

DOI: 10.5846/stxb201710191883

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): - .
Li J H, Wang S J, Wang H, Zhang Z, Cao R, Chen M K, Li S H, Chen Q B. Effect of ant nesting on soil respiration in a tropical forest of *Syzygium oblatum* community. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(17): - .

蚂蚁筑巢对高檐蒲桃热带森林群落土壤呼吸的影响

李霁航,王邵军*,王红,张哲,曹润,陈闽昆,李少辉,陈奇伯

西南林业大学生态与水土保持学院,昆明 650224

摘要:蚂蚁筑巢能够改变热带森林土壤微生物与土壤理化性质的状况,从而对土壤呼吸时间动态产生重要影响。本研究以西双版纳高檐蒲桃热带森林群落为研究对象,采用 Li-6400-09 便携式土壤呼吸测定仪对蚂蚁筑巢地与非筑巢地土壤呼吸进行测定。研究表明:(1)高檐蒲桃群落土壤呼吸呈明显的单峰型季节变化趋势,且土壤呼吸速率蚂蚁筑巢地($4.96 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)高于非筑巢地($4.42 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)。(2)土壤温度和土壤水分显著影响土壤呼吸的时间动态($P < 0.01$);蚂蚁筑巢显著改变巢内温度与水分($P < 0.05$),进而影响土壤呼吸动态。土壤温度对土壤呼吸动态的贡献:蚁巢(83.8%—91.8%)大于非巢地(81.2%—83.1%),但由于筑巢地土壤湿度低于非巢地,土壤水分对土壤呼吸动态的贡献率表现为蚁巢低于非筑巢地。(3)蚂蚁筑巢显著增加土壤微生物量($P < 0.05$),从而对土壤呼吸速率产生极显著的影响($P < 0.01$)。蚂蚁筑巢引起微生物生物量碳的增加能够解释 76.9%—71.1%的土壤呼吸变化。(4)蚂蚁筑巢引起土壤理化性质变化对土壤呼吸产生一定的影响。土壤容重与土壤呼吸速率呈显著负相关;土壤呼吸速率与土壤微生物量碳、有机质、易氧化有机碳、全氮、硝氮和铵氮显著正相关($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$)。因此,蚂蚁筑巢显著改变土壤微生物(如微生物生物量碳)、土壤物理性质(如土壤温度与水分)、土壤化学性质(如碳和氮养分),进而对热带森林土壤呼吸产生重要影响。

关键词:蚂蚁;西双版纳;热带森林;土壤呼吸;时间动态

Effect of ant nesting on soil respiration in a tropical forest of *Syzygium oblatum* community

LI Jihang, WANG Shaojun*, WANG Hong, ZHANG Zhe, CAO Run, CHEN Minkun, LI Shaohui, CHEN Qibo

College of Ecology and Soil & Water Conservation, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

Abstract: Ant nesting induces a significant change of soil microbial and physicochemical properties, which can exert a significant effect on the temporal dynamics of soil respiration in tropical forests. The Li-6400-09 portable soil respiration chamber was used to measure respiration from ant nests and the reference soils in a *Syzygium oblatum* community of tropical Xishuangbanna, Yunnan. The results were as following: (1) Soil respiration rates had obvious temporal variation, showing a single peak curve trend. They were higher in ant nests ($4.96 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) than in reference soils ($4.42 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). (2) The temporal variation of soil respiration was affected by soil temperature and soil water ($P < 0.01$). Ant nesting significantly changed soil temperature and water in ant nests ($P < 0.05$), which affected soil respiration. The contribution of soil temperature to soil respiration was higher in ant nests (83.8%—91.8%) than in reference soils (81.2%—83.1%). However, the contribution of soil water to soil respiration was lower in ant nests than in reference soil, which may owe to the lower soil moisture in ant nests. (3) Ant nesting significantly increased soil microbial biomass carbon ($P < 0.05$), which had a significant effect on soil respiration rate ($P < 0.01$). The increase in the soil microbial biomass

基金项目:国家自然科学基金项目(41461052, 31660191);云南省教育厅项目(2017YJS089);国家林业局“948”项目(2015-4-39)

收稿日期:2017-10-19; 网络出版日期:2018-00-00

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

carbon due to ant nesting can explain 76.9%—71.1% of soil respiration. (4) The change of soil physicochemical properties under the effect of ant nesting had a significant effect on soil respiration. Soil bulk density was negatively correlated with soil respiration, while soil respiration was positively related with soil microbial biomass carbon, soil organic matter, soil easily oxidized organic carbon, total nitrogen, nitrate nitrogen, and ammonium nitrogen ($P < 0.05$ or $P < 0.01$). Therefore, ant nesting changes soil microbial (i.e., soil microbial biomass carbon), soil physical properties (i.e., soil temperature and soil water), and soil chemical properties (i.e., soil carbon and nitrogen concentrations), which can have a significant effect on soil respiration dynamics in the tropical forest.

Key Words: ant; Xishuangbanna; tropical forest; soil respiration; temporal dynamics

近年来,大气中 CO_2 浓度升高导致的温室效应,越来越受到全球的广泛关注^[1]。土壤是 CO_2 的一个重要排放源,全球大约 20% 的 CO_2 释放来自土壤^[2]。土壤呼吸作为土壤碳的主要输出途径和大气 CO_2 的一个重要途径,其微小的变化就能够引起大气 CO_2 浓度的显著改变和土壤碳积累速率的明显波动^[3-5]。因此,研究土壤呼吸对于理解全球气候变化及全球碳平衡具有重要的科学意义。

土壤呼吸是主要由根系呼吸、土壤微生物呼吸及土壤动物呼吸等组成的一个复杂生物生态学过程^[6]。它受土壤养分可用性(如可溶性 C 和 N)及土壤物理因素(如土壤结构、水分、温度等)所调控^[2]。目前,土壤呼吸的影响因素研究主要集中于非生物因素^[7-8],而关于 CO_2 产生的土壤生物学机制,特别是土壤动物如何影响土壤微生物与土壤理化状况进而调控土壤呼吸动态,仍然相当模糊,较大地制约人们对土壤温室气体排放机制的理解。

蚂蚁是广泛分布于土壤中的大型动物,被称之为生态系统工程师^[9]。它能够调控土壤理化性质、微生物多样性及活性,从而对土壤呼吸产生至关重要的影响^[10-11]。蚂蚁筑巢通过改变土壤温度、土壤湿度、土壤容重等物理性质^[12],影响 CO_2 的溶解度、扩散相、扩散速率及其数量^[13],进而间接调控土壤呼吸过程^[14]。蚂蚁通过筑巢、取食、排泄及搬运等活动,使巢穴内食物残渣、植物组织、蚜虫蜜露、排泄物等物质聚集,改变土壤 C、N 等化学性质,进而调控土壤呼吸的时空动态^[15]。另外,蚂蚁活动引起的有机物积累能够促进或抑制某些土壤真菌和细菌群落发展^[16],从而导致微生物呼吸速率的改变^[17]。但是,目前关于蚂蚁的研究主要集中于种类鉴定与区系组成,而有关蚂蚁筑巢如何通过改变土壤性质进而影响土壤呼吸动态的研究,却少见报道。

