

# Experimental Analysis of Drip Irrigation Multi Crop Water Requirement and Irrigation System in Arid Area

Heping Zhou<sup>1,2</sup>, Chao Zhai<sup>1,2</sup>, Chonghua Xiao<sup>1</sup>, Jian Zhao<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Xinjiang Water Conservancy Management Center, Urumqi Xinjiang

<sup>2</sup>Xinjiang Irrigation Center Test Station, Changji Xinjiang

Email: xjslzhp@126.com

Received: Sep. 12<sup>th</sup>, 2018; accepted: Sep. 23<sup>rd</sup>, 2018; published: Sep. 30<sup>th</sup>, 2018

## Abstract

The irrigation technology with the main mode of drip irrigation under the film is applied in the arid Xinjiang irrigation area. The irrigation system of a variety of crops in the drip irrigation area has not been systematically established. This paper is based on the advanced underground corridor type test pit test shed test facilities, using the irrigation quota single factor 4 levels and the random area group field irrigation experiment scheme. 12 kinds of crop water demand and irrigation system test were carried out synchronously. The results showed that the quota of water demand and irrigation water was 412 mm and 390 mm; dry rice was 829 mm and 933 mm; millet was 539 mm and 573 mm; potatoes were 560 mm, 510 mm; soybean was 559 mm, 557 mm; rape was 469 mm, 533 mm; sunflower flower was 515 mm and 530 mm; beet is 492 mm and 515 mm; melon is 510 mm and 467 mm; tomato is 533 mm and 519 mm; carrot is 468 mm and 486 mm; alfalfa is 608 mm and 570 mm. The experimental analysis results provide technical support for water saving irrigation quota management in irrigation area.

## Keywords

Drip Irrigation in Arid Area, 12 Crops, Water Requirement, Irrigation System, Experiment

# 干旱区滴灌多作物需水量及灌溉制度试验分析

周和平<sup>1,2</sup>, 翟超<sup>1,2</sup>, 肖重华<sup>1</sup>, 赵健<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>新疆水利管理总站, 新疆 乌鲁木齐

<sup>2</sup>新疆灌溉中心试验站, 新疆 昌吉

Email: xjslzhp@126.com

收稿日期: 2018年9月12日; 录用日期: 2018年9月23日; 发布日期: 2018年9月30日

文章引用: 周和平, 翟超, 肖重华, 赵健. 干旱区滴灌多作物需水量及灌溉制度试验分析[J]. 农业科学, 2018, 8(10): 1119-1131. DOI: 10.12677/hjas.2018.810165

## 摘要

以膜下滴灌为主模式的灌溉技术在干旱新疆灌区大面积应用, 针对滴灌区多种作物灌溉制度尚未系统建立应用问题, 该文基于先进的地下廊道式测坑防雨棚测验设施, 采用灌水定额单因素4水平, 随机区组田间灌溉试验方案, 系统性同步实施滴灌12种作物需水量及灌溉制度试验, 结果表明: 春麦需水量和灌溉用水定额为412 mm、390 mm; 早稻为829 mm、933 mm; 谷子为539 mm、573 mm; 土豆为560 mm、510 mm; 大豆为559 mm、557 mm; 油菜为469 mm、533 mm; 葵花为515 mm、530 mm; 甜菜为492 mm、515 mm; 打瓜为510 mm、467 mm; 蕃茄为533 mm、519 mm; 胡萝卜为468 mm、486 mm; 苜蓿为608 mm、570 mm, 试验分析结果为灌区节水灌溉定额管理提供技术支撑。

## 关键词

干旱区滴灌, 12种作物, 需水量, 灌溉制度, 试验

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

## 1. 引言

截止 2016 年新疆地方系统膜下滴灌 229 万  $\text{hm}^2$ , 占总灌溉面积 46% [1], 膜下滴灌成为干旱区农业高用水主模式, 在农业灌区滴灌水肥调控、节水增产、水资源总量与定额管理, 社会经济生态协调发展方面发挥着重要作用。灌区种植作物约 30 种, 但主要种植小麦、水稻、玉米、棉花、豆类、谷子、薯类、葵花、油菜、甜菜、瓜类、蔬菜、苜蓿 13 种作物, 其中棉花、小麦、玉米、蔬菜 4 类占播种面积的 85%以上[2]。目前, 滴灌技术已广泛应用于灌区大田几乎所有作物, 近年来, 除滴灌棉花、玉米以外, 灌区大尺度范围 5 种粮作(春麦、早作水稻、土豆、谷子、大豆); 4 种经作(油菜、葵花、甜菜、打瓜); 2 种蔬作(工业番茄、胡萝卜); 饲草苜蓿 12 种大宗作物高效节水灌溉制度尚未建立, 加快滴灌多作物灌溉制度试验应用尤显重要。

天山北坡准噶尔盆地南缘区膜下滴灌玉米灌溉水量试验[3]结果 3570~6370  $\text{m}^3/\text{hm}^2$ , 产量达 13,061~14,929  $\text{kg}/\text{hm}^2$ 。魏永霞等[4]进行玉米滴灌调亏、充分灌溉试验表明, 苗期轻度调亏, 产量比对照降低 7.89%、节水 8.26%、水分利用效率提高 33%; 苗期中度调亏, 产量比对照增加 5.20%、节水 16.71%、水分利用效率提高 26.25%, 玉米苗期适宜水分亏缺是一种有效的灌溉制度[5] [6] [7]。基于滴灌条件以玉米试验, 进行有关产量、耗水量及灌水量试验, 分析灌溉水生产效率及灌溉制度[8]。连续 3 年新疆准噶尔盆地南缘区膜下滴灌棉花试验表明, 棉花生育期耗水量 450~625 mm, 不同年份气温对棉花生育阶段需水量影响较大, 水分生产率随着灌水量呈现先增后降变化。赵自明[9]对春小麦、玉米间作进行试验, 建立了滴灌次数、滴灌定额与作物产量及灌溉水分生产率函数, 试验分析得出间作种植的小麦和玉米滴灌优化灌溉制度。水稻是一种喜水性作物, 传统灌溉用水量达 1800 mm, 采用农业节水具有较大潜力, 通辽市灌区经试验数据分析水稻膜下滴灌最优灌溉制度[10], 新疆干旱区膜下滴灌水稻种植, 在滴灌穴播机技术[11]、水稻苗期生长黄枯病害发生机理[12]、膜下滴灌水稻除草剂效果[13]等方面, 多有试验研究报告。近年新疆博州灌区对谷子滴灌播前准备、适期播种、田间管理、病虫害防治等栽培技术方面进行了研究[14], 内蒙阿拉善绿洲灌区膜下滴灌谷子水氮肥试验表明, 拔节期需水量最大, 适宜灌溉定额 504 mm,

