文章编号:1000-7601(2022)05-0105-11

doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2022.05.12

地埋式橡塑渗灌滴头的研制及其性能测试

HASSANN Butera,何家俊,刘艳伟,杨启良,苗为伟

(昆明理工大学现代农业工程学院,云南昆明 650500)

摘 要:针对橡塑渗灌管变异系数高、在线源式灌溉过程中水头损失大等问题,本文以橡塑渗灌管为柱状出流面,再结合迷宫流道技术设计了一种点源式灌溉的地埋式橡塑渗灌滴头。通过水力性能测试、短周期抗堵塞试验以及土壤入渗试验对滴头性能进行了分析。结果表明,滴头流量变异系数为4.17%,压力-流量关系式为q=0.6435h^{0.4161},符合国家生产标准,并具备一定的压力补偿性能;在3种泥沙浓度(W1=0.5g·L⁻¹,W2=0.1g·L⁻¹,W3=1.5g·L⁻¹)、100 kPa工作压力下,滴头有效灌溉次数分别为15、11、5次,达到灌水器抗堵塞性能平均标准;将滴头深埋30 cm进行土壤入渗试验,在100 kPa工作压力下,未出现深层渗漏现象,湿润锋在580 min 后到达土壤表面,可有效减少灌溉水蒸发,节约水资源。该地埋式橡塑渗灌滴头水力性能优秀,抗堵塞性能良好,湿润体体积大,土壤含水率分布均匀,可广泛适用于果园灌溉以及科研试验等。

关键词:橡塑渗灌滴头;地下渗灌;迷宫流道;堵塞;水力性能

中图分类号:S275.4 文献标志码:A

Development and hydraulic performance test of subsurface direct-insertion rubber-plastic infiltration dripper

HASSANN Butera, HE Jiajun, LIU Yanwei, YANG Qiliang, MIAO Weiwei

(Faculty of Modern Agriculture Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China)

Abstract: In the process of line source irrigation, the rubber-plastic porous pipes have a high manufacturing deviation coefficient and significant waterhead loss. Given these issues, a point-source irrigation method of subsurface direct-insertion rubber-plastic infiltration dripper was designed in this study using the labyrinth channel technology, with the rubber-plastic porous tube as the column-shaped outflow surface. Then, the hydraulic performance of the dripper was tested. Specifically, the dripper was buried in the flowerpot. The results showed that the coefficient of variation of dripper flow was 4.17%. The pressure-flow relationship was $q = 0.6435h^{0.4161}$, demonstrating a preferable pressure compensation performance. Besides, the short-period anti-clogging test was conducted with the intermittent muddy drip irrigation test method. Under three sediment concentrations (W1 = 0.5 g \cdot L⁻¹, W2 = 1.0 $g \cdot L^{-1}$, W3=1.5 $g \cdot L^{-1}$) and the working pressure of 100 kPa, the effective irrigation times of the dripper were 15, 11, and 5, respectively. This reflects that the dripper had excellent anti-clogging performance. Furthermore, the dripper was buried 30 cm deep under the working pressure of 100 kPa for continuous irrigation tests. There was no deep seepage phenomenon, the soil moisture was evenly distributed, and the wetness peak reached the soil surface after 580 minutes. The comprehensive results indicated that the dripper had good hydraulic performance and anti-clogging performance, as well as a large volume of the wetted body. Thus, it can be widely used in orchard irrigation and scientific research experiments. It is hoped that this research provides a reference for the point-source irrigation of rubber-plastic infiltration pipes.

收稿日期:2021-12-12 修回日期:2022-06-17

基金项目:国家自然科学基金(51779113,51979134);云南省基础研究计划面上项目(202101AT070125);昆明理工大学分析测试重点项目 (2021T20110170);云南省高校特色作物高效用水与绿色生产重点实验室项目(KKPS201923009)

作者简介:HASSANN Butera(1996-),男,卢旺达共和国人,硕士,研究方向为农业节水灌溉设备研究。E-mail: buterahassan@gmail.com 通信作者:刘艳伟(1981-),女(蒙古族),内蒙古开鲁人,副教授,博士,主要从事农业水土工程研究。E-mail: liuyanwei@kust.edu.cn

Keyword: rubber-plastic porous pipe; subsurface infiltration irrigation; labyrinth of runners; blockage; hydraulic performance

高效的节水灌溉技术对提高水资源利用效率 具有重要意义,不仅能为灌溉工程设计提供技术支 撑,还可有效推动涉农产业的发展。常见的节水灌 溉技术包括渗灌技术、滴灌技术、痕灌技术以及微 润灌技术等^[1-4]。其中渗灌技术是根据作物需水量 通过埋入地下的渗灌管或微孔滴头,以定点定量的 方式湿润作物根系层,具有控制杂草生长、提高灌 溉水利用效率以及增加作物产量等优点^[5-7]。

目前,常见的渗灌材料主要包括橡塑渗灌 管^[8-10]、微孔陶瓷^[11-13]以及半透膜渗灌管^[14-15]等。 微孔陶瓷应用于节水灌溉已有两千年历史,近 20 a 来,为提高陶瓷孔隙率和力学性能,在渗灌设备上 通常选用 Si₃N₄、Al₂O₃等高性能陶瓷,其制造工艺复 杂、成本较高,微孔直径为微米级^[16-17]。半透膜渗 灌管通常在低压状态下运行,管内水流在水势梯度 差驱动下向功能性半透膜外迁移,从而使土壤湿 润,流量为 50~200 mL·m⁻¹·h⁻¹。这两种渗灌管 流量小,难以满足高需水量植株生长需求。与之相 比,橡塑渗灌管主要由胶粉和聚乙烯在高温下粘合 而成,价格低廉、工艺相对简单,在 2 m 水头下流量 可达到 6~15 L·m⁻¹·h⁻¹,发生堵塞时,管上微孔 在压力作用下会产生一定的扩张,有利于排出管壁 中的杂质,恢复渗灌管流量。

