

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.06.014

贾沁琦,徐飞,陈炳江,等.长三角地区典型阔叶林地土壤 CH₄ 和 N₂O 通量特征及其影响因子:以杭州市为例[J].水土保持学报,2024,38(6):195-202.
JIA Qinqi, XU Fei, CHEN Bingjiang, et al. Characteristics and influencing factors of soil CH₄ and N₂O fluxes in typical broad-leaved forests in the Yangtze River Delta region, China: A case study of Hangzhou[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(6): 195-202.

长三角地区典型阔叶林地土壤 CH₄ 和 N₂O 通量特征及其影响因子

——以杭州市为例

贾沁琦¹, 徐飞¹, 陈炳江¹, 鲁嫣然¹, 陈丽涵¹, 胡嘉豪¹, 郭娜², 方双喜^{1,2}

(1. 浙江工业大学环境学院, 杭州 310014; 2. 浙江工业大学碳中和创新研究院, 杭州 310014)

摘要: [目的] 长三角地区森林覆盖率达 33.4%, 其下垫面土壤对区域温室气体的收支平衡具有重要影响。为探讨该地区森林生态系统土壤 CH₄ 和 N₂O 通量变化特征及土壤理化性质和凋落物对该 2 种温室气体通量的影响。[方法] 以浙江省杭州市典型阔叶林地土壤为研究对象, 于 2022 年 11 月至 2023 年 11 月采用静态箱—气相色谱法对土壤—大气界面的 CH₄ 和 N₂O 通量进行原位观测。[结果] 去除凋落物 (S) 和保留凋落物 (SL) 处理下 CH₄ 年平均吸收通量分别为 (47.82 ± 18.54), (36.80 ± 13.55) μg/(m² · h), N₂O 年平均排放通量分别为 (80.74 ± 45.24), (52.70 ± 25.98) μg/(m² · h)。S 和 SL 处理下 CH₄ 吸收通量的季节变化趋势相似, 春夏 2 季的吸收通量高于秋冬 2 季。2 种处理下 N₂O 排放通量也呈现出一致的季节变化规律, 夏季排放通量最高, 春季次之, 秋冬 2 季较低。凋落物对土壤 CH₄ 吸收和 N₂O 的排放有显著影响, 去除凋落物处理使得土壤 CH₄ 年平均吸收通量提高 29.9%, 土壤 N₂O 年平均排放通量提高 53.2%。相关性分析表明, 2 种处理下的 CH₄ 吸收通量与 N₂O 排放通量分别与土壤有机碳含量和土壤温度呈显著正相关 ($p < 0.05$)。SL 处理下 CH₄ 吸收通量与土壤质量密度呈显著负相关 ($p < 0.05$)。[结论] 阔叶林地在森林碳汇方面发挥着重要作用, 阔叶林地土壤凋落物管理对平衡 CH₄ 吸收与 N₂O 排放, 减缓气候变暖至关重要。

关键词: 阔叶林; CH₄; N₂O; 通量; 影响因子

中图分类号: X16

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)06-0195-08

Characteristics and Influencing Factors of Soil CH₄ and N₂O Fluxes in Typical Broad-leaved Forests in the Yangtze River Delta Region, China

— A Case Study of Hangzhou

JIA Qinqi¹, XU Fei¹, CHEN Bingjiang¹, LU Yanran¹, CHEN Lihan¹,

HU Jiahao¹, GUO Na², FANG Shuangxi^{1,2}

(1. School of Environment, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;

2. Zhejiang Carbon Neutral Innovation Institute, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: [Objective] The forest coverage rate in the Yangtze River Delta region reaches 33.4%, and the underlying surface soil may have an important impact on the regional greenhouse gas budget. To explore the characteristics of changes in CH₄ and N₂O fluxes in the forest ecosystem soil in this region, as well as the effects of soil physicochemical properties and litter on these two greenhouse gas fluxes. [Methods] Taking the typical broad-leaved forest soil in Hangzhou, Zhejiang Province as the research object, soil-air interface CH₄ and N₂O fluxes were continuously measured from November 2022 to November 2023 by the static chamber-gas chromatography method. [Results] The average annual absorption fluxes of CH₄ in the soil without litter (S) and soil with litter (SL) treatments were (47.82 ± 18.54), (36.80 ± 13.55) μg/(m² · h), as well as the

收稿日期: 2024-06-11

修回日期: 2024-07-25

录用日期: 2024-08-07

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-11-22

资助项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFC2305205); 国家自然科学基金项目 (42275113)

第一作者: 贾沁琦 (2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事大气温室气体相关监测研究。E-mail: 221122270149@zjut.edu.cn

通信作者: 方双喜 (1979—), 男, 教授, 博导, 主要从事温室气体及相关微量成分监测技术集成开发及观测研究。E-mail: fangsx@zjut.edu.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

average emission fluxes of N_2O were (80.74 ± 45.24) , (52.70 ± 25.98) $\mu g/(m^2 \cdot h)$, respectively. The seasonal variations of CH_4 absorption fluxes were similar under the two treatments of S and SL, with the absorption flux in spring and summer being higher than that in autumn and winter. The N_2O emission fluxes of the two treatments also showed similar seasonal variations, with the highest in summer, followed by spring, and lower in autumn and winter. Litter had a significant impact on CH_4 absorption and N_2O emissions, with litter remove leading to a 29.9% increase in CH_4 influx and a 53.2% increase in N_2O efflux. Correlation analysis revealed that the CH_4 absorption flux and N_2O emission flux under the two treatments were significantly positively correlated with soil organic carbon content and soil temperature, respectively ($p < 0.05$). The CH_4 absorption flux had a significant negative correlation with soil bulk density under SL treatment ($p < 0.05$). [Conclusion] The research results indicate that broad-leaved forests have an important role in forest carbon sinks, and the management of soil litter in broad-leaved forest is crucial for balancing CH_4 absorption and N_2O emissions, as well as mitigating climate warming.

