

## 降雨梯度对林地土壤呼吸温度敏感性影响研究进展

罗伶书<sup>1,2</sup>, 杜 盛<sup>2,3\*</sup>

(1. 西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨陵 712100; 2. 西北农林科技大学 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨陵 712100; 3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100)

**摘 要:**在全球气候变化背景下,降雨格局改变导致生态系统碳循环发生变化,土壤呼吸温度敏感性( $Q_{10}$ )是土壤呼吸机理研究和碳排放模型构建与预测的重要内容,探究降雨梯度下林地土壤呼吸温度敏感性的影响因素具有重要意义。以我国生态气候区作为降雨梯度表征,基于公开发表的文献资料,重点总结以我国干旱、半干旱和半湿润3个气候区确定的降雨梯度下,林地土壤呼吸温度敏感性影响的研究进展和作用机理。结果表明,降雨梯度下降雨格局改变会对土壤水热状况、土壤底物、土壤微生物群落及其酶活性等产生影响,土壤水分、土壤温度、土壤有机质、土壤微生物及酶活性和林地植被类型都会影响土壤呼吸强度,导致土壤呼吸温度敏感性发生变化;降雨梯度下,各因素对土壤呼吸温度敏感性影响程度不同,且各因素相互作用,导致林地土壤呼吸温度敏感性存在不确定性。针对目前林地土壤呼吸温度敏感性研究所存在的问题,建议今后应进一步统一土壤呼吸测定标准,通过长期野外实验结合室内模型推演增加试验结果的准确性,扩大研究范围,准确估算未来气候变化条件下林地的土壤呼吸温度敏感性。

**关键词:**降雨梯度;土壤呼吸温度敏感性;降雨格局;影响因素;碳排放

**中图分类号:**S714.5      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2023)02-0076-08

## Research Progress on the Effects of Rainfall Gradient on the Temperature Sensitivity of Soil Respiration in Woodland

LUO Ling-shu<sup>1,2</sup>, DU Sheng<sup>2,3\*</sup>

(1. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China)

**Abstract:** Under the background of global climate change, the change of rainfall pattern leads to the change of forest ecosystem carbon cycle. Soil respiration temperature sensitivity ( $Q_{10}$ ) is an important content of soil respiration mechanism research and carbon emission model construction and prediction. It is of great significance to explore the influencing factors of forest soil respiration temperature sensitivity under rainfall gradient. Based on the published literatures, this study identified the semi humid, semi-arid and arid climate regions as three rainfall gradients, and each rainfall gradient represents the rainfall range divided by the climate region. It summarized the research progress and action mechanism of the influencing factors of soil respiration temperature sensitivity of forest land in China under the rainfall gradient. Research progress shows that the change of rainfall pattern under rainfall gradient will have an impact on soil moisture and heat status, soil substrate, soil microbial community and its enzyme activity, while soil moisture, soil temperature, soil organic matter, soil microorganisms and enzyme activity and forest vegetation type will affect

收稿日期:2022-02-05 修回日期:2022-07-19

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0504601)。

第一作者:罗伶书。研究方向:黄土高原植被恢复与水土保持。E-mail:2358567014@qq.com

\* 通信作者:杜 盛,博士生导师,研究员。研究方向:树木生理生态、植被恢复以及森林生态系统。E-mail:shengdu@ms.iswc.ac.cn

soil respiration intensity, resulting in the change of soil respiration temperature sensitivity, and under rainfall gradient. The influence of various factors on the sensitivity of soil respiration temperature is different, and the interaction of various factors leads to the uncertainty of  $Q_{10}$  in woodlands. In view of the problems existing in the current research on soil respiration temperature sensitivity of forest land, it is suggested that the measurement standard of soil respiration should be further unified in the future, the accuracy of the experimental results should be increased through long-term field experiments combined with indoor model deduction, and the research scope should be expanded to accurately estimate the soil respiration temperature sensitivity of forest land under the condition of future climate change.

**Key words:** rainfall gradient; temperature sensitivity of soil respiration; rainfall pattern; influencing factor; carbon emission

土壤呼吸是陆地生态系统碳循环的重要组成部分,林地土壤呼吸特征及动态变化对森林生态系统碳循环和大气二氧化碳( $\text{CO}_2$ )浓度以及全球气候变化都有重要影响。据估测,全球大气碳库储量约  $7.5 \times 10^{14}$  kg,土壤碳库储量约  $1.58 \times 10^{15}$  kg;森林作为陆地生态系统的主体,储存着陆地生态系统60%以上的有机碳,其中土壤碳库是主要部分<sup>[1]</sup>,因此,林地土壤碳排放对全球碳平衡具有重要影响<sup>[2-3]</sup>。土壤呼吸是大气与陆地碳交换的重要方式,占生态系统呼吸的60%~90%,是化石燃料燃烧 $\text{CO}_2$ 排放量的10倍以上<sup>[4]</sup>。对森林生态系统土壤呼吸动态变化及其影响因素的研究是认识陆地生态系统碳排放和碳循环机理的关键<sup>[5]</sup>。

土壤呼吸对温度响应的敏感性采用  $Q_{10}$  参数值表示,即温度每升高 10 °C 土壤呼吸速率增加的倍数。土壤呼吸的温度敏感性是表征陆地碳循环与气候变化间反馈关系的关键参数<sup>[6-7]</sup>。目前,有关  $Q_{10}$  的研究内容主要集中在不同区域土壤温度<sup>[8-9]</sup>、土壤含水量<sup>[10-11]</sup>、植被类型<sup>[12-13]</sup>、凋落物<sup>[14-15]</sup>以及时间和空间动态变化对  $Q_{10}$  的影响<sup>[16-17]</sup>,研究发现  $Q_{10}$  在区域尺度上存在较大的空间变异<sup>[7,18]</sup>,如陈光水等<sup>[19]</sup>对国内森林样地的土壤呼吸及相关因子数据进行处理,中国森林土壤呼吸  $Q_{10}$  值介于 1.33~5.53,平均值 2.65;郑甲佳等<sup>[20]</sup>构建的中国森林生态系统年尺度  $Q_{10}$  数据集, $Q_{10}$  值 1.09~6.24,平均值 2.37,研究尺度不同也是目前  $Q_{10}$  研究存在差异的主要原因。

我国地域辽阔,地形复杂,东南沿海,西北内陆,降水量的总体分布呈现由东南沿海地区往西北内陆地区递减的特征,根据年降雨量等级将我国林地按照湿润、半湿润、半干旱和干旱4个气候区进行降雨梯度划分,每个降雨梯度代表不同气候分区的降雨量范围。同一降雨梯度下,降雨量的长期作用导致林地土壤水热条件、土壤有机物、土壤微生物以及土壤植被类型等土壤理化性质保持相对稳定状态,成

