

不同种植模式对坡耕地红壤有机碳氮组分的影响

杨春怀, 李永梅, 李孝梅, 鲁泽让, 赵吉霞*

(云南农业大学资源与环境学院, 云南 昆明 650201)

摘要: 探究不同种植模式下红壤有机碳、氮组分的变化规律, 为改善红壤质量具有重要意义。通过小区试验, 以玉米//萝卜间作 (MS)、玉米//大豆间作 (MR)、单种玉米 (MM)、单种大豆 (RR) 和单种萝卜 (SS) 为研究对象进行探讨。结果显示, 间作能够促进土壤有机碳 (SOC)、全氮 (TN) 和微生物量碳 (MBC)、氮 (MBN) 及可溶性有机碳 (DOC)、氮 (DON) 含量的增加, 其中 MBC 和 MBN 含量的提升效果较显著。MR 处理的 SOC、MBC 和 DOC 含量较 MM 和 RR 处理分别提高 18.40% ~ 31.60% 和 5.40% ~ 52.10%, TN、MBN 和 DON 含量分别提高 13.40% ~ 84.30% 和 19.20% ~ 64.40%; MS 处理 SOC、MBC 和 DOC 含量较 MM 和 SS 处理分别提高 5.10% ~ 9.60% 和 12.00% ~ 53.80%, TN、MBN 和 DON 含量分别提高 2.70% ~ 31.00% 和 0.80% ~ 23.42%。其中, MBC 和 DON 含量占 SOC 和 TN 的比重较大, 分别为 1.00% ~ 1.71% 和 5.10% ~ 14.18%。相关性分析表明, 各碳、氮组分含量与土壤有机碳、氮呈显著正相关, 其中 DOC 与 SOC、MBN 与 TN 之间的相关系数均高于 0.70, 说明 DOC 与 MBN 可较好地反映土壤 SOC 和 TN 的动态变化。综上所述, 间作种植是有利于研究区内坡耕地水土保持和土壤肥力的关键技术措施之一。

关键词: 坡耕地红壤; 间作; 土壤活性碳组分; 土壤活性氮组分

红壤坡耕地是云南省重要的农业区, 也是主要的经济和粮食作物生产基地。因其严重的土壤结构破坏和水土流失, 使土壤耕层变浅, 理化性质功能下降^[1], 从而严重影响了土壤质量和作物的生长。其中坡耕地水土流失程度以强烈为主, 轻度流失面积占全省坡耕地面积的 13.26%, 中度流失面积占 19.90%, 强烈流失面积占 47.39%, 极强烈流失面积占 17.61%, 剧烈流失面积占 1.84%。研究表明, 土壤碳、氮水平是反映农业土壤肥力的重要指标, 其浓度的变化与土壤持水能力、抗侵蚀能力和作物的养分供应密切相关^[2-3]。土壤有机碳、氮在生产与分解的生物过程中存在耦合, 其主要体现在土壤碳、氮数量的关联和有机质从凋落物分解到稳定化合物的形成过程, 因此, 土壤氮素动态变化受土壤有机碳质量和数量的影响^[4]。研究也表明, 土壤碳、氮含量之间呈极显著线性关系, 碳含量增加的同时氮含量也随之增加^[5]。土壤活性碳、氮组分易受地上部

和地下部环境的影响, 降解速率较快, 易被微生物利用, 是土壤质量变化的灵敏指示^[6]。同时, 活性有机质可直接或间接参与养分循环和物质转化过程, 能够在土壤碳库中快速反映碳的各组分的改变和转移^[7]。因此, 研究红壤碳、氮及其组分有助于揭示土壤碳、氮库动态变化机制, 对缓解地力衰退、提高土壤肥力、促进坡耕地红壤养分循环具有重要意义。

研究发现, 土壤有机碳氮、微生物量碳氮和可溶性有机碳氮的数量和变化受施肥、耕作和种植模式等措施的影响较大^[8]。间作种植由于物种多样性和作物在资源获取的时间、空间格局中的互补性, 能改善土壤环境、提高土壤有机质含量、减少水土流失^[9]。众多研究表明, 不同间作系统可以使土壤碳储量和氮储量分别增加 3.00% ~ 4.00% 和 8.00% ~ 63.00%^[10-11]。农金花^[12]研究发现, 柑橘/大球盖菇间作在一定程度上能够促进土壤中碳、氮组分的形成和累积, 增加土壤养分。也有研究发现, 土壤有机碳含量在间作体系中显著增加; 张玉岱等^[13]、王义祥等^[14]分别对苹果白三叶复合系统和桃园生草栽培的研究也发现, 土壤有机碳含量与有机碳密度在复合系统中显著提高。此外, 周卫军等^[15]研究也发现, 柑橘//大豆间作提高了大豆的固氮能力, 增加作物产量。梨园间作水稻与梨园单作相比, 土壤全氮平均增幅为 31.30%^[16]。然而, 也

