

不同保水剂对旱地春玉米生长 发育和产量的影响

刘 礼,孙东宝,王庆锁

(中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所,农业部旱作节水农业重点开放实验室,北京 100081)

摘 要:保水剂的应用为旱地玉米实现高效生产提供了有力保障。为探究山西旱地玉米田适宜保水剂类型,通过为期 2 年的田间定位试验,研究了不同保水剂类型下旱地玉米生理指标及其产量的变化。试验共设置 4 个处理,分别为聚丙烯酸钾(PAAS)保水剂、聚丙烯酰胺(PAM)保水剂、黄腐酸保水剂(HA),另以不施保水剂(CK)作为对照。结果表明,施用保水剂能有效缓解玉米生长前期的干旱胁迫,显著提高玉米苗期、拔节期的叶面积指数、叶绿素含量、光合速率、蒸腾速率以及地上部干物质累积量,降低玉米籽粒败育率,使秃顶长变小,同时玉米穗长、穗粒数以及单穗重增加,从而提高旱地玉米产量。不同保水剂类型作用效果不同,各指标均表现为 PAAS>PAM>HA。与 CK 相比,PAAS 处理玉米产量提高 21.6%,穗长增加 11.4%,穗粒数增加 120 粒,单穗重增加 21.6%。为获得较高的玉米产量,PAAS 可作为试验当地春玉米田保水剂的最佳选择。

关键词:保水剂类型;春玉米;生理指标;产量

中图分类号:S343.1 **文献标志码:**A

Effects of different water-retention agents on yield and growth of dryland spring maize

LIU Li, SUN Dongbao, WANG Qingsuo

(Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy
of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The application of water retaining agent provides a strong guarantee for the realization of high efficiency production of dry land corn. In order to find out the suitable type of water retaining agent in corn field of dry land in Shanxi Province, the physiological indexes and yield changes of corn in dryland under different types of water retaining agents were studied through a two-year field positioning test. Four treatments including potassium polyacrylate (PAAS), polyacrylamide (PAM), fulvic acid (HA), and a control (CK) without water retaining agent. The results showed that the application of water retaining agents effectively alleviated the drought stress in the early stage of corn growth in the experimental area, significantly improved the leaf area index, chlorophyll content, photosynthetic rate, transpiration rate, and dry matter accumulation in the above ground of corn at seedling and jointing stages, reduced the rate of corn grain abortion and the bald head length, and increased the ear length, the number of grains per ear and the weight of a single ear. This improved the dryland corn yield. Different types of water retention agents had different effects and they are ranked as PAAS>PAM>HA. Compared with CK, PAAS increased corn yield by 21.6%, ear length by 11.4%, grain number per ear by 120, and single ear weight by 21.6%. Therefore, PAAS could be used as the best choice of water holding agent in local spring corn field to obtain higher corn yield among the studied agents.

Keywords: type of water-retention agents; spring corn; physiological index; maize yield

收稿日期:2019-12-11

修回日期:2020-04-14

基金项目:山西省重点研发计划重点项目“山西有机旱作农业关键技术研究示范”(201703D211002-2);国家自然科学基金“北方旱作区春玉米水分生产力空间分异特征及其驱动机制研究”(31401344)

作者简介:刘礼(1990-),女,河北保定人,硕士,研究方向为农业水资源与环境。E-mail:liuli033631@163.com

通信作者:孙东宝(1979-),男,山东济宁人,副研究员,主要从事旱作农业节水研究。E-mail:sundongbao@caas.cn

我国北方旱作区 56% 以上的农田依靠自然降水发展雨养农业^[1]。该地区全年总降水量少,季节分布不均,约 60%~70% 的降水集中在 7—9 月,春季干旱多发^[2-3]。春玉米是北方旱区的主要粮食作物,苗期和拔节期干旱是限制玉米生长的主要因素,加之同期气温高、叶面积指数小,地表裸露面积大,土壤水分蒸发损失严重,加剧了土壤干旱程度。与此同时,干旱还限制了土壤养分的运移和玉米根系对养分的吸收,进一步抑制玉米生长发育,导致减产^[4]。因此,有效缓解苗期和拔节期干旱是该地区玉米稳产与高产的重要保证。

