

DOI: 10.5846/stxb202008042034

马昀, 孟晨, 岳健敏, 宋乃平, 谢莉, 杜灵通. 宁夏荒漠草原不同林龄人工柠条林地土壤优先流研究. 生态学报, 2022, 42(3): 895-903.

Ma Y, Meng C, Yue J M, Song N P, Xie L, Du L T. Study on preferential flow of soil of artificially planted caragana korshinskii shrubland in different years of desert grassland in Ningxia. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(3): 895-903.

宁夏荒漠草原不同林龄人工柠条林地土壤优先流研究

马 昀^{1,2}, 孟 晨^{1,2,3,*}, 岳健敏^{1,2}, 宋乃平^{1,2}, 谢 莉^{1,2}, 杜灵通^{1,2}

1 宁夏大学生态环境学院, 银川 750021

2 宁夏大学西北土地退化与生态系统恢复国家重点实验室, 银川 750021

3 宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021

摘要: 土壤优先流作为土壤中常见的水分流动方式, 会造成土壤水分流失、地下水污染及坡面土体稳定性降低等问题。以位于宁夏盐池县的典型荒漠草原为研究区域, 通过土壤水分入渗染色法、CT 扫描法、图像处理技术相结合的分析方式, 选取人工营造 9、14、24、35 年的柠条灌丛林地, 以空白草地作为对照, 探究不同恢复年限人工柠条林土壤优先流特征及其与土壤大孔隙与根系的关系。结果表明: (1) 不同林龄柠条林地土壤优先流特征及大孔隙度具有显著差异, 表现为随着种植年份的增加, 土壤大孔隙度逐渐升高, 土壤入渗染色深度随之加深, 同时染色面积比随着柠条林林龄的增加而增大。(2) 土壤基质流深度表现为随着种植年份的增加而增大, 人工柠条林地的土壤优先流程度显著高于草地。(3) 随着人工柠条林龄的增加, 土壤根系数量增加, 而灌丛生长发育过程中的根系活动使得灌丛林地土壤具有更多迂曲度低、连通性强的孔隙, 这些大孔隙是导致土壤水分优先迁移的主要因素。因此, 植物根系和土壤大孔隙变化是影响荒漠草原人工柠条恢复过程中土壤水分分布的关键因素, 合理配置人工林以改善根系及土壤结构特征, 或可有效提高荒漠草原地区的土壤水分利用效率。

关键词: 优先流; 荒漠草原; 人工柠条林; 风沙土; 大孔隙

Study on preferential flow of soil of artificially planted caragana korshinskii shrubland in different years of desert grassland in Ningxia

MA Yun^{1,2}, MENG Chen^{1,2,3,*}, YUE Jianmin^{1,2}, SONG Naiping^{1,2}, XIE Li^{1,2}, DU Lingtong^{1,2}

1 College of ecological environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

2 Key Laboratory of land degradation and ecosystem restoration in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

3 Key Laboratory of rehabilitation and reconstruction of degraded ecosystems in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

Abstract: Soil preferential flow is a common way of water flow in the soil, which causes soil water loss, groundwater pollution, and reduces slope soil stability. This paper takes a typical desert grassland as the research area in Yanchi County, Ningxia. And we selected artificially constructed shrubland (9, 14, 24, and 35 ages) as the research objects and used blank grassland as the control group, which explored the characteristics of soil preferential flow and its relationship with soil structure by soil water infiltration combining dyeing method, CT scanning method, and image processing technology. The results showed that: (1) there were significant differences in soil preferential flow characteristics and macroporosity. Soil macroporosity gradually and color depth of soil infiltration increased with the increase of planting years. Meanwhile, the ratio of dyeing area increased with the increase of *Caragana korshinskii* forest age. (2) The depth of soil matrix flow increased with the increase of vegetation planting years, and the soil priority degree of artificial *Caragana korshinskii* forest was significantly higher than that of grassland. (3) With the increase of the age of *Caragana korshinskii*

基金项目: 宁夏回族自治区自然科学基金项目(2021AAC05005)

收稿日期: 2020-08-04; 网络出版日期: 2021-10-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mengchen@nxu.edu.cn

plantation, the number of soil roots improved. The root activity in the process of shrub growth and development made the soil to have much lower tortuosity and stronger connectivity macropores, which were the main factors to lead to the preferential migration of soil water. Therefore, the changes of plant roots and soil macropores are the key factors to effect the soil water distribution in the process of artificial *Caragana korshinskii* restoration in desert steppe. The reasonable allocation of artificial forest plantation could improve soil water use efficiency in desert steppe effectively owing to its role in root system and soil structure characteristics modification.

