doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.12.017

微喷灌与陶瓷渗灌互补装置设计与试验

朱德兰[1,2]　张　锐[1,2]　赵　航[1,2]　葛茂生[1,2]　程　琪[1,2]　蔡耀辉[3]

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100;
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. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要: 针对农果复合种植中农作物和果树的根系深度、灌溉时间和灌水量等指标存在明显差异,采用传统单一灌溉方式难以同时兼顾果树深根和套种作物浅根的灌溉问题,以实现深浅根高效灌溉为目标,开发一种基于水压控制的微喷灌与陶瓷渗灌互补装置。在对装置进行整体结构设计的基础上,重点对 3 个核心部件:渗灌压力转换器、微喷压力转换器和伸缩装置进行优化配置。对渗灌压力转换器开展二因素六水平全试验优化设计,优选出渗灌压力转换器中弹性膜片的硬度(70 HA)和厚度(1.5 mm),该条件下,可使地下灌溉的工作压力范围为 0.015 ~ 0.055 MPa,流量 10 L/h,流态指数为 0.004。在对微喷压力转换器进行结构设计的基础上,确定弹簧劲度系数为 1 500 N/m,可保证微喷头在低压下(小于 0.066 MPa)不喷水,理论推导出伸缩装置的临界伸长压力为 0.066 MPa,与试验结果(当水压达到 0.066 MPa 时,伸缩装置开始伸长,0.15 MPa 时伸缩装置升至最高点,微喷头开始稳定工作)相符。制作出微喷灌与陶瓷渗灌互补装置实物模型,参照国家标准进行性能测试,并将模型应用在日光温室,结果表明:本装置以水压 0.066 MPa 为界,低压渗灌灌溉果树深根,高压微喷灌灌溉套种作物浅根系,互补灌溉功能良好,土壤剖面含水率实测值满足设计预期。该研究可为农果复合林深、浅根的高效灌溉提供有效解决方案。

关键词: 农果复合种植; 微喷灌; 陶瓷渗灌; 渗灌压力转换器; 微喷压力转换器

中图分类号: S277.9+4　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2021)12-0162-09　　**OSID**:

Structural Design and Performance Test of Telescopic Micro-sprinkler Irrigation and Ceramic Infiltration Irrigation Complementary Device

ZHU Delan[1,2]　ZHANG Rui[1,2]　ZHAO Hang[1,2]　GE Maosheng[1,2]　CHENG Qi[1,2]　CAI Yaohui[3]

(1. *College of Water Resources and Architectural Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*
2. *Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas*, *Ministry of Education*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*
3. *Institute of Soil and Water Conservation*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: In view of the obvious differences in root depth, irrigation time and irrigation amount between crops and fruit trees in agroforestry, it is difficult to take into account the irrigation problems of deep roots of fruit trees and shallow roots of interplanting crops by traditional single irrigation method. In order to achieve efficient irrigation of deep and shallow roots, a complementary device of micro-sprinkler irrigation and ceramic infiltration irrigation based on water pressure control was developed. On the basis of the overall structure design of the device, the optimal configuration of the three core components: ceramic subsurface irrigation pressure converter, micro-sprinkler pressure converter and telescopic device was focused. The hardness (70 HA) and thickness (1.5 mm) of the elastic diaphragm in the ceramic subsurface irrigation pressure converter were optimized through the full test of two factors and six levels. Under this condition, the working pressure range of underground irrigation can be 0.015 ~ 0.055 MPa, and the flow rate was 10 L/h. Based on the structure design of the micro sprinkler pressure converter, the spring stiffness coefficient was 1 500 N/m, which can ensure that the micro nozzle did not spray water under low pressure (less than 0.066 MPa). The critical elongation pressure of the telescopic device was

收稿日期: 2020-12-09　修回日期: 2020-12-31

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFE0103000)、陕西省重点研发计划项目(2020ZDLNY01-01)、国家外国专家局“111”计划项目(B12007)和国家自然科学基金项目(52009111)

作者简介: 朱德兰(1969—),女,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉技术研究,E-mail: dlzhu@126.com

0.066 MPa, which was consistent with the test results: when the water pressure reached 0.066 MPa, the telescopic pipe began to extend. When it was 0.15 MPa, the telescopic pipe rose to the highest point, and the micro nozzle started to work stably. On the basis of the above, the physical model of the micro-sprinkler irrigation and ceramic infiltration irrigation complementary device was made, and the performance test was carried out according to the national standards, and the model was applied in the greenhouse, the results showed that the device with 0.066 MPa water pressure as the boundary, the deep roots of fruit trees were irrigated by low-pressure ceramic infiltration irrigation, and shallow roots were irrigated by high-pressure micro sprinkler irrigation. The complementary irrigation function was good, and the measured soil moisture content met the design expectations. The research result can provide an effective solution for efficient irrigation of deep and shallow roots in agroforestry.

Key words: agroforestry; micro-sprinkler irrigation; ceramic infiltration irrigation; ceramic subsurface irrigation pressure converter; micro-sprinkler pressure converter

0　引言

农果复合种植模式近年来被广泛应用[1-2]。农果复合林中果树和农作物有机结合,可减少地表蒸发,增加土壤有机质、微生物群落和酶活性,提高土地生产力和水资源利用率[3-6]。相比于单一种植,农果复合在获得更大产出和效益的同时,也能蓄水保墒,防治土壤侵蚀[7-8]。农果复合种植模式中果树和作物的根系位于不同深度的土层,在吸收水分时存在明显的层次差异,一年生套种作物主要利用浅层水分,多年生果树主要吸收深层土壤水分[9-12]。此外,农作物和果树的根系在灌水量和灌水时间上也存在较大差异。

