

# 生物炭对砂土水肥保持及苹果生长的影响研究

李晗灏, 李文庆\*, 王媛, 王桂伟

(山东农业大学资源与环境学院, 土肥资源高效利用国家工程实验室, 山东泰安 271018)

**摘要:** 为解决砂土易漏水漏肥的问题, 以富士/平邑甜茶为试材, 探讨了生物炭在砂土苹果园中的应用效果。结果表明, 生物炭与化肥配合穴施增加了优质果率, 提高了单果质量与单株产量, 分别达到 70.21%、261.92 g 和 59.62 kg, 较传统单独穴施化肥的对照分别增加了 43.40%、15.21% 和 36.06%; 可溶性固形物和维生素 C 含量较对照提高了 7.10% 和 30.30%, 果实品质得到改善; 土壤速效氮和速效钾含量分别达 153.58 和 142.2 mg · kg<sup>-1</sup>, 较对照提升 15.69% 和 33.27%; 在降水后第 3 天生物炭施用土层土壤含水量较上、下土层分别高 36.65% 和 27.92%, 1 个月后仍然分别高 56.65% 和 45.79%。结果显示, 生物炭与化肥配合穴施的方法在砂土苹果园中对其肥水的保持及苹果产量和品质的提高均有显著效果。

**关键词:** 苹果; 生物炭; 砂土; 产量; 品质

**中图分类号:** S 661.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0513-353X (2019) 03-0599-08

## Effect of Biochar on Water and Nutrient Conservation and Apple Growth in Sandy Soil

LI Hanhao, LI Wenqing\*, WANG Yuan, and WANG Guiwei

(College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Tai'an, Shandong 271018, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of low water and nutrient conserving capacity of sandy soil, five-year-old Fuji/*Malus hupehensis* Rehd. was taken as material to study the effects of biochar and compost on soil water and nutrient conserving capacity and apple growth. The results showed the percentage of high quality fruit, single apple fruit weight and apple yield of biochar combined with chemical fertilizer were 70.21%, 261.92 g and 59.62 kg, respectively, increasing by 43.40%, 15.21% and 36.06%, respectively, compared with the single hole application of chemical fertilizer treatment (control). The content of fruit soluble solids and vitamin C increased by 7.10% and 30.30%, respectively. Biochar combined with chemical fertilizer increased soil available nitrogen, available potassium, being 153.58 and 142.2 mg · kg<sup>-1</sup>, respectively, which increased by 15.69% and 33.27%, compared with the conventional fertilization treatment. On the third days after precipitation, soil water content of biochar application was 36.65% and 27.92% higher than that of upper and lower soil layers respectively. After one month evaporation, the soil water was still 56.65% and 45.79% higher than the upper and lower soil layers, respectively. The results showed that the combination of biochar and chemical fertilizer had significant

**收稿日期:** 2018-08-12; **修回日期:** 2019-02-18

**基金项目:** “十二五” 国家科技计划项目 (2014BAD16B02); 山东省重点研发计划项目 (2016CYJS05A02, 2017CXGC0306); 山东省发展计划项目 (2013GNC11309)

\* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: wqli@sdau.edu.cn)

effects on soil water, nutrient content, yield and quality of apple fruit in sandy soil.

**Keywords:** apple; biochar; sandy soil; yield; quality

砂土漏水漏肥的特点导致其肥力水平较低, 作物产量不高, 尤其在缺少灌溉条件的地区, 作物产量大受影响(赵国栋等, 2010)。为了更好地调控砂土地水分及养分的供给, 人们进行了若干尝试, 如客土及大量使用有机肥, 以及目前大规模推广的水肥一体化技术, 但这些需要较大的工程量及较多的有机肥投入, 或者有稳定的水分供给及较高的一次性投入。束怀瑞等(1984)提出的穴贮肥水技术能有效解决干旱地区果树水分及养分的供给, 提高苹果产量, 但随着秸秆的腐烂分解, 其作用会逐渐减弱。因此探讨更简单、效果更持久的水肥管理模式极为必要, 尤其是对漏水漏肥的砂土更是如此。

