北京地区 2 种类型土壤优先流染色形态特征及其影响因素

郑 欣，程金花，张洪江，王 葆，张勇刚，程竞萱

（北京林业大学水土保持学院，北京 100083）

摘要：通过野外染色示踪试验结合室内图像解析技术，对北京地区 2 种类型土壤（淋溶褐土和潮土）进行了优先流染色形态特征及其影响因素研究。结果表明：(1)样地土壤用浓度为 4 g/L 的亮蓝溶液 27.3 L 染色后，淋溶褐土基质流深度均值为 7.72 cm，潮土为 8.56 cm，潮土优先流发生相对滞后；(2)淋溶褐土的优先流比、染色面积比、最大染色深度和长度指数均大于潮土，优先流现象更明显；(3)淋溶褐土优先路径集中区较多，侧向流较发达，且染色面积比和土壤深度相关性大于潮土，两者关系更密切；(4)2 种类型土壤的土壤质地和土壤有机质与染色面积比显著相关（$P<0.01$），直径为 1～3 mm 的根长密度也和染色面积比呈显著相关（$P<0.05$）。淋溶褐土优先流现象比潮土更明显，2 种类型土壤对优先流染色特征影响较大的为土壤质地、土壤有机质和直径为 1～3 mm 的根长密度。

关键词：优先流；染色形态特征；影响因素；淋溶褐土；潮土

中图分类号：S152.7 **文献标识码**：A **文章编号**：1009-2242(2018)03-0113-07

DOI：10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.03.018

Characteristics and Influencing Factors of Preferential Flow Dyeing Morphology of Two Soils in Beijing

ZHENG Xin, CHENG Jinhua, ZHANG Hongjiang, WANG Bao, ZHANG Yonggang, CHENG Jingxuan

(*College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Bejing* 100083)

Abstract: The characteristics of preferential flow dyeing and the influencing factors of two soils (leached cinnamon soil and fluvo-aquic soil) in Beijing were studied through field dyeing and tracing combined with indoor image analysis. The results showed that: (1) After the soils were dyed with 27.3 L of a brilliant blue solution with a concentration of 4 g/L, the average depth of matrix flow was 7.72 cm in the leached cinnamon soil and 8.56 cm in the fluvo-aquic soil, and the preferential flow in the latter relatively lagged. (2) The dyeing ratio, the maximum depth of dyeing and the length index in the leached cinnamon soil were greater than those in the fluvo-aquic soil, which meant the preferential flow phenomenon in the leached cinnamon soil was more obvious. (3) More concentrated preferential path areas and more developed lateral flow were existed in the leached cinnamon soil, also the correlation between dyeing ratio and soil depth in the leached cinnamon soil was more obvious than those of the fluvo-aquic soil. (4) Soil texture and soil organic matter were significantly correlated with the dyeing ratio ($P<0.01$) in two soils. The root length density of 1～3 mm in diameter and dyeing ratio were significantly correlated ($P<0.05$). The preferential flow phenomenon in the leached cinnamon soil was more obvious than that of the fluvo-aquic soil. The soil texture, soil organic matter and the root length density of 1～3 mm in diameter were the major influencing factors for the characteristics of preferential flow dyeing in two soils.

Keywords: preferential flow; dyeing morphological characteristics; influencing factors; leached cinnamon soil; fluvo-aquic soil

在土壤各向异性的情况下，优先流就是在众多外部因素的共同作用下，沿着特定的路径向下发生非稳定性渗流的现象[1]。优先流的不均匀性可延迟地表径流峰值，延长洪水历时，有利于水资源保护和调控[2]；但也能增加污染物向土壤深层运移的几率[3]，造成地下水资源的污染与减少，对人类的生存造成威胁。因此，优先流的研究将是现在以及今后研究的重点。

现有优先流的研究对象较单一，对不同环境条件下优先流的特征研究需要进一步加强[1,4]。不同环境下的优先流研究主要集中在不同土地利用类型和

收稿日期：2018-01-19

资助项目：水体污染控制与治理科技重大专项（2017ZX07101-004）；北京市科学技术委员会计划项目（Z151100001115001）

第一作者：郑欣（1995—），女，在读硕士研究生，主要从事优先流研究。E-mail：zx_bjfumango@126.com

通信作者：程金花（1979—），女，教授，博士生导师，主要从事土壤侵蚀、森林水文研究。E-mail：jinhua_cheng@126.com

不同林分，而对不同类型土壤的优先流研究较少。戴翠婷等[5]以三峡库区三种土地利用方式为对象，发现园地优先流发育较活跃，优先路径分化程度较高；王伟[6]对三峡库区紫色砂岩地区 4 种林地进行观测发现不同类型林地的土壤优先流发展过程具有一定差别，随土壤垂直深度增加，林地土壤优先流的空间异质性逐渐加剧；王发等[7]研究发现耕地 0—20 cm 范围内染色面积占染色总面积的比例远大于自然封育区，且水分入渗深度小于自然封育区。

优先流的研究方法主要有 CT 扫描法、穿透曲线法、渗透仪法、模型法和示踪法[8-9]。CT 扫描法虽然快速方便，但是数据处理复杂，且考虑到重复试验时，价格昂贵；使用原状土柱通过穿透曲线法测定时，土柱在取样、运输的过程中会对土样造成一定的扰动，并且由于取样和测定的时差，会影响到试验结果的精确性；采用模型法模拟优先流需要大量的试验数据进行验证，而此试验可为今后模型法提供试验数据；示踪法可采用染色剂或者元素示踪，用染色剂或者元素的运动表征土壤水分的运动，简单易行，且为原地试验，结果较准确。

