

氮磷添加对刨花楠人工林土壤氮磷矿化速率的影响

林秋燕¹, 钟全林^{1,2,3*}, 邹宇星¹, 安凡¹

(1. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007; 2. 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州 350007; 3. 福建师范大学福建省植物生理生态重点实验室, 福州 350007)

摘要: 为了探讨氮磷添加对刨花楠 (*Machilus pauhoi*) 人工林氮磷矿化速率的影响和氮-磷矿化耦合关系, 为选择合理施肥方式提供参考。以福建省南平市延平区太平试验林场内已进行了 6 年野外氮磷添加试验的刨花楠人工林为研究对象, 采用野外原位培养方法, 测定不同氮磷添加处理后刨花楠人工林林地土壤氮磷矿化特征, 分析氮磷添加对土壤氮矿化、磷矿化的影响。结果显示: 施氮处理仅显著提高土壤硝态氮含量, 但对土壤氮、磷矿化和 β -N-乙酰氨基葡萄糖苷酶 (NAG) 活性均有抑制作用; 与氮添加相比, 氮磷共同添加则显著提高土壤可溶性有机氮含量、酸性磷酸酶活性和氮、磷矿化速率, 其中氮矿化、磷矿化速率分别提高 24.25%、85.95%, 但磷添加处理对氮矿化和磷矿化影响均不显著 ($P>0.05$)。混合线性模型结果表明, 磷矿化与土壤可溶性有机氮、pH 值均呈显著正相关; 氮矿化与土壤容重呈显著负相关, 与可溶性有机氮呈显著正相关, 而且氮磷矿化速率间呈二次曲线耦合关系。氮磷共同添加显著提高土壤氮磷矿化速率, 在刨花楠人工林中土壤 pH 值、可溶性有机氮、容重是驱动土壤氮磷矿化的主要因子。在今后对刨花楠人工林的管理时应该更加注重氮磷共同添加对土壤养分和氮磷转化速率的影响, 以更好地进行可持续经营。

关键词: 氮磷添加; 氮矿化; 磷矿化; 土壤养分; 刨花楠

中图分类号: S714.5

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2023)04-0702-07

Effects of N and P addition on the conversion rate of soil N and P in *Machilus pauhoi*

LIN Qiuyan¹, ZHONG Quanlin^{1,2,3}, ZOU Yuxing¹, AN Fan¹

(1. College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007; 2. State Key Laboratory Breeding Base of Humid Subtropical Mountain Ecology, Fuzhou 350007; 3. Fujian Province Key Laboratory of Plant Ecophysiology, Fujian Normal University, Fuzhou 350007)

Abstract: With an experiment conducted Taiping experimental national forestry farm, Yanping district, Nanping city of Fujian Province, this study was aimed to investigate the effects of nitrogen and phosphorus addition on the conversion rate and the coupling of N-P mineralization in *Machilus pauhoi* and to provide reference for the selection of reasonable fertilization methods. The study was carried out in *Machilus pauhoi* plantations with 6 years N and P addition experiment, the cultivation experiment in situ was conducted to determinate the N and P mineralization, that in order to determine the effect of N and P addition on soil N and P mineralization. The results indicated that +N addition treat only significantly increased soil NO_3^- -N, but inhibited soil N and P mineralization and β -N-acetylglucosaminidase (NAG). +NP treat significantly increased soil soluble organic N. N and P co-addition (+NP) significantly increased soil soluble organic nitrogen content and N mineralization and P mineralization and acid phosphatase activity. Compared with N addition, N mineralization and P mineralization increasing by 24.25% and 85.95%. However, the effect of +P treat on both N mineralization and P mineralization was not significant ($P>0.05$). The mixed linear model results indicate that P mineralization was significantly and positively correlated with soil soluble organic N and pH. N mineralization was significantly positively correlated with soil soluble organic N, but was significantly negatively correlated with bulk weight. The results of our study revealed a quadratic curve coupling of N and P mineralization rates. +NP treat significantly increased the rate of soil N and P mineralization. We found that soil pH, soluble organic N and bulk weight were the main factors

收稿日期: 2022-08-31

基金项目: 国家自然科学基金 (31971643) 和福建省科技厅产学研合作项目 (2019N5009) 共同资助。

作者简介: 林秋燕, 硕士研究生。E-mail: 1360062798@qq.com

* 通信作者: 钟全林, 博士, 教授。E-mail: qlzhong@126.com

driving soil N and P mineralization in *Machilus pauhoi* plantations. Future management of *Machilus pauhoi* plantations should pay more attention to the effect of N and P addition on soil nutrients and the conversion rate of N and P, which can allow for better sustainable management of the *Machilus pauhoi* plantations.

