

除草剂残留下生物炭对甜菜生长的影响

李玉梅^{1,2}, 宋柏权², 刘峥宇³, 王根林^{4*}, 魏丹^{1*}, 金梁¹, 张磊¹

(1.黑龙江省农业科学院土壤肥料与环境资源研究所, 黑龙江 哈尔滨 150086; 2.黑龙江大学农学院, 黑龙江 哈尔滨 150086; 3.黑龙江省绥滨农场, 黑龙江 绥滨 154213; 4.黑龙江省农业科学院畜牧研究所, 黑龙江 哈尔滨 150086)

摘要:采用盆栽试验,模拟除草剂土壤残留环境,研究土壤中异噁草松残留对甜菜生长的影响,阐明利用生物炭降低残留药害、促进甜菜生长的作用。结果表明:土壤中异噁草松残留达到 $0.12\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,甜菜生长受抑制,并随残留量增加而逐渐加重;当土壤中异噁草松浓度大于 $0.48\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,幼苗初期生长受重度药害抑制率达100%;施入一定量生物炭后,幼苗受药害症状普遍减轻或不受药害,植株生长旺盛,根冠比增加,根系形态结构改善,含糖量平均增加1.10%,与未施炭处理差异显著。试验结果表明,土壤中施入一定量的生物炭,能够降低除草剂残留对甜菜生长的抑制作用,对甜菜生长有明显的促进作用。

关键词:甜菜;除草剂残留;生物炭

中图分类号:X53

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2015)03-0269-06

doi: 10.13254/j.jare.2014.0366

Effects of Bio-char on Sugar Beet Growth in Clomazone Residual Soil

LI Yu-mei^{1,2}, SONG Bai-quan², LIU Zheng-yu³, WANG Gen-lin^{4*}, WEI Dan^{1*}, JIN Liang¹, ZHANG Lei¹

(1.Institute of Soil Fertilizer and Environment Resource, Heilongjiang Academy of Agriculture and Science, Harbin 150086, China; 2.Agricultural College of Heilongjiang University, Harbin 150086, China; 3.Suibin Farm of Heilongjiang Province, Suibin 154213, China; 4.Institute of Animal Husbandry, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China)

Abstract: Effects of biological carbon (bio-char) on sugar beet growth were studied by pot experiments simulating long residual herbicide residues in soil environment. The results showed that the safety threshold of sugar beet growth with clomazone residual was $0.12\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, and beyond this value, sugar beet growth was in inhibition with clomazone residues increased gradually; Early seedling growth under severe phytotoxicity inhibition rate reached 100% when clomazone concentration was greater than $0.48\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; Seedlings subjected to injury symptoms generally reduced to no phytotoxicity after put into a certain amount of bio-car in soil, the plant growth and root shoot ratio increased. Sugar beet root tuber yield and total sugar yield were influenced after applying carbon, sugar content increased 1.10%, which showed significant difference compared with CK. It explained that the bio-char could promote the growth of sugar beet. Applying biochar to soil could reduce the biological hazardous taken by clomazone residues within certain scope.

Keywords: sugar beet; herbicide residual; bio-char

甜菜是对除草剂较为敏感的作物,尤其在幼苗期,主根如果接触高浓度农药,就会出现岔根、畸型根等严重抑制生长的现象。异噁草松是防治大豆田顽固性阔叶杂草鸭跖草、苣荬菜、刺菜等常用除草剂,研究表明,异噁草松施用量达 $1\,250\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ ($600\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$),对甜菜的安全周期是16个月^[1],具有残效期长、药害重

的特点。黑龙江省北部是我国大豆的主产区,有些地块连续种植大豆已达20多年,土壤受异噁草松、氟磺胺草醚等长残效除草剂残留影响严重,已经成为下茬甜菜、马铃薯、玉米等高产作物种植的瓶颈。

生物炭是生物质通过热裂解的方法在缺氧或者少氧条件下制备的一种富含孔隙结构、含炭量高的炭化物质^[2]。研究发现,土壤/沉积物中含有一种高比表面炭类物质(HSACM),无论是极性化合物还是非极性化合物都能在HSACM上发生非线性吸附^[3]。而生物炭(秸秆灰、木炭、黑炭)中含有大量的HSACM,通过对非极性有机物的吸附,控制污染物在土壤环境中的迁移、转化,从而降低其生物学毒性^[4-5]。关于土壤