位于热带北缘的西双版纳地区,是我国大陆热带雨林集中分布的重要区域。该区地貌复杂、小气候多样,是我国蚂蚁区系及多样性最为丰富的地区^[18]。热带森林复杂的蚂蚁区系组成及其活动,可能显著改变土壤性质及土壤 C、N 生态学过程,进而影响土壤呼吸动态。因此,本文以西双版纳高檐蒲桃热带森林群落为研究对象,比较蚂蚁筑巢地和非筑巢地土壤呼吸时间动态,并分析蚂蚁筑巢引起土壤微生物生物量及土壤理化性质改变对土壤呼吸速率的影响,不仅有助于正确量化热带森林土壤 CO_2 排放特征,而且有助于理解蚂蚁活动对西双版纳热带森林土壤呼吸影响的过程及机制。

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,其地理位置为 $21^{\circ}55'N$ 、 $101^{\circ}16'E$ 。由于地处东南亚热带北缘,属北热带季风气候,年平均气温 21.5°C , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 7860°C ,年平均降雨量 1557 mm ,终年无霜。一年中干湿季分明,其中雨季(5—10月)为 1335 mm ,占全年的 87%,干季(11月—4月)为 202 mm ,仅占全年降雨量的 13%。地带性植被为热带季节雨林和季雨林,土壤为由白垩纪砂岩发育而成的砖红壤。

在中国科学院西双版纳热带植物园实验区内,选择有代表性的高檐蒲桃群落,样地基本情况如下:高檐蒲桃群落(*Syzygium oblatum*),海拔 619 m ,盖度 95%左右,群落高度 17 m 左右;土壤为由白垩纪砂岩发育而成的

砖红壤,上覆盖枯枝落叶 6—7 cm;样地主要树种高檐蒲桃 (*Syzygium oblatum*)、思茅崖豆 (*Millettia leptobotrya*)、鸡嗉子榕 (*Ficus semicordata*)、印度栲 (*Castanopsis indica*)、云南黄杞 (*Engelhardia spicata*)、黑风藤 (*Fissistigma polyanthum*)、南山花 (*Prismatomeris connata*)、多型叉蕨 (*Tectaria polymorpha*)、红豆蔻 (*Alpinia galanga*)、子分叉露兜 (*Pandanus furcatus*) 等。

1.2 土壤呼吸速率及土壤性质测定

于 2015 年 3 月、6 月、9 月及 12 月,在样地中随机选择 3 个样方 (40 m×40 m),样方间隔 15 m,每个样方中选择 10 个平均直径约 9 cm 蚂蚁巢穴 (蚂蚁巢穴采用诱捕法确定),将 PVC 土壤圈 (直径 10 cm) 沿巢穴四周插入,使土壤圈覆盖整个巢穴 (提前 24 h 埋入),在土壤圈上采用 Li-6400 便携式光合作用测量仪 (配备 Li-6400-09 土壤呼吸室) 测定土壤 CO₂ 排放速率,同时在距离每个蚁巢 5 m 外设置一个对照样点 (非筑巢)^[19],同步测定土壤呼吸速率。

在测定蚂蚁巢与非筑巢地土壤呼吸速率同时,采用便携式土壤水分温度测量仪 (SIN-TN8) 测定巢穴与非筑巢地 3 个土层 (0—5、5—10、10—15 cm) 的土壤温度,为了获得巢穴真实的土壤理化性质,破坏性取样采集各层土壤样品,带回实验室进行土壤理化性质测定。土壤含水率 (%) 采用烘干称量法 (105℃, 24 h); 土壤容重环刀法测定; pH 采用电位法测定; 土壤有机质采用油浴加热—重铬酸钾容量法测定; 土壤易氧化碳采用高锰酸钾氧化法; 土壤微生物量碳采用氯仿水浴法; 全氮采用扩散法测定; 水解性氮采用碱解扩散法测定; 铵态氮采用氧化镁浸提扩散法; 硝态氮采用酚二磺酸比色法。

1.3 数据分析

采用经验指数模型来描述土壤温度与土壤呼吸之间的关系: $R_s = ae^{bT}$; R_s 为土壤呼吸速率 ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), T 为土壤温度 (°C), a 代表土壤温度是 0°C 时的土壤呼吸速率, b 为土壤呼吸与温度间指数模型中的温度反应系数。 Q_{10} 值是指土壤呼吸对温度的敏感程度,即温度每升高 10°C 时土壤呼吸速率增加的倍数^[6]。 Q_{10} 值采用指数模型进行计算,公式为: $Q_{10} = e^{10b}$; 采用 Quadratic: $R_s = ax^2 + bx + c$ 回归模型,分别对 0—5、5—10 cm 及 10—15 cm 土壤含水率 (X/%) 和土壤呼吸速率 (R_s) 相互关系进行分析。

将所采集的数据 (土壤温度、土壤湿度、有机质、pH、全氮、水解氮、容重、硝态氮、铵态氮、易氧化碳、微生物量碳) 进行采集后用 Excel 进行作图对比分析,用 SPSS 17.0 进行各变量的差异显著性分析、相关分析及回归分析。

2 结果与分析

2.1 土壤呼吸速率及土壤温度、水分、微生物量碳的时间动态

通过对西双版纳高檐蒲桃热带森林群落蚁巢与非筑巢地土壤呼吸速率的连续观测,研究表明,总体而言,蚁巢土壤呼吸速率均高于非巢地,但经方差分析检验,蚁巢土壤呼吸仅 3 月 [(4.47±0.13) $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$] 和 9 月 [(5.43±0.17) $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$] 与非巢地 [3 月:(4.27±0.24) $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 9 月:(4.09±0.14) $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$] 之间存在显著差异 (图 1, $P < 0.05$)。蚁巢与非巢地土壤呼吸速率随月份均呈单峰型变化趋势 (图 1, $P < 0.05$)。土壤呼吸速率 6 月份均达到最高 (蚁巢为 6.23 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 非巢地为 6.13 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), 均显著高于 12 月 (蚁巢为 3.42 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 非巢地为 3.17 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) ($P < 0.05$)。

