

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2024.03.004

郭刘明, 卢树昌. 不同调理剂施用对富磷土壤磷素吸收及其形态变化影响. 土壤, 2024, 56(3): 488–494.

不同调理剂施用对富磷土壤磷素吸收及其形态变化影响^①

郭刘明, 卢树昌*

(天津农学院农学与资源环境学院, 天津 300392)

摘要: 针对集约化设施土壤中磷素过度累积, 本文开展盆栽试验, 探究不同类型土壤调理剂施用对糯玉米干物质积累、磷素吸收及土壤磷素形态变化的影响。结果表明, 生物质炭 70%+明矾 30% 处理玉米的长势最好, 其盆干生物量最高为 44.6 g/plant, 显著高于对照处理 19.57%。土壤总磷和水溶性磷含量在施用调理剂后与种植前相比均有不同程度的降低。在土壤无机磷组分变化方面, 明矾 100% 与生物质炭 100% 处理均提高了缓效性磷源的含量, 生物质炭 70%+明矾 30% 处理显著提高了速效性磷源含量。生物质炭 70%+明矾 30%、生物质炭 30%+腐植酸 30%+明矾 30% 处理可以有效抑制土壤碱性磷酸酶的活性, 同时抑制土壤有机磷素的矿化。综合来看, 生物质炭 70%+明矾 30% 处理在释放土壤潜在性磷源、提高土壤速效性磷源、促进作物磷素吸收、提高作物干物质质量积累等方面的综合表现较好。

关键词: 土壤调理剂; 富磷土壤; 磷素吸收; 磷素形态变化

中图分类号: S156.2; S153 **文献标志码:** A

Effects of Different Conditioning Agents on Phosphorus Uptake and Form Changes in Phosphorus-rich Soil

GUO Liuming, LU Shuchang*

(College of Agronomy & Resources and Environment, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300392, China)

Abstract: In order to solve excessive accumulation of phosphorus in the soil of intensive facilities, this study conducted a pot experiment to explore different types of soil conditioners on dry matter accumulation, phosphorus uptake and changes in soil phosphorus forms of waxy maize. The results showed that maize grew best under biochar 70% + alum 30% treatment with the highest dry biomass of 44.6 g/plant, increased significantly by 19.57% than control treatment. The application of conditioner decreased the contents of total phosphorus and water-soluble phosphorus to varying degrees. In terms of changes in soil inorganic phosphorus composition, 100% alum and 100% biochar treatments increased the content of slow-acting phosphorus sources, and 70% biochar + 30% alum treatment significantly increased the content of fast-acting phosphorus sources. Biochar 70% + alum 30%, biochar 30% + humic acid 30% + alum 30% treatments effectively inhibited the activity of soil alkaline phosphatase and the mineralization of soil organophosphorus. On the whole, biochar 70% + alum 30% treatment has good comprehensive performance in releasing soil potential phosphorus sources, improving soil available phosphorus sources, promoting crop phosphorus absorption, and improving crop dry matter quality accumulation.

Key words: Soil conditioner; Phosphorus-rich soil; Phosphorus uptake; Phosphorus form change

磷素在作物生长发育中起着重要作用, 不仅是构成作物体内多种重要有机化合物以及酶类物质的组成成分, 还是作物体内酶促反应的能源物质, 同时对作物产量的形成也起到重要作用^[1-2]。在农业系统中为了保证作物产量, 通常会盲目施用大量磷肥, 导致

土壤中积累大量磷素, 磷素的过度累积不仅会使植物产生毒害, 同时还极大增加了土壤中磷素淋溶流失带来的环境风险^[3-5]。有研究表明, 我国土壤有效磷含量合理范围为 20 ~ 40 mg/kg, 此时在保证作物产量品质的同时, 可防止地表径流中磷浓度增高^[6]。针对

①基金项目: 天津市重点研发计划科技支撑重点项目(19YFZCSN00290)资助。

* 通讯作者(lsc9707@163.com)

作者简介: 郭刘明(1999—), 男, 河南驻马店人, 硕士研究生, 主要从事农田土壤与作物生长环境方面的研究。E-mail: 1459275045@qq.com