收稿日期:2014-12-23

基金项目:农业部产业体系项目(CARS-04-01A);黑龙江省普通高校甜菜遗传育种重点实验室开放课题

作者简介:李玉梅(1971—),女,四川射洪人,博士,研究方向为污染土壤修复。E-mail: liyumeiwxyl@126.com

*通信作者:王根林 E-mail: wanggenlin2005@163.com

魏丹 E-mail: wd2087@163.com

中异噁草松残留对甜菜生长的影响及利用生物炭修复污染土壤还少有报道,因此,在前期研究基础上,开展异噁草松残留下,生物炭对甜菜生长的影响研究,为今后农业生产中利用生物炭修复污染土壤,调整种植结构提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤为典型黑土,基本理化指标:全氮 0.134%、全磷 0.118%、全钾 2.13%、碱解氮 163.0 mg·kg⁻¹、速效磷 63.2 mg·kg⁻¹、速效钾 187.92 mg·kg⁻¹、有机质 34.8 g·kg⁻¹、pH 值 6.74。生物炭(C)由沈阳应用生态研究所提供,基本理化性质:全氮 0.785%、全磷 0.133%、全钾 2.41%、有机质 583 g·kg⁻¹、pH 值 8.56。异噁草松由大连松辽公司生产,标准含量 480 g·L⁻¹。供试甜菜品种为 9048,单粒。底肥用量尿素 0.04 g·kg⁻¹、磷酸二铵 0.18 g·kg⁻¹、氯化钾 0.61 g·kg⁻¹,在甜菜叶丛生长期和块根生长期追施氮肥。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计

试验于 2013—2014 年在黑龙江省农业科学院盆栽试验场进行。根据大豆田异噁草松标准喷施量 2 250 mL·hm⁻²,全部残留土壤(土壤容重 1.2~1.3 g·cm⁻³,0~20 cm 耕层)为 0.48 mg·kg⁻¹。设计土壤中异噁草松残留量与添加生物炭(C)共 12 个处理:(1)异噁草松残留量 0.06 mg·kg⁻¹;(2)异噁草松残留量 0.12 mg·kg⁻¹;(3)异噁草松残留量 0.24 mg·kg⁻¹;(4)异噁草松残留量 0.48 mg·kg⁻¹;(5)异噁草松残留量 0.72 mg·kg⁻¹;(6)异噁草松残留量 0.06 mg·kg⁻¹+生物炭(C)300 g;(7)异噁草松残留量 0.12 mg·kg⁻¹+生物炭(C)300 g;(8)异噁草松残留量 0.24 mg·kg⁻¹+生物炭(C)300 g;(9)异噁草松残留量 0.48 mg·kg⁻¹+生物炭(C)300 g;

(10)异噁草松残留量 0.72 mg·kg⁻¹+生物炭(C)300 g;(11)异噁草松 0 mg·kg⁻¹;(12)异噁草松 0 mg·kg⁻¹+生物炭(C)300 g。每处理 5 次重复。

1.2.2 试验方法

盆栽用桶大小为直径 30 cm×高 30 cm,将无农药残留土壤统一过 3.0 mm 筛,每桶装土量 20 kg。采用混土施药方法,先将异噁草松稀释成一定浓度后与土壤混拌均匀,再将生物炭与事先混合好的药土混拌、装桶、施肥、播种、覆土。每桶均匀播 20 粒种子,浇水量 1 500 mL·桶⁻¹。

1.2.3 测定项目与方法

在甜菜生长第 30、40、50 d 采用常规方法测定出苗指数、株高、生物量、叶绿素含量,成熟期测定块根重、根冠比、根系形态、含糖率等指标^[6];叶绿素用日本岛津自动叶绿素仪测定;含糖率采用手持糖度计测量。

根系形态特性分析:将洗净的甜菜根系样品放置在 30 cm×40 cm 树脂玻璃槽内,并注水至 3~4 mm 深,使根系充分散开,用双面光源扫描系统(EPSON Expression 1640XL,美国 EPSON 公司)扫描根系,经专用数字化软件(WinRhizo Reg V2004a)分析获得根长、根体积、根表面积及平均根直径等形态指标^[7]。

