DOI: 10.20103/j.stxb.202401140121

王剑南,崔嵘,池成林,董立本,张吉利.增温对蒙古栎林土壤呼吸及组分的影响.生态学报,2024,44(22):10367-10376. Wang J N, Cui R, Chi C L, Dong L B, Zhang J L.The effect of experimental warming on soil respiration and its components of *Quercus mongolica* forest. Acta Ecologica Sinica,2024,44(22):10367-10376.

增温对蒙古栎林土壤呼吸及组分的影响

王剑南^{1,2,3},崔 嵘^{1,2,3},池成林^{1,2,3},董立本^{1,2,3},张吉利^{1,2,3,*}

1 国家林业和草原局哈尔滨林业机械研究所,哈尔滨 150086

2 中国林科院寒温带林业研究中心,哈尔滨 150086

3 黑龙江抚远森林生态系统定位观测研究站, 抚远 156500

摘要:为明确气候变暖对蒙古栎林土壤碳排放的潜在影响,以三江平原蒙古栎次生林为研究对象,分析 5—11 月土壤呼吸组分 对增温(1℃)和断根交互处理的响应。结果表明,增温使未断根组表层土壤平均升高 1.35℃,断根组表层土壤平均升高0.65℃, 表层土壤含水量平均升高 0.02m³/m³(P<0.05),土壤总呼吸速率增加 11.9%(P<0.05),土壤异养呼吸无显著变化(P>0.05)。各 月份土壤异养呼吸速率占土壤总呼吸速率的比例均达到 50%以上。土壤温度与土壤总呼吸速率、土壤异养呼吸速率均呈现指 数正相关关系(P<0.01),土壤体积含水量与土壤总呼吸速率、土壤异养呼吸速率呈现线性负相关关系(P<0.01)。增温会导致土 壤呼吸温度敏感性(Q₁₀)降低,其中土壤总呼吸 Q₁₀值降低 0.45,土壤异养呼吸 Q₁₀值降低 0.39。不同月份 Q₁₀存在差异,其中 9 月 份最高,其次为 8 月份和 10 月份,11 月份最低。双因素方差分析表明,以增温、断根为自变量时主效应存在(P<0.05),二者无显著 交互作用(P>0.05)。模拟气候变暖初期蒙古栎林土壤总呼吸速率会显著升高,增加的土壤碳排放会进一步促进气候变暖,不同季 节土壤呼吸速率升高幅度存在差异,夏季土壤碳排放要高于其它季节,而 Q₁₀则是于夏季和秋季的过渡时段更高。 关键词;土壤呼吸;蒙古栎林;增温实验;土壤呼吸敏感性;土壤碳循环

The effect of experimental warming on soil respiration and its components of *Quercus mongolica* forest

WANG Jiannan^{1,2,3}, CUI Rong^{1,2,3}, CHI Chenglin^{1,2,3}, DONG Liben^{1,2,3}, ZHANG Jili^{1,2,3,*}

1 Harbin Research Institute of Forestry Machinery, National Forestry and Grassland Administration, Harbin 150086, China

2 Research Center of Cold Temperate Forestry, Chinese Academy of Forestry, Harbin 150086, China

3 Fuyuan National Key Field Observation and Research Station for Forest Ecosystem in Heilongjiang, Fuyuan 156500, China

Abstract: To investigate the potential impact of climate warming on soil carbon emissions from *Quercus mongolica* forest, the response of soil respiration components to a 1°C temperature increase and root-cutting interaction during the period from May to November was examined in a secondary forest dominated by *Quercus mongolica* in the Sanjiang Plain. The findings demonstrated that the average increase in surface soil temperature was 1.35° C in the unbroken root group and 0.65° C in the broken root group, while the average increase in surface soil water content was $0.02m^3/m^3(P<0.05)$. Additionally, there was an 11.9° increase in soil total respiration rate (P<0.05), with no significant changes observed in soil heterotrophic respiration rate to total soil respiration rate exceeded 50% in all groups during each month. The soil temperature exhibited a significant positive correlation with both the total respiration rate of the soil (P<0.01), while the soil volume water content exhibited a significant negative correlation with both the soil total respiration rate and the soil heterotrophic respiration rate (P<0.01). The increase in

