基于不同空气质量模型的二噁英沉降效果研究

史梦雪[1],伯 鑫[2,3*],田 飞[4],杨朝旭[5],王 刚[6],马根慧[7],贾瑜玲[8],李时蓓[2,3],朱 彬[1**] (1.南京信息工程大学大气物理学院,江苏 南京 210044；2.生态环境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.山东省环境保护科学研究设计院有限公司,山东 济南 250013；5.吉林化工学院资源与环境工程学院,吉林 吉林 132022；6.三捷环境工程咨询(杭州)有限公司,浙江 杭州 310012；7.CERC 环境科技(北京)有限公司,北京 100872；8.四川省环境工程评估中心,四川 成都 610041)

摘要：为评估不同空气质量模型(AERMOD、ADMS 和 CALPUFF)在复杂地形-气象场条件下的干湿沉降模拟效果,利用上述模型模拟我国西南某代表性山地的医废、垃圾焚烧项目的二噁英环境影响,并通过土壤实测数据进行模型分析验证.结果表明:AERMOD、ADMS 和 CALPUFF 模拟的空气中年均浓度依次为 1.53×10^{-8}~4.14×10^{-6},5.23×10^{-9}~3.28×10^{-6} 和 2.66×10^{-9}~2.59×10^{-7}ngTEQ/m^3; AER MOD、ADMS 和 CALPUFF 模拟的固定点位总沉降量依次为 4.41~285.72,3.07~268.02 和 0.02~1.35ngTEQ/m^2.在扩散、沉降形态上,CALPUFF 的模拟结果与其他两种模型均表现出较大差异,AERMOD 和 ADMS 的沉降形态相似,空气中的扩散形态却存在差异.利用土壤监测值验证模型效果发现,AERMOD、ADMS 和 CALPUFF 的相关系数 *r* 分别为 0.66、0.70 和 0.83,CALPUFF 的模拟结果在空间分布上表现更为优越,可作为相关项目的布点指导模型.

关键词：二噁英；AERMOD；沉降；ADMS；CALPUFF

中图分类号：X511 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2020)01-0024-07

DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2020.0003

Study on deposition effects of dioxins based on different air quality models. SHI Meng-xue[1], BO Xin[2,3*], TIAN Fei[4], YANG Zhao-Xu[5], WANG Gang[6], MA Gen-hui[7], JIA Yu-ling[8], LI Shi-bei[2,3], ZHU Bin[1**] (1.School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China；2.Appraisal Center for Environment and Engineering, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100012, China；3.State Environmental Protection Key Laboratory of Numerical Modeling for Environment Impact Assessment, Beijing 100012, China；4.Shandong Academy of Environmental Science Co., Ltd., Jinan 250013, China；5.College of Resources and Environmental Engineering, Jilin Institute of Chemical Technology, Jilin 132022, China；6.Trinity Consultants, Hangzhou 310012, China；7.CERC (China) Co., Ltd., Beijing 100872, China；8.Sichuan Environment and Engineering Appraisal Center, Chengdu 610041, China). *China Environmental Science*, 2020,40(1)：24~30

Abstract：In order to evaluate the modeling effects of different air quality models (AERMOD, ADMS and CALPUFF) on dry and wet deposition under complex terrain-weather conditions, using the above models simulated the impacts of dioxins on ambient environment from the medical waste and waste incineration projects which were in a representative mountainous area in southwest China. The deposition effects were verified by analysis of soil sampling data. The results showed that the annual average concentrations in the air modeled by AERMOD, ADMS and CALPUFF were 1.53×10^{-8}~4.14×10^{-6}, 5.23×10^{-9}~3.28×10^{-6} and 2.66×10^{-9}~2.59×10^{-7} ngTEQ/m^3 respectively; the results of total soil deposition at the monitoring points modeled by AERMOD, ADMS and CALPUFF were 4.41~285.72, 3.07~268.02 and 0.02~1.35ngTEQ/m^2 respectively. The modeling results of CALPUFF showed great differences in both diffusion & deposition patterns, compared to the other two models. The simulated deposition patterns of AERMOD and ADMS were similar, while the simulated diffusion patterns in the air were not. Through the verification of soil monitoring data, it was found that the correlation coefficients *r* of AERMOD, ADMS and CALPUFF were 0.66, 0.70 and 0.83 respectively. The modeling results of CALPUFF were superior in spatial distribution and can be used as the guidance model for related projects.

