

黑龙江省水源地优先流区与基质流区土壤特性分析

王赵男, 辛颖, 赵雨森

(东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040)

摘要: 以黑龙江省东部山地天然次生林为研究对象, 采用野外染色示踪和统计分析相结合的方法, 应用 Photoshop Cs5, Image pro Plus6.0 图像处理软件, 分析天然次生林下优先流区和基质流区土壤特性差异。结果表明: 黑龙江省东部山地天然次生林土壤优先流现象极为明显, 主要以大孔隙流、指流以及管流为主。表层土壤孔隙间的连通性好, 水分运动过程变得相对均匀, 不易于发生优先流。10—45 cm 土层范围内, 染色路径不再整体均匀扩散, 表现出明显的优先迁移特征, 产生优先流, 并表现出了一定的环绕特性。从土壤表层到底层, 染色区非毛管孔隙度比未染色区高 0.3%~2.0%。非毛管性孔隙可视作大孔隙, 是产生优先流的主要原因。0—40 cm 土层范围内, 染色区土壤饱和持水量、毛管持水量和田间持水量均高于未染色区, 染色区土壤容重均低于未染色区。20—40 cm 是该地区天然次生林土壤产生“优先路径”最明显的土层。在此范围内优先流区土壤入渗速率明显大于基质流区, 证明该区土壤特性差异是黑龙江省东部山地天然次生林优先流产生的主要原因。

关键词: 土壤特性; 优先流; 基质流; 孔隙度; 入渗

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)01-0049-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.01.009

Analysis on Soil Characters of Preferential Pathways and Soil Matrix in Water-source Area of Heilongjiang Province

WANG Zhaonan, XIN Yin, ZHAO Yusen

(College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040)

Abstract: This paper took the soil characteristics between preferential flow and matrix of natural secondary forests at eastern mountainous region in Heilongjiang province as research object. By using the field dye tracer method and Image processing software. The results showed that: The phenomenon of soil preferential flow was very obviously in natural secondary forests at eastern mountain in Heilongjiang province. There were mainly macropore flow, mean flow and pipe flow. The soil pore connectivity was unimpeded in surface. Water movement process became relatively uniform. So the preferential flow was not easy to occur. Within the range of 10—45 cm soil layer, the dyeing path was no longer a whole uniform diffusion. There was obviously preferential migration and certain surround characteristics. From surface to bottom of soil, the non-capillary porosity of staining region was 0.3%—2.0% higher than unstained area. Meanwhile, non-capillary porosity was considered as main reason for the generation of preferential flow. In the range of 0—40 cm soil layer, the water holding capacity, capillary capacity and field capacity in the dyeing area were higher than those of unstained area, the soil bulk density was on the contrary. The priority path was most obviously in 20—40 cm of soil in natural secondary forest. In this area, the infiltration rate of preferential flow area was significantly higher than that of matrix. And it proved that the difference of soil characteristic was the main reason of soil preferential flow of natural secondary forest at eastern mountain in Heilongjiang province.

Keywords: soil properties; preferential flow; matrix flow; porosity; infiltration

优先流是描述在多种环境条件下所发生的非平衡流过程的术语^[1], 主要指土壤水分以及溶质沿着某一路径迁移, 绕过大部分土壤基质, 快速通过土壤介质的运动过程^[2-3], 而该迁移路径一般是大孔隙、虫穴

洞、根系等优先通道。优先流是十分普遍的水分运动特性, 同时也是世界水文研究的难点和重点。受土壤质地、孔隙度等因素影响, 大量的连通性通畅的土壤孔道可构成水分快速运动和长距离搬运土壤颗粒的

通道^[4],进而促进优先流产生。优先流存在于各类土壤及母质中,它是土壤从均质走向非均质的标志^[5],国外在这方面的研究已经取得显著的成果。相关学者通过采用监测土壤水分变化、土柱穿透曲线、数值模拟等办法对鹭峰森林公园、重庆四面山和三峡等地区的优先流特征分别进行了相关研究。但是这些方法模拟性较强,间接的扩大了优先流现象。而染色示踪法因自身具有直观、准确、成本低等优点被广泛应用于试验中。