收稿日期: 2023-06-01; 录用日期: 2023-08-26

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFD1901500、2022YFD1901501 和 2022YFD1901502)。

作者简介: 杨春怀 (1998-), 硕士研究生, 主要从事坡耕地水土保持研究。E-mail: 2292840566@qq.com。

通讯作者: 赵吉霞, E-mail: zhaojixiacc@163.com。

有研究表明,与单作相比,间作系统由于氮的高分解和吸收从而减少土壤碳、氮储量^[17]。土壤结构与有机碳、氮密切相关,有机碳进入土壤后,在土壤生物作用下分解为一系列短链化合物,再通过生物构建作用与土壤矿物颗粒形成土壤团聚体,提高团聚体稳定性,从而改善土壤质地和结构,减少水土流失^[4]。但目前关于红壤坡耕地不同种植模式下碳、氮的研究较少,因此,有必要探明间作种植下土壤有机碳、氮养分及其组分的变化特征,以改良坡耕地土壤耕层结构,优化土壤蓄水保肥能力,从而减少坡耕地水土流失。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

田间试验在云南省昆明市盘龙区松华乡大摆村(25° 15' N, 102° 59' E)进行,此地海拔为2200 ~ 2300 m,年均气温为16℃,年均降水量为900 ~ 1000 mm。长期定位试验于2017年开始,本试验于2019年10月在作物成熟期进行采样;供

试土壤为红壤,其基本性质如表1。试验作物品种有萝卜(水白晶)、大豆(滇豆7号)、玉米(云瑞88)。

表1 供试土壤基本理化性质

有机质 (g · kg ⁻¹)	pH	碱解氮 (mg · kg ⁻¹)	有效磷 (mg · kg ⁻¹)	速效钾 (mg · kg ⁻¹)
39.55	5.20	105.00	26.83	217.00

1.2 试验设计

在同一坡面随机区组设计面积为4 m × 10 m = 40 m²的15个小区,试验共设置5个处理:玉米//大豆间作(MR),玉米//萝卜间作(MS),玉米单作(MM),大豆单作(RR),萝卜单作(SS),每个处理设置3个重复,其种植模式见表2。间作试验于2017年开始,后期2018和2019年在种植模式和处理不变的基础上连续种植3年,而本试验在2019年5月种植并于10月作物成熟期进行采样。作物在每年5 ~ 10月种植一季,收获后试验地为空闲状态。

表2 不同处理的种植模式

处理	种植模式	行距(m)	株距(m)	种植区的行株数
MR	2行玉米间作2行大豆	0.40	大豆0.25,玉米0.25	玉米12行 × 13株 大豆11行 × 16株
MS	2行玉米间作2行萝卜	0.40	玉米0.25,萝卜0.30	玉米12行 × 13株 萝卜11行 × 11株
MM	宽窄行	宽行0.80,窄行0.40	0.25	17行 × 16株
RR	等行距	0.60	0.25	17行 × 16株
SS	等行距	0.60	0.30	17行 × 13株

1.3 田间管理

按照当地常规施肥量进行施肥,间作与单作玉米、大豆和萝卜施肥量均不变,单作玉米和间作玉米施肥量均为N 315.00 kg · hm⁻²、P₂O₅ 120.00 kg · hm⁻²、K₂O 120.00 kg · hm⁻²,其中氮肥1/2作基肥,1/2在喇叭口期进行追肥,磷肥和钾肥作基肥施用;单作大豆和间作大豆施肥量均为N 120.00 kg · hm⁻²、P₂O₅ 240.00 kg · hm⁻²、K₂O 180.00 kg · hm⁻²;单作萝卜和间作萝卜施肥量均为N 150.00 kg · hm⁻²、P₂O₅ 150.00 kg · hm⁻²、K₂O 225.00 kg · hm⁻²。所用氮肥为尿素(N 46%),磷肥为过磷酸钙(P₂O₅ 16%),钾肥为硫酸钾(K₂O 51%),施肥方式均为穴施。同时根据土壤干旱和杂草生长

情况适时进行灌水和除草。

1.4 土样采集与测定方法

在成熟期进行采样,每个小区按“S”形(3点采样)进行采样,采集0 ~ 20 cm土层行间土样(玉米//大豆间作采集玉米大豆之间的行间土,玉米//萝卜间作采集玉米萝卜之间的行间土),混合成一个样品,一部分土样自然风干后用于测定有机碳(SOC)、氮组分,另一部分土样在0 ~ 4℃冷藏,以待及时测定微生物量碳(MBC)、氮(MBN)和可溶性有机碳、氮。