保水剂作为一种新型节水材料,具有良好的吸水、保水特性。施入土壤后能保留大量的水分和养分,在水分缺乏时可根据作物需求缓慢释放,提高土壤水分、养分的有效性,从而改善作物生长状况^[5-7],特别是在干旱地区,效果更为显著^[8]。研究发现,保水剂能显著提高旱地玉米出苗率及幼苗成活率^[9-10],同时促进玉米生长发育,对玉米株高、叶面积指数、光合能力以及地上部、根部生物量的累积^[11-13]等均具有明显的促进作用,提高了玉米水肥利用效率^[14-16],从而达到节水增产的目的。保水剂的施用效果又受到保水剂种类、施用量、土壤条件和气象等多种因素的影响。近年来许多研究结果证实施用保水剂能显著提高玉米产量^[14,17],但大多数研究主要是关于单一保水剂类型及不同保水剂用量对土壤改良和作物产量的影响^[17-19],关于玉米生长发育对不同类型保水剂在土壤中应用的动态响应研究较少。基于以上现状,本研究选择了市面上常见的 3 种类型保水剂作为研究对象,分别为腐殖酸类(黄腐酸)、聚丙烯酸盐类(聚丙烯酸钾)和聚丙烯酰胺,以山西典型旱地玉米田为研究对象,进行了为期两年的田间定位试验,比较研究了不同类型保水剂对旱地玉米各生理指标、干物质累积动态、产量及其构成因素的影响,为保水剂在山西旱地玉米田的推广和选择应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2012 年 4 月—2013 年 10 月在农业部寿阳旱地农业重点野外科学观测试验站进行,该试验站位于山西省寿阳县宗艾镇宗艾村(37°51'N, 113°05'E,海拔 1 135 m)。试验地区属于暖温带大陆性半湿润气候,年平均气温 8.11℃,≥10℃积温 2 994℃·d,无霜期 130 d,多年平均降水量 474.2 mm。土壤类型为褐土,质地为砂质粘土。播前土壤

含水量为 25.05%,供试土壤基本理化性质为:pH 8.4,有机质 17.6 g·kg⁻¹,全氮 0.956 g·kg⁻¹,有效磷 1.8 mg·kg⁻¹,速效钾 25.2 g·kg⁻¹。气象资料由寿阳气象站提供,试验期间 2012 年和 2013 年玉米生育降水量分别为 471.4 mm 和 496.6 mm,降水分布见图 1。

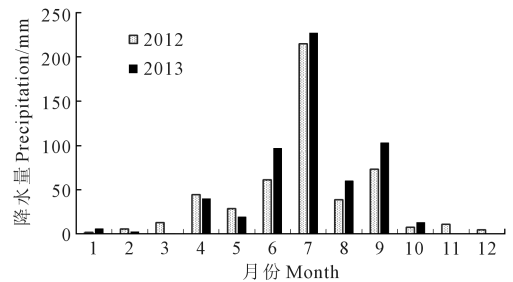


图 1 试验年降水量及其分布

Fig.1 Annual precipitation and its distribution

1.2 试验材料

供试材料为春玉米,品种为大丰 30 号。播种深度为 5~7 cm,行距 60 cm,株距 30 cm,种植密度为 55 000 株·hm⁻²。播种日期分别为 2012 年 4 月 30 日和 2013 年 4 月 27 日,并于每年 10 月 1 日收获。2 年试验期间分别在玉米不同生长阶段进行取样测定,取样时间分别为:苗期(2012 年 6 月 11 日、2013 年 6 月 14 日)、拔节期(2012 年 7 月 11 日、2013 年 7 月 15 日)、开花期(2012 年 8 月 3 日、2013 年 8 月 5 日)和灌浆期(2012 年 9 月 7 日、2013 年 9 月 5 日)。

供试保水剂类型有 3 种,分别为:聚丙烯酸钾 PAAS(甘肃海瑞达有限公司生产的聚丙烯酸盐类保水剂);黄腐酸 HA 和聚丙烯酰胺 PAM(山东济南运泽化工有限公司生产的腐植酸类、非离子性聚合物保水剂)。

1.3 试验设计

本试验共设 4 个处理,分别为:不施保水剂(CK),保水剂 PAAS,保水剂 HA,保水剂 PAM;每个处理 3 次重复,共 12 个小区,小区面积为 80 m²(8 m×10 m)。施用方法为保水剂与基肥混匀后穴施,保水剂施用量为 50 kg·hm⁻²,种肥施用量为 100 kg·hm⁻²,为避免肥料对种子的影响,种肥施于距离种子 15 cm 的位置;拔节后期追施尿素 180 kg·hm⁻²。对照除不施用 PAAS、PAM 和 HA 外,其它管理措施均与上述 3 个处理一致。

1.4 测定指标与方法

1.4.1 叶面积指数 在玉米定苗后,每个小区选择 3 株代表性植株,对其每个叶片的长度和最大宽度进行测定。之后每 10 d 测定一次,并采用系数法计算叶面积。叶面积指数 LAI 是指叶片总面积与土地

