

DOI: 10.11766/trxb201804240215

庐山毛竹扩张及模拟氮沉降对土壤 N_2O 和 CO_2 排放的影响*

李超 刘苑秋 王翰琨 陈琦 邓邦良 刘晓君 董星宇 张令[†]
郑翔 曹雯

(江西农业大学林学院, 鄱阳湖流域森林生态系统保护与修复国家林业局重点实验室(江西农业大学), 江西省森林培育重点实验室, 南昌 330045)

摘要 毛竹是我国南方广泛分布的一种典型的森林资源, 其扩张已引发了多方面的生态问题, 但是目前关于氮沉降背景下毛竹扩张引起的土壤 N_2O 和 CO_2 气体排放变化的研究甚少, 且无原位观测数据。采用静态箱-气相色谱法, 分析江西庐山毛竹纯林、毛竹扩张形成的毛竹-日本柳杉混交林及日本柳杉纯林3种林分土壤的 N_2O 和 CO_2 排放速率和累积排放量及其对模拟氮沉降的响应。结果表明: (1) 混交林土壤的 NH_4^+ -N含量、 NO_3^- -N含量及pH分别为 $14.39\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $8.65\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、4.88, 显著高于日本柳杉纯林的 $9.75\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $5.58\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、4.05, 但是混交林土壤DOC含量($236.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)却显著低于日本柳杉纯林($382.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。 (2) 混交林土壤 N_2O 累积排放量($393.6\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$)显著高于毛竹纯林($202.5\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$)和日本柳杉纯林($192.8\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$), 混交林土壤 CO_2 累积排放量($4\ 655\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$)显著高于日本柳杉纯林($2\ 815\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$)。 (3) 模拟氮沉降未对3种林分类型土壤的 CO_2 排放速率和累积排放量产生显著影响, 但明显增加了混交林和日本柳杉纯林的 N_2O 累积排放量。本研究表明: 毛竹扩张不同阶段土壤的理化性质、 N_2O 及 CO_2 排放表现出不同特征。毛竹扩张过程中一定程度上增大了土壤 N_2O 和 CO_2 的排放量, 但是完全扩张后 N_2O 排放出现明显下降趋势, 而 CO_2 的排放未发生显著变化。同时, 氮沉降促进了毛竹未扩张和扩张初期土壤的 N_2O 排放, 而对 CO_2 排放未产生显著影响。表明在未来气候变化条件下管理亚热带毛竹扩张时, 必须明确考虑这些生态系统组成、结构和影响因子之间的影响。

关键词 庐山; 毛竹扩张; 模拟氮沉降; 土壤 N_2O 和 CO_2 排放

中图分类号 S714.3 **文献标识码** A

近一个世纪以来, 全球气候变暖引发了界对温室气体排放及其潜在风险的广泛关注。氧化亚氮(N_2O)、二氧化碳(CO_2)是与全球气候变化密切相关的2种重要的温室气体, 探索其源汇及地域排放特征也成为目前全球气候变化研究领域的重

要内容。森林土壤是与 N_2O 及 CO_2 排放相关的重要碳、氮库^[1]。大量研究表明, 森林土壤的C、N特征因植物种类组成的变化^[2]和植被类型^[3]的转变而改变^[4-5], 而土壤的C、N特征和环境条件的改变会进一步影响土壤微生物群落^[6]。由于土壤温

* 江西庐山森林生态系统国家定位观测研究站专项研究(9022206523)资助 Supported by Special Study on National Positioning Observation Research Station for Forest Ecosystem of Lushan Mountain, Jiangxi Province (No. 9022206523)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: lingzhang09@126.com

作者简介: 李超(1993—), 男, 陕西宝鸡人, 硕士研究生, 主要从事土壤碳氮循环与全球变化研究。E-mail: ydlichao@126.com

收稿日期: 2018-04-24; 收到修改稿日期: 2018-07-14; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2018-10-08

室气体排放受到C、N底物和微生物群落控制，因此土壤C、N状态和植被的群落变化可能会改变土壤的温室气体排放。

目前，源于人类活动的外源氮输入大约比源于陆地生态系统的氮输入高30%~50%^[7]，人类活动加速了全球活性氮的排放和固定。1961—2010年的50年内，中国陆地大气氮沉降速率由0.29 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$ 增长至2.32 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$ ，增加了近8倍^[8]，目前中国已成为氮沉降最严重的区域之一。研究表明，森林中外源氮的输入对森林生态系统的C、N循环过程、土壤微生物群落特征及生态系统的稳定性产生了重要影响^[9]。

毛竹 (*Phyllostachys edulis*) 属禾本科竹亚科刚竹属，是一种高大散生乔木状克隆植物，广泛分布于我国亚热带地区。毛竹属于典型的无性系繁殖，其营养生长过程（即克隆生长）使其具有相当大的水平拓展能力，依靠强大的地下茎（竹鞭）不断向邻近的异质小生境蔓延，实现种群克隆扩张，形成混交林甚至毛竹纯林。毛竹强大的入侵性对周边植被构成了潜在的威胁。因此，近期的研究已将毛竹视为亚热带地区一种潜在的入侵物种^[10-12]。

目前，关于毛竹扩张的研究主要集中于其扩张对阔叶林的根系^[13]、土壤物理性质^[14]、土壤碳^[15]、氮^[16]、磷^[12]特征以及对生态系统生物多样性^[17]、土壤动物^[18]、土壤微生物^[15]的影响等方面，而对于在氮沉降背景下其扩张及对土壤

温室气体排放造成的影响研究甚少，且无原位观测数据。本研究采用静态箱-气相色谱法，在江西庐山自然保护区选择毛竹林扩张严重的日本柳杉 (*Cryptomeria japonica*) 林为研究对象，分析比较毛竹纯林、毛竹扩张形成的毛竹-日本柳杉混交林及日本柳杉纯林的土壤 N_2O 和 CO_2 排放速率及累积排放量，同时通过人工模拟氮沉降试验，探究3种林分土壤 N_2O 和 CO_2 排放速率及累积排放量对氮沉降的响应，为毛竹扩张的生态影响研究提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

