

# 土壤孔径分布对污染物迁移过程中 弥散系数的影响

李小平<sup>a</sup>, 朱伟<sup>a,b</sup>

(河海大学 a. 环境学院; b. 水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 弥散作用主要受土体孔隙结构影响, 基于孔隙结构特征对弥散作用的影响这一问题, 通过压汞实验确定土样孔径分布, 以水动力弥散理论为基础, 以3种不同粒径组分砂土作土样, 以氯化钠作为示踪剂, 进行一维土柱水动力弥散和扩散实验。并由实验结果计算出各土样的机械弥散和扩散系数, 得出以下结论: 随着特征孔径  $d_{60}$  或者不均匀系数  $P_u$  增大, 分子扩散系数只有很小程度的增加, 但机械弥散系数却有大幅度的增大, 而且扩散作用在整个水动力弥散作用中所占的比例也越来越小, 机械弥散受孔隙结构特征影响程度较分子扩散而言要大的多。

**关键词:** 污染物; 污染物迁移过程; 孔径分布; 砂柱实验; 弥散参数; 示踪剂

中图分类号: X53

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)02-0172-04

## Effect of distribution of soil pore size on dispersion coefficient in migration process of pollutant

LI Xiaoping<sup>a</sup>, ZHU Wei<sup>a,b</sup>

(a. College of Environment; b. National Engineering Research Center of Water Resources  
Efficient Utilization and Engineering Safety, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The role of dispersion is mainly affected by soil pore structure. Based on the problem, the paper determined the pore size distribution of sandy soil samples by mercury intrusion porosimetry (MIP). Based on the hydrodynamic dispersion theory, one dimensional sand column diffusion experiments were carried out in laboratory. Three sandy soils with different particle size distribution were used as the samples and NaCl solution was used as tracer material in the experiments. The mechanical dispersion coefficient and diffusion coefficient of each soil sample were calculated according to the experiment. The results show that with the increase of  $d_{60}$  or  $P_u$  coefficient, the coefficient of molecule diffusion increases little, but the coefficient of machinery dispersion has obvious increase, and the proportion of diffusion role in the whole role of hydrodynamic dispersion become smaller and smaller. The influence of pore structure characteristics on mechanical dispersion is greater than on molecule diffusion.

**Key words:** pollutant; migration process of pollutant; pore size distribution; sand column experiment; dispersion parameter; tracer reagent

随着经济的发展, 城市生活垃圾和各种工业垃圾数量剧增, 种类复杂。目前除少数国家外, 对固体废弃物的处置仍以填埋为主。固体废弃物通过自身分解和接受大气降水的淋滤会产生大量渗出液, 以间接和直接的方式污染土壤和地下水系统。

渗沥液在土体中的迁移过程主要是由对流和水动力弥散引起, 水动力弥散是由溶质在多孔介质中的机械弥散和分子扩散共同作用的结果, 因此, 水动

力弥散系数  $D$  可表示为分子扩散系数  $D'$  和机械弥散系数  $D''$  之和, 即  $D = D' + D''$ <sup>[1]</sup>。由于机械弥散是由流速不均一现象引起的, 通常认为机械弥散系数是流速的函数, DeSmedt 等在一维垂直土柱中对两种不同粒径的玻璃球进行实验, 发现弥散系数与平均孔隙流速呈线性关系, 即  $D_L = \alpha V$ , 其中  $\alpha$  为弥散度,  $V$  为平均孔隙流速<sup>[2]</sup>。张富仓等<sup>[3]</sup>测定壤土弥散系数时发现, 非饱和土壤水动力弥散系数值与溶质

收稿日期: 2013-12-02; 修回日期: 2013-12-24

基金项目: 巢湖重污染汇流湾污染控制技术与工程示范研究 (2012ZX07103-005); 水利部公益性行业专项项目 (201201015); 国家重点基础研究发展规划 973 项目 (2012CB719804)

