北亚热带地带性森林土壤温室气体通量对土地利用方式改变和降水减少的响应

菊花^{1,2} 申国珍^{2*} 马明哲² 葛结林² 徐文婷² 赵常明² 张秋良¹

¹内蒙古农业大学林学院, 呼和浩特 010019; ²中国科学院植物研究所植被与环境变化重点实验室, 北京 100093

摘要 弄清土地利用和降水变化对林地土壤主要温室气体(CO₂、CH₄和N₂O)排放通量变化的影响, 是准确评估森林土壤温室气体排放能力的重要基础。该研究以常绿落叶阔叶混交林原始林、桦木(*Betula luminifera*)次生林和马尾松(*Pinus massoniana*)人工林为对象, 采用静态箱-气相色谱法研究了3种土地利用方式(常绿落叶阔叶混交林原始林、桦木次生林和马尾松人工林)和降水减少处理状况下森林土壤CO₂、CH₄和N₂O通量排放特征, 并探讨了其环境驱动机制。研究结果表明: 原始林土壤CH₄吸收通量显著高于次生林和人工林, 次生林CH₄吸收通量显著高于人工林土壤。人工林土壤CO₂排放通量显著高于原始林和次生林土壤。次生林土壤N₂O排放通量高于原始林和人工林, 但三者间差异不显著。降水减半显著抑制了3种不同土地利用方式下林地土壤CH₄吸收通量; 降水减半处理对原始林和次生林土壤CO₂排放通量均具有显著的促进作用, 而对人工林土壤CO₂排放通量具有显著的抑制作用; 降水减半处理促进了原始林和人工林林地土壤N₂O排放而抑制了次生林林地土壤N₂O排放。原始林和次生林林地土壤CH₄吸收通量随土壤温度升高显著增加, CH₄吸收通量与土壤温度均呈显著相关关系; 原始林、次生林和人工林土壤CO₂和N₂O排放通量与土壤温度均呈显著正相关关系; 土壤湿度抑制了次生林和人工林土壤CH₄吸收通量, 其CH₄吸收通量随土壤湿度增加显著减少; 原始林土壤CO₂排放通量与土壤湿度呈显著正相关关系。自然状态下, 原始林土壤N₂O排放通量与土壤湿度呈显著正相关关系, 原始林和次生林土壤N₂O排放通量与硝态氮含量呈显著相关关系。研究结果表明全球气候变化(如降水变化)和土地利用方式的转变将对北亚热带森林林地土壤温室气体排放通量产生显著的影响。

关键词 神农架; 降水减少; 土地利用方式转变; CO₂排放; CH₄吸收; N₂O排放; 环境因子

引用格式: 菊花, 申国珍, 马明哲, 葛结林, 徐文婷, 赵常明, 张秋良 (2016). 北亚热带地带性森林土壤温室气体通量对土地利用方式改变和降水减少的响应. 植物生态学报, 40, 1049–1063. doi: 10.17521/cjpe.2016.0069

Greenhouse gas fluxes of typical northern subtropical forest soils: Impacts of land use change and reduced precipitation

JU Hua^{1,2}, SHEN Guo-Zhen^{2*}, MA Ming-Zhe², GE Jie-Lin², XU Wen-Ting², ZHAO Chang-Ming², and ZHANG Qiu-Liang¹

¹College of Forestry, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010019, China; and ²State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

Abstract

Aims It is important to study the effects of land use change and reduced precipitation on greenhouse gas fluxes (CO₂, CH₄ and N₂O) of forest soils.

Methods The fluxes of CO₂, CH₄ and N₂O and their responses to environmental factors of primary forest soil, secondary forest soil and artificial forest soil under a reduced precipitation regime were explored using the static chamber and gas chromatography methods during the period from January to December in 2014.

Important findings Results indicate that CH₄ uptake of primary forest soil ((-44.43 ± 8.73) μg C·m⁻²·h⁻¹) was significantly higher than that of the secondary forest soil ((-21.64 ± 4.86) μg C·m⁻²·h⁻¹) and the artificial forest soil ((-10.52 ± 2.11) μg C·m⁻²·h⁻¹). CH₄ uptake of the secondary forest soil ((-21.64 ± 4.86) μg C·m⁻²·h⁻¹) was significantly higher than that of the artificial forest ((-10.52 ± 2.11) μg C·m⁻²·h⁻¹). CO₂ emissions of the artificial forest soil ((106.53 ± 19.33) μg C·m⁻²·h⁻¹) were significantly higher than that of the primary forest soil ((49.50 ± 8.16) μg C·m⁻²·h⁻¹) and the secondary forest soil ((63.50 ± 5.35) μg C·m⁻²·h⁻¹) (*p* < 0.01). N₂O emissions of the secondary forest soil ((1.91 ± 1.22) μg N·m⁻²·h⁻¹) were higher than that of the primary forest soil ((1.40 ± 0.28)

收稿日期Received: 2016-02-23 接受日期Accepted: 2016-05-12

* 通信作者Author for correspondence (E-mail: snj@ibcas.ac.cn)

$\mu\text{g N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$) and the artificial forest soil ($(1.01 \pm 0.86) \mu\text{g N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$). Reduced precipitation (-50%) had a significant inhibitory effect on CH_4 uptake of the artificial forest soil, while it enhanced CO_2 emissions of the primary forest soil and the secondary forest soil. Reduced precipitation had a significant inhibitory effect on CO_2 emissions of the artificial forest soil and N_2O emissions of the secondary forest ($p < 0.01$). Reduced precipitation promotes N_2O emissions of the primary forest soil and the artificial forest soil. CH_4 uptake of the primary forest and the secondary forest soil increased significantly with the increase of soil temperature under natural and reduced precipitation. CO_2 and N_2O emission fluxes of the primary forest soil, secondary forest soil and artificial forest soil were positively correlated with soil temperature ($p < 0.05$). Soil moisture inhibited CH_4 uptake of the secondary forest soil and the artificial forest soil ($p < 0.05$). CO_2 emissions of the primary forest soil were significantly positively correlated with soil moisture ($p < 0.05$). N_2O emissions of primary forest soil and secondary forest soil were significantly correlated with the nitrate nitrogen content ($p < 0.05$). It was implied that reduced precipitation and land use change would have significant effects on greenhouse gas emissions of subtropical forest soils.

Key words Mt. Shennongjia; precipitation reduction; land use change; emissions of CO_2 ; uptake of CH_4 ; emissions of N_2O ; environmental factors

Citation: Ju H, Shen GZ, Ma MZ, Ge JL, Xu WT, Zhao CM, Zhang QL (2016). Greenhouse gas fluxes of typical northern subtropical forest soils: Impacts of land use change and reduced precipitation. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 40, 1049–1063. doi: 10.17521/cjpe.2016.0069

二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4)和氧化亚氮(N_2O)是大气主要的温室气体。人类活动引起的 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 等温室气体的排放对全球增温的贡献率达80%并有不断增加的趋势,是近50年来驱动气候变暖的主要原因(Christiansen *et al.*, 2015)。土地利用与土地覆盖变化(LULCC)是影响陆地生态系统碳循环的一个关键因素(Willcock *et al.*, 2016)。土地利用与土地覆盖变化的改变将改变土壤微环境及土壤物理化学过程和微生物活动,进而影响土壤温室气体的产生与排放(Ball *et al.*, 2002; Flechard *et al.*, 2007; 刘慧峰等, 2014)。

