

生物炭对京郊沙化地土壤性质和苜蓿生长、养分吸收的影响

郑瑞伦¹, 王宁宁¹, 孙国新², 谢祖彬³, 庞卓¹, 王庆海¹, 武菊英^{1*}

(1.北京市农林科学院北京草业与环境研究发展中心, 北京 100097; 2.中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 3.中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要:通过田间试验研究了施用生物炭(14 t·hm⁻²)和种植苜蓿对京郊沙化地的改良作用。试验设裸地(BL)、裸地添加生物炭(BLB)、种植苜蓿不加生物炭(A)和种植苜蓿添加生物炭(AB)四个处理。结果表明:添加生物炭使土壤容重显著减小 11.5%~11.6%, pH 值显著增加 0.1~0.2 个单位, 田间持水量和总孔隙度分别增加 9.1%~10.3%和 7.6%~11.3%, 土壤总氮、有机碳含量和氮、磷、钾、锌的有效含量分别增加 10.3%~25.8%、52.8%~71.7%、12.7%~23.5%、141.7%~233.3%、47.7%~81.1%、94.2%~95.2%, 有效铁含量最高减小 29.1%, 阳离子代换量(CEC)和钙、镁、锰、硼的有效含量无显著变化;种植苜蓿没有显著影响土壤 pH 值、容重、总孔隙度、田间持水量、CEC 和氮、钙、镁、锌、硼的有效性, 总体上显著减小了土壤含水量和总氮、速效磷、速效钾的含量, 增加了铁和锰的有效含量。BLB 处理土壤含水量比 BL 显著增加 13.9% ($P<0.05$);添加生物炭使苜蓿地上部生物量、含水量和氮、磷、钾、钙、镁、铁、锌、锰、硼的吸收累积量分别显著增加 91.1%、3.6%、110.0%、130.9%、200.4%、82.6%、44.8%、89.5%、102.7%、99.5%、104.7%。生物炭与苜蓿种植相结合可在短期内改善京郊沙化地土壤的理化性质、提高养分有效性和恢复植被。

关键词:生物炭;苜蓿;沙化;容重;田间持水量;有机碳;氮;有效性

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2015)05-0904-09 **doi:**10.11654/jaes.2015.05.013

Effects of Biochar on Soil Properties and Alfalfa Growth and Nutrient Uptake in Desertified Land in Beijing Suburb

ZHENG Rui-lun¹, WANG Ning-ning¹, SUN Guo-xin², XIE Zu-bin³, PANG Zhuo¹, WANG Qing-hai¹, WU Ju-ying^{1*}

(1.Beijing Research & Development Center for Grasses and Environment, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 2.Research Center for Eco-Environment Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3.Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Biochar has potential to improve soil properties and enhance plant growth. A field experiment was conducted to investigate the effects of biochar additions (14 t·hm⁻²) on soil properties and alfalfa growth and nutrient uptake in desertified land in Beijing suburb. Four treatments were designed, including bare land (BL), bare land amended with biochar (BLB), alfalfa without (A) and with biochar addition (AB). Results showed that biochar additions significantly decreased soil bulk density by 11.5%~11.6%, but increased soil pH by 0.1~0.2 units, field capacity by 9.1%~10.3%, and soil total porosity by 7.6%~11.3%. Soil water content was 13.9% higher in BLB treatment than in BL treatment ($P<0.05$). Compared to no biochar treatment, biochar additions also increased contents of total nitrogen (TN), organic carbon (OC), available nitrogen, available phosphorus, available potassium, and available zinc by 10.3%~25.8%, 52.8%~71.7%, 12.7%~23.5%, 141.7%~233.3%, 47.7%~81.1%, and 94.2%~95.2%, respectively, while decreased available iron by up to 29.1%. Cation exchange capacity (CEC), and available calcium, magnesium, manganese and boron concentrations were not significantly affected by biochar amendment. Alfalfa did not show significant impacts on soil pH, soil bulk density, total porosity, field capacity, CEC and available nitrogen, calcium,

收稿日期:2014-11-14

基金项目:北京市农林科学院青年科研基金(QNJJ201314);北京市农林科学院科技创新能力建设专项(KJCX20140301);北京市农业科技项目(20140109)

作者简介:郑瑞伦(1982—),男,山西介休人,博士,助理研究员,主要从事退化土地修复研究。E-mail:rlzheng@163.com

* 通信作者:武菊英 E-mail:wujuying@grass-env.com

magnesium, zinc, and boron, but decreased soil water content, TN concentration, available phosphorus and potassium, while increased available iron and manganese. Biochar addition enhanced dry biomass, water content, nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, magnesium, iron, zinc, manganese, and boron contents of alfalfa shoot by 91.1%, 3.6%, 110.0%, 130.9%, 200.4%, 82.6%, 44.8%, 89.5%, 102.7%, 99.5% and 104.7%, respectively. These results suggest that a combination of biochar amendment and alfalfa planting could improve soil physicochemical properties, enhance phytoavailability of soil nutrients, and restore vegetation for desertified land in Beijing suburb.

Keywords: biochar; alfalfa; desertified land; bulk density; field capacity; organic carbon; nitrogen; phytoavailability

土地沙化一直是北京主要的生态问题之一,这些沙化土地干旱贫瘠、持水保肥力极差,不能够有效利用灌溉水和自然降水,造成植被稀少、风起扬沙。在水资源十分匮乏的北京,要快速持久地提高沙化地土壤的持水保肥能力、恢复和增加植被,对节水高效的沙化地修复方法的研究已迫在眉睫。

