

刘芸婷,潘俊臣,莫碧霞,等. 腐殖酸和生物质炭对土壤磷素转化及甘蔗生长的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(7):220-226.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.07.030

# 腐殖酸和生物质炭对土壤磷素转化及甘蔗生长的影响

刘芸婷,潘俊臣,莫碧霞,姚校娟,易科,覃美,唐新莲

(广西大学农学院甘蔗生物学重点实验室,广西南宁 530004)

**摘要:**为探究腐殖酸与生物质炭配施化学磷肥对酸性土壤磷素活化及甘蔗生长的影响。采用盆栽试验,探究了2个施磷水平和2种磷素活化剂的施用对土壤养分、磷素转化及甘蔗生长的影响。结果表明,腐殖酸与生物质炭单独施用或配合施用提高了土壤速效磷、磷素活化率、有机质、有效钾、碱解氮的含量及磷酸酶的活性,且甘蔗株高、茎粗、全磷含量、磷积累量及磷肥利用率也有所提高,但显著降低了土壤无机磷 O-P 的含量,其中 0.1 g/kg 磷肥 + 2 g/kg 腐殖酸处理(P1F)的土壤 O-P 含量显著低于单施 0.1 g/kg 磷肥处理(P1)49.35%,腐殖酸与生物质炭配施处理(P1FS)较空白对照处理(CK)的土壤有机质含量和磷酸酶活性分别显著提高了 29.31% 和 42.11%。在 2 个施磷水平下,腐殖酸与生物质炭的施用对土壤无机磷形态含量增加的效果从大到小依次为 Fe-P > Ca-P > Al-P > O-P。表明施用腐殖酸与生物质炭提高了土壤的速效养分、磷素含量、磷酸酶活性,促进了土壤磷素转化,进而影响了甘蔗对磷素的吸收利用。

**关键词:**腐殖酸;生物质炭;甘蔗;磷;有效性;磷转化

**中图分类号:**S153.6;S566.106

**文献标志码:**A

**文章编号:**1002-1302(2023)07-0220-07

磷是植物必需的矿质营养元素,对作物产量与品质具有至关重要的作用<sup>[1]</sup>。甘蔗作为我国重要的经济作物,属于多年生禾本科单子叶植物,其生

长期长,对磷素需求量多,磷肥施用量大<sup>[2-3]</sup>。广西壮族自治区地处热带、亚热带地区,具有优异的气候条件和丰富的水资源,是我国甘蔗的主产区;但广西壮族自治区绝大多数蔗区土壤类型为酸性红壤,该土壤脱硅富铝、富铁化严重,土壤中的铁铝氧化物极易将磷(P)固定成难溶性磷酸盐而难以被植物直接吸收利用,进而导致土壤有效磷含量及甘蔗的当季磷肥利用率低,仅有 10%~25%<sup>[4]</sup>。为满足甘蔗对磷含量的高需求,生产上普遍存在过量施用磷肥的情况,这不仅增加了生产成本,还导致酸性

收稿日期:2022-04-22

基金项目:广西科技重大专项(编号:桂科 2018-266-Z01);广西创新驱动发展专项(编号:桂科 AA17204078)。

作者简介:刘芸婷(1997—),女,广西玉林人,硕士,主要从事农业资源开发与利用研究。E-mail:781250977@qq.com。

通信作者:唐新莲,博士,副教授,主要从事植物营养与环境生态研究。E-mail:txl@gxu.edu.cn。

[24]赵军,耿增超,尚杰,等. 生物炭及炭基硝酸铵对土壤微生物量碳、氮及酶活性的影响[J]. 生态学报,2016,36(8):2355-2362.

[25]Zhang L Y, Xiang Y Z, Jing Y M, et al. Biochar amendment effects on the activities of soil carbon, nitrogen, and phosphorus hydrolytic enzymes: a meta-analysis[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2019, 26(22):22990-23001.

[26]杜倩,黄容,李冰,等. 生物炭还田对植烟土壤活性有机碳及酶活性的影响[J]. 核农学报,2021,35(6):1440-1450.

[27]张桃香,郑钰钢,陈辉. 不同温度生物炭对油茶林红壤呼吸作用及酶活性的影响研究[J]. 土壤通报,2019,50(1):96-102.

[28]Mierzwa-Hersztek M, Gondek K, Baran A. Effect of poultry litter biochar on soil enzymatic activity, ecotoxicity and plant growth[J]. Applied Soil Ecology, 2016, 105:144-150.

[29]Steinbeiss S, Gleixner G, Antonietti M. Effect of biochar amendment

on soil carbon balance and soil microbial activity[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(6):1301-1310.

[30]Lammirato C, Miltner A, Kaestner M. Effects of wood char and activated carbon on the hydrolysis of cellobiose by  $\beta$ -glucosidase from *Aspergillus niger*[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(9):1936-1942.

[31]胡蓉,郑露,刘浩,等. 秸秆还田对水稻根际微生物多样性和水稻纹枯病发生的影响[J]. 植物保护学报,2020,47(6):1261-1269.

