

乳熟后灌溉对夏玉米水分利用效率及干物质转运的影响*

党红凯 李伟 曹彩云 郑春莲 马俊永 李科江

(河北省农林科学院旱作农业研究所,衡水 053000)

摘要:于2011—2012年玉米生长季节,采用3个高产玉米品种,在乳熟后期分期(设9月20日、9月25日、9月30日3水平,不灌水为对照,分别用I9.20、I9.25、I9.30和CK表示)进行灌溉单因素试验。结果表明:各灌水处理与CK相比,成熟期1m土体土壤含水率提高2.92%~14.14%。不同灌水处理农田蒸散量变幅为380.67~434.91mm,处理间由小到大为I9.25、I9.20、I9.30、CK。不同处理影响干物质积累转移,CK和I9.30处理提高了吐丝前营养器官同化物向籽粒的转化效率,I9.20与I9.25处理则提高了吐丝后营养器官同化物的转化效率,而最终产量以I9.20与I9.25处理较高。不同处理籽粒水分生产率为21.94~26.53kg/m³,以CK最高或较高。这表明,乳熟后适期灌溉,虽然降低了水分利用率,但提高了籽粒产量。结合本研究地区小麦—玉米一体化生产,乳熟后灌水建议在9月20~25日期间进行。

关键词:夏玉米 乳熟后期 灌溉 水分利用效率 干物质转运

中图分类号:S513;S152.7 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-1298(2014)05-0131-08

引言

通过节水措施实现高效用水是发掘农田节水潜力的关键^[1]。普通高产夏玉米,生育期需水350~520mm^[2],河北平原玉米生长季节多年平均降水量400mm^[3]。由于受季风性气候影响,该区的降水主要集中在7、8月份^[4],只靠自然降水进行玉米生产,籽粒产量和水分生产潜力均很低^[5]。玉米生育后期需水较少^[6],轻度水分胁迫不会造成明显减产,而且还能提高水分利用效率^[7]。前人研究表明,秸秆覆盖能提高农田土壤含水率,减轻干旱对玉米灌浆的影响,起到节水增产的作用^[8];灌浆阶段适度水分胁迫有利于干物质快速积累,缩短灌浆期^[9],但严重胁迫使夏玉米光合生理特性受到强烈抑制^[7];灌浆期干旱胁迫主要通过减小粒重而降低产量^[10]。联系到小麦玉米一体化、机械化生产^[11],优化乳熟后期土壤水分状况具有重要的生产意义。但关于本地区夏玉米乳熟后灌溉对土壤水分转化及夏玉米干物质转运的影响研究还不够系统。为此本文在大田条件下,连续2年于夏玉米乳熟后进行分期灌溉,研究分期灌溉对农田水分平衡、玉米干物质积累转运及水分利用效率的影响,旨在为高效用水提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 基本情况

田间试验在河北省农林科学院旱作农业研究所旱作节水农业实验站(115.72°E,37.90°N,海拔高度21.0m)进行。该区土壤属于潮土,0~100cm平均土壤容重1.41g/cm³,田间持水量27.93%。0~20cm耕层基础肥力为:有机质质量比12.26g/kg,全氮质量比1.24g/kg,速效氮质量比84.98mg/kg,速效磷质量比18.8mg/kg,速效钾质量比80.9mg/kg。多年来试验田冬小麦、夏玉米秸秆全量还田。年均蒸发量1785mm,年均降水量不足510mm,该站具有我国北方半干旱农业区的典型特征。2011年、2012年夏玉米生育期间降水量见表1。

1.2 试验设计

田间试验于2011年、2012年连续实施两年,选用生育期一致的浚单20、郑单958、先玉335等3个品种,2011年6月16日播种,8月14日吐丝,10月17日收获;2012年6月17日播种,8月16日吐丝,10月13日收获。设置9月20日灌水(I9.20)、9月25日灌水(I9.25)、9月30日灌水(I9.30)和不灌水(CK)4个处理。乳熟后灌水量45mm,小区面积40m²(5m×8m),3次重复,顺序排列,处理区之间

收稿日期:2013-07-08 修回日期:2013-08-06

*“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2013BAD05B05、2011BAD29B01)和公益性行业(农业)科研专项资助项目(201203077)

作者简介:党红凯,助理研究员,主要从事节水节肥栽培生理研究,E-mail:wheatcrop@126.com

通讯作者:李科江,研究员,主要从事节水农业研究,E-mail:nkylkj@126.com

表 1 玉米生育期降水量
Tab.1 Precipitation during maize growth stage

年份	生长时期							全生 育期
	播种 ~ 吐丝	吐丝 ~ 9-15	9-16 ~ 09-20	9-21 ~ 9-25	9-26 ~ 9-30	9-31 ~ 10-5	10-6 ~ 收获	
2011	292.4	115.7	22.5	0	0	0.8	59.0	490.4
2012	287.4	97.7	0	27.0	8.0	0	0	420.1

设置 0.5 m 宽隔离带。3 个玉米品种并列布置,底施复合肥(含 N 质量分数 15%、P₂O₅ 质量分数 15%、K₂O 质量分数 15%)450 kg/hm²,播种后浇蒙头水(灌水量 75 mm),大口期追尿素(含 N 质量分数 46%)375 kg/hm²。折合总施肥量为 N 236.3 kg/hm²、P₂O₅ 67.5 kg/hm²、K₂O 67.5 kg/hm²。

1.3 土壤含水率的测定及农田耗水量和水分利用效率的计算

采用钻土干燥法测定土壤含水率,夏玉米播种后每隔 10 d,生育后期每隔 5 d,同一品种每小区钻取 0 ~ 100 cm 土层土样,每 10 cm 为一层进行取土。以土壤含水率进一步计算作物耗水量,计算公式为

$$E_{i(1-2)} = 10 \sum_{i=1}^n \gamma_i H_i (\theta_{i1} - \theta_{i2}) + P + I + G - R - F$$

(1)

式中 $E_{i(1-2)}$ ——阶段耗水量 i ——土层编号
 n ——总土层数
 γ_i ——第 i 层土壤干容重
 H_i ——第 i 层土壤厚度
 θ_{i1} 、 θ_{i2} ——第 i 层土壤时段初和时段末的含水率(以占干土重的百分数计算)
 P ——有效降水量
 I ——时段内的灌水量
 G ——时段内地下水对作物根系的补给量,mm
 R ——时段内测定区域的地表径流量,mm
 F ——时段内根区深层渗漏量,mm

