

张立丹, 高诚祥, 徐柠, 等. 腐植酸碱性液体肥对香蕉生长的影响及机制 [J]. 华南农业大学学报, 2022, 43(5): 12-19.
ZHANG Lidan, GAO Chengxiang, XU Ning, et al. Efficacy of humic acid alkaline liquid fertilizer on banana growth and mechanism[J]. Journal of South China Agricultural University, 2022, 43(5): 12-19.

腐植酸碱性液体肥对香蕉生长的影响及机制

张立丹¹, 高诚祥¹, 徐柠¹, 王学江², 解永军³, 孙少龙¹, 樊小林¹

(1 华南农业大学 资源与环境学院/广东高校环境友好型肥料工程技术研究中心, 广东 广州 510642; 2 五洲丰
农业科技有限公司, 山东 烟台 264002; 3 施可丰化工股份有限公司, 山东 临沂 276000)

摘要:【目的】探究腐植酸碱性肥料对香蕉生长的影响及促生机制, 为腐植酸碱性肥料的研制与推广应用提供理论依据。【方法】采用盆栽试验, 研究腐植酸碱性肥料对香蕉生物量、土壤微生物、酶活性、根系活力和土壤氮磷养分含量的影响。【结果】与常规复合肥和无腐植酸碱性液体肥料相比, 腐植酸碱性肥料有利于促进香蕉生长, 明显增加香蕉生物量、根系活力、土壤脲酶活性、酸性磷酸酶活性、土壤矿质氮含量、有效磷含量以及细菌、真菌和放线菌数量。香蕉叶面积增加了 50~100 cm², 生物量增加了 10%~21%, 香蕉根系活力增加了 89%~188%, 土壤脲酶活性增加了 25%~91%, 酸性磷酸酶活性增加了 2.4~3.5 倍。腐植酸碱性液体肥处理的土壤细菌、真菌和放线菌的数量分别是常规肥料的 1.6~14.4、1.7~26.7 和 2.3~3.8 倍, 分别是无腐植酸碱性肥的 3.0~10.6、3.9~56.0 和 1.2~2.0 倍。【结论】施用腐植酸碱性液体肥能明显促进香蕉生长, 其机制在于: 一方面, 肥料的碱性改良了土壤酸性环境而有利于土壤微生物多样性; 另一方面, 肥料的腐植酸增加了土壤的脲酶和酸性磷酸酶活性, 改善了土壤的氮、磷营养状况, 进而增加土壤肥力。因此, 施用腐植酸碱性液体肥料是为香蕉提供养分和提高土壤肥力的有效措施。

关键词: 腐植酸碱性肥料; 香蕉; 根系活力; 土壤脲酶; 酸性磷酸酶; 土壤微生物数量
中图分类号: S143 文献标志码: A 文章编号: 1001-411X(2022)05-0012-08

Efficacy of humic acid alkaline liquid fertilizer on banana growth and mechanism

ZHANG Lidan¹, GAO Chengxiang¹, XU Ning¹, WANG Xuejiang², XIE Yongjun³, SUN Shaolong¹, FAN Xiaolin¹
(1 College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University/ Environment Friendly Fertilizer Engineering Technology Research Center of Guangdong College, Guangzhou 510642, China; 2 Worldfull Agricultural Science & Technology Co., Ltd., Yantai 264002, China; 3 Shikefeng Chemical Co., Ltd., Linyi 276000, China)

Abstract: 【Objective】To reveal the effect of humic acid alkaline fertilizer on banana growth and its promotion mechanism, and provide a theoretical basis for the development, popularization and application of the humic-acid alkaline fertilizer. 【Method】Banana pot experiment was carried out. Banana biomass, soil microorganism, enzyme activity, root activity, soil nitrogen and phosphorus nutrient content were measured to identify the efficacy of humic acid alkaline liquid fertilizer. 【Result】Compared with conventional compound fertilizer and non-humic-acid alkaline liquid fertilizer, humic acid alkaline fertilizer could promote banana

收稿日期: 2021-11-17 网络首发时间: 2022-04-29 15:28:47
网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20220429.1110.002.html>
作者简介: 张立丹, 助理研究员, 博士, 主要从事香蕉营养与施肥研究, E-mail: lidanzhang@scau.edu.cn; 通信作者: 樊小林, 教授, 博士, 主要从事新型肥料研发与应用、作物营养与施肥研究, E-mail: xlfan@scau.edu.cn
基金项目: 国家重点研发计划 (2020YFD1000104); 国家现代农业产业技术体系 (CARS-31); 国家重点研发计划 (2018YFD0201100)

growth and biomass, increase root activity. The soil urease and acid phosphatase activities, soil mineral nitrogen and available phosphorus content, number of bacteria, fungi and actinomycetes increased obviously. Leaf area and biomass increased by 50–100 cm² and 10%–21%, respectively. The root activity increased by 89%–188%. Soil urease and acid phosphatase activity increased by 25%–91% and 2.4–3.5 times, respectively. The number of soil bacteria, fungi and actinomycetes of humus-acid alkaline liquid fertilizer were 1.6–14.4, 1.7–26.7 and 2.3–3.8 times those of compound fertilizer treatment, respectively. The corresponding data of the humus acid alkaline liquid fertilizer were 3.0–10.6, 3.9–56.0 and 1.2–2.0 times of those of alkaline liquid fertilizer without humus acid, respectively. 【Conclusion】 Application of humic acid alkaline liquid compound fertilizer could obviously promote banana growth. The mechanism was that the acidic soil environment was improved by the alkaline fertilizer and then the soil microbial diversity increased on the one hand; The humic acid increased soil urease and acid phosphatase activities, the soil nitrogen and phosphorus nutritional status were improved on the other hand to increase soil fertility. Therefore, the synergistic application of humic acid and alkaline liquid fertilizer is a rational measure to supply nutrients to banana and improve soil fertility.