Key words：dioxin；AERMOD；deposition；ADMS；CALPUFF

焚烧法因其减量化和资源化的优势,逐渐成为我国垃圾处理的主要方法[1].垃圾焚烧过程中会产生各种颗粒物和气体,其中不乏一些对人体有害的持久性有机污染物(POPs),二噁英就是其中之一[2-3].二噁英是氯代二苯并二噁英(PCDDs)和多氯代二苯并呋喃(PCDFs)的合称[4-6],结构非常稳定,共有 210

收稿日期：2019-06-18

基金项目：四川省环境保护科技计划项目(2018HB22,2019HB12);国家自然科学基金资助项目(71673107)

* 责任作者，高工, boxin@acee.org.cn; ** 教授, binzhu@nuist. edu.cn

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

种单体,其中2,3,7,8−位均被氯取代的17种异构体具有生理毒性,在土壤环境中很难自行消除,对人体有很强的致癌致畸性[7-8].因此对焚烧项目产生二噁英的浓度、沉降量分布的研究预测势在必行.

AERMOD、ADMS 和 CALPUFF 是我国最新发布的《环境影响评价技术导则　大气环境》(HJ2.2−2018)[9]推荐的空气质量法规模型.AERMOD属于稳态烟羽模型,它以扩散统计理论为出发点,假设污染物的浓度分布在一定程度上服从高斯分布[10]. ADMS 属于三维高斯模型,但是处于不稳定条件下,将摒弃高斯模型体系,采用小风对流模式和PDF 模式[11].CALPUFF 为三维非稳态拉格朗日扩散模型[12],可模拟时间和空间发生变化时三维流场的改变,考虑污染物的输送、转化和清除过程等[13]. AERMOD、ADMS 和 CALPUFF 至今在国内外的空气污染模拟上有广泛应用,特别是应用于我国环境影响评价领域.在危险废物、垃圾焚烧等项目上,环评单位多采用 AERMOD 作为大气污染物预测模式, ADMS 和 CALPUFF 在焚烧类项目的应用上较少.在利用 AERMOD 预测空气污染物的分布时,环评单位重点模拟污染物在空气中的扩散分布,对污染物的干湿沉降研究较少.土壤作为污染物干湿沉降后的主要载体之一,关于污染物干湿沉降后对土壤环境的影响研究相对缺乏,尤其是多种模型沉降模拟研究.寿幼平等[14]采用 AERMOD 模拟了颗粒物干沉降对模型模拟结果的影响,田飞等[15]采用 CALPUFF 研究了三个焚烧项目产生的二噁英的土壤沉降量,已有研究均没有评估不同模型(AERMOD、ADMS 和 CALPUFF 等)的干湿沉降模拟效果.

为了解空气质量模型的模拟效果,验证模型成为科研人员在模型开发后重点关注的问题[16-17].利用环境监测资料与模拟结果进行比对是较为常用的方法,现有的验证研究多与环境空气监测数据比对,但由于气象条件多变,空气中的采样点不易确定位置,而且需要多次采样,费用高、耗时长,缺点明显.对于某些涉及沉降的污染物,可以利用土壤监测值进行验证研究,该方法涉及的土壤采样往往不受时间限制,也可以提前进行布点.关于 AERMOD、ADMS 和 CALPUFF 在空气污染物模拟效果上的研究已广泛开展,验证结果均能接受[18-20],但尚未采用土壤监测值来验证三个模型的干湿沉降效果.

本研究以我国西南某山地为研究区域,将利用 AERMOD、ADMS 和 CALPUFF 预测该区域医废和垃圾焚烧项目排放的二噁英的环境影响,结合土壤监测数据进行 AERMOD、CALPUFF 和 ADMS 的沉降模拟结果的验证分析,找出适合模拟该地区二噁英沉降的优势模型,同时为复杂地形−气象场条件下的空气质量模型评估验证提供一种新的思路.

1　研究方法

1.1　研究区域、对象和监测方案

研究区域为我国西南地区某山地,预测范围为15km×15km,海拔高度为 160~670m,预测范围内建有医废和垃圾焚烧项目,2 个项目距离较近,均位于山坡上,海拔较高,周边共有 3 个气象站 (图 1),项目具体信息见表 1.