[32]赵凤艳,张勇勇,张明琦,等. 有机物料对设施番茄长期连作土壤细菌群落结构的影响[J]. 生态学杂志,2019,38(6):1732-1740.

[33]Delgado-Baquerizo M, Maestre F T, Reich P B, et al. Microbial diversity drives multifunctionality in terrestrial ecosystems[J]. Nature Communications, 2016, 7:10541.

土壤区土壤磷素大量累积,增加了水土环境污染风险,不利于甘蔗产业的可持续发展。因此,研究减少土壤中磷的累积与固定、活化土壤磷库中潜在的磷以提高磷肥利用率的有效措施非常关键,也是我国磷肥可持续发展中亟需解决的问题。

腐殖酸结构上有酚羟基、羧基等含氧官能团,具有较强的离子交换性、吸附性,可降低土壤矿物对磷酸盐的吸附。生物质炭是一种富碳、稳定性高的有机物质,具有透气性较好、比表面积大、稳定性高等特点,一般呈弱碱性<sup>[5]</sup>。研究表明,施用腐殖酸肥料能减少土壤对磷的固定,提高土壤速效磷含量<sup>[6]</sup>,使土壤磷素主要以无机磷 Fe-P、Al-P 的形态存在<sup>[7-9]</sup>,单施腐殖酸有机肥能增加玉米产量和肥料利用率<sup>[10-11]</sup>,同时能改变土壤胶体对磷的吸附,促进磷的转化。现有的研究表明,腐殖酸和生物质炭都能活化土壤磷,但活化效果和机制尚不清楚,二者的复合作用也鲜见报道。近年来,腐殖酸和生物质炭在农业生产上的应用主要集中在土壤改良、环境效应等方面<sup>[12-13]</sup>,而对土壤磷素转化的影响,特别是对于南方酸性土壤磷素形态转化过程中腐殖酸和生物质炭的响应机制及对甘蔗生长和磷素吸收利用的研究还鲜有报道。因此,本研究采用盆栽试验,设置了 2 个施磷水平和腐殖酸与生物质炭 2 种磷素活化剂不同配比,探究腐殖酸与生物质炭配合减量磷肥的施用对酸性土壤有机质、速效磷含量,无机磷各形态转化及磷肥利用率的影响,以期今后腐殖酸和生物质炭型活化土壤磷素专用肥的研发及甘蔗高产、磷高效的养分管理提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验土壤材料

供试土壤采集自广西大学农学院实验基地,为第四纪红土母质发育的赤红壤,基本理化性状如下:含全氮 0.63 g/kg,全磷 0.45 g/kg,速效磷 10.52 mg/kg,碱解氮 139.86 mg/kg,有效钾 125.00 mg/kg,有机质 15.07 g/kg,Al-P 13.35 mg/kg,Fe-P 98.89 mg/kg,Ca-P 17.59 mg/kg,O-P 3.48 mg/kg,pH 值为 5.78。

供试材料为腐殖酸原粉、生物质炭(稻壳)。供试氮肥为尿素(N 含量 46%)、磷肥( $P_2O_5$  含量 16%)、氯化钾( $K_2O$  60%),甘蔗供试品种为广西大学农学院甘蔗生物学重点实验室培育的中蔗 9 号

(Z9),该品种具有早生、快发、晚熟和产量高的特点。

### 1.2 试验设计

试验磷肥设置 0.1、0.2 g  $P_2O_5$ /kg 土这 2 个水平,腐殖酸(F)和生物质炭(S)处理组均设 0.2 g/kg 土这 2 个水平,加上空白对照(CK)共 9 个处理(试验方案见表 1),除 CK 外其余各处理的氮钾肥均按 0.4 g/kg 土施用,每个处理 3 次重复,完全随机化设计。盆栽试验每桶(高 40 cm、直径 60 cm)装入过 5 mm×5 mm 网筛的风干土 30 kg,按表 1 试验方案将肥料与供试材料混匀装入,浇自来水使土壤含水量达到田间最大持水量的 60%。将中蔗 9 号切成长度 4~5 cm 的单芽茎,经浸泡催芽、长根,选取长势一致的单芽茎。于 2020 年 7 月 20 日种植,每桶种植 5 株,2 周后间苗定植 3 株,盆栽置于广西大学农学院温网室种植,种植期间不追肥,2021 年 1 月 2 日收获。样品采集称质量后装至无菌袋中带回实验室,用去离子水清洗干净,放置 105 °C 烘箱杀青 0.5 h 后,于 65 °C 烘箱完全烘干后称质量,粉碎混匀后用于测定全磷含量。

表 1 盆栽试验方案

处理	$P_2O_5$	腐殖酸	生物质炭
CK	0	0	0
P1	0.1	0	0
P1F	0.1	2	0
P1S	0.1	0	2
P1FS	0.1	2	2
P2	0.2	0	0
P2F	0.2	2	0
P2S	0.2	0	2
P2FS	0.2	2	2

