

化学联合调控对玉米光合特性及产量的影响

朱元浩,杨培岭,廖人宽,任树梅

(中国农业大学水利与土木工程学院,北京 100083)

摘要:在水分胁迫条件下,结合有机-无机复合型土壤保水剂(SAP)与膜反射型抗蒸腾剂黄腐酸(FA)两种化学制剂,探究联合调控与单一调控下春玉米光合作用的响应规律及其产量驱动机理。试验采用随机区组设计,设置了 CK,SAP,SAP+FA,FA 4 个处理。结果表明: SAP 是调蓄土壤含水量的控制因素,较 CK 增加 12% 以上;化控制剂有其有效作用期,SAP 作用于整个玉米生育期,而 FA 在拔节中后期对光合的促进最明显;SAP+FA 处理比 CK 产量增加 21.3%,比 FA 和 SAP 分别增加 9.3%、11.7%,与光合强度呈现出一致性。

关键词: SAP;黄腐酸(FA);光合特性;水分胁迫;玉米;产量

中图分类号: S513.01; S274 **文献标志码:** A

Maize photosynthetic characteristics and yield under chemical integrated regulation

ZHU Yuan-hao, YANG Pei-ling, LIAO Ren-kuan, REN Shu-mei

(College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Under water stress condition, the response rule of spring maize photosynthesis and yield-driven mechanism was explored with chemical integrated or single regulation technology, combined Superabsorbent polymer (SAP) and Fulvic acid (FA). Randomized block design was set as CK, SAP, SAP+FA, and FA, and each group had three replications. The results indicated that SAP was the major factor to regulate soil moisture content, which had been enhanced by 12% from CK. The chemical reagents had their specific effective durations. SAP played a big role during the entire growth period of maize, while FA promoted photosynthesis mostly during the middle and late jointing stage. SAP+FA ultimately resulted in yield increases of 21.3%, 9.3% and 11.7% compared with CK, FA and SAP, respectively, showing an agreement with the photosynthetic efficiency.

Keywords: SAP; fulvic acid; photosynthetic characteristics; water stress; maize; yield

旱地农业的发展对保障我国的粮食安全具有重大的战略意义,而水分胁迫和土壤贫瘠等因素却严重制约其发展^[1]。因此,在利用有限的水资源和肥力条件下,探究旱地农业的生产模式,实现水肥利用效率最大化,并进一步转化为经济效益和环境效益,将对我国农业发展具有重大推动作用。

化学调控是一项基于水肥因子的重要旱地农业技术^[2]。它通过化学制剂作用于土壤与作物本身,实现保水、保肥、增产等目的,提升旱地农业活力。研究表明^[3-5],通过土壤保水剂、黄腐酸(FA)等化学制剂的合理应用,可以起到有效增加水肥入渗和土壤保蓄能力、降低作物奢侈蒸腾、促进作物生理生长等效用。

然而目前的化控研究主要集中在单一化学调控作用效应的探究^[6-8],探究化学联合调控效应的研究较少^[9-10]。而光合作用作为决定作物产量的关键因子^[11-13],二者的关系也一直是研究热点,因此本文以春玉米为试验对象,结合 SAP 与 FA 两种化学制剂,对照单一调控与联合调控下光合作用的响应,从玉米光合特性变化的角度讨论化学调控增产的机理,论证化学联合调控的科学性。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地点位于北京通州区中国农业大学试验站,试验期间降水量 285.5 mm,年平均气温 14.6℃,

收稿日期:2015-02-15
基金项目:国家自然科学基金项目(51379210);北京市水土保持工作站项目“生态清洁小流域面源污染防治关键技术及集成模式研究”
作者简介:朱元浩(1991—),男,浙江金华人,硕士研究生,研究方向为化学调控对植物的作用机理。E-mail: 16407311@qq.com。
通信作者:杨培岭(1958—),男,教授,主要从事农业水土资源、节水灌溉理论与技术研究。E-mail: yangpeiling@126.com。

土壤质地为壤土,土壤基本物理性质见表 1。

表 1 0~100 cm 土层土壤物理性质
Table 1 Physical properties of 0~100 cm soil layer

土壤深度/cm Soil depth	饱和含水量/% Saturation capacity	田间持水量/% Field capacity	干容重/(g·cm ⁻³) Bulk density	孔隙度/% Porosity
0~20	27.80	21.23	1.45	41.76
20~40	29.89	23.21	1.64	41.47
40~80	28.64	20.10	1.57	44.99
80~100	28.81	15.75	1.58	45.48

1.2 试验材料

供试玉米品种为京科 25;SAP 为有机-无机复合型土壤保水剂(山东东营华业新材料有限公司提供),淡黄色固体颗,粒径 1.6~4.0 mm;FA 为膜反射型抗蒸腾剂(新疆汇通旱地龙腐植酸有限责任公司提供),褐色液体。

