

保水剂与氮磷肥配施对玉米生长及养分吸收的影响

魏琛琛¹, 廖人宽², 王瑜¹, 魏榕¹, 杨凤茹¹, 杨培岭¹

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100044)

摘要: 以夏玉米为研究对象, 采用避雨桶栽试验方法精确控制水肥条件, 研究保水剂(SAP)与 5 种氮磷肥配比(N:P 分别为 1:4, 2:3, 1:1, 3:2, 4:1)模式对土壤肥力水平、玉米植株生长及其养分吸收利用的效应。结果表明, 保水剂与氮磷肥均衡施用(N:P 为 1:1)能够促进玉米植株的生长及对养分的吸收利用, 生育期内平均株高、叶面积较其他处理分别提高了 3.36%~7.19%, 5.36%~29.26%; 干物质积累与植株氮、磷累积量较其他处理分别提高了 13.79%~27.61%, 15.91%~32.47%, 18.66%~33.75%; 同时与未施保水剂处理相比, 生育期内土壤平均无机氮含量减少 5.42%, 有效磷含量提高 3.55%; 在本试验条件下, 施用 SAP 1.68 g/pot, N 2.89 g/pot, P 2.89 g/pot 可得到最大玉米产量 113.93 g/pot, 收获时产量较其他处理提高了 18.69%~30.94%。试验结果为华北地区应用保水剂条件下的夏玉米氮磷肥施用配比提供了参考。

关键词: 保水剂; 氮磷肥配施; 玉米生长; 养分吸收

中图分类号: S143; S513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2018)06-0236-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.06.034

Effects of SAP Combined Application of Nitrogen and Phosphorus Fertilizers on Maize Growth and the Nutrient Uptake

WEI Chenchen¹, LIAO Renkuan², WANG Yu¹, WEI Rong¹, YANG Fengru¹, YANG Peiling¹

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044)

Abstract: Excessive application of fertilizers is one of the major problems that hinder the sustainable development of dryland agriculture. Summer maize was taken as the object in the paper, and the rain-proof barrel experiment was conducted to accurately control the water and fertilizer supply, then the effects of super absorbent polymer(SAP) and five kinds ratio of nitrogen and phosphorus fertilizers (1:4, 2:3, 1:1, 3:2, 4:1) on soil fertility, plant growth, nutrient uptake and utilization of maize were studied. The results showed that the balanced application of SAP with N and P could promote plant growth and the absorption and utilization of nutrients. The average plant height and the leaf area increased by 3.36%~7.19% and 5.36%~29.26%, respectively. Compared with other treatments, the dry matter accumulation and nitrogen and phosphorus accumulation increased by 13.79%~27.61%, 15.91%~32.47%, 18.66%~33.75%, respectively. Compared with no SAP treatment, the soil inorganic nitrogen content decreased by 5.42%, and the available phosphorus content increased by 3.55%. Under the conditions of this experiment, the maximum yield of 113.93 g/pot was obtained by applying SAP 1.68 g/pot, N 2.89 g/pot, P 2.89 g/pot, and the yield at harvest increased by 18.69%~30.94%. The results provide a reference for the application of nitrogen and phosphorus fertilizers for summer maize under the condition of applying SAP in North China.

Keywords: super absorbent polymer(SAP); ratio of nitrogen and phosphorus fertilizers; maize growth; nutrient uptake

玉米是我国种植最广泛的谷类作物之一, 2016 年玉米种植面积占全国谷物种植面积的 38.95%^[1]。玉米在我国食品安全和国民经济发展中占有重要地位, 属于对氮、磷肥敏感性作物, 氮、磷养分是玉米生长过程中最重要的营养元素^[2]。合理施用氮(磷)肥

可以提高玉米对养分元素的吸收利用, 进而提高玉米产量^[3-5]。然而, 并非氮(磷)肥施用量越大越好。过量的肥料施入土壤中以后, 不仅会由于氮、磷比例失调造成玉米减产^[6], 那些未被作物吸收利用的养分会随降雨或灌溉水污染地下水与地表水; 部分氮素还会

经过氨挥发、硝化和反硝化作用进入大气,进而污染大气环境^[7]。因此,如何通过施肥来维持玉米产量的同时减小其对环境的污染,是促进玉米增产和环境可持续发展的关键性问题。

保水剂作为一种新型高分子材料,能够迅速吸收自身成百上千倍的水分,且能够重复吸释水分供植物利用^[8]。同时还能够改善土壤物理特性,促进种子萌发提高存活率,降低灌溉需求^[9-11]。目前对于保水剂在农业方面的研究已经形成了与其自身吸释水肥、提高肥效与调节植物生理节水效应的系统的理论体系^[12]。由于保水剂蓄水保肥的特性,其与氮、磷肥配施后对玉米的生物量、水肥利用效率明显提高^[13-14],且能够减少氮、磷、钾养分的淋溶损失和尿素的氨挥发量^[15],在促进植株生长的同时减少了面源污染发生的可能性。结合研究现状,目前关于保水剂与肥料配施的研究多集中于保水剂单独与氮肥和磷肥施用对植株生长、土壤养分有效性的影响。但实际施用过程保水剂与氮磷肥往往共同产生作用,保水剂与氮磷肥的施用比例不同可能对植株生长及土壤养分有效性产生不同的影响。因此,针对氮磷肥配比不合理产生的减产、环境污染问题,研究保水剂作用下不同氮磷肥配比对玉米生长、土壤养分有效性的影响对旱区节水增产与可持续发展具有重要意义。