庐山自然保护区位于江西省九江市 (115°51'—116°07' E, 29°30'—29°41' N)，总面积约30.2 km^2 。气候属于亚热带季风气候，年均降水量为2070 mm，年均温度11.6℃，年均雾日191 d，霜期150 d^[19]。庐山的毛竹林以前只生长在600 m左右的低海拔地区，但是，目前已经扩张到海拔较高(高达950 m)的曾被阔叶林生长覆盖的地区。区内毛竹面积约4 142 hm^2 ，占总面积的13.12%，近十几年来，毛竹的数量估计增加了230万余株^[19]。

本试验地点位于海拔940~960 m的金竹坪，试验设置3个林分样地：(1)毛竹纯林，林样地土壤

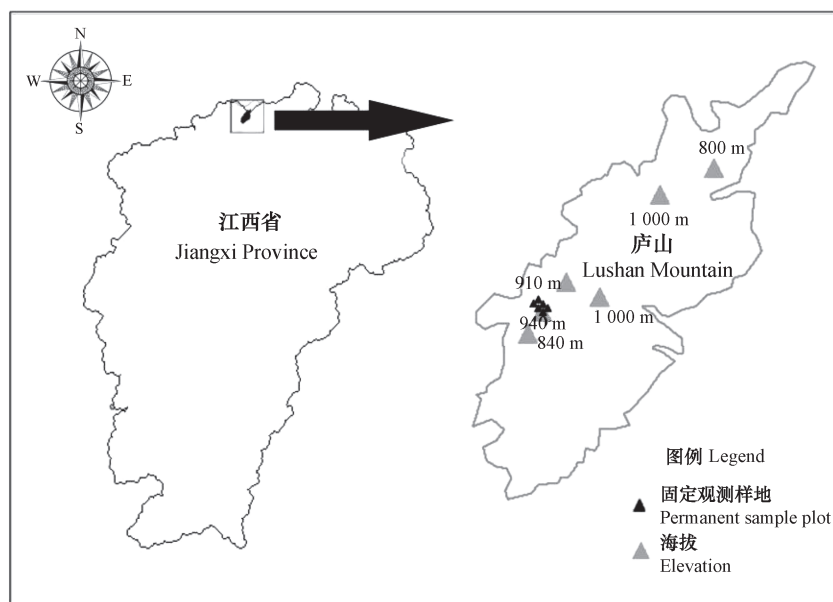


图1 试验样地区位图

Fig.1 Distribution of the sample sites

为山地黄壤,成土母质主要为石英砂岩风化的残积物和坡积物,土层深度为40~60 cm。(2)毛竹-日本柳杉混交林(以下称“混交林”,形成于2010年前后),样地土壤为山地黄棕壤,土质较疏松,土层深度为60~90 cm。(3)日本柳杉纯林,样地土壤为山地黄棕壤,土质较疏松,土层深度为60~90 cm。三种样地均林下灌草较少,覆盖率低,零散分布的植物有中国绣球(*Hydrangea chinensis*)、华南毛蕨(*Cyclosorus paretiticus*)、山麦冬(*Liriope spicata*)、山柃(*Lindera reflexa*)、凹叶厚朴(*Magnolia officinalis*)、淡竹叶(*Lophatherum gracile*)、老鼠矢(*Symplocos stellaris*)、鸡爪槭(*Acer palmatum*)、斑叶兰(*Goodyeraschlechtendaliana*)、毛叶石楠(*Photinia villosa*)等。

1.2 研究方法

2017年4月,在选定的3种林分类型中,每种林分类型各随机设置3个面积为30 m×30 m的样地,共9个样地。每个样地设置空白对照和氮沉降两种处理方式。

采用静态箱-气相色谱法测定土壤N₂O和CO₂通量。静态箱体由箱体和底座两部分组成,箱体为内径20 cm,高80 cm的PVC管制成,底座为内径18.7 cm、外径23.5 cm、高10 cm、壁厚1 cm的PVC圆环凹槽。在选定的每个样地中分别随机布置2个PVC底座(模拟氮沉降和空白对照两种处理),底座埋入土壤6~8 cm深,埋好后去除环内的活体植物及凋落物,上方覆盖一层孔眼大小为1 mm×1 mm的纱网,防止凋落物掉落其中。本研究未包含完整植物的自养呼吸,因此未分析生态系统净碳收支^[20]。分别在5月和9月对各个样地中一个底座内及周围1 m²用手提式喷雾器均匀喷洒尿素(CO(NH₂)₂)溶液进行氮沉降处理,每次施氮水平为N 4 g·m⁻²,在另一个底座内及周围喷洒相同质量的蒸馏水作为空白对照。

2017年4—11月毛竹生长季进行气体采集,频率为每月一次。施氮后加密采样,平均2 d采集一次,持续两周,通量平稳后恢复每月一次。为避免天气因素影响,选择晴朗、无风天气采集气体。采气时先在底座内加入适量水保证采气时的密封性,后将采气箱扣放在底座凹槽中,并用60 mL塑料注射器在扣箱后0、5、10、15 min分别抽取40 mL气

体。每次抽取气体时来回拉动注射器使箱内气体充分混合,每个点共采集4个气样,采集的气样储存在专用的气袋(德霖铝箔采气袋,大连)中,迅速带回实验室,使用气相色谱仪(Agilent 7890B, USA)分析,确定每个样品的N₂O和CO₂浓度。采气期间同时记录土壤温度(10 cm)、土壤湿度(10 cm)及大气温度。

气体样品采集同时,在静态箱周围多点采集0~10 cm深土壤样品后混合均匀,同时在样地中采集新鲜的毛竹凋落物、日本柳杉凋落物。土壤样品去除石砾、根系等杂物,用冰袋运回实验室用于测定其可溶性有机碳(DOC)、铵态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)、全氮(TN)含量和pH。凋落物风干后研磨过筛,测定有机碳(OC)、全氮(TN)含量。相应指标的样品处理及测定方法参考文献[21]。

1.3 数据分析

土壤N₂O和CO₂排放通量采用如下方程式计算:

$$F = \rho \cdot \frac{V}{A} \cdot \frac{P}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T} \cdot \frac{dC_t}{dt}$$