1.3 试验设计

试验采用随机区组设计,设置 4 个处理,分别为 CK,SAP,SAP+FA,FA,每个处理设置 3 个小区重复,小区面积 15m²(5 m×3 m)。玉米种植株距为 30 cm,行距为 60 cm,即每小区种植 18×6 株玉米,不同处理间设置 1 m 宽隔离带。SAP 施用方式为在玉米播种前挖沟,与土混合埋施,施用深度 25 cm,施用浓度 90 kg·hm⁻²。FA 施用方式为叶面喷施,施用浓度为 400 倍液,0.075 kg·m⁻²(往期试验的最优配比),分别于 6 月 5 日(拔节期),7 月 9 日(抽雄期),8 月 1 日(灌浆期)喷施 3 次。施肥方式按照当地种植习惯进行。玉米于 4 月 30 日播种,5 月 9 日出苗,全生育期内无灌水。

1.4 测定项目及方法

(1)土壤含水率。土壤含水率的测定采用烘干法,测定深度为 0~10、10~20、20~30、30~40、40~60、60~80、80~100 cm,共 7 层,每小区随机选取 3 个点,最后同一处理取均值。取样日期为 5 月 25 日(苗期)、6 月 7 日(拔节期)、6 月 14 日、6 月 21 日、7 月 10 日(抽雄期)、8 月 3 日(灌浆期),共 6 次。

(2)光合特性。玉米的光合特性参数,包括气孔导度、光合速率、蒸腾速率等,采用 CI-340 手持式光合测量系统进行测定。测定日期为 6 月 7 日(拔节初期)、6 月 17 日(拔节中期)、6 月 27 日(拔节后期)、7 月 10 日(抽雄期)、8 月 3 日(灌浆期),共 5 次,每次测量每小区随机选择 5 个样本,每个样本重复测量 3 次,同一处理取均值,以上日期均为典型晴朗日,测定时间为 8:00—18:00,间隔 2 h 测定 1 次。

(3)玉米生理指标。参照传统方法对玉米的生理指标进行测定,每小区随机选择 5 个样本进行测量,包括各生育期内的株高、株径、干物质量等。产量计算方法为:穗粒数×穗数×百粒重÷1.14,种植密度为 52 500 株·hm⁻²,按含水率 14%折算产量。

1.5 数据分析

数据采用 Excel 和 SPSS 17.0 进行处理分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理下土壤含水率的分布规律

如图 1 所示,所有处理全生育期的平均含水率在 12.8%~7.9%之内,根据测定的不同深度的田间持水量,土壤含水率最大为 57.5%田间持水量,因此所有处理处在中轻度的水分胁迫条件下。对于 SAP 的两个处理,在 10~30 cm 深度土壤含水率高于 CK,且差异呈极显著(表 2),这是由于 SAP 施用于 25cm 深的土层中,对于降水有着蓄留的作用,在一定深度范围内能够调节土壤含水量。对于 40 cm 以下的土壤,各处理并未表现出差异性,而下层土壤为砂质土壤,因此含水率较低。而从 0~40 cm 的根系层土壤含水率看,SAP 与 SAP+FA 的土壤含水率明显高于 CK,FA 却并未呈现明显差异(表 3)。在全生育期,施用 SAP 的处理在 0~40 cm 土层土壤含水率更加稳定。

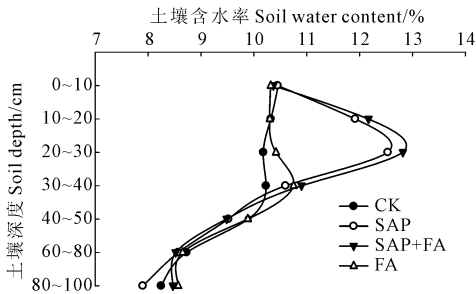


图 1 生育期内不同土壤深度的平均土壤含水率
Fig.1 Average soil water content in different soil depths during the growth period

表 2 土壤含水率显著性检验
Table 2 Significance test of soil water content

处理间比较 Comparison of treatments	土壤深度 Soil depth/cm						
	0 ~ 10	10 ~ 20	20 ~ 30	30 ~ 40	40 ~ 60	60 ~ 80	80 ~ 100
CK - SAP	1.000	0.000	0.000	0.588	0.330	0.767	0.469
CK - SAP + FA	0.847	0.000	0.000	0.329	0.291	0.683	0.652
CK - FA	0.758	0.894	0.619	0.447	0.966	0.911	0.511
SAP - SAP + FA	0.847	0.323	0.547	0.657	0.932	0.911	0.246
SAP - FA	0.758	0.000	0.000	0.824	0.351	0.853	0.175
SAP + FA - FA	0.908	0.000	0.000	0.824	0.310	0.767	0.835

表 3 各生育期 0 ~ 40 cm 土层平均土壤含水率/%
Table 3 Average water content at different growth stages in 0 ~ 40 cm soil layer

处理 Treatments	日期 Date(M - d)						均值 Average
	05 - 25	06 - 07	06 - 14	06 - 21	07 - 10	08 - 03	
CK	9.1b	11.1a	9.7b	10.8c	10.8b	10.3c	10.3b
SAP	11.4a	11.0a	11.8a	11.8b	11.5a	10.9b	11.4a
SAP + FA	11.4a	11.4a	11.7a	12.3a	11.5a	11.3a	11.6a
FA	9.4b	11.3a	10.1b	10.8c	11.1b	10.0c	10.4b

注:同一列中不同字母代表显著差异达到 0.05 水平,下同。
Note: In the same column, different letters represented significant difference at the 0.05 level, and the same below.

