

施用生物炭对华北平原冬小麦土壤水分和籽粒产量的影响

阚正荣 濮超 祁剑英 马守田 刘鹏 赵鑫 张海林*

(中国农业大学 农学院/农业农村部农作制度重点实验室,北京 100193)

摘要 为探究施用生物炭对华北平原农田土壤水分和冬小麦籽粒产量的影响,于2014—2017年在中国农业大学吴桥实验站设置施用生物炭7 200(BH)、3 600(BM)、1 800(BL)和0 kg/hm²(CK)4个处理。结果表明:与CK处理相比,BH、BM和BL处理3年平均增产分别为1.84%、7.28%和5.03%,并且降低了耗水量,水分利用效率分别提高5.96%~14.86%、9.42%~19.18%和5.96%~13.50%。同时施用生物炭增加了土壤含水量,与CK处理相比,土壤上层0~60 cm BM处理增幅最大;中层60~120 cm和下层120~200 cm均为BL处理增幅最大($P < 0.05$)。综上所述,施用生物炭可以增加土壤含水量和籽粒产量。统计分析表明,当施炭量分别为3 389~3 882和3 500~4 357 kg/hm²,0~60 cm土层土壤含水量和籽粒产量均最高,且0~60 cm土层土壤含水量与籽粒产量间存在显著的正相关关系($P < 0.05$)。因此,施用生物炭可以增加土壤含水量,降低水分消耗,提高冬小麦籽粒产量和水分利用效率,在本试验条件下以施用3 000~4 500 kg/hm²为宜。

关键词 华北平原; 生物炭; 土壤含水量; 水分利用效率; 籽粒产量

中图分类号 S278

文章编号 1007-4333(2019)04-0001-10

文献标志码 A

Effects of biochar on soil water and grain yield of winter wheat in the North China Plain

KAN Zhengrong, PU Chao, QI Jianying, MA Shoutian, LIU Peng, ZHAO Xin, ZHANG Hailin*

(College of Agronomy and Biotechnology/Key Laboratory of Farming System of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract A field experiment was conducted to study the impact of biochar on soil water and grain yield of winter wheat under wheat-maize cropping system in the North China Plain. Four treatments, including 7 200 (BH), 3 600 (BM), 1 800 (BL) and 0 (CK) kg/hm² biochar addition rates, were conducted during 2014 – 2017 at Wuqiao Experimental Station of China Agricultural University, Hebei Province. The results showed that: Compared with the CK, BH, BM and BL increased the grain yield of winter wheat by 1.84%, 7.28% and 5.03% on average for 3 years, respectively. In addition, additional biochar reduced the water consumption and improved the water use efficiency by 5.96% – 14.86%, 9.42% – 19.18% and 5.96% – 13.50%, respectively. The application of biochar also increased the soil water content. Compared with the CK, the increase amplitude of BM was the largest in the upper layer of 0-60 cm. The increase amplitude of BL was the largest in the middle layer of 60 – 120 cm and the lower 120 – 200 cm, respectively ($P < 0.05$). In summary, biochar addition can increase soil water content and grain yield. Statistical analysis showed that the soil water content and grain yield were the highest under 3 389 – 3 882 kg/hm² and 3 500 – 4 357 kg/hm² biochar addition rates, respectively. Moreover, there was a positively significant correlation between soil water content of 0 – 60 cm soil layer and grain yield ($P < 0.05$). Therefore, the application of biochar not only increased soil water

收稿日期: 2018-04-08

基金项目: 国家公益性行业(农业)科研专项(201503136)

第一作者: 阚正荣, 博士研究生, E-mail: kZR@cau.edu.cn

通讯作者: 张海林, 教授, 主要从事保护性耕作及农田生态研究, E-mail: hailin@cau.edu.cn

content and reduced water consumption, but also increased grain yield and water use efficiency of winter wheat.

Application of 3 000–4 500 kg/hm² biochar under the conditions of this experiment was optimal.

Keywords North China Plain; biochar; soil water content; water use efficiency; grain yield

近年来,在倡导固碳减排和应对全球变暖的大背景下,生物炭可为农业生产提供诸多优势而成为近年来研究的热点^[1]。生物炭是生物质在限氧环境中热化学转化产生的固体物质,其高孔隙度^[2]和多微孔结构^[3]特征益于改善土壤结构和持水能力,有利于减缓干旱与半干旱地区作物生长所受水分胁迫^[4-5]。华北平原是我国重要的粮食生产基地,但存在严重的干旱问题,尤其是冬小麦季,降雨只能满足作物需水的25%~40%,约有200~300 mm的水分亏缺,水资源短缺正在威胁着华北平原的农业可持续发展^[6-7]。因此,探究生物炭对华北区域冬小麦生产及其水分利用的影响对于缓解该区域水资源压力和提高冬小麦产量有重要意义。

