

大孔隙数量对土壤水和溶质运移影响研究

杨梦¹ 张振坤^{2*}

1 安徽省水利发展规划研究中心 2 安徽省水文局

DOI:10.12238/hwr.v8i12.5897

[摘要] 本论文通过开展室内扰动土大孔隙优势流试验,研究最基本的大孔隙结构因子,大孔隙直径、数量及其组合变化对土壤水分和溶质运移影响。通过试验获得了大孔隙土柱流速曲线、溶质穿透曲线、溶质穿透特征指标等结果。表明:土壤中大孔隙直径和数量越大,出流速率越大,初始穿透时间越早,初始穿透浓度越高,流速曲线因土壤非平衡结构均呈现出不同程度的波动性;因优势流通道的存在和溶质早期穿透现象,含大孔隙土柱溶质穿透曲线均呈现出双峰特征,不对称性和拖尾现象。

[关键词] 优势流; 人造大孔隙; 大孔隙直径; 大孔隙数量; 溶质穿透曲线

中图分类号: TV431+.4 文献标识码: A

Effect of large pore number on soil water and solute transport

Meng Yang¹ Zhenkun Zhang^{2*}

1 Anhui Provincial Water Resources, Development, Planning and Research Center

2 Anhui Provincial Hydrology Bureau

[Abstract] This paper studies the influence of the most basic large pore structure factor, the change of large pore diameter, quantity and its combination by carrying out the test of large pore advantage flow in indoor disturbed soil. The results of flow velocity curve, solute penetration curve and solute penetration characteristic index are obtained. It shows that the larger the diameter and quantity of large pores in the soil, the larger the outflow rate, the earlier the initial penetration time, and the higher the initial penetration concentration, the degree of fluctuation due to the non-equilibrium structure of the soil, the dominant circulation channel and the early penetration of solute, the penetration curve of solute with large pore soil column showed bimodal peaks, asymmetry and trailing.

[Key words] dominant flow; artificial large pore; large pore diameter; large pore number; solute penetration curve

优势流又称优先流、非均匀流,是土壤中常见和重要的水流运动和溶质运移方式^[1]。随着近些年工农业的快速发展,地下水污染问题日益加剧。研究表明,我国农业区地下水中的硝态氮污染十分严重,近些年来在地下水中检测到的农药种类以及化学物质残留越来越多^[2]。优势流种类繁多,其中大孔隙流是众多因素中最重要和最活跃的因素^[3]。土壤大孔隙的存在可以造成土壤优先水流和溶质优先迁移,成为水分和化学物质快速、远距离运移的主要甚至可能是唯一的通道^[4]。影响大孔隙流的因素主要有大孔隙直径、数量、位置、土壤质地和耕作方式等。综合国内外研究进展发现,关于大孔隙流水分和溶质运移的实验总共分为两类,一类为水分及溶质在含有大孔隙土壤中的水流实验,另一类为确定大孔隙结构特征的实验。其中第一类实验按实验地点的不同,可以分为室内实验和田间实验。田间实验更接近实际条件,但田间土壤结构不均匀,包含各种类型的大孔隙,观

察到的优先流可能是不同来源的综合贡献,同时也受限于现场实验仪器,不能控制实验条件和进行重复实验。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 供试土壤。本试验采用安徽省铜陵羊耳山附近壤粘土,土壤机械组成见表1,基本物理性质见表2。

表1 土壤机械组成

粒径(mm)	2-0.05	0.05-0.005	<0.005
含量(%)	12.8	51.8	35.4

表2 土壤基本物理性质

干容重 ρ_d (g/cm ³)	比重 ρ (g/cm ³)	孔隙度(%)	饱和含水率(%)	土壤质地
1.3	2.54	49	37.43	壤粘土

1.1.2 试验装置。试验装置系统主要包括能提供定水头的供水装置马氏瓶,亚克力板制作的试验土柱^[5],收集装置以及人造大孔隙。土柱装置选用亚克力制作的圆柱(内径194mm,高450mm),土柱上部设有连接马氏瓶的进水口,试验过程中控制6cm的定水头,土柱底部设有多孔底板和出流液收集装置。土柱顶部铺设2cm厚的石英砂,使溶液能够均匀入渗且减少土柱表面扰动,底部铺设颗粒级配良好的石英砂作为反滤层,起到滤水挡土作用。

大孔隙数量试验方案见表2,其中方案 I 均质土柱作为试验对照组。大孔隙数量试验方案中,大孔隙数量设置为1、4和16个,直径均为1mm。本次试验中,大孔隙均插在同一位置。

