

多孔介质中非均匀流动特性的染色示踪试验研究

王 康¹, 张仁铎², 缴锡云³

(1. 武汉大学水利水电学院水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072; 2. 中山大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510275; 3. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 通过土壤染色剂进行的 4 组试验, 对不同介质结构条件下的水流和溶质非均匀运动规律, 非均匀流动变异信息分布特征关系以及全局性非均匀流动示踪方法进行了研究。结果表明, 即使在相对比较均匀的介质条件下, 流动也表现出明显的非均匀特性; 对数正态分布能够较好的反映水流的运动分布模式, 相比水流运动, 溶质的运动和分布规律明显不同, 表现出更多的不确定性和变异性。

关键词: 染色示踪剂; 多孔介质; 图像标准化; 非均匀流动; 浓度分布模式

中图分类号: P641.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2007)05-0662-06

非饱和土壤是保证农业产量, 维持和改善森林、草原系统质量的基础, 而同时许多污染物经过非饱和土壤进入地下水而造成难以治理的污染。由于多孔介质高度的空间变异性和各向异性, 非饱和土壤中水流和溶质运移的研究十分具有挑战性, 具体表现在: 流动的尺度特性, 各向异性和高度非线性。介质的空间结构特性和流体运动的非线性的结合将导致不均匀的流体运动途径, 形成指状流^[1], 并且即使在均质的土壤中, 流动的非线性(或者非稳定性)也将会导致指状流的出现^[2], 并且指状流还在不同的尺度下发生^[3]。为了表征多孔介质中非均匀流动特性, 本文采用土壤染色示踪剂, 在不同的土壤结构条件下进行了 4 组试验, 对多孔介质中非均匀流动特性进行观测, 在此基础上研究和探讨不同结构介质条件下的水流和溶质非均匀运动规律, 以及水流和溶质非均匀运动模式变异信息分布特征关系。

1 田间试验

田间试验于 2005 年 4 月~ 8 月在日本鸟取大学干燥地研究中心进行。试验设计如图 1(a) 所示。试验区域控制面积为 $D_x \text{ cm} \times D_y \text{ cm}$, 试区周围 50 cm 的区域作为保护区, 保护区处理与试区相同。通过水箱供水的 Sunrisansui 微喷系统形成入渗上边界条件, 试验前, 检验并调整了微喷系统的喷洒均匀度, 使得试验区域的水流入渗边界条件比较均匀。将地表的植物用剪刀小心的剪去, 并尽可能的不破坏原状土结构。试验开始前在保护区的一侧开挖了一个工作剖面, 并取样测定土壤初始含水率和电导度 EC 值。在水箱中注入浓度为 4 g/L 的 FCF 染色剂溶液和 4 g/L 的 Cl^- 混合溶液, 通过微喷系统均匀的喷洒到地面, 喷洒强度 0.015 mm/s, 喷洒时间 40 min。染色水流完全入渗后, 用防水和隔热材料将试验区覆盖以防止表层水分蒸发。沿 x 方向逐层挖取土壤, 形成垂直方向($y-z$ 方向)的剖面后, 用 Canon Power Shot S50 数码照相机记录水流运动所形成的染色分布模式, 剖面间距为 5~ 10 cm。在一些选定的剖面上(图 1(b) 所示), 取样测定土壤含水率和电导度 EC 。实验在白天进行, 为保证照相的质量, 用白色的半透明树脂板对自然光线进行了散射^[4]。

收稿日期: 2006-07-12; 修订日期: 2006-10-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50528910, 50609019, 50578127); 湖北省自然科学基金资助项目(2006ABA239)

