文章编号：1005-0906(2020)03-0119-08 DOI: 10.13597/j.cnki.maize.science.20200316

长期水分亏缺对吉林省不同年代玉米品种光合及物质生产特性的影响

曹玉军[1],路 明[1],都 钧[2],吕艳杰[1],姚凡云[1],魏雯雯[1],
刘志铭[1],王虹霏[3],刘 卓[1],王永军[1]

(1.吉林省农业科学院,长春 130033；2.长春市农业科学院,长春 130112；3.吉林农业大学农学院,长春 130124)

摘 要：以吉林省20世纪70年代以来的3个不同年代大面积推广的玉米品种为材料,采用遮雨棚土柱栽培试验,研究长期水分亏缺对不同年代玉米品种光合特性及干物质转运的影响。结果表明,与对照相比,水分亏缺使老品种(1970s和1990s)果穗叶净光合速率(*P*n)、最大光化学效率(*F*v/*F*m)降低幅度大于当代品种(2010s)。水分亏缺下,当代玉米品种叶片和茎鞘干物质转运率高于老品种,与对照相比,2010s、1990s和1970s玉米品种叶片和茎鞘干物质平均转运率分别提高了48.9%、47.7%和33.8%。水分亏缺下,玉米花前贮藏同化物转运对子粒产量贡献率随着年代的推进而降低,花后干物质积累量对产量贡献率则随着年代的推进而提高。

关键词：玉米;不同年代;长期水分亏缺;光合特性;干物质生产

中图分类号：S513.01 **文献标识码**：A

Effects of Long-term Water Deficit on Photosynthesis and Dry Matter Production Characteristics of Maize Varieties Released in Different Eras in Jilin Province

CAO Yu-jun[1], LU Ming[1], DU Jun[2], LÜ Yan-jie[1], YAO Fan-yun[1], WEI Wen-wen[1],
LIU Zhi-ming[1], WANG Hong-fei[3], LIU Zhuo[1], WANG Yong-jun[1]

(1. *Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun* 130033;
2. *Changchun Academy of Agricultural Sciences, Changchun* 130112;
3. *College of Agriculture, Jilin Agricultural University, Changchun* 130124, China)

Abstract: In this paper, maize varieties which had been widely popularized since 1970s in Jilin province released in three different eras(1970s, 1990s and contemporary era) were used as the materials. The effects of long term water deficit on photosynthetic characteristics and dry matter remobilization of maize varieties in different eras were studied by tubular column cultivation experiment with rain shelter. Compared with the control, water deficit reduced the net photosynthetic rate(*P*n) and maximum photochemical efficiency(*F*v/*F*m) of ear leaves of old varieties (1970s and 1990s) more than that of contemporary varieties(2010s). Under long-term water deficit, the dry matter remobilization rate of leave and stem-sheath of contemporary maize varieties was higher than that of the old ones. Relative to the control, the average translocation rate of leaf and stem-sheaths dry matter in 2010s, 1990s and 1970s increased by 48.9%, 47.7% and 33.8%, respectively. In addition, under water deficit, the contribution rate of storage assimilates before anthesis to grain yield decreased with the advancement of the era, while the contribution rate of dry matter accumulation to grain after anthesis increased with the development of the era.

Key words: Maize; Different eras; Long-term water deficit; Photosynthetic characteristic; Dry matter production

录用日期：2019-3-26

基金项目：吉林省农业科技创新工程(CXGC2017ZY015)、国家重点研发计划课题(2016YFD0300103,2017YFD0300603)

作者简介：曹玉军,助理研究员,博士,主要从事玉米生理生态研究。E-mail:caoyujun828@163.com

刘 卓和王永军为本文通讯作者。Email:liuzhuo0726@163.com Email:yjwang2004@126.com

玉米是吉林省的第一大粮食作物，其种植面积、总产量分别占全国的12%和15%，单产、人均占有量连续多年居全国首位，为保障国家粮食安全做出了重要贡献[1]。近年来，吉林省玉米产量大幅度提高，优良品种的更替、栽培技术的改进及生产条件的改善起到了重要作用，其中遗传改良的贡献约占40%[2]。研究玉米品种演进特性有助于更好的选择优良农艺性状，从而促进产量的提高[3]。国内外对不同年代玉米品种农艺和生理性状的变化趋势进行了较多研究。Borrás 和 Otegui[4]研究表明，不同年代玉米品种营养器官同化产物转运能力存在较大差异，与老品种相比，当代玉米品种生育后期叶片干物质转移率低，为提高玉米花后物质生产奠定了基础。新老品种之间生长速率差异达33%左右，这一差别大约80%源于新品种开花后具有较高光能利用效率和碳同化能力及较低的光能耗散比例[5~7]。