### 1.3 测定项目与方法

土壤 pH 值采用电极法,土水比为 1 g : 2.5 mL;土壤有机质含量采用重铬酸钾氧化-外加热法测定;土壤碱解氮含量采用凯氏定氮蒸馏法测定;土壤有效钾含量采用 1 mol/L  $NH_4OAc$  溶液浸提-火焰光度法测定;土壤磷酸酶活性采用对硝基苯磷酸二钠(PNPP)法测定;土壤速效磷含量采用 0.5 mol/L  $NaHCO_3$  (pH 8.5) 浸提-钼锑抗比色法测定;土壤无机磷形态含量采用连续浸提法测定,其中土壤 Fe-P 含量采用 0.1 mol/L NaOH 浸提,土壤 Al-P 含量采用 0.5 mol/L  $NH_4F$  (pH 8.2) 浸提,土壤 Ca-P 含量采用 0.5 mol/L ( $1/2H_2SO_4$ ) 浸提,土壤

O-P 含量采用 0.3 mol/L 柠檬酸钠溶液浸提,滤液均采用钼锑抗比色法测定;甘蔗全磷含量采用  $H_2SO_4-H_2O_2$  消化-钒钼黄比色法测定<sup>[14]</sup>。

按以下公式进行计算:

磷积累量(g/桶) = 干质量(g) × 全磷含量(%);

磷肥利用率 = (施磷处理甘蔗吸磷总含量 - 不施磷处理甘蔗磷总含量) / 施磷量 × 100%;

磷素活化率(PAC) = (土壤速效磷含量 / 土壤全磷含量) × 100%。

#### 1.4 数据分析

采用 Excel 软件进行数据整理、作图,采用 SPSS 23 软件的邓肯比较法进行显著性差异分析( $\alpha = 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理对酸性土壤速效磷含量及磷素活化率的影响

由表 2 可知,随着种植时间的延长,土壤速效磷含量除 P2FS 外均呈先降低后升高的趋势,且施用腐殖酸和生物质炭的各处理在第 180 天的土壤速效

磷含量除 P2FS 外均显著高于空白对照(CK)和单施磷肥处理(P1 和 P2)。在种植的第 60 天、120 天, P1F、P1S 和 P1FS 处理显著高于 CK 和 P1 处理, P2S 和 P2FS 处理显著高于 CK 和 P1、P2 处理。种植的第 180 天, P1F、P1S 和 P1FS 处理的土壤速效磷含量显著分别比 P1 处理高 25.38%、24.42% 和 16.87%; P2F、P2S 和 P2FS 处理的土壤速效磷含量分别比 P2 处理高 14.21%、20.54% 和 10.31%,其中与单施磷肥的处理相比, P1F 处理对速效磷含量的增加效果最显著。

各处理的土壤磷素活化率变化规律与土壤速效磷含量变化规律相似。在种植的第 60 天、120 天、180 天施用腐殖酸和生物质炭的各处理(P1F、P1S、P1FS、P2F、P2S、P2FS)土壤的磷素活化率显著高于 CK、P1 和 P2 处理(P2F 第 60 天除外)。种植第 180 天, P1F、P1S 和 P1FS 处理是 P1 处理的 1.21、1.18、1.12 倍, P2F、P2S 和 P2FS 处理的土壤磷素活化率是 P2 处理的 1.12、1.19、1.10 倍,其中以单施腐殖酸处理(P1F)对土壤磷素活化率的增加效果最显著,表明施用腐殖酸与生物质炭能提高土壤的速效磷素含量、磷酸酶活性,进而促进土壤磷素的转化。

表 2 不同处理对土壤速效磷含量及磷素活化率的影响

处理	速效磷含量(mg/kg)			磷素活化率(%)		
	第 60 天	第 120 天	第 180 天	第 60 天	第 120 天	第 180 天
CK	12.11 ± 0.36d	9.95 ± 0.09e	9.99 ± 0.76f	3.28 ± 0.10d	2.69 ± 0.03c	2.59 ± 0.13f
P1	13.81 ± 0.42c	10.68 ± 0.28de	12.57 ± 0.74de	3.57 ± 0.14c	2.71 ± 0.05c	3.25 ± 0.17d
P1F	15.62 ± 1.17ab	12.31 ± 1.10b	15.76 ± 0.84a	3.99 ± 0.30ab	3.14 ± 0.21b	3.93 ± 0.22a
P1S	16.35 ± 0.30a	13.56 ± 0.44a	15.64 ± 0.30a	4.11 ± 0.12a	3.38 ± 0.09a	3.85 ± 0.06ab
P1FS	16.34 ± 1.08a	13.59 ± 0.77a	14.69 ± 0.77ab	4.22 ± 0.22a	3.42 ± 0.18a	3.64 ± 0.17bc
P2	14.44 ± 0.23c	10.97 ± 0.45cd	11.54 ± 0.62e	3.66 ± 0.06c	2.75 ± 0.09c	2.89 ± 0.12e
P2F	14.97 ± 0.56bc	11.88 ± 0.07bc	13.18 ± 0.34cd	3.72 ± 0.15bc	3.01 ± 0.03b	3.25 ± 0.11d
P2S	15.73 ± 0.52ab	12.20 ± 0.69b	13.91 ± 0.74bc	3.99 ± 0.14ab	3.04 ± 0.19b	3.44 ± 0.22cd
P2FS	15.90 ± 0.54ab	13.30 ± 0.15a	12.73 ± 0.59d	4.00 ± 0.12ab	3.37 ± 0.04a	3.18 ± 0.17d

