

杉木林土壤温室气体排放对毛竹入侵及采伐的短期响应

张庆晓¹, 陈 璐¹, 朱向涛², 王 楠², 白尚斌²

(1. 浙江农林大学 林业与生物技术学院, 浙江 杭州 311300; 2. 浙江农林大学 暨阳学院, 浙江 诸暨 311800)

摘要: 【目的】探讨毛竹 *Phyllostachys edulis* 入侵及采伐对杉木 *Cunninghamia lanceolata* 林土壤温室气体排放及理化性质的影响, 为科学管控毛竹入侵现象提供理论依据。【方法】采用静态箱-气相色谱法对毛竹纯林(毛竹林)、采伐入侵毛竹后的杉木释放林(释放林)、毛竹-杉木混交林(混交林)和杉木纯林(杉木林)土壤温室气体通量进行短期原位监测。【结果】毛竹的入侵及采伐均增加了土壤二氧化碳(CO₂)排放通量, 毛竹林、释放林、混交林和杉木林排放通量分别为 827.55、485.09、374.33 和 300.44 mg·m⁻²·h⁻¹; 氧化亚氮(N₂O)排放通量分别为 120.86、98.03、82.89 和 70.23 μg·m⁻²·h⁻¹; 土壤甲烷(CH₄)吸收通量分别为 155.38、145.77、135.26 和 119.62 μg·m⁻²·h⁻¹。土壤温度从大到小依次为混交林(19.77℃)、释放林(18.72℃)、毛竹林(18.49℃)、杉木林(18.32℃), 土壤含水率依次为释放林(27.32%)、杉木林(23.04%)、毛竹林(18.67%)、混交林(16.36%)。相关性分析表明: 4种林分土壤CO₂、N₂O排放通量和CH₄吸收通量均与土壤温度呈极显著正相关($P < 0.01$), 且具有一致动态变化规律; 与土壤无机氮[铵态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)]呈正相关; 与土壤微生物生物量碳(MBC)呈负相关。【结论】毛竹入侵及采伐均导致杉木林土壤温室气体排放通量总量增加, 对区域大气环境造成负面影响; 土壤温度、土壤含水率是影响3种温室气体排放的主要土壤指标, 是引起不同林分间温室气体排放差异的主要原因。表5参50

关键词: 杉木; 毛竹; 入侵; 采伐; 土壤温室气体

中图分类号: S714.2 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2021)04-0703-09

On the short-term response of soil greenhouse gas emissions in *Cunninghamia lanceolata* forest to the expansion and eradication of *Phyllostachys edulis*

ZHANG Qingxiao¹, CHEN Jun¹, ZHU Xiangtao², WANG Nan², BAI Shangbin²

(1. College of Forestry and Technology, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 2. Jiyang College, Zhejiang A&F University, Zhuji 311800, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective] With an investigation of the effects of expansion and eradication of *Phyllostachys edulis* (moso bamboo) on soil greenhouse gas emission flux and soil physical and chemical properties in *Cunninghamia lanceolata* (Chinese fir) forest, this paper is aimed to provide theoretical basis for the scientific management of moso bamboo expansion. [Method] Short-term in-situ monitoring was carried out of the soil greenhouse gas flux in pure moso bamboo forest (BF), Chinese fir released forest upon the eradication of moso bamboo from the Chinese fir forest mixed with moso bamboo (RF), moso bamboo and Chinese fir mixed forest (MF), and pure Chinese fir forest (CF) using a static chamber gas chromatography method. [Result] The expansion and eradication of moso bamboo increased the soil CO₂ emission flux, which were 827.55, 485.09, 374.33 and 300.44 mg·m⁻²·h⁻¹ for BF, RF, MF and CF respectively whereas the soil N₂O emission flux were

收稿日期: 2020-08-24; 修回日期: 2021-05-18

基金项目: 国家自然科学基金面上基金资助项目(31770680, 31770681); 浙江省自然科学基金面上基金资助项目(LY14C160010); 暨阳“533英才计划”项目(2018C5); 浙江省省院合作林业科技项目(2019SY06)

作者简介: 张庆晓(ORCID: 0000-0002-5855-8184), 从事森林生态学研究。E-mail: 512172003@qq.com。通信作者: 白尚斌(ORCID: 0000-0002-0747-3252), 教授, 博士, 从事全球变化与森林生态功能及树木对养分胁迫、环境污染的适应研究。E-mail: sequia96@163.com

120.86, 98.03, 82.89 and 70.23 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, and the soil CH_4 absorption flux were 155.38, 145.77, 135.26 and 119.62 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$. The soil temperature decreases from MF (19.77 $^{\circ}\text{C}$) to RF (18.72 $^{\circ}\text{C}$), BF (18.49 $^{\circ}\text{C}$) and CF (18.32 $^{\circ}\text{C}$) while the soil moisture content decreases from RF (27.32%) to CF (23.04%), BF (18.67%) and MF (16.36%). In these four different stands, the soil CO_2 and N_2O emission fluxes and CH_4 absorption fluxes were significantly positively correlated with soil temperature and moisture content ($P < 0.01$) with consistent dynamic changes and had a positive correlation with soil inorganic nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$) but a negative correlation with soil microbial biomass carbon (MBC). [Conclusion] The expansion and eradication of moso bamboo resulted in the increase of soil greenhouse gas emission flux in Chinese fir forest, which had a negative impact on the regional atmospheric environment. On the other hand, the soil temperature and soil water content were the main driving factors for the three kinds of greenhouse gas emissions, and could lead to the differences in greenhouse gas emissions among the four stands. [Ch, 5 tab. 50 ref.]