水分生产率  $0.91 \text{ kg/m}^3$ , 膜下滴灌谷子氮肥最佳施用量  $180 \text{ kg/hm}^3$  [15] [16]。张恒嘉等[17]对膜下滴灌马铃薯进行灌溉试验表明, 马铃薯块茎形成期水分轻度调亏水分利用效率最高, 比块茎膨大期中度调亏、淀粉积累期轻度调亏和全生育期充分供水分别提高 36%、32%和 14%, 块茎形成期轻度调亏不会降低马铃薯产量, 但尚未对滴灌马铃薯灌溉制度分析。黑龙江西部半干旱区滴灌大豆不同水分处理试验表明, 滴灌大豆适宜灌水量  $109 \text{ mm}$  [18], 复播大豆高产节水适宜膜下滴灌水量  $336 \text{ mm}$  [19], 彭辉等[20]介绍了新大豆 8 号品种的膜下滴灌高产栽培技术栽培管理技术, 洪明等[21]经大田小区试验对核桃间作滴灌大豆耗水规律进行研究, 间作滴灌大豆生育期耗水量  $277 \text{ mm}$ , 较非间作滴灌大豆耗水量减小 26.5%, 尚未分析灌溉定额。西宁市北郊川水地滴灌春油菜水肥试验表明[22], 滴灌油菜最佳施肥量 N 量  $74.2 \text{ kg/hm}^2$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$  为  $65.0 \text{ kg/hm}^2$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  为  $31.2 \text{ kg/hm}^2$ , 最高产量  $2863 \text{ kg/hm}^2$ , 尚未见滴灌油菜灌溉制度试验。郑凤杰等[23]以盆栽探讨不同微咸水滴灌对食用葵花生长影响, 当微咸水矿化度较低水平( $\leq 3.5 \text{ g/L}$ )时, 对葵花产量影响较小的同时, 微咸水可提高改善作物籽实营养品质, 滴灌葵花水肥灌溉试验尚未见报道。樊福义等[24]进行高寒干旱区膜下滴灌甜菜灌溉制度试验, 生育期有效降雨量  $350 \text{ mm}$  正常年份情况下, 膜下滴灌甜菜灌水四次, 灌溉定额  $180 \text{ mm}$ 。新疆阿勒泰地区打瓜滴灌耗水量进行田间试验表明, 开花坐果期耗水大于中期、后期[25], 滴灌条件下打瓜、蕃茄[26]、胡萝卜多见于农业栽培及生物量技术研究, 需水量及灌溉制度试验国内文献尚未见报道。浅埋式滴灌苜蓿需水及灌溉制度近年有所研究, [27]试区浅埋式滴灌苜蓿适宜灌水定额  $45 \text{ mm}$ 、灌水周期  $7\sim 10 \text{ d}$ , [28]地理滴灌紫花苜蓿灌水量和滴灌带埋深试验结果表明, 滴灌带埋深  $20 \text{ cm}$ , 灌水定额  $22\sim 30 \text{ mm}$ , 灌水周期  $5\sim 7 \text{ d}$ 。

综上, 国内滴灌棉花、玉米等作物水肥灌溉试验较多, 其他作物需水量及灌溉制度试验分析较少, 甚至有些作物尚未见有相关研究报道, 本研究基于先进的地下廊道式测坑灌溉试验设施, 采用统一的灌溉试验设计方案, 系统性同步开展滴灌 12 种作物需水量及灌溉制度试验, 以期减少试验周期、节时省费、提升试验效率[29], 为干旱新疆灌区多作物滴灌节水灌溉制度提供支撑。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 试区概况

试区位于新疆灌溉中心试验站(昌吉滨湖镇 13 户村)占地面积  $6.67 \text{ hm}^2$ ,  $87^\circ 18'E$ 、 $44^\circ 01'N$ , 海拔  $600 \text{ m}$ 。地处天山北坡带头屯河流域冲积、洪积南缘, 多年平均降水  $181.7 \text{ mm}$ 、蒸发  $1739.1 \text{ mm}$ 、日照  $7.8 \text{ h}$ , 气温  $13.1^\circ\text{C}$ ,  $\geq 0^\circ\text{C}$  积温  $3834.3^\circ\text{C}$  以上, 属典型内陆干旱气候。试区分布棕漠土, 质地为中、轻壤土,  $0\sim 120 \text{ cm}$  土壤干容重  $1.46\sim 1.65 \text{ g/cm}^3$ , 耕作层  $1.50\sim 1.60 \text{ g/cm}^3$ ,  $0\sim 120 \text{ cm}$  田间持水量(干土重)  $18.8\%\sim 23.9\%$ , 耕作层  $20.1\%\sim 23.4\%$ 。地下水埋深  $3.0\sim 4.5 \text{ m}$ , 供水井 1 眼单井出流量  $126 \text{ m}^3/\text{h}$ , 地表与地下水矿化度分别为  $0.2$ 、 $0.6 \text{ g/L}$ , 耕层土壤全盐  $0.12\%$  无盐渍化, 土壤 pH 值 8.7 碱性。耕作层土壤有机质  $1.51\%$ , 土壤全氮、全磷、全钾分别为  $0.09\%$ 、 $0.07\%$ 、 $1.51\%$ , 有效氮、磷、钾, 分别为  $0.0054\%$ 、 $0.0069\%$ 、 $0.0479\%$ , 肥力中偏下, 表现缺氮少磷钾富特点。试区自动气象观测站 1 处, 图 1 为地下廊道防雨棚式灌溉试验测坑设施, 试区共有 2 组试验测坑, 其中 1 组可进行土壤水分、温度、盐分(电导率)自动采集, 测坑总面积  $604 \text{ m}^2$ , 48 个测坑小区面积  $6.67 \text{ m}^2$ 。

### 2.2. 试验设计

2016 至 2017 年进行 12 种作物滴灌试验, 以灌水定额单因素[30]安排 4 种不同处理水平, 以随机区组法进行田间试验(表 1), 作物品种、每次灌水时间、施肥种类、方法和施肥量等农业技术参照当地灌区种植管理。试验用滴灌系统灌溉方式, 毛管间距  $0.6 \text{ m}$ , 滴头间距  $0.20 \text{ m}$ , 滴头流量  $2.1 \text{ L/h}$ , 额定工作压力  $0.1 \text{ Mpa}$ 。采用地下廊道防雨棚式灌溉试验测坑设施, 每个测坑试验小区可控制地下水、土壤水侧渗和降



