

张继宁, 周 胜, 李广南, 等. 秸秆生物炭对水稻生长及滩涂土壤化学性质的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(6): 492-499.

ZHANG Ji-ning, ZHOU Sheng, LI Guang-nan, et al. Improving the coastal mudflat soil chemical properties and rice growth using straw biochar[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(6): 492-499.

秸秆生物炭对水稻生长及滩涂土壤化学性质的影响

张继宁^{1,2}, 周 胜^{1,2*}, 李广南³, 孙会峰^{1,2}

(1.上海市农业科学院生态环境保护研究所, 上海 201403; 2.上海低碳农业工程技术研究中心, 上海 201415; 3.湖南科技学院化学与生物工程学院, 湖南 永州 425100)

摘 要:为改善滨海滩涂土壤结构和性质,提高其保肥供肥能力。本研究单施秸秆生物炭,并按滩涂土壤湿质量的5%、10%、15%和20%的比例将生物炭与滩涂土壤混匀,连续两年考察一次性施用生物炭以及生物炭改良滩涂土壤的效果。调查了两个稻季的水稻产量和谷草比,并监测了两个稻季土壤性质的动态变化。结果表明:适宜地添加秸秆生物炭增加了水稻产量、提高了谷草比;增加了土壤电导率(EC)和阳离子交换量(CEC);提高了土壤碳、氮含量,但在稻季休闲期,土壤中碳、氮会发生矿化而引起碳、氮含量减少;生物炭的添加对滩涂土壤pH没有显著影响。研究表明,滩涂土壤施加秸秆生物炭可以改善土壤结构,培肥地力,在消化大量农作物秸秆的同时为粮食产区的发展分担压力。

关键词:滩涂土;秸秆生物炭;水稻;土壤培肥;矿化

中图分类号:S153

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2018)06-0492-08

doi: 10.13254/j.jare.2017.0332

Improving the coastal mudflat soil chemical properties and rice growth using straw biochar

ZHANG Ji-ning^{1,2}, ZHOU Sheng^{1,2*}, LI Guang-nan³, SUN Hui-feng^{1,2}

(1.Institute of Eco-environmental Protection Research, Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201403, China; 2.Shanghai Engineering Research Center of Low-carbon Agriculture, Shanghai 201415, China; 3.College of Chemistry and Bioengineering, Hunan University of Science and Technology, Yongzhou 425100, China)

Abstract: In this research, straw biochar was added to the coastal mudflat soil in amounts of 5%, 10%, 15% or 20% (m/m, wet weight) to improve soil fertility. The rice grain yield and the grain-straw ratio were recorded for two years. And the soil properties were also investigated to evaluate the effects of biochar on rice plant growing and soil properties. The results showed that the rice grain yield and the grain-straw ratio were increased with the appropriate biochar amount amended. Straw biochar also increased soil electrical conductivity (EC) and cation exchange capacity (CEC). The contents of soil total carbon and soil nitrogen were improved with biochar amended comparing with that of control although their values decreased due to mineralization during soil fallow. No significant effects of biochar were obtained on soil pH. It is an environmental friendly approach to improve coastal mudflat soil fertility using straw biochar as it has the ability of carbon immobilization and improvement of soil fertility.

Keywords: coastal mudflat soil; straw biochar; rice; soil fertilization; mineralization

近50年来,滩涂围垦作为实现“耕地占补平衡”的有效手段得到了迅速发展。上海市在沿海滩涂采用围垦-促淤-围垦等有效的拦沙造地方式,圈围滩

涂土地面积达 $6.0 \times 10^4 \text{ hm}^2$,占全市土壤资源15.4%^[1]。长江流域的滩涂土壤不同于其他地区,这类滩涂土壤的pH在7.4~8.5左右^[2],因长期受海水浸渍,盐分组成以氯化物为主。土壤多为砂质土壤,基本无结构、孔隙率低、保肥供肥能力较差,经过三年改良的滩涂土壤颗粒在0.025~0.05 mm之间(上海市奉贤区)^[3]。因此增加有机质为主导的土壤培肥是这类滩涂土壤改良的关键,而如何获得廉价优质的有机肥是滩涂土壤

收稿日期:2017-12-23 录用日期:2018-03-07

基金项目:国家自然科学基金项目(41601315, 41375157);国家科技支撑计划课题(2013BAD11B02)

作者简介:张继宁(1978—),女,内蒙古兴安盟人,主要从事土壤改良及固体废物处理与资源化研究。E-mail: j.n.zhang@163.com

*通信作者:周 胜 E-mail: zhoust@263.net

改良的一个限制因素。

我国每年产生的秸秆达到7.0亿t以上^[4],秸秆的就地焚烧不但增加了温室效应,而且污染空气和水体,乃至成为季节性的生态环境灾难。但植物秸秆是可再生资源的原料^[5],而且基本不含重金属等有害物质,如将其加工成生物炭再施入农田,既可以改善土壤功能和促进土壤生态系统发育,也可以提高循环利用的安全性^[6-7]。迄今有关植物秸秆的报道较多地集中在其对作物产量的影响^[8-10]和对温室气体减排的效果方面^[11-13],而利用生物炭改良滩涂土壤的研究数量不多。张瑞等^[1]曾报道生物竹炭对滩涂土壤的改良效果,其采用的小白菜盆栽试验表明,1.5 t·hm⁻²的竹炭施用量显著增加了小白菜产量并提高了土壤的阳离子交换量(CEC);刘鸿骄等^[14]以绿豆为供试作物,发现施用芦苇秸秆炭相比其秸秆直接还田降低了土壤的呼吸强度。水稻是长江流域的主要种植作物,而且水田具有降盐作用,将秸秆生物炭应用于东南沿海低产滩涂土壤,探讨其对水稻的增产和土壤改良效果,对解决上海市土地资源不足和有机废弃物料难以处理的问题有参考意义。

