

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2022.02.012

不同林龄杉木人工林土壤氮转化酶活性特征

彭紫薇, 焦鹏宇, 高李文, 郭文, 刘先, 胡亚林, 王玉哲*

(福建农林大学林学院, 福建福州 350002)

摘要: [目的] 探讨土壤氮转化酶活性及根际效应随杉木生长发育的变化特征, 为杉木人工林的施肥管理和可持续经营提供科学依据。[方法] 以不同发育阶段杉木人工林(7、15、24、34 a)为研究对象, 测定根际与非根际土壤氮转化酶活性(β -葡萄糖苷酶(BG)、乙酰- β -D-氨基葡萄糖苷酶(NAG)、蛋白水解酶(PRO)、脲酶(URE)、亮氨酸氨基肽酶(LAP)、硝酸还原酶(NR)), 探讨不同发育阶段杉木人工林土壤氮转化酶活性、根际效应及其与土壤理化性质的关系。[结果] 林龄和根际对6种土壤氮转化酶活性影响均存在显著差异($p < 0.05$); 杉木林根际和非根际土壤氮转化酶活性均随林龄增加先下降后上升, 不同林龄杉木根际土壤BG、NAG、PRO、URE和LAP活性均显著高于非根际土壤($p < 0.05$), 根际与非根际土壤的NR活性差异因林龄而异, 15 a和24 a杉木林根际土壤的NR活性极显著高于非根际土壤的($p < 0.01$), 而7 a和34 a杉木林根际与非根际土壤的NR活性差异不显著($p > 0.05$)。15 a杉木林土壤NR活性的根际效应显著高于7 a和34 a杉木林($p < 0.05$)。杉木根际与非根际土壤酶活性的关键因素是碳氮比与铵态氮含量。[结论] 中亚热带杉木人工林在中龄林阶段土壤氮转化酶活性最低, 说明在受氮沉降影响严重的中亚热带地区, 氮仍可能是杉木速生期的主要限制因素之一, 在今后的营林施肥措施上, 应把重点放在中龄林阶段, 以满足杉木对氮的需求, 达到可持续经营管理的目的。

关键词: 杉木; 林龄; 氮; 土壤酶; 根际效应

中图分类号: S714.3; S791.27

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2022)02-0104-08

氮是植物生长发育所必需的营养元素, 也是全球陆地生态系统生产力的限制元素^[1]。特别是在我国亚热带地区, 虽然氮沉降现象严重, 氮仍然是速生期人工林的主要限制因子^[2-3]。土壤酶主要是由微生物以及植物根系分泌得来的一种生物催化剂, 具有催化复杂合成的有机体形成简单有机分子的作用^[4-5], 能反映土壤微生物活性以及对养分的吸收转化能力^[6]。参与土壤氮转化过程的酶包括 β -葡萄糖苷酶(BG)、乙酰- β -D-氨基葡萄糖苷酶(NAG)、蛋白水解酶(PRO)、脲酶(URE)、亮氨酸氨基肽酶(LAP)、硝酸还原酶(NR)等, 其中, 硝酸还原酶是植物体内氮同化代谢的关键酶^[7], 能催化硝酸离子, 对还原硝酸盐起调节作用^[8]。

影响土壤酶活性的因素包括土壤微环境条件(温度、含水率等)、养分状况以及地形地貌条件等^[9-10], 一方面通过改变林内环境条件影响土壤微环境, 另一方面影响凋落物的形成与分解改变土壤微生物数量和群落组成来影响土壤氮转化酶活性^[11]。由于不同发育阶段植物的凋落物质量和数量不同^[12], 植物土壤酶活性受林龄影响^[13], 如赵海燕^[14]研究秦岭地区华北落叶松人工林地酶活性变化中发现, 土壤磷酸酶、脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性均随林龄呈“高一低—高”的趋势; 段春燕等^[15]在桂北不同林龄桉树人工林的研究发现, 随林龄的增加, 土壤脲酶、蔗糖酶、酸性磷酸酶、过氧化氢酶活性均呈增加趋势。此外, 林龄还可能通

收稿日期: 2021-06-19 修回日期: 2021-12-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(31700378)

作者简介: 彭紫薇, 女, 硕士。主要研究方向: 森林培育技术。电话: 15705990286。Email: pengzw2021@163.com

* 通讯作者: 王玉哲, 男, 博士, 讲师。主要研究方向: 森林生态系统碳氮循环。电话: 13023808399。Email: wangyuzhe@fafu.edu.cn

过根际效应来影响土壤氮转化酶活性, 根际是受土壤根系影响且范围狭小的土区^[16], 是植物与土壤物质交换能量流动的界面^[17], 植物根系通过其分泌物及凋落物和死亡根细胞分裂为土壤提供能量, 使根际与非根际土环境条件(如土壤 pH 值、微生物量、土壤酶活性、水分含量等)造成差异^[18-19]。

杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.) 作为我国重要的用材树种, 其人工林面积居我国首位^[20]。然而, 长期的集约化经营导致杉木林地养分循环障碍, 并引起土壤微生物群落结构和多样性的改变^[21]。氮素是我国亚热带杉木生长的限制因子^[22], 而土壤中氮素有效性由氮转化相关的酶调控, 为了解不同发育阶段杉木林土壤的供氮能力, 有必要了解土壤氮转化酶活性随林龄的变化规律。为此, 本文以我国中亚热带不同林龄杉木人工林为研究对象, 测定根际与非根际土壤中与氮循环

相关的酶活性及土壤基本理化性质, 探讨土壤氮转化酶活性及根际效应随杉木生长发育阶段的变化特征, 旨在为杉木人工林的施肥管理和可持续经营提供科学依据。

1 试验地概况

试验地位于福建省南平市延平区, 福建农林大学西芹教学林场(26°33' N, 118°06' E), 属典型亚热带季风气候, 年均降水量 1 817 mm, 年平均气温 19.4 °C, 海拔多为 200~500 m。土壤类型为黄红壤。

采用空间代替时间方法, 选择不同发育阶段的杉木人工林(7年生幼龄林、15年生中龄林、24年生近熟林和34年生成熟林), 在每种林龄杉木林中, 设置4个20 m × 20 m的样方, 每个林龄共4个重复。各林龄杉木林基本情况见表1。

表1 试验地基本情况

Table 1 Basic characteristics of experimental plot

林龄 Stand age/a	胸径 Diameter at breast height/cm	树高 Height/m	密度 Stand density/(株·hm ⁻²)	郁闭度 Crown density	坡向 Slope aspect	坡度 Slope degree/(°)
7	10.5±0.25	6.1±0.18	2 850	0.5	东南	29
15	17.8±0.26	13.9±0.28	1 913	0.7	南	26
24	24.2±0.38	15.4±0.11	1 594	0.8	南	25
34	27.9±0.57	16.1±0.10	1 148	0.8	南	25

注: 数据为均值±标准差。

Note: Data are shown as mean ± standard deviation.

2 研究方法

2.1 土壤采集与处理

2019年7月, 在每个样方内选择生长状况相似(胸径和树高接近林分平均值)的3棵杉木, 采集0~20 cm非根际与根际土壤样品, 根际土壤样品采集采用抖落法^[23]。每个样方内的3棵杉木土壤样品作为该样方重复, 16个样方共采集96个样品(根际与非根际土各48个)。去除土壤中的石块和根等杂物后, 过2 mm筛。过筛后的土分成2份: 一份风干, 用于测定土壤pH、全碳和全氮; 另一份在4 °C冰箱冷藏保存, 用于土壤含水量、铵态氮、硝态氮、可溶性有机碳含量和酶活性测定。

2.2 土壤样品分析

土壤含水量采用105 °C烘干法; 土壤pH采用pH计测定(土水比1:2.5混合搅拌); 土壤用2 mol·L⁻¹ KCl液浸提后, 浸提液硝态氮和铵态氮

含量用全自动间断化学分析仪(SmartChem200, AMS, 意大利)测定^[24], 可溶性有机碳含量采用总有机碳分析仪(TOC-LCPH, Shimadzu, 日本)测定; 测定土壤全碳和全氮用元素分析仪(Vario MICRO cube, Elementar, 德国)。β-葡萄糖苷酶(BG)、β-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶(NAG)、脲酶(URE)、酸性蛋白酶(PRO)、亮氨酸氨基肽酶(LAP)、硝酸还原酶(NR)酶活性采用比色法, 用可见分光光度法测定, 测定吸光值升高速率计算各土壤酶活性^[25]。土壤酶活性单位用μmol·d⁻¹·g⁻¹土样表示。

2.3 数据处理

根际效应(RE)是根际与非根际土壤对应特征值的比值^[17], 计算公式为:

$$RE = \text{根际土壤含量} / \text{非根际土壤含量}$$

若RE>1为根际正效应, RE<1则为根际负效应。

利用 SPSS 22.0 软件对数据统计分析, 双因素方差分析检验林龄、根际及其交互作用对土壤理化性质和酶活性的影响, 不同林龄杉木根际(非根际)之间的差异用单因素方差分析, 采用最小显著差异法(LSD)和成对 *t* 检验进行检验。土壤酶活性和理化性质之间的关系用 Pearson 相关分析, 运用多元统计分析软件 Canoco 5.0 对不同林龄土壤酶活性与理化性质之间的关系进行冗余分析(RDA)。

3 结果与分析

3.1 土壤基本理化性质

不同林龄杉木林根际和非根际土壤基本理化性

质见表 2。不同林龄土壤性质均存在显著差异(全碳和全氮除外)($p < 0.05$), 根际土壤 pH 值显著低于非根际土壤($p < 0.05$)。7 a 杉木林土壤 pH 值显著高于 24、34 a 杉木林($p < 0.05$), 15、24 a 杉木林土壤含水量显著高于 7、34 a 杉木林($p < 0.05$), 7、24 a 杉木林碳氮比显著高于 15 a 杉木林($p < 0.05$)。7、24、34 a 杉木林土壤铵态氮含量显著高于 15 a 杉木林($p < 0.05$), 15 a 杉木林土壤硝态氮含量显著高于 7、34 a 杉木林($p < 0.05$)。根际与非根际土壤含水量、全碳、全氮、碳氮比、可溶性有机碳、铵态氮和硝态氮含量均差异不显著($p > 0.05$)。

