

重度盐渍化湿地土壤酶活性对生物炭添加及浅翻处理的响应

田晓燕¹, 陆冠茹^{1,2}, 高楠^{1,2}, 杨锦媚^{2,3}, 于君宝⁴, 韩广轩², 管博^{2*}

(1. 吉林建筑大学 市政与环境工程学院, 吉林 长春 130118; 2. 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室(烟台海岸带研究所), 山东省海岸带环境过程重点实验室, 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台, 264003; 3. 河南理工大学 资源环境学院, 河南 焦作 454000; 4. 鲁东大学 滨海生态高等研究院, 山东 烟台 264025)

摘要:研究了生物炭添加及浅翻处理对黄河三角洲滨海湿地重度盐渍化湿地土壤的影响,分析了不同处理下的土壤酶活性以及土壤理化因子的变化,初步探讨了浅翻及生物炭添加对重度盐渍化土壤的短期改良效果。结果表明:与对照相比,单一的浅翻处理使土壤表层电导率提高,但浅翻处理并未显著改变土壤的容重、含水率和总碳含量。添加高量生物炭后可显著降低土壤容重,增加土壤表层孔隙度,土壤表层总碳、有机质含量均显著增加。浅翻处理不能提高酶活性,但配合中、高量生物炭的添加,可以显著提高蔗糖酶的活性。综合来看,短期内生物炭的添加对于重度盐渍化土壤有一定的改善作用,土壤酶活性有不同程度的提高。

关键词:盐渍化湿地;土壤容重;生物炭;碱性磷酸酶;蔗糖酶

中图分类号:S147.2 文献标识码:A 文章编号:0564-3945(2020)05-1189-07

DOI:10.19336/j.cnki.trtb.2020.05.24

田晓燕, 陆冠茹, 高楠, 杨锦媚, 于君宝, 韩广轩, 管博. 重度盐渍化湿地土壤酶活性对生物炭添加及浅翻处理的响应[J]. 土壤通报, 2020, 51(5): 1189-1195

TIAN Xiao-yan, LU Guan-ru, GAO Nan, YANG Jin-mei, YU Jun-bao, HAN Guang-xuan, GUAN Bo. Effect of Biochar Addition and Ploughing on Soil Enzyme Activities in Heavily Degraded Saline Wetland[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020, 51(5): 1189-1195

黄河三角洲滨海湿地地处黄河入海口,这里资源丰富,生境独特,以盐渍化湿地、芦苇沼泽、潮汐湿地和河漫滩等湿地类型为主^[1]。然而受河流、陆地、海洋等多种动力系统的作用的影响,生态环境脆弱,加之近年来黄河水沙量减少,气候因素导致区域降雨量严重低于土壤蒸发量,使土壤盐渍化程度加剧,重度退化“光板地”面积不断增加。土壤盐渍化严重制约了该区域经济社会的可持续发展。如何合理利用和保护黄河三角洲土壤资源、恢复并改良退化盐渍化土壤,成为各方关注的焦点^[2]。

现有的盐碱地改良技术,主要包括土壤化学改良、生物改良、工程改良及农业措施改良^[3]。近年来有研究发现^[4],土壤中施入花生壳生物炭可以显著提高土壤蔗糖酶和脲酶活性;胡华英^[5]等发现对人工杉木林土壤添加生物炭能提高土壤pH值、全磷、有效磷、速效钾等含量;Oleszczuk^[6]等研究发现土壤中添加生物炭能提高大部分酶的活性并保护酶活性与微生物,

但相关生物炭添加对重度盐渍化土壤的改良研究还比较少。土壤酶(如磷酸酶、脲酶等)作为土壤组份中最活跃的有机成分之一,参与土壤中各种化学反应和生物化学过程^[7],不仅是表征土壤物质能量代谢旺盛程度和评价土壤肥力高低的重要生物指标^[8-9],还是常用表征土壤环境质量及土壤生态系统变化的敏感指标^[10]。土壤容重、电导率、总氮(TN)、总碳(TC)、有机质(OM)等含量是土壤重要的理化因子,能够反映土壤质量和土壤生产力水平^[11]。本文通过分析土壤酶活性、土壤理化因子对不同生物炭添加量及浅翻等处理的响应,探讨生物炭添加措施对重度盐渍化土壤改良的效果,以为黄河三角洲重度盐渍化土壤的改良提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验地位于中国科学院黄河三角洲滨海湿地生