Key Words: preferential flow; desert steppe; shrub introduction; aeolian sandy soil; macropores

土壤优先流是一种常见的水分运动形式^[1-3],是一种非均匀流^[4],水分穿过非均质土壤时便会形成优先流^[5]。当土壤中存在优先路径时,水分和溶质会通过少部分土壤基质快速渗入到地下水或土壤深层中,其会导致土壤养分、水分的快速流失^[6],减少植物对水分养分的吸收,并导致地下水污染风险增加^[7-8]。因此,对于土壤优先流特征的深入研究在生态环境建设和水资源的合理利用方面都有着非常重要的作用。

土壤类型及条件差异是影响土壤优先流类型及强度的最主要因素。土壤优先流主要可分为大孔隙流、指流、漏斗流、环绕流及短路流^[9-11]等。其中,大孔隙流会导致水分和溶质快速运移^[12]。目前对于优先流的研究多集中于大孔隙流及其特征分析,对优先流发生的类型及强度研究较少。影响优先流特征的因素较多,主要包括土壤孔隙、质地等土壤结构参数以及土壤含水量、根系、土地利用类型等^[13],其中导致优先流形成的主要原因是土壤空间异质性^[14]。土壤优先流的发生在很大程度上受到土壤质地的影响,盛丰等^[15]发现,土壤质地中,土壤黏粒的含量与优先流的发生概率成正比。Beven 等^[16]发现粉沙和粘质土壤中更容易发生大孔隙流。但以往研究多集中于壤土、黑土、栗钙土等广泛分布的土壤,而对风沙土土壤优先流特征的研究较少。

在风沙土广泛分布的干旱地区,土壤水分对植被的恢复及生态环境的建设更为重要。荒漠草原是荒漠向草原过度的一种典型生态系统,风沙土是荒漠草原的典型土壤,沙土土壤质地粗,结构差,容易形成孔隙结构^[17],从而形成优先路径,促进优先流的发生^[18]。国家和地方先后在荒漠草原地区建设了退耕还林、三北防护林等人工植被建设工程^[19],但在荒漠草原地区大面积的灌木引入后,随着恢复年限的增加植被出现了退化现象^[20]。目前,荒漠草原地区植被过程中土壤优先流特征还有待研究,限制了对人工柠条林建设后土壤水分时空分布规律的理解,成为了维持区域人工植被生态系统持续稳定的知识瓶颈。本研究将通过野外土壤水分入渗染色示踪法^[21]及 CT 扫描法^[22],分析荒漠草原地区不同恢复年限人工柠条林土壤优先流特征及其与土壤结构的关系,以期荒漠草原地区人工植被恢复管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏盐池县内(37°57'23"—37°83'47"N, 106°77'99"—107°50'70"E),平均海拔 1600 m,属于典型的荒漠草原区。研究区属于温带大陆性气候,年均降水量为 280 mm, 80%以上的降雨量集中在 5—9 月,其中全年 60%以上的降雨又集中在 7—9 月,年均蒸发量为 2710 mm,无霜期为 150 d,年平均气温为 8.1℃。西风和西北风为全年主要风向,主要发生在春季。研究区主要的土壤类型是灰钙土和风沙土,研究区主要物种有牛枝子(*Lespedeza potaninii*)、老瓜头(*Cynanchum komarovii*)、草木樨状黄耆(*Astragalus melilo-tooides*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、短花针茅(*Stipa breviflora*)、苦豆子(*Sophora alopecuroides*)、绵蓬(*Corispermum hyssopifolium*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)等。

1.2 样点选取

本实验一在宁夏盐池县荒漠草原区内设置 5 个样地,根据不同种植年份选取 4 个实验样地,另选取草本样地为空白对照组。样地一为 1985 年种植(35 年生)人工柠条林(坐标 37°49.2152'N, 107°30.3382'E,海拔 1519 m),样地二为 1996 年种植(24 年生)人工柠条林(坐标 37°49.0330'N, 107°29.7485'E,海拔 1491 m),

样地三为 2006 年种植(14 年生)的人工柠条林(坐标 37°49.1854'N, 107°30.1312'E, 海拔 1489 m), 样地四为 2011 年种植(9 年生)的人工柠条林(坐标 37°49.3001'N, 107°29.6180'E, 海拔 1497 m), 样地五为草地对照组(坐标 37°49.4154'N, 107°29.7912'E, 海拔 1511 m)。

1.3 样品采集与土壤物理参数测定

沿土壤剖面每隔 12 cm 用环刀采取 3 个环刀样和散土样, 取样深度分别为 0—10 cm、10—20 cm 和 20—40 cm, 样品用自封袋带回实验室进行测定。采用环刀法、环刀定水头入渗、MS3500 激光粒度仪和 CT 扫描图像分析等方法分别对不同试验样地的土壤容重、渗透速率、土壤颗粒组成和土壤孔隙度等土壤物理参数进行测定分析(表 1)。

