

## 杉木纯林和混交林土壤温室气体通量的差异

徐睿<sup>1</sup>, 姜春前<sup>1</sup>, 白彦锋<sup>1</sup>, 刘秀红<sup>1</sup>, 汪思龙<sup>2</sup>

(1. 中国林业科学研究院 林业研究所 国家林业和草原局林木培育重点实验室, 北京 100091; 2. 中国科学院 沈阳应用生态研究所, 辽宁 沈阳 110016)

**摘要:** 为了探讨杉木 *Cunninghamia lanceolata* 纯林和杉木-阔叶树混交林土壤温室气体通量的差异及其影响因素, 采用静态箱-气相色谱法, 对杉木纯林及3种杉木-阔叶树混交林(杉木-樟树 *Cinnamomum camphora* 混交林、杉木-栲树 *Castanopsis fargesii* 混交林、杉木-桤木 *Alnus cremastogyne* 混交林)的土壤温室气体通量进行了原位观测。结果表明: 杉木纯林土壤二氧化碳(CO<sub>2</sub>)的排放通量(490.48 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>)高于杉木-栲树混交林(254.27 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>)和杉木-桤木混交林(331.51 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>), 杉木纯林(32.29 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>)和杉木-桤木混交林(32.24 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>)土壤氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)的排放通量高于杉木-栲树混交林(2.66 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>)。在杉木-栲树混交林、杉木-桤木混交林和杉木纯林中, 土壤二氧化碳排放通量与土壤温度呈线性相关, 杉木人工林土壤氧化亚氮排放通量与土壤硝态氮质量分数和土壤孔隙含水量(W<sub>FS</sub>)呈极显著相关。回归分析显示: 杉木-栲树混交林、杉木-桤木混交林、杉木纯林的土壤氧化亚氮排放通量与土壤 W<sub>FS</sub> 呈指数增长关系, 4种林分中土壤氧化亚氮排放通量与土壤硝态氮质量分数呈线性关系。森林的树种组成对土壤温室气体排放通量有影响。杉木纯林转换为杉木-阔叶树混交林后, 土壤二氧化碳排放通量减少。土壤氧化亚氮排放通量的变化来源于样地土壤硝态氮质量分数的变化。图7表4参38

**关键词:** 森林生态学; 杉木纯林; 杉木-阔叶树混交林; 亚热带森林土壤; 二氧化碳(CO<sub>2</sub>); 氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)

中图分类号: S718.5

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2019)02-0307-11

## Soil greenhouse gas fluxes in pure and mixed stands of Chinese fir

XU Rui<sup>1</sup>, JIANG Chunqian<sup>1</sup>, BAI Yanfeng<sup>1</sup>, LIU Xiuhong<sup>1</sup>, WANG Silong<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, National Forestry and Grassland Administration, Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, Liaoning, China)

**Abstract:** To investigate the differences in soil CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O fluxes as well as CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O flux factors from Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) stands (CL) and mixed stands of Chinese fir and *Cinnamomum camphora* (CL-CC), *Castanopsis fargesii* (CL-CF), and *Alnus cremastogyne* (CL-AC), CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O fluxes were quantified with a static chamber-gas chromatography method with 5 replications. Results of one-way ANOVA showed that CO<sub>2</sub> fluxes in CL (490.48 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>) were significantly higher ( $P < 0.05$ ) than in CL-CF (254.27 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>) and CL-AC stands (331.51 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>), and N<sub>2</sub>O fluxes in CL (32.29 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>) and CL-AC (32.24 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>) were higher ( $P < 0.05$ ) than in CL-CF (2.66 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>). In CL-CF, CL-AC, and CL, a linear relationship was observed between CO<sub>2</sub> and soil temperature. Also nitrate-N and water filled pore space (W<sub>FS</sub>) were significantly correlated with soil N<sub>2</sub>O flux. In CL-CF, CL-AC, and CL, an exponential relationship was observed between N<sub>2</sub>O fluxes and W<sub>FS</sub>. A linear relationship was also observed between N<sub>2</sub>O and nitrate-N. Forest species composition, usually considered an important factor influencing CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O fluxes, decreased net CO<sub>2</sub> emissions with conversion from a pure Chinese fir stand to a mixed Chinese fir stand with differences

收稿日期: 2018-05-21; 修回日期: 2018-08-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0505604)

作者简介: 徐睿, 从事森林培育研究。E-mail: xurui7803@126.com。通信作者: 姜春前, 研究员, 博士, 从事林业与气候变化研究。E-mail: jiangchq@caf.ac.cn

in soil  $N_2O$  flux among the stands possibly being attributed to differences in soil  $NO_3-N$  content. [Ch, 7 fig. 4 tab. 38 ref.]

**Key words:** forest ecology; pure stands of Chinese fir; mixed stands of Chinese fir; subtropical forest soil;  $CO_2$ ;  $N_2O$

土壤是大气温室气体的主要来源之一<sup>[1]</sup>, 是重要的碳库和氮库。全球土壤固定碳量为 1 500 Pg<sup>[2]</sup>, 土壤(包含施肥的农田)氮总量为 133~140 Pg<sup>[3]</sup>。土壤的变化会引起大气温室气体浓度的变化。土壤每年温室气体净排放达 350 Pg 二氧化碳当量<sup>[4]</sup>, 是人类活动造成的二氧化碳排放的 6~7 倍<sup>[5]</sup>。森林约占全球陆地面积的 33%, 多数森林土壤为二氧化碳( $CO_2$ )和氧化亚氮( $N_2O$ )的排放源<sup>[4,6]</sup>。研究森林土壤是减少温室气体排放的重要基础。杉木 *Cunninghamia lanceolata* 是中国南方主要用材树种, 杉木人工林约占中国人工林面积的 13%<sup>[7]</sup>。杉木有速生、材质好等优点, 不仅具有经济效益, 还能固定二氧化碳, 发挥着生态效益<sup>[8-10]</sup>。但杉木纯林存在地力衰退问题<sup>[11-13]</sup>, 杉木与阔叶树种混交可以改善土壤理化性质<sup>[14-17]</sup>。针叶纯林和针-阔混交林土壤温室气体排放通量有显著差异<sup>[18-19]</sup>, 不同树种比例下土壤温室气体通量有显著差异<sup>[20]</sup>, 针叶纯林与针-阔混交林的林分组成差异对土壤温室气体通量的影响程度和原因还未得到一致的结论。土壤容重、土壤全碳、全氮、硝态氮等是土壤温室气体通量的影响因素<sup>[19,21-22]</sup>, 由于树种组成、土壤和气候的差异, 不同森林土壤温室气体通量的主要影响因素不同。大量研究<sup>[23-28]</sup>显示: 杉木纯林土壤温室气体通量受土壤温度、土壤湿度及土壤理化性质的影响。有研究<sup>[23]</sup>显示: 杉木纯林土壤二氧化碳和氧化亚氮排放通量主要受土壤氮的影响。添加氮肥后, 杉木林土壤二氧化碳排放通量降低, 而氧化亚氮排放通量升高<sup>[24,26]</sup>。土壤水分<sup>[25]</sup>、土壤温度<sup>[26]</sup>与杉木纯林土壤的氧化亚氮排放通量呈显著相关。土壤温度<sup>[27-28]</sup>和土壤水分<sup>[28]</sup>是杉木林土壤二氧化碳排放通量的主要影响因素。杉-阔混交林与杉木纯林相比土壤环境和土壤理化性质有差异, 杉木纯林转换为杉木-阔叶树混交林, 其温室气体通量的变化及主要影响因素还需要进一步研究。人工林土壤温室气体的排放研究是推算土壤温室气体排放的基础。在估算森林温室气体排放量时, 也应考虑树种组成的影响, 考虑混交林和纯林土壤温室气体排放通量的差异。本研究以湖南会同森林生态系统国家野外科学观测研究站杉木纯林与 3 种杉木-阔叶树混交林土壤为研究对象, 比较了杉木纯林和杉木-阔叶树混交林的土壤二氧化碳和氧化亚氮排放通量差异及主要影响因素, 从而为估算土壤温室气体排放量提供数据支持, 为杉木-阔叶树混交林的阔叶树种的选择提供依据。

