

# 秸秆复合管水力性能初探

仵峰<sup>1,2</sup>, 楚运旺<sup>1</sup>, 宰松梅<sup>1,2</sup>, 王富斌<sup>1</sup>, 刘生东<sup>1</sup>

(1. 华北水利水电大学水利学院, 河南 郑州 450046; 2. 河南省节水农业重点实验室, 河南 郑州 450046)

**摘要:** 简述了秸秆复合管的制作方法, 进行了秸秆复合管地下灌溉田间测试, 研究了秸秆复合管埋地后的灌水效果。试验以秸秆复合管的秸秆掺量和管长为主要因素, 分析了出流量、入渗速率和灌水均匀度等灌水指标。结果表明: 在秸秆掺量为5%、7%、9%水平下, 管长为3.5 m的秸秆复合管单位长度累计出流量比管长为1.0 m的秸秆复合管分别高出71.66%、77.52%、8.14%, 灌水均匀度分别减小3.60%、5.45%、13.72%。在管长为1.0 m和3.5 m水平下, 秸秆掺量为7%和9%的秸秆复合管单位长度累计出流量分别比秸秆掺量为5%时减少了12.60%、15.80%和9.09%、18.70%。秸秆掺量为7%时, 不同管长的秸秆复合管入渗速率的波动程度最小, 出水性能相对稳定。秸秆掺量为7%时, 管长为1.0 m秸秆复合管的灌水均匀度达到85.00%, 秸秆掺量为5%时, 管长为3.5 m秸秆复合管的灌水均匀度达到81.38%。综合考虑出流量、入渗速率、均匀度等试验指标, 认为秸秆复合管具备作为灌水毛管用于田间灌溉的条件, 秸秆掺量在5%~7%时, 秸秆复合管的水力性能最优。

**关键词:** 秸秆复合管; 制备; 出流量; 入渗速率; 均匀度

**中图分类号:** S277 **文献标志码:** A

## Preliminary study on hydraulic performance of straw composite pipe

WU Feng<sup>1,2</sup>, CHU Yunwang<sup>1</sup>, ZAI Songmei<sup>1,2</sup>, WANG Fubin<sup>1</sup>, LIU Shengdong<sup>1</sup>

(1. School of water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, Henan 450046, China;  
2. Henan Key Laboratory of Water-saving Agriculture, Zhengzhou, Henan 450046, China)

**Abstract:** A new type of irrigation pipe named straw composite pipe (SCP) was developed. The manufacturing method of SCP was introduced, and the field test of subsurface irrigation using SCP was carried out to study the irrigation effect of SCP after it was implemented underground. In the experiment, the main factors were the straw content and the length of SCP, and the irrigation indexes such as accumulated flow rate, infiltration rate, and uniformity of irrigation were analyzed. Results showed that at the levels of straw content of 5%, 7%, and 9%, the accumulated flow rate per unit length of SCP with a length of 3.5 m was 71.66%, 77.52%, and 8.14% higher than that of SCP with a length of 1.0 m, the irrigation uniformity of SCP with a length of 3.5 m was 3.60%, 5.45%, and 13.72% lower than that of SCP with a length of 1.0 m, respectively. With tube lengths of 1.0 m and 3.5 m, the cumulative flow rate per unit length of a SCP with a straw content at 7% and 9% decreased by 12.60%, 15.80%, and 9.09%, 18.70%, respectively, compared with that of the straw content of 5%. When the straw content was 7%, the fluctuation of infiltration rate of the two tube lengths of SCP was the smallest, and the water discharge performance was relatively stable. When the content of straw was 7%, the uniformity of irrigation of SCP with a length of 1.0 m reached 85.00%, and when the content of straw was 5%, the uniformity of irrigation of SCP with a length of 3.5 m reached 81.38%. The test indexes of accumulated flow rate, infiltration rate, and uniformity were considered, it was showed that SCP had the condition of being used as irrigation capillary for field irrigation. When the straw content was 5%~7%, the hydraulic performance of SCP was the best.

**Keywords:** straw composite pipe (SCP); preparation; flow rate; infiltration rate; uniformity

中国是一个农业大国,同时又是一个水资源匮乏的国家,每年消耗在农田灌溉上的水量占全社会用水总量 50% 以上。中国的灌溉水利用系数仅为 0.51<sup>[1]</sup>,与发达国家仍存在一定差距,亟需探寻一种符合中国国情的节水灌溉技术,缓解农业用水的压力。地下灌溉由来已久,灌溉水经埋设在距地表 10~40 cm 处的渗水毛管或滴头对作物根区进行灌溉<sup>[2-4]</sup>,与地面灌溉相比可节水 70%~80%<sup>[5]</sup>。研究表明,地下灌溉可调节土壤理化性状,提高土壤孔隙度,改善耕作层土壤结构<sup>[6-7]</sup>,改良土壤的水热条件<sup>[8]</sup>,降低管理成本,提高作物品质,促进作物增产;且灌溉管网埋于地下,可节省土地,提高土地利用率<sup>[9]</sup>。但由于地下灌溉存在滴头易堵塞<sup>[10]</sup>、维修难度大、毛管回收成本高等问题<sup>[11]</sup>,限制了其发展。近几年来,涌现出负压灌溉及痕量灌溉等新型灌溉技术<sup>[12-13]</sup>,但这些技术均有其适用条件,甚至还存在部分技术难题,推广应用尚存争议<sup>[14]</sup>。