2.2 不同处理下玉米气孔导度的变化规律

如图 2 所示,所有处理气孔导度有明显的日变化过程,且均在 12:00 左右达到峰值。从整个玉米的生长阶段看,各个处理在拔节初期、中期,气孔导度的峰值较小,最高为 0.18 mol·m⁻²·s⁻¹,而到后期,气孔导度的峰值最高达到了 0.23 mol·m⁻²·s⁻¹,这可能是由于气孔的发育带来的差异,因此各个处理呈现出一致性。在每个生育阶段,不同处理对气孔导度的影响呈现差异性。从峰值看,基本呈现 SAP> SAP + FA> CK> FA 的规律(7 月 10 日例外, SAP> CK> SAP + FA> FA,可能由 SAP + FA 处理的保水剂未充分作用于根系,未发挥保水效用导致)。

在不同时期处理间峰值的差异大小并不一致(表 4),说明不同化控制剂可能具有不同的作用有效期。SAP + FA 处理与 CK 处理气孔导度峰值并未呈现显著性差异,而 SAP 和 FA 处理在几个阶段呈现显著性差异。从整个生育阶段看,各处理对气孔导度峰值的影响在拔节初期和灌浆期呈显著性差异的较多,而在拔节中后期和抽雄期差异不显著。从处理的日变化情况看,化学调控处理的作用在 8:00—14:00 之间更加明显,有较明显的规律性,而到后阶段,尤其是 16:00 以后,处理间的气孔变化情况较复杂,规律性不强,这可能由于玉米在白天前阶段的生理活动较强烈,使得化学调控的作用明显。

表 4 气孔导度峰值显著性检验
Table 4 Significance test of peak stomatal conductance

处理间比较 Comparison of treatments	日期 Date(M - d)				
	06 - 07	06 - 12	06 - 17	07 - 10	08 - 03
CK - SAP	0.038	0.230	0.024	0.616	0.063
CK - SAP + FA	0.066	0.472	0.164	0.101	0.213
CK - FA	0.038	0.419	0.301	0.062	0.423
SAP - SAP + FA	0.737	0.600	0.252	0.219	0.442
SAP - FA	0.001	0.665	0.005	0.138	0.017
SAP + FA - FA	0.002	0.925	0.030	0.761	0.059

2.3 不同处理下玉米光合速率的变化规律

如图 3 所示,CK 在不同时期净光合速率均在 12:00 左右达到峰值,而另 3 个处理除了在 7 月 10

日与 CK 一样在 12:00 左右达到峰值外,其他阶段均延后了 Pn 峰值达到的时间,在 14:00 左右达到。峰值在整个生育阶段有着先增大再减小的趋势,这可

能与不同阶段的生理活动强弱有关。各个时期,净光合速率峰值最大的处理为 SAP + FA,最小为 CK,且 CK 与 SAP + FA 在不同生育阶段峰值均呈显著性差异(表 5)。在拔节前期、中期、后期和抽雄期、灌浆期, SAP + FA 比 CK 分别高出 35.6%、24.3%、18.1%、16.5%、23.7%。其他处理间只在几个阶段

呈显著差异或均无显著差异。从 P_n 的日变化过程看,化学调控处理下,延长了玉米强光合作用的时间。各个阶段,处理间出现明显差异的往往是在 10:00 以后,尤其是在 12:00—16:00 之间,而之前由于温度、光照强度等因素较弱,并未出现明显差异。