**Figure 1.** Underground corridor canopy irrigation test pit facilities  
**图 1.** 地下廊道防雨棚式试验测坑设施

**Table 1.** Level design of crop irrigation test factors  
**表 1.** 作物灌溉试验因素水平设计

试验区号	灌水定额/mm
1	30.0
2	37.5
3	45.0
4	52.5

水影响，每个测坑试验小区面积 6.67 m<sup>2</sup>，测坑试验小区内滴灌带铺设与大田一致。

### 2.3. 试验过程

供试春小麦(新春 6 号)，水稻(新稻 11 号)，土豆(费乌瑞它)，谷子(SF 黄金谷)，大豆(95-33)，油菜(塔油 2 号)，葵花(高油王 DK567)，甜菜(丰甜 2 号)，打瓜(SWBB-01)，蕃茄(利丰早熟)，胡萝卜(驰诚黄)，苜蓿(紫花)。作物播时播量、栽培方式、施肥(药)种类数量等农业技术，均按当地大田作物生产管理，12 种作物主要施尿素和速溶性二铵滴灌肥，施肥 3 次分别在作物前期(5 月上旬)、中期(6 月中旬)及中后期(7 月上旬)实施，施肥量 375~450 kg/hm<sup>2</sup>。12 种作物滴灌试验，均以 1 条滴灌带(毛管) 2 行作物播种，春麦、水稻、土豆、油菜、胡萝卜、苜蓿 6 种作物，均无地膜滴灌，其他 6 种作物均为膜下滴灌方式。试验观测气象数据由田间自动气象站采集，试验处理小区灌溉水量由水表控制计量，每个处理小区固定埋设 2 处土壤含水率测管，用 PR2 水分仪结合取土样烘干法对 0~100 cm 土层(每层 20 cm)，每 3 d 进行土壤含水率观测，灌水前、后加测。12 种作物不同生育阶段，采用小区 1 m<sup>2</sup> 样点 3 处取均值观测生育期(作物生育期以不同作物生育生理有 50%变化量发生的时间)、群体密度、株高、叶面积动态，作物成熟后每区



人工收割脱粒晾晒干净后进行千粒重、产量考种。为了解收获前后土壤理化状态,进行容重、田间持水量、小区耕层土壤有机质、有效 N、P、K 取样分析。

## 2.4. 分析方法

作物需水量利用试验小区实测土壤含水率,按下式分析:

$$ET = 10 \sum_{i=1}^n \gamma_i H_i (W_{i1} - W_{i2}) + M + P + K - C \quad (1)$$

式中  $ET$  为作物生长阶段需水量, mm;  $i$  为土壤层次号数;  $n$  为土壤层次总数目;  $\gamma_i$  为第  $i$  层土壤干容重,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;

$H_i$  为第  $i$  层土壤厚度, cm;  $W_{i1}$  为第  $i$  层土壤在时段始含水率, % (干土重);  $W_{i2}$  为第  $i$  层土壤在时段末含水率, % (干土重);  $M$  为时段内的灌水量, mm;  $P$  为时段内的降水量, mm;  $K$  为时段内的地下水补给量, mm, 在有底坑或地下水位  $\geq 3$  m 条件下,  $K = 0$ ;  $C$  为时段内的排水量, mm, 地表排水与下层排水之合。

作物需水强度按下式分析:

$$F = \sum_{i=1}^n m_i / N_i \quad (2)$$

式中  $F$  为作物需水强度, mm/d;  $i$  为作物生长的第  $i$  阶段;  $n$  为作物生长划分的阶段数目;  $m_i$  为作物生长的第  $i$  阶段需水量, mm;  $N_i$  为作物生长的第  $i$  阶段天数, d。

有效雨量以实际观测,按下式分析:

$$P_0 = 10\gamma H(W_2 - W_1) + (ET_d - K_d)t \quad (3)$$

式中  $P_0$  为有效雨量, mm;  $\gamma$  为土壤干容重,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $H$  为根系吸水层深度, cm;  $t$  为前后两次测定土壤含水率相隔时间, d;  $ET_d$  为时段内日平均蒸发蒸腾量, mm/d;  $K_d$  为  $t$  时段内旱田日平均地下水有效补给量, mm/d;  $W_1$ 、 $W_2$  为降雨前、后测得土壤含水率, % (占干土重)。

本文有效雨量[31]范围 0.35~0.52 取值 0.41。

试验相关要素与目标关系分析,采用多元线性模型以最小二乘法拟合:

$$y = k_0 + k_1 x_1 + k_2 x_2 + \dots + k_n x_n \quad (4)$$

式中  $y$  为分析目标;  $k_n$  为回归系数。

灌溉制度优化分析按下式:

$$y = a + bx_i + cx_i^2 \quad (5)$$

式中  $y$  为作物产量,  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ;  $x_i$  为对试验产量有影响的观测参数;  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为经验系数。

对式(5)一阶导数并令其等于 0:

$$dy/dx_i = b + 2c = 0 (c < 0) \quad (6)$$

用 SPSS19.0 对试验数据进行方差  $F$  显著性检验,采用 Excel 2007 绘制图表。

## 3. 结果与分析

### 3.1. 作物需水量

基于试验作物生长期动态及土壤水分观测信息,应用式(1)~(2)得 12 种作物生长阶段及生育期需水量,由表 2 结果看出,春小麦生育期年均需水量和需水强度分别为 412.46 mm、4.51 mm/d; 早稻分别为 829.04

mm、5.28 mm/d; 谷子分别为 538.66 mm、4.07 mm/d; 土豆分别为 559.65 mm、4.22 mm/d; 大豆分别为 559.41 mm、4.91 mm/d; 油菜分别为 469.17 mm、4.81 mm/d; 葵花分别为 515.07 mm、4.10 mm/d; 甜菜分别为 492.60 mm、3.45 mm/d; 打瓜分别为 510.39 mm、4.07 mm/d; 蕃茄分别为 532.57 mm、4.43 mm/d;