为该降雨梯度下林地土壤的特性。降雨格局改变会造成土壤理化性质的改变,影响植物根系以及土壤微生物的呼吸作用,是导致区域间土壤呼吸温度敏感性出现差异的主要因素。目前,我国对于土壤呼吸温度敏感性的研究虽多,但关于降雨梯度下降雨格局变化如何影响土壤呼吸温度敏感性尚不清楚。本研究以半湿润、半干旱和干旱地区为主要对象,针对不同分区土壤水热状况、土壤有机物、土壤微生物及其酶活性以及植被类型对土壤呼吸温度敏感性的影响进行综合论述,并对目前研究中存在的问题加以分析,对未来该领域的研究提出展望。

## 1 降雨梯度下影响土壤呼吸温度敏感性的主要因素

土壤是林地植物和动物赖以生存的基本条件,其中,水热条件是决定植被区域地带性分布和土壤呼吸强度的主要影响因素,呼吸底物是土壤微生物分解的原料,土壤微生物参与土壤呼吸活动的全过程。降雨梯度下,降雨格局的改变会对林地土壤水分和温度,土壤有机物含量,土壤微生物群落组成和结构及其酶反应等产生影响,且对不同降雨梯度产生的作用强度存在差异,这将直接或间接影响土壤呼吸速率,也必然影响土壤呼吸的温度敏感性。

### 1.1 土壤水分

土壤水分含量会改变土壤通透性和对土壤底物的溶解,影响土壤微生物的呼吸作用和物质扩散运动。土壤水分变化也会改变土壤的比热容,导致不同生态系统  $Q_{10}$  存在很大差异<sup>[21]</sup>。在适宜的水分条件下,植被生长和微生物活动等都不受水分的限制,温度敏感性随着温度的变化而变化<sup>[22]</sup>;相反,水分过多或是过少,都会限制氧气扩散以及物质的溶解,水分成为土壤呼吸的限制因子<sup>[23]</sup>。在不同干、湿气候区降雨时空分布不均匀,导致土壤水分有较高的变异性<sup>[24]</sup>,影响土壤呼吸强度,导致土壤呼吸的温度敏感性不同。

在干旱、半干旱地区,土壤较干燥,土壤通透性较强,利于土壤生物进行呼吸,但不利于土壤底物的扩散<sup>[25-26]</sup>,水分成为土壤呼吸及其温度敏感性的主要限制因子,该区域  $Q_{10}$  相对较低,适当的降雨会提高  $Q_{10}$  值。有研究发现黄土高原半干旱区  $Q_{10}$  值介于 1.50~1.68,增雨提高了  $Q_{10}$ <sup>[27]</sup>。干旱区的灌丛出现了相似的情况,无降雨变化时泡泡刺(*Nitraria sphaerocarpa*)的  $Q_{10}$  为 1.37,当雨量增长 2 倍和 3 倍时, $Q_{10}$  分别为 1.46 和 1.62<sup>[28]</sup>。在半湿润地区,小叶樟(*Camphor microphylla*)湿地的土壤  $Q_{10}$  值 1.45~4.29,且随着土壤平均含水量的增大而增大<sup>[29]</sup>,半干旱半湿润区过渡区  $Q_{10}$  也具有相同的特征<sup>[30]</sup>。但有研究者对中国多个地区的  $Q_{10}$  进行综合分析得到,中国森林的  $Q_{10}$  值与年降水量呈显著负相关的结论<sup>[18,20]</sup>,这可能与林地土壤水分阈值不同有关,在适宜水分条件下, $Q_{10}$  随着水分的增加而上升,当土壤含水量超过或低于某个阈值,土壤呼吸及其  $Q_{10}$  会降低<sup>[22,31-32]</sup>,降雨格局改变导致土壤含

水量差异增大,进而影响  $Q_{10}$ 。通过国内各降雨梯度下各因素对土壤呼吸温度敏感性的影响(表 1)统计可以看出,从半湿润区到干旱区, $Q_{10}$  总体上呈现先增加后降低的趋势,增雨处理会显著提高水分较少地区土壤呼吸温度敏感性。这表明土壤含水量少的区域土壤呼吸敏感性长期保持相对较低状态,当发生降雨事件时, $Q_{10}$  值急速上升;而较为湿润地区, $Q_{10}$  值的增减受到当年降雨频次和多少的影响,年降雨量增加甚至会导致  $Q_{10}$  值下降。

## 1.2 土壤温度

生态系统气候变暖实验模型分析<sup>[33]</sup>和基本生物动力学<sup>[1]</sup>都表明土壤呼吸对温度的响应强度随温度而变化,土壤呼吸速率与土壤温度呈显著的指数函数关系<sup>[34]</sup>。土壤温度随着土壤水分和空气温度的变化而变化,导致降雨梯度下温度对  $Q_{10}$  的影响存在差异。温度对  $Q_{10}$  的作用可直接通过温度变化产生影响,间接通过影响土壤有机物种类和含量,土壤微生物群落结构以及酶活性等影响温度敏感性。

表 1 国内各降雨梯度下各因素对土壤呼吸温度敏感性的影响

Table 1 Effects of the factors on the temperature sensitivity of soil respiration under different rainfall gradients

| 降雨梯度 | 年平均降雨量/mm | 林分类型   | $Q_{10}$    | 处理类型       | $Q_{10}$ 的变化 | 参考文献 |
|------|-----------|--------|-------------|------------|--------------|------|
| 半湿润区 | 650~720   | 油松     | 1.1         | 自然降雨       | ↓            | [62] |
|      |           | 落叶松人工林 | 3.64        | —          | —            | [13] |
|      |           | 油松     | 2.83        | —          | —            | [12] |
|      |           | 侧柏     | 3.16        |            |              |      |
|      |           | 落叶阔叶林  | 2.51        |            |              |      |
|      | 550~600   | 小叶章    | 4.29        | 增雨/升温      | ↑/↑          | [29] |
|      |           | 灌丛     | 1.74        |            | 0/↑          |      |
| 半干旱区 | 525       | 撂荒地    | 1.50~1.68   | 增雨/升温      | ↑/↑          | [27] |
|      |           | 油松林    | 4.31        | 自然降雨/升温    | 0/↑          | [38] |
|      |           | 樟子松    | 1.908~2.668 | 减雨 30%     | ↓            | [30] |
|      | 413.9     |        |             | 增雨 30%     | ↑            |      |
|      |           | 针叶林    | 2.89        | 增雨         | ↑            | [10] |
|      |           | 草地     | 2.94        |            |              |      |
|      | 347       | 羊草地    | 1.15~2.25   | 增雨/升温      | ↑ ↓ / ↓ ↓    | [31] |
|      | 271.42    | 克氏针茅   | 4.03~4.49   | 增雨/升温      | 0/0          | [64] |
| 干旱区  | 40        | 泡泡刺    | 1.37        | 增雨 200%/升温 | ↑/↓          | [28] |
|      |           |        |             | 增雨 300%/升温 | 0/↓          |      |

