

Predictive Analysis of the Impact of Municipal Solid Waste Incineration Plants on Soil Environment

Yue Zhang

Zhongsheng Environmental Technology Development Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710000, China

Abstract

The heavy metals and dioxins in the flue gas from municipal solid waste incineration settle into the soil under the influence of gravity, thereby potentially impacting the soil environment. Additionally, in the event of an accident, leachate from the collection pool can seep into the soil, also affecting the soil environment. This study analyzes the impact of municipal solid waste incineration plants on the soil environment. The research results indicate that after 30 years of operation, the impact of heavy metals and dioxins on the soil through atmospheric deposition is relatively minor; similarly, the impact of heavy metals from waste leachate on the soil through vertical seepage is also relatively minor. This study provides reference recommendations for predicting the impact of similar projects on soil, offering certain theoretical value and practical significance.

Keywords

household waste; incineration; settlement; infiltration; soil

生活垃圾焚烧厂对土壤环境影响预测分析

张悦

中圣环境科技发展有限公司, 中国·陕西 西安 710000

摘 要

生活垃圾焚烧烟气中的重金属和二噁英随着烟气在重力作用下, 沉降到土壤中, 从而会对土壤环境造成影响。另外, 渗滤液收集池在事故状态下, 渗滤液下渗进入土壤中, 亦会对土壤环境造成影响。本研究通过分析生活垃圾焚烧厂对土壤环境的影响。研究表明, 生活垃圾焚烧厂运行30年, 重金属和二噁英通过大气沉降对土壤影响较小; 垃圾渗滤液中的重金属通过垂直下渗对土壤影响较小。本研究为类似项目对土壤影响预测提供参考建议, 具有一定的理论价值和实际意义。

关键词

生活垃圾; 焚烧; 沉降; 下渗; 土壤

1 工程概况

该生活垃圾焚烧厂位于中国西北地区的某个城市, 处置规模为 160t/d, 采用机械炉排垃圾焚烧炉, 配套建设有渗滤液处理站、初期雨水池、危废贮存库等设施。

2 污染影响识别

该焚烧厂土壤影响途径主要是大气沉降和垂直入渗两种途径。土壤环境影响情形为正常工况下焚烧烟气污染物通过大气沉降进入土壤; 渗滤液处理站、初期雨水池、危废暂存库、垃圾池、柴油罐区和汽车卸料平台等在非正常工况下液体通过垂直入渗到土壤中。

3 土壤影响预测与评价

3.1 大气沉降影响

3.1.1 计算模型

本项目工艺装置大气沉降影响主要是焚烧炉正常情况下排放的废气中主要是颗粒物、二噁英、铅、汞、镉等, 因此, 本次大气沉降预测焚烧炉烟气中二噁英、铅、汞、镉、砷进入土壤的影响。按照《环境影响评价技术导则 土壤环境》附录 E 方法一计算:

$$\Delta S = n(I_s - L_s - R_s) / (\rho_b \times A \times D)$$

污染物的年输入量 I_s 的计算公式为:

$$I_s = W_0 \times A \times V \times 3600 \times 24 \times 365$$

涉及大气沉降影响的项目可不考虑输出量, 因此上述公式简化为:

$$\Delta S = nI_s / (\rho_b \times A \times D)$$

土壤中某一种物质的预测值未增加值与现状值的叠加:

$$S = S_b + \Delta S$$

【作者简介】张悦 (1989-), 女, 中国陕西西安人, 硕士, 从事环保研究。

3.1.2 污染物沉降计算过程与结果

根据(HJ2.2-2018)《环境影响评价技术导则-大气环境》中的模式进行预测,该焚烧厂重金属大气沉降参数选取及土壤年输入量见表1。主要参数及不同年份预测结果见表2。

可见,土壤中重金属的含量随着运行年限的增加而逐渐增大,到30年时,本项目Hg大气沉降造成土壤中Hg的含量增加量为0.00089570mg/kg,叠加土壤现状监测值后为0.055895697mg/kg;Pb大气沉降造成土壤中Pb的含量增加量为0.00492633mg/kg,叠加土壤现状监测值后为25.80492633mg/kg;As大气沉降造成土壤中As的含