采用染色示踪法获得优先流时,一般认为土壤的染色区域为优先流区,未染色区域为基质流区。引起优先流发生的因素有很多,如土壤的特性、植物根系的分布、动物的活动以及人为干扰等^[6],其中土壤的特性是最基本的影响因素。我国优先流研究起步较晚,目前主要集中在西南、华中和华东地区^[7-8]。而我国东北林区发挥着涵养水源、保持水土等重要的生态功能,目前尚没有关于该地区土壤优先流的研究报道。本文以黑龙江省东部山地水源涵养林为研究对象,采用染色示踪法,研究该地区天然次生林土壤优先流区和基质流区的土壤特性差异,以期为黑龙江省东部山地林区水源涵养、植被生态建设提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黑龙江省东北林业大学帽儿山实验林场老山试验站(127°20′42″—127°36′15″ E, 45°16′44″—45°19′00″ N),属张广才岭西北部小岭的余脉,地势丘陵起伏,平均海拔 300 m,最高海拔 805 m。季风气候鲜明,冬季漫长、寒冷干燥,夏季温热短暂,年平均气温 2.8℃,年均降水量 723.8 mm,多集中在 7—8 月,无霜期 120~140 d。属长白植物区系,是东北部山区较为典型的天然次生林^[9]。原有的阔叶红松林遭到采伐和人为破坏后形成了种类繁多的天然次生林和人工林,如柞树(*Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb)、红松(*Pinus koraiensis*)、兴安落叶松(*Larix gmelinii*)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、云杉(*Picea asperata*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、胡桃楸(*Juglans mandshurica*)、黄菠萝(*Phelodendron amurense*)、五角槭(*Acer mono*)、椴树(*Tilia tuan*)、糖槭(*Acer saccharum*)、榆树(*Ulmus pumila* L)、山桃(*Amygdalus davidiana*)、丁香(*Syringa*)等树种。地带性土壤为暗棕壤,平均土层厚度在 35—40 cm,非地带性土壤为有白浆土、沼泽土、草甸土等土壤类型。

1.2 研究方法

1.2.1 野外染色示踪试验 2015 年 9 月在帽儿山实验林场老山试验站选取具有代表性的天然次生林作为

研究对象,设置面积为 400 m² (20 m×20 m)的试验观测样地。样地树种组成为五角槭(*Acer mono*)、青杨(*Populus cathayana*)、蒙古栎(*Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb)、白桦(*Betula platyphylla*),平均胸径为 9.5 cm,平均高为 7.7 m,郁闭度为 0.8。在样地内选取 3 块试验点,试验点距离周边植株距离均等且每个试验点周围的植株数量大体相同。首先清理每个试验点地表较大的枯枝和砾石,将一个长宽均为 100 cm、高 50 cm、厚 0.5 cm 的铁框放置在选定的试验点上。紧贴着铁框的外围挖沟,让铁框在重力作用下下沉 30 cm,用气锤将铁框内壁 5 cm 以内的土壤捣实,以防止染料沿铁框内壁缝隙下漏。以研究当地降雨资料为依据,使用模拟降雨器将 25 L 浓度为 4.0 g/L 的亮蓝染色剂^[10]均匀喷洒在铁框内。溶液喷洒完毕后,用塑料布将铁框盖好,四周绑紧,确保染色后再无其他降水输入。

1.2.2 样品采集 染色示踪试验 24 h 后,在不扰动框内土体的情况下移走铁框,除去染色示踪土体每边 10 cm 的边缘土,用土壤刀和软毛刷将土壤剖面修平,用数码相机将每个垂直剖面的染色剖面拍摄下来。然后每 10 cm 为一层水平挖掘土壤剖面,直到再没有染色区域为止。在每 10 cm 土层范围内,按照染色区和未染色区域分别用 6 个 100 cm³ 环刀取原状土,用于测定土壤物理性质。同时用已知质量铝盒在环刀取原状土的位置取相应的土壤,带回实验室用于测定土壤含水率。同时用数码相机每 10 cm 为一层采集水平土壤染色剖面。

1.2.3 土壤物理指标测定 将取好的环刀和铝盒带回实验室,用渗透桶法测定容重和孔隙度,用烘干法测定土壤含水率^[11]。

1.2.4 数据分析方法 利用 Photoshop Cs5 将采集到的土壤染色剖面图像进行镜头校正、裁剪,经过自动调整对比度,通过颜色替换和灰度调节,使图像调成黑色和白色的二元图片,其中黑色为染色区,白色为未染色区^[12]。再将图片导入专业图像软件 Image Pro Plus6.0 中,对已经处理后的图像进行统计和分析。

