

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2021.01.013

杉木林下套种阔叶树对土壤生态酶活性及其化学计量比的影响

孙思怡^{1,2}, 卢胜旭^{1,2}, 陆宇明^{1,2}, 许恩兰^{1,2}, 吴东梅^{1,2},
刘春华³, 蒋宗培³, 郭剑芬^{1,2*}

(1. 福建师范大学地理科学学院 福建 福州 350007; 2. 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地 福建 福州 350007;
3. 福建农林大学莘口教学林场 福建 三明 365000)

摘要: [目的] 研究杉木林下套种阔叶树的土壤生态酶活性及其化学计量比, 评估该林分土壤养分和肥力状况。[方法] 在福建省三明市格氏栲自然保护区杉木林试验示范区设置 3 种处理, 分别是杉木成熟林套种阔叶树、杉木幼林套种阔叶树, 以及不套种阔叶树的杉木纯林 (对照), 测定其表层 (0~10 cm) 土壤的理化性质、土壤微生物生物量碳氮磷含量及土壤酶活性, 并计算酶化学计量比。[结果] 杉木林下套种阔叶树后, 尤其是杉木成熟林套种阔叶树, 土壤全碳 (TC)、全氮 (TN)、微生物生物量碳 (MBC) 含量增加。套种处理之后, 土壤 β -N-乙酰氨基葡萄糖苷酶 (NAG) 和酸性磷酸酶 (AP) 酶活性显著升高, β -葡萄糖苷酶 (β G) 酶活性显著降低; β G: AP 和 NAG: AP 的平均值分别为 0.006 4 和 0.011 3, 远低于全球平均水平, 表明该区域土壤微生物受磷限制, AP 酶和 NAG 酶的活性提高, 使得 β G: AP 和 β G: NAG 值在套种处理之后显著降低。冗余分析表明土壤 C: N 和 MBC: MBN 分别解释土壤酶活性和生态酶化学计量比变异的 92.3% 和 4.4%。[结论] 杉木套种阔叶树有助于土壤养分积累, 改良土壤性状。

关键词: 杉木; 套种; 生态酶化学计量; 土壤养分; 冗余分析

中图分类号: S714, S791.27

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2021)01-0106-08

土壤微生物是土壤有机质分解和养分周转的主要参与者^[1]。土壤酶作为微生物代谢的指标, 推动着土壤微生物分解有机质, 在土壤碳、氮、磷循环过程中发挥着重要的作用^[2]。Sinsabaugh 等研究认为, 水解酶的活性可以作为微生物营养需求的指标, 而且在 C、N 和 P 周转相关的酶活性之间也存在化学计量关系^[3]。相关研究将微生物用于获取碳、氮、磷养分的主要水解酶的比值 (β G : NAG : AP), 称为生态酶化学计量比, 能够反映土壤微生物群落的养分需求和利用能力, 并与土壤养分循环、转化及其有效性联系起来, 可用来衡量土壤微生物能量和养分资源的限制状况^[3-5]。已有的研究表明生态酶活性及其计量比受到温度、水分、pH 值、养分

有效性、微生物生物量以及植被特征等因素的影响^[6-10], 而将土壤-微生物生物量-酶化学计量比结合起来的研究鲜有报道。

杉木 (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.) 为我国南方主要造林树种, 栽培面积大^[11]。近几十年来, 由于杉木林长期单一的纯林经营, 造成连栽杉木人工林的土壤肥力退化、生产力下降等问题^[12-15]。已有研究表明, 对杉木人工林进行间伐、套种等改造, 能够改善林分质量, 丰富生物多样性^[16]; 杉木纯林在套种改造后形成混交林的土壤微生物生物量^[17]、土壤肥力和土壤酶活性^[18]也得到提高。但过去关于杉木林下套种阔叶树的研究更多地仅关注套种后土壤理化性质及养分的变化, 从土

收稿日期: 2020-03-18 修回日期: 2020-04-13

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFD0600304); 福建省科技厅公益类重点项目 (2019R1002-4); 福建省高等学校新世纪优秀人才支持计划项目 (J1-1253)

* 通讯作者: 郭剑芬, 教授, 博士生导师, 主要从事森林碳循环与全球变化研究。E-mail: jfguo@fjnu.edu.cn

壤酶活性及其化学计量比角度的研究较少。为此,本研究在三明格氏栲自然保护区建立杉木林下套种阔叶树试验,研究套种后土壤酶活性及生态酶计量比的特征,以探讨杉木林下套种阔叶树对提高土壤肥力、促进土壤养分周转的效果。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与实验设计

试验区位于福建省三明市格氏栲自然保护区(117°28'E, 26°11'N)内,该区属于中亚热带季风气候,夏热冬冷且雨热同季,年均温 19~20℃,年降水量达 1 740 mm。保护区内平均海拔 300~350 m,以低山丘陵为主,植物群落种类丰富且分层明显。土壤主要以红壤和黄壤为主,多呈酸性,土壤厚度超过 1 m。

