

崔月峰,孙国才,郭奥楠,等. 秸秆和生物炭还田对冷凉稻区土壤物理性质及 pH 值的影响[J]. 江苏农业科学,2020,48(21):255-260.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.21.049

秸秆和生物炭还田对冷凉稻区土壤物理性质及 pH 值的影响

崔月峰¹, 孙国才¹, 郭奥楠², 史鸿儒³, 王桂艳¹, 王健¹, 黄文佳¹, 卢铁钢¹

(1. 铁岭市农业科学院, 辽宁铁岭 112616; 2. 辽宁省铁岭市农业农村局, 辽宁铁岭 112608;

3. 辽宁省农业发展服务中心, 辽宁沈阳 110034)

摘要:为探究秸秆和生物炭还田对改善我国冷凉稻区土壤物理性质和 pH 值的可行性,研究秸秆直接还田和秸秆炭化(生物炭)还田对冷凉稻田土壤容重、孔隙度、温度、pH 值的影响。结果表明,与常规生产相比,秸秆(6 t/hm^2)、少量生物炭(2 t/hm^2)、大量生物炭(40 t/hm^2)还田使水稻不同生育时期下稻田土壤容重分别降低 6.02%~11.86%、2.69%~6.67%、8.58%~11.32%,总孔隙度分别增加 7.41%~14.93%、3.19%~8.38%、9.81%~14.27%,通气孔隙度分别增加 22.28%~192.11%、17.80%~92.11%、52.44%~157.11%;秸秆和少量生物炭还田对稻田土壤温度和 pH 值没有显著影响,但大量生物炭还田在水稻生育后期可使土壤温度显著提高 5.13%~8.79%、pH 值提高 3.15%~5.96%。综上,秸秆和生物炭还田能够降低土壤容重、增加总孔隙度和通气孔隙度,只有大量生物炭还田才会显著提高土壤温度和 pH 值。

关键词:秸秆;生物炭;冷凉稻区;土壤物理性质;土壤 pH 值

中图分类号: S152;S511.06 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2020)21-0255-06

我国农林废弃物资源丰富,每年各类秸秆产量 7 亿 t,约占全世界秸秆产量的 20%~30%,居世界第一,其中 50% 以上秸秆被用做薪柴或被废弃焚烧,不仅造成了资源浪费,同时也污染了环境^[1-2]。因此,秸秆综合处理和高效利用已成为解决土壤、资源、环境和农业可持续发展问题的关键。秸秆是我国生物质能资源和有机肥源的重要组成部分,还田后在土壤中分解,能够改良土壤结构和物理性状,提高有机质含量,在保持和提高土壤肥力方面具有重要作用^[3-4]。研究表明,秸秆还田后,土壤容重下降,孔隙度提高,利于改良土壤结构和通气状况^[5-6],加强土壤对光辐射的吸收和转化,具有增温效应,短期主要体现在 0~5 cm 土层,长期则主要体现在 0~15 cm 土层^[7]。

生物炭来源于秸秆等生物质,具有孔隙结构丰富、比表面积大、吸附力强等特性,能够对持留水分、固持养分起到良好的载体作用,可以降低土壤容重,增加孔隙度,改善土壤通气条件^[8-9]。土壤 pH 值降低是农业土壤肥力质量下降的一个重要指标,而生物炭能降低比自身 pH 值低的土壤的酸性及比它 pH 值高的土壤的碱性,且不受制作材料的限制^[10]。还有研究表明,生物炭改良土壤的机制是通过影响土壤 pH 值,改善土壤性能,提高土壤肥力,达到促进作物生长的目的^[11-12]。

然而,当前关于秸秆炭化还田的研究多集中在温暖湿润的热带或亚热带地区,针对北方冷凉地区稻田的研究很少。由于冷水灌溉及寒冷的气候因素导致我国北方稻田土壤温度较低,而且土壤黏重,团粒结构少,孔隙度低,透水、透气性差,微生物活性弱,特别是由于长期、大量的化学肥料施入,导致稻田土壤酸化加剧、土壤生产力降低^[13-14],因此有必要开展该生态气候区秸秆和生物炭的应用效应研究。本试验着重研究生物炭还田对冷凉稻田土壤物理性状、pH 值的影响,以期为东北冷凉稻区改土提质提供参考。

收稿日期:2020-01-14

基金项目:国家重点研发计划(编号:2018YFD0300305-02、2017YFD0300710-A04);国家现代农业产业技术体系建设专项(编号:CARS-01-51)。