Key words: *Cunninghamia lanceolata*; *Phyllostachys edulis*; invasion; cutting; soil greenhouse gas

二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4)、氧化亚氮(N_2O)是引起全球温室效应最主要的3种温室气体^[1],其排放持续增加将会导致全球气候变暖加剧。森林土壤汇集了全球土壤73%的碳库^[2],是温室气体重要的吸收汇、排放源和转换器^[3],对调节全球气候变化及碳、氮平衡具有至关重要的作用。研究表明^[4-5]:森林演替、土地利用方式改变及森林过度采伐均会导致森林土壤温室气体排放通量上升,尤其是后两者引起的 CO_2 排放通量约占人类碳排放总量的30%,是全球 CO_2 排放通量大幅度增加的最主要原因之一。因此,合理利用现有林地,科学经营森林,探究各因素对土壤温室气体排放的影响机制,对减缓全球温室效应意义重大,也是当前国内外的研究热点。杉木 *Cunninghamia lanceolata* 是中国优质速生丰产的乡土针叶树种,人工栽培面积大^[6],在缓解木材需求压力、增加农民经济效益方面作用突出,同时杉木具有巨大的固碳潜力,对缓解气候变化起到不可忽视的作用^[7-10]。但杉木纯林存在土壤肥力衰退、土壤质量下降等问题^[11],极易遭受周边毛竹 *Phyllostachys edulis* 的入侵。毛竹是中国特有高大散生无性系克隆植物^[12],因其特殊生物学特性和优越的固碳能力成为中国优势碳汇造林树种^[13]。毛竹林生物碳储量较高^[14-15],年平均碳吸收量为 8.13 $\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[16],远高于马尾松 *Pinus massoniana* 及其他常绿阔叶林树种。但由于毛竹繁殖能力强大,毛竹产量快速增长。近年来国内市场毛竹价格下滑,竹农的经营积极性大大降低,许多地区出现大面积抛荒毛竹林^[17]。抛荒后毛竹入侵周边林分的速度加快,入侵现象愈加明显,蚕食周边林分愈加严重,区域生物多样性受到严重威胁。遭受毛竹入侵的杉木林土壤肥力、pH、含水率等理化性质和微生物群落结构均会发生相应变化,进而影响土壤温室气体排放^[18]。为探究杉木林土壤温室气体排放对毛竹入侵及采伐的短期响应,本研究以毛竹纯林(毛竹林)、采伐入侵毛竹后的杉木释放林(释放林)、毛竹-杉木混交林(混交林)和杉木纯林(杉木林)作为研究对象,比较毛竹入侵、采伐前后土壤温室气体排放差异及主要影响因素,为毛竹入侵、采伐对杉木林土壤温室气体排放的短期影响提供基础数据,也为科学管控毛竹入侵问题提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区浙江省杭州市临安区於潜镇南山村(30°19'N, 119°39'E)位于杭州市西部,为典型亚热带季风气候。研究区四季分明,雨量充沛,光照充足,年平均降水日 158 d,年平均降水量 1 613.9 mm,主要集中于6-8月,其中降水量最多为6月(328.5 mm),最少为12月(44.3 mm)。年平均气温 16.4 $^{\circ}\text{C}$,最高气温出现在8月(28.4 $^{\circ}\text{C}$),最低1月(5.1 $^{\circ}\text{C}$)。年平均无霜期 237 d,年平均日照时数 1 847.3 h,样地全境地貌以中低山丘陵为主,主要土壤类型为酸性红壤,森林覆盖率 81.93%。

1.2 样地设置

于研究区毛竹入侵杉木地段选择坡向(均为东北朝向)、坡度、地形、海拔等初始条件基本一致的毛竹林、释放林、混交林、杉木林等4种林分,分别在各林分上、中、下3个区域各随机设置1个温室气

体排放通量观测点, 共计 12 个点, 安装静态箱。静态箱底座在测量温室气体前 1 个月安装完成, 安装时插入土壤 5 cm 处, 避开树木的根及毛竹的竹鞭, 并保证其密封性。样地布置工作于 2019 年 6 月完成。各林分基本情况如表 1 所示。

1.3 研究方法

于 2019 年 7–12 月进行土壤温室气体排放通量监测。每月中旬选典型晴天采集气体, 采样时间 9:00–11:00。每隔 10 min 用 100 mL 注射器采集 90 mL 气体, 共采集 4 次, 密封带回实验室, 用气相色谱仪 (GC-2014, Shimadzu Inc, Kyotob, 日本) 检测 CO_2 、 N_2O 和 CH_4 , 计算土壤温室气体通量: $F = \rho \times (d_c/d_t) \times H \times 273 / (273 + t)$ 。其中: F 为被测温室气体排放通量 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$); ρ 为标准状态下被测气体密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); d_c/d_t 为被测气体浓度随时间变化率; H 为静态箱高度 (m); t 为采气时温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

采气的同时, 测定各静态箱附近 10 cm 土层处的温度, 采集 0–20 cm 表层土壤, 测定土壤含水率、pH、铵态氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝态氮 ($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、微生物生物量碳 (MBC)、微生物生物量氮 (MBN)。其中土壤含水率用烘干法测定; 土壤 pH 用数显玻璃电极测定 (水土质量比为 5:1); $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 用氯化钾浸提-比色法测定^[19]; 土壤 MBC、MBN 用氯仿熏蒸法测定^[20]。所有数据均为 3 次重复处理平均值 \pm 标准误。

1.4 数据分析

用 SPSS 16.0 和 Excel 2013 分析数据。采用单因素方差分析和最小显著性差异法检验不同林分土壤温室气体排放通量差异显著性; 采用 Pearson 相关分析法分析温室气体通量与各项土壤指标间相关性。

2 结果与分析

2.1 不同林分土壤温室气体排放通量特征

由表 2 可知: 不同林分土壤 CO_2 排放通量均随月份变化逐渐减小; 7 月土壤 CO_2 排放通量均最大, 其中毛竹林排放通量为 $1\,362.83 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 分别是释放林、混交林、杉木林的 1.28、1.43 和 1.89 倍; 9 月开始土壤 CO_2 排放通量显著减小 ($P < 0.05$), 至 12 月达到最小值; 12 月土壤 CO_2 排放通量从大到小依次为毛竹林、释放林、混交林、杉木林。4 种林分土壤 CO_2 月平均通量差异显著 ($P < 0.05$), 与杉木林相比, 混交林、释放林土壤 CO_2 排放通量分别增加 24.59%、61.46%。