Key words: nitrogen and phosphorus addition; N mineralization; P mineralization; soil nutrients; *Machilus pauhoi*

氮(N)和磷(P)是限制亚热带森林生态系统生产力的关键营养元素,对植物生长代谢和养分循环具有重要作用^[1-2],影响着森林初级生产力和主要生态过程。土壤N、P矿化是指土壤动物、微生物等将土壤中难以被植物吸收利用的有机态N、P转化为可为植物直接吸收利用的无机态N、P的过程^[3-4],是生态系统N、P循环的关键环节,主要通过调控土壤养分循环和能量流动影响土壤N、P供给能力和生态系统净初级生产力^[5-7]。同时,N、P养分添加作为调控森林生态系统生产力的有效手段^[8],也影响着微生物对养分的需求和土壤无机N、P储量,因此研究N、P添加对森林无机N、P变化的影响对森林经营管理具有重要意义。前人研究发现,土壤理化性质可能驱动土壤矿化过程,Gan等^[9]关于不同森林类型土壤养分矿化的研究结果显示P矿化与可溶性有机氮的浸出呈显著正相关;N矿化速率与土壤pH值、可溶性有机碳氮呈极显著正相关,而与土壤碳氮比呈负相关^[10]。另外,N作为限制植物生长的关键因子,其N有效性通常由N矿化速率所决定,因此深入探究N矿化对于揭示土壤N有效性具有重要意义^[11]。目前关于N、P添加对亚热带区域森林土壤N素转化的研究结果还没有统一的结论,有促进^[12-13]、抑制^[14-15]或不影响^[16],仍有待进一步研究。受长期风化淋溶的影响,P是亚热带生态系统中的限制性元素,如何调控土壤P矿化过程是目前亚热带地区土壤矿化的研究重点。但目前关于土壤P矿化的研究主要集中在农田生态系统中^[17-18],在森林生态系统尤其是N、P添加方面的研究还鲜见报道^[9,19]。

刨花楠作为我国亚热带区域珍贵常绿阔叶速生乡土树种,由于其用途广泛、经济价值高,近年来已被大面积种植,因此开展刨花楠人工林土壤N、P矿化研究对我国刨花楠人工林可持续经营具有积极意义^[20]。目前,N、P添加对刨花楠人工林生长^[21]、叶片^[22]及细根性状^[23]的影响已有一定量的研究,但外源N、P输入如何影响刨花楠人工林林地土壤N转化和P转化还需进一步研究。本研究以刨花楠人工林为研究对象,通过设置N、P添加实验,并利用野外PVC顶盖埋管法分析土壤N、P矿化潜力,探究外源N、P输入对刨花楠人工林土壤N、P矿化的影响并分析N-P矿化间的耦合关系,对理解亚热带森林土壤N、P矿化,改善森林土壤质量、提

高养分有效性具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于福建省南平市延平区太平试验林场(26°15'N,117°50'E),该地区属于典型的中亚热带海洋性气候,夏季炎热,冬季微寒,年均降水量为1663.9mm,年均气温为19.3℃,无霜期269d。

1.2 试验设计

2016年在刨花楠人工林内设置12个林分 and 土壤等条件相似的10m×10m样方,为了减少不同施肥处理的相互干扰,在各样方设置不小于5m缓冲带,同期进行样方基本调查及土壤取样,研究区刨花楠林龄为2年,密度为180株·亩⁻¹,平均株高为(170.3±27.93)cm,平均地径为(2.57±0.57)mm,土壤初始全N含量为(1.09±0.18)mg·g⁻¹,全P含量为(0.04±0.03)mg·g⁻¹,容重为(0.93±0.19)g·cm⁻³。根据团队前期研究发现当N添加量为100kg·hm⁻²·a⁻¹最适合刨花楠生长^[24],因此本研究于2017年进行养分控制实验,分别设置4种处理即对照(CK,即不添加氮磷)、施氮(+N,100kg·hm⁻²·a⁻¹)、施磷(+P,10kg·hm⁻²·a⁻¹)、施氮磷(+NP,分别为100kg·hm⁻²·a⁻¹+10kg·hm⁻²·a⁻¹),每个处理3个重复,N和P分别用NH₄NO₃和P₂O₅进行添加。施肥方式采用根部施肥法,根据树冠投影挖环状沟,将肥料均匀撒入后及时覆土。

1.3 样品收集及氮磷矿化培养

采用野外原位PVC顶盖埋管法研究刨花楠人工林土壤N、P矿化速率^[24],该方法阻止了部分NO₃⁻-N流失,也最大程度模拟了野外温度、湿度对矿化微生物的影响,可更好地评估森林土壤N、P实际矿化速率^[25]。操作方法为:在每个样方内随机选取3个具有代表性的样点,去除表层凋落物和杂质,将2个PVC管(内径为5cm,高为15cm)垂直打入0~10cm土层内,取出其中一个PVC管,在顶部和底部分别用透气不透水薄膜封紧后放回原位进行野外原位培养。将另一个PVC管取出后运回实验室用于土壤理化性质测定,如铵态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)、可溶性有机态氮(DON)、速效磷(SAP)、pH值、酶活性等。培养实验于2022年3月开始,培养时间为30d^[26],并

