

不同来源生物质炭对土壤养分及小麦生长的影响^①

李绍通¹, 李仁英^{1,2*}, 鲁惠明³, 刘雨霏¹, 张 朴¹, 王孙雨¹, 杜鸿萱¹

(1 南京信息工程大学生态与应用气象学院农业与生态气象江苏省高校重点实验室, 南京 210044; 2 中国气象局生态系统碳源汇重点开放实验室, 南京 210044; 3 安徽科技学院资源与环境学院, 安徽凤阳 233100)

摘 要: 为筛选提高土壤养分及促进小麦生长的生物质炭来源, 用小麦秸秆、玉米秸秆、水稻秸秆及花生壳作为原材料制备了 4 种不同来源的生物质炭, 通过盆栽试验, 研究了不同来源生物质炭对土壤养分、小麦株高、小麦各部位干物质量及氮磷吸收的影响。结果表明: 4 种来源生物质炭均增加了土壤有机质、碱解氮和有效磷的含量, 其中小麦秸秆生物质炭对土壤碱解氮和有效磷含量的增加效果较好, 与对照相比, 分别增加了 30.27% 和 71.68% ($P<0.05$)。4 种来源生物质炭均增加了小麦的株高和成熟期小麦茎秆和叶片的干物质量, 促进了小麦生长, 其中小麦秸秆生物质炭的效果最佳。此外, 4 种来源生物质炭还增加了小麦叶片的净光合速率。虽然 4 种来源生物质炭均未显著增加小麦各部位的全氮含量, 但却显著增加了小麦茎秆和叶片中的全磷含量。综上可知, 4 种来源生物质炭均能改善土壤养分及促进小麦生长, 其中小麦秸秆生物质炭具有较好的效果, 在小麦种植区推荐施用。

关键词: 生物质炭; 土壤养分; 小麦生长; 氮磷吸收; 净光合速率

中图分类号: S512.1 **文献标志码:** A

Effects of Biochars from Different Sources on Soil Nutrients and Wheat Growth

LI Shaotong¹, LI Renying^{1,2*}, LU Huiming³, LIU Yufei¹, ZHANG Pu¹, WANG Sunyu¹, DU Hongxuan¹

(1 Jiangsu Provincial University Key Laboratory of Agricultural and Ecological Meteorology, School of Ecology and Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2 Key Laboratory of Ecosystem Carbon Source and Sink, China Meteorological Administration, Nanjing 210044, China; 3 College of Resource and Environment, Anhui Science and Technology University, Fengyang, Anhui 233100, China)

Abstract: In order to screen out the biochar that can enhance soil nutrients and promote wheat growth, four kinds of biochars from wheat straw, corn straw, rice straw and peanut shell were prepared and their effects on soil nutrients, plant height, dry weight and nitrogen-phosphorus uptake of wheat were studied using a pot experiment. The results showed that the four kinds of biochars all increased the contents of organic matter, alkali-hydrolyzable nitrogen and available phosphorus in soil. In addition, the contents of soil alkali-hydrolyzable nitrogen and available phosphorus under wheat straw biochar treatment were higher than other biochar treatments, with significant increase of 30.27% and 71.68% ($P<0.05$), respectively, in comparison with the control. The four kinds of biochars all increased the plant height and dry weights of stems and leaves of wheat at maturity, thus could promote wheat growth, among which the wheat straw biochar had the best effect. In addition, the four kinds of biochars also increased the net photosynthetic rate of wheat leaves. Although the four kinds of biochars did not significantly increase the total nitrogen contents in various parts of wheat, it significantly increased the total phosphorus contents in stems and leaves of wheat. In conclusion, the four kinds of biochars all can improve soil nutrients and promote wheat growth, among which wheat straw biochar has the best effect, and is recommended to apply in wheat growing areas.

Key words: Biochar; Soil nutrients; Wheat growth; Nitrogen and phosphorus uptake; Net photosynthetic rate

我国是农业大国, 农作物种类繁多, 农业生产总量大, 随之产生了大量的秸秆资源。据联合国粮农组织统计估算, 我国年秸秆资源产量居世界之首, 约占全球秸秆资源总量的 1/5^[1]。目前, 秸秆炭化还田被

①基金项目: 2023 年江苏省碳达峰碳中和科技创新专项(BE2023398)资助。

* 通信作者(ryli75@163.com)

