

铺设长度及入口压力交互作用对小流量滴灌带灌水均匀度的影响

阿垦里白·木赛^{1,2}, 李丰琇^{1,2}, 艾鹏睿^{1,2}, 马英杰^{1,2}, 付秋萍^{1,2}
田敏^{1,2}, 阿布都卡依木·阿布力米提³

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆水利工程安全与水灾害防治自治区重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052; 3. 新疆中农智水科技有限公司, 新疆 昌吉 831100)

摘要:为探究滴灌带铺设长度与入口压力交互作用对灌水均匀度的影响。以3种J型(进口型号)滴灌带和1种G型(国产型号)滴灌带为研究对象,分别对不同铺设长度和入口压力组合下的滴头流量进行测定,并运用变差系数(C_v)、Christiansen 均匀系数(C_u)及 Keller 均匀系数(E_u)进行了评价。结果表明: C_v 、 C_u 、 E_u 均随着滴灌带铺设长度和入口压力的变化而变化, C_u 与 E_u 呈正相关,与 C_v 呈负相关;以滴水孔流量变差系数 C_v 为判别指标,滴灌带铺设长度为200 m时, J_1 型入口压力为5~11 m、 J_2 型入口压力为3~11 m的滴灌带质量等级均为A(优);入口压力在1~11 m范围时, J_3 型滴灌带在各压力下的质量等级均为B(良)、G型滴灌带质量等级均为D(不合格)。滴灌带铺设长度为100 m时,J型滴灌带入口压力在1~11 m范围的质量等级均为A(优);G型入口压力在1~3 m时滴灌带质量等级为C(一般)。以均匀系数 E_u 和 C_u 为判别指标,J型滴灌带铺设长度为300 m时灌水均匀度均最低,入口压力为9~11 m时灌水均匀度均最高。基于上述判别指标,本试验所选各类型滴灌带铺设长度和入口压力的最佳搭配为: J_1 型滴灌带铺设长度200 m、入口压力9 m; J_2 型滴灌带铺设长度200 m、入口压力11 m; J_3 型滴灌带铺设长度200 m、入口压力11 m;G型滴灌带铺设长度100 m、入口压力7 m。

关键词:滴灌;小流量滴灌带;灌水均匀度;铺设长度;入口压力

中图分类号:S275.6

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2023)04-0217-08

Effect of the interaction between laying length and inlet pressure on irrigation uniformity of the small flow drip irrigation belt

Akenlibai · Musai^{1,2}, LI Fengxiu^{1,2}, AI Pengrui^{1,2}, MA Yingjie^{1,2},
FU Qiuping^{1,2}, TIAN Min^{1,2}, Abudukayimu · Abulimiti³

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;

2. Xinjiang Key Laboratory of Hydraulic Engineering Safety and Water Disasters Prevention, Urumqi

830052, China; 3. Xinjiang Smart Water for Agriculture Co., Ltd., Changji 831100, China)

Abstract: In order to explore the influence of the interaction between the laying length of drip irrigation belt and inlet pressure on the irrigation uniformity, three J-type (imported) drip irrigation belts and one G-type (made in China) drip irrigation belt were laid for the study of drip flow under different laying lengths and inlet pressure combinations. Then, the indices of Christiansen uniformity coefficient (C_u), variation coefficient (C_v) and Keller uniformity coefficient (E_u) were used to evaluate the drip irrigation belts. Experimental results show that C_v , C_u and E_u all change with the inlet pressure and laying length, C_u is positively correlated with E_u , but negatively correlated with C_v . With C_v as the discrimination index, when the laying length is 200 m, the inlet pressure of J_1 -type ranges from 5 to 11 m, and that of J_2 -type ranges from 3 to 11 m, the quality of the drip irrigation belt can reach A (excellent); the quality of

收稿日期:2022-12-29; 修回日期:2023-03-31

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD1900804-04);自治区重点研发专项项目(202107331);机采长绒棉水肥高效利用技术研究及示范项目(20210101);自治区重大科技专项项目(2020A01002-2)

作者简介:阿垦里白·木赛(1994—),男,新疆尼勒克人,硕士研究生,主要从事节水灌溉技术研究。

通讯作者:马英杰(1969—),男,河北保定人,教授,博士生导师,主要从事干旱区灌溉排水理论与技术研究。

J_3 -type is B (good) and G-type is D (unqualified) when the inlet pressure fall in the range of 1 – 11 m. When the laying length is 100 m, the quality of J-type drip irrigation belt is A (excellent) under the inlet pressure of 1 – 11 m; G-type is C (general) under the inlet pressure of 1 – 3 m. With the uniformity coefficient E_u and C_u as the discriminant indices, the irrigation uniformity of J-type drip irrigation belt is the lowest when the laying length is 300 m, and it is the highest when the inlet pressure is 9 – 11 m. Based on the above criteria, the optimal combination of laying length and inlet pressure of different drip irrigation belts are as follows: the length is 200 m, the inlet pressure is 9 m for J_1 -type drip irrigation belt; the length is 200 m, the inlet pressure is 11 m for J_2 -type and J_3 -type drip irrigation belt; the length is 100 m, the inlet pressure is 7 m for G-type drip irrigation belt.

