

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.03.005

邱丽丽, 李增强, 徐基胜, 等. 生物质炭和秸秆施用对黄褐土生化性质及小麦产量的影响. 土壤, 2021, 53(3): 475–482.

生物质炭和秸秆施用对黄褐土生化性质及小麦产量的影响^①

邱丽丽^{1,2,3}, 李增强¹, 徐基胜¹, 李 慧⁴, 赵炳梓^{1*}, 张佳宝¹

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 楚雄师范学院地理科学与旅游管理学院, 云南楚雄 675000; 3 中国科学院大学, 北京 100049; 4 河南农业大学资源与环境学院, 郑州 450002)

摘 要: 以位于河南省方城县的黄褐土田间定位试验为平台, 监测生物质炭和秸秆连续施用 4 a 后小麦拔节期和成熟期土壤性质变化及其与成熟期籽粒产量的关系, 明确影响小麦产量的主要土壤生化因子。试验包含 6 个处理, 即分别在不施用生物质炭(-B)和施用生物质炭(+B)条件下各设置 3 个处理: ①对照(CK), ②单施化肥(NPK), ③秸秆还田配施化肥(NPK+S)。结果表明: 生物质炭和秸秆施用对土壤生化性质和籽粒产量的影响基本上不存在交互作用。连续 4 a 施用生物质炭后, 小麦产量平均降低了 17.4%。尽管 NPK+S 与 NPK 处理间平均产量没有显著差异, 但它们比 CK 处理产量分别增加了 33.8% 和 37.4%。采用偏最小二乘法路径模型(PLS-PM)分别分析了拔节期和成熟期的土壤速效养分、活性有机质和酶活性对产量的影响, 发现小麦拔节期的土壤速效养分含量, 特别是氮素的供应是直接影响的为重要因子; 而成熟期土壤生化性质对作物产量的影响比较小。因此, 为防止黄褐土上施用生物质炭和秸秆后小麦产量降低, 需要特别注意小麦拔节期土壤氮素的补充。

关键词: 生物质炭; 秸秆还田; 速效养分; 活性有机质; 酶活性; 小麦产量

中图分类号: S154.3 **文献标志码:** A

Effects of Biochar and Straw Application on Soil Biochemical Properties and Wheat Yield in Yellow-cinnamon Soil

QIU Lili^{1,2,3}, LI Zengqiang¹, XU Jisheng¹, LI Hui⁴, ZHAO Bingzi^{1*}, ZHANG Jiabao¹

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2 School of Geographic Science and Tourism Management, Chuxiong Normal University, Chuxiong, Yunnan 675000, China; 3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4 College of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: A four-year field experiment was conducted in Fangcheng County of Henan Province to disclose the relation between crop yield and soil properties at jointing and maturity stages of winter wheat planted with biochar application (+B) or not (-B), and both contained three treatments of chemical fertilizers (NPK), chemical fertilizers plus straw (NPK+S), and an amended control (CK). The results showed that biochar and straw had no interaction effect on wheat yield. The average wheat yield was reduced by 17.4% following continuous application of biochar for 4 a. Compared to CK, wheat yield of NPK+S and NPK treatments increased by 33.8% and 37.4%, respectively, while no significant differences in wheat yield existed between NPK+S and NPK treatments. Relationships between wheat yield and soil properties at jointing or maturity stages were obtained using PLS-PM model, and it was found that wheat yield was affected mostly by N supply at jointing stage, while soil properties had less effect on wheat yield at maturity stage. In conclusion, more attentions should be paid to N supply at jointing stage of wheat in the yellow-cinnamon soil to prevent yield decrease after biochar and straw are applied.

Key words: Biochar; Straw returning; Available nutrient; Active organic matter; Enzyme activity; Wheat yield

生物质炭是生物质原料在无氧或限氧条件下经高温热解的产物, 因其在碳封存、减少温室气体排放、提高土壤质量和作物生产力等方面的潜力而被广泛

用于改良农田土壤^[1]。施用生物质炭可改善土壤结构、降低土壤养分浸出、增强土壤酶活性、增加土壤中作物生长所必需的营养供应、刺激作物根系生长,

①基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41271311)资助。

* 通讯作者(bzhao@issas.ac.cn)

作者简介: 邱丽丽(1979—), 女, 吉林通榆人, 副教授, 博士研究生, 主要从事土壤生态学研究。E-mail: 125870372@qq.com

从而促进作物产量提升^[1-2]。全球 371 个独立试验结果表明,施用生物质炭后作物地上生物量和产量平均提高 26% 和 17%^[3]。少数研究表明生物质炭可导致作物产量降低 4% ~ 24%^[4]。然而,施用生物质炭对土壤生化性质的影响随作物生育期而异。窦露等^[5]发现,生物质炭处理与化肥处理相比,其脲酶活性仅在拔节期增加,过氧化氢酶活性仅在返青期降低,而碱性磷酸酶活性却在拔节至扬花期升高。刘露等^[6]报道,壤土上施用高量生物质炭提高了小麦拔节期和成熟期的土壤 NO₃-N 和有机碳含量。

