

DOI: 10.20103/j.stxb.202504170914

刘心语, 竹京玲, 陈康民, 王懿祥. 抛荒毛竹林带状改造对土壤 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 通量的影响. 生态学报, 2026, 46(4): 2064-2073.

Liu X Y, Zhu J L, Chen K M, Wang Y X. Effects of strip transformation on soil CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O fluxes in abandoned phyllostachys edulis. Acta Ecologica Sinica, 2026, 46(4): 2064-2073.

## 抛荒毛竹林带状改造对土壤 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 通量的影响

刘心语<sup>1,3</sup>, 竹京玲<sup>2,3</sup>, 陈康民<sup>4</sup>, 王懿祥<sup>2,3,\*</sup>

1 浙江农林大学林业与生物技术学院, 临安 311300

2 浙江农林大学环境与资源学院, 碳中和学院, 临安 311300

3 浙江农林大学全省农林生态系统固碳减排重点实验室, 临安 311300

4 杭州市临安区林业局, 临安 311300

**摘要:** 毛竹林作为我国亚热带地区重要的碳汇生态系统, 但长期抛荒导致的林分退化不仅削弱其碳汇功能, 还可能通过改变土壤微环境降低 CH<sub>4</sub> 吸收能力并加剧 N<sub>2</sub>O 排放。近年来, 带状改造被广泛用于抛荒毛竹林生态修复, 但其对土壤 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 通量的影响仍不明确。以浙江省安吉县抛荒毛竹林为研究对象, 设置抛荒对照、集约经营、三种带状改造(轻度、中度和重度)及皆伐改造共 6 种处理, 通过连续 12 个月的定位观测, 结合静态箱-气相色谱法与土壤因子测定。结果表明: (1) 抛荒对照的土壤 CH<sub>4</sub> 年吸收量为 (8.68±0.08) kg hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>, N<sub>2</sub>O 年排放量为 (1.46±0.02) kg hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>; 与抛荒对比, 轻、中、重度改造使 CH<sub>4</sub> 吸收量减少 11.40%—32.37% ( $P < 0.05$ ), N<sub>2</sub>O 排放量增加 17.12%—47.26% ( $P < 0.05$ ), 且改造强度与温室气体通量变化呈显著正相关; (2) 土壤 CH<sub>4</sub> 吸收与温度、含水率、硝态氮和水溶性有机氮均呈极显著负相关 ( $R^2 = 0.41—0.58$ ), 而 N<sub>2</sub>O 排放与温度、硝态氮、铵态氮及水溶性碳氮组分呈显著正相关 ( $R^2 = 0.49—0.67$ ); (3) 轻度与中度改造在提升土壤肥力(硝态氮增加 13%—18%、有机碳提高 7%—12%) 的同时, 全球增温潜势(GWP) 增幅最低(45.94%—80.70%), 显著优于重度改造与皆伐 ( $P < 0.05$ )。研究表明, 轻、中度带状改造可实现抛荒竹林生态功能恢复与温室气体减排的协同优化, 为亚热带竹林可持续经营提供科学依据。

**关键词:** 毛竹林; 带状改造; 土壤 CH<sub>4</sub> 通量; 土壤 N<sub>2</sub>O 通量; 土壤环境因子

## Effects of strip transformation on soil CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O fluxes in abandoned phyllostachys edulis

LIU Xinyu<sup>1,3</sup>, ZHU Jingling<sup>2,3</sup>, CHEN Kangmin<sup>4</sup>, WANG Yixiang<sup>2,3,\*</sup>

1 College of Forestry and Biotechnology, Zhejiang A&F University, Lin'an 311300, China

2 College of Environmental and Resource Sciences, College of Carbon Neutrality, Zhejiang A&F University, Lin'an 311300, China

3 Key Laboratory of Carbon Sequestration and Emission Reduction in Agricultural and Forest Ecosystems of Zhejiang Province, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Lin'an 311300, China

4 Forestry Bureau in Lin'an District, Lin'an 311300, China

**Abstract:** Moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) forests represent crucial carbon sink ecosystems in subtropical China. However, long-term abandonment leading to stand degradation not only weakens their carbon sequestration capacity but may also reduce soil CH<sub>4</sub> uptake and enhance N<sub>2</sub>O emissions by altering soil microenvironments. In recent years, strip cutting transformation has been widely adopted for ecological restoration of abandoned moso bamboo forests, yet its impacts on soil CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O fluxes remains unclear. This study conducted in abandoned bamboo forests in Anji County, Zhejiang Province, established six treatments: abandoned control (CK), intensive management (IM), and three strip cutting

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32071762)

收稿日期: 2025-04-17; 网络出版日期: 2025-11-13

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangyixiang@zafu.edu.cn

transformation intensities (light: LC; moderate: MC; heavy: HC), along with clear-cutting transformation (CC). Through 12 months of continuous in-situ monitoring using the static chamber-gas chromatography method combined with soil factor measurements, the results showed: (1) The annual soil CH<sub>4</sub> uptake for CK was (8.68±0.08) kg hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>, and the annual N<sub>2</sub>O emissions was (1.46±0.02) kg hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>. Compared to CK, LC MC, and HC significantly reduced CH<sub>4</sub> uptake by 11.40%—32.37% ( $P < 0.05$ ) and increased N<sub>2</sub>O emissions by 17.12%—47.26% ( $P < 0.05$ ), with transformation intensity showing significant positive correlations with greenhouse gas flux changes. (2) Soil CH<sub>4</sub> uptake exhibited highly significant negative correlations with soil temperature, moisture, nitrate nitrogen (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N), and water-soluble organic nitrogen (WSON) ( $R^2 = 0.41—0.58$ ), while N<sub>2</sub>O emissions showed significant positive correlations with soil temperature, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, ammonium nitrogen (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N), and water-soluble carbon/nitrogen components ( $R^2 = 0.49—0.67$ ;  $P < 0.05$ ). (3) While enhancing soil fertility (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N increased by 13%—18%; organic carbon by 7%—12%), LC and MC treatments resulted in the lowest increases in global warming potential (GWP) (45.94%—80.70%), significantly outperforming HC and CC ( $P < 0.05$ ). These results demonstrate that light and moderate strip cutting transformation can achieve synergistic optimization between restoring ecological functions in abandoned bamboo forests and mitigating greenhouse gas emissions providing a scientific basis for sustainable management of subtropical bamboo forests.