目前关于添加生物炭对作物产量影响的研究较多,然而由于土壤类型、土壤肥力差异、作物种类、生物炭生成时的温度和原料、施用量等的不同,研究结果差异很大^[8-9]。分析生物炭对产量造成影响的原因,大多研究认为由于生物炭本身的多微孔结构,比表面积较大,吸附能力较强,施入土壤可降低土壤容重,增加孔隙度,进而会对土壤的持水能力和土壤有效养分造成影响^[10],然而生物炭的持水性能与自身结构和吸湿能力有关,亦受土壤质地和施用量的制约^[11]。郭大勇等^[12]和Kammann等^[13]研究发现适量的生物炭可以增加作物产量,而高量的施用会抑制作物生长,降低产量,由于年际间效应和环境变化等综合因素影响,生物炭的作物学效应还有待进一步田间验证。已有研究表明生物炭在华北平原的施用可以改善土壤理化特性和维持较高的微生物活性^[14-15],然而是否会对冬小麦的水分利用及产量产生积极影响以及适宜的施用量还缺乏相应的研究,并且前人对土壤水分的研究大多集中在成熟期的表层土壤,利用田间试验手段长期研究生物炭对田间深层土壤水分影响鲜有报道,其影响机制还有待进一步研究。

本研究基于华北平原小麦-玉米两熟种植系统,从土壤含水量、水分利用效率、冬小麦籽粒产量等变化情况揭示施用生物炭以及不同施用量对小麦生产的影响及其机理,以期生物炭在华北平原的应用以及适宜的施用量提供参考,从而缓解华北平原水资源压力,提高冬小麦产量。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2014—2017年冬小麦生长季在中国农业大学吴桥实验站进行。实验站位于河北省沧州市吴桥县曹洼乡(37°36' N, 116°21' E, 海拔19.7 m)。吴桥县属于温带半干旱季风性气候,冬季寒冷,夏季高温,常年平均气温12.6℃,全年≥0℃积温4 862.9℃,常年日照2 623.3 h,常年降水约为500 mm,年内季节性分布不均。供试土壤为冲积型盐化潮土,田间最大持水量为30.0%,试验土壤0~100 cm土层内土质为壤土,100~120 cm为粘土层,120 cm以下基本为砂土,部分土层夹杂少量粘土。0~20 cm土层的有机质含量为12.4 g/kg,全氮含量为0.79 g/kg,土壤碱解氮36.95 mg/kg,土壤速效磷44.60 mg/kg,土壤速效钾94.20 mg/kg,土壤pH值为7.67。

1.2 试验设计

试验采用田间小区试验,每个小区面积70 m²(5 m×14 m),试验设置生物炭年施用量7 200(BH)、3 600(BM)、1 800(BL)和0 kg/hm²(CK)共4个处理,采用完全随机试验设计,3次重复,共12个小区。冬小麦采用联合收割机收获,根茬约为30 cm,秸秆均匀覆盖在田间,冬小麦收获后免耕直播夏玉米。各处理作物品种、灌溉、施肥量均相同。生物炭由河南三利新能源有限公司生产,其中有机碳质量分数38.70%,全氮1.34%,全磷0.20%,全钾3.7%,pH 9.36。施用方法为:每年冬小麦播种前人工将生物炭均匀撒施到土壤表面,采用旋耕机将其翻耕混入作物耕层土壤中(一般深度为10 cm左右)。供试冬小麦品种为‘济麦22’,2014—2015年冬小麦于2014年10月11日播种,2015年6月11日收获;2015—2016年冬小麦于2015年10月10日播种,2016年6月11日收获;2016—2017年冬小麦于2016年10月11日播种,2017年6月10日收获。冬小麦播种量300 kg/hm²,冬小麦播种时施用尿素、磷酸二铵和硫酸钾用量分别为197、326和240 kg/hm²,各处理在拔节前均追施尿素150 kg/hm²,其他管理同一般大田。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 土壤容重测定

在冬小麦收获时,采用环刀法测定土壤容重,环刀的直径和高均为 5 cm,体积即为 100 cm³,分别在 0~5、5~10、10~20、20~30 和 30~50 cm 5 个土层利用环刀取土,每层均重复 3 次,于 105 °C 烘干,采用式(1)计算土壤容重。

$$\rho = (W1 - W2)/V \quad (1)$$

式中: ρ 为土壤容重, g/cm³; $W1$ 为烘干土与环刀质量, g; $W2$ 为环刀质量, g; V 为环刀体积, cm³。

1.3.2 土壤水分测定

在冬小麦成熟期,用土钻取 0~200 cm 土层土样,测定土壤含水量。其中 0~40 cm,每 10 cm 为 1 层; 40~200 cm,每 20 cm 为 1 层。105 °C 烘干至恒重。采用式(2)、(3)和(4)分别计算土壤含水量和土壤水消耗量。

$$W = (T1 - T2)/T2 \times \rho \times 100\% \quad (2)$$

式中: W 为土壤含水量, %; T_1 为鲜土质量, g; T_2 为干土质量, g。

0~60、60~120 和 120~200 cm 土层土壤含水量采用式(3)计算。

$$D = \sum_{i=1}^n W_i \cdot H_i / h \quad (3)$$

式中: D 为 0~60、60~120 和 120~200 cm 土层土壤含水量, %; i 为土壤层次号数; n 为土壤层次数, 0~60、60~120 和 120~200 cm 土层 n 分别为 5、3 和 4; W_i 为土壤体积含水量, %; H_i 为第 i 层土壤土层厚度, cm; 0~60、60~120 和 120~200 cm 土层 h 分别为 60、60 和 80 cm。

