

配施味精废浆促进杨树生长提高土壤活性有机碳及碳库管理指数

井大炜^{1,2}, 邢尚军^{2*}, 刘方春², 马海林²,
杜振宇², 马丙尧², 于学斗¹, 朱亚萍¹

(1. 德州学院, 德州 253023; 2. 山东省林业科学研究院, 济南 250014)

摘要:为探讨味精废浆改良林地土壤的生物学效应以及确定化肥与味精废浆配施的合适比例,以欧美 1-107 杨为试材,通过连续 4 a 的大田试验,研究了 CK (对照,不施肥)、N₁₀₀ (尿素提供 100%的氮)、M₁₀N₉₀ (味精废浆和尿素分别提供 10%与 90%的氮)、M₃₀N₇₀ (味精废浆和尿素分别提供 30%与 70%的氮)与 M₅₀N₅₀ (味精废浆和尿素各提供 50%的氮)等处理对杨树林地土壤总有机碳、活性有机碳组分与其有效率、碳库管理指数 (carbon pool management index, CPMI) 及林木生长的影响。结果表明:同 N₁₀₀ 处理相比, M₁₀N₉₀、M₃₀N₇₀ 和 M₅₀N₅₀ 处理的总有机碳含量均显著升高,其中 M₅₀N₅₀ 处理明显高于其他处理; M₃₀N₇₀ 处理的活性有机碳 (active organic carbon, AOC)、可溶性有机碳 (dissolved organic carbon, DOC)、微生物量碳 (microbial biomass carbon, MBC) 含量及其有效率均达最高值,其中 AOC 质量分数分别较 CK、N₁₀₀、M₁₀N₉₀ 和 M₅₀N₅₀ 处理显著高出 43.58%、59.35%、20.71%和 9.65%, DOC 质量分数分别显著高出 62.71%、52.38%、28.00%和 14.29%;同时, M₃₀N₇₀ 处理的 CPMI 达到 192.56, 分别比 N₁₀₀、M₁₀N₉₀ 和 M₅₀N₅₀ 处理明显提高 89.45、43.58 和 30.86。此外, M₃₀N₇₀ 处理的胸径、树高和材积平均增长率分别为 23.40%、21.62%和 45.05%, 亦明显高于其他处理。与 M₃₀N₇₀ 处理相比, M₁₀N₉₀ 和 M₅₀N₅₀ 处理对林地土壤活性有机碳各组分、CPMI 和林木增长率的作用效果较小。相关性分析表明,材积增长率与 AOC、AOC 有效率、DOC、MBC 和 CPMI 存在极显著相关关系 ($P<0.01$)。可见,味精废浆与化肥以 3:7 比例配施能提高杨树林地土壤活性有机碳含量和碳库管理指数,有利于改善土壤质量、提高土壤肥力,并促进林木生长,从而为味精废浆在林业上的高效利用提供理论依据。

关键词:土壤; 有机碳; 肥料; 杨树; 味精废浆; 活性有机碳; 碳库管理指数

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.z1.018

中图分类号: S714

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-Supp.1-0124-08

井大炜, 邢尚军, 刘方春, 马海林, 杜振宇, 马丙尧, 于学斗, 朱亚萍. 配施味精废浆促进杨树生长提高土壤活性有机碳及碳库管理指数[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊 1): 124—131. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.z1.018

http://www.tcsae.org

Jing Dawei, Xing Shangjun, Liu Fangchun, Ma Hailin, Du Zhenyu, Ma Bingyao, Yu Xuedou, Zhu Yaping. Applied monosodium glutamate wastewater promoting poplar growth, improving soil active organic carbon and carbon pool management index[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(Supp.1): 124—131. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.z1.018 http://www.tcsae.org

0 引言

林地施肥通过直接或间接的方式调控土壤有机质的输入,能在一定程度上影响土壤有机碳的积累及矿化^[1]。可见,在施肥条件下研究土壤有机碳的变化规律,对于指导实现土壤有机碳库的正向培育有很重要的意义。但因为背景和自然水平的变异,土壤有机碳一般在较短时间内的细微变化很难被发觉,占土壤有机碳比例较小且周转速度较快的部分称作活性有机碳,可作为有机碳库变化的更敏感指标^[2]。活性有机碳组成以易氧化有机碳、

可溶性有机碳和微生物量碳为主^[3],这部分有机碳与土壤速效养分、物理性状关系密切^[4],可更好地指示土壤质量^[5],且对施肥措施的反应更为迅速^[6]。同时,也有研究发现^[7],土壤活性有机碳有效率、可溶性有机碳有效率与微生物熵等作为土壤碳库质量的敏感因子,亦可以较好地指示土壤有机碳活性和碳素有效性。此外,土壤碳库管理指数 (carbon pool management index, CPMI) 由于综合了人为影响下土壤碳库、碳库活度指标,且可反映外界条件对土壤活性有机碳及总有机碳含量的影响,能够相对全面地反映外界管理措施对土壤碳库中各组分在质、量上的变化,进而反映土壤质量的更新或下降程度^[7]。由此可知,探究某一项培肥措施对土壤活性有机碳组分与 CPMI 的作用效果,对于评价该项措施对土壤肥力的提升效应具有重要指导意义。

中国是味精生产大国,每年产生约 $10\,009\times 10^4$ t 的味精废浆^[8],直接排放会严重污染环境^[9]。目前常用的处理方法由于操作复杂、技术性强,且成本高,很难实现循环再利用。而味精废浆的浓度大,全氮、有机物含量高,

收稿日期: 2015-07-17 修订日期: 2015-12-01

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31500513); 山东省农业重大应用技术创新课题“杨树超高产栽培关键技术研究”; 山东省科技发展计划项目“山东省干旱瘠薄山地集雨造林关键技术研究”(2010GSF10621); 德州学院科技人才引进项目 (311890)。

作者简介: 井大炜,男,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。德州 德州学院,253023。Email: jingdawei009@163.com

*通信作者: 邢尚军,男,山东莱芜人,研究员,主要从事植物营养与土壤肥料研究。济南 山东省林业科学研究院,250014。Email: xingsj-126@126.com

并含有磷和钾等元素, 同时亦含有丰富的游离氨基酸、蛋白质及部分微量元素^[9]。有研究发现, 味精废浆中核酸的水解产物可以作为植物生长素, 不仅能明显促进食用菌、玉米、水稻、茶叶的增产和果实早熟^[8], 还能显著阻碍土壤致病菌的生长及改善土壤生境^[10]。还有研究得出^[11-12], 味精废浆的施用可以促进西瓜与白菜的生长, 并能明显改善品质。因此, 若将味精废浆进行合理加工利用当作农业生产的新型肥料, 则可以变废为宝, 既能缓解环境的压力, 还可为农业生产提供新肥源, 这对于提升农作物的种植效益有重要的实际意义, 同时也将有力的推动味精的生产企业与农业可持续发展, 可谓一举两得^[11]。可以推测, 味精废浆在林业上亦有广阔的应用前景。目前国内外学者关于有机肥对土壤活性有机碳和 CPMI 方面的研究已做了大量工作, 但大多数集中在水稻^[1,5]、玉米^[13]、小麦^[14]等农作物生长的农田土壤上, 而关于林地土壤上的应用研究则相对较少, 尤其针对味精废浆与化肥以不同配施方式对杨树林地土壤活性有机碳与 CPMI 的研究尚罕见报道。而施肥是影响土壤有机碳与活性有机碳的主要因素, 并与碳质量密切相关^[15]。所以, 开展这方面的研究对于评价味精废浆循环利用效应、人工林地土壤优化管理措施及农林业可持续发展具有重要的理论意义和实践价值。鉴于此, 本文在等养分条件下, 通过 4 a 大田试验研究了味精废浆与化肥以不同的搭配比例对杨树林地土壤活性有机碳(易氧化有机碳、可溶性有机碳和微生物量碳)及碳库管理指数的影响, 旨在为提高土壤质量管理与味精废浆的高效利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点和供试材料

