

程 功, 刘廷玺, 王冠丽, 等. 降雨和凋落物对人工杨树林土壤温室气体通量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(6): 1398–1407.

CHENG Gong, LIU Ting-xi, WANG Guan-li, et al. Effects of rainfall and litter on soil greenhouse gas fluxes in artificial poplar forest[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(6): 1398–1407.

降雨和凋落物对人工杨树林土壤温室气体通量的影响

程 功¹, 刘廷玺^{1,2*}, 王冠丽^{1,2}, 段利民^{1,2}, 李东方^{1,2}

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018; 2. 内蒙古自治区水资源保护与利用重点实验室, 呼和浩特 010018)

摘 要:本研究以科尔沁沙丘-草甸梯级生态系统中人工杨树林为研究对象, 于2017年5—10月采用静态箱-气相色谱法, 对CO₂、CH₄和N₂O进行了原位观测, 探究降雨和凋落物对森林生态系统土壤温室气体通量的影响, 实验共设3个处理: “I-去除凋落物”、“II-维持原状”和“III-加倍凋落物”。结果表明: 土壤状态较干燥的5月23日及7月20日雨后CH₄吸收值在短时间内均有所增加, 土壤温度较高的7月20日雨后CH₄吸收值增长率远大于土壤温度较低的5月23日, 土壤状态较湿润的8月4日雨后CH₄吸收值呈明显降低趋势; 降雨前后CH₄通量均表现为吸收, 且其吸收强度表现为: 处理I > 处理II > 处理III。生长季N₂O排放与CH₄吸收之间呈现显著的线性负相关关系($P < 0.05$)。I、II、III处理后生长季CO₂通量平均值分别为243.47、357.14、406.36 mg·m⁻²·h⁻¹, 去除凋落物使土壤CO₂通量显著降低30.81%, 加倍凋落物则使CO₂通量显著提高13.78%, 去除凋落物处理对土壤CO₂通量的降低幅度远大于加倍凋落物对土壤CO₂通量的提高幅度; 生长季土壤CO₂的温度敏感性(Q_{10})表现为: 处理I (1.070) > 处理II (1.046) > 处理III (1.011), 不同凋落物处理下林地土壤CO₂通量对土壤温度响应的差异不显著。

关键词: CO₂; 凋落物; 降雨; CH₄; 温度敏感性; 温室气体

中图分类号: X511 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2019)06-1398-10 doi:10.11654/jaes.2018-1252

Effects of rainfall and litter on soil greenhouse gas fluxes in artificial poplar forest

CHENG Gong¹, LIU Ting-xi^{1,2*}, WANG Guan-li^{1,2}, DUAN Li-min^{1,2}, LI Dong-fang^{1,2}

(1. Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Inner Mongolia Water Resource Protection and Utilization Key Laboratory, Hohhot 010018, China)

Abstract: The paper was based on the artificial poplar forests in the Horqin sand dune-meadow cascade ecosystem. In the period from May to October in 2017, the author used static chamber-GC (a chromatographic analyzer using gas as a mobile phase, and the type is Agilent 7890B) technique to conduct in situ observation on the greenhouse gas fluxes including CO₂, CH₄ and N₂O. To explore the effects of rainfall and litter on the greenhouse gas fluxes in forest ecosystem, the experiments were divided into three phases: I - no litter, II - control check and III - double litter. The results showed that the CH₄ absorption increased in a short period of time after rainfall on May 23 and July 20, and the growth rate on July 20 was much higher than that on May 23 on account of the higher soil temperature. On August 4th, the CH₄ absorption significantly decreased when the soil moisture was higher after rainfall. The CH₄ flux showed absorption before and after rainfall,

收稿日期: 2018-10-07 录用日期: 2018-12-21

作者简介: 程 功 (1993—), 男, 黑龙江大庆人, 硕士研究生, 研究方向为温室气体通量。E-mail: 18645979803@163.com

*通信作者: 刘廷玺 E-mail: txliu1966@163.com

基金项目: 国家自然科学基金重点国际合作、重点与地区项目 (51620105003, 51139002, 51669017, 51769020); 教育部科技创新团队滚动发展计划项目 (IRT_17R60); 科技部重点领域创新团队项目 (2015RA4013); 内蒙古自治区草原英才创新创业人才团队、内蒙古农业大学寒旱区水资源利用创新团队项目 (NDTD2010-6)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (51620105003, 51139002, 51669017, 51769020); The Ministry of Education Innovative Research Team (IRT_17R60); The Ministry of Science and Technology Innovative Research Team in Priority Areas (2015RA4013); The IMAU Innovative Research Team (NDTD2010-6)

and the absorption intensity demonstrated: “I - no litter” > “II - control check” > “III - double litter”. There was a distinctly negative linear correlation between N_2O emission and CH_4 absorption in the growing season ($P < 0.05$). The average CO_2 fluxes in the growing season showed: “I - no litter”: $243.47 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, “II - control check”: $357.14 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, and “III - double litter”: $406.36 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. The soil CO_2 flux of the “no-litter” set decreased 30.81%, while the soil CO_2 flux of the “double-litter” set increased 13.78%, which can be inferred that the decreasing range of soil CO_2 flux caused by litter removal was much greater than the increasing range of soil CO_2 flux caused by double litter; the temperature coefficient (Q_{10}) of soil greenhouse gases during the growing season presented: “I - no litter” (1.070) > “II - control check” (1.046) > “III - double litter” (1.011). The impacts of soil CO_2 fluxes had to soil temperature under different circumstances of litter treatments were not significantly uneven.

Keywords: CO_2 ; litter; rainfall; CH_4 ; temperature sensitivity; greenhouse gas

温室气体不断增加所导致的全球变暖可能会引起海平面上升、飓风、病虫害等问题,严重威胁人类的生存和发展^[1]。森林储存了全球植被碳库的86%以上,其中森林土壤碳库约为全球土壤碳库的73%^[2],森林作为陆地生态系统的主体,其土气界面的温室气体交换是全球碳氮循环的重要组成部分^[3],其土壤温室气体通量任何微小的变化都会对全球碳氮平衡产生显著影响^[4]。

