

生物炭与螯合剂配施条件下土壤无机磷的动态变化

杨 洋, 张 阳, 郝 宇, 苏国立, 林艳芝, 李春江, 隋亚杰, 刘琳琳, 张秀双

(辽宁省盐碱地利用研究所, 盘锦 124010)

摘 要: 为了提高土壤磷素使用的有效性, 以辽宁碱性土壤为研究对象进行试验研究。采用室内培养, 测定了在不同地力下, 生物炭与 3 种螯合剂(草酸、柠檬酸、EDTA) 在低中高三种浓度下对土壤磷素的活化规律。从各形态无机磷自身活化情况来看, 土壤中 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 的含量有所提高。其中 Al-P 的活化率最高, 低中高地力在 3 种浓度下的平均活化率为 34.5%, 35.1% 和 35.3%, Ca-P 的活化率最低, 但是其贡献率最高, 含量占到土壤总无机磷含量的 74.4%、73.5% 和 72.9%。土壤无机磷总活化量以及各形态无机磷组分含量随着螯合剂浓度的升高而增多。相同浓度下, 草酸的活化能力最强, 其次为 EDTA。低浓度时, 柠檬酸对 Fe-P 的活化能力最强, 草酸对 Al-P 的活化能力最强。在中、高浓度时, 草酸对各形态无机磷的活化能力都最强。试验证明生物炭与螯合剂配施, 可以有效增加土壤磷素无效态向有效态的转化。

关键词: 生物炭; 螯合剂; 无机磷组分; 盐碱土

中图分类号: S153.61

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2020)03-0415-06

Effects of biochar and chelating agent on dynamic change of inorganic phosphorus in soil

YANG Yang, ZHANG Yang, HAO Yu, SU Guoli, LIN Yanzhi,

Li Chunjiang, SUI Yajie, LIU Linlin, ZHANG Xiushuang

(Liaoning Saline-Alkali Land Utilization and Research Institute, Panjin 124010)

Abstract: In order to improve the availability of soil phosphorus, alkaline soil in Liaoning province was studied. In this study, indoor culture was used to determine the activation rules of soil phosphorus by biochar and three chelating agents (oxalic acid, citric acid and EDTA) at low, medium and high concentrations under different soil forces. From Self-activation of inorganic phosphorus in various forms of view, the contents of $\text{Ca}_2\text{-P}$ and $\text{Ca}_8\text{-P}$ in soil were increased. Among them, the activation rate of Al-P was the highest, the average activation rate was 34.5%, 35.1% and 35.3% at three concentrations of low, medium and high soil fertility, and the activation rate of Ca-P was the lowest, but its contribution rate was the highest, accounting for 74.4%, 73.5% and 72.9% of the total inorganic phosphorus content in the soil. The total activation amount of soil inorganic phosphorus and the content of inorganic phosphorus in various forms increased with the increase of chelating agent concentration. At the same concentration, oxalic acid had the strongest activation ability, followed by EDTA. At low concentration, citric acid had the strongest activation ability to Fe-P and oxalic acid had the strongest activation ability to Al-P . At medium and high concentration, oxalic acid has the strongest activation ability to all forms of inorganic phosphorus. It was proved that the combination of biochar and chelating agent could effectively increase the conversion of soil phosphorus from invalid state to effective state.

Key words: biochar; chelating agent; inorganic phosphorus composition; saline alkaline soils

磷素是作物生长必需的大量元素, 土壤无机磷是土壤磷素的重要组成部分, 它是植物生长所需磷素的一个重要供给源。作物对土壤中磷的当季利用率一般只有 10%~25%, 大部分磷肥积累于土壤中。土壤中的磷素 95% 为无效形式存在, 在低磷环境胁迫

条件下, 植物根系会分泌大量的有机酸进入根际, 这些有机酸具有较强的络合能力, 并于阴离子竞争吸附位点, 减少磷素的固定, 这些有机酸能够促进土壤中磷素的活化, 提高磷素的有效性, 对土壤理化性质、矿物溶解、重金属毒害等具有重要影响。