以上问题,有学者指出通过施用土壤调理剂方法来降低土壤磷素累积风险。

土壤调理剂是指加入到土壤中来改善土壤物理性状、化学性质以及微生物活性的物质,具有改善土壤状况、增强土壤可持续利用功能、减弱土壤中磷素过度累积的作用,按土壤调理剂的作用机理可以分为营养型调理剂、协调型调理剂、钝化型调理剂三大类^[7-8]。生物质炭具有疏松多孔和比表面积较大的特点,对改善土壤通气性和保肥性有较好效果,可以促进作物对磷素的吸收,降低磷素流失风险^[9-10]。有研究发现,明矾通过促进土壤活性磷向缓效态磷转化,达到钝化土壤磷素的目的,从而缓解土壤中活性磷源含量较高且易流失的问题^[11]。近年来,腐植酸肥料在农业领域应用较广泛,具有低碳、节能的特点,同时作为土壤的一部分对环境也不会产生污染^[12]。研究发现,腐植酸可以活化土壤中固态磷含量,提高土壤养分有效性,促进作物对土壤磷素的吸收利用^[13-14]。

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physiochemical properties of tested soil

有机质(g/kg)	全磷(g/kg)	全氮(g/kg)	有效磷(mg/kg)	pH	含盐量(g/kg)	阳离子交换量(CEC)(cmol/kg)
29.60	4.93	2.94	487.18	7.75	0.57	27.61

供试土壤调理剂选用草本生物质炭、腐植酸、明矾,具体理化性状见表 2。土壤调理剂用量按照耕层土重 2.4×10^6 kg/hm² 折算,其常规用量分别为 10.0、0.63、0.94 g/kg 干土。

表 2 供试土壤调理剂基本理化性状

Table 2 Basic physiochemical properties of tested soil conditioners

材料	pH	总氮(g/kg)	总磷(g/kg)	有机质(g/kg)
生物质炭	8.30	2.87	5.90	85.37
明矾	2.50	-	-	-
腐植酸	4.85	4.73	4.37	70.96

1.2 试验设计

试验在天津农学院温室中进行,共设 7 个处理:T1(对照处理,无调理剂)、T2(生物质炭 70%+明矾 30%)、T3(生物质炭 50%+明矾 50%)、T4(生物质炭 30%+腐植酸 30%+明矾 30%)、T5(明矾 100%)、T6(腐植酸 100%)、T7(生物质炭 100%),每处理 3 次重复。供试土壤样品自然风干后过 5 mm 筛,按照试验设计称取相应的供试调理剂并将其与土壤混匀后装入高 22 cm、上口径 30 cm、下口径 18 cm 的试验盆,每盆装干土 5 kg,调理剂一次性施用。每盆播种 3 粒种子,待出苗后留取长势均匀一致的玉米 2 株。

试验于 2022 年 5 月 9 日进行布置和播种,5 月

综合国内外研究报道发现,目前对于应用土壤调理剂对土壤磷素过度累积的研究主要集中在单一作用的调理剂,对不同作用机理调理剂组合施用的研究较少。因此,本研究选用生物质炭、明矾、腐植酸 3 种作用机理不同的调理剂,研究其组合搭配施用对富磷土壤磷素吸收及其形态变化的影响,旨在为防控土壤磷素过度累积造成农田质量下降及面源污染提供科学遵循,以助力农业绿色可持续发展。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

供试作物为糯玉米(澳早 60),生育期约 85 d。

供试土壤为采自天津市武清区大孟庄镇后幼庄的设施富磷土壤。该区种植制度以番茄、黄瓜等果菜-叶菜为主,养分投入偏高,供磷水平富足。供试土壤基本理化性质见表 1。

15 日出苗,8 月 6 日在玉米 11~12 叶时收获。每 1~2 天上午 8:00—9:00 灌水一次,每次每盆灌水 600 mL,灌水量根据土壤含水量情况进行适当调整,在夏天温度较高时,可增加灌水量,每次不超过 900 mL。试验期间不施用任何肥料。

1.3 采样与测试

1.3.1 农艺性状 玉米在播种后 30 d 和 60 d 对其生长情况进行观察,其中株高采用钢卷尺测量玉米根尖至顶端叶的距离,茎粗采用游标卡尺对地上第二节间中央茎的最大直径进行测量,叶色(SPAD 值)采用 SPAD-502 仪测定顶部倒三叶的叶中部及两端叶片读数的平均值。

1.3.2 植物干物质积累量及吸收磷素积累量测定 采集整株植物样品(包含根、茎、叶、果穗部位),干物质积累量采用每盆收获鲜植株的风干重进行计算。糯玉米吸收磷素积累量以风干样粉碎后,采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮-钼蓝比色法测定^[15]。作物盆吸磷量=每盆干物质积累量×含磷量。

1.3.3 土壤磷素测定 试验结束时,采集土壤样品。土壤总磷采用浓硫酸-高氯酸消解-钼蓝比色法测定,有效磷采用碳酸氢钠溶液浸提-钼蓝比色法测定,水溶性磷采用氯化钙溶液浸提-钼蓝比色法测定,无

