

DOI: 10.5846/stxb201809061907

刘旭军,程小琴,田慧霞,刘莉,韩海荣.间伐和凋落物处理对华北落叶松人工林土壤磷形态的影响.生态学报,2019,39(20): - .
Liu X J, Cheng X Q, Tian H X, Liu L, Han H R. Effects of thinning and litter manipulation on soil phosphorus dynamics in a *Larix principis-rupprechtii* plantation. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): - .

间伐和凋落物处理对华北落叶松人工林土壤磷形态的影响

刘旭军,程小琴,田慧霞,刘莉,韩海荣*

北京林业大学林学院,北京 100083

摘要:土壤磷在维持生态系统功能稳定性中发挥重要作用,研究间伐和凋落物处理下的土壤磷组分特征及转化机理,对森林生态系统磷素管理和可持续发展具有重要意义。本文采用 Tiessen 改良的 Hedley 分级方法,探究了不同间伐强度(未间伐、轻度间伐、中度间伐、重度间伐)和凋落物处理(对照、加倍、去凋、切根去凋)下土壤磷形态的变化特征及其驱动因子。结果显示:随着间伐强度的增大,土壤活性磷(Resin-Pi、NaHCO₃-Pi 和 NaHCO₃-Po)、土壤微生物量磷和酸性磷酸酶活性呈先增加后降低的趋势,且在中度间伐最高。凋落物加倍(DL)显著增加了土壤活性磷(Resin-Pi、NaHCO₃-Pi 和 NaHCO₃-Po)、土壤微生物量磷和酸性磷酸酶活性。稳定态磷(HCl-Pi、浓 HCl-Pi 和浓 HCl-Po)、残留态磷(Residual-P)不受间伐和凋落物处理的影响。冗余分析(RDA)显示,土壤微生物量磷、酸性磷酸酶活性和土壤有机碳是引起华北落叶松人工林表层土壤磷组分变化的重要因子。研究表明,适度的间伐和增加凋落物能够显著提高华北落叶松人工林表层土壤磷素的活化能力。本研究为华北落叶松人工林的可持续经营提供依据。

关键词:间伐;凋落物处理;土壤磷组分;土壤微生物磷;酸性磷酸酶活性;土壤有机碳

Effects of thinning and litter manipulation on soil phosphorus dynamics in a *Larix principis-rupprechtii* plantation

LIU Xujun, CHENG Xiaoqin, TIAN Huixia, LIU Li, HAN Hairong*

Forestry College of Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: Soil phosphorus (P) plays an important role in maintaining the stability of ecosystem functions. Understanding the effects of forest management practices (e.g., thinning) on soil phosphorus fractions is important for soil phosphorus management for sustainable development in forest ecosystems. In this paper, a modified Hedley phosphorus fractionation method was used to sequentially extract soil samples and investigate the characteristics of soil phosphorus fractions with different thinning intensities (control, T₀; Low thinning, T₁₅; Moderate thinning, T₃₅; Heavy thinning, T₅₀) and litter manipulation (control, CK; exclusion litter, NL; addition litter, DL; exclusion litter and roots, NRL) in a *Larix principis-rupprechtii* plantation and addressed its determining factors. The results showed that soil labile phosphorus (Resin-Pi, NaHCO₃-Pi and NaHCO₃-Po), soil microbial biomass phosphorus, and acid phosphatase activity increased first and then decreased with the increase of thinning intensity, and the maximum appeared in T₃₅. DL treatment significantly increased soil labile phosphorus (Resin-Pi, NaHCO₃-Pi and NaHCO₃-Po), soil microbial biomass phosphorus, and acid phosphatase activity. No-labile phosphorus (HCl-Pi, concentrated HCl-Pi and concentrated HCl-Po) and residual phosphorus (Residual-P) were not affected by thinning or litter treatments. The redundancy analysis (RDA) indicated that the changes

基金项目:国家重点研发计划(2016YFD0600205);国家自然科学基金项目(No. 31700372)

收稿日期:2018-09-06; 网络出版日期:2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hanhr@bjfu.edu.cn

in phosphorus fractions were mainly driven by soil microbial biomass phosphorus, acid phosphatase activity, and soil organic carbon in the surface soil of the *Larix principis-rupprechtii* plantation. The results suggested that moderate thinning and increased litter could significantly improve the activation of phosphorus in the surface soil of the *Larix principis-rupprechtii* plantation.

Key Words: thinning; litter treatments; soil phosphorus fractions; soil microbial phosphorus; acid phosphatase activity; soil organic carbon

磷(phosphorus, P)是维持植物生长发育的重要营养元素。土壤磷是植物吸收利用的主要磷源,在维持生态系统功能的稳定性中发挥重要作用^[1]。土壤中的磷素存在多种形态,不同形态磷素的有效性也存在差异^[2]。各形态磷素间的相互转化受植被、气候、土壤类型、土壤微生物和人类活动等影响^[3-9]。长期以来,磷被认为是热带、亚热带森林生态系统的限制性养分元素^[6-10],而温带森林主要受氮的限制^[11]。但近年来,温带森林生态系统受磷限制的报道越来越多^[12-14]。因此研究温带森林土壤磷组分特征对于更好地发挥温带森林生态系统功能意义重大。

间伐是森林经营管理的重要手段之一。间伐能够改善植物对养分的竞争,以及通过对林内光照、水分、温度的重新分配影响土壤微生物和磷酸酶活性,从而对土壤磷素的生物化学循环产生影响^[15]。例如:Imai 等人的研究发现间伐能使土壤全磷和有机磷含量降低^[16-17];欧江等人发现间伐能显著提高马尾松人工林土壤有效磷和微生物磷(microbial biomass phosphorus, MBP)含量^[18-19];Hu 等认为间伐显著增加了土壤 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 和 $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$ 含量,土壤有效性提高^[20]。在森林生态系统中,凋落物在养分循环(包括磷)中扮演重要角色^[21-23]。间伐过程中会留下许多凋落物,而随着间伐强度的增加,凋落物输入量会减小^[24]。目前,大多数研究主要集中在凋落物处理对土壤碳氮、土壤呼吸和土壤微生物结构的影响^[25-31],凋落物处理对土壤磷素的影响鲜有报道^[32-34]。