生物炭是生物质在缺氧或绝氧条件下经高温热解生成的富碳物质, 近年来在农业生产以及环境修复方面得到了广泛应用(丁艳丽等, 2013; 闫丽娟等, 2014; 姚玲丹等, 2016)。由于生物炭具有高孔隙度、大比表面积、强吸附能力以及高阳离子交换量等优点(陈温福等, 2013), 大量的研究证实其能够改良土壤物理性质, 并提高土壤的保水保肥能力。

目前关于生物炭的研究多集中于对土壤理化性质和作物产量的影响(张斌等, 2012; 李程和李小平, 2015; 张爱平等, 2015)。而关于生物炭在砂土苹果园改良的应用鲜有报道, 本试验中探讨了将生物炭与化学肥料配合穴施来解决砂土地苹果水分及养分供给问题, 以期对砂土水肥管理提供更方便有效的手段。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料及处理

试验于2015年11月至2017年11月在山东省临沂市蒙阴县野店镇河漫滩上的5年生苹果果园进行, 品种为烟富6/平邑甜茶(*Fuji/Malus hupehensis* Rehd.), 株行距为3 m × 4 m, 树形纺锤形, 树势健壮, 日常按常规管理方式进行管理。供试土壤为砂土, 土壤有机质含量 $9.71 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 速效氮 $108.74 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 速效磷 $12.42 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 速效钾 $92.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

设3个处理, 生物炭、堆肥和化肥(对照, 当地传统做法)。在果树两侧滴水线附近挖两个长60 cm, 宽50 cm, 深40 cm的坑, 每个坑内施用5 kg的生物炭或堆肥, 同时混入复合肥(N-P-K = 15-15-15) 4 kg, 然后覆土, 对照只施入化肥。3株树为1个重复, 选择长势接近的树作为试验用树, 每个处理6次重复。

生物炭为炭化的花生壳(由专利设备自制而成), 堆肥由玉米秸秆堆制而成, 基本理化指标见表1, 化肥采购于农大肥业, 为N-P-K = 15-15-15常规复合肥料。各处理于2013年11月布置, 每年5月和9月分两次施肥, 其中5月施肥量占80%, 9月占20%。

表1 试验用材料基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of test materials

材料 Material	pH	电导率/ $(\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1})$ Conductivity	全氮/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$ Total N	全磷/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$ Total P	全钾/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$ Total K
生物炭 Biochar	9.32	670.33	0.73	3.72	16.65
堆肥 Compost	6.96	1 389.67	0.82	3.43	9.49

## 1.2 测定项目及测定方法

在距离树干 120 ~ 150 cm 行间处理处为取样点, 土壤含水量在降水后第 3 天及经过 1 个月蒸发后测定, 采用 SPECTRUM TDR300 土壤水分测定仪, 于下午 2: 00—3: 00 测定; 每年 10 月初苹果收获期采集样品, 土壤速效氮采用碱解扩散法提取, 用 Tector 5020 流动注射分析仪法测定; 土壤有效磷用碳酸氢钠浸提, 钼锑抗比色法测定吸光度, 土壤速效钾用中性醋酸铵浸提火焰光度计测定 (鲍士旦, 2000)。叶片叶绿素含量用 SPAD-502 型手持型叶绿素仪进行测定; 叶绿素荧光参数使用英国 Hansatech 公司生产的 FMS-2 脉冲调制式荧光仪测定, 时间为上午 10: 00—12: 00; 根系数采用剖面观察法统计。

苹果果实硬度使用姜堰市银河仪器厂 YHKC-2A 型颗粒强度测定仪测定; 可溶性固形物含量采用折光仪法测定; 维生素 C 含量用二氯酚靛酚测得; 可滴定酸含量采用滴定法测得。

单株产量 = 随机选取的单株 100 个果实的平均单果质量 × 单株总果数; 采用苹果分级器判定果实等级, 横径 > 80 mm 为优质果。

试验数据采用 SAS8.0 软件及 Excel2016 进行数据处理和统计分析, 采用邓肯氏新复极差法进行多重比较 ( $P = 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 生物炭对苹果产量的影响

通过 2016 年的数据 (表 2) 可以看出, 在传统施入化肥的基础上施入生物炭, 苹果单果质量和单株产量, 分别比当地传统施入化肥的对照提升了 11.07% 和 36.06%, 优质果率远高于对照, 生物炭处理与堆肥处理相比, 差异未达到显著水平。2017 年, 生物炭与堆肥处理的苹果产量保持了持续的增长, 单株产量、单果质量和优质果率均显著高于对照。