供试土壤测定指标方法参考《土壤农化分析》^[18];微生物量碳、氮采用氯仿熏蒸—K₂SO₄浸提法测定^[19];可溶性有机碳(DOC):称取过2 mm筛的

新鲜土样 20 g 于 100 mL 离心管中, 加入 40 mL 蒸馏水 (水土比为 2:1), 在 25℃ 条件下, 以 $250 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速度振荡 0.5 h, 接着在转速为 $8000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下离心 10 min, 上部悬浮液过 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜, 滤液测定前需在 -18°C 冷冻保存; 滤液中有机碳含量用总有机碳 (TOC) 分析仪测定; 可溶性有机氮 (DON): 可溶性总氮 (TSN) 与矿质氮 (SIN) 差减法获得, 其中 TSN 和 SIN 分别采用带有氮检测器的 TOC 分析仪和流动分析仪测定。

1.5 数据处理

数据采用 Excel 2010 进行数据预处理, 应用 SPSS 23.0 进行数据统计分析, 并采用 origin 进行相关图形的绘制。

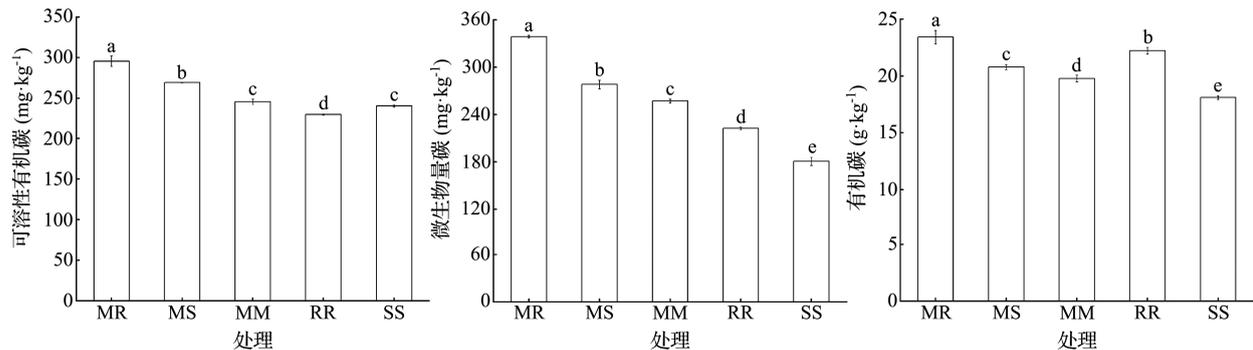


图 1 不同处理下有机碳组分的含量

注: 不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

2.2 不同种植模式对坡耕地红壤有机氮组分及碳氮比的影响

如图 2 所示, 各活性有机碳、氮组分在不同种植模式下的变化规律不同, 其中与单作相比, 间作种植可提高 TN、MBN 和 DON 的含量。与 MM 和 RR 处理相比, MR 处理可分别显著提高 TN 含量 13.40% 和 19.20%、MBN 含量 84.30% 和 64.40%、DON 含量 75.60% 和 50.00%。MS 处理下 TN 含量较 MM 和 SS 处理提高了 2.70% 和 4.40% ($P > 0.05$), MBN 含量较 MM 和 SS 处理显著提高了 31.00% 和 0.80%, 而 DON 则较 MM 处理降低了 4.46%, 较 SS 处理显著降低了 23.42%。

由图 2 可知, 土壤碳氮比 (SOC/TN) 波动范围为 9.90 ~ 12.58, 其中除 RR 处理外, MR、MS 处理 SOC/TN 均高于 MM、SS 处理 ($P > 0.05$)。微生物量碳氮比 (MBC/MBN) 和可溶性有机碳氮比 (DOC/DON) 波动范围分别为 2.12 ~ 3.93 和 3.15 ~ 5.28, 且 MS 处理均显著高于 SS 处理; 而

2 结果与分析

2.1 不同种植模式对坡耕地红壤有机碳组分的影响

与单作相比, 间作种植可显著提高土壤 SOC、MBC、DOC 含量 (图 1)。其中, 间作 MR 处理 SOC 含量较单作 MM、RR 处理分别显著提高了 18.40%、5.40% ($P < 0.05$), MS 处理 SOC 含量较单作 MM、SS 处理分别显著提高了 5.10%、14.80% ($P < 0.05$)。且 MBC、DOC 含量变化趋势与 SOC 一致, 即间作种植高于单作种植, MR 处理 MBC、DOC 含量分别较 RR 和 MM 处理分别显著提高 31.60% ~ 52.10% 和 20.38% ~ 28.70%, MS 处理 MBC、DOC 含量较 MM 和 SS 处理分别显著提高 8.10% ~ 53.80% 和 9.60% ~ 12.00%。

