

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2022.01.005

# 干热河谷新银合欢人工林土壤颗粒态有机碳氮特征

罗明没<sup>1</sup>, 毛姣艳<sup>1</sup>, 师睿<sup>2</sup>, 李玮<sup>1</sup>, 胡斌<sup>1</sup>, 冯德枫<sup>3\*</sup>

(1. 云南大学生态与环境学院, 云南省高原山地生态与退化环境修复重点实验室, 云南昆明 650091; 2. 云南大学国际河流与生态安全研究院, 云南昆明 650091; 3. 中国林业科学研究院高原林业研究所, 云南昆明 650233)

**摘要:** [目的] 探究人工林恢复过程中的土壤颗粒态碳氮含量变化特征, 为研究土壤碳氮动态对人工林恢复的响应机制提供依据。[方法] 选择金沙江元谋干热河谷天然灌草丛(对照样地, CK)和不同林龄阶段的新银合欢林地(新银合欢幼龄林(SL)、中龄林(ML)和成龄林(LL))为研究对象, 研究天然灌草丛和不同阶段新银合欢林地土壤颗粒态碳氮含量的变化特征。[结果] 与天然灌草丛相比, 新银合欢林分显著影响土壤有机碳(SOC)、总氮(TN)、颗粒态有机碳(POC)、颗粒态有机氮(PON)、POC/SOC、POC/PON和颗粒态质量比例; SOC和TN含量在成龄林阶段最高, 而POC、PON、POC/SOC、POC/PON均在中龄林阶段最高。[结论] 新银合欢入侵干热河谷灌草丛会显著改变土壤碳氮动态及其稳定性, 成龄林阶段的土壤养分含量最高, 而中龄林阶段土壤稳定性最低。该研究为综合评价新银合欢人工林在提升干热河谷土壤生态功能方面提供科学依据和数据支撑。

**关键词:** 干热河谷; 植被恢复; 活性碳; 有机质稳定性; 碳氮比

**中图分类号:** S154.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-1498(2022)01-0040-08

土壤是陆地生态系统最大的有机碳库, 在全球碳循环中起着重要作用, 土壤有机碳库的微小变化都极有可能显著影响全球的碳平衡<sup>[1-2]</sup>。土壤有机碳(SOC)由多种活性、功能和周转速率不同的组分构成<sup>[3]</sup>。SOC很难准确及时反映环境变化对土壤碳汇功能的影响, 因而土壤有机碳组分变化是认识SOC库动态变化的关键<sup>[4]</sup>。土壤活性有机碳组分具有较强的环境变化敏感性, 它的动态响应变化能够准确反映土壤碳库的细微变化<sup>[5]</sup>。土壤颗粒态有机碳(POC)是活性有机碳库的重要组成部分, 其在有机碳库中所占比例(POC/SOC)及其养分含量和化学计量特征在一定程度上能够指示土壤有机碳的稳定性<sup>[6]</sup>。具有较高POC/SOC值的土壤有机碳比较容易被矿化, 而具有较低POC/SOC值的土壤有机碳相对较稳定<sup>[7]</sup>。土壤颗粒态有机氮

(PON)属于土壤有机氮中的活性部分, 容易转化分解为无机态氮素, 直接用于植物氮源补给, 维持土壤氮素的平衡, 在土壤氮循环过程中起着非常重要的作用<sup>[8]</sup>。PON主要由部分分解的植物残留物和微生物副产物组成, 是微生物氮的主要来源<sup>[9]</sup>。它通常与净氮矿化相关<sup>[10]</sup>, 增加土壤PON含量会提高土壤有机氮循环速率和有效性<sup>[11]</sup>。PON的敏感性变化可以指示土壤有机氮动态, 因此, 研究颗粒态碳氮变化对土壤碳氮动态及其稳定性具有重要作用<sup>[11]</sup>。

干热河谷地区植被是我国西南地区较为脆弱的典型生态系统<sup>[12]</sup>。新银合欢(*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit)根系发达且具有根瘤, 固氮作用良好, 生长迅速且耐旱和耐瘠能力强, 对于热生境具有较强的适应性, 在金沙江干热河谷地区的植被

收稿日期: 2021-06-23 修回日期: 2021-11-15

基金项目: 中国林业科学研究院基本科研业务费专项(CAFYBB2020SY031); 国家自然科学基金(32101594); 国家级大学生创新创业训练计划(201910673010)资助

\* 通讯作者: 冯德枫, 博士。主要研究方向: 恢复生态、生态化学计量学和土壤碳氮循环。E-mail: fengdf@caf.ac.cn

恢复中被大量引进, 形成了该区域典型的新银合欢人工林<sup>[13]</sup>。研究表明, 种植新银合欢会降低土壤C/N, 影响颗粒态有机物质的储存<sup>[14]</sup>。目前, 干热河谷地区新银合欢林地的相关研究主要集中在地表植物物种组成和多样性的环境负效应<sup>[15]</sup>、土壤碳储量<sup>[16]</sup>以及土壤水分变化特征<sup>[17]</sup>等方面, 而对新银合欢林地土壤有机碳稳定性及其碳氮动态研究较少涉及。活性组分碳氮动态变化在土壤碳氮循环过程中起着重要作用, 探究新银合欢林地恢复过程中的土壤颗粒态碳氮含量及其分配特征有助于揭示干热河谷典型固氮人工植被对土壤碳氮动态的影响机制。因此, 在金沙江元谋干热河谷地区, 选择天然灌草丛为对照, 以不同林龄阶段的新银合欢林地土壤为研究对象, 研究新银合欢入侵过程全土和土壤颗粒态有机碳氮含量及其分配比例变化特征, 以期阐明干热河谷新银合欢人工林的土壤固碳能力及其稳定机制, 为科学客观评估区域植被恢复提升土壤生态功能效应方面提供理论依据。