出苗指数=处理出苗率×100%/对照出苗率;受抑制率=受害株数×100%/出苗数。

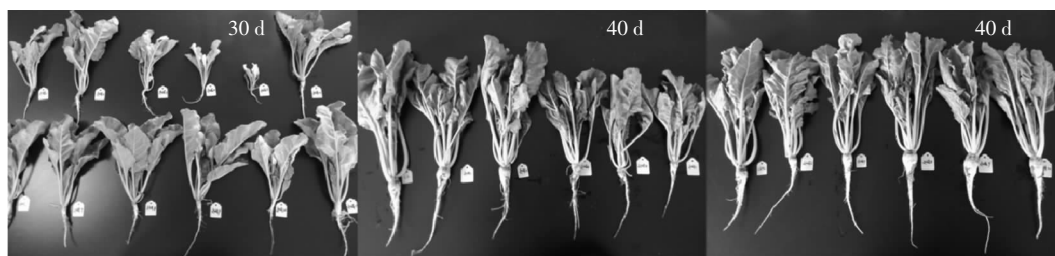
1.3 数据处理

采用 Excel 2003 计算试验数据,DPS 6.55 进行统计分析。

2 结果与讨论

2.1 生物炭对甜菜出苗的影响

土壤中除草剂残留对甜菜出苗有一定的影响。由图 1~图 2 可见,随着异噁草松残留量的增加,甜菜出



左上:异噁草松 0.06~0.72 mg·kg⁻¹ 处理第 30 d;左下:异噁草松 0.06~0.72 mg·kg⁻¹+生物炭(C)处理第 30 d;
中:异噁草松 0.06~0.72 mg·kg⁻¹ 处理第 40 d;右:异噁草松 0.06~0.72 mg·kg⁻¹+生物炭(C)处理第 40 d

图 1 不同处理甜菜第 30、40 d 生物学形态

Figure 1 The biological characteristics of sugar beet at the thirtieth and fortieth days with treatments

苗率降低,平均出苗率仅为 37.91%;当土壤中异噁草松浓度达到 0.48、0.72 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,甜菜出苗率、出苗指数分别为 36.67%、61.54%和 26.20%、60.46%,幼苗初期生长受重度药害抑制率达 100%;当土壤中异噁草松达 0.24 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,幼苗生长受轻度药害抑制率为 93.3%;异噁草松浓度低于 0.24 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,甜菜出苗率、出苗指数升高,受抑制率降低,残留量在 0.06~0.12 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,甜菜幼苗均表现不受药害现象。

生物炭对提高甜菜出苗率,减轻异噁草松残留药害,具有一定的促进作用。由图 1~图 2 可见,土壤中添加生物炭后,甜菜出苗率增加,平均为 54.67%;当土壤中异噁草松浓度达 0.48、0.72 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,甜菜出苗率为 53.33%、46.67%,出苗指数为 123.09%、93.34%,均高于不施炭处理;幼苗初期生长仅受轻度药害抑制,抑制率分别为 30.30%、45.45%,受重度抑制率为

0;当土壤中异噁草松浓度达 0.24 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,幼苗生长受轻度药害抑制率为 25%,与同一残留浓度未加炭处理差异显著。

2.2 生物炭对甜菜生长的影响

生物炭可降低除草剂残留药害危害,促进作物生长^[8-9]。由表 1 可见,土壤中异噁草松浓度在 0~0.72 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,添加一定比例生物炭后,幼苗株高平均增加 16.0%,叶绿素含量前期明显高于对照;随生育进程延长,加炭处理株高、叶绿素增加逐渐优势减小,而根冠比增加,这与块根类作物营养生长逐渐向地下部分转移有关;幼苗生长 30~50 d 内,加炭处理生物量平均增加 120.95%、32.86%、52.93%,与对照差异显著,说明生物炭可消减高残留药害对甜菜生长的抑制作用,这一点与前期结果一致^[9-10]。

根冠比是影响作物养分吸收效率的重要因子。有研究认为,环境胁迫条件下,根冠比增加,是作物对逆境的主动适应性反应机制^[11-12]。由表 1 和图 1 可见,未添加生物炭处理,甜菜幼苗根冠比随着异噁草松浓度的增加而降低,差异显著。添加生物炭后,根冠比呈增加趋势,尤其是在异噁草松 0.48、0.72 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 高残留处理间差异不显著,这与添加生物炭后,改善了土壤微域逆境,降低了异噁草松残留药害有关,其机理还有待于进一步研究。

