

糠醛渣及其生物炭对盐渍土理化性质影响的比较研究

孙军娜^{1,2}, 董陆康³, 徐 刚^{1*}, 邵宏波^{1,4*}

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所海岸带生物学与生物资源利用重点实验室, 山东 烟台 264003; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 烟台大学化学化工学院, 山东 烟台 264003; 4. 青岛科技大学生命科学研究所, 山东 青岛 266042)

摘要:为了更好地利用糠醛渣及其炭化产物来改良盐渍土,通过室内 56 d 的培养试验研究了添加糠醛渣和其生物炭后土壤 pH 值、电导率、总有机碳、阳离子交换量、碱化度、有效磷、硝氮、氨氮等理化性质的变化。结果表明,糠醛渣加入土壤后能降低土壤 pH 值,且效果比生物炭显著,2.5%糠醛渣甚至比 5%生物炭更易降低盐渍土的 pH 值。从提高土壤有效磷含量的角度来说,5%的糠醛渣能提高土壤中 4~6 倍有效磷含量,其改良作用要优于生物炭。与糠醛渣相比,生物炭更能增加土壤总有机碳含量,最大增幅处比糠醛渣高 62%。在降低土壤碱化度方面生物炭也比糠醛渣强,5%糠醛渣和生物炭处理土壤碱化度分别为培养初期的 51%和 43%。同时也发现,生物炭并未比糠醛渣有更高的增加土壤阳离子交换量的能力,这可能与试验周期较短有关。总之,从短期试验效果看,在降低土壤 pH 值和提高土壤有效磷方面,糠醛渣作用较为显著;而在提高土壤总有机碳含量,降低土壤碱化度方面,生物炭优于糠醛渣。

关键词:糠醛渣;生物炭;总有机碳;阳离子交换量;碱化度;有效磷

中图分类号:S153 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2014)03-0532-07 **doi:**10.11654/jaes.2014.03.020

Effects of Furfural and Its Biochar Additions on Physical-chemical Characteristics of a Saline Soil

SUN Jun-na^{1,2}, DONG Lu-kang³, XU Gang^{1*}, SHAO Hong-bo^{1,4*}

(1.Key laboratory of Coastal Biology&Bioresources Utilization, Yantai Institute of Coastal Zone Research,Chinese Academy of Sciences,Yantai 264003,China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3.Chemistry and Chemical Engineering College, Yantai University, Yantai 264003, China; 4.Institute of Life Sciences, Qingdao University of Science&Technology, Qingdao 266042, China)

Abstract: So far there is little information available about furfural and its biochar effects on saline soils. Here we conducted an incubation experiment to study the effects of furfural and its biochar applications on soil pH, electricity conductivity, total organic carbon, cation exchange capacity, exchange sodium percentage and available phosphorus of a saline soil during 56 d incubation. Furfural was found to be more effective in influencing soil pH and available phosphorus than its biochar. The decrease of soil pH by 5% biochar was less than that by 2.5% furfural. Compared with the control, applying furfural increased soil available phosphorus by 4 to 6 times, while biochar increased it by 2 to 5 times. However, biochar increased total organic carbon 62% greater than furfural did. In addition, biochar addition reduced soil exchange sodium percentage more effectively than furfural did. No significant difference between furfural and its biochar was found in soil cation exchange capacity.

Keywords: furfural; biochar; total organic carbon; cation exchange capacity; exchange sodium percentage; available phosphorus

黄河三角洲的土壤类型主要为泥沙型盐渍土,土壤的盐渍环境极大地限制了植物的生长,极低的生物

量造成土壤有机质含量较低^[1],因此黄河三角洲的土壤保水保肥能力很弱^[2],土壤环境的恶化又进一步加剧了土壤的盐渍环境^[3],限制了作物的生长。通过施用有机物料可以明显地改善土壤的盐渍环境,提高作物产量,促进土壤的改良^[4]。糠醛渣是一种酸性有机物质,来源广,且价格低廉,对改良盐碱土有一定效果^[5]。李茜^[6]和蔡阿兴^[7]等研究发现,糠醛渣能降低土壤 pH 值和碱化度,提高作物产量。而糠醛渣等生物有机质(如:动植物废弃物等)在缺氧或低氧条件下高温裂解后形成的生物炭,有机质含量和比表面积较大^[8-10],对

收稿日期:2013-06-07

基金项目:中科院烟台海岸带研究所“一三五”发展规划“黄河三角洲陆海界面过程、生态演变与修复技术”(Y254021031);国家自然科学基金(41001137;41171216);中国科学院创新团队国际合作伙伴计划“海岸带典型环境过程与资源效应”;烟台市科技发展项目“经济植物高效利用”(Y133021041);烟台市双百人才计划(XY-003-02)

