

# Analysis of Crop Coefficient and Water Productivity in Drip Irrigation Environment

Xinwei Meng<sup>1</sup>, Heping Zhou<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Institute of Agricultural Sciences, Ninth Division of Xinjiang, Emin Xinjiang

<sup>2</sup>Xinjiang Water Conservancy Management Center, Urumqi Xinjiang

Email: \*xjslzhp@126.com

Received: May 10<sup>th</sup>, 2019; accepted: May 21<sup>st</sup>, 2019; published: May 28<sup>th</sup>, 2019

## Abstract

Crop coefficient and water production efficiency are the basic parameters for analyzing and evaluating irrigation water quota and irrigation benefit. Based on the actual production investigation in drip irrigation area, the crop coefficient and irrigation water productivity of 12 kinds of field drip irrigation crops were analyzed by mathematical statistics method. The results showed that the crop coefficient and water productivity of spring wheat under drip irrigation were 0.79 and 1.52 kg/m<sup>3</sup> during the whole growth period; rice coefficient and water productivity were 1.04 and 0.76 kg/m<sup>3</sup>; potato crop coefficient and water productivity were 0.74 and 8.08 kg/m<sup>3</sup> under drip irrigation; millet crop coefficient and water productivity were 0.70 and 2.04 kg/m<sup>3</sup> under drip irrigation; soybean crop coefficient and water productivity were 0.83 and 0.87 kg/m<sup>3</sup> under drip irrigation; rape crop coefficient and water productivity were 0.89 and 0.54 kg/m<sup>3</sup> under drip irrigation. The crop coefficient and water productivity of drip irrigation sunflower were 0.85 and 0.82 kg/m<sup>3</sup>; the crop coefficient and water productivity of drip irrigation beet were 0.64 and 17.05 kg/m<sup>3</sup>; the crop coefficient and water productivity of drip irrigation melon were 0.78 and 0.55 kg/m<sup>3</sup>; the crop coefficient and water productivity of drip irrigation tomato were 0.81 and 24.12 kg/m<sup>3</sup>; the crop coefficient and water productivity of drip irrigation carrot were 0.80 and 19.18 kg/m<sup>3</sup>; and the crop coefficient and water productivity of drip irrigation alfalfa were 0.80, 4.15 kg/m<sup>3</sup>. The results provide a reference for the evaluation of crop water requirement and irrigation water production efficiency under drip irrigation.

## Keywords

Drought Irrigation Area, Drip Irrigation Crops, Crop Coefficient, Water Productivity, Analysis

## 滴灌环境作物系数及水分生产率分析

孟新伟<sup>1</sup>, 周和平<sup>2\*</sup>

\*通讯作者。

<sup>1</sup>新疆第九师农业科学研究所, 新疆 额敏

<sup>2</sup>新疆水利管理总站, 新疆 乌鲁木齐

Email: xjslzhp@126.com

收稿日期: 2019年5月10日; 录用日期: 2019年5月21日; 发布日期: 2019年5月28日

## 摘要

作物系数和水分生产效率是分析评估灌溉用水定额和灌溉效益的基础参数, 本文基于滴灌灌区生产实际调研采用数理统计方法, 对12种大田滴灌作物系数和灌溉水分生产率进行了分析, 结果表明: 全生育期滴灌春麦作物系数和水分生产率为0.79、1.52 kg/m<sup>3</sup>; 滴灌水稻作物系数和水分生产率为1.04、0.76 kg/m<sup>3</sup>; 滴灌土豆作物系数和水分生产率为0.74、8.08 kg/m<sup>3</sup>; 滴灌谷子作物系数和水分生产率为0.70、2.04 kg/m<sup>3</sup>; 滴灌大豆作物系数和水分生产率为0.83、0.87 kg/m<sup>3</sup>; 滴灌油菜作物系数和水分生产率为0.89、0.54 kg/m<sup>3</sup>; 滴灌葵花作物系数和水分生产率为0.85、0.82 kg/m<sup>3</sup>; 滴灌甜菜作物系数和水分生产率为0.64、17.05 kg/m<sup>3</sup>; 滴灌打瓜作物系数和水分生产率为0.78、0.55 kg/m<sup>3</sup>; 滴灌蕃茄作物系数和水分生产率为0.81、24.12 kg/m<sup>3</sup>; 滴灌胡萝卜作物系数和水分生产率为0.80、19.18 kg/m<sup>3</sup>; 滴灌苜蓿作物系数和水分生产率为0.80、4.15 kg/m<sup>3</sup>。分析结果为滴灌作物需水量及灌溉水分生产效率评估提供了参考依据。