表 1 土壤物理参数
Table 1 Soil physical parameters

样地 Sample plot	土壤深度 Depth/cm	土壤容重 Soil Bulk density/ (g/m ³)	稳渗速率 Stable seepage rate/ (mm/min)	土壤重量含水量 Soil weight water content/%	土壤颗粒组成 Soil particle composition		
					<0.05 mm	0.05—0.25 mm	>0.25 mm
9 年生 Nine years old	0—10	1.44±0.01	2.23±0.05	9.47±0.21	5.35	58.32	36.33
	10—20	1.48±0.00	2.57±0.17	8.84±0.53	1.85	58.24	39.91
	20—30	1.47±0.01	2.73±0.26	8.39±0.32	1.83	60.25	37.92
14 年生 Fourteen years old	0—10	1.29±0.06	2.73±0.05	8.85±1.11	6.58	55.35	21.87
	10—20	1.34±0.01	3.00±0.08	12.23±2.44	7.88	59.16	30.73
	20—30	1.35±0.01	3.73±0.17	15.70±2.87	3.51	53.25	32.4
24 年生 Twenty-four years old	0—10	1.32±0.01	2.67±0.12	6.60±3.72	9.81	68.32	21.87
	10—20	1.27±0.03	3.00±0.22	7.58±1.43	6.12	63.15	30.73
	20—30	1.31±0.02	3.37±0.66	8.13±1.90	7.35	60.25	32.4
35 年生 Thirty-five years old	0—10	1.31±0.05	3.53±0.21	11.65±1.53	9.53	76.28	14.19
	10—20	1.32±0.04	3.37±0.26	10.05±1.60	6.3	70.12	23.58
	20—30	1.36±0.01	4.23±0.42	7.05±1.99	3.29	71.35	25.36
草地对照 The grass contrast	0—10	1.31±0.02	2.70±0.16	7.98±0.91	0.98	61.67	37.35
	10—20	1.36±0.01	3.20±0.24	7.80±0.29	1.25	50.36	48.39
	20—30	1.36±0.01	3.50±0.24	7.68±0.47	1.16	53.45	45.39

表中土壤容重、渗透速率、土壤重量含水量为平均值±标准差

1.4 入渗染色实验

以往对优先流的研究方法包括染色示踪法、穿透曲线法^[23]、CT 扫描法等。本次实验采用的是染色示踪法和 CT 扫描法, 其中染色示踪法所使用的亮蓝^[24]试剂具有无毒、显色性强、成本低廉等特点, 被广泛应用于土壤优先流研究中。

在研究区内, 选择地形平整、植被分布和植被数量较为均匀的实验样地为试验点。将优先流染色示踪土壤观测剖面分别设置在与试验点相邻的灌丛斑块位置, 灌丛内投影面积和灌丛外投影面积需同时覆盖于染色面积中。首先将试验点土壤表层的杂质(如: 砾石、掉落的枯枝)处理干净, 同时不能影响腐殖质层。之后用长 120 cm、宽 60 cm、高 30 cm, 厚度为 0.5 cm 的自制铝合金框架用小锤垂直砸入土壤 15 cm, 地面留高 15 cm。然后在铝合金框架上覆盖塑料膜用以保护土壤, 24 h 后进行实验。24 h 之后, 取走之前覆盖的塑料膜, 然后将配好的 4 g/L 的亮蓝染色剂用恒流泵以积水渗透的方式均匀喷洒于金属框内。具体的倾洒亮蓝溶液体积根据研究区 7—8 月的降水情况(以 24 h 降水量 15 mm 作为试验标准), 根据布设的染色样方表面积和实际消耗量计算出需要 11.5 L 的亮蓝溶液。在 4 g/L 的 11.5 L 的亮蓝溶液均匀喷洒完毕后, 继续用塑料膜将铝合金框架覆盖, 以避免降水等其它水分的进入和野外动物等的影响, 同时减少蒸发。染色 24 h 之后, 移除铝合金框架, 以间隔为 12 cm 垂直挖掘染色剖面, 每挖掘一层, 用高分辨率数码相机进行拍摄, 每个染色样地最后得

到灌丛内外共 10 张垂直剖面染色图。

1.5 CT 扫描及土壤结构参数计算

在剖面挖掘的同时,于灌丛投影面积内不同土层(0—10 cm、10—20 cm、20—30 cm)的染色区和未染色区利用高 70 mm、直径 50 mm 的自制壁厚 1 mm 的钢制管体进行土壤取样,每层各取一个染色土样及未染色土样,即(4 个林龄×2 个重复+1 个对照)×2 种染色情况×2 层土壤=共计 36 个 PVC 管,在进行密封处理后一起送往实验室进行 CT 扫描。

CT 扫描后,每个土柱将得到 464 张横向切层图像。首先利用 ImageJ 软件对所有横切图进行预处理,再使用图像处理软件 Avizo 2019.1 对每个土柱的所有横切图像进行三维重构,得到各原状土样的三维可视化图像。基于三维图像重建,利用空气管法确定大孔隙阈值^[25],利用 Avizo 2019.1 软件的 Label Analysis 对大孔隙体积等参数进行计算。

1.6 图像处理与数据分析

利用 ERDAS IMAGINE v9.2 对染色图像进行几何校正,并利用 Photoshop CS6 对图像进行光照校正、降噪及阈值处理。最后,利用 Image ProPlus v6.0 软件,通过形态学解析处理及分割、计数、分水线处理等功能,划分出独立闭合的染色团块,提取染色图像的面积、数量和位置,并且通过计算获得染色图像的优先流比、基质流深度、长度指数以及染色面积比。其中,优先流比的计算公式见式 1:

$$PF = \left(1 - \frac{L \times W}{S_r} \right) \times 100\% \quad (1)$$

式中, PF 代表优先流比(%), L 代表基质流深度(cm), W 代表水平染色宽度(cm)