于2022年4月取回PVC管进行 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、SAP测定。

地面凋落物与培养前土壤样品同期取样，于2022年3月采用地面凋落物全部收获法收集刨花楠人工林地面20 cm×20 cm区域内所有凋落叶，较小的凋落物碎片(<4 mm)作为有机土壤被去除，将凋落叶样品用去离子水清洗表面泥土等杂质后在75 °C烘箱中烘干至恒重，称重并研磨，用于碳(C)、N、P养分测定。

1.4 测定指标及方法

土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量采用2 mol·L⁻¹氯化钾溶液浸提-连续流动分析仪(SKALAR, 荷兰)测定方法；土壤DON含量使用去离子水浸提-连续流动分析仪测定方法，利用差值法计算，DON=可溶性总氮-可溶性铵态氮-可溶性硝态氮；土壤pH值(土水比1:2.5)用pH计测定；土壤总氮(TN)、总碳(TC)利用Vario MAX碳氮元素分析仪测定；全磷(TP)采用硫酸-高氯酸消煮浸提后用连续流动分析仪测定；土壤容重采用环刀法测定；地面凋落物C、N含量采用元素分析仪(Elemental Analyzer Vario EL III, 德国)通过燃烧法测定；P含量采用硫酸-高氯酸消煮提取，连续流动分析仪测定；氮、磷矿化速率则用以下公式计算：

$$N_{\text{amo}} = (\text{NH}_4^+\text{-N}_A - \text{NH}_4^+\text{-N}_B) / t \quad (1)$$

$$N_{\text{nit}} = (\text{NO}_3^-\text{-N}_A - \text{NO}_3^-\text{-N}_B) / t \quad (2)$$

$$N_{\text{min}} = (\text{NH}_4^+\text{-N}_A + \text{NO}_3^-\text{-N}_A - \text{NH}_4^+\text{-N}_B - \text{NO}_3^-\text{-N}_B) / t \quad (3)$$

$$P_{\text{min}} = (\text{AP}_A - \text{AP}_B) / t \quad (4)$$

式(1)-(4)中， N_{amo} 为土壤氨化速率， N_{nit} 为土壤硝化速率， N_{min} 为土壤净氮矿化速率， P_{min} 为土壤磷矿化速率， $\text{NH}_4^+\text{-N}_A$ 为培养后铵态氮含量， $\text{NH}_4^+\text{-N}_B$ 为培养前铵态氮含量， $\text{NO}_3^-\text{-N}_A$ 为培养后硝态氮含量， $\text{NO}_3^-\text{-N}_B$ 为培养前硝态氮含量， AP_A 为培养后有效磷含量， AP_B 为培养前土壤有效磷含量， t 为培养时间(30 d)。

土壤酶活性采用荧光分析仪测定^[27]，称取1 g新鲜土壤样品置于锥形瓶中加入125 mL醋酸缓冲溶液(50 mmol·L⁻¹, pH为5)并用旋涡振荡器混匀，置成土壤悬浮液。将土壤悬浮液使用移液枪加入96孔微孔酶板中，依次加入不同标志底物(表1)，将其置于20 °C恒温培养箱中避光培养4 h后利用多功能酶标仪(Spectra Max M5, Molecular Devices, 美国)测定其荧光光度，分析其中氮获取酶、磷获取酶2种水解酶的活性，通过计算、转换得出水解酶活性。

表1 土壤中测定的集中胞外酶、其相应的底物及本研究中的缩写

Table 1 Concentrated extracellular enzymes assayed in soil, corresponding substrate, and the abbreviation used in this study

项目	名称	缩写	底物
氮获取酶	$\beta\text{-N}$ -乙酰氨基葡萄糖苷酶	NAG	4-MUB-N-acetyl- $\beta\text{-D}$ -glucosaminide
磷获取酶	酸性磷酸酶	AP	4-MUB-phosphate

1.5 数据处理及分析

使用SPSS软件对不同N、P添加处理下土壤理化性质进行单因素方差分析，并用Duncan多重比较法对不同N、P添加处理间的差异性进行显著性检验，利用Origin进行绘图；以施肥处理为随机效应，以土壤理化性质为固定效应，以 N_{amo} 、 N_{nit} 、 N_{min} 和 P_{min} 为因变量，在R语言中使用混合线性模型对所需数据进行分析，得出影响刨花楠人工林地土壤氮、磷矿化的关键土壤因子；将 N_{min} 和 P_{min} 分别设为 x 和 y 运用SPSS中曲线估计进行拟合并进行显著性检验，选择二次曲线分析土壤N-P矿化的耦合关系。

2 结果与分析

2.1 氮磷添加对土壤基本理化性质的影响

与CK、+NP相比，+N处理明显增加了土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量($P<0.05$)；与CK处理相比，+NP则使

