

磷肥中腐植酸添加比例对玉米产量、磷素吸收及土壤速效磷含量的影响

李 军, 袁 亮, 赵秉强, 李燕婷, 温延臣, 李 伟, 林治安*

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081)

摘要:【目的】腐植酸可提高磷肥的肥效, 对于其在磷肥中适宜添加量的研究可为我国磷肥的“增效减量”提供依据。【方法】将腐植酸增效剂按 1%、5%、10% 和 20% 的比例添加到磷酸一铵中, 制成四种腐植酸磷肥试验产品 (HP1、HP2、HP3 和 HP4), 利用土柱栽培试验研究在等磷量 (施 P_2O_5 量 0.1 g/kg 干土) 投入及等肥料重量 (施磷肥实物量 0.16 g/kg 干土, 即施 P_2O_5 量分别减少 1%、5%、10%、20%) 投入情况下, 腐植酸磷肥对玉米产量、磷素吸收利用及土壤速效磷含量的影响。【结果】1) 在等磷量施用情况下, 与普通磷肥 (P) 相比, 四种腐植酸磷肥处理玉米籽粒产量增加 4.5%~13.6%, 且腐植酸添加量越大产量越高, 均显著高于普通磷肥处理; 在等肥料重量施用下, 随着腐植酸磷肥施入 P_2O_5 量的减少, 玉米籽粒产量逐渐降低, 当 P_2O_5 施用量减少 20% 时籽粒产量与普通磷肥处理相比仍未显著降低。2) 腐植酸磷肥处理在等磷量施用下较普通磷肥处理可显著提高玉米籽粒磷吸收量和地上部磷吸收总量, 分别增加 6.0%~15.4% 和 6.3%~14.0%, 但秸秆磷吸收量无显著变化; 当腐植酸磷肥施入 P_2O_5 量减少 20% 时籽粒磷吸收量和地上部磷吸收总量会显著低于普通磷肥处理。3) 与普通磷肥处理相比, 在等磷量施用下, 腐植酸磷肥的表现利用率提高 5.9~13.1 个百分点, 农学利用率、偏生产力分别提高 26.5%~79.1%、4.5%~13.5%, 且均达到显著水平。4) 施入腐植酸后主要影响 0—50 cm 土层的土壤速效磷含量, 其中 15—30 cm 土层速效磷含量增加最为显著, 与普通磷肥处理相比增加 18.1%~36.6%。【结论】腐植酸增效剂在 1%~20% 的添加比例范围内对磷肥均具有较好的增效作用, 可提高玉米产量、磷素吸收量及磷肥利用效率, 并可提高土壤中的速效磷含量, 且腐植酸添加量越大效果越好; 利用腐植酸的增效作用来减少磷肥施用量是可行的, 在当前磷肥施用量的基础上可减少磷肥用量 20% 左右而保证玉米不减产。

关键词: 腐植酸增效剂; 磷酸一铵; 玉米产量; 磷吸收利用; 土壤速效磷

Effect of adding humic acid to phosphorous fertilizer on maize yield and phosphorus uptake and soil available phosphorus content

LI Jun, YUAN Liang, ZHAO Bing-qiang, LI Yan-ting, WEN Yan-chen, LI Wei, LIN Zhi-an*

(National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land/Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: 【Objectives】Humic acid has been proved to be able to improve the use efficiency of phosphorous fertilizers. Research on the appropriate addition dosage will provide scientific way in reducing application rates of P_2O_5 through the synergistic effect of humic acid. 【Methods】Four kinds of humic acid P fertilizer (HP1, HP2, HP3 and HP4) were made by adding different proportions of HA (the added proportions were 1%, 5%, 10% and 20%, respectively) to mono-ammonium phosphate(P). A soil column experiment was conducted to investigate the effects of HP on maize yield, phosphorus uptake, P fertilizer use efficiency and the content of soil available phosphorus under the same P_2O_5 application rate and the reduction of P_2O_5 application rates (P_2O_5 application rates were decreased by 1%, 5%, 10% and 20%, respectively). 【Results】1) Compared with the normal P treatment,

收稿日期: 2016-08-22 接受日期: 2016-11-14

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目 (2016YFD0200402); 国家科技支撑计划课题 (2015BAD23B02) 资助。

作者简介: 李军 (1991—), 男, 山东昌乐人, 硕士研究生, 主要从事新型肥料与肥料增效剂研究。Email: sdlijun2014@163.com

* 通信作者 Tel: 0534-2186505, E-mail: zhianlin@163.com

the grain yields of the HPs were significantly increased by 4.5% to 13.6% with the increase of added proportion of HA under the same P_2O_5 application rate. The reduction of the P_2O_5 application rate can lead to the decrease of the grain yields, but there was no significant decrease while the P_2O_5 application rate was reduced by 20%. 2) The grain phosphorus uptakes and aboveground phosphorus uptakes of the HPs were significantly increased by 6.0% to 15.4% and 6.3% to 14.0% compared to the normal P treatment under the same P_2O_5 application rate, but there were significant differences when the P_2O_5 application rate was reduced by 20%. 3) The phosphate apparent efficiencies of the HPs were increased by percentage points of 5.9 to 13.1, and the agronomic efficiencies and partial factor productivities were increased by 26.5%–79.1% and 4.5%–13.5% under the same P_2O_5 application rate. 4) Compared with the normal P treatment, humic acid mainly affected the soil available phosphorus contents in 0–50 cm soil layer. In particular, the soil available phosphorus contents of the HPs in 15–30 cm soil layer were increased by 18.1% to 36.6%. **【Conclusions】** Addition of humic acid shows satisfactory role in improving maize yield, phosphorus uptake and utilization, and increasing the soil available phosphorus contents under the same phosphorus input rate (P_2O_5 0.1 g/kg soil). P_2O_5 application rate can be reduced by about 20% through the synergistic effect of humic acid without affecting the yield.

