

干旱土壤中生物炭对黑麦草生长的促进机制

朱自洋^{1,2}, 段文焱^{1,2}, 陈芳媛^{1,2}, 李杉^{1,2}, 陶文梅^{1,2}, 唐睿裕^{1,2}

(1.昆明理工大学环境科学与工程学院,昆明 650500;2.云南省土壤固碳与污染控制重点实验室,昆明 650500)

摘要: 通过控制不同生物炭添加量和降水量,分析土壤理化性质及黑麦草(*Lolium perenne* L.)的各项生长指标,探究不同添加量的生物炭对缺水植物生长促进的直接与间接作用。结果表明:生物炭的添加可以提高土壤的田间持水率、土壤中速效磷的含量以及土壤的pH;干旱条件下,增加生物炭的用量能促进黑麦草植株的增高,但高剂量的生物炭抑制黑麦草的生长;生物炭加入并不能持续性的保持土壤中的水分,高浓度(>15%)的生物炭反而增大土壤中水分的流失,但由于生物炭中钾元素为植物对抗干旱提供了必要条件。适当添加生物炭(5%)可缓解黑麦草在缺水时生长发育受到的抑制作用,并促进黑麦草的根系生长以及保证较高的发芽率。土壤中添加生物炭对于干旱条件下植物的生长有促进作用,有利于缓解植物受干旱胁迫的影响。

关键词: 生物炭毒性; 干旱; 植物根系; 土壤改良

中图分类号: X712

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)01-0352-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.01.045

The Mechanism of Biochar Facilitate Ryegrass Growth in Arid Soils

ZHU Ziyang^{1,2}, DUAN Wenyan^{1,2}, CHEN Fangyuan^{1,2},

LI Shan^{1,2}, TAO Wenmei^{1,2}, TANG Ruiyu^{1,2}

(1. Faculty of Environmental Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500;

2. Yunnan Provincial Key Laboratory of Carbon Sequestration and Pollution Control in Soils, Kunming 650500)

Abstract: In order to explore the direct and indirect effects of biochar on plant growth under water shortage condition, the growth indicators of ryegrass (*Lolium perenne* L.) and the physical and chemical properties of the soil were observed by controlling different addition of biochar and precipitation. The results showed that the addition of biochar could increase the field water holding capacity of the soil, the content of available phosphorus and soil pH. Under drought conditions, increasing the amount of biochar increased the height of ryegrass plants, but high-dose of biochars inhibited the growth of ryegrass. The addition of biochar could not maintain soil moisture, high concentration (> 15%) of biochar even increased the loss of soil moisture, but because of the potassium in biochar, it could provide the necessary nutrient for ryegrass to fight against the drought condition. Our results showed that appropriate addition of biochar (5%) could alleviate the inhibition of the growth and development of ryegrass in the absence of water, and promote their root growth and ensure a higher germination rate. In a word, the addition of biochar to the soil could promote plant growth under drought conditions and help alleviate the effects of drought stress on plants.

Keywords: biochar toxicity; drought; plant root system; soil improvement

生物炭作为一种新型农林废弃物炭化还田方式受到广泛关注。生物炭不仅能充当土壤改良剂,为植物提供氮、磷等生长必需的养分及改善土壤的理化性质(如提高土壤pH、提高土壤孔隙率)来促进植物的生长,提高作物产量^[1]。生物炭还能作为吸附剂,吸附、固定土壤中的重金属和有机污染物,控制污染物

向地下水及农作物的迁移,保证生态环境和粮食安全。近年来受全球气候变化的影响,我国乃至世界干旱灾害频繁发生,给农业生产带来巨大挑战。在未来30~90年,世界大部分地区预计将遭受更严重的干旱。土壤干旱可导致植物根系吸收水分困难,破坏植物体内的水分平衡,使植物生长受到抑制或完全停

收稿日期:2021-07-17

资助项目:国家自然科学基金项目(41807377);昆明理工大学高层次人才平台建设项目(KKKP201722018)

第一作者:朱自洋(1995—),男,在读硕士研究生,主要从事生物炭与土壤污染控制研究。E-mail:2456728155@qq.com

通信作者:段文焱(1989—),女,副教授,硕士生导师,主要从事生物炭与土壤污染控制研究。E-mail:duanwenyan0405@qq.com

止^[2]。前人^[3-4]研究结果已经证实生物炭添加对土壤持水和植物生长有积极作用。Qian等^[3]研究发现,施入2%竹子生物炭能够显著增加田间持水量,且随着生物炭添加量增加而增加;另一方面,生物炭还能够延缓肥料养分在土壤中的释放过程,提高土壤养分利用率,从而使作物增产,Zheng等^[4]研究发现,新鲜生物炭含有大量N(23~635 mg/kg)、P(46~1 664 mg/kg)等营养物质,为植物营养元素的供给提供了必要保证。因此,生物炭的添加既能增强土壤保水持水能力,也能补充土壤中植物养分。