刨花楠人工林土壤DON含量显著提高了32.24% ($P<0.05$)；而+N、+P处理对刨花楠人工林TC、TN、TP等其他土壤理化性质无显著影响($P>0.05$, 表2)。

2.2 氮磷添加对土壤酶活性的影响

+P处理显著降低土壤AP活性，+NP处理后土壤AP活性显著高于+N、+P处理；而+N处理的土壤NAG活性显著低于其他处理($P<0.05$, 图1)。可见，N、P添加对土壤磷获取酶和氮获取酶有显著影响，其中+P处理可显著提高氮获取酶活性，但对磷获取酶则起抑制作用。

2.3 氮磷添加对刨花楠地面凋落物的影响

与CK、+P处理相比，+NP处理显著提高刨花楠人工林地面凋落物现存量($P<0.05$)，但使凋落物C:N显著降低12.72%、12.74%，同时也使+N处理下凋落物C:N显著降低；+N、+NP处理显著增加地面凋落物N:P，但N、P添加对凋落物C、N、P含量无显著影响(表3)。

表 2 氮磷添加对土壤理化性质的影响
Table 2 Effects of N and P addition on soil physicochemical properties.

处理	TC/ (mg·g ⁻¹)	TN/ (mg·g ⁻¹)	TP/ (mg·g ⁻¹)	SAP/ (mg·g ⁻¹)	NO ₃ ⁻ -N/ (mg·g ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N/ (mg·g ⁻¹)	DON/ (mg·g ⁻¹)	容重/ (g·cm ⁻³)	pH 值
CK	2.84±0.32 ^a	0.26±0.01 ^a	0.22±0.01 ^a	3.17±0.23 ^a	0.31±0.02 ^b	5.65±0.39 ^a	6.41±0.34 ^b	0.99±0.09 ^a	4.39±0.05 ^a
+N	2.66±0.21 ^a	0.26±0.01 ^a	0.21±0.004 ^a	2.94±0.34 ^a	0.94±0.23 ^a	6.24±0.39 ^a	7.06±0.64 ^b	0.89±0.04 ^a	4.38±0.07 ^a
+P	2.78±0.12 ^a	0.25±0.01 ^a	0.21±0.01 ^a	3.04±0.16 ^a	0.32±0.01 ^{ab}	5.17±0.27 ^a	8.46±0.46 ^{ab}	0.93±0.06 ^a	4.69±0.2 ^a
+NP	2.66±0.12 ^a	0.26±0.01 ^a	0.22±0.01 ^a	2.65±0.19 ^a	0.58±0.14 ^b	6.26±0.48 ^a	9.46±1.16 ^a	0.87±0.04 ^a	4.35±0.03 ^a

注: 每列不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$, $n=3$), 数据表示均值±标准误差; CK (对照, 即不添加氮磷), +N (100 kg·hm⁻²·a⁻¹), +P (10 kg·hm⁻²·a⁻¹), +NP (100 kg·hm⁻²·a⁻¹+10 kg·hm⁻²·a⁻¹)。下同。

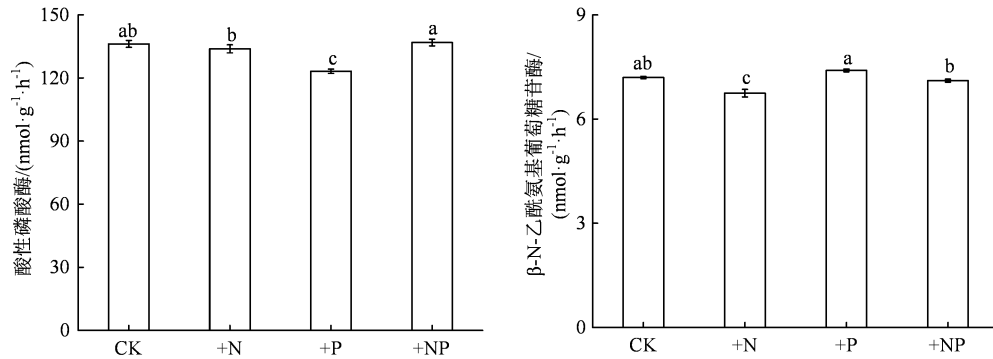


图 1 氮磷添加对土壤酶活性的影响

Figure 1 Effects of nitrogen and phosphorus addition on soil enzyme activity

表 3 氮磷添加对地面凋落物碳氮磷养分的影响

Table 3 Effects of N and P addition on C, N and P nutrients in above ground apoplastic leaves

