

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.15.0098



秸秆颗粒形态对沟灌入渗特征影响的试验研究

郑健^{1,2}, 王燕^{1,2}, 蔡焕杰³, 张恩继^{1,2}, 孙雨欣^{1,2}

(1. 兰州理工大学西部能源与环境研究中心, 甘肃 兰州 730050; 2. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3. 西北低碳城镇支撑技术协同创新中心, 甘肃 兰州 730050)



郑健

摘要: 为了探明秸秆粉碎颗粒形态对沟灌土壤水分运移特征和土壤质量含水率分布状况的影响, 采用具有不同秸秆粉碎形态的玉米叶(片状)和玉米芯(颗粒状), 进行了室内试验研究, 并采用 HYDRUS-2D 软件对不同处理湿润锋运移情况进行了模拟. 结果表明: 具有片状形态的玉米叶各处理, 随混掺比例及埋深的不同, 均能降低土壤的入渗率, 而具有颗粒形态的玉米芯处理显著增加了土壤入渗率; 玉米芯混掺处理表明在埋深(10, 15] cm 设置混掺层能增大土壤的垂向运移距离, 18% 土壤质量含水率等值线垂向距离明显大于埋深(5, 10] cm 处理的; 玉米叶不同埋深处理表明埋深(10, 15] cm 比(5, 10] cm 更能增加 18% 土壤质量含水率等值线的水平距离; 3% Y10~15(混掺比例 3%, 玉米叶, 埋深(10, 15] cm) 处理最大土壤质量含水率值达到 21%, 而其垂向运移距离最短, 说明该处理能够有效地阻滞水分的垂向入渗, 增强植物混掺层上部土壤质量含水率; 采用 HYDRUS-2D 软件模拟的湿润锋运移值与实测值误差在 3% 以内, 说明其能够准确描述植物混掺条件下沟灌入渗过程中的湿润锋运移特征.

关键词: 秸秆; 颗粒形态; 沟灌; 入渗特征; 土壤质量含水率; 试验

中图分类号: S274.3; S152.72 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2016)01-0066-07

郑健, 王燕, 蔡焕杰, 等. 秸秆颗粒形态对沟灌入渗特征影响的试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(1): 66-72, 80.

ZHENG Jian, WANG Yan, CAI Huanjie, et al. Experimental investigation into effects of maize leaf and straw fragments on soil water infiltration characteristics in furrow irrigation[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME), 2016, 34(1): 66-72, 80. (in Chinese)

Experimental investigation into effects of maize leaf and straw fragments on soil water infiltration characteristics in furrow irrigation

ZHENG Jian^{1,2}, WANG Yan^{1,2}, CAI Huanjie³, ZHANG Enji^{1,2}, SUN Yuxin^{1,2}

(1. China Western Energy & Environment Research Center, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China; 2. China Northwestern Collaborative Innovation Center of Low-carbon Urbanization Technologies, Lanzhou, Gansu 730050, China; 3. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Area of Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To clarify effects of straw fragments on soil water infiltration characteristics and water content distribution in the soil in furrow irrigation, a series of experiments are carried out in laboratory by using maize leaf and straw fragments with different sizes, proportions and depths buried. In addition,

收稿日期: 2015-05-07; 网络出版时间:

网络出版地址:

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51369014); 甘肃省教育厅科研项目(2013A-038); 兰州理工大学红柳青年教师培养计划项目(Q201413)

作者简介: 郑健(1981—), 男, 甘肃会宁人, 副教授, 博士(zhj16822@163.com), 主要从事水资源高效利用研究.

王燕(1982—), 女, 甘肃靖远人, 讲师, 硕士(wangyan821108@163.com), 主要从事节水灌溉理论研究.

the wetting front movement of soil water in different treatments is simulated with the software of HYDRUS-2D. The results show that soil water infiltration rate is decreased in the cases with maize leaf fragments, but increased in the cases with maize straw fragments significantly. For the cases with maize straw fragments, the soil vertical infiltration distance is increased if the fragments are buried in a depth of 10-15 cm, and the vertical distance of 18% soil water content contours is greater than that if the fragments are buried in 5-10 cm depth. In the cases with maize leaf fragments, the horizontal distance of 18% soil water content contours is increased when the fragments are buried in 10-15 cm depth compared with 5-10 cm depth. In the case that the soil is blended with 3% maize leaves in 10-15 cm depth, the maximum soil water content can be as high as 21%, and the vertical infiltration distance is the shortest. This implies that in this treatment the water movement in the vertical direction has been obstructed effectively and the water content in the soil above the buried layer is increased simultaneously. Meanwhile, the error of wetting front movement between experiment and simulation of HYDRUS-2D is less than 3%, suggesting the software demonstrate the behavior of wetting front movement accurately.