Key words: humic acid addition; phosphorous fertilizer; maize yield; P uptake and utilization; soil available phosphorus

施用磷肥是为作物生长发育提供所必需磷素的主要途径之一,但磷肥直接施入土壤后极易被固定,随着时间的延长有效性逐渐降低,形成作物难以吸收利用的非有效态磷酸盐^[1-2],且磷素在土壤中的移动性较差,主要通过扩散作用到达根表^[3-4]。磷肥的这些特性使其在土壤中有效性较低,使得农业生产中磷肥的投入量要远高于作物需求量才能满足作物的生长需要^[5],造成我国磷肥当季利用率只有10%~20%^[5-7],且过量施用的磷肥使土壤中的磷素趋向盈余,环境风险大大增加^[8-9],但是磷肥施用量的增长在带来资源浪费及环境污染风险的同时并未显著增加作物产量^[10]。因此,针对当前我国磷肥施用现状,研究如何减少磷肥在土壤中的固定,提高磷肥利用率及减少磷肥施用量是当前的热点,通过对磷肥的增效改性来提高其肥效是推动我国肥料产业实现“增效减量”目标的重要手段之一。

腐植酸是一种富含酚羟基、羧基、醇羟基等活性官能基团,并具有一定物理、化学、生物活性的天然高分子物质^[11],广泛存在于褐煤、风化煤、泥炭等自然资源中^[12]。研究发现腐植酸可活化土壤中的难溶性磷,减少磷素在土壤中的吸附与固定,提高磷在土壤中的有效性^[13]。王斌等^[14]在典型灰漠土试验表明,施用腐植酸能够增加土壤速效磷含量,且随着腐植酸用量的增加而增加,但腐植酸的施用量必须达到一定水平才能激活土壤中的固定态磷;李志坚等^[15]研究发现,在磷肥中添加少量腐植酸(腐植酸添

加量 $\leq 1\%$)即可提高作物产量及磷素吸收量。研究已证明腐植酸作为优质、高效、环保的肥料增效剂对磷肥具有增效作用^[16],且腐植酸抑制土壤中有效磷的固定与腐植酸和磷肥的比例有关^[14-15],但是当前研究中腐植酸不同添加量对磷肥的影响规律并不明确,如果加大磷肥中腐植酸添加量,是否会持续提高磷肥肥效还有待研究,同时在此基础上研究磷肥中增加腐植酸添加量后能否降低磷肥施用量?因此,利用腐植酸作为高效肥料增效剂添加到磷酸一铵中,制成腐植酸磷肥试验产品,通过试验研究磷肥中腐植酸不同添加量对玉米产量、磷素利用及土壤速效磷含量的影响以及利用腐植酸减少磷肥施用量的可行性,以期通过试验为腐植酸在磷肥“增效减量”中的应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤及作物

试验于2015年6月至10月在中国农业科学院德州实验站禹城试验基地进行,供试作物为玉米,品种为郑单958。土壤类型为潮土,质地为轻壤,供试土壤采自试验基地连续三年不施任何肥料的匀地试验田,分别采集试验田0—30 cm耕层土及30—90 cm底层土,过1 cm筛、混匀、备用,0—30 cm、30—90 cm土的pH分别为8.49、8.54,有机质11.3、10.7 g/kg,全氮0.78、0.69 g/kg,速效磷17.8、8.8 mg/kg,速效钾132、115 mg/kg。

1.2 供试肥料

将风化煤经过发酵、活化等流程制成腐植酸增效剂 (HA), 其中含 C 54.52%、N 0.87%、总腐植酸 45.96%、游离腐植酸 45.18%、羧基含量 0.7 meq/g、酚羟基含量 2.07 meq/g、pH 7.27、E4/E6 3.32。将研制的腐植酸增效剂与磷酸一铵混合均匀制成四种腐植酸磷肥试验产品 (HP1、HP2、HP3、HP4), 供试肥料性质见表 1。

表 1 供试磷肥腐植酸增效剂添加比例及含磷量
Table 1 Proportion of humic acid addition and P₂O₅ contents in prepared phosphorous fertilizer

代号 Code	腐植酸增效剂 (%) HA	P ₂ O ₅ 含量 (%) P ₂ O ₅ content	pH
P	0	61.04	4.47
HP1	1	60.26	4.51
HP2	5	57.92	4.63
HP3	10	54.14	4.72
HP4	20	49.39	4.89

1.3 试验设计

试验采用土柱栽培方式, 将高 100 cm、内径 25 cm 的 PVC 管埋入土中, 管口上部高出地面 3 cm, 下不封口, 与自然土壤直接接触。每个土柱共装入 50 kg 干土, 土层深 90 cm, 其中土层下部 30—90 cm 装底层土 (干土 35 kg), 上部 0—30 cm 装耕层土 (干土 15 kg)。氮、钾施肥量以 0—30 cm 土壤干重 15 kg 计, 各处理施用量一致, 0—30 cm 为将供试肥料与土壤混匀后的土层, 氮肥为磷酸一铵和尿素 (N 46.5%), 施用量为 N 0.2 g/kg 干土, 钾肥用氯化钾 (K₂O 60%), 施用量为 K₂O 0.2 g/kg 干土。

