doi：10.11838/sfsc.1673-6257.23534

覆膜种植措施对垄作农地土壤优先流空间异质性的影响

许　昊[1, 2]，陈晓冰[1, 2*]，杨　婷[3, 4]，秦梓城[3, 4]，刘思佳[3, 4]，刘俊杰[3, 4]

（1. 桂林理工大学广西岩溶地区水污染控制与用水安全保障协同创新中心，广西　桂林　541004；
2. 桂林理工大学广西环境污染控制理论与技术重点实验室，广西　桂林　541004；
3. 广西环境污染控制理论与技术重点实验室科教结合科技创新基地，广西　桂林　541004；
4. 桂林理工大学环境科学与工程学院，广西　桂林　541004）

摘　要：为进一步针对垄作田间农业生产制定高效的需水用肥策略提供科学支撑，将野外染色示踪试验和室内土柱水分入渗实验相结合，利用图像形态学解析、模拟入渗分析、熵权分析和灰色系统理论分析等方法，对垄作覆膜和垄作（对照）种植措施下的农地土壤优先流空间异质性特征进行分析，阐明覆膜种植措施下的垄作农地土壤优先流空间分布及其运动变化规律，揭示覆膜种植措施影响下的优先流与垄作田间土壤水分运动过程的作用关系。结果表明：在相同外部供水条件下，垄作覆膜种植农地的水分集中分布在 0 ~ 10 cm 土壤表层，随着土壤深度的增加分布范围逐渐缩小，其土壤染色复杂程度随着土壤深度的增加先增大后减少。而垄作种植农地在 10 ~ 30 cm 土壤深度范围内的水分分布出现显著的指状优先流分化现象。同时，垄作覆膜农地土壤达到饱和状态的时间是垄作农地的 1.36 倍，其单位时间内的平均土柱水流出流量（质量流率为 0.20 g/s）显著（P<0.05）小于垄作农地（质量流率为 0.35 g/s），土壤优先流程度相较更高，土壤属性中饱和导水率对优先流程度影响最大。垄作覆膜种植措施相较垄作在一定程度上能够进一步降低农地土壤空间内优先流的发生及其分布，减少水分向土壤深层渗漏，起到一定程度的蓄水保墒作用。

关键词：垄作；覆膜；土壤水分；优先流；响应关系

土壤水分作为农业用水的重要组成[1]，是保障农作物生长发育的关键物质基础。近年来如何开展土壤水资源的高效利用已成为我国抓好粮食和农产品生产、推进农业可持续发展、实现农民增收亟待解决的重要问题之一。农业生产中常采用改变种植措施[2]、培肥土壤[3]和选育良种[4]等形式来提高农地水土资源的利用效率。其中，垄作[5-6]通过使田间形成凹凸微地形，增大地表粗糙度，减小地表径流的同时增加水分入渗，改善了田间土壤水分状况，提升了作物水分利用，目前已成为我国南方农业生产中广泛使用的一种种植措施。但由于当前南方持续性干旱、高温和强降水等极端天气逐年增多[7-8]，产生地土壤干湿交替过程使垄作田间环境频繁出现土壤板结、干缩开裂等现象，不良的田间土壤环境一定程度上影响了农业生产[9]。为此，在农作物种植过程中常辅以覆膜种植措施[10-11]。农业覆膜具有降低土壤蒸发强度、减缓土壤板结和保持土壤温度等[12]作用，以此来改善田间土壤水热环境，进而促进作物的成活与生长，以达到提高作物产量的目的。综合垄作与覆膜二者的优势作用可以看出，其主要通过影响土壤蓄渗过程，进而改变田间水分状况，最终实现提升农作物产量的目标。当前，针对垄作和覆膜种植措施如何影响土壤水分状况进而促进作物生长发育的研究，多数集中在分析与揭示其影响下的土壤含水率[13]、土壤湿度[14]和土壤贮水量[15]等田间土壤水分蓄存状况以及作物土壤水分利用效率[16]等方面，而土壤水分运动作为关系土壤蓄渗过程，反映田间土壤水分状况的重要组成内容[17]，其直接影响作物的水肥利用，对生长发育具有更重要的作用[18]。目前关于垄作与覆膜措施下的土壤水分运动研究多关注溶质运移[19-20]，虽然可以通过揭示溶质在土壤

收稿日期：2023-09-03；**录用日期：**2023-10-26

基金项目：广西自然科学基金项目（2017GXNSFBA198102）；广西环境污染控制理论与技术重点实验室项目（1701K009）；广西研究生教育创新计划项目（YCSW2022307）；桂林理工大学博士科研启动基金项目（GUTQDJJ2017001）。

作者简介：许昊（1997-），在读硕士研究生，主要从事土壤水分运动与模拟研究。E-mail：xuhao0861@163.com。

通讯作者：陈晓冰，E-mail：jayvision_chen@126.com。

中的迁移运动状况来反映土壤水分运动，但运动过程易受溶质种类、浓度以及土壤理化性状的影响[21]，无法较好地表征土壤水分实际的运动情况。

当前研究发现，农地土壤板结、干缩变化产生的孔隙、裂隙是诱发优先流的常见因素[22-23]，优先流的发生会引起水肥溶质的快速渗漏，分析其在土壤中的空间异质性状况，有助于反映田间土壤水分运动情况[24-25]，同时，进一步揭示其对水肥溶质迁移的作用。近年来，针对农地土壤优先流的相关研究主要集中在不同的入渗水量[26]、耕作方式[27-28]在一定程度上影响作物生长方面。为探究不同秸秆还田措施对田间土壤优先流的影响，以秸秆覆盖（CM）和农作物种植类型[29]对优先流的发生、分布与空间变化的影响为方向，同时进一步深入探讨不同农业生产措施下的土壤优先路径空间结构[30]状况以及优先路径形成影响。在气候变化影响下的垄作田间配合覆膜种植措施，对原本由土壤板结、干缩开裂形成的不良立地环境下的土壤水分运动，特别是对优先流运动影响方面。从影响土壤水分运动状况的角度来看，覆膜种植措施与垄作相比是否通过影响优先流改变田间作物的土壤水分利用效率，进而实现作物产量的提高，目前无法从相关研究中直接得到说明。因此，揭示垄作覆膜种植措施下的优先流在土壤空间内的变化规律对于阐明垄作覆膜措施下的土壤水分运动对作物需水用水与影响作物产量具有重要的理论指导意义。

综上所述，本研究将野外原位染色示踪与室内土柱水分入渗实验相结合，利用图像形态学解析、模拟分析和多元统计分析等方法，系统探究垄作与垄作覆膜两种种植措施下的田间土壤优先流空间分布及其运动变化特征，阐明覆膜种植措施对垄作田间土壤优先流空间异质性的影响，为进一步完善垄作与覆膜条件下的农地土壤水分运动理论，以及认识垄作覆膜种植技术对农作物生长的影响提供一定科学支撑。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于广西桂林市临桂区，地理位置为110° 01′ E，25° 17′ N，属于亚热带季风气候区，年平均温度与降水量分别为18.9℃和1869 mm，土壤类型以红壤土和水稻土为主。在研究区内选取2块相邻且长和宽均分别为20和10 m水平的农田作为试验样地，采用垄作种植措施，每块试验样地设置多条种植垄带，每条垄带宽120 cm、垄高15 cm，垄间距离为15 cm。种植作物选择广西第三大蔬菜种植品种辣椒（桂椒12号），底肥施加生物有机肥300 kg/hm^2，追肥期使用复合肥380 kg/hm^2。在作物种植前，对其中一块样地的种植垄上使用0.005 mm厚聚乙烯地膜经拉紧、铺平和盖严等过程进行垄作覆膜处理（M），另一块样地只进行垄作对照处理（CK）。野外试验时间为2022年9月，试验期间研究地内未发生降雨事件。

