

DOI: 10.5846/stxb201610272195

刘玉槐, 严员英, 张艳杰, 严月, 赵玉皓, 徐燕, 陈伏生, 葛体达, 鲁顺保. 不同温度条件下亚热带森林土壤碳矿化对氮磷添加的响应. 生态学报, 2017, 37(23): 7994-8004.

Liu Y H, Yan Y Y, Zhang Y J, Yan Y, Zhao Y H, Xu Y, Chen F S, Ge T D, Lu S B. Effects of nitrogen and phosphorus addition under different temperatures on the soil carbon mineralization in a *Cunninghamia lanceolata* plantation in the subtropics. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(23): 7994-8004.

不同温度条件下亚热带森林土壤碳矿化对氮磷添加的响应

刘玉槐^{1,4}, 严员英², 张艳杰¹, 严月¹, 赵玉皓¹, 徐燕¹, 陈伏生³, 葛体达⁴, 鲁顺保^{1,*}

1 江西师范大学生命科学学院, 南昌 330022

2 江西省林业科学院湿地中心, 南昌 330032

3 江西农业大学林学院, 南昌 330045

4 中国科学院亚热带农业生态研究所区域农业生态研究中心, 长沙 410125

摘要:在氮沉降增加的背景下, 土壤可利用性氮(N)素增加是多数陆地生态系统正经历的重要生态学过程。氮沉降增加对土壤呼吸会产生扰动, 进而影响到森林土壤碳循环。以江西省泰和县石溪杉木林为研究对象, 开展 N 沉降模拟试验, 采用碱液吸收法分析 4 种不同 N 沉降处理在不同温度(5、15、25、35℃)下对土壤碳排放量的影响。N 沉降对土壤呼吸具有抑制作用, 随着温度的升高, 各处理对土壤呼吸碳排放呈显著性增加趋势($P < 0.05$)。不同温度条件下添加磷(P)处理对 CO₂ 累积排放量与添加高 N 处理变化规律类似。在 5℃ 条件下, N 会抑制土壤碳矿化, 且随 N 浓度升高抑制作用越强, P 处理能促进土壤碳排放; 15℃ 和 35℃ 条件下, N 和 P 处理对土壤碳排放量均有抑制作用。在较高温度(25℃ 和 35℃)培养下, 土壤全碳对 CO₂ 累积排放量均有显著性影响。在 25℃ 条件下, 土壤 DOC 含量对土壤碳排放量的影响显著($P < 0.05$), 其他温度无影响。在 5℃ 时, 不同处理下土壤含水量对土壤碳排放量影响显著。对 N 沉降与土壤 Q_{10} 值进行方差分析表明不同处理对 Q_{10} 值无显著性差异。通过单库模式方程 $C_m = C_o(1 - \exp^{-kt})$ 对土壤潜在碳排放进行模拟得出 5、15℃ 和 35℃ 对土壤潜在排放量有显著影响。

关键词:氮沉降; 杉木; 碳矿化; 温度

Effects of nitrogen and phosphorus addition under different temperatures on the soil carbon mineralization in a *Cunninghamia lanceolata* plantation in the subtropics

LIU Yuhuai^{1,4}, YAN Yuanying², ZHANG Yanjie¹, YAN Yue¹, ZHAO Yuhao¹, XU Yan¹, CHEN Fusheng³, GE Tida⁴, LU Shunbao^{1,*}

1 College of Life Sciences, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China

2 Centre for Wetland Jiangxi Forestry Academy, Nanchang 330032, China

3 College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China

4 Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China

Abstract: Increase in the soil nitrogen (N) availability under increasing N deposition is an important ecological process

基金项目:国家自然科学基金(31360136, 31560168, 31660072); 江西省自然科学基金(20151BAB204007, 20161BAB204175)

收稿日期:2016-10-27; **网络出版日期:**2017-08-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: luxunbao8012@126.com

that most terrestrial ecosystems experience. Increasing N deposition could affect soil respiration and consequently, affect the soil carbon (C) and N cycling. In this study, an N deposition simulation experiment was carried out in the *Cunninghamia lanceolata* forest in Shixi, Taihe County, Jiangxi Province, China. Soil carbon emissions were analyzed, using an alkali absorption method, under four treatments (no N and Phosphorus (P) addition (CK), N1 addition, N2 addition, and P addition) at four different temperatures (5°C, 15°C, 25°C, and 35°C). Soil respiration was inhibited by N deposition. As the temperature increased, soil respiration increased substantially ($P < 0.05$). Different treatments had different effects on soil carbon emissions. The change regulation of CO₂ accumulation emission and high N change regulation were similar for P addition under different temperature conditions. At 5°C, N addition inhibited soil carbon mineralization and this effect was stronger with increasing N concentration, whereas P addition promoted the soil carbon emission with increasing N concentration. However, at 15°C and 35°C, N and P addition had an inhibitory effect on the soil carbon emission. At higher temperatures (25°C and 35°C), total soil carbon significantly affected the CO₂ accumulation; however, at lower temperatures (5°C and 15°C) total soil carbon had the opposite effect on CO₂ accumulation. At 5°C, soil water content in different treatments had a significant effect on soil carbon emission, whereas the other three temperatures (15°C, 25°C, and 35°C) had no significant effect. At 25°C, soil carbon emission was significantly affected by soil DOC ($P < 0.05$), whereas no effect was observed at the other three soil temperatures (5°C, 15°C, and 35°C). At 25°C, soil DON had no significant effect on soil carbon accumulation emission. At 5°C, soil water content in different treatments had a significant effect on soil carbon emission but no significant effect at the other three temperatures (15°C, 25°C, and 35°C). The Q_{10} value under N and P addition was lower than that under the control condition (no N and P addition) and the Q_{10} value decreased with increasing N concentration. However, the difference in N deposition had no significant effect on the Q_{10} values. The potential carbon emission from soil respiration was simulated by the single reservoir model, $C_m = C_o(1 - \exp^{-kt})$. The results indicated that the four treatments had a significant effect on potential soil carbon emission at 5°C, 15°C, and 35°C, but no significant effect at 25°C.

Key Words: N deposition; *Cunninghamia lanceolata* plantation; carbon mineralization; temperature

土壤呼吸是陆地生态系统土壤和大气之间 CO₂ 交换的重要组成部分。全球气候变化引起气温升高加速了土壤有机碳在微生物和动物的矿化作用,其产物通过土壤呼吸作用以 CO₂ 形式释放反馈回大气圈,进一步加剧全球变暖,因此,土壤呼吸对环境变化反应最为敏感^[1-2],这也是目前全球变化研究的热点问题,各国学者对此研究异常活跃,他们正尝试通过量化各种生态系统碳通量与环境因子之间的关系模型来预测未来全球变化对陆地生态系统的影响^[3]。

N、P 是植物生长的必需元素,也是植物从土壤中吸收最多的元素。在土壤中 99% 以上的氮素是通过微生物矿化作用将其转化为植物可直接吸收的有效态氮^[4]。当前全球气温升高、降水格局改变以及大气氮沉降增加等因素正在强烈改变着陆地生态系统的碳汇强度及其分布格局^[5]。这些动态的环境因子迫使植被改变其小气候进而影响土壤呼吸。大量的研究表明土壤水分和温度敏感性对土壤碳矿化具有重要影响^[6-7],施氮肥对土壤呼吸的影响也存在较大争议,如 Gallardo 等^[8]认为施氮肥能够增加土壤呼吸,Kane 等^[9]的研究表明施氮肥对土壤呼吸速率没有显著的影响,Haynes 等^[10]对针叶林地施肥结果却显著降低土壤的呼吸速率。

