

基于染色示踪的农膜残留农田土壤优先流特征

胡 琦, 李仙岳, 史海滨, 田 彤, 陈 宁, 张月红

(内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

摘要: 随着覆膜农作的发展, 农膜残留日益严峻, 严重影响土壤水流运动。为了探索农膜残留对水流运动的影响机制, 在河套灌区九庄节水综合试验站, 设计 3 种残膜量, 分别为 0, 300, 600 kg/hm², 于成熟期在各试验小区选择典型区域进行 20, 80 mm 水量的染色示踪试验, 共 6 个处理, 研究不同残膜量对土壤物理特性的影响, 基于染色示踪技术分析不同入渗量和不同残膜量对土壤水流运动的影响, 并评价各处理土壤剖面的优先流特征。结果表明: 随着残膜量增加, 土壤容重、饱和导水率和土壤初始含水率呈下降趋势, 而土壤孔隙度呈增大趋势, 土壤中随机分布的残膜导致残膜处理(300, 600 kg/hm²)的各物理参数有较高的变异系数。基于土壤染色剖面二值化图像分析, 土壤优先流发育程度随残膜量和入渗量增加而提高, 300, 600 kg/hm² 残膜量处理的最大染色深度(M_{DSD})和土壤染色剖面的变异系数(C_v)随残膜量增加而增大, 与 20 mm 入渗量相比, 80 mm 入渗量下残膜处理的 M_{DSD} 和 C_v 分别平均增加 47.23% 和 27.34%。不同处理的优先流特征指标差异显著, 5 个优先流特征指标(染色面积比、基质流深度、优先流比、长度指数和变异系数)均显示残膜处理(300, 600 kg/hm²)的优先流程度高于无残膜处理(0 kg/hm²), 可见残膜量及入渗量的增加均会增大土壤优先流的发生几率和强度。

关键词: 农膜残留; 土壤物理参数; 优先流; 入渗量

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)03-0142-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.03.022

Soil Preferential Flow Characteristics of Agricultural Film Residual Farmland Based on Dye Tracing Method

HU Qi, LI Xian Yue, SHI Haibin, TIAN Tong, CHEN Ning, ZHANG Yuehong

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018)

Abstract: Agricultural plastic film residual (PFR) increase quickly with the development of mulching cultivation, and have a strong impact on soil water movement. In order to study the influence of PFR on water flow movement mechanism, the experiment was carried out in water saving experiment station of Jiuzhuang, Hetao irrigation area. There were six treatments, including three PFR amounts (0, 300, 600 kg/hm²) and two water infiltration amounts (20, 80 mm). The influence of different PFR amounts on soil physical properties was studied, the effects of different PFR amounts and different infiltration amounts on soil water flow was analyzed based on dye tracing method, and the preferential flow characteristics for each treatments were evaluated. The results showed that soil bulk density, saturated water conductivity, and initial soil moisture content showed a decreasing trend with the increase of PFR amount, while an increasing trend for soil porosity. The random distribution of residual film in soil lead to higher variation coefficient of each physical parameter of PFR treatment. The development degree of soil preferential flow increased with the increase of PFR amount and infiltration amount. The maximum dyeing depth (M_{DSD}) and the coefficient of variation of soil staining profile (C_v) of 300, 600 kg/hm² PFR treatment increased with the increase of PFR amount. Compared with 20 mm infiltration, the M_{DSD} and C_v for PFR treatment at 80 mm infiltration increased by 47.23% and 27.34%, respectively. In addition, the characteristic index of preferential flow of different treatments was significantly different. Five characteristic preferential flow indexes (dyeing area, uniform flow depth, preferential flow ratio, length index, and coefficient of

收稿日期: 2019-11-06

资助项目: 国家自然科学基金项目(51669020, 51469022, 51539005); 内蒙古自然科学基金项目(2016JQ06)

第一作者: 胡琦(1994—), 女, 硕士研究生, 主要从事农业生态环境效应研究。E-mail: 593802524@qq.com

通信作者: 李仙岳(1980—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农业生态环境效应研究。E-mail: lixianyue80@126.com

variation) revealed that the preferential flow of 300, 600 kg/hm² PFR treatment was higher than that of 0 kg/hm² treatment. It can be seen that the increase of residual film amount and infiltration amount will increase the occurrence probability and strength of soil preferential flow.

Keywords: agricultural film residual; soil physical parameters; preferential flow; infiltration

地膜覆盖是重要的农艺措施,特别在干旱盐渍化地区已成为节水、保墒、控盐、增温、高产的主要手段之一^[1-2],因此导致地膜的使用量和覆膜面积逐年增加。目前我国地膜年使用量已达全球第一,高达216万t以上^[3],仅在河套灌区每年地膜使用量就高达14 354.74 t^[4]。农用地膜的生产材料主要是聚乙烯,它的化学分子结构非常稳定,在土壤中自行降解至少需要几百年^[5]。如果多年覆膜连作,且地膜回收机制不健全,农膜残留累积到一定程度会产生系列负面影响及环境污染^[6]。由于农用地膜厚度较薄(通常低于0.008 mm),经过风吹日晒以及农事耕作后极易破损,特别在地表滴灌条件下,残留的农膜碎片面积多以<5 cm²存在于土壤中^[7],且主要分布在耕作层(0—30 cm)^[6]。当土壤中存在农膜残留,会影响土壤水分运移,使土壤局部水分分布不均匀^[8],抑制作物根系生长^[9],并导致作物减产^[8]。