土壤 N_2O 排放通量最高值出现在 7 月, 此时, 从大到小分别为毛竹林 ($190.36 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)、释放林 ($158.04 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)、混交林 ($138.19 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) 和杉木林 ($129.26 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$), 最低值均出现在 12 月。从平均通量来看, 毛竹林比其他 3 种林分分别高出 23.29%、45.81% 和 72.09%, 且差异显著 ($P < 0.05$), 混交林与杉木林间差异不显著 ($P > 0.05$)。

4 种林分均表现为 CH_4 吸收汇。其中杉木林土壤 CH_4 吸收通量最大值出现在 7 月, 其他 3 种林分均出现在 8 月; 4 种林分最小值均出现在 12 月。7–10 月, 土壤 CH_4 吸收通量从大到小均为毛竹林、混交林、释放林、杉木林。11 月开始混交林 ($128.53 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) 超过毛竹林 ($123.95 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) 成为最大的土壤 CH_4 吸收汇。4 种林分土壤月平均 CH_4 吸收通量从大到小依次为毛竹林、混交林、释放林、杉木林。

2.2 不同林分环境因子及土壤理化性质变化

由表 3 可知: 土壤温度具有明显的季节动态变化规律, 7–10 月, 4 种林分土壤温度逐渐降低, 11 月后趋于稳定。混交林月平均温度显著高于其他 3 种林分 ($P < 0.05$), 从大到小依次为: 混交林 ($19.77 \text{ }^{\circ}\text{C}$)、释放林 ($18.72 \text{ }^{\circ}\text{C}$)、毛竹林 ($18.49 \text{ }^{\circ}\text{C}$)、杉木林 ($18.32 \text{ }^{\circ}\text{C}$)。4 种林分土壤含水率波动较大, 最大值均出现在 7 月, 最小值均出现在 11 月。释放林土壤月平均含水率最高 (27.32%), 分别是杉木林、毛竹林、混交林的 1.19、1.46、1.67 倍。由表 4 可知: 释放林土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量分数显著高于其他 3 种林分 ($P < 0.05$), 其他 3 种林分之间差异不显著 ($P > 0.05$), 说明采伐毛竹对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量分数具有显著影响。土壤 pH、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、MBC、MBN 等其他指标林分间差异不显著 ($P > 0.05$)。

表 1 4 种林分基本情况

林分类型	pH	海拔/m	郁闭度	毛竹密度/ (株·hm ⁻²)	杉木密度/ (株·hm ⁻²)
毛竹林	4.08±0.14 b	170	0.80	2 067±117 b	
释放林	4.46±0.08 a	170	0.75		889±189 b
混交林	4.43±0.10 a	180	0.85	1 092±259 a	878±214 b
杉木林	4.14±0.11 b	190	0.90		1 733±157 a

说明: 数据为平均值 \pm 标准误。同列不同小写字母表示不同林分差异显著 ($P < 0.05$)

表2 4种林分土壤温室气体通量

Table 2 Soil greenhouse gases fluxes of four types of forests

林分	CO ₂ 排放通量/(mg·m ⁻² ·h ⁻¹)						
	7月	8月	9月	10月	11月	12月	月平均通量
毛竹林	1362.83±45.50 Aa	1355.47±64.51 Aa	976.98±10.75 Ba	678.60±14.14 Ca	389.90±64.57 Da	201.54±17.49 Ea	827.55±14.41 a
释放林	1067.60±67.46 Ab	906.95±63.96 Bb	525.57±38.42 Cb	280.36±26.53 Db	78.67±6.26 Eb	51.39±5.17 Eb	485.09±28.33 b
混交林	951.70±45.80 Ab	533.83±16.15 Bc	479.24±53.94 Bb	175.66±22.53 Cc	57.07±13.21 Db	48.46±5.34 Db	374.33±7.90 c
杉木林	719.63±22.33 Ac	481.77±18.67 Bc	408.80±14.19 Cb	115.99±7.88 Dc	44.08±5.67 Eb	32.35±3.31 Eb	300.44±2.95 d
林分	N ₂ O排放通量/(μg·m ⁻² ·h ⁻¹)						
	7月	8月	9月	10月	11月	12月	月平均通量
毛竹林	190.36±19.48 Aa	163.02±8.36 ABa	145.95±15.68 ABa	122.82±12.08 Ba	55.59±3.53 Ca	47.40±7.09 Ca	120.86±4.06 a
释放林	158.04±7.80 Aab	139.15±8.44 Aa	125.78±14.99 Aab	67.64±6.06 Bb	61.16±5.24 Ba	36.44±4.86 Ba	98.03±5.63 b
混交林	138.19±5.80 Ab	132.87±16.12 Aa	106.52±10.42 Aab	49.41±9.44 Bb	36.90±9.26 Ba	33.47±5.48 Ba	82.89±3.16 c
杉木林	129.26±12.96 Ab	118.20±20.84 Aa	77.07±12.08 Bb	37.21±5.54 BCb	35.35±8.97 BCa	24.28±3.42 Ca	70.23±2.54 c
林分	CH ₄ 吸收通量/(μg·m ⁻² ·h ⁻¹)						
	7月	8月	9月	10月	11月	12月	月平均通量
毛竹林	192.28±17.14 Aa	196.35±5.15 Aa	163.82±9.69 ABa	155.25±10.89 ABa	123.95±8.55 BCa	100.62±11.31 Ca	155.38±7.29 a
释放林	165.62±14.46 Aa	167.35±14.12 Aa	141.02±11.79 ABa	132.34±12.60 ABab	123.18±8.70 ABa	92.04±9.20 BAa	135.26±0.85 b
混交林	179.35±8.90 Aa	179.86±14.11 Aa	147.69±16.98 ABa	136.48±5.54 ABab	128.53±7.34 Ba	102.68±9.65 Ba	145.77±2.34 ab
杉木林	159.07±9.29 Aa	151.44±10.73 Aa	136.18±16.50 ABa	110.88±8.71 BCc	95.10±3.95 CDa	65.05±4.75 Da	119.62±2.82 c

说明：同行不同大写字母表示不同月份间差异显著($P < 0.05$)；同列不同小写字母表示不同林分间差异显著($P < 0.05$)