本研究主要针对华北地区氮磷肥普遍施用不合理的现象,采用避雨桶栽试验研究方法,通过研究保水剂与不同氮磷肥配比对玉米生长、养分吸收、土壤养分有效性和产量的变化规律,提出适宜华北平原夏玉米种植的保水剂与氮磷肥配合施用水平,为华北平原夏玉米种植合理施肥提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

避雨桶栽试验于 2016 年 6—10 月在中国农业大学通州试验站日光温室进行(39°42′07″N,116°41′02″E)。供试玉米品种为郑单 958(属高产、稳产、紧凑型中熟玉米杂交种)。供试土壤取自试验站日光温室南侧空地耕层 0—20 cm 土壤,为粉质黏壤土(砂粒、粉粒、黏粒质量分数分别为 26.45%,60.57%,12.98%),容重为 1.4 g/cm³,田间持水率(FC)为 27.46%。土壤全氮含量 0.49 g/kg,全磷含量 0.61 g/kg,有机质含量 4.17 g/kg,碱解氮含量 52.4 mg/kg,有效磷含量 4.6 mg/kg,速效钾含量 63.6 mg/kg,pH 8.7,土壤肥力属于 V 级水平。土壤经风干、剔除植物残体后过 2 mm 筛备用。供试保水剂购自北京汉力森新技术有限公司,白色透明颗粒,主要成分为交联聚丙烯酰胺,在去离子水中溶胀平衡后吸水倍率为 597 g/g,0.9% NaCl 吸收量≤50 g/g,粒径为 0.8~1.6 mm。

1.2 试验设计

在相同保水剂施用量 1.68 g/pot 前提下^[16-17],试验

设置 5 种不同的氮磷肥配比(N:P 为 1:4,2:3,1:1,3:2,4:1),以不施保水剂为对照 CK(N:P 为 1:1),共计 6 个处理,每个处理 8 个重复。各处理布置见表 1。保水剂播前与 10—15 cm 的土壤均匀混合^[18]。氮肥品种为尿素(N 质量分数为 46.4%),分别在播前(基施)和抽穗期(随水追施)按照 1:1 施入土壤,磷肥为过磷酸钙(P₂O₅ 质量分数为 18%),钾肥为硫酸钾(K₂O 质量分数为 52%),磷钾肥作基肥,考虑实际大田施用情况,基肥播前与 0—20 cm 土壤均匀混合后一次性施入。采用塑料盆装土(上、下底内径和高分别为 29,37,40 cm),每盆装干土 48.10 kg(填土容重为 1.4 g/cm³)。为保证良好的通气条件,在每盆底部均匀设置 3 个 2 cm 的通气孔与碎石反滤层(图 1)。

表 1 夏玉米桶栽试验处理 单位:g/pot

处理	因素			
	SAP 用量	施氮量	施磷量	施钾量
CK	0	2.89	2.89	2.31
T1	1.68	1.16	4.62	2.31
T2	1.68	2.31	3.47	2.31
T3	1.68	2.89	2.89	2.31
T4	1.68	3.47	2.31	2.31
T5	1.68	4.62	1.16	2.31

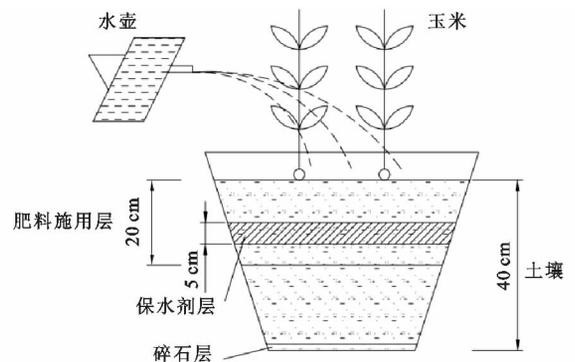


图 1 桶栽试验布置

夏玉米于 2016 年 6 月 29 日播种,10 月 29 日收获,生育期 123 天。每盆播种 5 粒玉米种子,7 月 7 日(三叶期)间苗至 2 株均匀的小苗。试验期间每 6~7 天利用称重法控水,保持轻微的干旱胁迫(75%~65% FC)。

1.3 测定指标与方法

在玉米生长过程中每 7 天测定各处理株高、叶面积变化情况。生育期内共进行 4 次破坏性取样,取样时间分别为拔节期(8 月 26 日)、抽穗期(9 月 5 日)、灌浆期(10 月 9 日)和成熟期(10 月 29 日)。取样时,玉米沿土壤表面剪断,地上部烘干后测定其干重、植株中全氮和全磷的含量,地下部分按 0—10,10—15,15—40 cm 分层测定土壤中无机氮(NH₄⁺-N、NO₃⁻-N)和有效磷含量。