## 1 研究区概况

本研究在湖南省会同县广坪镇么哨村李家大山(26°50'59"N, 109°36'20"E)进行。地貌类型为山地中丘陵, 坡度为 15~20°, 海拔为 423~515 m。属于亚热带湿润气候, 年均气温为 16.5 °C, 年均降水量约 1 200 mm。土壤类型为黄壤。

本研究以杉木纯林(CL)和杉木-樟树 *Cinnamomum camphora* 混交林(CL-CC), 杉木-栲树 *Castanopsis fargesii* 混交林(CL-CF)和杉木-桤木 *Alnus cremastogyne* 混交林(CL-AC)为研究对象, 4 个林分均处于同一山坡的中坡位置, 坡向为西北向, 坡度约 20°(表 1)。樟树、栲树、桤木都是南方常见的绿化树种, 其中桤木为固氮树种。4 个林分的杉木人工林造林前为一代杉木林, 1990 年皆伐, 于 1991 年春季采取实生苗造林, 株行距为 1.67 m × 1.67 m。其中杉木-栲树混交林、杉木-桤木混交林、杉木-樟树混交林中杉木阔叶树木混交比例为 8:2。4 个林分造林后管理措施一致。

表 1 林分基本情况

Tabel 1 General situation of experimental plots

林分类型	林龄/a	平均树高/m	平均胸径/cm	郁闭度	海拔/m
杉木-樟树混交林(CL-CC)	27	17.03	25.71	0.70	469~515
杉木-栲树混交林(CL-CF)	27	15.51	21.96	0.72	429~494
杉木-桤木混交林(CL-AC)	27	16.56	22.48	0.60	444~499
杉木纯林(CL)	27	15.80	22.52	0.75	423~468

## 2 研究方法

### 2.1 样地设置

在 4 个林分中分别设置 5 个温室气体通量观测点。5 个样点呈梅花状分布, 上部设置 2 个, 中部 1 个, 下部 2 个。同一林分内, 观测点之间的间隔至少为 20 m。混交林中的观测点选择在杉木和阔叶树之间, 且观测点与邻近杉木和阔叶树树木的距离相等; 杉木纯林中的观测点选择在杉木之间, 观测点与邻近 2 株杉木的距离相等。

### 2.2 土壤温室气体通量及环境因子数据采集

2017 年 7-12 月, 每月中旬选择非降水且天气稳定的 3 d, 在每个观测点采用静态箱-气相色谱法确定土壤温室气体排放通量。静态箱由不透光的 PVC 管制作而成, 分为底箱和顶箱 2 个部分。底箱在测定土壤温室气体通量 1 个月前, 固定在选定的观测点土壤中。底箱插入土壤约 7 cm, 上沿露出土壤 2 cm, 尽量避开树木的根。在整个测量期间保持底箱位置不变, 用于定期测量土壤温室气体排放速率。顶箱内安装直径 12 cm 风扇, 用于混匀箱内气体; 箱侧壁装置电子温度传感器, 测定静态箱箱内温度。在测定前 1 d, 在尽量避免扰动底箱内部土壤的情况下, 剪除底箱内的植物。

土壤温室气体排放通量数据采集时间为每天的 9:00-12:00。取样时, 将静态箱顶箱置于底座上, 密封。扣箱 0, 10, 20 和 30 min 后从箱体中抽取 100 mL 气体, 注入气体样品袋。气体样品在 1 周内使用气相色谱仪 (Agilent 7890B, Agilent Co.) 完成测定 (表 2)。得到气体样品的二氧化碳和氧化亚氮气体浓度, 计算出二氧化碳和氧化亚氮气体通量, 公式如下:

$$F = \rho \frac{V}{A} \frac{P}{P_0} \frac{T_0}{T} \frac{dC_t}{dt} \quad (1)$$

式(1)中:  $F$  为土壤气体净交换通量 (二氧化碳单位  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ , 氧化亚氮单位  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ );  $\rho$  为标准状态下被测气体的气体密度 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $V$  和  $A$  分别为静态箱的有效体积 ( $\text{m}^3$ ) 和静态箱观测的土壤面积 ( $\text{m}^2$ );  $P$  为采样点大气压 (kPa);  $P_0$  为标准状态下的大气压 (101.325 kPa);  $T$  为静态箱内气体温度 (K);  $T_0$  为标准状态下被测气体的温度 (273.15 K);  $\frac{dC_t}{dt}$  为静态箱内被测气体随时间变化的直线斜率。

表 2 气相色谱仪运行参数

Table 2 Operating parameter of gas chromatograph

气体	检测器	$T_{\text{测定器}}/^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{柱温}}/^{\circ}\text{C}$	载气	载气流速/( $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ )	$t/\text{min}$
二氧化碳	氢火焰离子化检测器 (FID)	250	60	氮气	25	5.4
氧化亚氮	微量池电子捕获检测器 (uECD)	350	60	氩甲烷	5	6.8

采集气体样品的同时, 用温度传感器测量取样点大气温度和土壤 10 cm 处温度。采集地表 10 cm 处土壤, 采用烘干法测定土壤 10 cm 处含水率, 并将结果转换为土壤孔隙含水量 (water filled pore space,  $W_{\text{FPS}}$ )。

### 2.3 土壤理化性质测定

2017 年 7-12 月, 每月采集土壤样品, 采集静态箱 30 cm 范围内的 0~20 cm 层扰动土。土壤样品采用多点取样, 清除静态箱周围 30 cm 范围内土壤表面凋落物, 使用直径 5 cm 的土钻在每个观测点随机取 3 个土壤, 3 个土壤均匀混合作为 1 个待测土壤样品。土样带回室内后去除肉眼可见的根系和石块等, 并过 2.00 mm 筛。土壤样品分为 2 份: 1 份在室温下阴干以测定土壤全碳、全氮和土壤 pH; 另一份新鲜土样用于测定铵态氮等。取过 0.25 mm 筛的风干土 0.1 g, 用元素分析仪测定土壤全碳、全氮, 并计算碳氮比<sup>[29]</sup>。风干土壤样品采用电位法 [ $m(\text{水}):m(\text{土})=2.5:10.0$ ] 测定土壤 pH 值。取过 2.00 mm 筛的新鲜土壤样品分别测定土壤铵态氮、硝态氮 (氯化钾浸提-比色法)<sup>[19]</sup> 和土壤微生物量碳、微生物量氮 (氯仿熏蒸-硫酸钾浸提-TOC 仪测定)<sup>[30]</sup>。土壤容重、土壤最大持水量的测定参考《森林土壤水分-物理性质的测定》<sup>[31]</sup> 的环刀法。