近年来,大气氮沉降加重^[11],并成为全球化趋势^[12],我国现已是世界第三大氮沉降集中区^[13]。全球化背景下大气氮沉降量的增加已成为许多森林的新生态因子^[14],长期的高氮输入可提高土壤碳矿化速率,导致土壤酸化。土壤呼吸对气候变化(氮沉降、温度和水分)又非常敏感,且氮沉降、温度及水分对其土壤碳矿化影响机制尚未得到一致结论,氮沉降和温度变化是亚热带地区面临的重要生态环境问题,它们对森林地土壤碳矿化的影响如何?土壤呼吸对二者间的响应是否存在差异?均具有重要科学意义。本文以杉木人工林为研究对象,拟通过模拟气候变化试验,研究该地区土壤碳矿化对氮沉降以及温度敏感性的响应,研究结果将有

利于了解氮沉降如何引起土壤碳排放的变化,为降低土壤 CO₂ 排放提供参考。

1 研究地区与研究方法

1.1 试验地概况

试验地位于江西省泰和县中国科学院千烟洲生态试验站(26°42'N, 115°04'E), 该地区属典型的中亚热带湿润季风气候, 夏季炎热干燥, 冬季寒冷潮湿。年均相对湿度 89%, 年均温度在 18℃, 6 月最高温达 29.7℃, 1 月最低温可达 6.5℃, 年均日照时数 1400 h, 年总辐射量约为 4349 MJ/m², 年平均降水量约为 1500 mm, 降雨集中在 4—6 月, 夏季降水量占全年降水量的 50% 以上。该区域为典型红壤丘陵地貌, 土壤母质是第四纪红粘土。研究区域大气沉降向林地输入的氮为 82.8 kg hm⁻² a⁻¹, 干沉降为主, 占 67%, 大气氮沉降是大气氮沉降主要贡献者, 占大气干沉降 82.0%, 占大气氮沉降总量的 56%^[15]。

1.2 实验设计及样品采集

试验样地起始时间为 1990 年, 1991 年 4 月开始种植植物。施肥自 2012 年春季起, 每季度各施肥 1 次, 施肥方式是将氮肥和磷肥拌少量细沙进行均匀撒施。土壤样品采集时间为 2015 年 1 月, 在立地条件一致的杉木人工林中, 选取 12 个 20 m×20 m 的样方, 将这 12 个样方随机各选出 3 个样方作为重复, 每个重复分别进行 CK、N₁、N₂ 和 P 处理, 4 种处理分别为: CK 为不施肥只施沙; N₁: 氮肥(NH₄NO₃) 量为 142.857 kg hm⁻² a⁻¹ (含氮量为 50 kg N hm⁻² a⁻¹); N₂: 285.714 kg hm⁻² a⁻¹ (含氮量为 100 kg N hm⁻² a⁻¹); P: 磷肥(Na₂HPO₄) 量为 229.043 kg hm⁻² a⁻¹ (含磷量为 50 kg P hm⁻² a⁻¹), 相邻样方之间留出一个间距为 10 m 的缓冲带以减少不同施肥带来的影响。在每个样方中以 S 型选取 5 个点, 分别用直径 7.5 cm 的土钻在 0—10 cm 取土壤样品, 然后将从同一样方的土壤混合, 每份土壤样品约 1000 g, 装入无菌自封袋带回实验室。将新鲜土壤样品过 2 mm 筛去除土壤动物、小石头、可见的植物残体和根系等杂质, 再将每份土壤样品平均分为 2 份, 一份用于测定土壤含水量、pH、全氮和全碳的含量, 另一份放入 4℃ 冰箱保存, 用于测定土壤可溶性碳氮及生物活性。土壤基本理化性质见表 1。

表 1 土壤的基本理化性质

Table 1 Physicochemical properties of the soil used in the experiment

处理 Treatments	含水量 Moisture/%	pH	全氮 Total N/%	全碳 Total C/%	碳氮比 C/N	全磷 Total P/‰
CK	20.64±1.35a	4.45±0.12ac	0.14±0.02a	2.24±0.23a	15.84±0.57a	0.16±0.02b
N ₁	19.55±0.81a	4.19±0.05b	0.13±0.01a	2.14±0.10a	16.36±0.36	0.16±0.01b
N ₂	19.30±0.93a	4.21±0.05c	0.13±0.00a	2.11±0.10a	15.76±0.36a	0.17±0.01b
P	19.08±1.35a	4.65±0.11a	0.13±0.02a	2.02±0.16a	15.66±0.95a	0.27±0.01a

CK 为不施肥只施沙; N₁: 含氮量为 50 kg N hm⁻² a⁻¹; N₂: 含氮量为 100 kg N hm⁻² a⁻¹; P: 含磷量为 50 kg P hm⁻² a⁻¹。同列不同字母 a、b、c 表示不同处理间土壤理化性质差异显著 ($P < 0.05$)

1.3 实验方法

方法参照 Chen 等^[16], 采用元素分析仪 (Isoprime-EuroEA3000, 意大利) 测定土壤全碳、全氮含量, SOC、SON 含量采用 2 mol/L KCl 浸提, 然后用 TOCN 分析仪测定 SOC 和可溶性总氮 (total soluble N, TSN), pH 值用 1:25 水溶液、pH 计测定, 土壤碳矿化测试方法: 先称取新鲜土壤 40.0 g, 将其含水量调到田间持水量的 60%, 放入 4 个恒温培养箱 (温度分别设为 5、15、25、35℃) 里进行 42 d 培养。土壤碳矿化测定方法采用碱液吸收法: 2 个 70 mL 的带盖塑料瓶置于 1 L 的容器内, 其中一个为 CO₂ 吸收装置, 其内加入用于吸收 CO₂ 的 0.1 mol/L NaOH, 另一个装有 40.0 g 鲜土, 在 22℃ 条件下进行培养, 同时做 5 个对照试验 (仅放置碱液)。培养第 1、3、7、14、21、28、35、42 d 后将盛有 0.1 mol/L NaOH 吸收瓶取出后, 先加入 1 mol/L BaCl₂ 使得土壤排放的 CO₂ 以碳酸盐的形式沉淀, 加入酚酞指示剂后搅拌, 用 0.05 mol/L HCl 进行滴定剩余的 NaOH。对土壤碳矿化进行模拟方程

$$C_m = C_o(1 - \exp^{-kt})$$

式中, C_m 为瞬时碳排放量, C_o 是土壤碳排放量极大值, k 为常数, t 为培养时间。做潜在最高碳排放量^[17], 结合温度敏感性 Q_{10} 分析, 即温度每升高 10℃ 土壤碳矿化速率所增加的倍数。

1.4 数据处理

实验数据采用 SPSS 17.0 软件进行分析, 对不同处理间的差异显著性进行双因素方差分析, 并用 LSD 法进行差异显著性检验, 并用 SigmaPlot 12.0 软件进行数据分析和制图, 显著性差异水平 $\alpha = 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 氮沉降对土壤碳矿化的影响

