DOI: 10.5846/stxb201503240560
菊花,申国珍,徐文婷,赵常明,苏磊,王杨,谢宗强,张秋良.神农架主要森林土壤 CH_4、CO_2 和 N_2O 排放对降水减少的响应.生态学报,2016,36(20): - .
Ju H, Shen G Z, Xu W T, Zhao C M, Su L, Wang Y, Xie Z Q, Zhang Q L.The emission of CH_4, CO_2, and N_2O in the typical forest soils of Shennongjia under the precipitation reduction .Acta Ecologica Sinica,2016,36(20): - .

神农架主要森林土壤 CH_4、CO_2 和 N_2O 排放对降水减少的响应

菊花[1,2],申国珍[2],徐文婷[2],赵常明[2],苏磊[2],王杨[2],谢宗强[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:研究降水格局改变后森林土壤温室气体排放格局,可为森林温室气体排放清单制定提供科学依据。本研究以神农架典型森林类型常绿落叶阔叶混交林和 2 种人工林马尾松和杉木林为研究对象,研究了降水格局改变后,其土壤 CH_4吸收、CO_2 和 N_2O 的排放格局和可能机制。结果表明:常绿落叶阔叶混交林吸收 CH_4通量为(-36.79±13.99) μg C m^{-2} h^{-1},显著大于马尾松和杉木两种人工林的 CH_4吸收通量,其吸收通量分别为(-14.10±3.38) μg C m^{-2} h^{-1}和(-7.75±2.80) μg C m^{-2} h^{-1}。马尾松和杉木两种人工林 CO_2排放通量分别为(107.03±12.11) μg C m^{-2} h^{-1}和(80.82±10.29) μg C m^{-2} h^{-1},显著大于常绿落叶阔叶混交林(71.27±10.59) μg C m^{-2} h^{-1}。常绿落叶阔叶混交林 N_2O 排放通量为(8.88±6.75) μg N m^{-2} h^{-1},显著大于杉木人工林(5.93±2.79) μg N m^{-2} h^{-1}和马尾松人工林(1.64±1.02) μg N m^{-2} h^{-1}。分析 3 种森林土壤 CH_4吸收量与其环境因子之间的关系发现,常绿落叶阔叶混交林的 CH_4吸收通量与其土壤温度呈现显著的指数负相关关系($P<0.01$)。常绿落叶阔叶混交林、马尾松林和杉木林的土壤 CO_2排放通量与其空气温度和土壤温度之间均呈现显著的指数正相关关系($P<0.01$)。常绿落叶阔叶混交林和马尾松林土壤 N_2O 排放通量与空气温度之间均呈现显著的指数正相关关系($P<0.01$),而马尾松林与土壤温度之间呈显著正相关($P<0.05$),与土壤湿度之间均无显著相关。降水减半后,减少降水对常绿落叶阔叶混交林和马尾松林土壤 CH_4吸收通量均具有明显的促进作用,但对杉木林土壤 CH_4吸收量具有抑制作用,对常绿落叶阔叶混交林和杉木林土壤 CO_2平均排放通量均具有明显的促进作用,而对马尾松林土壤 CO_2平均排放通量明显抑制作用,对常绿落叶阔叶混交林、马尾松和杉木林土壤 N_2O 排放量具有明显的抑制作用。

关键词:神农架;模拟降水减少;常绿-落叶阔叶混交林;马尾松林;杉木林;CO_2、CH_4和 N_2O 排放

The emission of CH_4, CO_2, and N_2O in the typical forest soils of Shennongjia under the precipitation reduction

JU Hua[1,2], SHEN Guozhen[2], XU Wenting[2], ZHAO Changming[2], SU Lei[2], WANG Yang[2], XIE Zongqiang[2], ZHANG Qiuliang[1,*]

1 *College of Forestry, Inner Mongolia Agricultural University, Huhot* 010019, *China*

2 *State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100093, *China*

Abstract: Research on the pattern of the greenhouse gas emission from the forest soil during the precipitation reduction would provide a scientific basis for the establishment of the forest greenhouse gas emissions inventory. In this study, we explored the emission pattern and its possible mechanism of CH_4, CO_2, and N_2O release from the soils of the mixed

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(XDA05020303)

收稿日期:2015-03-24; **网络出版日期**:2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zqlemail@ vip.sina.com

deciduous and broadleaved evergreen forest, *Pinus massoniana* forest and *Cunninghamia lanceolata* forest under the treatment of precipitation reduction . The results indicated that the flux of CH_4 uptake of the mixed deciduous and broadleaved evergreen forest was (-36.79 ± 13.99 μg C m^{-2} h^{-1}), which was significantly higher than that of the *P. massoniana* forest soil (-14.10 ± 3.38 μg C m^{-2} h^{-1}) or the *C. lanceolata* forest soil (-7.75 ± 2.80 μg C m^{-2} h^{-1}). The CO_2 emissions of the *P. massoniana* forest soil andthe *C. lanceolata* forest soil were (107.03 ± 12.11 μg C m^{-2} h^{-1}) and (80.82 ± 10.29 μg C m^{-2} h^{-1}) respectively, which were significantly higher than those of the mixed deciduous and broadleaved evergreen forest (71.27 ± 10.59 μg C m^{-2} h^{-1}). The N_2O emissions of the mixed deciduous and broadleaved evergreen forest soil were (8.88 ± 6.75 μg N m^{-2} h^{-1}), which was significantly greater than that of the *C. lanceolata* forest (5.93 ± 2.79 μg N m^{-2} h^{-1}) and that of the *P. massoniana* forest (1.64 ± 1.02 μg N m^{-2} h^{-1}). The flux of the CO_2 emissions of the mixed deciduous and broadleaved evergreen forest soil had a significantly negative exponential relationship with the soil temperature ($P < 0.01$). The N_2O emission of the soil had a significantly positive exponential relationship with the air temperature of the mixed deciduous and broadleaved evergreen forest and the *P. massoniana* forest ($P < 0.01$), and a positive relationship with the soil temperature ($P < 0.05$). Precipitation reduction increased the uptake of CH_4 significantly of both mixed deciduous and broadleaved evergreen soil, and the *P. massoniana* forests soil, but inhibited the uptake of CH_4 of the *C. lanceolata* forests soil. In addition, precipitation reduction significantly increased the CO_2 emissions of the mixed deciduous and broadleaved evergreen soil, and the *C. lanceolata* forest soil. At the same time, the precipitation reduction significantly inhibited the N_2O emission of the mixed deciduous and broadleaved evergreen forest soil, and the *P. massoniana* and the*C. lanceolata* forest soil.