## 关键词

干旱灌区, 滴灌作物, 作物系数, 水分生产率, 分析

Copyright © 2019 by author(s) 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

作物系数是分析作物灌溉用水定额的基本参数, 过去对常规沟畦灌作物系数试验分析较多, 随着滴灌节水技术的应用, 滴灌作物系数近年有所研究[1]。田间试验滴灌春麦出苗、拔节、抽穗、开花灌浆、成熟各生育期作物系数分别为 0.76、0.77、1.11、1.16、0.46, 全生育期平均作物系数为 0.87。田间试验结果表明[2]马铃薯初始生长期、生育中期和成熟期实测作物系数分别为 0.3、1.06 和 0.72, 生育中期作物系数最大。大田膜下滴灌玉米、向日葵灌溉用水制度试验研究表明[3], 生长初期、快速生长期、生长中期、成熟期, 膜下滴灌玉米作物系数分别为 0.16、0.72、1.25、0.41; 膜下滴灌向日葵作物系数分别为 0.19、0.78、1.26、0.32。近年滴灌枣树用水量及作物系数试验分析较多, 黄土高原区滴灌枣树不同灌水量、不同灌水次数作物系数影响试验表明[4], 作物系数随灌水定额和灌水次数增加而增大, 枣树萌芽展叶期、开花坐果期、果实膨大期、成熟期作物系数分别为 0.47、0.65、1.15、1.13; 陕西米脂县[5]试验观测枣树萌芽展叶期、开花坐果期、果实膨大期、果实成熟期作物系数分别为 0.50、0.68、1.26、0.94; 新疆干旱区成龄滴灌枣树田间试验表明[6], 萌芽展叶期作物系数 0.74~0.86, 开花坐果期作物系数 1.24~1.36, 果实膨大期作物系数 1.22~1.45, 果实成熟期作物系数 0.63~0.92。综合滴灌枣树作物系数可以看出, 不同地区生长枣树在不同生长期作物系数大小不同, 但具有前期小生长中期增大生长后期减小的相同变化规律。

灌溉水分生产率反映了作物灌溉用水效率, 是衡量灌区农业生产水平、灌溉工程状况、灌溉管理水平的指标[7]。根据[8] 1998~2010年灌溉水资源和粮食产出数据分析全国灌溉水分生产率为 $1.108 \text{ kg/m}^3$ , 表明我国粮食单方水产粮已过 $1 \text{ kg}$ 。地理滴灌紫花苜蓿灌溉水分生产率试验结果表明[9], 地理滴灌紫花苜蓿耗水量、产量和水分生产率均随灌水量增加而显著增加, 灌溉水分生产率 $1.80 \text{ kg/m}^3$ 。滴灌樱桃西红柿产量和灌溉水分生产率试验结果表明[10], 与沟灌相比灌溉水分生产率提高了 $31.2\%$ ; 西瓜、棉花间作模式滴灌、沟灌灌溉水分生产率试验结果表明[11], 灌溉水分生产率比沟灌提高了 $14.9\%$ 、 $9.2\%$ ; [12]采用统计资料、卫星遥感和地面气象数据相结合方法, 分析2005~2013年间盘锦市稻田平均灌溉水分生产率为 $1.17 \text{ kg/m}^3$ 。

综上, 目前国内滴灌春小麦、玉米、马铃薯、向日葵以及枣树作物系数, 滴灌苜蓿、樱桃西红柿、西瓜、棉花等灌溉水分生产率试验分析较多, 其他滴灌作物尚未更多的研究报道, 本研究基于灌区生产调查对12种作物滴灌作物系数和灌溉水分生产率进行了分析, 为干旱区滴灌作物灌溉用水量和灌溉用水效益分析评估提供参考依据。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 研究区概况