自 2014 年 4 月开始,在三明格氏栲自然保护区建立杉木林下套种阔叶树的杉木林试验区。套种前先对林地进行疏伐、清除林下杂草、穴状整地,每个处理的立地条件、坡向、坡位等条件基本一致,明穴规格为 40 cm × 30 cm × 30 cm,林分株行距为 2 m × 3 m。设置 3 种套种处理,分别为杉木成熟林套种阔叶树(套种成熟林)、杉木幼林套种阔叶树(套种幼林)和杉木纯林(对照),每种处理设置 20 m × 20 m 的标准样地 5 个。套种阔叶树种的杉木林龄分别为 51 年生和 4 年生,杉木纯林的林龄为 4 年生。林下套种的种植密度以各阔叶树种生长后能覆盖地表为宜,套种的阔叶树均为 3 年生,包括马褂木(*Liriodendron chinense* (Hemsl.) Sarg.)、火力楠(*Michelia macclurei* Dandy) 和乐昌含笑(*Michelia chapensis* Dandy),三者比例为 1:1:1。栽植后于当年 8—9 月抚育 1 次,次年 8—9 月进行第二次抚育,抚育内容主要包括松土、清除林地杂草等,以促进幼林良好地生长^[19]。

1.2 试验研究方法

1.2.1 土壤样品采集 2018 年 10 月,在套种的每个样地内按“S”型选 5 个点,用土钻取表层土壤(0~10 cm),将土壤分别充分混合均匀并去除可见的细根和石砾等,再将土样过 2 mm 筛装入自封袋。一部分存在 4℃ 冰箱中,用于测定土壤含水量、微生物生物量、碳、氮、磷(MBC、MBN、MBP)含量、土壤酶活性等,另外一部分自然风干,主要用来测定土壤 pH 值和土壤全碳(TC)、全氮(TN)、全磷(TP)含量等。

1.2.2 土壤基本理化性质测定 土壤含水量运用铝

盒烘干衡定法测定,采用 ElementarVario MAX 碳氮元素分析仪(GmbH, Hanau, Germany)测定土壤 TC 和 TN 含量;土壤 TP 含量的测定则加入浓硫酸-高氯酸消煮后提取待测溶液,使用连续流动分析仪(Skalar san++, Skalar, 荷兰)测定。

1.2.3 土壤微生物生物量碳、氮、磷测定 土壤微生物量运用氯仿熏蒸-浸提法,每个鲜土样各称取 5 份(5 × 5 g),两组土样放到 50 mL 小烧杯中做熏蒸处理,另两组土样放到离心管中,放不含氯仿的干燥器中做未熏蒸处理,剩余一组加入 62.5 μL 的 1 000 mg·kg⁻¹ 磷标液,放置 24 h 进行加标回收实验。24 h 后,将烧杯中的熏蒸土样取出,土壤微生物生物量碳和氮(MBC、MBN)用 2 mL 0.5 mol·L⁻¹ K₂SO₄ 洗至离心管中,土壤微生物生物量磷(MBP)用 20 mL 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 洗至离心管中。未熏蒸的土样则分别直接加入 20 mL 0.5 mol·L⁻¹ K₂SO₄ 和 20 mL 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃。MBC 含量用总有机碳分析仪(TOC-VCPH/CPN, Shimadzu, 日本)测定,MBN、MBP 含量用连续流动分析仪(San++, Skalar, 荷兰)测定。

1.2.4 土壤酶活性测定 土壤酶活性测定参考 Saiya-Cork 等^[20-21]的方法,各样品分别称取 1 g 土壤加入 125 mL 50 mmol·L⁻¹ 且 pH 值为 5.0 的醋酸缓冲液中,制成悬浮液,静置 30 min 取上清液 200 μL 加入 96 孔微孔板中。每个样品有 16 个重复(200 μL 样品溶液+50 μL 200 μmol·L⁻¹ 底物溶液),8 个阴性对照(200 μL 醋酸缓冲溶液+50 μL 底物溶液)、8 个空白(200 μL 样品溶液+50 μL 缓冲溶液)和 8 个淬灭标准液(200 μL 样品溶液+50 μL 标准液)及淬灭标准对照液(200 μL 缓冲液+50 μL 标准液)进行校正。再将微孔板置于 20℃ 黑暗培养箱中恒温培养 4 h 后取出,加入 1 mol·L⁻¹ NaOH 至每个微孔井使其终止反应。最后采用 Synergy H4 多功能酶标仪(Molecular Devices, San Jose, USA)检测荧光度,酶活性以每小时每克干物质产生底物的摩尔数(nmol·g⁻¹·h⁻¹)来表达。各种土壤酶的名称、缩写、类型及所用标定底物详见表 1。

1.3 数据处理

数据经 Microsoft Excel 2019 软件处理后,使用 SPSS 22.0 软件进行分析,通过单因素方差分析(One-way ANOVA)检验不同套种处理下土壤理化性质、土壤微生物生物量、生态酶活性及其化学计量比的差异显著性,并用 Pearson 相关分析法分析土壤酶活性及其化学计量比与土壤理化性质和

表1 土壤酶的种类、缩写、类型和所用底物

Table 1 The abbreviations, type and substrates of soil enzyme

| 酶 Enzyme | 缩写 Abbreviation | 类型 Type | 底物 Substrate |
|---|--------------------|------------------------|--|
| 酸性磷酸酶 Acid phosphatase | AP | P-targeting hydrolytic | 4-MUB-phosphate |
| β -葡萄糖苷酶 β -glucosidase | β G | C-targeting hydrolytic | 4-MUB- β -D-glucoside |
| β -N-乙酰氨基葡萄糖苷酶 β -N-acetylglucosaminidase | NAG | N-targeting hydrolytic | 4-MUB-N-acetyl- β -D-glucosaminide |