$$SW = 10 \sum_{i=1}^n H_i (\theta_{i1} - \theta_{i2}) \quad (4)$$

式中: SW 为土壤水消耗量, mm; i 为土壤层次号数; n 为土壤层次总数; H_i 为第 i 层土壤厚度, cm; θ_{i1} 为第 i 层时段初的土壤体积含水量, θ_{i2} 为第 i 层时段末的土壤体积含水量。整个生育期蒸散量根据水分平衡公式计算:

$$ET = P + I + SW - R - D \quad (5)$$

式中: ET 代表总耗水量(蒸散量); P 为降雨量; I 为灌水量; R 为地表径流; D 为深层渗漏量; SW 代表土壤水消耗量。 R 和 D 在本试验中可以忽略,所以水分平衡公式为:

$$ET = I + P + SW \quad (6)$$

$$WUE = Y/ET_1 \quad (7)$$

式中: WUE 为产量水平的水分利用效率, kg/hm²; Y 为作物经济产量, kg/hm²; ET_1 为作物生育期的总耗水量, mm。

1.3.3 群体茎蘖动态

齐苗后,每小区框定长势均匀具有代表性的 1 m²,进行数苗记录,在之后冬小麦拔节、成熟期分别同苗期定点调查茎蘖总数(均包含主茎)。

成穗率 = 成熟期单位面积穗数 /

$$\text{最高分蘖期(拔节期)单位面积茎蘖数} \times 100\% \quad (8)$$

1.3.4 叶面积指数

分别在冬小麦拔节期、孕穗期和开花期从每小区取 10 株长势均匀的植株,测定单株叶面积,叶面积使用 Yaxin-1241 叶面积仪进行测量,经过换算得出叶面积指数。

1.3.5 产量及产量结构

成熟后每处理各取 1 m² 收获,3 次重复,换算成籽粒含水率为 13% 时的最终产量,并测定有效穗数和籽粒产量。

1.4 数据处理与分析方法

采用 Microsoft Excel 2016 软件进行数据计算和绘图,使用 SigmaPlot 12.0 和 SPSS 19.0 统计分析软件进行统计分析和差异显著性检验(LSD 法)。

2 结果与分析

2.1 施用生物炭对冬小麦成熟期土壤容重的影响

施用生物炭对不同土层土壤容重的影响年际间总体趋势基本一致(表 1),不同施炭量对土壤容重的影响主要在 0~20 cm 土层。0~5 cm 土层中,与 CK 相比,施用生物炭降低了土壤容重,且以 BH 处理降幅最大,达到显著水平($P < 0.05$),3 年平均下降 7.14%。5~10 cm 土层中,BH 处理容重在 3 年中均为最低,与 BM、BL、CK 处理相比,3 年平均降幅分别为 6.20%、4.72% 和 5.47%,达到显著水平($P < 0.05$)。比较 3 年的平均值发现,10~20 cm 土层中,容重大小依次为 CK > BM > BL > BH,20~30 cm 土层为 CK > BL > BM > BH,30~50 cm 土层为 BL > CK = BM > BH,3 个土层容重均为 BH 处理最低,与 CK 处理相比,3 个土层的降幅分别为 7.04%、4.05% 和 1.94%,均达显著水平($P < 0.05$)。经方差分析,除 20~30 cm 和 30~50 cm 土层,其他 3 个土层的容重在年份间达显著水平,其中 0~5 cm 土层达到极显著水平。

表1 生物炭对冬小麦成熟期土壤容重的影响
Table 1 Effects of biochar on soil bulk density of winter wheat at maturity stage

年份 Year	处理 Treatment	土壤深度/cm Soil depth				
		0~5	5~10	10~20	20~30	30~50
2014—2015	BH	1.13 b	1.18 b	1.29 bc	1.46 a	1.55 a
	BM	1.20 ab	1.25 a	1.31 b	1.46 a	1.52 a
	BL	1.21 ab	1.22 ab	1.26 c	1.45 a	1.53 a
	CK	1.23 a	1.24 a	1.40 a	1.47 a	1.57 a
2015—2016	BH	1.22 b	1.24 b	1.39 b	1.44 b	1.49 a
	BM	1.28 a	1.33 a	1.49 a	1.45 b	1.58 a
	BL	1.28 a	1.31 a	1.48 a	1.52 a	1.56 a
	CK	1.30 a	1.32 a	1.51 a	1.55 a	1.56 a
2016—2017	BH	1.15 b	1.22 b	1.29 b	1.35 b	1.49 a
	BM	1.23 a	1.29 a	1.36 a	1.43 a	1.51 a
	BL	1.24 a	1.27 a	1.33 ab	1.41 ab	1.59 a
	CK	1.25 a	1.28 a	1.35 a	1.42 ab	1.49 a
均值 Mean	BH	1.17 b	1.21 b	1.32 b	1.42 b	1.51 a
	BM	1.24 a	1.29 a	1.39 a	1.45 ab	1.54 a
	BL	1.24 a	1.27 a	1.36 ab	1.46 a	1.56 a
	CK	1.26 a	1.28 a	1.42 a	1.48 a	1.54 a
方差分析 ANOVA	T	**	*	*	*	ns
	Y	**	*	*	ns	ns
	T×Y	ns	ns	ns	ns	ns