近年来随着气候变化,单纯依靠降水的“雨养”已经难以满足农果复合系统中的水分需求,因此须采取一定的灌溉措施[13-14]。果园中最常见的节水灌溉方式是地面滴灌,由于果树耗水量大,使用地面滴灌时通常需增加滴头数量,延长灌溉时间,才能使灌溉水充分入渗到果树的深层根系[15-17]。因此将水直接输送至作物根区,实现灌溉对象由土壤到作物的转变才能有效提高灌溉水利用效率[18-19]。但根区直接灌溉需要将灌水器埋置于地下,普通的地下滴灌灌水器极易发生负压吸泥、根系入侵等堵塞问题,一旦产生,难以检修[20]。为此蔡耀辉等[21-22]以黏土为主要原料,制作出兼顾力学性能和水力性能的微孔陶瓷灌水器,并利用 Hydrus-2D 软件模拟出灌水器的结构参数和埋置深度,将灌水器应用于苹果树,结果表明,微孔陶瓷灌水器可促进果树增产,依据土壤水势实时补充土壤水分,防止地表径流和深层渗漏[23-24]。虽然直接灌溉根区可满足深层果树根系的水肥补给,但却难以兼顾根系较浅的一年生套种作物[25]。微喷灌系统喷洒水滴粒径小,雾化程度高[26]。在高温下开启微喷灌系统,可快速降温增湿,调节田间小气候,提高了叶片的气孔导度和光合速率[27]。微喷灌存在较大的蒸发或飘移损失,湿润层深度较小,适合灌溉农果复合种植中的浅根系作物[28-30]。现有灌水器的灌溉对象局限于单一的深根或浅根,对农果复合林而言,滴灌、微喷灌等单一的灌溉方式易导致深根或浅根缺水,造成水分胁迫。综上,开发一种能同时灌溉深根和浅根的灌水装置具有十分重要的现实意义。

因此,本文设计一种基于水压控制的微喷灌与陶瓷渗灌互补装置,以实现“低压-渗灌-深根,高压-微喷灌-浅根”的灌溉功能。优选渗灌压力转换器中弹性膜片的结构参数,使渗灌部分具有良好的压力补偿效果;开发微喷压力转换器,使微喷头在低压工况(渗灌)下不出流;理论推导伸缩装置中伸缩装置临界伸长压力并进行试验验证。将灌水器实际应用于猕猴桃大棚中,跟踪监测灌溉效果。以期为农果复合种植中深根和浅根的高效灌溉提供一种新方法。

1　结构设计与工作原理

微喷灌与陶瓷渗灌互补装置(互补式灌水器)结构示意图如图 1 所示。非灌溉期间,灌水器不进行渗灌和微喷灌。灌溉工况下,灌溉水从支管流入灌水器,当水压力较低时,渗灌压力转换器开启,水流从陶瓷渗灌器流出进行渗灌,而微喷压力转换器关闭;随着水压力的增大,渗灌压力转换器中弹性膜片形变增大,出水口过水断面面积减小,当压力超过一定值后,弹性膜片封堵流道,渗灌停止。此时,伸缩装置伸长,微喷压力转换器开启,微喷头开始喷洒,灌溉浅根系作物。灌溉结束后,伸缩装置在自身重力和弹簧拉力的作用下自动收缩,灌溉过程结束。为实现基于水压力的“低压-渗灌-深根,高压-微喷-浅根”自动转换功能,设计了如图 1 所示的装置,并对渗灌压力转换器、微喷压力转换器和伸缩装置 3 个核心部件进行重点设计。

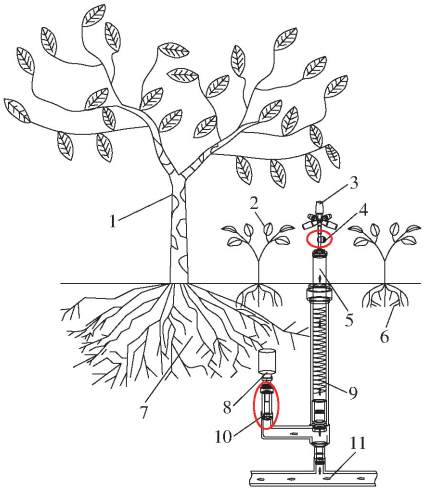


图 1 微喷灌与陶瓷渗灌互补装置结构示意图

Fig. 1 Schematic of complementary device

1. 果树 2. 套种作物 3. 微喷头 4. 微喷压力转换器 5. 伸缩装置 6. 浅根系 7. 深根系 8. 陶瓷灌水器 9. 弹簧 10. 渗灌压力转换器 11. 支管

1.1 渗灌压力转换器

由图 1 可知,渗灌压力转换器位于陶瓷灌水器下端,用于控制渗灌灌水器的开闭。通过 AutoCAD 和 Pro/E 软件建模,设计的渗灌压力转换器如图 2 所示,通过 SPS450B 型激光快速成型机制作出试验样品,材料为光敏树脂,加工精度 0.1 mm。如图 2a 所示,工作时水从柱体下方流入,水压力作用在柱体底部,推动柱体向上运动,当水压较低时,柱体上方弹性膜片的压缩较小,水流通过弹性膜片与出水孔之间的间隙出流;当压力持续增加,弹性膜片形变增大,彻底封堵流道(渗灌压力转换器关闭,微孔陶瓷灌水器停止出流)。

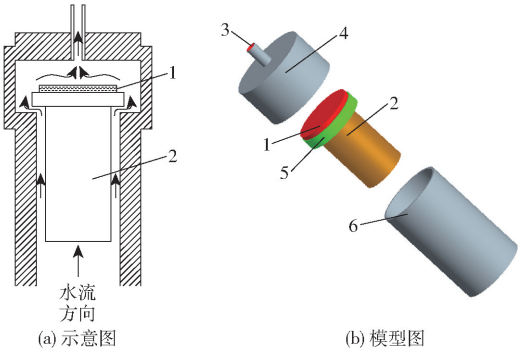


图 2 渗灌压力转换器结构示意图

Fig. 2 Structure diagrams of infiltration irrigation pressure converter

1. 弹性膜片 2. 柱体 3. 出水孔 4. 空腔 5. 柱体上平台 6. PVC 外壳

如图 2b 所示,渗灌压力转换器由 PVC 外壳、柱体和弹性膜片 3 部分组成。陶瓷灌水器进水口端通常连接直径 20 mm 的标准 PVC 管件,故本文选取 PVC 外壳为直径 20 mm、壁厚 2 mm 的标准 PVC 管[20];为使柱体在 PVC 管中能上下运动且在低压过水时不产生较大晃动,将柱体直径设计为略小于 PVC 管内径(18 mm),为 16 mm;柱体上平台起“固定”作用,可确保无压不过流时,柱体不滑落,其直径为 19 mm(小于 PVC 外壳直径 20 mm 且大于 PVC 管内径 18 mm);空腔尺寸参照压力补偿式灌水器的上腔体,为定型的标准件,其内径和高度分别为 20 mm和 10 mm[14,31];弹性膜片为压力补偿式灌水器中常用垫片,直径为 15 mm;为连接常用的 ϕ4 接头,将出水口直径设计为 4 mm。综上,渗灌压力转换器各部件尺寸如表 1 所示。