Key words: drip irrigation; imported low-discharge drip irrigation belt; irrigation uniformity; laying length; inlet pressure

1 研究背景

滴灌是一种局部灌水方式,具有节水、节肥、省工、总投资少、高效等明显优点^[1-3],在新疆的玉米^[4-5]、小麦^[6-7]、棉花^[8-9]等多种作物种植中得到应用。但由于滴灌带铺设长度短、出地桩和阀门数量多、安装工作量大、一次性投资高、机械化作业不方便等原因,制约了当地滴灌技术的推广。随着土地运营规模不断扩大以及高标准农田建设和自动化滴灌技术的发展,长距离滴灌带铺设成为发展趋势,但灌水质量是否满足作物需水要求,是亟待验证的

关键问题。

2022年4—10月在新疆维吾尔自治区昌吉市昌吉国家农业科技园区京新园农场实施了一项滴灌工程项目,滴灌带单侧铺设长度达到295 m,滴灌带采用进口和国产两种类型,其大田布置如图1所示。但该项目没有系统测试和分析灌水质量情况。已有研究表明,灌水均匀度是对滴灌系统灌水质量进行评估的核心指标,因此,开展不同铺设长度及入口压力的交互作用对小流量滴灌带灌水均匀度的影响研究,对于科学评价滴灌带灌水质量,指导滴灌工程实施等生产实践活动意义重大。

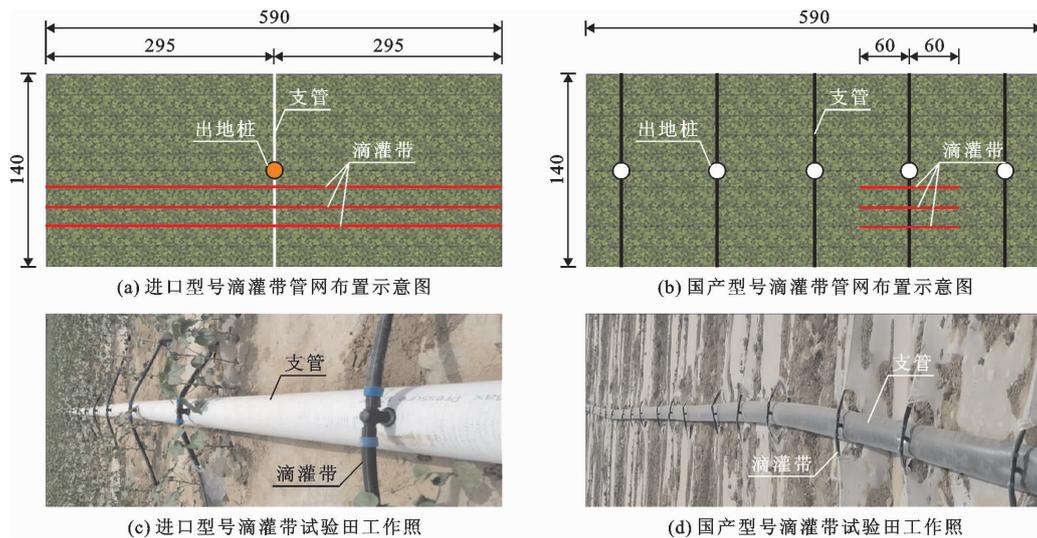


图1 进口滴灌带与国产滴灌带大田布置示意图(单位:m)

在设计滴灌系统并进行运行管理时,灌水均匀度是一个关键指标,采用较高的灌水均匀度能够达到作物增产、提质的目的,但会导致滴灌系统运营成本增加^[10];而在灌水均匀度较低的情况下,不仅会造成作物减产还会出现水分渗漏以及养分流失的情况,进而引发面源污染。张国祥等^[11]认为,为了提升滴灌系统的灌水均匀度、控制系统运行成本,滴头

设计水头应小于5 m。因而系统铺设长度、入口压力与灌水均匀度的关系一直备受关注。李文等^[12]、刘焕芳等^[13]认为入口压力对灌水均匀度的影响较小,而铺设长度对灌水均匀度影响显著。席奇亮等^[14]认为内嵌式滴灌带的灌水均匀度优于薄壁式滴灌带,更适合用于长距离铺设。郑国玉等^[15]研究发现,低压系统中滴头流态系数不大于0.5的滴灌

带可以改善低压系统的灌水均匀度,确保灌水质量要求。以上研究结果丰富了滴灌系统灌水均匀度的内容,但是,关于大田中常使用的滴灌带的最佳铺设长度、不同铺设长度和入口压力的交互作用对灌水均匀度的影响、铺设长距离滴灌带是否满足灌水质量要求等问题的研究较少。因此,本文以3种以色列产小流量滴灌带与1种国产当地常用的滴灌带为研究对象,开展不同毛管入口压力和铺设长度下灌水均匀度测试试验,对低压系统中4种滴灌带质量等级进行评价,分析不同铺设长度及入口压力条件下灌水均匀度的差异及交互效应影响,根据最大灌水均匀度要求,对低压条件下铺设长度与入口压力组合进行寻优,并建立灌水均匀度与变差系数的相关关系,以为长毛管铺设的滴灌系统优化布置提供理论依据。

2 材料与方 法

2.1 研究区概况

本试验于2022年9月在新疆维吾尔自治区昌吉国家农业科技园区开展,园区位于天山北缘、准噶尔盆地南缘(87°06'13.08"E,44°11'09.59"N,海拔578 m),属于温带大陆性气候,大于10℃积温度为3 183.1℃,年均降水量为242 mm、蒸发量为1 566 mm、风速为1.7 m/s、日照时间为2 867 h,6—9月日均太阳总辐射为19.5 MJ/(m²·d),日均相对湿度为55%。

2.2 试验材料

本试验选用以色列耐特菲姆(Netafim)农业科技有限公司生产的3种Stream line X进口内镶式小流量滴灌带(以下简称J₁型、J₂型、J₃型)和昌吉市

昌吉国家农业科技园区常用的一种国产内镶式滴灌带(以下简称G型)进行对比试验,各型滴灌带基本参数见表1。

表1 试验用滴灌带参数

滴灌带类型	管径/mm	滴头间距/cm	额定流量/(L·h ⁻¹)
J ₁ 型	22	30	0.35
J ₂ 型	22	30	0.75
J ₃ 型	16	40	1.10
G型	16	30	3.00