作者简介:孙军娜(1984—),女,博士研究生,主要从事土壤化学方面研究。E-mail:jnsun@yic.ac.cn

* **通信作者:**徐 刚 E-mail:gxu@yic.ac.cn

邵宏波 E-mail:shaohongbochu@126.com

保水保肥^[11-12]及增加微生物活性^[13-14]有重要作用,也被用作土壤改良剂^[15-18]。但目前还没有关于糠醛渣炭化前后对盐渍土理化性质影响的对比研究。因此本文通过室内恒温培养和淋溶试验,根据酸碱性、水溶性盐分、土壤基本养分及阳离子交换性能等的变化趋势对改良效果进行评价,以期应用糠醛渣和生物炭改良盐渍土提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤采自黄河三角洲盐渍土(37°45′50″N, 118°59′24″E),土壤采集后弃除石砾和植物残体,于室温自然风干后过2 mm筛备用。供试原料的理化性质见表1。土壤pH值为8.3,碱化度高达27%,属于强碱性土壤^[19]。无机氮主要以NO₃-N为主(占无机氮含量的77%),总磷含量550 mg·kg⁻¹,其中有效磷含量较低(约占总磷的1%)。所用糠醛渣是玉米轴经过工业蒸馏后的残渣,呈深褐色。糠醛渣生物炭(以下简称为生物炭)是糠醛渣在马弗炉300℃下炭化4 h制得。糠醛渣pH值为2.9,电导率为3.9 mS·cm⁻¹,总有机碳含量较高,为318.5 g·kg⁻¹。无机氮含量为45.8 mg·kg⁻¹,主要以NH₄⁺-N为主,有效磷含量196 mg·kg⁻¹,占总磷的22%。生物炭中C/N较高,总有机碳含量占总碳的83.6%,无机氮含量较低,阳离子交换量为41.8 cmol·kg⁻¹,与糠醛渣相比增加了12%。

1.2 试验方法

为考察糠醛渣和生物炭对盐渍土理化性质影响的异同,通过土壤培养试验进行验证。试验共设5个处理:CK(空白),不添加任何物质;T1,添加2.5%糠醛渣;C1,添加2.5%生物炭;T2,添加5%糠醛渣;C2,添加5%生物炭,每个处理4次重复。试验中每个土壤培养容器内装500 g黄河三角洲盐渍土,控制样品含水量为最大含水量的30%(每日通过称重法补充蒸发掉的水分),温度为25℃恒温。在培养的1、3、7、14、21、28、42、56 d取土样,测定pH、电导率、有效磷、总有机碳、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N含量,水分损失用称重

法补充。培养的第4 d和38 d,用蒸馏水模拟降雨(150±10)mL,收集淋溶液,测量淋溶液中磷、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N含量。

1.3 测定方法

供试原料理化性质按照土壤农业化学分析方法^[19]测量。pH值(土水比=1:2.5)、电导率(EC,土水比=1:5)。总碳(TC)、总氮(TN)用元素分析仪(Elementar, Vario Micro cube)测量,总有机碳(TOC)采用重铬酸钾氧化-比色法测量,交换性K⁺/Ca²⁺/Na⁺/Mg²⁺(Exchange K⁺/Ca²⁺/Na⁺/Mg²⁺)用乙酸铵-火焰原子吸收分光光度计测量,阳离子交换量(CEC)用乙酸钠-火焰原子吸收分光光度计测量,总磷(TP)和有效磷(AP)用钼锑抗比色法测量,硝态氮(NO₃⁻-N)和铵态氮(NH₄⁺-N)用连续流动分析仪(Seal, AutoAnalyzer III)测量。

1.4 数据处理

土壤碱化度ESP是评价盐渍土的一个关键参数,ESP=15是引起土壤结构恶化的临界值^[20]。

$$ESP(\%) = \frac{Na^+}{CEC} \times 100$$

其中,Na⁺为交换性钠的含量,cmol·kg⁻¹;CEC为阳离子交换量,cmol·kg⁻¹。

试验数据采用Excel 2010和SPSS 13.0软件进行统计分析。各处理之间的显著性差异采用单因素方差分析法(One-way ANOVA),显著性水平为0.05。

2 结果与讨论

2.1 糠醛渣及生物炭对土壤理化性质的影响

2.1.1 pH值的变化

由图1可以看出,加入糠醛渣和生物炭均使土壤pH值降低,其加入量越高,pH值越低,主要由于糠醛渣和生物炭pH值远低于土壤的pH值。同剂量糠醛渣同生物炭相比更能降低土壤pH,这主要是因为糠醛渣具有更强的酸性,2.5%糠醛渣甚至比5%生物炭更易降低盐渍土的pH。5%糠醛渣培养期间可以降低0.5~0.8个单位土壤pH(土壤pH值为8.3~8.6),而同剂量的生物炭培养期间仅降低0.25~0.4个单位土壤