面积的比值。

$$A = 0.74 \times L_k \times W_k \tag{1}$$

$$LAI = \sum_{k=1}^n A/S \tag{2}$$

式中, A 为叶片叶面积; 0.74 为叶面积系数; L_k 为第 k 片叶片的长度; W_k 为第 k 片叶片的宽度; LAI 为叶面积指数, S 为土地面积。

1.4.2 生理指标的测定 叶绿素含量 (SPAD): 采用便携式叶绿素仪 (SPAD-502) 测定。分别在玉米 5 叶、10 叶、抽穗期和灌浆期选择 5 片发育完全的幼叶进行测定并记录数据。

玉米净光合速率 (P_n) 与蒸腾速率 (Tr): 使用 LI-6400 便携式光合系统测定仪 (利用自然光源和田间 CO_2) 测定玉米叶片的净光合速率、蒸腾速率。分别在玉米苗期、拔节期、开花期和灌浆期从每个处理中选择具代表性的 3 株玉米, 于上午 10:00—11:00 间进行测定, 测定部位为植株顶部第一片全展叶的中部。

$$Tr = \frac{F(W_r - W_s)}{100 \times S(1000 - W_s)} \tag{3}$$

式中, F 为空气流量 ($\mu mol \cdot s^{-1}$); W_s 为样品水摩尔比 ($mmol \cdot mol^{-1}$); W_r 为参比水摩尔比 ($mmol \cdot mol^{-1}$); S 为叶面积 (m^2)。

$$P_n = \frac{F(C_r - C_s)}{100S} - C_sE \tag{4}$$

式中, C_s 为样品室 CO_2 浓度 ($\mu mol \cdot mol^{-1}$); C_r 为参比室 CO_2 浓度 ($\mu mol \cdot mol^{-1}$)。

1.4.3 玉米地上部干物质累积量 (SDM) 分别在玉米苗期、拔节期、开花期和收获期从每个处理选取 3 株代表性植株, 取地上部分在 $105^{\circ}C$ 烘箱中杀青 30 min, 然后在 $85^{\circ}C$ 下烘干至恒重, 称重并记录干物质重量。

1.4.4 产量及其构成因素 玉米成熟后, 每个小区

将除去边行的其余部分全部收获, 然后分别测定玉米穗数、每穗穗长、秃尖长。待玉米自然风干后脱粒, 测定其穗粒重、千粒重、籽粒产量, 并将籽粒产量换算成公顷产量 ($kg \cdot hm^{-2}$)。

1.5 数据处理

数据处理和统计分析分别采用 Microsoft Excel 2013 和 SAS 6.12。在 5% 的概率水平下, 采用 F 值进行方差分析比较。

2 结果与分析

2.1 不同保水剂对玉米叶面积指数 (LAI) 的影响

随生育期的推进, 不同保水剂处理下玉米叶面积指数 (LAI) 变化如图 2 所示。2012、2013 年不同处理 LAI 随时间推移变化趋势基本一致, 均在 8 月 5 日左右达到最大值。与对照相比, PAAS、PAM 和 HA 处理下玉米平均最大叶面积指数分别增加了 6.2%、3.6% 和 2.4%。不同保水剂在玉米不同生长期对叶面积指数的增加效应不同, 在玉米生育前期 (6 月—7 月中旬) LAI 显著增加, 且 $PAAS > PAM > HA$ 。如 2012 年 7 月 1 日, PAAS、PAM 和 HA 三种处理下玉米叶面积指数分别比对照增加了 45.9%、35.1% 和 24.3%; 2013 年 7 月 15 日, LAI 分别增加了 47.1%、33.7% 和 24.4%。但生长后期 (7 月 25 日后) PAAS、PAM 和 HA 处理下玉米叶面积指数与对照处理均无显著性差异, 保水剂对植株生长的作用不明显, 甚至低于对照。以 PAAS 为例, 2012 年 7 月 15 日至 8 月 15 日 LAI 由 2.28 提高到 2.81, 增长 23.2%。而对照组 LAI 由 1.56 提高到 2.57, 同期增加 64.7%。这可能是由于降雨充足时, 对照处理玉米发生补偿生长。由此可见, 土壤中添加保水剂可显著促进玉米生长前期叶片膨大, 尤其是 PAAS 效果更优。

