文章编号:1000-7601(2022)01-0086-09

doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2022.01.10

基于多指标分析和分形维数的不同种植 年限压砂地基质流与优先流特征研究

阮晓晗^{1,2},白一茹^{1,2},王幼奇¹,高小龙^{1,2}

(1.宁夏大学地理科学与规划学院,宁夏 银川 750021;2.宁夏大学生态环境学院,宁夏 银川 750021)

摘 要:为明晰不同种植年限压砂地土壤优先流和基质流状况、改善区域水分生态环境,以宁夏不同种植年限 (2、5、10、20、30 a 和 40 a)压砂地为研究对象,通过野外染色示踪试验,结合形态学、多指标分析及分形理论对不同年 限压砂地土壤优先流和基质流特征进行分析。结果表明:随种植年限增长,土壤容重显著增大(P<0.05),饱和导水 率显著降低(P<0.05),压砂地砾石粒径配比基本表现为大于 5 mm 粒径砾石占比减少、小于 5 mm 粒径砾石占比增 加;种植 5、10、20、30、40 a 较2 a的染色面积比减少了 34.60%、35.02%、47.51%、64.71%、72.15%,基质流深度分别减 少了 12.46、14.77、17.60、22.47、23.45 cm,基质流比为 2 a(98.61%)>5 a(86.35%)>10 a(74.89%)>20 a(74.49%)>30 a(64.11%)>40 a(63.76%),优先流比为 2 a(1.39%)<5 a(13.65%)<10 a(25.11%)<20 a(25.52%)<30 a(35.89%)< 40 a(36.24%),湿润锋迹线的分形维数表现为 2 a<10 a<5 a<20 a<30 a<40 a,即种植年限增加,湿润锋迹线的不规律 性呈增大趋势。综合染色特征参数和分形维数可知种植年限越长,压砂地染色形态的不均匀性越高,基质流区占比 逐渐减小,优先流区占比逐渐增大、发育程度增高。

关键词:优先流;基质流;分形维数;压砂地;种植年限 中图分类号:S152.7 文献标志码:A

Characteristics of matrix flow and preferential flow in gravel-sand mulched field in different planting years based on multi-index analysis and fractal dimension

RUAN Xiaohan^{1,2}, BAI Yiru^{1,2}, WANG Youqi¹, GAO Xiaolong^{1,2}

(1. School of Geography and Planning, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China;
2. School of Ecology Environment, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: To clarify the preferential and matrix flow of gravel-sand mulched field with different planting years and improve the regional water ecological environment, the soil preferential flow and matrix flow characteristics in gravel-sand mulched field in different planting years (2, 5, 10, 20, 30 a and 40 a) were analyzed by the field dyeing tracer test, combined with morphology, multi-index analysis and fractal theory. The gravel-mulched land with different planting years was used as the research object. The results showed that with the increase of planting years, the soil bulk density increased significantly (P < 0.05), and the saturated hydraulic conductivity decreased significantly (P < 0.05). The ratio of the gravel size of the sand-pressed ground basically showed that the proportion of gravels larger than 5 mm decreased, and the proportion of gravels smaller than 5 mm increased. Compared with 2 a, the dyeing area ratio of 5, 10, 20, 30 a, and 40 a was reduced by 34.60%, 35.02%, 47.51%, 64.71%, and 72.15%, and the depth of matrix flow decreased by 12.46, 14.77, 17.6, 22.47, 23.45 cm, respectively. The matrix flow ratios were 2 a (98.61%) > 5 a (86.35%) > 10 a (74.89%) > 20 a (74.49%) > 30 a (64.11%) > 40 a (63.76%), and the preferential flow ratios were 2 a(1.39%) <5 a (13.65%) <10 a(25.11%) <20 a(25.52%) <30 a (35.89%) <40 a(36.24%). The fractal dimension of the wet front trace was 2 a <10 a <5 a <20 a <30 a <40 a, meaning when the planting age increased, the irregularity of the wet front trace increased too. Comprehensive dyeing characteristic parameters and fractal dimensions indicated that the longer the planting years, the higher the unevenness of the

基金项目:国家自然科学基金(41867003,41761049);宁夏自然科学基金(2020AAC03049);宁夏青年科技人才托举工程项目 作者简介:阮晓晗(1995-),女,陕西商洛人,硕士研究生,研究方向为土壤水分运动。E-mail: rxh0625@163.com

通信作者:王幼奇(1980-),男,安徽泾县人,副教授,主要从事水土资源与环境方面研究。E-mail:wyq0563@163.com

收稿日期:2021-04-20 修回日期:2021-07-29

dyeing morphology of the gravel-sand mulched field became. The proportion of matrix flow area gradually decreased while the proportion of preferential flow area and the degree of development increased over time.

