

王晓维, 徐健程, 孙丹平, 等. 生物炭对铜胁迫下红壤地油菜苗期叶绿素和保护性酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(4):640-646.

WANG Xiao-wei, XU Jian-cheng, SUN Dan-ping, et al. Effects of biochar on chlorophyll and protective enzyme activity of rape seedlings in red soil under copper stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(4):640-646.

生物炭对铜胁迫下红壤地油菜苗期叶绿素和保护性酶活性的影响

王晓维^{1,2}, 徐健程^{1,2}, 孙丹平^{1,2}, 罗宇航², 龙昌智², 鲁美娟³, 杨文亭^{1,2*}

(1.江西农业大学作物生理生态与遗传育种教育部重点实验室, 南昌 330045; 2.江西农业大学农学院, 南昌 330045; 3.江西农业大学国土资源与环境学院, 南昌 330045)

摘要:通过盆栽试验,研究了不同生物炭添加量(质量分数为0、2%、5%)对铜胁迫(300 mg·kg⁻¹)下红壤地油菜(*Brassica campestris* L.)苗期叶绿素含量、抗氧化酶活性[超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)和过氧化物酶(POD)]、可溶性蛋白含量及丙二醛含量(MDA)的影响。结果表明:铜胁迫下油菜叶片的叶绿素a、b和总叶绿素含量均有所降低,SOD、CAT、POD、MDA及可溶性蛋白含量均增加;随着生物炭添加量的增加,油菜叶片的叶绿素a、b及总叶绿素含量呈上升趋势,油菜叶片的SOD、CAT、POD、MDA及可溶性蛋白含量则均呈一定的下降趋势。综合来看,施加生物炭有利于提高红壤地铜污染(300 mg·kg⁻¹)中油菜苗期的叶绿素含量,减缓铜胁迫的毒害作用,从而有利于维持油菜正常生长。

关键词:铜胁迫;油菜;生物炭;叶绿素;抗氧化酶活性;丙二醛

中图分类号:X712 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2016)04-0640-07 doi:10.11654/jaes.2016.04.005

Effects of biochar on chlorophyll and protective enzyme activity of rape seedlings in red soil under copper stress

WANG Xiao-wei^{1,2}, XU Jian-cheng^{1,2}, SUN Dan-ping^{1,2}, LUO Yu-hang², LONG Chang-zhi², LU Mei-juan³, YANG Wen-ting^{1,2*}

(1.Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetic Breeding, Ministry of Education, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2.College of Agriculture, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 3. College of Territorial Resources and Environmental, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

Abstract: A pot experiment was carried out to study the effects of biochar additions on chlorophyll content, antioxidant enzyme activity[superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), and peroxidase (POD)], soluble protein content and malondialdehyde (MDA) content in rape (*Brassica campestris* L.) seedlings in red soil under copper stress (300 mg·kg⁻¹). The biochar was applied at 0, 2%, and 5% (m/m). Copper stress decreased content of chlorophyll a and b and total chlorophyll, but increased SOD, CAT, POD, MDA, and soluble protein content in rape leaves. Compared with no biochar addition, applying biochar increased the content of chlorophyll a and b and total chlorophyll, but reduced the activities of SOD, CAT, POD, and MDA, and the content of soluble protein in rape leaves. In conclusion, biochar applications improve chlorophyll content of rape seedlings, alleviate copper stress on rape seedlings, and maintain rape seedling normal growth under 300 mg Cu·kg⁻¹ stress.

Keywords: copper stress; rape; biochar; chlorophyll; antioxidant enzyme activity; malondialdehyde

收稿日期:2015-09-29

基金项目:国家自然科学基金项目(31360108);江西省博士后科研择优资助项目(2015KY42);江西农业大学博士科研启动项目(09005376)