Keywords: broad-leaved forests; CH_4 ; N_2O ; flux; affecting factor

Received: 2024-06-11

Revised: 2024-07-25

Accepted: 2024-08-07

Online(www.cnki.net): 2024-11-22

政府间气候变化专门委员会(IPCC)在其第六次评估中指出,人类活动产生的温室气体排放是导致全球变暖的主要原因。甲烷(CH_4)和氧化亚氮(N_2O)是导致全球气候变暖的两种重要温室气体^[1]。 CH_4 在大气中的浓度仅次于二氧化碳(CO_2),是影响地球辐射平衡第二重要的长寿命温室气体,其在大气中的寿命为 8~12 年,在百年尺度上的增温潜势是 CO_2 的 29 倍^[2]。 N_2O 在大气中浓度不高,但其增温潜势(GWP)约是 CO_2 的 273 倍,且在大气中的停留时间可达 114 年^[3]。

森林是陆地生态系统的主体,其下垫面土壤则是 CH_4 、 N_2O 等主要温室气体源汇交换的重要界面^[4],因而对全球碳氮循环可能具有重要影响。森林土壤和大气之间温室气体的交换通量在很大程度上取决于土壤的理化性质。刘硕等^[5]在对我国温带森林土壤温室气体排放的研究中发现,温度和土壤含水率影响温室气体的排放,且不同林型之间温度和土壤含水率对 CH_4 吸收和 N_2O 排放的作用存在着明显的差异;高伟峰^[6]在对寒温带大兴安岭冻土区温室气体通量的研究中表明, CH_4 通量受到土壤温度的显著影响, N_2O 通量受多个土壤理化性质的共同影响,包括土壤温度、有机碳、全氮、pH 等。此外,也有研究^[7-8]表明,在森林生态系统中凋落物的输入也对土壤温室气体产生影响。凋落物种类、数量及分解过程都对土壤微生物的数量和活性及土壤理化性质产生影响,进而影响温室气体通量^[9-10]。因此,在对森林生态系统温室气体通量进行研究时,也应考虑到凋落物的影响。

长三角地区属于亚热带季风气候区,雨水充沛,森林覆盖率高,主要植被类型为亚热带常绿阔叶林^[11]。第九次全国森林资源清查结果显示,长三角地区森林

覆盖率为 33.4%。该地区较大的森林面积所贡献的土壤吸收,可能极大地抵消人为活动排放的温室气体对大气环境的影响。在“碳达峰”与“碳中和”的情景下,准确认识该地区森林土壤对温室气体交换特征及其影响因子,对于评估该区域森林生态系统对区域碳中和战略贡献具有重要意义。为此,本文以浙江省杭州市典型阔叶林为研究对象,对保留自然凋落物和人为去除凋落物的土壤—大气的 CH_4 和 N_2O 气体交换通量进行持续定点原位监测。比较 2 种不同处理下土壤 CH_4 和 N_2O 的通量变化特征,探讨土壤理化性质及凋落物对土壤 CH_4 和 N_2O 通量的影响机制。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

采样点位于浙江省杭州市西湖区太子湾公园内 ($30^{\circ}13'N, 120^{\circ}08'E$), 公园面积 80.03 hm^2 , 该地区具有典型的亚热带季风气候特征, 其气候温暖湿润, 四季分明, 光照充足, 雨量丰沛。采样期内(2022 年 11 月至 2023 年 11 月), 研究区域平均气温 $19.3^{\circ}C$, 年降水量 750.39 mm。本研究以长三角地区典型地带性植被常绿阔叶混交林为研究对象, 麻栎(*Quercus acutissima*) 作为优势种, 同时伴生有香樟(*Cinnamomum camphora*) 和构树(*Broussonetia papyrifera*) 等多种阔叶树种。平均树高约为 14.7 m, 平均胸径约为 25.5 cm, 森林郁闭度为 0.87。草本层和灌木种类丰富, 主要有苕麻(*Boehmeria nivea*)、车前草(*Plantago asiatica*)、毛蕨(*Cyclosorus interruptus*) 等。研究区域土壤质地以砂质壤土为主, 土壤呈弱酸性, 地表常年覆盖 2~3 cm 的凋落物, 凋落物层主要包含落叶、落枝和落果等, 腐殖质层厚度约为 5 cm。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置、样品采集和测定 本研究设置人为去除地表凋落物(S)和维持原状保留凋落物(SL)2种处理,每种处理设3个重复。为减少采样系统本身对气体排放的影响,本试验另外设置1个空白通量箱(用聚乙烯薄膜覆盖林地土壤),通过样品箱与空白箱通量之差,求出样品的实际交换通量,共7个采集样方。2种处理下采集样地的土壤理化性质见表1。于2022年11月至2023年11月期间每7天左右选取晴朗天气,采用静态箱法在所设立的取样点进行气体采集。静态箱(暗箱)为圆柱形的PVC材质,内径30 cm,高50 cm,箱体一侧设有取样口,箱顶装有风扇。采样时,向底座内加入适量的水,罩上顶箱,保证静态箱的气密性,接通风扇电源,将静态箱上的取气口和采样气袋与自动定时抽气泵连接。取样时间采用30 min 罩箱时间,即在罩箱后的第0,10,20,30 min 时抽取气样。采样时需同步记录箱内温湿度、0—5 cm 土层土壤温湿度及采样点的气温、气压等。土壤样品分别在春、夏、秋、冬4个季节取样(0—5 cm 土层),用于测定土壤质量密度、pH 等其他理化性质。采样后将气体样品带回实验室内,利用团队自制的三通道气相色谱仪进行浓度分析,检测CH₄和N₂O气体浓度。其中CH₄检测器为氢火焰离子化检测器(FID),N₂O检测器为电子俘获检测器(ECD)。该系统对CH₄和N₂O气体的分析精度均可以达到0.08%^[12]。土壤样品带回实验室测定其质量密度、pH等理化性质,具体方法为:质量密度采用环刀法,pH采用电位法,土壤有机碳的测定采用重铬酸钾—分光光度法,土壤全氮采用凯氏定氮法^[13]测定。

