

聂新星, 张自咏, 黄玉红, 等. 生物炭与氮肥配施对高粱生长及镉吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(12): 2749–2756.

NIE Xin-xing, ZHANG Zi-yong, HUANG Yu-hong, et al. Effects of simultaneous biochar and nitrogen fertilizer application on the photosynthesis and Cd uptake of sorghum[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(12): 2749–2756.

生物炭与氮肥配施对高粱生长及镉吸收的影响

聂新星^{1,2,3}, 张自咏⁴, 黄玉红⁴, 冯敬云^{1,2,5}, 张志毅^{1,2,3}, 杨利^{1,2,3*}

(1.湖北省农业科学院植保土肥研究所, 武汉 430064; 2.农业农村部废弃物肥料化利用重点实验室, 武汉 430064; 3.农业环境治理湖北省工程研究中心, 武汉 430064; 4.湖北工程学院生命科学技术学院, 湖北 孝感 432000; 5.长江大学化学与环境工程学院, 湖北 荆州 434023)

摘要:为探讨生物炭与氮肥配施对高粱生长及镉(Cd)吸收的影响,采用盆栽试验,研究了在中、轻度Cd污染土壤(以YB1、YB2表示)上分别进行0、2%和5% 3个生物炭用量(以B₀、B₂、B₅表示)配施0、200、500 mg·kg⁻¹ 3个施氮水平(以N₀、N₂₀₀、N₅₀₀表示)对土壤理化性质、有效Cd含量、高粱光合特性及其Cd吸收的影响。结果表明:两种土壤上,增加生物炭用量能提高土壤pH和有机质含量,并在5%添加量时显著降低土壤CaCl₂-Cd含量;氮肥水平仅在YB1土壤上显著影响土壤CaCl₂-Cd含量。YB1土壤上,氮肥水平对高粱净光合速率、气孔导度和蒸腾速率有显著影响,均有随施氮量增加而增加的趋势;而高粱地上部Cd含量与CaCl₂-Cd含量显著正相关,在B₅N₀处理中最低(3.87 mg·kg⁻¹),B₀N₂₀₀处理中最高(6.79 mg·kg⁻¹)。YB2土壤上,生物炭用量对高粱净光合速率、气孔导度、胞间CO₂浓度和蒸腾速率均有极显著影响,气孔导度和蒸腾速率有随生物炭用量增加而降低的趋势;高粱地上部Cd含量与气孔导度、蒸腾速率显著正相关,与生物量显著负相关,在B₂N₅₀₀处理中最低(3.79 mg·kg⁻¹),B₀N₀处理中最高(5.32 mg·kg⁻¹)。研究表明,生物炭与氮肥配施能影响土壤理化性质、高粱光合特性和生长等因素,进而影响高粱地上部对Cd的吸收,不同土壤条件下影响高粱地上部Cd吸收的主要因素存在差异。

关键词:生物炭;镉;光合特征;交互作用;高粱

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2019)12-2749-08 doi:10.11654/jaes.2019-1071

Effects of simultaneous biochar and nitrogen fertilizer application on the photosynthesis and Cd uptake of sorghum

NIE Xin-xing^{1,2,3}, ZHANG Zi-yong⁴, HUANG Yu-hong⁴, FENG Jing-yun^{1,2,5}, ZHANG Zhi-yi^{1,2,3}, YANG Li^{1,2,3*}

(1. Institute of Plant Protection and Soil Science, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China; 2. Key Laboratory of Fertilization from Agricultural Wastes, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430064, China; 3. Hubei Engineering Research Center for Agricultural Environmental Control, Wuhan 430064, China; 4. College of Life Science and Technology, Hubei Engineering University, Xiaogan 432000, China; 5. School of Chemical and Environmental Engineering, Yangtze University, Jingzhou 434023, China)

Abstract: To investigate the effects of simultaneous biochar and nitrogen fertilizer application on soil properties and on the photosynthesis and Cd uptake of sorghum, two soils (YB1 and YB2), which possessed different levels of Cd pollution, were treated with either 0, 2%, or 5% biochar (B₀, B₂, and B₅, respectively) and with either 0, 200 mg·kg⁻¹, or 500 mg·kg⁻¹ nitrogen fertilizer (N₀, N₂₀₀, and N₅₀₀, respectively). The results showed that the highest biochar rate (5%) significantly increased soil pH and organic matter content and significantly reduced CaCl₂-Cd content, regardless of soil type. Meanwhile, nitrogen fertilizer application only exerted significant effects on the CaCl₂-Cd content

收稿日期: 2019-09-12 录用日期: 2019-10-22

作者简介: 聂新星(1990—),男,湖北宜昌人,硕士,研究实习员,主要从事土壤污染修复与农化分析方面的研究。E-mail: niexxing@163.com

*通信作者: 杨利 E-mail: 516416134@qq.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0801003)

Project supported: The National Key R&D Program of China(2017YFD0801003)

of soil YB1. Nitrogen fertilizer application also significantly affected net photosynthetic rate, stomatal conductance, and transpiration rate, all of which increased with increasing nitrogen fertilizer application rate in soil YB1. In addition, the Cd concentration of sorghum shoots was positively correlated with the $\text{CaCl}_2\text{-Cd}$ content of soil YB1, and the lowest Cd content ($3.87 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) was observed in the B_5N_0 treatment, whereas the highest content ($6.79 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) was observed in the B_0N_{200} treatment. For soil YB2, net photosynthetic rate, stomatal conductance, intercellular CO_2 concentration, and transpiration rate were significantly affected by biochar application rate. However, stomatal conductance and transpiration rate decreased with increasing biochar rate. Moreover, the Cd concentrations of sorghum shoots grown in soil YB2 were positively correlated with stomatal conductance and transpiration rate and were negatively correlated with aboveground biomass, and the lowest Cd content ($3.79 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) was observed in the B_2N_{500} treatment, whereas the highest content ($5.32 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) was observed in the B_0N_0 treatment. Therefore, simultaneous biochar and nitrogen fertilizer application affect the Cd accumulation of sorghum shoots by influencing soil properties, photosynthetic characteristics, and aboveground biomass. However, Cd uptake is also affected by soil type.