注: ↑ 表示  $Q_{10}$  升高; ↓ 表示  $Q_{10}$  下降; 0 表示无影响; — 表示试验未涉及。

土壤温度变化会导致  $Q_{10}$  发生变化,滕泽宇等<sup>[35]</sup>在恒、变温培养模式对  $Q_{10}$  进行测定的结果证明这一观点。有研究者基于文献对森林生态系统年尺度土壤呼吸温度敏感性数据分析处理,测算得到  $Q_{10}$  随年平均温度增加而减小,较为寒冷地区的土壤呼吸对温度升高的敏感性高于较温暖地区<sup>[36]</sup>。Chen 等<sup>[37]</sup>通过对北方、寒温带、温带和热带、亚热带多个观测点土壤呼吸数据进行统计分析,结果表明  $Q_{10}$  值均随着土壤温度的升高而降低,但是温度

对  $Q_{10}$  解释的百分比不同,在北方和温带温度对  $Q_{10}$  变化的解释达到 50%,而其他地方相对较低。由表 1 统计的结果表明,在半湿润半干旱大部分地区林分  $Q_{10}$  是随着增温而上升的,而在干旱地区  $Q_{10}$  随着温度上升而下降,但部分区域温度变化对  $Q_{10}$  作用不显著,说明在这些区域温度不是影响  $Q_{10}$  的主要因素。严俊霞等<sup>[38]</sup>研究表明,在低温时的  $Q_{10}$  值大于高温时的  $Q_{10}$  值,且  $Q_{10}$  最低值出现在土壤水分相对较低时期,说明该地区土壤水分和温



度共同影响  $Q_{10}$  值。针对温度对  $Q_{10}$  影响的不确定性,有研究者进行了模拟增温实验,发现温度对土壤呼吸的促进作用是一种短期响应,一段时间后增温对土壤呼吸的影响非常微弱<sup>[39-40]</sup>,对土壤呼吸的温度敏感性影响作用变小。这种现象是由于增温造成土壤碳库中速效碳的快速消耗,长效碳有较强的稳定性,短暂的升温对其影响不显著。降雨梯度下,当长效碳对温度不敏感温度时,就会造成  $Q_{10}$  随年平均温度增加而减小<sup>[41]</sup>。

### 1.3 土壤有机物

土壤有机物是指以各种形态存在于土壤中的所有含有机碳的物质,包括土壤中的各种动、植物残体,分解和合成的各种有机物质。研究表明,陆地植被净初级生产力的 50%~90% 通过凋落物运输到土壤中,这一部分碳量对土壤释放碳量的平均贡献率为 33%<sup>[42-43]</sup>。细根生物量是土壤有机物的重要组成部分,其主要是由植被的种类和数量决定的,细根的生长和周转非常迅速,细根周转可占森林净初级生产力的 10%~75%<sup>[44]</sup>。在降雨梯度下,土壤有机物种类和数量存在差异,而土壤有机质差异影响土壤呼吸温度敏感性。

降雨梯度下,凋落物产量和组成不同,导致凋落物的分解速率有差异,而凋落物分解得快慢影响着土壤养分归还速率<sup>[45]</sup>,土壤呼吸底物有效性是影响  $Q_{10}$  值的主要因素。有研究者预测,未来降水减少将抑制湿润地区凋落物分解,显著减少凋落物 C、N 和 P 的释放<sup>[46]</sup>,从而降低土壤呼吸速率,改变土壤呼吸温度敏感性。也有研究表明,在干旱半干旱区降水虽迅速提高了凋落物分解速率<sup>[47]</sup>,但也会加速凋落物中有机物的损失<sup>[48]</sup>。降雨对土壤有机质的影响要同时考虑凋落物分解和损失,这将造成降雨之后土壤有机物含量存在不确定性,导致  $Q_{10}$  变化存在不确定性。土壤水分、温度等会影响细根生物量,不同林分凋落物的组成、分解速率以及分解后的有机质储量等会影响细根生物量<sup>[49]</sup>,细根生物量作为林地土壤地下部分土壤有机物质的主要来源,其分解和周转速率对土壤有机物含量有决定性作用。温度也是影响土壤有机质含量的重要因素,升温会加快土壤呼吸底物的消耗速率、降低土壤呼吸底物的有效性,导致  $Q_{10}$  下降<sup>[50-51]</sup>。因此,降雨梯度下,降雨格局改变会直接或间接影响土壤有机质含量,当降雨导致土壤有机物供应不足时, $Q_{10}$  会降低<sup>[52]</sup>,反之, $Q_{10}$  值上升。

### 1.4 土壤微生物及酶活性

土壤微生物对环境条件具有敏感性,在合适的环境条件下才可以正常地生产和繁殖,土壤性质是

影响生态系统中土壤微生物群落结构和功能的主要因素,降水对土壤理化性质和土壤微生物具有显著影响<sup>[53]</sup>。土壤微生物及其分泌的多种酶参与土壤呼吸的全过程,微生物种类和数量、酶活性对土壤呼吸温度敏感性产生影响<sup>[23]</sup>。

在干旱、半干旱地区,土壤水分是引起微生物生物量变化的关键因素。长期少降雨会出现资源匮乏,影响森林生态系统土壤微生物生物量及群落结构<sup>[54]</sup>,短期的降雨可以满足部分生物水平的限制<sup>[55]</sup>,造成土壤中的有机质和微生物群落等出现高低交替的现象,导致  $Q_{10}$  值出现季节性变化。在半湿润地区,减少旱季降雨量和增加雨季降雨量都将影响微生物群落,会显著降低真菌群落多样性,但对细菌群落多样性的影响不显著,半湿润区真菌网络对降水变化的响应更强<sup>[56]</sup>。在一般情况下,降雨梯度对土壤微生物种类和数量变化表现为,土壤生物数量与温度变化一致时, $Q_{10}$  会升高,当温度变化和土壤生物数量变化不一致时, $Q_{10}$  会降低<sup>[50]</sup>。土壤中的植物根系、微生物细胞在进行土壤生物化学过程中会产生土壤酶活性,对土壤化学反应起催化作用<sup>[57]</sup>。土壤酶催化土壤中凋落物和细根的分解,动植物和微生物残体的水解以及土壤中各种有机、无机化合物的氧化还原反应等,并在过程中不断的向大气中释放  $CO_2$ 。降雨梯度下,土壤温度和水分变化都将影响土壤酶活性<sup>[58]</sup>,酶活性大小决定土壤底物释放  $CO_2$  的反应速率,酶活性增加可以促进土壤底物分解、转化以及各类氧化还原反应,增加土壤中有机质的含量,促进土壤呼吸温度敏感性。

