

保水缓释磷肥对夏玉米生长和叶片光合特性的影响

赵有欣,陈钰蓉,付 赞,何东昱,陈佳慧,邢玉美,万云婷,范 震,田晓飞

(聊城大学 地理与环境学院,山东 聊城 252059)

摘 要 农业灌溉用水资源不足和土壤磷素有效性不高是限制我国夏玉米高产优质的关键因素。为探究自制的保水缓释磷肥在夏玉米生产上的应用效果,于2020年在聊城大学环境土壤学试验站通过土柱栽培试验,以不施磷肥(CK)处理为对照,探究磷酸二铵(P)、缓释聚磷酸铵(APP)、保水剂负载磷酸二铵(SAP-P)和保水剂负载缓释聚磷酸铵(SAP-APP)对夏玉米生长和叶片光合特性的影响。结果表明:施用磷肥显著提高了夏玉米株高和叶面积。与P处理相比,APP、SAP-P和SAP-APP处理提高了夏玉米灌浆期叶片净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)和气孔导度(G_s),降低了胞间 CO_2 浓度(C_i)。APP和SAP-P处理籽粒产量无显著差异,但较P处理分别增产3.0%和4.3%。与APP和SAP-P处理相比,SAP-APP处理显著提高了夏玉米穗粒数,但对百粒重影响不显著。各处理籽粒产量以SAP-APP处理最高,较其它施磷处理产量增加8.8%~13.4%。因此,本研究所制备的保水型缓释磷肥能够改善夏玉米产量形成关键期叶片光合特性,在夏玉米生产中具有较好的应用前景。

关键词 保水缓释磷肥;夏玉米;光合特征;产量

中图分类号 S147.5;S365

文献标识码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Effects of Water Retaining and Slow-Release Phosphorus Fertilizer on Leaf Photosynthetic Characteristics and Growth of Summer Maize

ZHAO Youxin, CHEN Yurong, FU Zan, HE Dongyu, CHEN Jiahui,
XING Yumei, WAN Yunting, FAN Zhen, TIAN Xiaofei

(School of Geography and Environment, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China)

Abstract Abstract The lack of irrigation water resources and low soil phosphorus availability are the main limitation factors for the production of maize in North China Plain. A column study was conducted in Liaocheng University to explore the effects of our novel prepared slow-release and high water retention phosphorus fertilizer on the leaf photosynthetic characteristics and yield of summer maize. There were 5 treatments included in the present study, no phosphorus treatment as control (CK), diammonium phosphate (P), ammonium poly-phosphate (APP), diammonium phosphate loaded superabsorbent (SAP-P) and SAP loaded APP (SAP-APP). The results indicated

收稿日期:2022-03-12

基金项目:国家自然科学基金项目(41807092);山东省高等学校科学技术计划(KJ2018BAF034);聊城大学博士基金项目(318051839);聊城大学科研基金项目(318012114)资助

通讯作者:田晓飞,男,汉族,博士,讲师,研究方向:新型肥料研发与应用, E-mail: tianxiaofei624@163.com。

that the use of phosphorus fertilizer significantly promoted the plant height and leaf areas of summer maize. Compared with P treatment, the net photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (T_r) and stomatal conductance (G_s) at the filling stage in APP, SAP-P and SAP-APP treatments were enhanced while the intercellular CO_2 content (C_i) significantly decreased. The grain yields between APP and SAP-P was nearly the same, which were 3.0% and 4.3% higher than P treatment. The biomass and grains per plant were improved, and the grain yield was 8.8%~13.4% higher than other phosphorus application treatments by using SAP-APP. Therefore, our newly developed slow-release phosphorus fertilizers with high water retention can enhance the photosynthetic characteristics of summer maize and have great potential to apply in North China plain.