间伐和凋落物处理都会对土壤磷素产生影响,但两者的交互作用对土壤磷素的影响尚未见报道。华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)是我国暖温带山地森林重要的建群树种之一,本文通过对华北落叶松人工林进行间伐和林内布设凋落物处理实验,研究间伐强度和凋落物处理对土壤磷形态的影响,试图找出影响温带森林土壤磷循环的关键环境因子,为华北落叶松人工林土壤磷素的科学管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于山西省长治市沁源县太岳山国有林管理局好地方林场(111°59' E, 36°40' N),平均海拔 2337 m,属暖温带半干旱大陆性季风气候。年均气温 6.2℃,年均降水量 680 mm(主要集中在 7—9 月)。年均无霜期 120 d,年均日照 2500 h—2700 h, $\geq 10^\circ\text{C}$ 的年积温 2500℃—3000℃。土壤类型以褐土、棕壤为主。该区主要植被类型属温带落叶阔叶林带,主要乔木树种有华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、白桦(*Betula platyphylla*)、辽东栎(*Quercus wutaishanica*)等。灌木主要有沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、黄刺玫(*Rosa xanthina*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、绣线菊(*Spiraea salicifolia*)等。草本主要有细叶苔草(*Carex rigescens*)、小红菊(*Dendranthemachanetii*)、柳兰(*Epilobium angustifolium*)等。

1.2 样地设置

用于本研究的华北落叶松人工林于 1981 年种植,初植密度为 2500 株/hm²。2012 年 4 月,选取立地条件、栽培技术和抚育措施一致的华北落叶松人工林,以单株间伐的方式进行林分密度调控处理,依据间伐株数所占的比例分为 4 个梯度:未间伐(T_0 , 0%)、轻度间伐(T_{15} , 15%)、中度间伐(T_{35} , 35%)、强度间伐(T_{50} , 50%),处理后,所有地上粗木质残体均移出林地。每种间伐强度设置 3 个重复,共 12 块 25 m×25 m 固定标准

样地。2014 年 7 月,对样地内胸径 $\geq 3\text{cm}$ 的华北落叶松进行每木检尺和立地条件的调查,样地信息见表 1。

表 1 样地基本特征

Table 1 Characteristics of sampling plots

处理 Treatment	平均胸径 Diameter at breast height/cm	平均树高 Height/m	密度 Density/ (株/hm ²)	林龄 Age/a	坡度 Slope/(°)	坡向 Aspect	坡位 Position	海拔 Altitude/m
T ₀	15.01±0.51	14.19±2.30	2095±64	35	25	北	上坡	2327
T ₁₅	14.85±0.69	14.06±2.02	1850±121	35	24	北	上坡	2334
T ₃₅	15.96±0.38	15.86±0.96	1402±90	35	24	北	上坡	2346
T ₅₀	16.81±1.26	15.41±2.22	1109±187	35	25	北	上坡	2339

森林凋落物包括地上凋落物和地下凋落物。2014 年 7 月,采用完全随机区组设计方法在每块样地内设置 12 个 2 m×2 m 小样方,分为 4 种凋落物处理:(1)原状(CK):保留原来状态;(2)去凋(NL):去除地表全部凋落物,并在样方上设置离地 0.5 m 高的尼龙网凋落框,阻止凋落物落入样方内;(3)加倍(DL):将去凋处理样方收集的全部凋落物(包括样方上调落框收集的凋落物)均匀撒入凋落物加倍样方内;(4)切根去凋(NRL):采用挖壕沟法在样方边界挖深 0.8 m 的壕沟,将石棉瓦插入壕沟阻止外围根系进入样方内,去除样方内地表全部凋落物,并设置离地 0.5 m 高的尼龙网凋落框,阻止凋落物落入样方内;每种处理 3 个重复。

1.3 样品采集

2017 年 8 月用内径 5 cm 土钻采集样地内各小样方内 0—10 cm 土壤,每个样方内随机选取 3 个点,将同一样地相同处理的土壤混匀,装在自封袋中,置于保温箱中立即带回实验室,共 48 份土样。土壤去除碎石、动植物残体后过 2 mm 筛,分成 2 份,其中一份置于 4℃ 冰箱内冷冻保存,用于土壤微生物量磷和酸性磷酸酶的测定;另一份土样在自然条件下阴干,取一部分过 0.149mm 筛,用于土壤基本理化性质、土壤磷组分的测定。

1.4 各指标测定方法

土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)采用重铬酸钾外加热法测定。pH 采用酸度计法测定(pH 计: Sartorius PB-10, 美国,水土比为 2.5:1)。土壤全氮(total nitrogen, TN)采用浓 H₂SO₄-混合加速剂消化法连续流动分析仪(SEAL AutoAnalyzer 3 HR, 德国)测定。土壤含水率(soil moisture content, SMC)采用烘干法测定^[35]。

土壤微生物量磷采用氯仿熏蒸处理, pH 为 8.5 的 0.5 mol/L NaHCO₃ 溶液浸提,钼蓝比色法测定,转换系数为 0.4^[36]。土壤酸性磷酸酶活性(acid phosphatase activity, APA)采用对硝基苯磷酸盐法来测定^[37]。

土壤磷组分采用 Tiessen 改良的 Hedley 磷分级体系^[38],采用连续浸提的方法,取 0.5g 过 0.149 mm 筛风干土,依次用 HCO₃⁻ 饱和的阴离子交换树脂、0.5 mol/L NaHCO₃、0.1 mol/L NaOH、1 mol/L HCl、浓 HCl 浸提,最后将残余的土样用浓 H₂SO₄-H₂O₂ 在 360℃ 下高温消煮,分别测定各级土壤无机磷含量;另取 10 ml 部分 0.5 mol/L NaHCO₃、0.1 mol/L NaOH、浓 HCl 浸提液用浓硫酸酸化,过硫酸铵消解,用于各级全磷的测定;上述溶液磷含量均用钼蓝比色法测定。Hedley 根据植物对各形态磷素吸收利用的难易程度,将其分为土壤活性磷(Resin-Pi、NaHCO₃-Pi 和 NaHCO₃-Po)、中等活性磷(NaOH-Pi 和 NaOH-Po)、稳定态磷(HCl-Pi、浓 HCl-Pi 和浓 HCl-Po)、残留态磷(Residual-P)。

1.5 数据处理

采用 Microsoft Office Excel 2016 和 SPSS 19.0 软件对数据进行统计分析,采用双因素方差分析(Two-way ANOVA)检验不同间伐强度、不同凋落物处理方式及其两者的交互作用对土壤理化性质、土壤磷组分、土壤酸性磷酸酶活性和土壤微生物量磷的影响,显著水平为 $\alpha=0.05$;采用单因素方差分析(One-way ANOVA)比较不同间伐强度和不同凋落物处理方式下土壤理化性质、土壤磷组分、土壤酸性磷酸酶活性和土壤微生物磷的差异,显著水平为 $\alpha=0.05$;采用 Canoco 4.5 软件,以土壤磷组分为响应变量,以土壤理化性质、酸性磷酸酶活

性和微生物量磷为解释变量做冗余分析(RDA)。作图采用 Origin Pro 2017 软件。表中数据均为平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 土壤基本理化性质

