

DOI: 10.5846/stxb202001060050

闵惠琳, 陈琳, 刘世荣, 曾冀, 李华, 郑路. 亚热带马尾松人工林土壤氮矿化对减雨的反应. 生态学报, 2021, 41(13): 5289-5299.

Min H L, Chen L, Liu S R, Zeng J, Li H, Zheng L. Responses of soil nitrogen mineralization to throughfall reduction in a *Pinus massoniana* plantation in southern China. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(13): 5289-5299.

亚热带马尾松人工林土壤氮矿化对减雨的反应

闵惠琳^{1,2}, 陈琳^{1,2,*}, 刘世荣³, 曾冀¹, 李华^{1,2}, 郑路^{1,2}

1 中国林业科学研究院热带林业实验中心, 凭祥 532600

2 广西友谊关森林生态系统国家定位观测研究站, 凭祥 532600

3 中国林业科学研究院, 北京 100091

摘要:为预测降水变化对人工林生态系统土壤氮矿化过程的影响,以亚热带马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)人工林为研究对象,采用PVC顶盖埋管法,研究穿透雨减少50%和不减雨(对照)下土壤氮矿化特征。铵态氮是亚热带马尾松人工林无机氮存在的主要形态,土壤氮矿化以氨化作用为主。穿透雨减少显著降低了土壤净硝化速率、土壤含水量、pH、可溶性有机碳含量、过氧化物酶及丛枝菌根真菌饱和脂肪酸,而显著增加了土壤净氨化速率、硝态氮、N-乙酰-葡萄糖苷酶和蛋白酶,但是影响程度因季节和土层而异。土壤净氨化速率与N-乙酰-葡萄糖苷酶呈极显著负相关,土壤含水量是对土壤净硝化速率影响力最大的变量, β -葡萄糖苷酶、真菌饱和脂肪酸及细菌真菌饱和脂肪酸比的影响次之。表明短期降水减少显著改变了马尾松人工林的土壤理化性质、净氨化和硝化速率,这可能会进一步影响其树木生长和养分吸收。

关键词:穿透雨减少;马尾松;土壤氮矿化;土壤酶活性;土壤微生物

Responses of soil nitrogen mineralization to throughfall reduction in a *Pinus massoniana* plantation in southern China

MIN Huilin^{1,2}, CHEN Lin^{1,2,*}, LIU Shirong³, ZENG Ji¹, LI Hua^{1,2}, ZHENG Lu^{1,2}

1 Experimental Center of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Pingxiang 532600, China

2 Youyiguan Forest Ecosystem Research Station, Pingxiang 532600, China

3 Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

Abstract: To better predict responses of soil nitrogen mineralization to the changes of precipitation variations in plantation ecosystem, a throughfall reduction experiment including 50% of throughfall and natural rainfall (control) treatments was conducted in *Pinus massoniana* plantation in southern subtropical China. Soil nitrogen mineralization rates were measured by closed-top tube incubation method. The soil nitrogen mineralization of *Pinus massoniana* plantation was dominated by ammonification. The throughfall reduction treatment significantly decreased soil net nitrification rate, soil water content, pH, soluble organic carbon, peroxidase and AMF PLFAs. Conversely, the throughfall reduction treatment significantly increased soil net ammonification rate, NO_3^- -N, N-acetyl-glucosidase and leucine-amino-peptidase, which varied with different seasons and the soil layers. Soil net ammonification rate was significantly negatively correlated with N-acetylglucosaminidase. The variable that had the greatest influence on the soil net nitrification rate was the soil water content, followed by β -glucosidase, fungal PLFAs and Bacteria/Fungi ratio. The results indicated that the short-term experimental throughfall reduction significantly altered soil physicochemical properties, soil net ammonification rate and soil

基金项目:国家自然科学基金面上项目(31971655);中国林业科学研究院中央级公益性科研院所基金科研业务费专项资金项目(CAFYBB2017QA026)

收稿日期:2020-01-06; 修订日期:2021-04-06

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: daqiqiu@163.com

net nitrification rate, which could further affect the tree growth and nutrient uptake of *Pinus massoniana* plantation.

Key Words: throughfall reduction; *Pinus massoniana*; soil nitrogen mineralization; soil enzyme activity; soil microbe

氮素的有效性是限制森林生产力的主要因素之一。有机氮为土壤氮素的主要存在形式,有机氮通过微生物的矿化作用转化为无机态氮,进而被植被吸收利用^[1],因此土壤氮矿化是森林生态系统氮素循环的一个重要过程^[2]。在全球气候变化下,全球和区域降水格局发生明显改变,如中高纬度地区降雨量明显增加,而亚热带和低纬度地区降雨量减少 30% 以上,同时降雨量和降雨强度的季节规律也发生变化^[3]。全球降水格局的变化将通过影响土壤的理化性质、微生物和酶活性等影响土壤氮矿化过程,从而影响森林生态系统生物多样性及生产力^[4],因此研究土壤氮矿化对降水变化的响应机制具有重要意义。

土壤氮矿化速率对土壤氮素有效性起决定性作用,是反映陆地生态系统植物生长及其健康状况的关键指标^[5]。土壤氮矿化速率受土壤微生物群落组成和活性、土壤温湿度、土壤通透性、有机氮含量等多种因素的影响^[6-9]。降水通过改变土壤通气条件和水分渗透性,对土壤酶活性、微生物以及凋落物分解产生影响,进而对土壤氮转化过程有重要的调控作用^[10]。以往关于降水变化对森林土壤氮矿化的影响研究多是采用室内培养比较不同土壤水分状况对土壤氮矿化的影响,而野外降水模拟研究较缺乏,由于不同研究的降水处理、群落和土壤类型等不同,降水变化对土壤氮矿化作用的影响机制复杂且存在地区差异^[11-16],因此有必要对不同气候区和森林类型进行深入研究。

马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.) 适应性强、耐干旱与瘠薄,是我国覆盖面积最大的针叶树种^[17],也是我国热带和亚热带地区重要的乡土树种。目前,马尾松人工林土壤氮矿化的研究,一方面是关注其动态变化特征^[18-19],二是控制实验条件对土壤氮矿化的影响,如凋落物的去除、添加和去除根系^[18,20-22],然而南亚热带马尾松土壤氮矿化对降水变化的响应机制尚不清楚。因此,本研究以南亚热带马尾松人工林为对象,采用 PVC 顶盖埋管法,开展模拟穿透雨减少 50% 控制实验,探讨马尾松人工林土壤氮矿化对降水减少的响应规律及其影响因素,为预测土壤氮素矿化对降水变化的响应提供参考依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验地位于中国林业科学研究院广西友谊关森林生态系统国家定位观测研究站热带林业实验中心伏波实验场(106°52'32"E, 22°01'58"N),属南亚热带季风气候,干雨季节明显,年降雨量 1361 mm,主要集中于 5—10 月,试验区近 50 年来,年均降雨量总体上呈下降趋势(图 1),年均温 20.5—21.7℃,极端高温 40.3℃,极端低温 -1.5℃,地貌以低山丘陵为主,海拔 400—650 m,土壤主要是花岗岩风化形成的红壤,土壤厚度大于 100 cm。试验林为 1983 年种植在杉木采伐迹地上的新造马尾松林地,面积 6.3 hm²,海拔 550 m^[23]。

