

牛粪对杨树人工林土壤生物学性状及其生长的影响

范利可¹, 井大炜¹, 付修勇¹, 刘富刚¹, 袁晓兰¹, 王璐¹, 贾海慧², 咎林生²

(1. 德州学院 资源环境与规划学院, 山东 德州 253023; 2. 德州学院 生态与园林建筑学院, 山东 德州 253023)

摘要: [目的] 探讨施用牛粪对杨树人工林土壤生物学性状与生长的作用效果, 为土壤培肥制度的建立及杨树人工林的合理施肥提供理论依据。[方法] 通过 3 a 大田试验, 研究 CK(对照, 不施肥)、CF(单施化肥)、CM(牛粪)和 CM+CF(牛粪和化肥各提供 50% 的氮)等处理对杨树人工林土壤理化特征、微生物数量、微生物量碳氮、活性有机碳、碳库管理指数(CPMI)及生长的影响。[结果] 与 CF 处理相比, CM+CF 处理显著提高了土壤中细菌数、真菌数、微生物总量和微生物量碳、氮含量, 其中微生物量碳、氮含量分别较 CF 处理显著提高 42.20% 和 43.75%; CM+CF 处理还能明显提高土壤中碱解氮、速效磷、速效钾和交换性 Mg 含量, 并显著降低土壤 pH 值。同时, CM 处理使土壤总有机碳含量达最高值, 而 CM+CF 处理使土壤的低活性、中活性、高活性有机碳含量和 CPMI 最高, 其中 CPMI 分别较 CK, CF 和 CM 处理显著高出 52.76, 47.16, 25.89。此外, CM+CF 处理使杨树人工林的材积平均生长率达到 45.36%, 并显著高于其他处理。与 CM+CF 处理相比, CM 处理对土壤和材积的影响效果较小。[结论] 牛粪与化肥配施有助于改善杨树人工林土壤的生物学性状, 有利于促进林木生长。

关键词: 杨树人工林; 牛粪; 生物学性状; 碳库管理指数

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)05-0058-05

中图分类号: S157.3

文献参数: 范利可, 井大炜, 付修勇, 等. 牛粪对杨树人工林土壤生物学性状及其生长的影响[J]. 水土保持通报, 2017, 37(5): 58-62. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.05.010; Fan Like, Jing Dawei, Fu Xiuyong, et al. Effects of cattle manure on soil biological characteristics and growth of poplar plantation[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(5): 58-62. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.05.010

Effects of Cattle Manure on Soil Biological Characteristics and Growth of Poplar Plantation

FAN Like¹, JING Dawei¹, FU Xiuyong¹, LIU Fugang¹,
YUAN Xiaolan¹, WANG Lu¹, JIA Haihui², ZAN Linsheng²

(1. College of Resources Environment and Planning, Dezhou University, Dezhou, Shandong 253023, China; 2. College of Ecology and Garden Architecture, Dezhou University, Dezhou, Shandong 253023, China)

Abstract: [Objective] Exploring the effects of cattle manure application on soil biological characteristics and growth of poplar plantation, to provide theoretical basis for the establishment of soil fertility system and reasonable fertilization of poplar plantation. [Methods] A field experiment with four treatments, i. e. CK (neither urea nor cattle manure was applied), CF (100% of nitrogen was provided by urea), CM (100% of nitrogen was provided by cattle manure), and CM+CF (50% and 50% of nitrogen was provided by cattle manure and urea, respectively) was conducted to determine effects of different treatments on physicochemical properties, microbial populations, microbial biomass carbon, microbial biomass nitrogen, active organic carbon, carbon pool management index (CPMI) and growth of poplar plantation. [Results] In comparison to CF treatment, CM+CF treatment significantly increased the populations of bacteria, fungi and total microorganism, and the contents of microbial biomass carbon and microbial biomass nitrogen increase 42.20% and 43.75%, respectively. The contents of available nitrogen, available phosphate, available potassium and exchangeable Mg were significantly increased by CM+CF treatment, while the pH value was obviously decreased. Meanwhile, the maximum value of total organic carbon content was observed in CM treatment,

