

# 减量施肥条件下腐植酸保水剂对玉米产量及白浆土养分含量的影响

王楠<sup>1</sup>,包岩<sup>1\*</sup>,姚凯<sup>1</sup>,陈殿元<sup>1\*\*</sup>,张殿锡<sup>2</sup>,孙鑫<sup>1</sup>,王帅<sup>1</sup>  
(1. 吉林农业科技学院农学院,吉林 吉林 132101; 2. 吉林省润禾滩地农业开发有限公司,吉林 长岭 131500)

**摘要:** 为了揭示腐植酸保水剂(WA)在减量施肥下的应用效果,以不施肥(CK)为空白对照,设置全量施肥(Tf)、减少氮肥20%(Df-N 20%)、减少磷肥20%(Df-P 20%)、减少钾肥20%(Df-K 20%)以及在此基础上配施WA(Tf-WA、Df-N 20%-WA、Df-P 20%-WA、Df-K 20%-WA),探究减量施肥条件下WA对玉米产量及白浆土养分含量的影响。结果表明:各施肥处理的玉米出苗率,灌浆期展开叶片数、株高、单叶叶面积,穗粒数及产量均较CK显著增加。Df-N 20%、Df-K 20%处理添加WA后使玉米产量分别显著提高9.4%、13.4%;在Tf、Df-P 20%处理条件下配施WA则使产量显著降低。Df-P 20%、Df-P 20%-WA处理玉米收获期的土壤pH值较拔节期分别显著降低3.7%、3.1%,加剧了白浆土的酸化进程;与拔节期相比,玉米收获期Df-K 20%、Tf-WA、Df-P 20%-WA、Df-K 20%-WA处理白浆土有机质含量分别显著提高2.5%、2.1%、6.3%、4.4%,其余处理均不利于有机质成分的积累,其中Df-N 20%-WA处理对有机质的消耗程度最大,使其降低28.3%;与拔节期相比,玉米收获期除CK白浆土全氮含量保持稳定外,其余处理全氮含量均不同程度地降低,从降幅来看,Tf、Df-K 20%处理配施WA能够缓解全氮含量的下降趋势,而Df-N 20%、Df-P 20%处理添加WA则增加其对全氮的利用;在各施肥基础上配施WA对白浆土碱解氮含量没有规律性影响,但Df-K 20%-WA处理能够在一定程度上缓解碱解氮的下降趋势、提高白浆土的有效磷含量,而Df-K 20%处理能够有效促进白浆土碱解氮的累积;除玉米灌浆期外,其余4个时期,添加WA的处理白浆土有效磷含量均较未施WA处理显著提升;添加WA的各施肥处理均有利于玉米成熟期和收获期白浆土速效钾的消耗。综上,以减少氮肥20%或减少钾肥20%为前提,施用WA可增加玉米产量,前者不利于白浆土有机质积累;无论是否配施WA,减少磷肥20%均可加速土壤酸化进程;施肥能有效促进白浆土全氮的消耗,但对碱解氮含量未见规律性影响。

**关键词:** 腐植酸保水剂; 减量施肥; 玉米; 产量; 养分含量  
**中图分类号:** S158.5;S513      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1004-3268(2017)11-0052-08

## Effect of Humic Acid Water-retaining Agent on Yield Properties of Maize and Albic Soil Nutrients Based on Reducing Fertilizer Application

WANG Nan<sup>1</sup>,BAO Yan<sup>1\*</sup>,YAO Kai<sup>1</sup>,CHEN Dianyuan<sup>1\*\*</sup>,ZHANG Dianxi<sup>2</sup>,SUN Xin<sup>1</sup>,WANG Shuai<sup>1</sup>  
(1. College of Agriculture,Jilin Agricultural Science and Technology University,Jilin 132101,China; 2. Runhe Agriculture Development Co.,Ltd.in Jilin Province,Changling 131500,China)

**Abstract:** In order to reveal the application effect of humic acid water-retaining agent(WA) under the condition of reducing fertilizer,no fertilizer(CK) used as a blank control,the treatments of total fertilizer

收稿日期:2017-05-22  
基金项目:吉林农业科技学院青年基金项目(吉农院合字[2014]第207号,吉农院合字[2015]第206号);国家自然科学基金项目(41401251);吉林农业科技学院重点学科培育项目(吉农院合字[2015]第X006号,吉农院合字[2015]第X009号)  
作者简介:王楠(1982-),女,吉林九台人,讲师,博士,主要从事土壤肥力调控研究。E-mail:wangnan664806@126.com  
\* 与第一作者同等贡献  
\*\* 通讯作者:陈殿元(1963-),男,吉林农安人,教授,硕士,主要从事作物育种及栽培技术研究。E-mail:jlcdy@sina.com

(Tf), decreasing N fertilizer 20% (Df-N 20%), decreasing P fertilizer 20% (Df-P 20%), decreasing K fertilizer 20% (Df-K 20%), and respectively combined with WA (Tf-WA, Df-N 20%-WA, Df-P 20%-WA and Df-K 20%-WA) were set to explore their effects on the yield properties of maize and albic soil nutrients. The results were as follows: the emergence rate of maize, total leaf number during the grain filling stage, plant height, leaf area of single leaf, grain number per spike and yield treated by fertilization significantly increased compared with CK. Based on Df-N 20% and Df-K 20% treatments, the application of WA could increase the corresponding maize yields by 9.4% and 13.4%, respectively. On the contrary, based on the Tf and Df-P 20% treatments, combined application of WA could obviously decrease their yields. The Df-P 20% and Df-P 20%-WA treatments could further aggravate the acidification of albic soil and decrease the pH value by 3.7% and 3.1%, respectively. Compared with the maize jointing stage, the organic matter contents treated by Df-K 20%, Tf-WA, Df-P 20%-WA and Df-K 20%-WA on the harvest time, the increasing rate were 2.5%, 2.1%, 6.3% and 4.4%, respectively, on the contrary, the other treatments were all bad for the accumulation of organic matter content, among which the consumption degree of organic matter content in the Df-N 20%-WA treatment was the greatest, reaching 28.3%. Compared with the jointing period, apart from CK treatment could make the total N content stable, all the other treatments could decrease the total N content to varying degrees. From the extent of reduction, based on Tf and Df-K 20% treatments, the applied WA could ease the downtrend of total N content, however the Df-N 20% and Df-P 20% treatments could increase their consumption of total N contents under the same conditions. On the basis of the fertilizer, the combined application of WA had no regular effect on the available N, however, the Df-K 20%-WA treatment could alleviate the downward trend of available N to a certain extent and enhance the available P content of albic soil. The Df-K 20% treatment could effectively promote the accumulation of available N contents. Except the filling stage of corn, the WA could make the available P content significantly enhance compared with no WA at the other four stages of growth. Different fertilization treatments amended with WA were all beneficial to the consumption of available K content of albic soil in the mature period and harvesting time. In conclusion, based on the decreasing N fertilizer 20% or decreasing K fertilizer 20%, the combined application of WA could increase the corn yield, in which the former was not good for the accumulation of organic matter in albic soil; The soil acidification process could be accelerated by reducing P fertilizer 20%, whether or not it was combined with WA; Fertilization could effectively promote the consumption of total N content in albic soil, but did not have the regular effect on the content of available N.