Key words: straw; particle morphology; furrow irrigation; infiltration characteristics; soil water content; experiment

秸秆还田技术是目前世界上普遍重视的改善农田生态环境和培肥地力的重要措施,在降低秸秆焚烧所造成大气污染的同时,还有增肥增产作用^[1]. 现有研究成果表明,秸秆还田具有改善土壤结构和提高土壤水分蓄持能力的作用^[2-4]. 王珍等^[5]、王增丽等^[6-7]的研究结果表明,长秸秆会降低土壤入渗能力,而长秸秆和粉碎秸秆施入土壤后明显提高了土壤的蒸发失水比,但各处理对土壤持水能力差异不大. 王燕等^[8]的研究结果表明,添加一定比例的玉米叶能增加土壤湿润体的水平迁移距离,减少土壤水分的垂向入渗,进而增大耕层土壤质量含水率. QIU等^[9]的研究结果表明,秸秆还田能优化碳氮比,提高氮的利用效率,减少硝态氮的累积;ABRO等^[10]研究结果表明,在一定的水分条件下,玉米秸秆还田能够优化碳氮比,恢复土壤中的有机碳含量,提高土壤质量.

但上述研究工作主要关注秸秆还田量及秸秆粉碎程度对土壤理化性质的影响,而针对秸秆粉碎颗粒形态与土壤理化性质之间的关系还缺乏相关研究. 沟灌是中国地面灌溉中普遍应用于中耕宽行距作物的一种较好的灌水方法^[11],具有投资能耗低、田间工程简单和操作方便等优点^[12]. 目前,众多学者借助试验和数值模拟等手段,研究了不同条件下的沟灌水流运动过程^[13-14]、水分入渗规律和灌溉效果^[15-17],但尚未见到不同秸秆粉碎颗粒形状下沟灌土壤水分运移的研究成果.

文中以玉米芯(颗粒状)和玉米叶(片状)为秸秆还田材料,通过室内试验,研究秸秆颗粒粉碎形

态对沟灌土壤水分运移的影响. 在此基础上,利用HYDRUS-2D软件模拟不同处理下的土壤湿润锋运移情况,进而探讨不同秸秆颗粒粉碎形态对土壤水分运移规律的影响,为改进沟灌灌水技术和提高灌水质量提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤为甘肃景泰中泉乡荒地0~40 cm表层土壤,取回风干后,过2 mm土壤筛备用,并采用土壤颗粒分析仪进行土壤粒径分析,其小于2.000, 1.000, 0.050, 0.010和0.001 mm粒径的质量分数分布分别为100%, 99.46%, 80.26%, 23.13%和10.06%;土壤容重为1.4 g/cm³. 按照中国土壤分类标准,供试土壤属于粉壤土,俗称黄绵土. 试验采用甘肃农村地区种植面积大且较易获得的玉米叶和玉米芯作为试验材料,试验前将其粉碎成长宽各1 cm大小备用.

土壤水分特征曲线表示了土壤水的能量与数量之间关系,是研究土壤水分运动最重要和最基本的工具^[18]. 试验在西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室进行,采用CR-21G型高速冷冻离心机测定土壤水分,将土壤质量含水率 θ 与土壤水分吸力 S (Pa)进行拟合,得

$$S = 11.271\theta^{-2.4117}, R^2 = 0.98. \quad (1)$$

1.2 试验装置

图1为沟灌试验装置及取样点分布图. 试验装

置采用矩形有机玻璃土箱,其长、宽、高分别为40, 12和35 cm,如图1a所示. 试验过程中考虑灌水沟具有对称性,取1/2沟开展试验研究. 同时设置排气孔,降低试验过程中气阻产生的影响. 试验中,灌水采用马氏瓶预定水量灌溉.