株高、叶面积采用卷尺、游标卡尺测量计算;土壤无机氮含量采用连续流动分析仪测定;植株全氮含量采用 H₂SO₄-H₂O₂ 蒸馏法测定;植株全磷含量采用

H₂SO₄—H₂O₂ 钒钼黄吸光光度法测定;土壤中有效磷含量采用碳酸氢钠法测定^[19]。

1.4 数据分析

采用 SPSS 21.0 软件进行统计性检验分析,数据处理及作图在 Excel 2016 软件中完成。

2 结果与分析

2.1 保水剂与不同氮磷肥对比对植株生长的影响

2.1.1 保水剂与不同氮磷肥对比对株高、叶面积的影响

玉米的株高、叶面积是判断其生长发育情况的

表 2 保水剂与不同氮磷肥对比对株高、叶面积的影响

处理	株高/cm				叶面积/cm ²			
	拔节期	抽穗期	灌浆期	成熟期	拔节期	抽穗期	灌浆期	成熟期
CK	87.3a	153.5a	153.9a	153.8a	679.53b	2422.04ab	2341.11a	2117.91a
T1	86.5a	150.4a	150.4a	150.0a	646.22b	2430.32ab	2328.04a	2057.06a
T2	86.5a	147.7a	146.7a	147.7a	647.76b	2301.76ab	2198.77ab	1674.11a
T3	90.2a	159.0a	158.4a	159.2a	764.26a	2657.89a	2484.09a	2059.52a
T4	87.6a	153.5a	153.5a	153.6a	688.42ab	2401.59ab	2089.03ab	1601.92a
T5	87.4a	148.6a	149.0a	149.2a	668.96b	2101.15b	1888.95b	1503.72a

注:同一列不同字母表示各处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

2.1.2 保水剂与不同氮磷肥对比对地上部干物质的影响 玉米产量在一定范围内与干物质积累量呈正相关关系,高的生物量是获得高产的基础^[20-21]。由表 3 可以看出,在拔节期施用保水剂各处理的干物质积累大于对照处理 CK($P > 0.05$),这说明保水剂对植株拔节期的生长具有积极效应。追肥后,干物质积累迅速上升,随追肥量增大整体呈先增大后减小的趋势,T3 处理能获得较大的干物质积累量,施肥比例不合理不同程度抑制了植株干物质积累。处理 T3 生育期内平均地上干物质积累量较 CK 和其他氮磷肥配施处理分别提高了 16.69%,13.79%~27.61%。表明保水剂与氮磷肥合理配施对玉米地上部的干物质积累具有积极的影响,为高产提供了物质基础。

表 3 保水剂与不同氮磷肥对比对玉米地上部干重的影响
单位:g/pot

处理	拔节期	抽穗期	灌浆期	成熟期
CK	13.54a	44.81a	65.95ab	94.99b
T1	17.20a	34.68bc	62.85ab	87.17b
T2	18.49a	32.14c	62.89ab	87.01b
T3	18.63a	44.45a	78.87a	113.93a
T4	19.09a	39.41ab	70.37ab	95.99ab
T5	17.57a	41.26ab	61.85b	90.76b

2.2 保水剂与不同氮磷肥对比对植株养分吸收的影响

氮、磷、钾 3 种养分中,玉米对氮素吸收量最多,对磷素吸收量最少^[22]。玉米对土壤有效养分的吸收和转运影响了干物质积累,进而影响产量^[23]。从表 4 可以看出,植株全含氮量随时间逐渐增大,且各时期都随氮肥施用量增大整体表现出先增大后减小的趋势。拔节期,由于根系相对较浅,施用保水剂各处理植株全含氮量较

重要指标。由表 2 可知,各处理植株生育期平均株高表现为:T3>CK=T4>T1>T5>T2,平均叶面积大小表现为:T3>CK>T1>T2>T4>T5。氮磷肥施用比例不协调均会对株高、叶面积产生抑制作用。T3 处理施用量对株高、叶面积的增长效果最好,平均株高较 CK 和其他氮磷肥配施处理分别提高了 3.36%和 3.36%~7.19%,叶面积较 CK 和其他氮磷肥配施处理分别提高了 5.36%和 6.76%~29.26%,为增产创造了条件。

CK 有显著性提高($P < 0.05$),分别提高了 30.30%,45.45%,51.52%,45.45%和 36.36%,氮肥施用量对植株全含氮量没有显著性影响($P > 0.05$)。追肥后各处理植株氮素含量较拔节期提高,处理 T3 的氮素含量较其余处理显著提升($P < 0.05$)。施用保水剂能够促进植株对土壤中氮的吸收,各生育期 T3 较 CK 处理植株全含氮量分别提高了 51.52%,4.82%,17.89%,22.66%。

表 4 保水剂与不同氮磷肥对比对玉米植株全含氮量的影响
单位:g/pot

处理	拔节期	抽穗期	灌浆期	成熟期
CK	0.33b	0.83a	0.95ab	1.28b
T1	0.43ab	0.65bc	0.89b	1.12b
T2	0.48a	0.58c	0.86b	1.58a
T3	0.50a	0.87a	1.12a	1.57a
T4	0.48a	0.74abc	1.02ab	1.27b
T5	0.45ab	0.74abc	0.96ab	1.25b