研究区位于新疆头屯河流域天山北坡准格尔盆地南缘昌吉滴灌农业区,  $87^{\circ}18'E$ 、 $44^{\circ}01'N$ , 平均海拔 $600 \text{ m}$ 。多年平均降水量 $181.7 \text{ mm}$ 、蒸发量 $1739.1 \text{ mm}$ 、平均日照时数 $7.8 \text{ h}$ , 平均气温 $13.1^{\circ}\text{C}$ ,  $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温 $3834.3^{\circ}\text{C}$ , 属典型内陆干旱气候。灌区主要分布棕漠土, 质地多为中、轻壤土, 由实际样品检测结果分析,  $0 \text{ cm} \sim 30 \text{ cm}$ 耕作层土壤容重以及田间持水量分别为 $1.50 \text{ g/cm}^3 \sim 1.60 \text{ g/cm}^3$ 、 $20.1\% \sim 23.4\%$ 。灌区地下水埋深 $3.0 \text{ m} \sim 4.5 \text{ m}$ , 地表与地下水矿化度多年平均值均小于 $1 \text{ g/L}$ , 耕层土壤全盐含量 $0.10\% \sim 0.20\%$ 属于非盐渍化, 土壤pH值 $8.7$ 碱性。耕作层土壤有机质含量在 $1.05\% \sim 1.95\%$ , 多年平均 $1.51\%$ , 土壤肥力中偏下, 多年平均土壤全氮、全磷、全钾分别为 $0.09\%$ 、 $0.07\%$ 、 $1.51\%$ , 土壤养分表现为缺氮少磷钾富状态。

### 2.2. 灌区调查方法

灌区种植作物有20余种, 本研究对种植的春小麦(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(SWB-01)、蕃茄(利丰早熟)、胡萝卜(驰诚黄)、苜蓿(紫花), 即12种滴灌作物农业种植技术灌溉用水量和滴灌作物产量及气象数据等进行调查统计。滴灌作物主要施尿素和速溶性二铵滴灌肥, 施肥3次分别在作物生长期(5月上旬)、中期(6月中旬)及中后期(7月上旬)实施, 施肥量 $375 \text{ kg/hm}^2 \sim 450 \text{ kg/hm}^2$ 。滴灌田间采用“覆膜1管2行”即1条毛管(滴灌带)2行作物滴灌方式, 春麦、水稻、土豆、油菜、胡萝卜、苜蓿6种作物田间不铺地膜滴灌, 其他6种作物为膜下滴灌方式。滴灌农田气象数据由田间自动气象站采集, 滴灌作物灌溉单位面积用水量、作物不同生育生长阶段时间、滴灌作物单位面积产量、不同作物产量收购价格等基本情况的, 均为灌区实际调查统计。

### 2.3. 分析研究方法

参考作物蒸发蒸腾量, 按彭曼-蒙特斯(Penman-Monteith)公式分析[13]:

$$ET_0 = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0.34 \cdot u_2)} \quad (1)$$

式中:  $ET_0$ 为参考作物蒸发蒸腾量,  $\text{mm/d}$ ;  $\Delta$ 为温度-饱和水汽压关系曲线在 $T$ 处的切线斜率,  $\text{kPa/}^{\circ}\text{C}$ ;

$R_n$  为净辐射,  $\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ ;  $G$  为土壤热通量,  $\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ ;  $\gamma$  为湿度表常数,  $\text{kPa}/^\circ\text{C}$ ;  $T$  为平均气温,  $^\circ\text{C}$ ;  $u_2$  为 2 m 高水平处风速,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $e_a$  为饱和水汽压,  $\text{kPa}$ ;  $e_d$  为实际水汽压,  $\text{kPa}$ 。

由式(1)看出需要计算参数较多, 为了简化采用水利部灌溉试验总站计算软件分析, 利用当地平均气温( $T$ )、水气压( $e_d$ )、2 米高处风速( $u_2$ )、日照时数( $n$ )气象参数分析计算得  $ET_0$  值。

作物系数为滴灌作物生育期或某阶段需水量与参考作物蒸发蒸腾量比值, 按下式分析:

$$K_C = \sum_{i=1}^n ET_i / ET_{0i} \quad (2)$$

式中:  $K_C$  为作物系数;  $i$  为作物生长的第  $i$  阶段;  $n$  为作物生长划分的阶段数目;  $ET_i$  为作物生长的第  $i$  阶段需水量,  $\text{mm}$ ;  $ET_{0i}$  为作物生长的第  $i$  阶段参考作物蒸发蒸腾量,  $\text{mm}$ 。

