

# 退化马尾松林恢复过程中芒萁覆盖对土壤微生物 生物量碳氮及其周转的影响

苏浩浩<sup>1,2</sup>, 黄桥明<sup>1,2</sup>, 邓翠<sup>1,2</sup>, 吕茂奎<sup>1,2</sup>, 谢锦升<sup>1,2</sup>

(1.福建师范大学地理科学学院,福州 350007;2.福建师范大学湿润亚热带生态地理过程教育部重点实验室,福州 350007)

**摘要:**为探究侵蚀退化红壤马尾松林恢复过程中林下芒萁对土壤微生物生物量碳氮月动态及其周转的影响,以不同恢复年限的马尾松林为研究对象,对比分析马尾松林恢复过程中林下保留芒萁、去除芒萁处理和林下裸地土壤中 12 个月的土壤微生物生物量碳(MBC)和微生物量氮(MBN)含量及其周转速率、周转时间和流通量,并分析其与土壤理化性状的关系。结果表明:(1)保留芒萁覆盖处理的 MBC 和 MBN 平均含量分布比林下裸地提高 26.99%~277.31%和 13.54%~173.39%,而去除芒萁处理分布比保留芒萁处理降低 12.29%~27.01%和 5.02%~28.45%,差异均随恢复年限呈先降低后增加的趋势。(2)所有处理的土壤微生物量碳氮季节动态均表现为春夏季较高,秋冬季较低的趋势,进入生长季前的土壤微生物量碳氮含量更能反映该地区的平均水平。(3)在退化马尾松林恢复过程中,芒萁覆盖降低土壤微生物生物量碳氮周转速率,增加周转时间,提高土壤微生物生物量碳氮含量和流通量,促进土壤有机质的积累和养分释放。相关分析和逐步回归分析表明,MBC、MBN 流通量分别与 DOC、DON 呈显著正相关,周转速率分别与铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)和 TN 呈显著负相关,表明土壤碳和氮及其有效性是影响土壤微生物量周转的关键因素。

**关键词:** 植被恢复; 林下植被; 土壤微生物生物量碳氮; 周转; 退化红壤

中图分类号:S714.3

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2023)03-0336-09

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2023.03.043

## Effects of *Dicranopteris Dichotoma* Covered on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen and Their Turnover During Restoration of Degraded *Pinus Massoniana* Forest

SU Haohao<sup>1,2</sup>, HUANG Qiaoming<sup>1,2</sup>, DENG Cui<sup>1,2</sup>, LÜ Maokui<sup>1,2</sup>, XIE Jinsheng<sup>1,2</sup>

(1.College of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007; 2.Key Laboratory of Humid Subtropical Eco-Geographical Processes of the Ministry of Education, Fujian Normal University, Fuzhou 350007)

**Abstract:** In order to explore the effects of *Dicranopteris dichotoma* on the monthly dynamics and turnover of soil microbial biomass carbon and nitrogen in the restoration process of *Pinus massoniana* forest in eroded degraded red soil, the *P. massoniana* forests with different restoration years were used as the research object. The contents of soil microbial biomass carbon (MBC) and microbial biomass nitrogen (MBN), turnover rate, turnover time and flux in the soil of 12 months in the soil of *P. massoniana* forest with *D. dichotoma*, removal of *D. dichotoma* and bare land were compared and analyzed, and their relationships with soil physical and chemical properties were analyzed. The results showed that : (1) The average content of MBC and MBN in the treatment of retaining *D. dichotoma* was 26.99%~277.31% and 13.54%~173.39% higher than that in the bare land, while the distribution of the treatment of removing *D. dichotoma* was 12.29%~27.01% and 5.02%~28.45% lower than that of retaining *D. dichotoma*. (2) The seasonal dynamics of soil microbial biomass carbon and nitrogen in all treatments showed a trend of higher in spring and summer and lower in autumn and winter, the soil microbial biomass carbon and nitrogen content before entering the growing season can better reflect the average level of the region; (3) In the restoration process of degraded *P. massoniana* forest, *D. dichotoma* coverage decreased soil microbial biomass carbon and nitrogen turnover rate,

收稿日期:2022-11-14

资助项目:国家自然科学基金面上项目(31870604);国家自然科学基金重点项目(32030073)

第一作者:苏浩浩(1998—),男,硕士研究生,主要从事侵蚀退化地植被恢复研究。E-mail:su15535437987@126.com

通信作者:谢锦升(1972—),男,教授,主要从事森林生态系统过程与全球变化。E-mail:jshxie@163.com

increased turnover time, increased soil microbial biomass carbon and nitrogen content and flux, and promoted soil organic matter accumulation and nutrient release. Correlation analysis and stepwise regression analysis showed that MBC and MBN flux were significantly positively correlated with DOC and DON, respectively, and turnover rate was significantly negatively correlated with  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  and TN, respectively, indicating that soil carbon and nitrogen and their availability were key factors affecting soil microbial biomass turnover.

**Keywords:** vegetation restoration; understory vegetation; soil microbial biomass carbon and nitrogen; turnover; red soil degradation

林下植被是森林生态系统的重要组成部分,不仅保持水土,还影响树木幼苗更新、森林演替、碳和养分循环等许多重要的生态过程<sup>[1]</sup>。林下植被生物量相对于上层林木小得多,其重要性和生态学意义却远超它所代表的生物量。是否清除林下植被是重要的森林经营措施,通过减少水肥竞争促进林木生长,提高木材产量。然而,清除林下植被可能导致增加养分损失,减少生物多样性,影响森林生产力的可持续性<sup>[2]</sup>。林下植被生长促进土壤养分循环,提高土壤水分含量和碳储量,去除林植被如蕨类提高土壤温度和光照有效应<sup>[3]</sup>,增加土壤侵蚀和养分淋湿的风险<sup>[4]</sup>。此外,林下植被较高的周转速率产生大量凋落物分解返回土壤中,促进养分积累和林木生长<sup>[5]</sup>;去除林下植被后,根系和叶片中可利用碳源的输入减少,降低植物生物量,影响土壤微生物生物量及其群落结构组成,如去除林下植被后土壤有机碳氮比的变化影响土壤真菌细菌比<sup>[6-7]</sup>,且林下植被凋落物质量的不同影响土壤微生物对其分解和利用的难易程度,对土壤微生物生长代谢和养分利用产生负面影响。土壤微生物生物量作为稳定和促进土壤养分周转,增加土壤固碳潜力的关键生态因子,在研究土壤碳氮循环、养分转化能力、土壤固碳潜力以及提高土壤肥力和生产能力方面发挥着重要作用,然而,林下植被对土壤微生物生物量碳氮动态及其周转影响的认识还很有限。

