

DOI: 10.5846/stxb202005131217

左倩倩,王邵军,王平,曹乾斌,赵爽,杨波.蚂蚁筑巢对西双版纳热带森林土壤有机氮矿化的影响.生态学报,2021,41(18):7339-7347.

Zuo Q Q, Wang S J, Wang P, Cao Q B, Zhao S, Yang B. Effect of ant colonization on soil organic nitrogen mineralization in the Xishuangbanna tropical forest. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(18): 7339-7347.

蚂蚁筑巢对西双版纳热带森林土壤有机氮矿化的影响

左倩倩,王邵军*,王平,曹乾斌,赵爽,杨波

西南林业大学生态与环境学院,昆明 650224

摘要:蚂蚁作为生态系统工程师能够调节土壤微生物及理化环境,进而对热带森林土壤有机氮矿化速率及其时间动态产生显著影响。以西双版纳白背桐热带森林群落为研究对象,采用室内需氧培养法测定土壤有机氮矿化速率,比较蚁巢和非蚁巢土壤有机氮矿化速率的时间动态,揭示蚂蚁筑巢活动引起土壤无机氮库、微生物生物量碳及化学性质改变对有机氮矿化速率时间动态的影响。结果表明:(1)蚂蚁筑巢显著影响土壤有机氮矿化速率($P<0.01$),相较于非蚁巢,蚁巢土壤有机氮矿化速率提高了261%;(2)土壤有机氮矿化速率随月份推移呈明显的单峰型变化趋势,即6月最大(蚁巢 $1.22 \text{ mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 、非蚁巢 $0.41 \text{ mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$),12月最小(蚁巢 $0.82 \text{ mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 、非蚁巢 $0.18 \text{ mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$);(3)两因素方差分析表明,不同月份及不同处理对土壤有机氮矿化速率、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 及 $\text{NO}_3\text{-N}$ 产生显著影响($P<0.05$),但对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的交互作用不显著;(4)蚂蚁筑巢显著提高了无机氮库($\text{NH}_4\text{-N}$ 与 $\text{NO}_3\text{-N}$)、微生物生物量碳、有机质、水解氮、全氮及易氧化有机碳等土壤养分含量,而降低了土壤 pH 值;(5)回归分析表明,铵态氮和硝态氮对土壤有机氮矿化速率产生显著影响,分别解释 87.89%、61.84% 的有机氮矿化速率变化;(6)主成份分析表明 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、微生物生物量碳及有机质是影响有机氮矿化速率时间动态的主要因素,而全氮、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、易氧化有机碳、水解氮及 pH 对土壤有机氮矿化速率的影响次之,且 pH 与土壤有机氮矿化速率呈显著负相关。总之,蚂蚁筑巢活动主要通过影响土壤 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、微生物生物量碳及有机质的状况,进而调控西双版纳热带森林土壤有机氮矿化速率的时间动态。研究结果将有助于进一步提高对土壤氮矿化生物调控机制的认识。

关键词:蚂蚁筑巢;土壤有机氮矿化速率;时间动态;热带森林;西双版纳

Effect of ant colonization on soil organic nitrogen mineralization in the Xishuangbanna tropical forest

ZUO Qianqian, WANG Shaojun*, WANG Ping, CAO Qianbin, ZHAO Shuang, YANG Bo

College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

Abstract: Ants often act as ecosystem engineers in mediating the soil microbial and physicochemical properties. This thus can exert a crucial effect on soil organic nitrogen mineralization and its temporal dynamics in tropical forest. The indoor-aerobic incubation method was used to determine soil organic nitrogen mineralization rates in *Mallotus paniculatus* community of Xishuangbanna tropical forest. This study aimed to compare temporal dynamics of soil organic nitrogen mineralization rates in ant nests and the reference soils. We also revealed the effects of the changes of soil inorganic nitrogen pool (i.e., $\text{NH}_4\text{-N}$ and $\text{NO}_3\text{-N}$), microbial biomass carbon, and chemical properties on the temporal dynamics of organic nitrogen mineralization rates driven by the ant nesting activities. The results were as follows: (1) Ant colonization had a significant effect on soil nitrogen mineralization rates ($P<0.01$). The mean organic nitrogen mineralization rates were 261% higher in ant nests than in reference soils. (2) The monthly dynamics in soil organic nitrogen mineralization rates showed an

基金项目:国家自然科学基金项目(32060281,31660191);云南省高校优势特色重点学科(05000511311);云南省教育厅科学研究基金项目(自然科学类)(11070641)

收稿日期:2020-05-13; 修订日期:2021-07-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shaojunwang2009@163.com

obvious trend of single peak, which was the largest in June (ant nests: $1.22 \text{ mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$, reference soils: $0.41 \text{ mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$) and the smallest in December (ant nests: $0.82 \text{ mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$, reference soils: $0.18 \text{ mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$). (3) Two-way ANOVAs showed that the factors of month and treatment had significant effects on the concentrations of soil organic nitrogen mineralization rates, $\text{NH}_4\text{-N}$, and $\text{NO}_3\text{-N}$ ($P < 0.05$), but no significant interaction of them was observed on $\text{NO}_3\text{-N}$. (4) Ant colonization significantly increased the concentrations of soil inorganic nitrogen pool ($\text{NH}_4\text{-N}$ and $\text{NO}_3\text{-N}$), microbial biomass carbon, organic matter, hydrolyzable nitrogen, total nitrogen, readily oxidizable organic carbon, but reduced the value of soil pH. (5) The regression analysis showed that ammonium and nitrate nitrogen had significant effects on soil organic nitrogen mineralization rates, accounting for 87.89% and 61.84% of the changes in soil organic nitrogen mineralization rates, respectively. (6) Principal component analysis indicated that ammonium nitrogen, microbial biomass carbon, and organic matter were the main factors affecting the temporal dynamics of soil nitrogen mineralization rates, followed by total and nitrate nitrogen, readily oxidizable organic carbon, hydrolyzable nitrogen, and pH. Soil pH was negatively correlated with soil nitrogen mineralization rates. In short, the ant colonization had a crucial role in regulating the temporal dynamics in soil organic nitrogen mineralization rates, through affecting ammonium nitrogen, microbial biomass carbon, and soil organic matter in the Xishuangbanna tropical forest. The results would be helpful to further improve our understanding of the biological regulation mechanism of soil nitrogen mineralization.