研究表明,生物炭在减缓全球变暖^[1]、减小污染物的生物有效性^[2-3]、改善土壤理化性质^[4-7]及增加作物产量方面有很大潜力^[8-9]。但是,生物炭对土壤理化性质及作物生长的影响很大程度上取决于土壤类型、生物炭种类与气候条件^[10-12],甚至会产生负面作用。邓万刚等^[13]研究发现,把生物炭施入海南花岗岩砖红壤后降低了王草和柱花草产草量及品质。通过用四种不同原材料烧制的生物炭对五种不同类型土壤的改良研究发现,土壤 pH 值的提高、土壤碳含量和持水量的增加及氮矿化率的变化均取决于土壤类型和生物炭种类^[10]。Noguera 等^[11]的研究结果表明,不同土壤(肥沃土壤、贫瘠土壤和施肥的贫瘠土壤)中硝态氮、铵态氮的含量及水稻生长情况对生物炭处理的响应相差很大。施用生物炭对我国南方红壤和黄棕壤的 pH 值、有机质、速效磷、速效钾和碱解氮含量的影响差异很大,生物炭对红壤的改良效果明显好于黄棕壤^[12]。生物炭处理可显著增加红壤(Red Ferrosol)上种植的玉米地上部生物量,却减小了典型沙土(Orthic Tenosol)上种植的玉米生物量^[14]。除土壤类型外,气候条件对生物炭改良土壤的效果也有很大影响^[9,15]。Uzoma 等^[9]在日本的研究结果表明,生物炭改善了砂质土壤的理化性质,玉米籽粒产量增加 150%;而在芬兰的田间研究表明,生物炭没有影响砂质土壤上小麦的氮吸收和籽粒产量^[15]。

在京北风沙区降雨量小、风力大的气候条件下,施用生物炭能否增加沙化地土壤的持水保肥能力和增加植被,还缺乏相关研究。本试验通过在京郊沙化地上施用生物炭和种植肥田豆科草本植物苜蓿,研究了生物炭对京郊沙化土壤理化性质的改善作用及对养分有效性和苜蓿生长的影响,旨在为发展节水节肥、快速有效修复京郊沙化地的方法提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2013 年 8 月上旬至 11 月中旬在北京市延庆县康庄镇沙化荒草地上(北纬 27°50',东经 113°02')进行。该地区位于京北风沙区,属温带与中温带、半干旱与半湿润带的过渡带,年均日照 2800 h,年均气温 8℃,平均风速 7 m·s⁻¹ 以上,年均降雨量 400~500 mm。由于干旱多风、水源短缺,造成该地区植被稀少,土地沙化裸露严重。土壤砂粒(2~0.02 mm)、粉粒(0.02~0.002 mm)和粘粒(<0.002 mm)的占比分别为 58.8%、27.1%和 14.1%,根据国际土壤质地分级标准供试土壤为砂质壤土。

1.2 试验设计

试验用生物炭是以农田废弃玉米秸秆为原材料,在 400℃下烧制 4 h 得到,成炭率为 40%(烧制 1 t 炭需 2.5 t 秸秆)。土壤和生物炭的理化性质见表 1。试验设置裸地不加生物炭(BL)、裸地添加生物炭(BLB)、种植苜蓿不加生物炭(A)和种植苜蓿添加生物炭(AB)4 个处理。每个处理 3 个重复,加炭量为 14 t·hm⁻²。根据目前生物炭连续转化技术,生产 1 kg 生物炭最少需要 0.1 kW·h 电,按工业用电每度电 0.95

表 1 供试土壤和生物炭理化性质

Table 1 Some physical and chemical properties of tested soil and biochar

项目	pH	TOC/ mg·g ⁻¹	TN/ mg·g ⁻¹	CEC/ cmol·kg ⁻¹	碱解氮/ mg·kg ⁻¹	速效磷/ mg·kg ⁻¹	速效钾/ mg·kg ⁻¹	有效钙/ mg·g ⁻¹	有效镁/ mg·g ⁻¹	DTPA-Fe/ mg·kg ⁻¹	DTPA-Zn/ mg·kg ⁻¹	DTPA-Mn/ mg·kg ⁻¹	H ₂ O-B/ mg·kg ⁻¹
土壤	8.3	6.1	0.65	15.8	39.7	4.0	120	15.1	0.37	5.7	0.34	7.9	0.30
生物炭	9.5	648	20.9	25.4	290	605	26 112	4.4	0.74	2.6	9.4	29.7	4.0

元·(kW·h)⁻¹和14 t·hm⁻²还田量计算,生物炭还田成本为1330元·hm⁻²[16]。2013年8月初,将生物炭施入土壤并与20 cm耕层土混匀后播种紫花苜蓿,播种量为20 kg·hm⁻²,行距为20 cm。每个试验微区面积为1.44 m²(1.2 m×1.2 m),共12个微区,完全随机区组排列,外设1 m保护区,微区之间0~30 cm土层用塑料布隔开。苜蓿播种并灌足底水后(每个微区10 L水)不再人工浇水,完全依靠自然降水提供苜蓿生长所需要的水分。

1.3 试验方法

苜蓿出苗并生长3个月后沿地面5 cm处割取植株茎叶,称量记录鲜重,然后用去离子水洗净,105℃杀青0.5 h后80℃烘干至恒重,称量记录干重。收获后立即用土钻按照五点法采集耕层土壤(0~20 cm)样品,并均匀混合每个微区土样,风干后过2 mm筛。

土壤基础理化性状测定参照《土壤农业化学分析方法》[17]。用环刀法测定5~10 cm土层土壤容重、孔隙度、田间持水量和含水量。土壤和生物炭中速效磷含量用0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃提取比色测定,速效钾、有效钙和有效镁用1 mol·L⁻¹ CH₃COONH₄溶液提取,有效铁、锌、锰用DTPA溶液浸提,有效硼用沸水提取,ICP-OES测定浸提液中的元素浓度。土壤和生物炭的碱解氮浓度用碱解扩散法测定。土壤有机碳(TOC)含量用重铬酸钾氧化法测定。生物炭中的TOC和总氮(TN)含量用元素分析仪测定。土壤和生物炭的pH值用pH计测定,水土比分别为2.5:1和10:1。土壤和生物炭的阳离子代换量(CEC)依据Hendershot和Duquette[18]的方法:称取2 g土壤或生物炭样品于50 mL离心管中,加20 mL 0.1 mol·L⁻¹的BaCl₂溶液振荡2 h,离心后过滤,用ICP-OES测定过滤液中钾、钙、