然而,目前大部分的研究仅关注生物炭施用过程中对土壤水分的保持或对植物养分供给等单一因素对农作物生长的促进作用,而对植株在缺水条件下,生物炭是否能缓解缺水对植物生长的抑制作用研究仍较为缺乏,探索生物炭的保水能力以及生物炭的养分供给,如何保证了干旱条件下植株的正常生长和发育,以应对未来气候变化有着重要的科学价值。已有研究^[5-7]指出,土壤中添加生物炭会抑制植物生长,如吴鹏豹等^[5]研究指出,生物炭添加对植物产量及营养品质产生降低效应;Beesley等^[6]研究发现,生物炭加入提高了As、Cu、Pb等重金属在土壤中的活性,可造成植物营养不良等。但缺水条件下,生物炭对植物的毒性作用(重金属的溶出、自由基活性变化)仍未可知,干旱土壤中生物炭溶出的重金属难以随土壤水向下迁移而加剧了生物炭对植物生长的抑制,也可能由于水介导产生的自由基活性减弱使生物炭对植株的毒性下降^[7]。因此生物炭在缺水条件下对植物生长发育的影响仍需系统研究。摸清生物炭的添加对缺水条件下植物生长的影响机制,可为利用生物炭提高干旱缺水地区植物的成活率提供新方法,拓宽生物炭应用及为干旱地区水土保持提供新思路。

因此,本研究通过控制土壤生物炭添加量和土壤水分含量,测量黑麦草(*Lolium perenne* L.)在不同生物炭含量及土壤含水量条件下的各项生长指标,分析在缺水条件下,生物炭对黑麦草生长以及土壤水分固持的影响,一方面能够为生物炭施用在干旱地区提供技术支持;另一方面能够进一步探究生物炭促进植物生长的原因和机理。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 试验区概况及土壤 试验区选择昆明理工大学环境科学与工程学院试验田,北纬24.85°,东经102.87°。研究区春旱严重,夏无酷暑,秋凉少雨,冬无严寒,四季之分不显著,气候的地区性明显;多年平均气温14.7℃,相对湿度75%,风速为2.2 m/s,年

日照时间2 448.7 h,多年平均降水量935 mm,无霜期227天,降水量年内分配不均,年际变化较大。

土壤类型为云南红壤,采样深度为0—15 cm,随机多点取样,混合均匀后作为土壤样品土样过25目(0.707 mm)孔径筛,在筛土过程中自然去除石砾、有机残体(残留的作物根系)等非土壤物质,筛完后备用。土样风干后进行土壤基本理化性质测定。云南红壤的pH为5.75,C、N、H、S占比分别为0.504%,0.044%,1.098%,0.011%,全P和速效N、P、K的含量分别为0.43 g/kg和27.40,6.47,128.32 mg/kg。

1.1.2 试验草种及生物炭 草种选用的是生长迅速、产草量高的护坡植物黑麦草(云南交投市政园林工程有限公司提供)。其在年降水量500~1 500 mm的地方均可生长,10℃左右能较好生长,27℃以下为生长适宜温度。略能耐酸,适宜的土壤pH为6~7。试验所用生物炭为玉米秸秆生物炭,购于辽宁金和福农业有限公司。玉米秸秆生物炭的C、N、O、H、S占比分别为69.62%,1.38%,13.22%,2.21%,0.19%,比表面积为10.48 m²/g。

1.2 试验设计

试验于2019年10月在室内且通风良好条件下进行。设计种植开始前浇水,保持土壤水分在47%左右,种植后每10天浇1次水(处理D)和每3天浇1次水(对照CK)2种降水模式,根据适宜降水量计算,每次浇水78 mL,以模拟年降水量300,1 000 mm,每组设置3个重复。本试验土壤中生物炭添加比例分别为0,1%,2%,5%,10%,15%,20%。根据试验处理要求,将过25目孔径筛的生物炭按比例与土壤混匀,采用42个盆钵(高15.5 cm,上口径13 cm,下口径9 cm),保证盆钵装填土壤后土面平整且花盆中土层高度在15 cm左右。而边坡种植草本植物一般为撒播,种子密度约为20 kg/hm²,按此比例换算将约0.4 g(约182粒)试验草种均匀播撒在盆钵土面表层,再用约1 cm的薄土均匀覆盖。采用随机区组排列盆栽,4天后种子萌发,在生长过程中浇灌去离子水。种植过程中测定植物株高并在29天后采收测量植株根深、鲜重、干重、钾元素含量等生长及生理指标。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 土壤各性质的测定 使用烘干法测量0—15 cm土层的土壤水分含量,利用取土器均匀取0—15 cm土壤,根据烘干前后质量差计算土壤水分含量,播种后每3天浇水前测量1次。因是室内盆栽种植,所以无需在降水时加测土壤的水含量。田间持水量测定采用威尔科克斯法^[8],吸水10 h,退水8 h,根据生物炭与土壤混合物前后2次质量差,得出土样田间持水量。土壤pH采用pH计测量,土壤与溶液的

质量比为 1 : 5,即取 20 g 土壤,加入 100 mL 水。土壤溶液振荡 2 h,2 h 后测量 pH。土壤全氮、全碳是利用元素分析仪(vario MICRO cube, Elementar)进行测定,将待测土壤过 200 目孔径筛后取 2 mg 左右土样放入锡舟封口折叠并测量。土壤速效磷利用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提,土壤与溶液质量比为 1 : 20,即 0.5 g 土壤,加入 10 mL 溶液,振荡 30 min 离心取上清液,用紫外—可见分光光度计(UV-2600)检测速效磷,土壤铵态氮利用 2 mol/L KCl 浸提,土壤与溶液质量比为 1 : 10,即 1 g 土壤,加入 10 mL 溶液,振荡 1 h 离心取上清液,土壤硝态氮利用饱和 CaSO₄ 溶液浸提,土壤与溶液质量比为 1 : 15,即 1 g 土壤,加入 15 mL 溶液,振荡 10 min 离心取上清液,用水质分析仪检测速效氮^[9]。