式中, F 表示气体排放通量(单位为mg·m⁻²·h⁻¹,通量为正则说明土壤排放该气体,为负则为吸收该气体; ρ 为标准状态下被测气体的密度(mg·m⁻³); V 和 A 分别为静态箱体体积(m³)和箱体底面积(m²); P 和 P_0 分别为观测时的大气压和标准大气压(KPa); T 和 T_0 分别为观测时的箱内温度和标准状态温度(°C); dC_t/dt 为单位时间内箱内气体浓度随时间变化的速率(m³·m⁻³·h⁻¹)。

土壤N₂O和CO₂累积排放量计算公式如下:

$$M = \sum (F_{i+1} + F_i) / 2 \times (t_{i+1} - t_i) \times 24$$

式中, M 表示气体累积排放量(CO₂气体累积排放量单位为mg·m⁻²,N₂O为μg·m⁻²), F 表示气体排放通量(CO₂气体通量单位为mg·m⁻²·h⁻¹,N₂O为μg·m⁻²·h⁻¹), $(F_{i+1} + F_i)$ 表示为同一采样点连续两次气体排放通量之和, i 表示第 i 次采集气体样品, $(t_{i+1} - t_i)$ 为连续两次采集样品期间所隔天数。

采用SPSS 19.0进行数据分析,Origin 8.1作图。

采用单因素方差分析(ANOVA)和多重比

较 (LSD Duncan) 检验不同林分类型之间土壤 DOC、TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、pH 及凋落物 OC、TN 等理化性质的差异性。以林分类型和模拟氮沉降为固定效应, 试验时间为随机效应, 采用混合模型方差分析, 分析林分类型、模拟氮沉降以及二者的交互作用对土壤 N₂O 和 CO₂ 排放速率的影响。运用二因素方差分析 (two-way ANOVAs) 分析林分类型和模拟氮沉降对土壤 N₂O 和 CO₂ 累积排放量的影响, 所有差异性检验水平 $\alpha = 0.05$ 。

2 结 果

2.1 不同林分类型的土壤理化性质

从表1看出, 不同的林分类型对土壤的化学性质产生了不同程度的影响。毛竹纯林与日本柳杉纯

林的土壤 DOC 含量无显著差异 ($P > 0.05$), 但混交林与其他两个林分类型间差异显著 ($P < 0.05$), 且低于其他两个林分类型, 说明在毛竹扩张进入日本柳杉纯林的过程中, 土壤的 DOC 含量有降低的趋势。日本柳杉纯林与混交林土壤 TN 含量之间无显著差异 ($P > 0.05$), 毛竹纯林土壤 TN 含量显著低于其他两种林分类型 ($P < 0.05$)。混交林与毛竹纯林土壤 NH₄⁺-N 含量及 pH 均无显著差异 ($P > 0.05$), 日本柳杉纯林土壤 NH₄⁺-N 含量及 pH 显著低于其他两种林分类型 ($P < 0.05$)。毛竹纯林与日本柳杉纯林间土壤 NO₃⁻-N 含量无显著差异 ($P > 0.05$), 混交林土壤 NO₃⁻-N 含量显著高于毛竹纯林与日本柳杉纯林 ($P < 0.05$), 说明在毛竹扩张过程中, 扩张区域土壤 NO₃⁻-N 含量有增大趋势。

表1 不同林分类型土壤基本理化性质方差分析比较

Table 1 Analysis of variance (ANOVA) of soil chemical properties relative to type of forest

林分类型 Forest type	可溶性有机碳 DOC /(mg·kg ⁻¹)	全氮 TN /(g·kg ⁻¹)	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N /(mg·kg ⁻¹)	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N /(mg·kg ⁻¹)	pH
毛竹纯林 Pure moso bamboo forest	373.6 ± 12.0a	2.25 ± 0.24b	17.04 ± 2.99a	5.70 ± 1.18b	4.78 ± 0.10a
混交林 Mixed forest	236.5 ± 19.9b	4.05 ± 0.33a	14.39 ± 1.74a	8.65 ± 1.08a	4.88 ± 0.14a
日本柳杉纯林 Pure Japanese cedar forest	382.0 ± 20.4a	3.31 ± 0.15a	9.75 ± 1.87b	5.58 ± 0.82b	4.05 ± 0.14b

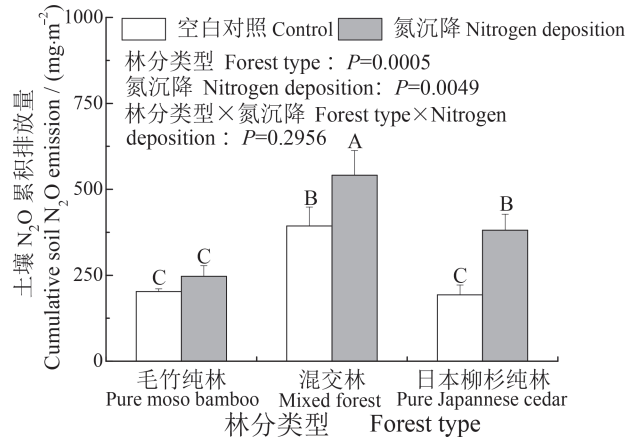
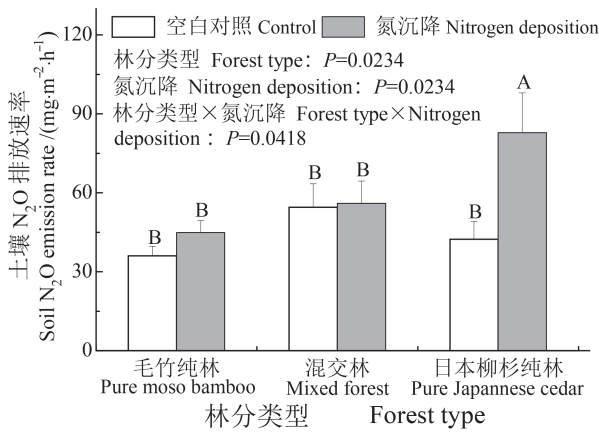
注: 平均值 ± 标准误。同列不同小写字母表示不同林分类型土壤之间差异显著 ($P < 0.05$) Note: Mean ± standard error. Means with different letters in the same column are significantly different between the forests ($P < 0.05$)