试验地点设置在山东省济南市北郊林场(36°40'N, 117°00'E), 于 1956 年 5 月 3 日建场, 占地面积为 872 hm², 四季分明, 日照充分, 年平均气温和降雨量分别为 14℃ 和 650~700 mm。供试土壤为潮土, 土壤速效 N、P 和 K 质量分数分别为 19.28、14.57 和 43.86 mg/kg。有机肥是利用味精行业所产生的废浆制成颗粒肥料(有机质质量分数 23.28%, 全氮 7.48%, 全磷 1.06%, 全钾 0.09%, pH 值 6.62), 由山东信乐味精有限公司提供, 距离北郊林场约 80 km。

所用化肥是尿素(N 质量分数 46%)、过磷酸钙(P₂O₅ 质量分数 12%)与氯化钾(K₂O 质量分数 60%)。杨树是 3 a 生欧美 I-107 杨人工林, 株行距为 2.5 m×5 m, 南北行向, 林木生长基本一致, 平均树高、胸径分别为 8.56 m、7.48 cm。

1.2 试验设计

采用田间试验, 随机区组设计, 共设 5 个处理: ①CK, 不施肥; ②N₁₀₀, 尿素提供 100%的氮; ③M₁₀N₉₀, 味精废浆有机肥与尿素分别提供 10%与 90%的氮; ④M₃₀N₇₀, 味精废浆有机肥与尿素分别提供 30%与 70%的氮; ⑤M₅₀N₅₀, 味精废浆有机肥与尿素各提供 50%的氮。重复 3 次, 每个小区 30 棵树(分为 3 行, 每行 10 棵树), 面积为 375 m²。

在距离树干 60 cm 处挖深 30 cm 和长 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、P₂O₅ 和 K₂O 含量相当于 154.85、52.68 和 41.95 kg/hm², 各处理磷和钾不足部分分别由过磷酸钙与氯化钾补足。试验于 2011 年 4 月开始, 之后每年的施肥量随杨树林龄的增大而按照 10%的递增比例进行调整。

1.3 测定项目和方法

2014 年 10 月 19 日, 在各个小区按“S”型选取 7 点, 在距树干 60 cm 处分别用土钻法采集 0~30 cm 土层土样, 3 次重复, 混合均匀后分别用四分法取出适量土样并分成两份, 其中一份新鲜土样过 2 mm 筛立即测定土壤可溶性有机碳和微生物量碳, 另一份土样风干后过 1 mm 筛用于土壤总有机碳与活性有机碳的测定。以试验开始前未经处理的土样作为参考土壤, 其总有机碳和活性有机碳的质量分数分别为 14.29 和 4.06 g/kg。

土壤总有机碳(soil total organic carbon, TOC)采用重铬酸钾氧化外加加热法进行测定; 活性有机碳(active organic carbon, AOC)采用 333 mmol/L KMnO₄ 氧化法测定^[13]; 非活性有机碳含量是总有机碳与活性有机碳含量之差; 可溶性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)的测定采用水提取、过滤方法^[16]; 微生物量碳(microbial biomass carbon, MBC)的测定采用氯仿熏蒸-K₂SO₄ 提取法。

土壤碳库管理指数的计算方法^[13]如下所示

$$\text{碳库指数} = \frac{\text{样品有机碳含量}}{\text{参考土壤有机碳含量}}, \quad (1)$$

$$\text{碳库活性} = \frac{\text{活性有机碳含量}}{\text{非活性有机碳含量}}, \quad (2)$$

$$\text{碳库活性指数} = \frac{\text{样品碳库活性}}{\text{参考土壤碳库活性}}, \quad (3)$$

$$\text{碳库管理指数} = \frac{\text{碳库指数}}{\text{碳库活性指数}} \times 100, \quad (4)$$

$$\text{碳素有效度 A} = \frac{\text{活性有机碳含量}}{\text{土壤有机碳含量}} \times 100\%, \quad (5)$$

$$\text{碳素有效度 B} = \frac{\text{可溶性有机碳含量}}{\text{土壤有机碳含量}} \times 100\%, \quad (6)$$

$$\text{微生物熵} = \frac{\text{微生物量碳含量}}{\text{土壤有机碳含量}} \times 100\%。 \quad (7)$$

生长率计算。分别于 2011 年 4 月 22 日与 2014 年 10 月 19 日用测高器、胸径尺测定所有试验林木的树高 h 与胸径 d , 并用公式 $V=3.14d^2 \cdot h \cdot f/4$, $f=0.42$ 计算材积^[17]; 然后采用普雷斯勒公式^[18]计算树高、胸径与材积平均生长率

$$P_h = \frac{(h_2 - h_1) \times 200}{(h_2 + h_1) \cdot n}, \quad (8)$$

$$P_d = \frac{(d_2 - d_1) \times 200}{(d_2 + d_1) \cdot n}, \quad (9)$$

$$P_v = \frac{(v_2 - v_1) \times 200}{(v_2 + v_1) \cdot n}。 \quad (10)$$

式中 P_h 、 P_d 和 P_v 分别表示树高平均生长率, %、胸径平均生长率, %、材积平均生长率, %; h_1 和 h_2 分别表示间隔 n 年前和 n 年后测得的树高, m; d_1 和 d_2 分别表示间隔 n 年前和 n 年后测得的胸径, m; v_1 和 v_2 分别表示间隔 n 年前与 n 年后测得的总材积, m^3 ; n 为两次测定的间隔年数。

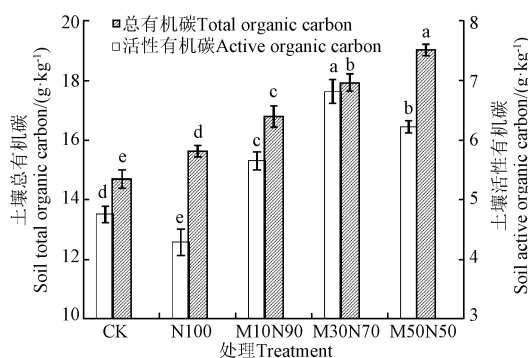
1.4 数据处理

采用 Excel 2013 处理数据并制图, 采用 SPSS 19.0 数据统计软件进行方差分析与多重比较(least significant difference, LSD, $P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 总有机碳和活性有机碳