### 2.4 数据处理

采用单因素方差分析、Duncan 多重比较、非参数检验方法检验不同林分间温室气体通量差异的显

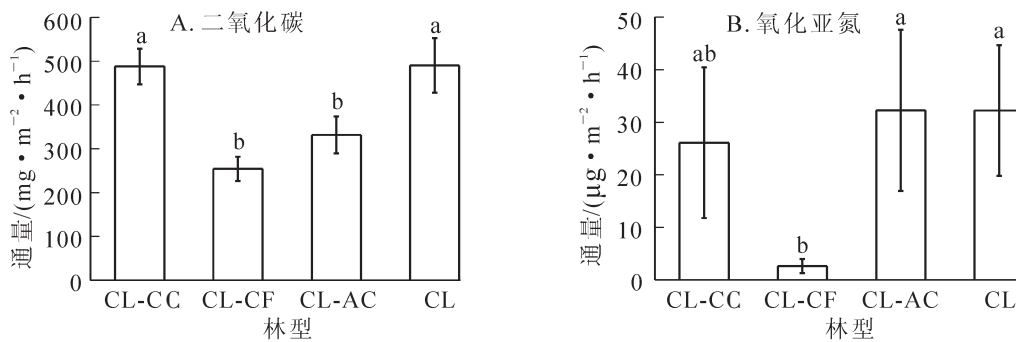
著性。采用 Pearson 相关和回归分析确定土壤理化性质与土壤温室气体排放量的关系。采用 SPSS 19.0 进行统计分析, 用 Excel 和 Origin 进行图表制作。

### 3 结果与分析

#### 3.1 杉木纯林和混交林土壤二氧化碳和氧化亚氮的排放速率

杉木纯林的土壤二氧化碳通量( $490.48 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ )最高, 显著高于杉木-栲树混交林( $254.27 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ )和杉木-桉木混交林( $331.51 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ), 分别高出 92.90%和 47.95%; 与杉木-樟树混交林( $487.92 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ )相比差异不显著( $P>0.05$ , 图 1A)。

杉木人工林的土壤氧化亚氮排放通量从高到低依次为杉木-桉木混交林( $32.29 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ), 杉木纯林( $32.24 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ), 杉木-樟树混交林( $26.08 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ), 杉木-栲树混交林( $2.66 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ )。土壤氧化亚氮排放通量呈指数分布而非正态分布, 故采用非参数检验。结果显示: 杉木-桉木混交林和杉木纯林土壤氧化亚氮的排放通量显著高于杉木-栲树混交林( $P<0.05$ , 图 1B)。



不同小写字母表示不同林分间差异显著( $P<0.05$ )。数值为平均值±标准误( $n=30$ )。CL-CC代表杉木-樟树混交林, CL-CF代表杉木-栲树混交林, CL-AC代表杉木-桉木混交林, CL代表杉木纯林

图 1 杉木纯林和混交林土壤二氧化碳(A)和氧化亚氮(B)的平均通量

Figure 1 Mean CO<sub>2</sub> (A) and N<sub>2</sub>O (B) fluxes of soil in pure and mixed Chinese fir stands

#### 3.2 土壤理化性质对杉木纯林、杉木混交林土壤温室气体排放的影响

由表 3 可以看出: 杉木纯林、杉木-樟树混交林、杉木-栲树混交林、杉木-桉木混交林的土壤容重差异不显著。杉木-桉木混交林土壤 pH 值显著低于其他林分。不同林分间土壤全碳和全氮质量分数差异显著, 土壤全碳质量分数从大到小依次为杉木-桉木混交林, 杉木-樟树混交林, 杉木-栲树混交林, 杉木纯林; 土壤全氮质量分数从大到小依次为杉木-桉木混交林, 杉木-栲树混交林, 杉木纯林, 杉木-樟树混交林。但不同林分间土壤二氧化碳和氧化亚氮排放通量与土壤容重、土壤 pH 值、土壤全碳和全氮质量分数无显著差异( $P>0.05$ )。

表 3 杉木纯林和混交林土壤理化性质(0~20 cm)

Table 3 Soil physical and chemical properties of pure and mixed stands of Chinese fir (0~20 cm)

林分	$T_{\text{土壤}}/^{\circ}\text{C}$	$W_{\text{FS}}/\%$	$\rho_{\text{土壤}}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	pH	$w_{\text{全碳}}/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	$w_{\text{全氮}}/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	$w_{\text{铵态氮}}/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	$w_{\text{硝态氮}}/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	$w_{\text{微生物量碳}}/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	$w_{\text{微生物量氮}}/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$
CL-CC	18.44±6.70 a	73.57±5.94 c	1.25±0.01 a	4.55±0.03 a	13.20±0.21 b	1.28±0.01 c	5.80±0.44 a	1.30±0.26 b	371.75±62.68 a	156.40±45.33 a
CL-CF	18.51±6.93 a	78.29±5.71 b	1.30±0.03 a	4.52±0.03 a	12.78±0.08 c	1.34±0.01 b	5.11±0.38 a	0.33±0.11 b	421.86±58.58 a	195.87±49.34 a
CL-AC	19.12±6.78 a	74.17±8.60 c	1.26±0.04 a	3.93±0.03 c	14.71±0.12 a	1.51±0.03 a	4.85±0.40 a	3.00±0.55 a	359.51±119.85 a	166.05±41.73 a
CL	19.39±6.94 a	76.99±7.80 a	1.28±0.01 a	4.43±0.02 b	11.91±0.09 d	1.39±0.01 b	5.23±0.42 a	1.09±0.23 b	423.14±126.80 a	201.07±50.60 a

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

表 4 可见: 不同林分间土壤 10 cm 处温度差异不显著; 而杉木纯林土壤  $W_{\text{FS}}$  显著高于 3 种杉木-阔叶树混交林, 其中杉木-栲树混交林显著高于杉木-樟树混交林和杉木-桉木混交林。不同林分间, 土壤铵态氮、微生物量碳、微生物量氮之间差异不显著( $P>0.05$ )。而 Pearson 相关分析显示: 杉木人工林土壤二氧化碳排放通量与铵态氮呈极显著正相关关系( $P<0.01$ ), 与微生物氮呈显著正相关( $P<0.05$ ), 与土



壤微生物量碳无显著相关关系( $P>0.05$ )；土壤氧化亚氮通量与土壤铵态氮、微生物碳、微生物氮相关不显著( $P>0.05$ )。土壤氧化亚氮通量与硝态氮呈极显著正相关关系( $P<0.01$ )。

表 4 土壤温室气体排放速率与各因素的相关关系( $n=120$ )