对于严重侵蚀土壤上恢复的森林,林下植被的作用显得更为突出。在南方红壤侵蚀区,芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)是侵蚀劣地最早侵入的先锋植物之一,根茎匍匐横走于土壤表层,生长快,再生力强,具有良好的保持水土和改良土壤功能,常在马尾松(*Pinus massoniana*)林下形成大片单优群落<sup>[8]</sup>,但其在退化红壤生态系统恢复与演替进程中的重要性远未得到认识,不但当地居民习惯于收割芒萁作为燃料,而且生态恢复工作中也常被忽视。在退化马尾松林恢复过程中,芒萁覆盖增加地下根系生物量,增强土壤团聚体稳定性<sup>[9]</sup>,促进土壤有机质积累和养分的保持<sup>[10-11]</sup>;芒萁覆盖增加土壤全氮含量和土壤氮矿化速率,降低硝态氮的淋溶损失<sup>[12]</sup>。此外,增加土壤微

生物生物量及其活性,微生物群落结构更为丰富<sup>[13-14]</sup>。土壤微生物生物量碳氮及其周转对土壤有机碳稳定性和氮保持具有重要作用,然而林下植被芒萁如何影响土壤微生物生物量碳氮的动态变化及其周转还不清楚。因此,通过在退化恢复马尾松林中进行林下芒萁去除试验,探讨芒萁覆盖对土壤微生物生物量碳氮及其周转的影响机制,为水土流失区林下植被管理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区与试验样地概况

研究区位于福建省长汀县河田镇(25°33′—25°48′N, 116°18′—116°31′E),年均气温为17.0~19.5℃,年无霜期265天,年均降水量约1700mm,雨热同期,降雨集中且强度大,为亚热带季风气候区,平均海拔390m。河田镇地形为河谷盆地,汀江纵贯南北,地区土壤为燕山运动早期形成的中粗粒花岗岩发育的红壤,花岗岩风化壳深厚,抗蚀抗冲能力较弱。该区植被大面积破坏,土壤侵蚀程度不断加剧,是全国强度水土流失区之一,现存植被主要为马尾松次生林和人工林,结构比较单一,生存状况较差。林下植被以芒萁为主。

通过时空代换法,在河田镇选取母岩土壤均为花岗岩的3个不同治理恢复年限的马尾松林组成植被恢复序列,各个林地治理前本底条件与未治理地基本一致,均为A层土壤流失殆尽,B层裸露,各试验样地基本治理情况分别为Y0、Y17、Y35。

Y0(未治理地):位于来油坑,坡度19°,土壤侵蚀强度大,地表沟壑发育,土壤立地条件极差,植被以马尾松为主,平均树高2m,平均胸径3.1cm,马尾松密度1741株/hm<sup>2</sup>,林下生长芒萁,芒萁覆盖度为15%。

Y17(恢复17年):位于石壁下,坡度8°,于2002年开始对该地区进行穴状整地,在马尾松之间挖穴栽种种类芦(*Neyranudia reynaudiana*)或播种宽叶雀稗(*Paspalum wettsteinii*)治理后任其自然生长,现阶段马尾松平均树高7m,平均胸径7.4cm,马尾松林密度3341株/hm<sup>2</sup>,林下植被以芒萁为主,芒萁覆盖度为90%。

Y35(恢复 35 年):位于水东坊,坡度 11°,从 1984 年开始对该地区进行植被恢复治理,通过挖壕整地,种植黑荆(*Acacia mearnsii*)后通过封禁管理减少人为干扰破坏,任其自然恢复,但黑荆因几次寒流全部死亡,目前为马尾松林,马尾松平均树高 13.7 m,平均胸径 14 cm,马尾松林密度为 1 433 株/hm<sup>2</sup>,林下植被以芒萁为主,芒萁覆盖度 85%。

### 1.2 样地设置与样品采集处理

2014 年 8 月,3 个不同恢复年限的马尾松林中分别设计保留芒萁、去除芒萁和原有林下裸露地 3 种处理,每种处理 3 个重复,共计 27 个样方。在上述 3 个马尾松林中分别随机各设置 3 个 20 m×20 m 的标准样地,每个样地分为 4 个 10 m×10 m 的亚样方,随机选取 2 块设置保留芒萁(NRD)和去除芒萁(RD)2 种处理,第 1 次人工将芒萁地上部分清除,以后每月清理 1 次再生的芒萁。同时,以相邻的无芒萁覆盖林下裸地作为参照(CK),林下裸地面积和形状根据实际裸露地情况而定。

试验处理 4 年后,从 2018 年 10 月至 2019 年 9 月,于每月月底用取土钻(内径 2 cm)在每个处理以“S”形随机多点(10 个点)取 0—10 cm 土层的土壤并均匀混合,共 27 个混合样。取回的新鲜土样带回实验室后立即取部分土样测定土壤含水率,剩余土样挑去石砾、植物根系和 >2 mm 的碎屑,过 2 mm 土壤筛后于 4 °C 冰箱冷藏,用于测定土壤微生物生物量碳和氮含量;2019 年 4 月的土壤样品同时测定土壤各项基本理化指标和土壤容重。

### 1.3 试验方法

1.3.1 土壤基本理化性质的测定 土壤 pH 采用玻璃电极 pH 计测定,水土比 2.5:1(V/V)。土壤容重用环刀法测定;土壤含水率采用铝盒烘干法测定;土壤有机碳和全氮含量采用土壤碳氮元素分析仪(elementar vario el III,德国)测定;土壤可溶性有机质通过去离子水浸提后过 0.45 μm 滤膜,用总有机碳分析仪(TOC-VCPH,Shimadzu,Kyoto,日本)测定溶解性有机碳,用连续流动分析仪(Skalar San++,荷兰)测定溶解性有机氮;铵态氮和硝态氮含量测定,土壤使用氯化钾浸提后,其浸提液采用连续流动分析仪(Skalar San++,荷兰)测定。