作者简介: 李小平 (1987-), 男, 江西萍乡人, 硕士, 主要从事土体中污染物水动力弥散作用的研究。

通讯作者: 朱伟 (1962-), 男, 甘肃平凉人, 教授, 主要从事河湖污染控制、水质改善以及生态修复理论与技术等研究。

浓度无关,土柱装填的差异及土壤在湿润膨胀中闭塞空气才是数值差异的本质因素。郑西来<sup>[4]</sup>通过弥散试验测得的土样有效孔隙度仅为0.1,远比一般的孔隙度要小,说明参与水质弥散的孔隙是相对的大孔隙。王洪涛<sup>[5]</sup>指出分选好的介质弥散系数小,分选差的介质弥散系数大;均质介质中的弥散系数小,而非均质中弥散系数大。孔隙系统的存在在污染物迁移的水动力弥散作用过程中起着至关重要的作用,尚慢廷<sup>[6]</sup>等以 $\text{Br}^-$ 作示踪剂,研究粉砂壤土中大孔隙对溶质弥散的影响,发现含有大孔隙结构的原状土的水动力弥散系数值比扰动土大2个数量级。

已有研究对于水动力弥散系数的测定基本都建立在忽略分子扩散系数的基础上,并且孔隙对弥散作用的影响的研究大多定性在大孔隙。本文针对孔径分布对弥散作用的影响这一问题,先通过压汞实验确定土样孔径分布,并通过对水动力弥散系数和扩散系数的测定,经计算求解出机械弥散系数,进而分析孔径分布对弥散作用的影响。

## 1 材料和方法

### 1.1 实验装置

实验装置示意图见图1,扩散实验和弥散实验共

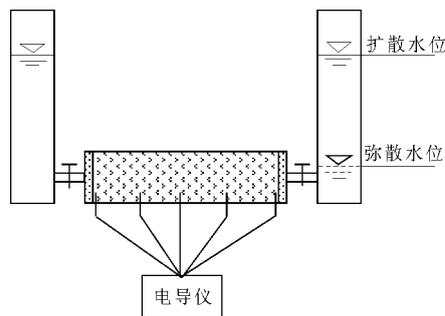


图1 实验装置示意图

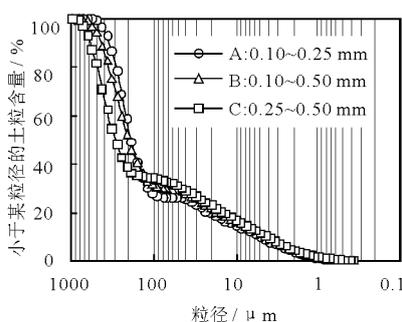


图2 土样粒径累积分布曲线

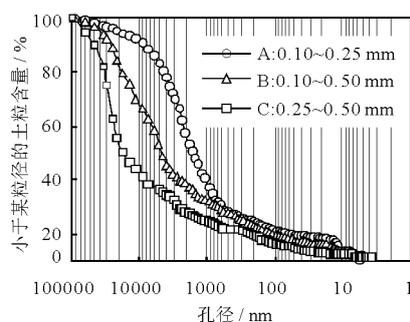


图3 土样孔径累积分布曲线

1.2.2 溶液 扩散溶液和渗透示踪剂均采用浓度为0.1 mol/L的NaCl溶液。动水作用下,土样对NaCl几乎没有吸附作用,可以忽略吸附项<sup>[7]</sup>。本试验需随时测试溶液浓度,考虑利用电导率替代测试浓度以进行求参。NaCl溶液浓度与其电导率之间有很好的线性关系,线性关系见图4,拟合方程为 $y = 260.27x + 0.6114$ ,相关系数 $R^2 = 0.9996$ 。

### 1.3 实验方法

1.3.1 分子扩散 在中间有机玻璃柱中填入土样并压实,保持密封,通过抽真空使土样饱和。在装置左端有机玻璃柱中加入扩散溶液,右端柱中加入蒸馏水,保持两端水头相等,使其在无水头差条件下进

用一套装置。中间为有机玻璃柱,左右加透水石,两端各添加一个有机玻璃柱。进行扩散实验时,中间土柱直径为10 cm,长度为20 cm,保持两端玻璃柱中水位持平,中间土柱中隔一段距离设置盐分传感器;进行弥散实验时,左边玻璃柱为定水头装置,为渗透试验提供水头压力 $H$ ,中间土柱直径为10 cm,长度为40 cm,出水处设置盐分传感器测定电导率。

### 1.2 实验材料

1.2.1 土样特性 将普通建筑用砂用标准筛筛出0.10~0.25 mm、0.10~0.50 mm、0.25~0.50 mm 3种粒径范围的细砂,将其以85:15的比例分别与粘土混和均匀,制成A、B、C 3种土样。3种土样粒径分布曲线见图2。