试验分为等磷 (P₂O₅) 量和等肥料量施用两部分, 共 10 个处理, 8 次重复。以只施氮、钾肥, 不施磷肥处理为对照 (CK); 以施 P₂O₅ 0.1 g/kg 干土 (以 0—30 cm 土壤干重 15 kg 计, 下同), 即折合施入磷酸一铵肥料实物量 0.16 g/kg 干土的普通磷肥处理为对照 (P); 等磷 (P₂O₅) 量施用为将四种腐植酸磷肥 (HP1、HP2、HP3、HP4) 均按施 P₂O₅ 量 0.1 g/kg 干土施入, 分为 P-HP1、P-HP2、P-HP3、P-HP4 四个处理; 等肥料量施用为四种腐植酸磷肥均按肥料实物量 0.16 g/kg 干土施入, 分为 F₁-HP1、F₅-HP2、F₁₀-HP3、F₂₀-HP4 四个处理, 即与 P 处理相比施 P₂O₅ 量分别减少 1%、5%、10%、20%。磷肥施用方法同上述氮、钾肥。

试验玉米于 2015 年 6 月 15 日播种, 每个土柱播种 4 粒, 在苗期间苗, 留玉米苗一株, 玉米生长期管理按照常规栽培技术要求进行。于 2015 年 10 月 2 日玉米成熟期收获测产, 将秸秆和籽粒分别烘干粉碎, 利用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮—钼钒黄比色法测定全磷含量; 收获后采集 0—15、15—30、30—50、50—70、70—90 cm 土壤样品, 利用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定土壤速效磷含量^[17]。

1.4 数据处理与分析

计算公式如下^[18-19]:
收获指数 (HI) = 籽粒产量/地上部生物量 × 100%;
植株各部位磷吸收量 (g/pot) = 植株各部位生物量 × 植株各部位磷含量;
磷素收获指数 (PHI) = 籽粒磷吸收量/地上部吸磷总量 × 100%;
磷肥表观利用率 (PRE) = (施磷处理地上部吸磷总量 - 不施磷处理地上部吸磷总量)/施磷量 × 100%;
磷肥偏生产力 (PPFP, kg/kg) = 施磷处理籽粒产量/施磷量;
磷肥农学效率 (PAE, kg/kg) = (施磷处理籽粒产量 - 不施磷处理籽粒产量)/施磷量。
试验数据采用 Excel 进行数据处理与作图, SAS 8.0 软件进行数据统计分析, Duncan 新复极差法进行多重比较 (P<0.05)。

2 结果与分析

2.1 腐植酸磷肥对玉米产量及产量构成因素的影响

从表 2 可看出, 在等磷 (P₂O₅) 量施用下, 与普通磷肥 (P) 相比, 四种腐植酸磷肥均可显著提高玉米籽粒产量, 产量增加 4.5%~13.6%, 且随着腐植酸添加量的增加产量逐渐增加, 以 P-HP4 最高, 显著高于 P-HP1 和 P-HP2, P-HP3 显著高于 P-HP1; 腐植酸磷肥处理玉米生物量增加 3.5%~12.0%, 其中 P-HP2、P-HP3、P-HP4 显著高于普通磷肥处理。从产量构成因素可看出, 腐植酸磷肥主要通过提高玉米的穗粒数来提高籽粒产量, 随着腐植酸添加量的增加玉米穗粒数逐渐增加, 达 9.8%~15.7%, 与普通磷肥处理相比, P-HP2、P-HP3、P-HP4 处理达到显著水平, 增加腐植酸添加量对玉米百粒重无显著影响; 从收获指数看出, 近 60% 的生物量集中在籽粒中, 但腐植酸磷肥对玉米收获指数无显著提高。

在等肥料量施用下 (表 2), 虽然四种腐植酸磷肥

表 2 施用不同腐植酸磷肥的玉米产量及产量构成因素

Table 2 Grain yields and yield components of maize applied with different phosphorous fertilizers

处理 Treatment	穗粒数 Grain No. per spike	百粒重 (g) 100 grain weight	籽粒产量 (g/pot) Grain yield	生物量 (g/pot) Biological yield	收获指数 (%) Harvest index
CK	531 ± 32.50 f	32.0 ± 1.32 b	169.7 ± 8.49 f	297.5 ± 9.66 g	57.1 ± 1.38 a
P	594 ± 17.15 e	34.5 ± 1.00 a	204.9 ± 6.36 e	357.0 ± 16.32 ef	57.5 ± 2.07 a
P-HP1	622 ± 17.02 cde	34.3 ± 0.69 a	214.2 ± 5.67 cd	369.4 ± 10.77 cde	58.0 ± 2.13 a
P-HP2	652 ± 24.24 abc	34.2 ± 0.97 a	222.8 ± 2.87 bc	378.9 ± 6.53 bc	58.8 ± 0.78 a
P-HP3	667 ± 25.92 ab	33.6 ± 0.81 ab	225.6 ± 4.35 ab	384.2 ± 7.74 b	58.7 ± 0.91 a
P-HP4	687 ± 38.21 a	33.9 ± 1.60 a	232.7 ± 2.61 a	399.8 ± 3.67 a	58.2 ± 0.31 a
F ₁ -HP1	658 ± 30.35 abc	33.0 ± 1.24 ab	216.9 ± 7.97 c	371.8 ± 14.16 bcd	58.4 ± 1.06 a
F ₅ -HP2	643 ± 49.93 bcd	33.4 ± 1.71 ab	214.6 ± 8.07 cd	364.9 ± 6.98 def	58.8 ± 1.83 a
F ₁₀ -HP3	616 ± 25.38 de	33.6 ± 1.08 ab	207.1 ± 7.17 de	360.8 ± 5.10 def	57.4 ± 1.72 a
F ₂₀ -HP4	599 ± 15.78 e	33.4 ± 0.88 ab	200.1 ± 6.53 e	353.1 ± 7.42 f	56.7 ± 1.62 a

