

新型肥料对棉花产量及土壤物化性质的影响

李万涛, 王开勇, 苏继霞, 安梦洁, 鄂玉联, 田小明

(石河子大学农学院, 新疆 石河子 832000)

摘要: 为了探究 PPMn 型水溶肥混合棉粕腐植酸肥施用对棉田土壤和棉花产量的影响, 通过红外光谱和扫描电镜分析两种新型水溶肥的官能团特征和外观特征, 并利用田间小区试验研究了两种新型水溶肥对棉田土壤物理性质及团聚体、棉花产量和肥料利用率的影响。结果表明: 施用棉粕腐植酸肥(H)、PPMn 型水溶肥(P)和两种新型水溶肥混合(HP)对改善土壤物化结构和提升棉花产量均优于常规水溶肥(S)和不施肥(CK), 其中 HP 处理效果最好。HP 处理使土壤容重降低 8.15%, 土壤孔隙度增加 7.49%, 有效降低了 <0.25 mm 土壤团聚体所占比例, 显著提升氮磷钾的农学利用效率, 棉花产量相对于其他处理增加 7.5%~41.0%。

关键词: 高分子型水溶肥; 腐植酸; 土壤; 棉花

中图分类号: S145.9; S562

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)04-0268-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.04.042

Effects of New Fertilizer on Cotton Yield and Soil Physical and Chemical Properties

LI Wantao, WANG Kaiyong, SU Jixia, AN Mengjie, E Yulian, TIAN Xiaoming

(College of Agronomy, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000)

Abstract: In order to explore the effects of PPMn type water soluble fertilizer mixed with humic acid of cottonseed meal fertilizer on soil properties and cotton yield, the functional and appearance characteristics of two novel water soluble fertilizers were studied by infrared spectroscopy and scanning electron microscopy analysis. The field experiments were also conducted to study soil physical properties, cotton yields and fertilizer use efficiency. The results showed that application of humic acid fertilizer of cottonseed meal (H), PPMn type water soluble fertilizer (P) and two new types of water soluble fertilizer (HP) had the better effects on improving soil physicochemical structure and enhance the cotton yield than the conventional water soluble fertilizer (S) and no fertilizer (CK), and HP gave the best. Under HP, soil bulk density was decreased by 8.15%, soil porosity was increased by 7.49%, the proportion of <0.25 mm soil aggregate was reduced effectively, the agronomic efficiency of nitrogen phosphorus and potassium was improved significantly, and the cotton yield was increased by 7.5%~41.0% compared with other treatments.

Keywords: high molecular water soluble fertilizer; humic acid; soil; cotton

棉花是一种重要的经济作物,对农业和经济发展具有重要意义。施肥是提高棉花产量和品质的一个重要手段,然而随着现代化农业和管理模式与技术的发展以及土壤质量下降,传统和常规的施肥已不能满足棉花生产的需求^[1-2]。功能型水溶肥料由大、中、微量营养元素肥料和具有特殊效果的有机或无机材料复配而成,使其具有改良土壤、促进养分吸收、提高养分利用率、增强作物抗逆性、防虫抗病等功能,完全克服了传统化肥对土壤环境带来的负面影响,能适应农业发展对棉花生产的要求,其添加的生物活性物质有腐植酸、氨基酸和高分子树脂等。腐植酸含有

生物活性物质和其他有益成分,对作物的生长具有良好的调节作用,还能释放活泼氢离子,使腐植酸表现出弱酸性和化学反应性,具有较强的离子交换、吸附和络(螯)合作用^[3],含腐植酸的水溶肥料具有增加土壤团粒结构、提高土壤阳离子吸收性能、增加土壤保肥能力、对化学肥料具有调控和增效等功能,对作物产量和品质具有促进和提升作用^[4-6]。高分子材料可以通过物理包覆、物理、化学吸附、氢键、离子键及共价键等作用结合复合肥料养分,形成既具有改良土壤,又具有保水保肥的功能型水溶肥^[7-8],由于高分子材料具有吸附交换作用和保水保肥特性,使含高分