基质流深度(L)指土壤染色面积比 $\geq 80\%$ 时对应的土壤深度(cm)。

长度指数计算公式见式 2:

$$L_i = \sum_{i=1}^n |DC_{i+1} - DC_i| \quad (2)$$

式中, L_i 为长度指数(%), DC_i 和 DC_{i+1} 分别指土壤剖面第 i 层和第 $i+1$ 层的染色面积比(%), n 为土壤剖面层数。

染色面积比计算公式见式 3:

$$DC = \left(\frac{S_t}{S_n + S_t} \right) \times 100\% \quad (3)$$

式中, DC 为染色面积比(%), S_t 为土壤剖面总染色面积(cm^2), S_n 为土壤剖面未染色的总面积(cm^2)。

优先流染色形态变异系数计算公式见式 4^[26]:

$$CV = \frac{\sqrt{\frac{n \sum_{i=1}^n DC_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n DC_i \right)^2}{n(n-1)}}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n DC_i} \quad (4)$$

式中, CV 为土壤染色面积比变异系数; n 为土壤剖面垂直计算土层数; DC_i 为土壤剖面第 i 层对应的染色面积比(%)。

2 结果与分析

2.1 人工柠条恢复过程中土壤优先流分布特征

在荒漠草原地区,不同林龄林地土壤剖面的染色情况见图 1。可见,不同林龄人工柠条林地的土壤优先流染色深度具有显著差异。其中 35 年生柠条林土壤优先流染色深度最深,其次为空白对照组草地,24 年生和 14 年生柠条林地优先流染色深度相近,9 年生柠条林地优先流染色深度最浅。在 0—140 mm 的土层深度

上,35 年生柠条林地染色呈均匀分布,140—320 mm 土层中呈现出深度不同的染色分支。24 年生和 14 年生柠条林地在 0—70 mm 的土层深度上染色均匀,24 年生柠条林在 70—140 mm 土层上呈现出不同程度的分支,14 年生柠条林在 70—170 mm 土层呈现出分支。9 年生柠条林在 0—60 mm 的土层上染色均匀分布,在 60—180 mm 的土层上呈现出不同程度的分支。草地对照组在 0—120 mm 的土层中染色均匀分布,在 120—190 mm 土层中呈现出不同的分支。可见,35 年生柠条林地土壤优先入渗深度最大,而草地土壤水分入渗则以基质流为主。

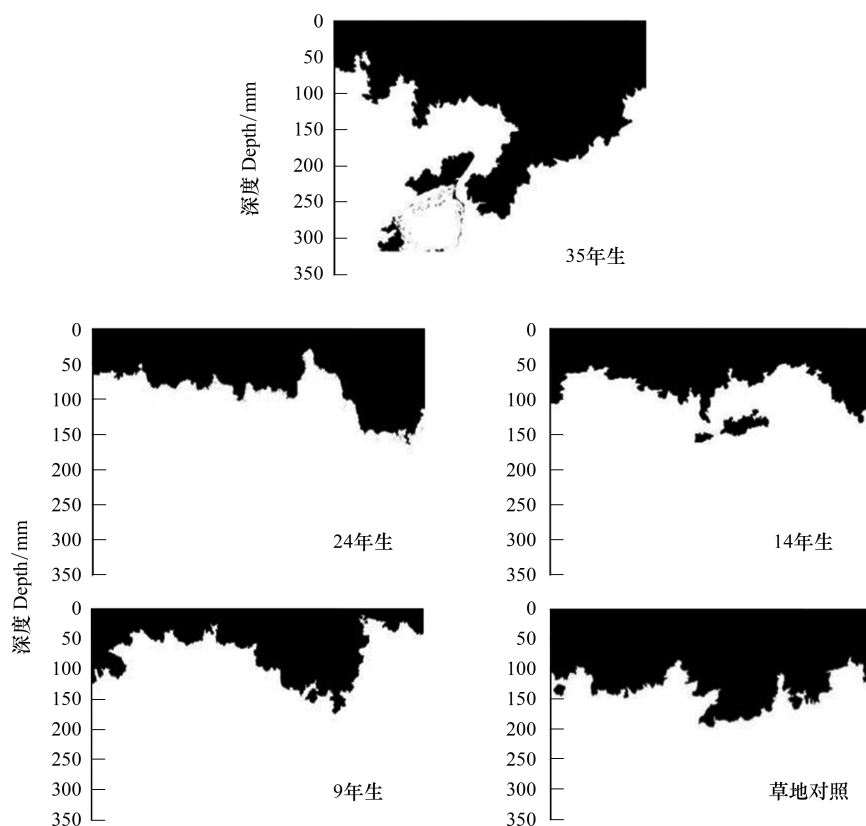


图 1 优先流垂直分布图像

Fig.1 Prioritize the flow of vertically distributed images

2.2 土壤染色深度及染色面积比

土壤染色深度及染色面积比可以表明优先流路径深度^[24]。在荒漠草原地区,不同林龄人工柠条林地和草地的土壤染色面积比(图 2)均表现为随着土层深度的增加而减小,对比 5 个样地 0—400 mm 土壤剖面染色面积比的最大值,表现为 35 年生柠条林(33.06%)>草地(28.67%)>9 年生柠条林(26.8%)>24 年生柠条林(22.69%)>14 年生柠条(22.69%)。而土壤染色深度表现为草地(165.5 mm)>35 年生柠条林(156.75 mm)>9 年生柠条林(121.385 mm)>14 年生柠条林(118.8 mm)>24 年生柠条林(110.9 mm)。其中,35 年生柠条林染色面积比及染色深度远高于其它柠条林地,这是因为 35 年生柠条林生长年限久,其根系系统更加丰富,根系活动造成了更丰富且更深的土壤优先流路径^[27]。柠条灌丛林地的土壤染色深度小于草地,这是由于人工种植灌丛的过程中,翻耕破坏了草地原有的孔隙结构^[28],阻碍了水分的入渗,且柠条人工林的建设增强了林下土壤的持水性^[29]。其中,除 35 年生柠条林地外,9、14、24 年生柠条林地土壤入渗染色面积及染色深度差异不显著,其中 9 年生柠条林染色面积和染色深度略高于 14 年生和 24 年生柠条林地,这可能是与 9 年生柠条林地的土壤条件、微地形等因素有关。