不同处理下的土壤有机碳、全氮、含水率和 pH 差异显著(表 2)。在未间伐样地中,DL 处理下的土壤有机碳含量最高;NL 和 NRL 的含水率显著高于 CK 和 DL,其他性质均无显著差异。在轻度间伐样地中,土壤有机碳呈现 DL>CK>NL>NRL;DL 处理下土壤全氮含量最低,NL 处理下的含水率最低,pH 不同凋落物处理间差异不显著。在中度间伐样地中,土壤有机碳呈现 DL>CK>NL>NRL;NL 含水率显著低于 CK,NL 和 NRL 处理下的 pH 显著高于 CK 和 DL。在重度间伐样地中,DL 有机碳含量显著高于其他 3 种处理;NL 处理下含水率最低。

表 2 各处理土壤基本理化性质

Table 2 Physicochemical properties of soils under different treatments

间伐 Thinning	凋落物处理 Litter manipulation	土壤有机碳 SOC/(g/kg)	全氮 Total N/(g/kg)	含水率 Moisture/%	pH
T ₀	CK	36.88±1.08Aa	3.01±0.74Aa	46.23±0.97ABb	5.94±0.15Aa
	NL	37.20±0.84Aa	2.11±0.71Aa	38.66±1.77Aa	6.27±0.01Ba
	DL	47.04±0.78Ab	2.13±0.03Aa	44.27±0.06Ab	6.17±0.37Aa
	NRL	39.16±0.55ABa	2.06±0.13Aa	38.43±0.56Aa	6.27±0.03ABa
T ₁₅	CK	42.02±1.77Ba	2.96±0.61Ab	45.19±1.23Aab	6.00±0.22Aa
	NL	39.43±1.39Aa	2.50±0.33Aab	40.05±1.57ABa	6.16±0.09ABa
	DL	49.39±4.37Ab	2.02±0.39Aa	47.49±2.94ABb	6.35±0.32Aa
	NRL	37.55±0.57Aa	2.16±0.31ABab	41.90±5.75ABab	6.46±0.26Ba
T ₃₅	CK	47.63±0.84Cc	3.28±0.45Aa	60.41±4.19Cb	5.90±0.09Aa
	NL	44.13±0.65Bb	2.71±0.51Aa	50.49±3.87Ca	6.19±0.12ABb
	DL	55.54±0.66Bd	2.54±0.36ABa	57.07±2.33Bab	5.93±0.10Aa
	NRL	41.51±0.58BCa	2.68±0.22Ca	51.49±4.42Ca	6.04±0.12Aab
T ₅₀	CK	42.92±1.80Ba	3.30±0.38Aa	57.39±1.22BCb	5.83±0.16Aa
	NL	43.57±3.22Ba	2.94±0.69Aa	44.49±1.50Ba	5.96±0.19Aa
	DL	55.22±1.69Bb	3.07±0.35Ba	57.03±7.70Bb	5.93±0.12Aa
	NRL	43.88±2.72Ca	2.62±0.22BCa	47.80±1.44BCa	6.08±0.08Aa

T₀:对照,Control;T₁₅:轻度间伐,Low thinning;T₃₅:中度间伐,Moderate thinning;T₅₀:重度间伐,Heavy thinning;CK,原状,control;NL:去除凋落物,Exclusion litter;DL:加倍凋落物,Addition litter;NRL:切根去凋,Exclusion litter and roots;不同大写字母表示不同间伐强度间差异显著,不同小写字母表示不同凋落物处理间差异显著($P<0.05$)

方差分析表明,间伐强度对土壤有机碳、含水率和 pH 有极显著影响($P<0.01$),对土壤全氮含量有显著影响($P<0.05$);凋落物处理对土壤有机碳、全氮和含水率有极显著影响($P<0.01$),对土壤 pH 有显著影响($P<0.05$);而间伐强度×凋落物处理对土壤有机碳、全氮、含水率和 pH 无显著交互作用(表 3)。

2.2 土壤磷组分特征

凋落物处理对土壤全磷含量有极显著影响($P<0.01$),间伐强度、间伐强度×凋落物处理的交互作用对土壤全磷含量影响不显著(表 4)。在相同间伐强度样地内,DL 处理下的土壤全磷含量均最高,NRL 处理下土壤全磷含量最低(图 1)。

间伐强度、凋落物处理及其交互作用对土壤 Resin-Pi、NaHCO₃-Pi、NaHCO₃-Po 和 NaOH-Po 影响极显著($P<0.01$);间伐强度对土壤 NaOH-Pi 影响极显著($P<0.01$),凋落物处理、间伐强度×凋落物处理的交互作用对土壤 NaOH-Pi 影响不显著;间伐强度、凋落物处理及其交互作用对土壤稀 HCl-Pi、稀 HCl-Pi、浓 HCl-Po 和

Residual-P 含量无显著影响(表 4)。在相同间伐强度下,DL 处理下的 Resin-Pi、NaHCO₃-Pi、NaHCO₃-Po 和 NaOH-Po 均显著高于其他三种处理,Resin-Pi 呈 DL>CK>NRL>NL,NaHCO₃-Pi、NaHCO₃-Po 和 NaOH-Po 呈 DL>CK>NL>NRL。在相同凋落物处理下,随着间伐强度的增大,Resin-Pi、NaHCO₃-Pi 和 NaHCO₃-Po 呈先增大后降低的趋势;除 NRL 处理下的 NaOH-Po 外,Resin-Pi、NaHCO₃-Pi、NaHCO₃-Po 和 NaOH-Po 含量均在中度间伐强度下最大。在相同凋落物处理下,NaOH-Pi 含量均随间伐强度的增大而减少,且中度间伐强显著高于对照。交互处理下,T₃₅×DL 下的 Resin-Pi、NaHCO₃-Pi、NaHCO₃-Po 和 NaOH-Po 分别增加了 1.03、2.61、1.23 和 0.23 倍,增幅均为最大;T₃₅×NRL 使 NaOH-Po 含量降低了 48.19%,降幅最大。间伐和凋落物处理及交互作用对稳定态磷(HCl-Pi、浓 HCl-Pi 和浓 HCl-Po)和残留态磷(Residual-P)影响不显著。各处理下,土壤磷组分中,Residual-P 含量最高,约占土壤全磷含量的 48.64%—59.19%;NaHCO₃-Pi 含量最低,约占土壤全磷含量的 0.28%—1.59%(图 1)。

表 3 间伐强度和凋落物处理及其两者交互作用对土壤基本理化性质影响的方差分析表

Table 3 Statistical summary of thinning intensities, litter treatments and their interaction effect on soil basic physicochemical

因子 Factors	自由度 Degree of freedom	土壤有机碳 SOC		全氮 Total N		含水率 Moisture		pH	
		<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
		间伐强度 Thinning intensities	3	30.169	<0.001	5.408	<0.005	33.856	<0.001
凋落物处理 Litter treatments	3	76.123	<0.001	6.636	0.002	17.848	<0.001	5.495	0.004
间伐强度×凋落物处理 Thinning intensities× Litter treatments	9	2.114	0.063	0.438	0.902	0.787	0.630	0.937	0.510