秸秆还田是提升土壤质量的常用措施,其不仅可平衡作物营养,显著改善土壤结构和水热条件,而且可提升土壤有机碳和养分,促进作物稳产和增产^[7]。相对于单施化肥,秸秆还田配施化肥明显提高了作物产量^[8],增加了土壤总有机碳及其组分^[9]以及速效养分含量,对土壤酶活性也有明显的活跃作用^[10]。秸秆施用不当也会对土壤环境和作物生产力产生负面影响。王晓娟等^[11]曾发现高比例的秸秆还田会降低玉米产量。秸秆还田对土壤的改良同样受到作物生育期的影响。研究表明,秸秆还田降低了冬小麦返青期土壤 NO₃-N 含量,但却有利于成熟期 NO₃-N 的积累^[12]。李秀等^[13]发现秸秆还田后土壤微生物生物量碳氮在小麦整个生育期呈现先增加再降低的趋势,在拔节期达到最大值。

虽然学者针对生物质炭和秸秆还田导致的作物产量升高或降低及其影响因子方面开展了大量研究,并从土壤性质变化角度做出解释,但绝大多数结果都是基于成熟期或收获后土壤性质变化与产量的关联^[2,7-10],而涉及生物质炭和秸秆施用后土壤性质随作物生育期的动态变化及其对产量的作用研究仍较少。不同生育期内土壤性质的变化会显著影响该时期作物生长进而影响最终产量。因此,明确不同生育期土壤性质对作物产量的作用,对在最佳时期采取有效措施提高当季作物生产力至关重要。

黄褐土是黄淮海平原重要的耕作土壤之一,其土质黏重,耕性和通透性差,是该地区主要的障碍土壤。本研究以田间定位试验为平台,监测生物质炭和秸秆连续施用 4 a 后的土壤生化性质和小麦产量。研究目的包括:①明确生物质炭及秸秆连续施用对小麦拔节期和成熟期黄褐土生化性质的影响;②评估不同生育期土壤生化性质对小麦产量的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

田间定位试验位于河南省方城县赵河镇现代农

业示范园区(33°08' N, 112°58' E),始建于 2012 年 10 月的小麦季。该区域气候属亚热带大陆性气候,年平均气温 15 °C,年均降水量 800 ~ 1 200 mm。供试土壤为黄褐土,质地为黏壤土。试验开始前耕层(0 ~ 20 cm)土壤理化性质为:容重 1.5 g/cm³, pH 5.9,有机质 22.8 g/kg,碱解氮 191.0 mg/kg,有效磷 46.6 mg/kg,速效钾 99.0 mg/kg。

1.2 试验设计

试验包括不施用生物质炭(-B)和施用生物质炭(+B)两种方式,每种方式均设置对照(CK)、单施化肥(NPK)和秸秆还田配施化肥(NPK+S)3 个施肥措施,共计 6 个处理。每个处理均设 3 个重复小区,小区采用随机区组排列,每个小区面积为 40 m²。生物质炭购自河南商丘三利新能源有限公司,为小麦秸秆于约 400 °C 限氧热解制备所得,其含碳量 489.6 g/kg,含氮量 18.4 g/kg,含磷量 2.5 g/kg,含钾量 34.7 g/kg。供试秸秆为玉米秸秆,来自试验小区周边肥力均匀的田块,其含碳量 429.7 g/kg,含氮量 7.0 g/kg,含磷量 1.09 g/kg,含钾量 14.7 g/kg。供试化肥为尿素、过磷酸钙和氯化钾。

试验地种植方式为冬小麦-夏玉米轮作。在小麦季,当季所用磷肥、钾肥、玉米秸秆(长 3 ~ 5 cm)和生物质炭均一次基施,50% 的氮肥作为基肥,剩余 50% 氮肥在小麦拔节期开沟追施。小麦季具体化肥施用量见表 1,确保各施肥处理间总施氮量相同。在玉米季,各施肥处理仅施用化肥,施用量均为 N 210 kg/hm²、P₂O₅ 75 kg/hm² 和 K₂O 90 kg/hm²,其中 50% 氮肥、全部磷肥和钾肥在玉米五叶期沟施,剩余 50% 氮肥于抽雄期穴施。小麦和玉米收获后其秸秆全部移出小区,其他田间管理方式与当地常规管理方式相同。

表 1 小麦季生物质炭、秸秆和化肥施用量
Table 1 Application amounts of biochar, straw and chemical fertilizer in wheat growing season

处理	施用量(kg/hm ²)		
	生物质炭	秸秆	化肥(N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)
CK-B	0	0	0
CK+B	4 500	0	0
NPK-B	0	0	180-90-75
NPK+B	4 500	0	180-90-75
NPK+S-B	0	9 000	117-90-75
NPK+S+B	4 500	9 000	117-90-75

1.3 样品采集与测定

在小麦拔节期(追肥前,2016 年 3 月 6 日)和

成熟期(2016年6月2日)采集耕层(0~15 cm)土样。每个小区均用多点混合法采集土样,置于冰盒中运回实验室。在实验室内将样品中石砾及动植物残体等挑出,一部分土样过2 mm筛,然后保存在-20℃冰箱中,用于测定土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、水溶性有机碳、氮(DOC、DON),热水提取态有机碳、氮(HWC、HWN),微生物生物量碳、氮(MBC、MBN)以及土壤酶活性。另一部分土样风干后研磨过2 mm筛用于测定土壤中有效磷(AP)和速效钾(AK)含量。

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、有效磷和速效钾含量分别采用靛酚蓝比色法、双波长比色法、钼锑抗比色法和火焰光度法测定^[14]。DOC和DON含量采用Jones和Willett^[15]的方法测定。HWC和HWN含量采用Ghani等^[16]的方法测定。MBC和MBN含量采用氯仿熏蒸-硫酸钾浸提法测定^[17]。采用3,5-二硝基水杨酸比色法测定土壤淀粉酶(AMY)和转化酶(INV)活性;苯酚钠-次氯酸钠比色法和三苯基四唑氯化物比色法分别测定脲酶(URE)和脱氢酶(DEH)活性;磷酸苯二钠比色法测定酸性磷酸酶(ACP)活性^[18]。在小麦收获期,每个小区随机取3个1 m²

