

重金属污染物在土壤中的扩散规律及埋置策略研究

郭鸿^{1,2}, 高斌¹, 陈茜¹

(1. 陕西理工学院 土木工程与建筑学院, 汉中 723000; 2. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为了探索重金属污染物在土壤中的扩散规律, 本文基于三维扩散方程, 推导出了空间、时间和扩散系数等因素对埋置点周围重金属污染物浓度的影响规律。在此基础上, 分析比较了集中埋置和分散埋置方法对重金属污染物浓度分布影响的异同。结果表明: 在其他条件相同时, 某一空间位置的浓度随扩散时间和扩散系数的增大先增大后逐渐减小, 最后曲线趋于平缓; 相同扩散时间情况下, 浓度随着扩散半径的增大而减小, 当扩散半径大于一定值时, 浓度趋于零。对同量的污染物的三种不同的埋置方案进行分析发现: 埋置点越少, 其附近的浓度越高, 而埋置点越多, 远处的浓度越低。

关键词: 土壤; 重金属; 污染物扩散; 集中埋置; 分散埋置

中图分类号: X53

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)02-0237-04

Study on diffusion law of heavy metal in soil and its buried strategy

GUO Hong^{1,2}, GAO Bin¹, CHEN Xi¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723000, China;

2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: In order to investigate the diffusion law of heavy metal pollutants in soil, the paper deduced the effect law of space, time and diffusion coefficient on the pollutant concentration of heavy metal around the buried point based on three-dimensional diffusion equation. It also analyzed the influence of differences between two buried methods such as namely centralized and decentralized buried approaches on pollutant concentration distribution of heavy metal. The results show that when the other conditions are the same, the concentration of a spatial position increases first and then decrease with the increase of both diffusion time and diffusion coefficient, and Finally the curve tends to be gentle; when the diffusion time keeps constant, the concentration decreases with the increase of diffusion radius, and trends to zero at the end. After comparing three different buried methods, it found that the fewer the buried points, the higher the nearby concentration, and the more buried points, the lower the concentration at far positions.

Key words: soil; heavy metal; pollution diffusion; centralized buried approach; decentralized buried approach

1 研究背景

随着工业化进程和科技的迅速发展, 城市工业和生活垃圾的日益增多, 垃圾填埋场或者农作土壤周围的重金属污染问题已日渐突出^[1-4]。因此, 对重金属渗滤液在土壤中的扩散规律作深入研究是很有必要的。国外在这方面的研究工作开始于20世纪70、80年代, 直到现在在该领域的研究还比较活

跃。在此期间, 提出了不少扩散的数学模型, 同时也进行了许多大规模试验^[5]。国内关于重金属渗滤液在土壤中扩散的研究报道较少, 目前尚处于监测监控阶段。土壤是人类赖以生存的基础, 是最为重要的生产资源。研究重金属渗滤液在土壤中的扩散对于土壤的保护有着重要的意义。

目前处理含重金属污染物的方法虽然有很多, 诸如化学沉淀, 氧化还原反应, 溶液萃取分离, 吸附,

收稿日期: 2015-09-21; 修回日期: 2015-11-12

基金项目: 陕西省教育厅专项科研项目(15JK1117)

作者简介: 郭鸿(1984-), 男, 陕西长武人, 博士, 讲师, 研究方向为环境岩土工程等。

离子交换等方法。然而,鉴于技术和成本的制约,深层埋置仍然是较为普遍使用的方法。埋置法对土地,尤其是耕作土壤,有潜在的安全隐患^[6]。汞,铅,镉等重金属离子已经被列为剧毒物,成为重点治理对象^[7]。含重金属垃圾的污染问题已经成为国内外研究者所关注的焦点^[8-10]。由于重金属在理化条件复杂的土壤环境中,有十分复杂的迁移转化过程,重金属污染物在土壤中的迁移模型包括两个重要过程:水分循环即模型中的流水模型和污染循环即溶质迁移模型,每个一过程又与很多物理、化学和生物过程相联系。因此在现场检测和实验室中,往往由于复杂因素的影响,导致测定结果难以解释^[11-14]。

鉴于此,本文基于扩散理论,建立了重金属污染物在三维条件下的扩散方程,推导了空间、时间因素和扩散系数等因素对埋置点周围土壤中重金属污染物浓度的影响规律,旨在从理论上揭示其在土壤中的扩散规律,从而为污染物的埋置方案提供一定的参考。

2 重金属污染物扩散方程的建立^[15]