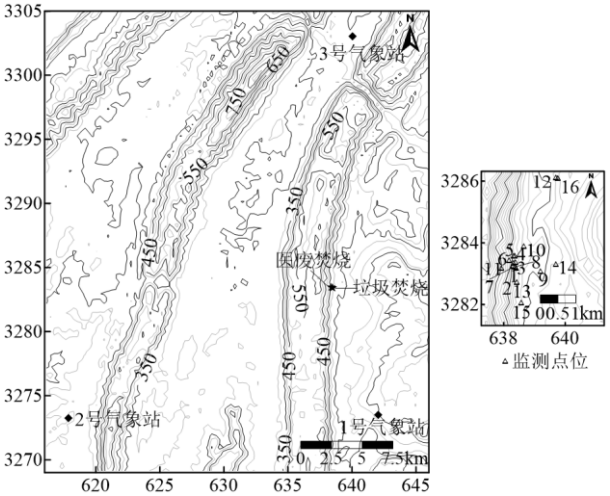


图 1　研究区域地形和二噁英土壤监测布点

Fig.1　Topographic map of the study area and dioxin soil monitoring site map

UTM 坐标系,单位 km

表 1　项目信息

Table 1　Project information

项目	*X*(km)	*Y*(km)	烟囱高度(m)	海拔高度(m)	烟气出口温度(℃)	烟囱内径(m)	烟气流速(m/s)	排放强度(tTEQ/a)	运行时间(a)
医废	638.41	3283.48	45	327.44	147	2.47	8	4.55×10^{-8}	13
垃圾	638.50	3283.41	60	309.44	160	3.25	8	2.84×10^{-7}	13

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

研究采样点和采样频次参考了《土壤环境监测技术规范》(HJ/T166-2004)[21],共分散设置 16 个土壤监测点(图 1).土壤样品的采集检测过程中,以五点法采集样品,混合预处理样品后,以四分法获取所需检测样品,样品的检测分析采用国家标准《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》(HJ77.2-2008)[22].

1.2 模型数据

大气中二噁英主要附着于固相颗粒中,其中小粒径颗粒物中的二噁英占比大 [23-26].相关研究指出,小粒径颗粒物的扩散情况相似,在实际粒径信息缺乏的情景下,部分小粒径颗粒物可归为一类考虑[27].有关研究指出 PM_{10} 可作为二噁英模拟过程的载体[28].本研究由于没有对颗粒物粒径进行实际测量,且两个项目均有布袋除尘设施,除尘率较高,颗粒物排放以 PM_{10} 为主,因此假定二噁英附着在 PM_{10} 上.关于矫正系数,焚烧秸秆、喷洒农药等因素的影响研究较少,对此尚处在资料收集过程中;由于医废焚烧厂已停产,不能实现长期监测,排放量难以矫正,相关影响因素给模型模拟结果的影响无法确定,暂时难以采用矫正系数来优化控制质量模型.由于二噁英结构非常稳定,本研究不考虑二噁英化学反应,AERMOD、ADMS 和 CALPUFF 的相关模型数据来源见表 2.

表 2 模型数据来源

Table 2 The data sources of models

模型	地面气象(2016 年)	高空气象(2016 年)	地形	地表参数	土地利用类型
AERMOD	1 号气象站	中尺度数值模式 WRF[29]	美国地质勘探局(USGS),数据精度为 90m[30]	AERSURFACE 在线服务系统[31]	-
ADMS	1 号气象站			-	-
CALPUFF	1 号、2 号 3 号气象站			-	30m 高分辨率土地利用数据[30]

注:"-"表示模型未输入一系列值.

1.3 验证方法

环境空气质量模型的验证主要采用模型验证案例法、模型比较法等.本研究使用模型验证案例法展开验证,以土壤监测值与模型模拟值的相关系数 r 作为模型验证的统计指标,相关系数 r 的计算公式如下所示.

$$r=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(O_i-\overline{O}\right)\left(M_i-\overline{M}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(O_i-\overline{O}\right)^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(M_i-\overline{M}\right)^2}}$$

式中:O_i 为土壤实际监测值,$\overline{O}$ 为其平均值;M_i 为模型模拟的沉降量,$\overline{M}$ 为其平均值;n 为采样点数量.

2 结果与讨论

2.1 排放二噁英对空气污染影响分析

研究通过 AERMOD、ADMS 和 CALPUFF 模拟二噁英在整个区域空气中的扩散情况(图 2),各模型整个区域空气中的年均浓度模拟结果的值见表 3.

模拟结果显示:三个模型模拟的空气中二噁英的扩散情况存在一定差异,ADMS 模拟的浓度高值区更接近污染源,AERMOD 和 CALPUFF 的浓度高值区均偏向污染源的西南侧;模型模拟浓度低值区,AERMOD 和 ADMS 的扩散较为相似,呈块状分布,而 CALPUFF 则呈带状分布;浓度高值区向低值区的过渡阶段,AERMOD 和 ADMS 的扩散较为集中,主要在污染源周边扩散,其中 ADMS 的扩散呈西北-东南走向的椭圆形分布,而 AERMOD 的模拟结果主要沿着 460m 左右的山体带状分布, CALPUFF 的扩散整体呈南北走向的带状并且向西分布,过渡阶段主要由污染源所在山体向更高的山体扩散.由表 3 的统计结果来看:AERMOD、ADMS 和 CALPUFF 模拟的年均浓度依次为 1.53×10^{-8}~4.14×10^{-6},5.23×10^{-9}~3.28×10^{-6} 和 2.66×10^{-9}~2.59×10^{-7}ngTEQ/m^3.3 个模型的年均浓度模拟结果的范围和平均值为 AERMOD 最大,ADMS 次之, CALPUFF 最小.经对比相关环境空气监测结果发现,本研究中模型的模拟结果量级相对偏小,原因可能是模拟过程中输入的污染物排放源强为单次监测值,不能充分代表项目二噁英的长期排放量;加之研究区域气象场复杂,大气运动随机变化,由于模型难以充分还原气象场