注 (Note): P-HP1~P-HP4 分别表示等施磷水平下不同腐植酸增效剂比例的磷肥 Represent phosphorous fertilizers containing humic acid of 1%, 5%, 10% and 20%; F₁-HP1~F₂₀-HP4 分别表示等肥料用量下不同腐植酸增效剂比例的磷肥 Represent the same fertilizer input using the phosphorous fertilizer containing humic acid of 1%, 5%, 10% and 20%; 同列数据后不同字母表示处理间在 5% 水平差异显著 Values followed by different letters in a column are significant among the treatments at the 5% level. CK 与 P 分别表示不施磷和施普通磷肥处理 Represent no P and normal P treatments, respectively.

随着施入 P₂O₅ 量的减少玉米籽粒产量逐渐降低,但在 P₂O₅ 施用量减少 1%、5% (F₁-HP1、F₅-HP2) 时,籽粒产量显著高于普通磷肥处理,当 P₂O₅ 施用量减少 20% (F₂₀-HP4) 的情况下,籽粒产量与普通磷肥处理相比仍未显著降低。腐植酸磷肥处理中随着 P₂O₅ 施用量的减少,玉米百粒重无显著变化,但穗粒数逐渐减少,其中 F₁-HP1 和 F₅-HP2 处理穗粒数显著高于普通磷肥处理, F₁₀-HP3 和 F₂₀-HP4 处理穗粒数与 P 处理相比无显著差异。

2.2 腐植酸磷肥对玉米磷素吸收利用的影响

2.2.1 腐植酸磷肥对玉米磷素吸收量的影响 在等磷 (P₂O₅) 量施用下 (表 3), 与普通磷肥处理 (P) 相比, 腐植酸磷肥可显著增加玉米籽粒磷吸收量和地上部磷吸收总量, 分别增加 6.0%~15.4% 和 6.3%~14.0%, 其中 P-HP4 处理最高, 显著高于 P-HP1 和 P-HP2 处理, P-HP3 处理显著高于 P-HP1 处理; 在玉米秸秆中, 各施磷处理磷吸收量无显著变化; 从磷素收获指数可以看出, 玉米吸收的磷素主要集中在籽粒中, 腐植酸磷肥 P-HP3 处理显著提高了磷素收获指数, 高于 P 处理 1.8 个百分点。

在等肥料量施用下 (表 3), 随着四种腐植酸磷肥施入 P₂O₅ 量的减少, 玉米籽粒吸磷量和地上部吸磷总量逐渐降低, 当 P₂O₅ 施用量分别减少 1%、5%、

10% (F₁-HP1、F₅-HP2、F₁₀-HP3) 时, 与 P 处理相比无显著变化, 但当 P₂O₅ 施用量减少 20% (F₂₀-HP4) 时, 籽粒吸磷量和地上部吸磷总量显著低于 P 处理; 随着 P₂O₅ 施用量的减少, 腐植酸磷肥的磷素收获指数无明显变化。

2.2.2 腐植酸磷肥对磷肥利用效率的影响 在等磷 (P₂O₅) 量施用下 (表 4), 腐植酸磷肥处理与普通磷肥处理 (P) 相比可显著提高磷素的表观利用率、农学效率和偏生产力, 分别增加 5.9~13.1 个百分点、26.5%~79.1% 和 4.5%~13.5%, 其中 P-HP4 处理的表观利用率、农学效率和偏生产力均显著高于 P-HP1、P-HP2 处理, P-HP3 处理的显著高于 P-HP1 处理, 在磷肥偏生产力中 P-HP2 处理显著高于 P-HP1 处理。

在等肥料量施用下 (表 4), 与 P 处理相比, 当腐植酸磷肥处理 P₂O₅ 施用量减少 1%、5%、10% (F₁-HP1、F₅-HP2、F₁₀-HP3) 时磷肥表观利用率无明显变化, 当 P₂O₅ 施用量减少 20% (F₂₀-HP4) 时表观利用率显著下降, 降低 4.1 个百分点; 腐植酸磷肥处理农学利用效率随着 P₂O₅ 施用量的减少而减小, 但 F₁-HP1 和 F₅-HP2 处理仍显著高于 P 处理; 磷素偏生产力则表现相反, 随着施 P₂O₅ 量的减少, 腐植酸磷肥偏生产力呈增加趋势, 高于 P 处理 7.0%~22.0%, 均达到显著水平。

表 3 施用不同腐植酸磷肥的玉米各部位磷吸收量
Table 3 P₂O₅ uptakes in different organs of maize applied with different phosphorous fertilizers