目前关于农膜残留对土壤结构、水力性质以及土壤水分入渗等方面的影响已做了大量室内研究^[5,10-11]。有研究^[5,10]表明,土壤孔隙度随着农膜残留量的增加而增加,而土壤容重和饱和导水率则随残膜量的增加呈下降趋势。同时,农膜残留会明显降低垂直方向的湿润体积分布,从而导致残膜区土壤含水率明显低于无残膜区^[10],且土壤中残膜量越多,则滴灌湿润锋运移距离和湿润体积会越小,水分入渗的不确定性也会越明显^[11]。但另有研究表明,当土壤中残膜达到一定量后会使土壤中出现优先流,李元桥等^[12]通过室内入渗试验发现,随着农膜残留量的增加土壤中大孔隙比例也随之增加,当残膜量达到720 kg/hm²时,残膜区土壤大孔隙比例增加,并易产生土壤水分的优势迁移。而水流和溶质通过土壤中的优先流路径更快移动到土壤深层,导致污染物到达地下水的的时间缩短,从而增加了污染物向土壤深层运移的几率^[13],故优先流路径较多的农田地下水更易受污染,因此定量探索土壤中优先流对于农业灌溉和肥料的高效利用、农业面源污染具有重要意义^[14]。在农田中当虫洞^[14]、植物根系^[15]和农业机械耕作^[16]等因素存在时,会易于产生优先流,与之类似当竖向和斜向分布的残膜存在会导致农膜—土壤界面易于产生优先路径,这样不可避免会产生优先流^[12]。对于优先流的研究,通常采用染色示踪法进行直观观察,该方法已在农田、林地、山区等^[15-17]区域及不同灌

溉量^[14]、不同坡耕地类型^[18]、不同水质灌溉^[19]等条件下的优先流特征识别中得到广泛应用。农膜残留对土壤物理特性及水流运动的影响,主要是基于室内试验研究,对于田间条件下农膜残留对土壤物理特性的影响,特别对入渗条件下水流阻滞效应、优先流特性等方面的研究较少。

本文主要针对田间条件下不同残膜量对土壤物理特性的影响进行分析,并基于染色示踪技术探索不同入渗量及不同残膜量对农田优先流发育状况的影响,并对优先流进行评价,以期揭示农膜残留对土壤物理性质和优先流发育程度的影响机制,为农膜残留农田的灌溉和深层渗漏提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2017—2018年在内蒙古河套灌区双河镇九庄节水综合试验站(107°18'E,40°41'N)进行。该地区属于中温带半干旱大陆性气候,年均降水量为145 mm,年均潜在蒸发量为2 275 mm,昼夜温差大,日照时间长,多年日照时间平均为3 229.9 h,是中国日照时间较长的地区之一。光、热、水同期,无霜期130天左右,适宜于农作物生长。试验区0—50 cm土层以粉砂壤土为主,平均容重为1.47 g/cm³。

1.2 研究方法

1.2.1 试验材料与设计 通过对该区域的调查,覆膜滴灌区农膜残留主要分布在0—30 cm土层,残膜碎片面积集中在3~5 cm²,连续覆膜15年的残膜量约为150 kg/hm²^[2]。本试验分别于2017年5月10日和2018年5月1日在玉米农田中设置0,300,600 kg/hm² 3个残膜量,为保证处理的一致性,选用新的聚乙烯塑料地膜(磴口县大众塑料厂生产),膜厚为0.008 mm,用长剪刀将地膜分割为长×宽为2 cm×2 cm的碎片,根据小区面积计算残膜量,然后用天平(精度:0.01 g)称重待用,在整地前先将碎膜均匀铺撒在小区表面,再利用旋耕机均匀将碎膜混入0—30 cm耕层。每个小区农艺措施、灌溉施肥措施均一致,均采用覆膜滴灌耕作,每个小区预留一定的空地用于染色示踪试验,并定期除草。在玉米成熟期,分别于2017年9月15日和2018年9月10日进行染色示踪试验,每种残膜量处理农田中分别选取土质均一、面积1 m²的田块用于染色试验,且每种残膜量处理中

均设置 20,80 mm 2 种入渗量,试验共 6 个处理,每个处理均有 3 个重复对照,共计 18 个小区。

1.2.2 染色试验 在染色试验前 1 天,进行试验预处理。在各残膜处理小区中分别选择地面平整、无作物种植、无杂草区域,采用双套环试验装置,每个处理同心安置 2 个尺寸分别为 0.5 m×0.5 m×0.4 m 和 1.0 m×1.0 m×0.4 m 矩形框(图 1),矩形框嵌入土壤 0.2 m,露出地面 0.2 m。试验前将矩形框的土壤表面刮平,尽量避免破坏土壤的原状结构。并且把矩形框周围的缝隙填上土,确保染色时溶液不会渗漏到试验区边缘,影响染色试验结果。

染色试验当天,配置亮蓝染色示踪剂(4 g/L),染色剂采用易溶于水的食品添加剂亮蓝(FCF)(C₃₇H₃₄N₂Na₂O₉S₃),用喷壶将亮蓝溶液喷洒在内框的试验样地上(喷洒量为 20,80 mm),在外框注入与内框相同水头高度的清水,以免出现水位差,导致染色剂下渗不均匀,不符合天然状况。为防止降雨影响,待样地溶液无积水状态后(约 10 min)铺设防雨布,入渗 24 h 后移走防雨布,对染色区域进行开挖,每个染色区域以 10 cm 间隔纵向开挖 5 个 0.5 m×0.5 m 的正方形剖面,用剖面刀将剖面刮平,用数码相机沿垂直方向拍摄土壤剖面染色图片。

