植物营养与肥料学报 2012,18(4):825-831
Plant Nutrition and Fertilizer Science

有机无机复混肥优化化肥养分利用的效应与机理研究

Ⅱ.有机物料与磷肥复混对玉米产量及肥料养分吸收利用的影响

杜 伟[1,3], 赵秉强[1*], 林治安[2], 袁 亮[2], 李燕婷[1]
(1 农业部植物营养与肥料重点实验室,中国农业科学院农业资源与农业区划研究所,北京 100081;
2 中国农业科学院德州实验站,山东德州 253015; 3 清华大学环境学院,北京 100084)

摘要: 本研究采用团粒法工艺,利用味精厂玉米淀粉制糖形成的糖渣(A)作为有机原料,与磷酸一铵复混制成有机无机复混磷肥,运用土柱栽培试验研究等磷(设置低、中、高3个施磷水平)投入条件下不同有机无机比例的有机无机复混磷肥对玉米产量和磷素吸收利用的影响。结果表明,1)低、中、高磷水平下有机无机复混磷肥单株玉米籽粒产量平均比化肥磷处理分别提高19.14%、11.29%和37.83%,且有机无机复混磷肥处理比对应的有机物料处理的增产幅度大于化肥磷处理比对应的不施磷肥CK处理的增产幅度,有机物料与化学磷肥复混,明显提高了化学磷肥的增产效果。2)无论是施用化学磷肥还是有机无机复混磷肥,玉米植株的含磷量大都在一定程度上低于不施磷肥的CK处理,可能是施用磷肥大幅度增产引起的"稀释效应"所致;但施用磷肥处理的植株吸磷量却明显高于不施磷肥的CK处理。3)有机物料与化学磷肥复混具有优化化肥养分利用和提高化学磷肥利用率的效果。低磷、中磷和高磷水平下,有机无机复混磷肥处理玉米植株吸磷量比化肥磷(P)处理分别提高12.58%、2.82%和33.42%;低磷、中磷和高磷水平下,有机无机复混磷肥处理化肥磷素表观利用率分别平均比化肥磷处理提高了16.59、1.21和16.04个百分点。

关键词: 有机无机复混肥;新型肥料;磷肥利用率;玉米;产量
中图分类号: S143.6　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1008-505X(2012)04-0825-07

Effect and mechanism of organic-inorganic compound fertilization on chemical fertilizer utilization

Ⅱ. Effects of ammonium phosphate combined with organic material on maize yield and fertilizer utilization

DU Wei[1,3], ZHAO Bing-qiang[1*], LIN Zhi-an[2], YUAN Liang[2], LI Yan-ting[1]
(*1 Ministry of Agriculture Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer/Institute of Agricultural Resource and Regional Planning, CAAS, Beijing 100081, China; 2 Dezhou Experiment Station, CAAS, Dezhou, Shandong 253015, China; 3 School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Abstract: In this study, organic-inorganic compound phosphorus (P) fertilizer was made by combining organic waste material (from monosodium glutamate factory) with ammonium phosphate, and potted plant experiments (setting up three input rates of total P) were conducted to investigate effects of the compound P fertilizer on yield, nutrient uptake, nutrient use efficiency of maize under the same total P application rate. The results showed that compared to the chemical fertilizer treatment, the grain yield are increased by 19.1%, 11.3% and 37.8%, respectively under the low, medium, and high P application rates of the organic-inorganic compound P fertilization. The relative increases of maize grain yield of the organic-inorganic compound P fertilizer treatments to those of the

收稿日期: 2011-09-19　　**接受日期:** 2012-01-02
基金项目: "十一五"国家科技支撑计划项目(2006BAD10B03);"十二五"国家科技支撑计划课题(2011BAD11B05)资助。
作者简介: 杜伟(1979—),男,山东齐河县人,博士后,主要从事资源与环境研究。Tel: 010-62784701, E-mail: weidu@mail.tsinghua.edu.cn
*通讯作者 Tel: 010-82108658, E-mail: bqzhao@163.com

corresponding organic material treatments are greater than those of the inorganic P fertilizer treatments to no P fertilizer treatments, and the organic-inorganic P fertilization increases nutrients uptake of maize. Compared to the fertilizer P treatments, the P uptakes of maize plants are increased by 12.58%, 2.82% and 33.42%, respectively under the low, medium and high total P application rates of the organic-inorganic compound P fertilization. The organic-inorganic P fertilization increases P use efficiency. In the case of the same amount of total P applied, under the low, medium and high total P application rates, the organic-inorganic compound P fertilizer applications increase the inorganic-P apparent recovery efficiency by 16.59, 1.21 and 16.04 percent, respectively, compared to the ammonium-phosphate treatment.