2.2 毛竹扩张及模拟氮沉降对土壤 N₂O 排放的影响

由图2可知, 林分类型、模拟氮沉降以及二者的交互作用对土壤 N₂O 的排放速率有显著的影响, 林分类型、模拟氮沉降对 N₂O 累积排放量有显著影响, 但是二者的交互作用对其无显著影响。3种林分类型的 CK 的 N₂O 的排放速率无显著差异 ($P > 0.05$)。但是从累积排放量来看, 混交林与其他两种林分类型的 N₂O 累积排放量差异极显著 ($P < 0.01$)。虽然3种林分类型 CK 的土壤 N₂O 的排放速率差异未达到显著水平, 但混交林排放速率略高于其他林分类型, 所以经过时间的累积效应, 导

致排放速率无显著差异但累积排放量差异却显著。

如图2, 模拟氮沉降对各林分类型的土壤 N₂O 排放影响不一致。日本柳杉纯林 CK 与氮沉降处理之间差异极显著 ($P < 0.01$), 氮沉降促进了日本柳杉纯林土壤 N₂O 排放速率和累积排放量。毛竹纯林 CK 与氮沉降处理之间无显著差异 ($P > 0.05$), 氮沉降未对毛竹纯林土壤 N₂O 排放产生影响。混交林 CK 的土壤 N₂O 排放速率与氮沉降处理间无显著差异 ($P > 0.05$), 氮沉降未对混交林的 N₂O 排放速率产生显著影响, 但是从累积排放量来看, CK 与氮沉降处理的累积排放量间差异显著 ($P < 0.05$), 氮沉降增大了混交林土壤 N₂O 累积排放量。



注：图中P值为二因素方差分析结果。不同字母表示林分类型之间差异显著($P < 0.05$)。下同Note: The P value in the picture is the result of two-way ANOVAs; Means with different letters are significantly different between the forests ($P < 0.05$). The same below

图2 不同林分类型及模拟氮沉降条件下土壤N₂O排放速率及累计排放量比较

Fig. 2 Comparison between the forest soils in soil N₂O emission rates and cumulative emission as affected by nitrogen deposition

2.3 毛竹扩张及模拟氮沉降对土壤CO₂排放的影响

从图3看出，在本研究中，林分类型是影响土壤CO₂排放的重要因素，而氮沉降及其与林分类型的交互作用对土壤CO₂排放无显著影响。无论是CO₂排放速率还是累积排放量，日本柳杉纯林CK与其他两种林分类型CK之间差异均极显著 ($P < 0.01$)，毛竹纯林CK与混交林CK之间无显

著差异 ($P > 0.05$)。三种林分的土壤CO₂排放速率呈现出毛竹纯林 ($896 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)、混交林 ($887 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) 大于日本柳杉纯林 ($578 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) 的趋势，累积排放量呈现毛竹纯林 ($4276 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$)、混交林 ($4655 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$) 大于日本柳杉纯林 ($2815 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$) 的趋势，说明毛竹扩张增加了扩张区域土壤CO₂的累积排放量。图3可以看出，氮沉降并未对3种林分类型的土壤CO₂排放产生显著影响。

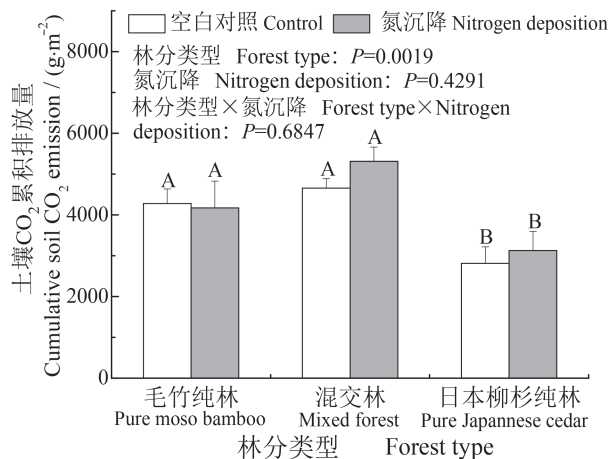
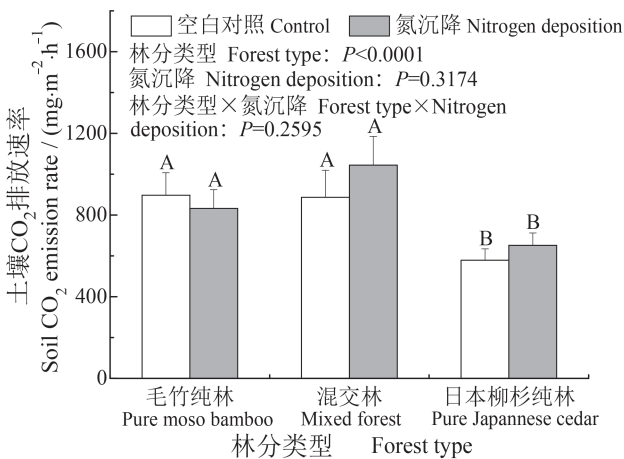


图3 不同林分类型及模拟氮沉降条件下土壤CO₂排放速率及累计排放量比较

Fig. 3 Comparison between the forest soils in soil CO₂ emission rates and cumulative emission as affected by nitrogen deposition

3 讨论

3.1 毛竹扩张对土壤理化性质的影响

植被类型转变会影响土壤基本理化性质和养分循环^[22]。相对于日本柳杉纯林，混交林的土壤

NH₄⁺-N、NO₃⁻-N含量增加，pH升高，土壤DOC含量降低，说明在毛竹扩张进入日本柳杉纯林的过程中，土壤的碳、氮循环过程发生了变化。与毛竹扩张进入的阔叶林相比，毛竹并未产生较多的凋落物输入量，较低的毛竹凋落物输入量导致其向土壤