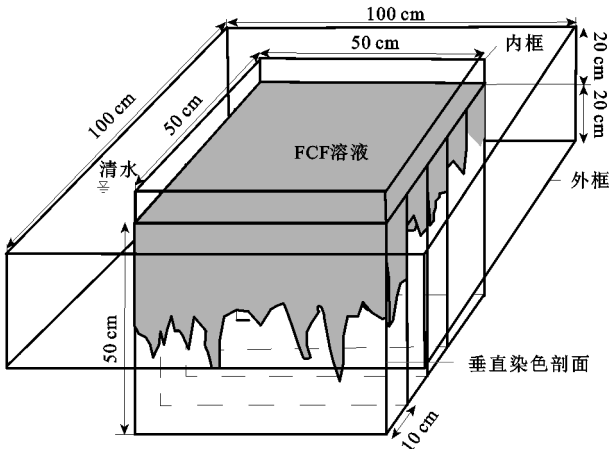


图 1 染色剖面示意

1.2.3 染色图像处理 首先对待测图像进行几何校正:用 Adobe Photoshop 2018(Adobe Systems)对图片进行裁剪,每张图片大小均为 50 cm,以便于对比;亮度与色彩校正:待测图片经过饱和度、明度、对比度调整,替换颜色,灰度、阈值调节将染色部分替换为黑色,未染色部分替换为白色;降噪处理:用 Imageproplus6.0(Media Cybernetics)软件将已通过 Photoshop 处理的图片颜色数值化,黑色用 0 表示(染色部分),白色用 255 表示(未染色部分),整个图片颜色数值为 0 或 255;数理统计:用 Imageproplus6.0 中 count 命令将待测图像数值化,并转为 Excel 格式待分析。

1.2.4 优先流评价指数 本文使用染色面积比

(D_c)、基质流深度(U_{niFr})、优先流比(P_{F-fr})、长度指数(L_i)、土壤染色剖面变异系数(C_v)等优先流评价指标,对 6 个处理染色剖面的优先流进行分析,具体计算方法为:

(1)染色面积比(D_c),一定土层深度剖面染色面积占该深度剖面总面积的百分比,计算公式为^[20]:

$$D_c = \frac{D}{D + N_D} \times 100\% \quad (1)$$

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

(2)基质流深度(U_{niFr}),当染色面积比 $>80\%$ 时,其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。

(3)优先流比(P_{F-fr}),为剖面优先染色区域占总染色区域的百分比,计算公式为^[21]:

$$P_{F-fr} = \left(1 - \frac{U_{niFr} W}{T_{otStAr}} \right) \times 100\% \quad (2)$$

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

(4)长度指数(L_i),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,计算公式为^[22]:

$$L_i = \sum_{i=1}^n |D_{C(i+1)} - D_{Ci}| \quad (3)$$

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

(5)土壤染色剖面变异系数(C_v),表示土壤剖面染色差异程度,计算公式为^[18]:

$$C_v = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (D_{Ci} - \overline{D_C})^2}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_{Ci}} \quad (4)$$

式中: $\overline{D_C}$ 为染色面积比的平均值。

1.3 样品采集与测定

在每个染色小区内,随机选取 3 个染色剖面,沿垂直方向每 10 cm 为 1 层取至 50 cm,采用环刀取各土层原状土,带回实验室测定土壤容重和饱和导水率,并计算土壤总孔隙度。每个染色小区每层指标取平均作为 1 个重复,共 3 个重复。

(1)土壤容重:采用环刀法测定,环刀规格为直径 50.46 cm,高 50 cm,容积为 100 cm^3 。

(2)土壤总孔隙度:计算公式为:

$$\varphi = \left(1 - \frac{\rho_{容}}{\rho_{密}} \right) \times 100\% \quad (5)$$

式中: φ 土壤总孔隙度(%); $\rho_{容}$ 土壤容重(g/cm^3); $\rho_{密}$ 土壤密度,一般取 2.65 g/cm^3 。

(3)土壤饱和和导水率:采用定水头法测定土壤饱和和导水率。

(4)土壤初始含水率:在染色前1天,采用烘干法测定0—10,10—20,20—30,30—40,40—50 cm的土壤初始含水率。

1.4 数据处理

利用Excel 2007进行数据整理,SPSS 20.0进行数据的统计和检验,用Origin 8.5和Adobe Illustrator CS6软件制图。

2 结果与分析

2.1 不同残膜量对土壤物理特性的影响

残膜作为一种外源物质,长期存在于土壤中会改变土壤结构^[5,10]。本研究中,在残膜层(0—30 cm),总体上随着残膜量的增加土壤初始含水率(本研究所涉及的初始含水率也就是作物生长末期的土壤含水率)、容重、饱和和导水率呈下降趋势,而孔隙度呈增大趋势,在30—50 cm土层由于无残膜存在,不同处理均无显著差异(表1)。在残膜层,当残膜量为300 kg/hm²,与无残膜处理相比初始含水率、容重、饱和和导水率两年平均分别下降15.49%,5.54%和9.59%,孔隙度增加6.69%。当残膜量增加到600 kg/hm²,其初始含水率、容重和饱和和导水率与300 kg/hm²残膜量处理相比平均分别降低10.64%,3.79%和7.50%,孔隙度增加3.98%,可以看出残膜量从300 kg/hm²增加到600 kg/hm²,各物理指标均呈显著差异,但变化程度低于残膜量从0 kg/hm²增加到300 kg/hm²。在残膜层,与无残膜处理相比,当土壤中残膜增加到600 kg/hm²,初始含水率最大降低24.48%,容重最大降低9.11%,饱和和导水率最大降低16.37%,孔隙度最大增加10.94%。可见,土壤中存在的残膜直接接触土壤,从而导致土壤容重减少,土壤孔隙度增加,饱和和导水率减小。另外,土壤中的残膜改变水分运动的路径,使得初始含水率降低。

由于残膜在土壤中的位置,以及残膜接触孔隙的面积等不确定性,从而导致土壤物理参数的变异性增大,同样随着残膜量的增加,各物理参数的变异系数(C_v)呈增大趋势(表1)。在残膜层,与无残膜处理相比,300 kg/hm²残膜量处理土壤初始含水率、容重、孔隙度以及饱和和导水率的 C_v 2年平均分别增加到3.27,3.12,2.61,2.23倍($P<0.05$),各参数的 C_v 平均增加到2.81倍。而600 kg/hm²残膜量处理各参数的 C_v 分别增加到4.46,5.64,4.69,3.61倍($P<0.05$),各参数的 C_v 平均增加到4.60倍。与无残膜土层(30—50 cm)相比,残膜层(0—30 cm)的300 kg/hm²残膜处理的土壤初始含水率、容重、孔隙度和饱