### 1.5 植被类型

我国半湿润、干旱半干旱区域植被类型随自然降雨梯度趋势分布一致,自东向西植被类型由落叶阔叶、林草原到荒漠,不同植被类型间  $Q_{10}$  存在差异。植被可以通过根系分泌物影响土壤成分<sup>[59]</sup>,根系的参与对土壤呼吸温度敏感性产生极显著的影响<sup>[60]</sup>。植被还可以使植物碳的分配模式和土壤微生物代谢过程发生改变,导致土壤呼吸的温度敏感性发生改变<sup>[61]</sup>。

降雨对相同植被的土壤呼吸温度敏感性影响不同,北京西部山区不同降雨处理的典型油松林的土壤呼吸速率温度敏感性不同,低降雨处理对油松林(*Pinus tabulaeformis*)土壤呼吸温度敏感性有促进作用,进一步增加降雨则一定程度抑制土壤呼吸温度敏感性<sup>[62]</sup>。不同植被类型土壤呼吸的温度敏感性也存在差异,同以北京山区 4 种典型植被类型为研究对象,在生长季内 4 种不同植被类型土壤呼吸的温度敏感性存在显著差异<sup>[12]</sup>。表 1 统计结果显

示,同为半湿润区的针叶林  $Q_{10}$  值变化范围为 1.1~3.16,同为半干旱区草地的土壤呼吸温度敏感性变化范围为 1.65~4.49。不同区域和不同植被类型林地土壤呼吸温度敏感性存在差异,是由于植被类型对土壤呼吸温度敏感性的影响主要是通过植被根系呼吸和林地凋落物分解来实现的,而这两者对  $Q_{10}$  的作用是通过土壤水热因子、土壤底物以及土壤微生物等多个方面共同产生的,如刘殿君等<sup>[28]</sup>对极度干旱地区进行增雨实验,发现灌丛与裸地间的土壤呼吸温度敏感性存在差异,且增雨条件下灌丛的土壤呼吸温度敏感性相比裸地更低,主要原因是灌丛下根系呼吸的温度敏感性相对较低。Yuste 等<sup>[63]</sup>研究发现,临近的落叶硬木林与常绿林相比,  $Q_{10}$  值更大,主要原因  $Q_{10}$  变化具有季节性,硬木林的底物供应季节变化率高于常绿林。

### 1.6 降雨梯度下影响因子间共同作用对 $Q_{10}$ 的影响

降雨梯度下,不同地区的土壤环境具有明显的变化,导致区域间土壤呼吸温度敏感性存在差异。降雨梯度对土壤呼吸敏感性影响的作用及途径如图 1 所示,土壤呼吸温度敏感性由年平均温度、平均降水量、植被类型、有机物质量与组成、酶的活性以及微生物种类与数量共同决定。因此,在对土壤呼吸

温度敏感性进行测定时,首先应该确定该地区土壤呼吸及其  $Q_{10}$  影响的主要限制因素,如在湿润地区土壤水分含量在阈值之前,温度是土壤呼吸的主要限制因子;但超过阈值后,土壤含水量成为主要影响因素<sup>[64]</sup>。降雨格局主要造成林地水热条件的变化,影响底物的形成,土壤微生物生长和繁殖,不同土壤微生物种群对水分的适应性差异导致土壤微生物组成和数量不同<sup>[65-66]</sup>,进而影响土壤呼吸温度敏感性;温度影响着土壤呼吸过程的所有环节,在一定范围内增加温度可以提高土壤微生物数量和促进酶活性<sup>[67-68]</sup>,而温度过高会降低酶活性甚至改变酶结构,造成微生物多样性丧失,改变土壤呼吸温度敏感性。生态环境决定植被类型,植被类型的差异会造成土壤生态因子的差异,进而影响土壤呼吸的温度敏感性。根据已有研究表明土壤呼吸因子间的作用是相互影响的<sup>[69]</sup>,是否意味着,在一定范围内影响土壤呼吸及其温度敏感性的各种因素所引起的土壤呼吸及  $Q_{10}$  值增加和降低可能会相互抵消掉一部分,增加土壤呼吸及其  $Q_{10}$  变化的不确定性。综上所述,降雨梯度下,土壤因子与环境因子间相互作用的复杂性是导致土壤呼吸及其  $Q_{10}$  形成差异的共同因素,也是未来土壤呼吸温度敏感性探究的重要内容。

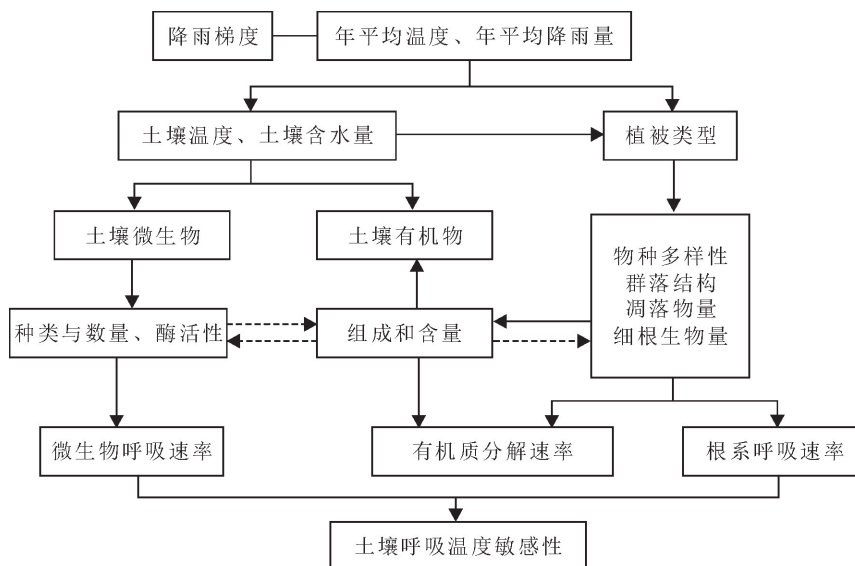


图 1 降雨梯度对土壤呼吸敏感性影响的作用及途径

Fig. 1 Effects and pathways of rainfall gradient on soil respiration sensitivity

## 2 主要结论和研究展望

探究我国降雨格局改变对林地土壤呼吸温度敏感性的影响,对我国陆地生态系统碳循环的研究具有重要作用。在全球气候变化的背景下降雨格局发生改变,导致北半球中纬度地区降雨量增大,亚热带地区降水量下降<sup>[70]</sup>,中国作为全球气候变化的敏感区和受影响显著区域,极端气候出现频次增多<sup>[71]</sup>,这必