表 2 不同处理苹果产量指标  
Table 2 Different processing apple output indicators

年份 Year	处理 Treatment	单株产量/kg Yield per plant	单果质量/kg Fruit weight	优质果率/% High quality fruit rate
2016	化肥 (对照) Chemical fertilizer (Control)	43.82 ± 1.68 b	235.81 ± 7.08 b	48.96 ± 3.42 c
	堆肥 Compost	53.85 ± 2.41 a	245.35 ± 9.55 ab	69.24 ± 4.72 b
	生物炭 Biochar	59.62 ± 2.42 a	261.92 ± 1.68 a	70.21 ± 3.71 b
2017	化肥 (对照) Chemical fertilizer (Control)	60.65 ± 2.21 b	227.33 ± 12.78 b	52.26 ± 2.42 c
	堆肥 Compost	75.82 ± 9.89 a	272.14 ± 15.88 a	81.07 ± 2.48 a
	生物炭 Biochar	76.86 ± 4.11 a	310.01 ± 21.78 a	84.72 ± 1.44 a

注: 相同年份标有相同小写字母的数据差异未达显著水平 ( $P < 0.05$ )。

Note: Differences in data with the same letter in the same year were not significant ( $P < 0.05$ ) .

### 2.2 生物炭对土壤水分的影响

分别在 2016 年 7 月 21 日 (降雨后第 3 天, 降水强度为 61.9 mm) 和 8 月 21 日 (经过 1 个月蒸发后) 对土壤不同土层含水量进行了测定。

结果 (图 1) 表明, 降水后第 3 天生物炭处理能够有效提升施肥区域 (20 ~ 40 cm 土层) 土壤的蓄水能力, 其含水量为 18.83%, 较上、下土层分别提高 36.65% 和 27.92%, 比对照处理 (含水量

14.37%) 提高了 31.04%，堆肥处理施肥区域 (20 ~ 40 cm 土层) 含水量为 19.80%，显著高于生物炭处理。

在雨后经过 1 个月蒸发后对不同土层含水量又进行测定 (图 2)，此时生物炭处理施肥区域 (20 ~ 40 cm 土层) 土壤的含水量为 11.78%，较上、下土层提高 56.65% 和 45.79%，并显著高于对照 (含水量 7.63%)。堆肥处理施肥区域 (20 ~ 40 cm 土层) 含水量为 13.70%，显著高于生物炭处理。这说明生物炭能够显著提升土壤的保水能力，其保水效果与堆肥接近。

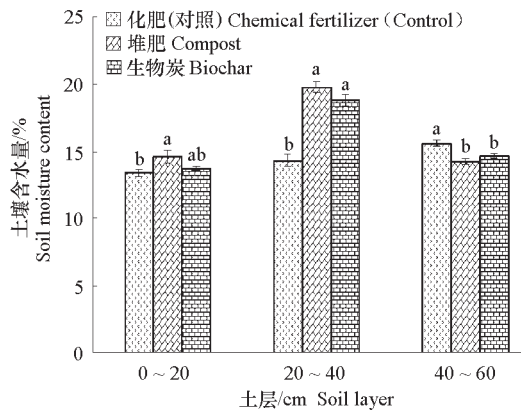


图 1 降水后第 3 天不同处理土壤分层含水量  
Fig. 1 Soil layer moisture content in different treatments on the 3rd day after precipitation

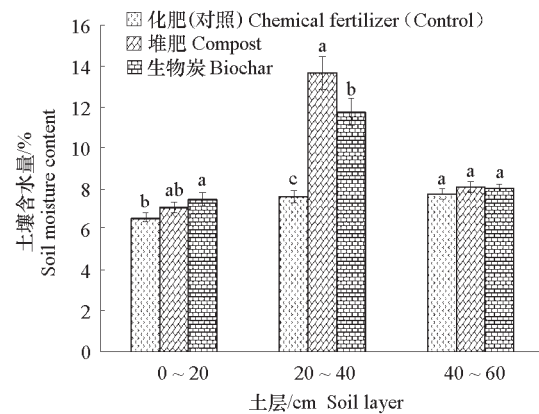


图 2 降雨后 1 个月不同处理土壤分层含水量  
Fig. 2 Soil stratified water content under different treatments one month after rainfall