表1 样地土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the soil collected from the sample plots

处理	pH	质量密度/ (g·cm ⁻³)	有机碳/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)
S	6.72±1.04	0.95±0.05	32.26±3.84	2.49±0.19
SL	6.41±0.91	1.02±0.07	35.09±5.50	3.16±0.45

注:表中数据为平均值±标准差。下同。

1.2.2 气体通量计算与分析 温室气体通量计算公式为:

$$F = \rho \times \frac{V}{A} \times \frac{d_c}{d_i} = \rho \times H \times \frac{d_c}{d_i} \quad (1)$$

$$F_{\text{实际}} = F_{\text{样地}} - F_{\text{空白}} \quad (2)$$

式中: F 为气体交换通量[mg/(m²·h)或μg/(m²·h)]; $F_{\text{样地}}$ 为样品静态箱内气体通量[mg/(m²·h)或μg/(m²·h)]; $F_{\text{空白}}$ 为空白箱内气体通量[mg/(m²·h)或μg/(m²·h)]; $F_{\text{实际}}$ 为样品箱扣除空白箱后实际

的气体交换通量[mg/(m²·h)或μg/(m²·h)]; ρ 为箱内气体密度(mol/m³); V 为采样箱体积(m³); A 为采样箱底面积(m²); H 为采样箱的高度(m); $\frac{d_c}{d_i}$ 为采样箱内痕量气体的浓度变化率(mg/h或μg/h)。 $F < 0$ 时表示土壤从大气中吸收该气体; $F > 0$ 时表示土壤释放该气体到大气中。

温室气体累积排放量计算公式为:

$$M = \sum (F_{i+1} + F_i) / 2 \times (t_{i+1} - t_i) \times 24 \quad (3)$$

式中: M 为所测温室气体累积排放量(kg/hm²); F_{i+1} 与 F_i 分别为第 $i+1$ 次和第 i 次采气时的平均气体排放通量[mg/(m²·h)或μg/(m²·h)]; t_{i+1} 和 t_i 分别为第 $i+1$ 次和第 i 次采样时间(d)。

全球增温潜势(GWP)计算公式为:

$$\text{GWP} = M_{\text{CH}_4} \times 29 + M_{\text{N}_2\text{O}} \times 273 \quad (4)$$

式中:GWP为全球增温潜势效应(kg/hm²); M_{CH_4} 和 $M_{\text{N}_2\text{O}}$ 分别为测定时期内CH₄和N₂O的累计排放量(kg/hm²);29和273分别为CH₄和N₂O在百年尺度上相当于CO₂的GWP倍数。

利用Excel 2016软件和SPSS 27.0软件对温室气体通量数据进行整理分析。使用独立样本T检验方法比较2种处理间气体通量差异。用Pearson法对气体通量与土壤理化性质进行相关性分析。图表中数据为平均值±标准差。试验所测土壤CH₄通量均为负值(吸收),文中采用CH₄通量的绝对值(即吸收速率)进行数据分析及图表绘制。

2 结果与分析

2.1 土壤CH₄和N₂O通量的季节变化特征

从图1可以看出,S和SL2种处理下土壤CH₄通量呈相似的季节变化趋势:春季(3—5月)和夏季(6—8月)的吸收通量较高,秋季(9—11月)和冬季(12—2月)的吸收通量较低。NAZARIES等^[14]研究发现,森林土壤CH₄吸收通量的变化主要受CH₄氧化菌群落的影响。本研究中,春夏2季的吸收通量大于秋冬2季,可能与土壤中CH₄氧化菌的活性和数量有关。春夏季,气温和土壤温度逐渐升高使得土壤中CH₄氧化菌活性增强、数量增加^[15],从而提高土壤对CH₄的吸收;秋冬季,气温逐渐降低,土壤中微生物活性也随之减弱,从而导致CH₄氧化速率下降,因此,土壤对CH₄的吸收通量也逐渐减少。由图2可知,按不同季节CH₄吸收通量大小排序,S处理下为春季>夏季>秋季>冬季;SL处理下为夏季>春季>秋季>冬季。STEINKAMP等^[16]在对森林生态系统的研究中发现,森林土壤CH₄氧化速率存在明显的季节差异,夏季CH₄氧化速率相对较高,春秋季节次之,冬季则最低。本研究中SL

处理下土壤 CH_4 吸收通量的季节变化规律与其研究^[16]发现的甲烷氧化速率变化规律一致。但在 S 处理下夏季土壤 CH_4 吸收通量却小于春季。是由于研究区域在夏季降雨较多, S 处理下由于没有凋落物的阻挡, 使得雨水更易渗透进入土壤, 导致土壤湿度升高 (S 处理下夏季土壤平均湿度为 27.7%, 高于 SL 处理下的 25.8%), 较高的土壤湿度不利于土壤与空气中的氧气进行气体交换, 而 CH_4 氧化菌在有氧条件下活性更强, 才能氧化消耗更多的 CH_4 。因此, 夏季的降雨影响土壤中 CH_4 氧化菌的活性, 使得 CH_4 氧化量减少, 进而导致 S 处理下夏季土壤 CH_4 吸收通量低于春季。