Key words low-release and water retention phosphorus; summer maize; leaf photosynthesis; increase production

0 引言

夏玉米是重要的粮食作物、饲料作物以及经济作物^[1]。磷作为夏玉米生长所必需的大量元素之一,合理的磷肥施用对于保障我国粮食安全至关重要^[2,3]。由于土壤特定的理化性状和磷酸盐在土壤中的化学行为,华北平原地区夏玉米生产所施入的磷肥的利用率在25%左右^[4]。大部分所施磷肥都作为无效态(难溶态)残留在土壤中,这些积累在土壤中的磷是水体富营养化的重要来源,过量使用磷肥与氮肥的过度应用^[5]相似,已经产生了较为严重的环境问题^[6]。因此施用缓效磷肥,通过阻碍土壤颗粒和磷肥的直接接触而减少土壤对磷的固定,尽可能发挥磷肥后效对于提高磷肥利用率至关重要。

水分是影响夏玉米产量形成的另一关键因子,但华北平原地区农业灌溉用水资源严重不足,水分利用效率较低^[7]。保水剂是一种含有多种亲水基团并适度交联的高分子聚合物,因其独特的三维空间网络结构和大量亲水性官能团的存在而具有超强的吸水持水能力^[8,9]。但是传统保水剂多为机械强度和耐盐性较差的聚丙烯酸(钠)或聚丙烯酰胺类产品,价格较高且在土壤中难以降解,易对环境造成二次污染^[10],限制了在大田粮食作物上的推广应用。以农作物秸秆中大量存在的纤维素为原材料可以制备成本低廉、吸水持水能力强且具有良好生物降解性的保水剂。以淀粉、纤维素等可降解原材料制备的保水剂为载体,以脲甲醛、聚磷酸铵等缓释肥料为养分源制备的保水缓释肥料能够更充分发挥二者水分保蓄及养分缓释功能^[11-13],但是针对保水缓释磷肥在夏玉米等粮食作物上应用的研究还较少。因此,本研究以自制的玉米秸秆纤维素基保水缓释磷肥为供试肥料,采用土柱栽培试验探究其对夏玉米生长和叶片光合特征动态变化的影响,以期保水缓释肥料的应用提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2020年6~10月在聊城大学东校区土壤生态环境教学科研基地(36°26'N, 116°01'E)进行。该地区属于半干旱大陆性气候,年平均气温13.1℃,年均降雨量578.4 mm。供试夏玉米品种为“德单121”。供试土壤为石灰性潮土,0~20 cm土壤基本理化性状为:有机质12.5 g/kg,全氮0.7 g/kg,硝态氮24.5 mg/kg,铵态氮6.5 mg/kg,有效磷17.2 mg/kg,速效钾143.5 mg/kg, pH值为7.9(水土比2.5:1)。试验所用保水缓释磷肥参照Zhao^[13]等方法,以玉米秸秆纤维素与丙烯酸接枝共聚物为载体,分别以聚磷酸铵和磷酸二铵为缓释磷源制得(图1)。所制备的保水缓释磷肥吸水前为灰色半透明固体颗粒,吸水后呈无色透明凝胶状。

1.2 试验设计

试验为土柱栽培试验,共设5个处理,分别为不施磷肥对照(CK)、磷酸二铵(P)、缓释聚磷酸铵(APP)、保水剂负载磷酸二铵(SAP-P)和保水剂负载聚磷酸铵(SAP-APP),每个处理3次重复。除CK处理只施氮钾肥外,其他处理氮磷钾肥施入量相同,分别为3.11-1.78-2.67 (N-P₂O₅-K₂O) g/株。

供试土柱为高120 cm,内径20 cm的加厚PVC管,每个土柱装风干土42 kg。在装土时首先将35 kg土壤填入土柱中,然后将各处理肥料分别与7.0 kg土壤混合均匀后填入对应土柱中。2020年6月1日每个土柱播种2粒,待幼苗真叶展开后定植一株,在播种后和灌浆期每个土柱浇水2 L,夏玉米整个生育期内各土柱均按常规高产栽培模式进行除草、除虫等田间管理,整个生育期各土柱的管理保持一致。