Key words: organic-inorganic compound fertilizer; new type fertilizer; P fertilizer use efficiency; maize; yield

化学磷肥施入土壤后,容易与土壤发生化学反应,形成各种形态难溶性磷酸盐而被固定,影响作物对磷的吸收利用,磷肥的当季利用率大多不到20%[1-2]。因此,磷肥施入土壤后,如何减少固定、提高利用效率是人们关注和研究的热点[3-4]。已有研究发现,通过施用有机肥、木质素、腐植酸、低分子量有机酸等外源有机物质可以改善土壤供磷环境[5-9],减少土壤对磷的固定;另外,通过改性处理改变化学磷肥的理化性质并影响其进入土壤后的物理、化学行为[10-11],从而提高磷肥利用率。有机无机复混磷肥是化学磷肥改性的可行途径[12-13],如木质素改性磷肥影响到土壤无机磷的形态转化和无机磷库结构,可以提高化学磷肥的有效性[1,14-15]。施用有机无机复混肥料具有增加作物产量和提高肥料利用率的作用[16-17]。

过去研究有机无机复混肥对作物产量和肥料利用的影响,多是有机物料与无机氮、磷、钾等多种元素进行复混,制成多元素有机无机复混肥料,来研究其增产效果和机理。然而将有机物料按不同比例与化学氮肥、化学磷肥和化学钾肥分开来复混,分别制成有机无机复混氮肥、有机无机复混磷肥和有机无机复混钾肥,深入系统研究有机物料与化肥复混对氮肥、磷肥和钾肥的调控效应与机理的尚不多见。

本研究利用味精厂制糖工序产生的糖渣为有机物料,将其与磷酸一铵复混造粒,制成有机无机复混磷肥,利用大型土柱栽培试验,研究有机物料与磷肥复混对磷素吸收利用的影响,以期为通过有机无机复混优化作物对化学磷肥的吸收利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采自中国农业科学院德州实验站禹城试验基地,选择连续三年不施任何肥料的低肥力田块,取0—30 cm土层土壤,挑除石块、根系,过3 mm筛,充分混匀备用。土壤类型为潮土,质地为轻壤,pH(1∶1土水比浸提)8.33,有机质含量10.07 g/kg,全氮0.543 g/kg,速效磷(P_2O_5)3.58 mg/kg,速效钾(K_2O)82.7 mg/kg。

利用味精厂玉米淀粉制糖工序产生的废渣(简称"糖渣",风干基,代号:A)与磷酸一铵(代号:P,P_2O_5含量44%)按重量比3∶1、1∶1和1∶3混配,利用圆盘工艺造粒,分别制成代号为A_3P_1、A_1P_1和A_1P_3 3种有机无机复混磷肥。供试有机物料糖渣(A)和3种有机无机复混磷肥的养分含量见表1。

表1 供试肥料养分含量

Table 1 Nutrient contents of experimental fertilizers and organic material

供试肥料 Fertilizers for the experiment	代号 Code	有机质 OM (%)	全氮 Total N (%)	全磷 Total P (P_2O_5 %)	全钾 Total K (K_2O %)	pH
糖渣 Sugar residue	A	95.8	4.72	0.36	0.03	3.49
有机无机复混磷肥	A_3P_1	75.1	6.29	11.3	0.02	4.37
Organic-inorganic	A_1P_1	49.8	7.86	22.1	0.02	5.25
compound P fertilizers	A_1P_3	23.2	9.43	33.2	0.01	6.12

供试作物为玉米,品种为郑单 958 号。

1.2 试验处理与方法

试验采用土柱栽培方式,选用内径为 25 cm,高 100 cm 的 PVC 管,全部埋入土中,上口与地面高度一致,下不封口,与自然土壤直接接触,模拟田间栽培状态。按照当地耕层土壤平均容重 1.365 g/cm^3 计算,每个土柱装土 57 kg。有机无机复混磷肥和化学磷肥(磷酸一铵)按等全磷量投入原则设计不同施磷水平,全部均匀混施于土柱 0—30 cm 土层中;氮、钾肥按充足供应原则设计,氮肥用尿素,施用量为 N 300 kg/hm^2(N 74 mg/kg),钾肥用氯化钾,施用量 K_2O 225 kg/hm^2(K_2O 55 mg/kg),均作为基肥一次性混施入 0—30 cm 土壤中。

试验选择 A_3P_1、A_1P_1、A_1P_3 和 P(磷酸一铵)4 个肥料品种。设低磷(P_2O_5 45 kg/hm^2,即 P_2O_5 11 mg/kg)、中磷(P_2O_5 90 kg/hm^2,即 P_2O_5 22 mg/kg)和高磷(P_2O_5 180 kg/hm^2,即 P_2O_5 44 mg/kg) 3 个施肥水平。