收稿日期: 2019-08-15

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFD0300700)资助。

作者简介: 杨 洋, 助理研究员。E-mail: 412344867@qq.com

生物炭是生物质在缺氧条件下高温热解产生的副产物,具有比表面积大,结构疏松多孔等特点^[1-3]。前人研究表明^[4-7]在土壤中添加生物炭,可以增大土壤比表面积、土壤持水量、土壤 pH 值、有机碳含量,在保持土壤中 N、P 元素的同时为微生物提供寄生场所来改良土壤,对作物的产量也有积极的促进作用。

盐碱土多年来重用轻养,土壤磷素积累问题突出,土壤对磷素的固持能力随着土壤磷素的积累而下降。利用生物炭还田培肥一种好方法,其具有改善土壤结构,增加土壤有机质,减少过量施用化肥带来的土壤退化和污染的作用。同时螯合剂可以活化土壤中难溶性磷,提高土壤磷的有效性。本研究主要以盐碱地水稻土为研究对象,通过生物炭与螯合剂的添加,测定和分析土壤中各无机磷组分含量变化规律,探讨不同地力水平下生物炭与螯合剂配施对土壤磷素各组分转化作用,为今后盐碱型水稻土磷肥减量化施用以及磷素合理调控提供理论依据和实践方法。

1 材料与方法

1.1 供试材料

水稻土于 2018 年取于辽宁省盐碱地利用研究所试验基地,土壤基本概况为:低地力土壤全盐 0.62%,pH 值为 8.41,有机质含量为 0.84%,有效磷 3.21 mg·kg⁻¹,碱解氮 44.59 mg·kg⁻¹,速效钾 269.92 mg·kg⁻¹;中地力土壤全盐 0.11%,pH 值为 7.97,有机质含量为 1.99%,有效磷 6.03 mg·kg⁻¹,碱解氮 91.72 mg·kg⁻¹,速效钾 223.74 mg·kg⁻¹;高地力土壤全盐 0.12%,pH 值为 7.06,有机质含量为 2.27%,有效磷 12.44 mg·kg⁻¹,碱解氮 109.56 mg·kg⁻¹,速效钾 280.19 mg·kg⁻¹。生物炭将粉碎稻草过 20 目筛子后在厌氧情况下升温 450℃,持续 5 h。

1.2 研究方法

本试验采用室内培养,土量为 1 500 g 每盆,生物炭用量为土质量的 1%使用,淹水培养,加水至高于土壤 15 cm 左右。柠檬酸、草酸、EDTA 分别以浓度 0、4、20 和 100 mmol·kg⁻¹ 添入桶中,同时设置 CK 处理,CK 处理为不添加任何东西。所有试验设置 3 个重复。25℃培养 45 d,培养过程中定期搅拌,改善土壤通气状况,定期补水。

1.3 数据处理

采用文献[8]无机磷分级测定土壤不同形态无机磷组分的含量,每个指标 3 次重复。不同形态磷的活化量 (mg·kg⁻¹) = 加有机酸后对应形态磷浸提

量 (mg·kg⁻¹) - 未加有机酸时不同形态磷浸提量 (mg·kg⁻¹)。所有数据应用 SPSS17.0 软件进行方差分析及显著差异比较;用 Excel2007 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 生物炭与螯合剂配施对土壤总无机磷活化情况的变化