样方的麦穗,待风干后脱粒测定小麦籽粒重并用来表征产量。

1.4 数据处理

对数据进行双因素方差分析并采用LSD方法进行多重比较。采用偏最小二乘路径模型(partial least squares path modeling, PLS-PM)分析土壤生化性质之间的作用及其对产量的影响。统计分析采用软件SPSS 24.0和R4.0.1中的PLSPM程序包完成。

2 结果与分析

2.1 成熟期小麦籽粒产量与不同生育期土壤速效养分

表2表明,除了拔节期的速效钾,生物质炭与秸秆配施化肥对成熟期小麦籽粒产量和生育期内速效养分均没有交互作用。连续4 a施用生物质炭显著降低了小麦籽粒产量,平均产量降幅达17.4%。相反,生物质炭施用显著提升了拔节期有效磷和速效钾含量及成熟期速效钾含量,其平均含量增幅分别达9.0%、19.5%和12.4%,但对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 没有显著影响(表2)。

表2 生物质炭和秸秆配施化肥对成熟期小麦产量和不同生育期土壤速效养分的影响
Table 2 Effects of biochar and straw with fertilizer on wheat yields and soil available nutrients in different growth periods

生育期	处理	产量(kg/hm ²)			$\text{NH}_4^+\text{-N}$ (mg/kg)			$\text{NO}_3^-\text{-N}$ (mg/kg)			AP(mg/kg)			AK(mg/kg)		
		-B	+B	平均	-B	+B	平均	-B	+B	平均	-B	+B	平均	-B	+B	平均
拔节期	CK				5.0	4.5	4.8 b	2.0	2.6	2.3 b	16.3	17.8	17.1 b	102.4	121.1	111.8 c
	NPK				7.9	6.5	7.2 a	7.2	5.9	6.6 a	21.8	23.3	22.6 a	133.6	145.2	139.4 b
	NPK+S				7.0	6.6	6.8 a	6.5	7.1	6.8 a	22.3	24.7	23.5 a	139.4	182.3	160.9 a
	平均				6.6	5.9		5.3	5.2		20.1	21.9		125.1	149.5	
	B						NS					*				**
	S						*					**				**
成熟期	CK	8 244	6 074	7 159 b	3.4	2.7	3.1 a	7.2	7.1	7.2 c	13.8	15.2	14.5 b	100.1	115.8	108.0 b
	NPK	10 554	9 120	9 837 a	3.8	3.6	3.7 a	31.7	29.1	30.4 a	17.3	19.7	18.5 a	123.7	131.5	127.6 a
	NPK+S	10 314	8 842	9 578 a	3.2	3.1	3.2 a	16.2	19.9	18.1 b	17.2	21.2	19.2 a	121.7	141.3	131.5 a
	平均	9 704	8 012		3.5	3.1		18.4	18.7		16.1	18.7		115.2	129.5	
	B		*				NS					NS				**
	S		**				NS					*				**
交互作用	B×S		NS				NS				NS				NS	

注: $\text{NH}_4^+\text{-N}$: 铵态氮, $\text{NO}_3^-\text{-N}$: 硝态氮, AP: 有效磷, AK: 速效钾。B: 生物质炭处理, S: 秸秆配施化肥处理, B×S: 交互作用; 同列小写字母不同表示同一生育期不同秸秆配施化肥处理间差异显著($P<0.05$); *, ** 表示影响达 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 显著水平, NS 表示没有显著影响; 下表同。

秸秆配施化肥处理显著影响籽粒产量及生育期内速效养分含量。NPK+S与NPK处理间籽粒平均产量没有显著差异,但它们比CK处理的平均产量增加了33.8%和37.4%(表2)。拔节期的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和有效磷

的平均含量在NPK+S和NPK处理间没有显著差异,但它们比CK处理的平均含量分别高195.7%、187.0%和37.4%、32.2%;速效钾平均含量按秸秆配施化肥处理间的排列顺序为NPK+S>NPK>CK(表2)。成熟

期的 NO_3^- -N 平均含量在 NPK 处理中最高, NPK+S 处理次之, CK 处理最低; 有效磷和速效钾平均含量在 NPK+S 和 NPK 处理间没有显著差异, 但它们比 CK 处理中其平均含量分别高 32.4%、27.6% 和 21.8%、18.1%(表 2)。

2.2 不同生育期土壤活性有机质含量

生物质炭与秸秆配施化肥对不同生育期活性有机质含量基本上没有交互作用(表 3)。施用生物质炭显著增加拔节期的 DON 和 HWN(平均含量增幅分别为 19.0% 和 11.4%)和成熟期的 HWN(平均含量增幅为 11.6%)。

秸秆配施化肥处理显著影响拔节期的 DON、HWC、HWN、MBN, 它们的平均含量在 NPK+S 和 NPK 处理间没有显著差异(表 3), 但分别比 CK 处理的平均含量增加 46.9%、66.7%, 7.8%、5.7%, 9.7%、20.3% 和 50.4%、63.3%。秸秆配施化肥处理显著影响成熟期的 DOC、DON、MBN, 其中 DOC 含量在处理间的显著差异主要表现在 NPK 处理的 DOC 平均含量比 CK 处理高 11.4%; NPK+S 处理的 DON 平均含量比 NPK 处理低 31.8%, 而比 CK 处理高 65.5%; NPK+S 与 CK 处理的 MBN 平均含量没有显著性差异, 但它们比 NPK 处理低 28.4%~41.6%(表 3)。