全球温室气体浓度的增加通过增加森林净初级生产力(NPP)导致森林中凋落物数量的增大^[5],凋落物会通过改变土壤温室气体通量从而影响森林生态系统的碳、氮储量^[6]。林地土壤中微生物的数量和活性、植物养分的供应以及水热条件很大程度上受到枯枝落叶的数量、成分以及分解速率的影响,因此凋落物在一定程度上影响土壤温室气体的交换^[7]。凋落物对土壤温室气体的影响也因植被环境、观测周期和季节性温湿度的变化而有所不同^[8-9]。研究表明在云杉林、油松人工林、杉木人工林等树种所构成的林地中,凋落物会促进 CO_2 及 N_2O 的排放并抑制 CH_4 吸收^[10-14]。降雨是自然状态下森林土壤水分的主要来源,降雨通过短时间内改变土壤水分状态,影响土壤有机质分解速率^[15]、微生物活性^[16]、甲烷菌生长环境^[17]、土壤好氧状态(转变为厌氧状态)^[18],直接或间接地影响温室气体的吸收或排放。一般情况下,降雨会导致 CO_2 和 N_2O 排放量的增加及 CH_4 吸收值的增大^[19]。但也有研究显示,一定程度上的降雨会使 CO_2 和 N_2O 溶解于土壤孔隙水从而降低雨后 CO_2 和 N_2O 的通量^[20-21]。干旱半干旱地区约占全球陆地面积的40%以上^[22],其土壤的温室气体交换也是干旱半干旱地区土壤碳氮损失的主要过程之一。土壤温室气体通量的交换是一个复杂的生物化学过程,会受到诸多环境及生物因素的影响^[23],其中土壤水分含量对温室气体通量的影响较为显著^[22],而干旱半干旱地区土壤

水分含量常年较低,因此研究降雨及凋落物对干旱半干旱地区森林土壤温室气体通量的影响十分重要。

杨树是常见的人工林地树种之一,科尔沁地区沙丘分布广泛,当地牧民为改善沙化土壤数十年来不断人为栽种杨树,周遭环境有所改善,沙丘边界向沙丘内部萎缩。科尔沁地区生长季降水分布不均,秋冬季节树林中凋落物较多,当地牧民并未对凋落物焚烧或掩埋处理,自然状态下的凋落物和集中降雨对温室气体的排放具有较大影响。因此本文以科尔沁沙丘-草甸相间地区人工杨树林为研究对象,研究不同程度降雨和改变凋落物数量对温室气体通量的影响及其动态变化,探讨干旱半干旱地区人工林地土壤温室气体吸收或排放的规律及环境因子对温室气体通量的影响,为干旱半干旱地区人工林地温室气体通量源汇规律研究和碳氮循环过程提供数据支持和理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区通辽市科尔沁左翼后旗阿古拉镇($122^\circ 39' 18'' \text{E}$, $39^\circ 18' 01'' \text{N}$),地处科尔沁沙地东南。该区多年平均降雨量389 mm,主要集中在6—9月;多年平均水面蒸发量($\Phi 20 \text{ cm}$ 蒸发皿)1412 mm,主要集中在4—9月;多年平均相对湿度55.8%;多年平均气温6.6℃,年极端最低气温-33.9℃,年极端最高气温36.2℃;年平均风速3~4 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。植物生长主要依赖天然降雨。区内沙丘地带性土壤和非地带性土壤广泛发育,交错分布,主要土壤类型为砂土、砂壤土和壤砂土。研究区地理位置见图1。

本文选择人工杨树林作为研究对象,杨树林内主要生长人工种植杨树,树种为小叶杨与黑杨杂交(*Populus simonii* × *P. nigra*),对试验区内选定的调查样方抽样调查显示,人工杨树林树龄介于25~30年,平均为28年,平均树高为11.9 m,平均胸径为11.2 cm,

树的株距与行距变化在2~3 m不等间距。树林在生长季郁闭度为2级,即树冠闭合程度(%)为[40, 70)。人工杨树林内广泛分布低矮乔木与草本植物,乔木主要有构树 [*Broussonetia papyrifera* (Linn.) L' Hér. ex Vent.]、稠李 (*Prunus padus* L.) 等;草本主要有水蒿 (*Artemisia selengensis* Turcz. ex Bess.)、角蒿 (*Incarvillea sinensis* Lamarck)、小飞蓬 [*Conyza canadensis* (L.) Cronq.] 等;盖度约23%,凋落物厚度1.1~2.0 cm,平均1.5 cm,现存量为 $647.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,其中 $498 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 为未分解,腐殖质层平均厚度约5 cm,平均土壤有机质含量 $3.06 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置、样品采集和测定

分别在人工林地实验区内随机选取3个取样点,取样点处放置3个相邻的底箱并分别在底箱内做“Ⅰ—去除凋落物处理:去除取样点样方内全部地表凋落物”“Ⅱ—维持原状无处理:维持原状不做任何处理”和“Ⅲ—加倍凋落物处理:收集远处凋落物并均匀撒在取样点样方内”3种处理,3种处理取气前1 d均齐根剪断箱内活植物体,以减小对土壤层的扰动。

2017年5—10月每7 d左右选取晴好天气的9:00—

11:00时段,在所设立的取样点同时进行温室气体通量(CO_2 、 CH_4 、 N_2O)的原位观测。采用静态箱—气相色谱法,静态箱由厚2.0 mm的非透明PVC板制成,静态箱规格为 $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$,包括顶箱和基座两部分。基座边缘设有水槽,每次观测前在水槽中加入适量的水,后将顶箱置于基座上,上下箱体用水槽中的水密封。在实验开始一周前将静态箱基座插入土壤中,并在整个生长季实验中不取出或挪动基座,尽量不破坏原有植物及土壤状态,尽可能将人为因素对微量气体交换的扰动降到最低,基座埋入深度在5 cm以上(实际计算通量时以地箱高度为准)。静态箱经由传统静态箱改造而成,内设小风扇,能够让箱内气体快速有效混合,采样前先罩上顶箱静置1 min使气体充分混合;在箱内设置温度计,可以实时观测箱内气体温度。采用30 min罩箱时间,即每个采样箱分别罩箱后的0、10、20 min和30 min抽取气体样品。采样容器为100 mL带三通阀的医用注射器,将注射器与箱体一侧的三通阀相连,抽取30~60 mL气体样品放入气袋,同时使用秒表记录取样时间和箱内温度。气样带回实验室后,一周之内使用安捷伦7890B气相色谱仪测定 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 浓度。