现有研究多集中在南方地区，北方的土壤优先流研究较少。淋溶褐土、潮土均为北京地区主要的农业耕作土壤之一，但是系统研究较少。本试验针对 2 种类型土壤，采用野外亮蓝染色示踪法，结合图像分析技术和数理统计方法，研究 2 种类型土壤的优先流特征，包括染色形态特征和空间分布特征及其影响因素，以揭示北京地区不同类型土壤优先流运移规律，为该地区不同类型土壤优先流模型模拟研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

淋溶褐土取样于鹫峰国家森林公园，其地处中国华北平原西部，北京市海淀区苏家沱镇境内，属太行山系最北段与燕山山脉相会处的北京西山。地理坐标为东经 116°05′，北纬 40°03′，总面积 811.173 hm^2，最高海拔 1 153 m。气候为华北暖温带半湿润半干旱大陆性气候，年降水量 630 mm，年平均气温 11.6 ℃[10]。试验点位于鹫峰森林公园中心区，土壤类型属山地淋溶褐土，植物群系属暖温带落叶阔叶林，主要树种有侧柏、五角枫、山杏等。

潮土取样于轻工业环境保护研究所生态修复实验基地，其位于北京市昌平区马池口镇亭自庄，属于温榆河冲积平原和燕山、太行山支脉的结合地带。地理坐标为东经 116°08′，北纬 40°10′，属温带半湿润大陆性季风气候，多年平均年降水量 579.1 mm，年平均气温 11.8 ℃[11]。试验点土壤类型为潮土，主要树种为杨树、柳树、桑树等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择与调查 2017 年 7 月 8-22 日分别在鹫峰和昌平研究区内选择平坦地带的淋溶褐土和潮土。样地基本情况见表 1。

表 1 样地基本情况调查表

土壤类型	样地编号	地理位置	海拔/m	坡向	植被	植被覆盖度/%
淋溶褐土	H1	40°03′53″N,116°05′52″E	124	阳坡	山杏、山枣	65
	H2	40°03′53″N,116°05′51″E	122	阳坡	山杏、元宝枫	69
潮土	C1	40°10′45″N,116°08′23″E	60	阳坡	桑树	59
	C2	40°10′45″N,116°08′24″E	61	阳坡	桑树	61

1.2.2 染色示踪试验 将试验样地适当除去草本、上层腐殖质等杂物，然后用长为 1.3 m，宽 1 m，高 0.5 m的铝塑板将染色试验样地圈出，并分成面积相等的横纵剖面 2 个区域，即 2 个长宽均为 50 cm 的正方形区域，中间、边缘均设宽为 10 cm 的缓冲带。每块铝塑板埋入土中使其露出 15 cm 高度，并且把每块铝塑板周围的缝隙填上土，确保染色时溶液不会集中流到试验区边缘，影响染色试验结果。

野外染色示踪试验示踪剂选用食品添加剂—亮蓝，因亮蓝易溶于水且无毒性，不会对土壤造成污染。提前配置模拟大雨量 35 mm 的亮蓝溶液（浓度 4 g/L）27.3 L，用喷壶均匀喷洒在用铝塑板围成的试验样地中，每个样地溶液加入耗时均控制在无积水状态 15 min。之后用防雨膜布覆盖在染色区域，避免降雨带来的水分稀释溶液。

染色 24 h 后进行染色剖面的挖掘，用卷尺在染色区域量出横纵剖面挖掘区域以缓冲带隔开，即长宽均为 50 cm 区域，并做标记，每隔 5 cm 依次挖开不同深度的横剖面，并将剖面边缘修葺平整，拍照记录每层横剖面染色状态；纵剖面每隔 10 cm 挖掘，每层染色状态拍照记录。染色试验样地布置和剖面示意见图 1。

1.2.3 样品采集与室内测定 在挖掘土壤水平剖面时，每层水平剖面取 1.5 kg 土壤样品和所有的根系样品测定土壤理化性质、根系特性。土壤容重、土壤总孔隙度采用环刀法测定；土壤含水量采用烘干法测定；土壤质地采用比重计法测定；土壤有机质采用重铬酸钾稀释热法[12]测定；土壤 pH 采用 pH 计测定。

按照根系直径≤1，1～3，3～5，5～10，≥10 mm 将每层的根系样品进行分级，测量各级根系总长度，得出根长密度。然后将根系样品烘干称重，得出根重密度。

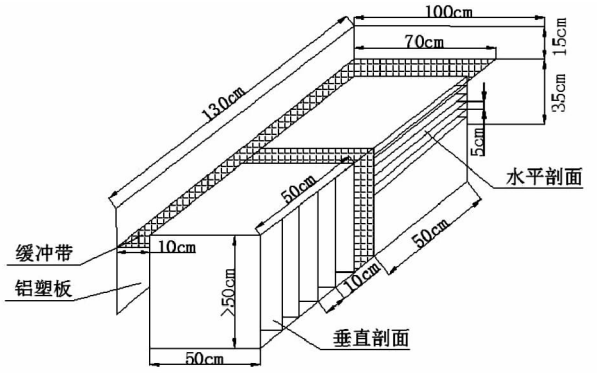


图 1　染色试验样地布设和剖面示意

1.2.4　染色图像解析　首先对染色图像进行几何校正:用 Photoshop CS 5.0 对图片进行裁剪,要求裁剪后的每张图片大小均为 50 cm,以便于对比;然后亮度与色彩校正:将土壤染色图片经过饱和度、明度、对比度调整,替换颜色,灰度、阈值调节将土壤染色部分替换为黑色,未染色部分替换为白色;降噪处理:用 Image Pro Plus 6.0 软件将已经通过 Photoshop CS 5.0 处理的图片颜色数值化,即 0 代表黑色为染色部分,255 代表白色为未染色部分,整个图片颜色数值为 0 或者 255;数理统计:将 Image Pro Plus 6.0 中所得染色图片数值结果保存,将保存的图片数值化矩阵结果导出。