处理 Treatment	磷吸收量 P ₂ O ₅ uptake (g/pot)			磷素收获指数 (%) PHI
	秸秆 Straw	籽粒 Grain	地上部 Aboveground	
CK	0.24 ± 0.01 d	0.86 ± 0.03 f	1.10 ± 0.04 f	78.2 ± 0.96 d
P	0.27 ± 0.02 abc	1.17 ± 0.03 d	1.43 ± 0.05 d	81.5 ± 1.28 bc
P-HP1	0.28 ± 0.03 ab	1.24 ± 0.03 c	1.52 ± 0.05 c	81.7 ± 1.41 bc
P-HP2	0.28 ± 0.01 ab	1.28 ± 0.02 bc	1.56 ± 0.02 bc	82.0 ± 0.48 abc
P-HP3	0.26 ± 0.01 abc	1.31 ± 0.01 ab	1.58 ± 0.02 ab	83.3 ± 0.53 a
P-HP4	0.28 ± 0.00 a	1.35 ± 0.02 a	1.63 ± 0.02 a	82.7 ± 0.18 ab
F ₁ -HP1	0.25 ± 0.01 cd	1.19 ± 0.05 d	1.44 ± 0.05 d	82.3 ± 0.64 ab
F ₅ -HP2	0.25 ± 0.02 cd	1.15 ± 0.05 d	1.39 ± 0.05 d	82.4 ± 0.97 ab
F ₁₀ -HP3	0.26 ± 0.01 cd	1.15 ± 0.03 d	1.41 ± 0.03 d	81.6 ± 1.07 bc
F ₂₀ -HP4	0.25 ± 0.01 cd	1.06 ± 0.04 e	1.32 ± 0.03 e	80.8 ± 1.01 c

注 (Note): P-HP1~P-HP4 分别表示等施磷水平下不同腐植酸增效剂比例的磷肥 Represent phosphorous fertilizers containing humic acid of 1%, 5%, 10% and 20%; F₁-HP1~F₂₀-HP4 分别表示等肥料用量下不同腐植酸增效剂比例的磷肥 Represent the same fertilizer input using the phosphorous fertilizer containing humic acid of 1%, 5%, 10% and 20%; 同列数据后不同字母表示处理间在 5% 水平差异显著 Values followed by different letters in a column are significant among the treatments at the 5% level. CK 与 P 分别表示不施磷和施普通磷肥处理 Represent no P and normal P treatments, respectively.

表 4 施用不同腐植酸磷肥的玉米磷肥利用效率
Table 4 Phosphorus fertilizer efficiencies of maize applied with different phosphorous fertilizers

处理 Treatment	表观利用率 (%) Recovery efficiency	农学效率 (kg/kg) Agronomic efficiency	偏生产力 (kg/kg) Partial productivity
P	22.1 ± 3.22 d	23.4 ± 4.24 f	136.6 ± 4.24 f
P-HP1	28.0 ± 3.28 c	29.6 ± 3.78 cde	142.8 ± 3.78 e
P-HP2	30.5 ± 1.39 bc	35.4 ± 1.91 bc	148.5 ± 1.91 cd
P-HP3	31.9 ± 1.37 ab	37.3 ± 1.57 ab	150.4 ± 1.57 bcd
P-HP4	35.2 ± 1.10 a	41.9 ± 1.74 a	155.1 ± 1.74 b
F ₁ -HP1	23.1 ± 3.51 d	31.8 ± 5.37 bcd	146.1 ± 5.37 de
F ₅ -HP2	20.4 ± 3.76 de	31.4 ± 5.66 bcd	150.6 ± 5.66 bcd
F ₁₀ -HP3	23.0 ± 2.44 d	27.6 ± 5.31 def	153.4 ± 5.31 bc
F ₂₀ -HP4	18.0 ± 2.67 e	25.3 ± 5.44 ef	166.7 ± 5.44 a

注 (Note): P-HP1~P-HP4 分别表示等施磷水平下不同腐植酸增效剂比例的磷肥 Represent phosphorous fertilizers containing humic acid of 1%, 5%, 10% and 20%; F₁-HP1~F₂₀-HP4 分别表示等肥料用量下不同腐植酸增效剂比例的磷肥 Represent the same fertilizer input using the phosphorous fertilizer containing humic acid of 1%, 5%, 10% and 20%; 同列数据后不同字母表示处理间在 5% 水平差异显著 Values followed by different letters in a column are significant among the treatments at the 5% level.

2.3 等磷量施用下腐植酸添加量对土壤速效磷含量的影响

由表 5 可以看出, 在等磷 (P₂O₅) 量施用下, 施

用磷肥后主要对 0—50 cm 土层中的速效磷含量产生较大影响。与普通磷肥 (P) 相比, 腐植酸磷肥处理可提高 0—15 cm 土层土壤速效磷含量, 其中 P-HP2 处理达到显著水平, 增加 20.3%; 在 15—30 cm 土层有效磷含量增加 18.1%~36.6%, 均显著高于 P 处理; 在 30—50 cm 土层中, P-HP3 和 P-HP4 处理可显著提高土壤速效磷含量, 较 P 处理提高 24.4%~24.8%, P-HP1 和 P-HP2 处理无显著变化; 而在 50—90 cm 土层中, 各施磷处理间土壤速效磷含量无明显变化。

2.4 等磷量施用下土壤速效磷与玉米产量、磷吸收量的相关性分析

由表 6 可知, 在等磷 (P₂O₅) 量施用下, 玉米籽粒产量、地上部吸磷总量、秸秆磷吸收量、籽粒磷吸收量与 0—30 cm 土层速效磷含量相关性较强, 其中 0—30 cm 土层速效磷含量与玉米籽粒产量、地上部吸磷总量、籽粒磷吸收量均呈极显著正相关, 与秸秆磷吸收量呈正相关, 但是相关性不显著; 在整个 0—90 cm 土层速效磷含量与玉米籽粒产量、地上部吸磷总量、籽粒磷吸收量、秸秆磷吸收量的相关性与 0—30 cm 土层规律类似, 但是 0—30 cm 土层各性状间的相关性要高于 0—90 cm 土层, 用 0—30 cm 土层的速效磷含量的相关性即可代表整个 0—90 cm 土层。