处理	LCC/(mg·g ⁻¹)	LNC/(mg·g ⁻¹)	LPC/(mg·g ⁻¹)	LCC : LNC	LCC : LPC	LNC : LPC	现存量/(t·hm ⁻¹)
CK	46.57±0.47 ^a	8.97±0.45 ^a	0.39±0.01 ^a	52.86±2.42 ^a	119.82±3.43 ^a	2.3±0.11 ^b	3.79±0.21 ^b
+N	47.34±0.66 ^a	10.23±0.32 ^a	0.41±0.01 ^a	46.57±1.38 ^b	115.88±3.14 ^a	2.5±0.09 ^a	4.32±0.34 ^{ab}
+P	46.43±0.37 ^a	9.08±0.72 ^a	0.42±0.04 ^a	52.87±2.83 ^a	116.88±8.76 ^a	2.21±0.10 ^b	3.72±0.24 ^b
+NP	46.39±0.9 ^a	10.08±0.24 ^a	0.40±0.01 ^a	46.13±1.02 ^b	115.28±3.40 ^a	2.5±0.06 ^a	4.83±0.36 ^a

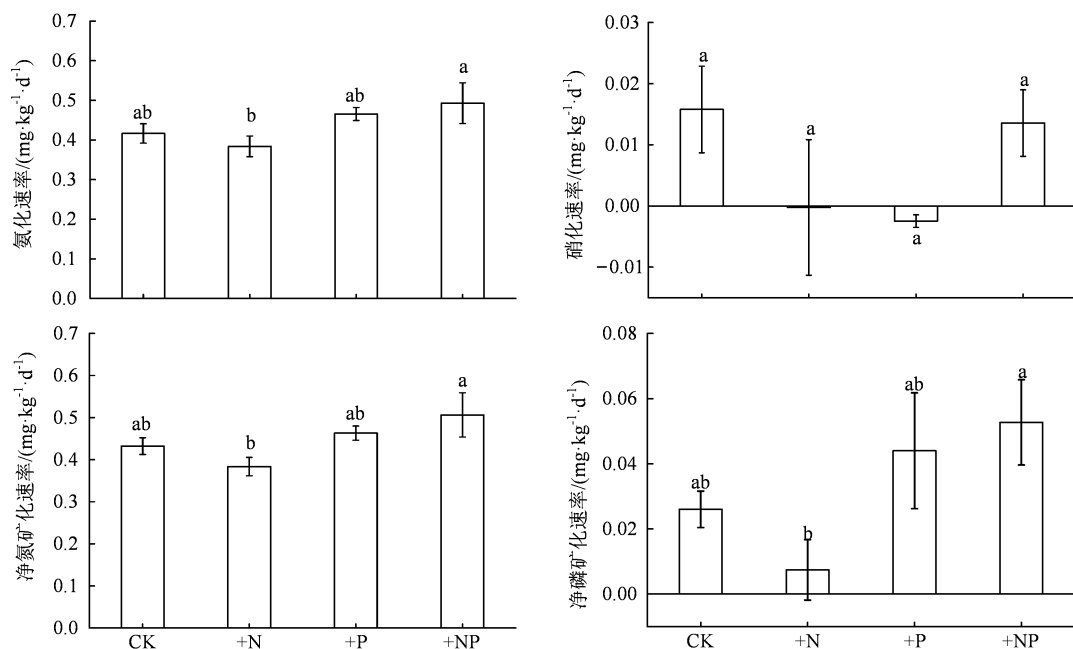


图 2 氮磷添加对土壤氮磷矿化速率的影响

Figure 2 Effects of N and P addition on the rate of soil N and P mineralization

2.4 氮磷添加对土壤氮磷矿化速率的影响

+N 处理显著抑制了土壤 N_{\min} 、 P_{\min} ($P<0.05$), 且主要通过抑制氨化速率使刨花楠人工林土壤 N_{\min} 较+NP 相比显著降低了 24.25% ($P<0.05$); 与+NP

相比, +N 处理使土壤 P_{\min} 显著降低了 85.95%, 而与 CK 相比, +N、+P 施肥处理对 N_{\min} 、 P_{\min} 的影响均未达到显著水平 ($P>0.05$, 图 2)。

表 4 土壤氮磷矿化速率与土壤理化性质的混合线性模型结果

Table 4 Results of the mixed linear model of soil N-P mineralization rate and soil physicochemical properties.

随机效应 RE	因变量 DV	截距	固定效应					R^2
			pH 值	容重	NO_3^- -N	NH_4^+ -N	DON	
处理	N_{amo}	0.253	—	—	—	—	0.036*	0.670
	N_{nit}	0.344	-0.086*	—	-0.065**	0.022*	—	0.688
	N_{\min}	0.553	—	-0.040*	—	—	0.040*	0.640
	P_{\min}	-0.528	0.100*	—	—	—	0.011*	0.716

注: * $P<0.05$, ** $P<0.01$, “—”代表无显著影响, 表中各数值分别代表截距和各指标所对应的回归系数, $n=12$ 。

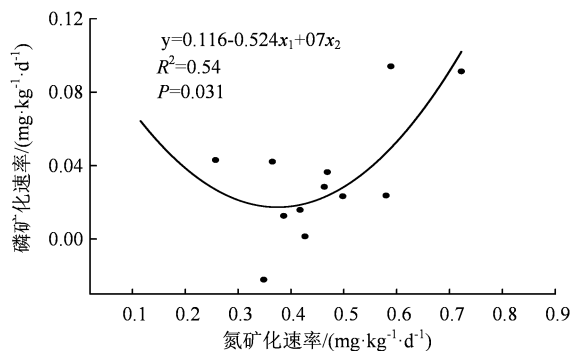


图 3 土壤 N-P 矿化相关性研究 ($n=12$)