表 2 不同林龄杉木林土壤基本理化性质

Table 2 Soil basic physico-chemical properties in Chinese fir plantations at different stand ages

土壤性质 Soil properties	土壤类型 Soil type	林龄 Stand ages/a			
		7	15	24	34
pH值	根际土	4.44 ± 0.05 aB	4.29 ± 0.06 abB	4.19 ± 0.02 bB	4.20 ± 0.05 bB
	非根际土	4.51 ± 0.02 aA	4.46 ± 0.07 abA	4.28 ± 0.06 bA	4.41 ± 0.04 bA
含水量/% Soil moisture content	根际土	29.75 ± 0.55 bA	33.97 ± 1.06 aA	36.00 ± 1.49 aA	30.12 ± 0.74 bA
	非根际土	30.10 ± 0.68 bA	34.87 ± 0.86 aA	34.55 ± 1.34 aA	30.39 ± 0.29 bA
全碳/(g·kg ⁻¹) Total carbon	根际土	20.15 ± 0.27 aA	19.44 ± 0.92 aA	21.62 ± 1.29 aA	18.62 ± 1.49 aA
	非根际土	19.85 ± 0.54 aA	18.10 ± 0.92 aA	19.23 ± 1.45 aA	18.37 ± 1.48 aA
全氮/(g·kg ⁻¹) Total nitrogen	根际土	1.32 ± 0.01 aA	1.45 ± 0.07 aA	1.40 ± 0.09 aA	1.32 ± 0.14 aA
	非根际土	1.32 ± 0.04 aA	1.35 ± 0.06 aA	1.28 ± 0.06 aA	1.34 ± 0.11 aA
碳氮比 C/N	根际土	15.27 ± 0.22 abA	13.43 ± 0.08 cA	15.49 ± 0.22 aA	14.28 ± 0.58 bcA
	非根际土	15.04 ± 0.09 abA	13.36 ± 0.15 cA	14.95 ± 0.51 aA	13.82 ± 0.59 bcA
可溶性有机碳/(mg·kg ⁻¹) Dissolved organic C	根际土	147.46 ± 8.64 bcA	174.96 ± 15.25 abA	202.77 ± 30.53 aA	104.63 ± 4.32 cA
	非根际土	119.52 ± 10.28 bcA	137.18 ± 16.15 abA	158.97 ± 29.95 aA	107.96 ± 2.88 cA
铵态氮/(mg·kg ⁻¹) Ammonium nitrogen	根际土	5.75 ± 0.81 aA	3.07 ± 0.18 bA	4.75 ± 0.29 aA	5.51 ± 0.23 aA
	非根际土	6.22 ± 0.32 aA	3.26 ± 0.18 bA	5.70 ± 0.11 aA	5.65 ± 0.41 aA
硝态氮/(mg·kg ⁻¹) Nitrate nitrogen	根际土	1.41 ± 0.26 cA	9.52 ± 1.46 aA	6.73 ± 1.04 abA	4.80 ± 0.46 bA
	非根际土	2.05 ± 0.35 cA	8.54 ± 0.27 aA	7.22 ± 0.78 abA	4.60 ± 0.16 bA

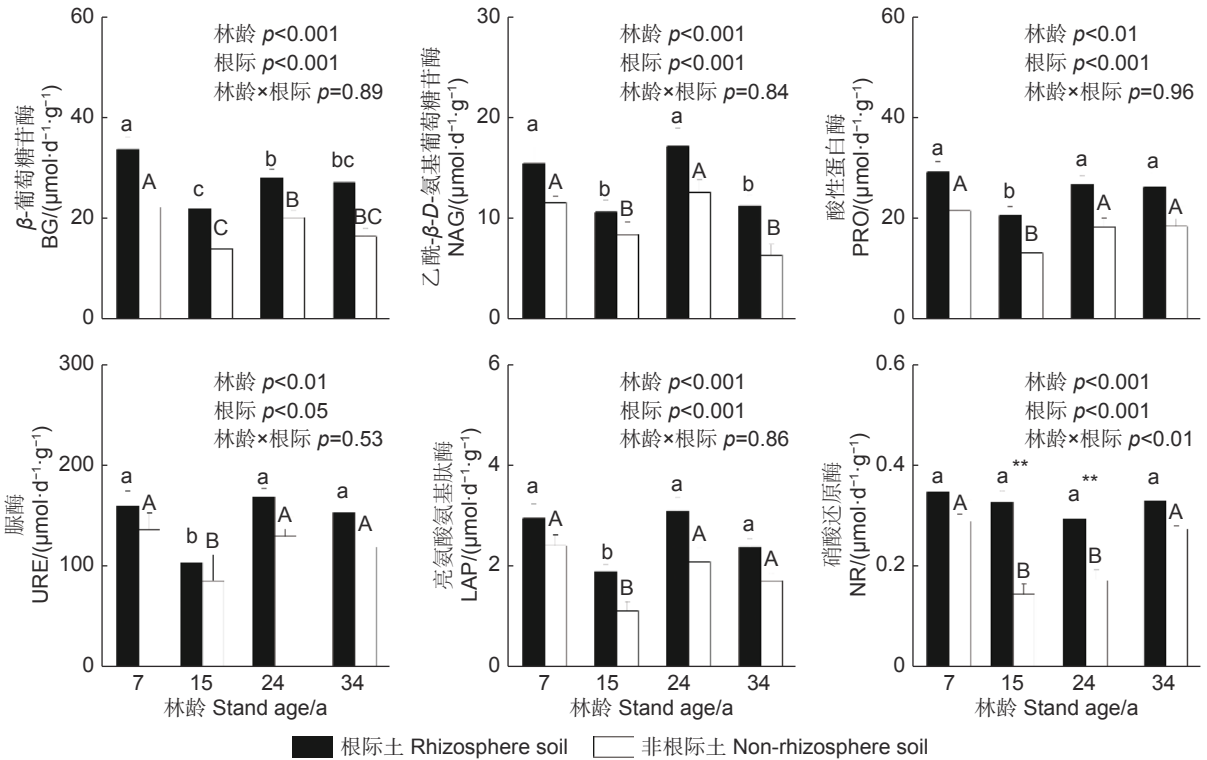
注: 同行不同小写字母表示不同林龄间杉木人工林根际土(非根际土)差异显著($p < 0.05$); 不同大写字母表示同一林龄杉木人工林土壤根际土与非根际土间差异显著($p < 0.05$)。