表1 供试原料的理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of materials used

原料	pH	EC/ mS·cm ⁻¹	TC/ g·kg ⁻¹	TN/ g·kg ⁻¹	TOC/ g·kg ⁻¹	CEC/ cmol·kg ⁻¹	ESP/%	TP/ mg·kg ⁻¹	AP/ mg·kg ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N/ mg·kg ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N/ mg·kg ⁻¹	Exchange cations/mg·kg ⁻¹			
												K ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
土	8.3	0.5	16.9	1.0	4.7	7.2	26.9	550	5	52.2	15.4	120	446	557	3007
糠醛渣	2.9	3.9	394.9	9.8	318.5	37.4	13.8	903	196	1.4	44.4	1132	759.5	1252	4373
生物炭	4.5	2.7	506.4	11.5	423.6	41.8	12.4	1222	139	0.8	1.7	11 616	1190	1377	9156

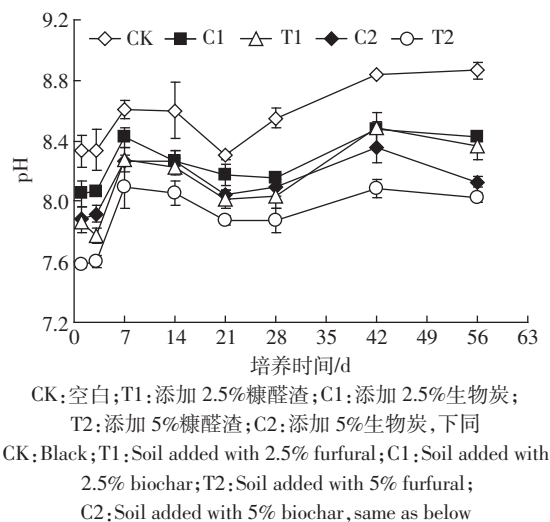


图1 糠醛渣和生物炭对土壤 pH 值的影响

Figure 1 Effects of furfural and its biochar additions on soil pH

pH 值。土壤 pH 的降低有利于难溶元素的溶解活化, 可以增加土壤溶液的离子浓度^[21]。

2.1.2 电导率的变化

土壤中可溶性盐分与电导率成正比^[22-23], 因此可溶性盐变化可由浸出液电导率的变化看出。由图2可知, 各组中电导率的变化呈先降低再增加后下降的趋势, 这主要是因为电导率受模拟降雨影响较大, 淋溶带走了土壤中大量可溶性盐, 第一次淋溶后各处理电导率降低了 35%~44%。随着糠醛渣与生物炭用量的增加土壤的电导率均增加, 一方面由于糠醛渣和生物炭较低的 pH 值使一部分难溶性成分溶解活化, 从而增加了土壤中的可溶性盐分, 使电导率有所增加; 另一方面增加的氢离子与土壤胶体表面发生阳离子代换作用^[24], 释放离子增加土壤电导率。糠醛渣和生物炭均增加了土壤可溶性盐的含量, 但生物炭的增幅较

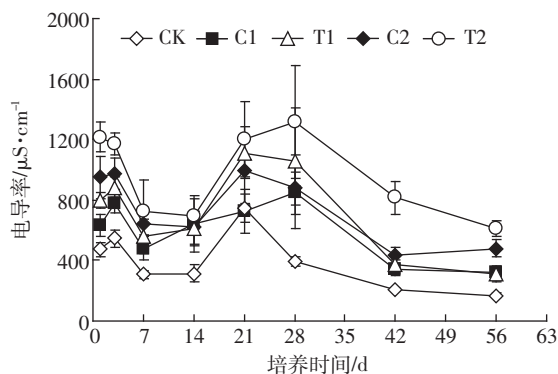


图2 糠醛渣和生物炭对土壤电导率的影响

Figure 2 Effects of furfural and its biochar additions on soil electrical conductivity

小, 因此, 糠醛渣炭化比其本身对土壤盐分的影响小。

2.1.3 土壤总有机碳的变化

由图3可知, 每个处理土壤总有机碳含量随时间变化差异不大 ($P>0.05$), 这可能与活性有机质含量较低及淋溶过程中的损失有关^[25-26]。糠醛渣和生物炭均能大幅提高土壤中总有机碳的含量, 生物炭效果更加明显。加入生物炭的处理, 土壤中总有机碳含量最高可达空白的 8 倍。培养第 7 d, 2.5% 生物炭处理比同比例糠醛渣处理总有机碳含量高 62%。这可能由于生物炭含有较高的有机质, 其总有机碳含量约是土壤的 89 倍, 糠醛渣中总有机碳含量约是土壤的 67 倍 (表 1)。唐光木^[27]、高海英^[28]等也发现, 生物炭的加入能显著提高土壤有机碳的含量, 这对提高土壤质量和增加作物产量有重要作用。