较低的氮输入量^[10]，从而导致毛竹林土壤较低的TN含量和 N_2O 排放量（表1，图2）。但是，毛竹扩张形成的混交林的土壤TN含量和 N_2O 排放量却均高于毛竹纯林和日本柳杉纯林（表1，图2），这可能是因为毛竹扩张进入日本柳杉林提高了土壤固氮菌群多样性，但是随着年限延长，固氮菌群结构差异、多样性及丰度降低减小，故在毛竹林扩张初期的混交林土壤TN含量高于生长多年的毛竹纯林^[23]。同时，与日本柳杉纯林相比，混交林的土壤pH较大，说明毛竹扩张导致了土壤pH增加（表1），这可能会改变一些氨氧化细菌和与硝化作用相关的古生菌群落的改变^[24]，从而影响土壤氮转化过程。

3.2 毛竹扩张对土壤 N_2O 和 CO_2 排放的影响

虽然许多氮转化过程会导致土壤 N_2O 排放，但是硝化和反硝化作用是形成 N_2O 的主要过程，故凡是对这两个过程具有影响的因素如：土壤pH、碳氮底物可利用性、土壤温度、土壤水分、微生物群落结构和丰度等发生变化均会导致土壤中 N_2O 排放通量的变化^[25]。土壤中的 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 作为土壤硝化作用与反硝化作用的反应底物，与土壤 N_2O 排放量密切相关。本研究中，混交林中的 NH_4^+-N 含量较高， NO_3^--N 含量较低，说明在毛竹扩张过程中，对土壤的氨化和硝化作用产生了影响，这可能也是毛竹林土壤 N_2O 排放量较低的原因^[16]，这与Song^[10]、Li^[16]等的研究结果一致。毛竹纯林与日本柳杉纯林土壤的TN含量、 NH_4^+-N 含量、pH均差异显著，但 NO_3^--N 含量无显著差异，而且土壤 N_2O 排放速率和累积排放量无显著差异，说明反硝化作用可能是其产生 N_2O 的主要过程^[26]，而混交林的 NO_3^--N 含量高于其他两种林分类型，这可能也是混交林土壤 N_2O 排放量高于其他两种林分类型的主要原因。此外，在毛竹扩张的过程中，土壤的pH升高，这可能缓解了pH对于土壤微生物活动的限制，改变了一些氨氧化细菌和与硝化作用相关的古生菌群落，促使土壤微生物的活性和多样性发生改变，影响土壤的硝化和反硝化细菌的活动，进而影响了土壤 N_2O 的排放。

土壤呼吸主要由植物的根系呼吸、土壤微生物的异养呼吸以及土壤动物呼吸和部分化学氧化产生，其中植物根系呼吸和土壤微生物的异养呼吸是 CO_2 产生的主要过程^[27]。因为毛竹具有发达的地下茎（竹鞭），且繁殖能力强，当毛竹扩张进入日

本柳杉纯林形成混交林，会显著增加林地土壤中的细根生物量^[28]，进而增大根系呼吸的 CO_2 产生量。同时，毛竹根茎的快速繁殖生长通常伴随着较多的细根或根际沉积的碳输入，这可能会增加土壤的TOC和DOC含量，进而增加扩张区域土壤中的 CO_2 排放^[16]。通常情况下，日本柳杉纯林的土壤pH低于毛竹纯林，这可能限制了土壤微生物对土壤有机碳的分解。然而，随着毛竹不断扩张进入日本柳杉林，形成的混交林的土壤pH升高，缓解了pH对于土壤微生物活动的限制，导致更多的土壤有机碳被分解，从而促进混交林土壤 CO_2 的排放通量，所以，这可能也是混交林DOC含量低于其他两种林分类型的原因。此外，凋落物的C/N是反映其分解速率快慢的重要因素，毛竹凋落物与日本柳杉凋落物的OC含量（443.4、550.4 $g \cdot kg^{-1}$ ）、TN含量（13.7、6.89 $g \cdot kg^{-1}$ ）及C/N（33.53、85.01）均差异显著。可以看出，与日本柳杉相比，毛竹凋落物的C/N更低，说明其更易分解。毛竹扩张进入日本柳杉纯林后，其凋落物分解较快，能较快地释放更多的养分到土壤中，缓解微生物活动的养分限制，促进微生物对凋落物的分解，增加土壤的碳输入，从而增加混交林土壤 CO_2 的排放^[29]。此外，研究发现，较低的凋落物C/N的森林土壤中微生物活性更高^[29]，输入的毛竹凋落物较低的C/N可能激发混交林土壤的微生物活性，从而影响土壤有机碳的分解，同时提高土壤微生物异养呼吸产生的 CO_2 量，进而增大土壤的 CO_2 排放量，这可能也是毛竹纯林和混交林土壤 CO_2 排放量高于日本柳杉纯林的原因之一。

3.3 模拟氮沉降对土壤 N_2O 和 CO_2 排放的影响

模拟氮沉降作为一种外源氮输入方式，会改变土壤中氨氧化细菌（Ammonia-oxidizing bacteria, AOB）和氨氧化古菌（Ammonia-oxidizing archaea, AOA）的群落丰度和活性，而AOB或AOA会在氨单加氧酶和羟胺氧化还原酶的催化下，将 NH_3 氧化成 NO_2^- ，该反应的中间产物 NH_2OH 会分解释放 N_2O ，是硝化作用的关键步骤，也是限速步骤^[30]。但是目前关于氮沉降对土壤 N_2O 排放的研究结果并不一致，一般分为促进、抑制及无影响三种结论^[31]。与毛竹纯林和混交林相比，日本柳杉纯林的土壤 N_2O 排放对于模拟氮沉降的响应最为剧烈，模拟氮沉降促进了日本柳杉纯林的土壤 N_2O 的排放速率，增加了其累积排放量，