2.1.1 氮沉降对不同温度条件下土壤累积碳排放量的影响

从图 1 可知, 在 5℃ 时, 土壤碳矿化累积排放量随氮浓度的升高呈下降趋势; 在 15℃ 时, 氮沉降对土壤碳矿化累积排放量具有一定的抑制作用, 但 P 肥对土壤累积碳排放量具有一定的促进作用; 在 25℃ 时, 氮沉降对土壤呼吸累积碳排放量均低于对照组, 且低氮处理抑制作用更强; 在 35℃ 条件下, 两者氮沉降处理对土壤呼吸累积碳排放量均表现为一定的抑制作用。在同一温度下, 各处理间均无显著性差异 ($P > 0.05$)。随着温度的升高, 对照 CK 和 N、P 添加处理下土壤碳矿化累积碳排放量显著增加 ($P < 0.05$, 图 2)。

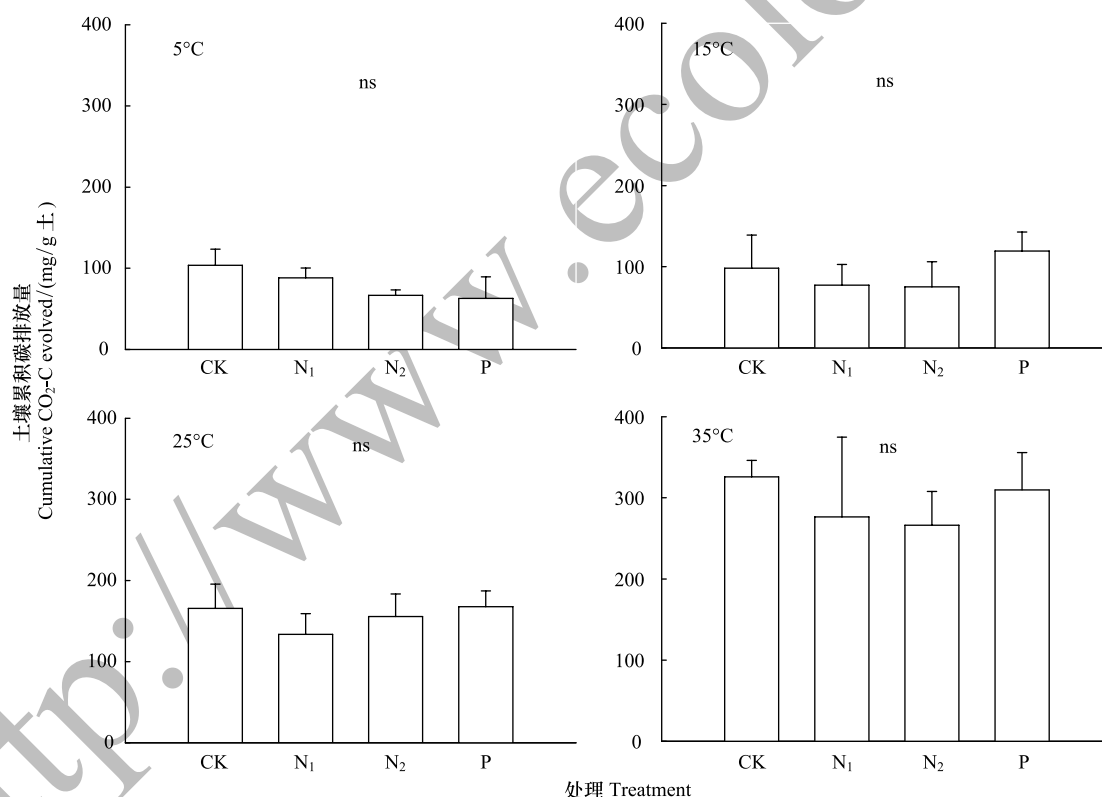


图 1 NP 添加对杉木林在相同温度下土壤碳矿化量的影响

Fig.1 Effects of substrate addition on CO₂-C emission under *Cunninghamia lanceolata* in the same temperature

CK 为不施肥只施沙; N₁: 含氮量为 50 kg N hm⁻² a⁻¹; N₂: 含氮量为 100 kg N hm⁻² a⁻¹; ns: 差异不显著 ($P > 0.05$)。图中数据为平均值 ± 标准误差

从图 2 可以看出, 温度升高显著提升了林地土壤碳矿化量, 不同处理间, 不同温度对土壤碳排放量均有一定的影响。在 CK 处理中, 5℃ 和 15℃ 间无显著性差异, 但均显著低于 25℃ 和 35℃ 对土壤碳矿化的影响 ($P < 0.05$), 35℃ 对土壤碳排放量影响显著高于 25℃。N₁ 处理中, 于 35℃ 时 CO₂ 累计排放量显著高于其他温度土

壤碳排放量 ($P < 0.05$), 但 5、15、25℃ 间无显著差异。N₂ 处理中, 随温度升高 CO₂ 土壤累计排放量逐渐增加, 其中 5℃ 与 15℃, 15℃ 与 25℃ 之间差异不显著, 但 5℃ 显著低于 25℃、后者显著低于 35℃ ($P < 0.05$)。添加 P 处理中, 不同温度对 CO₂ 累计排放量与 N₂ 变化规律类似, 即 35℃ 处理下碳排放量最大, 其次为 25℃ 和 15℃, 最小排放量为 5℃ 处理。

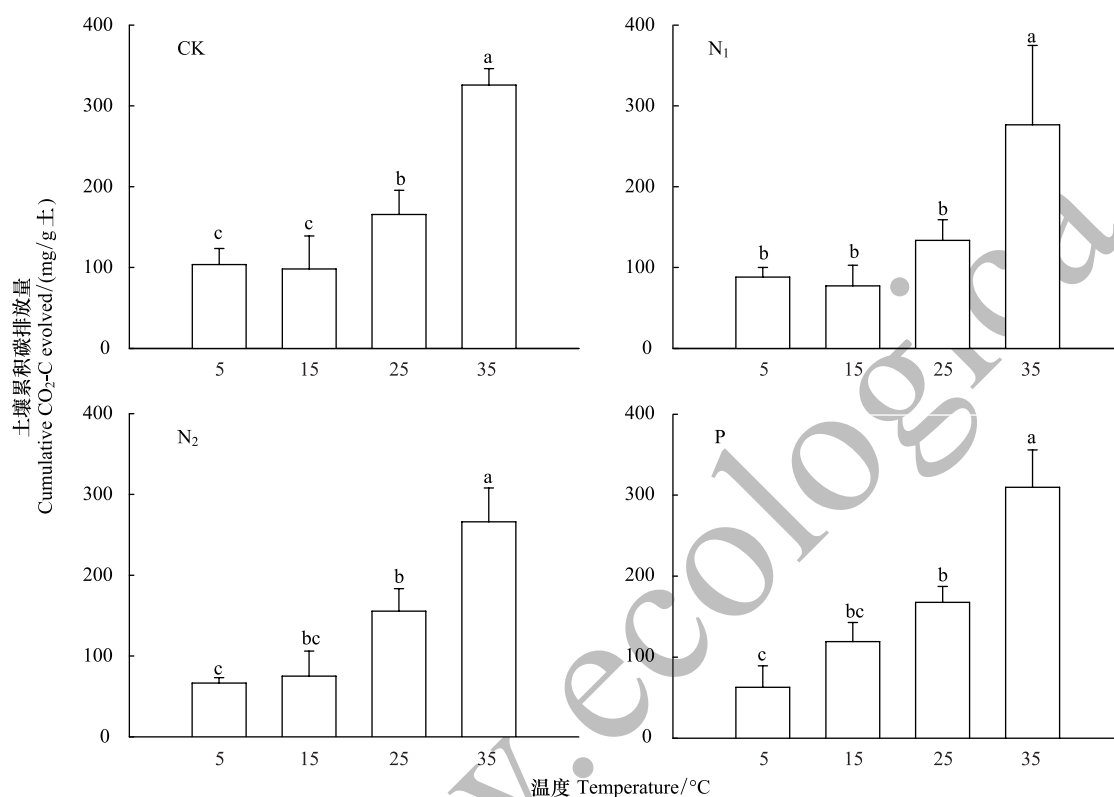


图2 底物添加在不同温度下对杉木林土壤矿化量的影响

Fig.2 Effects of substrate addition on CO₂-C evolved under *Cunninghamia lanceolata* in different temperature