Keywords: biochar; cadmium; photosynthetic characteristic; interactive effect; sorghum

近百年来,全球工业化、城镇化的快速发展,加速了重金属通过大气沉降、灌溉水或农业投入品等途径进入农田,许多国家和地区农田土壤重金属超标问题日益突出^[1-2]。重金属具有较强的生物毒性,可降解性低,易在生物体内富集,是威胁粮食安全和人体健康的主要风险因子之一,其中镉(Cd)因其生物毒性大、生物活性高、污染面积广而受到广泛关注。为修复中轻度Cd污染农田土壤,国内外学者开展了大量的相关研究工作^[3-4]。在众多Cd污染土壤修复措施中,原位钝化技术即通过向土壤中加入各类钝化材料,调控Cd的赋存形态、降低其生物有效性,进而阻控其向植物体迁移,实现Cd中轻度超标农田的“边利用、边修复”,是一种行之有效的修复方式^[5-6]。

生物炭作为一种由生物质在高温缺氧条件下缓慢热解得到的富含碳的有机物质,一般呈碱性,且具有丰富的孔隙结构、较大的比表面积及大量羟基、羧基基团^[7]。生物炭能够通过提高土壤pH^[5],或吸附、离子交换等作用^[8]钝化土壤Cd,是一种受到广泛关注的钝化材料。施用生物炭虽然能钝化土壤Cd,但生物炭在高温热解条件下剩余的氮结构复杂,对土壤速效氮的添加作用有限^[9],因此,生物炭配施化肥,特别是氮肥对作物增产至关重要^[10]。施用氮肥虽然能显著促进作物光合作用及干物质积累^[11],但也促进作物对Cd的吸收。Li等^[12]3年的多点田间试验研究表明,当施氮量为 $200 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,春小麦籽粒平均Cd含量从对照处理的 $53 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 上升至 $87 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。Xiao等^[13]的盆栽试验结果表明,在施用2.5%(m/m)的生物炭时,菊苣Cd含量随施氮量增加显著降低;而不施或施用1.5%的生物炭时,氮肥的施用能显著促进菊苣对Cd的吸收。Yang等^[14]研究也表明,施用过量硝态氮能够促进水稻对Cd的吸收。因此,在Cd污染土壤上

合理配施生物炭与氮肥,对确保作物增产、粮食安全具有重要意义。

有关生物炭材质、用量及改性生物炭施用对作物Cd吸收的影响研究较多^[5,15],而生物炭配施氮肥对作物Cd吸收的研究鲜有报道。本研究选取不同Cd污染程度的土壤,以高粱为研究材料,通过盆栽试验探究生物炭与氮肥(尿素)配施对高粱地上部Cd吸收的影响,并从土壤理化、作物光合特性等方面初步解释其机理,以期合理施用生物炭钝化修复Cd污染农田提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2019年5月23日至7月26日在湖北省农业科学院植保土肥研究所($114^{\circ}18' \text{ E}$, $30^{\circ}29' \text{ N}$)盆栽场进行。根据前期土壤调查结果,两种供试黄棕壤取自湖北省大冶市稻田0~20 cm耕层土壤,分别代表中、轻度Cd污染农田土壤(以YB1、YB2表示),其基本理化性质见表1。YB1和YB2全Cd含量分别为 $1.27 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.46 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均超过《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)规定的风险筛选值。

生物炭是水稻秸秆在 450°C 高温缺氧条件下裂解制备而成,由湖北金日生态能源股份有限公司生产提供,其基本理化性质为pH 8.81,有机碳含量 $151.8 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮0.66%,全磷0.39%,全钾1.21%。

供试甜高粱品种为阿尔托2号,由湖南隆平高科耕地修复技术有限公司提供,属于中早熟品种,播后70~85 d进入开花期,全生育期90~110 d。

1.2 试验设计

试验采用裂区设计,以生物炭施用量为主区,施

表1 试验土壤基本理化性质

Table 1 Physicochemical properties of studied soils

土壤编号 Soil code	pH	有机质 Organic matter/g·kg ⁻¹	碱解氮 Avail-N/mg·kg ⁻¹	速效磷 Olsen-P/mg·kg ⁻¹	速效钾 Avail-K/mg·kg ⁻¹	有效镉 CaCl ₂ -Cd/mg·kg ⁻¹	全镉 Total Cd/mg·kg ⁻¹
YB1	6.08	48.04	111.92	20.68	184.14	0.58	1.27
YB2	5.45	35.50	66.89	15.16	246.59	0.32	0.46

