

膜孔灌夏玉米耗水特性和水分生产效率试验研究

董玉云^{1,2}, 王宝成¹, 贾丽华³, 穆红文⁴, 费良军⁵

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省道路桥梁与地下工程重点实验室, 甘肃 兰州 730070;

3. 陕西省农业工程勘察设计院, 陕西 西安 710068; 4. 甘肃省电力设计院, 甘肃 兰州 730050;

5. 西安理工大学水资源研究所, 陕西 西安 710048)

摘要: 通过测坑试验, 研究了膜孔灌水频率和灌水量对夏玉米耗水量、产量和水分生产效率产生的影响。结果表明, 拔节期和抽穗期是玉米需水的关键阶段; 相同灌水频率时, 耗水量随灌水量的增加而增大, 相同灌水量时, 耗水强度随灌水频率的增加而增大; 玉米产量与玉米生育期总耗水量之间呈良好的抛物线关系; 膜孔灌夏玉米产量和水分生产效率较佳的需水量是 $2\ 546 \sim 3\ 410\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$; 灌水条件相同时, 玉米膜孔灌比常规畦灌的耗水量减少 6.2%, 水分生产效率提高 23.3%, 增产 15.9%。

关键词: 膜孔灌; 夏玉米; 耗水特性; 水分生产效率

中图分类号: S275.9 文献标志码: A 文章编号: 1000-7601(2014)05-0007-05

Study on the water consumption characteristics and water production efficiency of summer corn under film hole irrigation

DONG Yu-yun^{1,2}, WANG Bao-cheng¹, JIA Li-hua³, MU Hong-wen⁴, FEI Liang-jun⁵

(1. College of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Gansu Province Key Laboratory of Road and Bridge and Underground Engineering, Lanzhou, Gansu 730070, China;

3. Agricultural Survey and Design Institute of Shaanxi, Xi'an, Shaanxi 710068, China;

4. Gansu Design Institute of Electric Power, Lanzhou, Gansu 730050, China;

5. Institute of Water Resources, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: Through the field small plots experiment, has studied the impacts of irrigating frequency and irrigating volume to the water consumption, yield and water production efficiency of summer corn under film hole irrigation. The results showed that: The jointing stage and heading stage were the key stage for the corn water requirement. The water consumption was increasing with added irrigating volume under the same irrigating frequency. The water consumption intensity was added with increase of the irrigating frequency at the same irrigating quota. The corn yield with total water consumption showed a good parabolic relation. The corn water requirements with better yield and high water production efficiency were $2\ 546\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ to $3\ 410\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ by the film hole irrigation. Compared with the film hole irrigation to the common border irrigation, the water consumption was decreased 6.2%, water production efficiency was increased 23.3%, and yield was increased 15.9% under same irrigation condition.

Keywords: film hole irrigation; summer corn; water consumption characteristics; water production efficiency

膜孔灌是在地膜覆盖栽培的基础上发展起来的一种地面灌溉新技术, 具有增温保墒、节水效果好、投资少等特点, 目前已经在我国西北干旱地区广泛应用^[1]。目前, 国内对膜孔灌的研究主要是费良军、吴军虎、缴锡云等^[2-5]开展的单点源土壤水分运移特性、影响因素及数学模型等方面的试验研究以及

费良军、董玉云等^[6-8]对膜孔交汇入渗的土壤水氮运移特性、影响因素的研究。直至目前尚未见到国外有关膜孔灌的研究报道。玉米是我国主要的粮食作物, 覆膜条件下关于玉米的研究多见于膜下滴灌不同灌水处理对玉米的形态、耗水量、产量的影响^[9-12], 但其在膜孔灌溉条件下的研究鲜有报

收稿日期: 2014-01-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(50579064); 长江学者和创新团队发展计划(IRT 1139); 兰州交通大学“青蓝”人才工程基金(QL-08-20A)

作者简介: 董玉云(1975—), 女, 河北任丘人, 博士, 副教授, 主要从事水资源规划和农田水、肥运移方面的研究。E-mail: dongyuyun2003@163.com。

道^[13-16]。因此,研究膜孔灌夏玉米的耗水规律有十分重要的意义。本文研究了灌水频率和灌水量对玉米耗水量和水分生产效率的影响,以期为提高膜孔灌条件下作物水分利用效率及制定合理的灌溉制度提供一定的理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验设计

