

# 黄淮海平原三种土壤中优势流现象的 试验研究\*

程竹华 张佳宝 徐绍辉

(中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

**摘要** 在黄淮海平原选择三种不同质地类型的土壤(砂壤土, 淤土, 风沙土), 各设 1.5m × 1.5m 两个小区, 其中一个小区在试验开始前两天灌水约 56kg, 以获得不同的初始含水量。将 100mm 含有染色剂亮蓝的水灌入小区, 一天之后, 开挖 1m × 1m 的剖面拍照, 进行图像分析处理, 计算剖面中染色百分比随深度的变异, 研究所形成的优势流的状况与土壤类型、土壤初始含水量的关系。结果表明: 不同土壤发生优势流的程度不同, 结构发育好的土壤更容易形成优势流; 在风沙土和砂壤土上初始含水量影响优势流形成的程度, 初始含水量越高, 优势流现象越明显, 但在本试验设置的含水量条件下这种差异在淤土上是不显著的。在比较容易形成优势流的砂壤土上进行的多效唑和非反应性阴离子(氯离子)的优势迁移研究表明: 氯离子极易随水分迁移, 在优势流存在的地方采集土壤样品均得到其氯离子含量远远高于土壤本底值的结果; 对于迁移性一般的多效唑, 在染色剂到达的最大深度亦能测得其存在。

**关键词** 染色示踪剂, 优势流, 初始含水量

**中图分类号** S152.72

由于田间土壤的高度非均一性, 水分和溶质在其中的运移情况十分复杂, 建立在均质土壤基础上的水分和溶质运移方程往往不能应用于田间。在近几十年以来, 越来越多的研究者发现, 当灌溉和降雨时, 有相当数量的水分迅速通过大孔隙(包括土壤生物孔穴、土壤裂隙、裂缝和植物根孔)迁移, 到达深层土壤甚至是地下水, 人们把这种现象称为优势流(Preferential flow)现象, 也有人称之为大孔隙流(Macropore flow)、管道流(Channeling)等<sup>[1]</sup>。研究表明, 水分通过大孔隙的运动的特点是速度快, 迁移距离长。那么, 这是否会影响到一些农业化学物质在土壤中的迁移、降解和残留等行为呢? 人们发现, 在许多田间条件下, 污染物移动的速率比单纯考虑土壤基本迁移和吸附参数所得到的速率要快得多。众多的研究者认为, 这与大孔隙流有直接的关系<sup>[2-4]</sup>。对人类生存环境质量的关注, 使得人们对优势流现象的研究也日益重视起来。

然而对土壤这样一个复杂系统中水分和溶质的三维运动进行特征化是很困难的, 尤其当土壤含有大量的优势流通道时, 情况就更加复杂了。在这样的条件下, 土壤中点与点之间水分和溶质运移的变异性极大, 即使对很小的土块, 用常规方法也不能得到溶质分布

\* 本研究为国家自然科学基金项目(批准号49671041)资助

收稿日期: 1998-02-23; 收到修改稿日期: 1998-08-28

的精确结果,而用有颜色或有荧光的染料来作示踪剂,则能够直观地显示整个土壤剖面中水分和溶质的空间分布<sup>[5]</sup>。

本文用染色示踪法来研究不同土壤形成优势流的潜在力和土壤初始含水量对优势流形成状况的影响,以及农业化学物质(多效唑)和非反应性阴离子(氯离子)的优势迁移现象。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试土壤及染色剂简介

1.1.1 供试土壤 在黄淮海平原的河南省封丘县选取三种土壤:腰粘砂壤土、底壤淤土、风沙土,分别分布在潘店、赵岗和大黑岗。

腰粘砂壤土:属黄潮土中的砂壤土亚类。其表层为砂壤土,20~50cm 出现 20~50cm 的粘土层。本试验所开挖的剖面:0~35cm 为砂壤土,35~70cm 为粘土,70cm 以下为粉沙至轻壤。