不同小写字母表示同一处理不同温度间差异显著 ($P < 0.05$), 图中数据为平均值 $\pm$ 标准差

2.1.2 氮沉降对不同温度条件下土壤碳矿化速率的影响

由图 3 可知, 在同一温度下, 不同处理土壤矿化速率大致趋势是先急速下降然后趋于平缓。在 5℃ 时, 由于温度较低, 各处理土壤矿化率偏低, N₂、P 二者呈先缓慢上升再趋于平缓的单峰曲线, CK、N₁ 培养 3 d 内呈急速下降, 并且 N₁ 在前 3 天土壤矿化速率高于 CK, P 处理最低, 在第 7 天后变化缓慢; 在 15℃ 时, 对照 CK 在第 7 天略有升高外, 其他处理都是先下降再趋于平缓; 在 25℃ 时, P 处理后的第 3 天后土壤矿化速率开始下降, 其他处理都是先下降再趋于稳定, N₁ 处理土壤矿化速率始终为最低; 在 35℃ 时, 各处理都是先下降后趋于平稳, NP 添加对土壤矿化速率影响的规律为: P > N₁ > N₂。从图 3 还可以看出, 温度对土壤碳矿化速率的影响显著。

2.2 环境因子对土壤累积碳排放量的影响

2.2.1 土壤全碳对土壤累积碳排放量的影响

从图 4 可以看出, 对土壤在不同温度条件下, 做土壤全碳和累积碳排放量进行分析得出, 在 5℃ 和 15℃ 条件下, 土壤全碳对土壤碳排放量无显著性差异, 在 25℃ 条件下, 土壤全碳与土壤碳排放量呈类似开口朝上的抛物线的变化趋势, 即随土壤全碳含量的增加, 土壤碳排放量先减小后增加。在 35℃ 条件下, CO₂ 累积排放量随土壤全碳含量显著增加 ($P < 0.05$), 对其全碳和碳排放量进行回归分析, 得回归方程为: $y = -10.1595 + 143.201x$, $R^2 = 0.38$ 。