试验处理:低磷、中磷、高磷水平分别与 A_3P_1、A_1P_1、A_1P_3和 P 4 个复混比例组合成处理,为了便于比较不同处理中化学磷肥的真实效果,了解有机物料与磷酸一铵复混后能否优化化学磷肥的利用,本研究还设置了不同磷肥投入水平下与各有机无机复混磷肥处理相对应的等量有机物料处理,例如 A-A_3P_1 处理只投入有机物料 A,其施用量对应于 A_3P_1 处理中有机物料 A 的投入量。设置不施磷肥对照(只施氮、钾肥,用量与其它施肥处理相同)处理(CK)。试验共 22 个处理,重复 8 次。

1.3 玉米栽培方法

试验在中国农业科学院德州实验站禹城试验基地网室中进行,土柱按照"40 cm + 80 cm"宽窄行种植方式排列,玉米株距 30 cm。预先挖沟将 PVC 管埋入土中,上口与地面一致,下口与自然土壤密切接触,分 4 次装入混匀、过筛的低肥力土壤,前 3 次装土至离地面 30 cm 处,每次装土后均灌等量水沉实土壤,保持容重一致。最上层 30 cm 按照试验处理将肥料均匀混于土壤后装入 PVC 管中。试验于 2009 年 5 月 19 日播种,每柱播种 5 粒玉米种子,播深 3cm,出苗一周后间苗,每柱留苗 1 株。玉米生长期间按常规栽培措施管理,2009 年 9 月 1 日玉米成熟收获测产。

1.4 数据处理与分析

供试肥料的养分表观利用率和化肥养分表观利用率通过下式计算:

肥料养分表观利用率(%) =(施肥处理养分吸收量 - 空白对照养分吸收量)/施肥量 ×100;

化肥养分表观利用率(%) =(复混肥处理养分吸收量 - 对应有机物料处理养分吸收量)/化肥施用量 ×100。

采用 EXCEL 软件对数据进行整理;SAS 软件包进行单因素分析;LSD 方法对处理间差异进行多重比较,经 t 检验进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 有机无机复混磷肥对玉米产量的影响

由表 2 看出,在等磷量投入条件下,低磷水平有机无机复混磷肥处理单株玉米籽粒产量(A_3P_1、A_1P_1 和 A_1P_3 的平均值)为 53.35 g,比化学磷肥处理(P)的 44.78 g 增产 19.14%;中磷水平有机无机复混磷肥处理单株玉米籽粒产量(A_3P_1、A_1P_1 和 A_1P_3 的平均值)为 67.61 g,比化学磷肥处理(P)的 60.758 g 增产 11.29%;高磷水平有机无机复混磷肥处理单株玉米籽粒产量(A_3P_1、A_1P_1 和 A_1P_3 的平均值)为 88.41 g,比化学磷肥处理(P)的 64.14 g 增产 37.83%。本试验中,试验处理按等全磷量投入原则设计,因为有机物料中含有少量磷素(表 1),有机无机复混磷肥处理中投入的化学磷肥量(来自磷酸一铵)比磷酸一铵处理(P)的化学磷肥施用量要稍低一些。上述结果看出,即使在化学磷肥投入量稍低的情况下,有机物料与化学磷肥复混处理玉米籽粒产量仍然高于化学磷肥处理,有机物料与化学磷肥复混表现出明显促进化学磷肥增产作用。

由表 2 亦进一步看出,低磷投入水平下,有机无机复混磷肥处理籽粒产量(A_3P_1、A_1P_1、A_1P_3 平均)比对应的有机物料处理(A-A_3P_1、A-A_1P_1 和 A-A_1P_3 平均)的 36.02 g 增产 48.11%,增产幅度高于化肥 P 处理比 CK 增产的 33.79%,表现出有机物料与化学磷肥复混后,明显优化了化学磷肥增产的效果。中磷投入水平下,有机无机复混磷肥处理(A_3P_1、A_1P_1、A_1P_3 平均)籽粒产量为 67.61 g,比对应的有机物料处理(A-A_3P_1、A-A_1P_1 和 A-A_1P_3 平均)的 36.28 g 增产 86.52%,增产幅度高于化肥 P 处理比 CK 增产的 81.51%,也表现出有机物料与磷肥复混后优化了化肥的增产效果。高磷投入水平下,有机无机复混磷肥处理(A_3P_1、A_1P_1、A_1P_3 平均)籽粒产量为 88.41 g,比对应的有机物料处理(A-A_3P_1、A-A_1P_1 和 A-A_1P_3 平均)的 31.70 g 增产 178.90%,增产幅度高于化肥 P 处理比 CK 增产的