## 1 研究区概况

元谋干热河谷 (25°31'~26°07' N, 101°36'~102°07' E) 位于金沙江流域干热亚区<sup>[16]</sup>, 是金沙江流域干热河谷的典型代表区域。该地区属南亚热带干热季风气候, 多年平均气温 21.9℃, 年均降水量 642.2 mm, 年平均蒸发量 3 911.2 mm, 年日照时数约 2 670.4 h<sup>[18]</sup>。其气候与萨王纳稀树草原气候相似<sup>[19]</sup>。土壤类型主要为燥红土、紫色土和变性土。

研究地点位于国家林业和草原局云南元谋荒漠生态系统国家定位站和元谋县国有林场大哨分场, 海拔分布范围为 1 200~1 550 m。由于国有林场严禁放牧和长期的人工管护, 生态站内存在典型的天然

灌草丛群落, 其中, 灌木主要以滇榄仁 (*Terminalia franchetii* Gagnep.)、余甘子 (*Phyllanthus emblica* Linn.)、车桑子 (*Dodonaea viscosa* (L.) Jacq)、华西小石积 (*Osteomeles schwerinae* Schneid.) 和岩柿 (*Diospyros dumetorum* W. W. Smith) 等为优势物种; 草本主要以扭黄茅 (*Heteropogon contortus* (Linn.) Beauv.)、孔颖草 (*Bothriochloa pertusa* (L.) A. Camus)、拟金茅 (*Eulaliopsis binate* (Retz.) C. E. Hubb.) 和橘草 (*Cymbopogon goeringii* (Steud.) A. Camus) 等禾本科为优势物种。2000年前后, 林场附近居民点和国道引入种植了新银合欢, 通过种子传播和种群生长的方式, 不断扩大种群分布面积, 后逐步扩散进入生态站内的天然灌草丛中。据此, 沿着新银合欢成龄林向外不断发展形成了不同林龄阶段的斑块状的新银合欢人工群落。

## 2 研究方法

### 2.1 试验设计

本研究以元谋干热河谷生态定位站内海拔 1 550 m 处的天然灌草丛 (对照样地) 和不同林龄阶段的新银合欢林地作为研究对象。在土壤背景一致的前提下, 通过查阅国有林场资料并结合林分结构特征 (密度、郁闭度和胸径) 选取研究样地 (20 m × 20 m), 依据林龄将新银合欢林分划分为 3 个不同的林龄阶段: 幼龄林阶段 (SL, 3 a)、中龄林阶段 (ML, 10 a) 和成龄林阶段 (LL, 20 a), 并选择各个龄级样地临近的天然灌草丛作为对照样地 (5 m × 5 m, CK), 每种处理 4 个重复, 从而形成新银合欢入侵 (SL、ML、LL) 干热河谷天然灌草丛 (CK) 的系列样地。样地具体信息见表 1。

表 1 新银合欢样地基本情况

Table 1 General information of *Leucaena leucocephala* plantations

阶段 Stages	物种组成 Species composition	平均高度 Average height/m	平均密度 Average density/(株·m <sup>-2</sup> )	平均胸径 Average DBH/cm	最大胸径 Maximum DBH/cm
CK	车桑子、滇榄仁、扭黄茅、橘草、孔颖草	1.2	—	—	—
SL	新银合欢、扭黄茅	1.7	44.00	0.90	2.67
ML	新银合欢、滇榄仁	5.6	3.76	3.16	17.97
LL	新银合欢、滇榄仁、华西小石积、扭黄茅	7.4	0.64	6.05	31.00

### 2.2 样品采集与处理

在选择好的灌草丛和新银合欢样地中, 调查物

种组成和高度, 每个样地内设置 4 个 1 m × 1 m 的小样方, 在每个小样方内去除凋落物后使用内径

为 5 cm 的土钻按照“S”形选择 4 个点采取 0~10 cm 的土壤样品, 将各个样地内的土壤挑出砾石和根系后混合土壤样品带回实验室用于测定土壤有机碳、全氮和土壤颗粒态有机碳氮。

### 2.3 测定方法

SOC 含量采用重铬酸钾氧化-容量法测定<sup>[20]</sup>; 全氮 (TN) 采用全自动间断化学分析仪 (CleverChem Anna, 德国) 测定; POC 和 PON 含量参照湿筛法测定<sup>[21]</sup>, 取过 2 mm 筛的风干土样 10.00 g, 放入 250 mL 三角瓶内, 加入 100 mL 浓度为 5 g·L<sup>-1</sup> 六偏磷酸钠溶液, 手摇 3 min 后, 在震荡机上振荡 18 h (18℃, 90 r·min<sup>-1</sup>)。土壤悬液过 53 μm 筛, 反复用蒸馏水冲洗直到过滤后水为无色, 收集筛上剩余土样到已称质量的铝盒中, 在 60℃ 下烘干 48 h 后称其质量。将铝盒内土壤研磨后, 过 100 目筛, 分析土壤颗粒态的全碳 (全氮) 含量 (g·kg<sup>-1</sup>)。计算公式为:

$$\text{颗粒有机碳(氮)含量} = \frac{\text{全碳(全氮)浓度} \times \text{烘干土样}}{\text{风干土质量} \times k}$$