表 1 渗灌压力转换器各部件尺寸

Tab. 1 Dimensions of components of ceramic subsurface irrigation pressure converter mm

部件名称	直径	高度 h
柱体	16	20
柱体上平台	19	6
空腔	20	10
弹性膜片	15	
出水孔	4	

1.2 伸缩装置

为实现伸缩装置在非灌溉期间地埋,减小对耕作的影响,将直径 20 mm、长 30 cm 的伸缩装置内插在直径 32 mm 的 PVC 外管中,灌溉时微喷头随伸缩杆上下移动,喷洒高度可调节,灌溉结束后,伸缩装置通过自身重力和弹簧拉力回缩。为使伸缩过程稳定均匀,伸缩装置材质选取光洁度较好的薄壁不锈钢,弹簧线径为 1.6 mm。

1.3 微喷压力转换器

为控制微喷头在低压条件下不出水,利用防滴器工作原理,设计微喷压力转换器,如图 1 所示,其安装位置位于伸缩装置和微喷头之间。微喷压力转换器结构如图 3 所示。当水压较低时,弹性膜片紧贴过水通道断面,流道封闭,出水口不过流;受压面受到较大的水流推力时,弹性膜片产生形变,压缩弹簧,微喷压力转换器开启,水流通过空腔到达出水口,微喷头开始喷洒。

2 核心部件参数试验优化

2.1 渗灌压力转换器弹性膜片参数试验优选

2.1.1 试验设计

渗灌压力转换器中弹性膜片形变程度对渗灌部分的压力补偿和流道封堵有决定性的作用。因此,将压力补偿式灌水器中常用的弹性膜片厚度(1.0、1.5、1.6、1.7、2.0、3.0 mm,记为 T1 ~ T6)和硬度(20 ~ 70 HA,间隔10 HA,记为H2 ~ H7)设为试验因素,

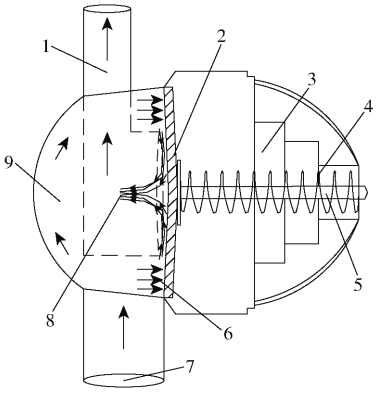


图 3　微喷压力转换器结构示意图

Fig. 3　Schematic of micro-sprinkler pressure converter structure

1. 出水口　2. 弹性膜片　3. 外壳　4. 弹簧　5. 固定杆　6. 受压面　7. 进水口　8. 过水通道　9. 空腔

每种因素取 6 个水平，采用完全试验，测试所有处理下微孔陶瓷灌水器的压力-流量关系。弹性膜片硬度制作精度为 3 HA，厚度制作精度为 0.1 mm，分别用邵氏硬度计和游标卡尺测量。渗灌器工作压力为 5 ~ 100 kPa，每隔 5 kPa 测试 1 次，测试时间为 2 min，每个处理重复 3 次，取平均值。

2.1.2　试验结果与分析

图 4 为渗灌压力转换器中不同厚度和硬度的弹性膜片的压力-流量关系。流量随膜片硬度的增加而增加，膜片硬度相同时，随着厚度增加，压力补偿范围和稳定流量均呈现先增大后稳定再减小的趋势，但不同厚度的膜片对起调压力的影响不显著。

渗灌出水口的水力特征方程为

$$Q = kp^x \tag{1}$$

式中　Q——流量，L/h　　k——流量系数

p——工作压力，MPa

x——流态指数

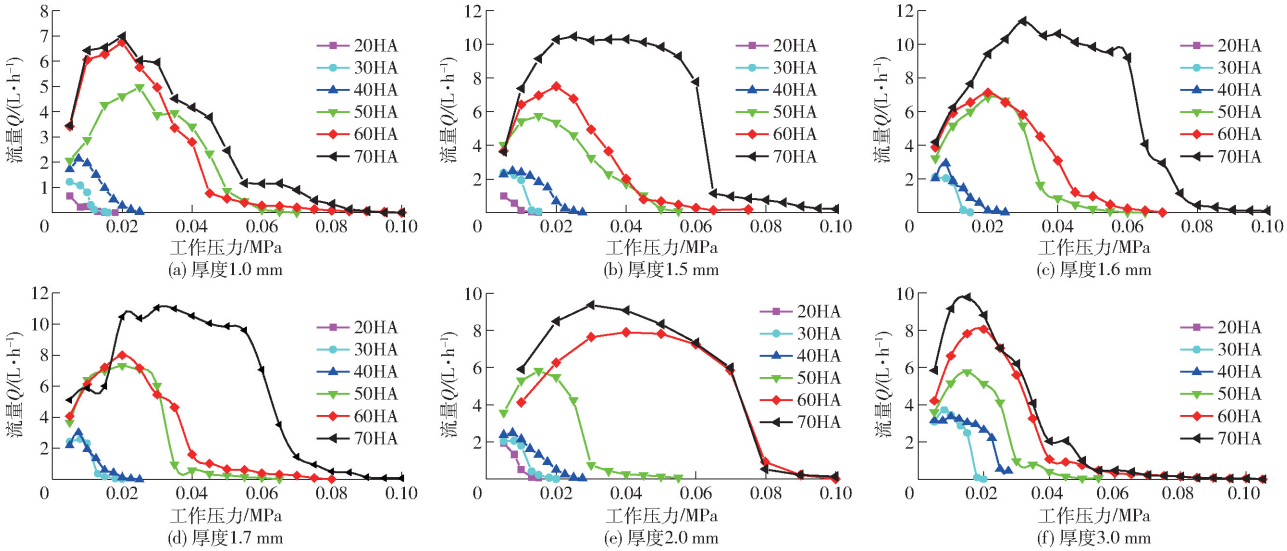


图 4　不同厚度、硬度弹性膜片的压力-流量关系曲线

Fig. 4　Pressure - flow relationship of elastic diaphragms with different thicknesses and hardnesses