机磷组分根据蒋柏藩-顾益初的北方石灰性土壤的方法测定^[15]。土壤碱性磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法测定,以 24 h 后 1 g 土壤中释放出酚的毫克数表示土壤碱性磷酸酶的活性^[16]。土壤中总无机磷含量为 Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P、Fe-P、O-P、Ca₁₀-P 6 种形态无机磷的总和,土壤有机磷含量为土壤总磷与总无机磷之差。

1.4 数据处理

试验数据采用 Excel 2019 进行处理,采用 SPSS 22.0 软件进行统计分析,应用 Duncan 法和 LSD 法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同调理剂施用下糯玉米长势状况

不同处理糯玉米长势情况见表 3。糯玉米生长中期

(60 d) 的株高在施用组合调理剂的处理中表现为 T2>T3>T4, 其中 T2 处理高于对照 T1 处理 5.88%; 施用单一调理剂处理中, 株高以 T5 处理表现较好, 显著高出对照处理 15.84%, T6 处理最低。从糯玉米茎粗来看, 组合调理剂的 T2、T3 处理在盆栽出苗 30 d 和 60 d 均不同程度增大; 单一调理剂的 T6 处理在盆栽出苗 60 d 时糯玉米的茎粗较大, 高出对照处理 16.31%。从糯玉米的叶片数和叶色值来看, 盆栽出苗 30 d 的糯玉米生长叶片数以及 30 d 和 60 d 的叶色值在各处理间均没有显著差异; 盆栽出苗 60 d 时糯玉米的叶片数在施用组合调理剂的处理中以 T3 较好, T4 处理较差, 低于对照处理 14.44%; 单一调理剂的处理中 T6 的叶片数最大。综合糯玉米的长势来看, 土壤调理剂施用对糯玉米叶片数、茎粗、株高等均有不同程度改善, 其中以 T5、T2 处理较好, 其次是 T3、T7 处理。

表 3 不同处理糯玉米长势状况
Table 3 Waxy maize growth statuses under different treatments

处理	株高 (cm)		茎粗 (mm)		叶片数		叶色 (SPAD 值)	
	DAS 30d	DAS 60d	DAS 30d	DAS 60d	DAS 30d	DAS 60d	DAS 30d	DAS 60d
T1	77.0 ± 3.3 a	110.5 ± 3.7 bc	11.97 ± 2.02 a	11.65 ± 0.45 b	5.3 ± 1.7 a	9.0 ± 0.8 ab	28.2 ± 1.1 a	37.8 ± 1.6 a
T2	77.3 ± 3.8 a	117.0 ± 8.3 ab	12.53 ± 1.54 a	12.47 ± 0.73 ab	6.7 ± 0.9 a	8.7 ± 1.2 ab	27.3 ± 5.4 a	33.0 ± 3.2 a
T3	71.3 ± 1.9 ab	116.5 ± 9.4 ab	12.77 ± 1.44 a	12.93 ± 1.14 ab	7.3 ± 0.5 a	9.3 ± 0.5 ab	27.3 ± 4.6 a	36.7 ± 0.6 a
T4	74.0 ± 4.9 a	99.7 ± 9.7 c	9.43 ± 1.01 a	11.40 ± 0.36 b	6.3 ± 0.5 a	7.7 ± 0.5 b	27.1 ± 3.5 a	42.3 ± 1.9 a
T5	76.0 ± 2.8 a	128.0 ± 4.1 a	12.43 ± 1.39 a	12.93 ± 0.05 ab	6.3 ± 0.5 a	9.0 ± 0.8 ab	24.5 ± 2.1 a	40.4 ± 2.8 a
T6	63.0 ± 2.4 b	113.5 ± 3.7 abc	10.34 ± 0.77 a	13.55 ± 0.29 a	5.0 ± 1.4 a	9.7 ± 0.5 a	29.1 ± 4.3 a	37.6 ± 0.8 a
T7	68.5 ± 6.9 ab	117.5 ± 2.9 ab	12.21 ± 1.34 a	12.20 ± 0.98 ab	6.7 ± 0.5 a	9.0 ± 0.8 ab	21.1 ± 4.4 a	40.0 ± 0.9 a

注: DAS 30d、DAS 60d 分别表示盆栽出苗后 30 d 和 60 d; 同列数据小写字母不同表示处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