收稿日期:2018-01-21

资助项目:国家国际科技合作专项(2015DFA11660);国家重点研究计划项目(2016YFC0501406);国家科技支撑计划项目(2014BAC14B030-2);国家自然科学基金项目(31560169);石河子大学高层次人才基金项目(RCZX201314);石河子大学校级课题项目(ZZZC201619)

第一作者:李万涛(1992—),男,河南洛阳人,在读硕士研究生,主要从事土壤环境与生态安全研究。E-mail:1078957657@qq.com

通信作者:王开勇(1978—),男,新疆石河子人,副教授,博士,主要从事土壤环境与生态安全研究。E-mail:wky20@163.com

子材料的水溶肥具有改善土壤团聚结构、提高离子交换性能、增加土壤保水保肥能力和作物对养分吸收利用的效果^[9-11]。目前关于含高分子材料水溶肥和腐植酸水溶肥研究较多,但高分子水溶肥混合腐植酸肥施用对土壤物化结构和作物产量的影响研究较少,通过红外光谱和扫描电镜等技术分析其机理的研究鲜有报道。本文通过研究棉粕腐植酸水溶肥和 PPMn 型水溶肥的物化特征及两种新型功能型水溶肥混合施用对棉田土壤物理特性和棉花产量的影响,旨在为棉花的科学选肥和合理施肥提供理论依据和技术支撑。

表1 供试肥料成分与配比

肥料类型	养分配比	成分组成
常规滴灌肥	N : P ₂ O ₅ : K ₂ O 为 26 : 12 : 12	尿素和水溶复合肥复配
棉粕腐植酸肥	总养分含量 200 g/L, N 104 g/L, P ₂ O ₅ 48 g/L, K ₂ O 48 g/L, 总腐植酸 35 g/L	棉粕腐植酸提取液和复合肥复配
PPMn 型水溶肥	总养分含量 500 g/L, N 260 g/L, P ₂ O ₅ 120 g/L, K ₂ O 120 g/L, PPMn 20 g/L	高分子材料 PPMn 和复合肥复配

1.3 试验方法

采用小区控制试验方法,小区面积为 40 m²,试验设置 5 个处理:CK(不施肥处理)、S(施用常规水溶肥 600 kg/hm²)、P(施用 PPMn 型水溶肥 600 L/hm²)、H(施用棉粕腐植酸肥 1 500 L/hm²)和 HP(P 和 H 分别减半后混合施用),每个处理 3 次重复。

表2 棉花生育期间灌水量和肥料追施分配

单位:%

处理	灌溉次数/次										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
灌水比例(占总灌溉量之比)	15	8	8	8	10	12	10	8	8	8	5
施肥比例(占总施肥量之比)	12	12	12	10	10	10	12	8	8	6	—

1.4 研究方法

棉花测产时采集耕层土壤,干筛法测定土壤团聚体,环刀法测定土壤容重。农学效率=(施肥区籽棉产量-不施肥籽棉产量)/施肥量;籽棉产量=单位面积株数×单株铃数×单铃重。

数据处理运用 Excel 2003 软件对数据进行处理和作图,用 SPSS 20.0 软件进行统计分析和差异显著性检验。红外光谱分析采用 BRUKER EQUINOX55 型红外光谱仪,分辨率 4 cm⁻¹,扫描波长区间为 400~4 000 cm⁻¹,扫描电镜采用 SU 8000(5.0 kV)。

2 结果与分析

2.1 两种水溶肥红外光谱及扫描电镜分析

将棉粕腐植酸肥和 PPMn 水溶肥分别进行红外光谱分析。从图 1 可以看出,两种新型功能型水溶肥物质构成差异不大,氮磷钾存在的形式相近。棉粕腐植酸肥在 3 232 cm⁻¹ 出现 C—H 或 N—H 伸缩振动吸收峰,1 765 cm⁻¹ 和 1 656 cm⁻¹ 出现 C=O 吸收峰,1 409 cm⁻¹ 处有 N—H 的吸收峰,1 100 cm⁻¹ 处有 C—O 的吸收峰,970 cm⁻¹ 处有芳香烃的弯曲振动,这表明棉粕腐植酸肥中存在各种羟基和氢键,羰基、羧基、氨基、

