

张喜亭,杨茗,杨艳波,等.小兴安岭针叶林与阔叶林土壤温湿度敏感性差异研究[J].黑龙江农业科学,2025(1):51-55.

# 小兴安岭针叶林与阔叶林土壤温湿度敏感性差异研究

张喜亭<sup>1</sup>,杨茗<sup>1</sup>,杨艳波<sup>2</sup>,冯鹏<sup>1</sup>,仲召亮<sup>3</sup>,梁梓<sup>1</sup>,武弘源<sup>1</sup>

(1. 乐山师范学院 生命科学学院,四川 乐山 614000;2. 东北林业大学 化学化工与资源利用学院,黑龙江 哈尔滨 150040;3. 九江学院 资源环境学院,江西 九江 332000)

**摘要:**为了探究小兴安岭地区针、阔叶林土壤碳汇稳定性差异,对小兴安岭凉水国家级自然保护区内针、阔叶林进行调查并采集 0~20 cm 表层土壤样品,测定土壤有机碳含量(SOC)、土壤异养呼吸速率( $R_s$ )、温度敏感性( $Q_{10}$ )、湿度敏感性( $H_s$ )及土壤理化性质指标。结果表明,阔叶林土壤有机碳含量较针叶林显著高出 31.49% ( $P < 0.05$ ),土壤异养呼吸速率针、阔叶林间差异不显著。针叶林土壤温度敏感性( $Q_{10}$ )比阔叶林显著高出 16.82%,但湿度敏感性针、阔叶林间差异不显著。与针叶林相比,阔叶林土壤有机碳含量更高,且阔叶林温度敏感性更低。冗余分析结果表明土壤容重对碳汇稳定性影响最大。

**关键词:**针叶林;阔叶林;土壤有机碳;温度敏感性;湿度敏感性

森林是陆地生态系统中最大的碳库,在全球碳循环及减缓气候变化过程中作用重大<sup>[1-3]</sup>。土壤有机碳作为土壤的重要组成部分,其来源较为复杂,主要包括植物、动物、微生物和凋落物<sup>[4-5]</sup>。土壤有机碳分解的温度敏感性、湿度敏感性对土壤碳循环意义重大,也决定了全球气候变化的反馈<sup>[6]</sup>。土壤呼吸作用是森林土壤中有机碳以  $CO_2$  的形式释放到大气中的过程,是森林生态系统重要的生态学过程。土壤温度敏感性指的是温度每上升 10 °C 土壤呼吸速率增大的倍数;其值大小表征了土壤有机质分解速率对温度变化响应的敏感程度<sup>[7]</sup>。土壤温度敏感性与土壤性质、底物质量、植被类型和地理气候等因素密切相关<sup>[8]</sup>。陈焯雄等<sup>[9]</sup>分析了不同生态系统和地理格局的  $Q_{10}$  值,结果表明  $Q_{10}$  值的分布区间为 1.04~5.55,平均值为 2.11。此外,土壤的湿度变化也会对土壤呼吸作用产生影响,土壤湿度可以通过影响底物扩散和土壤微生物代谢活动来影响有机碳的分解速率<sup>[9]</sup>。富利等<sup>[10]</sup>研究了不同土地利用类型下土壤呼吸对湿度变化的响应,结果表明梭梭林地、绿洲农田的土壤呼吸速率与土壤水分极显著正相关 ( $P < 0.01$ )。郝龙飞等<sup>[11]</sup>研究表明,氮添加处理能够显著改变东北地区森林土壤温度敏感性系数,但对土壤呼吸和土壤湿度间的相关性没有影响。在全球气候变化背景下,需要综合研究森林土壤有机碳积累、有机碳分解的温

度敏感性和湿度敏感性<sup>[12]</sup>,这有助于更精准地理解森林土壤碳汇的有效性。

阔叶林与针叶林是我国东北林区最为重要的两种林型,二者互为转换是林分演替过程中较为常见的现象<sup>[13]</sup>。本研究以小兴安岭凉水国家级自然保护区为研究对象,探究针叶林和阔叶林土壤碳汇稳定性的差异,以期小兴安岭地区基于林分管理提升土壤碳汇功能提供数据支撑。

## 1 研究地点与方法

### 1.1 研究地概况

研究地点位于黑龙江凉水国家级自然保护区(47°6'N~47°16'N,128°47'E~128°57'E)。黑龙江凉水国家级自然保护区总面积为 12 133  $hm^2$ ,年均气温为 0.3 °C,年平均降水量为 676 mm。保护区内地带性土壤为森林暗棕壤,土层厚度约为 30~60 cm<sup>[14-15]</sup>。