作者简介:崔月峰(1984—),男,山西大同人,博士,副研究员,主要从事水稻育种和栽培研究。E-mail:sncyf552@126.com。

通信作者:卢铁钢,研究员,主要从事水稻育种、栽培和示范推广。E-mail:lutg3308@sina.com。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验在铁岭市农业科学院内水稻试验田进行,地处我国辽宁北部(42°14'N,123°48'E),具有典型的半湿润大陆季风气候,年平均气温为 6.3℃,4—9 月份活动积温 3 496.9℃,降水量 643.5 mm,日照时数 1 357.6 h,平均气温 19.1℃。试验田已经连续种植水稻超过 40 年,灌溉水来源于地下 30 m 处的冷水。土壤耕层(0~20 cm 土层)营养指标含量如下:全氮含量 1.06 g/kg,全磷含量 0.85 g/kg,全钾含量 17.24 g/kg,速效氮含量 93.64 mg/kg,速效磷含量 38.28 mg/kg,速效钾含量 75.06 mg/kg,有机碳含量 10.73 g/kg,pH 值 6.36。

供试品种为北方超级粳稻沈农 265,主茎叶片数为 15,具有株型紧凑、分蘖力较强、穗型直立的特性。供试秸秆粉碎成 0.5~1.0 cm 的小段,生物炭由辽宁省生物炭工程技术研究中心将秸秆在 400~500℃热解缺氧条件下生产,将约 1/3 秸秆制成粒径为 1.5~2.0 mm 的生物炭,秸秆和生物炭主要理化性质见表 1。

表 1 秸秆及生物炭主要理化性质

指标	全氮含量 (%)	全磷含量 (%)	全钾含量 (%)	有机碳含量 (%)	pH 值
秸秆	0.87	0.45	2.04	50.36	6.93
生物炭	1.28	0.73	1.46	63.27	9.02

1.2 试验设计

试验共设 4 个处理,即当地常规施肥:46% 尿素 456.5 kg/hm²、12% 过磷酸钙 875 kg/hm²、52% 硫酸钾 202 kg/hm²,记做 CK;秸秆还田:在 CK 基础上施入秸秆 6 t/hm²,记做 S;少量生物炭还田:在 CK 基础上施入生物炭 2 t/hm²(按秸秆可以转化为 30% 生物炭计算),计做 C1;大量生物炭还田:在 CK 基础上施入生物炭 40 t/hm²,记做 C2。

试验采用育苗移栽的种植方式,于 2013 年 4 月 18 日播种、5 月 28 日移栽、10 月 8 日收获,2014 年 4 月 14 日播种、5 月 27 日移栽、10 月 9 日收获,插秧规格为 30.0 cm×13.3 cm,每穴 3 苗,随机区组排列设计,每个处理 3 次重复,共计 12 个小区,每个小区面积为 21 m²。各小区单独打埂,均配有上水、排水渠道,单灌、单排。氮肥分基肥:蘖肥:穗肥质量比=5:3:2 施入,秸秆和生物炭在水稻移栽前

100% 一次性施入,均匀分散到土壤表面,然后旋耕混匀,过磷酸钙做基肥 100% 一次性施入,硫酸钾做基肥和穗肥各施 50%。其他栽培管理措施按常规水稻大田生产规程进行。

1.3 土壤样品采集与测定

在水稻分蘖期、拔节期、抽穗期、灌浆期、成熟期用土钻垂直铲挖(1 孔)植株根部周围 0~20 cm 土壤样本,每个小区随机取 3 点,自然风干后测定样品的 pH 值;在每个小区内埋地温计,取土时读取土壤向下深度为 5 cm 处的温度,同时采用环刀法测定土壤的容重、孔隙度,具体测定方法参照鲁如坤主编的《土壤农业化学分析方法》。