作者简介:王晓维(1989—),男,广东韶关人,硕士,从事农业生态环境研究。E-mail:sgwxw89@163.com。徐健程与第一作者同等贡献

*通信作者:杨文亭 E-mail:ywt111@163.com

全球对生物炭(Biochar)科学研究的重视源于对亚马逊地区原始农业所形成的特殊黑土“Terra Preta”的研究^[1],这类黑土由于富含黑碳而保持了较高的土壤肥力。近年来,随着土壤重金属污染的日趋严重,利用生物炭降低重金属污染方面的研究成为热点。国内外科学家们围绕生物炭添加入土壤后,可以改善土壤理化性质及生物群落,主要在土壤容重^[2]、孔隙度^[3]、pH值^[4]和阳离子交换量^[5],土壤养分^[6],土壤中污染物的稳定性^[7]及其迁移行为^[8],土壤中微生物群落^[9]等方面开展了大量的工作。研究表明,生物炭可以通过表面静电吸附、阳离子交换、吸附-沉淀等作用机制^[10-11]对土壤重金属进行吸附,从而降低土壤重金属活性。目前生产生物炭的原料主要有秸秆^[12]、畜禽粪便^[13]、谷物废弃物^[14]等,不同原料制成的生物炭对重金属的作用效果也不尽相同^[15]。研究报道,水稻秸秆生物炭可使酸溶态的Cu(II)和Pb(II)分别降低19.7%和18.8%,而使酸溶态的Cd(II)降低了5.6%^[16]。鸡粪或木质生物炭可降低Cd和Pb的生物有效性,但增加了土壤Cu和Zn的生物有效性^[17]。花生壳生物炭对红壤Cu污染是否具有修复效果目前还未见报道。

油菜是江西冬季农业大力推广的种植作物,是江西省最重要的油料作物,据江西省统计年鉴数据,2013年江西省油菜种植面积达54.8万hm²^[18]。已有研究表明江西省由于采矿或工业区污水灌溉导致局部较大面积的农田土壤铜污染^[19],同时大量生猪粪便作为有机肥施用到农田中造成短时间土壤铜元素的累积,江西报道的耕地铜元素超标量达国家II级土壤标准10倍以上,最高达548.30mg·kg⁻¹^[20]。土壤铜含量过高会抑制油菜生长^[21],利用生物炭是否可以降低土壤铜对油菜的负面影响?重金属污染对作物的影响首先体现在保护性酶活性方面,在一定的重金属浓度范围内,植物的抗氧化酶活性出现激活效应,即随着重金属胁迫浓度的升高而提高,但超出一定阈值后,抗氧化酶活性则迅速下降^[22]。本文以油菜为研究对象,施用花生壳为基质的生物炭来探讨铜污染胁迫下油菜苗期的生理生化特征,以期为南方铜污染红壤地冬季油菜种植提供一定的参考依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试植物:油菜(*Brassica campestris* L.)品种为LX1,来自江西农业大学农学院。

供试土壤:土壤采自江西农业大学科技园红

壤试验地表层(0~20 cm)红壤,土壤使用前先于室内自然风干,剔除植物根系后,过2 mm筛后备用。试验土壤基本理化性状为:pH 3.96,有机碳含量18.18g·kg⁻¹,全氮1.74g·kg⁻¹,碱解氮121.33mg·kg⁻¹,全磷0.69g·kg⁻¹,有效磷31.68mg·kg⁻¹,全钾5.02g·kg⁻¹,速效钾163.67mg·kg⁻¹,全铜为33.52mg·kg⁻¹,有效态铜为2.31mg·kg⁻¹(DTPA提取,原子吸收分光光度计测定)。根据国家II级土壤标准(Cu 50mg·kg⁻¹),供试土壤均未受到铜污染。

供试生物炭:生物炭购自河南商丘三利新能源有限公司,原料是花生壳,经350~500℃热裂解炭化而成,室内测定其基本理化性质为:pH 9.16,有机碳含量323.76g·kg⁻¹,全氮10.52g·kg⁻¹,全磷44.73g·kg⁻¹,全钾15.51g·kg⁻¹。

按照试验设计,添加2%(98%供试土壤+2%生物炭)和5%(95%供试土壤+5%生物炭)比例生物炭与土壤充分混合均匀后的理化性质如表1所示。

表1 供试材料理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soil-biochar mixture used

供试材料	pH	有机碳 TC/ g·kg ⁻¹	全氮 TN/ g·kg ⁻¹	全磷 TP/ g·kg ⁻¹	全钾 TK/ g·kg ⁻¹
2%生物炭	5.14	23.35	1.96	0.97	5.46
5%生物炭	5.29	35.25	2.36	1.32	5.78

1.2 盆栽试验与采样

试验于2014年11月8日—2015年1月7日进行。采用双因素随机区组设计,设置三个生物炭比例,分别为C0(0%)、C2(2%)、C5(5%),根据食用农产品产地环境质量评价标准(HJ/T 332—2006),食用作物产地铜浓度限值为200mg·kg⁻¹,本试验设置外源添加300mg·kg⁻¹作为铜污染处理(Cu300),不添加外源铜为对照处理(Cu0),铜浓度均以总铜含量计,共6个处理(表2)。铜污染处理组利用分析纯硫酸铜(CuSO₄·5H₂O)配制成溶液后浇入供试土壤中,充分搅拌混匀,平衡两周后使用。盆栽用长60 cm、宽40 cm、高30 cm的泡沫箱为容器,底部钻孔以透水,每盆装土10 kg。每处理重复3次,共18盆。于2014年11月8日播种,每盆播30粒种子,于2014年12月8日第一次取样并间苗,每盆定植6株。于2015年1月7日进行第二次取样。取样后以离子水将油菜叶片洗净,去除叶脉后立即测定其中叶绿素含量、抗氧化酶活性、丙二醛和可溶性蛋白含量。

