钢厂烧结机烟气排放对土壤二噁英浓度的影响

孙博飞[1],伯 鑫[2*],张尚宣[3],刁晓君[2],阚 慧[4],程 吉[5],刘 梦[6],伍鹏程[7],周 甜[2],胡晓波[1] (1.河北正润环境科技有限公司,河北 石家庄 050000；2.环境保护部环境工程评估中心,北京 100012；3.中冶赛迪重庆环境咨询有限公司,重庆 400013；4.南京大学环境规划设计研究院股份公司,江苏 南京 210093；5.三捷环境工程咨询(杭州)有限公司,浙江 杭州 310012；6.中持水务股份有限公司,北京 100192；7.首都经济贸易大学,北京 100070)

摘要：为分析钢铁烧结机排放二噁英沉降对土壤污染的影响,根据2016年河北某钢铁厂烧结机头二噁英排放监测数据、土壤监测数据等,建立了基于 CALPUFF 数值模型的钢铁烧结机排放二噁英类污染物沉降土壤的计算方法.结果显示,该企业烧结机二噁英毒性当量为0.017~0.025ng-TEQ/Nm^3,排放因子为0.044~0.081μg-TEQ/t,3个土壤监测点二噁英浓度结果为0.82~2.4ng/kg,采用CALPUFF模式模拟烧结机二噁英对土壤监测点沉降量结果为1.46~3.44ng/kg,模拟结果与周边土壤监测点实测趋势一致.

关键词：二噁英；钢铁；烧结；土壤污染；CALPUFF

中图分类号：X512 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2017)11-4222-08

Effect of exhaust gas from sintering machines on the concentration of dioxin in soil around a steel plant. SUN Bo-fei[1], BO Xin[2*], ZHANG Shang-xuan[3], DIAO Xiao-jun[2], KAN Hui[4], CHENG Ji[5], LIU Meng[6], WU Peng-cheng[7], ZHOU Tian[2], HU Xiao-bo[1] (1.Hebei Zhengrun Environmental Technology Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China；2.The Appraisal Center for Environment and Engineering, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100012, China；3.CISDI Chongqing Environmental Consulting CO., Ltd., Chongqing 400013, China；4.Academy of Environmental Planning and Design, Nanjing University, Nanjing 210093, China；5.Trinity Consultants China Office, Hangzhou 310012, China；6.CSD Water Service Co., Ltd., Beijing 100192, China；7.Capital University Of Economics And Business, Beijing 100070, China). *China Environmental Science*, 2017,37(11)：4222~4229

Abstract：In order to investigate the influence of dioxins emitted from iron-steel sintering machines on soil pollution, both monitored data by a steel plant in Hebei Province in 2016 and CALPUFF simulations are used to design a method to estimate the amount of sintering-emitted dioxins that is deposited in the surrounding soil. Results show that the toxicity equivalency quantity (TEQ) of dioxin in exhaust gas from the sintering machines of this steel plant is 0.017~0.025ng-TEQ/Nm^3. The emission factor is 0.044~0.081ug-TEQ/t. The concentration of dioxins in three soil samples ranges from 0.82 to 2.4ng/kg, which is consistent with the simulated results by CALPUFF (1.46~3.44ng/kg).

Key words：dioxin；steel plant；sintering；soil pollution；CALPUFF

二噁英(Dioxin)是多氯代二苯并-对-二噁英(PCDDs)和多氯代二苯并呋喃(PCDFs)的总称,具有不可逆的致畸、致癌、致突变毒性[1],不易自然降解,属于《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》首批管控的持久性有机污染物(POPs)之一[2].研究结果显示我国二噁英类污染物排放量居于世界首位,其中2004年钢铁行业(烧结等)共向大气排放1.6734kg TEQ,占大气二噁英类污染物排放量的33.19%[3],是我国最大的二噁英排放行业[4-8].一些学者利用AERMOD、CALPUFF、CMAQ等空气质量模型对环境介质中的二噁英类物质影响程度、范围进行了预测和分析工作[9-12],包括对城市生活垃圾焚烧厂排放二噁英类物质在大气中扩散和迁移过程模拟[13-14].国内外学者在CMAQ模式中物理、化学模块的基础上增加了半挥发 PCDD/Fs 气相-颗粒相间分配

收稿日期：2017-04-27

基金项目：国家重点实验室开放基金课题(16K01ESPCT);环境保护部基金课题(1441402450017-2)

* 责任作者, 高工, boxinet@gmail.com

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

机制以适应二噁英类污染物的物化特性[15],张珏等[16]采用此方法模拟了长三角地区不同行业排放二噁英在大气中的输送/转化和沉降过程.相关研究结果显示,2006~2009 年北京、天津、唐山等城市大气中二噁英类污染物平均监测浓度范围为 0.28~0.51pg-TEQ/Nm^3[17-19],略高于发达国家主要城市.