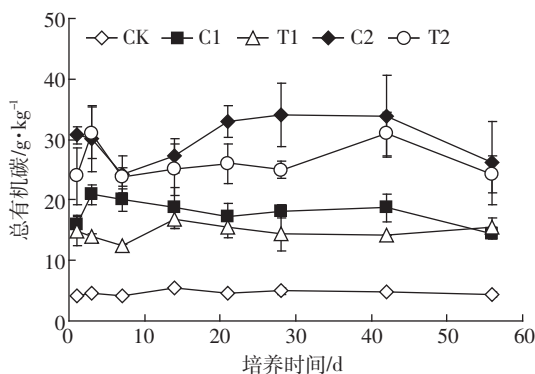


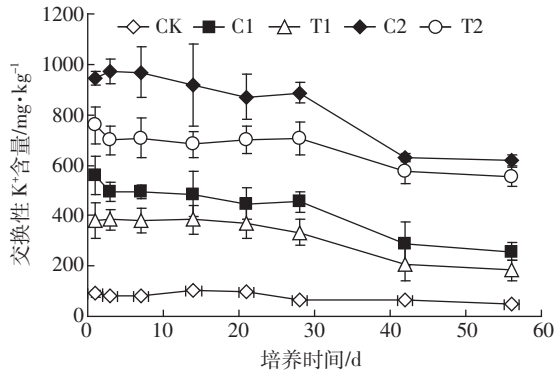
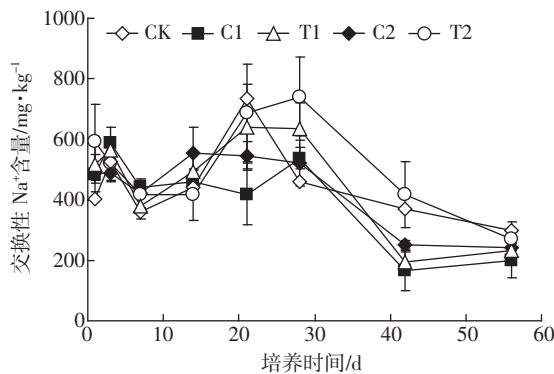
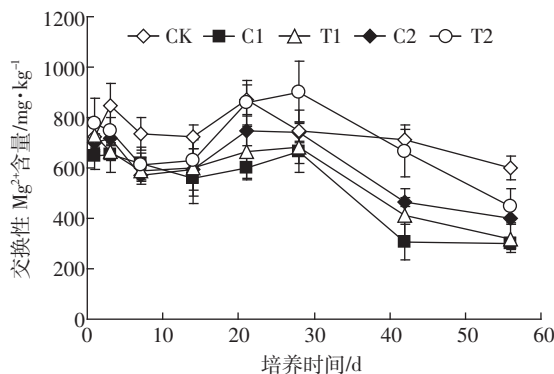
图3 糠醛渣和生物炭对土壤总有机碳的影响

Figure 3 Effects of furfural and its biochar additions on soil organic matter

2.1.4 土壤交换性钾钙钠镁、碱化度和阳离子交换量的变化

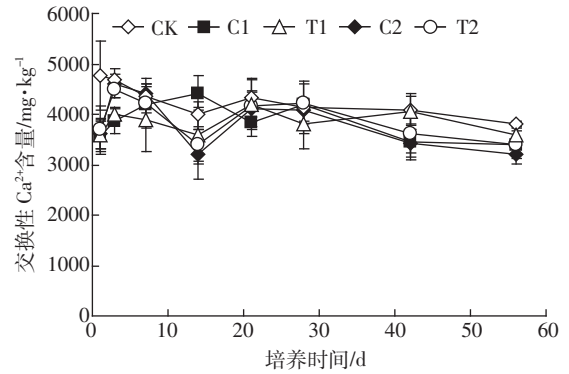
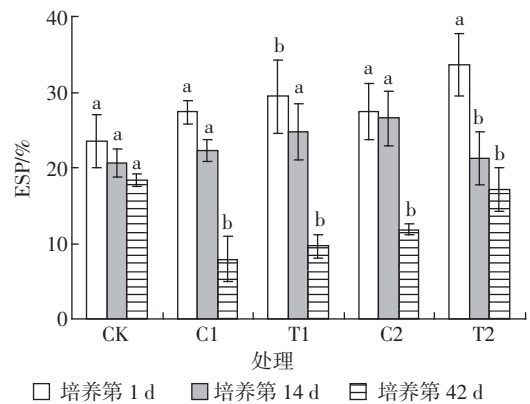
加入糠醛渣和生物炭明显增加了土壤中交换性 K^+ 含量, 且加入量越多, 交换性 K^+ 含量越大, 生物炭作用比糠醛渣显著 (图 4)。糠醛渣和生物炭中交换性 K^+ 含量分别是土壤的 10 倍和 96 倍 (表 1)。由图 5、6、7 可知, 加入糠醛渣和生物炭对交换性 Na^+ 、交换性 Mg^{2+} 、交换性 Ca^{2+} 影响差异不显著 ($P>0.05$)。

随着培养时间增加, 加入生物炭比糠醛渣更能降低土壤的碱化度 (图 8)。试验末期, 5% 糠醛渣和生物炭处理土壤碱化度分别为最初的 51% 和 43%。一方面可能由于生物炭中交换性 Ca^{2+}/Mg^{2+} 浓度较高, 能将土壤胶体吸附的 Na^+ 代换下来^[29], 从而降低土壤中交换性 Na^+ 的含量。由表 1 可知, 生物炭中交换性 Ca^{2+} 是土壤中的 3 倍; 另一方面, 生物炭本身疏松多孔的性质, 使土壤的总孔隙度增加^[16], 受到淋洗会带走更多