收稿日期:2024-01-14; 网络出版日期:2024-08-22

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(CAFYBB2020ZA001-1);国家重点研发计划课题(2021YFD2200402)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: xtafktj@126.com

temperature led to a reduction in the sensitivity of soil respiration (Q_{10}), with the Q_{10} value of total soil respiration decreasing by 0.45 and the Q_{10} value of heterotrophic soil respiration decreasing by 0.39. Q_{10} exhibited temporal variations, with the highest values observed in September, followed by August and October, while the lowest values were recorded in November. The two-way ANOVA revealed a significant main effect when temperature increase and root breaking were treated as independent variables (P < 0.05). However, no significant interaction between them was observed (P > 0.05). During the initial phase of simulated climate warming, there was a 11.9% increase in total soil respiration rate in *Quercus mongolica* forest in average, leading to an amplified emission of soil carbon and further exacerbating climate change. Seasonal variations were observed in the magnitude of this increase, with higher soil carbon emissions occurring during summer months and greater sensitivity to changes in temperature during the transition from summer to autumn.

Key Words: soil respiration; Quercus mongolica; warming experiment; soil respiration sensitivity; soil carbon cycling

土壤碳库是陆地生态系统碳库的最大组分,调节土壤向大气中排放的 CO₂对于减缓全球变暖进程具有重要意义。然而,目前对气候变暖如何影响土壤碳排放以及内在影响机制仍不完全清楚^[1-3]。土壤呼吸是一种较为复杂的生物化学过程,主要包括自养呼吸(主要为植物根系呼吸)和异养呼吸(主要为土壤微生物呼吸), 受温度、湿度和土壤 pH 等诸多环境因素的影响^[4]。

自 20 世纪 90 年代,一些研究者通过林地土壤下埋藏电缆^[5]、红外加热^[6]、开顶箱^[7]等方式开展增温研究,普遍认为模拟气候变暖会显著提高森林土壤呼吸速率。对亚热带针叶林的研究发现增温 0.95℃时会刺激 土壤 CO₂排放^[8]。在云南哀牢山亚热带森林的增温实验中,土壤温度升高了 2.1℃,土壤异养呼吸速率增加 22.9%^[6]。在青藏高原亚高山森林的增温实验中,当温度升高 4℃,土壤总呼吸速率增加 45.1%^[5]。而 Liu 等 在暖温带研究发现,红外线加热器可以使土壤温度上升 1.4—1.9℃,土壤总呼吸速率上升 32.0%—46.3%^[9]。

除了对土壤呼吸产生直接影响外,增温也会降低土壤总呼吸、自养呼吸和异养呼吸的温度敏感性,而自养 呼吸的温度敏感性高于异养呼吸^[10]。土壤呼吸具有明显的季节变化特征,但在南亚热带森林研究发现增温 对旱季土壤呼吸的影响要大于对湿季,湿季气温可能更接近或已经达到土壤呼吸的最适温度,可能是该时段 增温影响土壤呼吸并不明显的原因^[4]。土壤温、湿度共同解释土壤呼吸的季节变化^[11-13],二者可以通过影 响土壤微生物群落和土壤酶等途径影响土壤呼吸及其组分^[14-15]。目前多数野外控制增温实验在季节间温差 较小的温带、亚热带或热带森林生态系统开展。然而,对于北半球北方森林土壤呼吸如何响应气候变暖的研 究十分有限^[16-17]。

蒙古栎(Quercus mongolica)为壳斗科栎属一种,是中国东北地区的珍贵用材树种和阔叶林主要组成树种, 蒙古栎受气候变暖的作用明显,地理分布范围呈继续扩大趋势^[18-20]。本研究以抚远地区蒙古栎林为研究对 象,建立我国纬度最高的森林野外原位土壤增温控制实验,连续多月测定土壤温度、土壤体积含水量及土壤呼 吸速率等指标。通过断根处理分析增温对土壤不同呼吸组分的影响,预期揭示①在寒冷地区的东北蒙古栎林 土壤呼吸及其组分如何响应土壤增温,②增温对蒙古栎林土壤呼吸及其组分的影响是否随季节显著变化。研 究结果将为蒙古栎林的经营及管理提供理论依据,为精准评估气候变化背景下我国东北森林的土壤碳汇提供 数据支撑。