采用 SPSS 19.0 统计分析软件对试验数据进行处理与分析,采用单因素方差分析法比较优先流区和基质流区土壤属性的差异,显著性水平设定为 $P=0.05$,采用 Sigma plot 与 Excel 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 土壤优先流现象

土壤染色剖面垂直分布特征如图 1 所示,研究区天然次生林土壤优先流现象极为明显,主要以大孔隙流、指流以及管流为主。水分通过根系孔道和穴居动物的孔道绕过基质区快速的运动到土壤的下层。在

0—10 cm 土层,染色分布相对均匀,染色面积较大,10 cm 时染色面积达到最大值 97.64%。在 10—45 cm 土层,染色路径表现明显的偏离分布,不再是整体的均匀扩散。土壤水分表现出明显的优先运移特征,水分的运移是以优先流为主。10 cm 土层以下的染

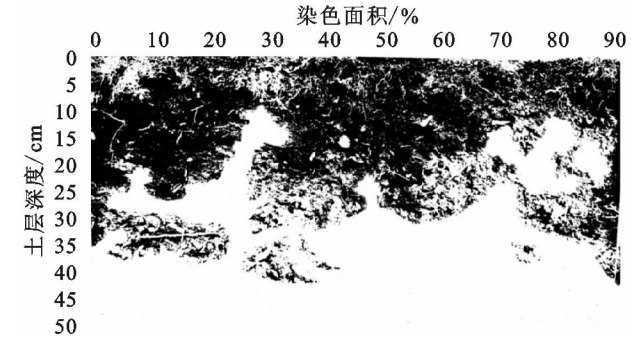


图 1 优先流区和基质流区在土壤剖面的分布

2.2 优先流区和基质流区孔隙度分析

由图 2 可知,40—50 cm 土层范围内,染色区土壤总孔隙度和毛管孔隙度低于未染色区,非毛管孔隙度高于未染色区;在 0—50 cm 土层范围内染色区非毛管孔隙为 6.40%~2.19%,未染色区非毛管孔隙为 6.14%~1.10%。在整个剖面中染色区非毛管孔隙总是高于未染色区,且在 20—40 cm 处表现极为显著($P<0.05$)。最大染色深度能够描述优先流的快速运动特征^[13],在挖掘剖面时,亮蓝溶液的最大染色深度为 46 cm,说明非毛管孔隙是产生优先流的主要原因。

2.3 优先流区和基质流区持水性特征分析

优先流区与基质流区土壤持水特性分析结果见表 1。土壤饱和持水量、毛管持水量和田间持水量呈现出随着土层深度的增加逐渐降低的趋势,且差异显著($P<0.05$)。0—10 cm 土层范围内,田间持水量都达到了 93%以上,饱和持水量和毛管持水量全部在 100%以上。因为表层土壤中有大量植物根系,导致表层土壤容重较低,未染色区和染色区分别为 0.86, 0.81 g/cm³。10—20 cm 土层,田间持水量骤然降低到 65%以下,饱和持水量和毛管持水量也急剧下降。土壤容重升高到 1.00, 0.91 g/cm³。土壤上层比下层的持水量高出近一倍。

0—40 cm 土层范围内,每一层染色区土壤饱和持水量、毛管持水量和田间持水量均高于未染色区。染色区土壤容重均低于未染色区,且土壤容重随土层深度的增加而逐渐升高。土壤容重反映土壤质地,土壤质地的异质性造成土壤孔隙度的差异,进而影响了不同土层深度的持水量,导致了水分运移时优先选择的路径不同,诱导了优先流的产生。再次反映出土壤质地的差异性,是优先流形成的主要原因之一。

色面积总体随土层深度加深逐渐减小。但是在 15 cm 和 20 cm 深时染色面积又分别增加到 71.19%和 72.37%。结合染色图像发现,染色部分出现了环形区域,避开了土层下的一部分土壤,从两侧下渗,优先流表现出了一定的环绕特性。