表2 盆栽试验设计

Table 2 Design for pot experiment

处理 Treatment	铜浓度 Copper concentration/mg·kg ⁻¹	生物炭比例 Biochar proportion/%
Cu0-C0	0	0
Cu0-C2		2
Cu0-C5		5
Cu300-C0	300	0
Cu300-C2		2
Cu300-C5		5

1.3 生理生化指标测定

超氧化物歧化酶(Super Oxide Dismutase, SOD)采用氮蓝四唑法测定,过氧化物酶(Peroxidase, POD)活性采用愈创木酚法测定,过氧化氢酶(Catalase, CAT)活性采用紫外吸收法测定,丙二醛(Malondialdehyde, MDA)含量采用硫代巴比妥酸法测定,可溶性蛋白采用考马斯亮蓝法测定,叶绿素含量利用丙酮-乙醇(V1:V2=80%:20%)混合液提取,分光光度法测定^[23]。

1.4 数据统计

用Excel 2010进行数据整理,用SPSS19.0统计软件进行单因素方差分析,利用Origin9.0绘图。

2 结果与分析

2.1 油菜叶片叶绿素含量

从表3可以看出,无论有无铜污染胁迫,30 d和60 d的油菜叶片中叶绿素a、叶绿素b、总叶绿素含量均随着生物炭的添加呈上升趋势,且无铜污染处理下3个处理叶绿素a、b和总叶绿素含量均显著高于铜污染处理下3个处理。播种后30 d,无铜污染条件下,添加5%生物炭处理油菜叶绿素b和总叶绿素含量较其余两个处理分别显著提高了68.8%和35.0%,

22.7%和14.1%,而叶绿素a含量则无显著变化。铜污染条件下,添加5%生物炭处理油菜叶绿素a、叶绿素b和总叶绿素含量均较其余两处理有所提高,但差异均不显著。播种后60 d,无铜污染处理下,添加5%生物炭较其余两个处理均显著提高了油菜叶片叶绿素a、b和总叶绿素含量,增幅分别为19.8%、16.9%和82.8%,55.9%、41.3%和31.4%。铜污染处理下,3个生物炭处理的叶绿素a和叶绿素b含量均无显著差异,而从总叶绿素含量来看,添加5%生物炭处理较0%生物炭处理总叶绿素含量显著提高了41.0%。

2.2 油菜叶片超氧化物歧化酶活性

从图1可以看出,两次取样铜污染处理油菜叶片中超氧化物歧化酶均高于无铜污染处理,且30 d时铜污染处理下各生物炭处理超氧化物歧化酶活性均显著高于无铜污染处理。播种后30 d,无铜污染处理下,添加2%和5%生物炭处理分别较0%生物炭处理油菜叶片超氧化物歧化酶活性显著降低了10.2%和10.4%;铜污染处理下,添加2%和5%生物炭处理分别较0%生物炭处理显著降低了6.8%和7.2%。播种60 d后,无铜污染处理下各生物炭处理超氧化物歧化酶活性随着生物炭添加量的增多而呈上升趋势,但处理间差异不显著。铜污染处理下,则随着生物炭添加量的增多而超氧化物歧化酶活性呈显著下降,添加2%和5%生物炭处理较0%生物炭处理超氧化物歧化酶活性分别显著降低了10.6%和11.4%。

2.3 油菜叶片过氧化物酶活性

从图2可以看出,两次取样中,铜污染处理油菜叶片的过氧化物酶活性均高于无铜污染处理,但播种后30 d时,铜污染处理下各处理过氧化物酶活性均较无铜污染处理显著提高。播种后60 d时,铜污染处理下0%生物炭和添加2%生物炭较相对应的无铜污