试验在西安理工大学露天试验场防雨棚下的测坑中进行,试验所用土壤为粉壤土,土壤的有机质含量 $11.08 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $0.79 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 本底值 $4.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 本底值 $1.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 值为 8.0,田间持水率 23.5%,平均容重 $1.20 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

膜孔灌试验采用 2 因素 3 水平组合设计,见表 1,共 9 个处理,3 次重复。同时设一个处理 10(畦灌)与处理 9 的灌水定额和灌水次数相同,与膜孔灌做比较。3 次灌水时间为拔节期 2 次,抽穗期 1 次;4 次灌水为拔节期 2 次、抽穗期和灌浆期各 1 次;5 次灌水为出苗期 1 次、拔节期 2 次、抽穗期和灌浆期各 1 次。测坑面积是 2.08 m^2 ,将地膜覆于整平后的田面。所播玉米为新户单 4 号,在撒播种子处开直径为 6 cm 的作物放苗孔。5 月 30 日实施灌水量为 $450 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 的播前灌水。6 月 11 日采用穴播法播种,将玉米种子播于地表下 5 cm 处,株距为 40 cm,行距为 60 cm。播种前将尿素(含纯氮 46%) $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、过磷酸钙 ($150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 和硫酸钾 ($120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 作为基肥一次性施于地表下 10 cm 处,生育期不追肥,9 月 20 日收获。

表 1 玉米灌水处理

Table 1 Irrigation treatments of maize

处理 Treatment	灌水定额 Irrigation quota $/(\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2})$	灌水次数 Irrigation times	灌溉定额 Irrigation norm $/(\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2})$
1	375	3	1125
2	375	4	1500
3	375	5	1875
4	525	3	1575
5	525	4	2100
6	525	5	2625
7	675	3	2025
8	675	4	2700
9	675	5	3375
10 畦灌 (border irrigation)	675	5	3375

1.2 观测方法

在玉米生育期用土钻取土,在土壤剖面上沿水平和垂直两个方向布设取土点。水平控制范围为 23 cm,分别于距作物根系水平距离 3、13、23 cm 处取土,垂直方向控制深度为 100 cm,每 10 cm 一层,于苗期、拔节期、抽穗期、灌浆期、乳熟期和收获后取土,用烘干法测定土壤含水率。玉米的田间耗水量用水量平衡法计算。收获后测定玉米籽粒产量。

2 膜孔灌玉米耗水特性分析

2.1 不同灌水处理玉米生育期耗水规律

2.1.1 不同灌水处理玉米耗水量及耗水模数 表 2 为不同灌水处理玉米各生育阶段的耗水量和耗水模数。可以看出:膜孔灌玉米各灌水处理在整个生育期的总体耗水规律相同,以拔节期耗水量最大,抽穗期耗水量次之,苗期和灌浆成熟期耗水量较小,说明拔节期和抽穗期是玉米需水的关键阶段。在苗期,对于相同的灌水次数,处理 3、处理 6 和处理 9 的耗水量分别为 45.52、52.83 mm 和 72.93 mm,中灌水定额和大灌水定额的处理比小灌水定额的处理耗水量分别高出 16% 和 60%,表明灌水定额越大,耗水量越大。在拔节期,耗水量达到高峰,在小灌水定额的处理中,各处理耗水量受灌水次数的影响差异显著;而在中灌水定额和大灌水定额的处理中,受灌水次数的影响较小,耗水量差异较小。抽穗期以后,灌水定额和灌水次数对耗水量的影响程度较苗期和拔节期小,但耗水量仍然是随着灌水次数的增加而增大。

对比处理 9 和处理 10 可以看出,膜孔灌的土壤水分消耗总量比常规畦灌减少 6.2%。主要原因是膜孔灌的覆膜作用抑制了棵间土壤的无效蒸发。

表 3 为各处理玉米不同生育阶段的耗水强度。可以看出:夏玉米的耗水强度在拔节期和抽穗期较大,苗期和灌浆成熟期相对较小。对于相同的灌水定额,灌水次数越多,耗水强度越大;相同的灌水次数,灌水定额越大,耗水强度也越大。