在长期使用过程中,众多学者通过充气、二次 搅拌等加工工艺,大大提升了橡塑渗灌管孔隙的均 匀性系数和抗老化能力^[9]。但在实际使用过程中, 由于橡塑渗灌管流量较大,内壁相对粗糙,在线源 式灌溉过程中依然存在较大的水头损失[10,18]。同 时受到材料以及制作工艺影响,导致橡塑渗灌管具 有一定的塑性,性能较为不稳定。例如,Vilela 等^[19] 对橡塑渗灌管在不同工作压力下的直径变化进行 分析,发现对于内径为12 mm 和20 mm 的渗灌管, 当工作压力由 50 kPa 上升到 400 kPa 时,管道内径 分别增加了 3.9% 和 7.3%。国内学者高西宁等^[20] 在对橡塑渗灌管的水力性能测试中发现,在渗灌管 长距离灌溉过程中有着较大的水头损失,且主要发 生在靠近进水口一端的前半段。张书函等[21]在研 究橡塑渗灌管渗水速率的变化规律时发现,渗灌管 每一次的渗水速率相对于上一次渗水速率有不同 程度的恢复,并且随着灌水次数的增加,恢复程度 逐渐减小。综上所述,橡塑渗灌管虽然存在价格低 廉、流量大以及可自动恢复流量等优点,但由于其 材料性质及使用方法所限,在实际应用过程中容易 出现水头损失大、灌水不均匀,工作压力范围小等 问题。

因此,基于节水渗灌研究技术现状,本文提出 了以橡塑渗灌管点源式灌溉取代传统线源式灌溉 的方法来增加系统灌水均匀度,并设计了以迷宫流 道和橡塑渗灌管为主体的地埋式橡塑渗灌滴头,通 过试验对滴头水力性能、抗堵塞性能以及土壤湿润 体特征进行研究,分析了橡塑渗灌管在地埋点源式 灌溉应用中的可行性,以期为橡塑渗灌管在地下点 源式灌溉方法上的使用提供参考依据。

1 滴头结构设计

1.1 滴头基本结构

本滴头主要由齿形迷宫流道、滴头管体和橡塑 渗灌管 3 个部分组成,整体结构如图 1 所示。滴头 主体和迷宫流道采用 3d 光固化打印技术(深圳市 金石三维打印科技有限公司,JS-1700)塑造成形, 材料为光敏树脂(深圳市金石三维打印科技有限公 司,JS-UV-HP-02A),打印精度为 0.1 mm。迷宫流 道位于滴头管体上方,与毛管相连接,结构如图 2 所 示,齿形迷宫流道长 16.5 mm,其中齿宽度 *a* 为 1.5 mm,齿间距离 *b* 为 1.8 mm,齿高度 *h* 为 1.2 mm,流 道宽 *w* 为 1.4 mm,齿角度 *θ* 为 64°。滴头管体下方 有 4 个长为 24 mm、宽为 3 mm 的方形对称出水口。

选用聚乙烯橡塑渗灌管(广东顺绿喷灌设备有限公司,内径12 mm,外径16 mm)进行试验,该渗灌 管在100 kPa工作压力下流量为25 L·m⁻¹·h⁻¹, 其主要分为内、中、外三层结构,外层为光滑保护 层,厚度0.1~0.2 mm,可有效减少负压吸泥以及植 物根系入侵;中间为多孔渗水层,具有大量不规则 微孔,便于水分传输;内层为粗糙颗粒层,可吸附水 中杂质^[22]。制备滴头时,从3个批次橡塑渗灌管中 随机截取5 cm进行组装,将橡塑渗灌管紧密包覆出 水口,以3/5 毛管(内径3 mm、外径5 mm)连接滴头 与聚乙烯支管,使滴头以点源式地下渗灌方式进行 灌溉。

1.2 工作原理

橡塑渗灌管由于流量大、内壁粗糙,在铺设相同管道长度下,与点源式灌溉方式(管上滴头,内镶贴片式滴头)相比,水头损失较大。对于流体在圆管中的沿程水头损失,通常采用达西公式^[23]计算:

$$h_f = \lambda \, \frac{l}{d} \, \frac{V^2}{2g} \tag{1}$$

式中, h_f 为沿程水头损失, $m;\lambda$ 为沿程摩阻系数;l为 毛管长度,m;d为毛管直径,m;V为管内水流速度, $m \cdot s^{-1};g$ 为重力加速度, $m \cdot s^{-2}$ 。

当毛管满流时,雷诺数计算公式为:

$$Re = \frac{Vd}{\nu} \tag{2}$$

式中, Re 为雷诺数; ν 为运动粘度, $m^2 \cdot s^{-1}$ 。

本试验所使用的橡塑渗灌管,内径为12 mm,流 量为25 L·m⁻¹·h⁻¹,当管长10 m,水温为20℃时, *Re*=7324>3000,属于紊流范围。在紊流粗糙区内 λ =f(K/d),取橡塑渗灌管当量糙粒高度*K*=0.5 mm, 根据莫迪图^[24]选定沿程摩阻损失系数为0.0692,通 过公式(1)计算沿程水头损失为1.087 m。采用点 源式灌溉方法时,假设各滴头出水均匀,滴头流量 为5 L·h⁻¹,间距0.5 m,PE 管内径14 mm,管长10 m,计算得出*Re*=2510.54。在2000<*Re*<3000 区间 内,当管壁光滑时,通常认为沿程摩阻系数为 0.04^[25]。通过公式(1)计算得出沿程水头损失为 0.047 m。点源式灌溉的局部水头损失主要来源于 毛管连接件插入聚乙烯支管时水流边界发生变化 产生的紊流所导致^[26-28],可采用公式(3)计算

$$h_{j} = \sum_{i=1}^{N} \xi \frac{V_{i}^{2}}{2g}$$
(3)

式中, h_i 为局部水头损失,m;N为灌水器个数;i为 灌水器编号; ξ 为局部水头损失系数; V_i 为第i段毛 管内水流速度,m·s⁻¹。

其中对于局部水头损失系数 ξ 的计算还没有统 一标准,根据以往研究的计算方法^[27-30],当毛管连 接件断面面积为 33.6 mm²时,紊流状态下毛管的局 部水头损失为 0.06~0.12 m,即总水头损失范围在 0.107~0.167 m 之间,与橡塑渗灌管的线源式灌溉 方式相比,水头损失大大减少。因此以点源式灌溉 方式取代橡塑渗灌管传统线源式灌溉方式,在节约 水资源的同时,还有利于减少水头损失,提高灌溉 系统灌水均匀度。

橡塑渗灌管主要由橡胶粉和聚乙烯颗粒高温 粘合而成,无法精确控制孔隙均匀度,导致流量变 异系数较高,CV值在10%~50%之间。此外由于橡 塑渗灌管具有一定塑性,对工作压力变化较为敏 感,当工作压力过高时,会导致管体永久变形以及 出现管壁滋水等现象。当以橡塑渗灌管作为渗灌 材料进行点源式灌溉时,在橡塑渗灌管滴头进水口 增加迷宫流道可有效扩大滴头工作范围,降低滴头 对工作压力的敏感度。

