

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2023.05.017

宋亮, 赵冰琴, 申远洋, 等. 新银合欢林土壤理化性质-微生物生物量耦合协调关系研究. 土壤, 2023, 55(5): 1070–1079.

新银合欢林土壤理化性质-微生物生物量耦合协调关系研究^①

宋亮^{1,2,3}, 赵冰琴^{1,2*}, 申远洋^{1,2}, 朱万庆^{1,2}, 杜祥运⁴, 高儒章^{1,2}, 许文年^{1,2}

(1 三峡大学防灾减灾湖北省重点实验室, 湖北宜昌 443002; 2 三峡大学水泥基生态修复技术湖北省工程研究中心, 湖北宜昌 443002; 3 三峡大学水利与环境学院, 湖北宜昌 443002; 4 贵州省水利投资集团有限责任公司, 贵阳 550081)

摘要: 研究采用空间代替时间序列的方法, 通过方差分析、相关性分析和偏最小二乘路径模型探究向家坝工程扰动区 6 种不同龄级新银合欢林土壤理化性质与微生物生物量的耦合协调关系。结果表明: ①原生草地群落(A1, 无新银合欢群落)土壤含水量、养分水平和微生物生物量均最高, 新银合欢入侵后在草灌阶段土壤含水量、养分水平和微生物生物量显著下降。新银合欢成为灌丛时(A3, 新银合欢 2 a 群落)土壤含水率、有机碳、全氮、全磷、微生物生物量碳氮含量分别下降为 A1 群落的 51.2%、33.9%、31.6%、27.1%、72.8% 和 61.5%, pH 上升至 8.16, 使得土壤更为碱化。②土壤微生物生物量碳与土壤含水率显著相关($P<0.05$), 土壤微生物生物量碳氮比与 pH 呈显著相关; 土壤含水率、养分水平和微生物生物量三者之间相互影响且作用显著, 高土壤含水率有利于土壤养分与微生物生物量的存在和转化。③原生样地结构稳定, 协调度 D 较高(0.716 2); 新银合欢入侵后, 协调度随着新银合欢林龄增大呈现波动下降, 至 A4 群落(新银合欢 3~4 a)时协调度降至最小值(0.501 2); 在乔木阶段土壤养分与微生物生物量缓慢增加且趋于稳定, 协调度缓慢上升, 最终在新银合欢纯林时稳定趋于勉强协调发展类型。因此, 针对不同龄级新银合欢林, 要根据不同恢复阶段的土壤生境条件采取不同调控措施, 在植被恢复的物种搭配选择上应注重草灌结合, 促进土壤以及整个生态系统的健康发展。

关键词: 新银合欢林; 土壤理化性质; 土壤微生物生物量; 耦合协调关系; PLS-PM 模型

中图分类号: S157.1; S714.2 **文献标志码:** A

Evaluation of Coupling Coordination Relationship Between Soil Physicochemical Properties and Microbial Biomass of *Leucaena leucocephala* Plantation

SONG Liang^{1,2,3}, ZHAO Bingqin^{1,2*}, SHEN Yuanyang^{1,2}, ZHU Wanqing^{1,2}, DU Xiangyun⁴, GAO Ruzhang^{1,2}, XU Wennian^{1,2}

(1 Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 2 Hubei Provincial Engineering Research Center of Slope Habitat Construction Technique Using Cement-based Materials, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 3 College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 4 Guizhou Water Conservancy Investment Group Co., Ltd., Guiyang 550081, China)

Abstract: This study adopted the method of space instead of time series to explore the coupling coordination relationship between soil physicochemical properties and microbial biomass of *Leucaena leucocephala* in six succession ages in Xiangjiaba engineering disturbance area by analysis of variance, correlation analysis and partial least squares path model. The results showed that: 1) Soil water content, nutrient level and microbial biomass were all the highest in native grassland community (A1, 0 year), and were decreased significantly in the grass-shrub stage after the invasion of *Leucaena leucocephala*. When *Leucaena leucocephala* became shrubbery (A3, 2 years), soil water content, organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, microbial carbon, and microbial nitrogen contents decreased to 51.2%, 33.9%, 31.6%, 27.1%, 72.8% and 61.5% of A1 community, respectively. Soil pH was increased to 8.16, making soil more alkaline. 2) Soil microbial carbon contents were significantly correlated with soil water content ($P<0.05$). The microbial biomass carbon-nitrogen ratio was also significantly correlated with soil pH. The interaction among soil water content, nutrient level and microbial biomass was significant, so high soil water content was conducive to the existence and transformation of soil nutrients and microbial biomass. 3) The structure of the original sample

①基金项目: 国家自然科学基金项目(52200230)、湖北省教育厅科学技术研究项目(Q20221210)和内蒙古自治区科技重大专项课题项目(2021ZD0007-03)资助。

* 通讯作者(bingqinzhao@163.com)

作者简介: 宋亮(1999—), 男, 甘肃天水人, 硕士研究生, 主要研究方向为边坡生态防护与生态修复。E-mail: 2394300914@qq.com

was stable, so the coordination degree was higher (0.716 2). After the invasion of *Leucaena leucocephala*, the coordination degree was decreased with the age increase of *Leucaena leucocephala*, and decreased to the lowest (0.501 2) in A4 (3–4 years). In the arbor stage, soil nutrients and microbial biomass were increased slowly and tended to be stable, and the coordination degree was increased slowly and finally stabilized in the pure plantation of *Leucaena leucocephala*. Therefore, for *Leucaena leucocephala* plantation in different succession ages, different regulatory measures should be taken according to soil habitat conditions at different stages of restoration. In the selection of species for vegetation restoration, attention should be paid to the combination of grass-shrub in order to promote the healthy development of soil and the entire ecosystem.

Key words: *Leucaena leucocephala* plantation; Soil physiochemical properties; Soil microbial biomass; Coupling coordination relationship; PLS-PM model

植被和土壤是陆地生态系统的重要组成部分,土壤质量和植被演替相互影响,土壤质量特性的变化规律对揭示植被演替方向和空间分布具有重要的参考价值,同时植物群落的演替也影响土壤性状出现曲线变化^[1-2]。土壤理化性质与微生物生物量是决定土壤肥力、反映生境变化的重要指标,通过研究土壤理化性质与微生物生物量可以描绘土壤环境的状况^[3-4]。植被类型、地表凋落物储量与构成、凋落物分解速率、林木根系生长发育以及环境因子等各项差异均会在一定程度上影响土壤理化性质与微生物生物量^[5-6]。钟芳等^[7]研究发现人工林的建植能够改善土壤理化性质及微生物生物量,但在短期内恢复不到天然林地的自然水平。蒲洁等^[8]对农牧交错带草灌乔 3 种典型植被土壤研究表明,植被恢复可以明显提高表层土壤理化性质及微生物生物量,且以灌木林地水平最高。林权虹等^[9]研究指出退耕还林还草后,不同植被恢复类型下土壤养分含量无显著差异,但草地土壤微生物生物量碳氮含量均高于林地、灌丛和耕地。可以看出不同植被类型下土壤理化性状与微生物生物量之间密切相关,且具有不同的耦合关系,因此研究不同植被恢复过程中土壤理化性质与微生物生物量的变化规律,能更好地揭示植被状况的差异和变化^[10]。