注: BH、BM、BL 和 CK 分别为生物炭 7 200、3 600、1 800 和 0 kg/hm²; T 表示施用生物炭处理; Y 表示年。同列不同小写字母表示同一年份不同施炭水平间差异显著 ($P < 0.05$), ** 表示 $P < 0.01$ 水平上差异显著, * 表示 $P < 0.05$ 水平上差异显著, ns 表示不显著, 下同。

Note: BH, BM, BL and CK refers to 7 200, 3 600, 1 800 and 0 kg/hm², respectively. T and Y indicate biochar addition treatments and year, respectively. Different small letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level among biochar addition treatments in the same year. ** and * indicate difference at 0.01 and 0.05 level. And ns mean not significant. The same below.

2.2 施用生物炭对冬小麦成熟期土壤水分的影响

总体上,施用生物炭增加了3个土层土壤含水量,且以BH和BM处理增加幅度最大(表2)。对于0~60 cm土层,BM处理含水量最高,BL次之,3年的均值BM分别比BH、BL和CK高17.38%、5.70%和23.96%。60~120 cm土层,施用生物炭

最高的BH处理含水量最高,3年的均值BH分别比BM、BL和CK高7.81%、12.44%和11.81%,达到显著水平($P < 0.05$)。120~200 cm土层相同变化。3个土层的土壤含水量在年份间均达到显著水平($P < 0.05$),其中0~60和60~120 cm土层达到极显著水平($P < 0.01$),见表2。

表2 生物炭对冬小麦成熟期土壤含水量的影响
Table 2 Effects of biochar on soil water content of winter wheat at maturity stage %

年份 Year	处理 Treatment	土层深度/cm Soil depth		
		0~60	60~120	120~200
2014—2015	BH	11.11 b	18.52 a	31.32 a
	BM	13.11 a	17.89 a	28.56 ab
	BL	12.23 ab	16.55 b	29.56 ab
	CK	10.54 b	16.46 b	27.08 b
2015—2016	BH	12.03 ab	17.99 a	30.89 a
	BM	13.55 a	16.98 ab	28.33 ab
	BL	13.22 a	15.69 b	28.56 ab
	CK	11.25 b	16.33 ab	27.36 b
2016—2017	BH	10.01 b	16.88 a	28.96 a
	BM	12.26 a	14.66 a	27.42 ab
	BL	11.35 ab	15.26 a	26.65 b
	CK	9.89 b	14.98 a	26.33 b
均值 Mean	BH	11.05 b	17.80 a	30.39 a
	BM	12.97 a	16.51 b	28.10 b
ANOVA	BL	12.27 a	15.83 b	28.26 b
	CK	10.56 b	15.92 b	26.92 b
	T	**	**	**
方差分析	**	**	*	
	T×Y	ns	ns	ns

2.3 施用生物炭对冬小麦生长发育与籽粒产量的影响

2.3.1 施用生物炭对冬小麦群体茎蘖动态的影响

施用生物炭对基本苗、最大茎蘖数、有效穗数和成穗率有极显著的影响($P < 0.01$, 表3)。BH和BL处理基本苗3年均均为最高, BM处理次之, BH、BM和BL处理的3年基本苗比CK平均增加10.54%、7.37%和1.66%, BH和BM处理达显著水平($P < 0.05$)。BM处理最大茎蘖数较低, 但有效穗数较高, 最终成穗率在3年中均为最高, BM处理分别比BH、BL和CK处理高28.93%、16.46%和19.38%。除有效穗数, 基本苗、最大茎蘖数和成穗率在年份间均达到显著水平($P < 0.05$)。

2.3.2 施用生物炭对冬小麦叶面积指数的影响

施用生物炭对冬小麦主要生育时期的叶面积指数有显著影响($P < 0.05$, 表4), 其中对孕穗期和开花期的影响达到极显著水平($P < 0.01$)。不同施炭量对拔节期的叶面积指数的影响年份间不一致, 3年的均值表现为BM>BL>BH>CK。孕穗期达到最大叶面积指数值, BM处理在2014—2017年均均有较高水平, 3年的均值显著高于BL和CK处理; 并且BM处理在开花期也有也保持着较高水平, 3年的均值相比于BH、BL和CK分别高7.69%、10.85%和16.67%, 达到显著水平($P < 0.05$)。拔节期、孕穗期和开花期叶面积指数在年份间均达到显著水平($P < 0.05$), 其中开花期达到极显著水平($P < 0.01$)。

2.3.3 施用生物炭对冬小麦籽粒产量和水分利用效率的影响

施用生物炭对籽粒产量的影响 3 个年份间较一

致,施用生物炭增加了籽粒产量(表 5),其中 BM 处理最高,BL 次之,BH、BM 和 BL 处理 3 年的均值比 CK 处理分别高 1.84%、7.28%和 5.03%,其中 BM

