

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.017

小麦提前造墒灌水对玉米后期光合与产量的影响*

党红凯¹ 曹彩云¹ 郑春莲¹ 杜雄² 马俊永¹ 李科江¹
(1. 河北省农林科学院旱作农业研究所, 衡水 053000; 2. 河北农业大学农学院, 保定 071000)

摘要: 于2011—2012年玉米生长后期,进行小麦分期提前造墒灌溉(设置9月20日、9月25日、9月30日灌溉3个水平,不灌水为对照,分别用I9.20、I9.25、I9.30和CK表示)单因素试验,研究小麦提前造墒灌溉对夏玉米后期光合与产量的影响。结果表明:玉米后期穗位叶净光合速率(P_n)日变化,CK为“双峰”曲线,其他处理为“单峰”曲线。 P_n 日变化均值以I9.20与I9.25处理较高,2年同品种处理间棒3叶叶源量(L_{sc})也以I9.20与I9.25处理较高。与光合特性不同,茎秆糖分含量以CK较高,其他处理较低。不同灌水模式还对玉米灌浆有一定影响,I9.20、I9.25处理的最大灌浆速率及灌浆平均速率较大,灌浆活跃期较长,快增期百粒质量积累量较多,百粒质量与籽粒产量较高。另外,水分处理还对干物质再分配有一定影响,吐丝后同化物输入籽粒量表现为I9.25>I9.20>I9.30≥CK。可见,河北平原小麦适期提前造墒灌溉,改善了玉米群体光合性能,促进了吐丝后同化物向籽粒运转,提高了籽粒产量。综上所述,本研究条件下小麦造墒灌水建议提前于9月20—25日。

关键词: 冬小麦 夏玉米 造墒灌水 光合特性 产量

中图分类号: S152.7⁺5; Q945 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)10-0127-09

Effect of Pre-sowing Irrigation Advancement of Winter Wheat on Photosynthesis and Yield of Summer Maize at Later Growth Stage

Dang Hongkai¹ Cao Caiyun¹ Zheng Chunlian¹ Du Xiong² Ma Junyong¹ Li Kejiang¹
(1. Dryland Farming Institute, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Hengshui 053000, China
2. College of Agronomy, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, China)

Abstract: In order to clarify the characteristics of photosynthesis and yield responses of summer maize to pre-sowing irrigation advancement for winter wheat, a single factor experiment of irrigation times (Sep. 30th, Sep. 25th, Sep. 20th written as I9.30, I9.25, I9.20) was conducted during 2011—2012 and no irrigation advancement treatment was taken as control (CK). The results indicated that the diurnal variation of net photosynthesis (P_n) in ear leaf of maize was different among the four treatments, CK showed a single peak curve, while the other three treatments showed bimodality. As to the averages of the diurnal variation of P_n of each treatment, I9.20 and I9.25 were higher than others and the change of leaf source capacity (L_{sc}) of the total three near ear leaves appeared a similar pattern, i. e., I9.20 and I9.25 showed higher values. The changing of sugar content in maize stem, however, was different from that of the photosynthesis characteristics; the stem sugar content of CK was higher than those of other treatments. Grain filling was also influenced by different irrigation treatments. The I9.20 and I9.25 treatments showed larger maximum filling rates, longer active grain filling periods, and higher grain weights and grain yield. Different irrigation times had effect on the dry matter distribution as well. The amount of accumulated dry matter after anthesis of different treatments showed a trend as I9.25>I9.20>

收稿日期: 2014-12-26 修回日期: 2015-04-01
* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2013BAD05B05)、公益性行业(农业)科研专项资助项目(201203077、201303133-1-2)和河北省自然科学基金资助项目(C2014301026)
作者简介: 党红凯, 副研究员, 博士, 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

I9.30≥CK, which demonstrated that the pre-sowing irrigation advancement of winter wheat was able to improve the population photosynthetic performance, promote dry matter translocation from vegetative organs to grains after anthesis, and finally increase the grain yield of maize in Hebei Plain. The best period for irrigation advancement in this experiment was from Sep. 20th to Sep. 25th.

Key words: Winter wheat Summer maize Pre-sowing irrigation Photosynthesis characteristic Yield

引言

河北平原是我国重要的冬小麦夏玉米两熟生产区,周年粮食生产面临着先天降水不足又无地表水补给的现状,该区农田灌溉主要依赖于超采地下水^[1]。受气候影响,进入9月中下旬降水减少,不能满足玉米产量形成和下茬小麦出苗对水分的需求^[2]。结合本区域气候特点,将小麦造墒提前到九月中下旬,既能减轻玉米旱情,又能满足小麦出苗对水分的需求,起到“一水两用”的作用^[3]。开展小麦-玉米一体化节水技术研究,提高周年水分利用效率,对稳定本区域粮食生产、发展可持续农业具有重要意义^[4]。近年来,有关学者就水分对夏玉米光合特性及物质生产的影响进行了系列研究,获得了一些重要结论。继瑞鹏等^[5]明确了不同时期水分胁迫均会降低玉米物质生产能力。吴玮等^[6]认为,重度干旱胁迫对光合速率降低的影响以吐丝期最大,其次为乳熟期。白莉萍等^[7]发现乳熟期干旱胁迫通过降低籽粒质量而减产。王育红等^[8]指出,乳熟期充足水分供应可提高平均灌浆速率和灌浆持续时间。但是关于河北平原冬小麦底墒水提前对夏玉米后期光合特性与产量形成的影响缺乏定量研究。受生产习惯影响,河北平原农民趋向于在玉米收获后灌小麦底墒水,且对收获前灌水存在争议。究其原因,一是玉米收获前田间灌溉操作不便;二是提前灌小麦

底墒水对玉米产量影响认识不足。河北平原夏玉米生产受气候与栽培条件限制,平均产量在6 200 kg/hm²水平上难以突破^[9]。该区地下水超采严重,缓解粮食增产与地下水超采的矛盾,是当前亟待解决的问题^[10]。为探索小麦玉米周年节水增产途径,从高效用水角度需要明确小麦提前造墒对玉米后期光合特性与产量形成的影响。本文通过提前对小麦分期造墒,创建不同水分条件下的玉米高产群体,定量研究各群体光合特性与产量形成,为小麦-玉米一体化节水栽培技术提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 基本情况

田间试验于2011年和2012年玉米生长季在河北省农林科学院旱作节水农业试验站进行。该站位于河北平原中部,种植制度采用冬小麦-夏玉米一年两熟制,平均无霜期188 d,年日照时数为2 509.4 h,年均气温、降水量、蒸发量分别为12.8℃、510 mm、1 785 mm,该区域具有中国北方半干旱农业生产区的典型特征。试验田耕层(0~20 cm)土壤肥力为:有机质质量比12.26 g/kg,全氮质量比1.24 g/kg,速效氮质量比84.98 mg/kg,速效磷质量比18.80 mg/kg,速效钾质量比80.90 mg/kg。冬小麦、夏玉米收获后秸秆全量粉碎还田。2011年和2012年夏玉米生育期间气象因素见表1。

表 1 试验年度夏玉米生育期内的气象因素

Tab.1 Accumulate temperature, hours of sunshine, effective radiation and wind speed during summer maize growing period