2.3 试验装置与方法

滴灌系统试验装置如图2所示。将地表水水源引入储水池(体积为45 m³),采用智能永磁变频水泵(型号为XL25GZHB 2-20)进行增压,运用压力调节阀对滴灌带进口压力进行调节(压力表精度为0.025 MPa),使用水杯、量筒、秒表等对滴头流量进行观测,待滴灌带入口压力稳定后开始记录滴水时间(测试时长为6 min)。本试验设置铺设长度和入口压力2个因素,滴灌带铺设长度分别为100 m(L₁处理)、200 m(L₂处理)、300 m(L₃处理),入口压力分别为1 m(Y₁处理)、3 m(Y₃处理)、5 m(Y₅处理)、7 m(Y₇处理)、9 m(Y₉处理)、11 m(Y₁₁处理),分别测量了不同铺设长度和入口压力条件下滴头的流量,测量时分别从滴灌带首端第4个滴头和末端第4个滴头起沿滴灌带共选取32个测量点(首端16个,末端16个),并计算出灌水均匀度,每组试验重复3次。

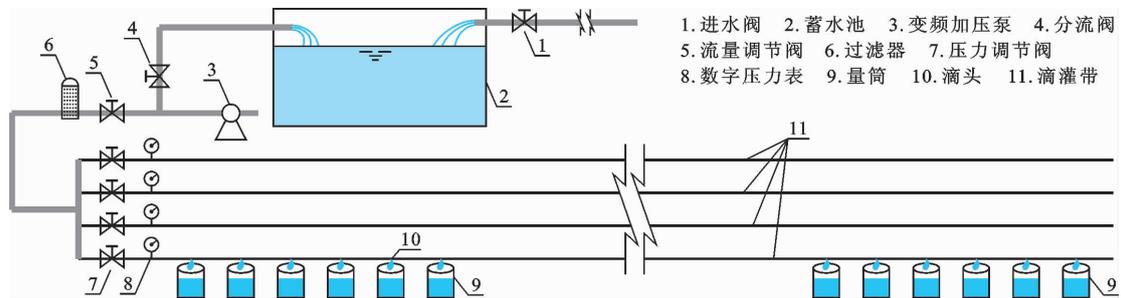


图2 滴灌系统试验装置示意图

2.4 灌水均匀度的计算

灌水均匀度是评价滴灌系统灌水质量优劣的主要技术指标之一^[16]。本研究采用变差系数(C_v)、Christiansen 均匀系数(C_u)和 Keller 均匀系数(E_u)作为评价指标对所选不同类型滴灌带的灌水均匀度进行评价,各指标计算方法见公式(1)~(5),评价

等级划分见表2。

C_u 计算公式:

$$C_u = 1 - \frac{\overline{\Delta x}}{x} \quad (1)$$

$$\overline{\Delta x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}| \quad (2)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3)$$

式中: C_u 为Christiansen均匀系数; n 为滴水孔个数; Δx 为滴水孔流量的平均偏差,L/h; x_i 为第*i*个滴水孔的流量,L/h; \bar{x} 为各滴水孔平均流量,L/h。

C_v 计算公式:

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (4)$$

式中: C_v 为滴水孔流量的变差系数; σ 为滴水孔流量的标准差,L/h。

E_u 计算公式:

$$E_u = \frac{\bar{x}_{25\%}}{\bar{x}} \quad (5)$$

式中: E_u 为Keller均匀系数; $\bar{x}_{25\%}$ 为占实测滴水孔数目1/4的低流量平均值,L/h。

表2 E_u 、 C_v 和 C_u 指标评价等级划分

评价等级	E_u	C_v	C_u
优(A)	(0.90,1.00]	(0,0.05)	> 0.8(合格)
良(B)	(0.80,0.90]	[0.05,0.10]	
一般(C)	(0.70,0.80]	(0.10,0.15]	
不合格(D)	[0,0.70]	> 0.15	[0,0.8)

注: E_u 和 C_v 评价等级划分参考《美国国家灌溉工程手册》^[17];
 C_u 评价等级划分参考《微灌工程技术标准》^[18]。

2.5 数据处理

利用Excel 2013对全部测试资料进行了整理和计算,并利用SPSS 22.0对其进行统计和分析。

3 结果与分析

3.1 滴灌带不同铺设长度和入口压力下滴水孔流量的变差系数

试验观测了滴灌带不同铺设长度和入口压力下所选滴水孔的流量,并计算出各试验型号滴灌带在不同铺设长度时滴水孔流量的变差系数 C_v 随入口压力的变化规律,如图3所示。

由图3可知,当滴灌带铺设长度为100 m时(图3(a)),J型滴灌带在多数入口压力值下满足 $C_v < 0.05$,等级属于A(优);G型滴灌带入口压力在1~3 m范围内满足 $0.10 < C_v \leq 0.15$,等级属于C(一般)。当滴灌带铺设长度为200 m时(图3(b)), J_1 型滴灌带入口压力在5~11 m、 J_2 型滴灌带入口压力在3~11 m下均满足 $C_v < 0.05$,等级属于A(优); J_3 型滴灌带在各入口压力值下满足 $0.05 < C_v \leq 0.10$,等级属于B(良);G型滴灌带在各入口