表 5 等磷量施用下腐植酸添加量对土壤速效磷含量的影响 (mg/kg)

Table 5 Soil available phosphorus contents affected by different HA proportion under the same P_2O_5 application rate

土层 Soil layer (cm)	CK	P	P-HP1	P-HP2	P-HP3	P-HP4
0—15	6.18 ± 0.11 c	10.90 ± 0.87 b	10.94 ± 0.21 b	13.11 ± 1.21 a	12.83 ± 0.88 ab	12.43 ± 0.93 ab
15—30	8.16 ± 0.58 d	13.70 ± 0.42 c	16.18 ± 0.28 b	18.72 ± 0.74 a	17.62 ± 0.45 ab	16.37 ± 0.70 b
30—50	6.14 ± 0.46 abc	5.36 ± 0.43 bc	5.27 ± 0.11 c	6.39 ± 0.76 ab	6.69 ± 0.67 a	6.67 ± 0.42 a
50—70	5.77 ± 0.64 a	4.55 ± 0.07 b	4.80 ± 0.50 b	5.01 ± 0.23 ab	5.07 ± 0.70 ab	4.74 ± 0.37 b
70—90	5.24 ± 0.67 a	4.38 ± 0.28 a	4.99 ± 0.39 a	4.92 ± 0.86 a	4.79 ± 0.50 a	4.93 ± 0.53 a

注 (Note): P-HP1 – P-HP4 分别表示等施磷水平下不同腐植酸增效剂比例的磷肥 Represent phosphorous fertilizers containing humic acid of 1%, 5%, 10% and 20%; 同行数据后不同字母表示处理间在 5% 水平差异显著 Values followed by different letters in a row are significant among the treatments at the 5% level.

表 6 不同层次土壤速效磷含量与玉米产量、磷吸收量的相关性 (r)

Table 6 Correlation coefficients of soil available phosphorus contents with grain yields and P_2O_5 uptake of maizes

土层 (cm) Soil layer	籽粒产量 Grain yield	地上部吸磷总量 Aboveground P uptake	秸秆磷吸收量 Straw P uptake	籽粒磷吸收量 Grain P uptake
0—30	0.9569**	0.9620**	0.7976	0.9604**
0—90	0.9485**	0.9404**	0.7305	0.9392**

注 (Note): “*” 表示在 0.05 水平显著相关, “**” 表示在 0.01 水平极显著相关 “*” Correlation is significant at the 0.05 level and “**” correlation is significant at the 0.01 level.

3 讨论

研究已表明, 磷肥中添加少量腐植酸即可显著提高小麦、玉米、水稻、棉花等作物产量和磷肥利用率^[15, 20]。在本研究中, 磷酸一铵中的腐植酸添加量增加后 (腐植酸增效剂含量 1%~20%), 在等磷量施用下, 对玉米均有良好的增产效果, 且增产效果与腐植酸添加量呈正相关, 说明增加腐植酸添加量后仍可提高磷肥肥效, 但当前的添加量只到 20%, 继续增大的效果, 还有待进一步研究。试验表明当腐植酸磷肥施磷量减少 20% 时, 玉米籽粒产量与普通磷肥相比并未显著降低, 说明利用腐植酸的增效作用减少磷肥施用量 20% 左右是可行的。我国风化煤和褐煤储量丰富且价格低廉, 是对磷肥改性增效的理想材料, 本研究中生产 1 吨腐植酸增效剂成本约为 1000 元。以腐植酸添加量 10% 和 20% 为例, 生产腐植酸含量为 10%、20% 的腐植酸磷肥成本约为 1720 元/t、1640 元/t (按普通磷酸一铵 1800 元/t 计), 在大田等养分投入条件下, 与普通磷酸一铵相比, 腐植酸磷酸一铵可分别使每公顷玉米增产 915 kg 和 1215 kg, 分别增收 1464 元和 1944 元, 而增加的腐植酸成本投入仅为 25.5 元和 56.25 元 (按磷酸一铵施用量 225 kg/hm²、玉米产量 9000 kg/hm²、玉米价格 1.6 元/kg 计算); 在等肥料量投入情况下, 腐植酸添

加量为 10% 和 20% 的腐植酸磷肥较普通磷酸一铵肥料成本分别下降 4.4% 和 8.9%, 但仍能保证作物产量。可见, 通过开发腐植酸磷肥来提高磷肥肥效、降低磷肥施用量是经济可行的。

磷肥施用量的降低不仅可以节约磷肥资源, 对环境也能起到一定的保护作用。据统计, 磷肥施用量的增加使得我国土壤中的 Olsen-P 平均含量由 1980 年的 7.4 mg/kg 升至 2007 年的 24.7 mg/kg, 呈现累积趋势^[9]。如果磷肥施用量过高, 土壤盈余的磷素一旦超过环境阈值, 势必会增加向水体迁移的风险^[21], 加剧水体富营养化。因此, 利用腐植酸提高磷肥肥效减少磷肥施用量, 来减轻对环境的风险是十分有意义的。