氮量为副区。生物炭设0、2%、5% 3个施用比例(以B₀、B₂、B₅表示);氮肥用量设0、200、500 mg·kg⁻¹ 3个水平(以N₀、N₂₀₀、N₅₀₀表示),每种土壤共9个处理,每个处理3次重复。氮、磷、钾肥分别为尿素、磷酸二氢钙和氯化钾。磷、钾肥用量分别为P₂O₅ 50 mg·kg⁻¹、K₂O 100 mg·kg⁻¹,全部底肥施用。氮肥分底肥(5月23日)60%、6~8叶期(7月3日)20%、10~12叶期(7月15日)20% 3次施用。每盆装过1 cm筛的风干土3 kg,生物炭、底肥与土壤混匀后装入盆中,用自来水调节土壤含水量至田间持水量的60%,平衡一周后每盆播种3粒,播种深度约为3 cm,苗期(2~3叶)间苗,每盆保留生长较为一致的幼苗1株。高粱生长期间,根据土壤水分状况用自来水对土壤进行补水,防治病虫害一次。

1.3 样品采集及分析

根据天气情况,于7月23日9:00—11:30使用便携式光合测定仪(LI-6400XT, Li-Cor Biosciences, Lincoln, NE, USA)对高粱进行净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、胞间CO₂浓度(Ci)和蒸腾速率(Tr)的测定,每株高粱选择中部3片叶子进行测定,取平均值。测定时使用内置红蓝光源,测定气体流速为500 mmol·s⁻¹,光照强度为1000 mmol·s⁻¹,叶面温度为25℃,CO₂浓度为400 μmol·mol⁻¹,测定过程中每30 min进行匹配一次,以保证测定数据的准确性。

7月26日对高粱地上部生物量进行收获,105℃杀青30 min,75℃烘干至恒质量、称质量、粉碎。全Cd含量采用HNO₃-H₂O₂湿法消解,石墨炉原子吸收仪(900T;PerkinElmer, Waltham, MA, USA)测定,采用标准物质GBW(E)100348进行质量控制。植株收获后,将整盆土壤混匀,取土壤样品0.5 kg,土样风干后过20目和100目尼龙筛,分别用于pH和有效态Cd、有机质含量的测定。土壤和生物炭pH、有机质含量等基本理化性质参照《土壤农化分析》常规方法测定^[16];由于YB1和YB2均为酸性土壤,有效态Cd采用0.1 mol·L⁻¹CaCl₂提取^[17],石墨炉原子吸收仪测定。

1.4 数据处理

采用Microsoft Excel 2010进行数据处理,SPSS

24.0进行方差分析,Origin 9.0进行图表绘制。

2 结果与分析

2.1 生物炭与氮肥配施对土壤pH和有机质含量的影响

由表2可知,生物炭用量及其与施氮水平的交互作用对YB1和YB2土壤pH均有极显著影响($P<0.01$),土壤pH在B₅添加量时达到最高。此外,在不施或低生物炭用量(B₀和B₂)时,增加氮肥用量显著($P<0.05$)降低YB2土壤pH。两种土壤有机质含量仅随生物炭用量的增加显著增加($P<0.05$)。

2.2 生物炭与氮肥配施对土壤有效Cd含量的影响

由图1可看出,生物炭用量对两种土壤CaCl₂-Cd含量有显著影响($P<0.05$)。在同一施氮水平下,CaCl₂-Cd含量随生物炭用量的增加而降低,且与B₀处理相比,B₅处理CaCl₂-Cd含量显著降低($P<0.05$)。施氮水平仅对YB1土壤CaCl₂-Cd含量有显著影响($P<0.05$),施氮水平为N₀时,B₀、B₂和B₅用量下CaCl₂-Cd

表2 生物炭与氮肥配施对土壤pH和有机质含量的影响

Table 2 Effects of simultaneous biochar with nitrogen fertilizer application on soil pH and organic matter content

处理 Treatments	pH		有机质 Organic matter/g·kg ⁻¹	
	YB1	YB2	YB1	YB2
B ₀ N ₀	6.11±0.02b	5.49±0.05b	48.42±0.17c	36.44±0.48c
B ₀ N ₂₀₀	6.06±0.01bc	5.36±0.02cd	49.29±0.18c	35.83±0.28c
B ₀ N ₅₀₀	6.01±0.01c	5.30±0.01d	47.12±0.24c	35.56±0.15c
B ₂ N ₀	6.05±0.04bc	5.47±0.03b	60.08±1.2b	47.34±0.93b
B ₂ N ₂₀₀	6.12±0.03b	5.38±0.01c	57.37±1.58b	44.61±2.49b
B ₂ N ₅₀₀	6.09±0.01b	5.32±0.02cd	60.26±1.57b	47.82±0.16b
B ₅ N ₀	6.11±0.03b	5.55±0.03ab	70.80±1.45a	61.29±3.13a
B ₅ N ₂₀₀	6.19±0.03a	5.58±0.01a	73.27±2.58a	61.43±0.64a
B ₅ N ₅₀₀	6.20±0.01a	5.56±0.01a	73.63±6.02a	64.88±0.91a
B	**	**	**	**
N	NS	**	NS	NS
B×N	**	**	NS	NS

注:同列数值后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$);* $P<0.05$;** $P<0.01$;NS为不显著。

Note: The different lowercase letters in a column indicate significant difference among treatments at 5% level; * $P<0.05$; ** $P<0.01$; NS-Not significant.