将导致我国陆地生态系统的土壤呼吸温度敏感性发生变化。本研究通过分析降雨梯度下土壤温度、土壤含水量、土壤有机物、土壤微生物及酶活性和植被类型等对土壤呼吸温度敏感性的影响作用及途径,得出在不同降雨梯度下各因子对土壤呼吸温度敏感性的作用机理不同,且存在复杂的相互作用的结论。此外,研究进展显示目前对土壤呼吸温度敏感性的研究仍存在问题。针对所存在问题提出以下建议。

目前已有的研究对土壤呼吸的测定方法、测量深度、测定时间等都不同,所获得的数据之间可比性较差,测定结果也不能用来计算大尺度林地碳排放。因此,应统一土壤呼吸测量标准和规程<sup>[72]</sup>,达到从林地出发以最小偏差推算出各降雨条件下的土壤呼吸温度敏感性。

受区域尺度降雨格局变化的影响,导致土壤呼吸具有愈加强烈的季节性,而目前野外试验周期普遍较短,可能无法准确反应试验区的土壤呼吸动态变化。因此,在全球气候变化条件下,研究者要考虑延长野外试验周期以获得大量数据,并通过结合各种模拟试验和研究模型来提高研究结果的准确性。

目前,我国对土壤呼吸温度敏感性已有研究主要集中在东部、中部和南部的湿润、半湿润以及半干旱地区,对西北干旱地区的研究相对较少<sup>[20,28]</sup>。为准确得到我国林地不同空间尺度上的碳排放量,研究区有必要涵盖我国所有林地,获得更多的野外实时数据,提高土壤呼吸测定结果的精确性。因此,在之后的研究中要扩大试验空间范围,并将西北部地区作为研究的重要对象。

除了水热条件、土壤底物、土壤微生物以及植被类型对土壤呼吸温度敏感性产生影响,海拔、地形地貌、林下植被、光照条件等因素也对土壤呼吸温度敏感性存在不同程度的作用。在未来气候变化条件下,陆地生态系统各环境因子的相互作用更为复杂,从不同尺度上导致土壤呼吸温度敏感性发生改变。关注全球气候变化方向,解决其变化对土壤呼吸测定准确性产生的一系列难题,是未来亟待解决的问题。

## 参考文献:

- [1] DAVIDSON E A, JANSSENS I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change[J]. *Nature*, 2006, 440(7081): 165-173.
- [2] 王平, 王邵军, 曹乾斌, 等. 西双版纳热带森林恢复过程中土壤有机碳矿化速率的时空变化[J]. *西北林学院学报*, 2021, 36(3): 22-28.  
WANG P, WANG S J, CAO G B, *et al.* Spatiotemporal dynamics of soil carbon mineralization rates during the restoration of Xishuangbanna tropical forests[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2021, 36(3): 22-28. (in Chinese)
- [3] 王红, 王邵军, 李霁航, 等. 森林土壤呼吸及其主要调控因素研究进展[J]. *西北林学院学报*, 2017, 32(1): 92-97. (in Chinese)  
WANG H, WANG S J, LI J H, *et al.* Characteristics and the influencing factors of forest soil respiration: a review[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2017, 32(1): 92-97. (in Chinese)
- [4] BOND L B, THOMSON A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record[J]. *Nature*, 2010, 464(7288): 579-582.
- [5] 夏雪, 车升国. 陆地生态系统有机碳储量和碳排放的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(29): 214-218.
- [6] ARONSON E L, MCNULTY S G. Appropriate experimental ecosystem warming methods by ecosystem, objective, and practicality[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(11): 1791-1799.
- [7] LENTON T M, HUNTINGFORD C. Global terrestrial carbon storage and uncertainties in its temperature sensitivity examined with a simple model[J]. *Global Change Biology*, 2003, 9(10): 1333-1352.
- [8] WANG R, SUN Q, WANG Y, *et al.* Contrasting responses of soil respiration and temperature sensitivity to land use types: cropland vs apple orchard on the Chinese Loess Plateau[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 621: 425-433.
- [9] 康静, 任海燕, 王悦骅, 等. 短花针茅荒漠草原土壤呼吸对长期增温和氮素添加的响应[J]. *干旱区资源与环境*, 2019, 33(5): 151-157.
- [10] YAN J X, CHEN L F, LI J J, *et al.* Five-year soil respiration reflected soil quality evolution in different forest and grassland vegetation types in the Eastern Loess Plateau of China[J]. *Clean Soil Air Water*, 2013, 41(7): 680-689.
- [11] 赵河聚, 岳艳鹏, 贾晓红, 等. 模拟增温对高寒沙区生物土壤结皮—土壤系统呼吸的影响[J]. *植物生态学报*, 2020, 44(9): 916-925.  
ZHAO H J, YUE Y P, JIA X H, *et al.* Effects of simulated warming on biological soil crust-soil system respiration in alpine sandy lands[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2020, 44(9): 916-925. (in Chinese)
- [12] 郑鹏飞, 余新晓, 贾国栋, 等. 北京山区不同植被类型的土壤呼吸特征及其温度敏感性[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(5): 1726-1734.  
ZHENG P F, YU X X, JIA G D, *et al.* Soil respiration and its temperature sensitivity among different vegetation types in Beijing mountain area, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(5): 1726-1734. (in Chinese)
- [13] 张慧东, 尤文忠, 魏文俊, 等. 暖温带-中温带过渡区4种典型森林土壤呼吸的温度敏感性[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(11): 1757-1764.  
ZHANG H D, YOU W Z, WEI W J, *et al.* Temperature sensitivity of soil respiration in four forest types in temperate ecotone, Northeast China[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2015, 24(11): 1757-1764. (in Chinese)
- [14] 谢育利, 陈云明, 唐亚坤, 等. 地表凋落物对油松、沙棘人工林土壤呼吸的影响[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(6): 52-61.
- [15] 张彦军. 凋落物呼吸温度敏感性的变化特征及其影响因素[J]. *环境科学*, 2017, 38(8): 3497-3506.  
ZHANG Y J. Variation in the temperature sensitivity of surface litter respiration and its influencing factors[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(8): 3497-3506. (in Chinese)
- [16] BOND L B, BAILEY V L, CHEN M, *et al.* Globally rising soil heterotrophic respiration over recent decades[J]. *Nature*, 2018, 560(7716): 80-83.
- [17] WANG B, ZHA T S, JIA X, *et al.* Soil water regulates the control of photosynthesis on diel hysteresis between soil respiration and temperature in a desert shrubland[J]. *Biogeosciences*, 2017, 14(17): 3899-3908.