经相关分析检验,蚁巢与非筑巢地土壤呼吸速率变化与土壤温度、水分、微生物量碳呈极显著的正相关 (图 1 和图 2, $P < 0.01$)。蚁巢和非巢地不同土层 (0—5、5—10、10—15 cm) 土壤温度、水分、微生物量碳均表现为 6 月份最高,12 月份最低,这种时间变化与土壤呼吸速率变化趋势相一致。不同月份中,蚁巢不同土层土壤温度 ($P < 0.05$) 与土壤微生物量碳 ($P < 0.05$) 均高于非巢地,这与蚁巢土壤呼吸速率高于非巢地相对应。不同土层中,除非筑巢地 12 月份 0—5 cm 与 10—15 cm 土壤温度和 0—5 cm 与 5—10 cm 土壤微生物量碳差异不显著外,其他月份 0—5 cm 蚂蚁筑巢地土壤温度及土壤微生物量碳均显著高于 5—10 cm 与 10—15 cm 土层 ($P < 0.05$)。除蚂蚁筑巢地 3 月份 5—10 cm 土壤水分与非筑巢地差异不显著外,其他月份各层的土壤水

分,蚂蚁筑巢地均显著低于非筑巢地($P<0.05$)。

2.2 土壤呼吸速率与土壤温度及水分的相互关系

2.2.1 与土壤温度的关系

对蚁巢与非筑巢地 3 个土层(0—5、5—10、10—15 cm)土壤温度与土壤呼吸速率分别进行回归分析(图 3),结果表明,蚁巢与非筑巢地各层土壤温度均与土壤呼吸速率达到极显著正相关($P<0.01$)。同时,蚁巢 3 个土层土壤温度均大于非筑巢地(图 2),因此,蚂蚁筑巢改变各土层的土壤温度可能会对土壤呼吸速率产生重要影响。另外,不同土层土壤温度对土壤呼吸的贡献存在差异:蚁巢 0—5 cm 土层土壤温度能够解释 91.76% 土壤呼吸变化,显著高于 5—10 cm 土层温度(83.80%)与 10—15 cm 土层温度(88.42%);非蚁巢 0—5 cm 土层土壤温度可以对土壤呼吸提供 83.11% 的贡献,均大于深层土壤的贡献率(81.23%,82.85%)。根据 Q_{10} 值的大小,可以看出蚁巢土壤表层土壤呼吸速率对土壤温度的敏感度最高($Q_{10} = 1.89$),非蚁巢土壤则为 10—15 cm

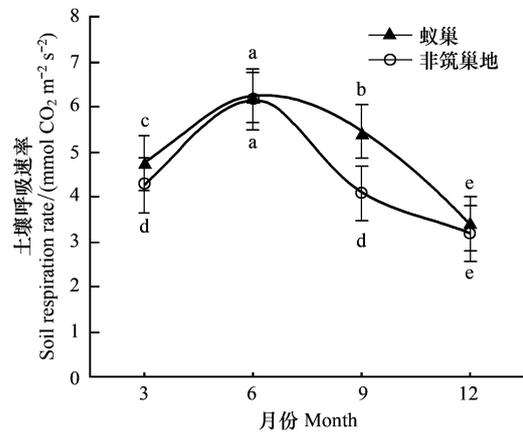


图 1 蚁巢和非筑巢地土壤呼吸速率的时间动态

Fig.1 The seasonal dynamics of soil respiration rate in ant nests VS reference soils

相同小写字母表示差异不显著, $P>0.05$

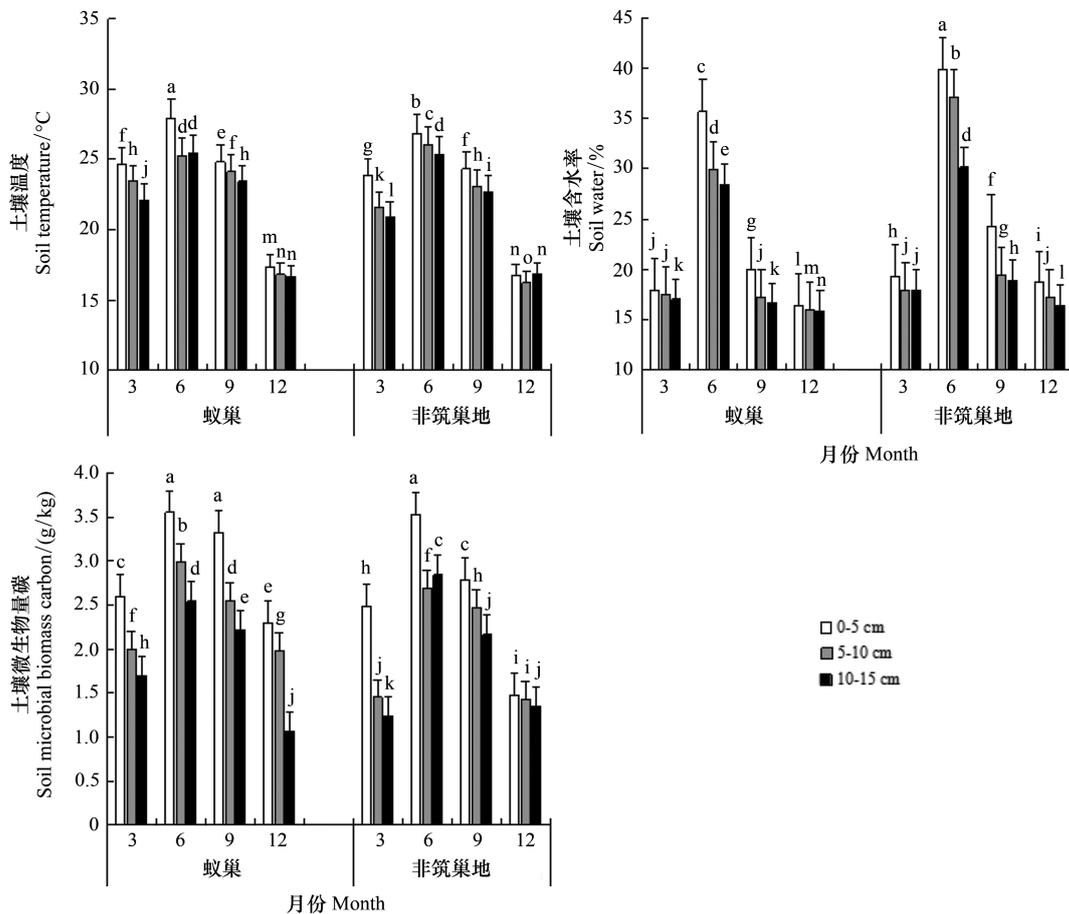


图 2 蚁巢和非筑巢地土壤不同土层土壤温度、水分及微生物量碳的季节动态

Fig.2 The spatiotemporal dynamics of soil temperature, soil water and soil microbial biomass carbon in ant nests VS reference soils
相同小写字母表示差异不显著, $P>0.05$