当地下水埋深大于 2.5 m 时, G 可以不计,本试验的地下水埋深在 7 m 以下,因此无地下水补给。试验区地势平坦,无地表径流产生,故 R 为 0。 F 计算方法为灌水(或降水)前 100 cm 土层内有效土壤含水率加上灌水量再减去田间持水量^[12]。籽粒(干物质)水分生产率计算公式为

$$W_{ue} = Y/E_{tc}$$

(2)

式中 Y ——籽粒产量(该阶段生物产量)
 E_{tc} ——玉米生育期间蒸散量(该阶段农田蒸散量)

1.4 干物质测定

于吐丝期和收获期连取代表性植株 5 株,作为考察样本。将样本地下部分剪去,按叶片、茎和叶

鞘、穗轴、苞叶、籽粒等器官拆分(除籽粒外,包括茎叶在内的其他器官为营养器官),105℃干燥箱中杀青 30 min 后,于 80℃干燥至质量恒定,冷却后称干质量。与干物质转移效率相关的计算公式为^[13]

$$T_v = W_1 - W_2$$

(3)

$$R_1 = T_v/W_1 \times 100\%$$

(4)

$$T_g = W_3 - R_1$$

(5)

$$R_2 = T_v/G \times 100\%$$

(6)

式中 T_v ——吐丝前营养器官同化物转运量,kg/hm²
 T_g ——吐丝后同化物输入籽粒量,kg/hm²
 W_1 ——吐丝期单位种植面积营养器官干质量,kg/hm²
 W_2 ——收获期单位种植面积营养器官干质量,kg/hm²
 W_3 ——收获期籽粒干产量,kg/hm²
 R_1 ——吐丝前营养器官同化物转运率,%
 R_2 ——吐丝前同化物对籽粒产量贡献率,%

1.5 数据处理方法

采用 Excel 和 SPSS 软件进行数据处理和统计分析。

2 结果与分析

2.1 乳熟后分期灌水对夏玉米耗水的影响

2.1.1 收获期 0 ~ 100 cm 土层水分差异

不同处理与 CK 相比,1 m 土体土壤含水率提高 2.92% ~ 14.14% (由表 2 统计)。2 年收获期各土层土壤含水率从高到低基本依次为:I9.30、I9.25、I9.20、CK,仅有 2011 年 20 ~ 40 cm 土层土壤含水率表现不同,从高到低依次为:CK、I9.20、I9.30、I9.25。2011 年 10 月 9 日降水 59.0 mm,有效补充了各处理的土壤水分,表现为收获期 20 cm 以下土层土壤含水率不同程度高于 2012 年。

结合田间持水量(0 ~ 30 cm 田间持水量平均为 27.23%),2011 年 0 ~ 30 cm 土壤相对湿度在 80% 以上,土壤墒情较好,特别是 I9.30 处理,达到了 89.79%;2012 年 0 ~ 30 cm 的 CK、I9.20、I9.25、I9.30 土壤相对湿度分别为 69.30%、76.35%、79.45% 和 87.59%,CK 墒情较差,I9.20、I9.25 处理墒情适宜,I9.30 土壤较湿。

表 2 收获期各处理 0 ~ 100 cm 土层土壤含水率														
Tab.2 Water content in 0 ~ 100 cm soil layer under different treatments at mature stage														%
措施	2011 土层深度/cm							2012 土层深度/cm						
	0 ~ 10	10 ~ 20	20 ~ 30	30 ~ 40	40 ~ 60	60 ~ 80	80 ~ 100	0 ~ 10	10 ~ 20	20 ~ 30	30 ~ 40	40 ~ 60	60 ~ 80	80 ~ 100
CK	19.36 ^b	20.81 ^a	26.46 ^{ab}	30.68 ^a	26.99 ^c	27.88 ^b	26.44 ^b	18.71 ^b	18.98 ^b	19.92 ^b	23.60 ^b	25.69 ^b	28.54 ^{ab}	24.93 ^b
I9.20	23.25 ^a	19.58 ^{ab}	24.33 ^b	28.23 ^b	27.78 ^{bc}	29.14 ^b	29.14 ^a	22.77 ^a	18.24 ^b	21.37 ^b	27.42 ^{ab}	28.49 ^a	28.21 ^b	25.56 ^{ab}
I9.25	22.97 ^a	18.88 ^b	25.02 ^b	27.16 ^b	29.50 ^{ab}	31.15 ^a	29.20 ^a	19.94 ^{ab}	19.79 ^b	25.17 ^a	25.14 ^b	29.51 ^a	29.78 ^a	26.39 ^a
I9.30	23.77 ^a	21.41 ^a	28.17 ^a	28.93 ^b	30.30 ^a	31.01 ^a	30.59 ^a	22.53 ^a	22.35 ^a	26.67 ^a	29.17 ^a	29.34 ^a	30.42 ^a	26.58 ^a
平均	22.34 ^a	20.17 ^a	26.00 ^a	28.75 ^a	28.64 ^a	29.80 ^a	28.84 ^a	21.75 ^a	19.84 ^a	23.28 ^b	26.33 ^b	28.26 ^a	29.24 ^a	25.87 ^b
极差	2.01	1.15	1.70	1.48	1.52	1.57	1.74	1.57	1.79	3.16	2.46	1.77	1.04	0.76
变异系数/%	9.01	5.70	6.54	5.14	5.32	5.27	6.02	7.22	9.02	13.58	9.33	6.26	3.55	2.96

注:不同字母表示同土层不同处理之间在 0.05 水平上差异显著。

2.1.2 不同处理对农田水分转化过程的影响

不同处理同年同期比较,处理实施后 0 ~ 5 d,该期处理土壤储水量显著高于其他期处理与 CK。如表 3 所示,全生育期土壤储水量 94.43 ~ 127.15 mm,2 年均以 I9.30 处理最高,以 CK 处理最低。与土壤储水量相似,处理实施后 0 ~ 5 d,该期处理渗漏量显著高于其他期处理与 CK。2011 年各期处理土壤水渗漏量分别高于 2012 年各处理。全生育期不同处

理渗漏量为 20.00 ~ 90.74 mm,2 年从小到大表现为 I9.20、I9.30、I9.25、CK。与土壤储水量、渗漏量不同,农田蒸散量一般是灌水后的高于其他期处理。全生育期不同处理农田蒸散量变幅为 380.67 ~ 434.91 mm,2 年从小到大均依次表现为 I9.25、I9.20、I9.30、CK。乳熟后蒸散量占总蒸散量的 12.09% ~ 24.24%,I9.25、I9.20 较高,I9.30、CK 较低。