MR 处理则低于 MM、RR 处理。

2.3 不同种植模式下土壤活性有机碳、氮组分分配比率

由表 3 可知, 与单作相比, 间作种植可显著提高土壤微生物量碳、氮和可溶性有机碳、氮占土壤有机碳氮的分配比率, 其中 MBC/SOC、MBN/TN 提升效果较显著。MBC/SOC 以 MR、MS 处理最高, 其比值分别为 1.45、1.34。而 DOC/SOC 除 SS 处理最高外, 均为间作处理高于单作且差异显著。MBN/TN 变化趋势与 DOC/SOC 一致, 即除 SS 处理最高外, 间作处理均高于单作。DON/TN 为 2.68% ~ 4.49%, MR 处理最高, 为 4.49%, MS 处理最低, 为 2.68%。

2.4 不同种植模式下土壤有机碳、氮组分相关性分析

各碳、氮组分与土壤有机碳、氮均呈正相关 (表 4), 表明各有有机碳、氮组分与土壤有机碳、氮间存在紧密关系。其中 TN 与 MBN、MBC、DOC

呈极显著相关 ($P<0.01$), 与 DON 呈显著相关 ($P<0.05$); DON 与 MBN 呈极显著相关 ($P<0.01$), 与 SOC、DOC 呈显著相关 ($P<0.05$); MBN 与 SOC、MBC、DOC 呈显著相关 ($P<0.05$); SOC 与 MBC 呈极

显著相关 ($P<0.01$), 与 DOC 呈显著相关 ($P<0.05$); MBC 与 DOC 呈极显著相关 ($P<0.01$)。且 DOC 与 MBN、MBC 之间的相关系数均高于 0.85, DON 与 MBN 之间的相关系数均高于 0.80。

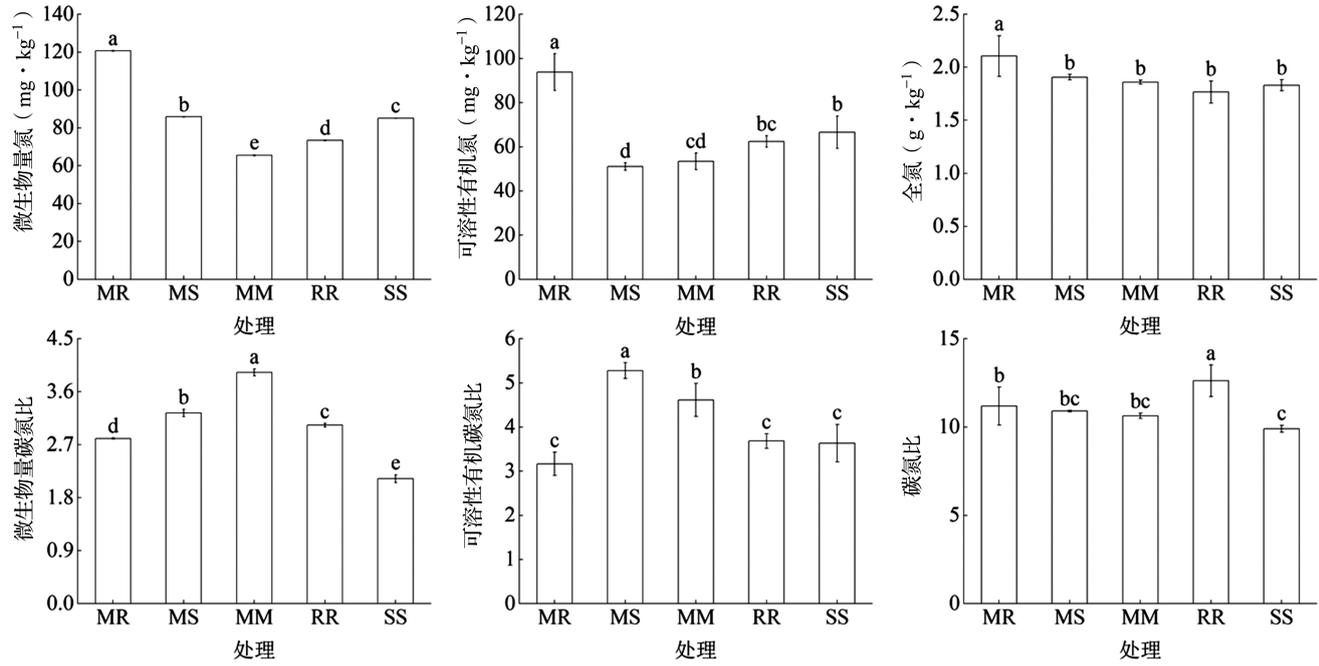


图 2 不同处理下有机氮组分含量和碳氮比差异

表 3 不同处理下土壤有机碳、氮组分分配比率 (%)

