



炭基肥与调亏灌溉对大豆生长及水分利用效率的影响

姜雪¹,王丽学¹,戴皖宁¹,栾永鹏¹,胡剑²

(1. 沈阳农业大学 水利学院,辽宁 沈阳 110866;2. 辽宁睿鑫水利工程有限公司,辽宁 沈阳 110400)

摘要:为探究棕壤土环境下适宜大豆生长的炭基肥施肥量和调亏灌溉程度,在盆栽条件下,设置4种不同水平的炭基肥施用量,并于大豆开花期进行调亏灌溉与炭基肥互作,分析炭基肥施用量和调亏灌溉程度主效应及二者的交互效应对大豆株高、干物质重、产量和水分利用效率的影响。结果表明:轻度调亏BF₂W₂处理下,施加300 kg·hm⁻²炭基肥对株高的补偿作用较其它处理增长幅度最大,为19.53%;施加600 kg·hm⁻²炭基肥和轻度调亏灌溉互作可以促进大豆地上部干重,较对照处理增加68.59%,根干重则在600 kg·hm⁻²时出现峰值,根冠比整体表现为在同一水分条件下随着施肥量的增加逐渐降低;该组合模式有利于大豆产量和水分利用效率的提高,大豆的产量为每盆89.58 g,较产量最低处理增产51.16%,该处理下水分利用效率比最低水分利用效率提高了55.07%。此种组合模式下的炭基肥施用量和调亏灌溉程度可以为该环境下的大豆生产提供理论依据。

关键词:炭基肥;调亏灌溉;东北大豆;产量;水分利用效率

Effects of Biochar Based Fertilizer and Regulated Deficit Irrigation on Growth and Water Use Efficiency of Soybean

JIANG Xue¹, WANG Li-xue¹, DAI Wan-ning¹, LUAN Yong-peng¹, HU Jian²

(1. College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 2. Liaoning Ruixin Hydraulic Engineering Co., Ltd., Shenyang 110400, China)

Abstract: In order to explore the effects of biochar based fertilizer application and the degree of regulated deficit irrigation on soybean growth, yield and water use efficiency under brunisolic soil environment, we setted four different levels of carbon base fertilizer application to interact with regulated deficit irrigation at the flowering stage, and analyzed the main effects of biochar based fertilizer and regulated deficit irrigation and the effects between them on the plant height, dry matter weight, yield and water use efficiency of soybean. The results showed that the compensation effect of 300 kg·ha⁻¹ biochar applied based on fertilizer under the slight deficit reduction (BF₂W₂ treatment) on plant height was the largest, which was 19.53%, the application of 600 kg·ha⁻¹ biochar based fertilizer and slight regulated deficit irrigation can promote the dry weight of soybean shoots, which was 68.59% higher than that of the control treatment, the root dry weight peaked at 600 kg·ha⁻¹, the root-shoot ratio was generally reduced under the same water condition with the increasing of fertilizer application. The model was beneficial to the increase of soybean yield and water use efficiency, whose yield of soybean was 89.58 g per pot, which increased by 51.16% compared with the lowest yield, the water use efficiency under this treatment increased by 55.07% compared with the lowest water use efficiency. This model based on the biochar fertilizer application and the degree of regulated deficit irrigation can provide a theoretical basis for the production of soybean in this environment.

Keywords: Biochar based fertilizer; Regulated deficit irrigation; Soybean of northeast region; Yield; Water use efficiency

目前,作为我国主要的油料、粮食、肥料和工业原料,大豆产量及经济效益仍然偏低。据统计,东北地区大豆种植面积达到全国大豆种植面积的50%,产量占据全国总产量的30%左右,东北地区大豆产量直接影响我国大豆总产量^[1]。在我国水资源短缺的现状中,农业灌溉水利用效率仅为0.54,与先进国家相比相差近一倍,尤其是东北地区,农业用水利用效率更是有待提高^[2]。调亏灌溉的节水增产效应已经被很多试验证实,调亏灌溉改变作物水分供给,同时改变了充分供水下作物不同组织器官对于光合产物的分配,提高水分利用效

率,进而提高作物的产量。作物正常的生长发育是地上部光合和地下部根系吸收水分和养分相统一的反馈过程,强大的根系吸收促进地上部的光合作用,而充足的光合产物又会为根系的生长提供必需的营养物质,调亏灌溉理论认为根系对于水分利用效率的提高起到决定性作用,研究调亏灌溉对大豆株高、地上部、地下部干物质重及根冠比能反映出作物的生长发育状况,而真正符合作物的生长需水生理特性的调亏灌溉,则需要作物适宜的生育期进行适度的水分亏缺^[3]。白伟等^[4]认为在大豆苗期进行调亏灌溉,对其生长初期起到抑制的作用,

收稿日期:2019-08-26

基金项目:国家教育部留学回国人员科研启动基金(20101174)。

第一作者简介:姜雪(1994-),女,硕士,主要从事节水灌溉及区域水资源高效利用方面的研究。E-mail:865900783@qq.com。

通讯作者:王丽学(1964-),女,博士,教授,博导,主要从事节水灌溉及区域水资源高效利用研究。E-mail:1531353023@qq.com。

影响出苗率。结合车艳朋等^[5]研究,大豆结荚期干旱处理容易造成减产现象,而于大豆开花期进行调亏灌溉,恢复供水后,大豆的株高、茎粗、叶面积等呈现明显的超补偿现象,使产量明显提高,因此本研究选在大豆开花期进行不同程度的调亏灌溉。