作者简介: 李绍通(2000—), 男, 云南昆明人, 硕士研究生, 主要从事农业环境治理研究。E-mail: 961698656@qq.com

认为是农业废弃物资源化利用的一种新模式,对于秸秆等农业废弃物资源化利用、盐碱地障碍消减、农业应对气候变化及农业可持续发展等具有重要意义^[2-4]。

秸秆炭化还田是指将农作物秸秆(如小麦、玉米、水稻秸秆等)在限氧条件下经高温(350~850 ℃)裂解制备成生物质炭,然后将生物质炭用作调理剂施入土壤的过程。近年来,将生物质炭施入土壤以提高土壤肥力、促进作物增产的方法备受关注^[5]。生物质炭具有较大的比表面积和丰富的孔隙结构,能吸附土壤养分,减少水肥流失,提高土壤肥力,间接影响作物生长,提高作物产量^[6]。支梦玲^[7]的研究发现,小麦秸秆生物质炭能够改善土壤理化性质,提高土壤速效氮、有效磷含量和阳离子交换量,从而促进棉花的生长。郑云珠等^[8]的研究表明,施用小麦秸秆生物质炭能够提高土壤水分含量,显著提高冬小麦株高和生物量。此外,玉米秸秆及其生物质炭对麦玉轮作系统的土壤肥力和作物产量也有显著的提升作用^[9]。黄清扬等^[10]研究表明,不同秸秆生物质炭复配基质中,水稻秸秆生物质炭复配基质对波斯菊发芽率和生物量的提升效果最佳。冯今萍等^[11]研究发现,花生壳及其生物质炭能显著提升红薯产量,也能显著提高土壤酶及微生物活性。生物质炭不仅增加作物的生物量,同时也促进作物对营养元素的吸收。杨艳等^[12]研究表明,生物质炭使玉米干物质质量增加 14.1% 的同时,显著提高了玉米籽粒氮吸收量和秸秆钾吸收量。刘美玲等^[13]研究表明,水稻秸秆生物质炭提高了小麦籽粒和茎叶的氮、磷、钾含量及累积量。然而,也有研究表明,生物质炭施用降低了水稻氮磷的吸收量^[14]。

目前,相关研究大多集中于单一来源的生物质

炭,而不同来源的生物质炭其性能存在一定差异,且小麦对其响应也不一致,因此,不同来源的生物质炭在小麦种植区的应用潜力尚需进一步研究。基于此,本研究通过盆栽试验,探讨小麦秸秆、玉米秸秆、水稻秸秆及花生壳 4 种来源生物质炭对土壤养分、小麦生长及其氮磷吸收的影响,对比分析 4 种来源生物质炭的影响差异,以期筛选出能够提高土壤肥力、促进小麦生长及提高小麦营养元素吸收的生物质炭来源,从而为生物质炭在小麦种植领域的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采集于南京信息工程大学农业气象试验站耕作层(0~20 cm),经自然风干,去除作物残枝和石砾后,过 2 mm 和 0.149 mm 筛备用。土壤的理化性质按照《土壤农化分析》^[15]进行测定,结果见表 1。

表 1 供试土壤的基本理化性质
Table 1 Basic physicochemical properties of tested soil

pH	有机质(g/kg)	全氮(g/kg)	有效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)
6.82	9.28	1.06	6.89	62.8

供试生物质炭以小麦秸秆、玉米秸秆、水稻秸秆以及花生壳 4 种材料自行制备:将 4 种材料洗净、烘干、研磨、过 2 mm 筛,于 105 ℃下干燥 24 h,然后分别称取 260 g 装入瓷罐中,再放置于温度为 600 ℃的马弗炉中热解 1 h,待冷却至室温后取出,研磨过 0.25 mm 筛备用。小麦秸秆、玉米秸秆、水稻秸秆和花生壳生物质炭的理化性质见表 2。

表 2 不同来源生物质炭基本性质
Table 2 Basic properties of biochars from different sources

生物质炭来源	有机碳(g/kg)	阳离子交换量(cmol/kg)	总磷(g/kg)	总氮(g/kg)	比表面积(m ² /g)	有效磷(mg/kg)	碱解氮(mg/kg)	速效钾(g/kg)
小麦秸秆	361.29	28.25	0.781	0.266	65.22	125.67	54.42	1.45
玉米秸秆	386.12	30.50	0.875	0.360	78.35	111.31	51.61	1.58
花生壳	450.35	29.12	0.622	0.297	70.40	86.26	41.24	0.98
水稻秸秆	391.29	27.25	0.581	0.386	71.22	118.43	49.34	2.04

供试作物为小麦,品种为扬麦 20。

1.2 试验设计

盆栽试验于 2016—2017 年在南京信息工程大学农业气象试验站开展。试验共设置 5 个处理,分别为:对照处理(不添加生物质炭)、小麦秸秆生物质炭处理、玉米秸秆生物质炭处理、花生壳生物质炭处理和水稻秸秆生物质炭处理,每个处理重复 3 次。试验时,称取过

2 mm 筛的土样 6.00 kg,加入肥料(施肥用量为 N 225 kg/hm², P 125 kg/hm², K 90 kg/hm²)和 4 种生物质炭(添加量为土壤质量的 4%),混匀后装入塑料盆(盆高 18.50 cm,上口径 23.00 cm,底直径 20.00 cm)。

小麦秧苗准备:小麦种子用 30% 的双氧水浸泡消毒 15 min,用蒸馏水洗净并浸泡,置于 30 ℃ 的培养箱中过夜;然后转移至吸水纸上,不断补充水分,

待发芽 5 d 后, 选取长势一致的小麦秧苗进行移栽。试验时, 每盆移栽 10 棵小麦秧苗, 成活后间苗, 保留长势一致的 5 棵秧苗。小麦生长期, 密切监视控制病虫害发生, 同时不断补充水分, 保持土壤湿润。