Keywords: preferential flow; matrix flow; fractal dimension; gravel-sand mulched field; planting years

优先流是在重力和土壤水力的结合作用下水 分穿透并绕过了大部分土壤基质和毛孔,沿某些特 定路径快速进入土壤的非平衡流现象^[1],广泛存在 于各种异质性渗透介质和土壤中。土壤优先流能 够反映土壤结构体的大孔隙状况^[2]、增加土体水分 运动通道[3],在水分亏缺地区,优先流可以提高水 分传导效率[4],为植物根系提供水分[5],是土壤水 分补给的重要来源之一^[6]。土壤砾石^[7]、裂隙^[8]、 植物根系^[9]、动物活动^[10]及人为耕作措施^[11]等易 在土壤内部形成大孔隙导致优先流出现。压砂地 是西北地区充分利用有限降水资源的一种旱作农 业模式,其土壤表面覆盖砾石改变了地表过水断 面、形成大孔隙^[12],为优先流发育和存在创造了有 利条件。因此深入研究优先流和基质流特征对明 晰压砂地土壤水分运动过程具有积极作用,为提高 压砂地土壤水分利用效率提供参考。

近些年,一些学者对砾石类型^[13]、覆盖颗粒大 小^[14]、形状^[15]、含量^[16]及其在土壤基质中的分 布^[17]等方面进行了研究,结果表明砾石覆盖度^[18]、 覆盖量[19]及砾石的空间分布[20]对水分运动过程产 生重要影响。一般而言土壤砾石含量增加会导致 土壤孔隙增大,有利于水分入渗,进而促进基质流 和优先流发育和形成^[21]。在三峡库区,戴翠婷 等[22] 对 3 种不同类型土地进行染色示踪试验发现 砾石和大孔隙特征共同影响土壤水分运动过程。 在北方土石山区,赵思远等[23]研究发现不同坡位的 土石介质改变了土石山区土壤水分运动过程,促进 了优先流产生。在西北黄土区,邵明安等^[24]研究发 现在一定程度上含砾石土壤中砾石对于水分入渗 过程、土壤饱和导水率等水力学参数及土壤持水性 能有一定的影响。在巴基斯坦约旦河西岸, Jakob 等[25]以染色示踪剂进行小范围灌溉试验,发现含有 砾石的土壤中优先流现象明显。在宁夏压砂地区, 白一茹等[26]对不同砾石覆盖厚度条件下压砂地的 土壤水分入渗过程进行研究,发现与裸地相比砾石 覆盖厚度会显著增加累计入渗量,提高水分入渗速 率。综上可知,砾石会改变土壤结构和孔隙状况, 促进优先流形成及发育。优先流在土壤中存在广 泛,但是由于不同区域的气候、地形、土壤理化性 质、耕作方式和土石状况等差异,砾石在土壤中的存 在方式及其对优先流入渗的影响也有很大差异。由 于压砂地的覆盖和独特耕作方式使得其入渗过程较 其他土壤类型更为复杂。针对压砂地优先流区域和 基质流区域入渗特征,尤其是以年限变化为主要因素 影响下的优先流和基质流特征研究较为缺乏。

随着压砂地耕作年限增加,覆盖层土石混合程 度及比例发生显著变化,进而改变了土壤结构、重 构了土壤大孔隙分布特征、增加了土壤水分运动通 道,其优先流和基质流发育程度和发生路径也产生 相应变化。因此本研究以宁夏中部干旱带不同年 限压砂地土壤剖面为研究对象,通过原位亮蓝染色 示踪试验获取剖面染色图像,根据形态解析理论分 析优先流和基质流形态特征,利用特征参数及分形 特征进一步明晰优先流和基质流程度,综合分析耕 作年限对压砂地优先流区和基质流区的土壤特性 分布差异,为改善压砂地水分生态环境、促进旱作 农业提供一定的理论帮助。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏中卫市兴仁镇(105°22′E,36° 76′N),地处宁夏中部干旱带,属干旱半干旱气候, 海拔1679~1680 m,年平均温度13.4℃,年日照时 数2990 h,多年平均降水量240~260 mm,年蒸发量 3200 mm 左右,无霜期168~175 d 左右。光热资源 十分丰富,昼夜温差大,土壤为灰钙土,是硒砂瓜主 产区。覆盖砾石来自香山风化碎石,覆盖厚度为15 ~25 cm。试验时间为2020年10月。

1.2 试验方法

1.2.1 样地选择与布设 通过前期调研,压砂地耕 层主要分布在 0~25 cm 土层。在试验区选取 2、5、 10、20、30 a 和 40 a 的压砂地随机设置试验小区,样 地按不同年限标记为 A1、A2、A3、A4、A5 和 A6(图 1)。由于试验前一周有降雨,试验小区各样地水分 含量基本一致,平均土壤含水量为 12.58%±0.49%。 选取地势平坦区域,清除表面枯枝落叶及杂草,尽 量避免破坏压砂地原状结构,采用 70 cm×70 cm×40 cm 的隔离装置垂直砸人土中 35 cm,即形成试验观 测小区,填实装置与土之间的缝隙并敲击装置外壁 防止侧渗影响试验结果。为保证样地在染色试验 前的土壤前期含水量相近,处理完毕后在试验装置 上覆盖聚乙烯塑料薄膜防止降雨等其他影响,静置 24 h 后进行后续试验。

1.2.2 土壤物理性质测定 在每个试验小区内挖 开表面砾石覆盖层直至土壤层,整平后用环刀取垂 直方向上 0~10 cm 土层的原状土,共 3 个重复。利 用环刀样测定土壤容重、土壤总孔隙度及饱和导水 率。样地基本情况见表 1。

土壤饱和导水率测定采用定水头法^[27],计算 方法:

$$K_{\rm s} = 10Q \times L/A \times \Delta H \times t \tag{1}$$

式中, K_s 为饱和导水率(mm·min⁻¹);Q 为渗透量(ml);L 为土层厚度(cm); ΔH 为渗流路径的总水头 差(cm);t 为渗透时间(min);A 为水流经过的横截 面积(cm²)。

为了便于比较不同温度下所测得的 K_a值,将其

换算为10℃时的饱和导水率:

$$K_{10} = K_t / (0.7 + 0.03t)$$
 (2)