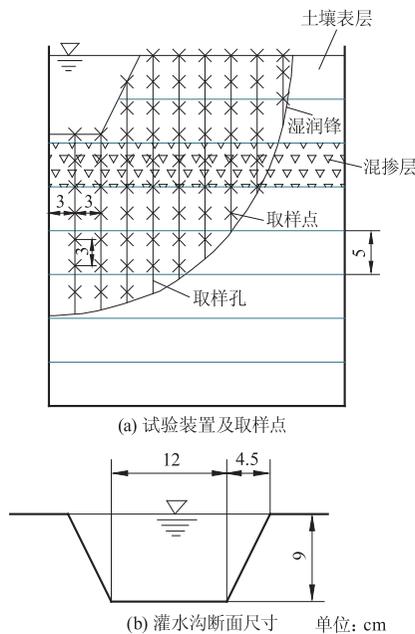


图1 沟灌试验装置及取样点分布
Fig. 1 Distribution of furrow irrigation and sampling points distribution

1.3 试验设计及方法

试验设置具有片状形态的玉米叶(Y)和颗粒形态的玉米芯(X)2种混掺物,依据前期的试验和田间实际调查结果设置混掺比例为1%和3%(质量分数),同时秸秆还田主要存在于土壤表层,故试验设置混掺层为从土表面以下(5,10]和(10,15] cm 2层. 试验开始前将供试土壤按设计容重(1.40 g/cm³)分层(每5 cm为1层)均匀装入试验土箱,在设置添加植物混掺物的土层装入搅拌均匀的玉米叶、玉米芯与土壤的混合物,装好后在设定区域挖1/2灌水沟,断面形状统一采用常见的梯形,断面尺寸如图1b所示. 根据试验用土类型及预试验,为了更好地体现试验结果,所有处理设置灌水量为1 200 mL. 灌水入渗开始后,记录时间并定时观测土壤湿润锋推进过程,间隔一定时间在试验土箱一侧外壁上描出不同时刻所对应的湿润锋运移位置,同时记录不同处理下沟内无积水时所用入渗时间. 试验设计如表1所示,表中*d*,*m*分别为埋深、混掺比例,每处理设置3个重复. 试验结束后,放置30.0 min待土壤水分基本稳定,并绘制最后湿润锋运移曲线,

同时用2.0 cm直径的土钻按图1a所示取样,采用烘干法测定土壤含水率. 利用HYDRUS-2D软件对不同处理条件下湿润锋运移情况进行模拟, Sufer 8.0软件绘制土壤质量含水率等值线分布图.

表1 试验设计
Tab. 1 Experimental design

处理	试验参数		
	<i>d</i> /cm	混掺物	<i>m</i> /%
1	—	纯土	—
2	(5,10]	玉米芯(X)	1
3	(10,15]	玉米芯(X)	1
4	(5,10]	玉米叶(Y)	1
5	(10,15]	玉米叶(Y)	1
6	(5,10]	玉米芯(X)	3
7	(10,15]	玉米芯(X)	3
8	(5,10]	玉米叶(Y)	3
9	(10,15]	玉米叶(Y)	3

2 结果与分析

2.1 不同处理对土壤水分入渗率的影响

图2为不同处理土壤入渗率变化曲线,图中CK为纯土处理,*i*,*t*分别为入渗率、入渗时间. 由图可知,植物混掺种类、埋深及混掺比例的不同,对土壤水分入渗率产生了明显影响. ① 1%混掺比例(图2a)中,处理1% X10~15(1%混掺比例,玉米芯,埋深(10,15] cm.下同)的土壤水分入渗率明显大于处理X5~10,CK,Y5~10和Y10~15的;3%混掺比例(图2b)中,入渗率按处理排序由大至小为X5~10,X10~15,CK,Y5~10,Y10~15;② 图2c,2d表明玉米芯各处理显著增大了土壤水分入渗率,而玉米叶各处理有减小土壤水分入渗率的作用,处理3% X5~10对土壤水分入渗的增大幅度最大;③ 玉米叶(图2c)相同比例不同埋深中,处理3% Y10~15(混掺比例3%,玉米叶,埋深(10,15] cm.下同)的土壤水分入渗率最小,而在玉米芯(图2d)相同比例、不同埋深中,处理3% X5~10的土壤水分入渗率在全部处理中最大.

初步分析形成的主要原因如下:

1) 在土壤中加入一定比例的玉米叶和玉米芯,改变了土壤中孔隙的大小及分布. 植物混掺物的加入减小了土壤中大孔隙的比例,增大了中小孔隙的比例;同时,随着混掺比例的增大,中等孔隙比例逐渐减小,小孔隙比例逐渐增大^[19],而小孔隙的增加会减小土壤的入渗速率,使得处理1% X10~15的土壤水分入渗率大于处理1% X5~10的,而处理3% X10~15的则小于3% X5~10的.