### 2.3 生物炭对土壤养分的影响

对不同深度土壤的养分含量进行测定，结果表明，生物炭能有效保持养分，改善土壤的供肥性能。从图 3 看，在施肥区域 (20 ~ 40 cm 土层) 生物炭处理速效氮含量为  $129.88 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，较上、下土层提高了 19.93% 和 20.20%，较对照 (速效氮含量  $112.27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 提高了 15.69%；堆肥处理速效氮含量为  $142.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，较上、下土层提高了 20.83% 和 20.05%，并显著高于对照；较生物炭处理提高 9.49%。生物炭与堆肥处理均能提高施肥区域土壤速效氮含量以及氮素保持能力，堆肥效果优于生物炭。

就土壤有效磷而言 (图 4)，在施肥区域 (20 ~ 40 cm 土层) 生物炭处理有效磷含量为  $11.57 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，显著低于上、下土层，且较对照显著降低。堆肥处理有效磷含量为  $15.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，较上、下土层分别提升 21.25% 和 29.55%，与传统施化肥处理相比该土层有效磷含量提高  $2.64 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，差异达显著水平。

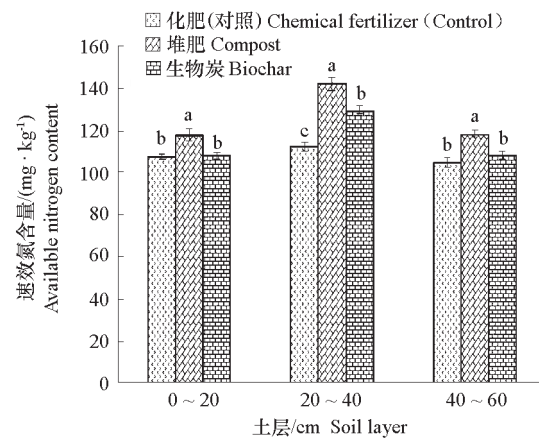


图 3 各处理不同深度土壤速效氮含量  
Fig. 3 Available nitrogen content in different depths of each treatment

生物炭处理能够提高土壤速效钾含量 (图 5)。在施肥区域 (20~40 cm 土层) 生物炭处理速效钾含量为  $163.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 明显高于其上、下土层, 较对照提升 33.27%, 与堆肥处理差异不显著; 堆肥处理速效钾含量为  $153.58 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 明显高于上、下土层。

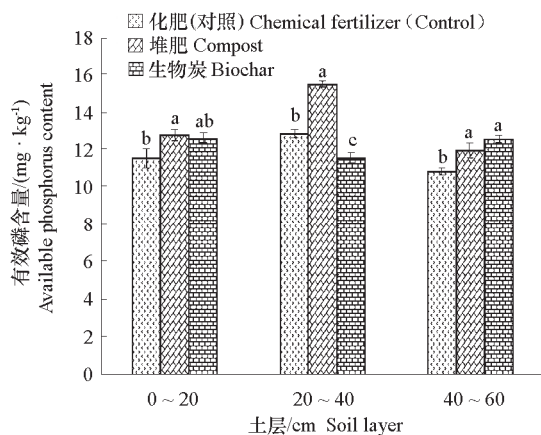


图 4 各处理不同深度土壤有效磷含量

Fig. 4 Available phosphorus content in soils at different depths of different treatments