Notes: Different lowercase letters in the same row indicate significant differences among stand ages in rhizosphere soil (non-rhizosphere soil) ($p < 0.05$), and different uppercase letters indicate significant differences between the rhizosphere and non-rhizosphere soil at the same stand age ($p < 0.05$).

3.2 土壤氮转化酶活性及根际效应

图 1 表明: 根际和林龄对 6 种土壤氮转化酶活性存在显著影响($p < 0.05$), 其交互作用仅对土壤 NR 活性存在极显著影响($p < 0.01$)。BG 活性在 7 a 杉木林土壤中最高, 极显著高于 15、24、34 a 杉木林($p < 0.001$); 7、24 a 杉木林土壤 NAG 活性极显著高于 15、34 a 杉木林($p < 0.001$); 土壤 PRO、URE 和 LAP 活性均在 15 a 杉木林最低, 且显著低于 7、24、34 a 杉木林($p < 0.01$)。

不同林龄杉木林根际土壤 BG、NAG、PRO、URE 和 LAP 活性均显著高于非根际土壤($p < 0.05$)。根际土与非根际土的 NR 活性也因林龄而异, 15、24 a 杉木林根际土壤的 NR 活性极显著高于非根际土壤($p < 0.001$)。图 2 表明: 不同林龄杉木林土壤 NR 活性的根际效应存在显著差异, 在 15 a 杉木林中最高, 显著高于 7、34 a 杉木林($p < 0.05$); BG、NAG、PRO、URE 和 LAP 活性的根际效应在林龄间差异不显著($p > 0.05$)。

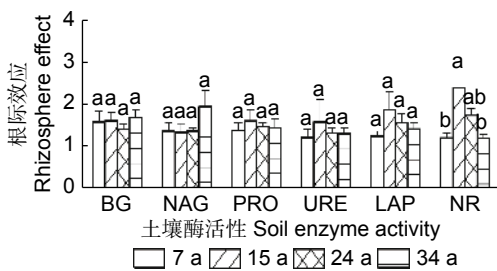


注: 不同小写字母表示不同林龄间杉木林根际土存在显著差异 ($p < 0.05$); 不同大写字母表示不同林龄间杉木林非根际土存在显著差异 ($p < 0.05$); **表示同一林龄根际与非根际土存在极显著差异 ($p < 0.01$)。

Notes: Different lowercase letters indicate significant differences among stand ages in rhizosphere soil ($p < 0.05$), and different uppercase letters indicate significant differences among stand ages in non-rhizosphere soil ($p < 0.05$). ** indicate significant difference between rhizosphere and non-rhizosphere soil at the same stand age ($p < 0.01$).

图 1 不同林龄杉木人工林土壤氮转化酶活性

Fig. 1 Soil nitrogen-cycling enzyme activities of Chinese fir plantations at different stand ages



注: 不同小写字母表示不同林龄间存在显著差异 ($p < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among stand ages at the 0.05 level.

