

生物炭与常规施肥对烟草生长及镉污染吸收的影响^①

许跃奇¹, 赵铭钦^{1*}, 尤方芳¹, 陈发元¹, 李慧¹, 金洪石², 金江华², 李天鹏³

(1 国家烟草栽培生理生化基地, 河南农业大学烟草学院, 郑州 450002; 2 吉林烟草工业有限责任公司, 吉林延吉 133001;

3 山西省运城市平陆县优质烟叶开发服务中心, 山西运城 044300)

摘要: 采用盆栽试验, 研究了生物炭、复合肥、有机肥施用对 Cd 污染土壤上烟草生物量、烟叶抗氧化酶活性、Cd 含量、根际土壤 pH、土壤有效态 Cd 含量的影响。结果表明, 生物炭与常规肥料配施能显著提高烟草各部位生物量及烟叶抗氧化酶活性, 促进烟株的生长; 5 种处理烟株对 Cd 的转运能力表现为茎/根 < 叶/根, 烟叶 Cd 含量表现为下部叶 > 中部叶 > 上部叶, 烟株 Cd 含量表现为烟叶 > 茎 > 根; 生物炭对上部叶 Cd 含量的削减效应低于有机肥, 对根系 Cd 含量的削减效应高于有机肥, 生物炭与复合肥、有机肥配施烟草各部位 Cd 含量下降最明显; 施加生物炭能显著提高烟草根际土壤 pH, 而复合肥却在一定程度上降低了土壤 pH; 生物炭、有机肥能降低土壤中有效态 Cd 含量, 有效态 Cd 含量与根际 pH 呈显著负相关。另外, 生物炭与有机肥、复合肥配施能更好地提高烟叶抗氧化酶活性, 增强烟株的抗逆性, 从而减少烟草对 Cd 的吸收。

关键词: 生物炭; 施肥; 生物量; 酶活性; 镉含量; pH; 有效态镉

中图分类号: S153

相关研究表明^[1], 我国的耕地重金属污染的面积占耕地总量的 1/6 左右, 镉(Cd)污染是最为常见的重金属污染之一, 烟草又是一种对 Cd 吸收能力很强的作物, Cd 在土壤、烟叶、烟气中的含量两两间呈极显著正相关^[2], 烟叶中的 Cd 主要通过烟气以气溶胶的形式进入人体^[3], 并在人体内逐渐积累, 危害人类健康。

施肥是农业生产最普遍的增产措施, 不仅能够为植物生长提供必需的营养成分, 也能够影响重金属的形态转化进而达到修复土壤污染的目的^[4]。生物炭由于其表面丰富的微孔和官能团结构, 具有很强的吸附能力, 在酸性红壤条件下生物炭主要通过提高土壤 pH, 从而降低土壤重金属的生物有效性, 达到降低农田重金属污染的目的^[5-7]。对于北方地区偏碱性的土壤条件下, 有关生物炭对土壤重金属影响的研究并不多见, 而利用生物炭与施肥技术相结合改善烟叶重金属污染的研究更鲜有报道。为此, 本文以烤烟为试验材料, 研究了生物炭与常规施肥对烟草生长、叶片抗氧化酶系统、烟草 Cd 含量、根际土壤 pH、土壤有效态 Cd 含量的影响, 旨在探

索烟草重金属的消减技术, 为优质清洁烟叶的生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以豫烟 12 号为供试品种进行盆栽试验, 试验选取当地健康烟田耕层(0~20 cm)土壤, 土壤类型为褐土, pH 为 7.7, 有机质 8.35 g/kg, 速效钾 0.16 g/kg, 速效磷 7.83 mg/kg, Cd 0.04 mg/kg。

1.2 试验设计

试验于 2014 年 5—9 月于山西省长子县王峪试验站进行, 试验设 5 个处理: 未施肥(CK)、施用复合肥(C)、施用复合肥+生物炭(C+B)、施用有机肥+复合肥(C+M)、施用有机肥+复合肥+生物炭(C+M+B), 生物炭用量 20 g/kg^[8], 其中复合肥 Cd 含量 0.02 mg/kg, 有机肥 Cd 含量 0.06 mg/kg。生物炭(以花生壳为原料, 在 500℃ 高温厌氧条件下热解 4 h)购于河南三利新能源公司, 有机碳 647.16 g/kg, C/N 为 42.52, pH 为 8.2, Cd 含量 0.01 mg/kg。每盆纯氮含量为 3 g, 施肥后的土壤最终养分含量为 N:P₂O₅:K₂O = 1:

基金项目: 吉林烟草工业有限责任公司、中国烟草总公司山西省公司重点科技攻关项目(JY201201)资助。

* 通讯作者(zhaomingqin@126.com)

作者简介: 许跃奇(1988—), 男, 河南新郑人, 硕士研究生, 主要研究方向为烟草质量评价。E-mail: 15093385318@163.com

1.5 : 3 ,每个处理设置 20 个重复 ,每盆装土 15 kg ,盆栽土壤通过施加硫酸镉调节土壤重金属 Cd 浓度为 1.00 mg/kg^[9-10] ,老化一个月后 ,移栽健康长势一致的烟苗 ,于烟草成熟期进行烟叶样品采集。

1.3 测定方法

样品前处理 :烟叶样品于 105℃ 杀青 ,75℃ 烘干 ,过 0.25 mm 尼龙网筛 ;烟叶重金属 Cd 采用微波消解 ,石墨炉原子吸收法^[11]测定 ;叶片丙二醛含量测定采用硫代巴比妥酸法 ,SOD 活性测定采用 NBT 光化学还原法 ,POD 活性测定采用愈创木酚法 ,CAT 活性测定采用紫外分光吸收法^[12] ;根际土壤 pH 测定采用电位法 ;土壤有效态 Cd 采用 DTPA 法^[13]提取 ,测定方法同烟株样品。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2007 软件进行数据计算和作图 ,SPSS19.0 统计软件进行差异性分析和相关描述统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对烟草生长的影响

2.1.1 不同施肥处理对烟草株高及生物量的影响 从表 1 可以看出 ,与对照 CK 相比 ,施用复合肥与复合肥+有机肥处理烟草的株高均显著增加 ,分别增加了 29.34%、34.14% ,复合肥+生物炭与有机肥+复合肥+生物炭处理下烟草的株高与对照相比分别增加了 40.39%、45.20% ,由此可以看出生物炭对烟株生长的促进作用要大于有机肥。从烟草各部分的生物量来看 ,就地上部分而言 ,4 种处理下烟草地上部分生物量分别增加了 67.53%(C)、73.16%(C+B)、92.37%(C+M)、120.84%(C+M+B) ;烟草地下部分根系的生物量 4 种施肥处理没有显著差异 ,不同处理下烟株根冠比差异也不显著。整体来看 ,4 种施肥处理对烟草的生长均有促进作用 ,以有机肥+复合肥+生物炭处理下烟草生长表现最优。

表 1 不同施肥处理下烟草株高及生物量

Table 1 Heights and biomasses of tobacco under different fertilizer treatments

处理	株高 (cm)	地上部分(g/株)	地下部分(g/株)	总量(g/株)	根冠比
CK	69.33 d	116.32 d	25.98 b	142.30 d	0.22 a
C	89.67 c	194.87 c	39.28 a	240.90 c	0.24 a
C+B	97.33 ab	201.42 c	46.03 a	241.37 c	0.20 a
C+M	93.00 bc	223.76 b	48.09 a	271.52 b	0.22 a
C+M+B	100.67 a	256.88 a	49.88 a	305.09 a	0.19 a