式中, K_{10} 为温度为 10°C 时的 $K_s(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$; K_t 为 温度为 $t(^{\circ}C)$ 时的饱和导水率(mm · min^{-1});t 为水 温($^{\circ}C$)。

1.2.3 砾石分选 2020年9月20日至10月5日 进行不同年限压砂地砾石分选。在研究区压砂地 集中分布区域以网格法均匀布点,选取2、5、10、20、 30 a 和 40 a 压砂地,根据各年限压砂地在研究区内 所占面积比分别选取11、31、33、15、6、6个样点,共 计102个样点。在每一个样点内选取50 cm×50 cm 范围内砾石覆盖层全部砂石风干后用50、31.5、25、 16、10、5、2 mm 筛子逐层过筛,选取不同粒径的砾石 进行称重、记录,压砂地砾石粒径配比情况见表2。



图1 研究区位置

Fig.1 Location of the study area

表1 样地基本情况

Table 1	Basic	situation	of	samp	ling	plots
---------	-------	-----------	----	------	------	-------

				1 01	
样地 Sampling plot	种植年限/a Planting years	海拔 Elevation/m	容重 Bulk density /(g・cm ⁻³)	土壤饱和导水率 Soil saturated hydraulic conductivity/(mm・min ⁻¹)	作物类型 Crop
A1	2	1736.94	1.48±0.01c	1.06±0.67a	硒砂瓜 Selenium sand watermelon
A2	5	1732.12	$1.53 \pm 0.02 \mathrm{b}$	$0.33 \pm 0.35 \text{b}$	硒砂瓜 Selenium sand watermelon
A3	10	1718.77	$1.54 \pm 0.04 \mathrm{b}$	0.24±0.17b	硒砂瓜 Selenium sand watermelon
A4	20	1681.08	1.61±0.02a	$0.15 \pm 0.04 \mathrm{b}$	硒砂瓜 Selenium sand watermelon
A5	30	1671.35	$1.62 \pm 0.03a$	$0.09 \pm 0.04 \mathrm{b}$	硒砂瓜 Selenium sand watermelon
A6	40	1667.20	$1.63 \pm 0.04a$	$0.08 \pm 0.04 \mathrm{b}$	硒砂瓜 Selenium sand watermelon

注:同列不同字母表示差异显著(P<0.05),下同。

Note: Different letters in the same column indicate significant difference at P < 0.05, the same below.

表 2 不同种植年限压砂地砾石粒径配比/%

Table 2 Grave	particle size	ratio of gravel-sand	mulched fields with	different planting years
---------------	---------------	----------------------	---------------------	--------------------------

样地	粒径 Grain size/mm							
Sampling plot	>50	31.5~50	25~31.5	16~25	10~16	5~10	2~5	<2
A1	4.7a	4.6a	5.7a	8.2a	13.7a	16.8ab	21.1a	25.3c
A2	4.2a	4.3a	5.5a	7.8ab	11.4a	14.8c	23.7a	28.3ab
A3	3.4ab	3.9a	5.0a	7.3abc	11.6a	14.8bc	24.1a	29.8ab
A4	2.7ab	3.4a	4.7a	7.2a	11.3a	14.2abc	24.8a	31.7b
A5	1.7bc	2.6b	4.4a	6.1bc	12.7a	15.9a	24.5a	32.2ab
A6	0.84c	2.99b	3.61a	5.66c	12.45a	15.66abc	25.01a	34.78a

1.3 土壤优先流特征分析

1.3.1 染色示踪试验 试验前移除表面覆膜,基于研究区 0~25 cm 耕层过饱和水量,同时结合研究区 最大灌水量制定染色溶液量,配制 36 L 浓度为4 g · L⁻¹的亮蓝(FCF, C₃₇H₃₄N₂Na₂O₉S₃)溶液均匀喷洒 在 70 cm×70 cm 的装置范围内的压砂地上,当样地 表面无积水后在表面铺设聚乙烯塑料薄膜防止降 雨及蒸发等影响。待 24 h 后移除表面薄膜,将装置 取出,选择试验小区内中心 50 cm×50 cm 区域每 10 cm 切垂直纵剖面,挖开深度为 50 cm,布设标尺后,使用高分辨率的数码相机在距剖面相同距离、相同 高度的位置对各个土壤垂直染色剖面进行拍摄,选 取其中有代表性的剖面图像进行分析。拍摄过程 中配测量标尺和灰阶比色卡,以便后续图像处理与 分析,染色剖面见图 2 所示。

1.3.2 图像处理 将图像导入 Adobe Photoshop CC 2019 中,根据图像中布设的标尺对图片进行几何矫 正和色彩校正,得到裁剪后尺寸为 500×500 pixels 的图像,调整饱和度和对比度以加大染色区域与非 染色区域色彩对比,选择染色区域丢弃色彩转化为 灰度图,调整阈值使图像显示效果与实际染色效果 一致,选择非染色区域填充为白色(用 255 表示), 染色区域为黑色(用 0 表示),整个图片颜色数值为 0 或 255。将处理后的图像导入 Image Pro Plus 6.0 中,将待测图像数值化并转为 Excel 待分析。



图 2 染色剖面示意图

Fig.2 Schematic diagram of stained profile 1.3.3 染色特征参数

(1)染色面积比(D_c)

$$D_c = \frac{D}{S} \times 100\% \tag{3}$$

式中, D_e 为剖面染色面积比,D 为剖面染色面积 (cm²),S 为图像总面积(cm²)。

(2)最大染色深度(M_{DSD}),染色剂下渗的最大 深度。

(3) 基质流深度(U_{niFr}), 染色面积比>80%的染

色区域为基质流区域,其最大深度为基质流深度。

(4) 基质流比(*P*_f,),染色区域中基质流区域占 总染色区域的百分比。

$$P_{fr} = \frac{U_{niFr}W}{T_{otstar}} \times 100\%$$
(4)