中国年均化肥的消耗量已经高达 5 000 万 t 左右,成为世界化肥生产和消费的第一大国^[6]。化肥的浪费不仅会带来资源上的浪费,而且还会造成水体、大气、土壤等环境的严重污染。生物炭基肥是一种以生物炭为载体与化肥混合在一起的复混新型肥料,除具备生物炭改良土壤、保水保肥的基本特性外,还融合了生物炭与肥料所具有的肥力,加上其自身结构的特点与稳定性,使养分缓慢释放,比普通肥料肥效更持久、高效,因而能够更稳定的促进作物的生长^[7-10]。战秀梅等^[11]发现,炭基肥能够改善土壤的保水保肥能力,促进作物光合产物的生长和产量的形成。目前,单一生育期调亏灌溉和炭基肥的结合对大豆在棕壤土环境上的生长变化规律的研究较少,对此,本研究基于东北大豆产区棕壤土环境,将炭基肥和调亏灌溉结合,在炭基肥不同施加量的基础上,于大豆的开花期进行不同程度的水分亏缺处理,探究该环境下炭基肥和调亏灌溉互作效应对大豆生长、产量及水分利用效率的影响,以期为大豆减肥控水条件下的优质高产提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2018 年 5 - 10 月在沈阳市东部沈阳农业大学水利学院综合试验基地(41°44'N;123°27'E)遮雨棚中进行盆栽试验。试验基地海拔 44.7 m,属于温带大陆性季风气候,冬季寒冷干燥,夏季高温多雨。土壤类型为棕壤土,土壤理化性质为全氮 3.04 g·kg⁻¹,全磷 3.62 g·kg⁻¹,全钾 23.19 g·kg⁻¹,有机质 33.93 g·kg⁻¹,0 ~ 100 cm 土层平均土壤容重为 1.41 g·cm⁻³,田间持水率为 0.38 cm³·cm⁻³,凋萎系数为 0.068 cm³·cm⁻³。

1.2 试验设计

供试大豆品种为东豆一号,选用 34 cm(上口直径)×22 cm(下口直径)×23 cm(高)的塑料盆钵置于遮雨棚内,防止雨水淋入,生物炭基复混肥由沈阳隆泰生物工程有限公司提供(作为基肥一次性施入),炭基肥总养分≥36%(N-P₂O₅-K₂O 为 10%-13%-13%),C 养分含量为 20%。盆栽土壤取自沈阳农业大学水利学院综合试验基地农田 0 ~ 30 cm 的土层,经过自然风干,粉碎过 2 mm 筛后与炭基肥

肥均匀混合装入盆中,每盆装风干土 17 kg。

采用裂区试验设计,共设两个因素:炭基肥施用量 BF 和大豆开花期调亏灌溉程度 W。炭基肥施用量为主区,设 4 个水平:0 kg·hm⁻²(不施肥 BF₀),300 kg·hm⁻²(低肥 BF₁),600 kg·hm⁻²(中肥 BF₂),900 kg·hm⁻²(高肥 BF₃)。开花期调亏灌溉为裂区,水分调亏下限设置 3 个水平:土壤含水量为田间持水量的 45% ~ 50%(重度调亏 W₁);土壤含水量为田间持水量的 60% ~ 65%(轻度调亏 W₂);土壤含水量为田间持水量的 75% ~ 80%(常规灌溉 W₃)。该生育期灌水上限为田间持水量的 80%,其它生育期灌水均保持常规灌溉,试验中采用称重法严格控制土壤水分,共 12 个处理,3 次重复。每盆灌等量水自然蒸发失水至适宜含水量(田间持水量的 70% 左右)后播种,选取大小、饱满度一致的种子 5 粒播于盆内,距离土壤表面 5 cm 左右,于三叶期定苗,每盆保留两株长势相同且较好的大豆植株,盆栽管理保证大豆正常生长发育,整个生育期无病虫害影响。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 株高 采用米尺测量,于大豆各生育期测量大豆植株基部至最高叶尖的高度,每 10 d 测 1 次。

1.3.2 干物质重量及根冠比测定 大豆收获后,收集每盆大豆植株,并将植株分为地上部和地下部,放入烘箱中 105 ℃ 杀青 30 min,75 ℃ 烘干至恒重,用 0.01 g 电子天平称取植株干物质重量。根冠比 = 根干重/地上部干重。

1.3.3 产量及产量构成 大豆成熟收获后,分盆考种,测定单株荚数、单株粒数、百粒重及每盆粒重等产量性状。

百粒重:大豆成熟收获后,将晾晒后每组编号的籽粒取出 3 组,每组 100 粒,用精度 0.001 g 电子天平分别称重。若 3 组数值相差不大于平均值的 3% 时,平均重即为百粒重。如差值超过 3%,再称取 100 粒重,用最接近的 3 组数值的平均值作为百粒重。