项目	年份	生育进程							生育阶段	
		播种— 吐丝	吐丝— 09-15	09-16— 09-20	09-21— 09-25	09-26— 09-30	10-01— 10-05	10-06— 收获	09-21— 收获	全生育期
有效辐射/(kJ·m ⁻²)	2011	14 190.9	5 570.5	1 592.6	2 410.7	1 592.7	1 723.2	3 380.5	9 107.1	30 461.1
	2012	24 723.9	11 457.2	2 456.4	1 771.2	2 320.8	2 272.2	3 272.1	9 636.3	48 273.8
日照时数/h	2011	428.3	193.5	24.5	50.4	36.7	39.3	76.2	202.6	848.9
	2012	410.2	193.3	47.4	27.4	49.2	46.1	72.1	194.8	845.7
积温/℃	2011	1 721.6	725.5	77.4	89.8	87.2	74.3	194.9	446.2	2 970.7
	2012	1 414.0	725.8	101.9	108.4	96.6	90.2	141.6	436.8	2 678.5

1.2 试验设计

选用生育期一致的3个高产玉米品种郑单958、先玉335、浚单20,2011年播种期、吐丝期、收获期分别为6月16日、8月14日和10月17日;

2012年为6月17日、8月16日和10月13日。水分处理设9月20日(I9.20)、9月25日(I9.25)、9月30日(I9.30)灌水和不灌水(CK)4个处理。各处理灌水量45 mm,小区面积40 m²(5 m×8 m),

3 次重复,顺序排列。3 个玉米品种并列布置,底施复合肥(N、P₂O₅、K₂O 质量分数分别为 15%、15%、15%)450 kg/hm²,播种后浇蒙头水(75 mm),大口期追尿素(N 质量分数 46%)375 kg/hm²。共施 N、P₂O₅、K₂O 量分别为 236.3、67.5、67.5 kg/hm²。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 叶片净光合速率(P_n)测定

自叶片展开后,采用美国 CID 公司生产的 CI-340 型便携式光合测定系统,每隔 10 d 对棒 3 叶的 P_n 进行测定,每次选代表性植株测定,每叶位叶片连续测定 3 次。

1.3.2 叶源量(L_{SC})计算

棒 3 叶对 CO₂ 同化量的累积量(mol /m²),计算式^[11]为

$$L_{SC} = \sum_{i=1}^n (P_n HS)_i$$

(1)

式中 P_n ——净光合速率 i ——测定次数
 H ——测定间隔天数的光照时数
 S ——单位面积土地上不同叶位叶面积

1.3.3 茎秆糖分含量测定

用 MQK-80S 型便携式折光仪,于籽粒乳熟期每个处理取 5 株,测定玉米茎秆穗下节糖分含量,求其平均值。

1.3.4 籽粒灌浆过程模拟

于夏玉米吐丝期后选择生长一致、同一天授粉、有代表性的植株做标记。自玉米散粉后,每隔 5 d 取做标记的植株果穗,直至收获,取其中下部籽粒

100 粒,测定干质量,重复 3 次。以散粉后天数为自变量(t)。

1.3.5 干物质与产量测定

参考文献[3]进行测定与计算。

1.3.6 考种与测产

收获前在 3 个夏玉米品种每小区随机连续取 40 个果穗进行考种,测定穗部性状。产量为每小区单收的实测结果。

1.4 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 不同水分条件下夏玉米光合特性变化

2.1.1 夏玉米后期叶面积指数(LAI)与穗位叶叶绿素(SPAD)变化

由表 2 可见,玉米后期 I9.20 与 I9.25 处理 LAI 高于 I9.30 与 CK 处理。随生育进程延长,I9.20、I9.25 与 I9.30 处理 LAI 高值维持时间也以 CK 处理较长。收获期年际间比较,郑单 958 处理间 2011 年 LAI 高于 2012 年。其余 2 个品种均以 2012 年较高。穗位叶 SPAD 的变化与 LAI 变化相似,生育后期穗位叶 SPAD 处理间以 I9.25 最高或较高。随生育进程 SPAD 下降速度以 CK 最快,收获期处理间 SPAD 表现为 I9.25 ≥ I9.20 > I9.30 > CK。年际间比较,收获期 SPAD 以 2012 年较高。

表 2 灌水处理后夏玉米 LAI 与穗位叶 SPAD 变化比较
Tab.2 LAI and SPAD of ear leaf under different irrigation treatments

品种	处理	LAI						SPAD					
		2011 年			2012 年			2011 年			2012 年		
		09-30	10-05	10-17	09-30	10-06	10-12	09-30	10-05	10-17	09-30	10-06	10-12
郑单 958	CK	3.77 ^a	3.34 ^b	1.84 ^b	4.21 ^a	3.01 ^a	1.74 ^b	54.90 ^a	52.40 ^a	48.21 ^a	54.15 ^a	50.90 ^a	50.70 ^a
	I9.20	3.95 ^a	3.70 ^a	1.76 ^b	4.22 ^a	3.14 ^a	2.72 ^a	52.67 ^{ab}	54.77 ^a	51.22 ^a	55.42 ^a	53.96 ^a	51.81 ^a
	I9.25	3.91 ^a	3.70 ^a	2.67 ^a	4.12 ^a	3.23 ^a	2.36 ^{ab}	57.22 ^a	55.79 ^a	52.85 ^a	54.63 ^a	53.18 ^a	51.72 ^a
	I9.30	3.89 ^a	3.77 ^a	2.10 ^{ab}	4.22 ^a	3.09 ^a	2.16 ^{ab}	51.01 ^b	53.73 ^a	48.33 ^a	52.89 ^a	53.09 ^a	51.34 ^a
先玉 335	CK	3.33 ^{ab}	2.45 ^{ab}	0.98 ^c	3.92 ^a	3.39 ^a	2.79 ^b	49.73 ^a	46.12 ^a	27.90 ^b	56.72 ^a	50.65 ^a	49.14 ^a
	I9.20	3.01 ^b	2.82 ^a	1.73 ^b	4.18 ^a	3.51 ^a	3.10 ^a	53.40 ^a	49.21 ^a	46.52 ^a	56.31 ^a	52.69 ^a	51.23 ^a
	I9.25	3.66 ^a	2.75 ^{ab}	2.40 ^a	3.62 ^a	3.42 ^a	2.87 ^{ab}	52.80 ^a	46.69 ^a	46.21 ^a	57.65 ^a	50.33 ^a	49.99 ^a
	I9.30	3.33 ^{ab}	2.15 ^b	1.40 ^b	3.42 ^a	3.28 ^a	2.87 ^{ab}	50.30 ^a	44.40 ^a	43.80 ^a	51.97 ^a	50.23 ^a	49.97 ^a
浚单 20	CK	3.58 ^a	2.74 ^{ab}	1.61 ^b	3.05 ^a	2.72 ^a	2.16 ^{ab}	53.11 ^a	45.31 ^a	41.63 ^a	55.60 ^a	50.41 ^a	49.86 ^a
	I9.20	3.83 ^a	2.98 ^a	2.42 ^a	3.40 ^a	2.76 ^a	2.22 ^{ab}	52.33 ^a	49.72 ^a	44.12 ^a	54.07 ^a	53.17 ^a	52.41 ^a
	I9.25	3.27 ^a	2.72 ^{ab}	1.02 ^c	2.92 ^a	2.88 ^a	2.46 ^a	54.12 ^a	50.21 ^a	49.40 ^a	56.44 ^a	54.48 ^a	53.54 ^a
	I9.30	3.58 ^a	2.38 ^b	1.02 ^c	3.01 ^a	2.63 ^a	1.78 ^b	50.40 ^a	46.12 ^a	44.12 ^a	49.24 ^b	53.08 ^a	49.73 ^a