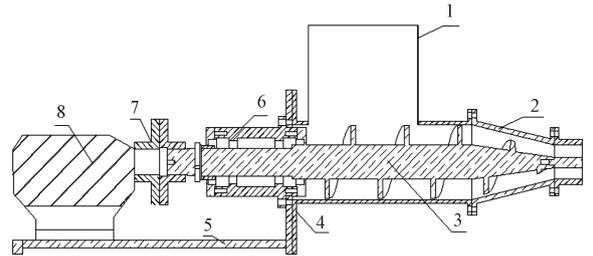
秸秆作为农田产物之一,其产量占比可达作物生物总量的 50% 左右<sup>[15]</sup>,随着粮食的连年增产,中国作物秸秆年产量已超出  $1 \times 10^9$  t<sup>[16]</sup>。秸秆“五化”<sup>[17]</sup>为秸秆的综合利用提供了新思路,其中秸秆还田(秸秆肥料化)是维持作物生产力和培肥地力的有效措施<sup>[18-26]</sup>,也是秸秆资源化利用的主要手段之一。但由于秸秆直接还田存在着秸秆与土壤的混合度差,影响机械耕作和作物出苗<sup>[27]</sup>;微生物与作物争夺速效氮素影响作物生长<sup>[28]</sup>;以及秸秆直接还田可能带来的病虫害隐患等问题<sup>[29]</sup>,使其难以实现全量还田或者连续还田。目前,中国秸秆还田占比 43.2%<sup>[30]</sup>,与美国(68%)、英国(73%)以及日本(75%)还存在较大差距<sup>[31-32]</sup>。

综合考虑地下灌溉与秸秆还田两种技术的优势与不足,参照在秸秆材料化利用方面已有的研究结论<sup>[33-34]</sup>,自主研发了秸秆复合管成型机,用于制作新型的地下灌溉绿色管材——秸秆复合管。秸秆复合管应用于地下灌溉,既可达到灌溉的目的,又能够实现对作物秸秆的集中处理,在开发一种新型节水灌溉模式的同时,开辟了一种秸秆还田的新途径。本文对埋于田间的秸秆复合管进行了初步灌水试验,研究了利用秸秆复合管进行地下灌溉的可行性。针对秸秆掺量及秸秆复合管长度 2 个因素,对秸秆复合管的水力性能进行了初步分析,为以秸秆复合管为核心的秸秆地下灌溉技术的推广应用奠定基础。

## 1 材料与方法

试验于 2019 年 1 月 14 日至 3 月 24 日在河南省节水农业重点实验室进行。所用秸秆为试验田中收获的前茬玉米秸秆,玉米品种为郑单 958。玉米收获后,用秸秆还田机将其打碎,并收集 3~8 cm 长的秸秆碎段备用。制作秸秆复合管的土壤取自试验田中的表层土,土壤类型为沙质壤土,干容重为  $1.4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

试验所需的秸秆复合管由自主研发的秸秆复合管成型机制成。秸秆复合管成型机组成如图 1 所示,主要由入料口、外壳、螺旋轴、支架、底座、轴承、联轴器以及电机等 8 部分组成,其中电机是整个装置的动力来源,为螺旋轴的转动提供动力;螺旋轴为变径螺旋轴,轴毂上附有等宽圆锥螺旋叶片;螺旋轴至无缝钢管与圆锥外壳连接处改为由直径 2.8 cm 的圆柱状轴毂连接,外壳依据螺旋轴形状设计为圆锥状,其前端出料口处用法兰将圆锥外壳和长 10 cm 内径 6.0 cm 的无缝钢管连接。为了实现电机转速的精准控制,配备了减速比为 23:1 的减速机以及型号为 Z2400-3R7G/5R5P 的电流矢量型变速调频器。