1.3.4 水分利用效率 每天早晨 8:00 用台秤称盆重,与前一天比较两天的重量之差即为大豆的日耗水量。

水分利用效率(WUE)计算公式为 $WUE = Y/ET$,式中:Y 为每盆大豆产量(g);ET 为全生育期大豆耗水量(kg)。

1.4 数据分析

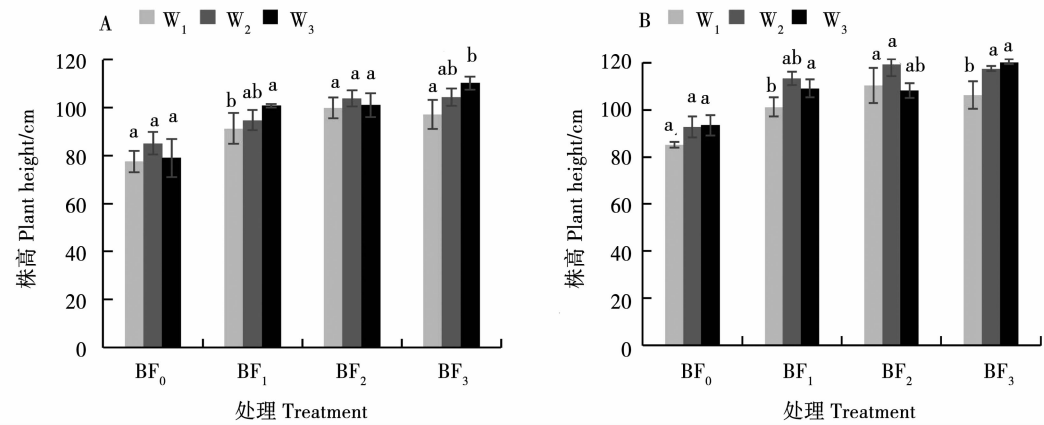
采用 Excel 2010、DPS 7.05 和 Origin 2019 对试验数据进行处理、分析和作图。主因子和交互因子事后均值差异检测采用 Duncan 新复极差法,显著性水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 对大豆株高的影响

由图 1 可知,开花期和结荚期株高最大处理均为 BF_3W_3 ,两个时期株高分别为 110.17 和 121.54 cm,较株高最小处理 BF_0W_1 分别提高了 42.05% 和

36.31%。炭基肥施肥量对大豆株高有显著正效应,随着肥量的增加大豆株高逐渐增加,表现为 $BF_3 > BF_2 > BF_1 > BF_0$,而调亏灌溉程度对株高的影响则随着炭基肥的施入发生变化, W_3 时,株高均随着炭基肥施入量的增加而逐渐增高; W_2 和 W_1 时,结荚期复水后 BF 各处理对大豆株高的补偿效应显著。



不同小写字母代表 0.05 水平差异显著,下同。
Different lowercase indicate significant difference ($P < 0.05$), the same below.

图 1 炭基肥及调亏灌溉对开花期 (A)、结荚期 (B) 大豆株高的影响
Fig. 1 Effects of carbon base fertilizer and water deficit on plant height of soybean at flowering stage (A) and pod bearing stage (B)

2.2 对大豆干物质重及根冠比的影响

炭基肥和调亏灌溉交互效应对大豆地上部干重的影响如图 2 所示:大豆地上部干重最大值出现在 BF_3W_3 处理下,为每盆 72.23 g,较最小处理 BF_0W_1 提高 93.34%。大豆地上部干重随炭基肥施肥量的增加呈现逐渐增加的趋势。在同一肥量下,亏水会抑制大豆地上部干重,但在 $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 条件下, W_1 地上部干重大于 W_3 , $600\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 条件下, W_2 地上部干重大于 W_3 。而在同一水分条件下,施入 3 种不同量炭基肥的处理地上部干重大于无肥对照。

炭基肥和调亏灌溉交互效应对大豆根干重的影响如图 2 所示: BF_3W_3 处理的大豆根干重最大为每盆 16.36 g,较根干重最小处理 BF_0W_3 提高

55.37%。水分的亏缺会促进大豆根干重的增加,但并非干旱程度越高,根干重越大,适度的调亏更有利于大豆根系的生长。在 BF_0 条件下,根干重随亏水程度的增大而增大,在 BF_1 、 BF_2 水平下, W_1 、 W_2 的调亏处理均较 W_3 常规处理根干重显著增加,而水分调亏对根干重影响表现为在 W_1 、 W_2 两种不同调亏程度下,根干重随炭基肥施入量增加呈现先增加后降低的趋势。

炭基肥和调亏灌溉交互效应对大豆根冠比的影响如图 3 所示:在同一肥量条件下,亏水会增大根冠比,表现为 W_1 和 W_2 大于 W_3 ,而在同一调亏程度下,根冠比随着炭基肥施入量的增加逐渐降低, W_3 条件下炭基肥的施入量对根冠比的影响并未产生规律性的变化。

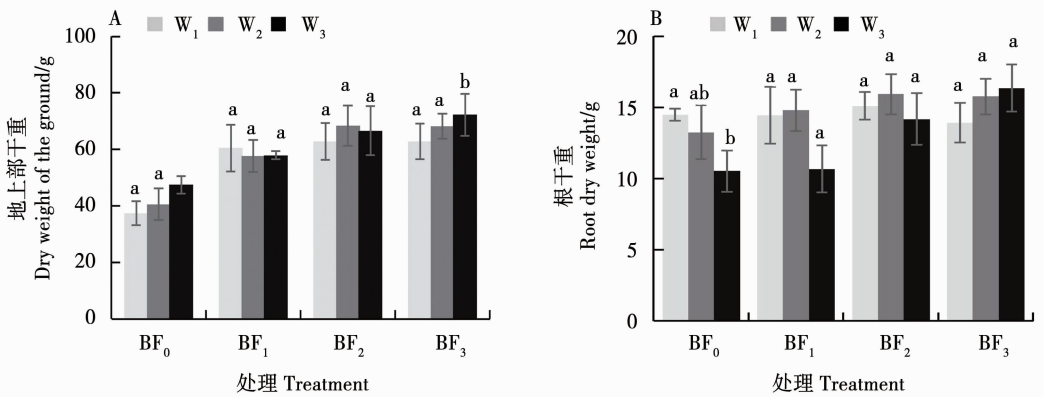


图 2 炭基肥和调亏灌溉对大豆地上部干重 (A)、根干重 (B) 的影响
Fig. 2 Effect of biochar based fertilizer and regulated deficit irrigation on dry weight (A) and root dry weight (B) of soybean shoots