作者简介: 王 康(1975-), 男, 河北霸州人, 副教授, 博士, 主要从事地下水、土壤水动力学理论研究。

E-mail: wwang kang@163.com

在砂土条件下进行了 4 组试验: 试验 I 在休耕地上进行, 2000 年夏季作物收获之后就没有进行过任何农业行为; 试验 II 在常耕地进行, 2005 年 3 月对表层 0~ 30 cm 深度进行了机械化翻土和平整; 试验 III 在凹凸不平的地表条件下进行; 试验 IV 所在的地点生长着繁茂杂草, 相比其它实验, 试验 IV 地下 0~ 30 cm 深度根系最为发达。试验 I 和试验 II 控制面积为 400 cm × 300 cm ($D_y \times D_x$), 试验 II 和试验 IV 控制面积为 300 cm × 200 cm ($D_y \times D_x$)。各试验喷洒强度, 喷洒时间, 示踪剂浓度等完全相同。

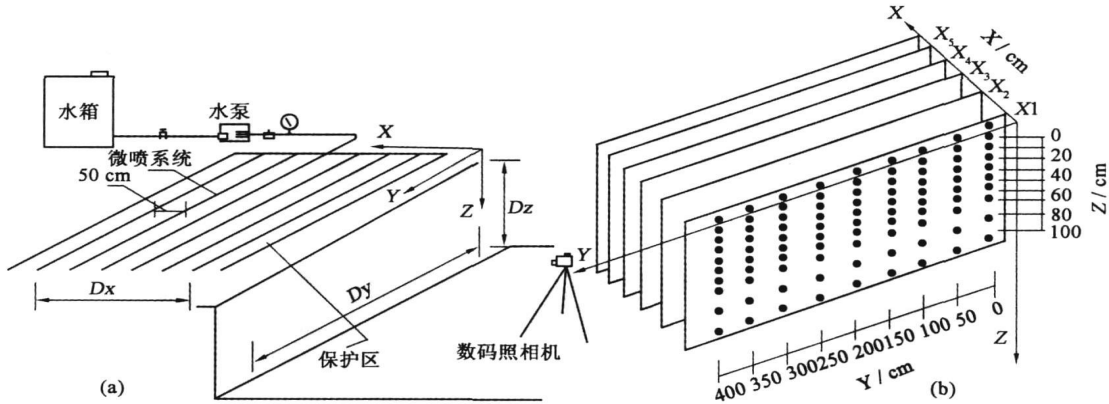


图 1 田间试验示意图

Fig. 1 Diagram of the experimental setup

2 非均匀流动模式分析

2.1 全局性流动信息提取

非均匀流动信息以数字图像的方式被记录下来, 须通过图像分析的方法, 根据图像的颜色模式提取水流运动(对是否染色进行判断)和溶质迁移信息(浓度分布)。由于试验条件的限制, 剖面在不同的时间形成, 对各个剖面进行照相的时间是不同的, 因此所得到的图像的颜色模式是不同的, 主要表现在两个方面: 一是由于照相时, 阳光照射方向和角度不同, 造成不同位置处的光线强度是不同的, 尽管在试验时, 也采用了无色半透明树脂版对阳光进行了散射, 但是为了保证试验数据的一致性, 仍然需要考虑外界光线强度不同所造成的影响; 二是由于试验条件和试验方法的限制, 必须在不同的时间内对所形成的染色剖面进行照相, 而即使对于同一个物体, 外界光线变化情况下照相得到的颜色模式也是不相同的, 因而必须进行标准化处理, 这样, 所得到的数据才有可比性。与之对应, 标准化处理包括照相条件一致性调节和颜色模式调节两个方面: 首先将图像从 RGB (三原色) 模式转换为 HSV 模式, 对于转化为 HSV(色相)模式的图像, 提取四周边框位置的亮度 V 值, 并计算其平均值 \bar{V} ; 进而计算图像各像素位置 (x, y) 的 $\bar{V}/V(x, y)$, 并认为在 x 或者 y 方向的 $\bar{V}/V(x, y)$ 关系表现出线性关系, 采用最小二乘法拟合这种线性关系, 得到各个像素位置的拟合值 $\hat{V}(x, y)$; 将图像各像素的亮度值乘以修正值 $V(x, y) \times \hat{V}(x, y)$, 对图像的亮度进行调整; 保持图像的 H 和 S 值不变, 调整 V 值后, 重新转换为 RGB 模式, 这样, 就完成了图像的照相条件标准化过程。可以认为, 调整后的图像是在同一个外界条件下照相得到的。图像标准化处理后, 采用 Baveye et al.^[5] 提出的临界值的方法将剖面染色模式照片转化为染色(黑色)和未染色(白色)二元信息, 提取非均匀水流运动模式。并分别配置 0.1~ 4.0 g/L 浓度的染色剂溶液(步长 0.1 g/L), 在原状土条件下, 将土壤充分染色, 得到不同浓度的 RGB 颜色模式, 在此基础上拟合得土壤染色 RGB 模式和浓度之间的关系为^[6]