1.2　样地布设

分别在2块试验样地的种植带上随机选取3个染色示踪试验区，并清理表面枯枝落叶。在每个试验区中使用长、宽和高分别为60、60和30 cm，厚度为0.3 cm的金属样方，沿种植带方向分别在植株间布设垂直和水平剖面挖掘样方各1个，2个样方之间相隔20 cm，总计布设12个样方。样方上使用聚乙烯薄膜覆盖24 h，以避免试验前外界因素的干扰影响。

1.3　野外染色示踪试验

24 h后，移除覆盖样方上的聚乙烯薄膜，将浓度为4 g/L的亮蓝溶液10 L（含5%的损耗）使用装有稳定恒流泵的供水装置以150 mL/min的速度分别均匀喷洒到2个样方内，再使用聚乙烯薄膜覆盖整体样方24 h。移除覆盖薄膜，水平样方中选取中间区域以10 cm高度为一层进行挖掘，垂直样方中以10 cm宽度为一层进行挖掘，水平和垂直方向挖掘均至样地最大染色深度。水平剖面和垂直剖面挖掘后，使用毛刷清理剖面表面的土壤颗粒，再使用1510万像素单反相机对剖面图像进行拍照，获得土壤水平和垂直剖面染色图像数据。在对每一层的水平剖面拍照完成后，采集3个环刀原状土样，并分层各取土壤样品约1.5 kg，用于测定土壤理化性质。样方布置与具体挖掘示意图见图1。

1.4　土壤染色图像处理与分析

1.4.1　土壤染色图像处理

使用WEGO对染色图像进行裁剪和校正处理，通过Photoshop CS6进行阈值、降噪与灰度调节，存储为黑白二色图像。再使用Image pro Plus 6.0进行栅格化修正和二值化处理，最终将图像生成由0（黑色）和255（白色）两种数值组成的数据矩阵，用于土壤染色图像分析使用。

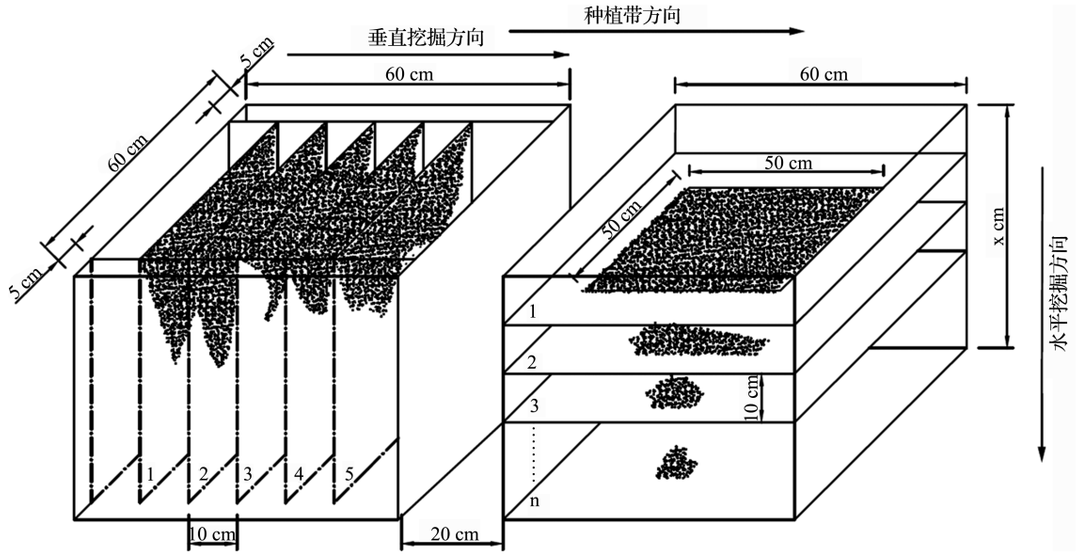

图 1　样方布置与挖掘示意图

1.4.2　土壤染色图像分析

（1）土壤剖面染色面积比

土壤剖面染色面积比是指剖面图像上染色像素点（0 黑色）的个数占整张染色图像像素点数量的比例。其值越大，表明水分在土壤剖面空间上的分布越广泛。计算公式[30]为：

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

式中：D_C 为土壤剖面染色面积比（%）；D 为剖面染色土壤像素点（数值为 0）个数的总面积（cm^2）；N_D 为剖面未染色土壤像素点（数值为 255）个数的总面积（cm^2）。

（2）土壤最大染色深度

土壤最大染色深度是指垂直剖面染色图像中染色达到的最深染色深度。其值越大，表明土壤优先流入渗越深。

（3）土壤染色复杂度

土壤染色复杂度是指染色图像在染色剖面上的复杂程度。其值越大，土壤染色形态越复杂，土壤优先流越发育。计算公式[31]为：

$$C = \frac{lgP^2}{lgA} \quad (2)$$

式中：C 为土壤染色复杂度；P 为染色图像总周长（mm）；A 为染色区域面积（mm^2）。

（4）土壤染色形态分形维数

土壤染色形态分形维数是指土壤优先流的异质性和相似性。其值越大，表明土壤染色剖面中染色区域水分分布越复杂。计算公式[32]为：

$$F_D = \lim_{r \to \infty} \frac{\log N(r)}{r} \quad (3)$$

式中：F_D 为土壤染色形态分形维数；$N(r)$ 为覆盖在图形上的盒子数；r 为盒子边长。

（5）土壤染色面积比空间变异系数

土壤染色面积比空间变异系数是指在一定土壤深度范围内，垂直剖面染色面积比与水平剖面染色面积比的空间变异系数，分析优先流空间变化程度。其值越大，表明优先流空间变异程度越高。计算公式[33]为：

$$CV_P = \frac{|DC_{vi} - DC_{Hi}|}{DC_{Hi}} \quad (4)$$

式中：CV_P 为土壤染色面积比空间变异系数；i 为土壤深度位置（cm）；DC_{vi} 为 i 深度的垂直染色图像染色面积比（%）；DC_{Hi} 为 i 深度的水平染色图像染色面积比（%）。

1.5　土柱制取与水分入渗试验

在染色示踪观测点旁 10 ~ 20 cm 处，选择相对平坦区域，使用高 60 cm、直径 10 cm 的有机玻璃土柱，制取 50 cm 的原状土柱。为防止土柱内土壤扰动和水分蒸发，使用泡沫填充剂填充管内上端高 10 cm 的无土壤柱体部分，底部加入滤纸，再使用保鲜膜将两端包裹，运回实验室进行水分入渗实验。土柱上端利用马氏瓶保持 5 cm 的去离子水水头高度进行水分入渗实验，并以 10 cm 深度为间隔使用 TH5 水分测定仪监测不同深度下不同时刻的