**Key words:** humic acid water-retaining agent; reducing application of fertilizer; maize; yield; nutrient content

吉林省东部白浆土区是玉米增产潜力较大的区域,但该区域土壤瘠薄、干旱频发、水肥资源生产效率较低。近年来,该区域玉米的产量波动较大,总体表现为随干旱程度加剧而降低的趋势。因此,为大面积提高玉米产量,必须探索简单易行、成本较低的保水和培肥措施来抵御灾害性干旱对玉米生产的威胁。此外,吉林省玉米生产一次性施肥现象普遍,寻求新的有机替代品来取代化肥也是现阶段亟待解决的核心生产问题。

作为一类新型的亲水性高分子功能性材料,腐植酸保水剂(humic acid water-saving agent, WA)的核心组分——腐植酸结构中含有羧基、酚羟基、羰基和醇羟基等活性功能基团,大量亲水基团使其在与水接触时易发生电离并与水分子结合成氢键,吸持

大量水分。此外,形成的聚合物网状结构又具有弹性,其内部离子浓度与外部溶液易产生渗透势差,可使水分不断涌入聚合物内部,发挥蓄水保水功能,可见,WA的吸水过程主要表现为渗透作用机制<sup>[1]</sup>。

近年来,随着干旱气候的频发以及土壤贫瘠趋势的加剧,多地探索了保水剂对作物生产及土壤养分所发挥的优势作用。赵敏等<sup>[2]</sup>通过研究保水剂对夏玉米生长发育及产量的影响得出,保水剂能促进种子萌发、提高根系活力;郭世文等<sup>[3]</sup>指出,土壤水分状况与玉米株高、叶面积、穗粒数、干质量、产量和收获指数密切相关,而保水剂和黄腐酸的施用能够缓解干旱对上述指标引起的不良影响;刘世亮等<sup>[4]</sup>利用盆栽试验研究了在砂薄土壤中施用保水剂对作物生长及土壤养分转化的影响,结果发现,施

用保水剂能显著提高玉米株高、增加总叶面积、提高肥料利用率;雷恩等<sup>[5]</sup>研究认为,施用适宜浓度的松土保水剂可有效提高玉米株高、单株叶面积、单株生物量、根系干质量、苗期净同化率、叶绿素含量和根系活力。可见,保水剂的施入对于作物产量性状的提高和维持确有帮助。而就土壤养分性状而言,马焕成等<sup>[6]</sup>通过田间试验表明,森林土壤中施加保水剂可显著提高土壤中的养分含量,使土壤碱解氮含量提高 133.1%~295.8%、有效磷含量提高 10.4%~43.2%、速效钾含量提高 124.2%~220.3%;黄震等<sup>[7]</sup>采用土柱模拟试验方法,以不施保水剂处理为对照,比较了聚丙烯酸盐类保水剂、有机-无机复合保水剂和腐植酸型保水剂对土壤水分以及尿素和硝酸铵 2 种氮肥的保持效应,结果发现,腐植酸型保水剂对 2 种氮肥的保持效果显著优于对照,且对土壤脲酶活性有所促进;程闯胜等<sup>[8]</sup>研究指出,与未施保水剂处理相比,保水剂施用量为 45 kg/hm<sup>2</sup>时,20~60 cm 土层含水率提高 18.3%,0~60 cm 土层硝态氮、铵态氮、有效磷含量分别提高 8.7%、16.3%、47.8%。综上,施用 WA 在改善土壤水分状况、提升玉米产量性状等方面不乏报道,在提高肥料利用率、优化土壤养分条件等方面也有所研究,但在减少肥料供应的前提下,施用 WA 对玉米产量及白浆土养分性状的改善效果尚未见系统报道。鉴于此,通过田间试验研究全量及减量施肥条件下 WA

对玉米产量性状及白浆土养分状况的影响,以揭示 WA 在当前倡导减量施用化肥背景下所发挥的优势作用,为玉米抵御干旱等灾害性天气以及构建稳产的地力条件提供技术参考。

1 材料和方法

1.1 试验材料

WA 由吉林省润禾滩地农业开发有限公司提供。供试玉米品种为半紧凑型的中晚熟品种翔玉 998(审定编号:吉审玉 2014038,Y822 为母本,X923-1 为父本),生育期 127 d,需≥10℃积温 2 700℃。

1.2 试验设计

田间试验在吉林农业科技学院北大地玉米试验田(N 43°57'07"、E 126°28'32"、H 190 m)进行,该地属北温带大陆性季风气候,土壤类型为白浆土,有机质含量 13.6 g/kg、全氮含量 0.77 g/kg、碱解氮含量 126.6 mg/kg、有效磷含量 40.8 mg/kg、速效钾含量 134.9 mg/kg,pH 值 5.42。