收稿日期: 2017-04-09

修回日期: 2017-05-04

资助项目: 国家自然科学基金项目“断根对杨树切口处不同根序细根的形态特征、解剖结构及生理代谢的调控机理研究”(31500513); 德州学院科技人才引进项目(311890)。

第一作者: 范利可(1998—), 女(汉族), 河南省驻马店市人, 本科生, 研究方向为自然地理与资源环境。E-mail: dlxfank@163.com。

通讯作者: 井大炜(1982—), 男(汉族), 陕西省绥德县人, 博士, 讲师, 主要从事植物营养机理与调控研究。E-mail: jingdawei009@163.com。

whereas the contents of low-labile, moderate-labile and high-labile organic carbon, and CPMI were notably increased by CM+CF treatment, indicative of 52.76, 47.16 and 25.89 increases in CPMI over the values of CK, CF and CM, respectively. Additionally, the average volume growth rate in CM+CF treatment was 45.36%, which was significantly higher than those of other treatments. However, in CM treatment, fewer effects on soil and volume of poplar were observed in comparison with the one of CM+CF treatment. [Conclusion] Cattle manure co-applied with inorganic fertilizer was beneficial to improve soil biological characteristics and promote the growth of poplar plantation.

Keywords: poplar plantation; cattle manure; biological characteristics; carbon pool management index

杨树旁侧根系庞大,随林木逐渐生长,其旁侧根系向四周的伸展区域不断变大。当杨树林郁闭后,地下根系相互交织在一起,根系盘生极易使杨树变成“小老树”,且易滋生传播病虫害^[1],导致此时期根系活性明显减弱,细根数量急剧减少,进而显著降低了杨树根系对养分、水分的吸收能力^[2]。因此,如何改善杨树郁闭林的生长状况是亟待解决的关键问题。而有机肥的合理施用为解决这一问题提供了新思路。

有机肥富含营养成分,可优化土壤微生物群落,改善土壤理化性状,并对养分具有缓释效应,与化肥相比养分利用率更高、肥效期更长^[3]。所以,在化肥中配施有机肥是农业研究者一直关注的热点课题。大量研究认为^[4-5],有机肥与化肥搭配可以改善土壤理化特征,增强土壤的供肥性,有助于提升土壤肥力。牛粪是一种丰富的有机肥资源,仅次于猪粪,约占畜禽粪便的 1/3^[6]。近年来,诸多学者关于牛粪对水稻^[7]、玉米^[8]、小麦^[9]等农作物的影响开展了深入的探索研究,并获得较好的增产效应,但利用牛粪在杨树林木方面的应用报道较少,尤其针对牛粪对杨树郁闭林土壤生物学性状及生长的研究更是鲜见报道。目前在人工林营造和经营中,过多施用化肥而有机肥施用很少的现象仍然普遍存在,且有机肥与化肥尚缺乏合适的搭配比例,导致施肥的盲目性,这在一定程度上造成了林地土壤生态环境的退化与林地生产力的下降,所以急需科学有效的施肥技术来改善林地肥力。土壤微生物是土壤有机质、土壤养分转化与循环的内在动力^[10];而土壤活性有机碳与土壤速效养分、土壤物理性状等紧密相关,已成为评价土壤质量与土壤管理的重要指标之一^[11]。碳库管理指数是土壤管理措施引起土壤有机碳改变的重要指标,能够敏感且系统地监测土壤碳的变化,并反映农林措施导致土壤质量下降或更新的程度^[11-12]。可见,掌握这些土壤生物学特征指标的变化规律对于了解施肥的作用机理并评价施肥效果具有重要的理论指导意义。为此,本研究拟以腐熟好的牛粪为供试原料,开展牛粪与化肥配施对杨树郁闭林土壤理化特征、微生物数量、活性有机碳与碳库管理指数及生长的研究,旨在为土壤培

肥制度的建立及杨树人工林的合理施肥提供理论依据与技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验地点与供试材料