1.3.2 草本植物生长指标的测定 随机选取大于等于该盆栽内 1/2 植株数的植物采用直尺测量土壤表面到植株顶端的垂直距离,取平均值记为株高。根深采用直尺测量用滤纸吸干水分的较为完好的植物根系。在测完植株株高后,用剪刀将每盆盆栽中的植物剪下,剪碎后装入称重的铝盒内,再将其放入分析天平中称量。在测量完根深后,同样用剪刀将其剪碎,之后装入称重的铝盒内,再将其放入分析天平中称量。测量完鲜重后,在 105 ℃ 杀青 15 min 后 80 ℃ 条件下烘干至恒重后(11 h)放入分析天平中称量。植株生长率是利用株高及测量天数拟合直线,选取直线段的斜率 *k* 值作为植株生长率。地上部分测量干重后采用 HNO₃ + HClO₄ (5 : 1, V : V) 在微波消解仪 (APL 16 位普及型微波消解系统, MD8H 型) 中消解,用超纯水定容 100 mL,再用原子吸收分光光度计 (日立 Z-2000 系列偏振塞曼原子吸收分光光度计, 日本) 测量钾含量^[9]。

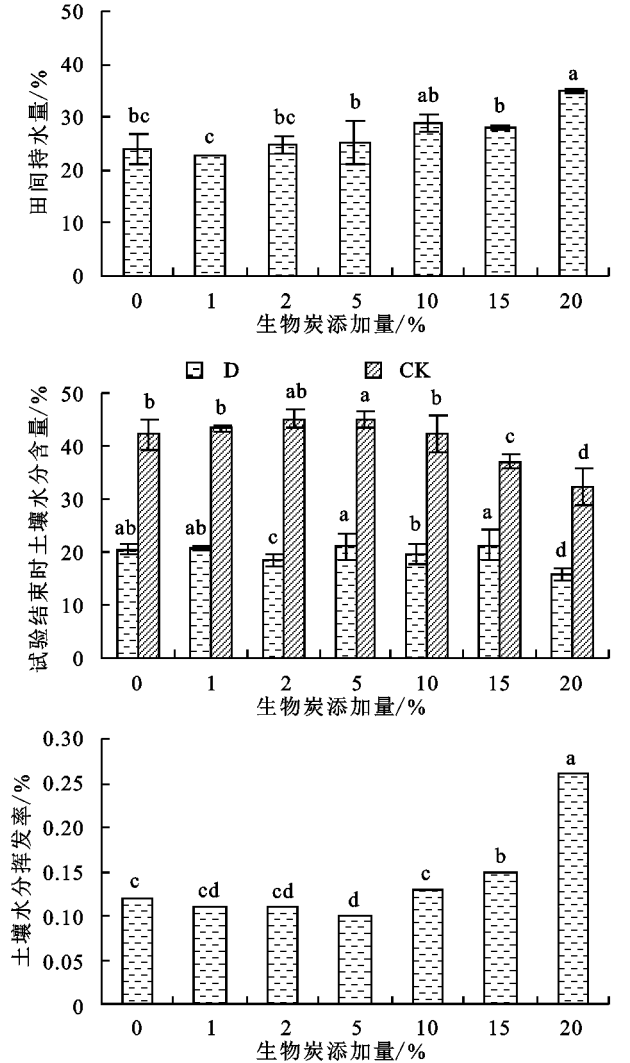
1.3.3 数据分析 试验数据利用 Excel 2003 软件进行作图,利用 SPSS 2015 软件进行显著性检验及双因素分析。

2 结果与分析

2.1 生物炭对土壤性质的影响

2.1.1 生物炭对土壤中水含量的影响 由图 1 可知,不同比例生物炭的土壤随着生物炭加入量上升,其最大持水率从 22% 上升到 34% 左右,但只有当生物炭添加量较高时,其对田间持水量的影响才较为显著。CK 中土壤水分含量高于相同条件下的田间持水量,主要是由于盆栽试验中排水不畅导致的。这与 Liu 等^[10] 研究土壤中生物炭添加量最大时,其土壤最大持水率最高的结果一致。Glaser 等^[11] 通过田间试验发现,添加生物炭的土壤较未添加生物炭的土壤在

持水性能上至少增加 18%。在干旱条件下,在黑麦草的生长过程中,生物炭的存在不能保持土壤较高的水分,除 20% 添加量情况下,无论生物炭添加多少,在植物生长后期,土壤水分含量都基本保持一致。试验结束时,土壤水分随着添加在土壤中生物炭浓度不断升高,水分含量不断降低,这一现象在 CK 中尤其突出。其原因不仅和植物的生长利用了土壤中的水分有关,还与生物炭的添加增加土壤比表面积有关。因为无论是 CK 还是 D 处理,生物炭添加量在 20% 时,植物生长都受到不同程度的抑制,土壤中的水分含量下降也最为明显。这可能是因为生物炭大量添加,增大了土壤的比表面积,使水更容易从土壤中流失。高海英等^[12] 研究也报道了超过一定用量(80 t/hm²) 的生物炭会降低土壤持水性能。从本研究对生物炭混合土壤加热失水的结果中得到进一步证实。生物炭含量超过 10% 时,土壤水分挥发较快。



注:图柱上方不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$);土壤水分挥发率是添加不同量生物炭的土壤在 60 ℃ 烘箱内 6 次含水量降低斜率 *k* 值,每次取样间隔 20 min。