表 3 生物炭对冬小麦群体茎蘖动态的影响

Table 3 Effects of biochar on population dynamic of tillers of winter wheat

年份 Year	处理 Treatment	基本苗数/ ($\times 10^4/\text{hm}^2$) Basic seedlings	最大茎蘖数/ ($\times 10^4/\text{hm}^2$) Maximum number of stem tiller	有效穗数/ ($\times 10^4/\text{hm}^2$) Efficient spike number	成穗率/% Spike rate percentage
2014—2015	BL	477.22 a	2 006.95 b	656.40 c	32.71 b
	BM	472.52 a	1 985.62 b	826.65 a	41.63 a
	BH	429.01 b	2 036.80 b	715.64 b	35.14 b
	CK	425.66 b	2 178.92 a	749.55 b	34.40 b
2015—2016	BL	500.30 a	1 865.92 a	652.52 c	34.97 b
	BM	480.93 a	1 655.39 b	792.33 a	47.86 a
	BH	460.25 b	1 625.37 b	725.60 b	44.64 a
	CK	465.27 b	1 611.85 b	692.57 b	42.97 a
2016—2017	BL	586.14 a	2 279.14 a	859.10 b	37.69 b
	BM	565.38 a	1 958.66 b	907.58 a	46.34 a
	BH	548.68 ab	2 200.23 a	811.22 c	36.87 b
	CK	523.60 b	2 156.34 a	785.20 c	36.41 b
均值 Mean	BL	521.22 a	2 050.67 a	722.67 b	35.12 b
	BM	506.28 a	1 866.56 c	842.19 a	45.28 a
	BH	479.32 b	1 954.13 b	750.82 b	38.88 b
	CK	471.51 b	1 982.37 ab	742.44 b	37.93 b
方差分析 ANOVA	T	**	**	**	**
	Y	*	*	ns	*
	T \times Y	ns	ns	ns	ns

表 4 生物炭对冬小麦不同生育时期叶面积指数的影响

Table 4 Effects of biochar on leaf area index during different growing stages of winter wheat

年份 Year	处理 Treatment	拔节期 Jointing stage	孕穗期 Booting stage	开花期 Flowering stage
2014—2015	BH	4.32 b	5.01 b	4.12 ab
	BM	4.65 a	5.35 a	4.25 a
	BL	4.75 a	5.12 ab	3.65 b
	CK	4.31 b	4.98 b	3.55 b
2015—2016	BH	4.16 ab	5.64 a	3.70 b
	BM	4.21 a	5.58 a	4.08 a
	BL	4.00 b	4.33 b	3.46 c
	CK	4.25 a	4.55 b	3.78 b

表 4(续)

年份 Year	处理 Treatment	拔节期 Jointing stage	孕穗期 Booting stage	开花期 Flowering stage
2016—2017	BH	5.15 ab	6.24 a	2.71 b
	BM	5.32 a	6.32 a	3.01 a
	BL	5.05 b	5.44 b	3.12 a
	CK	4.41 c	6.10 a	2.39 b
均值 Mean	BH	4.54 b	5.63 a	3.51 b
	BM	4.73 a	5.75 a	3.78 a
	BL	4.60 ab	4.96 c	3.41 b
	CK	4.32 b	5.21 b	3.24 c
方差分析 ANOVA	T	*	**	**
	Y	*	*	**
	T×Y	ns	ns	ns

表 5 生物炭对冬小麦籽粒产量与水分利用效率的影响

Table 5 Effects of biochar on grain yield and water use efficiency of winter wheat

年份 Year	处理 Treatment	籽粒产量/ (kg/hm ²) Grain yield	总耗水量/mm Total water consumption	水分利用效率/ (kg/hm ²) Water use efficiency
2014—2015	BH	8 600.26 b	398.68 c	21.57 ab
	BM	8 956.23 a	405.30 c	22.10 a
	BL	8 566.77 b	425.62 b	20.13 bc
	CK	8 263.68 c	440.12 a	18.78 c
2015—2016	BH	7 970.79 b	457.32 bc	17.43 ab
	BM	8 637.75 a	442.65 c	19.51 a
	BL	8 554.30 a	460.35 b	18.58 a
	CK	8 025.92 b	490.16 a	16.37 b
2016—2017	BH	7 686.70 ab	369.56 b	20.80 b
	BM	7 959.63 a	370.64 b	21.48 a
	BL	7 895.34 a	379.65 ab	20.80 b
	CK	7 529.65 b	383.65 a	19.63 b
均值 Mean	BH	8 085.92 b	408.52 b	19.79 ab
	BM	8 517.87 a	406.20 b	20.97 a
	BL	8 338.80 ab	421.87 a	19.77 ab
	CK	7 939.75 b	437.98 a	18.13 b
方差分析 ANOVA	T	**	*	*
	Y	**	**	ns
	T×Y	ns	ns	ns

处理达到显著水平($P < 0.05$)。并且施用生物炭降低了生育期耗水量, BH、BM 和 BL 处理 3 年的均值比 CK 处理分别降低了 7.21%、7.26% 和 3.68%, 其中 BH 和 BM 处理达到显著水平($P < 0.05$)。施用生物炭提高了水分利用效率, 表现为 $BM > BH > BL > CK$, 其中 BM 处理显著高于 CK 处理($P < 0.05$)。除了水分利用效率, 籽粒产量和耗水量在年份间均达到极显著水平($P < 0.01$)。