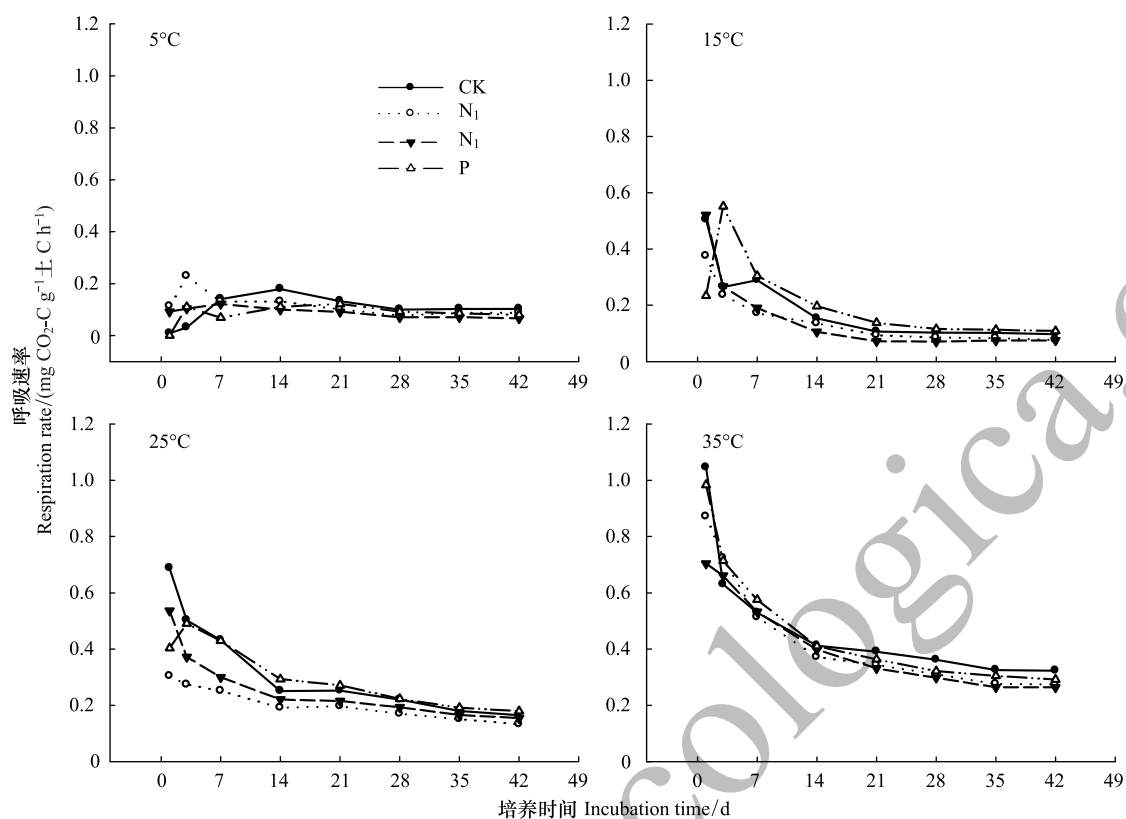


图3 不同底物添加对杉木林土壤矿化速率的影响

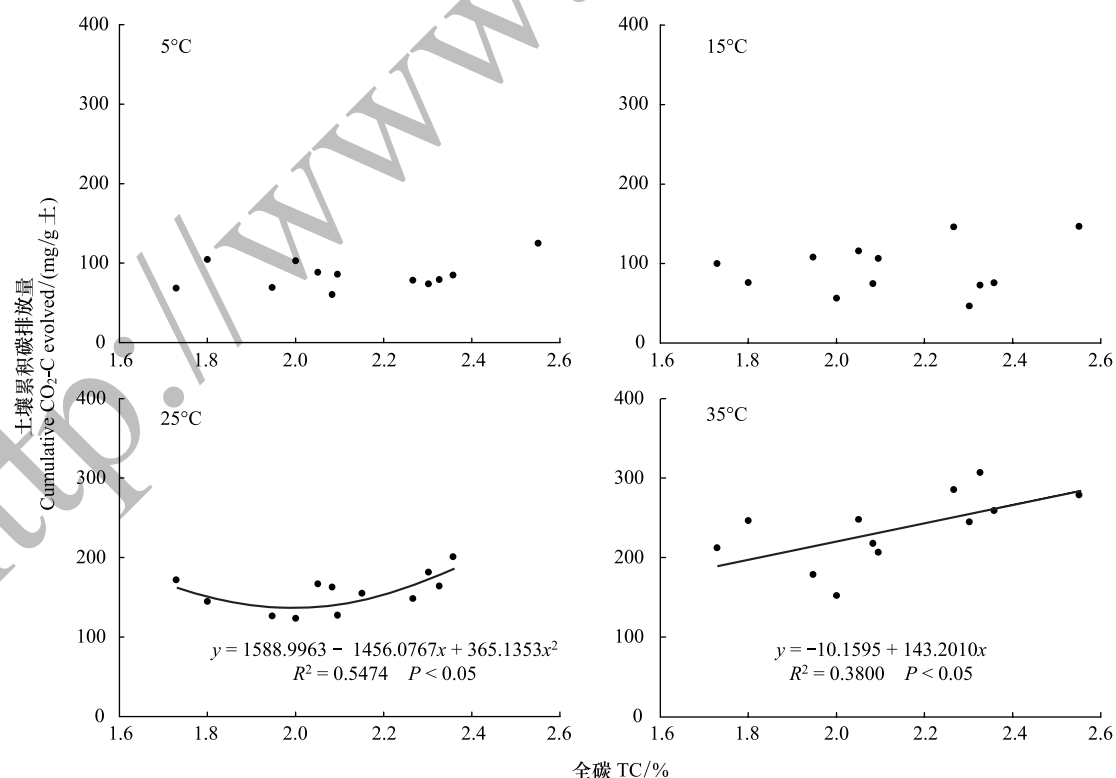
Fig.3 Effects of different substrate addition on rate of *Cunninghamia lanceolata* soil respiration

图4 全碳对不同氮添加处理杉木林土壤碳矿化的影响

Fig.4 Effects of total carbon for *Cunninghamia lanceolata* soil carbon mineralization under different nitrogen addition

2.2.2 土壤可溶性碳氮对土壤累积碳排放量的影响

从图 5 可以看出,在 5、15、35℃ 条件下,土壤 DOC 对土壤碳排放量影响无显著性差异($P > 0.05$)。在 25℃ 条件下,土壤碳排放量随 DOC 含量先增后减,呈类似开口朝下的抛物线变化规律,且差异达显著性($P < 0.05$)。在同一温度条件下,土壤 DON 对土壤累积碳排放量均无显著性差异($P > 0.05$)。

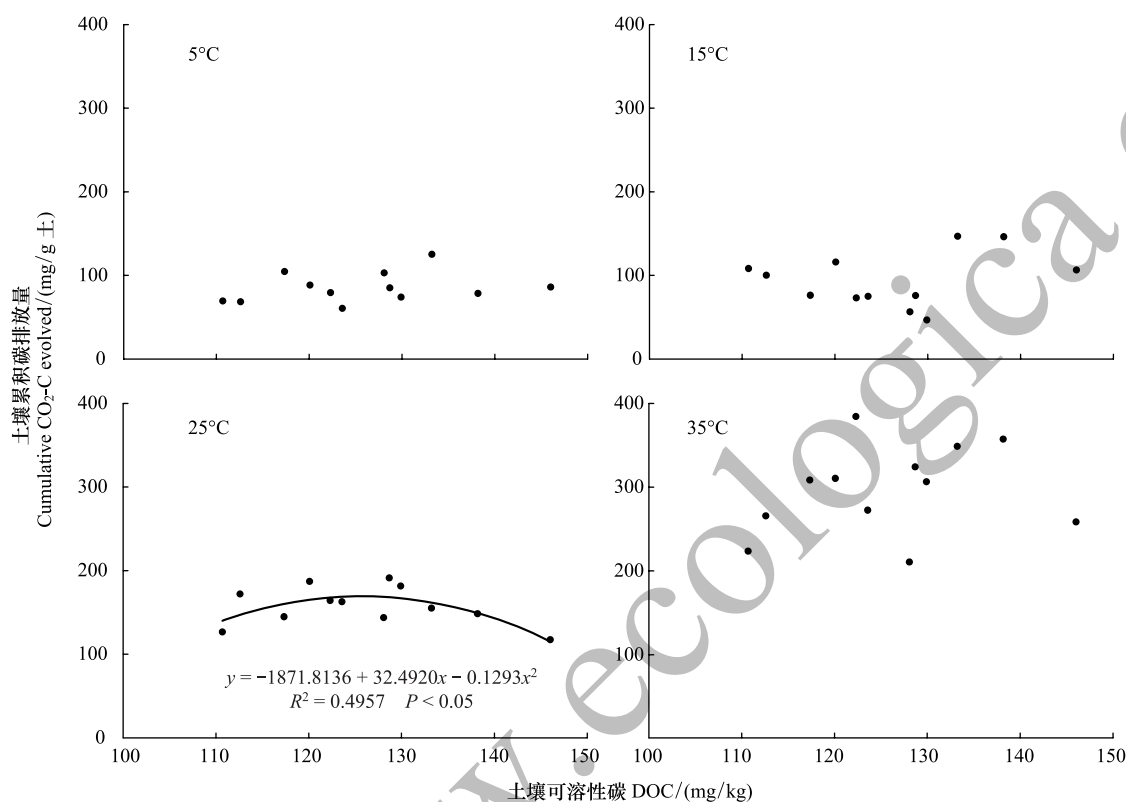


图 5 可溶性有机碳对不同氮添加处理杉木林土壤碳矿化的影响

Fig.5 Effects of Dissolved Organic for *Cunninghamia lanceolata* soil carbon minerlization under different nitrogen addition

2.2.3 土壤含水量对土壤累积碳排放量的影响

从图 6 可以看出,在 5℃ 时,不同处理下杉木林土壤碳排放量随土壤含水量增加而增加,且差异达显著性水平($P < 0.05$)。在其他温度条件下并无显著性差异,在同一含水量的条件下,土壤碳排放量随温度的升高而增加,说明土壤含水量并不是影响土壤碳排放量的调控因子。

2.3 土壤矿化潜在排放量及其对温度敏感性的响应

在没有外界干扰的情况下长时间培养后土壤累积碳排放量将会达到一个峰值。对杉木林地土壤进行氮添加处理,在 42 d 的室内培养实验中,运用方程 $C_m = C_o(1 - \exp^{-kt})$ 对土壤潜在碳排放进行模拟,得出在不同温度不同处理下杉木林土壤最大碳排放量(表 2),相关系数 R^2 基本在 0.9 以上,说明拟合效果很好。在 5℃ 条件下,N 会抑制土壤矿化,且随 N 浓度升高抑制作用越强,P 处理能促进土壤碳排放;15℃ 和 35℃ 条件下,NP 处理对土壤碳排放量均有抑制作用;在 25℃ 条件下,不同处理对杉木林土壤潜在排放量影响不显著。

土壤矿化与温度的关系还可以从温度敏感性角度来研究(Q_{10}),因为二氧化碳产生的温度敏感性可作为有机质降解温度敏感性的主要指标。本研究中 Q_{10} 培养 42d 的结果见表 3,其范围为 1.5149—1.8354,从表 3 可以看出,N 和 P 处理对土壤 Q_{10} 值均有下降趋势,其中 N 浓度升高, Q_{10} 值下降,对不同处理的 Q_{10} 值做方差分析得出它们无显著差异。