- [18] XU Z F, TANG S S, XIONG L, *et al.* Temperature sensitivity of soil respiration in China's forest ecosystems: patterns and controls[J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, 93: 105-110.
- [19] 陈光水, 杨玉盛, 吕萍萍, 等. 中国森林土壤呼吸模式[J]. *生态学报*, 2008(4): 1748-1761.  
CHEN G S, YANG Y S, LV P P, *et al.* Regional patterns of soil respiration in China forest [J]. *Journal of ecology*, 2008(4): 1748-1761. (in Chinese)
- [20] 郑甲佳, 黄松宇, 贾昕, 等. 中国森林生态系统土壤呼吸温度敏感性空间变异特征及影响因素[J]. *植物生态学报*, 2020, 44(6): 687-698.  
ZHENG J J, HUANG S Y, JIA X, *et al.* Spatial variation and controlling factors of temperature sensitivity of soil respiration in forest ecosystems across China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2020, 44(6): 687-698. (in Chinese)
- [21] 余治雨, 赵志敏, 徐磊. 降水对半湿润区土壤呼吸的影响研究[J]. *南阳师范学院学报*, 2020, 19(4): 9-15.
- [22] MCCULLEY R L, BOUTTON T W, ARCHER S R. Soil respiration in a subtropical savanna parkland: Response to water additions[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71(3): 820-828.
- [23] 杨毅, 黄玫, 刘洪升, 等. 土壤呼吸的温度敏感性和适应性研究进展[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(10): 1811-1820.
- [24] ZHANG J T, LI Z. The spatial and temporal distribution pattern of moisture conditions in the mi-humid to semi-arid temperate zone in recent 45 years[C]//Symposium on Regional Response to Global Change and Physical Geography novation. 2007.
- [25] NIKOLOVA P S, RASPE S, ANDERSEN C P, *et al.* Effects of the extreme drought in 2003 on soil respiration in a mixed forest[J]. *European Journal of Forest Research*, 2009, 128(2): 87-98.
- [26] ALMAGRO M, LÓPEZ J, QUEREJETA J I, *et al.* Temperature dependence of soil CO<sub>2</sub> efflux is strongly modulated by seasonal patterns of moisture availability in a Mediterranean ecosystem[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(3): 594-605.
- [27] 王兴, 钟泽坤, 朱玉帆, 等. 增温和增雨对黄土丘陵区撂荒地土壤呼吸的影响[J]. *环境科学*, 2022, 43(3): 1657-1667.
- [28] 刘殿君, 张金鑫, 卢琦, 等. 极端干旱区增雨对泡泡刺(*Nitraria sphaerocarpa*)群落土壤呼吸温度敏感性的影响[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(3): 584-590.  
LIU D J, ZHANG J X, LU Q, *et al.* Rain enrichment-accelerated carbon emissions from soil in a *Nitraria sphaerocarpa* community in hyperarid region[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(3): 584-590. (in Chinese)
- [29] 张金波, 宋长春, 杨文燕. 不同土地利用下土壤呼吸温度敏感性差异及影响因素分析[J]. *环境科学学报*, 2005, 25(11): 109-114.  
ZHANG J B, SONG C C, YANG W Y. Temperature sensitivity of soil respiration and its effecting factors in the different land use[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(11): 109-114. (in Chinese)
- [30] 任艳林, 杜恩在. 降水变化对樟子松人工林土壤呼吸速率及其表观温度敏感性 Q<sub>10</sub> 的影响[J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 2012, 48(6): 933-941.
- [31] 罗光强, 耿元波. 温度和水分对羊草草原土壤呼吸温度敏感性的影响[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(5): 1938-1943.
- [32] 吴海东, 闫钟清, 张克柔, 等. 高原泥炭地 CO<sub>2</sub> 通量对极端干旱的响应机理研究[J]. *林业科学研究*, 2020, 33(4): 92-101.  
WU H D, YAN Z Q, ZHANG K R, *et al.* Response mechanism of CO<sub>2</sub> flux to extreme drought on an Plateau Peatland [J]. *Forest Research*, 2020, 33(4): 92-101. (in Chinese)
- [33] MCGUIRE A D, JERRY M M, DAVID W K, *et al.* Equilibrium responses of soil carbon to climate change: empirical and process based estimates[J]. *Biogeogr*, 1995, 22: 785-796.
- [34] 葛晓改, 童冉, 曹永慧, 等. 模拟干旱下凋落物输入对毛竹林土壤呼吸及温度敏感性的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(7): 2233-2242.  
GE X G, TONG R, CAO Y H, *et al.* Effect of litter fall input on soil respiration and its temperature sensitivity in moso bamboo forest under simulated drought[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(7): 2233-2242. (in Chinese)
- [35] 滕泽宇, 陈智文, 白震, 等. 恒、变温培养模式对土壤呼吸温度敏感性影响之异同[J]. *土壤通报*, 2016, 47(1): 47-53.
- [36] LI J Q, PEI J M, PENDALL E, *et al.* Spatial heterogeneity of temperature sensitivity of soil respiration: a global analysis of field observations[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2020, 141(2): 107-675.
- [37] CHEN H, TIAN H Q. Does a General temperature-dependent Q<sub>10</sub> model of soil respiration exist at biome and global scale? [J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2005, 47(11): 1288-1302.
- [38] 严俊霞, 秦作栋, 张义辉, 等. 土壤温度和水分对油松林土壤呼吸的影响[J]. *生态学报*, 2009, 29(12): 6366-6376.  
YAN J X, QIN Z D, ZHANG Y H, *et al.* Effects of soil temperature and moisture on soil respiration of *Pinus tabulaeformis* forest [J]. *Journal of ecology*, 2009, 29(12): 6366-6376. (in Chinese)
- [39] RUSTAD L E, CAMPBELL J L, MARION G M, *et al.* A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming[J]. *Oecologia*, 2001, 126(4): 543-562.
- [40] SALESKA S R, HARTE J, TORN M S. The effect of experimental ecosystem warming on CO<sub>2</sub> fluxes in a montane meadow[J]. *Global Change Biology*, 1999, 5(2): 125-141.
- [41] 刘洪升, 刘华杰, 王智平, 等. 土壤呼吸的温度敏感性[J]. *地理科学进展*, 2008(4): 51-60.
- [42] RAICH J W, SCHIESINGEU W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. *Tellus*, 1992, 44B(2): 81-99.
- [43] ZHAN G P, TIAN X J, HE X B, *et al.* Effect of litter quality on its decomposition in broadleaf and and coniferous forest [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2008, 44(4): 392-399.
- [44] 裴智琴, 周勇, 郑元润, 等. 干旱区琵琶柴群落细根周转对土壤有机碳循环的贡献[J]. *植物生态学报*, 2011, 35(11): 1182-1191.  
PEI Z Q, ZHOU Y, ZHENG Y R, *et al.* Contribution of fine root turnover to the soil organic carbon cycling in a *Reaumuria soongorica* community in an arid ecosystem of Xinjiang