马尾松林分生长状况见表 1,林下主要物种有大叶栎(*Quercus griffithii* Hook. f. et Thoms ex Miq.)、杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)、火力楠(*Michelia macclurei* Dandy)、柏拉木(*Blastus cavaleriei* Lour.)、越南悬钩子(*Rubus cochinchinensis* Tratt.)、酸藤子(*Embelia laeta* (L.) Mez)、乌毛蕨(*Blechnum orientale* L.)、小花露籽草(*Ottochloa nodosa* var. *micrantha* (Balansa) Keng f.)、金毛狗(*Cibotium barometz* (L.) J. Sm.)、五节芒(*Miscanthus floridulus* (Lab.) Warb. ex Schum. et Laut.)等。

1.2 试验设计和取样测定

2017 年 6 月—2018 年 5 月,在立地条件相对均一的条件下,于马尾松人工林林冠下布设 6 个 20 m × 20 m 样地,进行减少 50% 穿透雨和不减雨(对照)模拟试验。根据该区域近 50 年来年均降雨量呈减少的变化趋势(图 1)及全球干旱模拟控制实验大多数采用的 50% 截雨比例,本研究设置了减少 50% 穿透雨处理^[24],减雨样地具体布设参见陈琳等的方法^[23]。

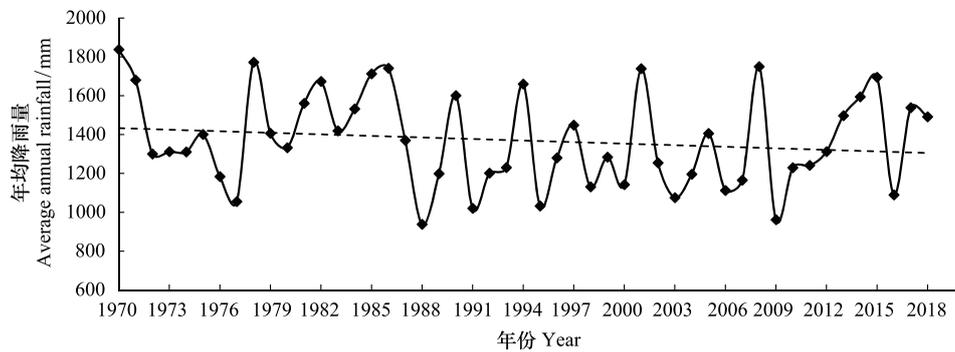


图 1 研究区域 1970—2018 年年均降雨量变化

Fig.1 The change of average annual rainfall during the year between 1970 and 2018 in the study area

表 1 马尾松人工林林分特征

Table 1 Stand characteristics of a *Pinus massoniana* plantation

处理 Treatment	林分密度 Stem density/ hm ²	平均胸径 Mean DBH/cm	平均树高 Mean height/m	胸高断面积 Basal area/ (m ² /hm ²)	坡向 Slope direction	坡度 Slope degree/(°)
马尾松对照 PMC Control of <i>P. massoniana</i>	242±38a	31.8±0.9a	20.0±0.4a	20.5±1.2a	偏西	18
马尾松减雨 PMT Treatment of <i>P. massoniana</i>	292±29a	30.8±1.1a	17.7±0.3b	23.3±1.2a	偏西	18

同一行不同字母表示同一林分处理间差异显著 ($P < 0.05$); DBH: Diameter breast height

采用 PVC 顶盖埋管法原位测定土壤净氮矿化速率^[25], 于 2017 年 6 月 26 日—2017 年 7 月 31 日、2017 年 9 月 29 日—2017 年 10 月 26 日、2017 年 12 月 25 日—2018 年 1 月 23 日、2018 年 3 月 30 日—2018 年 5 月 2 日, 分 4 个周期培养。

土壤含水量 (SWC) 用烘干法测定, 土壤 pH 值用电导法测定, 土壤全氮 (TN) 用凯氏定氮法测定, 土壤有机碳 (SOC) 用酸性重铬酸钾氧化法测定, 土壤铵态氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝态氮 ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) 使用流动注射分析仪进行测定, 土壤可溶性有机碳 (DOC) 使用 TOC 分析仪测定, 土壤微生物量碳 (MBC) 和氮 (MBN) 用氯仿熏蒸法测定^[26], 土壤微生物群落结构用磷脂脂肪酸法 (PLFAs) 测定^[27]。

1.3 数据处理

土壤净氮矿化速率 (NMR) 为净氨化速率 (NAR) 和净硝化速率 (NNR) 之和^[28], 计算公式如下:

$$\text{土壤净氮矿化速率} = (\text{培养后的 } \text{NO}_3^-\text{-N} + \text{NH}_4^+\text{-N}) - (\text{土壤初始 } \text{NO}_3^-\text{-N} + \text{NH}_4^+\text{-N}) / \text{培养天数 } 30 \text{ d} \quad (1)$$

$$\text{土壤净硝化速率} = (\text{培养后的 } \text{NO}_3^-\text{-N} - \text{土壤初始 } \text{NO}_3^-\text{-N}) / \text{培养天数 } 30 \text{ d} \quad (2)$$

$$\text{土壤净氨化速率} = (\text{培养后的 } \text{NH}_4^+\text{-N} - \text{土壤初始 } \text{NH}_4^+\text{-N}) / \text{培养天数 } 30 \text{ d} \quad (3)$$

利用 SPSS 17.0 软件进行单因素方差分析, 采用 Pearson 分析土壤理化性质、土壤微生物量和群落组成与土壤氮矿化速率之间的相关性。在相关性分析的基础上, 选择相关性显著的指标, 进一步对土壤氮矿化速率与其他指标进行主成分回归分析, 揭示影响土壤矿化速率的关键因子。主成分回归分析之前, 先进行 KMO 检验, 当满足 $\text{KMO} > 0.5$, $P < 0.05$ 条件时进行主成分回归, 因此本文仅对土壤净硝化速率与各指标进行主成分回归分析。

2 结果与分析

2.1 马尾松人工林土壤理化性质对减雨的响应

由图 2 所示, 马尾松人工林减雨处理与对照样地的土壤含水量、铵态氮和硝态氮浓度变化规律基本一致, 均表现出雨季 (2017 年 6 月—10 月) 大于旱季 (2018 年 1 月—5 月)。土壤铵态氮是马尾松无机氮存在的主

要形态,铵态氮浓度为硝态氮浓度的 2.5—8.2 倍。与对照相比,减雨导致 0—10 cm 和 10—20 cm 土层含水量分别减少了 19.8%和 10.6% ($P<0.05$),而 2018 年 3 月 30 日 10—20 cm 土层硝态氮浓度显著增加了 29% ($P<0.05$)。但是,不同处理之间两个土层的铵态氮浓度均差异不显著 ($P>0.05$)。

