

多种有机物料混施对苹果幼苗生长、氮素利用及土壤特性的影响

王璐, 朱占玲, 刘照霞, 马玉婷, 孙福欣, 葛顺峰, 姜远茂

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

摘要: 以“M9T337”苹果幼苗为试材, 利用¹⁵N 同位素示踪技术, 研究了等氮量投入下, 不同有机物料单施及混施对苹果幼苗生长、¹⁵N 吸收利用及土壤特性的影响。试验设置 CK(只施用化学肥料, 不施有机物料)、S(秸秆)、B(生物炭)、F(牛粪)、SB(1/2 秸秆+1/2 生物炭)、SF(1/2 秸秆+1/2 牛粪)、FB(1/2 牛粪+1/2 生物炭)、SFB(1/3 秸秆+1/3 牛粪+1/3 生物炭)8 个处理。结果表明: 施用有机物料可以促进苹果幼苗的生长, 其中 SFB 处理植株鲜重、株高、茎粗、叶面积、根系活力达到最优, 显著高于 CK 和单施有机物料的处理。添加有机物料能降低土壤容重、增加孔隙度、提高土壤含水量, 其中施用生物炭的处理土壤容重降幅较大、孔隙度较高。处理期间, 有机物料混合施用的处理土壤矿化氮含量、土壤酶活性及微生物数量均优于有机物料单独施用的处理。与 CK 和单施有机物料的处理相比, 有机物料混合施用显著提高了苹果幼苗¹⁵N 利用率和土壤¹⁵N 残留率, 降低了¹⁵N 损失率, 其中 3 种有机物料混施效果最好。综合分析可知, 有机物料能促进苹果幼苗生长, 改良土壤性质, 促进植株对¹⁵N 的吸收利用, 其中牛粪、秸秆和生物炭混合施用的处理(SFB 处理)效果最佳。研究结果以期有机物料在苹果园土壤质量提升和化肥减施增效中的应用提供依据。

关键词: 苹果; 生物炭; 牛粪; 秸秆; 根系; 土壤理化特性; 氮素利用

中图分类号: S661.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)05-0362-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.05.048

Effects of Mixtures of Different Organic Materials on Apple Seedling Growth, Nitrogen Utilization and Soil Properties

WANG Lu, ZHU Zhanling, LIU Zhaoxia, MA Yuting, SUN Fuxin, GE Shunfeng, JIANG Yuanmao

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

Abstract: M9T337 apple seedlings were used to study the effects of different organic materials and their combination on plant growth, nitrogen utilization and soil properties by using the ¹⁵N isotope tracer technique. There were 8 treatments: CK (chemical fertilizer), S (straw), B (biochar), F (cow dung), SB (1/2 straw + 1/2 biochar), SF (1/2 straw + 1/2 cow dung), FB (1/2 cow dung + 1/2 biochar), SFB (1/3 straw + 1/3 cow dung + 1/3 biochar). The results showed that the application of organic materials promoted the growth of apple seedlings, and SFB treatment had the best fresh weight, height, stem diameter, leaf area and root activity, which were significantly higher than CK and the treatment of single organic materials. The application of organic materials decreased soil bulk density, increased soil total porosity and soil moisture content. The soil bulk density and total porosity under the combined application of biochar were better. During the treatment period, the soil mineralized nitrogen contents, the soil enzymes activities and microbial population under the treatments with mixed organic materials were better than those under the treatments with organic materials alone. Compared with CK and the single organic materials, the combined application of organic materials significantly improved the ¹⁵N utilization rate of apple seedlings and ¹⁵N residual rate in soils, reduced the ¹⁵N loss rate and the SFB treatment had the best effect. According to the comprehensive analysis, the application of different organic materials could promote the growth of apple seedlings, improve soil properties, and improve the

收稿日期: 2021-04-19

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0201100); 财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系项目(CARS-27); 山东省泰山学者工程专项(TSPD20181206); 科技部“科技助力经济 2020”重点专项(2020YFF0426464); 心连心氮肥高效利用创新平台开放基金项目(2019-2022)

第一作者: 王璐(1996—), 女, 硕士研究生, 主要从事苹果氮素营养研究。E-mail: 1363851768@qq.com

通信作者: 姜远茂(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事果树营养生理和果园土壤肥力研究。E-mail: gsyj@sdau.edu.cn

朱占玲(1984—), 女, 博士, 讲师, 主要从事果树营养和高效施肥研究。E-mail: zhzh@sdau.edu.cn

absorption and utilization of ^{15}N , among which the combined application of cow dung, straw and biochar (SFB treatment) had the best effect. These findings could provide a basis for the application of organic materials in apple orchard for the soil quality improvement and fertilizer reduction and efficiency.