螯合剂与土壤中的矿物质发生反应,能够促使部分无机磷释放出来。通过图 1 可以看出,生物炭与螯合剂配施可以使土壤中磷素活化,并且与螯合剂的浓度和总类有关。随着螯合剂浓度的升高,有效增加了总无机磷的活化量。螯合剂主要由氢离子和有机酸阴离子两部分组成,氢离子能直接与矿物态磷的磷酸根结合,通过酸解作用将有效磷释放出来,另一方面,有机酸阴离子能与矿物态磷的金属离子络合,从而促进了有效磷的释放^[9-10]。因此,螯合剂的浓度越高,酸解反应和络合效应越强,从而有效磷释放的越多。在图 1-a 中,经过 45 d 培养后,有效磷增加量平均为 8.78 mg·kg⁻¹,在低浓度 (4 mmol·kg⁻¹) 处理中,低分子量有机酸能够迅速提高总无机磷的释放,其中柠檬酸与 EDTA 释放的有效磷总量最多,分别为 347.09 mg·kg⁻¹ 和 347.13 mg·kg⁻¹。低浓度时活化的有效磷可能来源于土壤表面所吸附的可交换态无机磷。随着浓度的进一步提高,磷的活化总量迅速上升,其中 EDTA 活化能力最高,总无机磷含量为 356.20 mg·kg⁻¹。在高浓度 (100 mmol·kg⁻¹) 处理中,释放的总无机磷含量达到最大值。在图 1-b 中,在浓度为 4 mmol·kg⁻¹ 的时候,变化趋势同低地力土壤,随着浓度的增加,总无机磷活化含量受到螯合剂品类的影响,草酸的活化能力大于其他两种螯合剂。浓度高于 20 mmol·kg⁻¹ 的时候无机磷总量迅速增加并在最高浓度达到最大值,草酸活化能力最强,总无机磷活化含量为 362.69 mg·kg⁻¹。在图 1-c 中,高地力土壤总无机磷活化含量变化趋势同低、中地力土壤。活化能力最高的螯合剂为柠檬酸,其次为草酸。总体来说,螯合剂的活化能力为草酸 > EDTA > 柠檬酸。许多学者认为在低分子量有机酸对红壤^[9]、碱性土^[11]磷的活化效果研究中发现,草酸对总磷的活化效果最好,且有机酸浓度越高,磷的释放越多,这与本研究结果一致。同时在生物炭与螯合剂配施的条件下,总无机磷活化含量要高于单独施入有机酸的情况。这说明,添加生物炭可以使土壤蓬松,有利于微生物的生长,释放出低浓度酸,促进了无机磷组分的转化,进而增加土壤无机磷含量,提高了土壤的磷素含量。

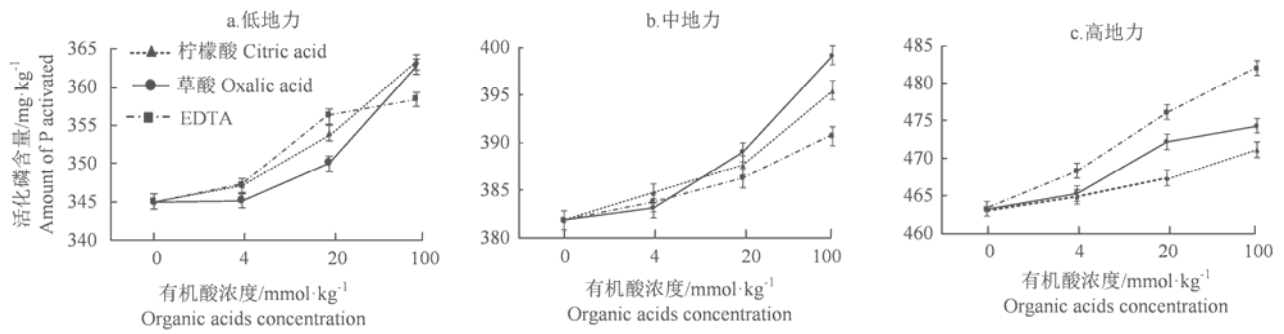


图 1 生物炭与螯合剂配施对土壤无机磷活化总量的影响

Figure 1 Effect of biochar and chelating agent on total inorganic phosphorus activation in soil