Key words: Humic-acid alkaline fertilizer; Banana; Root vigor; Soil urease; Acid phosphatase; Soil microbial population

腐植酸 (Humic acid, HA) 是动植物残体通过复杂的生物及物理化学作用形成的天然有机高分子混合物。按腐植酸相对分子质量的大小和溶解性能可将其分为棕腐酸 (又称胡敏酸)、黑腐酸 (又称真腐酸) 和黄腐酸 (又称富里酸) 3 大类。由于腐植酸的特殊结构和官能团赋予它对植物生长的刺激和促进作用^[1-2], 所以几十年来腐植酸的研究与应用一直受到各界的关注。近 40 年来, 由于化肥大量和不合理施用等原因^[3-5], 已导致我国 70% 的土壤存在耕作障碍, 0.23×10⁹ hm² 耕地被污染, 土壤板结、养分失衡、有机质贫乏等问题普遍存在^[6-8]。特别是土壤酸化除了引起土壤物理化学障碍以外, 更重要的是破坏了土壤微生物群落结构^[9-11], 致使土传病害严重, 例如香蕉枯萎病的肆虐已经威胁到我国香蕉产业^[12-14]。

为了农业的持续和健康发展, 亟需开展耕地保育, 为此腐植酸肥料引起各方面的长期关注。据国家化肥登记中心网站资料统计, 近些年腐植酸肥料产品登记数量剧增, 占前 20 多年同类产品登记总数的 60% 以上^[15]。然而当前腐植酸类型的肥料仍然是常规酸性或生理酸性化肥与腐植酸的复混肥。虽然肥料中的腐植酸有改土培肥的效果, 但是由于化肥与腐植酸的双重酸性导致腐植酸肥料的酸性更强, 酸性对土壤的危害可能大于腐植酸本身的有益功能。例如肥料的酸性会加剧土壤的酸化, 而土壤酸化又会进一步带来诸如土壤重金属活化、病虫害加剧等一系列土壤耕作障碍问题。故此, 研发高 pH 化肥及其与腐植酸的复合 (混) 肥是解决问题的根本出路。本文作者团队提出了碱性肥料的概念^[16],

并研发了碱性肥料、碱性腐植酸肥料的制造与应用技术。然而相对而言, 我国的碱性腐植酸肥料研究还相当薄弱。同时, 我国腐植酸肥料主要应用于三大粮食作物及部分蔬菜、棉花等经济作物上^[17]。在小麦、玉米、水稻作物上施用酸性腐植酸肥料^[18-20], 不但其酸害不明显, 特别是施用于北方种植小麦、玉米的石灰性土壤上, 还能降低土壤 pH, 有利于作物生长。但是, 在南方的酸性土壤上施用酸性腐植酸肥料, 不仅难于发挥腐植质的改土作用, 而且由于肥料的酸性还会造成土壤 Cd 等重金属活化^[21-22]、加剧香蕉枯萎病发生^[9, 12, 14, 23]。如果将腐植酸肥料的化学性质由酸性改变成碱性, 那么上述问题就会迎刃而解, 同时还能充分发挥腐植酸的各种有益功能。腐植酸型碱性液体复合肥料就是本文作者所在广东高校环境友好型肥料工程技术研究中心针对目前酸性腐植酸肥料的短板而研发的新型腐植酸肥料。本文以热带亚热带酸性土壤及该地区主要经济作物香蕉为对象, 系统地研究腐植酸碱性液体肥料对香蕉的生长效应, 并通过土壤微生物群落数量、土壤养分、土壤酶活性等方面的研究, 揭示腐植酸碱性液体肥料的作用机理, 为腐植酸型碱性液体复合肥在香蕉产业中的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试肥料是华南农业大学广东高校环境友好型肥料工程技术研究中心研发的腐植酸型碱性液体复合肥料 (简称腐植酸碱性液体肥)。腐植酸碱性

液体肥是参考含腐植酸水溶肥料标准^[24], 采用羟甲基脲醛工艺制造的, 与对照肥料氮磷钾相等、腐植酸质量浓度分别为 0、10、30 和 50 g/L, 分别标记为 AF0、AF1、AF2 和 AF3。肥料的氮磷钾总量均为 500 g/L, N、P₂O₅、K₂O 质量比为 1.0:0.5:2.0, pH 为 9.0。另外, 以尿素、过磷酸钙及硫酸钾、氯化钾为原料配制氮磷钾总质量比为 45%, 其氮、磷、钾比例与液体复合肥相等的掺混肥为常规复合肥, 标记为 Comp。共计 5 种供试肥料, 即 5 个试验因素。

供试土壤采自华南农业大学树木园, 风干后过 10 mm 筛, 按照土壤:椰糠为 2.5:1.0 的体积比混合。供试土壤的理化性状如下:全氮 0.73 g/kg, 速效氮 46.62 mg/kg, 速效磷 0.45 mg/kg, 速效钾 55.35 mg/kg, 有机质 11.70 g/kg, 土壤 pH 6.1。