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

变化,种种局限导致了模拟结果与相关环境空气监测结果的差异.

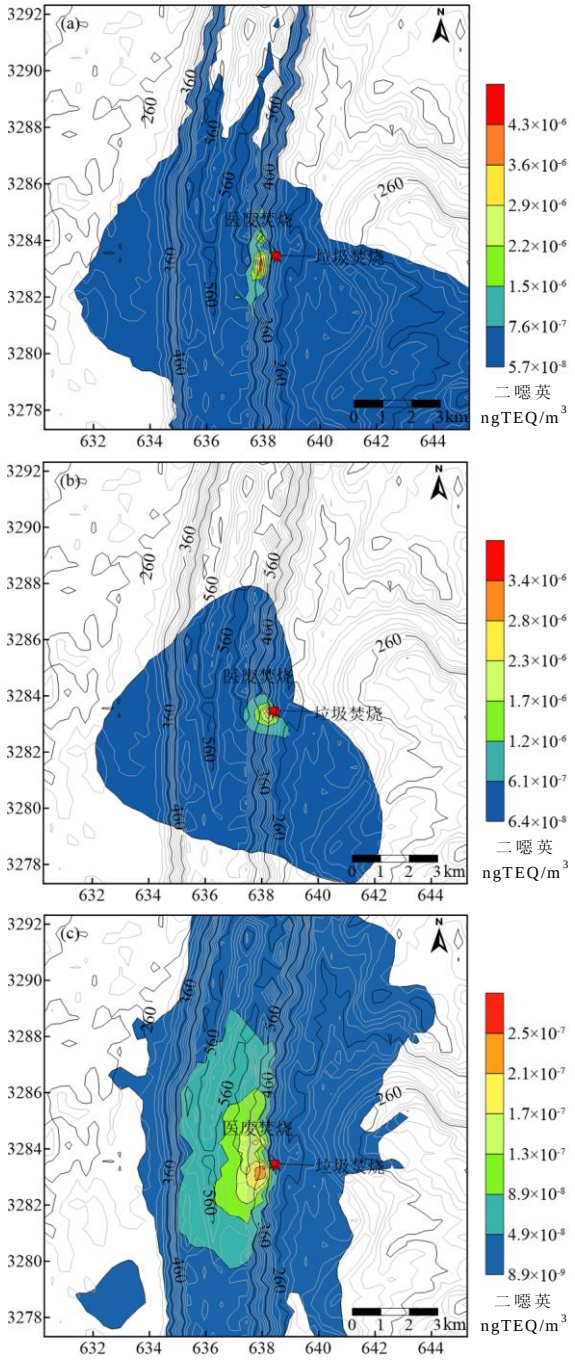


图 2　项目周边空气中二噁英模拟扩散情况

Fig.2　The simulated diffusion of dioxins in the air surrounding the project

(a)、(b)、(c)依次为 AERMOD、ADMS、CALPUFF 模拟结果,UTM 坐标系,单位 km

就研究区域的二噁英年均浓度分布结果来看,CALPUFF 与 AERMOD 和 ADMS 的扩散存在较大差异,AERMOD 和 ADMS 的形态的差异相对较小,该结论与王栋成等[32]的研究结论一致.对于扩散形态和量级的差异性,考虑与三个模型对风场的处理有关.三个模型均考虑了风速随高度的变化,AERMOD 和 ADMS 都假设风向恒定,唯有 CALPUFF 考虑了风向随高度的变化.同时,CALPUFF 对于风场的处理考虑了地形动力学效应、坡面流、地形阻塞效应.另外,由于 ADMS 采用 FLOWSTAR 模式来计算小尺度地形上空流场和湍流场,也导致了与 AERMOD 在扩散形态和量级上存在一定差异,尤其是扩散形态上.本研究区域作为复杂地形,风场变化复杂,且 CALPUFF 与其他两个模型在气象参数输入上最显著的差异是该模型使用了三个气象站的数据,导致了二噁英空气中年均扩散结果的差异性.