表3 4种林分土壤温度与土壤含水率

Table 3 Soil temperature and soil moisture content of four types of forests

林分	土壤温度/℃						
	7月	8月	9月	10月	11月	12月	月平均温度
毛竹林	23.31±0.25 a	25.72±0.07 b	25.03±0.06 a	15.00±0.00 b	8.82±0.17 a	9.05±0.08 a	18.49±0.07 b
释放林	28.91±1.12 a	25.27±0.23 b	23.80±0.00 b	15.28±0.19 b	9.17±0.35 a	9.90±0.18 a	18.72±0.22 b
混交林	29.06±0.55 a	26.95±0.40 a	24.89±0.19 a	17.62±0.34 a	10.33±0.48 a	9.77±0.26 a	19.77±0.24 a
杉木林	26.73±0.55 a	24.80±0.13 b	23.48±0.06 b	15.57±0.27 b	9.62±0.34 a	9.72±0.29 a	18.32±0.09 b
林分	土壤含水率/%						
	7月	8月	9月	10月	11月	12月	月平均含水率
毛竹林	31.19±4.06 b	20.24±4.39 b	22.27±1.51 bc	15.33±2.18 b	10.47±0.42 a	12.51±0.41 a	18.67±1.96 bc
释放林	47.75±0.85 a	32.35±1.91 a	32.23±0.92 a	21.67±0.63 a	13.31±2.08 a	16.59±0.89 a	27.32±0.32 a
混交林	29.20±3.97 b	19.63±2.34 b	16.67±3.01 c	11.98±0.67 b	7.12±0.55 a	13.56±1.00 a	16.36±1.75 c
杉木林	38.58±0.89 ab	25.41±1.17 ab	28.15±1.98 ab	16.85±1.23 b	13.03±1.86 a	16.22±2.62 a	23.04±1.54 ab

说明：同列不同小写字母表示不同林分间差异显著($P < 0.05$)

表4 4种林分土壤理化性质

Table 4 Soil physical and chemical properties of four types of forests

林分	pH	NH ₄ ⁺ -N/(mg·kg ⁻¹)	NO ₃ ⁻ -N/(mg·kg ⁻¹)	MBC/(mg·kg ⁻¹)	MBN/(mg·kg ⁻¹)
毛竹林	4.03±0.06 a	6.27±0.75 b	11.37±1.95 a	615.57±81.88 a	116.17±22.55 a
释放林	4.21±0.08 a	12.53±1.74 a	16.90±2.06 a	767.26±45.22 a	129.51±12.63 a
混交林	4.26±0.01 a	5.67±1.52 b	16.39±3.79 a	708.71±91.09 a	143.19±17.07 a
杉木林	4.20±0.02 a	6.03±0.93 b	17.70±1.35 a	511.87±60.59 a	103.56±13.43 a

说明：同列不同小写字母表示不同林分间差异显著($P < 0.05$)

2.3 土壤温室气体排放与土壤理化性质的相关性分析

相关性分析显示(表 5): 4 种林分土壤 CO₂、N₂O 排放通量及 CH₄ 吸收通量均与土壤温度、土壤含水率呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 呈正相关 ($P > 0.05$); 与 MBC 呈负相关 ($P > 0.05$)。杉木林土壤 CO₂、N₂O 排放通量及 CH₄ 吸收通量与土壤 pH 呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。

表 5 土壤温室气体通量与土壤理化性质的 Pearson 相关系数

Table 5 Pearson correlation coefficient among soil greenhouse gases fluxes and soil properties

林分	气体	土壤温度	土壤含水率	土壤pH	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	MBC	MBN
毛竹林	CO ₂	0.944**	0.760**	-0.731	0.933**	0.851*	-0.710	-0.029
	N ₂ O	0.914**	0.744**	-0.941**	0.759	0.615	0.726	-0.266
	CH ₄	0.838**	0.568*	-0.591	0.480	0.688	-0.544	0.122
释放林	CO ₂	0.957**	0.924**	0.705	0.912*	0.838*	-0.559	0.187
	N ₂ O	0.938**	0.882**	0.735	0.986**	0.855*	-0.594	0.047
	CH ₄	0.796**	0.677**	0.800	0.727	0.709	-0.058	0.395
混交林	CO ₂	0.913**	0.863**	0.979**	0.660	0.108	-0.317	0.857*
	N ₂ O	0.915**	0.789**	0.991**	0.732	0.348	-0.226	0.878*
	CH ₄	0.802**	0.586*	0.833*	0.759	0.314	-0.006	0.926**
杉木林	CO ₂	0.952**	0.926**	0.956**	0.871*	0.698	-0.713	0.460
	N ₂ O	0.868**	0.773**	0.945**	0.844*	0.673	-0.787	0.304
	CH ₄	0.882**	0.744**	0.949**	0.611	0.537	-0.722	0.343

说明: *表示 $P < 0.05$, **表示 $P < 0.01$

3 讨论与结论

3.1 毛竹入侵及采伐对土壤温室气体排放的短期影响

植被覆盖变化显著影响土壤碳库与土壤呼吸过程。毛竹入侵及采伐引起植被变化, 其群落物种组成、凋落物特征、土壤理化性质和生物学性质也发生了根本性的转变, 从而显著影响土壤的碳库动态特征。本研究表明: 毛竹林、释放林、混交林和杉木林均表现为土壤 CO₂、N₂O 的排放源及土壤 CH₄ 的吸收汇。XU 等^[21]发现毛竹入侵会改变群落结构, 增加细菌多样性, 使得土壤异养呼吸加强, 土壤 CO₂ 排放通量增加, 这与本研究结果一致。释放林土壤 CO₂ 排放通量显著高于杉木林 ($P < 0.05$), 可能原因是: 采伐毛竹后林分郁闭度减小, 林下光照增加, 土壤温度上升, 土壤有机质分解加速, 土壤呼吸增强。毛竹林与混交林土壤 CO₂ 排放通量显著高于杉木林 ($P < 0.05$), 一方面是毛竹林、混交林土壤温度略高, 而土壤 CO₂ 排放与土壤温度呈指数型极显著正相关^[22]; 另一方面, 毛竹种群在扩张过程中, 细根生物量空间分布格局发生明显变化, 细根生物量及比例显著增加^[23], 从而导致土壤 CO₂ 排放通量增加。