表 3 不同处理夏玉米农田阶段水分变化									
Tab.3 Dynamic change of soil moisture under different irrigation treatments									
年份	参数	措施	不同生育时期农田水分变化/mm				阶段农田水分变化/mm		9-20~收获 占总蒸散量 百分比/%
			播种~9-19	9-20~9-24	9-25~9-29	9-30~收获	9-20~收获	全生育期	
2011	土壤 储水量	CK	126.68±2.70 ^a	-10.96±0.26 ^b	-18.07±0.04 ^b	4.12±2.18 ^b	-24.91±2.48 ^c	101.77±5.18 ^b	20.90±0.29 ^b
		I9.20	126.97±4.01 ^a	5.09±0.11 ^a	-23.40±0.23 ^c	-6.69±1.68 ^c	-24.64±2.02 ^c	101.97±6.03 ^b	
		I9.25	117.27±2.67 ^b	-9.05±0.09 ^b	13.80±0.14 ^a	-17.00±1.84 ^d	-12.25±2.07 ^b	105.02±4.74 ^{ab}	
		I9.30	115.33±3.94 ^b	-9.09±0.01 ^b	-17.73±0.22 ^b	23.01±0.58 ^a	-3.81±0.81 ^a	111.49±4.75 ^a	
	渗漏量	CK	58.29±0.97 ^a	0 ^b	0 ^b	0 ^c	0 ^c	58.29±0.97 ^c	
		I9.20	59.36±1.14 ^a	27.38±0.32 ^a	0 ^b	0 ^c	27.38±0.32 ^a	90.74±2.34 ^a	
		I9.25	58.75±1.03 ^a	0 ^b	9.72±0.01 ^a	2.00±0.00 ^b	11.72±0.01 ^b	70.47±1.04 ^b	
		I9.30	62.62±0.97 ^a	0 ^b	0 ^b	25.66±0.06 ^a	25.66±0.06 ^a	88.28±1.03 ^a	
	农田蒸散量	CK	320.63±3.67 ^a	10.96±0.26 ^a	18.07±0.04 ^{ab}	55.68±2.18 ^c	84.71±2.48 ^b	405.34±6.15 ^c	
		I9.20	320.27±5.15 ^a	12.53±0.43 ^a	23.40±0.23 ^a	66.49±1.68 ^b	102.41±2.34 ^a	422.69±8.37 ^{ab}	
		I9.25	329.58±3.70 ^a	9.05±0.09 ^a	21.48±0.15 ^a	74.80±1.84 ^a	105.33±2.08 ^a	434.91±5.78 ^a	
		I9.30	327.65±4.91 ^a	9.09±0.01 ^b	17.73±0.22 ^b	56.16±0.61 ^c	82.98±0.84 ^b	410.63±5.78 ^{bc}	
	土壤 储水量	CK	105.65±4.65 ^a	8.31±0.42 ^c	-5.67±0.11 ^b	-13.86±0.01 ^b	-11.22±0.54 ^d	94.43±5.22 ^b	
		I9.20	99.45±5.21 ^a	40.38±0.68 ^a	-16.16±0.09 ^c	-20.99±0.06 ^c	3.23±0.83 ^b	102.67±6.04 ^b	
		I9.25	101.71±3.40 ^a	6.23±0.07 ^c	24.00±0.20 ^a	-31.95±0.07 ^d	-1.72±0.34 ^c	99.98±3.74 ^b	
		I9.30	106.90±3.67 ^a	16.71±0.06 ^b	-13.12±0.13 ^c	16.66±0.07 ^a	20.25±0.26 ^a	127.15±3.93 ^a	
	渗漏量	CK	20.00±0.13 ^a	0 ^b	0 ^b	0 ^b	0 ^c	20.00±0.13 ^c	
		I9.20	19.86±0.22 ^a	20.28±0.21 ^a	0 ^b	0 ^b	20.28±0.21 ^a	40.14±0.43 ^a	
		I9.25	19.20±0.51 ^a	0 ^b	9.43±0.01 ^a	0 ^b	9.43±0.01 ^b	28.63±0.52 ^b	
		I9.30	18.82±0.42 ^a	0 ^b	0 ^b	9.28±0.02 ^a	9.28±0.02 ^b	28.00±0.44 ^b	
	农田蒸散量	CK	334.45±4.81 ^a	10.69±0.42 ^a	21.67±0.11 ^b	13.86±0.01 ^c	46.04±0.54 ^d	380.67±5.35 ^c	12.09±0.03 ^d
		I9.20	340.79±5.43 ^a	11.34±0.89 ^a	24.16±0.09 ^{ab}	20.99±0.06 ^b	56.49±1.04 ^b	397.29±6.47 ^b	14.22±0.03 ^b
		I9.25	339.39±3.91 ^a	10.77±0.07 ^a	29.37±0.21 ^a	31.95±0.07 ^a	72.09±0.35 ^a	411.49±4.26 ^a	17.52±0.10 ^a
		I9.30	334.20±4.09 ^a	10.29±0.01 ^a	21.12±0.13 ^b	19.34±0.09 ^b	50.75±0.22 ^c	384.95±4.37 ^{bc}	13.18±0.09 ^c

注:不同字母表示不同处理之间在 0.05 水平上差异显著,下同。

处理实施后,2 年同期处理不同时期比较,土壤储水量变化不具规律性。2012 年从 9 月 20 日到收获土壤储水减少量小于 2011 年同阶段。但 2 年该

阶段除 CK 外,其他处理土壤水渗漏量 2011 年均高于 2012 年。进一步对灌水实施后的 5 d、10 d、收获期作比较,2011 年该阶段随生育进程农田蒸散量有

增加的趋势,2012 年除 I9. 25 处理随生育进程农田蒸散量有增加的趋势,其他处理均以 9 月 25 到 30 日阶段较高。2 年各处理 9 月 20 日到收获阶段农田蒸散量 2011 年高于 2012 年,9 月 20 日到收获阶段农田蒸散量占总蒸散量比例也以 2011 年较

高。结合 2 年农田灌水量与降水量(见表 4),灌水处理前降水量变化影响处理实施后农田土壤储水量,土壤储水量与不同处理农田水分变化密切相关,土壤储水量越高,灌水后渗漏量越多,农田蒸散量越大。