新银合欢(*Leucaena leucocephala*)原产于中美洲,属豆科银合欢属,抗旱耐瘠薄,生长能力极强且成林周期短^[11]。干热河谷的造林实践证明其具有广泛的适应性和很强的抗逆性,具有良好的水土保持功能,是边坡恢复先锋物种的优先选择^[12]。近几十年,在向家坝等大型水利工程施工扰动区边坡以及废弃矿山边坡修复中应用广泛^[11]。前人通过研究新银合欢不同生长阶段对农耕地^[13]和人工林^[14]土壤理化性质的影响,发现新银合欢林在植被恢复过程中具有良好的固碳作用^[13]和固土效应^[15],在提高土壤抗蚀性^[16]和降雨截流^[17]功能等方面也具有良好效应。但新银

合欢林建植多年后会侵占当地生长资源,形成单一优势种群,并不断向四周蔓延扩散,对植被恢复及土壤性质造成很大影响^[18]。

因此,本研究选取向家坝工程扰动区 6 种不同龄级的新银合欢林地为研究对象,通过建立不同龄级新银合欢林土壤理化性质-微生物生物量耦合协调模型,探讨土壤理化性质及微生物生物量的变化特征,阐明土壤理化性质与微生物生物量的响应关系,可为现有新银合欢林植被恢复效果的可持续性调控提供科学参考,并为提高同类植被生态恢复工程科学管理水平提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川省宜宾县金沙江干流下游的向家坝水电站左岸坝肩出口处,是横江与金沙江交汇的三角地带,坐标为 28°22'15"N ~ 28°39'16"N、104°3'27"E ~ 104°25'25"E。地属亚热带湿润季风气候区,河谷地带则带有南亚热带的气候特点。该区热量充沛,多年平均气温 17.8 °C,雨量充沛但分布不均,年降水量介于 1 300 ~ 1 700 mm,主要集中于 5—10 月。年均蒸发量在 1 500 ~ 1 800 mm,年均相对湿度为 82%。日照充沛,年日照总时数为 950 ~ 1 180 h。

1.2 样地选择与植被调查

2019 年 8 月对 2007 年向家坝水电站修建所产生的工程扰动区边坡进行野外植被调查。通过调查发现自 2009 年起对该工程扰动区边坡实施生态修复时,在边坡加入新银合欢作为生态修复的先锋物种,历经多年的生长后形成新银合欢纯林。根据新银合欢树龄变化、林地分布情况,采用时空替代法将新银合欢林划分为:无新银合欢群落、新银合欢 1 a 群落、新银合欢 2 a 群落、新银合欢 3 ~ 4 a 群落、新银合欢 5 ~ 6 a 群落以及新银合欢 7 ~ 8 a 群落,分别用 A1、A2、A3、A4、A5、A6 表示。所选样地海拔均在 288.9 ~

502.7 m, 由于在设置样方时, 从 A6 到 A1 群落是沿着山坡自上而下进行, A5、A6 群落对应山坡上坡位, A4 群落对应山坡中上坡位, A3 群落对应山坡中坡

位, A2 群落对应山坡中下坡位, A1 群落对应山坡下坡位。不同龄级新银合欢林沿箭头方向, 呈条带状分布, 样地分布见图 1。

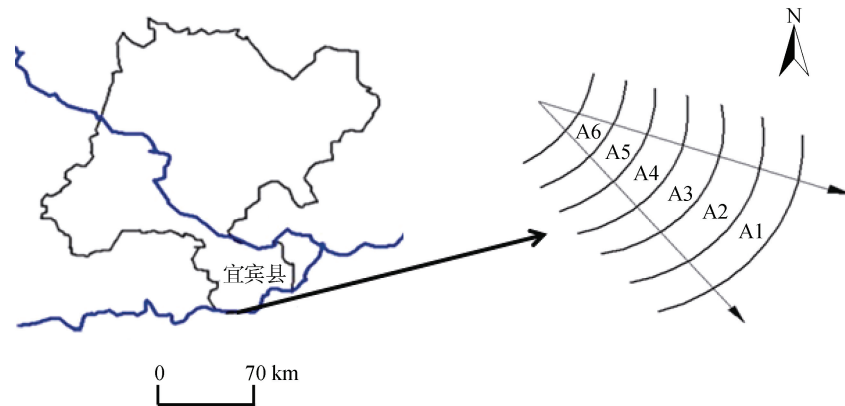


图 1 样地分布图

Fig. 1 Sample plot distribution

在不同龄级新银合欢群落随机设置 3 个标准样方(5 m × 5 m), 在每个样方内充分调查其物种组成以及新银合欢的树高和冠幅。按照新银合欢生长不同树龄和平均高度, 将林地内不同生长时期的新银合欢划分成 3 个生活型: 草本(<1 m)、灌木(<5 m)、乔木(5 ~ 10 m)。A1 群落中有植物种数 21 种, 绝大多数为草本, 藤本 1 种, 无灌木和乔木, 仅以草本植物为主。A2 群落中新银合欢仅以幼苗形态出现, 群落的物种组成依旧以草本植物为主。A3 群落中新银合欢生长发育为灌木, 群落物种数出现明显变化, 其中草本植物 13 ~ 21 种, 灌木 1 种, 藤本植物退出

植被演替序列, 群落结构由原来以草本植物为主的单层结构过渡到草-灌双层结构, 群落层片增加。A4 群落中新银合欢幼树生长发育为小乔木, 物种数出现骤降, 为 6 ~ 10 种, 群落物种组成以乔木为主, 草-灌为辅, 形成明显的草-灌-乔 3 层结构。新银合欢生长 5 a 以后成长为中型乔木, 灌木层为新银合欢树苗, 草本层为新银合欢幼苗和落葵薯两种植物, 原有稗草、龙葵、灰绿藜、马齿苋、香附子、鬼针草等植物消失退出植被演替序列。A5、A6 群落的植物种数为 1 ~ 2 种, 是为新银合欢纯林群落。样地的基本情况见表 1。

表 1 不同龄级新银合欢林样地概况

Table 1 Sample plot information of *Leucaena leucocephala* plantations in different succession stages

