

# 喷嘴结构改造对微喷灌系统喷洒均匀度的影响研究

艾木都力·吾守尔<sup>1\*</sup>, 阿力木·许克尔<sup>2</sup>, 董文明<sup>3</sup>, 穆哈西<sup>3#</sup>

<sup>1</sup>新疆水利水电科学研究院, 新疆 乌鲁木齐

<sup>2</sup>新疆伊犁水利水电投资开发(集团)有限公司, 新疆 伊犁

<sup>3</sup>新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2023年12月18日; 录用日期: 2024年1月16日; 发布日期: 2024年1月23日

## 摘要

目的: 微喷头的喷洒均匀度与系统的灌溉效果有密切的关系, 经常出现漏喷现象而直接影响作物的正常生长, 从而导致作物的生长不齐产量降低, 该文提出改造喷嘴结构提高喷洒均匀度的方法。方法: 根据微喷头的三个参数与喷洒均匀度之间的关系, 原森苳喷头与改造喷嘴条件下对喷洒水量进行试验研究。结果: 试验结果表明: 在无风的条件下, 喷头流量受工作压力、喷嘴直径及喷嘴结构的影响, 当工作压力和喷嘴直径大时, 射程不理想, 打击强度大, 反之相反; 在工作压力稳定的条件下, 喷嘴直径及内部结构确定喷洒均匀度结论: 森苳喷头经改造喷嘴结构之后, 喷洒均匀度明显提高, 缩短喷洒时间, 并符合多喷头的组合原理。

## 关键词

微喷头, 喷嘴结构, 喷洒不均原因, 解决方法

# Study on the Influence of Nozzle Structure Reform on Sprinkling Uniformity of Micro Sprinkler Irrigation System

AI Mudouli·Wushuer<sup>1\*</sup>, A Limu·Xukeer<sup>2</sup>, Wenming Dong<sup>3</sup>, Haxi Mu<sup>3#</sup>

<sup>1</sup>Xinjiang Institute of Water Resources and Hydropower Research, Urumqi Xinjiang

<sup>2</sup>Xinjiang Yili Water Resources and Hydropower Investment Development Group, Yili Xinjiang

<sup>3</sup>College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi Xinjiang

\*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 艾木都力·吾守尔, 阿力木·许克尔, 董文明, 穆哈西. 喷嘴结构改造对微喷灌系统喷洒均匀度的影响研究[J]. 农业科学, 2024, 14(1): 47-58. DOI: 10.12677/hjas.2024.141008

## Abstract

**Objective:** The spraying uniformity of micro-nozzle is closely related to the irrigation effect of the system, and leakage and spraying often affect the normal growth of crops, which leads to the uneven growth of crops and the reduction of yield. This paper proposes a method to improve the spraying uniformity by reforming the nozzle structure. **Method:** According to the relationship between the three parameters of the micro-nozzle and the spraying uniformity, the experimental study on the spraying amount was carried out under the condition of the original Senqi nozzle and the modified nozzle. **Result:** The experimental results show that under the condition of no wind, the nozzle flow is affected by the working pressure, nozzle diameter and nozzle structure. When the working pressure and nozzle diameter are large, the range is not ideal and the impact intensity is large, and vice versa. Under the condition of stable working pressure, the nozzle diameter and internal structure determine the spraying uniformity. **Conclusion:** After revamping the nozzle structure, the uniformity of senqi nozzle is improved obviously, the spraying time is shortened, and it is in line with the combination principle of multiple nozzles.

## Keywords

Micro Nozzle, Nozzle Structure, Reasons for Uneven Spraying, The Solution

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

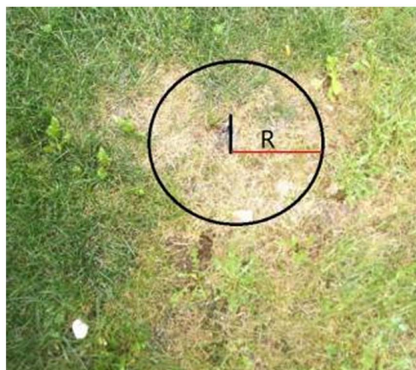
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

新疆是内陆干旱区，降雨稀少，蒸发量大，水资源短缺，降雨量往往不能满足作物对水分的要求，采用节水灌溉技术的方法满足作物的需水量。节水灌溉技术在我国已得到广泛应用，尤其是草坪和绿化作物常用微灌系统[1] [2]。一般由干管、支管、竖管及喷头组成的节水灌溉技术称之为喷灌系统[3]。喷灌系统根据竖管的高度、喷洒方式和工作压力的大小可分为喷灌和微喷灌等两大类[4] [5]。