91.63%,有机物料与磷肥复混后优化化学磷肥增产的效果更加明显。上述结果进一步证明了有机物料与磷肥复混,明显提高了化学磷肥的增产效果,优化了化学磷肥的利用。

表2 等全磷投入条件下有机无机复混磷肥对玉米籽粒和生物产量的影响(g/plant)

Table 2 Effects of organic-inorganic compound P fertilizers on maize grain yield and biomass under the same total P input rate

磷水平 P level	项目 Item	CK	P	A_3P_1	A_1P_1	A_1P_3	$A-A_3P_1$	$A-A_1P_1$	$A-A_1P_3$
低磷	籽粒 Grain	33.47 c	44.78 b	57.80 a	50.47 ab	51.78 ab	41.99 b	34.06 c	32.03 c
Low P	生物量 Biomass	77.18 d	108.69 c	135.21 a	121.32 b	124.76 ab	88.50 d	77.68 d	74.51 d
中磷	籽粒 Grain	33.47 c	60.75 b	69.55 a	64.40 ab	68.87 ab	40.99 c	31.59 c	36.28 c
Middle P	生物量 Biomass	77.18 c	139.32 b	158.74 a	148.56 ab	150.21 ab	87.46 c	76.99 c	82.55 c
高磷	籽粒 Grain	33.47 c	64.14 b	88.67 a	87.27 a	89.28 a	34.67 c	31.53 c	28.90 c
High P	生物量 Biomass	77.18 c	143.96 b	185.84 a	180.59 a	186.49 a	82.21 c	72.69 c	69.83 c

注(Note): $A-A_3P_1$、$A-A_1P_1$ 和 $A-A_1P_3$ 代表糖渣处理,其投入量分别对应于 A_3P_1、A_1P_1 和 A_1P_3 中糖渣的投入量 Treatments of $A-A_3P_1$, $A-A_1P_1$ and $A-A_1P_3$ represent sugar residue (A) and which input rate of sugar residue (A) are equal respectively to those of $A-A_3P_1$, $A-A_1P_1$ and $A-A_1P_3$; 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 the same row are significant between treatments at the 5% level.

根据表2结果,3个施肥水平平均,A_3P_1、A_1P_1 和 A_1P_3 处理的单株玉米籽粒产量分别为72.01、67.38和69.98 g,有机无机复混磷肥中有机物料含量的高低对产量的影响没有表现出明显的规律性。不同施肥处理对生物产量的影响规律与籽粒产量基本相同。

2.2 有机无机复混磷肥对玉米植株磷素吸收利用的影响

2.2.1 对玉米植株磷素含量的影响 由表3看出,低、中、高磷投入条件下,化学磷肥处理(P)玉米籽粒和秸秆含磷量大都略低于不施磷肥的CK,这可能是因为施用磷肥后作物大幅度增产(如不同施肥水平下,P处理比CK处理玉米籽粒增产33.79%~91.63%,表2)导致的"稀释效应"所致。同样,有机无机复混磷肥处理在不同施磷水平下,其玉米籽粒和秸秆磷素含量也大都低于不施磷肥的CK处理,其原因也可能是因为施用有无机复混磷肥后作物大幅度增产(如不同施肥水平下,有机无机复混磷肥处理比CK玉米籽粒增产50.79%~166.75%,表2)导致的"稀释效应"所致。低、中、高磷投入水平下,有机无机复混磷肥处理玉米籽粒含磷量(A_3P_1、A_1P_1、A_1P_3 的平均值)分别为0.155%、0.152%和0.161%,与化肥磷(P)处理玉米籽粒磷素含量的0.159%、0.154%和0.155% 基本相近;有机无机复混磷肥处理玉米秸秆含磷量(A_3P_1、A_1P_1、A_1P_3 的平均值)分别为0.056%、0.081%和0.072%,与化肥磷(P)处理玉米秸秆磷素含量的0.062%、0.094%和0.076%基本相近或略低。因此单独施用有机物料处理($A-A_3P_1$、$A-A_1P_1$ 和 $A-A_1P_3$),其玉米籽粒和秸秆含磷量与不施磷肥的CK处理相近或较之略低。另外,有机无机复混磷肥中有机物料比例的高低与玉米秸秆含磷量之间的关系没有明显的规律性,但有机无机复混磷肥随有机物料比例的提高,玉米籽粒磷含量则有升高的趋势。