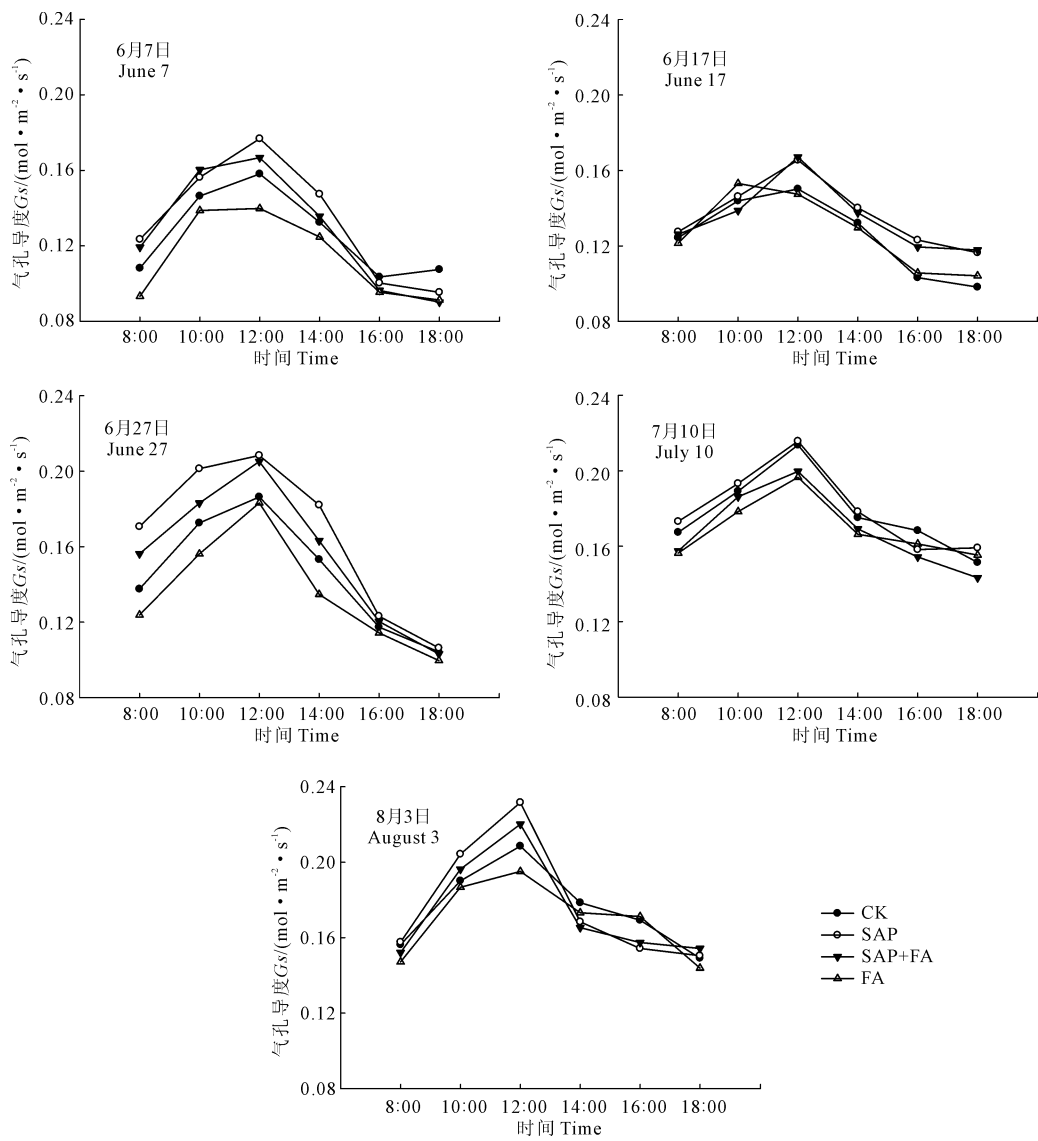


图 2 玉米各生育期的气孔导度日变化情况

Fig. 2 Daily variation of stomatal conductivity at different growth stages of maize

表 5 净光合速率峰值显著性检验

Table 5 Significance test of peak net photosynthetic rates

处理间比较 Comparison of treatments	日期 Date(M - d)				
	06 - 07	06 - 12	06 - 17	07 - 10	08 - 03
CK - SAP	0.027	0.015	0.503	0.105	0.100
CK - SAP + FA	0.015	0.001	0.017	0.017	0.029
CK - FA	0.330	0.073	0.292	0.611	0.208
SAP - SAP + FA	0.699	0.039	0.052	0.274	0.455
SAP - FA	0.136	0.344	0.680	0.230	0.636
SAP + FA - FA	0.074	0.008	0.100	0.039	0.238