处理	MBC/SOC	MBN/TN	DOC/SOC	DON/TN
MR	1.45 ± 0.04a	5.73 ± 0.50a	1.26 ± 0.03a	4.49 ± 0.72a
MS	1.34 ± 0.04b	4.50 ± 0.06b	1.29 ± 0.02b	2.68 ± 0.11b
MM	1.30 ± 0.01b	3.52 ± 0.04bc	1.24 ± 0.02c	2.87 ± 0.17bc
RR	1.00 ± 0.01c	4.15 ± 0.25c	1.03 ± 0.00c	3.54 ± 0.17cd
SS	1.00 ± 0.03c	4.65 ± 0.13d	1.33 ± 0.01d	3.64 ± 0.34d

注: 不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

表 4 不同处理下土壤有机碳和全氮及其组分的相关性

指标	DOC	MBC	SOC	DON	MBM	TN
DOC	1.000					
MBC	0.886**	1.000				
SOC	0.539*	0.742**	1.000			
DON	0.589*	0.482	0.518*	1.000		
MBN	0.858*	0.661*	0.542*	0.844**	1.000	
TN	0.733**	0.715**	0.416	0.555*	0.726**	1.000

注: * 表示在 $P<0.05$ 水平显著相关, ** 表示在 $P<0.01$ 水平极显著相关。

3 讨论

3.1 不同种植模式对坡耕地红壤有机碳、氮组分的影响

土壤有机碳、氮是土壤重要的组成部分,其含量、组成和动态变化决定着土壤质量状况和土壤结构。活性有机质在土壤肥力变化和碳氮比循环方面具有重要作用,其受地上部和地下部环境影响较大^[20]。以往研究表明,间作通过提高作物根系分泌物、凋落物等溶解性有机碳来源,提高土壤中有效性较高、易被微生物利用的活性有机碳、氮组分的含量,有助于增强微生物的活性,从而增加土壤微生物量碳、氮^[21-22]。较多研究也发现,由于较高的生物量和生态位互补间作系统可显著提高土壤有机碳组分含量^[23-25]。本研究也有类似结论,间作种植能有效增加有机碳及其组分含量。与单作相比,间作植物多样性较丰富,碳源的增加影响微生物群落多样性和活性,也抑制分解过程中的碳损失,从而增加碳储量^[11]。此外,丰富且复杂的间作作物根系通过周转可为土壤提供较稳定的碳^[26-27]。微生物底物的增加可通过加速矿化和腐解土壤原有机碳和碳源,从而增加活性碳组分含量^[28]。张宏^[29]研究表明,土壤生物量与有机碳的积累呈正相关关系。另外一项研究证实间作系统中作物根系发达,进而促进有机碳含量增加^[30],本研究结果与之保持一致。然而,有部分学者认为间作系统可使土壤 SOC 和 TN 的储量降低^[28],间作固存碳的能力不明显和对养分资源充分利用的优势促进了作物对根际碳的吸收利用,进而导致养分耗竭使土壤碳浓度下降^[30-31],这可能是间作系统导致土壤中 SOC 和 TN 含量下降的主要原因之一。

较多研究结果表明,间作在一定程度能够促进土壤中氮组分的形成和累积,从而增加土壤养分^[10-11, 32]。本研究也有类似的结论,MR、MS 处理 TN 和各氮组分含量均高于 MM、RR、SS 处理,除 DON 含量 MS 处理较 MM、SS 处理存在下降的趋势外。可能是碳、氮储量存在正反馈调节机制,间作丰富物种多样性促进种间交互作用,进而提高土壤碳和氮含量^[2, 33]。地上部生物量和植物根系是导致土壤中氮含量增加的另一原因。与单作相比,间作处理下生物量和根系量较大,能改善土壤结构,有利于微生物生存,从而提高表层土壤中碳、氮、磷的营养转化率,增加间作区土壤氮含量。同时,间作通过