式中, P_{fr} 为土壤剖面基质流占比(%), U_{niFr} 为基质 流深度(cm),W为土壤剖面宽度, T_{atstar} 为总染色面 积(cm²)。

(5)优先流比(*P_{F-fr}*),染色区域中优先流区域 占总染色区域的百分比。土壤优先流比越高,说明 研究范围内的土壤优先流发育程度越高^[28]。

$$P_{F-fr} = 1 - P_{fr}$$
 (5)
式中, P_{F-fr} 为土壤剖面优先流占比(%)。

(6) 土壤染色剖面变异系数(*CV*),土壤剖面内 部染色差异程度。

$$CV = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n} (D_{ci} - \overline{D}_{c})^{2}}}{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} D_{ci}}$$
(6)

式中, D_{ci} 为土壤剖面第*i*层的染色面积比, \overline{D}_{c} 为染色 面积比的平均值,*n*为剖面染色层数(本文以 1 mm 厚度为1层,*n* = 500)。

1.3.4 分形维数 分形维数是量化自然界中不规则形状的数学方法,土壤优先流现象形成的湿润锋迹线是不规则和无序的几何形态,具有明显分形特征^[29]。选择边长为r的正方形小盒子,对湿润峰迹线进行覆盖,统计覆盖湿润锋迹线的小盒子数记为 N(r)。当缩小盒子尺寸直至趋近于0时得到分形 维数(F_p),其公式为:

$$F_{D} = -\lim_{r \to 0} \frac{\lg N(r)}{\lg r}$$
(7)

若 F_p = 1,表明湿润锋迹线为直线,此时入渗状态完全均匀,无明显优先流状况;若 F_p > 1,表明湿润锋迹线波动,存在优先流发育,且 F_p 越大,湿润锋迹线不规则程度越高,说明入渗均匀程度越差,优先流发育程度越高。本文土壤剖面湿润锋迹线 F_p 值由 FractalFox 2.0 完成。

2 结果与分析

2.1 不同种植年限压砂地染色形态分析

图 3 给出了不同种植年限压砂地的染色形态, 黑色为染色区域,白色为未染色区域。可以看出随 着种植年限增加,砾石覆盖层与下层土壤边界逐渐 模糊。各样地的染色表现出以基质流形式均匀染 色和湿润峰锯齿状波动优先流染色相结合,随后在 土壤下层不同层面表现出一定优先流特征,基本呈 现出种植年限越长基质流区域越小,优先流现象出 现深度越浅的趋势。A1、A2、A3、A4砾石覆盖层整 体染色形态均匀,说明砾石层连通性好,孔隙分布 均匀,有利于亮蓝溶液向下迁移,而 A5、A6 砾石覆 盖层染色深度明显较浅且分布形态规则性差,表明 相对密实度较大且孔隙较为分散,不利于水分均匀 入渗。A1 整体以均匀的活塞流入渗为主,基质流区 域在整体染色区域占比较大,入渗接近最大深度位 置才出现优先流。在 0~25 cm 土层部分染色较为 均匀,存在少数点状未染色区域,可能是由于部分 砾石改变了水分运动通路。25 cm 以下出现横向染 色片区和纵向条带状染色区域,说明在这个区域内 土壤出现了优先流特征,入渗过程主要以竖直入渗 为主。A2,A3,A4 在砾石层内主要以基质流形式均 匀向下入渗,但进入土层后均出现了不同程度的优 先流现象, A2 在 12 cm 左右深度出现不连续横向未 染色区域,可能是由于砾石层与土层分界区域的不 连续性改变了部分水分通道,在这个间断层下部3 cm 左右又呈现出较为均匀的染色形态,在18~48 cm 土层出现纵向条带状优先流,可能是由于蚯蚓等 生物活动造成的。A3砾石层染色较为均匀但染色 程度和基质流区域占比较 A2 更低,其染色图像在 18 cm 深度以下出现深度不一的条块状染色形态。 A4 砾石覆盖层整体染色形态均匀性较 A3 更差,基 质流范围主要在 0~11 cm 的砾石层内,1~5 cm 局 部区域出现横向染色程度较浅片区。11 cm 向下染 色形态呈模糊的指状分布,同时出现了清晰的纵向 洞穴状染色带。而 A5 与 A6 入渗过程几乎只在砾 石分布的区域进行,少部分延伸到砾石与土壤混合 地带,入渗形态极不均匀,基质流仅在接近地表的 浅层区域存在且基质流区域面积较小,A5染色区域 与未染色区域边界模糊,说明 A5 砾石层中存在大 量土壤目内部分布有大量密集的孔隙,水分通过这 些孔隙传导形成染色区域和未染色区域的过渡边 界。A6 基质流区较 A5 更小,染色区域边界清楚且 染色区域深浅不一,可能由于长期弃耕且缺水导致 土壤严重板结,形成了密度较大的土块与砾石混合 物,水分难以由地表向下传递,大部分只能通过砾 石在土体中形成的大孔隙传导,同时由于土壤与砾 石两种介质存在水分传导的差异性进一步导致内 部染色程度不同。