Key Words: ant colonization; soil organic nitrogen mineralization rates; temporal dynamics; tropical forest; Xishuangbanna

土壤有机氮矿化是调控森林土壤养分循环的一个重要生物生态学过程。土壤有机氮约占土壤总氮量的 96% 左右^[1],但有机氮须经氮矿化将土壤有机氮转化为无机氮后才可被植物吸收与利用^[2]。土壤有机氮矿化过程中,土壤动物与微生物共同作用将土壤有机氮转变为 $\text{NH}_4\text{-N}$ 及 $\text{NO}_3\text{-N}$,并可能促进土壤硝化与反硝化过程的 N_2O 排放。土壤有机氮矿化受土壤动物和微生物、气候及土壤理化性质等因素的影响^[2, 3]。因此,土壤有机氮矿化作为表征土壤供氮能力的主要指标^[3],在一定程度上反映森林土壤质量状况,并能对森林生态系统的结构、功能及全球气候变化缓解等方面起着重要调控作用。

蚂蚁作为重要的大型节肢土壤动物之一,能够影响土壤有机氮矿化的微生物过程及动态,进而调控森林生态系统的养分循环及能量流动^[4]。蚂蚁通过破碎、混合、搬运等筑巢定居活动影响土壤物理性质(温度、水分及孔隙度等)、土壤化学性质(pH 及 C、N 等养分),并改变土壤微生物群落的结构和多样性,进而促进土壤有机氮的分解与矿化^[5]。特别是蚂蚁筑巢活动通过促进微生物生长把难以分解的有机氮转化为可被植物吸收、利用的无机氮^[6],影响土壤有机氮矿化速率的时间动态,从而间接影响森林群落结构、多样性及演替^[7]。

目前,国内外学者关于土壤动物对土壤有机氮矿化影响的研究相对较少,尤其缺乏蚂蚁筑巢定居对热带森林土壤有机氮矿化速率时间动态影响的研究。西双版纳作为我国大陆热带雨林集中分布的重要地区,其地貌复杂、小气候多样,是我国蚂蚁多样性最丰富的区域^[8]。热带森林复杂多样的蚂蚁类型及生命活动,显著改变土壤微生物及理化性质,进而影响土壤有机氮矿化速率的时间动态。本研究选择处于演替前期的白背桐群落为研究对象,比较蚁巢与非蚁巢土壤有机 N 矿化速率的时间动态,并分析蚂蚁活动引起土壤无机 N 库、微生物生物量及基本化学性质的改变对有机 N 矿化速率的影响,对于深入理解热带森林土壤 N 循环调控机制及其在全球气候变化中的地位与作用具有十分重要的科学意义。

1 材料与方法

1.1 样地概况

研究区位于中国科学院西双版纳热带植物园($21^\circ 55' \text{N}$, $101^\circ 16' \text{E}$)。西双版纳具有典型的季风气候,从 11 月到次年 4 月属干季。年平均降水量约为 1557 mm,湿季(5 月至 10 月)降水量约占总降水的 87%。年平

均气温为 21.5 ℃。特别是旱季从午夜到中午均有大雾,这使得旱季的大部分时间里均能保持一定的土壤湿度。因此,西双版纳广泛分布着热带雨林和季雨林,藤本植物非常发达。

然而,近几十年来由于刀耕火种等农业活动导致热带森林大面积破坏,形成一系列处于不同恢复阶段的次生热带森林群落阶段。因此,本研究在中国科学院西双版纳热带植物园研究区内,选择处于演替前期(约 12 年)的白背桐(*Mallotus paniculatus*)群落作为研究样地。样地海拔约 600 m,凋落物层厚大约 1—2 cm,植被盖度 60%左右,土壤属于砖红壤。样地主要树种有:白背桐(*M. paniculatus*)、野生风轮草(*Clinopodium chinensis*)、丰花草(*Borreria stricta*)、粉被金合欢(*Acacia pruinescens*)、椴叶山麻秆(*Alchornea tiliifolia*)等。

1.2 土壤取样及基本性质测定

随机选择 3 个白背桐群落样地(40 m×40 m,间隔大于 200 m)。于 2019 年 3、6、9、12 月,每个样地中随机选择 3 个蚁巢与 3 个非蚁巢样方(相距 5 m),采用诱饵法^[5]确定蚁巢位置。按照 2 个土层(0—5 cm、5—10 cm)分别采集蚁巢与非蚁巢土样,每个样方同一土层土壤均匀混合,用四分法取 1 kg 左右土样。装入自封袋,做好标签,立即放入加冰的冷藏箱中,带回实验室储藏在 4℃ 冰箱直至分析。土壤性质按 Wang 等方法测定^[5],微生物生物量碳采用氯仿水浴法测定;铵态氮与硝态氮采用 1 mol/L KCl 浸提,滤液用连续流动分析仪测定(BRAN+LUEBBE-AA3,德国)^[9];全氮采用高氯酸硫酸消煮,连续流动分析仪测定;水解氮采用碱解扩散法测定;pH 电位法测定;易氧化有机碳采用高锰酸钾氧化法测定;有机质采用油浴加热-重铬酸钾氧化法测定。基本土壤性质见表 1。