这说明在日本柳杉纯林土壤中,氮源可能是其土壤排放 N_2O 的限制因素。而且,日本柳杉纯林的土壤 NH_4^+-N 含量最低(表1),这是不利于土壤硝化作用的,但是在毛竹扩张进入后,提高了土壤 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 含量,潜在提高了土壤 N_2O 产生的氮源水平,这与Li等^[16]的研究结果是一致的,说明毛竹扩张改变了土壤N循环。但也有可能是因为施N后,日本柳杉纯林N吸收量低于毛竹纯林,更多的氮素以气体或淋溶形式流失而导致 N_2O 排放量的增加。氮沉降对混交林土壤 N_2O 排放速率无显著影响,却增加了其 N_2O 累积排放量。这可能是因为随着毛竹的不断扩张进入日本柳杉林,混交林土壤的各项理化性质趋近于毛竹纯林,所以氮沉降未显著促进其排放速率,但是经过时间累积,其排放量显著增大,说明毛竹扩张可能进一步增加了氮沉降对日本柳杉纯林土壤 N_2O 排放的促进作用。

氮沉降一般通过改变植物根系生物量、凋落物分解速率、土壤C/N、及土壤微生物数量和活性而影响土壤 CO_2 的排放速率^[32]。但是目前关于氮沉降对土壤 CO_2 排放的研究结果并不一致,一般分为促进、抑制及无影响三种结论。在本研究中,模拟氮沉降并未对庐山3种不同林分类型土壤的 CO_2 排放产生显著影响(图3),这与Micks^[33]和吴江明^[34]等的研究结果一致。主要原因可能如下:

(1) 土壤中 NH_4^+-N 含量较高(表1),对木质素分解的酶活性产生了抑制作用,降低了其分解速率,从而减少了木质素分解所产生的 CO_2 量,但是可能促进了微生物的呼吸作用,当二者减少和增大的 CO_2 量相当时对土壤 CO_2 排放不产生影响^[35]。

(2) 外源氮激发了土壤微生物活性,从而增加土壤微生物呼吸产生的 CO_2 量,但是因为氮添加增加了土壤中的有效氮含量,导致根系吸收N素所需消耗的能量减小,当二者呼吸作用量相当,可能相互抵消而对土壤的 CO_2 排放不产生影响^[36]。

3.4 林分类型与模拟氮沉降的交互作用对土壤 N_2O 和 CO_2 排放的影响

在本研究中,氮沉降与林分类型的交互作用对土壤 N_2O 累积排放量、 CO_2 排放速率及 CO_2 累积排放量无显著影响,但是对 N_2O 的排放速率具有显著影响。氮沉降显著促进了日本柳杉纯林的 N_2O 排放速率,但对毛竹纯林和混交林的 N_2O 排放速率没有产生显著影响。在本试验中,氮沉降处理使用尿

素($CO(NH_2)_2$)溶液,因为尿素溶液易水解形成 NH_4^+ ,而毛竹纯林与混交林土壤的 NH_4^+-N 显著高于日本柳杉纯林(表1),所以外界的 NH_4^+-N 输入增大了日本柳杉纯林的N反应底物,促进土壤硝化作用,进而导致其 N_2O 排放速率的增大。此外,日本柳杉纯林土壤pH显著低于毛竹纯林和混交林(表1),这可能不利于土壤微生物的活动。然而,尿素水解产生 NH_4^+ 的同时也会产生 OH^- ,这对于日本柳杉纯林的酸性土壤有一定的中和作用,能在一定程度上增大土壤pH,从而增强反硝化酶活性、促进反硝化作用的进行,进而促进土壤 N_2O 的产生^[37]。

4 结论

毛竹扩张过程中一定程度上增大了土壤 N_2O 和 CO_2 的排放量,但是完全扩张后 N_2O 排放出现明显下降趋势,而 CO_2 的排放未发生显著变化。氮沉降显著促进了柳杉纯林和混交林的 N_2O 排放,但是对毛竹纯林 N_2O 及3种林型土壤的 CO_2 排放无显著影响。

致谢 感谢白天军、潘俊、牛杰慧等在野外样品采集及室内样品分析方面给予的帮助,感谢江西庐山森林生态系统国家定位观测研究站的支持。

参考文献

- [1] IPCC. Climate change 2014. New York: Cambridge University Press, 2014
- [2] Zhang L, Wang S, Liu S, et al. Perennial forb invasions alter greenhouse gas balance between ecosystem and atmosphere in an annual grassland in China. *Science of the Total Environment*, 2018, 642: 781—788
- [3] 梁月明, 苏以荣, 张伟, 等. 桂西北不同植被恢复阶段土壤氨氧化细菌遗传多样性研究. *土壤学报*, 2013, 50(2): 364—371
Liang Y M, Su Y R, Zhang W, et al. Genetic diversities of soil ammonia-oxidizing bacteria at various vegetation restoration stages in southwest Guangxi (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(2): 364—371
- [4] 郭曼, 郑粉莉, 和文祥, 等. 黄土丘陵区不同退耕年限植被多样性变化及其与土壤养分和酶活性的关系. *土壤学报*, 2010, 47(5): 979—986