2.1.2 耗水量、耗水强度与灌水量和灌水次数的关系 经分析,在本研究试验条件下,膜孔灌玉米生育期耗水量、耗水强度与灌水量和灌水次数之间均满足线性函数关系。即

$$ET_T = Aw + Bn + C$$

$$w_1 \leq w \leq w_2, n_1 \leq n \leq n_2 \quad (1)$$

$$\bar{R} = Dw + En + F$$

$$w_1 \leq w \leq w_2, n_1 \leq n \leq n_2 \quad (2)$$

式中, ET_T 为玉米生育期总耗水量(mm); \bar{R} 为玉米

生育期平均耗水强度($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); w 为玉米生育期灌溉定额(mm); n 为玉米生育期灌水次数(次); w_1 、 w_2 、 n_1 、 n_2 分别为最小灌水定额、最大灌水定额、最

小灌水次数、最大灌水次数; A 、 B 、 C 、 D 、 E 、 F 为拟合参数。

表 2 不同灌水处理玉米各生育阶段的耗水量 ET

Table 2 The maize water consumption ET in each growth stage under different irrigation treatments

处理 Treatment	苗期 - 拔节 Seeding - jointing		拔节 - 抽穗 Jointing - heading		抽穗 - 灌浆 Heading - filling		灌浆 - 成熟 Filing - maturity		全生育期 耗水量 Total ET /mm
	耗水量 ET /mm	耗水模数 Module index/%	耗水量 ET /mm	耗水模数 Module index/%	耗水量 ET /mm	耗水模数 Module index/%	耗水量 ET /mm	耗水模数 Module index/%	
	1	39.25	19.33	70.30	34.62	64.22	31.63	29.27	
2	36.47	16.27	72.89	32.52	68.88	30.72	45.93	20.49	224.17
3	45.52	17.76	91.87	35.84	72.14	28.15	46.79	18.25	256.32
4	35.75	15.42	101.68	43.87	56.67	24.45	37.70	16.26	231.80
5	37.95	14.41	104.15	39.55	59.91	22.75	61.35	23.30	263.36
6	52.83	17.61	104.06	34.70	73.78	24.60	69.25	23.09	299.92
7	36.65	13.57	134.04	49.64	51.26	18.98	48.10	17.81	270.04
8	43.49	14.87	125.66	42.97	57.25	19.58	66.02	22.58	292.42
9	72.93	19.86	138.85	37.81	86.25	23.48	69.22	18.85	367.26
10	101.83	26.10	130.52	33.45	74.02	18.97	83.80	21.48	390.17
膜孔灌平均值 Mean value	44.54	16.57	104.83	39.06	65.60	24.93	52.63	19.45	267.59

表 3 不同灌水处理玉米各生育阶段日耗水强度 $R/(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})$

Table 3 Daily water consumption intensity R of maize in each growth stage under different irrigation treatments

处理 Treatment	苗期 - 拔节 Seeding - jointing	拔节 - 抽穗 Jointing - heading	抽穗 - 灌浆 Heading - filling	灌浆 - 成熟 Filing - maturity	全生育期平均日耗水强度 average daily water consumption intensity
1	1.57	2.51	3.26	1.05	2.10
2	1.46	2.25	3.28	1.64	2.25
3	1.82	3.28	4.81	1.67	2.90
4	1.43	3.63	3.78	1.35	2.55
5	1.52	3.72	3.99	2.19	2.86
6	1.95	3.72	4.52	2.12	3.08
7	1.47	4.79	3.42	1.72	2.85
8	1.74	4.49	4.12	2.36	3.18
9	2.92	4.96	5.12	2.47	3.87
10	3.92	4.50	4.93	2.99	3.98
膜孔灌平均值 Mean value	1.76	3.71	4.03	1.84	2.85

对表2、表3中玉米生育期总耗水量及平均耗水强度数据拟合得:

$$ET_T = 0.686w + 2.698n + 114.472$$

$$112 \leq w \leq 337, 3 \leq n \leq 5 \quad R^2 = 0.963 \quad (3)$$

$$\bar{R} = 0.007w + 0.022n + 1.193$$

$$112 \leq w \leq 337, 3 \leq n \leq 5 \quad R^2 = 0.948 \quad (4)$$

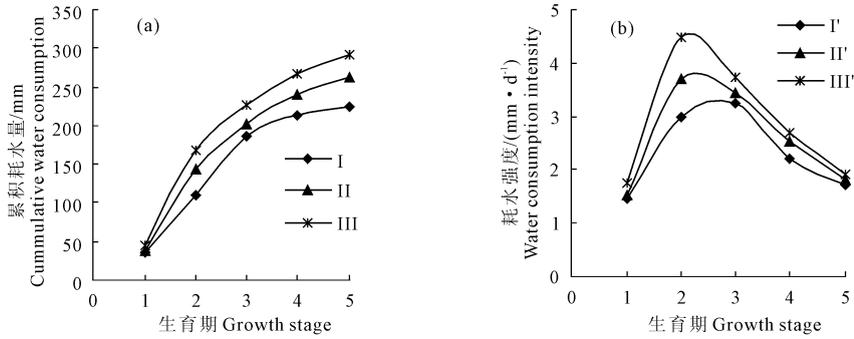
拟合数据点共有 9 个,取显著性水平为 0.01,其临界相关系数为 0.798,可以看出模型的决定系

数均大于临界相关系数,模型的拟合效果较好。

2.2 不同灌水处理对膜孔灌玉米生育期耗水规律的影响

2.2.1 灌水定额对耗水规律的影响 图 1 表示灌水次数为 4 次时不同灌水定额的玉米生育期累积耗水量和耗水强度曲线,图 1(a)中 I、II、III 分别表示灌水定额分别为 375、525、675 $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 的累积耗水量,图 1(b)中 I'、II'、III' 表示其相应各生育阶段的

耗水强度,横坐标轴的 1、2、3、4、5 代表生育期。



1. 苗期 Seeding stage; 2. 拔节期 Jointing stage; 3. 抽穗期 Heading stage; 4. 灌浆期 Filling stage; 5. 乳熟期 Milky stage

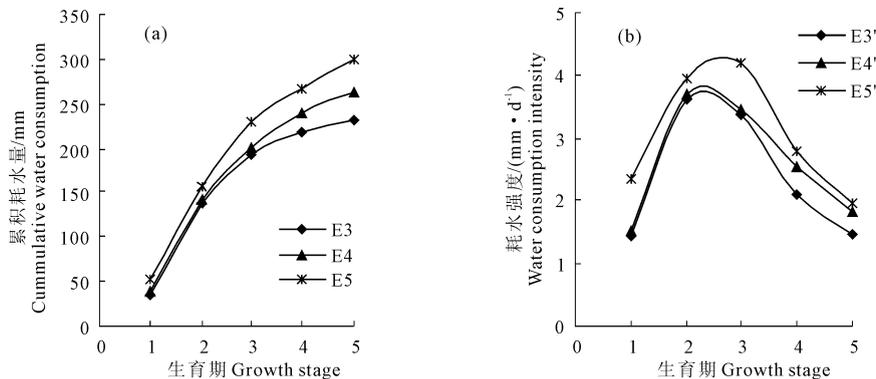
图 1 不同灌水定额的玉米累积耗水量及耗水强度

Fig. 1 Cumulative water consumption and water consumption intensity in different irrigation quota

可以看出:在玉米生育期中,累积耗水量在生育前期增加较快,后期增加较小。耗水强度曲线呈抛物线型,在苗期及灌浆、乳熟期耗水强度相对较小,拔节期、抽穗期耗水强度较大,在拔节期达到最大值。从图 1 还可以看出,玉米生育期灌水定额对耗水量及耗水强度均有较大的影响,灌水定额越大,玉米生育期的累积耗水量越大,耗水强度也越大。

2.2.2 灌水次数对耗水规律的影响 图 2 表示灌水定额为 $525 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 时不同灌水次数的玉米生育

期累积耗水量及耗水强度曲线, E_3 、 E_4 、 E_5 代表各灌水次数下的累积耗水量, E_3' 、 E_4' 、 E_5' 为相应处理的耗水强度。可以看出:灌水 5 次的处理较灌水 4 次的处理在苗期的累积耗水量及耗水强度分别高出 35.38 mm 和 $0.36 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$;灌水 4 次的处理较灌水 3 次的处理在灌浆期的累积耗水量及耗水强度分别高出 13.36 mm 和 $0.21 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。可见苗期增加灌水次数对玉米耗水影响较大,在灌浆期增加灌水对玉米耗水量的影响较小。



1. 苗期 Seeding stage; 2. 拔节期 Jointing stage; 3. 抽穗期 Heading stage; 4. 灌浆期 Filling stage; 5. 乳熟期 Milky stage

图 2 不同灌水次数的玉米累积耗水量及耗水强度

Fig. 2 Cumulative water consumption and consumption rate in different irrigation frequency