图4 糠醛渣和生物炭对土壤交换性 K⁺的影响Figure 4 Effects of furfural and its biochar additions on soil exchange K⁺ content图5 糠醛渣和生物炭对土壤交换性 Na⁺的影响Figure 5 Effects of furfural and its biochar additions on soil exchange Na⁺ content图6 糠醛渣和生物炭对土壤交换性 Mg²⁺的影响Figure 6 Effects of furfural and its biochar additions on soil exchange Mg²⁺ content

交换性 Na⁺,使碱化度降低。

由图9可知,随着培养时间增加,生物炭并未比糠醛渣有更好的改良土壤阳离子交换量的作用,这可能与试验周期短有关^[30]。随着培养时间的增加,生物炭表面基团被氧化使表面电荷密度增加可能会大幅增加阳离子交换量^[31]。糠醛渣和生物炭加入均使土壤

图7 糠醛渣和生物炭对土壤交换性 Ca²⁺的影响Figure 7 Effects of furfural and its biochar additions on soil exchange Ca²⁺ content

同一处理柱状图上不同小写字母表示 $P < 0.05$ 水平差异显著。下同

图8 糠醛渣和生物炭对土壤碱化度(ESP)的影响

Figure 8 Effects of furfural and its biochar additions on soil exchange sodium percentage(ESP)

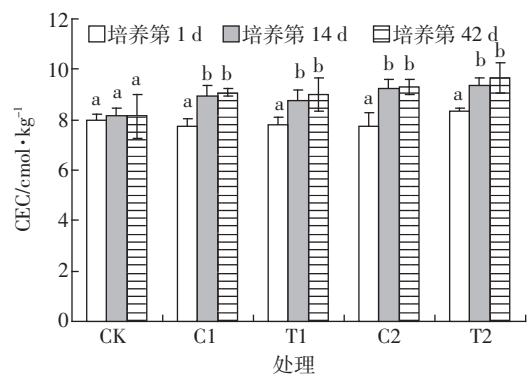


图9 糠醛渣和生物炭对土壤 CEC 的影响

Figure 9 Effects of furfural and its biochar additions on soil cation exchange capacity

的阳离子交换量有所增加($P < 0.05$),5%生物炭加入使土壤阳离子交换量增加了15%(培养第42 d与培养第1 d相比),这说明加入糠醛渣和生物炭使土壤缓冲性能增加^[30]。这可能由于有机质较大的比表面积和

大量负电荷官能团,增加了土壤胶体的交换点位而使阳离子交换量增大^[16]。

2.1.5 土壤有效磷的变化

由图 10 可看出,糠醛渣和生物炭均能显著提高土壤中有效磷的含量。一方面糠醛渣和生物炭 pH 值较低,施入土壤后能降低土壤酸度,伴随土壤酸度的降低有效磷的含量会显著增加^[32];另一方面糠醛渣和生物炭中有效磷含量较高,糠醛渣中的有效磷含量约是土壤的 40 倍(表 1),因此施入土壤后可以直接增加土壤有效磷的含量。5%生物炭可以提高 2~5 倍有效磷含量,而 5%的糠醛渣能提高土壤中 4~6 倍有效磷含量,从提高土壤有效磷含量的角度来说,生物炭改良作用要低于糠醛渣本身。由表 1 可知,糠醛渣在炭化过程中,尽管总磷含量增加了,但其有效磷含量却出现了下降,这说明糠醛渣在炭化过程中出现了磷的固定化现象,这与交换性 Ca^{2+} 在炭化过程中大幅升高的结果是一致的。炭化过程中大量活性 Ca^{2+} 的出现导致了有效磷含量的降低^[33]。

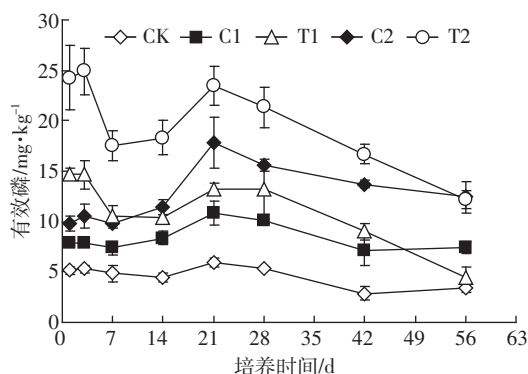


图 10 糠醛渣和生物炭对土壤有效磷的影响

Figure 10 Effects of furfural and its biochar additions on soil available P content

培养第 3 d 及第 28 d 后土壤中有效磷含量降低,这主要由于淋溶带走了大量的可溶性磷。5%糠醛渣处理培养第 7 d 取样土壤中有效磷含量降低了 30% (与第 3 d 相比)。随着培养时间的增加,土壤中有效磷有所升高(第 21 d 达到最高值),这可能是由于糠醛渣和生物炭对土壤磷有活化作用^[23]。