图 2 不同林龄杉木人工林土壤碳氮转化酶活性的根际效应

Fig. 2 Rhizosphere effect on soil nitrogen-cycling enzyme activities of Chinese fir plantations at different stand ages

3.3 土壤理化性质对土壤氮转化酶活性的影响

表 3 表明: 根际土壤 BG 活性与 pH 值呈显著正相关; PRO 和 NR 活性与非根际土壤含水量呈极显著负相关; 根际土壤 URE、LAP 活性与 C/N

显著正相关, 非根际土壤 BG、PRO、LAP 活性均与 C/N 呈显著正相关。根际土壤 BG、URE、LAP 活性及非根际土壤 PRO、LAP 活性均与铵态氮含量呈显著正相关, 非根际土壤 NR 活性与铵态氮含量呈极显著正相关; 根际土壤 BG 活性及非根际土壤 NR 活性均与硝态氮含量呈极显著负相关, 非根际土壤 BG、PRO 活性均与硝态氮含量呈显著负相关。

土壤酶活性与土壤理化因子之间冗余分析 (RDA) 结果 (图 3) 表明: 根际土第 1 轴和第 2 轴分别解释了酶活性总变异的 44.6% 和 9.4%; 非根际土第 1 轴和第 2 轴分别解释了酶活性总变异的 31.9% 和 13.8%。本研究所选 8 个土壤理化因子对根际土壤酶活性有显著影响, 其中, 影响较大的有碳氮比和铵态氮含量; 选取的土壤理化因子对非根际土壤酶活性均存在显著影响, 铵态氮含量与碳氮比对酶活性影响较大。

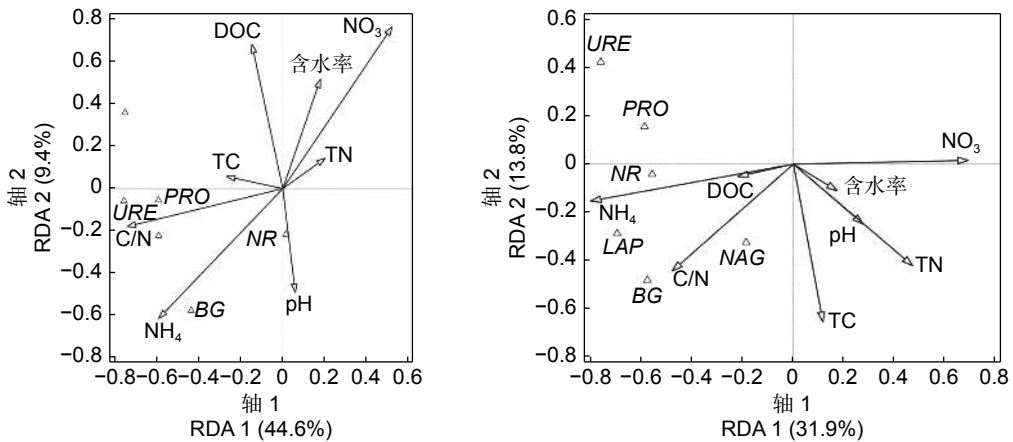
表 3 土壤酶活性与土壤理化性质的相关分析

Table 3 Pearson correlation coefficients for relationships between soil enzymes and soil physico-chemical properties

土壤性质 Soil properties	土壤类型 Soil type	BG	NAG	PRO	URE	LAP	NR
pH值	根际	0.53*	-0.04	0.01	-0.24	0.14	0.23
	非根际	0.08	-0.16	0.05	-0.17	-0.04	0.32
含水量 Soil moisture content	根际	-0.42	0.15	-0.42	-0.21	0.25	-0.41
	非根际	-0.34	0.25	-0.67**	-0.21	-0.37	-0.66**
全碳 Total carbon	根际	0.09	0.29	0.004	0.09	0.49	-0.27
	非根际	0.37	0.10	0.07	-0.07	-0.005	0.23
全氮 Total nitrogen	根际	-0.16	-0.05	-0.12	-0.27	0.10	-0.33
	非根际	0.03	-0.06	-0.33	-0.24	-0.42	0.08
碳氮比 C/N	根际	0.41	0.49	0.20	0.60*	0.60*	0.15
	非根际	0.53*	0.21	0.59*	0.22	0.58*	0.24
可溶性有机碳 Dissolved organic C	根际	-0.33	0.45	-0.10	-0.06	0.32	-0.42
	非根际	0.005	0.37	-0.34	0.19	-0.07	-0.35
铵态氮 Ammonium nitrogen	根际	0.51*	0.16	0.30	0.56*	0.56*	0.12
	非根际	0.50	0.13	0.60*	0.40	0.76*	0.68**
硝态氮 Nitrate nitrogen	根际	-0.72**	-0.11	-0.40	-0.43	-0.35	-0.21
	非根际	-0.58*	0.10	-0.66*	-0.43	-0.46	-0.82**

注: *表示显著相关 ($P<0.05$), **表示极显著相关 ($P<0.01$)。

Notes: * indicate significant correlated at 0.05 level, and ** indicate significant correlated at 0.01 level.



注: TC、DOC、NO₃、TN、NH₄、C/N、BG、NAG、PRO、URE、LAP、NR 分别表示全碳、可溶性有机碳、硝态氮、全氮、铵态氮、碳氮比、β-葡萄糖苷酶、乙酰-β-D-氨基葡萄糖苷酶、蛋白水解酶、脲酶、亮氨酸氨基肽酶、硝酸还原酶。

Notes: TC, DOC, NO₃, TN, NH₄, C/N, BG, NAG, PRO, URE, LAP, NR denote total carbon, dissolved organic C, nitrate nitrogen, total nitrogen, ammonium nitrogen, C/N ratio, β-glucosidase, N-acetyl-β-D-glucosaminidase, protease, urease, leucine aminopeptidase, nitrate reductase, respectively.