Key Words: Mt. Shennongjia; precipitation reduction; mixed evergreen and deciduous broad leaved forest; *Pinus massoniana* forest; *Cunninghamia lanceolata* forest; emission of CO_2, CH_4, and N_2O

全球气候变暖,已成为不争的事实。自工业革命以来,全球平均气温增加了 0.85 ℃, 预计到 21 世纪末还将增加 0.3—4.8 ℃(IPCC, 2014)[1]。大气 CO_2、CH_4和 N_2O 等温室气体浓度的增加,是导致气候变暖的直接原因[2]。2011 年全球大气中的 CO_2、CH_4和 N_2O 浓度,分别比工业革命(1750 年)前增加了 40%、150%和 20% (IPCC, 2014)[1]。大气中的 CO_2、CH_4和 N_2O 在生物圈和大气圈之间进行着复杂的交换, 其“源-汇”关系决定着生态系统对气候变暖的响应与反馈的方向和程度[3]。

森林作为陆地生物圈的主体,不仅维持着全球 86%以上的植被碳库,同时也维持着全球 73%的土壤碳库[4]。森林土壤较小幅度的变动,都可能影响整个大气温室气体的浓度,进而对陆地生态系统的结构和功能,产生深刻的影响[5]。因此, 在全球气候变暖的背景下, 有关森林土壤温室气体通量变化的研究,已成为研究的焦点。

降水格局的变化是影响森林土壤温室气体通量变化的主要因素之一。1960—2000 年间,我国的总降水量增加了 2%,降水频率减少了 10%[6]。未来,在 SRES AIB 情景下,区域年平均降水量 21 世纪前期(2011—2040 年)降水呈弱减少趋势,减幅在-3%—0 之间;从 21 世纪中期到后期(2041—2080 年),降水变为增加趋势,增幅在-3%—6%之间[7]。全球降水格局(包括降水量、降水强度、降水的季节变化等)的改变,将直接影响到森林土壤温室气体的排放[1]。

目前,已有一些关于降水格局改变对草原和森林生态系统植被生产力、物种组成、幼苗生长、生物量、土壤呼吸及土壤有机碳组份影响的研究[8-11]。Davidson 认为,降水量的改变对森林温室气体通量排放产生显著的影响[12],温带森林在降雨量减少 14%—45%后,其甲烷的氧化量将增加 4%—102%[13]。但是,对降水格局改变后,森林生态系统 CH_4吸收具有很大的不确定性。李伟等研究结果表明,降水改变未能显著影响土壤 CH_4通量[14]。Castro 等研究表明,土壤 CH_4通量和土壤水分呈显著的负相关关系,且土壤水分能解释 CH_4通量变

异的 78%[15]。土壤水分对于降水格局改变的响应,受季节、温度、光照、植被和土壤质地等诸多因素的限制,从而使降水格局改变对土壤 CH_4通量影响的不确定性进一步扩大[15]。土壤水分接近最大田间持水力时,土壤 CO_2通量达到最大,低于和高于该值时,CO_2通量都会减少[16]。

神农架地处我国秦巴山地,位于 Global 200 Ecoregions 70"中国西南温带森林生态区"中的"大巴山山地常绿林生态区",以其生态系统的独特性和完好的原始状态,成为大巴山山地常绿林生态区的典型代表。常绿落叶阔叶混交林为该区地带性植被类型,也是北亚热带保存最为完好的常绿落叶阔叶混交林。较之东亚亚热带其他区域,为北半球保存了最为完好的常绿落叶阔叶混交林。未来气候变化情景下,土地利用方式改变和温度、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[7]。但是,到目前为止,有关北亚热带常绿落叶阔叶混交林土壤温室气体排放的研究,几乎为空白[17]。我们不清楚这类地带性森林类型在土地类型和降水格局改变后,其温室气体排放格局将如何改变?

本研究,以神农架地区典型地带性森林-常绿落叶阔叶混交林及 2 种常见人工林马尾松和杉木人工林为研究对象,研究了降水格局改变对 3 种森林土壤 CO_2、N_2O 排放和 CH_4吸收的影响,以期揭示北亚热带森林土壤降水格局改变后,其温室气体通量的空间变异及其可能机制,为该地区温室气体排放总体核算提供理论依据。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区自然概况

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(以下简称"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°56′—110°58′E,31°15′—31°57′N ,海拔 1755 m。该地区为我国中部山地与东部丘陵低山区的过渡地带,相对高差达 2700 m。受东南季风和大气环流的影响,气候为中亚热带向北亚热带的过渡带。气温偏凉且多雨,并随海拔的升高形成低山、中山、亚高山 3 个气候带。年平均气温 10.6℃,年平均日照率为 42%,相对湿度为 73%—75%,平均年蒸发量 500—800 mm,年降水量 1306.2—1722.0 mm ,降水多集中于夏季,冬季较少,最冷月(1 月)和最热月(7 月)的平均温度分别为-4 ℃和 25 ℃[18]。随海拔升高,依次呈现出亚热带、暖温带、中温带等多种气候类型。该区植被分布具有明显的垂直地带性,随海拔升高依次为常绿阔叶林、常绿落叶阔叶混交林、落叶阔叶林、针阔混交林、针叶林及灌丛。地带性土壤主要为黄棕壤,随海拔自下而上依次为:海拔 550—1500 m 分布有山地黄棕壤、海拔 1500—2200 m 分布有山地棕壤、海拔 2200—2900 m 分布有山地暗棕壤、海拔 2900 m 以上为山地棕色针叶林土[19](表 1)。

本研究以神农架地区典型地带性植被常绿落叶阔叶混交林(Mixed evergreen and deciduous broad leaved forest;MNR),及马尾松(*Pinus massoniana*;PNR)人工林和杉木(*Cunninghamia lanceolata*;CNR)人工林为研究对象。其中,常绿落叶阔叶混交林平均胸径为 11.50 cm ,平均树高为 8.4 m ,森林郁闭度为 0.90。建群种为米心水青冈(*Fagus engleriana*)和曼青冈(*Cyclobalanopsis oxyodon*),并伴有粉白杜鹃(*Rhododendron hypoglaucum*)、短柄枹栎(*Quercus serrata* var*brevipetiolata*)、湖北鹅耳枥(*Carpinus hupeana*)、四照花(*Cornws kousa subsp chinensis*)、巴东栎(*Quercusengleriana*)、多脉青冈(*Cyclobanopsis multinervis*)等乔木树种组成。灌木层主要有箭竹(*Fargesia spathacea*)、箬竹(*Indocalamus tessellates*);草本层主要有苔草(*Carex*)、多种蕨类、淫羊藿(*Epimadium*)、堇菜(*Viola*)、变豆菜(*Sanicula*)、黄水枝(*Tiarella polyphylla*)、报春(*Primula*)、蟹甲草(*Parasenecio*)、鹿药(*Smilacina*)、唐松草(*Thalictrum*)、层间植物有五月瓜藤(*Holboellia fargesii*)、拔葜(*Smilax*)、猕猴桃(*Actinidia*)、铁线莲(*Clematis*)等。土壤为山地黄棕壤。

马尾松人工林平均胸径为 9.60 cm ,平均树高为 8.2m ,森林郁闭度为 0.93 ,乔木层主要为马尾松(*P. massoniana*),半生树种有短柄枹栎(*Quercus serrata* var. *brevipetiolata glandulifera*)、栓皮栎(*Quercus variabil*)、宜昌荚蒾(*Viburnum erosum*)、米饭花(*Vacciniuim mandarinorum*)、毛黄栌(*Cotinus coggygria* var. *pubescens*)、双盾木(*Dipelta floripunda*)等。土壤为山地黄棕壤。