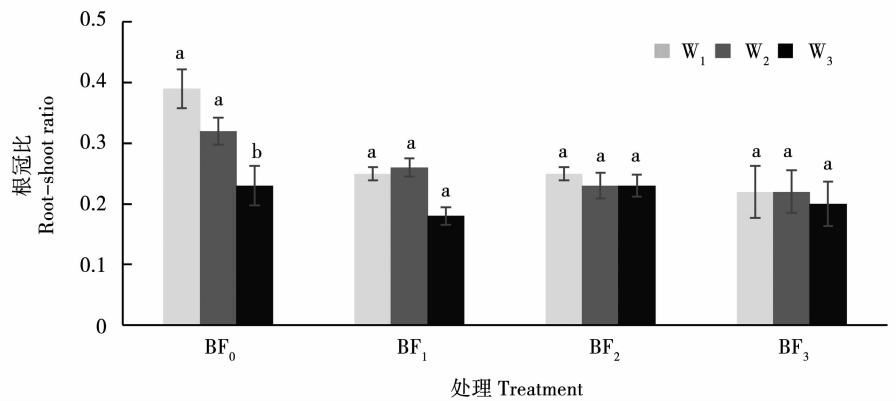


图3 炭基肥和调亏灌溉对大豆根冠比的影响

Fig.3 Effect of biochar based fertilizer and regulated deficit irrigation on soybean root-shoot ratio

2.3 对大豆产量及产量构成因素的影响

由表1可知,产量最高处理BF₂W₂为每盆89.58 g,产量最低处理BF₀W₁为每盆59.26 g,BF₂W₂处理较BF₀W₁处理增产51.16%。在同一肥量条件下,与W₃相比,W₂轻度调亏有增产现象,W₁则显著减产。在同一水分条件下,产量随炭基肥施肥量的增加而增加,且在BF₂水平下产量最高,两种调亏程度下,炭基肥的施加能够弥补水分亏缺对产量的影响,轻度调亏的增产效果优于重度调亏。

不同炭基肥和调亏灌溉下大豆产量构成因素的变化与产量基本一致,在单株荚数、单株粒数、百粒重方面,均在BF₂W₂处理下出现最大值,分别为单株荚数130.83,单株粒数482.33,百粒重29.56 g,较最低产量构成分别提高25.80%、96.73%和

11.13%。整体来看BF₂W₂处理具有较高的产量构成,各处理对每粒重的影响无明显规律。

2.4 对大豆水分利用效率(WUE)的影响

由表1可知,BF₂W₂组合处理WUE最高为1.07 g·kg⁻¹,较WUE最低处理BF₁W₃提高55.07%,BF₂W₂处理显著高于其它组合。在同一肥量条件下,水分调亏有助于提高WUE,轻度调亏WUE提高幅度优于重度调亏;在W₁、W₂两种不同调亏程度下,WUE随炭基肥施肥量的增加呈现先增加后降低的趋势,即在BF₂施肥量为600 kg·hm⁻²时,WUE最高,施肥量为900 kg·hm⁻²的BF₃处理WUE降低,BF₂W₁处理与BF₂W₂处理较BF₂W₃处理分别提高16.91%和25.44%,显然BF₂W₂处理较W₃常规对照提高幅度更大。

表1 不同处理对大豆产量及产量构成和水分利用效率的影响

Table 1 Effects of different treatments on yield and WUE of soybean

处理 Treatment		单株荚数 Number of pods per plant	单株粒数 Seed number per plant	百粒重 100-seed weight/g	每粒重 Weight per seed/g	每盆产量 Production per pot/g	水分利用效率 WUE/(g·kg ⁻¹)
BF ₀	W ₁	104.00 a	254.17 a	19.89 a	0.12 ab	59.26 b	0.74 b
	W ₂	108.00 a	245.17 a	18.43 b	0.14 a	65.73 a	0.84 a
	W ₃	106.00 a	312.00 a	19.62 ab	0.11 b	64.96 a	0.70 b
BF ₁	W ₁	107.83 a	283.50 a	23.12 a	0.13 a	66.24 b	0.87 a
	W ₂	117.67 ab	333.83 a	24.35 a	0.12 ab	73.82 a	0.89 a
	W ₃	113.67 b	372.17 a	23.19 a	0.09 b	68.59 ab	0.69 b
BF ₂	W ₁	118.33 ab	347.67 b	25.69 b	0.13 a	79.84 b	1.00 a
	W ₂	130.83 ab	482.33 a	29.56 a	0.10 a	89.58 a	1.07 a
	W ₃	125.17 a	433.33 ab	27.43 b	0.11 a	83.72 ab	0.85 b
BF ₃	W ₁	117.33 a	316.67 a	24.85 b	0.13 a	74.99 a	1.02 a
	W ₂	120.17 a	360.50 a	28.77 a	0.11 ab	81.58 a	0.98 a
	W ₃	126.33 a	425.50 a	28.13 a	0.08 b	83.01 a	0.77 b

