

亮蓝示踪土壤水分运移的适宜浓度研究

华 瑞¹, 徐学选², 张少妮³

(1. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 陕西华地房地产估价咨询有限公司, 陕西 西安 710065)

摘 要: 尽管亮蓝是一种广泛用于研究土壤水分运移的染色剂, 但其自身的吸附作用是否影响水分自由运移、如何选择适宜的染色浓度等尚需研究。此次使用 5 种浓度的亮蓝溶液在 3 种土壤中进行土柱入渗试验, 对比不同亮蓝浓度下的稳定出流速率、水分穿透时间、湿润锋与染色峰偏离情况, 寻求亮蓝染色剂在土壤水分运移示踪研究中的适宜浓度。结果表明: (1) 在 0~2.0 g/L 浓度范围内, 亮蓝染色剂的添加未影响到水向土体入渗行为, 即亮蓝染色剂示踪土壤入渗是可行的。 (2) 染色剂浓度为 1.5 g/L 时, 水分穿透土柱的时间、稳定出流速率最接近对照 (0.0 g/L), 但各浓度之间差异很小; 而以染色锋面与水的湿润锋面之差计算的迟滞系数值判断, 黑垆土适宜的亮蓝溶液为 1.5 g/L, 黄绵土 1.5~2.0 g/L 和砂土 2.0 g/L 浓度。 (3) 迟滞系数与土壤黏粒含量存在极显著正相关关系, 有一定吸附能力的亮蓝溶液更适合黏粒含量低的土壤。综合考虑, 三类土壤采用 1.5~2.0 g/L 染色浓度研究土壤水分运移是可行的。

关键词: 亮蓝; 入渗速率; 水分穿透时间; 稳定出流速率; 迟滞系数

中图分类号: S152.7⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2016)06-0073-05

Research for Suitable Brilliant Blue Concentrations to Trace Soil Water Movement

HUA Rui¹, XU Xuexuan², ZHANG Shaoni³

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3. Shaanxi Huadi Real Estate Appraisal and Consulting Co., LTD. Xi'an 710065, China)

Abstract: Although brilliant blue is one of dyes which is widely used to trace water movement path, there is a need to examine whether the absorption of brilliant blue affects the water movement and how researchers can choose a more suitable dyeing concentration. In order to determine the suitable concentration of brilliant blue by comparing steady effluent rate, water breakthrough time and the condition of deviation between wetting front and dyeing front, this infiltration experiment is set in three soil types by using 5 brilliant blue concentrations. The results are demonstrated as follows. (1) Among the ranges of 0~2.0 g/L, the addition of brilliant blue has no apparent effect on the infiltration behavior, namely, it is feasible to use brilliant blue to trace water infiltration. (2) When the brilliant blue concentration is 1.5 g/L, the water breakthrough time and steady effluent rate are almost close to control group (0.0 g/L), but differences are small between different concentrations; however, according to the retardation coefficient (R) caused by the differences between dyeing front and wetting front, the most suitable concentration for Heilu soil is 1.5 g/L brilliant blue, 1.5~2.0 g/L brilliant blue for loessial soil and 2.0 g/L brilliant blue for sandy soil. (3) There is significant positive correlation between R and clay content. Brilliant blue, which has adsorption capacity, is most suitable for the soils whose clay contents are low. By comprehensive consideration, it is feasible to use 1.5~2.0 g/L brilliant blue to trace soil water movement.

Keywords: brilliant blue; infiltration rate; water breakthrough time; steady effluent rate; retardation coefficient

收稿日期: 2015-12-05

修回日期: 2016-01-05

资助项目: 国家自然科学基金 (41471439; 41171421)

