

施用炭化苹果枝粉末对平邑甜茶生长及根系构型的影响

闫丽娟, 杨洪强*, 苏倩, 门秀巾, 张玮玮

(山东农业大学园艺科学与工程学院, 作物生物学国家重点实验室, 山东泰安 271018)

摘要: 选取冬季修剪下来的‘红富士’苹果枝条, 分别在 400、600 和 700 °C 下厌氧炭化后粉碎过筛, 按照 1% 和 2% 的质量比施入 2 年生盆栽平邑甜茶的盆土中, 调查平邑甜茶光合性能、植株生长量、根系活力和根系构型参数等。结果表明, 3 种温度热解制备的炭化苹果枝粉末明显提高平邑甜茶叶片净光合速率、株高、干径和植株干质量, 明显增加根活力、根系总长度、根系直径、根系表面积和根系体积, 并且明显增大根系分形维数, 使根系结构复杂化; 在 400 ~ 700 °C 的范围内, 随着炭化温度升高, 炭化苹果枝粉末对平邑甜茶的作用效果也逐渐升高; 土壤施用 2% 的炭化苹果枝粉末的作用效果大于施用 1% 的处理。

关键词: 苹果; 炭化果枝; 炭化温度; 平邑甜茶; 光合性能; 根系构型

中图分类号: S 661.1

文献标志码: A

文章编号: 0513-353X (2014) 07-1436-07

Effects of Carbonized Powder of Apple Branch on the Growth and Root Architecture of *Malus hupehensis*

YAN Li-juan, YANG Hong-qiang*, SU Qian, MEN Xiu-jin, and ZHANG Wei-wei

(College of Horticulture Science and Engineering, Shandong Agricultural University/State Key Laboratory of Crop Biology, Tai'an, Shandong 271018, China)

Abstract: The experiment was carried on using 2-year-old potted *Malus hupehensis* Rehd. seedlings with the carbonized branches from ‘Red Fuji’ apple tree pruned in winter applied, which were pyrolysed at temperature of 400, 600 and 700 °C respectively. It was investigated that the photosynthetic performance, plant growth, root activity and root architecture parameters of *Malus hupehensis* seedlings after carbonized powder of apple branches were applied to the pots with the mass ratio of 1% and 2%. The results showed that the leaf net photosynthetic rate, plant height, stem diameter, total dry weight, root activity, root fractal dimension, total root length, root diameter, root surface-area and root volume were all increased significantly after applied with carbonized powder of apple branch to the soil, and all of them increased with the increase of the branch carbonization temperature from 400 °C to 700 °C. The root structure of *Malus hupehensis* seedlings was more complex after treated by carbonized branches. The effect of application 2% carbonized powder of apple branches to the soil is better than that of 1%.

收稿日期: 2014 - 03 - 17; 修回日期: 2014 - 06 - 03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31171923, 31372016); 国家科技支撑计划项目 (2014BAD16B02)

* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: hqyang@sdau.edu.cn; labft@sdau.edu.cn)

Key words: apple; carbonized branch; carbonization temperature; *Malus hupehensis*; photosynthesis; root architecture

许多果园每年都有大量枝条被修剪下来, 这些枝条除了被当作柴禾燃烧外, 大部分都堆放在果园和路旁, 不仅影响果园环境, 浪费有机资源, 还可能成为病虫害传播及引发火灾的隐患。合理利用果树枝条, 已成为果园管理和研究的重要内容之一。