当含重金属垃圾被埋在土壤中时,由于垃圾中的渗滤液和土壤中水分的存在,重金属将会以渗滤液中离子的形式扩散到土壤中,而且会由于浓度梯度差,从浓度高向浓度低处扩散^[16]。为了确定重金属离子在土壤中的扩散规律,将重金属填埋时刻记作 $t = 0$,埋置点选为坐标原点,时刻 t 无穷空间中任一点 (x,y,z) 污染物浓度记为 $\psi(x,y,z,t)$,其单位为 kg/m^3 。假设重金属离子的传播服从扩散定律,即单位时间通过单位法向面积的流量与它的浓度梯度成正比^[17]。

则单位时间通过单位法向面积的流量为:^[18]

$$q = -k_e \text{grad } \psi \tag{1}$$

式中: k_e 为扩散系数, m^2/s ; grad 为梯度;负号为由浓度高向浓度低的地方扩散。 q 为单位时间通过单位法向面积的流量, kg/s 。考察空间间域 Ω , Ω 的体

积为 V ,包围 Ω 的曲面为 N , N 的外法线向量为 p ,则在 $[t, t + \Delta t]$ 内通过 Ω 的流量为:

$$M_1 = \int_t^{t+\Delta t} \iint_S q p \text{d} s \text{d} t \tag{2}$$

而 Ω 内重金属离子的增量为:

$$M_2 = \iiint_V [\psi(x,y,z,t) - \psi(x,y,z,t + \Delta t)] \text{d} v \tag{3}$$

由质量守恒定律

$$M_1 = M_2 \tag{4}$$

根据曲面积分的奥 - 高公式

$$\iint_S q p \text{d} s = \iiint_V \text{div } q \text{d} v \tag{5}$$

其中 div 是散度记号。由(1) ~ (5) 式,再利用积分中值定理得到

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = k_e \text{div}(\text{grad } \psi) = k_e \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \right) \tag{6}$$

式中: $t > 0, -\infty < x,y,z < \infty$

假设重金属埋置看作在土壤中某一点向四周等强度地瞬时释放重金属离子,如不计其他因素的影响,则其将在无穷空间扩散^[19]。初始条件为作用在坐标原点的点源函数,可记作

$$y(x,y,z,0) = M \sigma(x,y,z) \tag{7}$$

式中: Q 为重金属埋置释放的重金属离子总量; $\sigma(x,y,z)$ 为单位渗透强度的点源函数。

方程(6)满足条件(7)的解为^[20]:

$$\psi(x,y,z,t) = \frac{M}{(4\pi k_e t)^{3/2}} e^{-\frac{x^2+y^2+z^2}{4k_e t}} \tag{8}$$

这个结果表明,对于任意时刻 t ,重金属渗滤液浓度 ψ 的等值面是球面 $x^2 + y^2 + z^2 = R^2$,并且随着球面半径 R 的增加, ψ 的值是连续减少的;当 $R \rightarrow \infty$ 或 $t \rightarrow \infty$ 时, $\psi(x,y,z,t) \rightarrow 0$ 。

3 重金属渗滤液扩散分析

根据公式(8)可以得到土壤中重金属渗滤液浓度 ψ 随着时间 t 、扩散系数 k_e 、及半径 R 之间的关系如图 1 所示:

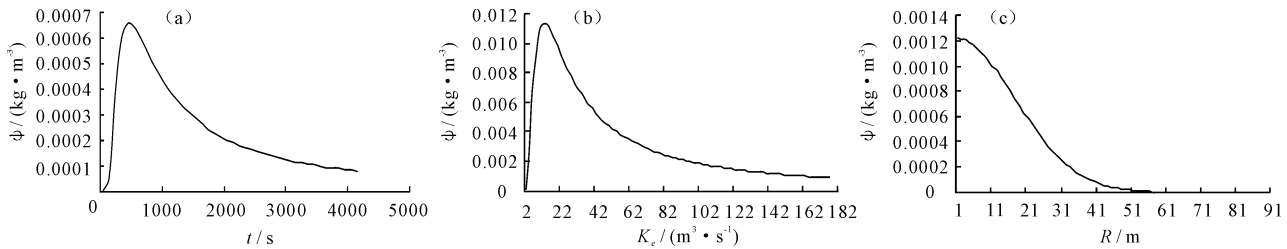


图 1 时间和扩散系数、半径对重金属离子浓度的影响

从图 1(a)可以看出:保持其他条件不变,随着时间 t 的增加,在距离埋置点同一距离的重金属离子的浓度 ψ 先呈现增大趋势,当增大到某一数值时,浓度开始减小,随着时间的持续增加,这一点的浓度一直减小,直至一个接近 0 的稳定值。从图 1(b) 可以看出:控制其他条件不变,改变扩散系数 k_e 的值,从图中可以看出随着扩散系数 k_e 的增大,重金属离子的浓度呈现先增大,后减小的变化趋势,且当扩散系数 k_e 为某一数值时,这一点重金属离子的浓度最大。图 1(c) 表明:当控制扩散系数 k_e 不变,时间 t 不变,通过改变半径 R 的大小得出在不同半径时重金属离子的浓度 ψ ,从图 1(c) 中可以看出,随着半径 R 的增大,浓度 ψ 是不断减小的,直至减小到 0,也就是说,距离重金属埋置点越远的地方浓度越小,即距离重金属埋置点的距离越远的地方,土壤污染程度越小。