表 3 生物质炭和秸秆配施化肥对不同生育期土壤活性有机质的影响
Table 3 Effects of biochar and straw with fertilizer on soil active organic matter contents in different growth periods

生育期	处理	DOC(mg/kg)			DON(mg/kg)			HWC(mg/kg)			HWN(mg/kg)			MBC(mg/kg)			MBN(mg/kg)		
		-B	+B	平均	-B	+B	平均	-B	+B	平均	-B	+B	平均	-B	+B	平均	-B	+B	平均
拔节期	CK	52.2	51.0	51.6 a	7.6	11.5	9.6 b	366.4	376.5	371.5 b	38.9	43.9	41.4 b	163.9	181.2	172.6 b	9.2	18.6	13.9 b
	NPK	49.0	49.5	49.2 a	15.1	16.9	16.0 a	393.0	392.5	392.8 ab	46.0	53.6	49.8 a	187.0	227.6	207.3 a	24.2	21.1	22.7 a
	NPK+S	51.3	49.7	50.5 a	13.6	14.6	14.1 a	387.7	412.8	400.3 a	44.3	46.5	45.4 ab	192.9	197.2	195.0 ab	19.9	21.8	20.9 a
	平均	50.8	50.1		12.1	14.4		382.4	393.9		43.1	48.0		181.3	202.0		17.8	20.5	
	B	NS			*			NS			*			NS			NS		
	S	NS			**			*			**			NS			**		
	B×S	NS			NS			NS			NS			NS			*		
成熟期	CK	36.1	37.4	36.8 b	14.6	14.4	14.5 c	357.5	387.3	372.4 a	41.9	47.1	44.5 a	155.8	168.1	162.0 a	9.3	12.8	11.1 b
	NPK	40.8	41.2	41.0 a	38.0	32.5	35.2 a	376.3	387.0	381.7 a	44.4	48.8	46.6 a	167.0	172.5	169.8 a	16.1	21.9	19.0 a
	NPK+S	38.3	40.2	39.3 ab	22.4	25.5	24.0 b	383.1	411.2	397.2 a	45.2	50.8	48.0 a	175.6	186.4	181.0 a	14.2	13.0	13.6 b
	平均	38.4	39.6		25.0	24.1		372.3	395.2		43.8	48.9		166.1	175.7		13.2	15.9	
	B	NS			NS			NS			**			NS			NS		
	S	*			**			NS			NS			NS			**		
	B×S	NS			NS			NS			NS			NS			NS		

注: DOC、DON: 水溶性有机碳、氮; HWC、HWN: 热水提取态有机碳、氮; MBC、MBN: 微生物生物量碳、氮。

2.3 不同生育期土壤酶活性

与上述结果类似, 生物质炭与秸秆配施化肥对不同生育期酶活性没有交互作用(表 4)。施用生物质炭显著增加拔节期和成熟期的脲酶和脱氢酶活性, 其平均活性的增幅分别为 10.4%、8.6% 和 8.7%、6.7%。秸秆配施化肥显著影响拔节期和成熟期的所有测定的酶活性, NPK+S 处理的酶活性平均比 CK 高 12.1%~40.9%, 而 NPK 与 CK 处理间酶活性基本没有显著差异(表 4)。

2.4 土壤生化性质对作物产量的影响

利用 PLS-PM 分析了小麦产量与两个生育期土壤生化性质的关系(图 1)。图 1A 表明, 本研究测定的拔节期土壤速效养分、活性有机质、酶活性总共解释产量变异的 33%, 其中土壤速效养分(直接路径系数=0.94)的直接影响显著高于活性有机质和酶活性

(直接路径系数分别是-0.27 和-0.23)。在土壤养分变量中, NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、有效磷、速效钾的解释方差均大于 0.70(图 1C)。

然而在成熟期, 土壤速效养分、活性有机质、酶活性总共解释产量变异的 16%, 并且决定小麦产量的直接路径系数都小于 0.20(图 1B), 表明成熟期土壤速效养分、活性有机质、酶活性对产量的影响不如拔节期显著, 尽管其中脲酶、淀粉酶活性与速效钾含量具有较高的解释方差(图 1D)。