表 1 土壤无机磷组分含量及形态分布

Table 1 Contents and morphological distribution of inorganic phosphorus in soil

mg·kg⁻¹

土样 Soil	种类 Variety	浓度/mm ³ ·kg ⁻¹ Concentration	Ca ₂ -P	Ca ₈ -p	Al-P	Fe-P	Ca ₁₀ -P
低地力 Low soil fertility	柠檬酸	0	12.71 (3.00)	50.31 (14.0)	40.78 (11.0)	47.64 (13.0)	194.75 (56.0)
		4	17.64 (5.0)	59.76 (17.0)	39.61 (11.0)	45 (12.0)	186.47 (53.0)
		20	29.83 (8.00)	60.12 (16.0)	37.6 (10.0)	41.55 (11.0)	182.4 (51.0)
		100	40.4 (11.0)	74.12 (20.0)	34.51 (9.00)	35.34 (9.00)	178.96 (49.0)
	草酸	0	12.71 (3.00)	50.31 (14.0)	40.78 (11.0)	47.64 (13.0)	194.75 (56.0)
		4	23.99 (6.00)	53.4 (15.0)	37.06 (10.0)	44.27 (12.0)	190.75 (55.0)
		20	32.35 (9.00)	65.94 (18.0)	30.27 (8.00)	37.65 (10.0)	185.16 (52.0)
		100	46.33 (12.0)	78.22 (21.0)	28.24 (7.00)	34.1 (9.00)	175.54 (48.0)
	EDTA	0	12.71 (3.00)	50.31 (14.0)	40.78 (11.0)	47.64 (13.0)	194.75 (56.0)
		4	22.25 (6.00)	51.31 (14.0)	37.95 (10.0)	43.54 (12.0)	192.75 (55.0)
		20	30.82 (8.00)	53.85 (15.0)	39.25 (11.0)	40.19 (11.0)	191.36 (53.0)
		100	42.21 (11.0)	70.03 (19.0)	32.61 (9.00)	35.65 (9.00)	176.63 (49.0)
中地力 Medium soil fertility	柠檬酸	0	25.89 (6.00)	59.76 (15.0)	46.11 (12.0)	55.08 (14.0)	195.39 (51.0)
		4	29.72 (7.00)	62.22 (16.0)	45.86 (11.0)	54.37 (14.0)	193.36 (50.0)
		20	35.01 (9.00)	72.58 (18.0)	42.19 (10.0)	48.56 (12.0)	188.28 (48.0)
		100	48.26 (12.0)	79.49 (20.0)	41.46 (10.0)	43.7 (11.0)	180.07 (45.0)
	草酸	0	25.89 (6.00)	59.76 (15.0)	46.11 (12.0)	55.08 (14.0)	195.39 (51.0)
		4	29.21 (7.00)	67.31 (17.0)	45.97 (11.0)	53.93 (14.0)	187.56 (48.0)
		20	38.33 (9.00)	76.58 (19.0)	42.41 (10.0)	46.51 (11.0)	184.53 (47.0)
		100	46.08 (11.0)	89.4 (22.0)	40.62 (10.0)	47.46 (11.0)	174.37 (43.0)
	EDTA	0	25.89 (6.00)	59.76 (15.0)	46.11 (12.0)	55.08 (14.0)	195.39 (51.0)
		4	36.07 (9.00)	65.94 (17.0)	45.54 (11.0)	49.83 (12.0)	186.25 (48.0)
		20	40.17 (10.0)	78.03 (20.0)	41.43 (10.0)	47.01 (12.0)	179.6 (46.0)
		100	45.67 (11.0)	86.67 (22.0)	40.66 (10.0)	43.73 (11.0)	173.74 (44.0)
高地力 High soil fertility	柠檬酸	0	45.02 (9.00)	78.85 (17.0)	55.56 (11.0)	69.36 (14.0)	213.49 (46.0)
		4	49.78 (10.0)	86.67 (18.0)	51.29 (11.0)	66.75 (14.0)	210.79 (45.0)
		20	58.42 (12.0)	95.58 (20.0)	47.74 (10.0)	60.43 (12.0)	204.62 (43.0)
		100	67.29 (14.0)	105.7 (22.0)	42.95 (9.00)	57.84 (12.0)	196.19 (41.0)
	草酸	0	45.02 (9.00)	78.85 (17.0)	55.56 (11.0)	69.36 (14.0)	213.49 (46.0)
		4	59.21 (12.0)	85.22 (18.0)	52.56 (11.0)	62.91 (13.0)	206.47 (44.0)
		20	65.67 (13.0)	100.5 (21.0)	50.06 (10.0)	56.98 (12.0)	197.9 (41.0)
		100	79.35 (16.0)	106.67 (22.0)	47.19 (9.00)	50.06 (10.0)	191.36 (40.0)
	EDTA	0	45.02 (9.00)	78.85 (17.0)	55.56 (11.0)	69.36 (14.0)	213.49 (46.0)
		4	49.72 (10.0)	83.31 (17.0)	53.65 (11.0)	68.79 (14.0)	210.87 (45.0)
		20	59.54 (12.0)	98.03 (20.0)	49.84 (10.0)	64.39 (13.0)	204.08 (42.0)
		100	73.32 (15.0)	109.4 (22.0)	45.88 (9.00)	60.65 (12.0)	191.32 (39.0)