Keywords: apple; biochar; cow dung; straw; root; soil physical and chemical properties; nitrogen utilization

氮素在果树的生长发育过程中起着关键性作用^[1],土壤氮素主要来源是外源氮肥的施用。为追求高产,生产中往往存在氮肥过量施用的问题,氮肥过量施用会造成树体生理紊乱和生理性病害频繁发生,同时,由于我国果园土壤有机碳含量相对偏低,土壤保肥性能较差,多余氮素会通过氨挥发、硝化—反硝化、淋洗和径流等途径损失到环境中,不仅降低了氮素的利用率,还会造成水体富营养化、土壤质量下降及微生物群落稳定性被破坏等问题^[2-3]。在保障果树优质丰产的前提下,如何改善土壤理化结构,合理施用氮肥,提高氮素利用率一直是人们关注的重点。

有机物料是指动植物残体、生活废物、人畜粪便等有机物质,是仅次于煤炭、石油、天然气的第四大能源^[4]。施用有机物是改善园土质量的有效措施,已有研究^[5-6]表明,施用生物炭、秸秆、牛粪等有机物料均可改善土壤理化结构、促进作物优质优产。但不同有机物料自身的稳定性及其在土壤中矿化速率和供肥时效各异,单施或混施对土壤质量、养分有效性和植株生长也会产生的不同影响。混合施用性质(C/N、木质素/N等方面)差异较大的有机物料会发生“混合分解效应”^[7],直接影响土壤有机碳矿化及物质腐解过程。前人^[8]研究表明,与施用单一秸秆相比,豆科绿肥与小麦秸秆组合还田利于提高土壤活性有机碳含量,在此基础上配施生物炭,土壤有机碳含量及其中惰性碳占比得到进一步提高。李明静等^[9]通过温室微区试验发现,与单施鸡粪的处理相比,混施鸡粪、稻草及钾肥的处理温室番茄产量增加了31.59%,土壤微生物量碳和微生物量氮分别增加了36.04%和31.25%,土壤蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶等酶活性均得到不同程度的提高。多种物料混合施用对土壤养分的影响效果优于物料单独施用,这是因为混合物料释放的总养分高于其对应单一物料释放养分的加权平均值^[10]。

以往对于不同物料混合施用的研究多集中在其对土壤理化特性和土壤肥力的影响,而关于多种物料组合对苹果植株生长发育及化肥氮利用效率的影响尚不够深入。为此,本研究以“M9T337”苹果幼苗为试材,通过盆栽试验,结合 ^{15}N 同位素示踪技术,探讨不同有机物料(高稳定性生物炭、中稳定性秸秆、低稳定性牛粪)单施及混施对苹果幼苗生长、氮素利用及土壤理化特性的影响效果及机理,旨在为苹果生产中通过有机替代改善土壤理化性质,提高氮素利用效率

提供依据。

1 材料与方 法

1.1 供试材料与试验设计

试验于2020年6月3日至10月10日在山东农业大学园艺试验站防雨棚进行,试材为“M9T337”苹果幼苗,供试土壤为壤土,土壤有机质含量14.10 g/kg,全氮含量0.83 g/kg,速效磷含量37.73 mg/kg,速效钾含量193.14 mg/kg。

试验选用高25 cm,直径20 cm的塑料盆,每盆装土4 kg,6月3日将生物炭、秸秆、牛粪进行不同的组合并与土壤混合均匀,共8个处理,分别为只施用化学肥料(CK)、施入秸秆(S)、生物炭(B)、牛粪(F)、1/2秸秆+1/2生物炭(SB)、1/2秸秆+1/2牛粪(SF)、1/2牛粪+1/2生物炭(FB)、1/3秸秆+1/3牛粪+1/3生物炭(SFB)。有机物料拌土均匀待其适度腐解,1周后选取长势一致、无病虫害的苗子栽入盆中,每个处理15株,单株为1个重复,各处理总氮投入量相同为1.2 g/盆,氮含量不足的处理添加尿素补充。植株长势平稳时(6月20日)一次性施入 ^{15}N —尿素(上海化工研究院生产,丰度10.11%)0.5 g,硫酸钾(含 K_2O 50%)2.4 g,过磷酸钙(含 P_2O_5 14%)7.5 g,施肥后立即浇水,进行常规管理。

生物炭为460℃碳化苹果枝,基本理化性质为:有机碳含量486.79 g/kg,全氮含量7.39 g/kg,全磷含量0.96 g/kg,全钾含量2.83 g/kg;秸秆为玉米秸秆,基本理化性质为:有机碳含量338.80 g/kg,全氮含量10.10 g/kg,全磷含量2.20 g/kg,全钾含量1.30 g/kg;牛粪经腐熟、风干后施用,基本理化性质为:有机质含量216.85 g/kg,有机碳含量354.00 g/kg,全氮含量12.41 g/kg,全磷含量8.52 g/kg,全钾含量10.33 g/kg。以上外源有机物料均粉碎后过20目筛。

1.2 测定指标及方法

10月10日植株基本停止生长时(共处理122天),对植株进行破坏性取样,同时进行土壤取样,测定土壤理化性质等指标。

1.2.1 植株生长指标、根系形态及根系活力 测量植株株高、茎粗及鲜重;使用台式扫描仪(国产NUS-can 700)扫描叶面积;使用WinRHIZO(2007版)根系分析软件扫描分析总根长、总表面积、根尖数;根系活力用氯化三苯基四氮唑(TTC)还原法^[11]测定。

1.2.2 土壤理化性质 土壤有机碳、硝态氮及铵态

氮含量使用重铬酸钾氧化—分光光度法^[12]、连续流动分析仪 CFA 和 TRAACS2000 进行测定;土壤 pH、电导率使用 PHS—3G 型 pH 计和 DDS—307A 型电导率测定仪测定;土壤容重用不锈钢环刀采集原状土样,烘干法^[12]测定。