2.3 生物炭对甜菜根系形态的影响

植物吸收养分的能力主要取决于根系的形态^[12]。根系是作物生长所需养分的主要通道,根系形态决定作物获得养分和水分的能力^[13],根长、根表面积和根体积都直接影响着作物对养分的吸收和运输能力^[14-15]。在甜菜幼苗生长第 30 d,由图 3~图 6 可见,不同处理下根系形态发生变化。随着异噁草松浓度的增

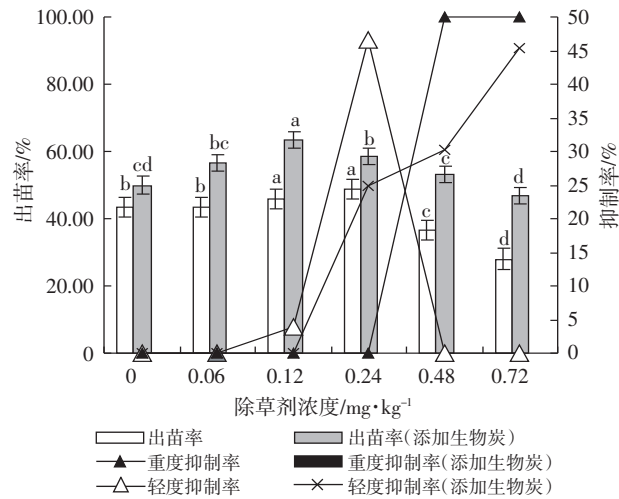


图 2 不同处理甜菜出苗率及受抑制率变化

Figure 2 The effect of different treatments on sugar beet seeding and inhibition rate

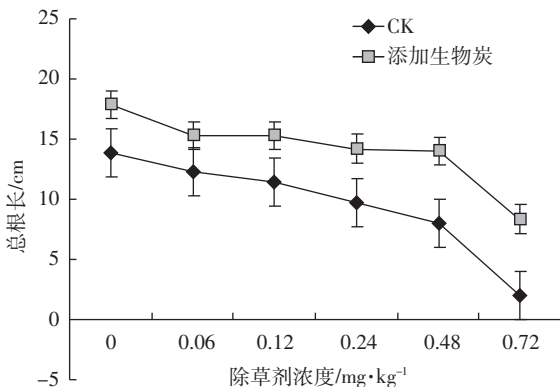


图 3 不同处理甜菜根系总根长变化

Figure 3 The effect of different treatments on sugar beet total root length

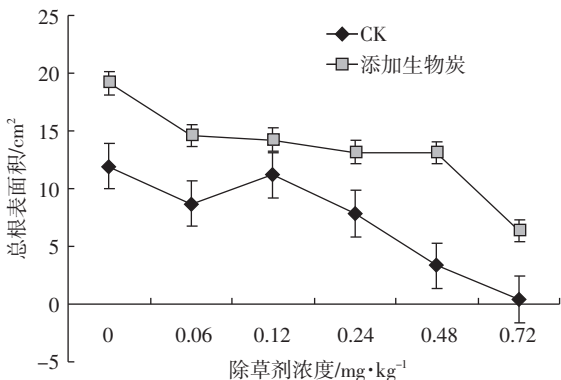


图 4 不同处理甜菜根系总根表面积变化

Figure 4 The effect of different treatments on sugar beet total surface area

表 1 不同处理下甜菜苗期生物学指标变化

Table 1 The effect of different treatments on sugar beet biological characteristics