注:表中数值为平均值 ± 标准差,同列数据后不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ ),表 3 ~ 表 6 同。

### 2.2 不同处理对土壤无机磷组分的影响

由表 3 可知,添加腐殖酸与生物质炭的各处理土壤 Fe-P 的含量高于 CK、P1、P2 处理。P1F、P1S、P1FS 处理的土壤 Fe-P 含量分别显著高于 P1 处理 25.33%、10.72% 和 7.73%, P1F 处理的土壤 Fe-P 含量最高,显著高于 P2 处理 7.44%。添加腐殖酸与生物质炭的各处理中, P1S、P1FS 处理的土壤 Al-P 含量显著高于 P1 处理 27.85%、72.99%, P2F、P2FS 处理的土壤 Al-P 含量高于 P2 处理

36.51%、57.45%。P1F、P1S、P1FS 处理的土壤 Ca-P 含量分别显著高于 P1 处理 42.27%、29.62%、60.17%, P2F、P2S 处理显著高于 P2 处理 25.12%、40.82%。添加腐殖酸与生物质炭的各处理土壤 O-P 含量低于 CK、P1、P2 处理,其中 P1F、P2F 处理的土壤 O-P 含量分别显著低于 P1、P2 处理 49.35%、33.02%。在 2 个施磷水平下,腐殖酸与生物质炭的施用对土壤无机磷 Fe-P 含量提高最明显,且对土壤无机磷形态增加大小为 Fe-P >

表 3 不同处理对土壤无机磷组分的影响

处理	Fe-P 含量	Al-P 含量	Ca-P 含量	O-P 含量
CK	71.97 ± 2.55e	12.88 ± 0.87c	18.76 ± 1.05cde	3.14 ± 0.87a
P1	82.01 ± 4.05d	13.18 ± 1.63c	13.91 ± 1.27f	3.10 ± 0.12a
P1F	102.78 ± 1.29a	12.58 ± 0.69c	19.79 ± 2.34bcd	1.57 ± 0.05d
P1S	90.80 ± 2.21b	16.85 ± 2.25b	18.03 ± 0.13cde	2.40 ± 0.58abc
P1FS	88.35 ± 3.92bc	22.80 ± 0.61a	22.28 ± 2.06ab	1.81 ± 0.14d
P2	83.77 ± 2.45cd	13.75 ± 0.35c	16.56 ± 1.46e	3.21 ± 0.56a
P2F	83.60 ± 3.10cd	18.77 ± 0.12b	20.72 ± 0.84abc	2.15 ± 0.38bcd
P2S	90.00 ± 3.02b	14.39 ± 0.16c	23.32 ± 1.03a	2.94 ± 0.36ab
P2FS	82.37 ± 1.93d	21.65 ± 1.40a	17.32 ± 1.66de	2.86 ± 0.12ab

Ca-P > Al-P > O-P。

综上所述,腐殖酸与生物质炭施用有效提高了土壤中 Fe-P、Al-P、Ca-P 的含量,使部分难溶性的 O-P 转化为相对缓效的 Fe-P、Al-P、Ca-P 储存在土壤中,促进难溶性磷 O-P 向潜在性磷源转化,提高土壤有效性磷源的含量,进而提高土壤磷素的有效性。

### 2.3 不同处理对酸性土壤理化性质及酶活性的影响

由表 4 可知,添加生物质炭处理的土壤 pH 值显著高于 CK、P1 和 P2 处理,其中以 P1FS 处理的土壤 pH 值最高,可见,生物质炭对酸性土壤的酸碱度有一定的调节作用。腐殖酸与生物质炭施用明显提高了土壤有机质、有效钾、碱解氮的含量及磷酸酶的活性。其中 P1F、P1S 和 P1FS 处理的土壤有机质含量显著高于 P1 处理 10.51%、13.21% 和

21.44%, P2F、P2S 和 P2FS 处理的土壤有机质含量显著高于 P2 处理 14.39%、10.20% 和 26.90%,且 P1FS 和 P2FS 处理比 CK 显著高 29.31%、23.23%; P1S 处理的土壤有效钾含量最高,较 P1 处理显著提高了 24.01%, P2S 和 P2FS 处理的土壤有效钾含量显著高于 P2 处理 12.37% 和 20.55%。P1F、P1S 和 P1FS 处理的土壤碱解氮含量显著高于 P1 处理 52.58%、89.44% 和 42.05%, P2F、P2S 和 P2FS 的土壤碱解氮含量较 P2 处理有所增加,但差异不显著。同时 P1FS 处理的土壤磷酸酶活性显著高于 P1 处理 10.89%, P2F、P2S 和 P2FS 处理的土壤酸性磷酸酶活性显著高于 P2 处理 11.61%、8.93% 和 13.39%,且 P1FS、P2FS 处理的土壤磷酸酶活性比 CK 显著高 42.11%、33.68%。表明腐殖酸与生物质炭的施用提高了土壤有机质、有效钾、碱解氮的含量及磷酸酶的活性,丰富了土壤中的速效养分含量。