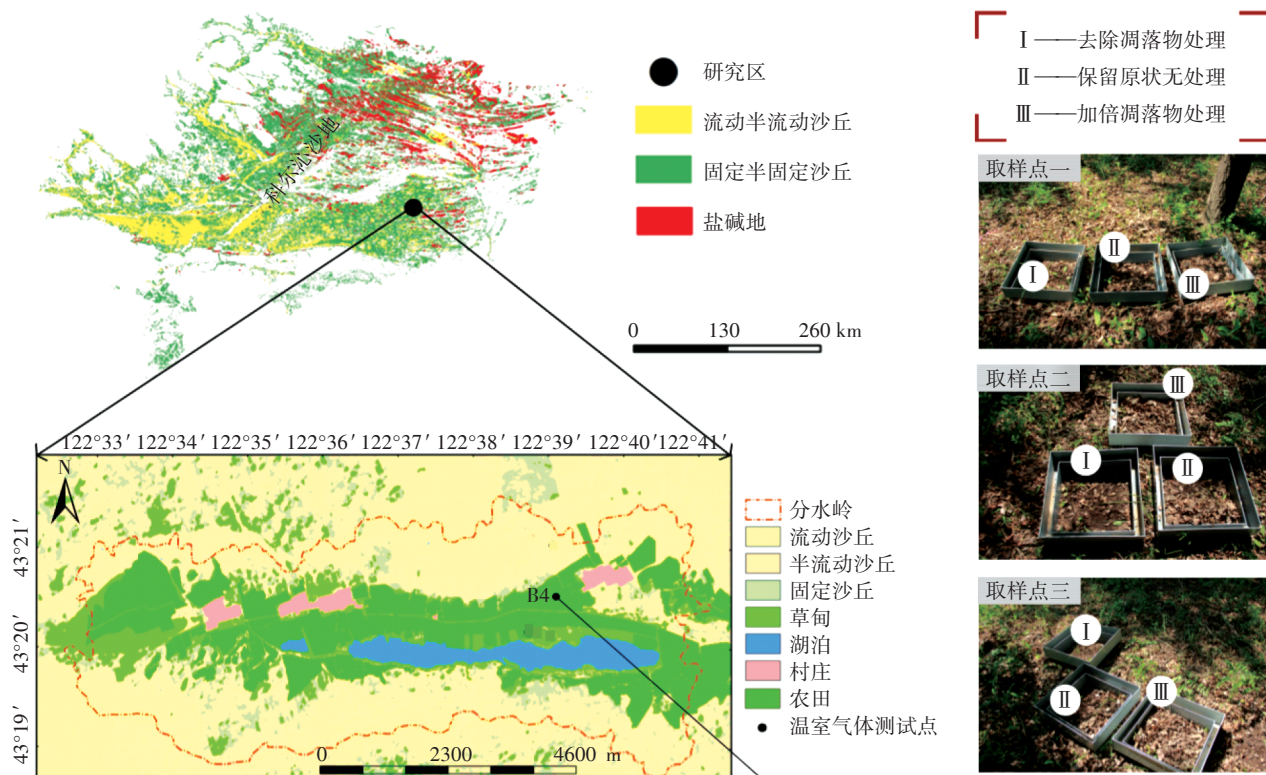


图1 研究区地理位置与试验点布设

Figure 1 Geographic position and distribution of soil-respiration sampling sites in the research area

1.2.2 土壤温度和含水量

气温和降雨量等气象要素通过试验点附近布设的波文比-土壤环境监测系统全天候 24 h 自动采集,气温由距地面 2 m 高处的传感器(HMP45C, Vaisala, Helsinki, Finland)测量,降雨量通过距地面 0.7 m 高处无冠层遮挡的自记雨量计(TE525MM, Texas Electronics, Dallas, USA)测量,土壤温度、土壤水分通过分层位(10、20 cm 等)埋在土壤中的探头(Hydra Probe II, Stevens, USA)测量,以上数据通过数据采集器(CR1000, Campbell, Logan, USA)每 10 min 在线采集一次,计算平均值,自动存储。由于气象站数据并不能完全辐射所有样方,因此同时在使用 JM624 手持温度计记录 10、20 cm 处土壤温度并使用铝盒法测量不同取样点的表层土壤水分含量(0~40 cm 分层位测量,即分别测量 10、20、30、40 cm 处土壤水分含量)。

1.2.3 气体通量的计算

通量是指单位时间通过某单位面积输送的物理量。气体交换通量(F)计算公式:

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

式中: ρ 为箱内气体密度; Δm 、 Δc 分别为 t 时间内箱内气体质量和混合比浓度的变化; A 、 V 、 H 分别为采样箱的底面积、体积和气室高度。当 F 为负值时表示吸收, F 为正值时表示排放。

建立土壤温室气体通量与土壤平均温度(T_s)的关系:

$$F = ae^{bT_s}$$

式中: a 、 b 为待定系数。土壤温室气体温度敏感性

(Q_{10})计算公式为:

$$Q_{10} = e^{10b}$$

1.2.4 数据分析

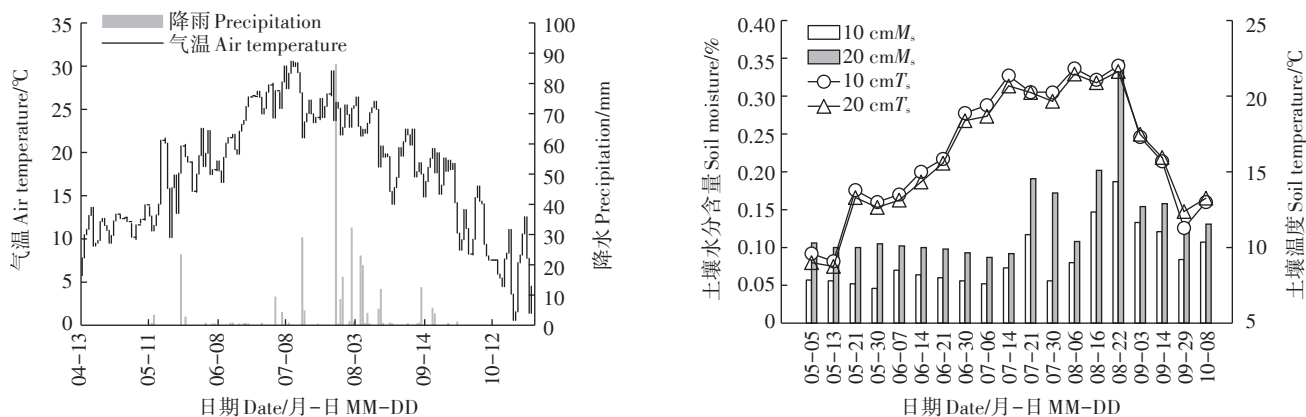
利用 Office Excel 2013 和 Spss 19.0 对原始数据进行整理分析,采用重复测量方差(Repeated-measures ANOVA)检验降雨后不同凋落物处理之间的差异性,运用线性回归分析温室气体通量与土壤温湿度之间的相关性,使用单因素方差分析(One-way ANOVA)计算不同凋落物处理之间的差异性。图中数据均为平均值±标准误差。