由图 1 和图 2 可知, 2 种处理下土壤 N_2O 排放通量也呈相似的季节变化趋势, 且排放通量大小均表

现为夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季, 与 LIU 等^[17]在亚热带地区森林生态系统中的研究结果一致。造成这种季节变化的原因可能与土壤的水热条件有关。进入春季, 气温升高, 土壤温度也逐渐升高, N_2O 通量也呈波动上升趋势, 可能是由于土壤温度的升高增加土壤中硝化和反硝化细菌酶的活性, 加速 N_2O 的排放。夏季, 气温继续升高, 降雨的增加也导致土壤湿度的变化, 此阶段土壤温湿度可能有利于土壤硝化与反硝化作用; 另一方面, 气温进一步地上升, 加快土壤有机质的分解, 为参与硝化、反硝化作用的微生物提供足够的能源和基质^[18], 进而促进土壤 N_2O 的排放。进入秋季后, 气温回落, 微生物活性也逐渐减弱, 导致 N_2O 的产生量减少, 从而导致 N_2O 排放通量减少。

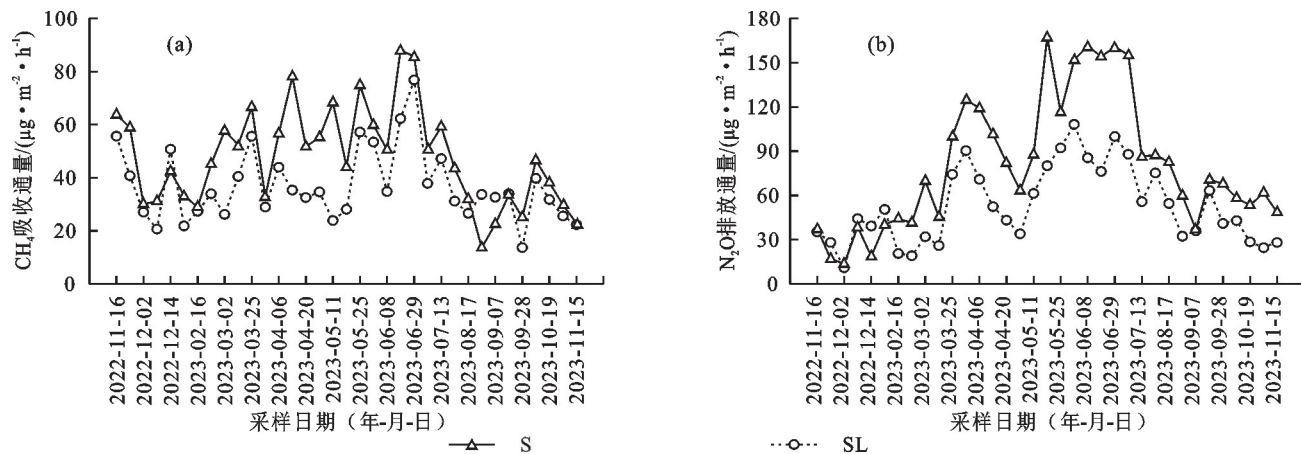
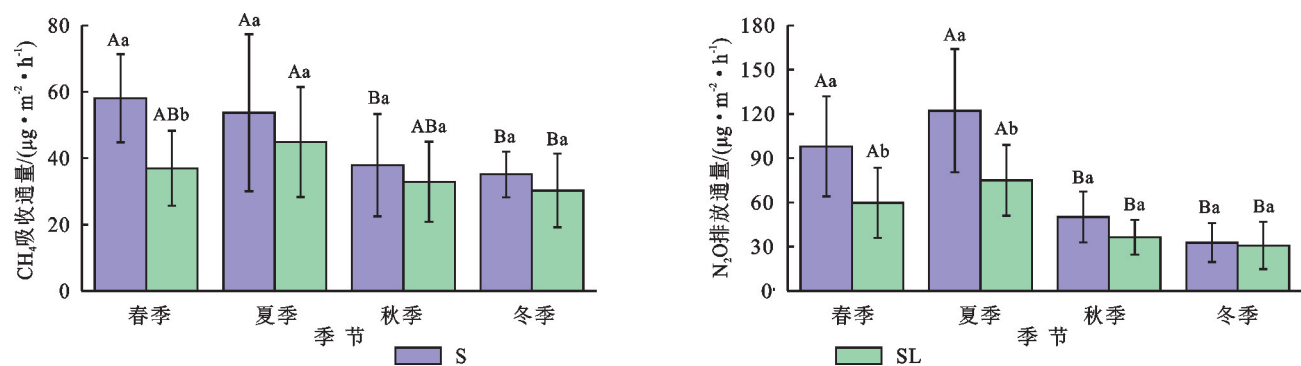


图 1 土壤 CH_4 和 N_2O 通量的动态变化

Fig.1 Dynamic variations of CH_4 and N_2O fluxes



注: 图柱上方不同小写字母表示相同季节不同处理下差异显著 ($p < 0.05$); 不同大写字母表示相同处理不同季节下差异显著 ($p < 0.05$)。

图 2 土壤 CH_4 和 N_2O 通量的季节变化

Fig.2 Seasonal variations of CH_4 and N_2O fluxes

2.2 凋落物对土壤 CH_4 和 N_2O 通量的影响

由图 1 可知, S 处理下 CH_4 吸收通量整体高于 SL 处理。由表 2 可知, S 和 SL 处理下土壤 CH_4 年平均吸收通量分别为 (47.82 ± 18.54) , (36.80 ± 13.55) $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。经 T 检验, 2 种处理下的 CH_4 年平均吸收通量有显著差异 ($p < 0.05$), 说明凋落物对土壤 CH_4 吸收有显著影响。凋落物去除后土壤 CH_4 年平均吸收通量升高 29.9%。去除凋落物后, 土壤裸露,

使土壤温度升高 (表 3), 使得 CH_4 氧化菌活性增强^[15], 导致土壤对 CH_4 的吸收增加。有研究^[19]发现, 当土壤中氮素含量升高时, 土壤 CH_4 的吸收受到抑制, 是因为 NH_4^+ 可替代多种 CH_4 氧化细菌的底物, 并可作为一种竞争性抑制剂对 CH_4 氧化菌产生影响。本研究中, SL 处理下的土壤全氮含量显著高于 S 处理 (表 3)。因此也可能导致 SL 处理下土壤 CH_4 吸收通量低于 S 处理。