土壤排放的 N₂O 主要是土壤微生物硝化和反硝化作用产生的。本研究发现: 混交林土壤 N₂O 排放通量高于杉木林。徐道炜^[24]研究指出: 毛竹入侵杉木林, 林地表层土壤水溶性有机碳增加, 作为微生物重要的可利用能源物质, 土壤水溶性有机碳含量升高增强了土壤硝化、反硝化作用, 使得土壤 N₂O 排放通量增加。释放林土壤 N₂O 排放通量显著高于杉木林 ($P < 0.05$)。毛竹采伐后, 释放林的土壤含水率增加, 采伐剩余物归还量较大, 这两者同时促进土壤反硝化进程, 提高了土壤 N₂O 排放通量。这与 DARMENMANN 等^[25]和 YASHIRO 等^[26]的研究结果相似。

BORKEN 等^[27]研究发现: 较高的土壤含水率会抑制 CH₄ 在氧气 (O₂) 中的扩散能力, 减少林分对土壤 CH₄ 的吸收。本研究表明: 释放林土壤 CH₄ 吸收能力显著低于毛竹林和混交林 ($P < 0.05$), 这与 ZERVA 等^[28]研究结果一致。释放林土壤含水率高于其他林分, 土壤 CH₄ 排放增加, 可能是释放林土壤 CH₄ 吸收通量低于毛竹林和混交林的原因。土壤无机氮 (NH₄⁺-N、NO₃⁻-N) 含量也会影响土壤 CH₄ 排放。研究^[29]表明: 土壤 NH₄⁺-N 质量分数增加使得土壤中的氨氧化细菌活性增强, 而氨氧化细菌在一定条件下具有氧化 CH₄ 能力, 一定程度上抵消了 NH₄⁺-N 对甲烷氧化菌的竞争性抑制作用。释放林土壤 NH₄⁺-N 质量分数高于混交林也可能是造成土壤 CH₄ 吸收通量降低的主要原因。土壤 CH₄ 吸收能力还受土壤 pH 影

响。好氧条件下,土壤甲烷氧化菌最佳 pH 为 5.0~6.0,耐酸性要高于甲烷产生菌^[30];毛竹入侵降低了土壤 pH,有利于甲烷氧化菌氧化 CH₄,从而增加土壤 CH₄ 吸收能力。因此,毛竹入侵及采伐对土壤 CH₄ 吸收通量造成的影响是多个影响因子共同作用的结果。综上所述,毛竹入侵及采伐后,杉木林表层土壤温室气体排放通量增加,对区域大气环境造成一定程度负面影响,建议由采伐毛竹改为挖笋等措施来控制毛竹入侵。

3.2 土壤温度和含水率对土壤温室气体排放的影响

土壤温度和含水率对土壤温室气体排放具有显著影响^[29]。4种林分土壤温室气体排放与吸收呈明显动态变化特征,即夏高冬低,这与已有的研究结果一致^[31-32]。相关性分析表明:土壤 CO₂、N₂O 排放、CH₄ 吸收均与土壤温度呈极显著正相关 ($P < 0.01$),这与严俊霞等^[33]对山西高原落叶松 *Larix gmelini* 人工林土壤呼吸研究、王磊等^[34]对亚热带湿地松 *Pinus elliottii* 林研究及 FENDER 等^[35]对温带落叶林土壤温室气体排放强度研究结果一致。可能的原因是:①在一定温度范围内,土壤温度上升会加强土壤微生物活性和土壤有机质分解作用,加大土壤温室气体排放量^[36];②在亚热带森林,在土壤水分及底物充足前提下,土壤温度上升会增强土壤氮素矿化作用,使得土壤 N₂O 排放量增加^[37];③好氧条件下,土壤温度升高,甲烷氧化菌繁殖速度加快、活性加强,对土壤 CH₄ 的消耗增加^[38],即 CH₄ 吸收量增加。

3种温室气体排放与土壤含水率均呈极显著正相关 ($P < 0.01$),这与朱旭丹^[39]的研究结果相似;土壤含水率对土壤温室气体排放造成显著影响,与高升华等^[40]发现亚热带黑杨 *Populus nigra* 人工林土壤 CH₄ 吸收通量与土壤水分并不存在相关性结果不同。原因可能是土壤 CH₄ 吸收通量不仅受土壤含水率影响,而是受多个影响因子共同作用。就土壤 CO₂、N₂O 排放而言,土壤含水率的影响体现在3个方面:①土壤含水率增加,植物根系生长量随之提高,导致植物根系呼吸作用大大增强^[41];②含水率增加提升了土壤可溶性有机质有效性及可移动性,作为土壤微生物呼吸底物及活动能量来源^[42],可溶性有机质对增强微生物呼吸作用、硝化/反硝化作用产生不可忽视影响;③土壤含水率上升,土壤微生物数量及种类也随之增加,导致土壤温室气体排放作用加强^[43]。

3.3 土壤理化性质与土壤温室气体的相关性

谢军飞等^[44]研究表明:土壤 CO₂ 排放主要来源于植物自养呼吸及动物、微生物的异养呼吸, NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 作为土壤有效氮主要组成部分,其质量分数增加有利于有机质分解,促进细根生长、生物生产量和微生物活性,从而增强土壤 CO₂ 各个环节排放通量,与本研究结果一致。相关性分析表明:土壤 CO₂ 排放与 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 呈显著正相关 ($P < 0.05$),4种林分土壤 N₂O 排放通量与土壤 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 质量分数亦呈正相关。这可能是因为 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 分别作为硝化、反硝化过程底物,其质量分数增加,促进土壤 N₂O 生产过程,从而增加土壤 N₂O 排放。