表 1 供试土壤的基本性质

Table 1 Basic edaphic properties of the sampled soils

月份 Month	土壤 Soil	pH	微生物生物量碳 Microbial biomass carbon/ (g/kg)	土壤有机质 Soil organic matter/(g/kg)	易氧化有机碳 Readily oxidizable organic carbon/ (g/kg)	全氮 Total nitrogen/ (g/kg)	水解氮 Hydrolyzable nitrogen/ (mg/kg)
3	蚁巢	3.26±0.05Ba	1.58±0.05Ac	42.33±1.99Ab	9.28±0.41Ab	0.70±0.04Ac	107.61±1.87Ab
	非蚁巢	3.41±0.04Aa	1.24±0.05Bc	34.96±1.87Bc	7.52±0.15Bc	0.55±0.03Bc	85.85±1.60Bb
6	蚁巢	3.12±0.04Bb	1.90±0.05Aa	48.71±2.04Aa	10.66±0.34Aa	1.28±0.05Aa	122.15±2.2Aa
	非蚁巢	3.29±0.02Ab	1.62±0.06Ba	41.12±1.53Ba	8.30±0.32Ba	0.93±0.04Ba	96.51±1.72Ba
9	蚁巢	3.23±0.05Aa	1.79±0.04Ab	46.46±2.16Aa	10.34±0.32Aa	1.03±0.04Ab	117.17±1.95Aa
	非蚁巢	3.33±0.04Ab	1.42±0.05Bb	38.70±1.98Bb	8.03±0.32Bb	0.75±0.04Bb	93.1±1.81Ba
12	蚁巢	3.31±0.05Aa	1.56±0.04Ac	41.22±1.98Ab	9.53±0.13Ab	0.65±0.03Ac	101.74±2.17Ab
	非蚁巢	3.44±0.03Aa	1.12±0.05Bd	33.95±1.93Bc	7.43±0.10Bc	0.49±0.03Bd	82.83±1.35Bb

不同大写字母表示同一月份不同处理差异显著($P<0.05$),不同小写字母表示同一处理不同月份显著差异($P<0.05$)

1.3 土壤有机氮矿化速率测定

土壤有机氮矿化采用室内需氧培养法进行测定^[10-12]。分别把蚁巢与非蚁巢土壤按照 0—5 cm、5—10 cm 分层混匀后,称取 100 g 风干土样(过 2 mm 筛)装于 500 mL 培养瓶,用去离子水调节土壤含水量至田间持水量的 40%,在 25 ℃ 下预培养 7 d,以激活土壤微生物。预培养结束后,土壤含水量调节至田间持水量的 60%,测定土壤 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的含量作为初始量,剩余土壤培养瓶用网纱布封口,保持通气状态,在 25 ℃ 恒温培养箱培养 15 d,每个处理 3 个重复,在第 3、6、9、12、15 天用重量法调节含水量,补偿培养期间损失的水分,培养结束后测定 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的含量。本文只研究整体平均矿化速率,土壤有机氮矿化速率= $[(\text{土壤培养后的 } \text{NH}_4\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N})-(\text{土壤初始 } \text{NH}_4\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N})]/\text{培养天数}$ 。

1.4 数据处理

实验数据经整理后用 Excel 制成表格。用两因素方差分析(Two-way ANOVAs)研究不同月份、不同处理及其交互作用对土壤有机氮矿化速率的影响,用 SPSS 23.0 进行数据统计分析,方差分析前数据检验正态性和方差齐性,采用 LSD 法进行比较不同数据间的差异性(把显著性水平设为 0.05),分析土壤有机氮矿化速率

与土壤指标之间的关系采用主成分分析(PCA)。

2 结果与分析

2.1 蚁巢和非蚁巢土壤有机氮矿化速率的时间动态

对西双版纳白背桐热带森林土壤有机氮矿化速率(4个月2个土层均值)测定可知(图1),蚁巢土壤有机氮矿化速率($1.01 \text{ mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$)显著高于非蚁巢($0.28 \text{ mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$) ($P<0.05$),与非蚁巢相比,蚁巢土壤有机氮矿化速率提高了260.71%,表明蚂蚁筑巢活动显著提高土壤有机氮矿化速率。

土壤有机氮矿化速率随月份推移呈明显的“单峰型”变化趋势。蚁巢($1.22 \text{ mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$)和非蚁巢($0.41 \text{ mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$)土壤有机氮矿化速率均在6月份达到峰值;12月份达到最低值,其中蚁巢与非蚁巢氮矿化速率分别为 0.82 、 $0.18 \text{ mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$ (图1)。蚁巢土壤有机氮矿化速率在不同月份差异显著($P<0.05$),而非蚁巢土壤有机氮矿化速率3月份($0.22 \text{ mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$)和12月份之间($0.18 \text{ mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$)未达到显著差异($P>0.05$),其它月份土壤有机氮矿化速率均达到显著差异($P<0.05$)。两因素方差分析表明(表2),不同月份及不同处理对土壤有机氮矿化速率产生显著影响($P<0.05$),且两者之间存在明显的交互作用($P<0.05$)。

2.2 蚁巢和非蚁巢土壤无机氮库含量的时间动态

白背桐群落蚁巢与非蚁巢土壤培养前后 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量的变化如图2所示,非蚁巢土壤 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量均显著低于蚁巢($P<0.05$),这表明蚂蚁筑巢显著提高土壤 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量。蚁巢与非蚁巢土壤 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量培养前后均呈现出明显的单峰变化,6月最高,12月最低。其中蚁巢土壤培养前后 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量在3月和12月均差异不显著($P>0.05$),而非蚁巢土壤培养前 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量则在9月和3月差异不显著($P>0.05$),其它月份之间均具有显著差异($P<0.05$)。同时,蚁巢与非蚁巢土壤经培养后 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量均显著增加,但蚁巢土壤 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的增加量显著高于非蚁巢。两因素方差分析表明(表2),土壤 $\text{NH}_4\text{-N}$ 受月份、处理及两者交互作用的显著影响($P<0.05$)。