迷宫流道作为目前灌水器流道形式中性能最 优越的流道形式之一,通过复杂的边界条件引起紊 流,从而形成局部压力损失,达到消能效果^[31-33]。 通过 Workbench 软件中的 Fluent 模块对该迷宫流道 进行模拟分析,采用 sweep 方法进行网格划分,最大 网格尺寸 0.005 mm, 网格总数 48 万。流道进口设 定为压力进口,进口压力为100 kPa,出口设定为压 力出口,出口压力0 kPa,运用 Transition k-kl-omega 湍流模型和 Simple 压力速度耦合算法进行模拟解 析^[34-36],得出流道速度矢量图和总压云图如图3所 示。通过图 3a 可以看出,迷宫流道内主要分为主流 区和涡流区,主流区矢量箭头密集,其水流流速较 快,以贴近出水口方向内壁的形式流动。涡流区为 椭圆形,其矢量箭头由外向内逐渐稀疏,在涡流中 心位置水流速度趋向于零。结合图 3b 可以发现,各 流道单元涡流区对应压力云图呈现阶梯型下降,达 到了消能效果,扩大了滴头的工作压力范围,并有 利于提高灌溉系统灌水均匀度。

2 材料与方法

2.1 试验材料与装置

水力性能测试和滴头抗堵塞试验装置如图 4a 所示,主要由恒压水箱、水沙搅拌机、PE 管(广州顺 绿喷灌设备有限公司)、阀门、减压阀(上海天川仪 表厂,精密度 1.6 级)、花盆(直径 30 cm,深度 35 cm)等组成。如图 4b 所示,将滴头埋入花盆 10 cm, 选用电子秤(深圳市帝衡电子有限公司,量程 15 kg,精度 1 g)测量花盆灌溉前后质量差值,作为灌水 量。选用昆明理工大学呈贡校区农业水土试验大 棚红壤土填入花盆,土壤自然风干后,过 2 mm 筛 网,其黏粒、粉粒、砂粒数分别为 39.64%、33.48%、 26.88%,田间持水率为 34.9%,土壤容重为 1.35 g・ cm⁻³。每个花盆以 5 cm 土层分次装入,压实并保持 表面粗糙,避免土壤分层。

土壤入渗试验在自制土箱(长×宽×高,60 cm× 60 cm×70 cm)中进行,以恒压水箱供水,土箱侧壁 每隔5 cm 开直径 2.5 cm 的取土孔,底部设若干通 气孔,试验土壤以容重 1.35 g·cm⁻³分层(5 cm)填 入土箱。

2.2 试验方法

根据《农业灌溉设备滴头和滴灌管技术规范和 试验方法》(GB/T 17187-2009/ISO 9261:2004)^[37] 测试滴头水力性能。试验前将出水口水压分别调 整至最小、最大压强并保压 3 min, 重复 3 次, 然后将 压力调节到100 kPa,保持到调试过程(1 h)结束。 调试结束后进行流量测量,每次待压力稳定 3 min 后进行测量,重复2次,2次误差小于2%并取平均 值作为滴头的流量。

采用间歇性浑水滴灌测试方法进行短周期抗 堵塞试验,以农田灌溉水质标准^[38]为基础,选取灌 溉水中悬浮物(质量浓度≤0.1g·L⁻¹)5 倍浓度以 上进行灌水试验,配置4种泥沙质量浓度分别为 W1(0.5 g · L⁻¹) W2(0.1 g · L⁻¹) W3(1.5 g · L⁻¹) 的水源作为灌溉水,工作压力为100 kPa,灌溉时长 30 min。试验中通过水沙搅拌机保证水沙混合均匀,



5. Rubber-plastic porous pipe; 6. Earth breaking cone

图 1 地埋式橡塑滴头结构图

Fig.1 Structure diagram of underground in-line rubber plastic penetration emitte



w:Runner width; θ :Tooth angle

图 2 迷宫流道结构图

Fig.2 Structure diagram of labyrinth channel

每组试验完成后更换滴头,并对灌溉系统进行冲 洗,保证无泥沙残留。试验泥沙选自昆明理工大学 呈贡校区农业水土试验大棚,将粗筛后的泥沙风 干、碾磨后过 200 目筛网(孔径 0.075 mm), 取直径 小于 0.075 mm 的泥沙颗粒作为试验材料,泥沙级配



图 3 迷宫流道速度矢量图以及总压分布云图(局部)

Fig.3 Velocity vector diagram and total pressure distribution cloud diagram of labyrinth channel (local)



(b)灌水工作图 Irrigation working drawing

1.搅拌机;2.水箱;3.止水阀;4.水泵;5.压力表;6.调压阀; 7.支管:8.毛管:9.滴头:10.试验花盆

- 1. Blender; 2. Water tank; 3. Water stop valve; 4. Water pump;
- 5. Pressure gauge; 6. Pressure regulating valve; 7. Branch pipe;
 - 8. Capillary; 9. Dripper; 10. Flowerpot

图 4 试验系统示意图及灌水工作图

Fig.4 Schematic diagram of test system and irrigation working diagram

109

区间为:(0,0.038](4.72%)、(0.038,0.045] (8.68%)、(0.045,0.053](15.37%)、(0.53,0.63] (22.56%)、(0.063,0.075]mm(48.67%)。试验水 为昆明理工大学呈贡校区自来水,pH 值为 7.28,细 菌总数为零,硬度为 310 mg・L⁻¹,悬浮颗粒为零,电 导率为 670 μS・cm⁻¹,试验时平均水温为 22℃。

通过土壤入渗试验确定土壤湿润体特征,在 100 kPa工作压力下,将该滴头贴近箱角深埋 30 cm 进行持续灌水试验,定时记录湿润体轮廓线。通过 烘干法测定土壤含水率,通过 Surfer 软件以最小曲 率法绘制湿润锋轮廓和含水率等值线图。

2.3 评价方法

2.3.1 滴头流量的变异系数 CV 滴头流量的变异 系数 CV 反映了同一批次不同滴头之间的流量偏 差,同时也反映了其制造偏差。根据《农业灌溉设 备滴头和滴灌管技术规范和试验方法》(GB/T17187 -2009)^[37]规定,在额定工作压力下,式样滴头的变 异系数应不大于 7%。变异系数 CV 计算公式为:

$$CV = \frac{s_q}{\bar{q}} \times 100\% \tag{4}$$

式中, s_q 为试样流量标准偏差, $\mathbf{L} \cdot \mathbf{h}^{-1}$; \overline{q} 为试样平 均流量, $\mathbf{L} \cdot \mathbf{h}^{-1}$ 。