2.4 不同施炭水平下土壤含水量的籽粒产量的变化情况

施炭量与相应的上层土壤含水量(0~60 cm) 存在显著的相关关系($P < 0.05$) (图 1), 随着施炭量的增加, 土壤含水量呈现先上升后下降的趋势, 2014—2015、2015—2016 和 2016—2017 年当施炭量分别为 3 882、3 389 和 3 676 kg/hm² 时, 土壤含水量可以达到最大值。

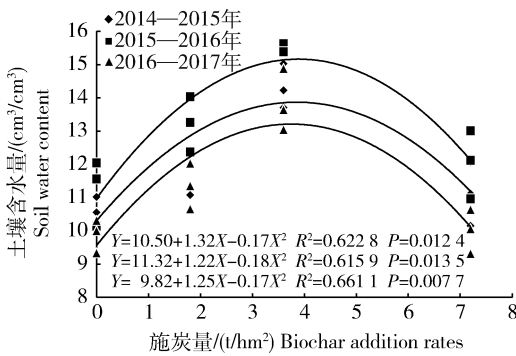


图 1 不同施炭水平下 0~60 cm 土层土壤含水量的变化情况

Fig. 1 The dynamic of soil water content of 0—60 cm soil depth under different biochar addition rates

对不同施炭量与籽粒产量进行相关分析 (图 2), 发现 2014—2015 和 2015—2016 年, 2 年施炭

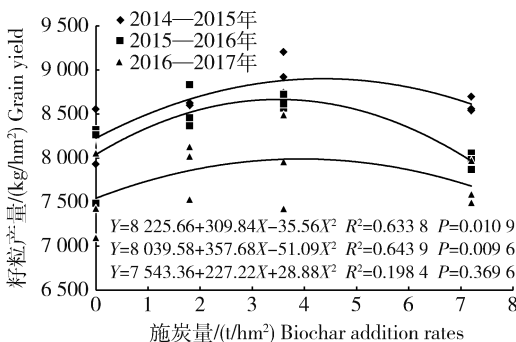


图 2 不同施炭水平下籽粒产量的变化情况

Fig. 2 Dynamic of grain yield under different biochar addition rates

量与相应的籽粒产量之间存在显著的相关关系 ($P < 0.05$)。随着施炭量的增加, 土壤含水量呈现先上升后下降的趋势, 当施炭量分别为 4 357 和 3 500 kg/hm² 时, 籽粒产量达到最大值, 分别为 8 901 和 8 666 kg/hm²。

不同施炭量下 0~60 cm 土层土壤含水量与相应的籽粒产量进行相关性分析, 发现两者存在显著的相关关系 ($P < 0.05$) (图 3)。

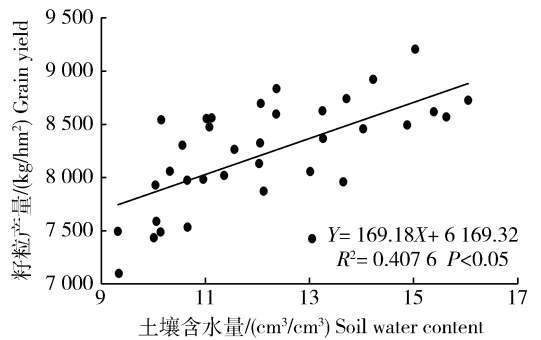


图 3 不同施炭水平下 0~60 cm 土层土壤含水量与籽粒产量相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis between soil water content of 0—60 cm soil depth and grain yield under different biochar addition rates

3 讨论

生物炭是多孔材料, 密度较低, 越来越多的研究表明, 施用生物炭可以降低土壤容重^[16-17], 其直接原因是稀释效应^[18], 即由于生物炭容重远低于土壤容重, 因此生物炭施用量越大, 土壤容重越低。另一方面, 生物炭通过改善土壤通气状况, 保持养分和水分, 从而提高土壤微生物的数量和活性, 增强菌体与矿物质土粒之间的相互作用, 也增强微生物分泌物团聚土壤矿物质颗粒的作用, 从而降低土壤容重^[19]。本研究结果表明, 施用生物炭显著降低了表层土壤容重 ($P < 0.05$), 并以施用量最高的 BH 处理降幅最大, 与前人结果一致^[16]。

本研究结果表明, 与 CK 处理相比, 施用生物炭增加了土壤含水量。其中, 比较上层 0~60 cm 土壤含水量表明, BM 处理增幅最大, 中层 60~120 cm 和下层 120~200 cm 均为 BL 处理增幅最大, 均达显著水平 ($P < 0.05$)。农田施用生物炭后, 土壤含水量的高低一方面由生物炭本身特性决定, 其表面是多微孔结构, 具有一定的吸水倍率, 可增加土壤对