表3 试验方案

方案	I	II	III
大孔隙数量(个)	0	1	1、4、16

1.2 试验方法

将烘干后的供试土样碾碎,过1mm筛,在土样表面均匀喷水控制含水量在12%左右以减少压实后土柱内部裂隙的产生。土柱边壁使用砂纸打磨并涂抹凡士林以减少边壁流现象,然后按照 $1.3\text{g}/\text{cm}^3$ 干容重压实土壤。土柱装填完成后按照图2所示大孔隙位置插入不锈钢棒,缓慢拔出后注入一定浓度的聚丙烯酰胺^[6],它是一种高分子水溶性聚合物,能够维持人造大孔隙的稳定,静置6小时等待土壤完全吸收后将土柱放入水箱饱和24小时。试验方案 I 中均质土柱作为试验对照组,不需要插入大孔隙,其余条件均与含大孔隙的试验组相同。

试验开始前用去离子水淋洗土柱以降低土壤内初始溶质浓度。污染物采用 $9.53\text{g}/\text{L}$ 的NaBr ($9.4\text{mS}/\text{cm}$) 溶液,使用一次性脉冲式的施加方式,在试验开始时加入6cm定水头所需要的污染液,后用马氏瓶控制6cm恒定水头。试验过程中每10分钟收集一次渗滤液,同时记录水量和溶质浓度,由于电导率与溶液中的离子浓度成正比,为了便于操作,用电导率仪测定的电导率代替Br离子浓度。

2 结果与分析

2.1 出流速率分析

含不同数量大孔隙土柱和均质土柱出流速度如图1所示,其中纵坐标为土柱单位流速。表3为各土柱出流速度的统计参数,平均值反映了土柱出流的平均速度,标准差反映了各速度值的离散程度,变异系数反映了大孔隙出流的不稳定性。

表4 不同数量大孔隙土柱出流速度统计参数

孔径 流速	均质	1mm	4个1mm	16个1mm
最小值	0.008	0.014	0.016	0.046
最大值	0.012	0.017	0.053	0.122
平均值	0.009	0.015	0.024	0.072
标准差	0.001	0.001	0.009	0.022
变异系数	0.070	0.070	0.358	0.302

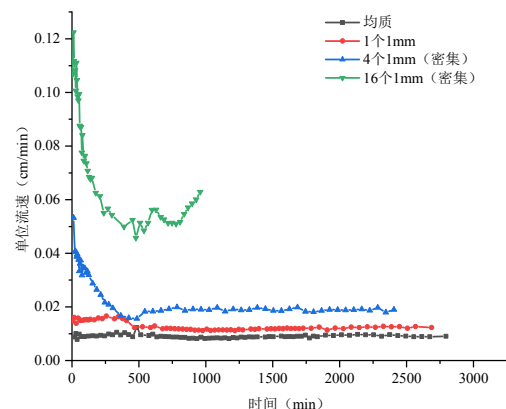


图1 不同数量大孔隙土柱出流速度

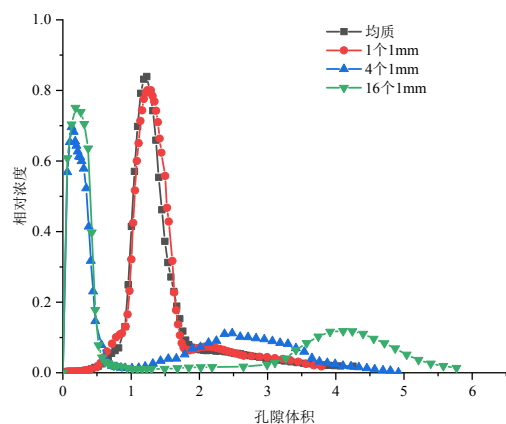


图2 不同数量大孔隙土柱溶质穿透曲线

从图3中可以看出含大孔隙土柱出流速率均高于均质土柱,含大孔隙土柱出流速率约为均质土柱的数倍,这是典型的优势流现象,即使大孔隙只占土柱的一小部分,却对土柱出流起到很大作用。从图4中可以看出,和含不同直径大孔隙土柱一样,所有含大孔隙的土柱出流速度均高于均质土柱,随着大孔隙数量的增多,出流速度显著增加,同时呈现出不稳定的波动特征,这点也可从表3中的变异系数看出。多孔土柱变异系数是单孔土柱的3-5倍,含4个1mm大孔隙土柱和含16个1mm大孔隙土柱出流速度在试验前期随时间变化大,原因是试验前期大孔隙的不稳定,待大孔隙稳定后,流速趋于平缓。