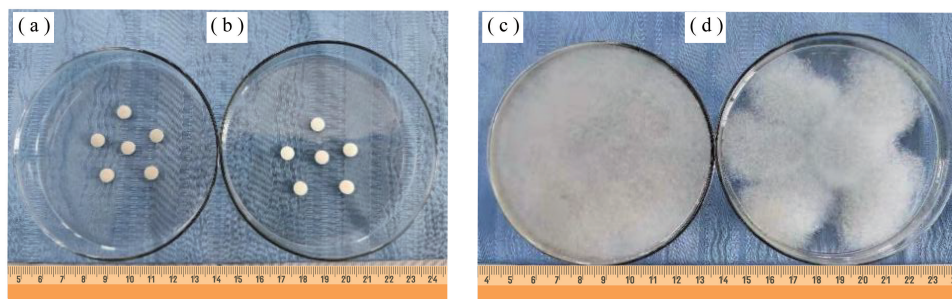


图1 溶胀前后纤维素保水剂(a,b)和保水剂负载缓释聚磷酸铵(c,d)图片

1.3 测定项目与方法

分别在夏玉米拔节期(6月21日)、大喇叭期(7月8日)、开花期(7月26日)和灌浆期(9月15日)测定株高,采用直尺测量穗位叶的长度和宽度,利用长宽系数法(长 $\times$ 宽 $\times$ 0.75)计算叶面积。在9月3日至9月15日每隔3d采用LI-6800新一代光合-荧光全自动测量系统(LI-COR,美国)测定整个灌浆期穗位叶光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和胞间 CO_2 浓度(C_i)等参数。测定时采用红蓝光源,控制叶室内光合有效辐射强度 $1\,000\,\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,参比室中叶片温度为 $(25\pm 1)\,^{\circ}\text{C}$, CO_2 浓度为 $(400\pm 5)\,\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。10月5日玉米收获时将地上部按照茎叶分开,105 $^{\circ}\text{C}$ 杀青30min后在75 $^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒重。统计各处理玉米穗粒数、百粒重和籽粒产量。

1.4 数据处理

采用Microsoft excel 2010软件进行数据处理,使用SPSS 19.0软件对数据进行显著性差异监测(LSD法, $p<0.05$),使用Origin 8.0进行作图。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对夏玉米生长的影响

夏玉米株高随生育期延长而逐渐增加,且各施磷处理株高均显著高于CK处理(表1)。与P处理相比,开花期APP和SAP-P处理株高分别增加12.2%和12.4%,灌浆期分别增加6.1%和10.9%,但对拔节期和大喇叭口期株高无显著影响。各生育期SAP-APP处理与SAP-P处理株高基本一致,但灌浆期SAP-APP处理较APP处理株高显著增加5.9%。

表1 不同施肥处理对夏玉米各时期株高的影响

处理	株高/cm			
	拔节期	大喇叭口期	开花期	灌浆期
CK	35.0 $\pm$ 2.4 ^c	93.8 $\pm$ 10.9 ^b	183.3 $\pm$ 8.7 ^c	194.7 $\pm$ 4.8 ^d
P	44.3 $\pm$ 3.1 ^b	116.4 $\pm$ 7.0 ^a	201.0 $\pm$ 10.4 ^b	215.0 $\pm$ 7.8 ^c
APP	47.2 $\pm$ 4.4 ^{ab}	122.3 $\pm$ 7.5 ^a	226.0 $\pm$ 6.2 ^a	228.0 $\pm$ 5.9 ^b
SAP-P	50.4 $\pm$ 2.9 ^{ab}	118.4 $\pm$ 5.8 ^a	225.5 $\pm$ 7.2 ^a	238.5 $\pm$ 13.7 ^{ab}
SAP-APP	53.4 $\pm$ 5.7 ^a	121.7 $\pm$ 9.2 ^a	222.3 $\pm$ 6.6 ^a	241.5 $\pm$ 7.6 ^a

注:表中标有相同小写字母表示在 $p<0.05$ 水平下差异不显著。

不同磷肥处理对夏玉米灌浆期叶面积具有显著影响(图2)。施磷显著提高了灌浆期夏玉米叶面积,较CK处理叶面积显著增加18.1%~48.2%。与P处理相比,SAP-P和SAP-APP处理叶面积分别显著增加21.4%和25.4%,但APP与P处理叶面积差异不显著。SAP-P和SAP-APP处理叶面积基本一致,较APP处理分别增加了4.0%和7.4%。