指标	除草剂浓度/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	30 d		40 d		50 d	
		CK	添加生物炭	CK	添加生物炭	CK	添加生物炭
株高/cm	0	21.90±0.57aA	25.15±0.94bC	29.35±0.37abAB	30.00±0.98cB	30.47±0.64cC	33.50±0.49aA
	0.06	21.35±0.66aA	25.50±0.73bBC	30.75±0.69aA	32.43±0.64aA	33.17±1.09bB	34.07±0.33aA
	0.12	21.67±0.40aA	26.30±0.65aAB	30.00±1.14aAB	32.07±0.91abA	38.30±1.14aA	35.50±0.58aA
	0.24	19.35±0.33bB	26.83±0.55aA	28.10±1.31bB	31.80±0.49abAB	32.50±1.14bB	34.53±0.77aA
	0.48	14.60±0.57cC	20.75±0.45cD	25.26±0.44cC	31.00±0.57bcAB	27.00±1.31dD	33.87±0.91aA
	0.72	8.20±0.98dD	17.10±1.14dE	24.00±1.31cC	26.50±0.73dC	26.80±0.57dD	29.00±1.18bB
	Sd	0.58	0.64	0.14	0.10	0.53	1.05
叶绿素 (SPDA)	0	43.97±0.45aA	40.15±0.94aA	48.68±0.72bcB	44.25±0.49dC	42.45±1.40cdB	43.85±0.69aA
	0.06	38.26±0.94bB	40.72±1.34aA	52.57±0.99aA	47.06±0.76abAB	43.65±0.64bcAB	37.44±0.78dC
	0.12	37.40±0.98bBC	42.24±1.12aA	49.60±1.47bAB	45.74±0.87cB	41.03±0.28dB	38.06±0.45dC
	0.24	37.84±0.59bB	41.23±0.40aA	46.94±1.05cBC	44.07±0.90dC	42.28±0.90cdB	40.50±0.90cB
	0.48	35.25±0.81cC	41.09±0.90aA	43.65±0.87dC	47.93±1.83aA	45.51±0.69abA	40.96±1.09cB
	0.72	25.15±0.44dD	34.06±0.88bB	44.20±0.49dC	46.74±1.03bcAB	45.93±0.31aA	42.00±0.71bA
	Sd	0.74	1.25	1.65	0.31	1.11	0.88
生物量/ $\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$	0	23.35±0.99aA	43.61±0.91aA	82.20±1.14bB	105.68±1.21bB	130.89±1.36bB	146.72±1.45cC
	0.06	15.88±1.04bBC	31.70±0.65bB	94.05±0.88aA	101.89±1.39cC	133.95±1.50aA	134.99±0.99cD
	0.12	17.00±0.98bB	30.60±0.68bcBC	95.64±0.91aA	112.40±0.90aA	132.70±1.55aA	138.76±1.03dD
	0.24	14.03±0.63cC	27.70±0.49dD	74.54±1.47cC	101.60±0.65cC	85.25±3.67cC	161.05±0.77bB
	0.48	7.07±0.13dD	29.60±0.57cC	53.11±1.05dD	91.76±0.69dD	67.47±2.23dD	172.37±1.53aA
	0.72	2.20±0.16eE	15.67±0.43eE	50.87±1.22eE	86.75±0.61eE	63.73±1.69eE	169.90±2.20aA
	Sd	0.68	0.40	0.07	1.50	1.14	3.10
根冠比	0	0.13±0.02aA	0.14±0.01aA	0.38±0.02aA	0.32±0.02dD	0.50±0.03bB	0.74±0.03abA
	0.06	0.10±0.02bB	0.11±0.01bA	0.39±0.02aA	0.36±0.01cC	0.72±0.02aA	0.74±0.04abA
	0.12	0.08±0.01cC	0.12±0.01abA	0.25±0.00bB	0.44±0.02bB	0.46±0.02cC	0.77±0.03aA
	0.24	0.07±0.00cC	0.12±0.01abA	0.19±0.02cC	0.37±0.04cC	0.35±0.02dD	0.72±0.03abA
	0.48	0.04±0.01dD	0.12±0.02abA	0.18±0.00cC	0.50±0.03aA	0.22±0.02eE	0.68±0.03bB
	0.72	0.02±0.00eD	0.13±0.01abA	0.16±0.01cC	0.45±0.04bB	0.22±0.01eE	0.67±0.02bB
	Sd	0.02	0	0.06	0.03	0.04	0.01