注 : 同列数据小写字母不同表示处理间差异达到 $P < 0.05$ 显著水平。

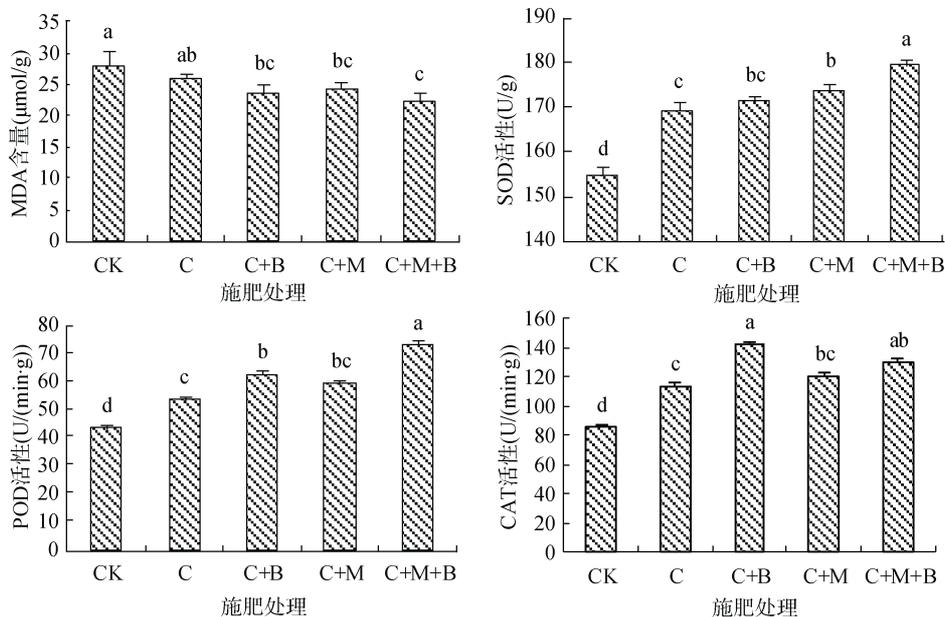
2.1.2 不同施肥处理对烟叶抗氧化酶系统的影响效应 从图 1 可以看出 ,在未添加任何肥料下 ,受重金属 Cd 胁迫的烟叶的 MDA 含量最高 ,膜质过氧化程度较强 ,其自身的组织细胞受到的破坏也较严重 ;复合肥能降低叶片中 MDA 含量 ,生物炭对 MDA 含量的影响要高于有机肥 ,以有机肥+复合肥+生物炭处理 MDA 含量最低 ,低于对照处理 20.88%。不同施肥处理均可以显著提高烟叶中 SOD、POD、CAT 酶活性 ,施加生物炭后 POD、CAT 酶活性显著高于单纯施肥处理。烟叶中 SOD 酶活性的大小顺序为有机肥+复合肥+生物炭>有机肥+复合肥>复合肥+生物炭>复合肥>CK ,复合肥、有机肥、生物炭的单独施用对叶片 SOD 酶活性的影响并不显著 ,土壤 Cd 胁迫下三者协同作用能显著增强烟叶的抗氧化酶活性 ,进而抵御逆境胁迫对烟草自身细胞的毒害。

2.2 不同施肥处理对烟草镉含量、土壤 pH 及土壤有效态镉含量的影响

2.2.1 不同施肥处理对烟草各部位 Cd 含量的影响 从图 2 可以看出 ,5 种处理烟叶中重金属 Cd

含量表现为下部叶>中部叶>上部叶 ,在烟株的含量表现为烟叶>茎>根 ,这与吴玉萍等^[14]研究相一致。烟叶是整个烟株经济价值最高的部位 ,对烟草的产量和质量影响最大 ,4 种施肥处理烟叶上、中、下部位重金属 Cd 含量均显著低于对照处理 ,说明在土壤 Cd 胁迫下 ,通过合理施肥可以减小叶片中重金属 Cd 含量。

施用复合肥能够降低烟草 Cd 含量 ,复合肥与生物炭配施后对上部叶 Cd 含量影响不显著 ,而复合肥与有机肥配施能显著降低上部叶的 Cd 含量 ,就上部叶而言有机肥对叶片 Cd 含量的削减作用大于生物炭 ;就中、下部叶来看 ,施用生物炭和有机肥能降低叶片 Cd 含量 ,但两者的削减作用差异不显著 ;对烟株根系来说 ,施加生物炭处理显著降低根系 Cd 含量 ,且生物炭对 Cd 的削减作用大于有机肥。有机肥+复合肥+生物炭处理后烟叶上、中、下部位 Cd 含量均显著性下降 ,相比对照分别下降 84.74%、86.53%、80.57% ,茎、根中重金属 Cd 含量相比对照下降 65.87%、60.46% ,说明生物炭与有机肥、复合肥配