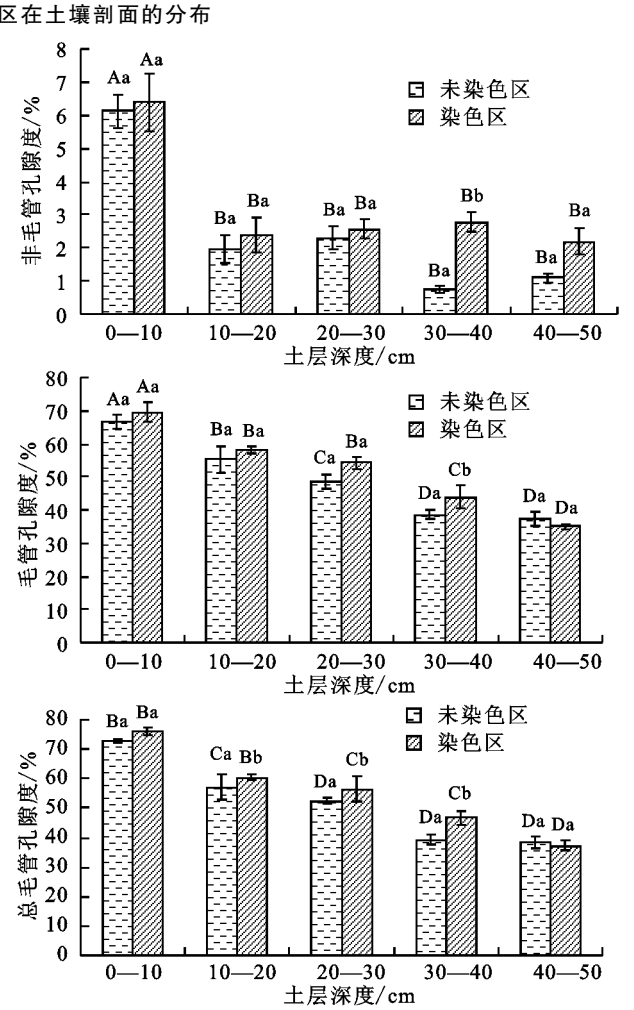
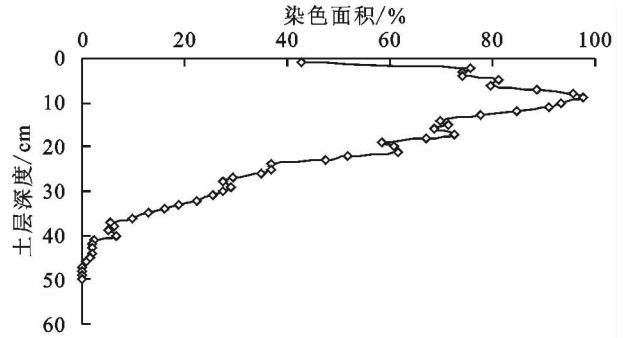


图 2 优先流区和基质流区孔隙度差异性

2.4 优先流区和基质流区入渗特性分析

优先流区与基质流区入渗过程如图 3 所示,天然次生林土壤入渗速率开始有正常的波动现象,在 36 min 后都达到了稳渗。染色区和未染色区土壤入渗过程表现出不同的差异。未染色区表层土壤入渗速率波动浮动较大。

表 1 优先流区和基质流区持水性特征差异

土层深度/cm	土壤容重/(g·cm ⁻³)		土壤饱和持水量/%		土壤毛管持水量/%		土壤田间持水量/%	
	未染色区	染色区	未染色区	染色区	未染色区	染色区	未染色区	染色区
0—10	0.86±0.01Aa	0.81±0.01Aa	112.91±1.57Aa	124.22±5.63Ab	103.41±3.28Aa	113.23±4.79Ab	93.96±3.37Aa	94.53±4.18Ab
10—20	1.00±0.01Ba	0.91±0.01Bb	56.22±3.83Ba	69.84±2.70Bb	54.30±3.99Ba	67.09±1.80Bb	51.13±2.07Ba	65.03±1.87Bb
20—30	1.08±0.01Ca	1.01±0.02Cb	50.96±4.63Ba	59.04±4.02Ba	47.13±4.89Ba	56.59±4.37Cb	42.15±1.01Ca	51.73±4.50Cb
30—40	1.43±0.01Da	1.27±0.01Db	26.50±1.53Ca	36.91±0.71Ca	26.00±1.51Ca	34.69±1.15Db	24.65±1.14Da	33.38±1.41Db
40—50	1.51±0.02Ea	1.49±0.01Ea	25.41±1.77Ca	25.58±1.39Db	24.69±1.80Ca	24.07±0.85Ea	22.62±1.34Da	22.96±0.76Eb