3 讨论

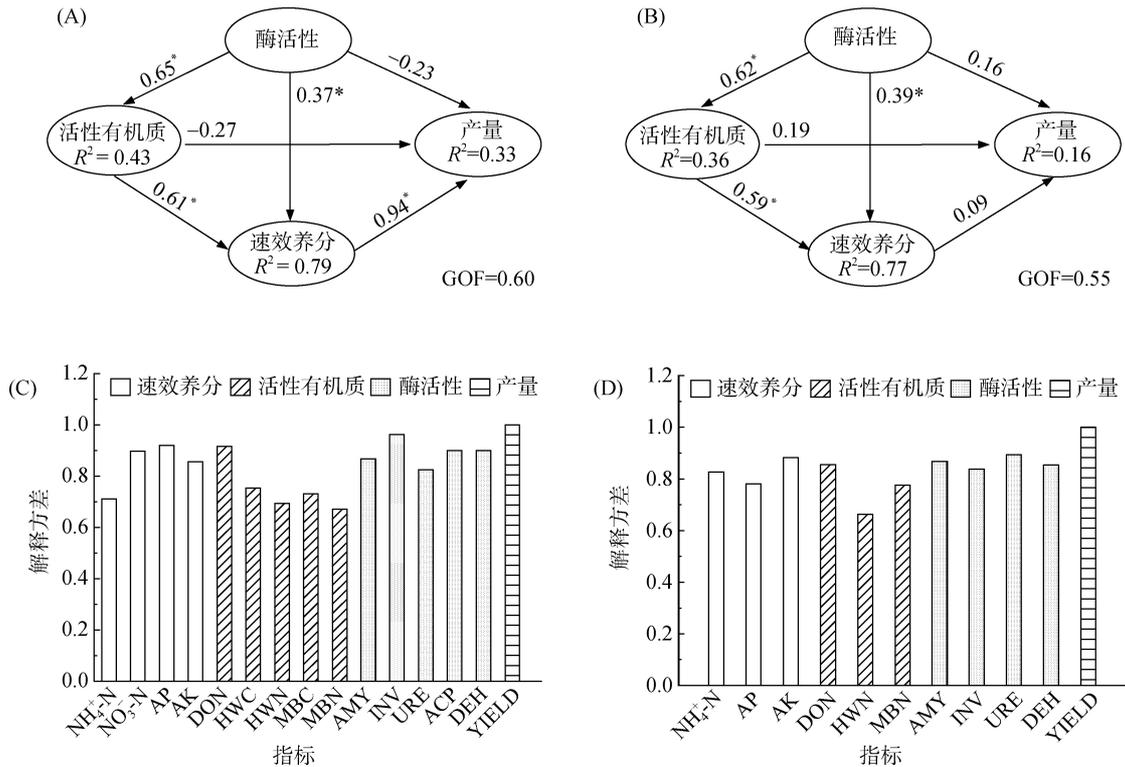
3.1 生物质炭和秸秆施用对土壤生化性质的影响

3.1.1 速效养分 表 2 表明连续 4 a 施用生物质炭显著提升了拔节期和成熟期土壤速效钾含量和拔节期有效磷含量。这与陈心想等^[19]的研究结果一致,

表 4 生物质炭和秸秆配施化肥对不同生育期土壤酶活性影响
Table 4 Effects of biochar and straw with fertilizer on soil enzyme activities in different growth periods

生育期	处理	AMY(mg/(g·24h))			INV(mg/(g·24h))			URE(mg/(g·24h))			ACP(mg/(g·24h))			DEH(TPF μg/(g·24h))		
		-B	+B	平均	-B	+B	平均									
拔节期	CK	0.96	1.01	0.99 b	21.8	22.6	22.2 b	0.45	0.46	0.46 b	0.92	0.92	0.92 b	84.2	85.7	85.0 b
	NPK	1.08	1.00	1.04 b	23.6	24.7	24.1 b	0.48	0.52	0.50 b	1.00	0.99	0.99 b	90.2	93.8	91.2 b
	NPK+S	1.13	1.35	1.24 a	26.7	29.5	28.1 a	0.52	0.60	0.56 a	1.06	1.11	1.09 a	99.0	117.2	108.1 a
	平均	1.06	1.12		24.0	25.6		0.48	0.53		0.99	1.01		91.1	98.9	
	B		NS			NS			*			NS			*	
	S		*			**			**			**			**	
	B×S		NS			NS			NS			NS			NS	
成熟期	CK	0.60	0.72	0.66 b	19.6	20.4	20.0 b	0.41	0.46	0.44 c	0.94	0.88	0.91 b	72.5	72.1	72.3 b
	NPK	0.84	0.92	0.88 a	21.6	23.5	22.6 b	0.48	0.49	0.49 b	0.94	0.91	0.93 b	74.0	78.4	76.2 b
	NPK+S	0.85	1.01	0.93 a	26.1	26.7	26.4 a	0.50	0.56	0.53 a	1.00	1.04	1.02 a	79.9	91.1	85.5 a
	平均	0.76	0.88		22.4	23.6		0.46	0.50		0.96	0.94		75.5	80.5	
	B		*			NS			**			NS			*	
	S		**			**			**			*			**	
	B×S		NS			NS			NS			NS			NS	

注：AMY：淀粉酶，INV：转化酶，URE：脲酶，ACP：酸性磷酸酶，DEH：脱氢酶。



(A、C：拔节期，B、D：成熟期。A、B中箭头上方数字表示直接路径系数，*表示作用显著。YIELD：籽粒产量，其他土壤生化指标同前)

图 1 两个生育期土壤生化性质与小麦产量的 PLS-PM 分析

Fig. 1 PLS-PM analysis of soil biochemical properties and wheat yields at two wheat growth stages

他们发现施用生物质炭提高了新积土有效磷和速效钾含量。其原因可能与生物质炭中所含的磷、钾元素释放到土壤有关。此外，施用生物质炭可减少土壤中氮、磷、镁等养分淋失^[20]，从而利于土壤有效磷含