试验地点设置在山东省济南市北郊林场(36°40'N, 117°00'E),年平均气温与年平均降雨量分别为14℃与650~700 mm。供试土壤为潮土,土壤速效 N、P 和 K 含量分别为 19.52, 15.10, 46.95 mg/kg。试验所用牛粪采自附近养殖场,并经腐熟发酵好、风干后施用,其基本理化性状为:含水量 22.16%,有机质 116.76 g/kg,全氮 7.58 g/kg,全磷 5.60 g/kg,全钾 3.26 g/kg。所用化肥为尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含 P₂O₅ 12%)与硫酸钾(含 K₂O 50%)。杨树为 5 年生 I-107 欧美杨人工林,株行距 3 m×4 m,南北行向,林木生长均匀,平均树高 12.79 m,平均胸径 12.43 cm。

1.2 试验设计

采用大田试验,随机区组设计,设 4 个处理:①CK 不施肥;②单施化肥(CF);③牛粪(CM);④牛粪提供 50%的氮,化肥提供 50%的氮(CM+CF)。每个小区 30 棵树,重复 3 次。在距离树干 60 cm 处挖深 30 cm,长 60 cm 的施肥沟,并将肥料与土壤混匀,然后再填满夯实。除 CK 外,各处理均为等养分量,N、P 和 K 含量相当于 156.65, 52.79, 42.10 kg/hm²,各处理磷、钾不足部分分别用过磷酸钙、硫酸钾补足。试验从 2014 年 4 月开始,之后每年的施肥量随杨树林龄的增长而按 10%的递增比例调整。

1.3 测定项目与方法

2016 年 10 月 21 日,在每个小区按“S”型选取 7 点,用土钻法取 0—20 cm 土层土样,重复 3 次,分别混匀后用四分法取出适量土样分成 2 部分,一部分新鲜土样过 2 mm 筛立即进行土壤微生物数量和微生物量碳、氮的测定,一部分土样风干过 1 mm 筛后用于土壤理化性状和总有机碳、活性有机碳的测定。

土壤微生物数量采用稀释平板计数法,细菌、放线菌与真菌的测定分别采用牛肉蛋白胨琼脂培养基、改良高氏 1 号培养基与马丁—孟加拉红培养基;土

壤微生物量碳、氮的测定采用氯仿熏蒸 K_2SO_4 浸提法^[13]。

土壤 pH 值采用电位法测定(水土比 2.5 : 1), 碱解氮、速效磷和速效钾分别采用碱解扩散法、碳酸氢钠—钼锑抗比色法和醋酸铵—火焰光度计法测定, 交换性钙、镁的测定采用醋酸铵溶液提取—原子吸收分光光度法, 总有机碳的测定采用重铬酸钾氧化外加热法^[13-14]。

土壤活性有机碳测定及碳库管理指数计算: 采用 33,167,333 mmol/L $KMnO_4$ 氧化法分别测定土壤样品的高活性、中活性与低活性有机碳含量。以对照处理土壤为参照, 碳库管理指数参照王改玲等^[11]的方法计算。

生长率的计算: 分别在 2014 年 4 月 18 日与 2016 年 10 月 21 日用胸径尺、测高器测定所有试验树木的胸径 d 和树高 h , 用公式 $V=3.14 d^2 hf/4(f=0.42)$ 计算材积; 然后采用普雷斯勒公式^[15] 计算材积平均生长率:

$$P_v = \frac{(v_2 - v_1) \times 200}{(v_2 + v_1) \times n}$$

式中: P_v ——材积平均生长率%; v_1, v_2 ——间隔 n 年前和 n 年后测得的总材积(m^3); n ——2 次测定的间隔年数(a)。

1.4 数据处理

采用 Excel 2013 处理数据并制图, 采用 SPSS

17.0 统计软件进行方差分析和多重比较(least significant difference, LSD 法, $p < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 微生物数量与微生物量碳、氮