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2015—2016 年在新疆石河子大学试验站(44°18′42.37″N,86°03′20.72″E)进行,土壤类型为灰漠土,土壤质地为壤土,容重 1.35 g/cm³,总孔隙度 48.9%,pH 7.9,盐度(EC 1:5) 0.28 dS/m,碱解氮含量 60.5 mg/kg,速效磷含量 10.3 mg/kg,速效钾含量 175.6 mg/kg,有机质含量 12.5 g/kg。

1.2 供试材料

供试作物及品种:棉花新陆早 60(XLZ60),供试肥料见表 1。

棉田设置一膜三管六行,行距配置方式为宽窄行(即 60 cm—20 cm—60 cm)。4 月 25 日播种,9 月底实收测产,种植密度为(1.5~1.8)×10⁵ 株/hm²,全生育期 4 次化控。灌水周期为 7 天,灌水量为 4 500 m³/hm²,肥料随水滴施,具体施肥及灌水管理见表 2。

醇和酚、烯键、醚键,具有芳香结构;PPMn 型高分子水溶肥在 3 232 cm⁻¹ 出现 N—H 或 C—H 的伸缩振动吸收峰,2 398 cm⁻¹ 出现 O—H 的伸缩振动吸收峰,2 067 cm⁻¹ 出现碳三键或累积碳双键的振动吸收峰,1 765 cm⁻¹ 出现 C=O 的振动吸收峰,1 384 cm⁻¹ 处有酰胺基的 N—H 变形振动,917 cm⁻¹ 处有 N—H 和 O—H 的变形振动吸收峰,表明 PPMn 型水溶肥含有氢键、大量胺基和游离氨基,存在羧基、羟基和羰基、烯键和酰胺络合,含有一些矿物质盐。

将棉粕腐植酸肥和 PPMn 水溶肥分别进行扫描电镜分析(图 2),可知两种新型水溶肥微观结构不同。棉粕腐植酸肥的结构致密,具有褶皱状结构,空隙较大;PPMn 型水溶肥的结构分散且不均一,空隙较大并无规律。

2.2 两种新型水溶肥对土壤容重和孔隙度的影响

土壤容重和孔隙度是衡量土壤肥力的重要指标,土壤容重的大小与土壤质地、结构、有机质含量、土壤紧实度、耕作措施等有关,研究^[12]表明,施肥可以改善土壤容重。从表 3 可以看出,不同肥料处理下的土壤容重和土壤总孔隙度有所不同,但差异不显著(P>0.05)。

施肥降低了土壤容重,增加了土壤总孔隙度,各处理的变化量差异显著。从两年间的变化量来看,施肥处理的容重变化量均显著高于 CK,其中 HP 处理效果最好,容重降低了 8.15%;从总孔隙度两年的变化量来看,P、H、HP 处理均显著高于 S 和 CK,其中 H 最大,孔隙度增加了 9.15%,HP 孔隙度增加了 7.49%。总体来看,H、P 和 HP 处理均能改善土壤物理状况。