3 讨论

土壤矿化是一个非常复杂的生物学过程,受土壤温度、土壤含水量、土壤 C、N 含量等非生物因子以及植

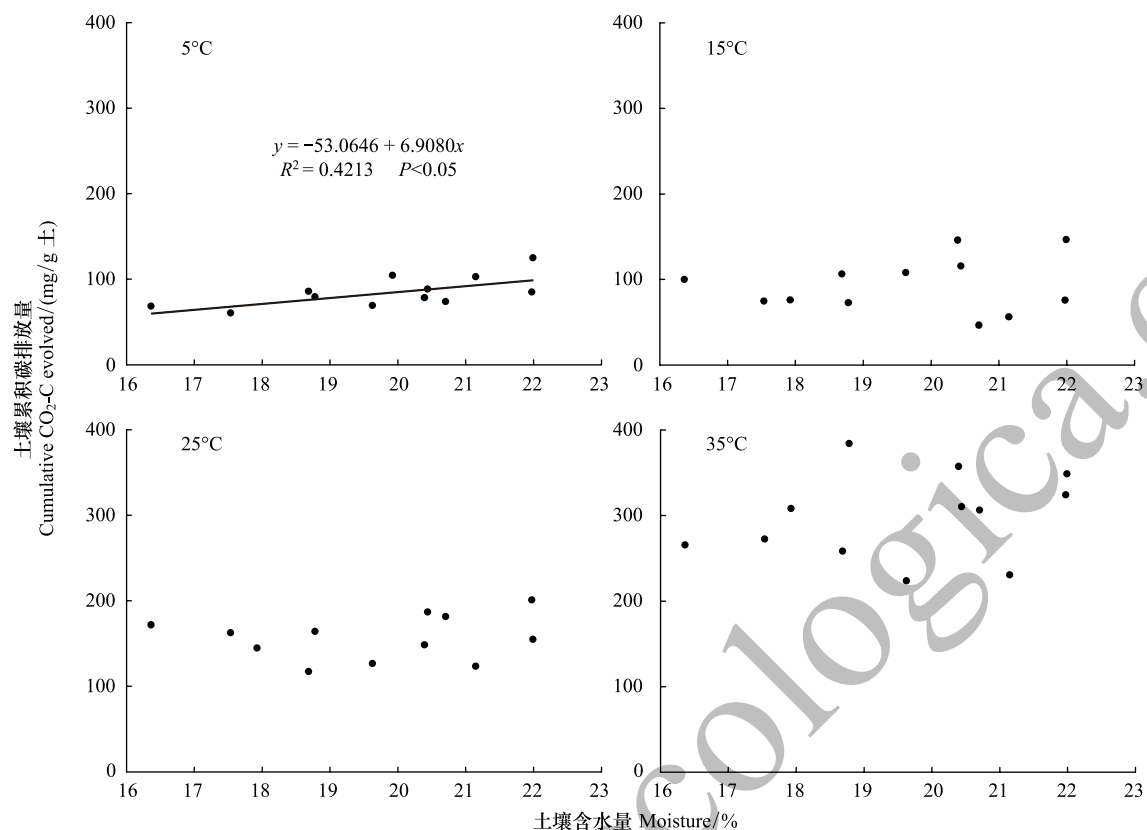


图 6 土壤含水量对不同氮添加处理杉木林土壤碳矿化的影响

Fig.6 Effect of moisture for *Cunninghamia lanceolata* soil carbon minerlization under different nitrogen addition

被类型、根系等生物因子综合影响^[18]。温度是影响土壤矿化一个重要的因子,土壤矿化和温度之间具有显著的相关关系^[19-20]。本研究结果表明,温度升高能显著提升林地土壤碳矿化量。在不同氮沉降处理下,温度对土壤碳排放量均存在不同程度的影响。在对照处理中,25℃和35℃对土壤碳排放量影响显著,且显著高于5℃和15℃间对土壤碳矿化的影响($P < 0.05$),可能原因是随着温度的升高,土壤中的微生物活性增加促进了土壤矿化,增温在短时间内可刺激土壤矿化产生大量 CO_2 ^[21-22]。在森林生态系统中,土壤碳矿化受温度的影响较为复杂,主要是温度对土壤生物活性的影响,往往同时还受土壤外源 N 添加的影响^[20]。在 N_1 处理中,35℃时 CO_2 累计排放量显著高于其他温度对土壤碳排放量的影响($P < 0.05$),且其他温度间无显著差异。在 N_2 处理中,随温度升高 CO_2 土壤累计排放量逐渐增加,且 5℃与 25、35℃间的差异显著($P < 0.05$),外源氮的输入可能导致根系氮浓度的增加,进而影响土壤矿化作用^[23]。在同一温度下,与对照组相比,土壤碳排放量均随氮浓度的升高而减少,说明氮沉降对土壤碳呼吸具有抑制作用,在 25℃和 35℃条件下,氮抑制呼吸作用,高温条件下抑制作用更强^[24-25],主要原因是高氮处理降低土壤 pH 值,导致土壤微生物活性降低,分解有机碳的速率降低,从而抑制了土壤矿化^[26],这种现象在针叶林和阔叶林中的影响更为明显^[27]。也可能是由于氮素的增加降低土壤 C/N 进而改变土壤微生物的呼吸进而影响土壤矿化^[28-30],也有学者认为氮添加对土壤矿化的无影响或促进作用^[31-32]。在不同温度条件下,土壤有机碳矿化速率呈日趋下降,培养 21 d 后矿化速率趋于平缓,其原因可能是土壤可利用性碳、氮基质的量是影响其矿化的主要因素,因此,在矿化培养实验中,前期土壤易矿化的有机碳数量较多,已被微生物分解,培养到中后期土壤矿化主要受到可利用碳含量的限制,微生物开始难矿化有机碳,使得分解速率下降, CO_2 释放量开始降低^[33]。较高温度培养过的样品 CO_2 释放速率显著低于较低温度,很多长期培养试验中,都观测到基质大量损耗后,试验后期土壤矿化速率的降低^[34],Yoshitake 等发现添加氮在开始会刺激土壤矿化,但不会持续下去^[26],这也与本研究土壤矿化率在后期降低

并趋于稳定相一致^[35]。随着温度的升高,CK 和 N、P 添加在短时间内对土壤矿化碳排放呈显著性增加趋势($P < 0.05$)。添加 P 处理中,不同温度对 CO₂ 累计排放量与 N₂ 变化规律类似,可能的原因是 P 对土壤微生物比较敏感抑制土壤矿化^[36-37]。

表 2 不同温度下各处理土壤潜在矿化最大排放量及参数

Table 2 Comparison of calculated potentially mineralizable organic C pools C_o and first order rate constants K of different treatments at different temperatures in soil