2 结果与讨论

2.1 气温、降雨及土壤水热变化

与其他年份相比,2017 年是一个降雨分布不均且相对干旱的年份。2017 年 4—10 月科尔沁地区自然降雨 23 次,累计降雨量 319.8 mm,其中小雨 16 次,中雨 6 次,大雨、暴雨各 1 次。全年降雨主要集中在 8 月上旬,8 月 4—15 日累计降雨共 212.1 mm,占整个生长季降雨的 66.3%。2017 年年平均气温 6.9 °C,在 7 月 18 日达到最高温度 30.41 °C,随后逐渐降低(图 2)。

人工林地土壤温度(T_s)与气温整体趋势相近,高温均出现在 7、8 月份。土壤水分含量(M_s)变化主要依赖于降雨,从图 2 可以看出 7 月 20 日和 8 月上中旬连续降雨后土壤水分含量出现明显增加,其中 8 月上中旬的连续大量降雨使 8 月 22 日附近出现人工林地在全年土壤水分含量的最大值。从图中可以看出 20 cm 的土壤水分含量较于 10 cm 土壤水分含量受到降雨影响更大,且具有一定的滞后性。



M_s 为土壤水分含量, T_s 为土壤温度。下同

M_s means soil moisture, T_s means soil temperature. The same below

图2 人工林地试验区2017年植物生长季气温、降雨变化和土壤温湿度变化

Figure 2 Changes in air temperature, rainfall, soil temperature and moisture of artificial forest trial during the growing season in 2017

2.2 降雨及土壤因素对温室气体的影响

降雨主要通过改变土壤水分含量的方式间接地影响温室气体通量^[15],同时也会改变微生物分解速率从而影响土壤中的碳、氮含量^[24]。本文主要选取中雨、大雨和暴雨等对生长季温室气体通量影响较大的降雨进行研究,其中主要选取5月23日(中雨,累计降雨23.5 mm)、7月20日(大雨,累计降雨29.1 mm)和8月4日(8月4日暴雨,累计降雨86.5 mm;8月7日夜间至次日凌晨累计降雨24.8 mm)3次对整个生长季温室气体通量影响较大的降雨前1 d至降雨后5 d(前后共7 d)的温室气体通量及土壤水分含量变化。

雨后CO₂通量均表现出先增大后降低的趋势(图3a1、图3b1、图3c1),5月23日与8月4日降雨后5 d的CO₂通量均比雨前晴天大,8月7日晚至8日凌晨再次出现降雨,使得土壤水分含量再次增大,因此8月8日CO₂通量出现了二次增长。7月20日降雨后CO₂通量也出现了短时间内的增大,但由于人工林地土壤水分含量在雨后迅速降低,雨后的CO₂通量随之呈现明显的减小趋势。本研究区处于干旱半干旱地区,年平均土壤水分含量低于10%,在土壤受到水分胁迫的条件下,土壤CO₂通量的波动主要取决于土壤水分含量的变化^[25],5月23日和7月20日土壤较干旱的状态下降雨后CO₂通量的增长率明显高于8月4日(表1),表明土壤较干旱的情况下CO₂通量受到土壤水分的影响更显著^[26]。降雨前后CO₂通量均表现为排放,且处理I<处理II<处理III。

5月23日及7月20日土壤较干旱状态下的CH₄吸收值在降雨后短时间内均有不同程度上的增加,8月4日土壤较湿润状态下降雨后CH₄吸收值则明显降低(图3a2、图3b2、图3c2),其原因在于短期内土壤水

分含量的迅速增加会刺激土壤中甲烷氧化菌短时间内的活性,导致CH₄吸收值出现增大趋势^[27-28],但一段时间内土壤水分含量的增大会导致土壤中氧气含量减小,同时促进CH₄的产生,抑制甲烷氧化菌活性,从而降低CH₄的吸收强度^[27]。温度也是影响CH₄吸收值增大的因素之一,但在土壤较干旱地区温室气体通量对土壤温度的响应受到土壤水分含量的限制^[29],因此土壤温度较高的7月20日降雨后CH₄吸收值的增长率远大于5月23日(表2)。降雨前后CH₄通量均表现为吸收,且其吸收强度表现为:处理I>处理II>处理III。

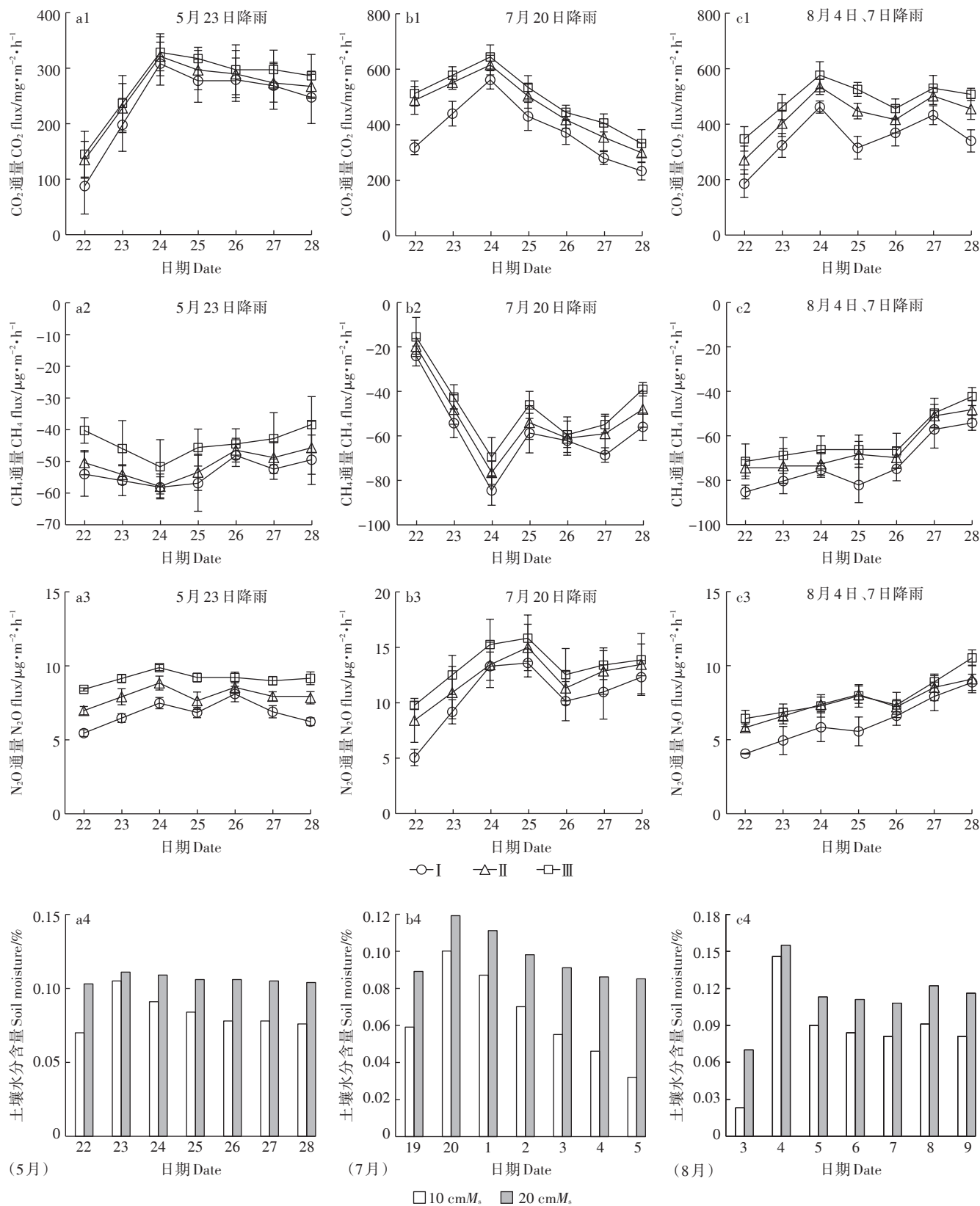
雨后N₂O通量均在短时间内呈现明显的增大趋势(图3a3、图3b3、图3c3),其主要原因是降雨导致的土壤水分含量的增大将土壤从好氧变为厌氧环境^[27],从而促进N₂O通量的增大。温度是N₂O通量变异的主要原因之一^[29],因此N₂O通量在温度较高的7月20日降雨后的增长率远高于温度较低的5月23日(表2)。也有研究表明降雨会通过改变光合作用强度和光照条件来抑制CO₂和N₂O的排放^[30],但本研究区人工林地生长的杨树较为茂盛,除杨树本身外,其余伴生的草本及低矮乔木受到光照较少,因此与上述研究发现的规律不同。降雨前后N₂O通量均表现为排放,且处理I<处理II<处理III。