2.2.2 对玉米磷素吸收的影响 由表4看出,施用磷肥增加了玉米植株吸磷量,有机无机复混磷肥效果尤其明显。低、中、高磷投入水平下,有机无机复混磷肥处理植株吸磷总量(A_3P_1、A_1P_1、A_1P_3 的平均值)分别比化肥P处理提高12.58%、2.82%和33.42%;低磷投入水平下,化肥P处理植株吸磷量比不施磷肥的CK处理提高23.05%,而有机无机复混磷肥处理(A_3P_1、A_1P_1、A_1P_3 的平均值)植株吸磷量0.1172 g,比对应有机物料处理($A-A_3P_1$、$A-A_1P_1$、$A-A_1P_3$ 的平均值)的0.0821 g提高了42.75%;中磷投入水平下,化肥P处理植株吸磷量比不施磷肥的CK提高了84.52%,而有机无机复混磷肥处理(A_3P_1、A_1P_1、A_1P_3 的平均值)植株吸磷量0.1605 g,比对应有机物料处理($A-A_3P_1$、$A-A_1P_1$、

表 3　等全磷投入条件下有机无机复混磷肥对玉米籽粒和秸秆磷含量的影响(%)

Table 3　Effects of organic-inorganic compound P fertilizers on P contents of grain and straw of maize under the same total P input rate

磷水平 P level	植株部位 Plant parts	CK	P	A_3P_1	A_1P_1	A_1P_3	$A-A_3P_1$	$A-A_1P_1$	$A-A_1P_3$
低磷	籽粒 Grain	0.159 a	0.159 a	0.160 a	0.156 a	0.149 a	0.149 a	0.154 a	0.170 a
Low P	秸秆 Straw	0.088 a	0.062 ab	0.047 b	0.048 b	0.073 a	0.073 a	0.054 b	0.076 a
中磷	籽粒 Grain	0.159 a	0.154 a	0.155 a	0.156 a	0.146 a	0.153 a	0.158 a	0.146 a
Middle P	秸秆 Straw	0.088 ab	0.094 a	0.071 b	0.085 a	0.088 a	0.074 b	0.088 ab	0.102 a
高磷	籽粒 Grain	0.159 bc	0.155 bc	0.167 a	0.163 a	0.154 c	0.153 c	0.146 c	0.167 a
High P	秸秆 Straw	0.088 a	0.076 abc	0.070 bc	0.082 a	0.064 c	0.079 ab	0.068 bc	0.065 c

注(Note): 1)$A-A_3P_1$、$A-A_1P_1$ 和 $A-A_1P_3$ 代表糖渣处理,其投入量分别对应于 A_3P_1、A_1P_1 和 A_1P_3 中糖渣的投入量 Treatments of $A-A_3P_1$, $A-A_1P_1$ and $A-A_1P_3$ represent sugar residue (A) and which input rate of sugar residue (A) are equal respectively to those of $A-A_3P_1$, $A-A_1P_1$ and $A-A_1P_3$; 2)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 the same row are significant between treatments at the 5% level.

$A-A_1P_3$ 的平均值)的 0.0875 g 提高了 83.43%; 高磷投入水平下,化肥 P 处理植株吸磷量比不施磷肥的 CK 提高了 77.19%,而有机无机复混磷肥处理(A_3P_1、A_1P_1、A_1P_3 平均)植株吸磷量 0.2000 g,比对应有机物料处理($A-A_3P_1$、$A-A_1P_1$、$A-A_1P_3$ 平均)的 0.0743 g 提高了 169.18%。从表 4 亦看出,不同处理籽粒和秸秆中含磷量结果与植株磷总量结果规律相似。综上结果说明,有机无机复混磷肥与化学磷肥相比,改善了磷素吸收,提高了植株吸磷量。表 4 还表明,有机无机复混磷肥中有机物料的比例高低对作物磷素吸收的影响规律不明显。

2.2.3 对化肥利用率的影响　化肥 P 与不施磷肥的 CK 比较,可以计算出化学磷肥的表观利用率; 同样,有机无机复混磷肥与相对应的等量有机物料投入处理比较,例如,将 A_3P_1 与 $A-A_3P_1$ 比较,可以计算出有机无机复混磷肥处理中化学磷肥的利用率

表 4　等全磷条件下有机无机复混磷肥对单株玉米磷素吸收的影响(g/plant)

Table 4　Effects of organic-inorganic compound P fertilizers on P uptakes of maize per plant under the same total P input rate