**Key Words:** Moso bamboo forests; strip transformation; soil CH<sub>4</sub> fluxes; soil N<sub>2</sub>O fluxes; soil environmental factors

森林土壤是温室气体(GHG)的重要源与汇,其碳氮循环过程对全球气候变化具有关键调控作用。其中,甲烷(CH<sub>4</sub>)和氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)虽在大气中浓度较低,但其百年尺度全球增温潜势(Global Warming Potential, GWP)分别高达CO<sub>2</sub>的29.8倍和273倍<sup>[1]</sup>,对温室效应的贡献不可忽视。根据世界气象组织(WMO)2021年发布的《温室气体公报》,2020年大气中CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的浓度分别达到工业化前水平的262%和123%<sup>[2]</sup>。因此,厘清森林经营活动对土壤CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O通量的调控机制,对全球气候变化应对和碳中和目标实现具有重要意义。

毛竹(*Phyllostachys edulis*)是我国重要的林木资源,根据第九次全国森林资源清查数据,我国毛竹林面积为467.8万hm<sup>2</sup>,约占竹林总面积的73%<sup>[3]</sup>,其快速生长特性使其能高效捕集CO<sub>2</sub>并转化为生物量,显著提升固碳效率。已研究表明,集约经营毛竹林的年固碳量可达杉木人工林、热带山地雨林、马尾松林及粗放经营毛竹林的2—4倍<sup>[4]</sup>。然而,近年来因竹产业衰退导致抛荒面积快速扩张,引发枯死竹和倒竹乱象<sup>[5]</sup>、生物多样性下降<sup>[6]</sup>、土壤质量劣化<sup>[7]</sup>及碳汇功能衰退<sup>[8]</sup>。尤为严峻的是,抛荒竹林可能从碳汇转变为CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的净排放源<sup>[9]</sup>,加剧区域温室效应。不同于常规森林,毛竹需通过“隔年择伐、去老留新”维持生长活力。因此,探索和构建一种既能有效恢复退化竹林生态功能(特别是碳汇功能)、又能最小化其温室气体排放风险的新型管理模式,对遏制抛荒蔓延、促进竹林可持续经营及实现多重生态效益具有迫切的实践价值。

毛竹林采伐方式主要包括皆伐、择伐、横条状采伐及带状采伐。皆伐虽具经济效益高、操作简便等优势<sup>[10]</sup>,但对生态系统破坏显著<sup>[11]</sup>;择伐可保留部分林分以维持生物多样性和土壤质量<sup>[12]</sup>,但技术要求复杂且成本高昂;横条状采伐生态干扰小但山地清理成本高。相较而言,带状采伐通过保留带与采伐带交替布局,维持连续林冠覆盖,缓解生境破碎化与水土流失,并形成异质性微生境以支持物种多样性<sup>[13]</sup>。因此,针对抛荒毛竹林生态修复,带状改造被广泛视为高效营林模式。其核心优势在于通过调控采伐带宽与保留带比例,改变凋落物输入、土壤温湿度及微生物群落组成,从而显著影响CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O通量,这对评估其作为抛荒竹林生态修复措施的温室气体净效应至关重要。有研究表明,高强度采伐因移除冠层和凋落物层,植被缺失抑制甲烷氧化菌活性,且土壤温湿度剧变<sup>[14]</sup>,导致土壤CH<sub>4</sub>吸收能力急剧下降<sup>[15]</sup>,而低强度采伐通过保留植被维持微生物活性,CH<sub>4</sub>吸收速率虽低于未采伐区,但显著高于皆伐地<sup>[16]</sup>;皆伐通常通过提升土壤温度、加速氮矿化及减少植物氮吸收竞争,显著增加N<sub>2</sub>O排放<sup>[17—20]</sup>;但因低强度采伐扰动未突破氮循环阈值或受有机质截

留缓冲,  $N_2O$  排放可能与未采伐区无显著差异<sup>[21]</sup>。然而, 现研究多聚焦于温带与北方森林, 针对亚热带抛荒毛竹林的带状改造的观测稀缺, 且缺乏对土壤关键环境因子的动态解析。基于此, 本研究以浙江省典型抛荒毛竹林为对象, 设置抛荒对照(CK)、集约经营(IM)、轻度(LC)、中度(MC)、重度(HC)带状改造及皆伐改造(CC)共6种处理, 探究以下科学问题: (1) 抛荒竹林改造后土壤  $CH_4$  吸收与  $N_2O$  排放的时空格局如何变化? (2) 土壤温湿度、活性碳氮组分如何驱动  $CH_4$  和  $N_2O$  的气体通量? (3) 何种改造模式能兼顾生态恢复与温室气体减排? 研究结果可为亚热带退化竹林生态管理提供理论支撑, 助力“碳中和”目标下森林多目标经营策略的制定。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概括

研究区域位于中国浙江省湖州市安吉县灵峰寺林场(119°41'E—119°53'E, 30°23'N—30°53'N), 安吉县被誉为“中国竹乡”, 属于亚热带季风气候, 日照充足, 四季分明。该地区年平均气温 16.6°C, 其中最低平均气温(-5.5°C)出现在1月, 最高平均气温(30.8°C)出现在7月。年均日照时数为 1612—2430h, 年均降水量为 761—1780mm。该地年均无霜期约 231d, 年均相对湿度 70%以上。研究区土壤类型为黄壤和黄棕壤, 土层厚度中度, 土质疏松, 以轻壤质土为主, 林内土壤砾石含量高。实验观测期为 2023 年 3 月—2024 年 2 月。

### 1.2 样地处理

试验在浙江省安吉县灵峰寺林场选择立地条件基本一致的地段设置 6 种处理样地: 抛荒毛竹林(CK, 对照)、轻度带状采伐+补植珍贵树种改造(保留带 9m+采伐带 6m, LC)、中度带状采伐+补植珍贵树种改造(保留带 9m+采伐带 9m, MC)、重度带状采伐+补植珍贵树种改造(保留带 9m+采伐带 12m, HC)、皆伐改造+补植珍贵树种(CC)及集约经营毛竹林(IM)。样地设置遵循随机区组设计, 每种处理重复 3 次, 共计 18 个样地, 样地间最小间距 >20m 以避免边缘效应干扰。对于抛荒毛竹林、集约经营和皆伐改造毛竹林, 设置面积为 30m×30m 的样地, 在样地中间设置 20m×20m 的核心观测区, 外围 5m 作为缓冲区; 对于 3 种强度的带状改造林地(LC、MC、HC)规格为[采伐带宽(6m、9m、12m)+保留带宽 9m]×30m, 沿等高线布设, 采伐带与保留带交替排列, 上下边界内 5m 作为缓冲区。

采伐和补植于 2020 年 4 月进行, 采伐带内的毛竹全部清除, 保留带维持原状。采伐带内补植树种为浙江樟(*Cinnamomum chekiangense* Nakai)、浙江楠(*Phoebe chekiangensis* C. B. Shang)、红豆树(*Ormosia hosiei* Hemsl. & E. H. Wilson)和红豆杉(*Taxus wallichiana* var. *chinensis* (Pilger) Florin), 补植密度相同(株行距均为 3m×3m)。改造后在采伐带进行两次简单的劈灌抚育(主要是清理笋和割草), 抛荒毛竹林不进行任何经营活动, 集约经营毛竹林在大年对新竹钩梢, 每两年择伐三度竹, 每年挖笋, 没有施肥。