量的增加。然而，活性磷在土壤中极易发生固定作用，这可能导致了小麦成熟期生物质炭对土壤有效磷含量无显著影响。

NPK+S 比 NPK 处理的拔节期速效钾含量高，成

熟期 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量低(表 2), 表明秸秆还田有助于提升拔节期的速效钾含量, 降低成熟期的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量。冯爱青等^[21]在棕壤上进行的盆栽试验结果表明, 秸秆配施氮肥比单施氮肥提高了小麦整个生育期 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量, 但生育期内两个处理间速效钾含量没有显著差异。可见, 该研究结果与冯爱青等的结果不一致, 这可能与试验条件和土壤类型不同有关。秸秆中的钾元素主要以离子状态存在, 秸秆进入土壤后钾离子能够快速释放到土壤中, 从而提高了拔节期速效钾含量。钾离子的淋溶损失可能是导致秸秆还田配施化肥与单施化肥处理间土壤速效钾在成熟期无显著差异的原因。成熟期小麦对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的吸收利用程度降低, 但有研究表明, 秸秆还田配施氮肥比单纯施氮肥更能提高作物的氮素利用效率^[22], 因此, 作物对土壤中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的吸收消耗差异可能是造成成熟期 NPK+S 处理 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量相对于 NPK 处理降低的原因。

3.1.2 活性有机质 活性有机碳、氮是土壤有机碳、氮中最活跃和最易变化的部分, 对土壤管理措施响应敏感。表 3 表明施用生物质炭显著提高了小麦拔节期土壤 DON、HWN 含量及成熟期 HWN 含量。Gundale 和 DeLuca^[23]也曾发现, 施入生物质炭的土壤中氮循环加快, 可溶性氮含量提高。土壤活性有机碳、氮主要来自于外源有机物料、根系及其分泌物和土壤自身有机质的分解过程。生物质炭对活性有机氮含量的影响一方面可能是由于生物质炭自身所具有的有机氮组分通过淋溶作用直接进入土壤所造成的。另一方面, 生物质炭进入土壤后会导致微生物将更多的无机氮转化为有机氮维持自身的生长和代谢活动^[24], 微生物死亡后这些有机氮释放到土壤中, 从而提高了土壤活性有机氮含量。

在拔节期, NPK+S 与 NPK 处理间的活性有机质含量没有显著差异, 但在成熟期则是 NPK+S 处理的 DON 和 MBN 含量显著低于 NPK 处理(表 3); 表明秸秆施用对活性有机氮的影响随着作物生育期不同而异。秸秆还田后其自身含有的部分含氮物质先溶出, 但很快会被土壤微生物吸收同化^[25]。土壤中可溶性氮或因微生物的吸收同化而消耗; 或因土壤有机质和秸秆的分解而增加。在小麦成熟期, 秸秆腐解的养分释放缓慢, 当土壤中矿质氮含量较低时, 微生物则以可溶性有机氮作为氮源, 其同化作用可能造成了成熟期土壤可溶性有机氮的降低。此外, 已有研究表明秸秆还田在冬小麦生育前期对土壤温度表现出明显的增温效应, 在生育后期却表现为降温效应^[13]。而在一定范围内, 温度与微生物活性与数量呈正相关关

系^[26]。因此, 秸秆还田的降温效应可能导致了成熟期秸秆还田配施化肥处理较单施化肥处理的微生物生物量氮的下降。李秀等^[13]研究也发现, 秸秆还田较无秸秆还田处理能增加冬小麦生育前期的 MBC、MBN 含量, 之后缓缓降低, 在灌浆期甚至降低土壤 MBC、MBN 的含量。

3.1.3 酶活性 土壤酶大部分是由微生物释放, 并推动着土壤生物化学转化过程。连续施用生物质炭显著提高了两个生育期的脲酶、脱氢酶活性和成熟期淀粉酶活性(表 4)。这与王智慧等^[2]的研究结果一致。土壤中酶活性主要受酶促反应底物浓度以及环境条件的影响^[18]。生物质炭对土壤酶活性的提高主要是因为^[24]: 生物质炭具有巨大的比表面积, 能够吸附胞外酶分子和底物, 提高酶与底物的表面亲和力; 生物质炭通过改变土壤理化性质而提高酶活性; 生物质炭可能释放一些小分子物质作为一些特定酶的调节剂(比如乙烯可导致 $\beta\text{-N}$ -乙酰氨基葡萄糖苷酶活性上调)。

连续施用秸秆显著提高了拔节期和成熟期土壤转化酶、脲酶、酸性磷酸酶和脱氢酶活性(表 4), 表明秸秆还田是增加与碳氮磷转化相关酶活性的重要因素。李腊梅等^[27]也发现, 长期秸秆还田能够显著增加土壤中脲酶、酸性磷酸酶和脱氢酶活性。这可能是由于秸秆中含有较高的碳水化合物及丰富的有机态氮磷等物质, 为相关酶提供了充足的反应底物, 从而有效地提高了酶活性^[18]。

3.2 不同生育期土壤性质与作物产量

施用生物质炭后, 当季小麦产量显著降低(表 2)。Kishimoto 和 Sugiura^[28]曾报道在火山灰土上施用 5 t/hm^2 和 15.25 t/hm^2 生物质炭导致大豆产量分别降低了 37% 和 71%, 究其原因是生物质炭添加提高了土壤 pH, 导致土壤中微量元素缺乏。另一项研究报道, 在酸性土壤上单施 4、8 和 16 t/hm^2 生物质炭(未配施氮肥)后, 水稻籽粒产量分别降低了 23%、10% 和 26%, 而配施氮肥后其产量没有显著性变化^[29]。本研究中 PLS-PM 分析表明小麦拔节期的土壤速效养分含量是直接影响黄褐土上当季小麦产量的重要因素(图 1A)。其中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、有效磷、速效钾的解释方差均大于 0.70(图 1C), 表明这 4 个参数是影响小麦产量的重要参数。施用生物质炭显著提升了拔节期的有效磷和速效钾含量, 而对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 没有显著影响, 进一步表明 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 可能是影响小麦产量降低的最为重要因子。 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 在土壤中的净变化量取决于多个微生物过程的综合