作物需水量、参考作物蒸发蒸腾量、作物系数关系如下:

$$ET = ET_0 \cdot K_C \quad (3)$$

式中:  $ET$  为作物需水量,  $\text{mm}$ ;  $ET_0$  为参考作物蒸发蒸腾量,  $\text{mm}$ ;  $K_C$  为作物系数。

滴灌作物水分生产率, 表征作物单位面积产量与该作物全生育用水量比值, 反映单方水量可以产出作物产量水平, 按下式分析[14]:

$$\eta_{\text{sp}} = Y_i / E \quad (4)$$

式中:  $Y_i$  为某种作物单产,  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ;  $E$  为该作物全生育期灌溉用水量,  $\text{m}^3/\text{hm}^2$ 。

调查统计数据利用 Excel 2007 进行分析绘制图。

### 3. 结果与分析

#### 3.1. 滴灌作物系数变化分析

作物系数( $K_C$ )是作物需水量( $ET$ )与参考作物蒸腾量( $ET_0$ )比值,  $ET$  通过试验观测获得,  $ET_0$  据当地气象资料用彭曼公式计算。考虑作物系数特征, 宜将滴灌作物生长划分为四个阶段进行分析: 1) 作物初始生长期, 从播种到作物覆盖率接近 10%, 此阶段作物系数为  $K_{c1}$ ; 2) 作物快速发育期, 从覆盖率 10%到充分覆盖, 即大田作物覆盖率达到 70%~80%, 此阶段作物系数为  $K_{c2}$ ; 3) 作物生育中期, 作物生长从充分覆盖到成熟期开始, 叶片开始发黄, 此阶段作物系数为  $K_{c3}$ ; 4) 作物成熟期, 从叶片开始变黄到作物生理成熟或收割, 此阶段作物系数为  $K_{c4}$ 。

基于灌区作物生长期动态和气象观测数据及滴灌用水量基本情况, 应用式(1)~(3)得 12 种滴灌作物不同生长阶段作物系数见表 1 所示, 由分析结果可知, 滴灌春麦全生育期作物系数  $K_C = 0.79$ , 滴灌旱作水稻全生育期作物系数  $K_C = 1.04$ , 滴灌土豆全生育期作物系数  $K_C = 0.74$ , 滴灌谷子全生育期作物系数  $K_C = 0.70$ , 滴灌大豆全生育期作物系数  $K_C = 0.83$ , 滴灌油菜全生育期作物系数  $K_C = 0.89$ , 滴灌葵花全生育期作物系数  $K_C = 0.85$ , 滴灌甜菜全生育期作物系数  $K_C = 0.64$ , 滴灌打瓜全生育期作物系数  $K_C = 0.78$ , 滴灌蕃茄全生育期作物系数  $K_C = 0.81$ , 滴灌胡萝卜全生育期作物系数  $K_C = 0.80$ , 滴灌苜蓿全生育期作物系数  $K_C = 0.80$ 。滴灌作物全生育期作物系数由大到小为: 滴灌作物全生育期作物系数由大到小为, 滴灌旱作水稻  $1.04 >$  滴灌油菜  $0.89 >$  滴灌葵花  $0.85 >$  滴灌大豆  $0.83 >$  滴灌蕃茄  $0.81 >$  滴灌胡萝卜  $0.80 =$  滴灌苜蓿  $0.80 >$  滴灌春麦  $0.79 >$  滴灌打瓜  $0.78 >$  滴灌土豆  $0.74 >$  滴灌谷子  $0.70 >$  滴灌甜菜  $0.64$ 。由全生育期滴灌作物系数大小分析结果看出, 旱作水稻滴灌用水量相对最大其作物系数较大, 其次滴灌用水量中等偏高的油菜、葵花、大豆、蕃茄、胡萝卜和苜蓿作物系数在 0.80 以上, 滴灌用水量相对小的春麦、打瓜、土豆、谷子和甜菜作物系数 0.65~0.70 间。

**Table 1.** Analysis of crop coefficients at different growth stages of drip irrigation crops  
**表 1.** 滴灌作物不同生长阶段作物系数分析