式中:  $k$  为风干土与烘干土的换算系数<sup>[21]</sup>。

### 2.4 数据处理

试验数据利用 Excel 2016 软件整理。采用单因素方差 (One-way ANOVA) 分析和多重比较 (最小显著差异法 LSD) 分析各项土壤指标 (SOC、TN、POC、PON、C/N、POC/PON) 在灌草丛和新银合欢林地之间以及 4 个不同阶段间的差异显著性 ( $p < 0.05$ ), 采用线性回归分析各土壤指标间关系。在 SPSS Statistics 19.0 上实现统计分析, 利用

OriginPro9.0 绘图。

## 3 结果与分析

### 3.1 全土 SOC、TN 和颗粒态质量比例的变化趋势

单因素方差分析结果 (图 1) 显示: 新银合欢入侵样地与灌草丛样地之间的 SOC、POC、PON、POC/SOC、C/N 和 POC/PON 差异不显著 ( $df=1, p > 0.05$ ), 而 TN、PON/TN 差异显著 ( $p < 0.05$ )。表 2 表明: 全土 SOC、TN 和 C/N 平均值分别为 11.87~61.06 g·kg<sup>-1</sup>、0.78~3.59 g·kg<sup>-1</sup> 和 9.20~19.99, 新银合欢林分生长阶段显著影响全土的 SOC ( $p=0.004$ ) 和 TN ( $p=0.024$ ) 含量, 而对 C/N 影响不显著 ( $p=0.334$ )。与对照灌草丛相比, 新银合欢入侵早期阶段的 SOC 并无显著变化, 而随着林龄增加, SOC 含量显著增加。土壤 TN 含量随林龄增大呈逐渐增加的变化趋势。图 2 表明: 颗粒态质量比例平均值为 41.15%~63.30%, 受到新银合欢入侵年限的显著影响 ( $p=0.003$ ), 幼龄林和中龄林阶段的颗粒态质量比例显著高于灌草丛和成龄林阶段, 且中龄林阶段的土壤颗粒态质量比例最高。

### 3.2 土壤颗粒态的碳氮含量及分配比例变化趋势

表 2 表明: 土壤 POC 平均值为 1.18~12.09 g·kg<sup>-1</sup>, 其值在不同阶段新银合欢林地间差异显著 ( $p=0.001$ ), 与对照灌草丛样地相比, 土壤 POC 含量在幼龄林和成龄林阶段样地上没有发生显著变化, 而在中龄林阶段样地中显著高于其他样地阶

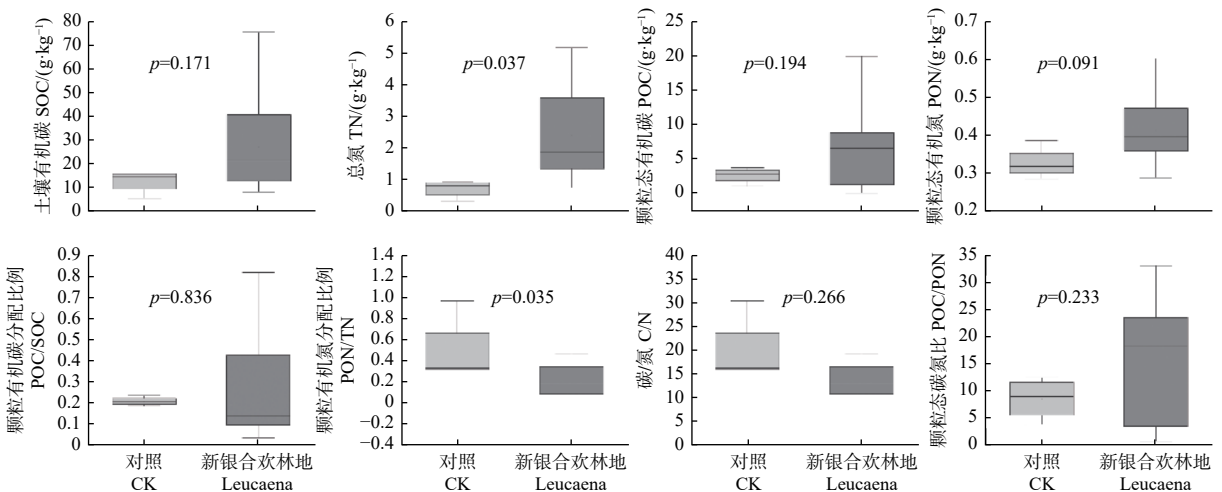


图 1 新银合欢林地与灌草丛土壤间碳氮含量特征的差异性

Fig. 1 Differences of carbon and nitrogen content characteristics between *Leucaena leucocephala* plantation and shrub-grass

表 2 土壤有机碳氮及颗粒态碳氮分配比例在不同林分阶段间的差异性

Table 2 Differences in the distribution ratio of soil organic carbon and nitrogen and particulate carbon and nitrogen at different stages