4 埋置方案比较

考虑 3 种重金属污染物埋置方案,即集中埋置(1 个埋置点)和分散埋置(2 和 3 个埋置点)。3 种埋置方案如图 2 所示。

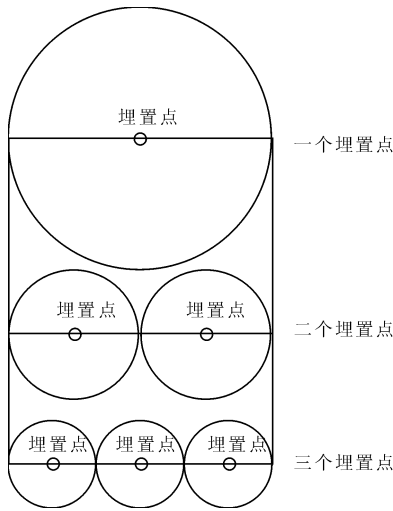


图 2 重金属污染物埋置示意图

假设 3 种埋置方案中重金属离子的总量相同,均为 M 。即对于 3 种方案,离子源总量分别为 $M, M/2$ 和 $M/3$ 。按照式(8)计算得到 3 种埋置方式下重金属离子浓度和水平埋置距离的关系。如图 3 所示,在近距离范围内,对于同量的重金属污染物,埋置点越少,重金属离子浓度越高;随着距离污染源的不断增大,埋置点越少则周围土壤中重金属离子浓度越低。

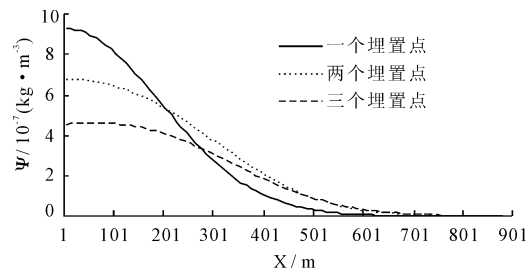


图 3 重金属离子浓度随距离变化曲线

5 结 论

本文通过对土壤中重金属离子的扩散规律和重金属污染物的埋置策略研究,主要得出了以下结论:

- (1) 当其他条件相同时,某一空间位置的浓度随扩散时间和扩散系数的增大先增大后逐渐减小,最后其值趋于稳定;
- (2) 在相同扩散时间情况下,浓度随着扩散半径的增大而减小,当扩散半径大于一定值时,浓度趋于零。
- (3) 对同量的污染物的三种不同的埋置方案进行分析发现:埋置点越少,其附近的浓度越高,而埋置点越少,远处的浓度越低。也就是说,可以根据扩散距离及其扩散浓度或者根据对土壤的污染要求选择将重金属垃圾集中埋置或者分开一定的距离进行埋置,从而在最大程度上减少对土壤的污染和对生态环境的破坏。

参考文献:

[1] 张学佳,纪 巍,康志军,等. 石油类污染物对土壤生态环境的危害[J]. 化工科技,2008,16(6):60-65.
[2] 李煜蓉. 土壤环境质量评价与污染预测实例研究[D]. 长春:吉林大学,2010.
[3] 楚伟华. 石油污染物在土壤中迁移及转化研究[D]. 大庆:大庆石油学院,2005.
[4] 张凤杰. 铜在土壤上的吸附行为及其共存污染物对其吸附的影响[D]. 大连:大连理工大学,2013.
[5] 丁信伟,王淑兰,徐国庆. 可燃及毒性气体泄漏扩散研究综述[J]. 化学工业与工程,1999,16(2):118-122.
[6] 卢 彬. 重金属污染物在土壤中迁移规律及修复技术研究[J]. 环境科学与管理,2014,39(9):109-112.
[7] 常学秀,文传浩,王焕校. 重金属污染与人体健康[J]. 云南环境科学,2000,19(1):59-61.
[8] Laman J D, Kors N, Rooijen N V, et al. Inhibition of primary production as induced by heavy metal ions on phytoplankton population off Cochin[J]. Indian Journal of Fisheries,1990,37(1):51-54.