1 试验地概况与研究方法

1.1 试验地概况

研究区域位于黑龙江省抚远市林业局,该地区属于中温带大陆性气候,年平均气温 2.2℃,年平均降水量 约 600mm,年有效积温 2200℃,全年无霜期平均约为 150d,降雪主要集中于 11 月至次年 4 月,平均海拔 245m。当地森林植被具有明显的岛状分布特征,区域优势与代表性较强。研究样地主要植被类型是以蒙古

栎为优势种的温带阔叶林,主要伴生乔木包括白桦 (Betula platyphylla)、色木槭(Acer mono)、山杨(Populus davidiana)、紫椴(Tilia amurensis)和黑桦(Betula dahurica)等,乔木平均胸径约15.9cm,灌木树种包括毛 榛子(Corylus mandshurica)、刺五加(Acanthopanax senticosus)、胡枝子(Lespedeza bicolor)和接骨木 (Sambucus williamsii)等,草本有轮叶沙参(Adenophora tetraphylla)、唐松草(Thalictrum aquilegiifolium)、地榆 (Sanguisorba officinalis)和小叶章(Calamagrostis angustifolia)等。



图 1 研究样地基本情况 Fig.1 Distribution of sample sites

1.2 样地设置

于 2021 年 6 月选取林龄、坡向相近的 6 块蒙古栎

样地,每块样地大小为 3m×4m,树木平均胸径 15.2cm,平均树高 12m,林分密度 1100 株/hm²,样地属东北半阳 坡,坡度 5—10°。6 块样地均进行增温及断根处理,4 种处理组合(对照、增温、断根、增温+断根)共 24 个处理 样方(图 2)。本研究采用温度可控的 kaglo-5120m 红外线增温管与传统 OTC 增温棚于 2023 年 4 月开始进行 联合增温,增温管采悬挂高度为 1.5m,使土壤 5cm 深度温度升高约 1℃。采用壕沟法进行断根处理,在样方四 周挖约 1—2m 壕沟,埋入厚塑料布阻断样方外根系进入。断根样方内,每两周清除一次所有地上植被。



图 2 为增温棚内增温管、LI-8100 土壤呼吸仪及其传感器、断根处理方法及样地布设图

1.3 土壤呼吸及土壤温湿度测定

土壤呼吸测定:采用 LI-8100 土壤碳通量测量系统,于 2023 年 5—11 月每月中下旬在无降雨的气象条件





Fig.3 Meteorological data of sample sites during the observation period

下测定 3d,每天于上午 9:00—12:30 测定一次。在每次测定土壤呼吸的同时分别采用 LI-8100 土壤碳通量测量系统附带的温湿度传感器(LI-8100-201、Diviner-2000)测定 0—5cm 土层土壤温湿度。

1.4 土壤呼吸温度敏感性计算

土壤呼吸温度敏感性(*Q*₁₀)表示土壤呼吸的温度敏感系数,即温度升高 10 ℃时土壤呼吸速率升高的倍数,增温与对照状态下土壤呼吸速率与对应呼吸组分土壤温度之间的关系,采用指数模型进行模拟:

$$R = \alpha e^{\beta T} \tag{1}$$

式中: R 是土壤呼吸速率(μ mol m⁻² s⁻¹), T 是对应呼吸组分 5cm 的土壤温度(\mathbb{C}), α, β 是方程拟合参数。土 壤呼吸的温度敏感性(Q_{10}) 计算公式:

$$Q_{10} = e^{10\beta} \tag{2}$$

1.5 数据分析

用 EXCEL 2016 软件进行图表的绘制。利用 SPSS 21.0 统计软件,对不同处理样地间的土壤呼吸速率、土壤温湿度采用单因素方差分析法(One-way ANOVA)进行显著性差异分析(*P*<0.05),并采用双因素方差分析(Two-way ANOVA)分析以土壤呼吸速率为因变量,增温、断根为因变量的主效应及交互效应。

2 结果与分析

2.1 各处理组和对照组土壤温度变化

增温导致土壤温度显著增加1℃。7月土壤温度达到最高值,其中增温-未断根组土壤温度最高,为18. 95℃。8月后土壤温度开始明显下降,至11月时土壤温度已降至0℃以下,而断根处理未对土壤温度造成显 著影响(图4)。