2.2 不同施肥处理对夏玉米植株光合特征的影响

总体而言,随灌浆天数的增加各处理穗位叶净光合速率(P_n)值均呈逐渐降低趋势(图3)。除在灌浆后第14d时P与CK处理叶片 P_n 值差异不显著外,其他施磷处理均显著提高了灌浆期叶片 P_n 值,表明施用磷肥有助于夏玉米干物质的形成。在灌浆后第1d时,SAP-APP处理 P_n 值显著高于P和APP处理,但与SAP-P处理

差异不显著。第7 d时,各处理 P_n 值呈 $SAP-APP > SAP-P > APP > P > CK$ 的规律,但 $SAP-P$ 和 APP 处理差异不显著。第11 d时, $SAP-APP$ 、 $SAP-P$ 和 APP 处理 P_n 值较 P 处理分别显著增加 15.4%、9.6%和 8.6%。第14 d时,各施磷肥处理叶片 P_n 值无显著差异。

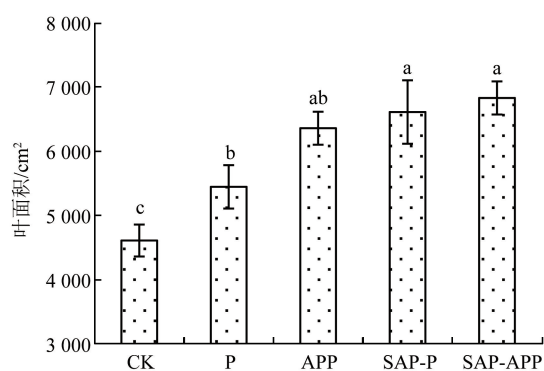


图2 各处理夏玉米植株叶面积

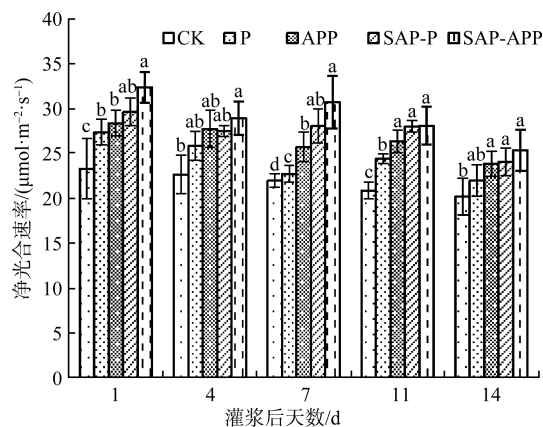


图3 不同处理对夏玉米净光合速率的影响

总体而言,随灌浆后天数的增加各处理胞间 CO_2 浓度值(C_i)呈逐渐升高趋势(图4)。与 CK 相比,施用磷肥显著降低了 C_i 值,但在第7、11、14 d时 P 处理和 CK 处理的 C_i 值无显著差异。与 P 处理相比, APP 和 $SAP-P$ 处理显著降低了灌浆后第1 d时 C_i 值, $SAP-APP$ 处理显著降低了灌浆后第1、7、11 d时 C_i 值。在灌浆后第7、11 d时, $SAP-APP$ 处理 C_i 值显著低于 $SAP-P$ 和 APP 处理。