2.3.2 滴头水力性能指标 流态指数 x 是滴头重要 水力性能指标之一,反映了滴头的流量对压力变化 的敏感程度, x 越趋向于 0, 滴头压力补偿性能越优 秀, 当 x 等于 1 时, 滴头流量与工作压力成正比。滴 头流量 q 与工作水头 h 之间关于流态指数的关系为 q=k · h^x, 式中 k 为常数。流态指数 x 计算公式为:

 $x = \log(q_1/q_2)/\log(p_1/p_2)$ (5) 式中, $p_1 p_2$ 为滴头工作压力, kPa; $q_1 q_2$ 为与 $p_1 p_2$ 相对应的流量, L · h⁻¹。

2.3.3 滴头以及灌溉系统堵塞指标 对于单个滴 头的堵塞情况,通常以滴头实际流量与清水下实测 流量的比值(相对流量 q_r)来判断,当 q_r小于 75% 时,认为滴头产生了严重堵塞^[39]。对于滴灌系统, 目前还没有统一堵塞评价标准和方法,众多学者在 评价灌溉系统堵塞情况时,常采用克里斯琴森均匀 度系数与平均相对流量降幅相结合的方法评价堵 塞情况^[40-42]。当滴头发生堵塞时,克里斯琴森均匀 度系数 Cu 和平均相对流量 q_r数值均减少,堵塞越严 重,减少的幅度越大,本文将 q_r大于 75%, Cu 大于 70% 的灌溉过程记为有效灌溉。克里斯琴森均匀度 系数的计算公式为:

$$Cu = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} |q_i - \bar{q}|}{\sum_{i=1}^{n} q_i}$$
(6)

式中,n为滴头总数; q_i 为第i个滴头流量, $L \cdot h^{-1}$ 。

3 结果与分析

3.1 滴头变异系数及水力性能测试

滴头渗水速率与变异系数 CV 随压力变化曲线 如图 5 所示。可以看出,变异系数随着工作压力的 增加呈现先减小后增加的趋势,范围在 3.59% ~ 10.96%之间,当工作压力为 60 kPa 时,CV 取得最小 值 3.59%。根据美国工程师协会(ASAE)2010 年发 布的"微管系统田间评价方法"^[43],以 100 kPa 为额 定工作压力,该滴头对应 CV 值为 4.17% (小于 5%),达到优秀评价,ASAE 滴头评价表如表 1 所 示。经回归计算,滴头压力 – 流量关系式为 q =0.6435 $h^{0.4161}$, $R^2 = 0.996$,该曲线拟合程度高,流态指 数 x 为 0.4161,表明滴头具备一定的压力补偿性能。

与传统橡塑渗灌管相比,该滴头 CV 值明显降低,一方面是由于该滴头属于管上滴头,其水头损失与传统橡塑渗灌管相比相对较小;另一方面认为 是在滴头进水口处迷宫流道消能作用下,滴头上橡 塑渗灌管各微孔所受压力均匀,微孔扩张程度更为 接近,降低了滴头 CV 值。



图 5 滴头渗水速率和变异系数(CV)随压力变化曲线

Fig.5 Seepage rate and coefficients of variation under different pressure

表 1 ASAE 滴头变异系数评价表

Table 1 Recommended classification of emitter's coefficient of variation

滴头类别 Emitter type	CV	评价 Evaluate
点源式灌溉滴头 Point source	< 0.05	优秀 Excellent
	$0.05 \sim 0.07$	良好 Average
	$0.07 \sim 0.11$	一般 Marginal
	0.11~0.15	勉强可用 Poor
	>0.15	不可使用 Unacceptable

当进口压力大于 160 kPa 时,滴头变异系数突 增,从花盆中取出滴头进行灌水试验,发现部分滴 头的橡塑渗灌管外壁有小孔滋水现象,横截面渗水 严重。是因为工作压力过大时,橡塑渗灌管直径扩 大并产生了刚性形变,无法紧密包覆滴头出水口, 从而使不同滴头之间产生形态变化差异,导致滴头 流量的变异系数增加。

3.2 滴头的抗堵塞性能测试

3.2.1 滴头抗负压吸泥能力 在 3.1 小节试验完成 后,将滴头进行常温风干处理,部分滴头上的橡塑 渗灌管如图 6(见 112页)所示。可以看出,随着工 作压力的提升,渗灌管外表壁泥沙附着情况逐渐加 重,且渗灌管两端面处出现明显泥沙累积现象。工 作压力为 40 kPa 时,两端面上泥沙入侵范围最小, 在 0.1~0.3 mm 范围内;工作压力为 160 kPa 时,泥 沙入侵范围最大,在 0.5~0.7 mm 范围内。这是由 于灌溉水在管壁内横向运输,使渗灌管两端成为出 水口,当工作压力增加时,出水口负压吸泥情况加 重所导致。

将橡塑渗灌管竖直剖开,从图6竖直剖面图可 以看出,与渗灌管两端泥沙入侵情况对比,泥沙对 渗灌管壁入侵程度较浅,在各压力下泥沙入侵厚度 均保持在0.2 mm以内,说明该橡塑渗灌管的三层结 构可有效阻止泥沙入侵,通过观察,渗灌管内壁及 迷宫流道处均无泥沙痕迹,表明该滴头抗负压吸泥 能力良好。 3.2.2 不同泥沙浓度下滴头的抗堵塞性能 不同 泥沙浓度下滴头的平均相对流量以及克里斯琴森 均匀度系数随灌水次数变化如图 7 所示。可以看 出,在W3 试验条件下,灌水次数达到 6 次后,滴头 平均相对流量 \bar{q}_r 和克里斯琴森均匀度系数 Cu 分别 为 54.26%和 13.99%,大部分滴头产生了严重堵塞; W1 试验条件下,10 次灌水后,滴头 \bar{q}_r 和 Cu 值分别 为 91.94%和 89.94%;W2 试验条件 10 次灌水后, \bar{q}_r 与 Cu 分别为 81.04%和 79.78%。可以看出当泥沙 浓度分别为 0.5 g·L⁻¹和 1.0 g·L⁻¹时,滴头堵塞程 度较轻,滴头 \bar{q}_r 数值和 Cu 数值较为接近,当泥沙浓 度为 1.5 g·L⁻¹时,滴头堵塞程度以及堵塞速度开 始大幅度增加,说明在 1.0~1.5 g·L⁻¹含沙量之间 存在最易堵塞的临界泥沙浓度。