目前,农民在滩涂土壤上种植作物之前,会增施有机肥并将上一茬作物秸秆粉碎还田。比如,上海市东滩滩涂每年在水稻收获后,水稻秸秆还田量6.8 t·hm⁻²、有机肥基施13.2 t·hm⁻²以及腐植酸类肥料2.3 t·hm⁻²^[15]。江苏省东台地区的滩涂土壤,每年秸秆还田10 t·hm⁻²,有机肥施用20 t·hm⁻²^[16]。Bai等^[17]研究发现75~600 t·hm⁻²的生活污泥用量提高了滩涂土壤的养分含量。一般来说,生物炭在土壤中的施用量不超过5%,但低剂量生物炭的施用对养分贫瘠及水田土壤的改良基本无影响^[18]。本研究为考察生物炭对滩涂土壤性质的影响,在没有秸秆还田和增施有机肥的基础上,将秸秆生物炭一次性大剂量地混施在滨海滩涂土壤中,通过连续两年的水稻盆栽监测试验,探讨了秸秆生物炭用量对滩涂土壤pH、电导率(EC)、土壤碳/氮含量、土壤CEC和土壤养分的影响,分析了水稻产量和谷草比对生物炭不同用量的响应规律,试图为科学合理地施用生物炭并维持滩涂土壤改良的效果提供理论依据和应用参数。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

滨海滩涂土壤取自上海市奉贤区海湾农场(30°53'24"N,121°23'15"E),该农场已经围垦10年。该

区属亚热带湿润季风气候,降水量主要集中在6—8月份。该土壤主要种植作物为水稻、小麦和大麦,一般是水稻—小麦(大麦)轮作。取样区地下水位较高,海水经常倒灌。取样深度为0~30 cm,土样取回后充分混匀。供试生物炭为水稻秸秆生物炭,热解温度为500~600℃,土壤和生物炭的常规理化性质见表1。

表1 滩涂土壤和秸秆生物炭的理化性质

Table 1 Physico-chemical properties of experimental materials

性质 Properties	滩涂土 Coastal mudflat soil	秸秆生物炭 Straw biochar
含水率/%	81.1±2.5	3.5±0.1
pH	7.6±0.2	8.0±0.2
EC/μS·cm ⁻¹	200.0±10.0	5 910.0±100.0
总碳/%	1.3±0.1	62.6±2.6
总氮/%	0.03±0.00	0.72±0.00
C/N	38.2	86.9
CEC/cmole ⁺ ·kg ⁻¹	11.9±0.3	40.4±1.2
水溶性NO ₃ ⁻ /mg·kg ⁻¹	1.0±0.0	10.0±0.0
水溶性PO ₄ ³⁻ /mg·kg ⁻¹	1.6±0.2	1 090.0±30.0
水溶性K ⁺ /mg·kg ⁻¹	64.5±5.4	20 600.0±590.0

1.2 试验方法

2015年6月至2016年10月,试验在上海市农业科学院庄行试验基地进行。所用试验箱体积为90 L(长57 cm、宽39 cm、高40 cm),每个试验箱装土35.0 kg(土层高20 cm)。2015年6月将秸秆生物炭以5%、10%、15%和20%的添加比例(生物炭质量/滩涂土湿质量)与滩涂土壤充分混匀,4个处理分别记为C-5、C-10、C-15和C-20;以不添加秸秆生物炭的滩涂土壤为对照,记为CK。滩涂土壤和生物炭的均匀混合物经过泡水后,施用尿素0.75 t·hm⁻²和复合肥0.37 t·hm⁻²(参照当地施肥标准)。复合肥购自天源农化国际有限公司,登记号为FS15NPK0030,其中N、P₂O₅、K₂O的比例相同,分别为16:16:16。

2015年6月25日在每试验箱内移栽4株水稻幼苗(花优14),株高30 cm,分蘖数为3,于10月水稻成熟收获后土壤进行休闲。2016年7月不再施入生物炭,将上一季水稻根系残茬翻入土壤中,经过泡水和施肥(施肥品种和施肥量同2015年)后将水稻幼苗4株(花优14)移栽入箱,株高30 cm,分蘖数为3,并于10月收获。

1.3 样品采集和分析方法

水稻产量和谷草比的测定方法:分别剪断每个试验箱内的4株水稻植株后,装入大信封带回实验室放入烘箱,在75℃条件下烘干至恒质量。将水稻穗剪下测定质量,水稻穗质量与水稻植株(去除水稻穗)质

量之比为谷草比。水稻穗脱粒,其籽粒质量除以85%记为水稻产量。

分别在2015年和2016年水稻种植前,水稻生长1、2、3个月,及水稻收获时采集土壤样品,每季采集5次,两季共计10次。采样深度为20 cm,同一个试验箱内随机选取5个点取样并重复测定。土壤样品经风干过2 mm筛。

土壤样品和生物炭样品的测定方法:按水土比5:1加入去离子水,水平振荡6 h后得浸提液,分别使用pH计(PB-21, Sartorius AG, 德国)和电导率仪(DDSJ-318, 精科, 中国)测定土壤浸提液的pH和EC。土壤水浸提液中的 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 和 K^+ 含量采用离子色谱仪(930 Compact IC Flex, Metrohm, 瑞士)测定。将过2 mm筛的土样,采用醋酸铵交换-火焰分光光度法测定土壤CEC^[19]。2 mm风干土样经粉碎研磨过100目筛后,采用元素分析仪(Vario EL cube, Elementar, 德国)测定土壤中总碳(TC, %)和总氮(TN, %)含量。2 mm风干土样经过HCl浸提振荡,再经过粉碎研磨过100目筛后,采用元素分析仪(Vario EL cube, Elementar, 德国)测定土壤总有机碳(%)含量^[20]。