**Figure 1.** Spraying effect of micro-sprinkling irrigation lawn

**图 1.** 微喷灌草坪喷洒效果

**【研究意义】**小面积的绿化灌区经常采用微喷灌系统，微喷灌系统由干管、支管和毛管上安装的许多微喷头组成，介于喷灌和滴灌之间的一种灌水方式[6] [7] [8]。微喷灌系统的喷洒均匀度直接影响作物的正常生长，喷洒水量的不均匀性不仅降低作物的覆盖度，而且影响作物的产量，因此研究喷洒均匀度是非常重要的。**【前人研究进展】**目前国内外很多学者研究节水灌溉技术的应用及研发相关设备，取得了引人瞩目的成果，并解决了很多实际问题[9] [10]。微喷灌系统的喷洒均匀度受难以把握无法控制的外部因素，也受内在因素的影响，对外部因素工作压力和喷头的内部结构进行分析可知：当喷头的竖管为原点时，离喷头远处的喷洒水量多，喷头近处的喷洒水量少，从而已形成喷洒不均匀的问题，这种喷洒不均问题亟待解决的技术问题(如图 1、图 2 所示)。



**Figure 2.** Effect of micro-spray irrigation alfalfa grass spraying  
**图 2.** 微喷灌苜蓿草喷洒效果

**【切入点】**根据喷头的几何参数、工作参数和水力性能等三个参数，对微喷头喷洒效果有关的流量、工作压力、射程及喷洒均匀度等指标进行分析，从喷头喷嘴结构为基础研究微喷头的喷洒均匀度。**【拟解决的问题】**该文解释了微灌系统各参数间的关系。在此基础上，两种微喷头(森芪和佐尔)剖开后发现：这两种喷头的内部结构基本相似，所以对森芪喷头的喷嘴进行改造，把喷洒不均的喷嘴改为能均匀喷洒的喷嘴，与此同时，对喷嘴改造前后的森芪喷头喷洒水量进行试验，为提高微喷灌系统的均匀度和灌溉效率提供依据。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 试验材料与方法

试验材料包括：支管，水表，球阀，毛管，竖管，微喷头、量水杯及尺子等；根据微喷头的三参数(几何参数、工作参数、水力性能参数)的原理，解释微灌系统各参数间的关系。在此基础上，森芪和佐尔两种微喷头分别剖开对内部结构进行分析，其中以所选的森芪喷头为基础，采用磨平喷嘴内部凸形扭面下部保留上部的方法，对森芪喷头的喷嘴内部进行改造，把喷洒不均的喷嘴改为能均匀喷洒的喷嘴。与此同时，对喷嘴改造前后的森芪喷头喷洒水量进行试验，通过试验数据来证实改造喷嘴后喷头喷洒水量的均匀性，解决了喷头的喷洒水量不均匀问题。

### 2.2. 微喷灌喷嘴的处理方法

1) 喷头形状及结构。通过上述喷头三个参数进行分析可知：工作压力、喷嘴直径及结构直接影响喷头流量的主要因素，如果工作压力和喷嘴直径大，射程不理想，打击强度大，反之相反；在工作压力固定的条件下，喷嘴直径及内部结构确定喷洒效果。森芪和佐尔喷头的结构如图 3 和图 4 所示。把这两

种喷头劈开观察喷嘴内部结构可知：喷嘴的内部由凸形扭面和凹形面组成。由于厂家的不同凸形扭面和凹形面设置在微喷头内的右边或左边，除此之外这两种喷头的内部结构基本上是一样的。



**Figure 3.** Nozzle of senqi and zuer micro-nozzle

**图 3.** 森芪和佐尔微喷头的喷嘴



**Figure 4.** Internal structure of senqi and zuer nozzles

**图 4.** 森芪和佐尔喷嘴的内部结构

图 4 中 1 是森芪喷嘴内凸形扭面的上部；2 是森芪喷嘴内部的凹面；3 是森芪喷嘴内凸形扭面的下部；4 是佐尔喷嘴内凸形扭面的上部；5 是佐尔喷嘴内凸形扭面的下部；6 是佐尔喷嘴内凹面。

2) 喷洒水量不均的原因。试验结果表明：喷嘴内部的凸形扭面和凹形面合在一起之后，喷嘴内部形成曹的形式，从进水口进的水在曹里受挤压而喷转出在外，从而增加喷头的转速。但是喷嘴上端宽、下端窄的原因直接影响喷洒均匀度，从而出现喷头的湿润范围内射程远处喷洒水量多，近处喷洒水量少的现象。这种喷洒不均匀情况一般很难发现，主要原因是降雨量和湿度大的灌区而言，喷洒周期长、相应的喷洒时间短，也就是说喷灌起到补充灌溉的作用；对干旱区而言：连续喷洒的时间为 3~4 h，并喷洒周期 7~8 天左右(作物种类有关)，在此情况下，射程远处喷洒水量多，喷洒的水下渗深度 15 cm 左右，射程近处喷洒的水下渗深度浅易蒸发，满足不了作物的需水量，所以出现如图 1 和图 2 所示的情况。