图 1 不同生物炭添加量对土壤田间持水量、土壤水分含量及土壤水分挥发率的影响

2.1.2 生物炭对土壤 pH、速效磷、氮的影响 由图 2 可知,当添加生物炭后,土壤 pH 随着生物炭含量的增加而提高。当生物炭的添加量为 2%,5%时,土壤 pH 为 6~7,最适宜黑麦草生长。Kannan^[13]研究发现,在酸性土壤中施用木材生物炭(5 t/hm²),土壤 pH 提高了 0.5 个单位,与本试验所得结果相似。土壤速效磷含量随着生物炭含量增加而增加。当生物炭含量为 20%时,土壤中速效磷含量达到 38.25 mg/kg。磷是植物生长发育的必需营养养分之一,以多种途径参与植物体内各种代谢过程。土壤中生物炭的添加可以为黑

麦草的生长发育提供更多的速效磷。Figueiredo 等^[14]利用不同试剂提取生物炭中的速效磷来证明生物炭可作为植物吸收的磷来源。

随着生物炭含量的增加,土壤中速效氮降低(图 2),这可能是由于生物炭能够有效吸附无机氮,减少无机氮的流失,Thomas 等^[15]研究表明,土壤中添加 10%的柳木生物炭可明显增加参与氮循环的微生物,可促进氮的循环。因此,生物炭中的有机氮也可通过微生物的作用逐步分解为无机氮,供植物吸收和利用。

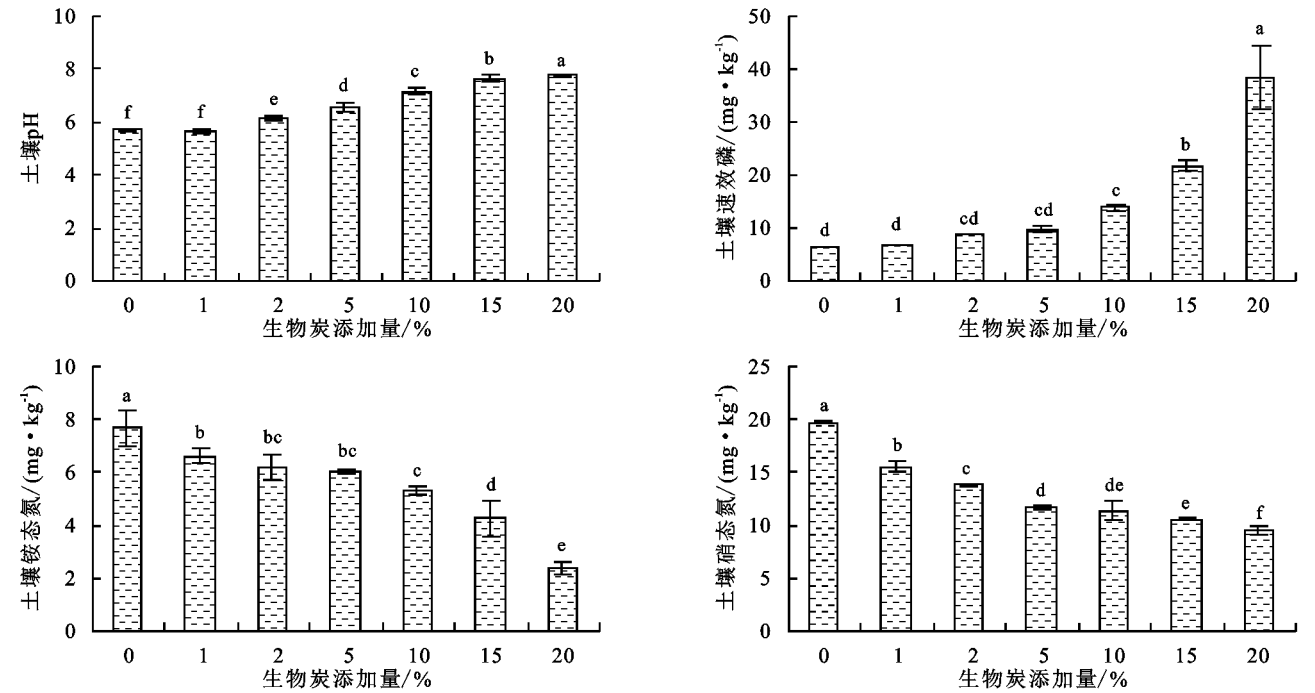


图 2 不同生物炭添加量对土壤 pH、速效磷、铵态氮及硝态氮的影响

2.2 生物炭对黑麦草生长的影响

2.2.1 双因素方差检验 双因素方差分析结果(表 1)表明,生物炭、水分对黑麦草发芽率、株高、根深、地上部干重、地下部干重及地上部钾含量均显著影响,而生物炭、水分及生物炭与水分的交互作用对地下部分钾含量的影响均不显著,可能与根系只是吸

收和转运的器官,并不储存太多的钾元素有关。生物炭与水分的交互作用对株高、根深、地下部干重及地上部钾含量均显著影响,而对黑麦草发芽率、地上部分干重的影响不显著,可能是水分及生物炭添加量这2个因素对发芽率和地上部分干重的影响存在间接关联。

表 1 生物炭、水分及生物炭与水分的交互作用对黑麦草生长指标及钾含量的双因素方差分析(P 值)

因素	发芽率	株高	根深	地上部干重	地下部干重	地上部钾含量	地下部钾含量
生物炭添加量	0	0	0.026	0.023	0	0	0.176
水分	0	0	0	0	0	0	0.383
生物炭添加量×水分	0.279	0	0.002	0.091	0.002	0	0.670

2.2.2 对黑麦草发芽率的影响 土壤水分不足时,导致种子膨胀所需水分不足,种子的出苗数量、出苗时间受到影响,因此发芽率也能反映土壤的水分情况。由图 3 可知,D 处理发芽率普遍低于 CK。随着生物炭添加量的增加,D 处理和 CK 黑麦草的发芽率也随之先增大后减小,水分充足的情况下添加量为 10%时,黑麦草发芽率最大 92%;而干旱条件下,生