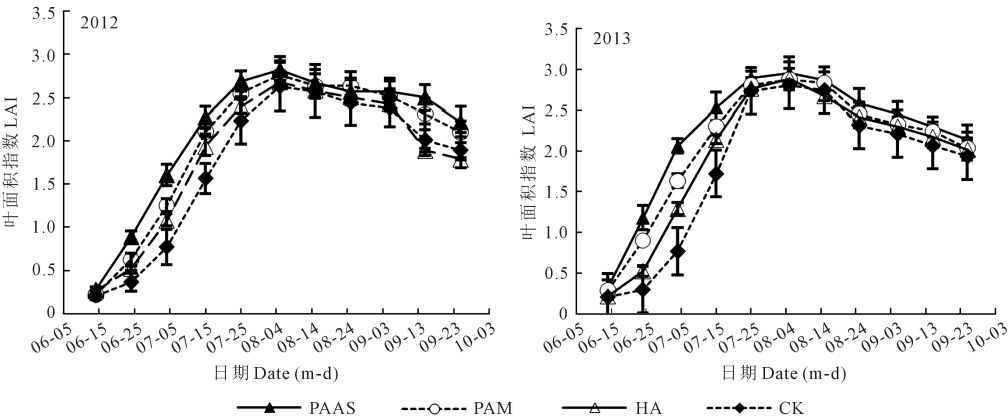
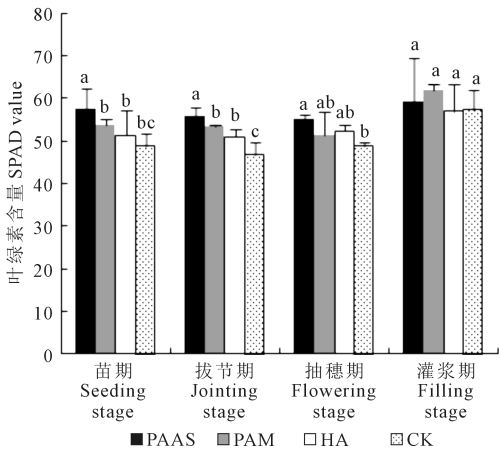


图 2 不同保水剂对玉米生育期叶面积指数的影响
Fig.2 Effect of different water-retention agents on leaf area index in maize growth period

2.2 不同保水剂对玉米各生理指标的影响

2.2.1 叶绿素含量(SPAD 值) SPAD 值可以反映叶片的相对叶绿素浓度和植物的营养状况。随生育期的动态变化,不同保水剂处理下玉米 SPAD 值变化如图 3 所示。与对照相比,PAAS、PAM 和 HA 处理下玉米苗期、拔节期 SPAD 值显著增加,苗期 SPAD 值依次提高了 17.9%、10.6%和 5.6%,拔节期分别提高了 19.6%、14.6%和 9.0%。不同保水剂间 PAAS>PAM>HA,且 PAAS 显著高于 PAM 和 HA, PAM 和 HA 间差异不显著。同时 PAAS 也可明显提高玉米抽穗期叶绿素含量,与对照相比提高了 13.0%;而 PAM 和 HA 则与对照无显著差异。由此可见,保水剂能显著增加玉米生长前期 SPAD 值,而 PAAS 效果更为显著。

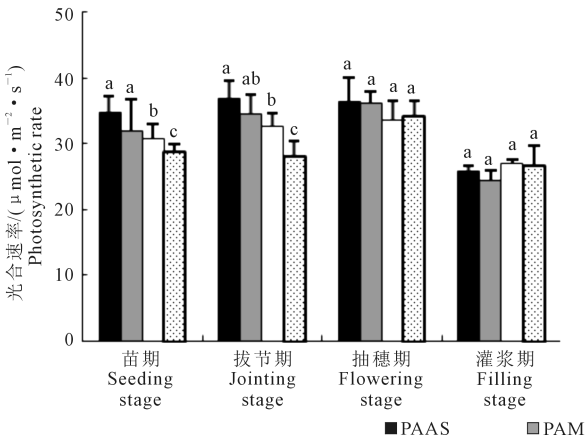


注:图中不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference among treatments ($P<0.05$). The same below.