注:不同大写字母表示剖面内不同土层间差异($P<0.05$);不同小写字母表示同一土层内染色与未染色的差异($P<0.05$)。

染色区 10—20 cm 土层入渗速率最高为 0.400 mm/min,在 12 min 时达到稳渗,稳渗速率为 0.283 mm/min。20—30 cm 土层入渗速率最高为 0.500 mm/min,在 10 min 时达到稳渗,稳渗速率为 0.490 mm/min。20—30 cm 土层的入渗速率和稳渗速率最高,且更早达到稳渗状态。30—40 cm 土层在 24 min 时达到稳渗速率。

结合优先流图像信息(图 1),20—40 cm 是产生“优先路径”的最明显且最多的土层。这 2 层土壤非毛管孔隙恰好是除基质流区(0—10 cm)外较大的,再

次证明 20—40 cm 土层有相互连通性良好的大孔隙网路,形成了较多的“优先路径”诱导了优先流的发生,使得水分绕过了土壤致密的地区并快速下渗,所以该处土壤入渗速率明显大于其他区域^[14]。这是由于表层土壤枯枝落叶层较厚,加之根系纵横,使得孔隙度较大,水分下渗加快,用时缩短。直到 40—50 cm 处,入渗速率先降低再升高,在 36 min 时才达到稳渗,时间较长,是因为土层已逐渐达到母质层,土壤紧实,孔隙极小,阻碍了水分的下渗,所以水分入渗整体趋势呈现由高到低。

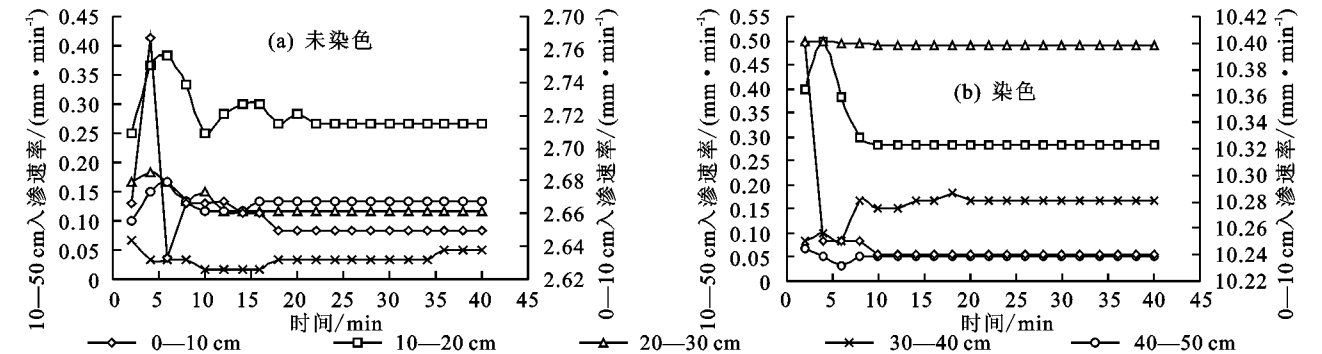


图 3 优先流区和基质流区入渗特征差异

3 讨论

野外染色示踪可以直观地展示出优先路径及染色程度。借助这种研究方法可以很好的研究土壤类型、含水率、斥水性和孔隙等土壤特性对优先流的形成和发育影响的情况^[15]。孙龙等^[16]研究证明不同土壤深度的土壤特性有着较大的差异。本研究表明,黑龙江东部山地天然次生林地区存在极明显的优先流现象。土壤优先流的发生本身具有极大的随机性,而影响优先流的因素又十分的繁多,优先流的存在,使其土壤内部的水流运动速度有较大的提高,影响土壤物理特性,反过来土壤物理性质对优先流的发生和发育也有很大影响。这与孙龙等的研究结果相符。