- Guo M, Zheng F L, He W X, et al. Variation of vegetation diversity and its relationship with soil nutrient and enzyme activity in lands of different abandoned years in the loess hilly-gully region (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47 (5): 979—986
- [5] Zhang L, Zhang Y, Zou J. et al. Decomposition of *Phragmites australis* litter retarded by invasive *Solidago canadensis* in mixtures: An antagonistic non-additive effect. *Scientific Reports*, 2014, DOI: 10.1038/screp05488
- [6] Xu Q F, Jiang P K, Wu J S, et al. Bamboo invasion of native broadleaf forest modified soil microbial communities and diversity. *Biological Invasions*, 2015, 17: 433—444
- [7] Ramirez K S, Craine J M, Fierer N. Consistent effects of nitrogen amendments on soil microbial communities and processes across biomes. *Global Change Biology*, 2012, 18 (6): 1918—1927
- [8] 顾雪峰, 黄玫, 张远东, 等. 1961—2010年中国区域氮沉降时空格局模拟研究. *生态学报*, 2016, 36 (12): 3591—3600
- Gu X F, Huang M, Zhang Y D, et al. Modeling the temporal-spatial patterns of atmospheric nitrogen deposition in China during 1961—2010 (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36 (12): 3591—3600
- [9] Mo J, Zhang W, Zhu W, et al. Nitrogen addition reduces soil respiration in a mature tropical forest in southern China. *Global Change Biology*, 2008, 14 (2): 403—412
- [10] Song Q N, Ouyang M, Yang Q P, et al. Degradation of litter quality and decline of soil nitrogen mineralization after moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) invasion to neighboring broadleaved forest in subtropical China. *Plant and Soil*, 2016, 404 (1/2): 113—124
- [11] Li Y, Li Y F, Chang S X, et al. Bamboo invasion of broadleaf forests altered soil fungal community closely linked to changes in soil organic C chemical composition and mineral N production. *Plant and Soil*, 2017, 418 (1/2): 507—521
- [12] Wu C S, Mo Q F, Wang H K. et al. Moso bamboo (*Phyllostachys edulis* (Carriere) J. Houzeau) invasion affects soil phosphorus dynamics in adjacent coniferous forests in subtropical China. *Annals of Forest Science*, 2018, 75: 24. <https://doi.org/10.1007/s13595-018-0703-0>
- [13] 沈蕊, 白尚斌, 周国模, 等. 毛竹种群向针阔林扩张的根系形态可塑性. *生态学报*, 2016, 36 (2): 326—334
- Shen R, Bai S B, Zhou G M, et al. The response of root morphological plasticity to the expansion of a population of *Phyllostachys edulis* into a mixed needle- and broad-leaved forest. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36 (2): 326—334
- [14] 赵雨虹, 范少辉, 罗嘉东. 毛竹扩张对常绿阔叶林土壤性质的影响及相关分析. *林业科学研究*, 2017, 30 (2): 354—359
- Zhao Y H, Fan S H, Luo J D. The influence of *Phyllostachys edulis* expanding into evergreen broadleaf forest on soil property and its related analysis (In Chinese). *Forest Research*, 2017, 30 (2): 354—359
- [15] Qin H, Niu L M, Wu Q F. et al. Bamboo forest expansion increases soil organic carbon through its effect on soil arbuscular mycorrhizal fungal community and abundance. *Plant and Soil*, 2017, 420: 407—421
- [16] Li Z, Zhang L, Deng B, Liu Y, et al. Effects of moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) invasions on soil nitrogen cycles depend on invasion stage and warming. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24 (32): 24989—24999
- [17] 欧阳明, 杨清培, 陈昕, 等. 毛竹扩张对次生常绿阔叶林物种组成、结构与多样性的影响. *生物多样性*, 2016, 24 (6): 649—657
- Ouyang M, Yang Q P, Chen X, et al. Effects of the expansion of *Phyllostachys edulis* on species composition, structure and diversity of the secondary evergreen broad-leaved forests (In Chinese). *Biodiversity Science*, 2016, 24 (6): 649—657
- [18] 廖丽琴, 刘苑秋, 孔凡前, 等. 庐山冬季土壤动物群落及功能群对毛竹扩张的响应. *江西农业大学学报*, 2017, 39 (4): 721—730
- Liao L Q, Liu Y Q, Kong F Q, et al. Response of soil fauna community and function groups to moso bamboo expansion in winter in Lushan Mountain (In Chinese). *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2017, 39 (4): 721—730
- [19] 刘信中, 王琅, 等. 江西省庐山自然保护区生物多样性考察与研究. 北京: 科学出版社, 2010
- Liu X Z, Wang L, et al. Investigation and research on biodiversity science of Lushan nature reserve in Jiangxi Province (In Chinese). Beijing: Science Press, 2010
- [20] 熊正琴, 张晓旭. 氮肥高效施用 in 低碳农业中的关键作用. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23 (6): 1433—1440