2.2 各处理组和对照组土壤体积含水量变化

增温导致土壤体积含水量显著增加(P<0.05),其中断根组增加0.02m³/m³,未断根组增加0.02m³/m³。 5—7月土壤体积含水量逐渐下降,其中7月对照-未断根组土壤体积含水量最低,为0.19m³/m³。土壤体积含水量于8月有所回升,8—10月土壤体积含水量趋于平稳,而11月土壤体积含水量几乎趋近于0。断根组土

壤体积含水量要高于未断根组(图5)。



图 4 各处理组和对照组土壤温度变化



图 4 表示 5—11 月土壤温度变化的柱形图及不同处理组 2023 年平均土壤温度变化的柱形图,图中数据为平均值(标准差);不同小写字母 表示断根处理后与未断根处理下土壤温度存在显著性差异(P<0.05);不同大写字母表示相同断根处理下对照组与增温组之间土壤温度存 在显著性差异(P<0.05)





Fig.5 Changes of soil volume water content in each treatment group and control group

图 5 表示 5—11 月土壤体积含水量变化的柱形图及不同处理组 2023 年平均土壤体积含水量变化的柱形图,图中数据为平均值(标准差); 不同小写字母表示断根处理后与未断根处理下土壤体积含水量存在显著性差异(P<0.05)。不同大写字母表示对照组与增温组之间土壤 体积含水量存在显著性差异(P<0.05)

2.3 各处理组和对照组土壤呼吸速率变化

增温导致非断根组土壤呼吸速率显著增加 11.9%,断根组土壤呼吸无显著变化。断根导致土壤呼吸速率 显著降低,其中对照组降低了 16.3%,增温组降低了 14.3%。总体上看温度越高,土壤呼吸速率越高,而在 7 月份,除对照-未断根组外,其余三组土壤呼吸速率相较于 6 月均呈现了下降的趋势,且该三组土壤呼吸速率 于 8 月份均回升并达到今年最高值,8 月后土壤呼吸速率开始明显下降,于 11 月时均降至 1.5μmol m⁻² s⁻¹以 下(图 6)。

2.4 土壤总呼吸速率变化与土壤温度、土壤体积含水量的关系

将 5—11 月土壤呼吸观测数据汇总后,结果发现:增温导致土壤总呼吸温度敏感性降低。土壤总呼吸速 率与土壤温度、土壤体积含水量均呈现显著相关(P<0.05),土壤温度与土壤总呼吸速率均呈现极显著指数正 相关(P<0.01),而土壤体积含水量与土壤总呼吸速率则呈显著线性负相关(P<0.05)(图 7、图 8)。

将 5—11 月土壤异养呼吸数据汇总后,结果表明增温导致土壤异养呼吸温度敏感性降低。土壤异养呼吸 速率与土壤温度、土壤体积含水量均呈现极显著相关(P<0.01)。土壤温度与土壤异养呼吸速率均呈极显著





图 6 各处理组和对照组土壤呼吸速率变化



图 6 表示 5-11 月土壤呼吸速率变化的柱形图及不同处理组 2023 年平均土壤呼吸速率变化的柱形图,图中数据为平均值(标准差);不同 小写字母表示断根处理与未断根处理之间土壤呼吸速率存在显著性差异(P<0.05)。不同大写字母表示对照组与增温组之间土壤呼吸速 率存在显著性差异(P<0.05)



图 7 土壤总呼吸速率-土壤温度回归散点图方程

Fig.7 Soil total respiration rate-soil temperature regression scatter plot equation

指数正相关(P<0.01),而土壤体积含水量与土壤异养呼吸速率呈极显著线性负相关(P<0.01)。土壤异养呼 吸速率与土壤总呼吸对土壤温度、土壤体积含水量相关性基本一致(图9、图10)。

2.5 增温对土壤呼吸敏感性的影响

将 5—11 月土壤呼吸敏感性数据(Q₁₀)汇总后可以看出:9 月土壤呼吸敏感性显著高于其他月份,11 月除 增温-未断根组外,其余三组土壤呼吸敏感性均降至1以下,除对照-断根组外,其余三组土壤呼吸敏感性于 5-6月均处于上升趋势并于7月份开始下降,而对照-断根组则在6月便出现了下降的趋势,并于7月开始回 升。四组处理组8月份土壤呼吸敏感性均高于7月份,于9月达到峰值后开始下降,其中增温-未断根组11 月出现了回升的趋势,而其余三组于11月均达到观测时段(5—11月)最低值(图11)。