玉米是旱地作物中需水量较大且对干旱胁迫影响敏感的作物之一。吉林省属典型的雨养农业区，玉米生产中经常受到季节性不同程度的干旱胁迫，水分是限制该区玉米生长与产量形成的主要环境因素之一，严重制约了玉米产量的进一步提高。关于干旱胁迫时期及胁迫强度对玉米产量、根系特性、叶片衰老、叶片气体交换参数、叶片光系统活性及物质生产等方面的研究前人已有较多报道[8~12]，这些研究大多选择生理特性差别较大的不同基因型进行研究。随着品种更替，不同年代玉米品种对水分亏缺的抗性已经发生了变化[11]，但在长期水分亏缺条件下不同年代品种的光合性能及物质积累与分配的演变特性尚不清楚。因此，本研究比较分析吉林省不同年代玉米品种花后光合特性及物质转运对水分亏缺响应的变化趋势，为玉米抗旱品种选育与抗逆栽培提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

选用20世纪70年代(1970s)、90年代(1990s)和当代(2010s)3个年代吉林省大面积推广应用的9个代表性玉米品种为材料。试验品种由吉林省农业科学院玉米研究所提供(表1)。

表1 试验玉米杂交种推广年代和选育单位

Table 1 Details of the maize hybrids used

品 种 Variety	推广年代 Age of popularization	杂交组合 Hybridized combination	育成单位 Breeding institution
吉单101	1970s	吉63×黄早4	吉林省农业科学院
四单10	1970s	系14×吉63	四平市农业科学院
中单2号	1970s	Mo17×自330	中国农业科学院
吉单180	1990s	吉853×Mo17	吉林省农业科学院
四单19	1990s	444×Mo17	四平市农业科学院
吉单159	1990s	吉846×丹340	吉林省农业科学院
先玉335	2010s	PH6WC×PH4CV	登海先锋种业有限公司
郑单958	2010s	郑58×昌7-2	河南省农业科学院
农华101	2010s	NH60×S121	北京金色农华种业科技有限公司

1.2 试验设计

试验于2018年在人工防雨棚中进行，采用PVC管柱栽培，PVC管柱内径35 cm，柱高60 cm，埋于地下。管栽用土类型为黑土，取自农田30 cm表土层，过筛并与细河沙按2∶1(体积比)混匀，混合后土壤的养分含量，有机质10.4 g/kg、全氮0.9 g/kg、全磷0.3 g/kg、全钾12.4 g/kg、速效磷17.6 mg/kg、速效钾105.3 mg/kg。播种时每个管柱作基肥施入纯N 3.5 g、P_2O_5 3.0 g、K_2O 3.0 g，拔节期追施纯N 3.5 g。

试验设2个水分处理，正常供水处理(CK)，相当于80%~85%的田间持水量；水分亏缺处理(WD)，相当于50%~55%的田间持水量。每天中午用SM300(Delta-T，UK)土壤水分测定仪测定土壤含水量以确定补水量，水分亏缺处理时间从玉米8展叶开始到开花后30 d。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 气体交换参数

从玉米吐丝期开始每10 d于上午9:30~12:00时用Li-6400型便携式光合测定系统(LI-COR，USA)，设定人工光源强度为1600 μmol/(m²·s)，测定穗位叶净光合速率 *Pn*[μmol /(m²·s)]、蒸腾速率 *Tr*[mmol/(m²·s)]、气孔导度 *Gs*[mmol/(m².s)]和细胞间隙

CO_2浓度*Ci*(μmol/mol),每个处理测定3株。

1.3.2　叶绿素荧光动力学参数

用FMS-2脉冲调制式荧光仪(Hansatech,UK)测量叶绿素荧光各参数,测定光适应下稳态荧光(*F*s)、最大荧光(*F*m′)、最小荧光(*F*o′)和暗适应20 min后的初始荧光(*F*o)、最大荧光(*F*m)等荧光参数;参照Demming-Adams等[13]方法,最大光化学效率*F*v/*F*m=(*F*m-*F*o)/Fm,实际量子产量ΦPSII=(*F*m′-*F*s)/Fm′,光化学猝灭系数*q*P=(*F*m′-*F*s)/(*F*m′-*F*o′),非光化学猝灭系数*q*N=(*F*m-*F*m′)/(*F*m-*F*o)。

1.3.3　干物质积累

分别于吐丝期和成熟期取样3株分为叶片、茎鞘(成熟期含穗轴和苞叶)和子粒3个部分。于105℃杀青30 min,75℃烘至恒重时,称干重。

参照戴明宏等[14]方法计算花后营养器官(叶片和茎鞘)干物质转运量、转运率及其对子粒的贡献率。

营养器官干物质转运量=开花期各营养器官干物质积累量-收获期各营养器官干物质积累量;