1.2.5　染色图像指数　本研究使用国内外学者提出的使用较多的优先流评价指数染色面积比、基质流深度、优先流比、长度指数[13-16]进行 2 种类型土壤优先流染色特征的分析,具体计算方法为:

(1)染色面积比 D_c。染色面积比为一定土壤深度处或整个剖面染色面积占该深度土壤总宽度或剖面总面积的百分比[13],计算公式为:

$$D_c=\frac{D}{D+N_D}\times 100\%$$

式中:D_c 为土壤剖面染色面积比(%);D 为土壤剖面总染色面积(cm^2);N_D 为土壤剖面未染色总面积(cm^2)。

(2)基质流深度 U_{niFr}。土壤基质流区为发生在土壤表层连续、均匀的水流区域[14],而优先流是广大研究者针对土壤基质流提出的一个相对的概念。本研究以染色面积比大于 80%的染色区域作为基质流区域,其所能达到的最大深度为基质流深度[15]。

(3)优先流比 P_{F-fr}。优先流比为剖面优先染色区域占总染色区域的百分比[16],计算式为:

$$P_{F-fr}=(1-\frac{U_{niFr}W}{T_{otStAr}})\times 100\%$$

式中:P_{F-fr} 为土壤剖面优先流比(%);U_{niFr} 为土壤剖面基质流深度(cm);W 为土壤剖面水平宽度(cm);T_{otStAr} 为土壤剖面染色区总面积(cm^2)。

(4)长度指数 L_i。长度指数指土壤染色剖面单位土壤深度的上下染色面积的绝对差值[15]。

$$L_i=\sum_{i=1}^{n}|D_{C(i+1)}-D_{Ci}|$$

式中:L_i 为土壤剖面第 $i+1$ 层与第 i 层染色面积比之差绝对值的和;$D_{C(i+1)}$ 为第 $i+1$ 层染色面积比(%);D_{Ci} 为第 i 层染色面积比(%);N 为土壤剖面垂直土层数。

1.2.6　数据处理　图像处理使用 Photoshop CS 5.0 软件、Image Pro Plus 6.0 分别进行尺寸校正、形态处理和二元数值化,利用 Excel 2013 软件进行数据统计,SPSS 18.0 软件进行数据分析,Origin 8.0 软件制图。

2　结果与分析

2.1　不同类型土壤染色形态特征

2.1.1　染色面积比　由于本研究中 2 种类型土壤每一类型设置 2 组样地,土壤剖面较多,结合样地调查情况和试验图像拍摄效果,每个样地选择 1 组处理后的染色图像进行结果展示与分析。

染色面积比在一定程度上反映了亮蓝示踪剂在整个土壤剖面上的分布情况,是在一定土壤深度内土壤水的平均入渗结果,其值越大,说明水分下渗越多。但是染色面积比并不是越大越好,优先流现象的发生说明水分和溶质是优先运移的,表现为明显的湿润锋快速运移现象[17],也就是染色图像所展示的条形独立的染色区域,即优先流集中发生区。染色面积比越大,说明优先流现象越不明显[13],即条状独立分化的优先流染色形态相对较少。

由图 2 可知,2 种类型土壤垂直剖面处理后的染色面积比随着深度的增加而降低,但不同剖面降低的速率不同,剖面 H1－1、H1－2、C1－3 降低速率较高,示踪剂在土壤剖面内入渗较浅,说明土壤浅层基质流区域较大,优先路径深层分布较少。剖面 H1－4、剖面 C1－1 变化速率较低且较缓,示踪剂在土壤剖面内的入渗深度较深,而 H1－4 的基质流深度为 10.8 cm,大于其他剖面的基质流深度;C1－1 的基质流深度为 10.03 cm,除 C1－2 外,均大于其他剖面相应值。表明 H1－4、C1－1 优先流区域深层分布较大,优先路径在深层的分布较多。同一类型土壤部分剖面染色面积比也相差较大,如 H1－1、H1－2 的染色面积比与横轴围成的面积明显小于其他 3 个剖面,由此可见,虽然为同一类型土壤,但是因为环境条件、空间位置等的差异,不同样地、不同剖面的优先流现象存在差别,也反映了优先流在土壤空间内的高度变异性[18-19]。将 H1、C1 的 5 个纵剖面不同深度处的染色面积比进行算术平均,结果 H1 的染色面积比平均值为 16.62%～40.43%,C1 的染色面积比均值为 22.92%～33.63%,变化幅度较小,说明淋溶褐土优先流的空间变异性更高,可能是因为淋溶褐土的样地植被覆盖度较高,植物根系形成的大孔隙较多,从而使优先流分布更复杂。