1.入料口;2.外壳;3.螺旋轴;4.支架;5.底座;  
6.轴承;7.联轴器;8.电机

1. Feeding inlet; 2. Shell; 3. Spiral shaft; 4. Bracket; 5. Base;  
6. Bearings; 7. Coupling; 8. Motor

图 1 秸秆复合管成型机的组成结构

Fig.1 Composition and structure of straw composite pipe forming machine

### 1.1 秸秆复合管的制备材料及性能

秸秆复合管是由秸秆、水、土壤混合物经秸秆复合管成型机挤压而成的中空管道,如图 2 所示。秸秆复合管内径  $28_{-0.64}^{+0.98}$  mm,外径  $60_{+0.03}^{+1.16}$  mm,质地均匀,内壁光滑。管壁上分布有均匀的微小裂缝,具有较好输水、透水条件,具备成为一种新型灌溉材料的潜质。

观察发现,经秸秆复合管成型机混合挤压之后,秸秆主要以较小的条块状秸秆和纤维状的秸秆

丝2种形态存在。条块状秸秆在复合管中作为骨架,维系复合管的断面稳定,使其在过水状态下不易垮塌。纤维状的秸秆丝则可起连接作用,增加了复合管的抗拉性能,使其不易发生断裂。根据试验要求不同,可以制作出不同长度的秸秆复合管。秸秆复合管埋于作物根层附近,灌溉时,水流经管壁及微小裂缝渗出,扩散至周围土壤,从而达到灌溉的目的。

### 1.2 秸秆复合管的性能试验方法

为探究秸秆复合管能否应用于灌溉及其灌水效果等问题,以秸秆掺量及秸秆复合管长度为试验因素进行了田间小区灌水试验,研究秸秆复合管的水力性能。经预试验可知,秸秆掺量的合理范围在9%(质量百分数)以内,试验选取3个秸秆掺量分别为5%、7%和9%;受试验条件限制,初步试验选取的2个管长分别为1.0 m和3.5 m。试验开始前对所取用来制作秸秆复合管的土壤以及秸秆进行含水率的测量,并用薄膜对其进行覆盖处理,减少期间水分蒸发,以保证所测含水率的准确性。经预试验得知,混合料的综合含水率在22%(质量含水率)左右时,秸秆复合管的成型效果良好。试验前,调整混合料的初始含水率,当其含水率为22%时进行秸秆复合管的制作。

为避免电机转速、埋管沟宽及断面规格、埋管间距等因素对试验结果产生影响,试验中电机转速定为 $50 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,埋管沟等腰梯形断面为沟深16 cm、

下底宽度10 cm、上口宽度15 cm。复合管埋深10 cm(复合管的顶端距地表的距离),管距50 cm。埋管时,管与沟之间的空隙及其上方的回填土进行人工压实。

每组试验设置3个重复,以平均值作为试验结果。试验因素水平布置如表1所示。

为排出秸秆复合管内空气,将自带排气功能的输水管(管壁上方嵌入一根与外界连通的內径为6 mm的塑料软管)插入秸秆复合管中,用粘土对连接处进行密封。试验前先对复合管进行充水,用烧杯在输水管道另一端向管内进行充水,直至排气管开始滴水,用止水夹封闭排气管,连通供水管道开始试验。利用马氏瓶原理,采用自制的恒压供水装置对秸秆复合管进行供水,压力水头为0.5 m。试验开始后,每隔10 min记录一次供水量,直至试验结束。

灌水试验时间控制为2 h,灌水结束后,对地表土壤湿润宽度进行测量,利用地表土壤湿润面状况,对灌水均匀度进行评价。采用等间距法对地表湿润宽度进行测量,管长1.0 m、3.5 m的秸秆复合管测量间距分别为0.2、0.5 m。

灌水均匀度计算公式如下:

$$Cu = \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |b_i - b|}{nb} \right) \times 100\% \quad (1)$$

式中, $Cu$ 为均匀度; $b_i$ 为*i*测点地表湿润宽度(m); $b$ 为各测点地表平均湿润宽度(m); $n$ 为试验测点总数。

## 2 结果与分析

### 2.1 秸秆复合管的出流量

由于秸秆复合管埋于地下,其出流量难以直接测量。根据水量平衡原理,以自制的恒压供水装置的供水量作为秸秆复合管地下灌溉的出流量。单位管长上各组单位长度秸秆复合管的10 min出流量( $\text{mL} \cdot \text{m}^{-1}$ )及累计出流量( $\text{mL} \cdot \text{m}^{-1}$ )统计见表2。

由表2可知,不同秸秆掺量及管长对单位时段内秸秆复合管单位管长的10 min出流量影响规律大致相同。灌水前期单位管长的10 min出流量较大,随灌水时间的延长,出流量逐渐减小,并趋于稳定。秸秆复合管的管长对其出流量具有较大影响。秸秆掺量为5%、7%、9%水平下,管长为3.5 m的秸秆复合管单位长度的累计出流量比管长为1.0 m的分别高出71.66%、77.52%、8.14%,表明随着管长的增长,单位管长的累计出流量有明显增大的趋势,即