森林砍伐是人为引起的一种土地利用变化,是影响大气温室气体浓度变化的最重要的驱动因子(Houghton, 2003)。森林砍伐后,热带森林土壤有机质减少7%–54%,温带森林土壤减少20%–50% (张金屯, 1998)。对寒带森林和热带雨林的研究发现,森林转化为耕地后,其土壤 CO_2 排放通量增加(Grünzweig *et al.*, 2003; 盛浩等, 2010)。而对福建亚热带季风常绿林、纽约温带季风林和加利福尼亚州温带森林的研究发现,森林转变成农田后,其土壤 CO_2 排放通量显著减少(Ishizuka *et al.*, 2002; Carlisle *et al.*, 2006; 褚金翔和张小全, 2006)。因此,目前有关森林转变为农田后对其土壤 CO_2 排放通量变化的研究还存在较大的争议。

森林转变为农田也是改变土壤 CH_4 源汇最重要

的人类活动方式(Hiltbrunner *et al.*, 2012)。森林转变为农田后,土壤氧化 CH_4 的能力降低60% (Galford *et al.*, 2010)。农田转变为人工林有利于土壤吸收大气中的 CH_4 (Merino *et al.*, 2004)。森林转变为农田后,其土壤 N_2O 的排放通量增加。Takakai等(2006)研究表明,森林转变为农田后,其土壤 N_2O 通量显著增加。还有研究发现,森林转化成耕地后,其土壤 N_2O 通量的变化不显著(Merino *et al.*, 2004)。原始林转变为次生林和人工林后,其土壤 CH_4 、 CO_2 和 N_2O 的排放通量发生显著改变。对中国西南山地热带季雨林和橡胶林的研究发现,土壤排放 CH_4 、 CO_2 的通量为原始林>次生林>人工林,而土壤 N_2O 的通量依次为次生林>原始林>人工林(Werner *et al.*, 2006)。对苏门答腊岛森林土壤研究发现,森林砍伐初期,其土壤 N_2O 排放通量增加,随着森林土壤的恢复,其土壤 N_2O 排放通量逐渐减少,甚至低于原来的水平(Weitz *et al.*, 1998)。还有研究发现,原始林转化成次生林后,其土壤 N_2O 排放通量下降(Verchot *et al.*, 1999; Liu *et al.*, 2008)。

降水是调节和控制生物地球化学过程的关键因子。降水格局的改变(包括降水量、降水强度、降水季节变化等),将可能影响陆地碳循环的源汇功能,进而对全球变化的趋势和格局产生深远的影响(Davidson *et al.*, 2004)。政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次评估报告显示,亚洲北部冬季降水量

可能增长50%以上,而夏季降水预计几乎不变(Stocker *et al.*, 2013)。人类土地利用方式的改变对生态系统水循环产生显著的影响。在最极端排放的情景下,热带和极地部分区域降水增长可能超过50%。与此相反,亚热带的大部分地区降水可能减少30%(Stocker *et al.*, 2013)。研究显示,在IS92a和IS92d两种温室气体排放情景下,21世纪末我国平均降水量将分别增加20%和10%,且随着温室气体浓度增加,降水量将继续增加(许吟隆等, 2003)。因此,开展土地利用转变和降水变化对森林土壤主要温室气体排放通量影响的研究,揭示其影响因素和作用机理,将有助于减少土壤温室气体排放、增加土壤碳储量并减缓全球气温持续升高的趋势。

神农架地处秦巴山地,是我国北亚热带典型地带性植被类型常绿落叶阔叶混交林的主要分布区域。在未来气候变化情景下,土地利用方式和降水格局的改变,将是影响北亚热带森林稳定性和动态的关键因素(IPCC, 2011)。本研究以我国北亚热带典型地带性常绿落叶阔叶混交林原始林、桦木次生林和马尾松人工林土壤为研究对象,探讨降水格局和土地利用方式改变对其土壤CO₂、N₂O和CH₄排放通量的影响,并分析其可能机制,以期评估CO₂、N₂O和CH₄排放能力,提高对CO₂、N₂O和CH₄等温室气体排放的认识,为国家制定碳排放决策提供科学依据。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

本研究在湖北神农架森林生态系统国家野外科学观测研究站(简称“神农架站”)开展。神农架地处

我国鄂西地区,属大巴山脉东延之余脉,地理位置为109.93°–110.97° E, 31.25°–31.95° N。研究区内最低海拔420 m,最高海拔3 105.4 m,平均海拔1 700 m。该地区属北亚热带气候,为亚热带向暖温带过渡区,具有明显的过渡带(Ecotone)特征。气候主要受东南季风影响,年平均气温10.6 °C,最冷月(1月)和最热月(7月)的平均温度分别为–4 °C和25 °C,无霜期约300天。年降水量为1 306.2–1 722.0 mm,降水多集中于夏季,冬季较少。年平均日照率为42%,相对湿度为73%–75%,年蒸发量为500–800 mm。土壤以酸性黄棕壤为主,土壤表层有较厚的枯枝落叶层,厚度达10 cm。土壤理化性质见表1。

本研究以神农架北亚热带典型地带性森林-常绿落叶阔叶混交林原始林及其在土地利用方式改变后形成的桦木(*Betula luminifera*)次生林和马尾松(*Pinus massoniana*)人工林为研究对象。各土地利用类型的立地状况见表2。

1.2 样地设置

于2012年4月,在常绿落叶阔叶混交林、桦木次生林和马尾松人工林分布的典型地段,分别选取立地条件相似地段,建立实验样地。其中,原始林和次生林样地,按照坡度大小分为上坡、中坡、下坡设置3个30 m × 10 m样方。人工林样地也按照坡度大小把样地分成上坡、中坡、下坡,各建立3个40 m × 20 m样方。样方内又分为6个5 m × 5 m的小样方,并编号。实验分2个处理组,对照和降水减半,每种处理组3个重复。为了防止不同处理间的干扰,在不同处理间挖掘25–30 cm的壕沟设置缓冲区,并沿垂直方向埋入塑料膜进行分割。降水减半处理(或降水

表1 湖北神农架3种土地利用方式下林地表层土壤(0–20 cm)基本理化性质(平均值±标准误差)

Table 1 The woodland surface soil (0–20 cm) physicochemical properties under the three kind of land use type in Shennongjia, Hubei, China (mean ± SE)

土壤因子 Factors of soil	原始林 Primary forest	次生林 Secondary forest	人工林 Artificial forest
全氮 Total N (g·kg ⁻¹)	3.83 ± 0.43	1.90 ± 0.28	1.35 ± 0.06
全磷 Total P (g·kg ⁻¹)	801.50 ± 0.03	239.23 ± 37.74	245.47 ± 12.93
全钾 Total K (g·kg ⁻¹)	6.35 ± 0.01	19.69 ± 0.61	18.06 ± 0.41
硝态氮 Nitrate nitrogen (g·kg ⁻¹)	7.43 ± 0.92	5.06 ± 1.09	3.32 ± 0.5.
铵态氮 Ammonium nitrogen (g·kg ⁻¹)	34.32 ± 3.46	17.04 ± 1.42	13.70 ± 1.20
可溶性有机碳 Dissolved organic carbon (g·kg ⁻¹)	119.80 ± 30.83	76.69 ± 20.54	92.97 ± 9.34
可溶性有机氮 Organic nitrogen (g·kg ⁻¹)	22.98 ± 5.64	13.03 ± 3.80	14.18 ± 0.99
有机碳 Organic carbon (g·kg ⁻¹)	57.58 ± 8.12	18.99 ± 3.61	14.46 ± 1.10
pH	5.50 ± 0.02	5.13 ± 0.22	4.96 ± 0.05
土壤容重 Soil bulk density (g·m ⁻¹)	1.30 ± 0.04	1.32 ± 0.07	1.47 ± 0.01
土壤湿度 Soil moisture (%)	48.50 ± 1.33	32.54 ± 0.01	30.00 ± 1.79

表2 湖北神农架3种土地利用方式的立地特征

Table 2 Site characteristics of three kind of land use type in Shennongjia, Hubei, China