1.4 数据处理

采用SPSS 16.0和Origin软件进行数据处理和绘图。所有的结果均采用测定结果的平均值表示,不同处理之间的多重比较采用最小显著差数法(LSD, $P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 水稻产量和谷草比的变化

2015年和2016年水稻产量结果如图1所示。2015年CK、C-5、C-10、C-15和C-20处理的产量分别为4364、4456、5858、5633 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和4599 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, C-10和C-15处理的水稻产量较高,较CK增产29.1%和34.2%。生物炭施入少的C-5处理和生物炭施入多的C-20处理,其水稻产量与对照差异不大。2016年CK、C-5、C-10、C-15和C-20处理的产量分别为2235、3024、3121、3542 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和4573 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。从结果看,随着秸秆生物炭的施入量增加,水稻产量呈逐渐增加趋势,添加生物炭的水稻产量较CK增产35.3%~104.6%。

2015年和2016年水稻谷草比的结果如图2所示。2015年CK、C-5、C-10、C-15和C-20的谷草比分别为0.87、0.76、1.11、0.95和0.73, C-10和C-15处理的水稻谷草比较高,比当季CK处理增加9.2%和

27.6%。2016年CK、C-5、C-10、C-15和C-20处理的谷草比分别为0.77、0.91、0.86、1.23和1.18,且随着秸秆生物炭的施入量增加,水稻谷草比呈逐渐增加趋势,添加生物炭处理的水稻谷草比较当季CK处理增加11.7%~59.7%。

2015年和2016年的试验结果表明,水稻产量的变化趋势与谷草比的变化趋势一致。2016年水稻产量低于2015年的外在原因是:该试验基地2015年稻季平均温度24.1℃、总降雨量695.4 mm,而2016年稻季平均温度26.5℃、总降雨量为403.8 mm,而且降水主要集中在后期,影响了抽穗期后干物质的积累,从而影响了2016年水稻的生物量和稻谷产量。

2.2 土壤总碳、总有机碳和总氮的变化

连续两季水稻栽种后,不同处理不同时期滩涂土壤样品的总碳含量变化如图3所示,图中的间隔符表示两季之间的土壤休闲期。对于CK来说,2015年水稻生长期间土壤总碳含量在1.3%~1.4%之间,土壤在休闲期的碳含量保持不变。而在2016年试验结束后土壤碳含量略增加到1.6%。由于生物炭自身总碳含

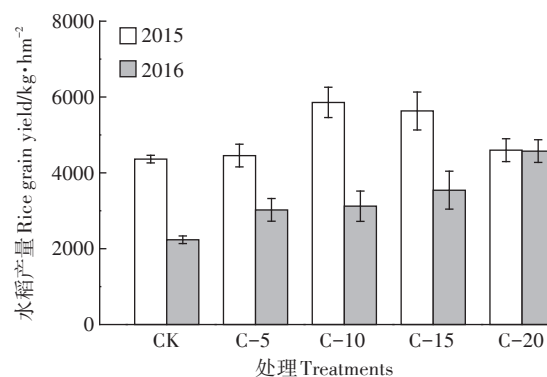


图1 连续两年不同处理的水稻产量

Figure 1 Rice grain yield for different treatments

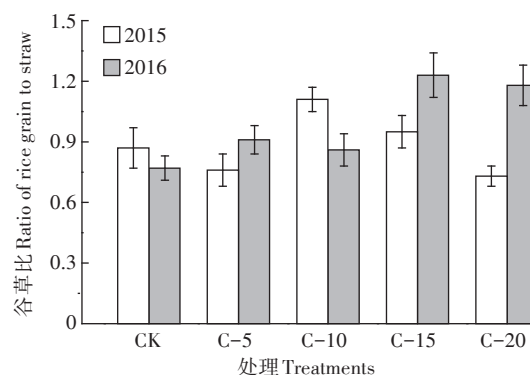
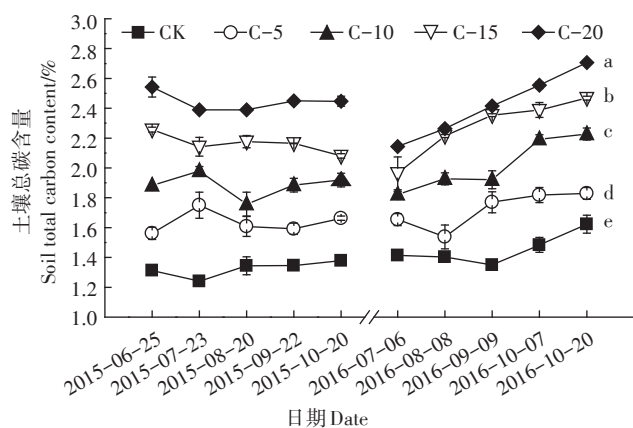


图2 连续两年不同处理的谷草比

Figure 2 Ratios of rice grain to straw for different treatments

量较高,所以生物炭处理的土壤样品中碳含量较高,最初混入炭后表现为C-20(2.5%)>C-15(2.3%)>C-10(1.8%)>C-5(1.5%),2016年水稻收获后表现为C-20(2.7%)>C-15(2.5%)>C-10(2.2%)>C-5(1.8%)。统计结果表明5个处理之间差异达到了5%显著水平。2015年水稻生长期间,各处理总碳含量随时间的变化差异不大,可能因为土壤处于淹水条件下,还原性较强,其中有机物的分解较为缓慢^[20]。土壤经8个月休闲,生物炭施入少的C-5处理中的总碳含量变化不大,而施入多的C-10、C-15和C-20处理的土壤样品中总碳含量明显下降,且随着生物炭的用量增加,下降幅度从5.4%增大至12.4%。