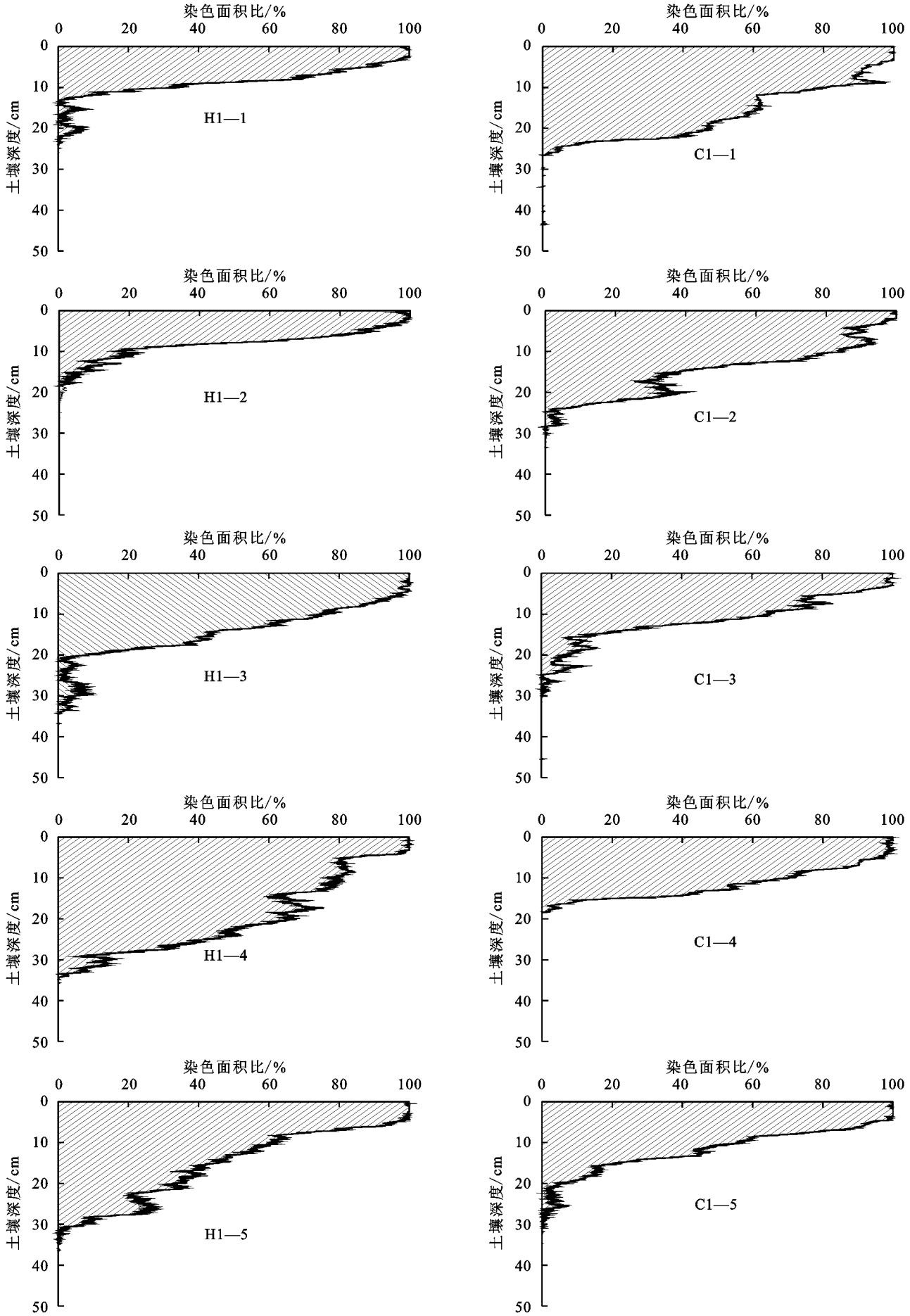


图 2 土壤剖面染色面积比分布

最大染色深度反映了土壤水分入渗的最大深度,数值越大,说明土壤水分入渗越深,在一定程度上反映了优先流的分布深度。H1－3、H1－4 的最大染色深度均在 35 cm,均大于 C1 样地垂直剖面的最大染色深度,说明淋溶褐土部分剖面的染色溶液入渗能力强于潮土,优先路径对入渗贡献较多,优先流在更深的土壤层发育较好。淋溶褐土 H1－1、H1－2 剖面的最大染色深度都不到 25 cm,与其他剖面相差较大,说明染色水流的空间入渗变异性较高,可能是因为褐土样地内植被较多,因根系形成的优先路径错综复杂,从而使优先流发育更复杂。淋溶褐土和潮土的最大染色深度均值分别为 30.83,27.44 cm,说明优先流在褐土土壤深层发生的概率更高,大孔隙在深层出现的几率更高,优先流现象更明显。

2.1.2　*染色形态指标*　由表 2 可知,淋溶褐土基质流区深度为 6.14～10.8 cm,平均值为 7.72 cm;潮土基质流区位于 7.2～10.23 cm 土壤深度范围内,均值是 8.56 cm。同一类型土壤由于根系、动物活动等形成的优先路径的不同分布,不同剖面的优先流发生深度不同。褐土基质流区范围较小,说明优先路径异质性较潮土复杂。基质流深度反映了土壤基质流染色的临界深度位置,即阈值。数值越大,表明土壤基质流区域越大,土壤优先流发生相对滞后[15]。2 种类型土壤基质流深度有所差异,潮土变幅较褐土小,均值较大,说明潮土因土壤较紧实或者石块含量较多,因大孔隙等形成的优先路径较少,优先流空间分布较稳定,但是发生相对滞后。

根据 1.2.5 中优先流比的公式进行计算得到淋溶褐土优先流比为 26.11%～55.17%,潮土为 31.62%～40.35%,而优先流比反映了土壤优先流染色区域占整个土壤剖面染色区域的比例,数值越大,说明优先流占水分运动的比例越大,优先流现象明显[16]。可知褐土优先流比变幅较潮土大,潮土优先流现象较稳定。褐土优先流比均值为 39.47%,而潮土为 35.7%,说明褐土优先流现象较潮土明显。随着土壤水入渗过程,优先流区域的形状变化较基质流区明显,因此研究者引入了长度指数,其值越大,优先流现象越明显[15]。由长度指数的计算公式结合图像数据可得到褐土的长度指数为 355.08%～547.62%,均值为 441.06%;潮土的长度指数为 224.39%～386.19%,均值为 308.24%。出现这个结果可能是因为潮土的根长密度为 126 m/m^3,而褐土为 160 m/m^3,潮土土壤中植物根系相对褐土较少,土壤紧实度较高,孔隙结构较简单,连通到土壤深层的孔隙较少,染色水流沿着这些优先路径下渗较浅,故潮土优先流现象较弱。