样地编号	树龄 (a)	优势物种
A1	0	稗草(<i>Echinochloa crusgalli</i>)、马齿苋(<i>Portulaca oleracea</i>)、龙葵(<i>Solanum nigrum</i>)、灰绿藜(<i>Chenopodium glaucum</i>)、香附子(<i>Cyperus rotundus</i>)、鬼针草(<i>Bidens Pilosa</i>)
A2	1	稗草(<i>Echinochloa crusgalli</i>)、龙葵(<i>Solanum nigrum</i>)、灰绿藜(<i>Chenopodium glaucum</i>)、马齿苋(<i>Portulaca oleracea</i>)、香附子(<i>Cyperus rotundus</i>)、新银合欢(幼苗)(<i>Leucaena leucocephala</i> seedling)
A3	2	新银合欢(<i>Leucaena leucocephala</i>)、稗草(<i>Echinochloa crusgalli</i>)、马齿苋(<i>Portulaca oleracea</i>)、龙葵(<i>Solanum nigrum</i>)、鬼针草(<i>Bidens Pilosa</i>)、灰绿藜(<i>Chenopodium glaucum</i>)
A4	3 ~ 4	新银合欢(<i>Leucaena leucocephala</i>)、艾草(<i>Artemisia argyi</i>)、鬼针草(<i>Bidens Pilosa</i>)、稗草(<i>Echinochloa crusgalli</i>)、马齿苋(<i>Portulaca oleracea</i>)、龙葵(<i>Solanum nigrum</i>)
A5	5 ~ 6	新银合欢(<i>Leucaena leucocephala</i>)、落葵薯(<i>Anredera cordifolia</i>)
A6	7 ~ 8	新银合欢(<i>Leucaena leucocephala</i>)

1.3 研究方法

完成植被情况调查后, 在每个样方内进行土壤采集, 因人工植被恢复措施覆土层厚度约为 10 cm, 故在每个样方内用取土铲按“S”形采集 0 ~ 10 cm 表层土壤 5 份, 后将同一样地内 15 个土样均匀混合。剔

除石块、根系、凋落物、动植物残体等, 过 2 mm 筛后将样品一分为二。一部分低温保存带回实验室, 置于 -20 °C 冰箱保存, 用于测定土壤微生物生物量碳(MBC)和微生物生物量氮(MBN)含量; 另一部分用塑封袋装好, 常温带回实验室, 自然风干后, 用于测定

其他土壤理化性质。

土壤理化性质测定方法参照文献[19]：土壤含水率(θg)采用烘干法(105 °C)测定；土壤 pH 测定采用玻璃电极法；土壤有机碳(SOC)含量测定采用重铬酸钾氧化-硫酸亚铁滴定法；全氮(TN)含量测定采用凯氏消解-蒸馏滴定法；全磷(TP)含量测定采用钼锑抗比色法；MBC 和 MBN 测定采用氯仿熏蒸浸提法。土壤微生物熵(qMB)是 MBC 与 SOC 的比值，也可揭示土壤质量的变化状况^[20]。

采用耦合协调度模型^[21]对不同龄级新银合欢林土壤理化性质与微生物生物量关系进行计算分析(公式 1~5)，对耦合度^[22]与协调度^[23]等级划分如表 2 所示。

$$C = \sqrt{\frac{U_1 U_2}{\left(\frac{U_1 + U_2}{2}\right)^2}} \quad (1)$$

$$U_1 = \sum_{i=1}^n a_i x_i \quad (2)$$

$$U_2 = \sum_{j=1}^m b_j y_j \quad (3)$$

式中：C 是土壤理化性质微生物生物量的耦合度，取值范围为[0, 1]，C 越大，说明两系统相互作用越强； a_i 、 b_j 为第 i 个土壤理化指标和第 j 个土壤微生物指

标的权重值； x_j 、 y_j 为第 i 个土壤理化指标和第 j 个土壤微生物指标的标准化值； U_1 为土壤理化性质综合评价函数， U_2 为土壤微生物生物量综合评价函数。

$$T = \alpha U_1 + \beta U_2 \quad (4)$$

$$D = \sqrt{CT} \quad (5)$$

式中： T 为土壤理化性质-微生物生物量的综合协调指数； α 、 β 为土壤理化性质和土壤微生物生物量的贡献率，在土壤质量系统中，土壤理化性质和土壤微生物生物量二者重要性系数相同，故 α 、 β 取均值 0.5； D 是土壤理化性质-微生物生物量的协调度，取值范围为[0, 1]， D 越大，说明两系统协调程度越好。

1.4 数据分析与处理

采用 Excel 2016、Origin 2021 进行常规数据的统计以及作图。用 SPSS 22.0 对不同龄级新银合欢林土壤理化性质和微生物生物量指标进行单因素方差分析，并用 SPSS 22.0 对土壤理化性质和微生物生物量各指标间进行 Pearson 相关分析。以上统计分析显著性水平均设定为 $\alpha = 0.05$ 。采用 R(4.0.0)中的“plsmp”包进行偏最小二乘路径回归分析(PLS-PM)。在耦合协调度模型中为了消除指标单位不同所带来的误差，使其数据具有可比性，采用极差法对数据进行标准化处理。土壤指标权重计算采用主成分分析方法(PCA)。

表 2 耦合度和协调度分级
Table 2 Classification of coupling degree and coordination degree

耦合度	耦合程度	协调度	协调程度
$0 \leq C \leq 0.3$	低级水平耦合	$0 \leq D \leq 0.1$	极度失调衰退类
		$0.1 < D \leq 0.2$	严重失调衰退类
$0.3 < C \leq 0.5$	拮抗阶段	$0.2 < D \leq 0.3$	中度失调衰退类
		$0.3 < D \leq 0.4$	轻度失调衰退类
$0.5 < C \leq 0.8$	磨合阶段	$0.4 < D \leq 0.5$	濒临失调衰退类
		$0.5 < D \leq 0.6$	勉强协调发展类
$0.8 < C \leq 1$	高水平耦合	$0.6 < D \leq 0.7$	初级协调发展类
		$0.7 < D \leq 0.8$	中级协调发展类
		$0.8 < D \leq 0.9$	良好协调发展类
		$0.9 < D \leq 1.0$	优质协调发展类

2 结果与分析

2.1 不同龄级新银合欢林土壤理化性质

由表 3 可知，A1 群落土壤含水率远高于其余群落且差异显著($P < 0.05$)，土壤含水率随新银合欢林龄增加呈减少趋势，当新银合欢成为灌木时 A3 群落土壤含水率下降至 A1 群落的 51.2%。各群落土壤 pH 为 8.01~8.49，呈偏弱碱性，这主要是由于新银合欢

根系分泌物的介导下土壤环境状况会发生变化，导致根际土和非根际土均呈弱碱性^[24]。

各群落土壤 SOC、TN 以及 TP 含量分别为 8.55~25.20、0.18~0.57 和 0.54~1.99 g/kg，均低于蒋家沟干热河谷区 9 a 生新银合欢人工林 0~10 cm 土壤养分含量^[12]。并且土壤 SOC、TN 和 TP 含量变化规律均表现为在新银合欢草灌阶段快速减少，分别下降至 A1 群落的 33.9%、31.6% 和 27.1%；当新银合欢成

表 3 不同龄级新银合欢林土壤理化性质
Table 3 Soil physiochemical properties of *Leucaena leucocephala* plantations in different succession stages