表 4 不同处理对土壤养分的影响

处理	pH 值	有机质含量 (g/kg)	有效钾含量 (mg/kg)	碱解氮含量 (mg/kg)	磷酸酶活性 [mg/(g·d)]
CK	6.01 ± 0.02de	13.58 ± 0.72e	61.16 ± 1.78e	41.99 ± 0.01d	0.95 ± 0.10d
P1	6.04 ± 0.07cd	14.46 ± 0.19d	102.33 ± 3.50d	44.33 ± 10.68d	1.22 ± 0.02b
P1F	6.07 ± 0.02cd	15.98 ± 0.07b	97.59 ± 7.32d	67.64 ± 10.68b	1.28 ± 0.07ab
P1S	6.14 ± 0.03c	16.37 ± 0.13b	126.90 ± 4.06a	83.98 ± 14.00a	1.23 ± 0.07b
P1FS	6.39 ± 0.08a	17.56 ± 0.01a	99.90 ± 8.69d	62.97 ± 7.00b	1.35 ± 0.02a
P2	6.05 ± 0.05cd	13.83 ± 0.07e	102.18 ± 2.40d	51.31 ± 8.07bcd	1.12 ± 0.03c
P2F	5.92 ± 0.02e	15.82 ± 0.60bc	105.57 ± 3.15cd	62.98 ± 12.12b	1.25 ± 0.03b
P2S	6.11 ± 0.08cd	15.24 ± 0.13c	114.82 ± 7.21bc	60.63 ± 8.06bc	1.22 ± 0.05b
P2FS	6.28 ± 0.08b	17.55 ± 0.31a	123.18 ± 8.93ab	62.98 ± 0.01b	1.27 ± 0.03ab

### 2.4 不同处理对甘蔗农艺性状及生物量的影响

由表 5 可知,添加腐殖酸与生物质炭的各处理对甘蔗的生长有一定的促进作用。施用腐殖酸和生物质炭的各处理株高、茎粗、SPAD 值及整株鲜重

高于 CK、P1 (P1F、P1S 的株高除外)、P2 处理,其中 P2F、P2S 处理的茎粗显著高于 P2 处理 14.68%、13.40%, P2F、P2S、P2FS 处理的 SPAD 值显著高于 P2 处理 26.52%、22.15%、21.39%, P2F 处理的甘

表5 不同处理对甘蔗农艺性状及生物量的影响

处理	株高 (cm)	茎粗 (mm)	SPAD 值	整株鲜质量 (g)
CK	96.83 ± 5.48b	17.60 ± 2.18d	65.33 ± 12.39d	1 030.91 ± 48.26e
P1	144.44 ± 10.94a	22.77 ± 0.13bc	82.75 ± 3.49bc	1 759.92 ± 8.80bcd
P1F	137.94 ± 3.77a	23.41 ± 0.29abc	88.69 ± 0.59ab	1 769.00 ± 49.57bcd
P1S	137.00 ± 3.28a	23.55 ± 0.73abc	86.89 ± 0.63abc	1 764.49 ± 49.17cd
P1FS	150.28 ± 8.74a	24.29 ± 0.67ab	88.40 ± 5.16ab	1 866.69 ± 75.67abc
P2	134.50 ± 3.04a	21.87 ± 0.75c	77.39 ± 5.82c	1 788.42 ± 53.49bcd
P2F	150.00 ± 0.00a	25.08 ± 0.93a	97.91 ± 1.65a	1 903.42 ± 77.57a
P2S	141.11 ± 9.52a	24.80 ± 0.11a	94.53 ± 3.06a	1 869.27 ± 71.72ab
P2FS	146.39 ± 8.20a	23.61 ± 0.73abc	93.94 ± 7.69a	1 730.56 ± 20.33d

蔗鲜质量显著高于 P2 处理 6.43%。表明腐殖酸与生物质炭的施用提高了甘蔗的茎粗、SPAD 值和甘蔗的鲜质量,进而促进了甘蔗的生长。

### 2.5 不同处理对甘蔗磷含量及磷素积累量的影响

由表 6 可知,施用腐殖酸与生物质炭各处理的甘蔗磷素积累量、磷肥利用率高于 CK、P1、P2(P1F、P1FS 的磷积累量除外)处理,其中 P1F、P1S 处理的甘蔗全磷含量显著高于 P1 处理 7.87%、20.22%,P2F、P2S、P2FS 处理的全磷含量显著高于 P2 处理 27.09%、23.41%、7.02%。P1S 处理的甘蔗磷积累量显著高于 P1 处理 19.65%,P2F、P2S 处理显著高于 P2 处理 27.92%、22.20%。P1S 处理的磷肥利用率是 P1 处理的 1.26 倍,P2F、P2S、P2FS 处理的磷肥利用率分别是 P2 处理的 1.64、1.51、1.25 倍。表明腐殖酸与生物质炭施用通过提高了甘蔗的全磷和磷积累量,来促进甘蔗对磷素的吸收利用。