由图 1 可知, 同对照相比, 不同施肥措施均显著提高杨树林地土壤总有机碳含量。在各个施肥处理中, 味精废浆与化肥配施处理的总有机碳含量显著高于单施化肥处理; 而在 3 个配施处理中, $M_{50}N_{50}$ 处理的总有机碳含量最高, 依次是 $M_{30}N_{70}$ 和 $M_{10}N_{90}$ 处理, 分别较 N_{100} 处理明显高出 21.69%、14.72% 和 7.42%; 其中 $M_{50}N_{50}$ 处理分别较 $M_{10}N_{90}$ 和 $M_{30}N_{70}$ 处理显著提高 13.28% 和 6.08%。可见, 随味精废浆有机肥所占比例的增加, 林地土壤的总有机碳含量亦呈现出逐渐递增的趋势。



注: CK、 N_{100} 、 $M_{10}N_{90}$ 、 $M_{30}N_{70}$ 、 $M_{50}N_{50}$ 分别表示不施肥、尿素提供 100% 的氮、味精废浆和尿素分别提供 10% 和 90% 的氮、味精废浆和尿素分别提供 30% 和 70% 的氮、味精废浆和尿素各提供 50% 的氮, 不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

Note: CK, N_{100} , $M_{10}N_{90}$, $M_{30}N_{70}$, $M_{50}N_{50}$ respectively meant neither urea nor monosodium glutamate wastewater was applied, 100% of nitrogen was provided by urea, 10% and 90% of nitrogen was provided by monosodium glutamate wastewater and urea, respectively, 30% and 70% of nitrogen was provided by monosodium glutamate wastewater and urea, respectively, 50% and 50% of nitrogen was provided by monosodium glutamate wastewater and urea, respectively. Different letters mean significantly different ($P < 0.05$). Same as below.

图 1 味精废浆和化肥配施对土壤总有机碳与活性有机碳含量影响

Fig.1 Effects of monosodium glutamate wastewater co-applied with inorganic fertilizer on total organic carbon and active organic carbon contents in soil

从图 1 还可知, 味精废浆和化肥配施处理较对照可明显提高土壤活性有机碳含量, 而单施化肥处理则显著降低。在配施味精废浆处理中, $M_{30}N_{70}$ 处理活性有机碳的质量分数最高, 分别比 CK、 N_{100} 、 $M_{10}N_{90}$ 和 $M_{50}N_{50}$ 处理显著高出 43.58%、59.35%、20.71% 和 9.65%。由此可见, 杨树林地土壤的活性有机碳含量随味精废浆所占比例的增加而呈先升后降的趋势。

2.2 土壤碳素有效率

由表 1 可知, 同 CK 相比, N_{100} 处理的 AOC 有效率显著降低, $M_{30}N_{70}$ 处理的 AOC 有效率则明显升高并达最高值, 而 $M_{10}N_{90}$ 、 $M_{50}N_{50}$ 处理与 CK 无显著性差异。 $M_{30}N_{70}$ 处理的 DOC 与 MBC 含量明显高于其他处理, 其中 DOC 质量分数分别比 CK、 N_{100} 、 $M_{10}N_{90}$ 与 $M_{50}N_{50}$ 处理提高 62.71%、52.38%、28.00% 和 14.29%, MBC 质量分数分别提高 177.78%、134.38%、53.06% 和 29.31%; 其次是 $M_{10}N_{90}$ 与 $M_{50}N_{50}$ 处理, 也显著高于 CK 与 N_{100} 处理, 而 N_{100} 处理的 MBC 含量明显高于 CK, 但 DOC 含量与 CK 差异不显著。此外, 同 CK 和 N_{100} 处理相比, $M_{10}N_{90}$ 、 $M_{30}N_{70}$ 和 $M_{50}N_{50}$ 处理的 DOC 有效率和微生物熵均明显升高, 其中 $M_{30}N_{70}$ 处理的 DOC 有效率和微生物熵亦显著高于其他处理, 而 $M_{10}N_{90}$ 与 $M_{50}N_{50}$ 处理间差异未达显著水平。数据表明, 对杨树连续 4 年实施味精废浆有机肥与化肥配施处理可明显引起林地土壤活性有机碳及其有效率的变化, 其中味精废浆和化肥以 3:7 比例配施的效果最突出, 表明有机肥与化肥的搭配比例为关键因素。

表 1 味精废浆和化肥配施对土壤有机碳活性组分及其有效率影响

Table 1 Effects of monosodium glutamate wastewater co-applied with inorganic fertilizer on active components of soil organic carbon and its efficiency

处理 Treatment	AOC 有效率 AOC efficiency/%	可溶性有机 碳 DOC/ (g·kg ⁻¹)	DOC 有效率 DOC efficiency/%	微生物量碳 MBC/ (g·kg ⁻¹)	微生物熵 Microbial quotient/%
CK	32.36±0.84b	0.59±0.02d	4.02±0.22c	0.27±0.02e	1.84±0.09d
N_{100}	27.38±0.39c	0.63±0.03d	4.03±0.18c	0.32±0.02d	2.05±0.10c
$M_{10}N_{90}$	33.65±0.55b	0.75±0.04c	4.47±0.16b	0.49±0.03c	2.92±0.32b
$M_{30}N_{70}$	38.04±0.42a	0.96±0.04a	5.35±0.29a	0.75±0.08a	4.18±0.56a
$M_{50}N_{50}$	32.70±0.57b	0.84±0.03b	4.42±0.14b	0.58±0.05b	3.05±0.25b

注: 数据为平均值±标准差, 同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$); CK、 N_{100} 、 $M_{10}N_{90}$ 、 $M_{30}N_{70}$ 、 $M_{50}N_{50}$ 分别表示不施肥、尿素提供 100% 的氮、味精废浆和尿素分别提供 10% 和 90% 的氮、味精废浆和尿素分别提供 30% 和 70% 的氮、味精废浆和尿素各提供 50% 的氮, 下同。

Note: Data representation for average value± standard deviations. Column values not followed by the same letters are significantly different ($P < 0.05$); CK, N_{100} , $M_{10}N_{90}$, $M_{30}N_{70}$, $M_{50}N_{50}$ respectively meant neither urea nor monosodium glutamate wastewater was applied, 100% of nitrogen was provided by urea, 10% and 90% of nitrogen was provided by monosodium glutamate wastewater and urea, respectively, 30% and 70% of nitrogen was provided by monosodium glutamate wastewater and urea, respectively, 50% and 50% of nitrogen was provided by monosodium glutamate wastewater and urea, respectively, the same below.