图 3 土壤酶活性与土壤理化因子之间的冗余分析

Fig. 3 Redundancy analysis (RDA) of soil enzyme activities and soil physico-chemical properties

4 讨论

4.1 杉木人工林土壤氮转化酶活性对生长发育的响应

随着树木的不断生长, 林分结构和林内气候环

境发生改变, 生态系统的物质循环受到影响, 从而
影响土壤微生物群落和土壤酶活性^[25]。本研究
中, 杉木林土壤氮转化酶活性随林龄增加先下降后上

升,随着杉木林的不断增长,土壤中的有机质不断累积,森林凋落物增多,给微生物提供良好的生存条件^[26],提高了酶活性。本试验中研究的6种土壤氮转化酶的活性在15年生林分中最低,与耿玉清等^[27]的研究结果一致。在造林初期,大量的抚育措施使土壤健康水平大大提高,促进了养分的吸收,随着林龄的增长,植物不断地吸收土壤养分,土壤养分下降,微生物种类及数量降低,土壤基本理化性质不断变差^[28],因此,15年生杉木林的土壤酶活性比7年生杉木林有所下降。随着林分不断成熟,林分内环境条件改善,林下植被生物量和多样性增加,凋落物不断增多,土壤微生物数量增多和土壤有机质不断累积,土壤酶活性逐渐上升。

4.2 杉木人工林土壤碳氮转化酶活性的根际效应

根系是林木吸收水分和养分的主要器官,同时也是进行物质交换和能量运输的重要场所^[29]。根系附近的微生物含量高于周围土壤,根际可分泌大量的胞外酶类物质,引起土壤根际酶活性与非根际存在差异^[30]。本研究中,土壤氮转化酶的根际效应均为正效应(图2),表明不同林龄的杉木均可以通过根系分泌物为根际微生物提供能量和养分,改善根际环境^[18]。林龄和根际对所测6种土壤氮转化酶活性均存在显著影响,其交互作用仅对NR活性影响显著,说明根际与非根际土壤NR活性差异与林龄有关,15、24年生根际土的NR活性显著高于非根际土,其原因是15、24年生是杉木生长旺盛的阶段,对N需求量相对较高^[31],根际土周围的酶活性提高,而非根际土酶的活性受根系影响较小,受土壤微生物影响较大,这导致了根际与非根际土酶活性的差异,本研究中NR的根际效应在不同林龄段有显著差异的结果也体现了这一点。随林龄的增长,根际也会影响酶活性,不同林龄根际土的NR活性差异不显著,而非根际土7、34年生的NR活性显著高于15、24年生(图1),主要是因为非根际土酶活性主要受土壤微生物、凋落物等影响。前人^[3]研究发现,杉木人工林速生期氮素可利用性低于幼林期和老林期,由于15、24年生林分受到氮素的限制,NR活性也受影响,与7、34年生林分相比有较大差异。

本研究中,除土壤硝酸还原酶外,不同林龄杉木的土壤酶活性的根际效应均没有显著差异,15年生杉木林土壤硝酸还原酶的根际效应显著高于7年生和34年生,与范媛媛等^[29]在研究油松的结果不完全一致。杉木的整个生长过程中,中龄林

阶段耗氮量明显高于其他阶段^[32],这一阶段是从腐殖质分解获得有机质为主转变到通过根产物获得有机质为主的过程^[29]。地下根系需要吸收更多的氮以供植物生长,促使硝酸还原酶的活性增强,而非根际部分受到养分需求的反馈较低,还因为林内郁闭度大,林地内温度、湿度条件减弱等原因使得非根际土酶活性降低。

4.3 杉木人工林土壤氮转化酶活性的影响因素

土壤酶作为生态系统中物质循环的关键因子^[33],影响着土壤的生物化学循环过程,环境与土壤理化性质的改变也会影响土壤酶活性^[34]。冗余分析结果表明,碳氮比与铵态氮含量均对根际与非根际土壤酶活性影响较大。碳氮比在根际土壤与URE和LAP活性呈显著正相关,铵态氮含量则是与BG、URE和LAP呈显著正相关,与前人^[35]研究结果不太一致。有研究表明,氮转化酶的活性随着可利用碳的增加而提高^[36],中亚热带地区虽然是氮相对富集的地区^[37],但土壤中可供植物直接利用的氮很少,这就需要微生物分解土壤的有机物,为植物提供充足的氮促进其生长,更多的碳也被固定到了土壤中。无论是根际土还是非根际土的氮转化酶活性与全氮含量不显著相关,这与前人^[38]研究沙地樟子松人工林土壤脲酶活性与土壤全氮含量呈正相关的结论不一致,这可能是由于供试土壤质地不同导致的,沙地土壤的氮含量较低,而本研究的土壤类型为花岗片麻岩上发育而成的黄红壤,与沙地土壤相比土壤中氮含量相对较高。

5 结论

中亚热带杉木不同发育阶段人工林土壤氮转化酶活性随林龄呈现先下降后上升的趋势,在15年生林分中酶活性最低,表明在受氮沉降影响严重的中亚热带地区,氮仍可能是杉木速生期的主要限制因素之一。土壤氮转化酶活性的根际效应显著,其中,15年生杉木林土壤硝酸还原酶的根际效应显著高于7年生和34年生,表明中龄林阶段杉木人工林对N需求量仍较大,且非根际土受N限制更严重。在今后的营林施肥措施上,应把重点放在中龄林阶段,以满足杉木对于氮的需求,达到可持续经营管理的目的。

参考文献:

- [1] LeBauer D S, Treseder K K. Nitrogen limitation of net primary productivity in terrestrial ecosystems is globally distributed[J].