阶段 Stages	土壤有机碳 SOC/(g·kg <sup>-1</sup> )	总氮 TN/(g·kg <sup>-1</sup> )	碳/氮 C/N	颗粒态有机碳 POC/(g·kg <sup>-1</sup> )	颗粒态有机氮 PON/(g·kg <sup>-1</sup> )	颗粒态有机碳分配比例 POC/SOC	颗粒态有机氮分配比例 PON/TN	颗粒态碳氮比 POC/PON
CK	13.42±2.42 c	0.78±0.14 b	19.99±5.95	2.93±0.57 b	0.33±0.02 b	0.22±0.01 b	0.50±0.16	8.96±1.90 b
SL	11.87±1.16 c	2.03±0.79 ab	9.20±3.36	1.18±0.30 b	0.43±0.03 a	0.09±0.02 b	0.30±0.09	2.78±0.75 b
ML	28.10±5.55 b	1.77±0.24 b	16.86±3.79	12.09±2.91 a	0.50±0.04 a	0.49±0.14 a	0.30±0.06	23.34±3.63 a
LL	61.06±15.31 a	3.59±0.71 a	17.13±2.64	7.32±0.53 bc	0.33±0.02 b	0.14±0.04 b	0.11±0.03	22.32±2.50 a
<i>F</i>	7.656	4.514	1.253	10.388	7.615	5.868	2.794	18.984
<i>p</i>	<b>0.004</b>	<b>0.024</b>	0.334	<b>0.001</b>	<b>0.004</b>	<b>0.010</b>	<b>0.086</b>	<b>0.001</b>

注: 表中数据为平均值±标准误差( $n=4$ ), 同列不同字母代表不同林龄阶段差异显著( $p<0.05$ )。

Notes: Values shown are means and standard deviation ( $n=3$ ). Different letters indicate significant differences between different stand ages ( $p<0.05$ ).

段。POC 占全土 SOC 的比例 (POC/SOC) 平均值为 0.09~0.49, 且该值在新银合欢不同林龄阶段间差异显著 ( $p=0.010$ ), 表现为中龄林阶段样地中 POC/SOC 显著高于其他 3 类样地 (表 2)。土壤 PON 含量平均值为 0.33~0.50 g·kg<sup>-1</sup>, 新银合欢入侵过程导致 PON 发生显著变化 ( $p=0.004$ ), 其值随着新银合欢入侵年限的增加出现先增加后减小的趋势, 在新银合欢幼龄林和中龄林阶段林地的土壤 PON 含量显著高于灌草丛和成龄林阶段。PON 占全土 TN 的比例 (PON/TN) 平均值为 0.11~0.50, 随新银合欢入侵呈降低趋势, 但其影响不显著, 表现为新银合欢入侵成龄林样地的 PON/TN 最低 (表 2)。土壤颗粒态碳氮比 (POC/PON) 的平均值为 2.78~23.34, 也受到新银合欢入侵林分阶段的显著影响 ( $p=0.001$ ), 具体表现为 POC/PON 随着林龄增加而显著增大, 中龄林和成龄林阶段的 POC/PON 要显著高于其他阶段 (表 2)。

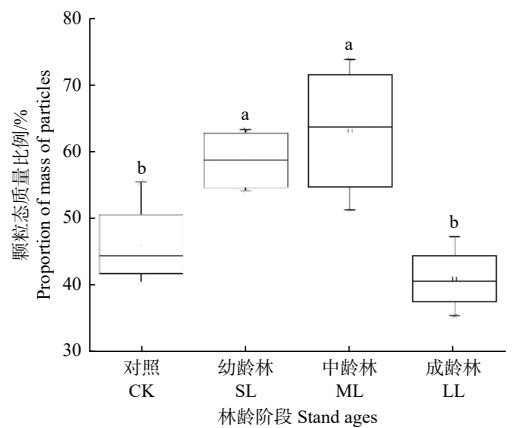
### 3.3 全土和颗粒态碳氮相关关系

从天然灌草丛阶段到新银合欢林地不断发展过程中, 全土和颗粒态碳氮含量间存在紧密关联, 其中, 全土的碳氮含量间存在更为显著的非线性幂函数变化关系 (图 3)。图 4 表明: POC/SOC 和 PON/TN 比例均与土壤颗粒态质量比例显著正相关, POC 含量和 POC/SOC 均随着土壤中颗粒态碳含量增加而极显著增加 ( $p<0.05$ ); 土壤颗粒态碳氮比 (POC/PON) 显著受到 POC 含量的影响。

## 4 讨论

### 4.1 新银合欢入侵对土壤有机碳和全氮的影响

植物叶和根凋落物分解过程中被释放进入土壤



注: 不同字母表示不同林龄阶段间差异显著 ( $p<0.05$ )。下同。

Notes: Different letters indicate statistical significance at different stand ages ( $p<0.05$ ).