底壤淤土:属黄潮土中的淤土亚类。其表层为重壤以上,50cm 以下出现 > 20cm 的轻壤或中壤层。本试验所开挖的剖面:0~22cm 为重壤,22~72cm 为胶泥层,72cm 以下为轻壤。

风沙土:为沙丘推平,种植作物 4~5 年的固定风沙土。在 1m 土体内以 < 0.25mm 的细粉沙为主,剖面层次分化不明显。

1.1.2 染色剂 作为示踪剂的染料必须具有以下几个特点:(1)在土壤中颜色清晰可见;(2)有着跟水相似的迁移特性,也就是说,它在土壤中所受的阻滞作用应该很弱;(3)这种化学物质本身及其分解产物应该是无毒的,并且不会引发有害的过程。本试验中所选用的亮蓝符合以上几个要求。

亮蓝是一种食品添加剂,为带金属光泽的红紫色颗粒或粉末,无臭。溶于水时呈蓝色,显色性极强。在 pH > 5.83 时呈阴离子状态,不易被土壤颗粒所吸附。其 LD<sub>50</sub>(致死中量,即一次性给药有 50% 受试动物死亡时所需要的该药的剂量或浓度)为 4600mg/(kg 体重)。因此亮蓝具有低毒性,其在食品中的最大使用量为 0.025g/kg。

### 1.2 田间试验方法

田间试验分两步进行:

1.2.1 不同类型的土壤形成优势流的潜力研究 每种土壤上设 1.5m × 1.5m 的小区两个,染色试验开始前两天,将其中的一个小区灌水约 56kg,在腰粘砂壤土上约至田间持水量的 70%~80%,作为高含水量小区,另一个作为低含水量小区。小区均用 1.5m × 1.5m 的塑料框围起,高为 30cm 的塑料框埋入地下 20cm,可以在一定程度上防止水分侧渗。将 100mm 的亮蓝溶液(含有亮蓝 3kg/m<sup>3</sup>)灌入小区,一天之后开挖 1m × 1m 剖面,观察其染色情况,记录亮蓝迁移的最大深度,然后拍照以备图像分析处理之用。每个小区共开挖剖面 4 个(相邻剖面间隔 20cm),观察小区中不同剖面的染色变异情况。

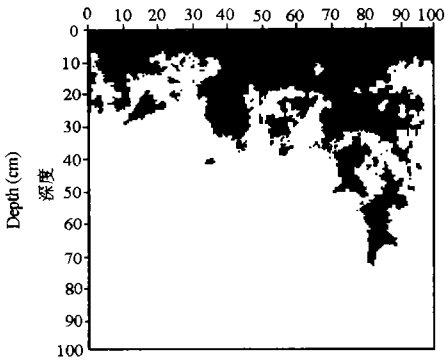
1.2.2 化学物质的优势迁移研究 选择优势流现象明显的土壤,进行化学物质迁移的研究。根据亮蓝在剖面中迁移的最大深度、整个剖面染色图形的不规则性,来确定在该土壤上优势流发生的程度,选出容易产生优势流的土壤进行化学物质(包括多效唑、氯离子)的优势迁移研究。由于亮蓝在砂壤土上最大迁移深度(120cm)高于其它两种土壤,而且剖面染色图案也更为不规则,因此第二部分试验在砂壤土上进行。

将多效唑按照规定使用浓度和使用量均匀地喷在小区上(每公顷喷雾 300mg/kg 的多效唑药

Dyed profile-1 of low water content plot of sandy loam soil

Trench length (cm)

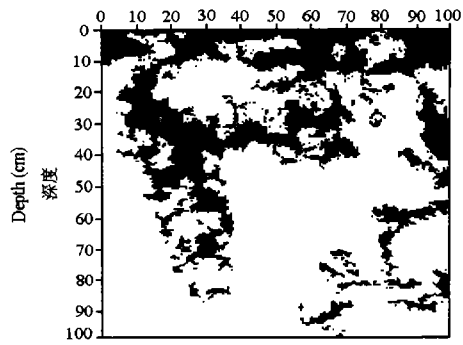
砂壤土低含水量小区染色剖面-1  
剖面水平距离



Dyed profile-2 of high water content plot of sandy loam soil

Trench length (cm)