1.3 样品采集与测定

小麦灌浆期, 用光合仪(Li-6400XT, 美国 LI-COR 公司)测定小麦叶片的净光合速率(Pn), 每盆重复测定 4 片叶取平均值。小麦种植 30、60、90、120 d 后, 分别测定小麦株高。小麦成熟后, 分茎部、叶片、麦穗 3 个部分收获, 用自来水、去离子水分别淋洗后, 用吸水纸擦干, 于烘箱中以 105 ℃ 杀青 30 min, 再经 60 ℃ 烘干后分别称重, 然后用高速粉碎机粉碎待测。同时采集小麦根际土壤。取土时, 先用小铲子将小麦连土整体从盆中取出, 避免断根, 再轻轻晃动去除根系间松散土壤, 将仍附着在根系上的土壤用刷子刷下作为根际土。土壤样品经自然风干、去除杂质、研磨、过 20 目和 100 目尼龙筛, 用于测定土壤碱解氮、有效磷和有机质含量。

样品分析按照《土壤农化分析》^[15]测定: 小麦各部位样品用硫酸-过氧化氢消煮, 凯氏定氮法测定全氮含量, 钼蓝比色法测定全磷含量。土壤碱解氮采用碱解扩散法测定; 土壤有效磷采用碳酸氢钠浸提-钼蓝比色法测定; 土壤有机质用重铬酸钾氧化-外加热法测定。

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2010 对小麦植株与土壤养分的各指标进行统计与分析, 并绘制相关图表。采用 SPSS 26 软件, 通过单因素方差分析(One-way ANOVA)及 LSD 法比较不同处理间的差异。

2 结果与分析

2.1 不同生物质炭处理下土壤有机质及速效养分含量

不同来源生物质炭对土壤有机质、碱解氮、有效磷含量的影响如表 3 所示。由表 3 可知, 小麦秸秆、玉米秸秆、花生壳和水稻秸秆生物质炭处理均显著增加了土壤有机质含量($P<0.05$), 其中, 花生壳生物质炭处理对土壤有机质含量的增加效果最好, 与对照相比, 土壤有机质含量增加了 107.54%。与土壤有机质类似, 不同来源生物质炭处理均显著增加了土壤碱解氮含量。与对照相比, 小麦秸秆、玉米秸秆、花生壳和水稻秸秆生物质炭处理分别使土壤碱解氮含量增加 30.27%、27.97%、11.16% 和 20.72%, 其中, 小麦秸秆生物质炭处理对土壤碱解氮的增加效果最好。

不同来源生物质炭处理也增加了土壤有效磷含量, 其中, 小麦秸秆、玉米秸秆和水稻秸秆生物质炭处理增加幅度达到显著水平($P<0.05$), 与对照相比, 分别增加了 71.68%、48.79% 和 58.58%。

表 3 不同生物质炭处理下土壤有机质、碱解氮与有效磷含量

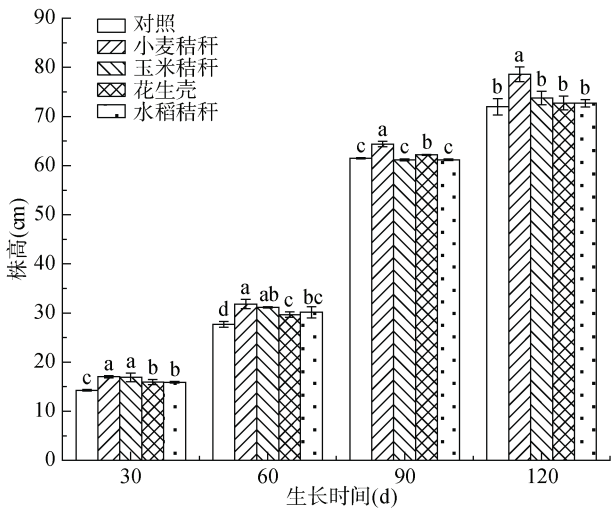
Table 3 Contents of soil organic matter, alkali-hydrolyzable nitrogen and available phosphorus under different biochar treatments

生物质炭来源	有机质(g/kg)	碱解氮(mg/kg)	有效磷(mg/kg)
对照	10.61±2.11b	37.33±2.38b	7.01±0.91b
小麦秸秆	21.96±2.07a	48.63±5.80a	12.04±0.94a
玉米秸秆	21.79±3.13a	47.77±4.29a	10.43±0.91a
花生壳	22.03±3.13a	41.49±1.40a	8.49±0.90ab
水稻秸秆	21.94±2.10a	45.06±4.29a	11.12±0.91a