样地编号	θ (%)	pH	SOC(g/kg)	TN(g/kg)	TP(g/kg)	C/N
A1	34.34 ± 0.01 a	8.02 ± 0.06 b	25.20 ± 0.42 a	0.57 ± 0.04 a	1.99 ± 0.13 a	24.71 ± 2.27 d
A2	22.08 ± 0.13 b	8.01 ± 0.03 b	14.49 ± 0.61 c	0.40 ± 0.16 b	1.33 ± 0.07 b	36.23 ± 3.81 c
A3	17.59 ± 0.09 c	8.16 ± 0.06 b	8.55 ± 0.11 d	0.18 ± 0.04 c	0.54 ± 0.10 c	47.50 ± 2.75 a
A4	16.31 ± 0.41 d	8.49 ± 0.10 a	20.91 ± 0.55 b	0.52 ± 0.18 ab	0.54 ± 0.19 c	40.21 ± 3.06 c
A5	15.27 ± 0.90 d	8.41 ± 0.04 a	21.19 ± 0.25 b	0.48 ± 0.12 b	0.57 ± 0.04 c	44.15 ± 2.08 b
A6	16.58 ± 0.11 d	8.49 ± 0.09 a	24.75 ± 0.08 a	0.56 ± 0.05 a	0.65 ± 0.09 c	44.20 ± 1.61 b

注：表中数据为平均值 ± 标准差；同列数据小写字母不同表示样地间差异显著($P < 0.05$)。

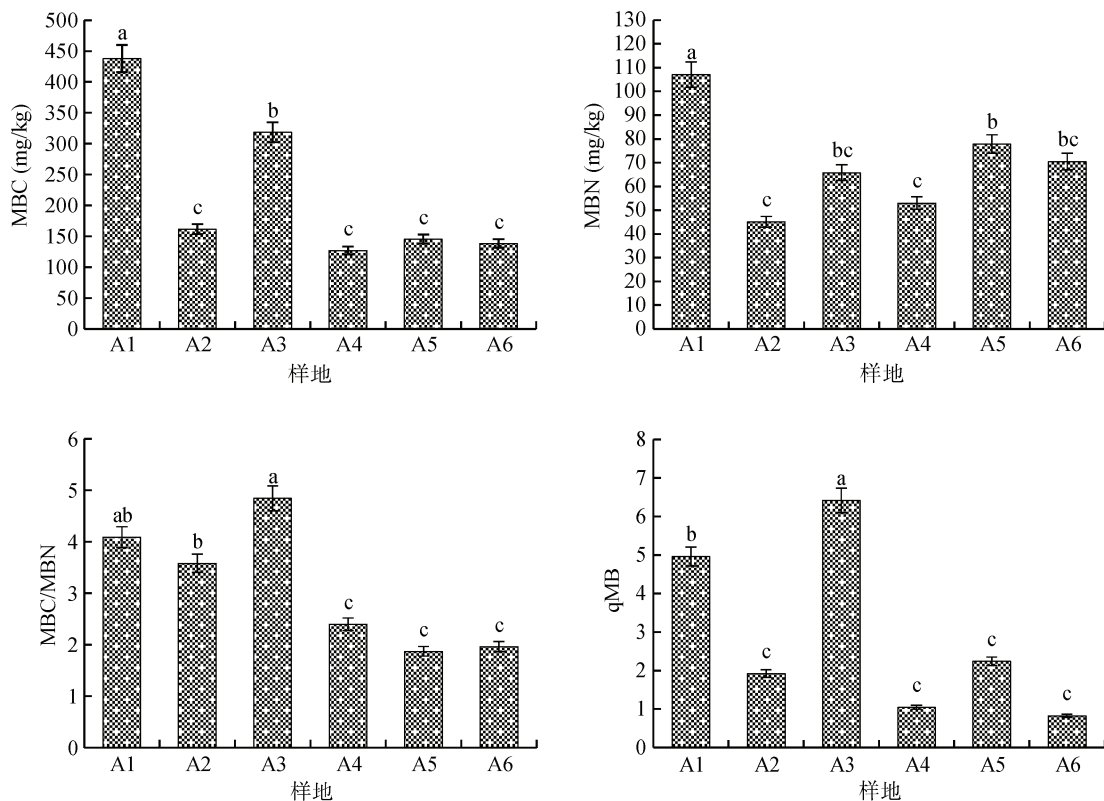
林后缓慢增加，并且土壤 SOC 和 TN 含量基本恢复到 A1 群落水平。表明在新银合欢生长发育初期会通过种间竞争大量吸收土壤养分，造成土壤养分含量迅速减少，而当新银合欢生长成为优势物种后，引起的群落结构改变，造成微生物数量及分解转化能力发生变化，使得后期土壤养分缓慢增加，但是总体含量仍然较低^[12]。

土壤碳氮比(C/N)被作为土壤氮矿化能力的标志之一，低的 C/N 可以加速微生物在有机质分解过程中的养分释放速率以及氮的矿化速率，促进土壤中有效氮的增加^[25]。各群落土壤 C/N 整体在 24.71 ~

47.50，除了 A1 群落为 24.71 之外，其他群落土壤 C/N 均远大于 30，均高于微生物分解的最佳值范围。说明 A1 群落土壤腐殖化程度较高，氮矿化能力强，而其他群落土壤腐殖化程度较低，不利于氮矿化作用。

2.2 不同龄级新银合欢林土壤微生物生物量

由图 2 可知，各群落土壤 MBC、MBN 含量以及 MBC/MBN、qMB 变化范围分别为 127.14 ~ 437.78 mg/kg、45.14 ~ 107.06 mg/kg、1.87 ~ 4.84 和 0.83 ~ 6.42，其中 A1 群落土壤 MBC、MBN 含量和 A3 群落土壤 MBC/MBN 和 qMB 明显高于其他群落



(MBC: 微生物生物量碳; MBN: 微生物生物量氮; MBC/MBN: 微生物生物量碳氮比; qMB: 微生物熵。图中小写字母不同表示样地间差异显著($P < 0.05$))