高温炭化是有机物料资源化利用的途径之一。近年研究表明, 秸秆、稻壳、竹木和动物粪便等有机物料在限氧或绝氧的条件下, 通过高温裂解可形成一种理化性质稳定、富含芳香化结构的生物炭; 将生物炭施入土壤可以改善土壤结构, 提高作物产量和肥料利用效率, 还可减少土壤氮素流失和温室气体排放等 (Lehmann et al., 2006; Jeffery et al., 2011)。但生物炭的作用效果和理化性质明显受制备温度和原材料的影响 (Spokas & Reicosky, 2009; Yuan & Xu, 2011), 其中, 高温条件下制备的生物炭比低温下的生物炭含有较多矿质养分, 中低温条件下形成的生物炭具有较高的离子交换量 (Gaskin et al., 2008) 和更明显减少土壤 N_2O 排放的效果 (Felber et al., 2012; Wang et al., 2013); 用作物秸秆烧制的生物炭比以竹木为原材料烧制的生物炭更有利于水稻的生长发育 (刘玉学, 2011)。目前研究最多的生物炭是秸秆炭和稻壳炭等, 应用对象也主要是水稻、玉米等一二年生谷物, 研究内容主要集中于生物炭对土壤结构和理化特性的影响以及生物炭在温室气体排放中的作用等 (Glaser et al., 2002; Steiner et al., 2007; Asai et al., 2009)。苹果枝条在成分和结构上与一年生作物秸秆和稻壳等不一样, 苹果生长发育也不同于谷物, 人们对果树施用炭化苹果枝后的反应并不清楚, 对枝条在不同温度下的炭化产物的生物学效应研究也很少。平邑甜茶是苹果生产中广泛应用的砧木, 也是苹果根系研究的良好材料。本研究中以冬季修剪下来的苹果枝条为原料, 在不同温度下炭化处理后, 将其施用在平邑甜茶根区土壤后, 探讨平邑甜茶植株生长发育及根系构型的变化, 为果园废弃物资源化利用和根区土壤管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试验于 2012 年 11 月至 2013 年 8 月在山东农业大学果树试验站进行。试验用枝条取自山东农业大学南校试验基地的‘红富士’苹果 (*Malus × domestica* Borkh. ‘Red Fuji’) 树。供试植株为生长势相近的 2 年生盆栽平邑甜茶 (*Malus hupehensis* var. *pinyiensis* Jiang)。花盆内径 18 cm, 高 14 cm, 装土量为 2.3 kg。盆土由普通褐土、鸡粪、河沙按照 3:1:1 的体积比均匀混合而成, 其速效磷 $33.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解氮 $26.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾 $102.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有机质 $12.41 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 7.3。

1.2 苹果枝条的炭化

将苹果枝条洗净、风干、粉碎后填满于密闭坩埚中, 放入高温炉, 分别在 400、600 和 700 °C 下厌氧加热, 制得 3 种炭化苹果枝条, 待冷却后置于研钵中研磨均匀, 过 20 目筛, 分别简称 400 °C 炭、600 °C 炭和 700 °C 炭。

1.3 炭化苹果枝粉末的施用

按照占土壤质量比, 将 3 种温度炭化的苹果枝粉末以 1% 和 2% 的比例 (前期 0.5% ~ 8.0% 的用量试验显示 1% ~ 2% 的效果比较好, 故本研究选用这两个用量) 分别施入盆土中, 混合均匀后装盆; 2013 年 3 月 24 日将长势一致的 2 年生平邑甜茶栽入盆中。以未施入炭化苹果枝粉末的盆土为对照 1,

以施入 1%和 2%的粉碎过 20 目筛而未炭化的苹果枝条粉末的盆土分别为对照 2 和对照 3;每两盆一个处理, 每盆 1 株, 重复 3 次。

1.4 测定方法

株高、干径和相对叶绿素含量分别在处理后 50、71、87、113 和 128 d 测定; 叶片净光合速率、植株干质量、根系活力和根系构型参数在处理 133 d 时测定。

选择晴天 9—11 时, 对平邑甜茶枝条中部功能叶用 CIRAS-2 便携式光合仪测定净光合速率, 取平均值。叶绿素相对含量采用 SPAD-502 PLUS 叶绿素测定仪, 选择枝条中部功能叶, 每株测定 10 片叶取其平均值。根系活力采用氯化三苯基四氮唑 (TTC) 法测定 (赵世杰 等, 2002)。用米尺与游标卡尺测量平邑甜茶幼苗株高和茎粗; 用烘干法测量各处理植株的干生物量。

根系构型参数: 将处理后的实生苗小心取出, 在水中将根系展开, 然后用 ScanMaker i800 plus 扫描仪获取根系扫描图像, 用万深 LA-S 系列植物图像分析仪系统测定根系长度、表面积、体积、根尖数、直径、分形维数等根系构型参数。根尖数指根系中各级别根尖的总和, 分形维数用盒维数表示, 其计算参照王义琴等 (1999) 的方法。分形维数是分形几何的基本参数, 能够对根系分生习性进行定量, 并能够从整体上反应根系结构的复杂程度以及根系的分支特性 (王义琴 等, 1999; 陈吉虎 等, 2006)。