试验共设 9 个处理(表 1),各处理均在玉米播种前(4 月 28 日)一次性施入基肥,每个处理重复 3 次,区组间设有 1 m 保护行且随机排列。小区长 15 m、宽 9.1 m,面积为 136.5 m<sup>2</sup>,按 14 垄种植玉米,垄距为 0.65 m、株距为 0.24 m,种植密度为 6.5 万株/hm<sup>2</sup>。各处理间病虫害防治及田间管理措施一致。

表 1 试验处理及具体施用方法

处理	代号	每小区具体的施肥量
空白对照	CK	不施肥
全量施肥	Tf	尿素 5.20 kg、磷酸二铵 2.10 kg、氯化钾 1.85 kg
减少氮肥 20%	Df-N 20%	尿素 4.16 kg、磷酸二铵 2.10 kg、氯化钾 1.85 kg
减少磷肥 20%	Df-P 20%	尿素 5.20 kg、磷酸二铵 1.65 kg、氯化钾 1.85 kg
减少钾肥 20%	Df-K 20%	尿素 5.20 kg、磷酸二铵 2.10 kg、氯化钾 1.48 kg
全量施肥配施 WA	Tf-WA	尿素 5.20 kg、磷酸二铵 2.10 kg、氯化钾 1.85 kg、0.3 kg WA
减少氮肥 20%配施 WA	Df-N 20%-WA	尿素 4.16 kg、磷酸二铵 2.10 kg、氯化钾 1.85 kg、0.3 kg WA
减少磷肥 20%配施 WA	Df-P 20%-WA	尿素 5.20 kg、磷酸二铵 1.65 kg、氯化钾 1.85 kg、0.3 kg WA
减少钾肥 20%配施 WA	Df-K 20%-WA	尿素 5.20 kg、磷酸二铵 2.10 kg、氯化钾 1.48 kg、0.3 kg WA

1.3 测定项目及方法

采用五点采样法分别在玉米拔节期(6 月 6 日)、抽雄期(7 月 13 日)、灌浆期(8 月 14 日)、成熟期(9 月 20 日)和收获期(10 月 13 日)采集各小区的土样,测定白浆土的 pH 值以及有机质、全氮、碱解氮、有效磷和速效钾含量,测试方法分别采用电位法、重铬酸钾氧化—外加加热法、半微量凯氏定氮法、碱解扩散法、NaHCO<sub>3</sub> 浸提—钼锑抗比色法、CH<sub>3</sub>COONH<sub>4</sub> 浸提—火焰光度法进行。

5 月 16 日调查出苗率,出苗率=田间苗数/播

种粒数×100%。在玉米灌浆期,每个小区选取 5 株代表性植株,调查株高、展开叶片数、茎粗、叶面积,测定方法如下:量取雄穗顶部到地面的距离即为株高;以整个叶片全部从下位叶鞘中伸展露出为依据测查展开叶片数;测量近地面倒数第 3 节间扁面直径作为茎粗,以 cm 表示;在每个植株上选取距离玉米穗最近的 5 个叶片测算叶面积,单叶叶面积按照如下公式计算: $A=L\times W\times 0.75$ ,式中,A 为叶面积(cm<sup>2</sup>)、L 为叶长(即从叶环至叶尖的长度,cm)、W 为叶宽(即叶片最宽处,cm)、0.75 为修正系数。玉

米成熟后,理论测产方法:以小区为单位,分别测算垄距、株距,连续选取 10 株计算平均每株穗数,在其中随机选取 5 穗测算平均穗粒数,依据百粒质量,根据下式计算玉米理论测产数据。

玉米理论测产数据(kg/hm<sup>2</sup>) =  
$$\frac{\text{平均每株穗数} \times \text{平均穗粒数} \times \text{百粒质量(g)}}{\text{平均垄距(m)} \times \text{平均株距(m)} \times 10}$$

1.4 数据处理

用 Excel 2003 对数据进行整理,采用 SPSS 18.0 进行统计分析。采用单因素 ANOVA 分析和 Duncan’s 多重极差检验法比较处理间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 减量施肥下 WA 对玉米产量性状的影响

如表 2 所示,与 CK 相比,Tf、Df - N 20%、Df - P 20%、Df - K 20% 及其配施 WA 相应处理(Tf - WA、Df - N 20% - WA、Df - P 20% - WA 和 Df - K 20% - WA)的出苗率,灌浆期展开叶片数、株高、单叶叶面积,穗粒数及产量均显著增加。在 Tf 和 Df - P 20% 基础上配施 WA(Tf - WA 和 Df - P 20% - WA)均不利于玉米产量增加,分别使其显著降低8.2%和

7.7%;而 Df - N 20% - WA 处理下的产量分别比 Df - N 20%、Df - K 20% 处理显著增加 9.4%、13.4%。Tf - WA 处理灌浆期的展开叶片数和株高均较未施 WA 的处理下降,而单叶叶面积和茎粗与未施 WA 的处理差异不显著,但 Tf - WA 处理的穗粒数较 Tf 处理显著降低,降幅达 2.4%,最终其产量也有显著降低。在 Df - N 20% 基础上配施 WA,出苗率降低 2.7%,但能显著增加灌浆期的展开叶片数、单叶叶面积,穗粒数及产量,这也许是因为施用 WA 使展开叶片数和单叶叶面积有所增加,光合作用增强,进而使产量增加。在 Df - P 20% 的基础上施用 WA 也不利于出苗率以及灌浆期展开叶片数、株高、茎粗的提高,最终使产量显著降低。据此推测,施入 WA 可能对磷有一定的吸持作用,进而减少了玉米对磷素的吸收,不利于产量的提高。与 Df - K 20% 相比,Df - K 20% - WA 处理灌浆期的展开叶片数、株高分别提高 3.8%、6.1%,相反,使单叶叶面积和茎粗分别降低 6.9% 和 3.8%,但其对穗粒数和产量均有显著提升作用。