表6 不同处理对甘蔗磷含量及磷素积累量的影响

处理	全磷含量 (g/kg)	磷积累量 (mg/株)	磷肥利用率 (%)
CK	3.40 ± 0.14b	110.99 ± 16.78d	
P1	2.67 ± 0.14e	146.64 ± 9.59c	11.03 ± 0.02cd
P1F	2.88 ± 0.04d	155.88 ± 5.64c	13.15 ± 0.01bc
P1S	3.21 ± 0.04c	175.46 ± 2.01b	16.63 ± 0.00a
P1FS	2.70 ± 0.08e	154.89 ± 5.47c	12.92 ± 0.01bc
P2	2.99 ± 0.06d	175.38 ± 13.27b	8.81 ± 0.02d
P2F	3.80 ± 0.09a	224.34 ± 3.56a	14.41 ± 0.00bc
P2S	3.69 ± 0.09a	214.31 ± 9.92a	13.26 ± 0.01a
P2FS	3.20 ± 0.02c	177.01 ± 7.20b	10.98 ± 0.03bc

### 2.6 土壤养分与甘蔗农艺性状的相关性分析

相关性分析结果(表 7)表明,土壤速效磷与 PAC、Fe-P、有机质、有效钾、碱解氮含量、磷酸酶活性和整株鲜质量呈极显著的正相关。土壤 PAC 与

Fe-P、Al-P、有机质、有效钾、碱解氮、磷酸酶活性、磷积累量及整株鲜质量呈显著或极显著正相关。Fe-P 含量与有机质含量、有效钾含量、碱解氮含量、磷酸酶活性及鲜质量呈显著正相关。Al-P 含量与有机质含量、有效钾含量、磷酸酶活性呈显著正相关,但 O-P 含量与速效磷含量、PAC、Fe-P 含量、有机质含量、磷酸酶活性及鲜质量呈显著或极显著负相关,表明土壤速效磷含量的提高与土壤的有机质、有效钾、碱解氮含量及磷酸酶活性等养分含量有密切关系,同时速效养分含量的提高,有利于甘蔗的生长和对养分的吸收利用。

## 3 讨论

### 3.1 腐殖酸和生物质炭的施用对磷素转化的影响

腐殖酸和生物质炭可改变土壤对金属离子的吸附,影响磷素有效性<sup>[15]</sup>。通过添加腐殖酸和生物质炭与肥料的合理配施促进作物的生长,提高土壤磷素有效性,是解决磷肥利用率低和新型磷肥研发及施用问题的重要途径。闫光第等研究报道,腐殖酸减少了土壤对磷的固定,提高了土壤速效磷的含量<sup>[16-17]</sup>;高天一等研究表明,生物质炭增加了土壤磷的积累,提高土壤中磷素有效性<sup>[18]</sup>,且据杨彩迪等研究表明,施用生物质炭提高了土壤中全磷、速效磷的含量<sup>[19]</sup>。而本研究结果表明,施用腐殖酸与生物质炭显著提高了土壤速效磷含量、磷素活化率及无机磷(Fe-P、Al-P)的含量,且单独施用的处理较配合施用处理效果更显著,其中以 P1S 处理的影响效果最显著。

本研究发现 CK 处理的磷素活化率随时间的增加呈降低的趋势,这可能由于无外源磷施入,作物从土壤中持续吸收速效磷,使有效磷含量降低,从而使磷素活化率降低,这个现象在鲁艳红等的研究

表 7 土壤养分与甘蔗农艺性状的相关性分析

项目	相关系数													
	速效磷含量	PAC	Fe-P 含量	Al-P 含量	Ca-P 含量	O-P 含量	有机质含量	有效钾含量	碱解氮含量	磷酸酶活性	全磷含量	磷积累量	整株鲜质量	
速效磷含量	1.000													
PAC	0.543 **	1.000												
Fe-P 含量	0.868 **	0.446 *	1.000											
Al-P 含量	0.210	0.400 *	-0.072	1.000										
Ca-P 含量	0.339	0.361	0.327	0.226	1.000									
O-P 含量	-0.618 **	-0.471 *	-0.569 **	-0.232	-0.337	1.000								
有机质含量	0.632 **	0.562 **	0.408 *	0.765 **	0.293	-0.543 **	1.000							
有效钾含量	0.570 **	0.504 **	0.441 *	0.403 *	0.024	-0.068	0.563 **	1.000						
碱解氮含量	0.709 **	0.555 **	0.548 **	0.270	0.288	-0.343	0.569 **	0.608 **	1.000					
磷酸酶活性	0.713 **	0.457 *	0.673 **	0.417 *	0.167	-0.487 *	0.630 **	0.695 **	0.455 *	1.000				
全磷含量	-0.200	0.246	-0.265	-0.028	0.427 *	0.068	-0.122	-0.065	0.039	-0.436 *	1.000			
磷积累量	0.352	0.601 **	0.300	0.285	0.370	-0.192	0.285	0.621 **	0.348	0.457 *	0.472 *	1.000		
整株鲜质量	0.602 **	0.499 **	0.555 **	0.366	0.188	-0.382 *	0.491 **	0.734 **	0.438 *	0.882 **	-0.218	0.716 **	1.000	