作物	分析项目	作物不同生长阶段				
		初始生长期 $K_{c1}$	快速发育期 $K_{c2}$	生育中期 $K_{c3}$	成熟期 $K_{c4}$	全生育期 $K_c$
春麦	生长天数(d)	23	30	14	24	92
	蒸腾量 $ET_0$ (mm/d)	5.20	6.17	5.90	5.73	5.74
	需水量 $ET$ (mm/d)	2.59	6.63	6.55	2.65	4.51
	作物系数 $K_c$	0.50	1.08	1.11	0.47	0.79
旱作水稻	生长天数(d)	33	66	22	36	157
	蒸腾量 $ET_0$ (mm/d)	5.66	5.83	4.55	3.64	5.13
	需水量 $ET$ (mm/d)	4.98	6.55	5.52	3.33	5.30
	作物系数 $K_c$	0.88	1.12	1.21	0.95	1.04
土豆	生长天数(d)	13	33	32	54	132
	蒸腾量 $ET_0$ (mm/d)	5.13	5.49	5.79	5.52	5.58
	需水量 $ET$ (mm/d)	2.49	5.28	5.84	2.59	4.14
	作物系数 $K_c$	0.48	0.95	1.02	0.47	0.74
谷子	生长天数(d)	33	44	24	33	134
	蒸腾量 $ET_0$ (mm/d)	5.66	6.16	6.09	4.82	5.67
	需水量 $ET$ (mm/d)	2.75	5.21	6.05	2.15	4.00
	作物系数 $K_c$	0.48	0.85	0.99	0.45	0.70
大豆	生长天数(d)	16	47	21	28	113
	蒸腾量 $ET_0$ (mm/d)	5.89	5.70	5.98	5.77	5.76
	需水量 $ET$ (mm/d)	3.95	5.55	6.29	2.86	4.78
	作物系数 $K_c$	0.67	0.98	1.05	0.50	0.83
油菜	生长天数(d)	34	18	19	22	93
	蒸腾量 $ET_0$ (mm/d)	5.11	6.59	5.57	5.54	5.48
	需水量 $ET$ (mm/d)	3.75	7.48	5.35	4.35	4.85
	作物系数 $K_c$	0.73	1.14	0.96	0.79	0.89
葵花	生长天数(d)	10	39	25	47	121
	蒸腾量 $ET_0$ (mm/d)	5.53	4.05	4.99	5.80	5.07
	需水量 $ET$ (mm/d)	3.56	4.10	5.57	3.76	4.25
	作物系数 $K_c$	0.64	1.04	1.12	0.64	0.85
甜菜	生长天数(d)	11	26	13	87	138
	蒸腾量 $ET_0$ (mm/d)	5.26	5.35	6.10	5.37	5.39
	需水量 $ET$ (mm/d)	2.37	5.27	6.63	2.59	3.44
	作物系数 $K_c$	0.45	0.98	1.08	0.49	0.64

Continued

	生长天数(d)	9	28	27	57	121
打瓜	蒸腾量 $ET_0$ (mm/d)	5.30	5.27	6.01	5.08	5.32
	需水量 $ET$ (mm/d)	3.25	4.59	6.12	3.21	4.13
	作物系数 $K_C$	0.61	0.87	1.02	0.62	0.78
	生长天数(d)	11	41	31	34	116
蕃茄	蒸腾量 $ET_0$ (mm/d)	5.19	5.58	5.75	5.59	5.59
	需水量 $ET$ (mm/d)	1.83	5.52	6.46	2.38	4.48
	作物系数 $K_C$	0.36	0.98	1.13	0.43	0.81
	生长天数(d)	11	20	27	60	118
胡萝卜	蒸腾量 $ET_0$ (mm/d)	5.64	5.57	6.02	4.60	5.17
	需水量 $ET$ (mm/d)	3.16	5.03	5.32	3.28	4.07
	作物系数 $K_C$	0.55	0.90	0.88	0.74	0.80
	生长天数(d)	11	111	11	10	143
苜蓿	蒸腾量 $ET_0$ (mm/d)	4.26	5.51	4.49	4.59	5.29
	需水量 $ET$ (mm/d)	1.67	4.56	4.41	3.29	4.24
	作物系数 $K_C$	0.38	0.83	0.98	0.71	0.80

图 1 为 12 种滴灌作物不同生长阶段作物系数分布, 由分析结果可知, 12 种滴灌作物系数表现为以下共同的基本规律:

1) 作物生长过程中作物系数变化表现为, 初始生长期  $K_{C1}$  小, 快速发育期  $K_{C2}$  开始增大, 生育中期  $K_{C3}$  达到最大, 成熟期  $K_{C4}$  逐渐下降, 作物系数总体表现前期由小到大, 作物生长旺盛期最大, 后期逐渐减小。