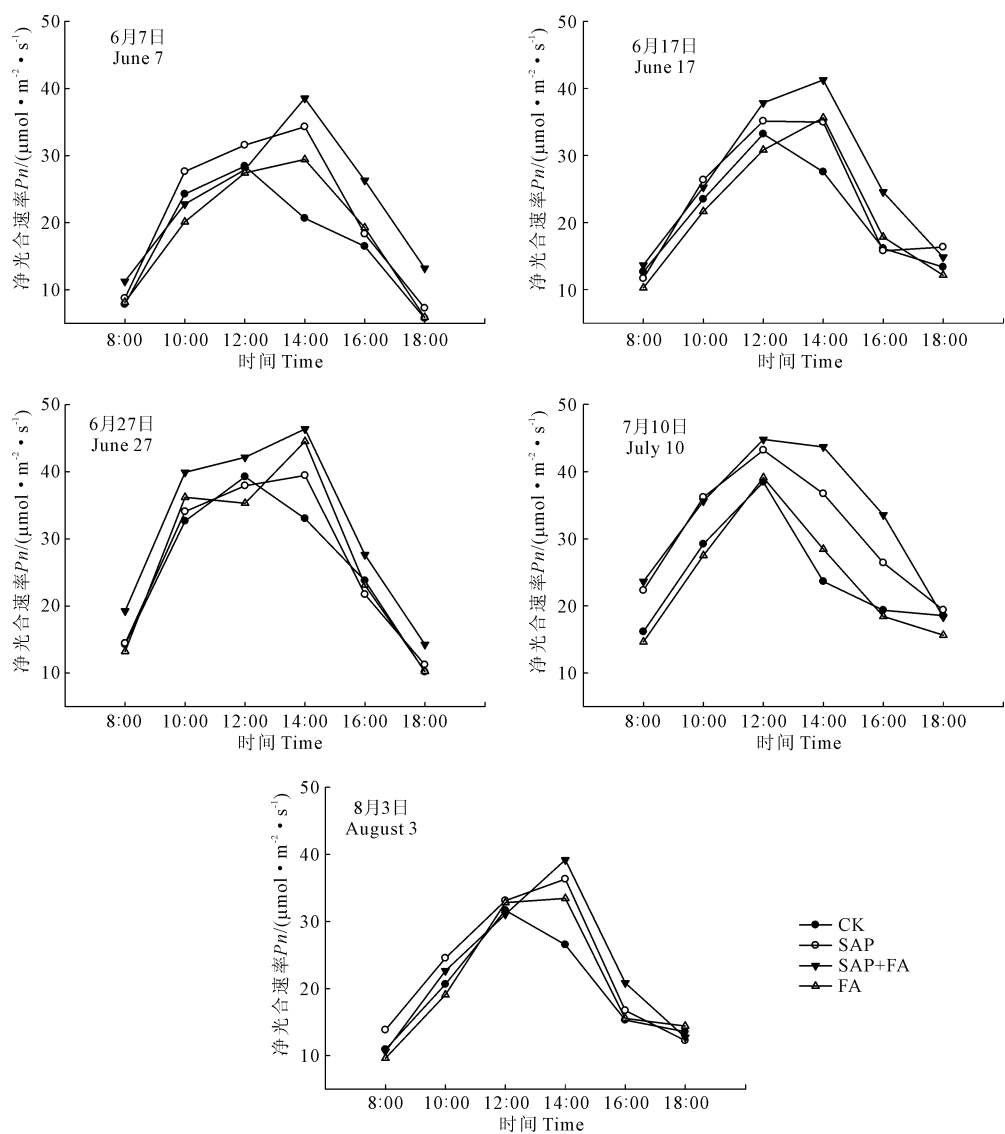


图 3 玉米各生育期净光合速率日变化情况

Fig.3 Daily variation of net photosynthetic rate at different growth stages of maize

2.4 不同处理下玉米蒸腾速率的变化规律

蒸腾速率的变化情况较复杂,在玉米不同生育阶段都呈现出不同的特点(图 4)。在拔节初期、中期各个处理均在 12:00 左右达到峰,分别呈现 $SAP > CK > SAP + FA > FA$ 和 $SAP > SAP + FA > CK > FA$ 。但 6 月 7 日在 14:00 左右,各处理间呈现出显著差异,FA 最小,SAP、SAP + FA、CK 3 个处理分别比 FA 高出 28.9%、15.8%、4.5%。在拔节后期,SAP 与 SAP + FA 处理则在 14:00 才到达峰值,且各处理自 12:00 开始,蒸腾速率均维持在较高的水平,这可能与温度有关。在灌浆期,各个处理的差异是最明显的,基本均呈现显著差异(表 6)。首先 CK、FA 处理在 12:00 左右达到峰值,而 SAP、SAP + FA 处理则在 14:00 左右达到峰值,但两个处理在 12:00 左右都已经非常接近峰值,在 14:00,4 个处理间的差异是最

大的, $SAP > SAP + FA > CK > FA$, 分别比 FA 高出 82.5%、61.9%、20.9%。从日变化曲线看,在不同生育阶段,蒸腾速率基本呈现 SAP 最大,FA 最小,而 SAP + FA 与 CK 的大小随着生育阶段不同而呈现不同的规律,但是呈显著性差异的并不多,灌浆期是化控影响蒸腾速率最显著的时期。

2.5 不同处理下玉米农艺性状的变化规律

玉米农艺性状见表 7。各个处理产量与 CK 相比均有增加,增加幅度 $SAP + FA > FA > SAP$,分别为 21.3%、10.9%、8.6%,且差异均为显著。百粒重的规律与产量一致。穗粒数虽然较 CK 均有所增加,但差异不显著。而株高、株径、穗长、穗粗 4 项指标间变化规律并不一致。各处理与 CK 相比,株高均有所增加,但只有 FA 与 CK 呈显著差异。株径间差异较明显,SAP + FA、SAP、FA 分别比对照增加 10.