表 2　淋溶褐土、潮土染色形态特征

参数	土壤类型	最小值	最大值	平均值±标准差
基质流	淋溶褐土	6.14	10.80	7.72±1.78
深度/cm	潮土	7.20	10.23	8.56±1.30
染色	淋溶褐土	16.62	40.43	26.83±8.96
面积比/%	潮土	22.92	33.63	26.70±4.32
优先	淋溶褐土	26.11	55.17	39.47±10.79
流比/%	潮土	31.62	40.35	35.70±3.35
长度	淋溶褐土	355.08	547.62	441.06±65.58
指数/%	潮土	224.39	386.19	308.24±67.79

2.2　优先流染色空间分布特征

土壤垂直剖面染色形态可以说明优先流随土壤深度分布状况,但是对于垂直剖面部分独立的染色区域,无法看出优先流的水平分布状况,故需要对水平染色图像进行分析,以便能更完整地表现优先流的空间分布情况。

2.2.1　*优先流水平分布特征*　将 2 种类型土壤的水平剖面(每层 5 cm)染色图像进行处理和数据分析,得出每个剖面不同水平宽度(以垂直剖面 0 cm 处为起点,向右 0～5,5～10,10～15,…,45～50 cm)处的平均染色面积比,分析分布状况。

由 2 种类型土壤水平剖面染色数据分析得出褐土水平剖面平均染色面积比为 51.99%,潮土为 49.73%,说明因褐土根系、动物活动等形成的大孔隙较多,土壤较疏松,染色水流下渗更多。由图 3 可知,褐土水平染色分布呈“多峰”型,有 3 个峰值,分别为 83.21%,55.36%,51.95%,处于峰值处的这 3 部分比其他区域染色形态变化更显著,说明这 3 处有因根系等形成的优先路径分布。前人[3,8]将水平剖面分布的最低染色面积比部分作为基质流染色面积区,高于最低染色面积比的水平剖面范围划为优先流集中发生区域。根据褐土的水平分布情况来看,其有 3 个主要的优先路径集中分布区,即染色水流沿着这 3 个主要优先路径分布区进行迁移,其他区域是水流的整体均匀下渗。潮土水平剖面染色面积比分布呈“双峰”型,峰值分别为 64.47%,38.58%,说明潮土主要有 2 个优先路径分布区,且优先流染色形态变化较稳定,褐土染色形态变化较潮土剧烈,此结果与 2.1 中结果类似。

淋溶褐土染色面积比水平分布在 5～25 cm 范围内沿着剖面边界有增大现象,这表明褐土在水平宽度 5～25 cm 间染色水流有明显的侧向迁移的现象,即有侧向流的发展,说明剖面其他部分染色水流已经达到基质流流量,染色水流沿着剖面少量优先路径向土壤深处迁移,优先流发生较强烈。潮土在水平宽度 25～45 cm 处也有类似现象,侧向流主要在 25～45 cm 处发生,此处优先路径相对集中,优先流发育较好。

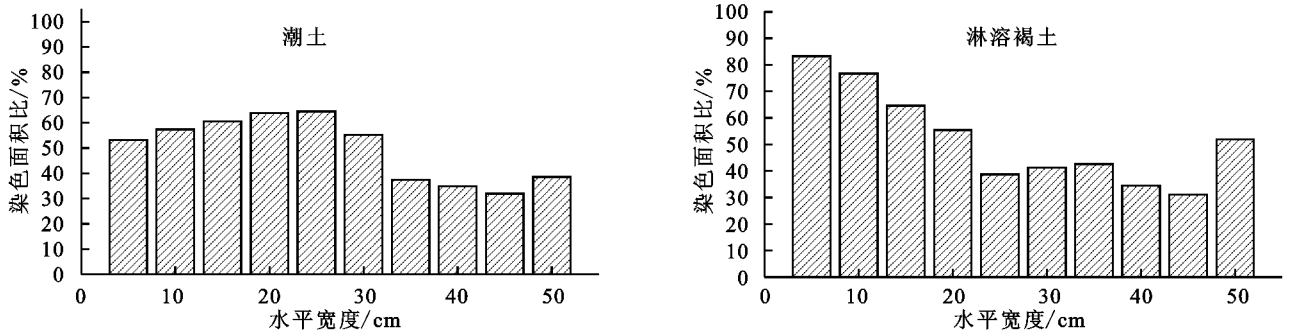


图 3 淋溶褐土、潮土染色面积比水平分布

2.2.2 染色面积比随土壤深度变化规律 染色面积比和土壤深度大致呈负相关的关系，为了进一步验证此关系，将染色剖面染色面积比与土壤深度进行相关性分析。2 种类型土壤均表现出显著相关（$P<0.01$），继续对染色面积比和土壤深度进行曲线估计，根据 R^2 选择最适回归曲线。由表 3 可知，对垂直剖面和水平剖面的染色面积比、土壤深度进行曲线估计，结果显示垂直剖面染色面积比和土壤深度相关关系用立方回归 R^2 较高，而水平剖面则用线性回归较适合。垂直和水平剖面回归类型的差异性可能是由于横剖面为每隔 5 cm 土壤深度拍取的图像较少，不同深度处染色面积比数据量较少，精确度较低，相对垂直剖面来说用立方回归没有线性回归合适。

淋溶褐土垂直剖面染色面积比和土壤深度回归关系中 R^2 为 0.988，大于潮土 R^2 的相应值 0.975，可看出褐土的染色面积比和土壤深度相关性更高，联系更紧密，水平剖面 2 种类型土壤也有相同的现象。潮土的关联性则较弱，这可能是因为潮土基质流区域较深，优先路径较少，染色水分下渗较浅，染色水流多集中在浅层，浅层与深层的染色水分入渗差异较大，从而出现染色面积比与土壤深度的相关性较低。