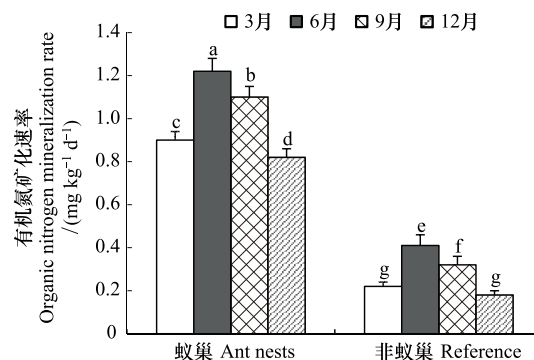


图1 蚁巢和非蚁巢土壤有机氮矿化速率的时间动态

Fig.1 Temporal dynamics of soil organic nitrogen mineralization rate in ant nests and the reference soils

不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)

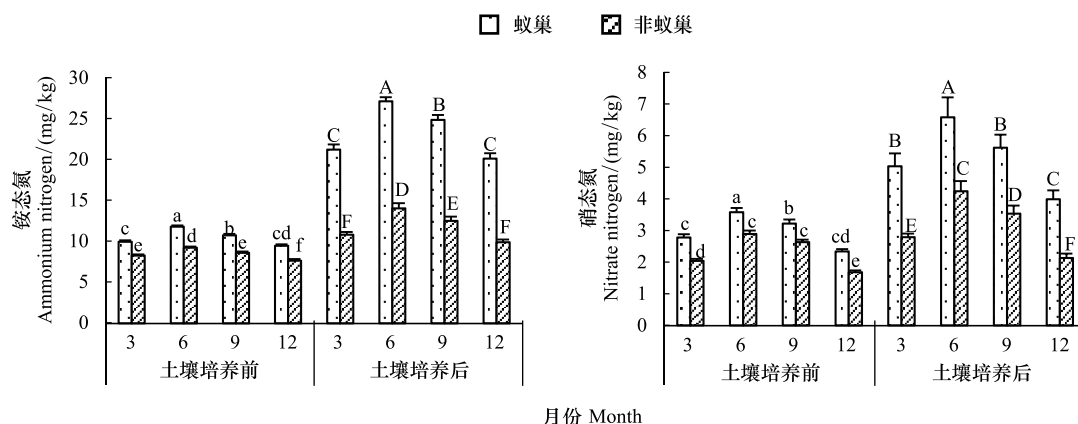


图2 蚁巢和非蚁巢土壤无机氮含量的时间动态

Fig.2 Temporal dynamics of soil inorganic carbon concentrations in ant nests and the reference soils

不同小写字母表示土壤培养前差异显著 ($P<0.05$),不同大写字母表示土壤培养后差异显著 ($P<0.05$)

蚁巢和非蚁巢土壤培养前后 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量均表现为蚁巢大于非蚁巢(图 2)。蚁巢与非蚁巢土壤培养前后 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量随月份变化呈现与 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量相同的变化趋势,即 6 月>9 月>3 月>12 月。蚁巢与非蚁巢土壤培养前 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量均在 6 月和 9 月未达到显著差异($P>0.05$),而蚁巢土壤培养后 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量在 3 月和 9 月差异不显著($P>0.05$)。蚁巢和非蚁巢土壤培养结束后, $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量均显著增加,非蚁巢增加量明显低于蚁巢。两因素方差分析表明(表 2),处理及月份均对土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 产生显著影响($P<0.05$),但两者交互作用对土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 未产生显著影响($P>0.05$)。

表 2 不同处理(蚁巢与非蚁巢)、月份及它们的相互作用对有机氮矿化速率影响的方差分析

Table 2 ANOVA analyses on the effects of treatment (ant nests VS reference), month, and their interactions on soil organic nitrogen mineralization rate

来源 Source	df	$\text{NH}_4\text{-N}$		$\text{NO}_3\text{-N}$		有机氮矿化速率 Organic nitrogen mineralization rate	
		F	P	F	P	F	P
处理 Treatment	1	386.16	<0.001	34.16	<0.001	254.50	<0.001
月份 Month	3	123.21	<0.001	45.95	<0.001	73.19	<0.001
处理×月份 Treatment×month	3	2.77	0.007	0.46	0.900	2.15	0.034

2.3 土壤有机氮矿化速率与无机氮之间的相互关系

采用指数、线性及多项式对土壤无机氮($\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$)与土壤有机氮矿化速率进行回归分析,选择拟合度最好的多项式描述分析(图 3),结果表明,土壤 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 均对土壤有机氮矿化速率产生显著影响,土壤有机氮矿化速率随 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量的增加呈递增趋势(图 3),但土壤 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 对土壤有机氮矿化速率的贡献率不同,表现为土壤 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的贡献率(87.89%)高于土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的贡献率(61.84%)。