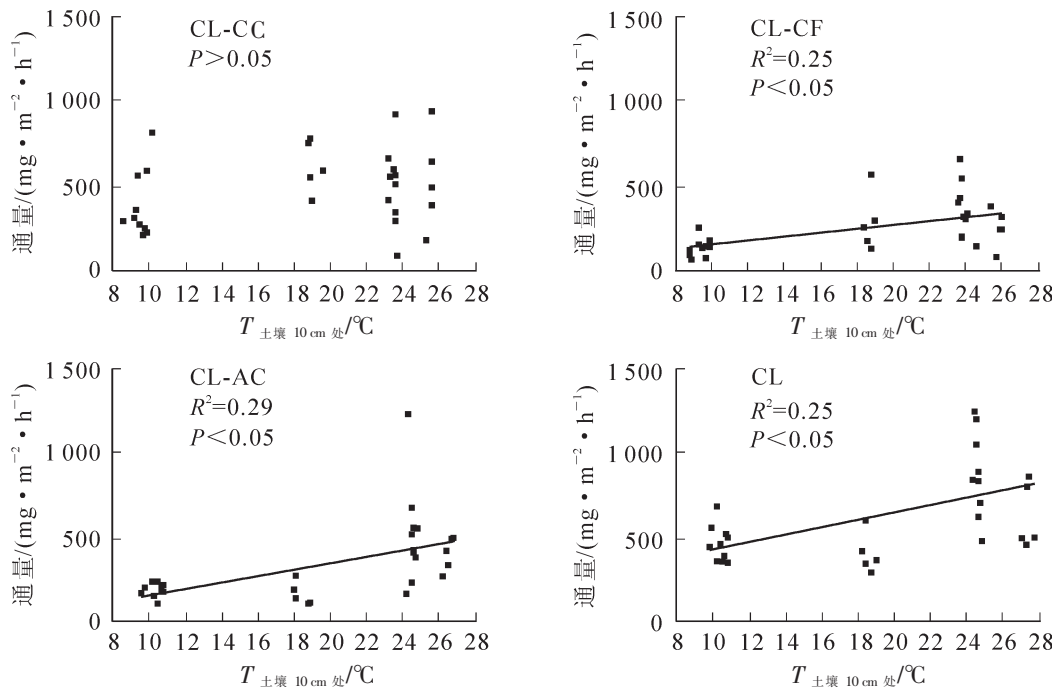
气体	土壤温度	$W_{\text{FS}}$	铵态氮	硝态氮	微生物量碳	微生物量氮
二氧化碳	0.423**	0.155	0.380**	0.219*	-0.213	0.224*
氧化亚氮	0.267**	0.532**	0.177	0.541**	0.044	-0.207

说明：\*表示  $P<0.05$ ，\*\*表示  $P<0.01$

部分影响因素与土壤温室气体通量结合进行回归分析，结果显示：杉木-樟树混交林中土壤 10 cm 处温度与土壤二氧化碳通量之间没有显著性相关关系( $P>0.05$ )，而在杉木-栲树混交林( $R^2=0.25$ ,  $P<0.05$ )、杉木-桉木混交林( $R^2=0.29$ ,  $P<0.05$ )、杉木纯林( $R^2=0.25$ ,  $P<0.05$ )中，土壤 10 cm 处温度与土壤二氧化碳通量呈显著线性相关(图 2)。在杉木-桉木混交林中，土壤二氧化碳通量与 10 cm 处  $W_{\text{FS}}$  之间存在显著线性关系( $R^2=0.21$ ,  $P<0.05$ )，而在杉木-樟树混交林、杉木-栲树混交林、杉木纯林中，土壤二氧化碳通量与土壤 10 cm 处  $W_{\text{FS}}$  无显著相关( $P>0.05$ ，图 3)。

杉木-栲树混交林土壤氧化亚氮通量与土壤 10 cm 处温度显著相关( $R^2=0.13$ ,  $P<0.05$ )，而在其他 3 个林分中未发现这种关系( $P>0.05$ )；杉木-樟树混交林( $R^2=0.14$ ,  $P<0.05$ )土壤氧化亚氮通量与土壤 10 cm 处  $W_{\text{FS}}$  呈显著线性关系(图 4)，杉木-栲树混交林( $R^2=0.61$ ,  $P<0.05$ )，杉木-桉木混交林( $R^2=0.96$ ,  $P<0.05$ )，杉木纯林( $R^2=0.71$ ,  $P<0.05$ )的土壤 10 cm 处  $W_{\text{FS}}$  与土壤氧化亚氮通量呈显著的指数关系(图 5)。土壤氧化亚氮通量随土壤 10 cm 处  $W_{\text{FS}}$  上升而增加，在杉木-栲树混交林和杉木-桉木混交林中，当  $W_{\text{FS}}$  升高至 80% 时，土壤氧化亚氮通量急剧升高，杉木纯林则在土壤  $W_{\text{FS}}$  升高至 90% 时急剧升高。

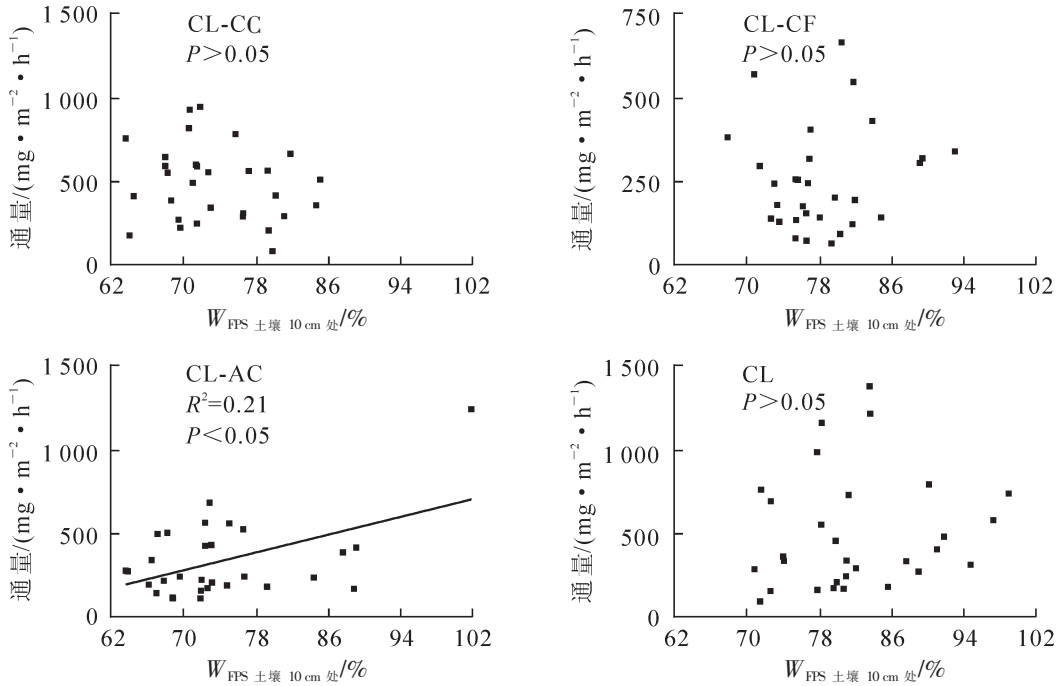
4 种林分中，土壤氧化亚氮通量都与土壤硝态氮呈显著正相关( $P<0.05$ ，图 6)。仅在杉木-栲树混交林和杉木纯林中，土壤二氧化碳通量与土壤铵态氮呈显著正相关( $P<0.05$ ，图 7)。