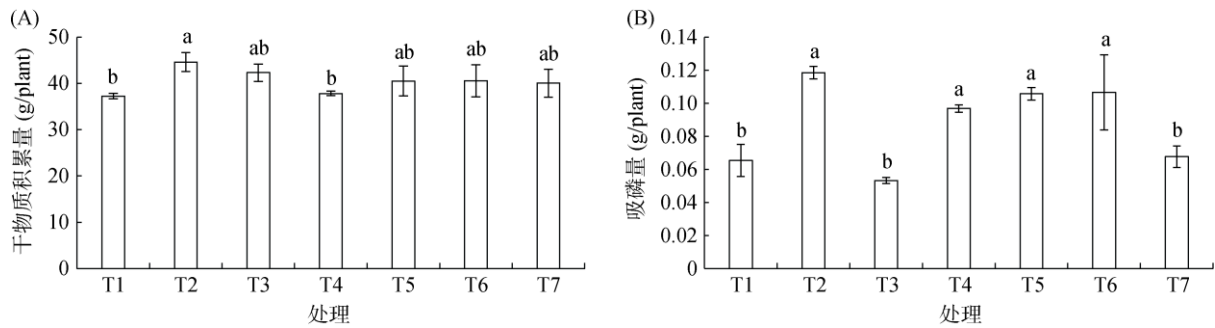
2.2 不同调理剂施用对糯玉米干物质积累和吸磷量的影响

在施用组合调理剂的处理中糯玉米的干物质积累量与对照处理相比均有不同程度的增高(图 1A), 其中以 T2 处理的干物质积累最高, 显著高出对照处理 19.57%, 其次是 T3 处理; 施用单一调理剂的处理中以 T6 处理较佳, 与对照处理相比均增高了 8.77%, 其次是 T5 处理。总体来看, 施用组合调理剂处理的糯玉米干物质积累状况要优于施用单一调理剂处理, 其中以施用组合调理剂的 T2 处理干物质积累最高, 为 44.6 g/plant。从糯玉米的吸磷量来看(图 1B), 在施用组合调理剂的处理中 T2 处理的吸磷量最高, 显著高出对照处理 115.50%, 其次是 T4 处理, T2 处理的糯玉米在吸磷量方面表现较差; 施用单一调理剂处理中以 T5 处理的糯玉米吸磷量最高, 显著高出对照处理 61.83%, 其次是 T6 处理, T7 处理的糯玉米吸

磷量最少。总体来看, 施用组合调理剂处理下, 糯玉米对磷素吸收要优于单一调理剂处理, 其中 T2 处理吸磷量最高, 为 0.119 g/plant, 显著高于对照处理。

2.3 不同调理剂施用下土壤磷素形态变化及碱性磷酸酶活性变化

施用土壤调理剂后土壤中总磷和水溶性磷含量与基础值相比均有不同程度下降(图 2A、2B)。在施用组合调理剂的处理中, 土壤总磷以 T3 处理降低最多, 与基础值相比降低了 4.01%; T4 处理的水溶性磷含量较基础值相比显著下降了 22.99%。施用单一调理剂的处理中, T5 处理土壤总磷含量降低最多, 较基础值降低了 4.54%, 其次是 T7 处理; 土壤水溶性磷含量方面, T6 处理降低最明显, 比基础值显著下降了 20.96%, 其次是 T5 处理。总体来看, 组合调理剂处理中的 T4 处理对降低土壤中水溶性磷含量、



(图中小写字母不同表示处理间差异显著($P < 0.05$), 下同)

图 1 不同调理剂施用对糯玉米干物质积累和吸磷量的影响

Fig. 1 Effects of different conditioners on dry matter accumulation and phosphorus uptake in waxy maize

减轻土壤磷素淋洗的环境风险效果较佳, 其次是 T2 处理。从图 2C 可以看出, 施用土壤调理剂后土壤中有效磷含量均有不同程度的变化, 施用组合调理剂的处理中 T3 处理对降低土壤中有效磷的效果最明显, 与对照处理相比显著降低了 22.17%, 其次是 T4 处理, T2 处理降低较少; 施用单一调理剂的处理中, T6、T5 处理土壤有效磷含量与对照处理相比分别显著降低了 5.98%、3.36%, 而 T7 处理则显著增高。总体来看, 组合调理剂对降低土壤中有效磷含量的效果要好

于单一调理剂。就土壤碱性磷酸酶活性而言, 施用组合调理剂的处理中, T2 处理较对照处理显著下降了 57.02%(图 2D), 其次是 T4 处理, T3 处理对抑制碱性磷酸酶活性的效果相对较差, 但与对照处理相比也显著降低了 30.43%; 而施用单一调理剂的处理中, T6、T7 处理较对照处理分别显著下降了 14.90%、10.37%, T5 处理没有显著变化。总体来看, 组合调理剂对土壤中碱性磷酸酶活性的抑制作用要好于单一调理剂, 其中 T2 处理效果最为显著。