6%、4.4%、4.3%。FA 处理的穗长显著低于其他三组处理,而三组之间无显著差异,穗粗则是 SAP + FA

与 FA 处理显著高于 CK,SAP 处理,但两两之间均无显著差异。

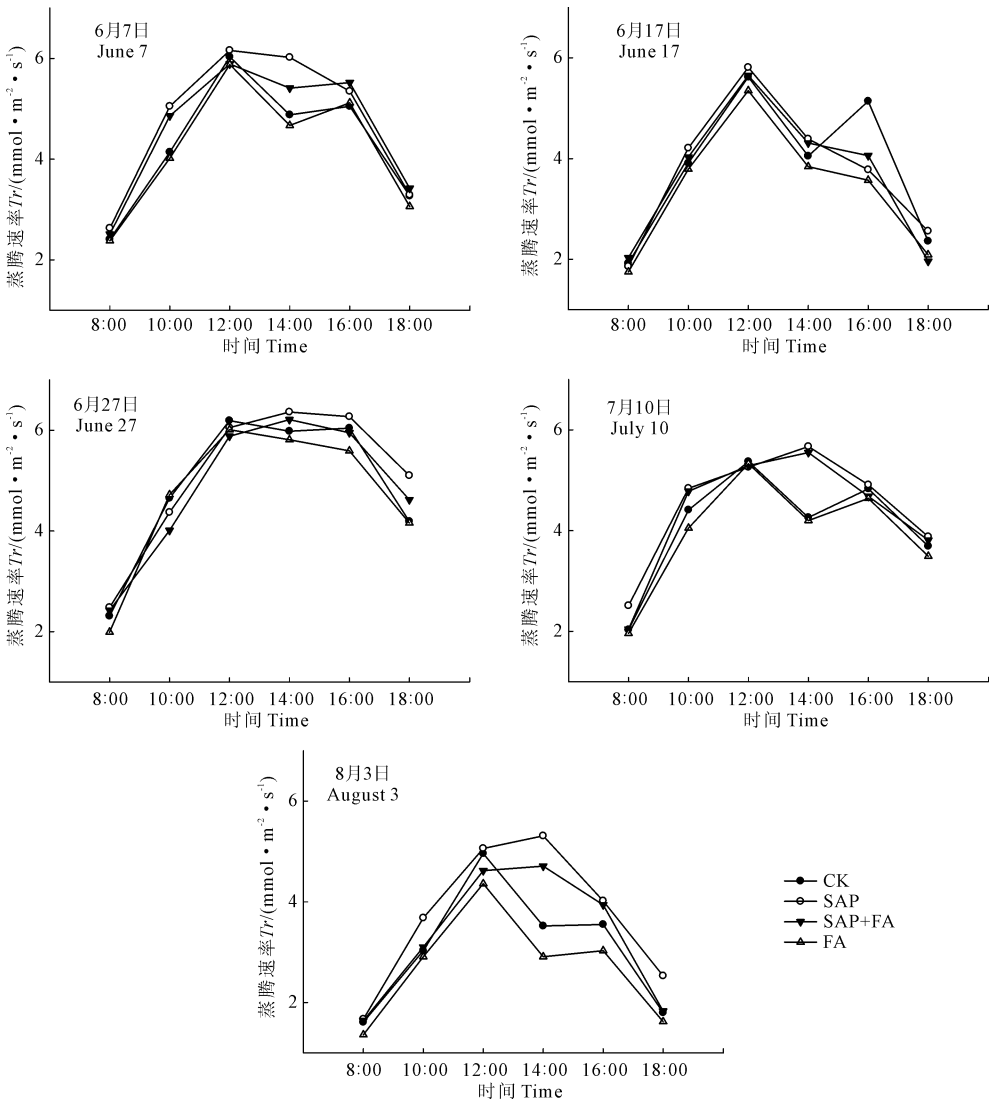


图 4 玉米各生育期蒸腾速率日变化

Fig.4 Daily variation of transpiration rate at different growth stages of maize

表 6 蒸腾速率峰值显著性检验

处理间比较 Comparison of treatments	日期 Date(M - d)				
	06 - 07	06 - 12	06 - 17	07 - 10	08 - 03
CK - SAP	0.540	0.401	0.153	0.122	0.026
CK - SAP + FA	0.044	0.211	0.123	0.667	0.254
CK - FA	0.156	0.069	0.104	0.778	0.003
SAP - SAP + FA	0.017	0.650	0.889	0.062	0.004
SAP - FA	0.058	0.259	0.805	0.078	0.000
SAP + FA - FA	0.438	0.478	0.914	0.880	0.020

3 讨 论

土壤水分条件是影响作物生理活动的重要因

子^[14-16],当受到水分胁迫时,各项生理指标,如气孔阻力、叶绿素含量等都会产生相应的变化,进一步导致作物的光合特性产生变化。本试验的各个处理

表 7 玉米农艺性状

Table 7 Agronomic characters of maize

处理 Treatments	株高/cm Height	株径/cm Diameter	穗长/cm Ear length	穗粗/cm Ear width	百粒重/g 100-grain weight	穗粒数 Grains	产量/(kg·hm ⁻²) Yield
CK	324.30b	2.359c	22.66a	5.248b	33.16c	551a	8415.34c
SAP	327.00b	2.462b	22.42a	5.360b	35.00b	567a	9139.14b
SAP + FA	333.50b	2.608a	21.59a	5.668a	37.65a	589a	10211.81a
FA	341.00a	2.461b	20.88b	5.625a	35.39b	573a	9339.21b

在全生育期土壤含水率维持在 50% 田间持水量左右,处于中轻度水分胁迫状态。在化学调控下,不同处理在不同时期光合特性参数呈现出一定的规律性,其中包含阶段特性,也具备内在联系。