2) 不同阶段作物系数大小有所不同, 这是作物自身生物学特性反映, 它与作物种类、品种、生育期以及作物群体叶面积指数等因素有关。

3) 滴灌作物系数随着滴灌用水量的增加呈增长趋势, 但作物系数在不同生长阶段大小变化分布特征相似。对于大多数作物而言, 生育期阶段作物系数 0.36~1.21 间, 全生育期 0.64~1.04 之间。较大或过量灌溉用水将会导致作物系数的增大, 由此, 也反映出土壤水分过多和作物对水分无效消耗, 则不利于农业节水灌溉。

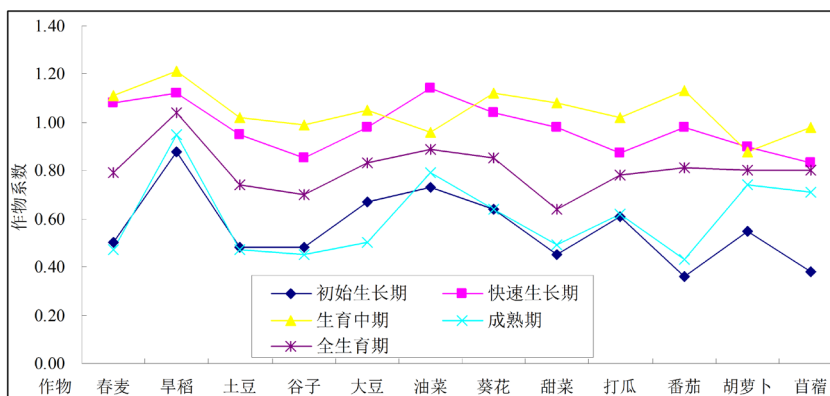


Figure 1. Crop coefficient distribution under drip irrigation at different growth stages  
图 1. 不同生长阶段滴灌作物系数分布

### 3.2. 滴灌作物灌溉水分生产率分析

基于灌区作物全生育期降水量、蒸发量、气温, 以及 12 种滴灌作物灌溉用水定额、产量水平基本情况调查统计, 按照式(4)得出灌区滴灌作物灌溉水分生产效率见表 2 所示。分析结果可以看出: 1) 调查分析灌区作物全生育期降水量 51.3 mm~97.2 mm, 其中有效降水量仅有 26.7 mm~50.5 mm, 蒸发量 880.0 mm~1555.5 mm, 蒸发量是降水量的 17.3~16.0 倍, 气温 21.8℃~23.1℃, 反映了降水少、气温高、蒸发强烈的干旱区农业水利灌溉重要基础意义。2) 灌溉水分生产率与滴灌灌溉定额和滴灌产量水平具有相关性, 灌溉水分生产率随着灌溉定额减少及滴灌产量水平增加呈现增长, 不同滴灌作物灌溉水分生产率为: 滴灌春麦灌溉定额 3435 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, 产量水平 5220 kg/hm<sup>2</sup>, 灌溉水分生产率 1.52 kg/m<sup>3</sup>; 滴灌水稻灌溉定额 7845 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, 产量水平 6000 kg/hm<sup>2</sup>, 灌溉水分生产率 0.76 kg/m<sup>3</sup>; 滴灌土豆灌溉定额 3435 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, 产量水平 39225 kg/hm<sup>2</sup>, 灌溉水分生产率 8.08 kg/m<sup>3</sup>; 滴灌谷子灌溉定额 4395 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, 产量水平 8985 kg/hm<sup>2</sup>, 灌溉水分生产率 2.04 kg/m<sup>3</sup>; 滴灌大豆灌溉定额 4545 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, 产量水平 3945 kg/hm<sup>2</sup>, 灌溉水分生产率 0.87 kg/m<sup>3</sup>; 滴灌油菜灌溉定额 3855 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, 产量水平 2085 kg/hm<sup>2</sup>, 灌溉水分生产率 0.54 kg/m<sup>3</sup>; 滴灌葵花灌溉定额 4395 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, 产量水平 3600 kg/hm<sup>2</sup>, 灌溉水分生产率 0.82 kg/m<sup>3</sup>; 滴灌甜菜灌溉定额 4260 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, 产量水平 72645 kg/hm<sup>2</sup>, 灌溉水分生产率 17.05 kg/m<sup>3</sup>; 滴灌打瓜灌溉定额 3990 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, 产量水平 2190 kg/hm<sup>2</sup>, 灌溉水分生产率 0.55 kg/m<sup>3</sup>; 滴灌工业番茄灌溉定额 4395 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, 产量水平 106005 kg/hm<sup>2</sup>, 灌溉水分生产率 24.12 kg/m<sup>3</sup>; 滴灌胡萝卜灌溉定额 4395 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, 产量水平 84285 kg/hm<sup>2</sup>, 灌溉水分生产率 19.18 kg/m<sup>3</sup>; 滴灌苜蓿灌溉定额 5220 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, 产量水平 21645 kg/hm<sup>2</sup>, 灌溉水分生产率 4.15 kg/m<sup>3</sup>。