3) 微喷嘴的处理方法。喷嘴的改进方法是指：在喷嘴出水口的倾斜度不变的条件下，磨平喷嘴内凸形扭面下部的 1/3，保留上部的扭面，喷嘴宽度匀设为 1 mm [11]。

### 2.3. 试验设计

野外试验 2017 年 7~8 月在篮球场进行，场地地面是平滑的水泥，气温 36°，微喷灌系统由 1 条支管和 2 条毛管组成，每条毛管上安装 5 个喷头。在支管流量为 10 L/h、工作压力为 10 MPa、毛管间距为 10 m、

喷头间距为 10 m、每次开 1 条毛管的条件下，分别做原森芪喷头和改造喷头喷嘴的 2 种试验(如图 5 所示)。

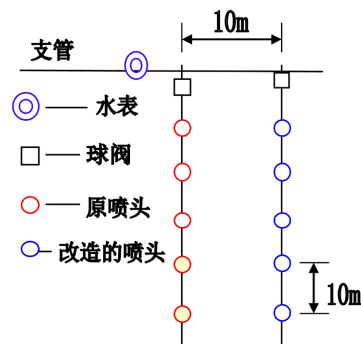


Figure 5. Two test charts of Sen Yuen Qi nozzle and modified nozzle.

图 5. 原森芪喷头和改造喷头喷嘴的 2 种试验图

### 3. 结果与分析

微灌系统由若干个微喷头组成。一般采用机械性能好，结构简单，工作可靠，水力性能好的微喷头，才能满足微灌系统的主要技术和节能的要求。为了避免微灌系统技术和节能要求间的相互制约矛盾，选用微喷头时，应全面考虑各种的要求，必须深入了解微喷头各水力参数之间的关系及其影响因素，才符合生产的要求[12] [13] [14] [15]。只要单一微喷头的喷洒水量均匀，才能许多微喷头组合形成的系统喷洒水量也均匀，因此对微喷头的三参数进行研究是解决喷洒不均匀的关键。该文以森芪和佐尔两种微喷头作为材料，对这两种微喷头的喷嘴形状及内部结构进行试验，并对微喷头的几何参数、工作参数和水力性能等三参数进行分析，采用改造微喷头喷嘴的方法，解决喷洒不均匀的问题。

#### 3.1. 微喷头的几何参数

微喷头的几何参数包括以下三个方面的内容：

1) 微喷头的进水口直径( $D$ )。进水口直径是竖管进水口的内径  $D$  (mm)，也就是毛管连接支撑的竖管，用于将水从毛管引至微喷头，一般常用竖管内径为 4 mm [16]。竖管内径小的条件下，设计的流速在 3~4 m/s 范围内时，才满足微喷头喷洒要求。

2) 微喷头喷嘴直径( $d$ )的作用。喷嘴直径是指喷嘴喷出水孔的直径  $d$  (mm)，有一定的工作压力条件下，喷嘴直径是反应喷洒能力好坏的重要指标。喷嘴的形状、喷嘴的结构、直径与工作压力之间有密切的关系。当工作压力相同时，则喷嘴直径越大，喷水量和喷洒强度就越大，但射程不一定越远，地面易积水，造成土壤侵蚀，雾化程度相对下降。雾化程度不仅与喷嘴结构及喷洒强度有密切的关系，而且喷洒强度与作物种类、土壤下渗能力、气候条件(气象、风速等)也有密切的关系。

3) 喷射角度( $\alpha$ )。喷射角度(又称为喷射仰角)是指喷嘴出口处射流与水平面的夹角。在工作压力和流量相等的条件下，喷射仰角是影响射程和喷洒水量分布的主要参数，最常用的旋转式喷射仰角为  $180^\circ$  为宜。

#### 3.2. 微喷头的工作参数

微喷头的工作参数包括以下三个方面的内容：



1) 工作压力( $h$ )。从最不利点的毛管起从下而上减管道损失加地形落差计算获得的工作压力( $H_{\text{需}}$ )。管道损失主要包括管道的沿程损失和局部水头损失(一般考虑多孔系数), 局部水头损失是沿程水头损失的10%来计算, 局部水头损失计算获得, 沿程水头损失和局部水头损失之和称为总损失。

① 系统流量计算( $Q_{\text{需}}$ )。系统流量是在分管上同时工作支管流量计算到水源所需的流量( $Q_{\text{需}}$ ), 以系统流量( $Q_{\text{需}}$ )和水源处的水头( $H_{\text{需}}$ )作为选水泵的控制依据。实践中同时满足系统流量( $Q_{\text{需}}$ )和水源处的水头( $H_{\text{需}}$ )较为困难。因此, 以系统流量( $Q_{\text{需}}$ )为主选择水泵, 所选水泵的扬程与水源处的水头( $H_{\text{需}}$ )不一定相等。满足系统流量相应的扬程大于水源处水头( $H_{\text{需}}$ )的情况下, 系统流量相应的扬程减去首部损失即系统提供的水头。系统提供的水头减去各管段的阶段损失加地形落差计算到每个节点(每条分管和支管的交接点)上即节点压力计算, 节点压力是选定管道承受压力的依据。