土壤含水率数据。土柱下端出流时开始计时，以每5 min的时间记录出流体积用于计算质量流率。

（1）土壤质量流率

土壤质量流率是通过土柱截面的液体质量与时间的比值，其值越大，表明相同时间内水流下渗程度越强。计算公式[34]为：

$$q = \frac{m}{t} \quad (5)$$

式中：q为质量流率（g/s）；m为下渗液体质量（g）；t为液体出流的时间（s）。

（2）土壤水分分层活跃程度

土壤水分分层活跃程度根据变异系数和标准差来划分，能反映土层水分的活跃程度。其值越小，表明土层中水分分布越稳定，计算公式[35]为：

$$C_v = \frac{SD}{\bar{x}} \quad (6)$$

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})} \quad (7)$$

式中：$\bar{x}$为水分获取的平均值（%）；SD为标准差；n为样本总数；x_i为水分第i个获取值（%）。

1.6　土壤理化属性的测定

土壤质地利用马尔文激光粒度仪测定，土壤容重采用环刀法测定，土壤饱和导水率采用恒定水头法测定，土壤有机质使用重铬酸钾容量法测定，以上测定方法参考《土壤物理学》[36]。

1.7　数据统计分析

本研究使用Excel 2019对数据进行整理分析，并利用SPSS 21.0对数据进行单因素方差分析、差异性分析和相关性分析（P<0.05）。使用MATLAB对样本数据进行熵权-TOPSIS综合评价分析，使用AutoCAD 2016和Origin 2021对相关数据分析结果进行作图。

2　结果与分析

2.1　田间土壤优先流空间分布

土壤剖面的染色形态在一定程度上反映了土壤中优先流的空间分布状况。通过野外染色示踪试验，各获得水平和垂直土壤剖面染色图像30张。对2种不同种植措施下的土壤剖面染色面积与整体平均染色面积对比，分别选取同一观测区染色面积比与平均染色面积比最接近的图像作为典型图像进行展示分析。不同种植措施下土壤垂直方向的染色形态如图2所示，垄作覆膜农地在土壤表层0 ~ 10 cm处的染色形态分化现象少于垄作农地染色形态分化，在0 ~ 10 cm土壤表层内垄作农地的土壤染色呈整体分布状态，土壤水分竖向分布相对均匀，在土壤10 ~ 30 cm深度范围内染色形态开始呈现显著的指状优先流分化现象，其平均最大染色深度为39.5 cm，是垄作覆膜农地的1.39倍（P<0.05），垄作农地土壤水分沿深度以竖向分布为主。垄作覆膜农地的染色形态在0 ~ 10 cm土壤深度范围内呈现整体均匀分布状态，随深度的增加，染色形态呈现分化现象，但程度低于垄作农地，此外，在深层土壤中染色现象逐渐消失，说明垄作覆膜农地土壤水分主要集中分布在0 ~ 10 cm土壤层中，整个0 ~ 50 cm土壤垂直空间内优先流相对较少。同时，垄作覆膜农地平均总染色面积比为44.16%，显著（P<0.05）小于垄作农地（57.97%），进一步说明垄作农地优先流现象显著。

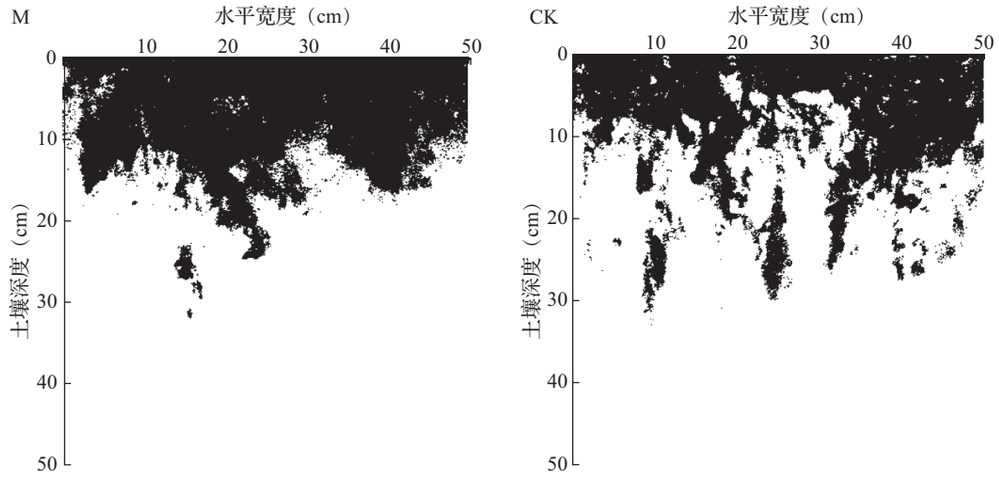

图2　2种种植措施下农地土壤垂直染色形态图像

为进一步量化优先流沿土壤深度的分布变化情况，分析得到各层土壤染色的平均复杂度，结果如图 3 所示。随土壤深度的增加，土壤染色形态越复杂，并在 20 ~ 30 cm 土层中存在差异（P<0.05），即垄作农地在此土层的平均染色复杂度是垄作覆膜农地的 1.16 倍。但垄作覆膜农地土壤深层未发生染色现象，而垄作农地土壤复杂度随着土壤深度的增加（0 ~ 40 cm）逐渐增大（图 3）。总体来说，垄作农地的土壤染色复杂程度（平均复杂度 1.61）相对较高，即垄作种植措施下优先流现象相对明显。

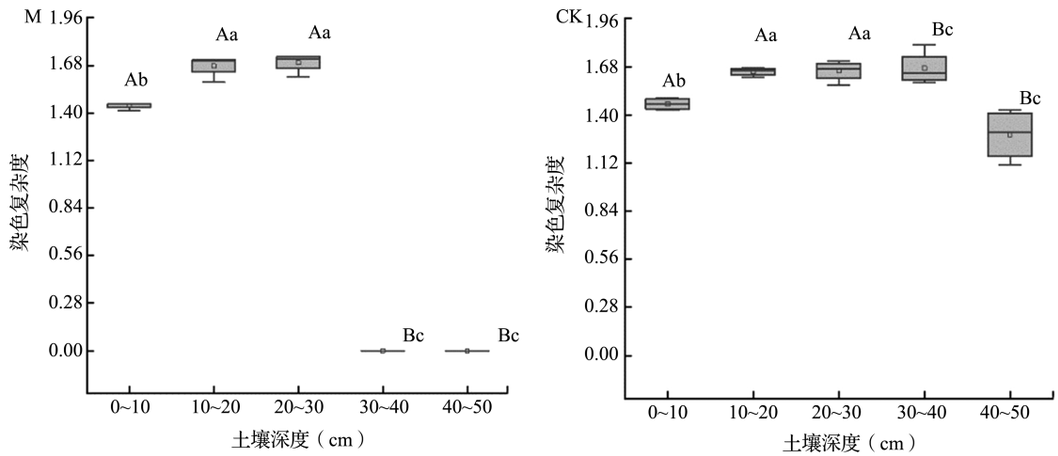

图 3　2 种种植措施下农地不同深度土壤染色形态复杂度

注：图中不同大写字母表示相同深度不同样地间差异显著（P<0.05），不同小写字母表示不同深度相同样地间差异显著（P<0.05）；n=3。下同。

2 种不同种植措施下农地的土壤水平方向染色形态如图 4 所示。垄作覆膜农地的土壤染色在 0 ~ 10 cm 深度时呈现整体分布形态，随土壤深度的增加，逐渐转变成团块状分布（20 ~ 30 cm）形态，最后呈现零星散点状分布在 30 ~ 50 cm 土层中。而垄作农地的土壤染色在 0 ~ 10 cm 土层中分布更广泛，在 20 ~ 50 cm 土层中染色形态沿深度逐渐聚集为团状。通过对不同农地的水平染色形态参数进行分析，垄作农地在 20 ~ 30 和 30 ~ 40 cm 土层中平均染色面积比分别为 16.6% 和 13.7%，是垄作覆膜农地在相同土层染色面积比的 2.48 和 5.26 倍，表明在 20 ~ 40 cm 的土壤深度中，垄作农地土壤优先流现象相对较明显。