微生物生物量碳氮等指标的相关性。使用 Canoco Software 5.0 软件对生态酶活性及其化学计量与土壤理化因子和微生物生物量的关系进行冗余分析 (RDA)。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质

如表 2 所示, 杉木成熟林套种后土壤 pH 值、TC、TN 含量显著高于套种幼林以及杉木纯林, 而两者之间无显著差异。不同的套种处理对土壤 TP 的含量无显著影响。不同处理之间土壤 C:N、

C:P、N:P 差异显著, 其中 C:N 的范围为 13.31~9.36, 变化趋势是套种成熟林 > 套种幼林 > 杉木纯林, C:P 和 N:P 的范围分别是 260.67~103.38 和 19.74~9.94, 变化趋势则是套种成熟林的比值显著高于套种幼林和杉木纯林, 而套种幼林与杉木纯林之间无显著差异。

2.2 土壤微生物生物量碳、氮、磷

土壤微生物生物量碳、氮、磷在不同套种处理间变化显著 (表 3)。套种成熟林的微生物生物量碳 (MBC) 含量分别比套种幼林和杉木纯林高 8.07% 和 14.90%。套种成熟林的微生物生物量磷 (MBP)

表2 不同套种处理土壤理化性质

Table 2 Physical and chemical properties of soil under different interplanting treatments

| 处理 Treatments | 套种幼林 Young interplanting forest | 套种成熟林 Mature interplanting forest | 杉木纯林 Pure Chinese fir plantation |
|---|------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| 酸碱度 pH | 4.308 ± 0.03 b | 4.46 ± 0.07 a | 4.16 ± 0.03 b |
| 含水量 Soil water content/% | 0.99 ± 0.11 a | 0.92 ± 0.06 a | 0.86 ± 0.13 a |
| 总碳 Total carbon/(g·kg ⁻¹) | 12.93 ± 0.90 b | 19.84 ± 0.14 a | 11.62 ± 0.79 b |
| 总氮 Total nitrogen/(g·kg ⁻¹) | 1.23 ± 0.06 b | 1.51 ± 0.01 a | 1.15 ± 0.03 b |
| 总磷 Total phosphorus/(g·kg ⁻¹) | 0.19 ± 0.08 a | 0.08 ± 0.01 a | 0.09 ± 0.01 a |
| 碳氮比 C:N | 10.68 ± 0.17 b | 13.31 ± 0.14 a | 9.36 ± 0.10 c |
| 碳磷比 C:P | 103.38 ± 22.12 b | 260.67 ± 21.52 a | 133.34 ± 17.6 6b |
| 氮磷比 N:P | 9.94 ± 2.16 b | 19.74 ± 1.51 a | 13.20 ± 1.59 b |

注: 表中数据为平均值 ± 标准差 (n = 5), 同一行不同小写字母表示不同处理间差异显著 (P < 0.05)。

Notes: The data in the table are mean ± standard deviation (n = 5). Different lowercase letters in the same row indicate significant differences between different treatments (P < 0.05).

表3 不同套种处理下微生物生物量及其计量比

Table 3 Microbial biomass and its metering ratio under different interplanting treatments

| 处理 Treatments | 套种幼林 Young interplanting forest | 套种成熟林 Mature interplanting forest | 杉木纯林 Pure Chinese fir plantation |
|------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| 微生物生物量碳 MBC/(mg·kg ⁻¹) | 317.16 ± 40.88 b | 342.76 ± 15.56 a | 298.31 ± 16.08 b |
| 微生物生物量氮 MBN/(mg·kg ⁻¹) | 13.11 ± 0.72 a | 18.42 ± 1.86 a | 15.64 ± 1.51 a |
| 微生物生物量磷 MBP/(mg·kg ⁻¹) | 43.00 ± 0.94 b | 49.68 ± 0.94 a | 36.33 ± 0.94 b |
| MBC:MBN | 25.03 ± 4.39 a | 14.51 ± 2.38 a | 24.24 ± 1.68 a |
| MBC:MBP | 7.34 ± 0.85 a | 6.89 ± 0.23 a | 8.26 ± 0.61 a |
| MBN:MBP | 0.31 ± 0.02 b | 0.37 ± 0.04 ab | 0.43 ± 0.05 a |

注: 表中数据为平均值 ± 标准差 (n = 5), 同一行不同小写字母表示不同处理间差异显著 (P < 0.05)。

Notes: The data in the table are mean ± standard deviation (n = 5). Different lowercase letters in the same row indicate significant differences between different treatments (P < 0.05).