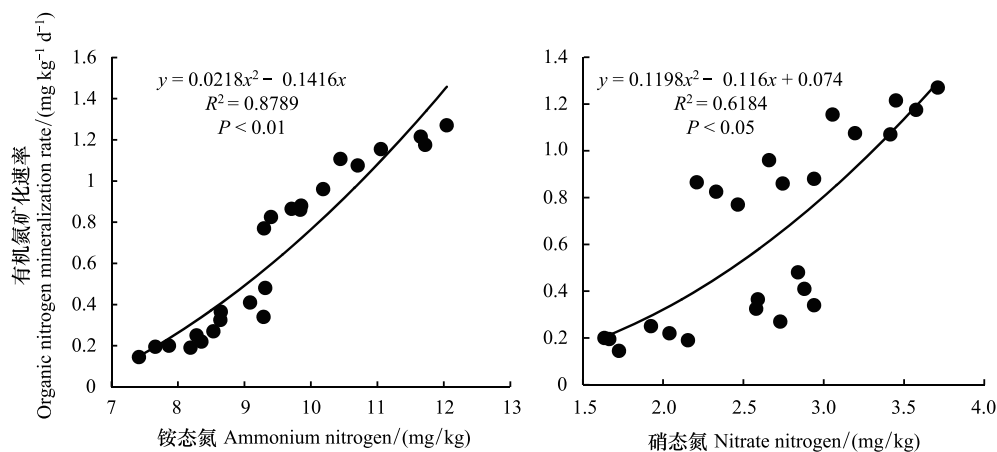


图 3 土壤无机氮库和有机氮矿化速率的关系

Fig.3 Relationship between soil inorganic nitrogen pool and organic nitrogen mineralization rate

2.4 有机氮矿化速率与土壤基本化学性质之间的相互关系

研究表明,蚂蚁筑巢对土壤微生物生物量碳及化学性质的影响存在一定差异(表 1)。与非蚁巢相比,蚂蚁活动提高了土壤微生物生物量碳、易氧化有机碳、有机质、全氮、水解氮含量,降低了土壤 pH 值。除 pH 外,不同月份之间土壤化学性质差异显著($P<0.05$)。

土壤有机氮矿化速率与土壤基本化学性质的主成分分析可知(图 4),第一坐标轴对土壤有机氮矿化速率的贡献较大,解释 97.2%的有机氮矿化速率;而第二坐标轴仅解释 2.6%的有机氮矿化速率。土壤有机氮矿化速率与微生物生物量碳、铵态氮、有机质、全氮、硝态氮、水解氮、易氧化有机碳呈正相关,与 pH 呈负相关。铵

态氮、微生物生物量碳、有机质与有机氮矿化速率的夹角较小,是有机氮矿化速率的主要驱动因子,而全氮、硝态氮、水解氮、易氧化有机碳、pH 对有机氮矿化速率的影响次之。

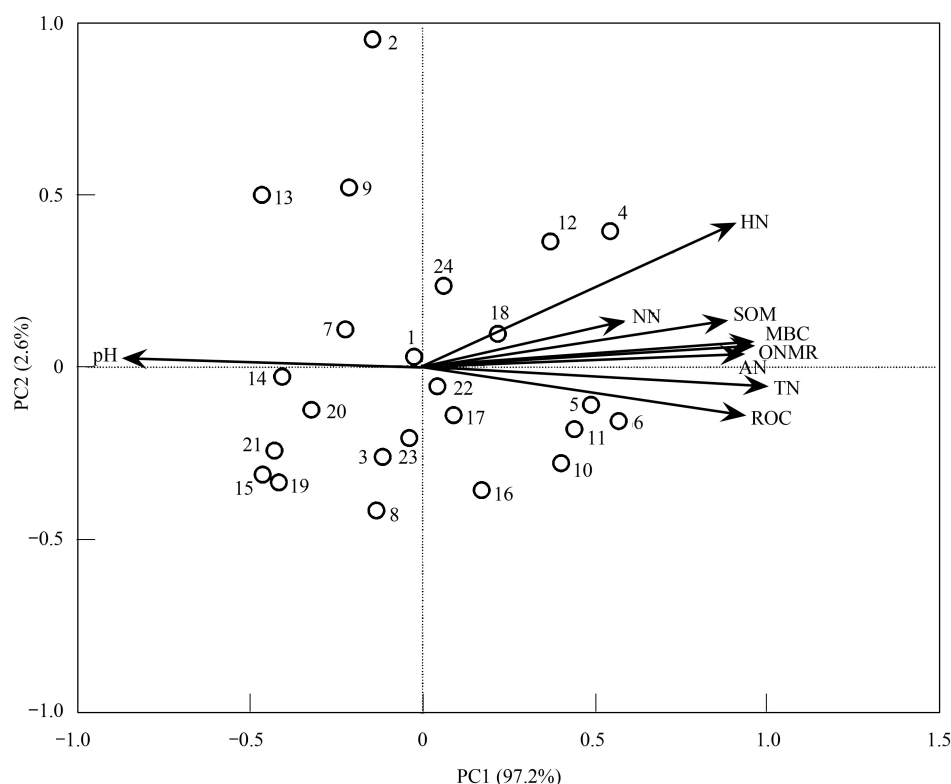


图4 有机氮矿化速率与土壤基本化学性质的主成分分析

Fig.4 Principal component analysis of soil organic nitrogen mineralization rate and basic chemical properties

ONMR:有机氮矿化速率 Organic nitrogen mineralization rate;MBC:微生物生物量碳 Microbial biomass carbon;AN:Ammonium nitrogen;SOM:土壤有机质 Soil organic matter;TN:全氮 Total nitrogen;NN:Nitrate nitrogen;ROC:易氧化有机碳 Readily oxidizable organic carbon;HN:水解氮 Hydrolyzable nitrogen;pH:土壤 pH

3 讨论

3.1 蚂蚁筑巢对土壤氮矿化时间动态的影响

本研究发现,蚂蚁筑巢显著提高土壤有机氮矿化速率。这可能是因为蚂蚁通过搬运、破碎、摄食(花瓣、动植物残体)及自身的代谢活动(排泄、呼吸)使巢内土壤微生物生物量碳及土壤养分含量增加,促进了土壤微生物数量增长及活性,进而刺激土壤有机氮的矿化^[13]。另一方面,蚂蚁筑巢活动能加速微生物体内氮素的释放,同时,蚂蚁自身代谢产物释放能够提高土壤酶活性,从而促进土壤有机氮的矿化^[14-17]。因此,蚂蚁筑巢活动主要通过增加巢穴内土壤养分含量,提高微生物及土壤动物的多样性,进而加速了土壤有机氮的矿化。