② 系统工作压力的确定。系统的工作压力反应微喷头是否正常工作指标, 其工作压力可分为3个档次, 10 MPa~12 MPa 的压力范围是最低工作压力、20 MPa 的压力是标准工作压力、30 MPa 的压力是最大工作压力。一般喷头进水口的压力不能低于最小压力, 也不能大于最大工作压力为宜。设计微喷灌系统时, 一般不考虑毛管和喷嘴流道内的水力损失, 采用毛管进水口处的压力平均分摊给每一个喷头的压力来计算, 所以经常出现毛管上的每个喷头压力不均情况。

2) 喷头流量( $q$ )。工作压力、喷嘴直径及喷嘴结构直接影响喷头流量。在工作压力和喷嘴直径大的条件下, 喷头流量会变大; 当工作压力大, 喷嘴直径较小的条件下, 喷头流量变小、雾化程度增大。由此可见, 喷头流量是选择喷头直径、结构、进水口直径的重要因素, 工作压力与喷头流量之间的关系如下:

$$q = ch^x \quad (1)$$

在式(1)中的  $q$  为喷头流量(L/h);  $c$  为流量系数;  $h$  为工作压力(MPa);  $x$  为流态指数, (一般按照下列流态选取, 层流  $x = 1$ , 光滑稳流  $x = 0.57$ , 紊流  $x = 0.5$ )。

3) 喷灌的射程( $R$ ), 射程的单位一般采用 m 表示。喷头喷水量的均匀度与工作压力、射程和喷嘴结构有密切的关系。在喷嘴已定的条件下, 工作压力增大, 喷头的射程也相应增大; 工作压力超出最大工作压力时, 再增加压力可提高雾化程度, 射程保持不变, 喷头的喷洒强度小、喷洒均匀度不理想。因此, 为提高喷灌对土壤的适用性, 喷头的布置间距可以增大, 这对于降低成本有利, 所以射程是喷头的一个重要工作参数[16]。

### 3.3. 微喷灌的水力性能参数

喷头的水力性能参数包括以下三个方面的内容:

1) 喷灌的喷洒强度( $\rho_s$ )。喷灌强度是设计微灌系统的主要参数, 又称之为微喷灌强度, 在单位面积上单位时间内喷洒的水量称之为微喷灌的强度, 一般用单位时间内喷洒在灌溉土地上的水深来表示, 计算单位用 mm/h 或 mm/min 表示。由于喷洒水量的分布不一定是均匀的, 因此, 喷头的水力性能用喷洒强度来评价的。

水滴在空气中的蒸发和飘移损失不考虑的条件下, 喷洒强度是以喷头喷出的水量与喷洒在地面上的水量相等的原理为依据, 用下式进行计算的:

$$\rho_s = \frac{1000q}{S} \quad (2)$$

式中:  $\rho_s$  为喷嘴强度(mm/h);  $q$  为喷头流量( $\text{m}^3/\text{h}$ );  $S$  为单一个喷头的控制面积( $\text{m}^2$ ); 喷头在全圆式喷洒时,  $S = \pi R^2$ ; 喷头作扇形喷洒时,  $S = \frac{\alpha}{360} \pi R^2$  ( $\alpha$  为扇形角)。

2) 微喷灌的水量分布图。不考虑风速影响的条件下,对喷头水量分布的影响因素有工作压力、喷头的类型和结构。下面通过试验,对原喷头和改造喷嘴后的森苕微喷头进行比较,将试验结果绘制喷头水量分布曲线如图4和图5所示。

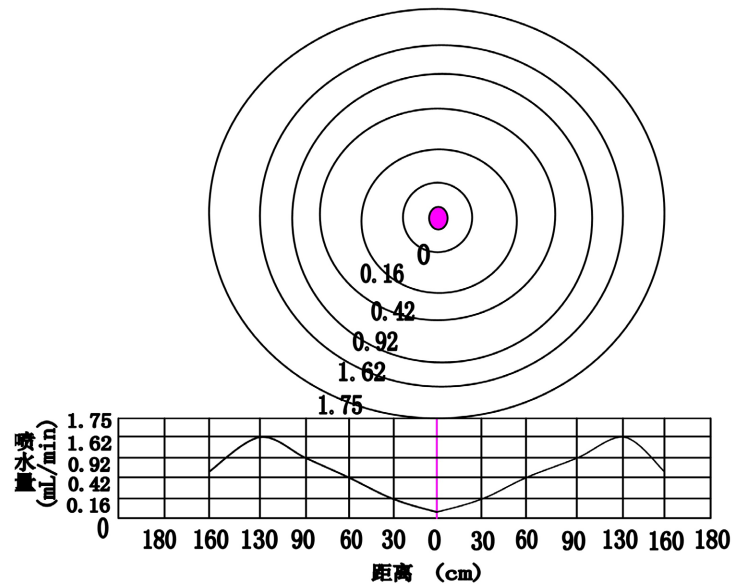


Figure 6. Water distribution map of the original micro-sprinkler  
图6. 原微喷头的水量分布图