减雨处理对马尾松人工林土壤理化性质和土壤酶的影响程度因季节和土壤深度的不同而不同(表 2),旱季,减雨导致 0—10、10—20 cm 土层可溶性有机碳均显著降低 ($P<0.05$),分别减少了 59.94%和 37.78%,而对土壤酶活性无显著影响 ($P>0.05$)。雨季,减雨导致 10—20 cm 土层 pH、0—10 cm 土层过氧化物酶和 10—20 cm 土层蛋白酶活性显著降低 ($P<0.05$),而 0—10 cm 蛋白酶和 10—20 cm 土层 N-乙酰-葡萄糖苷酶活性显著升高 ($P<0.05$)。从土层深度来看,除了 pH 和可溶性有机氮随着土层的加深而升高之外,其余指标均随着土层深度的加深而降低。从季节来看,pH 和可溶性有机碳均为旱季>雨季 ($P<0.05$),蛋白酶和过氧化物酶表现出旱季<雨季的规律 ($P<0.05$)。

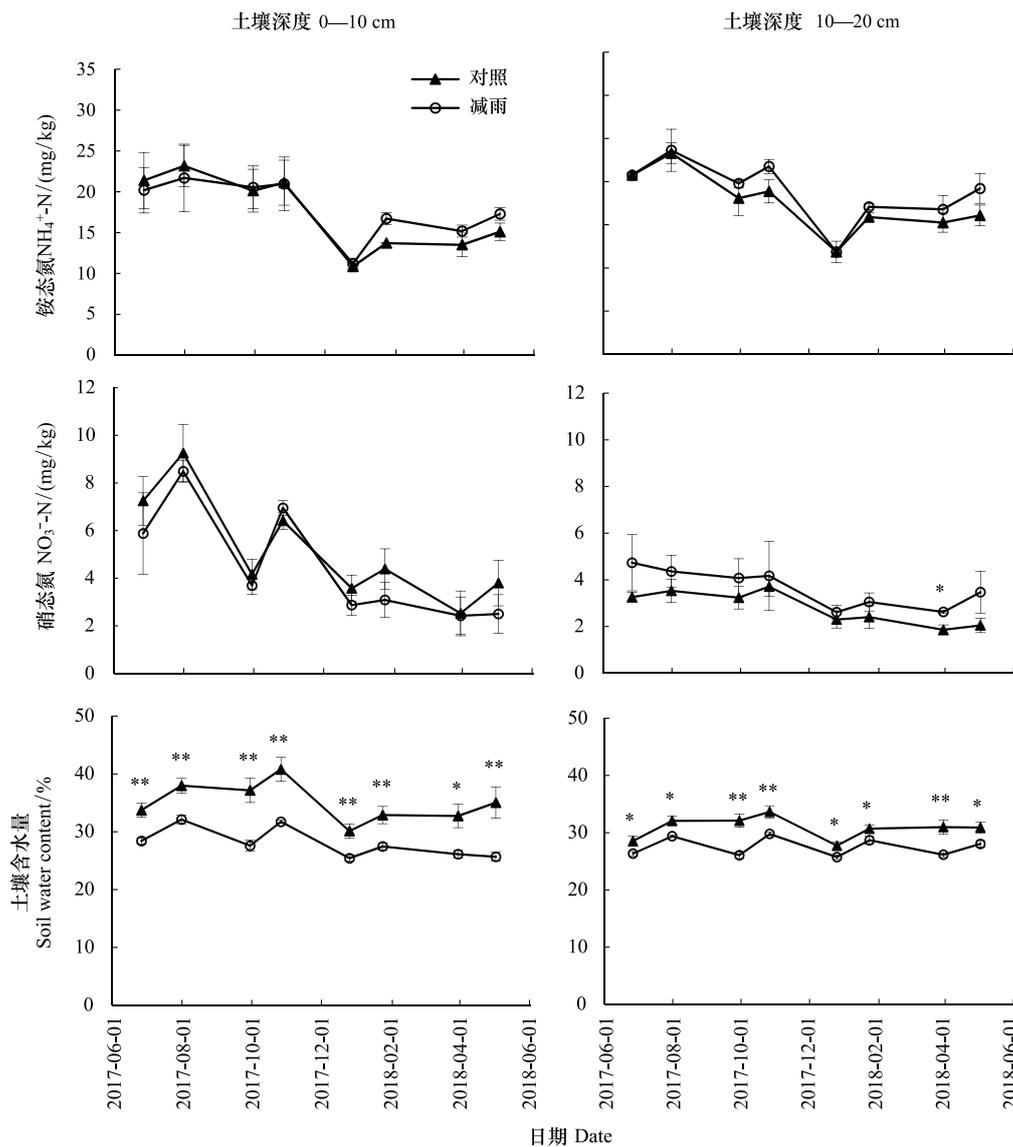


图 2 马尾松人工林铵态氮、硝态氮和土壤含水量对穿透雨减少的响应

Fig. 2 Responses of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ concentration and soil water content to throughfall reduction in *P. massoniana* plantation

表 2 马尾松人工林土壤理化性质对穿透雨减少的响应

Table 2 Response of soil physicochemical properties to throughfall reduction in *P. massoniana* plantation

季节 Season	指标 Parameter	土壤深度 0—10 cm		土壤深度 10—20 cm	
		马尾松对照 PMC	马尾松减雨 PMT	马尾松对照 PMC	马尾松减雨 PMT
雨季 Wet season	pH	4.10±0.03aB	4.07±0.03aB	4.21±0.00aB	4.13±0.02bB
	SOC/(g/kg)	33.01±1.03aA	34.89±4.08aA	19.44±0.54aB	20.88±1.11aA
	TN/(g/kg)	2.23±0.08aA	2.18±0.13aA	1.44±0.01aB	1.41±0.08aA
	C/N ratio	14.92±1.03aA	15.91±1.05aA	13.53±0.25aA	14.98±1.37aA
	DOC/(mg/kg)	741.28±48.52aB	650.43±53.94aB	635.46±6.58aB	519.45±140.32aA
	DON/(mg/kg)	34.49±1.87aA	34.15±5.06aA	48.34±1.87aA	46.59±2.73aA
	NAG/(nmol g ⁻¹ h ⁻¹)	1297.60±107.17aA	1210.77±71.74aA	282.23±15.62bA	391.09±28.88aA
	LAP/(nmol g ⁻¹ h ⁻¹)	1592.30±36.31bA	1814.46±7.11aA	1651.14±31.06aA	1379.05±61.01bA
	βG/(nmol g ⁻¹ h ⁻¹)	1188.40±26.48aA	1027.85±64.1aA	400.43±28.31aA	506.11±44.87aA
	POX/(nmol g ⁻¹ h ⁻¹)	54.28±2.33aA	62.81±16.75aA	46.08±5.78aA	47.99±6.43aA
	PER/(nmol g ⁻¹ h ⁻¹)	780.37±13.57aA	520.96±27.43bA	281.27±14aA	285.38±26.34aA
旱季 Dry season	pH	4.66±0.08aA	4.68±0.10aA	4.85±0.03aA	4.80±0.04aA
	SOC/(g/kg)	39.54±3.42aA	39.50±7.85aA	22.13±0.64aA	23.57±2.04aA
	TN/(g/kg)	2.48±0.14aA	2.40±0.24aA	1.59±0.03aA	1.61±0.10aA
	C/N ratio	15.93±0.66aA	16.15±1.61aA	13.98±0.26aA	14.66±1.07aA
	DOC/(mg/kg)	2541.40±201.16aA	1007.20±40.15bA	1528.30±88.90aA	950.97±143.30bA
	DON/(mg/kg)	27.58±2.34aA	23.15±2.60aA	33.88±2.90aB	27.31±2.00aB
	NAG/(nmol g ⁻¹ h ⁻¹)	580.77±82.17aA	529.30±98.54aA	294.45±52.44aA	291.21±33.65aA
	LAP/(nmol g ⁻¹ h ⁻¹)	975.73±30.42aB	886.2±144.03aB	703.23±42.29aB	724.16±68.32aB
	βG/(nmol g ⁻¹ h ⁻¹)	548.93±92.74aB	461.79±50.74aA	283.04±31.91aA	315.81±82.87aA
	POX/(nmol g ⁻¹ h ⁻¹)	34.4±1.47aB	30.02±2.38aA	27.96±1.01aB	25.80±3.78aB
	PER/(nmol g ⁻¹ h ⁻¹)	221.91±23.94aB	198.79±28.55aB	109.36±7.96aB	125.52±20.92aB

SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon; TN: 全氮 Total nitrogen; C/N: 碳/氮比值 C/N ratio; DOC: 可溶性有机碳 Soluble organic carbon; DON: 可溶性有机氮 Soluble organic nitrogen; NAG: N-乙酰-葡萄糖苷酶 N-acetyl-glucosidase; LAP: 蛋白酶 Leucine-amino-peptidase; βG: β-葡萄糖苷酶 β-glucosidase; POX: 酚氧化酶 Phenoloxidase; PER: 过氧化物酶 Peroxidase; 相同土层和季节, 不同小写字母表示处理之间差异显著 ($P < 0.05$); 相同土层和处理, 不同大写字母表示季节之间差异显著 ($P < 0.05$)

2.2 马尾松人工林土壤微生物量和群落组成及其对减雨的响应

从表 3 可以看出减雨处理、土层和季节对土壤微生物量有不同程度的影响。减雨导致雨季 0—10 cm 土层微生物量碳氮比显著减少了 45.85% ($P < 0.05$)。在减雨处理下, 雨季除真菌饱和脂肪酸之外, 其余指标均有不同程度的降低; 旱季细菌饱和脂肪酸和丛枝菌根真菌饱和脂肪酸也随着减雨处理而降低。减雨导致旱季 10—20 cm 土层丛枝菌根真菌饱和脂肪酸显著减少了 26.83% ($P < 0.05$)。真菌饱和脂肪酸和丛枝菌根真菌饱和脂肪酸均随着土层深度的加深而降低, 细菌和真菌饱和脂肪酸均随着土层深度的加深而升高。

2.3 马尾松人工林土壤氮矿化速率对减雨的响应

马尾松人工林的土壤氮矿化以土壤氨化作用为主 (图 3)。减雨处理与对照两个土层的土壤净氮矿化速率均差异不显著 ($P > 0.05$), 而穿透雨减少导致 2017 年 12 月—2018 年 1 月 0—10 cm 土层净氨化速率显著增加 ($P < 0.05$), 使 2018 年 3—5 月 0—10 cm 土层净硝化速率显著减少 ($P < 0.05$)。

2.4 土壤净氮矿化速率与土壤理化性质、土壤微生物量和群落饱和脂肪酸的关系

如表 4 所示, 土壤净氨化速率与 N-乙酰-葡萄糖苷酶存在极显著负相关关系 ($P < 0.01$), 土壤净硝化速率与土壤含水量、硝态氮、铵态氮、N-乙酰-葡萄糖苷酶、β-葡萄糖苷酶、酚氧化酶、过氧化物酶、细菌、真菌饱和脂肪酸及细菌真菌饱和脂肪酸比均存在显著相关关系 ($P < 0.05$), 土壤净氮矿化速率与理化性质、微生物量和群落饱和脂肪酸均无显著相关关系 ($P > 0.05$)。

表 3 马尾松人工林土壤微生物量和群落组成对穿透雨减少的响应

Table 3 Responses of soil microbial biomass and community PLFAs to throughfall reduction in *P. massoniana* plantation

季节 Season	指标 Parameter	0—10 cm		10—20 cm	
		马尾松对照 PMC	马尾松处理 PMT	马尾松对照 PMC	马尾松处理 PMT
雨季 Wet season	MBC/(mg/kg)	173.10±40.51aA	80.36±10.77aA	148.96±75.01aA	74.73±19.21aA
	MBN/(mg/kg)	57.42±13.22aA	51.23±11.82aA	29.68±8.24aA	27.8±15.90aA
	MBC/MBN ratio	3.01±0.01aB	1.63±0.14bA	5.89±0.37aA	4.46±3.63aA
	Bacterial PLFAs/(mol %)	57.16±1.49aA	54.69±1.64aA	58.96±0.42aA	58.29±0.65aA
	Fungal PLFAs/(mol %)	12.11±0.70aA	13.20±1.30aA	9.50±0.37aA	9.74±0.70aA
	Bacteria/Fungi ratio	4.77±0.41aA	4.24±0.52aA	6.22±0.23aA	6.06±0.51aA
	AMF PLFAs/(mol %)	1.63±0.14aA	1.36±0.03aA	1.51±0.06aA	1.18±0.02aA
旱季 Dry season	MBC/(mg/kg)	162.90±41.41aA	191.16±65.43aA	162.20±90.22aA	146.91±29.11aA
	MBN/(mg/kg)	9.03±1.76aB	11.46±6.48aA	16.20±0.92aA	20.29±7.11aA
	MBC/MBN ratio	17.66±1.35aA	18.07±9.83aA	10.74±6.40aA	12.70±8.25aA
	Bacterial PLFAs/(mol %)	58.47±0.36aA	57.56±1.07aA	59.60±1.28aA	55.97±0.69aA
	Fungal PLFAs/(mol %)	11.85±0.31aA	11.96±0.53aA	10.19±0.48aA	9.47±0.16aA
	Bacteria/Fungi ratio	4.94±0.15aA	4.84±0.31aA	5.89±0.40aA	5.92±0.15aA
	AMF PLFAs/(mol %)	1.96±0.09aA	1.59±0.10aA	1.64±0.08aA	1.20±0.01bA

MBC: 微生物量碳 Microbial biomass carbon; MBN: 微生物量氮 Microbial biomass nitrogen; MBC/MBN: 微生物量碳/氮比 Microbial biomass C/N; Bacterial PLFAs: 细菌饱和脂肪酸; Fungal PLFAs: 真菌饱和脂肪酸; Bacteria/Fungi ratio: 细菌和真菌饱和脂肪酸比; AMF PLFAs: 丛枝菌根真菌饱和脂肪酸; 相同土层和季节, 不同小写字母表示处理之间差异显著 ($P < 0.05$), 相同土层和处理, 不同大写字母表示季节之间差异显著 ($P < 0.05$)

表 4 马尾松人工林土壤氮矿化与理化性质、微生物量和群落结构的相关关系

Table 4 Correlation coefficients of soil net mineralization on soil properties, microbial biomass and community composition in *P. massoniana* plantation