供试钵钵是盆口直径 17 cm, 高度 15 cm 的红色塑料盆, 每盆装土 2.2 kg。供试地点在华南农业大学广东高校环境友好型肥料工程技术研究中心网室。供试作物是具有 4 片绿叶的健康巴西蕉假植苗。选用香蕉为供试作物的优点一方面在于它是典型的热带亚热带作物, 有利于研究结果在当地的应用, 另一方面香蕉生长期长, 即使研究其苗期的肥料效应, 时间长达 3 个月, 已达到热带亚热带叶菜和大部分果菜的生长期, 结果对这类大田作物有一定的指导意义。

1.2 试验设计与管理

试验采用 5 因素(上述 5 种肥料)对比设计, 即腐植酸 AF0、AF1、AF2 和 AF3 和常规复合肥 Comp 共 5 个处理, 其中 Comp 和 AF0 为对照, 每个处理重复 6 次, 每盆 1 株, 单株为 1 个重复。Comp 和 AF0 的比较用于研究常规固态肥料与等养分液体肥料的差异, AF0 和 FA1、FA2、FA3 的比较用于研究等养分液体肥料中有无腐植酸的差异。每个处理的养分用量相等, 即香蕉移栽后第 1 个月, 每周施肥 1 次, 肥料溶液的质量浓度为 2 g/L, 每次浇灌 200 mL/盆。第 2 个月开始至试验结束每周施肥 1 次, 肥料溶液的质量浓度为 3 g/L, 每次浇灌 200 mL/盆。香蕉移栽 90 d 后收获采样。香蕉生长期进行正常的浇水、病虫害防治等日常管理。

1.3 测定项目及方法

肥料 N、P、K 的含量参考农业标准 NY/T1977—2010 方法测定^[25]。腐植酸的含量根据农业标准 NY/T1971—2010 方法测定^[26]。土壤 pH 用电位计法测定; 土壤铵、硝态氮用 0.01 mol/L 的 CaCl₂ 浸提, 然后用 AA3 自动分析仪测定; 土壤有效磷用 NH₄F-HCL 法测定^[27]。香蕉株高用直尺统一测量基

部到最新完全展开叶与茎的交叉点的距离(精度 0.1 cm); 茎粗用游标卡尺统一测量距地表 2 cm 处香蕉假茎的直径(精度 0.1 mm); 叶面积 = 叶长×叶宽×0.762 9+0.026 6, 其中 0.763 9 和 0.026 6 为香蕉叶面积系数; 叶片叶绿素相对含量用便携式 502 SPAD 仪测定完全展开的倒数第 2 片叶的 SPAD 值, 每片叶子测 6 个点, 包括叶缘基部、中部和尾部, 最后取平均值。根系活力用氯化三苯基四氮唑 (TTC) 法测定^[28]。土壤微生物群落用平板培养法测定^[29]。土壤脲酶活性用靛酚蓝比色法测定, 土壤磷酸酶活性用磷酸苯二钠比色法测定^[29]。

1.4 数据处理与分析

数据的统计分析采用 SPSS 17.0 软件, 图表采用 Microsoft office excel 绘制。

2 结果与分析

2.1 腐植酸碱碱性液体肥对香蕉生长指标的影响

表 1 结果表明, 常规复合肥 (Comp) 和无腐植酸碱碱性液体肥 (AF0) 间的株高、茎粗、叶面积和叶片 SPAD 值无显著差异, 表明肥料的形态以及液体肥的碱性不影响其肥效。但是腐植酸碱碱性液体肥处理 (AF1、AF2 和 AF3) 的株高均显著大于 Comp 和 AF0 处理的株高, 其中, 比 Comp 的增加了 2~4 cm, 比 AF0 的增加了 3~5 cm。AF1、AF2 和 AF3 处理的叶面积明显大于 Comp 和 AF0 处理的, 其中, 比 Comp 的增加了 50~65 cm², 比 AF0 的增加了 85~100 cm²。结果显示, Comp、AF0、AF1 和 AF2 处理间的茎粗无统计学上的差异, 只有 AF3 的茎粗较 Comp 的增加了 11%, 且差异显著。AF1、AF2 和 AF3 处理的 SPAD 值明显大于 AF0 的。由此可见, 当养分含量相等时, Comp 和 AF0 的肥效相等, 但是两者的肥效不如碱性液体腐植酸肥料的肥效, 腐植酸碱碱性液体肥能更好地发挥其碱性 与腐植酸的协同效果, 从而增加叶面积和叶绿素的含量, 促进香蕉生长。

2.2 腐植酸碱碱性液体肥对香蕉生物量的影响

腐植酸型碱性液体肥有利于香蕉生长和光合作用的效果还体现为能明显地提高香蕉的生物量(表 2)。与 Comp 和 AF0 相比, 腐植酸碱碱性液体肥料处理 (AF1、AF2 和 AF3) 的根鲜生物量分别提高了 10.2%~15.1% 和 5.9%~10.7%。但 AF1、AF2 和 AF3 处理间的根鲜生物量差异不显著。AF1、AF2 和 AF3 处理的茎鲜生物量比 Comp 和 AF0 处理分别提高了 16.1%~26.0% 和 8.1%~17.4%, 三者间以 AF3 处理显著高于其他 2 个处理, 提高了

表 1 腐植酸碱性液体肥 (AF) 对香蕉株高、茎粗、叶面积和叶片 SPAD 值的影响¹⁾

Table 1 Effect of humic acid alkline liquid fertilizer (AF) on plant height, stem diameter, leaf area and SPAD value of banana