从表 1 可见, 杨树人工林土壤中细菌、放线菌与真菌所占微生物总量的比例分别为 73.15%~82.30%, 15.81%~25.19% 与 1.42%~1.89%, 这表明细菌占绝对优势, 其次为放线菌, 而真菌最少。与 CK 相比, 不同施肥处理均显著增加了土壤中细菌数、真菌数和微生物总量, 而对放线菌数未产生显著影响。在各施肥处理中, CM+CF 处理的细菌数、真菌数与微生物总量均最高, 并显著高于其他处理, 其中细菌数分别较 CK, CF 和 CM 处理显著增加 91.60%, 47.68% 和 17.37%; 依次为 CM 处理, 其细菌数、真菌数和微生物总量也显著高于 CF 处理。同时, 不同处理的微生物量碳、氮呈现出基本一致的变化规律, 大小次序为: CM+CF > CM > CF > CK, 且各处理之间均达差异显著水平, 说明牛粪与化肥配施处理对土壤微生物量碳、氮含量的增幅最大, 其中 CM+CF 处理的微生物量碳、氮分别较 CF 处理明显增加 42.20% 和 43.75%。由此可见, 施用牛粪对杨树人工林土壤的微生物数量和微生物量碳、氮含量的增加幅度显著大于单施化肥, 其中牛粪与化肥配施的作用效果更显著。

表 1 不同施肥处理对杨树人工林土壤微生物数量与微生物量碳、氮含量的影响

处理	细菌/ (10^5 CFU · g^{-1})	放线菌/ (10^5 CFU · g^{-1})	真菌/ (10^5 CFU · g^{-1})	微生物总量/ (10^5 CFU · g^{-1})	微生物量碳/ ($mg \cdot kg^{-1}$)	微生物量氮/ ($mg \cdot kg^{-1}$)
CK	21.55 ± 2.18 ^d	7.42 ± 0.59 ^a	0.49 ± 0.05 ^c	29.46 ± 1.02 ^d	432.09 ± 15.38 ^d	26.16 ± 2.56 ^d
CF	27.96 ± 1.65 ^c	7.37 ± 0.33 ^a	0.51 ± 0.05 ^c	35.84 ± 0.95 ^c	498.25 ± 10.81 ^c	35.68 ± 1.64 ^c
CM	35.18 ± 2.83 ^b	7.65 ± 0.46 ^a	0.68 ± 0.07 ^b	43.51 ± 0.69 ^b	612.76 ± 18.25 ^b	42.37 ± 3.09 ^b
CM+CF	41.29 ± 1.75 ^a	7.93 ± 0.53 ^a	0.95 ± 0.09 ^a	50.17 ± 0.82 ^a	708.53 ± 12.06 ^a	51.29 ± 2.12 ^a

注: CK 为对照; CF 为单施化肥; CM 为单施牛粪; CM+CF 为牛粪提供 50% 的氮, 化肥提供 50% 的氮。数据为平均值 ± 标准误, 同一列中不同小写字母表示处理间差异显著 ($p < 0.05$)。下同。

2.2 土壤营养元素

由表 2 可见, 不同施肥处理对杨树人工林土壤的 pH 值产生了显著影响, CM+CF 处理的 pH 值最低, 分别较 CK, CF 和 CM 处理显著下降 0.38, 0.32, 0.14 个单位, 其中 CF, CK 处理间无显著性差异, 而其他处理之间均达差异显著水平。CM+CF 处理的碱解氮、速效磷与速效钾含量均最高, 并显著高于其他处理, 分别较 CF 处理明显高出 27.13%, 29.66% 和 20.09%; 其次是 CM 处理, 亦显著高于 CK, CF 处理。

表明牛粪的施用对土壤中速效养分含量的提升效果显著优于单施化肥。同时, 从表 2 还可知, 各处理对杨树人工林土壤中交换性 Ca 和 Mg 也具有一定影响。同 CK 相比, 不同施肥处理对交换性 Ca 含量的影响较小, 而对交换性 Mg 含量却产生显著影响, 各处理交换性 Mg 含量的大小次序为: CM+CF > CM > CF ≈ CK, CM+CF 处理的交换性 Mg 含量显著高于其他处理。以上分析认为, 牛粪配施化肥对杨树人工林土壤的营养元素含量具有显著的改善效应。