$$\log C = 3.4824 - 0.01415R - 0.04456B - 0.00016R^2 + 0.00028G^2 \quad R^2 = 0.9872 \quad (1)$$

式中 C 为土壤染色浓度; R 、 G 、 B 分别为染色模式的红色、绿色和蓝色通道值。

2.2 水流运动非均匀特性分析

图 2(a) ~ (d) 分别为试验 I ~ 试验 IV, $X = 170 \text{ cm}$ 位置剖面土壤水分运动模式(染色模式)的比较(图中 Z_{\max} 为相应剖面最大染色入渗深度)。4 组试验中, 土壤水流的运动均表现出明显的非均匀流动特性, 仅在表层 5~10 cm 范围内土壤被完全染色, 随后染色比例迅速下降。各剖面之间水流运动模式也表现出明显的差异, 4 组试验最大入渗深度, 50% 染色深度的比较如表 1 所示, 介质结构相对均匀的常耕地条件下进行的试验 II 的 50% 染色深度和最大染色入渗深度的比值明显的小于其它 3 组试验, 而在凹凸不平地面进行试验 III 染色覆盖面积下降速度最快, 染色入渗深度最大; 最大染色深度随着 50% 染色深度的减小而表现出增加的趋势。

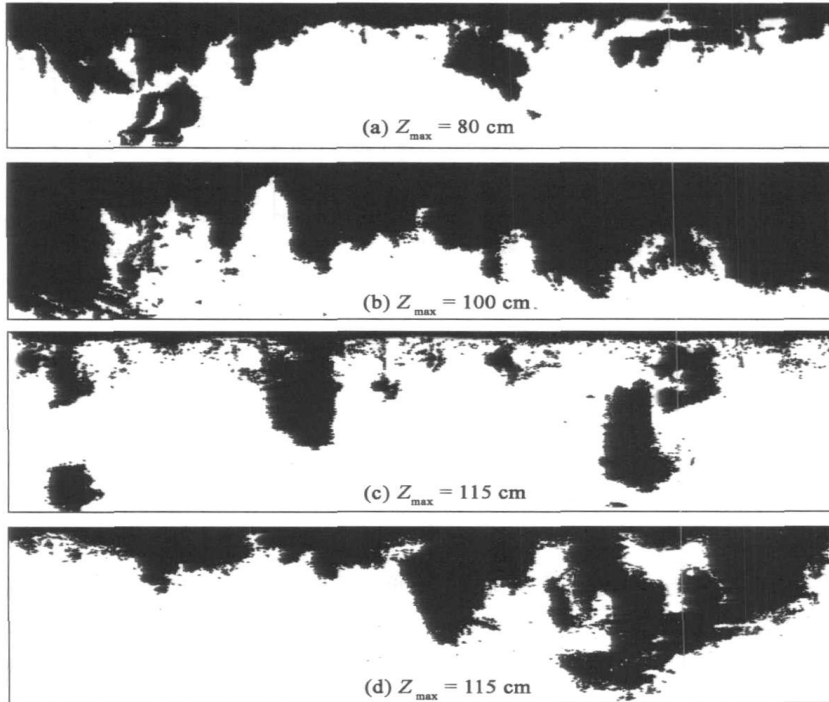


图 2 各试验不同剖面入渗模式的比较

Fig 2 Comparison of dyed patterns for each experimental plot

由图 2 中可知, 最大入渗深度以上的区域并没有完全被染色。为了特征水流运动的非均匀特性, 引入实际入渗深度的概念, 定义为

$$Z_{Act}(x, y) = \sum_{i=1}^k \beta \Delta Z_i(x, y) \quad (2)$$