注: 括号内数值为相应组分占无机磷总量的百分比

Note: The data in parentheses are the percentages of the fraction in total inorganic phosphorus

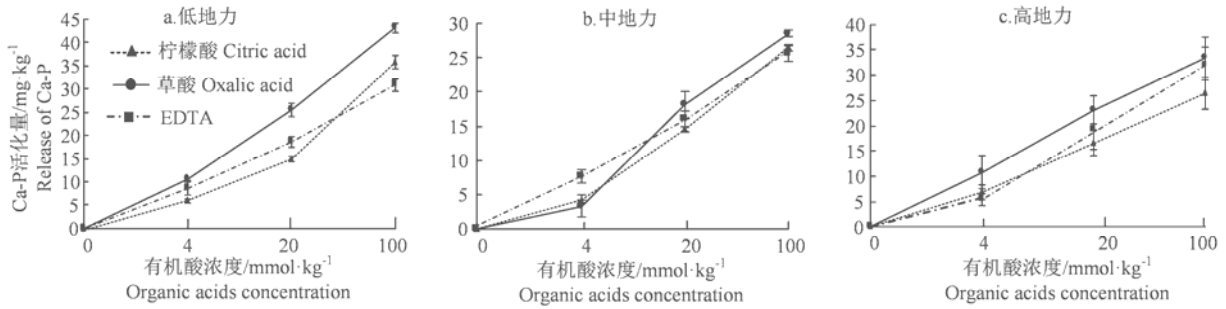


图 2 生物炭与螯合剂配施对不同地力土壤 Ca-P 活化量的影响

Figure 2 Effect of biochar and chelating agent on Ca-P activation in soil with different soil fertility

2.2 生物炭与螯合剂配施对土壤各形态无机磷的活化规律

2.2.1 生物炭与螯合剂配施对土壤无机磷含量及形态的影响 从表 1 可以看出, 加入低分子有机酸培养 45 d 后, 不同肥力土壤无机磷组成的变化是不同的。在生物炭与螯合剂的作用下, 供试土壤中 $\text{Ca}_2\text{-P}$, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 都有不同程度的增加, 而 Al-P 、 Fe-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 的含量明显下降, 这说明土壤中的 Al-P 、 Fe-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 在螯合剂的作用下向 $\text{Ca}_2\text{-P}$, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 转化, 生物炭的添加有效的增加了各土壤中无机磷组分的含量。不同浓度的有机酸对土壤无机磷组分含量有一定影响, 随着浓度的增加, 无机磷的组分出现上升趋势, 高地力土壤无机磷组分含量高于低地力无机磷组分含量, 土壤中这些无机磷组分的增加或者减少与螯合剂的种类、浓度和土壤磷含量密切相关, 三种酸的活化能力为草酸 > EDTA > 柠檬酸。生物炭与螯合剂的加入对 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 的变化最高, 对 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 的影响最小。