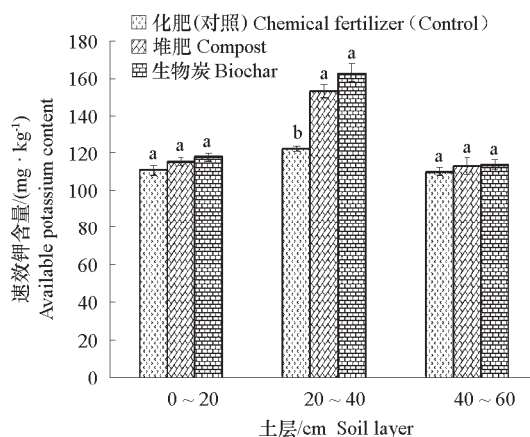


图 5 各处理不同深度土壤速效钾含量

Fig. 5 Available K contents of soils at different depths of different treatments

## 2.4 生物炭对苹果根系的影响

土壤水分及养分状况的改善, 会对苹果的根系生长产生影响。

对苹果根系数的调查结果 (图 6) 表明, 在 20~40 cm 土层, 生物炭处理的施肥坑内平均根系数为 13.1 条, 较非施肥坑显著提高 81.9%。堆肥处理施肥坑内平均根系数为 12.3 条, 较非施肥坑提高 38.2%。生物炭与堆肥处理有相同的变化规律, 且两处理在施肥坑内根系数差异不显著。可见生物炭改善了施肥区域的水分及养分状况, 有利于改善土壤理化性质, 有效地促进了果树根系的生长。

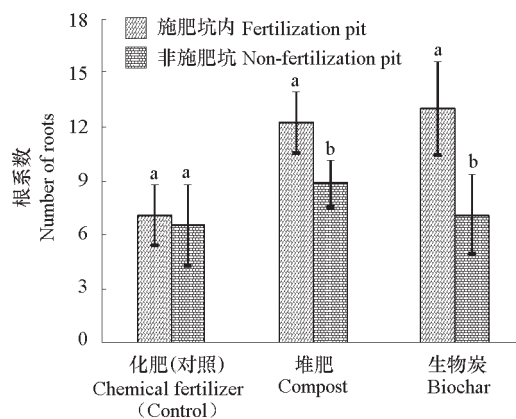


图 6 不同处理苹果根系生长状况

Fig. 6 Different growth conditions of apple roots

## 2.5 生物炭对苹果叶片光合性质的影响

土壤水分及养分状况的改善, 促进了根系的生长及对养分的吸收, 进而影响果树地上部的生长。植株叶片的叶绿素含量用 SPAD 值表示 (王娟 等, 2006)。表 3 的结果表明生物炭处理叶片 SPAD 值显著高于对照, 较对照提高了 18.34%, 与堆肥处理差异未达到显著水平。

为了更好地了解苹果叶片光合特性, 对叶绿素荧光指标进行了测定。叶绿素荧光指标反映了叶片光合作用过程中光系统对光能的吸收、传递、耗散、分配等 (李光庆 等, 2010)。生物炭处理的  $\Phi_{PSII}$ 、 $F_v/F_M$  和  $F_v/F_0$  分别较对照提高 4.2%、7.8%和 15.6%。PS II 最大光化学效率和 PS II 潜在活性

值大说明 PS II 反应中心的能量捕捉效率高, PS II 量子产额高说明光能转化效率高, 为暗反应的碳同化积累更多的能量, 有利于干物质的积累。堆肥处理各指标与生物炭处理差异未达到显著水平, 但显著高于对照。

表 3 不同处理对苹果叶片光合性质的影响

Table 3 Effect of different treatments on the properties of apple leaves

处理 Treatment	SPAD	$\Phi_{PSII}$	$F_v/F_m$	$F_v/F_o$
化肥 (对照) Chemical fertilizer (Control)	57.72 ± 1.04 b	0.601 ± 0.006 b	0.808 ± 0.007 b	4.524 ± 0.315 b
堆肥 Compost	64.41 ± 0.56 a	0.625 ± 0.008 a	0.868 ± 0.005 a	5.117 ± 0.271 a
生物炭 Biochar	68.31 ± 1.08 a	0.626 ± 0.005 a	0.871 ± 0.008 a	5.228 ± 0.435 a

注:  $\Phi_{PSII}$  为 PS II 量子产额,  $F_v/F_m$  为 PS II 最大光化学效率,  $F_v/F_o$  为 PS II 潜在活性。同列标有相同小写字母的数据差异未达显著水平 ( $P < 0.05$ )。

Note:  $\Phi_{PSII}$  is PS II quantum yield,  $F_v/F_m$  is the maximum photochemical efficiency of PS II and  $F_v/F_o$  is potential activity of PS II. Differences in data with the same letter in the same column were not significant ( $P < 0.05$ ).