土层敏感度最高($Q_{10} = 1.97$)。

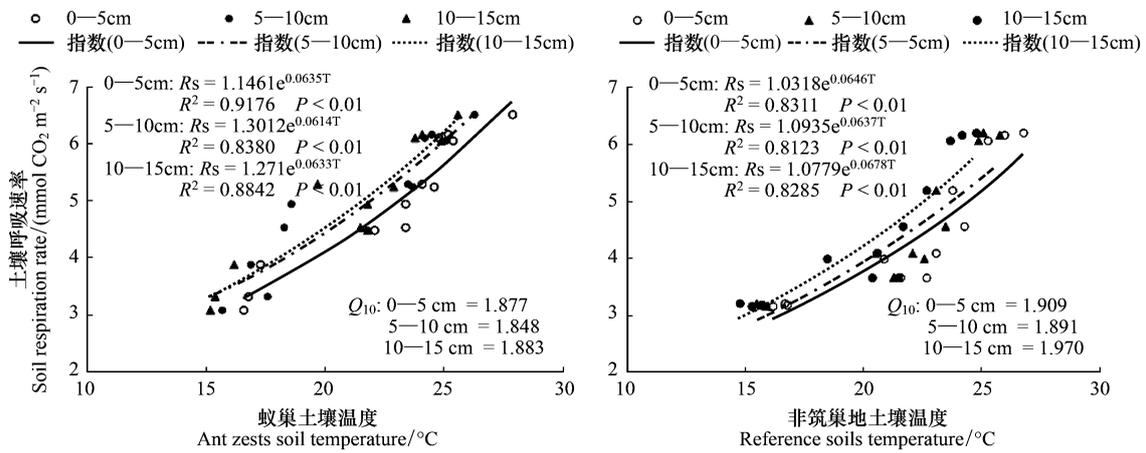


图 3 蚁巢和非筑巢地土壤温度和土壤呼吸速率的关系

Fig.3 Relationship between soil respiration rate and soil temperature in ant nests VS reference soils

2.2.2 与土壤水分的关系

对蚁巢与非筑巢地 3 个土层(0—5、5—10、10—15 cm)土壤水分与土壤呼吸速率相互关系进行回归分析(表 1),结果表明蚁巢与非巢地各土层土壤水分均对土壤呼吸速率达到了极显著影响($P < 0.01$)。但 3 个土层中蚁巢土壤水分对土壤呼吸的贡献率均小于非巢地。另外,蚁巢 0—5 cm 土壤水分对土壤呼吸速率的贡献率(71.59%)小于 5—10 cm(74.14%)与 10—15 cm(74.83%)土层;与之相反,非巢地土壤 0—5 cm 土壤水分对土壤呼吸速率的贡献率(84.71%)高于 5—10 cm(81.18%)与 10—15 cm(77.25%)土层。同时,与非巢地相较而言,蚂蚁筑巢显著降低了 0—5 cm 层土壤水分(图 2),可能导致蚁巢该 0—5 cm 层土壤水分对土壤呼吸速率的贡献率较低。

表 1 蚁巢和非筑巢地土壤水分和土壤呼吸速率的关系

Table 1 Relationship between soil respiration rate and soil water in ant nests VS reference soils

| 土壤类型 Soil type | 土壤深度/cm Soil depth | $Rs = ax^2 + bx + c$ | R^2 | P |
|-------------------------|-----------------------|--------------------------------------|--------|-------|
| 蚁巢 Ant nests soils | 0—5 | $Rs = -0.0139x^2 + 0.8221x - 5.5214$ | 0.7159 | 0.008 |
| | 5—10 | $Rs = -0.0147x^2 + 0.8519x - 5.7198$ | 0.7414 | 0.003 |
| | 10—15 | $Rs = -0.0139x^2 + 0.8045x - 5.0864$ | 0.7483 | 0.001 |
| 非筑巢地 Reference soils | 0—5 | $Rs = -0.0066x^2 + 0.4974x - 3.1391$ | 0.8471 | 0.000 |
| | 5—10 | $Rs = -0.0058x^2 + 0.4479x - 2.3977$ | 0.8118 | 0.000 |
| | 10—15 | $Rs = -0.0041x^2 + 0.3432x - 0.9145$ | 0.7725 | 0.001 |

2.3 土壤呼吸速率与土壤微生物量碳的相互关系

对蚁巢与非筑巢地不同土层(0—5、5—10、10—15 cm)土壤微生物量碳和土壤呼吸速率相互关系进行回归分析,研究表明(图 4),蚁巢与非筑巢地土壤微生物量碳均与土壤呼吸速率呈极显著正相关关系($P < 0.01$),同时,3 个土层中蚁巢微生物量碳均显著大于非筑巢地(图 2),说明蚂蚁筑巢提高了各土层的土壤微生物量碳含量,可能对土壤呼吸速率产生重要影响。另外,0—5 cm 深度土壤微生物量碳对土壤呼吸速率贡献率(蚁巢:76.93%,非巢地:73.72%),显著高于 5—10 cm 土层(蚁巢:72.54%,非巢地:59.95%)与 10—15 cm 土层(蚁巢:71.06%,非巢地:52.20%)。

2.4 土壤呼吸速率与土壤理化性质相互关系

研究表明,蚂蚁筑巢对土壤理化性质的变化产生了重要影响,但对不同土壤指标的影响存在一定的差异

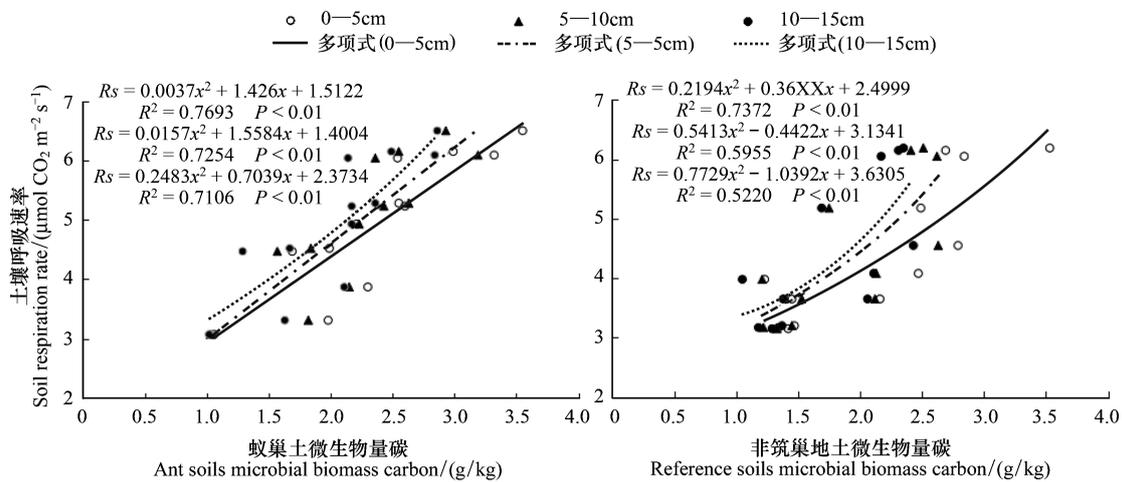


图 4 蚁巢和非筑巢地土壤微生物量碳和土壤呼吸速率的关系

Fig.4 Relationship between soil respiration rate and soil microbial biomass carbon in ant nests VS reference soils