CL-CC代表杉木-樟树混交林，CL-CF代表杉木-栲树混交林，CL-AC代表杉木-桉木混交林，CL代表杉木纯林

图 2 土壤二氧化碳通量与土壤 10 cm 处温度之间的关系

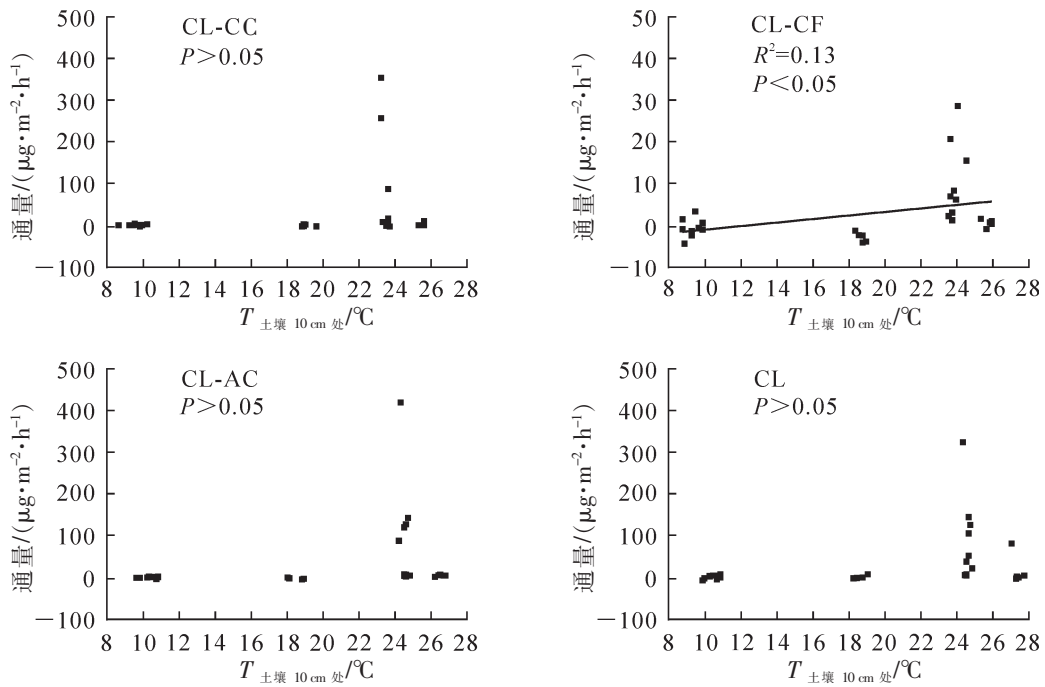
Figure 2 Relationships between soil CO<sub>2</sub> fluxes and temperature at the depth of 10 cm



CL-CC代表杉木-樟树混交林, CL-CF代表杉木-栲树混交林, CL-AC代表杉木-槲木混交林, CL代表杉木纯林

图3 土壤二氧化碳通量与土壤10 cm处  $W_{FFS}$  之间的关系

Figure 3 Relationships between soil CO<sub>2</sub> fluxes and  $W_{FFS}$  at the depth of 10 cm



CL-CC代表杉木-樟树混交林, CL-CF代表杉木-栲树混交林, CL-AC代表杉木-槲木混交林, CL代表杉木纯林

图4 土壤氧化亚氮通量与土壤10 cm处温度之间的关系

Figure 4 Relationships between soil N<sub>2</sub>O fluxes and temperature at the depth of 10 cm

## 4 讨论

### 4.1 土壤二氧化碳通量

本研究中, 杉木纯林土壤二氧化碳通量显著高于杉木-栲树混交林和杉木-槲木混交林, 与杉木-樟树混交林差异不显著。森林土壤二氧化碳通量主要来源于根系的自养呼吸和土壤微生物及土壤动物的异养

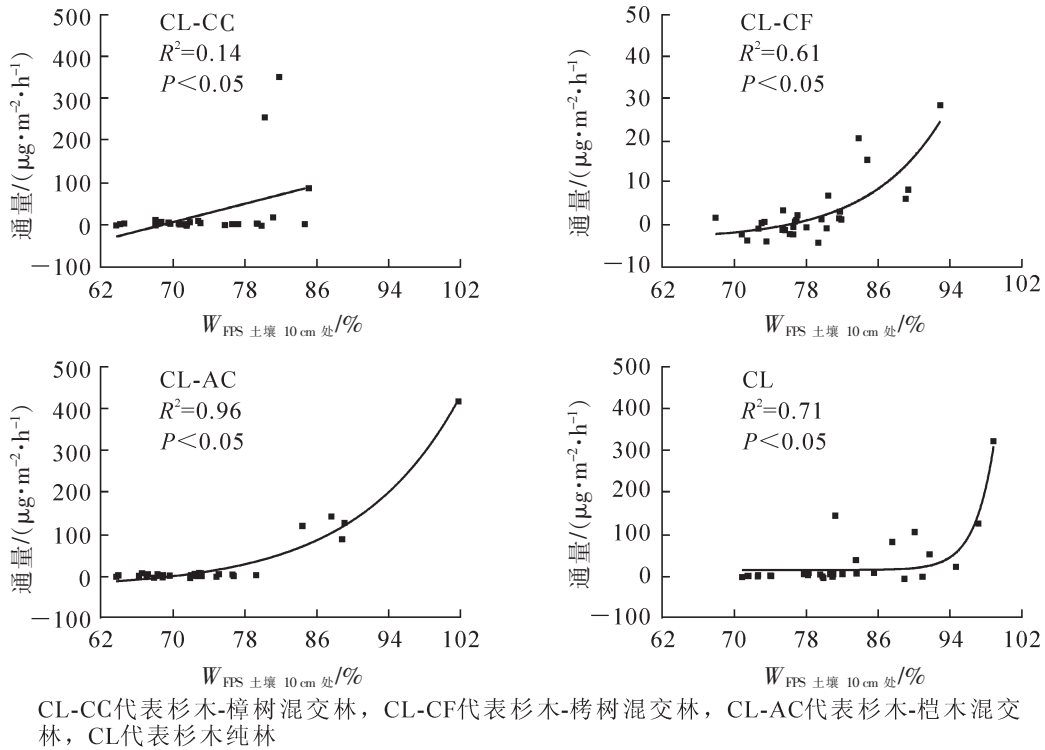


图 5 土壤氧化亚氮通量与土壤 10 cm 处  $W_{FFS}$  之间的关系

Figure 5 Relationships between soil  $N_2O$  fluxes and  $W_{FFS}$  at the depth of 10 cm