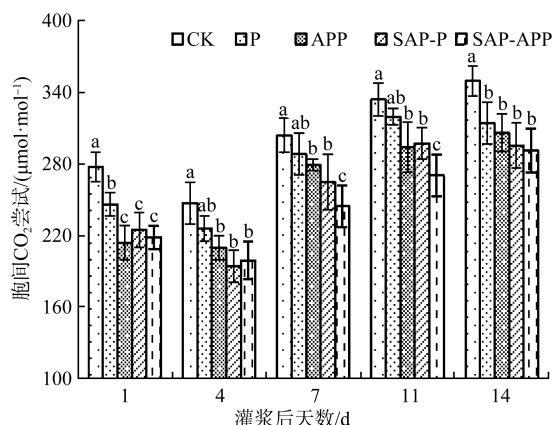


图4 不同处理对夏玉米胞间 CO_2 浓度的影响

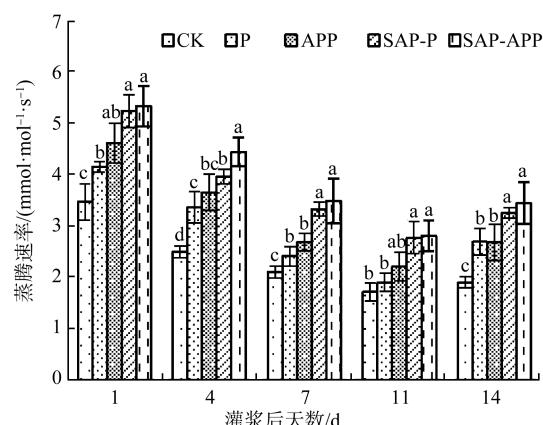


图5 不同处理对夏玉米蒸腾速率的影响

夏玉米灌浆期蒸腾速率(T_r)与 P_n 的变化趋势一致,均呈现随灌浆天数的增加而逐渐降低的趋势(图5)。施用磷肥显著提高了夏玉米灌浆期蒸腾速率,但第11、14 d时 P 和 APP 处理与 CK 处理 T_r 值差异不显著。与 P 处理相比,在整个灌浆期 $SAP-P$ 和 $SAP-APP$ 处理叶片 T_r 值分别增加了 21.0%和 27.9%,但 APP 与 P 处理 T_r 值差异不显著。与 APP 处理相比,在灌浆后的第4、7、14 d时 $SAP-APP$ 处理叶片 T_r 值分别显著增加21.5%、29.9%和 28.5%。

由图6看出,各处理气孔导度(GS)均随灌浆后天数的增加而逐渐降低趋势。与 CK 处理相比, APP 、 $SAP-P$ 和 $SAP-APP$ 处理均显著提高了整个灌浆期穗位叶 GS 值,但 P 处理仅在灌浆后的第11、14 d显著增强了气孔导度。 P 处理和 APP 处理叶片 GS 值无显著差异,但 $SAP-P$ 和 $SAP-APP$ 处理 GS 值较 P 处理分别增加了 22.1%~63.0%和 23.2%~79.5%。同一灌浆时期, $SAP-P$ 和 $SAP-APP$ 处理的 GS 值无显著差异。

2.3 不同施肥处理对夏玉米产量的影响

与 CK 相比,各施磷处理地上部干物质质量、穗粒数和籽粒产量分别显著增加 26.8%~37.6%、33.2%~41.8%和 28.0%~45.2%,但对百粒重无显著影响(表2)。各施磷处理叶片干物质质量基本一致,但 $SAP-APP$ 处理茎秆干物质质量较 P 处理显著增加了 11.9%。与 P 和 APP 处理相比, $SAP-APP$ 处理地上部干物质质量分别增加了 8.5%和 8.2%,穗粒数分别增加了 5.5%和 5.2%。 $SAP-APP$ 处理穗粒数较 $SAP-P$ 处理显著增加 6.5%,这主要与 $SAP-APP$ 降低了玉米果穗秃尖有关。各处理籽粒产量以 $SAP-APP$ 处理最高,较其他施磷处理增加 8.8%