图 3 垂直剖面染色图像 Fig.3 Images of vertical stained profiles

2.2 不同种植年限压砂地染色特征参数分析

分别对 A1、A2、A3、A4、A5 和 A6 样地的土壤剖 面染色图像进行分析处理,得到染色面积比(D_e)、 基质流深度(U_{niFr})、基质流比(P_{fr})、优先流比 (*P_{F-fr}*)、最大染色深度(*M_{DSD}*)和染色剖面变异系数 (*CV*)6个染色特征参数,不同种植年限压砂地垂直 剖面染色特征参数见图 4。一般情况下,染色剂由 上至下入渗,上层土壤直接接触染色溶液且接触面 积大,因此 D_e逐层由上到下越来越小,在下层土壤 染色形态分化明显。随种植年限增长,D_e呈减小趋 势,A1、A2、A3、A4、A5 的 D_e分别是 A6 的 3.59、 2.35、2.33、1.88 倍和 1.27 倍。各样地剖面水分入渗 过程主要以基质流形式进行,入渗至一定深度后染 色形态开始分化,D_e层间波动明显。U_{niFr}反映基质 流入渗的深度,也代表优先流出现的边界,与 A1 相 比 A2、A3、A4、A5、A6 的 U_{niFr}分别减少 42.73%、 50.65%、60.36%、77.06%、80.42%,随种植年限增长 不同处理的 U_{niFr}变小,即随种植年限增长基质流区 域越小,优先流出现深度越浅。P_{fr}为基质流区域占 比,值越大说明基质流区域越大,水分下渗以基质 流方式入渗范围越大。各样地的 P_{fr}表现为 A1 (98.61%)>A2(86.35%)>A3(74.89%)>A4(74.48%) >A5 (64.11%)>A6(63.76%),即各样地基质流区在 整体染色区的占比较大,基质流是染色溶液入渗的主 要方式,且随种植年限增长,基质流占比减小,基质流 区域减小。P_{F-f}表征了土壤优先流染色区域占整个 土壤剖面染色区域的比例,其值越大,说明该样地优 先流占整个水分运动的比例越大,优先流现象明显。 各样地的 P_{F-f}表现为 A6>A5>A4>A3>A2>A1,种植年 限越长其 P_{F-f}越大。M_{DSD}是土壤水分入渗能力的表 征,各样地的 M_{DSD}依次为 A2>A1>A3>A4>A5>A6,表 明除 A2 外压砂地土壤水分入渗能力随种植年限增加 而减小。土壤 CV 可以定量表征土壤剖面染色的均 匀程度,A1、A2、A3、A4、A5、A6 的 CV 分别为 0.09、 0.38、0.17、0.22、0.31、0.28,除 A2 样地外不同样地水分 分布的不均匀程度随年限增长呈增大趋势。



图 4 垂直剖面染色特征参数

Fig.4 Vertical dyeing characteristic parameters

2.3 不同种植年限压砂地湿润锋迹线及分形维数 分析

分形理论最初由 Bains^[30]提出,随后由 Tyler 等[31]引入土壤科学研究。湿润锋迹线分析可以反 映不同区域水分入渗的深度,进而说明入渗在水平 方向不同位置的差异性,这种差异可能是由土壤内 部结构和物理性质差异造成的。湿润锋迹线的分 形维数(F_n)是土壤水分入渗不均匀程度的表征,分 形维数越大表明其湿润锋波动越明显,优先流发育 越明显。从图 3 可以看出, A1 的湿润锋迹线在 25~ 35 cm 深度范围内,湿润锋迹线波动明显但波动幅 度较小,说明 A1 样地优先流出现较为滞后且发育 程度不高。A2 的湿润锋迹线在 17~48 cm 土层深 度范围内,湿润锋波动程度远高于 A1,说明优先流 发育明显程度高于 A1。A3 湿润锋迹线在 19~35 cm 土层深度范围内, 左侧区域整体入渗深度较右侧 更深且更均匀,右侧区域湿润锋迹线斜率较大,优 先流深度不一。A4 湿润锋迹线在 15~30 cm 土层 深度范围内,有明显入渗较深的条带状区域。A5湿 润锋迹线主要在 5~20 cm 土层深度范围内,总体入 渗深度明显小于种植年限短的样地,湿润锋边界模 糊无明显分界线,整体呈片区状分布,片区内染色 较为均匀。A6湿润锋迹线总体在 5~18 cm 土层深 度范围内,在6个样地中整体入渗深度最浅,但染色 边界清晰且湿润锋波动明显。通过分析湿润锋迹 线特征可以发现不同种植年限样地均有优先流发 育,由于 M_{nsp}不同,年限短的样地湿润锋分布区域 较大,年限长的则呈相反趋势。湿润锋迹线可以定 性分析不同年限样地优先流状况,并且分形维数可 以进一步定量分析优先流发育程度。不同样地湿 润锋迹线的分形维数为 A6>A5>A4>A2>A3>A1(表 3),种植年限增长样地湿润锋迹线的分形维数呈增 大趋势,其水分入渗的不均匀性越高,因此优先流 发育水平相对越高。

表 3 不同样地湿润锋迹线分形维数

Table 3 Fractal box dimension of soil dyeing profile image of sampling plots

项目	样地 Sampling plot							
Item	A1	A2	A3	A4	A5	A6		
F_D	1.06	1.29	1.23	1.35	1.40	1.41		
R^2	0.970	0.965	0.968	0.965	0.960	0.960		