2.1.6 各处理土壤 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 的变化

由图 11 可知,各处理中 NH_4^+ -N 呈现先升高后降低的趋势,培养第 14 d 左右, NH_4^+ -N 浓度达到最高,可能由于淋溶使土壤含水量增加,使微生物活性增强,促进了土壤中有机氮的矿化^[34-36]。培养 14 d 后,土壤 NH_4^+ -N 浓度逐渐降低,试验末期 NH_4^+ -N 浓度减少

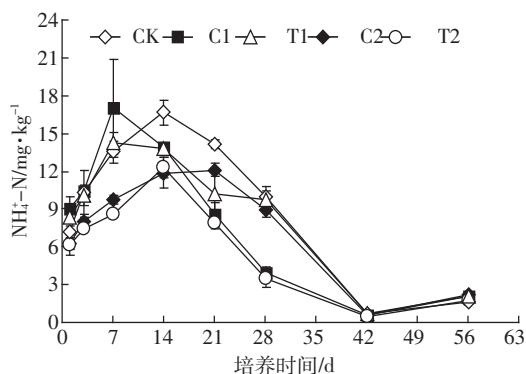


图 11 糠醛渣和生物炭对土壤 NH_4^+ -N 的影响

Figure 11 Effects of furfural and its biochar additions on soil NH_4^+ -N content

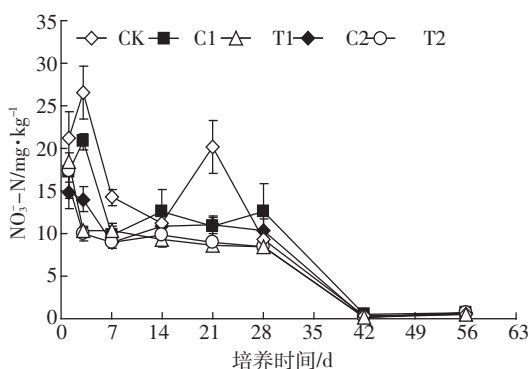


图 12 糠醛渣和生物炭对土壤 NO_3^- -N 的影响

Figure 12 Effects of furfural and its biochar additions on soil NO_3^- -N content

到 $2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下。一方面可能由于易矿化有机氮逐渐减少的缘故,另一方面土壤 pH 值升高使土壤中氨挥发增加^[37],再加上淋溶损失,因此试验后期 NH_4^+ -N 浓度较低。由图 12 可知,土壤中 NO_3^- -N 浓度在两次淋溶后都显著降低。第二次淋溶后,各处理 NO_3^- -N 含量降低 95% 以上,这说明土壤中 NO_3^- -N 易淋失^[38-39]。

由图 11 和图 12 可以看出,糠醛渣和生物炭加入未使土壤中无机氮的含量增加($P>0.05$)。这可能由于糠醛渣和生物炭加入土壤后, NH_4^+ -N 未完全被土壤胶体吸附,在 pH 值较高的土壤中极不稳定而挥发^[40],而且糠醛渣和生物炭中 NO_3^- -N 含量较低,所以均未对土壤无机氮含量产生影响。

2.2 糠醛渣及生物炭对土壤淋溶液的影响

由表 2 可知,第一次淋溶过程中,加入生物炭和糠醛渣的处理中淋出 NH_4^+ -N 浓度明显增加,且随着用量的增加而增大。第二次淋溶液中,各处理 NH_4^+ -N 浓度并无明显差异。随着淋溶次数增加,各处理淋出 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 浓度明显下降。加入 2.5% 生物炭处理,淋溶液中 NO_3^- -N 浓度从第一次淋溶的 $14.85 \text{ mg} \cdot$

表 2 各处理淋溶液中无机氮和有效磷的含量
Table 2 Inorganic N and available P in leaching solution

处理	第一次淋溶——培养第 3 d			第二次淋溶——培养第 38 d		
	氨氮/mg·L ⁻¹	硝氮/mg·L ⁻¹	有效磷/μg·L ⁻¹	氨氮/mg·L ⁻¹	硝氮/mg·L ⁻¹	有效磷/μg·L ⁻¹
土	0.41±0.15c	28.93±5.05c	65.25±6.21b	0.18±0.07b	2.22±1.92a	27.62±10.5b
土+2.5%炭	2.68±0.96ab	14.85±3.75d	73.45±3.59b	0.49±0.17a	0.6±0.37a	36.06±11.06b
土+2.5%渣	1.02±0.01c	61.13±3.69b	61.98±5.11b	0.26±0.09b	0.15±0.02a	25.58±7.66b
土+5%炭	2.94±0.28a	40.97±6.88c	88.47±7.51a	0.18±0.003b	0.54±0.57a	64.53±8.66a
土+5%渣	1.97±0.31b	80.34±9.08a	59.24±6.89b	0.2±0.09b	0.47±0.31a	18.66±3.71b

注:同一列中不同字母表示差异显著($P<0.05$)。
Note: Different letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level.