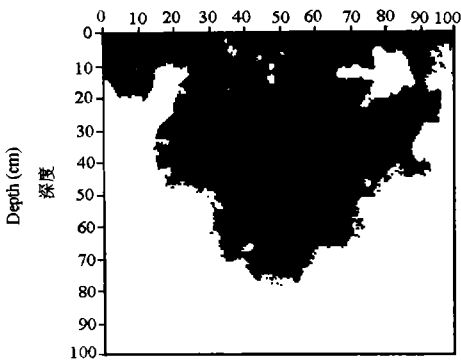
砂壤土高含水量小区染色剖面-2  
剖面水平距离



Dyed profile-2 of low water content plot of warp clay soil

Trench length (cm)

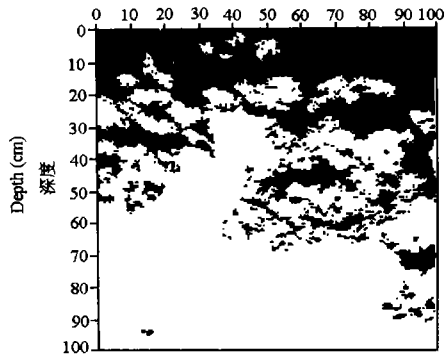
淤土低含水量小区染色剖面-2  
剖面水平距离



Dyed profile-4 of high water content plot of warp clay soil

Trench length (cm)

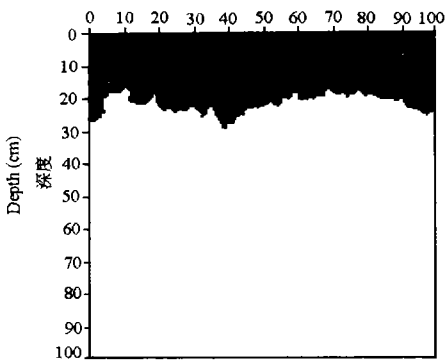
淤土高含水量小区染色剖面-4  
剖面水平距离



Dyed profile-2 of low water content plot of eolian sand soil

Trench length (cm)

风沙土低含水量小区染色剖面-2  
剖面水平距离



Dyed profile-2 of high water content plot of eolian sand soil

Trench length (cm)

风沙土高含水量小区染色剖面-2  
剖面水平距离

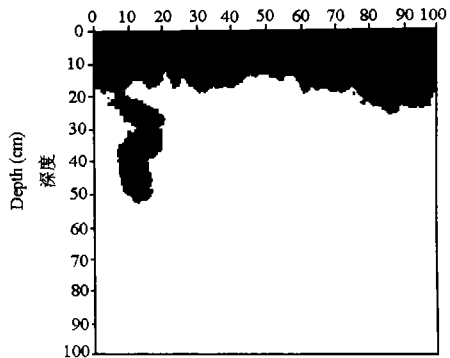


图1 部分剖面的染色图案

Fig.1 Dyed vertical patterns of part of the profiles

液900kg),  $\text{Cl}^-$  ( $1\text{mol}/\text{m}^2$ 小区)以  $\text{CaCl}_2$ 的形式以少量水溶解亦均匀地喷在土壤表面,然后将60mm的亮蓝溶液(浓度为  $3\text{kg}/\text{m}^3$ )灌入小区,一天之后开挖剖面,根据亮蓝的指示作用采集土壤样品进行分析。

**1.3 室内图像分析处理** 剖面染色照片经扫描存入计算机,利用 Photoshop3.0 对图像文件编辑处理,滤去土壤颜色,只保留亮蓝的颜色,编程计算不同深度亮蓝染色部分所占的面积百分比,作图得到这一百分比随深度变化的曲线。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同土壤发生优势流的程度不同