表 4 不同处理对夏玉米农田水分的去向及其比例的影响

Tab.4 Effects of different treatments on the ratios of different resource of water consumption								
年份	措施	灌水量 + 降水量/mm	农田蒸 散量/mm	农田蒸散量占降水量 + 灌水量百分比/%	土壤储 水量/mm	土壤储水量占降水量 + 灌水量百分比/%	渗漏量 /mm	渗漏量占降水量 + 灌水量百分比/%
2011	CK	565. 40	405. 34 ± 6. 15 ^c	71. 69 ± 0. 43 ^a	101. 77 ± 5. 18 ^b	18. 00 ± 0. 30 ^a	58. 29 ± 0. 97 ^c	10. 31 ± 0. 12 ^c
	I9. 20	610. 40	422. 69 ± 8. 37 ^{ab}	69. 25 ± 0. 26 ^b	101. 97 ± 6. 03 ^b	16. 71 ± 0. 46 ^b	90. 74 ± 2. 34 ^a	14. 87 ± 0. 40 ^a
	I9. 25	610. 40	434. 91 ± 5. 78 ^a	71. 25 ± 0. 80 ^{ab}	105. 02 ± 4. 74 ^{ab}	17. 21 ± 0. 78 ^{ab}	70. 47 ± 1. 04 ^b	11. 54 ± 0. 37 ^{bc}
	I9. 30	610. 40	410. 63 ± 5. 78 ^{bc}	67. 27 ± 0. 41 ^b	111. 49 ± 4. 75 ^a	18. 26 ± 0. 49 ^a	88. 28 ± 1. 03 ^a	14. 46 ± 0. 12 ^{ab}
2012	CK	495. 10	380. 67 ± 5. 35 ^c	78. 89 ± 0. 38 ^a	94. 43 ± 5. 22 ^b	19. 07 ± 0. 32 ^b	20. 00 ± 0. 13 ^c	4. 04 ± 0. 30 ^b
	I9. 20	540. 10	397. 29 ± 6. 47 ^b	73. 55 ± 0. 21 ^c	102. 67 ± 6. 04 ^b	19. 01 ± 0. 23 ^b	40. 14 ± 0. 43 ^a	7. 43 ± 0. 60 ^a
	I9. 25	540. 10	411. 49 ± 4. 26 ^a	76. 17 ± 0. 32 ^b	99. 98 ± 3. 74 ^b	18. 51 ± 0. 33 ^b	28. 63 ± 0. 52 ^b	5. 30 ± 0. 02 ^b
	I9. 30	540. 10	384. 95 ± 4. 37 ^{bc}	71. 27 ± 0. 87 ^d	127. 15 ± 3. 93 ^a	23. 54 ± 0. 47 ^a	28. 00 ± 0. 44 ^b	5. 18 ± 0. 50 ^b

2. 1. 3 不同处理对农田水分平衡的影响

同年份处理间比较,农田蒸散量以 I9. 25 最高,I9. 20 次之,CK 最低;年际间比较,2011 年各处理农田蒸散量分别高于 2012 年相应处理。同年份处理间比较,土壤储水量与农田蒸散量高低表现不尽相同,以 I9. 30 最高,CK 最低;年际间比较,CK 与 I9. 25 以 2011 年较高,I9. 25 与 I9. 30 以 2012 年较高。同年份处理间比较,渗漏量以 I9. 20 最高,CK 最低;渗漏量年际间差异较大,2011 年各处理均高于 2012 年。

农田蒸散量占总供水量(灌水量 + 降水量)的 67. 27% ~ 78. 89%。2 年处理间农田蒸散量占总供水量的比例由大到小依次为:CK、I9. 25、I9. 20、I9. 30(见表 4)。土壤储水量占总供水量的比例有

所不同,但均以 I9. 30 最高,其次为 CK,I9. 25 与 I9. 20 较低。渗漏量占总供水的 4. 04% ~ 14. 87%。2 年处理间渗漏量占总供水量的比例由大到小依次为 I9. 20、I9. 30、I9. 25、CK。

2. 2 不同处理对夏玉米干物质积累分配的影响

营养器官吐丝前同化物运转率变幅 7. 06% ~ 27. 48%(见表 5)。吐丝前同化物运转量对籽粒的贡献率变幅 10. 15% ~ 41. 89%。吐丝后干物质同化量对籽粒的贡献率变幅 58. 11% ~ 88. 89%。同品种不同处理,营养器官吐丝前同化物向籽粒的转运量、转运率及其对籽粒的贡献率,均以 CK 与 I9. 30 处理较高,以 I9. 25 或 I9. 20 处理较低。吐丝后营养器官同化物向籽粒的输入量和对籽粒的贡献率,以 I9. 25 处理最高,其次为 I9. 20 处理,以 I9. 30

表 5 不同处理吐丝后营养器官干物质再分配量和吐丝后积累量(2011 年)

Tab.5 Different treatments on dry matter translocation amount from vegetative organs to grain and the accumulation amount after spinning (2011)						
品种	措施	吐丝前营养器官同化 物运转量/(kg·hm ⁻²)	吐丝前营养器官同 化物运转率/%	吐丝前同化物运转量 对籽粒的贡献率/%	吐丝后同化物输入 籽粒量/(kg·hm ⁻²)	吐丝后干物质同化量 对籽粒的贡献率/%
浚单 20	CK	4 125. 57 ± 110. 38 ^a	27. 48 ± 0. 46 ^a	41. 89 ± 0. 39 ^a	5 724. 00 ± 68. 41 ^b	58. 11 ± 1. 03 ^b
	I9. 20	3 288. 38 ± 107. 66 ^b	21. 73 ± 0. 33 ^b	32. 07 ± 0. 33 ^b	6 965. 81 ± 107. 43 ^a	67. 93 ± 0. 96 ^a
	I9. 25	3 476. 43 ± 96. 57 ^b	23. 06 ± 0. 23 ^b	33. 98 ± 0. 28 ^b	6 753. 49 ± 97. 24 ^a	66. 02 ± 0. 87 ^a
	I9. 30	3 854. 08 ± 109. 46 ^{ab}	25. 74 ± 0. 47 ^{ab}	39. 18 ± 0. 41 ^a	5 981. 71 ± 104. 48 ^b	60. 82 ± 0. 97 ^b
郑单 958	CK	1 702. 27 ± 34. 63 ^a	12. 13 ± 0. 39 ^a	17. 39 ± 0. 19 ^a	8 087. 31 ± 134. 55 ^b	82. 61 ± 0. 72 ^a
	I9. 20	1 113. 93 ± 27. 68 ^b	7. 76 ± 0. 11 ^b	11. 11 ± 0. 13 ^b	8 910. 13 ± 145. 24 ^a	88. 89 ± 0. 96 ^a
	I9. 25	1 007. 29 ± 19. 38 ^b	7. 06 ± 0. 07 ^b	10. 15 ± 0. 14 ^b	8 918. 49 ± 120. 09 ^a	89. 85 ± 0. 97 ^a
	I9. 30	1 716. 73 ± 40. 65 ^a	12. 06 ± 0. 13 ^a	17. 83 ± 0. 23 ^a	7 913. 05 ± 132. 86 ^b	82. 17 ± 1. 00 ^a
先玉 335	CK	3 338. 75 ± 75. 43 ^a	23. 41 ± 0. 79 ^a	38. 13 ± 0. 39 ^a	5 417. 48 ± 92. 34 ^c	61. 87 ± 0. 48 ^b
	I9. 20	2 834. 46 ± 34. 62 ^b	20. 18 ± 0. 42 ^b	30. 41 ± 0. 30 ^b	6 485. 64 ± 87. 43 ^b	69. 59 ± 0. 59 ^a
	I9. 25	2 739. 22 ± 29. 47 ^b	19. 28 ± 0. 30 ^b	28. 70 ± 0. 27 ^b	6 806. 46 ± 95. 43 ^a	71. 29 ± 0. 82 ^a
	I9. 30	3 252. 02 ± 62. 43 ^a	22. 86 ± 0. 29 ^a	36. 14 ± 0. 46 ^a	5 747. 45 ± 107. 58 ^c	63. 86 ± 0. 73 ^b