杉木人工林平均胸径为 12.98cm ,平均树高 8.8m ,森林郁闭度为 0.95 ,乔木层主要为杉木(*C. lanceolata*),此外还分布有栓皮栎(*Quercus variabilis*)、鹅耳枥(*Carpinus turczaninowii*)短柄枹栎(*Quercus glandulifera*)等。土壤为山地黄棕壤。

表 1 不同森林类型表层土壤(0—20cm)基本理化性质(平均值,标准误)

Table 1 The surface soil (0—20 cm) physicochemical properties in different forest types(Mean,SE)

森林类型 Forest types	位置 Location	海拔/m Elevation	坡向 Aspect	坡度/(°) Slope	土层深/cm Soil depth	全氮 Total N/(g/kg)	硝态氮 Nitrate Nitrogen/(mg/kg)	铵态氮 Ammonium Nitrogen/(mg/kg)	PH	土壤容重 Soil bulk density/(g/cm^3)	土壤含水量/% Soil Moisture
常绿落叶阔叶混 MF	N31°18′23″ E110°28′27″	1670	NW10°	40°	0—20	2.46±0.03	7.43±0.92	34.32±3.46	5.5±0.02	1.30±0.04	48.50±1.33
马尾松林 PF	N31°19′16.8″ E110°29′13.6″	1325	NW6°	36°	0—20	1.35±0.04	5.06±1.09	13.70±1.20	4.96±0.03	1.47±0.01	30.00±1.79
杉木林 CF	N31°19′29.4″ E110°28′57.7″	1348	NW8°	38°	0—20	1.22±0.153	3.20±0.59	19.09±4.28	4.66±0.03	1.40±0.03	34.00±1.70

MF:常绿落叶阔叶混交林 Mixed deciduous and evergreen broadleaved forest;PF:马尾松林 *Pinus massoniana*;CF:杉木林 *Cunninghamia lanceolata*

1.2 实验设计

本研究于 2012 年 4 月上旬,在 3 种森林类型中,分别选取立地条件相似地段,建立实验样地。其中,常绿落叶阔叶混交林样地,按照坡度大小分为上坡、中坡、下坡 3 个 30 m×10 m 样方。马尾松和杉木人工林同样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。每个样方之间,留有足够宽的隔离带(约 3 m 宽),以防止相互之间的干扰。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,常绿落叶阔叶林为 MNR(对照;降水 100%)、MRR(降水减小 50%),马尾松林为 PNR(对照; 降水 100%)、PRR(降水减小 50%),杉木林为 CNR(对照;降水 100%)、CRR(降水减小 50%)。每种处理组 3 个重复。模拟降水控制实验,使用直径为 5 cm 的 PVC 管从中间剖开,以 5 cm 的间距固定在 4 m×4 m、高 1 m 的铝架上,截去了 50%的降水,在降水控制 3 个重复样方周围挖取壕沟以阻止坡面径流对截雨效果的影响。

1.3 样品采集与处理

本研究采用静态暗箱法-气相色谱法,进行气体通量分析。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,保证盖箱时段箱内温差小于 2℃,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。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 10cm 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 10cm。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。每种森林类型共有两个处理,每个处理 3 个重复,共 6 个实验单元,每个实验单元设一个采样箱,3 种森林类型共设置 18 个采样箱。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。

气体样品取样时间为 2012 年的生长旺季 6—11 月的 8:00—11:00,每 7d 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。用 60 mL 聚乙烯医用注射器采集样品完毕后立即带回实验室,用 Agilent7890A 气相色谱仪分析气体浓度。以单位时间气样浓度的变化,作为该时间段的气体排放速率,所有样品的气体浓度和采样时间的相关系数(R^2)>0.95,视为有效。测定理化性质的土壤样品是按照样地上、中、下坡在每个样方随机选取 6 个采样点,去除凋落物层,用直径 7 cm 的土钻取 0—20 cm 土壤,每点取 3 钻,混合装入密封袋运回实验室处理。去除细跟和明显石块,新鲜土样过 4 mm 筛,等分为两份,一份用于硝态氮、铵态氮测定,另一份风干后过 2 mm 筛,用于 pH 值、有机碳、全氮、碱解氮测定。称取相当于 10.0g 干土重的新鲜土样,置于用蒸馏水清洗好的广口聚乙烯瓶,加入 50 mL 2mol · L^{-1}的氯化钾溶液,震荡 1h ,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 5.0g 干土重的新鲜土样,置于用蒸馏水清洗好的广口聚乙烯瓶,加入 50 mL 去离子水,震荡 1h , 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)测定;称取过 2 mm 筛的风干土壤 10.0g 于 50mL 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。

1.4　环境因子测定

每次采气体样品时,使用电子温度计测定气温和 10 cm 处的土壤温度,使用便携式土壤温湿度计测定仪测定 10 cm 处的土壤相对湿度。同时,在每个样地内,装有自动数据采集器(HOBO H21-002, Oneset Computer Corporation, Cape Cod, USA),测定样地气温、10 cm 处的土壤温度、0—10 cm 处土壤湿度、降雨量以及土壤含水量,自计采集器每两分钟采集一次数据,24 h 全年采集。

1.5　数据分析与处理

气体交换通量计算公式为:

$$F = \frac{\Delta m}{A \cdot \Delta t} = \frac{\rho \cdot V \cdot \Delta c}{A \cdot \Delta t} = \rho \cdot H \cdot \frac{\Delta c}{\Delta t}$$

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(cm^2)、体积(cm^3)和气室高度(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。

利用 SPSS17.0 软件进行 ANOVA 统计分析,用 Person 相关性对环境变量与气体通量之间的关系进行分析,用 LSD 多重检验法检验土壤 pH、有效氮、CH_4、CO_2和 N_2O 排放量在不同林型间差异显著性,用成对 T 检验法分别森林类型对成对处理进行平均通量差异显著性检验,用 R 软件作图。

2　结果与分析

2.1　降水减少下 CH_4的吸收

生长季期间,3 种森林土壤均表现为 CH_4的汇。其中,常绿落叶阔叶混交林吸收通量为(-36.79±13.99) μg C m^{-2} h^{-1},显著大于马尾松林(-14.10±3.38) μg C m^{-2} h^{-1}和杉木林(-7.75±2.80) μg C m^{-2} h^{-1}($P<0.05$,表 2)。降水减半后,常绿落叶阔叶混交林和马尾松林样地 CH_4吸收通量减少,常绿落叶阔叶混交林吸收 CH_4的通量为(-34.42±5.91) μg C m^{-2} h^{-1},但差异不显著。马尾松林 CH_4吸收通量为(-13.64±4.56) μg C m^{-2} h^{-1},与降水未减半通量(-14.10±3.38) μg C m^{-2} h^{-1}差异不显著($R=0.545$,$P>0.05$)。而降水减半后杉木人工林 CH_4吸收通量显著增加,为(-20.12±5.68) μg C m^{-2} h^{-1},差异显著($R=0.089$,$P<0.05$)(表 3)。常绿落叶阔叶混交林和马尾松林 2 种森林模拟降水处理对土壤 CH_4吸收量的影响均不明显,差异不显著,而杉木林样地模拟降水处理对土壤 CH_4吸收量的影响达到极显著(图 1)。