在水分胁迫条件下,化学调控并未改变气孔开度到达峰值的时间,但峰值呈现不同程度差异,在拔节初期差异基本显著。总体来看,施用了保水剂的两个处理气孔导度均要大于未施用保水剂的处理,这说明保水剂改善了土壤含水状况,一定程度上缓解了水分胁迫状态。而 FA 处理始终是气孔开度最小的,这也从源头揭示了抗蒸腾的机理。但对比 SAP+ FA 与 CK,始终是 SAP+ FA 的气孔导度更大,这可能说明 SAP 对气孔导度的影响相对 FA 更大,尤其在拔节中期和后期,这两个阶段 SAP 与 SAP+ FA,FA 与 CK 分别两两接近。在本试验中,FA 对气孔导度作用最明显的时期是拔节初期与灌浆期,而保水剂的效用在全生育期都较明显,这也说明保水剂是从源头改变土壤的含水状况,而 FA 只能通过调节气孔减缓水分耗用,并不能改变整个生理变化趋势。

而对于光合速率,化学调控处理推迟了峰值出现的时间,反而在气孔导度较低的 14:00 左右达到峰值,这一规律除了在抽雄期未满足外,在整个玉米关键生育期均满足。研究表明,气孔导度降低,使得参与光合作用的 CO₂ 减少,会降低光合速率^[17],但在本试验中,并不符合。这说明化学调控优化了光合作用的某一条件,弥补了气孔导度降低对光合的影响,并达到促进的效果。光合作用的影响因子有温度、水分、CO₂、酶活性、矿质元素、光质等^[18-20],在本试验中,由于保水保肥的效用,化学调控很可能优化了水分、矿质元素以及酶活性等条件,使得光合作用强度得到显著提升,对后期玉米产量的增长起到了决定性的作用。从处理间的作用看,SAP+ FA 处理始终保持光合速率峰值的最大值,且对照 CK 在全生育期呈显著差异,而单一的 SAP 或者 FA 处理仅在某几个阶段呈现显著性差异,这说明化学联合调控的优越性。在拔节初期、灌浆期和抽雄期,

SAP 处理的峰值大于 FA 处理,在拔节中期和后期,FA 处理大于 SAP 处理,说明对于光合速率来说,两者的有效作用时间也不一致。总体来看,SAP 处理与 FA 处理相比在整个玉米生育期对光合作用的影响更明显持久,进一步说明保水剂对玉米水肥利用的有效调节,保证玉米光合作用的进行,而 FA 对酶活性的提高^[21]也同时提升了光合作用,这表明化学联合调控的科学性与合理性。

玉米的蒸腾速率与气孔导度具有较大相关性,基本在 12:00 左右到达峰值。施用保水剂的处理由于保持了较高的土壤含水率而保持较高的蒸腾速率,而施用 FA 的处理由于气孔开度的减小,会在一定程度上降低蒸腾速率,因此呈现 SAP> SAP+ FA> CK> FA 的规律。相对气孔导度和光合速率的处理间差异,蒸腾速率的处理间差异较小,多数未呈显著差异,只在灌浆期差异显著,可能是由于各处理均处于相同的环境中,相对湿度这个蒸腾速率的决定因素差异较小,导致组间差异不大。在耗水差异不大的情况下,化学联合调控提高了水分的利用效率,使得玉米的生理活动保持较活跃状态,有利于光合作用的进行。

综上所述,化学联合调控对玉米光合特性的影响直接影响玉米产量,SAP+ FA、FA、SAP 比 CK 产量分别增加 21.3%、10.9%、8.6%,差异均显著,且 SAP+ FA 处理比 FA 和 SAP 处理产量分别增加了 9.3%和 11.7%,差异也均显著。这表明了化学联合调控的优越性和科学性,它综合了单一化学调控的优势,在干旱条件下能够显著优化土壤水肥条件和植物的生理活性,在达到节水保肥的调节目标后,实现作物增产,取得经济效益和环境效益。

4 结 论

1) 在土壤水分胁迫条件下,SAP 对调节土壤的水分条件有显著作用,较 CK 增加 12% 以上,而 FA 在叶面喷施的方式下则对土壤水分无明显影响,因此化学联合调控在土壤水分的调节上主要以 SAP 为决定因素。

2) 不同的化控制剂具有其最有效的作用时间。在本试验中,保水剂的有效作用时间是较持久的,对整个玉米生育期都起到调控作用;而 FA 的作用时间较短,通常只有 20~30 d,且不同生育期的作用效果也不同,仅就光合作用而言,FA 最有效的时间为拔节中后期。

3) 在本试验 SAP 施用浓度 90 kg·hm⁻²,FA400 倍液,0.075 kg·m⁻²条件下,化学调控处理均出现了增产,其中,化学联合调控下,由于最大化提高了光合效率,增产幅度最高,较 CK 增产 21.3%。

参 考 文 献:

[1] 罗志成.北方旱地农业研究的进展与思考[J].干旱地区农业研究,1994,12(1):4-13.

[2] 杨培岭,廖人宽,任树梅,等.化学调控技术在旱地水肥利用中的应用进展[J].农业机械学报,2013,44(6):100-109.

[3] 杨永辉,吴普特,武继承,等.复水前后冬小麦光合生理特征对保水剂用量的响应[J].农业机械学报,2011,42(7):116-123.