和导水率的 C_v 分别增加336.58%,270.45%,317.31%和308.12%,而600 kg/hm²残膜处理的各参数的 C_v 分别增加439.87%,497.33%,591.72%和510.45%。土壤中残膜的随机分布增加土壤水分在剖面内的变异性,从而促进了优先流的产生。

2.2 不同残膜量对土壤水非均匀流动的影响

选择具有代表性的染色图像进行二值化处理,分析不同残膜量处理在不同入渗量条件下土壤水流动特征。从图2可以看出,不同处理的土壤水流动特征,黑色区域是染色区,代表该区域已被染色剂湿润。随着残膜量的增加最大染色深度(M_{DSD})呈增大趋势,优先流分布深度增加。300,600 kg/hm²残膜量处理的 M_{DSD} 分别是0 kg/hm²处理的1.10,1.19倍。当入渗量为20 mm时,300,600 kg/hm²残膜量处理的 M_{DSD} 较0 kg/hm²处理分别增加17.59%和31.46%,而当入渗量为80 mm时,300,600 kg/hm²残膜量处理的 M_{DSD} 比0 kg/hm²处理分别增加5.61%和12.19%。可见,随着土壤中农膜残留量增加,除了产生阻水效应外,土壤—残膜界面所形成的优先流路径也增加,从而导致土壤中优先流产生的几率增加,这个结果与李元桥等^[12]的结论相似。另外,随着入渗量的增加,最大染色深度(M_{DSD})也呈增大趋势,与20 mm入渗量相比,80 mm入渗量条件下3个残膜量处理的平均 M_{DSD} 增加47.23%。这也说明入渗量越大,土壤水向下的流动势能越高,优先流越易形成。

同时从染色二值图(图2)中也能直观看出,随着残膜量的增加染色均匀度呈降低趋势,在20 mm入渗量条件下无残膜处理在0—15 cm土层基本全染色(图2a),80 mm入渗量时,无残膜处理在0—30 cm土层基本全染色(图2d),而对应的600 kg/hm²残膜量处理则出现较明显的非均匀性(图2f)。土壤染色剖面变异系数(C_v)可以定量表征土壤剖面染色的均匀程度,与0 kg/hm²处理相比,300,600 kg/hm²残膜量处理的 C_v 2年平均分别增加104.05%和122.97%。当入渗量为20 mm时,300,600 kg/hm²残膜量处理的 C_v 分别是0 kg/hm²处理的1.56,1.67倍。入渗量为80 mm,300,600 kg/hm²残膜处理的 C_v 分别是0 kg/hm²处理的2.71,3.00倍。另外,随着入渗量增加无残膜处理的 C_v 降低,而残膜处理的 C_v 增大,80 mm入渗量下残膜处理的 C_v 较20 mm入渗量条件下平均增加27.34%。可见,增大入渗量使得无残膜处理的染色均匀的区域增加,而残膜处理的土壤剖面中优先流发育程度较高,导致其染色均匀度有所下降。

表 1 不同残膜量条件下的土壤物理参数

年份	土层 深度/cm	残膜量/ (kg·hm ⁻²)	初始 含水率/%	C _v /%	容重/ (g·cm ⁻³)	C _v /%	孔隙度/ %	C _v /%	饱和导水率/ (mm·h ⁻¹)	C _v /%
2017	0—10	0	22.17a	0.84	1.41a	1.02	46.79c	1.19	35.08a	1.07
		300	20.65b	2.50	1.37b	2.48	48.30b	4.11	31.63b	2.09
		600	17.29c	3.25	1.31b	7.05	50.57a	7.89	29.68c	3.15
	10—20	0	21.84a	1.13	1.44a	1.21	45.66c	2.01	37.34a	2.22
		300	17.17b	3.07	1.34b	2.78	49.43b	3.54	33.16b	4.56
		600	15.11c	4.07	1.27b	5.23	52.08a	5.76	30.27c	6.79
	20—30	0	25.32a	0.91	1.45a	0.95	45.28c	1.10	33.53a	1.36
		300	19.61b	4.09	1.40b	3.18	47.17b	3.36	29.18b	3.18
		600	18.44c	5.13	1.33c	6.33	49.81a	4.68	27.74c	5.86
	30—40	0	27.71a	0.76	1.51a	0.88	43.02a	1.01	32.34a	0.99
		300	27.18a	0.82	1.50a	0.91	43.40a	1.06	31.63a	1.04
		600	26.58a	0.87	1.49a	1.08	43.77a	1.14	31.54a	1.10
	40—50	0	25.33a	0.52	1.53a	0.88	42.26a	0.82	30.68a	0.53
		300	24.88a	0.67	1.51a	0.95	43.02a	0.84	30.14a	0.56
		600	24.38a	0.72	1.49a	1.01	43.77a	0.88	30.03a	0.61
	0—10	0	23.32a	0.62	1.41a	1.43	46.75c	1.34	36.13a	1.23
		300	20.12b	2.90	1.36ab	4.06	48.68b	2.98	33.33b	2.76
		600	18.06c	3.19	1.31b	6.86	50.53a	5.68	30.79c	4.08
	10—20	0	27.09a	1.25	1.45a	0.78	45.18c	1.08	36.75a	2.04
		300	22.07b	2.56	1.30a	3.35	50.94b	2.68	34.16b	3.19
		600	20.79c	3.51	1.27b	5.03	51.97a	6.04	31.27c	5.88
2018	20—30	0	23.34a	0.80	1.51a	1.35	43.04c	0.76	34.24a	0.65
		300	21.30b	3.02	1.42a	5.21	46.42b	2.86	31.18b	3.32
		600	18.36c	5.63	1.39b	7.49	47.57a	5.02	28.45c	5.19
	30—40	0	21.89a	0.70	1.51a	0.97	42.96a	0.51	33.52a	0.79
		300	21.38a	0.75	1.51a	1.02	43.02a	0.56	32.33a	0.84
		600	20.97a	0.83	1.50a	1.22	43.34a	0.64	32.04a	0.93
	40—50	0	21.14a	0.47	1.54a	0.87	41.91a	0.64	31.08a	0.44
		300	20.72a	0.53	1.53a	0.91	42.26a	0.66	30.24a	0.68
		600	20.45a	0.64	1.52a	0.93	42.67a	0.72	29.63a	0.74