表 3　各模型整个区域空气中二噁英年均浓度模拟结果 (ngTEQ/m^3)

Table 3　The modeling results of annual average concentration of dioxin in the air for the entire area of each model (ngTEQ/m^3)

项目	AERMOD	ADMS	CALPUFF
最小值	1.53×10^{-8}	5.23×10^{-9}	2.66×10^{-9}
最大值	4.14×10^{-6}	3.28×10^{-6}	2.59×10^{-7}
平均值	1.16×10^{-7}	6.66×10^{-8}	1.89×10^{-8}

2.2　排放二噁英对土壤污染影响分析

表 4　各点位二噁英土壤监测值(ngTEQ/kg)

Table 4　The soil monitoring values of dioxins at each point (ngTEQ/kg)

点位	监测值	点位	监测值	点位	监测值	点位	监测值
1	15.00	5	1.50	9	0.75	13	0.90
2	2.30	6	0.26	10	0.71	14	0.96
3	1.40	7	1.20	11	0.30	15	0.60
4	2.00	8	2.30	12	0.28	16	0.49

本研究共有 16 个二噁英土壤监测点位,监测结果见表 4.利用三个模型对应模拟了相应点位的二噁英土壤沉降值,考虑模拟的二噁英土壤年均沉降通量[ngTEQ/(m^2·a)]和医废与垃圾焚烧项目实际运行时间(两个项目均为 13a),累计计算得到医废和垃圾焚烧项目的土壤总沉降量(ngTEQ/m^2),模拟过程中干湿沉降均考虑.沉降模拟过程中,三种模型均假设二噁英附在 PM_{10} 上,模拟了相应点位的二噁英土壤

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

沉降(图 3),具体结果见表 5.

模拟结果显示:依照土壤监测点位的分布模拟,AERMOD 和 ADMS 的结果整体向东南方向沉降,其中 ADMS 的结果分布更为密集,CALPUFF 的结果则主要向西沉降,同时向南北方向延伸.表 5 显示:固定点位模拟的情景下,CALPUFF 的土壤沉降模拟与 AERMOD 和 ADMS 的土壤沉降模拟在量级上表现出较大区别, 虽然与空气中年均浓度的量级排序特征相似,CALPUFF 的土壤沉降量级依旧是三者中最小,但是其它两个模型的土壤沉降模拟比 CALPUFF 的土壤沉降模拟大了 2~3 个量级;AERMOD 和 ADMS 的固定点位土壤沉降模拟量级趋于一致.1~8 号点位距离污染源较近,9~16 号点位距离污染源较远, CALPUFF 在 1~8 号点位模拟的土壤总沉降量都大于等于 9~16 号点位的模拟值,AERMOD 除去 5、6 号点位,ADMS 除去 6 号点位,剩余点位模拟的土壤总沉降量都大于 9~16 号点位的模拟值.此外,尽管 AERMOD 和 ADMS 模拟的固定点位土壤总沉降量量级相似,但是在 1~8 号点位,除去 3、4 号点位,AEROMD 的模拟值都小于 ADMS 的模拟值,在 9−16 号点位则出现了相反的情况,AEROMD 的模拟值都大于 ADMS 的模拟值.

表 5 各模型监测点位二噁英土壤沉降模拟结果(ngTEQ/m^2)

Table 5 The soil deposition of dioxins simulated by each model at the monitoring points (ngTEQ/m^2)

点位	AERMOD	ADMS	CALPUFF	点位	AERMOD	ADMS	CALPUFF
1	141.52	142.72	1.35	9	119.75	92.60	0.11
2	168.28	171.80	1.35	10	44.32	38.82	0.19
3	285.72	268.02	1.35	11	50.64	45.95	0.38
4	132.97	131.65	0.98	12	4.41	3.07	0.02
5	102.29	105.55	0.98	13	48.26	42.09	0.35
6	82.75	89.96	0.38	14	26.32	20.64	0.10
7	126.36	132.76	1.35	15	25.10	19.15	0.13
8	155.92	159.88	1.35	16	4.43	3.08	0.02

有关研究发现颗粒物干沉降对 AERMOD 模拟结果的影响较大[18,33],对 CALPUFF 的模拟结果影响较小[33].目前对于 ADMS 在沉降上的研究较少.对于模拟二噁英土壤总沉降量的不同,可能与三种模型对于风速、稳定度和沉降分数计算有关,Tartakovsky 等[34]在平坦地形进行了 AERMOD 和 CALPUFF 的干沉降研究,得出类似结论.AERMOD 和 ADMS 将污染物的扩散当作烟羽处理,CALPUFF 则处理为烟团;AERMOD 和 ADMS 模拟过程中以山坡上羽流中心线的高度变化作为地形的变化,而 CALPUFF 的模拟过程则将地形变化处理为近似水平;又由于 ADMS 对流场和湍流场的特殊处理方式,加上研究区域气象场复杂,风速多变,从而导致了最终的结果.