干物质转运率=营养器官干物质转运量/开花期各营养器官干物质积累量×100%;

转运贡献率=干物质转运量/成熟期子粒干重×100%;

开花后干物质输入子粒量=成熟期子粒干重—开花前营养器官干物质转运量;

开花后干物质积累量对子粒产量的贡献率=开花后同化物输入子粒量/成熟期子粒干重×100%。

1.4　数据处理与分析

采用Microsoft Excel 2010进行数据处理,SPSS 17.0软件进行方差分析,处理间平均数差异的显著性检验用Duncan's法;采用Sigmaplot 14.0软件作图。

2　结果与分析

2.1　水分亏缺对不同年代玉米品种产量及其构成的影响

不同年代玉米品种和水分处理对玉米穗粒数、百粒重、子粒产量均有显著影响,但不同品种、水分处理间的交互作用差异不显著(表2)。在两种水分处理下,玉米穗粒数、百粒重及子粒产量均表现为2010s>1990s>1970s。水分亏缺下,单株产量年代间差异均达显著水平,穗粒数、百粒重2010s、1990s与1970s差异显著;在正常供水条件下,不同年代玉米品种百粒重无显著性差异,单株产量、穗粒数2010s、1990s与1970s差异显著,而2010s和1990s差异不显著。与对照相比,水分亏缺导致不同年代玉米品种的穗粒数、百粒重及子粒产量显著降低,其中1970s、1990s和2010s 3个年代玉米品种的穗粒数、百粒重及单株子粒产量分别比对照降低28.5%、24.2%、19.7%,16.0%、15.0%、2.4%和39.9%、35.6%、21.6%。可见,水分亏缺导致老品种的减产幅度远大于当代品种。

表2　水分亏缺对不同年代玉米品种产量及其构成的影响

Table 2　Effects of water deficit on yield and yield component of maize varieties released in different ages

处 理 Treatment	年 代 Age	穗粒数 Kernel numbers per ear	百粒重(g) 100-kernel weight	单株产量(g) Grain yield per plant
CK	1970s	404 b	32.1 a	129.8 b
	1990s	499 a	32.6 a	162.7 a
	2010s	497 a	33.8 a	167.9 a
WD	1970s	289 b	27.0 b	77.9 c
	1990s	399 a	28.2 b	114.7 b
	2010s	406 a	33.0 a	131.6 a
AVONA				
水分处理		17.58**	28.61**	106.24**
品　种		29.56*	32.65*	65.62*
水分处理×品种		8.09*	11.09*	9.78**

2.2　水分亏缺对不同年代玉米品种光合特性的影响

由图1可知,花后不同年代玉米品种果穗叶净光合速率(*P*n)均随着生育进程的推进而降低,水分亏缺处理各时期*P*n均显著低于对照。与对照相比,水分亏缺使老品种*P*n降低幅度大于当代品种,其中花期至花后40 d,1970s、1990s和2010s玉米品种果穗叶*P*n水分亏缺处理与对照相比各时期平均降幅分别为29.4%、21.8%和16.1%。花后0~20 d,两个

水分处理不同年代玉米品种果穗叶*Pn*差异均不明显。花后30 d,玉米果穗叶*Pn*均表现为2010s>1990s>1970s,其中2010s显著高于1970s,其他年代间差异不显著。花后40 d,正常供水条件下2010s玉米果穗叶*Pn*分别比1990s和1970s提高14.7%和30.1%,而水分亏缺条件下2010s玉米果穗叶*Pn*分别比1990s和1970s提高23.9%和61.9%。可见,在水分亏缺条件下当代玉米品种(2010s)在生育后期与老品种相比具有更高的光合速率。