图1为各小区选出的部分染色剖面,从亮蓝在剖面中迁移的最大深度和剖面染色图案的不规则性可以看出,潘店的腰粘砂壤土形成优势流的潜力最大,也就是说,砂壤土最容易发生优势流。其次是赵岗的底壤淤土。而在大黑岗的风沙土上,亮蓝在剖面中基本是均匀迁移的,迁移的最大深度也只有50cm左右。原因是,砂壤土和淤土由于长期的耕作和质地本身的关系,含有大量植物根孔、蚯蚓虫孔和裂隙等,土壤高度非均质化,亮蓝在其中不是均匀下移,而是在许多地方绕过土壤基质优先通过这些大孔隙进行迁移,表现在土壤剖面上为亮蓝以许多连续或不连续的分支无规则地分布在土壤剖面,而不是从土壤表面开始均匀地染色。大黑岗的风沙土整个土体内都以  $< 0.25\text{mm}$ 的细粉沙为主,结构较均一,由于耕种时间短,大的裂隙、根孔和虫孔也很少,因此形成优势流的潜力也不大。但是,只要有大的孔隙,仍然有优势流的发生(大黑岗风沙土高含水量小区染色剖面-2,即为一蚯蚓虫孔存在所引起的优势流现象)。

不同质地的土壤形成优势流的潜在力不同,结构发育好的土壤更容易发生优势流,而发育较差的风沙土则不容易发生。因此传统认为持水性能良好的粘土和壤土却能使部分水和溶质在极短的时间内迁移到深层土壤甚至是地下水(潘店试区地下水位在雨季可升至  $1\text{m}^{[6]}$ ),如果优势流中含有农药、化肥、除草剂等农业化学物质,就极有可能对深层土壤和地下水造成污染,因此,对结构发育好的土壤更应该从农田管理上探讨防止优势流的措施。

### 2.2 土壤初始含水量在一定程度上影响优势流形成的程度

各类型土壤高、低含水量小区不同深度初始重量含水量如图2所示。

由表1可以看出,在三种土壤上,亮蓝迁移的最大深度都是高含水量小区比低含水量小区深。 $t$ -检验结果表明,大黑岗风沙土和潘店砂壤土上,含水量对染料迁移的深度有明显的影响( $\alpha = 0.05$ ),而在赵岗的淤土上,这种影响不显著。原因可能与淤土的干缩湿胀的特性有关,含水量高时,土壤膨胀造成大孔隙减少,影响到水分和溶质以优势流迁移。

而从染色剂在剖面不同深度的染色百分比曲线也可以看出在不同土壤迁移的深度和染色不规则性方面的差异。分别将同一土壤高、低含水量小区四个染色剖面相同深度染色百分比求平均值,得到平均染色百分比曲线,如图3所示。从这些曲线上也可以看出,低含水量小区染色百分比曲线比较局限于剖面上部,且较为规则;而高含水量小区曲线则向剖面下层延伸较大,且极为不规则。