图 2 干热河谷新银合欢林地土壤颗粒态质量比例  
Fig. 2 The proportion of mass of soil particulate of *Leucaena leucocephala* plantation in dry-hot valley

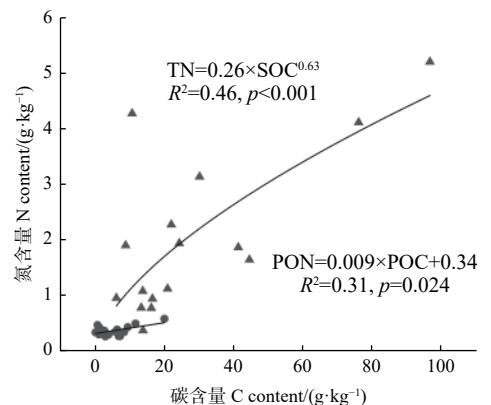


图 3 全土和土壤颗粒态碳氮含量变化关系

Fig. 3 Relationships between carbon and nitrogen contents of bulk and soil particulate

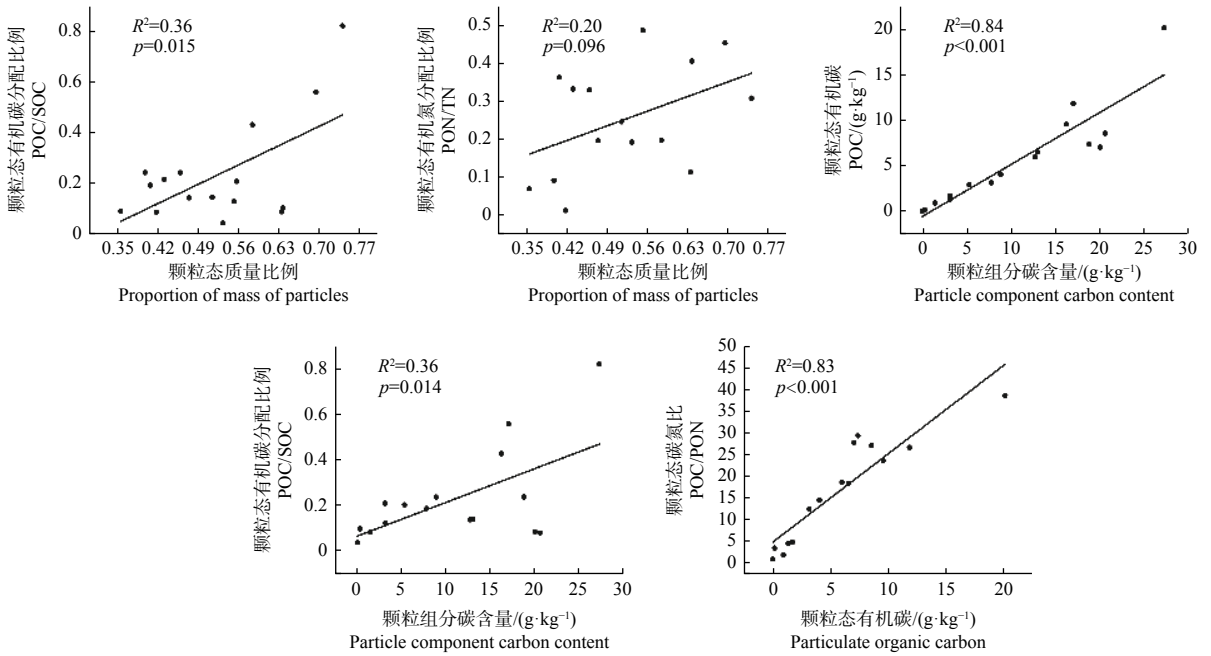


图 4 土壤颗粒态质量比例、颗粒态碳氮含量及其分配比例间关系

Fig. 4 Relationship between the proportion of mass, carbon and nitrogen contents and the distribution of soil particular

的碳是影响 SOC 变化的重要途径<sup>[22-23]</sup>。地上凋落物量及其分解释放过程通常会随着林分生长发生变化<sup>[24]</sup>。研究发现,干热河谷新银合欢人工林土壤 SOC 含量随着林龄阶段增长而不断增大(表 2),与不同林龄梯度上固氮的桉木<sup>[24]</sup>和刺槐人工林<sup>[25]</sup>的研究结果一致,这可能是林分结构特征(地上生物量、密度和郁闭度等)在不同发育阶段的变化所致<sup>[26]</sup>。林地土壤 SOC 的动态变化体现了碳输入与分解的净效应。随着林龄增大,逐渐增加的地上生物量会导致碳输入增加,新银合欢密度和郁闭度也会随之增加,能有效降低林间土壤温度及增加了林分尺度的水分蒸发散失。降低的土壤温度和湿度在一定程度上抑制了微生物群落和酶活性,削弱土壤有机质分解强度,导致土壤碳输出下降<sup>[1]</sup>。本研究, SOC 含量随林龄呈现增大的变化趋势表明新银合欢林地发展过程中土壤碳输入量超过碳分解作用<sup>[27]</sup>。先前研究表明,相对于灌草丛和其他人工植被类型,干热河谷地区营造新银合欢群落能有效改善土壤养分状况<sup>[28]</sup>。本研究也发现,新银合欢入侵天然灌草丛在一定程度上提升了土壤全氮含量(表 2)。新银合欢是典型的豆科固氮植物,随着林分生长和土壤微环境的改善,一方面生物固氮作用会持续不断的将氮素输入进土壤<sup>[29-30]</sup>;另一方面林分生长过程中凋落物归还量的增加也会促进氮素释放进入土壤中,从而使新银合欢林地土壤氮素状