表 2 减量施肥下 WA 对玉米产量性状的影响

处理	出苗率/%	灌浆期				穗粒数/个	产量/(kg/hm <sup>2</sup> )
		展开叶片数/片	株高/m	单叶叶面积/cm <sup>2</sup>	茎粗/cm		
CK	90.6C	12.2D	2.8C	502.1F	2.3C	508.4G	7 423.6E
Tf	94.8AB	13.6AB	3.4A	600.8D	2.4BC	601.3C	10 211.7C
Df - N 20%	95.5A	13.1C	3.4A	594.9E	2.5AB	561.8F	9 412.3D
Df - P 20%	95.1A	13.8A	3.4A	607.8BC	2.6A	572.2E	11 807.0A
Df - K 20%	94.1AB	13.1C	3.3AB	656.2A	2.6A	585.4D	10 149.7C
Tf - WA	94.1AB	13.3BC	3.3AB	602.7CD	2.5AB	586.7D	9 370.4D
Df - N 20% - WA	92.9B	13.8A	3.4A	659.7A	2.5AB	618.2B	10 301.2C
Df - P 20% - WA	94.3AB	13.4BC	3.2B	608.3BC	2.5AB	573.1E	10 896.9B
Df - K 20% - WA	94.3AB	13.6AB	3.5A	611.2B	2.5AB	653.3A	11 505.7A

注:同列不同大写字母表示各处理在 0.05 水平上的差异显著。

2.2 减量施肥下 WA 对白浆土 pH 值及有机质、全氮含量的影响

如表 3 所示,随玉米生育时期的推进,Tf、Tf - WA、Df - N 20% - WA 和 Df - P 20% - WA 处理下 pH 值呈先增后减再略有提升的变化趋势,而其余处理整体上则表现为先增加后渐趋降低的趋势。与 CK 相比,玉米抽雄期各处理白浆土 pH 值均有显著提升。同一处理不同生育时期比较,收获期 CK、Df - N 20%、Tf - WA、Df - N 20% - WA 处理白浆土 pH 值均较拔节期显著提高,增幅分别为 5.9%、4.1%、7.5%、3.7%;而 Df - P 20% 和 Df - P 20% - WA 处理 pH 值较拔节期分别显著降低 3.7% 和 3.1%,使白浆土进一步酸化,可见,减少磷酸二铵施

用可加速土壤酸化,而配施 WA 可在一定程度上缓解 pH 值的下降趋势;Tf、Df - K 20%、Df - K 20% - WA 处理拔节期和收获期的 pH 值差异不显著。与 Tf、Df - N 20%、Df - P 20%、Df - K 20% 处理相比,添加 WA 的相应处理玉米抽雄期白浆土 pH 值分别降低 12.1%、10.8%、7.6%、9.2%,而拔节期和收获期白浆土 pH 值则总体上表现为显著提高。与 Tf 处理相比,Tf - WA 处理使灌浆期 pH 值显著降低3.6%,而成熟期 pH 值则显著增加 3.6%;与 Df - N 20% 处理相比,Df - N 20% - WA 处理 pH 值在灌浆期增加 6.5%,在成熟期降低 0.7%;而 Df - P 20% - WA、Df - K 20% - WA 处理 pH 值在灌浆期分别较未施 WA 处理降低 8.4%、5.9%,在成熟期则无显著变化。

表 3  减量施肥下 WA 对白浆土 pH 值及有机质、全氮含量的影响

指标	处理	拔节期	抽雄期	灌浆期	成熟期	收获期
pH	CK	5.09 ± 0.14dD	5.22 ± 0.12cI	5.30 ± 0.11bF	5.44 ± 0.06aE	5.39 ± 0.18aCD
	Tf	5.25 ± 0.10cC	7.08 ± 0.11aA	5.52 ± 0.08bE	5.03 ± 0.09dE	5.22 ± 0.13cF
	Df - N 20%	5.08 ± 0.18eD	6.87 ± 0.11aB	5.67 ± 0.17bD	5.37 ± 0.12cBC	5.29 ± 0.10dE
	Df - P 20%	5.20 ± 0.11cC	6.46 ± 0.12aC	5.83 ± 0.21bC	5.23 ± 0.09cD	5.01 ± 0.16dG
	Df - K 20%	5.33 ± 0.08dB	6.39 ± 0.09aD	5.97 ± 0.10bB	5.67 ± 0.15cA	5.35 ± 0.12dD
	Tf - WA	5.35 ± 0.10cB	6.22 ± 0.12aE	5.32 ± 0.16cF	5.21 ± 0.05dD	5.75 ± 0.15bA
	Df - N 20% - WA	5.43 ± 0.16dA	6.13 ± 0.02aF	6.04 ± 0.10bA	5.33 ± 0.20cC	5.63 ± 0.09cB
	Df - P 20% - WA	5.44 ± 0.12bA	5.97 ± 0.13aG	5.34 ± 0.15cF	5.20 ± 0.14dD	5.27 ± 0.12cdEF
	Df - K 20% - WA	5.40 ± 0.15cAB	5.80 ± 0.12aH	5.62 ± 0.12bD	5.63 ± 0.09bA	5.44 ± 0.08cC
有机质含量/(g/kg)	CK	11.3 ± 0.1cD	11.9 ± 0.4bDE	13.7 ± 0.1aA	13.9 ± 0.1aA	10.8 ± 0.2dD
	Tf	13.9 ± 0.3aB	13.3 ± 0.3aAB	11.2 ± 0.9cC	14.2 ± 0.4aA	12.2 ± 0.1bB
	Df - N 20%	12.6 ± 0.2bC	11.7 ± 0.1cE	13.5 ± 0.2aA	12.6 ± 0.2bCD	12.0 ± 0.3cB
	Df - P 20%	12.8 ± 0.3abC	12.4 ± 0.1bcCD	10.4 ± 0.3dD	13.1 ± 0.2aB	12.3 ± 0.1cB
	Df - K 20%	11.9 ± 0.3bD	13.2 ± 0.2aAB	10.1 ± 0.3cD	12.4 ± 0.4bCD	12.2 ± 0.3bB
	Tf - WA	14.1 ± 0.3abB	13.6 ± 0.2bcA	13.4 ± 0.4cA	12.6 ± 0.2dD	14.4 ± 0.4aA
	Df - N 20% - WA	15.9 ± 0.6aA	12.5 ± 0.3bcC	12.1 ± 0.2cB	13.0 ± 0.2bBC	11.4 ± 0.3dC
	Df - P 20% - WA	11.2 ± 0.4dE	11.9 ± 0.5cDE	13.4 ± 0.1aA	12.7 ± 0.2bCD	11.9 ± 0.4cB
	Df - K 20% - WA	13.5 ± 0.3bB	13.0 ± 0.3bB	12.4 ± 0.3cB	13.2 ± 0.3bB	14.1 ± 0.2aA
全氮含量/(g/kg)	CK	0.79 ± 0.04bBC	0.93 ± 0.03aA	0.79 ± 0.01bDE	0.78 ± 0.03bB	0.80 ± 0.03bA
	Tf	0.92 ± 0.02aA	0.81 ± 0.04bC	0.80 ± 0.03bcd	0.77 ± 0.04cBC	0.68 ± 0.02dD
	Df - N 20%	0.75 ± 0.01bcd	0.80 ± 0.02abC	0.83 ± 0.02aCD	0.78 ± 0.03abB	0.68 ± 0.03cD
	Df - P 20%	0.78 ± 0.03bBCD	0.76 ± 0.04bcd	0.87 ± 0.03aAB	0.84 ± 0.03aA	0.67 ± 0.03cD
	Df - K 20%	0.80 ± 0.03bB	0.79 ± 0.01bC	0.86 ± 0.03aB	0.89 ± 0.03aA	0.74 ± 0.02cB
	Tf - WA	0.89 ± 0.02aA	0.92 ± 0.04aA	0.91 ± 0.02aA	0.88 ± 0.02aA	0.81 ± 0.01aA
	Df - N 20% - WA	0.81 ± 0.03bB	0.87 ± 0.02aB	0.75 ± 0.03cE	0.73 ± 0.02cdC	0.69 ± 0.02dCD
	Df - P 20% - WA	0.82 ± 0.02aB	0.73 ± 0.01cdD	0.79 ± 0.04abDE	0.76 ± 0.03bcBC	0.69 ± 0.02dCD
	Df - K 20% - WA	0.74 ± 0.03bcd	0.78 ± 0.00abCD	0.79 ± 0.02aDE	0.76 ± 0.02abcBC	0.73 ± 0.02cBC