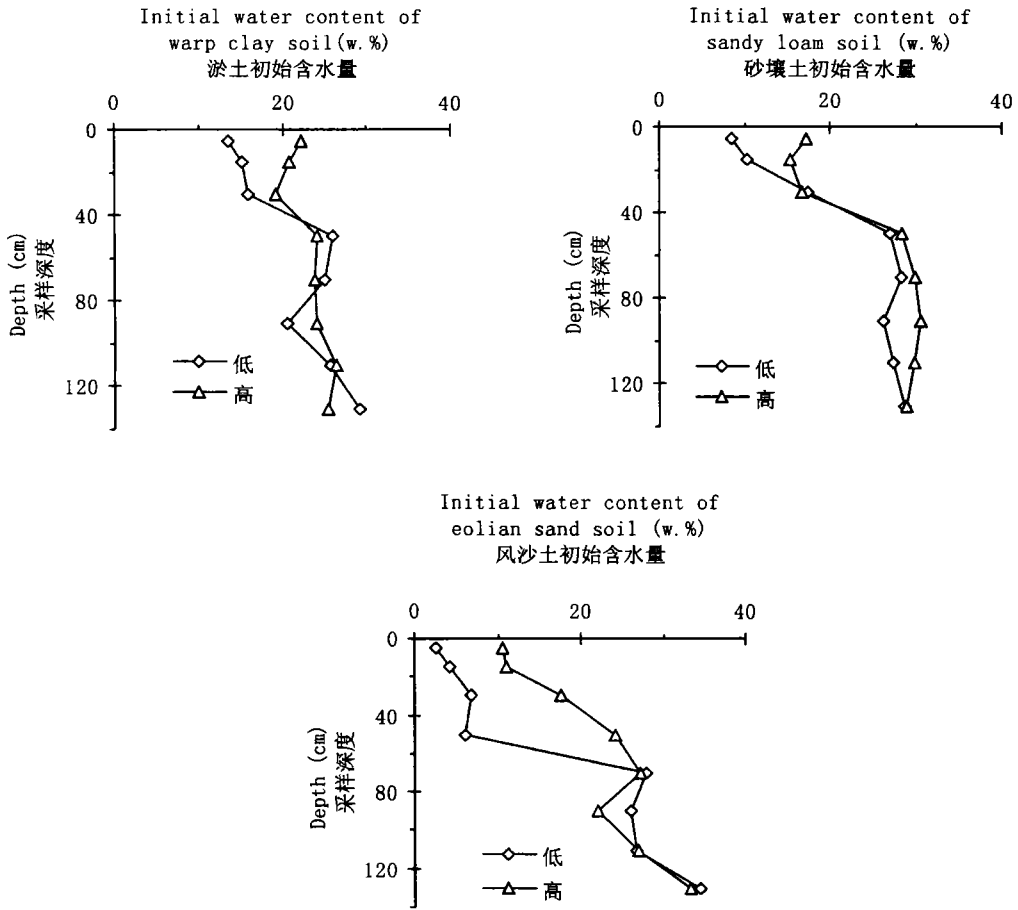


图2 不同小区土壤的初始含水量  
Fig.2 Initial water content for different soil plots

表1 初始含水量对染料迁移最大深度的影响

Table 1 The influence of initial water content on the deepest transport depth of the dye

含水量 Water content	剖面 Profile	染料最大迁移深度 (cm) Deepest transport depth of the dye		
		砂壤土 Sandy loam Soil	淤土 Warp clay soil	风沙土 Eolian sand soil
		高	1	92
	2	105	68	53
	3	110	55	41
	4	112	95	45
低	1	75	92	31
	2	40	79	29
	3	59	74	28
	4	75	86	28