与 CK 较低。

2.3 不同处理对农田日均蒸散量和水分利用率的
影响

2.3.1 农田日均蒸散量

处理实施后,9 月 20 日到 24 日农田日均蒸散量以 I9.20 处理最高或较高;9 月 25 日到 29 日农田日均蒸散量以 I9.25 处理最高,其次为 I9.20 处理;9 月 30 日到收获期农田日均蒸散量以 I9.25 处理最高,其次为 I9.20、I9.30,以 CK 最低(见表 6)。年际间比较,各处理平均农田日均蒸散量,9 月 20~29 日以 2012 年较高,9 月 30 日到收获期以 2011 年较高。

表 6 不同处理农田日均蒸散量

Tab.6 Effects of different treatments on water consuming intensity under different treatments

年份	处理	不同生育时期农田日均蒸散量/(mm·d ⁻¹)			阶段农田日均蒸散量/(mm·d ⁻¹)	
		9-20~9-24	9-25~9-29	9-30~收获	9-20~收获	全生育期
2011	CK	2.19±0.05 ^{ab}	3.61±0.01 ^b	3.09±0.12 ^c	3.02±0.09 ^b	3.26±0.05 ^c
	I9.20	2.50±0.09 ^a	4.68±0.04 ^a	3.69±0.09 ^b	3.66±0.08 ^a	3.41±0.07 ^{ab}
	I9.25	1.81±0.02 ^b	4.30±0.03 ^a	4.16±0.10 ^a	3.76±0.07 ^a	3.51±0.05 ^a
	I9.30	1.82±0.02 ^b	3.55±0.04 ^b	3.12±0.03 ^c	2.96±0.03 ^b	3.31±0.05 ^{bc}
	平均	2.08 ^a	4.04 ^a	3.52 ^a	3.35 ^a	3.37 ^a
	极差	0.33	0.55	0.51	0.42	0.11
	变异系数/%	15.92	13.59	14.54	12.49	3.29
2012	CK	2.14±0.08 ^a	4.33±0.02 ^{bc}	0.99±0.01 ^c	1.91±0.02 ^d	3.20±0.04 ^c
	I9.20	2.27±0.18 ^a	4.83±0.02 ^b	1.44±0.01 ^b	2.35±0.04 ^b	3.34±0.05 ^b
	I9.25	2.14±0.01 ^a	5.87±0.04 ^a	2.28±0.01 ^a	3.00±0.01 ^a	3.46±0.04 ^a
	I9.30	2.06±0.01 ^a	4.22±0.03 ^c	1.23±0.01 ^b	2.11±0.01 ^c	3.23±0.04 ^{bc}
	平均	2.15 ^a	4.81 ^a	1.49 ^b	2.34 ^b	3.31 ^a
	极差	0.09	0.75	0.56	0.47	0.12
	变异系数/%	4.04	15.65	37.78	20.23	3.57

2.3.2 干物质水分生产率和籽粒水分生产率

同年份同品种生物产量以 I9.20 与 I9.25 处理较高;同处理年际间比较,浚单 20 和郑单 958 以 2011 年高,而先玉 335 则以 2012 年较高(见表 7)。2 年籽粒产量为 8 756.20~10 666.00 kg/hm²,同年份同品种均以 I9.20 和 I9.25 处理产量最高或较高;同品种同处理年际间比较,以 2012 年产量较高。9 月 20 日到收获期阶段,同品种干物质水分生产率 2011 年以 I9.20 或 I9.25 较高,2012 年则以 CK 或 I9.30 较高;同品种同处理年际间比较,干物质水分生产率以 2012 年产量较高。全生育期干物质水分生产率 48.34~55.03 kg/m³,2 年全生育期干物质水分生产率不同处理间差异不具规律性;年际间比较,郑单 958 以 2011 年较高,浚单 20 和先玉 335 以 2012 年较高。2 年籽粒水分生产率 21.60~26.53 kg/m³,2011 年以 CK 和 I9.20 较高,2012 年以 CK 和 I9.30 较高;年际间比较,2012 年籽粒水分生产率高于 2011 年各处理。

从处理开始实施到收获(9 月 20 日到收获),农田日均蒸散量 2 年均以 I9.25 处理最高,其次为 I9.20 处理,以 CK 和 I9.30 处理较低。全生育期农田日均蒸散量处理间变化趋势与从灌水开始实施到收获(9 月 20 日到收获)变化趋势相似。同处理年际间比较,2011 年从灌水开始实施到收获阶段与全生育期农田日均蒸散量均高于 2012 年。不同处理农田耗水强度变幅为 3.20~3.51 mm/d,2 年从小到大依次为 I9.25、I9.20、I9.30、CK。年际间比较,各处理平均农田日均蒸散量,9 月 20 日到收获期和全生育期农田日均蒸散量以 2011 年较高。