注:数据结果用均值±标准偏差来表示;同行不同小写字母表示同一处理不同生育时期差异显著( $P<0.05$ );同列不同大写字母表示同一指标不同处理间差异显著( $P<0.05$ ),下同。

如表 3 所示,随玉米生育时期的推进,CK 和 Df - P 20% - WA 处理白浆土有机质含量先增加后下降,Tf - WA、Df - K 20% - WA 处理白浆土有机质含量先下降而后增加,其余处理的有机质含量水平波动较大。与玉米拔节期相比,收获期 Df - K 20%、Tf - WA、Df - P 20% - WA、Df - K 20% - WA 处理白浆土有机质含量均有所提升,增幅分别达 2.5%、2.1%、6.3%、4.4%,其余处理均不利于有机质含量的累积,其中 Df - N 20% - WA 处理对有机质的消耗程度最大,降幅达 28.3%。在配施 WA 的处理中,Tf - WA、Df - N 20% - WA、Df - K 20% - WA 处理白浆土有机质含量在玉米拔节期至灌浆期均呈渐趋降低趋势,而 Df - P 20% - WA 处理白浆土有机质含量逐渐增高,并在灌浆期达到峰值。

如表 3 所示,CK 白浆土全氮含量在抽穗期出现峰值,而在其他时期保持稳定;Tf 处理全氮含量随玉米生育时期的推进而渐趋降低,Df - N 20%、Tf - WA、Df - N 20% - WA、Df - K 20% - WA 处理白浆

土全氮含量先增加后降低,Df - P 20%、Df - K 20%、Df - P 20% - WA 处理全氮含量均表现为降低—增高—再降低的规律。与拔节期相比,收获期除了 CK 全氮含量保持稳定外,其余处理全氮含量不同程度地降低,Tf、Df - N 20%、Df - P 20%、Df - K 20%、Tf - WA、Df - N 20% - WA、Df - P 20% - WA、Df - K 20% - WA 全氮含量降幅分别为 26.1%、9.3%、14.1%、7.5%、9.0%、14.8%、15.9%、1.4%。从降幅来看,Tf 和 Df - K 20% 处理配施 WA 能够缓解全氮含量的下降趋势,而 Df - N 20% 和 Df - P 20% 处理施加 WA 则能够增加其对全氮的利用程度。

**2.3  减量施肥下 WA 对白浆土速效养分含量的影响**

如表 4 所示,玉米抽雄期,各施肥处理白浆土碱解氮含量均较 CK 不同程度地降低,其中,Tf - WA 处理更有利于白浆土碱解氮的利用,即在全量施肥基础上施用 WA 能够促进白浆土碱解氮的利用。与拔节期相比,在玉米收获后,CK、Tf、Df - N 20%、Df - P 20%、

Tf - WA、Df - N 20% - WA、Df - P 20% - WA、Df - K 20% - WA 处理白浆土碱解氮含量均显著降低,降幅分别为 24.4%、59.5%、46.1%、48.2%、37.4%、31.9%、52.9%、23.4%,而 Df - K 20% 处理白浆土碱解氮含量则提高 6.6%。可见,全量施肥更有利于白浆土碱解氮的消耗,而 Df - K 20% - WA 则能在一定程度上缓解碱解氮的下降趋势,使其降幅低于 CK,相反,Df - K 20% 处理能够显著促进白浆土碱解氮的积累。在各施肥基础上配施 WA 均未对白浆土碱解氮产生规律性影响。