肥料类型	$\rho(\text{腐植酸})/(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	株高/cm	茎粗/cm	叶面积/ cm^2	叶片 SPAD 值
Fertilizer type	Humic acid content	Plant height	Stem diameter	Leaf area	SPAD value of leaf
Comp	0	27.75±1.44bc	27.22±0.60b	571.10±8.91ab	52.52±0.73c
AF0	0	26.52±0.77c	28.44±0.43ab	536.12±29.23b	56.14±1.63bc
AF1	10	29.8±0.51ab	28.33±0.40ab	621.23±12.29a	61.02±1.17a
AF2	30	31.63±1.06a	28.82±0.67ab	635.89±37.53a	59.87±1.13ab
AF3	50	31.26±1.17a	30.18±0.77a	625.96±30.94a	57.20±1.79ab

1) Comp: 常规复合肥;表中数据为平均值±标准误, $n=6$; 同列数据后的不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$, DMRT法)

1) Comp: Conventional compound fertilizer; Data are means ± SE, $n=6$; Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments ($P<0.05$, DMRT method)

表 2 腐植酸碱性液体肥 (AF) 对香蕉单株鲜生物量的影响¹⁾

Table 2 Effect of humic acid alkaline liquid fertilizer (AF) on fresh biomass per plant of banana g

肥料类型	$\rho(\text{腐植酸})/(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	根	茎	叶	地上部
Fertilizer type	Humic acid content	Root	Stem	Leaf	Aboveground
Comp	0	21.83±0.44b	104.17±2.21d	71.54±2.46d	175.71±4.03d
AF0	0	22.71±0.42b	111.80±3.36c	80.49±3.23c	192.28±4.39c
AF1	10	24.08±0.36a	122.97±3.21b	95.41±3.33b	218.38±4.66b
AF2	30	24.05±0.52a	120.89±2.58b	91.25±3.00b	212.13±3.14b
AF3	50	25.13±0.40a	131.29±2.18a	101.46±1.30a	232.74±3.70a

1) Comp: 常规复合肥;表中数据为平均值±标准误, $n=6$; 同列数据后的不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$, DMRT法)

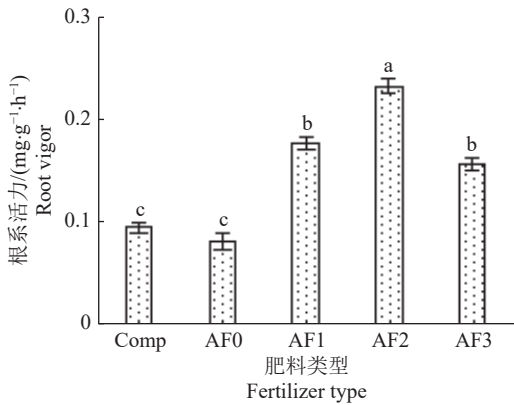
1) Comp: Conventional compound fertilizer; Data are means ± SE, $n=6$; Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments ($P<0.05$, DMRT method)

6.8%~8.6%。AF1、AF2 和 AF3 处理的叶鲜生物量比 Comp 和 AF0 处理的分别提高了 27.5%~41.8% 和 13.3%~26.1%，三者之间结果与茎鲜生物量一致，以 AF3 最高，较 AF1 和 AF2 提高了 6.3%~11.2%。AF0 处理的茎、叶鲜生物量明显大于 Comp 的，分别增加了约 7.3% 和 12.5%。就地上部鲜生物量而言，施用腐植酸碱性液体肥和无腐植酸碱性液体肥均能明显增加香蕉的地上部生物量。AF0、AF1、AF2 和 AF3 的地上部鲜生物量分别比 Comp 的增加了 9.4%、24.3%、20.7% 和 32.5%，其中腐植酸碱性液体肥的生物量比无腐植酸碱性液体肥的增加了 10.3%~21.0%。说明腐植酸具有明显的促生效果，而且腐植酸与碱性液体肥的复合更能显著提高香蕉的生物量。

2.3 腐植酸碱性液体肥对香蕉根系活力的影响

肥料处理对香蕉根系活力影响的结果见图 1。3 个腐植酸碱性液体肥处理的根系活力均显著大于常规复合肥 (Comp) 和无腐植酸碱性液体肥 (AF0) 的，其中 AF1、AF2 和 AF3 的根系活力比

Comp 的分别增加了 89%、148% 和 66%，比 AF0 的



Comp: 常规复合肥; AF0、AF1、AF2 和 AF3: 腐植酸质量浓度分别为 0、10、30 和 50 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; 柱子上的不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$, DMRT 法)

Comp: Conventional compound fertilizer; AF0, AF1, AF2 and AF3: The concent of humic acid is 0, 10, 30 and 50 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively; Different lowercase letters on the bars indicate significant differences among treatments ($P<0.05$, DMRT method)

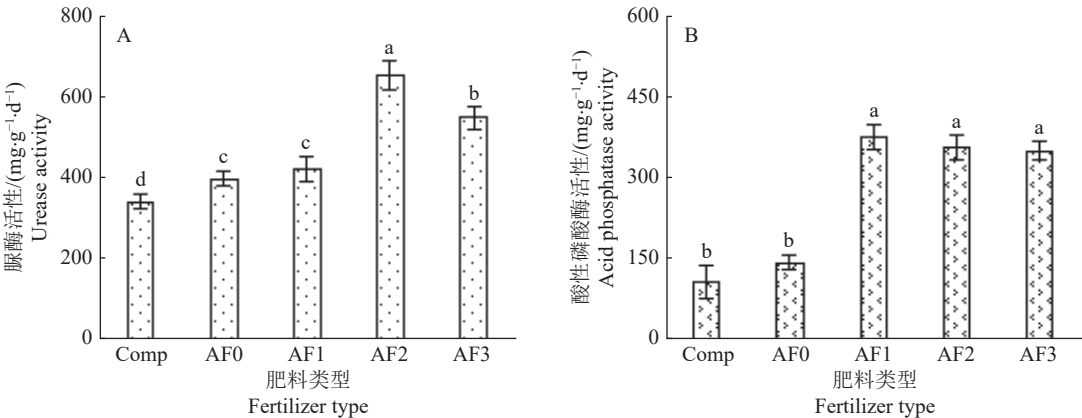
图 1 腐植酸碱性液体肥 (AF) 对香蕉根系活力的影响
Fig. 1 Effect of humic acid alkaline liquid fertilizer (AF) on root vigor of banana