- Ecology, 2008, 89(2): 371-379.
- [2] Liu X J, Zhang Y, Han W X, *et al.* Enhanced nitrogen deposition over China[J]. Nature, 2013, 494(7438): 459-462.
- [3] 郑璐嘉, 黄志群, 何宗明, 等. 林龄、叶龄对亚热带杉木人工林碳氮稳定同位素组成的影响[J]. 林业科学, 2015, 51 (1): 22-28.
- [4] 孙 毅, 和润莲, 何光熊, 等. 滇西并流河谷区土壤酶活性化学计量学特征与环境因子的关系[J]. 应用生态学报, 2021, 32 (4): 1269-1278.
- [5] 胡华英, 张燕林, 褚昭沛, 等. 红壤侵蚀区不同植被恢复阶段土壤酶活性和微生物多样性变化[J]. 应用与环境生物学报, 2021, 3 (2): 1-11.
- [6] 谢 云, 郭芳芸, 曹 兵. 大气CO₂浓度倍增对宁夏枸杞根区土壤微生物与酶活性的影响[J]. 中国农学通报, 2021, 37 (3): 90-97.
- [7] 赵念席, 沈广爽, 石雪芹. 硝酸还原酶活性响应的物种特异性[J]. 实验室研究与探索, 2014, 33 (8): 18-21.
- [8] 唐晓清, 肖云华, 王康才, 等. 氮素营养对苗期崧蓝叶中硝酸还原酶活性与矿质元素吸收的影响[J]. 西北植物学报, 2013, 33 (9): 1851-1858.
- [9] 杨万勤, 王开运. 森林土壤酶的研究进展[J]. 林业科学, 2004, 40 (2): 152-159.
- [10] Zhang W, Qiao W J, Gao D X, *et al.* Relationship between soil nutrient properties and biological activities along a restoration chronosequence of *Pinus tabulaeformis* plantation forests in the Ziwuling Mountains, China[J]. Catena, 2018, 161(2): 85-95.
- [11] 陆 琴, 李冬琴. 土壤酶及其生态指示作用研究进展[J]. 安徽农业科学, 2020, 48 (18): 14-17.
- [12] 张佐玉, 周凤娇, 张 喜, 等. 黔东南杉木纯林及其混交林凋落物年产量与月动态变化[J]. 西部林业科学, 2017, 46 (2): 20-26.
- [13] Miao Y, Dan Y, Xuan Y. Soil microbial communities and enzyme activities in sea-buckthorn (*Hippophae rhamnoides*) plantation at different ages[J]. PLoS ONE, 2018, 13(1): e0190959.
- [14] 赵海燕. 秦岭地区华北落叶松人工林地土壤养分及生物学特性的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [15] 段春燕, 何成新, 徐广平, 等. 桂北不同林龄桉树人工林土壤养分及生物学特性[J]. 热带作物学报, 2019, 40 (6): 1213-1222.
- [16] 马志良, 赵文强, 刘 美, 等. 增温对高寒灌丛根际和非根际土壤微生物生物量碳氮的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30 (6): 1893-1900.
- [17] 莫雪丽, 戴晓琴, 王辉民, 等. 中亚热带典型人工林常见乔灌木根际效应——以江西泰和千烟洲为例[J]. 植物生态学报, 2018, 42 (7): 723-733.
- [18] 李丽娟, 谢婷婷, 张松林, 等. 三峡库区消落带4种适生植物根际与非根际土壤养分与酶活性特征研究[J]. 生态学报, 2020, 40 (21): 7611-7620.
- [19] Bulgarelli D, Schlaeppi K, Spaepen S, *et al.* Structure and functions of the bacterial microbiota of plants[J]. Annual Review of Plant Biology, 2013, 64(1): 807-838.
- [20] 涂宏涛, 孙玉军, 刘素真, 等. 亚热带杉木人工林生物量及其碳储量分布——以福建将乐县杉木人工林为例[J]. 中南林业科技大学学报, 2015, 35 (7): 94-99.
- [21] Liu X, Wang Y Z, Liu Y H, *et al.* Response of bacterial and fungal soil communities to Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) long-term monoculture plantations[J]. Frontiers in Microbiology, 2020, 11: 181.
- [22] Tong R, Zhou B Z, Jiang L, *et al.* The growth of Chinese fir is limited by nitrogen: Evidences from N: P ratio, N or P variability and NuRE based on a regional investigation[J]. Forest Ecology and Management, 2020, 460: 117905.
- [23] Phillips R P, Fahey T J. The influence of soil fertility on rhizosphere effects in northern Hardwood forest soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2008, 72(2): 453-461.
- [24] 杜大俊. 不同林龄杉木人工林土壤氮素含量及吸收特征研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2020.
- [25] 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.
- [26] 陆 梅, 卫 捷, 韩智亮. 滇池西岸4种针叶林的土壤微生物与酶活性[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39 (6): 56-59.
- [27] 耿玉清, 白翠霞, 赵铁蕊, 等. 北京八达岭地区土壤酶活性及其与土壤肥力的关系[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28 (5): 7-11.
- [28] 涂程伟, 彭彩云, 柳萃玉, 等. 华西雨屏区不同林龄杉木人工林土壤酶活性的动态变化[J]. 东北林业大学学报, 2021, 49 (7): 91-95.
- [29] 范媛媛, 李 懿, 李启迪. 不同林龄油松土壤微生物、酶活性和养分特征[J]. 水土保持研究, 2019, 26 (6): 58-64.
- [30] Benítez E, Melgar R, Sainz H, *et al.* Enzyme activities in the rhizosphere of pepper (*Capsicum annum* L.) grown with olive cake mulches[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2000, 32(13): 1829-1835.
- [31] 郑兴蕊, 王克勤, 宋娅丽, 等. 滇中亚高山不同森林土壤酶活性对模拟N沉降的响应[J]. 林业科学研究, 2021, 34 (2): 50-62.
- [32] 胡亚利, 孙向阳, 张建国, 等. 杉木人工林土壤养分变化规律[J]. 河北林业科技, 2007 (1): 9-11.
- [33] 徐振锋, 唐 正, 万 川, 等. 模拟增温对川西亚高山两类针叶林土壤酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21 (11): 2727-2733.
- [34] 孙思怡, 卢胜旭, 陆宇明, 等. 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[J]. 林业科学研究, 2021, 34 (1): 106-113.
- [35] Stark S, Männistö 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.
- [36] Allison S D, Vitousek P M. Responses of extracellular enzymes to simple and complex nutrient inputs[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37(5): 937-944.