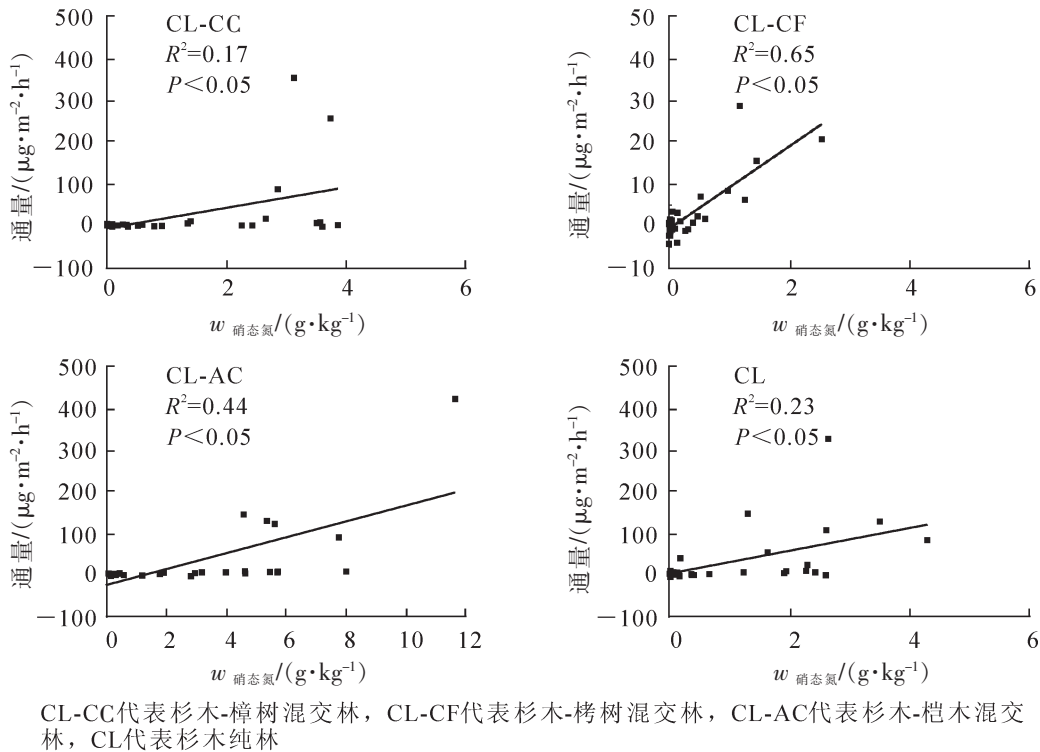
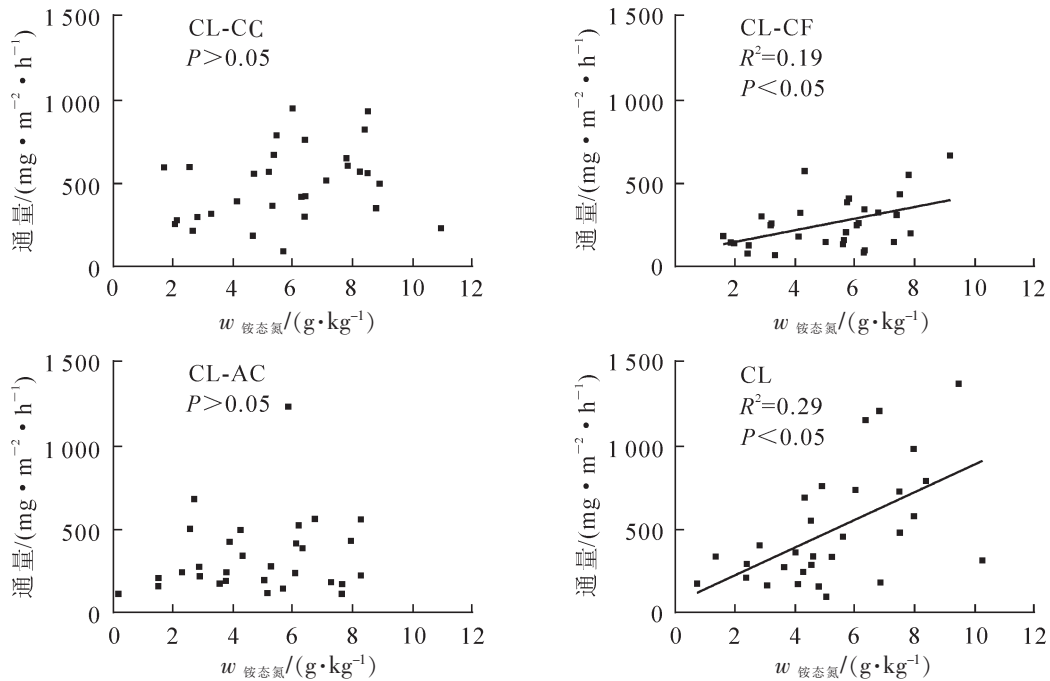


图 6 土壤氧化亚氮通量与硝态氮之间的关系

Figure 6 Relationships between soil  $N_2O$  fluxes and  $NO_3^-$

呼吸<sup>[32]</sup>。不同研究的森林土壤温室气体通量影响因素不同。DÍAZ-PINÉS 等<sup>[33]</sup>研究显示：针叶纯林的土壤二氧化碳排放通量比针阔混交林高，针叶纯林较高的土壤有机碳解释了这一结果。也有研究结果与之相反，WANG 等<sup>[19]</sup>的实验显示：马尾松 *Pinus massoniana* 纯林土壤的二氧化碳通量低于马尾松-红椎 *Castanopsis hystrix* 针阔混交林，差异来源于细根生物量、叶凋落物量、土壤氮和土壤碳氮比。其影响因



CL-CC代表杉木-樟树混交林, CL-CF代表杉木-栲树混交林, CL-AC代表杉木-桉木混交林, CL代表杉木纯林

图7 土壤二氧化碳通量与铵态氮之间的关系

Figure 7 Relationships between soil CO<sub>2</sub> fluxes and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>

素较多,机理复杂。针叶纯林与针阔混交林土壤二氧化碳通量差异可能来源于针叶纯林和针阔混交林的细根生物量、凋落物量、土壤有机碳、土壤全氮、土壤碳氮比的差异,也可能是由于树种组成不同导致的森林内部微气候改变,如土壤温度、土壤湿度<sup>[19,30]</sup>。本研究中,土壤二氧化碳通量与土壤10 cm处温度呈极显著正相关,与大量研究结果一致<sup>[19-20,30]</sup>,温度会影响土壤微生物的活性,进而影响土壤二氧化碳通量。本研究中,土壤二氧化碳通量与土壤铵态氮显著正相关,但不同林分间土壤铵态氮差异不显著,且不同林分的土壤铵态氮与土壤二氧化碳通量的关系较差,土壤铵态氮质量分数的差异可能并不是造成不同林分二氧化碳通量差异的主要原因。

#### 4.2 土壤氧化亚氮通量

树种组成对土壤氧化亚氮通量有影响。BORKEN等<sup>[20]</sup>发现欧洲云杉 *Picea abies*-欧洲山毛榉 *Fagus sylvatica* 混交林土壤氧化亚氮通量高于欧洲云杉纯林土壤。本研究中,杉木纯林和杉木-桉木混交林的土壤氧化亚氮通量显著高于杉木-栲树混交林,杉木纯林和杉木-阔叶树混交林土壤氧化亚氮通量受树种影响。土壤氧化亚氮通量与硝态氮呈极显著正相关。这与许多亚热带土壤温室气体排放的研究结果基本一致<sup>[25,34]</sup>,而与陈玲等<sup>[35]</sup>的研究结果不一致。可能是陈玲等<sup>[35]</sup>的研究以南方农田、竹林等不同生态系统土壤为研究对象,其土壤氧化亚氮主要来源于硝化反应,而杉木人工林土壤氧化亚氮主要来源于反硝化作用<sup>[25]</sup>,释放的氧化亚氮多来源于硝态氮库<sup>[36]</sup>。由此推断:杉木-栲树混交林土壤硝态氮显著低于其他3种林分,可能是杉木-栲树混交林的氧化亚氮通量较低的主要原因。