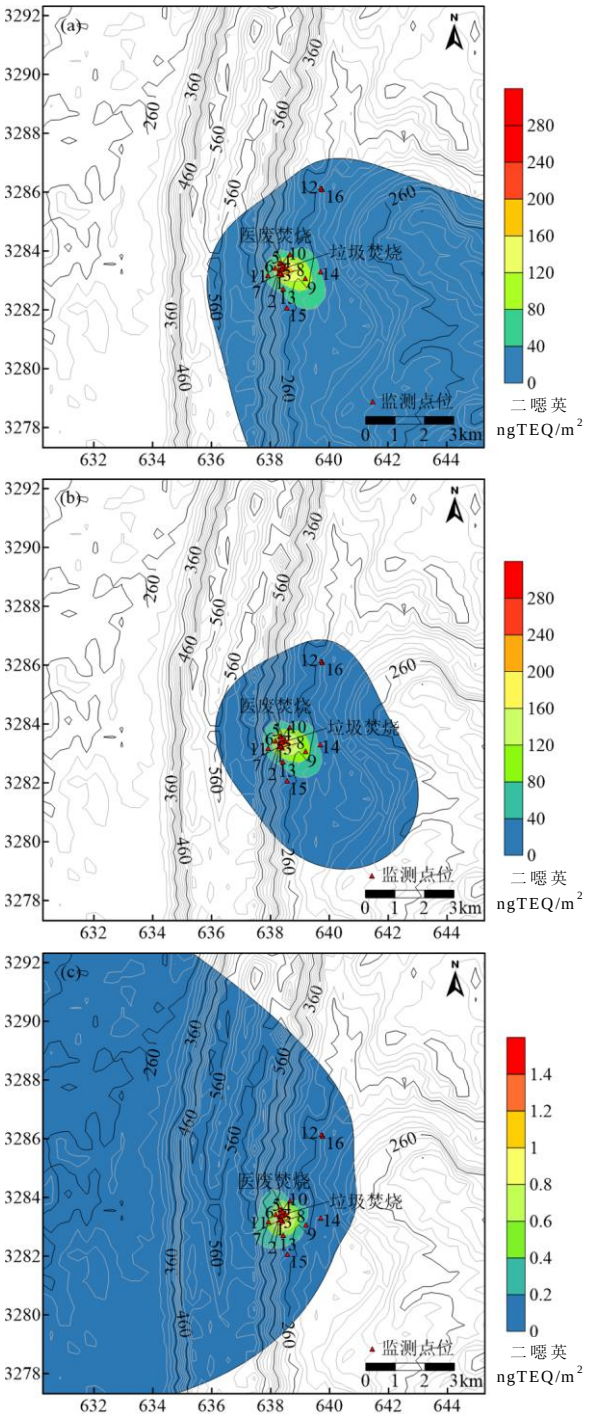


图 3 监测点位二噁英土壤模拟沉降情况

Fig.3 The simulated soil deposition of dioxins at the monitoring points

(a)、(b)、(c)依次为 AERMOD、ADMS、CALPUFF 模拟结果,UTM 坐标系,单位 km

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

2.3　模型验证

为验证模型模拟二噁英土壤沉降的效果,本研究对比模型模拟数据与实际监测数据相关性,来进行模型验证,以此说明模型的准确性.对于 1~16 号点位的实际监测数据,经过对比发现 1 号点位的实际监测值明显异常,因此在相关性分析中剔除 1 号点位的值,各模型的相关系数 *r* 见表 6.

表 6　三种模型的 *r* 值对比

Table 6　Contrast of *r* values of three models

AERMOD	ADMS	CALPUFF
0.66**	0.70**	0.83**

注:“**”表示在0.01水平上(双侧)显著相关.

由表 6 可以发现:三种模型的模拟数据与实际监测数据的相关系数均较好,且都通过了显著性检验,其中 CALPUFF 的相关系数最佳,达到了 0.83.尽管在二噁英土壤总沉降量上 CALPUFF 与 AERMOD 和 ADMS 存在较大差异,但是由于其相关系数更佳,说明 CALPUFF 对二噁英沉降的空间分布的模拟是可接受的.由于未进行二噁英土壤背景值监测,具体哪种模型在量级上的模拟更具备参考性本研究不做具体分析,但是与土壤中污染物的监测值比对不失为一种新的空气质量模型验证方法.因我国生活垃圾、固体废物、医疗废物等产量逐年增加,而垃圾焚烧可有效减少堆积量,焚烧厂的建立已是大势所趋,二噁英的排放量也必将由此增多, CALPUFF 在模拟二噁英沉降的空间分布上的优势,令该模型可作为排放类似沉降污染物项目的选址、布点采样等工作的辅助模型.