况逐步富集<sup>[31]</sup>,这可能是新银合欢林地土壤 TN 含量不断增加且在成龄林阶段呈现显著最高的原因。

#### 4.2 新银合欢入侵对土壤颗粒态碳氮含量及分配比例的影响

颗粒态有机碳氮含量与土壤结构具有密切关系,易受到植被类型转变的影响<sup>[32]</sup>。本研究结果发现,新银合欢入侵及其林分生长过程不仅能显著影响 SOC 和 TN 含量,而且也会显著影响 POC 和 PON 含量。土壤颗粒态有机碳氮通常受土壤有机碳氮含量及颗粒态质量比例的共同影响<sup>[32]</sup>。新银合欢林地土壤 SOC 和 TN 含量分别与 POC 和 PON 含量间均存在显著正相关关系(图 3),表明碳氮含量在这两个土壤组分间存在密切关联。研究结果显示,新银合欢林分生长过程中颗粒态有机碳氮分配比例与颗粒态质量比例正相关,且二者间的变化趋势一致,表明颗粒态质量比例可能对颗粒有机碳氮动态变化有着更加强烈的调控作用<sup>[33]</sup>。颗粒态有机碳氮是一种非保护性有机碳氮,它们在土壤中的周转率相对较快,对土壤中植物残体积累和根系分布变化较为敏感<sup>[34]</sup>。另外,颗粒态有机氮在矿化作用下能被转化成可吸收的无机氮,使其成为土壤供氮能力的一个潜在指标<sup>[35]</sup>。本研究结果显示, POC 和 PON 含量的最小值发生在灌草丛和幼龄林阶段,而最大值则存在于中龄林阶段(表 2)。表明干热河谷灌草丛土壤受较好物理保护,使其氮供应潜力

较低,而林分生长后期阶段土壤中非保护性的碳氮含量增加,这可能与新银合欢生长过程中叶凋落物和根系积累密切相关。全土 C、N 含量的最大值均存在于成龄林阶段,而颗粒态 C、N 含量的最大值则均存在于中龄林阶段,表明虽然新银合欢入侵能显著的增加全土和颗粒态的 C、N 含量,但是 C、N 养分动态的变化趋势在不同土壤组分之间存在很大的差异。

土壤颗粒态质量比例反映了土壤中具有非保护性结构有机质的相对数量<sup>[36]</sup>。凋落物有机质输入是控制土壤颗粒组分的主要因素<sup>[37]</sup>。本研究中,颗粒态质量比例在不同林龄间具有显著差异性,且在中龄林中最高,可能是由于不同林龄水热要素改变土壤凋落物有机质输入量所导致。灌草丛和幼龄林阶段地上生物量较低,凋落物输入量较低,而相对于中龄林阶段,成龄林阶段的凋落物数量虽然较多,但林下郁闭环境导致的较低光照和温度环境会抑制凋落物分解速率,从而导致了非保护性有机质组分在中龄林阶段土壤中积累最多<sup>[38]</sup>。颗粒态有机碳氮分配比例反映了土壤中活性组分有机碳氮的相对数量。POC/SOC 表征着颗粒态有机碳的相对数量,与土壤有机碳稳定性相关<sup>[39]</sup>,而 PON/TN 则反映了土壤中非保护性氮的相对数量<sup>[40]</sup>。本研究结果发现,新银合欢入侵及林分生长阶段显著影响土壤颗粒态有机碳比例(POC/SOC),且最大值在中龄林阶段,这表明新银合欢林分中期阶段土壤中非保护性有机质含量较高,发生矿化分解作用的潜力较大,养分循环速率越快<sup>[41]</sup>。

### 4.3 新银合欢入侵对全土和土壤颗粒态 C/N 的影响

碳氮比(C/N)与土壤氮矿化速率存在负相关关系,同土壤有机质质量和稳定性变化密切相关<sup>[42]</sup>,可以用来反映土壤碳氮循环过程和土壤质量变化敏感性<sup>[43]</sup>。本研究结果显示,新银合欢入侵及生长显著影响 POC/PON,而对全土 C/N 并无显著影响。表明全土和土壤颗粒态 C/N 随林分生长的变化趋势并不一致,这可能是由于两个土壤组分中 C-N 含量在新银合欢林地生长过程中存在不同形式的协同变化关系所致。具体而言,全土 C-N 间关系符合非线性趋势,而颗粒态 C-N 间存在线性正相关变化关系(图 3)。土壤颗粒态质量比例、颗粒态有机碳氮含量及比值之间具有密切关系<sup>[33]</sup>,它们的动态变化均能体现土壤活性组分变化情况。

土壤颗粒态质量比例、POC/SOC、PON/TN 及 POC/PON 值均在新银合欢中龄林阶段处于最大,这说明中龄林阶段中非稳定性有机质的比例较大,土壤稳定性较差,在环境变化干扰压力下,易发生碳氮养分分解释放。

## 5 结论

干热河谷新银合欢林分 SOC 和 TN 含量在成龄林阶段最高,而颗粒态质量比例、颗粒态有机碳含量及颗粒态有机碳分配比例和 POC/PON 均在中龄林阶段最高,表明全土和颗粒态有机碳氮动态对新银合欢生长过程的响应存在差异。干热河谷地区新银合欢入侵天然灌草丛后显著增加了土壤的碳汇潜力,但也改变了土壤有机碳氮的稳定性。因此,新银合欢中龄林阶段土壤稳定性较低,是响应人为管理和干扰活动的关键时期,该研究为干热河谷地区植被恢复及其可持续管理工作提供理论指导。