用 Microsoft Excel 2007 和 DPS 软件进行数据分析, 用新复极差法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 施用炭化苹果枝粉末对平邑甜茶叶片光合性能的影响

施用 1%和 2%炭化苹果枝粉末 50 ~ 128 d 后, 平邑甜茶叶绿素相对含量均显著高于对照 (未施入苹果枝的对照 1、施入未炭化苹果枝粉末的对照 2 和对照 3), 而且对照 2 和对照 3 也明显高于对照 1; 在整个测定阶段, 经 700 °C 炭处理后的平邑甜茶叶片的叶绿素相对含量均高于 400 °C 炭和 600 °C 炭处理, 其中在处理 113 ~ 128 d, 炭化苹果枝粉末施用量为 2%的处理显著高于 1%的处理 (表 1)。

表 1 炭化苹果枝粉末对平邑甜茶叶片叶绿素相对含量和净光合速率的影响
Table 1 Effects of carbonized powder of apple branch on the relative content of chlorophyll and net photosynthetic rate in *M. hupehensis* leaf

炭化温度/°C Carbonization temperature	炭粉比例/% Charcoal powder proportions	叶绿素相对含量 Relative chlorophyll content (SPAD value)					净光合速率/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) Net photosynthetic rate
		50 d	71 d	87 d	113 d	128 d	133 d
未炭化 Uncarbonized	0 (对照 1 Control 1)	40.6 d	44.8 d	47.0 e	50.8 f	52.7 f	11.1 d
	1 (对照 2 Control 2)	43.0 c	45.2 d	48.1 d	51.9 e	53.6 e	12.5 c
	2 (对照 3 Control 3)	43.2 c	45.7 d	49.3 d	52.1 e	53.7 e	12.8 c
400	1	46.3 b	46.9 c	51.1 c	53.2 d	55.1 d	14.2 ab
	2	46.4 b	48.0 b	52.6 b	54.1 c	56.9 c	15.1 a
600	1	47.3 ab	48.7 b	51.8 bc	54.0 c	56.1 c	14.9 ab
	2	47.8 a	49.9 a	53.2 a	55.7 b	57.8 b	15.5 a
700	1	47.6 a	49.6 a	52.1 b	55.9 b	56.8 c	15.6 a
	2	47.9 a	51.2 a	53.3 a	57.3 a	59.2 a	15.7 a

注: 同一列数值后字母相同表示处理间差异未达到显著性水平, $P < 0.05$ 。下同。
Note: The same letters in the same column indicate not significant at 0.05 level. The same below.

由表 1 还可看出, 施用 1%和 2%的 3 种炭化苹果枝粉末 133 d 后, 平邑甜茶叶片净光合速率均显著高于对照。对于 400 ℃炭和 600 ℃炭, 施用量为 2%的处理叶片光合速率虽高于施用量 1%的处理, 但差异不显著; 对于 700 ℃炭, 施用量为 1%和 2%的没有显著差异。在施用量相同时, 700、600 和 400 ℃炭处理间无差异。

2.2 施用炭化苹果枝粉末对平邑甜茶植株生长的影响

由表 2 可以看出, 施用炭化苹果枝粉末后, 平邑甜茶株高在整个测定阶段均高于未施用粉末的对照, 其中在处理 50 d, 3 种炭化苹果枝粉末只在施用量为 2%时对株高增加(相对于施用同量未炭化粉末对照)达到显著水平, 处理后 71 ~ 128 d, 施用 1%和 2%的 3 种炭化苹果枝粉末都使株高显著高于施同量未炭化粉末对照。

总体上看, 在施用量相同时, 700 ℃炭对株高的促进作用最大, 其次是 600 ℃炭和 400 ℃炭; 在炭化温度相同时, 施用量为 2%时的株高大于 1%时的株高。

由表 2 还可以看出, 施用炭化苹果枝粉末后, 在 50 ~ 71 d, 3 种炭化苹果枝粉末只在施用量为 2%时对干径的增加较施同量未炭化粉末对照达到显著水平; 在处理 87 ~ 128 d, 施用 1%和 2%的 3 种炭化苹果枝粉末都使干径的增加较施同量未炭化粉末对照达到显著水平。

从总体来看, 在施用量相同时, 700 ℃炭对干径的促进作用最大, 其次是 600 ℃炭和 400 ℃炭; 在炭化温度相同时, 施用量为 2%时的干径大于 1%时的干径。