二噁英通常以颗粒态、气溶胶态或气态存在,通常由燃烧过程直接排放或前体物转化形成[20-21].二噁英排放导致的环境污染既涉及到大气,还影响下垫面如土壤的生态环境安全,土壤被认为是二噁英最主要的汇[22].研究表明二噁英类污染物可长期稳定存在于土壤中[23-24].烧结机排放的二噁英是持续源,二噁英会不断地沉降富集到土壤中,目前对钢铁行业企业排放二噁英的研究主要集中在浓度监测、组分分析、大气模拟扩散等方面[11,25-33],鲜有考虑二噁英沉降对土壤污染的影响.此外,通过查阅《土壤污染防治行动计划》、《关于加强二噁英污染防治的指导意见》、《重点行业二噁英污染防治技术》以及 2003~2013 年钢铁行业环境影响评价报告书,发现其中均未涉及二噁英烟气排放沉降对土壤污染的影响.

本研究以河北某钢铁厂为例,根据多年烧结矿产量数据、烧结机头二噁英排放监测数据、土壤监测数据,利用气象模式 WRF 中尺度气象数据,建立了基于 CALPUFF 数值模型的钢铁烧结机排放二噁英类污染物沉降土壤的计算方法,揭示烧结机排放大气二噁英类污染物在空气相—土壤相迁移规律、造成潜在污染场地范围,为开展钢铁行业二噁英大气污染、土壤污染防治等提供科学依据.

1　材料与方法

1.1　研究区域与对象

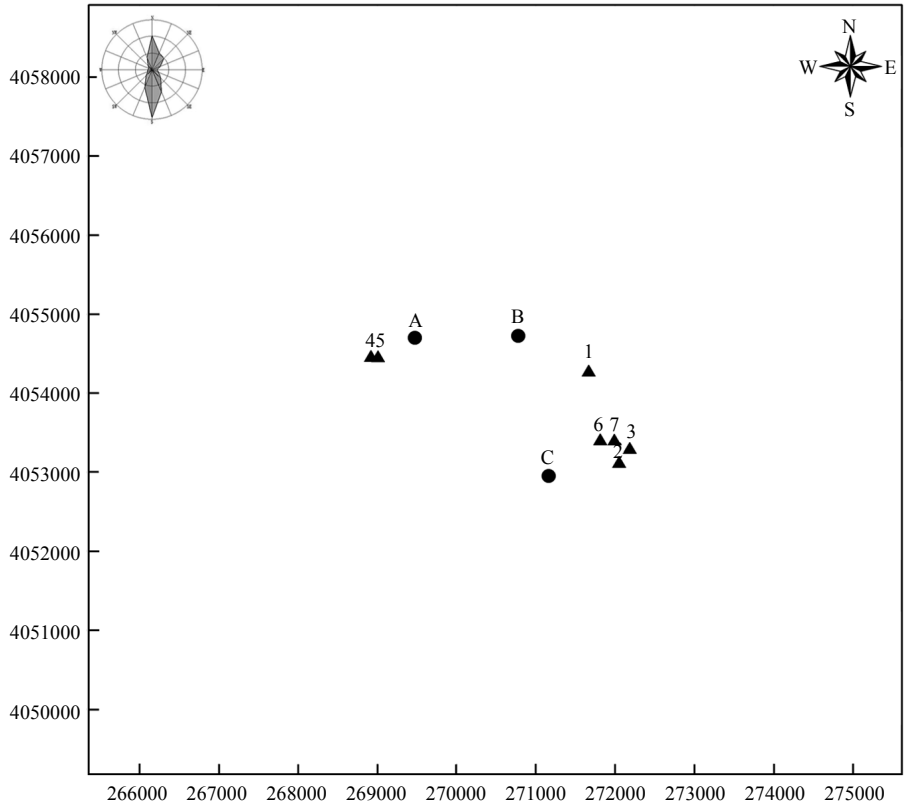


图 1　烧结机、土壤监测点位置关系(UTM 坐标系,单位: m)

Fig.1　Location of sintering machines and soil monitoring sites

▲1 代表 400m^2 烧结机,▲2、▲3 代表 435m^2 烧结机,▲4、▲5 代表 360m^2 烧结机,▲6、▲7 代表 90m^2 烧结机,●A、●B、●C 代表土壤监测点

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

该钢铁厂共有 7 台烧结机,分别为 1 台 400m^2 烧结机(1999 年 12 月投产,年产烧结矿 360 万 t)、2 台 435m^2 烧结机(分别在 2009 年 4 月、2015 年 10 月投产,2 台年产烧结矿均为 400 万 t)、2 台 360m^2 烧结机(分别在 2008 年 3 月、5 月投产,2 台年产烧结矿均为 360 万 t)和 2 台 90m^2 烧结机(分别在 1991 年 7 月、12 月投产,于 2015 年底停产,2 台年产烧结矿均为 80 万 t).所有烧结机机头烟气均采用三电场电除尘器净化,设置石灰石石膏湿法烟气脱硫装置,拆除了脱硫旁路,厂内无电炉工序.烧结机位置见图 1. 截至土壤监测点采样时间,1 号烧结机已运行 17a,2 号烧结机已运行 7a,3 号烧结机已运行 1a,4 号和 5 号烧结机已运行 8a,6 号和 7 号烧结机已运行 24a.