腐植酸在一定程度上可提高磷素的移动性, 杜振宇等^[22]研究发现, 腐植酸与磷肥配合施用明显增加肥际微域中的水溶性磷和酸溶性磷含量, 促进磷由肥源向土壤中扩散, 增加其迁移距离; 同时腐植酸可刺激作物根系发育, 克服磷在潮土中移动距离很短这一缺陷^[23], 增加根系与磷肥的接触面积进而提高磷的吸收效率; 腐植酸还可促进磷在植株各器官间的转移提高籽粒磷吸收量^[24-25]。在本研究中, 磷肥中添加腐植酸后显著提高了玉米籽粒磷吸收量, 并促进了磷素在玉米体内的转运, 提高了磷素收获指数。

土壤速效磷含量是表征土壤供磷能力的重要指标,分析地上部磷吸收量与 0—30 cm 土层土壤速效磷含量的关系可看出,两者呈极显著正相关,说明 0—30 cm 土层中速效磷含量高低直接关系到作物对磷素的吸收利用。在本研究中发现,与普通磷肥相比,腐植酸磷肥在提高玉米对土壤磷素吸收的情况下,仍能增加 0—30 cm 土层速效磷含量,说明腐植酸减少了磷肥在土壤中的固定,活化了土壤难溶性磷。这是由于腐植酸施入土壤后,会离解出羟基、酚基等官能基团,与磷酸根竞争土壤胶体表面的吸附位点,减少土壤对磷的吸附^[13],电离出的这些阴离子还可与钙、铁、铝等离子发生络合和溶解反应,促进土壤难溶性磷的释放^[26-28];同时腐植酸与钙、铁、铝等离子络合形成的 HA-金属(M)-磷酸盐等络合物,减缓了有效性磷向难溶性磷的转化速度,从而抑制了磷肥的固定^[29]。杨志福^[30]通过对北方不同土壤研究发现,在磷铵中添加腐植酸铵可使土壤固磷量减少 6.6%~44.9%。在这些反应中腐植酸添加量不同,与磷酸盐、金属离子等的反应程度可能也会不同,添加量越高可能使土壤中磷的有效性越高,使得即使减少一定的磷肥施用量,仍能维持土壤中的速效磷含量。

结合当前我国磷肥利用现状,开发腐植酸磷肥将是未来一个重要的发展方向,但是本试验为华北平原潮土小麦-玉米轮作制度下一年的研究结果,对全国不同土壤类型和种植制度下,腐植酸磷肥的应用效果还需进一步研究与验证。

4 结论

腐植酸对磷肥具有一定的增效作用。在等磷量施用下,与普通磷肥相比,施用腐植酸磷肥后玉米籽粒产量增加 4.5%~13.6%,且在腐植酸增效剂添加比例为 1%~20% 的范围内,腐植酸添加量越大其增产效果越好,腐植酸磷肥还可促进玉米对磷素的吸收,提高磷肥表观利用率、农学利用率、偏生产力,提高 0—30 cm 土层土壤速效磷含量。在保证玉米产量的前提下利用腐植酸的增效作用可在当前磷肥施用水平的基础上减少磷肥用量 20% 左右。

参 考 文 献:

- [1] 冯固,杨茂秋,白灯莎,黄全生. 用 ^{32}P 示踪研究石灰性土壤中磷素的形态及其有效性变[J]. 土壤学报, 1990, 33(3): 301-307.
- Feng G, Yang M Q, Bai D S, Huang Q S. Study on changes in fractions and availability of phosphorus in calcareous soil by ^{32}P tracer method[J]. Acta Pedologica Sinica, 1990, 33(3): 301-307.

- [2] Kleinman P J A, Sharpley A N, Wolf A M, *et al.* Measuring water-extractable phosphorus in manure as an indicator of phosphorus in runoff[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66(6): 2009-2015.
- [3] Castro B, Torrent J. Phosphate availability in calcareous Vertisols and Inceptisols in relation to fertilizer type and soil properties[J]. Fertilizer Research, 1994, 40(2): 109-119.
- [4] Delgado A, Madrid A, Kassem S, *et al.* Phosphorus fertilizer recovery from calcareous soils amended with humic and fulvic acids[J]. Plant and Soil, 2002, 245(2): 277-286.
- [5] 张福锁,王激清,张卫峰. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.
- Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, *et al.* Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 915-924.
- [6] 程明芳,何萍,金继运. 我国主要作物磷肥利用率的研究进展[J]. 作物杂志, 2010, (1): 12-14.
- Cheng M F, He P, Jin J Y. Advance of phosphate recovery rate in Chinese main crops[J]. Crops, 2010, (1): 12-14.
- [7] 王庆仁,李继云. 论合理施肥与土壤环境的可持续性发展[J]. 环境科学进展, 1999, (2): 117-125.
- Wang Q R, Li J Y. Fertilizer proper use and sustainable development of soil environment in China[J]. Advances in Environmental Science, 1999, (2): 117-125.
- [8] 鲁如坤. 土壤磷素水平和水体环境保护[J]. 磷肥与复肥, 2003, 18(1): 4-8.
- Lu R K. The phosphorus level of soil and environmental protection of water body[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2003, 18(1): 4-8.
- [9] Li H, Huang G, Meng Q, *et al.* Integrated soil and plant phosphorus management for crop and environment in China. A review[J]. Plant and Soil, 2011, 319(1-2): 157-167.
- [10] Perassi I, Borgnino L. Adsorption and surface precipitation of phosphate onto CaCO_3 -montmorillonite: effect of pH, ionic strength and competition with humic acid[J]. Geoderma, 2014, 232: 600-608.
- [11] 马红梅,洪坚平,谢英荷. 腐植酸绿色肥效机理浅析[J]. 江苏农业科学, 2009, (6): 392-394.
- Ma H M, Hong J P, Xie H Y. To analyse the mechanism of green humic acid fertilizer[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2009, (6): 392-394.
- [12] 马秀欣,赵宏波. 我国泥炭、褐煤和风化煤的资源优势及其应用领域[J]. 中国煤炭, 2004, 30(9): 47-50.
- Ma X X, Zhang H B. Resource superiority of peat, lignite and weathered coal in China and application field[J]. Chinese Coal, 2004, 30(9): 47-50.
- [13] Alvarez R, Evans L A, Milham P J, *et al.* Effects of humic material on the precipitation of calcium phosphate[J]. Geoderma, 2004, 118(3): 245-260.
- [14] 王斌,马兴旺,许咏梅. 腐植酸对灰漠土棉田土壤无机磷形态的影响[J]. 新疆农业科学, 2007, (3): 312-317.
- Wang B, Ma X W, Xu Y M, *et al.* Effects of humic acids on inorganic phosphorus forms in gray desert soil and soil of cotton field[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2007, (3): 312-317.
- [15] 李志坚,林治安,赵秉强. 增效磷肥对冬小麦产量和磷素利用率的