表 2　温室气体通量 LSD 法多重比较结果

Table 2　Multiple comparisons of the greenhouse gas flux by LSD

通量 Flux	森林类型 Forest type	森林类型 Forest type	平均差 Mean Difference (I-J)	标准误 Std. Error	显著性 Sig.
CH_4	MF	PF	-22.682*	2.290	0.000
		CF	-29.033*	2.290	0.000
	PF	MF	22.682*	2.290	0.000
		CF	-6.351*	2.265	0.007
	CF	MF	29.033*	2.290	0.000
		PF	6.351*	2.265	0.007
CO_2	MF	PF	-35.769*	9.372	0.000
		CF	-9.559	9.371	0.312
	PF	MF	35.769*	9.371	0.000

续表

通量 Flux	森林类型 Forest type	森林类型 Forest type	平均差 Mean Difference (I-J)	标准误 Std. Error	显著性 Sig.
		CF	26.211*	9.267	0.006
	CF	MF	9.559	9.371	0.312
		PF	−26.211*	9.267	0.006
N_2O	MF	PF	7.236	3.775	0.060
		CF	2.950	3.775	0.437
	PF	MF	−7.236	3.775	0.060
		CF	−4.286	3.733	0.255
	CF	MF	−2.950	3.775	0.437
		PF	4.286	3.733	0.255

*:平均差在 0.05 水平下显著

表 3 不同降水处理下 3 种林型温室气体通量差异显著性检验

Table 3 The significance of difference of greenhouse gas flux of the three type of forest under the precipitation treatments

通量 Flux	森林类型 Forest type	对照 Comparison	降水减小 50% Precipitation decreases by 50%	R	T	P
CH_4	常绿落叶阔叶混交林 MF	−36.79±13.99	−34.42±5.91	0.676	−1.557	0.134
	马尾松林 PF	−14.10±3.38	−13.64±4.56	0.545	−0.168	0.868
	杉木林 CF	−7.75±2.80	−20.12±5.68	0.089	7.385	0.000
CO_2	常绿落叶阔叶混交林 MF	71.27±10.59	76.10±7.01	0.948	−2.142	0.044
	马尾松林 PF	107.03±12.11	80.94±8.42	0.874	6.707	0.000
	杉木林 CF	80.82±10.29	90.62±13.18	0.789	−2.401	0.025
N_2O	常绿落叶阔叶混交林 MF	8.88±6.75	6.12±2.22	0.855	2.270	0.034
	马尾松林 PF	1.64±1.02	1.26±0.85	0.297	1.065	0.298
	杉木林 CF	5.93±2.79	1.85±1.26	−0.013	1.011	0.323

2.2 降水减少下 CO_2的排放

生长季 3 种森林土壤均表现为 CO_2的排放源。马尾松和杉木 2 种人工林 CO_2的排放通量分别为(107.03±12.11) μg C m^{-2} h^{-1}和(80.82±10.29) μg C m^{-2} h^{-1},显著高于常绿落叶阔叶混交林的 CO_2排放通量(71.27±10.59) μg C m^{-2} h^{-1}(P <0.05,表 2)。降水处理对 3 种森林土壤 CO_2排放量影响均显著。降水减半后,常绿落叶阔叶混交林和杉木林 CO_2平均排放通量分别为(76.10±7.01) μg C m^{-2} h^{-1}和(90.62±13.18) μg C m^{-2} h^{-1},显著高于对照样地(71.27±10.59) μg C m^{-2} h^{-1},(80.82±10.29) μg C m^{-2} h^{-1}(R=0.948,P<0.05)。降水减半后,马尾松林 CO_2排放通量为(107.03±12.11) μg C m^{-2} h^{-1},显著小于自然状态的排放通量(80.94±8.42) μg C m^{-2} h^{-1}(R=0.874,P<0.05)(表 3)。

2.3 降水减少下 N_2O 的排放

生长季 3 种森林土壤均表现为 N_2O 的源,常绿落叶阔叶混交林 N_2O 排放通量为(8.88±6.75) μg N m^{-2} h^{-1},显著大于杉木人工林(5.93±2.79) μg N m^{-2} h^{-1}和马尾松人工林(1.64±1.02) μg N m^{-2} h^{-1}。常绿落叶阔叶混交林、马尾松林和杉木林样地的 N_2O 平均排放量之间差异均无显著(P>0.05)(表 2)。降水减半后,常绿落叶阔叶混交林、马尾松林和杉木林 CO_2平均排放通量分别为(6.12±2.22) μg N m^{-2} h^{-1},(1.26±0.85) μg N m^{-2} h^{-1}和(1.85±1.26) μg N m^{-2} h^{-1},低于对照样地(8.88±6.75) μg N m^{-2} h^{-1},(1.64±1.02) μg N m^{-2} h^{-1}和(5.93±2.79) μg N m^{-2} h^{-1}, 3 种森林样地 N_2O 排放通量随降水处理水平的降低均减少(图 1)。