注: 表中同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$), 下同。

2.2 不同生物质炭处理下小麦生长状况

不同来源生物质炭对小麦株高的影响如图 1 所示。由图 1 可知, 总体上, 不同来源生物质炭处理均增加了小麦的株高。在小麦生长 30 d 时, 小麦秸秆、玉米秸秆、花生壳和水稻秸秆生物质炭处理分别使小麦株高显著增加 19.34%、18.43%、11.63% 和 11.42%; 随着生长时间的延长, 除小麦秸秆生物质炭处理外, 其余 3 种来源生物质炭处理小麦株高与对照处理的差异逐渐减小, 当生长至 120 d 时, 其小麦株高与对照处理未见显著差异。小麦秸秆生物质炭处理在各时间点均显著增加了小麦株高, 但增幅随着生长时间的延长呈减小的趋势, 在生长 120 d 时增幅为



(柱图上方不同小写字母表示同一时间不同处理间差异显著 ($P<0.05$), 下同)

图 1 不同来源生物质炭对小麦各时间株高的影响

Fig. 1 Effects of different kinds of biochars on plant heights of wheat during different growth time

9.21%。可见,施入生物质炭可有效促进小麦前期的生长,后期的促进作用减弱,而小麦秸秆生物质炭的促进效果最持久。

不同来源生物质炭对小麦地上部生物量的影响如图2所示。由图2可知,添加4种生物质炭均增加了小麦茎秆生物量,其中小麦秸秆、玉米秸秆和水稻秸秆生物质炭处理的增量达显著水平,与对照处理相比,分别增加26.31%、11.23%和26.89%。施用小麦秸秆和水稻秸秆生物质炭显著增加了小麦叶片生物量,而施用玉米秸秆和花生壳生物质炭处理则与对照处理无显著差异。施用水稻秸秆生物质炭显著增加了小麦麦穗生物量,增幅为23.02%,而其他3种生物质炭处理与对照处理无显著差异。由此可知,4种生物质炭施入土壤后,均能在一定程度上促进小麦生长,其中小麦秸秆生物质炭和水稻秸秆生物质炭对于小麦的生物量积累具有较大的提升作用。

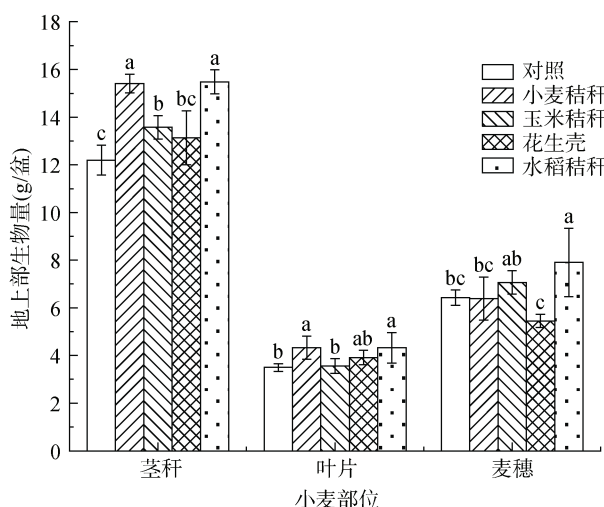


图2 不同来源生物质炭对小麦地上部生物量的影响

Fig. 2 Effects of different kinds of biochars on aboveground biomass of wheat

不同来源生物质炭对小麦叶片光合速率的影响如图3所示。由图3可知,4种来源生物质炭处理均增加了小麦净光合速率,其中小麦秸秆生物质炭处理增加显著,与对照处理相比,增加了44.27%。

2.3 不同生物质炭处理下小麦氮磷含量

小麦地上部各部位的氮、磷含量如图4和图5所示。由图4可知,虽然玉米秸秆和花生壳生物质炭处理增加了小麦茎秆的全氮含量,但差异未达显著水平。同样地,小麦秸秆、玉米秸秆和花生壳生物质炭处理增加了小麦叶片的全氮含量,玉米秸秆和花生壳生物质炭增加了小麦麦穗的全氮含量,但差异均未达显著水平。