图 3 不同保水剂对玉米叶绿素含量的影响(2012 年)

Fig.3 Effect of different water-retention agents on chlorophyll content of maize (2012)



2.2.2 净光合速率(P_n)和蒸腾速率(T_r) 随生育期的动态变化,不同保水剂处理下玉米净光合速率(P_n)和蒸腾速率(T_r)变化如图 4 所示。与对照相比,施用保水剂显著提高了玉米苗期、拔节期的 P_n 和 T_r 。在玉米苗期,PAAS、PAM 和 HA 处理 P_n 分别提高了 48.6%、29.6%和 12.4%, T_r 分别提高了 27.4%、4.2%和 22.2%。拔节期保水剂的作用效果更为显著, P_n 分别比对照提高了 60.2%、49.4%和 42.0%, T_r 分别提高了 28.3%、17.4%和 9.7%;不同保水剂间表现为 PAAS>PAM>HA,且 PAAS 显著高于 HA。到了抽穗期,PAAS 和 PAM 处理玉米 P_n 和 T_r 仍有所提高,但幅度较小, P_n 分别比对照提高了 9.9%和 9.3%,而 HA 处理则与对照无显著性差异。玉米灌浆期,保水剂对 P_n 和 T_r 无影响,处理间差异不显著,原因可能是这一时期雨量较充沛,叶片光合和蒸腾作用受干旱胁迫的影响小。由此可见,施用保水剂能够显著提高玉米生长前期净光合速率(P_n)和蒸腾速率(T_r),且 PAAS 的作用效果更好。

2.3 不同保水剂对玉米干物质累积量(SDM)的影响

不同保水剂处理玉米不同生育阶段地上部分干物质累积量变化特征如图 5。总的来看,保水剂处理玉米 SDM 较对照处理显著增加($P<0.05$)。与 CK 相比,2012 年 PAAS、PAM 和 HA 处理的地上干物质累积量增加了 8.7%~14.5%,2013 年增加了 9.3%~24.9%。不同保水剂对 SDM 累积的影响不同,其中 PAAS 对 SDM 的促进作用最好,HA 的作用不明显,两者间差异显著,而 PAAS 与 PAM 两年的 SDM 无显著性差异。

不同保水剂处理下,不同生长阶段的 SDM 累积比例不同。出苗到拔节阶段,2012 年保水剂处理下的 SDM 与对照相比无显著性差异,而 2013 年 PAAS

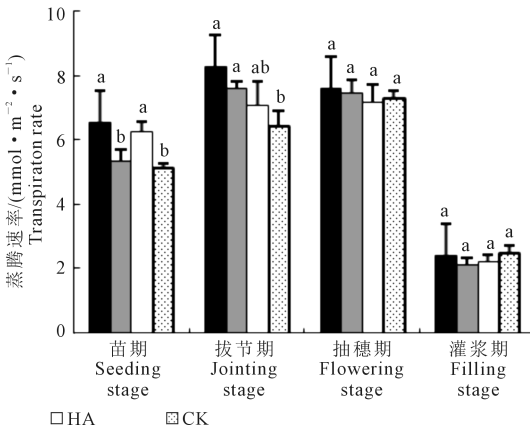


图 4 不同保水剂对玉米净光合速率和蒸腾速率的影响(2012 年)

Fig.4 Effects of different water-retention agents on net photosynthetic rate and transpiration rate of maize (2012)

和 HA 处理的 SDM 显著高于 CK, PAM 处理下有所增加, 但差异不显著。可能是因为土壤水分条件不同, 2012 年土壤底墒较高, 而 2013 年苗期降水量较少(图 1), 同时 HA 的作用效果低于 PAAS 和 PAM。拔节到开花阶段降水量较少, 干旱胁迫相对较严重, 2012、2013 年保水剂处理玉米 SDM 均较 CK 处理显著增加。如 2012 年, PAAS、PAM 和 HA 的 SDM 较对照处理分别提高了 36.0%、22.2% 和 12.6%。但开花到灌浆阶段, 降水较多, 2012、2013 年保水剂处理下 SDM 与对照间均无显著性差异。由此可见施用保水剂能显著提高玉米开花前地上干物质累积量。以 PAAS 为例, 2012 年和 2013 年开花前 SDM 累积比例分别为 51.6% 和 58.1%, 对照组分别为 42.5% 和 50.3%(图 5)。这种差异主要是由于保水剂显著提高了玉米生育前期的净光合速率(图 4)。

2.4 不同保水剂对玉米产量及其构成因素的影响

由表 1 可知, 3 种不同保水剂处理下玉米穗长、穗粒数、单穗重均较不施保水剂(CK)处理显著增加 ($P<0.05$), 其中以聚丙烯酸钾(PAAS)处理增幅最大; 与 CK 相比, PAAS 处理下 2 个试验年份玉米穗长平均增加 11.4%, 穗粒数平均增加 120 粒, 单穗重平均增加 21.6%; 其次是聚丙烯酰胺(PAM), 黄腐酸(HA)的增幅最小, 且与 PAAS 有显著性差异。不同保水剂处理间玉米千粒重无显著性差异, 可能是因为玉米灌浆期降水较充足, 水分和养分均不是限制玉米生长的主要因子, 故玉米灌浆基本没有受到影响。就秃尖长而言, 保水剂处理明显降低了玉米秃尖长, 其中 PAAS 的降幅最大, 与 CK 相比减小了 1.2 cm; PAM 与 HA 处理下玉米秃尖长有所减小, 但差异并不显著。