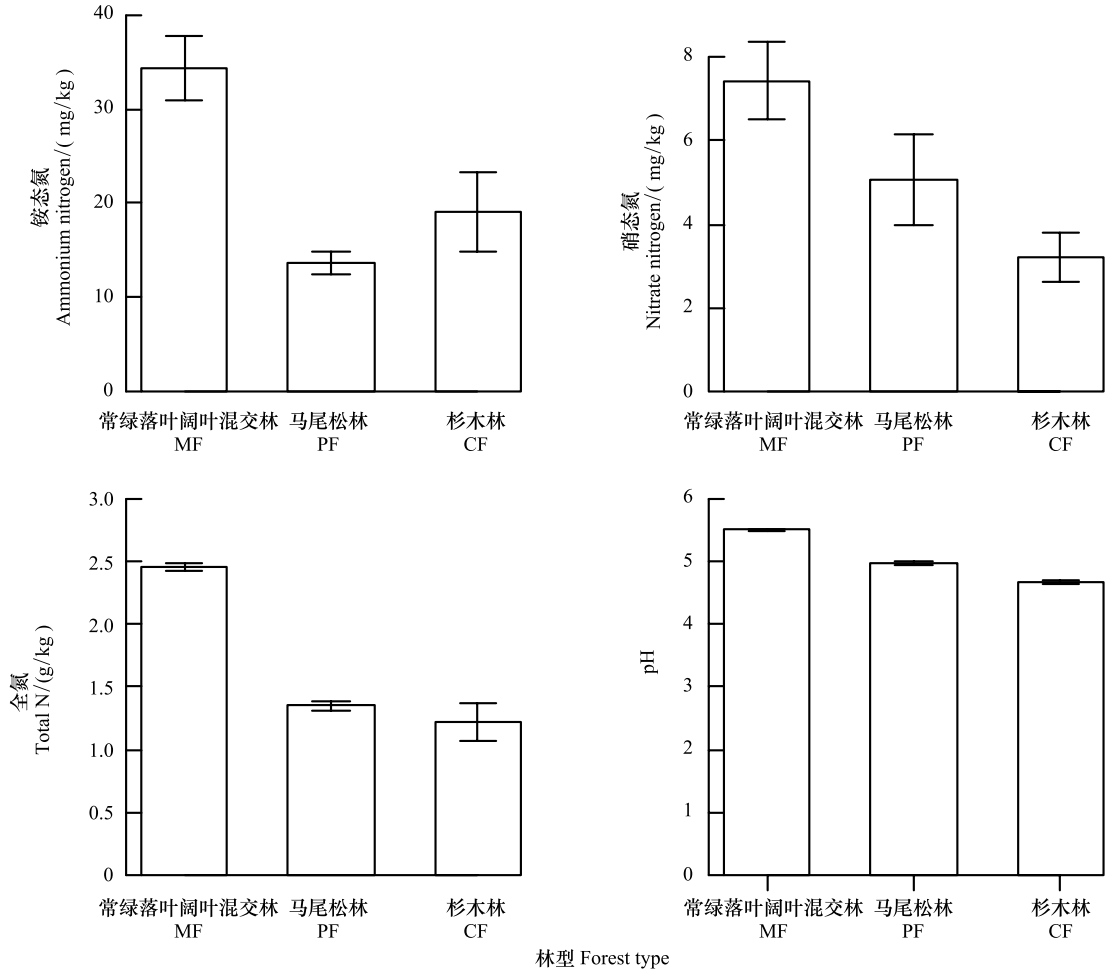


图 1　不同处理条件下 3 种林型温室气体通量变化特征

Fig.1　Greenhousu gas flux change features of the Mixed evergreen and deciduous broadleaved forest (MF), *Pinus massoniana* (PF), *Cunninghamia lanceolata* (CF) forest soil under the different processing conditions

3　讨论

3.1　CH_4排放及其对模拟降水减少的响应

本研究发现,常绿落叶阔叶混交林的 CH_4的吸收通量明显大于 2 种人工林的吸收通量。因为不同森林类型的建群树种不同,它们对资源的利用程度不同,以及 3 种森林土地利用类型的发育阶段不同,且环境因子对 CH_4消耗的影响程度不同,因而其 CH_4通量不同。常绿落叶阔叶混交林的土壤 CH_4吸收能力与土壤温度呈显著负相关,与空气温度和土壤湿度并无显著相关(表 4),马尾松和杉木人工林 CH_4吸收能力与空气温度、土壤温度和土壤湿度无显著相关($P \geq 0.01$)(表 4);已有研究表明土壤 CH_4氧化不仅受环境因子的影响,而且也与土壤 pH 等理化性质范围有关[20]。本研究发现,3 种不同森林之间土壤 CH_4排放通量大小顺序与土壤全氮含量和 pH 值的大小顺序基本一致,土壤全氮平均含量和 pH 值的大小变化顺序为:常绿落叶阔叶混交林>马尾松林>杉木林,其中常绿落叶阔叶混交林土壤全氮平均含量和 pH 值显著高于其余样地($P<0.05$),其余样地间的差异均不显著($P>0.05$)(图 2)。

此外,这种响应同样与土壤有效氮含量的大小响应基本一致。3 种森林类型有效氮(硝态氮+铵态氮)含量大小变化顺序为:常绿落叶阔叶混交林>杉木林>马尾松林(图 2)。其中,常绿落叶阔叶混交林的有效氮含量显著高于其余样地的有效氮含量($P<0.05$)(图 2)。周存宇等[21](2006)的研究发现,CH_4的吸收通量在鼎

湖山 3 种不同森林类型间的差异显著,阔叶林的土壤容重较小,土壤结构较为疏松,通气性较好,适合甲烷氧化菌的生长、代谢和繁殖。而刘惠等[22](2008)对华南丘陵的马尾松人工林和果园研究发现,2 种森林类型对地表 CH_4的影响较小。许多研究表明,阔叶林的 CH_4吸收通量大于针叶林通量[23]。本研究结果与大多数研究结果一致,可能是因为针叶林酸性土壤中的甲烷氧化菌数量远低于阔叶林土壤中甲烷氧化菌的数量[24],因而,阔叶林土壤的 CH_4通量大于两种人工林土壤 CH_4的通量。

表 4 气体通量与空气温度、土壤温度和土壤湿度的相关性

Table 4 The correlation between greenhouse gas flux and air temperature , soil temperature and soil moisture

通量 Flux	MAT	MST	MSM	PST	PAT	PSM	CST	CAT	CSM
CH_4	−0.413	−0.557**	0.151	−0.34	−0.299	0.526	0.247	0.254	−0.478
	0.056	0.007	0.503	0.113	0.166	0.01	0.257	0.242	0.021
CO_2	0.855**	0.847**	−0.652**	0.772**	0.837**	0.068	0.726**	0.815**	−0.255
	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.757	0.000	0.000	0.240
N_2O	0.423*	0.292	−0.25	0.534**	0.421*	0.056	0.042	−0.033	−0.084
	0.05	0.187	0.263	0.009	0.045	0.801	0.850	0.882	0.705

* 表示 $P<0.05$ 水平时相关性显著(双尾), ** 表示 $P<0.01$ 水平时相关性显著(双尾);MAT:常绿落叶阔叶混交林空气温度 Air tempreture of Mixed evergreen and deciduous broadleaved forest;MST:常绿落叶阔叶混交林土壤温度 Soil tempreture of Mixed evergreen and deciduous broadleaved forest;MSM:常绿落叶阔叶混交林土壤湿度 Soil moisture of Mixed evergreen and deciduous broadleaved forest;PST:马尾松林空气温度 Air temperature of *Pinus massoniana* forest;PAT:马尾松林土壤温度 Soil temperature of *Pinus massoniana* forest;PSM:马尾松林土壤湿度 Soil moisture of*Pinus massoniana* forest;CST:杉木林空气温度 Air temperature of Cunninghamia lanceolata;CAT:杉木林土壤温度 Soil temperature of Cunninghamia lanceolata;CSM:杉木林土壤湿度 Air moisture of Cunninghamia lanceolata