分别增加了 119%、188% 和 93%。AF2 处理的根系活力增量最大, 分别比 AF1 和 AF3 增加了 32% 和 49%。根系活力强则有利于香蕉根系吸收利用养分和水分而促进其生长。由此可见, 腐植酸碱性液体肥较常规复合肥和无腐植酸碱性液体肥可以显著地提高香蕉根系活力, 且在腐植酸用量为 30 g/L 时对于增加香蕉根系活力的效果最佳。无腐植酸碱性液体肥和常规复合肥处理间的根系活力无显著差异, 因此, 碱性肥料与腐植酸配合是增加香蕉根系活力的有效措施。

2.4 腐植酸碱性液体肥对土壤酶活性的影响

肥料处理对土壤脲酶和酸性磷酸酶活性影响的结果见图 2。5 个处理的脲酶活性大小为 AF2 > AF3 > AF1 > AF0 > Comp, 其中 AF1、AF2 和 AF3 处理的脲酶活性比 Comp 处理的分别增加了 25%、91% 和 61%, 比 AF0 处理的分别增加了 7.0%、64.4% 和 38.3%。AF0 和 Comp 处理的脲酶

活性也有明显的差异, 前者比后者的增加了 16% (图 2A)。可见, 碱性液体肥较常规肥复合肥可明显增加土壤脲酶活性, 其中腐植酸用量为 30 g/L 时的效果最佳, 促进脲酶活性最明显, 这一结果和腐植酸碱性液体肥对根系活力影响的结果一致。腐植酸碱性液体肥对土壤酸性磷酸酶活性影响的结果表现为, AF1、AF2、AF3 的酶活性均显著高于 Comp 和 AF0 处理的, 分别是 Comp 的 3.5、3.3 和 3.4 倍, 分别是 AF0 的 2.6、2.5 和 2.4 倍, 3 个腐植酸碱性液体肥料之间的酸性磷酸酶活性无显著差异, Comp 和 AF0 之间无显著差异 (图 2B)。脲酶是土壤氮素循环中的关键酶, 其活性与土壤氮素的转化关系密切, 酸性磷酸酶参与土壤有机磷分解。故此, 腐植酸碱性液体肥较常规肥料在提高土壤脲酶和酸性磷酸酶活性方面功能更强, 从而改善香蕉的氮、磷营养。综合土壤脲酶活性和土壤酸性磷酸酶活性, 肥料中腐植酸用量为 30 g/L 时为宜。



Comp: 常规复合肥; AF0、AF1、AF2 和 AF3: 腐植酸质量浓度分别为 0、10、30 和 50 g·L⁻¹; 各图中, 柱子上方的不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$, DMRT 法)

Comp: Conventional compound fertilizer; AF0, AF1, AF2 and AF3: The concent of humic acid is 0, 10, 30 and 50 g·L⁻¹, respectively; In each figure, different lowercase letters on the bars indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$, DMRT method)

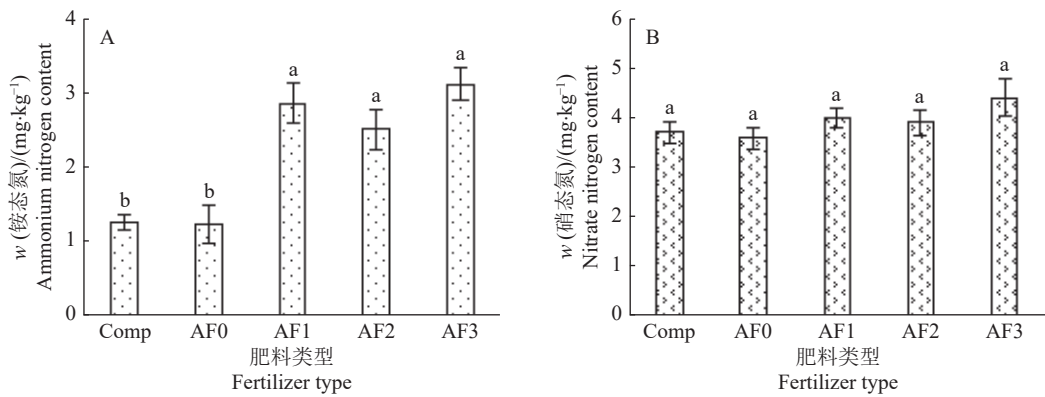
图 2 腐植酸碱性液体肥 (AF) 对土壤脲酶和酸性磷酸酶活性的影响

Fig. 2 Effects of humic acid alkaline liquid fertilizer (AF) on soil urease and acid phosphatase