为进一步量化说明土壤水平方向的优先流空间分布状况，计算获得土壤水平染色形态分形维数，结果如图 5 所示。垄作覆膜农地和垄作农地的染色形态分形维数最大值均出现在土壤表层，水分空间分布最复杂。随着土壤深度的增加，分形维数均呈下降的变化趋势，其中，在 10 ~ 40 cm 土层内垄作农地的分形维数均大于垄作覆膜农地，且随深度的继续增加，40 ~ 50 cm 土层内二者的分形维数无显著差异（P>0.05），说明垄作覆膜农地土壤水平分布空间内优先流现象相对较少，土壤水分在水平空间分布更加稳定。

为综合量化优先流在土壤空间内的整体分布变化程度，分析获得土壤染色空间变异系数。在整个土壤空间内，垄作覆膜农地的平均土壤染色空间变异系数为 0.86，显著（P<0.05）大于垄作农地，是其的 1.32 倍，说明在整个土壤空间内垄作覆膜措施相比于垄作措施降低了深层土壤空间内优先流的发生及其分布现象。

2.2　田间土壤优先流空间运动

图 6 为 2 种种植措施下土壤含水率随水分入渗时间的变化过程。垄作覆膜农地在 0 ~ 10 cm 的土层深度，土壤的含水率在 T=7 min 时开始变化波动，此时水流已下渗至土壤 10 cm 深度处。在 T=35 min 时，土壤含水率升高 33.4%，此后土壤含水率保持稳定。在相同的土层深度下，垄作农地在 T=44 min 时的土壤含水率从 34.2% 上升至 36.4%，并达到相对稳定状态。在 10 ~ 20、20 ~ 30、30 ~ 40 和 40 ~ 50 cm 土层深度下，垄作覆膜种植农地土壤含水率开始升高至稳定含水率时所用时间分别为 43、54、74 和 112 min，土壤含水率达到稳定时的值分别为 25.3%、23.2%、27.0% 和

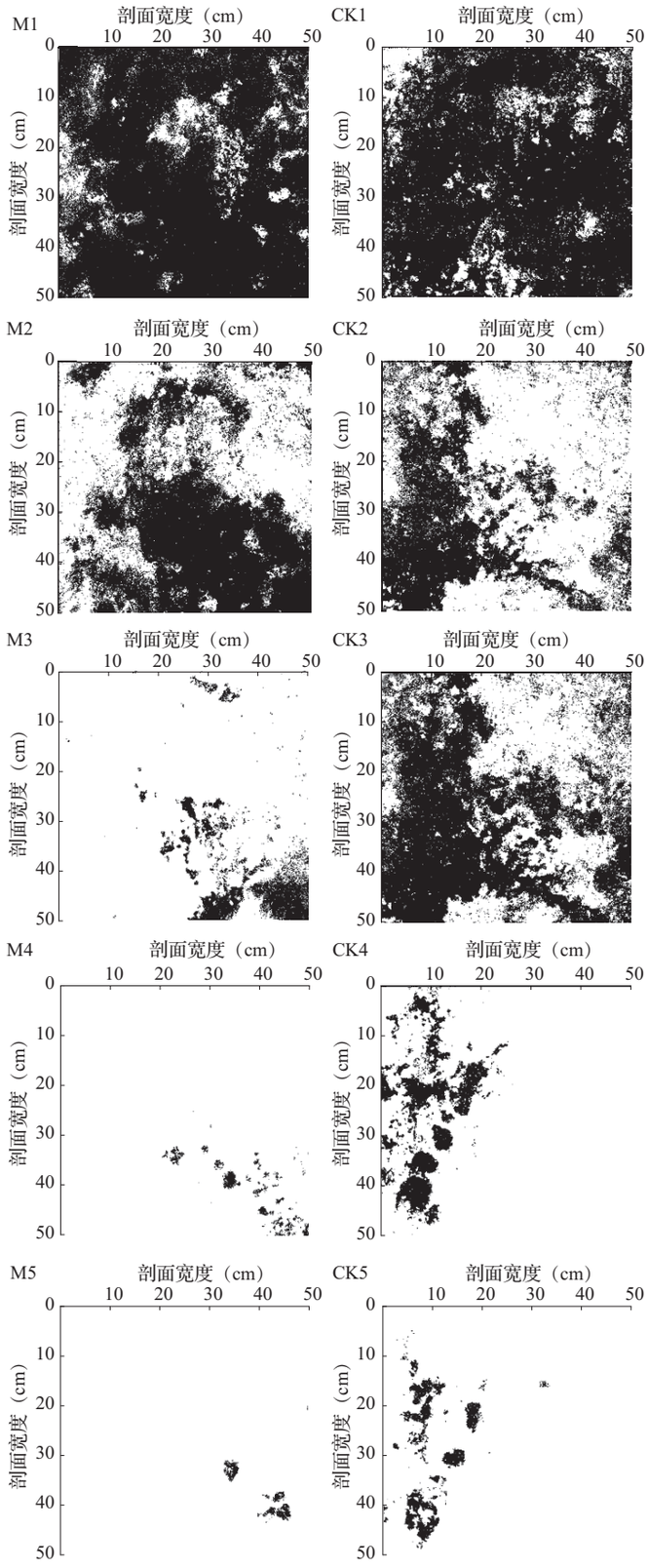

图 4　2 种种植措施下农地土壤水平染色形态图像

注：数字 1 ~ 5 分别代表 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30、30 ~ 40、40 ~ 50 cm 的土层深度。