1.2.3 土壤微生物及酶类 采用稀释平板计数法测定根际土壤中微生物数量,细菌、放线菌和真菌分别采用牛肉膏蛋白胨培养基、改良高氏 I 号培养基和马丁氏培养基进行培养、分离与计数。土壤脲酶活性采用苯酚钠—次氯酸钠比色法(以 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量表示, $\mu\text{g/g}$),蔗糖酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法(以葡萄糖含量表示, mg/g),纤维素酶活性采用醋酸—CMC 比色法(以葡萄糖含量表示, $\mu\text{g/g}$),过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法(以高锰酸钾含量表示, mg/g)^[13]。

1.2.4 植株器官全氮及 ^{15}N 丰度分析 每个处理采集 6 株苹果幼苗,解析样品根、茎、叶。样品按清水、洗涤剂、清水、1% 盐酸、3 次去离子水顺序冲洗后,在 105 °C 下杀青 30 min,随后在 80 °C 下烘干至恒量,电磨粉碎后过 60 目筛,混匀后装袋备用。样品全氮用凯氏定氮法^[11]测定,植株和土壤 ^{15}N 丰度在山东农业大学资源环境学院应用 MAT—251 质谱仪测定。

1.3 数据分析

$$^{15}\text{N} \text{ 利用率}(\%) = (\text{Ndff} \times \text{器官全氮量}) \div \text{施肥量} \times 100\% \quad (1)$$

$$^{15}\text{N} \text{ 残留率}(\%) = \text{土壤中}^{15}\text{N} \text{ 残留量} \div ^{15}\text{N} \text{ 施用量} \times 100\% \quad (2)$$

$$^{15}\text{N} \text{ 损失率}(\%) = 100\% - ^{15}\text{N} \text{ 利用率} - ^{15}\text{N} \text{ 残留率} \quad (3)$$

$$\text{土壤容重}^{[12]}: \rho_b = m / (V(1 + \theta_m)) \quad (4)$$

$$\text{土壤孔隙度}^{[12]}: P_t = (1 - \rho_b / d_s) \times 100\% \quad (5)$$

式中: ρ_b 为土壤容重 (g/cm^3); m 为环刀内湿样重量 (g); V 为环刀体积 (cm^3); θ_m 为样品含水量 (%); P_t 为土壤总孔隙度 (%); d_s 为土壤密度,通常采用密度值为 2.65 g/cm^3 。

应用 SPSS 17.0 软件进行单因素方差分析,应用 Microsoft Excel 2007 软件进行图表绘制。

2 结果与分析

2.1 不同处理对植株根系形态及根系活力的影响

由表 1 可知,添加有机物料促进了苹果幼苗根系的生长。不同有机物料配施处理的根系形态指标均高于有机物料单独施用的处理 ($P < 0.05$),其中 SFB 处理的总根长、总表面积、根系体积、根尖数及根系活力均达到最优。有机物料两两配施的处理 SB、SF 和 FB 根系形态指标差异不显著。有机物料单独施用的处理 B 根系形态指标要优于 S、F 处理。与其他处理相比,添加生物炭的处理 SFB、FB、SB、B 植株根系活力相对更高,分别是 CK 的 1.23, 1.18, 1.13, 1.12 倍。

表 1 不同处理对苹果幼苗根系生长的影响

处理	总根长/ cm	总表面/ cm^2	根系体积/ cm^3	根尖数/ 个	根系活力/ ($\mu\text{g} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$)
S	1623.6 ± 139.3c	406.0 ± 42.8c	3.86 ± 0.31c	11216.3 ± 673.7c	87.09 ± 3.13c
B	2015.0 ± 125.2b	437.7 ± 35.6c	4.32 ± 0.31b	12234.0 ± 638.0b	89.57 ± 3.72bc
F	1815.0 ± 168.4c	382.6 ± 29.9c	3.62 ± 0.26c	11332.3 ± 668.4c	86.87 ± 3.22c
SB	2430.6 ± 182.1ab	517.3 ± 42.5b	4.82 ± 0.24a	12694.0 ± 667.8ab	90.87 ± 3.21bc
SF	2380.6 ± 160.1ab	498.1 ± 37.7b	4.63 ± 0.48a	12721.0 ± 764.3ab	87.75 ± 3.43c
FB	2462.8 ± 138.1ab	526.3 ± 38.9b	4.80 ± 0.48a	12948.0 ± 754.0ab	94.88 ± 3.29ab
SFB	2659.8 ± 202.8a	568.9 ± 33.1a	4.83 ± 0.44a	13176.6 ± 684.8a	98.22 ± 4.13a
CK	1346.2 ± 98.5d	338.8 ± 23.1d	2.86 ± 0.24d	10251.7 ± 555.2d	80.07 ± 3.51d

注:表中数据为平均值 ± 标准差;同列不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

2.2 不同处理对植株生物量的影响

有机物料配施处理的植株鲜重、株高、茎粗及叶面积均高于有机物料单独施用的处理(表 2),其中,3 种有机物料配施(SFB 处理)处理下植株鲜重、株高、茎粗和叶面积均为最大;2 种有机物料配施处理下植株生物量指标差异规律不显著 ($P > 0.05$),其中 FB 处理的株高显著高于 SB、SF 处理 ($P < 0.05$),SF 处理的叶面积显著高于 FB、SB 处理 ($P < 0.05$),SB 处理的植株鲜重及茎粗均高于 FB、SF 处理;有机物料单独施用的处理中,施加牛粪(F 处理)更利于植株生物量的增加。