表 4 间伐强度和凋落物处理及其两者交互作用对土壤磷组分影响的方差分析表

Table 4 Statistical summary of thinning intensities, litter treatments and their interaction effect on soil phosphorus fractions

因子 Factors	自由度 Degree of freedom		Resin-Pi	NaHCO ₃ -Pi	NaHCO ₃ -Po	NaOH-Pi	NaOH-Po	稀 HCl-Pi	浓 HCl-Pi	浓 HCl-Po	Residual-P	TP
间伐强度 Thinning intensities	3	<i>F</i>	114.01	283.85	78.38	412.34	54.00	1.55	0.46	1.24	1.102	1.69
		<i>P</i>	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.221	0.711	0.311	0.365	0.191
凋落物处理 Litter treatments	3	<i>F</i>	155.19	443.82	250.39	2.49	613.38	2.65	2.32	1.75134	0.39	12.52
		<i>P</i>	<0.001	<0.001	<0.001	0.08	<0.001	0.068	0.097	0.179	0.755	<0.001
间伐强度×凋落物 处理 Thinning intensities× Litter treatments	3	<i>F</i>	4.84	32.29	14.21	1.53	18.64	0.47	0.71	0.71005	0.95	0.91
		<i>P</i>	<0.001	<0.001	<0.001	0.184	<0.001	0.877	0.690	0.695	0.497	0.526

2.3 土壤微生物量磷和酸性磷酸酶活性

间伐强度、凋落物处理及其交互作用对土壤 MBP 和 APA 有极显著影响($P<0.01$)(表 5)。相同凋落物处理方式下,MBP 均随间伐强度的增大呈先增加后降低的趋势,且在中度间伐强度下含量最高;DL 和 CK 处理下的 APA 在中度间伐强度最高,NL 和 NRL 处理下的 APA 在轻度间伐强度最高。相同间伐强度下,MBP 含量和 APA 大小均为 DL>CK>NL>NRL(图 2,图 5)。

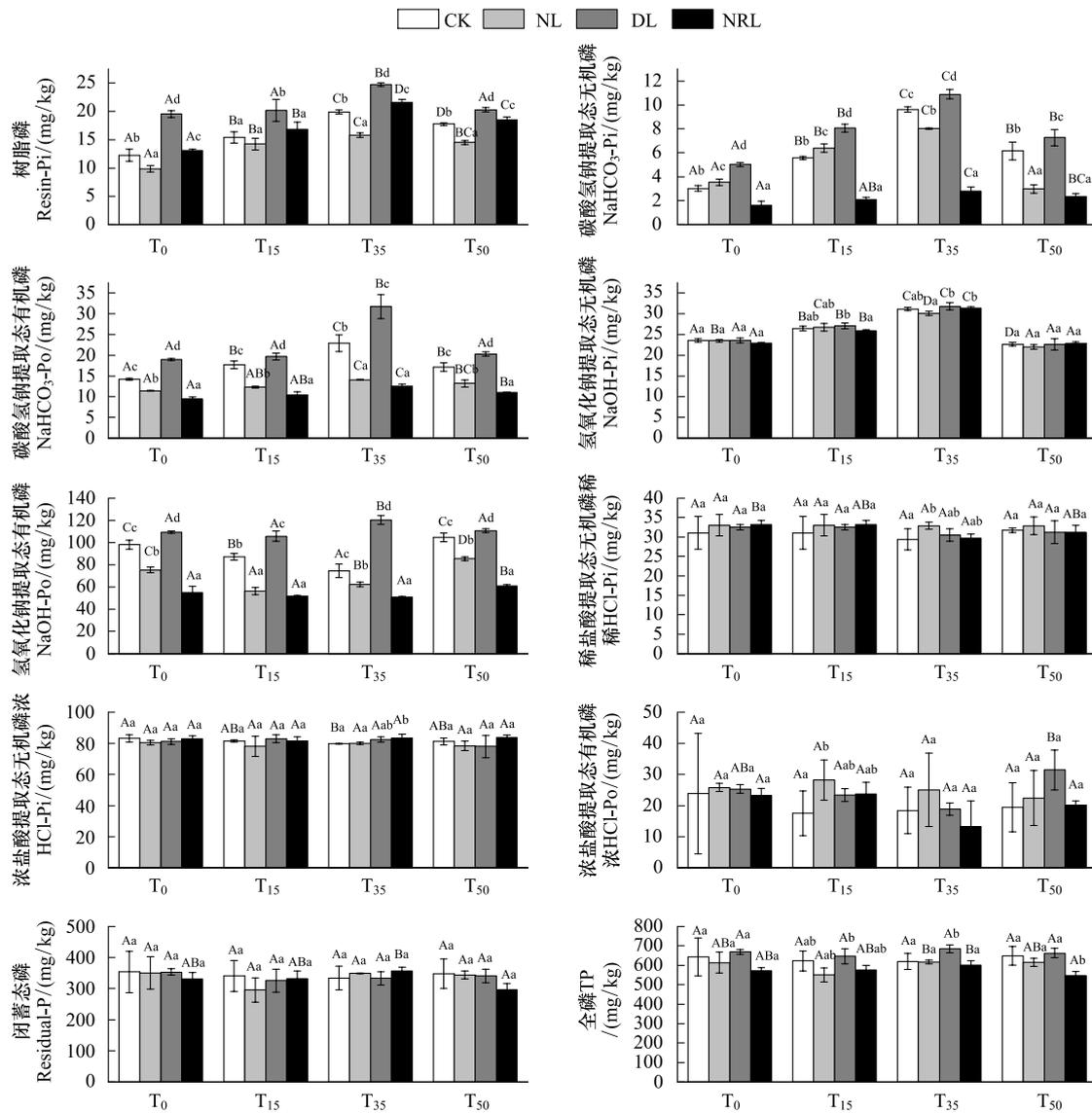


图1 不同处理下土壤磷组分特征

Fig.1 Soil phosphorus fractions under different treatments

T₀:对照, control; T₁₅:轻度间伐, Low thinning; T₃₅:中度间伐, Moderate thinning; T₅₀:重度间伐, Heavy thinning; CK, 原状, control; NL: 去除凋落物, Exclusion litter; DL: 加倍凋落物, Addition litter; NRL: 切根去凋, Exclusion litter and roots; 不同大写字母表示不同间伐强度间差异显著, 不同小写字母表示不同凋落物处理间差异显著 ($P < 0.05$); 图中数据为平均值 \pm 标准差

表5 间伐强度和凋落物处理及其两者交互作用对土壤微生物量磷、酸性磷酸酶活性影响的方差分析表

Table 5 Statistical summary of thinning intensities, litter treatments and their interaction effect on soil microbial biomass and acid phosphatase activity