### 参考文献:

- [1] Zhang K, Dang H, Zhang Q, *et al.* Soil carbon dynamics following land-use change varied with temperature and precipitation gradients: evidence from stable isotopes[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(7): 2762-2772.
- [2] Eze S, Palmer S M, Chapman P J. Soil organic carbon stock and fractional distribution in upland grasslands[J]. *Geoderma*, 2018, 314: 175-183.
- [3] 吴庆标,王效科,郭然.土壤有机碳稳定性及其影响因素[J].*土壤通报*, 2005, 36(5): 743-747.
- [4] Ziegler S E, Billings S A, Lane C S, *et al.* Warming alters routing of labile and slower-turnover carbon through distinct microbial groups in boreal forest organic soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 60: 23-32.
- [5] Chen J, Xiao W, Zheng C, *et al.* Nitrogen addition has contrasting effects on particulate and mineral-associated soil organic carbon in a subtropical forest[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 142: 107708.
- [6] 江森华,吕茂奎,林伟盛,等.生态恢复对红壤侵蚀地土壤有机碳组成及稳定性的影响[J].*生态学报*, 2018, 38(13): 4861-4868.
- [7] 吴建国,张小全,王彦辉,等.土地利用变化对土壤物理组分中有机碳分配的影响[J].*林业科学*, 2002, 38(4): 19-29.
- [8] 姬强.土壤颗粒态有机碳及其活性对不同耕作措施响应[D].杨凌:西北农林科技大学, 2012.
- [9] Gregorich E G, Beare M H, Mckim U F, *et al.* Chemical and biological characteristics of physically uncomplexed organic matter[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(3): 975-985.
- [10] Whalen J K, Bottomley P J, Myrold D D. Carbon and nitrogen mineralization from light- and heavy-fraction additions to soil[J]. *Soil Bio-*

- logy and Biochemistry, 2000, 32(10): 1345-1352.
- [11] 林 栋, 张德罡. 草地轮作年限和季节对土壤不同组分有机氮含量的影响[J]. 草原与草坪, 2020, 40 ( 3 ): 23-29.
- [12] 唐国勇, 李 昆, 孙永玉, 等. 干热河谷4种固氮植物根瘤固氮潜力及其影响因素[J]. 林业科学研究, 2012, 25 ( 4 ): 432-437.
- [13] 马姜明, 李 昆, 等. 元谋干热河谷人工林的土壤养分效应及其评价[J]. 林业科学研究, 2006, 19 ( 4 ): 467-471.
- [14] Vanlauwe B, Sanginga N, Merckx R. Soil organic matter dynamics after addition of nitrogen-15-labeled leucaena and dactyloctenium residues[J]. Soil Science Society of America Journal, 1998, 62(2): 461-466.
- [15] 方海东, 纪中华, 杨艳鲜, 等. 金沙江干热河谷新银合欢人工林物种多样性研究[J]. 水土保持研究, 2005, 12 ( 1 ): 135-137.
- [16] Tang G, Li K. Tree species controls on soil carbon sequestration and carbon stability following 20 years of afforestation in a valley-type savanna[J]. Forest Ecology and Management, 2013, 291: 13-19.
- [17] 王艳丹, 张梦寅, 范建成, 等. 金沙江干热河谷银合欢人工林的土壤水分变化特征[J]. 热带生物学报, 2018, 9 ( 1 ): 61-68.
- [18] 唐国勇, 李 昆, 孙永玉, 等. 干热河谷不同利用方式下土壤活性有机碳含量及其分配特征[J]. 环境科学, 2010, 31 ( 5 ): 1365-1371.
- [19] 宗亦臣, 郑勇奇, 张川红, 等. 元谋干热河谷地区新银合欢天然更新的初步调查[J]. 生态学杂志, 2007, 26 ( 1 ): 135-138.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [21] Bu R, Lu J, Ren T, et al. Particulate organic matter affects soil nitrogen mineralization under two crop rotation systems[J]. PLoS ONE, 2015, 10(12): e0143835.
- [22] Novara A, Gristina L, La Mantia T, et al. Carbon dynamics of soil organic matter in bulk soil and aggregate fraction during secondary succession in a Mediterranean environment[J]. Geoderma, 2013, 193-194: 213-221.
- [23] Liu X, Yang T, Wang Q, et al. Dynamics of soil carbon and nitrogen stocks after afforestation in arid and semi-arid regions: A meta-analysis[J]. Science of the Total Environment, 2018, 618: 1658-1664.
- [24] Joshi R K, Garkoti S C. Dynamics of ecosystem carbon stocks in a chronosequence of nitrogen - fixing Nepalese alder (*Alnus nepalensis* D. Don. ) forest stands in the central Himalaya[J]. Land Degradation and Development, 2021. DOI: 10.1002/ldr.3901.
- [25] 董生健, 何小谦. 黄土丘陵区不同林龄人工刺槐林下植被及土壤系统演变特征[J]. 水土保持通报, 2016, 36 ( 5 ): 20-27.
- [26] 唐国勇, 李 昆, 孙永玉, 等. 土地利用方式对土壤有机碳和碳库管理指数的影响[J]. 林业科学研究, 2011, 24 ( 6 ): 754-759.
- [27] Song X, Shi S, Lu S, et al. Changes in soil chemical properties following afforestation of cropland with *Robinia pseudoacacia* in the southeastern Loess Plateau of China[J]. Forest Ecology and Management, 2021, 487: 118993.
- [28] 唐国勇, 高成杰, 李 昆. 植被恢复对干热河谷退化土壤改良的影响[J]. 生态学报, 2015, 35 ( 15 ): 5157-5167.
- [29] Dana E D, Mota J F. Vegetation and soil recovery on gypsum outcrops in semi-arid Spain[J]. Journal of Arid Environments, 2006, 65(3): 444-459.
- [30] Forrester D I, Bauhus J, Cowie A L, et al. Mixed-species plantations of *Eucalyptus* with nitrogen-fixing trees: A review[J]. Forest Ecology and Management, 2006, 233(2-3): 211-230.
- [31] 朱 凯, 李玉灵, 徐学华, 等. 不同林龄刺槐林对冀东铁尾矿客土土壤养分含量的影响[J]. 河北农业大学学报, 2016, 39 ( 1 ): 69-74.
- [32] Von Lützwow M, Kögel-Knabner I, Ekschmitt K, et al. Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions - a review[J]. European Journal of Soil Science, 2006, 57(4): 426-445.
- [33] Mendham D S, Heagney E C, Corbeels M, et al. Soil particulate organic matter effects on nitrogen availability after afforestation with *Eucalyptus globulus*[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, 36(7): 1067-1074.
- [34] Franzluebbers A J, Arshad M A. Particulate organic carbon content and potential mineralization as affected by tillage and texture[J]. Soil Science Society of America Journal, 1997, 61(5): 1382-1386.
- [35] 刘志祥, 郝庆菊, 江长胜, 等. 耕作方式对紫色水稻土颗粒态氮的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25 ( 6 ): 110-114.
- [36] Cambardella C A, Elliott E T. Carbon and nitrogen dynamics of soil organic-matter fractions from cultivated grassland soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(1): 123-130.
- [37] Gosling P, Parsons N, Bending G D. What are the primary factors controlling the light fraction and particulate soil organic matter content of agricultural soils?[J]. Biology and Fertility of Soils, 2013, 49(8): 1001-1014.
- [38] 吴建国, 艾 丽. 土壤颗粒组分中氮含量及其与海拔和植被的关系[J]. 林业科学, 2008, 44 ( 6 ): 10-19.
- [39] Alvarez C R, Alvarez R. Are active organic matter fractions suitable indices of management effects on soil carbon? A meta-analysis of data from the Pampas[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2016, 62(11): 1592-1601.
- [40] St Luce M, Whalen J K, Ziadi N, et al. Labile organic nitrogen transformations in clay and sandy-loam soils amended with <sup>15</sup>N-labelled faba bean and wheat residues[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 68: 208-218.
- [41] Xiao Y, Huang Z G, Lu X G. Changes of soil labile organic carbon fractions and their relation to soil microbial characteristics in four typical wetlands of Sanjiang Plain, Northeast China[J]. Ecological Engineering, 2015, 82: 381-389.
- [42] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2008, 28 ( 8 ): 3937-3947.
- [43] Zibilske L M, Bradford J M. Soil aggregation, aggregate carbon and nitrogen, and moisture retention induced by conservation tillage[J]. Soil Science Society of America Journal, 2007, 71(3): 793-802.