土壤温度和土壤水分含量共同作用促进了温室气体吸收或排放的增大^[31],但在受到水分胁迫的干旱半干旱地区,温室气体通量对土壤温度的响应高度依赖于土壤水分含量的变化^[32-33]。将生长季温室气体通量的月变化与土壤因素进行相关分析,其结果表明:CO₂通量与土壤温度、土壤水分含量之间均呈极显著正相关;CH₄通量与10、20 cm处土壤水分含量、

表1 雨后1、3、5 d内温室气体通量平均值的增长率(%)

Table 1 Growth ratio of the average greenhouse gas fluxes on the 1st day, 3rd day and 5th day after rainfall(%)

时间 Time	处理 Treatments	5月23日			7月20日			8月4日		
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
雨后1 d	I	125.9	3.8	18.5	38.2	125.5	81.3	74.4	-5.7	22.0
	II	69.1	7.4	13.2	13.0	143.2	29.7	48.7	-1.1	13.5
	III	63.3	14.2	8.7	12.8	174.1	28.0	33.1	-3.7	6.5
雨后3 d	I	198.1	5.6	27.1	49.9	173.4	137.4	97.6	-7.0	34.3
	II	109.1	9.4	16.5	14.1	200.8	55.8	70.5	-3.9	26.3
	III	102.9	18.7	11.9	14.3	239.8	48.7	50.2	-6.2	14.5
雨后5 d	I	203.9	0.6	31.2	30.9	172.7	125.8	104.9	-13.2	52.3
	II	108.9	3.4	17.1	0.1	201.8	51.0	70.1	-9.8	30.0
	III	103.8	14.6	10.6	1.8	251.4	42.3	46.9	-11.1	19.2



图中5月23日、7月20日及8月4日降雨当天温室气体通量均为前后2 d的平均值

The greenhouse gas fluxes after rainfall on May 23th, July 20th and August 4th refer to the average value based on the two days before and after the day

图3 人工林地生长季降雨后温室气体通量变化及其相关性

Figure 3 Greenhouse gas flux changes and correlations in artificial forest land in the growing season after rainfall

10 cm 土壤温度之间呈极显著负相关,土壤温度和土壤水分含量的增加会促进CH₄的吸收,但过多的土壤水分含量会抑制土壤对CH₄的吸收^[29];N₂O 通量与10 cm 处土壤水分含量之间呈显著正相关,与土壤温度之间呈极显著正相关,N₂O 通量对土壤温度的响应更强烈^[34](表2)。

2.3 凋落物对温室气体通量的影响

凋落物对温室气体通量的影响主要通过分解后对土壤碳氮的补充来实现^[35],因此改变土壤表层凋落物会影响到凋落物上的微生物,从而对土壤微生物群落的结构产生影响,进而影响土壤温室气体通量的变化^[36]。本研究分别对3组样方内的取样点进行了“Ⅰ-去除凋落物处理”“Ⅱ-维持原状无处理”和“Ⅲ-加倍凋落物处理”,3组处理温室气体通量分别表现出显著差异性($P<0.05$),说明凋落物对土壤温室气体通量有显著影响(图4)。从图4中还可以看出,在生长季3种温室气体通量分别表现为土壤CO₂和N₂O的排放以及CH₄的吸收,且3种温室气体通量均具有明显的季节性变化。

Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ处理后生长季CO₂通量平均值分别为243.47、357.14、406.36 mg·m⁻²·h⁻¹,去除凋落物使土壤CO₂通量显著降低30.81%,加倍凋落物则使CO₂通量显著提高13.78%,去除凋落物处理对土壤CO₂通量的降低幅度远大于加倍凋落物对土壤CO₂通量的提高幅度(图4a),表明去除凋落物和加倍凋落物对土壤CO₂通量的影响并不是线性的。其原因可能是凋落物加倍后其分解速度导致对土壤的碳氮输出并不是成倍增长的,输入的氮元素促进微生物生长和繁殖,从而土壤CO₂通量也不是呈线性增加的^[37]。本研究计算出不同处理后生长季土壤温室气体通量的温度

敏感性(Q_{10})表现为:处理Ⅰ(1.070)>处理Ⅱ(1.046)>处理Ⅲ(1.011),不同凋落物处理下林地土壤CO₂通量对土壤温度响应的差异不显著^[15]。