土壤湿度影响参与硝化和反硝化作用的微生物活性<sup>[4]</sup>,还会影响土壤透气性、土壤氧含量<sup>[37]</sup>。土壤湿度较大情况下,土壤处于厌氧环境,促进了反硝化作用。本研究中,杉木-栲树混交林、杉木-桉木混交林、杉木纯林土壤的氧化亚氮通量随土壤  $W_{\text{FS}}$  增加而呈指数型增加,在较低湿度条件下(低于80%~90%  $W_{\text{FS}}$ ),土壤氧化亚氮通量维持在一个较低的水平,这与白贞智<sup>[38]</sup>的研究结果一致。本研究中各林分的土壤氧化亚氮通量对土壤10 cm处  $W_{\text{FS}}$  的响应略有差异,这可能是土壤中硝态氮质量分数不同造成的。杉木-栲树混交林土壤硝态氮质量分数显著低于其他林分,其土壤氧化亚氮排放通量总体水平较低,且在不同  $W_{\text{FS}}$  条件下的差异较小。杉木-桉木混交林土壤硝态氮质量分数较高,土壤氧化亚氮排放通量显著高于杉木-栲树混交林,高于杉木纯林和杉木-樟树混交林但差异不显著;且不同  $W_{\text{FS}}$  条件间土壤氧化亚氮排放通量差异较大,土壤氧化亚氮通量与土壤10 cm处  $W_{\text{FS}}$  的回归拟合效果最佳( $R^2=0.96$ ,  $P <$



0.05)。在土壤硝态氮质量分数较高, 氮源充足的情况下, 土壤  $W_{\text{FN}}$  是土壤氧化亚氮通量的主要影响因素。

## 5 结论

杉木纯林、杉木-樟树混交林、杉木-栲树混交林、杉木-桉木混交林土壤均表现为二氧化碳和氧化亚氮的源。不同林分的树种组成不同, 土壤温室气体排放有差异。不同林分之间土壤二氧化碳通量有差异, 杉木纯林土壤二氧化碳通量显著高于杉木-栲树混交林、杉木-桉木混交林, 与杉木-樟树混交林差异不显著。杉木-栲树混交林土壤氧化亚氮通量显著低于其他林分。

温度是土壤二氧化碳通量的主要影响因素。土壤硝态氮质量分数和土壤  $W_{\text{FN}}$  是土壤氧化亚氮排放通量的主要影响因素, 是造成杉木纯林、杉木-樟树混交林、杉木-栲树混交林、杉木-桉木混交林土壤氧化亚氮通量差异的主要原因。

## 6 参考文献

- [1] IPCC. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [M]. Cambridge U K: Cambridge University Press, 2013: 3 – 38.
- [2] NIEDER R, BENBI D K. *Carbon and Nitrogen in the Terrestrial Environment* [M]. Dordrecht: Springer, 2008: 87 – 108.
- [3] BATJES N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world [J]. *Eur J Soil Sci*, 1996, **47**: 151 – 163.
- [4] OERTEL C, MATSCHULLAT J, ZURBA K, *et al.* Greenhouse gas emissions from soils: a review [J]. *Chem der Erde-Geochem*, 2016, **76**(3): 327 – 352.
- [5] SCHLESINGER W H, BERNHARDT E S. *Biogeochemistry: An Analysis of Global Change* [M]. 3 rd. San Diego: Academic Press, 2013: 419 – 428.
- [6] KIM D G, KIRSCHBAUM M U F. The effect of land-use change on the net exchange rates of greenhouse gases: a compilation of estimates [J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2015, **208**(1): 114 – 126.
- [7] 国家林业局森林资源管理司. 第八次全国森林资源清查结果[J]. 林业资源管理, 2014(1): 1 – 2.  
Divison of Forest Resources Management, State Forestry Administration. The result of 8 th National Forest Inventory [J]. *For Resour Manage*, 2014(1): 1 – 2.
- [8] 李娟, 白彦锋, 彭阳, 等. 湖南会同县杉木人工林管理碳汇的核算研究[J]. 林业科学研究, 2017, **30**(3): 436 – 443.  
LI Juan, BAI Yanfeng, PENG Yang, *et al.* Carbon accounting of Chinese fir plantation in Huitong, Hu'nan Province [J]. *For Res*, 2017, **30**(3): 436 – 443.
- [9] 王枫, 沈月琴, 朱臻, 等. 杉木碳汇的经济学分析: 基于浙江省的调查[J]. 浙江农林大学学报, 2012, **29**(5): 762 – 767.  
WANG Feng, SHEN Yueqin, ZHU Zhen, *et al.* Economic analysis of Chinese fir forest carbon sequestration: based on Zhejiang's survey [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2012, **29**(5): 762 – 767.
- [10] 施志娟, 白彦锋, 孙睿, 等. 杉木人工林伐后 2 种恢复模式碳储量的比较[J]. 林业科学研究, 2017, **30**(2): 214 – 221.  
SHI Zhijuan, BAI Yanfeng, SUN Rui, *et al.* A comparative study on carbon storage in Chinese fir plantations with two restoration approaches [J]. *For Res*, 2017, **30**(2): 214 – 221.
- [11] 孙启武, 杨承栋, 焦如珍. 连栽杉木人工林土壤肥力变化的主分量分析[J]. 林业科学研究, 2003, **16**(6): 689 – 693.  
SUN Qiwu, YANG Chengdong, JIAO Ruzhen. PCA on the soil degradation of the successive Chinese fir plantation [J]. *For Res*, 2003, **16**(6): 689 – 693.
- [12] 杨玉盛, 何宗明, 陈光水, 等. 杉木多代连栽后土壤肥力变化[J]. 生态环境学报, 2001, **10**(1): 33 – 38.  
YANG Yusheng, HE Zhongming, CHEN Guangshui, *et al.* PCA of soil fertility under different gaps of continuously planting Chinese fir [J]. *Soil Environ Sci*, 2001, **10**(1): 33 – 38.
- [13] 范少辉, 盛炜彤, 马祥庆, 等. 多代连栽对不同发育阶段杉木人工林生产力的影响[J]. 林业科学研究,