钠、铝、锰、铁和镁元素的浓度。植物和土壤总氮含量用凯氏定氮法测定。植物样用HNO₃-H₂O₂高温密闭消解后,定容到25 mL容量瓶,ICP-OES测定消解液中的元素浓度(对于磷、钾、钙、镁,称样量为0.100 0 g;对于铁、锰、硼、锌,称样量为0.600 0 g)。在整个测定过程中用土壤成分分析标准物质(GBW07402)和植物成分分析标准物质(GBW07603)进行全程质量控制,各元素的加标回收率在87%~104%之间。

1.4 数据处理

样品均值的比较采用LSD检验($P<0.05$)。所有数据均进行双因素分析,检验添加生物炭和种植苜蓿对土壤理化性质和养分有效性影响的显著性,及两者的交互作用。所有统计分析均在SPSS16.0软件(SPSS Inc., USA)下进行。

2 结果与分析

2.1 添加生物炭和种植苜蓿对土壤理化性质和养分有效性的影响

2.1.1 土壤理化性质变化

添加生物炭后,沙化土壤的容重显著减小11.5%~11.6%,田间持水量和总孔隙度分别增加9.1%~10.3%和7.6%~11.3%,毛管孔隙度没有显著变化,pH值总体上显著增加0.1~0.2个单位($P<0.05$)。种植苜蓿对土壤pH、容重、田间持水量、总孔隙度和毛管孔隙度无显著影响(表2)。生物炭和苜蓿处理均没有显著影响CEC。裸地条件下,添加生物炭后土壤含水量显著增加了13.9%;在不加和添加生物炭处理中,种植苜蓿使土壤含水量分别显著减小12.6%和28.3%;施用生物炭和种植苜蓿在土壤含水量上表现出显著的交互作用。添加生物炭使土壤总氮和有机碳含量分别增

表2 添加生物炭和种植苜蓿处理对土壤理化性质的影响

Table 2 Effects of biochar addition and alfalfa planting on physical and chemical properties of soil

项目		pH	CEC/cmole·kg ⁻¹	容重/g·cm ⁻³	总孔隙度/%	毛管孔隙度/%	田间持水量/%	含水量/%	TN/mg·g ⁻¹	TOC/mg·g ⁻¹
不加生物炭	裸地	8.3	15.8	1.4	42.8	29.3	21.3	12.2	0.65	6.1
	苜蓿	8.4	15.8	1.3	41.1	28.2	22.2	10.7	0.59	6.5
添加生物炭	裸地	8.4	15.2	1.2	46.1	28.3	23.3	13.9	0.82	9.4
	苜蓿	8.5	15.8	1.2	47.7	28.6	23.5	10.0	0.72	10.5
生物炭(B)		*	ns	*	*	ns	**	ns	**	**
种植苜蓿(P)		ns	ns	ns	ns	ns	ns	***	*	ns
B×P		ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns

注:*, **, *** 分别表示生物炭(B)或种植苜蓿(P)在 $P<0.05$, $P<0.01$, $P<0.001$ 水平下影响显著或交互作用显著, ns 表示影响或交互作用不显著。下同。

Note: *, **, and *** indicate significant effects of biochar (B) and/or alfalfa planting (P) treatments at levels of $P<0.05$, $P<0.01$, and $P<0.001$, respectively; ns indicates no significant effect ($P>0.05$). The same below.

加 10.3%~25.8%和 52.8%~71.7%($P<0.01$);种植苜蓿总体上减小了土壤总氮含量($P<0.05$),但没有影响土壤有机碳含量。

2.1.2 土壤养分有效性的变化

生物炭处理使得土壤碱解氮、速效磷和速效钾含量分别增加 12.7%~23.5% ($P<0.05$)、141.7%~233.3%和 47.7%~81.1% ($P<0.001$); 种植苜蓿总体上减小了土壤速效磷($P<0.01$)和速效钾($P<0.05$)的含量,但没有影响土壤碱解氮含量(表 3)。加炭条件下,种植苜蓿使土壤速效磷和速效钾的含量分别显著减小 27.5%和 18.5%;不加炭处理中,种植苜蓿没有引起土壤速效磷和速效钾含量的显著变化。添加生物炭和种植苜蓿没有显著影响土壤有效钙和有效镁的含量。

对于中微量营养元素,添加生物炭总体上减小了土壤有效铁的含量($P<0.01$),增加了土壤有效锌的含量($P<0.001$),对有效锰和有效硼含量的影响不显著(表 3)。加炭条件下,裸地(BLB)和种植苜蓿(AB)处理中有效铁含量分别比不加炭(BL 和 A)减小了 29.1%和 16.4%。在加炭处理中,AB 比 BLB 的有效铁

含量高 38.1%($P<0.05$),而在不加炭处理中,种植苜蓿没有显著影响土壤有效铁的含量。添加生物炭没有显著影响土壤有效锰的含量;加炭处理中,种植苜蓿使有效锰的含量显著增加 38.2%。添加生物炭后土壤有效锌含量显著增加 94.2%~95.2%,种植苜蓿对土壤有效锌含量的影响不显著。添加生物炭和种植苜蓿对有效硼含量的增加作用均不显著。