注:数值后不同小写字母表示同品种不同水分处理之间在 $p < 0.05$ 水平上差异显著。下同。

2.1.2 不同水分条件下穗位叶 P_n 日变化

由表 3 可见,2011 年 10 月 2 日测定穗位叶 P_n

日变化的特征曲线有 2 种表现,I9.25、I9.20、I9.30 等 3 个处理为非典型的“单峰”曲线,峰值出现在

10:00,处理间峰值变幅为 27.7 ~ 33.1 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$;不灌水的 CK 为非典型的“双峰”曲线,主峰出现在 11:00,其峰值变幅为 24.1 ~ 28.0 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,次峰出现在 13:00,其峰值变幅为 16.0 ~

19.6 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。
不同水分条件比较,上午 19.20、19.25 与 19.30 处理 P_n 高于 CK,下午表现不具规律性。同品种不同处理 P_n 日变化均值表现为 19.25 > 19.20 > 19.30 > CK。

表 3 水分处理对穗位叶 P_n 日变化的影响 (2011-10-02)

Tab.3 Diurnal variation of net photosynthetic rate (P_n) of summer maize ear leaf under different irrigation treatments													平均值	
品种	处理	$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$												
		测定时间												
		07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00		
郑单 958	CK	15.4 ± 0.1 ^{ab}	18.1 ± 0.2 ^a	23.4 ± 0.1 ^b	23.5 ± 0.4 ^b	24.1 ± 0.2 ^{ab}	15.4 ± 0.4 ^b	16.0 ± 0.5 ^b	13.9 ± 0.5 ^{ab}	11.9 ± 0.3 ^b	4.9 ± 0.5 ^a	2.3 ± 0.2 ^b	15.4	
		17.3 ± 0.4 ^a	20.4 ± 0.8 ^a	27.0 ± 0.3 ^{ab}	30.2 ± 1.3 ^{ab}	24.2 ± 0.4 ^a	23.6 ± 0.4 ^a	19.8 ± 0.7 ^a	16.1 ± 0.6 ^a	10.7 ± 0.3 ^b	4.7 ± 0.2 ^b	4.2 ± 0.2 ^a	18.1	
	19.20	18.4 ± 0.2 ^a	20.7 ± 0.2 ^a	28.6 ± 0.2 ^a	33.1 ± 0.4 ^a	19.7 ± 0.4 ^{ab}	19.6 ± 0.7 ^a	18.6 ± 0.8 ^a	16.3 ± 0.3 ^a	15.2 ± 0.7 ^a	5.7 ± 0.4 ^{ab}	2.6 ± 0.3 ^b	17.8	
		17.9 ± 0.3 ^b	18.2 ± 0.2 ^a	24.8 ± 0.3 ^b	28.0 ± 0.5 ^b	22.8 ± 0.2 ^a	18.6 ± 0.7 ^b	16.5 ± 0.8 ^b	10.7 ± 0.5 ^b	9.9 ± 0.6 ^b	4.8 ± 0.6 ^b	3.5 ± 0.4 ^{ab}	16.0	
	19.25	5.1 ± 0.4 ^b	15.4 ± 0.9 ^b	24.2 ± 1.1 ^a	26.7 ± 0.3 ^a	28.0 ± 1.0 ^b	18.6 ± 0.4 ^b	19.4 ± 0.4 ^a	15.4 ± 0.4 ^{ab}	10.3 ± 0.4 ^{ab}	2.6 ± 0.3 ^b	0.9 ± 0.4 ^c	15.1	
		7.4 ± 0.2 ^a	19.8 ± 0.3 ^a	24.9 ± 0.2 ^a	30.2 ± 0.1 ^{ab}	26.1 ± 0.4 ^a	23.3 ± 0.1 ^{ab}	21.6 ± 0.2 ^a	17.6 ± 0.3 ^a	10.5 ± 0.3 ^{ab}	3.1 ± 0.1 ^{ab}	2.9 ± 0.2 ^a	17.0	
	19.30	6.3 ± 0.2 ^{ab}	18.6 ± 0.4 ^a	24.2 ± 0.2 ^a	33.1 ± 0.1 ^a	27.1 ± 0.5 ^a	24.5 ± 0.2 ^a	21.1 ± 0.2 ^a	18.1 ± 0.3 ^a	8.6 ± 0.3 ^b	4.0 ± 0.1 ^a	2.0 ± 0.2 ^a	17.1	
		5.9 ± 0.5 ^b	17.4 ± 0.7 ^{ab}	25.1 ± 0.4 ^a	29.5 ± 0.7 ^{ab}	26.4 ± 1.0 ^a	21.3 ± 0.8 ^{ab}	19.4 ± 0.4 ^a	15.8 ± 0.4 ^a	12.4 ± 0.4 ^b	4.5 ± 0.3 ^a	1.5 ± 0.2 ^b	16.3	
	先玉 335	CK	6.9 ± 0.3 ^c	18.2 ± 0.7 ^a	19.1 ± 0.1 ^b	24.2 ± 0.6 ^b	25.4 ± 0.4 ^b	19.1 ± 0.1 ^{ab}	19.6 ± 0.4 ^a	16.4 ± 0.4 ^a	14.2 ± 0.3 ^b	8.3 ± 0.1 ^a	0.6 ± 0.5 ^c	15.6
			19.9 ± 0.1 ^a	18.6 ± 0.1 ^a	22.5 ± 0.2 ^a	27.7 ± 0.1 ^{ab}	27.0 ± 0.4 ^{ab}	23.6 ± 0.2 ^a	20.9 ± 0.4 ^a	17.9 ± 0.2 ^a	16.8 ± 0.1 ^a	6.5 ± 0.4 ^a	5.4 ± 0.3 ^a	18.8
19.20		15.1 ± 0.3 ^b	19.6 ± 0.2 ^a	22.6 ± 0.1 ^a	30.3 ± 0.3 ^a	28.6 ± 0.4 ^a	19.6 ± 0.2 ^{ab}	19.0 ± 0.4 ^a	17.8 ± 0.2 ^{ab}	10.4 ± 0.2 ^b	3.9 ± 0.1 ^b	3.0 ± 0.3 ^b	17.3	
		13.8 ± 0.3 ^b	18.2 ± 0.3 ^a	23.7 ± 0.3 ^a	29.2 ± 1.3 ^a	24.8 ± 0.6 ^b	18.1 ± 0.7 ^b	16.6 ± 0.5 ^a	14.7 ± 0.7 ^b	12.3 ± 0.3 ^{ab}	5.9 ± 0.3 ^{ab}	5.1 ± 0.3 ^a	16.6	