物炭的添加对发芽率有显著影响,当含量为 5%时,黑麦草的发芽率最大,较低的生物炭含量对黑麦草发芽有促进作用,当生物炭含量为 20%时,黑麦草的发芽率被明显抑制,可能是因为在干旱和半干旱地区水分是影响种子萌发的主要因子^[16],也可能是高含量的生物炭会对黑麦草种子产生有害作用,降低黑麦草的发芽率。

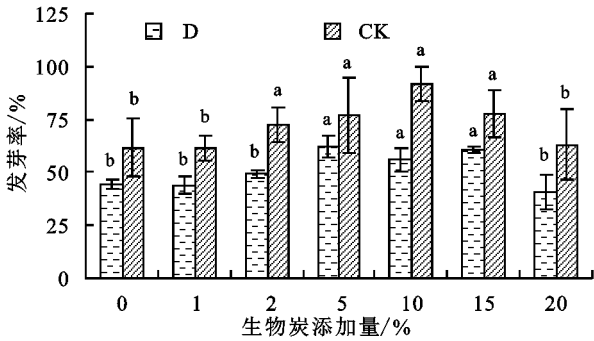


图 3 不同生物炭添加量对黑麦草发芽的影响

2.2.3 生物炭对黑麦草株高和地上生物量的影响

植物受到干旱胁迫后,一方面通过调节自身的代谢水平减少对水分的需求,并通过改变自身根冠比扩大地下部分吸收水分的范围;另一方面也可能通过吸收钾元素,调节自身的渗透压控制水分流失。为区分生物炭影响下,具体是什么因素决定了黑麦草植株生长及抗旱能力,本研究对比了不同浓度的生物炭对黑麦草在干旱和水分充沛下的生长发育情况。由图 4 可知,干旱条件下,当生物炭添加量在 2%~10% 时,黑麦草生长率随着生物炭含量增加而增加,且植株增高显著,在添加量为 5% 时,能使植株的生长接近于水分充足时植物未添加生物炭的生长情况。生物炭添加量为 10% 时,株高最高为 10.42 cm,超过植株在水分充足时未添加生物炭的株高。黑麦草植株在干旱条件下的地上部分的生物量明显低于水分充足时的生物量。未添加生物炭时,D 处理的生物量为 2.12 g,仅为 CK 生物量的 72%,说明土壤水分能够影响植株生物量。生物炭能够缓解由缺水导致的黑麦草植株的生长抑制作用。但这一结论与生物炭的保水作用关系不大,因为只有当生物炭添加量在 20% 时,生物炭才能显著改变土壤的田间持水率(图 1),但黑麦草的生长在生物炭添加量为 5% 时就已经接近于 CK 的情况(图 4)。而在水分充足的情况下,当生物炭的添加量为 2% 时,黑麦草的株高最高为 11.54 cm;当生物炭的添加量为 5% 时,此时植株的增长最快,为 0.5 cm/d($R^2>0.9$)。这与邵慧芸等^[17]研究结果一致,在低剂量(0.2%~1%)的生物炭添加下促进烟草植株的显著增高。这一结果说明,生物炭对植物的促进作用应该是生物炭为植株提供必要的营养物质。但在相同的生物炭添加量下,CK 黑麦草的生长情况优于 D 处理;当土壤中水分充足时,能够使生物炭释放出更多的溶出性有机物和无机盐促进植物生长。但添加过量的生物炭,黑麦草的生长被抑制。在干旱条件下,当生物炭的添加量为 20% 时,植株生长情况受到严重抑制,低于水分充足条件下同为添加 20%

生物炭植株生长的情况。而在水分充足的情况下,超过 10% 的生物炭添加量即能抑制黑麦草株高的增长。本研究表明,高剂量的生物炭抑制黑麦草植株的生长,且抑制作用随土壤水分的增加越明显。这是因为充足的水分导致有毒物质活性增强。Liao 等^[18]研究表明,生物炭上的持久性自由基有较高活性,能够与水反应生成活性氧自由基,加速细胞老化,破坏植物表皮细胞正常生长周期,抑制植物的生长发育;另一方面是由于生物炭的 pH 较高(图 2),水分充分的情况下,能够产生大量的 OH⁻ 离子,使植物根部局部 pH 较高,阻碍植物细胞延伸,严重影响植物生长。因此生物炭的毒性并不会由于土壤缺水而增大,相反是土壤水分充足才更容易增强生物炭的毒性。