生长季3种处理后(Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ)的CH₄通量平均值分别为-65.77、-49.26、-40.23 μg·m⁻²·h⁻¹,去除凋落物使CH₄吸收值显著提高33.51%,加倍凋落物使CH₄吸收值显著降低18.33%,加倍凋落物处理使CH₄吸收受到了明显的抑制(图4b)。有研究表明土壤中氮含量显著增加时会抑制土壤CH₄的吸收,NH₄⁺可以代替很多CH₄氧化菌的基质,而且可能是竞争抑制剂^[38]。凋落物腐败、分解的过程中也可能会释放少量的CH₄,也有可能是土壤有机质和氮的累积使N/C含量增大,从而抑制CH₄的吸收^[39-40]。也有研究者的研究结果没有表明土壤TN与CH₄吸收值之间具有显著相关性,因此也不能断定土壤中氮含量的增长会对CH₄吸收产生抑制^[41]。

从图4c可以看出凋落物的改变对N₂O通量有显著影响,3种处理后(Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ)生长季N₂O通量的平均值分别为5.77、7.99、9.42 μg·m⁻²·h⁻¹,去除凋落物处理使N₂O通量显著降低27.69%,加倍凋落物处理使N₂O通量显著提高18.05%。凋落物的分解使得其所含的营养物质释放到土壤中,土壤中碳氮含量会明显增加^[41],土壤中的碳氮不仅为硝化反应和反硝化反应提供了原料,同时也对参与反应的微生物提供了能源^[41],土壤中的氮作为重要的营养元素也刺激了土壤微生物的繁殖^[41],从而多方面影响了硝化反应和反硝化反应,使得土壤N₂O排放增加。

2.4 土壤CH₄吸收与N₂O排放之间的关系

生长季CH₄吸收与N₂O排放的月变化呈现出相反的趋势,N₂O排放增大的同时CH₄的吸收值减小(图

表2 温室气体通量与土壤因素的关系

Table 2 Relationship between greenhouse gas fluxes and soil factors

温室气体 Greenhouse gas	对比处理 Treatments	10 cmM _s	20 cmM _s	10 cmT _s	20 cmT _s
CO ₂	Ⅰ	0.876**	0.765**	0.679**	0.752**
	Ⅱ	0.860**	0.778**	0.658**	0.707**
	Ⅲ	0.861**	0.770**	0.621**	0.700**
CH ₄	Ⅰ	-0.809**	-0.780**	-0.524**	-0.314
	Ⅱ	-0.807**	-0.807**	-0.511**	-0.288
	Ⅲ	-0.829*	-0.818**	-0.448**	-0.249
N ₂ O	Ⅰ	0.464*	0.215	0.895**	0.754**
	Ⅱ	0.465*	0.241	0.884**	0.705**
	Ⅲ	0.475*	0.302	0.877**	0.685**

注:* $P<0.05$; ** $P<0.01$ 。

Note: * indicates $P<0.05$; ** indicates $P<0.01$.

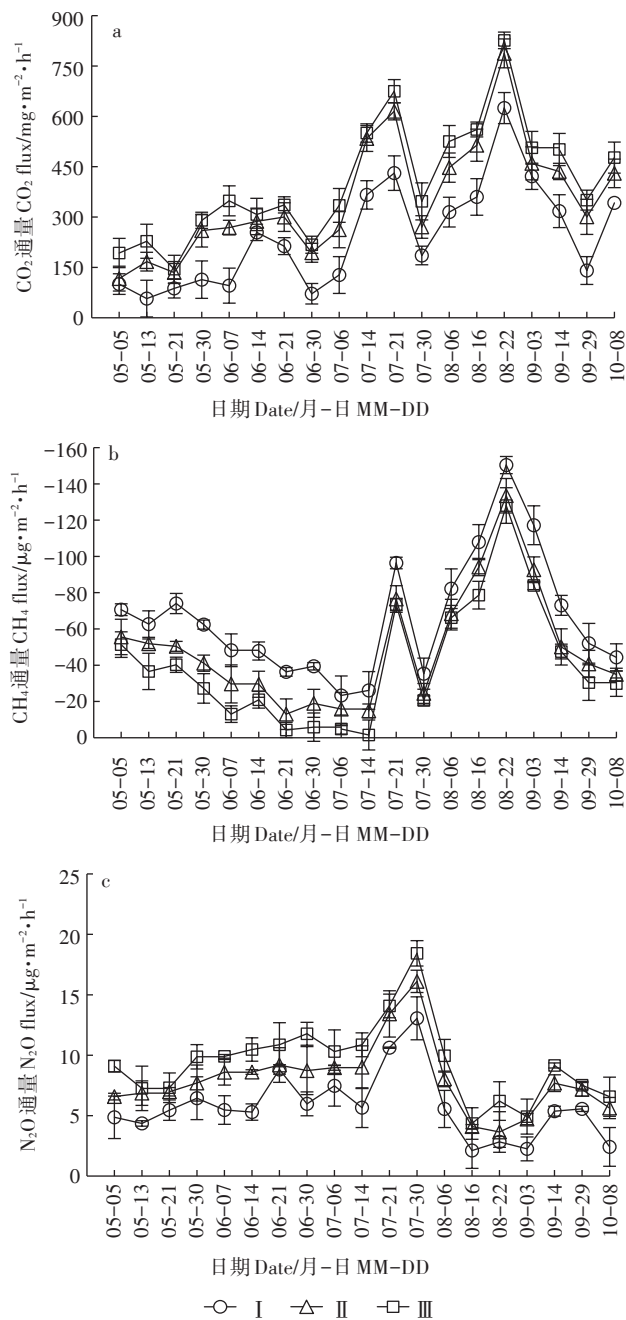


图4 生长季温室气体通量变化

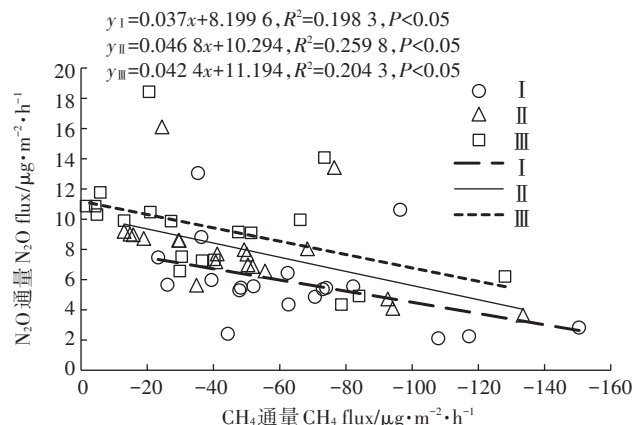
Figure 4 Monthly changes of greenhouse gases flux