### 1.3 气体采集及测定方法

温室气体通量采用静态箱-气相色谱法测定。2020 年 11 月, 在每个样地的采伐带和保留带中心位置各安置 1 个静态箱。静态箱为组合式, 分为顶箱(30cm×30cm×30cm)和底座(30cm×30cm×10cm)两部分, 均由聚氯乙烯(PVC)板制成。箱内顶部安装直径 10cm 的小风扇, 用 12 V 蓄电池供电, 以保持箱内气体浓度差均匀。箱顶部中央开有直径 1cm 的小孔, 内置橡胶塞作为取样口。采样箱的基座大致安置在每个样方的中部, 以减少干扰。将底座插入 5cm 土壤中固定, 底座上部四周内有凹槽(槽宽、深各 5cm), 取样时注水密封。从 2023 年 3 月—2024 年 2 月, 每月中旬选择一个晴朗的天气, 在上午 9:00—11:00 间进行气体采集, 有研究显示该时间段的土壤气体通量可代表森林土壤日均排放<sup>[22]</sup>。气体采样时, 先开启顶箱内的风扇, 再将静态箱顶箱安置在底座凹槽中, 并在凹槽注入适量的水, 以保持静态箱的密封。在静态箱封后的第 0、10、20、30min, 用 25 mL 医用注射器采气样品, 并注入密封的真空气瓶中, 带回实验室于 48h 内使用 Agilent 7890 气象色谱仪(安捷伦, 美国)完成测定。

土壤温室气体通量的计算公式为:

$$F = \rho \times \frac{V}{A} \times \frac{P}{P_0} \times \frac{T_0}{T} \times \frac{dC_i}{d_i}$$

式中: $F$  为土壤温室气体用量( $\mu\text{g CH}_4 \text{ m}^{-2}\text{h}^{-1}$ ;  $\mu\text{g N}_2\text{O m}^{-2}\text{h}^{-1}$ );  $\rho$  为标准状态下温室气体的密度( $\text{kg/m}^3$ ),  $A$  为箱底面积( $\text{m}^2$ ),  $V$  为箱子的体积( $\text{m}^3$ ),  $P_0$  是标准状态下大气压力,  $P$  是采样期间试验箱内的大气压力(Pa),  $dC_i/d_i$  是采样期间气体浓度变化的速率( $\text{mol m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ ),  $T_0$  和  $T$  分别为标准条件下的绝对温度(K)和实际箱内温度( $^{\circ}\text{C}$ )。

年累计温室气体排放量计算公式如下:

$$F = \sum_{i=1}^{12} R_i \times 24 \times D \times 10^{-5}$$

式中, $F$  为累计温室气体排放量( $\text{kg CH}_4 \text{ hm}^{-2}\text{a}^{-1}$ ;  $\text{kg N}_2\text{O hm}^{-2}\text{a}^{-1}$ ),  $R_i$  为温室气体每个月的排放通量( $\mu\text{g CH}_4 \text{ m}^{-2}\text{h}^{-1}$ ;  $\mu\text{g N}_2\text{O m}^{-2}\text{h}^{-1}$ ),  $i$  为采样数,  $D$  为采样时间,  $10^{-5}$  为单位转换系数, 将  $\mu\text{g/m}^2$  转换为  $\text{kg/hm}^2$ 。

100 年影响尺度的土壤直接排放的温室气体的全球增温潜势计算公式:

$$\text{GWP} = f\text{CH}_4 \times 25 + f\text{N}_2\text{O} \times 298$$

式中: $f$  为土壤温室气体总排放量, 单位为  $\text{t/hm}^2$ 。

#### 1.4 土壤环境因子的测定

每月在采气的同时, 在 5cm 深处测量每个静态箱周围的土壤温度。同时, 采集 0—10cm 深度的土壤放入 105 $^{\circ}\text{C}$  烘箱内烘干后测定土壤含水率。此外, 在小室附近随机选取 5 个点, 每两个月采集一次土壤样品。将 5 个土壤样品充分混合成一个混合土样, 过筛 (<2mm), 保存在 4 $^{\circ}\text{C}$  冰箱中, 用于测定水溶性有机碳 (WSOC) 和氮 (WSON)、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 。水溶性有机碳、氮测定采用水浸提法<sup>[23]</sup>, 采用有机碳分析仪 (TOC-VCPH, 日本京都岛津公司) 测定。铵态氮采用靛酚蓝比色法<sup>[24]</sup>; 硝态氮采用紫外分光光度法<sup>[24]</sup>。

#### 1.5 数据处理

使用 Excel 2019 对原始数据进行统计汇总。IBM SPSS 22.0 和 Origin 2021 用于数据分析和绘图。采用重复测量方差分析 (Repeated Measurement Analysis of Variance, ANOVA) 分析不同处理、时间及其交互作用对土壤 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 通量以及土壤环境因子的影响。在进行方差分析之前, 对数据进行了正态性和齐性检验, 并在必要时对数据进行了对数转换。采用 Pearson 相关分析确定土壤 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 通量与土壤环境因子之间的关系, 显著性水平设定为  $P=0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同带状改造方式下毛竹林土壤温室气体通量的变化特征

在 12 个月的试验期间, 土壤 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的通量在六种经营处理下表现出明显的季节变化 (图 1), 土壤 CH<sub>4</sub> 在夏季吸收量低, 冬季吸收量高, 而土壤 N<sub>2</sub>O 在夏季的排放量高, 冬季排放量低。

在 12 个月的试验期内, 6 个处理的土壤 CH<sub>4</sub> 吸收通量呈现  $\text{HC} < \text{CC} < \text{IM} < \text{MC} < \text{LC} < \text{CK}$  ( $P < 0.05$ ) 的趋势 (表 1)。CK 的 CH<sub>4</sub> 年累积吸收量为  $(8.68 \pm 0.08) \text{ kg hm}^{-2}\text{a}^{-1}$ , 与 CK 相比, LC、MC、HC、CC 和 IM 处理的土壤 CH<sub>4</sub> 年累积吸收量分别减少了 11.40%、17.63%、32.37%、26.37%、17.95% ( $P < 0.05$ ) (图 2)。处理、观测时间及其交互作用对 CH<sub>4</sub> 排放速率的影响均显著 ( $P < 0.01$ )。