2.5 腐植酸碱性液体肥对土壤矿质态氮和有效磷含量的影响

土壤矿质态氮是土壤中铵态氮 (NH_4^+) 与硝态氮 (NO_3^-) 之和。本文研究矿质态氮的目的方面在于检验肥料的碱性是否会造成氮的损失; 另一方面是为了检验肥料的腐植酸是否可以通过改良土壤微生物群落而改善土壤的氮素营养状况。结果表明, 在施氮量相等的条件下, AF1、AF2、AF3 处理土壤的铵态氮含量均显著高于对照处理 (Comp 和 AF0), 其中腐植酸碱性肥料处理之间、常规肥料和无腐植酸碱性液体肥处理之间的铵态氮含量无统计学差异 (图 3A)。说明施用碱性肥料并未导致氮

挥发而损失氮素, 而腐植酸的加入明显增加了香蕉可利用的氮。其可能原因是肥料中的腐植质促进了土壤脲酶的活性 (图 2)。图 3B 结果还表明, 腐植酸碱性液体肥处理 (AF1、AF2 和 AF3) 和常规肥料处理 (Comp)、无腐植酸碱性肥 (AF0) 间硝态氮含量均无显著差异。说明无论是碱性肥料还是常规肥料并未影响土壤的硝化作用, 其可能原因和酸性土壤硝化作用弱有关。就土壤矿质态氮而言, AF1、AF2、AF3 的矿质态氮含量无统计学差异, 但是均大于 Comp 和 AF0 的含量。由此可见, 施用腐植酸碱性液体肥不但不会造成土壤氮素损失, 反而能够明显地增加土壤的矿质态氮含量, 从而提高土壤供氮



Comp: 常规复合肥; AF0、AF1、AF2 和 AF3: 腐植酸质量浓度分别为 0、10、30 和 50 g·L⁻¹; 各图中, 柱子上方的不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$, DMRT 法)

Comp: Conventional compound fertilizer; AF0, AF1, AF2 and AF3: The concent of humic acid is 0, 10, 30 and 50 g·L⁻¹, respectively; In each figure, different lowercase letters on the bars indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$, DMRT method)

图 3 腐植酸碱性液体肥 (AF) 对土壤矿质态氮含量的影响

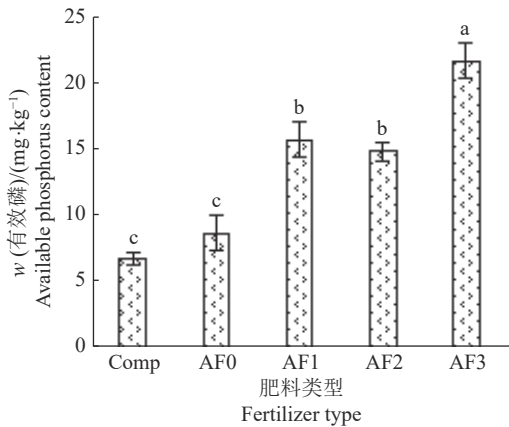
Fig. 3 Effect of humic acid alkaline liquid fertilizer (AF) on mineral nitrogen content in soil

量, 改善香蕉的氮素营养。

施用腐植酸碱性液体肥明显增加了土壤有效磷含量 (图 4)。无腐植酸碱性液体肥处理 (AF0) 和常规复合肥处理 (Comp) 间的有效磷含量无显著差异, 但均显著低于腐植酸碱性液体肥处理 AF1、AF2、AF3。腐植酸碱性液体肥处理间以 AF3 的有效磷含量显著大于 AF1 和 AF2 处理的。就平均土壤有效磷含量而言, 腐植酸碱性液体肥处理比未添加腐植酸的 Comp 和 AF0 增加了 127%, 其中 AF3 处理比 Comp 和 AF0 平均增加了 183%, AF1 和 AF2 处理比 Comp 和 AF0 平均增加了 99%。其主要原因是肥料中添加腐植酸后明显增加了土壤的酸性磷酸酶活性 (图 2), 从而有利于土壤有机磷的水解^[30]。可见, 肥料中施用腐植酸碱性液体肥能够显著提高土壤中有有效磷含量, 减少磷元素的固定和损失, 其中以腐植酸用量为 50 g/L 时效果最佳。

2.6 腐植酸碱性液体肥对土壤微生物的影响

由表 3 可知, 细菌、真菌和放线菌数量均是碱



Comp: 常规复合肥; AF0、AF1、AF2 和 AF3: 腐植酸质量浓度分别为 0、10、30 和 50 g·L⁻¹; 柱子上方的不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$, DMRT 法)

Comp: Conventional compound fertilizer; AF0, AF1, AF2 and AF3: The concent of humic acid is 0, 10, 30 and 50 g·L⁻¹, respectively; Different lowercase letters on the bars indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$, DMRT method)

图 4 腐植酸碱性液体肥 (AF) 对土壤有效磷含量的影响

Fig. 4 Effect of humic acid alkaline liquid fertilizer (AF) on available phosphorus content in soil

表 3 腐植酸碱性液体肥 (AF) 对土壤微生物数量的影响¹⁾

Table 3 Effect of humic acid alkaline liquid fertilizer (AF) on microbial population quantity in soil

肥料类型 Fertilizer type	ρ(腐植酸)/(g·L ⁻¹) Humic acid content	细菌/(×10 ⁵ cfu·g ⁻¹) Bacteria	真菌/(×10 ⁴ cfu·g ⁻¹) Fungi	放线菌/(×10 ³ cfu·g ⁻¹) Actinomyces
Comp	0	1.28±0.12c	6.34±0.43cd	1.76±0.44de
AF0	0	1.74±0.38c	2.82±0.30d	3.32±0.42d
AF1	10	2.01±0.36c	11.08±0.65c	4.51±1.09b
AF2	30	5.20±0.55b	16.36±1.55b	4.03±0.40bc
AF3	50	18.44±0.50a	169.08±0.80a	6.67±0.39a