压力值下满足 $C_v > 0.15$,等级属于D(不合格)。当滴灌带铺设长度为300 m时(图3(c)), J_1 型滴灌带入口压力在1~5 m下满足 $0.05 < C_v \leq 0.1$,等级属于B(良),在7~11 m下满足 $C_v > 0.15$,等级属于D(不合格); J_2 型滴灌带入口压力在1~11 m范围内满足 $0.10 < C_v \leq 0.15$,等级属于C(一般); J_3 型滴灌带在各入口压力下满足 $C_v > 0.15$,等级属于D(不合格);G型滴灌带在各入口压力下的 C_v 值均大于0.9,等级属于D(不合格)。

从上述滴水孔流量的变差系数 C_v 值分析可知,当滴灌带铺设长度为300 m时,除 J_1 型滴灌带在个别入口压力下质量达到等级B(良)之外,其余均为一般或不合格,试验所测试的3种滴灌带的制造工艺不适宜铺设300 m。

3.2 滴灌带不同铺设长度和入口压力下灌水均匀度的变化

用Christiansen均匀系数(C_u)和Keller均匀系数(E_u)表征灌水均匀度,各类型滴灌带不同铺设长度和入口压力下 C_u 和 E_u 的变化分别见图4、5,图中不同小写字母表示处理间存在显著性差异($P < 0.05$),下同。

用Christiansen均匀系数(C_u)表征灌水均匀度时,由于J型滴灌带的灌水均匀度随铺设长度和进口压力的变化趋势类似,因此以 J_1 型滴灌带为例进行分析。由图4(a)可知, J_1 型滴灌带在不同铺设长度条件下, L_3 处理的 C_u 值最低(0.886 5),显著低于 L_1 、 L_2 处理($P < 0.05$),而 L_1 、 L_2 处理的 C_u 差异不显著;由图5(a)可知, J_1 型滴灌带在不同入口压力条件下, Y_9 处理的 C_u 值最高(0.970 1),显著高于 Y_1 处理,而与其他处理的 C_u 值差异不显著,说明 C_u 值随着铺设长度和入口压力的变化而变化,但长度对其变化影响显著,入口压力对其变化影响不显著。对于G型滴灌带,以 L_1 处理的 C_u 值最高(0.847 9),显著高于 L_2 、 L_3 处理,G型滴灌带3种铺设长度之间的差异均达到了显著水平($P < 0.05$),在6种入口压力的灌水均匀度中, Y_{11} 处理的 C_u 值最高,与 Y_9 和 Y_7 差异不显著($P > 0.05$),与其他各处理之间的差异达到了显著水平($P < 0.05$)。

用Keller均匀系数(E_u)表征灌水均匀度时,由图4(b)、5(b)可以看出,J型滴灌带的 E_u 值变化趋势也类似。以 J_1 型滴灌带为例,不同铺设长度条件下, L_3 处理的 E_u 值最低(0.811 4),显著低于 L_1 、 L_2 处理($P < 0.05$),而 L_1 、 L_2 处理的 E_u 差异不显著;

不同滴灌带入口压力条件下, Y_9 处理的 E_u 值最高(0.958 2), 显著高于 Y_1 处理, 而与其他处理差异不显著。对于 G 型滴灌带, 3 种铺设长度中, 以 L_1 处理的 E_u 值最高(0.824 3), 显著高于 L_2 、 L_3 处理, G 型滴灌带 3 种铺设长度 E_u 值之间的差异均达到了显著水平($P < 0.05$); 6 种入口压力中, Y_{11} 处理的 E_u 值最高, 与 Y_1 、 Y_3 、 Y_5 之间的差异达到了显著水平($P < 0.05$)。

通过上述分析认为, 虽然 J 型滴灌带铺设长度

为 300 m 时可满足《微灌工程技术标准》^[18] 要求, 但按照《美国国家灌溉工程手册》^[17] 评价, 灌水质量仅为良或一般, 而铺设长度 ≤ 200 m 时, E_u 和 C_u 值均大于 0.9, 评价等级为 A(优)。因此, 建议 J 型滴灌带铺设长度小于 200 m。G 型滴灌带的铺设长度为 100 m 时, E_u 和 C_u 值均大于 0.8, 评价等级为 B(良), 也仅能满足《微灌工程技术标准》要求, 而铺设长度为 200 和 300 m 时, E_u 值为 0.018 4 ~ 0.289 9, 评价等级为 D(不合格)。