- [9] 王志伟,张元标. 危险化学品污染物在空气、水和土壤中的扩散与迁移研究进展[J]. 包装工程,2006,27(4):5-9.
- [10] 胡少平. 土壤重金属迁移转化的分子形态研究[D]. 杭州:浙江大学,2009.
- [11] 李昌朕. 重金属离子铅在土壤中的纵向迁移规律研究[D]. 淄博:山东理工大学,2014.
- [12] 傅晓文. 盐渍化石油污染土壤中重金属的污染特征、分布和来源解析[D]. 济南:山东大学,2014.
- [13] Mason R P, Laporte J M, Andres S. Factors controlling the bioaccumulation of mercury, methylmercury, arsenic, selenium, and cadmium by fresh water invertebrates and fish [J]. Environmental Contamination and Toxicology, 2000,38(3):283-297.
- [14] Perceval O, Pinel-Alloul B, Méthot G, et al. Cadmium accumulation and metallothionein synthesis in fresh water bivalves (*Pyganodon grandis*): relative influence of the metal exposure gradient versus limnologic a variability [J]. Environmental Pollution, 2002,118(1):5-17.
- [15] 王 瑶. 土壤重金属环境风险评估和污染防治对策研究[D]. 西安:西北大学,2014.
- [16] 蒋煜峰. 污灌土壤中重金属形态及化学治理研究[D]. 壮族:西北师范大学,2006.
- [17] 余开彪,胡 斌,张 挺. 垃圾渗滤液在土体中扩散规律的模拟计算[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(11):1944-1948.
- [18] 关共凑,徐 颂,黄金国. 重金属在土壤-水稻体系中的分布、变化及迁移规律分析[J]. 生态环境,2006,15(2):315-318.
- [19] 朱映川,刘 雯,周遗品,等. 水体重金属污染现状及其治理方法研究进展[J]. 广东农业科学,2008(8):143-146.
- [20] 陈 威,杨亦霖,张爱国,等. 非饱和土壤中重金属污染物迁移机理分析[J]. 安徽大学学报(自然科学版),2010,34(5):98-103.

(上接第 236 页)

- [8] 祖皮艳木·买买提,海米提·依米提,吕云海. 于田绿洲典型区土壤盐分及盐渍土的空间分布格局[J]. 土壤通报,2013,44(6):1314-1320.
- [9] 陈亚宁,李卫红,陈亚鹏,等. 新疆塔里木河下游断流河道输水与生态恢复[J]. 生态学报,2007,27(2):538-545.
- [10] 郑 丹,陈亚宁,薛 燕. 新疆塔里木河下游断流河道输水对地下水变化的影响分析[J]. 干旱区地理,2004,27(2):216-220.
- [11] 芦艳玲,叶朝霞. 塔里木河下游地下水位对生态输水的响应[J]. 干旱区研究,2012,29(4):574-578.
- [12] 安红燕,叶 茂,徐海量,等. 塔里木河下游胡杨径向生长量对生态输水的响应[J]. 中国沙漠,2011,31(4):957-962.
- [13] 杨玉海,陈亚宁,李卫红. 新疆塔里木河下游土壤特性及其对物种多样性的影响[J]. 生态学报,2008,28(2):602-611.
- [14] 周洪华,陈亚宁,李卫红. 塔里木河下游绿洲-荒漠过渡带植物多样性特征及优势种群分布格局[J]. 中国沙漠,2009,29(4):688-696.
- [15] 叶朝霞,陈亚宁,李卫红. 塔里木河下游生态输水对地下水位影响的综合评价[J]. 干旱区资源与环境,2007,21(8):12-16.
- [16] 姚荣江,杨劲松,姜 龙,等. 基于聚类分析的土壤盐渍剖面特征及其空间分布研究[J]. 土壤学报,2008,45(1):56-65.
- [17] 李新国,赖 宁,陈蜀江,等. 开都河流域下游绿洲表层土壤盐分空间变异特征分析——以焉耆县为例[J]. 地理与地理信息科学,2014,30(1):105-109.
- [18] 杨红梅,徐海量,樊自立,等. 塔里木河下游表层土壤盐分空间变异和格局分析[J]. 中国沙漠,2010,30(3):564-570.
- [19] 胡克林,陈海玲,张源沛,等. 浅层地下水埋深、矿化度及硝酸盐污染的空间分布特征[J]. 农业工程学报,2009,25(S1):21-25.
- [20] 赵 军,刘焕军,隋跃宇,等. 农田黑土有机质和速效氮磷不同尺度空间异质性分析[J]. 水土保持学报,2006,20(1):41-44.
- [21] 付秋萍,张江辉,王全九,等. 塔里木盆地土壤盐分变化特征分析[J]. 自然科学进展,2007,17(8):1091-1097.
- [22] 陈永金,陈亚宁,刘加珍,等. 塔里木河下游地下水化学特征对生态输水的特征响应[J]. 地理学报,2005,15(1):15-21.