土地利用类型 Land use types	原始林 Primary forest	次生林 Secondary forest	人工林 Artificial forest
位置 Location	31.31° N 110.47° E	31.33° N 110.49° E	31.32° N 110.49° E
海拔 Elevation (m)	1 670	1 321	1 325
坡度 Slope (°)	40°	38°	36°
降水量 Precipitation (mm)	708.8	637.40	2187.60
平均胸径 Mean diameter at breast height (cm)	11.5	10.97	9.60
郁闭度 Canopy	0.90	0.95	0.93
建群种 Constructive species	米心水青冈 <i>Fagus engleriana</i> 青冈 <i>Cyclobalanopsis glauca</i>	桦木 <i>Betula luminifera</i> 鹅耳枥 <i>Carpinus turczaninowii</i>	马尾松 <i>Pinus massoniana</i> 短柄枹栎 <i>Quercus glandulifera</i>
土壤类型 Soil type	山地黄棕壤 Mountain yellow brown earth	山地黄棕壤 Mountain yellow brown earth	山地黄棕壤 Mountain yellow brown earth

减少50%)由直径为5 cm的PVC管从中间剖开实现,以5 cm的间距固定在4 m×4 m、高1 m的铝架上,截取的降水通过沟渠排出。为消除PVC管的遮阴影响,自然降水处理样地上也水平放置了同样规格的PVC管。管壁上密集钻12 mm的孔,以利于截取降水的渗漏。2014年1–12月试验期间定期清除杂草。土壤温室气体采用静态暗箱法-气相色谱法进行分析。在每个样方内,于实验开始前一周,将采样箱基座插入采样点,采用随机排列,尽量不破坏原有植被。由于地表枯枝落叶层以及根系深度的原因,3个重复中的基座插入地下的深度相差不超过2 cm (计算气体通量时以实际地箱高度为准)。

1.3 研究方法

1.3.1 温室气体通量的测定

于2014年1–12月,进行土壤温室气体(CO₂、CH₄和N₂O)通量的原位观测。采样箱由厚2.0 mm的不锈钢板制成,包括顶箱和地箱两部分。为减小箱内外温差,保证盖箱时箱内温差小于2 °C,采样箱外面包有优质棉保温被。顶箱为正立方体(50 cm×50 cm×30 cm),下方开口(刘玲玲等, 2008)。下面端焊接有2.5 cm的平台,用于粘贴密封胶条。顶箱上安装3 mm外径采样管及与之匹配的过壁接头,并装有搬运把手。地箱为10 cm高的方管形,面积为50 cm×50 cm,顶端有2.5 cm的平台,用于与顶箱上的密封条对接,下端插入土壤,深度为10 cm (刘玲玲等, 2008)。观测过程中,地箱位置固定不变,以保证底座底部内的植被和土壤受干扰最小。采样时将顶箱紧密扣在地箱上。每次采样时间基本固定在9:00–11:30,以此时的通量代表采样日的日均通量(杜睿等, 2004),每7天取样一次。取样时,在静态箱封闭后的0、15、30、45、60 min,每15 min取一次

样。采样时,用60 mL聚乙烯医用注射器经三通阀连接针头通过箱顶部橡胶塞取样,抽取约60 mL箱内气体样品,同时记录采样时间。共采集5 (5次抽样)×3 (3个重复)×2 (2种处理)×3 (3块样地)=90个气样。试验期间,共有效采集42次气样。3–11月份每周采样1次,冬季(1、2、12月份)每两周采样一次,采集完后气体样品立即带回实验室。

用气相色谱仪(Agilent 7890A, Agilent Technologies, Palo Alto, USA)分析CO₂、CH₄和N₂O气体浓度。温室气体通量的计算是通过气体浓度随时间的变化,计算单位地表面积的气体排放通量。所有气体样品均在采集后24 h内完成分析。

土壤温室气体排放通量用以下公式计算:

$$F = \Delta m / (A \times \Delta t) = \rho \times V \times \Delta c / (A \times \Delta t) = \rho \times H \times \Delta c / \Delta t$$

式中: F 为气体交换通量, ρ 为箱内气体密度(mol·m⁻³), Δm 和 Δc 分别为 Δt 时间内箱内气体质量(g)和混合比浓度的变化(μg·m⁻³), A 、 V 、 H 分别为采样箱底面积(cm²)、体积(cm³)和采样箱高度(cm), $\Delta c/\Delta t$ 为箱内气体浓度变化(μg·g⁻¹·h⁻¹)。 F 为负值时表示吸收,为正值时表示排放。

1.3.2 土壤温度和湿度的测定

每次采气体样品时,使用手持式温度记录仪(JM624, 今明仪器有限公司, 天津)测定采样开始、中间和结束时样地土壤温度,并使用便携式土壤温湿度计测定每个静态箱内土壤0–5 cm深度的湿度。同时,在每个样地内,安装气象站(HOBO H21-002, Onset Computer Corporation, Cape Cod, USA),每2 min自动测定并储存5 cm深度的土壤温度和0–5 cm深度土壤湿度,24 h全年采集。

1.3.3 土壤理化性质测定

利用铝盒法和环刀法,测定表层土壤(0–20 cm)

的含水量和容重。按照样地上坡、中坡、下坡3个位置, 在每个样方内随机选取6个点, 去除凋落物层, 在每个点用直径8.5 cm的采土器取0–20 cm深的表层土, 每个样方由6次取样混合而成。土样立即带回实验室, 去除细根和明显石块, 新鲜土样过4 mm筛, 等分为两份。其中, 一份用于硝态氮、铵态氮、可溶性有机碳(DOC)和可溶性有机氮(DON)测定, 另一份样品风干磨细后过孔径2 mm筛和1 mm筛, 用于pH值、有机碳、全氮、全磷和全钾的测定。

土壤pH、有机碳、铵态氮、硝态氮和可溶性有机碳和氮、全氮、全磷、全钾均采用常规方法测定(国家标准)。称取相当于10.00 g干土质量的新鲜土样, 置于用蒸馏水清洗好的广口聚乙烯瓶, 加入50 mL $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的KCl溶液, 振荡1 h, 用直径为9 cm的定量滤纸过滤后的液体用于土壤铵态氮(流动分析比色法)和硝态氮(流动分析比色法)测定; 称取5.00 g干土质量的新鲜土样, 置于用蒸馏水清洗好的广口聚乙烯瓶, 加入50 mL去离子水, 振荡1 h, 直径为9 cm的定性滤纸过滤后的液体用于Liqui-TOC II型TOC仪测定总有机碳; 土壤全氮用半微量凯氏法, 凯氏定氮仪(FOSS 2200, Foss Analytical Company, Copenhagen, Denmark)测定; 称取过2 mm筛的风干土壤10.00 g于50 mL烧杯中, 加入25 mL蒸馏水, 磁力搅拌器搅拌2 min, 静置30 min, 用Sartorius PB-10型pH计测定土壤pH值。

1.3.4 数据分析与处理

数据采用SPSS 16.0 (SPSS, Chicago, USA)进行统计分析。用单因素方差分析中最小显著性差异法(LSD)检验 CH_4 、 CO_2 和 N_2O 年均通量在对照和降水减半处理后的显著性差异。用成对 t 检验法检验同一土地利用方式不同降水处理的显著性差异。采用指数和线性方程函数拟合土壤温度、土壤湿度、硝态氮(NO_3^- -N)和铵态氮(NH_4^+ -N)与 CH_4 、 CO_2 和 N_2O 通量的关系。

$$F = m \times e^{b \times T} \quad (1)$$

$$F = \alpha \times x + \beta \quad (2)$$

(1)式通常表示土壤温度(T)和土壤 CO_2 通量(F)之间的指数关系, 其中 m 和 b 是参数。

(2)式通常表示土壤温度、土壤湿度、硝态氮(NO_3^- -N)和铵态氮(NH_4^+ -N)与 CH_4 、 CO_2 和 N_2O 通量的线性关系。其中 F 表示 CH_4 、 CO_2 和 N_2O 年均通量, α 和 β 为参数, x 是变量因子。