孔隙度是非常重要的土壤物理指标,土壤的孔隙状况直接影响优先流的分布。土壤总孔隙度包括毛管孔隙(<0.1 mm)和非毛管孔隙(>0.1 mm)。毛管孔隙借助毛管力的作用能够保持水分,其中以 0.1~0.001 mm 毛管孔隙的毛管作用最强,小于 0.001 mm 的孔隙,由于受制于颗粒间束缚水膜的影响,不起毛管作用。黑龙

江省东部山地天然次生林 0—40 cm 土层染色区总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度均高于未染色区。0—10 cm 土层土壤孔隙度最高,染色区毛管孔隙度为 69.46%、总孔隙度为 75.85%,未染色区毛管孔隙度为 66.72%、总孔隙度为 72.84%。在 40 cm 处,染色区毛管孔隙度为 35.07%、总孔隙度为 37.26%,未染色区毛管孔隙度为 37.32%、总孔隙度为 38.42%。表层土壤孔隙间的连通性好,具有很强连通网络,使得表层水分运动过程变得相对均匀,不易于发生优先流。由土壤染色剖面图像(图 1)也可以看出,表层土壤几乎全部被染色。主要是由于天然次生林下土壤表层有较多的枯落物层和植物根系,大量的分解和半分解的枯落物与植物的根系在土壤表层相互纵横形成了一个网状的连通的水分运输结构,使得水分在下渗和再分配过程中均匀分布在土壤表层,所以染色较为均匀。

土壤大孔隙是描述优先流发生的一个重要的参数。它与土壤中发生的许多过程紧密相关,并受土壤特性的影响。Germann 等^[17]认为大孔隙能为土壤内

部水分快速的运移提供有效的通道,是水分及溶质快速穿透、绕过土壤基质的最主要的、甚至是唯一的通道。目前,大孔隙还没有一个完全明确的统一的定义,林大仪^[18]认为土壤总孔隙度与毛管孔隙度之差可以作为土壤大孔隙度。同时 Glab^[19]认为土壤表层由于根系形成的网络促进了大孔隙的形成,极易诱导优先流的发生。本文的研究结果表明,随着土层深度的增加,大孔隙度也逐渐的降低,染色区和未染色区的孔隙度差异证明大孔隙是黑龙江东部山地天然次生林土壤优先流发生的重要影响因素。这与时忠杰等^[20]、石辉等^[21]的研究结论一致。

Beven 等^[22]发现大孔隙中水分及溶质的运移主要受重力势支配,毛管势和基质势对其影响不大,已有试验证明大孔隙可视为非毛管性孔隙。则可认为黑龙江省东部山地天然次生林土壤优先流产生的主要的原因之一是土壤大孔隙的作用。

田间持水量被认为是土壤所能稳定保持的最高土壤含水量。Radulovich 等^[23]将土壤达到田间持水量时排水的孔隙定义为大孔隙,土壤优先流独有的持水特性恰恰是诱导土壤优先流路径的形成原因之一。

由于天然次生林土壤表层有一层较厚的分解和半分解的枯枝落叶层。林内乔灌木的主根系垂直扎的较深,侧根和细根相互缠绕延伸整个土壤表层,与分解的枯枝落叶正好形成了很多致密多孔的小室,滋养了真菌和土壤微生物,进而又加速了枯落物层分解。在模拟降雨过程中,土壤表层有一定的斥水性^[24]。土壤的斥水性导致了土壤水分的不均匀的入渗,从而形成了优先流^[25]。

染色面积百分比作为优先流的一个特性指标,可以定性的显示出水流快速穿透和环绕的运动现象,能够直观的表现出优先路径的发生和发育程度,是反映优先流的一个重要的参考,将染色面积比和不同土层深度的土壤特性建立相应的关系是一种近年来比较常用的研究方法,但把不同土层的染色面积比极细的划分在目前很少,Bouma 等^[26]研究表明作为优先流特征参数,染色面积百分比可以监测土壤内孔隙的数量、直径和大小,本研究中,以 16×40 个像素点表征土壤剖面的 $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$,充分的表征了优先流的每一厘米的染色程度,完全的体现了整体的优先流的特性。Etana 等^[27]研究表明染色面积百分比随土壤深度的增加而逐渐降低。蒋小金^[28]研究发现染色区域出现了环绕的特征,在土壤中层出现染色土壤突然增加的现象。黑龙江省东部山地天然次生林在 15 cm 到 30 cm 土层内染色面积百分比同样也出现了突然增加的现象,优先流出现了明显的环绕特征。