2) 玉米叶的片状形态使土壤水分入渗路径的弯曲程度增加,土壤水分垂向入渗阻滞效应明显,土壤水分入渗率减小;而玉米芯粒径远大于土体粒径,玉米芯的颗粒形态在一定程度上增加了土壤水分入渗通道,造成土壤水分入渗率较纯土处理有所

增大。

3) 埋深(10,15] cm时,玉米叶/芯混掺层位于灌水沟底部,对土壤水分垂向入渗影响较大;而埋深(5,10] cm时,位于灌水沟侧壁的部分区域,对土壤水分入渗率的影响较小。

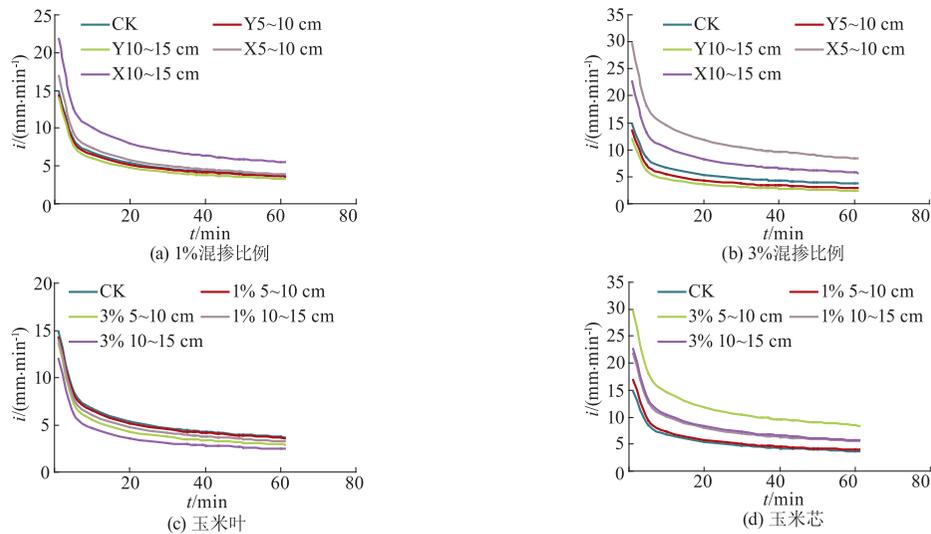


图2 不同处理土壤入渗率变化曲线

Fig. 2 Soil infiltration rate curves in different treatments

2.2 不同处理对湿润锋运移的影响

2.2.1 运移特征

图3为9个不同处理条件下的湿润锋运移曲线,图中曲线上数字表示时间,单位为min; h , l 分别为垂向运移距离、水平运移距离.从图中可以看出:① 试验结束后,处理1% X5~10和1% X10~15中湿润锋在垂向和水平的运移距离,按入渗深度排序由大至小均为(5,10],(10,15] cm,CK;处理1% Y5~10和1% Y10~15中,埋深(5,10] cm的水平运移距离大于埋深(10,15] cm的,说明埋深(10,15] cm对湿润锋的运移起到了一定的阻滞作用;处理3% X5~10和3% X10~15中,埋深(10,15] cm的垂向和水平运移距离均大于埋深(5,10] cm的;处理3% X10~15的水平运移距离均为各处理中最大的;处理3% Y10~15中,其水平运移距离明显大于垂向运移距离,且所需入渗时间也为各处理中最长,说明该处理对水分在垂直方向上的阻滞作用大于水平方向上的.② 玉米芯各处理有增大土壤水分入渗的作用,在处理1%,3% X5~10和1%,3% X10~15中,位于沟底部的埋深(10,15] cm的增大水分运移距离明显大于埋深(5,10] cm的.③ 处理1%,3% Y5~10和1%,3% Y10~15对

土壤水分入渗的阻滞作用较处理1%,3% X5~10和1%,3% X10~15的明显;处理1%,3% Y5~10和1%,3% Y10~15对土壤水分运移均能产生一定的阻滞作用,说明玉米叶比玉米芯能有效地阻止土壤水分的垂向入渗,其中处理3% Y10~15对土壤水分运移阻滞作用较1% Y10~15明显.