由表 2 可知,S 处理下土壤 N₂O 年平均排放通量为(80.74±45.24) μg/(m²·h),显著高于 SL 处理下的(52.70±25.98) μg/(m²·h)。凋落物去除后,使得土壤 N₂O 年平均排放通量提高 53.2%。凋落物去除后土壤 N₂O 排放通量增加,一方面可能是因为凋落物是阻碍气体扩散的屏障,影响土壤—大气界面 O₂ 和 N₂O 的扩散^[20]。凋落物层的存在降低大气中 O₂ 向土壤中的扩散速率,进而影响硝化作用,使得硝化作用产生的 N₂O 量减少。同时,凋落物层的存在也影响土壤中产生的 N₂O 向大气中排放,因此保留凋落物处理使土壤 N₂O 排放通量减少;另一方面,凋落物层改变土壤的理化性质,进而影响土壤 N₂O 的排放。已有研究^[21]表明,土壤温湿度是影响土壤 N₂O 排放的重要因子。本研究中,S 处理下土壤平均温度和湿度分别为 19.65 °C 和 26.23%,高于 SL 处理下的 19.38 °C 和 25.54%。郑循华等^[22]研究表明,土壤 N₂O 排放的适宜温度为 15~25 °C。在适宜的温度范围内,N₂O 的排放随着土壤温度的升高而升高^[23]。本研究中 2 种处理下的土壤平均温度均在 N₂O 排放的适宜温度范围内,且 S 处理下的土壤平均温度大于 SL 处理,因此可能导致 S 处理下土壤 N₂O 排放量更大。桑文秀等^[24]在对土壤温室气体排放对温湿度的响应的研究中表明,可能是因为土壤湿度的增加有利于提高反硝化菌的活性,

从而促进反硝化作用产生更多的 N₂O,因此土壤湿度为 10%~30%时,土壤 N₂O 排放通量随着湿度的增加而增加。本研究中 S 处理下土壤湿度为 21.75%~30.05%,SL 处理为 19.16%~30.62%,且 S 处理下土壤平均湿度大于 SL 处理(表 3)。因此,也可能是因为 S 处理下土壤湿度更高,土壤的反硝化作用更强,导致 N₂O 排放通量更大。

CH₄ 和 N₂O 的增温效应不同,对全球气候变暖的贡献亦不相同。温室气体累积排放量的大小可以反映一段时间内温室气体的排放强度。全球增温潜势(GWP)通常被用来反映不同温室气体对全球变暖的相对影响。试验期间 CH₄ 和 N₂O 累积排放总量及温室效应的贡献见表 2。在试验期内,阔叶林地土壤表现为大气 CH₄ 的汇和 N₂O 的源。S 处理下土壤 CH₄ 累积吸收通量与 N₂O 累积排放通量均大于 SL 处理。与 SL 处理相比,S 处理使得土壤 CH₄ 累积吸收通量增加 28.8%,使土壤 N₂O 累积排放通量增加 47.5%。若不考虑 CH₄ 和 N₂O 在大气中的干湿沉降以及其他的物理化学生成消耗过程,试验期间,SL 处理的综合增温潜势为(1 113.49±21.10) kg/hm²,显著低于 S 处理(1 657.05±28.19) kg/hm²,即保留凋落物处理显著降低阔叶林地土壤对 CH₄ 和 N₂O 2 种温室气体的综合增温效应。

表 2 土壤 CH₄ 和 N₂O 通量及其综合增温潜势

Table 2 Soil CH₄ and N₂O fluxes and their comprehensive potential for greenhouse effect

处理	CH ₄ 吸收通量		N ₂ O 排放通量		综合增温潜势/ (kg·hm ⁻²)
	年平均吸收通量/ (μg·m ⁻² ·h ⁻¹)	累积吸收通量/ (kg·hm ⁻²)	年平均排放通量/ (μg·m ⁻² ·h ⁻¹)	累积排放通量/ (kg·hm ⁻²)	
S	47.82±18.54a	3.94±0.06a	80.74±45.24a	6.49±0.11a	1657.05±28.19a
SL	36.80±13.55b	3.06±0.05a	52.70±25.98b	4.40±0.08b	1113.49±21.10b

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($p<0.05$)。下同。

表 3 凋落物对土壤理化性质的影响

Table 3 Effects of litter on physical and chemical properties of soil

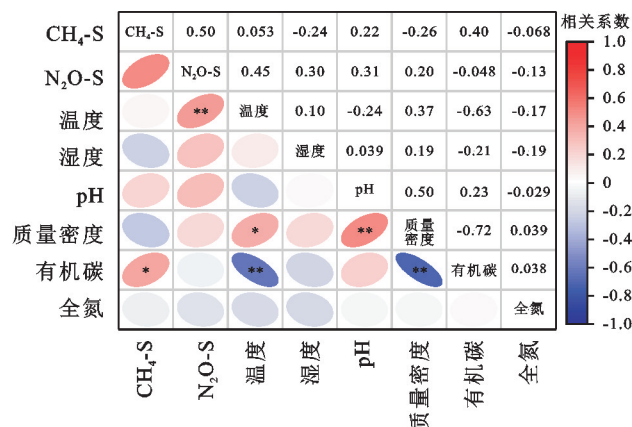
处理	土壤 温度/°C	土壤 湿度/%	pH	质量密度/ (g·cm ⁻³)	有机碳/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)
S	19.65±7.85a	26.23±3.48a	6.68±0.09a	0.95±0.07a	31.71±1.89a	2.42±0.09a
SL	19.38±7.65a	25.54±3.16a	6.46±0.21a	1.04±0.05a	33.54±2.24a	2.84±0.44b