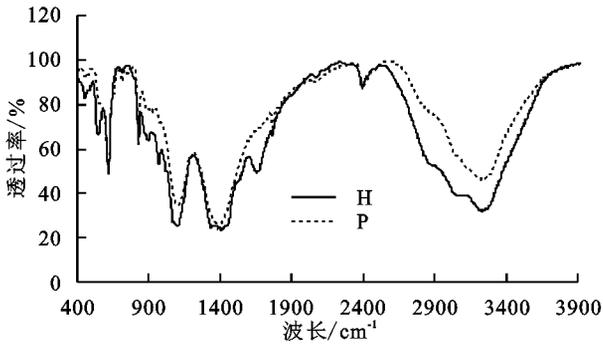


图 1 棉粕腐植酸肥(H)和 PPMn 型水溶肥(P)红外光谱

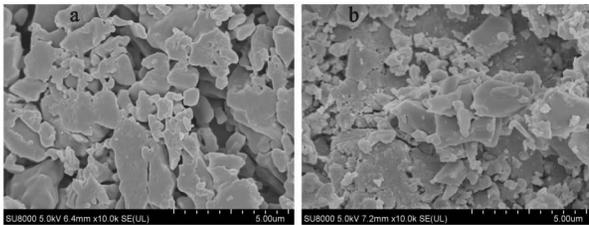


图 2 棉粕腐植酸肥(a)和 PPMn 型水溶肥(b)电镜扫描

2.3 两种新型肥料对土壤团聚体组成的影响

从表 4 可以看出,不同施肥处理对棉田土壤不同粒径团聚体有显著影响($P < 0.05$),其中 2~5 mm 团聚体占比最大。施肥第 1 年(2015 年)的土壤团聚

表 4 不同肥料处理下土壤不同粒径团聚体变化

年份	处理	>5 mm	2~5 mm	1~2 mm	0.25~1 mm	<0.25 mm
2015	CK	27.08±2.71b	31.70±3.21a	20.15±1.79b	18.66±1.66bc	2.40±0.34c
	S	20.24±2.34c	32.85±3.25a	21.46±2.25ab	22.04±2.32b	3.41±0.09b
	P	14.42±2.01d	25.64±3.16b	24.89±2.68a	30.44±2.99a	4.61±0.38a
	H	29.40±3.02ab	34.00±2.97b	19.01±2.03b	15.57±1.55cd	2.02±0.06cd
	HP	31.98±2.96a	36.26±2.89b	17.48±1.74c	12.52±1.35d	1.74±0.13d
2016	CK	24.65±1.12a	32.45±3.05a	19.24±2.01ab	19.58±0.99bc	4.08±0.12b
	S	15.63±0.16c	29.64±2.86a	20.89±2.37ab	27.56±1.23a	6.28±0.32a
	P	18.06±1.25a	34.25±2.98a	20.48±1.94ab	25.01±0.95c	2.19±0.92cd
	H	19.11±0.21bc	32.73±3.79a	22.27±1.88a	23.28±0.96b	2.60±0.08c
	HP	22.71±1.86ab	35.89±3.67a	21.99±2.10a	17.85±1.33c	1.56±0.07d

2.4 两种新型水溶肥的农学利用效率

从表 5 可以看出,各处理的肥料农学利用效率存在明显差异,S 最低,HP 最高,两种新型水溶肥处理中 H 优于 P。从施肥第 1 年(2015 年)的数据可以看出,HP 处理的 N 农学利用效率最高(5.9 kg/kg),相对 S、P、H 处理分别提升了 25.0%,14.4%,11.1%;HP 处理的 P、K 农学利用效率均为 15.3 kg/kg,相对与 S、P、H 分别提升 66.3%,37.8%,30.8%。从施肥第 2 年(2016 年)的数据可以看出,HP 处理的 N 农学利用效率为 7.2 kg/kg,相对与 S、P、H 处理分别提升 63.2%,26.7%,14.1%;HP 处理的 P、K 农学利用效率为 17 kg/kg,相对与 S、P、