**Table 2.** Water requirement analysis of 12 crops in the same period

**表 2.** 同期试验 12 种作物需水量分析

试验作物	试验年份	分析项目	初始生长期	快速发育期	生育中期	成熟期	全生育期
春麦	2016	阶段需水量/mm	54.24	201.32	98.67	55.68	409.91
		需水强度/(mm/d)	2.26	7.19	7.59	2.32	4.61
	2017	阶段需水量/mm	53.28	201.04	102.90	57.78	415.00
		需水强度/(mm/d)	2.22	7.18	6.86	2.14	4.42
	年均	阶段需水量/mm	53.76	201.18	100.79	56.73	412.46
		需水强度/(mm/d)	2.24	7.18	7.23	2.23	4.51
旱稻	2016	阶段需水量/mm	162.86	413.58	142.80	108.00	827.24
		需水强度/(mm/d)	4.79	6.78	5.95	3.00	5.33
	2017	阶段需水量/mm	204.61	399.6	119.13	107.5	830.84
		需水强度/(mm/d)	5.53	6.66	6.27	2.50	5.23
	年均	阶段需水量/mm	183.74	406.59	130.97	107.75	829.04
		需水强度/(mm/d)	5.16	6.72	6.11	2.75	5.28
谷子	2016	阶段需水量/mm	78.40	227.20	152.00	59.83	517.43
		需水强度/(mm/d)	2.24	5.68	6.08	1.93	3.95
	2017	阶段需水量/mm	99.00	232.76	147.84	80.28	559.88
		需水强度/(mm/d)	3.30	5.29	6.16	2.23	4.18
	年均	阶段需水量/mm	88.70	229.98	149.92	70.06	538.66
		需水强度/(mm/d)	2.77	5.49	6.12	2.08	4.07
土豆	2016	阶段需水量/mm	23.43	220.89	211.68	101.99	557.99
		需水强度/(mm/d)	2.13	5.97	5.88	2.17	4.26
	2017	阶段需水量/mm	30.16	231.62	205.92	93.6	561.3
		需水强度/(mm/d)	2.32	6.26	5.72	1.95	4.19
	年均	阶段需水量/mm	26.80	226.26	208.80	97.80	559.65
		需水强度/(mm/d)	2.22	6.11	5.80	2.06	4.22
大豆	2016	阶段需水量/mm	59.40	265.08	135.30	98.10	557.88
		需水强度/(mm/d)	4.95	5.64	6.15	3.27	5.03
	2017	阶段需水量/mm	52.74	273.07	127.60	107.52	560.93
		需水强度/(mm/d)	2.93	5.81	6.38	3.36	4.80
	年均	阶段需水量/mm	56.07	269.08	131.45	102.81	559.41
		需水强度/(mm/d)	3.94	5.73	6.27	3.32	4.91
油菜	2016	阶段需水量/mm	81.94	172.44	101.43	99.25	455.06
		需水强度/(mm/d)	2.41	9.58	4.83	3.97	4.64
	2017	阶段需水量/mm	146.32	108.63	113.24	115.08	483.27
		需水强度/(mm/d)	4.72	6.39	5.96	4.11	4.94
	年均	阶段需水量/mm	114.13	140.54	107.34	107.17	469.17
		需水强度/(mm/d)	3.57	7.99	5.40	4.04	4.81

Continued

葵花	2016	阶段需水量/mm	28.3	197.40	157.36	130.05	513.11
		需水强度/(mm/d)	2.83	5.64	5.62	2.55	4.14
	2017	阶段需水量/mm	56.64	52.82	146.07	261.50	517.03
		需水强度/(mm/d)	4.72	1.39	5.41	5.23	4.07
	年均	阶段需水量/mm	42.47	125.11	151.72	195.78	515.07
		需水强度/(mm/d)	3.78	3.51	5.52	3.89	4.10
甜菜	2016	阶段需水量/mm	16.32	122.08	104.39	182.40	425.19
		需水强度/(mm/d)	2.04	4.36	8.03	2.28	3.29
	2017	阶段需水量/mm	30.6	159.84	88.66	280.9	560
		需水强度/(mm/d)	2.55	6.66	6.82	2.65	3.61
	年均	阶段需水量/mm	23.46	140.96	96.53	231.65	492.60
		需水强度/(mm/d)	2.29	5.51	7.42	2.46	3.45
打瓜	2016	阶段需水量/mm	22.47	144.00	168.50	178.20	513.17
		需水强度/(mm/d)	3.21	4.80	6.74	2.70	4.01
	2017	阶段需水量/mm	36.1	131.25	185.4	154.86	507.61
		需水强度/(mm/d)	3.61	5.25	6.18	2.67	4.13
	年均	阶段需水量/mm	29.29	137.63	176.95	166.53	510.39
		需水强度/(mm/d)	3.41	5.03	6.46	2.68	4.07
蕃茄	2016	阶段需水量/mm	18.60	266.50	198.90	73.50	557.50
		需水强度/(mm/d)	1.55	6.50	6.63	2.10	4.73
	2017	阶段需水量/mm	18.15	245.28	184.20	60.00	507.63
		需水强度/(mm/d)	1.65	5.84	6.14	1.50	4.13
	年均	阶段需水量/mm	18.38	255.89	191.55	66.75	532.57
		需水强度/(mm/d)	1.60	6.17	6.38	1.80	4.43
胡萝卜	2016	阶段需水量/mm	21.00	113.88	165.30	132.24	432.42
		需水强度/(mm/d)	1.75	4.38	5.70	2.28	3.46
	2017	阶段需水量/mm	46.86	133.44	146.07	177.55	503.92
		需水强度/(mm/d)	4.26	5.56	5.41	3.35	4.38
	年均	阶段需水量/mm	33.93	123.66	155.69	154.90	468.17
		需水强度/(mm/d)	3.76	5.10	5.08	2.84	3.92
苜蓿	2016	阶段需水量/mm	18.00	497.93	51.15	35.8	602.88
		需水强度/(mm/d)	1.50	4.93	4.65	3.58	4.50
	2017	阶段需水量/mm	8.28	546	37.62	20.43	612.33
		需水强度/(mm/d)	0.92	4.20	3.42	2.27	3.85
	年均	阶段需水量/mm	13.14	521.97	44.39	28.12	607.61
		需水强度/(mm/d)	1.21	4.57	4.04	2.92	4.18

胡萝卜分别为 468.17 mm、3.92 mm/d；苜蓿分别为 607.61 mm、4.18 mm/d。结果表明，即使相同滴灌模式和试验方案条件下，不同作物需水量和需水强度有较大差异。

由图 2 可知，12 种作物需水量和需水强度范围分别为 413 mm~829 mm、3.45 mm/d~5.28 mm/d 之间，春麦需水量相对小，旱稻最大，需水量由小到大顺序为：春麦、油菜、胡萝卜、甜菜、打瓜、葵花、番茄、春玉米、谷子、棉花、土豆、大豆、苜蓿、旱稻。甜菜需水强度相对小，旱稻最大，由小到大顺序为：甜菜、胡萝卜、打瓜、谷子、葵花、苜蓿、土豆、番茄、春麦、油菜、大豆、旱稻。