收稿日期:2020-02-01;修订日期:2020-09-17

基金项目:国家自然科学基金山东联合基金重点支持项目(U1806218)和黄河三角洲国家级自然保护区专项经费资助

作者简介:田晓燕(1965-),教授,硕士,主要研究方向为污水处理与湿地生态。E-mail:txy1317@163.com

* 通讯作者;E-mail: bguan@yic.ac.cn

态试验站(北纬 37°45'52", 东经 118°58'52")。该区域属于暖温带季风型大陆性气候, 四季分明, 年平均气温 12.2 °C, 无霜期 196 d, 年平均降水量为 609.5 mm, 降水集中于 7、8 月, 年均蒸发量 1962 mm^[12]。

选择的试验地为重度退化盐渍化湿地, 土壤盐分以 NaCl 为主, 旱季土壤表面会析出盐结皮, 实验初始(2018 年 5 月)测得土壤表层(0 ~ 10 cm)平均电导率为 17.90 ± 1.61 mS cm⁻¹。

1.2 试验设计及处理

田间小区试验于 2018 年 5 月初布置, 小区面积为 3 m × 3 m, 四周围起池埂(宽 50 cm)。试验共设五个处理: A(对照组, 无任何处理), B(浅翻 20 cm), C(浅翻 + 添加低量生物炭), D(浅翻 + 添加中量生物炭), E(浅翻 + 添加高量生物炭); 其中, 生物炭添加低量为 0.5 kg m⁻², 中量为 1 kg m⁻², 高量为 2 kg m⁻²。其中浅翻处理: 用小型手推式旋耕机将土壤表层约 20 cm 进行旋耕, 浅翻 + 生物炭添加处理: 均匀撒播相应浓度的生物炭到土壤表层, 然后用小型手推式旋耕机将土壤表层约 20 cm 进行旋耕, 确保添加的生物炭与表层土壤混匀。各处理完成后进行盐地碱蓬种子播种, 以 10 g m² 的密度均匀撒播到各样地。试验期间不进行浇水处理, 以自然降雨形式进行自然补水修复, 2018 年月降雨量如图 1 所示。每一处理重复 5 次, 小区随机排列。

1.3 采样方法及指标测定

样品的采集: 于 2018 年 8 月 25 日进行采样, 每个小区采用品字法采样 3 次, 每个样点采集 0 ~ 10 cm 土层, 将 3 次采集的样品混合作为 1 个重复, 5 个重复小区分别以同样的方式进行采样, 采样后迅速将土壤样品装入冰盒中带回实验室 4 °C 保存, 并在一周内进行土壤酶活性测定, 取部分样品放置阴凉处风干, 用于土壤理化因子测定。

土壤容重的测定: 采用环刀法在现场取样、取样深度为 0 ~ 10 cm, 样品带回实验室 105 °C 烘干, 称其干重后计算得出。

土壤含水率的测定: 采用烘干法测定。

土壤电导率的测定: 采用 2265FS 便携式土壤电导率原位测量仪进行土壤表层电导率测量, 探针测量深度约为土壤表层以下 5 cm。

土壤总碳、总氮含量测定: 将风干样品研磨, 过 100 目筛, 用元素分析仪 (Elementar Vario Macro, 德国) 进行测定。

土壤有机质测定: 取 1 g 过 100 目筛的风干土, 采用 1 mol L⁻¹ 盐酸与土壤充分混合, 去除土壤中的

无机碳, 待去除完全后将土壤进行烘干, 用元素分析仪 (Elementar Vario Macro, 德国) 进行测定土壤总有机碳, 土壤有机质与有机碳存在线性关系, 采用经验公式(土壤有机质 = 土壤有机碳 × 1.724) 进行换算得到土壤有机质含量^[13]。

土壤脲酶活性测定: 采用苯酚钠比色法^[13]。取过 2 mm 筛的土样 5 g 置于三角瓶中, 加入 1.5 ml 甲苯、20 ml 柠檬酸缓冲液 (pH 6.7) 和 1 ml 尿素溶液 (10%)。37 °C 恒温培养 24 h 后, 用滤纸过滤。取 1 ml 滤液置于 50 ml 容量瓶中, 加入 4 ml 苯酚钠溶液和 3 ml 次氯酸钠 (0.9%) 溶液, 放置 20 min 后定容, 用分光光度计于 578 nm 波长处比色。