表 3 染色面积比和土壤深度回归关系

土壤类型	剖面类型	回归方程	R^2
淋溶褐土	纵剖面	$y=114.732-1.071x^3+3.373x^2-3.182x$	0.988
	横剖面	$y=109.703-0.994x$	0.985
潮土	纵剖面	$y=119.012-0.294x^3+2.268x^2-2.806x$	0.975
	横剖面	$y=117.051-0.987x$	0.968

注：y 为染色面积比（%）；x 为土壤深度（cm）。

2.3 染色面积比的影响因素分析

用 SPSS 对染色面积比的影响因素进行 Pearson 相关性分析。2 种类型土壤不同土壤深度测定的理化性质，包括土壤容重，土壤总孔隙度，土壤含水量，土壤有机质，土壤 pH，土壤质地等性质；根系状况，包括<1，1～3，3～5 mm 根长密度，根重密度见表 4。

表 4 土壤理化性质和根系特征

土壤类型	土壤深度/cm	染色面积比/%	容重/(kg·m^{-3})	含水量/%	土壤总孔隙度/%	土壤质地			pH	有机质/(g·kg^{-1})	根长密度/(m·m^{-3})			根重密度/(kg·m^{-3})
						砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%			≤1 mm	1～3 mm	3～5 mm	
淋溶褐土	5	94.36	1.40	41.5	45.6	65.42	24.76	9.82	7.51	20.3	341.0	2.0	0	0.02
	10	78.63	1.43	40.7	46.2	62.73	27.34	9.93	7.69	20.1	288.0	106.0	0	0.01
	15	68.36	1.42	34.7	43.9	51.34	37.32	11.34	7.67	17.2	505.0	34.0	14.0	0.03
	20	56.70	1.45	32.1	42.5	48.30	40.72	10.98	7.93	13.7	424.0	126.0	38.0	0.07
	25	33.04	1.49	39.1	43.1	38.92	48.32	12.76	7.36	10.1	408.0	154.0	0	0.03
	30	26.83	1.51	33.8	40.4	34.53	50.75	14.72	7.16	7.9	296.0	153.0	0	0.03
	35	6.00	1.57	36.9	39.2	28.30	55.97	15.73	7.23	6.3	272.0	156.0	49.0	0.07
潮土	5	96.69	1.39	39.0	40.2	55.88	33.81	10.31	7.27	11.9	296.0	41.0	3.0	0.01
	10	88.41	1.36	42.5	39.9	52.42	35.82	11.76	7.93	10.3	424.0	111.0	15.0	0.01
	15	62.55	1.38	41.2	39.7	48.26	38.91	12.83	7.68	9.5	152.0	103.0	10.0	0.02
	20	59.36	1.41	41.5	36.6	47.30	39.74	12.96	7.63	9.1	264.0	81.0	50.0	0.02
	25	24.79	1.40	39.4	35.3	35.34	47.94	16.72	7.57	8.2	208.0	123.0	0	0.02
	30	15.51	1.45	43.0	33.8	30.51	49.78	19.71	7.63	7.9	240.0	188.0	7.0	0.02
	35	0.79	1.47	45.5	30.9	25.32	53.85	20.83	7.72	7.3	145.0	140.0	38.0	0.02

将表 4 中理化性质和根系数据与染色面积比进行相关性分析，结果 2 种类型土壤中以下指标特征在不同的概率范围显示与染色面积比显著相关，其他指标并没有显著相关性。由表 5 可知，2 种类型土壤与染色面积比相关系数较高的为土壤总孔隙度、土壤质地和土壤有机质，而土壤容重、总孔隙度与土壤质地有极大关系。土壤质地与淋溶褐土和潮土的染色面积比都在 $P<0.01$ 上显著相关，但相关系数不同，前者砂粒、粉粒、黏粒的相关系数均大于后者相应的值，说明土壤质地对不同类型土壤优先流的影响程度不同。这个结果可能是因为 2 类土壤成土母质不同，形成的过程也不同，并且还有其他植被类型、海拔等原因。由表 1 可知，淋溶褐土样地的海拔几乎为潮土样地的 2 倍，影响了 2 种类型土壤质地和优先流染色百

分比的相关性。土壤质地的相关系数最高,土壤有机质次之,然后为土壤总孔隙度,此结果与陈效民等[20]的研究结果相似。根系状况中直径为 1～3 mm 的根长密度与染色面积比在 $P<0.05$ 概率内显著相关,因此不是所有的根系都对优先流路径有贡献,较小的(<1 mm)和较大的(3～5 mm)根系对染色水流下渗贡献率都较低,植物根孔对优先流路径的贡献主要在 1～3 mm 范围内。

表 5　土壤染色面积比与土壤理化性质及根长密度相关性

土壤类型	土壤容重	土壤总孔隙度	土壤质地			土壤有机质	1～3 mm 根长密度
			砂粒	粉粒	黏粒		
淋溶褐土	−0.974**	0.927**	0.988**	−0.984**	−0.958**	0.982**	−0.841*
潮土	−0.850*	0.948**	0.989**	−0.993**	−0.975**	0.961**	−0.787*

注:** 表示在 $P<0.01$ 水平上显著相关,* 表示在 $P<0.05$ 水平上显著相关。

此结果可以解释 2 种类型土壤优先流染色特征的不同,淋溶褐土砂粒含量较高,土壤总孔隙度较高,1～3 mm 根长密度较高,从而使大孔隙形成的优先路径较多,染色水流下渗较多,且更易形成优先流。优先流染色面积比和有机质呈正相关关系,说明有机质含量越高,优先流发生越明显。这可能是因为有机质的存在会影响土壤团聚体的形成,而良好的团聚体结构对应着较大的土壤间孔隙。2 种类型土壤有机质含量由土壤浅层到深层有降低的趋势,淋溶褐土有机质含量(g/kg)从浅层到深层依次为 20.3,20.1,17.2,13.7,10.1,7.9,6.3,潮土则从 11.9 降到 7.3,说明有机质含量和优先流发生特征有着密不可分的联系。