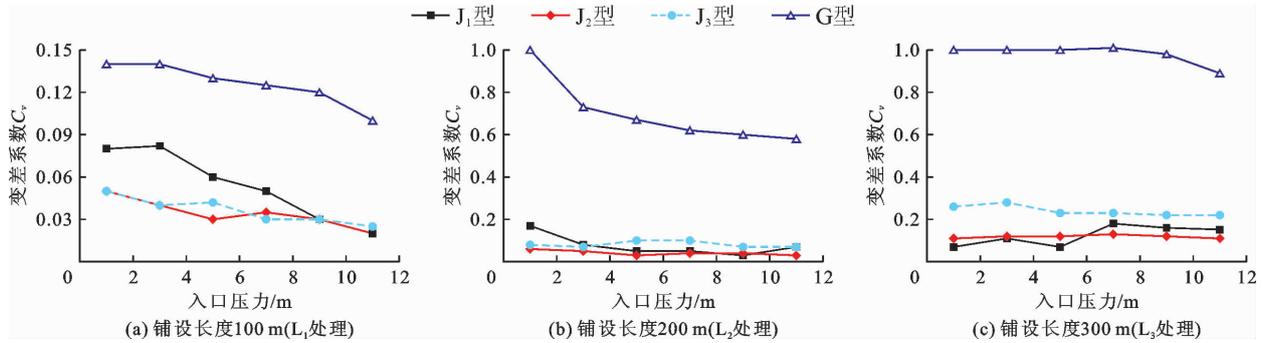


图 3 各类型滴灌带在不同铺设长度时滴水孔流量的 C_v 值随入口压力的变化规律

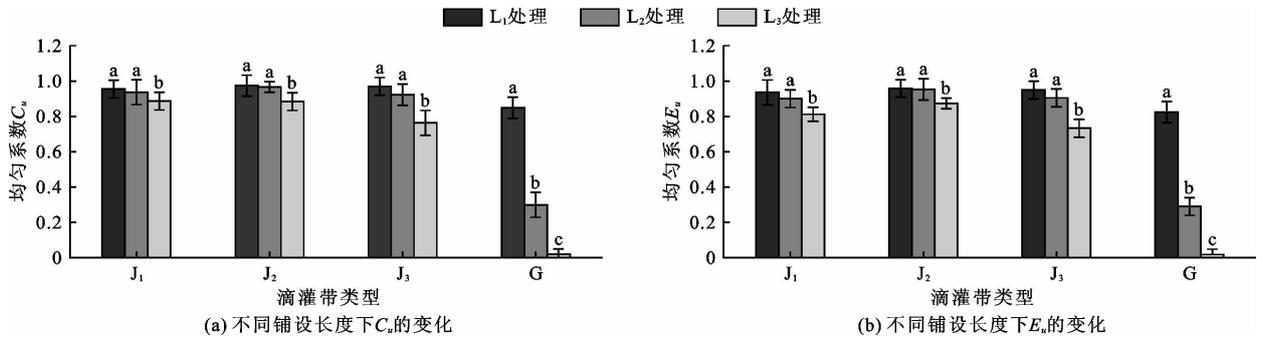


图 4 各类型滴灌带不同铺设长度下 C_u 和 E_u 值的变化

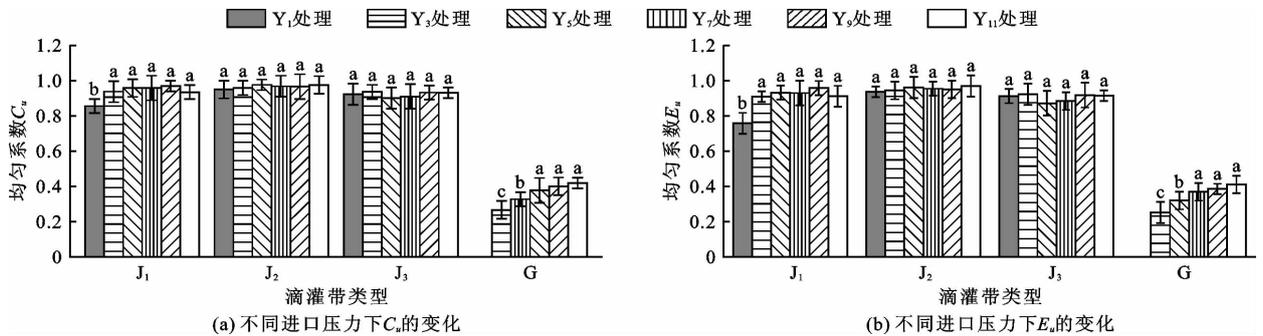


图 5 各类型滴灌带不同入口压力下 C_u 和 E_u 值的变化

3.3 铺设长度和入口压力交互作用对灌水均匀度的影响分析

根据上文分析, 选取 100 m (L_1 处理) 和 200 m (L_2 处理) 两种滴灌带铺设长度, 研究 J_1 型、 J_2 型、 J_3 型和 G 型 4 种型号滴灌带在该两种铺设长度和 6 种

入口压力 (Y_1 、 Y_3 、 Y_5 、 Y_7 、 Y_9 、 Y_{11} 处理) 交互作用对灌水均匀度的影响, 结果见图 6。由图 6 中灌水均匀度最优的角度来看, 当铺设长度为 100 m 时, J_1 型滴灌带的最优组合为 $L_1 \times Y_{11}$, 其灌水均匀度为 0.980 7, J_2 型滴灌带的最优组合为 $L_1 \times Y_{11}$, 其灌水

均匀度为0.9819, J_3 型滴灌带的最优组合为 $L_1 \times Y_9$, 其灌水均匀度为0.9825, G型滴灌带的最优组合为 $L_1 \times Y_7$, 其灌水均匀度为0.8610; 当铺设长度为200 m时, J_1 型滴灌带的最优组合为 $L_2 \times Y_9$, 其灌水均匀度为0.9700, J_2 型滴灌带的最优组合为 $L_2 \times Y_{11}$, 其灌水均匀度为0.9766, J_3 型滴灌带的最优组合为 $L_2 \times Y_{11}$, 其灌水均匀度为0.9368, 而G型滴灌带无最优组合。

由图6可知, 对于 J_1 型滴灌带, $L_1 \times Y_5$ 、 $L_1 \times Y_7$ 、 $L_1 \times Y_9$ 、 $L_1 \times Y_{11}$ 、 $L_2 \times Y_5$ 、 $L_2 \times Y_7$ 、 $L_2 \times Y_9$ 组合的灌水均匀度分别为0.9600、0.9506、0.9718、0.9807、0.9583、0.9588、0.9700, 显著优于其他组合, 其中最佳搭配为 $L_1 \times Y_{11}$ 和 $L_2 \times Y_9$; 对于 J_2 型滴灌带, $L_1 \times Y_3$ 、 $L_1 \times Y_5$ 、 $L_1 \times Y_7$ 、 $L_1 \times Y_9$ 、 $L_1 \times Y_{11}$ 、 $L_2 \times Y_5$ 、 $L_2 \times Y_7$ 、 $L_2 \times Y_9$ 、 $L_2 \times Y_{11}$ 组合的灌水均匀度分别为0.9707、0.9805、0.9704、0.9783、0.9819、