由表 5 看出,夏玉米植株全含磷量随时间逐渐累积,各时期随磷肥施用量增大呈现出先增大后减小的趋势,氮磷肥配比不合理不同程度的抑制了植株中磷的累积。在拔节期,由于保水剂创造的良好根际水肥条件,施保水剂各处理植株全含磷量显著高于未施保水剂处理 CK($P < 0.05$),其余各处理间(T1~T5)没有显著性的差异($P > 0.05$)。其余时期,除 T3 处理外,不同氮磷肥配比处理并未表现出显著性差异($P > 0.05$)。施用保水剂(T3)相较未施保水剂(CK)处理,促进了植株中磷的累积,各生育期较 CK 分别提高了 47.33%,9.73%,18.86%,40.52%。施用保水剂能够显著提高植株含氮(磷)量,而在此基础上合理配施氮肥和磷肥,能使植株对于氮、磷元素的吸收达到最大化。

表 5 保水剂与不同氮磷肥对比对玉米植株含磷量的影响

处理	单位:mg/pot			
	拔节期	抽穗期	灌浆期	成熟期
CK	31.12b	67.86ab	135.52a	141.07b
T1	44.17a	74.49a	120.04a	149.72b
T2	43.01a	49.25b	114.06a	152.27ab
T3	45.85a	74.46a	161.08a	198.23a
T4	43.94a	56.95ab	140.04a	163.27ab
T5	40.59a	65.14ab	112.43a	150.34b

2.3 保水剂与不同氮磷肥对比对土壤养分的影响

硝态氮、铵态氮是土壤无机氮主要组成部分,有效磷是土壤中能被植株吸收利用的磷成分。作为土壤中氮、磷素的速效养分,了解保水剂与不同氮磷肥配比作用条件下土壤无机氮、有效磷分布的影响对植株生长、土壤养分有效性具有重要意义。

2.3.1 土壤无机氮含量 夏玉米生育期土壤无机氮含量随土壤深度分布情况见图 2。其含量总体表现为抽穗期>拔节期/灌浆期>成熟期。由于植株拔节期快速

生长对土壤养分的消耗,无机氮含量相对较小。在抽穗期追肥后,土壤无机氮含量明显上升。而后,随着夏玉米生长、干物质积累与灌水对无机氮的淋溶作用,土壤无机氮含量逐渐下降。各处理 15—40 cm 土壤无机氮含量在各生育期都出现了积聚的现象。CK、T2、T3、T4 和 T5 处理生育期平均无机氮含量较 T1 处理分别提高了 51.30%,16.58%,43.52%,44.04%和 68.91%。过少施氮会导致土壤中无机氮含量过小,从而影响作物生长,增施氮肥能够提高土壤中无机氮的含量,但施氮过多导致无机氮在土壤剖面累积,由于硝态氮在土壤中容易运移,而铵态氮又可以向硝态氮转化,增加了无机氮的淋溶风险。

T3 与 CK 处理相比,施用保水剂后,在拔节期与灌浆期 10—15 cm 无机氮含量较低,抽穗期(追肥后)和成熟期含量较高。结合灌水施肥条件与植株全含氮量变化规律,施用保水剂在吸持无机氮的同时又能促进植株对氮素的吸收利用。