注:同列不同字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。下同。

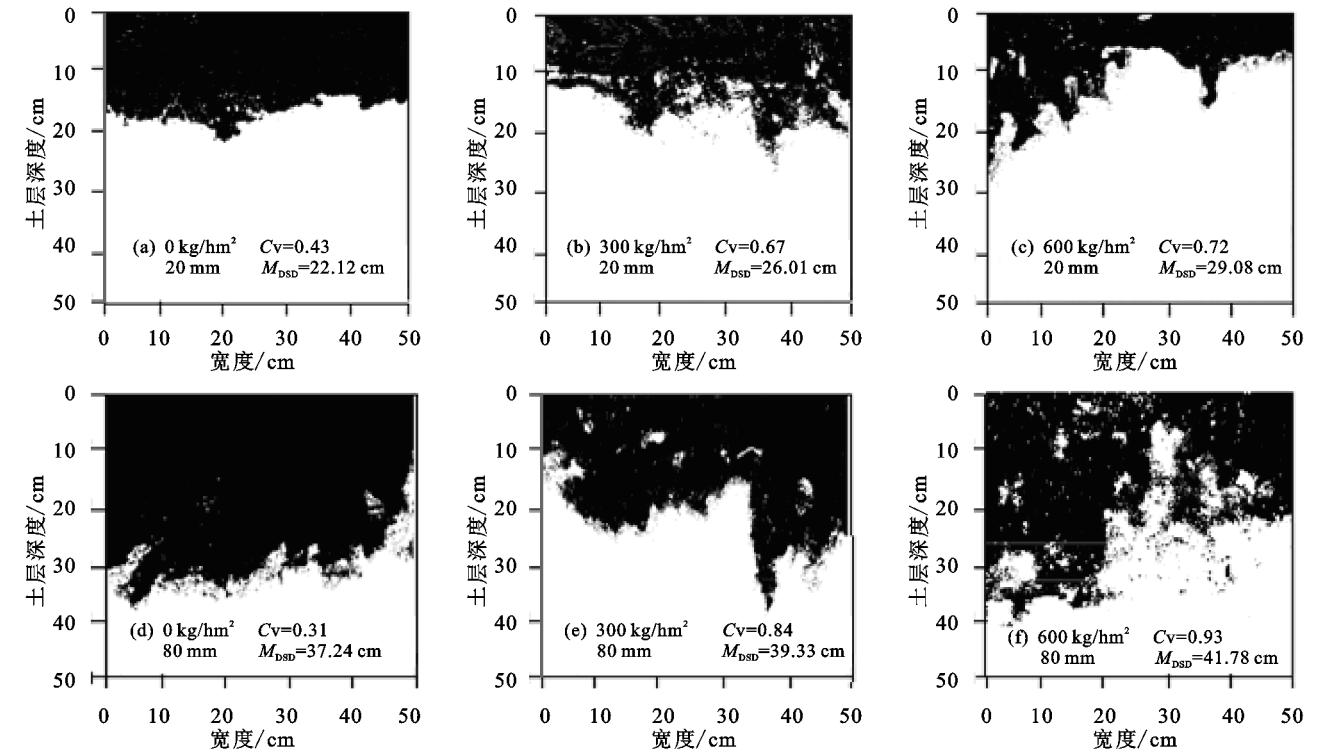


图 2 土壤中不同残膜量处理在 20,80 mm 入渗量条件下的流动模式

2.3 不同残膜量对土壤剖面优先流特征指数的影响

由于上层土壤先接触入渗水,接触面比下层土壤大,所以总体上不同处理的染色面积比(D_c)均随着土层加深而降低。残膜在土壤中的随机分布阻滞水流入渗,从而出现不同入渗量条件下残膜处理的 D_c 在相同土层均小于无残膜处理(图3),不同入渗量下300,600 kg/hm²残膜量处理的 D_c 平均值与无残膜处理(0 kg/hm²)相比,2年平均分别下降15.81%和28.51%(图4)。入渗量为20 mm时,0—10 cm土层300,600 kg/hm²残膜量处理的 D_c 与0 kg/hm²处理相比,分别下降1.86%和6.12%;10—20 cm土层分别下降38.10%和51.76%($P < 0.05$),但在20—30 cm土层,600 kg/hm²残膜量处理

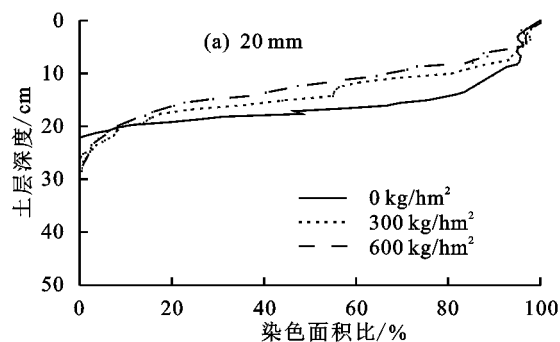
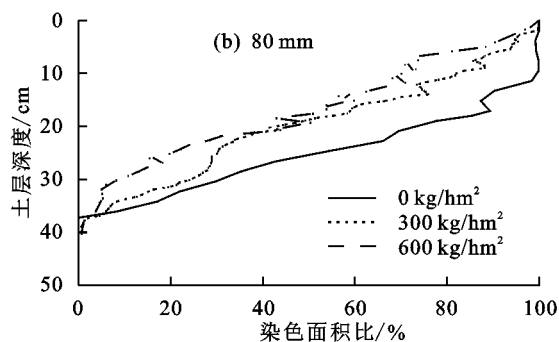