量增加量为0.00030790mg/kg,叠加土壤现状监测值后为14.2003079mg/kg;Cd大气沉降造成土壤中Cd的含量增加量为0.00019593 mg/kg,叠加土壤现状监测值后的预测值为0.280195934mg/kg,均符合(GB15618-2018)《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》中风险筛选值要求。本项目二噁英大气沉降造成土壤中二噁英的含量增加量为0.00277106ng/kg,叠加土壤现状监测值后的预测值为0.117771063ng/kg,二噁英累积浓度符合(GB36600-2018)《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》风险筛选值中一类用地标准限值的要求。

表 1 该焚烧厂重金属大气沉降参数选取及土壤年输入量

序号	相关参数	Hg	Pb	As	Cd	二噁英 pgTEQ/m ³
1	落地浓度年均最大值 (μ g/m ³)	0.00032	0.00176	0.00011	0.00007	0.00099
2	网格面积 (m ²)	160000 (400 × 400)				
3	沉降速率 (m/s)	0.001				
4	时间 (a)	1				
5	表层土壤容重 (kg/m ³)	1690				
6	表层土壤深度 (m)	0.2				
7	年输入量 (g)	1.614643	8.880538	0.555034	0.353203	0.000005

表 2 焚烧炉烟气污染物大气沉降对土壤预测结果

项目	预测年份 (年)	增加量 (mg/kg)	背景值 (mg/kg)	叠加值 (mg/kg)	标准 mg/kg	占标率 (%)
Hg	1	0.00002986	0.055	0.055029857	3.4	1.62
	30	0.00089570	0.055	0.055895697	3.4	1.64
Pb	1	0.00016421	25.8	25.80016421	170	15.18
	30	0.00492633	25.8	25.80492633	170	15.18
Cd	1	0.00000653	0.28	0.280006531	0.6	46.67
	30	0.00019593	0.28	0.280195934	0.6	46.70
As	1	0.00001026	14.2	14.20001026	25	56.80
	30	0.00030790	14.2	14.2003079	25	56.80
二噁英 ng/kg	1	0.00009237	0.115	0.115092369	10	1.15
	30	0.00277106	0.115	0.117771063	10	1.18

3.2 垂直入渗影响

该焚烧厂在采取了源头控制和全厂分区防渗措施的前提下,生产过程中的物料堆放、一般工业固废、危险废物、生活废水和生产废水均不会造成下渗到土壤中。该焚烧厂中存在地下和半地下的工程构筑物,比如渗滤液收集池、渗滤液处理系统、生活垃圾储坑等,在非正常情况下,渗滤液中个污染因子可能通过裂缝进入土壤中,继而在土壤中垂直入渗污染土壤环境。

3.2.1 预测模型

各地方的土壤有不一样的性质,比如土壤含水率、土壤容重、孔隙度等,各污染因子的理性性质也有所不同,这些不同的因素控制着各污染因子在土壤包气带层中的分布和运移。一般认为,水在包气带中的运移符合活塞流模式,由于评价区土壤层包气带地层岩性单一,污染物的弥散、吸

附和降解作用所产生的侧向迁移距离远远小于垂向迁移距离,因此本次将污染物在土壤包气带中的迁移概化为一维垂向数值模型。

场地包气带岩性主要为黄土,地下水位于垃圾池底3m,模型上边界概化为稳定的污染物定水头补给边界,给出土壤剖面定水头压力为-100cm,下边界为自由排泄边界。按照环境影响评价中土壤导则要求,该焚烧厂中土壤垂直入渗采用一维垂向饱和—非饱和土壤中水分运动方程作为土壤水流运动的控制方程为:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] - s$$

基于多孔介质溶质运移理论,构建一维非饱和土壤中污染物迁移的数学模型如下:

$$\frac{\partial(\theta c)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D \frac{\partial c}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} (qc)$$

3.2.2 数值模拟工具

本研究采用HYDRUS-1D软件进行土壤系统数值建模。该软件由美国盐土实验室基于 Worm 模型架构优化升级，专门针对饱和 - 非饱和和多物理场耦合过程（水流、热传导及多组分溶质传输）开展动态仿真分析。其算法框架集成水分运移方程、热扩散方程、溶质对流 - 弥散方程及根系吸水模型，可处理稳态与非稳态边界条件，支持多维数据交互接口。模型求解器基于 Calerkin 线性有限元法构建，具备模拟水循环、农业污染物（如农药、重金属）及有机化合物迁移转化过程的功能，在土壤水盐动力学、氮素循环及污染物环境行为预测领域具有较高的工程适用性。