1.2 烟气二噁英监测方法

选取 400m^2(1 号)和 435m^2(2 号)烧结机排放废气作为监测对象,在设备正常运行情况下对废气中二噁英进行连续监测.二噁英类物质检测分析依据采用国家标准“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法-高分辨质谱法”(HJ77.2-2008)[34],采样点和采用频次参考“固定源废气监测技术规范”(HJ/T397-2007)[35].每个采样点位采集 3 个样品,连续采样,分别测定其排放浓度,采样口选取机头烟囱排口,采样仪器选取 ZR-3720 废气二噁英采样器,烟气参数监测选取崂应 3012H 自动烟气测试仪,分析仪器选取 AutoSpec Premier 高分辨磁质谱系统.

1.3 土壤二噁英监测方法

本研究综合考虑钢铁厂 7 台烧结机所在位置,同时结合区域常年主导风向和周边居民集中分布情况来布设土壤采样点,2016 年 9 月选取 3 个土壤监测点对二噁英进行检测,取 0~20cm 表层土进行样品采集,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)[36];采样点和采用频次参考“土壤环境监测技术规范”(HJ/T166-2004),分析仪器选取 AutoSpec Premier 高分辨磁质谱系统.土壤监测点位置见图 1.

1.4 模型参数

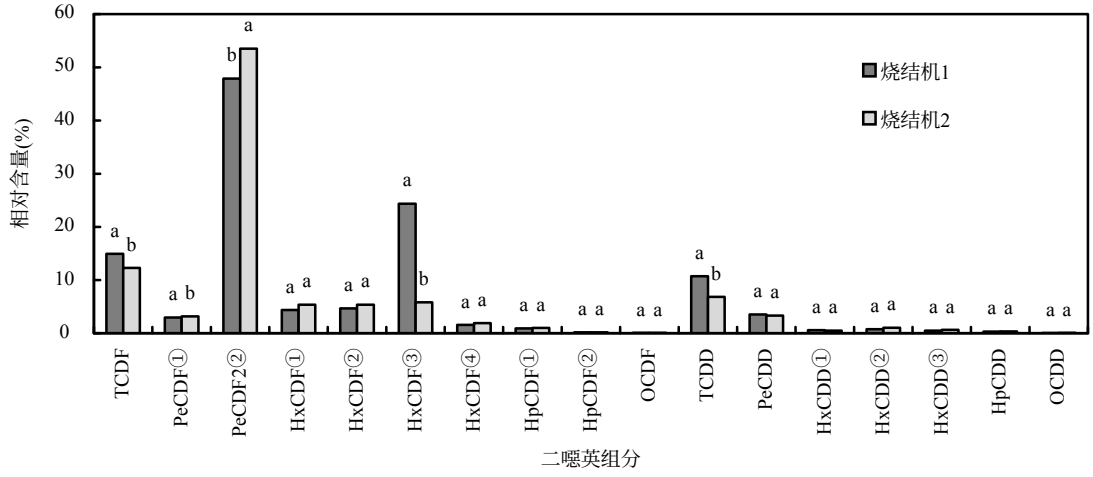


图 2 烧结机尾气二噁英类物质毒性当量差异性分析

Fig.2 Difference analysis of TEQ of dioxin components in exhaust gas from sintering machines

a 表示不存在显著性差异(P>0.05);b 表示存在显著性差异(P<0.05)

TCDF:2,3,7,8-四氯代二苯并呋喃;PeCDF①:1,2,3,7,8-五氯代二苯并呋喃;PeCDF②:2,3,4,7,8-五氯代二苯并呋喃;HxCDF①:1,2,3,4,7,8-六氯代二苯并呋喃;HxCDF②:1,2,3,6,7,8-六氯代二苯并呋喃;HxCDF③:2,3,4,6,7,8-六氯代二苯并呋喃;HxCDF④:1,2,3,7,8,9-六氯代二苯并呋喃;HpCDF①:1,2,3,4,6,7,8-七氯代二苯并呋喃;HpCDF②:1,2,3,4,7,8,9-七氯代二苯并呋喃;OCDF:八氯代二苯并呋喃;TCDD:2,3,7,8-四氯代二苯并二噁英;PeCDD:1,2,3,7,8-五氯代二苯并二噁英;HxCDD①:1,2,3,4,7,8-六氯代二苯并二噁英;HxCDD②:1,2,3,6,7,8-六氯代二苯并二噁英;HxCDD③:1,2,3,7,8,9-六氯代二苯并二噁英;HpCDD:1,2,3,4,6,7,8-七氯代二苯二噁英; OCDD:八氯代二苯并二噁英