土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量呈现  $\text{CK} < \text{LC} < \text{MC} < \text{HC} < \text{IM} < \text{CC}$  ( $P < 0.05$ ) 的趋势 (表 1)。CK 的 N<sub>2</sub>O 年累积吸收量为  $(1.46 \pm 0.02) \text{ kg hm}^{-2}\text{a}^{-1}$ , 与 CK 相比, LC、MC、HC、CC、IM 处理的土壤 N<sub>2</sub>O 年累积排放量分别增加了 17.12%、31.50%、47.26%、70.54%、63.69% ( $P < 0.05$ ) (图 2)。处理、观测时间及其交互作用对 N<sub>2</sub>O 排放速率的影响均显著 ( $P < 0.01$ )。

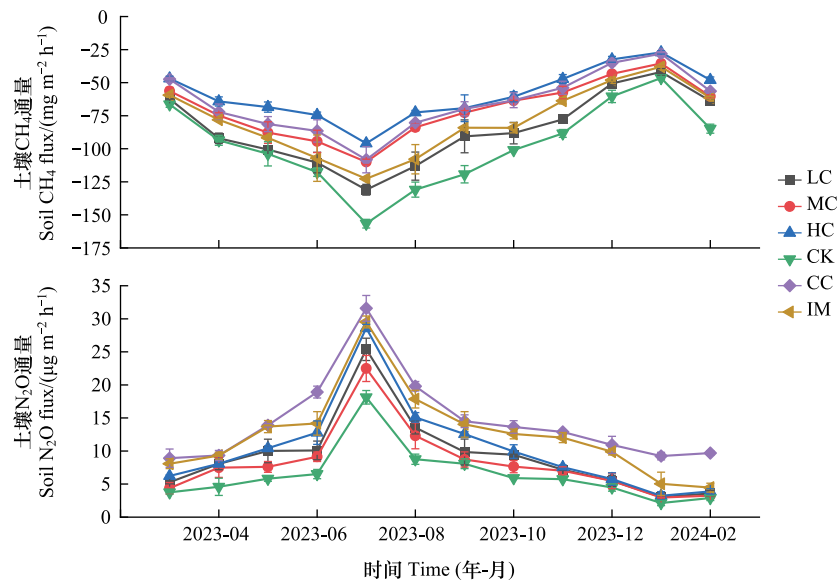


图 1 不同经营处理毛竹林土壤  $N_2O$  和  $CH_4$  通量的月动态变化

Fig.1 Monthly dynamics of Soil  $N_2O$  and  $CH_4$  fluxes in moso bamboo plantations under different management treatment

CK:抛荒毛竹林 Abandoned moso bamboo forests; LC:轻度带状改造 Light strip clear-cutting transformation; MC:中度带状改造 Moderate strip clear-cutting transformation; HC:重度带状改造 Heavy strip clear-cutting transformation; CC:皆伐改造 Clear-cutting transformation; IM:集约经营 Intensive management

表 1 不同经营处理毛竹林土壤  $CH_4$  和  $N_2O$  通量重复观测方差分析

Table 1 Repeated-measures ANOVA of soil  $CH_4$  and  $N_2O$  fluxes under different management practices in bamboo forests

处理 Treatment	甲烷吸收量 $CH_4$ uptake/ ( $\mu g m^{-2} h^{-1}$ )	氧化亚氮排放量 $N_2O$ emission/ ( $\mu g m^{-2} h^{-1}$ )	硝态氮 $NO_3^-$ -N/ (mg/kg)	铵态氮 $NH_4^+$ -N/ (mg/kg)	水溶性有机碳 WSOC/ (mg/kg)	水溶性有机氮 WSON/ (mg/kg)
抛荒竹林 CK	98.71±5.94a	16.58±1.00a	6.23±0.80cd	5.56±0.47d	120.16±4.51e	10.16±1.76a
轻度改造 LC	87.49±4.89b	19.46±1.16b	6.00±0.80d	6.92±0.65ab	129.70±5.68ac	9.16±0.88a
中度改造 MC	81.29±4.63c	21.83±1.23c	6.58±0.84c	6.36±0.73c	121.10±5.69de	11.17±1.19a
重度改造 HC	66.74±4.11d	24.49±1.34d	6.39±0.97c	7.38±0.71a	125.30±5.37cd	9.92±0.90a
集约毛竹 IM	80.98±4.61c	27.12±1.56e	7.06±1.12b	6.70±0.89b	132.99±6.00b	9.71±1.01a
皆伐毛竹 CC	72.82±4.53e	28.34±1.60f	7.62±1.11a	7.09±0.89abc	139.44±7.17a	11.51±1.23a
处理 ( $df=5$ ) Treatment	***	***	***	***	***	***
月份 ( $df=11$ ) Month	***	**	**	*	**	**
处理×月份 ( $df=55$ ) Treatment×Month	**	**	***	*	**	**

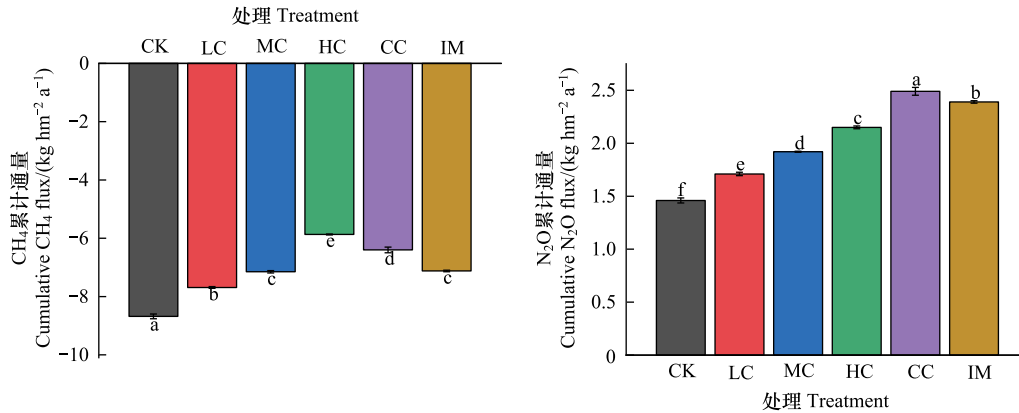
$CH_4$ : 甲烷 Methane;  $N_2O$ : 氧化亚氮 Nitrous oxide;  $NO_3^-$ -N: 硝态氮 Nitrate nitrogen;  $NH_4^+$ -N: 铵态氮 Ammoniacal nitrogen; WSOC: 水溶性有机碳 Water-soluble organic carbon; WSON: 水溶性有机氮 Water-soluble organic nitrogen; \*, \*\*, \*\*\* 分别表示  $P<0.05$ ,  $P<0.01$ ,  $P<0.001$ ; 不同小写字母表示不同处理之间存在显著差异性 ( $P<0.05$ )