~13.4%,说明所制备的保水型缓释聚磷酸铵在夏玉米生产具有较好的应用潜力。

3 讨论

合理的土壤水分和磷素供应是促进作物生长发育、调节生理代谢等作用的基础^[14]。协同优化夏玉米各生育期,尤其是产量形成关键期土壤磷素和水分时空供给有助于提高夏玉米光合效率和营养物质积累,进而提高作物产量^[15,16]。本研究结果表明,施磷能够显著可以促进夏玉米植株生长,显著提高各生育期株高(表 1)和灌浆期叶面积(图 2)。株高和叶面积作为夏玉米生长最直观的表现,在一定程度上可以较好地反映土壤水分和磷素供应情况^[17,18]。在华北平原广泛分布的石灰性土壤中,所施用的普通磷肥很容易通过沉淀作用转化为作物难以直接吸收利用的 Al-P、Ca₈-P 和 Fe-P 型等磷酸盐^[19]。聚磷酸盐在土壤中正磷酸盐离子有着更好的移动性^[20],从而能够更好地避免土壤对所施入磷肥的固定,提高磷肥生物有效性。Holloway^[21]等通过田间试验发现,在澳大利亚石灰性土壤上聚磷酸铵的当季磷肥利用率是普通磷肥的 15 倍,Holloway^[22]等的研究也发现在土壤中残留的聚磷酸铵使第二年小麦增产 15.0%。但在本试验结果中,单独施用聚磷酸铵处理较普通磷肥处理并未显著增加夏玉米地上部干物质积累和籽粒产量(表 2),这可能与本研究所用的聚磷酸铵聚合度仍然较高,在土壤中水解速度无法精准匹配夏玉米对磷素的吸收,从而导致聚磷酸铵所含磷素无法被当季夏玉米完全吸收利用,部分磷肥仍然以聚合态的形式在土壤中积累起来有关。

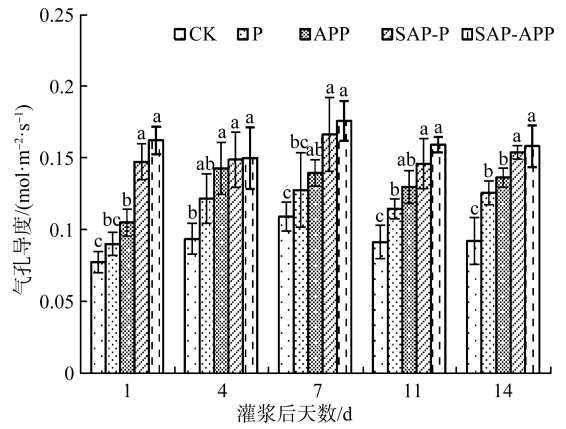


图 6 不同处理对夏玉米气孔导度的影响

表 2 不同处理对夏玉米产量构成的影响

处理	茎秆/(g·plant ⁻¹)	叶片/(g·plant ⁻¹)	地上部干物质/(g·plant ⁻¹)	穗粒数	百粒重/g	籽粒产量/(g·plant ⁻¹)
CK	59.3±6.0 ^c	57.3±4.0 ^b	116.6±10.1 ^c	377.3±13.6 ^c	276.3±2.7 ^a	104.3±3.9 ^c
P	73.1±0.9 ^b	74.7±1.7 ^a	147.8±2.6 ^b	507.3±15.9 ^b	263.1±2.6 ^a	133.5±4.2 ^b
APP	75.2±2.4 ^{ab}	73.1±3.7 ^a	148.3±6.1 ^b	508.7±18.5 ^b	270.4±2.7 ^a	137.5±3.6 ^b
SAP-P	77.9±4.2 ^{ab}	75.9±2.9 ^a	153.8±7.1 ^{ab}	502.5±13.2 ^b	276.9±2.8 ^a	139.2±3.9 ^b
SAP-APP	81.8±1.2 ^a	78.6±3.2 ^a	160.4±4.4 ^a	535.0±12.9 ^a	282.4±2.9 ^a	151.4±5.0 ^a

注:表中标有相同小写字母表示在 $p<0.05$ 水平下差异不显著。

磷作为植物细胞磷脂双分子层的重要组成元素,光合作用中的光合磷酸化作用、CO₂ 的固定、光合产物的运输等过程也需要磷素的参与^[23,24],磷素供应不足会抑制作物自身碳代谢和相关同化物的运输,最终降低了植物的光合速率^[25]。本研究结果表明,各施磷处理,尤其是保水剂负载缓释聚磷酸铵处理在显著提高了夏玉米叶面积(图 2)的同时,还增强了整个灌浆期穗位叶的净光合速率(图 3),这可能与聚磷酸铵中氮素和磷素的缓慢释放,在夏玉米灌浆期仍能维持较高的土壤养分供应有关。这与卢豪^[26]等人发现的施用控释掺混磷肥可以改善与光合作用相关酶活性的结论相一致。