含量分别为0.54、0.45 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和0.42 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;施氮水平为 N_{500} 时,CaCl₂-Cd含量分别上升至0.60、0.56 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和0.46 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2.3 生物炭与氮肥配施对高粱叶片光合特性和地上部生物量的影响

YB1土壤上,氮肥水平对高粱叶片Pn有显著影响($P<0.05$),对Gs和Tr有极显著影响($P<0.01$),均有随施氮量增加而增加的趋势(表3)。YB2土壤上,生物炭用量对Pn、Gs、Ci和Tr均有极显著影响($P<0.01$),其中Pn有随生物炭用量增加而增加的趋势。施氮水平能显著($P<0.05$)影响两种土壤高粱地上部生物量(图2),均在 N_{500} 处理时生物量最高;而生物炭用量增加时,两种土壤高粱地上部生物量整体表现为先上升后下降的趋势。

2.4 生物炭与氮肥配施对高粱地上部Cd含量的影响

由图3可知,YB1土壤上,生物炭用量对高粱地上部Cd含量有显著影响($P<0.05$),但氮肥水平及其

与生物炭配施的交互作用对高粱地上部Cd含量影响均不显著($P>0.05$)。 B_5N_0 处理高粱地上部Cd含量最低为3.87 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, B_0N_{200} 处理高粱地上部Cd含量最高为6.79 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。同一生物炭用量下,与 N_0 相比,除 B_2N_{200} 处理外,施氮均能促进高粱地上部对Cd的吸收。YB2土壤上,生物炭用量、施氮水平及两者交互作用均未对高粱地上部Cd含量产生显著影响($P>0.05$)。但同一生物炭用量下,随着施氮水平增加,高粱地上部Cd含量有降低的趋势。 B_2N_{500} 处理高粱地上部Cd含量最低为3.79 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, B_0N_0 处理高粱地上部Cd含量最高,为5.32 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。可见,生物炭用量、施氮水平在不同土壤上对高粱地上部Cd吸收的影响不同。

2.5 高粱地上部Cd含量影响因素相关性分析

运用Pearson双侧检验对YB1(表4)和YB2(表5)土壤中影响高粱地上部Cd吸收的土壤因素、高粱地上部生物量和叶片光合作用参数进行相关性分析。

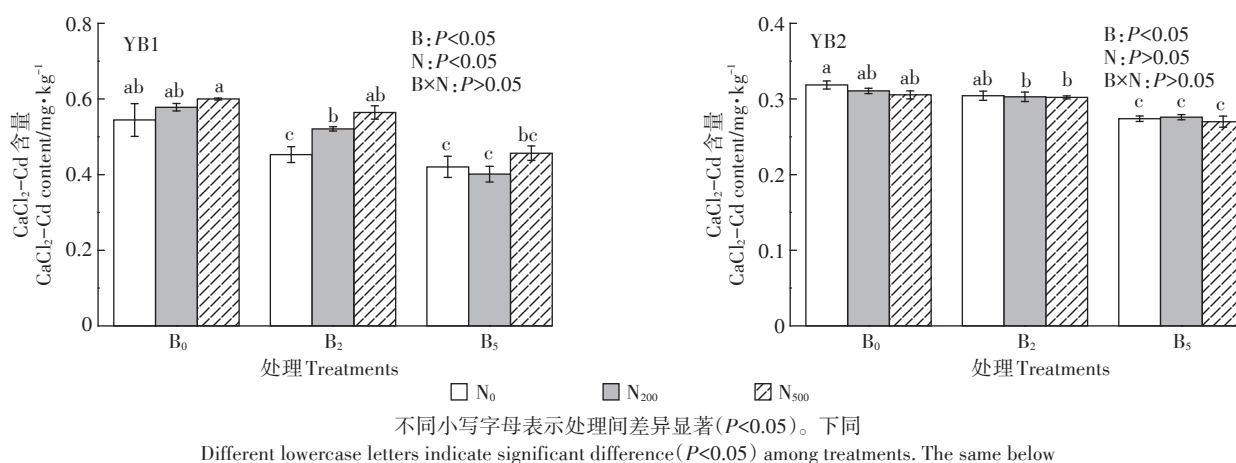


图1 生物炭与氮肥配施对土壤CaCl₂-Cd含量的影响

Figure 1 Effects of simultaneous biochar with nitrogen fertilizer application on soil CaCl₂-Cd content

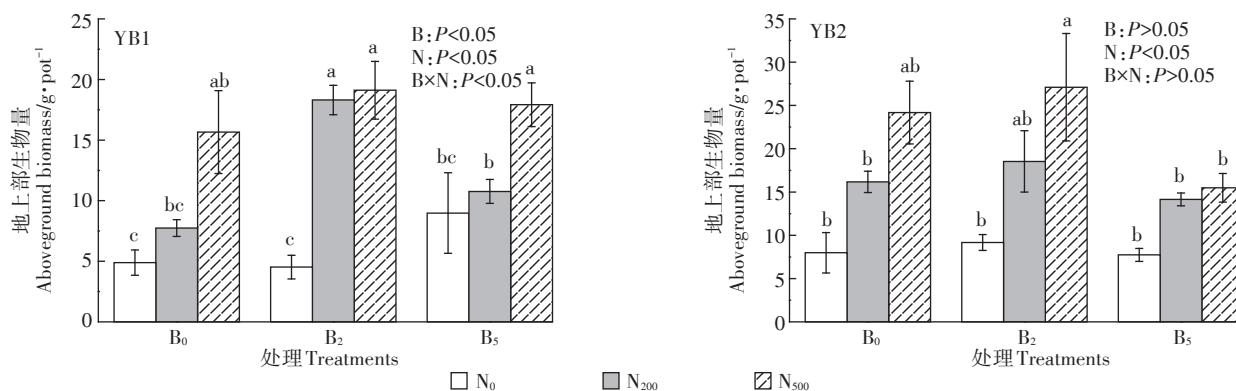


图2 生物炭与氮肥配施对高粱地上部生物量的影响

Figure 2 Effects of simultaneous biochar with nitrogen fertilizer application on aboveground biomass of sorghum