表2 不同施肥处理对杨树人工林土壤营养元素含量的影响

处理	pH 值	碱解氮/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效磷/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	交换性 Ca/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	交换性 Mg/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
CK	8.29±0.04 ^a	21.97±0.85 ^d	16.68±0.35 ^d	49.16±0.76 ^c	12.27±0.21 ^a	0.59±0.05 ^c
CF	8.23±0.03 ^a	23.85±0.42 ^c	18.04±0.54 ^c	52.07±0.98 ^c	12.18±0.39 ^a	0.63±0.03 ^c
CM	8.05±0.03 ^b	25.59±1.06 ^b	21.26±0.49 ^b	56.69±2.01 ^b	12.41±0.35 ^a	0.81±0.02 ^b
CM+CF	7.91±0.02 ^c	30.32±1.29 ^a	23.39±0.67 ^a	62.53±1.79 ^a	12.65±0.27 ^a	0.92±0.03 ^a

2.3 活性有机碳与碳库管理指数

由表3可见,不同处理土壤总有机碳含量的大小次序为:CM>CM+CF>CF≈CK,这说明牛粪的施用相比单施化肥更利于杨树人工林土壤总有机碳的积累。CM+CF处理的低活性有机碳含量显著高于其他处理,CM处理次之,分别较CF处理显著提高29.12%和18.74%,且低活性有机碳占总有机碳的比重分别为32.01%和27.35%。与低活性有机碳相比,中活性和高活性有机碳含量相对较低,波动范围分别为0.98~1.56,0.39~0.71 g/kg。同CF相比,

CM+CF和CM处理的中活性、高活性有机碳含量均显著升高。从表3还可知,CM+CF处理的碳库管理指数最高,并显著高于其他处理,分别比CK,CF和CM处理显著高出52.76,47.16,25.89;依次是CM处理,也明显高于CF处理;而CF处理较CK有下降趋势,但差异未达显著水平。由此可见,牛粪与化肥搭配比单施化肥能显著提高杨树人工林土壤的总有机碳、3种活性有机碳含量与碳库管理指数,这表明配施牛粪既能提高杨树人工林土壤的有机碳数量,还可改善土壤有机碳质量,进而提高土壤的综合生产力。

表3 不同施肥处理对杨树人工林土壤活性有机碳与碳库管理指数的影响

处理	总有机碳/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	低活性有机碳/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	中活性有机碳/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	高活性有机碳/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	碳库管理指数
CK	14.12±0.31 ^c	4.05±0.15 ^d	1.25±0.06 ^b	0.39±0.02 ^c	100.00±0.00 ^c
CF	14.59±0.76 ^c	4.43±0.08 ^c	0.98±0.10 ^c	0.52±0.05 ^b	105.60±2.95 ^c
CM	19.23±0.42 ^a	5.26±0.19 ^b	1.49±0.14 ^a	0.64±0.03 ^a	126.87±5.06 ^b
CM+CF	17.87±0.55 ^b	5.72±0.12 ^a	1.56±0.09 ^a	0.71±0.05 ^a	152.76±3.62 ^a

2.4 材积生长率

连续3a的施肥措施对杨树人工林木的材积生长产生了显著影响。由图1可以看出,不同处理材积平均生长率的大小次序为:CM+CF>CM>CF>CK,且各处理之间的差异均达显著水平,表明各施肥处理较对照均明显促进了林木的生长,其中CM+CF处理的材积平均生长率为45.36%,分别较CK,CF和CM处理显著提高47.13%,27.34%和10.50%;其次为CM处理,其材积平均生长率也显著高于CK和CF处理,分别高出33.15%和15.24%。综合分析认为,牛粪的施入较单施化肥可以显著提高杨树人工林的材积平均生长率,其中牛粪搭配化肥处理的影响效果最佳。