2.5 炭基肥和调亏灌溉对大豆生长、产量及水分利用效率的互作效应

2.5.1 炭基肥和调亏灌溉对大豆植株生长的影响

如表 2 所示:炭基肥施入量极显著促进了株高,而水分调亏会抑制株高,交互作用下,W₂ 水平下 BF₀、BF₁、BF₂ 和 BF₃ 处理结荚期株高较开花期分别增长

8.97%、19.53%、14.77% 和 12.62%;而 W₁ 水平下 BF₀、BF₁、BF₂ 和 BF₃ 处理结荚期株高较开花期分别增长 9.81%、10.86%、10.45% 和 9.35%,可见轻度调亏下炭基肥的施入对结荚期的补偿效应较为明显。

表 2 炭基肥和调亏灌溉对大豆干物质重、产量、水分利用效率影响的方差分析

Table 2 Variance analysis of the effect of carbon base fertilizer and water deficit regulation on dry matter, yield and water use efficiency of soybean

		株高		产量及产量构成因素 Yield and yield component									水分利用效率 WUE /(g·kg ⁻¹)
主因子 The main factor	Plant height/cm		地上部干重 Above-ground dry weight/g	根干重 Dry root weight/g	根冠比 Root-shoot ratio	单株荚数 Number of pods per plant	单株粒数 Seed number per plant	百粒重 100-seed weight/g	单粒重 Weight per seed/g	每盆产量 Production per pot/g			
	开花期 Flowering period	结荚期 Pod stage											
	BF ₀	79.89 c	92.13 c	41.79 b	12.76 a	0.31 a	106.00 c	270.44 b	19.31 c	0.12 a	63.31 c	0.76 c	
	BF ₁	95.65 b	109.54 b	58.59 a	13.32 a	0.23 b	113.06 bc	329.83 ab	23.55 b	0.11 a	69.55 bc	0.82 bc	
	BF ₂	101.56 ab	113.74 a	65.93 a	15.07 a	0.24 b	124.78 a	421.11 a	27.56 a	0.11 a	84.38 a	0.97 a	
	BF ₃	103.89 a	116.43 a	67.76 a	15.35 a	0.21 b	121.28 ab	369.22 a	27.25 a	0.11 a	79.86 ab	0.92 ab	
	W ₁	91.47 b	104.90 a	55.78 a	14.50 a	0.28 a	111.88 a	301.75 b	23.38 b	0.13 a	70.08 b	0.91 a	
	W ₂	96.51 ab	110.93 a	58.72 a	14.94 a	0.26 ab	119.17 a	355.46 a	25.28 a	0.12 ab	77.68 a	0.95 a	
	W ₃	97.75 a	108.05 a	61.05 a	12.93 b	0.21 b	117.79 a	385.75 a	24.59 a	0.09 b	75.07 a	0.75 b	
误差源	BF	23.405 **	83.464 **	11.034 **	1.336	5.362 *	10.556 **	6.207 *	19.060 *	0.36	6.263 *	5.178 *	
Error source	W	3.458 *	2.157	0.866	5.403 *	3.719 *	1.708	5.825 *	9.326 *	5.068 *	8.627 **	20.684 **	
	BF × W	0.882	0.908	0.317	6.774 *	1.075	5.273 *	3.926 *	4.745 **	3.909 *	0.498	1.135	

表中数值表示各主因子和交互因子方差分析的 *F* 值;* 和 ** 分别表示在 *P* < 0.05 和 *P* < 0.01 水平上显著相关;BF 为炭基肥施量主因子;W 为调亏灌溉程度主因子;BF×W 为变量交互因子。

Values in the table represent *F* values of variance analysis of main factors and interactive factors; * and ** represent significant correlation at *P* < 0.05 and *P* < 0.01 levels respectively; BF means the main factor of carbon fertilizer amount; W means the main factor of water deficit regulation degree; BF×W means the variable interaction factor.

BF 各处理显著促进了地上部干重。与 BF₀ 相比,BF₁、BF₂、BF₃ 处理大豆地上部干重分别增加 40.20%、57.74% 和 62.12%;而各调亏程度对其的单独作用不显著,整体趋势为亏缺程度越大地上部干重越小;炭基肥的施入会弥补水分亏缺对地上部干重的影响,在 BF₁ 水平下,W₁ 较 W₃ 处理高 4.35%,在 BF₂ 水平下,W₂ 较 W₃ 处理高 2.69%。

各水分调亏程度显著影响根干重,表现为 W₂ > W₁ > W₃,W₁、W₂ 较 W₃ 处理根干重分别增加 12.10% 和 15.47%,W₂ 促进作用大于 W₁。炭基肥和调亏灌溉的交互效应对根干重影响显著,在 BF₁、BF₂ 水平下,两种调亏处理较 W₃ 常规对照根干重均显著增加,BF₁ 水平下,W₁ 和 W₂ 处理分别增加 35.42% 和 38.61%,BF₂ 水平下,W₁ 和 W₂ 处理分别增加 6.63% 和 12.35%;同一调亏程度下施加 900 kg·hm⁻² 炭基肥较施加 600 kg·hm⁻² 炭基肥的

根干重略有降低。

BF 和 W 各主因子对大豆根冠比均有显著性影响。BF 各主因子对根冠比影响表现为 BF₀ > BF₂ > BF₁ > BF₃,炭基肥的施入促进了地上部干重,一定程度上抑制了根干重,从而显著降低了根冠比;W 各处理增加了大豆的根冠比,W₁、W₂ 的调亏处理较 W₃ 处理根冠比分别增加 31.41% 和 21.79%。