- Uygur Autonomous Region, China[J]. Journal of plant ecology, 2011, 35(11): 1182-1191. (in Chinese)
- [45] 杨彬,郝清玉. 半干旱区和湿润区木麻黄海防林凋落物、土壤主要养分特征及其影响因素[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(3): 9-15.
- YANG B, HAO Q Y. Characteristics and impacting factors of litter fall and soil nutrients in coastal protection forests of *casuarinaequisetifolia* in humid and semi-arid regions[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(3): 9-15. (in Chinese)
- [46] ZHOU S X, HUANG C D, XIANG Y B, *et al.* Effects of reduced precipitation on litter decomposition in an evergreen broad-leaved forest in western China[J]. Forest Ecology and Management, 2018, 430: 219-227.
- [47] YAHDIJIAN L, OSVALDO E S, AMY T A. Differential controls of water input on litter decomposition and nitrogen dynamics in the patagonian steppe[J]. Ecosystems, 2006, 9(1): 128-141.
- [48] 李成道,李向义, Henry J Sun, 等. 极端干旱区花花柴 (*Karelinia caspia*)、骆驼刺 (*Alhagi sparsifolia*) 和胡杨 (*Populus euphratica*) 叶片凋落物分解特征[J]. 中国沙漠, 2019, 39(2): 193-201.
- LI C D, LI X Y, HENRY J S, *et al.* Decomposition characteristics of *Karelinia caspia*, *Alhagi sparsifolia* and *Populus euphratica* leaves in extremely arid areas[J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(2): 193-201. (in Chinese)
- [49] 唐立涛,字洪标,胡雷,等. 青海省森林细根生物量及其影响因素[J]. 生态学报, 2019, 39(10): 3677-3686.
- TANG L T, ZI H B, HU L, *et al.* Forest biomass and its influencing factors in Qinghai Province [J]. Journal of ecology, 2019, 39(10): 3677-3686. (in Chinese)
- [50] BRADFORD M A, DAVIES A, FREY S D, *et al.* Thermal adaptation of soil microbial respiration to elevated temperature[J]. Ecology Letters, 2008, 11(12): 1316-1327.
- [51] YUSTE J C, MA S, BALDOCCHI D D. Plant-soil interactions and acclimation to temperature of microbial-mediated soil respiration may affect predictions of soil CO<sub>2</sub> efflux[J]. Bio-geochemistry, 2010, 98(1/3): 127-138.
- [52] 杨庆朋,徐明,刘洪升,等. 土壤呼吸温度敏感性的影响因素和不确定性[J]. 生态学报, 2011, 31(8): 2301-2311.
- YANG Q P, XU M, LIU H S, *et al.* Impact factors and uncertainties of the temperature sensitivity of soil respiration[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(8): 2301-2311. (in Chinese)
- [53] 李娜,王宝荣,安韶山,等. 黄土高原草地土壤细菌群落结构对于降水变化的响应[J]. 环境科学, 2020, 41(9): 4284-4293.
- LI N, WANG B R, AN S S, *et al.* Response of soil bacterial community structure to precipitation change in grassland of Loess Plateau[J]. Environmental Science, 2020, 41(9): 4284-4293. (in Chinese)
- [54] 聂园园,周贵尧,邵钧炯,等. 模拟干旱对亚热带森林土壤微生物生物量及群落结构的影响[J]. 复旦学报:自然科学版, 2017, 56(1): 97-105.
- [55] 张静茹,张雷一,刘方,等. 降雨对干旱半干旱地区土壤微生物影响研究进展[J]. 世界林业研究, 2014, 27(4): 6-12.
- ZHANG J R, ZHANG L Y, LIU F, *et al.* Research progress in effect of rainfall on soil microbe in arid and semi-arid area [J]. World Forestry Research, 2014, 27(4): 6-12. (in Chinese)
- [56] HE D, SHEN W, EBERWEIN J, *et al.* Diversity and co-occurrence network of soil fungi are more responsive than those of bacteria to shifts in precipitation seasonality in a subtropical forest[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2017, 115: 499-510.
- [57] 秦纪洪,张文宣,王琴,等. 亚高山森林土壤酶活性的温度敏感性特征[J]. 土壤学报, 2013, 50(6): 1241-1245.
- QIN J H, ZHANG W X, WANG Q, *et al.* Temperature sensitivity of enzyme activity in subalpine forest soil in Southwest China [J]. Acta pedologica sinica, 2013, 50(6): 1241-1245. (in Chinese)
- [58] KIRSCHBAUM M U F. Will changes in soil organic matter act as a positive or negative feedback on global warming? [J]. Bio-geochemistry, 2000, 48(1): 21-51.
- [59] 温晨,杨智姣,杨磊,等. 半干旱黄土小流域不同植被类型植物与土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2021, 41(5): 1824-1834.
- WEN C, YANG Z J, YANG L, *et al.* Ecological stoichiometry characteristics of plants and soil under different vegetation types in the semi-arid loess small watershed[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(5): 1824-1834. (in Chinese)
- [60] BONE R, NADELHOFFER K, CANARY J, *et al.* Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration[J]. Nature, 1998, 396: 570-572.
- [61] 闫宝龙,赵清格,张波,等. 不同植被类型对土壤理化性质和土壤呼吸的影响[J]. 生态环境学报, 2017, 26(2): 189-195.
- YAN B L, ZHAO Q G, ZHANG B, *et al.* Effects of different vegetation types on soil physicochemical properties and soil respiration[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, 26(2): 189-195. (in Chinese)
- [62] 李会杰,饶良懿,宋丹丹,等. 不同降雨处理对北京西部山区油松林土壤呼吸的影响[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(1): 79-82, 86.
- [63] YUSTE J C, JANSSENS I A, CARRARA A, *et al.* Annual Q<sub>10</sub> of soil respiration reflects plant phenological patterns as well as temperature sensitivity[J]. Global Change Biology, 2004, 10(2): 161-169.
- [64] 谷蕊,潮洛濛,张立欣,等. 水热因子对克氏针茅草原土壤呼吸及其土壤温度敏感性的影响[J]. 草业学报, 2015, 24(4): 21-29.
- GU R, CHAO L M, ZHANG L X, *et al.* The influence of hydrothermal factors on soil respiration and soil temperature sensitivity of *Stipa krylovii* steppe, Inner Mongolia, China [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2015, 24(4): 21-29. (in Chinese)
- [65] 李磊,王岩,胡姝娅,等. 草甸草原土壤碳/氮矿化潜力及土壤微生物水分敏感性对极端干旱的响应[J]. 应用生态学报, 2020, 31(3): 814-820.
- LI L, WANG Y, HU S Y, *et al.* Responses of soil potential carbon/nitrogen mineralization and microbial activities to extreme droughts in a meadow steppe[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(3): 814-820. (in Chinese)