含量分别比套种幼林和杉木纯林高 15.54% 和 36.75%。但是微生物生物量氮 (MBN) 含量在三者之间没有显著差异。杉木纯林土壤的 MBN:MBP 明显高于套种幼林, 而与套种成熟林差异不显著。MBC:MBN 以及 MBC:MBP 在不同套种处理之间的差异均不显著。

2.3 土壤酶活性及其计量比

不同的套种处理显著影响土壤酸性磷酸酶 (AP)、 β -葡萄糖苷酶 (β G) 和 β -N-乙酰氨基葡萄糖苷酶 (NAG) 这 3 种土壤水解酶活性 (图 1), 其变化范围分别为 93.29~60.81、0.70~0.22、0.96~0.71

$\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 。其中 AP 酶活性在不同处理间的变化趋势是套种成熟林 > 套种幼林 > 杉木纯林; 杉木纯林的 β G 酶活性显著高于套种成熟林和套种幼林, 而套种成熟林和套种幼林之间没有显著差异; 套种成熟林的 NAG 酶活性最高且与套种幼林差异显著, 而杉木纯林与其他两个处理间没有显著差异。如图 2 所示, 杉木纯林 β G:NAG 和 β G:AP 显著高于套种成熟林和套种幼林, 但 β G:NAG 和 β G:AP 在套种成熟林和套种幼林之间差异不显著。NAG:AP 在各个处理之间的差异均不显著。

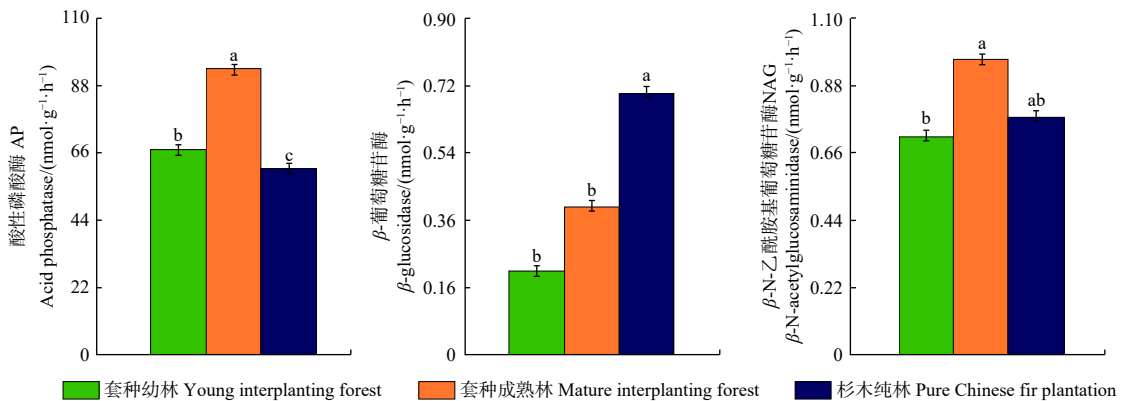


图 1 套种处理对土壤酶活性的影响

Fig. 1 Effects of different interplanting treatments on soil enzyme activities

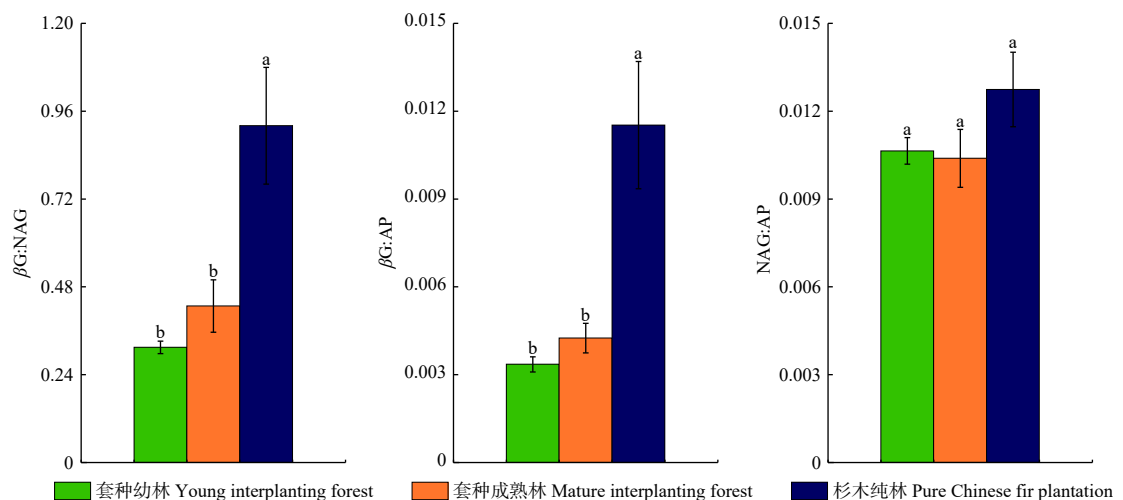


图 2 套种处理对土壤生态酶化学计量比的影响

Fig. 2 Effects of different intercropping treatments on soil ecological enzyme stoichiometry

2.4 土壤生态酶活性及化学计量比与土壤理化性质的相关性

Pearson 相关分析 (表 4) 表明土壤 AP、NAG 酶活性分别与土壤 pH、TC、TN、MBP 含量以及

C:N、C:P、N:P 和 MBN:MBP 显著正相关。其中土壤 AP 酶活性与土壤 pH、TC、TN、MBP 含量以及 C:N、C:P 和 N:P 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 土壤 NAG 酶活性与 pH 值以及 MBN:MBP 呈显著

正相关。而土壤生态酶计量比中 NAG:AP 与土壤理化性质相关性不显著, β G:NAG 与 MBP 呈显著负相关、与 MBN:MBP 呈显著正相关, β G:AP 与 pH 值和 C:N 呈显著负相关, 与 MBP 呈极显著负相关, 而与 MBN:MBP 呈显著正相关。冗余分析表明土壤生态酶活性及其计量比与土壤 C:N 和