2.2 不同水分条件下夏玉米光合物质生产特性
2.2.1 不同水分条件下玉米茎秆糖分质量分数变化
生育后期玉米茎秆糖分质量分数处理间比较,CK 处理高于 19.20、19.25 与 19.30 处理(表 4)。水分处理越早,收获期糖分质量分数与 CK 差异越小。年际间变化表现为 2011 年从 9 月 20 日到收获期,糖分质量分数呈“单峰”曲线变化,以 9 月 30 日或 10 月 5 日较高;2012 年则不同,与 9 月 30 日相比,10 月 6 日糖分质量分数略有降低,但收获期又有所升高。2 年收获期茎秆糖分质量分数变幅 3.12% ~ 9.30%,CK、19.20、19.25 与 19.30 处理糖分质量分数分别为 7.03%、5.88%、5.81%、5.66%(同处理平均值)。年际间同处理不同品种差异不同,先玉 335 收获时茎秆糖分质量分数以 2012 年较高,而浚单 20 差异则不具规律性。说明,茎秆糖分质量分数

变化与生育进程有关,更与当季的气候条件、水分状况及品种特性等密切相关。
2.2.2 不同水分条件下夏玉米干物质积累分配
由表 5 可见,吐丝前营养器官同化物再分配对籽粒质量影响较小,处理间营养器官同化物吐丝前运转率变幅为 11.98% ~ 22.22%,营养器官吐丝前同化物对籽粒贡献率变幅为 14.41% ~ 29.77%。营养器官吐丝前同化物向籽粒的运转量、运转率及贡献率处理间表现一致为 CK > 19.30 > 19.20 > 19.25。籽粒质量主要来自吐丝后营养器官同化物再分配,吐丝后同化物同化量对籽粒质量的贡献率高达 70.23% ~ 85.60%。与吐丝前同化物对籽粒质量的贡献率相反,吐丝后干物质同化量对籽粒质量的贡献率、吐丝后输入籽粒量处理间均表现为 19.25 > 19.20 > 19.30 > CK。

表 4 水分处理对夏玉米茎秆糖分质量分数变化影响

Tab.4 Dynamic change of sugar concentration in stem of summer maize under different irrigation treatments %									
品种	处理	2011 年					2012 年		
		09－20	09－25	09－30	10－05	10－17	09－30	10－06	10－12
郑单 958	CK	3.33 ^{ab}	4.72 ^a	8.08 ^a	8.82 ^a	8.12 ^a	3.52 ^a	2.85 ^a	6.03 ^a
	I9.20	3.11 ^b	4.22 ^a	6.74 ^c	6.72 ^b	5.28 ^d	2.21 ^b	2.77 ^a	4.95 ^b
	I9.25	3.53 ^a	4.37 ^a	7.68 ^b	7.47 ^{ab}	6.08 ^c	2.11 ^b	2.28 ^b	5.01 ^b
	I9.30	3.94 ^a	4.65 ^a	7.86 ^{ab}	7.88 ^{ab}	6.96 ^b	2.31 ^b	2.55 ^{ab}	5.01 ^b
先玉 335	CK	5.28 ^a	6.94 ^a	8.28 ^a	9.28 ^a	7.72 ^a	5.61 ^a	3.00 ^a	9.52 ^a
	I9.20	5.12 ^a	6.10 ^b	7.95 ^a	9.22 ^a	5.20 ^{bc}	4.90 ^b	2.75 ^{ab}	9.30 ^a
	I9.25	5.41 ^a	6.31 ^b	7.93 ^a	8.24 ^b	6.32 ^b	5.51 ^a	2.44 ^b	9.02 ^a
	I9.30	5.32 ^a	6.54 ^{ab}	8.01 ^a	6.92 ^c	4.76 ^c	5.10 ^{ab}	2.34 ^b	9.01 ^a
浚单 20	CK	3.21 ^{ab}	5.82 ^a	7.17 ^a	6.14 ^a	5.62 ^a	3.90 ^a	3.14 ^a	5.20 ^a
	I9.20	3.13 ^b	4.98 ^b	5.27 ^c	5.64 ^b	5.44 ^a	2.21 ^b	2.25 ^b	5.13 ^a
	I9.25	3.41 ^a	5.40 ^{ab}	6.57 ^b	5.72 ^b	3.48 ^b	3.20 ^{ab}	2.41 ^b	4.98 ^a
	I9.30	3.20 ^{ab}	5.41 ^{ab}	6.89 ^{ab}	5.90 ^{ab}	3.12 ^b	3.24 ^a	2.41 ^b	5.09 ^a

表 5 不同水分处理对干物质再分配影响(2012 年)

Tab.5 Effects of different irrigation treatments on dry matter translocation of summer maize from vegetative organs to grain (2012)

品种	处理	营养器官同化物吐丝前	营养器官同化物	吐丝前同化物运转量对	吐丝后同化物输入	吐丝后同化物同化量对
		运转量/(kg·hm ⁻²)	吐丝前运转率/%	籽粒质量的贡献率/%	籽粒量/(kg·hm ⁻²)	籽粒质量的贡献率/%
郑单 958	CK	1 890.53 ± 26.53 ^a	15.03 ± 0.31 ^a	20.05 ± 0.19 ^a	7 540.47 ± 98.43 ^b	79.95 ± 0.47 ^b
	I9.20	1 549.62 ± 18.49 ^b	12.45 ± 0.19 ^b	15.41 ± 0.18 ^b	8 503.88 ± 86.74 ^a	84.59 ± 0.86 ^a
	I9.25	1 471.90 ± 27.53 ^b	11.98 ± 0.18 ^b	14.40 ± 0.14 ^b	8 752.10 ± 109.38 ^a	85.60 ± 0.69 ^a
	I9.30	1 786.67 ± 31.41 ^a	14.18 ± 0.14 ^a	18.52 ± 0.23 ^{ab}	7 858.83 ± 88.62 ^b	81.48 ± 1.08 ^{ab}
先玉 335	CK	2 243.61 ± 38.73 ^a	17.61 ± 0.24 ^a	23.00 ± 0.34 ^a	7 512.39 ± 73.62 ^b	77.00 ± 0.73 ^b
	I9.20	1 915.93 ± 22.46 ^{ab}	15.20 ± 0.13 ^b	18.54 ± 0.28 ^{ab}	8 418.57 ± 89.65 ^a	81.46 ± 0.36 ^a
	I9.25	1 666.17 ± 18.73 ^b	13.15 ± 0.27 ^c	16.47 ± 0.22 ^b	8 447.33 ± 85.47 ^a	83.53 ± 0.47 ^a
	I9.30	1 945.02 ± 22.53 ^{ab}	15.29 ± 0.31 ^b	20.16 ± 0.30 ^a	7 702.98 ± 74.03 ^b	79.84 ± 0.88 ^{ab}
浚单 20	CK	3 007.11 ± 38.46 ^a	22.22 ± 0.54 ^a	29.77 ± 0.31 ^a	7 093.39 ± 100.37 ^b	70.23 ± 0.84 ^b
	I9.20	2 651.49 ± 29.63 ^{bc}	19.87 ± 0.37 ^b	25.15 ± 0.26 ^{ab}	7 889.51 ± 116.52 ^{ab}	74.85 ± 0.91 ^{ab}
	I9.25	2 387.58 ± 18.95 ^c	18.05 ± 0.15 ^c	22.38 ± 0.24 ^b	8 278.42 ± 134.68 ^a	77.62 ± 0.68 ^a
	I9.30	2 822.80 ± 29.67 ^b	21.37 ± 0.42 ^a	28.45 ± 0.29 ^a	7 100.49 ± 107.76 ^b	71.55 ± 0.78 ^b

