[6] 李煜婷,金宜英,刘富强.AERMOD 模型模拟城市生活垃圾焚烧厂二噁英类物质扩散迁移 [J]. 中国环境科学, 2013,33(6):985-992.
Li Y T, Jin Y Y, Liu F Q, Diffusion and transformation of PCDD/Fs of municipal waste incineration plant by using AERMOD model [J]. Chinese Environmental Science, 2013,33(6):985-992.

[7] 王　奇.危险废物焚烧厂二恶英排放的环境分布及健康风险评估研究 [D]. 杭州:浙江大学, 2014.
Wang Q. Study on environmental distribution and health risk assessment of PCDD/F emissions from hazardous waste incineration [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.

[8] 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]. Chinese Environmental Science, 2017,37(11):4222-4229.

[9] 刘淑芬,田洪海,任　玥,等.我国二噁英污染水平和环境归趋模拟 [J]. 环境科学研究, 2010,23(3):261-265.
Liu S F, Tian H H, Ren Y, et al. Pollution situation and environmental fate of PCDD/Fs in China. Research of Environmental Sciences, 2010,23(3):261-265.

[10] 齐　丽,周志广,许鹏军,等.北京地区二噁英类的环境多介质迁移和归趋模拟 [J]. 环境科学研究, 2012,25(5):543-548.
Qi L, Zhou Z G, Xu P J, et al. Simulation of the transfer and fate of PCDD/Fs in Beijing using a steady-state multimedia fugacity Model [J]. Research of Environmental Sciences, 2012,25(5):543-548.

[11] 刘鹤欣,罗　锐,冉小鹏,等.采用高斯模型的垃圾焚烧污染物环境监测及布点 [J]. 西安交通大学学报, 2015,49(5):147-154.
LIU H X, Luo Y, Ran X P, et al. Monitoring spots setting for the

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

pollutants emitted from incinerators based on Gaussian Model [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015,49(5):147-154.

[12] 王 超,陈 彤,王 奇,等.气象条件对点源排放二噁英模拟的影响规律研究 [J]. 环境污染与防治, 2017,39(1):82-87.
Wang C, Chen T, Wang Q, et al. Study of the influence of meteorological condition to modeling the transformation of dioxin emitted by point source [J]. Environmental Pollution & Control, 2017, 39(1):82-87.

[13] 张 珏,孟 凡,何友江,等.长江三角洲地区大气二噁英类污染物输送-沉降模拟研究 [J]. 环境科学研究, 2011,24(12):1393-1402.
Zhang Y, Meng F, He Y J, et al. Simulation of transport-deposition of Dibenzo-p-Dioxins and Dibenzo Furans in the atmosphere in the Yangtze River delta Region [J]. Research of Environmental Sciences, 2011,24(12):1393-1402.

[14] Brown M J, Arya S P, Snyder W H. Vertical dispersion from surface and elevated release: An investigation of a non-Gaussian plume model [J]. Journal of Applied Meteorology, 1993,32(3):490-505.

[15] 魏 杰,宋 宇,蔡旭晖.复杂地形大气污染物传输和扩散的高分辨率模拟 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2008,(6):938-944.
Wei J, Song Y, Cai X H. High resolution simulations to transport and diffusion over complex terrain [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2008,(6):938-944.

[16] 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. Using CALPUFF for near-field atmospheric dispersion simulation over complex terrain [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2013,49(3):452-462.

[17] 赖锡柳,王 颖,杨雪玲,等.AERMOD 与 CALPUFF 模拟复杂地形空气质量的对比 [J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2017,53(6): 792-798.
Lai X L, Wang Y, Yang W L, et al. Acomparative study of AERMOD and CALPUFF simulation of the air quality on a complex terrain [J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2017,53(6):792-798.

[18] 生态环境部. HJ964-2018 环境影响评价技术导则-土壤环境(试行) [M].

[19] 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]. Chinese Environmental Science, 2015,35(2):364-373.

[20] 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]. Environmental monitoring management and technology, 2009,21(3):9-13+47.

[21] Scire J S, Strimaitis D G, Yamartino R J. A user's guide for the CALMET dispersion model (Version 5) [M]. Concord,MA: Earth Tech, 2000:1-332.

[22] Yim S H L, Fung J C H, Lau A K H. Use of high-resolution MM5/CALMET/CALPUFF system: SO_2 apportionment to air quality in Hong Kong [J]. Atmospheric Environment, 2010,44:4850-4858.

[23] Scire J S, Robe F, Fernau M, et al. A userps guide for the CALMET meteorological model [J]. Concord: Earth Tech Inc, 2000:21-57.

[24] 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]. Chinese Environmental Science, 2015,35(9):2570-2575.

[25] HJ77.2-2008 环境空气和废气 二噁英类的测定 同位素稀释高分辨气相色谱-高分辨质谱法 [S].
HJ77.2-2008 Ambient air and waste gas Determination of polychlorinated dibenzo-p-dioxins (PCDDs) and polychlorinated dibenzofurans (PCDFs) Isotope dilution HRGC-HRMS [S].

[26] 孔佑花,张金贵,张少伟,等.河谷型城市风场及污染物扩散的 CFD 数值仿真 [J]. 环境科学研究, 2018,31(3):450-456.
Sun Y H, Zhang J G, Zhang S W, et al. CFD numerical simulation of wind field and pollutant dispersion in Valley Cities [J]. Research of Environmental Sciences, 2018,31(3):450-456.

[27] 雷 鸣,海 景,程 江,等.小型生活垃圾热处理炉二恶英和重金属的排放特征 [J]. 中国环境科学, 2017,37(10):3836-3844.
Lei M, Hai J, Cheng J, et al. Emission characteristics of dioxins and heavy metals from small-scale thermal treatment furnaces for disposing domestic solid waste [J]. Chinese Environmental Science, 2017,37(10):3836-3844.

[28] EPA. A Comparison of CALPUFF with ISC3 [M] North Car-olina: Office of air quality planning and standards Research Triangle Park, 1998:1-10.

[29] 张雯婷,王雪松,刘兆荣,等.贵阳建筑扬尘 PM_{10} 排放及环境影响的模拟研究 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2010,46(2):258-264.
Zhang W T, Wang X S, Liu Z R, et al. Construction fugitive PM_{10} emission and its influences on air quality in Guiyang [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2010,46(2):258-264.

[30] 薛文博,王金南,杨金田,等.淄博市大气污染特征模型模拟及环境容量估算 [J]. 环境科学, 2013,34(4):1264-1269.
Xue W B, Wang J N, Yang J T, et al. Simulation of air pollution characteristics and estimates of environmental capacity in Zibo city [J]. Environmental Science, 2013,34(4):1264-1269.

[31] 杨多兴,韩永伟,拓学森.门头沟生态区排放的大气颗粒物输送的模拟研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2007,(5):113-117.
Yang D Y, Han Y W, Tuo X S. Simulation study on transport of airborne particulate matters originated from the ecological area in Mentougou [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2007,(5):113-117.

[32] 周志广,田洪海,刘爱民,等.北京市农业区不同使用类型土壤中二噁英类分析 [J]. 环境化学, 2010,29(1):18-24.
Zhou Z G, Tian H H, Liu A M, et al. Study PCDD/Fs in different type soil in agricultural from Beijing city [J]. Environmental Chemistry, 2010,29(1):18-24.

作者简介: 田 飞(1985-),男,山东济南人,工程师,主要研究方向为环境数值模拟及二噁英环境影响研究.发表论文 3 篇.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net