第一作者: 华瑞 (1990—), 女, 河南省鹤壁市人, 硕士研究生, 主要研究方向: 土壤水分入渗。E-mail: hua937061979@163.com

通信作者: 徐学选 (1966—), 男, 陕西省大荔县人, 研究员, 主要研究方向: 生态水文。E-mail: xuxuexuan@nwsuaf.edu.cn

在土壤水分运移路径的研究中,染色法因可显示土壤湿润进程,且操作方便,花费低,往往被选用。亮蓝,属水溶性非偶氮类着色剂,其分子式为 $C_{37}H_{34}N_2Na_2O_9S_3$,其具有低背景值^[1-2]、低毒^[3-5]、高溶解度^[6]、易检测^[7]等优势,且可与土壤颜色产生鲜明对比(尤其是在大田试验中)^[5],因此被多数研究所采用。如 Forrer 等^[8]介绍了利用亮蓝染色剂研究土壤优势流;吴庆华等^[9]提出利用不同土层染色剂的染色面积比的变异系数评价优先流;Wang 等^[10]挖取不同的土壤纵剖面,用亮蓝和淀粉—碘化钾两种染色剂分别示踪土壤大孔隙及土壤大孔隙流。尽管多数学者采用亮蓝作为研究土壤水分、溶质运移的染色剂,但其用量却出现一个宽泛的范围,如王在敏等^[11]采用亮蓝 FCF 染色示踪剂,研究膜下滴灌条件的水盐运移规律,使用亮蓝溶液浓度为 10 g/L;吕文星^[12]采用染色法研究三种土地利用方式(荒地、玉米地和柑橘地)优先流及其对硝态氮运移影响,染色剂选用 4 g/L 亮蓝溶液;邱琳等^[13]使用染色法对大孔隙进行定量分析时采用亮蓝示踪剂浓度为 3 g/L;章明奎等^[14]用亮蓝溶液染色鉴定旱耕地土壤磷优势流途径,试验选择的亮蓝溶液浓度为 2 g/L;章明奎^[15]在研究重金属在土壤中优势流迁移时,使用的亮蓝溶液为 2 g/L。上述研究选用亮蓝染色剂的浓度均缺少试验依据。一般在使用染色法时,采用染色面积或染色峰变化情况分析水分或溶液在土壤中运移状况,但并未注意到染色剂浓度变化是否影响到湿润锋运移速度、出现染色峰与湿润锋的脱离^[16]。据我们应用亮蓝溶液染色农林草地土壤的实践看,1 g/L 浓度已可非常清晰地给出染色区域,以往的浓度存在偏大的可能。

鉴于此,此次试验旨在探讨在 0~2.0 g/L 范围内,亮蓝溶液浓度对三种不同土壤入渗能力的影响,采用迟滞系数(Retardation Coefficient,*R*)量化染色剂与水分运移之间的差异。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

选取陕西省长武县黄绵土、侵蚀严重的黑垆土及陕西省杨凌区砂土为供试土壤,三种土壤均取自地表 0—30 cm,黄绵土取自塬面耕地,黑垆土取自塬边林地,而砂土取自渭河边。经自然风干后过 2 mm 筛子,利用马尔文激光粒度仪测定其机械组成,见表 1,按国际粒级制分级。使用重铬酸钾法测得黄绵土、黑垆土及砂土的有机质含量分别是 9.92、10.81、2.13 g/kg。

1.2 试验装置

试验装置由供水装置、土箱和收集装置组成,供

水装置是由马氏瓶($\Phi=8.0$ cm)及输水管(皮质)组成。土箱材质为有机玻璃(厚 1.0 cm),其规格大小为 30 cm×1.9 cm×70 cm(长×宽×高)。收集装置为 0.8 cm 厚的 PVC 漏斗,土箱渗出的水经漏斗流入塑料烧杯进行收集。

表 1 供试土壤机械组成

土壤类型	土壤机械组成 /%		
	<0.002 mm	0.002—0.02 mm	>0.02 mm
黄绵土	16.05	35.04	48.91
黑垆土	14.55	33.35	52.11
砂土	2.26	4.80	98.12

1.3 试验方法

(1) 试验准备。前期准备包括土壤准备、土箱装土和染色溶液配制三方面。

土壤准备:将自然风干后过 2 mm 筛子的土样,洒水湿润,黄绵土、黑垆土控制土壤含水率在 13%(约相当于 50%田间持水量),沙土控制在 6%左右,配好后用塑料袋进行密封。