3 讨论

3.1 乳熟后灌溉对农田蒸散量和水分利用率及干物质运转的影响

本研究 2 年各品种不同处理农田蒸散量 380.67~434.91 mm,籽粒产量 8 756.23~10 666 kg/hm²,籽粒水分生产率 21.60~26.53 kg/m³。其中以总供水量 610.4 mm(2011 年)、540.1 mm(2012 年)的 I9.25 处理农田蒸散量最高,籽粒产量最高或较高。王晖等^[14]在农田蒸散量(379.2~431.8 mm)与本研究相当条件下,采用秸秆覆盖等措施,籽粒产量(达到超高产)与籽粒水分生产率(31.5~33.8 kg/(hm²·mm))均比本研究高。另外,本研究在灌水量相同条件下,由于乳熟后灌水措施采取时期不同,渗漏量和农田蒸散量也不同。以上说明在田间采取适宜的节水技术,不增加灌水量实现产量与籽粒水分生产率的同步提高是可行的^[15-16]。

2 年从 9 月 20 日到收获阶段农田蒸散量来看,

19.20 与 19.25 处理蒸散量高于 CK 与 19.30 处理。阶段蒸散量高的 19.20 与 19.25 处理提高了吐丝后营养器官同化物的转化效率。而阶段蒸散量低的 CK 和 19.30 处理提高了吐丝前营养器官同化物向籽粒的转化效率,但最终产量以阶段蒸散量高的 19.2 与 19.25 处理较高^[13,17]。结合吐丝后干物质同化量对籽粒的贡献率,19.20 与 19.25 处理均促进了吐丝后同化干物质向籽粒的运转量(19.25 处理

最高),但 19.25 处理产量水分利用率低。可能是由于 19.25 处理在 9 月 20 日到收获阶段农田蒸散量较大所致。比较不同处理各品种籽粒产量,均以 19.25 处理最高或较高。同一措施不同品种比较,吐丝前营养器官同化物向籽粒的转化效率由高到低顺序为浚单 20、先玉 335 和郑单 958。这意味着农田蒸散量与品种特性和干物质积累转移密切相关^[16,18]。

表 7 不同处理对干物质水分生产率和籽粒水分生产率的影响

Tab.7 Effects of different treatments on water use efficiency of biomass and grain yield

品 种	措施	2011						2012					
		干物质水分生产率/(kg·m ⁻³)			生物产量 /(kg·hm ⁻²)	籽粒水分 生产率/ (kg·m ⁻³)	籽粒产量 /(kg·hm ⁻²)	干物质水分生产率/(kg·m ⁻³)			生物产量 /(kg·hm ⁻²)	籽粒水分 生产率/ (kg·m ⁻³)	籽粒产量 /(kg·hm ⁻²)
		9-20~	9-30~	全生				9-20~	9-30~	全生			
		9-29	收获	育期				9-29	收获	育期			
浚单 20	CK	54.56 ^c	14.39 ^b	51.16 ^{ab}	20 735.4 ^a	24.30 ^a	9 849.60 ^a	117.92 ^a	87.05 ^a	54.18 ^a	20 624.10 ^a	26.53 ^a	10 100.50 ^a
	19.20	61.60 ^b	24.88 ^a	52.28 ^a	22 098.3 ^a	24.26 ^a	10 254.20 ^a	112.88 ^a	57.54 ^b	53.44 ^{ab}	21 232.20 ^a	26.53 ^a	10 541.00 ^a
	19.25	62.91 ^b	20.02 ^{ab}	50.20 ^b	21 830.6 ^a	23.52 ^a	10 229.90 ^a	103.39 ^{ab}	34.70 ^c	52.27 ^b	21 509.10 ^a	25.92 ^{ab}	10 666.00 ^a
	19.30	66.26 ^a	16.46 ^b	51.03 ^{ab}	20 955.7 ^a	23.95 ^a	9 835.80 ^a	99.26 ^b	50.17 ^b	53.76 ^{ab}	20 693.80 ^a	25.78 ^b	9 923.30 ^a
郑单 958	CK	94.52 ^b	9.11 ^b	54.57 ^{ab}	22 118.1 ^a	24.15 ^a	9 789.60 ^a	92.62 ^{ab}	44.30 ^a	52.85 ^{ab}	20 119.40 ^a	24.77 ^a	9 431.00 ^a
	19.20	100.69 ^{ab}	13.80 ^a	55.03 ^a	23 262.7 ^a	23.71 ^a	10 024.10 ^a	97.74 ^a	49.13 ^a	52.74 ^{ab}	20 952.20 ^a	25.31 ^a	10 053.50 ^a
	19.25	115.65 ^a	12.62 ^{ab}	53.33 ^b	23 193.4 ^a	22.82 ^b	9 925.80 ^a	84.79 ^b	35.46 ^b	51.13 ^b	21 038.60 ^a	24.85 ^a	10 224.00 ^a
	19.30	107.9 ^a	14.51 ^a	53.95 ^b	22 153.8 ^a	23.45 ^{ab}	9 629.80 ^a	98.17 ^a	29.71 ^c	53.16 ^a	20 462.60 ^a	25.06 ^a	9 645.50 ^a
先玉 335	CK	45.74 ^d	5.41 ^b	48.55 ^a	19 678.1 ^b	21.60 ^a	8 756.23 ^b	103.17 ^a	40.45 ^a	53.20 ^a	20 250.70 ^a	25.63 ^{ab}	9 756.00 ^a
	19.20	49.91 ^c	9.62 ^a	48.57 ^a	20 531.3 ^{ab}	22.05 ^a	9 320.10 ^{ab}	104.69 ^a	39.21 ^a	52.92 ^{ab}	21 023.80 ^a	26.01 ^a	10 334.50 ^a
	19.25	72.38 ^a	11.56 ^a	48.34 ^a	21 425.3 ^a	21.94 ^a	9 545.70 ^a	93.32 ^b	28.03 ^b	51.33 ^b	21 120.50 ^a	24.58 ^b	10 113.50 ^a
	19.30	55.85 ^b	8.41 ^b	48.65 ^a	19 975.5 ^b	21.92 ^a	8 999.50 ^b	111.79 ^a	37.84 ^a	53.05 ^a	20 422.30 ^a	25.06 ^{ab}	9 648.00 ^a