[4] 李茂松,李 森,张述义,等.灌浆期喷施新型 FA 抗蒸腾剂对冬小麦的生理调节作用研究[J].中国农业科学,2005,38(4):703-708.

[5] 韩玉国,任树梅,李云开,等.黄腐酸(FA)旱地龙在苹果节水生产中的应用效果研究[J].农业工程学报,2004,20(6):93-97.

[6] 迟永刚,黄占斌,李茂松.保水剂与不同化学材料配合对玉米生理特性的影响[J].干旱地区农业研究,2005,23(6):136-140.

[7] 于 健,雷廷武,Shainberg I,等.不同 PAM 施用方法对土壤入渗和侵蚀的影响[J].农业工程学报,2010,26(7):38-44.

[8] 师长海,孔少华,翟红梅,等.喷施抗蒸腾剂对冬小麦旗叶蒸腾效率的影响[J].中国生态农业学报,2011,19(5):1091-1095.

[9] 杜社妮,白岗栓,赵世伟,等.沃特和 PAM 保水剂对土壤水分及马铃薯生长的影响研究[J].农业工程学报,2007,23(8):72-79.

[10] 廖人宽,杨培岭,任树梅,等.PAM 和 SAP 防治库区坡地肥料污染试验[J].农业机械学报,2013,44(7):113-120.

[11] 李少昆.关于光合速率与作物产量关系的讨论(综述)[J].石河子大学学报(自然科学版),1998,(S1):117-126.

[12] 许大全.光合速率、光合效率与作物产量[J].生物学通报,1999,34(8):11-13.

[13] 薛青武,上官周平.旱地作物的光合作用与产量[J].山西农业科学,1990,(11):27-30.

[14] 康绍忠,史文娟,胡笑涛.调亏灌溉对玉米生理指标及水分生产效率的研究[J].农业工程学报,1998,14(4):88-92.

[15] 房全孝,陈雨海.冬小麦节水灌溉的生理生态基础研究进展[J].干旱地区农业研究,2003,21(1):21-26.

[16] Alderfasi A A, Nielsen D C. Use of crop water stress index for monitoring water status and scheduling irrigation wheat[J]. Agricultural Water Management, 2001,46(3):241-251.

[17] Hirasawa T, Hsiao T C. Some characteristics of reduced lead photosynthesis at midday in maize growing in the field[J]. Field Crops Research, 1999,62:53-62.

[18] 孙 猛,吕德国,刘威生.杏属植物光合作用研究进展[J].果树学报,2009,26(6):878-885.

[19] 郑 洁,胡美君,郭延平.光质对植物光合作用的调控及其机理[J].应用生态学报,2008,19(7):1619-1624.

[20] 许大全. Progress in photosynthesis research: from molecular mechanisms to green revolution[J].植物生理学报,2001,27(2):97-108.

[21] 邱孟柯,回振龙,黄晓鹏,等.黄腐酸对雾培马铃薯幼苗抗旱性的影响[J].干旱地区农业研究,2013,31(3):155-161.

(上接第 98 页)

[14] 王彩绒,田霄鸿,李生秀,等.沟垄覆膜集雨栽培对冬小麦水分利用效率及产量的影响[J].中国农业科学,2004,37(2):208-214.

[15] 李小雁,张瑞玲.旱作农田沟垄微型集雨结合覆盖玉米种植试验研究[J].水土保持学报,2005,19(2):45-52.

[16] 姚晓晔,汪德水,程宪国,等.不同施肥水平下旱地冬小麦水分效应研究[J].土壤肥料,1994,(6):15-18.

[17] 杨文治,邵明安.黄土高原土壤水分研究[M].北京:科学出版社,2000:174-177.

[18] 戴万宏,吕殿青.缕土旱作区施肥对小麦产量和水分利用效率的影响[J].西北农业大学学报,1993,(21):0-93.

[19] 李凤民,徐进章.黄土高原半干旱地区集水型生态农业分析[J].中国生态农业学报,2002,10(1):101-103.

[20] Li X Y, Gong J D, Li F R. Incorporation of ridge and furrow method of rainfall harvesting with mulching for crop production under semiarid

conditions[J]. Agricultural Water Management, 2001,50(3):173-183.

[21] 张福锁,王激清,张 卫,等.中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J].土壤学报,2008,4(5):915-924.

[22] Ren X L, Jia Z K, Chen X L. Effect of micro-catchment rainwater harvesting on water and nutrient use efficiency in farmland under different simulated rainfall conditions[J]. Transactions of the CSAE, 2010,26(3):75-81.

[23] 李芳林,郝明德,杨 晓,等.黄土旱塬施肥对土壤水分和冬小麦产量的影响[J].麦类作物学报,2010,30(1):154-157.

[24] 王伟妮,鲁剑巍,李银水,等.当前生产条件下不同作物施肥效果和肥料贡献率研究[J].中国农业科学,2010,43(19):3997-4007.

[25] 李世娟,周殿贤,李建民.限水灌溉下不同氮肥用量对小麦产量及氮素分配利用的影响[J].华北农学报,2001,16(3):86-91.