# Characteristics of Particulate Organic Carbon and Nitrogen in Soil of *Leucaena leucocephala* Plantation in the Dry-hot Valley

LUO Ming-mo<sup>1</sup>, MAO Jiao-yan<sup>1</sup>, SHI Rui<sup>2</sup>, LI Wei<sup>1</sup>, HU Bin<sup>1</sup>, FENG De-feng<sup>3</sup>

(1. School of Ecology and Environmental Science, Yunnan University, Yunnan Key Laboratory for Plateau Mountain Ecology and Restoration of Degraded Environments, Kunming 650091, Yunnan, China; 2. Institute of International Rivers and Eco-security, Yunnan University, Kunming 650091, Yunnan, China; 3. Institute of Highland Forest Science, Chinese Academy of Forestry, Kunming 650233, Yunnan, China)

**Abstract:** [Objective] To investigate the change characteristics of soil particulate carbon and nitrogen content in the process of plantation restoration and to provide references for studying the response mechanism of soil carbon and nitrogen dynamics to plantation restoration. [Method] *Leucaena leucocephala* plantations at young age, middle age and matured age in Yuanmou dry-hot valley were selected and the natural shrub-grass plot as the control, the change characteristics of the soil particulate carbon and nitrogen content of natural shrub-grass plot and *L. leucocephala* plantations with different ages were studied. [Result] Compared with the natural shrub-grass plot, the age stage of *L. leucocephala* plantations significantly affected the soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), particulate organic carbon (POC), particulate organic nitrogen (PON), POC/SOC, POC/PON. The proportion of mass of soil particle, SOC and TN contents were the highest in the matured plantation, while the POC, PON, POC/SOC, and POC/PON were the highest in the middle aged plantation. [Conclusion] The invasion of *L. leucocephala* into shrubs in dry-hot valley will significantly change the dynamics of soil carbon and nitrogen and its stability. The soil nutrient content in the matured plantation is the highest, while the soil stability in the middle-aged plantation is the lowest. This study could provide data support for the comprehensive evaluation of the effect of *L. leucocephala* on improving the soil ecological function in dry-hot valley.

**Keywords:** dry-hot valley; vegetation restoration; activated carbon; organic stability; C/N ratio

(责任编辑: 徐玉秀)