土壤碱性磷酸酶活性测定: 采用磷酸苯二钠比色法^[13]。取过 2 mm 筛的土样 2 g 于三角瓶中, 加入 1.5 ml 甲苯、10 ml 0.02 M 磷酸苯二钠溶液和 10 ml 磷酸缓冲液 (pH 7.1)。样品于 37 °C 恒温培养 24 小时后, 用滤纸过滤。取 1 mL 滤液于 50 ml 容量瓶中, 加 1 ml 碱性溶液, 再加入 1 ml 0.5% 的铁氰化钾和 1 ml 0.3% 的 4-氨基安替吡啉溶液, 摇动, 仔细混匀, 这时溶液呈粉红色, 然后加水定容。待颜色稳定时 (20 ~ 30 min), 用分光光度计于 510 nm 波长处比色。

土壤蔗糖酶测定: 采用蔗糖水解比色法^[13]。取过 2 mm 筛的土样 5 g 置于三角瓶中, 加入 15 ml 8% 的蔗糖溶液、5 滴甲苯和 5 ml 磷酸缓冲 (pH 5.5)。37 °C 恒温培养 24 h 后, 取 1 ml 滤液加入 50 ml 容量瓶中, 加入 3 ml 3,5-二硝基水杨酸试剂, 于沸腾水浴中加热 5 min, 随后于流水下冷却 3 min, 用蒸馏水稀释、定容后用分光光度计于 508 nm 波长处比色。

1.4 数据处理

采用 Excel 2010, SPSS 24.0 进行数据处理、计算平均值, 用 Excel 2010 做表制图; 用最小显著差异法 (LSD) 检验处理间的差异性, 用 Pearson 双尾检验土壤性状间的相关性。显著水平均为 $P = 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 浅翻和生物炭添加对土壤理化性质的影响

与历年相比, 2018 年春季降雨量较多, 其中 4 月、5 月的降雨量约为 25.9 mm 和 98.9 mm (图 1), 对表层土壤盐分的控制起到了一定的促进作用。然而, 6 月、7 月的降雨量迅速下降, 同时气温升高, 使得土壤返盐现象加剧, 不利于植物正常生长。不同处理下土壤理化指标测定结果如表 1 所示。结果表明, 浅翻组 (B) 的电导率最高, 相比对照组 (A) 提高了 7.2%, 由图 2 可以看出, 浅翻样地土壤表层有明显的盐析出,

添加生物炭后(C、D、E)电导率有所下降,但效果不显著。与对照组(A)和浅翻组(B)相比,高量添加生物炭处理(E)下,土壤容重显著降低,降幅分别为 7.7%、5.6%;而含水率均有不同程度的提高,并差异显著,分别为 12.7%、14.6%。各处理下土壤中 TN 含量无明显变化。对于土壤中 TC、OM 含量,与对照组(A)相比,浅翻组(B)有所下降但不显著,高量生物炭处理(E)分别显著增加了 10.4%、10.3%;与浅翻组(B)相比,处理 E 分别显著增加了 19.5%、18.8%。

表 1 浅翻和生物炭添加对土壤理化性质的影响

Table 1 Effects of ploughing and biochar addition on physicochemical properties of soil

处理 Treatment	容重 Bulk density (g cm ⁻³)	含水率 Moisture content (%)	电导率 Electrical conductivity (mS cm ⁻¹)	TN Total nitrogen (mg g ⁻¹)	TC Total carbon (mg g ⁻¹)	OM Organic matter (mg g ⁻¹)
A	1.54 ± 0.03 a	24.31 ± 0.87 b	14.01 ± 1.41 b	0.36 ± 0.03 ns	14.52 ± 0.38 b	3.21 ± 0.56 b
B	1.51 ± 0.03 a	24.29 ± 0.66 b	17.64 ± 0.96 a	0.38 ± 0.04 ns	13.41 ± 0.28 b	2.98 ± 0.42 b
C	1.50 ± 0.03 ab	26.08 ± 0.75 ab	14.00 ± 1.33 b	0.32 ± 0.03 ns	13.71 ± 0.41 b	3.02 ± 0.69 b
D	1.50 ± 0.03 ab	24.79 ± 0.65 b	16.36 ± 0.64 ab	0.36 ± 0.04 ns	13.94 ± 0.39 b	3.08 ± 0.75 b
E	1.43 ± 0.02 b	27.84 ± 1.39 a	15.02 ± 1.40 ab	0.42 ± 0.03 ns	16.03 ± 0.82 a	3.54 ± 1.39 a