3.2 乳熟后灌溉与产量水平及农田蒸散量与栽培环境的关系

本研究进入 9 月份有效降水量明显减少,特别是 19.20 与 19.25 两期处理正处于降水量较小的时期。和 CK 与 19.30 处理相比,19.20 与 19.25 处理明显提高了籽粒产量,说明该阶段灌水有益于产量的提高^[10,19]。本研究 2011 年降水量明显高于 2012 年,但 2 年生物产量与籽粒产量水平相当,说明玉米生育需水关键期合理的供水是保证产量形成的关键。进一步比较 19.20 与 19.25 两期处理,同一品种处理间籽粒产量相当。这表明本研究条件下,19.20 与 19.25 处理均能为玉米灌浆提供充足的水分。结合本研究夏玉米适期晚收的实际^[20],与 19.20 处理相比较,19.25 处理推迟了玉米灌水时期,更适于保障晚收条件下夏玉米乳熟后期对水分的需求。但就本研究条件下,关于满足籽粒灌浆土壤含水率阈值的确定,还需在精确控制土壤水分的条件下,进行更深入的研究。

从本研究结果看出,夏玉米农田蒸散量变化还与气象条件有关。2 年各品种在施肥相同、灌水相当条件下,2011 年从 9 月 20 日到收获阶段日照辐射总量和平均风速分别为 100 194.0 kJ/m² 和

0.66 m/s,2012 年该生育时期阶段日照辐射总量和平均风速分别为 94 892.3 kJ/m² 和 0.30 m/s。2011 年该阶段农田蒸散量(82.98~105.33 mm)明显高于 2012 年(46.04~72.09 mm)。可见较高的日照辐射总量和平均风速增大了该阶段农田蒸散量^[21],农田蒸散量与栽培环境等多因素有关。

3.3 乳熟后灌溉与小麦玉米一体化种植

由于受气候影响,河北平原区进入 9 月份降水量明显减少,爽朗的天气为夏玉米灌浆提供了充足的光照,该阶段较高的农田蒸散量使水分成为限制籽粒产量进一步提高的主要因子。与 CK 相比,乳熟后适期灌溉(19.20 与 19.25)提高籽粒产量 1.39% 以上。本研究条件下,随乳熟后期灌水时间推迟,收获期 1 m 土体各土层含水率有增高的趋势,均高于 CK;乳熟后期灌水处理不同程度提高了土壤储水量,收获期处理间比较土壤储水量以 CK 最低。联系到李开元等^[22]提到的土壤水库效应,即用玉米季节的土壤储水来弥补小麦需水的缺额。本研究玉米乳熟后适期灌水(19.20 与 19.25 两期处理),满足玉米灌浆对水分的需求,也为下茬小麦储备了的底墒水,起到了增墒蓄水、促产增收的作用,实现了一水两用(乳熟后期灌浆水兼作小麦底墒水)。

19.30 处理虽然也起到了增墒的作用,但对夏玉米产量影响较小。另外,本地区土质偏粘,2011 年由于收获阶段发生降水,造成耕层土壤粘软,不利于农用机械下地作业。结合本地区生态条件、生产条件与乳熟后灌溉产生的经济效益,夏玉米乳熟后灌水建议在 9 月 20~25 日期间进行。

4 结束语

在总供水量 495.10~610.40 mm 条件下,乳熟后不同处理农田蒸散量为 380.67~434.91 mm,处理间从大到小依次为 I9.25、I9.20、I9.30、CK;2 年全生育期不同处理渗漏量为 20.00~90.74 mm,处理间从大到小依次为 I9.20、I9.30、I9.25、CK;2 年全生育期土壤储水量 94.43~127.15 mm,以 I9.30

处理最高,以 CK 处理最低。乳熟后到收获阶段,虽然各处理蒸散量仅占总蒸散量的 12.09%~24.24%,但乳熟后水分管理对于干物质积累与转移有重要影响,I9.20 与 I9.25 处理提高了吐丝后营养器官同化物的转化效率,CK 和 I9.30 处理提高了吐丝前营养器官同化物向籽粒的转化效率,而最终产量以 I9.20 与 I9.25 处理较高。可见,优化乳熟后水分管理比起生育前期具有更重要的生产意义。本研究籽粒水分生产率 21.60~26.53 kg/m³,以 CK 最高或较高。乳熟后灌水提高了收获期玉米田间土壤含水率。根据乳熟后灌溉对夏玉米水分利用效率及干物质运转特点,结合当季的气象条件,综合考虑包括小麦玉米一体化、机械化种植的实际,河北平原区夏玉米乳熟后灌水建议在 9 月 20~25 日期间进行。

参 考 文 献

- 1 康绍忠,杜太生,孙景生,等. 基于生命需水信息的作物高效节水调控理论与技术[J]. 水利学报, 2007, 38(6): 661-667.
Kang Shaozhong, Du Taisheng, Sun Jingsheng, et al. Theory and technology of improving irrigation water use efficiency based on crop growing water demand information[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(6): 661-667. (in Chinese)
- 2 Mo X, Liu S, Lin Z, et al. Prediction of crop yield, water consumption and water use efficiency with a SVAT-crop growth model using remotely sensed date on the North China Plain[J]. Ecological Modelling, 2005, 183: 301-322.
- 3 王慧军. 河北省粮食综合生产能力研究[M]. 石家庄: 河北省科学技术出版社, 2010: 94-101.
- 4 陈博,欧阳竹,程维新,等. 近 50 a 华北平原冬小麦-夏玉米耗水规律研究[J]. 自然资源学报, 2012, 27(7): 1186-1199.
Chen Bo, Ouyang Zhu, Cheng Weixin, et al. Water consumption for winter wheat and summer maize in the North China Plain in recent 50 years[J]. Journal of Nature Resources, 2012, 27(7): 1186-1199. (in Chinese)
- 5 郑春莲,曹彩云,党红凯,等. 黑龙江地区自然降水条件下粮食生产潜力研究[J]. 河北农业科学, 2012, 16(2): 15-19.
Zheng Chunlian, Cao Caiyun, Dang Hongkai, et al. Study on potential grain productivity under natural precipitation condition in Heilonggang Region[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2012, 16(2): 15-19. (in Chinese)
- 6 李秀芳,李淑文,和亮,等. 水肥配合对夏玉米养分吸收及根系活性的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(1): 188-191, 233.
Li Xiufang, Li Shuwen, He Liang, et al. Effects of water and fertilizer cooperation on plant nutrient accumulation and root activity of summer maize[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(1): 188-191, 233.
- 7 孟兆江,卞新民,刘安能,等. 调亏灌溉对夏玉米光合生理特性的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(3): 182-186.
Meng Zhaojiang, Bian Xinmin, Liu Anneng, et al. Effect of regulated deficit irrigation on physiological and photosynthetic characteristics of summer maize and its optimized combination of agronomic techniques[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(3): 182-186. (in Chinese)
- 8 张俊鹏,孙景生,刘祖贵,等. 不同水分条件和覆盖处理对夏玉米籽粒灌浆特性和产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(3): 501-506.
Zhang Junpeng, Sun Jingsheng, Liu Zugui, et al. Effect of moisture and mulching on filling characteristics and yield of summer maize[J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2010, 18(3): 501-506. (in Chinese)
- 9 于志青,于卫卫,谭秀山,等. 水分胁迫对夏玉米干物质积累与分配的影响[J]. 华北农学报, 2009, 24(增刊): 149-154.
Yu Zhiqing, Yu Weiwei, Tan Xiushan, et al. Effect of water stress on dry-matter partition of summer maize[J]. Acta Agriculturae Boreali-sinica, 2009, 24(Supp.): 149-154. (in Chinese)
- 10 白莉萍,隋方功,孙朝晖,等. 土壤水分胁迫对玉米形态发育及产量的影响[J]. 生态学报, 2004, 24(7): 1156-1160.
Bai Liping, Sui Fangong, Sun Chaohui, et al. Effects of soil water stress on morphological development and yield of maize[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(7): 1156-1160. (in Chinese)
- 11 贾洪雷,马成林,孙裕晶,等. 耕整种植联合作业工艺及配套机具[J]. 农业机械学报, 2004, 35(6): 61-64.
Jia Honglei, Ma Chenglin, Sun Yujing, et al. Study on technology and attachments of combined rototilling-tillage-planting operation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agriculture Machinery, 2004, 35(6): 61-64. (in Chinese)
- 12 Ertek A, Sensoy S, Gedik I, et al. Irrigation scheduling based on pan evaporation values for cucumber (*Cucumis sativus* L.) grown under field conditions[J]. Agricultural Water Management, 2006, 81: 159-176.
- 13 张仁和,郭东伟,张兴华,等. 吐丝期干旱胁迫对玉米生理特性和物质生产的影响[J]. 作物学报, 2012, 38(10): 1-7.
Zhang Renhe, Guo Dongwei, Zhang Xinghua, et al. Effects of drought stress on physiological characteristics and dry matter