2.2 溶质穿透过程分析

与大孔隙结构不同,优势流并没有一个公认的定义,因此用来描述土壤流动和溶质运移过程的标准技术之一就是穿透曲线,能够通过在不同时刻土壤中的一个或多个位置监测出流液的水量和浓度来获取土壤水和溶质流动的时空变化,以此确定流动模式。含不同数量大孔隙土柱和均质土柱溶质穿透曲线如图1和图2所示,通常溶质穿透曲线与通过土壤样本的孔隙体积的数量有关,因此选用横坐标为相对孔隙体积即出流液累积体积和孔隙体积的比值(V/V_0),纵坐标为相对溶质浓度即出流液浓度和初始浓度的比值(C/C_0)。表1为各土柱穿透特征指标。

表5 不同数量大孔隙土柱溶质穿透特征指标

特征	均质土柱	1mm	4个1mm	16个1mm
初始穿透时间(min)	394	327	5	3
初始穿透浓度(C/C ₀)	0.033	0.028	0.56	0.6
峰值穿透体积(V/V ₀)	1.23	1.24	0.128	0.184
峰值穿透浓度(C/C ₀)	0.84	0.8	0.70	0.75

表4中可以看出,大孔隙数量越多,初始穿透时间越早,初始穿透浓度越高,表明在含大孔隙的土壤中溶质早期即通过优势通道出流,而在小孔隙的土壤中由于出流速度较慢且大孔隙内溶质由于和基质域之间存在浓度差而发生侧向交换,导致数个小时之后才检测到浓度的上升。

从图1中可以看出,穿透曲线共分为两种类型,一种是呈现接近于正态分布的单峰曲线(均质土柱),一种是具有两个峰值的双峰曲线(含大孔隙土柱)。溶质早期穿透现象是穿透曲线出现双峰现象的原因,初始浓度上升剧烈,脉冲式添加的溶质几分钟之内通过大孔隙快速向底部迁移,因此出现了穿透曲线的第一个峰值,为大孔隙对溶质的贡献,随着基质中存在的溶质被淋洗出来,优先水流中的浓度降低到接近于零,但基质中的溶质浓度还是很高,逐渐被淋洗出来产生了第二个峰值。但需要注意的是,在产生第二峰值左右基质域中的溶质由两部分组成,一部分是直接来自土壤顶部通过基质域下渗的溶质,一部分是因为初始大孔隙域溶质浓度较高,与大孔隙周围的土壤基质由于机械弥散和分子扩散发生侧向交换的溶质,严格意义上讲,由于侧向交换而进入周围基质的溶质也属于大孔隙流的贡献。

3 结论

本文在选取了代表性大孔隙结构特征的基础上,通过室内人造大孔隙土柱模拟试验研究了大孔隙数量对水分及溶质运移

的影响,得出的主要结论如下:

含大孔隙的土柱的溶质穿透曲线都呈现出溶质早期穿透、双峰、不对称性和拖尾现象;随着土壤中大孔隙数量增多,优势流程度越大。

【参考文献】

[1]盛丰,张利勇,吴丹.土壤优先流模型理论与观测技术的研究进展[J].农业工程学报,2016,32(06):1-10.

[2]刘宏斌,张云贵,李志宏.北京市平原农区深层地下水硝酸盐氮污染状况研究[J].土壤学报,2005(03):411-418.

[3]Alaoui A,Goetz B.Dye tracer and infiltration experiments to investigate macropore flow[J].Geoderma,2008,144:279-286.

[4]Germann P F, Beven K. Kinematic Wave Approximation to Infiltration Into Soils With Sorbing Macropores[J]. Water Resources Research,1985,21(7):990-996.

[5]Arora B, Mohanty B P, McGuire J T. Inverse estimation of parameters for multidomain flow models in soil columns with different macropore densities[J].Water Resources Research, 2011,47.

[6]Larsbo M,Koestel J, Jarvis N. Relations between macropore network characteristics and the degree of preferential solute transport[J].Hydrology and Earth System Sciences,2014,18(12): 5255-5269.

作者简介:

杨梦(1995—),女,汉族,河南省舞阳县人,硕士学位,专业技术岗,初级工程师,水工结构,安徽省水利发展规划研究中心。

张振坤(1995—),男,汉族,安徽省阜阳市阜南县人,硕士研究生,科员,地下水,安徽省水文局。