- Xiong Z Q, Zhang X X. Key role of efficient nitrogen application in low carbon agriculture (In Chinese). *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23 (6) : 1433—1440
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 1999
- Bao S D. Soil agrochemical analysis (In Chinese). 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 1999
- [22] Jiang Y M, Chen C G, Liu Y Q, et al. Soil soluble organic carbon and nitrogen pools under mono- and mixed species forest ecosystems in subtropical China. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, 10: 1071—1081
- [23] 何冬华, 沈秋兰, 徐秋芳, 等. 不同年限毛竹林土壤固氮菌群落结构和丰度的演变. *土壤学报*, 2015, 52 (4) : 934—942
- He D H, Shen Q L, Xu Q F, et al. Evolvement of structure and abundance of soil nitrogen-fixing bacterial community in *Phyllostachys edulis* plantation with age of time (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (4) : 934—942
- [24] Nicol GW, Leininger S, Schleper C, et al. The influence of soil pH on the diversity, abundance and transcriptional activity of ammonia oxidizing archaea and bacteria . *Environmental Microbiology*, 2008, 10: 2966—2978
- [25] 毛新伟, 程敏, 徐秋芳, 等. 硝化抑制剂对毛竹林土壤 N_2O 排放和氨氧化微生物的影响. *土壤学报*, 2016, 53 (6) : 1528—1540
- Mao X W, Cheng M, Xu Q F, et al. Effects of nitrification inhibitors on soil N_2O emission and community structure and abundance of ammonia oxidation microorganism in soil under extensively managed *Phyllostachys edulis* stands (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (6) : 1528—1540
- [26] Zhang J B, Cai Z C, Zhu T B. N_2O production pathways in the subtropical acid forest soils in China. *Environmental Research*, 2011, 111 (5) : 643—649
- [27] 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
- Zhang D Q, Shi P L, Zhang X Z. Research progress on the main influencing factors of soil respiration (In Chinese). *Advances in Earth Science*, 2005, 20 (7) : 778—785
- [28] 刘骏, 杨清培, 宋庆妮, 等. 毛竹种群向常绿阔叶林扩张的细根策略. *植物生态学报*, 2013, 37 (3) : 230—238
- Liu J, Yang Q P, Song Q N, et al. Strategy of fine root expansion of *Phyllostachys pubescens* population into evergreen broad-leaved forest (In Chinese). *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013, 37 (3) : 230—238
- [29] 吕富成, 王小丹. 凋落物对土壤呼吸的贡献研究进展. *土壤*, 2017, 49 (2) : 225—231
- Lü F C, Wang X D. Contribution of litters to soil respiration: A Review (In Chinese). *Soils*, 2017, 49 (2) : 225—231.
- [30] Zhong W, Bian B, Gao N, et al. Nitrogen fertilization induced changes in ammonia oxidation are attributable mostly to bacteria rather than archaea in greenhouse-based high N input vegetable soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 2016, 93: 150—159
- [31] 方华军, 程淑兰, 于贵瑞, 等. 森林土壤氧化亚氮排放对大气氮沉降增加的响应研究进展. *土壤学报*, 2015, 52 (2) : 262—271
- Fang H J, Cheng S L, Yu G R, et al. Study on the responses of nitrous oxide emission to increased nitrogen deposition forest soils: A review (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (2) : 262—271
- [32] 王会来, 刘娟, 姜培坤, 等. 森林土壤呼吸对人为干扰因素的响应. *自然资源学报*, 2017, 32 (7) : 1240—1255
- Wang H L, Liu J, Jiang P K, et al. Responses of forest soil respiration to human disturbance (In Chinese). *Journal of Natural Resources*, 2017, 32 (7) : 1240—1255
- [33] Micks P, Aber J D, Boone R D, et al. Short-term soil respiration and nitrogen immobilization response to nitrogen applications in control and nitrogen-enriched temperate forests. *Forest Ecology and Management*, 2004, 196: 57—70
- [34] 莫江明, 方运霆, 徐国良, 等. 鼎湖山苗圃和主要森林土壤 CO_2 排放和 CH_4 吸收对模拟N沉降的短期响应. *生态学报*, 2005, 25 (4) : 682—690
- Mo J M, Fang Y T, Xu G L, et al. The short-term responses of soil CO_2 emission and CH_4 uptake to simulated N deposition in nursery and forests of Dinghushan in subtropical China (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25 (4) : 682—690
- [35] 高伟峰, 史宝库, 金光泽. 模拟氮沉降对典型阔叶红松林土壤呼吸的影响. *南京林业大学学报 (自然科学版)*, 2016, 40 (1) : 8—14
- Gao W F, Shi B K, Jin G Z. Effect of simulated nitrogen deposition on soil respiration in the typical mixed broadleaved-korea pine forest (In Chinese). *Journal of Nanjing Forestry University (Natural*

- Sciences Edition), 2016, 40 (1): 8—14
- [36] Bloom A J, Sukrapanna S S, Warner R L. Root respiration associated with ammonium and nitrate absorption and assimilation by barley. *Plant Physiology*, 1992, 99 (4): 1294—1301
- [37] Blanco-Jarvio A, Chavez-Lopez C, Luna-Guido M, et al. Denitrification in a chinampa soil of Mexico City as affected by methylparathion: A laboratory study. *European Journal of Soil Biology*, 2011, 47 (5): 271—278

Effects of Moso Bamboo (*Phyllostachys edulis*) Expansion and Simulated Nitrogen Deposition on Emission of Soil N_2O and CO_2 in Lushan Mountain

LI Chao LIU Yuanqiu WANG Hankun CHEN Qi DENG Bangliang LIU Xiaojun DONG Xingyu
ZHANG Ling[†] ZHENG Xiang CAO Wen

(Forestry College of Jiangxi Agricultural University, Key Laboratory of State Forestry Administration on Forest Ecosystem Protection and Restoration of Poyang Lake Watershed (JXAU), Jiangxi Key Laboratory of Silviculture, Nanchang 330045, China)

Abstract 【Objective】Moso bamboo is a typical type of forest resource widely distributed in South China. Its expansion, however, has caused a number of ecological problems, especially emission of soil N_2O and CO_2 in the groves as affected by nitrogen deposition, which has rarely any research papers, let alone in-situ field observation data. 【Method】In this study, the static chamber technique was used to monitor N_2O and CO_2 emission rates, cumulative N_2O and CO_2 emissions and their responses to simulated nitrogen deposition in pure moso bamboo forest, moso bamboo - Japanese cedar mixed forest and pure Japanese cedar forest in Lushan Mountain, Jiangxi Province. 【Result】Results show: (1) the content of NH_4^+-N , content of $NO_3^- -N$, and pH in the mixed forest soil was $14.39\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $8.65\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, and 4.88, respectively, significantly higher than their respective ones in the Japanese cedar forest soil (i.e. $9.75\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $5.58\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and 4.05), but the former ($236.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) was much lower than the latter ($382.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) in DOC content; (2) the cumulative N_2O emission in the mixed forest ($393.6\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$) was significantly higher than that in the moso bamboo forest ($202.5\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$) and that in the Japanese cedar ($192.8\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$), while the cumulative CO_2 emission in the mixed forest ($4\ 655\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$) was significantly higher than that in the Japanese cedar forest ($2\ 815\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$); and (3) simulated nitrogen deposition had no significant effect on CO_2 emission rate and cumulative CO_2 emission in the three types of forest soils, but significantly increased cumulative N_2O emission in the Japanese cedar forest soil and mixed forest soil. 【Conclusion】All the findings indicate that the soils varied in physicochemical property and N_2O and CO_2 emission characteristics with the expansion of moso bamboo. Expansion of moso bamboo did increase N_2O and CO_2 emission from the soils to a certain extent. However, when the expansion completed, like in the moso bamboo forest, emissions of N_2O decreased significantly, while emission of CO_2 did not change much. Meanwhile, nitrogen deposition promoted N_2O emission from the Japanese cedar forest soil (no bamboo intruding) and the mixed forest soil (early stage of moso bamboo expansion), but had no significant effect on CO_2 emission. It is, therefore, suggested that in management of moso bamboo expansion in subtropical China under future meteorological conditions, it is essential to take into account effects of composition and structure of the ecosystem and other various affecting factors.

Key words Lushan Mountain; Moso bamboo expansion; Simulated nitrogen deposition; Soil N_2O and CO_2 emission

(责任编辑: 卢 萍)