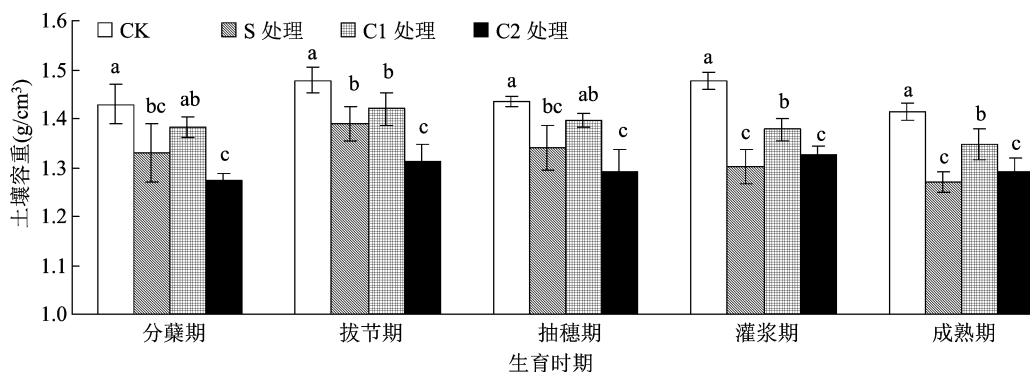
1.4 数据统计与分析

所有试验数据采用 Excel 2010 进行整理。差异采用 DPS 7.05 软件对试验数据进行单因素方差分析,多重比较(LSD)判断处理间的差异显著性($P < 0.05$),所有测定结果数据均以平均值±标准差的形式表达。

2 结果与分析

2.1 秸秆及生物炭对土壤物理性质的影响

2.1.1 秸秆及生物炭对土壤容重的影响 容重是衡量土壤物理特性的重要指标之一,对土壤通气性、含水量及营养物质的转运功能影响较大。从图 1 可以看出,土壤容重基本呈现出先升后降的趋势,但整个生长季内差异并不十分明显。CK 容重为 1.41~1.48 g/cm³,S 处理容重为 1.27~1.39 g/cm³,C1、C2 处理分别为 1.35~1.40 g/cm³、1.27~1.39 g/cm³。在分蘖期各处理容重为 1.27~1.43 g/cm³,S、C1、C2 处理的容重分别较 CK 降低 6.95%、3.34%、10.89%,其中 S、C2 与 CK 差异显著;拔节期各处理容重为 1.31~1.48 g/cm³,S、C1、C2 处理的容重分别较 CK 显著降低 6.02%、3.99 和 11.32%;抽穗期各处理容重为 1.29~1.44 g/cm³,S、C1、C2 处理的容重分别较 CK 降低 6.67%、2.69%、10.02%,其中 S、C2 与 CK 差异显著;灌浆期各处理容重为 1.30~1.48 g/cm³,S、C1、C2 处理的容重分别较 CK 显著降低 11.86%、6.67%、10.18%;成熟期各处理容重为 1.27~1.41 g/cm³,S、C1、C2 处理的容重分别较 CK 显著降低 10.00%、4.57%、8.58%。可见秸秆和生物炭还田都能显著降低水稻各个生育阶段下稻田土壤的容重,秸秆还田处理土壤容重较 CK 降低 6.02%~11.86%,且在生



柱上标有不同的小写字母表示在同一生育时期各处理间显著差异($P < 0.05$)。下图同

图1 秸秆及生物炭还田对土壤容重的影响

育后期降低幅度更大,少量生物炭还田处理土壤容重较 CK 降低 2.69% ~ 6.67%,在后期差异也达到了显著水平,而大量生物炭还田处理土壤容重较 CK 降低 8.58% ~ 11.32%,尤其在生育前期降低幅度更加明显。

2.1.2 秸秆及生物炭对土壤孔隙度的影响 土壤孔隙度与土壤透水透气性、导热性和紧实度关系密切。从表 2 可以看出,不同生育阶段下各处理间土壤总孔隙度都存在一定的差异。分蘖期 S、C1 和 C2 处理的总孔隙度较 CK 分别增加 8.12%、3.91% 和 12.74%,其中 S、C2 处理与 CK 差异显著,C1 处理与 CK 间差异未达显著水平;拔节期 S、C1 和 C2 处理的总孔隙度较 CK 分别显著增加 7.41%、5.08% 和 14.27%;抽穗期 S、C1 和 C2 处理较 CK 增加 8.03%、3.19% 和 11.85%,其中 S、C2 处理与 CK 差异显著,C1 处理与 CK 差异不显著;灌浆期 S、C1 和 C2 处理较 CK 分别显著增加 14.93%、8.38% 和 12.81%;成熟期 S、C1 和 C2 处理较 CK 分别显著增加 11.44%、5.23% 和 9.81%。可见秸秆还田能够显著提高稻田土壤的总孔隙度,提高幅度为 7.41% ~ 14.93%,且生育后期的增幅要高于前期;少量生物炭还田对提高稻田土壤的总孔隙度具有一定的功效,增加幅度在 3.19% ~ 8.38% 之间,尤其在灌浆期作用最明显;大量生物炭还田则在水稻整个生育时期都能显著提高稻田土壤的总孔隙度,提高幅度为 9.81% ~ 14.27%,且从分蘖期开始就起到了高效的作用。