[37] 鲍勇, 高颖, 曾晓敏, 等. 中亚热带3种典型森林土壤碳氮含量和酶活性的关系[J]. 植物生态学报, 2018, 42(4): 508-516.

[38] 于德良, 雷泽勇, 张岩松, 等. 沙地樟子松人工林土壤酶活性及其影响因子[J]. 干旱区研究, 2019, 36(3): 621-629.

Soil Enzyme Activity Related to Nitrogen Cycling in Chinese Fir (*Cunninghamia lanceolata*) Plantation with Different Stand Age

PENG Zi-wei, JIAO Peng-yu, GAO Li-wen, GUO Wen, LIU Xian, HU Ya-lin, WANG Yu-zhe

(Forestry College, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China)

Abstract: [Objective] To study the variation of soil nitrogen (N)-cycling enzyme activities and rhizosphere effect during the development of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantation and its driving factors. [Method] Rhizosphere and non-rhizosphere soils were collected from Chinese fir plantation with the ages of 7, 15, 24 and 34. The enzyme activities regulating soil nitrogen cycling (β -glucosidase (BG), acetyl- β -D-glucosaminidase (NAG), proteolytic enzyme (PRO), urease (URE), leucine aminopeptidase (LAP) and nitrate reductase (NR)) were measured. Redundancy analysis (RDA) and Pearson correlation were conducted to explore the relationship between soil nitrogen-cycling enzyme activities and the soil physico-chemical properties. [Result] Forest age and rhizosphere had significant effects on soil N-cycling enzyme activities ($P < 0.05$). The enzyme activities regulating soil nitrogen cycling in the non-rhizosphere soil decreased at first and then increased with the increase of forest age. The activities of BG, NAG, PRO, URE and LAP in rhizosphere soil were significantly higher than those in non-rhizosphere soil ($P < 0.05$). The difference of NR activity between rhizosphere and non-rhizosphere soil varied with forest age. The NR activity in rhizosphere soil was significantly higher than that of non-rhizosphere soil in 15- and 24-years-old Chinese fir plantations ($P < 0.01$). The rhizosphere effects of soil NR activities in 15-years-old Chinese fir plantation were significantly higher than those in 7-years-old and 34-years-old Chinese fir plantations ($P < 0.05$). The key factors regulating soil N-cycling enzyme activities in rhizosphere and non-rhizosphere soil were C/N and ammonium nitrogen content. [Conclusion] Soil N-cycling enzyme activities was the lowest in middle-age Chinese fir plantations in mid-subtropical China, indicating that nitrogen may still be one of the main limiting factors in the fast-growing stage of Chinese fir plantations. In the future, we should focus on the middle-age Chinese fir plantation, so as to meet the nitrogen demand of Chinese fir and achieve the purpose of sustainable management.

Keywords: *Cunninghamia lanceolata*; stand age; nitrogen; soil enzyme; rhizosphere effect

(责任编辑: 徐玉秀)