指标 Parameter	净氨化速率 NAR	净硝化速率 NNR	净氮矿化速率 NMR
pH	0.413	-0.283	0.285
土壤含水量 Soil water content	-0.099	0.377 **	0.051
铵态氮 NH_4^+ -N	-0.207	0.349 *	-0.045
硝态氮 NO_3^- -N	-0.024	0.457 **	0.162
土壤有机碳 Soil organic carbon	-0.060	0.382	0.080
总氮 Total nitrogen	0.019	0.408	0.165
碳/氮比 C/N ratio	-0.205	0.305	-0.087
可溶性有机碳 Soluble organic carbon	0.108	-0.039	0.076
可溶性有机氮 Soluble organic nitrogen	-0.402	-0.062	-0.404
微生物量碳 Microbial biomass carbon	0.164	-0.053	0.131
微生物量氮 Microbial biomass nitrogen	0.052	0.258	0.174
微生物量碳/氮比 Microbial biomass C/N	0.130	-0.250	0.007
N-乙酰-葡萄糖苷酶 N-acetyl-glucosidase	-0.488 **	0.663 **	-0.233
蛋白酶 Leucine-amino-peptidase	-0.395	0.188	-0.343
β -葡萄糖苷酶 β -glucosidase	-0.361	0.513 *	-0.156
酚氧化酶 Phenoloxidase	-0.249	0.475 *	-0.057
过氧化物酶 Peroxidase	-0.25	0.733 **	0.031
细菌饱和脂肪酸 Bacterial PLFAs	0.192	-0.570 **	-0.027
真菌饱和脂肪酸 Fungal PLFAs	-0.220	0.714 **	0.049
细菌/真菌饱和脂肪酸比 Bacteria/Fungi ratio	0.265	-0.694 **	0.003
丛枝菌根真菌饱和脂肪酸 AMF PLFAs	0.213	0.206	0.265

* 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上的显著差异; NAR: Net ammonification rate; NNR: Net nitrification rate; NMR: Net mineralization rate

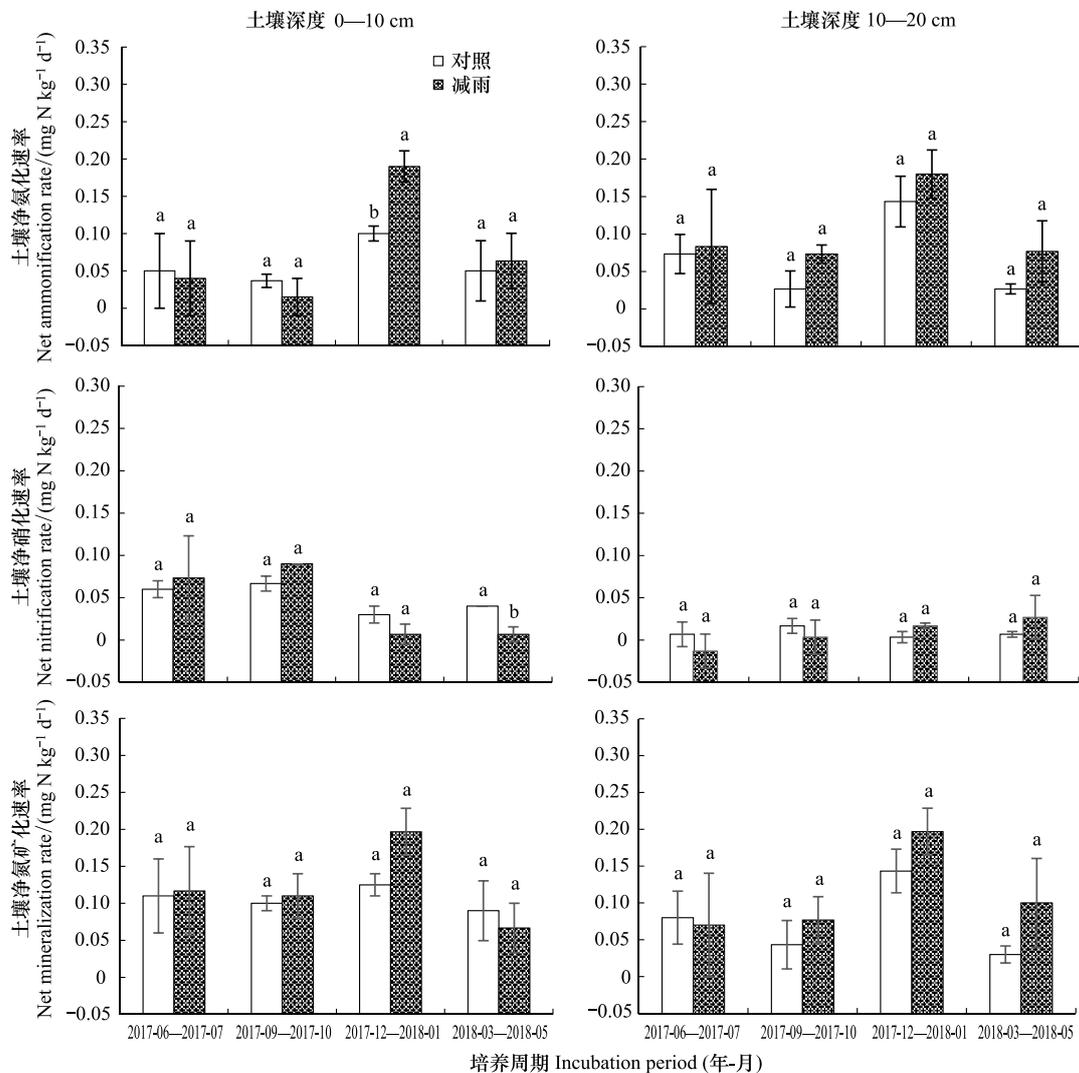


图3 马尾松人工林土壤净氨化、净硝化和净氮矿化速率对穿透雨减少响应

Fig.3 Responses of net ammonification rate (NAR), net nitrification rate (NNR) and net mineralization rate (NMR) to throughfall reduction

相同培养周期和土壤深度,不同小写字母表示处理和对照之间差异显著 ($P < 0.05$)

为了进一步比较各指标对土壤净氮转化速率的影响程度,从表4中选择具有显著相关性的指标进行主成分回归分析。与土壤净硝化速率显著相关的指标均入选回归方程,土壤净硝化速率与各指标的主成分回归分析方程为: $y = -0.015 + 0.005X_1 + 0.006X_2 + 0.001X_3 + 0.005X_4 - 0.002X_5 + 0.006X_6 - 0.006X_7 - 0.001X_8 + 0.005X_9 + 0.007X_{10}$ ($R^2 = 0.653, P < 0.01$)。各变量对土壤净硝化速率的影响程度排序依此为: $X_{10} > X_2 > X_7 > X_6 > X_9 > X_1 > X_4 > X_5 > X_3 > X_8$,说明土壤含水量的影响程度最大, β -葡萄糖苷酶、细菌真菌饱和脂肪酸比及真菌饱和脂肪酸的影响次之。

3 讨论

3.1 减雨对土壤氮矿化速率和土壤理化性质的影响

南亚热带马尾松人工林土壤氮矿化过程以氨化过程为主,这与土壤酸碱性密切相关^[29],马尾松人工林土壤 pH 在 4.02—4.88 之间,为酸性土壤,不利于发生硝化过程,该结果与肖好燕^[30]、葛晓敏^[31]等在其他地区的研究结果一致。降水改变直接影响土壤的水分状况和土壤物理生物化学过程,从而对土壤氮矿化过程产生影