注：\*\*、\* 分别表示在 0.01、0.05 水平上显著相关。

中也有类似的报道<sup>[20]</sup>。南方酸性土壤中 Fe-P、Al-P 和 Ca-P 可经有机磷矿化转化被植物吸收利用的形态,且已被证实为土壤潜在性磷源、而 O-P 是难以被植物吸收利用的难溶性磷源<sup>[21]</sup>。本研究结果表明,施用腐殖酸与生物质炭的各处理提高了土壤无机磷 Fe-P、Al-P 和 Ca-P 的含量,但降低了土壤 O-P 的含量,且无机磷主要以 Fe-P 形态增加,说明施用腐殖酸与生物质炭促进了难溶性磷 O-P 向潜在性磷源 Fe-P、Al-P 和 Ca-P 的转化,其中以单独施用腐殖酸的处理对 O-P 含量的降低效果最显著,这可能与腐殖酸特殊的分子结构有关,较强的阳离子交换能力,可激活铝、铁等离子与磷酸根离子结合,减少磷的固定,还可通过增加土壤中 Fe-P、Al-P 和 Ca-P 的含量来增加土壤中有效态磷的储量,促使更多的难溶性磷源 O-P 向有效态磷源 Fe-P、Al-P 和 Ca-P 转化,进而提高磷肥有效性。

### 3.2 腐殖酸和生物质炭的施用对土壤养分的影响

土壤 pH 值可影响钙、铁、铝等金属离子和磷酸根的结合,减少土壤对磷的固定,提高土壤磷素有效性<sup>[22]</sup>。腐殖酸提高了土壤有机质的含量<sup>[23]</sup>。高玉芬等研究结果表明,不同配比的黄腐酸肥均提高了土壤速效磷、速效钾的含量<sup>[24]</sup>。本研究结果表明,施用腐殖酸与生物质炭的各处理显著提高了土壤中有机质、有效钾、碱解氮的含量及磷酸酶活性。这可能与腐殖酸可活化板结土壤,改善土壤结构,

增加土壤的透气性,协调土壤的水、肥、气等状况有关;生物质炭具有较强的吸附能力,能促进土壤对有机质的吸附<sup>[25]</sup>,有机质能刺激植物根系分泌更多有机酸与锌、铁等元素螯合,促进难溶性磷转化,活化土壤中被固定的磷,提高土壤磷素有效性。

### 3.3 腐殖酸和生物质炭的施用对甘蔗生长及磷素吸收的影响

前人的研究表明,腐殖酸与生物质炭改善了土壤的肥力状况,提高了作物的产量<sup>[26]</sup>。生物质炭与化肥配施显著提高了水稻、玉米、花生等作物产量<sup>[27-29]</sup>,施用腐殖酸对菜豆生长发育及产量有明显促进作用<sup>[30]</sup>,腐殖酸与生物质炭的施用提高了甜高粱对磷素的吸收<sup>[31]</sup>。本研究结果表明,腐殖酸与生物质炭的施用促进了甘蔗的生长,其中以 P2F 处理的甘蔗茎粗增加效果最显著,显著高于 P2 处理 14.68%。施用腐殖酸与生物质炭各处理的磷素积累量也显著提高,其中以 P2F 处理的效果更显著,显著高于 P2 处理 27.92%。

在本研究中,腐殖酸与生物质炭的施用提高了磷肥利用率,其中以 P1S 处理效果最好。这可能与生物质炭具有疏松的结构和巨大的表面积有关,生物质炭的施入使土壤 pH 值和基本养分含量的增加,减少土壤对磷素的吸附,提高土壤有效磷含量,促进甘蔗对磷素的吸收利用。此外,在本研究条件下,在常规施磷的基础上减量磷肥(P1),配施腐殖酸与生物质炭的各处理磷肥利用率、磷积累量与常

规磷肥 P2 水平处理相比,并未降低反而有增加的趋势,说明配施腐殖酸与生物质炭在适量减磷的条件下仍能满足甘蔗对磷的需求和具有提高作物对磷肥利用的潜能,但该结论还需要结合田间试验进行验证。

#### 4 结论

施用腐殖酸与生物质炭的处理较 CK、P1 和 P2 处理土壤的速效磷、有机质、有效钾、磷酸酶及无机磷组分含量的有所提高,同时甘蔗茎粗增加,SPAD 值、磷积累量、磷肥利用率也明显提高。腐殖酸与生物质炭活化土壤中被固定的磷,促进无效态磷源 O-P 向有效态磷源 Fe-P、Al-P 和 Ca-P 的转化,从而促进甘蔗生长及对磷肥的高效利用。综上所述,从土壤速效磷、磷素活化系数、无机磷转化及甘蔗对磷素吸收利用的效应综合分析,对土壤磷素活化的效果由高到低表现为:生物质炭 > 腐殖酸 > 腐殖酸与生物质炭配施。