## 2.6 生物炭对苹果果实品质的影响

对苹果果实的品质指标进行了测定, 结果表明生物炭处理对苹果品质也有明显的影响 (表 4), 其中可溶性固形物和维生素 C 含量分别较对照显著提高了 7.10% 和 30.30%; 果实硬度、可滴定酸含量与对照差异未达到显著水平。生物炭与堆肥处理较对照显著提升了可溶性固形物和维生素 C 含量。生物炭处理与堆肥处理间的各指标差异均未达到显著水平。

表 4 不同处理苹果品质指标

Table 4 Different apple quality indicators

处理 Treatment	硬度/N Hardness	可溶性固形物/% Soluble solids	维生素 C / (mg · g <sup>-1</sup> ) Vitamin C	可滴定酸/% Titratable acid
化肥 (对照) Chemical fertilizer (Control)	36.75 ± 0.96 a	12.68 ± 0.22 b	0.099 ± 0.005 b	0.485 ± 0.02 a
堆肥 Compost	35.50 ± 1.49 a	13.46 ± 0.47 a	0.119 ± 0.002 a	0.465 ± 0.03 a
生物炭 Biochar	35.18 ± 2.29 a	13.58 ± 0.45 a	0.129 ± 0.006 a	0.455 ± 0.03 a

注: 同列标有相同小写字母的数据差异未达显著水平 ( $P < 0.05$ )。

Note: Differences in data with the same letter in the same column were not significant ( $P < 0.05$ ).

## 3 讨论

在本试验条件下, 生物炭及堆肥与化学肥料配合穴施有效地提高了砂土地果园苹果的产量, 添加生物炭的处理 20 ~ 40 cm 土层在降水后第 3 天含水量较上下土层分别提高 36.64% 和 27.92%, 经过 1 个月的蒸发后 20 ~ 40 cm 土层含水量较上下土层分别提高 56.65% 和 45.79%, 施用生物炭及堆肥后提高了土壤的田间持水量, 将其与化学肥料混合穴施可以创造一个能保持水分的环境, 在降雨或者灌溉时能有效保持水分, 并在后期持续供应苹果所需 (Basso et al., 2013; 安艳 等, 2016)。生物炭同时还具有较强的保肥性能, 将生物炭与化学肥料一起施用能有效改善砂土的养份供给, 本研究结果中施加生物炭的处理土壤速效氮及速效钾含量较未添加生物炭区域分别提高了 15.69% 和 33.27%, 这充分说明生物炭的施用增加了土壤的保肥能力, 而保水保肥能力的增强会改善苹果对水分及养分的吸收状况, 在田间状态下实现了肥水协同供给, 促进果树的生长。这是由于生物炭等与化肥共施能充分发挥其对养分的保持作用。

通过对苹果根系状况的调查发现, 施用生物炭的果树在施肥坑内根系数较非施肥坑区域有明显提高, 提高幅度为 81.9%, 这是由于根系具有向水向肥性 (杨凯 等, 2015), 水肥条件的改善为根系提供了良好的生长环境, 尤其对于砂土这种保水保肥能力较差的土壤可以在自然条件下实现“肥水耦合”有效改善其水肥供给。根系正常生长及水分养分吸收的正常进行会促进地上部分的生长 (白健 等, 2016), 本研究中施用生物炭的处理苹果叶片绿度明显增加, 叶绿素含量较高, 而这又促进了光合作用, 因此促进了植株对光能的捕获和转化效率, 叶片捕获光能和热消散能力比例 ( $F_v/F_o$ ) 及最大光化学效率 ( $F_v/F_m$ ) 提升, 说明在植株体内光能转化为化学能的效率加快, 促进了碳同化的效率, 保障了光合作用的高效进行, 这为光合产物的积累及产量的形成提供了良好的条件 (曹慧 等, 2004), 实际产量数据也表明了这一点, 施用生物炭的处理较未施用生物炭的传统施化肥方式显著提高了单株产量, 增大了单果质量及优质果率。在连续的研究中也发现, 采用生物炭与肥料穴施的果园不仅果实产量和品质得到提高, 而且苹果秋末落叶晚, 能保证后期果树碳水化合物的积累, 为来年年果树生长提供重要物质及能量的积累, 实际观察也发现生物炭处理的果园苹果大小年现象不明显, 与相邻果园的对比极其明显, 这说明养分及水分的正常协调供应能有效满足苹果营养, 促进健康生长, 实现高产稳产。