注: 同列中不同小写、大写字母分别表示处理间达显著水平 ($P < 0.05$, $P < 0.01$)。

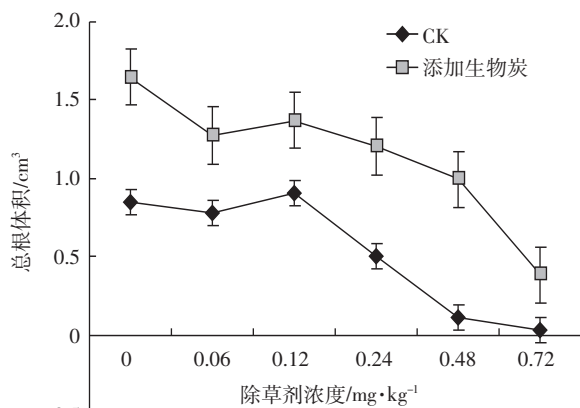


图 5 不同处理甜菜根系总根体积变化

Figure 5 The effect of different treatments on sugar beet total root volume

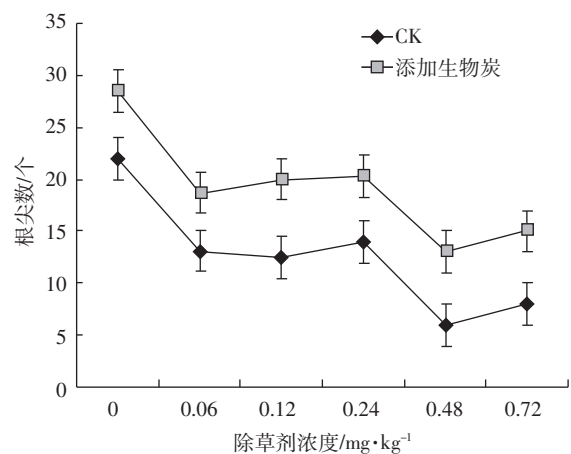


图 6 不同处理甜菜根系根尖数变化

Figure 6 The effect of different treatments on sugar beet total tip numbers

加,加炭处理总根长、总根表面积、总根系体积及根分枝数均高于未加炭处理。当异噁草松浓度达到 0.48 、 $0.72 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,未加炭处理根系各形态指标均最低,说明高浓度异噁草松对甜菜生长有较强的抑制作用。添加生物炭后,抑制作用得以缓解,根系吸收养分和水分的能力增强,表现为根长增加,体积增大,根尖数增多。

2.4 生物炭对甜菜产量及含糖量的影响

甜菜是主要的糖料作物,含糖量一般为 $14\% \sim 20\%$ 。由图 7 可见,加炭处理甜菜含糖量升高,平均为 15.01% ,较不加炭处理增加 1.10% ;未加炭处理,甜菜含糖量随异噁草松浓度增加略有提高,可能与高浓度残留下块根产量降低有关,但差异不显著。

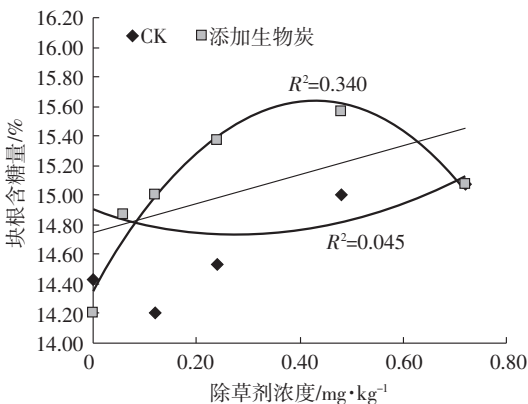


图 7 不同处理甜菜块根含糖率变化

Figure 7 The effect of different treatments on sugar beet sugar rate

收获期产量调查表明,生物炭对提高甜菜块根产量和产糖量有一定的促进作用。由图 8~图 9 可见,添加生物炭后,甜菜块根产量随异噁草松浓度的增加而增加,符合二次曲线 $y=790.75x^2+22.343x+650.32$ ($R^2=0.9251$),块根总产糖量与异噁草松浓度符合二次曲线