- Journal of Northwest A&F University: Nat. Sci. Ed., 2013, 41(6):56-61. (in Chinese)
- [11] 贾会霞,胡建军,卢孟柱. 基于 CE-AFLP 的 5 个美洲黑杨新品种指纹图谱分析[J]. 林业科学研究 2013,26(3):281-286. JIA H X, HU J J, LU M Z. Fingerprint analysis of five new cultivars of *Populus deltoides* based on CE-AFLP[J]. Forest Research, 2013, 26(3): 281-286. (in Chinese)
- [12] 樊荣,樊军锋,李周岐. 9 个白杨品种 SSR 指纹图谱构建及遗传关系的研究[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(2): 76-80. FAN R, FAN J F, LI Z Q. Fingerprinting and genetic relatedness of 9 varieties in *Populus* L. Sect. *Populus* using SSR markers[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(2): 76-80. (in Chinese)
- [13] 张妍,冯连荣,矫丽曼,等. 杨树指纹图谱建立研究进展[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(19): 32-33. ZHANG Y, FENG L R, JIAO L M, et al. The research progress of poplar fingerprint establishment[J]. Journal of Anhui Agri. Sci., 2015, 43(19): 32-33. (in Chinese)
- [14] 梁海永,刘彩霞,刘兴菊,等. 杨树品种的 SSR 分析及鉴定[J]. 河北农业大学学报, 2005, 28(4): 27-31. LIANG H Y, LIU C X, LIU X J, et al. Simple sequence repeat (SSR) analysis and identify of different cultivars in *Populus* L. [J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2005, 28(4): 27-31. (in Chinese)
- [15] 张德强,张志毅,杨凯. 杨树分子标记研究进展[J]. 北京林业大学学报, 2000, 22(6): 79-84. ZHANG D Q, ZHANG Z Y, YANG K. Advances of molecular marker researches in poplar[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2000, 22(6): 79-84. (in Chinese)
- [16] 王兴胜,林琪,曹龙,等. 不同杨树品种 DNA 指纹图谱特征研究[J]. 种子科技, 2020, 38(10): 6-9. WANG X S, LIN Q, CAO L, et al. Study on DNA fingerprint characteristics of different poplar varieties[J]. Seed Science and Technology, 2020, 38(10): 6-9. (in Chinese)
- [17] 贾会霞,姬慧娟,胡建军,等. 杨树新品种的 SSR 指纹图谱构建和倍性检测[J]. 林业科学, 2015, 51(2): 69-79. JIA H X, JI H J, Uu J J, et al. Fingerprints of SSR markers and ploidy detection for new *Populus* varieties[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2015, 51(2): 69-79. (in Chinese)
- [18] 刘春英,樊军锋,高建社,等. 杨树新杂种的 SSR 分析及鉴定[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(2): 70-73. LIU C Y, FAN J F, GAO J S, et al. Simple sequence repeat analysis and identification of new *Populus* hybrid[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(2): 70-73. (in Chinese)
- [19] RAHMAN M, DAYANANDAN S, RAJORA O. Microsatellite DNA markers in *Populus tremuloides*[J]. Genome, 2000, 43(2): 293-297.
- [20] RAJORA P, RAHMAN H. Microsatellite DNA and RAPD fingerprinting, identification and genetic relationships of hybrid poplar (*Populus × canadensis*) cultivars[J]. Theor Appl Genet, 2003, 106(3): 470-477.
- [21] LATUTRIE M, BERGERON Y, TREMBLAY F. Fine-scale assessment of genetic diversity of trembling aspen in North-western America[J]. BMC Evol. Biol., 2016, 26, 16(1): 231.
- [22] LEBEDEVA M, LEVKOE V, VOLKOV V, et al. The recovering of breeding achievements of *Populus × leningradensis bogd.* and *Populus × newensis bogd.* based on microsatellite analysis[J]. Russian Journal of Genetics Volume, 2016, 52: 1046-1055.
- [23] LIESEBACH H, SCHNECK V, EWALD E. Clonal fingerprinting in the genus *Populus* L. by nuclear microsatellite loci regarding differences between sections, species and hybrids[J]. Tree Genetics & Genomes Volume, 2010, 6: 259-269.
- [24] 王妍,李立华,徐宗艺,等. 东北地区主栽杨树品种的 SSR 分析及鉴定[J]. 东北林业大学学报, 2021, 49(4): 24-33. WANG Y, LI L H, XU Z Y, et al. SSR analysis and identification of main poplar varieties in Northeast China[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2021, 49(4): 24-33. (in Chinese)

(上接第 83 页)

- [66] 谭向平,申卫军. 降水变化和氮沉降影响森林叶根凋落物分解研究进展[J]. 生态学报, 2021, 41(2): 444-455. TAN X P, SHEN X J. Advances in the effects of precipitation regime alteration and elevated atmospheric nitrogen deposition on above and below-ground litter decomposition in forest ecosystems [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(2): 444-455. (in Chinese)
- [67] LENMANN A, ZHENG W S, Rillig MC. Soil biota contributions to soil aggregation[J]. Nature Ecology & Evolution, 2017, 21(1): 1828-1835. J
- [68] 王晓娇,蔡立群,齐鹏,等. 培肥措施对旱地农田土壤 CO<sub>2</sub> 排放和碳库管理指数的影响[J]. 草业学报, 2021, 30(2): 32-45. WANG X J, CAI L Q, QI P, et al. Effects of alternative fertilizer options on soil CO<sub>2</sub> emission and carbon pool management index in a dryland soil[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(2): 32-45. (in Chinese)
- [69] 孙殿超,李玉霖,赵学勇,等. 放牧及围封对科尔沁沙质草地土壤呼吸的影响[J]. 中国沙漠, 2015, 35(6): 1620-1627. SUN D C, LI Y L, ZHAO X Y, et al. Effects of grazing and enclosure on soil respiration rate in the horqin sandy grassland[J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(6): 1620-1627. (in Chinese)
- [70] 向元彬,周世兴,肖永翔,等. 降雨量改变对常绿阔叶林干旱和湿润季节土壤呼吸的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(14): 4734-4742. XIANG Y B, ZHOU S X, XIAO Y X, et al. Effects of precipitation variations on soil respiration in an evergreen broad-leaved forest during dry and wet seasons[J]. Journal of Ecology, 2017, 37(14): 4734-4742. (in Chinese)
- [71] 中国气象局气候变化中心. 中国气候变化蓝皮书[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- [72] 魏书精,罗碧珍,魏书威,等. 森林生态系统土壤呼吸测定方法研究进展[J]. 生态环境学报, 2014, 23(3): 504-514. WEI S J, LUO B Z, WEI S W, et al. Methods of measuring of soil respiration forest ecosystems: a review[J]. Journal of Ecological Environment, 2014, 23(3): 504-514. (in Chinese)