2.3 不同处理对土壤理化性质的影响

由表 3 可知,添加有机物料可降低土壤容重、提高总孔隙度,其中,施用了生物炭的处理效果更显著, B、SB、FB 和 SFB 处理的土壤容重均显著低于其他处理 ($P < 0.05$),而土壤总孔隙度则显著高于其他处理 ($P < 0.05$),其中以 SFB 处理土壤容重最低、土壤总孔隙度最高。有机物料配施处理的土壤含水量较高,其中, SFB 处理的土壤含水量最高,为 30.63%, SB、SF 和 FB 处理间的土壤含水量差异不显著 ($P > 0.05$),但均高于有机物料单独施用的处理。

本试验选用的碳化苹果枝的 pH 为 8.80~8.96, 生物炭单独施用处理(处理 B)的土壤 pH 最大, 为 8.33, 较对照提高了 0.60。生物炭与牛粪、秸秆配施处理的土壤 pH 增量较小, 与 CK 相比, SB、FB 和 SFB 处理的 pH 分别增加 0.15, 0.28, 0.02, 可见, 有机物料配施可以使 pH 保持在较平稳的范围。有机物料混施处理的电导率(EC)增量较为显著($P < 0.05$), 其中, 处理 SFB 的电导率为 930.67 mS/cm, 是 CK 的 1.32 倍, 增量最大; 处理 SF 和 SB 的增量次之, 分别是 CK 的 1.17, 1.09 倍; 有机物料单独施用的处理中, B 处理对电导率的影响较大, 主要是因为施入土壤的生物炭

能通过表面官能团的阳离子交换及吸附作用^[14], 提高土壤盐基离子的含量。

表 2 不同处理对植株生物量的影响

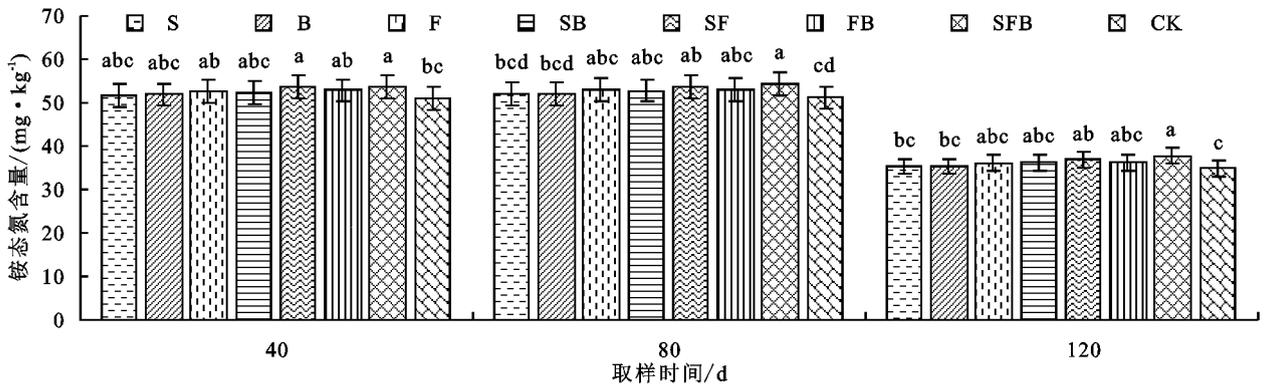
处理	鲜重/g	株高/cm	茎粗/mm	叶面积/mm ²
S	24.27±1.49c	36.17±2.98bc	6.04±0.45d	8351.8±310.3cd
B	24.12±0.74c	36.17±2.28bc	5.95±0.14de	8210.8±177.3d
F	27.91±3.38b	37.73±3.82abc	6.09±0.20d	8594.6±200.9bcd
SB	27.92±1.59b	40.37±2.10ab	6.73±0.17b	9324.6±249.5b
SF	27.04±1.96bc	40.73±3.91ab	6.53±0.15bc	10146.1±560.6a
FB	26.00±2.07bc	41.77±2.97a	6.23±0.15cd	8984.6±213.6bc
SFB	32.17±2.48a	42.63±2.77a	7.15±0.20a	10725.0±944.4a
CK	20.57±1.40d	33.84±1.59c	5.62±0.20ef	7077.1±162.8e

表 3 不同处理对土壤理化性质的影响

处理	容重/(g·cm ⁻³)	含水量/%	总孔隙度/%	pH	电导率/(mS·cm ⁻¹)
S	1.29±0.02c	22.38±2.27c	51.45±0.79c	7.85±0.18bcd	711.67±56.01d
B	1.22±0.04d	22.07±1.71c	53.96±1.51b	8.33±0.10a	732.00±16.09cd
F	1.37±0.01b	24.26±1.49c	48.17±0.44d	7.64±0.06cd	717.33±13.50d
SB	1.23±0.02d	27.18±1.02b	53.46±0.79b	7.88±0.13bc	770.67±12.01c
SF	1.26±0.04cd	27.85±1.08b	52.45±1.51bc	7.63±0.19d	822.67±12.66b
FB	1.23±0.01d	26.79±1.12b	53.58±0.38b	8.01±0.20b	733.33±15.50cd
SFB	1.11±0.01e	30.63±0.36a	58.11±0.38a	7.75±0.06cd	930.67±26.10a
CK	1.40±0.03ab	17.71±1.44d	47.04±0.95de	7.73±0.06cd	704.00±6.08d