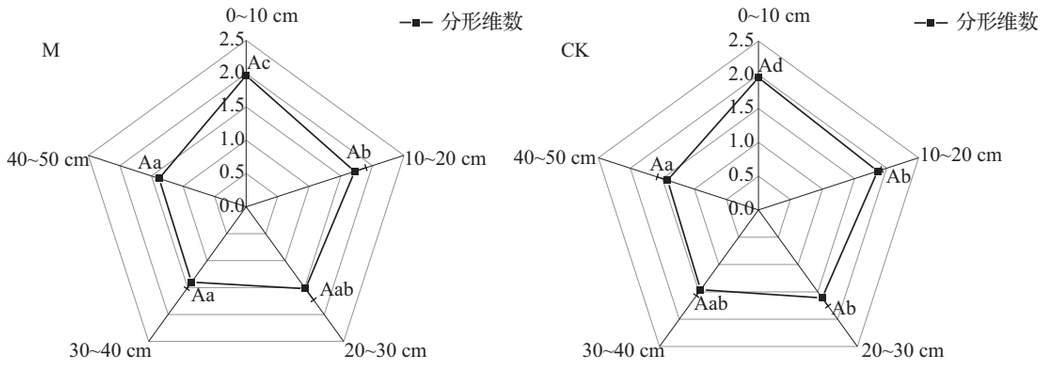

图 5　2 种种植措施下农地土壤水平染色形态分形维数

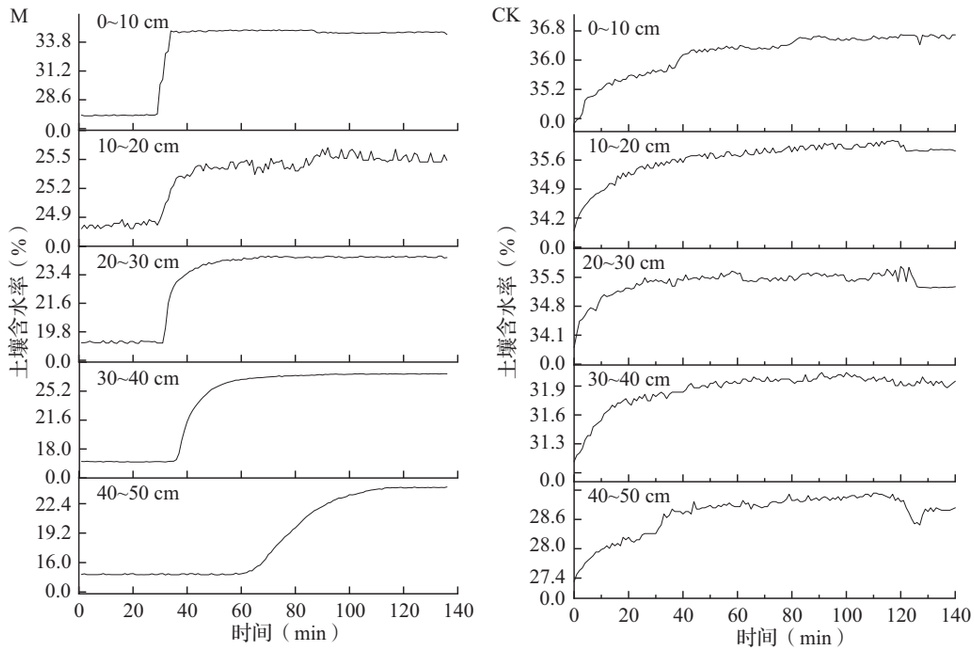

图 6　2 种种植措施下农地土壤含水率随时间的变化

注：图中的曲线分别表示水流在 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30、30 ~ 40、40 ~ 50 cm 土层的土壤平均含水率。

24.1%。垄作农地在土壤深度范围为 10 ~ 50 cm 内各层土壤含水率开始升高至稳定含水率状态所用时间分别为 37、43、48 和 60 min，含水率达到稳定时的值分别为 35.5%、35.3%、32.0% 和 28.5%。结合染色图像得出，垄作农地土壤中水流主要以优先流的形式快速下渗，入渗运动也更加活跃。垄作覆膜农地在 0 ~ 50 cm 土壤深度的土壤含水率上升变化的平均时间（63.5 s）为垄作农地的 1.37 倍（P<0.05），表明在相同外部供水条件下，垄作种植农地土壤水分多以优先流的形式快速下渗，土壤可以较早地达到饱和状态。

土壤水分分层活跃程度结果如表 1 所示，表层土壤对于水流入渗的响应最为直接与迅速，随着土壤深度的增加，土壤含水率变化程度降低，稳定性增强。垄作覆膜农地水分变化主要集中在表层（0 ~ 10 cm）土壤，其土壤水分随深度变化逐渐稳定，即在垄作覆膜措施下，水分在表层发生明显变化，结合染色图像可以得出，水分多汇集于表层土壤。整个土壤空间内，垄作措施下水分变化程度相对稳定，稳定程度随土层深度的增加逐渐增大，水分下渗分布变化大致相同，说明水分在土层之间快速下渗，优先流发育程度较显著。

表 1　2 种种植措施下农地土壤水分分层活跃程度

种植措施	土层深度（cm）	$\bar{x}$（%）	*SD*	*CV*	最大值（%）	最小值（%）	活跃等级
M	0 ~ 10	31.6181	3.2302	0.1022	33.5600	25.4970	次活跃层
	10 ~ 20	25.3324	0.3238	0.0128	25.6930	24.7130	相对稳定层
	20 ~ 30	22.1321	1.9765	0.0893	23.4490	18.6110	相对稳定层
	30 ~ 40	23.8358	1.6940	0.0711	27.2620	16.4750	相对稳定层
	40 ~ 50	21.7881	1.9957	0.0916	22.4680	14.6880	相对稳定层
CK	0 ~ 10	36.3343	0.6064	0.0167	36.8510	34.1706	相对稳定层
	10 ~ 20	35.6998	0.3741	0.0105	36.0883	34.0398	相对稳定层
	20 ~ 30	35.3703	0.2602	0.0074	35.7614	33.8873	相对稳定层
	30 ~ 40	31.8690	0.1612	0.0051	32.0349	31.1415	相对稳定层
	40 ~ 50	28.1766	0.3372	0.0120	28.5482	26.9792	相对稳定层

注：活跃层（20%<*CV*<30%，3<*SD*<4），次活跃层（10%<*CV*<20%，2<*SD*<3），相对稳定层（*CV*<10%，*SD*<2）。在实际划分过程中，标准差和变异系数不能同时满足分级标准时，以变异系数为准。

土壤质量流率能够量化反映土壤空间内单位时间内水分运动的快慢程度，进一步表征优先流的运动速度。图 7 为 2 种种植措施下原状土柱水分入渗实验分析得到的质量流率与时间过程的变化曲线。随时间的推移，平均质量流率初始阶段均呈现先上升后下降的变化趋势并达到相对稳定状态。垄作农地的平均初始质量流率（0.35 g/s）是垄作覆膜农地（0.20 g/s）的 1.75 倍（P<0.05）。垄作农地的土柱在 11 min 35 s 时开始出流，比垄作覆膜种植农地土柱出流时间提前 6 min 32 s，说明垄作农地水分入渗运动速度大于垄作覆膜农地，较早运动至土柱底端出口。结合垂直染色图像，垄作农地的土壤水流在土壤空间内快速下渗。在相同的外部供水条件下，垄作覆膜农地的质量流率在 10 min 时达到最大（0.21 g/s），随入渗时间变化，质量流率缓慢下降直至稳定。垄作种植农地在 15 min 时的平均质量流率达到峰值（0.36 g/s），此时优先流程度最大，随着时间的推移，土壤基质不断吸水，抑制土壤优先流的发展，质量流率也随之逐渐下降，其波动程度大于覆膜农地，表明垄作覆膜种植农地水分入渗速度较慢且运动过程相对平稳。当 2 种种植措施下农地质量流率达到相对稳定后，垄作农地质量流率是覆膜种植农地质量流率（0.10 g/s）的 2.6 倍（P<0.05），说明垄作农地的水流出流量更大。结合水平染色图像得出，在相同时间内，垄作农地水分入渗更深，土柱出流量更大，优先流发育相对较强。