图2 秸秆复合管试样

Fig.2 Straw composite pipe sample

表1 因素水平表

Table 1 Factor level table

处理 Treatment	秸秆掺量 Straw content/%	管长 Length/m
T <sub>1</sub>	5	1.0
T <sub>2</sub>	7	1.0
T <sub>3</sub>	9	1.0
T <sub>4</sub>	5	3.5
T <sub>5</sub>	7	3.5
T <sub>6</sub>	9	3.5

表 2 单位长度秸秆复合管 10 min 出流量统计

Table 2 Statistics of 10 min output flow of unit length SCP

处理 Treatment	时间间隔 Time interval/min												单位管长累 计出流量 Accumulated flow per unit pipe length ( $\text{mL} \cdot \text{m}^{-1}$ )
	0~10	10~20	20~30	30~40	40~50	50~60	60~70	70~80	80~90	90~100	100~110	110~120	
T <sub>1</sub>	4998.90	3174.06	2361.84	1969.72	1874.54	1785.19	1802.44	1689.80	1644.79	1666.59	1584.64	1730.71	26283.22
T <sub>2</sub>	3254.38	2184.00	1975.54	1827.26	1701.81	1655.30	1759.63	1876.75	1729.99	1696.75	1678.40	1632.85	22972.66
T <sub>3</sub>	4022.93	2859.29	3646.92	3103.74	2982.08	2969.15	2852.11	2608.39	2286.98	2189.05	2173.91	2224.77	33919.31
T <sub>4</sub>	7274.97	5976.48	5724.07	4245.76	3703.24	3450.52	2984.14	3183.97	2541.49	2024.45	2000.35	2008.32	45117.75
T <sub>5</sub>	7105.71	6481.90	4683.62	3089.71	3767.24	3232.96	2257.14	1925.71	2158.90	2211.43	1959.64	1907.40	40781.38
T <sub>6</sub>	6728.07	5011.43	3511.43	3718.30	3057.97	2329.29	1960.00	2340.21	2247.35	2113.46	1913.38	1750.48	36681.35

注: \* T<sub>3</sub> 试验中距进水端 0.2 m 处发生管涌。

Note: Piping occurred at 0.2 m from the intake in T<sub>3</sub> test.

管长越长,出流量越大。其中秸秆掺量在 5% 和 7% 水平下,3.5 m 秸秆复合管比 1.0 m 秸秆复合管单位长度累计出流量大 70% 以上,可能是由于秸秆复合管表面裂缝的累积效应所致,具体原因仍需进一步深入研究。而秸秆掺量为 9% 时,3.5 m 与 1.0 m 秸秆复合管单位长度的累计出流量增加比率与前两组相比存在较大差距,主要是处理 T<sub>3</sub> 在灌水过程中发生了管涌,累计出流量偏大导致其计算值偏小,为保证试验数据系列的完整性,处理 T<sub>3</sub> 灌水试验数据以前 20 min 参与分析,处理 T<sub>2</sub> 则整个试验过程均参与试验分析。

此外,秸秆掺量的变化对秸秆复合管的单位长度累计出流量也有一定影响,与掺量为 5% 的秸秆复合管相比,掺量为 7% 和 9% 时,1.0 m 和 3.5 m 长的秸秆复合管单位长度累计出流量分别少了 12.60%、15.80% 和 9.09%、18.70%。秸秆掺量为 5% 时,秸秆复合管单位长度的累计出流量最大,出流量相对稳定,渗水效果最好。

## 2.2 秸秆复合管的入渗速率

根据秸秆复合管各个时段的出流量计算出对应时段内的入渗速率,秸秆复合管入渗速率随时间变化过程见图 3。

由图 3 可知,管长为 3.5 m 时比管长为 1.0 m 时前期入渗速率大,且波动幅度也较大;随着灌水时间的增长,2 组管长的入渗速率均渐趋平稳,最终均接近于稳定入渗。整个秸秆复合管入渗过程可分为 3 个阶段:初始入渗阶段(0~30 min)、波动阶段(30~90 min)、稳定入渗阶段(90~120 min)。初始入渗阶段,各组的入渗速率均明显下降;波动阶段,各组入渗速率下降趋势变缓,但入渗速率波动幅度较大;灌水 90 min 后,各组入渗速率均趋于平稳,达到稳定入渗。处理 T<sub>3</sub> 入渗速率在 20~30 min 时发