1.3.2 土壤微生物生物量碳和氮含量测定 微生物生物量碳(MBC)和微生物生物量氮(MBN)采用氯仿熏蒸—K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>浸提的方法测定,称取 2 份 10 g 过 2 mm 筛的新鲜土样,分别置于有氯仿熏蒸和无氯仿熏蒸的真空干燥器中,在黑暗环境下熏蒸 24 h 后取出,再分别加入 40 mL 0.5 mol/L K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液,260 r/min 振荡 30 min,4 000 r/min 离心 30 min 后用 0.45 μm 滤膜过滤后,

MBC 用总有机碳分析仪(TOC-VCPH,Shimadzu,Kyoto,日本)测定,MBN 用连续流动分析仪(Skalar San++,荷兰)测定,计算公式为:

$$MBC = \frac{C \times V}{m / (1 + W)} / 0.45 \quad (1)$$

$$MBN = \frac{C \times V}{m / (1 + W)} / 0.54 \quad (2)$$

C = 熏蒸土壤有机碳(氮) - 未熏蒸土壤有机碳(氮) (3)

式中:C 为土壤微生物生物量碳(氮)浓度(mg/L);V 为浸提液体积(mL);m 为鲜土样质量(mg);W 为土壤含水率(%)。

### 1.4 计算方法与数据处理

土壤微生物生物量碳(氮)周转速率、周转时间、流通量的计算参考 McGill 等<sup>[15]</sup>和 Jenkinson 等<sup>[16]</sup>研究方法:

周转速率(/a) = 微生物生物量碳(氮)损失总量 / 微生物生物量碳(氮)平均值 (4)

周转时间(a) = 1 / 周转速率 (5)

流通量[kg/(hm<sup>2</sup>·a)] = 微生物生物量碳(氮)平均值 × 土壤容重 × 深度系数 / 周转时间 (6)

取样深度每 10 cm 深度系数为 1。

所有数据通过 Excel 2016 软件进行统计处理,利用 SPSS 20.0 软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA),双因素方差分析(two-way ANOVA),重复测量方差分析(repeated-measure ANOVA),Pearson 相关分析和逐步回归分析,并用最小显著性法(LSD)判断其显著性(α = 0.05)。用 Origin 2018 软件进行作图。文中的数据均为平均值 ± 标准误。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤微生物生物量碳氮月动态变化

退化马尾松林恢复过程中,不同芒萁覆盖处理下土壤微生物生物量碳氮月动态变化基本相似。Y0 的土壤微生物生物量碳随月份推移呈现明显的单峰模式,最高峰出现在 7 月,为 154.28 mg/kg;Y17 和 Y35 呈现多峰模式,最高峰分别在 7 月和 4 月,分别为 279.74,290.06 mg/kg;且 3 个植被恢复阶段的土壤微生物生物量碳含量均表现为:NRD > RD > CK(图 1)。重复测量方差分析结果表明,未治理地 MBC 随月动态产生显著变化,芒萁去除处理显著影响 Y0 和 Y35 的 MBC 含量(表 1)。

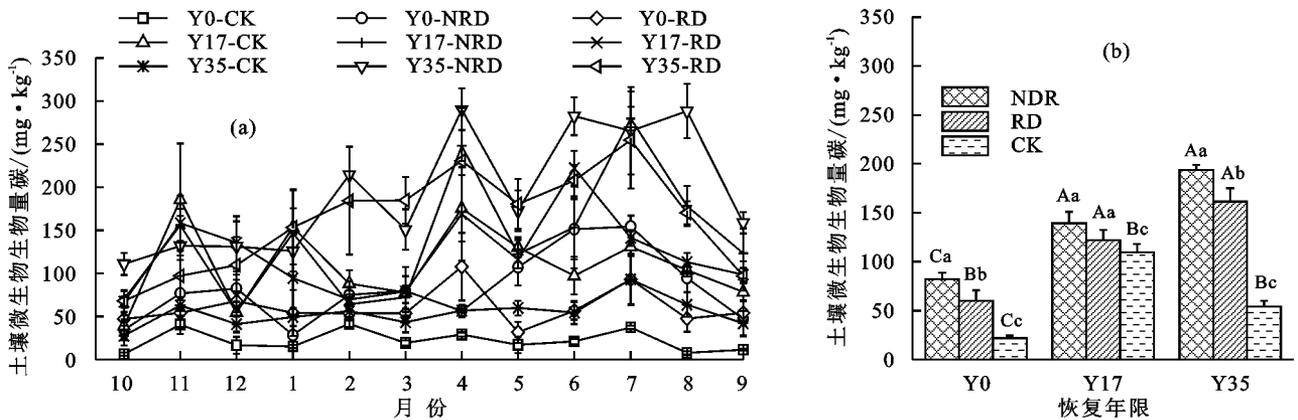
Y0 的土壤微生物量氮随月份推移呈现明显的双峰模式,最高峰出现在 6 月,为 16.62 mg/kg;Y17 和 Y35 的土壤微生物量氮呈现三峰模式,最高峰分别为 6 月和 7 月,分别为 21.77,33.22 mg/kg;且 3 个植被恢复阶段的 MBN 同样均表现为 NRD > RD > CK(图

2)。重复测量方差分析显示,3 个恢复年限的 MBN 含量随月动态无显著变化,芒萁去除处理显著影响 Y0 和 Y35 的 MBN 含量(表 1)。

退化马尾松林恢复过程中土壤 MBC 和 MBN 平均含量在芒萁覆盖、去除芒萁和林下裸地之间差异显著,表现为 NRD>RD>CK(图 1、图 2)。土壤微生物量碳氮年均含量变化范围分别为 21.80~193.59,3.47~20.10 mg/kg。在 Y0 中,保留芒萁覆盖处理的 MBC、MBN 含量分别比林下裸地的高 277.31%,173.39%,去除芒萁后则分别下降 26.99%,28.45%(图 1、图 2);在 Y35 中,保留芒萁覆盖处理的 MBC、MBN 分别比林下裸地提高 257.37%,144.50%,去除芒萁处

理后则分别下降 16.56%,16.29%。在相同芒萁处理情况下,不同植被恢复年限的土壤 MBC 和 MBN 变化趋势一致且差异显著,表现为 Y35>Y17>Y0,保留芒萁覆盖处理中,Y35 的 MBC 含量比未治理地的提高 135.37%,MBN 含量则提高 111.78%,但在林下裸地中,Y17 的 MBC、MBN 含量都显著高于 Y0 和 Y35,分别提高 402.48%,102.20%和 247.33%,46.67%。