通过压汞实验得出3种土样孔径分布曲线如图3所示,如图所示为小于10 μm孔径所占比例,得出3种土样孔隙中10 μm以上孔径所占比例分别为A:9.2%,B:35.4%,C:63.5%。由此可以得出C土样大多数孔径都较大,且基本在10 μm以上,B土样孔径分布比较均匀,A土样相对较小。由该曲线可得出累计孔径为60%和10%时所对应的特征孔径 $d_{60}$ 和 $d_{10}$ ,并计算孔径分布不均匀系数 $P_u = d_{60}/d_{10}$ ,具体数据详见表1。

行扩散实验,从而排除机械弥散的干扰。在扩散距离为4、8、12、16、20 cm处分别设置盐分传感器测定其电导率,实验时间为20 d。

1.3.2 水动力弥散 同样装填土样并饱和,通过定水头装置向其提供恒定水头压力 $H = 1.6$  m,进行水动力弥散实验。在出水口处设置盐分传感器,定期记录其出水电导率值,绘制击穿曲线,待出水电导率值达到原溶液电导率值时停止实验。

### 1.4 参数计算原理

1.4.1 扩散系数计算公式 离子扩散浓度的对数值( $\lg C$ )与扩散距离的平方( $x^2$ )呈线性关系,只要得到该直线的斜率,就可以确定扩散系数 $D'$ :

$$\lg C = A - \frac{0.1086x^2}{D't} \quad (1)$$

$$D' = \frac{0.1086}{Kt} \quad (2)$$

式中:  $D'$  为扩散系数;  $x$  为扩散距离;  $C$  为浓度;  $A$  为常数;  $K$  为曲线斜率;  $t$  为扩散时间<sup>[8]</sup>。

1.4.2 弥散系数计算公式 根据一维弥散模型推导出水动力弥散系数的计算公式为:

$$D = \frac{1}{8} \left[ \frac{X - Vt_{0.16}}{\sqrt{t_{0.16}}} - \frac{X - Vt_{0.84}}{\sqrt{t_{0.84}}} \right]^2 \quad (3)$$

式中:  $D$  为弥散系数;  $X$  为入水口与出水口距离;  $V$  为平均渗流速度;  $t_{0.16}$ 、 $t_{0.84}$  分别为出水口渗出溶液与初始溶液浓度比值分别为 0.16 和 0.84 时所对应的渗透时间<sup>[9]</sup>。

因机械弥散系数  $D'' = D - D'$ , 由此可计算得出各土样机械弥散系数  $D''$ 。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 3种不同粒径分布土样分子扩散试验结果

扩散浓度的对数值与扩散距离平方关系见图 5, 扩散浓度的对数值与扩散距离平方有较好线性关系, 且曲线拟合效果较好, 充分说明理论和实际相吻合。随着土样组分粒径的增大, 曲线斜率有一定程度的降

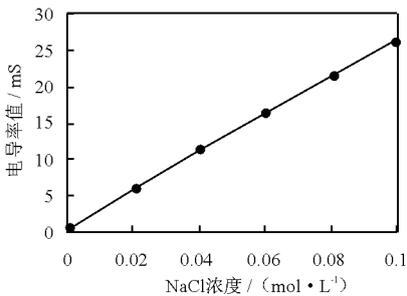


图4 NaCl 溶液浓度与电导率关系曲线

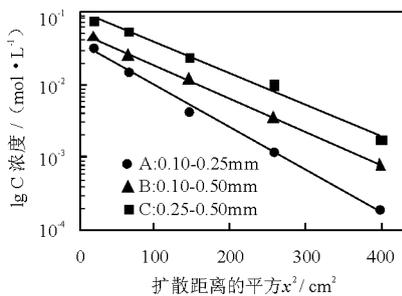


图5  $\lg C - x^2$  关系拟合曲线

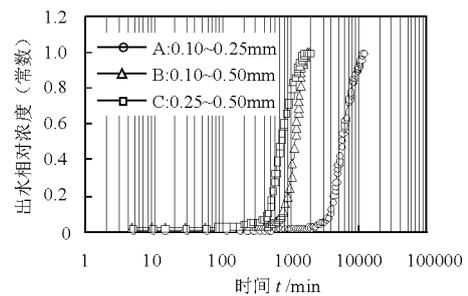


图6 示踪剂击穿曲线

### 2.3 孔径分布与弥散作用关系

分别取 3 种土样的 5 个特征孔径  $d_{40} \sim d_{80}$ , 对比特征孔径与机械弥散系数的关系见图 7(a), 特征孔径与各土样机械弥散系数都呈现正相关关系, 但曲线弯曲方向有明显变化, 即机械弥散系数增长速率由  $d_{40}$  逐渐减小变化至  $d_{80}$  的逐渐增大, 其中  $d_{60}$  呈较好的线性关系; 选取  $d_{60}$  与扩散系数建立关系见图 7(b), 扩散系数随  $d_{60}$  增加仅有小幅度的增长。