体数据显示,在 >5 mm 的土壤团聚体中,HP 最大,H 处理次之,CK 大于 S 处理居中,P 最小;在 2~5 mm 的团聚体中,各处理的大小关系为 HP>H>S>CK>P;在 1~2,0.25~1 mm 的团聚体中为 P>S>CK>H>HP;在 <0.25 mm 的团聚体中为 P>S>CK>H>HP。施肥第 2 年(2016 年)的土壤团聚体数据表明,在 >5 mm 的土壤团聚体中各处理的大小关系为 CK>HP>H>P>S;在 2~5 mm 的团聚体中为 HP>P>H>S>CK;在 1~2 mm 的团聚体中为 H>HP>S>P>CK;在 0.25~1 mm 的团聚体中为 S>P>H>CK>HP;在 <0.25 mm 的团聚体中为 S>CK>H>P>HP。总体来看,两年的结果基本一致,相对于 CK,S 处理增加了 <0.25 mm 的小团聚体的比例和 0.25~5 mm 的中型团聚体的比例,减少了大团聚体的数量,P 处理增加了中型团聚体的比例,明显减少了大团聚体数量,H 处理主要减少了小团聚体占比,HP 处理明显减少了小团聚体数量。

表 3 不同肥料处理下土壤物理特性变化

处理	容重/ ($g \cdot cm^{-3}$)	容重变化量/ ($g \cdot cm^{-3}$)	总孔隙 度/%	总孔隙度 变化量/%
CK	1.30±0.11a	-3.70±0.00d	50.43±3.82a	3.15±0.03d
S	1.32±0.04a	-2.22±0.01e	50.07±1.39a	2.41±0.01d
P	1.29±0.04a	-4.44±0.00c	51.17±1.78a	4.66±0.03c
H	1.27±0.06a	-5.93±0.01b	53.36±2.94a	9.15±0.03a
HP	1.24±0.06a	-8.15±0.01a	52.55±1.77a	7.49±0.02b

注:变化量相对于试验前土壤基础值,容重为 $1.35 g/cm^3$,总孔隙度为 48.9%。误差表示标准偏差,数字后小写字母表示 $P < 0.05$ 显著差异水平(Duncan 法)。下同。

H 分别提升 150.0%,61.9%,32.8%。结合两年的数据来看,HP 处理的肥料农学利用效率显著高于其他处理,随着时间推移呈现增长趋势。

2.5 两种新型水溶肥对棉花产量的影响

不同肥料处理对棉花产量的影响显著。从表 6 可以看出,施肥第 1 年各肥料处理下棉花单铃重差异不显著,HP 最大;各处理间单株铃数差异不显著,HP 处理单株铃数显著高于 CK,CK 单株铃数最少;从籽棉产量可以看出,最高产量为 HP 处理,增产比达到 41.9%,HP 处理相对 S、P、H 分别增产 13.2%,8.9%,7.5%。施肥第 2 年 HP 和 H 处理的单株铃数显著高于 S 和 CK;从

籽棉产量看 HP 处理增产达到 41.8%, HP 相对 S、P、H 增产分别为 22.2%, 13.6%, 8.8%。从两年的结果来看, 不同施肥处理对棉花产量的影响主要表现在单株铃数, HP 增产效果最好。

表 5 不同肥料处理下肥料农学利用效率变化

		单位: kg/kg		
年份	处理	N	P	K
2015	CK	—	—	—
	S	3.6	9.2	9.2
	P	4.3	11.1	11.1
	H	4.6	11.7	11.7
	HP	5.9	15.3	15.3
2016	CK	—	—	—
	S	2.9	6.8	6.8
	P	4.4	10.5	10.5
	H	5.4	12.8	12.8
	HP	7.2	17.0	17.0

表 6 不同肥料处理下棉花产量变化

年份	处理	单株铃数/个	单铃重/g	棉花产量/(kg·hm ⁻²)	增产比/%
2015	CK	6±0.6b	4.9±0.50a	4282.4±414.2b	—
	S	7±0.7ab	5.3±0.50a	5367.1±532.2ab	25.3
	P	7±0.7ab	5.4±0.50a	5580.8±519.3ab	30.3
	H	7±0.7ab	5.5±0.50a	5655.4±548.0ab	32.1
	HP	8±0.7a	5.5±0.50a	6077.7±631.1a	41.9
2016	CK	5±0.5c	5.4±0.05a	4759.7±347.7b	—
	S	6±0.3bc	5.1±0.03a	5557.7±505.3b	16.8
	P	6±0.2ab	5.1±0.04a	5990.4±568.0ab	25.9
	H	7±0.1a	5.1±0.03a	6252.1±670.7a	31.4
	HP	7±0.2a	5.1±0.04a	6747.5±472.7a	41.8