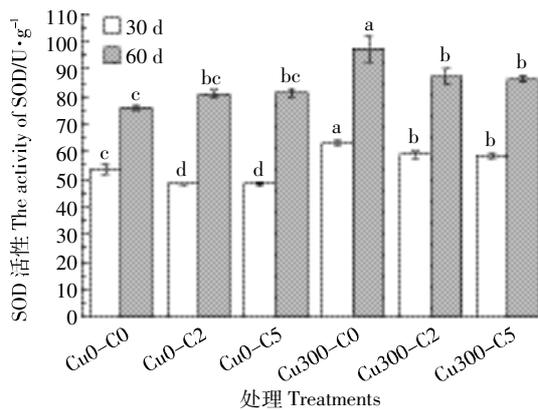
表3 油菜叶片叶绿素含量

Table 3 Chlorophyll content in leaves of rape seedling

取样时间 Sampling time	叶绿素含量 Chlorophyll content/mg·g ⁻¹ FW	Cu0-C0	Cu0-C2	Cu0-C5	Cu300-C0	Cu300-C2	Cu300-C5
30 d	叶绿素a Chlorophyll a	0.50±0.01a	0.50±0.03a	0.54±0.09a	0.28±0.01b	0.30±0.01b	0.32±0.01b
	叶绿素b Chlorophyll b	0.16±0.01b	0.20±0.03b	0.27±0.03a	0.08±0.01c	0.09±0.01c	0.10±0.01c
	总叶绿素 Total chlorophyll	0.66±0.01b	0.71±0.01b	0.81±0.06a	0.36±0.01c	0.39±0.01c	0.42±0.02c
60 d	叶绿素a Chlorophyll a	0.35±0.01b	0.36±0.01b	0.42±0.01a	0.16±0.02c	0.21±0.01c	0.22±0.01c
	叶绿素b Chlorophyll b	0.18±0.01b	0.21±0.01b	0.33±0.03a	0.06±0.01c	0.07±0.01c	0.09±0.00c
	总叶绿素 Total chlorophyll content	0.54±0.02b	0.58±0.02b	0.76±0.02a	0.21±0.03d	0.29±0.01c	0.30±0.01c

注:表中数据均是平均值±标准误,同行不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Values in table are mean±SE, different small letters within a row indicate a significant difference ($P<0.05$).



图中不同小写字母表示同一时期不同处理下差异显著($P < 0.05$),下同
Different small letters indicate a significant difference ($P < 0.05$)
between various treatments within a period. The same below

图1 油菜叶片超氧化物歧化酶活性

Figure 1 Activity of SOD in leaves of rape seedlings

染油菜叶片过氧化物酶活性显著提高。无铜污染处理下,随着生物炭添加量的增加,叶片过氧化物酶活性呈现下降趋势,但两次取样各处理间差异均不显著。铜污染处理下,播种后 30 d 时,随着生物炭添加量的增加,叶片过氧化物酶活性呈上升趋势,但处理间差异不显著;播种后 60 d 时,油菜叶片过氧化物酶活性随着生物炭添加量的增加而显著下降,添加 5% 生物炭处理较其余两处理过氧化物酶活性显著降低了 49.0% 和 29.5%,而添加 2% 生物炭亦较 0% 生物炭处理下的过氧化物酶活性显著降低了 23.3%。

2.4 油菜叶片过氧化氢酶活性

从图 3 可以看出,两次取样中,铜污染处理油菜叶片中过氧化物酶均高于无铜污染处理,其中油菜叶片过氧化氢酶活性在铜污染处理下的 0% 和 2% 生物炭处理均显著高于相对应的无铜污染处理。无铜污染

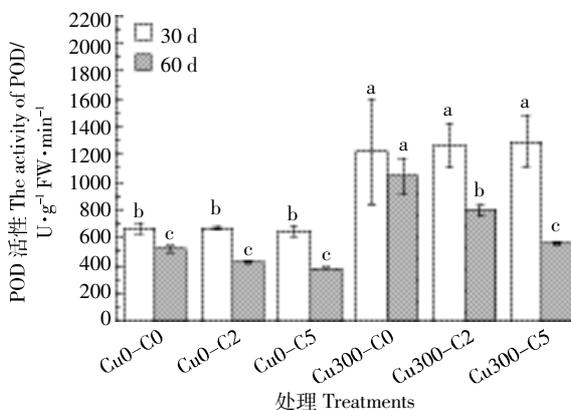


图2 油菜叶片过氧化物酶活性

Figure 2 Activity of POD in leaves of rape seedlings

处理下,随着生物炭添加量的增加,叶片过氧化氢酶活性均呈现上升趋势。播种后 30 d 时,添加 2% 和 5% 生物炭处理较 0% 生物炭叶片过氧化氢酶活性显著提高了 20.7% 和 32.5%。播种后 60 d 时,仅添加 5% 生物炭处理较 0% 生物炭处理叶片过氧化氢酶活性显著提高了 39.9%。铜污染处理下,随着生物炭添加量的增加,叶片过氧化物酶活性均呈现下降趋势,其中播种后 30 d 时,添加 5% 生物炭处理叶片过氧化氢酶活性较 0% 生物炭处理显著降低了 13.3%。播种后 60 d 时,添加 5% 生物炭处理较 0% 和 2% 生物炭处理叶片过氧化氢酶活性分别显著降低了 27.6% 和 20.0%。