20次灌水后,W1试验条件下,滴头平均相对流 量 q_r 为59.19%;W2试验条件下,滴头平均相对流 量 q_r 为33.33%。与第10次灌水数据相比,W1条 件下滴头相对流量减少了32.75%,W2条件下滴头 相对流量减少了47.41%。可以看出随着灌溉次数 的增加,滴头堵塞增长幅度逐渐加大,并且W2试验 条件下滴头的堵塞增长幅度明显大于W1试验。表 明滴头内部存在泥沙积累现象,每次灌水时,滴头 排出的泥沙存在一定限度,灌溉水中泥沙浓度越 高,滴头内泥沙累积现象越明显,从而加剧了滴头 的堵塞程度。





由于受到负压吸泥影响,地下灌水器的抗堵塞 性能与地上灌水器相比要求更高。余杨等^[44]通过 采用3个红壤粒径段和2种灌溉方式进行短周期抗 堵塞试验,结果表明同种条件下,根区渗灌方式的 有效灌水次数低于地上滴灌2~3次,在根区渗灌、2 m水头工作、1g·L⁻¹泥沙浓度条件下,当红壤粒径 分别为 D1(0~0.0385 mm)、D2(0.0385~0.074 mm)、D3(0.074~0.1 mm)时,内镶贴片式滴灌带有 效灌溉次数分别为 15、9、10 次;8 孔流量可调灌水 器有效灌溉次数分别为 8、6、3 次。王新坤等^[40]采 用 3 种泥沙粒径配比对滴灌带进行地上短周期抗堵 塞试验,在 100 kPa 工作压力条件下,当泥沙浓度分 别为 0.5、1.0、1.5 g·L⁻¹时,有效灌溉次数分别为 9 ~14、6~12、3~7 次。吴泽广等^[45]将泥沙(粒径小 于 0.01 mm)按粒径段分成 6 组,对迷宫流道滴灌带 进行地上短周期抗堵塞试验,当工作压力为 100 kPa, 泥沙浓度分别为 0.5、1.0、1.5 g·L⁻¹时, 有效灌溉次数分别为 4~18、3~15、3~5 次。通过对比可以看出,本滴头在 100 kPa 工作压力条件下, 泥沙浓度分别为 0.5、1.0、1.5 g·L⁻¹时, 有效灌溉次数分别为 15、11、5 次, 达到同类迷宫流道灌水器抗堵塞性能平均程度。滴头实际使用寿命还需综合灌水周期、灌水量以及水质等因素进行长期灌水试验探究。

将 3.2.2 小节试验后的滴头室温风干后拆除观察,发现迷宫流量齿角处以及橡胶渗灌管内部均存 在不同程度的泥沙堵塞,表明滴头内部堵塞程度受 到迷宫流道和橡塑渗灌管的共同影响,其堵塞机制 还需进一步研究。

3.2.3 不同压力下滴头的抗堵塞性能 选取 3 个 工作压力,即 H1 = 60 kPa、H2 = 100 kPa、H3 = 140 kPa 对滴头进行短周期抗堵塞试验,泥沙浓度为 0.5 g・L⁻¹。如图 8 所示,滴头在各工作压力下均表现 出随着灌溉次数增加堵塞程度逐渐加重的趋势,当 工作压力为 140 kPa 时,滴头测试数据波动较大,平 均相对流量存在先增加后减小的现象。这可能是 在高工作压力下,橡塑渗灌管微孔直径扩大,微孔 中杂质反复经历排出堵塞过程所导致。

16次灌水结束后各工作压力下的滴头相对流 量分别为 q_{r1}=65.11%、q_{r2}=75.86%、q_{r3}=77.19%,根 据 2.3.2 小节统计各压力下的滴头有效灌水次数, 分别为 11、14、15 次。可以看出当工作压力为 60 kPa 时,滴头抗堵塞性能相对较差;当工作压力为 100 kPa、140 kPa 时,滴头抗堵塞性能相对较差;当工作压力为 100 kPa、140 kPa 时,滴头抗堵塞性能与 H1 试验条 件下相比有所提升,但在 100~140 kPa 工作压力范 围内,滴头抗堵塞性能没有明显差异。这与李梦刚 等^[8]研究不同压力下橡塑渗灌管的渗水性能取得 的结论有所不同,滴头没有表现出随着工作压力的 增加抗堵塞性能显著提升的趋势。这是由于在 100 kPa 工作压力以下时,随着工作压力的提升,渗灌管 微孔直径受压扩大,有利于排出管壁中的杂质。当 工作压力大于 100 kPa 时,微孔直径受压扩大程度 减缓或者已扩大到塑性形变下的最大直径,此时随着工作压力的增加,滴头负压吸泥情况加重。因此在两种情况交互作用下,滴头表现出在100~140kPa工作压力范围内抗堵塞性能没有明显差异的结果。考虑滴头在不同工作压力下的*CV*变化和抗堵塞性能,100kPa是该滴头最适宜的工作压力。

3.3 滴头湿润锋分布

滴头在土壤中的出流受橡塑渗灌管出流面的 影响,可以认为是柱状面源出流,其湿润体的形状 等特征与普通点源式灌溉存在一定的差异,图9a显 示了滴头在100 kPa下不同时刻的湿润锋轮廓。由 图9可见,在滴头灌溉初期,湿润体1/2截面湿润锋 形状接近以橡塑渗灌管右边为圆心的优弧,随着灌 溉时间的增长,湿润锋向下运移距离逐渐大于水平 距离和竖直向上距离;灌水结束后,入渗的湿润体 轮廓为湿润体变成重心靠下的椭圆形。

湿润锋在不同方向上的运移距离随时间变化 过程如图 10 所示,用幂函数(R=at^b,式中,R 为湿润 锋运移距离,m;t为时间,h)进行拟合,拟合结果列 于表2。可以看出在灌水前期,水平方向湿润锋运 移距离大于竖直向下方向,160 min 后,湿润锋竖直 向下运移距离开始大于水平距离,灌水 330 min 后, 滴头上方湿润锋位置为22.4 cm,水平方向湿润锋位 置为 34.6 cm, 灌水器下方的运移位置 38.2 cm。这 主要是由于在灌水前期,滴头周围土壤含水率较 低,水分运移趋向于非饱和入渗,在土壤基质势、压 力势以及重力势的共同作下,湿润锋运移较快,受 到滴头出流面的影响,水平方向运移速度稍大于竖 直向下方向:灌水后期,随着湿润体体积的增加,土 壤含水率趋向饱和,土壤基质势作用不断减小,在 压力势和重力势的作用下,使得土壤含水率饱和区 湿润锋更易向垂直向下方向运移。通过湿润锋在 竖直向上方向运移的距离-时间拟合方程可以得 出,湿润锋在580 min 左右到达土壤表层,可有效减 少水分蒸发,达到节约水资源目的。



图 8 不同压力下滴头抗堵塞性能 Fig.8 Anti-clogging performance of emitter under different pressures

将 100 kPa 供水压力条件下土壤竖直剖面上的 含水率等值线绘出(见图 9b)。由图 9b 可知,灌水 结束后,土壤剖面含水率均表现为离滴头距离越远



注: 左、右两图为随机抽取的重复样本。

Note: Left and right figures are randomly selected doplicate samples.