**Table 2.** Water production efficiency of drip irrigation crops in irrigation area  
**表 2.** 灌区滴灌作物灌溉水分生产效率

作物	全生育期降水、蒸发、气温				灌溉定额 (m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup> )	产量水平 (kg/hm <sup>2</sup> )	水分生产率 (kg/m <sup>3</sup> )
	降水(mm)	有效降水(mm)	蒸发(mm)	气温(℃)			
春麦	53.8	28.0	1027.3	22.1	3435	5220	1.52
早稻	97.2	50.5	1555.5	22.2	7845	6000	0.76
土豆	79.0	41.1	1351.5	23.1	4800	39225	8.08
谷子	77.4	40.3	1427.5	23.0	4395	8985	2.04
大豆	61.2	31.5	1203.0	23.0	4545	3945	0.87
油菜	51.3	26.7	880.0	21.8	3855	2085	0.54
葵花	63.9	33.2	1245.5	23.0	4395	3600	0.82
甜菜	75.2	39.0	1398.4	23.0	4260	72645	17.05
打瓜	58.3	30.0	1239.5	22.5	3990	2190	0.55
番茄	59.4	30.9	1246.8	22.8	4395	106005	24.12
胡萝卜	88.3	45.9	1210.4	22.8	4395	84285	19.18
苜蓿	81.6	42.5	1403.4	22.6	5220	21645	4.15

灌溉水分生产率表征单位体积水量产出作物产量能力, 单位体积水量产出多, 说明灌溉水分生产效率高。图 2 为研究灌区 12 种滴灌作物灌溉水分生产率大小分布, 由分布结果看出, 在当地气候和灌溉水肥条件下, 因滴灌作物灌溉需水量不同灌溉水分生产率大小差异变化较大, 12 种滴灌作物灌溉水分生产

率范围  $0.54 \text{ kg/m}^3 \sim 24.12 \text{ kg/m}^3$ , 灌溉水分生产率相对小的作物为油菜, 灌溉水分生产率最大为番茄, 水分生产率由小到大顺序为: 油菜、打瓜、旱作水稻、葵花、大豆、春小麦、谷子、苜蓿、土豆、甜菜、胡萝卜、番茄。

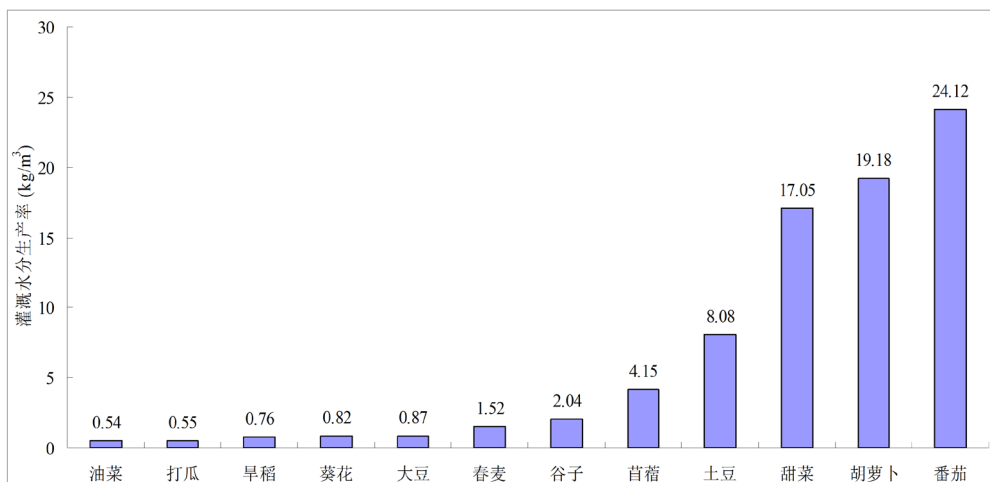


Figure 2. Distribution of irrigation water productivity of different drip irrigation crops  
图 2. 不同滴灌作物灌溉水分生产率大小分布