表2列出了不同处理不同时期滩涂土壤样品的有机碳含量,约占土壤总碳含量的50%~60%。从表2



不同小写字母表示不同处理差异达显著水平($P<0.05$)。下同
Different letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below

图3 连续两季水稻栽培后土壤总碳含量的变化

Figure 3 The changes of soil carbon contents for different treatments in 2015 and 2016

可以看出,连续两季水稻栽培后,各处理土壤中的有机碳含量基本没有变化;生物炭处理的土壤有机碳含量较高,统计结果表明5个处理之间差异达到了5%显著水平。这也说明了休闲期间土壤中碳含量减少主要是因为无机碳发生了矿化作用。

不同处理不同时期滩涂土壤样品的总氮含量变化如图4所示,图中的间隔符表示两季之间的土壤休闲期。2015年水稻生长期间,CK的土壤氮含量呈增加趋势,由最初的0.03%增加到0.07%,这种增加趋势与施氮肥有关^[9]。土壤经休闲之后,氮含量显著下降,由0.07%降低至0.05%。2016年第二季水稻种植期间,土壤样品中的氮含量变化差异不大。对于添加生物炭处理来说,其变化趋势与CK处理相似,但由于生物炭自身氮含量为0.7%,所以随着生物炭用量的增加,各处理的氮含量也相应地增加。统计结果表明5个处理之间差异达到了5%显著水平。

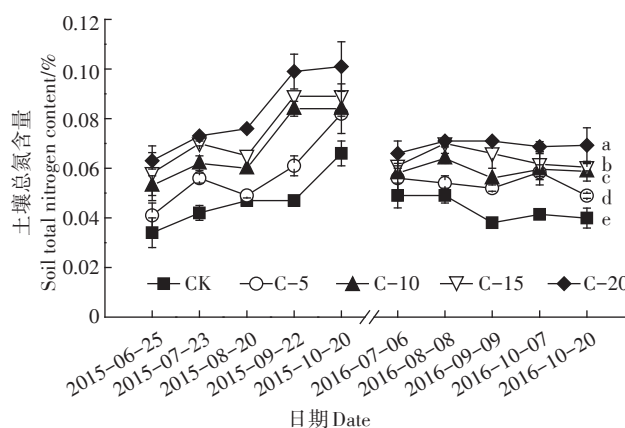


图4 连续两季水稻栽培后土壤总氮含量的变化

Figure 4 The changes of soil nitrogen contents for different treatments in 2015 and 2016

表2 水稻生长期间土壤总有机碳的变化

Table 2 The changes of soil organic carbon contents for different treatments in 2015 and 2016

取样时间 Date	CK	C-5	C-10	C-15	C-20
2015-06-25	0.35±0.01	0.68±0.20	0.84±0.07	0.95±0.07	1.22±0.22
2015-07-23	0.33±0.02	0.59±0.09	0.86±0.04	0.98±0.04	1.21±0.17
2015-08-20	0.34±0.04	0.50±0.05	0.77±0.10	1.00±0.12	1.20±0.19
2015-09-22	0.34±0.05	0.53±0.03	0.78±0.12	0.98±0.13	1.14±0.13
2015-10-20	0.36±0.06	0.53±0.04	0.72±0.10	0.95±0.19	1.16±0.12
2016-07-06	0.34±0.10	0.59±0.10	0.75±0.23	0.95±0.21	1.20±0.28
2016-08-08	0.38±0.02	0.58±0.06	0.86±0.12	1.05±0.10	1.32±0.28
2016-09-09	0.36±0.02	0.62±0.01	0.88±0.14	1.15±0.14	1.33±0.09
2016-10-07	0.38±0.02	0.63±0.05	0.87±0.19	1.12±0.18	1.38±0.18
2015-10-20	0.35±0.03	0.69±0.06	0.89±0.26	1.19±0.25	1.38±0.11

2.3 土壤CEC的变化

土壤CEC是土壤肥力的重要影响因素之一,直接反映土壤保蓄、供应和缓冲阳离子养分的能力。不同处理不同时期滩涂土壤CEC的变化如表3所示。对CK来说,经过两季水稻种植后,土壤CEC增加幅度为9.5%,这可能由于根系残茬增加了土壤的有机质含量^[21],导致CEC略有增加。

对于添加生物炭处理来说,土壤CEC随着生物炭的用量增大而提高,经过两季水稻栽种后各处理的土壤CEC表现为C-20(15.6 cmol·kg⁻¹)>C-15(15.3 cmol·kg⁻¹)>C-10(14.9 cmol·kg⁻¹)>C-5(13.9 cmol·kg⁻¹),较原滩涂土壤的CEC增加16.8%~31.1%。统计结果表明5个处理之间差异达到了5%显著水平。生物炭表面含有丰富的-COOH、-OH等含氧官能团^[6-7,22-24],这些官能团具有较大的CEC,能够帮助土壤持留更多的营养型阳离子^[24],而秸秆生物炭相比其他生物炭通常含有较高的CEC^[25],且在550℃的热解条件下秸秆生物炭的CEC最高^[25]。本研究中,秸秆生物炭CEC含量为40.4 cmol·kg⁻¹。随着生物炭添加量的增加以及生物炭在土壤中残留时间的延长,它们对土壤CEC的提高作用趋于明显^[24]。尽管生物炭提高

了该滩涂土壤的CEC,但是该土壤的CEC仍然较低,在13.9~15.6 cmol·kg⁻¹范围内,因此该滩涂土壤有待于进一步改良。

2.4 土壤EC和pH的变化

连续两季水稻栽种后,土壤EC的变化如图5所示,图中的间隔符表示两季之间的土壤休闲期。2015年稻季和土壤休闲期间,CK的土壤EC变化不大,均在200 μS·cm⁻¹左右。2016年稻季土壤EC出现了两