各处理的土壤铵态氮含量呈先上升后下降的趋势, 且均在 120 天后降到最低(图 1)。与处理 40 天相比, 80 天时铵态氮含量提高了 0.32%~1.48%, 其中 SFB 处理增幅最大(1.48%); 与处理 80 天相比, 120 天时土壤铵态氮降低了 30.54%~32.46%, 其中 SFB 处理降幅最小(30.54%)。单施化肥的 CK 处理土壤铵态氮含量始终

最低, 处理 40, 80, 120 天时分别为 51.02, 51.18, 34.91 mg/kg。不同时期, 添加牛粪处理的(F、SF、FB、SFB 处理)土壤铵态氮含量较高, 其中 SFB 处理含量最高, 处理 40, 80, 120 天时, 分别为 CK 的 1.03, 1.06, 1.08 倍, 除在 40 天时与 SF 处理差异不显著外($P > 0.05$), 80, 120 天时均显著高于其他处理($P < 0.05$)。



注:图柱上方不同小写字母表示同一提取时间不同处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

图 1 不同处理对土壤铵态氮含量的影响

由图 2 可知, 硝态氮含量随处理期间的推移呈降低趋势, 120 天时各处理硝态氮含量达到最低。CK 处理的化肥氮施用量最高, 但处理期间 CK 处理的土壤硝态氮含量始终最低, 处理 40, 80, 120 天时分别为 41.17, 38.87, 30.66 mg/kg, 这可能与前期幼苗对氮养分的快速利用及速效氮肥大量损失有关。处理期间, 有机物料配施的处理硝态氮降幅(12.07%~23.49%)均小于单施化肥的处理(25.52%), 可见添加有机物料有利于维持土壤硝态氮水平。处理 40 天时, B、SB 和

SFB 处理硝态氮含量差异不显著($P > 0.05$), 但均高于其他处理, FB 处理硝态氮含量(59.58 mg/kg)次之; 处理 80 天时, 施用生物炭的处理 B、SB、FB 和 SFB 土壤硝态氮含量较高, 分别为 57.34, 58.58, 57.17, 58.83 mg/kg; 处理 120 天后, SFB 处理的土壤硝态氮含量最高, 为 55.50 mg/kg。

2.4 不同处理对土壤酶活性的影响

由表 4 可知, 添加有机物料可提高土壤酶活性。有机物料配施处理(SB、SF、FB、SFB)的脲酶活性均高于秸

秆、牛粪和生物炭单独施用的处理,其中 SB、SF 处理的脲酶活性最高,其次是 SFB 处理。有机物料配施处理及单施生物炭处理的蔗糖酶活性较高,其中 SB 和 SFB 处理的蔗糖酶活性最高,分别是对照的 1.21、1.22 倍;B、SF 和 FB 处理蔗糖酶活性差异不显著($P>0.05$),但均显著高于 S 和 F 处理($P<0.05$)。施用秸秆处理(S、SB、SF 和 SFB)的纤维素酶活性较高,较对照提高了 31.37%~

44.71%,其中 SFB 处理的纤维素酶活性最高,为 $1.37 \mu\text{g/g}$;B、F 及 FB 处理的纤维素酶活性差异不显著($P>0.05$),但均高于对照处理($0.95 \mu\text{g/g}$)。施用生物炭处理(B、SB、FB 和 SFB)的过氧化氢酶活性较高,较对照提高了 35.00%~60.71%,其中,SFB 处理的过氧化氢酶活性最高,为 2.25 mg/g ;S、F 和 SF 处理的酶活性差异性不显著($P>0.05$),但均高于对照处理。