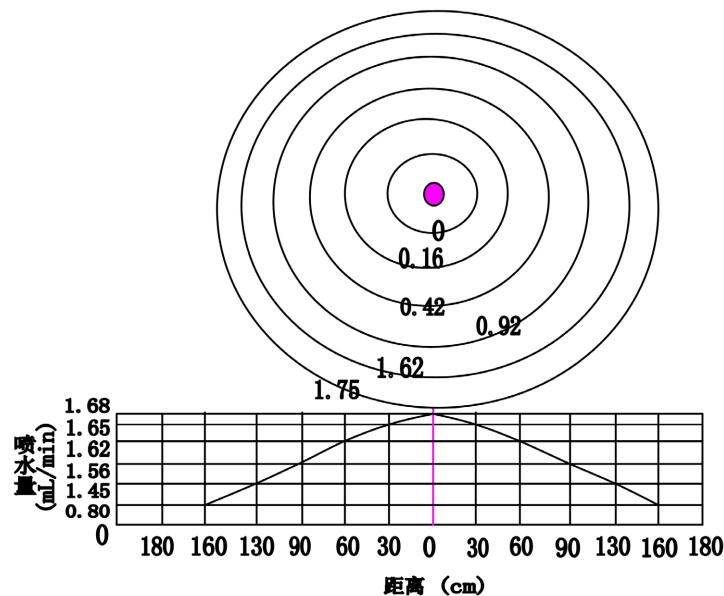


Figure 7. Water distribution map after nozzle modification  
图7. 改造喷嘴后的水量分布图

单一个原森苕微喷头喷洒时的水量分布图可看出(如图6所示):在工作压力10 MPa时,60 cm起喷洒水量逐渐增多到130 cm,峰值出现在130 cm之处,130 cm之后喷洒水量逐渐减少,这种情况不符合多喷头的组合原理;在工作压力15 MPa时,射程90~180 cm之间的喷水量增多,随着工作压力的增大,大部分水滴都变小,射程不远,0~90 cm间的滴水量不足。

改造后的森芪微喷头的水量分布图(如图7所示),在工作压力10 MPa时,0~130 cm之间的喷水量多,130 cm起喷洒水量逐渐减少;在工作压力15 MPa时,大部分水滴的大小不变,射程变化不明显。结果表明:改造喷嘴的森芪微喷头喷洒水量均匀,喷洒均匀度满足多微喷头组合设计的要求。

3) 喷灌水滴的打击强度。水滴打击强度表示喷头在喷洒范围内,单位面积上的水滴对土壤或作物的打击动能,也就是在单位时间内喷洒的水滴撞击作物的能量。对喷嘴进行改造之后水滴的大小均匀,水滴打击作物的强度变小。在实践中常用水滴直径(或雾化指标)来间接反映水滴打击强度。

① 微喷灌喷洒出的水滴直径。表1可看出:工作压力10 MPa的条件下,喷嘴进行改造后,森芪微喷头0~130 cm之间的水滴多,远处130~160 cm之间的水滴逐渐减少。这表明:在喷头工作压力、喷嘴直径和喷嘴结构不变的条件下,水滴直径大小均匀,因此,喷洒范围内喷洒的水量均匀。如果水滴直径大,易破坏土壤表层的团粒结构,并造成表土的板结,甚至会打伤幼苗,有时候水滴打击反弹出来的泥土会溅到作物叶面上影响作物的代谢功能;假如水滴直径过小时,水滴在空中受风的影响、容易蒸发或飘移等原因,从而浪费的水量较大。因此,要根据灌溉作物、土壤性质来确定水滴直径的适宜值为好。

② 喷灌的雾化指标( $\rho_d$ )。喷头水舌粉碎程度用雾化指标表示,雾化指标是喷头工作压力和喷嘴直径的比值来计算,计算公式如下:

$$\rho_d = \frac{1000h}{d} \quad (3)$$

式中: $\rho_d$ 为雾化指标; $h$ 为工作压力(m或MPa); $d$ 为喷嘴直径(mm)。

喷嘴结构、喷嘴的形状和工作压力与雾化指标有密切的关系,压力越大雾化指标越大,雾化程度越高就水滴直径就越小,打击强度越小。如果雾化指标 $\rho_d$ 过大,水量损失越大,能源和水量的浪费较大,对节水和节能不利。在微喷头的水力性能相同的条件下,喷头的工作压力越低越好,有利于节约能源。微灌技术的发展方向是采用低压喷头,因此,应在节省能源和其他费用间进行平衡选择为宜[17]。