### 1.2 方法

1.2.1 采样方法 本研究于 2015—2019 年多次对凉水保护区植被调查的基础上,于凉水保护区不同功能区(实验区、缓冲区及核心区)选择针叶林、阔叶林样方各 12 块,共计 24 块(样方大小为 30 m×30 m)。针叶林主要树种为落叶松(*Larix gmelinii*)、红皮云杉(*Picea koraiensis*)和白桦(*Betula platyphylla*)等;阔叶林主要树种为白桦、色木槭(*Acer mono*)等(样地概况见表 1)。在

收稿日期:2024-06-04

基金项目:乐山师范学院高层次人才引进科研启动项目(RC2023018);2024 年大学生创新创业训练计划项目(S202410649112);四川省自然科学基金青年基金(2024NSFSC1331);中央高校基本科研业务费专项(2572018AA19)。

第一作者:张喜亭(1991—),男,博士,讲师,从事植物多样性与森林土壤碳汇研究。E-mail:1468366531@qq.com。

各乔木样方中用环刀法对 0~20 cm 表层土壤 5 点取样并混合装入土壤袋中,用于后期土壤指标的测定。

表 1 凉水保护区样地统计表

项目	郁闭度	平均树高/m	平均胸径/cm
针叶林	均值	0.75	19.20
	标准误	0.04	0.35
阔叶林	均值	0.77	18.50
	标准误	0.05	0.36

### 1.2.2 土壤碳汇稳定性和理化性质指标的测定

土壤碳汇稳定性指标包括土壤有机碳含量(SOC)、土壤呼吸速率( $R_s$ )、温度敏感性( $Q_{10}$ )和湿度敏感性( $H_s$ )。土壤有机碳(SOC)含量测定方法采用重铬酸钾氧化-分光光度法<sup>[16]</sup>。

土壤温度敏感性测定时,将 100 g 风干土(过 2 mm 筛)放置在培养瓶(240 mL)中,加蒸馏水使土壤含水量为 25%。在 15、25 和 35 °C 温度条件下的恒温培养箱中分别培养 7 d,用带有土壤呼吸室的 Li-6400 光合仪进行土壤呼吸速率测定。指数方程用于描述土壤呼吸速率( $R_s$ )和温度之间的关系  $R_s = R_0 e^{bT}$ <sup>[17]</sup>。土壤温度敏感性( $Q_{10}$ )计算公式为:  $Q_{10} = e^{10b}$ 。

湿度敏感性测定时,恒温培养箱温度设置为 20 °C,将土壤含水量分别设置为 5%、10%、15%、20%、25%和 30%,培养 7 d 后用 Li-6400 进行土壤呼吸速率测定。通过线性回归方法描述了  $R_s$  与土壤湿度( $W$ )的关系:  $R_s = H_s W + d$ 。线性系数( $H_s$ )为湿度敏感性值。土壤异养呼吸速率( $R_s$ )为不同温度和湿度下土壤异养呼吸速率的均值。

土壤容重(BD)采用环刀法,含水量(MC)采用风干法测定,土壤 pH 采用酸度计测定,土壤电导率(EC)采用电导率仪测定<sup>[18]</sup>。

1.2.3 数据分析 通过 SPSS 25.0 统计软件进行单因素方差分析(ANOVA),比较针叶林、阔叶林间土壤碳汇稳定性(SOC、 $R_s$ 、 $Q_{10}$ 和  $H_s$ )的差异(显著性水平为  $P < 0.05$ );用 Pearson 相关分析探究土壤理化性质与碳汇稳定性指标间的相关性。采用 Canoco 5.0 软件中方差分解分析(Variance Partitioning Analysis)探究林分结构(郁闭度、平均树高和平均胸径)和土壤性质(容重、含水量、pH 和电导率)对土壤碳汇稳定性的相对解释量;冗余分析(Redundancy Analysis)排

序林分结构和土壤性质指标对土壤碳汇稳定性解释程度的大小。

## 2 结果与分析

### 2.1 针叶林和阔叶林土壤有机碳含量和呼吸速率差异

针叶林土壤有机碳(SOC)含量为 50.11  $g \cdot kg^{-1}$ ,阔叶林 SOC 含量为 65.89  $g \cdot kg^{-1}$ 。阔叶林有机碳含量显著高于针叶林( $P < 0.05$ ),阔叶林比针叶林土壤有机碳含量高出 31.49%(图 1A)。