提高根际参与氮循环和其他有益细菌群的丰度,促进碳水化合物分解和再利用,从而提高土壤氮含量^[34]。许多学者也证实,玉米-蚕豆、小麦-蚕豆间作通过根系分泌物刺激蚕豆根瘤生长与固氮,从而提高间作体系的氮素吸收量^[35-36]。MS 处理 DON 含量较 MM、SS 处理低的原因可能是间作作物中没有豆科作物,固氮能力差。另外,间作处理下生物量较高,促进了土壤中养分利用率的提高,从而导致土壤氮含量下降^[34]。郝旺林等^[37]研究也发现,不同作物间套作种植模式在提高光热等资源利用、土地生产力、协同增加作物产量等方面具有不同的优势。本研究也发现,与玉米//萝卜间作相比,玉米//大豆间作提高土壤碳、氮含量较明显,一方面以豆科植物为主的间作系统中豆科植物可以通过提高自身生物固氮能力降低对土壤中氮的吸收,还可以通过根系结构截获部分养分减少土壤中硝酸盐的淋溶,从而使土壤氮储量升高^[38-39]。另一方面豆科与禾本科间作,由于禾本科作物吸收土壤氮素能力较强的同时也增加了豆科植物的固氮能力,且玉米与大豆间作可显著改变玉米的根系形态,增大根系与土壤的接触面积,从而减小碳、氮养分的淋失^[38, 40]。

土壤碳氮比表征土壤系统内部的碳、氮耦合关系,可制约碳、氮平衡和揭示两者间的相互作用与关系以及养分的可获性^[41]。本试验中, SOC/TN、MBC/MBN、DOC/DON 波动范围均较小,分别为 9.90 ~ 12.58、2.12 ~ 3.93、3.15 ~ 5.28,其中 MS 处理 SOC/TN、MBC/MBN、DOC/DON 均高于 MM、SS 处理,可能是间作系统中作物生物量丰富,土壤碳源增加,最终导致碳氮比增加。另外,间作条件下外源碳的种类和数量高于单作,微生物底物的增加可以通过加速矿化和腐解土壤原有机碳和碳源,增加碳组分含量^[28]。而 MR 和 MM、RR 处理 SOC/TN、MBC/MBN、DOC/DON 差异不显著,可能是间作虽然增加了土壤有机碳和全氮含量,但土壤全氮含量的增加速度往往小于有机碳的增加速度,因此,土壤有机碳氮比较高。

3.2 不同种植模式下土壤活性有机碳、氮组分分配比率及相关性

活性碳、氮组分分配比率可反映该组分对有机碳、氮的贡献程度,其比例越高则有效性越强,越容易被微生物利用^[42]。研究发现,由于间作作物的生长可以为土壤提供根系分泌物、凋落物、残

体等溶解性有机碳来源,从而提高土壤溶解性有机碳、氮含量和比例;并且生物量较高的间作系统可通过提供微生物所需的养分和能量,增加微生物碳、氮含量^[12, 20]。也有学者表明,土壤总有机碳和全氮与土壤可溶性有机碳、氮以及微生物量碳、氮之间呈显著正相关关系^[29, 43]。本研究结果与之保持一致,即间作种植下土壤可溶性有机碳、氮和微生物量碳、氮占土壤有机碳比例普遍较单作要高,且微生物量碳、氮所占比例较大。而土壤可溶性有机氮所占比率在MS处理间作优势不明显,可能是作物间的相互作用促进土壤全氮转化为无机态氮,从而被作物直接吸收利用^[29]。土壤碳、氮组分之间具有一定的相关性,其中,SOC、MBC、TN、MBN与土壤碳、氮的转化密切相关。Sparling^[44]也指出,可将MBC/SOC作为土壤有机质变化的敏感指标。

4 结论

(1) 间作种植可显著提高土壤有机碳、氮及其组分的含量。玉米//大豆间作和玉米//萝卜间作处理较单作玉米、大豆和萝卜处理可有效提高有机碳、微生物量碳、可溶性有机碳和有机氮、微生物量氮、可溶性有机氮的含量,增加幅度分别为5.10%~53.8%和0.80%~84.3%。

(2) 间作种植可提高DOC、MBC和DON、MBN所占土壤SOC、TN的比例。其中MBC/SOC和DON/TN提高效果最显著,MBC/SOC为1.00%~1.71%,DON/TN为5.10%~14.18%。同时MBC、MBN与SOC、TN相关性较大,可较好地反映SOC、TN的动态变化。

参考文献:

- [1] 王帅兵. 等高反坡阶对滇中红壤坡耕地土壤水分运动影响研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2019.
- [2] Cong W F, Hoffland E, Li L, et al. Intercropping enhances soil carbon and nitrogen[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(4): 1715-1726.
- [3] Follett R F. Soil management concepts and carbon sequestration in cropland soils[J]. *Soil and Tillage Research*, 2001, 61(1-2): 77-92.
- [4] Hart J K. Proglacial glaciotectionic deformation at Melabakkar-Ásbakkar, west Iceland[J]. *Boreas*, 1994, 23(2): 112-121.
- [5] 杜满义, 范少辉, 漆良华, 等. 不同类型毛竹林土壤碳、氮特征及其耦合关系[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(4): 198-202.
- [6] Leifeld J, Kögel-Knabner I. Soil organic matter fractions as early indicators for carbon stock changes under different land-use[J]. *Geoderma*, 2005, 124(1-2): 143-155.
- [7] 王有良, 宋重升, 彭丽鸿, 等. 间伐对杉木人工林土壤碳氮及其组分特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(5): 204-212.
- [8] 刘金山, 戴健, 刘洋, 等. 过量施氮对旱地土壤碳、氮及供氮能力的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(1): 112-120.
- [9] 吴科生, 宋尚有, 李隆, 等. 氮肥和接种根瘤菌对碗豆玉米间作产量和水分利用效率的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22(11): 1274-1280.
- [10] Li Q, Yu P, Li G, et al. Grass-legume ratio can change soil carbon and nitrogen storage in a temperate steppe grassland[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 157: 23-31.
- [11] Chen J, Arafat Y, Wu L, et al. Shifts in soil microbial community, soil enzymes and crop yield under peanut/maize intercropping with reduced nitrogen levels[J]. *Applied Soil Ecology*, 2018, 124: 327-334.
- [12] 农金花. 果菇间作系统下紫色土碳氮组分变化特征及其相互关系研究[D]. 重庆: 西南大学, 2017.
- [13] 张玉岱, 李同川, 张道勇, 等. 间作白三叶对苹果/白三叶复合系统土壤总有机碳及轻组有机碳的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(4): 810-818.
- [14] 王义祥, 翁伯琦, 黄毅斌, 等. 不同垦殖方式下果园土壤有机碳的空间分布特征[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(12): 2511-2517.
- [15] 周卫军, 王凯荣, 李合松. 大豆-柑桔间作系统中作物对磷的吸收利用特性[J]. *生态学报*, 2003(12): 2565-2572.
- [16] 王建湘, 周杰良, 李树战, 等. 南方丘陵山地梨园间作早稻对土壤理化性质的影响[J]. *中国水土保持*, 2007(5): 33-34.
- [17] Zhou Q, Chen J, Xing Y, et al. Influence of intercropping Chinese milk vetch on the soil microbial community in rhizosphere of rape[J]. *Plant and Soil*, 2019, 440(1): 85-96.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 1999: 30-34.
- [19] 陈晓芳, 李忠佩, 刘明, 等. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳、氮分布和微生物生物量的影响[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(5): 950-960.
- [20] Yu Q, Hu X, Ma J, et al. Effects of long-term organic material applications on soil carbon and nitrogen fractions in paddy fields[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 196: 104483.
- [21] 张坤. 幼龄果园间作对土壤有机碳组分含量及活性的影响[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
- [22] Wang D, Yi W, Zhou Y, et al. Intercropping and N application enhance soil dissolved organic carbon concentration with complicated chemical composition[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 210: 104979.
- [23] 李华, 惠竹梅, 张振文, 等. 行间生草对葡萄园土壤肥力和葡萄叶片养分的影响[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(z1): 116-119.
- [24] 韩文斌, 谢树果, 杜春梅, 等. 四川丘陵区桔园间作豆科绿