Figure 3 Correlation study of soil N-P mineralization ($n=12$)

2.5 土壤氮-磷矿化速率与土壤性质的相关性分析

利用混合线性模型分析+N、+P 处理后土壤各理化性质对氮、磷转化速率的影响发现, 选取 pH 值、容重、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 和 DON 含量作为固定效应, 施肥处理作为随机效应所得到的线性模型具有统计意义。其中, 土壤 N_{amo} 与 DON 含量呈显著正相关; N_{nit} 与 pH 值、 NO_3^- -N 呈显著负相关, 与 NH_4^+ -N 呈显著正相关; N_{\min} 与土壤 DON 呈显著正相关, 但随容重增加而降低; P_{\min} 与土壤 pH 值、DON 含量呈显著正相关 (表 4)。

由图 3 可知, 土壤 P_{\min} 和 N_{\min} 呈先下降后上升的二次抛物线关系, 这说明土壤 N 和 P 矿化存在耦合关系。

3 讨论与结论

3.1 林地环境对土壤氮磷矿化速率的影响

土壤矿化是一个受生物与非生物因素控制的生物化学过程, 本研究通过混合线性模型发现土壤理化性质是驱动土壤矿化的关键因子, 结果显示 N_{\min} 与土壤容重呈显著负相关, 这是因为当土壤具有较高孔隙度即容重较小时, 可通过提高土壤保水和供

氧能力来增强微生物活性, 从而刺激 N_{\min} [28]。值得注意的是, 本研究发现土壤 N_{nit} 与 pH 值呈显著负相关, 这与杨仕明等 [29] 研究结果相似。但一般来说, 硝化细菌最适生存 pH 值为 6.7~8.3, 硝化速率会随 pH 值升高而增加 [30], 但因为本研究区土壤为典型的亚热带酸性红壤, 微生物长期生活在酸性环境中对其具有较强的适应性, 因此当 pH 增加时微生物活性则会被抑制, 造成对土壤 N_{nit} 的抑制; 但这种酸性环境又有利于土壤有机酸与铁铝氧化物结合形成不易分解的 P 形态, 从而抑制微生物对 P 的矿化 [5], 与本研究结果 P_{\min} 与土壤 pH 值呈正相关一致。另外, 森林植被类型及地上-地下凋落物输入等生物因子也是影响土壤矿化的重要因素。本研究发现+NP 处理显著提高凋落物现存量同时土壤 N_{\min} 达到最大值, 这与张锦新等 [31] 研究结果一致即凋落物输入量增加会提高土壤 N 矿化速率。这是因为林地表面凋落物现存量较大时会通过抑制土壤降温, 调控土壤微生物活性来提高土壤 N 矿化速率。另外有研究发现凋落物 C:N 高时, 土壤 N 含量不充足无法满足微生物生长需求因此经转化后的 N 易被微生物固定, 从而降低 N 矿化速率 [32]。本研究发现+N 处理显著降低了刨花楠林地土壤 N_{\min} 和地面凋落物 C:N, 与前人研究结果不一致, 这可能是与刨花楠树种特性相关。安凡等 [33] 研究发现添加 N 肥会抑制刨花楠比叶面积增长, 推测可能是+N 处理后刨花楠叶片比叶面积小与土壤接触面积小, 不利于微生物对凋落叶中 N 素分解及转换, 从而抑制土壤 N 矿化速率。因此森林类型作为驱动土壤 N、P 养分转化的另一关键因子, 影响土壤养分的可用性及植物生长。

3.2 外源氮磷添加对土壤氮磷矿化速率的影响

本研究结果发现, +N 处理后刨花楠林地土壤 N

转化酶活性 (NAG) 受到抑制, 并通过抑制土壤 N_{amo} 而抑制 N_{min} , 与聂二旗等^[14]研究结果一致。同时 Chen 等^[12]指出在 N 饱和森林中进行 N 添加对土壤 N_{min} 具有抑制作用, 这是因为过度 N 输入造成土壤酸化, 使 N_{min} 相关酶 (NAG) 的酶促反应降低^[14], 从而抑制土壤 N_{min} 。本研究结果发现与+N 相比, +NP 处理可通过改善土壤容重刺激 N_{min} , 这是因为同时添加 N、P 则会减轻生态系统 N 饱和状况, 使微生物对土壤 N 素的固持作用减弱, 从而增加 N_{min} ^[34], 因而 N、P 共同添加处理下土壤矿化速率更高。 P_{min} 对 N、P 添加的响应与 N_{min} 趋势一致, 均表现为+N 处理抑制土壤 P_{min} 而+P 和+NP 处理均略微提高了土壤 P 转化速率, 与 Dietrich 等^[35]研究结果一致, 这是由于 P 肥输入为微生物提供直接养分来源, 造成微生物对 P 的固定降低, 为了维持 P 固定化与矿化之间的平衡需促进土壤 P_{min} , 以控制 P 释放。本研究发现+NP 促进土壤 P_{min} , 这可能是因为+NP 处理促进刨花楠人工林土壤酸性磷酸酶活性 (AP), 进而促进 P 矿化进程, 与范珍珍等^[36]关于 N、P 添加对热带森林酸性磷酸酶研究结果一致, N、P 添加会提高酸性磷酸酶活性, 进而促进森林 P 转换过程。