蚁巢和非蚁巢土壤有机氮矿化速率时间动态均呈明显的“单峰型”变化趋势,即在6月最大,12月最小,这与黄容^[18]、肖好燕^[19]等学者关于氮矿化动态的规律相似。这可能是6月份高温高湿的土壤环境利于凋落物的分解和植物根系的分泌,导致C、N养分含量的积累,为微生物的繁殖生长提供充足的营养物质^[20-22],从而提高土壤有机氮矿化速率。而12月相对于干旱低温的微生境不利于养分积累和微生物繁殖,导致土壤氮素的矿化缓慢。另外蚁巢土壤有机氮矿化速率的时间变化幅度显著高于非蚁巢,表明蚂蚁筑巢通过影响土壤微生物及养分环境而调控土壤氮矿化动态。

3.2 蚂蚁筑巢引起热带森林土壤无机氮库改变对氮矿化的影响

本研究表明,蚂蚁活动显著提高土壤无机氮库的含量^[23],这是由于蚂蚁通过取食、搬运及代谢等活动提

高蚁巢土壤养分的可利用性。土壤无机氮库含量的增加可能还与蚂蚁疏松土壤并刺激土壤微生物活性与活化土壤养分等密切相关。另外,蚁巢与非蚁巢土壤无机氮库含量均为 6 月最高,这是由于 6 月气温、水分适宜,植物生长较快,地下根系分泌物增多,微生物活性增强^[24],加快土壤有机氮的分解和转化,导致土壤无机氮含量较高。这与张文文^[25]的研究结果相类似。不同月份蚁巢与非蚁巢 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量均在土壤无机氮库中处于主导地位,占土壤无机氮库的 70% 以上,这与前人的研究结果一致^[6, 26-27]。本研究中土壤酸性较强,限制了土壤的自养硝化作用,使土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量占比较低^[28-29]。同时,与带正电荷的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 相比,带负电荷的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 易淋溶流失,因此,土壤中的无机氮库主要以 $\text{NH}_4\text{-N}$ 形式存在^[30]。

土壤无机氮库作为评价土壤供氮能力的关键指标,代表土壤中植物生长过程吸收、利用的氮素水平,能够显著影响森林土壤有机氮矿化速率^[31]。本研究发现,土壤有机氮矿化速率随土壤 $\text{NH}_4\text{-N}$ 与 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量的增加而增大,且铵态氮对土壤有机氮矿化速率的贡献较大。而蚂蚁筑巢活动显著提高土壤无机氮含量,从而促进土壤氮矿化作用。有研究表明,森林土壤有机氮矿化速率受铵化作用的影响较大,铵化速率与氮矿化速率呈正相关关系^[6]。但也有研究表明土壤有机氮矿化速率与无机氮库中的铵态氮呈正相关关系,而硝态氮含量对氮矿化的影响不显著^[32]。土壤无机氮主要来自土壤可溶性有机氮,而蚂蚁活动能够加快溶解有机氮的释放,提高微生物活性,从而直接刺激了土壤有机氮的矿化。

3.3 蚂蚁筑巢引起土壤基本化学性质改变对氮矿化的影响

研究表明,蚂蚁筑巢活动显著提高蚁巢土壤微生物生物量碳、土壤有机质、全氮、水解氮、易氧化有机碳等碳氮养分含量,降低土壤 pH 值,从而促进土壤有机氮矿化速率。

土壤微生物作为土壤中重要的组成部分,是决定土壤有机氮矿化速率大小的关键生物因子。主成分分析表明微生物生物量碳对土壤氮素的矿化具有重要促进作用。与非蚁巢相比,蚁巢土壤微生物生物量碳含量较高,这主要是蚂蚁将有机食物大量富集于巢穴内,可提高土壤养分含量及细菌和真菌数量^[33],从而促进土壤有机氮的矿化。Carrillo 等^[34]认为土壤动物主要通过提高底物数量影响微生物活动,进而促进有机氮的矿化;陈小云等^[35]、Jiang 等^[36]研究得出土壤动物在代谢过程中会不断地向体外释放养分和不同种类的酶,同时在迁移活动过程中促进微生物在土壤中的扩散,利于土壤氮矿化。丁雪丽等^[37]的研究结果也发现土壤微生物生物量的增加能够显著提高有机氮矿化速率。

土壤有机氮矿化速率随土壤 pH 值减小而增大,蚂蚁活动降低了巢地土壤 pH,显著提高土壤氮矿化速率。这主要是因为蚂蚁在巢穴内进行的生命活动(如呼吸、排泄等)及有机物质分解、矿化等导致了巢穴土壤有机酸含量增加,从而导致 pH 值下降^[38]。较低土壤 pH 值有利于氮素的矿化,这可能由于一些土壤有机酸能够促进微生物的增长和活性^[39-40]。李一凡等^[41]、韩晓飞等^[42]等的研究也表明土壤 pH 值与有机氮矿化速率呈负相关。但有学者认为土壤 pH 值升高,土壤可溶性有机质含量增加,提供更多 C、N 养分满足微生物的生命活动,加快土壤氮素的矿化能力^[43-44]。因此,土壤 pH 值与有机氮矿化速率之间的关系存在一定的不确定性,可能与研究区不同土壤微生物与动物、气候环境及理化特性密切相关。