土箱装土:土箱土柱高度设为 60 cm。为避免石英砂和底层土壤堵塞出流孔,需先在土箱底部铺设滤纸,后加入 3 cm 石英砂,作反滤层。取出土样,充分混合均匀,装土时,每 5 cm 装一层,每层打毛,黑垆土及黄绵土容重控制在 1.3 g/cm³,渭河砂土容重控制在 1.65 g/cm³。土样装入完成后,在土表铺设 1 cm 石英砂,可避免初进水时对土表冲刷,并在石英砂表面铺一层滤纸。

染色溶液配制:亮蓝溶液浓度设定值为 0,0.25,0.5,1.0,1.5,2.0 g/L 5 个值。每次配制 2 L 溶液,用漏斗倒入马氏瓶,记录初始马氏瓶刻度。注意,在放置马氏瓶时,其水面高度应用马氏瓶通气管的最低端即发泡点持平。

(2) 试验过程。试验过程中,记录马氏瓶中溶液体积变化,即记录刻度值,前 10 min,每隔 1 min 记录,10 min 至 30 min 中,每隔 5 min 记录,30 min 至 60 min 每隔 10 min 记录,后每隔 30 min 记录。并且,在试验过程中拍摄图片以记录湿润峰和染色峰变化过程,前 30 min 每隔 5 min 进行拍照,30 min 至 60 min 每隔 10 min 拍照,后每隔 30 min 拍照。整个试验过程,直至出流流量达到稳定时,停止试验。试验进行 3 个重复。

(3) 图片处理及数据分析。试验中拍摄的图片经 Photoshop CS6 几何校正及 ArcGIS 9.3 编辑处理,得到各浓度溶液不同时间湿润锋和染色峰变化情况,并使用 ArcGIS 9.3 处理得出湿润面积及染色面积。使用 Sigmaplot 12.5 软件和 SPSS 19 进行数据分析。

(4) 迟滞系数。计算迟滞系数可量化染色剂与水分运移之间的差异,用同一时间湿润面积与染色面积的比值计算 R 值,即迟滞系数 R 越大,染色剂与水分运移两者之间差异越大,越不适宜表征水分在土壤剖面运移状况。Allaire-Leung 等^[17]提出用长度方法和时间方法表达迟滞系数。

而本次试验结果显示湿润锋和染色峰具有不均一性,且时间方法与长度方法结果相同,因此,选择同一时间湿润面积与染色面积的比值作为迟滞系数,即,

$$R = \frac{V_{H_2O}}{V_{dye}} = \frac{S_{H_2O}}{t} \frac{t}{S_{dye}} = \frac{S_{H_2O}}{S_{dye}} \quad (1)$$

式中: R 为迟滞系数; V_{H_2O} 为水在土箱内运移速度; V_{dye} 表示染色剂在土壤中运移速度; t ,表示溶液入渗时间; S_{H_2O} 表示湿润面积; S_{dye} 为染色面积。

2 结果与分析

2.1 不同浓度亮蓝对入渗速率影响

黄绵土、黑垆土和砂土在不同浓度亮蓝溶液条件下,入渗速率的变化情况见图 1(3 个重复试验的平均值)。图 1 可知,对于黄绵土和黑垆土,6 种入渗溶液的入渗速率曲线相当重合,特别是,在 60 min 后,六条曲线基本重合,表明了亮蓝溶液浓度在 0~2.0 g/L 范围内的变化并未影响到黑垆土和黄绵土的稳定入渗率。图 1 可看出各浓度下,3 类土壤入渗速率均在 0~10 min 时间内快速下降,在 60 min 后达到相对稳定状态。对于砂土而言,不同亮蓝溶液浓度,其入渗速率变化趋势与黑垆土、黄绵土仍具有一致性;但入渗速率曲线在 10~60 min 时段有明显区别,在 60 min 后曲线的重合情况并不如黑垆土和黄绵土,稳定入渗速率变化范围 3.0~3.97 mm/min,不同浓度稳定入渗率大小:0.25>1.5>0.5>1.0>2.0>0 g/L,有染色剂的溶液入渗速率较纯水都大,但染色剂浓度增加时这种趋势反而弱化(除了 1.5 g/L 浓度),说明砂土中染色剂的存在有加速入渗的可能,低浓度时这种加速作用更大。但染色剂浓度大小对入渗速率的作用经差异性检验并不显著,可认为染色剂的加入对入渗影响不大。