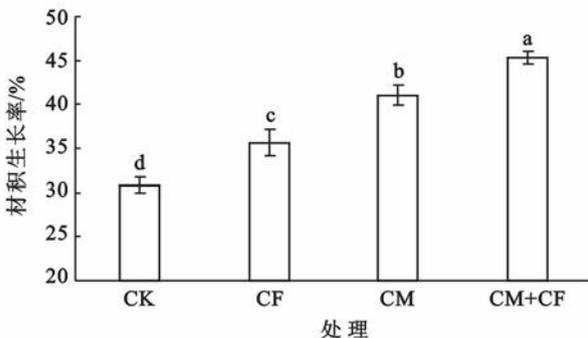


图1 不同施肥处理对杨树人工林材积平均生长率的影响

3 讨论

大量研究认为^[6,9,14,16],施用有机肥或有机-无机配施可提高土壤微生物数量。这一结论在本研究中得到了进一步验证:与对照和单施化肥处理相比,施用牛粪的两个处理使杨树人工林土壤的细菌数、真菌数和微生物总量均显著提高。其原因如下:①人工林土壤中大部分微生物实际上处于营养贫乏状态,而牛粪是一种丰富的有机肥资源,能为微生物提供新能量,使微生物的种群数量发生明显改变;②牛粪自身也会带入大量活的微生物,因此,施入牛粪在某种程度上起到了“接种”的效果^[6]。同时,牛粪处理较单施化肥处理还能显著提高土壤微生物量碳、氮含量,戚瑞敏等^[17]针对潮土进行长期不同施肥的研究也得出了类似的结论。而微生物量碳、氮是土壤养分的源与库,对土壤养分转化、循环起着重要作用^[10]。

本试验研究可知,牛粪的施用改变了杨树人工林土壤的理化性状。首先,施用牛粪使杨树人工林土壤的pH值显著降低。林木根系不仅能提供林木生长所需要的养分、水分,还能通过对养分的直接吸收与对微生物的间接作用来诱导土壤养分组分的改变,并产生根系分泌物^[18]。另有研究发现^[10,18],根系分泌

物中含有一定量的有机酸。牛粪能显著提高土壤中微生物数量,增强微生物活性,进而促进杨树根系的生长发育,可能会诱导根系分泌物中有机酸总量的增加,导致 pH 值的改变,这也许是施入牛粪降低土壤 pH 值的机理之一。同时,施用牛粪还显著提高了土壤速效磷和速效钾含量,这可能与土壤 pH 值的降低能提高磷、钾离子的溶解性有关,这也是土壤养分有效性增加的重要原因之一。

对土壤活性有机碳与碳库管理指数的探究,可以明确土壤管理与施肥的科学性^[14]。本试验研究表明,施用牛粪处理较单施化肥可以明显提高土壤中总有机碳、3 种活性有机碳含量与碳库管理指数,这与张亚杰等^[19]对玉米/大豆套作土壤的研究结果相似。这主要是由于牛粪含有丰富的有机碳,可为土壤提供直接的有机碳源,使土壤有机碳库增加;同时,施入牛粪会促使杨树根系的发育,增强根系活性,并明显扩大了根系的吸收面积^[20],进而能增加进入土壤的根系分泌物与有机残体数量^[14,21],故有助于生成活性有机碳,并提高碳库管理指数。本试验还得出,单施化肥的碳库管理指数相比对照有一定的下降趋势,但未达差异显著水平,这与史康婕等^[22]针对褐土的研究结论不完全一致,可能与土壤理化性状及林木生长特性等因素的差异有关。本试验还发现,在施用牛粪的 2 个处理中,牛粪与化肥配施处理对土壤生物学特性的改善效果明显优于牛粪处理。这可能与牛粪配施化肥有助于协调土壤的 C/N 比,并且化肥又弥补了土壤中消耗的氮,进而更利于改善土壤理化性质有紧密关联。

杨树的生长发育受到诸多因素的影响。本试验表明,牛粪与化肥配施使杨树的材积平均生长率显著高于其他处理,这主要是由于该处理能显著改善土壤生物学性状,增强了土壤的供肥能力,进而改善了根系生长的生态环境条件,故有助于促进杨树人工林木的生长。这也表明采用合理的施肥措施是解决杨树人工林“小老树”问题的有效方法之一。