2.3 碳库管理指数

表 2 中 CKT 代表参考土壤, 是试验开始前未经处理的土样混匀后的测定结果。可以得出, 各施肥处理相比对照均显著提高了林地土壤的非活性有机碳含量, 其中 $M_{50}N_{50}$ 处理显著高于其他处理, 而其他 3 个施肥处理间无显著性差异。表 2 还可知, 各处理的碳库指数 (CPI) 与总有机碳含量呈现出基本一致的变化规律。 $M_{30}N_{70}$ 处理的碳库活度 (A)、碳库活度指数 (AI) 与 CPMI 均明显高于其他处理, 其中 CPMI 分别较 N_{100} 、 $M_{10}N_{90}$ 与 $M_{50}N_{50}$ 处理显著高出 89.45、43.58 和 30.86; $M_{10}N_{90}$ 和 $M_{50}N_{50}$ 处理的 CPMI 也明显高于 CK 和 N_{100} 处理, 而 A、AI 与 CK 差异不显著, 但仍明显高于 N_{100} 处理。此外,

M₅₀N₅₀ 处理的 CPMI 明显高于 M₁₀N₉₀ 处理, 而 A、AI 与 M₁₀N₉₀ 处理差异未达显著水平。以上分析认为, 单施化肥较对照明显降低了杨树林地土壤的碳库管理指数, 而配施味精废浆有机肥则可显著提高碳库管理指数, 其中 3:7 比例搭配的提高幅度最大。

表 2 味精废浆和化肥配施对土壤碳库管理指数影响
Table 2 Effects of monosodium glutamate wastewater co-applied with inorganic fertilizer on soil carbon pool management index

处理 Treatment	非活性 有机碳 Non-active organic carbon (NAOC)/ (g·kg ⁻¹)	碳库指数 Carbon pool index(CPI)	碳库活度 Carbon pool activity(A)	碳库活度 指数 Carbon pool activity index (AI)	碳库管理 指数 Carbon pool management index(CPMI)
CKT	10.23±0.27c	1.00±0.00e	0.40±0.03c	1.00±0.00c	100.00±0.00e
CK	9.93±0.31c	1.03±0.02e	0.48±0.03b	1.20±0.05b	122.85±8.05d
N ₁₀₀	11.35±0.19b	1.09±0.03d	0.38±0.06c	0.94±0.16c	103.11±5.48e
M ₁₀ N ₉₀	11.14±0.34b	1.17±0.03c	0.51±0.02b	1.27±0.08b	148.98±6.55c
M ₃₀ N ₇₀	11.11±0.23b	1.25±0.04b	0.61±0.05a	1.53±0.12a	192.56±9.82a
M ₅₀ N ₅₀	12.80±0.49a	1.33±0.02a	0.49±0.02b	1.21±0.07b	161.70±8.96b

表 3 味精废浆和化肥配施对杨树胸径、树高与材积平均生长率影响
Table 3 Effects of monosodium glutamate wastewater co-applied with inorganic fertilizer on the average growth rates of DBH, tree height and volume

处理 Treatment	胸径 Diameter at breast height(DBH)/cm		树高 Tree height/m		材积 Volume/m ³		胸径生长率 DBH growth rate/%	树高生长率 Tree height growht rate/%	材积生长率 Volume growth rate/%
	2011 年 4 月 April 2011	2014 年 10 月 October 2014	2011 年 4 月 April 2011	2014 年 10 月 October 2014	2011 年 4 月 April 2011	2014 年 10 月 October 2014			
CK	7.36a	14.58d	8.43a	15.31d	0.015a	0.107d	16.45±0.72d	14.49±0.65d	37.70±1.08d
N ₁₀₀	7.52a	16.59c	8.57a	17.39c	0.016a	0.158c	18.81±0.20c	16.99±0.52c	40.81±0.45c
M ₁₀ N ₉₀	7.49a	17.61b	8.41a	17.92c	0.016a	0.183b	20.16±0.89b	18.06±0.47b	42.17±0.50b
M ₃₀ N ₇₀	7.38a	20.36a	8.65a	21.83a	0.016a	0.298a	23.40±0.75a	21.62±0.54a	45.05±0.93a
M ₅₀ N ₅₀	7.65a	18.54b	8.72a	19.21b	0.017a	0.218b	20.79±0.38b	18.78±0.61b	42.83±0.79b

2.5 相关性分析

味精废浆有机肥和化肥配施对杨树林地土壤活性有机碳、碳库管理指数及材积生长之间的相关关系(表 4)说明, 土壤总有机碳和活性有机碳库各指标及其有效率的相关性均不紧密, 而活性有机碳与可溶性有机碳、微生物量碳极显著正相关, 表明活性有机碳组分间存在转化关系; 碳库管理指数和活性有机碳、活性有机碳有效率、可溶性有机碳、微生物量碳达极显著相关关系, 与可溶性有机碳有效率、微生物熵显著正相关, 说明土壤活性有机碳各组分及其有效率的提高, 有助于提高土壤质量; 材积生长率与活性有机碳、活性有机碳有效率、可溶性有机碳、微生物量碳、碳库管理指数存在极显著相关关系, 而和总有机碳无显著相关性, 这说明活性有机碳各组分和林木材积生长、碳库管理指数的关系更为密切。以上指标间相关性可见, 林地土壤活性有机碳、碳库管理指数及林木生长之间是相互影响、相互制约的, 也说明杨树对味精废浆有机肥的响应是多种生物学过程综合作用的结果。

2.4 胸径、树高与材积生长率

连续 4 a 的施肥措施对杨树林木的胸径、树高与材积生长产生了明显的影响。由表 3 可见, 各处理胸径、树高和材积平均生长率呈现出一致的变化规律, 其大小次序均为: M₃₀N₇₀>M₅₀N₅₀≈M₁₀N₉₀>N₁₀₀>CK, 其中 M₃₀N₇₀ 处理的胸径、树高与材积平均生长率分别达到 23.40%、21.62%和 45.05%, 并明显高于其他处理, 其中胸径平均生长率分别较 CK、N₁₀₀、M₁₀N₉₀ 与 M₅₀N₅₀ 处理显著高出 42.21%、24.40%、16.08%和 12.55%, 树高平均生长率分别提高 49.20%、27.27%、19.72%和 15.13%, 而材积平均生长率分别高出 19.51%、10.40%、6.82%和 5.19%; M₁₀N₉₀ 与 M₅₀N₅₀ 处理的胸径、树高和材积平均生长率间均无显著性差异, 但均明显高于 CK 和 N₁₀₀ 处理; 而 N₁₀₀ 处理的平均生长率亦显著高于 CK。综合分析可知, 味精废浆与化肥配施处理较单施化肥能显著提高杨树林木的胸径、树高和材积平均生长率, 而在配施味精废浆的 3 个处理中, 随味精废浆有机肥所占比例的增加, 其平均生长率先升高后降低的变化趋势。

表 4 土壤活性有机碳库各指标间的相关性
Table 4 Correlation between indices of active organic carbon pool in soil

指标 Index	TOC	AOC	AOC efficiency	DOC	DOC efficiency	MBC	Mq	CPMI
AOC	0.792							
AOC efficiency	0.499	0.878*						
DOC	0.803	0.964**	0.786					
DOC efficiency	0.635	0.869*	0.880*	0.933**				
MBC	0.591	0.962**	0.755	0.992**	0.856*			
Mq	0.608	0.877*	0.859*	0.868*	0.893*	0.981**		
CPMI	0.727	0.989**	0.963**	0.952**	0.855*	0.967**	0.884*	
VGR	0.689	0.923**	0.938**	0.929**	0.861*	0.946**	0.875*	0.957**