不同恢复阶段退化马尾松林芒萁覆盖处理下的土壤微生物量碳氮年均含量分别为 82.25,139.10,193.59,9.49,13.69,20.10 mg/kg,与春季(3,4,5 月份)的土壤微生物量碳氮均值 81.02,147.63,204.51 mg/kg 和 8.94,12.60,16.73 mg/kg 相接近。



注:Y0、Y17、Y35 分别为未治理地、植被恢复 17 年、植被恢复 35 年;CK、NRD、RD 分别为林下裸地对照、保留芒萁处理、去除芒萁处理;不同大写字母表示不同恢复年限同一处理间差异显著,不同小写字母表示相同恢复年限不同处理间差异显著( $p < 0.05$ )。下同。

图 1 土壤微生物生物量碳月动态和年平均含量

表 1 芒萁处理和恢复时间对土壤微生物量碳氮含量的方差分析

项目	Y0		Y17		Y35	
	MBC	MBN	MBC	MBN	MBC	MBN
芒萁处理	0.003**	0.028*	0.212	0.479	0***	0***
时间	0.027*	0.240	0.613	0.160	0.140	0.157
芒萁处理×时间	0.235	0.601	0.525	0.184	0.154	0.987

注:MBC、MBN 分别为微生物生物量碳、微生物生物量氮;\* 为  $p < 0.05$ ; \*\* 为  $p < 0.01$ ; \*\*\* 为  $p < 0.001$ 。下同。

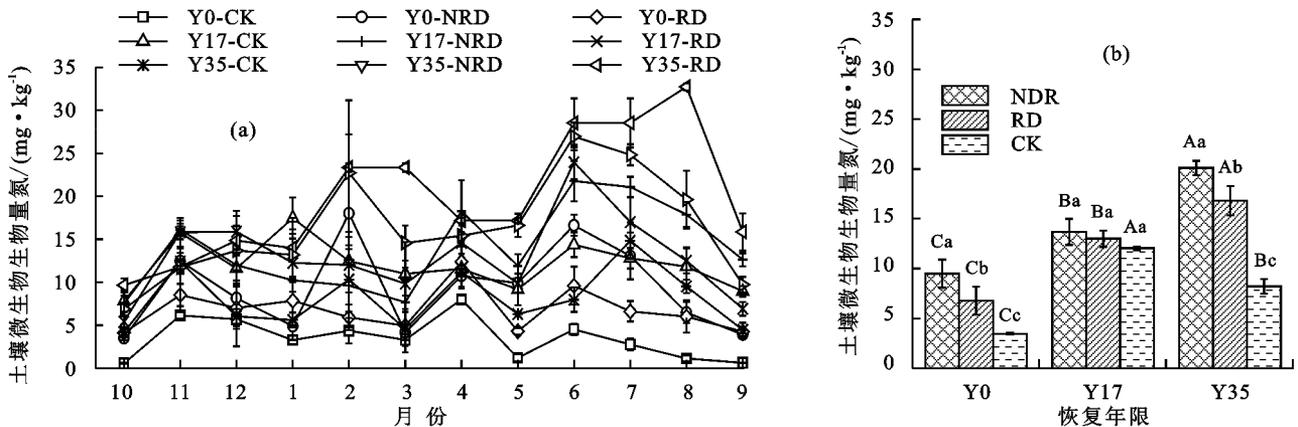


图 2 土壤微生物生物量氮月动态和年平均含量

## 2.2 土壤微生物生物量碳氮周转速率、周转时间和流量

由图 3 可知,在退化马尾松林恢复过程的不同芒

萁处理和林下裸地中,土壤微生物量碳氮的周转速率变化范围分别为 2.21~4.72,1.78~4.57 /a,周转时间分别为 0.22~0.48,0.22~0.59 年,流量分别为

14.29~58.88, 2.25~4.65 kg/(hm<sup>2</sup>·a)。

在退化马尾松林恢复过程中,相比于林下裸地, Y0 芒萁覆盖处理下的 MBC 周转速率显著低 29.73%, 周转时间显著高 33.05%, 而 Y17 和 Y35 的周转速率和周转时间无显著差异; 去除芒萁覆盖后, Y17 的 MBC 周转速率比保留芒萁处理的显著降低 33.93%, 周转时间增加 47.31%, 而 Y0 和 Y35 在去除芒萁处理后 MBC 周转速率和周转时间均无显著变化。同样, 与林下裸地相比, 芒萁覆盖处理下 Y0 和 Y17 的 MBN 周转速率和周转时间的规律与 MBC 相似, 而 Y35 的 MBN 周转速率比林下裸地显著低 47.05%, 周转时间高 102.48%; 去除芒萁覆盖处理对 MBN 周转速率和周转时间没有显著影响。

在相同芒萁处理下, 随恢复年限增加 MBC 和 MBN 的周转速率呈降低趋势, 周转时间呈增加趋势。其中林下裸地随恢复年限增加 MBC 周转速率

显著降低 53.24%, 周转时间显著增加 108.49%, 而 MBN 周转速率则表现为 Y17 的显著较低, Y35 低于 Y0 但没有显著差异。

在马尾松林所有恢复阶段, 芒萁覆盖处理下 MBC 和 MBN 流量均高于林下裸地。其中, Y0 和 Y35 芒萁覆盖处理下的 MBC 流量分别比林下裸地显著高 168.07% 和 218.73%, Y0 芒萁覆盖处理下 MBN 流量也比林下裸地显著高 105.93%, 其他则无显著差异。与保留芒萁覆盖处理相比, 去除芒萁处理显著降低 Y0 和 Y17 的 MBC 流量(分别降低 32.61% 和 39.26%), 以及 Y0 的 MBN 流量(降低 33.45%), 其他则无显著差异。

随着恢复年限增加, 保留芒萁覆盖处理的 MBC、MBN 流量无明显变化, 而林下裸地中 MBC 流量在 Y17 显著较高, MBN 流量在 Y35 最高, 比 Y0 林下裸地 MBN 流量显著高 88.04%。