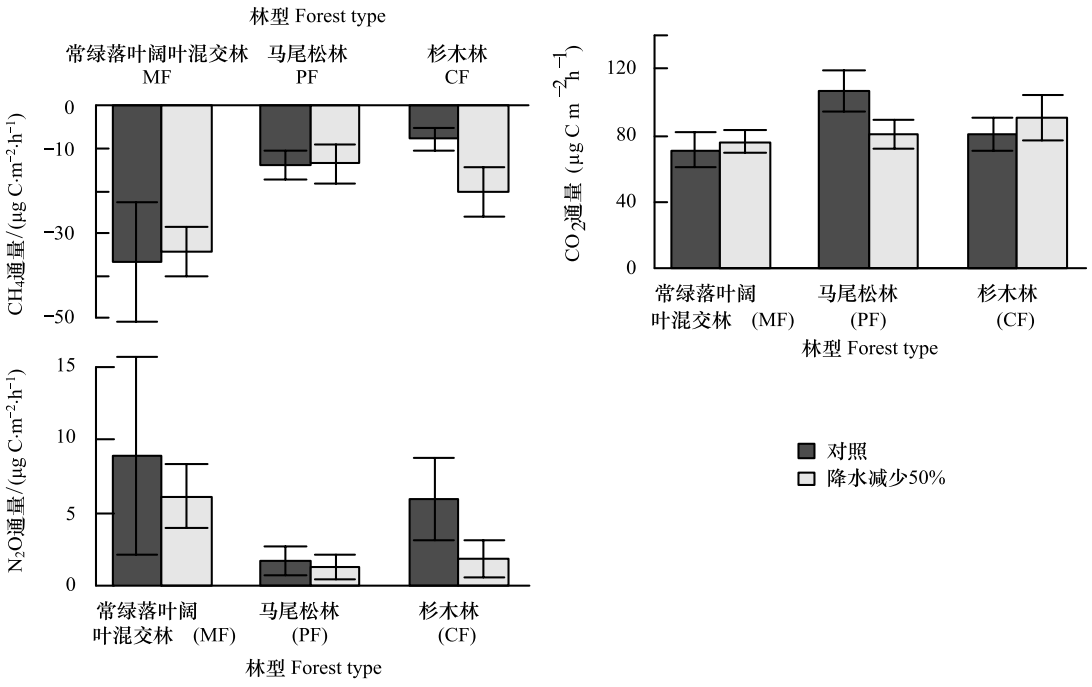


图 2 神农架常绿落叶阔叶混交林(MF)、马尾松林(PF)和杉木林(CF)土壤 pH 值、铵态氮含量、硝态氮含量、全氮含量的比较

Fig.2 Comparisons of soil pH values , ammonium nitrogen content ,nitrate nitrogen content and total nitrogen content of Mixed evergreen and deciduous broadleaved forest (MF) , *Pinus massoniana* (PF) , *Cunninghamia lanceolata* (CF) forest in shennongjia

本研究发现,降水减少后常绿落叶阔叶混交林和马尾松林 2 种森林土壤 CH_4吸收量变化不显著,而杉木林降水降水处理对其土壤 CH_4吸收影响极显著。究其原因,常绿落叶阔叶混交林的 CH_4的吸收能力跟土壤温

度显著相关,而与降雨量和空气温度等因子相关性不显著(表 2)。而马尾松和杉木 2 种人工林 CH_4的吸收能力不同,可能是因为杉木林土壤质地较干燥,具有良好的土壤空隙状况,氧气易于扩散到土壤中,促进土壤甲烷氧化微生物(如甲烷氧化菌)和甲烷氧化酶(如甲烷单加氧酶)的活性[25],增大了土壤吸收氧化大气 CH_4的能力。本研究中,6—11 月空气温度和土壤温度都较高,因而他们之间呈负相关性。齐玉春等[26]研究认为,降水后的一段时间内大气中的 CH_4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。有氧气或者氧化性物质存在时,催化还原小分子有机物形成甲烷的过程会受到影响,CH_4的产生过程受阻,而氧化过程增强。因此,甲烷的吸收通量会增加。但马尾松人工林的 CH_4吸收通量在降水减小后也可能为马尾松人工林底物可用性的作用强于降水的影响。

3.2　CO_2排放及其对模拟降水减少的响应

本研究结果进一步证明,土壤 CO_2排放存在森林类型和森林类型起源之间的差异。本研究中 3 种森林类型土壤 CO_2平均排放量分别为常绿落叶阔叶混交林 71.27±10.59 μg C m^{-2} h^{-1},马尾松林(107.03±12.11)μg C m^{-2} h^{-1},杉木林(80.82±10.29)μg C m^{-2} h^{-1},2 种人工林 CO_2排放通量显著高于常绿落叶阔叶混交林(近自然林)(图 1)。这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大小顺序基本相一致[27]。由于土壤 CO_2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[28],因此其各组分量和土壤的通气条件是土壤 CO_2排放的主要影响因素。本研究中 3 种林型土壤容重大小顺序为马尾松林(1.47±0.01)>杉木林(1.40±0.03)>常绿落叶阔叶混交林(1.30±0.04),与 3 种林型土壤 CO_2排放通量大小顺序基本一致(表 1)。森林 CO_2排放通量不仅跟森林起源、土壤理化性质有关还有受到环境因子的影响,常绿落叶阔叶混交林 CO_2通量与空气温度、土壤温度呈正相关及达到极显著($R=0.855, 0.847, P<0.01$),与土壤湿度呈负相关及达到极显著($R=-0.652, P<0.01$)(表 4);杉木林 CO_2通量与空气温度和土壤温度呈极显著正相关达到极显著($R=0.726, 0.815, P<0.01$),与土壤湿度呈负相关但不显著($R=-0.255, P=0.240$)(表 4);马尾松人工林 CO_2通量与空气温度和土壤温度呈极显著正相关($R=0.772, 0.837, P<0.01$),与土壤湿度呈正相关但不显著(表 4);说明从土壤表面释放的 CO_2主要来源于土壤中的生物学过程,包括土壤微生物呼吸、根呼吸和土壤动物呼吸。这些生物的呼吸强度在一定范围内都随降水减少,而土壤含水量相对的减少,从而改变土壤温度升高而土壤呼吸改变,因此地表 CO_2排放通量明显受降水量的制约。马尾松林明显不同与其他 2 个样地,随降水量的减少,马尾松人工林 CO_2排放量减少,原因为马尾松林平均土壤含水量明显小于其他 2 个类型(表 1)。

本研究中,两种人工林的 CO_2通量大于常绿落叶阔叶混交林,其可能原因为人工林正处在快速生长阶段,生态系统代谢旺盛,而常绿落叶阔叶混交林的林龄较大,植物的代谢较慢,因而其 CO_2通量较小[29]。史宝库等[30](2012)对小兴安岭 5 种森林类型土壤 CO_2通量研究发现,次生林和择伐林的 CO_2通量显著大于原始阔叶红松林。也有研究发现,阔叶林和针叶林土壤 CO_2通量之间没有显著差异[31]。Leckie 等[32]研究表明,针叶林凋落物中含有顽固性化合物,导致其分解速率较低,减缓了颗粒有机物的矿质化,针叶林土壤的 CO_2通量较小。

本研究发现常绿落叶阔叶混交林和杉木人工林,降水量减小均明显促进了 CO_2的排放通量,这与中国台湾云雾林中的研究结果一致[33]。主要原因为神农架地区常年较为湿润,降水减少促进了 CO_2的排放通量而降水减少,抑制了马尾松人工林 CO_2排放通量,这可能是马尾松人工林底物可用性的作用强于降水的影响。王义东等[34]认为,降水格局的变化改变了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,从而改变了土壤 CO_2的通量。降水对 CO_2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 CO_2的通量而抑制湿润土壤 CO_2的通量。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 CO_2排放通量[35]。但在湿润土壤中降水增加会抑制土壤 CO_2通量[36]。降水量的增加和减少导致不同生态系统中碳平衡的变化,例如,增加土壤湿度可以加快植物生长。但是,在有些生态系统中,这种碳储存量的增加被有机质的加速降解而抵消,但是他们对陆地碳储存量的净效应还是很难确