3 讨 论

随着种植年限增加压砂地砾石覆盖层从纯砾 石阶段逐渐转化为土石混合阶段,与此同时,由于 人为的机械破碎及风化作用导致砾石的破碎化,砾 石粒径呈减小趋势,且大量细土掺入到砾石层中、 同时部分砾石进入下层土壤,因此种植年限越长, 表层砾石覆盖层>5 mm 粒径砾石减少、<5 mm 粒径 砾石及细土增加。样地 A1、A2、A3、A4、A5、A6 土壤 容重分别为1.48、1.53、1.54、1.61、1.62、1.63 g·cm⁻³, 土壤容重随种植年限增长而增大;土壤饱和导水率 A1(1.06 mm \cdot min⁻¹) > A2(0.33 mm \cdot min⁻¹) > A3 $(0.24 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}) > A4(0.15 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}) > A5(0.09)$ mm · min⁻¹)>A6(0.08 mm · min⁻¹),说明随种植年 限增加,土壤导水能力逐渐减弱。原因在于压砂地 土体的层状结构导致其耕作方式与普通农田不同, 压砂地一旦铺成几乎不进行扰动性较大的翻耕,在 大型机械、重力和人为踩踏等共同作用下土壤容重 增加、孔隙度变小,进而导致土体中有效水分运动 通道减少、抑制了土壤水分传导过程,这与王超 等^[32]研究结果一致。

通过亮蓝染色试验获取的剖面优先流染色形 态图像,发现随种植年限增加,样地 D_{a} 、 U_{min} 、 P_{a} 和 M_{DSD} 都呈减小趋势, P_{F-f} 和 C_v 都呈增大趋势。一般 而言,水分以基质流形式入渗越深其优先流发育越 滞后[33]。原因在于压砂地种植初期,砾石覆盖层和 土壤层界限明显,水分通过砾石层迅速进入质地较 为均一且疏松的土壤层,因此种植年限小的压砂地 水分在土壤层中以基质流入渗为主,同时由于砾石 层储水能力弱,水分大部分在土体中分布,所以表 现出溶液染色较深的现象(图 3,A1,A2)。随种植 年限增加,压砂地由原来砾石覆盖层和土壤层逐渐 转变为土石混合介质统一体且容重变大,导致土石 混合介质中细土增加,水分有效库容与持水能力明 显增加,下渗过程中染色溶液留滞于土石混合介质 层,表现为溶液染色较浅的现象(图 3, A5、A6),同 时由于砾石的存在,导致染色溶液在该介质中形成 了明显的优先流特征。即压砂地种植年限增长耕 作层的土石混合比逐渐增大,容重增大、水分通道 弯曲程度增加,迫使水分对通道进行选择,阻碍了 水分均匀入渗进行的同时抑制了基质流、促进了优 先流发育,因此种植年限越长,土体剖面 $D_{c_{x}}M_{pp}$ 与 UniFr越小。A2样地UniFr小于A3 且出现明显优先流 特征,由于 A2 存在明显动物活动导致的通道,示踪 溶液在此疏松通道内快速运动并向四周扩散^[34].说 明动物活动形成的大孔隙可以促进优先流发育。 Schaik 等^[35]研究发现土壤优先流比越长,优先流程 度越高。本研究中种植年限越长 P_{t} 越小,而 P_{F-t} 越 大,说明种植年限越长水分难以以基质流形式向下 均匀入渗,而通过优先流形式继续入渗,入渗形式 虽然仍以基质流为主,但基质流区域占比减小,优 先流占比增大,因此其优先流发育程度逐渐提高。 随压砂地种植年限增加,土壤容重显著增加(P< 0.05)、饱和导水率显著减小(P<0.05),在染色形态上 表现为 *M*_{DSD}减小,因此 *P*_f随种植年限增加而减小。 *P*_{F-f}、*C*_e随种植年限增加总体上均呈增加趋势,说明 年限越长优先流发育程度提高,原因在于随种植年限 增加土石混合程度明显增加,且长期耕作压实导致土 壤容重显著增大,明显改变了土体孔隙度及其分布特 征,导致染色溶液入渗均匀程度变差,出现 *M*_{DSD}和基 质流深度明显减小,优先流发育程度变大的现象。

越来越多的学者通过图像分析确定分形尺寸. 以此分析优先流状况并取得了良好的效果[36-38]。 分形维数能够定量评价染色形状的不规则程度,能 够较为精确地评估和分析土壤剖面优先流发育程 度。本文研究表明 A1、A2、A3、A4、A5 与 A6 样地随 种植年限增加分形维数呈增大趋势,说明其剖面湿 润锋迹线的不规则性越大,水分入渗在剖面水平方 向上各个位置所能达到的最大入渗深度差异性较 大、入渗不均匀性大,优先流发育程度越高,与染色 特征参数获取的结果一致。可以看出分形维数能 够反映优先流发育程度,且结果具有参考性。本文 利用染色特征参数和分形维数分析不同年限压砂 地优先流发育程度,虽然能够较为直观描述不同种 植年限压砂地优先流特征,但是对于其大孔隙三维 分布特征和优先流通道的空间结构尚未明晰,因此 为了更好阐明压砂地优先流发育过程及其机制,后 续应引入 CT 扫描等方法进一步加强研究。

4 结 论

1)通过压砂地剖面染色形态可以看出,随着种 植年限增加土石混合程度增加,砾石覆盖层与下层 土壤边界逐渐模糊,整体上随土壤深度增加剖面染 色水流形态从均匀的活塞流向指流转变,基质流区 域减小,优先流区域增大。