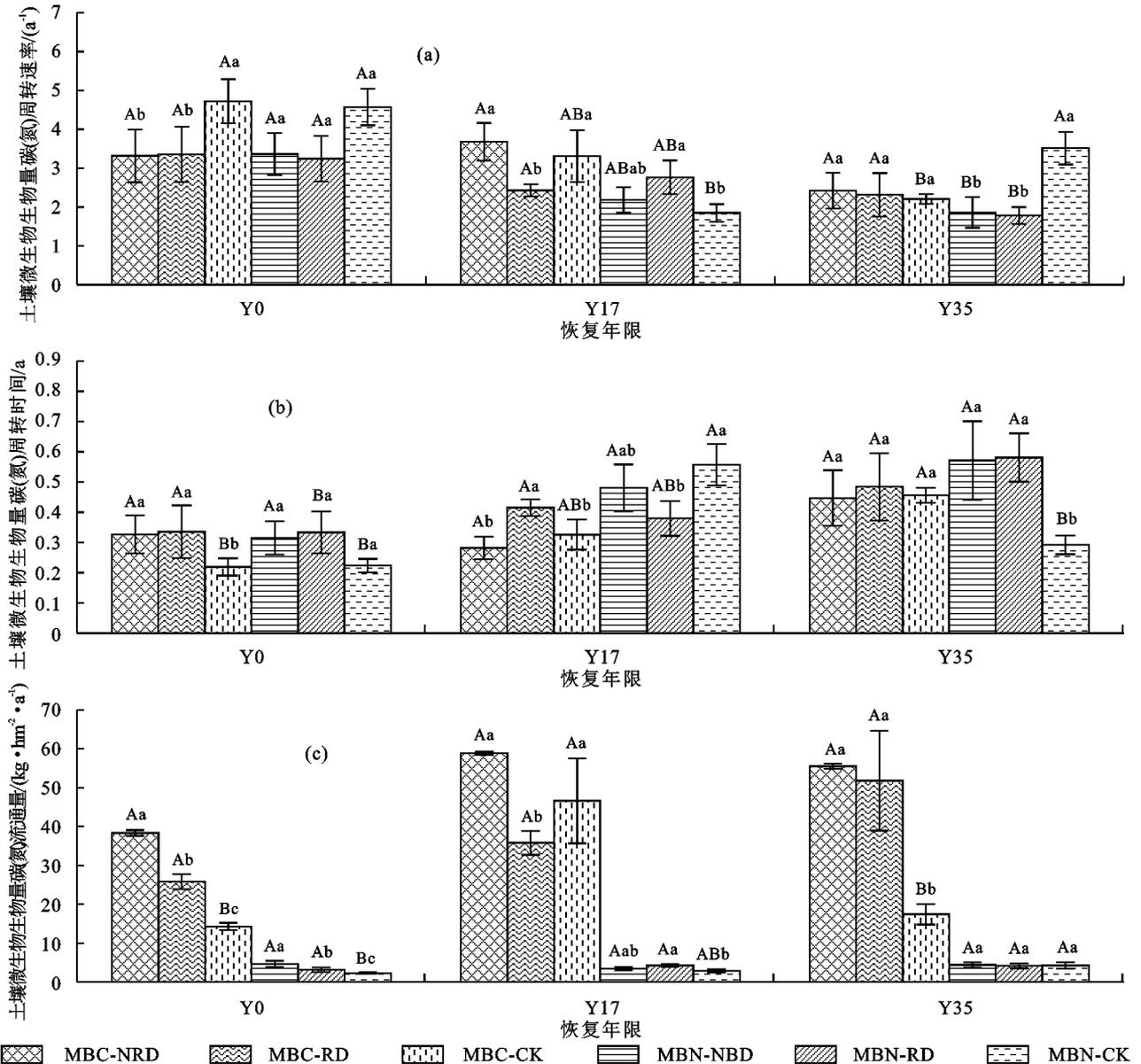


图 3 土壤微生物生物量碳氮周转速率、周转时间、流量

双因素分析结果显示,芒萁处理对 MBN 流量, MBC 和 MBN 的周转速率、MBC 和 MBN 的周转时间均无显著影响,而对 MBC、MBN 含量和 MBC 流量具有显著影响(表 2);恢复年限除了对 MBN

流量无显著影响外,对其余指标均有显著影响;芒萁处理和恢复年限的交互作用对 MBC、MBN 含量和 MBN 周转速率、MBN 周转时间具有显著影响(表 2)。

表 2 芒萁处理、恢复年限及其交互作用对土壤微生物生物量碳氮、流量、周转速率、周转时间的影响

变量	芒萁处理		恢复年限		芒萁处理×恢复年限	
	F	p	F	p	F	p
MBC	56.016	0***	70.610	0***	11.528	0***
MBN	30.952	0***	54.770	0***	6.851	0.002**
MBC 流量	8.838	0.002**	6.778	0.006**	2.467	0.082
MBN 流量	1.652	0.219	1.368	0.280	1.115	0.380
MBC 周转速率	1.383	0.276	5.880	0.011*	1.200	0.345
MBN 周转速率	3.512	0.052	11.208	0.001**	3.101	0.042*
MBC 周转时间	1.136	0.343	5.170	0.017*	0.479	0.751
MBN 周转时间	1.684	0.214	7.014	0.006**	3.052	0.044*

2.3 退化马尾松林恢复过程中土壤的基本理化性质

退化马尾松林保留芒萁覆盖处理下的 SOC、TN (Y17 除外)、DOC 和 DON 都显著高于林下裸地,分别高 81.85%~119.43%, 39.47%~51.92%, 85.20%~103.20%, 100.00%~155.34%, 土壤 pH、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 DIN 则无显著变化,土壤容重在 Y0、Y17 恢复阶段也无显著变化,在 Y35 阶段芒萁覆盖后显著降低(表 3)。在去除芒萁处理 4 年后,与保留芒萁覆盖相比,Y35 的土壤容重显著增加,Y0 的可溶性有机碳显著降低 38.57%,Y35 的可溶性有机氮显著降低 47.15%,Y17 的硝态氮显著增加 200.00%,其余的土壤性质则无显著差异。

随着恢复年限的增加,保留芒萁处理和林下裸地的土壤理化性质变化规律不完全一致。保留芒萁覆盖处

理下的马尾松林土壤 pH、土壤容重和硝态氮表现为,从 Y0 到 Y17 阶段分别降低 4.53%, 16.78%, 82.35%; Y17 和 Y35 阶段没有显著差异,而土壤有机碳和溶解性有机碳在保留芒萁覆盖处理下随恢复年限增加,Y0 到 Y17 阶段显著增加 236.72%, 57.48%, Y17 和 Y35 阶段没有显著差异,而全氮,溶解性有机氮、铵态氮、溶解性无机氮均随恢复年限的增加而增加。林下裸地的土壤 pH 和土壤容重均表现为先显著降低后显著增加,从 Y0 到 Y17 分别降低 2.56%, 10.49%, 从 Y17 到 Y35 分别增加 4.60%, 13.28%; 土壤全氮从 Y0 到 Y17 显著增加 84.21%, 从 Y17 到 Y35 又显著降低 25.71%, 土壤有机碳、溶解性有机碳氮、铵态氮和溶解性无机氮含量在 Y0 显著较低,而 Y17 和 Y35 之间没有显著差异,硝态氮含量则随恢复年限增加而显著降低。