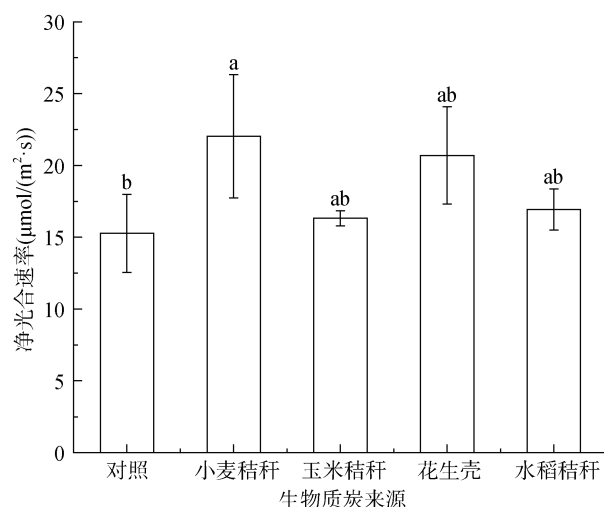


图3 不同来源生物质炭对小麦光合速率的影响

Fig. 3 Effects of different kinds of biochars on photosynthetic rate of wheat

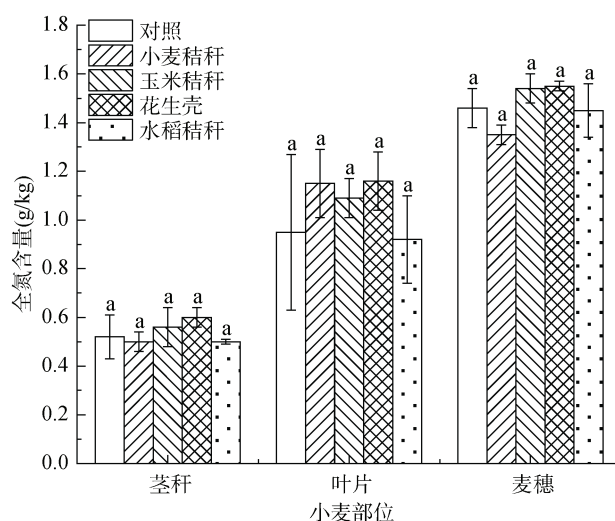


图4 小麦地上部各部位全氮含量

Fig. 4 Total nitrogen contents in various aboveground parts of wheat

水稻秸秆和玉米秸秆生物质炭处理均显著增加了小麦茎秆与叶片的全磷含量,小麦茎秆全磷含量分别增加了42.77%和51.45%,叶片全磷含量分别增加了85.59%和106.3%(图5)。而小麦秸秆生物质炭处理仅对小麦茎秆的全磷含量具有显著的提升作用,但增幅显著小于水稻和玉米秸秆生物质炭处理,为20.23%。此外,花生壳生物质炭处理小麦各部位的全磷含量与对照处理无显著差异。4种生物质炭处理对小麦麦穗的全磷含量没有显著影响。

2.4 小麦氮磷含量与土壤理化性质等指标的相关性

小麦生长120 d时,株高、净光合速率以及各部位干重、氮磷含量与土壤有机质、碱解氮和有效磷含量的相关分析结果如表4所示。由表4可知,小麦株

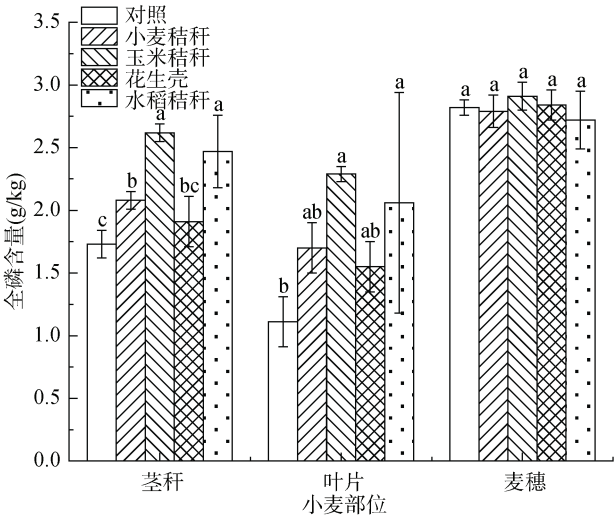


图 5 小麦地上部各部位全磷含量

Fig. 5 Total phosphorus contents in various aboveground parts of wheat

高、净光合速率以及各部位干重与土壤有机质、碱解氮、有效磷含量呈正相关关系，但相关性不显著。叶片干重与麦穗干重呈显著正相关，相关系数为 0.91 ($P<0.05$)。小麦茎秆的全磷含量和叶片的全磷含量呈显著正相关，相关系数为 0.98 ($P<0.05$)。虽然小麦茎秆的全磷含量与土壤有机质、碱解氮、有效磷含量呈正相关，但相关性未达显著水平。小麦麦穗干重与土壤有效磷含量呈显著正相关，相关系数为 0.93 ($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 不同生物质炭对土壤有机质和速效养分含量的影响

土壤有机质是评价土壤肥力水平的重要指标。本研究表明，小麦秸秆、玉米秸秆、水稻秸秆及花生壳 4 种来源的生物质炭均显著增加了土壤有机质含量，与他人的研究结果一致^[16]。由表 2 可知，这 4 种来源生物质炭具有较高的有机碳含量，为 361~450 g/kg，其中花生壳生物质炭的有机碳含量最高，这可能是 4 种生物质炭处理，特别是花生壳生物质炭处理使土壤有机质含量增加的原因之一^[17]。另外，生物质炭施用增加了土壤碳的芳香性和腐殖化系数，使其不易被土壤微生物分解，从而使得生物质炭中的有机碳长久固持在土壤中，导致土壤有机质含量增加^[18-19]。本研究中，生物质炭处理特别是小麦秸秆生物质炭处理增加了土壤碱解氮和有效磷含量(表 3)，这主要与生物质炭本身较高的碱解氮和有效磷含量有关(表 2)。另外，生物质炭具有丰富的孔隙结构，能够吸附土壤中的氮素和磷素，减少氮磷的淋失^[20]；生物质炭还能提高土壤解磷菌数量及磷酸酶和脲酶的活性，促进有机磷和有机氮的矿化，从而提高土壤碱解氮和有效磷的含量^[21-22]。本研究中，各处理土壤有效磷含量的顺序为：小麦秸秆生物质炭>