式中 $\Delta Z_i(x, y)$ 为 (x, y) 位置第 i 层(水平层)的厚度, 当该处被染色时 β 为 1, 反之, β 为 0。 $\Delta Z_i(x, y)$ 和 β 值都可以通过剖面染色分布信息直接得到。最大染色深度分布和实际染色深度概率分布的比较如图 3 中实线和灰线所示, 可以看出, 对于 4 组试验的最大染色入渗深度和实际入渗深度的概率分布, 都基本满足对数正态分布规律。近似的认为水流运动的非均匀性表现在水平方向和垂直方向, 垂直方向的非均匀性主要表现在最大入渗深度以上的区域没有被完全染色则是两个方向非均匀流动所共同造成的, 因此, 将最大染

表 1 流动非均匀特性特征参数比较

Table 1 Comparison of parameters used to characterize heterogeneous flow pattern

试验组号	最大入渗深度 / cm	50% 染色比例深度 / cm	σ_{\max}	σ_{act}	最大入渗深度 / 50% 染色比例深度
试验 I	95.4	23.4	1.268	1.187	4.07
试验 II	89.0	49.8	1.198	1.141	1.78
试验 III	134.1	8.4	1.763	1.178	15.9
试验 IV	115.9	12.3	2.065	1.925	8.60

色入渗深度分布的离散系数 σ_{\max} 和实际入渗深度分布的离散系数 σ_{act} (表 1) 作为评价流动非均匀性的指标, 由于实际入渗深度分布在一定程度上平均了水平方向的流动变异性, 因此最大入渗深度分布的离散系数大于实际入渗深度分布的离散系数, 对于在常耕地上所进行的试验 I, 流动特性相对比较均匀, σ_{\max} 和 σ_{act} 最小, 且二者较为接近。而流动表现出明显非均匀特性的试验 II 和试验 IV, σ_{\max} 和 σ_{act} 较大, 且差异比较明显。