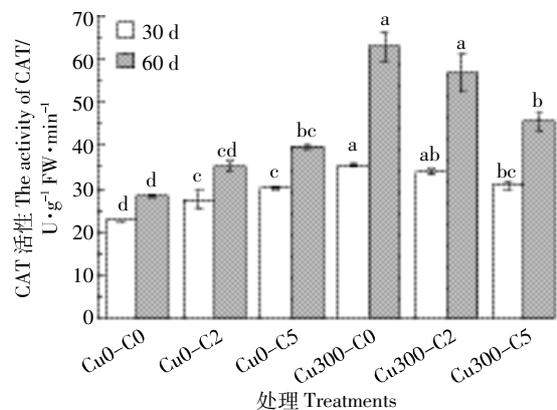


图3 油菜叶片过氧化氢酶活性

Figure 3 Activity of CAT in leaves of rape seedlings

2.5 油菜叶片丙二醛含量

从图 4 可以看出,播种后 30 d 时,铜污染处理油菜叶片丙二醛含量均高于无铜污染处理;无铜污染处理下,播种后 30 d 时,随着生物炭添加量的增多,叶片丙二醛含量呈下降趋势,但各处理间无显著差异。播种后 60 d 时,5% 生物炭较 2% 生物炭处理叶片丙二醛含量显著降低了 34.55%。铜污染处理下,随着生物炭添加量增加,叶片丙二醛含量均呈下降趋势。其中播种后 30 d 时,添加 2% 和 5% 生物炭较 0% 生物炭处理的丙二醛含量显著降低了 23.6% 和 31.5%。播种后 60 d 时,各处理间丙二醛含量均无显著差异。

2.6 油菜叶片可溶性蛋白含量

从图 5 可以看出,两次取样中,铜污染处理下油菜叶片可溶性蛋白含量均显著高于无铜污染处理。无污染处理下,播种后 30 d 时,各处理间叶片可溶性蛋白含量均无显著差异。播种后 60 d 时,2% 和 5% 生物炭处理较 0% 生物炭处理叶片可溶性蛋白含量显著降低了 10.9% 和 11.5%。铜污染处理下,随着生物炭添加量的

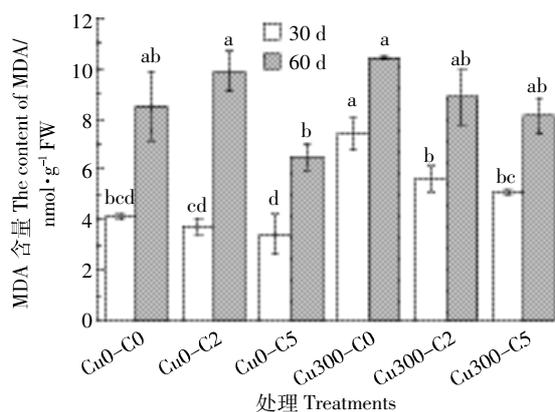


图4 油菜叶片丙二醛含量

Figure 4 Content of MDA in leaves of rape seedlings

增加,叶片可溶性蛋白含量均呈下降趋势。其中播种后 30 d 时,添加 2% 和 5% 生物炭较 0% 生物炭处理丙二醛含量显著降低了 11.7% 和 51.8%。播种后 60 d 时,5% 生物炭较 0% 生物炭处理叶片可溶性蛋白含量显著降低了 17.8%。