注: 2015 年种植密度为 1.8×10^5 株/hm²; 2016 年种植密度为 1.5×10^5 株/hm²。

3 讨论

大量研究^[13-16]表明, 腐植酸肥能使棉花增产达到 10%~40%, 腐植酸肥料施入土壤, 腐植酸中的羟基、羧基功能团能与土壤中的金属阳离子发生凝固反应, 促进土壤团粒结构形成, 从而改善土壤的理化性质, 增强土壤团聚能力, 提高土壤保水能力; 腐植酸的酸性和络合作用还能激活土壤中的营养物质, 腐植酸的吸附交

换作用使土壤中的养分以络合形态逐渐缓慢释放, 均适当地供给作物营养需求, 从而达到改良土壤、提高肥料利用效率的效果。本研究结果表明, H 处理使孔隙度增加 9.15%, 土壤容重降低 5.93%, 提高氮磷钾的农学利用效率达到 27%~88%, 提高棉花产量。针对施用棉粕腐植酸肥的土壤做电镜扫描(图 3)表明, 腐植酸的施用提升了土壤的团聚作用, 同时改善了土壤颗粒的结构, 使土壤颗粒有序地团聚, 增加了土壤空隙度。造成这种结果可能是 H 处理采用棉粕为原料提取的腐植酸区别于煤炭、泥炭和菜渣等原料提取的腐植酸, 具有更多胺基和游离氨基等活性物质, 增强作物抗性, 改善土壤生物环境, 棉粕腐植酸的大分子结构可以被植株分泌的有机酸断裂成易于作物吸收的含羧基和羟基的小分子结构, 从而促进作物生长, 提高产量和品质, 棉粕腐植酸中的含氧官能团如羧基、羰基等可以有效促进土壤团粒的团聚型, 提高中型团聚体的数量, 降低土壤容重, 提高土壤孔隙度。

近几年, 大量关于各种蔬菜和粮食作物施用含高分子材料水溶肥促进作物生长、提高产量和肥料利用率的研究^[17-22]被报道, 高分子材料的吸附交换作用和强大的亲水性, 含高分子材料的水溶肥能够吸附土壤溶液中的养分, 缓慢释放从而提高了水肥利用率。本研究中 P 处理使土壤容重降低 4.44%, 土壤孔隙度增加 4.66%, 氮的农学利用效率提高 19.4%~51.7%, 磷钾的农学利用效率提高 20.7%~88.2%, 增加棉花产量。针对施用 PPMn 型水溶肥的土壤电镜扫描(图 3)表明, PPMn 型水溶肥能够团聚土壤小颗粒, 使之不规则聚合, 增大土壤孔隙度, 降低土壤容重, 从而达到改善土壤结构的效果。这是由于 PPMn 型水溶肥中的 PPMn 是以 PAM(聚丙烯酰胺)和 PVA(聚乙烯醇)为主要的分子材料聚合而成高分子聚合物, 其中的羟基、氨基和酰胺基等亲水基团不但决定了其具有较强的保水性, 还能够与土壤离子有很好的吸附交换作用, 大结构更容易促进土壤团聚结构的形成。