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

CALPUFF 是中国环境保护部推荐的法规模式之一[37-39],为非稳态三维拉格朗日烟团模式,可利用三维气象场模拟排放源大气污染物的传输、扩散、干湿沉降等过程,特别是考虑了降水等因素对湿沉降影响,并适用于复杂气象场、复杂地形等条件下模拟,可更好模拟烧结机烟气排放的二噁英类污染物从大气传输到土壤富集过程.本研究采用 CALPUFF(版本号 6.42)数值模型,建模采用的地形数据为 90m 美国地质勘探局数据(USGS),土地利用数据精度为 30m[40],气象场、降水等资料采用气象模式 WRF.本研究考虑了每个烧结机的空间坐标、烟囱高度、二噁英排放量等信息,网格分辨率 100m,东西向 103 个格点,南北向 103 个格点.由于 PCDD/Fs 化学性质稳定,模拟不考虑 PCDD/Fs 的衰变与化学转化.本研究定量模拟每个烧结机排放二噁英类污染物对周边环境贡献情况(年均浓度、沉降速率等),综合考虑每个烧结机投产时间、关停时间等,计算每个烧结机导致周围环境的二噁英类物质土壤多年富集量,分析潜在污染场地空间范围.

1.5　数据差异性分析

采用单因素方差分析 2 台烧结机尾气间二噁英类物质毒性当量差异显著性.结果显示,2 台烧结机独立样本之间的显著性水平 p 值为 0.581(远高于 0.05),表示 2 台烧结机测定结果之间差异统计不显著.如图 2 所示,烧结机尾气 1 和 2 的差异性分析结果显示,17 种二噁英组分中 13 组组分在两烧结机之间差异统计不显著.

2　结果与讨论

2.1　烧结烟气二噁英排放因子

1 号烧结机和 2 号烧结机机头排放的二噁英毒性当量范围分别为 0.022~0.025 和 0.017~0.021ng-TEQ/Nm^3,其中排放的 2,3,4,7,8-五氯代二苯并呋喃(PeCDF)分别占二噁英排放总浓度的 48%和 53%,其次是 2,3,7,8-四氯代二苯并呋喃(TCDF),分别占二噁英排放总浓度的 14.9%和 12.3%,这两种同类物的贡献率远远高于其他 15 种同类物,这与现有文献结果接近[41-42].1 号、2 号烧结机机头排放的二噁英均能满足《钢铁烧结、球团工业大气污染物排放标准》(GB28662-2012) [43]中排放标准要求(0.5ng-TEQ/Nm^3).

根据实测浓度、年工作时间、工况等数据,推算 1 号、2 号烧结机二噁英排放因子分别为 0.081,0.055μg-TEQ/t.采用类比分析法,推算另外 5 台烧结机(3、4、5、6、7)二噁英的排放因子分别为 0.055,0.044,0.053,0.056,0.056μg-TEQ/t,而 2004 年我国二噁英排放清单中烧结工序大气排放因子为 5μg-TEQ/t[2-3].2 号烧结机排放因子相对 1 号烧结机较低,分析原因可能是 2 号烧结机设备较新、污染控制水平较好.

2.2　土壤二噁英来源分析

土壤监测点 A、B、C 二噁英毒性当量浓度分别为 0.82,2.2,2.4ng/kg,其中 PeCDF 占土壤监测点二噁英总量最高,分别为 36.6%、27.3%和 18.8%.3 组样品二噁英同类物整体变化趋势大致相同,其中 A 点二噁英浓度较低,可能是由于 A 毗邻新厂区(4 号、5 号烧结机开工运行时间较短),距离老厂区距离较远,烧结机排放二噁英类污染物富集到 A 点相对较少.

分析烧结烟气与采样点土壤浓度组分指纹特征(图 3),可发现烧结机烟气、土壤中二噁英同类物占比基本相同,二噁英类物质组分趋势基本一致,多氯二苯并呋喃明显高于多氯二苯并二噁英浓度,推测该厂周边区域内土壤二噁英污染主要来源可能来自烧结机烟气排放,本研究结果与巩宏平等研究结果类似[44].

2.3　烧结机对大气、土壤二噁英类污染物贡献分析

所有烧结机对周围环境空气二噁英类污染物年均贡献浓度见图 4,预测结果显示,二噁英大气年均贡献浓度较高区域主要在 4、5 号烧结机周围以及主导风下风向(当地多年主导风向为 S、N),这与 4、5 号烧结排放高度较低有关(4、5 号烧结机烟囱高度 55m,1 号烧结机烟囱高度 160m,2、3、6、7 号烧结机烟囱高度 150m).