4 结论

同单施化肥处理相比,牛粪与化肥配施处理不仅能显著提高杨树人工林土壤中细菌数、真菌数、微生物总量和微生物量碳、氮含量,还能明显提高土壤中碱解氮、速效磷、速效钾和交换性 Mg 含量,并显著降低土壤 pH 值。同时,牛粪处理使土壤总有机碳含量达最高值,而牛粪配施化肥处理使土壤的低活性、中活性、高活性有机碳含量和碳库管理指数最高。此外,牛粪配施化肥处理使杨树人工林的材积平均生长

率达到 45.36%,并显著高于其他处理。与牛粪配施化肥处理相比,牛粪处理对土壤和材积的影响效果较小。综上,牛粪与化肥配施有助于改善杨树人工林土壤的生物学性状,有利于促进林木生长。因此,建议在杨树人工林的实际生产中推广应用牛粪与化肥以等氮量配比的施肥措施。

[参 考 文 献]

- [1] Du Zhenyu, Xing Shangjun, Ma Bingyao, et al. Effects of root pruning on the growth and rhizosphere soil characteristics of short-rotation closed-canopy poplar [J]. *Forest Systems*, 2012, 21(2): 236-246.
- [2] 井大炜. 不同栽培措施对欧美 I-107 杨的增长效应及作用机理研究[D]. 山东 泰安: 山东农业大学, 2013.
- [3] 张晶, 张定一, 王丽, 等. 不同有机肥和氮磷组合对旱地小麦的增产机理研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(1): 238-243.
- [4] 王春新, 于鹏, 张玉玲, 等. 氮肥与有机肥配施对设施土壤呼吸的影响[J]. *土壤通报*, 2017, 48(1): 146-154.
- [5] 李猛, 张恩平, 张淑红, 等. 长期不同施肥设施菜地土壤酶活性与微生物碳源利用特征比较[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(1): 44-53.
- [6] 井大炜, 张红, 王明友. 牛粪对西瓜根际土壤微生物多样性及氮素利用率的影响[J]. *核农学报*, 2014, 28(11): 2102-2107.
- [7] 王飞, 林诚, 李清华, 等. 长期不同施肥下黄泥田土壤—水稻碳氮磷生态化学计量学特征[J]. *土壤通报*, 2017, 48(1): 169-176.
- [8] 徐大兵, 邓建强, 彭五星, 等. 施用牛粪和绿肥对土地整治区玉米产量和土壤理化性质的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(3): 856-862.
- [9] 李燕青, 林治安, 温延臣, 等. 不同类型有机肥与化肥配施对小麦品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(6): 1513-1522.
- [10] 井大炜, 王明友, 马海林, 等. 畦灌与保水剂配施对杨树根际土壤微环境特征及生长的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(1): 62-70.
- [11] 王改玲, 李立科, 郝明德. 长期施肥和秸秆覆盖土壤活性有机质及碳库管理指数变化[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(1): 20-26.
- [12] Blair G J, Lefroy R D B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems [J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46: 1459-1466.
- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.

些。研究不同类型的生物炭的理化性质,比较其在土壤中的应用,对于推广生物炭修复和改良土壤具有重要作用。

[参 考 文 献]