表3 生物炭与氮肥配施对高粱叶片光合特性的影响

Table 3 Effects of simultaneous biochar with nitrogen fertilizer application on the photosynthesis of sorghum

土壤编号 Soil code	处理 Treatments	净光合速率 Net photosynthetic rate/ $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	气孔导度 Stomatal conductance/ $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	胞间 CO_2 浓度 Inter-cellular CO_2 concentration/ $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$	蒸腾速率 Transpiration rate/ $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
YB1	B ₀ N ₀	25.80±1.43ab	0.25±0.02ab	209.33±6.17a	3.89±0.21ab
	B ₀ N ₂₀₀	23.83±0.54ab	0.22±0.00ab	204.33±3.98a	3.55±0.04b
	B ₀ N ₅₀₀	26.30±1.82ab	0.26±0.02a	199.00±17.06a	4.08±0.04ab
	B ₂ N ₀	22.23±1.45b	0.20±0.01b	197.67±6.57a	3.42±0.08b
	B ₂ N ₂₀₀	25.82±1.52ab	0.25±0.01ab	207.5±6.37a	3.80±0.08ab
	B ₂ N ₅₀₀	28.27±0.41a	0.27±0.01a	199.17±11.78a	4.22±0.07a
	B ₅ N ₀	23.92±2.66ab	0.22±0.03ab	193.33±5.96a	3.58±0.33b
	B ₅ N ₂₀₀	24.57±1.02ab	0.23±0.03ab	204.17±10.20a	3.61±0.24b
	B ₅ N ₅₀₀	26.85±0.29a	0.26±0.01a	212.01±3.01a	3.89±0.08ab
	B	NS	NS	NS	NS
	N	*	**	NS	**
	B×N	NS	NS	NS	NS
YB2	B ₀ N ₀	28.83±2.25bc	0.38±0.05ab	253.83±7.96a	4.78±0.32ab
	B ₀ N ₂₀₀	26.53±1.10c	0.26±0.04b	207.67±17.10b	3.86±0.27bc
	B ₀ N ₅₀₀	30.53±0.56bc	0.40±0.03a	254.50±9.75a	5.06±0.23a
	B ₂ N ₀	27.32±1.61c	0.30±0.05b	226.00±16.02ab	4.12±0.51ab
	B ₂ N ₂₀₀	32.52±1.66ab	0.28±0.03b	219.02±5.77ab	4.10±0.29b
	B ₂ N ₅₀₀	35.82±0.87a	0.25±0.02b	202.30±25.12b	3.79±0.13bc
	B ₅ N ₀	36.16±0.86a	0.24±0.03b	117.50±17.60c	3.69±0.31bc
	B ₅ N ₂₀₀	33.38±2.45ab	0.20±0.04b	115.31±14.62c	3.14±0.46c
	B ₅ N ₅₀₀	32.85±1.48ab	0.20±0.02b	115.45±8.28c	3.22±0.17bc
	B	**	**	**	**
	N	NS	NS	NS	NS
	B×N	*	NS	NS	NS

注:相同土壤同列数值后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$);* $P<0.05$;** $P<0.01$;NS为不显著。

Note: The different lowercase letters in a column within the same soil indicate significant difference among treatments at 5% level; * $P<0.05$; ** $P<0.01$; NS-Not significant.

结果表明,YB1土壤上,高粱地上部Cd含量与土壤pH、有机质含量呈显著负相关关系($P<0.05$),与土壤 $\text{CaCl}_2\text{-Cd}$ 呈显著正相关关系($P<0.05$),而与Pn、Gs、Ci、Tr和地上部生物量均无显著相关关系。YB2土壤上,高粱地上部Cd含量与Gs和Tr呈显著正相关关系($P<0.05$),与地上部生物量呈显著负相关关系($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 生物炭与氮肥配施对土壤理化性质及有效态Cd的影响

生物炭一般呈碱性,富含碳和矿质元素,同时具有多孔结构及丰富的表面官能团,可以通过改良土壤酸碱性、吸附、沉淀等多种机理或途径降低土壤Cd的生物有效性^[7-8]。土壤 $\text{CaCl}_2\text{-Cd}$ 含量与作物Cd含量

具有很好的相关性,能够较好地表征Cd的生物有效性^[17-18],而pH是影响土壤Cd生物有效性的重要土壤因素^[19]。本研究得到了较为一致的结果,即两种土壤上生物炭用量均能显著影响土壤pH,且在5%生物炭用量时能显著提高pH,而pH与 $\text{CaCl}_2\text{-Cd}$ 含量呈显著负相关关系。施用氮肥能直接或间接引起土壤酸化^[20],促进土壤Cd的形态转化和生物有效性的提高^[21]。本研究中,YB1土壤上氮肥水平显著影响土壤 $\text{CaCl}_2\text{-Cd}$ 含量,同一生物炭施用比例下,施氮水平增加能提高 $\text{CaCl}_2\text{-Cd}$ 含量;YB2土壤上虽然施氮水平也对土壤pH有显著影响,但 $\text{CaCl}_2\text{-Cd}$ 含量变化不显著。这可能与两种土壤中Cd的赋存形态不同有关。