水分的吸收^[3];另一方面由于生物炭与土壤混合显著降低了原土壤表层(0~20 cm)容重($P<0.05$),增加了土壤孔隙度,能够使降雨等水分从土壤上层向下层流动,从而增大了土壤持水量^[20]。另外,本研究表明,施用生物炭减少了全生育期的水分消耗,提高了水分利用效率,与前人研究结果一致^[21]。主要由于生物炭具有亲水基结构,从而具有极强的吸附和持水能力^[22],降低了渗流,减少消耗,提高了水分利用效率。然而本研究成果亦表明,随着施炭量增加,水分利用效率出现下降趋势。可能是由于过多的生物炭增加了土壤的斥水性,生物质炭中有机物多含疏水性基团,水会以液珠的形式滞留在土壤表面,在很长时间内不能下渗,导致水分在土壤表面蒸发^[23]。关于过量的生物炭加剧土壤表面蒸发的机理,还有待通过对冬小麦生育期内土壤蒸发量的监测作进一步的论证^[24]。

施用生物炭增加了籽粒产量,3年均值BH、BM和BL处理增幅分别约1.84%、7.28%和5.03%。一方面,生物炭有丰富的微孔结构,比表面积较大,孔隙结构丰富,吸附能力强,施入土壤后能吸附多种离子,不仅减少氮磷等养分的淋溶损失,而且可以延缓肥料养分在土壤中的释放,从而达到保持土壤养分的效果^[25],并且生物炭含碳量较高,施入土壤可以增加土壤有机质含量^[26],因此增加了基本苗数,成穗率,并且在开花期能够保持较高的叶面积指数。另一方面,华北平原年内降雨分布不均,小麦季降雨较少,水分成为限制小麦产量的主要影响因子,施用生物炭增加了成熟期3个土层的土壤含水量。

然而,本研究成果表明,随着生物炭施用量的增加,小麦产量反而有所降低,但仍然高于CK处理。以生物炭施用量为自变量,小麦产量及土壤含水量为因变量,经二次曲线拟合表明,当施炭量为3389~3882 kg/hm²时,0~60 cm土层含水量可以达到最大值,同时其籽粒产量也可以达到较大值(图1和图2)。分析认为,生物炭矿质养分含量低而含碳量较高,过量的生物炭施入土壤后供作物吸收利用的有效态养分较少,使土壤C/N提高,从而降低土壤养分尤其是氮素有效性,使产量有所降低^[27-28]。另外,不同的土壤类型和肥力状况、作物种类、生物炭本身理化性质和施用量等都会影响生物炭对作物生长、产量的影响效果^[24]。

4 结论

1)施用生物炭降低了冬小麦成熟期表层(0~

20 cm)土壤容重,提高了土壤含水量,当施炭量为3389~3882 kg/hm²时,0~60 cm土层含水量达到最大值。

2)施用生物炭增加了冬小麦基本苗数,茎蘖成穗率,开花期的叶面积指数,最终提高了籽粒产量,当施炭量为3500~4357 kg/hm²时,可以获得最高产量,同时降低了生育期内的耗水量,最终提高了水分利用效率。

3)综合分析,施用生物炭可以提高土壤含水量、冬小麦籽粒产量和水分利用效率,在本试验条件下以施用3000~4500 kg/hm²为宜。

参考文献 References

- [1] Lehmann J, Rillig M C, Thies J, Masiello C A, Hockaday W C, Crowley D. Biochar effects on soil biota—a review[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(9): 1812-1836
- [2] Huang M, Yang L, Qin H D, Jiang L G, Zou Y B. Quantifying the effect of biochar amendment on soil quality and crop productivity in Chinese rice paddies[J]. *Field Crops Research*, 2013, 154(3): 172-177
- [3] Oguntunde P G, Abiodun B J, Ajayi A E, Van De Giesen N. Effects of charcoal production on soil physical properties in Ghana[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171(4): 591-596
- [4] Uzoma K C, Inoue M, Andry H, Fujimaki H, Zahoor A, Nishihara E. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition [J]. *Soil Use and Management*, 2011, 27(2): 205-212
- [5] Gaskin J W, Speir R A, Harris K, Das K C, Lee R D, Morris L A, Fisher D S. Effect of peanut hull and pine chip biochar on soil nutrients, corn nutrient status, and yield[J]. *Agronomy Journal*, 2010, 102(2): 623-633
- [6] Fang Q X, Ma L, Green T R, Yu Q, Wang T D, Ahuja L R. Water resources and water use efficiency in the North China Plain: Current status and agronomic management options[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(8): 1102-1116
- [7] Zhang X Y, Pei D, Chen S, Sun H Y, Yang Y H, Zhang X Y, Pei D, Chen S Y, Yang Y H. Performance of double-cropped winter wheat-summer maize under minimum irrigation in the north China plain[J]. *Agronomy Journal*, 2006, 98(6): 1620-1626
- [8] Van Zwieten L, Kimber S, Morris S, Chan K Y, Downie A, Rust J, Joseph S, Cowie A. 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
- [9] Jeffery S, Verheijen F G A, van der Velde M, Bastos A C. A quantitative review of the effects of biochar application to soils