L⁻¹ 降到 0.6 mg·L⁻¹。糠醛渣和生物炭的加入并未减少无机氮的淋失,NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 等可溶性盐在受到降雨或灌溉时会溶出而流失。

两次淋溶过程中,生物炭处理中有效磷的淋出增加,且加入生物炭量越高,淋出浓度越大,这可能由于生物炭对有效磷持留能力较差,淋溶使生物炭中有效磷大量流失。糠醛渣处理有效磷的淋出量随着用量的增加而减少,说明糠醛渣加入对土壤有效磷的持留作用大于生物炭。

3 结论

(1)糠醛渣比生物炭更能降低土壤 pH 值,提高土壤中磷的活性及其利用率。5%生物炭可以提高 2~5 倍有效磷含量,而 5%的糠醛渣能提高土壤中 4~6 倍有效磷含量,这与糠醛渣较低的 pH 值密切相关。

(2)与糠醛渣相比,生物炭显著增加了土壤总有机碳含量,最大增幅达 62%。试验末期,加入 5%生物炭土壤碱化度为最初的 43%,比加入糠醛渣的土壤碱化度低,这与生物炭的多孔结构及交换性 Ca²⁺含量较高有关。虽然糠醛渣和生物炭的加入均增加了土壤可溶性盐含量,但生物炭的增幅较小,这说明糠醛渣炭化可降低改良过程中对土壤盐分增加的影响,这对改良盐渍土有积极的作用。

(3)糠醛渣和生物炭的加入均未使土壤中无机氮含量增加,这可能与氨氮的挥发和硝氮含量较低有关。加入生物炭并未使土壤中无机氮和有效磷的淋溶量减少,且生物炭对土壤阳离子交换量增幅也并不比糠醛渣大,随着生物炭的表面集团被氧化,其长期影响值得进一步关注。

参考文献:

[1] 董洪芳,于君宝,孙志高,等. 黄河口滨岸潮滩湿地植物-土壤系统有机碳空间分布特征[J]. 环境科学, 2011, 31(6): 1594-1599.

DONG Hong-fang, YU Jun-bao, SUN Zhi-gao, et al. Spatial distribution characteristics of organic carbon in the soil-plant systems in the Yellow River Estuary Tidal Flat Wetland[J]. *Environmental Science*, 2011, 31(6): 1594-1599.

[2] 白冰,陈效民,秦淑平. 黄河三角洲滨海盐渍土饱和导水率的研究[J]. 土壤通报, 2005, 36(3): 321-323.

BAI Bing, CHEN Xiao-min, QIN Shu-ping. Saturated hydraulic conductivity of seashore saline soil in Yellow River Delta[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(3): 321-323.

[3] Wang Z Y, Xin Y Z, Gao D M, et al. Microbial community characteristics in a degraded wetland of the Yellow River Delta[J]. *Pedosphere*, 2010, 20(4): 466-478.

[4] 秦嘉海,金自学,陈修斌,等. 含钾有机废弃物糠醛渣改土培肥效应研究[J]. 土壤通报, 2008, 38(4): 705-708.

QIN Jia-hai, JIN Zi-xue, CHEN Xiu-bin, et al. Effect of potassium containing organic offal furfural dreg on soil fertility[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 38(4): 705-708.

[5] 闫治斌,秦嘉海,王爱勤,等. 盐碱土改良材料对草甸盐土理化性质与玉米生产效益的影响[J]. 水土保持通报, 2011, 31(2): 122-127.

YAN Zhi-bin, QIN Jia-hai, WANG Ai-qin, et al. Effect of improvement materials on meadow saline soil properties and corn productive benefits [J]. *Bulletin of Soil Water Conservation*, 2011, 31(2): 122-127.

[6] 李茜,孙兆军,秦萍,等. 燃煤烟气脱硫废弃物和糠醛渣对盐碱土的改良效应[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(4): 70-73.

LI Qian, SUN Zhao-jun, QIN Ping, et al. Amelioration of saline-sodic soil with the by-product of flue gas desulphurization (BFGD) and furfural residue[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2008, 26(4): 70-73.

[7] 蔡阿兴,宋荣华,常运诚,等. 糠醛渣防治碱土及增产效果的初步研究[J]. 农业现代化研究, 1997, 18(4): 240-243.

[8] Demirbas A. Effects of temperature and particle size on bio-char yield from pyrolysis of agricultural residues[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2004, 72(2): 243-248.

[9] Van Zwieten L, Kimber S, Morris S, et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility [J]. *Plant and soil*, 2010, 327(1-2): 235-246.

[10] Kimetu J M, Lehmann J. Stability and stabilisation of biochar and green manure in soil with different organic carbon contents[J]. *Soil Research*, 2010, 48(7): 577-585.