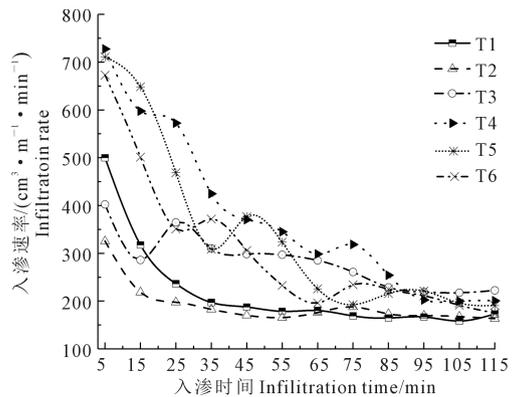


图 3 秸秆复合管入渗速率随时间变化曲线

Fig.3 Infiltration rate change of SCP

生突变,致使其入渗速率与处理 T<sub>1</sub> 和 T<sub>2</sub> 产生较大差异,这主要是因为试验进行到 20 min 时,其中 1 根秸秆复合管在距管头 20 cm 处发生了管涌,另外 2 根虽未发生管涌,但在试验过程中发现其出流量也明显大于处理 T<sub>1</sub> 和 T<sub>2</sub>,导致该时间段内入渗速率变化波动较大,具体原因有待深入研究。处理 T<sub>3</sub> 灌水进行到 40 min 时,发现灌水区域表层土内有蚯蚓活动,进而引起灌水量有较大波动,移除蚯蚓后,灌水恢复正常。

表 3 为各处理的秸秆复合管初始入渗速率、稳定入渗速率和平均入渗速率统计。综合分析图 3、表 3 可知,秸秆复合管的初始入渗速率为 247.13~632.52  $\text{mL} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ ,稳定入渗速率为 165.67~221.87  $\text{mL} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 。秸秆复合管的入渗速率和秸秆掺量存在一定联系。随着秸秆掺量的增大,平均入渗速率趋于减小,秸秆掺量为 5% 时,秸秆复合管的平均入渗速率最大。处理 T<sub>3</sub> 初始入渗速率明显大于处理 T<sub>2</sub>,表明处理 T<sub>3</sub> 发生管涌之前其入渗速率就已经发生突变。入渗速率的波动程度,反映了秸秆复合管在整个灌水过程中的稳定程度,入渗速率变化越小,说明秸秆复合管的水力性能越佳。

排除试验以外因素影响,处理  $T_2$  和  $T_3$  在整个灌水过程中,入渗速率的波动幅度最小,说明该两个处理秸秆复合管的水力性能比较稳定,即秸秆掺量为 7% 时,秸秆复合管的水力性能最为稳定。此外,管长对秸秆复合管的平均入渗速率和稳定入渗速率也有较大的影响,管长为 3.5 m 时比管长为 1.0 m 时单位管长的平均入渗速率和稳定入渗速率分别高出 47.38% 和 11.68%。

### 2.3 秸秆复合管的渗水均匀度

灌水试验结束后,对秸秆复合管进行地表湿润宽度统计,结果如图 4 所示。

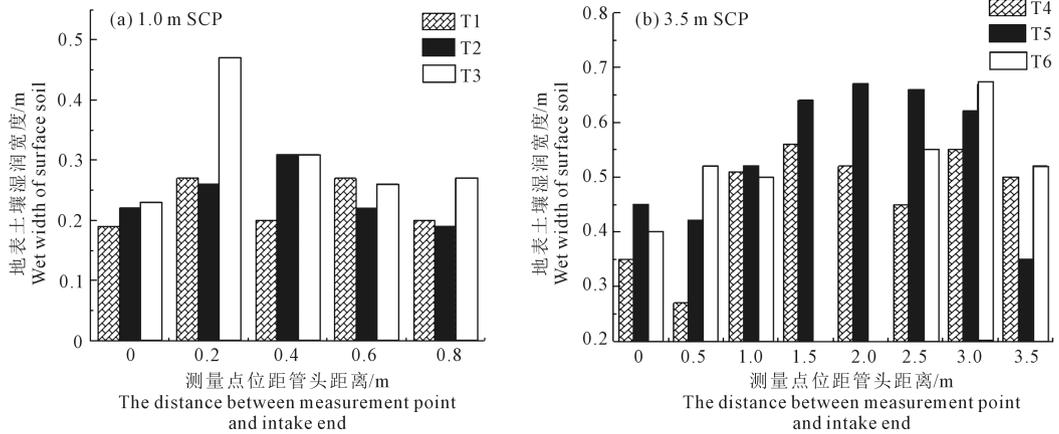


图 4 不同位置处地表湿润宽度

Fig.4 Wetwidth of surface at different positions

由图 4 可知,随着秸秆掺量的增加,地表湿润宽度总体上呈增加趋势。处理  $T_3$  试验的地表湿润宽度与试验中管涌出现有关,管涌的出现造成了地表湿润宽度显著增加。