初步分析形成上述规律的主要原因:① 处理1% Y5~10和1% Y10~15中,由于其混掺比例较小,对土壤孔隙率影响不大,使得其水平和垂向土壤水分运移与纯土处理差异不大;② 1%的玉米叶/芯混掺层土壤下部(埋深(10,15] cm)时,改善了沟内水分垂向入渗能力,利于水分进入到(10,15] cm土层内,从而加快了垂向和侧向入渗;3%的玉米叶/芯混掺层土壤中部(埋深(5,10] cm)时,恰好相反;③ 玉米叶和玉米芯的混掺使得其土壤水分扩散率与纯土的产生一定的差异,在植物混掺层与纯土层之间形成了土壤水分入渗突变面,对湿润锋的运移产生影响,同时,不同的埋深设置以及玉米叶、玉米芯的颗粒形态也对土壤水分的运移产生了一定的影响.

试验结果表明玉米叶和玉米芯混掺条件下的土壤水分运移受混掺物自身颗粒形态、混掺比例和埋深等多重因素的影响.

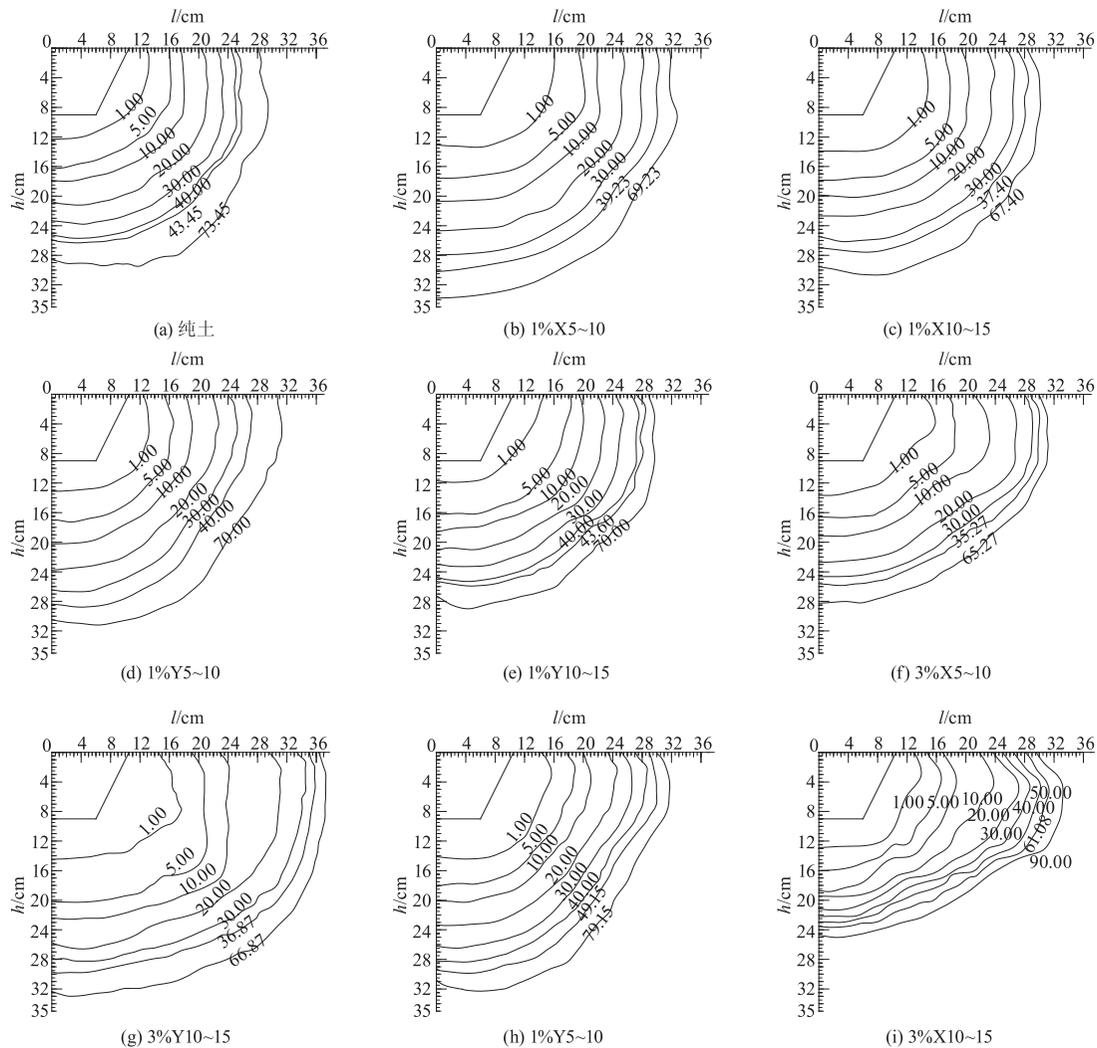


图3 不同处理湿润锋运移曲线

Fig. 3 Wetting front movement curves in different treatments

2.2.2 运移模拟分析

数值计算是一种研究并解决数学问题的数值近似解方法. 文中采用 HYDRUS-2D 软件对不同处理条件下湿润锋运移情况进行模拟. HYDRUS-2D 软件能够模拟水、热以及溶质在二维或三维多孔介质条件下的非饱和运动, 主要采用改进的 Richards 方程作为水流控制方程, 对非饱和条件下水分和溶质运移进行模拟.

由于试验过程中入渗为稳定流工况, 始终保持灌水沟内液面为满沟状态, 故为恒压入渗. 模拟按照层状土条件设置, 沟槽边界设为定水头边界, 土槽上层边界设为与大气连通边界, 侧面为零通量边界, 下边界为自由出流边界, 同时定水头边界设置水头为 9 cm. 模拟时段以额定灌水量入渗完成的最末时间段为准. 对于土壤的饱和导水率 K_s 、残余含水率 θ_r 、饱和含水率 θ_s 以及经验参数 α 和 n , 采用

Marquardt-Levenberg 参数最优化算法结合试验数据获得. 不同土壤类型的具体参数见表 2.

表 2 不同土壤类型水分特征参数
Tab. 2 Soil water characteristic parameters for different soil types

土壤类型	$\theta_r /$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	$\theta_s /$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	α / cm^{-1}	n	$K_s /$ ($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)
纯土	0.008 1	0.324 3	0.012	1.57	0.040
1% 玉米叶	0.009 7	0.334 3	0.010	1.59	0.050