2.6 双因素方差分析

将 5—11 月土壤呼吸观测结果汇总后,通过双因素方差分析,以土壤呼吸速率为因变量,以增温和断根处 理为自变量时(表1)可以看出,以增温、断根分别为自变量时均存在主效应(增温:F=14.561,P<0.05,断根: F=28.048,P<0.05),而以"增温与断根的交互项"为自变量时,双因素方差分析模型不显著(F=0.222,P>

10

8











Fig.9 Soil heterotrophic respiration rate-soil volumetric water content regression scatter plot equation





Fig.10 Soil heterotrophic respiration rate-soil volumetric water content regression scatter plot equation

0.05),说明二者没有交互效应。

3 讨论

在本研究中,采用壕沟法对根系切除进而区分土壤 总呼吸和土壤异养呼吸。虽然这一方法已广泛应 用^[4,9],但断根后死根分解的启动效应会影响土壤水 分、土壤温度、土壤微生物等变化,这种变化会对土壤异 养呼吸的判断产生误差^[21]。在前期研究中,对 2022 年 6月、8月于本样地的观测数据表明,未断根组土壤体积 含水量较断根组显著降低,可能是由于断根后,缺少根 系从土壤中吸收水分的过程,导致断根后土壤体积含水



图 11 各处理组和对照组 Q10 变化



量升高^[22],该结果可能会导致异养呼吸的高估^[23]。而在本研究中,断根未对 5—11 月平均土壤体积含水量 造成显著影响(图 5),可能是由于当地 6 月、8 月降水较多,而本研究范围在 5—11 月,且测量前一周基本未发 生降水或仅发生少量降水(图 3)。在本研究中,断根后土壤温度和土壤体积含水量均未发生显著变化,可以 认为断根组呼吸速率未受到断根后温度、水分变化的间接影响。

Table 1 Results of two-way ANOVA					
差异源 Source of Differences	Ⅲ型平方和 Type III sum of squares	df	均方 Mean square	F	Р
截距 Intercept	5077.580	1	5077.580	2511.470	0.000
增温 Warming	14.561	1	14.561	7.202	0.007
断根 Root-cutting treatments	28.048	1	28.048	13.873	0.000
增温×断根 Warming×Root-cutting treatments	0.222	1	0.222	0.110	0.741
误差 Error	1348.511	667	2.022		

表1 双因素方差分析结果

 $R^2 = 0.245$

7月土壤体积含水量较6月回落了0.08—0.11m³/m³(图5),则可能是由于6月测量前一周发生少量降水(12.2mm),而7月测量前一周未发生降水,同时温度升高会导致土壤中水分蒸发作用增强,降低了土壤体积含水量^[24],而11月土壤体积含水量趋近于0,则是由于11月土壤温度已经降至零下(-0.8—-2.2°C),0—10cm 土层大部分液态水已经结冰造成。土壤体积含水量与土壤呼吸速率主要呈极显著二次抛物线相关关系,过高(>0.4m³/m³)和过低(<0.1m³/m³)的土壤体积含水量都会抑制土壤呼吸作用(图8、图10),该结果与 王一等在暖温带锐齿栎林的研究结果基本一致^[25]。在本研究中,适宜的土壤含水量(0.2—0.3m³/m³)会丰富 土壤呼吸可用底物,同时提高土壤有机质的流动性和有效性,使土壤呼吸底物更容易分解。土壤含水量低会抑制土壤微生物对营养物质的获取能力并降低土壤有机碳的活性,而土壤含水量过高则可能会抑制根系生物 量和土壤微生物活性并形成厌氧环境,抑制土壤呼吸速率^[26]。