2.5.2 炭基肥和调亏灌溉对大豆产量及产量构成的影响 如表 2 所示,施加不同量炭基肥均可显著提高大豆产量,与 BF₀ 无肥对照相比,BF₁、BF₂、BF₃ 处理分别增产 5.59%、28.88% 和 27.79%,BF₃ 对应的 900 kg·hm⁻² 炭基肥增产效果较 BF₂ 的 600 kg·hm⁻² 碳基肥弱;各调亏程度显著影响产量,W₂ 较 W₃ 增产 3.48%,而 W₁ 却较 W₃ 减产 6.65%。炭基肥和调亏灌溉的交互因子对产量影响亚于主因子,施加 600 kg·hm⁻² 肥量的 BF₂W₂ 处理较 BF₂W₃ 处理增产

7.0%，而BF₂W₁的重度调亏较BF₂W₃常规处理减产10.87%。

各处理对产量构成的差异与产量变化基本一致，BF各处理对大豆单株荚数、单株粒数、百粒重的影响差异显著，均表现为BF₂>BF₃>BF₁>BF₀。与BF₀无肥处理相比，BF₁、BF₂、BF₃处理单株荚数显著提高6.66%、17.71%、14.41%，单株粒数显著提高21.96%、55.71%、36.52%，百粒重显著提高21.95%、42.72%、41.12%；各调亏程度对大豆每粒重影响差异显著，表现为W₁>W₂>W₃，其中W₁、W₂的调亏处理较W₃常规处理分别提高22.44%、34.04%；根据方差值可以看出，各影响因子对产量构成影响表现为调亏程度>炭基肥施入量>交互效应，交互效应对产量变异的影响较小。

2.5.3 炭基肥和调亏灌溉对大豆水分利用效率的影响 如表2所示：BF和W各主因子对大豆水分利用效率影响差异显著。同无肥的BF₀相比，BF₁、BF₂、BF₃处理分别提高了7.07%、27.70%和21.31%，水分调亏各处理表现为W₂>W₁>W₃，W₁和W₂调亏处理分别较W₃常规对照WUE提高了20.35%和25.49%；交互效应中，在600 kg·hm⁻²肥量下，BF₂W₁与BF₂W₂处理较BF₂W₃处理WUE分别提高16.91%和25.44%，BF₂W₂处理较BF₂W₃处理提高幅度更大。

3 讨论

在作物生长中，水分和养分之间以及作物与水分和养分之间存在着相互激励和抗拒的动态平衡关系，这种关系对作物的生长发育和产量形成了较大的影响，较高的生物量是作物高产的前提。因此，合理的灌水与施肥对作物光合产物的合理分配起到明显的协调和互补作用。

3.1 炭基肥和调亏灌溉对大豆生长的影响

干旱会抑制大豆根冠的生长，褚丽丽等^[12]认为适量施肥能有效缓解干旱对作物后期株高的抑制生长，补偿效应明显，而重度干旱条件下，施肥则会削弱作物的抗旱性能。本研究结果与褚丽丽等^[12]的研究结果一致。调亏条件下，炭基肥的施入弥补了水分的亏缺对大豆株高的抑制，轻度调亏的补偿效应优于重度调亏。蔡大鑫等^[13]认为当土壤处于水分亏缺时，根系将得到更多的同化产物，冠的生长受到抑制，使根冠比增大；白伟等^[14]认为花期调亏有利于复水后根系生长发育方面表现出不同程度的补偿效应。研究表明，调亏灌溉会促进根系的生长，根干重随调亏程度的增大而增大，根冠比随干旱程度而增加，这与郭相等^[15]在玉米上的研

究结果一致。原因是当土壤处于水分亏缺状态时，根系会向下深扎汲取养分和水分，表现出较强的抗旱能力，改变根系的吸收功能，从而降低了干物质分配到叶冠的比例，促进了根系的生长。王智慧等^[16]认为，施入不同配比炭基肥料均较单施生物炭或者单施复合肥对玉米植株干物质积累的促进作用大。研究表明，施入不同量炭基肥大豆地上地下部干物质重均大于未施肥处理，肥对根冠生长具有的调节作用导致根冠比随施肥量增加而降低。

杨建昌等^[17]、岳文俊等^[18]认为无论水分是否充足，增施氮肥对大豆地上部分茎叶生长的促进作用都大于根系，使根冠比减小。本研究发现，在未施加炭基肥的条件下，调亏灌溉会抑制大豆地上部生长，提高根冠比，而施加炭基肥的条件下，轻度调亏显著提高了大豆地上部干物重，形成良好的根冠比。可能是由于炭基肥的施入弥补了由于水分的亏缺对大豆地上部的影响，提高了作物对亏水的抵抗能力，保证了大豆的生产。而过度的亏水处理和施加炭基肥的条件下，同样会抑制作物地上部的生长，因此本研究中施加炭基肥的条件下，调亏下限为土壤含水率达到田间持水率的60%~65%时对大豆良好根冠的生长尤为有利。