响^[32,12]。本研究中,穿透雨减少导致 2018 年 3 月 30 日 10—20 cm 土层硝态氮浓度显著增加了 29% ($P < 0.05$),倪梦颖等^[33]隔离 50%降雨也得到硝态氮浓度在旱季突增,这可能与旱季偶发的强降雨有关。穿透雨减少对马尾松人工林土壤铵态氮、总氮和土壤净氮矿化速率的影响均不显著,这可能是由于大气中的水蒸气进入土壤中刺激耐旱微生物过程,使得土壤含水量的减少不足以影响土壤氮的供应^[34]。这在 Homyak 等^[35]的研究中得到证实,他发现降水减少并未导致土壤中矿质氮减少,并且在土壤含水量较低时,积极地微生物量氮处理过程仍在进行。总体上,穿透雨减少对土壤 pH 值的影响并不大,仅导致雨季 10—20 cm 土层 pH 显著降低 ($P < 0.05$),从 4.21 下降到 4.13;而季节对土壤 pH 影响更为明显,表现为旱季 pH (4.75) 显著大于雨季 (4.13),雨季 pH 较低可能与增温等其他因素有关,温度升高后,土壤盐溶液的浓度、CO₂ 和交换性阳离子会发生改变,进而影响土壤的 pH^[36-37]。

穿透雨减少导致马尾松人工林土壤净氮化速率在 2017 年 12 月—2018 年 1 月出现短暂升高的现象,这可能是雨季累积的铵态氮再利用的结果,此现象通常出现在旱季的初期^[38]。降水改变影响土壤湿度、土壤水分渗透性,影响硝化和反硝化细菌,进而影响土壤净硝化速率,同时受到季节性的影响^[39]。旱季,穿透雨减少导致马尾松人工林 0—10 cm 土层净硝化速率显著减少 ($P < 0.05$),这与 Chen 等^[12]减少旱季降水得到的结论一致,但是与任艳林等^[11]减雨 30%得到土壤净硝化速率增加的结论不一致,一方面,由于 3—5 月土壤含水量和土壤中铵态氮含量均处于较低水平(图 2),较低可矿化底物数量和氧气浓度抑制了硝化作用^[40]。另一方面,土壤水分减少导致硝化细菌活性受到抑制^[41]。雨季,穿透雨减少对马尾松人工林土壤净氮化速率、净硝化速率均无显著影响,这可能是由于微生物长期处于亚热带湿热环境中,对温度和湿度的敏感性有所降低,也可能与马尾松耐旱性强有关。Chen 等^[13]也研究发现穿透雨减少对红椎人工林土壤净硝化速率有显著影响,但是因季节和土层的差异而不同。

3.2 减雨对土壤氮矿化速率和微生物量和群落组成的影响

土壤微生物是有机质分解的主要贡献者之一,对土壤氮矿化过程具有重要的调控作用,在森林生态系统养分循环中扮演着重要的角色^[42]。微生物对湿度的变化很敏感,通常微生物活性随着土壤干燥而降低^[43]。Ren 等^[44]研究表明在年降水量大于 600 mm 的地区,降水减少引起微生物生物量显著降低。Homyak 等^[35]发现在热带当降水减少很小一部分时,微生物生物量增加,而当降水减少接近 100%时,微生物生物量显著减少。本研究中,减雨处理减少了土壤微生物生物量碳、氮的含量和碳氮比,这与向元彬等^[32]研究华西雨屏区常绿阔叶林得到的结果一致,可能由于降水改变使得微生物的繁殖速度、活性及微生物对底物的利用等受到抑制,从而使得土壤微生物量碳、氮含量降低。已有研究表明降水量变化显著影响土壤微生物群落组成^[45-46],或者对其无影响^[47-49],本研究中,穿透雨减少导致马尾松人工林旱季 10—20 cm 土层丛枝菌根真菌饱和脂肪酸显著减少 26.83% ($P < 0.05$),对细菌和真菌饱和脂肪酸无显著影响,表明细菌和其他真菌与丛枝菌根真菌相比具有更强的细胞壁和潜在更先进的渗透调节策略,因此对于旱有更好的耐受性,这也表明土壤微生物群落中的不同类群对土壤湿度和降雨模式的变化可能有不同的反应。而雨季穿透雨减少对细菌、真菌、丛枝菌根真菌饱和脂肪酸均无显著影响,这与吴华清等^[50]、Chen 等^[13]的研究结论一致,有研究表明在雨季只有土壤湿度超过一定范围才会对土壤微生物活动产生影响^[51]。徐嘉等^[52]通过降水控制,研究得到在旱季穿透雨减少显著减少了红椎人工林真菌、丛枝菌根真菌饱和脂肪酸和真菌细菌比,反之,在雨季显著增加了细菌、真菌和丛枝菌根真菌饱和脂肪酸,可能是受到土壤温湿度变化程度、采样时间及不同树种的影响,使得其与本研究结论不同。

土壤酶是一种具有蛋白质性质的高分子生物催化剂,直接参与土壤氮素的矿化过程,酶活性与土壤供氮能力及土壤氮矿化速率密切相关^[53]。土壤水分是土壤酶活性变化的重要驱动因素^[54]。本研究中,减雨导致雨季 0—10 cm 土层过氧化物酶和 10—20 cm 土层蛋白酶活性显著降低 ($P < 0.05$),由于减少土壤含水量限制了酶及底物的扩散^[55],这与 Sardans 等^[56]研究得到蛋白酶活性随土壤含水量降低而减小的结论一致。然而,减雨导致雨季 0—10 cm 蛋白酶和 10—20 cm 土层 N-乙酰-葡萄糖苷酶活性显著升高 ($P < 0.05$),这与李帅军

等^[57]的研究结果相似,可能由于微生物分泌更多的酶来抵制或适应不利环境而导致两种酶短暂升高,然而随着干旱胁迫的加剧,酶活性是否会急剧下降还有待进一步研究证明。减雨对旱季酶活性无显著影响($P > 0.05$),可能由于研究区降水充沛,隔离降雨后的土壤水分含量并未到达限制水平,因此酶活性并未显著降低。

3.3 土壤净氮矿化速率与土壤理化性质、土壤微生物量和群落饱和脂肪酸的关系

土壤氮矿化速率与土壤温湿度、土壤通透性、有机氮含量等因素密切相关^[5-6],且受到微生物群落组成及酶活性的直接影响^[53,58]。本研究中,土壤含水量是对土壤净硝化速率影响力最大的变量,于兴修等^[59]进行逐步回归分析亦得到土壤含水量是土壤氮矿化速率的主要影响因子。土壤净氨化速率、净氮矿化速率与群落饱和脂肪酸相关性不显著,说明土壤氮转化速率与微生物生长存在异步现象^[60]。然而,土壤净氨化速率与N-乙酰-葡萄糖苷酶存在极显著负相关关系($P < 0.01$),土壤净硝化速率与N-乙酰-葡萄糖苷酶、 β -葡萄糖苷酶、酚氧化酶和过氧化物酶均存在显著正相关关系($P < 0.05$)。陈影等^[61]研究表明土壤氮硝化量与蛋白酶、过氧化氢酶等显著正相关,这与本研究结果类似。