表 2 施用炭化苹果枝粉末对平邑甜茶株高和干径的影响

Table 2 Effects of carbonized powder of apple branch on the height and basal stem diameter of *M. hupehensis*

炭化温度/℃ Carbonization temperature	炭粉比例/% Charcoal powder proportions	株高/cm Plant height					干径/mm Stem diameter				
		50 d	71 d	87 d	113 d	128 d	50 d	71 d	87 d	113 d	128 d
未炭化 Uncarbonized	0 (对照 1 Control 1)	48.65 c	55.57 d	64.29 d	73.11 e	78.97 e	4.97 d	5.43 d	6.54 d	7.74 f	7.89 e
	1 (对照 2 Control 2)	54.20 b	58.91 d	77.42 c	99.48 d	101.25 d	5.07 d	5.64 cd	7.27 c	9.05 e	9.29 d
	2 (对照 3 Control 3)	54.61 b	60.60 cd	78.43 c	101.15 d	104.68 d	5.19 cd	5.69 c	7.34 c	9.11 e	9.45 d
400	1	55.28 b	65.30 b	83.04 b	105.21 c	111.35 c	5.26 c	5.74 c	7.44 b	9.28 d	9.74 c
	2	58.66 a	72.51 a	86.54 b	117.31 b	123.41 bc	5.75 b	6.13 ab	7.68 b	9.79 bc	10.69 b
600	1	57.33 ab	70.10 ab	85.33 b	106.67 c	121.02 c	5.89 b	5.95 b	8.09 ab	9.59 cd	10.62 b
	2	60.58 a	73.25 a	95.04 a	122.54 a	129.34 b	6.24 a	6.38 a	8.47 a	10.44 a	11.09 a
700	1	57.69 ab	69.51 ab	84.33 b	109.33 bc	121.58 c	5.79 b	5.87 bc	7.95 b	10.01 ab	10.61 b
	2	60.33 a	75.14 a	96.58 a	125.31 a	135.24 a	6.12 a	6.39 a	8.48 a	10.50 a	11.14 a

表 3 为施用炭化苹果枝粉末 133 d 后测定的平邑甜茶生物量。施用炭化和未炭化的苹果枝粉末后, 平邑甜茶地上部干质量、地下部干质量和总干质量均显著提高, 并且施用炭化苹果枝粉末处理高于施用未炭化的苹果枝粉末; 施用量相同时, 700 ℃炭对平邑甜茶生物量的促进作用最大, 其次是 600 ℃炭和 400 ℃炭; 在炭化温度相同时, 施用量为 2%时的平邑甜茶生物量大于 1%时, 其中, 施用 2%的 700 ℃炭的平邑甜茶生物量最高。

表 4 显示, 施用炭化和未炭化苹果枝粉末均增大根系总长度、根系表面积、根系体积、根系直径和根尖数, 其中施用炭化苹果枝粉末处理效果明显高于未炭化苹果枝粉末的处理。在施用量相同时, 700 ℃炭对平邑甜茶根系生长量的促进作用最大, 其次是 600 ℃炭和 400 ℃炭; 在炭化温度相同时, 施用量为 2%时的平邑甜茶根系生长量大于 1%时。2%的 700 ℃炭对平邑甜茶根系生长量的提高最大, 根系总长度、根系表面积比盆土未施任何物质的对照 1 提高了 71%、240%。

分形维数是描述根构型的重要参数。从表 4 可以看出, 施用炭化苹果枝 133 d 后平邑甜茶的根系分形维数显著高于对照 (盆土未施入苹果枝的对照 1、施入未炭化苹果枝的对照 2 及对照 3), 对照 2 及对照 3 也高于对照 1。施用量为 1% 时, 400 ℃ 炭、600 ℃ 炭和 700 ℃ 炭三者之间对根系分形维数的影响差异不显著, 但在施用量为 2% 时, 700 ℃ 炭对根系分形维数的影响明显高于 400 ℃ 炭和 600 ℃ 炭。

表 3 施用炭化苹果枝粉末对平邑甜茶植株干质量的影响
Table 3 Effects of carbonized powder of apple branch on the dry weigh of *M. hupehensis*