从不同生育阶段来看,CK 处理土壤毛管孔隙度为 37.66% ~ 40.46%,S 处理土壤毛管孔隙度为 36.30% ~ 40.23%,C1 处理土壤毛管孔隙度为 36.35% ~ 40.68%,C2 处理土壤毛管孔隙度为 38.20% ~ 40.33%,各处理在整个生育阶段均无显

表 2 秸秆及生物炭还田下土壤孔隙度的变化

生育时期	处理	总孔隙度 (%)	毛管孔隙度 (%)	通气孔隙度 (%)
分蘖期	CK	46.07 ± 0.90c	37.66 ± 2.31a	8.41 ± 0.76b
	S	49.81 ± 1.27ab	36.30 ± 0.55a	13.51 ± 1.79a
	C1	47.87 ± 0.46bc	36.35 ± 1.18a	11.51 ± 0.41a
	C2	51.94 ± 0.33a	39.13 ± 1.60a	12.82 ± 1.35a
拔节期	CK	44.29 ± 0.60c	38.14 ± 0.93a	6.15 ± 0.64b
	S	47.57 ± 0.79b	40.05 ± 2.78a	7.52 ± 3.57b
	C1	46.54 ± 0.74b	37.72 ± 1.08a	8.81 ± 1.79ab
	C2	50.61 ± 0.78a	39.11 ± 0.39a	11.49 ± 1.69a
抽穗期	CK	45.83 ± 0.23c	39.79 ± 1.87a	6.04 ± 1.80b
	S	49.51 ± 0.99ab	40.23 ± 0.93a	9.28 ± 1.64ab
	C1	47.29 ± 0.28bc	40.17 ± 0.98a	7.12 ± 1.45b
	C2	51.26 ± 1.00a	40.33 ± 1.74a	10.93 ± 2.50a
灌浆期	CK	44.26 ± 0.40c	40.46 ± 0.24a	3.80 ± 0.91c
	S	50.87 ± 0.79a	39.77 ± 1.65a	11.10 ± 1.86a
	C1	47.97 ± 0.50b	40.68 ± 0.62a	7.30 ± 0.90b
	C2	49.93 ± 0.35a	40.16 ± 0.21a	9.77 ± 0.68a
成熟期	CK	46.69 ± 0.39c	38.53 ± 1.28a	8.17 ± 1.77c
	S	52.03 ± 0.46a	37.24 ± 0.16a	14.79 ± 0.64a
	C1	49.13 ± 0.71b	37.97 ± 1.35a	11.16 ± 0.34b
	C2	51.27 ± 0.59a	38.20 ± 0.42a	13.07 ± 1.44ab

注:同一生育时期同列数据后不同小写字母表示各处理间存在显著差异($P < 0.05$)。

著性差异,可见无论是秸秆还是生物炭还田对稻田土壤毛管孔隙度都没有明显的影响,而且也不受生物炭施量的影响。

不同生育阶段下各处理间土壤通气孔隙度存在一定的差异。分蘖期 S、C1 和 C2 处理较 CK 分别显著增加 60.64%、36.86% 和 52.44%;拔节期 S、C1 处理较 CK 分别增加 22.28%、43.25%,差异不显著,C2 处理较 CK 显著增加 86.83%;抽穗期 S、C1 和 C2 处理较 CK 分别增加 53.64%、17.88% 和

80.96%, 其中 S、C1 处理与 CK 差异不显著, C2 处理与 CK 差异达到显著水平; 灌浆期 S、C1 和 C2 处理较 CK 分别显著增加 192.11%、92.11% 和 157.11%; 成熟期 S、C1 和 C2 处理较 CK 分别显著增加 81.03%、36.60% 和 59.98%。可见秸秆和少量生物炭还田在前期和后期能够显著提高稻田土壤的通气孔隙度, 尤其在灌浆期分别高达 192.11% 和 92.11%; 大量生物炭还田在整个生育期内都能显著提高稻田土壤的通气孔隙度, 增加幅度达 52.44% ~ 157.11%, 尤其在灌浆期作用最明显。