表 3 芒萁处理和恢复年限对土壤理化性质的影响

样地	处理	pH	容重	土壤有机碳/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮/ (g·kg <sup>-1</sup> )	溶解性有机碳/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	溶解性有机氮/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	铵态氮/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	硝态氮/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	溶解性无机氮/ (mg·kg <sup>-1</sup> )
Y0	CK	4.69±0.04Aa	1.43±0.07Aa	1.75±0.01Bb	0.38±0.02Cb	5.88±0.20Bb	0.23±0.10Bb	8.08±0.67Ba	0.73±0.55Aa	8.81±0.70Ba
	NRD	4.64±0.03Aa	1.42±0.05Aa	3.84±1.57Ba	0.53±0.09Aa	10.89±0.41Ba	0.46±0.03Ca	8.69±0.81Ba	0.68±0.43Aa	9.37±0.22Ba
	RD	4.54±0.11ABa	1.39±0.08Aa	3.51±0.76Ca	0.55±0.03Ba	6.69±0.60Bb	0.79±0.43Aa	10.37±3.07Aa	0.50±0.44Aa	10.88±1.85Aa
Y17	CK	4.57±0.02Ba	1.28±0.04Ba	7.11±0.85Ab	0.70±0.04Aa	8.44±0.42Ab	0.56±0.10Bb	11.87±1.56Aa	0.27±0.06Bab	12.15±0.87Aa
	NRD	4.43±0.02Ba	1.18±0.05Ba	12.93±1.50Aa	0.79±0.09Aa	17.15±1.01Aa	1.22±0.62Ba	10.71±0.68ABa	0.12±0.08Bb	10.83±0.35Ba
	RD	4.46±0.07Ba	1.22±0.17Aa	10.63±0.76Aa	0.73±0.06Aa	14.13±1.88Aa	1.21±0.01Aa	13.70±3.05Aa	0.36±0.15Aa	14.06±1.77Aa
Y35	CK	4.78±0.05Aa	1.45±0.03Aa	5.54±1.16Ab	0.52±0.06Bb	8.73±0.78Ab	1.03±0.21Ab	11.00±1.68Aa	0.15±0.01Cb	11.15±0.97ABa
	NRD	4.65±0.03Aa	1.20±0.05Bb	10.23±1.07Aa	0.79±0.04Aa	16.72±1.95Aa	2.63±0.68Aa	17.20±5.68Aa	0.27±0.06ABab	17.48±3.30Aa
	RD	4.72±0.06Aa	1.38±0.13Aa	7.61±0.96Bab	0.66±0.05ABab	13.91±1.98Aab	1.39±0.27Ab	14.69±3.65Aa	0.44±0.19Aa	15.13±2.13Aa

注:n=3,表中数据为平均值±标准误。

2.4 土壤微生物量碳氮的影响因子

SOC、TN、DOC、DON、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、DIN 与微生物量碳显著正相关;SOC、TN、DOC 与微生物量碳流量呈显著正相关;SOC、TN、DON、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、DIN 与微生物量碳周转速率呈显著负相关,而 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 与

微生物量碳周转速率显著正相关(表 4)。同样,SOC、TN、DOC、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、DIN 与微生物量氮周转速率显著负相关,而 DON 与微生物量氮流量显著正相关。可见,可利用碳源和氮源增加时显著改变微生物量碳氮流量。

表 4 土壤微生物量碳氮与土壤理化因子的相关性分析

变量	SOC	TN	DOC	DON	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	DIN
MBC	0.761**	0.805**	0.801**	0.709**	0.709**	-0.299	0.693**
MBN	0.737**	0.785**	0.812**	0.708**	0.729**	-0.366	0.706**
MBC 流通量	0.535**	0.510**	0.586**	0.307	0.263	-0.204	0.249
MBN 流通量	0.288	0.262	0.341	0.415**	0.214	-0.323	0.189
MBC 周转速率	-0.386*	-0.457*	-0.358	-0.542**	-0.587**	0.426*	-0.558**
MBN 周转速率	-0.567**	-0.658**	-0.577**	-0.355	-0.557**	0.124	-0.554**

表 5 逐步回归分析表明, MBC、MBN 含量及其流通量、周转速率的主导驱动因子存在差异。其中, MBC 的变化主要受 TN、DOC、DON 共同驱动, 解释率为 79.70%, MBN 含量的变化除受上述因子影响外, 还受 SOC 驱动, 解释率为 82.70%, 均达到极显著

水平; DOC 可以解释 MBC 流通量变化的 31.70%, 而 DON 仅解释 MBN 流通量变化的 13.90%; NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 驱动 MBC 周转速率变化, TN 驱动 MBN 周转速率变化, 解释率分别为 31.90%, 41.40%, 均达到极显著水平。

表 5 土壤微生物量碳氮与土壤理化因子的回归分析

变量	多元线性回归方程	R <sup>2</sup>	F	p
	MBC=0.353×TN+0.422×DOC+0.280×DON	0.797	35.060	0***
MBC	MBC 流通量=0.586×DOC	0.317	13.061	0.001**
	MBC 周转速率=-0.587×NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	0.319	13.164	0.001**
	MBN=0.602×DOC+0.307×DON+0.725×TN-0.572×SOC	0.827	32.058	0***
MBN	MBN 流通量=0.415×DON	0.139	5.208	0.031*
	MBN 周转速率=-0.658×TN	0.411	19.123	0***