炭化温度/℃ Carbonization temperature	炭粉比例/% Charcoal powder proportions	地上部干质量/g Dry weight of above-ground parts	地下部干质量/g Dry weight of under-ground parts	总干质量/g Total dry weight
未炭化 Uncarbonized	0 (对照 1 Control 1)	14.88 h	16.03 g	30.91 f
	1 (对照 2 Control 2)	21.50 g	18.27 f	39.77 e
	2 (对照 3 Control 3)	22.73 f	19.48 e	42.21 e
400	1	24.19 e	22.13 d	46.32 d
	2	28.34 c	23.98 c	52.32 c
600	1	26.25 d	22.76 d	49.01 d
	2	31.52 b	27.35 b	57.87 b
700	1	26.77 d	22.90 d	49.67 d
	2	37.54 a	33.43 a	70.97 a

表 4 施用炭化苹果枝粉末对植株根系活力和构型的影响
Table 4 Effects of carbonized powder of apple branch on the value of plant root

炭化温度/℃ Carbonization temperature	炭粉比例/% Charcoal powder proportions	根系活力 Root activity	根系总长度/ cm Total root length	根系表面积/ cm ² Root surface-area	根系体积/ cm ³ Root volume	根系直径/ mm Root diameter	根尖数 Root top number	分形维数 Fractal dimension
未炭化 Uncarbonized	0 (对照 1 Control 1)	449.8 e	1 779.24 g	537.91 f	30.42 g	0.772 d	3 012 f	1.592 f
	1 (对照 2 Control 2)	499.7 d	1 892.12 f	559.75 f	38.90 f	0.785 d	3 015 f	1.634 e
	2 (对照 3 Control 3)	511.9 d	1 937.27 f	634.31 e	47.49 e	0.793 d	3 163 f	1.660 d
400	1	577.1 c	2 054.59 e	829.54 d	74.85 d	0.871 c	3 594 e	1.695 c
	2	615.0 b	2 403.19 c	890.92 c	74.94 d	0.901 c	3 880 d	1.707 b
600	1	605.3 bc	2 077.76 e	894.73 c	79.50 d	0.997 b	4 150 c	1.696 c
	2	635.9 b	2 482.76 b	1 026.11 b	97.14 c	0.997 b	4 544 b	1.717 b
700	1	606.9 bc	2 296.10 d	1 008.81 b	106.76 b	0.991 b	4 239 c	1.704 bc
	2	670.3 a	3 047.52 a	1 829.18 a	377.08 a	1.123 a	8 032 a	1.744 a

3 讨论

生物炭是一种通气性和透水性均很好的多孔体, 容重小, 表面积大, 吸水、透气能力强, 并含有多重矿物质元素 (Glaser et al., 2002; Steiner et al., 2008); 生物炭还具有丰富的表面官能团和较强的吸附能力, 施入土壤可降低土壤容重 9%, 提高土壤总孔隙率 4.9% (Oguntunde et al., 2008), 改善土壤微生物种群结构 (Warno et al., 2007), 提高土壤阳离子交换量和土壤肥力 (Laird et al., 2010)。炭化苹果枝粉末同其他来源的生物炭具有类似的功能和性质, 施入土壤后, 必然会像其他生物炭一样改善土壤理化性质和优化土壤结构 (Steiner et al., 2008; 刘玉学 等, 2009)。

研究表明, 土壤施用炭化枝粉末后, 平邑甜茶叶片的叶绿素相对含量和净光合速率均有不同程

度的提高, 有利于积累更多的光合产物, 促进植株生长, 这与炭化生物材料可提高植株氮素吸收量有关 (Laird et al., 2010; van Zwieten et al., 2010; Haefele et al., 2011), 而氮素与叶绿素含量、叶绿体发育和光合酶活性的关系都很大。另外, 添加炭化苹果枝粉末可提高平邑甜茶植株株高、干径、地上部干质量、地下部干质量和总干质量。在育苗基质中添加柠条生物炭后, 番茄幼苗株高、茎粗、生物量也呈现类似的变化 (李志刚 等, 2012)。

根系活力是用根系呼吸链上的琥珀酸脱氢酶的活性反映的, 而主动吸收依赖于根系通过呼吸提供能量, 炭化苹果枝粉末提高根系活力, 表明炭化苹果枝粉末可促进根系的主动吸收; 此外, 在施用炭化苹果枝粉末之后, 平邑甜茶根系表面积和根系体积均增大, 而根系表面积增大可促进根系的被动吸收。主动吸收和被动吸收能力的全面提高必然会促进根系对养分的吸收利用, 进而也会促进植株根系和地上部的生长发育。