采用线性模型中多元回归方程拟合土壤温度和土壤湿度交互作用对 CH_4 、 CO_2 和 N_2O 通量的影响。

$$F = AX_1 + BX_2 + CX_1X_2 \quad (3)$$

(3)式通常表示土壤温度和土壤湿度的交互作用与 CH_4 、 CO_2 和 N_2O 通量的关系。其中 F 表示 CH_4 、 CO_2 和 N_2O 年均通量, A 、 B 和 C 为参数, X_1 、 X_2 和 X_3 均为变量因子。

显著性水平设定为 $p = 0.05$, 采用SigmaPlot 12.5绘图。

2 结果和分析

2.1 CH_4 通量

原始林、次生林和人工林土壤 CH_4 吸收通量分别为 $(-44.43 \pm 8.73) \mu\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $(-21.64 \pm 4.86) \mu\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $(-10.52 \pm 2.11) \mu\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。其中, 原始林 CH_4 吸收通量显著高于次生林和人工林, 次生林 CH_4 吸收通量显著高于人工林($p < 0.05$, 图1)。降水减半处理后, 原始林、次生林和人工林土壤均吸收 CH_4 , 吸收通量分别为 $(-37.42 \pm 5.11) \mu\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $(-19.61 \pm 4.88) \mu\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $(-6.52 \pm 2.96) \mu\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 降水减半使3种森林土壤 CH_4 吸收通量分别下降了15.78%、9.37%和38.03% ($p < 0.05$, 图1), 且原始林土壤 CH_4 吸收通量显著高于次生林和人工林, 次生林 CH_4 吸收通量显著高于人工林($p < 0.05$, 图1)。

2.2 CO_2 通量

原始林、次生林和人工林土壤 CO_2 排放通量分别为 $(49.50 \pm 8.16) \mu\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $(63.50 \pm 5.35) \mu\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $(106.53 \pm 19.33) \mu\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。其中, 人工林土壤 CO_2 排放通量显著高于次生林和原始林($p < 0.05$, 图1), 次生林土壤 CO_2 排放通量高于原始林, 但差异不显著($p > 0.05$, 图1)。降水减半处理后, 原始林、次生林和人工林土壤均排放 CO_2 , 排放通量分别为 $(56.25 \pm 6.77) \mu\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $(80.99 \pm 33.12) \mu\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $(78.43 \pm 8.82) \mu\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。降水减半使原始林和次生林土壤 CO_2 排放通量分别显著增加了13.62%和27.53% ($p < 0.05$, 图1), 人工林土壤 CO_2 排放通量显著减少了26.38% ($p < 0.05$, 图1), 且次生林土壤 CO_2 排放通量高于原始林和人工林, 人工林 CO_2 排放通量高于次生林($p > 0.05$, 图1)。

2.3 N_2O 通量

原始林、次生林和人工林土壤 N_2O 排放通量分

图1 常绿落叶阔叶混交林原始林、桦木次生林、马尾松人工林土壤温室气体通量(平均值±标准误差)。不同大写字母表示不同土地利用方式在0.05水平上差异显著;不同小写字母表示不同降水处理下同一土地利用方式在0.05水平上差异显著。AF, 人工林; PF, 原始林; SF, 次生林。NR, 自然降水样地; RR, 降水减半样地。

Fig. 1 Greenhouse gas fluxes of the primary forest, secondary forest and artificial forest (mean ± SE). The capital letters indicated the differences land use types in significant at 0.05 level and lowercase letters indicated the same land use types under different precipitation reduction treatments were significant at 0.05 level. AF, artificial forest; PF, primary forest; SF, secondary forest. NR, natural precipitation site; RR, precipitation reduction 50% site.

别为 $(1.40 \pm 0.28) \mu\text{g N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $(1.91 \pm 0.52) \mu\text{g N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $(1.01 \pm 0.86) \mu\text{g N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。其中, 次生林

土壤 N_2O 排放通量高于原始林和人工林土壤, 原始林土壤 N_2O 排放通量高于人工林, 但差异均不显著($p > 0.05$, 图1)。降水减半处理后, 原始林、次生林和人工林土壤均排放 N_2O , 降水减半使原始林和人工林土壤 N_2O 排放通量分别增加了91.69%和37.62%, 均达到显著($p < 0.05$, 图1), 桦木次生林 N_2O 排放通量减少了48.81% ($p < 0.05$, 图1), 且原始林土壤 N_2O 排放通量高于次生林和人工林, 差异呈显著($p < 0.05$, 图1), 人工林 N_2O 排放通量高于次生林, 但差异不显著($p > 0.05$, 图1)。

2.4 CH_4 、 CO_2 和 N_2O 通量与环境因子之间的关系

降水减半后, 原始林和次生林土壤 CH_4 吸收通量随土壤温度升高显著增加, CH_4 吸收通量与土壤温度均呈显著的负线性相关($p < 0.05$, 图2); 原始林、次生林和人工林土壤 CO_2 和 N_2O 排放通量与土壤温度均呈显著正相关($p < 0.05$, 图3, 图4)。降水减半后, 土壤湿度抑制了次生林和人工林土壤 CH_4 吸收通量, 其 CH_4 吸收通量随土壤湿度增加显著减少($p < 0.05$, 图2); 原始林土壤 CO_2 排放通量与土壤湿度呈显著正相关($p < 0.05$, 图3)。对照处理下, 原始林土壤 N_2O 排放通量与土壤湿度呈显著正相关($p < 0.05$, 图4)。自然状态下, 原始林和次生林土壤 N_2O 排放通量与硝态氮含量均呈显著线性相关($p < 0.05$, 图5)。对照和降水减半处理后, 原始林和次生林土壤 CH_4 、 CO_2 和 N_2O 通量均受土壤温度和土壤湿度互作的显著影响($p < 0.05$), 人工林土壤 CO_2 通量受土壤温度和土壤湿度互作的显著影响($p < 0.05$)。人工林对照样地土壤 N_2O 通量受土壤温度和土壤湿度互作的显著影响($p < 0.05$)。

3 讨论

本研究发现北亚热带常绿落叶阔叶混交林原始林、桦木次生林和马尾松人工林均为 CH_4 的汇、 CO_2 和 N_2O 的源。土地利用方式转变和降水格局改变对3种森林土壤 CH_4 、 CO_2 和 N_2O 通量均有影响。降水减半对3种森林土壤 CH_4 吸收均有抑制作用, 对原始林和次生林 CO_2 排放有显著促进作用, 对人工林 CO_2 排放有显著抑制作用。

3.1 CH_4 通量

原始林转化为次生林后, 其土壤 CH_4 吸收通量显著下降, 为原始林>次生林>人工林。这与西双版纳热带季雨林原始林、次生林和橡胶人工林的研究

图2 CH_4 通量与原始林(PF)、次生林(SF)和人工林(AF) 5 cm土壤温度和土壤湿度的关系。NR, 自然降水样地; RR, 降水减半样地。 $a1$, 虚线的斜率; $a2$, 实线的斜率。

Fig. 2 Relationships between the CH_4 fluxes and the soil temperature at 5 cm below surface and soil moisture at the 5 cm in the primary forest (PF), secondary forest (SF) and artificial forest (AF). NR, natural precipitation site; RR, precipitation reduction 50% site. $a1$, slope of dash line; $a2$, slope of solid line.