4b、图4c);反之N₂O排放减小的同时CH₄的吸收值增大。CH₄吸收值与N₂O排放值之间呈显著的负线性关系(图5)。

I - 去除凋落物处理: $y = -0.037x + 8.1996$, $R^2 = 0.1983$, $P < 0.05$;

II - 维持原状无处理: $y = -0.0468x + 10.294$, $R^2 = 0.2598$, $P < 0.05$;

III - 加倍凋落物处理: $y = -0.0424x + 11.194$, $R^2 = 0.2043$, $P < 0.05$;

图5 不同处理下N₂O排放值和CH₄吸收值的关系Figure 5 Relationship between N₂O emission and CH₄ absorption under different treatments

式中: y 为 N₂O 排放值, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; x 为 CH₄ 吸收值, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

土壤中微生物会促进硝化反应和反硝化反应产生 N₂O, 甲烷氧化菌驱动下的微生物活动吸收土壤-大气界面的 CH₄, 有研究认为 N₂O 排放对 CH₄ 吸收的抑制是由于土壤中 NH₄⁺(NH₃) 对 CH₄ 氧化菌竞争性抑制的结果^[38], 在长白山阔叶林多点位观测中发现 N₂O 排放和 CH₄ 吸收之间存在着非线性的负相关关系, 并且认为 N₂O 排放对 CH₄ 吸收的抑制依赖于土壤水分含量的变化^[11]。也有土壤培养模拟实验结果表明, N₂O 排放和 CH₄ 吸收之间存在着线性的正相关关系^[41], 本研究结果和以上研究的结果不同, 对于不同的气候、土壤有机质、植被、土壤类型而言, 土壤温室气体通量的机理均有所差异, 由此导致 N₂O 排放和 CH₄ 吸收之间的关系都有着不同的规律。且本文 3 种凋落物处理后 N₂O 排放值和 CH₄ 吸收值的关系没有显著差异 ($P > 0.05$), 因此要确定二者出现各种规律的条件, 还需要进一步探究。

3 结论

(1) 降雨在短时间内 (1~2 d) 会促进科尔沁地区人工林地土壤 CH₄ 吸收与 CO₂、N₂O 的排放, 随后由于土壤水分的降低, 土壤 CH₄ 吸收与 CO₂、N₂O 的排放也会随之减小, 且降雨对于土壤较干燥时段的土壤温室气体通量的影响更显著。

(2) 凋落物对科尔沁地区人工林地土壤 CO₂、N₂O 通量具有促进作用, 对于土壤 CH₄ 吸收会产生抑制; 去除凋落物处理对土壤 CO₂ 通量的降低幅度远大于加倍凋落物对土壤 CO₂ 通量的提高幅度; 不同凋落物

处理下林地土壤 CO₂ 通量对土壤温度响应的差异不显著。

(3) 本研究还发现生长季科尔沁地区人工林地土壤 CH₄ 吸收与 N₂O 排放之间具有显著的负相关关系, 但并未发现凋落物会对这种关系产生明确的影响, 这种负相关关系及凋落物对其影响还需进一步研究。

参考文献:

- [1] IPCC. Summary for Policymakers[M]//Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 27.
- [2] Woodwell G M, Whittaker R H, Reiners W A, et al. The biota and the world carbon budget[J]. *Science*, 1978, 199(4325): 141-146.
- [3] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, et al. Soil carbon pools and world life zones[J]. *Nature*, 1982, 298(5870): 156-159.
- [4] Hickler T, Smith B, Prentice I C, et al. CO₂ fertilization in temperate FACE experiments not representative of boreal and tropical forests[J]. *Global Change Biology*, 2008, 14(7): 1531-1542.
- [5] 陈光水, 杨玉盛, 王小国, 等. 格氏栲天然林与人工林根系呼吸季节动态及影响因素[J]. *生态学报*, 2005, 25(8): 1941-1947.
CHEN Guang-shui, YANG Yu-sheng, WANG Xiao-guo, et al. Root respiration in a natural forest and two plantations in subtropical China: Seasonal dynamics and controlling factors[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(8): 1941-1947.
- [6] 李化山, 汪金松, 赵秀海, 等. 模拟氮沉降下去除凋落物对太岳山油松林土壤呼吸的影响[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(4): 857-866.
LI Hua-shan, WANG Jin-song, ZHAO Xiu-hai, et al. Effects of litter removal on soil respiration under simulated nitrogen deposition in a *Pinus tabulaeformis* forest in Taiyue Mountain, China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(4): 857-866.
- [7] Wang Q, He T, Wang S, et al. Carbon input manipulation affects soil respiration and microbial community composition in a subtropical coniferous forest[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 178-179: 152-160.
- [8] Wang Y, Hao Y, Cui X Y, et al. Responses of soil respiration and its components to drought stress[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, 14(1): 99-109.
- [9] Sheng H, Yang Y, Yang Z, et al. The dynamic response of soil respiration to land-use changes in subtropical China[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(3): 1107-1121.
- [10] 张素彦, 蒋红志, 王 扬, 等. 凋落物去除和添加处理对典型草原生态系统碳通量的影响[J]. *植物生态学报*, 2018, 42(3): 349-360.
ZHANG Su-yan, JIANG Hong-zhi, WANG Yang, et al. Effects of litter removal and addition on ecosystem carbon fluxes in a typical steppe[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2018, 42(3): 349-360.
- [11] Mosier A, Schimel D, Valentine D, et al. Methane and nitrous oxide fluxes in native, fertilized and cultivated grasslands[J]. *Nature*, 1991, 350(6316): 330-332.
- [12] 解欢欢, 马文瑛, 赵传燕, 等. 苔藓和凋落物对祁连山青海云杉林土壤呼吸的影响[J]. *生态学报*, 2017, 37(5): 1379-1390.
XIE Huan-huan, MA Wen-ying, ZHAO Chuan-yan, et al. Effects of litter and moss on soil respiration in a spruce forest in the Qilian Mountains, Qinghai[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(5): 1379-1390.
- [13] 彭信浩, 韩海荣, 徐小芳, 等. 间伐和改变凋落物输入对华北落叶松人工林土壤呼吸的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38(15): 5351-5361.
PENG Xin-hao, HAN Hai-rong, XU Xiao-fang, et al. Thinning treatment and litterfall changes influence soil respiration in a *Larix principis-rupprechtii* plantation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(15): 5351-5361.
- [14] Wang D, Chen Z, Xu S. Methane emission from Yangtze estuarine wetland, China[J]. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 2009, 114(G2): 1588-1593.
- [15] Rey A, Petsikos C, Jarvis P G, et al. Effect of temperature and moisture on rates of carbon mineralization in a Mediterranean oak forest soil under controlled and field conditions[J]. *European Journal of Soil Science*, 2005, 56(5): 589-599.
- [16] Ryana S. Precipitation pulses and soil CO₂ flux in a Sonoran Desert ecosystem[J]. *Global Change Biology*, 2007, 13(2): 426-436.
- [17] Menyailo O V, Hungate B A, Abraham W R, et al. Changing land use reduces soil CH₄ uptake by altering biomass and activity but not composition of high-affinity methanotrophs[J]. *Global Change Biology*, 2008, 14(10): 2405-2419.
- [18] Dobbie K E, Smith K A T. Nitrous oxide emission factors for agricultural soils in Great Britain: The impact of soil water-filled pore space and other controlling variables[J]. *Global Change Biology*, 2003, 9(2): 204-218.
- [19] Rochette P, Desjardins R L, Pattey E. Spatial and temporal variability of soil respiration in agriculture fields[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1991, 71(2): 189-196.
- [20] Gu C, Riley W J. Combined effects of short term rainfall patterns and soil texture on soil nitrogen cycling: A modeling analysis[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2010, 112(1-4): 141-154.
- [21] Lee M S, Nakane K, Nakatsubo T, et al. Effects of rainfall events on soil CO₂ flux in a cool temperate deciduous broad-leaved forest[J]. *Ecological Research*, 2002, 17(3): 401-409.
- [22] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. *Tellus Series B-chemical & Physical Meteorology*, 1992, 44(2): 81-99.
- [23] 鲍 芳, 周广胜. 中国草原土壤呼吸作用研究进展[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(6): 713-726.
BAO Fang, ZHOU Guang-sheng. Review of research advances in soil respiration of grassland in China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(6): 713-726.
- [24] 李彬彬, 武兰芳. 土壤温室气体排放对 C/N 的响应[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(9): 2067-2078.
LI Bin-bin, WU Lan-fang. Soil greenhouse gases emission in response to the C/N[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(9): 2067-2078.
- [25] 曲桂芳, 徐文华, 王 会, 等. 五角槭根系的负激发效应降低了异