作用。以尿素等 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 形式施入的氮肥一般在 2~3 周内即可通过硝化作用迅速转变为移动性较强的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$, 而生物质炭的氧化表面也可以催化一定数量的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 氧化^[30]。生物质炭添加到农田土壤中, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的降低可能是挥发或被生物质炭强化固定的结果。由于微生物利用 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 需要消耗更多的能量, 因此其优先选择 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 作为氮源, 但当 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量不足以满足微生物需求时, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的微生物同化作用就有可能发生^[31]。Dail 等^[32]研究表明, 当 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 施入土壤之后, 在 15 min 之内其无机氮库便减少了 30%~60%, 这其中只有不到 5% 转化为难溶性有机氮, 而其余绝大多数转化为可溶性有机氮。而土壤中有效态碳的数量亦是限制微生物对氮源利用的关键因子, 当土壤中加入足够数量的碳源后完全可以刺激 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 同化^[33]。生物质炭含碳量高, 施入土壤后一方面刺激了微生物的数量和活性, 另一方面也增加了土壤有效碳源, 提高土壤 C/N, 会激发异氧微生物吸收更多的外源氮来满足自身生长对氮的需求; 但这同时也降低了土壤氮素的有效性。本研究中拔节期生物质炭施用后, 土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量有降低趋势(表 2), 微生物将无机氮转化为 DON 和 HWN 等有机氮(表 3), 不利于小麦对无机氮的吸收, 造成作物产量下降。已有的研究也表明施用生物质炭容易导致土壤氮素被固定, 不利于作物产量的提高^[34]。因此, 在黄褐土上施用生物质炭, 可考虑适当增加作物拔节期氮肥施用比例, 以缓解微生物与作物竞争氮素现象, 满足作物生长氮素的需要。

图 1B 表明本研究测定的小麦成熟期的土壤速效养分、活性有机质和酶活性对作物产量的直接影响都很小。小麦从播种到返青期, 根系生长量很小, 对养分需求少; 返青期到拔节期根系迅速生长, 对养分需求也迅速增加; 开花以后, 对养分的吸收率逐渐下降^[35]。刘兴海等^[36]认为, 拔节期是冬小麦的“N 素最大效益期”, 也称“N 素不足敏感期”, 在拔节期重施氮肥, 不仅不会引起贪青、倒伏, 而且能大大提高小麦后期的光合生产率, 达到成穗率高、提高粒重的明显效果。因此, 相对于拔节期, 成熟期的土壤生化性质对产量的调节效应可能较弱。

NPK+S 与 NPK 处理间的小麦籽粒平均产量没有显著差异(表 2), 表明连续 4 a 施用秸秆对小麦产量无显著性影响。秸秆中的氮磷等养分元素主要以有机形态存在, 进入土壤后短时间内并未完全被微生物分解释放, 从而造成拔节期土壤中速效氮和有效磷含量并没有显著提高。在拔节期, NPK+S 与

NPK 的处理间矿质态氮和活性有机氮均没有显著差异(表 3), 这一方面说明了秸秆还田配施化肥避免了微生物与作物争氮现象的发生, 另一方面也可能是施用秸秆处理小麦产量没有显著变化的原因。李晓等^[12]连续 3 a 的研究曾表明, 秸秆还田增产或减产与施氮量有关, 秸秆还田处理施氮量较低时小麦减产, 施氮量较高时小麦增产。因此, 今后仍需要评估秸秆与化肥的不同配比对不同生育期土壤养分的影响及生产效应, 为农业生产实践提供最合理的秸秆施用方案。

4 结论

1) 黄褐土上连续 4 a 施用生物质炭提高了小麦拔节期有效磷、速效钾、DON、HWN 含量以及脲酶和脱氢酶活性; 提高了成熟期速效钾、HWN 含量以及淀粉酶、脲酶和脱氢酶活性。连续施用秸秆提高了拔节期速效钾含量和两个生育期的转化酶、脲酶、酸性磷酸酶和脱氢酶活性, 降低了成熟期 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、DON 和 MBN 含量。

2) 黄褐土上连续 4 a 施用生物质炭后, 当季小麦减产; 而连续秸秆还田对产量却没有显著影响。小麦拔节期的土壤速效养分含量, 特别是氮素的供应是直接影响当季作物产量的最重要因子。因此在黄褐土施用生物质炭和秸秆, 应考虑适当增加作物拔节期氮肥施用比例, 从而提高作物生产力。

参考文献:

- [1] Palansooriya K N, Ok Y S, Awad Y M, et al. Impacts of biochar application on upland agriculture: A review[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 234: 52–64.
- [2] 王智慧, 殷大伟, 王洪义, 等. 生物炭对土壤养分、酶活性及玉米产量的影响[J]. *东北农业科学*, 2019, 44(3): 14–19.
- [3] Biederman L A, Harpole W S. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: A meta-analysis[J]. *GCB Bioenergy*, 2013, 5(2): 202–214.
- [4] Purakayastha T J, Bera T, Bhaduri D, et al. A review on biochar modulated soil condition improvements and nutrient dynamics concerning crop yields: Pathways to climate change mitigation and global food security[J]. *Chemosphere*, 2019, 227: 345–365.
- [5] 窦露, 杨福田, 谢英荷, 等. 生物菌肥、秸秆炭对麦田土壤酶活性及小麦产量的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2019, 25(4): 926–932.
- [6] 刘露, 王梓廷, 刘杨, 等. 长期施用生物炭对壤土土壤理化性质及微生物的影响[J]. *西北农业学报*, 2017, 26(4): 596–602.