MBC:MBN 显著相关。如图 3 所示, 第一轴解释了变量的 98.72%, 第二轴解释了变量的 0.03%, 其中土壤 C:N、MBC:MBN 和 C:P 分别解释土壤酶活性和生态酶化学计量比变化的 92.3%、4.4% 和 1.6%。此外, 土壤生态酶活性及其化学计量比可以将 3 种处理明显地区分开。

表 4 土壤酶活性、酶化学计量比与理化性质及土壤化学计量相关性

Table 4 Correlation between soil enzyme activity, enzyme stoichiometry and physicochemical properties and soil stoichiometry

| 相关性 Correlation | AP | β G | NAG | β G:NAG | β G:AP | NAG:AP |
|-----------------|---------|-----------|--------|---------------|--------------|--------|
| pH | 0.849** | -0.352 | 0.590* | -0.490 | -0.532* | -0.229 |
| SWC | -0.189 | 0.076 | 0.200 | -0.048 | 0.125 | 0.383 |
| TN | 0.881** | -0.226 | 0.455 | -0.346 | -0.404 | -0.359 |
| TC | 0.946** | -0.233 | 0.461 | -0.315 | -0.429 | -0.427 |
| TP | -0.214 | -0.296 | -0.277 | -0.244 | -0.225 | -0.122 |
| C:N | 0.968** | -0.391 | 0.485 | -0.500 | -0.580* | -0.422 |
| C:P | 0.809** | 0.062 | 0.481 | -0.028 | -0.120 | -0.238 |
| N:P | 0.667** | 0.191 | 0.463 | 0.088 | 0.035 | -0.104 |
| MBC | 0.605* | -0.196 | 0.421 | -0.301 | -0.311 | -0.141 |
| MBN | 0.462 | 0.346 | 0.256 | 0.222 | 0.198 | -0.081 |
| MBP | 0.883** | -0.487 | 0.432 | -0.609* | -0.651** | -0.402 |
| MBC:MBN | -0.211 | 0.027 | -0.218 | -0.190 | -0.219 | -0.050 |
| MBC:MBP | -0.413 | -0.131 | 0.397 | 0.476 | 0.401 | 0.096 |
| MBN:MBP | -0.061 | -0.049 | 0.628* | 0.587* | 0.616* | 0.229 |

注: *在0.05水平上显著相关; **在0.01水平上显著相关。

Notes: *Correlation is highly significant at the 0.05 level; ** Correlation is significant at the 0.01 level.

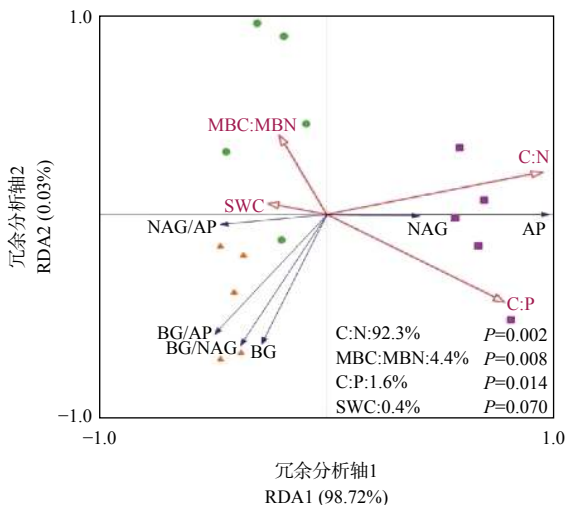


图 3 土壤酶活性和生态酶化学计量比与土壤理化因子的冗余分析

Fig. 3 Redundant analysis of soil enzyme activity and ecological enzyme stoichiometry and soil physical and chemical factors

3 讨论

3.1 不同套种处理对土壤养分、土壤微生物生物量及其化学计量的影响

研究表明, 林分的改变会引起凋落物数量和质量、生物量、土壤结构等变化, 从而影响土壤碳、氮、磷含量及微生物生物量^[22-24]。本研究中, 杉木在套种阔叶树后土壤 TC、TN、MBC、MBN 含量显著增加, 因为杉木的叶片多为厚革质, 富含大量的木质素、纤维素等难分解物质, 其凋落物不易淋溶或被土壤动物机械破坏, 微生物难以分解利用, 而阔叶树种凋落物反之, 更易于微生物的分解^[25-27]。相关研究发现凋落物的基质质量可以解释分解速率变异的 21.7%^[26], 杉木林下套种阔叶林后, 阔叶树比例增大, 凋落物质量的改变, 加速了凋落物分解, 进而影响土壤养分转化速率和土壤微生物生物

量^[28]。本研究结果表明, 套种成熟林的土壤 TC、TN、MBC、MBN 含量高于套种幼林, 这可能与不同林龄的凋落物产量和分解速率不同有关^[29-30]。凋落物数量和质量随林龄增加而改变, 使得土壤 TC 和 TN 含量升高, 提供了更为充足的土壤微生物所需养分, 从而提高了土壤微生物生物量。