定的[37]。

3.3 N_2O 排放及其对模拟降水减少的响应

本研究发现,常绿落叶阔叶混交林土壤 N_2O 排放通量显著大于 2 种人工林,可能是因为本研究所选取的常绿落叶阔叶混交林为近自然林,常绿落叶阔叶混交林的凋落物数量和土壤含水量均高于两种人工林,有利与土壤 N_2O 的产生。郑靖等[38]通过研究认为,不同森林类型会导致土壤的各种物理性质和化学性质有所不同。不同地理位置,不同森林土地利用方式下的水热状况、地上植物的组成空间结构[39]、土壤的物理和化学性质以及土壤微生物的数量和活性都有所不同。刘惠等[22](2008)对华南丘陵人工林研究发现,马尾松人工林和果园这 2 种土地利用方式对地表 N_2O 的影响较为显著。土壤 N_2O 的排放主要是通过土壤硝化和反硝化过程产生[40],上述两个过程前者是好氧过程,后者是厌氧过程。因此直接影响 N_2O 生物化学过程的因子包括土壤的硝态氮含量、铵态氮含量、水分、温度、pH 值和 O_2 供给状况和反应底物的有效性等[41]。

本研究结果显示,生长季 3 种森林类型,降水量减小抑制了常绿落叶阔叶混交林、马尾松人工林和杉木人工林土壤 N_2O 的排放。抑制 3 种森林类型 N_2O 排放通量的原因可能为,不同森林类型土壤的物理化学性质,底物可用性等都有所不同。肖冬梅等[42](2004)对长白山落叶红松林研究发现,土壤 N_2O 通量和土壤温度呈显著的指数关系。而刘实等[43](2010)对 4 种温带森林的研究,没有发现 N_2O 通量和土壤温度间呈现显著关系。王颖[44]研究发现,蒙古栎林和硬阔叶林土壤的 N_2O 通量与 5cm 的土壤温度之间呈显著的相关性,而红松林和落叶松林的 N_2O 通量与土壤温度之间没有显著的相关性。孙向阳和徐化成[41]研究发现,N_2O 排放通量的大小主要取决于土壤湿度及测定前 5d 内降水总量。而杜睿等[45]研究发现,在内蒙古羊草草原,有效降水影响 N_2O 排放通量的季节和年际间变化。本研究中的 3 种森林类型处在不同的生长阶段,在常绿落叶阔叶混交林和马尾松人工林中,N_2O 的通量更多的受温度的影响,N_2O 通量与空气温度呈正相关及达到显著($R=0.423$,$P=0.05$),而杉木林与空气温度、土壤温度和土壤湿度相关性不显著。

另外,森林土壤氮素供应状况也可能主要原因之一。3 种不同森林土壤 N_2O 排放通量大小顺序与土壤全氮含量的大小顺序基本一致,土壤全氮平均含量的大小变化顺序为:常绿落叶阔叶混交林>马尾松林>杉木林。其中,常绿落叶阔叶混交林土壤全氮平均含量显著高于马尾松和杉木林($P<0.05$,图 2)。此外,这种响应同样与土壤有效氮含量的响应基本一致。在 3 种森林类型中,有效氮(硝态氮+铵态氮)含量大小变化顺序为:常绿落叶阔叶混交林>杉木林>马尾松林,其中常绿落叶阔叶混交林的有效氮含量显著高于其余样地的有效氮含量($P<0.05$,图 2)。实验室条件下,长白山阔叶红松林土壤 N_2O 排放通量与 pH 值(4.15—6.15)之间均呈现显著的正相关关系[46]。本研究中,森林类型土壤 pH 的大小变化顺序为:常绿落叶阔叶混交林>马尾松林>杉木林,3 种林型的差异不显著($P>0.05$,图 2)。可见,氮的供应状况也是本研究中森林土壤 N_2O 排放的主要限制因素之一。

参考文献(References):

[1] IPCC. 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change // Core Writing Team, Pachauri R K, Meyer L A, eds. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

[2] Shcherbak I, Millar N, Robertson G P. Global metaanalysis of the nonlinear response of soil nitrous oxide (N_2O) emissions to fertilizer nitrogen. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111(25): 9199-9204.

[3] Smith K R, Desai M A, Rogers J V, Houghton R A. Joint CO_2 and CH_4 accountability for global warming. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(31): E2865-E2874.

[4] Pan Y D, Birdsey R A, Fang J Y, Houghton R, Kauppi P E, Kurz W A, Phillips O L, Shvidenko A, Lewis S L, Canadell J G, Ciais P, Jackson R B, Pacala S W, McGuire A D, Piao S L, Rautiainen A, Sitch S, Hayes D. A large and persistent carbon sink in the world's forests. Science, 2011, 333(6045): 988-993.

[5] Miles L, Kapos V. Reducing greenhouse gas emissions from deforestation and forest degradation: Global land-use implications. Science, 2008, 320(5882): 1454-1455.

[6] Liu B H, Xu M, Henderson M, Qi Y. Observed trends of precipitation amount, frequency, and intensity in China, 1960-2000. Journal of

Geophysical Research: Atmospheres, 2005, 110(D8): 1984-2012.

[7] 《第二次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第二次气候变化国家评估报告. 北京: 科学出版社, 2011.

[8] Fay P A, Carlisle J D, Knapp A K, Blair J M, Collins S L. Altering rainfall timing and quantity in a mesic grassland ecosystem: design and performance of rainfall manipulation shelters. Ecosystems, 2000, 3(3): 308-319.

[9] Knapp A K, Fay P A, Blair J M, Collins S L, Smith M D, Carlisle J D, Harper C W, Danner B T, Lett M S, McCarron J K. Rainfall variability, carbon cycling, and plant species diversity in a mesic grassland. Science, 2002, 298(5601): 2202-2205.

[10] Harper C W, Blair J M, Fay P A, Knapp A K, Carlisle J D. Increased rainfall variability and reduced rainfall amount decreases soil CO_2 flux in a grassland ecosystem. Global Change Biology, 2005, 11(2): 322-334.

[11] 吴茜, 丁佳, 闫慧, 张守仁, 方腾, 马克平. 模拟降水变化和土壤施氮对浙江古田山 5 个树种幼苗生长和生物量的影响. 植物生态学报, 2011, 35(3): 256-267.

[12] Davidson E A, Nepstad D C, Ishida F Y, Brando P M. Effects of an experimental drought and recovery on soil emissions of carbon dioxide, methane, nitrous oxide, and nitric oxide in a moist tropical forest. Global Change Biology, 2008, 14(11): 2582-2590.

[13] Borken W, Brumme R, Xu Y J. Effects of prolonged soil drought on CH_4 oxidation in a temperate spruce forest. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2000, 105(D6): 7079-7088.