- 2003, **16**(5): 560 – 567.
- FAN Shaohui, SHENG Weitong, MA Xiangqing, *et al.* Effect of successive planting on productivity of Chinese fir of different age plantations [J]. *For Res*, 2003, **16**(5): 560 – 567.
- [14] 罗云建, 张小全. 杉木(*Cunninghamia lanceolata*)连栽地力退化和杉阔混交林的土壤改良作用[J]. *生态学报*, 2007, **27**(2): 715 – 724.
- LUO Yunjian, ZHANG Xiaoquan. The assessment of soil degradation in successive rotations of Chinese fir plantation and the soil ameliotation of mixed plantation of Chinese fir and broad-leaved [J]. *Acta Ecol Sin*, 2007, **27**(2): 715 – 724.
- [15] 黄宇, 冯宗炜, 汪思龙, 等. 杉木与固氮和非固氮树种混交对林地土壤质量和土壤水化学的影响[J]. *生态学报*, 2004, **24**(10): 2192 – 2199.
- HUANG Yu, FENG Zhongwei, WANG Silong, *et al.* Effects of Chinese-fir mixing with N-fixing and non-N fixing tree species on forestland quality and forest-floor solution chemistry [J]. *Acta Ecol Sin*, 2004, **24**(10): 2192 – 2199.
- [16] 黄宇, 冯宗炜, 汪思龙, 等. 杉木、火力楠纯林及其混交林生态系统 C、N 贮量[J]. *生态学报*, 2005, **25**(12): 3146 – 3154.
- HUANG Yu, FENG Zhongwei, WANG Silong, *et al.* C and N stocks under three plantation forest ecosystems of Chinese-fir, *Michelia macclurei* and their mixture [J]. *Acta Ecol Sin*, 2005, **25**(12):3146 – 3154.
- [17] 王清奎, 汪思龙, 冯宗炜, 等. 杉木人工林土壤有机质研究[J]. *应用生态学报*, 2004, **15**(10): 1743 – 1749.
- WANG Qingkui, WANG Silong, FENG Zhongwei, *et al.* An overview on studies of organic matter in Chinese fir plantation [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2004, **15**(10): 1743 – 1749.
- [18] JONARD M, ANDRÉ F, JONARD F, *et al.* Soil carbon dioxide efflux in pure and mixed stands of oak and beech [J]. *Ann For Sci*, 2007, **64**(2): 141 – 150.
- [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 stands in China [J]. *For Ecol Manage*, 2013, **300**(4): 4 – 13.
- [20] BORKEN W, BEESE F. Methane and nitrous oxide fluxes of soils in pure and mixed stands of European beech and Norway spruce [J]. *Eur J Soil Sci*, 2006, **57**(5): 617 – 625.
- [21] TANG Xuli, LIU Shuguang, ZHOU Guoyi, *et al.* Soil-atmospheric exchange of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O in three subtropical forest ecosystems in southern China [J]. *Global Change Biol*, 2006, **12**(3): 546 – 560.
- [22] ULLAH S, FRASIER R, KING L, *et al.* Potential fluxes of N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> from soils of three forest types in Eastern Canada [J]. *Soil Biol Biochem*, 2008, **40**(4): 986 – 994.
- [23] 冯建新, 高伟民, 邓飞, 等. 亚热带天然常绿阔叶林转变为杉木人工林对土壤微生物呼吸的影响[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2015, **10**(2): 16 – 24.
- FENG Jianxin, GAO Weimin, DENG Fei, *et al.* Effects of the conversion of natural evergreen broadleaved forest into Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantation on soil microbial properties in subtropical China [J]. *J Subtrop Resour Environ* [J]. 2015, **10**(2): 16 – 24.
- [24] 张磊. 亚热带杉木林土壤温室气体排放对氮磷添加的响应[D]. 重庆: 西南大学, 2013.
- ZHANG Lei. *Response of Greenhouse Gas Fluxes to The Addition of Nitrogen and Phosphorous in Subtropical Fir Forest* [D]. Chongqing: Southwest University, 2013.
- [25] 陆建芳. 中亚热带杉木人工林土壤 N<sub>2</sub>O 产生过程真菌/细菌相对贡献及土壤水分和有机碳的影响[D]. 福州: 福建师范大学, 2014.
- LU Jianfang. *Fungal and Bacterial Relative Contributions to Soil N<sub>2</sub>O Production Processes as Affected by Soil Water Contents and Organic Carbon Sources for A Plantation of Cunninghamia lanceolata in Mid-Subtropical China* [D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2014.
- [26] 王亮, 李子君, 王建雷. 氮磷添加对杉木人工林土壤 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. *安徽农业科学*, 2015, **43**(4): 69 – 72.
- WANG Liang, LI Zijun, WANG Jianlei. Influence of nitrogen and phosphorus fertilizers on soil N<sub>2</sub>O emissions in Chinese fir plantation ecosystem [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2015, **43**(4): 69 – 72.
- [27] 蒲晓婷, 林伟盛, 杨玉盛, 等. 杉木幼林土壤垂直剖面 CO<sub>2</sub> 通量对土壤增温的响应[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(1): 288 – 297.

- PU Xiaoting, LIN Weisheng, YANG Yusheng, *et al.* Vertical profile of soil CO<sub>2</sub> flux in a young Chinese fir plantation in response to soil warming [J]. *Acta Sci Circumstant*, 2017, **37**(1): 288 – 297.
- [28] 方晰, 田大伦, 项文化, 等. 杉木人工林林地土壤 CO<sub>2</sub> 释放量及其影响因子的研究[J]. 林业科学, 2005, **41**(2): 1 – 7.
- FANG Xi, TIAN Dalun, XIANG Wenhua, *et al.* Soil CO<sub>2</sub> release rate and its effect factors in Chinese fir plantation [J]. *Sci Silv Sin*, 2005, **41**(2): 1 – 7.
- [29] WANG Q K, WANG S L. Soil microbial properties and nutrients in pure and mixed Chinese fir plantations [J]. *J For Res*, 2008, **19**(2): 131 – 135.
- [30] VANCE E D, BROOKS P C, JENKINSON D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass [J]. *Soil Biol Biochem*, 1987, **19**(19): 703 – 707.
- [31] 中国林业科学研究院林业研究所. 森林土壤水分-物理性质的测定: LY/T 1215-1999 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [32] LUO Yiqi, ZHOU Xuhui. *Soil Respiration and the Environment* [M]. Amsterdam: Academic Press, 2006: 257 – 305.
- [33] DÍAZ-PINÉS E, SCHINDLBACHER A, GODINO M, *et al.* Effects of tree species composition on the CO<sub>2</sub>, and N<sub>2</sub>O efflux of a Mediterranean mountain forest soil [J]. *Plant Soil*, 2014, **384**(1/2): 243 – 257.
- [34] 李海防, 段文军. 华南地区典型人工林土壤二氧化碳和氧化亚氮通量研究[J]. 浙江农林大学学报, 2011, **28**(1): 26 – 32.
- LI Haifang, DUAN Wenjun. Soil CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O fluxes from four typical plantations in southern China [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2011, **28**(1): 26 – 32.
- [35] 陈玲, 范会, 蒋静艳. 不同生态系统土壤生化特征及其与土壤呼吸和 N<sub>2</sub>O 排放的关系[J]. 环境科学, 2014, **35**(8): 3102 – 3109.
- CHEN Ling, FAN Hui, JIANG Jingyan. Soil biochemical characteristics in different ecological systems and their relationships with soil respiration and N<sub>2</sub>O emission [J]. *Environ Sci*, 2014, **35**(8): 3102 – 3109.
- [36] 陈仕东, 马红亮, 高人, 等. 高氮和 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>对中亚热带森林土壤 N<sub>2</sub>O 和 NO 产生的影响[J]. 土壤学报, 2013, **50**(1): 120 – 129.
- CHEN Shidong, MA Hongliang, GAO Ren, *et al.* Generation of N<sub>2</sub>O and NO in mid-subtropical forest soil as affected by high N and NO<sub>2</sub><sup>-</sup> contents [J]. *Acta Pedol Sin*, 2013, **50**(1): 120 – 129.
- [37] BOLLMANN A, CONRAD R. Influence of O<sub>2</sub> availability on NO and N<sub>2</sub>O release by nitrification and denitrification in soils [J]. *Global Change Biol*, 1998, **4**(4): 387 – 396.
- [38] 白贞智. 热带山地雨林土壤 N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> 通量及其对养分添加的响应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- BAI Zhenzhi. *N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> Emissions from Soil of A Tropical Mountain Rainforest and Responds to Nutrients Additions in Hainan Island, China* [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014.