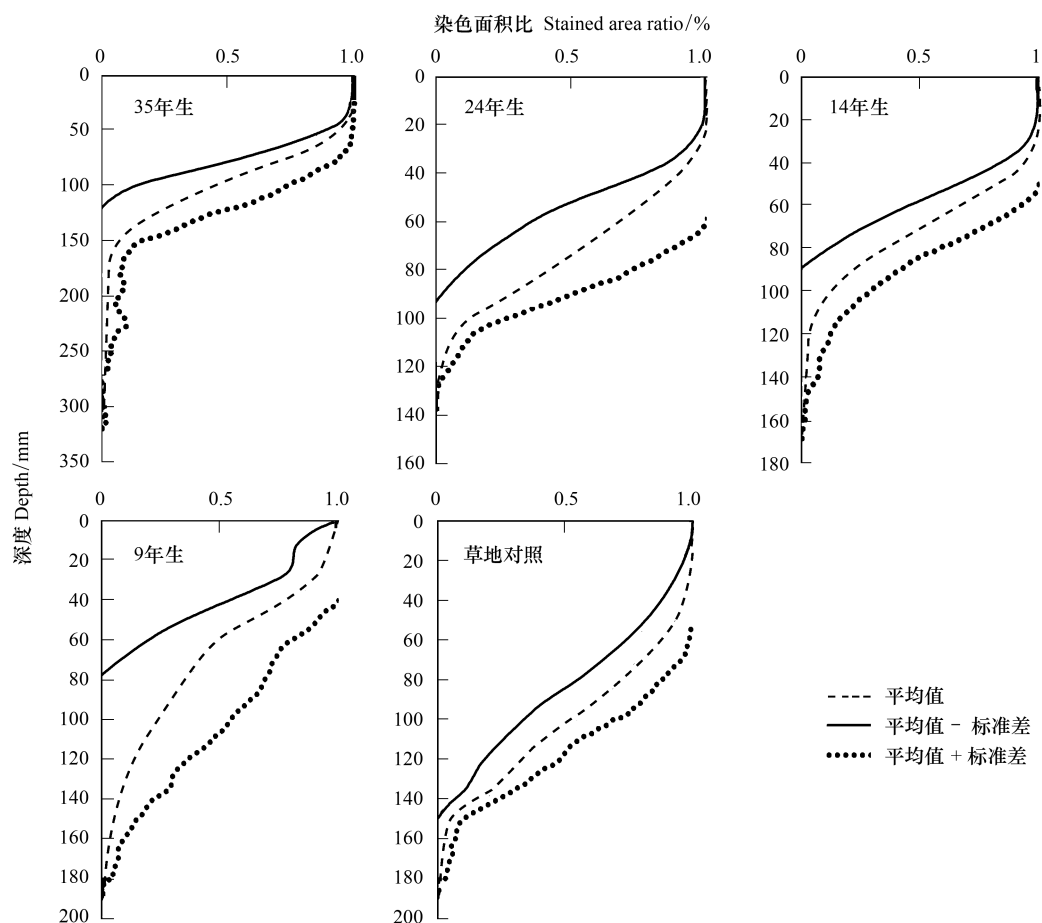


图2 土壤剖面平均染色面积变化

Fig.2 Change in average stained area of soil profile

2.3 土壤基质流深度及长度指数

土壤基质流深度可以较为准确的反映出土壤均质入渗状况。本次实验中,将染色面积大于 80% 的染色深度作为基质流深度。不同林龄柠条林的基质流深度中(表 2),表现为 35 年生柠条林地基质流深度(76.35 mm) > 草地(70 mm) > 24 年生柠条林地(58.8 mm) > 14 年生柠条林地(57.3 mm) > 9 年生柠条林地(50.61 mm)。可见人工柠条林建设过程中的翻耕措施会使土壤基质流深度减少,但随着灌丛引入后恢复年份的增加,人工柠条林地的基质流深度随之增高。

不同林龄柠条林长度指数大小表现为:35 年生柠条林(36.01%) > 空白草地(30.45%) > 9 年生柠条林(27.86%) > 24 年生柠条林(22.94%) > 14 年生柠条林(22.82%)。对比发现,35 年生柠条林地长度指数最大,14 年生柠条林长度指数最小。总体上,除 9 年生柠条林地外,长度指数随着种植年份的增加在逐渐增加。可见,随着灌丛引入后恢复年限的增加,土壤优先入渗深度随之增加。其中,9 年生柠条林长度指数大于 24 年生和 14 年生柠条林,主要原因可能是与 9 年生柠条林地的土壤条件与微地形有关。