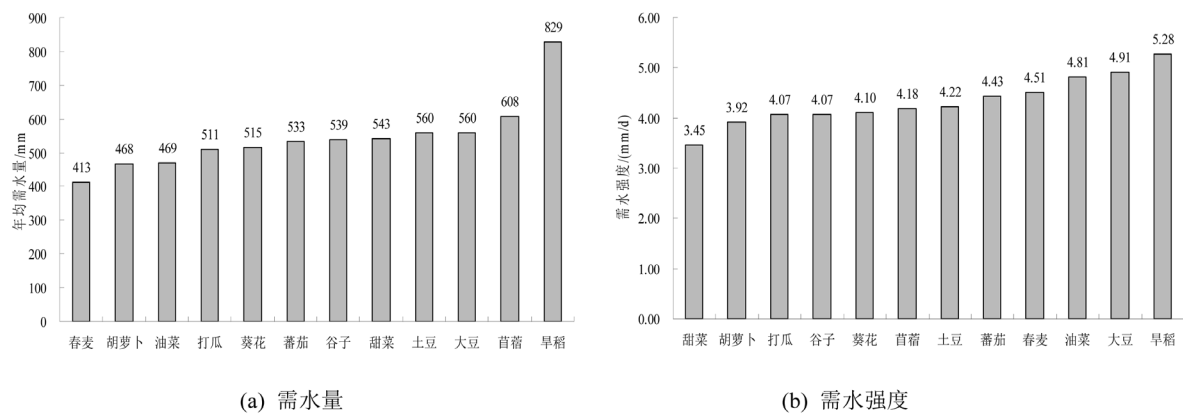


Figure 2. Water demand for 12 crops in the same period from small to large

图 2. 同期 12 种作物需水量由小至大排序

### 3.2. 气候对需水量影响

基于试验区田间自动化气象观测站数据,获得 12 种作物生长期主要气象因素及作物需水量(表 3)信息,应用式(3)~(4)进一步分析有效降水  $P_0$ 、蒸发  $W$ 、气温  $T$  与需水量  $M$  关系,经拟合多元线性回归方程为:

$$M = 273.14.70 - 0.195P_0 + 0.199W + 0.741T \quad (R_{(36,a=0.01)} = 0.756^{**} > R_u = 0.418)$$

由拟合方程分析看出,滴灌作物试区,有效降水量  $P_0$  系数-0.195,对作物需水量  $M$  具有负效应影响,说明有效降水量可以减少作物需水量,对作物需水有着补给作用;蒸发量  $W$  系数 0.199,气温  $T$  系数 0.741,对作物需水量  $M$  表现正效应影响,说明蒸发、气温尤其是气温增量变化对作物需水量影响大,反映了降水少、气温高、蒸发强烈的干旱区与灌溉农业作物需水关系。

### 3.3. 作物灌溉制度

#### 3.3.1. 作物灌溉制度试验

表 4 为灌水定额单因素四种处理水平,同期 12 种滴灌作物灌溉制度试验结果,由试验分析可以看出,旱作水稻灌水次数多 17~18 次,灌溉定额 525~915 mm 较大,试验产量 3600~8460 kg·hm<sup>-2</sup>;其它滴灌作物第一水滴灌采用“干播湿出”方法。春小麦灌水 8 次,在灌溉用水量较高的处理 4 水平下,灌溉定额 420 mm,试验产量 5250 kg·hm<sup>-2</sup>,油菜、葵花、打瓜、番茄、胡萝卜 5 种作物灌溉定额小于 600 mm;土豆、谷子、大豆、甜菜、油菜、苜蓿,灌溉定额 605~657 mm。

#### 3.3.2. 灌溉制度优化分析

基于 12 种作物滴灌试验观测的土壤湿度  $\beta$  (占田间持水量的%),以及表 4 试验作物灌水定额  $m$  (mm)、灌溉定额  $M$  (mm)、作物试验产量  $y$  (kg/hm<sup>2</sup>)信息,以式(5)建立滴灌试验作物灌溉制度优化分析的拟合函数见表 5 所示,从拟合函数结果看出,12 种滴灌作物观测分析因素与试验作物产量之间呈非线性多项式模型,总体拟合效果较好,采用式(6)对 12 种滴灌试验作物灌溉制度进行优化分析结果见表 6 和图 3。

由分析研究成果看出,通过作物试验处理设计及试验观测获取相关信息优化分析,进一步明确了 12 种作物灌溉制度适宜技术指标:春小麦灌水 8 次,适宜土壤湿度 71%,灌水定额 46.5 mm,灌溉定额 390 mm;旱作水稻灌水 18 次,适宜土壤湿度 80%,灌水定额 52.5 mm,灌溉定额 933 mm;土豆灌水 11 次,适宜土壤湿度 69%,灌水定额 43.5 mm,灌溉定额 510 mm;谷子灌水 11 次,适宜土壤湿度 72%,灌水定额 46.5 mm,灌溉定额 573 mm;大豆灌水 11 次,适宜土壤湿度 71%,灌水定额 45 mm,灌溉定额 557



**Table 3.** Relationship between meteorological factors and water requirement during different crop growth stages  
**表 3.** 不同作物生育期气象因素与需水量关系

试验作物	试验年份	生育期气象要素				生育期需水量 $M/mm$
		降水 $P/mm$	有效 $P_e/mm$	蒸发 $W/mm$	气温 $T/^\circ C$	
春麦	2016	99.4	51.7	1056.6	22.0	409.91
	2017	42.1	21.9	1318.8	22.5	415.11
	平均	70.8	36.8	1187.7	22.3	412.51
旱稻	2016	126.2	65.6	1703.7	22.8	826.79
	2017	40.6	21.1	1830.0	22.4	831.06
	平均	83.4	43.4	1766.9	22.6	828.93
谷子	2016	126.1	65.6	1559.0	23.2	517.64
	2017	45.8	23.8	1483.4	23.1	559.94
	平均	86.0	44.7	1521.2	23.2	538.79
土豆	2016	126.1	65.6	1552.0	23.2	558.14
	2017	45.8	23.8	1444.9	23.4	561.12
	平均	86.0	44.7	1498.5	23.3	559.63
大豆	2016	120.4	62.6	1336.0	23.0	558.14
	2017	43.1	22.4	1271.9	23.4	561.34
	平均	81.8	42.5	1304.0	23.2	559.74
油菜	2016	98.2	51.1	964.8	21.7	455.05
	2017	41.3	21.5	925.0	22.1	469.20
	平均	69.8	36.3	944.9	21.9	462.13
葵花	2016	125.6	65.3	1397.0	23.0	513.06
	2017	46.9	24.4	1303.9	23.2	516.93
	平均	86.3	44.9	1350.5	23.1	515.00
甜菜	2016	126.1	65.6	1493.0	23.1	424.98
	2017	39.2	20.0	1611.2	22.8	559.97
	平均	82.7	42.8	1552.1	23.0	492.48
打瓜	2016	125.6	65.3	1509.0	21.2	513.06
	2017	29.4	15.3	1205.9	23.7	507.84
	平均	77.5	40.3	1357.5	22.5	510.45
蕃茄	2016	125.6	65.3	1509.0	21.2	557.84
	2017	38.4	20.0	1330.6	23.6	507.64
	平均	82.0	42.7	1419.8	22.4	532.74
胡萝卜	2016	126.1	65.6	1452.0	23.1	432.84
	2017	22.3	11.4	1167.5	23.1	503.94
	平均	74.2	38.5	1309.8	23.1	468.39
苜蓿	2016	126.1	65.6	1552.0	23.2	602.91
	2017	58.7	30.5	1572.1	22.2	612.58
	平均	92.4	48.1	1562.1	22.7	607.75