### 3 讨论

#### 3.1 芒萁对土壤微生物量动态变化的影响

本研究发现, 土壤微生物生物量碳氮的季节波动与林下植被芒萁的生长、林龄以及林木生长节律有关。退化马尾松林不同恢复阶段的土壤微生物量碳氮季节变化格局基本呈现出生长季维持在较高水平, 随着植物进入非生长季下降。在以往的研究<sup>[17]</sup>中, 人工油松林恢复过程中土壤微生物生物量变化特征与本研究的结果相似, 但在红松林中土壤微生物量碳氮动态变化却表现出“冬高夏低”, 即非生长季较高, 生长季下降<sup>[18]</sup>。本研究中, 退化马尾松林在芒萁覆盖后地上输入部分的数量和种类更加丰富, 且芒萁生长的表层土壤中覆盖着厚厚的根毯层, 芒萁根系产生大量根系分泌物和根系脱落物, 为马尾松和土壤微生物生长季节资源竞争提供可利用养分<sup>[19]</sup>, 如本研究中芒萁覆盖后土壤总碳、总氮、溶解性有机碳氮含量显著增加(表 3); 且有研究<sup>[20]</sup>表明, 芒萁生长后提高表层土壤温湿度, 改善土壤环境, 进而促进土壤微生物量碳氮含量的增长和马尾松的生长。在恢复 35 年的马尾松林中土壤微生物量碳最大值出现在 4 月份, 原因可能是随着春季气温升高, 早春植物和土壤微生物共同固持养分可能形成“春坝”作用<sup>[21]</sup>, 使土壤微生物量呈现上升趋势。由于土壤微生物生

物量碳氮含量在一年中变异很大, 受所在区域的气候、地形、土壤、植被、人类干扰、土地利用类型等诸多因素的影响, 因此, 具体哪一阶段的土壤微生物量碳氮含量更能体现地区的平均水平一直存在争议。在本研究中, 芒萁覆盖下的退化马尾松林在不同恢复阶段土壤微生物量碳氮含量均与春季阶段相接近, 因此, 生长季前的土壤微生物量碳氮含量更能反映这一地区的平均水平。

#### 3.2 芒萁对土壤微生物量碳氮周转速率、周转时间、流通量的影响

土壤微生物生物量作为土壤养分转化的活性库和源, 其含量高低和周转特征变化可部分反映土壤微生物活动强弱和养分转化速率的快慢<sup>[20]</sup>, 是土壤养分有效性供应和有机质积累的灵敏指标。根据 McGill 等<sup>[15]</sup>和 Jenkinson 等<sup>[16]</sup>研究, 基于土壤微生物生物量的净变化, 通过土壤微生物量动态减少的总和来估算其周转特征, 即使微生物量长期保持不变, 也发生周转率的变化, 且同位素示踪技术也证明该方法在不同生态系统实地定性比较研究中具有的价值性<sup>[22]</sup>。土地利用类型的改变导致土壤有机质积累和养分有效性的差异, 使土壤微生物量周转特征表现出明显差异。已有研究<sup>[23]</sup>发现, 从耕地围牧草地到马尾松针阔混交林, 土壤微生物生物量碳氮周转速率的变化范围分别为 0.30~1.64, 0.90~1.10/a。在本

研究中,退化马尾松林恢复过程中土壤微生物量碳氮周转速率范围分别为 $2.21\sim 4.72, 1.78\sim 4.57/a$ ,周转速率相对较快,且土壤微生物量碳氮含量( $21.80\sim 193.60, 3.50\sim 20.10\text{ mg/kg}$ )和流通量[ $14.30\sim 58.90, 2.30\sim 4.70\text{ kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$ ]也明显低于人工油松林<sup>[17]</sup>( $155.00\sim 885.60, 33.70\sim 237.40\text{ mg/kg}$ )和围牧草地<sup>[23]</sup>[ $763.00\sim 1031.00, 101.00\sim 141.00\text{ kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$ ]。可能与退化马尾松林土壤有机质积累缓慢和土壤养分含量低有关,马尾松凋落物分解缓慢,土壤有机质和可用养分含量低,且马尾松和土壤微生物之间存在激烈的养分竞争,营养物质的缺乏导致土壤微生物数量少且活性差,土壤微生物仅能维持自身生长代谢过程,死亡速度加快。因此,退化恢复的马尾松林土壤微生物量碳氮含量相比于其他研究低,周转速率和周转时间快,流通量少。

在退化马尾松林恢复的不同阶段,芒萁对土壤微生物量周转的影响表现出不同的变化特征。在未治理地(Y0),芒萁覆盖处理增加土壤微生物量碳氮含量,降低周转速率,增加周转时间,但提高土壤微生物量碳氮流通量。林下植被芒萁促进马尾松凋落物分解,提高土壤有机碳和活性养分库,促进土壤微生物的生长代谢活动,提高土壤微生物在有机质分解和养分转化和供应上的能力<sup>[4]</sup>。在治理恢复17年的马尾林(Y17)中,芒萁处理下的马尾松林土壤微生物量碳氮周转与林下裸地相比没有显著差异,原因可能是随着植被恢复年限增加,马尾松林植被密度变大,林下裸地土壤中凋落物量输入增多,有机质的积累促进微生物量的增长,缩小微生物量周转上的差异,主效应分析中恢复年限对土壤微生物量周转具有显著影响也说明此观点(表2),且土壤环境条件改善,土壤微生物群落结构随着恢复时间更加丰富,种类更加复杂。而在治理恢复35年的马尾松林(Y35),芒萁覆盖处理增加土壤微生物量碳氮含量,并未改变土壤微生物量碳周转速率和周转时间,但增加微生物量碳流通量;芒萁覆盖降低微生物量氮周转速率,增加周转时间,而流通量无显著变化。微生物量碳库的大小是控制周转通量的关键因素<sup>[23]</sup>,芒萁覆盖后有机碳和养分含量增加,微生物活性增强,刺激微生物量周转,碳流通量增加;而微生物量氮流通量未显著改变原因可能是退化马尾松林在恢复过程中仍受氮限制影响,土壤微生物的相对氮限制提高微生物内部对氮素的保留和回收率<sup>[24]</sup>,微生物量氮损失少,且相关分析和逐步回归分析中微生物量氮流通量与溶解性有机氮含量的显著正相关,也说明土壤氮素对微生物量氮流

通量的限制。

芒萁覆盖与去除处理在未治理地与治理恢复35年马尾松林中对土壤微生物量碳氮的影响结果相一致,而芒萁处理对治理恢复17年土壤微生物量碳氮周转影响不同,表现为去除芒萁处理降低微生物量碳周转速率,增加周转时间,降低微生物量碳流通量;而芒萁去除后土壤微生物量氮周转速率增加,周转时间降低,流通量增加。可能是去除林下芒萁后土壤环境条件急剧变化,植物多样性降低,有机碳源输入减少,无法适应环境的微生物逐渐死亡,土壤微生物种类和数量减少导致微生物量碳周转速率和流通量降低,Zhang等<sup>[6]</sup>在针叶林中发现去除林下植被,土壤真菌和细菌生物量显著降低也证明此观点;而微生物量氮周转反映土壤氮素有效性和供应状况,相关分析和逐步回归分析中土壤微生物量氮周转速率与铵态氮呈显著负相关(表4、表5),表明土壤环境恶化,氮素有效性降低,迫使土壤微生物分解有机质获取可利用氮素维持自身生命活动,氮素转移率提高,流通量增加。