土壤氮矿化速率与有机质、全氮等含量密切相关,本研究蚁巢土壤具有较高的 C 与 N 养分含量,导致蚁巢土壤有机氮矿化速率显著高于非蚁巢,表明蚂蚁筑巢可以通过提高土壤养分含量而对土壤氮矿化产生显著影响。有研究表明,水解氮、全氮、易氧化有机碳等养分含量的增加能够为微生物生长提供充足的养分,刺激土壤微生物产生更多的酶^[45-46],从而促进土壤有机氮的矿化。另外,蚂蚁在取食过程中富集的大量土壤 C、N 养分,会通过改变微生物的群落结构、数量和活性来影响氮素的矿化^[47-50]。

4 结论

蚂蚁筑巢定居活动能够显著提高土壤有机氮的矿化速率,相较于非巢地,蚁巢土壤有机氮矿化速率提高了 261%。蚂蚁活动主要通过影响土壤无机氮库组分含量(如 $\text{NH}_4\text{-N}$)、微生物生物量碳及土壤养分(如有机质)的状况,进而调控热带森林土壤氮矿化速率的时间动态。研究结果将有助于理解土壤动物对热带森林土

壤 N 循环影响的过程与机制。

参考文献 (References):

- [1] 刘顺, 罗达, 刘千里, 张利, 杨洪国, 史作民. 川西亚高山不同森林生态系统碳氮储量及其分配格局. 生态学报, 2017, 37(4): 1074-1083.
- [2] Chapin III F S, Matson P A, Mooney H A. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology. New York, USA: Springer, 2002.
- [3] 张俊俊. 秦岭山地森林和草甸生态系统土壤碳氮动态特征及其对气候变化的响应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [4] Ohashi M, Maekawa Y, Hashimoto Y, Takematsu Y, Hasin S, Yamane S. CO₂ emission from subterranean nests of ants and termites in a tropical rain forest in Sarawak, Malaysia. Applied Soil Ecology, 2017, 117-118: 147-155.
- [5] Wang S J, Wang H, Li J H, Zhang Z. Ants can exert a diverse effect on soil carbon and nitrogen pools in a Xishuangbanna tropical forest. Soil Biology and Biochemistry, 2017, 113: 45-52.
- [6] 李巍, 刘兰英, 陈丽华, 林碧娇, 李玥仁. 武夷山常绿阔叶林土壤氮素矿化过程的研究. 福建农业学报, 2015, 30(6): 594-598.
- [7] Schumacher E. The impact of ants on the aboveground and belowground ecological network-field studies in a grassland and experiments with microcosms[D]. Göttingen: Niedersächsische Staats-und Universitätsbibliothek Göttingen, 2011.
- [8] 王邵军, 王红, 李霁航. 热带森林不同演替阶段蚂蚁巢穴的分布特征及其影响因素. 生物多样性, 2016, 24(8): 916-921.
- [9] 肖瑞晗, 满秀玲, 丁令智. 大兴安岭北部天然针叶林土壤氮矿化特征. 生态学报, 2019, 39(8): 2762-2771.
- [10] 郎漫, 李平, 魏玮. 不同质地黑土净氮转化速率和温室气体排放规律研究. 农业环境科学学报, 2020, 39(2): 429-436.
- [11] 吴迪, 崔晓阳, 郭亚芬. 寒温带林区不同林型下土壤中氮矿化特征. 北京林业大学学报, 2019, 41(9): 122-129.
- [12] 过燕琴, 高志亮, 张令, 秦艳梅, 刘树伟, 邹建文. 设施和露天栽培下有机菜地土壤氮素矿化和硝化作用的比较研究. 农业环境科学学报, 2010, 29(12): 2436-2442.
- [13] 李少辉, 王邵军, 张哲, 陈闽昆, 曹润, 曹乾斌, 左倩倩, 王平. 蚂蚁筑巢对西双版纳热带森林土壤易氧化有机碳时空动态的影响. 应用生态学报, 2019, 30(2): 413-419.
- [14] Araujo Y, Luizão F J, Barros E. Effect of earthworm addition on soil nitrogen availability, microbial biomass and litter decomposition in mesocosms. Biology and Fertility of Soils, 2004, 39(3): 146-152.
- [15] Bamminger C, Zaiser N, Zinsner P, Lamers M, Kammann C, Marhan S. Effects of biochar, earthworms, and litter addition on soil microbial activity and abundance in a temperate agricultural soil. Biology and Fertility of Soils, 2014, 50(8): 1189-1200.
- [16] 陈应武, 李新荣, 苏延桂, 窦彩虹, 贾晓红, 张志山. 腾格里沙漠人工植被区掘穴蚁(*Formica cunicularia*)的生态功能. 生态学报, 2007, 27(4): 1508-1514.
- [17] Paton T R, Humphreys G S, Mitchell P B. Soils: A New Global View. New Haven: Yale University Press, 1995.
- [18] 黄容, 潘开文, 王进闯, 李伟. 岷江上游半干旱河谷区 3 种林型土壤氮素的比较. 生态学报, 2010, 30(5): 1210-1216.
- [19] 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.
- [20] Seo K W, Heo S J, Son Y, Noh N J, Lee S K, Yoon C G. Soil moisture condition and soil nitrogen dynamics in a pure *Alnus japonica* forest in Korea. Landscape and Ecological Engineering, 2011, 7(1): 93-99.
- [21] 罗达, 史作民, 王卫霞, 刘世荣, 卢立华, 明安刚, 于浩龙. 南亚热带格木、马尾松幼龄人工纯林及其混交林生态系统碳氮储量. 生态学报, 2015, 35(18): 6051-6059.
- [22] Lang M, Cai Z C, Mary B, Hao X Y, Chang S X. Land-use type and temperature affect gross nitrogen transformation rates in Chinese and Canadian soils. Plant and Soil, 2010, 334(1/2): 377-389.
- [23] Wang S J, Li J H, Zhang Z, Chen M K, Li S H, Cao R. Feeding-strategy effect of *Pheidole* ants on microbial carbon and physicochemical properties in tropical forest soils. Applied Soil Ecology, 2019, 133: 177-185.
- [24] Gessner M O, Swan C M, Dang C K, McKie B G, Bardgett R D, Wall D H, Hättenschwiler S. Diversity meets decomposition. Trends in Ecology and Evolution, 2010, 25(6): 372-380.
- [25] 张文文, 肖晗冉, 杨宝玲, 董可嘉, 阮宏华, 郑阿宝, 沈彩芹, 曹国华. 不同土地利用类型土壤动物对土壤氮矿化季节变化的影响. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2016, 40(6): 20-26.
- [26] 沙丽清, 孟盈, 冯志立, 郑征, 曹敏, 刘宏茂. 西双版纳不同热带森林土壤氮矿化和硝化作用研究. 植物生态学报, 2000, 24(2): 152-156.
- [27] 赵大勇, 闫文德, 田大伦, 王光军, 郑威, 梁小翠. 不同施肥量对樟树与湿地松土壤氮矿化速率的影响. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(5): 129-133.