图3 CO₂通量与原始林(PF)、次生林(SF)和人工林(AF) 5 cm土壤温度和土壤湿度的关系。NR, 自然降水样地; RR, 降水减半样地。 a_1 , 虚线的斜率; a_2 , 实线的斜率。
Fig. 3 Relationships between the CO₂ fluxes and the soil temperature at 5 cm below surface and soil moisture at 5 cm in the primary forest (PF), secondary forest (SF) and artificial forest (AF). NR, natural precipitation site; RR, precipitation reduction 50% site. a_1 , slope of dash line; a_2 , slope of solid line.

图4 N_2O 通量与原始林(PF)、次生林(SF)和人工林(AF) 5 cm土壤温度和土壤湿度的关系。NR, 自然降水样地; RR, 降水减半样地。a1, 虚线的斜率; a2, 实线的斜率。

Fig. 4 Relationships between the N_2O fluxes and the soil temperature at 5 cm below surface and soil moisture at 5 cm in the primary forest (PF), secondary forest (SF) and artificial forest (AF). NR, natural precipitation site; RR, precipitation reduction 50% site. a1, slope of dash line; a2, slope of solid line.

图5 N_2O 通量与原始林(PF)、次生林(SF)和人工林土(AF)壤硝态氮含量的关系。NR,自然降水样地; RR,降水减半样地。 a_1 ,虚线的斜率; a_2 ,实线的斜率。

Fig. 5 Relationships between the N_2O fluxes and soil nitrate nitrogen content in the primary forest (PF), secondary forest (SF) and artificial forest (AF). NR, natural precipitation site; RR, precipitation reduction 50% site. a_1 , slope of dash line; a_2 , slope of solid line.

结果一致(Werner *et al.*, 2006),也与鼎湖山常绿阔叶林原始林、次生林和马尾松人工林土壤 CH_4 排放的研究结果一致(Tang *et al.*, 2006)。常绿落叶阔叶混交林为神农架地区的地带性植被,处于顶级演替,林分内的光照、水分、温度和养分条件充足,枯落物易分解,微生物呼吸及根系呼吸强于次生林和人工林。次生林是常绿落叶阔叶混交林20世纪70年代重度砍伐后形成的森林类型,水土流失相对严重,腐殖质层薄,养分条件较差,土壤有机碳流失也较严重,而马尾松人工林是常绿阔叶阔叶混交林采伐后人工种植的森林类型,虽然已形成复层林结构,可充分利用生长空间和光、热、水、养分等,但针叶林枯落物微生物分解速率较慢。 CH_4 吸收通量原始林>次生林>人工林的研究结果,可能是因为针叶林酸性土壤中的 CH_4 氧化菌数量远低于阔叶林土壤 CH_4 氧化菌数量所致。因而,阔叶林土壤的 CH_4 排放通量大于人工林(马尾松)土壤 CH_4 的通量。

本研究中,原始林和次生林土壤 CH_4 吸收通量与土壤温度均呈显著的负线性相关关系,而人工林 CH_4 吸收通量与土壤温度没有显著相关关系。次生林和人工林 CH_4 吸收通量与土壤湿度呈显著线性正相关,说明次生林和人工林这两种土地利用类型土壤湿度抑制了 CH_4 吸收。而原始林土壤 CH_4 吸收通量与土壤湿度无显著相关关系。西双版纳次生林和橡胶人工林 CH_4 吸收与土壤温度无显著相关,原始林 CH_4 吸收通量与土壤温度之间相关性较弱,同时3种不同土地利用方式土壤 CH_4 吸收通量与土壤湿度均呈显著负线性相关(Werner *et al.*, 2006)。Schaufler等(2010)发现,不同土地利用方式下欧洲土壤 CH_4 氧化速率与土壤湿度具有指数和多项式负相关。刘玲玲等(2008)对千烟洲红壤丘陵区人工针叶林土壤研究发现,其 CH_4 吸收通量随温度升高和湿度降低而增大,并呈显著的对数相关关系。而亚热带鼎湖山3种森林类型土壤 CH_4 吸收通量与土壤温度和土壤湿度均没有显著的相关性(Tang *et al.*, 2006)。氨态氮对 CH_4 氧化有明显抑制作用(Adamsen & King, 1993; Jassal *et al.*, 2011)。 CH_4 和 NH_4^+ 能被甲烷加单氧酶(MMO)氧化,过多的 NH_4^+ 会与 CH_4 竞争MMO,从而抑制 CH_4 氧化(Bodelier & Laanbroek, 2004)。也有研究发现,硝态氮和铵态氮对鹤山丘陵尾叶桉(*Eucalyptus urophylla*)林土壤 CH_4 排放无显著影响(李海防等, 2009)。

降水减半后, 3种森林土壤CH₄吸收通量均减少。但原始林土壤CH₄吸收通量显著高于次生林和人工林, 次生林CH₄吸收通量显著高于人工林。土壤温湿度是影响CH₄吸收通量的重要影响因素(Rustad *et al.*, 2000)。中纬度地区土壤吸收CH₄最适温度为15–25 °C (Castro *et al.*, 1995), 低于最适温度时, CH₄吸收率随温度升高而增加。温度对CH₄吸收的影响远小于水分的影响, 微生物需要一定的含水量才能保持相应的活性。当水分含量过高时, 土壤空隙被水分占据, 造成厌氧环境, 有利于产CH₄古生菌活性, 土壤表现为CH₄的正排放源, 反之为负排放源(耿世聪等, 2013)。本研究中, 马尾松人工林表层土壤容重(1.47 ± 0.01)大于次生林(1.32 ± 0.07)和原始林(1.30 ± 0.04)(表1), 降水后渗透性比较弱, 下层土壤轻组有机碳很难被补充, 土壤有机碳不利于深层埋存, 常绿落叶阔叶混交林原始林作为地带性植被, 结构复杂, 生态系统相对稳定, 对外界环境干扰具有较强的缓冲能力(Zhang *et al.*, 2006), 即土壤有机碳的稳定性高, 森林植被正向演替促进土壤有机碳的积累。常绿落叶阔叶混交林原始林CH₄吸收通量与土壤温度显著负线性相关, 与土壤湿度没有显著相关, 次生林CH₄吸收通量与土壤温度和湿度均显著线性负相关, 人工林CH₄吸收通量与土壤湿度呈显著线性正相关。与土壤铵态氮和硝态氮含量无显著相关($p > 0.05$)。齐玉春等(2004)研究认为, 降水后的一段时间内大气中的CH₄向土壤扩散的速度减慢, 从而使甲烷被吸收氧化的速度也减慢。

3.2 CO₂通量

本研究发现人工林CO₂年平均排放通量显著高于次生林和原始林, 次生林土壤CO₂年平均排放通量高于原始林, 但差异不显著。土地利用活动通过影响地上植被状况和土壤性质, 进而影响土壤CO₂排放。盛浩等(2010)分析了全球不同气候带森林转变为其他土地类型后对土壤CO₂排放的影响, 发现热带(包括亚热带)原始林转变为次生林和人工林后, 其土壤CO₂排放通量平均减少29%。原始林转变为其他土地利用方式后土壤CO₂排放显著增加, 其原因主要与不同森林类型之间植物根生物量、土壤微生物生物量、土壤有机质和容重等的差异有关(莫江明等, 2005)。土壤CO₂主要来源于植物根系和土壤生物(主要微生物)呼吸以及有机质的矿化分解(Steudler *et al.*, 2015), 其各组分量与土壤的通气条

件是土壤CO₂排放的主要影响因素。本研究中3种土地利用方式下土壤容重大小顺序为人工林(1.47 ± 0.01) > 次生林(1.32 ± 0.07) > 原始林(1.30 ± 0.04), 与3种土地利用方式土壤CO₂排放通量大小顺序一致(表1)。林地CO₂排放通量不仅与土地利用方式和森林起源有关, 还受降水变化等环境因子的影响。