磷水平 P level	植株部位 Plant parts	CK	P	A_3P_1	A_1P_1	A_1P_3	$A-A_3P_1$	$A-A_1P_1$	$A-A_1P_3$
低磷 Low P	籽粒 Grain	0.0531 d	0.0712 b	0.0923 a	0.0787 b	0.0769 b	0.0646 c	0.0581 cd	0.0568 cd
	秸秆 Straw	0.0315 bc	0.0328 b	0.0298 bc	0.0289 c	0.0448 a	0.0196 d	0.0267 bc	0.0206 d
	总量 Total	0.0846 c	0.1041 b	0.1221 a	0.1076 b	0.1218 a	0.0842 c	0.0848 c	0.0773 d
中磷 Middle P	籽粒 Grain	0.0531 cd	0.0935 b	0.1075 a	0.1006 ab	0.1003 ab	0.0625 c	0.0500 d	0.0529 cd
	秸秆 Straw	0.0315 cd	0.0626 a	0.0532 b	0.0599 a	0.0600 a	0.0274 d	0.0318 cd	0.0380 c
	总量 Total	0.0846 bc	0.1561 a	0.1607 a	0.1605 a	0.1603 a	0.0899 b	0.0818 c	0.0909 b
高磷 High P	籽粒 Grain	0.0531 c	0.0996 b	0.1481 a	0.1420 a	0.1375 a	0.0531 c	0.0459 d	0.0483 cd
	秸秆 Straw	0.0315 d	0.0502 c	0.0564 b	0.0633 a	0.0526 bc	0.0306 d	0.0229 e	0.0222 e
	总量 Total	0.0846 c	0.1499 b	0.2046 a	0.2053 a	0.1900 a	0.0837 c	0.0688 d	0.0705 d

注(Note): $A-A_3P_1$、$A-A_1P_1$ 和 $A-A_1P_3$ 代表糖渣处理,其投入量分别对应于 A_3P_1、A_1P_1 和 A_1P_3 中糖渣的投入量 Treatments of $A-A_3P_1$, $A-A_1P_1$ and $A-A_1P_3$ represent sugar residue (A) and which input rate of sugar residue (A) are equal respectively to those of $A-A_3P_1$, $A-A_1P_1$ and $A-A_1P_3$; 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 the same row are significant between treatments at the 5% level.

(理论上剔除了有机物料A中磷素的干扰)。由表5可以看出,低磷投入水平下,化肥P处理的磷肥利用率为20.24%,而有机无机复混磷肥处理(A_3P_1、A_1P_1、A_1P_3 平均)为36.83%,比化肥P处理提高了16.59个百分点;中磷投入水平下,化肥P处理磷肥利用率为37.10%,而有机无机复混磷肥处理(A_3P_1、A_1P_1、A_1P_3 平均)为38.31%,比化肥P处理提高了1.21个百分点;高磷投入水平下,化肥P处理的磷肥利用率为16.94%,而有机无机复混磷肥处理(A_3P_1、A_1P_1、A_1P_3 平均)为32.98%,比化肥P处理提高了16.04个百分点。因此,有机无机复混磷肥中有机物料的比例高低对磷肥利用率的影响不同,处理之间变化趋势表现不一致,其机理有待进一步研究。从以上结果可以看出,有机物料与化学磷肥复混,提高了化学磷肥的利用率,优化了化学磷肥的利用。

表5 等全磷条件下有机无机复混磷肥对化肥磷素利用效率的影响(%)

Table 5 Effects of organic-inorganic compound P fertilizers on chemical P use efficiency of maize under the same total P input rates

磷水平 P level	P	A_3P_1	A_1P_1	A_1P_3
低磷 Low P	20.24 b	40.32 a	23.86 b	46.31 a
中磷 Middle P	37.10 a	37.66 a	41.18 a	36.11 a
高磷 High P	16.94 b	32.15 a	35.71 a	31.09 a

注(Note):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 the same row are significant between treatments at the 5% level.

3 讨论

化学磷肥多是速溶性肥料,施入土壤后其磷酸根离子与土壤胶体中的阳离子如 Ca^{2+}、Al^{3+}、Fe^{3+} 等极易发生络合进而生成沉淀,影响作物对磷酸根的吸收而导致磷素利用率下降。从本研究结果看,有机物料与磷酸一铵复混造粒形成有机无机复混磷肥,明显优化了作物对化学磷肥的吸收利用,等磷投入条件下,有机无机复混磷肥玉米产量明显高于磷酸一铵化肥处理,其化学磷肥利用率也明显较磷酸一铵化肥处理的高。其原因,一方面是有机复混磷肥施入土壤后,无机磷肥可能受有机物料的直接保护作用,减少了土壤对磷的固定;另一方面有机物料通过对土壤环境的影响,进一步减少了对磷的固定。有机物料与磷肥复混改性后,可能降低了肥际土壤的局部磷酸根浓度,使磷酸根离子与金属离子接触的空间和时间发生了变化,从而减少了磷的固定;此外,有机物料中的活性官能团或低分子量有机酸对金属离子具有较强的络合能力,分解产生的有机酸可以溶解或解吸土壤中的Fe-P、Al-P和Ca-P,如Mnkeni和Mackenzie[18]、Kafkali和Bar-Yosef[19]及Lyamuremye等[20-21]的研究认为,有机酸对固相表面Fe、Al的络合作用消除了大量的磷吸附位点,从而减少了土壤对磷的固定。本研究发现,等化肥磷量投入条件下,与单施磷酸一铵化肥比较,有机复混磷肥提高了土壤 Ca_2-P、Ca_8-P 含量和比例,显著降低土壤Al-P含量,从而增加了土壤速效磷含量,对提高石灰性土壤的供磷水平具有积极影响;单独施用有机物料糖渣,对提高土壤速效磷含量的影响很小,但施用磷肥对土壤速效磷含量的影响却很大,尤其是有机复混磷肥对提高土壤速效磷含量的效果又明显高于磷酸一铵化肥处理[22],这进一步说明有机物料与化学磷肥复混可提高土壤中磷肥的供肥能力,主要原因可能在于有机物料对化学磷肥起到防固定等保护作用。