[14] 李伟, 白娥, 李善龙, 孙建飞, 彭勃, 姜萍. 施氮和降水格局改变对土壤 CH_4和 CO_2通量的影响. 生态学杂志, 2013, 32(8): 1947-1958.

[15] Castro M S, Melillo J M, Steudler P A, et al. Soil moisture as a predictor of methane uptake by temperate forest soils. Canadian Journal of Forest Research, 1994, 24(9): 1805-1810.

[16] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 阎志丹. 水分对土壤呼吸的影响及机理. 生态学报, 2003, 23(5): 972-978.

[17] 罗璐, 申国珍, 谢宗强, 周利光. 神农架海拔梯度上 4 种典型森林的土壤呼吸组分及其对温度的敏感性. 植物生态学报, 2011, 35(7): 722-730.

[18] Zhao C M, Chen W L, Tian Z Q, Xie Z Q. Altitudinal pattern of plant species diversity in Shennongjia mountains, central China. Journal of Integrative Plant Biology, 2005, 47(12): 1431-1449.

[19] 沈泽昊, 胡会峰, 周宇, 方精云. 神农架南坡植物群落多样性的海拔梯度格局. 生物多样性, 2004, 12(1): 99-107.

[20] Whittenbury R, Phillips K C, Wilkinson J F. Enrichment, isolation and some properties of methane-utilizing bacteria. Journal of General Microbiology, 1970, 61(2): 205-218.

[21] 周存宇, 周国逸, 王迎红, 张德强, 刘世忠. 鼎湖山主要森林生态系统地表 CH_4通量. 生态科学, 2006, 25(4): 289-293.

[22] 刘惠, 赵平, 林永标, 饶兴权. 华南丘陵区 2 种土地利用方式下地表 CH_4和 N_2O 通量研究. 热带亚热带植物学报, 2008, 16(4): 304-314.

[23] Steudler P A, Bowden R D, Melillo J M, Aber J D. Influence of nitrogen fertilization on methane uptake in temperate forest soils. Nature, 1989, 341(6240): 314-316.

[24] Heyer J. Results of enrichment experiments of methane-assimilating organisms from an exological point of view //Skryabin G K, Ivanov M V, Kondratjeva E N, Zavarzin G A, Yu, Trotsenko A, Nesterov A I eds. Microbial Growth on CI-Compounds. Puschino: USSR Academic Science, 1977: 19-21

[25] 梁巍, 张颖, 岳进, 吴劼, 史奕, 黄国宏. 长效氮肥施用对黑土水旱田 CH_4和 N_2O 排放的影响. 生态学杂志, 2004, 23(3): 44-48.

[26] 齐玉春, 董云社, 耿元波, 杨小红, 刘立新, 李明峰, 刘杏认. 内蒙古羊草草原不同物候期 CH_4通量日变化特征与日通量比较. 地理研究, 2004, 23(6): 785-794.

[27] 莫江明, 方运霆, 徐国良, 李德军, 薛璟花. 鼎湖山苗圃和主要森林土壤 CO_2排放和 CH_4吸收对模拟 N 沉降的短期响应. 生态学报, 2005, 25(4): 682-690.

[28] Steudler P A, Melillo J M, Bowden R D, Castro M S, Lugo A E. The effects of natural and human disturbances on soil nitrogen dynamics and trace gas fluxes in a Puerto Rican wet forest. Biotropica, 2015, 23(4): 356-363.

[29] Saiz G, Byrne K A, Butterbach-Bahl K, Kiese R, Blujdea V, Farrell E P. Stand age-related effects on soil respiration in a first rotation sitka spruce chronosequence in central ireland. Global Change Biology, 2006, 12(6): 1007-1020.

[30] 史宝库, 金光泽, 汪兆洋. 小兴安岭 5 种林型土壤呼吸时空变异. 生态学报, 2012, 32(17): 5416-5428.

[31] Hibbard K A, Law B E, Reichstein M, Sulzman J. An analysis of soil respiration across northern hemisphere temperate ecosystems. Biogeochemistry, 2005, 73(1): 29-70.

[32] Leckie S E, Prescott C E, Grayston S J. Forest floor microbial community response to tree species and fertilization of regenerating coniferous forests. Canadian Journal of Forest Research, 2004, 34(7): 1426-1435.

[33] Chang S C, Tseng K H, Hsia Y J, Wang C P, Wu J T. Soil respiration in a subtropical montane cloud forest in Taiwan. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148(5): 788-798.

[34] 王义东, 王辉民, 马泽清, 李庆康, 施蕾蕾, 徐飞. 土壤呼吸对降雨响应的研究进展. 植物生态学报, 2010, 34(5): 601-610.

[35] Norton U, Mosier A R, Morgan J A, Derner J D, Ingram L J, Stahl P D. Moisture pulses, trace gas emissions and soil C and N in cheatgrass and native grass-dominated sagebrush-steppe in wyoming, USA. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(6): 1421-1431.

[36] 金冠一, 赵秀海, 康峰峰, 汪金松. 太岳山油松人工林土壤呼吸对强降雨的响应. 生态学报, 2013, 33(6): 1832-1841.

[37] 李博, 赵斌, 彭容豪. 陆地生态系统生态学原理. 北京: 高等教育出版社, 2005.

[38] 郑靖, 王重阳, 王迎红, 鲁彩艳, 史奕, 陈欣. 下辽河平原典型农田融化期氧化亚氮和甲烷排放通量研究. 生态学杂志, 2005, 24(9): 999-1003.

[39] Ingwersen J, Butterbach-Bahl K, Gasche R, Papen H, Richter O. Barometric process separation: New method for quantifying nitrification, denitrification, and nitrous oxide sources in soils. Soil Science Society of America Journal, 1999, 63(1): 117-128.

[40] 莫江明, 方运霆, 林而达, 李玉娥. 鼎湖山主要森林土壤 N_2O 排放及其对模拟 N 沉降的响应. 植物生态学报, 2006, 30(6): 901-910.

[41] 孙向阳, 徐化成. 北京低山区两种人工林土壤中 N_2O 排放通量的研究. 林业科学, 2001, 37(5): 57-63.

[42] 肖冬梅, 王森, 姬兰柱, 韩士杰, 王跃思. 长白山阔叶红松林土壤 N_2O 排放通量的变化特征. 生态学杂志, 2004, 23(5): 46-52.

[43] 刘实, 王传宽, 许飞. 4 种温带森林非生长季土壤二氧化碳、甲烷和氧化亚氮通量. 生态学报, 2010, 30(15): 4075-4084.

[44] 王颖, 王传宽, 傅民杰, 刘实, 王兴昌. 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, 2009, 20(5): 1007-1012.

[45] 杜睿, 黄建辉, 万小伟, 贾月慧. 北京地区暖温带森林土壤温室气体排放规律. 环境科学, 2004, 25(2): 12-16.

[46] 张秀君, 徐慧, 陈冠雄. 影响森林土壤 N_2O 排放和 CH_4 吸收的主要因素. 环境科学, 2002, 23(5): 10-12.