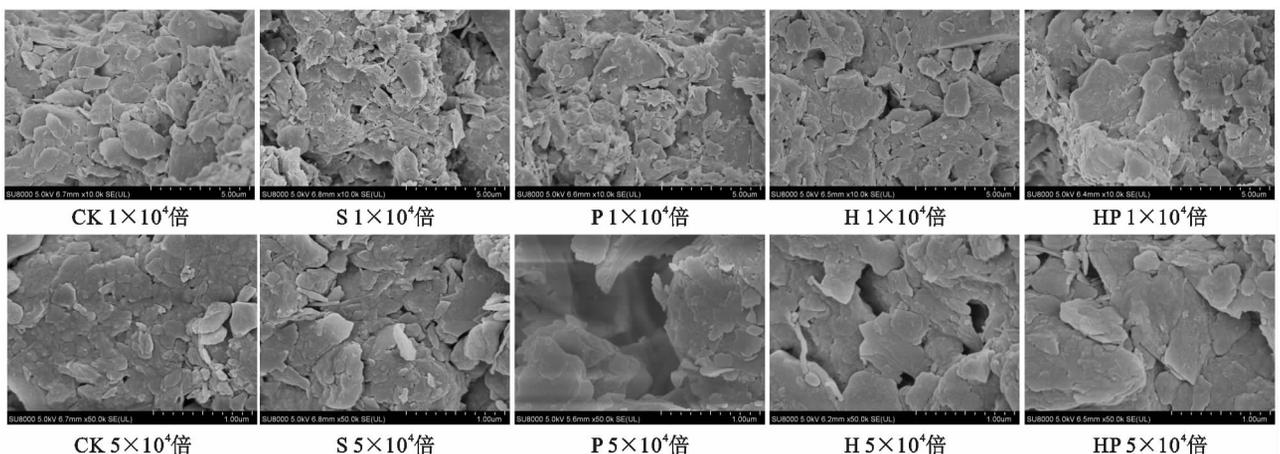


图 3 各处理土壤电镜扫描图

P 和 H 处理均能显著改善土壤物理性质, 提高棉花产量, 相对于 S 处理和 CK 有一定的优势。但

HP 处理无论是对土壤物理特性的改善还是对棉花产量的提升都表现最佳,对养分利用也有着持续的促进作用。从图 3 可以看出,HP 处理的土壤小团聚体相对较少,聚合成的中型和大型团聚体有规律地团聚。这是由于 HP 处理不但表现出 P 处理较强的亲水性和吸附作用,能够有效活化土壤颗粒,促进土壤团聚体的形成,也具有 H 除了大量活性含氧基团,能够有效络合土壤中的金属阳离子,改善土壤的生物环境,刺激作物生长,同时 P 和 H 处理均具有吸附交换作用,保证土壤养分能够均匀适当地供应作物吸收,提升肥料利用率。

4 结论

(1)通过红外光谱和电镜扫描分析表明棉粕腐植酸肥含有较多含氧活性基团,决定了腐植酸的酸性、亲水性、离子交换性和吸附络合能力,施用棉粕腐植酸肥的土壤微观结构表明其能有效改善土壤物理特性,降低了 <0.25 mm 土壤团聚体比例,增加了 $0.25\sim 5$ mm 的土壤团聚体的比例,肥料利用率显著提升,增加棉花产量 30%左右;PPMn 型水溶肥含有大量亲水基团和活性基团,结合其微观结构表明,PPMn 型水溶肥具有较强的吸水性、离子交换和吸附络合的能力,能够有效保持土壤水肥,促进大团聚体的形成,施用 PPMn 型水溶肥使土壤容重和孔隙度发生变化,显著降低了 >5 mm 和 <0.25 mm 的土壤团聚体数量,能够提高肥料利用率,增加棉花产量达到 25%~30%。

(2)HP 处理能够显著改善土壤物理状况,结合土壤微观形貌表明 HP 处理能促进土壤小颗粒无序团聚,中型颗粒有序组合,相对于其他几个处理氮肥肥料利用率提高 11.1%~66.3%,棉花增产达到 7.5%~41.0%。

参考文献:

[1] 郭承君. 有机水溶肥对棉花生长发育及产量影响的研究 [C]. 中国棉花学会. 中国棉花学会 2014 年年会论文汇编. 北京:中国棉花学会,2014:3.

[2] 张祥坤,侯振安,危常州,等. 不同配方液体滴灌专用肥的肥效研究[J]. 石河子大学学报(自然科学版),2004,22(1):35-38.