### 3.4. 试验数据的观测

1) 喷头湿润体及喷洒水量的观测。许多喷头组成的系统在最低工作压力下正常工作,可保证整个系统的正常运行,如果系统工作压力大,可多开几个同时工作的支管数来调节压力。本试验测试的工作压力为10 MPa,支管流量为10 L/h的条件下,以毛管最后一个微喷头作为研究对象,在喷洒射程内每10 cm处摆设置量水杯、观测原森芪微喷头和改造喷嘴之后森芪微喷头的喷水量。结果表明:每个量水杯内的水量随着喷水时间的延长而增多,在单一喷头喷洒时间为20 min时,原森芪微喷头喷洒湿润体如图8所示。改造喷嘴后森芪微喷洒湿润体如图9所示。



Figure 8. Wetted body of senqi micro-nozzle  
图8. 原森芪微喷头的湿润体





**Figure 9.** Wetted body of senqi micro-nozzle after nozzle modification

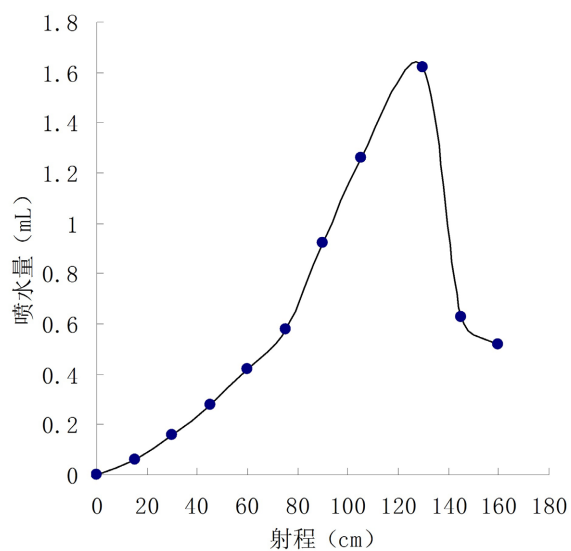
**图 9.** 经改造喷嘴后森芪微喷头的湿润体

原森芪喷头与改造喷嘴的喷洒水量(如表 1 所示), 喷嘴进行改造后喷洒水量的均匀度明显发生变化。

**Table 1.** The original Senqi nozzle and the spray water after the transformation nozzle  
**表 1.** 原森芪喷头和改造喷嘴后的喷洒水量

工作压力(MPa)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
射程(m)	0	15	30	45	60	75	90	105	130	145	160
原森芪喷洒水量(mm)	0	0.06	0.16	0.28	0.42	0.58	0.92	1.26	1.62	0.63	0.52
改喷嘴的喷洒水量(mm)	1.68	1.67	1.65	1.64	1.62	1.58	1.56	1.54	1.45	1.26	0.8

2) 喷头喷洒水量与射程的观测。根据表 1 中的观测数据, 绘制原森芪微喷头和改造喷嘴后的喷洒水量与射程的曲线(如图 10 和图 11 所示)。试验结果表明: 原森芪微喷头的喷洒水量峰值发生在 130 cm 处, 喷头远处 60~130 cm 喷水量多, 在小于 60 cm 的喷洒水量少, 在这种情况下无法实施多微喷头的组合。森芪微喷头的喷嘴进行改造后, 射程内的喷洒水量均匀, 离喷头 0~130 处的喷洒水量多, 在这种情况下不仅符合实施多微喷头的组合情况, 而且组合多喷头时不会出现喷洒不均匀情况。



**Figure 10.** Water volume curve of original micro sprinkler  
**图 10.** 原微喷头喷洒水量曲线

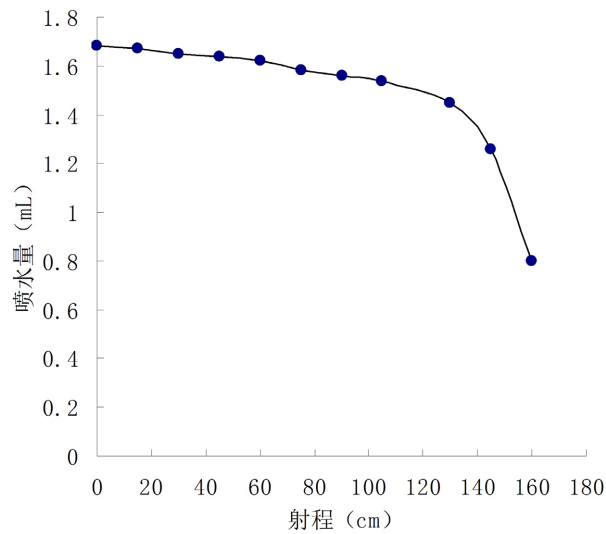


Figure 11. Water spraying curve of modified micro sprinkler  
图 11. 改造后微喷头的喷洒水量曲线