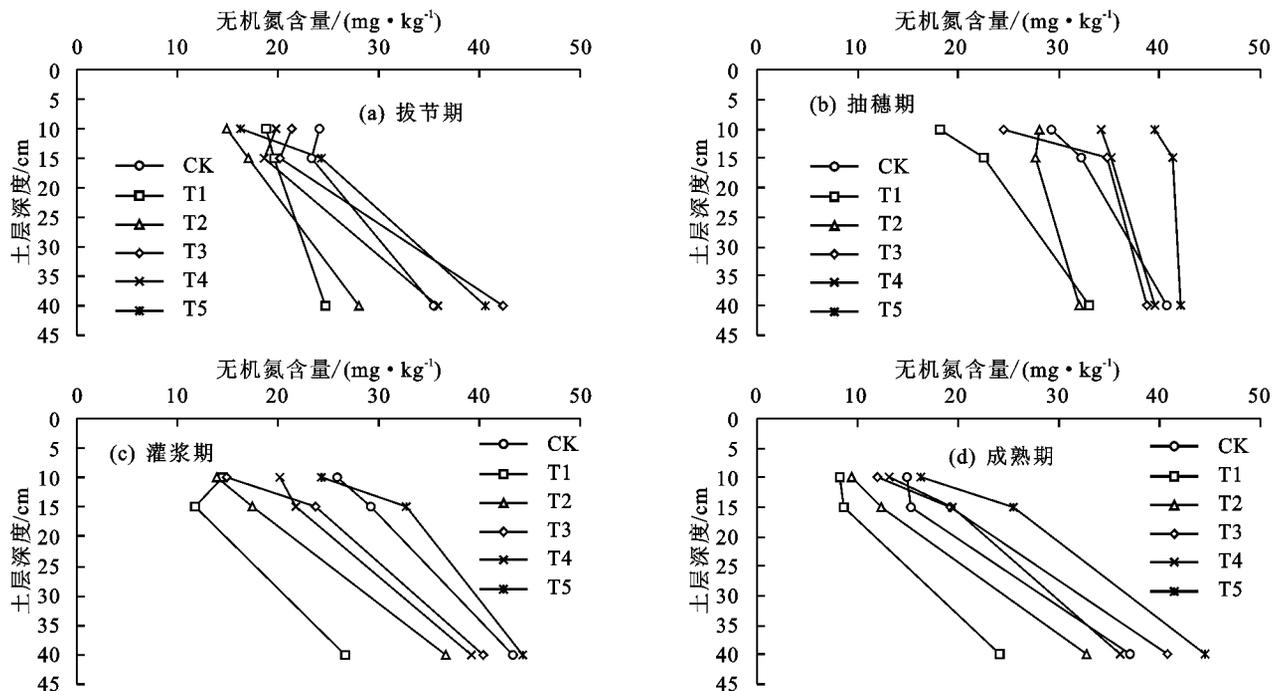


图 2 保水剂与不同氮磷肥对比对土壤无机氮含量影响

2.3.2 土壤有效磷含量 由图 3 可以看出,土壤有效磷含量在生育期内呈低—高一低变化,随施磷量增高呈增大的趋势。处理 CK、T1、T2、T3、T4 生育期土壤有效磷含量较 T5 分别提高了 138.03%,281.69%,87.32%,146.48%和 78.87%。各处理土壤有效磷含量最高值都出现在抽穗期或灌浆期。在成熟期,CK~T5 各处理土壤平均有效磷含量分别为 7.2,20.6,16.6,15.0,14.7,6.0 mg/kg,磷累积量随施磷量增大而增大,较播前 4.6 mg/kg 表现出不同程度的累积效应。这说明过量施用磷肥可能会使磷素在土壤中富集。

施用保水剂能够有效提高土壤中有效磷含量,T3 处理在施用保水剂后,土壤 10—15 cm 有效磷含量在拔节期、抽穗期、灌浆期和成熟期较 CK 处理分别提高了 62.50%,74.24%,73.51%和 18.63%,生育期内平均提高了 57.22%,结合植株全含磷量的变化规律,施用保水剂提高土壤有效磷含量的同时促进了植株对磷的吸收利用。