其中 x 为 0 ~ 1，$x = 0$ 表示灌水器出流不受压力影响，补偿效果良好。

对试验得到的渗灌出流量的压力和流量进行回归分析得到式(1)中的流量系数和流态指数，结果见表 2。采用 SPSS 软件对弹性膜片厚度 T(1.0 ~ 3.0 mm)、硬度 H(60 ~ 70 HA)共 12 种处理下灌水器的流态指数和流量进行多元线性回归分析，得到流量 Q、流态指数与弹性膜片结构参数之间的线性回归模型为

$$Q = f(H,T) = -5.890 + 0.197T + 0.535H \tag{2}$$

表 2　硬度为 60、70 HA 的弹性膜片压力补偿区间和流量系数及流态指数

Tab. 2　Pressure compensation interval and flow coefficient of elastic diaphragm with hardnesses of 60 HA and 70 HA

处理	T1H6	T1H7	T2H6	T2H7	T3H6	T3H7
流量系数 k	6.439	6.915	6.607	9.942	6.325	11.518
流态指数 x	-0.126	-0.183	0.090	0.004	0.016	-0.089
压力补偿区间/MPa	0.010 ~ 0.03	0.010 ~ 0.035	0.010 ~ 0.025	0.015 ~ 0.055	0.01 ~ 0.03	0.02 ~ 0.06
处理	T4H6	T4H7	T5H6	T5H7	T6H6	T6H7
流量系数 k	6.444	11.811	6.228	9.814	8.620	9.946
流态指数 x	0.195	-0.108	0.127	-0.108	-0.181	-0.323
压力补偿区间/MPa	0.010 ~ 0.025	0.02 ~ 0.06	0.02 ~ 0.06	0.02 ~ 0.06	0.015 ~ 0.055	0.01 ~ 0.03

$$x = f(H,T) = 1.098 - 0.015T - 0.083H \quad (3)$$

两回归方程的相关系数分别为 0.679 和 -0.728,表明硬度、厚度与流量呈正相关,与流态指数呈负相关。流量和流态指数回归方程中厚度和硬度的 sig. 值分别为 0.023 和 0.049,均小于 0.05,故厚度和硬度对流态指数和流量回归方程的影响显著。

以起调压力较小、流态指数较小、压力补偿区间较大、适宜流量为原则优选弹性膜片硬度和厚度。由表 2 可以看出,硬度为 70 HA、厚度分别为 1.5、1.6、1.7 mm 的 3 种弹性膜片在压力补偿区间内,稳定流量约为 10 L/h。进一步分析发现,厚度 1.5 mm 的弹性膜片不仅补偿区间较大,流量也更稳定,且当水压超过 0.06 MPa 后,其流量-压力曲线下降趋势最陡,即渗灌部分停止灌溉时间最短。因此,优选出厚度 1.5 mm、硬度 70 HA 的弹性膜片,其稳定工作流量约为 10 L/h,流态指数为 0.004。

图 5 为微喷灌与渗灌互补装置的压力-流量曲线,该图直观反映了两种灌水器在不同工作压力下的流量关系,当工作压力小于 0.066 MPa,渗灌具有压力补偿性能,流量稳定在 10 L/h,随着压力持续增加,微喷转换器开启,微喷头开始喷洒,流量逐渐增加至最大流量 40 L/h。

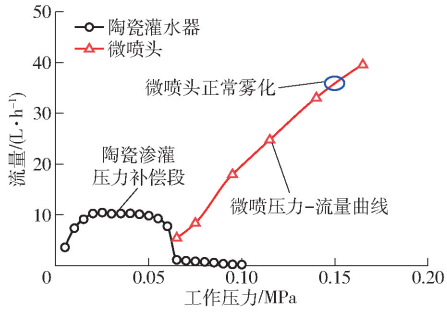


图 5 互补装置的压力-流量曲线

Fig. 5 Pressure - flow relationship of complementary device

综上所述,不同工作压力区间微喷灌与渗灌互补装置的工作状态如图 6 所示。

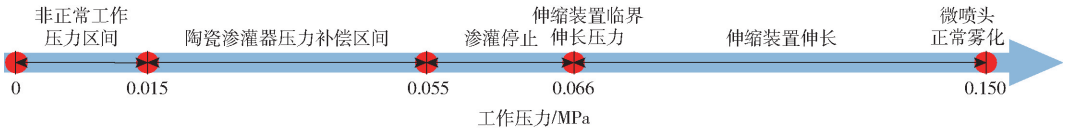


图 6 不同工作压力对应的工作状态

Fig. 6 Working states corresponding to different working pressures

2.2 伸缩装置与微喷压力转换器临界工作压力确定

2.2.1 试验设计

伸缩装置临界工作压力是指伸缩装置初始伸长时对应的压力,临界工作压力与伸缩装置自身重力、管壁摩擦力和伸缩装置下端的受压面积有关。首先通过理论分析得出弹簧线径(1.6 mm)、材质为薄壁不锈钢的伸缩装置临界伸长压力,再通过试验测定的伸缩装置伸长高度随压力的变化曲线进行验证。工作压力从 0.03 ~ 0.17 MPa 变化,间隔 0.01 MPa,伸长高度用毫米刻度尺测量。

微喷压力转换器的临界工作压力是指微喷头开始出水时的压力。由图 3 可知,弹簧可控制微喷压力转换器开闭,因此本试验以弹性膜片为脱离体进行受力分析(图 7),确定微喷压力转换器中弹簧劲度系数,使微喷压力转换器在低压时关闭,伸缩装置升起后打开。