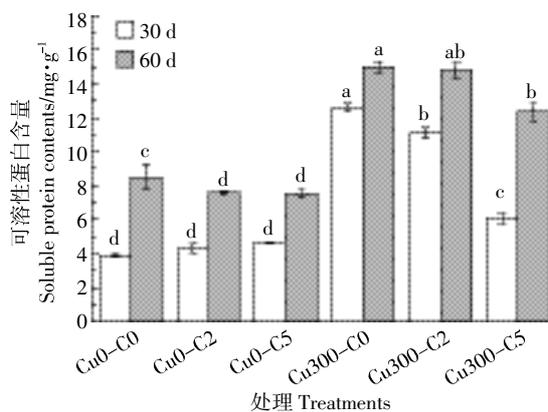


图5 油菜叶片可溶性蛋白含量

Figure 5 Soluble protein content in leaves of rape seedlings

3 讨论

铜是作物必需元素,但超量会对作物吸收矿质离子,抗氧化酶和生物膜透性产生影响,尤其是对相关蛋白质的合成、叶绿素等具有较大影响。从本研究的结果(表3)可以看出,叶绿素含量随着生物炭添加量的增加,无论是否受到铜污染,油菜叶绿素 a、b 和总叶绿素含量均呈上升趋势。在无铜污染条件下,叶绿素随着生物炭添加量的增加呈现上升趋势,且叶绿素 b 和总叶绿素含量均在添加 5% 生物炭时显著提高。这可能是供试生物炭由花生壳炭化形成,其中含有大量营养元素,添加到土壤后,能够为油菜生长提供更

多的氮、磷、钾等大量营养元素^[24]及钙、镁等微量元素,促进了油菜的生长,提高了油菜的叶绿素含量,其中镁元素是合成叶绿素的重要组分^[25],促进了叶绿素 b 的合成。同时由于不同生物炭配比造成了土壤营养的差异,从而导致了油菜叶绿素含量随着生物炭添加量增多而呈递增的趋势。同时由于生物炭的碱性强,加入土壤后能中和土壤酸性,从而提高土壤 pH 值(表1),使得铜离子发生钝化^[15],同时生物炭表面所带的电荷及官能团^[26]对土壤中的铜离子具有较强的吸附能力,而使土壤中的铜产生钝化^[11],且随着添加量的增多效果增强,因而降低铜离子对油菜造成的影响。

作物在受到重金属胁迫时,其自身为应对环境因子的胁迫,生理生化特征均会产生一定的应对机制,其中以抗氧化酶系统的变化特征最为显著。相同生物炭添加量下,无铜污染胁迫下油菜叶片的抗氧化酶活性均低于同一时期的铜污染胁迫,可能是由于受到铜胁迫时,细胞内的自由基含量增多,使得油菜发生质膜损伤,为了缓解质膜损伤,细胞内的抗氧化酶活性增强,用以分解产生的自由基等氧化物。由此说明油菜可能通过提高自身抗氧化酶活性来适应铜胁迫^[27]。

在本研究中,土壤铜污染胁迫时,油菜叶片超氧化物歧化酶活性、过氧化氢酶活性、丙二醛含量和可溶性蛋白含量均随着生物炭添加量的增多而呈下降趋势,且不同的取样时间均保持相似的趋势。可能是由于生物炭添加后提高了土壤 pH,大幅增加了土壤中氮磷钾等营养元素含量。前人研究发现土壤 pH 值是影响植物对重金属离子吸收的最主要因素^[28],随着 pH 值上升,重金属氢氧化物、硫化物、磷酸盐和碳酸盐的沉淀反应所起的作用逐渐增大,使得土壤有机质和土壤胶体对重金属的吸附增强,从而使得土壤中铜被钝化^[29],降低了其生物有效性^[30]。由于铜元素的生物有效性降低,油菜从根系吸收的铜离子可能相应地减少,从而可减缓铜离子对油菜叶片质膜的损伤,减少叶片中超氧自由基的含量。由于植物的超氧化物歧化酶系统的反馈作用,使得超氧化物歧化酶活性降低,进而减少过氧化氢的产生,进一步导致了过氧化氢酶活性降低^[31]。随着生物炭添加量的增多,叶片中质膜损伤减缓,因而质膜损伤产物丙二醛含量呈下降趋势。由于进入油菜叶片中的铜离子可能减少,且添加生物炭后大幅增加了土壤中的营养元素含量,为油菜生长提供了较为充足的营养供给,而前人研究表明增施氮肥能

缓解重金属对植物的毒害作用^[32],因此铜离子诱导其产生铜结合蛋白的数量可能减少,故铜污染土壤中可溶性蛋白含量随着生物炭的增加,亦呈下降趋势(图5)。

4 结论

(1)铜胁迫降低了油菜叶片的叶绿素 a、b 及总叶绿素含量,添加生物炭有利于提高油菜叶片叶绿素 a、b 及总叶绿素含量。

(2)铜胁迫提高了油菜叶片抗氧化酶活性、丙二醛及可溶性蛋白含量,添加生物炭降低了油菜叶片超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶、丙二醛和可溶性蛋白含量,从而有利于保护铜胁迫下油菜的正常生长。

参考文献:

- [1] Woods W I, Mccann J M. The anthropogenic origin and persistence of amazonian dark earths[J]. *Yearbook. Conference of Latin Americanist Geographers*, 1999, 25: 7-14.
- [2] Karhu K, Mattila T, Bergström 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 and Environment*, 2011, 140: 309-313.
- [3] Zhao X, Wang J, Wang S, et al. Successive straw biochar application as a strategy to sequester carbon and improve fertility: A pot experiment with two rice/wheat rotations in paddy soil[J]. *Plant and Soil*, 2014, 378: 279-294.
- [4] Bing W, Lehmann J, Hanley K, et al. Adsorption and desorption of ammonium by maple wood biochar as a function of oxidation and pH[J]. *Chemosphere*, 2015, 138: 120-126.
- [5] Abdel-Fattah T M, Mahmoud M E, Ahmed S B, et al. Biochar from woody biomass for removing metal contaminants and carbon sequestration[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2015, 22: 103-109.
- [6] 李江舟, 张庆忠, 姜翼来, 等. 施用生物炭对云南烟区典型土壤养分淋失的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2015, 34(1): 48-53.
LI Jiang-zhou, ZHANG Qing-zhong, LOU Yi-lai, et al. Effects of biochar addition on nutrient leaching loss of typical tobacco-planting soils in Yunnan Province, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2015, 34(1): 48-53.
- [7] Yip K, Tian F, Hayashi J I, et al. Effect of alkali and alkaline earth metallic species on biochar reactivity and syngas compositions during steam gasification[J]. *Energy Fuels*, 2009, 24(11): 173-181.
- [8] Zhang X, Wang H, He L, et al. Using biochar for remediation of soils contaminated with heavy metals and organic pollutants[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20(12): 8472-8483.
- [9] Paz-Ferreiro J, Gascó G, Gutiérrez B, et al. Soil biochemical activities and the geometric mean of enzyme activities after application of sewage sludge and sewage sludge biochar to soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2012, 48(5): 511-517.
- [10] Uchimiya M, Lima I M, Klasson K T, et al. Immobilization of heavy metal ions[Cu(II), Cd(II), Ni(II), and Pb(II)] by broiler litter-derived biochars in water and soil[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(9): 5538-5544.
- [11] Yang X, Liu J, Mcgrouter K, et al. Effect of biochar on the extractability of heavy metals(Cd, Cu, Pb, and Zn) and enzyme activity in soil[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015(3): 1-11.
- [12] 安增莉, 侯艳伟, 蔡超, 等. 水稻秸秆生物炭对 Pb(II) 的吸附特性[J]. *环境化学*, 2011, 30(11): 1851-1857.
AN Zeng-li, HOU Yan-wei, CAI Chao, et al. Lead(II) adsorption characteristics on different biochars derived from rice straw[J]. *Environmental Chemistry*, 2011, 30(11): 1851-1857.
- [13] 马锋锋, 赵保卫, 刁静茹, 等. 牛粪生物炭对水中氨氮的吸附特性[J]. *环境科学*, 2015, 36(5): 1678-1685.
MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei, DIAO Jing-ru, et al. Ammonium adsorption characteristics in aqueous solution by dairy manure biochar[J]. *Environmental Chemistry*, 2015, 36(5): 1678-1685.
- [14] 李力, 陆宇超, 刘娅, 等. 玉米秸秆生物炭对 Cd(II) 的吸附机理研究[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(11): 2277-2283.
LI Li, LU Yu-chao, LIU Ya, et al. Adsorption mechanisms of cadmium(II) on biochars derived from corn straw[J]. *Journal of Agriculture Environment Science*, 2012, 31(11): 2277-2283.
- [15] Karer J, Wawra A, Zehetner F, et al. Effects of biochars and compost mixtures and inorganic additives on immobilisation of heavy metals in contaminated soils[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2015, 226(10): 1-12.
- [16] Jiang J, Xu R K, Jiang T Y, et al. Immobilization of Cu(II), Pb(II) and Cd(II) by the addition of rice straw derived biochar to a simulated polluted ultisol[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 229/230(5): 145-150.
- [17] 侯艳伟, 曾月芬, 安增莉. 生物炭施用对污染红壤中重金属化学形态的影响[J]. *内蒙古大学学报: 自然科学版*, 2011, 42(4): 460-466.
HOU Yan-wei, ZENG Yue-fen, AN Zeng-li. Effects of the application of biochar on the chemical fraction of heavy metals in polluted red soil[J]. *Journal of Inner Mongolia University(Natural Science Edition)*, 2011, 42(4): 460-466.
- [18] 江西省统计局. 江西统计年鉴[J]. 北京: 国家统计局出版社, 2013: 259.
Statistic Bureau of Jiangxi. Jiangxi statistical year book[J]. Beijing: China Statistic Press, 2013: 259.
- [19] 林世滔, 李琳, 卢志红, 等. 基于 GIS 的江西省耕地土壤重金属污染评价研究[J]. *江西农业大学学报*, 2014, 36(5): 1167-1172.
LIN Shi-tao, LI Lin, LU Zhi-hong, et al. Evaluation of heavy metal pollution of farmland soil in Jiangxi Province based on GIS[J]. *Acta Agricultrae Universitatis Jiangxiensis*, 2014, 36(5): 1167-1172.
- [20] 王小玲, 王歆, 刘腾云, 等. 江西主要类型重金属污染现状及修复实践[J]. *江西科学*, 2014, 5(1): 594-599.
WANG Xiao-ling, WANG Xin, LIU Teng-yun, et al. Contaminated situation and remediation practice of the main types by heavy metals in