2.3 土壤 CH₄ 和 N₂O 通量与土壤理化性质的关系

将 S、SL 处理下土壤 CH₄ 和 N₂O 通量分别与其土壤理化性质进行相关分析。由图 3 可知,2 种处理下土壤 CH₄ 吸收通量均与土壤有机碳呈显著正相关($p<0.05$),SL 处理下还与土壤质量密度呈显著负相关($p<0.05$)。N₂O 排放通量与土壤温度呈显著正相关(S 处理下 $p<0.01$;SL 处理下 $p<0.05$)。土壤有机碳是甲烷产生的主要来源之一,同时也是甲烷氧化菌的主要能源^[25]。张强等^[26]对湖南省莽山地区 4 种典型森林类型(阔叶混交林、针阔混交林、常绿阔叶林及山地矮林)CH₄ 通量与土壤有机碳的研究

中也得出土壤 CH₄ 吸收通量随着土壤有机碳的增加而增加。可能是由于土壤有机碳作为微生物的呼吸底物,增加各微生物的活性,在一定程度上增加 CH₄ 氧化菌的活性,从而促进土壤对 CH₄ 的吸收。凋落物的碳源输入是影响土壤 CH₄ 吸收通量的重要因素之一。本研究发现,SL 处理下的土壤有机碳含量[(33.54±2.24) g/kg]相较于 S 处理[(31.71±1.89) g/kg]更高。但通量观测结果显示,S 处理下土壤 CH₄ 吸收通量高于 SL 处理。这一现象可能归因于凋落物本身对 CH₄ 从大气向土壤扩散存在一定的阻碍作用,即使凋落物的存在增加土壤有机碳含量,进而可能促

进土壤中 CH_4 氧化菌的活性,一定程度上加剧 CH_4 的氧化消耗。但多数研究^[20,27]显示,凋落物层可以通过影响气体向土壤中的扩散来降低土壤 CH_4 的吸收。因此,可能是因为凋落物的阻碍作用导致有机碳含量较高的 SL 处理下的土壤 CH_4 吸收通量低于有机碳含量相对较低的 S 处理。本研究中,SL 处理下 CH_4 吸收通量与土壤质量密度具有显著的负相关。土壤质量密度是反映土壤紧实度或通气状况的一个重要指标,它可以通过影响气体扩散来影响土壤温室气体通量变化^[28]。当土壤质量密度较高时,土壤较为紧密,土壤孔隙度较小,气体交换可能受到限制。因此,土壤质量密度越大,可能不利于大气中的 O_2 进入土壤,使得 CH_4 氧化菌的活性下降,土壤 CH_4 吸收通量减小。而 S 处理下 CH_4 吸收通量与土壤质量密度的相关性没有达到显著水平,这可能是由于 S 处理下土壤质量密度



注: * 表示 $p \leq 0.05$; ** 表示 $p \leq 0.01$ 。

图 3 土壤 CH_4 、 N_2O 通量与土壤理化性质的相关关系

Fig.3 Correlations between soil CH_4 and N_2O fluxes and soil physicochemical properties

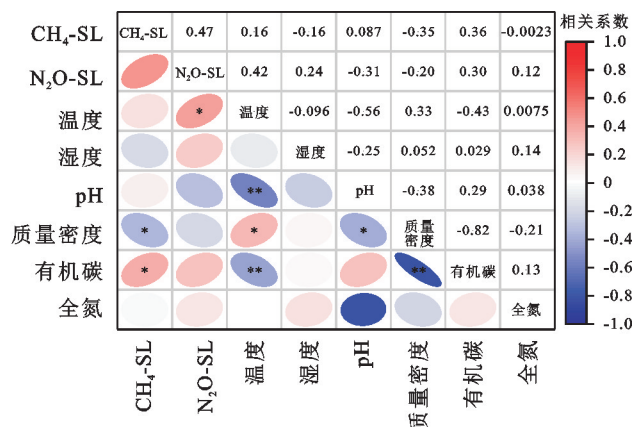
2.4 与其他地区森林土壤 CH_4 和 N_2O 通量的比较

在整个观测期间,S 处理下土壤 CH_4 吸收通量为 $13.63 \sim 88.16 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,平均值为 $(47.82 \pm 18.54) \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;SL 下土壤 CH_4 吸收通量为 $13.67 \sim 76.83 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,平均值为 $(36.80 \pm 13.55) \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。张强等^[26]在对亚热带湖南莽山地区常绿阔叶林地 CH_4 通量的全年观测中发现, CH_4 的通量为 $-48.8 \sim 39.0 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,全年平均值为 $-5.9 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。菊花等^[32]在对亚热带神农架地区典型常绿落叶阔叶混交林的研究中发现, CH_4 的年平均通量为 $-36.79 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。由此可见,虽同处亚热带地区,但在不同森林生态系统中 CH_4 吸收通量也存在一定的差异。表明不同的区域环境、通量观测方法等因素都对地气 CH_4 通量的交换造成不同程度的影响。

在观测期间,S 与 SL 处理下的土壤 N_2O 通量呈现显著波动,其波动范围分别为 $13.53 \sim 167.40, 10.93 \sim 108.14 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。2 种处理下土壤 N_2O 年平均通量分别为 $(80.74 \pm 45.24), (52.70 \pm 25.98) \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,不