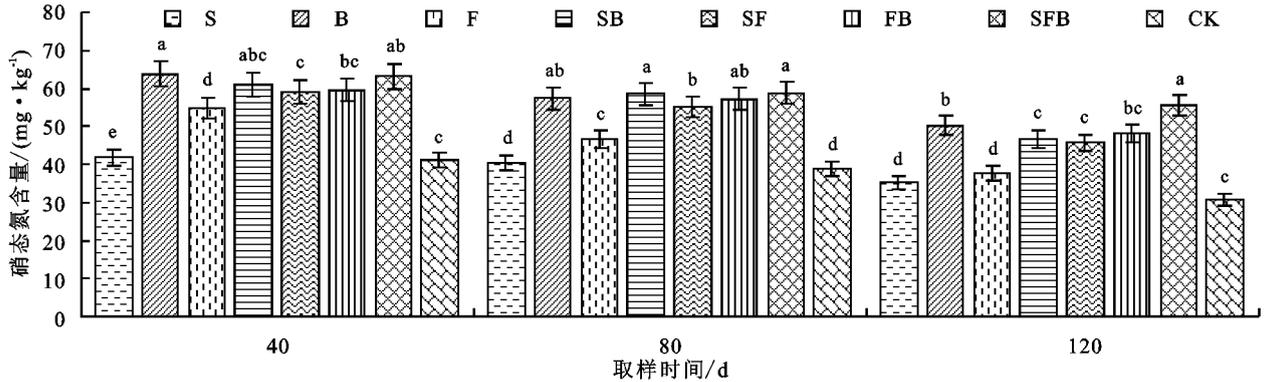


图 2 不同处理对土壤硝态氮含量的影响

表 4 不同处理对土壤酶活性的影响

处理	脲酶/ ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	蔗糖酶/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	纤维素酶/ ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	过氧化氢酶/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)
S	$93.42 \pm 1.42\text{c}$	$4.79 \pm 0.18\text{abc}$	$1.25 \pm 0.08\text{ab}$	$1.59 \pm 0.17\text{cd}$
B	$86.58 \pm 1.42\text{d}$	$4.92 \pm 0.20\text{ab}$	$1.21 \pm 0.10\text{b}$	$1.89 \pm 0.07\text{b}$
F	$80.85 \pm 2.10\text{e}$	$4.68 \pm 0.18\text{bcd}$	$1.21 \pm 0.11\text{b}$	$1.66 \pm 0.10\text{c}$
SB	$110.83 \pm 4.05\text{a}$	$5.25 \pm 0.34\text{a}$	$1.25 \pm 0.12\text{ab}$	$2.06 \pm 0.11\text{ab}$
SF	$107.22 \pm 3.87\text{a}$	$4.90 \pm 0.27\text{ab}$	$1.27 \pm 0.03\text{ab}$	$1.67 \pm 0.13\text{c}$
FB	$101.17 \pm 4.89\text{b}$	$5.14 \pm 0.35\text{ab}$	$1.23 \pm 0.03\text{b}$	$2.09 \pm 0.12\text{ab}$
SFB	$106.17 \pm 3.74\text{ab}$	$5.28 \pm 0.29\text{a}$	$1.37 \pm 0.02\text{a}$	$2.25 \pm 0.16\text{a}$
CK	$75.04 \pm 2.75\text{f}$	$4.34 \pm 0.30\text{cd}$	$0.95 \pm 0.01\text{c}$	$1.4 \pm 0.09\text{de}$

2.5 不同处理对苹果植株根际可培养微生物数量的影响

添加有机物料能显著提高苹果根际土壤微生物数量(表 5)。微生物均以细菌占绝对优势,放线菌次之,真菌含量最少。施用生物炭的处理(B、SB、FB 和 SFB 处理)微生物含量较高,其中 FB 处理和 SFB 处理细菌、真菌数量无显著差异($P>0.05$),但均高于其他处理;SFB 处理放线菌数量最高,是 CK 的 2.18 倍;SB 处理和 FB 处理放线菌数量差异不显著($P>0.05$),分别是 CK 的 1.97、2.06 倍。

表 5 不同处理对苹果根际土壤微生物数量的影响

处理	细菌/ ($10^4 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$)	真菌/ ($10^2 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$)	放线菌/ ($10^3 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$)
S	$90.0 \pm 5.3\text{de}$	$36.7 \pm 3.1\text{e}$	$115.5 \pm 1.8\text{d}$
B	$100.3 \pm 3.0\text{bc}$	$45.7 \pm 4.0\text{d}$	$128.0 \pm 2.6\text{c}$
F	$88.3 \pm 4.5\text{e}$	$32.0 \pm 2.6\text{e}$	$115.3 \pm 6.5\text{d}$
SB	$103.5 \pm 4.4\text{b}$	$69.3 \pm 3.1\text{b}$	$140.0 \pm 8.0\text{b}$
SF	$95.7 \pm 3.5\text{cd}$	$59.7 \pm 2.5\text{c}$	$110.3 \pm 5.5\text{d}$
FB	$110.7 \pm 3.5\text{a}$	$85.0 \pm 3.0\text{a}$	$146.0 \pm 4.0\text{b}$
SFB	$113.0 \pm 5.0\text{a}$	$86.0 \pm 3.0\text{a}$	$155.0 \pm 6.2\text{a}$
CK	$68.7 \pm 2.3\text{f}$	$23.3 \pm 2.5\text{f}$	$71.0 \pm 5.0\text{e}$

2.6 不同处理对苹果幼苗全氮量及¹⁵N 吸收利用的影响

由表 6 可知,施用有机物料可显著提高苹果植株全氮量和¹⁵N 吸收量,较对照分别提高了 30.05%~55.75%和 26.37%~61.57%。与有机物料单独施用的处理相比,有机物料配施处理的植株全氮量和¹⁵N 吸收量较高,其中,SFB 处理的植株全氮量和¹⁵N 吸收量最高;有机物料单独施用的处理中,F 处理植株全氮量和¹⁵N 吸收量均高于 S、B 处理。

与 CK 相比,施用有机物料显著提高了¹⁵N 利用率和残留率,降低了¹⁵N 的损失率。SFB 处理和 SB 处理的¹⁵N 利用率相对较高,分别为 18.21%和 17.54%,较 CK 分别提高了 6.94、6.27 个百分点;有机物料两两配施处理(SB、SF、FB)间¹⁵N 残留率和损失率差异均不显著,3 种有机物料配施处理(SFB)的¹⁵N 残留率(25.46%)最高,¹⁵N 损失率(56.33%)最低。

3 讨论

良好的土壤结构是植株生长发育的基础。土壤物理结构通常以容重、孔隙度、含水量等指标来体现,容重反映了土壤结构的疏松程度,合理的容重能改善土壤通气性,促进植株根系生长。本试验结果表明,与单施化肥相比,添加外源有机物料能降低土壤容重(2.14%~20.17%)、提高土壤孔隙度(2.41%~23.54%)、增加土壤含水量(24.64%~72.93%),其中,不同有机物料混施处理对土壤的改良效果优于有机物料单施处理,且以 3 种物料配施的处理(SFB 处理)改良效果最好,这与赵占辉等^[15]的研究结果一致。有机物料因自身特殊