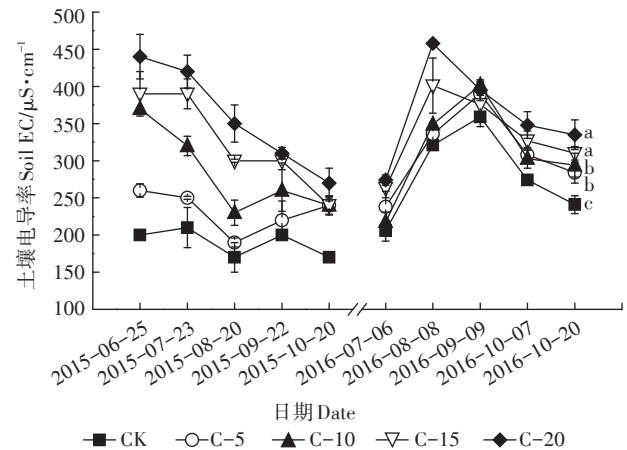


图5 连续两季水稻栽种后土壤EC的变化

Figure 5 The soil EC changes for different treatments

表3 水稻生长期间滩涂土壤CEC和水溶性离子的变化

Table 3 The changes of soil CEC and water extractable ions for different treatments in 2015 and 2016

项目 Items	处理 Treatments	2015					2016				
		06-25	07-23	08-20	09-20	10-20	07-06	08-08	09-09	10-07	10-20
CEC/cmole·kg ⁻¹	CK	11.9±0.3	12.2±0.1	12.0±0.3	13.9±0.4	11.2±0.5	14.5±0.3	14.8±0.1	13.6±0.1	13.4±0.2	13.0±0.1
	C-5	11.8±0.1	12.2±0.3	12.3±0.3	16.3±0.6	12.4±0.3	14.8±0.2	14.8±0.4	15.2±0.6	13.9±0.3	13.9±0.4
	C-10	12.3±0.3	13.9±0.3	12.4±0.3	18.1±0.1	12.2±0.4	15.4±0.5	15.9±0.4	15.6±0.3	14.3±0.3	14.9±0.4
	C-15	12.4±0.6	15.5±0.6	12.6±0.2	20.8±0.6	12.2±0.1	15.2±0.4	16.1±0.5	15.6±0.1	14.3±0.4	15.3±0.1
	C-20	12.2±0.2	13.7±0.3	14.4±0.3	21.1±0.2	12.6±0.2	15.2±0.3	16.9±0.4	16.5±0.4	16.1±0.3	15.6±0.3
NO ₃ ⁻ /mg·kg ⁻¹	CK	13.3±1.0	122.9±11.0	118.7±10.2	6.4±0.4	7.1±0.6	4.1±0.1	95.6±4.0	108.1±9.9	7.4±0.1	2.5±0.1
	C-5	70.6±3.8	142.8±11.2	87.8±5.4	7.5±1.0	8.7±0.9	5.7±0.3	102.5±5.2	92.4±3.6	8.5±0.5	3.7±0.2
	C-10	65.9±4.6	146.8±8.5	81.3±5.5	7.0±0.5	7.9±0.6	6.9±0.5	112.5±10.6	80.0±4.5	9.0±0.8	3.9±0.2
	C-15	58.4±3.2	138.1±8.8	63.7±2.9	8.3±1.5	6.5±0.1	6.8±0.1	123.9±5.9	72.1±3.0	10.3±0.8	5.6±0.1
	C-20	62.7±5.6	157.2±10.8	42.5±1.5	7.7±0.6	9.0±1.2	8.0±0.3	146.0±9.7	56.2±0.6	9.9±0.9	7.0±1.2
PO ₄ ³⁻ /mg·kg ⁻¹	CK	10.1±2.1	4.4±0.6	1.6±0.3	3.8±0.1	1.8±0.2	1.5±0.3	12.1±1.2	6.4±0.8	4.6±0.2	3.0±0.8
	C-5	20.2±2.7	9.7±5.9	3.5±0.4	3.8±0.3	3.0±0.2	3.2±0.5	35.2±2.5	10.3±5.8	6.8±0.5	3.5±0.5
	C-10	30.2±2.3	22.2±2.1	3.9±0.5	3.8±0.4	2.4±0.2	3.2±0.8	40.3±5.6	25.6±4.5	9.8±0.4	4.5±1.0
	C-15	35.4±4.3	37.5±2.8	3.5±1.0	3.7±0.5	2.1±0.2	3.5±0.5	46.4±5.9	58.9±3.6	12.2±1.0	5.1±0.8
	C-20	40.5±2.5	29.6±0.8	3.3±0.5	3.3±0.1	2.1±0.1	4.1±0.5	58.9±7.8	65.8±8.9	15.2±1.5	6.5±0.7
K ⁺ /mg·kg ⁻¹	CK	64.5±5.4	60.0±9.0	40.1±5.3	40.6±5.3	42.4±0.9	34.1±1.0	67.4±11.2	70.5±5.6	68.8±3.2	41.0±1.0
	C-5	68.8±9.0	60.4±5.4	41.9±0.4	45.9±3.9	69.8±3.1	44.7±1.6	81.0±15.4	98.9±8.9	100.0±6.5	59.8±2.5
	C-10	119.3±17.0	90.2±11.0	60.2±1.4	70.3±9.5	70.6±2.8	64.7±1.5	138.5±17.0	115.2±3.3	98.6±3.2	72.1±3.8
	C-15	168.1±22.4	171.8±0.8	89.3±3.1	86.5±10.2	78.8±0.4	70.2±3.6	177.6±33.2	147.5±5.6	85.6±11.2	82.4±0.6
	C-20	234.2±6.3	209.9±10.0	134.6±5.6	109.0±11.6	106.6±6.2	100.5±6.0	208.5±20.4	200.5±9.8	121.5±15.2	110.0±10.5