1) Comp: 常规复合肥; 表中数据为平均值±标准误, n=6; 同列数据后的不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$, DMRT法)

1) Comp: Conventional compound fertilizer; Data are means ± SE, n=6; Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$, DMRT method)

性腐植酸肥料处理明显多于 Comp 和 AF0，Comp 和 AF0 之间无显著差异。在腐植酸碱性肥料中，表现为随着肥料中腐植酸用量的增大，土壤的细菌、真菌和放线菌数量随之增加，当腐植酸的用量为 50 g/L(AF3) 时微生物数量最多。其中 AF3、AF2、FA1 的细菌数量分别是 Comp 的 14.4、4.1 和 1.6 倍，AF3 和 AF2 的细菌数量分别是 AF0 的 10.6 和 3.0 倍；AF3、AF2、FA1 的真菌数量分别是 Comp 的 26.7、2.6 和 1.7 倍，分别是 AF0 的 56.0、5.8 和 3.9 倍；AF3、AF2、FA1 的放线菌数量分别是 Comp 的 3.8、2.3 和 2.6 倍，分别是 AF0 的 2.0、1.2 和 1.4 倍。可见，土壤施用碱性肥料与腐植酸协同(腐植酸碱性液体肥)是增加土壤微生物数量、改善土壤微生物结构、促进植物生长的有效措施，肥料中腐植酸用量为 50 g/L 时，土壤细菌、真菌和放线菌数量均最多。

3 讨论与结论

当前我国耕地面临的问题是土壤酸化和土壤有机质缺乏引起的耕地质量退化。提升耕地质量和保障作物健康生长和优质高产的关键就在于改良过低的土壤 pH，并防止土壤进一步酸化，同时增加土壤有机质，为此就要从根治耕地退化的源头着手。我国耕地酸化的直接原因是长期大量、过量和不合理施用化学酸性化肥(如复合肥)和生理酸性化肥(如尿素、铵态氮肥)。近 40 年来，红壤 pH 从第 2 次土壤普查的 6.0~6.5，下降到了目前的 5.5 左右，平均下降了 0.2~0.5 个单位，有些土壤降低了 1.5~2 个单位^[3-5]。土壤酸化又导致了土壤 Cd 等重金属活化及其污染，并通过食物链威胁人类健康^[31-32]。土壤有机质缺乏的原因是施入土壤的有机肥质量良莠不齐，很多有机肥缺乏腐植质，对土壤的培肥改良效果不佳。尽管治理土壤酸化及其引起的土壤重金属污染、增加土壤有机质和提升地力是国家耕地保育的重中之重，然而长期以来，治理土壤酸化的方法是施用石灰和石灰性工业废弃物，而长期施用石灰不仅导致土壤板结，且改良效果不持久，容易返酸^[33]；施用石灰性工业废弃物又可能造成新的土壤污染问题。因此，要实现治理土壤酸化、土壤重金属污染和提升地力，就必须从绿色投入品着手，即研发和施用新型的碱性肥料替代常规的酸性或生理酸性肥料，实现在施肥和给作物提供营养物质的同时改良土壤酸性。也就是说解决由于大量和不合理施肥引起的土壤酸化、土壤酸化又导致 Cd 污染问题之根本出路在于改变肥料的酸碱性，

同时将腐植酸和肥料结合，研制腐植酸型碱性肥料，这也就是本文研究的目的所在。以往的研究证明碱性肥料的碱性可以中和土壤的活性酸和潜性酸而改良土壤酸性^[34]，与普通肥料比较，碱性肥料还具有抗病促生的功能^[9,16,23]。若肥料中再附以腐植酸，直接增加土壤的腐植质，既可培肥和改良土壤，又可为作物提供生长调节物。因此，腐植酸碱性液体复合肥是可以替代常规复合肥的功能肥料。

本文研究结果证明，应用腐植酸碱性液体肥有利于促进香蕉苗的生长，包括促进株高、茎粗和叶绿素含量，增加香蕉苗的生物量，为香蕉高产优质打好基础。本研究结果还表明：施用腐植酸碱性肥料后，肥料的碱性改良了土壤酸性环境，使其有利于土壤微生物多样性；肥料的腐植酸增加了土壤的脲酶和酸性磷酸酶活性，从而增加了土壤的矿质态氮和有效磷等养分；碱性环境和腐植酸协同作用有利于改善土壤环境和土壤营养状况，使香蕉的根系活力增加，从而促进香蕉的生长。

由此我们认为研制和推广应用腐植酸碱性液体肥料是以肥治肥、以肥治酸改土、培肥土壤和营养作物的有效措施。

与常规肥料相比，施用腐植酸碱性液体肥能明显促进香蕉生长，其机制在于一方面肥料的碱性改良了土壤酸性环境，增加了土壤细菌、真菌和放线菌数量，促进了土壤微生物多样性；另一方面是肥料中的腐植酸增强了土壤的脲酶和酸性磷酸酶活性，改善了土壤的氮、磷营养状况，从而有利于香蕉生长。今后相关领域可以进一步开展固体腐植酸碱性肥料制造技术、应用效果和机理的深入研究。

参考文献：

[1] CANELLAS L P, PICCOLO A, DOBBS L B, et al. Chemical composition and bioactivity properties of size-fractions separated from a vermicompost humic acid[J]. *Chemosphere*, 2010, 78(4): 457-466.

[2] 张水勤, 袁亮, 林治安, 等. 腐植酸促进植物生长的机理研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(4): 1065-1076.