3.2 生物炭与氮肥配施对高粱光合特性和生长的影响

光合作用是植物最基本的生理活动,影响着植物对土壤养分和重金属的吸收与转运、干物质的积累

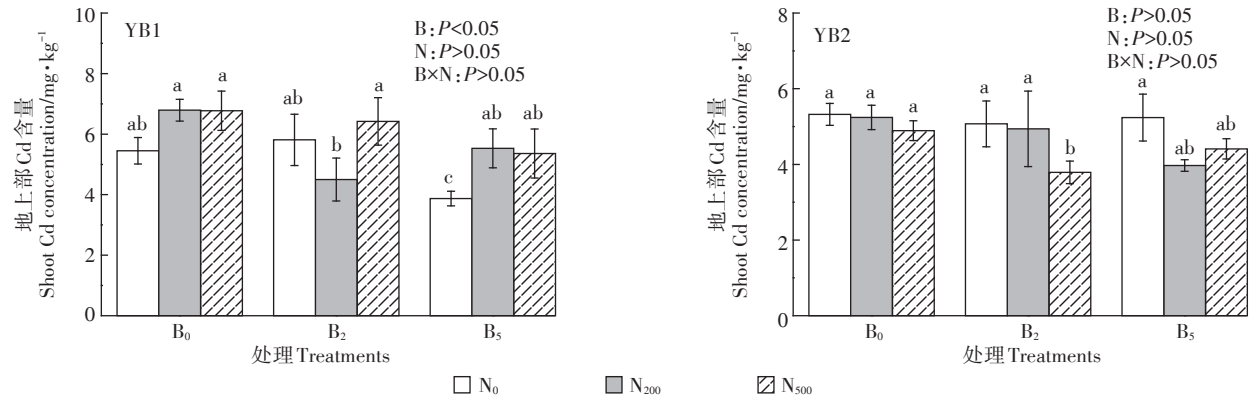


图3 生物炭与氮肥配施对高粱地上部Cd含量的影响

Figure 3 Effects of simultaneous biochar with nitrogen fertilizer application on Cd concentration in shoot of sorghum

表4 YB1土壤高粱地上部Cd含量影响因素相关性分析

Table 4 Correlation analysis on factors influencing Cd concentration in shoot of sorghum in soil YB1

	pH	OM	CaCl ₂ -Cd	Pn	Gs	Ci	Tr	S-biomass	Shoot-Cd
pH	1								
OM	0.67***	1							
CaCl ₂ -Cd	-0.53**	-0.71***	1						
Pn	0.12	-0.04	0.23	1					
GS	0.19	-0.03	0.26	0.88***	1				
Ci	0.26	0.01	0.13	0.17	0.44*	1			
Tr	-0.06	-0.23	0.37*	0.84***	0.89***	0.13	1		
S-biomass	0.2	0.2	0.24	0.3	0.29	-0.1	0.34*	1	
Shoot-Cd	-0.44*	-0.45*	0.35*	-0.04	0.02	0.2	0.11	-0.16	1

注: OM、Pn、Gs、Ci、Tr、S-biomass、Shoot-Cd 分别代表有机质含量、净光合速率、气孔导度、胞间CO₂浓度、蒸腾速率、地上部生物量和Cd含量。
P*<0.05; *P*<0.01; ****P*<0.001。下同。

Note: OM, Pn, Gs, Ci, Tr, S-biomass, Shoot-Cd represent organic matter content, net photosynthetic rate, stomatal conductance, intercellular CO₂ concentration, transpiration rate, aboveground biomass and Cd concentration in shoot of sorghum. **P*<0.05; ***P*<0.01; ****P*<0.001. The same below.

表5 YB2土壤高粱地上部Cd含量影响因素相关性分析

Table 5 Correlation analysis on factors influencing Cd concentration in shoot of sorghum in soil YB2

	pH	OM	CaCl ₂ -Cd	Pn	Gs	Ci	Tr	S-biomass	Shoot-Cd
pH	1								
OM	0.74***	1							
CaCl ₂ -Cd	-0.55**	-0.79***	1						
Pn	0.19	0.53**	-0.47*	1					
GS	-0.35*	-0.65***	0.38*		1				
Ci	-0.63***	-0.85***	0.74**	-0.39*	0.8***	1			
Tr	-0.42*	-0.68***	0.42*	-0.04	0.98***	0.8***	1		
S-biomass	-0.61***	-0.23	0.05	0.22	0.16	0.27	0.17	1	
Shoot-Cd	0.02	-0.25	0.08	-0.04	0.44*	0.27	0.48*	-0.47*	1

等^[22-23]。Pn、Gs、Ci和Tr作为重要的光合参数,是衡量植物光合作用强度的主要指标^[24]。氮是影响作物光合作用最关键的矿质元素,而增加氮素供应有利于光合作用的提高和干物质积累。本研究中,YB1土壤

上,氮肥水平对高粱叶片Pn、Gs和Tr有显著影响,均有随施氮量增加而增加的趋势,进而促进高粱生长。Abid等^[25]研究还发现,生物炭的施用可以减轻Cd对西红柿生长的胁迫,使光合作用增强。本研究结果表