有机无机复混磷肥中有机物料的高低可能也会影响到作物对磷的吸收利用。本研究中,有机无机复混磷肥中有机质的含量均超过了20%(糖渣与磷肥的最低比例为1:3,糖渣含量为25%,因糖渣的有机质含量超过90%,计算得有机无机复混磷肥中的有机质含量超过20%),在这种情况下,有机无机复混磷肥中有机物料含量的高低对作物产量、磷素吸收以及磷肥利用率都没有表现出明显的规律性。如果有机物料的比例更低一些,结果如何还有待进一步研究。

有机无机复混肥料中的有机物料往往含有一些养分,在研究有机物料对优化化肥利用的效应时,有机物料中的养分往往具有一定的干扰作用,因此需要设置与有机无机复混肥中等量有机物料投入的"有机物料对照"处理,如本研究中 $A-A_3P_1$ 处理只投入有机物料A,其投入量对应于 A_3P_1 处理中有机物料A的投入量。因此,化肥处理与不施肥的CK比较,可以看出化肥的效果;同样 A_3P_1 与 $A-A_3P_1$ 比较可以看出有机无机复混磷肥处理中化学磷肥的效果,这样从理论上就可剔除有机物料A中养分的干扰。

参考文献:

[1] 陈倩,穆环珍,黄衍初,等. 木质素对土壤磷素形态转化及对

磷有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2003, 26(6): 745-748.
Chen Q, Mu H Z, Huang Y C *et al*. Influence of lignin on transformation of phosphorus fractions and its validity[J]. J. Agro-Environ. Sci., 2003, 26(6): 745-748.

[2] 刘小虎, 邹德乙, 刘新华, 等. 长期轮作施肥对棕壤有机磷组分及其动态变化的影响[J]. 土壤通报, 1999, 30(4): 20-26.
Liu X H, Zou D Y, Liu X H *et al*. Influence of long term rotation fertilization on organic phosphorus components and transformation [J]. Chin. J. Soil Sci., 1999, 30(4): 20-26.

[3] 李中阳, 李菊梅, 徐明岗, 等. 外源磷对土壤无机磷的影响及有效性[J]. 中国土壤与肥料, 2007, (3): 32-36.
Li Z Y, Li J M, Xu M G *et al*. Change and availability of soil inorganic phosphorus components influenced by phosphorus fertilizer application[J]. China Soils Fert., 2007, (3): 32-36.

[4] 谢林花, 吕家珑, 张一平, 等. 长期施肥对石灰性土壤磷素肥力的影响Ⅱ. 无机磷和有机磷[J]. 应用生态学报, 2004, 15(5): 790-794.
Xie L H, Lv J L, Zhang Y P, *et al*. Influence of long-term fertilization on phosphorus fertility of calcareous soil Ⅱ. Inorganic and organic phosphorus[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2004, 15(5): 790-794.

[5] 王斌, 马兴旺, 许咏梅, 等. 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, 44(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 Agric. Sci., 2007, 44(3): 312-317.

[6] 王曰鑫, 侯宪文. 腐植酸对土壤中无机磷活化效应的研究[J]. 腐植酸, 2005, (2): 7-14.
Wang Y X, Hou X W. Study on humic acid activation of inorganic phosphorus in soil[J]. Humic Acid, 2005, (2): 7-14.

[7] 章永松, 林咸永, 罗安程, 等. 有机肥(物)对土壤中磷的活化作用及机理研究 Ⅰ. 有机肥(物)对土壤不同形态无机磷的活化作用[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(2): 145-150.
Zhang Y S, Lin X Y, Luo A C, *et al*. Studies on activation of phosphorous by organic manure in soils and its mechanisms I. Effect of organic manure (matter) on activation to different phosphate in soils[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 1998, 4(2): 145-150.

[8] 介晓磊, 李有田, 庞荣丽, 等. 低分子量有机酸对石灰性土壤磷素形态转化及有效性的影响[J]. 土壤通报, 2005, 36(6): 856-860.
Jie X L, Li Y T, Pang R L *et al*. Effect of low molecular weight organic acids on transformation and availability of phosphates in calcareous soil[J]. Chin. J. Soil Sci., 2005, 36(6): 856-860.