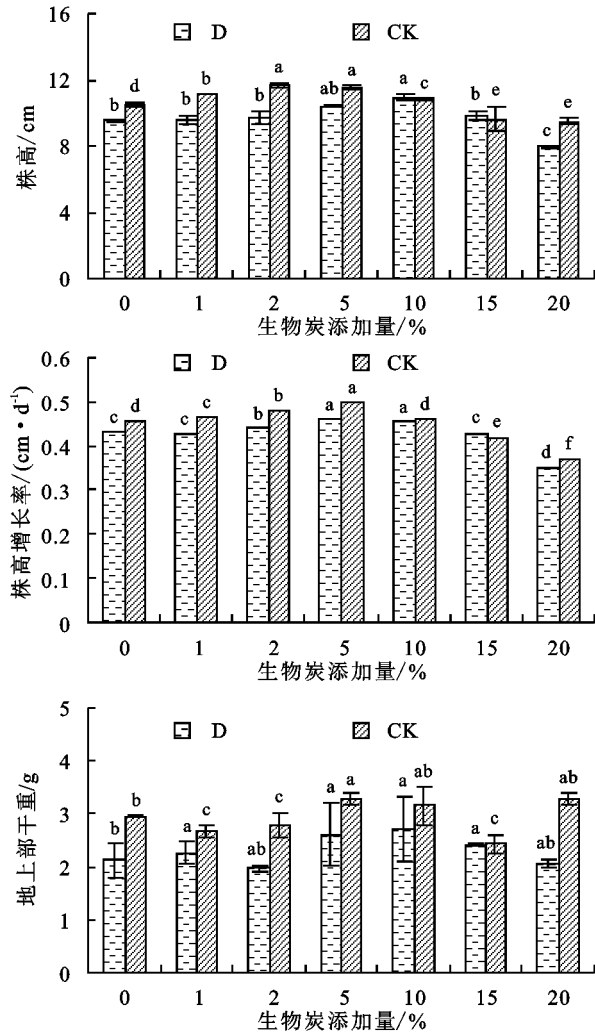


图 4 不同生物炭添加量对黑麦草株高、株高增长率及地上部干重的影响

2.2.4 生物炭对黑麦草根系生长的影响 地上与地下部分的干重(生物量)以及其分配情况(根冠比)是反映植株生长情况的重要指标。生物量的变化反映植株的生长情况,而根冠比的变化可反映出植株生长是否受到胁迫。由图 5 可知,D 处理与 CK 的根冠比在生物炭添加量<10% 时,基本保持一致,约为 0.3。

而当生物炭添加量为 10% 及以上时, D 处理与 CK 的根冠比均有不同程度的上升; 干旱条件下, 根冠比逐渐增大, 生物炭含量为 20% 时达到最大, 约为 0.68, 而 CK 黑麦草根冠比在生物炭含量为 10% 及以上时逐渐增大。Liu 等^[19] 研究认为, 根的生长需要依靠地上部分光合作用的产物, 而根的死亡则是由于根的呼吸作用大于有机物的供给所导致的, 因此地上部分与地下部分相互制约只能同步生长。当土壤中植物生长所必须的氮、磷等元素减少时, 增加光合作用产物向根系分配的比例, 使植物根冠比增加, 而土壤中钾离子的减少会导致根冠比降低。作物生长过程中, 根冠比越大, 作物对养分、水分的需求越高。D 处理中生物炭为 1%, 2% 时, 根冠比与未添加生物炭时基本一致, 而较高的生物炭含量却导致根冠比的大幅上涨, 一方面可能是生物炭较好的吸附能力降低了土壤中黑麦草生长所必需养分的植物可吸收能力, 本研究的速效氮由于生物炭的添加而大幅下降; 另一方面, 可能是生物炭增大了土壤的比表面积, 导致土壤中水分的含量进一步下降(图 1)。

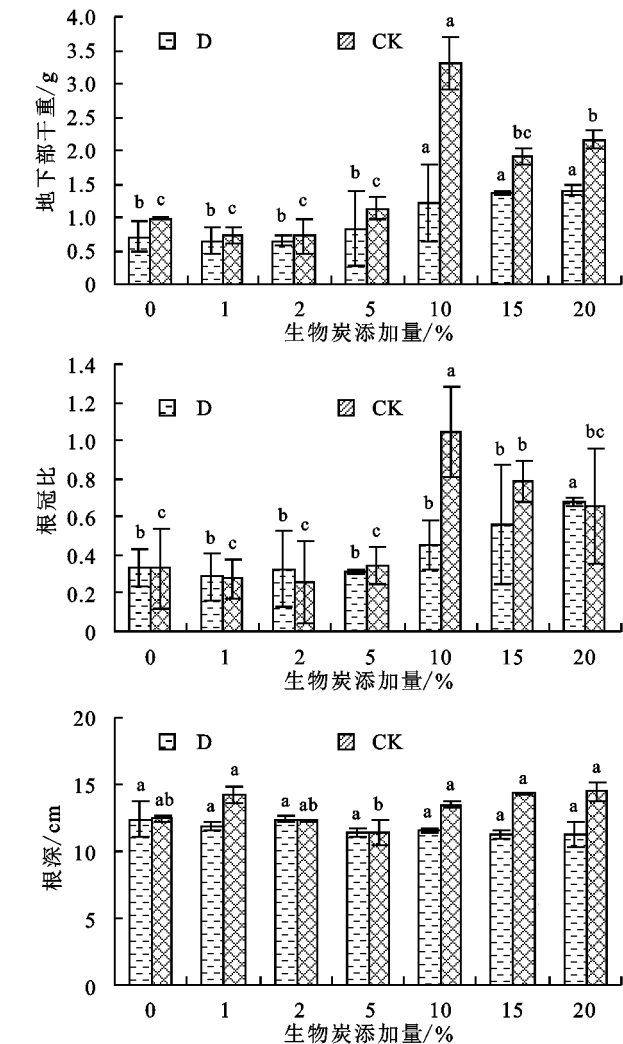


图 5 不同生物炭添加量对黑麦草地下部干重、根冠比及根深的影响

根系是植株吸收土壤水分及养分的重要器官, 根系在土壤中的生长状况直接影响地上部分的生长情况及植株对水分和养分的利用率。而土壤水分状况直接或间接地影响根系的生长发育及分布。在干旱胁迫的环境下, 植株对于水分及养分的可利用程度决定于根系的大小、形态以及根系竞争能力^[20]。由图 5 可知, 受干旱条件的影响, 随着生物炭添加量的增加对黑麦草根深有轻微抑制作用, 根深从 12.43 cm 下降到 11.19 cm。这是因为土壤干旱抑制了黑麦草植株整体的生长, 根深的增加也受到抑制。在水分充足的情况下, 土壤生物炭含量较低时(2% 和 5%), 黑麦草的根深有所下降, 说明此时土壤水分及养分适应植株生长。从地下部分的干重(图 5)可知, 土壤生物炭含量较低时(<10%), D 处理与 CK 地下部分的干重基本保持不变; 而当生物炭含量达到 10% 以上时, 地下部分的干重都有上升, 但 CK 的干重上升幅度较大。本研究表明, 随着生物炭的添加, 尤其是高浓度生物炭影响下, D 处理黑麦草的根系向下生长受限, 更倾向于停留在土壤上层寻求水分和养分。