将 5—11 月土壤呼吸观测结果通过双因素方差分析法分析后后可以看出,以增温、断根为自变量时均存 在显著主效应,说明二者均会显著影响土壤呼吸作用(表 1)。研究结果表明,土壤异养呼吸速率占土壤总呼 吸速率的 50%以上,说明在蒙古栎次生林中土壤异养呼吸是土壤总呼吸的主导部分,该结果与 Noh 等对寒温 带栎树林进行土壤增温后的结果—致^[27]。增温使土壤总呼吸起到了显著升高 11.9%(图 6),而 Noh 的研究 土壤总呼吸增加了 32%—45%,是由于其研究当地气候较冷,且土壤温度增加了 5℃,而本增温研究只提高土 壤温度约 1℃,与王一等的研究结果(增温 1.64℃,土壤呼吸速率增加 12.9%)相似^[25]。在相同增温手段下 (OTC+增温管),增温效果出现了差异,可能是由于于气候因素和增温方式的不同,本研究区域的年均温度较 低并且增温幅度较小,同时增温研究开展时间较短,短期增温对土壤呼吸的刺激效应可能有限,长期效应仍有 待观测。然而,2011—2020年全球地表温度比1850—1900年升高了1.1℃,持续的温室气体排放将导致全球 温升进一步增加,在纳入考虑的情景和模式路径中,全球温升的最佳估计值会在近期(2021—2040年)内达到 1.5℃,本研究升温幅度基本与预测的全球气候变暖升温趋势基本一致,可以视为模拟全球气候变暖的情境。

Wang 等对南亚热带红椎林的研究发现,增温对红椎林土壤呼吸的影响存在季节变化,增温后湿季土壤呼 吸速率强于旱季^[4]。在本研究中,模拟气候变暖对不同季节土壤呼吸速率的影响同样存在差异(图6),总体 上夏季土壤呼吸速率更高,可能是夏季更强的光照强度与更长的光照时间,增强了光合作用,光合作用产物向 土壤输送,土壤异养呼吸底物含量升高,土壤呼吸作用增强^[28]。但在7月除对照-未断根组外,其余三组土壤 呼吸速率相较于6月均呈现了下降的趋势,说明当月土壤自养呼吸作用增强,异养呼吸速率减弱,可能是此时 体积含水量低(0.19—0.23m³/m³),土壤异养呼吸作用受到了抑制。而8月温度下降,土壤体积含水量升高 (0.30—0.34m³/m³),促进了异养呼吸作用,除对照-未断根组下降外,其余三组呼吸作用全部回升(图6),可 能是由于8月在外界环境的刺激下,土壤微生物群落产生了适应外界环境的变化,同时8月地上异养呼吸的 底物更多,导致土壤呼吸速率增加。

 Q_{10} 是评价全球气候变化与陆地碳循环之间反馈关系的有效参数。生态系统、植被类型及区域的不同均 会导致 Q_{10} 值出现差异^[29]。 Q_{10} 主要受土壤生物、底物以及环境因子影响^[30],一般来说,气候越冷, Q_{10} 值就越 高^[31]。而随着温度的升高,水分过高或过低时 Q_{10} 降低^[30]。7月份 Q_{10} 降低可能是由于温度升高导致,9月 Q_{10} 显著高于其他月份,而10月份后 Q_{10} 开始下降,说明10月份后降雨减少并且土壤逐渐进入冻融期,含水量 逐渐降低,11月除增温-未断根组外,其余三组 Q_{10} 值均降至1以下,则可能是由于土壤水分过低导致(图11)。 土壤呼吸速率-土壤温度回归方程表明,增温导致 Q_{10} 降低 0.39—0.45,该结果与 Noh 的结果(0.38—0.43)比较 相似^[27],而断根后 Q_{10} 降低,则是由于土壤生物量由于断根处理急剧减少,影响了土壤呼吸过程,进而导致土 壤呼吸敏感性降低^[32](图 7,图 9)。土壤理化性质、时空尺度甚至生物因素等同样会影响 $Q_{10}^{[33-34]},增温对$ $<math>Q_{10}$ 的影响机制仍需要今后的补充实验来探索。

综上所述,在短期的增温处理下,蒙古栎林土壤温度、土壤体积含水量、土壤总呼吸速率均会显著上升,土 壤呼吸温度敏感性下降。说明在未来全球气候变暖的大背景下,作为我国东北地区蒙古栎森林生态系统也可 能会受到影响。全球气候变暖可能会通过改变土壤温度和土壤体积含水量,进而改变土壤自养和异养呼吸导 致三江平原蒙古栎天然林的整体土壤碳排放增加,且不同季节土壤呼吸速率升高幅度也存在差异,夏季土壤 碳排放要高于其它季度土壤碳排放。