土壤甲烷氧化菌氧化大气 CH₄ 是土壤吸收 CH₄ 的主要途径,而土壤无机氮通过影响 CH₄ 氧化改变土壤 CH₄ 吸收通量。BODELIER 等^[45]利用分子探针及 PCR 技术发现 NH₄⁺-N 能够促进甲烷氧化菌增加。本研究中,4种林分土壤 CH₄ 吸收通量与 NH₄⁺-N 均呈正相关,说明亚热带地区 NH₄⁺-N 含量越高 CH₄ 吸收能力越强。土壤 NH₄⁺-N 作为甲烷氧化菌主要氮源,其含量增加直接促进甲烷氧化菌生命活动,有利于 CH₄ 氧化,从而增加 CH₄ 吸收通量^[46]。但也有研究发现 NH₄⁺-N 会抑制甲烷营养菌活性并减少 CH₄ 吸收通量^[47]。由此推断,本研究中 NH₄⁺-N 对土壤 CH₄ 吸收的影响可能是前者作用效果大于后者造成。

微生物生物量碳是土壤重要的活性有效碳源,可为土壤微生物活动提供丰富的能量底物,影响参与土壤温室气体排放的各个生物化学过程。本研究表明:不同林分土壤 CO₂、N₂O 排放、CH₄ 吸收均与土壤 MBC 质量分数呈负相关,这与 MUHAMMAD^[48]在变性土中的研究结果相似。方慧云^[22]研究表明:土壤 CO₂、CH₄ 排放与土壤 MBC 质量分数呈正相关,这与本研究结果不一致。这可能是因为:①影响土壤温室气体排放机制的因素复杂,土壤 MBC 虽对土壤微生物活性起到促进作用,但并不是影响土壤温室气体排放的主要影响因子^[49];②土壤 MBC 对土壤温室气体排放的影响因林分类型、经营措施、环境状况等不同而呈现不同相关性^[50]。

4 参考文献

[1] 张玉铭,胡春胜,张佳宝,等.农田土壤主要温室气体(CO₂,CH₄,N₂O)的源/汇强度及其温室效应研究进展[J].中国生

- 态农业学报, 2011, **19**(4): 966 – 975.
- ZHANG Yuming, HU Chunsheng, ZHANG Jiabao, *et al.* Research advances on source/sink intensities and greenhouse effects of CO₂, CH₄ and N₂O in agricultural soils [J]. *Chin J Eco-Agric*, 2011, **19**(4): 966 – 975.
- [2] 俞淑红, 周国模, 施拥军, 等. 毛竹碳汇造林初期净碳汇量监测与不确定性分析[J]. *浙江农林大学学报*, 2016, **33**(5): 807 – 815.
- YU Shuhong, ZHOU Guomo, SHI Yongjun, *et al.* Net carbon sinks in the initial stages of moso bamboo stands [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2016, **33**(5): 807 – 815.
- [3] TANG Xuli, LIU Shuguang, ZHOU Guoyi, *et al.* Soil-atmospheric exchange of CO₂, CH₄ and N₂O in three subtropical forest ecosystems in southern China [J]. *Global Change Biol*, 2006, **12**(3): 546 – 560.
- [4] BALLANTYNE A P, ANDRES R, HOUGHTON R, *et al.* Audit of the global carbon budget: estimate errors and their impact on uptake uncertainty [J]. *Biogeosciences*, 2015, **12**(8): 2565 – 2584.
- [5] 杨玉盛, 董彬, 谢锦升, 等. 森林土壤呼吸及其对全球变化的响应[J]. *生态学报*, 2004, **24**(3): 583 – 591.
- YANG Yusheng, DONG Bin, XIE Jinsheng, *et al.* Soil respiration of forest ecosystems and its response to global change [J]. *Acta Ecol Sin*, 2004, **24**(3): 583 – 591.
- [6] 李智超, 张勇强, 厚凌宇, 等. 杉木人工林土壤微生物对林分密度的响应[J]. *浙江农林大学学报*, 2020, **37**(1): 76 – 84.
- LI Zhichao, ZHANG Yongqiang, HOU Lingyu, *et al.* Response of soil microorganism to stand density in *Cunninghamia lanceolata* plantation [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2020, **37**(1): 76 – 84.
- [7] 杨玉盛, 邱仁辉, 何宗明, 等. 不同栽杉代数 29 年生杉木林净生产力及营养元素生物循环的研究[J]. *林业科学*, 1998, **34**(6): 3 – 11.
- YANG Yusheng, QIU Renhui, HE Zongming, *et al.* Studies on the stand net productivity and biological cycle of nutrient elements elements in the 29-year old plantations of Chinese fir on different rotations [J]. *Sci Silv Sin*, 1998, **34**(6): 3 – 11.
- [8] 范少辉, 马祥庆, 陈绍栓, 等. 多代杉木人工林生长发育效应的研究[J]. *林业科学*, 2000, **36**(4): 9 – 15.
- FAN Shaohui, MA Xiangqing, CHEN Shaoshuan, *et al.* Comparative study on growth and development of generation plantations of Chinese fir [J]. *Sci Silv Sin*, 2000, **36**(4): 9 – 15.
- [9] 姚利辉, 康文星, 赵仲辉, 等. 会同杉木人工林不同生长阶段植物固碳特征[J]. *生态学报*, 2015, **35**(4): 1187 – 1197.
- YAO Lihui, KANG Wenxing, ZHAO Zhonghui, *et al.* Carbon fixed characteristics of plant of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantation at different growth stages in Huitong [J]. *Acta Ecol Sin*, 2015, **35**(4): 1187 – 1197.
- [10] 邸富宏. 中国南方杉木人工林碳动态模拟研究[J]. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 2016, **44**(8): 127 – 134.
- DI Fuhong. Simulation of carbon dynamics of Chinese fir plantation in southern China [J]. *J Northwest A&F Univ Nat Sci Ed*, 2016, **44**(8): 127 – 134.
- [11] 徐睿, 姜春前, 白彦锋, 等. 杉木纯林和混交林土壤温室气体通量的差异[J]. *浙江农林大学学报*, 2019, **36**(2): 307 – 317.
- XU Rui, JIANG Chunqian, BAI Yanfeng, *et al.* Soil greenhouse gas fluxes in pure and mixed stands of Chinese fir [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2019, **36**(2): 307 – 317.
- [12] 钟雅琪, 钟全林, 李宝银, 等. 毛竹扩张对亚热带常绿阔叶林主要树种叶结构型性状的影响[J]. *生态学报*, 2020, **40**(14): 5018 – 5028.
- ZHONG Yaqi, ZHONG Quanlin, LI Baoyin, *et al.* Effects of *Phyllostachys edulis* expansion on leaf structural traits of main tree species in subtropical evergreen broad-leaved forests [J]. *Acta Ecol Sin*, 2020, **40**(14): 5018 – 5028.
- [13] 陈双林, 吴柏林, 吴明, 等. 退化低丘红壤新造毛竹林地上部分生物量的研究[J]. *江西农业大学学报*, 2004, **26**(4): 527 – 531.
- CHEN Shuanglin, WU Bolin, WU Ming, *et al.* A study on aboveground biomass of Young bamboo stands of *Phyllostachys pubescens* in degenerative hill soil area [J]. *Acta Agric Univ Jiangxi*, 2004, **26**(4): 527 – 531.
- [14] YEN Tianming. Comparing aboveground structure and aboveground carbon storage of an age series of moso bamboo forests subjected to different management strategies [J]. *J For Res*, 2015, **20**(1): 1 – 8.
- [15] ZHOU Guomo, MENG Cifu, JIANG Peikun, *et al.* Review of carbon fixation in bamboo forests in China [J]. *Bot Rev*, 2011, **77**(3): 262 – 270.
- [16] NATH A J, LAL R, DAS A K. Managing woody bamboos for carbon farming and carbon trading [J]. *Global Ecol*