本研究根据预测每个烧结机排放到土壤二噁英年均总沉降通量[ng/(m^2·s)]以及实际生产时间,计算获得所有烧结机对土壤环境的总沉降量

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

(ng/m^2)(公式 1),预测结果烧结机二噁英排放对区域土壤沉降量主要集中在各个烧结机周围和主导风下风向(图 5).经过对比,可发现烧结机排放二噁英大气年均贡献浓度(图 4)与土壤总沉降量(图 5)趋势并不完全一致,这说明烧结机排放二噁英对土壤富集量不仅与烧结机的二噁英排放量有关,还与烧结机投产关停时间、污染物沉降、气象条件等因素有关.

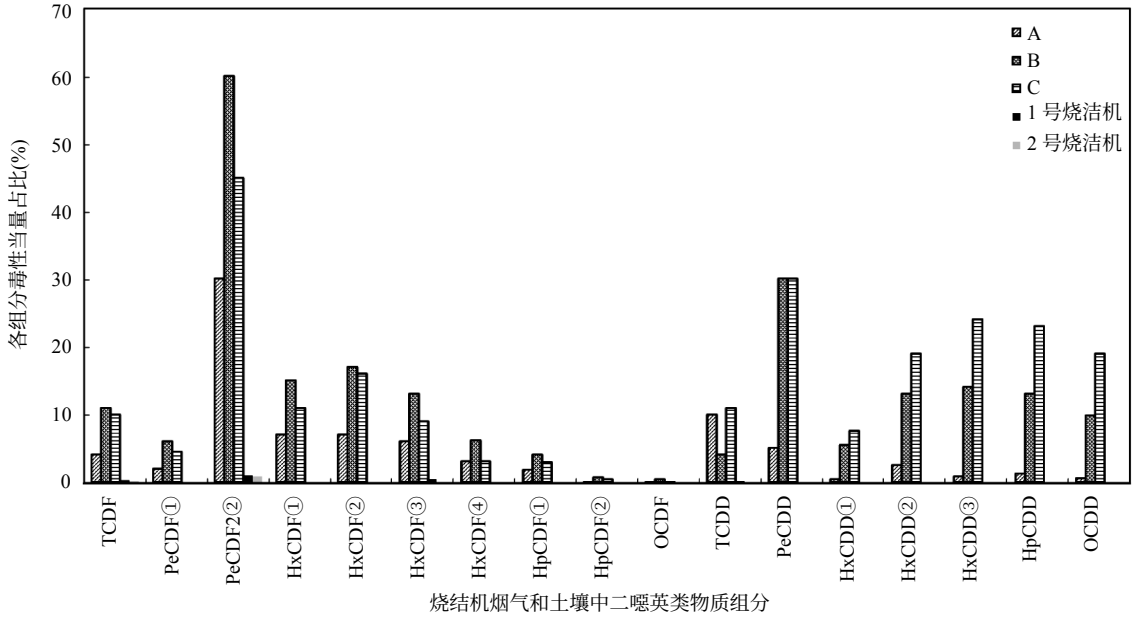


图 3 烧结机烟气和土壤监测点二噁英类物质毒性当量及组分趋势分析

Fig.3 TEQ and dioxin components in exhaust gas from sintering machines and in soil

TCDF:2,3,7,8-四氯代二苯并呋喃;PeCDF①:1,2,3,7,8-五氯代二苯并呋喃;PeCDF②:2,3,4,7,8-五氯代二苯并呋喃;HxCDF①:1,2,3,4,7,8-六氯代二苯并呋喃;HxCDF②:1,2,3,6,7,8-六氯代二苯并呋喃;HxCDF③:2,3,4,6,7,8-六氯代二苯并呋喃;HxCDF④:1,2,3,7,8,9-六氯代二苯并呋喃;HpCDF①:1,2,3,4,6,7,8-七氯代二苯并呋喃;HpCDF②:1,2,3,4,7,8,9-七氯代二苯并呋喃;OCDF:八氯代二苯并呋喃;TCDD:2,3,7,8-四氯代二苯并二噁英;PeCDD:1,2,3,7,8-五氯代二苯并二噁英;HxCDD①:1,2,3,4,7,8-六氯代二苯并二噁英;HxCDD②:1,2,3,6,7,8-六氯代二苯并二噁英;HxCDD③:1,2,3,7,8,9-六氯代二苯并二噁英;HpCDD:1,2,3,4,6,7,8-七氯代二苯二噁英; OCDD:八氯代二苯并二噁英

$$S=\Sigma f_{(i)}\times(T_{关停}-T_{投产})+\Sigma f_{(j)}\times T_{监测}-T_{投产} \quad (1)$$

式中:S 为土壤环境中二噁英总沉降量,ng/m^2;f 为单台烧结机排放到土壤中二噁英年均总沉降通量,ng/(m^2·s); i 为已停产的烧结机;j 为正常生产的烧结机;$T_{关停}$为烧结机关停时间,s;$T_{投产}$为烧结机投产时间,s;$T_{监测}$为进行土壤监测的时间,s.