**Table 4.** Experimental results of irrigation system for different crops in drip irrigation  
**表 4.** 滴灌不同作物灌溉制度试验处理结果

试验作物	试验年份	1 处理/(mm; kg·hm <sup>-2</sup> )			2 处理/(mm; kg·hm <sup>-2</sup> )			3 处理/(mm; kg·hm <sup>-2</sup> )			4 处理/(mm; kg·hm <sup>-2</sup> )		
		灌水次数	灌溉定额	试验产量	灌水次数	灌溉定额	试验产量	灌水次数	灌溉定额	试验产量	灌水次数	灌溉定额	试验产量
春麦	2016	8	240	4395	8	300	5040	8	360	5085	8	420	4935
	2017	8	240	4650	8	300	4950	8	360	6300	8	420	5550
	平均	8	240	4530	8	300	4995	8	360	5700	8	420	5250
旱稻	2016	17	510	3675	17	638	7050	17	765	10,125	17	893	9825
	2017	18	540	3510	18	675	3975	18	810	7800	18	945	7095
	平均	18	525	3600	18	660	5520	18	788	8970	18	915	8460
谷子	2016	11	330	7875	11	413	9225	11	495	9825	11	578	9750
	2017	12	360	6450	12	450	9765	12	540	10,635	12	630	10,230
	平均	12	345	7170	12	432	9495	12	518	10,230	12	605	9990
土豆	2016	11	330	28,875	11	413	31,425	11	495	37,755	11	578	35,250
	2017	12	360	24,900	12	450	30,150	12	540	56,070	12	630	30,600
	平均	12	345	26,895	12	432	30,795	12	518	46,920	12	605	32,925
大豆	2016	11	330	2550	11	413	3525	11	495	4650	11	578	3975
	2017	12	360	3795	12	450	4425	12	540	5295	12	630	4605
	平均	12	345	3180	12	432	3975	12	518	4980	12	605	4290
油菜	2016	9	270	1425	9	338	1605	9	405	2340	9	473	1905
	2017	10	300	1950	10	375	2250	10	450	2400	10	525	2325
	平均	10	285	1695	10	357	1935	10	428	2370	10	500	2115
葵花	2016	10	300	2325	10	375	2520	10	450	3405	10	525	3060
	2017	11	330	2400	11	413	3180	11	495	3990	11	578	3540
	平均	11	315	2370	11	395	2850	11	473	3705	11	552	3300
甜菜	2016	11	330	50,250	11	413	54,750	11	495	69,150	11	578	55,350
	2017	12	360	83,550	12	450	85,200	12	540	99,600	12	630	89,250
	平均	12	345	66,900	12	432	69,975	12	518	84,375	12	605	72,300
打瓜	2016	10	300	1800	10	375	2025	10	450	2250	10	525	1500
	2017	11	330	2670	11	413	3000	11	495	3900	11	578	3105
	平均	11	315	2235	11	395	2520	11	473	3075	11	552	2310
蕃茄	2016	11	330	76,440	11	413	103,950	11	495	120,855	11	578	114,660
	2017	11	330	109,200	11	413	128,850	11	495	140,250	11	578	136,590
	平均	11	330	92,820	11	413	116,400	11	495	130,560	11	578	125,625
胡萝卜	2016	11	330	81,150	11	413	84,450	11	495	100,800	11	578	86,625
	2017	11	330	55,380	11	413	57,810	11	495	73,740	11	578	59,760
	平均	11	330	68,265	11	413	71,130	11	495	87,270	11	578	73,200
苜蓿	2016	12	360	16,905	12	450	17,100	12	540	19,395	12	630	15,345
	2017	13	390	16,485	13	488	23,190	13	585	35,625	13	683	28,995
	平均	13	375	16,695	13	470	20,145	13	563	27,510	13	657	22,170

mm; 油菜灌水 9 次, 适宜土壤湿度 72%, 灌水定额 46.5 mm, 灌溉定额 533 mm; 葵花灌水 10 次, 适宜土壤湿度 73%, 灌水定额 48 mm, 灌溉定额 530 mm; 甜菜灌水 11 次, 适宜土壤湿度 69%, 灌水定额 45 mm, 灌溉定额 515 mm; 打瓜灌水 10 次, 适宜土壤湿度 66%, 灌水定额 42 mm, 灌溉定额 467 mm; 蕃