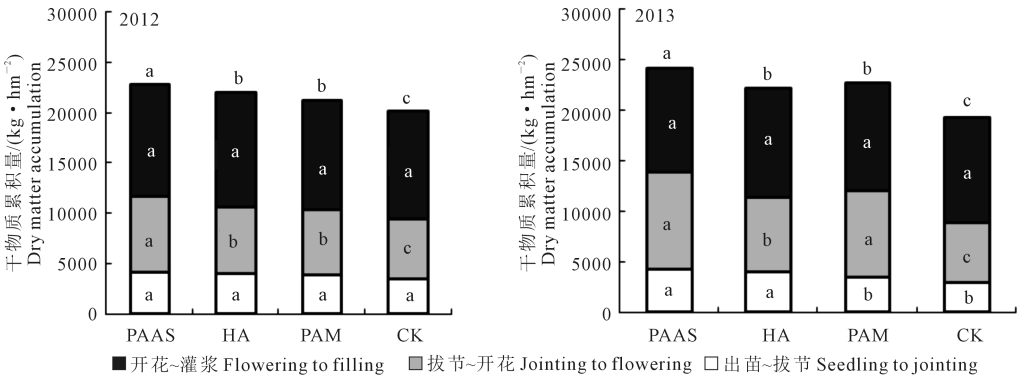


图 5 不同保水剂对玉米地上部干物质累积的影响

Fig.5 Effect of different water-retention agents on dry matter accumulation in maize above ground

表 1 不同保水剂对玉米产量及其构成因素的影响							
Table 1 Effects of different water-retention agents on maize yield and its components							
年份 Year	处理 Treatment	穗长/cm Spike length	穗粒数 Grain number per spike	单穗重/g Single spike weight	千粒重/g 1000-seed weight	秃尖长/cm Bald tip length	产量/(kg · hm ⁻²) Yield
2012	PAAS	21.7a	615.5a	212.4a	345.6a	2.3b	11282.6a
	PAM	21.3a	610.2a	202.0b	331.1a	3.2a	10729.1b
	HA	21.2a	588.8b	195.9b	333.0a	3.0a	10405.9b
	CK	20.4b	527.0c	178.3c	338.6a	3.4a	9470.0c
2013	PAAS	25.3a	729.4a	236.3a	324.0a	—	12566.2a
	PAM	24.5ab	675.1b	229.2ab	339.5a	—	12188.3a
	HA	23.1b	657.2c	216.9b	330.0a	—	11532.7b
	CK	21.8c	578.7d	190.9c	329.8a	—	10148.6c
两年平均 Average	PAAS	23.5a	672.4a	224.3a	334.8a	—	11924.4a
	PAM	22.9ab	642.7b	215.6ab	335.3a	—	11458.7ab
	HA	22.1b	623.0b	206.4b	331.5a	—	10969.3b
	CK	21.1c	552.8c	184.6c	334.2a	—	9809.3c

注:表中“—”代表 2013 年未测量秃尖长;同一列数值后不同字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note:The “—” in the table indicates the length of corn bald tip unmeasured in 2013. Different letters in the same column indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

保水剂处理显著增加了玉米产量。与对照相比,PAAS、PAM 和 HA 处理下玉米产量分别提高了 21.6%、16.8% 和 11.8%。增产效果表现为:PAAS>PAM>HA,且 PAAS 处理下玉米产量显著高于 HA。以上结果表明,PAAS 保水剂能显著提高玉米产量,主要是由于玉米穗长增加、秃尖长变短,穗粒数增多以及穗粒重的增加,而与千粒重无关。

3 讨论

在旱作玉米生产过程中,由于降水在年内分布极不均衡,生育前期干旱胁迫成为限制旱地玉米生产的主要因素;玉米生长后期降水相对充足但对产量影响较小。保水剂为高吸水性聚合物,能迅速吸收比自身重百倍甚至上千倍的水分,并且具有反复吸水的功能。在玉米前期缺水阶段可根据作物需求释放水分,缓解干旱胁迫,因此保水剂的应用成为提高旱地玉米产量的有效措施。