4 结论

通过建立在我国纬度最高地区的森林土壤增温实验,本研究发现短期增温使蒙古栎林土壤总呼吸显著增强,但是对土壤异养呼吸未造成显著影响,同时发现增温对土壤呼吸的影响存在季节差异。还发现了增温降低了蒙古栎林土壤总呼吸和土壤异养呼吸的温度敏感性。因此,气候变暖情境下,三江平原地区蒙古栎天然次生林的土壤碳排放速率可能会增加,抵消森林生长的碳汇积累。建议通过对蒙古栎天然林的合理择伐和优化树种配置提高中幼龄林的碳汇功能,以降低气候变暖背景下土壤碳排放急剧增加的潜在风险。

参考文献(References):

- [1] 田茜,杨芳,王召欢,张庆印.陆地生态系统土壤 CO₂排放对模拟增温的响应特征及影响因素.生态学报,2024,44(5):1928-1939.
- [2] 田宁,黄雪梅,陈龙池,黄苛,陶晓.施石灰对杉木人工林土壤呼吸及其温度敏感性的影响.应用生态学报,2023,34(5):1194-1202.
- [3] 吴丹咏,王秀君,雷慧闽.华北平原冬小麦-夏玉米农田生态系统土壤自养和异养呼吸模型构建.生态学报,2024,44(6):2364-2378.
- [4] Wang H, Liu S R, Wang J X, Li D, Shi Z M, Liu Y C, Xu J, Hong P Z, Yu H L, Zhao Z, Ming A G, Lu L H, Cai D. Contrasting responses of heterotrophic and root-dependent respiration to soil warming in a subtropical plantation. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 247: 221-228.
- [5] Sun S Q, Wu Y H, Zhang J, Wang G X, DeLuca T H, Zhu W Z, Li A D, Duan M, He L. Soil warming and nitrogen deposition alter soil

respiration, microbial community structure and organic carbon composition in a coniferous forest on eastern Tibetan Plateau. Geoderma, 2019, 353: 283-292.