图 6 橡塑渗灌管的泥沙分布情况





Fig.9 Profile of wetting front and water content distribution map

含水率越低,在半径 30 cm 之内湿润体土壤含水率为 27%,达到近 80%的田间持水率,湿润体体积大,满足植物根系生长需求。

由图 9b 可看出,饱和含水率区域等值线偏向滴 头下方,其中 28%含水率等值线水平方向位移为 19 cm,垂直向下方向位移为 23 cm,垂直向上位移 15 cm,饱和含水率区域各方向上水分运移速度表现为 垂直向下>水平方向>垂直向上,这与湿润锋在各方 向上运移速度相同,土壤水分高的区域在灌水器下 方分布更广。这是由于水分在土壤竖直剖面内受 到重力作用,更容易向下运动,因此造成灌水器下 方渗水量大于上方,湿润锋推进较远,高含水率区 域较大。湿润体下端轮廓清晰,未产生深层渗漏, 有利于节水以及植物生长。

土壤水分分布的均匀度是评价滴头渗水性能 的重要指标,可以通过克里斯琴森均匀度系数来进 行评价,计算方法与公式(6)相同。



图 10 湿润锋运移距离与时间的关系曲线

Fig.10 Relation curve between wetting front migration distance and time

表 2 各方向上湿润锋运移(Y)与时间(t)的拟合关系

Table 2Fitting between the wetting front migration (Y)and time (t) from different directions

湿润方向 - Wetting direction	拟合方程 Fitting equation		
	入渗深度 Y	相关系数 R ²	
	Infiltration depth	Correlation coefficient	
水平方向 Horizontal	$Y = 3.1468t^{0.4181}$	0.9874	
竖直向下 Straight down	$Y = 1.4784t^{0.5669}$	0.9950	
竖直向上 straight up	$Y = 1.5184t^{0.4662}$	0.9811	

垂

在 30 cm 水平距离内,土壤含水率分布特征及 克里斯琴森均匀度系数如表 3 所示,可以看出滴头 渗灌区域内土壤含水率的克里斯琴森均匀度系数区 间为 80~90%>70%,表明在该滴头地下渗灌条件下, 土壤水分分布均匀,能较好地满足植物需水要求。

3.5 管道铺设投资

假设本滴头和橡塑渗灌管单侧湿润距离均为 0.5 m,在地下点源式渗灌系统中,设置 100 根长 10 m 的支管,各支管间距为 1 m,每根支管上布置 10 个滴头,滴头间距 1 m。在线源式灌溉系统中,设置 100 根长 10 m 橡塑渗灌管进行灌水,管间间距为 1 m。以 2021 年市场价格为参照,在采用相同的动力 设备以及灌溉水处理设备情况下,两种灌溉系统管 道铺设投资概算如表 4 所示。

Table 3 Distribution characteristics of soil water				
contents and irrigation uniformity				
直深度 _		含水率/%		_ 克里斯琴森
ertical	平均值	最大值	最小值	均匀度系数
oth/cm	Average	Maximum	Minimum	Cu

表 3 含水率分布特征及灌水均匀性

depth/cm	一 一 小 山 Average	取八祖. Maximum	取/下阻 Minimum	Cu
5	8 08	0.53	7 25	0.8832
15	21.58	27.18	13.08	0.8526
25	25.33	34.24	18.76	0.8311
35	25.75	34.62	19.52	0.8461
45	22.41	28.32	14.59	0.8370
55	13.83	17.58	9.73	0.8135

Table 4 Investment estimate for pipeline laying of irrigation system

灌溉类别 Irrigation category	部件 Parts	数量 Quantity	单价 Unit price /Yuan	总价 Total price /Yuan
地下点源式 渗灌系统 Point-source irrigation	DN40 干管 DN40 Main pipe	110 m	5.4	594
	DN16 支管 DN16 Branch pipe	1000 m	0.7	700
	DN5 毛管 DN5 Capillary	500 m	0.3	150
	DN16 球阀 DN16 Ball valve	100	2	200
method	滴头 Dripper	1000	1.5	1500
	压力表 Pressure gauge	1	55	55
	水管接头、堵头等配件 Fittings	10%总价		319.9
总计 Total	~			3518.9
线源式 灌溉系统 Line-source irrigation method	DN40 干管 DN40 Main pipe	110 m	5.4	594
	DN16 支管 DN16 Branch pipe	50m	0.7	35
	橡塑渗灌管 Rubber-plastic porous pip	e 1000 m	1.7	1700
	DN16 球阀 DN16 Ball valve	100	2	200
	压力表 Pressure gauge	1	55	55
	水管接头、堵头等配件 Fittings	10%总价		258.4
总计 Total	-			2842.4

由表4可知,与线源式灌溉方式相比,单位面积 内点源式地下渗灌系统管道铺设投资增加了 23.8%。其中点源式地下渗灌系统中投资较大的项 目是滴头费用,占管道铺设耗材总投资的42.6%。 因此,为推广橡塑渗灌管在点源式灌溉方式上的应 用,需对滴头结构和制造工艺进一步优化,减小滴 头制造成本。

4 结 论

以橡塑渗灌管作为包覆材料,在滴头进水口处 增加迷宫流道,制备了一种地埋式橡塑滴头。结果 表明:

(1)在橡塑渗灌管滴头进水口增加迷宫流道, 可有效提高系统灌水均匀度,扩大滴头工作压力 范围。

(2)滴头变异系数为4.62%,压力-流量关系式 为q=0.6435h^{0.4161},达到国家生产标准,并具备一定 的压力补偿性能和抗堵塞能力。在地下渗灌条件 下,滴头湿润体体积大,土壤水分分布均匀。

(3)滴头的抗堵塞性能受到迷宫流道和橡塑渗 灌管的共同影响,其中迷宫流道各参数以及橡塑渗 灌管尺寸是否对滴头堵塞起到相互作用,还需进一 步研究。

(4)该滴头结构简单,对土壤扰动小,发生堵塞 时容易冲洗、更换滴头,有助于地下渗灌节水技术 推广。

参考文献:

- FAN J C, LU X J, GU S H, et al. Improving nutrient and water use efficiencies using water-drip irrigation and fertilization technology in Northeast China[J]. Agricultural Water Management, 2020, 241: 106352.
- [2] 王旭,孙兆军,杨军,等.几种节水灌溉新技术应用现状与研究进展
 [J].节水灌溉,2016,(10):109-112,116.