通过公式(1)对秸秆复合管的灌水均匀度进行计算,结果如表 4 所示。

由表 4 可知,灌水结束时秸秆复合管灌水均匀度在 67.09%~85.00% 之间,表明秸秆复合管具备成为一种新型灌溉材料的潜质,在一定程度上能够满足农田的灌溉需求。在管长为 1.0 m 时,秸秆掺量为 7% 时秸秆复合管的灌水均匀度最高(85.00%);而管长为 3.5 m 时,秸秆掺量 5% 时秸秆复合管的灌水均匀度最高(81.38%)。秸秆复合管长度相同时,随着秸秆掺量的变化,其灌水均匀度的变化规律不尽一致。处理  $T_3$  单位长度累计出流量比处理  $T_1$  和  $T_2$  分别高出 29.05%、47.65%,而灌水均匀度却分别降低 6.78%、7.41%,主要是由于灌水试验开始后发生管涌,形成地表积水,加速了该区域湿润锋的扩散速度,导致测量的地表湿润宽度值偏大,灌水均匀度偏低。处理  $T_6$  灌水均匀度也显著低于处理  $T_4$

表 3 入渗速率统计/( $\text{mL} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ )

Table 3 Infiltration rate statistics

处理 Treatment	初始入渗速率 Initial infiltration rate	稳定入渗速率 Stable infiltration rate	平均入渗速率 Average infiltration rate
$T_1$	351.16	165.67	219.03
$T_2$	247.13	168.45	191.44
$T_3$	350.97	221.87	282.66
$T_4$	632.52	214.36	375.98
$T_5$	609.04	205.93	339.84
$T_6$	508.36	200.62	305.68

表 4 灌水均匀度统计

Table 4 Statistics of irrigation uniformity

处理 Treatment	灌水均匀度 Irrigation uniformity/%
$T_1$	84.42
$T_2$	85.00
$T_3$	78.70
$T_4$	81.38
$T_5$	80.37
$T_6$	67.09
均值 Mean value	79.65

注: $T_3$ 灌水过程中发生管涌,所测灌水均匀度值失真,故其未参与均值计算。

Note: Piping occurred during  $T_3$  irrigation, the measured irrigation uniformity was not accurate and did not participate in the mean calculation.

和  $T_5$ ,且灌水过程未发生异常,其主要原因可能与秸秆掺量有关。处理  $T_6$  秸秆掺量最大(9%),在管材制作过程中,成型难度较大,且由于管长的要求,使这一问题变得尤为突出,导致最终测得的灌水均匀度仅为 67.09%,具体造成其灌水均匀度偏低的原

因,有待深入研究。

管长对秸秆复合管的灌水均匀度也有较大影响,秸秆掺量为 5%、7%、9% 条件下,管长为 3.5 m 时秸秆复合管的灌水均匀度比管长为 1.0 m 时分别降低 3.60%、5.45%、13.72%。

### 3 讨论与结论

秸秆复合管由秸秆、土壤以及水按一定比例混合,经秸秆复合管成型机挤压成型。经前期研究以及试验验证,对秸秆复合管的性能进行了初步研究,表明将秸秆复合管用于灌溉具有一定的可行性。主要结论如下:

(1)管长对秸秆复合管的出流量和灌水均匀度影响明显。在秸秆掺量为 5%、7%、9% 水平下,处理  $T_4$ 、 $T_5$ 、 $T_6$  的单位长度累计出流量比处理  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  分别增加 71.66%、77.52%、8.14%,灌水均匀度分别减小 3.60%、5.45%、13.72%。管长对秸秆复合管的灌水效果具有较大影响,而秸秆复合管管长对其水力性能的影响机理仍需深入研究。

(2)秸秆掺量对秸秆复合管的出流量、入渗速率以及灌水均匀度均有影响。随着秸秆掺量的增加,单位长度秸秆复合管的累计出流量趋于减小。管长为 1.0m 和 3.5 m 时,秸秆掺量为 7% 和 9% 的秸秆复合管单位长度累计出流量分别比秸秆掺量为 5% 时减少了 12.60%、15.80% 和 9.09%、18.70%;秸秆掺量为 7% 时,2 个管长秸秆复合管的入渗速率波动最小,水力性能最为稳定。在秸秆掺量为 7% 时,1.0 m 长的秸秆复合管灌水均匀度达到最高,在秸秆掺量为 5% 时,3.5 m 长秸秆复合管灌水均匀度达到最高,分别为 85.00% 和 81.38%。

(3)综合考虑出流量、入渗速率、均匀度等试验指标,认为秸秆复合管具备作为灌水毛管用于田间灌溉的条件,秸秆掺量在 5%~7% 时,秸秆复合管的水力性能最优。

秸秆复合管的研发是秸秆还田及地下灌溉两项技术的集成与创新。秸秆复合管以秸秆为骨架,原料均来自于田间,有望实现秸秆全量还田和持续还田,并为传统秸秆还田导致的作物出苗效果不佳、土壤碳氮比失调、集中调控与防治病虫害创造了便捷条件。与传统地下灌溉的一年铺设、多年使用模式相比,秸秆复合管的应用更具可变性和灵活性。试验证实了秸秆复合管用于田间灌溉具备一定的可行性,秸秆复合管地下灌溉有望成为一种新