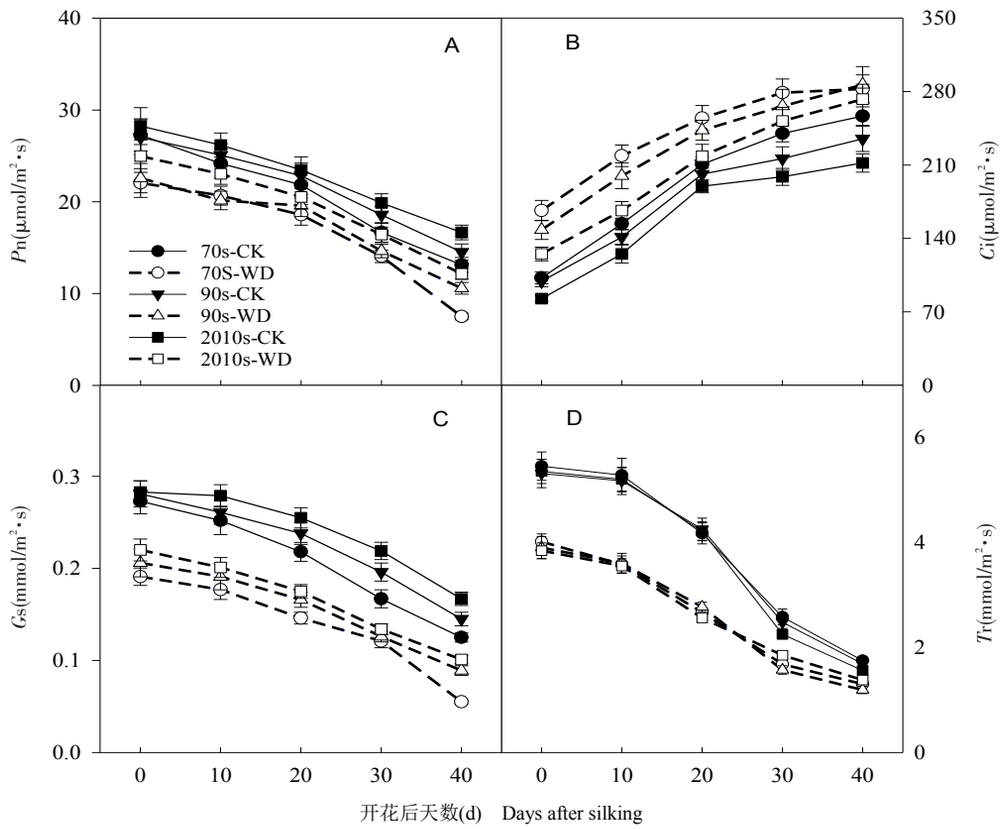

图1 水分亏缺对不同年代玉米品种开花后果穗叶净光合速率(*Pn*)、气孔导度(*Gs*)、胞间CO_2浓度(*Ci*)及蒸腾速率(*Tr*)的影响

Fig.1 Effects of water deficit on post-silking photosynthetic rate(*Pn*), stomatal conductance(*Gs*), intercellular CO_2 concentration(*Ci*) and transpiration rate(*Tr*) of maize varieties released in different eras

水分亏缺处理显著降低了玉米果穗叶气孔导度(*Gs*),在正常供水和水分亏缺下不同年代玉米品种*Gs*与*Pn*变化趋势基本一致,同样随着生育进程的推进而降低,花期与花后40 d相比,正常供水条件下2010s、1990s和1970s玉米果穗叶*Gs*分别降低了40.9%、48.4%和54.2%,而在水分亏缺条件下2010s、1990s和1970s玉米叶片*Gs*分别降低了54.1%、56.8%和71.2%。

胞间CO_2浓度(*Ci*)变化趋势与*Pn*相反,花后一直呈升高的趋势,不同水分处理不同年代间玉米品种果穗叶*Ci*均表现为1970s>1990s>2010s,且水分亏缺处理显著高于对照。从蒸腾速率(*Tr*)变化来看,在两种水分处理下,不同年代玉米品种*Tr*总体表现为1970s最高,2010s最低,但差异不明显,而不同年代玉米品种*Tr*正常供水要显著高于水分亏缺处理。

2.3 干旱胁迫对不同年代玉米品种叶绿素荧光参数的影响

最大光化学效率(*Fv*/*Fm*)反映*ΦPSII*原初最大光能利用效率。花后随着生育进程推进,不同水分处理不同年代玉米品种*Fv*/*Fm*呈下降趋势,且不同时期水分亏缺处理*Fv*/*Fm*均显著低于正常供水(图2),与对照相比,花期至花后40 d,1970s、1990s和2010s玉米品种果穗叶*Fv*/*Fm*水分亏缺处理各时期平均降幅分别为19.4%、13.2%和11.1%。花后0~20 d两种水分处理下不同年代玉米品种*Fv*/*Fm*差异均不显著。正常供水处理下,花后30 d、40 d玉米叶片*Fv*/*Fm*2010s分别比1990s和1970s提高4.4%、9.2%和12.2%和24.9%;水分亏缺下,花后30 d、40 d玉米叶片*Fv*/*Fm* 2010s分别比1990s和1970s提高7.3%、24.4%和13.3%、54.5%。实际量子产额(*ΦPSII*)反映