3种土地利用方式下林地土壤CO₂排放通量与土壤温度呈极显著正相关。其中, 原始林土壤CO₂排放通量与土壤湿度显著线性相关, 次生林和人工林均无显著相关。由此可见, 北亚热带典型地带性森林常绿落叶阔叶混交林土壤CO₂排放通量, 受温湿度双因素的共同作用强于次生林和人工林。桉木次生林和马尾松人工林受温度影响的过程也是影响土壤CO₂排放速率的重要因素。土壤释放的CO₂主要来源于土壤微生物呼吸、根系呼吸和土壤动物呼吸(Steudler *et al.*, 1989)。降水量减少, 土壤含水量下降, 导致土壤温度上升, 使土壤生物的呼吸强度在一定范围内随之改变, 从而改变土壤呼吸进程(徐冰鑫等, 2014)。因此, CO₂排放通量受降水量制约。

降水对CO₂通量的影响与土壤本身的水分状况也有关系, 一般情况下降水会促进干旱土壤CO₂的排放而抑制湿润土壤CO₂的排放。在干燥土壤中降水能改善土壤的水分状况, 激发土壤呼吸, 从而增加土壤CO₂排放通量(Norton *et al.*, 2008)。但对湿润土壤, 降水增加会抑制土壤CO₂通量(金冠一等, 2013)。本研究发现降水减半促进了原始林和次生林土壤CO₂的排放, 这与中国台湾云雾林的研究结果一致(Chang *et al.*, 2008)。主要原因为研究地区常年较为湿润, 降水减少促进了CO₂的排放通量。而降水减少抑制了马尾松人工林CO₂的排放通量, 这可能是马尾松人工林可用性底物的影响大于降水的影响。王义东等(2010)通过研究认为, 改变降水格局会影响底物的组成和有效性、土壤微生物的活性和数量、土壤的通气状况等, 从而使土壤CO₂的排放通量发生了变化。

3.3 N₂O通量

土壤N₂O排放主要与土壤硝化和反硝化过程密切相关(莫江明等, 2006)。因此, 影响N₂O排放的因子包括土壤硝态氮含量、铵态氮含量、土壤湿度、土壤温度、土壤pH值和土壤O₂供给状况及反应底物的有效性等(孙向阳和徐化成, 2001)。本研究发现, 神农架3种土地利用方式下森林土壤N₂O排放通量

均低于温带、南亚热带和热带森林土壤 N_2O 排放通量(杜睿等, 2004; 莫江明等, 2006; Werner *et al.*, 2006)。这主要是因为本研究地处北亚热带, 其年均降水量高, 致使土壤含水量较高, 且北亚热带气温较低所致。在3种土地利用方式中, 次生林土壤 N_2O 排放通量高于原始林和人工林土壤, 原始林土壤 N_2O 排放通量高于人工林。产生这种差异的原因可能在于: 桦木次生林为常绿落叶阔叶混交林在20世纪70年代被重度砍伐后形成的土地类型, 土地利用/土地覆被变化改变了林地小气候(光照、温度和降雨等)、土壤理化性质、地上有机物和无机养分的输入以及土壤有机质含量, 利于林地土壤 N_2O 的排放。原始林和人工林相比, 常绿落叶阔叶混交林原始林的凋落物数量及其分解速率高于人工林, 有机质的输入量比较高, 利于土壤 N_2O 的产生。马尾松人工林是常绿落叶阔叶混交林间伐后人工种植的土地类型, 人为干扰使得其林分年龄结构、林分密度以及植被结构发生了显著改变, 影响碳、氮、水等资源的循环过程, 使 N_2O 的排放量低于原始林和次生林。本研究结果与西双版纳的研究结果一致, N_2O 的排放通量均为次生林>原始林>人工林(Werner *et al.*, 2006)。而鼎湖山和亚马孙东部区研究结果则为原始林>次生林>人工林(Verchot *et al.*, 1999; Tang *et al.*, 2006)。

降雨量、土壤温度、土壤湿度、土壤容重及土壤有效氮含量等因素的改变, 是影响不同土地利用方式下土壤 N_2O 排放通量的重要驱动因子(李海防等, 2009)。本研究发现, 降水减少促进了原始林和人工林土壤 N_2O 排放通量, 抑制了桦木次生林 N_2O 排放通量, 土壤 N_2O 排放通量为原始林>人工林>次生林。3种土地利用方式土壤容重大小与 N_2O 排放通量大小顺序不一致, 土壤容重对 N_2O 排放通量影响的规律性不明显(表1)。在自然状态和降水减半后, 原始林、次生林和人工林土壤 N_2O 排放通量与土壤温度均呈显著正相关。自然状态下, 原始林土壤 N_2O 排放通量与土壤湿度呈显著正相关。这与蒙古栎林和硬阔叶林及长白山落叶红松林的研究结果一致(王颖等, 2009; 肖冬梅等, 2004)。蒙古栎林和硬阔叶林土壤 N_2O 通量与5 cm的土壤温度呈显著的相关性, 长白山落叶红松林土壤 N_2O 通量与土壤温度呈显著正相关。Verchot等(1999)研究发现亚马孙东部区不同土地利用方式土壤 N_2O 排放通量与土壤含水

量(土壤湿度)呈极显著线性相关, 这与本研究发现的 N_2O 排放通量与土壤湿度呈线性相关一致。

森林土壤氮素的供应状况是影响土壤 N_2O 排放的重要因素(Butterbach-Bahl *et al.*, 2002)。大量研究表明, 土壤 N_2O 排放与土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量正相关关系(Skiba *et al.*, 1998; Smith *et al.*, 2003)。本研究中, 土壤 N_2O 排放通量大小顺序与土壤全氮含量和有效氮(铵态氮+硝态氮)含量的大小顺序基本一致, 即原始林>次生林>人工林($p < 0.05$, 表1), 原始林和次生林土壤 N_2O 排放通量与硝态氮含量均呈显著线性相关($p < 0.01$)。

4 结论

1)土地利用类型的转变显著影响北亚热带典型常绿落叶阔叶混交林及其次生林和人工林土壤温室气体排放。常绿落叶阔叶混交林原始林及其转变后形成的桦木次生林和马尾松人工林, 土壤 CH_4 吸收通量为原始林>次生林>人工林, CO_2 排放通量为人工林>次生林>原始林, N_2O 排放通量为次生林>原始林>人工林。

2)降水减半对3种土地利用方式下林地土壤 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 通量均有显著影响。降水减半抑制了3种土地利用方式下林地土壤 CH_4 的吸收通量, 人工林土壤 CO_2 的排放通量和次生林土壤 N_2O 的排放通量。降水减半促进了原始林和次生林土壤 CO_2 的排放通量及原始林和马尾松人工林 N_2O 的排放通量。

3)土壤温度可能是决定 CO_2 通量“源-汇”关系的主要环境因子。土壤温度对原始林、次生林和人工林土壤 CH_4 和 N_2O 排放通量的影响大于土壤湿度。铵态氮含量与3种土地利用方式土壤 CH_4 、 CO_2 和 N_2O 通量无显著相关, 硝态氮含量与原始林和次生林 N_2O 通量呈显著相关, 与人工林无显著相关。

基金项目 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05020303)。

参考文献

- Adamsen A, King G (1993). Methane consumption in temperate and subarctic forest soils: Rates, vertical zonation and responses to water and nitrogen. *Applied and Environmental Microbiology*, 59, 485–490.
- Ball BC, McTaggart IP, Watson CA (2002). Influence of organic ley-arable management and afforestation in sandy loam to clay loam soils on fluxes of N_2O and CH_4 in