根系的形状和结构等都非常复杂。分形维数是表征分形几何体特征的参数, 用于根系, 可以从整体上对根系结构的复杂程度和根系分支习性进行定量描述。分形维数越小, 根系空间结构以及根系分支越简单, 反之越复杂 (王义琴 等, 1999; 陈吉虎 等, 2006)。本研究结果显示, 土壤施用炭化苹果枝粉末后, 平邑甜茶根系的分形维数变大, 表明施用炭化苹果枝粉末能够促使平邑甜茶根系空间结构及根系分支趋向复杂, 根系分枝量增大, 细根所占的相对比例增大, 活跃生长的根尖数增多, 这有利于改善根系的生理功能和提高植株对土壤资源的利用能力, 因而有利于平邑甜茶的生长, 并表现为株高、干径、地上部分干质量、地下部分干质量和总干质量等在施用炭化苹果枝后明显提高。另外, 施用未炭化的苹果枝粉末也有促进平邑甜茶生长、改善根系构型的效果, 这主要在于施入未炭化的苹果枝粉末相当于向土壤施入秸秆等有机物料, 除增加了土壤有机物质含量之外 (崔同丽 等, 2012), 还可提高土壤孔隙度, 降低土壤容重, 有利于改善根系的生长环境。

本研究中还发现, 在 400 ~ 700 °C 的范围内, 700 °C 炭化的苹果枝粉末对平邑甜茶生物量、光合性能和根系功能的促进作用最大。之所以产生这种效应, 应主要在于高温条件下 (700 °C) 制备的生物炭比低温下制备的生物炭具有更高的孔隙度和表面积, 吸附力也更强, 能更好地保持土壤肥水 (Yu et al., 2010; Zhang et al., 2010), 因而也对平邑甜茶生长发育和生理功能表现出更好的促进效果。

References

- Asai H, Samson B K, Stephan H M, Songyikhangsuthor K, Homma K, Kiyono Y, Inoue Y, Shiraiwa T, Horie T. 2009. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos: 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield. *Field Crops Research*, 111 (1/2): 81 - 84.
- Chen Ji-hu, Yu Xin-xiao, You Xiang-liang, Liu Ping, Zhang Chang-da, Xie Gang. 2006. Fractal characteristics of *Tilia tomentosa*'s root system under different water conditions. *Science of Soil and Water Conservation*, 4 (2): 71 - 74. (in Chinese)
- 陈吉虎, 余新晓, 有祥亮, 刘 苹, 张长达, 谢 港. 2006. 不同水分条件下银叶槭根系的分形特征. *中国水土保持科学*, 4 (2): 71 - 74.
- Cui Tong-li, Jiang Yuan-mao, Peng Fu-tian, Wei Shao-chong. 2012. Effects of different ratios of straw to N-fertilizer on growth of *Malus hupehensis* seedling and its absorption, distribution and utilization of nitrogen. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 36 (2): 169 - 176. (in Chinese)
- 崔同丽, 姜远茂, 彭福田, 魏绍冲. 2012. 秸秆和氮肥不同配比影响平邑甜茶幼苗的生长和对氮素的吸收、分配和利用. *植物生态学报*, 36 (2): 169 - 176.
- Felber R, Hüppi R, Leifeld J, Neftel A. 2012. Nitrous oxide emission reduction in temperate biochar-amended soils. *Biogeosciences Discuss*, 9: 151 - 189.
- Gaskin J W, Steiner C, Harris K, Das K C, Bibens B. 2008. Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use. *Transactions of the ASABE*, 51 (6): 2061 - 2069.