2.1.3 秸秆及生物炭对土壤温度的影响 土壤温度是水稻生长的重要生态因子, 对水稻根系吸收水分和营养有重要影响。从图 2 可以看出, 各处理下的土壤温度在分蘖期至抽穗期期间差异不大, 到灌浆期及其之后出现较大幅度的下降。分蘖期各处理下土壤温度为 24.8 ~ 25.8 °C, S、C1 和 C2 处理的温度分别较 CK 增加 4.03%、0.54% 和 2.01%, 各

处理间差异未达到显著水平; 拔节期各处理下土壤温度为 24.7 ~ 25.3 °C, S、C1 和 C2 处理的土壤温度分别较 CK 增加 0.68%、1.08% 和 2.70%, 各处理间差异不显著; 抽穗期各处理下土壤温度范围在 23.5 ~ 24.3 °C 之间, S、C1 和 C2 处理下的土壤温度分别较 CK 增加 0.02%、0.71% 和 3.55%, 各处理间差异不显著; 灌浆期各处理下土壤温度范围在 19.5 ~ 20.5 °C 之间, S、C1 和 C2 处理的土壤温度分别较 CK 增加 2.91%、3.25% 和 5.13%, 其中 C2 处理与 CK 差异显著; 成熟期各处理下土壤温度范围在 13.3 ~ 14.5 °C 之间, S、C1 和 C2 处理的土壤温度分别较 CK 增加 2.50%、3.75% 和 8.75%, 其中 C2 处理与 CK 差异显著。可见秸秆和少量生物炭还田对水稻各个生育阶段下的稻田土壤温度没有显著的提高优势, 而大量生物炭还田在前期对土壤温度影响不大, 而在生育后期能显著提高 5.13% ~ 8.79%。

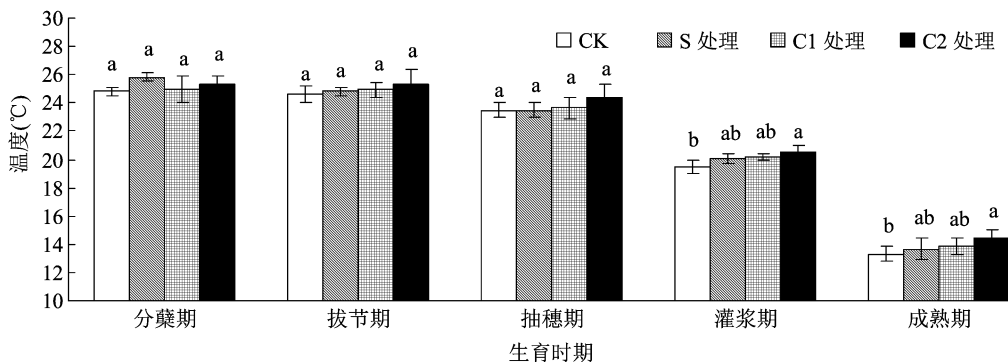


图2 秸秆及生物炭还田对土壤温度的影响

2.2 秸秆及生物炭对土壤 pH 值的影响

由图 3 可以看出, 在水稻整个生育期内, 各处理下土壤 pH 值基本表现为先降后升再降的波浪性趋势。分蘖期各处理的土壤 pH 值为 6.77 ~ 7.00, S、C1 处理的土壤 pH 值较 CK 分别增加 1.23%、0.25%, 与 CK 相比差异不显著, 而 C2 处理较 CK 显著增加 3.45%; 拔节期各处理的土壤 pH 值为 6.65 ~ 6.92, S 和 C1 处理较 CK 分别增加 2.51%、2.26%, 与 CK 相比差异不显著, C2 处理较 CK 显著增加 4.01%; 抽穗期各处理的土壤 pH 值为 6.88 ~ 7.10, S、C1 处理的 pH 值较 CK 分别增加 2.18%、1.70%, 与 CK 相比差异不显著, 而 C2 处理较 CK 显著增加 3.15%; 灌浆期各处理的土壤 pH 值为 6.43 ~ 6.80, S、C1 处理的土壤 pH 值较 CK 分别增加 1.55%、3.37%, 与 CK 相比差异不显著, 而 C2 处理较 CK 显著增加 5.70%; 成熟期各处理的土壤 pH