2.3 不同水分处理与夏玉米棒 3 叶 L_{sc}、产量构成比较

2.3.1 不同水分条件下棒 3 叶 L_{sc}与产量性状

由表 6 可见, I9.20、I9.25 与 I9.30 处理棒 3 叶全生育期 L_{sc} 高于 CK。与全生育期相比,棒 3 叶阶段(09－20—收获) L_{sc} 受灌水处理影响更大,处理间以 I9.25 与 I9.20 较高,其次为 I9.30,以 CK 最小(2011 年郑单 958 的 CK 处理除外)。年际间比较,棒 3 叶全生育期与阶段(9 月 20 日—收获)的 L_{sc} 处理差异较小,也不具规律性。总体来看,棒 3 叶全生育期 L_{sc} 处理间变幅为 7.71 ~ 9.61 mol/m²,阶段(9 月 20 日—收获)的 L_{sc} 处理间变幅为 0.85 ~ 1.39 mol/m²,占其棒 3 叶总 L_{sc} 的 9.43% ~ 13.96%。

夏玉米百粒质量变幅为 31.22 ~ 38.11 g,处理间比较百粒质量以 I9.20、I9.25 较高,年际间比较,

2012 年百粒质量高于 2011 年。与百粒质量相似,处理间籽粒产量以 I9.20、I9.25 较高,年际间 2012 年籽粒产量高于 2011 年。生物产量年际间差异较小,但处理间差异较大,各品种均以 I9.20、I9.25 较高。同年处理间收获系数不具规律性,年际间 2012 年收获系数高于 2011 年。

2.3.2 不同水分条件下籽粒灌浆特征

由表 7 可见,收获期百粒质量变幅为 31.98 ~ 35.49 g,阶段(9 月 20 日—收获期)灌浆量为 4.11 ~ 7.45 g,占总百粒质量的 12.83% ~ 20.99% (表 7)。处理间比较,阶段灌浆量及所占比例均以 I9.20、I9.25 较高,具体来看,2011 年阶段灌浆量表现为 I9.25 > I9.20 > CK > I9.30,所占比例则为 I9.25 > I9.20 > I9.30 > CK;2012 年处理间略有不同,阶段灌浆量及所占比例处理间表现一致为 I9.20 > I9.25 > I9.30 > CK。上述指标年际间比较,2012 年高于 2011 年。

表 6 不同处理对夏玉米棒 3 叶光合性能与产量性状影响

Tab.6 Photosynthetic performance in three-ear-leaves and yield components of summer maize under different treatments

品种	处理	棒 3 叶 $L_{SC}/(\text{mol}\cdot\text{m}^{-2})$				百粒质量/g		籽粒产量/ $(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})$		生物产量/ $(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})$		收获指数	
		2011 年		2012 年		2011 年	2012 年	2011 年	2012 年	2011 年	2012 年	2011 年	2012 年
		A	P	A	P								
郑单 958	CK	8.80 ^b	1.06 ^b	9.01 ^b	0.85 ^b	31.22 ^a	33.92 ^b	9 789.6 ^a	9 431.0 ^a	22 118.1 ^a	20 119.4 ^a	0.443 ^a	0.469 ^a
	I9.20	9.29 ^a	1.25 ^{ab}	9.61 ^a	1.29 ^a	31.86 ^a	34.62 ^a	10 024.1 ^a	10 053.5 ^a	23 262.7 ^a	20 952.2 ^a	0.431 ^a	0.480 ^a
	I9.25	9.17 ^{ab}	1.24 ^{ab}	9.27 ^{ab}	1.39 ^a	32.48 ^a	34.35 ^{ab}	9 925.8 ^a	10 224.0 ^a	23 193.4 ^a	21 038.6 ^a	0.428 ^a	0.486 ^a
	I9.30	9.40 ^a	1.31 ^a	9.42 ^a	1.12 ^{ab}	31.81 ^a	34.22 ^{ab}	9 629.8 ^a	9 645.5 ^a	22 153.8 ^a	20 462.6 ^a	0.435 ^a	0.471 ^a
先玉 335	CK	8.65 ^b	1.02 ^a	7.81 ^b	0.88 ^b	32.11 ^b	36.98 ^b	8 756.2 ^b	9 756.0 ^a	19 678.1 ^b	20 250.7 ^a	0.445 ^a	0.482 ^a
	I9.20	8.74 ^b	1.13 ^a	8.11 ^a	1.13 ^a	34.52 ^a	37.60 ^{ab}	9 320.1 ^{ab}	10 334.5 ^a	20 531.3 ^{ab}	21 023.8 ^a	0.454 ^a	0.492 ^a
	I9.25	9.18 ^a	1.24 ^a	7.89 ^b	1.09 ^a	33.63 ^{ab}	38.11 ^a	9 545.7 ^a	10 113.5 ^a	21 425.3 ^a	21 120.5 ^a	0.446 ^a	0.479 ^a
	I9.30	8.89 ^{ab}	1.12 ^a	7.71 ^b	0.93 ^{ab}	33.54 ^{ab}	36.28 ^b	8 999.5 ^b	9 648.0 ^a	19 975.5 ^b	20 422.3 ^a	0.451 ^a	0.472 ^a
浚单 20	CK	9.06 ^b	0.91 ^b	8.70 ^b	1.00 ^b	32.11 ^a	33.72 ^b	9 849.6 ^a	10 100.5 ^a	20 735.4 ^a	20 624.1 ^a	0.475 ^a	0.490 ^a
	I9.20	9.50 ^a	1.13 ^{ab}	9.11 ^a	1.26 ^a	32.37 ^a	35.49 ^a	10 254.2 ^a	10 541.0 ^a	22 098.3 ^a	21 232.2 ^a	0.464 ^a	0.496 ^a
	I9.25	9.33 ^{ab}	1.22 ^a	9.10 ^a	1.23 ^a	32.89 ^a	34.17 ^{ab}	10 229.9 ^a	10 666.0 ^a	21 830.6 ^a	21 509.1 ^a	0.469 ^a	0.496 ^a
	I9.30	9.60 ^a	1.01 ^{ab}	8.38 ^c	1.17 ^{ab}	31.98 ^a	33.88 ^b	9 835.8 ^a	9 923.3 ^a	20 955.7 ^a	20 693.8 ^a	0.469 ^a	0.480 ^a

注:A 为棒 3 叶全生育期叶源量;P 为 09—20—收获阶段棒 3 叶叶源量。

表 7 不同水分条件下浚单 20 灌浆特征

Tab.7 Effects of different irrigation treatments on characteristic parameters of grain-filling and yield components of summer maize