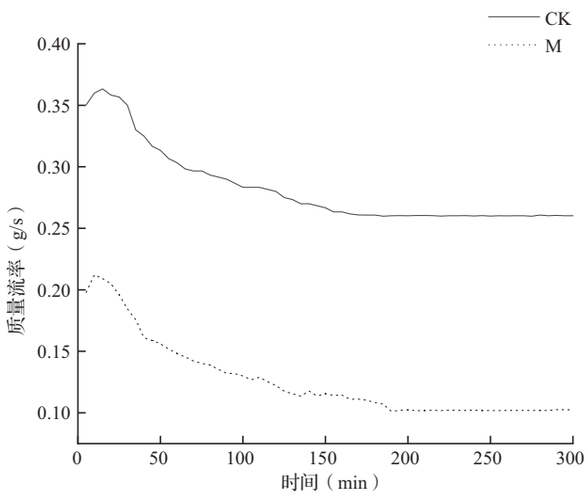

图 7　2 种种植措施下土壤质量流率随时间的变化

注：图中数据均为平均值；n=3。

2.3　田间土壤属性与优先流的响应关系

2 种不同种植措施下农地土壤属性分析结果见表 2。2 种不同种植措施下的土壤容重均随深度的增加而增大，但覆膜农地平均土壤容重（1.36 g/cm^3）高于垄作农地（1.32 g/cm^3），说明垄作覆膜种植措施下的土壤相对更紧实。垄作覆膜和垄作农地各层的土壤饱和导水率均随土层深度的增加呈现降低的变化趋势，但垄作农地总体平均饱和导水率（0.061 mm/s）相对较高。2 种农地土壤质地组成均以粉壤土为主，垄作覆膜农地在 0 ~ 50 cm 土层深度内的黏粒含量随深度的增加而增加，与垄作农地土壤相比，其黏粒含量占比更多，并随土层深度的增加而增大。此外，2 种不同种植措施下农地土壤有机质含量均随着土层深度的增加而降低，垄作覆膜农地有机质平均含量是垄作农地有机质平均含量的 2.2 倍（P<0.05），说明垄作覆膜农地具有较高的土壤有机质。

表 2　2 种种植措施下农地土壤基本性质

种植措施	土层深度（cm）	饱和导水率（mm/s）	有机质（g/kg）	容重（g/cm）	黏粒（%）	粉粒（%）	砂粒（%）
M	0 ~ 10	0.066 ± 0.001Aa	32.69 ± 6.15Aa	1.29 ± 0.08Aa	3.61 ± 1.91Aa	87.09 ± 2.35Aa	9.28 ± 1.85Aa
	10 ~ 20	0.037 ± 0.004Ab	31.37 ± 2.67Aa	1.37 ± 0.07Aa	3.91 ± 2.77Aa	85.25 ± 3.68Aa	10.83 ± 4.71Aa
	20 ~ 30	0.021 ± 0.006Ac	29.81 ± 5.48Aa	1.37 ± 0.06Aa	4.73 ± 2.60Aa	88.49 ± 2.28Aa	6.77 ± 2.86Aa
	30 ~ 40	0.014 ± 0.003Acd	25.81 ± 6.21Ab	1.43 ± 0.05Aa	5.96 ± 3.08Aa	87.85 ± 2.81Aa	6.17 ± 3.65Aa
	40 ~ 50	0.008 ± 0.001Ad	19.27 ± 3.06Ab	1.38 ± 0.06Aa	6.61 ± 1.83Aa	85.14 ± 5.11Aa	8.24 ± 5.37Aa
CK	0 ~ 10	0.108 ± 0.055Aa	16.89 ± 5.48Ba	1.23 ± 0.06Ab	2.71 ± 0.90Ab	90.16 ± 0.48Ba	7.11 ± 1.25Aa
	10 ~ 20	0.093 ± 0.026Bbc	14.76 ± 5.02Abc	1.35 ± 0.06Aab	2.53 ± 1.89Ab	88.58 ± 2.19Aa	8.87 ± 3.59Aa
	20 ~ 30	0.051 ± 0.006Bc	12.25 ± 3.56Abc	1.30 ± 0.07Aab	3.19 ± 1.68Ab	88.03 ± 4.49Aa	8.77 ± 5.81Aa
	30 ~ 40	0.031 ± 0.007Bd	10.63 ± 2.88Abc	1.36 ± 0.08Aab	4.50 ± 2.36Aab	87.99 ± 2.64Aa	7.51 ± 4.11Aa
	40 ~ 50	0.022 ± 0.001Ad	8.53 ± 2.09Ac	1.39 ± 0.07Aa	6.60 ± 1.83Aa	87.71 ± 2.53Aa	5.69 ± 2.41Aa

注：表中数据均为平均值 ± 标准差；图中不同大写字母表示相同深度不同样地间差异显著（P<0.05），小写字母不同表示不同深度相同样地间染色形态差异显著（P<0.05）；n=3。

为综合评价垄作覆膜和垄作种植农地土壤优先流发育程度，本研究针对表征优先流空间异质性特征的垂直染色面积比、最大染色深度、土壤染色形态分形维数、土壤染色面积比空间变异系数、土壤染色复杂度和土壤质量流率，先使用熵权法加权，然后进行 TOPSIS 分析，结果见表 3。垄作覆膜农地和垄作农地的相对贴近度分别为 0.41 和 0.59，表明垄作农地优先流发育程度更大。

表 3　2 种不同种植措施下农地土壤优先流发育程度

种植措施	最优解的距离（D_j^+）	最劣解的距离（D_j^-）	相对贴近度	排序
M	0.81	0.58	0.41	2
CK	0.58	0.81	0.59	1

通过灰色系统理论进一步量化分析 2 种不同种植措施下形成的土壤属性状况与土壤优先流之间的作用关系，将主要表征土壤属性的饱和导水率、有机质、容重、黏粒、粉粒和砂粒作为比较序列，将综合表征土壤优先流程度的贴进度作为参考序列，对二者进行灰色关联分析，分析结果如图 8 所示。土壤饱和导水率对优先流程度影响的关联度最大，其次为容重、黏粒含量和砂粒含量，最小为粉粒含量。土壤饱和导水率对 2 种种植措施下优先流程度均具有较强的影响，其中垄作种植措施下的饱和导水率（0.061 mm/s）相对较大。

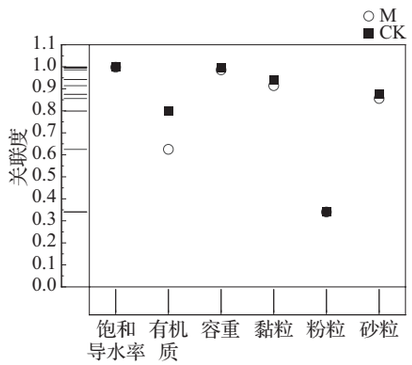

图 8　2 种不同种植措施下土壤属性与优先流贴近度关联性

3　讨论

虽然垄作种植措施形成的垄沟、垄台增加了土壤与雨水的接触面积，在一定程度上促进了土壤的蓄水能力[37]，但相较于垄作覆膜，垄作裸露的土壤表面在炎热多雨的气候环境下形成的干湿交替变化，使得土壤板结、干缩开裂等现象频发，导致优先流现象广泛发生[38]，在一定程度上影响了原本垄作田间积蓄雨水的作用，导致土壤水分状况发生改变。通过对覆膜种植措施下土壤水分变化研究得出[39-40]，覆膜措施可以使水分在原本裸露的垄作土壤表层实现聚集分布，土壤维持较高的含水率。本研究中得出，垄作覆膜种植措施相比于垄作降低了田间土壤优先流的发生与分布，使水分多集中分

布在 0 ~ 10 cm 土壤表层内。相关研究发现，秸秆、凋落物覆盖等覆盖措施虽能在田间地表上形成物理阻隔层，降低土壤表层水分蒸发，但其中覆盖层仍具有空隙，仍与空气相连通。而覆膜措施会使膜下土壤处于高封闭状态，阻隔土壤水分与大气的交互，减少水分散失的同时调节土壤的水热分布，良好的水热环境会增加土壤有机质[41]，促进土壤团聚体结构形成，稳定土壤层水分状况，形成水分在土壤层之间的内循环[42]，降低土壤空间内优先流的发生及其空间分布。