3　结论

3.1　根据三种模型的模拟结果,量级上,CALPUFF 的结果始终最小,AERMOD 和 ADMS 的结果在空气浓度上有差异,土壤沉降量上一致性较好;空间分布上,CALPUFF 模拟的空气和土壤中的二噁英整体往西输送,AERMOD 和 ADMS 的模拟空气中浓度分布依旧有差异,模拟的土壤中的二噁英则整体向东南沉降.

3.2　从土壤中二噁英的监测值和模拟的二噁英总沉降量的相关性来看,CALPUFF 的相关系数最大(0.83),相关性最好,尽管模拟的量级较小,还是可以判断 CALPUFF 对模拟复杂地形-气象场条件下二噁英土壤沉降的空间分布具备参考价值,且结合土壤监测数据的模型验证评估有一定的可行性.

3.3　基于焚烧法逐渐成为城市生态文明建设的重要手段,以及“邻避效应”的愈发严重, 因此可采用 CALPUFF 为类似焚烧项目的选址、建成后的定点监测提供技术支撑.

参考文献:

[1] 王德芳,高贤彪,项　娟,等.3 种生活垃圾处置方式的特点解析及评价方法研究展望 [J]. 天津农业科学, 2018,24(10):73-75.
Wang D F, Gao X B, Xiang J, et al. Characteristics analysis and evaluation methods prospects of three domestic waste disposal types [J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2018,24(10):73-75.

[2] Hutzinger O, Blumich M J, Berg M V D, et al. Sources and fate of PCDDs and PCDFs: An overview [J]. Chemosphere, 1985,14(6): 581-600.

[3] Rappe C. Sources of PCDDs and PCDFs. Introduction. Reactions, levels, patterns, profiles and trends [J]. Chemosphere, 1992,25(1/2):41-44.

[4] 唐　婷,安显金,肖保华.二恶英毒性和中国土壤及沉积物二恶英的研究进展 [J]. 地球与环境, 2016,44(5):586-593.
Tang T, An X H, Xiao B H. A review on toxicity of dioxins and it in soils and sediments of China [J]. Earth and Environment, 2013(s1):487-492.

[5] 刘　惠,孔丝纺,刘阳生,等.垃圾焚烧过程中二恶英污染的控制技术 [J]. 环境工程, 2013,(s1):487-492.
Liu H, Kong S F, Liu Y S, et al. Control Technology of dioxins pollution in waste incinerator [J]. Environmental Engineering, 2013, (s1):487-492.

[6] 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.

[7] 杨传玺,董文平,史会剑,等.制浆造纸行业二噁英生成与控制研究 [J]. 环境科技, 2014,27(2):36-40.
Yang C X, Dong W P, Shi H J, et al. Research of production and control about the dioxin based on the pulp and paper industry [J]. Environmental Science and Technology, 2014,27(2):36-40.

[8] Zhu J, Hirai Y, Yu G, et al. Levels of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in China and chemometric analysis of potential emission sources [J]. Chemosphere, 2008,70(4):703-711.

[9] HJ 2. 2-2018　环境影响评价技术导则 大气环境 [S].
HJ 2. 2-2018　Technical guidelines for environmental impact assessment atmospheric environment [s].

[10] 王淑兰,孟志鹏,丁信伟.适用于固定工业源泄放的扩散模型——AERMOD [J]. 化学工业与工程, 2003,20(4):231-236.
Wang S L, Meng Z P, Ding X W. A dispersion model for stationary industrial source applications—AERMOD [J]. Chemical Industry and Engineering, 2003,20(4):231-236.

[11] 丁　峰,赵　越,伯　鑫.ADMS 模型参数的敏感性分析 [J]. 安全与

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

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.

[12] 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. Review of atmospheric diffusion spersion model CALPUFF technology [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2009,21(3):9-13.

[13] 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 X L, et al. A comparative 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.

[14] 寿幼平,乔建哲,徐 静.颗粒物干沉降对 AERMOD 模型预测大气污染的影响 [J]. 气象与环境学报, 2012,28(4):16-21.
Shou Y P, Qiao J Z, Xu J. The effect of particulate dry deposition on air pollution simulated by AERMOD model [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2012,28(4):16-21.