除养分供应外,作物根际土壤水分含量是影响作物光合作用强弱的另一重要因素。保水剂通过快速吸水-缓慢释水过程调控土壤水分供应,再加上对土壤物理性质的改变,影响作物的生长发育^[27]。本研究结果表明,施用保水剂负载普通磷肥处理较磷酸二铵处理并未显著提高夏玉米地上部干物质质量和籽粒产量(表 2),这可能与磷酸二铵溶解后离子浓度较高,显著降低保水剂的吸水能力有关。但是保水剂负载聚磷酸铵处理较普通缓释聚磷酸铵地上部干物质质量增加了 8.2%,籽粒产量增加了 10.1%。这主要与聚磷酸铵所含养分能够缓慢释放,从而避免了吸水溶胀后保水剂结构内的溶液渗透压迅速增加^[27],对保水剂的吸水持水性能影响较小。此外,保水缓释肥料的三维网状交联聚合结构和亲水基团能够快速吸收并保持经灌溉或降水进入到土壤中的水分,在土壤含水量较高时减少水分蒸发,土壤含水量下降时又能在作物根际持续缓慢释放水分而满足作物需求^[28]。保水缓释磷肥能够在土壤中通过保水剂的快速吸水-缓慢放水和聚磷酸铵的养分缓释实现夏玉米产量

形成关键期养分、水分稳定供应,最终夏玉米表现出较好的增产效果。然而,本研究所制备的保水型缓释磷肥水分吸持和养分缓释效果未必是经济效益和增产效果最好的,今后将继续深入开展制备参数优化和保水型缓释磷肥在田间生产应用方面的研究。此外,针对保水剂与缓释磷肥对夏玉米生长和土壤磷素有效性交互效应的研究还有待于进一步深入。