2.2.2 生物炭与螯合剂配施对土壤无机磷组分活化

量的影响 物炭与螯合剂配施对土壤中 Ca-P 、 Al-P 和 Fe-P 的影响, 如图 2、3、4 所示。在图 2 中, 不同地力水平下, 随着螯合剂浓度的增加, 土壤 Ca-P 含量逐渐增加。与对照相比, 低地力中 Ca-P 在不同螯合剂的条件下, 柠檬酸、草酸、EDTA 的平均活化量分别增加 $18.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $26.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $19.35 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 中地力土壤中 Ca-P 在不同螯合剂的条件下, 柠檬酸、草酸、EDTA 的平均活化量分别增加 $15.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $16.65 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $16.46 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 高地力土壤中 Ca-P 在不同螯合剂的条件下, 柠檬酸、草酸、EDTA 的平均活化量分别增加 $16.64 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $22.43 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $18.86 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。在低浓度酸处理下, Ca-P 的含量变化缓慢, 随着酸浓度的进一步升高, 各有机酸能较大程度的活化 Ca-P 量。低地力土壤中 Ca-P 的活化量最大, 可能是由于增加了生物炭的缘故, 使得 Ca-P 含量增加, 由此可以说明在低地力土壤中同时施加生物炭与螯合剂可以更有效地提土壤中 Ca-P 的含量。各地力土壤中各螯合剂的活化能力为草酸 > EDTA > 柠檬酸。

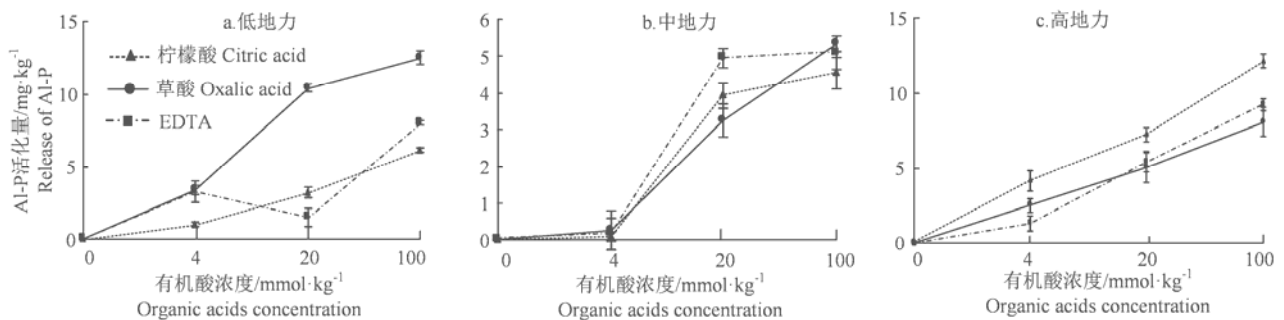


图 3 生物炭与螯合剂配施对不同地力土壤 Al-P 活化量的影响

Figure 3 Effect of biochar and chelating agent on Al-P activation in soil with different soil fertility

图 3 为生物炭与螯合剂配施条件下对不同地力土壤中 Al-P 活化量的影响。从总体来看, 随着螯合剂不同浓度的增加 Al-P 活化量逐渐增加。在图 3-a 中, 草酸的活化能力最大, 在浓度为 $20 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的时候, 草酸的活化能力是柠檬酸和 EDTA 活化能

力的 3 倍。低地力土壤中各螯合剂的活化能力为草酸 > EDTA > 柠檬酸。图 3-b 中, 螯合剂浓度大于 $4 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 土壤中 Al-P 活化量大幅度增加, 活化量增加了 4 倍, 之后随着浓度的增加, 活化量缓慢上升。中地力土壤中各螯合剂的活化能力为柠檬

酸>EDTA>草酸。图 3-c 中,随着螯合剂浓度的增加,Al-P 活化量平稳增加。高地力土壤中各螯合剂的活化能力为柠檬酸>草酸>EDTA。低地力土壤 Al-P 活化量与高地力土壤 Al-P 的活化量基本相同,低地力与高地力在柠檬酸、草酸、EDTA 条件下,Al-P 最高平均活化量分别 3.45 mg·kg⁻¹, 8.76 mg·kg⁻¹, 4.25 mg·kg⁻¹ 和 7.86 mg·kg⁻¹, 5.2 mg·kg⁻¹, 5.41 mg·kg⁻¹。出现此情况可能是由于生物炭的添加,使得低地力土壤肥力增加,同时增加了 Al-P 的活化量。