注:不同小写字母代表不同处理之间的显著差异。

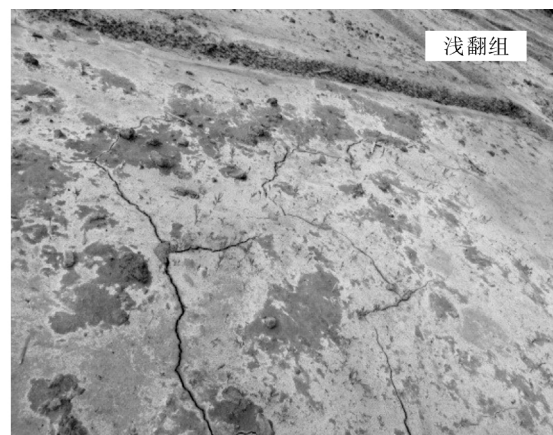
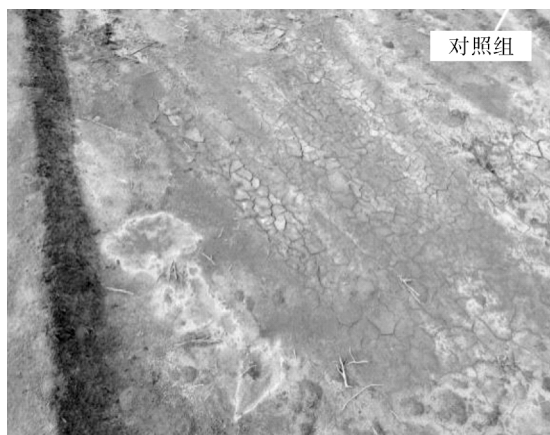


图 2 实验处理 2 个月(7 月)后对照组和浅翻组试验样地情况
Fig.2 Pictures of control and ploughing plots after 2 months of treatment

2.2 不同处理对土壤酶活性的影响

如图 3、图 4 所示,与对照组(A)相比,不同处理下脲酶活性均有一定程度提高,但尚未达到显著性差异;不同处理下磷酸酶活性呈先上升后下降的趋势,虽然在浅翻处理(B)最高,但无显著差异。从图 5 来看,浅翻处理(B)对于蔗糖酶活性无显著影响,但添加生物炭后,蔗糖酶活性有所提高,且差异显著。与对照组(A)相比,中量生物炭添加与浅翻处理后的酶活性(D)提高了 312.6%,高量生物炭添加与浅翻处理后的酶活性(E)提高了 769.5%;与浅翻处理(B)相比,中量生物炭添加与浅翻处理后的酶活性(D)提高了 219.8%,高量生物炭添加与浅翻处理后的酶活性(E)提高了 573.8%。

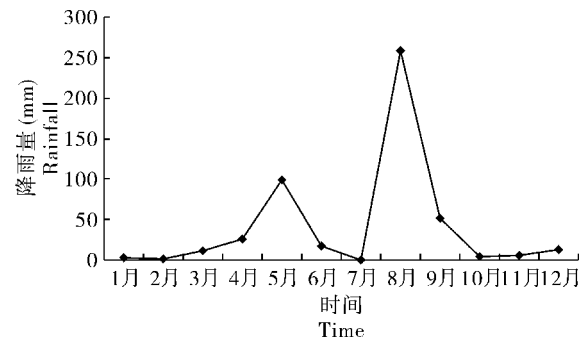
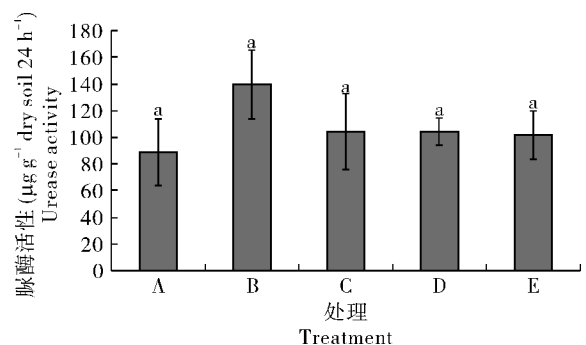


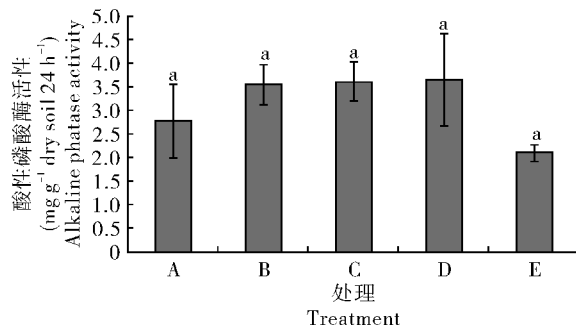
图 1 2018 年月平均降雨量
Fig.1 Monthly average rainfall in 2018