实际光化学效率。不同年代玉米品种ΦPSII在水分亏缺和正常供水处理下均呈下降趋势,ΦPSII值品种间均表现为2010s>1990s>1970s,且水分亏缺要显著低于正常供水处理,与正常供水相比,水分亏缺使老品种ΦPSII下降幅度大于当代品种,其中花期至花后40 d,1970s、1990s和2010s玉米品种果穗叶ΦPSII水分亏缺处理与对照相比各时期平均降幅分别为12.4%、9.2%和7.1%。光化学猝灭系数(*q*P)表示光化学反应,*q*P变化趋势与ΦPSII基本一致,而非光化学猝灭系数(*q*N)与*q*P变化趋势相反,总体呈上升的变化趋势。不同年代玉米品种*q*N值表现为1970s>1990s>2010s,且水分亏缺处理显著高于对照,从花期至花后40 d水分亏缺处理1970s、1990s和2010s *q*N值增加幅度分别为192.0%、123.5%和110.5%。表明水分亏缺下随着年代的推进,现代玉米品种过剩的光能以热耗散形式少。

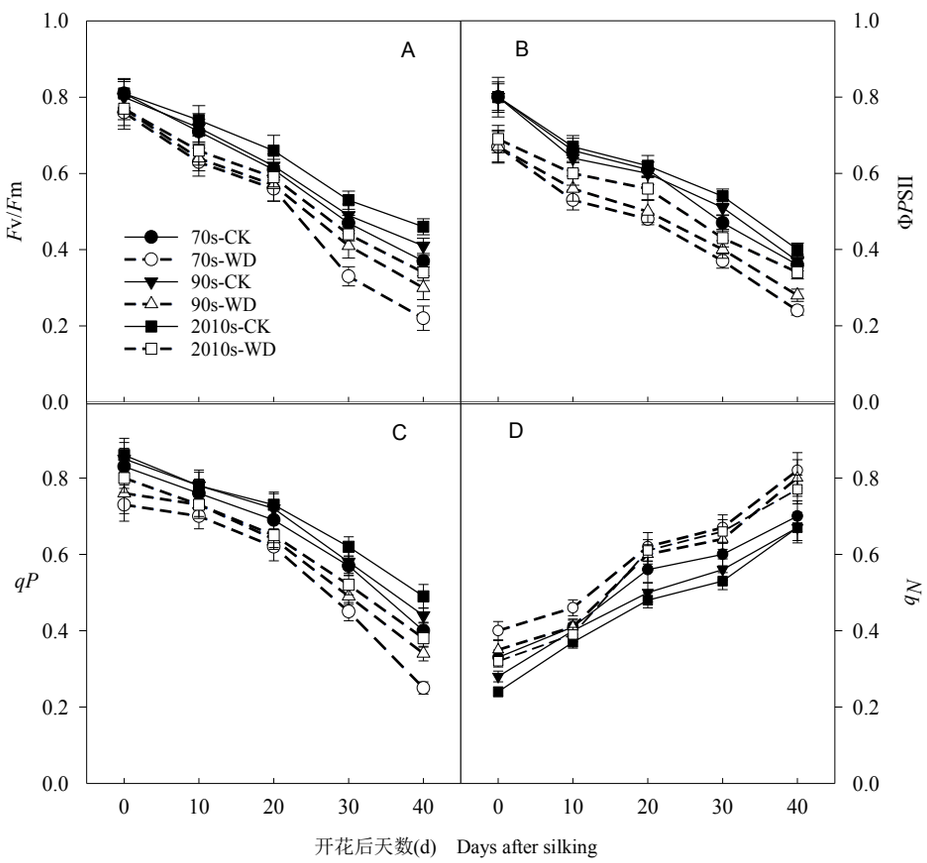

图2　干旱胁迫对不同年代玉米品种开花后果穗叶叶绿素荧光参数的影响

Fig.2　Effects of water deficit on maximal photochemical efficiency(*F*m/*F*v), actual photochemical effective quantum yield(ΦPSII), photochemical quenching(*q*P), and non-photochemical quenching(*q*N) after silking of maize varieties in different ages

表3　水分亏缺对不同年代玉米品种干物质转运量、转运率的影响

Table 3　Effects of water deficit on dry matter translocation and translocation efficiency of maize varieties in different ages　g/株

处理 Treatment	年代 Age	叶片干重 Leaf weight		转运量 Remobilization	转运率(%) Remobilization efficiency	茎秆干重 Stem weight		转运量 Remobilization	转运率(%) Remobilization efficiency
		吐丝期 Silking stage	成熟期 Mature stage			吐丝期 Silking stage	成熟期 Mature stage		
WD	1970s	37.7 a	32.6 a	5.1 c	13.5 b	94.9 a	79.3 a	15.6 b	16.5 b
	1990s	39.5 a	32.3 a	7.2 b	18.2 ab	96.4 a	79.1 a	17.3 a	17.9 a
	2010s	40.2 a	32.1 a	8.1 a	20.2 a	99.5 a	79.7 a	19.8 a	19.9 a
CK	1970s	42.6 a	37.8 a	4.8 b	11.3 a	115.8 a	102.9 a	12.9 b	11.1 b
	1990s	44.8 a	39.5 a	5.3 ab	11.8 a	118.7 a	104.2 a	14.50 a	12.2 ab
	2010s	43.6 a	37.7 a	5.9 a	13.5 a	120.4 a	104.3 a	16.1 a	13.4 a