本研究发现,保水剂对玉米苗期和拔节期的形态和生理指标的影响显著,而对生育后期的影响不显著。这是因为作物的成功种植取决于土壤水分的有效性,并且经常受到该地区土壤水位差的限制^[20]。施用保水剂相当于向土壤中加入了一个高保水性又具有高水势的附加系统^[21],当土壤水分含量较低时,保水剂吸收的水分可以缓慢释放以供玉米吸收,从而提高玉米的光合速率、蒸腾速率以及促进其形态发育;同时蒸腾速率的提高可以加速营养元素向玉米根区的质量流动^[22],使玉米能够在有限的供水条件下正常生长。而在降水较多的生育后期,土壤水分不是玉米生长的限制因子,因此施用保水剂的效果不显著。但本研究发现,玉米生长后期,对照处理玉米叶面积增长速率和干物质累积速率明显高于保水剂处理,可见在干旱胁迫后的大量降雨或复水条件下玉米会进行补偿性生长,这与 Wenkert 等^[23]的研究结果一致;但总的来看,CK 处理玉米的最大叶面积指数、干物质累积总量和籽粒产量均显著低于保水剂处理,表明这种补偿作用不能完全弥补前期干旱胁迫造成的影响,因此旱地玉米高产的关键在其生长前期。

施用保水剂可显著提高旱地玉米的产量。本试验中,玉米产量的增加主要是由于穗粒数以及单穗重的增加。保水剂的添加有效地改善了植物营养状态和玉米的光合能力,增加了玉米前期生长阶

段的干物质累积量,这为穗粒数的形成奠定了良好的基础。此外,保水剂处理玉米 LAI 和 P_n 显著增加,这也增强了玉米穗分化阶段光合产物的供应能力,从而降低种子败育率,使秃顶长变小。本研究 PAAS、PAM 和 HA 处理下玉米秃尖长均低于对照处理,进一步证明了这一观点。同时不同保水剂类型对玉米各生长生理指标、产量及其构成因素的影响不同,均表现为 PAAS 效果更优、PAM 次之、HA 最弱,这可能与保水剂本身性质有关。其中 PAAS 为钾离子性聚合物,其吸水、保水性能优于 PAM(非离子性聚合物),但其稳定性、耐盐性及使用寿命低于 PAM;而 HA 为有机弱酸,能够促进作物生长发育,但对植物根系的作用效果更为显著,且 HA 通常作为重金属吸附剂被广泛应用^[24]。PAAS 和 PAM 通常作为保水剂应用,我们可以根据实际生产的需求去选择应用。

4 结论

研究表明,施用保水剂能有效缓解试验地区玉米生长前期的干旱胁迫,显著提高玉米苗期、拔节期的叶面积指数、叶绿素含量、净光合速率、蒸腾速率以及地上部干物质累积量,降低玉米籽粒败育率,使秃顶长变小,同时玉米穗长、穗粒数以及单穗重增加,从而提高旱地玉米产量。不同保水剂类型作用效果不同,表现为 PAAS>PAM>HA。因此,PAAS 可作为试验当地春玉米田保水剂类型的最佳选择。

参考文献:

- [1] 信乃谄,侯向阳,张燕卿.我国北方旱地农业研究开发进展及对策[J].中国生态农业学报,2001,9(4):58-60.
- [2] 李生秀.中国旱地农业[M].北京:中国农业出版社,2004.
- [3] 吴普特.中国旱区农业高效用水技术研究与实践[M].北京:科学出版社,2011:15-20.
- [4] Whitford G W G. Chihuahuan desert annuals: Importance of water and nitrogen[J]. Ecology, 1987, 68(6):2032-2045.
- [5] 李云开,杨培岭,刘洪禄.保水剂农业应用及其效应研究进展[J].农业工程学报,2002,18(3):182-187.
- [6] 黄震,黄占斌,李文颖,等.不同 PAAS 对土壤水分和氮素保持的比较研究[J].中国生态农业学报,2010,18(2):245-249.
- [7] 杜建军,苟春林,崔英德,等.PAAS 对氮肥挥发和氮磷钾养分淋溶损失的影响[J].农业环境科学学报,2007,26(4):1296-1301.
- [8] Islam M R, Ren C, Zeng Z, et al. Fertilizer use efficiency of drought-stressed oat (*Avena sativa* L.) following soil amendment with a water-saving superabsorbent polymer[J]. Acta Agriculturae Scandi-

navica, Section B - Soil & Plant Science, 2011, 61(8):721-729.

[9] 王洪君,陈宝玉,梁赫,等.保水剂吸水特性及对玉米苗期生长的影响[J].玉米科学,2011, 19(5):96-99.

[10] 田露,李立军,晓霞等.不同保水材料对内蒙古黄土高原旱作玉米幼苗生长及土壤贮水特性的影响[J].干旱地区农业研究,2013,31(5):54-60.