0.9760、0.9687、0.9669、0.9766, 显著优于其他组合, 其中最佳搭配为 $L_1 \times Y_{11}$ 和 $L_2 \times Y_{11}$; 对于 J_3 型滴灌带, $L_1 \times Y_1$ 、 $L_1 \times Y_3$ 、 $L_1 \times Y_5$ 、 $L_1 \times Y_7$ 、 $L_1 \times Y_9$ 、 $L_1 \times Y_{11}$ 、 $L_2 \times Y_{11}$ 组合的灌水均匀度分别为0.9546、0.9638、0.9644、0.9765、0.9825、0.9747、0.9368, 显著优于其他组合, 其中最佳搭配为 $L_1 \times Y_9$ 和 $L_2 \times Y_{11}$; 对于G型滴灌带, $L_1 \times Y_1$ 、 $L_1 \times Y_3$ 、 $L_1 \times Y_5$ 、 $L_1 \times Y_7$ 、 $L_1 \times Y_9$ 、 $L_1 \times Y_{11}$ 组合的灌水均匀度分别为0.8386、0.8601、0.8454、0.8609、0.8420、0.8392, 显著优于其他组合, 其中最佳搭配为 $L_1 \times Y_7$ 。

3.4 不同入口压力条件下灌水均匀度各指标间相关关系分析

图7给出了灌水均匀度指标 Christiansen 均匀系数 (C_u) 与 Keller 均匀系数 (E_u)、变差系数 (C_v) 在滴灌带入口压力为低压(1~8 m)及常压(8~11 m)下的线性相关关系。

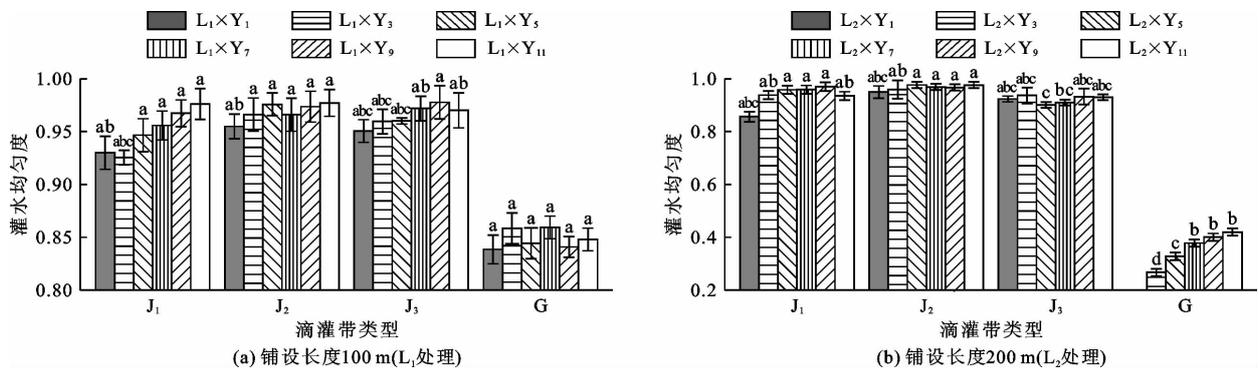


图6 各类型滴灌带不同铺设长度和入口压力交互作用对灌水均匀度的影响

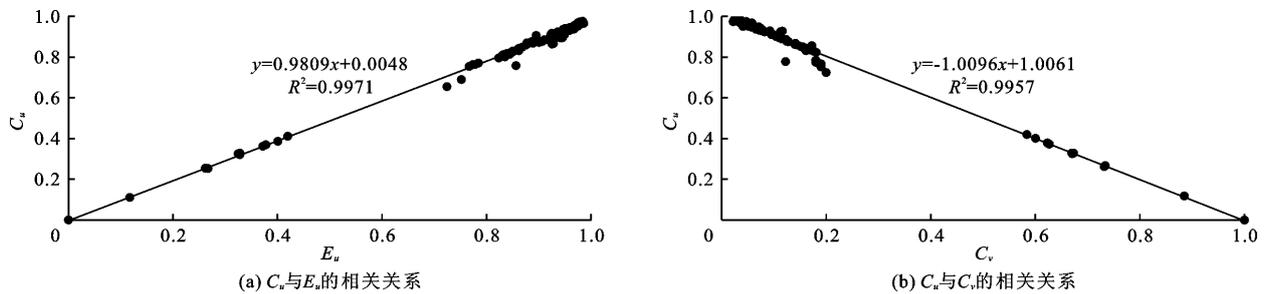


图7 C_u 与 E_u 、 C_v 的线性相关关系

由图7可知, 无论在低压(1~8 m)条件下还是常压(8~11 m)条件下, C_u 均随 E_u 的增加而增加, 呈正相关线性关系, 随 C_v 的增加而减小, 呈负相关线性关系, 而且 E_u 值均小于 C_u 值, 这与《微灌工程技术标准》^[18] 相一致。此外, 在不考虑压力的影响时, J_1 、 J_2 、 J_3 型滴灌带 E_u 值在0.8~1.0范围内, 并且大多数集中在0.96左右, 灌水均匀度较高, 仅有极少数值小于0.8。 C_u 与 E_u 的线性关系为 $C_u = 0.9809 E_u +$