年份	处理	百粒质量拟合方程	r	$G_{\max}/$	$T_{\max}/$	$F/$	$W_{\max}/$	$V/$	9 月 20 成熟期			
				($\text{g}\cdot(\text{d}\cdot 100$ 粒) $^{-1}$)	d	d	($\text{g}\cdot(100$ 粒) $^{-1}$)	($\text{g}\cdot(\text{d}\cdot 100$ 粒) $^{-1}$)	日百粒 质量/g	百粒质 量/g	灌浆 量/g	9 月 20 日—收获 所占比例/%
2011	CK	$W_t = 32.45/(1 + 51.95e^{-0.148t})$	0.992	1.131	26.77	17.85	18.737	0.519	27.99	32.11	4.12	12.83
	I9.20	$W_t = 32.70/(1 + 45.48e^{-0.142t})$	0.992	1.159	26.92	19.36	18.881	0.546	27.96	32.37	4.41	13.62
	I9.25	$W_t = 33.30/(1 + 48.16e^{-0.136t})$	0.997	1.197	28.53	19.39	19.228	0.526	27.04	32.89	5.85	17.79
	I9.30	$W_t = 32.45/(1 + 44.58e^{-0.136t})$	0.992	1.104	27.92	18.58	18.736	0.521	27.87	31.98	4.11	12.85
2012	CK	$W_t = 34.34/(1 + 59.81e^{-0.154t})$	0.996	1.326	26.48	16.76	19.826	0.563	27.78	33.72	5.94	17.62
	I9.20	$W_t = 36.00/(1 + 65.22e^{-0.157t})$	0.997	1.414	26.59	17.05	20.782	0.568	28.04	35.49	7.45	20.99
	I9.25	$W_t = 34.77/(1 + 58.17e^{-0.153t})$	0.998	1.351	26.53	17.20	20.077	0.577	27.89	34.17	6.28	18.38
	I9.30	$W_t = 34.44/(1 + 61.94e^{-0.157t})$	0.996	1.331	26.30	16.79	19.886	0.561	27.73	33.88	6.15	18.15

注: $G_{\max}$,最大灌浆速率; r ,相关系数; $T_{\max}$,最大灌浆速率出现天数; $W_{\max}$,快增期干物质积累量; F ,籽粒灌浆活跃期; V ,平均灌浆速率。

处理间比较还发现,最大灌浆速率、快增期百粒质量积累量及灌浆平均速率均以 I9.20、I9.25 处理较高,灌浆活跃期也以 I9.20、I9.25 处理较长。年际间比较,最大灌浆速率及百粒质量以 2012 年较高,最大灌浆速率出现时间以 2012 年较早,活跃天数也以 2012 年较长。

3 讨论

3.1 夏玉米光合特性对不同水分条件的响应

夏玉米生育末期 P_n 日变化中 I9.20、I9.25 与 I9.30 等高水分处理为“单峰”曲线,轻度干旱的 CK 处理为“双峰”曲线,谷值出现在光辐射较强的正午。此结论与刘祖贵等研究^[12]结果相似。不同处理进一步比较,CK 两峰之间的谷值与第 2 个峰值均低于相应时段 I9.20、I9.25 处理的光合速率,与 I9.30 处理相近。说明干旱条件下,夏玉米对强光

有效辐射的利用效率小于正常供水^[13];同时还表明,本研究条件下 9 月 30 日复水对玉米光合速率的恢复是有限的^[14]。

I9.20 与 I9.25 处理 P_n 日变化高于 CK 与 I9.30 处理(平均值)。2 年阶段(9 月 30 日—收获) LAI 与 SPAD 值动态变化,I9.25、I9.20 处理的 LAI 与 SPAD 值高于 CK、I9.30 处理。 L_{SC} 可作为玉米单株生产力的参考诊断指标^[15]。本研究条件下,2 年处理间棒 3 叶 L_{SC} 以 I9.20、I9.25 较高。I9.20、I9.25 与 I9.30 等处理阶段(9 月 20 日—收获) L_{SC} 分别比 CK 高出 25.70%、29.55%、16.43% (平均值)。以上从群体与个体上都表明,与 I9.30、CK 处理相比,I9.20、I9.25 处理更能满足玉米后期对水分的需求^[3],可改善群体光合生产能力。

3.2 糖分转化和籽粒质量形成与栽培环境的关系

玉米茎秆是光合产物从叶片向果穗运输的通

道。同年处理间比较,茎秆糖分含量以 CK 处理最高,以 I9.20 与 I9.25 处理较低。说明该阶段适宜供水能减少糖分在茎秆中积累,促进向果穗中转运^[16]。年际间比较,9 月 30 日—10 月 6 日茎秆含糖量以 2011 年较高,仅从水分供应不能发现造成差异的原因。结合张吉旺等^[17]结论,光照充足利于糖分向淀粉转化^[17],本研究条件下阶段(9 月 26 日—10 月 6 日)照辐射总量 2012 年($4\,593.0\text{ kJ/m}^2$)高于 2011 年($3\,315.9\text{ kJ/m}^2$),2011 年茎秆糖分含量高于 2012 年,本结果与张吉旺等结论一致^[17]。另外,当气温低于茎秆生长最适温度($24\sim 28^\circ\text{C}$)时其对糖分运输能力不同程度降低^[17-18],本研究 2011 年阶段(9 月 26 日—10 月 6 日)日均温度(16.15°C)低于 2012 年(18.68°C),是 2011 年该阶段茎秆糖分含量高于 2012 年的另一个原因。同品种同处理收获时茎秆糖分含量 2012 年却高于 2011 年。造成 2011 年收获时糖分含量较低的原因可能与 2011 年 10 月 9 日发生 59 mm 降雨有关,降雨提高了秸秆含水量,稀释了茎秆糖分含量;同时充足供水也利于糖分由茎秆向果穗等其他器官转运^[16]。

夏玉米百粒质量及与百粒质量密切相关的参数(平均灌浆速率、最大灌浆速率、灌浆活跃期等)均以 I9.20 与 I9.25 处理较高(或较长)。处理间比较,I9.20、I9.25 与 I9.30 等处理百粒质量分别比 CK 高出 3.23%、2.81%、0.91%(平均值);年际间比较,2012 年各处理百粒质量比 2011 年高 7.29%~9.21%(平均值)。可见,与水分处理相比,年型对粒质量的影响更大^[19]。进一步分析发现,2011 年、2012 年 9 月 16 日—10 月 5 日阶段平均温度分别为 16.4 、 19.9°C ,低于灌浆最适日均温度($22\sim 24^\circ\text{C}$)^[20],特别是 2011 年阶段平均温度仅高于灌浆下限温度(16°C)^[21] 0.4°C 。低温是造成 2011 年籽粒质量低于 2012 年的一个重要原因。此结论与本研究低温条件下茎秆对糖分运输能力降低,导致其糖分质量分数高的结果一致。另外,灌浆期光照还显著影响夏玉米籽粒质量形成,本研究 2012 年 9 月 16 日—10 月 5 日阶段日照辐射总量($8\,820.6\text{ kJ/m}^2$)高于 2011 年($7\,319.2\text{ kJ/m}^2$),与 2011 年相比,2012 年最大灌浆速率大,快增期籽粒干物质积累量高,此结论与史建国等研究结果一致^[22]。

