

Application of HYDRUS-2D Software in Soil Environmental Impact Assessment

Dongmei Yu¹ Lihong Yuan²

1. Xinjiang Tianhe Environmental Technology Consulting Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 832000, China
2. Xinjiang Tianchen Environmental Technology Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830026, China

Abstract

On the basis of soil physical and chemical property analysis and engineering experiments, taking a domestic waste incineration plant project as an example, the numerical simulation software HYRUS-2D was used to simulate the migration law of lead in the leachate in the soil. The results show that the software can quantitatively reflect the spatial and temporal changes of pollutants in the soil, and provide an effective method for the soil environmental impact prediction.

Keywords

HYRUS-2D; numerical simulation; soil; environmental impact prediction

HYDRUS-2D 软件在土壤环境影响评价中的应用

余冬梅¹ 袁丽红²

1. 新疆天合环境技术咨询有限公司, 中国·新疆 乌鲁木齐 832000
2. 新疆天辰环境技术有限公司, 中国·新疆 乌鲁木齐 830026

摘要

在土壤理化性质分析和工程实验的基础上, 以某生活垃圾焚烧厂项目为例, 利用数值模拟软件HYRUS-2D建立了数值模型, 对渗滤液中铅在土壤中的运移规律进行模拟。结果表明, 该软件能定量反映污染物在土壤中的时空变化过程, 为土壤环境影响预测提供了一种有效的方法。

关键词

HYRUS-2D; 数值模拟; 土壤; 环境影响预测

1 引言

2018年9月由生态环境部发布了HJ964—2018《环境影响评价技术导则土壤环境(试行)》(以下简称《导则》), 该《导则》规定了土壤环境影响评价的内容和方法, 同时要求选择适宜的预测方法, 预测评价建设项目各实施阶段不同环节与不同环境影响防控措施下的土壤环境影响。论文以某生活垃圾焚烧厂项目为例, 在土壤理化性质分析^[1]和工程试验的基础上, 借助HYDRUS-2D软件建立数值模型, 模拟污染物在土壤中的运移过程, 为土壤环境影响预测提供一种简便可行的方法。

2 研究区土壤及污染源概况

2.1 项目区包气带岩性及厚度

项目区浅部地层主要由第四纪全新统(Q)冲、洪积细

颗粒沉积物组成, 包气带主要以砂壤土、粉土、亚砂土为主, 据地下水水位观测资料, 选取地下水水位埋藏最浅的断面作为模拟断面(水位埋深为40m左右), 作为本次计算的模拟剖面, 详见表1。

根据观测井潜水面以上岩性为砂壤土(0~1m)、粉土(2~20m)、亚砂土(21~40m), 并在N1=10m、N2=20m、N3=30m、N4=40m处设置观测点, 详见图1。

表1 本项目包气带岩性

土层 /m	层厚度 /m	岩性
0-1	1	砂壤土
2-20	18	粉土
21-40	19	亚砂土

2.2 污染源概况及污染物因子

研究对象的污染源为生活垃圾焚烧厂渗滤液调节池。渗滤液中的污染物因子主要有化学需氧量、氨氮、重金属。根据HJ610—2016《环境影响评价技术导则地下水环境》

【作者简介】余冬梅(1981-), 女, 中国安徽阜阳人, 硕士, 工程师, 从事环境影响评价研究。

中 9.5 (预测因子的选取原则), 将特征因子按照重金属、持久性有机污染物和其他类别进行分类, 并对每一类别中的各项因子采用标准指数法进行排序, 分别取标准指数最大的因子作为预测因子。根据计算, 所有预测因子中, 铅 (Pb)、耗氧量 (以 CODMn 计)、氨氮 (NH₄-N) 在各类污染因子中的标准指数最大, 因此将 Pb、COD、NH₄-N 作为污染因子进行预测。但是, GB36600—2018《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准 (试行)》中没有耗氧量 (以 CODMn 计)、氨氮 (NH₄-N) 的标准, 因此本项目土壤预测因子为铅 (Pb)。垃圾渗滤液预测评价水质因子选择统计表详见表 2。