明,YB1土壤上施用生物炭未对高粱光合特性产生显著影响,这可能与高粱对Cd有较强的耐性^[26],而YB1土壤Cd污染($1.27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)未对高粱生长产生胁迫有关。YB2土壤上,生物炭用量对Pn、Gs、Ci和Tr均有极显著影响,而高粱叶片Gs、Ci和Tr有随生物炭用量增加而降低的趋势,这可能是高生物炭施用量(5%)抑制高粱生长的原因之一。张晗芝等^[27]的研究也发现,玉米苗期施用高量生物炭对玉米生长有一定程度的抑制作用。

3.3 生物炭与氮肥配施对高粱地上部Cd吸收的影响

高粱地上部Cd含量不仅受土壤Cd生物有效性的影响,还与高粱植株对Cd的吸收密切相关。本研究中,YB1土壤上,高粱地上部Cd含量有随生物炭用量增加而降低的趋势;除 B_2N_{200} 处理外,施氮均能在一定程度上提高高粱地上部Cd含量;且高粱地上部Cd含量与土壤 $\text{CaCl}_2\text{-Cd}$ 含量呈显著正相关关系,而与高粱光合作用参数均无显著相关关系。本研究结果还发现,施用生物炭能降低YB1土壤 $\text{CaCl}_2\text{-Cd}$ 含量;而同一生物炭施用比例下,施氮水平增加能提高土壤 $\text{CaCl}_2\text{-Cd}$ 含量。这表明YB1土壤上,生物炭和氮肥主要通过影响土壤 $\text{CaCl}_2\text{-Cd}$ 含量,进而影响高粱地上部对Cd的吸收。而YB2土壤上,生物炭用量与氮肥水平对高粱地上部Cd含量均无显著影响,但随着施氮水平增加,高粱地上部Cd含量有降低的趋势。这可能是因为施氮水平增加能提高地上部生物量,对其Cd含量有一定“稀释作用”。虽然施用5%生物炭时能显著降低YB2土壤 $\text{CaCl}_2\text{-Cd}$ 含量,但高粱地上部Cd含量与 $\text{CaCl}_2\text{-Cd}$ 含量无显著相关关系,而与叶片Gs和Tr显著正相关。这可能是因为YB2土壤上,5%生物炭用量抑制了高粱的生长,从而引起高粱地上部对Cd的富集。Liu等^[28]研究发现,干旱抑制花生生长也导致花生籽粒中Cd含量升高。

4 结论

(1)两种土壤上,增加生物炭用量能提高土壤pH值和有机质含量,对高粱地上部生物量整体上表现为先促进后抑制的趋势;氮肥水平增加促进高粱生长。

(2)在中度Cd污染土壤上,生物炭用量增加降低土壤 $\text{CaCl}_2\text{-Cd}$ 含量,减少高粱地上部Cd吸收;氮肥水平增加提高 $\text{CaCl}_2\text{-Cd}$ 含量,促进高粱地上部Cd吸收。在轻度Cd污染土壤上,土壤 $\text{CaCl}_2\text{-Cd}$ 含量仅在5%生物炭用量时显著降低,但高粱地上部Cd吸收与其生长情况更密切相关。

(3)生物炭与氮肥配施可影响高粱生长和其对Cd的吸收,实际生产中应根据土壤等条件选择适宜的配施比例。

参考文献:

- [1] Zhao F J, Ma Y, Zhu Y G, et al. Soil contamination in China: Current status and mitigation strategies[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 49(2): 750-759.
- [2] Yi K X, Wang F, Chen J Y, et al. Annual input and output fluxes of heavy metals to paddy fields in four types of contaminated areas in Hunan Province, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 634: 67-76.
- [3] 陈思慧, 张亚平, 李飞, 等. 钝化剂联合农艺措施修复镉污染水稻土[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(3): 563-572.
CHEN Si-hui, ZHANG Ya-ping, LI Fei, et al. Remediation of Cd-polluted paddy soils using amendments combined with agronomic measures[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(3): 563-572.
- [4] 杜志鹏, 苏德纯. 稻田重金属污染修复治理技术及效果文献计量分析[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(11): 2409-2417.
DU Zhi-peng, SU De-chun. Bibliometric analysis of the effects of heavy metal pollution remediation technologies on paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(11): 2409-2417.
- [5] 黄敏, 刘茜, 朱楚仪, 等. 施用生物炭对土壤Cd、Pb有效性影响的整合分析[J]. 环境科学学报, 2019, 39(2): 560-569.
HUANG Min, LIU Xi, ZHU Chu-yi, et al. A meta-analysis of effects of biochar application on the availability of Cd and Pb in soils[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(2): 560-569.
- [6] 崔俊义, 马友华, 王陈丝丝, 等. 农田土壤镉污染原位钝化修复技术的研究进展[J]. 中国农学通报, 2017, 33(30): 79-83.
CUI Jun-yi, MA You-hua, WANG Chen-si-si, et al. Farmland soil cadmium pollution of in situ passivation remediation technology[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(30): 79-83.
- [7] Lehmann J. Bio-energy in the black[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2007, 5(7): 381-387.
- [8] 董爱琴, 谢杰, 刘佳, 等. 土壤重金属钝化材料生物炭的研究进展[J]. 环境污染与防治, 2017, 39(3): 319-325.
DONG Ai-qin, XIE Jie, LIU Jia, et al. Advances on heavy metal passivation material of biochar in soils[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2017, 39(3): 319-325.
- [9] 聂新星, 李志国, 张润花, 等. 生物炭及其与化肥配施对灰潮土土壤理化性质、微生物数量和冬小麦产量的影响[J]. 中国农学通报, 2016, 32(9): 27-32.
NIE Xin-xing, LI Zhi-guo, ZHANG Run-hua, et al. Effects of biochar and its combined application with chemical fertilizers on physical and chemical properties and microbial quantity of fluvo-aquic soil and winter wheat yield[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32(9): 27-32.
- [10] 孟繁昊, 高聚林, 于晓芳, 等. 生物炭配施氮肥改善表层土壤生物化学性状研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(5): 1214-1226.
MENG Fan-hao, GAO Ju-lin, YU Xiao-fang, et al. Improvement of bio-