随玉米生育时期的推进,CK 白浆土有效磷含量呈先增加后下降的变化趋势,Tf、Df - N 20%、Df - K 20% - WA 处理白浆土有效磷含量呈先降低后升高的变化趋势,Df - P 20%、Df - K 20%、Tf - WA、Df - N 20% - WA、Df - P 20% - WA 处理白浆土有效磷含量均呈降低—升高—降低的波动变化。与拔节期相比,玉米收获期 CK、Df - K 20% - WA 处理白浆土有效磷含量显著增加,增幅分别为 16.1%、14.7%,Df - K 20%、Tf - WA、Df - N 20% - WA、Df - P 20% - WA 处理白浆土有效磷含量显著下降了 13.6%、3.8%、

18.4%、3.3%,而 Tf、Df - N 20% 和 Df - P 20% 处理白浆土有效磷含量在拔节期和收获期没有显著差异。可见,Df - K 20% 配施 WA 与 CK 相似,能够提高玉米收获后的土壤有效磷含量。与 CK 相比,各施肥处理白浆土有效磷含量在玉米灌浆期和成熟期总体表现为显著降低。除玉米灌浆期外,其余 4 个时期,添加 WA 的处理白浆土有效磷含量均较未施 WA 处理得到提升。

在玉米拔节期、灌浆期、成熟期和收获期,各施肥处理下白浆土速效钾含量均低于 CK。与 Tf、Df - N 20%、Df - P 20%、Df - K 20% 处理相比,Tf - WA、Df - N 20% - WA、Df - P 20% - WA、Df - K 20% - WA 处理玉米成熟期和收获期的白浆土速效钾含量均显著降低。与拔节期相比,玉米收获期各处理白浆土速效钾含量均显著降低,CK、Tf、Df - N 20%、Df - P 20%、Df - K 20%、Tf - WA、Df - N 20% - WA、Df - P 20% - WA、Df - K 20% - WA 处理的降幅分别为 24.2%、23.8%、14.6%、23.1%、26.5%、37.5%、21.9%、20.4%、18.3%,可见,全量施肥配施 WA 更有利于白浆土速效钾的利用,其次为 Df - K 20% 处理。

表 4 减量施肥下 WA 对白浆土碱解氮、有效磷和速效钾含量的影响

指标	处理	拔节期	抽雄期	灌浆期	成熟期	收获期
碱解氮含量/(mg/kg)	CK	130.1 ± 1.7bE	168.8 ± 1.1aA	126.6 ± 2.2bC	90.7 ± 2.7dD	98.4 ± 3.0cB
	Tf	154.7 ± 2.2aB	133.6 ± 2.1bC	84.4 ± 0.7dH	126.6 ± 3.3cA	62.6 ± 0.5eG
	Df - N 20%	161.7 ± 1.7aA	140.6 ± 2.3cB	147.7 ± 1.9bA	116.0 ± 1.8dB	87.2 ± 2.0eC
	Df - P 20%	161.7 ± 2.1aA	133.6 ± 2.4bC	105.5 ± 3.0cF	101.3 ± 3.9cC	83.7 ± 0.4dD
	Df - K 20%	105.5 ± 1.3cG	140.6 ± 2.8aB	112.5 ± 1.8bE	90.7 ± 0.8dD	112.5 ± 2.1bA
	Tf - WA	133.6 ± 1.2aD	126.6 ± 2.1bD	126.6 ± 2.2bC	76.6 ± 1.3dE	83.7 ± 0.5cD
	Df - N 20% - WA	112.5 ± 2.0bF	140.6 ± 2.2aB	100.2 ± 1.7cG	70.0 ± 1.5eF	76.6 ± 2.8dE
	Df - P 20% - WA	147.7 ± 1.8aC	133.6 ± 4.1bC	119.5 ± 2.8cD	98.4 ± 1.6dC	69.6 ± 2.2eF
	Df - K 20% - WA	91.4 ± 1.2dH	133.6 ± 0.9bC	140.6 ± 1.7aB	112.5 ± 2.3cB	70.0 ± 0.7eF
有效磷含量/(mg/kg)	CK	30.4 ± 2.3cE	32.5 ± 0.1cB	37.1 ± 0.9bA	40.6 ± 0.9aA	35.3 ± 0.8bB
	Tf	35.0 ± 0.5aC	32.1 ± 0.6bBC	29.5 ± 0.4dE	30.4 ± 0.3cF	34.3 ± 0.6aC
	Df - N 20%	32.1 ± 0.6aD	27.0 ± 0.3cG	29.8 ± 0.6bE	29.9 ± 0.8bF	32.9 ± 0.4aD
	Df - P 20%	32.0 ± 0.4cD	29.9 ± 0.8dE	36.3 ± 0.2aB	33.3 ± 0.2bE	31.8 ± 0.4cE
	Df - K 20%	29.5 ± 0.3aE	28.3 ± 0.3bF	27.7 ± 0.6bF	29.8 ± 0.4aF	25.5 ± 0.3cF
	Tf - WA	36.7 ± 0.5bB	35.5 ± 0.4cA	36.0 ± 0.4bcB	40.0 ± 0.5aAB	35.3 ± 0.4cB
	Df - N 20% - WA	44.1 ± 0.6aA	30.8 ± 0.4eDE	32.6 ± 0.2dD	39.5 ± 0.3bBC	36.0 ± 0.4cB
	Df - P 20% - WA	33.5 ± 0.4bCD	31.5 ± 0.8cCD	27.6 ± 0.2dF	37.5 ± 0.5aD	32.4 ± 0.4cDE
	Df - K 20% - WA	33.9 ± 0.5cC	31.2 ± 0.4dCD	35.1 ± 0.6bC	38.1 ± 0.5aC	38.9 ± 0.5aA
速效钾含量/(mg/kg)	CK	141.2 ± 1.2aA	115.0 ± 2.4bB	108.6 ± 2.2cA	108.5 ± 0.7cA	107.1 ± 2.4cA
	Tf	121.7 ± 0.8aB	103.7 ± 2.9bD	87.8 ± 2.5dD	91.9 ± 1.1cD	92.7 ± 1.2cC
	Df - N 20%	115.6 ± 3.4aC	107.9 ± 1.5bC	82.9 ± 0.4dE	101.1 ± 0.7cB	98.7 ± 0.7cB
	Df - P 20%	112.7 ± 1.1bC	119.7 ± 1.0aA	95.4 ± 0.9dC	97.8 ± 1.4cC	86.7 ± 1.1eD
	Df - K 20%	105.4 ± 1.9aD	95.4 ± 0.7bE	81.4 ± 1.5cEF	79.5 ± 0.5cdE	77.5 ± 0.6dF
	Tf - WA	123.1 ± 2.3aB	112.5 ± 1.0bB	99.7 ± 1.4cB	77.1 ± 2.1dF	76.9 ± 1.2dF
	Df - N 20% - WA	103.9 ± 1.6aD	87.2 ± 0.6bG	79.1 ± 1.1dFG	76.5 ± 1.2eF	81.1 ± 0.4cE
	Df - P 20% - WA	88.1 ± 0.8bE	92.4 ± 1.1aF	73.7 ± 0.4cH	72.3 ± 0.7dG	70.1 ± 0.2eG
	Df - K 20% - WA	87.2 ± 2.2aE	78.8 ± 0.7bH	76.5 ± 1.9bG	76.3 ± 2.0bF	71.2 ± 1.8cG