个高峰,其原因是施肥以及水稻残茬翻入后在土壤中的腐解^[20]。对于生物炭处理来说,土壤EC随着生物炭用量的增加而增大,具体表现:2015年生物炭刚混入土壤后,C-5($260\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)<C-10($370\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)<C-15($390\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)<C-20($440\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$),2015年水稻收获时C-5($230\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)<C-10($240\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)<C-15($250\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)<C-20($270\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$);2016年水稻收获时,C-5($284\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)<C-10($294\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)<C-15($310\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)<C-20($335\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)。以上情况是由于生物炭的EC较高($5910\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$),这与张瑞等^[1]的研究结论是一致的。

2015年水稻栽种期间,生物炭处理的土壤EC呈下降趋势,这主要是由于在淹水条件下,生物炭的灰分溶出率不断减少,土壤休闲期间的EC没有显著变化。2016年水稻栽种期间,土壤样品EC出现的两个高峰是由于水稻秧苗较小,所施的化肥残留在土壤中,导致土壤EC较高。随着水稻植株生长过程中对可溶性养分的吸收增强,土壤EC又呈下降趋势。2016年水稻收获后,生物炭处理的土壤EC较原滩涂土壤EC($200\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)增加了42.0%~67.5%。

连续两季栽种水稻后,土壤pH变化如图6所示,图中的间隔符表示两季之间的土壤休闲期。与原滩涂土壤的pH 7.6相比,增施生物炭并没有引起土壤pH的明显改变,仍处在7.4~7.6之间,这与林志灵等^[26]的研究结果相似,这可能是由于稻田土壤长期处于淹水条件下,其酸碱缓冲能力较强。

2.5 土壤水溶性养分的变化

不同处理不同时期滩涂土壤中水溶性 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 和 K^+ 的含量如表3所示。水溶性 NO_3^- 和 PO_4^{3-} 含量在施肥后呈显著上升趋势,随着水稻植株的吸收不断降

低。水溶性 K^+ 含量的变化与土壤EC有相同的变化趋势。由于秸秆生物炭含有磷、钾等离子^[27],所以水稻栽培期间生物炭处理的水溶性 PO_4^{3-} 和 K^+ 的平均含量相对较高,相比CK处理分别增加了86.0%~249.0%和15.8%~220.0%。

3 讨论

土壤中添加生物炭可形成碳汇并降低温室气体排放,同时改良土壤,提高土壤肥力并增加作物产量^[6-7,24]。生物炭大体分为碳和灰分两个部分,本研究的生物炭中碳所占比例为60%左右。生物炭中的碳素又可分为稳定态碳和易分解态碳^[28]。稳定态碳是难以氧化降解或难以被微生物利用的芳香化碳,占主要部分。易分解态碳是直接可被土壤微生物分解利用的脂肪族碳和氧化态碳,约占5.0%~37.0%^[28]。有研究表明,300~600℃秸秆生物炭中碳含量为643.1~701.5 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,而易分解态碳含量133.0~68.0 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,占碳含量的9.6%~20.7%^[29]。水田土壤长期处于淹水条件,生物炭在进入土壤后会释放出可溶态生物炭(Dissolvable biochar,能够过0.45 μm 滤膜的生物炭)^[30],这些游离的可溶态生物炭性质不稳定。实际上生物炭中的这部分碳会和土壤中的腐殖质和矿物质发生反应,减少其与微生物的接触,从而避免其被微生物分解^[28,30]。而长江口滩涂土壤类型以滨海盐土为主,养分贫瘠。土壤中有有机质、总氮和总磷含量分别介于0.06%~2.11%、0.08%~1.84%和0.46%~1.39%之间;土壤中以砂粒和粉粒(7.5%~36.6%)为主,黏粒(6.2%~13.3%)含量较少^[21]。所以,在这种条件下,生物炭中的易分解态碳和可溶态生物炭易被矿化,特别是在土壤休闲期间,土壤样品中碳含量减少了5.2%~14.2%。而且随着生物炭施用量的增加,易分解态碳和可溶态生物炭含量增加,影响了生物炭在滩涂土壤中的固碳能力。秸秆生物炭对土壤样品中碳矿化的促进作用,主要来源于生物炭自身携带的易分解态碳。若在外源有机碳存在的条件下,添加生物炭可增强土壤中碳素的固定^[28]。

生物炭中还包含钾、钠、钙、镁、硅等以灰分形式存在的无机元素^[23-24]。这也是生物炭初施在滩涂土壤后EC较高的原因,而且随着生物炭用量的增加,土壤EC逐渐提高。灰分含量在稻田淹水条件下逐渐减少,土壤EC也随之降低。对于贫瘠的滩涂土壤来说,生物炭可以为其提供矿质养分。本试验结果表明,秸秆生物炭显著提高了土壤中水溶性磷和钾的含量,增