土壤监测点模拟结果显示,C 点二噁英总沉降量(0.79ng/m^2)高于 A 和 B,B 点(0.36ng/m^2)略高于 A 点(0.33ng/m^2),与实测结果基本趋势一致(表 1),这说明本研究的二噁英沉降量模拟方法,可以丰富钢铁企业二噁英土壤污染预警体系内容,对开展潜在二噁英污染土地调查工作有着一定的参考意义.B 点模拟趋势与监测结果有一定偏差,分析原因该点周围可能存在其他因素对土壤中二噁英浓度有干扰(秸秆焚烧、除草剂使用等)[45],同时也可能是由于土壤吸附导致的提取不充分、容器壁吸附、测试限值等原因.

目前我国环境管理部门对二噁英等 POPs 污染物监测能力不足,尚未建立二噁英类污染预警应急体系,本研究方法可分析重点区域钢铁企业二噁英潜在影响土壤范围,发现潜在污染场地,为土壤、二噁英及 POPs 等污染防治提供了科学方法.

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

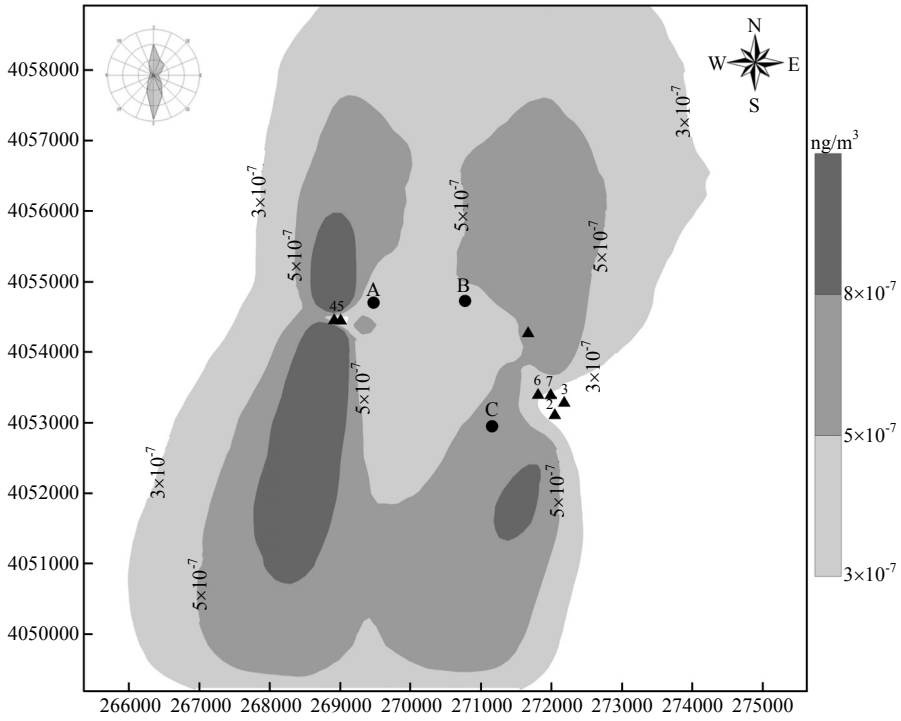


图 4　烧结机排放二噁英年均浓度等值线(UTM 坐标系,单位: m)