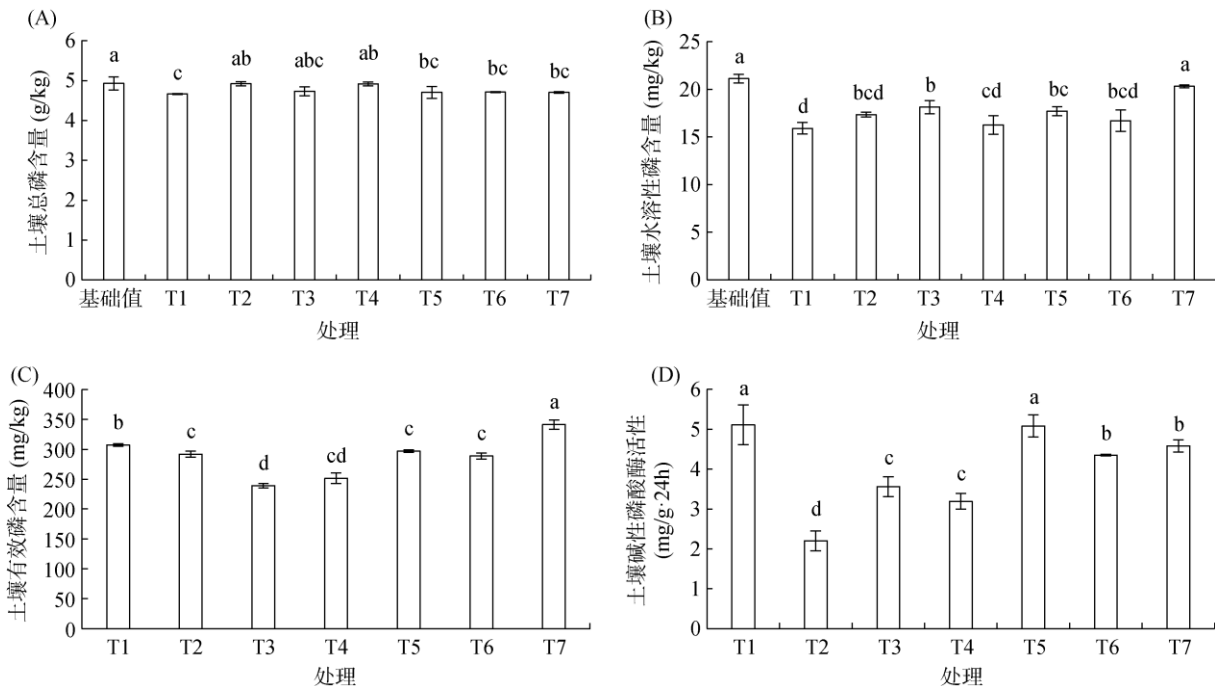


图 2 不同调理剂施用下土壤磷素形态变化及碱性磷酸酶活性变化

Fig. 2 Changes in soil phosphorus forms and alkaline phosphatase activities under different conditioners

2.4 不同调理剂施用下土壤无机磷组分含量

李志坚等^[17]认为可以将土壤无机磷组分划分为速效性磷源($\text{Ca}_2\text{-P}$)、缓效性磷源($\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P)、潜在性磷源($\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 和 O-P)。由图 3 可知, 对于 $\text{Ca}_2\text{-P}$, 在施用组合调理剂处理中, 除 T3 较对照处理有所降

低外, 其他处理均不同程度提高了其含量, 其中 T2 处理的含量最高, 较对照处理显著增加了 29.46%; 施用单一调理剂处理的 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量与对照处理相比均有不同程度下降, 其中 T6、T5 处理分别显著下降了 37.51%、36.48%。从缓效性磷源来看, T4 处理土壤

$\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量显著低于其他处理, T5 处理 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量则显著提高; T7 处理较对照处理显著提高了土壤 Al-P 含量, 其次是 T3 处理; T5 处理对提高土壤 Fe-P 含量的效果最显著, 其次是 T2 处理。从缓效性磷源 ($\text{Ca}_8\text{-P}+\text{Al-P}+\text{Fe-P}$) 的总体含量来看, 组合调理剂处理中 T4、T2 处理较对照处理均有不同程度的下降, 其中以 T4 处理较对照减少较多, T3 处理较对照处理则有所增加; 单一调理剂的 T5、T7 处理较对照处理有不同程度的增加, T6 处理则有所降低。除 T4 处理外, 其他处理均不同程度提高了土壤 O-P 含量, 其中以 T7 处理效果较好; T5 处理 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量显著高于其他处理, 其次是 T7、T3 处理。综合潜在性磷源来看, 施用组合调理剂处理中 T3、T2 处理较对照处理相比均有不同程度的增加, 其中 T3 处理增加较多, T4 处理与对照处理相比有所降低; 施用单一调理剂的