[3] Nan J K, Chen X M, Wang X Y, et al. Effects of applying flue gas desulfurization gypsum and humic acid on soil physicochemical properties and rapeseed yield of a saline-sodic cropland in the eastern coastal area of China [J]. *Journal of Soils and Sediments*,2016,16(3):38-50.

[4] Alenazi M, Wahb-Allah M, Abdel-Razzak H, et al. Water regimes and humic acid application influences potato growth, yield, tuber quality and water use efficiency[J]. *American Journal of Potato Research*,2016,93(5):463-473.

[5] 王振振,张超,史春余,等. 腐植酸缓释钾肥对土壤钾素含量和甘薯吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报,

2012,19(1):249-255.

[6] 樊红梅. 腐植酸对菊花光合特性、叶绿体超微结构和瓶插寿命的影响[D]. 济南:山东农业大学,2015.

[7] 刘瑞凤,宗莉,张传卫,等. 多功能复合材料对土壤物理性质的影响[J]. *中国农学通报*,2005,22(6):424-426.

[8] Tao S M, Liu J, Jin K M, et al. Preparation and characterization of triple polymer-coated controlled-release urea with water-retention property and enhances durability[J]. *Journal of Applied Polymer Science*,2010,27(4):2103-2111.

[9] Maghchiche A, Haouam A, Immirzi B. Use of polymers and biopolymers for water retaining and soil stabilization in arid and semiarid regions [J]. *Journal of Taibah University for Science*,2010,32(4):9-16.

[10] Ali O, Hamed G, Abdolreza M, et al. Synthesis, characterization, and fertilizer release study of the salt and pH-sensitive NaAlg-g-poly(AA-co-AAm)/RHA super-absorbent nanocomposite[J]. *Polymer Bulletin*,2017,21(1):1-25.

[11] 赵聪,申亚珍,杜昌文,等. 改性聚丙烯酸酯包膜控释肥料的控释性能研究[J]. *土壤学报*,2017,69(4):1-9.

[12] 韩光中,王德彩,谢贤健. 中国主要土壤类型的土壤容重传递函数研究[J]. *土壤学报*,2016,68(1):93-102.

[13] 王平,田长彦,张小勇,等. 黑液腐植酸肥料对棉花生长及土壤肥力的影响[J]. *干旱地区农业研究*,2012,30(4):70-75.

[14] 杨安民,刘漫道,唐保善,等. 腐植酸钾在棉花上应用效果研究[J]. *中国棉花*,1999,42(7):12-14.

[15] 段佳丽,薛泉宏,舒志明,等. 放线菌 Act12 与腐植酸钾配施对丹参生长及其根域微生态的影响[J]. *生态学报*,2015,35(6):1807-1819.

[16] 赵励军. 不同来源腐植酸促进植物生长活性及作用机理研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2005.

[17] 朱法厅,张保林,程亮,等. 具有保水功能的缓释肥料的制备研究[J]. *中国土壤与肥料*,2013,50(3):100-105.

[18] Hussain M R, Devi R R, Maji T K. Controlled release of urea from chitosan microspheres prepared by emulsification and cross-linking method[J]. *Iranian Polymer Journal*,2012,21(8):473-479.

[19] Mukerabigwi J, Wang Q, Ma X Y, et al. Urea fertilizer coated with biodegradable polymers and diatomite for slow release and water retention[J]. *Journal of Coatings Technology and Research*,2015,12(5):1085-1094.

[20] Gaurang P, Mundan B S. Preparation of PAM/PVA blending films by solution-cast technique and its characterization: A spectroscopic study[J]. *Iranian Polymer Journal*,2014,23(9):153-162.

[21] Azam R, Ali O, Adel R. Hydrogel/clinoptilolite nanocomposite-coated fertilizer: Swelling, water-retention and slow-release fertilizer properties[J]. *Polymer Bulletin*. 2015,72(11):2667-2684.

[22] 程冬冬. 高分子缓/控释肥的养分释放特征及应用效果研究[D]. 太原:中北大学,2015.