性(表 2)。相对非巢地而言,蚂蚁筑巢显著增加了土壤微生物量碳、易氧化有机碳、铵态氮、水解氮和 pH ($P < 0.05$)。然而,蚂蚁筑巢地土壤有机质、硝态氮、全氮及容重与非巢地没有显著差异。

表 2 蚁巢和非筑巢地土壤理化性质

Table 2 The soil physicochemical properties in ant nests VS reference soils

| 土壤类型 Soil type | 微生物 量碳 MBC/(g/kg) | 易氧化 有机碳 ROC/(mg/g) | 有机质 SOM/ (g/kg) | 全氮 TN/ (g/kg) | 铵态氮 NH ₄ -N/ (mg/g) | 硝态氮 NO ₃ -N/ (mg/g) | 水解氮 HN | pH | 容重 BD/ (g/cm ³) |
|----------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|---------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------|------------|-----------------------------------|
| 蚁巢 Ant nests soils | 2.09±0.46a | 9.98±0.53a | 39.02±6.11a | 1.41±0.39a | 10.53±2.01a | 2.41±0.47a | 116.67±35.23a | 3.53±0.05a | 1.21±0.20a |
| 非筑巢地 Reference soils | 1.72±0.68b | 7.55±0.95b | 35.10±4.88a | 1.35±0.33a | 9.03±1.15b | 2.45±0.51a | 94.39±27.78b | 3.45±0.08b | 1.22±0.19a |

相同小写字母表示不同处理之间没有显著差异 ($P > 0.05$); MBC: 微生物量碳 Microbial biomass carbon; ROC: 易氧化有机碳 Readily oxidized organic carbon; SOM: 有机质 Soil organic matter; TN: 全氮 Total nitrogen; NH₄-N: 铵态氮 Ammonium nitrogen; NO₃-N: 硝态氮 Nitrate nitrogen; HN: 水解氮 Hydrolyzable nitrogen; BD: 容重 Bulk density

对蚁巢和非蚁巢土壤呼吸速率与土壤理化性质进行相关性分析(表 3 与表 4)。蚁巢土壤呼吸速率与土壤微生物量碳、有机质、铵态氮、硝态氮表现出极显著相关关系 ($P < 0.01$), 与土壤异氧化碳、全氮、pH 呈显著相关性 ($P < 0.05$), 与土壤容重呈现出显著负相关关系 ($P < 0.05$), 与土壤水解氮相关性未达到显著性水平。非筑巢地土壤呼吸速率与土壤微生物量碳及铵态氮呈极显著相关 ($P < 0.01$), 与土壤易氧化有机碳、有机质、全氮呈显著相关性 ($P < 0.05$), 与土壤硝态氮、水解氮、pH 相关性不显著, 与土壤容重呈现出负相关关系。

3 讨论

3.1 蚂蚁巢穴与非筑巢地土壤呼吸速率特征

本研究表明,高檐蒲桃群落蚁巢与非筑巢地土壤呼吸速率均具有明显的季节变化,且 6 月份达最大值,呈现单峰型变化趋势,这与前人的研究结果基本一致^[20-22]。同时,蚁巢与非筑巢地土壤呼吸速率具有与土壤温度、水分及微生物量碳等相一致的时间变化规律。房秋兰和沙丽清^[23]关于西双版纳热带森林的研究也表明,季节雨林和橡胶林土壤呼吸速率与土壤温度、土壤含水率及微生物的季节变化相似。因此,土壤呼吸速率周期性的变化主要由土壤温度、土壤水分的周期性变化所调控,同时与土壤微生物的动态(如微生物量碳)密切相关^[24]。

本研究表明,样地各个月份蚂蚁巢穴土壤呼吸呈现高于非筑巢地的趋势,但仅在 3 月和 9 月份巢穴与非筑巢之间土壤呼吸存在显著差异 ($P < 0.05$),表明蚂蚁筑巢活动对土壤 CO₂ 的排放产生了一定的影响。蚂蚁

巢穴土壤呼吸速率在 6 月至 9 月的变化幅度 ($0.8 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) 小于非筑巢地 ($2.04 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), 6 月巢穴与非巢地土壤呼吸速率未能达到显著差异, 可能与蚂蚁筑巢能够保持温度和水分相对稳定密切相关。蚁巢具有物理隔离作用, 不仅能够在气温较高时降低巢内温度, 而且在降雨量增大时维持巢内湿度^[25]。

表 3 蚁巢土壤呼吸速率与土壤理化性质的相关性分析

Table 3 Correlation of physicochemical properties with soil respiration rate in nesting soils

| 蚁巢 Ant nests soils | 土壤呼 吸速率 <i>R_s</i> | 微生物 生物量碳 MBC | 易氧化 有机碳 ROC | 有机质 SOM | 全氮 TN | 铵态氮 NH ₄ -N | 硝态氮 NO ₃ -N | 水解氮 HN | pH | 容重 BD |
|--------------------------|------------------------------------|--------------------|-------------------|------------|----------|---------------------------|---------------------------|-----------|--------|----------|
| <i>R_s</i> | 1 | | | | | | | | | |
| MBC | 0.877 ** | 1 | | | | | | | | |
| ROC | 0.671 * | 0.796 ** | 1 | | | | | | | |
| SOM | 0.834 ** | 0.879 ** | 0.570 | 1 | | | | | | |
| TN | 0.645 * | 0.856 ** | 0.779 ** | 0.687 * | 1 | | | | | |
| NH ₄ -N | 0.740 ** | 0.820 ** | 0.939 ** | 0.569 | 0.717 ** | 1 | | | | |
| NO ₃ -N | 0.767 ** | 0.792 ** | 0.404 | 0.888 ** | 0.637 * | 0.451 | 1 | | | |
| HN | 0.515 | 0.781 ** | 0.497 | 0.822 ** | 0.746 * | 0.433 | 0.785 ** | 1 | | |
| pH | 0.635 * | 0.811 ** | 0.851 ** | 0.524 | 0.920 ** | 0.833 ** | 0.518 | 0.557 | 1 | |
| BD | -0.770 ** | -0.833 ** | -0.495 | -0.859 ** | -0.600 * | -0.606 * | -0.779 ** | -0.764 ** | -0.554 | 1 |