注:不同小写字母代表同一土层不同处理之间的差异显著。

图 3 不同处理下土壤脲酶活性变化

Fig.3 Dynamic changes of the urease activities in different treatments



注:不同小写字母代表同一土层不同处理之间的差异显著。

图 4 不同处理下土壤碱性磷酸酶活性变化

Fig.4 Dynamic changes of alkaline phosphatase activities in different treatments

2.3 土壤理化性质间的相关性

对土壤理化性质与酶活性进行皮尔逊相关性分析,如表 2 所示。蔗糖酶活性与土壤总碳($P = 0.01$)、

表 2 土壤理化性质与酶活性 Pearson 相关性分析

Table 2 Pearson correlations between soil physicochemical properties and enzyme activities

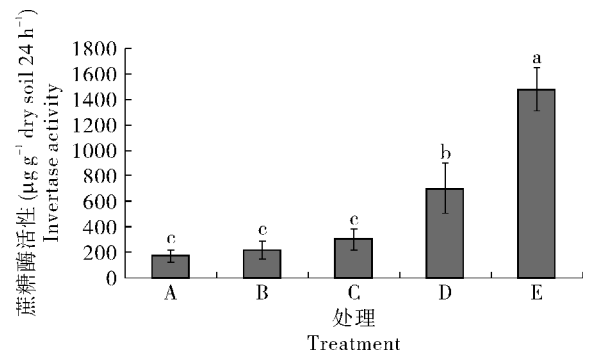
土壤指标 Soil indicator	脲酶活性 Urease activity ($\mu\text{g g}^{-1}$ dry soil 24 h ⁻¹)	碱性磷酸酶活性 Alkaline phosphatase activity (mg g^{-1} dry soil 24 h ⁻¹)	蔗糖酶活性 Invertase activity ($\mu\text{g g}^{-1}$ dry soil 24 h ⁻¹)
容重(g cm^{-3})	0.193 (0.429)	0.403 (0.078)	-0.398 (0.092)
含水率(%)	-0.032 (0.898)	-0.386 (0.093)	0.324 (0.176)
电导率(mS cm^{-1})	-0.070 (0.775)	0.091 (0.702)	0.036 (0.885)
总氮 (mg g^{-1})	0.185 (0.449)	-0.200 (0.398)	0.317 (0.186)
总碳(mg g^{-1})	0.049 (0.841)	-0.326 (0.161)	0.576** (0.010)
有机质(mg g^{-1})	0.056 (0.818)	-0.419 (0.066)	0.645** (0.003)

注:* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ 。

3 讨论

3.1 不同改良措施对土壤理化性质的影响

由于土壤本底基础较差,盐分较高,恢复较慢,盐地碱蓬植被的建植也并没有达到良好的效果,因此只进行了土壤理化指标及土壤酶活性的调查分析。与对照组(A)相比,浅翻处理(B)使土壤表层电导率显著升高($P < 0.05$),可能是因为浅翻使土壤表层物理结构改变,促进了土壤蒸腾作用,增加了土壤返盐速度,但对土壤其他性质未产生显著影响。配合生物炭的添加后,土壤性状逐步得到改良,特别是在高量生物炭添加处理(E)下,土壤容重明显下降,含水率、TC、OM含量明显上升。高量生物炭的添加直接增加了土壤中的碳含量、有机质含量,已有研究表明,生物炭表面含有的含氧官能团和胺基、羧基和酰胺基等基团^[20],可以有效减少养分淋失,增加土壤有机碳、有效磷、速效钾的含量,对土壤固碳具有促进作用^[21-24],也有研究表明,生物炭对土壤中的有机碳具有负激发效应,可以



注:不同小写字母代表同一土层不同处理之间的差异显著。

图 5 不同处理下土壤蔗糖酶活性变化

Fig.5 Dynamic changes of invertase activities in different treatments

有机质含量($P = 0.003$)呈显著正相关。脲酶活性、碱性磷酸酶活性与土壤理化性质的相关系数未达显著水平。

降低有机碳的矿化,使更多的有机碳留在土壤中^[25]。

生物炭表面积大、孔隙度大、容重小且远低于土壤容重的结构特征^[26,27],施入土壤必然改变原土样的孔隙状况,从而降低土壤容重^[28];降雨后,其良好的透气性、吸水性,能够提高土壤的保水能力^[29],田丹^[30]等人研究发现添加生物炭可以增加土壤的含水率,这一点在本研究中得到了证实,也表明添加生物炭可以从改变土壤物理性状的角度对重度盐渍化退化土壤进行改良。