3.3 小麦提前造墒灌水模式与夏玉米产量形成和小麦玉米周年生产

本研究处理间最大灌浆速率陆续在吐丝后 26 d(9 月 11 日后)出现,灌浆活跃期持续约 18 d(即 9 月 11 日—9 月 28 日),此结果与曹彩云等^[23]结论

一致。各处理的灌水时间,除 I9.30 处理在灌浆活跃期结束后进行灌水外,I9.20 与 I9.25 处理都在灌浆活跃期内进行。活跃期内进行的 I9.20 与 I9.25 处理,改善了灌浆参数,增加了籽粒质量,进而提高了产量^[8,24]。本研究 I9.20 与 I9.25 处理比轻度干旱的 CK 处理籽粒产量高 4.97%~5.32%(平均值),生物平均产量比 CK 处理高 4.50%~5.32%(平均值)。说明与 CK 处理比较,I9.20 与 I9.25 处理利于生物产量和籽粒产量的同步提高^[25]。结合本研究水分处理对同化物转化影响的结果,I9.20 与 I9.25 处理提高了吐丝后干物质同化量对籽粒质量的贡献率与吐丝后输入籽粒量。年际间比较,2012 年收获指数高于 2011 年,百粒质量与产量也以 2012 年高,而生物产量差异较小。表明光合物质运转的差异是造成年际间籽粒产量差异的重要原因^[26]。这意味着,与前期水分处理相比,小麦提前造墒灌溉对玉米产量形成具有更特殊的意义。

可见,在河北平原冬小麦-夏玉米主产区,小麦造墒灌水提前到 9 月 20—25 日,可将农田产生无效蒸发的水分作为玉米所用,在不增加成本的前提下提高玉米产量。同时该灌水模式还缩短了小麦玉米轮作倒茬时间,为本区域夏玉米生产争取了更多的光热资源,综合提升了资源的利用效率^[27]。

4 结束语

夏玉米乳熟末期 P_n 日变化表现为 I9.20、I9.25 与 I9.30 等高水分处理为“单峰”曲线,轻度干旱的 CK 处理为“双峰”曲线。I9.20 与 I9.25 处理 P_n 日变化高于 CK 与 I9.30 处理(平均值),LAI 与 SPAD 值也以 I9.20 与 I9.25 处理较高。上述指标变化对 L_{sc} 也产生了影响,I9.20、I9.25 与 I9.30 等处理阶段(9 月 20 日—收获) L_{sc} 分别比 CK 高 25.70%、29.55%、16.43%(平均值)。与光合特性不同,玉米茎秆糖分质量分数以 CK 较高,I9.20、I9.25 与 I9.30 处理较低。不同灌水模式还对玉米灌浆有一定影响,处理间比较最大灌浆速率、快增期百粒质量积累量及灌浆平均速率以 I9.20、I9.25 处理较高,灌浆活跃期以 I9.20、I9.25 处理较长。同年同品种处理间比较,百粒质量与籽粒产量也均以 I9.20、I9.25 处理较高。另外,水分处理还对干物质再分配有一定影响,吐丝后同化物输入籽粒量表现为 $I9.25 > I9.20 > I9.30 \geq CK$ 。综上所述,本研究条件下小麦造墒灌水提前于 9 月 20—25 日,可满足玉米后期对水分的需求,能改善群体光合性能,并增加吐丝后同化物向籽粒的输入量,最终实现产量的提高。

参 考 文 献

- 1 Sun H Y, Shen Y J, Yu Q, et al. Effect of precipitation change on water balance and WUE of the winter wheat-summer maize rotation in the North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(8): 1139–1145.
- 2 李新波, 孙宏勇, 张喜英, 等. 太行山山前平原区蒸散量和作物灌溉需水量的分析[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(2): 26–30.
Li Xinbo, Sun Hongyong, Zhang Xiying, et al. Analysis of irrigation demands and evapotranspiration in the piedmont of Taihang Mountain[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(2): 26–30. (in Chinese)
- 3 党红凯, 李伟, 曹彩云, 等. 乳熟后灌溉对夏玉米水分利用效率及干物质运转的影响[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(5): 131–138.
Dang Hongkai, Li Wei, Cao Caiyun, et al. Effects of late milk irrigation on water use efficiency and dry matter distribution of maize[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(5): 131–138. (in Chinese)
- 4 李艳, 刘海军, 黄冠华. 基于 RZWQM 模型的冬小麦-夏玉米水氮管理评价[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(6): 111–120.
Li Yan, Liu Haijun, Huang Guanhua. Evaluation of nitrogen and water management in winter wheat-summer maize cropping system in North China Plain using RZWQM[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(6): 111–120. (in Chinese)
- 5 纪瑞鹏, 车宇胜, 朱永宁, 等. 干旱对东北春玉米生长发育和产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(11): 3021–3026.
Ji Ruipeng, Che Yusheng, Zhu Yongning, et al. Impacts of drought stress on the growth and development and grain yield of spring maize in northeast China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(11): 3021–3026. (in Chinese)
- 6 吴玮, 景元书, 马玉平, 等. 干旱环境下夏玉米各生育时期光响应特征[J]. *应用气象学报*, 2013, 24(6): 723–730.
Wu Wei, Jing Yuanshu, Ma Yuping, et al. Light response characteristics of summer maize at different growth stages under drought[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2013, 24(6): 723–730. (in Chinese)
- 7 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 Fanggong, Sun Chaozhui, 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)
- 8 王育红, 蔡典雄, 姚宇卿, 等. 豫西旱坡地长期定位保护性耕作研究——II. 连年免耕和深松覆盖对麦田土壤温度的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2010, 28(2): 59–64.
Wang Yuhong, Cai Dianxiong, Yao Yuqing, et al. Study on long-term site-specific conservation tillage on sloping dryland in the western part of Henan—II. Effects of no-till and subsoiling with mulching on soil temperature in wheat field[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(2): 59–64. (in Chinese)
- 9 Wu D R, Yu Q, Wang E L, et al. Impact of spatial-temporal variations of climatic variables on summer maize yield in North China Plain[J]. *International Journal of Plant Production*, 2008, 2(1): 71–88.
- 10 刘晓敏, 张喜英, 王慧军. 太行山前平原区小麦玉米农业节水技术集成模式综合评价[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(2): 421–428.
Liu Xiaomin, Zhang Xiying, Wang Huijun. A comprehensive evaluation of wheat/maize agronomic water-saving models in the piedmont plain region of Mount Taihang[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(2): 421–428. (in Chinese)
- 11 曹树青, 赵永强, 温家立, 等. 高产小麦旗叶光合作用及籽粒灌浆进程关系的研究[J]. *中国农业科学*, 2000, 33(6): 19–25.
Cao Shuqing, Zhao Yongqiang, Wen Jiali, et al. Studies on photosynthesis in flag leaves and its relation to grain filling course of high-yield wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2000, 33(6): 19–25. (in Chinese)
- 12 刘祖贵, 陈金平, 段爱旺, 等. 不同土壤水分处理对夏玉米叶片光合等生理特性的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2006, 24(1): 90–95.
Liu Zugui, Chen Jinping, Duan Aiwang, et al. Effects of different soil moisture treatments on physiological characteristics of summer maize leaves[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2006, 24(1): 90–95. (in Chinese)
- 13 刘帆, 申双和, 李永秀, 等. 不同生育期水分胁迫对玉米光合特性的影响[J]. *气象科学*, 2013, 33(4): 378–383.
Liu Fan, Shen Shuanghe, Li Yongxiu, et al. Effect of water stress on maize photosynthetic characteristics in different growth stages[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2013, 33(4): 378–383. (in Chinese)
- 14 姚春霞, 张岁岐, 燕晓娟. 干旱及复水对玉米叶片光合特性的影响[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(3): 278–283.
Yao Chunxia, Zhang Suiqi, Yan Xiaojuan. Effects of drought and re-watering on photosynthetic characteristics of maize leaf[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2012, 19(3): 278–283. (in Chinese)
- 15 段巍巍, 赵红梅, 郭程瑾, 等. 夏玉米光合特性对氮素用量的反应[J]. *作物学报*, 2007, 33(6): 949–954.
Duan Weiwei, Zhao Hongmei, Guo Chengjin, et al. Responses of photosynthesis characteristics to nitrogen application rates in summer maize (*Zea mays* L.) [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(6): 949–954. (in Chinese)
- 16 Hume D J, Campbell D K. Accumulation and translocation of soluble solids in corn stalks[J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 1972, 52(3): 363–368.
- 17 张吉旺, 董树亭, 王空军, 等. 大田遮荫对夏玉米淀粉合成关键酶活性的影响[J]. *作物学报*, 2008, 34(8): 1470–1474.
Zhang Jiawang, Dong Shuting, Wang Kongjun, et al. Effects of shading in field on key enzymes involved in starch synthesis of summer maize[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(8): 1470–1474. (in Chinese)
- 18 卞云龙, 杜凯, 王益军, 等. 玉米茎秆糖含量的分布[J]. *作物学报*, 2009, 35(12): 2252–2257.
Bian Yunlong, Du Kai, Wang Yijun, et al. Distribution of sugar content in corn stalk[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2009,