值为 6.15 ~ 6.52, S、C1 处理的土壤 pH 值较 CK 分别增加 0.81%、2.44%, 与 CK 相比差异不显著, 而 C2 处理较 CK 显著增加 5.96%。可见秸秆和少量生物炭还田在水稻整个生长阶段对稻田土壤 pH 值有一定的提高趋势, 但与 CK 相比差异并不显著, 而大量生物炭还田则能够显著提高稻田土壤的 pH 值, 提高幅度为 3.15% ~ 5.96%, 且越到后期增加的幅度越大, 使土壤呈近中性状态。

3 结论与讨论

土壤的物理性质主要包括容重、孔隙度、含水量及温度, 土壤结构、通气性及有机质含量, 能够影响土壤肥力及植物根系在土壤中的生长。土壤容重和孔隙度都是反映土壤结构特性的重要指标, 二者间一般呈负相关关系。秸秆还田后土壤容重降低, 孔隙度增加, 使得土壤疏松、通气透水, 从而可以促进土壤微生物

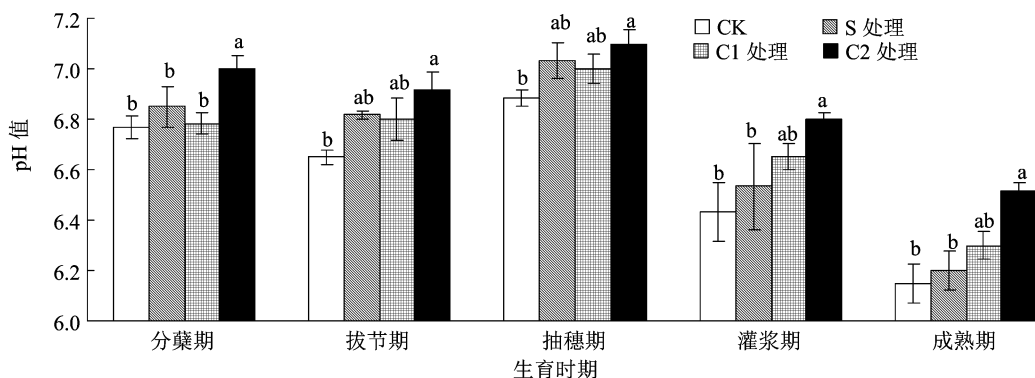


图3 秸秆及生物炭还田对土壤 pH 值的影响

物活动,增强土壤养分的供应^[15-16]。

董桂军等通过在寒区长期秸秆全量还田研究认为,随着秸秆还田年限的增加,土壤容重呈降低趋势,由 1.32 g/cm^3 降到 1.25 g/cm^3 ,显著降低了 0.07 g/cm^3 ^[17];李世忠等在宁夏回族自治区引黄灌区秸秆还田的研究表明,土壤容重较上年同期降低 10.9%,土壤孔隙度较上年同期提高 7.3%^[18]。本试验结果表明,秸秆还田使水稻不同生育阶段下稻田土壤 0~20 cm 的容重显著降低 6.02%~11.86%,同时总孔隙度提高 7.41%~14.93%,通气孔隙度增加 22.28%~192.11%,但对毛管孔隙度的影响不显著。秸秆还田能够影响土壤对光辐射的吸收转化和热量的传导,具有低温时“增温”和高温时“降温”的双重效应^[19]。有研究表明,秸秆还田配施化肥在 08:00 和 20:00 气温较低时提高了土壤温度,而在 14:00 气温较高时降低了土壤温度^[20]。肖国华等试验表明,稻草还田免耕覆盖能够使早春 0~5 cm 土层温度提高 0.7~1.0℃^[21]。据 Ramakrishna 等研究报道,秸秆覆盖主要影响 10 cm 以内浅层的土壤温度,对 10 cm 以下土层温度的调控作用不显著^[22]。本试验结果表明,秸秆还田虽然对稻田土壤向下深度 0~5 cm 的土层温度有一定的提升作用,但与 CK 差异不显著,其原因可能与秸秆还田方式、调查时间点以及土壤深度相关。

生物炭会影响土壤性质是因为其具有独特的多微孔结构与理化特性^[23-24]。生物炭质地疏松,能够改善土壤松紧度,促进团聚体形成,降低土壤容重,增加微生物量,提高微生物活性,改善土壤结构,增加总孔隙度,改善土壤的通气、透水性^[25-27]。Oguntunde 等研究表明,添加生物炭后,土壤容重降低 9%,而总孔隙度由 45.7% 提高到 50.6%^[28]。Githinji 通过生物炭和土壤的体积比设置沙壤土的培养试验结果表明,土壤容重随生物炭增加呈线性