- [6] Wu C S, Liang N S, Sha L Q, Xu X L, Zhang Y P, Lu H Z, Song L, Song Q H, Xie Y N. Heterotrophic respiration does not acclimate to continuous warming in a subtropical forest. Scientific Reports, 2016, 6: 21561.
- [7] Xu Z F, Wan C, Xiong P, Tang Z, Hu R, Cao G, Liu Q. Initial responses of soil CO₂ efflux and C, N pools to experimental warming in two contrasting forest ecosystems, Eastern Tibetan Plateau, China. Plant and Soil, 2010, 336(1): 183-195.
- [8] Xu G, Jiang H, Zhang Y B, Korpelainen H, Li C Y. Effect of warming on extracted soil carbon pools of *Abies faxoniana* forest at two elevations. Forest Ecology and Management, 2013, 310: 357-365.
- [9] Liu Y C, Liu S R, Wan S Q, Wang J X, Luan J W, Wang H. Differential responses of soil respiration to soil warming and experimental throughfall reduction in a transitional oak forest in central China. Agricultural and Forest Meteorology, 2016, 226: 186-198.
- [10] 余恒,张宇辉,郑蔚,郑永,魏智华,周嘉聪,刘小飞,陈仕东,杨智杰. 增温对寒潮期间亚热带常绿阔叶天然林土壤呼吸的影响. 水土 保持学报, 2023, 37(2): 301-309.
- [11] 杨月,杨华蕾,李昌达,杜明卉,吾娟佳,唐剑武.浙南人工红树林土壤呼吸季节变化特征及其对蓝碳功能的影响.海洋环境科学, 2023,42(6):825-833.
- [12] 孙亚荣,陈云明,王亚娟,刘少华,赵敏,刘乐,卢森堡.黄土丘陵区柠条人工林土壤水分动态变化特征及降雨特征对其影响.水土保持 学报,2023,37(1):272-279.
- [13] 郝艺晴,田慧敏,胡晓杰,刘彦春,琚煜熙,张旺.坡度和季节变化对鸡公山栓皮栎林土壤呼吸速率的影响.浙江林业科技,2021,41
 (6):9-14.
- [14] González-Real M M, Egea G, Martin-Gorriz B, Nortes P A, Baille A. Spatial variability of soil CO₂ efflux in drip-irrigated old and young citrus orchards and its dependence on biotic factors. Geoderma, 2017, 294: 29-37.
- [15] Chen Q Y, Niu B, Hu Y L, Luo T X, Zhang G X. Warming and increased precipitation indirectly affect the composition and turnover of labilefraction soil organic matter by directly affecting vegetation and microorganisms. The Science of the Total Environment, 2020, 714: 136787.
- [16] 赵世魁, 郭晋平, 张芸香. 暖温带山地天然次生林演替序列根系呼吸速率对林地增温的响应. 林业科学, 2023, 59(2): 10-21.
- [17] 刘运通,张一平,武传胜,梁乃申,沙丽清,罗鑫,刘玉洪.模拟亚热带常绿阔叶林土壤温度与土壤异养呼吸对气候变暖的响应.生态学 杂志,2016,35(7):1799-1806.
- [18] 于顺利,马克平,陈灵芝.东北地区蒙古栎群落区系地理成分分析.应用生态学报,1999,10(5):539-541.
- [19] 郭建平,高素华,刘玲,周广胜.气候变化对蒙古栎生长和气候生产力的影响.资源科学,2005,27(5):168-172.
- [20] 殷晓洁,周广胜,隋兴华,何奇瑾,李荣平.蒙古栎地理分布的主导气候因子及其阈值.生态学报,2013,33(1):103-109.
- [21] Hanson P J, Edwards N T, Garten C T, Andrews J A. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations. Biogeochemistry, 2000, 48(1): 115-146.
- [22] 王剑南,崔嵘,杜阳,池成林,张国强,张国庆,张吉利.模拟增温对不同月份蒙古栎林土壤呼吸的影响.温带林业研究,2023,6(3): 1-7.
- [23] Yan L M, Chen S P, Huang J H, Lin G H. Differential responses of auto- and heterotrophic soil respiration to water and nitrogen addition in a semiarid temperate steppe. Global Change Biology, 2010, 16(8): 2345-2357.
- [24] 孙宝玉,韩广轩. 模拟增温对土壤呼吸影响机制的研究进展与展望. 应用生态学报, 2016, 27(10): 3394-3402.
- [25] 王一,刘彦春,刘世荣,陆海波.模拟气候变暖和林内穿透雨减少对干旱年暖温带锐齿栎林土壤呼吸的影响.林业科学研究,2016,29 (5):698-704.
- [26] Lellei-Kovács E, Kovács-Láng E, Botta-Dukát Z, Kalapos T, Emmett B, Beier C. Thresholds and interactive effects of soil moisture on the temperature response of soil respiration. European Journal of Soil Biology, 2011, 47(4): 247-255.
- [27] Noh N J, Kuribayashi M, Saitoh T M, Nakaji T, Nakamura M, Hiura T, Muraoka H. Responses of soil, heterotrophic, and autotrophic respiration to experimental open-field soil warming in a cool-temperate deciduous forest. Ecosystems, 2016, 19(3): 504-520.
- [28] Kuzyakov Y. Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 38(3): 425-448.
- [29] Zheng Z M, Yu G R, Fu Y L, Wang Y S, Sun X M, Wang Y H. Temperature sensitivity of soil respiration is affected by prevailing climatic conditions and soil organic carbon content: a trans-China based case study. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(7): 1531-1540.
- [30] 杨庆朋,徐明,刘洪升,王劲松,刘丽香,迟永刚,郑云普.土壤呼吸温度敏感性的影响因素和不确定性.生态学报,2011,31(8): 2301-2311.
- [31] Noh N J, Kuribayashi M, Saitoh T M, Muraoka H. Different responses of soil, heterotrophic and autotrophic respirations to a 4-year soil warming experiment in a cool-temperate deciduous broadleaved forest in central Japan. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 247; 560-570.
- [32] Nikolova P S, Raspe S, Andersen C P, Mainiero R, Blaschke H, Matyssek R, Häberle K H. Effects of the extreme drought in 2003 on soil respiration in a mixed forest. European Journal of Forest Research, 2009, 128(2): 87-98.
- [33] Craine J, Spurr R, McLauchlan K, Fierer N. Landscape-level variation in temperature sensitivity of soil organic carbon decomposition. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 42(2): 373-375.
- [34] Fierer N, Craine J, McLauchlan K, Schimel J. Litter quality and the temperature sensitivity of decomposition. Ecology, 2005, 86: 320-326.