土壤优先流的研究尺度上大多数还是处于室内

封闭的实验室^[29],少数扩展至室外区域尺度等大尺度的研究中。同时研究优先流的方法技术也从单一的方法转变成计算机图像,室外试验、CT 扫描等相结合等,以及进一步的建立模型,从而得到更加精确的数据来呈现优先流的运动过程,使优先流的研究从定量逐渐达到定性上的研究。而怎样更好的运用多种技术相结合,建立行之有效的模型,是以后研究的难点和热点。

4 结论

野外染色示踪试验显示黑龙江省东部山地天然次生林土壤优先流现象极为明显,主要以大孔隙流、指流以及管流为主,水分可以通过根系孔道和穴居动物的孔道绕过基质区快速的运动到土壤的下层。表层土壤孔隙间的连通性好,具有很强连通网络,使得表层水分运动过程变得相对均匀,不易于发生优先流。在 $10\text{—}45 \text{ cm}$ 土层范围内,染色路径不再整体的均匀扩散,土壤水分表现出明显的优先运移特征,以优先流为主,并表现出了一定的环绕特性。

天然次生林优先流区和基质流区土壤特性存在明显的差异。优先流产生的主要原因之一是土壤大孔隙的作用。 $0\text{—}40 \text{ cm}$ 土层优先流区非毛管孔隙度均高于基质流区。非毛管性孔隙可视为大孔隙,是产生优先流的主要原因。土壤容重和孔隙度的差异影响了不同土层深度的持水量,导致了水分运移时优先选择的路径不同,诱导了优先流的产生。

$20\text{—}40 \text{ cm}$ 是该区天然次生林土壤产生“优先路径”最明显的土层。这个范围内优先流区土壤非毛管孔隙和入渗速率明显大于基质流区,再次证明土壤特性差异是黑龙江省东部山地天然次生林优先流产生的主要原因。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Gerke H H. Preferential flow descriptions for structured soils [J]. Journal of Plant Nutrition & Soil Science, 2006,169(3):382-400.
- [3] Clothier B E, Green S R, Deurer M. Preferential flow and transport in soil: Progress and prognosis[J]. European Journal of Soil Science, 2008,59(1):2-13.
- [4] 程金花,张洪江,史玉虎,等. 长江三峡花岗岩区林地优先流影响因子分析[J]. 水土保持学报,2006,20(5):28-33.
- [5] 田香姣,程金花,杜士才,等. 2 种土地利用方式下的优先流特征[J]. 水土保持学报,2014,28(3):37-41.
- [6] 吕文星,张洪江,吴煜禾,等. 基于点格局分析的林地表层土壤优先路径水平分布特征[J]. 水土保持学报,2012,26(6):68-74.
- [7] 王彬俨,程金花,张洪江,等. 北京昌平区农地土壤大孔