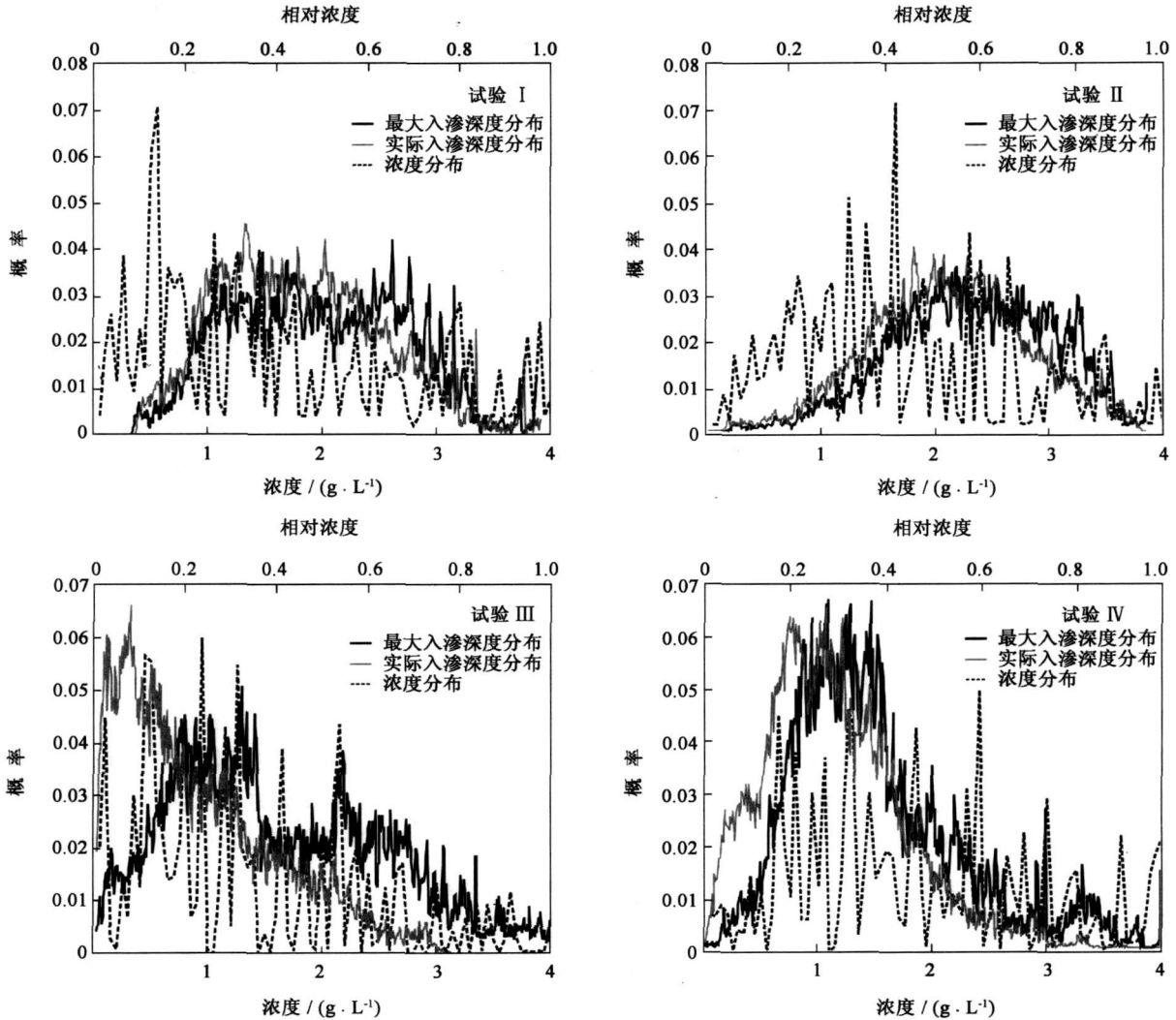


图 3 最大染色深度分布, 实际染色深度和浓度的概率分布

Fig. 3 Probability distribution of maximum dyed infiltration depths, actual dyed infiltration depths and concentration for plot I to plot IV

2.3 溶质运动非均匀特性分析

图 4 为将 4 组试验 $X = 170 \text{ cm}$ 位置剖面土壤染色 RGB 模式根据 (1) 式转化为浓度分布等值线图。可以看出, 4 组试验浓度分布模式完全不同。尽管总体来说, 染色浓度分布表现出随深度增加而减小的趋势, 但在 60~100 cm 深度仍然可以观测到较大浓度的染色区域。对于整个剖面, 或者指状流通道中, 无论是浓度的递减变化速度, 还是分布特征, 都各不相同, 无法用同一的规律进行描述。各试验浓度的概率分布如图 3 中虚线所示, 可以看出, 尽管水流入渗相对均匀的试验 II 浓度的概率分布接近对数正态分布, 但试验 I, 试验 II 和试验 IV 的浓度分布规律较为复杂, 浓度概率分布出现了多个锋值, 表明相比水流运动(染色模式), 浓度的分布表现出更大的变异性 and 不确定性。