4 结论

穿透雨减少导致马尾松人工林旱季0—10 cm 土层净硝化速率显著减少,旱季初期0—10 cm 土层净氨化速率短暂升高,而对土壤净氮矿化速率影响不显著。土壤净氨化速率与N-乙酰-葡萄糖苷酶呈极显著负相关,土壤净硝化速率与土壤含水量、 β -葡萄糖苷酶、真菌饱和脂肪酸、硝态氮、N-乙酰-葡萄糖苷酶及酚氧化酶呈显著正相关,与细菌真菌饱和脂肪酸比、细菌饱和脂肪酸及铵态氮呈显著负相关。此外,穿透雨减少显著影响土壤含水量、硝态氮、pH、可溶性有机碳、过氧化物酶、N-乙酰-葡萄糖苷酶、蛋白酶及丛枝菌根真菌饱和脂肪酸。总之,穿透雨减少50%改变了马尾松人工林的土壤氮素有效性,未来将影响林木对土壤养分的吸收及林分生长发育。虽然本研究探讨了短期减雨对土壤氮矿化的影响及其土壤理化性质和微生物调节机制,但是土壤氮矿化对长期减雨的响应以及土壤氮矿化的变化如何影响树木生长和养分吸收,有待进一步深入研究。

参考文献 (References):

- [1] DeLuca T, Nilsson M C, Zackrisson O. Nitrogen mineralization and phenol accumulation along a fire chronosequence in northern Sweden. *Oecologia*, 2002, 133(2): 206-214.
- [2] 王斌, 陈亚明, 周志宇. 贺兰山西坡不同海拔梯度上土壤氮素矿化作用的研究. *中国沙漠*, 2007, 27(3): 483-490.
- [3] 丁一汇. 中国的气候变化及其预测. 北京: 气象出版社, 2016.
- [4] Gordon H, Haygarth P M, Bardgett R D. Drying and rewetting effects on soil microbial community composition and nutrient leaching. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(2): 302-311.
- [5] Liu Y, He N P, Wen X F, Yu G R, Gao Y, Jia Y L. Patterns and regulating mechanisms of soil nitrogen mineralization and temperature sensitivity in Chinese terrestrial ecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 215: 40-46.
- [6] 罗亚晨. 冻融循环对寒温带针叶林土壤碳氮矿化的影响及氮素添加的调控效应[D]. 重庆: 西南大学, 2015.
- [7] Philippot L, Spor A, Hénault C, Bru D, Bizouard F, Jones C M, Sarr A, Maron P A. Loss in microbial diversity affects nitrogen cycling in soil. *The ISME Journal*, 2013, 7(8): 1609-1619.
- [8] Tian X F, Hu H W, Ding Q, Song M H, Xu X L, Zheng Y, Guo L D. Influence of nitrogen fertilization on soil ammonia oxidizer and denitrifier abundance, microbial biomass, and enzyme activities in an alpine meadow. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, 50(4): 703-713.
- [9] 王学霞, 董世魁, 高清竹, 张勇, 胡国铮, 罗文蓉. 青藏高原退化高寒草地土壤氮矿化特征以及影响因素研究. *草业学报*, 2018, 27(6): 1-9.
- [10] Xiang S R, Doyle A, Holden P A, Schimel J P. Drying and rewetting effects on C and N mineralization and microbial activity in surface and subsurface California grassland soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(9): 2281-2289.
- [11] 任艳林. 降水变化对樟子松人工林土壤无机氮和净氮矿化速率的影响. *北京大学学报: 自然科学版*, 2012, 48(6): 925-932.
- [12] Chen J, Xiao G L, Kuzyakov Y, Jenerette G D, Ma Y, Liu W, Wang Z F, Shen W J. Soil nitrogen transformation responses to seasonal precipitation changes are regulated by changes in functional microbial abundance in a subtropical forest. *Biogeosciences*, 2017, 14(9): 2513-2525.

- [13] Chen L, Wen Y G, Zeng J, Wang H, Wang J X, Dell B, Liu S R. Differential responses of net N mineralization and nitrification to throughfall reduction in a *Castanopsis hystrix* plantation in southern China. *Forest Ecosystems*, 2019, 6(1): 14.
- [14] Cregger M A, McDowell N G, Pangle R E, Pockman W T, Classen A T. The impact of precipitation change on nitrogen cycling in a semi-arid ecosystem. *Functional Ecology*, 2014, 28(6): 1534-1544.
- [15] Reichmann L G, Sala O E, Peters D P C. Water controls on nitrogen transformations and stocks in an arid ecosystem. *Ecosphere*, 2013, 4(1): 1-17.
- [16] Landesman W J, Dighton J. Response of soil microbial communities and the production of plant-available nitrogen to a two-year rainfall manipulation in the New Jersey Pinelands. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(10): 1751-1758.
- [17] 葛晓改, 肖文发, 曾立雄, 黄志霖, 周本智. 三峡库区马尾松林土壤凋落物层酶活性对凋落物分解的影响. *生态学报*, 2014, 34(9): 2228-2237.
- [18] 段伟, 郑威, 闫文德, 梁小翠, 李树战. 樟树和马尾松人工林土壤氮矿化季节动态特征. *中南林业科技大学学报*, 2011, 31(11): 96-100, 105.
- [19] 田红灯. 喀斯特城市不同森林类型土壤氮矿化特征[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2013.
- [20] 段伟. 亚热带樟树和马尾松林土壤氮矿化的动态研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2010.
- [21] 朱凡, 田大伦, 闫文德, 王光军, 段伟. 去根处理对枫香和马尾松群落土壤氮矿化的影响. *中国农学通报*, 2012, 28(22): 11-15.
- [22] 任文. 疏伐强度对马尾松人工林土壤氮素转化及其养分循环的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2012.
- [23] 陈琳, 刘世荣, 温远光, 曾冀, 李华, 杨予静. 亚热带红锥和马尾松人工林生长对穿透雨减少的响应. *应用生态学报*, 2018, 29(7): 2330-2338.
- [24] Hoover D L, Wilcox K R, Young K E. Experimental droughts with rainout shelters: a methodological review. *Ecosphere*, 2018, 9(1): e02088.
- [25] Tsui C C, Chen Z S. Net nitrogen mineralization and nitrification of different landscape positions in a lowland subtropical rainforest in Taiwan. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2010, 56(2): 319-331.
- [26] Bailey V L, Peacock A D, Smith J L, Bolton Jr H. Relationships between soil microbial biomass determined by chloroform fumigation-extraction, substrate-induced respiration, and phospholipid fatty acid analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(9): 1385-1389.
- [27] Cusack D F, Silver W L, Torn M S, Burton S D, Firestone M K. Changes in microbial community characteristics and soil organic matter with nitrogen additions in two tropical forests. *Ecology*, 2011, 92(3): 621-632.
- [28] Kolberg R L, Rouppert B, Westfall D G, Peterson G A. Evaluation of an In situ net soil nitrogen mineralization method in dryland agroecosystems. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, 61(2): 504-508.
- [29] 赵文君, 崔迎春, 吴鹏, 刘延惠, 丁访军, 侯贻菊, 舒德远. 喀斯特原生乔木林和次生林土壤氮矿化特征. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2017, 41(5): 13-17.
- [30] 肖好燕, 刘宝, 余再鹏, 万晓华, 桑昌鹏, 周富伟, 黄志群. 亚热带不同林分土壤矿质氮库及氮矿化速率的季节动态. *应用生态学报* 2017, 28(3): 730-738.
- [31] 葛晓敏, 陈水飞, 周旭, 徐辉, 胡亚萍, 江宝兴, 丁晖. 武夷山中亚热带常绿阔叶林土壤氮矿化的季节动态. *生态环境学报*, 2019, 28(7): 1351-1360.
- [32] 向元彬, 周世兴, 肖永翔, 胡庭兴, 涂利华, 黄从德. 降雨量改变对常绿阔叶林干旱和湿润季节土壤呼吸的影响. *生态学报*, 2017, 37(14): 4734-4742.
- [33] 倪梦颖, 张秋芳, 高金涛, 郑永, 周嘉聪, 陈岳民, 杨玉盛. 亚热带杉木人工林土壤胞外酶活性对隔离降雨的季节响应. *生态学报*, 2018, 38(6): 2119-2127.
- [34] McHugh T A, Morrissey E M, Reed S C, Hungate B A, Schwartz E. Water from air: an overlooked source of moisture in arid and semiarid regions. *Scientific Reports*, 2015, 5: 13767.
- [35] Homyak P M, Allison S D, Huxman T E, Goulden M L, Treseder K K. Effects of drought manipulation on soil nitrogen cycling: a meta-analysis. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2017, 122(12): 3260-3272.
- [36] 李欢, 杨玉盛, 司友涛, 林伟盛, 熊德成, 刘小飞. 模拟增温及隔离降雨对亚热带杉木人工林土壤可溶性有机质的数量及其结构的影响. *生态学报*, 2018, 38(8): 2884-2895.
- [37] Li D D, Li Y J, Liang J, Zhao C Z, Yin H J, Yin C Y, Cheng X Y, Liu Q. Responses of soil micronutrient availability to experimental warming in two contrasting forest ecosystems in the Eastern Tibetan Plateau, China. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, 14(6): 1050-1060.
- [38] Wang F M, Zhu W X, Xia H P, Fu S L, Li Z A. Nitrogen mineralization and leaching in the early stages of a subtropical reforestation in southern China. *Restoration Ecology*, 2010, 18(S2): 313-322.
- [39] Jongen M, Lecomte X, Unger S, Fangueiro D, Pereira J S. Precipitation variability does not affect soil respiration and nitrogen dynamics in the understorey of a Mediterranean oak woodland. *Plant and Soil*, 2013, 372(1/2): 235-251.