WANG X, SUN Z J, YANG J, et al. Application status and research progress of several new water-saving irrigation technologies [J]. Water Saving Irrigation, 2016,(10): 109-112, 116.

- [3] 牛文全,张俊,张琳琳,等.埋深与压力对微润灌湿润体水分运移的 影响[J].农业机械学报,2013,44(12):128-134.
 NIU W Q, ZHANG J, ZHANG L L, et al. Effects of buried depth and pressure head on water movement of wetted soil during moistube-irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 128-134.
- [4] 夏天,田军仓.痕量灌溉与微润灌溉技术研究进展及对比分析[J].
 节水灌溉,2017,(8):96-100.

XIA T, TIAN J C. Research status and comparative analysis on tracequantity irrigation technique and moistube-irrigation technique [J]. Water Saving Irrigation, 2017, (8): 96-100.

[5] PATEL N, RAJPUT T B S. Effect of drip tape placement depth and irrigation level on yield of potato[J]. Agricultural Water Management, 2007, 88(1/3): 209-223.

- [6] NAZARI E, BESHARAT S, ZEINALZADEH K, et al. Measurement and simulation of the water flow and root uptake in soil under subsurface drip irrigation of Apple tree[J]. Agricultural Water Management, 2021, 255; 106972.
- [7] 宋文,张玉龙,韩巍,等.渗灌灌水定额对温室黄瓜产量和水分利用 效率的影响[J].农业工程学报,2010,26(8):61-66.
 SONG W, ZHANG Y L, HAN W, et al. Effects of subirrigation quota on cucumber yield and water use efficiency in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(8): 61-66.
- [8] 李梦刚,孙兆军,焦炳忠,等.不同泥沙质量浓度及工作压力对微孔 地下渗灌管渗水性能的影响[J].灌溉排水学报,2020,39(6):93-98. LI M G, SUN Z J, JIAO B Z, et al. Effects of sediment concentration and operating water pressure on exfiltration of subsurface microporous infiltration irrigation pipe[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(6): 93-98.
- [9] 刘作新,梁海军.橡塑渗灌管生产工艺及其渗水性能研究进展[J]. 农业工程学报,2006,22(12):255-259.

LIU Z X, LIANG H J. Advance in manufacturing technique and discharge characteristics of rubber-based porous pipe as subirrigation lateral[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(12): 255-259.

- [10] PINTO M F, DE CAMARGO A P, NETO O R, et al. Hydraulic characterization of porous pipes made of recycled automobile tires used in subsurface irrigation [J]. Revista Brasileira De Engenharia Agrícola E Ambiental, 2014, 18(11): 1095-1101.
- [11] 李向明,杨建国.微孔陶瓷灌水器流量影响因素研究[J].农业机械
 学报,2016,47(4):73-78,89.
 LI X M, YANG J G. Factors influencing flow rate of microporous ce-

ramic irrigation emitters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(4): 73-78, 89.

- [12] 蔡耀辉,吴普特,朱德兰,等.硅藻土微孔陶瓷灌水器制备工艺优化
 [J].农业工程学报,2015,31(22):70-76.
 CAI Y H, WU P T, ZHU D L, et al. Preparation technology optimization of diatomite porous ceramic irrigation emitter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(22): 70-76.
- [13] CAI Y H, LI X M, DONG J H. Microstructure and mechanical properties of porous Si3N4-SiO2 ceramics fabricated by a process combining carbothermal reduction and sol-gel infiltration-sintering [J]. Materials Science and Engineering a, 2014, 601: 111-115.
- [14] DIRWAI T L, MABHAUDHI T, KANDA E K, et al. Moistube irrigation technology development, adoption and future prospects: a systematic scoping review[J]. Heliyon, 2021, 7(2): e06213.
- [15] 范严伟,赵彤,白贵林,等.水平微润灌湿润体 HYDRUS-2D 模拟及 其影响因素分析[J].农业工程学报,2018,34(4):115-124. FAN Y W, ZHAO T, BAI G L, et al. HYDRUS-2D simulation of soil wetting pattern with horizontal moistube-irrigation and analysis of its influencing factors[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(4): 115-124.
- [16] LI X M, WU P T, ZHU D L. Effect of foaming pressure on the properties of porous Si3N4 ceramic fabricated by a technique combining

foaming and pressureless sintering[J]. Scripta Materialia, 2013, 68 (11): 877-880.

- [17] 蔡耀辉,吴普特,朱德兰,等.粘土基微孔陶瓷渗灌灌水器制备与性能优化[J].农业机械学报,2015,46(4):183-188.
 CAI Y H, WU P T, ZHU D L, et al. Preparation and performance optimization of clay-based porous ceramics used in subsurface irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 183-188.
- [18] RETTORE NETO O, BOTREL T A, FRIZZONE J A, et al. Method for determining friction head loss along elastic pipes [J]. Irrigation Science, 2014, 32(5): 329-339.
- [19] VILELA L A A, SOCCOL O J, GERVASE E S, et al. Variations in diameter and head loss in polyethylene tubes submitted to different pressures [J]. Revista Brasileira De Engenharia Agricola e Ambiental, 2003, 7(1): 182-185.
- [20] 高西宁,张玉龙.微孔渗灌管水力特性的试验研究[J].灌溉排水学报,2009,28(1):104-106.
 GAO X N, ZHANG Y L. Flow hydraulic characteristics of the porous pipe buried in the ground [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2009, 28(1): 104-106.
- [21] 张书函,穆金元,王继民,等.新型微孔渗灌管渗水性能初步试验研 究[J].灌溉排水,1998,(2):57-60.
 ZHANG S H, MU J Y, WANG J M, et al. Preliminary experimental study on discharge characters of a subsurface irrigation tube[J]. Irrigation and Drainage, 1998,(2): 57-60.
- [22] 赵卫民.渗灌管的研制及其性能测试[D].北京:中国农业大学,2004.