2.3 生物炭对黑麦草钾含量的影响

钾对作物的生长发育、生理代谢过程有多方面的影响, 与作物抗旱性的关系极为密切。细胞中钾元素的含量决定了植物体内多种酶的活性, 植物生长过程所涉及到的多种不同类型的酶均需钾活化, 以促进植物光合作用、养分运输的正常进行。另外, 钾元素能够调节植物根系中的渗透压梯度, 活细胞内的渗透势是决定水分进入细胞的关键因素, 钾离子以及其他溶质的数量越多, 渗透势越大, 进入细胞的水分越多^[21]。在供水不足的情况下, 钾元素还可以调节植物叶面气孔的启闭, 提高植株的保水抗旱能力。由图 6 可知, 未添加生物炭时, CK 植株根系中的钾含量高于 D 处理中钾含量, 说明土壤水分充足促进钾元素的吸收, 而充足的钾元素又能进一步促进黑麦草的生长。而 D 处理中植株的枯萎死亡与土壤中钾含量低有较大关联。D 处理中黑麦草根系中所含钾元素含量随生物炭添加量的增加(0~2%)呈上升趋势, 当生物炭含量为 2% 时, 黑麦草根钾含量最高, 达到 28.69 g/kg, 并接近于 CK 的含量。这可能是生物炭添加提高土壤中钾含量, 促进黑麦草根吸收更多钾元素来维持渗透压, 提高抗旱能力, 生物炭本身所含有的钾元素能够显著增加土壤中速效钾的含量, 也可以通过增加阳离子交换量提高土壤中钾的利用率。侯新村等^[22] 也报道了生物炭的添加能够显著增加柳枝稷植株中钾含量提升其耐盐能力。生物炭的添加

量>2%时,2 组黑麦草根系中的钾含量大致相同,可能是在水分充足的情况下,生物炭的添加导致土壤中的盐分含量上升渗透压升高,促进了 CK 中黑麦草对钾离子的进一步吸收。地上部分的钾含量(图 6)较地下部分较高,但其含量趋势和地下部分相同,因为根是吸收营养物质的主要器官,并不贮存太多的营养物质,营养物质通过根运送至茎和叶等营养器官中,因此钾离子被运输到地上部分以满足黑麦草植株的生长发育。虽然 D 处理地上部分的钾含量低于 CK,

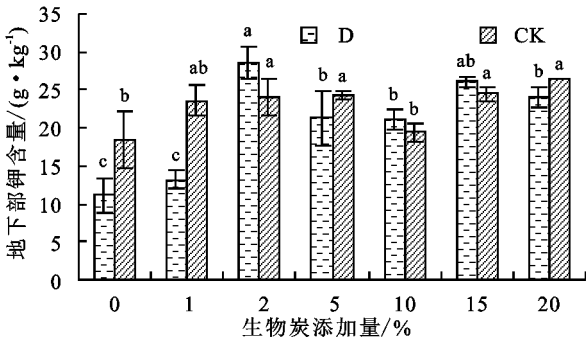


图 6 不同生物炭添加量对黑麦草地下、地上部钾元素含量的影响

3 结论

(1)生物炭的添加可以提高植物内钾含量,为植物提高保水抗旱能力提供条件,添加适量(5%~10%)的生物炭能提高土壤 pH,增加土壤速效磷含量以及减少土壤氮素流失,促进植物的生长发育。

(2)土壤中添加低剂量(1%~5%)生物炭能够明显促进黑麦草植株的生长,干旱条件下,生物炭的高添加量(10%)才能体现出较为明显的促进作用;但无论土壤干旱与否,高剂量(≥15%)生物炭都会抑制黑麦草生长。

(3)生物炭对土壤保水能力的影响与植株的根系、土壤孔隙有密切关系,生物炭的添加能够提高土壤的最大田间持水率。但是随着植物根系的生长,添加高浓度(≥10%)的生物炭反而降低土壤中水分的含量,因此当土壤中水分充足时生物炭的添加量应保持在 5%以下,以减少生物炭导致的水分流失,而对于干旱土壤,生物炭添加量也应不超过 15%。

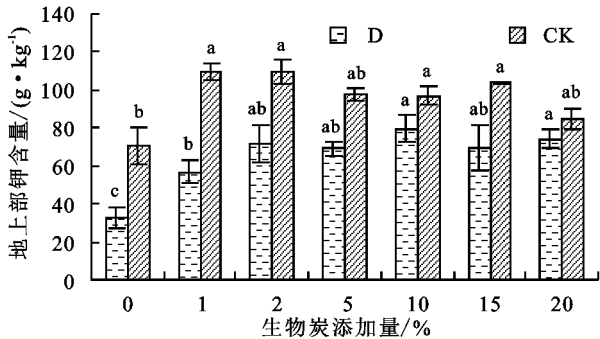
致谢:本试验使用的黑麦草种子由云南交投市政园林工程有限公司无偿提供,采样工作由云南省土壤固碳与污染控制重点实验室人员张建广、赵超凡等协助完成,在此表示感谢。

参考文献:

[1] Ding Y, Liu Y G, Liu S B, et al. Biochar to improve soil fertility. A review [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2016, 36(2): 36-54.