- [11] Steiner C, Teixeira W G, Lehmann J, 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.
- [12] Wardle D A, Nilsson M C, Zackrisson O. Fire-derived charcoal causes loss of forest humus[J]. *Science*, 2008, 320(5876):629-629.
- [13] 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.
- [14] Warnock D D, Lehmann J, Kuyper T W, et al. Mycorrhizal responses to biochar in soil-concepts and mechanisms[J]. *Plant and soil*, 2007, 300(1-2):9-20.
- [15] Laird D, Fleming P, Wang B, et al. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil[J]. *Geoderma*, 2010, 158(3-4):436-442.
- [16] Lehmann J, Joseph S. Biochar for environmental management: Science and technology[M]. Routledge, 2009.
- [17] Busscher W J, Novak J M, Evans D E, et al. Influence of pecan biochar on physical properties of a Norfolk loamy sand[J]. *Soil Science*, 2010, 175(1):10-14.
- [18] Masulili A, Utomo W H, Syechfani M S. Rice husk biochar for rice based cropping system in acid soil 1. The characteristics of rice husk biochar and its influence on the properties of acid sulfate soils and rice growth in West Kalimantan, Indonesia[J]. *Journal of Agricultural Science*, 2010, 2(1):39-47.
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
LU Ru-kun. Analytical methods of soil agrochemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [20] So H B, Aylmore L A G. How do sodic soils behave—the effects of sodicity on soil physical behavior[J]. *Soil Research*, 1993, 31(6):761-777.
- [21] Yuan J H, Xu R K. The amelioration effects of low temperature biochar generated from nine crop residues on an acidic Ultisol[J]. *Soil Use and Management*, 2011, 27(1):110-115.
- [22] 罗毅, 胡顺军, 王兴繁, 等. 一种电导率指标测可溶性盐分含量新方法[J]. 土壤学报, 2012, 49(6):1257-1261.
LUO Yi, HU Shun-jun, WANG Xing-fan, et al. A new method to determine soil soluble salt using electrical conductivity index[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(6):1257-1261.
- [23] Lehmann J, da Silva Jr J P, Steiner C, et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: Fertilizer, manure and charcoal amendments[J]. *Plant and Soil*, 2003, 249(2):343-357.
- [24] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal: A review[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(4):219-230.
- [25] Deenik J L, McClellan T, Uehara G, et al. Charcoal volatile matter content influences plant growth and soil nitrogen transformations[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(4):1259-1270.
- [26] Keith A, Singh B, Singh B P. Interactive priming of biochar and labile organic matter mineralization in a smectite-rich soil[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(22):9611-9618.
- [27] 唐光木, 葛春辉, 徐万里, 等. 施用生物黑炭对新疆灰漠土肥力与玉米生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(9):1797-1802.
TANG Guang-mu, GE Chun-hui, XU Wan-li, et al. Effect of supplying biochar on the quality of grey desert soil and maize cropping in Xinjiang, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(9):1797-1802.
- [28] 高海英, 何绪生, 陈心想, 等. 生物炭及炭基硝酸铵肥料对土壤化学性质及作物产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(10):1948-1955.
GAO Hai-ying, HE Xu-sheng, CHEN Xin-xiang, et al. Effect of biochar and biochar-based ammonium nitrate fertilizers on soil chemical properties and crop yield[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(10):1948-1955.
- [29] 胡树森, 王淑洁. 增施糠醛渣改良岗瓦碱土壤的试验[J]. 土壤, 1987, (3):130-134.
- [30] Liang B, Lehmann J, Solomon D, et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(5):1719-1730.
- [31] Cheng C H, Lehmann J, Engelhard M H. Natural oxidation of black carbon in soils: Changes in molecular form and surface charge along a climosequence[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, 72(6):1598-1610.
- [32] Devau N, Hinsinger P, Le Cadre E, et al. Fertilization and pH effects on processes and mechanisms controlling dissolved inorganic phosphorus in soils[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(10):2980-2996.
- [33] Tunesi S, Poggi V, Gessa C. Phosphate adsorption and precipitation in calcareous soils: The role of calcium ions in solution and carbonate minerals[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1999, 53(3):219-227.
- [34] Stanford G, Epstein E. Nitrogen mineralization—water relations in soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1974, 38(1):103-107.
- [35] Wennman P, Katterer T. Effects of moisture and temperature on carbon and nitrogen mineralization in mine tailings mixed with sewage sludge[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2006, 35(4):1135-1141.
- [36] Powers R F. Nitrogen mineralization along an altitudinal gradient: Interactions of soil temperature, moisture, and substrate quality[J]. *Forest Ecology and Management*, 1990, 30(1):19-29.
- [37] Dancer W S, Peterson L A, Chesters G. Ammonification and nitrification of N as influenced by soil pH and previous N treatments[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1973, 37(1):67-69.
- [38] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
HUANG Chang-yong. Soil science[M]. Beijing: Chinese Agriculture Science Press, 2000.
- [39] Delgado J A. Quantifying the loss mechanisms of nitrogen[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 57(6):389-398.
- [40] 杨帆, 李飞跃, 赵玲, 等. 生物炭对土壤氮转化影响的研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(5):1016-1020.
YANG Fan, LI Fei-yue, ZHAO Ling, et al. Influence of biochar on the transformation of ammonia nitrogen in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(5):1016-1020.