- Scotland. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 90, 305–317.
- Bodelier PL, Laanbroek HJ (2004). Nitrogen as a regulatory factor of methane oxidation in soils and sediments. *FEMS Microbiology Ecology*, 47, 265–277.
- Butterbach-Bahl K, Breuer L, Gasche R, Willibald G, Papen H (2002). Exchange of trace gases between soils and the atmosphere in Scots pine forest ecosystems of the northeastern German lowlands. 1. Fluxes of N_2O , NO / NO_2 and CH_4 at forest sites with different N-deposition. *Forest Ecology and Management*, 167, 123–134.
- Carlisle EA, Steenwerth KL, Smart DR (2006). Effects of land use on soil respiration: Conversion of oak woodlands to vineyards. *Journal of Environmental Quality*, 35, 1396–1404.
- Castro MS, Steudler PA, Melillo JM, Aber JD, Bowden RD (1995). Factors controlling atmospheric methane consumption by temperate forest soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 9, 1–10.
- Chang SC, Tseng KH, Hsia YJ, Wang CP, Wu JT (2008). Soil respiration in a subtropical montane cloud forest in Taiwan. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148, 788–798.
- Christiansen JR, Outhwaite J, Smukler SM (2015). Comparison of CO_2 , CH_4 and N_2O soil-atmosphere exchange measured in static chambers with cavity ring-down spectroscopy and gas chromatography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 211, 48–57.
- Chu JX, Zhang XQ (2006). Dynamic and fractionalization of soil respiration under three different land use/covers in the subalpine region of western Sichuan Province, China. *Acta Ecologica Sinica*, 26, 1693–1700. (in Chinese with English abstract) [褚金翔, 张小全 (2006). 川西亚高山林区三种土地利用方式下土壤呼吸动态及组分区分. 生态学报, 26, 1693–1700.]
- Davidson EA, Ishida FY, Nepstad DC (2004). Effects of an experimental drought on soil emissions of carbon dioxide, methane, nitrous oxide, and nitric oxide in a moist tropical forest. *Global Change Biology*, 10, 718–730.
- Du R, Huang JH, Wan XW, Jia YH (2004). The research on the law of greenhouse gases emissions from warm temperate forest soil in Beijing region. *Chinese Journal of Environmental Science*, 25, 12–16. (in Chinese with English abstract) [杜睿, 黄建辉, 万小伟, 贾月慧 (2004). 北京地区暖温带森林土壤温室气体排放规律. 环境科学, 25, 12–16.]
- Flechard CR, Ambus P, Skiba U, Rees RM, Hensen A, van Amstel A, Raschi A (2007). Effects of climate and management intensity on nitrous oxide emissions in grassland systems across Europe. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 121, 135–152.
- Galford GL, Melillo JM, Kicklighter DW, Cronin TW, Cerri CE, Mustard JF, Cerri CC (2010). Greenhouse gas emissions from alternative futures of deforestation and agricultural management in the southern Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107, 19649–19654.
- Geng SC, Chen ZJ, Zhang JH, Lou X, Wang XX, Dai GH, Han SJ, Yu DD (2013). Soil methane fluxes of three forest types in Changbai Mountain of Northeast China. *Chinese Journal of Ecology*, 32, 1091–1096. (in Chinese with English abstract) [耿世聪, 陈志杰, 张军辉, 姜鑫, 王秀秀, 戴冠华, 韩士杰, 于丹丹 (2013). 长白山三种主要林地土壤甲烷通量. 生态学杂志, 32, 1091–1096.]
- Grünzweig JM, Sparrow SD, Chapin FS (2003). Impact of forest conversion to agriculture on carbon and nitrogen mineralization in subarctic Alaska. *Biogeochemistry*, 64, 271–296.
- Hiltbrunner D, Zimmermann S, Karbin S, Hagedorn F, Niklaus PA (2012). Increasing soil methane sink along a 120-year afforestation chronosequence is driven by soil moisture. *Global Change Biology*, 18, 3664–3671.
- Houghton RA (2003). Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850–2000. *Tellus B*, 55, 378–390.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2011). Summary for policymakers. In: Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, Seyboth K, Matschoss P, Kadner S, Zwickel T, Eickemeier P, Hansen G, Schlömer S, von Stechow C eds. *Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation of Working Group III to the 11th Session of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Ishizuka S, Tsuruta H, Murdiyarso D (2002). An intensive field study on CO_2 , CH_4 , and N_2O emissions from soils at four land-use types in Sumatra, Indonesia. *Global Biogeochemical Cycles*, 16, 1049–1060.
- Jassal RS, Black TA, Roy R, Ethier G (2011). Effect of nitrogen fertilization on soil CH_4 and N_2O fluxes, and soil and bole respiration. *Geoderma*, 162, 182–186.
- Jin GY, Zhao XH, Kang FF, Wang JS (2013). The great rainfall effect on soil respiration of *Pinus tabulaeformis* plantation in Taiyue Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 33, 1832–1841. (in Chinese with English abstract) [金冠一, 赵秀海, 康峰峰, 汪金松 (2013). 太岳山油松人工林土壤呼吸对强降雨的响应. 生态学报, 33, 1832–1841.]
- Li HF, Xia HP, Fu SL, Zhang XF (2009). Emission of soil greenhouse gases in response to understory removal and cassia alata addition in an eucalyptus urophylla plantation in Guangdong Province, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 33, 1015–1022. (in Chinese with English abstract) [李海防, 夏汉平, 傅声雷, 张杏锋 (2009). 剔除林下灌草和添加翅荚决明对尾叶桉林土壤温室气体排