1% 玉米芯	0.009 6	0.316 4	0.009	1.62	0.047
3% 玉米叶	0.011 5	0.356 4	0.007	1.57	0.051
3% 玉米芯	0.011 4	0.332 8	0.008	1.63	0.048

将各处理的垂向运移距离和水平运移距离模拟值与实测值进行误差分析, 结果见表 3, 表中 h, l 分别为垂向运移距离、水平运移距离; 下标 m, t 分别表示模拟、实测; σ 为误差. 由表可知, 各处理的模拟值与实测值误差均在 3% 以内, 模拟精度较好, 说明采用 HYDRUS-2D 软件能够准确描述植物混掺条

件下沟灌入渗过程中湿润锋的运移特征.

表3 各处理时湿润锋运移距离实测值与模拟值对比
Tab.3 Comparison of experimental and predicted wetting front distances in different treatments

处理	垂向运移距离			水平运移距离		
	h_m/cm	h_l/cm	$\sigma/\%$	l_m/cm	l_l/cm	$\sigma/\%$
1	26.00	26.0	0	25.34	25.0	1.36
2	26.76	27.0	0.89	29.50	30.0	1.67
3	30.80	30.3	1.65	26.52	27.0	1.78
4	28.10	28.4	1.05	25.62	25.7	0.31
5	25.72	25.3	1.66	26.91	27.0	0.33
6	25.65	25.5	0.59	28.41	28.7	1.01
7	29.46	29.6	0.47	34.28	35.0	2.05
8	29.04	29.5	1.56	28.15	29.0	2.93
9	23.96	23.5	1.96	28.54	28.1	1.57

2.3 不同处理对土壤质量含水率分布的影响

图4为灌水结束后各处理的土壤质量含水率等值线分布图,图中曲线上的数字为质量含水率.由图可知:

1) 处理1%,3% X5~10和1%,3% X10~15

的土壤质量含水率分布图(见图4b,c,f,g)表明,在埋深(10,15]cm设置混掺层比在(5,10]cm设置混掺层更能增大土壤的垂向运移距离,18%土壤质量含水率等值线垂向距离明显大于埋深(5,10]cm的;处理1%,3% Y5~10和1%,3% Y10~15的土壤质量含水率分布图(见图4d,e,h,i)表明埋深(10,15]cm比(5,10]cm更能增大18%土壤质量含水率等值线的水平距离;

2) 各处理的含水量等值线图中,处理3% Y10~15的最大土壤质量含水率等值线(见图4i)达到21%,为各处理中最大.颗粒状玉米芯吸附能力强的优势在土壤水分入渗过程中没有得到体现,反而改善了土壤入渗性能,导致获得了较大湿润体;而处理3% Y10~15能够有效阻碍水分的垂向渗透,增大混掺层上部土壤质量含水率,在相同土壤水分入渗条件下,湿润体能获得较大的平均土壤质量含水率,有利用农作物根系对水分的吸收.