**Table 5.** Optimization analysis model of irrigation system for drip irrigation  
**表 5.** 滴灌作物灌溉制度优化分析模型

作物	土壤湿度 $\beta$		灌水定额 $m$		灌溉定额 $M$	
	模型	R	模型	R	模型	R
春麦	$y = -2.29\beta + 236 - 6122$	0.93**	$y = -4.067m^2 + 3734m - 3090$	0.86*	$y = -0.064M^2 + 46.7M - 3091$	0.86*
早稻	$y = -6.08\beta + 971 - 29985$	0.96**	$y = -10.800m^2 + 1131m - 20,895$	0.96**	$y = -0.034M^2 + 62M - 20,022$	0.92**
土豆	$y = -44.73\beta + 6023 - 171,285$	0.78	$y = -79.533m^2 + 7017m - 114,165$	0.78	$y = -0.596M^2 + 606.5M - 113,149$	0.78
谷子	$y = -6.41\beta + 926 - 23,040$	0.99**	$y = -11.400m^2 + 1063m - 14,432$	0.99**	$y = -0.086M^2 + 91.8M - 14,288$	0.99**
大豆	$y = -3.71\beta + 526 - 13,932$	0.94**	$y = -6.600m^2 + 602m - 9044$	0.94**	$y = -0.050M^2 + 52.0M - 8961$	0.94**
油菜	$y = -1.23\beta + 178 - 4146$	0.92**	$y = -2.200m^2 + 204m - 2492$	0.92**	$y = -0.0241M^2 + 21.3M - 2459$	0.92**
葵花	$y = -2.21\beta + 324 - 8384$	0.93**	$y = -3.933m^2 + 373m - 53,640$	0.93**	$y = -0.035M^2 + 35.3M - 5309$	0.93**
甜菜	$y = -37.88\beta + 5229 - 101,790$	0.77	$y = -37.33m^2 + 5963m - 53,280$	0.77	$y = -0.505M^2 + 514.5M - 52,410$	0.77
打瓜	$y = -2.63\beta + 349 - 8735$	0.84*	$y = -4.666m^2 + 395m - 5507$	0.84*	$y = -0.042M^2 + 37.3M - 5444$	0.84*
番茄	$y = -71.28\beta + 10392 - 249,105$	0.99**	$y = -126.732m^2 + 11950m - 152,295$	0.99**	$y = -1.047M^2 + 1087.0M - 152,295$	0.99**
胡萝卜	$y = -42.33\beta + 5813 - 118,725$	0.75	$y = -75.266m^2 + 6622m - 64,830$	0.75	$y = -0.622M^2 + 602.0M - 64,830$	0.75
苜蓿	$y = -21.98\beta + 3095 - 83,925$	0.88*	$y = -39.066m^2 + 3540m - 55,170$	0.88*	$y = -0.248M^2 + 281.3M - 54,720$	0.88*

注: 相关系数临界值  $R_{(45\%)} = 0.81$ ;  $R_{(41\%)} = 0.92$ , “\*\*\*”表示极显著; “\*”表示显著。

**Table 6.** Optimal irrigation system for drip irrigation crops  
**表 6.** 滴灌作物优化灌溉制度

试验作物	土壤湿度/%		灌水次数		灌水定额/mm		灌溉定额/mm		产量水平/(kg·hm <sup>-2</sup> )	
	试验	优化	范围	平均	试验	优化	试验	优化	试验	优化
春麦	50~80	71	8	8	30.0~52.5	46.5	420	390	5115	6000
早稻	50~80	80	17~18	18	30.0~52.5	52.5	915	933	6630	8940
土豆	50~80	69	11~12	11	30.0~52.5	43.5	476	510	34,380	41,340
谷子	50~80	72	11~12	11	30.0~52.5	46.5	473	573	9225	11,985
大豆	50~80	71	11~12	11	30.0~52.5	45.0	476	557	4110	5520
油菜	50~80	72	9~10	9	30.0~52.5	46.5	500	533	2025	3210
葵花	50~80	73	10~11	10	30.0~52.5	48.0	434	530	3060	4005
甜菜	50~80	69	11~12	11	30.0~52.5	45.0	476	515	73,395	79,965
打瓜	50~80	66	10~11	10	30.0~52.5	42.0	434	467	2535	3270
番茄	50~80	73	11	11	30.0~52.5	46.5	455	519	116,355	129,930
胡萝卜	50~80	69	11	11	30.0~52.5	43.5	455	486	74,970	81,300
苜蓿	50~80	70	12~13	12	30.0~52.5	45.0	516	570	21,630	25,425

茄灌水 11 次, 适宜土壤湿度 73%, 灌水定额 46.5 mm, 灌溉定额 519 mm; 胡萝卜灌水 11 次, 适宜土壤湿度 69%, 灌水定额 43.5 mm, 灌溉定额 486 mm; 苜蓿灌水 12 次, 适宜土壤湿度 70%, 灌水定额 45 mm, 灌溉定额 570 mm。

从以上灌溉制度优化分析结果看出, 12 种滴灌作物灌水定额普遍 45~53 mm, 而目前农田作物滴灌设计应用多以 30~45 mm 较小的灌水定额, 从作物灌溉用水需求结合试验研究认为, 较小灌水定额可适于砂质或粉沙等保水保肥性相对较低的土壤质地, 对于壤质类土壤质地作物滴灌宜用较大灌水定额, 这样符合作物滴灌局部灌溉用水特征, 既可保持土壤水分有效贮存利用, 也能适当减少灌水次数, 还可获得节水增产效果。

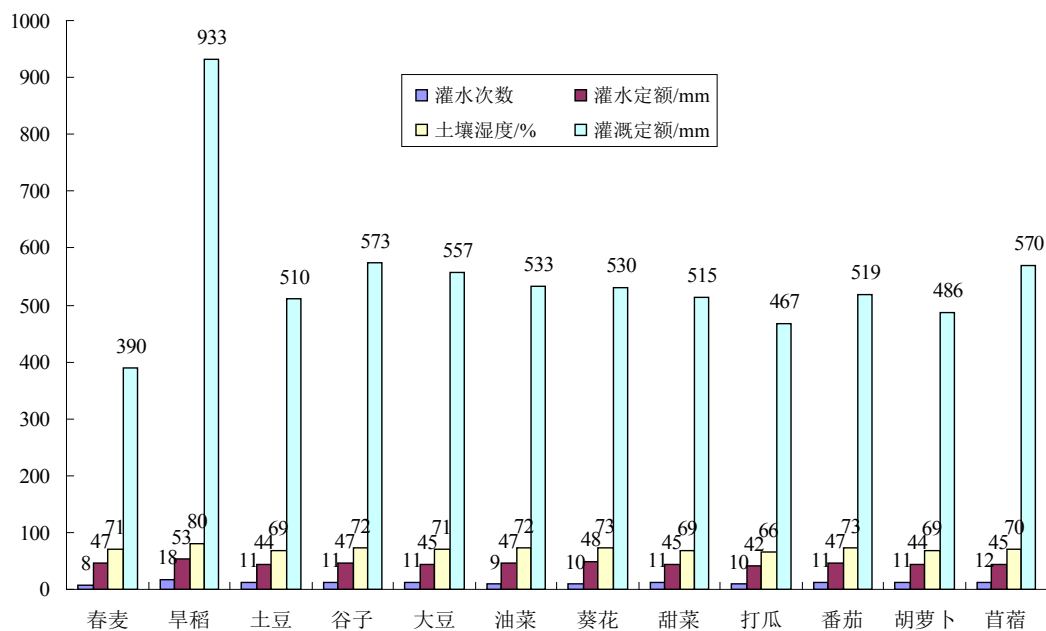


Figure 3. Optimal irrigation system for 12 kinds of drip irrigation crops in the same period