2.4 保水剂与不同氮磷肥对比对玉米耗水量、产量及水分利用效率的影响

由表 6 可以看出,除 T3 处理外,其余各处理玉米耗水量较 CK 均有不同程度下降,这种现象可能是

因为施用保水剂后减少了土壤的无效蒸发造成的。结合土壤养分与干物质变化情况,T3 处理耗水量增

大的原因可能是保水剂与氮磷肥均衡施用促进了植株的生长与对水分的吸收利用。

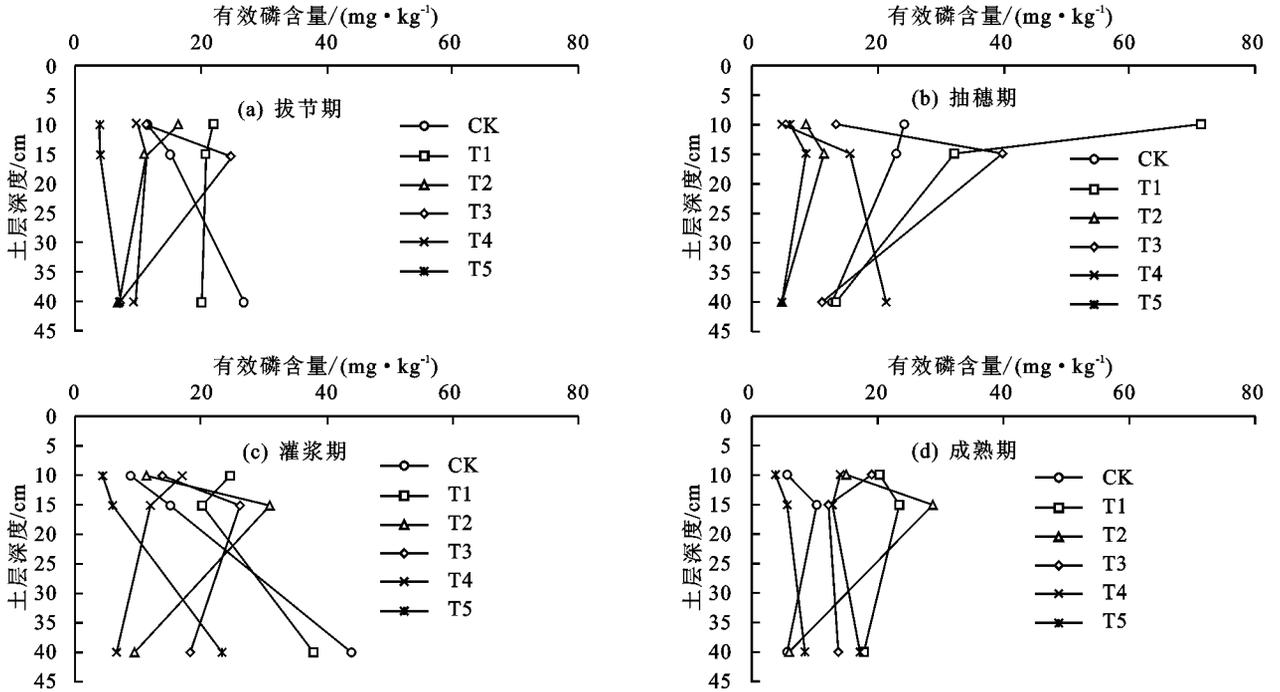


图 3 保水剂与不同氮磷肥对比对土壤有效磷含量影响

夏玉米产量随施氮(磷)量增大(减小)整体表现为先增大后减小的趋势,由大到小依次为:T3>T4>CK>T5>T1>T2。T3 处理产量显著大于其他处理($P<0.05$),与 CK 相比增产 19.94%,较 T1、T2、T4 和 T5 处理分别增产 30.70%,30.94%,18.69%和 25.53%。可以看出,施用保水剂较不施保水剂能使夏玉米增产,且保水剂与氮磷肥均衡施用(T3 处理)能使夏玉米产量达到最大;反之,则会导致不同程度的减产,施用较多的氮肥与施用较多的磷肥相比减产幅度较小。

各处理 WUE 随施氮(磷)量增加(减小)表现为先增大后减小的趋势,由大到小依次具体表现为:T3>T4>CK>T2>T5>T1,氮磷肥施用比例相差越大,WUE 越小。T3 处理植株 WUE 较其他处理显著提高($P<0.05$),与 CK 相比提高了 14.13%,较 T1、T2、T4 和 T5 处理分别提高 20.69%,16.24%,11.31%和 17.98%。

表 6 不同氮磷肥对比对玉米产量及水分利用效率的影响

处理	耗水量/ ($\text{kg} \cdot \text{pot}^{-1}$)	产量/ ($\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$)	WUE/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
CK	34.41ab	94.99b	2.76ab
T1	33.40bc	87.17b	2.61b
T2	32.14c	87.01b	2.71b
T3	36.14a	113.93a	3.15a
T4	33.93bc	95.99ab	2.83ab
T5	33.99bc	90.76b	2.67b

由表 7 相关性分析可知,夏玉米产量的形成与植株含氮量呈显著正相关关系($P<0.05$),与植株含磷量呈极显著正相关关系($P<0.01$);水分利用效率与株高、植株含氮(磷)量呈极显著正相关关系($P<0.01$),与叶面积、产量呈显著正相关关系($P<0.05$)。保水剂与氮磷肥合理配施,促进植株生长及其对养分的吸收利用,是提高玉米产量与水分利用效率的有效途径。

表 7 不同处理植株生理指标、土壤养分与产量、水分利用效率的相关性

项目	PH	LA	PW	PN	PP	SN	SP	Y	WUE
PH	1	0.864**	0.806**	0.465	0.553	0.328	-0.011	0.397	0.733**
LA		1	0.663*	0.364	0.513	-0.088	0.395	0.261	0.601*
PW			1	0.483	0.474	0.322	-0.116	0.560	0.559
PN				1	0.756**	0.306	-0.298	0.692*	0.802**
PP					1	0.035	0.162	0.714**	0.815**
SN						1	-0.769**	0.194	0.307
SP							1	-0.095	-0.129
Y								1	0.624*
WUE									1

注: ** 表示极显著相关($P<0.01$); * 表示显著相关($P<0.05$)。PH 为株高;LA 为叶面积;PW 为干物质;PN 为植株含氮量;PP 为植株含磷量;SN 为土壤无机氮含量;SP 为土壤有效磷含量;Y 为产量;WUE 为水分利用效率。

3 讨论

目前,关于保水剂与氮肥或磷肥单独配合施用效果已进行了大量研究,但保水剂与不同氮磷肥配比研究仍然较少。本文研究了保水剂与不同配比的氮磷肥施用于土壤耕层对玉米生长的影响,结果表明氮磷肥均衡施用结合保水剂保蓄水肥的作用,能够促进植株生长与养分吸收。已有研究^[24]表明,在生长后期维持一定的叶面积有助于增产。Islam等^[25]发现在亏缺灌溉条件下,施用SAP处理的株高和叶面积分别显著增加41.6%和79.6%。本研究发现,T3处理生育期内玉米的株高、叶面积均高于不施保水剂及其他氮磷肥配比处理,为增产创造了条件。同时,夏玉米植株干物质与含氮(磷)量随生育进程逐渐累积,且在各生育期内随施用氮(磷)肥量增多呈先增大后减小的趋势。T3处理能使植株含氮(磷)量在各生育期达到最大,且收获时地上部干物质大于其他处理。与玉米植株吸氮(磷)量随施氮(磷)量增大呈现不断增大的观点相反^[24,26]。这可能是由于氮磷肥施用比例失调,对植株的养分吸收产生负面的影响^[6]。