- [1] Lehmann J, Joseph S. Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation[M]. London and Newyork: Routledge, 2015.
- [2] Tripathi M, Sahu J N, Ganesan P. Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 55: 467-481.
- [3] 赵建坤,李江舟,杜章留,等.施用生物炭对土壤物理性质影响的研究进展[J].气象与环境学报,2016,32(6): 95-101.
- [4] 许燕萍,谢祖彬,朱建国,等.制炭温度对玉米和小麦生物质炭理化性质的影响[J].土壤,2013,45(1):73-78.
- [5] 王煌平,张青,李昱,等.热解温度对畜禽粪便生物炭产率及理化特性的影响[J].农业环境科学学报,2015,34(11):2208-2214.
- [6] 李蜜.水生植物基生物炭的酸碱性、碱(土)金属浸出性及对 Cu(II) 的吸附效应[D].上海:上海大学,2014.
- [7] Chen Yan, Shinogi Y, Taira M. Influence of biochar use on sugarcane growth, soil parameters, and groundwater quality[J]. Soil Research, 2010, 48(7): 526-530.
- [8] Piccolo A, Pietramellara G, Mbagwu J S C. Effects of coal derived humic substances on water retention and structural stability of Mediterranean soils[J]. Soil Use and Management, 1996, 12(4): 209-213.
- [9] 齐瑞鹏,张磊,颜永毫,等.定容重条件下生物炭对半干旱区土壤水分入渗特征的影响[J].应用生态学报,2014,25(8):2281-2288.
- [10] 孙红文,张彦峰,张闻.生物炭与环境[M].北京:化学工业出版社,2013.
- [11] Xu Yiliang, Chen Baoliang. Investigation of thermodynamic parameters in the pyrolysis conversion of biomass and manure to biochars using thermogravimetric analysis[J]. Bioresource Technology, 2013, 146(10): 485-493.
- [12] 国家质量技术监督局. GB/T12496.7-1999 木质活性炭试验方法: pH 值的测定[S].北京:中国标准出版社,1999.
- [13] 国家质量技术监督局. GB/T30202.1-2013 脱硫脱硝用煤质颗粒活性炭试验方法第 1 部分:堆积密度[S].北京:中国标准出版社,2013.
- [14] 王爽.海藻生物质热解与燃烧的试验与机理研究[D].上海:上海交通大学,2010.
- [15] Cheng C H, Lehmann J, Thies J E, et al. Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes[J]. Organic Geochemistry, 2006, 37(11): 1477-1488.
- [16] 吴伟祥,孙雪,董达,等.生物质炭土壤环境效应[M].北京:科学出版社,2015.
- [17] 吴志丹,尤志明,江福英,等.不同温度和时间碳化茶树枝生物炭理化特征分析[J].生态与农村环境学报,2015,31(4):583-588.
- [18] Glaser B, Haumaier L, Guggenberger G, et al. The 'Terra Preta' phenomenon: A model for sustainable agriculture in the humid tropics[J]. The Science of Nature, 2001, 88(1): 37-41.
- [14] 井大炜,王明友,张红,等.鸡粪对芸豆土壤有机碳氧化稳定性与碳库管理指数的影响[J].农业机械学报,2016,47(8):192-200.
- [15] 孟宪宇.测树学[M].北京:中国林业出版社,1996:158-204.
- [16] 井大炜,邢尚军,刘方春,等.畦灌配施保水剂改善杨树林下土壤物理性状提高微生物活性[J].农业工程学报,2015,31(14):116-122.
- [17] 戚瑞敏,赵秉强,李娟,等.添加牛粪对长期不同施肥潮土有机碳矿化的影响及激发效应[J].农业工程学报,2016,32(S2):118-127.
- [18] 井大炜,邢尚军,刘方春,等.保水剂施用方式对侧柏根际微生态环境的影响[J].农业机械学报,2016,47(5): 146-154.
- [19] 张亚杰,钱慧慧,刘坤平,等.施肥对玉米/大豆套作土壤活性有机碳组分及碳库管理指数的影响[J].华南农业大学学报,2016,37(3):29-36.
- [20] 刘晓.配施鸡粪对杨树苗根系形态和根际土壤微环境特征的影响[J].水土保持通报,2014,34(5):80-84.
- [21] 井大炜,邢尚军,刘方春,等.保水剂—尿素凝胶对侧柏裸根苗细根生长和氮素利用率的影响[J].应用生态学报,2016,27(4):1046-1052.
- [22] 史康婕,周怀平,杨振兴,等.长期施肥下褐土易氧化有机碳及有机碳库的变化特征[J].中国生态农业学报,2017,25(4):542-552.

(上接第 62 页)