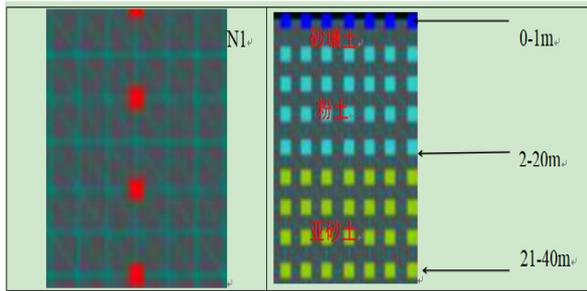


图 1 场区铺设防渗层后岩性及观测点分布图 (N 为观测点)

表 2 垃圾渗滤液预测评价水质因子选择统计表

污染因子类别	水质因子	浓度值	标准值	标准指数	预测评价因子
重金属	Hg	0.008	0.001	8	Pb
	Cr	0.5	0.05	10	
	Pb	2.5	0.01	250	
	Cd	0.25	0.005	50	
	As	0.1	0.05	2	
其他因子	COD	80000	20	4000	COD、NH ₃ -N
	SS	3000	30	100	
	NH ₃ -N	4000	0.5	8000	

3 土壤中水分和溶质运移原理

水是污染物运移的载体, 若进行土壤中污染物运移的模拟需要先对土壤中水分运移过程进行刻画。

3.1 非饱和带水分运移模型

非饱和带水分运移采用 Richards 方程的修改形式表示。由于污染物在弥散过程中垂向迁移距离往往大于侧向迁移距离, 所以本次模拟可认为污染物在包气带中呈一维垂直迁移。因此, 只考虑上下两个边界, 上边界为定流量边界, 下边界为潜水面 (含水率为饱和含水率)。土壤水分运动的数学模型如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K \frac{\partial h}{\partial z} \right] - K \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) = V(z, t), z = 0 & t \geq 0 \\ \theta(z, t) = \theta_s, & z = 0 & t \geq 0 \\ \theta(z, t) = \theta_0, & 0 < z \leq H & t = 0 \end{cases}$$

式中, θ ——土壤体积含水率;

h ——压力水头 [L], 饱和带大于零, 非饱和带小于零;

z, t ——分别为垂直方向坐标变量 [L]、时间变量 [T];

K ——垂直方向的水力传导度 [LT⁻¹];

s ——作物根系吸水率 [T⁻¹].

$$-k(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) = q_s$$

初始条件 $\theta(z, 0) = \theta_0(z), Z \leq z \leq 0$ 边界条件:

上边界: $z = 0$;

下边界: $h(Z, t) = hb(t)$.

式中, $\theta_0(z)$ ——剖面初始土壤含水率;

Z ——地表至下边界距离, L;

q_s ——地表水分通量, LT⁻¹, 蒸散取正值, 灌溉和降水入渗取负值;

$hb(t)$ ——下边界压力水头, L.

3.2 非饱和带水分运移模型

溶质运移模型根据多孔介质溶质运移理论, 考虑一维非饱和土壤溶质运移的数学模型为其中:

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

式中, c ——污染物介质中的浓度, mg/L;

D ——土壤水动力弥散系数, m²/d;

q ——渗流速率, m/d;

z ——沿 Z 轴的距离, m;

t ——时间变量, d;

θ ——土壤含水率, %.