图3 不同残膜量及不同入渗量对土壤剖面染色面积比(D_c)的影响

与无残膜处理相比,残膜处理的基质流深度(U_{nfr})在不同入渗量条件下均呈下降趋势,300,600 kg/hm²残膜量处理的 U_{nfr} 下降43.65%和58.50%(图4b),其中300,600 kg/hm²残膜量处理的基质流深度(U_{nfr})在20 mm入渗量下2年平均分别降低34.49%和45.51%($P < 0.05$),300,600 kg/hm²残膜量处理在80 mm入渗量下分别降低50.58%和68.34%,这表明无残膜处理较残膜处理具有较好的基质流作用,相应的优先流程度降低。优先流比(P_{F-fr})和长度指数(L_i)2个特征指数随着残膜量的增加而增大(图4c,d),300,600 kg/hm²残膜量处理的 P_{F-fr} 较无残膜处理增加14.53%和32.46%; L_i 增加19.31%和55.20%,其中20 mm入渗量下300,600 kg/hm²残膜量处理的 P_{F-fr} 分别是0 kg/hm²处理的1.13,1.27倍, L_i 2年平均分别为99.93和121.29,相比0 kg/hm²处理分别增加14.82%和39.36%;在80 mm入渗量条件下,300,600 kg/hm²残膜量处理的 P_{F-fr} 分别较0 kg/hm²处理分别增加16.08%和37.80%, L_i 2年平均分别增加23.11%和68.61%。可见,残膜量增加使得 P_{F-fr} 和 L_i 2个指标增大,即残膜处理的优先流发育程度较高。此外,随着入渗量的增大,残膜的影响效应增大,其中从无残膜到300 kg/hm²残膜量后,20,80 mm入渗量的 D_c 的降低值分别为10.56%和18.38%, U_{nfr} 的降低值分别为34.49%和50.58%,降幅程度分别增加74.09%和46.62%; P_{F-fr} 和 L_i 增幅程度分别增加25.45%和55.94%;当残膜量从300 kg/hm²增加到

反而更大,这主要是在20 mm入渗量条件下,平均入渗深度仅为20 cm,而残膜处理由于存在较多的优先流,其入渗深度增加,所以残膜量越大, D_c 越大。当入渗量为80 mm时,0—10 cm土层,300,600 kg/hm²残膜量处理的 D_c 与0 kg/hm²处理相比,分别下降7.38%和13.59%;10—20 cm土层,分别下降25.66%和35.06%;20—30 cm土层,分别下降31.28%和54.98%。可见,入渗量为20 mm时, D_c 受残膜影响的主要土层在0—20 cm,入渗量为80 mm时,影响深度增加,主要在0—30 cm土层。另外,随着残膜量增加,残膜处理的 D_c 与无残膜处理间差异在增大,也说明残膜越多优先流越易于发生。



600 kg/hm²后, D_c 和 U_{nfr} 降幅程度分别增加34.48%和113.74%, P_{F-fr} 和 L_i 增幅程度分别提高53.69%和72.92%。可见,残膜量越大优先流程度越大,在相同残膜量条件下入渗量越大,优先流现象越明显。

3 讨论

由于残膜在土壤中是随机分布的,当残膜处于平铺时会阻碍土壤水分入渗^[5],而当残膜在土壤中处于垂直分布时,与残膜接触的土壤会受到膨胀和挤压,使土壤孔隙增加,残膜—土壤界面也易产生优先流通道^[12],比如土壤中随机分布的残膜会显著改变不同土层的土壤物理性质,在10—20 cm土层中残膜处理的容重显著降低^[10],另外当土壤中残膜密度>1000 kg/hm²时,会造成棉花吐絮期土壤孔隙度分布不均,并且使30—40 cm土层孔隙度显著降低^[8],这与本研究结果一致,当残膜量为600 kg/hm²时,在0—30 cm土层土壤容重降低9.11%,孔隙度增加10.94%。通常情况下,土壤中存在残膜,作物根系向下生长受到抑制,在土壤上层的根系比重会比较高,所以在生育期在土壤上层消耗的土壤水分较大,从而导致土壤上层含水率较低,所以当土壤中残膜量越多,土壤初始含水率越低。当残膜量为300,600 kg/hm²时,对应的初始含水率较无残膜处理分别下降15.49%和16.37%,Jiang等^[10]的研究显示,在0—20 cm,残膜处理(0—20 cm研究土层约0.3 kg薄膜)与无残膜处理相比,初始含水率下降7.42%。另外,随残膜量

的增加残膜对土壤的堵塞现象通常大于优先流现象,如王志超等^[5]在室内试验中显示当残膜量从 0 增加到 200 kg/hm²,出现突降现象,饱和导水率仅为无膜处理的 12%,而李元桥等^[12]研究显示,尽管残膜量增加也导致饱和导水率下降,但是当残膜量增大到 720 kg/

hm²加快了湿润峰的运移,增加了饱和导水率,这可能是优先流导致的,本研究结果也表明,随着残膜量增加,优先流现象越明显。不同的是饱和导水率呈下降趋势,这是由于本研究中残膜量设置较小,虽然有优先流现象的产生,但并未使饱和导水率增加。