由表3所示，两种水分处理下玉米营养器官叶片、茎鞘干物质转运量及转运率均随着年代的推进而提高。在正常供水条件下，营养器官叶片、茎鞘干物质平均转运率2010s分别比1990s和1970s提高了11.9%和20.1%；在水分亏缺下，营养器官叶片、茎鞘干物质平均转运率2010s分别比1990s和1970s提高了13.8%和33.5%。与对照相比，干旱明显提高了不同年代玉米品种叶片和茎鞘干物质转运量及转运率，其中1970s、1990s和2010s玉米品种营养器官叶片和茎鞘干物质平均转运率分别比对照提高了33.8%、47.7%和48.9%。

无论是正常供水还是水分亏缺下，玉米花前贮藏同化物的转运量对子粒产量贡献率随着年代的推进而降低。水分亏缺下，玉米花前贮藏同化物的转运量对子粒产量贡献率表现为1990s和2010s显著低于1970s，而在正常供水下，不同年份品种间差异不明显。花后干物质积累量对子粒产量贡献率在正常供水下表现为1990s>2010s>1970s，但年代间差异不显著(表4)。在水分亏缺下，花后干物质积累量对子粒贡献率则随着年代的推进而提高，其中2010s分别比1990s和1970s提高2.7%和7.2%。可见，在水分亏缺下现代玉米品种花后干物质积累量对产量贡献较老品种更具有优势。

表4 水分亏缺下不同年代玉米品种花前营养体物质转运及花后干物质积累对子粒贡献率的影响

Table 4 Effects of pre-anthesis dry matter translocation of vegetative organs and post-silking dry matter accumulation on contribution of grain yield of maize hybrids in different ages under water deficit

g/株

处理 Treatment	年代 Age	开花前营养器官贮藏的同化物 Dry matter accumulated in vegetative organs before silking		开花后干物质积累 Dry matter accumulated after silking	
		向子粒转运量 Amount of translocation into grain	对子粒贡献率(%) Contribution ratio to grain	花后输入子粒产量 Amount of distribution into grain	对子粒贡献率(%) Contribution ratio to grain
WD	1970s	20.7 c	26.6 c	57.18 c	73.4 b
	1990s	26.5 b	23.3 b	78.21 b	76.7 a
	2010s	27.9 a	21.2 b	103.70 a	78.8 a
CK	1970s	17.7 c	13.6 a	112.10 b	86.4 a
	1990s	19.8 b	12.2 a	138.90 a	87.8 a
	2010s	22.0 a	12.1 a	149.90 a	87.9 a

3 结论与讨论

光合作用是作物生物产量形成的基础，光合作用的强弱直接影响到作物的生长发育及最终产量[15]，干旱导致光合作用下降是玉米减产的重要原因[16]。本研究结果表明，水分亏缺处理各时期叶片的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)和蒸腾速率(T_r)均显著低于对照。但不同年代玉米品种叶片光合速率对水分亏缺的响应不同，水分亏缺使老品种P_n降低幅度大于当代品种，其中花期至花后40 d，1970s、1990s和2010s玉米品种果穗叶P_n水分亏缺处理与对照相比各时期平均降幅分别为29.4%、21.8%和16.1%。水分亏缺引起植物光合作用下降的因素有气孔和非气孔因素[17]。Farquhar和Sharkey[18]研究表明，非气孔因素是水分亏缺处理引起不同年代玉米品种光合速率下降的主要原因，而且2010s玉米品种叶片光合作用受非气孔因素限制比1970s和1990s的品种低。PSII光化学活性的降低被认为是限制净光合速率提高的非气孔因素之一[19]。水分亏缺下小麦旗叶光合速率下降的原因主要是叶片的光合机构PSII受到破坏，导致PSII放氧复合体的损伤，光合电子传递链活性和碳同化相关酶活性降低[20~21]。本研究显示，水分亏缺使不同年代玉米品种ΦPSII、qP和F_v/F_m均显著下降，与对照相比，2010s玉米品种的光化学效率比1970s和1990s下降幅度小，其中花期至花后40 d，1970s、1990s和2010s玉米品种果穗叶ΦPSII水分亏缺处理与对照相比各时期平均降幅分别为12.4%、9.2%和7.1%。同时，与对照相比，水分亏缺使qN显著提高，但2010s玉米品种qN低于1970s和1990s，说明2010s玉米品种在水分亏缺下可通过较高的光化学活性和较强的热耗散能力来更多的利用所捕获的光能。