由表 1 可知, 土样组分孔径越大, 不均匀系数  $P_u$  随之增大,  $P_u$  越大, 表示孔径分布范围越大, 孔径大小分布也就越不均匀。图 8 为不均匀系数分别与分子扩散作用和机械弥散作用的关系, 随着  $P_u$  的增

低, 但基本相差不大。由该拟合曲线确定出的斜率计算各土样的扩散系数, 计算结果详见表 1。

图 6 为示踪剂击穿曲线, 可以看出: 3 组实验变化规律基本一致, 即开始阶段示踪剂电导率随时间变化比较缓慢, 中间出现明显拐点, 变化速率有明显的增加, 最后至实验近结束时又趋于平缓, 而且土样组分粒径越大的出现拐点时间越早。本次试验共用时 8 d, A 土样出水口所测示踪剂电导率在 198 h 趋于稳定, 即示踪剂完全穿透土柱, B 土样出水口电导率在 1 860 min 趋于稳定, C 土样出水口电导率在 1 680 min 趋于稳定, 由示踪剂击穿曲线确定各实验  $t_{0.16}$ 、 $t_{0.84}$ , 并由此计算水动力弥散系数, 结果详见表 1。

### 2.2 参数的计算

根据实验测定结果, 按照上述参数计算原理计算各实验的弥散参数, 计算结果列于表 1。

对比 3 组扩散实验计算结果发现: 3 种土样扩散系数有一定量的增大, 增大幅度非常小, 都在  $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  数量级范围内; 机械弥散系数值比扩散系数大一个数量级, 并随着特征孔径  $d_{60}$  的增大有明显的增加, 增大幅度较扩散系数而言要大。另外扩散系数在水动力弥散系数中所占比例很小, 并且随着  $d_{60}$  的增大其所占比例也越来越小。

加, 机械弥散系数有明显增大, 呈指数关系, 即孔径分布愈不均匀, 机械弥散作用愈大; 另外  $P_u$  越大, 分子扩散系数仅有较小幅度的增加, 而且扩散作用在整个水动力弥散作用中所占的比例也越来越小。

## 3 讨论

随着特征孔径或者不均匀系数的增大, 分子扩散系数都有较小幅度的增长, 理论上扩散作用主要受浓度梯度、含水率、温度等因素影响<sup>[10-11]</sup>, 与土样孔隙结构关系甚微。分析导致此结果可能原因如下: 本实验采用不同粒径范围细砂与粘土混合制成土样, 经测定 3 种土样孔隙率分别为 A: 41.2%, B:

表 1 参数计算结果

土样编号	$d_{60}$	$d_{10}$	$P_u$ (常数)	平均流速	$t_{0.16}$	$t_{0.84}$	$D'$	$D$	$D''$	$D'/D$ (常数)
A	2.56	0.035	73.14	$0.171 \times 10^{-2}$	4987	10105	$1.097 \times 10^{-9}$	$0.945 \times 10^{-8}$	$0.849 \times 10^{-8}$	0.101
B	9.02	0.085	106.12	$0.983 \times 10^{-2}$	913	1481	$1.381 \times 10^{-9}$	$2.352 \times 10^{-8}$	$2.387 \times 10^{-8}$	0.061
C	25.87	0.183	141.37	$1.323 \times 10^{-2}$	527	1162	$1.500 \times 10^{-9}$	$6.924 \times 10^{-8}$	$6.700 \times 10^{-8}$	0.032