ZHAO W M. Development and performance testing on porous drip lines[D]. Beijing: China Agricultural University, 2004.

- [23] 吴持恭,水力学与山区河流开发保护国家重点实验室(四川大学).水力学:上册[M].北京:高等教育出版社,2008:131-133.
 WU C G, State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering. Hydraulics: Volume I[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008: 131-133.
- [24] 刘方亮,毕洪涛.流体力学[M].北京:北京理工大学出版社,2017: 143-155.
 IIIIFI BLHT Fluid machanics [M] Poiiing Poiiing Institute Of

LIU F L, BI H T. Fluid mechanics [M]. Beijing: Beijing Institute Of Technology Press, 2017:143-155.

- [25] YITAYEW M. Simplified method for sizing laterals with two or more diameters[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2009, 135(1): 111-114.
- [26] CHAMBA D, ZUBELZU S, JUANA L. Determining hydraulic characteristics in laterals and drip irrigation systems[J]. Agricultural Water Management, 2019, 226: 105791.
- [27] 仇振杰,朱德兰,张林.滴头插入对滴灌毛管水头损失影响试验研究[J].排灌机械工程学报,2013,31(3):265-269.
 CHOU Z J, ZHU D L, ZHANG L. Experimental study on effect of on-line emitter on head loss in drip irrigation laterals [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(3): 265-269.
- [28] 王亚林,朱德兰,陈俊英,等.滴头插入式毛管局部水头损失模拟研究[J].水力发电学报,2016,35(4):22-31.
 WANG Y L, ZHU D L, CHEN J Y, et al. Numerical study on minor

head loss of on-line emitters in drip irrigation laterals[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(4): 22-31.

- [29] PALAU-SALVADOR G, SANCHIS L H, GONZ? LEZ-ALTOZANO, et al. Real local losses estimation for on-line emitters using empirical and numerical procedures[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2006, 132(6): 522-530.
- [30] PROVENZANO G, PUMO D. Experimental analysis of local pressure losses for microirrigation laterals[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2004, 130(4): 318-324.
- [31] AL-MUHAMMAD J, TOMAS S, AIT-MOUHEB N, et al. Experimental and numerical characterization of the vortex zones along a labyrinth milli-channel used in drip irrigation[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2019, 80: 108500.
- [32] AL-AMOUD A I, MATTAR M A, ATEIA M I, et al. Impact of water temperature and structural parameters on the hydraulic labyrinthchannel emitter performance[J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2014, 12(3): 580-593.
- [33] RAMACHANDRULA V R, KASA R R. Non-destructive characterization of physical and chemical clogging in cylindrical drip emitters[J]. Heliyon, 2020, 6(10): e05327.
- [34] 喻黎明,徐霞,杨启良,等.滴灌灌水器迷宫流道结构对泥沙运动的 影响[J].农业机械学报,2017,48(2):255-261.
 YU L M, XU X, YANG Q L, et al. Influence of geometrical parameters of labyrinth passage of drip irrigation emitter on sand movement
 [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 255-261.
- [35] 张爱习,霍倩,檀海斌,齿型流道灌水器数值模拟计算域的优化分析[J].节水灌溉,2019,(8):98-101.
 ZHANG A X, HUO Q, TAN H B. Optimization analysis of numerical simulation calculation domain of emitter with tooth type flow channel [J]. Water Saving Irrigation, 2019,(8): 98-101.
- [36] 田济扬, 白丹, 于福亮, 等.基于 Fluent 软件的滴灌双向流流道灌水器水力性能数值模拟[J].农业工程学报,2014,30(20):65-71.
 TIAN J Y, BAI D, YU F L, et al. Numerical simulation of hydraulic performance on bidirectional flow channel of drip irrigation emitter using Fluent[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(20): 65-71.
- [37] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.农业灌溉设备滴头和滴灌管技术规范和试验方法:GB/ T17187-2009[S].北京:中国标准出版社,2010.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, China National Standardization Administration Committee. Agricultural irrigation equipment-emitters and emitting pipe-specification and test methods: GB/T17187 $2009 [\,S\,].$ Beijing: Standards Press of China, 2010.

[38] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管 理委员会.农田灌溉水质标准:GB5084-2005[S].北京:中国标准出 版社,2006.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, China National Standardization Administration Committee. Standards for irrigation water quality: GB5084-2005[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.

- [39] 中华人民共和国住房和城乡建设部、微灌工程技术规范:GB/T50485-2009[S].北京:中国计划出版社,2009.
 Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for microirrigation engineering: GB/T50485-2009[S]. Beijing: China Planning Press, 2009.
- [40] 王新坤,樊二东,徐胜荣,等.射流三通对灌水器抗堵塞特性的影响
 [J].农业机械学报,2019,50(3):281-287.
 WANG X K, FAN E D, XU S R, et al. Effect of jet tee on anti-clogging characteristics of emitters [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 281-287.
- [41] ZHOU H X, LI Y K, WANG Y, et al. Composite fouling of drip emitters applying surface water with high sand concentration: Dynamic variation and formation mechanism[J]. Agricultural Water Management, 2019, 215: 25-43.
- [42] 喻黎明,余兴娇,李娜,等.不同冲洗措施下迷宫流道灌水器泥沙运 行分布机理研究[J].农业机械学报,2021,52(7):304-312.
 YU L M, YU X J, LI N, et al. Sediment distribution mechanism of labyrinth-channel emitters under different flushing measures [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 304-312.
- [43] American Society of Agricultural and Biological Engineers. Design and installation of micro-irrigation systems: ASABE EP405 [S]. St. Joseph: ASABE, 1988.
- [44] 余杨,许文其,宋时雨,等.红壤粒径肥料浓度和灌溉方式对不同灌水器堵塞的影响[J].农业工程学报,2018,34(15):92-99.
 YU Y, XU W Q, SONG S Y, et al. Influence of red loam particles, fertilizer concentration and irrigation method on clogging of different irrigation emitters[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(15): 92-99.
- [45] 吴泽广,张子卓,张珂萌,等.泥沙粒径与含沙量对迷宫流道滴头堵 塞的影响[J] 农业工程学报,2014,30(7):99-108.
 WU Z G, ZHANG Z Z, ZHANG K M, et al. Influence of particle size and concentration of sediment on clogging of labyrinth channels emitters[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(7): 99-108.