#### 4. 微喷灌系统的大田工作形式

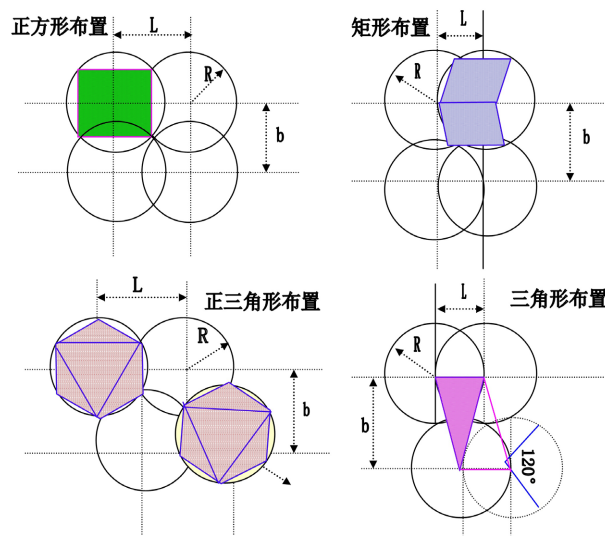


Figure 12. Multiple sprinkler combinations  
图 12. 多个喷头组合形式

1) 微灌系统微喷头的组合规律。一般情况下，微喷灌系统是喷灌时多微喷头组合喷洒水的方式进行灌溉，在微喷头的设计强度并不能表示实际的强度，二者在概念和数值上均有明显的区别。此外，为喷头喷洒出的水量不可避免地存在飘移损失和蒸发损失，所以实际喷洒强度和设计的喷洒强度也有差异。因此，引入洒水水利用系数表示实际喷洒到地面和作物上的水量与微喷头喷洒处的水量的差异，同时，根据为喷头的组合形式和作业方式一个微喷头在一次作业中的有效控制面积。喷头组合形式可分为扇形喷洒和全圆形喷洒两种，其中扇形喷洒是正方形布置和正三角形布置之分，全圆形喷洒是矩形和三角形布置之分(如图 12 所示)。单喷头同时喷洒，则一个喷头有效控制面积可用下式：

$$S_{\text{有效}} = L \times b \quad (4)$$

式中： $S_{\text{有效}}$ 为一个微喷头的有效湿润面积( $\text{m}^2$ )； $L$ 为毛管上微喷头间距( $\text{m}$ )； $b$ 为毛管的间距( $\text{m}$ )。

2) 多微喷头组合的喷灌强度。在微喷灌系统中，正确选择设计灌溉强度，对保证合理灌溉，提高灌水质量，有着重要的意义。一般情况下，微喷灌强度应与土壤透水性能相适应，应使喷灌强度不超过土壤入渗率(或允许喷灌强度)，而不会在地表形成积水或径流。当喷洒强度越大，射程越远，水滴直径就小，雾化程度高、将会造成喷水时间过长，水量蒸发、飘移损失加大。在喷嘴和喷洒水量大的条件下，喷灌强度越大，喷洒的水量会超过土壤入渗能力，将会出现地面积水或形成地表径流，破坏土壤结构，造成水土流失。多微喷头组合的喷灌强度按下式：

$$\rho = \frac{1000\eta}{S_{\text{有效}}} \times Q \quad (5)$$

式中： $\rho$ 为多微喷头组合的喷灌强度( $\text{mm}/\text{h}$ )； $Q$ 为微喷头流量( $\text{m}^3/\text{h}$ )； $\eta$ 为喷洒水利用系数。

3) 多微喷头的喷洒均匀度。喷洒均匀度是指喷灌面积上水量分布的均匀程度，喷洒均匀度是衡量喷头质量的指标，直接关系到喷灌作物的成活率。在喷灌系统中的喷灌均匀度是大面积上的均匀度，也就是喷头组合在一起时的均匀程度，喷洒均匀度是以单喷头的水量分布图为基础进行组合和分析，或实测得出的。喷洒均匀度与喷头结构、工作压力、喷头布置形式、喷头间距、喷头转速的均匀性、竖管的倾斜度、地面坡度和风速、风向等因素有关[18]。

表示喷灌均匀程度的方法很多，通常用喷洒均匀系数表示。均匀系数的公式有多种，我国国家标准(喷灌工程技术规范)中的规定采用美国克里斯琴森(Christiensen)均匀系数公式：

$$C_u = \left(1 - \frac{|\Delta h|}{\bar{h}}\right) \times 100 \quad (6)$$

式中： $C_u$ 为均匀系数(%)； $\bar{h}$ 为喷灌面积上各测点平均喷洒水深( $\text{mm}$ )； $\Delta h$ 为各点(量水杯)喷洒水深的平均偏差( $\text{mm}$ )。 $\bar{h}$ 和 $\Delta h$ 时要根据各测点代表的面积是否相等分别对待，选用如下式：