2)随种植年限增加染色面积变小、压砂地土壤 基质流占比和基质流深度减小,优先流占比增大, 基质流占主导的水分入渗形式逐渐减弱,优先流特 征变得更加明显。

3)染色湿润锋迹线的分形维数为 A6(1.41)> A5(1.40)>A4(1.35)>A3(1.23)>A2(1.22)>A1 (1.06),A6 样地优先流湿润锋迹线的不规则性最 高,A1 样地最低。即随种植年限增长,压砂地优先 流发育程度呈提高趋势。

参考文献:

- WANG D, NORMAN J M, LOWERY B, et al. Nondestructive determination of hydrogeometrical characteristics of soil macropores[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(2): 294-303.
- BOUMA J. Soil morphology and preferential flow along macropores [J].
 Agricultural Water Management, 1981, 3(4): 235-250.
- [3] ILEK A, KUCZA J, WITEK W. Using undisturbed soil samples to study how rock fragments and soil macropores affect the hydraulic conductivity of forest stony soils: some methodological aspects[J]. Journal of Hydrology, 2019, 570: 132-140.
- [4] HLAVÁCIKOVÁ H, HOLKO L, DANKO M, et al. Estimation of macropore flow characteristics in stony soils of a small mountain catchment[J]. Journal of Hydrology, 2019, 574: 1176-1187.
- [5] RANJIT KUMAR R, MEENAMBAL T, KUMAR V.Macropore flow as a groundwater component in hydrologic simulation: modelling, applications and results[J]. Current Science, 2017, 112(6): 1197-1207.
- [6] GERMANN P F, EDWARDS W M, OWENS L B. Profiles of bromide and increased soil moisture after infiltration into soils with macropores [J]. Soil Science Society of America Journal, 1984, 48(2): 237-244.
- [7] 骆紫藤,牛健植,孟晨,等.华北土石山区森林土壤中石砾分布特征 对土壤大孔隙及导水性质的影响[J].水土保持学报,2016,30(3): 305-308,316.
 LUO Z T, NIU J Z, MENG C, et al. Effects of distribution of rock fragment on macropores and hydraulic conductivity in forest soil in Rocky mountain area of northern China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(3): 305-308, 316.
- [8] 张中彬,彭新华.土壤裂隙及其优先流研究进展[J].土壤学报, 2015,52(3):477-488.

ZHANG Z B, PENG X H. A review of researches on soil cracks and their impacts on preferential flow[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(3): 477-488.

- [9] 杨秀霞,燕辉,周春火,等.水分胁迫下氮形态对水稻根系孔隙度及水分吸收的影响[J].干旱地区农业研究,2019,37(2):144-149. YANG X X, YAN H, ZHOU C H, et al. Effects ofnitrogen forms on root porosity and water absorption of rice under drought stress[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(2): 144-149.
- [10] 闫加亮,赵文智,张勇勇.绿洲农田土壤优先流特征及其对灌溉量的响应[J].应用生态学报,2015,26(5):1454-1460.
 YAN J L, ZHAO W Z, ZHANG Y Y. Characteristics of the preferential flow and its response to irrigation amount in oasis crop land[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(5): 1454-1460.
- [11] 贾浩,王振华,张金珠,等.不同残膜量对土壤水分运移的影响及模 拟[J].干旱地区农业研究,2021,39(1):49-56. JIA H, WANG Z H, ZHANG J Z, et al. Effects of different residual film quantity on soil moisture movement and simulation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(1): 49-56.
- [12] 白一茹,王幼奇,王菲,等.压砂地土壤导水特性空间格局及影响因子[J].干旱地区农业研究,2016,34(4):55-61.
 BAI Y R, WANG Y Q, WANG F, et al. Spatial variability of soil saturated hydraulic conductivity and its influencing factors in the gravel mulched field of Ningxia[J].Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(4): 55-61.
- [13] 周蓓蓓,邵明安,王全九.不同碎石种类对土壤入渗的影响[J].西 北农林科技大学学报(自然科学版),2011,39(10):141-148.
 ZHOU B B, SHAO M A, WANG Q J. Effect of different rock fragments species on soil infiltration[J]. Journal of NorthwestA & F Uni-

versity(Natural Science Edition), 2011, 39(10): 141-148.

- [14] AL-QINNA M, DON SCOTT H, BRYE K R, et al.Coarse fragments affect soil properties in a mantled-karst landscape of the Ozark highlands[J]. Soil Science, 2014, 179(1): 42-50.
- [15] HLAVÁCIKOVÁ H, NOVÁK V, ŠIMUNEK J.The effects of rock fragment shapes and positions on modeled hydraulic conductivities of stony soils[J]. Geoderma, 2016, 281: 39-48.
- [16] 李雪垠,李朝霞,王天巍,等.紫色土中砾石夹层对土壤水分入渗的 影响[J].水科学进展,2016,27(5):662-669.
 LI X Y, LIZ X, WANG T W, et al. Rock interbed containment effect on infiltration processes in purple soil regions[J]. Advances in Water Science, 2016, 27(5): 662-669.
- [17] POESEN J, INGELMO-SANCHEZ F. Runoff and sediment yield from topsoils with different porosity as affected by rock fragment cover and position[J]. Catena, 1992, 19(5): 451-474.
- [18] 赵云鹏,白一茹,王幼奇,等,城市绿地覆盖砂石后土壤水分入渗过 程及模型分析[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2017,45 (7):66-72.

ZHAO Y P, BAI Y R, WANG Y Q, et al. Investigating and modeling soil infiltration process with gravel mulch on urban green space [J]. Journal of Northwest A &F University (Natural Science Edition), 2017, 45(7): 66-72.