- [28] 王霞, 李辉信, 朱玲, 刘宾, 胡锋. 蚯蚓活动对土壤氮素矿化的影响. 土壤学报, 2008, 45(4): 641-648.
- [29] 田冬, 高明, 徐畅. 土壤水分和氮添加对 3 种质地紫色土氮矿化及土壤 pH 的影响. 水土保持学报, 2016, 30(1): 255-261.
- [30] 李铭, 朱利川, 张全发, 程晓莉. 不同土地利用类型对丹江口库区土壤氮矿化的影响. 植物生态学报, 2012, 36(6): 530-538.
- [31] 莫良玉, 吴良欢, 陶勤南. 无菌条件下小麦氨基酸态氮及铵态氮营养效应研究. 应用生态学报, 2003, 14(2): 184-186.
- [32] 陈书信, 王国兵, 阮宏华, 岳臻, 徐长柏, 徐亚明. 苏北沿海不同土地利用方式冬季土壤氮矿化速率比较. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2014, 38(1): 41-46.
- [33] Khamzina A, Lamers J P A, Martius C. Above- and belowground litter stocks and decay at a multi-species afforestation site on arid, saline soil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2016, 104(2): 187-199.
- [34] Carrillo Y, Ball B A, Bradford M A, Jordan C F, Molina M. Soil fauna alter the effects of litter composition on nitrogen cycling in a mineral soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(7): 1440-1449.
- [35] 陈小云, 刘满强, 胡锋, 毛小芳, 李辉信. 根际微型土壤动物——原生动物和线虫的生态功能. 生态学报, 2007(8): 3132-3143.
- [36] Jiang Y J, Sun B, Li H X, Liu M Q, Chen L J, Zhou S. Aggregate-related changes in network patterns of nematodes and ammonia oxidizers in an acidic soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 88: 101-109.
- [37] 丁雪丽, 何红波, 李小波, 白震, 解宏图, 张旭东. 不同供氮水平对玉米秸秆降解初期碳素矿化及微生物量的影响. 土壤通报, 2008, 39(4): 784-788.
- [38] 陈元瑶, 魏琮, 贺虹, 王云果. 秦岭地区 2 种蚂蚁巢内土壤理化性质和微生物量的相关性研究. 西北林学院学报, 2012, 27(2): 121-126.
- [39] Vinolas L C, Vallejo V R, Jones D L. Control of amino acid mineralization and microbial metabolism by temperature. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(7/8): 1137-1140.
- [40] 贾淑霞, 赵妍丽, 孙玥, 陈利, 王政权. 施肥对落叶松和水曲柳人工林土壤微生物生物量碳和氮季节变化的影响. 应用生态学报, 2009, 20(9): 2063-2071.
- [41] 李一凡, 王玉杰, 王彬, 李通. 西南酸雨区重庆缙云山常绿阔叶林土壤氮矿化特征. 林业科学, 2019, 55(6): 1-12.
- [42] 韩晓飞, 郑文冉, 徐畅, 慈恩, 高明, 杨超, 马啸. 重庆市植烟区不同肥力植烟土壤氮素矿化特性研究. 中国农学通报, 2010, 26(24): 188-192.
- [43] 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.
- [44] 秦子娴, 张宇亭, 周志峰, 石孝均, 郭涛. 长期施肥对中性紫色水稻土氮素矿化和硝化作用的影响. 中国农业科学, 2013, 46(16): 3392-3400.
- [45] Wagner D, Brown M J F, Gordon D M. Harvester ant nests, soil biota and soil chemistry. *Oecologia*, 1997, 112(2): 232-236.
- [46] 马芬, 马红亮, 邱泓, 杨红玉. 水分状况与不同形态氮添加对亚热带森林土壤氮素净转化速率及 N_2O 排放的影响. 应用生态学报, 2015, 26(2): 379-387.
- [47] 王晖, 莫江明, 鲁显楷, 薛璟花, 李炯, 方运霆. 南亚热带森林土壤微生物量碳对氮沉降的响应. 生态学报, 2008, 28(2): 470-478.
- [48] 王国兵, 阮宏华, 唐燕飞, 何容. 森林土壤微生物生物量动态变化研究进展. 安徽农业大学学报, 2009, 36(1): 100-104.
- [49] 李霁航, 王邵军, 王红, 张哲, 曹润, 陈闽昆, 李少辉, 陈奇伯. 蚂蚁筑巢对高檐蒲桃热带森林群落土壤呼吸的影响. 生态学报, 2018, 38(17): 6033-6042.
- [50] Wei Z Q, Wu S H, Zhou S L, Lin C. Installation of impervious surface in urban areas affects microbial biomass, activity (potential C mineralisation), and functional diversity of the fine earth. *Soil Research*, 2013, 51(1): 59-67.