注: *表示显著性相关(P<0.05), **表示极显著性相关(P<0.01)。TOC 为土壤总有机碳; AOC 为活性有机碳; AOC efficiency 为活性有机碳有效率; DOC 为可溶性有机碳; DOC efficiency 为可溶性有机碳有效率; MBC 为微生物量碳; Mq 为微生物熵; CPMI 为碳库管理指数; VGR 为材积生长率。
Note: *Correlation is significant at the 0.05 level. **Correlation is significant at the 0.01 level; TOC is soil total organic carbon; AOC is active organic carbon; AOC efficiency is active organic carbon efficiency; DOC is dissolved organic carbon; DOC efficiency is dissolved organic carbon efficiency; MBC is microbial biomass carbon; Mq is microbial quotient; CPMI is carbon pool management index; VGR is volume growth rate.

3 讨 论

3.1 味精废浆对林地土壤活性有机碳组分的影响

土壤活性有机碳是指在土壤中有效性较高、移动速度快且易被分解矿化的有机碳组分,对植物养分供应具有最直接的作用,可直接参与土壤化学反应并调节土壤碳素的转化,是土壤养分的驱动力^[19-21]。本试验结果表明,味精废浆有机肥与化肥配施较对照和单施化肥显著提高了杨树林地土壤的总有机碳与活性有机碳含量,且不同处理之间活性有机碳的波动幅度显著高于总有机碳,表明土壤活性有机碳对于土壤的施肥措施反应更敏感,也验证了总有机碳含量仅仅是合成固定与分解矿化间的动态平衡结果,并不能很好反映土壤有机碳的质量^[22],这与许多学者的研究结论一致^[23-24]。此外,国外有学者研究认为,对于热带土壤而言,333 mmol/L KMnO_4 浓度太高,使活性碳比例偏高,无法监测其土壤活性有机碳的变化,活性碳对不同农作系统亦不敏感^[25];并提出采用 0.02 mol/L KMnO_4 +0.1 mol/L CaCl_2 溶液的方法,其中 CaCl_2 溶液可澄清提取液以便于分析,它与土壤生物性质如呼吸、微生物量及团聚体紧密相关^[26]。而中国以温带土壤为主,活性有机碳的测定仍然以 333 mmol/L KMnO_4 最为常见^[5,13,27]。这表明针对不同区域的土壤特性,应选择各自适宜的测定方法。

土壤活性有机碳、可溶性有机碳和微生物量碳与总有机碳相比能更客观地反映土壤质量及肥力状况^[28],同时活性有机碳组分和输入到土壤中有机碳源的生物有效性密切相关^[29]。本研究中,配施味精废浆处理较单施化肥明显提高了林地土壤活性有机碳、可溶性有机碳与微生物量碳含量,这与何翠翠等^[13]在农田上的研究结果基本一致,这主要与味精废浆有机肥的含氮量较高、碳氮比较小,在土壤中较易被矿化分解有关。本研究还得出,在味精废浆与化肥的 3 个比例配施中,3:7 比例搭配对活性有机碳组分含量的提高幅度明显大于 1:9 和 5:5 比例。这可能是由于 3:7 比例配施不仅补充输入了有机碳源,而且能较好地调节土壤 C/N 比^[9,30],有利于改善土壤理化性状和刺激杨树根系的生长发育^[31],增强根系的摄取养分能力,使根系脱落物与分泌物增多,并且推动土壤微生物的快速繁殖^[32],从而为有机碳活性组分含量的升高创造了良好的条件。土壤可溶性有机碳为土壤微生物的关键能源,可溶性有机物中约有 10%~40% 的组分可以被微生物直接分解利用^[33-34]。本试验结果显示,各个处理的可溶性有机碳和微生物量碳含量呈基本一致的变化规律。主要是由于采集土样时间在杨树年生长进程的末期,此时土壤微生物逐渐利用难分解的有机物质,能产生可溶性有机物,使得土壤中可溶性有机碳含量呈增加趋势^[35]。此外,也有学者认为^[7],土壤活性有机碳有效率、可溶性有机碳有效率与微生物熵亦能更好的指示土壤碳素有效性及有机碳活性。本试验也得出类似的研究结论,而且相关性分析也表明,杨树的材积生长率与土壤活性有机碳组分及其有效率均达到显著或极显著相关关系,这进一步印证了土壤活性有机碳组分含量与其

有效率能有效指示农林业管理措施的生产效应。

3.2 味精废浆对林地土壤碳库管理指数的影响

Blair 等提出了土壤碳库管理指数 (CPMI),由于该指标和土壤物理性质、速效养分及施肥措施息息相关,从而成为土壤质量与管理的重要评价指标^[14,36]。有研究认为^[37],CPMI 升高说明土壤肥力上升,反之则说明土壤肥力下降。本试验得出,配施味精废浆处理较对照显著提高了林地土壤的 CPMI,而单施化肥处理的 CPMI 却明显低于对照。可能因为单施化肥措施能提高土壤中难氧化态有机碳的含量,故易造成土壤有机碳的老化^[38]。同时从相关性分析可知,CPMI 与活性有机碳、可溶性有机碳和微生物量碳存在极显著正相关关系。这表明连续 4 a 施用味精废浆有机肥对林地土壤有显著的培肥效应,并使土壤处于良性管理状态;而单施化肥则导致土壤质量呈现出下降趋势。本试验还表明,在味精废浆和化肥的 3 种比例搭配中,3:7 比例配施对土壤 CPMI 的影响效果显著优于 1:9 与 5:5 比例,这可能和 3:7 比例可以更明显地提高土壤的活性有机碳含量与其有效率密切相关,并且从 CPMI 与活性有机碳有效率达极显著正相关性也验证了这一点。同时味精废浆中养分以有机形态为主,具有一定缓释性能,如果施用量过大易导致林木在生长前期出现养分匮乏的问题;相反,若施用量过小,则不利于林木在生长后期的养分持续供应。这表明味精废浆有机肥和化肥的搭配比例至关重要。此外,速生杨对氮素的需求量较大,这正好与味精废浆有机肥较高的含氮量相吻合。因此,采用味精废浆有机肥与化肥合理的配施方式对于林地土壤能达到更好的培肥效果,并能有效促进杨树林木的生长。

本研究开展了连续 4 a 的培肥试验,得出的试验结论对于评估该地区的土壤肥力水平,进而建立林地土壤可持续管理措施具有一定参考价值,但由于大田环境很容易受到气候条件变化的影响等因素,活性有机碳库其他组分指标尚有待于后期进一步测定,而关于配施味精废浆有机肥条件下杨树林地土壤活性有机碳组分的变化规律还需要长期持续观测与深入探讨。