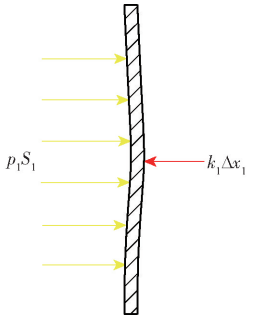


图 7 弹性膜片受力分析示意图

Fig. 7 Schematic of force analysis of elastic diaphragm

初始过流时刻的受压面积和弹簧劲度系数计算式为

$$S_1 = \pi r_1^2 \quad (4)$$

$$k_1 = \frac{p_1 S_1}{\Delta x_1} \quad (5)$$

式中 S_1——初始过流时刻的受压面积,m^2

r_1——过水通道半径,6 mm

k_1——弹簧劲度系数,N/m

p_1——伸缩装置升起时对应的水压力,MPa

Δx_1——弹簧预装压缩长度,即弹簧原长(2 cm)与固定杆长度(1.5 cm)之差

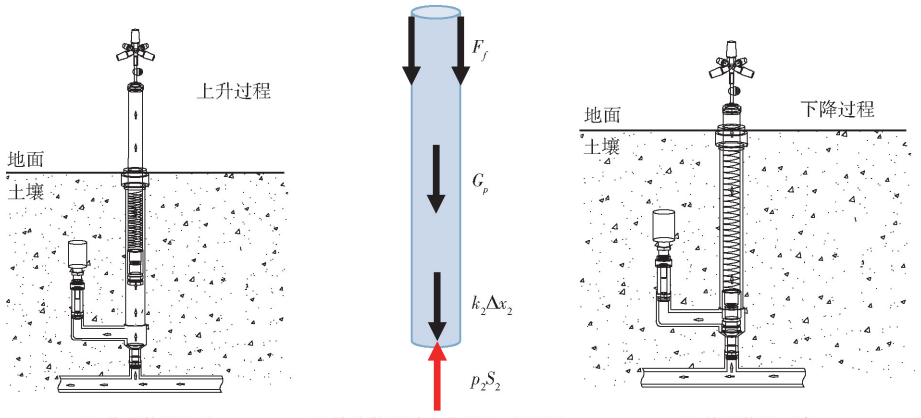
2.2.2 试验结果与分析

微喷灌与陶瓷渗灌互补装置通过水压的变化来控制工作状态。因此,确定陶瓷渗灌和微喷灌的工作压力范围和伸缩装置的临界伸长压力具有重要意义。伸缩装置的临界伸长压力处于陶瓷渗灌和微喷灌工作压力之间,因此,首先确定伸缩装置的临界伸长压力,再确定渗灌和微喷灌的工作压力区间。

取伸缩装置为脱离体,伸长过程受力分析如图 8b 所示,临界伸长状态力学平衡方程为

$$p_2 S_2 = F_f + G_p + k_2 \Delta x_2 \quad (6)$$

式中 p_2——临界伸长时管道内水压力,MPa



(a) 伸缩装置上升　(b) 伸缩装置受力分析(上升过程)　(c) 伸缩装置下降

图 8　伸缩装置上升-下降过程及受力分析

Fig. 8　Rising - falling process and force analysis of telescopic tube

S_2——伸缩装置与水的接触面积,取 710 m^2

G_p——伸缩装置自身重力,N

k_2——伸缩装置内弹簧的劲度系数,取 130 N/m

Δx_2——弹簧的压缩长度,取 3 cm

F_f——伸缩装置伸长时薄壁不锈钢管受到的摩擦阻力,N

伸缩装置在上升过程中,需要克服自身重力 G_p、摩擦阻力 F_f 和弹簧弹力 $k_2\Delta x_2$,而下降过程中弹簧压缩量被释放,给伸缩装置向下的弹力 $k_2\Delta x_2$,此时,管道中余留的水尚未排出,对伸缩装置起反向顶托作用,水压力作为阻力存在。伸长和下降两个过程中伸缩装置受的摩擦阻力不同,灌溉结束后,伸缩装置下降,F_f 的方向由竖直向下转变为竖直向上。由式(6)可知,欲求解伸缩装置伸长的临界压力 p_2,须先确定各临界压力对应的摩擦阻力 F_f。

以伸缩过程稳定为原则,在确定伸缩装置材质(薄壁不锈钢)和弹簧线径(1.6 mm)的基础上,可通过力学平衡分析推算伸缩装置伸长所需临界压力 p_2,本试验通过在伸缩装置上安装不同配重来测试 p_2 与伸缩装置重力的关系,为简化受力分析,在测量 F_f 时先取出伸缩装置内的弹簧,即 $k_2\Delta x_2=0$,不同水压力对应的摩擦阻力计算式为

$$F_f = p_2S_2 - G_p' \tag{7}$$

式中　G_p'——伸缩装置及其配重的总重力,N

由式(7)可知,推动力 p_2S_2 与伸缩装置及其配重的总重力 G_p' 之差即为该压力下的摩擦阻力 F_f,由此计算出各水压力对应的伸缩装置临界伸长摩擦阻力 F_f,取下配重,将 1.6 mm 线径($k_2=130$ N/m)的弹簧安装到伸缩装置中,安装后弹簧存在预压缩长度 $\Delta x_2=3$ cm。30 cm 薄壁不锈钢伸缩装置质量 m 为 200 g,g 取 9.8 m/s^2。由图 9 可知,当水压力约等于 0.066 MPa 时,水推力 p_2S_2 等于阻力 $G_p+F_f+k_2\Delta x_2$。

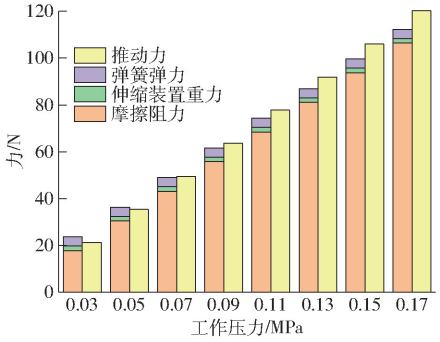


图 9　伸缩装置推动力/阻力随工作压力的变化关系

Fig. 9　Relationship between driving force and resistance of telescopic tube with working pressure