- 隙特征[J]. 水土保持学报, 2012, 26(3): 189-193.
- [8] 蒋小金, 王恩姮, 陈祥伟, 等. 典型黑土耕地土壤优先流环绕特征[J]. 应用生态学报, 2010, 21(12): 3127-3132.
- [9] 熊婕, 辛颖, 赵雨森. 水源涵养林水文生态效应研究进展[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(2): 463-465.
- [10] 陈晓冰, 张洪江, 李世友, 等. 紫色砂岩区不同植被类型土壤优先流特征及其影响因素[J]. 中国水土保持科学, 2014, 12(6): 42-49.
- [11] 陈立新. 土壤实验实习教程[M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2008: 6.
- [12] Mooney S J, Morris C. A morphological approach to understanding preferential flow using image analysis with dye tracers and X-ray Computed Tomography[J]. Catena, 2008, 73(2): 204-211.
- [13] 邵文伟. 鹭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.
- [14] 魏虎伟, 程金花, 张洪江, 等. 四面山 2 种林地大孔隙特征与优先流关系研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4): 263-268.
- [15] 魏虎伟, 程金花, 杜士才, 等. 利用染色示踪法研究四面山两种林地优先路径分布特征[J]. 水土保持通报, 2015, 35(2): 193-197, 204.
- [16] 孙龙, 张洪江, 程金花, 等. 重庆江津区柑橘地土壤大孔隙特征[J]. 水土保持学报, 2012, 26(3): 194-198.
- [17] Germann P F, Edwards W M, Owens L B. Profiles of bromide and increased soil moisture after infiltration into soils with macropores1 [J]. Soilence Society of America Journal, 1984, 48(2): 237-244.
- [18] 林大仪. 土壤学实验指导[M]. 北京: 中国林业出版社, 2004: 10-60.
- [19] Glab T. Impact of soil compaction on root development and yield of meadow-grass[J]. International Agrophysics, 2013, 27(1): 7-13.
- [20] 时忠杰, 王彦辉, 徐丽宏, 等. 六盘山典型植被下土壤大孔隙特征[J]. 应用生态学报, 2007, 18(12): 2675-2680.
- [21] 石辉, 刘世荣. 森林土壤大孔隙特征及其生态水文学意义[J]. 山地学报, 2005, 23(5): 23-29.
- [22] Beven K, Germann P G. Macropores and water flow in soils [J]. Water Resources Research, 1982, 18(5): 1311-1325.
- [23] Radulovich R, Solorzano E, Sollins P. Soil macrospore size distribution from water breakthrough curves [J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53(2): 556-559.
- [24] 肖自幸, 朱蔚利, 牛健植, 等. 鹭峰国家森林公园不同林分下土壤优先流现象研究[J]. 湖南农业科学, 2011(17): 118-121.
- [25] 秦纪洪, 赵利坤, 孙辉, 等. 岷江上游干旱河谷旱地土壤斥水性特征初步研究[J]. 水土保持学报, 2012, 26(1): 259-262, 272.
- [26] Bouma J, Dekker L W. A case study on infiltration into dry clay soil I. Morphological observations[J]. Geoderma, 1978, 20(1): 27-40.
- [27] Etana A, Larsbo M, Keller T, et al. Persistent subsoil compaction and its effects on preferential flow patterns in a loamy till soil[J]. Geoderma, 2013, 192(1): 430-436.
- [28] 蒋小金. 典型黑土耕地土壤优先流特征研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011.
- [29] 张英虎, 牛健植, 朱蔚利, 等. 森林生态系统林木根系对优先流的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(6): 1788-1797.
- (上接第 48 页)
- [16] 王鹏飞, 郑子成, 张锡洲. 玉米苗期横垄坡面地表糙度的变化及其对细沟侵蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 30-34.
- [17] 何晓玲, 郑子成, 李廷轩. 玉米种植下紫色坡耕地径流中磷素流失特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(12): 2441-2450.
- [18] 李恒鹏, 金洋, 李燕. 模拟降雨条件下农田地表径流与壤中流氮素流失比较[J]. 水土保持学报, 2008, 22(2): 6-9.
- [19] 张宇, 荣湘民, 王心星, 等. 覆盖与生态拦截对旱地土壤地表径流和氮素流失的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2): 15-19.
- [20] 潘忠成, 袁溪, 李敏. 降雨强度和坡度对土壤氮素流失的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 9-13.
- [21] 陈玲, 刘德富, 宋林旭, 等. 不同雨强下黄棕壤坡耕地径流养分输出机制研究[J]. 环境科学, 2013, 34(6): 2151-2158.
- [22] 吴希媛, 张丽萍, 张妙仙, 等. 不同雨强下坡地氮流失特征[J]. 生态学报, 2007, 27(11): 4576-4582.
- [23] 张威, 艾绍英, 姚建武, 等. 广州郊区菜地氮磷养分径流流失特征初步研究[J]. 农业资源与环境学报, 2009, 26(3): 73-78.
- [24] Liu Y, Tao Y, Wan K Y, et al. Runoff and nutrient losses in citrus orchards on sloping land subjected to different surface mulching practices in the Danjiangkou Reservoir area of China[J]. Agricultural Water Management, 2012, 110(3): 34-40.
- [25] 刘晓君, 李占斌, 宋晓强, 等. 土石山区不同农作方式下坡面径流氮素流失过程[J]. 水土保持学报, 2015, 29(1): 80-85.
- [26] 梁新强, 陈英旭, 李华, 等. 雨强及施肥降雨间隔对油菜田氮素径流流失的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(6): 14-17.