## 2.2 抛荒毛竹林不同改造对 GWP 的影响

毛竹林增温潜势呈现为  $CK<LC<MC<HC<IM<CC$  ( $P<0.05$ ) 的趋势 (图 3), CK 的毛竹林增温潜势为  $217.62 kg CO_{2-eq} hm^{-2} a^{-1}$ , 与 CK 相比, LC、MC、HC、CC、IM 处理的林地增温潜势分别增加了 45.94%、80.70%、127.47%、167.72%、145.85%。

## 2.3 不同改造对土壤理化性质的影响

土壤温度在六种经营处理下表现出明显的季节变化, 夏季最高, 冬季最低 (图 4)。毛竹林土壤月平均温

图2 不同经营处理毛竹林土壤 CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 年累积通量Fig.2 Annual cumulative fluxes of soil CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O under different management practices in bamboo forests

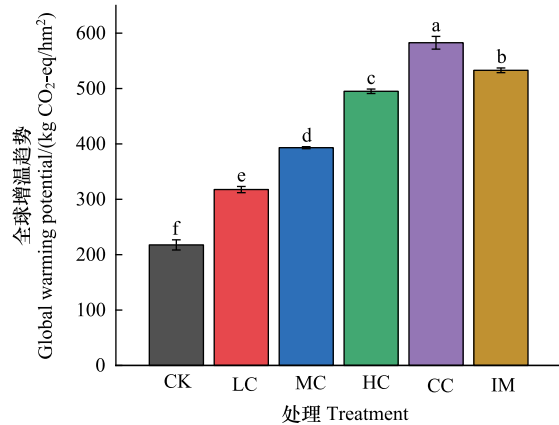
度呈现为  $CC < MC < IM < CK < HC < LC$  ( $P < 0.05$ ) 的趋势, CK 的土壤月平均温度为  $14.77^{\circ}\text{C}$ , 与 CK 相比, LC 和 HC 分别提高了土壤平均温度  $0.46^{\circ}\text{C}$  和  $0.35^{\circ}\text{C}$ , 而 MC、CC、IM 分别降低了土壤平均温度  $0.11^{\circ}\text{C}$ 、 $0.21^{\circ}\text{C}$ 、 $0.01^{\circ}\text{C}$ 。土壤月平均含水率呈现  $IM < HC < MC < LC < CK < CC$  ( $P < 0.05$ ) 的趋势, CK 的土壤月平均含水率为  $29.72\text{ g/kg}$ 。与 CK 相比, CC 的土壤含水率增加了  $4.45\%$ , LC、MC、HC、IM 处理的土壤月平均含水率分别降低了  $1.10\%$ 、 $1.54\%$ 、 $5.98\%$ 、 $8.12\%$ 。

毛竹林地土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 与  $\text{NH}_4^+$ -N 的含量呈现明显的季节性变化规律, 夏季最高、冬季最低 (图 5)。土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量呈现  $LC < CK < MC < HC < IM < CC$  ( $P < 0.05$ ) 的趋势 (表 1)。处理、观测时间及其交互作用对土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量的影响均显著 ( $P < 0.01$ )。CK 的土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量为  $(6.23 \pm 0.80)\text{ mg/kg}$ , 与 CK 相比, LC、MC 和 HC 均不显著影响  $\text{NO}_3^-$ -N 月均浓度, 而 CC 和 IM 显著提高了整个试验期间  $\text{NO}_3^-$ -N 月均浓度, 分别提高了  $22.28\%$  和  $13.29\%$  (表 1)。土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 的含量呈现  $CK < MC < IM < LC < CC < HC$  ( $P < 0.05$ ) 的趋势, 对照处理的土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 含量为  $(5.56 \pm 0.47)\text{ mg/kg}$ , 与 CK 相比, LC、MC、HC、CC、IM 显著提升了土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 月均浓度, 分别提高了  $24.46\%$ 、 $14.50\%$ 、 $32.80\%$ 、 $27.64\%$ 、 $20.57\%$ 。

6 个处理的土壤 WSOC 平均浓度呈现  $CK < MC < HC < LC < IM < CC$  ( $P < 0.05$ ) (表 1) 的趋势, 处理、观测时间及其交互作用对土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量的影响均显著 ( $P < 0.01$ )。与 CK 相比, LC、HC、CC 和 IM 显著提升了土壤 WSOC 平均浓度, 分别提高了  $7.94\%$ 、 $4.28\%$ 、 $10.68\%$ 、 $16.05\%$ 。其余五种处理对抛荒毛竹林的土壤 WSON 均无显著性影响。

#### 2.4 土壤 CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 通量与各环境因子的相关性

图 6 表明, 土壤 CH<sub>4</sub>通量与土壤温度、土壤含水率、 $\text{NO}_3^-$ -N 和 WSON 均呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ )。土壤 N<sub>2</sub>O 通量与土壤温度、湿度、 $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N 和 WSON 均呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 与 WSOC 呈显著正相关性 ( $P < 0.05$ )。土壤温度与土壤湿度、 $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N 和 WSON 的含量呈显著正相关 ( $P < 0.05$ )。土壤湿度、 $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N 和 WSOC 和 WSON 之间均呈现极显著正相关 ( $P < 0.01$ )。

图3 不同经营处理毛竹林土壤 CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 的全球增温趋势Fig.3 GWP of soil CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O fluxes under different management practices in bamboo forests

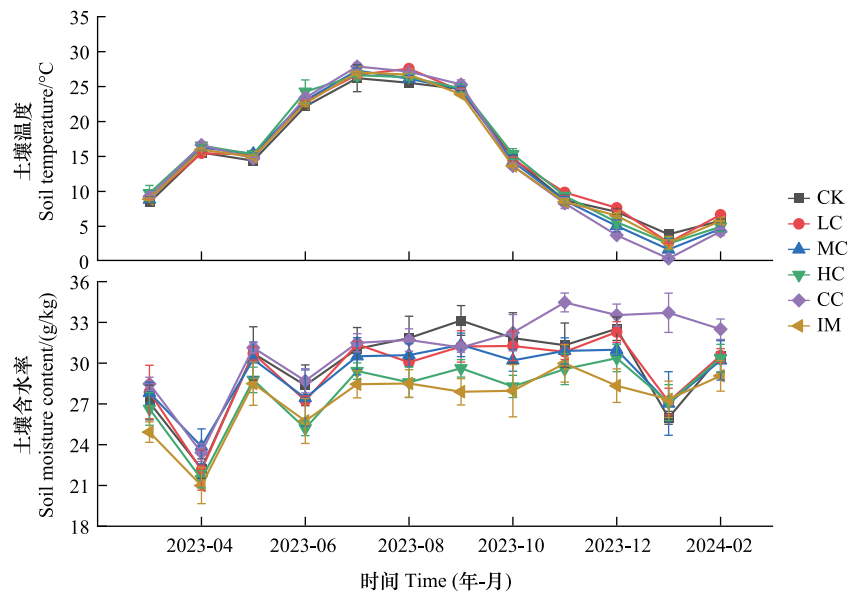


图 4 不同经营处理毛竹林的地下 5cm 处土壤温度及 0—20cm 土壤含水量的月变化

Fig.4 Monthly dynamics of soil temperature at 5cm depth and moisture content in the 0—20cm soil layer in moso bamboo plantations under different management treatments