(图中小写字母不同表示处理间差异达到 $P < 0.05$ 显著水平, 下同)

图 1 不同施肥处理对烟叶 MDA 含量、SOD 活性、POD 活性、CAT 活性的影响

Fig. 1 Effects of different fertilizer treatments on MDA contents and activities of SOD, POD and CAT of tobacco

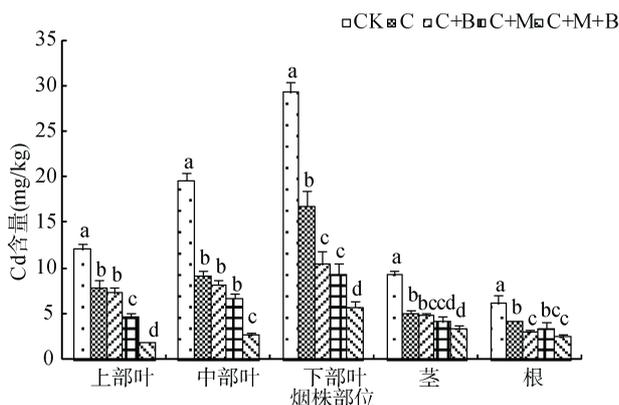


图 2 不同施肥处理下烟草各部位 Cd 含量

Fig. 2 Cadmium contents of tobacco different organs under different fertilizer treatments

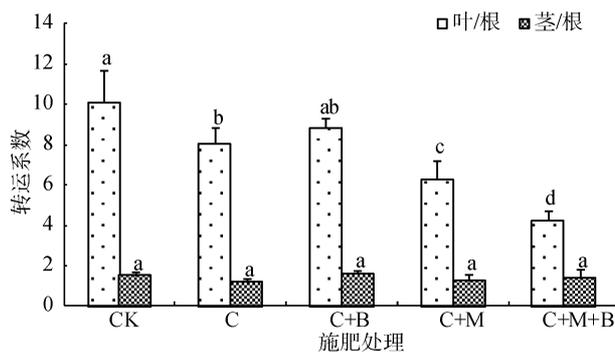


图 3 不同施肥处理下烟草 Cd 转运系数

Fig. 3 Cadmium transport coefficients of tobacco under different fertilizer treatments

施可以降低烟草重金属 Cd 含量, 从而提高烟叶大田生产过程中的安全性。

2.2.2 不同施肥处理对烟草 Cd 转运系数的影响

叶/根、茎/根转运系数分别是烟叶 Cd 含量与根系 Cd 含量、烟茎 Cd 含量与根系 Cd 含量的比值, 该转运系数用来表示烟草对重金属 Cd 由根部向地上部位的有效转运程度^[15], 烟株对 Cd 的转运能力规律表现为茎/根 < 叶/根。烟草对重金属 Cd 的吸收能力很强, 本试验的结果也表明整个烟株中烟叶 Cd 含量是最高的, 其次为烟茎, 根系 Cd 含量最低。从图 3 可以看出, 未施肥处理下烟草叶/根的值最大, 说明烟叶中的 Cd 含量最高, 不利于烟株的正常生长。有机肥处理下烟叶 Cd 转运系数要显著低于生物炭处理, 有机肥对烟叶 Cd 含量的影响要大于生物炭。有

机肥、复合肥、生物炭配施下烟叶 Cd 转运系数为 4.25, 与对照处理相比减小了 57.92%, 与其他 4 个处理达到显著性差异 ($P < 0.05$), 烟茎 Cd 转运系数并没有因为不同的施肥处理表现出显著差异。