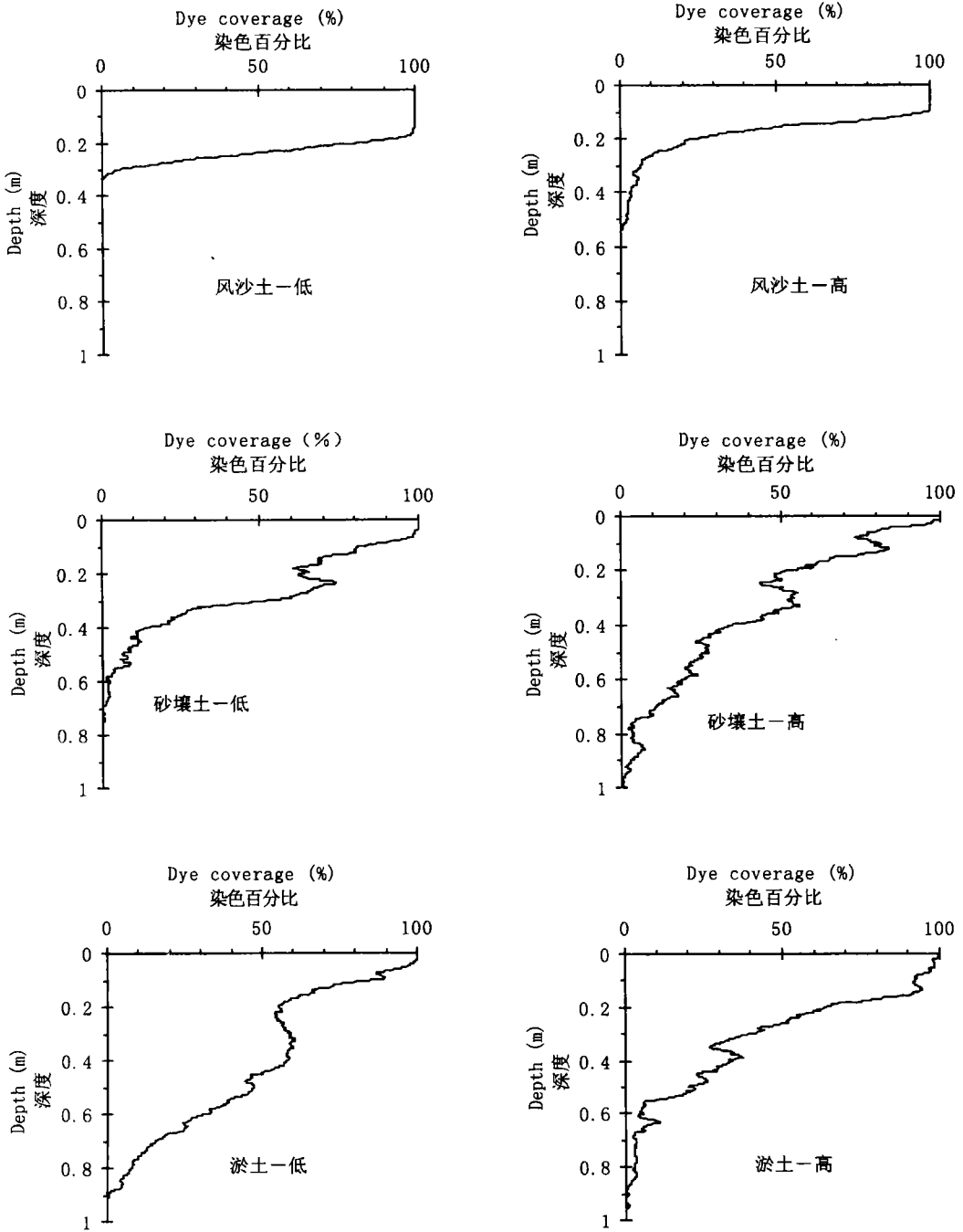


图3 各小区剖面平均染色百分比曲线

Fig.3 The average dye coverage percent curve of the profiles of each plot

### 2.3 化学物质的分析结果

由于  $Cl^-$  在土壤中的迁移性良好,在亮蓝染色的地方都能够检测到,从表 2 可以看出氯离子含量在表层只略高于土壤本底值,而在以后各层差异显著,根据 Markus Flury 等人

的研究<sup>1)</sup>:亮蓝与 I<sup>-</sup>相比,其相对迟滞系数为 1.2,可以肯定 Cl<sup>-</sup>的最大迁移深度超过亮蓝的最大染色深度。

多效唑在剖面各层次的分布如表 3 所示。

表2 氯离子在剖面中的含量分布

表3 小区土壤各层的多效唑含量分布

Table 2 Cl<sup>-</sup> content at each depth of the profile

Table 3 Paclobutrazol content at each depth of the plot

深度 Depth (cm)	处理土样含量 Treatment soil sample (mg/kg)	土壤本底值 Soil background (mg/kg)
0~5	46.60	
5~15	66.74	37.63
15~25	104.02	
25~35	101.21	25.56
35~45	104.73	
45~55	109.66	
55~65	101.21	25.21

深度 Depth (cm)	多效唑含量 Paclobutrazol content (mg/kg)
0~5	1.550
5~15	0.740
15~25	0.006
25~35	0.001
35~45	0.004
45~55	0.004
55~65	0.002