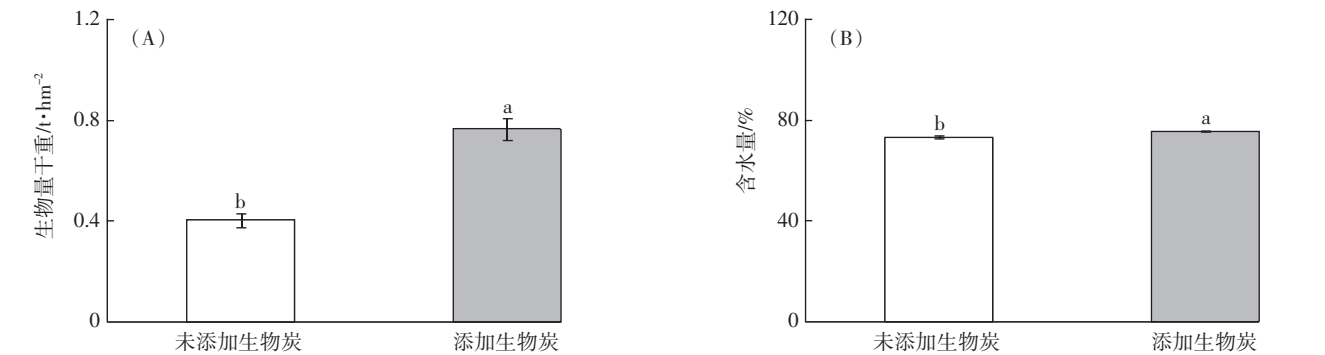
2.2 添加生物炭对苜蓿生长和营养元素吸收的影响

添加生物炭后(图 1),苜蓿地上部生物量比对照(不加炭)增加 91.1% ($P<0.01$),含水量增加 3.6% ($P<0.05$)。苜蓿地上部不同营养元素的含量变化受生物炭处理的影响不同(图 2)。添加生物炭后,苜蓿地上部的钾含量显著增加 45.7%,钙和镁的含量分别减小 11.3%和 29.5% ($P<0.05$) (图 2A),氮、磷和中微量元素铁、锌、锰、硼的含量无显著变化(图 2A、图 2B)。生物炭处理中(图 3),苜蓿地上部氮、磷、钾、钙、镁的总吸收累积量分别是对照的 2.1、2.3、3.0、1.8、1.4 倍,铁、锌、锰、硼的总吸收累积量分别是对照的 1.9、2.0、2.0、2.0 倍($P<0.05$)。

表 3 添加生物炭和种植苜蓿处理对土壤中营养元素有效含量的影响

Table 3 Effects of biochar addition and alfalfa planting treatments on concentrations of available nutrients in soil

项目		N/mg·kg ⁻¹	P/mg·kg ⁻¹	K/mg·kg ⁻¹	Ca/mg·g ⁻¹	Mg/mg·g ⁻¹	Fe/mg·kg ⁻¹	Zn/mg·kg ⁻¹	Mn/mg·kg ⁻¹	B/mg·kg ⁻¹
不加生物炭	裸地	39.7	4.0	120	15.1	0.37	5.7	0.34	7.9	0.30
	苜蓿	38.9	3.0	119	14.5	0.38	6.6	0.35	9.3	0.33
添加生物炭	裸地	44.7	13.3	217	13.6	0.36	4.0	0.66	8.5	0.33
	苜蓿	49.0	9.7	177	13.8	0.33	5.5	0.66	11.8	0.39
生物炭(B)		*	***	***	ns	ns	**	***	ns	ns
种植苜蓿(P)		ns	**	*	ns	ns	*	ns	**	ns
B×P		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns



图中不同小写字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)。下同

Different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$) between different treatments. The same below

图 1 添加生物炭对苜蓿地上部的干生物量和含水量的影响

Figure 1 Effects of biochar addition on shoot biomass(dry weight)(A) and water content(B) of alfalfa

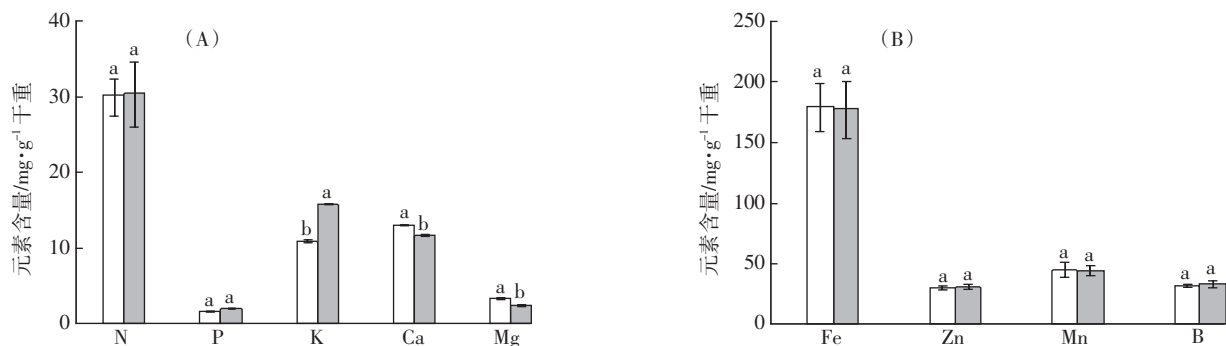


图2 添加生物炭对苜蓿地上部营养元素含量的影响

Figure 2 Effects of biochar addition on concentrations of nutrients in alfalfa shoot

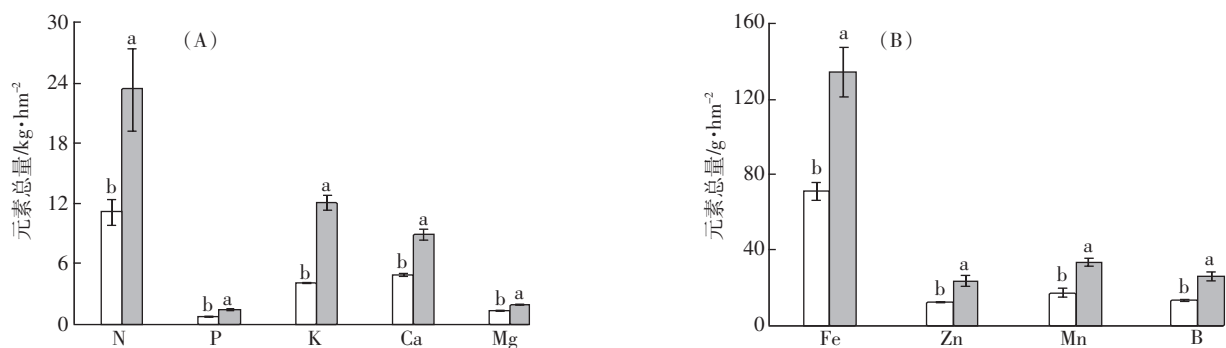


图3 添加生物炭对苜蓿地上部营养元素吸收总量的影响

Figure 3 Effects of biochar addition on total amount of nutrients accumulated in alfalfa shoot