初始条件:

$$c(z, t) = 0, t = 0, L \leq z < 0$$

边界条件:

$$c(z, t) = C_0, t > 0, z = 0 \text{ (连续点源)}$$

$$c(z, t) = \begin{cases} c_0 & 0 < t \leq t_0 \\ 0 & t > t_0 \end{cases} \text{ (非连续点源)}$$

4 土壤中污染物运移模拟过程

HYDRUS 是由美国国家盐土改良中心 (USS alinity Laboratory) 于 1991 年研制的用于模拟变饱和和多孔介质中水分、能量、溶质运移的数值模型, 已得到广泛的认可与应用^[2]。该软件能够较好地模拟水分与污染物在土壤中的分布和运移规律, 也可以与其他地下水、地表水模型相结合, 从宏观上分析水资源问题^[3]。HYDRUS-2D 是 HYDRUS 模型的二维版本, 是一种常用的水和溶质模拟软件。近年来, 该软件得到广泛的应用, 如叶永红等^[4]使用该软件预测了兰州西固商业石油储备库泄漏对包气带的影响, 郝芳华等^[5]

将其应用于河套灌区典型区域的土壤氮元素迁移,杨洋等^[6]利用 HYDRUS-2D 模拟了填埋场渗滤液中氨氮在包气带中的迁移转化规律等。

用 HYDRUS-2D 模拟土壤中污染物运移过程的方法如下。

4.1 参数设置

HYDRUS-2D 软件所需参数分为两类:一类是土壤特征参数,如土壤的饱和含水量、残余含水量和土壤水力曲线参数等水分参数;另一类是运移参数,如渗透系数、弥散系数等。

本模型不考虑土壤对污染物的吸附和污染物的转化。各参数除土层饱和渗透系数使用注水试验的实测值外,其余各参数均采用 HYDRUS-2D 软件自带的相应土层的经验参数值,模型中主要参数见表 3。

表 3 土壤包气带水文地质初始参数取值表

土壤岩性	土壤容重 ρ (g/cm ³)	饱和含水率 θ (g/g)	残余含水率 θ_r (g/g)	渗透系数 K_s (m/d)
砂壤土	1.89	0.41	0.065	1.061
粉土	1.37	0.46	0.034	0.06
亚砂土	2.28	0.41	0.057	3.502
				$K_{40m}=1.806$

4.2 边界条件和初始条件

上边界:上边界为渗滤液收集池的底部,假定池底破损,污染物非持续入渗,假定3个月(90d)发现该破损并进行补漏工作,则上边界为固定浓度边界,浓度 $C_0=2.5\text{mg/L}$ 。

下边界:假设潜水面随时间的变化幅度较小,可忽略不计,则下边界可以设为压力水头为零的第一类 Dirichlet 边界。

初始条件:本次模拟初始水头设定 $h_0=-100\text{cm}$ (土壤处于干燥状态),土壤中铅的初始浓度 $C_0=0\text{mg/L}$ 。

5 模拟实验结果分析

本次模拟对象为渗滤液调节池,假设池底防渗层破损,渗滤液通过破损区域泄漏到土壤中。将污染源概化为稳定的点源污染,污染物铅以固定浓度 0.01mg/L 持续入渗,泄漏的时长是 90d。预测结果见图 2、图 3。

由以上模拟结果可知:

利用 HYDRUS-2D 运行溶质运移模型,将相关土壤参数、污染源参数代入模型中,模型运行 20 年。项目场地为建设用地,污染物浓度边界以 GB36600—2018《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》表 1 中的第二类建设用地土壤污染风险筛选值(基本项目),即 800mg/kg 为界。该情景设定 Pb 为预测因子,模拟结果如图 2~6 所示。评价区土壤层包气带主。

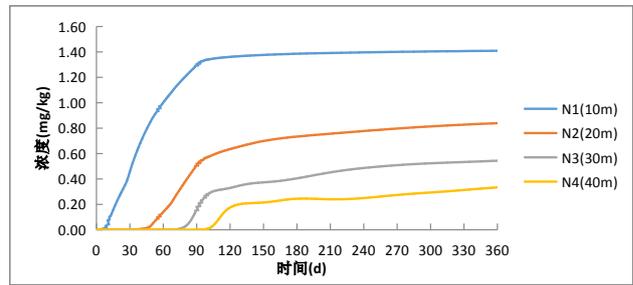


图 2 360d 内不同深度 Pb 浓度变化

在第 360d, N1(10m) 观测点土壤中的 Pb 浓度为 1.41mg/kg , N2(20m) 观测点土壤中的 Pb 浓度为 0.841mg/kg , N3(30m) 观测点土壤中的 Pb 浓度为 0.546mg/kg , N4(40m) 观测点土壤中的 Pb 浓度为 0.337mg/kg , 均不超过 GB36600—2018《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》表 1 中的第二类建设用地土壤污染风险筛选值(基本项目) 800mg/kg 的限值。