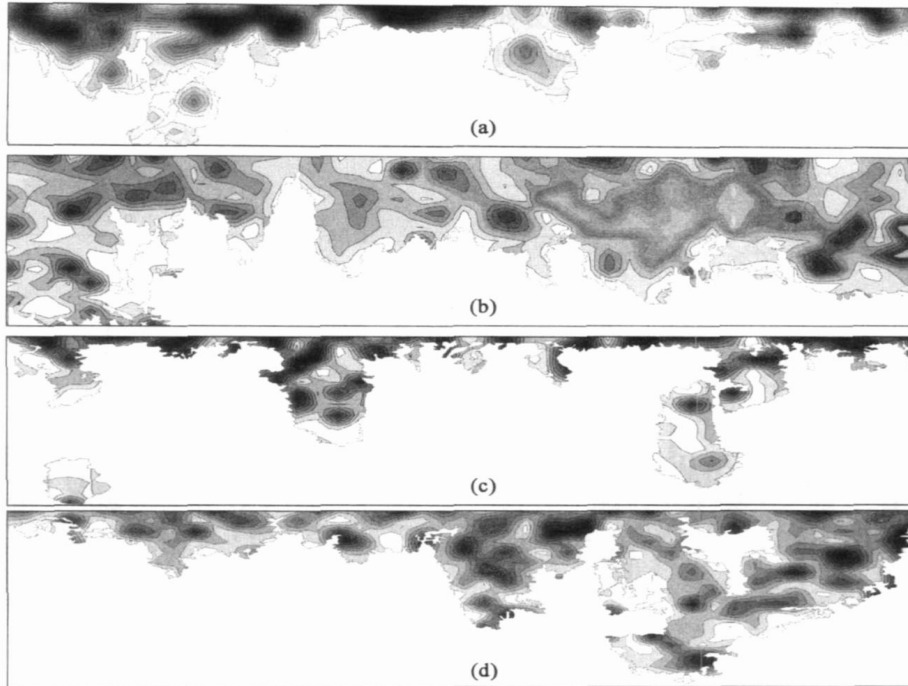


图4 各试验浓度分布的空间变化

Fig. 4 Spatial variation of the concentration distributions for the experimental plots

图5(a)为4组试验染色比例(染色面积/总面积)随深度变化的比较,图5(b)、图5(c)分别为染色区土壤含水率平均变化量和 Cl^- 离子浓度平均变化量(图1(b)所示取样位置测定)的比较。试验I,试验II和试验IV染色区土壤含水率的变化程度和范围较为接近,变化趋势也较为相似,但明显的区别于试验II染色区平均土壤含水率的变化,染色面积越小,则土壤含水率的变化量越大。尽管土壤含水率和浓度的变化量都表现出随深度递减的趋势,然而浓度随深度的变化趋势不同于土壤含水率的变化趋势,相比含水率的变化量, Cl^- 离子浓度变化程度更为明显。由于试验手段和分析方法不同,本文不对 Cl^- 离子浓度和染色浓度的分布规律进行比较。

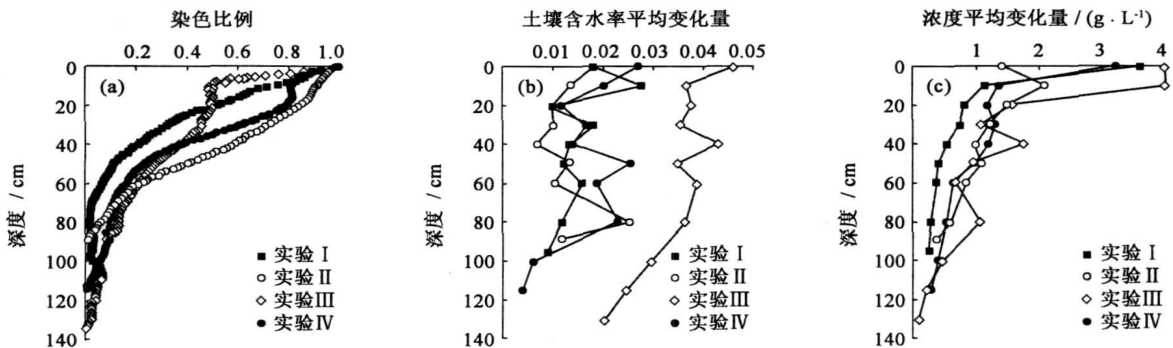
图5 各试验染色比例,染色区土壤含水率, Cl^- 离子浓度变化的比较

Fig. 5 Comparison of depth distributions of dyed coverage, soil water content, and Cl^- concentration in the dyed area