3　结 论

(1)淋溶褐土优先流现象较潮土明显。淋溶褐土的各个纵剖面优先流染色面积比变化较大,平均值较大,基质流深度较小,优先流比为 39.47,大于潮土的 35.7,长度指数较潮土高。综合各染色形态特征参数分析,淋溶褐土的优先流现象更明显,发育较潮土剧烈。

(2)淋溶褐土优先流发生较潮土剧烈,且与土壤深度关系更紧密。淋溶褐土水平剖面染色分布呈“多峰”型,优先路径集中区数量为 3 处;潮土呈“双峰”型,优先路径集中区为 2 处,淋溶褐土侧向流较潮土发达。2 种类型土壤染色面积比和土壤深度的曲线估计表明垂直剖面用立方回归最合适,水平剖面用线性回归最合适。淋溶褐土染色面积比和土壤深度的回归关系中 R^2 分别为 0.988,0.985,均大于潮土相应的值,拟合度较潮土高,两者关系更密切。

(3)对染色面积比影响较大的为土壤质地、土壤有机质和 1～3 mm 根系密度。2 种类型土壤的土壤质地和土壤有机质与染色面积比相关性较强($P<0.01$),且淋溶褐土的各相关系数绝对值均大于潮土。直径 1～3 mm 的根长密度与染色面积比显著相关($P<0.05$)。

参考文献:

[1] 徐宗恒,徐则民,曹军尉,等.土壤优先流研究现状与发展趋势[J].土壤,2012,44(6):905-916.

[2] 程金花,张洪江,史玉虎,等.长江三峡花岗岩地区优先流对渗流和地表径流的作用[J].水土保持通报,2007,27(2):18-23,42.

[3] 肖自幸.鹫峰国家森林公园土壤水力参数和溶质运移研究[D].北京:北京林业大学,2012.

[4] Zhang Y, Zhang X, Zhang Z, et al. Water flow and preferential flow: A State-of-the-Art throughout the literature. [EB/OL]. Hydrology and Earth System Sciences, 2017. [2017-12-10]. https://www.hydrol-earth-syst-sci-discuss.net/hess-2017-210/.

[5] 戴翠婷,刘窑军,王天巍,等.三峡库区高砾石含量紫色土优先流形态特征[J].水土保持学报,2017,31(1):103-108,115.

[6] 王伟.三峡库区紫色砂岩林地土壤优先流特征及其形成机理[D].北京:北京林业大学,2011.

[7] 王发,付智勇,陈洪松,等.喀斯特洼地退耕和耕作土壤优先流特征[J].水土保持学报,2016,30(1):111-116.

[8] 牛健植,余新晓,张志强.优先流研究现状及发展趋势[J].生态学报,2006,26(1):231-243.

[9] 高朝侠,徐学选,赵娇娜,等.土壤大孔隙流研究现状与发展趋势[J].生态学报,2014,34(11):2801-2811.

[10] 邵文伟.鹫峰国家森林公园优先流类型及影响因子研究[D].北京:北京林业大学,2011.

[11] 王彬俨.北京昌平区农地土壤优先路径特征及其对硝态氮运移的影响[D].北京:北京林业大学,2013.

[12] Shi Z, Xu L, Wang Y, et al. Effect of rock fragments on macropores and water effluent in a forest soil in the stony mountains of the Loess Plateau, China [J]. African Journal of Biotechnology, 2012, 11(39): 9350-9361.

[13] Flury M, H Fluhler, W A Jury, et al. Susceptibility of soils to preferential flow of water-a field study [J]. Water Resources Research, 1994, 30(7): 1945-1954.

[14] 吴庆华.基于土壤水入渗补给的优先流定量研究[D].北京:中国地质科学院,2013.

[15] Bargués Tobella A, Reese H, Almaw A, et al. The effect of trees on preferential flow and soil infiltrability in an agroforestry parkland in semiarid Burkina Faso [J]. Water Resources Research, 2014, 30(7): 3342-3354.

[16] Van Schaik N. Spatial variability of infiltration patterns related to site characteristics in a semi-arid watershed [J]. Catena, 2009, 78: 36-47.

(下转第 131 页)