表 4 不同指标间的相关性分析
Table 4 Correlation analysis of different indicators

指标	120 d 株高	Pn	茎秆干重	叶片干重	麦穗干重	茎秆 TN	叶片 TN	麦穗 TN	茎秆 TP	叶片 TP	麦穗 TP	土壤有机质	土壤碱解氮	土壤有效磷
120 d 株高	1													
Pn	0.71	1												
茎秆干重	-0.10	-0.53	1											
叶片干重	0.54	0.62	0.25	1										
麦穗干重	0.61	0.44	0.52	0.91*	1									
茎秆 TN	-0.37	0.14	-0.63	-0.46	-0.56	1								
叶片 TN	0.57	0.79	-0.69	-0.08	0.03	0.55	1							
麦穗 TN	-0.72	-0.35	-0.20	-0.61	-0.60	0.85	0.09	1						
茎秆 TP	0.08	-0.21	0.73	0.19	0.53	-0.10	-0.09	0.16	1					
叶片 TP	0.16	-0.04	0.61	0.25	0.56	0.01	0.09	0.19	0.98*	1				
麦穗 TP	-0.07	-0.13	-0.41	-0.77	-0.62	0.67	0.51	0.60	0.08	0.12	1			
土壤有机质	0.42	0.58	0.13	0.60	0.68	0.21	0.52	0.07	0.63	0.76	-0.04	1		
土壤碱解氮	0.71	0.41	0.36	0.51	0.76	-0.21	0.41	-0.30	0.74	0.81	0.03	0.80	1	
土壤有效磷	0.72	0.44	0.47	0.74	0.93*	-0.43	0.23	-0.50	0.67	0.72	-0.30	0.77	0.94*	1

注：*表示相关性达 $P<0.05$ 显著性水平；Pn 表示净光合速率，TN 表示全氮含量，TP 表示全磷含量。

水稻秸秆生物质炭>玉米秸秆生物质炭>花生壳生物质炭>对照,这与生物质炭中有效磷含量顺序一致。这表明,生物质炭本身的有效磷含量是造成土壤有效磷含量差异的重要原因。而不同来源生物质炭对土壤酶活性的影响不同,也是引起土壤有效磷含量差异的原因^[23]。本研究发现,水稻秸秆生物质炭处理土壤有效磷含量高于玉米秸秆生物质炭处理,可能是由于水稻秸秆生物质炭对磷酸酶活性的提高效应大于玉米秸秆生物质炭。侯建伟等^[24]研究也发现,水稻秸秆生物质炭处理土壤中中性磷酸酶活性大于玉米秸秆生物质炭处理,前者的有效磷含量高于后者,这验证了磷酸酶活性对土壤有效磷的作用。

此外,土壤 pH 的增加可以改变磷在土壤与土壤矿物或金属离子之间的相互作用^[25]。Eduah 等^[26]的研究表明,由 pH 升高引起的矿物-有机复合物的形成会降低磷在酸性土壤中的吸附,从而增加土壤中磷的有效性。Qian 等^[27]研究也表明,不同来源生物质炭施入土壤后,可以通过改善土壤理化性质(如 pH 或阳离子交换量等),直接或间接地影响土壤有效养分含量。

3.2 不同生物质炭对小麦生长的影响

本研究中,4 种来源生物质炭处理增加了小麦的株高及茎秆、叶片和麦穗的干重,其中,小麦秸秆生物质炭处理的增加效果最好。这主要与生物质炭处理增加了土壤有机质、碱解氮和有效磷含量有关(表 3)。土壤养分含量是影响小麦生长的关键因素之一。添加生物质炭增加了土壤养分,从而促进小麦生长^[28]。另一方面,生物质炭处理增加了小麦叶片的净光合速率(图 3),而小麦株高、干物质累积与光合作用密切相关。本研究中,生物质炭处理(除小麦秸秆生物质炭处理外)前期显著促进小麦株高、后期促进效果减弱,可能是由于生物质炭施用初期会释放一些挥发性物质,如酚、醛、醇等,能直接作用于小麦,促进其生长,而随着时间推移,挥发性物质浓度降低,其对小麦的促进作用减弱^[29]。与其他来源的生物质炭相比,小麦秸秆生物质炭对整个培育周期小麦株高及小麦秸秆和叶片干重增加效果最好。这除与小麦秸秆生物质炭对土壤碱解氮和有效磷含量的增加效果较好外,也与对净光合速率的显著提升有关。大量研究表明,施用生物质炭能减少土壤养分淋失,增加土壤有效养分,增加叶面积和提高作物光合能力,从而促进叶片生长,最终导致作物增产^[30]。本研究中,小麦麦穗干重与土壤有

效磷含量呈显著正相关关系,证明了土壤有效养分对小麦生长的促进作用。生物质炭对小麦生长的促进作用也被秦德志等^[31]所证实,即生物质炭可以提高小麦叶片叶绿素含量和净光合速率,从而增加小麦的生物量及产量。