Fig.4　Distribution of annual concentrations of dioxins from sintering machines

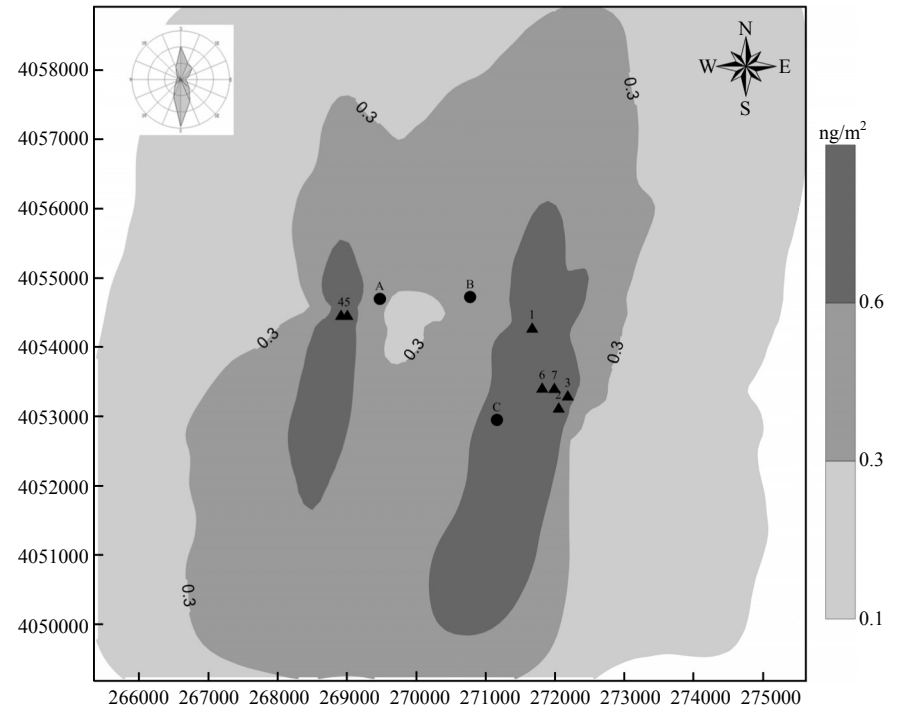


图 5　土壤中烧结机排放的二噁英总沉降量(UTM 坐标系,单位: m)

Fig.5　Deposition of sintering-machine-emitted dioxins in soil

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

表 1 土壤二噁英预测结果与监测结果对比

Table 1 Comparison of simulated and monitored dioxins in soil

点位	预测总沉降量 (ng/ m^2)	预测总沉降量 (ng/kg)	土壤监测浓度 (ng/kg)
A	0.33	1.46	0.82
B	0.36	1.58	2.2
C	0.79	3.44	2.4

3 结论

3.1 基于实测数据和类比分析法获取了典型钢铁厂烧结机二噁英排放因子为 0.044~0.081μg-TEQ/t,远小于 2004 年我国烧结排放清单中二噁英排放因子(5μg-TEQ/t).说明我国烧结机二噁英排放因子亟需更新,建立我国最新的自下而上的钢铁行业二噁英排放清单具有迫切性.

3.2 土壤监测二噁英浓度结果在 0.82~2.4ng/kg 之间,模拟烧结机二噁英对土壤监测点沉降量与实测数据趋势一致,可为环评中土壤污染预测提供思路.

参考文献：

[1] 苍大强,魏汝飞,张玲玲,等.钢铁工业烧结过程二噁英的产生机理与减排研究进展 [J]. 钢铁, 2014,49(8):1-8.

[2] 郑明辉,孙阳昭,刘文彬.中国二噁英类持久性有机污染物排放清单研究 [M]. 北京:中国环境科学出版社, 2008:10-34.

[3] 余 刚,杨小玲,黄 俊.中国二噁英类持久性有机污染物减排控制战略研究 [M]. 北京:中国环境科学出版社, 2008:2-3.

[4] 耿 静.二恶英类的控制政策及效果分析 [M]. 北京:冶金工业出版社, 2011:65-77.

[5] 吕亚辉,黄 俊,余 刚,等.中国二噁英排放清单的国际比较研究 [J]. 环境污染与防治, 2008,30(6):71-74.

[6] Liu G, Zheng M, Jiang G, et al. Dioxin analysis in China [J]. Trends in analytical chemistry, 2013,46:178–188.

[7] 黄启飞.重点行业二噁英控制技术手册Ⅱ [M]. 北京:中国环境科学出版社, 2015:18-27.

[8] 赵春丽,吴 铁,伯 鑫,等.钢铁行业履行斯德哥尔摩公约对策建议 [J]. 环境保护, 2014,8:43-45.

[9] Basham J, Whitwell I. Dispersion modeling of dioxin releases from the waste incinerator at Avonmouth, Bristol, UK [J]. Atmospheric Environment, 1999,33(27):3405-3416.

[10] Nathalie F,Jeanfrançois V, Eric L, et al. Dispersion modeling as a dioxin exposure indicator in the vicinity of a municipal solid waste incinerator: A validation study [J]. Environmental Science and Technology, 2006,40(7):2149-2155.

[11] Trinh H. Validation of the AERMOD air dispersion model: application to congener-specific dioxin deposition from an incinerator in midland, Michigan [J]. Organohalogen Compounds, 2009,71:992-995.

[12] 齐 丽,李 楠,任 玥,等.北京地区典型二噁英(PCDDs)及多氯联苯(PCBs)的长距离传输潜力—基于 TaPL3 模型的应用研究 [J]. 环境化学, 2013,32(7):1149-1157.

[13] 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.

[14] 姚宇坤,赵秋月,孙家仁,等.烟气与环境空气中二恶英的测定与数值模拟 [J]. 工业安全与环保, 2014,40(11):78-81.

[15] Meng F, Zhang B, Gbor P, et al. Models for gas/particle partitioning, transformation and air/water surface exchange of PCBs and PCDD/Fs in CMAQ [J]. Atmospheric Environment, 2007,41(39):9111–9127.

[16] 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):1394-1402.