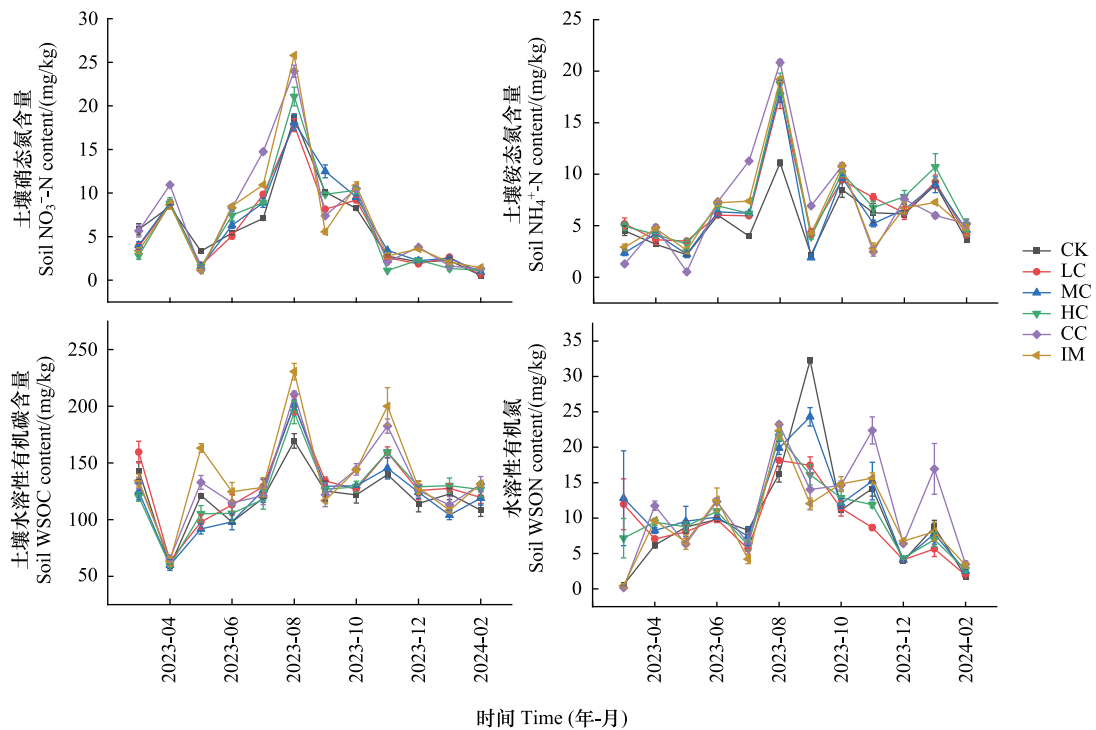


图 5 不同经营处理毛竹林的土壤 NO<sub>3</sub>-N、NH<sub>4</sub>-N、WSOC、WSON 含量的月变化

Fig.5 Monthly variations of soil NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N, WSOC and WSON content under different management practices in bamboo forests  
WSOC: 水溶性有机碳 Water-soluble organic carbon; WSON: 水溶性有机氮 Water-soluble organic nitrogen;

### 3 讨论

#### 3.1 不同带状改造模式对土壤 CH<sub>4</sub>通量的影响机制

本研究显示,带状改造显著降低了土壤 CH<sub>4</sub>吸收能力,且随改造强度增加呈梯度下降趋势(图 2)。这一

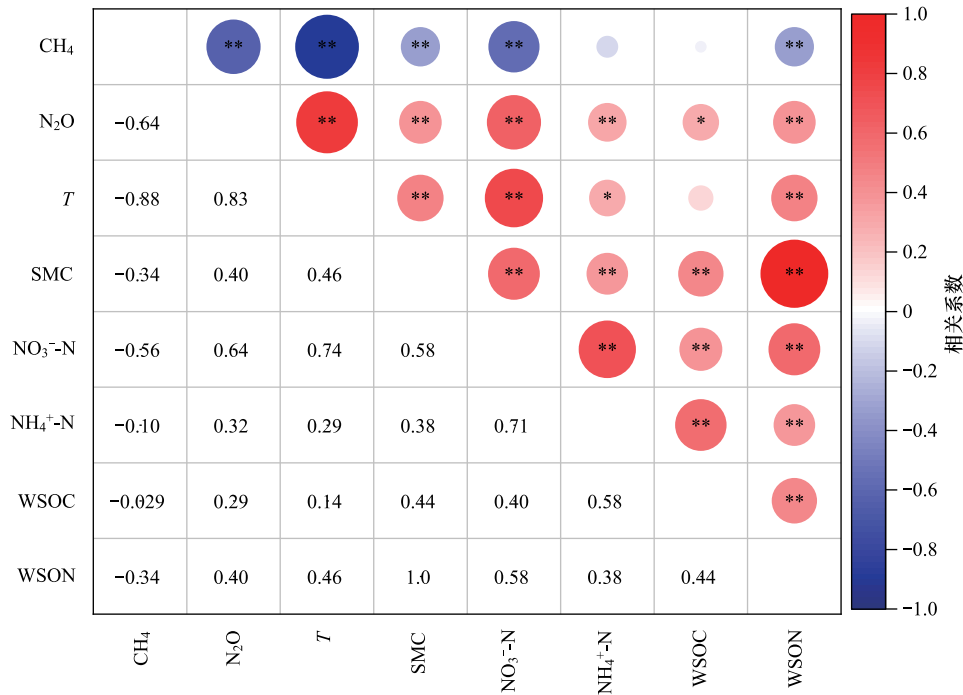


图 6 不同经营处理毛竹林土壤 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 与土壤各因子的相关性分析

Fig.6 Correlation analysis between soil CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions and soil variables in moso bamboo forests under different silvicultural treatments

T:土壤温度 Soil temperature; SMC:含水率 Soil moisture content; \*, \*\*, \*\*\* 分别表示  $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 、 $P < 0.001$