光合产物在营养器官积累及转运的多少是子粒产量形成的重要物质基础，前人研究表明，春玉米产量在很大程度上取决于生育后期的光合产物同化能力，但叶片与茎鞘的干物质转移与分配也是玉米子

粒产量形成的重要因素[22]。营养器官干物质转运与分配不仅受基因型影响、同时也受环境因素如高温、干旱等非生物胁迫影响[23,24]。本试验结果表明,水分亏缺均不同程度提高了不同年代玉米品种营养器官叶片和茎秆干物质转运量与转运率。但水分亏缺下2010s玉米品种花前营养器官干物质转运量及转运率均高于1970s和1990s,这可能是由于2010s玉米品种生育后期叶片光化学活性较高,叶片延缓衰老,从而驱动其自身更多花前营养器官贮藏的同化物向子粒转运。虽然花前营养器官干物质转运量及转运率2010s品种高于1970s和1990s,但花前营养器官贮藏同化物转运量对子粒贡献率1970s、1990s品种要显著高于2010s。但前人研究表明,营养器官干物质量转运到子粒中的比例并非越高越好,因为植株营养器官物质转运与光合性能关系密切,若转运到子粒中的比例过高可能会导致生育后期叶片衰老加快,叶片光合能力下降,子粒灌浆期缩短,产量下降[25],这正好与本试验在水分亏缺下1970s和1990s玉米品种生育后期叶片光合速率降幅比2010s的品种大、最终子粒产量比2010s玉米品种显著降低的研究结果相吻合。玉米子粒产量在很大程度上取决于生育后期光合产物的同化能力。本研究结果显示,无论正常供水还是水分亏缺条件下花后干物质积累量对子粒贡献率与产量结果一致,均表现为2010s>1990s>1970s,但水分亏缺下不同年代玉米品种灌浆期将同化产物运输到子粒中的能力存在差异,老品种子粒产量较多来源于花前营养器官贮藏同化物的转运,而新品种子粒产量则更多来源于花后较强的同化物积累。

在水分亏缺下,现代玉米品种(2010s)与老品种(1970s和1990s)相比,花后具有更强的光化学效率,能够驱动其自身更多花前营养器官贮藏的同化物向子粒转运,同时在水分亏缺下现代玉米品种花后干物质积累量对产量贡献较率老品种更具有优势。

参考文献:

[1] 王　滨. 吉林:世界黄金玉米带上的明珠[J]. 黑龙江粮食,2014(8): 35-36.
Wang B. Jilin: The bright pearl of world golden corn belt[J]. Heilongjiang Grain, 2014(8): 35-36.

[2] 谢振江,李明顺,徐家舜,等. 遗传改良对中国华北不同年代玉米单交种产量的贡献[J]. 中国农业科学,2009,47:781-789.
Xie Z J, Li M S, Xu J S, et al. Contributions of genetic improvement to yields of maize hybrids during different eras in North China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 47: 781-789. (in Chinese)

[3] Tollenaar M, Lee E A. Dissection of physiological processes underlying grain yield in maize by examining genetic improvement and heterosis[J]. Maydica, 2006, 51: 399-408.

[4] Borrás L., Otegui M. E. Maize kernel weight response to post-flowering source-sink ratio[J]. Crop Science, 2001, 41: 1816-1822.

[5] Duvick D N, Cassman K G. Post-Green revolution trends in yield potential of temperate maize in the north- central United States[J]. Crop Science, 1999, 39: 1622-1630.

[6] Tollenaar M, Aguilera. A. Radiation use efficiency of an old and a new maize hybrid[J]. Agronomy Journal, 1992, 84: 536-541.

[7] Ding L, Wang K J, Jiang G M, et al. Post-anthesis changes in photosynthetic traits of maize hybrids released in different years[J]. Field Crops Research, 2005, 93(1): 108-115.