- Jiangxi Province[J]. *Jiangxi Science*, 2014, 5(1): 594-599.
- [21] Chaignon V, Bedin F, Hinsinger P. Copper bioavailability and rhizosphere pH changes as affected by nitrogen supply for tomato and oilseed rape cropped on an acidic and a calcareous soil[J]. *Plant and Soil*, 2002, 243(2): 219-228.
- [22] Kebeish R, El-Ayouty Y, Husain A. Effect of copper on growth, bioactive metabolites, antioxidant enzymes and photosynthesis-related gene transcription in *Chlorella vulgaris*[J]. *World Journal of Biology and Biological Sciences*, 2014, 2(2): 34-43.
- [23] 张志良, 瞿伟菁, 李小方. 植物生理学实验指导[M]. 四版. 高等教育出版社, 2009.
- ZHANG Zhi-liang, QU Wei-qing, LI Xiao-fang. Plant physiology experimental guidance[M]. 4th Edition, Beijing: Higher Education Press, 2009.
- [24] 王艳红, 李盟军, 唐明灯, 等. 稻壳基生物炭对生菜 Cd 吸收及土壤养分的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(2): 207-214.
- WANG Yan-hong, LI Ming-jun, TANG Ming-deng, et al. Effect of rice husk biochar on lettuce Cd uptake and soil fertility[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(2): 207-214.
- [25] Uchimiya M, Wartelle L H, Klasson K T, et al. Influence of pyrolysis temperature on biochar property and function as a heavy metal sorbent in soil[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59(6): 2501-2510.
- [26] Heitkötter J, Marschner B. Interactive effects of biochar ageing in soils related to feedstock, pyrolysis temperature, and historic charcoal production[J]. *Geoderma*, 2015, 245: 56-64.
- [27] 杨红飞, 王友保, 李建龙. 铜、锌污染对水稻土中油菜 (*Brassica Chinensis* L.) 生长的影响及累积效应研究[J]. 生态环境学报, 2011, 20(10): 1470-1477.
- YANG Hong-fei, WANG You-bao, LI Jian-long. Impacts of Cu and Zn pollution on rape (*Brassica Chinensis* L.) growth and its accumulation effect of heavy metals in paddy soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(10): 1470-1477.
- [28] Rees F, Simonnot M O, Morel J L. Short-term effects of biochar on soil heavy metal mobility are controlled by intra-particle diffusion and soil pH increase[J]. *European Journal of Soil Science*, 2014, 65(1): 149-161.
- [29] Houben D, Sonnet P. Impact of biochar and root-induced changes on metal dynamics in the rhizosphere of *agrostis capillaris* and *lupinus albus*[J]. *Chemosphere*, 2015, 139(11): 644-651.
- [30] Anisimov V S, Kochetkov I V, Dikarev D V, et al. Effects of physical-chemical properties of soils on ^{60}Co and ^{65}Zn bioavailability[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15(11): 1-12.
- [31] Rubino J T, Franz K J. Coordination chemistry of copper proteins; How nature handles a toxic cargo for essential function[J]. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 2012, 107(1): 129-143.
- [32] 张帆, 万雪琴, 王长亮, 等. 镉胁迫下增施氮对杨树生长和光合特性的影响[J]. 四川农业大学学报, 2012, 29(3): 317-321.
- ZHANG Fan, WAN Xue-qin, WANG Chang-liang, et al. Effects of nitrogen supplement on photosynthetic characteristic and growth rate of poplar plants under cadmium stress[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2012, 29(3): 317-321.