### 3 结论与讨论

与 CK 相比,各施肥处理对于玉米出苗率、灌浆期展开叶片数、株高、单叶叶面积、穗粒数及产量等均有显著促进作用。Df - N 20% 和 Df - K 20% 处理配施 WA 能够使玉米产量增加 9.4% 和 13.4%, 而 Tf 和 Df - P 20% 处理辅以 WA 则使产量有所降低。陈振德等<sup>[9]</sup>在其报道中指出,腐植酸能明显促进玉米植株对 N、P、K 的吸收,使滞留在茎叶中的 N 和 K<sub>2</sub>O 明显增加。秦文等<sup>[10]</sup>研究认为,80% N + 腐植酸液肥处理在减施氮 42 kg/hm<sup>2</sup> 的情况下能达到 100% N 处理的效果,氮肥农学效率和氮肥回收效率提高,且穗粒数和产量较高。施入 WA 能够促进玉米植株对 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 的吸收<sup>[9]</sup>,但在减磷 20% 的条件下,玉米植株需求的磷素水平难以满足致使产量有所降低。杜建军等<sup>[11]</sup>指出,保水剂能够吸持和固定氮、磷、钾等可溶性养分,使其释放缓慢,造成玉米在需肥时期缺乏可利用养分,进而降低产量。根据该规律,结合本试验结果,全量施肥并配施 WA 能够提高土壤保肥性能,使更多养分固存和保蓄在土壤中,因此,短期内玉米产量会略微受到影响。

Df - P 20% 和 Df - P 20% - WA 处理使白浆土进一步酸化,玉米收获后 pH 值较拔节期分别降低 3.7% 和 3.1%, Df - P 20% 配施 WA 能够在一定程度上缓解 pH 值的下降趋势。有研究<sup>[12-13]</sup>指出,在缺磷胁迫下,作物根系分泌质子和有机酸的量明显增加,导致根际土壤酸化,pH 值降低,进而促进土壤磷的溶解,提高磷的有效性,而 WA 的施用能够使其部分碱性基团参与反应,使酸化程度缓解<sup>[14]</sup>。

与拔节期相比,玉米收获后 Df - K 20%、Tf - WA、Df - P 20% - WA、Df - K 20% - WA 处理白浆土有机质含量均明显增加,增幅分别为 2.5%、2.1%、6.3%、4.4%,其余处理则均不利于有机质含量的提升,其中 Df - N 20% - WA 处理有机质含量的消耗程度最大,达到 28.3%。侯贤清等<sup>[15]</sup>研究认为,保水剂能够促进土壤团聚体的形成,增加其对有机成分的固定。这可能是玉米收获后 Tf - WA、Df - P 20% - WA、Df - K 20% - WA 处理有机质含量较拔节期有所提升的原因。李平等<sup>[16]</sup>指出,减少氮肥投入能够刺激根际土壤微生物活性,打破施入 WA 而引起的土壤有机质聚集状况,最终加快有机质的消耗。这可能是本研究中 Df - N 20% - WA 处理不利于有机质积累的原因;有研究指出,减少钾肥

能够提高吡啶乙酸氧化酶的活性,促进碳水化合物向根系转移,使作物根际附近土壤有机质含量有所增加<sup>[17]</sup>,这可能是 Df - K 20% 处理在玉米收获后土壤有机质含量较拔节期增加的原因。

与拔节期相比,玉米收获后除 CK 能使白浆土全氮含量保持稳定外,其余处理均使全氮含量不同程度地降低。有研究<sup>[18]</sup>指出,不施肥处理下的土壤全氮含量可维系原有水平,这与本研究结论相似。李秀英等<sup>[19]</sup>认为,在施用化肥条件下,土壤硝化细菌和纤维素分解菌数量高于不施肥农田,由此推断,仅施化肥会增加硝化细菌的繁衍进而加速对氮素的转化,加之玉米生长需要,最终使白浆土全氮含量降低。从玉米收获后与拔节期的全氮含量变幅来看,Tf 和 Df - K 20% 处理配施 WA 能够缓解全氮含量的下降趋势,而 Df - N 20%、Df - P 20% 处理配施 WA 则能够增加其对全氮的消耗。这是因为 Tf 和 Df - K 20% 处理氮素的供给量较为充足,加之腐植酸的保肥功能,最终使历经玉米生育期白浆土全氮的下降程度有所缓解;而在减氮处理下,添加 WA 提高土壤微生物活性,使脲酶活性提升,进而促进了土壤原有氮素养分的活化,使玉米生长后的全氮损失程度加剧<sup>[20]</sup>;减磷施肥能增加玉米收获后籽粒中的氮素含量,进而使土壤氮素趋于消耗,最终加速了全氮的利用<sup>[21]</sup>。