温度/℃ Temperature	处理 Treatments	潜在碳排放量 Potentially carbon mineralizable	参数 Constant (K)	相关系数 Relation coefficient (R^2)
5	CK	138.663±22.858ab	0.032±0.005a	0.941±0.018a
	N ₁	134.848±18.117ab	0.026±0.007ab	0.921±0.040a
	N ₂	77.133±1.532b	0.037±0.020a	0.960±0.014a
	P	206.517±104.477a	0.016±0.009b	0.925±0.023a
15	CK	315.946±21.335a	0.054±0.034b	0.887±0.007a
	N ₁	85.397±20.987bc	0.102±0.079a	0.954±0.015a
	N ₂	74.193±18.464c	0.062±0.040ab	0.840±0.040a
	P	111.495±12.358b	0.098±0.085a	0.680±0.139b
25	CK	176.355±22.848a	0.062±0.004a	0.955±0.017a
	N ₁	174.745±26.953a	0.041±0.010b	0.987±0.005a
	N ₂	187.938±21.846a	0.041±0.001b	0.987±0.002a
	P	186.869±6.041a	0.053±0.007a	0.983±0.012a
35	CK	488.887±35.656a	0.025±0.002b	0.991±0.003a
	N ₁	348.949±64.454ab	0.033±0.002b	0.972±0.011a
	N ₂	315.799±48.418b	0.041±0.007a	0.981±0.004a
	P	477.196±130.299a	0.031±0.009a	0.974±0.021a

同一列不同小写字母表示同一温度不同处理间差异显著($P < 0.05$),图中数据为平均值 ± 标准差

表 3 第 42 天的 Q_{10} 值

Table 3 The Q_{10} value of the 42th day

处理 Treatment	Q_{10} value Q_{10} 值	处理 Treatment	Q_{10} value Q_{10} 值
CK	1.8354±0.1932	N ₂	1.6189±0.1125
N ₁	1.6454±0.1909	P	1.5149±0.0500

有关土壤矿化速率与温度的关系研究比较多,他们之间拟合的曲线方程较为复杂。本研究从温度敏感性角度来分析(Q_{10})。土壤矿化速率受温度的影响, Q_{10} 培养范围为 1.5149—1.8354,变异比较小,说明氮沉降的影响表明氮添加处理对杉木人工林土壤有机碳矿化对温度变化的敏感性不是特别明显,这与王红等研究的结果不一致^[38],其原因可能是土壤矿化是一个十分复杂的生物学过程, Q_{10} 值除受温度的影响外,还受土壤水分、根生物量及其他因子的综合结果^[28],因此,氮添加对土壤矿化温度敏感性影响的机理需要进一步细化研究。总之,未来气候变化对亚热带森林生态系统碳循环的影响及其机理会更为复杂,这将是今后的主要研究方向之一。

在森林生态系统中,土壤矿化是土壤碳库主要输出途径,因此,土壤碳库含量的高低对土壤矿化作用产生重要影响。从土壤全碳与土壤矿化的关系来看,在 5℃ 和 15℃ 条件下,土壤全碳对土壤碳排放量无显著性差异,在 25℃ 和 35℃ 条件下,土壤全碳对土壤碳排放量的影响均达差异显著($P < 0.05$),说明土壤全碳对土壤矿化影响同时也受温度调控。土壤碳库以及土壤氮素作为土壤有机碳矿化的底物,其含量必将直接对土壤有机碳矿化作用产生影响^[39-40]。但生态系统中非生物因子和生物因子间相互关系的复杂性,使得土壤有机碳矿化研究仍存在不确定性,如 Giardina 等认为温度的升高不会对土壤有机碳矿化产生影响^[41],本研究结果表明在 25℃ 条件下,土壤碳排放量随 DOC 含量先增后减($P < 0.05$),而其他温度条件下,土壤 DOC 对土

壤碳排放量并无显著性影响。且在同一温度条件下,土壤 DON 对土壤累积碳排放量均无显著性差异。土壤矿化除受土壤碳库影响外,可能还与土壤含水量密切相关,由于土壤含水量对呼吸速度影响较为复杂,往往同时取决于温度的配置状况。在一定温度条件下,土壤含水量适度提高不仅可以增强微生物的活性,也可以增加土壤中微生物的数量,从而加快土壤碳的矿化速度。本研究结果表明,在 5℃ 时,杉木林土壤矿化量随土壤含水量的增加而显著增加($P < 0.05$),在其他温度条件下并无显著性差异。在同一含水量的条件下,土壤碳排放量随温度的升高而增加,这与结论与 Hartley 研究的结果一致^[35]。温度对土壤有机碳矿化作用的影响可能会因土壤有机碳库以及土壤水分等因子的限制作用而减弱,并且对于土壤水分以及土壤碳、氮含量等因子对土壤有机碳矿化的影响也存在较大的争议^[40]。因此,土壤矿化对温度的响应是土壤性质、生物活性以及可利用性碳、氮综合作用的结果^[33]。

目前,室内培养方法广泛应用于土壤潜在碳排放的研究,由于土壤矿化在没有根系或气候因子等干扰的情况下,土壤矿化在长时间培养后终将达到平衡。本研究采用单库模式一级动力学方程 $C_m = C_o(1 - \exp^{-kt})$ 对土壤矿化潜在碳排放进行模拟,得出相关系数均在 0.9 以上。在 25℃ 条件下,不同处理对杉木林土壤潜在碳排放量影响不显著。在其他温度条件下,N 添加均会抑制土壤潜在碳排放量,且随 N 浓度升高抑制作用越强($P < 0.05$)。

4 结论

氮沉降对土壤矿化碳的累积排放量具有抑制作用。随着温度的升高,CK、N 和 P 添加对土壤矿化碳排放呈显著性增加趋势($P < 0.05$)。不同处理间,不同温度对土壤碳排放量均有一定的影响。不同温度条件下添加 P 处理中对 CO₂ 累计排放量与 N₂ 变化规律类似。在 5℃ 条件下,N 会抑制土壤矿化,且随 N 浓度升高抑制作用越强,P 处理能促进土壤碳排放;15℃ 和 35℃ 条件下,NP 处理对土壤碳排放量均有抑制作用;25℃ 时不同处理对土壤潜在碳排放量影响不显著。

在较高温度(25℃ 和 35℃)培养下,土壤全碳对 CO₂ 累积排放量均有显著性影响,较低的温度(5℃ 和 15℃)培养下,土壤全碳对土壤碳排放量无显著性差异。在 25℃ 条件下,土壤 DOC 含量对土壤碳排放量的影响显著($P < 0.05$),其他温度无影响。在同一温度条件下,土壤 DON 对土壤累积碳排放量均无显著性差异。在 5℃ 时,不同处理下土壤含水量对土壤碳排放量影响显著,在其他温度条件下并无显著性差异。

氮沉降和 P 处理对土壤 Q_{10} 值与对照相比均有下降趋势,随 N 浓度升高 Q_{10} 值下降,对不同处理的 Q_{10} 值做方差分析得出它们无显著差异。

参考文献(References):

- [1] 姜艳,王兵,汪如玉,杨清培. 亚热带林分土壤呼吸及其与土壤温湿度关系的模型模拟. 应用生态学报, 2010, 21(7): 1641-1648.
- [2] Zerva A, Mencuccini M. Short-term effects of clearfelling on soil CO₂, CH₄, and N₂O fluxes in a Sitka spruce plantation. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37(11): 2025-2036.
- [3] Li S G, Asanuma J, Eugster W, Kotani A, Liu J J, Urano T, Oikawa T, Davaa G, Oyunbaatar D, Sugita M. Net ecosystem carbon dioxide exchange over grazed steppe in central Mongolia. Global Change Biology, 2005, 11(11): 1941-1955.
- [4] 梁军伟,向成华,骆宗诗,宫渊波. 森林土壤呼吸研究进展. 应用生态学报, 2006, 17(12): 2451-2456.
- [5] Piao S L, Fang J Y, Ciais P, Peylin P, Huang Y, Sitch S, Wang T. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. Nature, 2009, 458(7241): 1009-1013.
- [6] Cox P M, Betts R A, Jones C D, Spall S A, Totterdell I J. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. Nature, 2000, 408(6809): 184-187.
- [7] Xu M, Qi Y. Soil-surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California. Global Change Biology, 2001, 7(6): 667-677.
- [8] Gallardo A, Schlesinger W H. Factors limiting microbial biomass in the mineral soil and forest floor of a warm-temperate forest. Soil Biology and Biochemistry, 1994, 26(10): 1409-1415.
- [9] Kane E S, Pregitzer K S, Burton A J. Soil respiration along environmental gradients in Olympic National Park. Ecosystems, 2003, 6(4): 326-335.
- [10] Haynes B E, Gower S T. Belowground carbon allocation in unfertilized and fertilized red pine plantations in northern Wisconsin. Tree Physiology, 1990, 8(1): 1-11.