3 玉米产量、水分生产效率 (WUE) 和耗水量的关系

3.1 不同灌水处理玉米产量及水分生产效率

本文将水分生产效率 WUE 定义为玉米每消耗 1 m^3 水所能生产的籽粒产量:

$$\text{设 } WUE = Y/ET \quad (5)$$

式中, Y 为玉米产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); ET 为玉米的耗水量 ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)。

表 4 为不同灌水处理的玉米产量及其水分生产

效率。可以看出:收获后玉米籽粒产量以处理 8 的最大,为 $6825.64 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,其次为处理 9,为 $6601.11 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;处理 5 的土壤水分生产效率最大,为 $2.43 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,其次为处理 7,为 $2.35 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。说明灌水定额较大时,产量较高,灌水定额较小时,增加灌水次数,也可明显增加玉米的产量。随着灌水定额的增大,增加灌水次数带来的产量增加值减小,在灌水次数较多时,产量有所下降。另外,在灌水定额较小时,虽然产量较小,但土壤水分生产效率相对较高。增加灌水次数,尤其是在灌水定额较大

时,产量有所增加,但土壤水分生产效率较低。

表 4 不同灌水处理的玉米产量及水分生产效率

Table 4 Maize yield and water productive efficiency

处理 Treatment	耗水量 ET_T $/(m^3 \cdot hm^{-2})$	产量 Yield $/(kg \cdot hm^{-2})$	水分生产效率 Water production efficiency/ $(kg \cdot m^{-3})$
1	2030.4	4503.18	2.22
2	2241.7	4935.91	2.20
3	2563.2	5621.34	2.19
4	2318.0	5314.09	2.29
5	2633.6	6387.14	2.43
6	2999.2	6322.21	2.11
7	2700.4	6356.37	2.35
8	2924.2	6825.64	2.33
9	3672.6	6601.11	1.80
10	3901.7	5696.48	1.46

对比处理 5 和处理 8,处理 8 较处理 5 增产 7%,但其灌溉用水量较处理 5 增加 28.6%,增加灌水量所获得的边际效益较小。因此,从节水和高产综合考虑,处理 5 比处理 8 效果好。

对比处理 9 和处理 10,膜孔灌较畦灌玉米水分生产效率提高 23.3%,增产 15.9%。

3.2 玉米产量和与全生育期耗水量的关系

图 3 为玉米籽粒产量(Y)与玉米生育期总耗水量(ET_T)的关系曲线。可以看出:随着耗水量的增加,产量逐渐增大,当耗水量达到一定值时,产量增加缓慢,开始呈现出“报酬递减”现象,当产量达到最大值后如继续增加耗水量,产量不增反降。

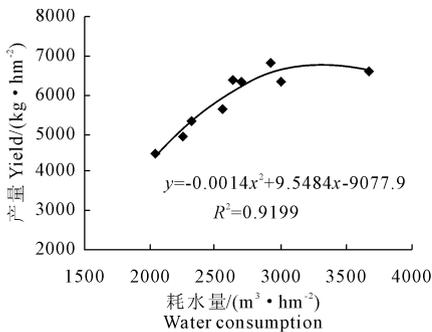


图 3 玉米产量与耗水量的关系曲线

Fig.3 Relation of yield and water consumption amount

由玉米籽粒产量(Y)与玉米生育期总耗水量(ET_T)的关系图可见,二者之间呈现良好的抛物线关系,其回归方程式为:

$$Y = aET_T^2 + bET_T + c \quad (6)$$

式中: a 、 b 、 c 为回归系数,其它符号意义同前。

采用式(6)对图 3 资料拟合得:

$$Y = -0.0014ET_T^2 + 9.5484ET_T - 9077.9$$

$$R^2 = 0.9199 \quad (7)$$

由于二次函数关系存在极值,所以作物产量的

最大值出现在一阶导数 $\frac{dY}{dET_T} = 0$ 处。

对式(7)求导,得到 ET_T 为 $3\ 410\ m^3 \cdot hm^{-2}$ 时, Y 最大,为 $7\ 203\ kg \cdot hm^{-2}$ 。

WUE 最大时出现在 $\frac{dWUE}{dET_T} = aET_T + b + \frac{c}{ET_T} = 0$ 处。求得 WUE 最大时, $ET_T = 2\ 546\ m^3 \cdot hm^{-2}$ 。