T5 处理与对照处理相比 O-P 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 分别显著提高了 37.48%、28.53%, T6 处理与对照处理相比有所降低。总体来看, T2 处理对提高土壤速效性磷源的效果较好, 可增强土壤中磷素对作物的供应能力, 同时可以一定程度提高土壤潜在性磷源含量, 缓效磷素的淋溶流失风险。

2.5 不同调理剂施用下土壤无机磷与有机磷含量比较

不同调理剂处理土壤无机磷与有机磷含量比较如表 4 所示, 施用组合调理剂处理均不同程度提高了土壤总有机磷的占比, 其中 T4 处理土壤总有机磷占比最高为 48.98%, 其次是 T2 处理; 施用单一调理剂处理中, 土壤总有机磷占比以 T6 处理最高, 占总磷比重 39.86%, T7 处理总有机磷占比较少为 28.85%。总体来看, 组合调理剂对抑制土壤中有机磷矿化的效果较好。

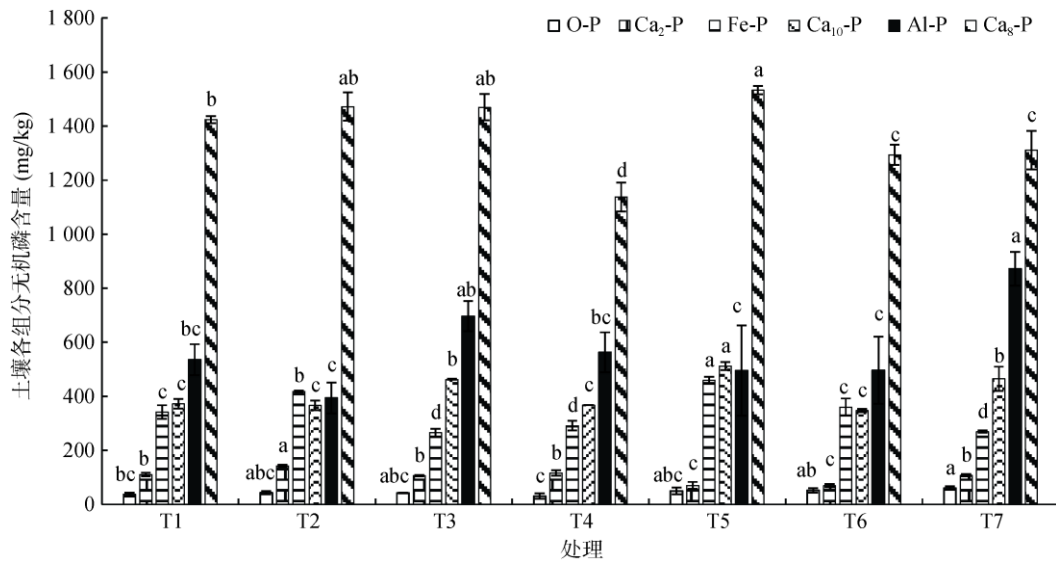


图 3 不同调理剂施用下土壤无机磷组分含量

Fig. 3 Soil inorganic phosphorus contents under different conditioners

表 4 不同处理土壤无机磷与有机磷含量比较

Table 4 Comparison of soil inorganic phosphorus and organophosphorus contents under different treatments

处理	总无机磷含量(g/kg)	有机磷含量(g/kg)	有机磷占总磷的比例(%)
T1	2 819.97 ± 88.89 ab	1 325.23 ± 135.11 c	31.93 ± 2.77 cd
T2	2 838.80 ± 108.12 ab	2 079.95 ± 117.71 ab	42.28 ± 2.24 ab
T3	3 044.28 ± 78.45 a	1 483.48 ± 361.68 c	32.35 ± 5.29 cd
T4	2 506.64 ± 138.26 c	2 409.04 ± 179.04 a	48.98 ± 3.24 a
T5	3 086.44 ± 128.03 a	1 616.69 ± 278.16 bc	34.22 ± 4.80 bcd
T6	2 618.24 ± 139.34 bc	1 744.86 ± 251.75 bc	39.86 ± 4.72 bc
T7	3 085.19 ± 106.60 a	1 252.53 ± 142.49 c	28.85 ± 3.03 d