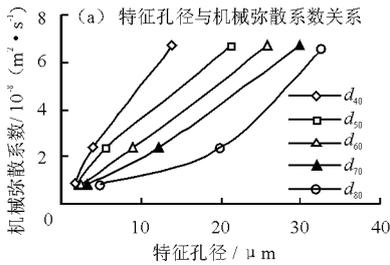


图 7 特征孔径与机械弥散系数、分子扩散系数的关系

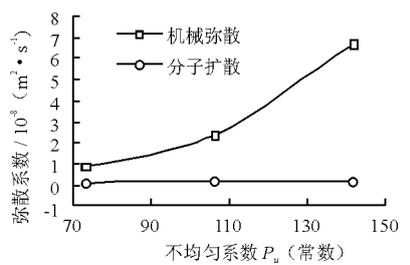
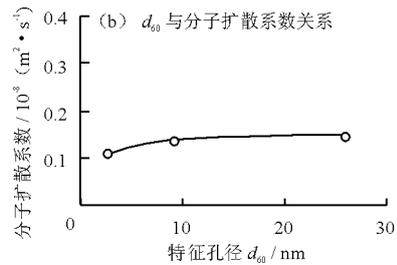


图 8 不均匀系数与弥散作用关系

42.8%, C:44.7%, 即土样中存在的孔隙体积大小有一定差异,取一个扩散断面,土样孔隙率越小,能为扩散作用提供的扩散通道就越少,因此分子扩散系数也就越小。

机械弥散系数随着特征孔径或者不均匀系数的增大有很大幅度的增加,由于机械弥散主要与土壤质地和结构有关,特征孔径越大,会使土壤中的水分沿其迅速地运移,而土样水分中的溶质也会随着水分的迅速运移而快速扩大运移范围,所以孔径越大的土样机械弥散系数也会越大;土样中的水分总是向着水土势降低的方向移动,而大孔隙具有较小的土水势,所以土壤水将优先从大孔隙通过,又由于大孔隙中土体对水分运动的阻力非常小,所以其运动速度非常快,这就导致了特征孔径越大的土样平均孔隙流速也越大,水动力弥散系数与平均孔隙流速成正比,所以特征孔径越大的土样水动力弥散系数也越大。

### 4 结 语

(1)随着土样组分孔径的增大,3种土样扩散系数小幅度的增加,且都在  $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  数量级范围内。机械弥散系数比扩散系数大一个数量级,并随着组分粒径的增大有明显的增加,增大幅度较扩散系数而言要大很多。

(2)特征孔径与机械弥散系数呈现正相关关系,且机械弥散系数增长速率由  $d_{40}$  逐渐减小变化至  $d_{80}$  的逐渐增大,其中  $d_{60}$  呈较好的线性关系;扩散系数随  $d_{60}$  增加仅有小幅度的增长。

(3)随着不均匀系数  $P_u$  的增加,机械弥散系数有明显增大,呈指数关系,即孔径分布愈不均匀,机

械弥散作用愈大; $P_u$  越大,分子扩散系数仅有较小幅度的增加,而且扩散作用在整个水动力弥散作用中所占的比例也越来越小。因此,机械弥散受孔隙结构影响程度较分子扩散而言要大的多。

### 参考文献:

- [1] Bear J. (李竞生,陈崇希译). 多孔介质流体动力学 [M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1983.
- [2] De Smedt F, Wierenga P J. Mass transfer in Porous media with Inunobile water [J]. Journal of Hydrology, 1979, 41 (1): 59 - 67.
- [3] 张富仓,康绍忠,潘英华. 饱和 - 非饱和土壤中吸附性溶质水动力弥散实验研究 [J]. 水利学报, 2002, 33 (3): 84 - 90.
- [4] 郑西来,钱会,杨喜成. 地下水含水介质的弥散度测定 [J]. 西安工程学院学报, 1998, 20 (4): 33 - 36.
- [5] 王洪涛. 多孔介质污染物迁移动力学 [M]. 北京:高等教育出版社, 2008.
- [6] 尚慢廷,冯杰,刘佩贵. 大孔隙对土壤水动力弥散系数影响的实验研究 [J]. 灌溉排水学报, 2009, 28 (5): 52 - 55.
- [7] 杨金忠. 一维饱和与非饱和水动力弥散的实验研究 [J]. 水利学报, 1986, 17 (3): 10 - 20.
- [8] 席永慧,任杰,胡中雄. 污染物离子在粘土介质中扩散系数的测定 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2003, 31 (5): 595 - 599.
- [9] 王全九. 土壤水动力弥散系数研究 [J]. 水资源与水工程学报, 1991, 2 (3): 42 - 46.
- [10] 时新玲,李志军,王锐. 土壤磷扩散的影响因素研究 [J]. 水土保持通报, 2003, 23 (5): 15 - 18.
- [11] Du Yanjun, Liu Songyu. Some factors controlling diffusive transport of potassium ion through clayey soils [J]. Journal of Southeast University, 2006, 22 (1): 106 - 111.