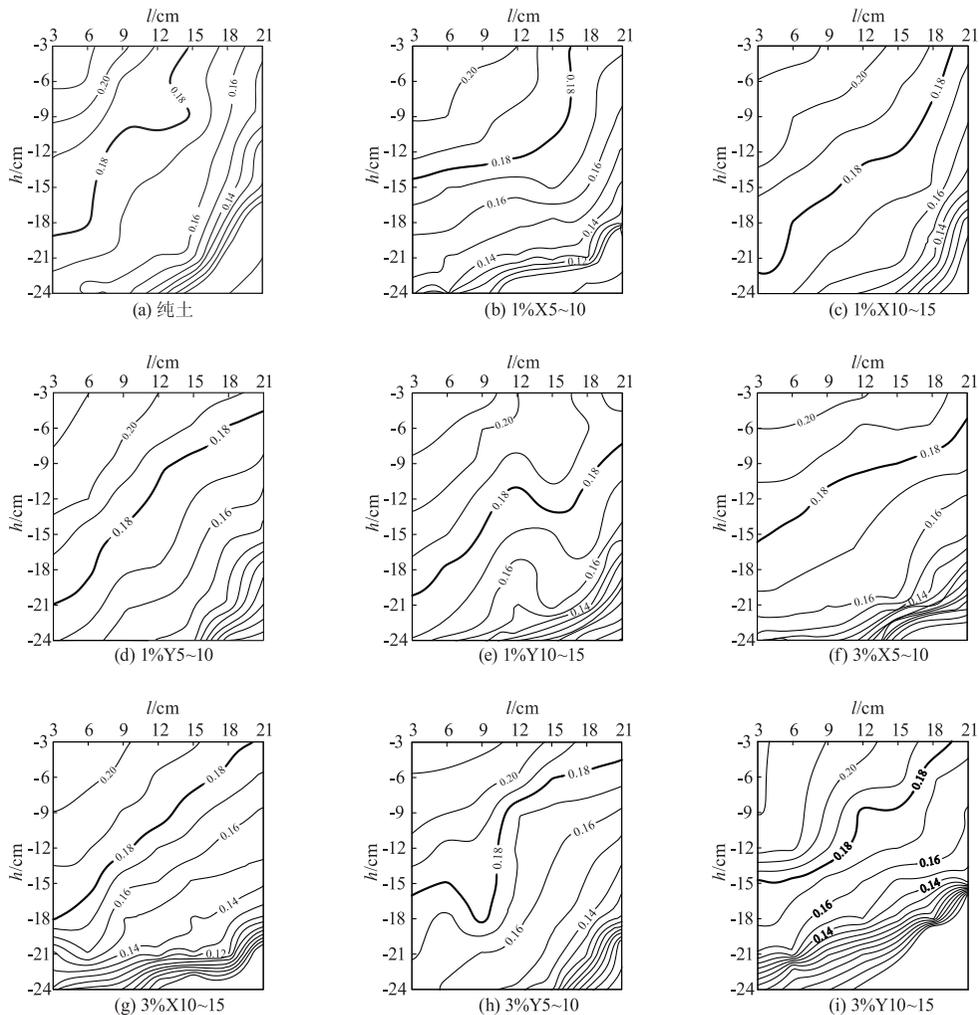


图4 不同处理土壤质量含水率等值线分布图
Fig.4 Soil water content contours in different treatments

3 结 论

通过在土壤中添加具有颗粒形态的玉米芯和片状形态的玉米叶,设置不同混掺比例及混掺层埋深,研究沟灌条件下秸秆颗粒形态对土壤水分运移及含水量分布的影响,得到如下结论:

1) 1%混掺比例中,处理 X10~15 的入渗率明显大于处理 X5~10, CK, Y5~10 和 Y10~15 的; 3%混掺比例中,入渗率按处理排序由大至小为 X5~10, X10~15, CK, Y5~10, Y10~15; 玉米芯的颗粒形态显著增大了土壤的入渗率,而玉米叶的片状形态有减小土壤入渗率的作用。