production in maize silking stage[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(10):1–7. (in Chinese)

14 王晖, 刘泉汝, 张圣勇, 等. 秸秆覆盖下超高产夏玉米农田产量和土壤水分的动态变化[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(5): 261–264.
Wang Hui, Liu Quanru, Zhang Shengyong, et al. Grain yield and soil water content of super-high-yield summer maize under straw mulching[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(5): 261–264. (in Chinese)

15 秦欣, 刘克, 周丽丽, 等. 华北地区冬小麦-夏玉米轮作节水体系周年水分利用特征[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(19): 4014–4024.
Qin Xin, Liu Ke, Zhou Lili, et al. Characteristics of annual water utilization in winter wheat-summer maize rotation system in North China Plain[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(19): 4014–4024. (in Chinese)

16 李全起, 房全孝, 陈雨海, 等. 底墒差异对夏玉米耗水特性及产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(2): 93–96.

17 陈素英, 张喜英, 邵立威, 等. 农业技术和气候变化对农作物产量和蒸散量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(5): 1039–1047.
Chen Suying, Zhang Xiyong, Shao Liwei, et al. Effects of climate change and agricultural technology improvement on evapotranspiration and crop yield[J]. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2011, 19(5): 1039–1047. (in Chinese)

18 张喜英. 提高农田水分利用效率的调控机制[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(1): 80–87.
Zhang Xiyong. Regulating mechanisms for improving farmland water use efficiency[J]. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2013, 21(1): 80–87. (in Chinese)

19 陈国平, 高聚林, 赵明, 等. 近年我国玉米超高产田的分布、产量构成及关键技术[J]. *作物学报*, 2012, 38(1): 80–85.
Chen Guoping, Gao Julin, Zhao Ming, et al. Distribution, yield structure, and key cultural techniques of maize superhigh yield plots in recent years[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(1): 80–85. (in Chinese)

20 付雪丽, 张惠, 贾继增, 等. 冬小麦-夏玉米“双晚”种植模式的产量形成及资源效率研究[J]. *作物学报*, 2009, 35(9): 1708–1714.
Fu Xueli, Zhang Hui, Jia Jizeng, et al. Yield performance and resources use efficiency of winter wheat and summer maize in double late-cropping system[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(9): 1708–1714. (in Chinese)

21 刘国水, 刘钰, 蔡甲冰, 等. 农田不同尺度蒸散量的尺度效应与气象因子的关系[J]. *水利学报*, 2011, 42(3): 284–289.
Liu Guoshui, Liu Yu, Cai Jiabing, et al. Study on the scale effect of farmland evapotranspiration and relationship with meteorological factors[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(3): 284–289. (in Chinese)

22 李开元, 李玉山. 黄土高原农田水量平衡研究[J]. *水土保持学报*, 1995, 9(2): 39–44.

Effects of Late Milk Irrigation on Water Use Efficiency and Dry Matter Distribution of Maize

Dang Hongkai Li Wei Cao Caiyun Zheng Chunlian Ma Junyong Li Kejiang
(Dry-land Farming Institute, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Hengshui 053000, China)

Abstract: Field experiments were conducted in the test station of Dry-land Farming Institute of Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences during 2011—2012. Three summer maize cultivars, Xundan 20, Zhengdan 958 and Xianyu 335, were used as experimental materials. The measurements were taken on irrigation by three stages (Sep. 20, Sep. 25, Sep. 30). The main results showed that compared with CK, different irrigation treatments during late milk period had increased the soil moisture by 2.92% ~ 14.14% in 0 ~ 100 cm layer at harvest. The evapotranspiration amounts of maize were ranged within 380.67 ~ 434.91 mm, and different treatments from small to large were I9.25, I9.20, I9.30 and CK. Different treatments also had effects on the dry matter distribution. The treatments of CK and I9.30 increased amount of assimilate storage in vegetative parts before silking to grains. I9.20 and I9.25 treatments, however, increased amount of assimilate storage in vegetative after silking to grains. Grain yield of I9.20 and I9.25 treatments were higher than those of other treatments. Water use efficiency for grain yield was range within 21.94 ~ 26.53 kg/m³, water use efficiency for grain yield of I9.25, I9.20 and I9.30 treatments were most obviously lower than that by CK treatment. This shows that at optimum irrigation time after milking, grain yield increases although water use efficiency for grain yield decreases. In comprehensive consideration of cultivating technique of high yield and efficiency for unified wheat and maize, the best time for irrigation was on 20 ~ 25 September.

Key words: Summer maize Late milk stage Irrigation Water use efficiency Dry matter transition