3.2.3 参数化方案

水力特性参数通过 van Genuchten-Mualem 本构模型描述粉质黏土的渗透规律（忽略磁滞效应），结合研究区包气带黄土的岩性特征，直接调用黄土类土壤水分特征参数数据库完成参数赋值。

3.2.4 空间离散

为提高污染物迁移模拟的空间分辨率，本研究采用非均匀剖分方法对土壤垂向剖面进行离散化处理，共生成 301 个计算节点。该离散方案通过局部加密关键区域（如污染源附近），在保证计算效率的同时，显著提升溶质锋面追踪精度。

3.2.5 情景假设及源强分析

本次评价以最不利的因素考虑，按照废水中污染物浓度最高的垃圾渗滤液收集池发生泄露情境进行影响预测，假设垃圾渗滤液收集池池底防渗层发生渗漏，参照地下水非正常情况预测源强假设，特征因子有铅、汞、砷、镉等，选择

占标率较高的特征因子铅、镉作为预测因子。渗漏控制指标依据《地下工程防水技术规范》（GB 50108-2008）Ⅱ级防水标准设定，其中宏观渗漏限制—工程全域湿渍总面积与防水总面积比值需 ≤0.1%；局部渗漏密度—在 100m² 量级防水单元内，湿渍分布点位不得超过 2 处；单点渗漏尺度—单处湿渍投影面积最大允许值为 0.1m²（等效直径 ≤357mm）。渗滤液收集池容积为 17.7m × 4.6m × 5m，按照渗滤液收集池的浸润面积为 304.42m²，则泄漏面积按照总防水面的 1/1000 核算，为 0.3m²，渗漏量不大于 2.5L/d，则正常状况下，渗水量为 0.0025m³/d。一般情况下，非正常工况泄漏量取正常值的 10 倍，则泄漏量为 0.025m³/d。则铅和镉的每天泄漏量分别为 0.0000375kg/d 和 0.00000375kg/d。其中铅、镉浓度分别为 1.5mg/L、0.15mg/L。建设单位每月检修一次，则渗漏时间按 30d 计。预测时间按 365d，1825d 计。

3.2.6 预测结果

基于 HYDRUS-1D 溶质运移模型的数值迭代求解，整合土壤物理属性、污染源强度及防渗层特性参数化输入，通过浓度归一化方程实现模拟结果的工程应用转换：

$$X_1 = \frac{X_0 \cdot \theta}{G_s} \times 10^3$$

核算出在不同泄漏时段深度 3m 处的土壤铅、镉的增加量,根据《HJ964-2018 环境影响评价技术导则 土壤环境（试行）》，每 kg 土壤中某一种物质的预测值用下式计算：

$$S=Sb+\Delta S$$

根据预测结果可知，在非正常情况下，在渗滤液收集池长时间持续泄露的情况下，污染物会对土壤产生一定的影响，土壤中 Pb 和 Cd 的预测值远低于《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB36600-2018）中筛选基准值。

表 3 不同时段土壤底层中重金属的增量及预测值

污染因子	渗漏后时间（d）	最大增量（mg/kg）	背景值（mg/kg）	叠加值（mg/kg）	标准值（mg/kg）	占标率（%）
Pb	365	0.433636	28.8	29.233636	800	3.65
	1825	0.438312	28.8	29.238312	800	3.65
Cd	365	0.043714	0.77	0.813714	65	1.25
	1825	0.043831	0.77	0.813831	65	1.25

4 结语

生活垃圾焚烧厂焚烧炉所排放的烟气中含有重金属及二噁英，这些污染物会随着烟气在重力的作用下沉降进入土壤中。通过预测，随着运行年限的增加，土壤中重金属的含量也逐渐增大。到 30 年时，土壤中 Hg、Pb、As、Cd、二噁英含量增加量叠加土壤现状监测值后满足相应的标准要求。

考虑发生泄露物料或污水渗漏事故的不确定性，垃圾

焚烧厂应做好防渗措施，定期巡查保证一旦出现泄漏点能够及时发现并且在第一时间采取应急措施，防止渗漏液的进一步泄露，同时对场地下游土壤定期进行跟踪监测。

参考文献

[1] 刘景霞,李赞.生活垃圾焚烧发电厂烟尘中重金属沉降对土壤环境的影响研究[J].绿色科技,2020.5（10）: 64-71.
[2] 曹伟伟,严雪伟,谌佳佳,等.垃圾焚烧电厂周边环境空气和土壤中二噁英含量研究[J].河南科学,2023.12（12）: 1765~1771.