** 表示 $P < 0.01$ 显著水平; * 表示 $P < 0.05$ 显著水平; *R_s*: 土壤呼吸速率 Soil respiration rate

表 4 非筑巢地土壤呼吸速率与土壤理化性质的相关性分析

Table 4 Correlation of physicochemical properties with soil respiration rate in reference soils

| 非筑巢地 Reference soils | 土壤呼 吸速率 <i>R_s</i> | 微生物 生物量碳 MBC | 易氧化 有机碳 ROC | 有机质 SOM | 全氮 TN | 铵态氮 NH ₄ -N | 硝态氮 NO ₃ -N | 水解氮 HN | pH | 容重 BD |
|----------------------------|------------------------------------|--------------------|-------------------|------------|-----------|---------------------------|---------------------------|-----------|--------|----------|
| <i>R_s</i> | 1 | | | | | | | | | |
| MBC | 0.854 ** | 1 | | | | | | | | |
| ROC | 0.582 * | 0.655 * | 1 | | | | | | | |
| SOM | 0.704 * | 0.912 ** | 0.632 * | 1 | | | | | | |
| TN | 0.664 * | 0.766 ** | 0.584 * | 0.697 * | 1 | | | | | |
| NH ₄ -N | 0.757 ** | 0.757 ** | 0.598 * | 0.704 * | 0.886 ** | 1 | | | | |
| NO ₃ -N | 0.540 | 0.743 ** | 0.276 | 0.717 * | 0.771 ** | 0.555 | 1 | | | |
| HN | 0.545 | 0.743 ** | 0.837 ** | 0.833 ** | 0.613 * | 0.546 | 0.515 | 1 | | |
| pH | 0.399 | 0.400 | 0.568 | 0.324 | 0.828 ** | 0.767 ** | 0.391 | 0.445 | 1 | |
| BD | -0.419 | -0.684 * | -0.597 * | -0.729 ** | -0.712 ** | -0.527 | -0.728 ** | -0.830 ** | -0.458 | 1 |

** 表示 $P < 0.01$ 显著水平; * 表示 $P < 0.05$ 显著水平

3.2 蚂蚁筑巢引起土壤温度变化对土壤呼吸的影响

土壤温度是影响土壤呼吸速率的一个重要的非生物环境因子, 本研究发现蚂蚁筑巢活动能够显著提高土壤温度 ($P < 0.05$)。蚂蚁筑巢能够维持较高的土壤温度, 可能与蚁巢对温度的物理隔离、蚁巢和蚂蚁对太阳辐射的接受以及蚁巢内微生物的新陈代谢产热密切相关^[25]。

蚂蚁筑巢引起土壤温度升高能够对土壤呼吸产生重要影响^[21-22]。本研究表明, 土壤呼吸速率与土壤温度呈极显著的正相关关系 ($P < 0.01$), 温度对土壤呼吸的贡献率蚁巢 (83.8%—91.8%) 大于非筑巢地土壤 (81.2%—83.1%), 说明蚂蚁筑巢能够通过改变巢内温度进而显著影响土壤呼吸速率。研究表明, 温度主要通过影响植物根系活动、土壤微生物数量与活性以及土壤酶活性等调控土壤呼吸动态^[26]。卢华正等^[27]的研究表明, 西双版纳热带季节雨林和橡胶林受土壤温度的影响, 其根系和土壤微生物的活性发生改变, 土壤呼吸也发生变化。杨庆朋等^[28]研究发现, 土壤温度较低时, 土壤酶的活性受限, 温度升高后, 酶的活性随之增强, 从

而改变土壤呼吸速率。冯朝阳等^[29]研究表明土壤温度可以通过影响微生物活性来改变土壤有机质的分解,进而改变土壤呼吸的速率。本研究中蚂蚁巢穴土壤具有较高的土壤温度,可能引起微生物的活动,从而能够对土壤呼吸速率产生重要影响。

3.3 蚂蚁筑巢引起对土壤水分变化对土壤呼吸的影响

土壤水分是能够显著影响土壤呼吸速率的另一个重要环境因子,本研究结果表明,除3月份,蚂蚁筑巢能够降低土壤水分($P < 0.05$)。有研究认为,蚂蚁取食时造成的植物组织覆盖地表,减少了水分的下渗,从而降低土壤水分^[30-31]。也有研究认为蚂蚁的呼吸、排泄、筑巢活动会增加蚁巢的湿度,从而增加土壤含水量^[32]。Woodell 和 King 等人^[33]及 Blomqvist 等人^[34]发现蚁丘具有较低的土壤水分含量,与增加的蒸发有关,因为在土堆中存在更多的毛孔,洞穴和通道。因此,蚂蚁筑巢能够显著影响土壤水分表现为增加或降低,具有一定的不确定性。

蚂蚁筑巢引起土壤水分的降低能够对土壤呼吸产生重要影响^[12,21]。蚁巢各土层土壤水分与土壤呼吸速率具有极显著的正相关关系,但由于蚁巢水分低于非巢地,蚁巢土壤水分对土壤呼吸的贡献率低于非巢地。研究表明,土壤水分与土壤呼吸速率呈正相关关系^[20,35],更多的研究认为土壤水分含量太高或太低都会抑制土壤呼吸速率,高于土壤最大持水率的 66.3% 或低于土壤体积分含水量的 5%—20%,会导致土壤呼吸速率降低甚至停止^[36]。土壤水分主要通过改变土壤中根系和微生物活性、土壤孔隙度、土壤气体扩散等方式来调控土壤呼吸^[37]。因此,在湿润的热带森林中,蚂蚁筑巢降低土壤湿度能够对土壤呼吸产生促进作用。

3.4 蚂蚁筑巢引起土壤微生物变化对土壤呼吸的影响

土壤微生物作为土壤中最活跃的生物组成部分,是影响土壤呼吸的主要生物因素^[38]。本研究结果表明,与非巢地相比,蚂蚁筑巢地具有较高的微生物生物量碳($P < 0.05$),说明蚂蚁活动显著促进土壤微生物的数量增长^[32]。蚂蚁筑巢活动能够通过改变土壤理化状况从而影响土壤微生物生物量碳的动态。