## 4 结论

(1)退化马尾松林恢复过程中土壤微生物量碳氮表现出“生长季高、非生长季降低”的动态格局,进入生长季前的土壤微生物量碳氮含量更能体现该地区芒萁覆盖后退化恢复马尾松林的平均水平。

(2)与林下裸地相比,芒萁覆盖后退化马尾松林凋落物输入的数量质量和活性养分增加,促进微生物的生长代谢和同化矿化能力,土壤微生物量增加;土壤微生物通过降低周转速率,增加周转时间,提高土壤微生物量碳氮流通量,促进退化恢复地土壤有机质积累和养分释放;而在退化恢复17年的马尾松林中,受植被恢复阶段、微生物自身特性和养分含量影响,芒萁对土壤微生物量周转无显著影响。去除芒萁处理4年后,则使土壤微生物量碳氮含量降低,微生物量碳氮周转速率、周转时间和流通量有往林下裸地发展的趋势。

(3)相关和逐步回归分析表明,土壤微生物量碳氮及其周转主要受碳和氮及其有效性的影响,碳氮有效性及其供应能力是影响马尾松林恢复过程中土壤微生物量周转的关键因子。

### 参考文献:

- [1] Negishi J N, Sidle R C, Noguchi S, et al. Ecological roles of roadside fern (*Dicranopteris curranii*) on logging road recovery in Peninsular Malaysia: Preliminary results[J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, 224 (1/2):176-186.
- [2] Yildiz O, Cromack J K, Radosovich S R, et al. Comparison

- of 5th-and 14th-year Douglas-fir and understory vegetation responses to selective vegetation removal[J]. *Forest Ecology and Management*, 2011, 262(4): 586-597.
- [3] Wan S Z, Zhang C L, Chen Y Q, et al. The understory fern *Dicranopteris dichotoma* facilitates the overstory Eucalyptus trees in subtropical plantations [J]. *Ecosphere*, 2014, 5(5): 1-12.
- [4] Chen Y Q, Zhang Y J, Cao J B, et al. Stand age and species traits alter the effects of understory removal on litter decomposition and nutrient dynamics in subtropical Eucalyptus plantations[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2019, 20: e00693.
- [5] Majasalmi T, Rautiainen M. The impact of tree canopy structure on understory variation in a boreal forest[J]. *Forest Ecology and Management*, 2020, 466: e118100.
- [6] Zhang Q, Wu J J, Yang F, et al. Alterations in soil microbial community composition and biomass following agricultural land use change[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 1-10.
- [7] Liu Z F, Wu J P, Zhou L X, et al. Effect of understory fern (*Dicranopteris dichotoma*) removal on substrate utilization patterns of culturable soil bacterial communities in subtropical Eucalyptus plantations[J]. *Pedobiologia*, 2012, 55(1): 7-13.
- [8] Zhao J, Wan S Z, Shao Y H, et al. *Dicranopteris*-dominated understory as major driver of intensive forest ecosystem in humid subtropical and tropical region[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 49: 78-87.
- [9] 吕茂奎, 谢锦升, 周艳翔, 等. 红壤侵蚀地马尾松人工林恢复过程中土壤非保护性有机碳的变化[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(1): 37-44.
- [10] Lyu M K, Xie J S, Giardina C P, et al. Understory ferns alter soil carbon chemistry and increase carbon storage during reforestation with native pine on previously degraded sites[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 132: 80-92.
- [11] 任寅榜, 吕茂奎, 谢锦升, 等. 侵蚀退化地植被恢复过程中芒萁对土壤可溶性有机碳的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38(7): 2288-2298.
- [12] 聂阳意, 吕茂奎, 谢锦升, 等. 植被恢复过程中芒萁覆盖对侵蚀红壤氮组分的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38(19): 6964-6971.
- [13] Yang Y, Zhang X Y, Zhang C, et al. Understory vegetation plays the key role in sustaining soil microbial biomass and extracellular enzyme activities[J]. *Biogeosciences*, 2018, 15(14): 4481-4494.
- [14] 张浩, 吕茂奎, 谢锦升. 红壤侵蚀区芒萁对土壤微生物群落结构的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38(5): 1639-1649.
- [15] McGill W B, Cannon K R, Robertson J A, et al. Dynamics of soil microbial biomass and water-soluble organic C in Breton L after 50 years of cropping to two rotations[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1986, 66(1): 1-19.
- [16] Jenkinson D S, Ladd J N. Microbial biomass in soil: Measurement and turnover [J]. *Soil Biochemistry*, 2021, 58: 415-472.
- [17] 刘占锋, 刘国华, 傅伯杰, 等. 人工油松林 (*Pinus tabulaeformis*) 恢复过程中土壤微生物生物量 C、N 的变化特征[J]. *生态学报*, 2007, 27(3): 1011-1018.
- [18] 刘爽, 王传宽. 五种温带森林土壤微生物生物量碳氮的时空格局[J]. *生态学报*, 2010, 30(12): 3135-3143.
- [19] Zhao J, Wang X L, Shao Y H, et al. Effects of vegetation removal on soil properties and decomposer organisms[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(5): 954-960.
- [20] Singh J S, Gupta V K. Soil microbial biomass: A key soil driver in management of ecosystem functioning[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 634: 497-500.
- [21] Warren M, Zou X M. Seasonal nitrogen retention in temperate hardwood forests: The "vernal dam" hypothesis and case studies[J]. *Acta Phytocological Sinica*, 2003, 27(1): 11-15.
- [22] Liebisch F, Keller F, Huguenin E O, et al. Seasonal dynamics and turnover of microbial phosphorus in a permanent grassland[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, 50(3): 465-475.
- [23] Chen H, Zhao X R, Chen X J, et al. Seasonal changes of soil microbial C, N, P and associated nutrient dynamics in a semiarid grassland of north China[J]. *Applied Soil Ecology*, 2018, 128: 89-97.
- [24] Spohn M, Widdig M. Turnover of carbon and phosphorus in the microbial biomass depending on phosphorus availability[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 113: 53-59.