研究发现孔隙通道发育的土柱使优先流现象显著[43]，且土壤含水率可较快达到稳定状态。本研究中垄作覆膜农地土壤含水率达到稳定的平均时间是垄作农地的 1.37 倍。水分入渗中垄作措施下各土层水分活跃程度均为相对稳定状况，通过分析得到垄作措施下的土壤容重相对较小，土壤容重的减小会提高土壤孔隙度，影响团聚体结构进而改变土壤的持水性能[44]。因此，垄作种植农地的孔隙通道相对更加发育，水分沿已形成的优先孔道快速流动，形成较明显的优先流现象，使得土壤层之间的水分波动性相对较小，土层整体表现相对稳定。垄作覆膜措施土壤上层为次活跃层，土壤上层水分波动性明显，相比于垄作措施，各层土壤含水率随时间变化的过程曲线有不同程度的滞后，表明在垄作覆膜措施下田间土壤中优先流发育相对较低。此外，有关研究得出，地膜的蓄水作用也会影响土壤的导水率等水力特性[45]，土壤导水率的改变引起土壤孔隙结构发生变化，进而影响水分在土壤中的下渗速率。本研究发现，垄作种植措施下质量流率显著（P<0.05）大于垄作覆膜农地。进一步说明在相同外部供水条件下，垄作覆膜下的田间土壤优先流运动过程更加显著。研究还发现，容重的增大会降低土壤的饱和导水率[35, 46]，土壤饱和导水率的增大会加快土壤水分运动[47]。同时，垄作覆膜种植农地土壤的平均黏粒含量大于垄作农地，土壤黏粒含量越高越会降低饱和状态下的下渗水量，导致饱和导水率也随之减小，抑制土壤水分运动。本研究中得出，土壤饱和导水率、容重、黏粒等对优先流发育程度影响均较大。此外，与秸秆覆盖等生物覆盖措施相比，地膜具有不通气、不透水等特性，易改变膜下土壤的温度与湿度[48]，促进微生物群落的活动，提高土壤有机碳各组分的含量[49]。本研究中垄作农地的低土壤容重、高土壤饱和导水率状况一定程度上促进了土壤优先流的发生，在相同外部供水条件下较垄作覆膜农地的土壤水分更易以优先流的形式向土壤深层运动并携带溶质等养分，进而降低了土壤中有机质含量，造成水肥流失[50]现象。

因此，垄作覆膜种植措施对土壤环境及其内部水分状况进行了一定程度的优化，可利于作物吸收水分，从而实现农产品的增收。相比于单一垄作、传统平作等种植措施，垄作覆膜种植措施具有进一步的田间保水保肥效果，对于提升作物种植中的水肥利用具有促进作用。

4　结论

（1）垄作覆膜种植措施下的农地土壤水分集中分布在 0 ~ 10 cm 土壤表层空间内，而垄作种植农地由于受到优先流的影响，土壤水分多以优先流形式在土壤深层空间内分布。

（2）覆膜种植农地平均质量流率、土壤含水率变化均小于无覆膜种植农地，优先流程度相对较低。

（3）垄作覆膜种植措施会增大土壤的容重，降低土壤的饱和导水率，进而降低了土壤优先流程度，其中土壤饱和导水率对优先流的影响最显著，影响程度为 0.9，综合评价得出，垄作覆膜种植农地优先流程度（0.41）低于垄作种植农地（0.59）。

参考文献：

[1]　李树峰，赵佳港，Farnsworth A，等. 新生代青藏高原生长对东亚水循环及生态系统的影响[J]. 科学通报，2023，68（12）：1567–1579.

[2]　张翔，范艺宽，毛家伟，等. 不同种植制度和施肥措施对烟田土壤养分及微生物的影响[J]. 华北农学报，2008（4）：208–212.

[3]　张月荷，梁霞，曹浚铂，等. 垄沟集雨种植的研究进展[J]. 节水灌溉，2022（10）：23–30.

[4]　杨露，毛云飞，胡艳丽，等. 生草改善果园土壤肥力和苹果树体营养的效果[J]. 植物营养与肥料学报，2020，26（2）：325–337.

[5]　江鑫，董文财，付强，等. 横坡与顺坡垄作模式土壤中水及示踪 Br– 分布特征[J]. 水土保持学报，2023，37（2）：253–259.

[6]　盖浩，刘平奇，张梦璇，等. 黑土坡耕地横坡垄作对减少径流及土壤有机碳流失的作用[J]. 水土保持学报，2022，36（2）：300–304，311.