图 4 为生物炭与螯合剂配施条件下对不同地力土壤中 Fe-P 活化量的影响。在不同地力下,随着各

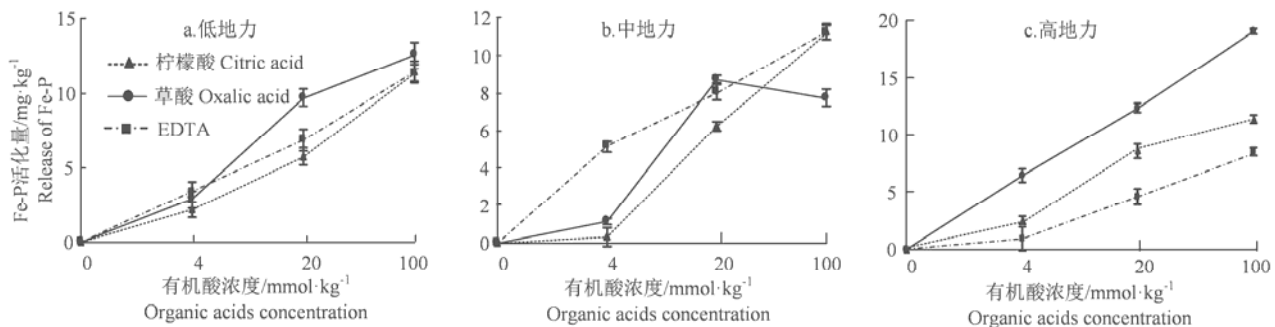


图 4 生物炭与螯合剂配施对不同地力土壤 Fe-P 活化量的影响

Figure 4 Effect of biochar and chelating agent on Fe-P activation in soil with different soil fertility

在不同浓度下,各形态无机磷对磷活化量的大小顺序是一致的,为 Ca-P>Fe-P>Al-P。在对照、低浓度、中浓度、高浓度等 4 个处理中,低、中、高 3 个地力水平 Ca-P 对无机磷总活化量的贡献最大,贡献率为 74.4%、73.5% 和 72.9%。Al-P 和 Fe-P 的贡献率分别为 11.5%、12.04%、11.9% 和 13.5%、14.4%、14.9%。随着浓度的提高,各形态无机磷的活化率也不断提高,低中高不同地力下,低浓度处理为 7.8%、7.4%、6.9%;中浓度处理为 23.1%、23.5%、23.4%;高浓度处理则高达 42.1%、42.6%、43.4%,这说明在高浓度时有一半的难溶性无机磷被低分子量有机酸活化释放。在低浓度处理时 Al-P 活化率最高,低中高不同地力为 17.2%、17.9%、18.3%。在中、高浓度时活化率从高到低的顺序为 Al-P>Ca-P>Fe-P。这也说明 Al-P 是一种非常有效的磷源,可以作为土壤磷库的主体^[12-13],Fe-P 和 Ca-P 对土壤有效磷库起重要调节作用^[14],这与一些研究不谋而合。Ca-P 活化率相对较低,但是贡献率位于首位,为土壤磷素活化起到主要作用。

3 结论

在生物炭与螯合剂配施于盐碱土壤时,土壤中

螯合剂浓度的增加,土壤中 Fe-P 活化量逐渐增加。在图 4-a 中,浓度为 4 mmol·kg⁻¹时,Fe-P 活化量基本相同,随着浓度增加到 20 mmol·kg⁻¹时,草酸的活化能力高于 EDTA 和柠檬酸。在草酸最大浓度时,Fe-P 活化量为 12.52 mg·kg⁻¹。图 4-b 中,3 种有机酸的活化能力为 EDTA>柠檬酸>草酸。浓度为 20 mmol·kg⁻¹时,草酸与 EDTA 的活化能力基本相同,并且高于柠檬酸。当浓度达到 100 mmol·kg⁻¹时候,柠檬酸与 EDTA 的活化能力一致,为 11.23 mg·kg⁻¹ 和 11.18 mg·kg⁻¹。图 4-c 中,随着有机酸的浓度增加出现稳步上升趋势。并且活化能力为草酸>柠檬酸>EDTA。草酸最大活化量为 19.08 mg·kg⁻¹。