#### 参考文献:

- [1] 李志坚,林治安,赵秉强,等. 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,2013,19(6):1329-1336.
- [2] 区惠平,周柳强,黄金生,等. 长期不同施肥对甘蔗产量稳定性、肥料贡献率及养分流失的影响[J]. 中国农业科学,2018,51(10):1931-1939.
- [3] 蒙世欢. 广西甘蔗施肥现状、问题及对策[J]. 广西农学报,2007,22(5):37-39.
- [4] 陈迪文,周文灵,吴启华,等. 华南地区果蔗磷肥高效利用技术规程[J]. 磷肥与复肥,2021,36(2):40-42.
- [5] 戴中民. 生物炭对酸化土壤的改良效应与生物化学机理研究[D]. 杭州:浙江大学,2017.
- [6] 张宏伟,陈港,唐爱民,等. 腐殖酸共聚物改良后土壤中磷肥有效性的研究[J]. 土壤肥料,2002(6):39-40.
- [7] 王曰鑫,侯宪文. 腐殖酸对土壤中无机磷活化效应的研究[C]// 第四届全国绿色环保肥料新技术、新产品交流会论文集. 北京:中国腐殖酸工业协会,2004:96-102.
- [8] Alvarez R, Evans L, Milham P. Effects of humic material on the precipitation of calcium phosphate[J]. Geoderma,2004,118(3/4):245-260.
- [9] 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.
- [10] 袁丽峰,黄腾跃,王改玲,等. 腐殖酸及腐殖酸有机肥对玉米养分吸收及肥料利用率的影响[J]. 中国农学通报,2014,30(36):98-102.
- [11] Xu G, Sun J N, Shao H B. Biochar had effects on phosphorus sorption and desorption in three soils with differing acidity[J]. Ecological Engineering,2014,62:54-60.
- [12] 曹殿云,兰宇,杨旭,等. 生物炭调节盐化水稻土磷素形态及释放风险研究[J]. 农业环境科学学报,2019,38(11):2536-2543.
- [13] 夏丽丹,曹升,张虹,等. 不同水分条件下生物炭对红壤磷素形态及磷酸酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报,2019,38(5):1101-1111.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社,2005:70-89.
- [15] Jing Z, Min L, Mick W. Phosphorus activators contribute to legacy phosphorus availability in agricultural soils: a review[J]. Science of the Total Environment,2018,612:522-537.
- [16] 闫光第,庞秀萍. 腐殖酸盐类对土壤磷固定的抑制[J]. 北京农业大学学报,1981(1):27-36.
- [17] 李军,袁亮,赵秉强,等. 腐殖酸尿素对玉米生长及肥料氮利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2017,23(2):524-530.
- [18] 高天一,李娜,彭靖,等. 连续施用生物炭对棕壤磷素形态及有效性的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2019,25(9):1451-1460.
- [19] 杨彩迪,宗玉统,卢升高. 不同生物炭对酸性农田土壤性质和作物产量的动态影响[J]. 环境科学,2020,41(4):1914-1920.
- [20] 鲁艳红,廖育林,聂军,等. 长期施肥红壤性水稻土磷素演变特征及对磷盈亏的响应[J]. 土壤学报,2017,54(6):1471-1485.
- [21] 项海光,翁焕新,孔祥乐. 红壤中各种结合态磷分布状况及其对酸的敏感性研究[J]. 农业环境科学学报,2003(2):138-141.
- [22] 张国秀,赵允格,许明祥,等. 黄土丘陵区生物结皮对土壤磷素有效性及碱性磷酸酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2012,18(3):621-628.
- [23] 吕金东,习利群. 腐殖酸复合肥在桉树栽培中的应用[J]. 江西林业科技,2006(增刊1):14-20.
- [24] 高玉芬,孙丽蓉,周莉娜,等. 黄腐酸土壤改良液体肥试验效果探讨[J]. 陕西农业科学,2011,57(6):100-103.
- [25] 勾芒芒,屈忠义. 生物炭对改善土壤理化性质及作物产量影响的研究进展[J]. 中国土壤与肥料,2013(5):1-5.
- [26] 程亮,张保林,王杰,等. 腐殖酸肥料的研究进展[J]. 中国土壤与肥料,2011(5):1-6.
- [27] 吴鹏飞,马祥庆. 植物养分高效利用机制研究进展[J]. 生态学报,2009,29(1):427-437.
- [28] Christoph Steiner, Wenceslau G. Teixeira, Johannes Lehmann, et al. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil[J]. Plant and Soil,2007,291(1/2):275-290.
- [29] 刘敏,纪立东,王锐,等. 施用生物质炭条件下减施氮肥对玉米生长和土壤的影响[J]. 江苏农业科学,2021,49(19):216-222.
- [30] 蔡鑫鑫,王舒,吕晓丽,等. 腐殖酸对芸豆农艺性状及产量的影响[J]. 黑龙江农业科学,2019(5):36-41.
- [31] 曲晶晶,郑金伟,郑聚锋,等. 小麦秸秆生物质炭对水稻产量及晚稻氮素利用率的影响[J]. 生态与农村环境学报,2012,28(3):288-293.