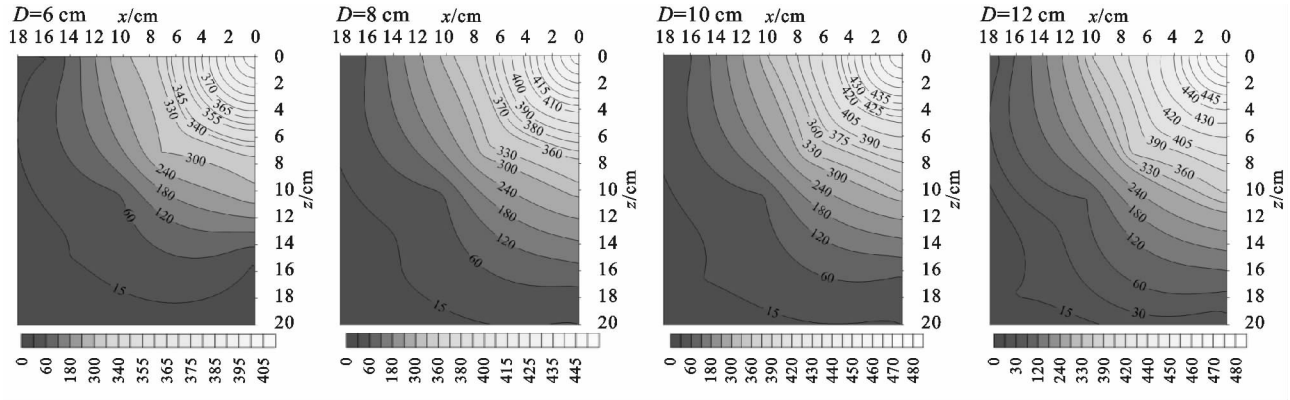


图 7　湿润体内土壤 NH_4^+ －N 含量分布等值线

3　结 论

（1）膜孔直径越大，湿润锋运移距离越大，湿润锋运移距离与入渗时间呈极显著的幂函数关系。膜孔直径对浑水膜孔灌肥液自由入渗湿润体内水分分布影响显著，膜孔直径越大，湿润体范围越大，高含水率区域越大，湿润体内同一位置处的含水率也越大。

（2）膜孔直径对浑水膜孔灌肥液入渗能力有较大影响。单位膜孔面积累积入渗量与入渗时间符合 Philip 入渗模型；相同入渗时间内，膜孔直径的越大，单位膜孔面积累积入渗量越小。随着膜孔直径的增大，吸渗率 S 和稳定入渗率 A 逐渐减小。

（3）膜孔直径越大，相同时间内 NO_3^- －N 浓度锋运移距离越大，同一位置处 NO_3^- －N 含量和 NH_4^+ －N 含量越大。在入渗 400 min 内，在膜孔中心附近区域 NO_3^- －N 含量和 NH_4^+ －N 含量较高，湿润体内土壤 NO_3^- －N 主要集中分布在距膜孔中心 15 cm 范围内，而 NH_4^+ －N 主要集中分布在距膜孔中心 8 cm 范围内。

参考文献：

[1] 董玉云. 膜孔入渗土壤水氮运移特性试验与数值模拟[D]. 西安：西安理工大学，2007.

[2] 费良军，程东娟，雷雁斌，等. 膜孔灌单点源入渗特性与数学模型研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2007，35(5)：212-216.

[3] 王锦辉，费良军，聂卫波. 浑水灌溉入渗特性研究进展与展望[J]. 干旱地区农业研究，2016，34(2)：265-270.

[4] 董玉云，王宝成，费良军. 膜孔肥液单向交汇入渗水氮运移特性试验研究[J]. 中国农村水利水电，2015(6)：91-94.

[5] 钟韵，费良军，傅渝亮，等. 浑水膜孔灌入渗影响因素[J]. 排灌机械工程学报，2017，35(2)：178-184.

[6] 林晓康. 不同因素对微咸水膜孔灌水氮盐运移影响[D]. 河北 邯郸：河北工程大学，2015.

[7] 刘利华，费良军，朱红艳，等. 含沙率对浑水膜孔灌单孔自由入渗特性的影响[J]. 灌溉排水学报，2017，36(12)：62-67.

[8] Li Y, Fan Y, Liu Y, et al. In fluencing factors and simplified model of film hole irrigation [J]. Water, 2017, 9(7): 543.

[9] Bouwer H, Ludke J, Rrice R C. Sealing pond bottoms with muddy water [J]. Ecological Engineering, 2001, 18(2): 5-8.

[10] Saeed M, Mahmood S. Application of film hole irrigation on borders for water saving and sunflower production [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2013, 38(6): 1347-1358.

[11] 费良军，王锦辉. 泥沙粒度组成对浑水膜孔灌单向交汇入渗特性的影响[J]. 农业机械学报，2016，47(4)：105-112.

[12] 费良军，王锦辉，金世杰. 不同膜孔直径的浑水膜孔灌自由入渗特性研究[J]. 农业机械学报，2016，47(2)：172-178.

[13] 金世杰，费良军，傅渝亮，等. 土壤初始含水率对浑水膜孔灌自由入渗特性影响[J]. 水土保持学报，2016，30(5)：235-239.

[14] 钟韵，费良军，傅渝亮，等. 土壤容重对浑水膜孔灌单点源自由入渗特性的影响[J]. 水土保持学报，2016，30(2)：88-91，96.

[15] 脱云飞，费良军，董艳慧，等. 土壤容重对膜孔灌水氮分布和运移转化的影响[J]. 农业工程学报，2009，25(2)：6-11.

[16] 朱兴华. 施肥条件下膜孔自由入渗水、氮运移特性试验研究[D]. 西安：西安理工大学，2006.

[17] 董玉云，费良军，穆红文. 肥液浓度对单膜孔入渗 NO_3^- －N 运移特性影响的室内试验研究[J]. 农业工程学报，2006，22(5)：204-206.

[18] 董玉云，费良军，任建民. 土壤质地对单膜孔肥液入渗水分及氮素运移的影响[J]. 农业工程学报，2009，25(4)：30-34.

[19] 费良军，刘显，王佳，等. 土壤容重对涌泉根灌土壤水氮运移特性的影响[J]. 农业机械学报，2017，48(8)：219-228.

(上接第 119 页)

[17] Aeby P, Forrer J, Steinmeier C, et al. Image analysis for determination of dye tracer concentrations in sand columns [J]. Soil Science Society of America Journal, 1997, 61(1): 33-35.

[18] 牛健植. 长江上游暗针叶林生态系统优先流机理研究[D]. 北京：北京林业大学，2003.

[19] 李伟莉，金昌杰，王安志，等. 土壤大孔隙流研究进展[J]. 应用生态学报，2007，18(4)：888-894.

[20] 陈效民，黄德安，吴华山. 太湖地区主要水稻土的大孔隙特征及其影响因素研究[J]. 土壤学报，2006，43(3)：181-183.