- [7] 刘禹池, 冯文强, 秦鱼生, 等. 长期秸秆还田与施肥对成都平原稻-麦轮作下作物产量和土壤肥力的影响[J]. 西南农业学报, 2015, 28(1): 240-247.
- [8] 吴鹏年, 王艳丽, 侯贤清, 等. 秸秆还田配施氮肥对宁夏扬黄灌区滴灌玉米产量及土壤物理性状的影响[J]. 土壤, 2020, 52(3): 470-475.
- [9] 赵惠丽, 董金璘, 师江澜, 等. 秸秆还田模式对小麦-玉米轮作体系土壤有机碳固存的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58(1): 213-224.
- [10] 王倩倩, 尧水红, 张斌, 等. 秸秆配施氮肥还田对水稻土酶活性的影响[J]. 土壤, 2017, 49(1): 19-26.
- [11] 王晓娟, 贾志宽, 梁连友, 等. 旱地有机培肥对玉米产量和水分利用效率的影响[J]. 西北农业学报, 2009, 18(2): 93-97.
- [12] 李晓, 李亚鑫, 张娟霞, 等. 玉米秸秆还田对冬小麦产量和不同生育期土壤硝态氮累积量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(6): 156-162.
- [13] 李秀, 韩佳乐, 吴文雪, 等. 秸秆还田方式对关中盆地土壤微生物量碳氮和冬小麦产量的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 170-176.
- [14] 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, 159-195.
- [15] Jones D L, Willett V B. Experimental evaluation of methods to quantify dissolved organic nitrogen (DON) and dissolved organic carbon (DOC) in soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(5): 991-999.
- [16] Ghani A, Dexter M, Perrott K W. Hot-water extractable carbon in soils: A sensitive measurement for determining impacts of fertilisation, grazing and cultivation[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35(9): 1231-1243.
- [17] Wu J, Joergensen R G, Pommerening B, et al. Measurement of soil microbial biomass C by fumigation-extraction—an automated procedure[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1990, 22(8): 1167-1169.
- [18] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986, 274-338.
- [19] 陈心想, 何绪生, 耿增超, 等. 生物炭对不同土壤化学性质、小麦和糜子产量的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(20): 6534-6542.
- [20] Laird D, Fleming P, Wang B Q, et al. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil[J]. Geoderma, 2010, 158(3/4): 436-442.
- [21] 冯爱青, 张民, 李成亮, 等. 秸秆及秸秆黑炭对小麦养分吸收及土壤酶活性的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(15): 5269-5277.
- [22] 赵鹏, 陈卓. 秸秆还田配施氮肥对夏玉米氮利用及土壤硝态氮的影响[J]. 河南农业大学学报, 2009, 43(1): 14-18.
- [23] Gundale M J, DeLuca T H. Charcoal effects on soil solution chemistry and growth of *Koeleria macrantha* in the ponderosa pine/Douglas-fir ecosystem[J]. Biology and Fertility of Soils, 2007, 43(3): 303-311.
- [24] Zhu X M, Chen B L, Zhu L Z, et al. Effects and mechanisms of biochar-microbe interactions in soil improvement and pollution remediation: A review[J]. Environmental Pollution, 2017, 227: 98-115.
- [25] 汤宏, 沈健林, 张杨珠, 等. 秸秆还田与水分管理对稻田土壤微生物量碳、氮及溶解性有机碳、氮的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(1): 240-246.
- [26] Davidson E A, Belk E, Boone R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest[J]. Global Change Biology, 1998, 4(2): 217-227.
- [27] 李腊梅, 陆琴, 严蔚东, 等. 太湖地区稻麦二熟制下长期秸秆还田对土壤酶活性的影响[J]. 土壤, 2006, 38(4): 422-428.
- [28] Kishimoto S, Sugiura G. Charcoal as a soil conditioner. In: Proceedings of a Symposium on Forest Products Research International: achievements and the future[C]. CSIR Conference Center, South Africa, 1985, 5: 1-15.
- [29] Asai H, Samson B K, Stephan H M, et al. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos: 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield[J]. Field Crops Research, 2009, 111(1/2): 81-84.
- [30] 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.
- [31] Burger M, Jackson L E. Microbial immobilization of ammonium and nitrate in relation to ammonification and nitrification rates in organic and conventional cropping systems[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35(1): 29-36.
- [32] Dail D B, Davidson E A, Chorover J. Rapid abiotic transformation of nitrate in an acid forest soil[J]. Biogeochemistry, 2001, 54(2): 131-146.
- [33] 程谊, 黄蓉, 余云飞, 等. 应重视硝态氮同化过程在降低土壤硝酸盐浓度中的作用[J]. 土壤学报, 2017, 54(6): 1326-1331.
- [34] Clough T, Condon L, Kammann C, et al. A review of biochar and soil nitrogen dynamics[J]. Agronomy, 2013, 3(2): 275-293.
- [35] 刘坤, 陈新平, 张福锁. 不同灌溉策略下冬小麦根系的分布与水分养分的空间有效性[J]. 土壤学报, 2003, 40(5): 697-703.
- [36] 刘兴海, 王树安, 李绪厚. 冬小麦抗逆栽培技术原理的研究 II 不同生育期重施氮肥对冬小麦生育和抗逆性的影响[J]. 华北农学报, 1986, 1(3): 1-9.