[15] 田 飞,伯 鑫,薛晓达,等.基于复杂地形-气象场的二噁英污染物沉降研究 [J]. 中国环境科学, 2019,39(4):1678-1686.
Tian F, Bo X, Xue X D, et al. Study on settlement of dioxin pollutants under complex terrain-weather conditions [J]. China Environmental Sci-ence, 2019,39(4):1678-1686.

[16] 蔺尾燕,贾尔恒·阿哈提,吕任生,等.基于 AERMOD 模型的乌鲁木齐机动车排放大气污染物的数值模拟 [J]. 安全与环境工程, 2016,23(1):30-35.
Lin W Y, Jiaerheng A, Lv R S, et al. Research on simulation of atmospheric pollution from motor vehicle emissions based on AERMOD model in Urumqi [J]. Safety and Environmental Engineering, 2016,23(1):30-35.

[17] 杨立春,敖世恩,陈豪立.结合 AERMOD 模型和正交试验设计研究工业点源最优的排放参数 [J]. 环保科技, 2013,19(2):14-16.
Yang L C, Ao S E, Chen H L. Combine the AERMOD model system and the orthogonal experimental design to study the optimal discharge parameters of the industrial point source [J]. Environmental Protection and Technology, 2013,19(2):14-16.

[18] Seangkiatiyuth K, Surapipith V, Tantrakarnapa K, et al. Application of the AERMOD modeling system for environmental impact assessment of NO_2 emissions from a cement complex [J]. Journal of Environmental Sciences, 2011,23(6):931-940.

[19] Elbir T. Comparison of model predictions with the data of an urban air quality monitoring network in Izmir, Turkey [J]. Atmospheric Environment, 2003,37(15):2149-2157.

[20] 孙大伟.新一代大气扩散模型(ADMS)应用研究 [J]. 环境保护科学, 2004,30(1):67-69.
Sun D W. Apply Research on New Generation Atmosphere Diffusion Model (ADMS) [J]. Environmental Protection Science, 2004,30(1):67-69.

[21] HJ/T166-2004 土壤环境监测技术规范 [S].
HJ/T166-2004 The technical specification for Soil environmental monitoring [S].

[22] 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].

[23] Eitzer B D, Hites R A. Polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in the ambient atmosphere of Bloomington, Indiana [J]. Environ-mental Science & Technology, 1989,23(11):1389-1395.

[24] Hippelein M, Kaupp H, Dörr G, et al. Baseline contamination assessment for a new resource recovery facility in Germany part II: atmospheric concentrations of PCDD/F [J]. Chemosphere, 1996,32(8): 1605-1616.

[25] Kaupp H, Towara J, Mclachlan M S. Distribution of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in atmospheric particulate matter with respect to particle size [J]. Atmospheric Environment, 1994,28(4):585-593.

[26] Kurokawa Y, Matsueda T, Nakamura M, et al. Characterization of non-ortho coplanar PCBs, polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in the atmosphere [J]. Chemosphere, 1996,32(3):491-500.

[27] USEPA. Human health risk assessment protocol for hazardous waste combustion facilities [EB/OL].]. http://www.epa.gov/osw/hazard/tad/td/combust/risk.htm, 2015-08-17.

[28] 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.

[29] Skamarock W C, Klemp J B. A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications [J]. Journal of Computational Physics, 2008,227(7):3465-3485.

[30] 伯 鑫.CALPUFF 模型技术方法与应用 [M]. 北京:中国环境出版社, 2016:23-35.
Bo X. CALPUFF model technology method and application [M]. Bejing: China Environmental Science Press, 2016:23-35.

[31] 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.

[32] 王栋成,王 勃,王 磊,等.复杂地形大气扩散模式在环境影响评价中的应用 [J]. 环境工程, 2010,28(6):89-93.
Wang D C, Wang B, Wang L, et al. Application of complex terrain atmospheric dispersion model in environmental impact assessment [J]. Environmental Engineering, 2010,28(6):89-93.

[33] 舒 璐,关 勖,祝禄祺,等. AERMOD 和 CALPUFF 干沉降在复杂地形下模拟结果的对比研究 [J]. 环境科学与管理, 2019,44(1):19-24.
Shu L, Guan X, Zhu L Q, et al. Comparison on simulation results of AERMOD and CALPUFF dry deposition in complex terrain [J]. Environmental Science and Management, 2019,44(1):19-24.

[34] Tartakovsky D, Stern E, Broday D M. Comparison of dry deposition estimates of AERMOD and CALPUFF from area sources in flat terrain [J]. Atmospheric Environment, 2016,142:430-432.

作者简介：史梦雪(1995-),女,江苏扬州人,南京信息工程大学硕士研究生,主要研究方向为大气环境数值模拟.

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