趋势与 HU 等<sup>[23]</sup>关于柳杉林不同管理措施下土壤温室气体通量变化的研究结果一致,未受干扰的林分表现出更强的 CH<sub>4</sub>氧化能力。鉴于本研究所有样地均表现为 CH<sub>4</sub>净吸收,其通量下降主要由甲烷氧化菌活性受抑制驱动,而非产甲烷过程。土壤 CH<sub>4</sub>吸收通量与土壤温度、土壤含水率、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 WSON 均呈极显著负相关,其中温度相关性最强。其抑制机制可解析为以下三方面。第一,带状改造导致林冠郁闭度下降,地表太阳辐射输入增加,使 5cm 土层温度升高 0.35—0.46℃(图 4),升温加速土壤有机氮矿化,导致 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量显著增加(14.50%—32.80%,表 1)。高浓度 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>与 CH<sub>4</sub>竞争甲烷单加氧酶(MMO)活性位点<sup>[25—26]</sup>,并通过反应产物(羟胺、NO<sub>2</sub>)不可逆抑制酶活性<sup>[27]</sup>,最终削弱甲烷氧化能力。该机制在重度改造样地尤为突出(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 与 CH<sub>4</sub>吸收量  $R^2 = 0.62$ ,  $P < 0.01$ ,图 6)。第二,改造形成的“暖干化”趋势虽提升土壤通气性,但土壤颗粒收缩导致孔隙连通性下降,阻碍 O<sub>2</sub>向甲烷氧化菌富集的深层微域扩散<sup>[28]</sup>。氧分压的局部不足直接限制 MMO 的羟化反应(需 O<sub>2</sub>参与)。第三,采伐剩余物输入使 WSOC 增加 4.28%—16.05%(表 1),刺激异养微生物耗氧呼吸。当 O<sub>2</sub>消耗速率超过大气扩散补给时,形成局部厌氧微区<sup>[29]</sup>,而甲烷氧化菌对缺氧环境高度敏感,远低于多数好氧菌<sup>[30]</sup>,导致甲烷氧化受抑。

### 3.2 不同带状改造模式对土壤 N<sub>2</sub>O 通量的影响机制

本研究表明,以抛荒竹林处理(图 2;表 1)为对照,其余 5 种经营处理显著增加了毛竹林土壤 N<sub>2</sub>O 的年累积排放量,其中轻度改造土壤 N<sub>2</sub>O 年累积排放量最小,皆伐改造年累积排放量最大。这与 Pearson 的研究<sup>[29]</sup>结果一致,皆伐地翻耕后土壤 N<sub>2</sub>O 的排放明显高于未翻耕地。土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量与土壤温度、WSOC、WSON、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度的均呈显著正相关,这与 Lemke<sup>[31]</sup>的研究结论一致,土壤 N<sub>2</sub>O 通量与活性有机碳库和活性有机氮库大小之间的正相关关系。基于上述相关性分析,本研究揭示影响其机制可能涉及以下途径:第一,带状改造后,土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量的增加为硝化作用提供了充足底物。硝化作用在好氧条件

下将  $\text{NH}_4^+$  逐步氧化为  $\text{NO}_2^-$  和  $\text{NO}_3^-$ , 其过程中产生的  $\text{N}_2\text{O}$  可通过化能异养硝化或硝化菌的副反应释放。改造后土壤温度升高 ( $0.35^\circ\text{C}$ — $0.46^\circ\text{C}$ ) 与含水率下降 ( $1.10\%$ — $8.12\%$ ) 形成“暖干化”微环境。温度升高直接提升硝化菌的氨单加氧酶活性<sup>[32]</sup>, 而含水率降至  $30\%$ — $40\%$  时, 土壤孔隙氧分压上升, 硝化作用占主导<sup>[33]</sup>。第二, 采伐通过移除部分植被降低了植物间对水分和氮素的竞争, 同时将大量采伐剩余物(如枝叶、根系碎屑)输入至林地表层。这一过程显著促进了凋落物的微生物分解, 进而提高土壤氮素有效性, 加速硝化作用的进行。因此, 本研究认为硝化作用是导致不同带状改造模式(特别是 LC, MC, HC, CC)下土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放增加的主导过程。本研究中土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量与  $\text{N}_2\text{O}$  通量呈显著正相关, 与 Duan 等<sup>[34]</sup> 在亚热带人工林的研究结论一致, 进一步验证了硝化作用对  $\text{N}_2\text{O}$  排放的主导贡献。此外, 采伐剩余物输入使土壤 WSOC 增加  $4.28\%$ — $16.05\%$ , 高强度采伐导致更多有机质输入, 为异养微生物提供了丰富的底物, 刺激  $\text{O}_2$  异养呼吸并形成局部厌氧微区, 可能短暂激活反硝化途径。然而, 在整体暖干化的土壤环境下, 反硝化作用受到强烈抑制。尽管采伐导致的 WSOC 输入可能在局部微区创造短暂的厌氧条件并激活反硝化途径, 但该过程产生的  $\text{N}_2\text{O}$  通量贡献相对较小, 且可能受到  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  底物的可利用性(虽然整体  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  增加, 但在活跃反硝化微区可能被快速还原)和反硝化菌活性在低含水率条件下受限的影响, 其排放强度显著低于主导的硝化作用。值得注意的是, 集约经营(IM)样地因频繁人为干扰(如施肥、松土), 其  $\text{N}_2\text{O}$  排放量显著高于自然恢复样地, 印证了人为活动对氮循环的强烈扰动<sup>[35]</sup>。

#### 4 结论

通过连续 12 个月的定位观测, 本研究揭示了不同带状改造模式对抛荒毛竹林土壤  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  气体通量的调控机制。与未改造抛荒对照相比, 所有改造处理均导致  $\text{CH}_4$  年累积吸收量减少了  $11.40\%$ — $32.37\%$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  排放量增加了  $17.12\%$ — $47.26\%$ , 且随着改造强度的增加而递增。与抛荒对比, 重度改造  $\text{N}_2\text{O}$  排放量增加了  $47.26\%$ ; 而轻度与中度改造通过维持较高植被覆盖度和土壤含水率, 使  $\text{CH}_4$  吸收量降幅仅为  $11.40\%$ — $17.63\%$ , 同时使土壤硝态氮含量增加了  $13\%$ — $18\%$ , 有机碳含量增加了  $7\%$ — $12\%$ , 显著提升土壤肥力。抛荒对照(CK)虽短期温室气体净效应较低, 但其不可持续的退化进程将导致碳汇功能持续衰退。相比之下, 轻度与中度带状改造在显著提升土壤肥力的同时, 将全球增温潜势(GWP)增幅控制在最低水平, 为遏制抛荒竹林退化、重建碳汇功能提供了优化路径。未来需结合长期观测, 优化带宽设计与氮素管理策略, 以协同提升生态修复与碳中和效益。