- on crop productivity using meta-analysis [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 144(1): 175-187
- [10] Ahmad M, Rajapaksha A U, Lim J E, Zhang M, Bolan N, Mohan D, Vithanage M, Lee S S, Ok Y S. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review [J]. *Chemosphere*, 2014, 99(3): 19-33
- [11] 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
- Chen W F, Zhang W M, Meng J. Advances and prospects in research of biochar utilization in agriculture [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(16): 3324-3333 (in Chinese)
- [12] 郭大勇, 商东耀, 王旭刚, 常会庆, 林帆. 改性生物炭对玉米生长发育、养分吸收和土壤理化性状的影响 [J]. *河南农业科学*, 2017, 46(2): 22-27
- Guo D Y, Shang D Y, Wang X G, Chang H Q, Lin F. Effects of modified biochar on growth, nutrients uptake of maize and soil physicochemical properties [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2017, 46(2): 22-27 (in Chinese)
- [13] Kammann C I, Linsel S, Göbbling J W, Koyro, H W. Influence of biochar on drought tolerance of *Chenopodium quinoa* Willd and on soil-plant relations [J]. *Plant and Soil*, 2011, 345(1-2): 195-210
- [14] 张星, 刘杏认, 张晴雯, 张庆忠, 任建强. 生物炭和秸秆还田对华北农田玉米生育期土壤微生物量的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(10): 1943-1950
- Zhang X, Liu X R, Zhang Q W, Zhang Q Z, Ren J Q. Effects of biochar and straw direct return on soil microbial biomass during maize growth season in North China Plain [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(10): 1943-1950 (in Chinese)
- [15] 陈红霞, 杜章留, 郭伟, 张庆忠. 施用生物炭对华北平原农田土壤容重、阳离子交换量和颗粒有机质含量的影响 [J]. *应用生态学报*, 2011, 22(11): 2930-2934
- Chen H X, Du Z L, Guo W, Zhang Q Z. Effects of biochar amendment on cropland soil bulk density, cation exchange capacity, and particulate organic matter content in the North China Plain [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(11): 2930-2934 (in Chinese)
- [16] Omondi M O, Xia X, Nahayo A, Liu X Y, Korai P K, Pan G X. Quantification of biochar effects on soil hydrological properties using meta-analysis of literature data [J]. *Geoderma*, 2016, 274: 28-34
- [17] 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
- [18] Hati K M, Swarup A, Dwivedi A K, Misra A K, Bandyopadhyay K K. Changes in soil physical properties and organic carbon status at the topsoil horizon of a vertisol of central India after 28 years of continuous cropping, fertilization and manuring [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2007, 119(1-2): 127-134
- [19] Burrell L D, Zehetner F, Rampazzo N, Wimmer B, Soja G. Long-term effects of biochar on soil physical properties [J]. *Geoderma*, 2016, 282: 96-102
- [20] Baronti S, Vaccari F P, Miglietta F, Calzolari C, Lugato E, Orlandini S, Pini R, Zulian C, Genesio L. Impact of biochar application on plant water relations in *Vitis vinifera* (L) [J]. *European Journal of Agronomy*, 2014, 53(2): 38-44
- [21] Basso A S, Miguez F E, Laird D A, Horton R, Westgate M. Assessing potential of biochar for increasing water-holding capacity of sandy soils [J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2013, 5(2): 132-143
- [22] 魏春辉, 任奕林, 刘峰, 邓宇玄, 苑晓辰. 生物炭及生物炭基肥在农业中的应用研究进展 [J]. *河南农业科学*, 2016, 45(3): 14-19
- When C H, Ren Y L, Liu F, Deng Y X, Yuan X C. Research progress of application of biochar and biochar-based fertilizer in agriculture [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2016, 45(3): 14-19 (in Chinese)
- [23] Peng X, Ye L L, Wang C H, Zhou H, Sun B. Temperature- and duration-dependent rice straw-derived biochar: Characteristics and its effects on soil properties of an Ultisol in southern China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2011, 112(2): 159-166
- [24] 李中阳, 齐学斌, 樊向阳, 吴海卿, 杜臻杰, 李平, 吕谋超. 生物炭对冬小麦产量、水分利用效率及根系形态的影响 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31(12): 119-124
- Li Z Y, Qi X B, Fan X Y, Wu H Q, Du Z J, Li P, Lv M C. Influences of biochars on growth, yield, water use efficiency and root morphology of winter wheat [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(12): 119-124 (in Chinese)
- [25] Laird D, Fleming P, Wang B, Horton R, Karlen D. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil [J]. *Geoderma*, 2010, 158(3-4): 436-442
- [26] Kimetu J M, Lehmann J. Stability and stabilisation of biochar and green manure in soil with different organic carbon contents [J]. *Soil Research*, 2010, 48(7): 577-585
- [27] Asai H, Samson B K, Stephan H M, Songyikhangsuthor K, Homma K, Kiyono Y, Inoue Y, Shiraiwa T, Horie T. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos [J]. *Field Crops Research*, 2009, 111(1-2): 81-84
- [28] 刘悦, 黎子涵, 邹博, 孙圣仪, 郭鉴增, 孙彩霞. 生物炭影响作物生长及其与化肥混施的增效机制研究进展 [J]. *应用生态学报*, 2017, 28(3): 1030-1038
- Liu Y, Li Z H, Zou B, Sun S Y, Guo J Z, Sun C X. Research progress in effects of biochar application on crop growth and synergistic mechanism of biochar with fertilizer [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(3): 1030-1038 (in Chinese)