型节水灌溉方式。但将秸秆复合管应用于地下灌溉的研究尚处于萌芽阶段,存在诸多问题亟需解决,如管材的水力性能、耐久性,节水效果以及秸秆腐解的碳氮比调节等,仍需进行深入研究。

### 参考文献:

- [1] 吴普特,孙世坤,王玉宝,等.作物生产水足迹量化方法与评价研究[J].水利学报,2017,48(6):651-660,669.
- [2] 王淑红,张玉龙,虞娜,等.保护地渗灌管的埋深对土壤水盐动态及番茄生长的影响[J].中国农业科学,2003,(12):1508-1514.
- [3] 仵峰.地下滴灌土壤水分运动特性与系统设计参数研究[D].咸阳:西北农林科技大学,2010.
- [4] 张霞,张育林,刘丹,等.种植方式和耕作措施对土壤结构与水分利用效率的影响[J].农业机械学报,2019,50(3):250-261.
- [5] 逢焕成.我国节水灌溉技术现状与发展趋势分析[J].中国土壤与肥料,2006,(5):1-6.
- [6] 刘作新,杜尧东.日光温室渗灌效果研究[J].应用生态学报,2002,13(4):409-412.
- [7] 高鹏,李增嘉,杨慧玲,等.渗灌与漫灌条件下果园土壤物理性质异质性及其分形特征[J].水土保持学报,2008,(2):155-158.
- [8] 刘洪波,张江辉,白云岗,等.不同节水灌溉技术对香梨地土壤温度的影响[J].干旱地区农业研究,2013,31(3):66-73.
- [9] 王淑红,张玉龙,虞娜,等.渗灌技术的发展概况及其在保护地中应用[J].农业工程学报,2005,21(S1):92-95.
- [10] 仵峰,范永申,李辉,等.地下滴灌灌水器堵塞研究[J].农业工程学报,2004,20(1):80-83.
- [11] Morey B, Zhao M, Zhu D L. The human dimensions of water saving irrigation: lessons learned from Chinese smallholder farmers[J]. Agriculture and Human Values,2015,32(2):347-360.
- [12] Zhao X J, Gao X, Zhangs X, et al. Improving the growth of rapeseed (*Brassica chinensis* L.) and the composition of rhizosphere bacterial communities through negative pressure irrigation[J]. Water, Air & Soil Pollution, 2019, 230(1):1-9.
- [13] Cui H B, Ren S M, Yang P L, et al. Analysis of soil water wetting and dynamics in trace quantity irrigation[C]//Li D L, Chen Y Y. Computer and Computing Technologies in Agriculture VIII. Cham: Springer, 2014:489-494.
- [14] 张国祥,赵爱琴.“痕量灌溉”理论支撑与技术特点的质疑[J].农业工程学报,2015,31(6):1-7.
- [15] 伍玉鹏,彭其安, Muhammad Shaaban,等.秸秆还田对土壤微生物影响的研究进展[J].中国农学通报,2014,30(29):175-183.
- [16] 石祖梁,邵宇航,王飞,等.我国秸秆综合利用面临形势与对策研究[J].中国农业资源与区划,2018,39(10):30-36.
- [17] 张晓文,赵改宾,杨仁全,等.农作物秸秆在循环经济中的综合利用[J].农业工程学报,2006,22(S1):107-109.
- [18] Wang J Z, Wang X J, Xu M G, et al. Crop yield and soil organic matter after long-term straw return to soil in China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2015, 102(3):371-381.
- [19] 梅楠,刘琳,隋鹏祥,等.秸秆还田方式对土壤理化性质及玉米产量的影响[J].玉米科学,2017,25(6):87-94.