#### 参考文献(References):

- [1] IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [2] World Meteorological Organization. The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2020. WMO Greenhouse Gas Bulletin, NO.17, 2021-10-25.
- [3] 国家林业和草原局编制. 中国森林资源报告—2014—2018. 北京: 中国林业出版社, 2019.
- [4] Zhou G M, Xu J M, Jiang P K. Effect of management practices on seasonal dynamics of organic carbon in soils under bamboo plantations. *Pedosphere*, 2006, 16(4): 525-531.
- [5] 魏玲玲, 邢思懿, 王懿祥. 我国毛竹林经营中的抛荒和自然扩张困境及对策. *竹子学报*, 2023, 42(3): 55-62.
- [6] 白尚斌, 周国模, 王懿祥, 梁倩倩, 陈娟, 程艳艳, 沈蕊. 天目山保护区森林群落植物多样性对毛竹入侵的响应及动态变化. *生物多样性*, 2013, 21(3): 288-295.
- [7] 刘广路, 范少辉, 蔡春菊, 刘希珍. 毛竹向撂荒地扩展过程中叶功能性状变化. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2017, 41(2): 41-46.
- [8] Zhao Y Z, Liang C F, Shao S, Chen J H, Qin H, Xu Q F. Linkages of litter and soil C: N: P stoichiometry with soil microbial resource limitation and community structure in a subtropical broadleaf forest invaded by moso bamboo. *Plant and Soil*, 2021, 465(1): 473-490.
- [9] 邓旭. 弃营年限对竹林土壤碳氮库及营养元素的影响研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2020.
- [10] Pan J, Liu Y Q, Niu J H, Fang H F, Feng Y, Bai T J, Zhang M, Deng W P, Siemann E, Zhang L. Moso bamboo expansion reduced soil  $\text{N}_2\text{O}$

- emissions while accelerated fine root litter decomposition; contrasting non-additive effects. *Plant and Soil*, 2024, 501(1): 7-21.
- [11] 张春贵. 巨尾桉人工林皆伐改择伐经济效益初探. *华东森林经理*, 2015, 29(3): 20-24.
- [12] 苏文会, 朱晓武, 范少辉, 曾宪礼, 刘广路. 采伐对森林生态系统的影响综述. *林业资源管理*, 2017(3): 35-40.
- [13] 贾丹. 低质林带状改造对土壤微生物影响的研究[D]. 黑龙江: 东北林业大学, 2021.
- [14] 耿世聪, 陈志杰, 张军辉, 娄鑫, 王秀秀, 戴冠华, 韩士杰, 于丹丹. 长白山三种主要林地土壤甲烷通量. *生态学杂志*, 2013, 32(5): 1091-1096.
- [15] 孙海龙, 张彦东. 采伐干扰对东北温带次生林土壤 CH<sub>4</sub> 通量的影响. *应用生态学报*, 2013, 24(10): 2737-2745.
- [16] 郭辉, 董希斌, 姜帆. 采伐强度对小兴安岭低质林分土壤碳通量的影响. *林业科学*, 2010, 46(2): 110-115.
- [17] Deng J Y, Wang G, Zhu Y C, Zhou D Y, Zhou L L, Yuan H F, Huang D Y, Jia H L. Conventional tillage combined with residue removal reduces growing-season methane emissions in flooded paddy (*Oryza sativa* L. subsp. *Japonica* Kato) fields. *European Journal of Agronomy*, 2022, 140: 126612.
- [18] Lavoie M, Kellman L, Risk D. The effects of clear-cutting on soil CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O flux, storage and concentration in two Atlantic temperate forests in Nova Scotia, Canada. *Forest Ecology and Management*, 2013, 304: 355-369.
- [19] 牟长城, 吴云霞, 李婉姝, 徐蕊. 采伐对小兴安岭落叶松-泥炭藓沼泽温室气体排放的影响. *应用生态学报*, 2010, 21(2): 287-293.
- [20] Zhang H, Tang C X, Berninger F, Bai S B, Wang H G, Wang Y X. Intensive forest harvest increases N<sub>2</sub>O emission from soil: A meta-analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, 2022, 172: 108712.
- [21] Mazza G, Agnelli A E, Cantiani P, Chiavetta U, Doukalianou F, Kitikidou K, Milios E, Orfanoudakis M, Radoglou K, Lagomarsino A. Short-term effects of thinning on soil CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> fluxes in Mediterranean forest ecosystems. *Science of The Total Environment*, 2019, 651(Pt 1): 713-724.
- [22] 王胜, 樊军, 王建国, 易彩琼, 高宇. 水蚀风蚀交错区土壤呼吸特征及其对水热因子的响应. *农业环境科学学报*, 2014, 33(9): 1770-1781.
- [23] Hu Y J, Zhang H, Lv Y, Ying B B, Wang Y X. Thinning intensity but not replanting different species affects soil N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> fluxes in *Cunninghamia lanceolata* plantation. *Science of The Total Environment*, 2022, 821: 153458.
- [24] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.
- [25] Bodelier P L E, Laanbroek H J. Nitrogen as a regulatory factor of methane oxidation in soils and sediments. *FEMS Microbiology Ecology*, 2004, 47(3): 265-277.
- [26] Schnell S, King G M. Mechanistic analysis of ammonium inhibition of atmospheric methane consumption in forest soils. *Applied and Environmental Microbiology*, 1994, 60(10): 3514-3521.
- [27] Wang Z P, Ineson P. Methane oxidation in a temperate coniferous forest soil: effects of inorganic N. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(3): 427-433.
- [28] Sun X Q, She D L, Fei Y H, Han X, Gao L. An improved pore-solid fractal model for predicting coastal saline soil hydraulic properties based on change-points determined by genetic algorithm-support vector regression. *Soil and Tillage Research*, 2022, 224: 105502.
- [29] Mäkiranta P, Laiho R, Penttilä T, Minkkinen K. The impact of logging residue on soil GHG fluxes in a drained peatland forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 48: 1-9.
- [30] 蔡元锋, 贾仲君. 土壤大气甲烷氧化菌研究进展. *微生物学报*, 2014, 54(8): 841-853.
- [31] Lemke R L, Izaurralde R C, Nyborg M. Seasonal distribution of nitrous oxide emissions from soils in the parkland region. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62(5): 1320-1326.
- [32] Maag M, Vinther F P. Nitrous oxide emission by nitrification and denitrification in different soil types and at different soil moisture contents and temperatures. *Applied Soil Ecology*, 1996, 4(1): 5-14.
- [33] Wei Z J, Shan J, Well R, Yan X Y, Senbayram M. Land use conversion and soil moisture affect the magnitude and pattern of soil-borne N<sub>2</sub>, NO, and N<sub>2</sub>O emissions. *Geoderma*, 2022, 407: 115568.
- [34] Duan T Z, Zhao J T, Zhu L Z. Insights into CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O emissions driven by applying biochar and nitrogen fertilizers in upland soil. *Science of The Total Environment*, 2024, 929: 172439.
- [35] Vitousek P M, Aber J D, Howarth R W, Likens G E, Matson P A, Schindler D W, Schlesinger W H, Tilman D G. Technical report: human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. *Ecological Applications*, 1997, 7(3): 737.