3.2 不同土壤改良措施对土壤酶活性的影响

脲酶是一种酰胺酶,能够促进有机质分子中酰胺键的水解^[31],脲酶活性是表征土壤供氮能力的重要指标^[32]。碱性磷酸酶活性能够促进有机磷化合物的水解,提高适生植物种群对可利用态磷的利用^[33]。数据分析表明,虽然浅翻处理与生物炭添加对于土壤脲酶活性、碱性磷酸酶活性产生了一定程度的促进作用,但各处理间无显著差异,原因可能是由于实验样地本身具有一定的异质性,削弱了各处理之间的差异。

蔗糖酶通过水解蔗糖为微生物提供能量,参与土壤有机质的矿化与分解,对增加土壤中易溶性营养物质起着重要的作用^[34]。处理 A 的蔗糖酶活性最低,浅翻处理(B)也并未对其明显提升,添加生物炭后,随着生物炭添加量的增加而提高,在中(D)、高(E)量生物炭添加体现出显著差异,可知生物炭的添加对于提高蔗糖酶活性的效果显著。蔗糖酶活性与土壤中的腐殖质、水溶性有机质黏粒含量及微生物的数量及其活动成正相关^[31],而添加生物炭能明显的改变微生物数量^[35],其增幅随用量的增加而增大^[16],从而影响蔗糖酶的活性。另一方面,蔗糖酶参与碳分解,而生物炭中有大量稳定的碳元素^[37],添加生物炭增加了土壤中碳的含量^[38],

提高了土壤 C/N,增加酶促基质^[39],相关性分析也表明,蔗糖酶的活性与 TN、OM 含量呈极显著正相关,因此添加高量的生物炭可以提高蔗糖酶活性。通过对国内不同试验区开展的生物炭添加实验整理分析(表3),我们发现不同试验地生物炭添加对土壤酶活性的影响具有差异性,如陈心想等^[16]在褐土农业试验田添加生物炭发现,脲酶活性明显提高,但碱性磷酸酶与蔗糖酶活性无显著变化;而潘全良等^[19]在花生田中添加生物炭结果表明,脲酶活性无明显改变,蔗糖酶活性显著提高,这些差异可能是由于各试验田间土壤条件不同而产生。

表 3 生物炭添加对不同试验区土壤酶活性的影响

Table 3 The effects of biochar addition on soil enzymes of different experimental field

实验地点 Experimental site	脲酶活性 Urease activity ($\mu\text{g g}^{-1}$ dry soil 24 h ⁻¹)	碱性磷酸酶活性 Alkaline phosphatase activity (mg g^{-1} dry soil 24 h ⁻¹)	蔗糖酶活性 Invertase activity ($\mu\text{g g}^{-1}$ dry soil 24 h ⁻¹)	参考文献
黄河口自然保护区芦苇湿地	降低	-	-	[14]
鹤山丘陵地红壤试验站	提高	-	提高	[15]
西北农林科技大学褐土农业试验田	提高	无明显变化	无明显变化	[16]
东台滨海防护林林场	降低	-	提高	[17]
内蒙古盐碱地	提高	-	提高	[18]
沈阳农业大学花生田试验基地	无明显变化	-	降低	[19]
黄河三角洲滨海重度盐渍化湿地	无明显变化	无明显变化	提高	本研究

综合本研究结果,浅翻与生物炭添加对于不同酶活性的影响程度有所差异,仅进行浅翻处理不能提高酶活性,添加中、高量生物炭可以显著提高蔗糖酶的活性,但对脲酶、碱性磷酸酶的活性作用尚未达到显著的促进作用。单一的浅翻处理并未明显改善土壤理化性状,但在浅翻与高量生物炭的综合处理下,土壤的容重明显下降,含水率、TN、TC、OM 含量显著增加。最后,由于本研究的改良处理尚处于初始阶段(短期效应),盐地碱蓬植被第一年的恢复效果不明显,后续将从土壤、植被等多方面综合评估不同改良方式对重度盐渍化退化湿地的综合效果。

参考文献:

[1] 王永丽,于君宝,董洪芳,等. 黄河三角洲滨海湿地的景观格局空间演变分析[J]. 地理科学, 2012, 32(6): 717 - 724.