总体上而言,亮蓝染色剂对黑垆土、黄绵土这种黏粒占一定比例的土壤水分入渗的速率影响可以不计,但对于黏粒含量偏低的砂土虽有影响,但也很小。

2.2 不同浓度亮蓝溶液对出流状况的影响

(1) 不同浓度亮蓝溶液对水分穿透时间的影响。由图 2 可知,对于黑垆土和黄绵土两种土壤,在 0~2.0 g/L 范围内,水分穿透时间变化趋势相同,均呈“N”形;对于黄绵土,亮蓝溶液 1.0~1.5 g/L 时水分穿透时间最

接近对照(0.0 g/L);对于黑垆土,水分穿透时间在浓度为 1.5~2.0 g/L 时最接近对照(0.0 g/L);而就砂土而言,不同浓度亮蓝溶液水分穿透时间趋于一致,变化范围为 27~35 min。总体来说,对于 3 种土壤,水分穿透时间最短的亮蓝溶液浓度基本约在 1.0 g/L。在浓度为 1.5 g/L 时,可视为 3 类土水分穿透时间最接近对照(0.0 g/L),即适宜浓度为 1.5 g/L。

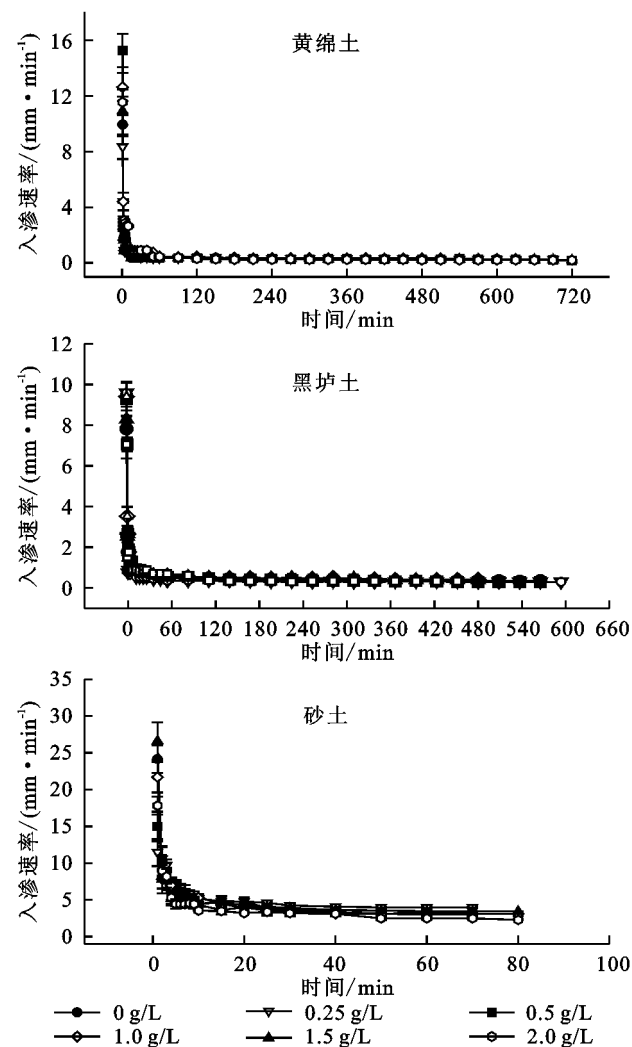


图 1 相同土壤不同浓度亮蓝溶液入渗速率随时间的变化

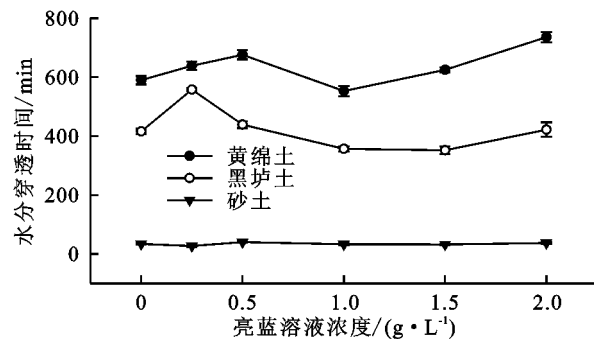


图 2 水分穿透时间随亮蓝溶液浓度的变化

(2) 不同浓度亮蓝溶液对稳定出流速率的影响。图 3 所为不同浓度亮蓝溶液出流量达到稳定后,所测得的稳定出流速率。可发现,在所研究亮蓝溶液浓度

范围内,黑垆土和黄绵土均呈平稳状态,黑垆土在1.0 g/L 浓度下其稳定出流速率略大,黄绵土则没有体现出浓度对其的影响。而对于砂土,曲线呈双峰曲线,出现两个峰值分别出现在浓度为 0.25 g/L 和 1.5 g/L,最小值出现在浓度为 2.0 g/L 时,此时只有在浓度为 0.5~1.0 g/L 或 1.5~2.0 g/L 与对照接近。由于砂土稳定入渗速率远大于其他两类,且随浓度变化出现了波动,因此,浓度对稳定入渗速率的影响主要是对砂质土壤。