因子 Factors	自由度 Degree of freedom	土壤微生物量磷 MBP Soil microbial biomass		土壤酸性磷酸酶活性 APA Soil acid phosphatase activity	
		F	P	F	P
间伐强度 Thinning intensities	3	80.616	<0.001	254.233	<0.001
凋落物处理 Litter treatments	3	272.345	<0.001	535.583	<0.001
间伐强度 \times 凋落物处理 Thinning intensities \times Litter treatments	9	8.753	<0.001	34.419	<0.001

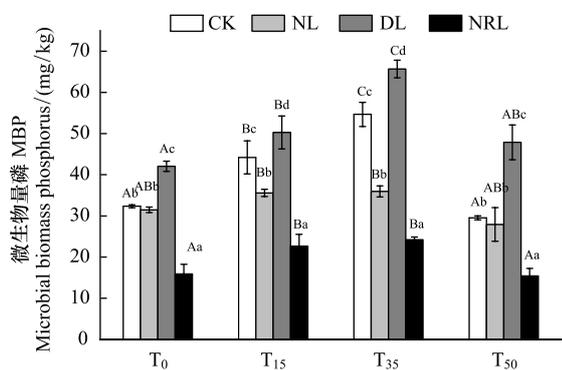


图 2 不同处理下土壤微生物量磷

Fig. 2 Microbial biomass phosphorus of soil under different treatments

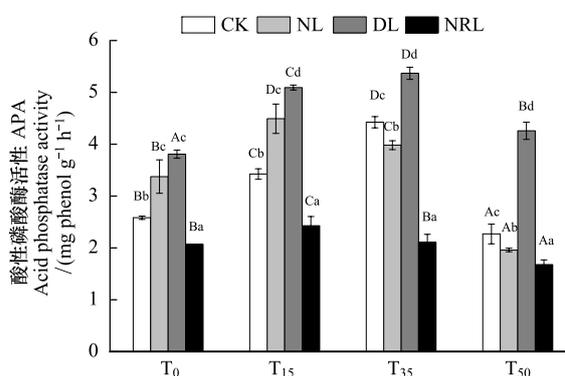


图 3 不同处理下土壤酸性磷酸酶活性

Fig. 3 Soil acid phosphatase activity under different under different treatments

2.4 土壤磷组分与环境因子的相关性

RDA 分析显示,MBP、APA 和 SOC 是影响土壤磷组分变化的关键因子。由图 4 可以看出,RDA 第 1 轴和第 2 轴分别解释了变量的 66.0%和 4.5%。MBP 对土壤磷组分的影响最大,其解释了土壤磷变化的 60.0% ($P=0.002$),其次为 APA 和 SOC。

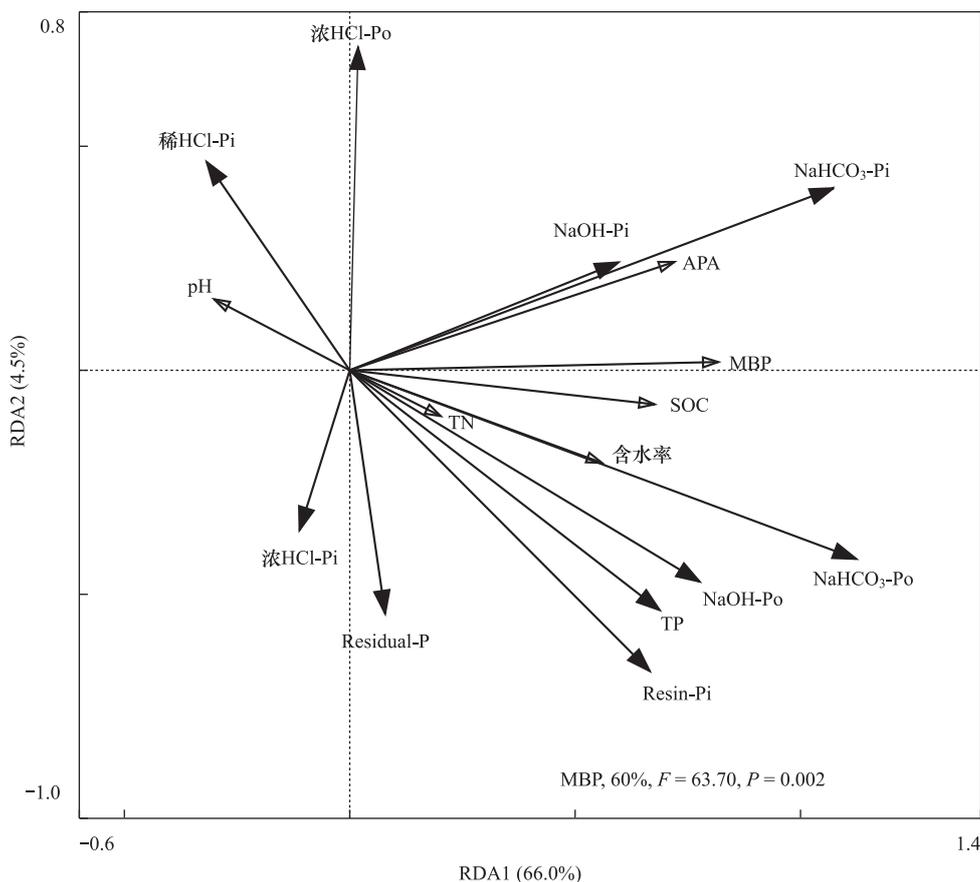


图 4 不同处理土壤磷组分差异的冗余分析

Fig. 4 Redundancy analysis (RDA) of soil phosphorus fractions under different treatments

3 讨论

3.1 间伐和凋落物处理对土壤理化性质的影响

本研究表明,适度的间伐强度增加了表层土壤有机碳、全氮和含水率。间伐通过降低林分密度,增加林内透光和穿透雨量,促进了凋落物的分解。此外,由于间伐缓解了树木对土壤养分的竞争,增加了植物地下生物量分配,导致大量的细根分解,且间伐后残留的死根分解,将养分归还到土壤中,从而提高了土壤养分含量,这与 Selig 等人的研究结果一致^[39-40]。但 Vesterdal 等^[41]认为间伐提高了土壤微生物活性,促进了有机质的分解,土壤养分含量下降;而 Jurgensen 等^[42]认为间伐对土壤有机碳和全氮含量影响不显著,造成这种差异的原因可能与树种、采伐年限、林龄以及是否将采伐物移除样地有关。本研究发现,随着间伐强度的增大,土壤 pH 有降低的趋势。可能由于间伐使植物根系活动加强^[20],促进植物根系分泌有机酸,从而使 pH 降低^[43]。