图 2 不同龄级新银合欢林土壤微生物生物量

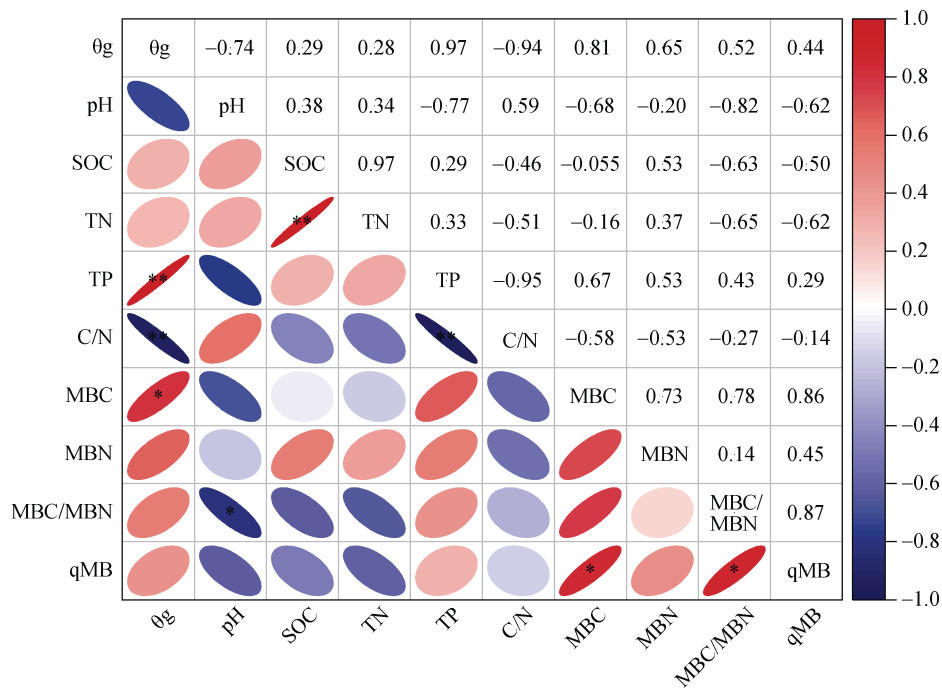
Fig. 2 Soil microbial biomass of *Leucaena leucocephala* plantations in different succession stages

且差异显著($P<0.05$)。整体来说,土壤 MBC 和 MBN 含量初期最高,随着新银合欢林龄增加使得土壤 MBC 和 MBN 有所降低, MBC 出现先上升后回落趋于平缓的分布格局,而 MBN 出现先骤降后缓慢上升的趋势,当新银合欢成为灌木时 A3 群落土壤 MBC 和 MBN 含量分别下降至 A1 群落的 72.8% 和 61.5%。除 A3 群落外,各样地 MBC/MBN 和 qMB 相较于 A1 群落均下降,土壤养分转化速率显著降低。这可能是因为不同龄级新银合欢林植被群落不同,其坡面凋落物层的厚度也不同,导致土壤微生物数量和结构差异也较大^[26]。人工边坡修复时间短,植被演替时间也较短,会影响其土壤微生物的繁衍周期。此外,

新银合欢持续生长改变植物群落结构也可能不利于土壤微生物的生长和繁殖,导致其土壤微生物生物量降低。

2.3 土壤理化性质与微生物生物量相关性及 PLS-PM 分析

不同龄级新银合欢林土壤理化性质和微生物生物量相关性分析(图 3)表明, θ_g 与 TP 呈极显著正相关($P<0.01$),与 C/N 呈极显著负相关($P<0.01$),与 MBC 呈显著正相关($P<0.05$); pH 与 MBC/MBN 呈显著负相关($P<0.05$); SOC 与 TN 呈极显著正相关($P<0.01$); TP 与 C/N 呈极显著负相关($P<0.01$); qMB 与 MBC 和 MBC/MBN 均呈显著正相关($P<0.05$)。



(*表示相关性达 $P<0.05$ 显著水平, **表示相关性达 $P<0.01$ 显著水平)

图 3 不同龄级新银合欢林土壤指标间的相关性

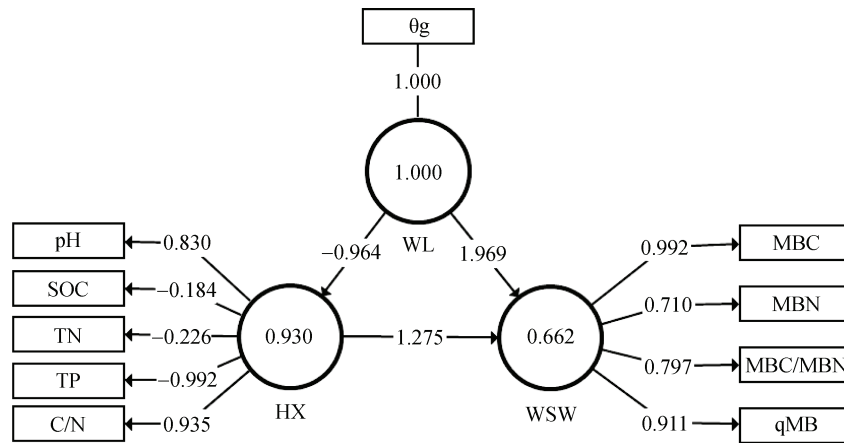
Fig. 3 Correlation between soil indexes of *Leucaena leucocephala* plantation in succession stage

在前述分析的基础上,进一步通过偏最小二乘路径模型(PLS-PM)分析了土壤理化性质与微生物生物量之间的关系,结果如图 4 所示。在 PLS-PM 计算中,物理性质系统的 $R^2=1.000$,化学性质系统的 $R^2=0.930$,微生物生物量系统的 $R^2=0.662$,均大于模型的拟合优度 0.650,故该模型中自变量解释因变量变异的程度良好。土壤化学性质对 pH、TP 和 C/N 的路径系数分别为 0.830、-0.992 和 0.935,达到显著水平,但对 SOC 和 TN 的影响不显著。土壤微生物生物量对 MBC、MBN、MBC/MBN 和 qMB 的路径系数分别为 0.992、0.710、0.797 和 0.911,均达到显著水平。土壤物理性质对化学性质和微生物生物量的路

径系数分别为-0.964 和 1.969,达到显著水平,足可见在不同龄级新银合欢林中土壤含水率对土壤养分与微生物生物量的影响较大。化学性质对土壤微生物生物量的路径系数为 1.275,表明土壤养分促进了土壤微生物生物量积累,且作用显著。

2.4 土壤理化性质-微生物生物量耦合协调特征分析

构建能够反映向家坝工程扰动区新银合欢林恢复效果的高敏感性评价指标体系,形成包括 θ_g 、pH、SOC、TN、TP 和 C/N 等 6 个指标在内的土壤理化性质子系统,以及包括 MBC、MBN、MBC/MBN 和 qMB 等 4 个指标在内的土壤微生物生物量子系统。各指标权重结果如图 5 所示。



(WL: 土壤物理性质; HX: 土壤化学性质; WSW: 土壤微生物生物量。圆内数字表示 R^2 ; 箭头上数字表示影响路径系数(正或负))

图 4 土壤理化性质和微生物生物量的偏最小二乘路径(PLS-PM)分析
Fig. 4 PLS-PM analysis of soil physicochemical properties and microbial biomass