由图 9 可看出,伸缩装置上升过程中的升力 p_2S_2 和阻力 $G_p+F_f+k_2\Delta x_2$ 随工作压力的变化关系,当工作压力大于 0.066 MPa 后,推动力大于阻力,伸缩装置开始上升,理论分析结果与图 10 实测结果吻合。由于弹簧弹力在上升过程中作为阻力,因此在试验工作压力下,推动力并未远大于阻力,伸缩装置上升过程的加速度较小,整个伸缩过程平缓、均匀,稳定。伸缩装置临界伸长压力 p_2 为 0.066 MPa。

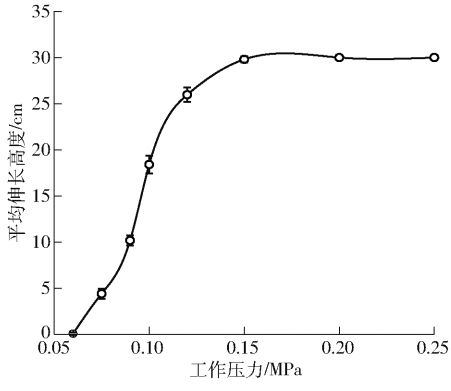


图 10　伸缩装置压力-伸长高度关系曲线

Fig. 10　Relationship between pressure and elongation height of telescopic tube

为验证上述推导过程的准确性,实测了薄壁不锈钢伸缩装置和 1.6 mm 线径弹簧的临界伸长压力。如图 10 所示,伸缩装置在 0.066 MPa 时开始伸长,与理论推导结果相符。由设计原理可知,伸缩装置伸长后,微喷头开始出水,联立式(4)、(5)计算出微喷压力转换器中弹簧劲度系数为 1 500 N/m。

3 互补装置性能测试

3.1 试验设计

按上述工作原理对灌水器结构进行设计制造,得到灌水器实物如图 11 所示。其中,渗灌部分选用西北农林科技大学自主研制、成本低廉、抗堵塞性能良好的微孔陶瓷灌水器;微喷部分选用雾化效果良好、水量分布较均匀的新型十字雾化微喷头,其主要工作参数如下:工作压力 0.15 ~ 0.30 MPa,流量 40 ~ 75 L/h,射程 0.8 ~ 1.5 m。通过调压旋钮调整压力在 0 ~ 0.18 MPa 范围变化,间隔 0.01 MPa,用雨量筒收集微喷头的流量,测试时间 5 min,设置 3 次重复。

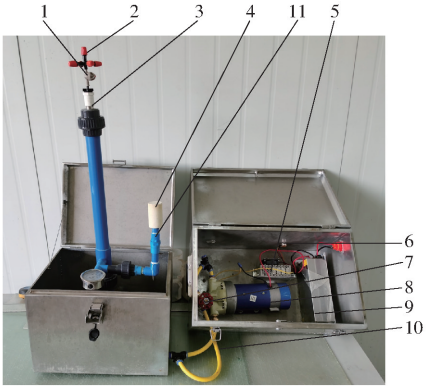


图 11 伸缩式微喷灌与陶瓷渗灌互补装置水力性能测试平台

Fig. 11 Hydraulic performance test platform

1. 微喷压力转换器 2. 微喷头 3. 伸缩装置 4. 陶瓷灌水器 5. 调速器 6. 调压旋钮 7. 阀门 8. 水泵 9. 电源 10. 水管 11. 渗灌压力转换器

3.2 性能检测结果

参照 SL/T 67.3—94,对本试验选用的雾化微喷头进行测试,结果表明,其表面光滑、无毛刺和锐边,不透光并经过抗紫外线处理,可适用于喷洒化肥、农药;可手工更换零部件,螺纹连接符合 GB 7306.1—2000 的规定;设计中微喷头额定工作压力为 0.15 MPa,经检测各部件在常温下能承受两倍额定工作压力,连接处不出现泄漏和脱落;额定工作压力下喷头喷洒直径 1.5 m,灌水强度 40 L/h。参照 GB/T 19812.2—2017,对渗灌部分进行测试,结果表明,渗灌灌水器材料为多孔陶瓷,内外表面光滑平整,无裂口,缺损及变形;在搭建的长 50 m 的试验平台上,每隔 1 m 安装一个互补式灌水器,额定工作压力 4 m 下,灌水器渗灌部分流量约为 10 L/h,流态指数 0.004。综上所述,互补式灌水器符合相关国家及行业标准。

4 田间应用试验

4.1 试验设计

加工、制作并组装了 150 个灌水器,安装在陕西省杨凌区五泉镇汤家村某猕猴桃温室(34°29′N,107°99′E)。安装时渗灌灌水器与猕猴桃根系水平距离 30 cm,装置整体埋于地下 30 cm 处。试验时首先调节压力为 0.04 MPa 进行渗灌,灌溉 2 h 后,增大首部压力至 0.15 MPa 进行微喷灌,喷洒 0.5 h。

4.2 田间应用效果

为直观验证灌水器应用效果,将灌水器进行实地应用,图 12 为田间布置和灌溉实况,设定相同的灌水量 10 L,对渗喷结合、微喷灌、地面滴灌和陶瓷渗灌 4 种不同灌溉方式灌水结束 1 d 后猕猴桃植株的土壤剖面进行观测,其土壤剖面含水率如图 13 所示。4 种灌水方式中,微喷灌和地面滴灌的主要湿润层深度为 15 ~ 30 cm,但由于微喷灌在喷洒过程中存在较大的蒸发和飘移损失,所以其主要湿润层的土壤含水率略低于地面滴灌;陶瓷渗灌器埋深为 30 cm,灌溉水由于重力的作用向下运移,地下 30 ~ 60 cm 处土壤含水率较大,靠近地表处则较低;互补式灌水器渗喷结合灌溉后,土壤剖面含水率自上而下分布均匀,说明该方法有效解决了渗灌难以湿润浅层土壤、微喷灌难以湿润深层土壤的问题。为期 1 年的跟踪观测结果显示灌水器伸缩转换效果良好,工作稳定,土壤剖面含水率分布均匀。