理化性能代替化肥施用可以改良土壤结构,生物炭自身容重仅为 $0.05 \sim 0.57 \text{ kg/m}^3$,且其堆积密度远低于耕作土壤,可显著降低土壤容重^[16];秸秆富含的纤维结构可以增加土壤孔隙度,且纤维腐解体能吸附水分,减少水分流失^[17];牛粪易被矿化分解利于土壤团聚体的形成,从而改善土壤结构。本研究发现,相较于单施化肥处理,各施用有机物料处理的植株根系形态指标及根系活

力均显著提高,其中不同物料混施处理的苹果幼苗根系形态指标(表1)及生物量(表2)均明显高于有机物料单施的处理。有机物料多为结合态且含有多种活性基团^[18],可以增强根系对养分和水分的吸收,最终促进了植株的生长。可见,多种物料配施对土壤改良及对苹果幼苗生长的促进效果呈正交互影响作用,这与李明静等^[9]的研究结果一致。

表6 不同处理对苹果幼苗全氮量及¹⁵N吸收利用的影响

处理	全氮量/ ($\text{mg} \cdot \text{plant}^{-1}$)	¹⁵ N吸收量/ ($\text{mg} \cdot \text{plant}^{-1}$)	¹⁵ N 利用率/%	¹⁵ N 残留率/%	¹⁵ N 损失率/%
S	289.07±3.98d	32.75±1.01e	14.24±0.44e	22.94±0.30d	62.82±0.74b
B	283.01±3.60d	35.1±1.01d	15.26±0.44d	23.48±0.46cd	61.26±0.90c
F	307.53±3.88c	34.22±1.09de	14.88±0.47de	23.08±0.28d	62.04±0.75bc
SB	328.17±3.38b	40.34±0.92ab	17.54±0.40ab	24.41±0.55b	58.05±0.95d
SF	331.69±4.17b	38.85±0.49bc	16.89±0.21bc	24.31±0.41bc	58.80±0.62d
FB	327.01±4.48b	38.07±0.81c	16.55±0.35c	24.12±0.55bc	59.33±0.20d
SFB	338.92±4.46a	41.88±0.76a	18.21±0.33a	25.46±0.46a	56.33±0.79e
CK	217.61±4.19e	25.92±1.20f	11.27±0.52f	20.04±0.71e	68.69±1.23a

土壤矿质态氮可被植物直接吸收利用,是作物的最主要氮源^[19]。试验处理期间铵态氮含量呈先升高后降低的趋势,这可能是由于施用有机物可以改善土壤氮素供应水平和供应能力。随处理期间的推移,土壤矿化氮含量降低,一部分氮素被植株吸收利用,另一部分则通过挥发、淋溶等途径损失。试验处理期间,施加牛粪的处理铵态氮含量较高,是因为牛粪中的有机氮可快速被矿化为小分子含氮物质,短期内可提高土壤铵态氮含量;施用生物炭的处理硝态氮含量较高,究其原因,可能是因为生物炭可以直接改善土壤结构,提高土壤溶解氧含量,在好氧条件下, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 能快速硝化形成 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ^[20]。

本研究发现,生物炭单施及多种物料混施的处理土壤矿化氮含量高于秸秆、牛粪单施的处理,可能是因为生物炭富含电荷且可以选择性吸附养分,其对 NH_4^+ 、 NO_3^- 有较强吸附作用^[21];不同物料混施能刺激土壤有机氮矿化过程,同时能够改善土壤结构、提高土壤酶活性及微生物含量等,从而加强了对养分的吸附固定及氮库的调节。与有机物料单施的处理相比,物料混施的处理土壤酶活性(表4)及微生物数量(表5)较高,有机物料混施更利于为酶促反应提供适宜的条件及充足的底物,从而提高碳氮循环中土壤脲酶、蔗糖酶及纤维素酶的活性,利于保持土壤碳氮平衡。过氧化氢酶是土壤中重要的氧化还原酶,其活性高低可以反映土壤微生物活性和功能多样性^[22],施用生物炭的处理通气性良好,其微生物较为活跃,过氧化氢酶活性也较高。生物炭可以改良土壤结构

为微生物提供适宜的环境,牛粪为微生物繁殖提供速效养分,秸秆中慢分解碳组分为微生物提供持久的碳源,有机物料混施优势互补,从而提高了土壤微生物数量。同时微生物可以吸持氮素,减少氮素损失,随植物生育期的延长,微生物相继死亡,被固持的氮素得到释放,从而实现土壤、微生物、作物之间矿质营养循环的平衡性^[23]。

同位素示踪结果表明,施用有机物料可以提高植株全氮量和¹⁵N吸收量,提高¹⁵N利用率,降低¹⁵N损失率。较单施化肥相比,有机物料可以改善土壤微环境,促进根系生长发育及其对氮素的吸收,从而提高植株全氮量和¹⁵N吸收量。施用牛粪、秸秆和生物炭能提高土壤及微生物对氮素的吸附固定能力,有效地减少了氮素随水淋失或以气态形式损失。同时有机物料能促进肥料氮向有机氮库及黏土矿物固定态铵库的转化^[24],从而提高氮肥在土壤中的残留,减少氮素损失。牛粪、秸秆和生物炭配施处理(SFB处理)的植株对¹⁵N吸收利用效率较高,这是因为秸秆可以使土壤保持合理的碳氮比,避免微生物与植株争夺氮素;牛粪可以被矿化为小分子含氮物质,能快速被植株吸收利用;生物炭自身带有电荷更利于吸附氮素,而且可抑制反硝化作用,减少氮素损失^[25]。3种有机物料优势互补,更利于苹果幼苗对肥料氮素的吸收利用。