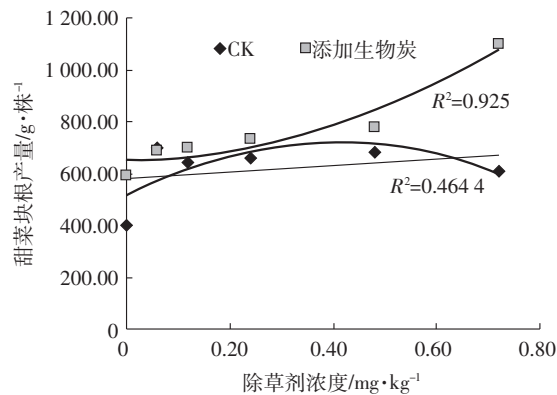


图 8 不同处理甜菜块根产量变化

Figure 8 The effect of different treatments on sugar beet yields

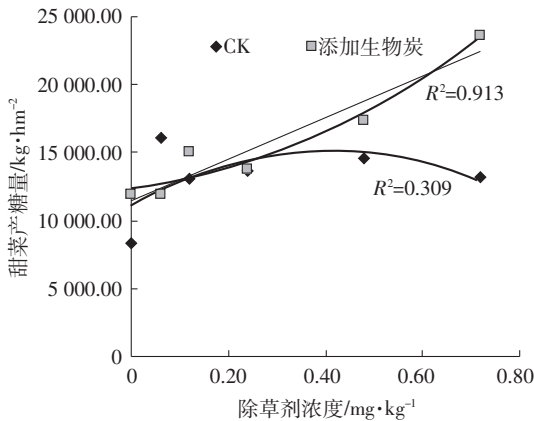


图 9 不同处理甜菜产糖量变化

Figure 9 The effect of different treatments on sugar beet total sugar content

$y=790.75x^2+22.343x+650.32$ ($R^2=0.913$),差异显著。未添加生物炭处理,甜菜块根产量随异噁草松浓度的增加而降低,符合二次曲线方程 $y=-1275.1x^2+1032.2x+511.68$ ($R^2=0.4664$),块根总产糖量符合二次曲线 $y=-1587.6x^2+1316.7x+738.13$ ($R^2=0.3093$),均呈负相关。

3 讨论

据不完全统计,中国有近 900 万 hm^2 的耕地遭受着不同程度的农药污染,各类可见性药害至少造成粮食减产 $5\% \sim 10\%$ ^[16]。甜菜属于除草剂敏感的作物,对异噁草松的安全周期较长(16 个月)。因此,在除草剂残留条件下,明确生物炭对作物生长的促进作用,对于降低药害残留,增加粮食产量具有一定的科学意义。

前茬除草剂残留对下茬作物是否都存在药害决定于除草剂在土壤中的残留量。试验表明,当土壤中异噁草松浓度达到 $0.48 \sim 0.72 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,甜菜幼苗初期生长受重度药害抑制率达 100% ;当土壤中异噁草松达 $0.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,幼苗生长受轻度药害抑制率达 93.3% 。添加生物炭后,甜菜受药害症状减轻或不受药害,生长旺盛,这一点与前期研究上一致^[9-10],生物炭通过短时间内的吸附作用,可降低除草剂残留药害对作物的抑制^[17-18]。

根、冠作为植株生长过程的两大功能器官,是相互依存相互竞争的统一体^[19]。根冠比是影响作物养分吸收效率的重要因子,环境胁迫条件下,作物根冠比增加,这是作物对逆境的主动适应性反应机制,已为许多学者所证实^[11-12]。未添加生物炭处理,甜菜幼苗的根冠比随着异噁草松浓度的增加而降低,差异显著。

添加生物炭后,根冠比增加,这与添加生物炭后,土壤微域环境得到改善,提高了除草剂在土壤中的生物降解速率,促进作物生长有关,其机理还有待于进一步研究。

甜菜的糖分积累受环境条件影响较大。添加生物炭后,甜菜含糖量升高,较不加炭处理增加 1.10%,同时甜菜块根产量、块根总产糖量增加,与不加炭处理差异显著。

4 结论

(1)土壤中异噁草松残留达一定量后,对甜菜生长有明显的抑制作用,并且随异噁草松土壤残留量增加抑制作用增强。

(2)添加生物炭后土壤中高浓度异噁草松残留对甜菜的生物有害性得到抑制,甜菜生长发育良好,根冠比增加,产糖率、产糖量提高。

(3)生物炭施入土壤后,一方面通过吸附作用,在短时间内降低除草剂残留对作物的药害,一方面通过改善土壤微域环境,加速除草剂的生物降解,促进甜菜的生长。通过本试验研究,可为农业生产上利用生物炭消除除草剂残留药害进一步提供科学理论依据。

参考文献:

- [1] 赵长山, 何付丽, 闫春秀. 黑龙江省化学除草现状及其存在问题[J]. 东北农业大学学报, 2008, 39(8): 136-139.
ZHAO Chang-shan, HE Fu-li, YAN Chun-xiu. The current situation and existing problems of chemical weed control in Heilongjiang Province [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2008, 39(8): 136-139. (in Chinese)
- [2] Lehmann J, Joseph S. Biochar for environmental management: science and technology[M]. London: Earth Scan, 2009.
- [3] Yang Y N, Sheng G Y. Pesticide adsorptivity of aged particulate matter arising from crop residue burns[J]. *J Agri Food Chem*, 2003, 51(17): 5047-5051.
- [4] 潘根兴, 张阿凤, 邹建文, 等. 农业废弃物生物黑炭转化还田作为低炭农业途径的探讨[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(4): 394-400.
PAN Gen-xing, ZHANG A-feng, ZOU Jian-wen, et al. Agricultural waste biomass carbon conversion as low carbon agriculture returning on the way[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(4): 394-400. (in Chinese)
- [5] 周丹丹. 生物炭质对有机污染物的吸附作用及机理调控[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
ZHOU Dan-dan. The mechanism of biological carbon adsorption of organic pollutants and control[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. (in Chinese)
- [6] 高俊凤. 植物生理学实验技术[M]. 西安: 世界图书出版社, 2000.
- [7] GAO Jun-feng. Plant physiology experimental technique[M]. Xi'an: World Books Publishing, 2000. (in Chinese)
- [8] 鲁如坤. 土壤农业化学方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
LU Ru-kun. Methods of soil and agricultural chemistry method[M]. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 2000. (in Chinese)
- [9] 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, 16: 3324-3333.
CHEN Wen-fu, ZHANG Wei-ming, MENG Jun. Research progress and prospect of agricultural biological carbon[J]. *China Agricultural Science*, 2013, 16: 3324-3333. (in Chinese)
- [10] 李玉梅, 刘忠堂, 王根林, 等. 生物炭对土壤残留异噁草松的生物有害性影响研究[J]. 作物杂志, 2013, 154(3): 111-115.
LI Yu-mei, LIU Zhong-tang, WANG Gen-lin, et al. Impact of biochar on the biological hazardous of clomazone residual in soil[J]. *Crops*, 2013, 154(3): 111-115. (in Chinese)
- [11] 李玉梅, 王根林, 刘忠堂, 等. 不同量生物炭消减土壤残留异噁草松对玉米有害性的影响[J]. 土壤通报, 2014, 45(1): 169-172.
LI Yu-mei, WANG Gen-lin, LIU Zhong-tang, et al. Impact of amount of bio-car on reducing biological hazardous of clomazone residual to corn in soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(1): 169-172. (in Chinese)
- [12] Comelissen G, Gustaffon O, Bueheli T, et al. Extensive sorption of organic compounds to black carbon, coal and kerogen in sediments and soil: mechanisms and consequences for distribution, bioaccumulation, and biodegradation[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39: 6881-6895.
- [13] Keiluweit M, Kleber M. Molecular-level interactions in soils and sediments: the role of aromatic π -systems[J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, 43(10): 3421-3429.
- [14] Glaser B, Balashov E, Haumaier L, et al. Black carbon indensity fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region[J]. *Organic Geochemistry*, 2000, 31: 669-678.
- [15] Druffel E R M. Comments on the importance of black carbon in the global carbon cycle[J]. *Marine Chemistry*, 2004, 192: 197-200.
- [16] Haefele S M, Konboon Y, Wongboon W, et al. Effects and fate of biochar from rice residues in rice-based systems[J]. *Field Crops Research*, 2011, 121(3): 430-440.
- [17] 孟宪科, 张宏军, 丁 东. 黑龙江省农药药害相关问题与思考[J]. 农药科学与管理, 2011(11): 9-11.
MENG Xian-ke, ZHANG Hong-jun, DING Dong. Heilongjiang Province issues related to pesticide injury and thinking of[J]. *Pesticide Science and Administration*, 2011(11): 9-11. (in Chinese)
- [18] Czimczik C I, Schmidt M W I, Schulze E-D. Effects of increasing fire frequency on black carbon and organic matter in podzols of Siberian Scots pine forests[J]. *Soil Science*, 2005, 56: 417-428.
- [19] Chao X, Wei P L, G Daniel, et al. Burned rice straw reduces the availability of clomazone to barnyardgrass[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 392(2-3): 284-289.
- [20] Dai X, Boutton T W, Glaser B, et al. Black carbon in a temperate mixed grass savanna[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37: 1879-1881.