2.4 染色形态变化程度及优先流程度分析

染色形态变化程度反映的是优先流的发育程度,按照划分的 4 个优先流染色形态变化程度^[26],包括相对稳定(CV_p 在 0—0.10 之间)、次活跃(CV_p 在 0.10—0.20 之间)、活跃(CV_p 在 0.20—0.40 之间)、速变(CV_p 大于 0.40)。对不同林龄的柠条林进行优先流染色形态变化程度的分析(表 3),可见不同样地土壤优先流变异系数表现为 9 年生柠条林 > 24 年生柠条林 > 35 年生柠条林 > 14 年生柠条林 > 草地对照。9 年生柠条林地土壤入渗染色变异系数最高,土壤优先流程度为速变,该样地土壤优先流现象最为明显;24 年生柠条林地土壤优先

流程度为活跃,优先流现象明显;14年生柠条林地、35年生柠条林地土壤优先流程度为次活跃,优先流现象不明显;草地对照组优先程度为次活跃,优先流现象不明显,染色变异系数低于所有灌丛土壤。可见,虽然土壤水分入渗深度、优先流深度受到林地恢复年限的影响,但林地土壤优先流程度不完全受人工柠条生长年限的影响。

表 2 不同林龄下的柠条灌丛优先流特征因子
Table 2 The characteristic factors of preferential flow of *Caragana korshinskii* shrubs under different ages

样地 Sample plot	样点编号 Sample number	基质流深度 Matrix flow depth/mm	基质流深度 平均值	长度指数 Length index/%	长度指数 平均值	染色深度 Dyeing depth/mm	染色深度 平均值	根孔数量 Number of root holes/个	大孔隙度 平均值	
			Mean value of matrix flow depth/mm		Length index average/%		Mean dyeing depth/mm		Average value of macroporosity/%	
35 年生 Thirty-five years old	1	85.1±15.14	76.35	38.16	36.01	182.3±56.94	156.75	16.00±8.04	染色	3.85
	2	67.6±20.87		33.85		131.2±20.10		22.33±6.24	未染色	2.14
24 年生 Twenty-four years old	1	49.9±18.60	58.8	32.92	22.94	103.1±21.53	110.9	11.33±3.30	染色	2.03
	2	67.7±13.20		12.96		118.7±12.66		24.67±9.29	未染色	1.72
14 年生 Fourteen years old	1	47.3±9.52	57.3	22.80	22.82	111.1±18.98	118.8	10.33±2.87	染色	1.59
	2	67.3±11.92		22.84		126.5±21.28		23.67±3.30	未染色	1.48
9 年生 Nine years old	1	54±31.68	50.61	28.77	27.86	126.1±28.26	121.39	14.33±1.70	染色	1.42
	2	47.22±25.8		26.94		116.7±43.20		14.00±0.82	未染色	1.34
草地对照 The grass contrast	1	70±21.02	70	30.45	30.45	165.5±15.02	165.5	19.67±8.73	染色	1.84
									未染色	1.46

表 3 不同年龄人工柠条林地土壤优先流染色形态变化程度
Table 3 Variation degree of soil preferential flow dyeing morphology in artificial *Caragana korshinskii* forests of different ages

样地 Sample plot	样点编号 Sample number	DC 最大值 Max-DC/%	DC 最小值 Min-DC/%	变异系数 CV	变异系数平均值 Mean of CV	程度等级 Degree level	优先流现象 Preferential flow
35 年生 Thirty-five years old	1	38.01	22.21	0.1843	0.1955	次活跃	较明显
35 年生 Thirty-five years old	2	32.50	17.61	0.2066			
24 年生 Twenty-four years old	1	24.88	11.30	0.2929	0.2040	活跃	明显
24 年生 Twenty-four years old	2	23.22	15.32	0.1152			
14 年生 Fourteen years	1	19.91	12.91	0.1441	0.1532	次活跃	较明显
14 年生 Fourteen years	2	28.83	17.07	0.1623			
9 年生 Nine years old	1	35.72	11.44	0.3881	0.4448	速变	极明显
9 年生 Nine years old	2	29.07	6.60	0.5015			
草地对照 The grass contrast	30.45	19.73	0.1273	0.1274	次活跃	较明显	

DC: 染色面积比 Dyeing area ratio; CV: 土壤染色面积比变异系数 Coefficient of variation

同时,虽然草地入渗染色深度高于灌丛林地,但其优先流程度要远低于其他人工灌丛林地。这是由于灌丛引入后土壤的根系系统更为丰富,随着种植年份的增加,其生长到达一定的阶段之后,生理生态学特征发生变化^[30],其相比草本植物更加丰富的根系系统活动会导致土壤产生更多的优先流路径,分布变广且分散,发生优先流的几率变大^[31]。因此虽然草地土壤入渗深度更深,但其主要以基质流为主,优先流程度较低。