3 讨论

3.1 添加生物炭对土壤理化性质的影响

由于较小的密度、较大的比表面积及含有大量的含氧官能团等,许多研究证实添加生物炭可以减小土壤容重,增加土壤 pH 值、孔隙度和田间持水量,与本研究结果一致^[10,19-22],在京郊沙化地上施用生物炭改善了土壤的理化性质。虽然有研究表明,添加生物炭可以增加土壤的 CEC^[4,19,22],但也有报道称,生物炭加入土壤培养 91 d 后土壤 CEC 没有增加^[21],与本研究结果一致。生物炭 CEC 的大小很大程度上取决于其表面的酸性含氧官能团的多少,生物炭加入土壤后,或许不能马上增加土壤 CEC,但随着生物炭表面被不断氧化,含氧官能团不断增加,土壤 CEC 也会随之增加^[23-24]。本试验中生物炭处理时间较短(三个月)可能是土壤 CEC 没有增加的主要原因。施用生物炭可以增加土壤的田间持水量,并且促使土壤含水量相应增加^[10,19-21]。本研究中,添加生物炭使得土壤田间持水量增加,从而增加了裸地土壤的含水量,而施用生物炭和种植苜蓿在土壤含水量上的显著交互作用可能是由于生物炭促进了苜蓿生长(图 1),增加了水分消

耗,从而使添加生物炭并种植苜蓿(AB)处理中土壤的含水量低于不施生物炭种植苜蓿(A)的处理。添加生物炭和种植苜蓿对沙化地土壤理化性质影响的长期效果如何还有待进一步研究。

3.2 添加生物炭对土壤养分有效性的影响

添加生物炭后,土壤中碱解氮含量的增加可能是两方面的原因造成的:一方面是由于生物炭本身含有较高的碱解氮含量(比土壤高 6.3 倍)(表 1),另一方面是生物炭提高了土壤中氮的生物有效性^[25]。生物炭可以通过促进土壤稳定态有机氮的矿化和易分解有机氮对铵态氮的吸附固定,短期内加快土壤氮的转化,从而增加土壤氮的生物有效性^[26]。添加生物炭后,土壤总氮矿化率可以增加 1.9~2.2 倍^[26]。但也有研究表明,在温带气候条件下,向肥沃土壤中添加生物炭没有促进氮的矿化和作物生长^[27]。这可能是由于生物炭中高 C/N 的不稳定成分促进了微生物对氮的固定,从而减小了氮的植物有效性^[28]。在不施用氮肥条件下,生物炭甚至会减小土壤中的硝态氮含量,从而不利于作物增产^[29]。因此,生物炭对土壤中氮素有效性的影响是生物炭中的有效氮含量、土壤氮含量、土壤性质、气候条件和微生物活动等综合作用的结果。

添加生物炭增加了土壤速效磷和速效钾的含量,与其他研究报道一致^[30-31]。这是由于一方面生物炭本身含有较高浓度的可供植物吸收利用的磷和钾(生物炭中速效磷和速效钾的含量分别是土壤的151.3倍和217.6倍,表1);另一方面,生物炭可以通过与土壤中有机物和其他阳离子(如 Ca^{2+})的相互作用影响土壤磷的有效性^[32-33]。Xu等^[32]研究表明,随小麦秸秆生物炭添加量的增加,碱性土壤对磷的吸附能力减小,磷的有效性增加,但也有研究表明,向石灰性土中添加生物炭后,土壤对磷的吸附能力增加,降低了磷的有效性^[33]。生物炭影响土壤磷有效性的主要机制仍然不明确,生物炭能够减少磷在铁氧化物表面的吸附,从而提高土壤中磷的生物有效性^[34],同时也可促使钙磷化合物的形成,使土壤中磷的有效性减小^[33]。生物炭中较高的有效性磷、钾含量对土壤速效磷和速效钾含量增加的贡献不可忽视。

生物炭处理没有显著影响土壤中有效钙和有效镁的含量,主要是由于试验所用生物炭中钙和镁的有效含量比土壤低或差别不大。土壤中有效钙的含量远高于生物炭,两者相差2.4倍(表1)。Zwieten等^[35]的研究结果表明,将交换性钙、镁含量远高于红壤土而低于钙质土的生物炭添加到土壤中后,红壤土中的交换性钙、镁含量显著增加,而钙质土中的交换性钙、镁含量没有显著变化。

虽然有报道表明,生物炭可以通过增强土壤对金属离子的吸附能力降低土壤中锌的有效性^[3,36],但这些研究多集中于对锌污染土壤的修复,而在本研究中,添加生物炭增加了土壤有效锌的含量(表3)。这是由于生物炭中有效锌的含量远高于土壤,为土壤有效锌含量的27.6倍(表1)。其他研究也表明,由于生物炭中的高锌含量,添加生物炭后土壤中有效锌的含量显著增加^[37]。与锌相似,生物炭中有效锰和有效硼的含量分别比土壤中高2.8倍和12.3倍(表1),也是添加生物炭后土壤锰和硼有效含量有所增加的原因之一($P>0.05$)。另外,生物炭本身含有的一些还原物质也会促进土壤中锰的溶出,从而增加土壤有效锰的含量^[38]。