本研究发现土壤 N_{min} 和 P_{min} 呈二次曲线相关, 可能是因为当土壤 N_{min} 累积 N 达到充足情况下, 为酸性磷酸酶提供养分来源^[37], 从而催化 P 矿化以提高土壤 P 供应能力。同时也说明土壤 N 矿化进程中可能伴随着 P 的释放, 在刨花楠人工林中土壤 N-P 具有耦合效应, 因此今后在进行刨花楠人工林经营管理时应该考虑 N、P 交互作用对植物生长的影响。但由于目前研究的局限性, 本研究并未考虑土壤 N、P 的固定率, 因此对于控制 N-P 耦合关系的机制需要进一步研究。

综上所述, 连续 N、P 施肥对刨花楠人工林土壤 N、P 矿化具有较大的影响。与单施氮 (+N) 相比, N、P 共同添加 (+NP) 显著提高土壤 N 矿化速率、P 矿化速率及可溶性有机氮含量, 有利于刨花楠对 N、P 养分的吸收利用; 刨花楠人工林土壤 N 矿化过程中会伴随着 P 矿化, N-P 矿化存在耦合关系。本研究发现刨花楠人工林土壤质量可通过同时添加 N、P 来改善, 同时注意土壤可溶性有机氮含量和 pH 值范围, 以便养分更好地矿化。因此, 与单独添加 N、P 养分相比, N、P 共同添加更有利于维护刨花楠人工林内土壤 N、P 循环过程, 减少养分流失, 更好地管理刨花楠人工林内土壤养分, 为可持续经营提供更科学指导。

参考文献:

- [1] FENG Z Z, RÜTTING T, PLEIJEL H, et al. Constraints to nitrogen acquisition of terrestrial plants under elevated CO₂[J]. *Glob Change Biol*, 2015, 21(8): 3152-3168.
- [2] ZHAO Q, ZENG D H. Nitrogen addition effects on tree growth and soil properties mediated by soil phosphorus availability and tree species identity [J]. *For Ecol Manag*, 2019, 449(3):117478.
- [3] VESTGARDEN L S, KJØNAAS O J. Potential nitrogen transformations in mineral soils of two coniferous forests exposed to different N inputs[J]. *For Ecol Manag*, 2003, 174(1/2/3): 191-202.
- [4] HARRISON A F. Labile organic phosphorus mineralization in relationship to soil properties[J]. *Soil Biol Biochem*, 1982, 14(4):343-351.
- [5] 姜一, 步凡, 张超, 等. 土壤有机磷矿化研究进展[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2014, 38(3): 160-166.
- [6] 罗亲普, 龚吉蕊, 徐沙, 等. 氮磷添加对内蒙古温带典型草原净氮矿化的影响[J]. *植物生态学报*, 2016, 40(5): 480-492.
- [7] LI Z L, TIAN D S, WANG B X, et al. Microbes drive global soil nitrogen mineralization and availability[J]. *Glob Change Biol*, 2019, 25 (3): 1078-1088.
- [8] 冯继广, 朱彪. 氮磷添加对树木生长和森林生产力影响的研究进展[J]. *植物生态学报*, 2020, 44(6): 583-597.
- [9] GAN H Y, SCHÖNING I, SCHALL P, et al. Soil organic matter mineralization as driven by nutrient stoichiometry in soils under differently managed forest stands[J]. *Front For Glob Change*, 2020, 3: 99.
- [10] 郎漫, 吴昌福, 苏孝纯, 等. 东北人工红松针叶林和天然次生阔叶混交林林下土壤氮初级转化速率特征[J]. *林业科学研究*, 2022, 35(3): 63-71.
- [11] 詹书侠, 陈伏生, 胡小飞, 等. 中亚热带丘陵红壤区森林演替典型阶段土壤氮磷有效性[J]. *生态学报*, 2009, 29(9): 4673-4680.
- [12] CHEN H, GURMESA G A, ZHANG W, et al. Nitrogen saturation in humid tropical forests after 6 years of nitrogen and phosphorus addition: hypothesis testing[J]. *Funct Ecol*, 2016, 30(2): 305-313.
- [13] ZHANG Q F, ZHOU J C, LI X J, et al. Nitrogen addition accelerates the nitrogen cycle in a young subtropical *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) plantation[J]. *Ann For Sci*, 2019, 76(2): 1-15.
- [14] 聂二旗, 张心昱, 郑国砥, 等. 氮磷添加对杉木林土壤碳氮矿化速率及酶动力学特征的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38(2): 615-623.
- [15] 赵阳, 张驰, 赵兹绯, 等. 氮磷添加对亚热带常绿阔叶林土壤氮素矿化的影响[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(7): 1690-1697.
- [16] WANG F M, LI J, WANG X L, et al. Nitrogen and phosphorus addition impact soil N₂O emission in a secondary tropical forest of South China[J]. *Sci Rep*, 2014, 4: 5615.