- chemical property of surface soil by combined application of biochar with nitrogen fertilizer[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(5): 1214–1226.
- [11] 林长松, 吴娜, 李峻成, 等. 施氮量对甜高粱光合特性·糖分积累及产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(17): 7086–7088, 7090.
- LIN Chang-song, WU Na, LI Jun-cheng, et al. Effects of nitrogen rate on the photosynthetic characteristics, sugar accumulation and yield of sweet sorghum[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(17): 7086–7088, 7090.
- [12] Li X L, Ziadi N, Bélanger G, et al. Cadmium accumulation in wheat grain as affected by mineral N fertilizer and soil characteristics[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2011, 91(4): 521–531.
- [13] Xiao Y, Li Y, Che Y, et al. Effects of biochar and nitrogen addition on nutrient and Cd uptake of *Cichorium intybus* grown in acidic soil[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2018, 20(4): 398–404.
- [14] Yang Y, Xiong J, Chen R, et al. Excessive nitrate enhances cadmium (Cd) uptake by up-regulating the expression of *OsIRT1* in rice (*Oryza sativa*) [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2016, 122: 141–149.
- [15] O'Connor D, Peng T, Zhang J, et al. Biochar application for the remediation of heavy metal polluted land: A review of in situ field trials[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 619: 815–826.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO Shi-dan. Analysis methods for soil agro-chemistry[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [17] 颜世红, 吴春发, 胡友彪, 等. 典型土壤中有效态镉 CaCl_2 提取条件优化研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(9): 99–104.
- YAN Shi-hong, WU Chun-fa, HU You-biao, et al. Optimization of CaCl_2 extraction of available cadmium in typical soils[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(9): 99–104.
- [18] Feng M H, Shan X Q, Zhang S, et al. A comparison of the rhizosphere-based method with DTPA, EDTA, CaCl_2 , and NaNO_3 extraction methods for prediction of bioavailability of metals in soil to barley [J]. *Environmental Pollution*, 2005, 137(2): 231–240.
- [19] Zeng F, Ali S, Zhang H, et al. The influence of pH and organic matter content in paddy soil on heavy metal availability and their uptake by rice plants[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(1): 84–91.
- [20] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008–1010.
- [21] 张洪, 赖凡, 吕家格, 等. 氮肥对油菜根-土界面镉迁移及镉组分变化特征的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(2): 169–172.
- ZHANG Hong, LAI Fan, LÜ Jia-ke, et al. Effect of nitrogen fertilizer on Cd translocation and changes of Cd fractions at soil-root interface of rape[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(2): 169–172.
- [22] Akhtar T, Zia-ur-Rehman M, Nacem A, et al. Photosynthesis and growth response of maize (*Zea mays* L.) hybrids exposed to cadmium stress[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(6): 5521–5529.
- [23] 张运红, 和爱玲, 杨占平, 等. 土壤改良剂对镉污染土壤小麦抗性、光合特性及产量的影响[J]. 河南农业科学, 2018, 47(12): 57–63.
- ZHANG Yun-hong, HE Ai-ling, YANG Zhan-ping, et al. Effects of soil amendments on resistance, photosynthetic characteristics and yield of wheat in cadmium-contaminated soils[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2018, 47(12): 57–63.
- [24] 蔡威威, 艾天成, 李然, 等. 控释肥及尿素添加剂对双季稻光合特性及产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2018(3): 54–60.
- CAI Wei-wei, AI Tian-cheng, LI Ran, et al. Effect of controlled release fertilizer and urea additive on photosynthetic characteristics and yield of double cropping rice[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2018(3): 54–60.
- [25] Abid M, Danish S, Zafar-ul-Hye M, et al. Biochar increased photosynthetic and accessory pigments in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plants by reducing cadmium concentration under various irrigation waters[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(27): 22111–22118.
- [26] 薛忠财, 李纪红, 李十中, 等. 能源作物甜高粱对镉污染农田的修复潜力研究[J]. 环境科学学报, 2018, 38(4): 1621–1627.
- XUE Zhong-cai, LI Ji-hong, LI Shi-zhong, et al. Study on the phytoremediation potential of energy crop sweet sorghum to Cd-contaminated agriculture soil[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(4): 1621–1627.
- [27] 张晗芝, 黄云, 刘钢, 等. 生物炭对玉米苗期生长、养分吸收及土壤化学性状的影响[J]. 生态环境学报, 2010, 19(11): 2713–2717.
- ZHANG Han-zhi, HUANG Yun, LIU Gang, et al. Effects of biochar on corn growth, nutrient uptake and soil chemical properties in seedling stage[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(11): 2713–2717.
- [28] Liu C F, Yu R G, Shi G R. Effects of drought on the accumulation and redistribution of cadmium in peanuts at different developmental stages [J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2017, 63(8): 1049–1057.