相较于 SL 处理更低,土壤本身通气性更好。

马秀枝等^[29]在对寒温带兴安落叶松林土壤温室气体通量的研究中发现,土壤 N_2O 通量与土壤温度呈显著正相关,与本研究结果一致。主要是因土壤温度升高,既可促进 N_2O 产生酶的活性,加快土壤硝化与反硝化进程,也可提高 N_2O 在不同土层的扩散速率^[30]。亦有研究^[5]发现,土壤湿度是影响林地土壤温室气体排放的重要因素。本研究中,土壤 N_2O 排放通量与土壤湿度之间的关系表现为土壤 N_2O 排放通量随着土壤湿度的增加而增加,但相关性未达到显著性水平,与 LIU 等^[17]在同处于亚热带地区的常绿阔叶林和毛竹林的研究结果一致,可能是由于本研究区位于亚热带季风区,雨量充沛,土壤湿度较高($19.16\% \sim 30.05\%$)。在土壤湿度较高的条件下,湿度对 N_2O 排放的影响作用可能被温度或其他环境因子的影响掩盖^[31]。



仅高于温带地区阔叶红松林地土壤 N_2O 年平均排放通量[保留凋落物和去除凋落物处理下分别为 $68.70, 33.79 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$],也高于寒温带地区山杨林地土壤 N_2O 年平均通量[保留凋落物和去除凋落物处理下分别为 $32.01, 31.47 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]^[33-34]。分析原因,可能与研究区域的气候紧密相关。本研究区属于典型的亚热带季风气候,降水充沛且雨热同期,适宜的温湿度条件有利于土壤微生物的活性,促进有机质的分解和氮素的转化,从而增加 N_2O 的生成。同时,多雨条件为土壤提供充足的水分,进一步促进微生物的反硝化作用,因此,比温带与寒温带地区林地土壤 N_2O 平均通量高。

3 结论

本研究通过对保留自然凋落物和人为去除凋落物 2 种处理下的阔叶林地土壤对比研究发现,长三角地区阔叶林地土壤表现为大气 CH_4 的汇, N_2O 的源。2 种处理下土壤 CH_4 吸收和 N_2O 排放通量均具有明显的季节变化规律。分析 2 种处理下土壤 CH_4

和 N₂O 通量与土壤理化性质之间的关系发现,土壤有机碳含量对阔叶林地土壤 CH₄ 吸收通量的影响较大。土壤质量密度对保留凋落物处理下的 CH₄ 吸收通量的影响大于去除凋落物处理。土壤温度对阔叶林地土壤 N₂O 排放通量影响较为明显。

阔叶林在森林碳汇方面发挥着重要作用,人为去除阔叶林地土壤表面凋落物后,导致土壤 CH₄ 吸收通量增加,同时也加剧 N₂O 的排放通量。但去除凋落物处理显著增加阔叶林地土壤对 CH₄ 和 N₂O 2 种温室气体的综合增温潜势,对全球气候变暖产生正反馈作用。因此,在森林生态系统的维护与管理中,保留林地土壤表层的自然凋落物有助于提高森林土壤的碳汇能力,在一定程度上减缓全球气候变暖趋势。

参考文献:

- [1] ZHAO Z, YUE Y B, SHA Z M, et al. Assessing impacts of alternative fertilizer management practices on both nitrogen loading and greenhouse gas emissions in rice cultivation [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 119: 393-401.
- [2] 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: Cambridge University Press, 2014.
- [3] GARDNER N, MANLEY B J W, PEARSON J M. Gas emissions from landfills and their contributions to global warming [J]. *Applied Energy*, 1993, 44(2): 165-174.
- [4] BOWDEN R D, DAVIDSON E, SAVAGE K, et al. Chronic nitrogen additions reduce total soil respiration and microbial respiration in temperate forest soils at the Harvard Forest [J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, 196(1): 43-56.
- [5] 刘硕,李玉娥,孙晓涵,等.温度和土壤含水量对温带森林土壤温室气体排放的影响[J].*生态环境学报*, 2013, 22(7): 1093-1098.
LIU S, LI Y E, SUN X H, et al. Effects of temperature and soil moisture on greenhouse gases emission of temperate forest soil [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(7): 1093-1098.
- [6] 高伟峰.大兴安岭连续多年冻土区温室气体释放特征及其影响因素[D].哈尔滨:东北林业大学, 2019.
GAO W F. Emission characteristics and influencing factors of greenhouse gas in the continuous permafrost region of Daxing'an Mountains, Northeast China [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2019.
- [7] 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 X H, HAN H R, XU X F, 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.
- [8] 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 G, LIU T X, WANG G L, 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.
- [9] 许晓静,张凯,刘波,等.森林凋落物分解研究进展[J].*中国水土保持科学*, 2007, 5(4): 108-114.
XU X J, ZHANG K, LIU B, et al. Review on litter decomposition in forest ecosystems [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2007, 5(4): 108-114.
- [10] 王意锟,方升佐,唐罗忠.营林措施及环境与森林凋落物分解的相互关系研究进展[J].*世界林业研究*, 2011, 24(2): 47-52.
WANG Y K, FANG S Z, TANG L Z. A review on the relation between forest management measures, environment and litter decomposition [J]. *World Forestry Research*, 2011, 24(2): 47-52.
- [11] 郑凯端,陈健,周杰,等.长三角地区一次严重雾霾事件的多源遥感监测研究[J].*国土资源遥感*, 2018, 30(1): 224-232.
ZHENG K D, CHEN J, ZHOU J, et al. Research on monitoring of a severe haze pollution over Yangtze River Delta based on multi-source remote sensing data [J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2018, 30(1): 224-232.
- [12] 洪海洋,臧昆鹏,陈圆圆,等.三通道气相色谱法监测大气中 CH₄、CO、CO₂、N₂O 和 SF₆ [J].*色谱*, 2022, 40(8): 763-771.
HONG H X, ZANG K P, CHEN Y Y, et al. Monitoring of atmospheric CH₄, CO, CO₂, N₂O and SF₆ using three-channel gas chromatography [J]. *Chinese Journal of Chromatography*, 2022, 40(8): 763-771.
- [13] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社, 2000: 106-107.
BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 106-107.
- [14] NAZARIES L, TATE K R, ROSS D J, et al. Response of methanotrophic communities to afforestation and reforestation in New Zealand [J]. *The ISME Journal*, 2011, 5(11): 1832-1836.
- [15] 郭家宏,范熠,张西美.温度对不同生态系统土壤甲烷氧化过程和甲烷氧化细菌的影响[J].*中国农业气象*, 2022, 43(6): 427-439.
GUO J H, FAN Y, ZHANG X M. Effect of temperature on soil methane oxidation and methanotrophs in different ecosystems [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2022, 43(6): 427-439.
- [16] STEINKAMP R, BUTTERBACH-BAHL K, PAPEN H. Methane oxidation by soils of an N limited and N fertilized spruce forest in the Black Forest, Germany [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(2): 145-153.