2.5 林地根孔、大孔隙特征对优先流的影响

分别对不同样点的 0—10 cm 的土壤剖面图用 photoshop 软件进行根孔数量的统计。得到不同样地根孔数量的平均值和标准差值(表 2)。可以发现,随着柠条林种植年限的增加,不同样地的根孔数量表现为 35 年生柠条林>24 年生>14 年生>空白草地>9 年生。说明随着种植年限的增加,柠条林在土壤中的根孔数量在不断增加。因为植物根系是水分流向土壤深层的优势流路径,水分入渗深度与植物根系大小成正相关^[32—33],且植物根系与周边非均质界面可以使水分加速向下运动,对土壤优先流现象的产生有重要作用^[34]。随着种植年份的增加,柠条林根系在深层土壤的数量增多,土壤水分入渗深度也随之增加。

对不同样地染色区及未染色区的土壤分别进行取样,利用 CT 扫描对各样地染色土壤及未染色土壤的大孔隙(孔径>0.3 mm)进行计算(图 3)。可以发现,在同一样点同一土层内,染色土壤的土壤大孔隙体积显著大于未染色土壤($P<0.05$),其中,在 35 年生样地染色及未染色土壤的大孔隙度平均值分别为 3.85% 及 2.14%;在 24 年生样地染色及未染色土壤的大孔隙度平均值分别为 2.03% 及 1.72%;在 14 年生样地染色及未染色土壤的大孔隙度平均值分别为 1.59% 及 1.48%;在 9 年生样地染色及未染色土壤的大孔隙度平均值分别为 1.42% 及 1.34%;在草地对照样地染色及未染色土壤的大孔隙度平均值分别为 1.84% 及 1.46%。从图 3 还可以看出,染色土壤中具有更多连续性强、迂曲度小、孔径大的大孔隙,这些孔隙正是土壤优先流现象产生的主要原因。因此,土壤入渗路径取决于大孔隙含量,若在同一区域内,土壤水分会在大孔隙含量相对更高的土壤区域入渗,而绕过土壤大孔隙含量相对更少的区域。

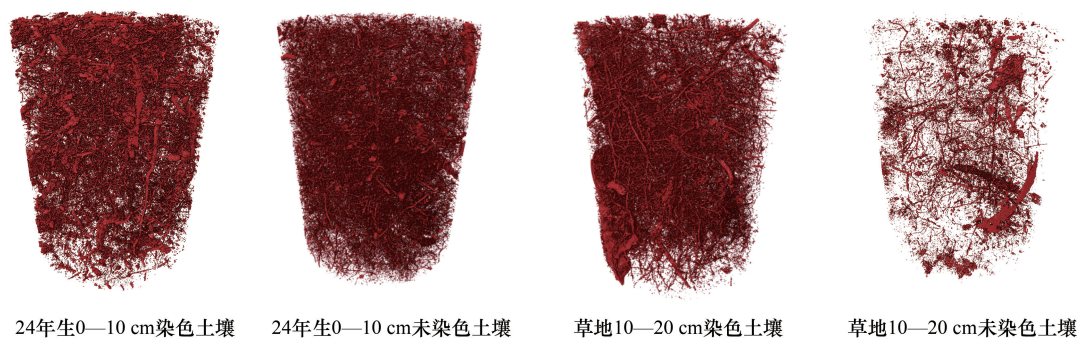


图 3 土壤大孔隙三维图像分析

Fig.3 Three-dimensional image analysis of soil macropores

3 结论

通过土壤水分入渗染色法、CT 扫描法、图像处理技术分析不同林龄柠条林土壤优先流特征,发现随着人工柠条林恢复年限的增加,土壤水分入渗能力逐渐增加,人工柠条林地的土壤优先流程度也高于草地,柠条林发育过程中根系活动对土壤大孔隙结构的改变影响了土壤水分入渗深度及方式,是影响土壤水分分布的关键因素。因此,在人工灌丛恢复过程中,可以通过植被合理配置与调控措施,改善根系及土壤结构特征,增强土壤持水性,从而在荒漠草原地区有限的降水条件下提高土壤水分利用效率及植物恢复的可持续性。

参考文献(References):

- [1] 吕刚, 金兆梁, 凌帅, 李叶鑫, 翟景轩, 王韞策, 郑洋, 杜昕鹏, 董亮. 浑河源头水源涵养林土壤优先流特征. 水土保持学报, 2019, 33(4): 287-292.
- [2] Jarvis N J. A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores; principles, controlling factors and consequences for water quality. European Journal of Soil Science, 2007, 58(3): 523-546.
- [3] Dekker L W, Ritsema C J, Wendroth O, Jarvis N, Oostindie K, Pohl W, Larsson M, Gaudet J P. Moisture distributions and wetting rates of soils at experimental fields in the Netherlands, France, Sweden and Germany. Journal of Hydrology, 1999, 215(1/4): 4-22.