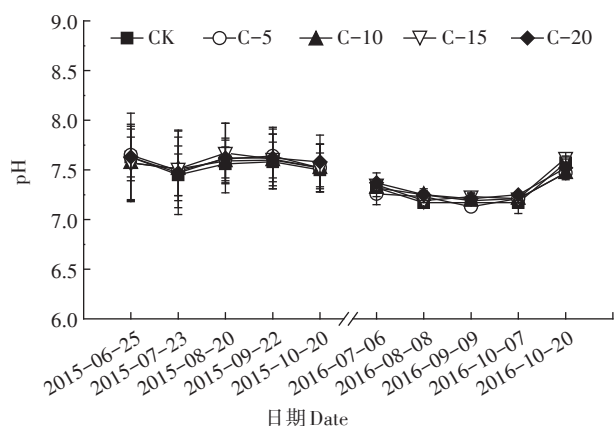


图6 连续两年水稻栽种后土壤pH的变化

Figure 6 Soil pH changes for different treatments

加幅度分别为86.0%~249.0%和15.8%~220.0%。本研究中生物炭的添加可为水稻生长提供营养元素,促进了水稻分蘖,增加了干物质积累,使水稻增产,这与Zhao等^[8]、Asai等^[10]、Knoblauch等^[12]的研究结果一致。这也可以说明2015年第一季水稻栽种时,生物炭的适宜添加比例处于10%~15%范围,而在2016年第二季栽种时,较高的生物炭添加量(20%)增产效应显著。其可能原因是,生物炭中的灰分在淹水条件下不断溶出大量可溶性离子,田面水和土壤的EC含量较高,导致盐分的累积,影响了其对滩涂土壤的改良效果,因此,第一季添加量20%的处理产量低于10%~15%添加量的处理。在第二季时,添加10%~15%生物炭处理的灰分含量已减少,而添加20%生物炭的处理,其供给土壤和田面水的养分含量范围适宜,促进了水稻产量的增加。

生物炭对土壤氮含量影响较为复杂。生物炭所含的氮凝聚形成杂环氮结构,从供氮角度来讲,生物炭主要提高土壤有机氮含量,但并不能直接提供植物生长的矿质氮。一次性施入生物炭后,由于总氮含量0.7%,所以随着生物炭用量的增加,2015年水稻栽种期,土壤氮素含量呈增加趋势。随着生物炭中易分解态碳被分解,氮的固持现象逐渐消失^[31],2016年土壤氮素含量相对2015年有所降低。

生物炭含有丰富的胡敏酸和富里酸^[22],表面含有丰富的-COOH、-OH等含氧官能团^[6-7,22-24],可提供水稻生长所需要的磷、钾、钙等营养元素^[23-24,30],生物炭自身具有较大的比表面积和表面负电荷,能够吸附无机离子及极性或非极性有机化合物^[24],促进水稻增产,提高土壤的CEC,改良滩涂土壤。若将生物炭与有机肥复合而成炭基肥/炭基缓释肥,有望减少生物炭中易分解态碳的大量释放,减少温室气体排放和田面水养分流失引起的稻田面源污染,还可通过缓慢而有效地释放养分,提高水稻产量和改善土壤的保肥能力,因地制宜地发挥生物炭的固碳减排功能。但生物炭的高量、持续输入是否会打破土壤生态平衡从而影响整个生态系统,还需要我们认真思考。

4 结论

(1)对第一季水稻来说,生物炭添加量为10%和15%的配比混施使水稻产量增加29.1%和34.2%,谷草比提高9.2%和27.6%;对第二季水稻来说,生物炭添加量为15%和20%的配比混施使水稻产量提高35.3%和104.6%,谷草比提高11.7%和59.7%。

(2)5%~20%的生物炭添加量提高了土壤的EC和CEC,与对照相比,整个试验期间土壤的平均EC增加幅度为13.7%~51.3%,平均CEC含量增加了3.5%~17.0%。

(3)5%~20%的生物炭添加量提高了土壤总碳和总氮的含量。但在稻季休闲期,土壤中的碳和氮会发生矿化作用而引起碳、氮含量减少。与对照相比,试验期间的土壤平均总碳和总氮的增加幅度分别为22.7%~73.8%和25.1%~65.8%。

(4)生物炭对滩涂土壤的pH没有显著影响。

总而言之,施加秸秆生物炭可以改善滩涂土壤结构,培肥地力,在消化大量农作物秸秆的同时为粮食产区的发展分担压力。

参考文献:

- [1] 张瑞, 杨昊, 张芙蓉, 等. 生物竹炭改良崇明滩涂盐渍化土壤的试验研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(12): 2404-2411.
ZHANG Rui, YANG Hao, ZHANG Fu-rong, et al. Effects of bamboo biochar on coastal saline soils of Chongming Island, Shanghai[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(12): 2404-2411.
- [2] 李小刚, 曹靖, 李凤民. 盐化及钠质化对土壤物理性质的影响[J]. 土壤通报, 2004, 35(1): 64-72.
LI Xiao-gang, CAO Jing, LI Feng-min. Influences of salinity, sodicity and organic matter on some physical properties of salt-affected soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(1): 64-72.
- [3] Long X H, Liu L P, Shao T Y, et al. Developing and sustainably utilize the coastal mudflat areas in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 569/570: 1077-1086.
- [4] 中国国家统计局. 中国统计年鉴2016[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China statistical yearbook 2016[M]. Beijing: China Statistics Press, 2016.
- [5] Zhang J G, Hu B. Microbial lipid production from corn stover via *Mortierella isabellina*[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2014, 174: 574-586.
- [6] Lehmann J. A handful of carbon[J]. *Nature*, 2007, 443: 143-144.
- [7] Sohi S P, Krull E, Lopez-Capel E, et al. A review of biochar and its use and function in soil[J]. *Advances in Agronomy*, 2010, 105: 47-82.
- [8] Zhao X, Wang J, Wang S, et al. Successive straw biochar application as a strategy to sequester carbon and improve fertility: A pot experiment with two rice/wheat rotations in paddy soil[J]. *Plant and Soil*, 2014, 378 (1/2): 279-294.
- [9] Sui Y H, Gao J P, Liu C H, et al. Interactive effects of straw-derived biochar and N fertilization on soil C storage and rice productivity in rice paddies of northeast China[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 544: 203-210.
- [10] Asai H T, Samson B K, n H M, et al. Biochar amendment techniques for upland rice production in northern Laos: 1. Soil physical proper-