2.2.3 不同施肥处理对土壤根际 pH 及土壤有效态 Cd 含量的影响

pH 是影响土壤重金属 Cd 生物活性的重要因素^[16-17], 从图 4 来看, 施用复合肥后烟草根际土壤 pH 与对照处理相比下降 0.03 个单位, 且达到显著水平 ($P < 0.05$), 施加有机肥后 pH 有所回升, 这与蔡泽江等^[18-19]的研究相一致。施用生物炭后无论是复合肥处理还是有机肥+复合肥处理, 土壤 pH 均显著增加, 且以有机肥+复合肥+生物炭处理 pH 最高, 与对照处理相比升高 0.11 个单位。在生物炭与有机肥处理之间, 施用生物炭对土壤根际 pH 的影响更为明显。土壤中有效态重金属含量是影响植物体对

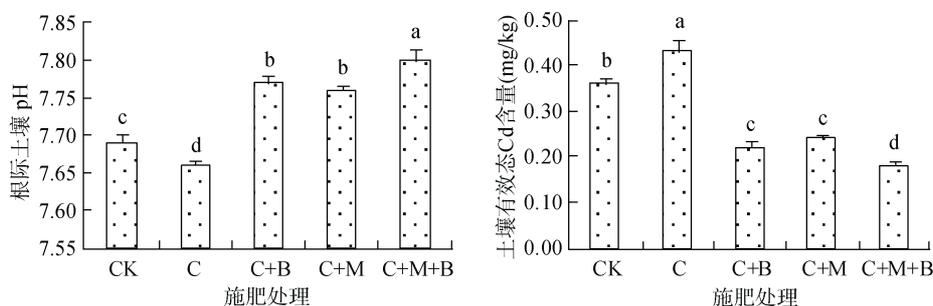


图 4 不同施肥处理下土壤根际 pH 及土壤有效态 Cd 含量

Fig. 4 pHs and soil available Cd contents in soil rhizospheres under different fertilizer treatment

重金属吸收的重要因素之一，从本试验的处理来看，4 种施肥处理对土壤有效态 Cd 含量的影响达到显著差异水平。施用复合肥能够增加土壤中有有效态 Cd 含量，高出对照处理 19.44%，施用生物炭、有机肥后，土壤中有有效态 Cd 含量显著下降，与对照处理相比分别下降了 38.89%、33.33%。生物炭与有机肥、复合肥配施下土壤的有效态 Cd 含量最低，低于对照处理 50.00%。对土壤根际 pH 与土壤有效态 Cd 进行相关分析发现，两者相关系数达到 $-0.94(P < 0.01)$ ，为极显著负相关，说明随着土壤 pH 的增加，土壤中有有效态 Cd 含量下降，烟株从土壤中吸收重金属 Cd 的几率也相对降低。

3 讨论

重金属 Cd 胁迫下，烟草的叶面积指数及植物学性状明显下降，营养器官发育受到极大的影响^[20]。从本试验的结果来看，土壤 Cd 胁迫下，采用不同施肥处理均能促进烟株的生长，显著提高地上、地下部位的生物量。合理施肥配比及施肥量能明显提高植物的保护酶活性，降低其自身的膜质过氧化程度，从而增强作物的抗逆性^[21-23]，但是关于生物炭对作物抗氧化酶系统影响的研究并不多见。在未添加任何肥料下，受重金属 Cd 胁迫的烟叶的 MDA 含量最高，膜质过氧化程度较强，不同施肥处理均可以显著提高烟叶中 SOD、POD、CAT 酶活性，复合肥、有机肥、生物炭的单独施用对叶片 SOD 酶活性的影响并不显著。综合来看，土壤 Cd 胁迫下烟株在有机肥+复合肥+生物炭处理下表现出的抗逆性更强，由于生物炭本身富含相对稳定的含碳有机化合物，可以吸附在烟株根系部位，在一定程度上抵御外来病菌及重金属对烟株的危害，另外生物炭也能提升叶片对胞间 CO_2 的同化能力，改善烟株叶片的光合性能，进而增强烟株地上部分的生长^[24]。