减少趋势($R^2 = 0.997$);当生物炭添加量为 25.0%、50.0%、75.0% 和 100.0% 时,土壤孔隙度较对照分别增加 10.0%、22.0%、38.0% 和 56.0%^[29]。本试验结果表明,少量生物炭还田使水稻各个生育时期下土壤容重降低 2.69%~6.67%,总孔隙度和通气孔隙度分别提高 3.19%~8.38% 和 17.88%~92.11%,而大量生物炭还田使土壤容重降低 8.58%~11.32%,总孔隙度和通气孔隙度分别提高 9.81%~14.27% 和 52.44%~157.11%,这与 Eastman 的研究结果^[30]一致。生物炭添加到土壤中可使土壤颜色变深,进而影响土壤热导率和地表反射率,造成土壤温度的变化。Zhang 等在我国华北地区农田通过生物炭长期定位试验表明,生物炭能够调节土壤向下深度为 5.0 cm 的土层温度波动,具有削峰填谷的作用,在冬季低温时施用生物炭可使土壤温度增加 0.6℃^[31]。Ventura 等研究发现,施用生物炭增加了地表温度,但对向下深度为 7.5 cm 的土壤温度无显著性影响^[32]。本试验结果表明,少量生物炭还田对水稻各个生育阶段下土壤温度没有显著性影响,而大量生物炭还田在水稻生育后期能显著提高土壤温度 5.13%~8.75%,可能是由水稻生育前期田间水分充足,生物炭又增大了土壤的保水性有关,土壤升温的速率会因为高的含水量而大大减弱^[33],而在后期浅湿干灌溉条件下,土壤含水率下降,深色的土壤更易吸收太阳能并降低土壤表面反射率,从而使得大量生物炭的增温效果突显出来。

土壤 pH 值决定了土壤酸碱度,直接影响着土壤养分的存在状态和有效性,对土壤微生物活性、矿物质转化以及有机质矿化起着重要的作用。秸秆还田在一定程度上可以调节土壤 pH 值,而适量的生物炭还田能提升土壤 pH 值,提升耕层土壤的氧化还原电位,降低还原物质总量,改善土壤有效养分的供应^[34]。本试验结果表明,秸秆和少量生物