本研究结果表明,凋落物处理对土壤理化性质有显著影响($P < 0.05$)。DL 显著增加了土壤有机碳含量,这与 Xu^[44]的研究结果相似,可能是因为 DL 使凋落物输入土壤中的碳比土壤呼吸消耗的碳更多,从而使土壤有机碳含量升高。然而也有学者认为 DL 对土壤有机碳含量影响不显著^[21,25,32],这可能与研究区森林类型、气候以及凋落物处理的时间不同有关。NL 和 NRL 与 CK 相比,土壤有机碳无显著差异,这与 Sayer 和 Huang 等人的研究结果一致^[21,32],他们认为地下根系对土壤有机碳的影响大于地表凋落物,地表凋落物去除使植物根系生物量增加,抵消了因凋落物去除减少的碳输入量。此外,NL 和 NRL 的土壤含水率显著低于 CK 和 DL,且 NL < NRL,一方面,凋落物去除使地表水分蒸发量增加,土壤含水率降低。另一方面,在生长季植物根系也会吸收大量的水分,而 NRL 由于阻断了植物根系对土壤水分的吸收,因此 NRL 处理的土壤含水率大于 NL 处理。

3.2 间伐和凋落物处理下土壤磷组分变化

土壤磷组分的分布状况能够反映一个地区的磷素供应能力。本研究区中,土壤活性磷含量很少,仅为土壤全磷含量的 4.2%—9.3%,且活性磷库以 $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$ 为主,约占活性磷库的 40.8%—48.9%,说明土壤有机磷的矿化作用在维持该地区落叶松人工林的生长方面可能发挥着重要作用。其次,该区域土壤磷素以 Residual-P 为主,约占全磷含量的 48.64%—59.19%,说明该地区大部分磷植物难以利用^[45]。

本研究发现,土壤活性磷和中等活性磷受间伐和凋落物处理及其交互作用影响显著($P < 0.05$)。中度间伐显著增加了土壤活性磷(Resin-Pi、 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 和 $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$)含量,这与许多研究结果相似^[17-18,20]。土壤磷组分间的迁移、转化和贮存与植物和微生物关系密切^[3],适度间伐使植物根系活动和土壤微生物活性增强,促进中等活性有机磷的矿化,其中一部分转化为活性磷供植物和微生物吸收利用,另一部分被土壤团聚体固定为 NaOH-Pi ^[46-47]。同时,中度间伐增加了土壤含水率和有机碳含量,减少了土壤表面对土壤磷素的吸附,活性磷含量升高^[33]。DL 显著提高了土壤活性磷(Resin-Pi、 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 和 $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$)和 NaOH-Po 含量,这与 Huang 在温带森林的研究结果相似^[32]。这可能是由于 DL 导致更高的碳输入,从而刺激了土壤微生物,使土壤微生物活性提高^[28,48]。在温带森林生态系统中,土壤微生物对有机磷的矿化作用主要是其对碳的需求驱动的,即微生物在有机磷矿化中会消耗大量的碳,而只吸收少量的磷,未被微生物吸收的磷素补充到土壤活性磷库和 NaOH-Po 中^[49]。本研究中,NL 和 NRL 降低了土壤活性磷(Resin-Pi、 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 和 $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$)含量,这与 Vincent 的研究结果相似^[48],可能与根系吸收和淋溶作用有关^[50]。Huang^[32]研究发现 NL 使土壤活性磷含量升高,而 Sayer^[21]则发现凋落物处理对土壤磷素无显著影响,研究结果不一致的原因可能与树种、气候以及凋落物处理年限不同有关。此外,间伐和凋落物处理对土壤活性磷和 NaOH-Po 有显著交互作用,中度间伐促进了 DL 处理后土壤活性磷的增加幅度,加剧了 NRL 处理后 NaOH-Po 的降低幅度,这可能与间伐和凋落物处理的交互作用对微生物和磷酸酶活性的影响有关。间伐和凋落物处理及其交互作用对土壤磷素的影响是多种物理生物化学过程综合作用的结果,受植被类型、土壤微生物、气候以及处理时间等因素的复杂影响,有待进一步深入研究。

本研究中,间伐和凋落物处理及其交互作用对土壤稳定态磷(HCl-Pi、浓 HCl-Pi 和浓 HCl-Po)、残留态磷(Residual-P)无显著影响,这可能与其主要受土壤母质的影响有关^[3,7-8]。本研究表明,土壤全磷含量受凋落物处理影响显著,间伐、间伐×凋落物处理的交互作用影响不显著,可能原因是,间伐后土壤养分利用效率提高^[15],植物对土壤磷素吸收的变化量相对全磷含量极少,因此不同间伐强度间土壤全磷含量差异不显著。土壤中的磷素在较短的时间尺度内主要来源于凋落物^[3],DL 处理增加了土壤磷素的输入量,因此土壤全磷含量增加,而 NL 和 NRL 由于减少了凋落物对土壤磷素的输入量,且由于淋溶作用增强,土壤全磷含量降低^[50]。

3.3 间伐和凋落物处理下土壤微生物量磷和酸性磷酸酶活性差异

土壤微生物量磷是土壤活性磷库的重要组成部分^[51]。本研究发现,随着间伐强度的增加,土壤微生物量磷呈现增加后降低的趋势,这与欧江等人的研究结果相似^[18-19]。DL 显著增加了土壤微生物量磷含量,Riikka^[27]也得到类似的研究结果,而 NL 和 NRL 显著降低了土壤微生物量磷,且间伐和凋落物的交互作用对其影响显著。导致这一结果的原因可能是由于适度的间伐提高了土壤温度^[28]和含水率,而 DL 为土壤微生物提供了充足的碳,土壤微生物活性提高,而 NL 和 NRL 使土壤含水率降低,抑制了土壤微生物活性(表 2)。

土壤酸性磷酸酶的活性受植物、微生物和其他环境因素的影响^[8,10,19]。间伐和 DL 显著增加了土壤酸性磷酸酶活性。一方面,间伐使植物对土壤磷素的需求增加^[52],且由于间伐和 DL 促进了土壤微生物活动,而土壤活性磷含量很少(图 1),刺激了植物和微生物分泌酸性磷酸酶;另一方面,间伐和 DL 提供了更加适宜的温度、水分条件,土壤酸性磷酸酶活性提高^[49]。

3.4 环境因子对土壤磷组分的影响

本研究发现,MBP、APA 和 SOC 是影响华北落叶松人工林表层土壤磷组分变化的关键因子。在森林生态系统中,土壤磷素的转化过程是由物理化学过程和微生物过程共同作用的结果。Bünemann^[53]研究发现,在温带森林生态系统中土壤磷素主要是由微生物过程决定的,土壤微生物一方面作为土壤活性磷库的重要来源之一,其吸收利用土壤中的无机磷,避免被土壤吸附固定。另一方面,土壤微生物分泌得磷酸酶对土壤磷素起到了活化作用。本研究区植物可利用的活性磷库以有机形式为主,植物和微生物分泌的酸性磷酸酶能将大部分的有机磷转化为可供植物和微生物吸收利用的有效磷^[4,54-55]。土壤有机质在维持土壤磷素有效性中也有重要作用,土壤有机质中的腐殖酸对于铁、铝离子具有较高的亲和力,与土壤中的磷素竞争吸附位点,从而降低对磷的吸附,阻止磷素形成沉淀,增加土壤磷素的有效性^[56],且土壤有机碳为土壤微生物生活提供了充足的能量,促进了微生物对土壤有机磷的矿化^[49]。