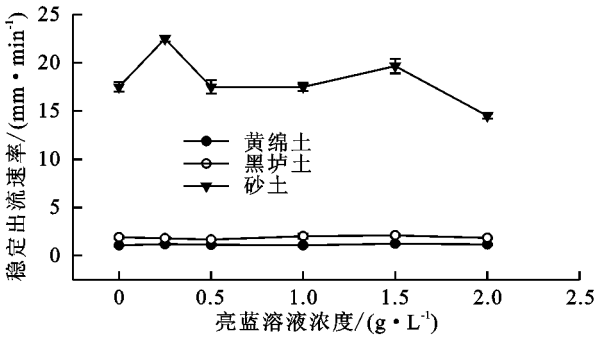


图 3 稳定出流速率随亮蓝溶液浓度的变化

综上所述,根据水分穿透时间、稳定出流速率判别,在0~2.0 g/L 范围内,亮蓝溶液浓度为 1.5 g/L 时,其 3 类土与对照(0.0 g/L)最为接近,可视为适宜浓度。

2.3 不同浓度亮蓝溶液在土壤入渗过程中的迟滞系数

2.3.1 不同浓度亮蓝溶液的迟滞系数比较 图 4 (黄绵土)可以看出,与黑垆土类似,所有浓度迟滞系数在 0~60 min 变化较为明显,都处于上升状态,迟滞系数大小顺序为:0.25>0.5>1.5>1.0>2.0 g/L;在 180 min 时,1.5 g/L 浓度亮蓝溶液迟滞系数小于 1 g/L;值得注意的是,在 420 min 时,1.5 g/L 浓度亮蓝溶液迟滞系数开始小于 2.0 g/L 浓度亮蓝溶液,但二者之间迟滞系数差距仅为 0.03。图 4(黑垆土)为黑垆土中,5 个浓度亮蓝溶液迟滞系数变化情况,其变化范围是 1.92~3.95;迟滞系数在 0~60 min 内发生了较大改变,均有不同程度的上升;在入渗 30 min 时,不同浓度亮蓝溶液迟滞系数大小顺序为:0.25>0.5>1.5>1.0>2.0 g/L,入渗 60 min 时,发生了改变,变为 0.25>0.5>1.0>2.0>1.5 g/L;60 min 后,迟滞系数达到相对稳定状态,大小顺序与 60 min 时一致,并未发生改变,亮蓝溶液 1.5 g/L 浓度迟滞系数最小,即,亮蓝溶液浓度为 1.5 g/L 时,湿润面积与染色面积比最小。对于砂土,不同浓度亮蓝溶液迟滞系数变化范围在 1.23~1.72。由图 4(砂土)可以得出,10 min 后,迟滞系数逐渐达到稳定状态,迟滞系数大小顺序变为:0.25>0.5>1.0>1.5>2.0 g/L,亮蓝溶液浓度为 2.0 g/L 时,迟滞系数最小。