3.3 不同生物质炭对小麦氮磷吸收的影响

研究表明,施入 4 种生物质炭后,小麦地上部各部分的全氮含量无显著差异,这可能是由于 4 种来源生物质炭施入土壤后,对土壤碱解氮含量的增加效果有限所致。虽然 4 种来源生物质炭处理在一定程度上增加了小麦茎秆、叶片和麦穗中的全氮含量,但差异未达显著水平。另外,施入生物质炭会增加土壤碳氮比,引起土壤微生物和作物争氮,从而降低作物对氮素的吸收^[32]。本研究中,4 种生物质炭处理均增加了小麦茎秆和叶片的全磷含量,这可能与生物质炭处理使土壤有效磷含量增加有关。生物质炭因其多孔的结构、较大的比表面积以及具有较多交换性阳离子基团等特性,能够抑制磷素的淋失,改善土壤性质,提高肥料利用率,从而促进作物养分吸收^[13]。而麦穗的全磷含量在各处理间无显著差异,这与陈心想等^[33]的研究结果相似,其研究表明,小麦磷吸收量对生物质炭的响应不明显,这可能与生物质炭用量及小麦品种有关。

本研究中,虽然土壤有效磷含量各处理表现顺序为小麦秸秆生物质炭>水稻秸秆生物质炭>玉米秸秆生物质炭>花生壳生物质炭>对照,但小麦叶片和茎秆中的全磷含量顺序为玉米秸秆生物质炭>水稻秸秆生物质炭>小麦秸秆生物质炭>花生壳生物质炭>对照。这主要与不同来源生物质炭对土壤有效磷的吸附解吸特性有关。李仁英等^[34]研究发现,生物质炭处理的土壤达到吸附解吸平衡时,土壤对磷的吸附量顺序为对照>小麦秸秆生物质炭>玉米秸秆生物质炭>花生壳生物质炭>水稻秸秆生物质炭,而土壤对磷的解吸率顺序为玉米秸秆生物质炭>水稻秸秆生物质炭>花生壳生物质炭>小麦秸秆生物质炭>对照。这表明,小麦秸秆生物质炭处理的土壤对磷的吸附能力较强,但解吸能力较差,而玉米秸秆生物质炭处理的土壤对磷的解吸能力较强,从而导致玉米秸秆生物质炭处理的小麦叶片和茎秆中的全磷含量较高,而小麦秸秆生物质炭处理的全磷含量相对较低。

4 结论

1) 小麦秸秆、玉米秸秆、水稻秸秆及花生壳 4

种来源生物质炭处理均增加了土壤有机质、碱解氮和有效磷含量,其中小麦秸秆生物质炭处理对土壤碱解氮和有效磷含量的增加效果较好,这表明 4 种来源生物质炭均能提高土壤的肥力水平。

2) 小麦生长前期(60 d 内)的株高对 4 种来源生物质炭的响应均较为显著,但随着时间的推移,各生物质炭促进生长的作用均逐渐减小,其中,仅小麦秸秆生物质炭能在生长全过程中显著提高小麦株高。4 种来源生物质炭中,小麦秸秆生物质炭和水稻秸秆生物质炭对小麦生物量累积具有较大提升作用。

3) 虽然 4 种来源生物质炭对小麦全氮含量没有显著影响,但增加了小麦茎秆和叶片的全磷含量。总体而言,本研究中 4 种生物质炭对土壤养分、小麦生长及养分吸收均具有一定的提升作用,但小麦秸秆生物质炭的提升效果最好。

参考文献:

- [1] 丛宏斌,姚宗路,赵立欣,等. 中国农作物秸秆资源分布及其产业体系与利用路径[J]. 农业工程学报, 2019, 35(22): 132–140.
- [2] Yao R J, Li H Q, Yang J S, et al. Combined application of biochar and N fertilizer shifted nitrification rate and *amoA* gene abundance of ammonia-oxidizing microorganisms in salt-affected anthropogenic-alluvial soil[J]. Applied Soil Ecology, 2022, 171: 104348.
- [3] 孙波,朱安宁,姚荣江,等. 潮土、红壤和盐碱地障碍消减技术与产能提升模式研究进展[J]. 土壤学报, 2023, 60(5): 1231–1247.
- [4] 尹英杰,商建英. 农作物秸秆腐解规律及其可溶性有机质特征[J]. 土壤学报, 2025, 62(3): 692–704.
- [5] 刘晓霞,金秉洁,张敏,等. 生物质炭用量对新垦耕地土壤肥力、细菌群落结构和功能以及作物生物量的影响[J]. 土壤, 2025, 57(1): 76–85.
- [6] Farrell M, MacDonald L M, Butler G, et al. Biochar and fertiliser applications influence phosphorus fractionation and wheat yield[J]. Biology and Fertility of Soils, 2014, 50(1): 169–178.
- [7] 支梦玲. 小麦秸秆与生物炭还田对棉田土壤固碳与棉花养分利用的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2022.
- [8] 郑云珠,田晓飞,翟胜,等. 小麦秸秆生物炭对冬小麦生长及土壤水分的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(23): 84–88.
- [9] 郑云珠,孙树臣. 秸秆生物炭和秸秆对麦玉轮作系统土壤养分及作物产量的影响[J]. 中国农业科技导报, 2023, 25(2): 152–162.
- [10] 黄清扬,江超,俞元春,等. 不同秸秆生物炭复配基质对波斯菊生理性质的影响[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(6): 147–153.
- [11] 冯今萍,周际海,魏倩,等. 花生壳及其生物炭施用对旱地红壤微生物活性及红薯产量的影响[J]. 土壤通报, 2023, 54(2): 392–399.
- [12] 杨艳,牡丹,杨雪芳,等. 等碳量配施玉米秸秆和生物炭对玉米生长及氮、磷、钾吸收的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2024(8): 180–187, 266.
- [13] 刘美玲,刘悦,陈婷婷,等. 水稻秸秆生物炭对江汉平原麦区小麦养分吸收和产量的影响[J]. 中国农学通报, 2021, 37(15): 7–13.
- [14] 汪勇,吕茹洁,黎星,等. 生物炭对双季稻生长与土壤理化性质的影响及其后效[J]. 中国土壤与肥料, 2021(4): 96–103.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [16] 程明琨,萧洪东,李学文,等. 减氮条件下生物炭施用对珠三角地区生菜产量、品质及土壤性质的影响[J]. 土壤, 2023, 55(1): 37–44.
- [17] Fan W, Wu J G. Short-term effects of returning granulated straw on soil microbial community and organic carbon fractions in dryland farming[J]. Journal of Microbiology, 2020, 58(8): 657–667.
- [18] 刘天,云菲,蒋伟峰,等. 农田施用生物炭的固碳减排效应及其影响因素综述[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(18): 7–13.
- [19] Fernández-Ugalde O, Gartzia-Bengoetxea N, Arostegi J, et al. Storage and stability of biochar-derived carbon and total organic carbon in relation to minerals in an acid forest soil of the Spanish Atlantic area[J]. Science of the Total Environment, 2017, 587/588: 204–213.
- [20] 张汴泓,王成己,杨铭榆,等. 生物炭对植烟土壤氮循环微生物及其功能基因的影响[J]. 南方农业学报, 2022, 53(9): 2444–2456.
- [21] Xu G, Sun J N, Shao H B, et al. Biochar had effects on phosphorus sorption and desorption in three soils with differing acidity[J]. Ecological Engineering, 2014, 62: 54–60.
- [22] Zhang C, Zhao X, Liang A J, et al. Insight into the soil aggregate-mediated restoration mechanism of degraded black soil via biochar addition: Emphasizing the driving role of core microbial communities and nutrient cycling[J]. Environmental Research, 2023, 228: 115895.
- [23] 陈梦婕,李小英,苏小娟,等. 不同种类生物炭对元宝枫育苗基质养分及酶活性的影响[J]. 西部林业科学, 2024, 53(1): 99–107, 118.
- [24] 侯建伟,邢存芳,邓晓梅,等. 不同秸秆生物炭对黄壤理化性质及综合肥力的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(11): 49–59.
- [25] Yang C D, Lu S G. Straw and straw biochar differently affect phosphorus availability, enzyme activity and microbial functional genes in an Ultisol[J]. Science of the Total Environment, 2022, 805: 150325.
- [26] Eduah J O, Nartey E K, Abekoe M K, et al. Phosphorus retention and availability in three contrasting soils amended with rice husk and corn cob biochar at varying pyrolysis temperatures[J]. Geoderma, 2019, 341: 10–17.

- [27] Qian Z Z, Tang L Z, Zhuang S Y, et al. Effects of biochar amendments on soil water retention characteristics of red soil at South China[J]. *Biochar*, 2020, 2(4): 479–488.
- [28] 高敬尧, 王宏燕, 许毛毛, 等. 生物炭施入对农田土壤及作物生长影响的研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2016, 44(10): 10–15.
- [29] 杨勇. 生物炭对作物的生长效应及机理研究进展[J]. *农业与技术*, 2017, 37(14): 57–58.
- [30] 阚正荣, 马守田, 祁剑英, 等. 施用生物炭对冬小麦光合潜力和籽粒产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2019, 39(6): 719–727.
- [31] 秦德志, 崔文芳, 陈静, 等. 滴灌下氮肥减量配施生物炭对玉米大豆间作系统光合特性和产量的影响[J]. *大豆科学*, 2024, 43(3): 332–341.
- [32] 南学军. N肥配施生物质炭和秸秆还田对土壤和小麦氮磷含量及其 N:P 的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2017.
- [33] 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.
- [34] 李仁英, 吴洪生, 黄利东, 等. 不同来源生物炭对土壤磷吸附解吸的影响[J]. *土壤通报*, 2017, 48(6): 1398–1403.

(责任编辑: 于 飞)