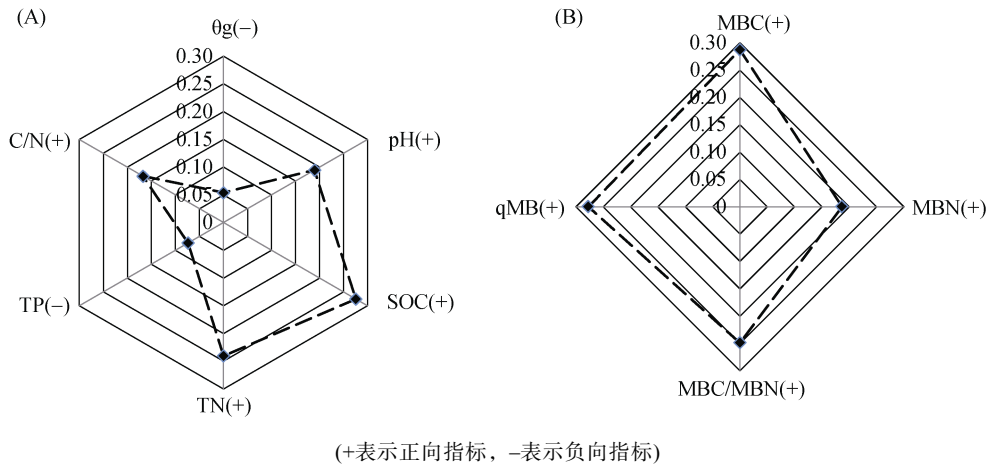


图 5 土壤理化性质(A)与微生物生物量(B)耦合协调度指标及其权重雷达图

Fig. 5 Radar map of coupling coordination index and weight between soil physicochemical properties (A) and soil microbial biomass (B)

对向家坝工程扰动区不同龄级新银合欢林的土壤理化性质-微生物生物量耦合协调度计算结果如表 4 所示。不同龄级新银合欢林土壤理化性质-微生物生物量耦合关系不同, 协调类型也存在一定差异, 6 种不同龄级新银合欢林土壤理化性质-微生物生物量耦合度 C 介于 0.572 1 ~ 0.975 5, 其顺序具体表现为 $A2 > A5 > A3 > A1 > A4 > A6$; 协调度 D 的变化范围为

0.501 2 ~ 0.716 2, 其顺序具体表现为 $A1 > A3 > A6 > A2 > A5 > A4$ 。扰动区不同龄级新银合欢林土壤理化性质-微生物生物量协调度总体表现为随新银合欢林龄增大呈现波动下降, 直到 A4 群落新银合欢成林时协调度从 A1 群落的 0.716 2 下降至最小值 0.501 2, 之后协调度缓慢上升, 到新银合欢成为纯林时协调度上升至 0.555 7, 最终稳定趋于勉强协调发展类型。

表 4 不同龄级新银合欢林土壤理化性质-微生物生物量耦合协调状况

Table 4 Coupling coordination degrees of soil physicochemical properties and microbial biomass of *Leucaena leucocephala* plantations in different succession stages

样地编号	U_1	U_2	C	T	D	协调类型
A1	0.304 2	0.864 8	0.877 5	0.584 5	0.716 2	中级协调发展类
A2	0.361 5	0.231 2	0.975 5	0.296 3	0.537 6	勉强协调发展类
A3	0.295 2	0.765 4	0.896 4	0.530 3	0.689 4	初级协调发展类
A4	0.772 4	0.081 7	0.588 2	0.427 0	0.501 2	勉强协调发展类
A5	0.441 0	0.188 2	0.915 7	0.314 6	0.536 7	勉强协调发展类
A6	0.982 6	0.097 1	0.572 1	0.539 9	0.555 7	勉强协调发展类

3 讨论

3.1 不同龄级新银合欢林对土壤理化性质的影响

新银合欢生长初期对土壤水分以及养分吸收速率快,不利于土壤养分的存在和转化,这主要是由于新银合欢具有较强的资源竞争能力和较广的生境适应性^[27]。拜得珍等^[28]研究发现新银合欢根系有较强的抗逆生长能力,不仅主根发达,侧根也生长旺盛,吸收水分和养分的能力极强,这样不仅耗费地力,而且在雨季和旱季分明的情况下,极易造成林地土壤干化。同时新银合欢生长和繁殖能力极强,会使林分密度不断增大,林内个体之间竞争激烈,更是使得土壤养分急剧减少^[11]。随着新银合欢发育为灌木,有明显的木质化结构后,在林地环境条件下新银合欢幼苗更新良好,破坏了物种多样性,使得土壤碱化,影响了微生物的分解速率,限制了土壤养分的积累,这主要是由于土壤养分积累与物种多样性以及群落结构有关。刘方炎等^[29]和陈金凤等^[30]均发现新银合欢纯林林下物种贫乏,生物量极低,植被群落结构相对单一,导致土壤有机质、碱解氮、速效钾等养分均低于台湾相思林地和天然次生植被。李彬等^[31]发现,混交林中新银合欢根系分布比纯林更趋于表层土壤,可以更快地吸收土壤养分促进自身生长,而林木混交可以改变林地空间结构,增加物种的多样性,抑制新银合欢生长,促进土壤养分积累^[32]。此外刘洁等^[33]发现新银合欢纯林土壤持水贮水能力低于乔草结合的恢复林地,淋溶作用使土壤养分向下迁移,也会造成表土养分枯竭。

当新银合欢成林后,土壤养分缓慢增加,这与郭灵辉等^[14]研究发现土壤养分随新银合欢林龄的增长呈先减小后缓慢增大的趋势一致。这主要是随着种间竞争,物种数急剧减少,对土壤养分耗量减小,使得土壤养分能够逐渐积累。另一方面新银合欢作为入侵物种属于豆科植物,可以在温度不高的季节进行固氮,在碱性土壤中土壤硝化作用可以顺利进行,促进养分积累^[34]。罗明没等^[34]也同样发现新银合欢入侵早期阶段土壤 SOC、TN 并无显著变化,而随着林龄增加土壤 SOC 与 TN 含量逐渐增加,并且 SOC 与 TN 呈显著正相关。方海东等^[35]在金沙江干热河谷对新银合欢人工林土壤养分的研究中表明,新银合欢林具有很好的土壤改良效应,可以降低土壤的 pH。本文研究结果与此有所不同,可能是由于本研究中对照组选取的是人工修复后的草地群落,而方海东等选用的对照组是流域未治理区的光板地。未治理区土壤不论

是理化性质或是团聚体结构等本身就很差,植物对该土壤有良好的改良效果。本研究中对照组为人工修复后的草地,群落具有较好的植被覆盖,生态环境良好,植被已然对土壤有了处于峰值的改良效果^[35]。而新银合欢生长多年形成纯林之后,植被类型单一,导致改良效果下降。

3.2 不同龄级新银合欢林对土壤微生物生物量的影响

植被演替过程中新银合欢的持续生长,不利于其他物种的生存,也会影响微生物群落的活性。研究表明植被、成土母质、降水和温度是影响土壤微生物的关键因素^[36]。Liu 等^[37]发现土地利用方式会影响植物群落组成和结构以及植物-土壤的相互作用,从而改变土壤微生物生物量。吴晓玲等^[38]发现草地土壤微生物生物量碳氮磷均高于林地、水田和旱地,这主要是因为草地物种丰富度高,枯落物增加了有机质向土壤的输入,为微生物提供了充足的碳源和氮源^[32]。在本研究区 A1 群落是人工修复后的草地群落,草地群落物种数丰富,土壤表层根系分布密集,其分泌物促进微生物活动,相比于木质化的灌木和乔木,草本纤维素含量较低,可以增加微生物基质的有效性,导致土壤微生物生物量较高^[39]。qMB 能够有效反映土壤有机质的活性变化,qMB 值越高代表土壤有机质活性越强,越容易被土壤微生物利用,qMB 作为评价土壤有效性的指标之一,可以在早期对土壤的退化提供预警^[20]。随着新银合欢林龄增加,除 A3 外各样地 qMB 均显著下降,说明在新银合欢林生长发育过程中土壤养分转化速率显著降低。这可能是由于随着新银合欢入侵,群落物种数不断减少,群落片层不断增加,林下植被趋于单一影响了土壤动植物的生长发育,降低了土壤微生物活性,造成土壤碳元素难以有效分解,使得土壤养分和微生物生物量处于较低水平。