3.2 炭基肥和调亏灌溉对大豆产量和水分利用效率的影响

任卫东^[19]认为，不同炭基肥肥料处理时大豆产量均比不施肥处理增产，增产幅度为6.41%~12.32%。闫春娟等^[20]认为适宜的肥量及土壤水分促进了大豆单株荚数、百粒重等产量性状；刘宁等^[21]认为，将炭基肥施入土壤中，可吸附更多的水分和养分离子，提高土壤养分吸持量和持水容量，改善土壤持水能力。然而，并非越多量的炭基肥对作物增产的促进作用越明显，过量的炭基肥会对作物造成减产的现象^[5]。在本研究中，施用炭基肥能显著提高大豆产量，其中施加600 kg·hm⁻²肥量增产效果较为明显，原因可能是炭基肥的施入提高了土壤的速效养分含量，延长肥效且促进作物生长，提高了产量。而施加炭基肥量达到900 kg·hm⁻²时大豆产量反而低于600 kg·hm⁻²，原因可能是由于炭基肥施肥量的增高造成生物炭含炭量的增多，导致土壤的C/N比提高，进而降低了土壤的有效养分。

蔡大鑫等^[13]通过试验证实，开花期轻度、中度的水分亏缺对增产较为有利，重度亏水则会造成减产现象。褚丽丽等^[21]认为营养生长期控水，根生物量随土壤含水量的增加而增加，对产量无明显影响，鼓粒期控水则对大豆造成减产作用，因此调亏

时期和调亏度的不同对大豆的产量有不同的影响。在本研究中, W_2 轻度调亏处理较 W_3 常规对照产量提高了 1.19%, W_1 重度调亏较 W_3 常规对照减产 8.77%。

王龙等^[22]认为,大豆各生育阶段对于水分敏感性有一定的差异,分枝到开花,开花到结荚,这些阶段不适合重度调亏,建议轻度适度调亏,在保证产量时使其水分利用效率达到最高。研究表明,适度的调亏有助于提高水分利用效率,在土壤水分下限为土壤含水率达到田间持水率的 60% ~ 65% 时,轻度调亏的水分利用效率最高。本研究还证实,施加炭基肥的处理水分利用效率高于未施肥的处理,且提高幅度差异显著。原因可能是炭基肥中的生物炭因其丰富的孔隙结构和官能团,改善了土壤水分状况,在减少水分供应情况下,大量的孔隙结构使土壤容重降低,通气透水性较好,有利于水分入渗,提高土壤持水性能,这与高海英等^[23]的研究一致。炭基肥的施入会缓解由于水分的亏缺造成大豆的减产,在施入炭基肥条件下,适量减少大豆耗水量可以提高大豆的水分利用效率和产量,而重度调亏虽减少了耗水量但会造成减产。说明土壤干旱时,施肥有利于增产,但限制产量提高的主导因素是水分,过度亏水则不利于产量的形成。这也证实了炭基肥较普通肥的优点在于炭基肥里的生物炭对土壤的改良作用,改善了土壤吸持水分和养分的能力,促进了种子的萌发和生长,从而促进作物生产力的提高。

4 结 论

本研究通过盆栽试验,研究了炭基肥和调亏灌溉对大豆生长、产量和水分利用效率的影响。水分的亏缺会抑制大豆的株高,轻度调亏在结荚复水后对株高有不同程度的补偿效应,结荚期补偿效应最高达到 14.77%。施加炭基肥条件下,轻度调亏显著提高了地上部干重,形成良好的根冠比。施入不同量炭基肥可促进大豆产量及产量构成,施入 600 kg·hm⁻²炭基肥条件下轻度调亏产量最高,为每盆 89.58 g,较产量最低处理增产 51.16%,水分利用效率提高 1.07 g·kg⁻¹,较最低水分利用效率提高 55.07%。施用 600 kg·hm⁻²炭基肥量对棕壤土环境下大豆生长、产量和水分利用效率起到了良好的作用,而且在该适宜施肥量条件下进行适度调亏(即保持土壤水分田间持水率的 60% ~ 65%),对大豆生长最为有利。综合来看,中肥轻度调亏为该环境下的最佳水肥组合模式,可以为此环境下大豆的生长提供理论指导。

参考文献

[1] 马增林. 黑龙江省大豆产业发展问题[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2009. (Ma Z L. Development of soybean industry in Heilongjiang province[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2009.)

[2] 龙晓辉, 周卫军, 郝聆菊, 等. 我国水资源现状及高效节水型农业发展对策[J]. 现代农业科技, 2010(11): 303-304. (Long X H, Zhou W H, Hao Y J, et al. Current situation of water resources in China and countermeasures for efficient water-saving agriculture development[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2010(11): 303-304.)

[3] 杨广海, 张万军, 崔建伟, 等. 作物调亏灌溉理论与技术研究进展[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(6): 2514-2516. (Yang G H, Zhang W J, Cui J W, et al. Research progress in theory and technology of crop regulated deficit irrigation[J]. Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(6): 2514-2516.)

[4] 白伟, 孙占祥, 刘晓晨, 等. 苗期调亏灌溉对大豆生长发育和产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(4): 50-53. (Bai W, Sun Z X, Liu X C, et al. Effects of regulated deficit irrigation on soybean growth and yield at seedling stage[J]. Agricultural Research in Arid Regions, 2009, 27(4): 50-53.)

[5] 车艳朋. 大豆花期调亏灌溉与生物炭互作的节水增产效应[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016. (Che Y P. Effect of water saving and yield increase on the interaction between regulated deficit irrigation and biochar in flowering period of soybean[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016.)

[6] 马文奇, 张福锁. 食物链养分管理-中国可持续发展面临的挑战[J]. 科技导报, 2008, 26(1): 68-73. (Ma W Q, Zhang F S. Nutrient management in food chain - challenges to China's sustainable development[J]. Science and Technology Herald, 2008, 26(1): 68-73.)