本研究中蚂蚁筑巢提高土壤微生物生物量碳含量,从而影响了土壤呼吸速率。蚂蚁筑巢引起土壤微生物量碳的增加,能够解释 71.1%—76.9% 土壤呼吸的变化,高于非筑巢地土壤微生物生物量碳对土壤呼吸的释量(52.2%—73.7%)。屈冉等人研究发现,土壤微生物是影响土壤呼吸速率的重要因素^[39]。郭明英等^[40]研究也表明土壤呼吸速率与土壤微生物量碳呈显著的正相关。因此,蚂蚁筑巢定居活动能够直接或间接影响巢内土壤温度、水分及养分,可能影响到土壤微生物数量及活性,进而对土壤呼吸产生重要影响。

3.5 蚂蚁筑巢引起土壤理化性质变化对土壤呼吸的影响

本研究中,蚂蚁筑巢显著提高了土壤有机质、易氧化有机碳、全氮、硝氮及铵氮等土壤养分含量,对土壤呼吸产生了重要影响。大量研究表明,蚂蚁能够通过筑巢、取食及排泄等活动把其他昆虫尸体、植物组织、蚜虫蜜露等物质带入蚁巢以及蚂蚁排泄物的积累,使蚁巢内 C、N 等养分含量富集^[41]。蚂蚁物质搬运活动会导致蚁巢内微环境,如酸碱度、温度、湿度以及土壤结构等发生变化,进而影响到土壤微生物区系的活性和丰富度^[42]。

土壤呼吸速率与测定的碳氮土壤养分指标具有显著正相关关系,说明蚂蚁筑巢引起土壤碳氮养分的变化对土壤呼吸动态产生了重要影响。土壤碳、氮元素的积累能为土壤微生物提供必须的碳/氮源和能量,影响土壤微生物的呼吸,从而提高土壤呼吸速率^[43]。一些研究表明,土壤有机质^[44]或土壤有机碳^[45]能够显著提高土壤微生物呼吸的底物,而土壤全氮^[46-47]、硝态氮^[45]、水解氮^[48]则能够通过促进植物根系生长,影响土壤微生物参与的有机物的分解,从而影响到土壤呼吸速率。因此,蚂蚁筑巢通过引起土壤碳、氮养分含量的增加,从而促进土壤 CO₂ 的排放。

本研究中蚂蚁筑巢显著降低了土壤容重。大多数研究普遍认为,蚂蚁对土壤掘穴,增加了土壤的孔隙度,进而改变了土壤内部固体和气体之间的比例,导致堆积密度的降低^[49]。陈骥等^[31]在青海湖北岸高寒草甸草原群落分析中发现。蚂蚁在筑巢的时候通过挖掘土壤,对有机物质的搬运,显著降低了土壤容重($P < 0.05$)。鱼小军等人^[30]在东祁连山高寒草地分析中发现,蚁巢土壤与相邻非蚁巢土壤相比,容重下降了 59%。同时,

本研究发现蚂蚁筑巢地土壤容重与土壤呼吸速率呈显著负相关, 蚂蚁筑巢降低土壤容重对土壤呼吸产生重要影响。因此, 蚂蚁筑巢降低土壤容重, 能够显著影响土壤孔隙度、持水性、通气性, 并改变土壤温度、土壤水分、植物根系和土壤微生物活性, 进而对土壤呼吸速率产生重要影响。

参考文献 (References):

- [1] 周涛, 史培军, 孙睿, 王绍强. 气候变化对净生态系统生产力的影响. 地理学报, 2004, 59(3): 357-365.
- [2] Blagodatsky S, Smith P. Soil physics meets soil biology: towards better mechanistic prediction of greenhouse gas emissions from soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 47: 78-92.
- [3] 韩广轩, 周广胜. 土壤呼吸作用时空动态变化及其影响机制研究与展望. 植物生态学报, 2009, 33(1): 197-205.
- [4] Scharlemann J P W, Tanner E V J, Hiederer R, Kapos V. Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. *Carbon Management*, 2014, 5(1): 81-91.
- [5] Matías L, Castro J, Zamora R. Effect of simulated climate change on soil respiration in a Mediterranean-type ecosystem: rainfall and habitat type are more important than temperature or the soil carbon pool. *Ecosystems*, 2012, 15(2): 299-310.
- [6] 刘颖, 韩士杰, 胡艳玲, 戴冠华. 土壤温度和湿度对长白松林土壤呼吸速率的影响. 应用生态学报, 2005, 16(9): 1581-1585.
- [7] Wang S J, Wang H. Response of soil respiration to a severe drought in Chinese *Eucalyptus* plantations. *Journal of Forestry Research*, 2017, 28(4): 841-847.
- [8] Subke J A, Carbone M S, Khomik M, Stoy P, Bahn M. Preface "Biotic interactions and biogeochemical processes in the soil environment". *Biogeosciences*, 2012, 9(5): 1823-1825.
- [9] Folgarait P J, Perelman S, Gorosito N, Pizzio R, Fernández J. Effects of *Camponotus punctulatus* ants on plant community composition and soil properties across land-use histories. *Plant Ecology*, 2002, 163(1): 1-13.
- [10] 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.
- [11] Lubbers I M, Van Groenigen K J, Fonte S J, Six J, Brussaard L, Van Groenigen J W. Greenhouse-gas emissions from soils increased by earthworms. *Nature Climate Change*, 2013, 3(3): 187-194.
- [12] 何娜, 王立海. 压实对土壤理化特性及土壤呼吸的影响研究进展. 森林工程, 2010, 26(1): 7-11.
- [13] Koehler B, Zehe E, Corre M D, Veldkamp E. An inverse analysis reveals limitations of the soil-CO₂ profile method to calculate CO₂ production and efflux for well-structured soils. *Biogeosciences*, 2010, 7(8): 2311-2325.
- [14] Oren A, Steinberger Y. Coping with artifacts induced by CaCO₃-CO₂-H₂O equilibria in substrate utilization profiling of calcareous soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(10): 2569-2577.
- [15] Pétal J. The influence of ants on carbon and nitrogen mineralization in drained fen soils. *Applied Soil Ecology*, 1998, 9(1/3): 271-275.
- [16] Czerwinski Z, Jakubczyk H, Petal J. The influence of ants of the genus *Myrmica* on the physico-chemical and microbiological properties of soil within the compass of anthills in the Strzeleckie meadows. *Polish Journal of Soil Science*, 1969, 2: 51-58.
- [17] Risch A C, Jurgensen M F, Schütz M, Page-Dumroese D S. The contribution of red wood ants to soil C and N pools and CO₂ emissions in subalpine forests. *Ecology*, 2005, 86(2): 419-430.
- [18] 杨效东, 余宇平, 张智英, 曹敏, 邓小保. 西双版纳傣族“龙山”片断热带雨林蚂蚁类群结构与多样性研究. 生态学报, 2001, 21(8): 1321-1328.
- [19] Holec M, Frouz J. The effect of two ant species *Lasius niger* and *Lasius flavus* on soil properties in two contrasting habitats. *European Journal of Soil Biology*, 2006, 42(S1): S213-S217.
- [20] 王邵军, 王红, 李霁航. 土壤温度与水分对昆明城市绿地土壤呼吸时间动态的影响. 西北林学院学报, 2016, 31(5): 306-310.
- [21] 赵吉霞, 王邵军, 陈奇伯, 王艳霞, 熊好琴. 滇中高原云南松幼林和成熟林土壤呼吸及主要影响因子分析. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2014, 38(3): 71-76.
- [22] 赵吉霞, 王邵军, 陈奇伯, 陈敏全, 舒蛟靖, 李元玖. 滇中云南松林土壤呼吸季节动态及其影响因子研究. 西北林学院学报, 2015, 30(3): 8-13, 20-20.
- [23] 房秋兰, 沙丽清. 西双版纳热带季节雨林与橡胶林土壤呼吸. 植物生态学报, 2006, 30(1): 97-103.
- [24] 武传胜, 沙丽清, 高建梅, 董丽媛. 哀牢山中山湿性常绿阔叶林与人工茶园土壤呼吸的季节变化. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2012, 36(3): 64-68.
- [25] Frouz J. The effect of nest moisture on daily temperature regime in the nests of *Formica polyctena* wood ants. *Insectes Sociaux*, 2000, 47(3): 229-235.