- ties, leaf SPAD and grain yield[J]. *Field Crops Research*, 2009, 111(1/2):81-84.
- [11] 李 露,周自强,潘晓健,等.不同时期施用生物炭对稻田 N_2O 和 CH_4 排放的影响[J]. *土壤学报*, 2015, 52(4):841-848.
- LI Lu, ZHOU Zi-qiang, PAN Xiao-jian, et al. Effects of biochar on N_2O and CH_4 emissions from paddy field under rice-wheat rotation during rice and wheat growing seasons relative to timing of amendment[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(4):841-848.
- [12] Knoblauch C, Maarifat A A, Pfeifer E M, et al. Degradability of black carbon and its impact on trace gas fluxes and carbon turnover in paddy soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(9):1758-1778.
- [13] 王妙莹,许旭萍,王维奇,等.炉渣与生物炭施加对稻田温室气体排放及其相关微生物影响[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(3):1046-1056.
- WANG Miao-ying, XU Xu-ping, WANG Wei-qi, et al. Effect of slag and biochar amendment on greenhouse gases emissions and related microorganisms in paddy fields[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(3):1046-1056.
- [14] 刘鸿桥,侯亚红,王 磊.秸秆生物炭还田对围垦盐碱土壤的低碳化改良[J]. *环境科学与技术*, 2014, 37(1):75-80.
- LIU Hong-jiao, HOU Ya-hong, WANG Lei. Amelioration effects of reed straw biochar returning to salty soil in the view of low carbon point[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 37(1):75-80.
- [15] 徐霞倩,顾介明,顾春军,等.浦东滩涂土壤综合改良技术和应用效应研究[J]. *上海农业学报*, 2016, 32(3):110-114.
- XU Xia-qian, GU Jie-ming, GU Chun-jun, et al. Study on the technology and application effect of the comprehensive improvement of shoal soil in Pudong[J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2016, 32(3):110-114.
- [16] 张建兵,杨劲松,姚荣江,等.有机肥与覆盖方式对滩涂围垦农田水盐与作物产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(15):116-125.
- ZHANG Jian-bing, YANG Jin-song, YAO Rong-jiang, et al. Dynamics of soil water, salt and crop growth under farmyard manure and mulching in coastal tidal flat soil of northern Jiangsu Province[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(15):116-125.
- [17] Bai Y C, Gu C H, Tao T Y, et al. Responses of ryegrass (*Lolium perenne* L.) grown in mudflats to sewage sludge amendment[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(2):426-433.
- [18] 徐 敏,伍 钧,张小洪,等.生物炭施用的固碳减排潜力及农田效应[J]. *生态学报*, 2018, 38(2):1-12.
- XU Min, WU Jun, ZHANG Xiao-hong, et al. Impact of biochar application on carbon sequestration, soil fertility and crop productivity[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(2):1-12.
- [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, 2000.
- LU Ru-kun. Soil agrochemistry analysis method[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [20] Dong X L, Singh B P, Li G T, et al. Biochar application constrained native soil organic carbon accumulation from wheat residue inputs in a long-term wheat-maize cropping system[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2018, 252:200-207.
- [21] 许 艳,濮励杰,张润森,等.江苏沿海滩涂围垦耕地质量演变趋势分析[J]. *地理学报*, 2017, 72(11):2032-2046.
- XU Yan, PU Li-jie, ZHANG Run-sen, et al. Cropland quality evolution following coastal reclamation at the prograding tidal flats of Jiangsu Province, China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(11):2032-2046.
- [22] Zhang J N, Lü F, Zhang H, et al. Humification characterization of biochar and its potential as a composting amendment[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, 26:390-397.
- [23] Zhang J N, Lü F, Zhang H, et al. Multiscale visualization of the structural and characteristic changes of sewage sludge biochar oriented towards potential agronomic and environmental implication[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5:9406.
- [24] 吴伟祥,孙 雪,董 达,等.生物质炭土壤环境效应[M].北京:科学出版社, 2015.
- WU Wei-xiang, SUN Xue, DONG Da, et al. Environmental effects of biochar in soil[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [25] Jeong C Y, Dodla S K, Wang J J. Fundamental and molecular composition characteristics of biochars produced from sugarcane and rice crop residues and by-products[J]. *Chemosphere*, 2016, 142:4-13.
- [26] 林志灵,王 静,张杨珠.不同施肥结构对稻田土壤CEC和土壤酸性的影响[J]. *土壤通报*, 2011, 42(1):42-45.
- LIN Zhi-ling, WANG Jing, ZHANG Yang-zhu. Effects of different fertilization systems on soil CEC and soil acidity in paddy field[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(1):42-45.
- [27] Zhang J N, Chen G F, Sun H F, et al. Straw biochar hastens organic matter degradation and produces nutrient-rich compost[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 200:876-883.
- [28] 陈 颖,刘玉学,陈重军,等.生物炭对土壤有机碳矿化的激发效应及其机理研究进展[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(1):314-320.
- CHEN Ying, LIU Yu-xue, CHEN Chong-jun, et al. Priming effect of biochar on the mineralization of native soil organic carbon and the mechanisms: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(1):314-320.
- [29] Sun J N, Wang B C, Xu G, et al. Effects of wheat straw biochar on carbon mineralization and guidance for large-scale soil quality improvement in the coastal wetland[J]. *Ecological Engineering*, 2014, 62:43-47.
- [30] 徐子博,俞 璐,杨 帆,等.土壤矿物质-可溶态生物炭的交互作用及其对碳稳定性的影响[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(11):4329-4335.
- XU Zi-bo, YU Lu, YANG Fan, et al. The interactions between soil minerals and dissolvable biochar and its influence on the stability of carbon[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(11):4329-4335.
- [31] Bruun E W, Peterson C, Strobel B W, et al. Nitrogen and carbon leaching in repacked sandy soil with added fine particulate biochar[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76:1142-1148.