- [20] 陈玉章, 柴守玺, 程宏波, 等. 秸秆还田结合秋覆膜对旱地冬小麦耗水特性和产量的影响[J]. 作物学报, 2019, 45(2): 256-266.
- [21] 隋鹏祥, 张文可, 梅楠, 等. 不同秸秆还田方式对春玉米产量、水分利用和根系生长的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 255-261.
- [22] 朱玉芹, 岳玉兰. 玉米秸秆还田培肥地力研究综述[J]. 玉米科学, 2004, 12(3): 106-108.
- [23] Yang S H, Xiao Y N, Xu J Z, et al. Effect of straw return on soil respiration and NEE of paddy fields under water-saving irrigation[J]. PLoS ONE, 2018, 13(10): 1932-6203.
- [24] Xia L L, Shu K L, Benjamin W, et al. Trade-offs between soil carbon sequestration and reactive nitrogen losses under straw return in global agroecosystems [J]. Global Change Biology, 2018, 24(12): 5919-5932.
- [25] Zhao H L, Abdul GS, Li S, et al. Effect of straw return mode on soil aggregation and aggregate carbon content in an annual maize-wheat double cropping system [J]. Soil & Tillage Research, 2018, 175: 178-186.
- [26] Tang H M, Xiao X P, Li C, et al. Effects of recycling straw of different winter covering crops on rhizospheric microbial community functional diversity in a double-cropped paddy field [J]. Agricultural Science & Technology, 2018, 38(18): 6559-6569.
- [27] Dai X Q, Li Y S, Ouyang Z, et al. Organic manure as an alternative to crop residues for no-tillage wheat-maize systems in North China Plain [J]. Field Crops Research, 2013, 149: 141-148.
- [28] 黄婷苗, 郑险峰, 侯仰毅, 等. 秸秆还田对冬小麦产量和氮、磷、钾吸收利用的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 853-863.
- [29] 吕开宇, 仇焕广, 白军飞, 等. 中国玉米秸秆直接还田的现状与发展 [J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(3): 171-176.
- [30] 王亚静, 王飞, 石祖梁, 等. 基于农业供给侧结构性改革背景的秸秆资源与利用研究 [J]. 中国农业资源与区划, 2017, 38(6): 13-20.
- [31] 王亚静, 王红彦, 高春雨, 等. 稻麦玉米秸秆残留还田量定量估算方法及应用 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(13): 244-250.
- [32] 王红彦, 王飞, 孙仁华, 等. 国外农作物秸秆利用政策法规综述及其经验启示 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(16): 216-222.
- [33] Marwen B, Naima B, Dashnor H, et al. Physical characterization of natural straw fibers as aggregates for construction materials applications [J]. Materials, 2014, 7(4): 3034-3048.
- [34] Yin J M, Wang S Y, Du Y F. Intensifying the road performance of asphalt concrete by matching the size distribution of short-thin straw pieces and aggregate framework [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27(5): 1-9.

(上接第50页)

### 参考文献:

- [1] 李荣荣, 熊黑钢, 段鹏程, 等. 干旱区平原水库下游盐渍化土壤光谱时空分布特征分析 [J]. 土壤通报, 2016, 47(3): 532-536.
- [2] 叶自桐. 利用盐分迁移函数模型研究入渗条件下土层的水盐动态 [J]. 水利学报, 1990, 21(2): 1-9.
- [3] 石元春, 李韵珠. 盐渍土的水盐运动 [M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1986, 172-228.
- [4] 王水献, 周金龙, 董新光. 地下水浅埋区土壤水盐试验分析 [J]. 新疆农业大学学报, 2004, 27(3): 52-56.
- [5] 陈亚新, 史海滨, 田存旺. 地下水与土壤盐渍化关系的动态模拟 [J]. 水利学报, 1997, 28(5): 78-84.
- [6] 李开明, 刘洪光, 石培君, 等. 明沟排水条件下的土壤水盐运移模拟 [J]. 干旱区研究, 2018, 35(6): 1299-1307.
- [7] 夏江宝, 赵西梅, 赵自国, 等. 不同潜埋深下土壤水盐运移特征及其交互效应 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(15): 93-100.
- [8] 许学工, 郭洪海, 彭慧芳. 平原水库对周边地下水及土壤的影响——以黄河三角洲耿井水库为例 [J]. 中国环境科学, 2004, 24(1): 115-119.
- [9] 毛海涛, 王正成, 黄庆豪, 等. 水库防渗措施及坝后排水沟距离对周边农田地下水埋深的影响 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(11): 98-107.
- [10] 毛海涛, 侍克斌, 李建华, 等. 西北干旱区平原水库防治土壤盐渍化渗流计算 [J]. 人民黄河, 2009, 31(11): 115-117.
- [11] 毛海涛, 王晓菊, 邵东国, 等. 平原水库防(截)渗体与坝后土壤盐碱化的影响规律 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2015, 48(6): 789-794.
- [12] 毛海涛, 樊哲超, 何华祥, 等. 干旱、半干旱区平原水库对坝后盐渍化的影响 [J]. 干旱区研究, 2016, 33(1): 74-79.
- [13] 毛海涛, 黄庆豪, 龙顺江, 等. 土壤盐渍化治理防护毯的研发及试验 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(17): 121-127.
- [14] 潘延鑫, 罗纨, 贾忠华, 等. 基于 HYDRUS 模型的盐碱地土壤水盐运移模拟 [J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(1): 135-142.
- [15] 石培君, 刘洪光, 何新林, 等. 基于 HYDRUS 模型的暗管排水水盐运移模拟 [J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(3): 224-231.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50288-2018 灌溉与排水工程设计规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
- [17] 刘明明, 段磊, 张琛, 等. 一维水分运移模型水力参数敏感性分析 [J]. 中国农村水电, 2019, (5): 131-135.