2) 在相同混掺比例条件下,玉米叶埋深(10, 15] cm 的入渗率均小于(5, 10] cm 的。玉米芯处理中,3%混掺比例时,埋深(10, 15] cm 的土壤水分入渗率小于(5, 10] cm 的; 1%混掺比例时,埋深(10, 15] cm 的土壤水分入渗率大于(5, 10] cm 的。

3) 玉米芯混掺埋深(10, 15] cm 能增大土壤的垂向运移距离,18%土壤质量含水率的等值线垂向距离明显大于埋深(5, 10] cm 的; 玉米叶不同埋深处理表明埋深(10, 15] cm 比(5, 10] cm 更能增大18%含水量等值线的水平距离,其中处理3% Y10~15 的土壤质量含水率为各处理中最大,而其垂向运移距离最短,说明该处理能够有效地阻碍水分的垂向渗透,增大混掺层上部土壤质量含水率。同时,采用 HYDRUS-2D 软件能够准确描述试验过程中的湿润锋运移特征,其模拟值与实测值误差均在3%以内。

参考文献 (References)

- [1] 龚振平, 杨悦乾. 作物秸秆还田技术与机具[M]. 北京:中国农业出版社, 2012:1-2.
- [2] ZHAO Shicheng, HE Ping, QIU Shaojun, et al. Long-term effects of potassium fertilization and straw return on soil potassium levels and crop yields in north-central China[J]. Field crops research, 2014, 169:116-122.
- [3] WANG X H, YANG H S, LIU J, et al. Effects of ditch-buried straw return on soil organic carbon and rice yields in a rice-wheat rotation system[J]. Catena, 2015, 127:56-63.
- [4] KUMAR A, KUMAR P, YADAV S K, et al. Effect of integrated nutrient management on yield and economics of pearl millet-wheat cropping system[J]. Environment and ecology, 2012, 30(1):57-59.
- [5] 王珍, 冯浩. 秸秆不同还田方式对土壤入渗特性及持水能力的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4):75-80.
- WANG Zhen, FENG Hao. Effect of straw-incorporation on soil infiltration characteristics and soil water holding capacity[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(4):75-80. (in Chinese)
- [6] 王增丽, 王珍, 冯浩. 秸秆粉碎氨化还田对土壤体积质量及持水特性的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11):211-215.
- WANG Zengli, WANG Zhen, FENG Hao. Effects of pulverized and ammoniated straw on soil bulk density and water-holding characteristics[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(11):211-215. (in Chinese)
- [7] 王增丽, 王珍, 冯浩. 预处理秸秆对土壤蒸发及秸秆分解率的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(9):816-821.
- WANG Zengli, WANG Zhen, FENG Hao. Effects of pretreated straws on soil evaporation and straw decomposition rate[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2013, 31(9):816-821. (in Chinese)
- [8] 王燕, 郑健, 冀宏, 等. 植物混掺物对甘肃景泰砂壤土入渗过程的影响[J]. 农业机械学报, 2010, 41(1):63-67.
- WANG Yan, ZHENG Jian, JI Hong, et al. Impacts of plant additive on the infiltration with sandy loam[J]. Transactions of the CSAM, 2010, 41(1):63-67. (in Chinese)
- [9] QIU Shaojun, JU Xiaotang, LU Xing, et al. Improved nitrogen management for an intensive winter wheat/summer maize double-cropping system[J]. Soil science society of america journal, 2012, 76(1):286-297.
- [10] ABRO S A, TIAN Xiaohong, WANG Xudong, et al. Decomposition characteristics of maize (*Zea mays* L.) straw with different carbon to nitrogen (C/N) ratios under various moisture regimes[J]. African journal of biotechnology, 2011, 10(50):10149-10156.
- [11] 张新燕, 蔡焕杰, 朱德兰. 沟灌条件下灌水沟入渗特性研究[J]. 中国农村水利水电, 2012(3):7-11.
- ZHANG Xinyan, CAI Huanjie, ZHU Delan. Experimental research on characteristics of two-dimensional infiltration in furrow irrigation[J]. China rural water and hydropower, 2012(3):7-11. (in Chinese)
- [12] AMER A M. Effects of water infiltration and storage in cultivated soil on surface irrigation[J]. Agricultural water management, 2011, 98(5):815-822.