生物炭作为农业有机废弃物炭化后的产物, 将其施入土壤能有效改善土壤尤其砂土等瘠薄土壤的水分及养分状况, 这对于改善建植在山岭薄地上的果园水肥状况具有重要的实践意义。同时生物炭在土壤中极为稳定, 能有效固定碳, 降低温室气体排放, 因此又具有重要的生态意义。

## References

- An Yan, Ji Qiang, Zhao Shi-xiang, Wang Xu-dong. 2016. Effect of biochar application on soil aggregates distribution and moisture retention in orchard soil. *Environmental Science*, 37 (1): 293 - 300. (in Chinese)
- 安 艳, 姬 强, 赵世翔, 王旭东. 2016. 生物质炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响. *环境科学*, 37 (1): 293 - 300.
- Bai Jian, Li Na, Fu Chun-xia, Zhang Zhi-yuan, Wang Yan-an, Shu Huai-rui. 2016. Effect of micro-environment regulation mode around root zone on the soil property and root growth of apple trees. *Acta Horticulturae Sinica*, 43 (5): 829 - 840. (in Chinese)
- 白 健, 李 娜, 付春霞, 张志远, 王衍安, 束怀瑞. 2016. 苹果根域调控对土壤理化性质和根系生长的影响. *园艺学报*, 43 (5): 829 - 840.
- Bao Shi-dan. 2000. *Soil agrochemical analysis*. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press. (in Chinese)
- 鲍士旦. 2000. *土壤农化分析*. 第 3 版. 北京: 中国农业出版社.
- Basso A S, Miguez F E, Laird D A, Horton R, Westgate M. 2013. Assessing potential of biochar for increasing water-holding capacity of sandy soils. *Global Change Biology Bioenergy*, 5 (2): 132 - 143.
- Cao Hui, Xu Xue-feng, Han Zhen-hai, Wang Xiao-wei, Guo Tu-qiang. 2004. Changes of physiological characteristic on photosynthesis in *Malus* seedling leaves during water stress. *Acta Horticulturae Sinica*, 31 (3): 285 - 290. (in Chinese)
- 曹 慧, 许雪峰, 韩振海, 王孝威, 郭图强. 2004. 水分胁迫下抗旱性不同的两种苹果属植物光合特性的变化. *园艺学报*, 31 (3): 285 - 290.
- Chen Wen-fu, Zhang Wei-ming, Meng Jun. 2013. Advances and prospects in research of biochar utilization in agriculture. *Scientia Agricultura Sinica*, 46 (16): 3324 - 3333. (in Chinese)
- 陈温福, 张伟明, 孟 军. 2013. 农用生物炭研究进展与前景. *中国农业科学*, 46 (16): 3324 - 3333.
- Ding Yan-li, Liu Jie, Wang Ying-ying. 2013. Effects of biochar on microbial ecology in agriculture soil: a review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 24 (11): 3311 - 3317. (in Chinese)
- 丁艳丽, 刘 杰, 王莹莹. 2013. 生物炭对农田土壤微生物生态的影响研究进展. *应用生态学报*, 24 (11): 3311 - 3317.
- Li Cheng, Li Xiaoping. 2015. Effect of biochar preparation and its application amount on soil carbon pool and plant growth. *Journal of Southern*