生物炭本身含有的还原性物质有助于土壤中铁的溶解,提高铁的有效性^[38],但本研究中生物炭处理显著减小了土壤有效铁的含量(表3),与Ch'ng等^[39]的结果一致。这是由于生物炭显碱性,表面含有很多含氧官能团,添加生物炭后土壤pH值的升高和土壤胶体负电荷的增加均会增加土壤对铁离子的吸附,从而降低土壤中铁的有效性^[19,40]。Cui等^[34]研究证实,生

物炭就是通过减小土壤溶液中的铁浓度来减少磷在铁氧化物上的吸附,提高磷的有效性。值得注意的是,生物炭处理引起的土壤有效铁含量的减小并没有影响苜蓿体内的铁含量(图2),可能与苜蓿吸收铁元素的生理机制有关(见下文)。

3.3 种植苜蓿对土壤中营养元素有效性的影响

据报道,在黄泛平原风沙化土地上种植苜蓿三年后,风沙土的容重显著减小,土壤孔隙度显著增加,持水性能提高,风沙土中的有机质、碱解氮、速效磷和速效钾的含量也成倍增加^[41],而本研究没有得到类似的结果(表2、表3)。这可能是由于本试验中苜蓿种植时间过短(三个月)所致,紫花苜蓿对土壤有机碳、总氮含量和养分有效性等的影响受苜蓿种植年限的影响很大^[42-43]。本研究试验地为荒草地,之前未种植苜蓿,所以在较短的种植期间内,苜蓿难以与土著根瘤菌建立很好的共生固氮体系,根际固氮能力较弱^[43],而且苜蓿还需要从土壤中吸收大量的矿质氮来满足自身的生长需求,有可能造成土壤氮含量的减小(表2)。对于土壤速效磷和速效钾含量,也有苜蓿种植三年后减小的报道^[44],苜蓿对土壤速效磷和速效钾含量的影响机制目前还不清楚。种植苜蓿显著增加了土壤中有效铁和有效锰的含量(表3),应与苜蓿生理代谢机制有关。在石灰性土壤有效铁含量普遍较低条件下,苜蓿会启动还原机制从根际吸收铁:苜蓿根系 H^{+} -ATPase系统会分泌大量 H^{+} 酸化根际土壤,增加土壤可溶性铁的浓度,然后增强根表皮细胞质膜上的 Fe^{3+} 还原酶活性,将土壤中的 Fe^{3+} 还原为可被吸收的 Fe^{2+} ,最后通过二价金属转运蛋白将 Fe^{2+} 转入根表皮细胞,被植物吸收^[45]。与铁相似,苜蓿也可以通过分泌有机酸等改变根际pH和Eh值提高根际土壤锰的有效性。种植苜蓿对京郊沙化地养分含量与有效性的长期影响作用还需要进一步研究。

此结果从另一方面说明添加生物炭可以提供苜蓿生长初期所需要的氮磷钾等营养元素,有助于促进苜蓿生长。而且,添加生物炭与种植苜蓿相结合还可以规避生物炭处理造成的铁有效性降低导致的植物缺铁,从而更好地恢复植被。

3.4 添加生物炭对苜蓿生长和元素吸收的影响

由于添加生物炭减小了土壤容重,增加了田间持水量和土壤总氮、有机碳的含量,提高了土壤氮、磷、钾的有效性,苜蓿地上部的干重和含水量也相应增加(图1)。这与许多研究结果一致^[3-6],表明短期内玉米秸秆炭可以促进京郊沙化地上苜蓿的生长。除土壤类

型、生物炭种类和气候条件外,生物炭的施用量也会影响其促进植物生长的作用^[9-15,31],最佳的生物炭施用量有待进一步开展试验研究确定。

添加生物炭虽然显著增加了苜蓿地上部生物量,但只有地上部钾含量显著增加,钙和镁的含量甚至显著减小,且没有显著影响其他营养元素的含量(图2),所测9种营养元素在苜蓿地上部中的总吸收累积量均显著增加(图3),与其他的研究报告类似。Voorde等^[30]的研究结果表明,添加生物炭后三叶草的地上部生物量比对照显著增加3倍左右,但只有钾含量显著增加,氮和磷的含量没有显著变化。据Fox等^[46]报道,生物炭处理使得黑麦草地上部生物量增加1.5倍,而元素含量只有钾和磷显著增加,氮、钙、镁、铁、锰、锌和硼的含量均显著减小,元素总累积量除铁外均显著增加。对114篇已发表论文的试验数据进行归纳分析表明,尽管由于土壤类型和气候原因导致一些变异性,但总体上讲,添加生物炭增加了植物地上部的生物量和钾含量,而植物体内的氮、磷含量没有显著增加^[47]。因此,与其他元素相比,苜蓿体内钾含量的提高有可能是造成苜蓿地上部生物量增加的主要原因(这种假设有待试验验证)。另外,虽然本研究未能测定苜蓿根系的特征及其生物量,但添加生物炭后土壤容重的减小和孔隙度的增加会有利于苜蓿根系的生长,从而促进苜蓿地上部的生长^[48]。有研究结果表明,随生物炭施用量增加番茄的产量显著增加,番茄产量与主根直径的相关系数达到0.85^[49]。

生物炭对苜蓿吸收累积营养元素的影响,特别是吸收氮的影响与有的研究报告并不一致,主要归因于不同的土壤元素含量、土壤类型、生物炭类型和作物种类^[27-29,31]。例如,芥菜、大麦和三叶草的生物量及其体内11种元素含量的变化对4种不同种类生物炭处理的响应差异很大^[31]。关于生物炭处理对植物吸收累积大量营养元素影响的研究报道比较多,但对生物炭影响植物吸收累积微量营养元素方面的研究报道还较少,本试验结果有助于补充这方面研究的缺乏,从而更加全面地评价生物炭在农业生产和生态修复中的作用。

4 结论

(1)玉米秸秆生物炭中氮、磷、钾、锌、锰和硼的有效含量分别是试验用土壤的7.3、151.3、217.6、27.6、3.8倍和13.3倍,生物炭本身含有丰富的植物生长所需的营养元素,且有效浓度较高。