图3. 同期12种滴灌作物优化灌溉制度

## 4. 结论与讨论

### 4.1. 结论

经2016至2017年滴灌田间试验分析,初步获得12种滴灌作物与灌溉制度相关的需水量、灌溉定额参数:春小麦为412 mm、390 mm;旱稻为829 mm、933 mm;谷子为539 mm、573 mm;土豆为560 mm、510 mm;大豆为559 mm、557 mm;油菜为469 mm、533 mm;葵花为515 mm、530 mm;甜菜为492 mm、515 mm;打瓜为510 mm、467 mm;蕃茄为533 mm、519 mm;胡萝卜为468 mm、486 mm;苜蓿为608 mm、570 mm,为灌区滴灌多种作物实施农业节水定额管理制度提供了参考依据。

### 4.2. 讨论

本试验取得了初步效果但尚需进一步研究:1) 鉴于灌溉农业气候年际变化差异性,尚需对12种作物进行周期性连续试验,以期获得较长系列成果。2) 为发挥区域试验对灌区指导应用,尚需从定额管理、总量控制层面综合考虑,充分利用试验基础信息,采用地学等数理统计分析检验,进一步拓展研究应用。

### 基金项目

新疆水利科技专项(G201601)资助。

### 参考文献

- [1] 新疆水利厅规划计划处. 新疆水利统计资料汇编[Z]. 新疆水利厅, 2016: 96-107.
- [2] 新疆统计局. 新疆统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017: 180-200.
- [3] 翟超, 周和平, 等. 北疆膜下滴灌玉米年际需水量及耗水规律[J]. 中国农业科学, 2017, 50(14): 2769-2780.
- [4] 魏永霞, 马瑛瑛, 刘慧, 等. 调亏灌溉下滴灌玉米植株与土壤水分及节水增产效应[J]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 252-260.
- [5] 宋晨. 不同作物膜下滴灌节水灌溉制度研究[J]. 现代经济信息, 2017(24): 358-359.

- [6] 周晓东. 滴灌条件下建平县主要作物高效节水灌溉制度研究[J]. 内蒙古水利, 2016(4): 33-34.
- [7] 李蔚新, 王忠波, 张忠学, 等. 膜下滴灌条件下玉米灌溉制度试验研究[J]. 农机化研究, 2016(1): 196-200.
- [8] 翟超, 周和平, 等. 膜下滴灌棉花年际需水量变化试验分析[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(6): 32-38.
- [9] 赵自明. 西北干旱缺水地区大田作物滴灌灌溉制度试验[J]. 武汉大学学报(工学版), 2006(4): 9-13.
- [10] 陈金武. 内蒙古通辽市水稻膜下滴灌灌溉制度试验研究[J]. 节水灌溉, 2018(4): 11-14.
- [11] 牛琪, 王士国, 陈学庚. 膜下滴灌水稻穴直播机研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(2): 90-95.
- [12] 王培武, 李治远. 膜下滴灌水稻苗期黄枯的机理研究[J]. 北方水稻, 2016(1): 1-5.
- [13] 陈林, 高哲, 银永安, 等. 不同浓度除草剂对膜下滴灌水稻苗期生长及土壤环境的影响[J]. 北方水稻, 2012(3): 24-26.
- [14] 丛虎滋, 戴爱梅, 洪浩. 新疆博州滴灌谷子优质高效栽培技术[J]. 农业科技通讯, 2017(3): 212-213.
- [15] 潘永霞, 田军仓, 沈晖, 等. 膜下滴灌不同灌水量对谷子需水规律及水分生产效率的影响[J]. 宁夏工程技术, 2016(2): 106-109.
- [16] 张云舒, 王治国, 付彦博, 等. 氮肥施用量对膜下滴灌谷子生长及产量的影响[J]. 新疆农业科学, 2017(6): 1061-1065.
- [17] 张恒嘉, 李晶. 绿洲膜下滴灌调亏马铃薯光合生理特性与水分利用[J]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 143-151.
- [18] 孙丹丹, 张忠学. 滴灌大豆不同灌水量的产量与水分效应分析[J]. 东北农业大学学报, 2012(5): 100-104.
- [19] 杜孝敬, 陈佳君, 徐文修, 等. 膜下滴灌量对复播大豆土壤含水量及产量形成的影响[J]. 中国农学通报, 2018(12): 36-44.
- [20] 彭辉, 张雁, 赵巧玲. 新大豆8号膜下滴灌高产栽培技术[J]. 新疆农垦科技, 2013(6): 8-9.
- [21] 洪明, 赵经华, 马英杰, 等. 果农树间作条件下滴灌大豆耗水规律试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(5): 114-116.
- [22] 张亚丽, 陈占全. 滴灌春油菜水肥高效利用技术研究[J]. 青海大学学报(自然科学版), 2014, 32(2): 5-9.
- [23] 郑凤杰, 杨培岭, 任树梅, 等. 微咸水滴灌对食用葵花的生长影响及其临界矿化度的研究[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(12): 19-23.
- [24] 樊福义, 苏文斌, 宫前恒, 等. 高寒干旱区膜下滴灌甜菜灌溉制度的研究[J]. 中国糖料, 2017, 39(6): 37-39.
- [25] 艾鹏睿, 赵经华, 马英杰, 等. 不同灌水定额下北疆地区滴灌打瓜耗水规律的研究[J]. 节水灌溉, 2016(11): 39-43.
- [26] 王新, 刁明, 马富裕, 等. 滴灌加工番茄叶面积、干物质生产与积累模拟模型[J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 161-168.
- [27] 洪明, 马英杰, 赵经华, 等. 新疆阿勒泰地区浅埋式滴灌苜蓿灌溉制度试验[J]. 草地学报, 2017, 25(4): 871-874.
- [28] 曹雪松, 李和平, 郑和祥, 等. 地理滴灌对紫花苜蓿耗水、产量及水分生产率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(5): 256-262.
- [29] 周和平, 翟超, 等. 基于土壤养分平衡的无重复灌溉试验分析与设计[J]. 现代农业科技, 2016(23): 180-184.
- [30] 中华人民共和国水利行业标准. 灌溉试验规范(SL13-2015)[P]. 北京: 中华人民共和国水利部发布, 2015-02-16.
- [31] 王忠, 周和平, 张江辉, 等. 新疆农业用水定额技术研究应用[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2012: 77-78.



**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2164-5507，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[hjas@hanspub.org](mailto:hjas@hanspub.org)