- [40] 李志杰, 杨万勤, 岳楷, 贺若阳, 杨开军, 庄丽燕, 聂富育, 谭波, 徐振锋. 川西亚高山 3 种典型森林土壤氮矿化特征. 应用与环境生物学报, 2016, 22(4): 612-617.
- [41] Zhalnina K, de Quadros P D, Camargo F A O, Triplett E W. Drivers of archaeal ammonia-oxidizing communities in soil. *Frontiers in Microbiology*, 2012, 3: 210.
- [42] Singh J S, Raghubanshi A S, Singh R S, Srivastava S C. Microbial biomass acts as a source of plant nutrients in dry tropical forest and savanna. *Nature*, 1989, 338(6215): 499-500.
- [43] Manzoni S, Schimel J P, Porporato A. Responses of soil microbial communities to water stress: results from a meta-analysis. *Ecology*, 2012, 93(4): 930-938.
- [44] Ren C J, Zhao F Z, Shi Z, Chen J, Han X H, Yang G H, Feng Y Z, Ren G X. Differential responses of soil microbial biomass and carbon-degrading enzyme activities to altered precipitation. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 115: 1-10.
- [45] Ren C J, Chen J, Lu X J, Doughty R, Zhao F Z, Zhong Z K, Han X H, Yang G H, Feng Y Z, Ren G X. Responses of soil total microbial biomass and community compositions to rainfall reductions. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 116: 4-10.
- [46] Williams M A, Rice C W. Seven years of enhanced water availability influences the physiological, structural, and functional attributes of a soil microbial community. *Applied Soil Ecology*, 2007, 35(3): 535-545.
- [47] Bi J, Zhang N L, Liang Y, Yang H J, Ma K P. Interactive effects of water and nitrogen addition on soil microbial communities in a semiarid steppe. *Journal of Plant Ecology*, 2012, 5(3): 320-329.
- [48] Sun L J, Qi Y C, Dong Y S, He Y T, Peng Q, Liu X C, Jia J Q, Guo S F, Cao C C. Interactions of water and nitrogen addition on soil microbial community composition and functional diversity depending on the inter-annual precipitation in a Chinese steppe. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(4): 788-799.
- [49] Huang G, Li Y, Su Y G. Effects of increasing precipitation on soil microbial community composition and soil respiration in a temperate desert, Northwestern China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 83: 52-56.
- [50] 吴华清, 陈小梅, 林媚珍, 张静, 褚国伟, 邓琦. 降水处理对南亚热带季风林土壤微生物群落结构的影响. 生态环境学报, 2016, 25(4): 583-590.
- [51] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 阎志丹. 水分对土壤呼吸的影响及机理. 生态学报, 2003, 23(5): 972-978.
- [52] 徐嘉. 南亚热带两种人工林土壤碳过程对减少降雨的响应[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014.
- [53] 王理德, 王方琳, 郭春秀, 韩福贵, 魏林源, 李发明. 土壤酶学研究进展. 土壤, 2016, 48(001): 12-21.
- [54] Baldrian P, Merhautová V, Petránková M, Cajthaml T, Šnajdr J. Distribution of microbial biomass and activity of extracellular enzymes in a hardwood forest soil reflect soil moisture content. *Applied Soil Ecology*, 2010, 46(2): 177-182.
- [55] Steinweg J M, Dukes J S, Paul E A, Wallenstein M D. Microbial responses to multi-factor climate change: effects on soil enzymes. *Frontiers in Microbiology*, 2013, 4: 146.
- [56] Sardans J, Peñuelas J. Soil enzyme activity in a Mediterranean forest after six years of drought. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(3): 838-851.
- [57] 李帅军, 郭剑芬, 吴东梅, 刘小飞, 林伟盛, 鲍勇. 隔离降雨对米楮天然林土壤微生物生物量和酶活性的影响. 亚热带资源与环境学报, 2018, 13(1): 17-25.
- [58] 曹帮华, 吴丽云. 滨海盐碱地刺槐白蜡混交林土壤酶与养分相关性研究. 水土保持学报, 2008, 22(1): 128-133.
- [59] 于兴修, 徐苗苗, 赵锦慧, 张家鹏, 王伟, 郭亚丽, 肖娟花. 丹江口库区覆膜土壤不同土层氮素矿化速率及其影响因素. 应用生态学报, 2018, 29(4): 1259-1265.
- [60] Song X L, Zhu J X, He N P, Huang J H, Tian J, Zhao X, Liu Y, Wang C H. Asynchronous pulse responses of soil carbon and nitrogen mineralization to rewetting events at a short-term: regulation by microbes. *Scientific Reports*, 2017, 7: 7492.
- [61] 陈影. 苏北沿海不同林分土壤氮素矿化及酶活性研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2017.