- 肥的效应 [J]. 中国南方果树, 2014 (5): 62-63.
- [25] 张媛. 华南红壤坡地幼龄果园间作对土壤碳、氮组分的影响 [D]. 广州: 华南农业大学, 2017.
- [26] Dikgwaltho S B, Chen Z D, Lal R, et al. Changes in soil organic carbon and nitrogen as affected by tillage and residue management under wheat-maize cropping system in the North China Plain [J]. *Soil and Tillage Research*, 2014, 144: 110-118.
- [27] Makumba W, Akinnifesi F K, Janssen B, et al. Long-term impact of a gliricidia-maize intercropping system on carbon sequestration in southern Malawi [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2007, 118 (1-4): 237-243.
- [28] 周泉, 张小短, 马淑敏, 等. 间作绿肥对油菜根际土壤碳氮及根际微生物的影响 [J]. *生态学报*, 2017 (23): 7965-7971.
- [29] 张宏. 黄土高原不同植被区侵蚀环境下有机碳及其组分分布特征 [D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2013.
- [30] 黄田田. 饲用油菜高丹草间作结合施肥对饲草产质量及土壤有机碳组分的影响 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020.
- [31] 廖桂平, 官春云. 不同播期对不同基因型油菜产量特性的影响 [J]. *应用生态学报*, 2001 (6): 853-858.
- [32] Gitari H I, Gachene C K K, Karanja N N, et al. Potato-legume intercropping on a sloping terrain and its effects on soil physico-chemical properties [J]. *Plant and Soil*, 2019, 438 (1): 447-460.
- [33] Hooper D U, Adair E C, Cardinale B J, et al. A global synthesis reveals biodiversity loss as a major driver of ecosystem change [J]. *Nature*, 2012, 486 (7401): 105-108.
- [34] 李艳君. 施磷和玉米/苜蓿间作对东北农牧交错带土壤有机碳和全氮储量的影响 [D]. 哈尔滨: 东北师范大学, 2021.
- [35] Li B, Li Y Y, Wu H M, et al. Root exudates drive interspecific facilitation by enhancing nodulation and N₂ fixation [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, 113: 6496-6501.
- [36] Liu Y C, Yin X H, Xiao J X, et al. Interactive influences of intercropping by nitrogen on flavonoid exudation and nodulation in faba bean [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 1-11.
- [37] 郝旺林, 梁银丽, 朱艳丽, 等. 农田粮-菜轮作体系的生产效益与土壤养分特征 [J]. *水土保持通报*, 2011, 31 (2): 46-51.
- [38] 李娟, 王文丽, 赵旭, 等. 根际分隔对玉米/豌豆间作种间竞争及豌豆结瘤固氮的影响 [J]. *干旱地区农业研究*, 2016, 34 (6): 177-183.
- [39] 张晓娜, 陈平, 杜青, 等. 玉米/大豆、玉米/花生间作对作物氮素吸收及结瘤固氮的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2019, 27 (8): 1183-1194.
- [40] 李金婷, 覃潇敏, 覃宏宇, 等. 间作对玉米根系形态特征及其氮磷养分吸收的影响 [J]. *南方农业学报*, 2022, 53 (5): 1348-1356.
- [41] 李序进, 蔡立群, 李海亮. 兰州百合连作土壤碳氮磷化学计量特征及酶活性研究 [J]. *中国农学通报*, 2021, 37 (6): 82-88.
- [42] 贺美, 王迎春, 王立刚, 等. 深松施肥对黑土活性有机碳氮组分及酶活性的影响 [J]. *土壤学报*, 2020, 57 (2): 446-456.
- [43] 李会科, 张广军, 赵政阳, 等. 黄土高原旱地苹果园生草对土壤养分的影响 [J]. *园艺学报*, 2007 (2): 477-480.
- [44] Sparling G P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter [J]. *Soil Research*, 1992, 30 (2): 195-207.

Effects of different planting patterns on organic carbon and nitrogen components of red soil in sloping farmland

YANG Chun-huai, LI Yong-mei, LI Xiao-mei, LU Ze-rang, ZHAO Ji-xia* (College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming Yunnan 650201)

Abstract: It is of great significance to study the changes of organic carbon and nitrogen components of red soil under different planting patterns to improve the quality of red soil. Through the plot experiment, five planting patterns of maize // radish intercropping (MS), maize // soybean intercropping (MR), maize monoculture (MM), soybean monoculture (RR) and radish monoculture (SS) were set up. The results showed that intercropping promoted the increase of soil organic carbon (SOC) and nitrogen (TN), microbial biomass carbon (MBC) and nitrogen (MBN), dissolved organic carbon (DOC) and nitrogen (DON) content, among which the enhancement effect of MBC and MBN content was more significant. Compared with MM and RR, the contents of SOC, MBC and DOC in MR treatment were increased by 18.40%-31.60% and 5.40%-52.10%, respectively, while the contents of TN, MBN and DON were increased by 13.40%-84.30% and 19.20%-64.40%, respectively. Compared with MM and SS treatments, the contents of SOC, MBC and DOC in MS treatment were increased by 5.10%-9.60% and 12.00%-53.80%, respectively, while the contents of TN, MBN and DON were increased by 2.70%-31.00% and 0.80%-23.42%, respectively. The contents of MBC and DON accounted for the larger proportion of SOC and TN, which were 1.00%-1.71% and 5.10%-14.18%, respectively. The correlation analysis showed that the content of each carbon and nitrogen component was significantly and positively correlated with SOC and TN, with the correlation coefficients between DOC and SOC, MBN and TN above 0.70, indicating that DOC and MBN could better reflect the dynamic changes of SOC and TN. In conclusion, the content of carbon and nitrogen components in red soil under intercropping is more advantageous than that under monoculture, which can be used as a technical measure for soil and water conservation, fertilizer increase and efficiency improvement of slope cultivated land in this area.

Key words: sloping cultivated red soil; intercropping; soil active carbon fractions; soil active nitrogen fractions