土壤 C:N:P 化学计量比是衡量土壤有机质和养分状况的指示器, 随植被类型和养分输入状况的变化而改变^[31-33]。本研究中杉木林在套种阔叶树之后 C:N 小于杉木幼林, 表明套种阔叶树可能增强了土壤微生物同化作用, 使得土壤养分从无机态转变为有机态, 增加土壤肥力, 进一步优化土壤质量。土壤 C:P 和 N:P 是 P 有效性和养分诊断的指标。全球森林土壤 C:P 为 81.9, N:P 为 6.6, 然而本研究中 3 种处理的 C:P 分别为 103.38、260.367、133.34, N:P 分别为 9.94、19.74、13.20, 均高于全球平均值, 这表明本区域森林土壤受到 P 素的限制。

3.2 不同套种处理对土壤酶活性和生态酶化学计量的影响

β G 酶作为土壤有机碳变化的指标之一, 会影响碳素的获得^[34], 土壤中的几丁质分解、氮素的获取受 NAG 酶活性的影响, AP 酶则影响土壤有机磷矿化以及磷素的获得^[35]。本研究中, 杉木林下套种阔叶树使得 β G 酶活性显著降低, 而土壤 TC 和 MBC 含量 (图 2, 3) 在套种处理后总体呈上升趋势, 表明在碳供应充足的情况下, β G 酶活性可能受其他非生物因子的影响更大。套种成熟林 NAG 酶活性高于套种幼林, 说明随着林龄的增加, 土壤理化性质和养分状况改变, 影响凋落物的数量和基质质量、林下生物量而改变土壤微生物生物量, 进而影响相关土壤酶活性。这与乔航等^[36]关于不同林龄油茶人工林土壤酶活性的研究结果基本一致。此外, 套种阔叶树之后 AP 酶活性显著提高, 这可能与套种后土壤微生物生物量磷含量提高有关。

土壤生态酶化学计量比能够有效地衡量微生物对 C、N、P 养分的需求^[34], 并且在一定程度上反映了土壤微生物生物量和土壤有机质之间的平衡状况、土壤微生物的养分吸收速率和生长效率^[37]。全球尺度上, β G:AP 和 NAG:AP 的平均值分别为 0.62 和 0.44^[38], 本研究 β G:AP 和 NAG:AP 的平均值分别为 0.006 4 和 0.011 3, 该研究结果远低于全球平均水平, 说明该区域森林生态系统养分循环

受 P 限制, 这是因为当微生物受磷限制时, 相应地会分泌更多的磷酸酶促进土壤有机磷矿化, 增加磷素的供应来缓解磷限制。磷酸酶分泌量的增多, 土壤中 β G:AP、NAG:AP 值则降低^[39], 这也与大多数研究结果一致^[12,40]。另外, 套种之后土壤碳氮含量增加, C:P、N:P 和 MBC:MBP、MBN:MBP 减小也有可能进一步造成 β G:AP 和 NAG:AP 减小。 β G:AP 和 β G:NAG 的值均在套种处理之后显著降低, 这可能主要与 AP 酶和 NAG 酶的活性提高以及 β G 酶活性降低有关。

3.3 土壤酶活性及生态酶化学计量特征变化的关键驱动因子

冗余分析结果表明, 土壤 C:N、MBC:MBN 和 C:P 分别解释土壤酶活性和生态酶化学计量的 92.3%、4.4% 和 1.6%。其中 C:N 与 NAG 成正相关, 与 β G、 β G:NAG、NAG 成负相关; MBC:MBN 与 NAG、 β G:NAG、 β G 成负相关; C:P 与 AP、 β G 成正相关, 与 β G:AP 成负相关。由于土壤酶主要来源于土壤微生物以及凋落物降解的产物等, 凋落物等养分输入改变会造成土壤养分计量比以及微生物生物量的改变, 因而导致土壤酶化学计量比亦受土壤养分化学计量比以及微生物生物量计量比的影响^[41]。本研究中, 相关性分析表明: β G:AP 与土壤 C:N 呈显著负相关, β G:NAG 与土壤 C:N 以及 MBC:MBN 均无显著相关性, 说明土壤酶化学计量与土壤养分计量以及微生物生物量并未存在严格的对应关系, 表明土壤酶化学计量关系是涉及多方面因素的复杂问题。这可能是由于土壤养分的计量比不能表征有效态养分的计量比^[42-43], 此外土壤酶活性可能更多地受到水分、温度等的间接影响。