4 结 论

本文通过连续 4 a 的大田试验,比较研究了 CK (对照,不施肥)、 N_{100} (尿素提供 100% 的氮)、 $\text{M}_{10}\text{N}_{90}$ (味精废浆和尿素分别提供 10% 和 90% 的氮)、 $\text{M}_{30}\text{N}_{70}$ (味精废浆和尿素分别提供 30% 与 70% 的氮) 与 $\text{M}_{50}\text{N}_{50}$ (味精废浆和尿素各提供 50% 的氮) 处理对杨树林地土壤总有机碳、活性有机碳组分与其有效率、碳库管理指数及林木生长的影响。主要结论如下:

1) 同 N_{100} 处理相比, $\text{M}_{10}\text{N}_{90}$ 、 $\text{M}_{30}\text{N}_{70}$ 与 $\text{M}_{50}\text{N}_{50}$ 处理的土壤总有机碳含量明显升高,其中 $\text{M}_{50}\text{N}_{50}$ 处理显著高于其他处理; $\text{M}_{30}\text{N}_{70}$ 处理的活性有机碳、可溶性有机碳、微生物量碳含量及其有效率均达最高值,其中活性有机碳质量分数分别比 CK、 N_{100} 、 $\text{M}_{10}\text{N}_{90}$ 与 $\text{M}_{50}\text{N}_{50}$ 处理显著高出 43.58%、59.35%、20.71% 和 9.65%,可溶性有机碳质量分数分别显著高出 62.71%、52.38%、28.00% 和 14.29%;

2) $M_{30}N_{70}$ 处理的碳库管理指数达到 192.56, 分别比 N_{100} 、 $M_{10}N_{90}$ 和 $M_{50}N_{50}$ 处理明显提高 89.45、43.58 和 30.86;

3) $M_{30}N_{70}$ 处理的胸径、树高与材积平均生长率分别为 23.40%、21.62% 和 45.05%, 亦明显高于其他处理。与 $M_{30}N_{70}$ 处理相比, $M_{10}N_{90}$ 和 $M_{50}N_{50}$ 处理对林地土壤活性有机碳各组分、碳库管理指数和林木生长率的作用效果较小。相关性分析说明, 材积生长率和活性有机碳、活性有机碳有效率、可溶性有机碳、微生物量碳及碳库管理指数有极显著相关性 ($P < 0.01$)。

综上, 本文试验条件下, 味精废浆和化肥以 3:7 比例配施能提高杨树林地土壤活性有机碳含量与碳库管理指数, 有利于改善土壤质量, 提高土壤肥力, 并促进林木生长。

[参 考 文 献]

- [1] 徐香茹, 蔡岸冬, 徐明岗, 等. 长期施肥下水稻土有机碳固持形态与特征[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(4): 753—760.
Xu Xiangru, Cai Andong, Xu Minggang, et al. Characteristics of organic carbon stabilization in paddy soil under long-term different fertilization[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, 34(4): 753—760. (in Chinese with English abstract)
- [2] 张文娟, 廖洪凯, 龙健, 等. 种植花椒对喀斯特石漠化地区土壤有机碳矿化及活性有机碳的影响[J]. 环境科学, 2015, 36(3): 1053—1059.
Zhang Wenjuan, Liao Hongkai, Long Jian, et al. Effects of Chinese prickly ash orchard on soil organic carbon mineralization and labile organic carbon in karst rocky desertification region of Guizhou province[J]. Environmental Science, 2015, 36(3): 1053—1059. (in Chinese with English abstract)
- [3] 魏燕华, 赵鑫, 翟云龙, 等. 耕作方式对华北农田土壤固碳效应的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(17): 87—95.
Wei Yanhua, Zhao Xin, Zhai Yunlong, et al. Effects of tillages on soil organic carbon sequestration in North China Plain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(17): 87—95. (in Chinese with English abstract)
- [4] 温延臣, 李燕青, 袁亮, 等. 长期不同施肥制度土壤肥力特征综合评价方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 91—99.
Wen Yanchen, Li Yanqing, Yuan Liang, et al. Comprehensive assessment methodology of characteristics of soil fertility under different fertilization regimes in North China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(7): 91—99. (in Chinese with English abstract)
- [5] 胡乃娟, 韩新忠, 杨敏芳, 等. 秸秆还田对稻麦轮作农田活性有机碳组分含量、酶活性及产量的短期效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 371—377.
Hu Naijuan, Han Xinzhong, Yang Minfang, et al. Short-term influence of straw return on the contents of soil organic carbon fractions, enzyme activities and crop yields in rice-wheat rotation farmland[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(2): 371—377. (in Chinese with English abstract)
- [6] 吴崇书, 章明奎. 长期不同施肥对茶园土壤碳氮磷构成的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(3): 578—583.
Wu Chongshu, Zhang Mingkui. Effects of long-term different fertilization on carbon, nitrogen and phosphorus pools in tea garden soils[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(3): 578—583. (in Chinese with English abstract)
- [7] 宋小艳, 张丹桔, 张健, 等. 马尾松(*Pinus massoniana*)人工林林窗对土壤不同形态活性有机碳的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(16): 5393—5402.
Song Xiaoyan, Zhang Danju, Zhang Jian, et al. Effects of gap size in *Pinus massoniana* plantations on different soil labile organic carbon fractions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(16): 5393—5402. (in Chinese with English abstract)
- [8] 林云琴, 王德汉, 王钊汀, 等. 造纸污泥与味精废液联合厌氧消化产甲烷性能研究[J]. 环境科学学报, 2010, 30(8): 1627—1633.
Lin Yunqin, Wang Dehan, Wang Tuting, et al. Methane production through anaerobic co-digestion of papermill sludge and monosodium glutamate waste liquor[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30(8): 1627—1633. (in Chinese with English abstract)
- [9] 张乃芹, 王明友. 味精废浆对西瓜根际土壤生物学特征的影响[J]. 核农学报, 2014, 28(9): 1701—1707.
Zhang Naiqin, Wang Mingyou. Effects of monosodium glutamate wastewater on rhizosphere soil biological characteristics of watermelon (*Citrullus lanatus*)[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2014, 28(9): 1701—1707. (in Chinese with English abstract)
- [10] 杜伟, 赵秉强, 林治安, 等. 有机无机复混肥优化化肥养分利用的效应与机理研究 III. 有机物料与钾肥复混对玉米产量及肥料养分吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 58—63.
Du Wei, Zhao Bingqiang, Lin Zhian, et al. Study on the enhancement and mechanism of organic-inorganic compound fertilizer on inorganic fertilizer utilization III. Effect of potassium sulfate combined with organic material on maize yield and K fertilizer utilization[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(1): 58—63. (in Chinese with English abstract)
- [11] 王明友, 张红, 李士平. 味精废浆有机肥对西瓜根系特性与根际土壤腐殖质组成的影响[J]. 水土保持通报, 2015, 35(5): 205—210.
Wang Mingyou, Zhang Hong, Li Shiping. Effects of monosodium glutamate wastewater manure on root characteristics and humus composition in rhizosphere soil of watermelon (*Citrullus lanatus*)[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(5): 205—210. (in Chinese with English abstract)
- [12] 彭智平, 黄继川, 于俊红, 等. 叶面喷施味精废液对白菜产量和品质的影响[J]. 广东农业科学, 2011(6): 64—65.
Peng Zhiping, Huang Jichuan, Yu Junhong, et al. Effects of foliar application of monosodium glutamate wastewater on yield and quality of Chinese cabbage[J]. Guangdong Agricultural Science, 2011(6): 64—65. (in Chinese with English abstract)
- [13] 何翠翠, 王立刚, 王迎春, 等. 长期施肥下黑土活性有机质和碳库管理指数研究[J]. 土壤学报, 2015, 52(1): 194—202.
He Cuicui, Wang Ligang, Wang Yingchun, et al. Effect of long-term fertilization on labile organic matter in and carbon pool management index of black soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(1): 194—202. (in Chinese with English abstract)
- [14] 李硕, 李有兵, 王淑娟, 等. 关中原作物秸秆不同还田方式对土壤有机碳和碳库管理指数的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(4): 1215—1222.
Li Shuo, Li Youbing, Wang Shujuan, et al. Effects of different straw-returning regimes on soil organic carbon and carbon pool management index in Guanzhong Plain, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(4): 1215—1222. (in Chinese with English abstract)