无机磷组分含量的变化受到螯合剂品类和浓度的影响,随着螯合剂浓度的增加,无机磷总活化量不断增加,活化能力为草酸>EDTA>柠檬酸,并且在低地力水平下,生物炭与螯合剂配施有助于土壤总无机磷含量的增加。与一些学者相比^[11],添加生物炭以后,无机磷总活化量增加了近 1 倍。这也说明生物炭可以提高土壤中无机磷的含量,进而增加土壤的养分。

生物炭与螯合剂配施能显著提高土壤中 Ca₂-P、Ca₈-P 的含量,同时降低土壤中 Al-P、Fe-P 和 Ca₁₀-P 含量,螯合剂对盐碱土壤无机磷形态组成的这种促进或降低作用充分说明了螯合剂能够促进土壤无效态磷向有效态磷的转化,这与杨绍琼等^[15]研究相一致。在低浓度时,柠檬酸对 Fe-P 的活化能力最强,草酸对 Al-P 的活化能力最强。在中、高浓度时,草酸对各形态无机磷的活化能力都最强。

对各形态无机磷对盐碱土壤的贡献来讲,Ca-P 的贡献率最大。从各形态无机磷自身的活化能力来看,Al-P 的活化率最高,与一些学者研究^[11]相比较,各无机磷组分的活化率有所增加,平均增加了 0.4 个百分点,这说明生物炭的添加,增加的土壤的比表面积,为微生物提供寄生场所,有利于土壤微生

物的繁殖, 这些微生物能够分泌少量的酸性物质, 可以将少量的磷从各形态的无机磷中释放出来, 进而增加了各无机磷组分的活化率。

参考文献:

- [1] 姜玉萍, 杨晓峰, 张兆辉, 等. 生物炭对土壤环境及作物生长影响的研究进展[J]. 浙江农业学报, 2013, 25(2): 410-415.
- [2] 郭碧林, 陈效民, 景峰, 等. 施用生物炭对红壤性水稻土重金属钝化与土壤肥力的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(3): 298-304.
- [3] 陈温福, 张伟明, 孟军, 等. 生物炭应用技术研究[J]. 中国工程科学, 2011, 13(2): 83-89.
- [4] 勾芒芒, 屈忠义. 土壤中施用生物炭对番茄根系特征及产量的影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(8): 1348-1352.
- [5] HOSSAIN M K, STREZOV V, YIN CHAN K, et al. Agromonic properties of wastewater sludge biochar and bioavailability of metals in production of cherry tomato (*Lycopersicon esculentum*)[J]. Chemosphere, 2010, 78(9): 1167-1171.
- [6] KARHU K, MATTILA T, BERGSTRÖM I, et al. Biochar addition to agricultural soil increased CH₄ uptake and water holding capacity-Results from a short-term pilot field study[J]. Agric Ecosyst Environ, 2011, 140(1/2): 309-313.
- [7] 郭碧林, 陈效民, 景峰, 等. 施用生物炭对红壤性水稻土重金属钝化与土壤肥力的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(3): 298-304.
- [8] 陈立新. 土壤实验实习教程[M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2005.
- [9] 王祺, 樊秉乾, 张帅, 等. 不同浓度螯合剂和浸提时间对土壤磷素提取效果研究[J]. 水土保持学报, 2018, 32(6): 302-308.
- [10] JONES D L, DARRAH P R. Role of root derived organic acids in the mobilization of nutrients from the rhizosphere[J]. Plant Soil, 1994, 166(2): 247-257.
- [11] 孔涛, 伏虹旭, 吕刚, 等. 低分子量有机酸对滨海盐碱土壤磷的活化作用[J]. 环境化学, 2016, 35(7): 1526-1531.
- [12] MCCALLISTER D L, BAHADIR M A, BLUMENTHAL J M, et al. Phosphorus partitioning and phosphatase activity in semi-arid region soils under increasing crop growth intensity 1[J]. Soil Science, 2002, 167(9): 616-624.
- [13] 韩梅, 李东坡, 武志杰, 等. 持续六年施用不同磷肥对稻田土壤磷库的影响[J]. 土壤通报, 2018, 49(4): 929-935.
- [14] 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.
- [15] 杨绍琼, 党廷辉, 戚瑞生, 等. 低分子量有机酸对石灰性土壤有机磷组成及有效性的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 167-171.