通过 PLS-PM 分析可见土壤微生物生物量直接受到土壤含水率影响,其中土壤微生物生物量碳氮变化趋势与土壤含水率随新银合欢林龄增加的变化趋势较为一致。因为水作为养分运移的载体,能够直接影响土壤养分与微生物生物量的分布特征^[40]。赵春梅等^[41]发现土壤含水率和温度是影响橡胶林土壤微生物生物量的主要物理指标,本文研究发现土壤含水率是土壤微生物生物量的关键因子结果与此相似。此外,新银合欢在 0~20 cm 土层中细根分布最多,有明显的表聚现象^[14]。而树龄是影响地下根径及空间分布的关键因素,植物根系发达程度与树龄呈正相

关, 树龄越长, 根径越大, 粗根所占比例也越大^[42]。新银合欢树龄越大, 植物根系越发达, 其生长发育所需水量和养分含量也越多, 所以新银合欢林的发育程度也会间接影响土壤微生物生物量。

3.3 土壤理化性质-微生物生物量耦合协调关系

土壤理化性质与微生物生物量相关性分析表明, 土壤微生物生物量碳与土壤含水率之间呈显著正相关。同时通过 PLS-PM 分析可见土壤含水率、养分水平和微生物生物量三者之间相互影响且作用显著。表明土壤理化性质与微生物生物量之间关系密切, 具有协同效应, 微生物生物量可表征土壤质量和土壤肥力^[3]。耦合协调度模型结果表明, 不同龄级新银合欢林土壤理化性质-微生物生物量耦合关系不同, 协调类型也存在一定差异。在所有群落中 A1 群落协调度 D 最高, 是为中级协调发展类。新银合欢入侵后, 协调度随着新银合欢林龄增大呈现波动下降, 最终稳定趋于勉强协调发展类型。这主要是因为 A1 群落是无新银合欢的草地群落, 优势物种主要是对环境适应性较好的草本植物, 输入到土壤中的有机质和凋落物较多, 周期短, 土壤微生物活性和微生物生物量高, 加速了土壤有机质和地表凋落物的分解和转化速率^[43], 与新银合欢入侵后相比更容易形成稳定结构, 所以其协调度较高, 为中级协调发展类。A2 群落中新银合欢入侵与原有物种形成激烈的种间竞争, 造成土壤水分、养分和微生物生物量急剧减少, 使协调度下降。A3 群落中新银合欢成为优势物种, 群落演替为草-灌双层结构, 可改变林下微环境, 与原有环境形成良好适应关系^[44], 协调度有所回升。

其后新银合欢幼树生长发育为小乔木, 新银合欢种群达到一定数量时会因资源争夺而排斥抑制本地物种, 群落物种数出现骤降, 最终排挤其他植物从而形成单种优势群落^[27]。当新银合欢成为垂直纯林群落后, 会发生激烈的种间竞争, 为了降低竞争态势物种间会出现一定的分离, 从而使群落达到稳态^[27], 为勉强协调发展类。但是新银合欢林土壤养分及微生物生物量的可利用程度仍然不高, 这一方面是由于土壤养分的有效性在 pH 为 6~7 的微酸条件下最高^[45], 而新银合欢的不断生长发育造成土壤碱化、含水量减少, 抑制了土壤酶的活性, 降低了碳素循环速率, 减少了土壤养分的积累^[46]。另一方面群落结构发展为草-灌-乔 3 层结构后, 新银合欢乔木层会通过化感作用以及对光、水、营养等的竞争减少林下植物的生长、生产力和多样性, 间接地影响进入土壤中的林下植物凋落物和分泌物以及土壤微生物群落^[47], 最终导致

新银合欢林土壤养分及微生物生物量较低。

4 结论

不同龄级新银合欢林土壤理化性质与微生物生物量存在明显差异, 且耦合协调关系有所不同。原生草地群落结构稳定, 土壤含水量、养分水平和微生物生物量最高, 并且耦合协调度也最高, 为中级协调发展类。新银合欢入侵后在草灌阶段土壤含水率、养分水平和微生物生物量显著下降, 土壤 pH 上升使得土壤更为碱化, 协调度也有所降低。新银合欢林在乔木阶段土壤养分与微生物生物量缓慢增加且趋于稳定, 协调度缓慢上升, 最终在新银合欢纯林时稳定趋于勉强协调发展类型。因此, 针对不同龄级新银合欢林, 要根据不同恢复阶段的土壤生境条件采取不同调控措施, 在植被恢复的物种搭配选择上应注重草灌结合, 促进土壤以及整个生态系统的健康发展。

参考文献:

- [1] 刘超华, 李凤巧, 廖杨文科, 等. 人工林对土壤地力的影响过程及其调控研究进展[J]. 土壤学报, 2023, 60(3): 644-656.
- [2] 童珊, 曹广超, 张卓, 等. 土壤全碳全氮空间异质性及影响因素分析——以祁连山南坡黑河上游为例[J]. 土壤, 2022, 54(5): 1064-1072.
- [3] Brockett B F T, Prescott C E, Grayston S J. Soil moisture is the major factor influencing microbial community structure and enzyme activities across seven biogeoclimatic zones in western Canada[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 44(1): 9-20.
- [4] Weber O B, Silva M C B, Silva C F, et al. Biological and chemical attributes of soils under forest species in Northeast Brazil[J]. Journal of Forestry Research, 2020, 31(5): 1959-1973.
- [5] Briggs C, Breiner J M, Graham R C. Physical and chemical properties of *Pinus ponderosa* charcoal[J]. Soil Science, 2012, 177(4): 263-268.
- [6] 张姣, 徐明, 文春玉, 等. 黔中地区不同干扰对马尾松林土壤性质的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(6): 135-143.
- [7] 钟芳, 柴晓虹, 王国基, 等. 植被恢复方式对黄土丘陵区土壤理化性质及微生物特性的影响[J]. 中国沙漠, 2014, 34(4): 1064-1072.
- [8] 蒲洁, 齐雁冰, 王茵茵, 等. 农牧交错带不同植被群落对土壤微生物量碳氮磷的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(4): 279-285.
- [9] 林权虹, 田地, 高菲, 等. 坝上地区退耕还林还草措施对土壤细菌的影响[J]. 土壤, 2022, 54(2): 307-313.
- [10] 张勇强, 李智超, 厚凌宇, 等. 林分密度对杉木人工林下物种多样性和土壤养分的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(1): 239-250.