0.0048 ($R^2 = 0.9971$); C_u 与 C_v 的线性关系为 $C_u = -1.0096 C_v + 1.0061$ ($R^2 = 0.9957$)。表明3个指标的相关性较好, R^2 均大于0.99, 灌水均匀度各指标之间可通过换算进行推求。

4 讨论

灌水均匀度是评价滴灌系统灌水质量的主要指标之一^[17], 滴灌带的制造偏差^[19]、入口压力^[20-21]、

铺设长度^[22]、地形坡度^[23-24]、堵塞^[25-30]等都会影响灌水均匀度。由于滴灌带厂家制造技术和材料热胀冷缩变形的影响,制造偏差难以避免^[31]。灌水均匀度还与滴头运行压力有关,而滴头运行压力又受到入口压力和铺设长度两个因素的影响^[32]。因此,本试验考虑了滴灌带铺设长度和入口压力及其之间的交互作用对灌水均匀度的影响。

在不同入口压力情况下,滴水孔流量的变差系数均随着压力的降低而增大,这与梁华锋等^[33]研究结果相同。本研究表明,不同入口压力下滴水孔流量变差系数大的滴灌带均为G型滴灌带,且远大于J型滴灌带。当滴灌带铺设长度不超过200 m时,J型滴灌带滴水孔流量的变差系数变化不明显。其原因是G型滴灌带制造精度低,而J型滴灌带制造精度高,这与张慧等^[34]的研究结果一致。在相同入口压力下,不同管径滴水孔流量的变差系数也有所不同,管径大,则变差系数小,如J₂型滴灌带(管径为22 mm,滴头间距为30 cm)滴水孔流量的变差系数一般小于J₃型滴灌带(管径为16 mm,滴头间距为40 cm)。

计算结果表明,滴灌带灌水均匀度受到4种滴灌带类型及其铺设长度和入口压力两种因素的显著影响,但两种因素的影响程度有所不同,相较于入口压力,铺设长度的影响更为显著,这与王建众等^[35]的研究结果相一致。当滴灌带入口压力在1~11 m范围内变化时,4种不同类型的滴灌带滴头平均流量与入口压力呈正相关,与滴灌带铺设长度呈负相关,这与李文等^[12]的研究结果一致。

滴灌带的铺设长度与入口压力之间存在显著的交互作用效应,J₁型滴灌带的最佳搭配为L₁×Y₁₁、L₂×Y₉;J₂型滴灌带的最佳搭配为L₁×Y₁₁、L₂×Y₁₁;J₃型滴灌带的最佳搭配为L₁×Y₉、L₂×Y₁₁;G型滴灌带的最佳搭配为L₁×Y₇。这与席奇亮等^[14]的研究结果存在一定的差异,可能是本试验采用的滴灌带铺设长度较长,导致滴灌带所需要的入口压力较高所致。

当滴灌带入口压力在1~11 m范围内、铺设长度在100~300 m范围内变化时,4种不同类型滴灌带的C_v值均随E_u值的增加而增加,呈正相关关系,随C_v值的增加而减小,呈负相关关系,而且E_u值均小于C_v值,这与李久生等^[36]的研究结果一致。

本研究中未考虑滴灌带铺设地形、管带堵塞以及入口高压条件等因素对灌水均匀度的影响,因而研究成果还有待于进一步完善。

5 结论

(1) 滴灌带灌水均匀度指标C_v、C_u、E_u均随着铺设长度和入口压力的变化而变化,铺设长度对其影响显著,入口压力对其影响不显著;C_u和E_u均可以定量评价滴灌带不同铺设长度和入口压力交互作用的组合关系,从而确定滴灌带铺设长度和入口压力的最优组合。该3个指标的相关性较强,C_u与E_u呈正相关,与C_v呈负相关。

(2) 从滴水孔流量变差系数C_v值分析,滴灌带铺设长度为200 m时,J₁型入口压力在5~11 m、J₂型入口压力在3~11 m范围内的滴灌带质量等级为A(优);入口压力在1~11 m范围时,J₃型滴灌带质量等级均为B(良)、G型滴灌带质量等级均为D(不合格)。滴灌带铺设长度为100 m时,J型滴灌带入口压力在1~11 m范围的质量等级均为A(优),G型滴灌带入口压力在1~3 m范围的滴灌带质量等级均为C(一般)。因此,为保证滴灌带灌水质量达到良及以上的水平,建议J型滴灌带铺设长度小于200 m,G型滴灌带铺设的长度远小于100 m。

(3) 我国《微灌工程技术标准》要求低于《美国国家灌溉工程手册》的要求,虽然J型滴灌带铺设长度为300 m时满足《微灌工程技术标准》要求,但按照《美国国家灌溉工程手册》评价,灌水质量等级仅为良或一般。G型滴灌带的铺设长度为100 m时,能满足《微灌工程技术标准》要求,但按照《美国国家灌溉工程手册》评价,灌水质量等级仅为良。

(4) 本试验所选各类型滴灌带铺设长度和入口压力的最佳搭配为:J₁型滴灌带铺设长度200 m、入口压力9 m;J₂型滴灌带铺设长度200 m、入口压力11 m;J₃型滴灌带铺设长度200 m、入口压力11 m;G型滴灌带铺设长度100 m、入口压力7 m。

参考文献:

- [1] 曹雪松,郑和祥,苗平,等.引黄滴灌条件下水氮互作对玉米耗水特性及产量的影响[J].灌溉排水学报,2022,41(3):33-39.
- [2] 李朝阳,王兴鹏,杨玉辉.滴灌带铺设模式对成龄枣树根系再分布及产量的影响[J].灌溉排水学报,2021,40(5):1-7.
- [3] 马英杰,何继武,洪明,等.新疆膜下滴灌技术发展过程及趋势分析[J].节水灌溉,2010(12):87-89.
- [4] 李德智,佟玲,吴宣毅,等.不同滴头流量和灌水频率对玉米产量、耗水及水分利用效率的影响[J].水资源与水工程学报,2020,31(4):208-215.
- [5] FENG Ji, LI Yunkai, WANG Weinan, et al. Effect of optimi-

- zation forms of flow path on emitter hydraulic and anti-clogging performance in drip irrigation system[J]. *Irrigation Science*, 2018(36):37-47.
- [6] 郑和祥,曹雪松,畅利毛,等.河套灌区不同盐渍化土壤冬小麦优化灌溉制度研究[J].*水资源与水工程学报*, 2020,31(4):152-156.
- [7] WANG Tianzhi, GUO Zuchen, KUO Chih-Ting. Effects of mixing Yellow River water with brackish water on the emitter's clogging substance and solid particles in drip irrigation [J]. *Irrigation Science*, 2019(1):1269.
- [8] 宁松瑞,颜安,柳维扬,等.盐胁迫膜下滴灌棉花生长及产量对氮磷钾追施配比的响应分析[J].*水资源与水工程学报*, 2022,33(5):208-215.
- [9] 李芳松,雷晓云,周世军,等.南疆地区棉花整个生育期内土壤水分空间变异性分析[J].*水资源与水工程学报*, 2010,21(2):63-67.
- [10] 陈渠昌.滴灌均匀度的模拟研究[D].北京:北京农业工程大学,1993.
- [11] 张国祥,吴普特.滴灌系统滴头设计水头的取值依据[J].*农业工程学报*, 2005, 21(9):20-22.
- [12] 李文,黄修桥,韩启彪,等.低压滴灌条件下均匀度各指标相关关系试验研究[J].*灌溉排水学报*, 2017, 36(4):72-76.
- [13] 刘焕芳,孙海燕,苏萍,等.微灌自压软管合理铺设长度的确定[J].*农业工程学报*, 2005, 21(2):46-50.
- [14] 席奇亮,葛国锋,周方,等.2种滴灌带灌水均匀度对铺设长度和进口压力的响应[J].*灌溉排水学报*, 2018, 37(3):78-83.
- [15] 郑国玉,马军勇,何帅,等.低压对不同滴头水力技术指标的影响[J].*节水灌溉*, 2021(8):74-77.
- [16] 罗春艳,牛文全.滴头堵塞率及堵塞位置对灌水均匀度的影响[J].*干旱地区农业研究*, 2014, 32(2):196-200.
- [17] 水利部国际合作司.美国国家灌溉工程手册[M].北京:水利电力出版社,1988.
- [18] 中华人民共和国水利部.微灌工程技术标准:GB/T 50485—2020[S].北京:中国计划出版社,2020.
- [19] 赵青青.低压供水条件下常规滴灌带水力性能研究[D].北京:中国农业科学院,2019.
- [20] 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.
- [21] 白雨薇,罗坤,周小波,等.低压滴灌灌水均匀性研究[J].*中国农村水利水电*, 2018(3):62-65+71.
- [22] 刘杨.小流量-高频次滴灌系统设计参数及土壤水分运移规律研究[D].北京:中国农业科学院,2018.
- [23] 周良.内镶贴片式滴灌带灌水均匀度与流量降幅影响因素研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2020.
- [24] 常换换.低压滴灌管水力学特性试验研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2014.
- [25] 于静静,范世峰.3种滴灌带流道滴头抗堵塞性能对比试验[J].*农业工程*, 2016, 6(4):59-60.
- [26] 张志新.滴灌工程规划设计原理与应用[M].北京:中国水利水电出版社,2007.
- [27] 刘璐,牛文全.滴灌灌水器流道堵塞及防治研究进展[J].*农机化研究*, 2012, 34(4):13-18.
- [28] LIU Lu, NIU Wenquan, GUAN Yahui, et al. Effects of urea fertigation on emitter clogging in drip irrigation system with muddy water[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2019, 145(9):04019020.
- [29] LIU Lu, NIU Wenquan, WU Zhiguan, et al. Effect of fertilization and sediment flow hydraulic characteristics in emitter clogging in muddy water drip fertigation system [J]. *Irrigation and Drainage*, 2018, 67(5):713-723.
- [30] SONG Peng, LI Yuankai, ZHOU Bo, et al. Controlling mechanism of chlorination on emitter bio-clogging for drip irrigation using reclaimed water[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 184:36-45.
- [31] 朱德兰,吴普特,王剑.滴头制造偏差对灌水均匀度及毛管造价的影响[J].*灌溉排水机械学报*, 2011, 29(2):175-179.
- [32] 王栋.高灌水均匀度防堵塞内镶贴片式地下灌水器设计研制及试验研究[J].*节水灌溉*, 2007(2):54-57.
- [33] 梁华锋,黄修桥,许峰,等.低压条件下滴头流量公式的试验研究[J].*灌溉排水学报*, 2014, 33(2):21-24.
- [34] 张慧,陶洪飞,如苏力·努尔,等.单翼迷宫式滴灌带的关键参数与灌水均匀度的响应关系[J].*节水灌溉*, 2021(4):98-103.
- [35] 王建众,牛文全,吴普特,等.滴灌毛管灌水均匀度试验研究[J].*人民黄河*, 2008, 30(3):56-57+68.
- [36] 李久生,饶敏杰.喷灌水量分布均匀性评价指标的试验研究[J].*农业工程学报*, 1999, 15(4):78-82.