图 2 表明,污染物浓度随着土壤埋深增大迅速减小,主要是由于土壤的吸附作用对污染物的运移有一定的阻滞作用。N4(40m) 观测点作为包气带的底板,在第 100d 时,观测到 Pb, 表明 Pb 已经穿过包气带进入含水层。

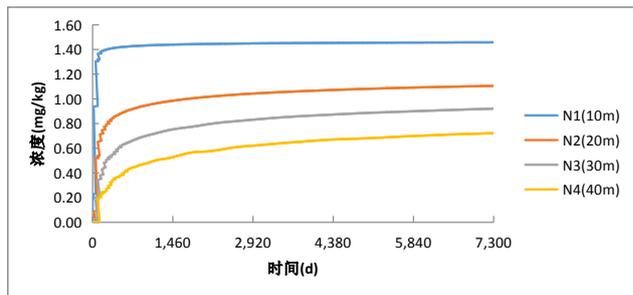


图 3 20 年内不同深度的 Pb 浓度变化

在第 7300d, N1(10m) 观测点土壤中的 Pb 浓度为 1.46mg/kg , N2(20m) 观测点土壤中的 Pb 浓度为 1.11mg/kg , N3(30m) 观测点土壤中的 Pb 浓度为 0.921mg/kg , N4(40m) 观测点土壤中的 Pb 浓度为 0.722mg/kg , 均不超过 GB36600—2018《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》表 1 中的第二类建设用地土壤污染风险筛选值(基本项目) 800mg/kg 的限值。

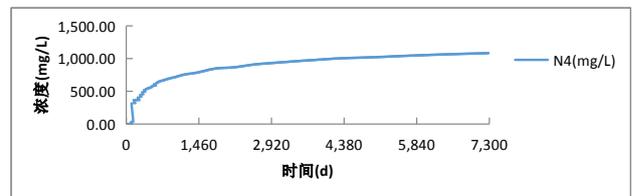


图 4 包气带底端潜水中 Pb 浓度变化

通过图 4 可知,在第 7300d, 包气带底端 40m 以下潜水中 Pb 浓度为 1083mg/L , 超过 GB/T14848—2017《地下水质量标准》中的 III 类标准 Pb 浓度 ($\leq 0.05\text{mg/L}$) 2.17 万倍。

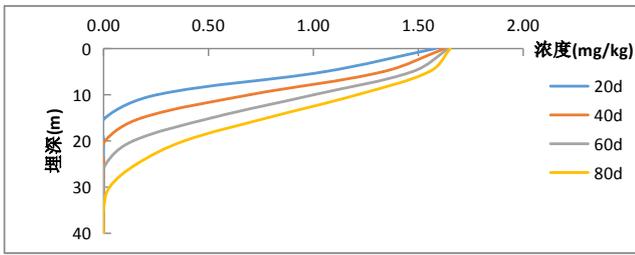


图5 Pb 动态扩散过程分布 (0~80 天)

通过图5可知, Pb 起始浓度为 1.55mg/kg, 从第 20~80d, 15m、20m、25m、40m 处土壤 Pb 浓度不断降低, 直至到 0。

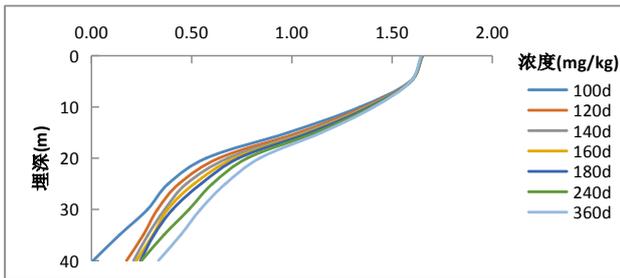


图6 Pb 动态扩散过程分布 (100~360 天)