- [17] 赵晶晶, 陈欣, 史奕, 等. 有机物料中有机磷矿化进程的研究[J]. 土壤通报, 2006, 37(6): 1114-1117.
- [18] WAN W J, HAO X L, XING Y H, et al. Spatial differences in soil microbial diversity caused by pH-driven organic phosphorus mineralization[J]. Land Degrad Dev, 2021, 32(2): 766-776.
- [19] 葛晓敏, 陈晓东, 唐罗忠, 等. 添加凋落物对杨树人工林土壤氮、磷矿化的影响初探[J]. 水土保持学报, 2013, 27(3): 189-193.
- [20] 易敏, 赖猛, 张露, 等. 人工林刨花楠木材主要特性的径向变异及其对气象因子的响应[J]. 应用生态学报, 2018, 29(11): 3677-3684.
- [21] 裴盼, 钟全林, 程栋梁, 等. 氮磷叶片喷施对未郁闭刨花楠人工幼林生长的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2016, 22(5): 831-838.
- [22] 李曼, 靳冰洁, 钟全林, 等. 氮磷添加对刨花楠幼苗叶片 N、P 化学计量特征的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2016, 22(2): 285-291.
- [23] 何睿瞳, 钟全林, 李宝银, 等. 氮磷配施对刨花楠幼林细根性状的影响[J]. 应用生态学报, 2022, 33(2): 337-343.
- [24] LIU S, LUO D, CHENG R, et al. Temporal variability in soil net nitrogen mineralization among forest regeneration patterns in eastern Tibetan Plateau[J]. Ecol Indic, 2021, 128: 107811.
- [25] 陈伏生, 曾德慧, 范志平, 等. 森林土壤氮素有效性的野外估测方法[J]. 林业科学, 2007, 43(S1): 83-88.
- [26] 黄桥明, 吕茂奎, 聂阳意, 等. 武夷山不同海拔森林表层土壤轻组有机质特征[J]. 生态学报, 2020, 40(17): 6215-6222.
- [27] 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 Biol Biochem, 2002, 34(9): 1309-1315.
- [28] ELRYS A S, ALI A, ZHANG H M, et al. Patterns and drivers of global gross nitrogen mineralization in soils[J]. Glob Change Biol, 2021, 27(22): 5950-5962.
- [29] 杨仕明, 蔡乾坤, 刘文飞, 等. 杉木人工林土壤氮矿化对长期氮添加和季节的响应[J]. 浙江农林大学学报, 2021, 38(5): 945-952.
- [30] 黄孝肖, 陈重军, 张蕊, 等. 厌氧氨氧化与反硝化耦合反应研究进展[J]. 应用生态学报, 2012, 23(3): 849-856.
- [31] 张锦新, 涂凤兰, 许恩兰, 等. 凋落物输入量对米槠天然林土壤氮矿化的影响[J]. 生态学杂志, 2022, 41(10): 1916-1922.
- [32] 左倩倩, 王邵军. 生物与非生物因素对森林土壤氮矿化的调控机制[J]. 浙江农林大学学报, 2021, 38(3): 613-623.
- [33] 安凡, 李宝银, 钟全林, 等. 光照强度和氮添加对刨花楠苗木生长与叶性状关系的影响[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2022, 38(5): 59-68.
- [34] BALDOS A P, CORRE M D, VELDKAMP E. Response of N cycling to nutrient inputs in forest soils across a 1000-3000 m elevation gradient in the Ecuadorian Andes[J]. Ecology, 2015, 96(3): 749-761.
- [35] DIETRICH K, SPOHN M, VILLAMAGUA M, et al. Nutrient addition affects net and gross mineralization of phosphorus in the organic layer of a tropical montane forest[J]. Biogeochemistry, 2017, 136(2): 223-236.
- [36] 范珍珠, 王鑫, 王超, 等. 整合分析氮磷添加对土壤酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(4): 1266-1272.
- [37] 曾泉鑫, 张秋芳, 林开森, 等. 酶化学计量揭示 5 年氮添加加剧毛竹林土壤微生物碳磷限制[J]. 应用生态学报, 2021, 32(2): 521-528.