- [11] 徐建霞, 王建柱, 李磊, 等. 边坡先锋植物新银合欢幼苗抗旱能力研究[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(18): 134-138.
- [12] 邓浩俊, 陈爱民, 严思维, 等. 不同林龄新银合欢重吸收率及其 C: N: P 化学计量特征[J]. 应用与环境生物学报, 2015, 21(3): 522-527.
- [13] 郭甜, 何丙辉, 蒋先军, 等. 新银合欢对紫色土坡地土壤有机碳固持的作用[J]. 生态学报, 2012, 32(1): 190-197.
- [14] 郭灵辉, 王道杰, 张云红, 等. 蒋家沟新银合欢人工林土壤养分分布及其与细根的关系[J]. 中国水土保持, 2010(12): 46-49.
- [15] 郭灵辉, 王道杰, 陈东, 等. 蒋家沟泥石流区新银合欢细根固土效应[J]. 水土保持通报, 2011, 31(5): 85-89, 214.
- [16] 陈爱民, 严思维, 林勇明, 等. 泥石流频发区不同林龄新银合欢土壤抗蚀性评价[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(9): 62-70.
- [17] 方海东, 潘志贤, 岳学文, 等. 元谋干热河谷新银合欢林对降水截流的效应[J]. 热带生物学报, 2014, 5(2): 147-152.
- [18] 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.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [20] 周元, 陈远学, 蒋帆, 等. 玉米地土壤微生物量碳、氮及微生物熵对不同物料还田的响应[J]. 水土保持学报, 2020, 34(2): 173-180.
- [21] 王淑佳, 孔伟, 任亮, 等. 国内耦合协调度模型的误区及修正[J]. 自然资源学报, 2021, 36(3): 793-810.
- [22] 刘慧, 温小艳, 李禹韬, 等. 生物炭施用模式生态效益与经济效益耦合协调度研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(11): 287-296.
- [23] 廖重斌. 环境与经济协调发展的定量评判及其分类体系——以珠江三角洲城市群为例[J]. 热带地理, 1999, 19(2): 12-16.
- [24] 杨青, 段旭, 赵洋毅, 等. 干热河谷典型林草植被根系分泌物特征及对土壤环境因子的影响[J]. 东北林业大学学报, 2022, 50(7): 53-60.
- [25] 王建林, 钟志明, 王忠红, 等. 青藏高原高寒草原生态系统土壤碳氮比的分布特征[J]. 生态学报, 2014, 34(22): 6678-6691.
- [26] 张于光, 张小全, 肖焯. 米亚罗林区土地利用变化对土壤有机碳和微生物量碳的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(11): 2029-2033.
- [27] 郭佳琦, 陈俊辰, 黄旬, 等. 喜旱莲子草入侵群落主要物种生态位和种间联结研究[J]. 生态环境学报, 2021, 30(8): 1607-1616.
- [28] 拜得珍, 纪中华, 杨艳鲜, 等. 银合欢冲沟治理水土保持效益研究[J]. 水土保持研究, 2004, 11(3): 226-228.
- [29] 刘方炎, 李昆, 马姜明. 金沙江干热河谷几种引进树种人工植被的生态学研究[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(3): 468-474.
- [30] 陈金凤, 余世钦, 符加方, 等. 华南红层地貌区不同利用方式土壤质量特征及其影响因素——以南雄盆地为例[J]. 生态环境学报, 2022, 31(5): 918-930.
- [31] 李彬, 唐国勇, 李昆, 等. 元谋干热河谷 20 年生人工恢复植被生物量分配与空间结构特征[J]. 应用生态学报, 2013, 24(6): 1479-1486.
- [32] 龚志莲, 李勇. 川西南不同植被木本物种多样性与土壤有机碳积累[J]. 生态环境学报, 2015, 24(9): 1447-1452.
- [33] 刘洁, 李贤伟, 纪中华, 等. 元谋干热河谷三种植被恢复模式土壤贮水及入渗特性[J]. 生态学报, 2011, 31(8): 2331-2340.
- [34] 罗明没, 毛姣艳, 师睿, 等. 干热河谷新银合欢人工林土壤颗粒态有机碳氮特征[J]. 林业科学研究, 2022, 35(1): 40-47.
- [35] 方海东, 魏雅丽, 刘刚才, 等. 金沙江干热河谷银合欢人工林对土壤养分的影响[J]. 干旱区研究, 2011, 28(2): 229-234.
- [36] Stumpf L, Pauletto E A, Pinto L F S, et al. Biological and physical quality of a mined soil under revegetation with perennial grasses[J]. Revista Brasileira De Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences, 2018, 13(1): 1-7.
- [37] Liu D, Huang Y M, An S S, et al. Soil physicochemical and microbial characteristics of contrasting land-use types along soil depth gradients[J]. Catena, 2018, 162: 345-353.
- [38] 吴晓玲, 张世熔, 蒲玉琳, 等. 川西平原土壤微生物生物量碳氮磷含量特征及其影响因素分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(10): 1607-1616.
- [39] 马晓俊, 李云飞. 腾格里沙漠东南缘植被恢复过程中土壤微生物量及酶活性[J]. 中国沙漠, 2019, 39(6): 159-166.
- [40] 梁香寒, 张克斌, 乔厦. 半干旱黄土区柠条林土壤水分和养分与群落多样性关系[J]. 生态环境学报, 2019, 28(9): 1748-1756.
- [41] 赵春梅, 王文斌, Didier L, 等. 不同母质发育橡胶林土壤微生物特征研究[J]. 西南农业学报, 2022, 35(4): 964-971.
- [42] 汪万福, 武发思, 徐瑞红, 等. 基于探地雷达的树木根系空间分布及对土遗址影响[J]. 中国沙漠, 2015, 35(5): 1163-1170.
- [43] 黄娟, 邓羽松, 韦慧, 等. 喀斯特峰丛洼地不同植被类型土壤微生物量碳氮磷和养分特征[J]. 土壤通报, 2022, 53(3): 605-612.
- [44] 贺静雯, 刘颖, 李松阳, 等. 蒋家沟流域不同海拔灌草层群落特征与土壤关系的研究[J]. 广西植物, 2020, 40(8): 1092-1100.
- [45] Xiong Y M, Xia H P, Li Z A, et al. Impacts of litter and understory removal on soil properties in a subtropical *Acacia mangium* plantation in China[J]. Plant and Soil, 2008, 304(1): 179-188.
- [46] 景宇鹏, 李跃进, 姚一萍, 等. 盐渍化土壤酶活性及其与微生物、理化因子的关系[J]. 中国农业科技导报, 2016, 18(2): 128-138.
- [47] Mitchell R J, Keith A M, Potts J M, et al. Overstory and understory vegetation interact to alter soil community composition and activity[J]. Plant and Soil, 2012, 352(1): 65-84.