图 12 灌溉实况及灌水 1 d 后不同深度土壤剖面

Fig. 12 Field application of complementary devices

本文设计的伸缩式微喷灌与陶瓷渗灌互补装置灌溉对象为农果复合种植中果树深根和套种作物浅根,其根系深度、灌溉时间和灌水量不同。因此在实际应用中,微喷灌与渗灌的使用频率、灌水量、灌溉时长等也不尽相同。以温室猕猴桃为例,成龄猕猴桃树和套种作物根系分别垂直分布在距地表 40 ~ 60 cm 和 10 ~ 20 cm 的土层中,6—8 月为需水高峰期,猕猴桃树每 8 ~ 10 d 灌溉 1 次,渗灌器每次工作 1.5 h,灌水 15 L,套种作物根系较浅,温室内温度较

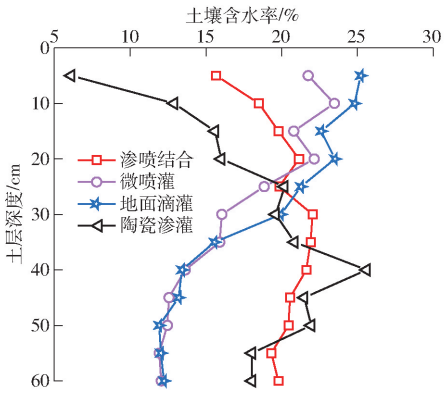


图 13　灌水 1 d 后土壤剖面含水率随土层深度的变化曲线

Fig. 13　Variation curves of soil water content in profile after 1 d of irrigation

高，为减少蒸发损失多为夜间灌溉，每 5 d 灌溉 1 次，微喷头每次工作 0.5 h，灌水 20 L。由于猕猴桃喜湿且不耐高温，因此正午温室内温度高于 35℃时需间歇式开启微喷灌，以降温增湿[32]。

需要注意的是，微喷头每次工作时间不宜超过 1 h，因为灌水量较大不仅会形成地表径流和土壤结皮，还会导致灌溉水下渗至猕猴桃根系附近，虽然同时灌溉了深根和浅根，但过量灌溉，降低了灌溉水利用效率，违背了互补式灌水器中微喷和渗灌分别针对不同根系进行灌溉的设计理念。使用渗灌应严格遵守猕猴桃各生育期耗水量确定灌溉制度，防止灌水量较大引起深层渗漏或根区湿度过大导致猕猴桃出现“烂根”现象[33]。

5　结论

（1）设计了伸缩式微喷灌与陶瓷渗灌互补装置，开发的 3 个核心部件——渗灌压力转换器、微喷压力转换器和伸缩装置协同使用可实现低压时渗灌，灌溉深根，压力较大时渗灌停止，伸缩装置升起，微喷头喷洒，灌溉浅根的功能。

（2）优选出渗灌压力转换器中具有压力补偿性能的弹性膜片，其硬度为 70 HA，厚度为 1.5 mm；设计了微喷压力转换器，可使微喷头在低压工况下不出流，0.066 MPa 时开始喷洒，0.15 MPa 时充分雾化；开发出伸缩装置，在伸缩装置材质为薄壁不锈钢、弹簧线径为 1.6 mm 时，理论推导出伸缩装置临界伸长压力为 0.066 MPa，与试验结果相符。

（3）制作了装置并在田间应用。实测压力转换，压力低于 0.066 MPa 时灌溉果树深根，高于 0.066 MPa 后自动转换为微喷灌，灌溉农作物浅根。为期 1 年的跟踪观测结果表明，灌水器伸缩转换效果良好，工作稳定，土壤剖面含水率分布均匀，表明深浅根均能得到有效灌溉，装置应用效果达到设计预期。

参　考　文　献

[1] GIANNITSOPOULOS M L, GRAVES A R, BURGESS P J, et al. Whole system valuation of arable, agroforestry and tree-only systems at three case study sites in Europe[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 269: 122283.

[2] ELAGIB N A, Al-SAIDI M. Balancing the benefits from the water-energy-land-food nexus through agroforestry in the Sahel[J]. Science of the Total Environment, 2020, 742: 140509.

[3] ZHENG W, GONG Q, ZHAO Z, et al. Changes in the soil bacterial community structure and enzyme activities after intercrop mulch with cover crop for eight years in an orchard[J]. European Journal of Soil Biology, 2018, 86(4): 34 – 41.

[4] ZHANG X, GAO G, WU Z, et al. Agroforestry alters the rhizosphere soil bacterial and fungal communities of moso bamboo plantations in subtropical China[J]. Applied Soil Ecology, 2019, 143: 192 – 200.

[5] KAY S, REGA C, MORENO G, et al. Agroforestry creates carbon sinks whilst enhancing the environment in agricultural landscapes in Europe[J]. Land Use Policy, 2019, 83(4): 581 – 593.

[6] BARKER S, DENNRTT M D. Effect of density, cultivar and irrigation on spring sown monocrops and intercrops of wheat (*Triticum aestivum* L.) and faba beans (*Vicia faba* L.)[J]. European Journal of Agronomy, 2013, 51: 108 – 116.

[7] 张凤云，吴普特，赵西宁，等. 间套作提高农田水分利用效率的节水机理[J]. 应用生态学报，2012，23(5)：1400 – 1406.
ZHANG Fengyun, WU Pute, ZHAO Xining, et al. Water-saving mechanisms of intercropping system in improving cropland water use efficiency[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(5): 1400 – 1406. (in Chinese)

[8] 罗锡文，廖娟，胡炼，等. 提高农业机械化水平促进农业可持续发展[J]. 农业工程学报，2016，32(1)：1 – 11.
LUO Xiwen, LIAO Juan, HU Lian, et al. Improving agricultural mechanization level to promote agricultural sustainable development[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(1): 1 – 11. (in Chinese)

[9] LIU Z, JIA G, YU X. Variation of water uptake in degradation agroforestry shelterbelts on the North China Plain[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, 287: 106697.

[10] LIU Z, JIA G, YU X. Water uptake and WUE of apple tree-corn agroforestry in the Loess hilly region of China[J]. Agricultural Water Management, 2020, 234: 106138.