4 结论

杉木套种阔叶树明显改变了土壤养分、微生物生物量、生态酶活性以及生态酶化学计量比。杉木林下套种阔叶树对土壤养分含量和相应的微生物生物量产生影响, 从而使得套种处理后 β G 酶活性显著降低, 土壤 AP 酶活性显著提高, 进而导致 β G:NAG、 β G:AP、NAG:AP 均降低。本研究结果还表明土壤生态酶化学计量比不能够很好的反映土壤养分元素的比例组成, 生态酶的活性可能更多地与有效态养分组成以及水分、温度等非生物因素有关, 有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Deng Q, Cheng X, Hui D, *et al.* Soil microbial community and its interaction with soil carbon and nitrogen dynamics following afforestation in central China[J]. *Science of The Total Environment*, 2016, 541: 230-237.
- [2] 刘善江, 夏 雪, 陈桂梅, 等. 土壤酶的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(21): 1-7.
- [3] Sinsabaugh R L, Follstad Shah J J. Ecoenzymatic stoichiometry and ecological theory[J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2012, 43(1): 313-343.
- [4] Hill B H, Elonen C M, Seifert L R, *et al.* Microbial enzyme stoichiometry and nutrient limitation in US streams and rivers[J]. *Ecological Indicators*, 2012, 18: 540-551.
- [5] Xu Z, Yu G, Zhang X, *et al.* Soil enzyme activity and stoichiometry in forest ecosystems along the North-South Transect in eastern China (NSTEC)[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 104(1): 152-163.
- [6] Sardans J, Peuelas J, Estiarte M. Changes in soil enzymes related to C and N cycle and in soil C and N content under prolonged warming and drought in a Mediterranean shrubland[J]. *Applied Soil Ecology*, 2008, 39(2): 223-235.
- [7] Stark S, Mnnist M K, Eskelinen A. Nutrient availability and pH jointly constrain microbial extracellular enzyme activities in nutrient-poor tundra soils[J]. *Plant and Soil*, 2014, 383(1/2): 373-385.
- [8] Bell T H, Klironomos J N, Henry H A L. Seasonal responses of extracellular enzyme activity and microbial biomass to warming and nitrogen addition[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(3): 820-828.
- [9] Kardol P, Cregger M A, Campany C E, *et al.* Soil ecosystem functioning under climate change: plant species and community effects[J]. *Ecology*, 2010, 91(3): 767-781.
- [10] Hu N, Li H, Tang Z, *et al.* Community size, activity and C: N stoichiometry of soil microorganisms following reforestation in a Karst region[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2016, 73: 77-8.
- [11] 邱勇斌, 凌高潮, 郑文华, 等. 间伐对杉木人工林不同组分碳、氮、磷含量及其生态化学计量关系的影响[J]. *林业科学研究*, 2019, 32(4): 64-69.
- [12] 俞新妥. 中国杉木研究进展[J]. *福建林学院学报*, 2006, 26(2): 177-185.
- [13] 范少辉, 盛炜彤, 马祥庆, 等. 多代连栽对不同发育阶段杉木人工林生产力的影响[J]. *林业科学研究*, 2003, 16(5): 560-567.
- [14] 李惠通, 张 芸, 魏志超, 等. 不同发育阶段杉木人工林土壤肥力分析[J]. *林业科学研究*, 2017, 30(2): 322-328.
- [15] 杨玉盛, 何宗明, 陈光水, 等. 杉木多代连栽后土壤肥力变化[J]. *土壤与环境*, 2001, 10(1): 35-40.
- [16] 孙冬婧, 温远光, 罗应华, 等. 近自然化改造对杉木人工林物种多样性的影响[J]. *林业科学研究*, 2015, 28(2): 62-68.
- [17] 何贵平, 陈益泰, 胡炳堂, 等. 杉木与马褂木、檫树混交林及其纯林生物量和土壤肥力研究[J]. *林业科学研究*, 2001, 14(5): 540-547.
- [18] 潘云龙, 林国伟, 陈志为, 等. 杉木纯林及杉桐混交林土壤酶活性研究[J]. *热带作物学报*, 2018, 39(5): 846-851.
- [19] 陆宇明, 吴东梅, 许恩兰, 等. 不同林龄杉木林下套种阔叶树对土壤磷组分的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(1): 275-282.
- [20] Saiya-Cork K R, Sinsabaugh R L, Zak D R. The effects of long-term nitrogen deposition on extracellular enzyme activity in an *Acer saccharum* forest soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(9): 1309-1315.
- [21] Tian J, Wei K, Condon L M, *et al.* Impact of land use and nutrient addition on phosphatase activities and their relationships with organic phosphorus turnover in semi-arid grassland soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2016, 52(5): 675-683.
- [22] Juan Carlos Álvarez-Yépez, Angelina M Y, Alberto Búrquez, *et al.* Variation in vegetation structure and soil properties related to land use history of old-growth and secondary tropical dry forests in northwestern Mexico[J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 256(3): 355-366.
- [23] Quideau S. Vegetation control on soil organic matter dynamics[J]. *Organic Geochemistry*, 2001, 32(2): 247-252.
- [24] Wardle D A. A comparative assessment of factors which influence microbial biomass carbon and nitrogen levels in soil[J]. *Biological Reviews*, 2008, 67(3): 321-358.
- [25] Lin C, Yang Y, Guo J, *et al.* Fine root decomposition of evergreen broadleaved and coniferous tree species in mid-subtropical China: dynamics of dry mass, nutrient and organic fractions[J]. *Plant and Soil*, 2011, 338(1-2): 311-327.
- [26] 唐仕姍, 杨万勤, 殷 睿, 等. 中国森林生态系统凋落叶分解速率的分布特征及其控制因子[J]. *植物生态学报*, 2014, 38(6): 529-539.
- [27] Anderson J M. Spatiotemporal effects of invertebrates on soil processes[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1988, 6(3): 216-227.
- [28] Perry D A, Choquette C, Schroeder P. Nitrogen dynamics in conifer-dominated forests with and without hardwoods[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1987, 17(11): 1434-1441.
- [29] 杨 凯, 朱教君, 张金鑫, 等. 不同林龄落叶松人工林土壤微生物量碳氮的季节变化[J]. *生态学报*, 2009, 29(10): 5500-5507.
- [30] Pablo L P, Verónica G, Guillermo M P. Dynamics of above- and below-ground biomass and nutrient accumulation in an age sequence of *Nothofagus antarctica* forest of Southern Patagonia[J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, 233(1): 85-99.
- [31] Sophie Z B, Katharina M K, Maria M. The application of ecological stoichiometry to plant-microbial-soil organic matter transformations[J]. *Ecologica Monographs*, 2015, 85(2): 133-155.
- [32] Fanin N, Fromin N, Buatois B, *et al.* An experimental test of the hypothesis of non-homeostatic consumer stoichiometry in a plant litter-microbe system[J]. *Ecology Letters*, 2013, 16(6): 764-772.
- [33] Shen C, Xiong J, Zhang H, *et al.* Soil pH drives the spatial distribution of bacterial communities along elevation on Changbai Mountain[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 57: 204-211.
- [34] Zhou X, Chen C, Wang Y, *et al.* Warming and increased precipita-