- Glaser B, Lehmann J, Zech W. 2002. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – A review. *Biology Fertility of Soils*, 35: 219 – 230.
- Haefele S M, Konboon Y, Wongboon W, Amarante S, Maarifat A A, Pfeiffer E M, Knoblauch C. 2011. Effects and fate of biochar from rice residues in rice-based systems. *Field Crops Research*, 121 (3): 430 – 440.
- Jeffery S, Verheijen F G A, van Der Velde M, Bastos A C. 2011. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 144 (1): 175 – 187.
- Laird D A, Fleming P, Davis D D, Horton R, Wang B, Karlen D L. 2010. Impact of biochar amendment on the quality of a typical Midwestern agricultural soil. *Geoderma*, 158: 443 – 449.
- Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. 2006. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems-A review. *Mitig Adapt Strat Global Change*, 11: 403 – 427.
- Li Zhi-gang, Liu Xiao-gang, Li Jian. 2012. Match application effects of ammonium sulfate and chicken manure in seedling substrate contained biomass charcoal. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 116 (1): 83 – 88. (in Chinese)
- 李志刚, 刘晓刚, 李 健. 2012. 硫酸铵与鸡粪配比在含生物质炭育苗基质中的应用效果. *中国土壤与肥料*, 116 (1): 83 – 88.
- Liu Yu-xue, Liu Wei, Wu Wei-xiang, Zhong Zhe-ke, Chen Ying-xu. 2009. Environmental behavior and effect of biomass-derived black carbon in soil: A review. *Soil and Fertilizer Science in China*, 20 (4): 977 – 982. (in Chinese)
- 刘玉学, 刘 微, 吴伟祥, 钟哲科, 陈英旭. 2009. 土壤生物质炭环境行为与环境效应. *应用生态学报*, 20 (4): 977 – 982.
- Liu Yu-xue. 2011. Effect of biochar on the characteristic of nitrogen loss and greenhouse gas emission from soil [Ph. D. Dissertation]. Hangzhou: Zhejiang University. (in Chinese)
- 刘玉学. 2011. 生物质炭输入对土壤氮素流失及温室气体排放特性的影响 [博士论文]. 杭州: 浙江大学.
- Oguntunde P G, Abiodun B J, Ajayi A E, van de Giesen N. 2008. Effects of charcoal production on soil physical properties in Ghana. *J Plant Nutr Soil Sci*, 171: 591 – 596.
- Spokas K A, Reicosky D C. 2009. Impacts of sixteen different biochars on soil greenhouse gas production. *Annals of Environmental Science*, 3 (1): 4.
- Steiner C, Teixeira W G, Lehmann J, Nehls T, Blum W E H, Zech W. 2007. Long term effects of manure, charcoal, and mineral: Fertilization on crop production and fertility on a highly weathered central Amazonian upland soil. *Plant and Soil*, 291: 275 – 290.
- Steiner C, Glaser B, Teixeira W G, Lehmann J, Blum W E H, Zech W. 2008. Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal. *Soil Science and Plant Nutrition*, 171: 275 – 290.
- van Zwieten L, Kimber S, Morris S, Chan K Y, Downie A, Rust J, Joseph S, Cowie A. 2010. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant and Soil*, 327 (1/2): 235 – 246.
- Wang Yi-qin, Zhang Hui-juan, Bai Ke-zhi, Sun Yong-ru. 1999. Application of fractal geometry in the studies of plant root systems. *Chinese Journal of Nature*, 21 (3): 143 – 146. (in Chinese)
- 王义琴, 张慧娟, 白克智, 孙勇如. 1999. 分形几何在植物根系研究中的应用. *自然杂志*, 21 (3): 143 – 146.
- Wang Z, Zheng H, Luo Y, Deng X, Herbert S, Xing B. 2013. Characterization and influence of biochars on nitrous oxide emission from agricultural soil. *Environ Pollut*, 174: 289 – 296.
- Warno D D, Lehmann J, Kuyper T W, Rillig M C. 2007. Mycorrhizal responses to biochar in soil-concepts and mechanisms. *Plant Soil*, 300: 9 – 20.
- Yu X Y, Pan L G, Ying G G, Kookana R S. 2010. Enhanced and irreversible sorption of pesticide pyrimethanil by soil amended with biochars. *Journal of Environmental Sciences*, 22 (4): 615 – 620.
- Yuan J H, Xu R K. 2011. The amelioration effects of low temperature biochar generated from nine crop residues on an acidic Ultisol. *Soil Use and Management*, 27 (1): 110 – 115.
- Zhang H H, Lin K D, Wang H L, Gan J, Kookana R S. 2010. Effect of *Pinus radiata* derived biochars on soil sorption and desorption of phenanthrene. *Environmental Pollution*, 158 (9): 2821 – 2825.
- Zhao Shi-jie, Shi Guo-an, Dong Xin-chun. 2002. Plant physiology experiment guidance. Beijing: China's Agricultural Science and Technology Press. (in Chinese)
- 赵世杰, 史国安, 董新纯. 2002. 植物生理学实验指导. 北京: 中国农业科学技术出版社.