- Conserv*, 2015, **3**(2): 654 – 663.
- [17] 蒋灵华, 毛朝明, 吴恒祝, 等. 浙江省松阳县毛竹林经营现状调查与分析[J]. 世界竹藤通讯, 2015, **13**(5): 28 – 34.
JIANG Linghua, MAO Chaoming, WU Hengzhu, *et al.* Investigation and analysis of moso forest management in Songyang County, Zhejiang Province [J]. *World Bamboo Rattan*, 2015, **13**(5): 28 – 34.
- [18] BOWDEN R D, NEWKIRK K M, RULLO G M. Carbon dioxide and methane fluxes by a forest soil under laboratory-controlled moisture and temperature conditions [J]. *Soil Biol Biochem*, 1998, **30**(12): 1591 – 1597.
- [19] WANG Hui, LIU Shirong, WANG Jingxin, *et al.* Effects of tree species mixture on soil organic carbon stocks and greenhouse gas fluxes in subtropical plantations in China [J]. *For Ecol Manage*, 2013, **300**: 4 – 13.
- [20] VANCE E D, BROOKES P C, JENKINSON D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C [J]. *Soil Biol Biochem*, 1987, **19**(6): 703 – 707.
- [21] XU Qiufang, JIANG Peikun, WU Jiasen, *et al.* Bamboo invasion of native broadleaf forest modified soil microbial communities and diversity [J]. *Biol Invasions*, 2015, **17**: 433 – 444.
- [22] 方慧云. 生物质炭输入对毛竹林固碳量及土壤温室气体排放的影响[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2019.
FANG Huiyun. *Effects of Biochar Application on Carbon Sequestration and Greenhouse Gases Emission in Moso Bamboo Forests* [D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2019.
- [23] 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[J]. 植物生态学报, 2013, **37**(3): 230 – 238.
LIU Jun, YANG Qingpei, SONG Qingni, *et al.* Strategy of fine root expansion of *Phyllostachys pubescens* population into evergreen broad-leaved forest [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2013, **37**(3): 230 – 238.
- [24] 徐道炜. 戴云山自然保护区毛竹向杉木扩张对林分土壤质量及其凋落物分解的影响[D]. 福州: 福建农林大学, 2018.
XU Daowei. *Study on the Soil Quality and Litter Decomposition in the Forest Stand of Phyllostachys edulis Expansion to the Cunninghamia lanceolata in Daiyun Mountain Nature Reserve* [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2018.
- [25] DANNENMANN M, GASCHER R, LEDEBUHR A, *et al.* The effect of forest management on trace gas exchange at the pedosphere-atmosphere interface in beech (*Fagus sylvatica* L.) forests stocking on calcareous soils [J]. *Eur J For Res*, 2007, **126**(2): 331 – 346.
- [26] YASHIRO Y, WAN R K, OKUDA T, *et al.* The effects of logging on soil greenhouse gas (CO₂, CH₄, N₂O) flux in a tropical rain forest, Peninsular Malaysia [J]. *Agric For Meteorol*, 2008, **148**(5): 799 – 806.
- [27] BORKEN W, DAVIDSON E A, SAVAGE K, *et al.* Effect of summer throughfall exclusion, summer drought, and winter snow cover on methane fluxes in a temperate forest soil [J]. *Soil Biol Biochem*, 2006, **38**(6): 1388 – 1395.
- [28] ZERVA A, MENCUCINI M. Short-term effects of clearfelling on soil CO₂, CH₄, and N₂O fluxes in a Sitka spruce plantation [J]. *Soil Biol Biochem*, 2005, **37**(11): 2025 – 2036.
- [29] 张炜, 莫江明, 方运霆, 等. 氮沉降对森林土壤主要温室气体通量的影响[J]. 生态学报, 2008, **28**(5): 2309 – 2319.
ZHANG Wei, MO Jiangming, FANG Yunting, *et al.* Effects of nitrogen deposition on the greenhouse gas fluxes from forest soils [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, **28**(5): 2309 – 2319.
- [30] 冯虎元, 程国栋, 安黎哲. 微生物介导的土壤甲烷循环及全球变化研究[J]. 冰川冻土, 2004, **26**(4): 411 – 419.
FENG Huyuan, CHENG Guodong, AN Lizhe. Microbial-mediated methane cycle in soils and global change: a review [J]. *J Glaciol Geocryol*, 2004, **26**(4): 411 – 419.
- [31] MORISHITA T, MATSUURA Y, KAJIMOTO T, *et al.* CH₄ and N₂O dynamics of a *Larix gmelinii* forest in a continuous permafrost region of central Siberia during the growing season [J]. *Polar Sci*, 2014, **8**(2): 156 – 165.
- [32] ZONA D, JANSSENS I A, AUBINET M, *et al.* Fluxes of the greenhouse gases (CO₂, CH₄ and N₂O) above a short-rotation poplar plantation after conversion from agricultural land [J]. *Agric For Meteorol*, 2013, **169**: 100 – 110.
- [33] 严俊霞, 李洪建, 李君剑, 等. 山西高原落叶松人工林土壤呼吸的空间异质性[J]. 环境科学, 2015, **36**(5): 1793 – 1801.
YAN Junxia, LI Hongjian, LI Junjian, *et al.* Spatial heterogeneity of soil respiration in a planted larch forest in Shanxi Plateau [J]. *Environ Sci*, 2015, **36**(5): 1793 – 1801.
- [34] 王磊, 程淑兰, 方华军, 等. 外源性NH₄⁺-N和NO₃⁻-N输入对亚热带人工林土壤N₂O排放的影响[J]. 土壤学报, 2016, **53**(3): 724 – 734.
WANG Lei, CHENG Shulan, FANG Huajun, *et al.* Effects of inputs of extraneous NH₄⁺-N and NO₃⁻-N on soil nitrous oxide