① 当各测点代表的面积相等时：

$$\bar{h} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n} \quad |\Delta h| = \frac{\sum_{i=1}^n |h_i - \bar{h}|}{n} \quad (7)$$

② 当各测点代表的面积不相等时，以面积为权，求加权平均值：

$$\bar{h} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i h_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad |\Delta h| = \frac{\sum_{i=1}^n S_i |h_i - \bar{h}|}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (8)$$

式中： $h_i$ 为某点的喷洒水深( $\text{mm}$ )； $S_i$ 为某点代表的喷洒面积( $\text{m}^2$ )； $n$ 为受水的量水杯点数。

## 5. 讨论

以森芪和佐尔两种喷头为材料，对喷头的三参数(几何参数、工作参数和水力性能参数)进行研究。森芪和佐尔两种喷头剖开后对内部结构进行对比可知：这两种喷头的内部结构基本相似，因此，以选择森芪喷头为研究对象，对森芪喷头的喷嘴进行改造的条件下，原森芪喷头和改造喷嘴之后的喷水量进行试验。试验结果表明：原森芪微喷头的喷洒水量峰值发生在 130 cm 处，喷头远处 60~130 cm 喷水量多，在小于 60 cm 的喷洒水量少，在这种情况下无法实施多微喷头的组合，这种结果与前人研究结果一致[18]。森芪微喷头的喷嘴进行改造之后，射程内的喷洒水量均匀，离喷头 0~130 处的喷洒水量多，在这

种情况不仅符合实施多微喷头的组合情况，而且组合多喷头时不会出现喷洒不均匀情况。

## 6. 结论

1) 在工作压力稳定的条件下，喷嘴直径及内部结构确定喷洒均匀度，经改造喷嘴结构后，微喷头的喷洒均匀度明显提高，缩短喷洒水的时间，并符合多喷头的组合原理。

2) 微喷头的喷嘴和喷嘴的内部结构直接影响喷洒均匀度，从而出现喷头射程的远处喷洒水量多，近处的喷洒水量少的现象。

3) 在喷嘴出水口的倾斜度不变、喷嘴宽度均匀为 1 mm 的条件下，可提高喷水量的均匀性，有效解决喷洒不均匀问题。

## 项目名称

国家自然科学基金“多寄主林垂直层次菱形栽种模式的防风固沙响应及灌溉制度研究”(3236130344)；横向项目“新疆耕地质量调查研究分析及治理对策研究”(6660939-2519HXKT1)。

## 参考文献

- [1] 史海滨, 田军仓, 刘庆华. 灌溉排水工程学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016: 94-128.
- [2] 王庆河. 农田水利[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006: 81-106.
- [3] 李宗尧. 节水灌溉技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004: 1-61.
- [4] 王春堂. 农田水利[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014: 184-263.
- [5] 周卫平, 宋广程, 邵恩. 微灌工程技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999: 1-143.
- [6] 陈雷. 节水灌溉技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999: 1-143.
- [7] 穆哈西, 穆丽德尔, 张小莹. 基于自压滴灌工程过滤装置及其控制面积研究[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(增刊 1): 102-106.
- [8] 穆哈西, 尼亚孜·胡马尔汗, 吾买尔·吐尔逊. 自压滴灌无用电过滤装置与系统流量平衡关系[J]. 中国农村水利水电, 2016, 408(10): 53-55.
- [9] 周世峰. 喷灌工程技术[M]. 北京: 黄河水利出版社, 2011: 1-216.
- [10] 穆哈西, 杰恩斯·马坦, 等. 基于自压滴灌工程过滤装置尺寸的确定及应用[J]. 节水灌溉, 2017, 257(1): 79-82.
- [11] 穆哈西, 黑木巴提·木哈拉, 等. 微喷头喷嘴的改进装置[P]. 中国专利: ZL2018219085005, 2018-03-05.
- [12] 李龙昌, 王彦军, 李永顺, 等. 管道输水工程技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998: 1-110.
- [13] 朱晓飞, 张振荣. 微喷灌在高效节水灌溉中的设计[J]. 上海水务, 2015, 31(4): 15-18.
- [14] 王凤民, 张媛. 微喷灌技术在农业中的应用[J]. 地下水, 2009, 31(141): 115-116.
- [15] 李治勤, 袁铃针, 李国元. 变频调速技术在微喷灌中的应用[J]. 节水灌溉, 2005(1): 21-23.
- [16] 张磊, 杜晓岗, 兰羽. 一种小型智能高效节水喷灌系统设计[J]. 自动控制与检测, 2015(9): 60-62.
- [17] 张德晖, 方文熙, 等. 单孔 PVC 微喷灌管喷水量的分布特性[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2010, 39(1): 102-106.
- [18] 赵竟成, 任晓力. 喷灌工程技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999: 1-172.