- 影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, (6): 1329–1336.
- Li Z J, Lin Z N, Zhao B Q, *et al.* Effect of value-added phosphate fertilizer on yield and phosphorus utilization of winter wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, (6): 1329–1336.
- [16] 李丽, 武丽萍, 成绍鑫. 腐植酸磷肥的开发及其作用机理研究进展[J]. 磷肥与复肥, 1999, 14(3): 60–63, 80.
- Li L, Wu L P, Cheng S X. Research on synergistic effect of humic acid on phosphate fertilizer[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 1999, 14(3): 60–63, 80.
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- Lu R K. Analysis methods of soil agricultural chemistry [M]. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [18] 范秀艳, 杨恒山, 高聚林. 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.
- Fan X Y, Yang H S, Gao J L, *et al.* Effects of phosphorus fertilization methods on phosphorus absorption and utilization of high yield spring maize[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(2): 312–320.
- [19] 谢亚萍, 闫志利, 李爱荣. 施磷量对胡麻干物质积累及磷素利用效率的影响[J]. 核农学报, 2013, 27(10): 1581–1587.
- Xie Y P, Yan Z L, Li A R, *et al.* Effect of phosphorus application rate on dry matter accumulation and phosphorus utilization efficiency in oil flax[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2013, 27(10): 1581–1587.
- [20] Waqas M, Bashir A, Muhammad A. Evaluation of humic acid application methods for yield and yield components of mungbean[J]. *American Journal of Plant Sciences*, 2014, 5: 2269–2276.
- [21] 薛巧云. 农艺措施和环境条件对土壤磷素转化和淋失的影响及其机理研究[D]. 杭州: 浙江大学博士学位论文, 2013.
- Xue Q Y. Effects of agronomic measures and environmental factors on soil phosphorus transformation and loss and corresponding mechanism[D]. Hangzhou: PhD Dissertation of Zhejiang University, 2013.
- [22] 杜振宇, 王清华, 刘方春, 马丙尧. 腐殖酸物质对磷在褐土中迁移的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2012, (2): 14–17, 50.
- Du Z Y, Wang Q H, Liu F C, Ma B Y. Phosphorus movement in a cinnamon soil as affected by humic substances[J]. *Soils and Fertilizer Sciences in China*, 2012, (2): 14–17, 50.
- [23] 司友斌, 王慎强, 陈怀满. 农田氮、磷的流失与水体富营养化[J]. 土壤, 2000, (4): 188–193.
- Si Y B, Wang S Q, Chen H M. The loss of nitrogen, phosphorus in farmland and water eutrophication[J]. *Soils*, 2000, (4): 188–193.
- [24] 孙桂芳, 金继运, 石元亮. 腐殖酸和改性木质素对土壤磷有效性影响的研究进展[J]. 土壤通报, 2011, 42(4): 1003–1009.
- Sun G F, Jin J Y, Shi Y L. Advances in the effect of humic acid and modified lignin on phosphorus availability to crops[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(4): 1003–1009.
- [25] Nardi S, Pizzeghello D, Muscolo A, *et al.* Physiological effects of humic substances on higher plants[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34: 1527–1536.
- [26] Suteerapataranon S, Bouby M, Geckeis H, *et al.* Interaction of trace elements in acid mine drainage solution with humic acid[J]. *Water Research*, 2006, 40: 2044–2054.
- [27] 张玉兰, 王俊宇, 马星竹. 提高磷肥有效性的活化技术研究进展[J]. 土壤通报, 2009, 40(1): 194–202.
- Zhang Y L, Wang J Y, Ma X Z, *et al.* Advances on activating technique research in improving the validity of phosphorus fertilizer[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(1): 194–202.
- [28] Sarir M S. Effect of different levels of lignitic coal derived humic acid on growth of maize plants[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2002, 33(19–20): 3567–3580.
- [29] Bedrock C N, Cheshire M V, Shand C A. The involvement of iron and aluminum in the bonding of phosphorus to soil humic acid[J]. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 1997, 28: 961–971.
- [30] 杨志福. 腐植酸类物质在农业生产中应用的试验研究、示范推广的阶段总结[J]. 江西腐植酸, 1986, (3): 7–58.
- Yang Z F. The stage summary of humic acid substances in agricultural production application of test research and demonstration promotion[J]. *Jiangxi Humic Acid*, 1986, (3): 7–58.