(2)添加生物炭后,京郊沙化地中苜蓿地上部的生物量显著增加91.1%,苜蓿体内的钾含量显著增加45.7%,氮、磷、钾、钙、镁、铁、锰、锌、硼在苜蓿地上部的总吸收累积量分别显著增加110.0%、130.9%、200.4%、82.6%、44.8%、89.5%、99.5%、102.7%和104.7%。

(3)添加生物炭使沙化地土壤的田间持水量、总孔隙度、有机碳和总氮含量分别增加9.1%~10.3%、7.6%~11.3%、52.8%~71.7%和10.3%~25.8%,土壤中氮、磷、钾和锌的有效含量分别增加12.7%~23.5%、141.7%~233.3%、47.7%~81.1%和94.2%~95.2%,但使有效铁的含量最高减小29.1%,对钙、镁、锰和硼的有效含量则无显著影响,裸地条件下添加生物炭后土壤含水量显著增加13.9%;种植苜蓿总体上增加了土壤中铁和锰的有效含量,减小了磷和钾的有效含量,没有影响其他营养元素的有效含量;添加生物炭和种植苜蓿均没有显著影响土壤的CEC。

(4)施用生物炭可在短期内改善京郊沙化地土壤的理化性质,提高土壤的保水能力,并增加苜蓿生物量。添加生物炭与种植苜蓿相结合对修复京郊沙化地土壤和增加植被有很大潜力,但相关修复机理还需要深入探索,施用生物炭促进苜蓿共生固氮的作用与机制以及长期的修复效果还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Lehmann J. A handful of carbon[J]. *Nature*, 2007, 447(7141): 143-144.
- [2] Li J, Li Y, Wu M, et al. Effectiveness of low-temperature biochar in controlling the release and leaching of herbicides in soil[J]. *Plant and Soil*, 2013, 370(1-2): 333-344.
- [3] Zheng R L, Cai C, Liang J H, et al. The effects of biochars from rice residue on the formation of iron plaque and the accumulation of Cd, Zn, Pb, As in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings[J]. *Chemosphere*, 2012, 89(7): 856-862.
- [4] Peng X, Ye L L, Wang C H, et al. Temperature- and duration-dependent rice straw-derived biochar: Characteristics and its effects on soil properties of an Ultisol in Southern China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2011, 112(2): 159-166.
- [5] Zhang A, Bian R, Pan G, et al. Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy: A field study of 2 consecutive rice growing cycles[J]. *Field Crops Research*, 2012, 127: 153-160.
- [6] Zheng R, Chen Z, Cai C, et al. Effect of biochars from rice husk, bran, and straw on heavy metal uptake by pot-grown wheat seedling in a historically contaminated soil[J]. *Bioresources*, 2013, 8(4): 5965-5982.
- [7] Karhu K, Mattila T, Bergstrom I, et al. Biochar addition to agricultural soil increased CH₄ uptake and water holding capacity: Results from a short-term pilot field study[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2011, 140(1): 309-313.

- [8] Zhang A, Liu Y, Pan G, et al. Effect of biochar amendment on maize yield and greenhouse gas emissions from a soil organic carbon poor calcareous loamy soil from central China plain[J]. *Plant and Soil*, 2012, 351(1-2):263-275.
- [9] Uzoma K C, Inoue M, Andry H, et al. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition[J]. *Soil Use and Management*, 2011, 27(2):205-212.
- [10] Streubel J D, Collins H P, Garcia-Perez M, et al. Influence of contrasting biochar types on five soils at increasing rates of application[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, 75(4):1402-1413.
- [11] Noguera D, Rondon M, Laossi K R, et al. Contrasted effect of biochar and earthworms on rice growth and resource allocation in different soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2010, 42(7):1017-1027.
- [12] 张 祥, 王 典, 姜存仓, 等. 生物炭对我国南方红壤和黄棕壤理化性质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(8):979-984.
ZHANG Xiang, WANG Dian, JIANG Cun-cang, et al. Effect of biochar on physicochemical properties of red and yellow brown soils in the South China Region[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(8):979-984.
- [13] 邓万刚, 吴鹏豹, 赵庆辉, 等. 低量生物质炭对 2 种热带牧草产量和品质的影响研究初报[J]. 草地学报, 2010, 18(6):844-847.
DENG Wan-gang, WU Peng-bao, ZHAO Qing-hui, et al. The effect of biochar on grass yield and quality[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2010, 18(6):844-847.
- [14] Smider B, Singh B. Agronomic performance of a high ash biochar in two contrasting soils[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2014, 191(SI):99-107.
- [15] Tammgeorg P, Simojoki A, Makela P, et al. Short-term effects of biochar on soil properties and wheat yield formation with meat bone meal and inorganic fertiliser on a boreal loamy sand[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2014, 191(SI):108-116.
- [16] Shie J L, Chang C Y, Chen C S, et al. Energy life cycle assessment of rice straw bio-energy derived from potential gasification technologies[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(12):6735-6741.
- [17] 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, 2000:146-227.
LU Ru-kun. Soil agricultural chemical analysis method[M]. Beijing: China Agriculture Science and Technique Press, 2000:146-227.
- [18] Hendershot W H, Duquette M. A simple barium chloride method for determining cation exchange capacity and exchangeable cations[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50(3):605-608.
- [19] Laird D A, Fleming P, Davis D D, et al. Impact of biochar amendments on the quality of a typical midwestern agricultural soil[J]. *Geoderma*, 2010, 158(3-4):443-449.
- [20] 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.
- [21] Basso A S, Miguez F E, Laird D A, et al. Assessing potential of biochar for increasing water-holding capacity of sandy soils[J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2013, 5(2):132-143.
- [22] Yuan J H, Xu R K, Zhang H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(3):3488-3497.
- [23] Cheng C H, Lehmann J, Thies J E, et al. Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes[J]. *Organic Geochemistry*, 2006, 37(11):1477-1488.
- [24] Liang B, Lehmann J, Solomon D, et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(5):1719-1730.
- [25] Zheng H, Wang Z, Deng X, et al. Impacts of adding biochar on nitrogen retention and bioavailability in agricultural soil[J]. *Geoderma*, 2013, 206:32-39.
- [26] Nelissen V, Rutting T, Huygens D, et al. Maize biochars accelerate short-term soil nitrogen dynamics in a loamy sand soil[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, 55:20-27.
- [27] Gueerena D, Lehmann J, Hanley K, et al. Nitrogen dynamics following field application of biochar in a temperate North American maize-based production system[J]. *Plant and Soil*, 2013, 365(1-2):239-254.
- [28] Perry L G, Blumenthal D M, Monaco T A, et al. Immobilizing nitrogen to control plant invasion[J]. *Oecologia*, 2010, 163(1):13-24.
- [29] Wang J, Pan X, Liu Y, et al. Effects of biochar amendment in two soils on greenhouse gas emissions and crop production[J]. *Plant and Soil*, 2012, 360(1-2):287-298.
- [30] Voorde T F J v d, Bezemer T M, Groenigen J W V, et al. Soil biochar amendment in a nature restoration area: Effects on plant productivity and community composition[J]. *Ecological Applications*, 2014, 24(5):1167-1177.
- [31] Kloss S, Zehetner F, Wimmer B, et al. Biochar application to temperate soils: Effects on soil fertility and crop growth under greenhouse conditions[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2014, 177(1):3-15.
- [32] Xu G, Sun J, Shao H, et al. Biochar had effects on phosphorus sorption and desorption in three soils with differing acidity[J]. *Ecological Engineering*, 2014, 62:54-60.
- [33] Chintala R, Schumacher T E, McDonald L M, et al. Phosphorus sorption and availability from biochars and soil/biochar mixtures[J]. *Clean-Soil Air Water*, 2014, 42(5):626-634.
- [34] Cui H J, Wang M K, Fu M L, et al. Enhancing phosphorus availability in phosphorus-fertilized zones by reducing phosphate adsorbed on ferrihydrite using rice straw-derived biochar[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2011, 11(7):1135-1141.
- [35] Zwieter V L, Kimber S, Morris S, et al. 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.
- [36] Houben D, Evrard L, Sonnet P. Beneficial effects of biochar application to contaminated soils on the bioavailability of Cd, Pb and Zn and the biomass production of rapeseed (*Brassica napus* L.)[J]. *Biomass & Bioenergy*, 2013, 57:196-204.
- [37] Olmo M, Alburquerque J A, Barrón V, et al. Wheat growth and yield responses to biochar addition under Mediterranean climate conditions[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, 50(8):1177-1187.
- [38] Graber E R, Tschansky L, Lew B, et al. Reducing capacity of water