炭还田在水稻整个生长阶段对稻田土壤 pH 值有增加的作用,但差异不显著,这与周运来等的研究结果^[35]一致。而大量生物炭还田能够显著提高稻田土壤 pH 值(增幅为 3.15%~5.96%),且越到生育后期增幅越大,可能与生物炭本身的酸碱度(本试验生物炭 pH 值为 9.02)及其生产过程中形成的碳酸盐(MgCO_3 、 CaCO_3)和有机酸根($-\text{COO}-$)有关^[8]。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 孙建飞,郑聚锋,程 琨,等. 基于可收集的秸秆资源量估算及利用潜力分析[J]. 植物营养与肥料学报,2018,24(2):404-413.
- [3] 安丰华,王志春,杨 帆,等. 秸秆还田研究进展[J]. 土壤与作物,2015,4(2):57-63.
- [4] 汤文光,肖小平,唐海明,等. 长期不同耕作与秸秆还田对土壤养分库容及重金属 Cd 的影响[J]. 应用生态学报,2015,26(1):168-176.
- [5] 赵海成,郑桂萍,靳明峰,等. 连年秸秆与生物炭还田对盐碱土理化性状及水稻产量的影响[J]. 西南农业学报,2018,31(9):1836-1844.
- [6] 田慎重,王 瑜,李 娜,等. 耕作方式和秸秆还田对华北地区农田土壤水稳性团聚体分布及稳定性的影响[J]. 生态学报,2013,33(22):7116-7124.
- [7] 王丽君. 黄土高原半干旱丘陵区不同耕作管理措施对旱地农田土壤温度的影响[D]. 兰州:兰州大学,2012.
- [8] 武 玉,徐 刚,吕迎春,等. 生物炭对土壤理化性质影响的研究进展[J]. 地球科学进展,2014,29(1):68-79.
- [9] 王 湛,李银坤,徐志刚,等. 生物质炭对土壤理化性状及氮素转化影响的研究进展[J]. 土壤,2019,51(5):835-842.
- [10] Yuan J H, Xu R K, Zhang H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures [J]. Bioresource Technology,2011,102(3):3488-3497.
- [11] Major J, Rondon M, Molina D, et al. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol[J]. Plant and Soil,2010,333(1/2):117-128.
- [12] Zwieten L V, 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.
- [13] 魏 丹,匡恩俊,迟凤琴,等. 东北黑土资源现状与保护策略[J]. 黑龙江农业科学,2016(1):158-161.
- [14] 康日峰,任 意,吴会军,等. 26 年来东北黑土区土壤养分演变特征[J]. 中国农业科学,2016,49(11):2113-2125.
- [15] 王振忠,董百舒,吴敬民. 太湖稻麦地区秸秆还田增产及培肥效果[J]. 安徽农业科学,2002,30(2):269-271.
- [16] 徐国伟,常二华,蔡 建. 秸秆还田的效应及影响因素[J]. 耕作与栽培,2005(1):6-9.
- [17] 董桂军,陈兴良,于洪娇,等. 寒区长期秸秆全量还田对水稻土理化特性的影响[J]. 土壤与作物,2019,8(3):251-257.
- [18] 李世忠,冯海东,解 倩,等. 宁夏引黄灌区土壤物理性状对玉米秸秆还田的响应[J]. 农业科学研究,2017,38(2):19-22.
- [19] 高 静,朱 捷,黄益国,等. 农作物秸秆还田研究进展[J]. 作物研究,2019,33(6):597-602.
- [20] 杨滨娟,黄国勤,钱海燕. 秸秆还田配施化肥对土壤温度、根际微生物及酶活性的影响[J]. 土壤学报,2014,51(1):150-157.
- [21] 肖国华,欧阳先辉,陈同旺,等. 稻草覆盖还田晚稻免耕节水栽培技术应用研究[J]. 作物研究,2006,20(3):220-222.
- [22] Ramakrishna A, Tam H M, Wani S P, et al. Effect of mulch on soil temperature, moisture, weed infestation and yield of groundnut in northern Vietnam [J]. Field Crops Research, 2006, 95 (2/3): 115-125.
- [23] 陈温福,张伟明,孟 军. 农用生物炭研究进展与前景[J]. 中国农业科学,2013,46(16):3324-3333.
- [24] 涂保华,胡 茜,张 艺,等. 基于不同类型秸秆制备的生物炭对稻田土壤温室气体排放的影响[J]. 江苏农业学报,2019,35(6):1374-1380.
- [25] Ogawa M, Okimori Y, Takahashi F. Carbon sequestration by carbonization of biomass and forestation: three case studies [J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2006, 11 (2):429-444.
- [26] Steiner C, Dearth M R, Teixeira W G, et al. Soil respiration curves as soil fertility indicators in perennial central Amazonian plantations treated with charcoal, and mineral or organic fertilisers [J]. Tropical Science, 2008, 47(4):218-230.
- [27] Herath H M S K, Camps - Arbestain M, Hedley M. Effect of biochar on soil physical properties in two contrasting soils: an alfisol and an andisol [J]. Geoderma, 2013, 209/210:188-197.
- [28] Oguntunde P G, Abiodun B J, Ajayi A E, et al. Effects of charcoal production on soil physical properties in Ghana [J]. Journal of Plant Nutrient and Soil Science, 2008, 171(4):591-596.
- [29] Githinji L. Effect of biochar application rate on soil physical and hydraulic properties of a sandy loam [J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2014, 60(4):457-470.
- [30] Eastman C M. Soil physical characteristics of an aeris ochraqualf amended with biochar [D]. Columbus: the Ohio State University, 2011.
- [31] Zhang Q Z, Wang Y D, Wu Y F, et al. Effects of biochar amendment on soil thermal conductivity, reflectance, and temperature [J]. Soil Science Society of America Journal, 2013, 77 (5):1478-1487.
- [32] Ventura F, Salvatorelli F, Piana S, et al. The effects of biochar on the physical properties of bare soil [J]. Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh, 2012, 103 (1):5-11.
- [33] Oguntunde P G, Fosu M, Ajayi A E, et al. Effects of charcoal production on maize yield, chemical properties and texture of soil [J]. Biology and Fertility of Soils, 2004, 39(4):295-299.
- [34] 钟 帅. 生物质炭对潜育性稻田水稻营养的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2013.
- [35] 周运来,张振华,范如芹,等. 秸秆还田方式对水稻田土壤理化性质及水稻产量的影响[J]. 江苏农业学报,2016,32(4):786-790.