[17] Li Y, Jiang G, Wang Y, et al. Concentrations, profiles and gas–particle partitioning of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in the ambient air of Beijing, China [J]. Atmospheric Environment, 2008,42(9):2037–2047.

[18] Ding L, Li Y, Wang P, et al. Seasonal trend of ambient PCDD/Fs in Tianjin City, northern China using active sampling strategy [J]. Journal of Environmental Sciences, 2012,24(11):1966–1971.

[19] Ren Z, Zhang B, Lu P, et al. Characteristics of air pollution by polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in the typical industrial areas of Tangshan City, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2011,23(2):228–235.

[20] Shi X L, Yu W, Fei X, et al. PBCDD/F formation from radical/radical cross-condensation of 2-Chlorophenoxy with 2-Bromophenoxy, 2,4-Dichlorophenoxy with 2,4-Dibromophenoxy, and 2,4,6-Trichlorophenoxy with 2,4,6-Tribromophenoxy [J]. Journal of Hazardous Materials, 2015,295:104-111.

[21] Shi X L, Zhang R M, Zhang H J, et al. Influence of water on the homogeneous gas-phase formation mechanism of polyhalogenated dioxins/furans from chlorinated/brominated phenols as precursors [J]. Chemosphere, 2015,137:142-145.

[22] 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.

[23] 吴宇澄,骆永明,滕 应,等.土壤中二噁英的污染现状及其控制与修复研究进展 [J]. 土壤, 2006,38(5):509-516.

[24] 黄伟芳,吴群河.二噁英污染土壤修复技术的研究进展 [J]. 广州环境科学, 2006,21(1):29-33.

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

[25] 王　堃,滑申冰,田贺忠,等.2011 年中国钢铁行业典型有害重金属大气排放清单 [J]. 中国环境科学, 2015,35(10):2934-2938.
[26] 伯　鑫,赵春丽,吴　铁,等.京津冀地区钢铁行业高时空分辨率排放清单方法研究 [J]. 中国环境科学, 2015,35(8):2554-2560.
[27] Wang L, Lu Y, He G, et al. Factors influencing polychlorinated dibenzo-p-dioxin and polychlorinated dibenzofuran (PCDD/F) emissions and control in major industrial sectors: Case evidence from Shandong Province, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2014,26(7):1513–1522.
[28] Tian B, Huang J, Wang B, et al. Emission characterization of unintentionally produced persistent organic pollutants from iron ore sintering process in China [J]. Chemosphere, 2012,89(4): 409–415.
[29] Die Q, Nie Z, Liu F, et al. Seasonal variations in atmospheric concentrations and gas–particle partitioning of PCDD/Fs and dioxin-like PCBs around industrial sites in Shanghai, China [J]. Atmospheric Environment, 2015,119:220–227.
[30] Huang T, Tian C, Zhang K, et al. Gridded atmospheric emission inventory of 2, 3, 7, 8-TCDD in China [J]. Atmospheric Environment, 2015,108:41–48.
[31] Basham J, Whitwell I. Dispersion modeling of dioxin releases from the waste incinerator at Avonmouth, Bristol, UK [J]. Atmospheric Environment, 1999,33(27):3405-3416.
[32] Nathalie F, Jeanfrançois V, Eric L, et al. Dispersion modeling as a dioxin exposure indicator in the vicinity of a municipal solid waste incinerator: A validation study [J]. Environmental Science and Technology, 2006,40(7):2149-2155.
[33] Li Y M, Pu W, Lei D, et al. Atmospheric distribution of polychlorinated dibenzo-p-dioxins, dibenzofurans and dioxin-like polychlorinated biphenyls around a steel plant Area, Northeast China [J]. Chemosphere, 2010,79(79):253–258.
[34] 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].
[35] HJ/T397-2007　固定源废气监测技术规范 [s].
[36] HJ 77.4-2008　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 [s].
[37] 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.
[38] 伯　鑫. CALPUFF 模型技术方法与应用 [M]. 北京:中国环境出版社, 2016:1-6.
[39] 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.
[40] 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.
[41] Wang L C, Lee W J, Tsai P J, et al. Emissions of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans from stack flue gases of sinter plants [J]. Chemosphere, 2003,50(9):1123–1129.
[42] 俞勇梅,李咸伟,何晓蕾,等.铁矿石烧结过程二噁英类排放机制及其控制技术 [M]. 北京:冶金工业出版社, 2014:10-34.
[43] GB28662-2012　钢铁烧结、球团工业大气污染物排放标准 [s].
[44] 巩宏平,田洪海,周志广,等.钢铁企业排放的烟气及厂区土壤中二噁英类污染研究 [J]. 环境保护科学, 2007,33(5):8-10.
[45] 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.

作者简介：孙博飞(1982-),女,河北石家庄人,硕士,主要研究方向为环境数值模拟及排污许可.发表论文 3 篇.

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