本试验土壤为北方的略偏碱性土壤($\text{pH} = 7.7$)，结果表明，4 种施肥处理均降低了烟株中的 Cd 含量，

施用生物炭处理后无论是复合肥处理还是有机肥+复合肥处理，土壤 pH 均显著增加，且以有机肥+复合肥+生物炭处理 pH 最高，可能是由于生物炭自身是强碱性，可以通过水土交融作用交换土壤的 H^+ ，降低其在土壤中的浓度，进而提高了土壤的 pH^[25-26]。前人研究表明^[10]，施用土壤改良剂可以不同程度地降低烟叶中 Cd 含量，不同改良剂处理的土壤有效态 Cd 与烟叶中 Cd 含量呈极显著正相关。4 种施肥处理下土壤有效态 Cd 的含量变化规律与根际土壤 pH 有极强的负相关性，随着根际土壤 pH 的增加，土壤有效态 Cd 含量下降，这也与许超等^[27]的研究相一致，生物炭能改变土壤的理化状况和理化条件，增强了对重金属离子的吸附能力，降低了重金属 Cd 的生物有效性和迁移性，最终降低了重金属的生态风险。结合不同施肥处理烟株各部位 Cd 含量来看，在略偏碱性的土壤中，生物炭与有机肥、复合肥的交互作用能明显提高根际土壤 pH，进而降低了烟草从土壤中吸收 Cd 的能力。

4 结论

施加生物炭及肥料均能促进烟株的生长，增加烟草的生物量，生物炭与有机肥、复合肥配施对烟草的生长有明显的促进作用。综合来看，生物炭与有机肥、复合肥配施能提高烟草根际土壤 pH 和烟叶抗氧化酶活性，增强烟株的抗逆性，减少烟草对 Cd 的吸收。

参考文献：

- [1] 宋伟, 陈百明, 刘琳. 中国耕地土壤重金属污染概况[J]. 水土保持研究, 2013, 20(2): 293-298
- [2] 孟建玉, 商胜华, 陆宁, 等. 土壤重金属含量对烟叶和烟气中重金属的影响[J]. 中国烟草科学, 2012, 33(3): 1-6
- [3] 张艳玲, 周汉平. 烟草重金属研究概述[J]. 烟草科技, 2004(12): 20-23
- [4] 徐明岗, 刘平, 宋正国, 等. 施肥对污染土壤中重金属行为影响的研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(z1): 328-333

- [5] Hua L, Wu W, Liu Y, et al. Reduction of nitrogen loss and Cu and Zn mobility during sludge composting with bamboo charcoal amendment[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2009, 16(1): 1–9
- [6] 侯艳伟, 池海峰, 毕丽君. 生物炭施用对矿区污染农田土壤上油菜生长和重金属富集的影响[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(6): 1 057–1 063
- [7] 陈少毅, 许超, 张文静, 等. 生物炭与氮肥配施降低水稻重金属含量的盆栽试验[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(14): 189–197
- [8] 邓万刚, 吴鹏豹, 赵庆辉, 等. 低量生物炭对 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
- [9] 胡钟胜, 章钢娅, 王广志, 等. 改良剂对烟草吸收土壤中镉铅影响的研究[J]. *土壤学报*, 2006, 43(2): 233–239
- [10] 陈钊, 高远, 张艳玲, 等. 不同土壤改良剂对烟草吸收镉的影响[J]. *烟草科技*, 2013(3): 72–76
- [11] 刘秀彩, 陈昱, 郑捷琼, 等. 卷烟中砷、铅、铬、镉、镍的石墨炉原子吸收测定[J]. *中国烟草科学*, 2011, 32(1): 71–74
- [12] 陈建勋, 王晓峰. *植物生理学实验指导*[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2006: 68–74
- [13] 李亮亮, 张大庚, 李天来, 等. 土壤有效态重金属提取剂选择的研究[J]. *土壤*, 2008, 40(5): 819–823
- [14] 吴玉萍, 杨虹琦, 徐照丽, 等. 重金属镉在烤烟中的累积分配[J]. *中国烟草科学*, 2008, 29(5): 37–39
- [15] 颜奕华, 郑子成, 李廷轩, 等. 烟草对土壤铅的吸收、转运及分配特征[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(11): 2 151–2 158
- [16] 周相玉, 冯文强, 秦鱼生, 等. 镁、锰、活性炭和石灰对土壤 pH 及镉有效性的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(6): 199–203
- [17] Leyva-Ramos R, Rangel-Mendez J R, Mendoza-Barron J, et al. Adsorption of cadmium() from aqueous solution onto activated carbon[J]. *Water Science and Technology*, 1997, 35(7): 205–211
- [18] 蔡泽江, 孙楠, 王伯仁, 等. 几种施肥模式对红壤氮素形态转化和 pH 的影响[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(14): 2 877–2 885
- [19] 蔡泽江, 孙楠, 王伯仁, 等. 长期施肥对红壤 pH、作物产量及氮、磷、钾养分吸收的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(1): 71–78
- [20] 袁祖丽, 马新明, 韩锦峰, 等. 镉胁迫对烟草营养器官发育及矿物质元素的影响[J]. *河南科学*, 2005, 23(5): 679–682
- [21] 刘刚, 殷浩, 黄盖群, 等. 氮磷钾肥施用量对桑树叶片抗氧化能力的影响[J]. *草业科学*, 2014, 31(4): 697–704
- [22] 廖兴国, 郭圣茂, 赖嫫, 等. 配方施肥对桔梗抗氧化酶活性的影响[J]. *贵州农业科学*, 2014, 42(10): 144–147
- [23] 常蓬勃, 李志云, 杨建堂, 等. 氮钾锌配施对烟草超氧化物歧化酶和硝酸还原酶活性及根系活力的影响[J]. *中国农学通报*, 2008, 24(1): 266–270
- [24] 宋久洋, 刘领, 陈明灿, 等. 生物炭施用对烤烟生长及光合特性的影响[J]. *河南科技大学学报(自然科学版)*, 2014, 35(4): 68–72
- [25] 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 Soil*, 2002, 35(4): 219–230
- [26] 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
- [27] 许超, 林晓滨, 吴启堂, 等. 淹水条件下生物炭对污染土壤重金属有效性及养分含量的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(6): 194–198