[2] Lipiec J, Doussan C, Nosalewicz A, et al. Effect of drought

但在适量生物炭的添加下仍可以保证植株正常生长。Zhao 等^[23]研究表明,在干旱条件下,钾不仅调节渗透剂含量及组成,从而提高棉花调节渗透压能力。Farrar 等^[24]研究发现,添加竹子生物炭增加土壤中钾含量,并能够增加株高及提高生姜叶面的钾浓度。Steven 等^[25]研究发现,钾还能促进木质素和纤维素的合成,促使植物茎秆粗壮。因此生物炭的添加可以增加植株内钾含量,调节植株根系渗透压,保证植株正常生长。



and heat stresses on plant growth and yield: A review [J]. *International Agrophysics*, 2013, 27(4): 463-477.

[3] 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): 1-10.

[4] Zheng H, Wang Z Y, Deng X, et al. Characteristics and nutrient values of biochars produced from giant reed at different temperatures [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 130(2): 463-471.

[5] 吴鹏豹,解钰,漆智平,等.生物炭对王草产量及营养品质的影响[J]. *草业科学*, 2012, 29(9): 1428-1434.

[6] Beesley L, Dickinson N. Carbon and trace element fluxes in the pore water of an urban soil following green-waste compost, woody and biochar amendments, inoculated with the earthworm *Lumbricus terrestris* [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(1): 188-196.

[7] Odinga E S, Waigi M G, Gudda F O, et al. Occurrence, formation, environmental fate and risks of environmentally persistent free radicals in biochars [J]. *Environment International*, 2019, 134: e105172.

[8] 颜永毫,郑纪勇,张兴昌,等.生物炭添加对黄土高原典型土壤田间持水量的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(4): 120-124.

[9] 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.

[10] Liu C, Wang H L, Tang X Y, et al. Biochar increased water holding capacity but accelerated organic carbon leaching from a sloping farmland soil in China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23

- (2):995-1006.
- [11] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal: A review [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(4): 219-230.
- [12] 高海英, 何绪生, 耿增超, 等. 生物炭及炭基氮肥对土壤持水性能影响的研究 [J]. *中国农学通报*, 2011, 27(24): 207-213.
- [13] Kannan P. Applying both biochar and phosphobacteria enhances *Vigna mungo* L. growth and yield in acid soils by increasing soil pH, moisture content, microbial growth and P availability [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2021, 308(5): e107258.
- [14] Figueiredo C C D, Reis A D S P J, Araujo A S D, et al. Assessing the potential of sewage sludge-derived biochar as a novel phosphorus fertilizer: Influence of extractant solutions and pyrolysis temperatures [J]. *Waste Management*, 2021, 124(1/2): 144-153.
- [15] Thomas F, Ducey J A, Ippolito K B, et al. Addition of activated switchgrass biochar to an aridic subsoil increases microbial nitrogen cycling gene abundances [J]. *Applied Soil Ecology*, 2013, 65(2): 65-72.
- [16] 刘静, 周景乐, 陈振江, 等. 内生真菌发酵液浸种对干旱胁迫下黑麦草种子萌发的影响 [J]. *草业科学*, 2018, 35(4): 839-847.
- [17] 邵慧芸, 张阿凤, 王旭东, 等. 2 种生物炭对烤烟生长、根际土壤性质和微生物群落结构的影响 [J]. *环境科学学报*, 2019, 39(2): 537-544.
- [18] Liao S H, Pan B, Li H, et al. Detecting free radicals in biochars and determining their ability to inhibit the germination and growth of corn, wheat and rice seedlings [J]. *Environmental Science and Technology*, 2014, 48(15): 8581-8587.
- [19] Liu Y N, Lai X F, Yang Q, et al. Effects of water supply on biomass yield, root/shoot ratio and water use efficiency of forage crops in intercropping systems [J]. *The Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(1): 113-121.
- [20] Li Q W, Liang J F, Zhang X Y, et al. Biochar addition affects root morphology and nitrogen uptake capacity in common reed (*Phragmites australis*) [J]. *The Science of the Total Environment*, 2021, 766(1/2): e144381.
- [21] Nasir H S M, Mahmudul H, Jasim U, et al. Impact of application of Trichoderma and biochar on growth, productivity and nutritional quality of tomato under reduced N-P-K fertilization [J]. *Annals of Agricultural Sciences*, 2020, 65(1): 107-115.
- [22] 侯新村, 胡艳霞, 孙宇, 等. 生物炭添加对滨海盐土柳枝稷生长的影响 [J]. *中国草地学报*, 2020, 42(1): 31-37.
- [23] Zhao W Q, Dong H R, Zahoor R, et al. Ameliorative effects of potassium on drought-induced decreases in fiber length of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) are associated with osmolyte dynamics during fiber development [J]. *The Crop Journal*, 2019, 7(5): 619-634.
- [24] Farrar M B, Wallace H M, Xu C Y, et al. Biochar co-applied with organic amendments increased soil-plant potassium and root biomass but not crop yield [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2021, 21(2): 784-798.
- [25] Steven F, Vaughn J A, Kenar A R, et al. Comparison of biochars derived from wood pellets and pelletized wheat straw as replacements for peat in potting substrates [J]. *Industrial Crops and Products*, 2013, 51(6): 437-443.