[3] HAO T, ZHU Q, ZENG M, et al. Impacts of nitrogen fertilizer type and application rate on soil acidification rate under a wheat-maize double cropping system[J/OL]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 270, 110888. [2021-11-15]. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110888>.

[4] CHENG M, WANG A, TANG C. Ammonium-based fertilizers enhance Cd accumulation in *Carpobrotus rossii* grown in two soils differing in pH[J]. *Chemosphere*, 2017, 188: 689-696.

[5] ZHOU X Y, XU M G, ZHOU S W, et al. Soil acidification characteristics in Southern China's croplands under long-term fertilization[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(6): 1615-1621.

[6] CUI Z, ZHANG H, CHEN X, et al. Pursuing sustainable productivity with millions of smallholder farmers[J]. *Nature*, 2018, 555(7696): 363-366.

[7] 曾宪成, 李双. 让腐植酸在优化土肥关系中发挥重要作用[J]. *腐植酸*, 2014(6): 1-7.

[8] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(2): 259-273.

[9] 李进, 樊小林, 蔺中. 碱性肥料对土壤微生物多样性及香蕉枯萎病发生的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(1): 212-219.

[10] 桂莎, 刘芳, 张立丹, 等. 复合菌剂防控香蕉枯萎病的效果及其微生物学机制[J]. *土壤学报*, 2020, 57(4): 995-1007.

[11] LI J, DUAN T T, LIN Z, Et al. Study on carbon source screening technology for prevention and control of banana fusarium wilt[J]. *American Journal of Biochemistry and Biotechnology*, 2020, 16(1): 87-95.

[12] 李华平, 李云锋, 聂燕芳. 香蕉枯萎病的发生及防控研究现状[J]. *华南农业大学学报*, 2019, 40(5): 128-136.

[13] DITA M, BARQUERO M, HECK D, et al. Fusarium wilt of banana: Current knowledge on epidemiology and research needs toward sustainable disease management[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 1468. doi: 10.3389/fpls.2018.01468.

[14] SENECHKIN I V, VAN OVERBEEK L S, VAN BRUGGEN A H C. Greater *Fusarium* wilt suppression after complex than after simple organic amendments as affected by soil pH, total carbon and ammonia-oxidizing bacteria[J]. *Applied Soil Ecology*, 2014, 73: 148-155.

[15] 《腐植酸》编辑部. 含腐植酸水溶肥料产品登记增长快[J]. *腐植酸*, 2017(4): 102.

[16] 樊小林, 李进. 碱性肥料调节香蕉园土壤酸度及防控香蕉枯萎病的效果[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(4): 938-946.

[17] 石朋飞, 玄先路, 侯翠红, 等. 腐植酸类肥料的研究现状及展望[J]. *河南化工*, 2015, 32(7): 7-11.

[18] 张祥, 梁济, 李接励, 等. 腐植酸肥料对小麦氮素吸收利用的影响[J]. *化肥工业*, 2019, 46(3): 61-66.

[19] 姜佰文, 谢晓伟, 王春宏, 等. 应用腐植酸减肥对玉米产量及氮效率的影响[J]. *东北农业大学学报*, 2018, 49(3): 21-29.

[20] 赫臣, 郑桂萍, 赵海成, 等. 增施腐植酸及减量施肥对盐碱地水稻穗部性状与产量的影响[J]. *作物杂志*, 2018(3): 129-134.

[21] 张亮亮, 樊小林, 张立丹, 等. 碱性肥料对稻田土壤和稻米镉含量的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(3): 891-896.

[22] 郭春铭, 刘卫军, 樊小林. 碱性长效缓释氮肥对蕉园土壤 pH 和香蕉氮肥利用效率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(1): 128-136.

[23] 李进, 张立丹, 刘芳, 等. 碱性肥料对香蕉枯萎病发生及土壤微生物群落的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(2): 429-436.

[24] 中华人民共和国农业部. 含腐植酸水溶肥料: NY 1106—2010[S]. 北京: 中国农业出版社, 2011.

[25] 中华人民共和国农业部. 水溶肥料总氮、磷、钾含量的测定: NY/T 1977—2010[S]. 北京: 中国农业出版社, 2011.

[26] 中华人民共和国农业部. 水溶肥料腐植植酸含量的测定: NY/T 1971—2010[S]. 北京: 中国农业出版社, 2011.

[27] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.

[28] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

[29] 关松荫. 土壤酶与土壤肥力[J]. *土壤通报*, 1980, 11(6): 41-44.

[30] 徐广平, 滕秋梅, 沈育伊, 等. 香蕉茎叶生物炭对香蕉枯萎病防控效果及土壤性状的影响[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(12): 2373-2384.

[31] TKACZYK P, MOCEK-PŁÓCINIAKA, SKOWROŃSKA M, et al. The mineral fertilizer-dependent chemical parameters of soil acidification under field conditions[J/OL]. *Sustainability*, 2020, 12(17): 7165. [2021-11-15]. <https://doi.org/10.3390/su12177165>.

[32] ZHU H, CHEN C, XU C, et al. Effects of soil acidification and liming on the phytoavailability of cadmium in paddy soils of central subtropical China[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 219: 99-106.

[33] HAYNES R J. What effect does liming have on silicon availability in agricultural soils?[J]. *Geoderma*, 2019, 337: 375-383.

[34] 曹巧滢, 江家泉, 王学江, 等. 新型碱性肥料治酸改土降镉的效果和机理[J/OL]. *土壤学报* (2021-07-09) [2021-11-05]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.p.20210709.1345.006.html>.

【责任编辑 李晓卉】