通过6图可知, Pb 起始浓度为 1.59mg/kg, 随着时间增加 (100~360d), 15m、20m、25m、40m 处土壤 Pb 浓度不断降低, 直至到 0, 第 360d 时, 40m 处土壤中 Pb 浓度逐渐增加至 0.55 mg/kg。

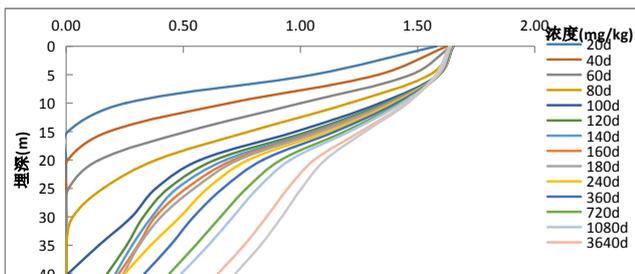


图7 Pb 扩散过程分布 (20~3640 天)

通过7图可知, Pb 起始浓度为 1.59mg/kg, 随着时间增加 (20~3640d), 15m、20m、25m、40m 处土壤 Pb 浓度不断降低, 直至到 0, 第 3640d 时, 40m 处土壤中 Pb 浓度

逐渐增加至 0.72mg/kg。

从图7可知, 从 20~7300d, 土壤中 Pb 浓度从 1.662mg/kg 逐渐减少, 大部分进入潜水含水层。

6 结论与建议

论文以某生活垃圾焚烧厂项目为例, 设定调节池因地基不均匀沉降导致池底开裂, 裂缝长 20m, 宽 4.0cm, 假定 3 个月后 (90d) 发现该破损并进行补漏工作, 渗漏液渗漏量为 990m³, 渗漏液中 Pb 浓度为 2.5mg/L, 用 HYDRUS-2D 软件建立数学模型, 模拟铅在土壤水中的运移规律。通过模拟结果可知: 在仅考虑土壤水的对流和弥散的作用下, 泄漏事故发生后, 污染物 Pb 以类似注入渗入方式连续不断注入包气带中。Pb 随入渗时间的增加, 在第 100d, 逐渐穿透包气带进入含水层, 直至整个包气带剖面土壤吸附达到饱和状态, 与污染物浓度达到平衡。途中模拟时间段内污染物浓度随着土壤埋深增大迅速减小, 主要是由于土壤的吸附作用对污染物的运移有一定的阻滞作用。第 0~20 年的包气带土壤中的 Pb 浓度均不超过 GB36600—2018《土壤环境质量建设用地区域土壤污染风险管控标准 (试行)》表 1 中的第二类建设用地区域土壤污染风险筛选值 (基本项目) 800mg/kg 的限值, 但会导致地下水中 Pb 超标。因此, 项目区在未来的建设中必须要做好防渗检漏措施。

参考文献

- [1] 李哲, 郭迎涛, 程紫华. 土壤环境现状现场调查方法评析[J]. 环境影响评价, 2019, 41(5): 8.
- [2] 刘超. 模拟降雨条件下非均值包气带中“三氮”迁移转化规律研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011.
- [3] Crevoisier, Popovaz, Mailholjc, et al. Assessment and simulation of water and nitrogen transfer under furrow irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(4): 354-366.
- [4] 叶永红, 宁立波. 石油类污染物在包气带中的迁移预测: 以兰州西固商业石油储备库为例[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(11): 186-189.
- [5] 郝芳华, 孙雯, 曾阿妍, 等. HYDRUS-1D 模型对河套灌区不同灌溉情境下氮素迁移的模拟[J]. 环境科学学报, 2008, 28(5): 853-858.
- [6] 杨洋, 李娟, 李鸣晓, 等. HYDRUS-1D 软件在地下水污染源强定量评价中的应用[J]. 环境工程学报, 2014, 8(12): 5293-5294.