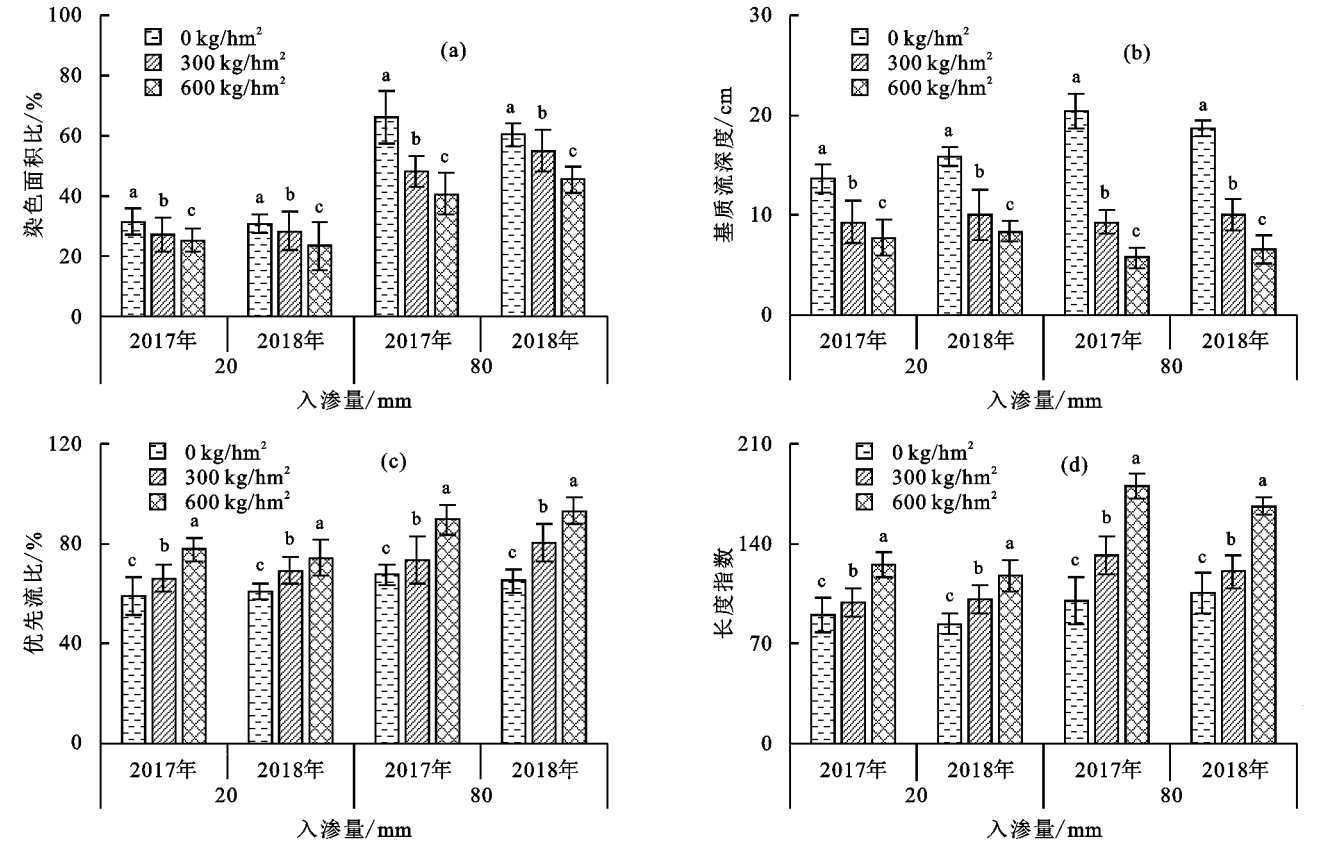


图 4 不同入渗量条件下不同残膜量处理优先流特征指数

基于染色示踪技术可以更加直观地了解农田土壤水流运动。陈晓冰等^[20]基于染色图像变异性定量分析优先流程度发现,湿润农地平均变异系数是干燥农地的 1.54 倍,其说明湿润农地存在的大孔隙较多,所以其优先流程度较干燥农地高。本研究中残膜是人为随机放置在土壤中,破坏了原有的土壤结构,增加了大孔隙数量,诱导了优先流产生,最终导致土壤染色剖面变异系数(C_v)随着残膜量增加而增大,300,600 kg/hm²残膜量处理的 C_v 分别增加 14.53% 和 32.46%。另外,王赵男等^[15]通过研究榛子灌木林根系对土壤优先流现象发生程度的影响时表明,根系腐烂会使得孔隙产生的几率增加,给优先流路径提供了条件,其最大染色深度可达到 46 cm。本研究表明,土壤中竖向或斜向存在的残膜也会增加孔隙产生的几率,而残膜量越大,产生孔隙的几率也越大;在入渗量 80 mm、残膜量 600 kg/hm² 条件下的最大染色深度(M_{DSD})最高,为 41.78 cm。这表明土壤中残膜的增加,使得一些孔隙通道被阻断,而由于土壤中本身还存在大孔隙,土壤水分对优先路径进行了选择,所以产生了优先流。本研究中还设置了入渗量的影

响,结果表明入渗量越大,残膜对优先流发育的影响程度越大,80 mm 入渗量下残膜处理的 M_{DSD} 和 C_v 分别平均增加 47.23% 和 27.34%,说明入渗量的增加,增强了水分的重力势,使其绕过残膜发生侧向入渗现象,而由于土壤中本身存在大孔隙,土壤水分优先选择该路径,导致其优先流发育程度更高,这与闫加亮等^[14]研究结果一致。随着灌溉量的增加,土壤水能以优先流的形式向土壤深处渗透。此外,对土壤染色剖面进行数据提取,5 个染色特征参数均在不同程度上表征了优先流发育程度。陈晓冰等^[20]和 Bargués 等^[21-22]在对三峡库区紫色砂岩区和干旱区不同立地的研究中指出,基质流深度和土壤剖面染色面积比越大,在一定程度上说明优先流发育程度越低。本研究表明,不同入渗量下 300,600 kg/hm² 残膜量处理的染色面积比平均值与无残膜处理相比,2 年平均分别下降 15.81% 和 28.51% (图 4a),300,600 kg/hm² 残膜量处理的基质流深度分别下降 43.65% 和 58.50%。说明残膜的存在会破坏土壤染色剖面的均匀性,使得残膜处理(300,600 kg/hm²)的优先流程度高于无残膜处理(0 kg/hm²)。张东旭等^[18]在对玉米地、南瓜