- extracts of biochars and their solubilization of soil Mn and Fe[J]. *European Journal of Soil Science*, 2014, 65(1):162-172.
- [39] Ch'ng H Y, Ahmed O H, Majid N M A. Improving phosphorus availability in an acid soil using organic amendments produced from agroindustrial wastes[J]. *The Scientific World Journal*, 2014, 2014:1-6.
- [40] Uchimiya M, Bannon D I, Wartelle L H. Retention of heavy metals by carboxyl functional groups of biochars in small arms range soil[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60(7):1798-1809.
- [41] 董智, 李红丽, 任国勇, 等. 黄泛平原风沙化土地种植牧草改良土壤效果研究[J]. 中国草地学报, 2008, 30(3):84-87.
DONG Zhi, LI Hong-li, REN Guo-yong, et al. Study on soil amelioration effect of planting grasses in wind-sandy land of Yellow River Floodplain[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2008, 30(3):84-87.
- [42] 邵继承, 张丽妍, 杨恒山. 种植年限对紫花苜蓿栽培草地草产量及土壤氮、磷、钾含量的影响[J]. 草业科学, 2009, 26(12):82-86.
TAI Ji-cheng, ZHANG Li-yan, YANG Heng-shan. Effect of different planting years on the yield of alfalfa and content of N, P, K in soil[J]. *Pratacultural Science*, 2009, 26(12):82-86.
- [43] 邵继承, 杨恒山, 张庆国, 等. 种植年限对紫花苜蓿人工草地土壤碳、氮含量及根际土壤固氮力的影响[J]. 土壤通报, 2010, 41(3):603-607.
TAI Ji-cheng, YANG Heng-shan, ZHANG Qing-guo, et al. Influence of planting years on nitrogen-fixing capacity of rhizosphere and contents of carbon and nitrogen in artificial pastures of alfalfa[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(3):603-607.
- [44] 杨恒山, 曹敏建, 范富, 等. 紫花苜蓿生长年限对土壤理化性状的影响[J]. 中国草地学报, 2006, 28(6):29-32.
YANG Heng-shan, CAO Min-jian, FAN Fu, et al. Effects of the number of growth years of alfalfa on the physical and chemical properties of soil[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2006, 28(6):29-32.
- [45] Marschner H, Rohmheld V. Strategies of plants for acquisition of iron[J]. *Plant and Soil*, 1994, 165:375-388.
- [46] Fox A, Kwapinski W, Griffiths B S, et al. The role of sulfur- and phosphorus-mobilizing bacteria in biochar-induced growth promotion of *Lolium perenne*[J]. *Fems Microbiology Ecology*, 2014, 90(1):78-91.
- [47] Biederman L A, Harpole W S. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2013, 5(2):202-214.
- [48] Whalley W R, Clark L J, Gowing D J G, et al. Does soil strength play a role in wheat yield losses caused by soil drying[J]. *Plant and Soil*, 2006, 280(1-2):279-290.
- [49] 勾芒芒, 屈忠义. 土壤中施用生物炭对番茄根系特征及产量的影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(8):1348-1352.
GOU Mang-mang, QU Zhong-yi. Effect of biochar on root distribution and yield of tomato in sandy loam soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(8):1348-1352.