因此,产量最大的耗水量为 $3\ 410\ m^3 \cdot hm^{-2}$,水分生产效率最大的耗水量为 $2\ 546\ m^3 \cdot hm^{-2}$ 。

3 结 论

1) 在膜孔灌溉条件下,拔节期和抽穗期是玉米需水关键阶段。灌水定额越大,玉米生育期耗水量越大。玉米生育期前期增加灌水次数,耗水量明显增大,玉米生育期后期增加灌水次数,则对耗水量影响减小。玉米生育期耗水量和耗水强度均与灌水量和灌水次数之间符合线性函数关系。

2) 玉米产量与玉米生育期总耗水量之间呈现良好的抛物线关系。

3) 从节水和高产两方面综合考虑,膜孔灌溉条件下,夏玉米产量和水分生产效率较佳的需水量是 $2\ 546 \sim 3\ 410\ m^3 \cdot hm^{-2}$ 。

4) 膜孔灌较畦灌具有较好的节水、增产效果。对于相同的灌水定额和灌水次数,玉米膜孔灌比常规畦灌的耗水量减少 6.2%,水分生产效率提高 23.3%,增产 15.9%。

参 考 文 献:

- [1] 费良军,吴军虎,王文焰,等.充分供水条件下单点膜孔入渗湿润特性研究[J].水土保持学报,2001,15(5):137-140.
- [2] 吴军虎,费良军,王文焰.膜孔灌溉单孔入渗特性研究[J].水科学进展,2001,(9):307-311.
- [3] 缴锡云.膜孔灌溉理论及实用技术初步研究[D].西安:西安理工大学水利水电学院,1999.
- [4] 费良军,程东娟,雷雁斌,等.膜孔灌单点源入渗特性与数学模型研究[J].西北农林科技大学学报,2007,35(5):212-216.
- [5] 费良军,李文文,吴军虎.膜孔灌单向交汇入渗湿润特性影响因素研究[J].水利学报,2003,(5):62-68.
- [6] 董玉云,费良军,穆红文.膜孔肥液单向交汇入渗特性及数学模型研究[J].干旱地区农业研究,2012,30(3):81-84.
- [7] 董玉云,费良军,任建民.肥液浓度对膜孔单向交汇入渗水分运移特性的影响[J].干旱地区农业研究,2009,27(6):83-88.
- [8] 董玉云,费良军.膜孔肥液多向交汇入渗湿润体特性试验研究[J].水利水电技术,2012,43(11):87-91.

参考文献:

- [1] 石玉林. 西北地区土壤荒漠化与水土资源利用研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 335.
- [2] 蔺娟, 地里拜尔苏力坦, 艾尼瓦尔·买买提. 新疆盐渍化区土壤养分的空间结构和分布特征[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(11): 113-117.
- [3] 苏实, 练薇薇, 杨文杰, 等. 盐胁迫对番茄种子萌发和幼苗生长的效应[J]. 华北农学报, 2006, 21(5): 24-27.
- [4] 费伟, 陈火英, 曹忠, 等. 盐胁迫对番茄幼苗生理特性的影响[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2005, 23(1): 5-10.
- [5] 齐士发, 石书兵, 俞钧山. 新疆加工番茄产业现状及障碍因子对策[J]. 新疆农业科技, 2007, (1): 41-41.
- [6] 陈建林, 吴雪霞, 朱为民. NaCl 胁迫下不同番茄品种幼苗耐盐性研究[J]. 上海农业学报, 2008, 24(3): 80-83.
- [7] 张纪涛, 徐猛, 韩坤, 等. 盐胁迫对番茄幼苗的营养及生理效应[J]. 西北农学报, 2011, 20(2): 128-133.
- [8] 史庆华, 朱祝军, Khalid Al-aghabary, 等. 等渗盐胁迫对番茄抗氧化酶和 ATP 酶及焦磷酸酶活性的影响[J]. 植物生理与分子生物学报, 2004, 30(3): 311-316.
- [9] 孟长军, 邹志荣, 钱卫鹏, 等. 不同樱桃番茄品种种子萌发期的耐盐性研究[J]. 西北农学报, 2007, 16(3): 169-174.
- [10] 杨凤军, 李天来, 臧忠婧, 等. 不同基因型番茄种子萌发期的耐盐性[J]. 应用生态学报, 2009, 20(7): 1691-1697.
- [11] 杨凤军, 李天来, 臧忠婧, 等. 外源钙施用时期对缓解盐胁迫番茄幼苗伤害的作用[J]. 中国农业科学, 2010, 43(6): 1181-1188.
- [12] 苏桐, 魏小红, 丁学智, 等. 外源 NO 与蔗糖对盐胁迫下番茄 (*Lycopersicon esculentum* Mill) 幼苗氧化损伤的保护效应[J]. 生态学报, 2008, 28(4): 1558-1564.
- [13] 董志刚, 程智慧. 番茄品种资源芽苗期和幼苗期的耐盐性及耐盐指标评价[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1348-1355.
- [14] Claussen W. Proline as a measure of stress in tomato plants[J]. Plant Science, 2005, 168(1): 241-248.
- [15] 刘翔, 许明, 李志文. 番茄苗期耐盐性鉴定指标初探[J]. 北方园艺, 2007, (3): 4-7.
- [16] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 280-282.
- [17] 张宪政. 植物叶绿素含量测定——丙酮乙醇混合液法[J]. 辽宁农业科学, 1986, (3): 26-28.
- [18] 周广生, 梅方竹, 周竹青, 等. 小麦不同品种耐湿性生理指标综合评价及其预测[J]. 中国农业科学, 2003, 36(11): 1378-1382.
- [19] 余家林. 农业多元试验统计[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1993: 188.
- [20] Foolad M R, Lin G Y. Genetic potential for salt tolerance during germination in *Lycopersicon* species[J]. Hort Science, 1997, 32(2): 296-300.
- [21] Dasgan H Y, Aktas H, Abak K, et al. Determination of screening techniques to salinity tolerance in tomatoes and investigation of genotype responses[J]. Plant Science, 2002, 163(4): 695-703.
- [22] 杨晓英, 章文华, 王庆亚, 等. 江苏野生大豆的耐盐性和离子在体内的分布及选择性运输[J]. 应用生态学报, 2003, 14(12): 2237-2240.
- [23] 李焯, 姜景彬, 刘洪兰, 等. 番茄苗期耐盐性相关指标的筛选研究[J]. 北方园艺, 2009, (10): 84-86.
- [24] 陈少裕. 膜脂过氧化对植物细胞的伤害[J]. 植物生理学通讯, 1991, 27(2): 84-90.
- [25] 张海波, 崔继哲, 曹甜甜, 等. 大豆出苗期和苗期对盐胁迫的响应及耐盐指标评价[J]. 生态学报, 2011, 31(10): 2805-2812.
- [26] 张耿, 高洪文, 王赞, 等. 偃麦草属植物苗期耐盐性指标筛选及综合评价[J]. 草业学报, 2007, 16(4): 55-61.
- [27] 钮福祥, 华希新, 郭小丁, 等. 甘薯品种抗旱性生理指标及其综合评价初探[J]. 作物学报, 1996, 22(4): 392-398.
- [9] 刘一龙, 张忠学, 郭亚芬, 等. 膜下滴灌条件下不同灌溉制度的玉米产量与水分利用效应[J]. 东北农业大学学报, 2010, 41(10): 53-56.
- [10] 刘战东, 肖俊夫, 刘祖贵, 等. 膜下滴灌不同灌水处理对玉米形态、耗水量及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(3): 60-64.
- [11] 魏永华, 陈丽君. 膜下滴灌条件下不同灌溉制度对玉米生长状况的影响[J]. 东北农业大学学报, 2011, 42(1): 55-60.
- [12] 谢夏玲, 赵元忠. 玉米膜下滴灌土壤温度的变化规律[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(1): 90-92.
- [13] 费良军, 韩雪冬, 贾丽华, 等. 膜孔灌对玉米不同生育期农田土壤硝态氮运移的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2008, 39(5): 598-602.
- [14] 曹俊, 费良军, 脱云飞. 灌水定额对玉米膜孔灌土壤水氮运移特性影响试验研究[J]. 地下水, 2009, 31(4): 99-102.
- [15] 费良军, 脱云飞, 董艳慧. 灌水定额对玉米膜孔灌氮素转化影响试验[J]. 武汉大学学报, 2009, 42(5): 592-596.
- [16] 曹俊, 费良军, 脱云飞. 玉米膜孔灌农田土壤水氮分布特性[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(1): 16-20.

(上接第 11 页)