总体上而言,5 个浓度亮蓝溶液在供试土壤—黄绵土、黑垆土及砂土中入渗所产生的迟滞系数有着一定程度上的不同:对于黑垆土,在迟滞系数达到相对稳定时,1.5 g/L 浓度下亮蓝溶液迟滞系数最小;对于砂土,浓度为 2.0 g/L 亮蓝溶液迟滞系数最小;对于黄绵土,迟滞系数达到相对稳定费时较长,约 60 min,1.5 g/L~2.0 g/L 亮蓝浓度适合用于其染色示踪试验。

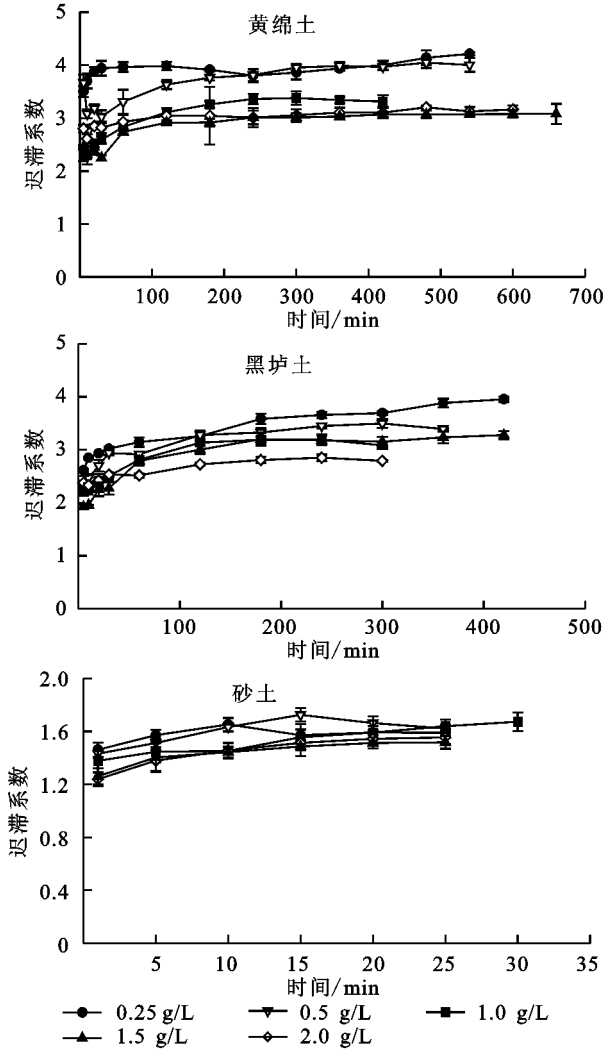


图 4 相同土壤类型不同浓度亮蓝溶液迟滞系数随时间的变化

2.3.2 土壤粘粒含量与迟滞系数相关分析 国外研究人员指出亮蓝溶液易吸附在土壤颗粒中^[17]。按照国际制土壤质地分级标准,得到供试土壤黑垆土、砂土及黄绵土黏粒(<0.002 mm)含量分别是:14.55%,2.26%,16.05%。选取迟滞系数与黏粒进行相关分析,得出二者存在极显著正相关关系,相关系数为 0.822,这表明迟滞系数会随着黏粒含量的增大而增大,原因应是亮蓝易吸附在黏粒含量高的土壤中。