[2] 王卓然,赵庚星,高明秀,等. 黄河三角洲垦利县夏季土壤水盐空间变异及土壤盐分微域特征[J]. 生态学报, 2016, 36(4): 1040 - 1049.

[3] 郭圣浩. 盐碱地改良技术研究现状与新发展 [J]. 山西水土保持科技, 2019(4): 4 - 6.

[4] 周震峰,王建超,饶潇潇. 添加生物炭对土壤酶活性的影响[J]. 江西农业学报, 2015, 27(6): 110 - 112.

[5] 胡华英,殷丹阳,曹升,等. 生物炭对杉木人工林土壤养分、酶活性及细菌性质的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(11): 4138 - 4148.

[6] OLESZCZUK P, JOŠKO I, FUTA B, et al. Effect of pesticides on microorganisms, enzymatic activity and plant in biochar-amended soil[J]. Geoderma, 2014, 214 - 215: 10 - 18.

[7] VERES Z, KOTROCZÓ Z, FEKETE I, et al. Soil extracellular enzyme activities are sensitive indicators of detrital inputs and carbon availability[J]. Applied Soil Ecology, 2015, 92: 18 - 23.

[8] 陈慧,郝慧荣,熊君,等. 地黄连作对根际微生物区系及土壤酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 12: 2755 - 2759.

[9] BENÍTEZ E, MELGAR R, SAINZ H, et al. Enzyme activities in the rhizosphere of Pepper (*Capsicum annum*, L.) grown with olive cake mulches [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32 (13): 1829 - 1835.

[10] 陈琳. 沈北新区不同用地类型土壤酶活性及其影响因素研究[D]. 沈阳大学, 2018.

[11] 柴华,何念鹏. 中国土壤容重特征及其对区域碳储量估算的意义[J]. 生态学报, 2016, 36(13): 3903 - 3910.

[12] 宋德彬,于君宝,王光美,等. 1961 ~ 2010 年黄河三角洲湿地地区年平均气温和年降水量变化特征[J]. 湿地科学, 2016, 14(02): 248 - 253.

[13] 鲍士旦. 土壤农化分析 (第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.

[14] 常晶晶. 生物炭、天然生物物质和有机氮肥对黄河三角洲滨海湿地土壤有机氮矿化的影响[D]. 中国海洋大学, 2015.

[15] PAZFERREIRO J, FU S, MENDEZ A, et al. Interactive effects of biochar and the earthworm *Pontoscolex corethrurus* on plant productivity and soil enzyme activities [J]. Journal of Soils and Sediments, 2014, 14(3): 483 - 494.