- 放的影响. 植物生态学报, 33, 1015–1022]
- Liu H, Zhao P, Lu P, Wang YS, Lin YB, Rao XQ (2008). Greenhouse gas fluxes from soils of different land-use types in a hilly area of South China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 124, 125–135.
- Liu HF, Wu X, Li Y, Li ZS, Liu GH (2014). Effects of land use change on greenhouse gas fluxes from soils: A review. *Chinese Journal of Ecology*, 33, 1960–1968. (in Chinese with English abstract) [刘慧峰, 伍星, 李雅, 李宗善, 刘国华 (2014). 土地利用变化对土壤温室气体排放通量影响研究进展. 生态学报, 33, 1960–1968.]
- Liu LL, Liu YF, Wen XF, Wang YH (2008). CH₄ emission flux from soil pine plantations in the Qian-Yanzhou red earth hill region of China. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 32, 431–439. (in Chinese with English abstract). [刘玲玲, 刘允芬, 温学友, 王迎红 (2008). 千烟洲红壤丘陵区人工针叶林土壤CH₄排放通量. 植物生态学报, 32, 431–439.]
- Merino A, Pérez-Batallón P, Macías F (2004). Responses of soil organic matter and greenhouse gas fluxes to soil management and land use changes in a humid temperate region of southern Europe. *Soil Biology & Biochemistry*, 36, 917–925.
- Mo JM, Fang YT, Lin ED, Li YE (2006). Soil N₂O emission and its response to simulated N deposition in the main forests of Dinghushan in subtropical China. *Chinese Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 30, 901–910. (in Chinese with English abstract) [莫江明, 方运霆, 林而达, 李玉娥 (2006). 鼎湖山主要森林土壤N₂O排放及其对模拟N沉降的响应. 植物生态学报, 30, 901–910.]
- Mo JM, Fang YT, Xu GL, Li DJ, Xue JH (2005). The short-term responses of soil CO₂ emission and CH₄ uptake to simulated N deposition in nursery and forests of Dinghushan in subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 25, 682–690. (in Chinese with English abstract) [莫江明, 方运霆, 徐国良, 李德军, 薛璟花 (2005). 鼎湖山苗圃和主要森林土壤CO₂排放和CH₄吸收对模拟N沉降的短期响应. 生态学报, 25, 682–690.]
- Norton U, Mosier AR, Morgan JA, Derner JD, Ingram LJ, Stahl PD (2008). Moisture pulses, trace gas emissions and soil C and N in cheatgrass and native grass-dominated sagebrush-steppe in Wyoming, USA. *Soil Biology & Biochemistry*, 40, 1421–1431.
- Qi YC, Dong YS, Geng YB, Yang XH, Liu LX, Li MF, Liu XR (2004). The comparison of the CH₄ flux diurnal variation characteristics and diurnal uptake flux in different phenologies in *Leymus chinense* grassland in Inner Mongolia, China. *Geographical Research*, 23, 785–794. (in Chinese with English abstract) [齐玉春, 董云社, 耿元波, 杨小红, 刘立新, 李明峰, 刘杏认 (2004). 内蒙古羊草草原不同物候CH₄通量日变化特征与日通量比较. 地理研究, 23, 785–794.]
- Rustad LE, Huntington TG, Boone RD (2000). Controls on soil respiration: Implications for climate change. *Biogeochemistry*, 48, 1–6.
- Schaufler G, Kitzler B, Schindlbacher A, Skiba U, Sutton MA, Zechmeister-Boltenstern S (2010). Greenhouse gas emissions from European soils under different land use: Effects of soil moisture and temperature. *European Journal of Soil Science*, 61, 683–696.
- Sheng H, Li X, Yang ZJ, Xie JS, Chen GS, Yang YS (2010). Impact of land use/cover change on soil CO₂ efflux in mid subtropical mountainous area of Southern China. *Scientia Geographica Sinica*, 30, 446–451. (in Chinese with English abstract) [盛浩, 李旭, 杨智杰, 谢锦升, 陈光水, 杨玉盛 (2010). 中亚热带山区土地利用变化对土壤CO₂排放的影响. 地理科学, 30, 446–451.]
- Skiba UM, Sheppard LJ, MacDonald J, Fowler D (1998). Some key environmental variables controlling nitrous oxide emissions from agricultural and semi-natural soils in Scotland. *Atmospheric Environment*, 32, 3311–3320.
- Smith KA, Ball T, Conen F, Dobbie KE, Massheder J, Rey A (2003). Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: Interactions of soil physical factors and biological processes. *European Journal of Soil Science*, 54, 779–791.
- Steudler PA, Bowden RD, Melillo JM, Aber JD (1989). Influence of nitrogen fertilization on methane uptake in temperate forest soils. *Nature*, 341, 314–316.
- Steudler PA, Melillo JM, Bowden RD, Castro MS, Lugo AE (2015). The effects of natural and human disturbances on soil nitrogen dynamics and trace gas fluxes in a Puerto Rican wet forest. *Biotropica*, 23, 356–363.
- Stocker TF, Qin DH, Plattner GK, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Midgley PM (2013). *The Physical Science Basis. Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group I Contribution to the “IPCC Fifth Assessment Report”*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 72.
- Sun XY, Xu HC (2001). Emission flux of nitrous oxide from forest soil in Beijing. *Scientia Silvae Sinicae*, 37(5), 57–63. (in Chinese with English abstract) [孙向阳, 徐化成 (2001). 北京低山区两种人工林土壤中N₂O排放通量的研究. 林业科学, 37(5), 57–63.]
- Takakai F, Morishita T, Hashidoko Y, Darung U, Kuramochi K, Dohong S, Hatano R (2006). Effects of agricultural land-use change and forest fire on N₂O emission from tropical peatlands, Central Kalimantan, Indonesia. *Soil Science and Plant Nutrition*, 52, 662–674.
- Tang XL, Liu SG, Zhou GY, Zhang DQ, Zhou CY (2006). Soil-atmospheric exchange of CO₂, CH₄, and N₂O in three subtropical forest ecosystems in southern China. *Global Change Biology*, 12, 546–560.

- Verchot LV, Davidson EA, Cattnio H, Ackerman IL, Erickson HE, Keller M (1999). Land use change and biogeochemical controls of nitrogen oxide emissions from soils in eastern Amazonia. *Global Biogeochemical Cycles*, 13, 31–46.
- Wang Y, Wang CK, Fu MJ, Liu S, Wang XC (2009). Soil nitrous oxide emission in four temperate forests in north eastern China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 20, 1007–1012. (in Chinese with English abstract) [王颖, 王传宽, 傅民杰, 刘实, 王兴昌 (2009). 四种温带森林土壤氧化亚氮通量及其影响因子. 应用生态学报, 20, 1007–1012.]
- Wang YD, Wang HM, Ma ZQ, Li QK, Shi LL, Xu F (2010). Review of response mechanism of soil respiration to rainfall. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 34, 601–610. (in Chinese with English abstract). [王义东, 王辉民, 马泽清, 李庆康, 施蕾蕾, 徐飞 (2010). 土壤呼吸对降雨响应的研究进展. 植物生态学报, 34, 601–610.]
- Weitz AM, Veldkamp E, Keller M, Neff J, Crill PM (1998). Nitrous oxide, nitric oxide, and methane fluxes from soils following clearing and burning of tropical secondary forest. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 103, 28047–28058.
- Werner C, Zheng X, Tang J, Xie B, Liu C, Kiese R, Butterbach-Bahl K (2006). N₂O, CH₄ and CO₂ emissions from seasonal tropical rainforests and a rubber plantation in Southwest China. *Plant and Soil*, 289, 335–353.
- Willcock S, Phillips OL, Platts PJ, Swetnam RD, Balmford A, Burgess ND, Fanning E (2016). Land cover change and carbon emissions over 100 years in an African biodiversity hotspot. *Global Change Biology*, 22, 2787–2800.
- Xiao DM, Wang M, Ji LZ, Han SJ, Wang YS (2004). Variation characteristics of soil N₂O emission flux in broad-leaved Korean pine forest of Changbai Mountain. *Chinese Journal of Ecology*, 23, 46–52. (in Chinese with English abstract) [肖冬梅, 王淼, 姬兰柱, 韩士杰, 王跃思 (2004). 长白山阔叶红松林土壤N₂O排放通量的变化特征. 生态学杂志, 23, 46–52.]
- Xu BX, Hu YG, Zhang ZS, Chen YL, Zhang P, Li G (2014). Effects of experimental warming on CO₂, CH₄ and N₂O fluxes of biological soil crust and soil system in a desert region. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 38, 809–820. (in Chinese with English abstract) [徐冰鑫, 胡宜刚, 张志山, 陈永乐, 张鹏, 李刚 (2014). 模拟增温对荒漠生物土壤结皮-土壤系统CO₂、CH₄和N₂O通量的影响. 植物生态学报, 38, 809–820.]
- Xu YL, Xue F, Lin YH (2003). Changes of surface air temperature and precipitation in China during the 21st century simulated by had CM2 under different greenhouse gas emission scenarios. *Climatic and Environmental Research*, 8(2), 209–217. (in Chinese with English abstract) [许吟隆, 薛峰, 林一骅 (2003). 不同温室气体排放情景下中国21世纪地面气温和降水变化的模拟分析. 气候与环境研究, 8(2), 209–217.]
- Zhang DQ, Sun XM, Zhou GY, Yan JH, Wang YS, Liu SZ, Zhou CY, Liu JX, Tang XL (2006). Seasonal dynamics of soil CO₂ effluxes with responses to environmental factors in lower subtropical forest of China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 49 (Suppl. II), 139–149.
- Zhang JT (1998). Effects of global climate change on C and N circulation in natural soils. *Scientia Geographica Sinica*, 18, 463–471. (in Chinese with English abstract) [张金屯 (1998). 全球气候变化对自然土壤碳、氮循环的影响. 地理科学, 18, 463–471.]

责任编辑: 谢宗强 责任编辑: 王 葳

植物生态学报官网

微信订阅号
期刊及学科
相关信息发布

微信服务号
稿件状态查询
全文检索浏览