- [15] 王朔林, 杨艳菊, 王改兰, 等. 长期施肥对栗褐土活性有机碳的影响[J]. 生态学杂志, 2015, 34(5): 1223—1228.
Wang Shuolin, Yang Yanju, Wang Gailan, et al. Effect of long-term fertilization on labile organic carbon in cinnamon soil[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(5): 1223—1228. (in Chinese with English abstract)
- [16] 祁心, 江长胜, 郝庆菊, 等. 缙云山不同土地利用方式对土壤活性有机碳、氮组分的影响[J]. 环境科学, 2015, 36(10): 3816—3824.
Qi Xin, Jiang Changsheng, Hao Qingju, et al. Effects of different land uses on soil active organic carbon and nitrogen fractions in jinyun mountain[J]. Environmental Science, 2015, 36(10): 3816—3824. (in Chinese with English abstract)
- [17] 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.
Jing Dawei, Xing Shangjun, Liu Fangchun, et al. Border irrigation co-applied with super absorbent polymers improving soil physical characteristics and increasing microbial activity in poplar forest[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(14): 116—122. (in Chinese with English abstract)
- [18] 孟宪宇. 测树学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1996: 158—204.
- [19] 陈安强, 付斌, 鲁耀, 等. 有机物料输入稻田提高土壤微生物碳氮及可溶性有机碳氮[J]. 农业工程学报, 2015, 31(21): 160—167.
Chen Anqiang, Fu Bin, Lu Yao, et al. Exogenous organic materials applied to paddy field improving soil microbial biomass C, N and dissolved organic C, N[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(21): 160—167. (in Chinese with English abstract)
- [20] 梁爱华, 韩新辉, 赵发珠, 等. 黄土高原丘陵区退耕还林地土壤碳氮库的动态变化[J]. 农业工程学报, 2014, 30(23): 148—157.
Liang Aihua, Han Xinhui, Zhao Fazhu, et al. Dynamics of soil carbon and nitrogen stocks following afforestation in gully region of Loess Plateau, China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(23): 148—157. (in Chinese with English abstract)
- [21] 范淼珍, 尹昌, 范分良, 等. 长期不同施肥对红壤碳、氮、磷循环相关酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(3): 833—838.
Fan Miaozhen, Yin Chang, Fan Fenliang, et al. Effects of different long-term fertilization on the activities of enzymes related to carbon, nitrogen, and phosphorus cycles in a red soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(3): 833—838. (in Chinese with English abstract)
- [22] 董扬红, 曾全超, 安韶山, 等. 黄土高原不同林型植被对土壤活性有机碳及腐殖质的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(1): 143—148.
Dong Yanghong, Zeng Quanchao, An Shaoshan, et al. Effects of different forest types on soil active organic carbon and soil humus composition in the loess plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(1): 143—148. (in Chinese with English abstract)
- [23] 王义祥, 黄毅斌, 叶菁, 等. 水保措施对油桃园土壤有机碳库及其组分的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(4): 803—809.
Wang Yixiang, Huang Yibin, Ye Jing, et al. Effects of different soil conservation measures on soil organic carbon pools in Nectarine Orchard[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(4): 803—809. (in Chinese with English abstract)
- [24] 张恒恒, 严昌荣, 张燕卿, 等. 北方旱区免耕对农田生态系统固碳与碳平衡的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4): 240—247.
Zhang Hengheng, Yan Changrong, Zhang Yanqing, et al. Effect of no tillage on carbon sequestration and carbon balance in farming ecosystem in dryland area of northern China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(4): 240—247. (in Chinese with English abstract)
- [25] Wang Weiqi, Lai DYF, Wang C, et al. Effects of rice straw incorporation on active soil organic carbon pools in a subtropical paddy field[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 152: 8—16.
- [26] Olateju Dolapo A, Kayode Steven A, Gabriel Akinboye O, et al. Evaluation of two methods of soil quality assessment as influenced by slash and burn in tropical rainforest ecology of Nigeria[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2013, 59(12): 1725—1742.
- [27] 张志毅, 熊又升, 徐祥玉, 等. 免耕起垄对冷浸田土壤有机碳活性的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(1): 192—197.
Zhang Zhiyi, Xiong Yousheng, Xu Xiangyu, et al. Effects of no-tillage and combing ridge on soil organic carbon active in cold waterlogged paddy field[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(1): 192—197. (in Chinese with English abstract)
- [28] 钟珍梅, 黄秀声, 翁伯琦, 等. 沼液对种植狼尾草的山地红壤可溶性有机氮和土壤微生物特征的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 111—116.
Zhong Zhenmei, Huang Xiusheng, Wen Boqi, et al. Effect of biogas slurry application on soluble organic nitrogen and microbial characteristics of hilly red soil under *pennisetum* (*P. americanum* and *P. purpureum*) grassland [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(5): 111—116. (in Chinese with English abstract)
- [29] 肖胜生, 房焕英, 段剑, 等. 植被恢复对侵蚀型红壤碳吸存及活性有机碳的影响[J]. 环境科学研究, 2015, 28(5): 728—735.
Xiao Shengsheng, Fang Huanying, Duan Jian, et al. Effects of vegetation restoration on soil carbon sequestration and active organic carbon in eroded red soil[J]. Research of Environmental Sciences, 2015, 28(5): 728—735. (in Chinese with English abstract)
- [30] 臧传聪. 施用味精废液对西瓜根际土壤微生物量碳、氮含量的影响[J]. 水土保持通报, 2014, 34(4): 99—103.
Zang Chuancong. Effects of monosodium glutamate wastewater co-applied with inorganic fertilizer on soil microbial C and N at rhizosphere of watermelon[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(4): 99—103. (in Chinese with English abstract)
- [31] 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.
Liu Xiao. Effect of chicken manure co-applied with inorganic fertilizer on root morphological and micro-environment characteristics in poplar seedlings rhizosphere soil[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(5): 80—84. (in Chinese with English abstract)
- [32] 井大炜, 邢尚军. 鸡粪与化肥不同配比对杨树苗根际土壤酶和微生物量碳、氮变化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 455—461.
Jing Dawei, Xing Shangjun. Effects of chicken manure mixed with inorganic fertilizer on soil enzyme activities, microbial biomass C and N at rhizosphere of poplar seedlings[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(2): 455—461. (in Chinese with English abstract)