35(12): 2252 – 2257. (in Chinese)

19 郭银巧, 李存东, 郭新宇, 等. 玉米水分管理动态知识模型的设计与实现[J]. 农业工程学报, 2007, 23(6): 165 – 169.
Guo Yingqiao, Li Cundong, Guo Xinyu, et al. Design and implementation of dynamic knowledge model for maize water management[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(6): 165 – 169. (in Chinese)

20 赵福成, 景立权, 闫发宝, 等. 灌浆期高温胁迫对甜玉米籽粒糖分积累和蔗糖代谢相关酶活性的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(9): 1644 – 1651.
Zhao Fucheng, Jing Liquan, Yan Fabao, et al. Effects of heat stress during grain filling on sugar accumulation and enzyme activity associated with sucrose metabolism in sweet corn[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(9): 1644 – 1651. (in Chinese)

21 张建平, 赵艳霞, 王春乙, 等. 不同时段低温冷害对玉米灌浆和产量的影响模拟[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2012, 40(9): 115 – 127.
Zhang Jianping, Zhao Yanxia, Wang Chunyi, et al. Modeling the impact of low temperature disaster during different development stages on grain filling processes and yields of maize[J]. Journal of Northwest A&F University: Nature Science Edition, 2012, 40(9): 115 – 127. (in Chinese)

22 史建国, 崔海岩, 赵斌, 等. 花粒期光照对夏玉米产量和籽粒灌浆特性的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(21): 4427 – 4434.
Shi Jianguo, Cui Haiyan, Zhao Bin, et al. Effect of light on yield and characteristics of grain-filling of summer maize from flowering to maturity[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(21): 4427 – 4434. (in Chinese)

23 曹彩云, 李科江, 崔彦宏, 等. 长期定位施肥对夏玉米籽粒灌浆影响的模拟研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(1): 48 – 53.
Cao Caiyun, Li Kejiang, Cui Yanhong, et al. Modeling the effect of long-term fertilization on grain filling of summer maize[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14(1): 48 – 53. (in Chinese)

24 张智猛, 戴良香, 胡昌浩, 等. 玉米灌浆期水分差异供应对籽粒淀粉积累及其酶活性的影响[J]. 植物生态学报, 2005, 29(4): 636 – 643.
Zhang Zhimeng, Dai Liangxiang, Hu Changhao, et al. Effects of different water treatments on starch accumulation and related enzyme activity in grain of maize during grain filling period[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2005, 29(4): 636 – 643. (in Chinese)

25 汪可欣, 付强, 姜辛, 等. 秸秆覆盖模式对玉米生理指标及水分利用效率的影响[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 181 – 186.
Wang Kexin, Fu Qiang, Jiang Xin, et al. Effect of straw mulching mode on maize physiological index and water use efficiency[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12): 181 – 186. (in Chinese)

26 Yang J C, Peng S B, Visperas R M, et al. Grain and dry matter yields and partitioning of assimilates in Japonica/Indica hybrid rice[J]. Crop Sciences, 2002, 42(3): 756 – 772.

27 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)

~~~~~

(上接第 104 页)

24 吕殿青, 邵明安, 王全九. 土壤持水特征测定中的容重变化及其确定方法[J]. 水利学报, 2003, 34(3): 110 – 114.  
Lü Dianqing, Shao Ming'an, Wang Quanjiu. Bulk density changing during measuring soil water retention characteristics and its determining method[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(3): 110 – 114. (in Chinese)

25 赵京考, 卢静, 谷思玉, 等. 降雨量和氮素对黑土区春玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(12): 74 – 78.  
Zhao Jingkao, Lu Jing, Gu Siyu, et al. Effects of precipitation and nitrogen on spring corn yield in black soil region[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(12): 74 – 78. (in Chinese)

26 Tarkalson D D, Payero J O. Comparison of nitrogen fertilization methods and rates for subsurface drip irrigated corn in the semi-arid great plains[J]. Transactions of the ASABE, 2008, 51(5): 1633 – 1643.

27 Li J, Meng Y, Li B. Field evaluation of fertigation uniformity as affected by injector type and manufacturing variability of emitters[J]. Irrigation Science, 2007, 25(2): 117 – 125.

28 Li J, Meng Y, Liu Y. Hydraulic performance of differential pressure tanks for fertigation[J]. Transactions of the ASABE, 2006, 49(6): 1815 – 1822.

29 Dajaman K, Irmak S, Rathje W R, et al. Maize evapotranspiration, yield production functions, biomass, grain yield, harvest index, and yield response factors under full and limited irrigation[J]. Transactions of the ASABE, 2013, 56(2): 273 – 293.

30 GB 1353—2009 玉米[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

31 Wang Z, Li J, Li Y. Effect of drip irrigation system uniformity and nitrogen applied on deep percolation and nitrate leaching during growing seasons of spring maize in semi-humid region[J]. Irrigation Science, 2014, 32(3): 221 – 236.