并且由 2.2 可以得出,就迟滞系数而言,砂土<黑垆土<黄绵土。黏粒含量越低的土壤类型越适宜

使用亮蓝溶液做染色示踪试验,即在所选三个土壤中砂土最适宜用亮蓝染色剂进行示踪试验,其次是黑垆土,最后是黄绵土。

3 结论

室内条件下,在黄绵土、黑垆土和砂土3种土壤填充的土箱中,研究5个不同浓度亮蓝溶液入渗状况,得出以下结论:在0~2.0 g/L范围内,亮蓝染色剂浓度的变化并未影响到入渗速率。亮蓝溶液浓度变化会引起黑垆土和黄绵土溶液穿透时间有所不同,即有所迟滞,一般在1.5 g/L最接近没有染色剂的水分入渗,但染色剂浓度对砂土影响较小;就稳定出流速率而言,黑垆土和黄绵土基本不随着浓度变化而改变,而砂土稳定出流速率随浓度变化而出现波动;亮蓝溶液浓度在1.5 g/L时,水分穿透时间及稳定出流速率与无染色剂最为接近。亮蓝染色剂更适用于砂质土壤,黏粒含量增加时,应注意染色剂的浓度。如果是研究入渗速率,染色剂浓度变化并未影响到试验结果,但如果是区分染色路径和研究优先流,则需要控制染色浓度。对于3种土壤来说,以迟滞系数为指标,1.5~2.0 g/L是合适的染色浓度,此时染色峰与湿润锋能最大程度接近。对比已有研究,已有研究的亮蓝浓度往往偏高,或引起溶液穿透土壤时间延长、染色峰与湿润锋更加偏离,进而会造成对于优先流的人渗贡献评价偏差。

本次试验土箱中选用均质土壤进行研究,属基础性的阶段,而在研究水分运移路径和优先流时,研究对象更多选用的是原状土,迟滞系数等可能因此发生改变,有待进一步深入研究。

参考文献:

- [1] Trudgill S T. Soil water dye tracing, with special reference to the use of Rhodamine WT, Lissamine FF and Amino G Acid[J]. *Hydrological Processes*, 1987,1(2): 149-170.
- [2] Everts C J, Kanwar R S, Alexander E C, et al. Comparison of tracer mobilities under laboratory and field conditions[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1989, 18(4):491-498.
- [3] Smart P L, Hulet C V, Samuel M D, et al. A review of the toxicity of twelve fluorescent dyes used for water tracing[J]. *National Speleological Society Bulletin*, 1984,46:21-33.
- [4] Flury M, Papritz A. Bromide in the natural environment; occurrence and toxicity[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1993,22(4):747-758.
- [5] Flury M, Flühler H. Brilliant Blue FCF as a dye tracer for solute transport studies: A toxicological overview[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1994, 23(5): 1108-1112.
- [6] Smart P L, Laidlaw I M S. An evaluation of some fluorescent dyes for water tracing[J]. *Water Resources Research*, 1977,13(1):15-33.
- [7] Davis S N, Campbell D J, Bentley H W, et al. Groundwater Tracers: National Water Well Association[R]. Worthington, OH:EPA Contract CR-810036,1985.
- [8] Forrer I, Papritz A, Kasteel R, et al. Quantifying dye tracers in soil profiles by image processing[J]. *European Journal of Soil Science*, 2000,51(2):313-322.
- [9] 吴庆华,张家发,蔺文静,等. 土壤水流模式染色剂示踪及优先流程度评估[J]. *农业工程学报*,2014,30(7):82-90.
- [10] Wang K, Zhang R. Heterogeneous soil water flow and macropores described with combined tracers of dye and iodine[J]. *Journal of Hydrology*, 2011,397(1):105-117.
- [11] 王在敏,靳孟贵,何雨江,等. 基于染色示踪的膜下滴灌棉田水盐运移规律[J]. *地球科学:中国地质大学学报*, 2012,37(5):1093-1100.
- [12] 吕文星. 三峡库区三种土地利用方式优先流特征及其对硝态氮运移的影响[D]. 北京:北京林业大学,2013.
- [13] 邱琳,吴华山,陈效民,等. 利用染色示踪和图像处理技术对土壤大孔隙进行定量研究[J]. *土壤*,2007,39(4): 621-626.
- [14] 章明奎,王丽平. 旱耕地土壤磷垂直迁移机理的研究[J]. *农业环境科学学报*,2007,26(1):282-285.
- [15] 章明奎. 污染土壤中重金属的优势流迁移[J]. *环境科学学报*,2005,25(2):192-197.
- [16] Allaire-Leung S E, Gupta S C, Moncrief J F. Water and solute movement in soil as influenced by macropore characteristics:1. Macropore continuity[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2000,41(3):283-301.
- [17] Kasteel R, Vogel H J, Roth K. Effect of non - linear adsorption on the transport behaviour of Brilliant Blue in a field soil[J]. *European Journal of Soil Science*, 2002,53(2):231-240.