4 结论

本研究所制备的保水缓释磷肥具有较好的水分吸持效果,能够改善夏玉米整个灌浆期叶片光合特征,提高穗位叶净光合速率、蒸腾速率和气孔导度,降低了胞间 CO_2 浓度,有助于夏玉米地上部干物质积累和籽粒产量的形成。施用保水剂负载缓释聚磷酸铵处理玉米籽粒产量最高,较其他施磷处理增产 8.8%~13.4%,在我国北方干旱半干旱地区农业生产具有较好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 张美微,刘京宝,李川,等.不同夏玉米品种产量和氮肥利用的水氮调控效应[J].玉米科学,2020,28(2):143-150.
- [2] 蔺飞阳,杜艾芳,许秀春,等.华北地区夏玉米生产中磷素利用特征研究[J].中国农学通报,2020,36(7):11-15.
- [3] 柏兆海,万其宇,李海港,等.县域农田土壤磷素积累及淋失风险分析——以北京市平谷区为例[J].农业环境科学学报,2011,30(9):1853-1860.
- [4] 黄占斌,孙朋成,钟建,等.高分子保水剂在土壤水肥保持和污染治理中的应用进展[J].农业工程学报,2016,32(1):125-131.
- [5] 范震,田晓飞,翟胜,等.包膜尿素与普通尿素配施对冬小麦产量及土壤氮素的影响[J].聊城大学学报(自然科学版),2020,33(2):105-110.
- [6] 龚娟,马友华,胡宏祥,等.农田土壤磷的环境指标研究进展[J].中国农学通报,2016,32(2):112-117.
- [7] 丁蓓蓓,张雪靓,赵振庭,等.华北平原限水灌溉条件下冬小麦产量及水分利用效率变化的 Meta 分析[J].灌溉排水学报,2021,40(12):7-17.
- [8] TUBERT E, VITALI V A, ALVAREZ M S, et al. Synthesis and evaluation of a superabsorbent-fertilizer composite for maximizing the nutrient and water use efficiency in forestry plantations[J]. Journal of Environmental Management, 2018, 2(10): 239-254.
- [9] ZOHURIAAN M J, POURJAVADI A, SALIMI H, et al. Protein-and homo poly (amino acid)-based hydrogels with super-swelling properties[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2009, 20(8): 655-671.
- [10] 贾振宇,崔英德,黎新明,等.聚丙烯酸钠高吸水性树脂的改性研究进展[J].化工进展,2004(5):468-471.
- [11] 陈冠霖,赵其国, DANSO PRINCE OFORI, 等.包膜型缓/控释肥料研究现状及其在功能农业中的应用展望[J].肥料与健康,2021,48(3):1-6.
- [12] 宋洁,朱晓斌,牛育华,等.KHA/PPA 缓释控肥料的制备及性能[J].应用化工,2021,50(1):117-121.
- [13] ZHAO Y X, FAN Z, CHEN Y R, et al. A bio-based hydrogel derived from moldy steamed bread as urea-formaldehyde loading for slow-release and water-retention fertilizers[J]. ACS Omega, 2021, 6(49): 33462-33469.
- [14] 羿明璇,陈震,管永祥,等.不同磷水组合对紫云英苗期养分吸收及根瘤固氮的影响[J].中国草地学报,2021,43(6):53-60.
- [15] 王艳丽,张富仓,李菊,等.灌溉和施磷对河西地区春玉米生长、产量和磷素利用的影响[J].西北农业学报,2021,30(9):1309-1320.
- [16] 王丹丹,李岚涛,韩本高,等.养分专家系统推荐施肥对夏玉米生理特性及产量的影响[J].农业资源与环境学报,2022,39(1):107-117.
- [17] 刘戈,王凯,刘延,等.不同灌溉模式对黄淮海平原夏玉米生产性状及水分利用率的影响[J].节水灌溉,2021(4):48-54.
- [18] 徐晨,赵洪祥,闫伟平,等.灌溉定额条件下玉米的产量形成及灌溉增产潜力研究[J].节水灌溉,2020(5):22-26+31.
- [19] ZHAO F, ZHANG Y, DIJKSTRA F A, et al. Effects of amendments on phosphorous status in soils with different phosphorous levels[J]. Catena, 2019, 172: 97-103.
- [20] 亢龙飞,王静,朱丽娜,等.不同形态磷酸盐及施用方式对石灰性土壤磷移动性和有效性的影响[J].植物营养与肥料学报,2020,26(7):1179-1187.
- [21] HOLLOWAY R E, BERTRAND I, FRISCHKE A J, et al. Improving fertiliser efficiency on calcareous and alkaline soils with fluid sources of PN and Zn[J]. Plant and Soil, 2001, 236(2): 209-219.
- [22] HOLLOWAY R, FRISCHKE B, BRACE D, et al. APP fluid surpasses granular in Australian grain trials[J]. Fluid J, 2005, 13(2): 14-16.
- [23] 林诚,李清华,王飞,等.不同施磷水平对冷浸田水稻磷含量、光合特性及产量的影响[J].热带亚热带植物学报,2016,24(5):553-558.
- [24] 袁继存,赵德英,徐锴,等.不同磷水平对“锦丰”梨光合及叶绿素荧光特性的影响[J].北方园艺,2019(6):65-68.
- [25] 陈芬,余高,陈容,等.减磷配施有机肥对辣椒生长及光合荧光特性的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2021,49(7):114-125.
- [26] 卢豪.包膜磷肥制备工艺优化及在小麦玉米轮作中的掺混施用效应[D].山东:山东农业大学,2020.
- [27] 郭东权,饶良懿.保水剂的发展现状及在农林和荒漠化修复中的应用研究[J].应用基础与工程科学学报,2021,29(6):1372-1385.
- [28] 魏蓉,田晓飞,翟胜,等.包膜尿素与保水剂配施对冬小麦生长和氮素利用的影响[J].土壤通报,2020,51(4):936-942.

(责任编辑:刘庆松)