已有研究^[27-28]表明,生育期内土壤平均无机氮、有效磷含量随氮(磷)肥施用量增大而增大,本研究也得到了同样的结论。研究发现施入保水剂(T3)较未施保水剂处理(CK),生育期内0—40 cm土壤平均无机氮含量减少5.42%,有效磷含量提高3.55%。结合植株氮(磷)含量可知,施用保水剂提高了土壤养分的有效性。杜建军等^[15]、黄震等^[29]的研究表明,土壤中施用保水剂后能明显降低氮、磷累积淋失量。本研究发现,T3与CK处理相比,在拔节末期与灌浆期10—15 cm无机氮含量较少,这可能是因为T3处理在10—15 cm施埋了保水剂后,创造了良好的水分与养分条件,促进了植株干物质积累与对氮素的吸收利用;而抽穗期(追肥后)和成熟期含量较大,这可能是因为在水肥施用后,由于保水剂对土壤水分和养分的吸持能力,使得保水剂层土壤养分含量明显升高,而在成熟期,可能是由于玉米接近停止生长,且灌浆期后,随着灌水次数的不断增多,水分对无机氮的淋溶作用造成了这种现象。T3处理与CK处理相比,土壤10—15 cm有效磷含量在各生育期都有所提高,平均提高了57.22%,与无机氮变化规律并不相同。产生这种现象可能由几点原因共同产生作用:一是磷肥全部基施且在土壤中不易运移;二是作物吸收磷素的含量小于吸收氮素的含量^[22];三是保水剂施用后,能够活化土壤中难溶性磷^[15];四是保水剂对养分离子的吸持作用。

玉米的产量在一定范围内随施氮、磷量增加而增加,过少施肥导致土壤中有效养分减少,从而导致产量的降低;而当施肥量超过某一阈值后,会对植株生长产生抑制作用,使其干物质积累变化不明显,导致

产量降低^[5-6,24,30]。合理施用氮肥或磷肥能够显著提高玉米的产量^[31],且与保水剂配施效果更好^[14-15]。本研究发现,保水剂与氮磷肥均衡施用后,植株干物质积累在各生育期相较其他处理均能达到较大值,且收获时产量较其他处理提高了18.69%~30.94%,氮磷肥施入不均衡都会导致玉米产量有不同程度的下降。本研究与程闯胜等^[32]得出的施用保水剂能够使玉米增产11%~20%相比,产量提高更多。通过植株、土壤指标与产量的相关性分析得到利用保水剂蓄水保肥的特性,与氮磷肥均衡施用,通过促进植株生长(株高、叶面积、干物质积累),提高养分吸收能力(植株含氮、磷量)是提高其产量与水分利用效率的主要途径。

4 结论

(1)保水剂与氮磷肥均衡施用(T3处理)能够提高玉米的株高、叶面积,生育期平均株高较CK和其他氮磷肥配施处理分别提高了3.36%和3.36%~7.19%,叶面积较CK和其他氮磷肥配施处理分别提高了5.36%和6.76%~29.26%,同时促进了干物质积累,生育期平均干物质积累较CK和其他氮磷肥配施处理分别提高了16.69%和13.79%~27.61%,为夏玉米高产提供了必要条件。

(2)保水剂与氮磷肥均衡施用(T3处理)能够使植株的氮(磷)累积量达到最大,生育期内植株氮累积量较CK和其他氮磷肥配比处理分别提高了20.00%和15.91%~32.47%,磷累积量较CK和其他氮磷肥配比各处理分别提高了27.71%和18.66%~33.75%。施用保水剂(T3处理)较未施用保水剂(CK处理)相比,生育期内土壤平均无机氮含量减少5.42%,有效磷含量提高3.55%。

(3)在本试验条件下,保水剂与氮磷肥均衡施用(T3处理)可以得到最大玉米产量113.93 g/pot,相对于CK和其他氮磷肥配比处理,收获时产量分别提高了19.94%和18.69%~30.94%。

综上所述,保水剂与氮磷肥均衡施用(施SAP 1.68 g/pot,施N 2.89 g/pot,施P 2.89 g/pot)较其他处理能够提高玉米的株高、叶面积;促进干物质形成的同时,也促进了玉米植株中氮、磷的累积,收获时产量与WUE显著提高。本试验结果为华北地区施用保水剂条件下的夏玉米氮磷肥施用配比提供了参考。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴[J]. 北京:中国统计出版社, 2017.
- [2] 柴颖. 氮磷肥配施对土壤速效养分及玉米产量的影响[D]. 新疆 石河子:石河子大学, 2015.
- [3] 夏来坤,陶洪斌,许学彬,等. 不同施氮时期对夏玉米干物质积累及氮肥利用的影响[J]. 玉米科学, 2009, 17(5): 138-140.
- [4] 王云奇,陶洪斌,黄收兵,等. 施氮模式对夏玉米氮肥利用和