3 讨论

相关研究表明, 土壤中添加适量的生物质炭可以

改善土壤环境和植物根际微生物活性, 同时对提高作物产量以及改善作物品质也有积极效应^[18-19]。周爽等^[20]、刘会丽等^[21]研究表明腐植酸可以改良土壤理化性

质、提高土壤磷养分有效性、增加作物产量。研究发现土壤中单施明矾、明矾配施生物质炭均可以不同程度改善土壤理化性状，促进作物对养分的吸收利用，从而提高作物产量^[22]。本盆栽试验条件下的研究结果表明，生物质炭、腐植酸、明矾单独施用对提高糯玉米干物质积累量有一定作用但差异不明显，生物质炭单施对提高作物磷素吸收的效果不佳，这与上述研究结果略有不同，可能原因是一茬盆栽试验时间较短，调理剂作用发挥不充分。调理剂配合施用同样对提高作物干物质积累有一定作用，特别是T2处理(生物质炭70%+明矾30%)的效果最为明显，同时对促进磷素吸收效果也要明显好于单施生物质炭的处理；其次是T3处理(生物质炭50%+明矾50%)，T4处理(生物质炭30%+腐植酸30%+明矾50%)的效果较差。这与上述前人研究结果部分相似，可见调理剂的搭配施用要考虑用量的同时，也要考虑选择合适的调理剂种类。明矾作为土壤调理剂的研究较少且不深入，可能原因是担心其含有的铝会对土壤造成潜在环境风险，甚至影响作物的正常生长，因此明矾的施用需要严格控制用量。

土壤磷素的沉淀和溶解、吸附以及有机磷的矿化是土壤中磷素形态变化的主要方式^[23-24]。本盆栽试验在无磷肥投入的情况下，土壤总磷含量经糯玉米种植后与种植前基础值相比均有不同程度降低，但与对照处理相比有所增加。这与王茜^[25]的研究结果有所不同，可能原因是盆栽土层较薄且玉米根系集中，在收集土样时根系处理不彻底导致土壤总磷测定含量有所增加，同时调理剂自身含有的部分磷素也可能是导致土壤总磷含量在短时间内有所增高的原因。

研究表明土壤有效磷含量的高低与土壤无机磷各形态有关，其中在石灰性土壤中有效磷含量与土壤速效性磷源Ca₂-P的含量关系密切，其次是作为缓效性磷源的Ca₈-P、Al-P、Fe-P^[26-27]。同时研究表明同种类调理剂在不同用量配比下最后所发挥的效果也有所不同^[28]。本试验中，单施生物质炭的处理通过提高缓效性磷源的含量提高了土壤有效磷的含量；T2处理促进了缓效性磷源和潜在性磷源向速效性磷源Ca₂-P的变化，以供作物生长需求，T3处理的无机磷形态通过向潜在性磷源变化降低了土壤中有效磷的含量，可见调理剂配比的用量不同也会影响最后的效果，这与上述前人研究结果相似。在本试验条件下，供试土壤中无机磷是磷素的主要形态，各处理无机磷和有机磷所占总磷含量的比例并不相同，但两者比率变化幅度不大，可见各形态无机磷之间通过互相

迁移变化，使二者之间保持动态平衡，该结果与前人研究^[29-30]相同。

4 结论

施用调理剂处理在糯玉米干物质质量积累和磷素吸收方面以生物质炭70%+明矾30%处理较佳；从土壤磷素形态变化来看，生物质炭50%+明矾50%、生物质炭70%+明矾30%处理对减少土壤有效磷效果较好；生物质炭70%+明矾30%、生物质炭30%+腐植酸30%+明矾30%处理可以有效抑制土壤碱性磷酸酶的活性，减弱土壤磷素的矿化转移，一定程度上阻止土壤有效磷素的过度积累；生物质炭70%+明矾30%处理对提高有效性磷源Ca₂-P的效果较佳。综合看，在无外源磷肥投入下，以生物质炭70%+明矾30%组合调理剂处理在释放土壤缓效性磷源、促进作物磷素吸收、提高作物干物质质量积累等方面综合表现较好。