在各施肥基础上配施 WA 对白浆土碱解氮含量均未产生规律性影响。减少钾肥 20% 处理能够有效促进白浆土碱解氮的积累。刘丽平等<sup>[22]</sup>认为,高钾处理(K<sub>2</sub>O 300 kg/hm<sup>2</sup>)能够显著抑制脲酶活性,适当降低钾素供应能够有效提升脲酶活性。而脲酶与碱解氮含量呈正相关关系<sup>[23]</sup>,因此,减少钾肥投入能够间接有利于增加碱解氮含量,这与本研究结论一致。在减少钾肥 20% 的基础上配施 WA 能够使白浆土碱解氮含量由积累转向消耗,这说明施入 WA 能够增加玉米植株对白浆土碱解氮的消耗。

本试验结果表明,Df - K 20% - WA 处理与 CK 历经玉米生育期后仍可提高白浆土的有效磷含量。毛平生等<sup>[24]</sup>指出,不施肥处理土壤有效磷含量提高是因为不施肥作物产量相对较低,对磷素吸收少,致使残留在土壤中的有效磷含量增高。基于 WA 施入条件,减少钾肥 20% 能够在确保玉米产量较高(11 505.7 kg/hm<sup>2</sup>)的前提下累积一定数量的有效磷,这可能是施入保水剂能够引入腐植酸的活化作用,使更多磷素向有效性转化。此外,王娟等<sup>[25]</sup>认

为,钾肥对碱性磷酸酶活性有抑制作用。由此可知,降低钾肥用量能够变相增加碱性磷酸酶的活性,提高土壤有效磷的含量。除玉米灌浆期外,其余4个时期,添加WA的处理白浆土有效磷含量均较未施保水剂处理得到提升。

在玉米拔节期、灌浆期、成熟期和收获期,各施肥处理白浆土速效钾含量均低于CK,结合玉米产量可推断,与CK相比,施肥更有利于玉米产量的提高,进而增加地上植株对土壤速效钾的消耗。相比之下,添加WA的施肥处理更有利于玉米成熟期和收获期白浆土速效钾的消耗。

综上,以减少氮肥20%或减少钾肥20%为前提,施用WA均可增加玉米产量,前者不利于白浆土有机质的累积;无论是否配施WA,减少磷肥20%均可加速土壤酸化进程;与CK相比,施肥能促进白浆土全氮的消耗,但对碱解氮含量未见规律性影响。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 赵敏,高会东,崔彦宏. 保水剂对夏玉米生长发育和产量的影响[J]. 玉米科学,2006,14(6):125-126.
- [3] 郭世文,李品芳,芦谅,等. 不同土壤水分条件下施用黄腐酸与保水剂对玉米生长、耗水及水分利用效率的影响[J]. 中国农业大学学报,2017,22(1):1-11.
- [4] 刘世亮,寇太记,介晓磊,等. 保水剂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.
- [5] 雷恩,赵光明,刘艳红. 不同稀释浓度松土保水剂对玉米营养生长的影响[J]. 江苏农业科学,2013,41(6):77-79.
- [6] 马焕成,罗质斌,陈义群,等. 保水剂对土壤养分的保蓄作用[J]. 浙江林学院学报,2004,21(4):404-407.
- [7] 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.
- [8] 程闯胜,任树梅,杨培岭,等. 保水剂对大雨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.
- [9] 陈振德,何金明,李祥云,等. 施用腐殖酸对提高玉米氮肥利用率的研究[J]. 中国生态农业学报,2007,15(1):52-54.
- [10] 秦文,韩燕来,张毅博,等. 减氮增施腐殖酸液肥对夏玉米产量和氮肥利用率的影响[J]. 河南农业科学,2017,46(4):21-25.
- [11] 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.
- [12] George T S, Fransson A M, Hammond J P, et al. Phosphorus nutrition: Rhizosphere processes, plant response and adaptations[M]//Bünemann E K, Oberson A, Fossard E. Phosphorus in action: Biological processes in soil phosphorus cycling( Soil biology ). Dordrecht, the Netherlands: Springer, 2010, 26: 245-271.
- [13] 丁玉川,陈明昌,程滨,等. 作物磷营养效率生理生化基础研究进展[J]. 山西农业科学, 2004, 32(3): 25-29.
- [14] 沈颖,徐秋芳,沈振明,等. 自制林木废弃物再生型保水剂在林业生产中的应用潜力评价[J]. 水土保持学报,2013,27(4):136-141,147.
- [15] 侯贤清,李荣,何文寿,等. 保水剂施用量对旱作土壤理化性质及马铃薯生长的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 325-330.
- [16] 李平,胡超,樊向阳,等. 减量追氮对再生水灌溉设施番茄根层土壤氮素利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2013,19(4):972-979.
- [17] Sánchez-Calderón L, López-Bucio J, Chacón-López A, et al. Phosphate starvation induces a determinate developmental program in the roots of *Arabidopsis thaliana* [J]. Plant & Cell Physiology, 2005, 46(1):174-184.
- [18] 田昌玉,林治安,左余宝,等. 氮肥利用率计算方法评述[J]. 土壤通报,2011,42(6):1530-1536.
- [19] 李秀英,赵秉强,李絮花,等. 不同施肥制度对土壤微生物的影响及其与土壤肥力的关系[J]. 中国农业科学,2005,38(8):1591-1599.
- [20] 崔娜,张玉龙,曲波,等. 保水剂对苗期番茄根际土壤微生物数量及土壤酶活性的影响[J]. 北方园艺, 2010(23):24-26.
- [21] 田雁飞. 秸秆还田与减量施肥对作物产量及土壤养分的影响研究[D]. 合肥:安徽农业大学,2012.
- [22] 刘丽平,孟亚利,杨佳萌,等. 不同施钾处理对棉田土壤钾素形态与土壤肥力的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2): 138-142.
- [23] 马宁宁,李天来,武春成,等. 长期施肥对设施菜田土壤酶活性及土壤理化性状的影响[J]. 应用生态学报,2010,21(7):1766-1771.
- [24] 毛平生,阮建云,李延升,等. 茶园不同施肥方式对土壤化学性质的影响[J]. 江西农业学报,2014,26(5):1-5.
- [25] 王娟,刘淑英,王平,等. 不同施肥处理对西北半干旱区土壤酶活性的影响及其动态变化[J]. 土壤通报, 2008, 39(2): 299-303.