- [16] 陈心想, 耿增超, 王 森, 等. 施用生物炭后壤土土壤微生物及酶活性变化特征[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(04): 751 - 758.
- [17] 徐 瑾, 王 瑞, 邓芳芳, 等. 施用生物炭对东台沿海杨树人工林土壤理化性质及酶活性的影响[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2020, 49(03): 348 - 353.
- [18] 黄 哲, 曲世华, 白 岚, 等. 不同秸秆混合生物炭对盐碱土壤养分及酶活性的影响[J]. 水土保持研究, 2017, 24(4): 290 - 295.
- [19] 潘全良, 宋 涛, 陈 坤, 等. 连续 6 年施用生物炭和炭基肥对棕壤生物活性的影响[J]. 华北农学报, 2016, 31(3): 225 - 232.
- [20] 郑华楠, 宋 晴, 朱 义, 等. 芦苇生物炭复合载体固定化微生物去除水中氨氮[J]. 环境工程学报, 2019, 13(2): 310 - 318.
- [21] 刘凯传. 混合基生物炭的制备及其土壤改良固碳作用研究[D]. 山东农业大学, 2018.
- [22] FENG Y, XU Y, YU Y, et al. Mechanisms of biochar decreasing methane emission from Chinese Paddy soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 46: 80 - 88.
- [23] LEHMANN J, RILLIG M C, THIES J, et al. Biochar effects on soil biota—A review [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(9): 1812 - 1836.
- [24] EZAWA T, YAMAMOTO K, YOSHIDA S. Enhancement of the effectiveness of indigenous arbuscular mycorrhizal fungi by inorganic soil amendments [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2002, 48(6): 897 - 900.
- [25] 张 倩, 刘冰洁, 余 璐, 等. 生物炭对滨海湿地盐碱土壤碳氮循环的影响[J]. 自然资源学报, 2019, 34(12): 2529 - 2543.
- [26] 李怡安, 胡华英, 周垂帆. 浅析生物炭对土壤碳循环的影响[J/OL]. 内蒙古林业调查设计, 2019, 05: 102 - 104.
- [27] NOVAK J M, BUSSCHER W J, LAIRD D L, et al. Impact of Biochar Amendment on Fertility of a Southeastern Coastal Plain Soil [J]. *Soil Science*, 2009, 174(2): 105 - 112.
- [28] 中国农业百科全书总编辑委员会植物病理学卷编辑委员会. 中国农业百科全书[M]. 北京: 中国农业出版社, 1986.
- [29] 张新学, 张国辉, 郭鑫年, 等. 生物炭对宁南山区不同质地土壤水分分蓄能力的影响[J]. 现代农业科技, 2016, 19: 183 - 184.
- [30] 田 丹, 屈忠义, 勾芒芒, 等. 生物炭对不同质地土壤水分扩散率的影响及机理分析[J]. 土壤通报, 2013, 44(6): 1374 - 1378.
- [31] 李凤霞, 王学琴, 郭永忠, 等. 宁夏引黄灌区不同盐化程度土壤酶活性及微生物多样性研究[J]. 水土保持研究, 2013, 20(01): 61 - 65.
- [32] 刘宇彤, 霍瑞阳, 李志国, 等. 不同处理方式对土壤酶活性的影响[J]. 森林工程, 2019, 35(2): 21 - 26.
- [33] 舒世燕, 王克林, 张 伟, 等. 喀斯特峰丛洼地植被不同演替阶段土壤磷酸酶活性[J]. 生态学杂志, 2010, 29(9): 1722 - 1728.
- [34] 张 艺, 赵 远, 张玉虎, 等. 生物炭及炭基缓释肥对土壤酶活性的影响[J/OL]. 江苏农业科学, 2019, 47(14): 321 - 326.
- [35] 蓝兴福, 王晓彤, 许旭萍, 等. 炉渣与生物炭施加对稻田土壤碳库及微生物的后续影响[J/OL]. 生态学报, 2019, 21: 1 - 9.
- [36] 陈心想, 耿增超, 王 森, 等. 施用生物炭后壤土土壤微生物及酶活性变化特征[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(4): 751 - 758.
- [37] 张旭东, 梁 超, 诸葛玉平, 等. 黑碳在土壤有机碳生物地球化学循环中的作用[J]. 土壤通报, 2003, 34(4): 349 - 355.
- [38] 郭 茹, 洪坚平. 生物炭腐植酸对盆栽油菜铬污染土壤化学性状及铬含量的影响[J]. 华北农学报, 2019, 34(5): 192 - 200.
- [39] 高文慧, 郭宗昊, 薛 晨, 等. 生物炭及炭基肥对大豆土壤酶活性的影响[J]. 淮北师范大学学报(自然科学版), 2020, 41(1): 48 - 53.

Effect of Biochar Addition and Ploughing on Soil Enzyme Activities in Heavily Degraded Saline Wetland

TIAN Xiao-yan^{1,2}, LU Guan-ru^{1,2}, GAO Nan^{1,2}, YANG Jin-mei^{2,3},
YU Jun-bao⁴, HAN Guang-xuan², GUAN Bo^{2*}

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, China; 2. Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation / Shandong Key Laboratory of Coastal Environmental Processes, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 3. School of Resource and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 4. The Institute for Advanced Study of Coastal Ecology, Ludong University, Yantai 264025, China)

Abstract: The effects of biochar adding and ploughing on heavily salinized soil were studied in the coastal wetland of the Yellow River Delta. The changes of soil physio-chemical parameters and soil enzyme activities were analyzed under different treatments, and the improvement effects of ploughing and biochar addition on severely salinized soil were discussed. Compared with the control group, the ploughing treatment increased the soil surface conductivity, but did not significantly change the soil bulk density, water content and total carbon content. However, the high amount of biochar adding treatment significantly reduced the soil bulk density, and increased total carbon and organic matter content. The activity of sucrase did not significantly changed by ploughing treatment, but after adding the medium or high amount of biochar, the activity of sucrose increased significantly. In conclusion, biochar addition could increase soil enzymes in a short time, which could be helpful for soil improvement of heavily degraded saline wetland.

Key words: Saline wetland; Soil bulk density; Biochar; Alkaline phosphatase activities; Invertase activities

[责任编辑:张玉玲]