- [17] LIU J, JIANG P K, LI Y F, et al. Responses of N_2O flux from forest soils to land use change in subtropical China[J]. *The Botanical Review*, 2011, 77(3): 320-325.
- [18] 王重阳, 郑靖, 顾江新, 等. 下辽河平原单季稻田主要温室气体排放及驱动机制[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(增刊 1): 237-242.
- WANG C Y, ZHENG J, GU J X, et al. Emission and affecting factors of major greenhouse gases from single-season paddy field in the lower reaches of Liaohe Plain [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(S1): 237-242.
- [19] 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.
- [20] CHENG J, LEE X, ZHOU Z, et al. The effects of litter layer and soil properties on the soil-atmosphere fluxes of greenhouse gases in karst forest, southwest China. [J]. *Polish Journal of Ecology*, 2013, 61(1): 79-92.
- [21] 谢海宽, 李贵春, 徐驰, 等. 不同灌溉方式对设施菜地 N_2O 排放的影响及其年际差异[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(4): 825-832.
- XIE H K, LI G C, XU C, et al. Effect of irrigation pattern on soil N_2O emissions and interannual variability in greenhouse vegetable fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(4): 825-832.
- [22] 郑循华, 王跃思, 沈壬兴, 等. 温度对农田 N_2O 产生与排放的影响[J]. *环境科学*, 1997, 19(5): 3-7.
- ZHENG X H, WANG Y S, SHEN R X, et al. Impacts of temperature on N_2O production and emission [J]. *Environmental Science*, 1997, 19(5): 3-7.
- [23] 何志龙, 周维, 田亚男, 等. 中亚热带丘陵区茶园和林地土壤春季 N_2O 排放及其影响因素[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(6): 1210-1217.
- HE Z L, ZHOU W, TIAN Y N, et al. Nitrous oxide emission and its impact factors in tea garden and woodland soils in subtropical hilly region of China during spring season [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(6): 1210-1217.
- [24] 桑文秀, 杨华蕾, 唐剑武. 不同土地利用类型土壤温室气体排放对温湿度的响应[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2021(4): 109-120.
- SANG W X, YANG H L, TANG J W. Response of soil greenhouse gas emissions to temperature and moisture across different land-use types[J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2021(4): 109-120.
- [25] ROBERTS K G, GLOY B A, JOSEPH S, et al. Life cycle assessment of biochar systems: Estimating the energetic, economic, and climate change potential[J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, 44(2): 827-833.
- [26] 张强, 沈燕, 韩天宇, 等. 湖南莽山 4 种林型甲烷通量及其影响因子[J]. *中南林业科技大学学报*, 2017, 37(9): 104-111.
- ZHANG Q, SHEN Y, HAN T Y, et al. Methane fluxes and the effective factors of four forests in Mangshan, Hunan Province[J]. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 2017, 37(9): 104-111.
- [27] PEICHL M, ARAIN M A, ULLAH S, et al. Carbon dioxide, methane, and nitrous oxide exchanges in an age-sequence of temperate pine forests [J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(8): 2198-2212.
- [28] KUNCORO P H, KOGA K, SATTA N, et al. A study on the effect of compaction on transport properties of soil gas and water I: Relative gas diffusivity, air permeability, and saturated hydraulic conductivity[J]. *Soil and Tillage Research*, 2014, 143: 172-179.
- [29] 马秀枝, 张秋良, 李长生, 等. 寒温带兴安落叶松林土壤温室气体通量的时间变异[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(8): 2149-2156.
- MA X Z, ZHANG Q L, LI C S, et al. Temporal variation of soil greenhouse gases fluxes in a cold-temperate *Larix gmelinii* forest in Inner Mongolia, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(8): 2149-2156.
- [30] ZHAN Y, XIE J F, YAO Z S, et al. Characteristics of annual N_2O and NO fluxes from Chinese urban turf-grasses[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 290: e118017.
- [31] 孙亚楠, 段琳博, 钟华昱, 等. 温室气体排放与番茄产量对水肥气耦合的响应机制研究[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(5): 312-322.
- SUN Y N, DUAN L B, ZHONG H Y, et al. Response mechanism of soil greenhouse gas emission and yield of greenhouse tomato to water-fertilizer-air coupling [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(5): 312-322.
- [32] 菊花, 申国珍, 徐文婷, 等. 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[J]. *生态学报*, 2016, 36(20): 6397-6408.
- JU H, SHEN G Z, XU W T, et al. The emission of CH_4 , CO_2 , and N_2O in the typical forest soil of Shennongjia under the precipitation reduction[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(20): 6397-6480.
- [33] 肖冬梅, 王森, 姬兰柱, 等. 长白山阔叶红松林土壤 N_2O 排放通量的变化特征[J]. *生态学报*, 2004, 23(5): 46-52.
- XIAO D M, WANG M, JI L Z, et al. Variation characteristics of soil N_2O emission flux in broad-leaved *Korean* pine forest of Changbai Mountain[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(5): 46-52.
- [34] 高明磊. 林下植被和凋落物对寒温带天然林土壤温室气体通量的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2021.
- GAO M L. Effects of understory vegetation and litter on soil greenhouse gas fluxes of natural forests in cold temperate zone[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2021.