[8] 王　芳,彭云玲,方永丰,等. 花后干旱胁迫对不同持绿型玉米叶片衰老的影响[J]. 水土保持通报,2018,38(04):66-72.
Wang F, Peng Y L, Fang Y F, et al. Effect of different stay-green maize on leaf senescence after flowering under drought stress[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(4): 66-72. (in Chinese)

[9] 李　耕,高辉远,赵　斌,等. 灌浆期干旱胁迫对玉米叶片光系统活性的影响[J]. 作物学报,2009,35(10):1916-1922.
Li G, Gao H Y, Zhao B, et al. Effects of drought stress on activity of photosystems in leaves of maize at grain filling stage[J]. Acta Agronomica Sinica, 2009, 35(10): 1916-1922. (in Chinese)

[10] 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):1884-1890.
Zhang R H, Guo D W, Zhang X H, et al. Effects of drought stress on physiological characteristics and dry matter production in maize silking stage[J]. Acta Agronomica Sinica, 2012, 38(10): 1884-1890. (in Chinese)

[11] 修文雯,田晓东,陈传晓,等. 充足灌水条件下不同年代玉米品种根系性状比较研究[J]. 玉米科学,2013,21(2):78-82,87.
Xiu W W, Tian X D, Chen C X, et al. Comparative study on the characteristics of maize root under the conditions of saturated irrigation in different eras[J]. Journal of Maize Sciences, 2013, 21(2): 78-82, 87. (in Chinese)

[12] 麻雪艳,周广胜. 夏玉米叶片气体交换参数对干旱过程的响应[J]. 生态学报,2018,38(07):2372-2383.
Ma X Y, Zhou G S. Effect of drought on leaf gas exchange in summer maize[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(7): 2372-2383. (in Chinese)

[13] Demmigadams B, Adams W W, Baker D H, et al. Using chlorophyll fluorescence to assess the fraction of absorbed light allocated to thermal dissipation of excess excitation[J]. Physiologia Plantarum, 1996, 98: 253-264.

[14] 戴明宏,陶洪斌,王利纳,等. 不同氮肥管理对春玉米干物质生产分配及转运的影响[J]. 华北农学报,2008,23(1):154-157.
Dai M H, Tao H B, Wang L N, et al. Effects of different nitrogen managements on dry matter accumulation, partition and transportation of spring maize(*Zea mays* L.)[J]. Acta Agriculturae. Boreali-Sinica, 2008, 23(1): 154-157. (in Chinese)

[15] 杨今胜,王永军,张吉旺,等. 三个超高产夏玉米品种的干物质生产及光合特性[J]. 作物学报,2011,37(2):355-361.
Yang J S, Wang Y J, Zhang J W, et al. Dry matter production and photosynthesis characteristics of three hybrids of maize(*Zea mays*

L.) with super-high-yielding potential[J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(2): 355-361. (in Chinese)

[16] 陈 军,戴俊英. 干旱对不同耐性玉米品种光合作用及产量的影响[J]. 作物学报,1996,22(6):757-762.
Chen J, Dai J Y. Effect of drought on photosynthesis and grain yield of corn hybrids with different drought tolerance[J]. Acta Agronomica Sinica, 1996, 22(6): 757-762. (in Chinese)

[17] Baker N R, Rosenqvist E. Application of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: an examination of future possibilities[J]. Journal of Experimental Botany, 2004, 55(403): 1607-1621.

[18] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. Annu Rev Plant Physiol, 1982, 33: 317-345.

[19] Aroca R, Irigoyen J J, Sánchez-Díaz M. Drought enhances maize chilling tolerance: II. Photosynthetic traits and protective mechanisms against oxidative stress[J]. Physiologia Plantarum, 2003, 117: 540-549.

[20] Ashraf M, Harris P J C. Photosynthesis under stressful environments: An overview[J]. Photosynthetica, 2013, 51(2): 163-190.

[21] Efeoğlu B, Ekmekçi Y, Çiçek N. Physiological responses of three maize cultivars to drought stress and recovery[J]. South African Journal of Botany, 2009, 75(1): 34-42.

[22] 黄智鸿,王思远,包 岩,等. 超高产玉米品种干物质积累与分配特点的研究[J]. 玉米科学,2007,15(3):95-98.
Huang Z H, Wang S Y, Bao Y, et al. Studies on dry matter accumulation and distributive characteristic in super high-yield maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2007, 15(3): 95-98. (in Chinese)

[23] Zhang Y H, Sun N N, Hong J P, et al. Effect of source-sink manipulation on photosynthetic characteristics of flag leaf and the remobilization of dry mass and nitrogen in vegetative organs of wheat[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2014, 13(8): 1680-1690.

[24] Yang J C, Zhang J H, Wang Z Q, et al. Water deficit induced senescence and its relationship to the remobilization of pre-stored carbon in wheat during grain filling[J]. Agronomy Journal, 2001, 93: 196-206.

[25] 赵 辉,戴廷波,姜 东,等. 高温下干旱和渍水对冬小麦花后旗叶光合特性和物质转运的影响[J]. 应用生态学报,2007,18(2):333-338.
Zhao H, Dai T B, Jiang D, et al. Effects of drought and water logging on flag leaf post-anthesis photosynthetic characteristics and assimilates translocation in winter wheat under high temperature [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(2): 333-338. (in Chinese)

(责任编辑:栾天宇)