- emission in subtropical plantation, South China [J]. *Acta Pedol Sin*, 2016, **53**(3): 724 – 734.
- [35] FENDER A C, GANSERT D, JUNGKUNST H F, *et al.* Root-induced tree species effects on the source/sink strength for greenhouse gases (CH₄, N₂O and CO₂) of a temperate deciduous forest soil [J]. *Soil Biol Biochem*, 2013, **57**: 587 – 597.
- [36] BAGGS E M, BLUM H. CH₄ oxidation and emissions of CH₄ and N₂O from *Lolium perenne* swards under elevated atmospheric CO₂ [J]. *Soil Biol Biochem*, 2004, **36**(4): 713 – 723.
- [37] 刘硕, 李玉娥, 孙晓涵, 等. 温度和土壤含水量对温带森林土壤温室气体排放的影响[J]. *生态环境学报*, 2013, **22**(7): 1093 – 1098.
- LIU Shuo, LI Yu'e, SUN Xiaohan, *et al.* Effects of temperature and soil moisture on greenhouse gases emission of temperate forest soil [J]. *Ecol Environ Sci*, 2013, **22**(7): 1093 – 1098.
- [38] 孙海龙. 采伐方式对东北温带次生林土壤温室气体通量和碳储量的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017.
- SUN Hailong. *Effects of Harvest Methods on Soil Greenhouse Gases and Soil Carbon Storage in the Temperate Secondary Forest* [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2017.
- [39] 朱旭丹. 不同更新方式对皆伐杉木林土壤温室气体排放的短期影响[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2016.
- ZHU Xudan. *Short-term Effects of Different Regenerations after Clearfelling on Soil Greenhouse Gases in Chinese Fir Plantation* [D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2016.
- [40] 高升华, 张旭东, 汤玉喜, 等. 滩地美洲黑杨人工林皆伐对地表甲烷通量的短期影响[J]. *林业科学*, 2013, **49**(1): 7 – 13.
- GAO Shenghua, ZHANG Xudong, TANG Yuxi, *et al.* Short-term effects of clear-cutting of *Populus deltoides* plantation on methane flux on the beach land of Yangtze River [J]. *Sci Silv Sin*, 2013, **49**(1): 7 – 13.
- [41] 张小朋, 殷有, 于立忠, 等. 土壤水分与养分对树木细根生物量及生产力的影响[J]. *浙江林学院学报*, 2010, **27**(4): 606 – 613.
- ZHANG Xiaopeng, YIN You, YU Lizhong, *et al.* Influence of water and soil nutrients on biomass and productivity of fine tree roots: a review [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2010, **27**(4): 606 – 613.
- [42] BORKEN W, DAVIDSON E A, SAVAGE K, *et al.* Drying and wetting effects on carbon dioxide release from organic horizons [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2003, **67**(6): 1888 – 1896.
- [43] ROSACKER L L, KIEFT T L. Biomass and adenylate energy charge of a grassland soil during drying [J]. *Soil Biol Biochem*, 1990, **22**(8): 1121 – 1127.
- [44] 谢军飞, 李玉娥. 农田土壤温室气体排放机理与影响因素研究进展[J]. *中国农业气象*, 2002, **23**(4): 47 – 52.
- XIE Junfei, LI Yu'e. A Review of studies on mechanism of greenhouse gas (GHG) emission and its affecting factors in arable soils [J]. *Chin J Agrometeorol*, 2002, **23**(4): 47 – 52.
- [45] BODELIER P L E, HAHN A P, ARTH I R, *et al.* Effects of ammonium-based fertilisation on microbial processes involved in methane emission from soils planted with rice [J]. *Biogeochemistry*, 2000, **51**: 225 – 257.
- [46] VELDKAMP E, WEITZ A M, KELLER M, *et al.* Management effects on methane fluxes in humid tropical pasture soils [J]. *Soil Biol Biochem*, 2001, **33**(11): 1493 – 1499.
- [47] KELLER M, VARNER R, DIAS J D, *et al.* Soil-atmosphere exchange of nitrous oxide, nitric oxide, methane, and carbon dioxide in logged and undisturbed forest in the Tapajos National Forest, Brazil [J]. *Earth Int*, 2005, **9**(23): 1 – 28.
- [48] MUHAMMAD W, VAUGHAN S M, DALAL R C, *et al.* Crop residues and fertilizer nitrogen influence residue decomposition and nitrous oxide emission from a vertisol [J]. *Biol Fert Soils*, 2011, **47**: 15 – 23.
- [49] LI Feiyue, CAO Xinde, ZHAO Ling, *et al.* Short-term effects of raw rice straw and its derived biochar on greenhouse gas emission in five typical soils in China [J]. *Soil Sci Plant Nutrit*, 2013, **59**: 800 – 811.
- [50] ZAVALLONI C, ALBERTI G, BIASIOL S, *et al.* Microbial mineralization of biochar and wheat straw mixture in soil: a short-term study [J]. *Appl Soil Ecol*, 2011, **50**: 45 – 51.