[11] Yazdani F , Allahdadi I , Akbari G A . Impact of superabsorbent polymer on yield and growth analysis of soybean (*Glycine max* L.) under drought stress condition[J]. Pakistan Journal of Biological SciencesPjbs, 2007, 10(23):4190.

[12] Egrinya E A , Islam R , An P , et al. Nitrate retention and physiological adjustment of maize to soil amendment with superabsorbent polymers[J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 52:474-480.

[13] Dorraji S S, Golchin A, Ahmadi S, et al. The effect of hydrophilic polymer and soil salinity on corn growth in sandy and loamy soils[J]. CLEAN-Soil, Air, Water, 2015, 38(7):584-591.

[14] 刘世亮,寇太记,介晓磊,等. PAAS 对玉米生长和土壤养分转化供应的影响研究[J]. 河南农业大学学报, 2005, 39(2):146-150.

[15] Jiang T, Teng L, Wei S, et al. Application of polyacrylamide to reduce phosphorus losses from a Chinese purple soil: A laboratory and field investigation[J]. Journal of Environmental Management, 2010, 91(7):1437-1445.

[16] 赵霞,黄瑞东,李朝海,等. 农艺措施和 PAAS 对土壤蒸发和夏玉米水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(1):101-106.

[17] 杨永辉,武继承,韩庆元,等. PAAS 对土壤孔隙影响的定量分析[J]. 中国水土保持科学,2011, 9(6):88-93.

[18] 雷廷武,唐泽军,张晴雯,等. 聚丙烯酰胺增加土壤降雨入渗减少侵蚀的模拟试验研究II.侵蚀[J]. 土壤学报, 2003, 40(3):401-406.

[19] Khaled H, Fawy H A. Effect of different levels of humic acids on the nutrient content, plant growth, and soil properties under conditions of salinity [J]. Soil & Water Research, 2011, 6(1):21-29.

[20] Wang X B, Wu H J, Dai K, et al. Tillage and crop residue effects on rainfed wheat and maize production in northern China [J]. Field Crops Research,2012,132:106-116.

[21] Yang L X,Yang Y, Zhang C, et al. Influence of super absorbent polymer on soil water retention, seed germination and plant survivals for rocky slopes eco-engineering[J]. Ecological Engineering, 2014, 62:27-32.

[22] 程宏,郑联寿,冯瑞云.播期对山西省春玉米生长发育及产量的影响[J].山西农业科学,2013,41(12):1336-1339.

[23] Wenkert W, Lemon W E, Sinclair T R. Leaf elongation and turgor pressure in field-grown soybean [J]. Agronomy Journal, 1978, 70:761-764.

[24] 郭志娟,张丽,魏清,等.腐植酸保水剂的现状及发展[J].磷肥与复肥,2014,29(1):34-37.

(上接第 256 页)

[23] Gilbert M E, Zwieniecki M A, Holbrook N M. Independent variation in photosynthetic capacity and stomatal conductance leads to differences in intrinsic water use efficiency in 11 soybean genotypes before and during mild drought [J]. Journal of Experimental Botany, 2011, 62(8):2875-2887.

[24] Li S Y, Wang W B, Yao X D, et al. Photosynthesis in reciprocal grafts of drought-tolerant and drought-sensitive cultivars of soybean under water stress [J]. Photosynthetica, 2019, 57(4):942-949.

[25] Liu F L, Andersen M N, Jensen C R. Loss of pod set caused by drought stress is associated with water status and ABA content of reproductive structures in soybean [J]. Functional Plant Biology, 2003, 30(3):271-280.

[26] Smith D M, Inman-Bamber N G, Thorburn P J. Growth and function of the sugarcane root system [J]. Field Crops Research, 2005, 92:169-183.

[27] Bo W, Tao L A I, Huang Q W, et al. Effect of N fertilizers on root growth and endogenous hormones in strawberry [J]. Pedosphere, 2009, 19(1):86-95.

[28] Liu G N, Zhang Z A, Xu K Z. Changes of some physiological characteristics and agronomic traits during genetic improvement of soybean cultivars in Jilin province of China [J]. Soybean Science, 2009,28(3):415-420.

[29] Li S Y, Teng F, Rao D M, et al. Photosynthesis of soybean cultivars released in different decades after grafting onto record-yield cultivars as rootstocks [J]. Photosynthetica, 2017, 55(4):579-587.

[30] Li S Y, Teng F, Rao D M, et al. Agronomic traits of soybean cultivars released in different decades after grafting record-yield cultivar as rootstock [J]. Plant Breeding, 2017, 136(2):133-138.