[9] 薛延丰, 赵会杰, 李奕林. 低分子量有机酸对石灰性潮土无机磷形态转化的影响[J]. 土壤通报, 2004, 35(4): 449-454.
Xue Y F, Zhao H J, Li Y L. Influence of low molecular weight organic acid on conversion of inorganic phosphorus in calcareous alluvial soil[J]. Chin. J. Soil Sci., 2004, 35(4): 449-454.

[10] 鲁如坤. 土壤磷素化学研究进展[J]. 土壤学进展, 1990, 18(6): 1-5.
Lu R K. Research progress of soil phosphorus chemistry[J]. Prog. Soil Sci., 1990, 18 (6): 1-5.

[11] 张宏伟, 陈浩, 唐爱民, 等. 腐植酸共聚物改良后土壤中磷肥有效性研究[J]. 土壤肥料, 2002, (6): 39-40.
Zhang H W, Chen G, Tang A M *et al*. Study on the efficiency of the phosphorous fertilizer in soil amended by humic acid copolymer[J]. Soils Fert., 2002, (6): 39-40.

[12] 肖洪云. 有机复合磷肥[P]. 中国专利: 981240131.5, 1999-07-14.
Xiao H Y. Organic-inorganic compound phosphorous fertilizer [P]. Chinese Patent: 981240131.5, 1999-07-14.

[13] 李代伦, 林世培, 郭升万. 利用城市生活垃圾制造有机复合磷肥[P]. 中国专利: 981121001.4, 1998-12-16.
Li D L, Lin S P, Guo S W. Organic-inorganic compound P fertilizer produced by using municipal garbage [P]. Chinese Patent: 981121001.4, 1998-12-16.

[14] 邓明萌, 胡国华, 陈全明, 等. 有机复合磷肥的生产[J]. 磷肥与复肥, 2002, 17(5): 54-56.
Deng M M, Hu G H, Chen Q M, *et al*. The production of organic-inorganic compound P fertilizer[J]. Phos. Comp. Fert., 2002, 17(5): 54-56.

[15] 郑超, 刘可星, 廖宗文, 等. 改性木质素对砖红壤磷素有效性的影响[J]. 华中农业大学学报, 2004, 23(5): 528-532.
Zheng C, Liu K X, Liao Z W, *et al*. Effect of modified lignin on phosphorus availability of latosol [J]. J. Huazhong Agric. Univ., 2004, 23(5): 528-532.

[16] 史春余, 张夫道, 张树清, 等. 有机-无机复合肥对番茄产量、品质和有关生理特性的影响[J]. 中国农业科学, 2004, 37(8): 1183-1187.
Shi C Y, Zhang F D, Zhang S Q *et al*. Effects of organic-inorganic compound fertilizers on yield, quality and some related physiological characteristics in tomato[J]. Sci. Agric. Sin., 2004, 37(8): 1183-1187.

[17] 廖宗文, 王卫红, 江东荣, 等. 有机无机复肥系统与肥效关系初探[J]. 华南农业大学学报, 1995, 16(2): 25-30.
Liao Z W, Wang W H, Jiang D R, *et al*. Preliminary study on the relationship of organic inorganic compound fertilizer system and fertilizer effect[J]. J. South China Agric. Univ. (Nat. Sci.), 1995, 16(2): 25-30.

[18] Mnkeni P N S, Mackenzie A F. Retentior of ortho- and polyphosphate in some Quebec soil as affected by added organic residues and calcium carbonate[J]. Can. J. Soil Sci., 1985, 651: 575-585.

[19] Kafkali V, Bar-Yosef B. Phosphorus absorption by kaolinite and montmorrillonite: Ⅱ. Organic anion competion[J]. Soil Sci. Am. J., 1988, 52: 1585-1589.

[20] Lyamuremye F, Dick R P, Baham J. Organic amendments and phosphorus dynamics: Ⅰ. Distribution of soil phosphorus fractions[J]. Soil Sci., 1996, 161(6): 436-443.

[21] Lyamuremye F, Dick R P, Baham J. Organic amendments and phosphorus dynamics: Ⅱ. Distribution of soil phosphorus fractions[J]. Soil Sci., 1996, 161(6): 444-451.

[22] 杜伟, 赵秉强, 林治安, 等. 有机复混磷肥对石灰性土壤无机磷形态组成及其变化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(6): 1388-1394.
Du W, Zhao B Q, Lin Z A *et al*. Effects of organic and inorganic phosphorus compound fertilizer on transformation of inorganic phosphorus pool in lime soils[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2011, 17(6): 1388-1394.