[11] GAO X, LIU Z, ZHAO X, et al. Extreme natural drought enhances interspecific facilitation in semiarid agroforestry systems[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 265(33): 444 – 453.

[12] BAI W, SUN Z, ZHENG J, et al. Mixing trees and crops increases land and water use efficiencies in a semi-arid area[J]. Agricultural Water Management, 2016, 178(2): 281 – 290.

[13] 袁寿其，李红，王新坤. 中国节水灌溉装备发展现状、问题、趋势与建议[J]. 排灌机械工程学报，2015，33(1)：78 – 92.
YUAN Shouqi, LI Hong, WANG Xinkun. Status, problems, trends and suggestions for water-saving irrigation equipment in China[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2015, 33(1): 78 – 92. (in Chinese)

[14] 李令媛，朱德兰，张林. 大流量压力补偿式灌水器水力性能[J]. 排灌机械工程学报，2013，31(12)：1083 – 1088.
LI Lingyuan, ZHU Delan, ZHANG Lin. Hydraulic performance of new pressure-compensating emitter with large flow[J].

Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013,31(12):1083 - 1088. (in Chinese)
[15] 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/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(12): 128 - 134.
NIU Wenquan, ZHANG Jun, ZHANG Linlin, et al. Effects of buried depth and pressure head on water movement of wetted soil during moistube-irrigation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 128 - 134. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20131221&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.12.021. (in Chinese)
[16] 程慧娟,王全九,白云岗,等. 垂直线源灌线源长度对湿润体特性的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 32 - 37.
CHENG Huijuan, WANG Quanjiu, BAI Yungang, et al. Influence of line source length of vertical line source irrigation on wetted soil change characteristics[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(6): 32 - 37. (in Chinese)
[17] SOKALSKA D I, HAMAN D Z, SZEWCZUK A, et al. Spatial root distribution of mature apple trees under drip irrigation system[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(6): 917 - 924.
[18] 吴普特,朱德兰,汪有科. 涌泉根灌技术研究与应用[J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(4): 354 - 357.
WU Pute, ZHU Delan, WANG Youke. Research and application of bubbled-root irrigation[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010,28(4):354 - 357. (in Chinese)
[19] 徐俊增,刘玮璇,卫琦,等. 基于 HYDRUS - 2D 的负压微润灌土壤水分运动模拟[J/OL]. 农业机械学报, 2021, 52(8): 287 - 296.
XU Junzeng, LIU Weixuan, WEI Qi, et al. Simulation of soil moisture movement under negative pressure micro-irrigation based on HYDRUS - 2D[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 287 - 296. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20210830&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.08.030. (in Chinese)
[20] 蔡耀辉. 微孔陶瓷灌水器开发与应用基础研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2019.
CAI Yaohui. Development and applied basic research of porous ceramic emitter[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019. (in Chinese)
[21] 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 Yaohui, WU Pute, ZHU Delan, et al. Preparation technology optimization of diatomite porous ceramic irrigation emitter[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(22): 70 - 76. (in Chinese)
[22] 蔡耀辉,吴普特,张林,等. 微孔陶瓷渗灌与地下滴灌土壤水分运移特性对比[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(4): 242 - 249.
CAI Yaohui, WU Pute, ZHANG Lin, et al. Comparison of characteristics of soil infiltration irrigation and moisture transfer for porous ceramic subsurface drip irrigation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 242 - 249. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170431&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.03. (in Chinese)
[23] CAI Y, WU P, ZHANG L, et al. Prediction of flow characteristics and risk assessment of deep percolation by ceramic emitters in loam[J]. Journal of Hydrology, 2018, 566: 901 - 909.
[24] CAI Y, WU P, ZHANG L, et al. Simulation of soil water movement under subsurface irrigation with porous ceramic emitter[J]. Agricultural Water Management, 2017, 192: 244 - 256.
[25] CAI Y, YAO C, WU P, et al. Effectiveness of a subsurface irrigation system with ceramic emitters under low-pressure conditions[J]. Agricultural Water Management, 2021, 243: 106390.
[26] LIU Z, JIAO X, ZHU C, et al. Micro-climatic and crop responses to micro-sprinkler irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2021, 243: 106498.
[27] 张川,张亨年,闫浩芳,等. 微喷灌结合滴灌对温室高温环境和作物生长生理特性的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(20): 83 - 89.
ZHANG Chuan, ZHANG Hengnian, YAN Haofang, et al. Effects of micro-sprinkler irrigation combined with drip irrigation on greenhouse high temperature environment and crop growth physiological characteristics[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(20): 83 - 89. (in Chinese)
[28] 朱兴业,万景红,ALEXANDER Fordjour,等. 旋转折射式喷头水量分布与喷灌均匀性试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 145 - 152.
ZHU Xingye, WAN Jinghong, ALEXANDER Fordjour, et al. Experiment of water distribution and uniformity of rotating plate sprinkler[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 145 - 152. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20180817&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.017. (in Chinese)
[29] 张以升,朱德兰,张林,等. 折射式喷头喷灌强度及能量空间变化规律研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 85 - 90.
ZHANG Yisheng, ZHU Delan, ZHANG Lin, et al. Spatial variation of application rate and droplet kinetic energy for fixed spray plate sprinkler[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 85 - 90. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20150713&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.013. (in Chinese)
[30] 葛茂生. 太阳能驱动卷盘式喷灌机灌水质量与优化设计研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2018.
GE Maosheng. Study on irrigation quality and optimal design of solar driven hard hose traveler[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018. (in Chinese)
[31] 魏正英,马胜利,周兴,等. 压力补偿灌水器水力性能影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(15): 19 - 25.
WEI Zhengying, MA Shengli, ZHOU Xing, et al. Influence factors on hydraulic performance of pressure-compensating emitter[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(15): 19 - 25. (in Chinese)
[32] 郭旭新,赵英,樊会芳,等. 陕西猕猴桃园可持续灌水技术[J]. 西北园艺(综合), 2019(3): 36 - 37.
[33] MU L, LIU H, CUI Y, et al. Mechanized technologies for scaffolding cultivation in the kiwifruit industry: a review[J]. Information Processing in Agriculture, 2018, 5(4): 401 - 410.