- 养呼吸及其温度敏感性[J]. 生态学报, 2016, 35(10):2692-2698.
- QU Gui-fang, XU Wen-hua, WANG Hui, et al. Negative priming effect of maple roots reduced heterotrophic respiration and its temperature sensitivity[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(10):2692-2698.
- [26] 熊 莉, 徐振锋, 杨万勤, 等. 川西亚高山粗枝云杉人工林地上凋落物对土壤呼吸的贡献[J]. 生态学报, 2015, 35(14):4678-4686.
- XIONG Li, XU Zhen-feng, YANG Wan-qin, et al. Aboveground litter contribution to soil respiration in a subalpine dragon spruce plantation of western Sichuan[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(14):4678-4686.
- [27] Kaye J P, Burke I C, Mosier A R, et al. Methane and nitrous oxide fluxes from urban soils to the atmosphere[J]. *Ecological Applications*, 2004, 14(4):975-981.
- [28] Kaye J P, Groffman P M, Grimm N B, et al. A distinct urban biogeochemistry[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2006, 21(4):192-199.
- [29] Menyailo O V, Hungate B A, Abraham W R, et al. Changing land use reduces soil CH₄ uptake by altering biomass and activity but not composition of high-affinity methanotrophs[J]. *Global Change Biology*, 2008, 14(10):2405-2419.
- [30] Kato T, Tang Y, Song G U, et al. Temperature and biomass influences on interannual changes in CO₂ exchange in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Global Change Biology*, 2006, 12(7):1285-1298.
- [31] Yan J, Zhang W, Wang K, et al. Responses of CO₂, N₂O and CH₄ fluxes between atmosphere and forest soil to changes in multiple environmental conditions[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(1):300-312.
- [32] Or D, Smets B F, Wraith J M, et al. Physical constraints affecting bacterial habitats and activity in unsaturated porous media: A review[J]. *Advances in Water Resources*, 2006, 30(6):1505-1527.
- [33] Šnajdr, J, Valášková V, Merhautová V, et al. Spatial variability of enzyme activities and microbial biomass in the upper layers of *Quercus petraea* forest soil[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2008, 40(9):2068-2075.
- [34] 徐 华, 蔡祖聪, 李小平, 等. 冬作季节土地管理对水稻土 CH₄排放季节变化的影响[J]. 应用生态学报, 2000, 11(2):215-218.
- XU Hua, CAI Zu-cong, LI Xiao-ping, et al. Effect of land management in winter crop season on seasonal variations of CH₄ emissions from rice paddy soils[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(2):215-218.
- [35] Chen D, Zhou L, Wu J, et al. Tree girdling affects the soil microbial community by modifying resource availability in two subtropical plantations[J]. *Applied Soil Ecology*, 2012, 53(2):108-115.
- [36] Li Y, Xu M, Sun O J, et al. Effects of root and litter exclusion on soil CO₂ efflux and microbial biomass in wet tropical forests[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36(12):2111-2114.
- [37] Yan W D, Chen X Y, Tian D L, et al. Impacts of changed litter inputs on soil CO₂ efflux in three forest types in central south China[J]. *Science Bulletin*, 2012, 58(7):750-757.
- [38] Steudler P A, Bowden R D, Melillo J M, et al. Influence of nitrogen fertilization on methane uptake in temperate forest soils[J]. *Nature*, 1989, 341(6240):314-316.
- [39] Boeckx P, Cleemput O V. Methane oxidation in a neutral landfill cover soil: Influence of moisture content, temperature, and nitrogen-turnover[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1996, 25(1):178-183.
- [40] 成 臣, 杨秀霞, 汪建军, 等. 秸秆还田条件下灌溉方式对双季稻产量及农田温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(1):186-195.
- CHENG Chen, YANG Xiu-xia, WANG Jian-jun, et al. Effect of different irrigation methods on rice yield and greenhouse gas emissions under crop residue incorporation in double rice-cropping systems[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(1):186-195.
- [41] 张秀君, 徐 慧, 陈冠雄. 影响森林土壤 N₂O 排放和 CH₄ 吸收的主要因素[J]. 环境科学, 2002(5):8-12.
- ZHANG Xiu-jun, XU Hui, CHEN Guan-xiong. Important factors controlling rates of N₂O emission and CH₄ oxidation from forest soil[J]. *Environmental Science*, 2002(5):8-12.