4 结论

适度的间伐能够显著提高华北落叶松人工林表层土壤活性磷(Resin-Pi、NaHCO₃-Pi 和 NaHCO₃-Po)含量,且在中度间伐强度下最高。间伐后凋落物加倍能够促进土壤磷素的活化,且中度间伐后凋落物加倍能最大限度的促进土壤活性磷含量。土壤微生物量磷、酸性磷酸酶活性和土壤有机碳是调控华北落叶松人工林表层土壤磷组分转化的关键土壤因子。由于间伐和凋落物处理对土壤磷组分的影响是一个复杂、长期的过程,本研究只探讨了间伐和凋落物处理在较短时间内对土壤磷素分的影响,因此需要长期的监测和进一步的深入探讨。

参考文献(References):

- [1] Fisk M, Santangelo S, Minick K. Carbon mineralization is promoted by phosphorus and reduced by nitrogen addition in the organic horizon of northern hardwood forests. *Soil Biology & Biochemistry*, 2015, 81(81): 212-218.
- [2] Hedley M J, Stewart J W B, Chauhan B S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Science Society of America Journal*, 1982, 46(5): 970-976.
- [3] 赵琼, 曾德慧. 陆地生态系统磷素循环及其影响因素. *植物生态学报*, 2005, 29(1): 153-163.
- [4] Hou E Q, Chen C R, Luo Y Q, Zhou G Y, Kuang Y W, Zhang Y G, Heenan M, Lu X K, Wen D Z. Effects of climate on soil phosphorus cycle

- and availability in natural terrestrial ecosystems. *Global Change Biology*, 2018, 24(8): 3344-3356.
- [5] Wood T E, Matthews D, Vandecar K, Lawrence D. Short-term variability in labile soil phosphorus is positively related to soil moisture in a humid tropical forest in Puerto Rico. *Biogeochemistry*, 2016, 127(1): 35-43.
- [6] 詹书侠, 陈伏生, 胡小飞, 甘露, 朱友林. 中亚热带丘陵红壤区森林演替典型阶段土壤氮磷有效性. *生态学报*, 2009, 29(9): 4673-4680.
- [7] 曾晓敏, 高金涛, 范悦新, 袁萍, 鲍勇, 高颖, 赵盼盼, 司友涛, 陈岳民, 杨玉盛. 森林转换后土壤因素影响中亚热带土壤磷的积累. *生态学报*, 2018, 38(13). (2018-03-16). <http://www.cnki.net/KCMS/detail/11.2031.Q.20180316.0907.034.html>.
- [8] 曾晓敏, 范跃新, 林开森, 袁萍, 赵盼盼, 陈怡然, 徐建国, 陈岳民. 亚热带不同植被类型土壤磷组分特征及其影响因素. *应用生态学报*, 2018, 29(7): 2156-2162.
- [9] 彭建勤, 林成芳, 洪慧滨, 林伟盛, 熊德成, 杨智榕, 杨玉盛. 中亚热带森林更新方式对土壤磷素的影响. *生态学报*, 2016, 36(24): 8015-8024.
- [10] Zhang X Y, Yang Y, Zhang C, Niu S L, Yang H, Yu G R, Wang H M, Blagodatskaya E, Kuzyakov Y, Tian D S, Tang Y Q, Liu S, Sun X M. Contrasting responses of phosphatase kinetic parameters to nitrogen and phosphorus additions in forest soils. *Functional Ecology*, 2018, 32(1): 106-116.
- [11] Vitousek P M, Howarth R W. Nitrogen limitation on land and in the sea: How can it occur? *Biogeochemistry*, 1991, 13(2): 87-115.
- [12] Elser J J, Bracken M E S, Cleland E E, Gruner D S, Harpole W S, Hillebrand H, Ngai J T, Seabloom E W, Shurin J B, Smith J E. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, 2007, 10(12): 1135-1142.
- [13] Braun S, Thomas V F D, Quiring R, Flückiger W. Does nitrogen deposition increase forest production? The role of phosphorus. *Environmental Pollution*, 2010, 158(6): 2043-2052.
- [14] Shaw A N, DeForest J L. The cycling of readily available phosphorus in response to elevated phosphate in acidic temperate deciduous forests. *Applied Soil Ecology*, 2013, 63(1): 88-93.
- [15] Fang X M, Zhang X L, Zong Y Y, Zhang Y, Wan S Z, Bu W S, Chen F S. Soil phosphorus functional fractions and tree tissue nutrient concentrations influenced by stand density in subtropical Chinese fir plantation forests. *PLoS One*, 2017, 12(10): e186905.
- [16] Imai N, Kitayama K, Titin J. Effects of logging on phosphorus pools in a tropical rainforest of Borneo. *Journal of Tropical Forest Science*, 2012, 24(1): 5-17.
- [17] 范静. 林分结构对杉木人工林土壤磷功能组分与营养器官氮磷化学计量比的影响[D].南昌: 江西农业大学, 2015.
- [18] 叶钰倩, 赵家豪, 刘畅, 关庆伟. 间伐对马尾松人工林根际土壤磷组分的影响. *生态学杂志*, 2018, 37(5): 1364-1370.
- [19] 欧江, 刘洋, 张健, 张捷, 崔宁洁, 邓长春, 纪托未, 和润莲. 长江上游马尾松人工林采伐林窗对土壤磷含量的初期影响. *生态学杂志*, 2014, 33(3): 592-601.
- [20] Hu B, Yang B, Pang X Y, Bao W K, Tian G L. Responses of soil phosphorus fractions to gap size in a reforested spruce forest. *Geoderma*, 2016, 279: 61-69.
- [21] Sayer E J. Using experimental manipulation to assess the roles of leaf litter in the functioning of forest ecosystems. *Biological Reviews*, 2006, 81(1): 1-31.
- [22] Sayer E J, Tanner E V J, Cheesman A W. Increased litterfall changes fine root distribution in a moist tropical forest. *Plant and Soil*, 2006, 281(1/2): 5-13.
- [23] Sayer E J, Tanner E V J, Lacey A L. Effects of litter manipulation on early-stage decomposition and meso-arthropod abundance in a tropical moist forest. *Forest Ecology and Management*, 2006, 229(1/3): 285-293.
- [24] Holmes K W, Chadwick O A, Kyriakidis P C, De Filho E P S, Soares J V, Roberts D A. Large-area spatially explicit estimates of tropical soil carbon stocks and response to land-cover change. *Global Biogeochemical Cycles*, 2006, 20(3): B3004.
- [25] Wang J J, Pisani O, Lin L H, Lun O O Y, Bowden R D, Lajtha K, Simpson A J, Simpson M J. Long-term litter manipulation alters soil organic matter turnover in a temperate deciduous forest. *Science of the Total Environment*, 2017, 607-608: 865-875.
- [26] Tanner E V J, Sheldrake M W A, Turner B L. Changes in soil carbon and nutrients following 6 years of litter removal and addition in a tropical semi-evergreen rain forest. *Biogeosciences*, 2016, 13(22): 6183-6190.
- [27] Rinnan R, Michelsen A, Jonasson S. Effects of litter addition and warming on soil carbon, nutrient pools and microbial communities in a subarctic heath ecosystem. *Applied Soil Ecology*, 2008, 39(3): 271-281.
- [28] 彭信浩, 韩海荣, 徐小芳, 蔡锰柯, 白英辰, 程小琴. 间伐和改变凋落物输入对华北落叶松人工林土壤呼吸的影响. *生态学报*, 2018, 38(15): 5351-5361.
- [29] 李晓杰, 刘小飞, 熊德成, 林伟盛, 林廷武, 施友文, 谢锦升, 杨玉盛. 中亚热带杉木人工林和米楮次生林凋落物添加与去除对土壤呼吸的影响. *植物生态学报*, 2016, 40(5): 447-457.