Effects of Biochar and Conventional Fertilization on Tobacco Growth and Cadmium Uptake

XU Yueqi¹, ZHAO Mingqin^{1*}, YOU Fangfang¹, CHEN Fayuan¹, LI Hui¹, JIN Hongshi²,
JIN Jianghua², LI Tianpeng³

(1 National Tobacco Cultivation Physiology and Biochemistry Research Center, Institute of Tobacco of Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China; 2 Tobacco Industrial Limited Company of Jilin, Yanji, Jilin 133001, China; 3 Pinglu County Service Center for Development of High-quality Flue-cured Tobacco, Yuncheng, Shanxi 044300, China)

Abstract: The influences of biochar on the biomass of tobacco, antioxidant enzymes activity in leaves, cadmium (Cd) content in tobacco, rhizosphere soil pH and soil available Cd content under the organic fertilizer and compound fertilizer were studied with pot experiment to investigate the effect of combination of biochar and conventional fertilization on tobacco growth and Cd cumulation. The results showed that the combination of biochar and conventional fertilization promoted the growth of tobacco plants, increased the biomass of each part of tobacco and enhanced the root activity and antioxidant enzyme activity of tobacco. Among the five groups of experiment, the transport capacity of Cd in tobacco plant showed that stem/root < leaf/root, Cd content in tobacco leaves were in order of lower leaves > mid-leaves > upper leaves, Cd contents in tobacco were of leaf > stem > root. The treatment with biochar was less effective than organic fertilizer in decreasing Cd content in top leaves, but more effective in decreasing Cd content in root. Cd content of various parts of tobacco was significantly decreased under the combination of biochar, organic fertilizer and compound fertilizer. The combination of organic fertilizer and compound fertilizer was more effective than the combination of biochar and compound fertilize in reducing Cd pollution in tobacco because biochar treatment significantly increased soil pH and compound fertilizer decreased soil pH. Biochar and organic fertilizer decreased the content of available Cd whose content was extremely significantly negative correlation with rhizosphere pH. As a result, the tobacco under the combination of biochar, organic fertilizer and compound fertilizer reduced Cd absorption because the combination led better growth and stronger resistance to tobacco.

Key words: Biochar; Fertilization; Biomass; Enzyme activity; Cd content; pH; Available Cd