## 4. 结论与讨论

### 4.1. 结论

灌区滴灌作物调查分析结果表明, 全生育期滴灌作物系数及其大小为: 旱作水稻 1.04、油菜 0.89、葵花 0.85、大豆 0.83、蕃茄 0.81、胡萝卜 0.80、苜蓿 0.80、春麦 0.79、打瓜 0.78、土豆 0.74、谷子 0.70、甜菜 0.64。旱作水稻作物系数较大, 油菜、葵花、大豆、蕃茄、胡萝卜和苜蓿作物系数 0.80 以上, 春麦、打瓜、土豆、谷子和甜菜作物系数相对较小在 0.65~0.70 之间。由于滴灌作物灌溉需水量不同灌溉水分生产率大小差异变化较大, 分析的 12 种滴灌作物水分生产率为  $0.54 \text{ kg/m}^3 \sim 24.12 \text{ kg/m}^3$ , 其中滴灌油菜水分生产率最小其值为  $0.54 \text{ kg/m}^3$ , 最大为工业番茄  $24.12 \text{ kg/m}^3$ 。

### 4.2. 讨论

经灌区调查统计分析获得了 12 种滴灌作物系数, 以及滴灌作物灌溉水生产效率, 为滴灌作物在缺少需水量基础资料条件下, 利用当地相关气象信息估算作物需水量, 以及评估滴灌不同作物灌溉水生产效率提供了基本参考数据。文中数据分析主要源于灌区不同滴灌作物的调查统计, 为进一步提升灌区多数滴灌作物系数和灌溉水分生产效率研究分析效果, 可在灌区调查统计分析基础上进一步结合田间试验方式开展测验, 以获得数据较为充实全面的相关试验研究分析结果。

## 参考文献

- [1] 宋常吉, 王振华, 郑旭荣, 等. 北疆滴灌春小麦耗水特征及作物系数的确定[J]. 西北农业学报, 2013, 22(3): 58-63.
- [2] 邱金亮, 王静, 张连根, 等. 滴灌条件下冬马铃薯需水规律及作物系数试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(2): 122-124.
- [3] 杜斌, 屈忠义, 于健, 等. 内蒙古河套灌区大田作物膜下滴灌作物系数试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(4): 16-20.



- [4] 杨凯. 黄土高原区山地滴灌枣树耗水规律与作物系数探究[J]. 南方农业, 2018(27): 139-142.
- [5] 胡永翔, 李援农, 张莹. 黄土高原区滴灌枣树作物系数和需水规律试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(11): 87-91.
- [6] 王则玉, 谢香文, 刘国宏, 等. 干旱区绿洲滴灌成龄枣树耗水规律及作物系数[J]. 新疆农业科学, 2015, 52(4): 675-680.
- [7] 郑捷, 李光永, 韩振中. 中美主要农作物灌溉水分生产率分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(11): 46-50.
- [8] 操信春, 杨陈玉, 何鑫, 等. 中国灌溉水资源利用效率的空间差异分析[J]. 中国农村水利水电, 2016(8): 128-132.
- [9] 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.
- [10] 卢成, 郑世宗, 周诗魁. 滴灌灌溉制度对樱桃西红柿产量及灌溉水分生产率的影响[J]. 浙江水利科技, 2015(5): 4-5.
- [11] 强小嫚, 孙景生, 刘浩. 膜下滴灌对西瓜/棉花间作产量及水分生产率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(6): 10-14.
- [12] 张旭东, 迟道才, 夏桂敏, 等. 盘锦市稻田水分生产率及水分生产函数研究[J]. 中国科技论文, 2017, 12(7): 758-763.
- [13] 段爱旺, 孙景生, 刘钰, 等. 北方地区主要农作物灌溉用水定额[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2004:30-36.
- [14] 李远华, 赵金河, 张思菊. 水分生产率计算方法及其应用[J]. 中国水利, 2001(8): 65-66.

#### 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)