- tion have differential effects on soil extracellular enzyme activities in a temperate grassland[J]. *Science of The Total Environment*, 2013, 444: 552-558.
- [35] 赵盼盼, 周嘉聪, 林开森, 等. 不同海拔对福建戴云山黄山松林土壤微生物生物量和土壤酶活性的影响[J]. *生态学报*, 2018, 39(8): 2676-2686.
- [36] 乔航, 莫小勤, 罗艳华, 等. 不同林龄油茶人工林土壤酶化学计量及其影响因素[J]. *生态学报*, 2019, 39(6): 1887-1896.
- [37] Sinsabaugh R L, Hill B H, Follstad Shah J J. Ecoenzymatic stoichiometry of microbial organic nutrient acquisition in soil and sediment[J]. *Nature*, 2010, 468(7320): 122-122.
- [38] Sinsabaugh R L, Lauber C L, Weintraub M N, *et al.* Stoichiometry of soil enzyme activity at global scale[J]. *Ecology Letters*, 2008, 11(11): 1252-1264.
- [39] 张星星, 杨柳明, 陈忠, 等. 中亚热带不同母质和森林类型土壤生态酶化学计量特征[J]. *生态学报*, 2018, 36(16): 5828-5836.
- [40] 袁萍, 周嘉聪, 张秋芳, 等. 中亚热带不同森林更新方式生态酶化学计量特征[J]. *生态学报*, 2018, 38(18): 6741-6748.
- [41] 陶宝先, 张金池, 俞元春, 等. 苏南丘陵地区森林土壤酶活性季节变化[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(10): 2349-2354.
- [42] Sinsabaugh R L, Follstad Shah J J. Integrating resource utilization and temperature in metabolic scaling of riverine bacterial production[J]. *Ecology*, 2010, 91(5): 1455-1465.
- [43] Ushio M, Balsler T C, Kitayama K. Effects of condensed tannins in conifer leaves on the composition and activity of the soil microbial community in a tropical montane forest[J]. *Plant and Soil*, 2013, 365(1-2): 157-170.

Effects of Chinese Fir Interplanted with Broadleaved Trees on Soil Ecological Enzyme Activity and Stoichiometry

SUN Si-yi^{1,2}, LU Sheng-xu^{1,2}, LU Yu-ming^{1,2}, XU En-lan^{1,2}, WU Dong-mei^{1,2},
LIU Chun-hua³, JIANG Zong-kai³, GUO Jian-fen^{1,2}

(1. School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007 Fujian, China; 2. Cultivation Base of State Key Laboratory of Humid Subtropical Mountain Ecology, Fuzhou 350007 Fujian, China; 3. Xinkou Experimental Forest Farm of Fujian Agriculture and Forestry University, Sanming 365000 Fujian, China)

Abstract: [Objective] To study the soil enzyme activities and their stoichiometry in Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) forests interplanted with broadleaved trees, and assess the soil nutrient and fertility conditions in these forests. [Method] Soil physicochemical properties, soil microbial biomass carbon (MBC), nitrogen (MBN) and phosphorus (MBP), and soil enzyme activities in surface soil (0~10 cm in depth) were determined in different interplanting forests (young Chinese fir interplanting forest, mature Chinese fir interplanting forest) and pure Chinese fir plantation in Sanming, Fujian Province. [Result] The contents of total C, total N and MBC increased significantly after interplanted with broadleaved trees, especially in mature Chinese fir interplanting forest. After interplanting, the activities of: β -N-Acetylglucosaminidase (NAG) and acid phosphatase (AP) increased significantly, and the activity of β -glucosidase (β G) decreased significantly. The ratios of β G:AP and NAG:AP were lower than global average, which showed that the soil microorganisms in this area were in the state of phosphorus restriction. The activities of AP and NAG increased after interplanting and thus β G:AP and β G:NAG ratios decreased significantly. Redundancy analysis showed that soil C:N and MBC:MBN explained 92.3% and 4.4% of soil enzyme activity and enzyme stoichiometric ratio variation, respectively. [Conclusion] Chinese fir interplanted with broadleaved trees can help to accumulate soil nutrients and improve soil properties.

Keywords: *Cunninghamia lanceolata*; interplanting; eco-enzymatic stoichiometry; soil nutrients; redundancy analysis