本试验在采集土样以后由于条件所限只是进行风干而未严格密封和低温保存,多效唑的挥发、分解等损失均未考虑,而且分析土样的数量也有限,所以不足以用来精确研究多效唑在土壤中的去向问题,而我们的主要目的也不在于此。但从得到的数据仍可以看出,在本试验条件下多效唑能够在极短的时间内迁移到深层土壤,在能够看出亮蓝的地方(60mm 灌水量时亮蓝的最大迁移深度为 57cm)都能够检测出多效唑。表层土壤由于在喷施过程中吸附了一部分多效唑,检出量较高,而在 15cm 以下,多效唑含量没有明显的逐渐降低的规律,这在某种程度上说明水和溶质的快速迁移使得吸附过程来不及发生,这也是优势流的一个特征。

### 3 小结

本试验利用染色示踪法,研究了黄淮海平原三种土壤中的优势流问题。结果表明不同土壤形成优势流的潜在力是不同的。砂壤土和淤土由于结构发育较好,存在着大量的“优势通道”(植物根孔,蚯蚓虫孔,裂隙等),所以更容易产生优势流,表现在染色剖面上,是染色图案的极度不规则、最大染色深度深,而质地均一,结构发育不良的风沙土,则不容易产生优势流,在一次性灌水量达 100mm 的情况下,一天之后染色剂最大迁移深度 50cm 左右。而由于优势流的出现,使农业化学物质能够迁移到深层土壤,此时如果地下水位高的话,农业化学物质就会进入地下水,在水中,除草剂、农药等的降解周期远远高于其在土壤中的降解周期,这就极有可能造成地下水中农业化学物质的累积,从而对地下水环境造成威胁。究竟这种威胁有多大,人类对此应该采取什么对策,这是值得继续研究和探讨的。

1) Flury M ect. Pesticide transport through unsaturated field soils: Preferential flow. 1994

## 参 考 文 献

1. Brusseau M L, Rao P S C. Modeling solute transport in structured soils: A review. *Geoderma*, 1990, 46: 169~192
2. Beven K, Germann P. Macropores and water flow in soils. *Water Resour. Res.*, 1982, 18:1311~1325
3. White R E. The influence of macropores on the transport of dissolved and suspended matter through soil. *Adv. Soil Sci.*, 1985, 3:95~121
4. van Genuchten M T, Rolston D E, German P F. Transport of water and solutes in macropores. *Geoderma, Spec. Issue*, 1990, 46:1~297
5. Ghodrati M, Jury W A. A field study using dyes to characterize preferential flow of water. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1990, 54:1558~1563
6. 顾国安, 刘兴文, 徐礼煜, 朱祥明. 封丘潘店试区土壤性状及其改良利用. 见: 黄淮海平原区区域治理技术体系研究. 南京: 科学技术出版社, 1987. 1~11

## EXPERIMENTAL STUDIES ON PREFERENTIAL FLOW IN THREE SOILS IN HUANG-HUAI-HAI PLAIN

Cheng Zhu-hua Zhang Jia-bao Xu Shao-hui

(*Institute of Soil Science, Academia Sinica, Nanjing 210008*)

### Summary

Three soils with different texture (sandy loam, eolian sand, warp clay) were selected in Huang-Huai-Hai Plain. Each treatment consisted of two 1.5m by 1.5m plots, one of which had been irrigated with about 56kg water two days before the dye experiment to achieve different initial water contents. Brilliant Blue was chosen as the dye tracer. One day after the irrigation, a vertical 1m by 1m soil profile was prepared. Photographs were taken for graphics analysis. And the relations between the occurrence of preferential flow and soil type, initial water content were studied. The results showed that susceptibility of different soils to preferential flow was different. Structured soils were more prone to produce bypass flow. The initial water content had a pronounced effect in sandy loam soil and eolian sand soil and no effect in warp clay soil according to the deepest transport depth of the dye. The preferential transports of paclobutrazol and  $\text{Cl}^-$  were carried on sandy loam soil.  $\text{Cl}^-$  was detected at every site where preferential flow existed and had a much higher content than soil background content. Paclobutrazol could also be detected even at the deepest transport depth of the dye.

**Key words** Dye tracer, Preferential flow, Initial water content