- 1995, 15(5): 317-325.
- [11] Vitousek P M, Aber J D, Howarth R W, Likens E L, Matson P A, Schindler D W, Schlesinger W H, Tilman D G. Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. *Ecological Applications*, 1997, 7(3): 737-750.
- [12] Matson P, Lohse K A, Hall S J. The globalization of nitrogen deposition: consequences for terrestrial ecosystems. *Ambio: A Journal of the Human Environment*, 2001, 31(2): 113-119.
- [13] Mo J M, Brown S, Xue J H, Fang Y T, Li Z. Response of litter decomposition to simulated N deposition in disturbed, rehabilitated and mature forests in subtropical China. *Plant and Soil*, 2006, 282(1/2): 135-151.
- [14] Kazda M. Indications of unbalanced nitrogen nutrition of Norway spruce stands. *Plant and Soil*, 1990, 128(1): 97-101.
- [15] 樊建凌, 胡正义, 庄舜尧, 周静, 王体健, 刘翠英. 林地大气氮沉降的观测研究. *中国环境科学*, 2007, 27(1): 7-9.
- [16] Chen C R, Xu Z H, Mathers N J. Soil carbon pools in adjacent natural and plantation forests of subtropical Australia. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(1): 282-291.
- [17] Smith J L, Schobel R R, McNeal B L, Campbell G S. Potential errors in the first-order model for estimating soil nitrogen mineralization potentials. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44(5): 996-1000.
- [18] 李玉宁, 王关玉, 李伟. 土壤呼吸作用和全球碳循环. *地学前缘*, 2002, 9(2): 351-357.
- [19] 严俊霞, 汤亿, 李洪建. 城市绿地土壤呼吸与土壤温度土壤水分的关系研究. *干旱区地理*, 2009, 32(4): 604-609.
- [20] Menyailo O V, Huwe B. Denitrification and C, N mineralization as function of temperature and moisture potential in organic and mineral horizons of an acid spruce forest soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 1999, 162(5): 527-531.
- [21] 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.
- [22] Mikan C J, Schimel J P, Doyle A P. Temperature controls of microbial respiration in arctic tundra soils above and below freezing. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(11): 1785-1795.
- [23] Eissenstat D M, Wells C E, Yanai R D, Whitbeck J L. Building roots in a changing environment: implications for root longevity. *New Phytologist*, 2000, 147(1): 33-42.
- [24] 吴浩浩, 徐星凯, 李团胜, 段存涛. 碳氮添加对不同湿润程度的温带森林土壤氧化亚氮排放影响. *科学通报*, 2014, 59(14): 1337-1347.
- [25] Zhao S C, Qiu S J, Cao C Y, Zheng C L, Zhou W, He P. Responses of soil properties, microbial community and crop yields to various rates of nitrogen fertilization in a wheat-maize cropping system in north-central China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 194: 29-37.
- [26] Yoshitake S, Sasaki A, Uchida M, Funatsu Y, Nakatsubo T. Carbon and nitrogen limitation to microbial respiration and biomass in an acidisulfatara field. *European Journal of Soil Biology*, 2007, 43(1): 1-13.
- [27] 王效科, 白艳莹, 欧阳志云, 苗鸿. 全球碳循环中的失汇及其形成原因. *生态学报*, 2001, 22(1): 94-103.
- [28] Janssens I A, Dieleman W, Luyssaert S, Subke J A, Reichstein M, Ceulemans R, Ciais P, Dolman A J, Grace J, Matteucci G, Papale D, Piao S L, Schulze E D, Tang J, Law B E. Reduction of forest soil respiration in response to nitrogen deposition. *Nature Geoscience*, 2010, 3(5): 315-322.
- [29] Traore S, Thiombiano L, Millogo J R, Guinko S. Carbon and nitrogen enhancement in cambisols and vertisols by *Acacia* spp. in eastern Burkina Faso: relation to soil respiration and Microbial biomass. *Applied Soil Ecology*, 2007, 35(3): 660-669.
- [30] Persson T, Wirén A. Microbial activity in forest soils in relation to acid/base and carbon/nitrogen status. *Communications of the Norwegian Forest Research Institute*, 1989, 81(suppl): S15-21.
- [31] Cheshire M V, Chapman S J. Influence of the N and P status of Plant material and of added N and P on the mineralization of C from ¹⁴C-labelled ryegrass in soil. *Biology and Fertility of Soils*, 1996, 21(3): 166-170.
- [32] Bradford M A, Fierer N, Reynolds J F. Soil carbon stocks in experimental mesocosms are dependent on the rate of labile carbon, nitrogen and Phosphorus inputs to soils. *Functional Ecology*, 2008, 22(6): 964-974.
- [33] 沈征涛, 施斌, 王宝军, 姜洪涛. 土壤有机质转化及 CO₂ 释放的温度效应研究进展. *生态学报*, 2013, 33(10): 3011-3019.
- [34] Hartley I P, Hopkins D W, Sommerkorn M, Wookey P A. The response of organic matter mineralisation to nutrient and substrate additions in sub-arctic soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(1): 92-100.
- [35] Jarvis P, Linder S. Botany: constraints to growth of boreal forests. *Nature*, 2000, 405(6789): 904-905.
- [36] Keith H, Jacobsen K L, Raison R J. Effects of soil phosphorus availability, temperature and moisture on soil respiration in *Eucalyptus pauciflora* forest. *Plant and Soil*, 1997, 190(1): 127-141.
- [37] 王红, 范志平, 邓东周, 陈德龙, 孙学凯, 高俊刚, 曾德慧. 不同环境因子对樟子松人工林土壤有机碳矿化的影响. *生态学杂志*, 2008, 27(9): 1469-1475.
- [38] Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 2006, 440(7081): 165-173.
- [39] Hopkins D W, Sparrow A D, Elberling B, Gregorich E G, Novis P M, Greenfield L G, Tilston E L. Carbon, nitrogen and temperature controls on microbial activity in soils from an Antarctic dry valley. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(10): 3130-3140.
- [40] 杨继松, 刘景双, 孙丽娜. 温度、水分对湿地土壤有机碳矿化的影响. *生态学杂志*, 2008, 27(1): 38-42.
- [41] Giardina C P, Ryan M G. Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature. *Nature*, 2000, 404(6780): 858-861.