- [33] 严芳萍, 康世昌, 陈鹏飞, 等. 青藏高原冰川区可溶性有机碳含量和来源研究[J]. 环境科学, 2015, 36(8): 2827—2832.
Yan Fangping, Kang Shichang, Chen Pengfei, et al. Concentration and source of dissolved organic carbon in snowpits of the Tibetan Plateau[J]. Environmental Science, 2015, 36(8): 2827—2832. (in Chinese with English abstract)
- [34] 苏朋, 傅昱, 何艳, 等. 控制条件下水肥耦合对黄泥田还田秸秆腐解及土壤碳转化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 1—11.
Su peng, Fu Yu, He Yan, et al. Effect of soil moisture and nitrogen fertilizer on the decomposition of straw returned to field and the transformation of carbon under controlled conditions[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(1): 1—11. (in Chinese with English abstract)
- [35] 熊丽, 杨玉盛, 万菁娟, 等. 可溶性有机碳在土壤剖面淋溶过程中的分馏[J]. 应用生态学报, 2015, 26(5): 1289—1296.
Xiong Li, Yang Yusheng, Wan Jingjuan, et al. Fractionation of dissolved organic carbon along soil profiles during the leaching process[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(5): 1289—1296. (in Chinese with English abstract)
- [36] 安娟娟, 陈少锋, 赵发珠, 等. 不同人工植被下土壤活性有机碳及碳库管理指数变化[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(5): 985—991.
An Juanjuan, Chen Shaofeng, Zhao Fazhu, et al. Changes of soil labile organic carbon and carbon management index under different artificial vegetations[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(5): 985—991. (in Chinese with English abstract)
- [37] 魏燕华, 赵鑫, 翟云龙, 等. 耕作方式对华北农田土壤固碳效应的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(17): 87—95.
Wei Yanhua, Zhao Xin, Zhai Yunlong, et al. Effects of tillages on soil organic carbon sequestration in North China Plain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(17): 87—95. (in Chinese with English abstract)
- [38] 蔡苗, 孟延, Mohammad A A, 等. 长期不同施肥对玉米根茬生物量及养分累积量的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(8): 2387—2396.
Cai Miao, Meng Yan, Mohammad A A, et al. Effects of long-term different fertilizations on biomass and nutrient content of maize root[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(8): 2387—2396. (in Chinese with English abstract)

Applied monosodium glutamate wastewater promoting poplar growth, improving soil active organic carbon and carbon pool management index

Jing Dawei^{1,2}, Xing Shangjun^{2*}, Liu Fangchun², Ma Hailin², Du Zhenyu², Ma Bingyao², Yu Xuedou¹, Zhu Yaping¹

(1. Dezhou University, Dezhou 253023, China; 2. Shandong Forestry Academy, Jinan 250014, China)

Abstract: Soil total organic carbon (TOC) is a stable and long-lasting carbon source and contains nearly all nutrients for plant growth, and therefore is a meaningful index for evaluating soil fertility. The quantity and quality of soil organic carbon influence soil potential productivity and reflect the spatial distribution and succession of plant community. However, it is not easy to detect short and medium term changes of total TOC due to the variation of soil background and natural level, and thus techniques that measure meaningful fractions of TOC should be used. The active organic carbon (AOC) as the component of TOC is a more sensitive indicator for environmental change. Although the proportion of AOC to TOC is very small, the AOC is closely related to soil productivity and plays important role in soil nutrient supply. Furthermore, the carbon pool management index (CPMI) calculated from changes in labile and total carbon relative to a reference soil shows to be a useful indicator for describing soil fertility. Therefore, analyzing the change rule of AOC and CPMI has important guiding significance for fertilization. In order to explore the biological effect of monosodium glutamate wastewater on soil improvement and determine the appropriate application level of inorganic fertilizer and monosodium glutamate wastewater for improving poplar growth, a field experiment including 5 treatments, i.e. CK (neither urea nor monosodium glutamate wastewater was applied), N₁₀₀ (100% of nitrogen was provided by urea), M₁₀N₉₀ (10% and 90% of nitrogen were provided by monosodium glutamate wastewater and urea, respectively), M₃₀N₇₀ (30% and 70% of nitrogen were provided by monosodium glutamate wastewater and urea, respectively) and M₅₀N₅₀ (50% and 50% of nitrogen were provided by monosodium glutamate wastewater and urea, respectively) was performed. The present study was conducted to determine the effects of different treatments on TOC, AOC component and effective rate, CPMI in soil and poplar growth. Results indicated that in comparison to N₁₀₀ treatment, the TOC content significantly increased under the treatments of M₁₀N₉₀, M₃₀N₇₀ and M₅₀N₅₀, and M₅₀N₅₀ treatment was apparently higher than other treatments. The AOC, dissolved organic carbon (DOC) and microbial biomass carbon (MBC) contents and their effective rates in M₃₀N₇₀ treatment all reached the maximum, of which AOC content was 43.58%, 59.35%, 20.71% and 9.65% higher than CK, N₁₀₀, M₁₀N₉₀ and M₅₀N₅₀ respectively and DOC content was 62.71%, 52.38%, 28.00% and 14.29% higher than CK, N₁₀₀, M₁₀N₉₀ and M₅₀N₅₀ respectively. In the meantime, the CPMI was 192.56 under the M₃₀N₇₀ treatment, which was 89.45, 43.58 and 30.86 higher than the treatments of N₁₀₀, M₁₀N₉₀ and M₅₀N₅₀, respectively. Additionally, the average growth rates of diameter at breast height (DBH), tree height and volume in M₃₀N₇₀ treatment were 23.40%, 21.62% and 45.05%, respectively, which were also obviously higher than other treatments. However, in M₁₀N₉₀ and M₅₀N₅₀ treatments, less effects on AOC component and CPMI in the forest soil and tree growth rates were observed compared with M₃₀N₇₀ treatment. The correlation analysis showed that volume growth rate was extremely significantly correlated with AOC, AOC effective rate, DOC, MBC and CPMI ($P < 0.01$). These results suggest that monosodium glutamate wastewater combined with inorganic fertilizer, especially M₃₀N₇₀ treatment, is beneficial to increase AOC content and CPMI of woodland soil, improve soil quality and fertility, and promote the growth of poplar. The results can provide theoretical foundation for the effective utilization of monosodium glutamate wastewater in forestry. In addition, we can speculate the monosodium glutamate wastewater combined with inorganic fertilizer would have broad application prospects in forest cultivation.

Keywords: soils; organic carbon; fertilizers; poplar; monosodium glutamate wastewater; active organic carbon; carbon pool management index