[7] 魏春辉, 任奕林, 刘峰. 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. (Wei C H, Ren Y L, Liu F. Research progress on application of biochar and biochar base fertilizer in agriculture[J]. Henan Agricultural Science, 2016, 45(3): 14-19.)

[8] 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. Research progress and prospect of agricultural biochar[J]. Chinese Agricultural Science, 2013, 46(16): 3324-3333.)

[9] Schulz H, Glaser B. Effects of biochar compared to organic and inorganic fertilizers on soil quality and plant growth in a greenhouse experiment[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2012, 175(3): 410-422.

[10] 张锴. 生物炭及炭基肥对土壤理化性质的影响[J]. 绿色科技, 2015(4): 196-198. (Zhang K. Effects of biochar and carbon-based fertilizer on soil physical and chemical properties[J]. Green Technology, 2015(4): 196-198.)

[11] 战秀梅, 彭靖, 王月, 等. 生物炭及炭基肥改良棕壤理化性状及提高花生产量的作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1633-1641. (Zhan X M, Peng J, Wang Y, et al. Effects of biochar and carbon-based fertilizer on improving physical and

chemical properties of brown soil and increasing peanut yield[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21 (6): 1633-1641.)

[12] 褚丽丽,张忠学. 氮素对大豆旱后补偿生长影响研究[J]. 灌溉排水学报,2009,28(1):78-80, 17. (Geng L L, Zhang Z X. Study on the effect of nitrogen on compensatory growth of soybean after drought[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2009, 28 (1):78-80,117.)

[13] 蔡大鑫,沈能展,崔振才. 调亏灌溉对作物生理生态特征影响的研究进展[J]. 东北农业大学学报, 2004, 35(2): 139. (Cai D X, Shen N Z, Cui Z C. Research progress of regulated deficit irrigation on physiological and ecological characteristics of crops[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2004, 35 (2): 139.)

[14] 白伟,孙占祥,刘晓晨,等. 花期调亏灌溉对大豆生长发育和产量的影响[J]. 土壤通报,2010(3): 683-687. (Bai W, Sun Z X, Liu X C, et al. Effects of flowering regulated deficit irrigation on soybean growth and yield[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010(3): 683-687.)

[15] 郭相平,康绍忠,索丽生. 苗期调亏处理对玉米根系生长影响的试验研究[J]. 灌溉排水, 2001, 20(1): 25-27. (Guo X P, Kang S Z, Shu L S. Experimental study on the effects of regulating deficit treatment on maize root growth during seedling stage [J]. Irrigation Drainage, 2001, 20(1): 25-27.)

[16] 王智慧,唐春双,范博文,等. 不同配比炭基肥对玉米生长、土壤养分及呼吸的影响[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2017, 29(3): 1-4. (Wang Z H, Tang C S, Fan B W, et al. Effects of different proportions of carbon-based fertilizers on maize growth, soil nutrient and respiration[J]. Journal of Heilongjiang August First Land Reclamation University, 2017, 29(3): 1-4.)

[17] 杨建昌,王志琴,朱庆森. 不同土壤水分状况下氮素营养对水稻产量的影响及其生理机制的研究[J]. 中国农业科学, 1996, 29(4): 58-66. (Yang J C, Wang Z Q, Zhu Q S. Effects of nitrogen nutrition on rice yield and its physiological mechanism under different soil moisture conditions[J]. Chinese Agricultural Sciences, 1996, 29(4): 58-66.)

[18] 岳文俊,张富仓,李志军,等. 返青期水分胁迫、复水和施肥对冬小麦生长及产量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 40(2): 57-63. (Yue W J, Zhang F C, Li Z J, et al. Effects of water stress, rehydration and fertilization on growth and yield of winter wheat during the rejuvenating period [J]. Citation Analysis of Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2016, 40(2): 57-63.)

[19] 任卫东. 施用炭基肥料对大豆农艺性状和产量性状的影响[J]. 农业科技通讯, 2012(7): 90-92. (Ren W D. Effect of applying biochar based fertilizer on agronomic traits and yield traits of soybean[J]. Agricultural Science and Technology Communication, 2012(7): 90-92.)

[20] 闫春娟,王文斌,涂晓杰,等. 不同生育时期干旱胁迫对大豆根系特性及产量的影响[J]. 大豆科学, 2013, 32(1): 59-62. (Yan C J, Wang W B, Tu X J, et al. Effects of drought stress on soybean root characteristics and yield at different growth periods [J]. Soybean Science, 2013, 32(1): 59-62.)

[21] 褚丽丽. 营养生长期水分胁迫和氮素对大豆干物质及产量的影响[J]. 节水灌溉, 2016(7): 31-35. (Chu L L. Effects of water stress and nitrogen on dry matter and yield of soybean during vegetative growth[J]. Water-Saving Irrigation, 2016(7): 31-35.)

[22] 王龙. 调亏灌溉条件下大豆耗水规律与水分利用效率的试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015. (Wang L. Experimental study on water consumption and water use efficiency of soybean under regulated deficit irrigation[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2015.)

[23] 高海英. 一种生物炭基氮肥的特征及其对土壤作物的效应研究[D]. 陕西: 西北农林科技大学, 2012. (Gao H Y. Characteristics of a biochar based nitrogen fertilizer and its effect on soil crops[D]. Shaanxi: Shaanxi Northwest A & F University, 2012.)