参考文献：

- [1] 骆妍妃, 覃潇敏, 农玉琴, 等. 不同磷水平下玉米-大豆间作对红壤无机磷组分及有效磷的影响[J]. 土壤, 2022, 54(1): 72-79.
- [2] 甘国渝, 金慧芳, 李燕丽, 等. 秸秆及其生物炭添加对土壤Olsen-P及磷素组分的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(5): 43-51.
- [3] 王瑞, 施卫明, 李奕林. 磷肥减施对集约化露天菜地周年磷损失削减效果评价[J]. 土壤学报, 2023, 60(1): 224-234.
- [4] Jae-Young C, Han K W, Jin-Kyu C, et al. N and P losses from a paddy field plot in central Korea[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2002, 48(3): 301-306.
- [5] 王瑞, 仲月明, 李慧敏, 等. 高投入菜地土壤磷累积、损失特征及阻控措施的研究进展[J]. 土壤, 2021, 53(6): 1115-1124.
- [6] 席雪琴. 土壤磷素环境阈值与农学阈值研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [7] 李晨昱, 卢树昌, 王茜. 土壤调理剂在农业领域研究现状、问题及前景[J]. 北方园艺, 2018(14): 154-160.
- [8] Yang X D, Feng Y S, Zhang X H, et al. Mineral soil conditioner requirement and ability to adjust soil acidity[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 18207.
- [9] 孙宁婷, 王小燕, 周豪, 等. 生物质炭种类与混施深度对紫色土水分运移和氮磷流失的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59(3): 722-732.
- [10] 包立, 刘惠见, 邓洪, 等. 玉米秸秆生物炭对滇池流域大棚土壤磷素利用和小白菜生长的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(4): 815-824.
- [11] 陈硕, 卢树昌, 张强, 等. 设施土壤改良与污染控制[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2021.

- [12] 王苗, 李艳红, 张殿凯, 等. 腐植酸肥料应用研究进展[J]. 应用化工, 2022, 51(7): 2052–2056.
- [13] 王敏, 刘石磊, 张帅, 等. 腐植酸钾与磷肥施用方式对土壤磷素移动性的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(2): 209–215.
- [14] Liu M L, Wang C, Wang F Y, et al. Maize (*Zea mays*) growth and nutrient uptake following integrated improvement of vermicompost and humic acid fertilizer on coastal saline soil[J]. Applied Soil Ecology, 2019, 142: 147–154.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [16] 关松荫. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1996.
- [17] 李志坚, 林治安, 赵秉强, 等. 增值磷肥对潮土无机磷形态及其变化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(5): 1183–1191.
- [18] 蒋志慧, 王文慧, 张有利, 等. 生物炭用量对鲜食糯玉米产量及品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(14): 109–115.
- [19] Hynšt J, Tůma I, Mikajlo I, et al. Interactive effect of biochar and urea addition increases plant growth and rhizosphere microbial activity and decreases N₂O emissions[J]. Rhizosphere, 2023, 27: 100763.
- [20] 周爽, 其力莫格, 谭钧, 等. 腐植酸提高土壤氮磷钾养分利用效率的机制[J]. 腐植酸, 2015(2): 1–8.
- [21] 刘会丽, 黄迎康, 李莎莎. 腐植酸复合肥对小麦产量和品质的影响[J]. 腐植酸, 2023(3): 57–61.
- [22] 李晨昱. 冬小麦、夏玉米复种下土壤调理剂对土壤理化性状及作物生长影响研究[D]. 天津: 天津农学院, 2019.
- [23] 林治安, 谢承陶, 张振山, 等. 石灰性土壤无机磷形态、转化及其有效性研究[J]. 土壤通报, 1997, 28(6): 274–276.
- [24] 谷思玉, 王宁娟, 陈渊, 等. 不同开垦年限农田黑土磷素形态及数量变化[J]. 土壤, 2014, 46(4): 662–668.
- [25] 王茜. 不同土壤调理剂施用对高磷土壤磷素形态转化及其作物吸收影响研究[D]. 天津: 天津农学院, 2020.
- [26] 何莹. 酸性土壤调理剂对石灰性土壤无机磷转化的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.
- [27] 李新平, 张亚林, 魏玉奎, 等. 杨凌地区大棚土壤无机磷形态及有效性研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4): 195–199.
- [28] 王茜, 卢树昌. 两种调理剂配施对设施富磷土壤磷素吸收与转化的影响[J]. 北方园艺, 2020(8): 87–92.
- [29] 刘彩玲, 王瑞, 李昱, 等. 不等量翻压紫云英处理下黄泥田土壤磷组分的变化[J]. 中国土壤与肥料, 2019(6): 44–48, 70.
- [30] 方兵, 陈林, 王阳, 等. 设施农业土壤磷素累积迁移转化及影响因素[J]. 环境科学, 2023, 44(1): 452–462.