- 产量效益的影响[J]. 核农学报, 2013, 27(2): 219-224.
- [5] 刘凯, 张吉旺, 郭艳青, 等. 施磷量对高产夏玉米产量和磷素利用的影响[J]. 山东农业科学, 2016, 48(4): 61-65.
- [6] 杜红霞, 吴普特, 王百群, 等. 施磷对夏玉米土壤硝态氮、吸氮特性及产量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2009, 37(8): 121-126.
- [7] Miao Y, Stewart B A, Zhang F. Long-term experiments for sustainable nutrient management in China: A review [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2011, 31(2): 397-414.
- [8] 李云开, 杨培岭, 刘洪禄. 保水剂在农业上的应用技术与效应[J]. 节水灌溉, 2002(2): 12-16.
- [9] Liao R K, Yang P L, Yu H L, et al. Establishing and validating a root water uptake model under the effects of super absorbent polymers[J]. *Land Degradation and Development*, 2018, 29(5): 1478-1488.
- [10] Liao R K, Yang P L, Zhu Y H, et al. Modeling soil water flow and quantification of root water extraction from different soil layers under multi-chemicals application in dry land field[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 203: 75-86.
- [11] Liao R K, Zhang Z, Yang P L, et al. Physiological regulation mechanism of multi-chemicals on water transport and use efficiency in soil-maize system[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 172: 1289-1297.
- [12] 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.
- [13] 苟春林, 王新爱, 李永胜, 等. 保水剂与氮肥的相互影响及节水保肥效果[J]. 中国农业科学, 2011, 44(19): 4015-4021.
- [14] 李永胜, 苟春林, 杜建军, 等. 保水剂与磷肥的相互影响及节水保肥效果[J]. 水土保持研究, 2014, 21(6): 67-71.
- [15] 杜建军, 苟春林, 崔英德, 等. 保水剂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.
- [16] 廖人宽, 张志成, 任树梅, 等. 化学集成调控技术对土壤水氮与玉米产量的影响[J]. 农业机械学报, 2014, 45(6): 166-171.
- [17] 白文波, 王春艳, 李茂松, 等. 不同灌溉条件下保水剂对新疆棉花生长及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(10): 69-76.
- [18] 朱元浩, 杨培岭, 杜鑫, 等. 利用氢氧稳定同位素探究保水剂对玉米根系作用机理[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(10): 42-46.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [20] 黄振喜, 王永军, 王空军, 等. 产量 15 000 kg/hm² 以上夏玉米灌浆期间的的光合特性[J]. 中国农业科学, 2007, 40(9): 1898-1906.
- [21] 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.
- [22] 张颖. 不同产量类型春玉米养分吸收特点及其分配规律的研究[J]. 玉米科学, 1997, 5(3): 70-72.
- [23] 宋海星, 李生秀. 玉米生长量、养分吸收量及氮肥利用率的动态变化[J]. 中国农业科学, 2003, 36(1): 71-76.
- [24] 王云奇, 陶洪斌, 杨利华, 等. 氮肥管理对夏玉米冠层结构和氮肥吸收利用的影响[J]. 玉米科学, 2013, 21(3): 125-130.
- [25] Islam M R, Hu Y, Mao S, et al. Effectiveness of a water-saving super-absorbent polymer in soil water conservation for corn (*Zea mays* L.) based on eco-physiological parameters[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2011, 91(11): 1998-2005.
- [26] 范秀艳, 杨恒山, 高聚林, 等. 施磷方式对高产春玉米磷素吸收与磷肥利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 312-320.
- [27] 栗丽, 洪坚平, 王宏庭, 等. 施氮与灌水对夏玉米土壤硝态氮积累、氮素平衡及其利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(6): 1358-1365.
- [28] Zhang W, Chen X X, Liu Y M, et al. The role of phosphorus supply in maximizing the leaf area, photosynthetic rate, coordinated to grain yield of summer maize[J]. *Field Crops Research*, 2018, 219: 113-119.
- [29] 黄震, 黄占斌, 李文颖, 等. 不同保水剂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.
- [30] 王宜伦, 刘天学, 赵鹏, 等. 施氮量对超高产夏玉米产量与氮素吸收及土壤硝态氮的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(12): 2483-2491.
- [31] 杜红霞, 吴普特, 冯浩, 等. 氮磷肥配施对夏玉米土壤含水量及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(3): 12-15.
- [32] 程闯胜, 任树梅, 杨培岭, 等. 保水剂对大田雨养玉米水肥利用效率影响的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(6): 141-144.

(上接第 228 页)

- [20] 王宏立, 张伟. 不同保护性耕作方式对东北寒地旱作区土壤温度的影响[C]//2010 年国际农业工程大会论文集, 2010, 11: 335-338.
- [21] Stockfisch N, Forstreuter T, Ehlers W. Ploughing effects on soil organic matter after twenty years of conservation tillage in Lower Saxony, Germany[J]. *Soil Tillage Research*, 1999, 52(1/2): 91-101.
- [22] 张建军, 王勇, 樊廷录, 等. 耕作方式与施肥对陇东旱塬冬小麦—春玉米轮作农田土壤理化性质及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(4): 1001-1008.
- [23] 武均, 蔡立群, 罗珠珠, 等. 保护性耕作对陇中黄土高原雨养农田土壤物理性状的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2): 112-117.