- [4] 魏虎伟,程金花,杜士才,李辉乾,徐贵来,张欣,田香姣. 利用染色示踪法研究四面山两种林地优先路径分布特征. 水土保持通报, 2015, 35(2): 193-197, 204-204.
- [5] 张东旭,张洪江,程金花. 基于多指标评价和分形维数的坡耕地优先流定量分析. 农业机械学报, 2017, 48(12): 214-220, 277-277.
- [6] Isensee A R, Helling C S, Gish T J, Kearney P C, Coffman C B, Zhuang W J. Groundwater residues of atrazine, alachlor, and cyanazine under no-tillage practices. *Chemosphere*, 1988, 17(1): 165-174.
- [7] 张英虎,牛健植,朱蔚利,韩旖旎,杜晓晴,陈上杰. 森林生态系统林木根系对优先流的影响. 生态学报, 2015, 35(6): 1788-1797.
- [8] Larsson M H, Jarvis N J, Torstensson G, Kasteel R. Quantifying the impact of preferential flow on solute transport to tile drains in a sandy field soil. *Journal of Hydrology*, 1999, 215(1/4): 116-134.
- [9] 卜囡,尚松浩,毛晓敏,冀蒙蒙. 层状土入渗试验中指流发育的分形特征及入渗规律. 水动力学研究与进展 A 辑, 2012, 27(02): 183-190.
- [10] 牛健植,余新晓,张志强. 优先流研究现状及发展趋势. 生态学报, 2006, 26(1): 231-243.
- [11] 郭会荣. 优先流影响下的入渗补给过程及溶质运移实验与模拟[D]. 武汉:中国地质大学(武汉), 2008.
- [12] 李伟莉,金昌杰,王安志,裴铁璠,关德新. 土壤大孔隙流研究进展. 应用生态学报, 2007, 18(4): 888-894.
- [13] Germann P F, Lange B, Lüscher P. Preferential flow dynamics and plant rooting systems//Lin H, ed. *Hydropedology*. Amsterdam: Academic Press, 2012: 121-141.
- [14] 朱钊岑,刘冰,刘婵,司瑞. 荒漠绿洲湿地土壤优先流与水分入渗特征. 生态学报, 2020, 40(12): 3979-3990.
- [15] 盛丰,方妍. 土壤水非均匀流动的碘-淀粉染色示踪研究. 土壤, 2012, 44(1): 144-148.
- [16] Beven K, Germann P. Macropores and water flow in soils. *Water Resources Research*, 1982, 18(5): 1311-1325.
- [17] Green R T, Bertetti F P, Miller M S. Focused groundwater flow in a carbonate aquifer in a semi-arid environment. *Journal of Hydrology*, 2014, 517: 284-297.
- [18] Mei X M, Zhu Q K, Ma L, Zhang D, Wang Y, Hao W J. Effect of stand origin and slope position on infiltration pattern and preferential flow on a Loess hillslope. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(5): 1353-1365.
- [19] Wang G Y, Innes J L, Lei J F, Dai S Y, Wu S W. China's forestry reforms. *Science*, 2007, 318(5856): 1556-1557.
- [20] Chen N, Ratajczak Z, Yu K L. A dryland re-vegetation in northern China: success or failure? Quick transitions or long lags? *Ecosphere*, 2019, 10(4): e02678.
- [21] 张婧. 土壤入渗与优先流测量方法研究[D]. 北京:中国农业大学, 2017.
- [22] Baveye P C, Laba M, Otten W, Bouckaert L, Sterpaio P D, Goswami R R, Grinev D, Houston A, Hu Y P, Liu J L, Mooney S, Pajor R, Sleutel S, Tarquis A, Wang W, Wei Q, Sezgin M. Observer-dependent variability of the thresholding step in the quantitative analysis of soil images and X-ray microtomography data. *Geoderma*, 2010, 157(1/2): 51-63.
- [23] Hu X, Li Z C, Li X Y, Liu Y. Influence of shrub encroachment on CT-measured soil macropore characteristics in the Inner Mongolia grassland of northern China. *Soil and Tillage Research*, 2015, 150: 1-9.
- [24] 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.
- [25] Meng C, Niu J Z, Li X, et al. Quantifying soil macropore networks in different forest communities using industrial computed tomography in a mountainous area of North China. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, 17(9): 2357-2370.
- [26] 陈晓冰. 重庆四面山四种土地利用类型土壤优先流特征研究[D]. 北京:北京林业大学, 2016.
- [27] 金兆梁. 不同林龄樟子松人工林土壤优先流特征[D]. 阜新:辽宁工程技术大学, 2019.
- [28] 杜满聪,李江涛,李淑玲,李集勤. 不同耕作方式对华南坡耕地土壤孔隙结构和抗穿透强度影响. 广州大学学报:自然科学版, 2018, 17(6): 74-80.
- [29] 陈晓冰,严磊,陈廷速,李振东,甘磊, Saeed R. 西南岩溶区粉垄耕作和免耕方式下甘蔗地土壤优先流特征. 水土保持学报, 2018, 32(4): 58-66.
- [30] 程杰,刘永辉,田瑛. 宁夏半干旱区柠条锦鸡儿灌木林生长特征. 水土保持通报, 2016, 36(1): 332-336.
- [31] Köhne J M, Köhne S, Šimůnek J. A review of model applications for structured soils: a) water flow and tracer transport. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2009, 104(1/4): 4-35.
- [32] Devitt D A, Smith S D. Root channel macropores enhance downward movement of water in a Mojave Desert ecosystem. *Journal of Arid Environments*, 2002, 50(1): 99-108.
- [33] Kim J G, Chon C M, Lee J S. Effect of structure and texture on infiltration flow pattern during flood irrigation. *Environmental Geology*, 2004, 46(6/7): 962-969.
- [34] Li X Y, Yang Z P, Li Y T, Lin H. Connecting ecohydrology and hydropedology in desert shrubs: stemflow as a source of preferential flow in soils. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009, 13(7): 1133-1144.