- [30] Wang Q K, He T X, Wang S L, Liu L. Carbon input manipulation affects soil respiration and microbial community composition in a subtropical coniferous forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 178-179(17): 152-160.
- [31] 吴君君. 人工针叶林生态系统凋落物输入调控对土壤有机碳动态和稳定性的影响[D]. 武汉: 中国科学院武汉植物园, 2017.
- [32] Huang W J, Spohn M. Effects of long-term litter manipulation on soil carbon, nitrogen, and phosphorus in a temperate deciduous forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 83: 12-18.
- [33] Schreeg L A, Mack M C, Turner B L. Leaf litter inputs decrease phosphate sorption in a strongly weathered tropical soil over two time scales. *Biogeochemistry*, 2013, 113(1/3): 507-524.
- [34] Vincent A G, Turner B L, Tanner E V J. Soil organic phosphorus dynamics following perturbation of litter cycling in a tropical moist forest. *European Journal of Soil Science*, 2010, 61(1): 48-57.
- [35] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [36] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 贺纪正, 肖和艾. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 土壤环境科学实验室, 2006.
- [37] Schneider K, Turrión M B, Gallardo J F. Modified method for measuring acid phosphatase activities in forest soils with high organic matter content. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2000, 31(19/20): 3077-3088.
- [38] Tiessen H, Moir J O. Characterization of available P by sequential extraction. *Soil Sampling and Methods of Analysis*, 1993, 824: 75-87.
- [39] 马芳芳, 贾翔, 赵卫, 周旺明, 周莉, 于大炮, 吴志军, 代力民. 间伐强度对辽东落叶松人工林土壤理化性质的影响. *生态学杂志*, 2017, 36(4): 971-977.
- [40] Selig M F, Seiler J R, Tyree M C. Soil carbon and CO₂ efflux as influenced by the thinning of loblolly pine (*Pinustaeda* L.) plantations on the Piedmont of Virginia. *Forest Science*, 2008, 54(1): 58-66.
- [41] Vesterdal L, Dalsgaard M, Felby C, Raulund-Rasmussen K, Jørgensen B B. Effects of thinning and soil properties on accumulation of carbon, nitrogen and phosphorus in the forest floor of Norway spruce stands. *Forest Ecology and Management*, 1995, 77(1/3): 1-10.
- [42] Jurgensen M, Tarpey R, Pickens J, Kolka R, Palik B. Long-term effect of silvicultural thinnings on soil carbon and nitrogen pools. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76(4): 1418-1425.
- [43] 陈立新, 姜一, 步凡, 段文标, 马海娟. 有机酸对温带典型森林土壤有机磷含量与矿化的影响. *北京林业大学学报*, 2014, 36(3): 75-82.
- [44] Xu S, Liu L, Sayer E J. Variability of above-ground litter inputs alters soil physicochemical and biological processes: a meta-analysis of litterfall-manipulation experiments. *Biogeosciences*, 2013, 10(11): 7423-7433.
- [45] Dieter D, Elsenbeer H, Turner B L. Phosphorus fractionation in lowland tropical rainforest soils in central Panama. *CATENA*, 2010, 82(2): 118-125.
- [46] 张彦东, 白尚斌, 刘雪峰, 王政权. 磷胁迫条件下落叶松幼苗对难溶性磷的利用. *应用生态学报*, 2000, 11(5): 668-670.
- [47] 张彦东, 白尚斌, 王政权, 王庆成. 落叶松根际土壤磷的有效性研究. *应用生态学报*, 2001, 12(1): 31-34.
- [48] Vincent A G, Turner B L, Tanner E V J. Soil organic phosphorus dynamics following perturbation of litter cycling in a tropical moist forest. *European Journal of Soil Science*, 2010, 61(1): 48-57.
- [49] Spohn M, Kuzyakov Y. Phosphorus mineralization can be driven by microbial need for carbon. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 61(6): 69-75.
- [50] 陈立新, 乔璐, 段文标, 黄兰英, 马海娟. 温带森林磷沉降-水系统输出-迁移动态特征及对土壤磷影响. *土壤学报*, 2012, 49(3): 454-464.
- [51] Turner B L, Lambers H, Condron L M, Cramer M D, Leake J R, Richardson A E, Smith S E. Soil microbial biomass and the fate of phosphorus during long-term ecosystem development. *Plant and Soil*, 2013, 367(1/2): 225-234.
- [52] Hofmann K, Heuck C, Spohn M. Phosphorus resorption by young beech trees and soil phosphatase activity as dependent on phosphorus availability. *Oecologia*, 2016, 181(2): 369-379.
- [53] Bünemann E K, Augstburger S, Frossard E. Dominance of either physicochemical or biological phosphorus cycling processes in temperate forest soils of contrasting phosphate availability. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 101: 85-95.
- [54] 陈立新, 杨承栋. 落叶松人工林土壤磷形态、磷酸酶活性演变与林木生长关系的研究. *林业科学*, 2004, 40(3): 12-18.
- [55] Chen L X, Zhang C, Duan W B. Temporal variations in phosphorus fractions and phosphatase activities in rhizosphere and bulk soil during the development of *Larixolgensis* plantations. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2016, 179(1): 67-77.
- [56] 陈立新. 落叶松人工林土壤质量变化规律与调控措施的研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2003.