- [26] 王红, 王邵军, 李霁航, 阿丽米拉·叶尔肯. 森林土壤呼吸及其主要调控因素研究进展. 西北林学院学报, 2017, 32(1): 92-97.
- [27] 卢华正, 沙丽清, 王君, 胡文艳, 吴兵霞. 西双版纳热带季节雨林与橡胶林土壤呼吸的季节变化. 应用生态学报, 2009, 20(10): 2315-2322.
- [28] 杨庆朋, 徐明, 刘洪升, 王劲松, 刘丽香, 迟永刚, 郑云普. 土壤呼吸温度敏感性的影响因素和不确定性. 生态学报, 2011, 31(8): 2301-2311.
- [29] 冯朝阳, 吕世海, 高吉喜, 刘尚华, 林栋. 华北山地不同植被类型土壤呼吸特征研究. 北京林业大学学报, 2008, 30(2): 20-26.
- [30] 鱼小军, 蒲小鹏, 黄世杰, 方强恩, 徐宁, 徐长林. 蚂蚁对东祁连山高寒草地生态系统的影响. 草业学报, 2010, 19(2): 140-145.
- [31] 陈骥, 曹军骥, 张思毅, 樊云龙, 王小菲, 魏永林. 蚂蚁扰动对青海湖北岸高寒草甸草原群落结构影响. 地球环境学报, 2013, 4(5): 1461-1469, 1480-1480.
- [32] 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.
- [33] Woodell S R J, King T J. The influence of mound-building ants on British lowland vegetation//Huxley C R, Cutler D F, eds. Ant-Plant Interactions. Oxford: Oxford University Press, 1991: 521-535.
- [34] Blomqvist M M, Olff H, Blaauw M B, Bongers T, Van Der Putten W H. Interactions between above-and belowground biota: importance for small-scale vegetation mosaics in a grassland ecosystem. Oikos, 2000, 90(3): 582-598.
- [35] Hashimoto S, Tanaka N, Suzuki M, Inoue A, Takizawa H, Kosaka I, Tanaka K, Tantasirin C, Tangtham N. Soil respiration and soil CO₂ concentration in a tropical forest, Thailand. Journal of Forest Research, 2004, 9(1): 75-79.
- [36] 沙丽清, 郑征, 唐建维, 王迎红, 张一平, 曹敏, 王锐, 刘广仁, 王跃思, 孙扬. 西双版纳热带季节雨林的土壤呼吸研究. 中国科学 D 辑地球科学, 2004, 34(S2): 167-174.
- [37] 黄石德. 降水和凋落物对木荷马尾松混交林土壤呼吸的影响. 浙江农林大学学报, 2012, 29(2): 218-225.
- [38] Cole B J. Nest architecture in the western harvester ant, *Pogonomyrmex occidentalis* (Cresson). Insectes Sociaux, 1994, 41(4): 401-410.
- [39] 屈冉, 李俊生, 罗遵兰, 吴晓蕾, 赵彩云, 汤博. 土壤微生物和有机酸对土壤呼吸速率的影响. 水土保持学报, 2010, 24(4): 242-245.
- [40] 郭明英, 朝克图, 尤金成, 徐丽君, 王丽娟, 贾淑杰, 辛晓平. 不同利用方式下草地土壤微生物及土壤呼吸特性. 草地学报, 2012, 20(1): 42-48.
- [41] Wagner D, Brown M J F, Gordon D F. Harvester ant nests, soil biota and soil chemistry. Oecologia, 1997, 112(2): 232-236.
- [42] 侯继华, 周道玮, 姜世成. 蚂蚁筑丘活动对松嫩草地植物群落多样性的影响. 植物生态学报, 2002, 26(3): 323-329.
- [43] Joshi M. Patterns of soil respiration in a temperate grassland of Kumaun Himalaya, India. Journal of Tropical Forest Science, 1995, 8(2): 185-195.
- [44] 陈书涛, 刘巧辉, 胡正华, 刘艳, 任景全, 谢薇. 不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异的影响因素. 环境科学, 2013, 34(3): 1017-1025.
- [45] Huang X M, Liu S R, Wang H, Hu Z D, Li Z G, You Y M. Changes of soil microbial biomass carbon and community composition through mixing nitrogen-fixing species with *Eucalyptus urophylla* in subtropical China. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 73: 42-48.
- [46] 孙轶, 魏晶, 吴钢, 赵景柱. 长白山高山冻原土壤呼吸及其影响因子分析. 生态学杂志, 2005, 24(6): 603-606.
- [47] 张东秋, 石培礼, 张宪洲. 土壤呼吸主要影响因素的研究进展. 地球科学进展, 2005, 20(7): 778-785.
- [48] 赵吉霞, 王邵军, 陈奇伯, 王艳霞, 舒蛟靖. 滇中高原云南松天然林和人工林土壤呼吸特征的比较. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(1): 96-103.
- [49] MacMahon J A, Mull J F, Crist T O. Harvester ants (*Pogonomyrmex* spp.): their community and ecosystem influences. Annual Review of Ecology and Systematics, 2000, 31: 265-291.