- [19] 刘晓青,左亿球,冯浩,等.砾石覆盖量对夏玉米作物系数及水分利 用效率的影响[J].干旱地区农业研究,2016,34(2):15-23,75. LIU X Q, ZUO Y Q, FENG H, et al. Effects of gravel mulching level on crop coefficients and water use efficiency of summer corn[J].Agricultural Research in the Arid Areas,2016, 34(2): 15-23, 75.
- [20] 王德金,赵文智,周宏.河西走廊中部荒漠砾幂特征及其对土壤水 分入渗的影响[J].中国沙漠,2020,40(6):233-241.
 WANG D J, ZHAO W Z, ZHOU H. Characteristics of desert pavement and its influence on water infiltration in the middle of the-Hexi corridor[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(6): 233-241.
- [21] KUNG K J S. Preferential flow in a sandy vadose zone: 1. Field observation[J]. Geoderma, 1990, 46(1/3): 51-58.
- [22] 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. DAICT,LIUYJ, WANGTW, et al. Characteristics of preferential flow under high-content rock fragment purple soil in the three gorges reservoir area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31 (1): 103-108, 115.
- [23] 赵思远,苏辉东,贾仰文,等.北方土石山区典型坡面优先流特征研究[J].水土保持学报,2018,32(6):9-15.
 ZHAO S Y, SU H D, JIA Y W, et al. Characteristics of preferential flow on typical slope in northern Rocky mountain area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(6): 9-15.
- [24] 邵明安,马东豪,朱元骏,等.黄土高原土石混合介质土壤水分研究
 [M].北京:科学出版社,2010:63-94.
 SHAO M A, MA D H, ZHU Y J, et al. Study on soil moisture of soil-rock mixture in Loess Plateau[M].Beijing:Science Press,2010:63-94.
- [25] SOHRT J, RIES F, SAUTER M, et al. Significance of preferential flow at the rock soil interface in a semi-arid karst environment [J]. Catena, 2014, 123: 1-10.
- [26] 白一茹,赵云鹏,王幼奇,等.宁夏砂田不同砾石覆盖厚度土壤入渗 过程及模型分析[J].水土保持学报,2017,31(4):81-85.
 BAIY R, ZHAOY P, WANG Y Q, et al. Soil infiltration process

BAI Y R, ZHAO Y P, WANG Y Q, et al. Soil infiltration process and model analysis of field mulched with different thickness of gravelsand in Ningxia[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31
(4): 81-85.

[27] 白一茹,王幼奇,展秀丽.陕北农牧交错带土地利用方式对土壤物 理性质及分布特征的影响[J].中国农业科学,2013,46(8): 1619-1627.

BAI Y R, WANG Y Q, ZHAN X L. Effects of different land use types on soil physical properties and their distributions in farmingpastoralecotone of northern Shaanxi [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(8): 1619-1627.

- [28] FLURY M, FLÜHLER H, JURY W A, et al. Susceptibility of soils to preferential flow of water: a field study [J]. Water Resources Research, 1994, 30(7): 1945-1954.
- [29] PACHEPSKY Y A, GIMÉNEZB D, CRAWFORD J W, et al. Conventional and fractal geometry in soil science [J]. Developments in Soil Science, 2000, 27: 7-18.
- [30] BAINS R. Fractal geometry mathematical foundations and applications
 [J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 1992, 9(4): 366-367.
- [31] TYLER S W, WHEATCRAFT S W. Fractal scaling of soil particlesize distributions: analysis and limitations[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(2): 362-369.
- [32] 王超,王菲,吴秀玲,等.压砂年限对土壤质量的影响研究[J].干旱 区资源与环境,2015,29(8):190-195.
 WANG C, WANG F, WU X L, et al. Research on evolvement of soil quality on gravel mulched field[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(8): 190-195.
- [33] 陈晓冰,韦灵,吴晗,等.秸秆覆盖下桂北岩溶区水稻田土壤优先流 特征[J].水土保持学报,2020,34(5);124-130.
 CHEN X B, WEI L, WU H, et al. The characteristics of preferential flow on straw mulching of paddy field in the karst region of north Guangxi[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(5): 124-130.
- [34] MCBRIDE D, ILANKOON I M S K, NEETHLING S J, et al. Preferential flow behaviour in unsaturated packed beds and heaps: incorporating into a CFD model[J]. Hydrometallurgy, 2017, 171: 402-411.
- [35] VAN SCHAIK N L M B. Spatial variability of infiltration patterns related to site characteristics in a semi-arid watershed [J]. Catena, 2009, 78(1): 36-47.
- [36] 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[J].农业机械学报,2017,48(12):214-220,277. ZHANG D X, ZHANG H J, CHENG J H. Quantitative analysis of preferential flow in slope farmland soils based on multi-index evaluation and fractional dimension[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 214-220, 277.
- [37] 李振东,朱彦光,陈晓冰,等.桂北岩溶区典型农地土壤优先流特征
 [J].水土保持研充,2019,26(5):68-74,80.
 LI Z D, ZHU Y G, CHEN X B, et al. Characteristics of soil preferential flow in typical farmland in the karst area of north Guangxi[J].
 Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(5): 68-74, 80.
- [38] 潘网生,许玉凤,卢玉东,等.基于非均匀性和分形维数的黄土优先 流特征定量分析[J].农业工程学报,2017,33(3):140-147.
 PAN W S, XU Y F, LU Y D, et al. Quantitative determination of preferential flow characteristics of loess based on nonuniformity and fractional dimension[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(3): 140-147.