有机物料施入土壤后其腐解程度对土壤理化特性的影响会随时间的推移而逐渐加深。本试验初步研究了有机物料施入后当年对土壤特性和植株生长及氮肥吸收利用的影响,处理时间较短;另外,本试验

是在盆栽条件下进行的,由于空间的局限会影响根系的生长,因此有机物料对土壤质量和苹果生长的长期影响仍需进一步研究。

4 结论

牛粪、秸秆和生物炭 3 种不同稳定性有机物料混合施用可显著改善土壤理化性质,促进苹果幼苗特别是根系生长,提高化学氮肥的利用效率,同时还增强了土壤对氮素的固持能力,减少了氮素损失。

参考文献:

- [1] Biserka M, Ranko C, Zoran K, et al. Nitrogen fertilization and chemical thinning with 6-benzyladenine affect fruitset and quality of golden delicious apples[J]. *Scientia Horticulturae*, 2012, 140: 81-86.
- [2] 葛顺峰, 彭玲, 任饴华, 等. 秸秆和生物质炭对苹果园土壤容重、阳离子交换量和氮素利用的影响[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(2): 366-373.
- [3] 葛顺峰, 姜远茂, 陈倩, 等. 土壤有机质含量对平邑甜茶生长及氮素吸收和损失的影响[J]. *水土保持学报*, 2011, 26(1): 81-84.
- [4] 黄容. 有机替代对菜园土壤温室气体排放和氮转化的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2019.
- [5] 曹辉, 李燕歌, 周春然, 等. 炭化苹果枝对苹果根区土壤细菌和真菌多样性的影响[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(17): 3413-3424.
- [6] Janus A, Peilfrene A, Heymans S, et al. Elaboration, characteristics and advantages of biochars for the management of contaminated soils with a specific overview on *Miscanthus* biochars [J]. *Environmental Management*, 2015, 162: 275-289.
- [7] Wu D D, Li T T, Wan S Q. Time and litter species composition affect litter-mixing effects on decomposition rates[J]. *Plant and Soil*, 2013, 371(1/2): 355-366.
- [8] 朱文玲. 小麦与豆科秸秆组合还田对土壤有机碳固持的影响[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [9] 李明静, 杨丽娟, 邹春娇, 等. 不同物料组合施用对温室番茄根系活力及土壤生物学特性的影响[J]. *土壤通报*, 2015, 46(4): 883-888.
- [10] 宋蒙亚, 李忠佩, 刘明, 等. 不同有机物料组合对土壤养分和生化性状的影响[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(17): 3594-3603.
- [11] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [12] 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.
- [13] 关松荫. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1986.
- [14] 冯丰, 曹辉, 荀咪, 等. 改性苹果废枝与化肥配施对苹果根区土壤及根系构型的影响[J]. *山东农业科学*, 2018, 50(9): 83-88.
- [15] 赵占辉, 张丛志, 蔡太义, 等. 不同稳定性有机物料对砂姜黑土理化性质及玉米产量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(10): 1228-1235.
- [16] 李金文, 顾凯, 唐朝生, 等. 生物炭对土体物理化学性质影响的研究进展[J]. *浙江大学学报*, 2018, 52(1): 192-206.
- [17] Zhao Y M, Lü H F, Qasim W, et al. Drip fertigation with straw incorporation significantly reduces N_2O emission and N leaching while maintaining high vegetable yields in solar greenhouse production[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 273: e116521.
- [18] 高洪军, 朱平, 彭畅, 等. 氮条件下长期有机无机配施对春玉米的氮素吸收利用和土壤无机氮的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(2): 318-325.
- [19] Mohanty S, Nayak A K, Kumar A, et al. Carbon and nitrogen mineralization kinetics in soil of rice-rice system under long term application of chemical fertilizers and farmyard manure[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2013, 58: 113-121.
- [20] Shamim G, Joann K W. Biochemical cycling of nitrogen and phosphorus in biochar-amended soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 103: 1-15.
- [21] Kimetu J M, Lehmann J. Stability and stabilisation of biochar and green manure in soil with different organic carbon contents [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2010, 48(7): 577-585.
- [22] 杨德廉, 周昕. 有机肥施用对烟田土壤酶活性的影响[J]. *中国农学通报*, 2020, 36(15): 60-67.
- [23] Lou Y L, Xu M G, Wang W, et al. Return rate of straw residue affects soil organic C sequestration by chemical fertilization [J]. *Soil and Tillage Research*, 2011, 113(1): 70-73.
- [24] Zhai S L, Wu Y C, Xu C F, et al. Symbiotic soil fungi suppress N_2O emissions but facilitate nitrogen remobilization to grains in sandy but not clay soils under organic amendments [J]. *Applied Soil Ecology*, 2021, 167: e104012.
- [25] van Zwieten L, Kimber S, Morris S, et al. Influence of biochars on flux of N_2O and CO_2 from Ferrosol[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2010, 48(6/7): 555-568.