- Agriculture, 46 (10): 1786 - 1791. (in Chinese)
- 李程, 李小平. 2015. 生物质炭制备及不同施用量对土壤碳库和植物生长的影响. 南方农业学报, 46 (10): 1786 - 1791.
- Li Guang-qing, Xie Zhu-jie, Yao Xue-qin, Chen Xue-hao. 2010. Studies on the relationship between chlorophyll fluorescence parameters and cold tolerance of cauliflower. *Acta Horticulturae Sinica*, 37 (12): 2001 - 2006. (in Chinese)
- 李光庆, 谢祝捷, 姚雪琴, 陈学好. 2010. 花椰菜叶绿素荧光参数与耐寒性的关系研究. 园艺学报, 37 (12): 2001 - 2006.
- Yang Kai, Hao Feng-zhen, Xu Hai-hong, Guo Xiang-hong, Zhang Peng-fei. 2015. Research progress of the root distribution. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 31 (22): 130 - 135. (in Chinese)
- 杨凯, 郝锋珍, 续海红, 郭向红, 张鹏飞. 2015. 果树根系分布研究进展. 中国农学通报, 31 (22): 130 - 135.
- Shu Huai-rui, Zhou Hong-wei, Gu San-liang, Xu Qiu-quan, Zhao Yong-rui, Liu Shu-lan. 1984. Experiment on planting technique of mulch covered with plastic film for storage of fertilizer in water and drought. *Deciduous Fruits*, (4): 1 - 7. (in Chinese)
- 束怀瑞, 周宏伟, 顾三良, 许秋泉, 赵永瑞, 刘淑兰. 1984. 地膜覆盖穴贮肥水旱栽技术试验. 落叶果树, (4): 1 - 7.
- Wang Juan, Han Dengwu, Ren Gang, Guo Jinqiang, Zhang Yongshuai, Wei Changzhou. 2006. A study on relation between SPAD value, chlorophyll and nitrogen content in cotton. *Xinjiang Agricultural Science*, 43 (3): 167 - 170. (in Chinese)
- 王娟, 韩登武, 任岗, 郭金强, 张永帅, 危常州. 2006. SPAD值与棉花叶绿素和含氮量关系的研究. 新疆农业科学, 43 (3): 167 - 170.
- Yan Li-juan, Yang Hong-qiang, Su Qian, Men Xiu-jin, Zhang Wei-wei. 2014. Effects of carbonized powder of apple branch on the growth and root architecture of *Malus hupehensis*. *Acta Horticulturae Sinica*, 41 (7): 1436 - 1442. (in Chinese)
- 闫丽娟, 杨洪强, 苏倩, 门秀巾, 张玮玮. 2014. 施用炭化苹果枝粉末对平邑甜茶生长及根系构型的影响. 园艺学报, 41 (7): 1436 - 1442.
- Yao Ling-dan, Cheng Guang-huan, Wang Li-xiao, Chen Huan-yu, Lou Li-ping. 2016. Effects of biochar application to microorganisms in soil. *Environmental Chemistry*, (4): 697 - 704. (in Chinese)
- 姚玲丹, 程广焕, 王丽晓, 陈环宇, 楼莉萍. 2016. 施用生物炭对土壤微生物的影响. 环境化学, (4): 697 - 704.
- Zhang Ai-ping, Liu Ru-liang, Gao Ji, Zhang Qing-wen, Chen Zhe, Hui Jin-zhuo. 2015. Effects of biochar on rice yield and nitrogen use efficiency in the ningxia yellow river irrigation region. *Journal of Plant Nutrition and Fertilize*, 21 (5): 1352 - 1360. (in Chinese)
- 张爱平, 刘汝亮, 高霁, 张晴雯, 陈哲, 惠锦卓. 2015. 生物炭对宁夏引黄灌区水稻产量及氮素利用率的影响. 植物营养与肥料学报, 21 (5): 1352 - 1360.
- Zhang Bin, Liu Xiao-yu, Pan Gen-xing, Zheng Ju-feng, Chi Zhong-zhi, Li Lian-qing. 2012. Changes in soil properties, yield and trace gas emission from a paddy after biochar amendment in two consecutive rice growing cycles. *Scientia Agricultura Sinica*, 45 (23): 4844 - 4853. (in Chinese)
- 张斌, 刘晓雨, 潘根兴, 郑聚锋, 池忠志, 李恋卿. 2012. 施用生物炭后稻田土壤性质、水稻产量和痕量温室气体排放的变化. 中国农业科学, 45 (23): 4844 - 4853.
- Zhao Guo-dong, Wei Qin-ping, Zhang Qiang, Wang Xiao-wei, Liu Song-zhong, Liu Jun. 2010. Effects of 1/4 root zone applying organic manure on growth of young apple trees in organic glass box. *Journal of Fruit Science*, 27 (2): 179 - 182. (in Chinese)
- 赵国栋, 魏钦平, 张强, 王小伟, 刘松忠, 刘军. 2010. 砂土1/4根域施用有机肥对苹果幼树生长的影响. 果树学报, 27 (2): 179 - 182.