[7]　支蓉，郑志海. 2021/2022 年冬季中国气候异常特征及南方

降水异常偏多成因分析[J]. 气象，2022，48（7）：925-935.
[8] 秦川，何洁琳，李艳兰，等. 2021年广西气候概况[J]. 气象研究与应用，2022，43（1）：84-89.
[9] 田晨，李志军，秦栋. 农业气象灾害对农作物产量的影响[J]. 农业与技术，2019，39（10）：131-132.
[10] 王杰，冯浩，王乃江，等. 垄作覆膜种植对夏玉米生长和土壤水分动态的影响[J]. 水土保持学报，2018，32（2）：110-119.
[11] 孙梦媛，刘景辉，赵宝平，等. 全覆膜垄作种植对旱作马铃薯生长和土壤特性的影响[J]. 水土保持学报，2018，32（5）：262-269，276.
[12] 张绪成，杨芳萍，杨发荣. 高水分利用效率作物品种选育的主要生理途径分析[J]. 灌溉排水学报，2013，32（3）：141-144.
[13] 赵海军，戴良香，张智猛，等. 盐碱地花生种植方式对土壤水盐动态、温度和产量的影响[J]. 灌溉排水学报，2016，35（6）：6-13.
[14] 上官宇先，师日鹏，李娜，等. 垄作覆膜条件下田间氨挥发及影响因素[J]. 环境科学，2012，33（6）：1987-1993.
[15] 邢毅，张抗萍，王志远，等. 西南旱地油菜田土壤水分和作物光合特征对覆盖材料和垄沟比的响应[J]. 应用生态学报，2020，31（10）：3461-3472.
[16] 肖列，刘国彬，薛萚，等. 黄土丘陵区不同土地利用方式对土壤水分及地上生物量的影响[J]. 水土保持通报，2016，36（4）：204-209，215.
[17] 张楠，韩金旭，江红，等. 耕作期内土壤水分和盐分运动规律及其影响因素[J]. 水土保持通报，2015，35（6）：8-14，20.
[18] 蒲敬轩，樊雅琼，冯许钰，等. 分根区交替灌溉对土壤水分养分条件及作物生长的影响[J]. 中国土壤与肥料，2022（9）：209-215.
[19] 陆培榕，邢玮麟，杨玉杰，等. 棚内微咸水覆膜滴灌下带间土壤水盐分布特征模拟[J]. 农业机械学报，2023，54（7）：360-371.
[20] 王水献，董新光，吴彬，等. 干旱盐渍土区土壤水盐运动数值模拟及调控模式[J]. 农业工程学报，2012，28（13）：142-148.
[21] 胡传旺，王辉，卢佳宇，等. 亚热带土壤导水特征对钠盐溶液浓度的响应[J]. 农业工程学报，2020，36（3）：86-91.
[22] 段凤仪，朱成立，王策，等. 灌溉优先流对裂隙分布密度、灌水强度及土壤湿度的响应机理[J]. 灌溉排水学报，2023，42（2）：32-41.
[23] 刘啟霞，刘小芳，田昕，等. 汾河流域下游不同土地利用方式下土壤性质对优先流发育的影响[J]. 水土保持研究，2023，30（5）：146-153，161.
[24] 张颢晖，严海军，惠鑫，等. 移动滴灌系统土壤水分入渗试验与数值模拟[J]. 农业工程学报，2023，39（6）：158-168.
[25] Su N. Random fractional partial differential equations and solutions for water movement in soils: Theory and applications[J]. Hydrological Processes，2023，37（3）：e14844.
[26] 管凝，程金花，侯芳，等. 不同入渗水量下的西南喀斯特地区人工林土壤优先流特征[J]. 土壤通报，2023，54（3）：587-595.
[27] 吴晗，陈晓冰，姜波，等. 秸秆还田对甘蔗地土壤优先流运动特征的影响[J]. 应用生态学报，2022，33（1）：141-148.
[28] Liu Y，Zhang Y，Xie L，et al. Effect of soil characteristics on preferential flow of *Phragmites australis* community in Yellow River delta[J]. Ecological Indicators，Amsterdam：Elsevier，2021，125：107486.
[29] 于师，李珍玉，王梦珂，等. 不同种植间距对香根草植物边坡优先流发育特征的影响[J]. 水土保持通报，2022，42（3）：49-56.
[30] 陈晓冰，程金花，陈引珍，等. 基于林分空间结构分析方法的土壤大孔隙空间结构研究[J]. 农业机械学报，2015，46（11）：174-186，194.
[31] Tang Q，Duncan J M，Guo L，et al. On the controls of preferential flow in soils of different hillslope position and lithological origin[J]. Hydrological Processes，2020，34（22）：4295-4306.
[32] 杨卫君，惠超，陈雨欣，等. 生物质炭施用下灌溉农田土壤团聚体稳定性及分型特征[J]. 水土保持学报，2022，36（6）：323-329.
[33] 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.
[34] 秦梓城，陈晓冰，刘思佳，等. 基于计算流体力学分析的蔗田土壤优先流运动过程研究[J]. 中国土壤与肥料，2023（2）：33-42.
[35] 陈晓冰，吴晗，姜波，等. 广西岩溶区稻田土壤优先路径的空间分布[J]. 应用生态学报，2020，31（12）：4099-4108.
[36] 邵明安，王全九，黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京：高等教育出版社，2006：87-97.
[37] 宋振伟，郭金瑞，邓艾兴，等. 耕作方式对东北春玉米农田土壤水热特征的影响[J]. 农业工程学报，2012，28（16）：108-114.
[38] Greve A，Andersen M S，Acworth R I. Investigations of soil cracking and preferential flow in a weighing lysimeter filled with cracking clay soil[J]. Journal of Hydrology，2010，393（1-2）：105-113.
[39] 韩固，苗芳芳，王楠，等. 宁南旱区耕作覆盖对马铃薯产量及土壤水热特征的影响[J]. 应用生态学报，2022，33（12）：3352-3362.
[40] 员学锋，吴普特，汪有科. 地膜覆盖保墒灌溉的土壤水、热以及作物效应研究[J]. 灌溉排水学报，2006（1）：25-29.
[41] 李光，史丽娟，崔旭东，等. 耕作方式对连作高粱产量及土壤水分与有机碳含量的影响[J]. 华北农学报，2023，38（2）：170-178.
[42] 侯亚玲，周蓓蓓，王全九，等. 枯草芽孢杆菌对盐碱土水分运动和水稳性团聚体的影响[J]. 水土保持学报，2017，31

（4）：105–111，147.
[43] 张文杰，李俊涛. 优先流作用下的胶体－重金属共迁移试验研究[J]. 岩土工程学报，2020，42（1）：46–52.
[44] 魏永霞，朱烟豫，刘慧. 连年施加生物炭对黑土区土壤改良与玉米产量的影响[J]. 农业机械学报，2022，53（1）：291–301.
[45] 刘萌，付威，樊军，等. 耕作与覆盖措施对黄土塬区春玉米田土壤水气传输的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2021，27（5）：814–825.
[46] 康文蓉，张勇勇，赵文智，等. 荒漠绿洲过渡带土壤饱和导水率的空间变异特征[J]. 水土保持学报，2021，35（5）：137–143.
[47] 单鱼洋，李晓菊，王全九，等. 磁化微咸水一维水平吸渗特征与水分运动参数分析[J]. 农业机械学报，2021，52（2）：266–274.
[48] 王立明，陈光荣，杨如萍，等. 覆膜种植方式对旱作大豆生长发育、产量及水分利用效率的影响[J]. 中国农学通报，2021，37（21）：8–14.
[49] 张林森，刘富庭，张永旺，等. 不同覆盖方式对黄土高原地区苹果园土壤有机碳组分及微生物的影响[J]. 中国农业科学，2013，46（15）：3180–3190.
[50] 杨成存，黄金文，韩凡香，等. 不同覆盖时期和方式对旱地马铃薯土壤水热及产量的影响[J]. 西北农业学报，2023，32（2）：253–263.

Effects of plastic film mulching on spatial heterogeneity of soil preferential flow in ridge tillage farmland

XU Hao[1, 2], CHEN Xiao-bing[1, 2*], YANG Ting[3, 4], QIN Zi-cheng[3, 4], LIU Si-jia[3, 4], LIU Jun-jie[3, 4]（1. Guilin University of Technology, Guangxi Collaborative Innovation Center for Water Pollution Control and Safety in Karst Area, Guilin Guangxi 541004; 2. Guilin University of Technology, Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology, Guilin Guangxi 541004; 3. Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology for Science and Education Combined with Science and Technology Innovation Base, Guilin Guangxi 541004; 4. Guilin University of Technology, College of Environmental Science and Engineering, Guilin Guangxi 541004）

Abstract: In order to provide scientific support for further formulating efficient water and fertilizer strategies for ridge farming field agricultural production, combined field staining tracer experiments with indoor soil column water infiltration experiments, and the image morphological analysis, simulated infiltration analysis, entropy weight analysis and gray system theory analysis were applied. The spatial heterogeneity characteristics of farmland soil preferential flow under ridge film mulching and ridge（control）planting measures were analyzed to clarify the spatial distribution and movement of farmland soil preferential flow under ridge film mulching measures. The relationship between preferential flow and soil water movement process in ridge field under the influence of film mulching measures was revealed. The results showed that under the same external water supply conditions, the water of ridge-mulching farmland was concentrated in the 0–10 cm soil surface layer, and the distribution range was gradually decreased with the increase of soil depth. The complexity of soil dyeing was increased first and then decreased with the increase of soil depth. However, the water distribution of ridge planting farmland in the range of 10–30 cm soil depth showed a significant finger-like preferential flow differentiation phenomenon. At the same time, the time for the soil to reach saturation in the ridge-mulched farmland was 1.36 times that of the ridge-mulched farmland. The average soil column outflow per unit time（mass flow rate of 0.20 g/s）was significantly（$P<0.05$）less than that of the ridge-mulched farmland（mass flow rate of 0.35 g/s）, and the degree of soil preferential flow was higher. Among the soil properties, saturated hydraulic conductivity had the greatest influence on the degree of preferential flow. Compared with ridge planting, ridge planting could further reduce the occurrence and distribution of preferential flow in farmland soil space to a certain extent, reduce water leakage to deep soil, and play a certain role in water storage and moisture conservation.

Key words: ridge planting; film covering; soil moisture; preferential flow; response relationship