地等坡耕地进行优先流定量分析过程中表明,南瓜地的优先流比和长度指数均大于玉米地,说明南瓜地优先流程度较高,原因是南瓜地采取免耕的模式,作物残茬会增加土壤孔隙度,使得其优先流特征较为明显。本研究结果表明,残膜处理(300,600 kg/hm²)的优先流比和长度指数均大于无残膜处理(0 kg/hm²),说明残膜处理的优先流程度均高于无残膜处理。

4 结 论

(1)随着残膜量增加,土壤容重、饱和导水率和土壤初始含水率呈下降趋势,而土壤孔隙度呈增大趋势,且残膜量越多各物理参数的变异性越大。在残膜层,与无残膜处理相比,300 kg/hm²残膜量处理的土壤初始含水率、容重和饱和导水率平均分别降低 15.49%,5.54%和 9.59%,土壤孔隙度增加 6.69%;与 300 kg/hm²残膜量处理相比,600 kg/hm²残膜量处理 3 个参数分别降低 10.64%,3.79%和 7.50%,孔隙度增加 3.98%,影响程度变小。300,600 kg/hm²残膜量处理导致各物理参数的变异系数分别增加到 2.81,4.60 倍。

(2)通过土壤染色剖面二值化图像分析,随着残膜量增加最大染色深度(M_{DSD})和土壤染色剖面变异系数(C_v)增加,入渗量越大残膜的影响程度越大。300,600 kg/hm²残膜量处理的 M_{DSD} 分别是 0 kg/hm² 处理的 1.10,1.19 倍; C_v 也增加 104.05%和 122.97%,且 80 mm 入渗量下残膜量对 M_{DSD} 的影响大于 20 mm 入渗量,平均增加 47.23%; C_v 平均增加 27.34%。

(3)随着残膜量的增加,染色面积比(D_c)和基质流深度(U_{mfr})呈下降趋势,优先流比($P_{\text{F-fr}}$)和长度指数(L_i)呈增大趋势,优先流发育程度增大。300,600 kg/hm²残膜量处理的 D_c 较 0 kg/hm² 处理降低 15.81%和 28.51%; U_{mfr} 降低 43.65%和 58.50%; $P_{\text{F-fr}}$ 增加 14.53%和 32.46%; L_i 增加 19.31%和 55.20%。

参考文献:

[1] Gu X B, Li Y N, Du Y D. Biodegradable film mulching improves soil temperature, moisture and seed yield of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) [J]. Soil and Tillage Research, 2017, 171: 42-50.

[2] 严昌荣, 刘恩科, 舒帆, 等. 我国地膜覆盖和残留污染特点与防控技术[J]. 农业资源与环境学报, 2014, 31(2): 95-102.

[3] 陈东城. 我国农用地膜应用现状及展望[J]. 甘蔗糖业, 2014(4): 50-54.

[4] 杨彦明, 傅建伟, 庞彰, 等. 内蒙古农田地膜残留现状分析[J]. 内蒙古农业科技, 2010(1): 10-12.

[5] 王志超, 李仙岳, 史海滨, 等. 农膜残留对土壤水力参数及土壤结构的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(5):

101-106, 140.

[6] 赵岩, 陈学庚, 温浩军, 等. 农田残膜污染治理技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 1-14.

[7] 王志超, 李仙岳, 史海滨, 等. 覆膜年限及灌水方法对河套灌区农膜残留的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(14): 159-165.

[8] 董合干, 刘彤, 李勇冠, 等. 新疆棉田地膜残留对棉花产量及土壤理化性质的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(8): 91-99.

[9] 李元桥, 何文清, 严昌荣, 等. 残留地膜对棉花和玉米苗期根系形态和生理特性的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 34(2): 108-114.

[10] Jiang X J, Liu W, Wang E, et al. Residual plastic mulch fragments effects on soil physical properties and water flow behavior in the Minqin Oasis, northwestern China[J]. Soil and Tillage Research, 2017, 166: 100-107.

[11] 李仙岳, 史海滨, 吕烨, 等. 土壤中不同残膜量对滴灌入渗的影响及不确定性分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(8): 84-90.

[12] 李元桥, 何文清, 严昌荣, 等. 点源供水条件下残膜对土壤水分运移的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 145-149.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 王赵男, 辛颖, 赵雨森. 长白山系榛子灌木林根系对优先流的影响[J]. 林业科学研究, 2017, 30(6): 887-894.

[16] 闫加亮, 赵文智. 长期机械耕作压实对绿洲农田土壤优先流的影响[J]. 生态学杂志, 2019, 38(5): 1376-1383.

[17] 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.

[18] 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.

[19] 盛丰, 吴丹, 张利勇. 再生水灌溉对农田土壤水流运动影响的研究进展[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊 2): 46-51.

[20] 陈晓冰, 张洪江, 程金花, 等. 基于染色图像变异性分析的优先流程度定量评价[J]. 农业机械学报, 2015, 46(5): 93-100.

[21] Schaik N L M B V. Spatial variability of infiltration patterns related to site characteristics in a semi-arid watershed[J]. Catena, 2009, 78(1): 1-47.

[22] Bargués T 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.