针叶林土壤异养呼吸速率( $R_s$ )为 4.53  $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ,阔叶林土壤呼吸速率为 5.34  $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 。阔叶林比针叶林土壤异养呼吸速率高出 17.88%,但针、阔叶林间土壤呼吸速率  $R_s$  差异未达到统计学显著水平(图 1B)。

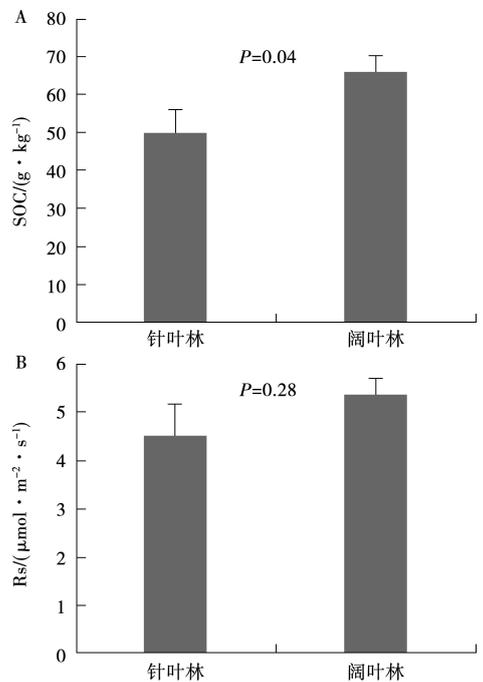


图 1 针阔叶林土壤有机碳含量(A)和呼吸速率(B)差异

### 2.2 针阔叶林土壤温度敏感性和湿度敏感性差异

针叶林土壤温度敏感性( $Q_{10}$ )为 2.50,阔叶林土壤温度敏感性( $Q_{10}$ )为 2.14。针叶林土壤温度敏感性( $Q_{10}$ )显著高于阔叶林( $P < 0.05$ ),针叶林温度敏感性( $Q_{10}$ )比阔叶林高出 16.82%(图 2A)。

针叶林土壤湿度敏感性  $H_s$  为 10.35,阔叶林土壤湿度敏感性  $H_s$  为 13.00。与针叶林相比,阔叶林土壤湿度敏感性  $H_s$  较针叶林高了 25.60%,

但针、阔叶林间土壤湿度敏感性  $H_s$  差异不显著 ( $P>0.05$ ) (图 2B)。

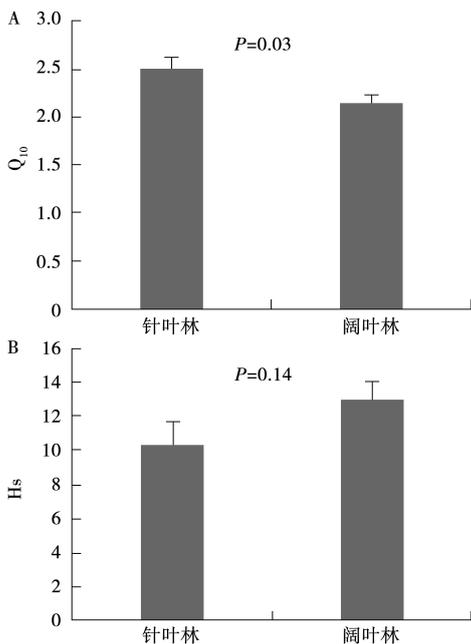


图 2 针阔叶林土壤温度敏感性(A)和湿度敏感性(B)差异

### 2.3 土壤碳汇稳定性指标和土壤理化性质与林分结构的相关分析

土壤碳截获稳定性指标与林分结构(郁闭度、平均树高和平均胸径)相关性均未达到统计学显著水平。土壤有机碳与土壤容重极显著负相关(相关系数为 $-0.622$ );土壤有机碳和土壤含水量极显著正相关(相关系数为 $0.548$ );土壤有机碳与土壤 pH、电导率相关性不大。土壤呼吸速率与土壤容重显著负相关(相关系数为 $-0.478$ );土壤呼吸速率与土壤含水量、土壤 pH、电导率相关性不大。土壤温度敏感性和土壤含水量显著负相关(相关系数为 $-0.426$ );土壤温度敏感性  $Q_{10}$  与土壤容重、土壤 pH、电导率相关性不大。土壤湿度

敏感性和 4 个土壤理化性质指标均未达到显著相关(表 2)。

表 2 碳汇稳定性指标和林分结构与土壤理化性质的相关分析

项目	土壤有机碳	土壤呼吸速率	土壤温度敏感性	土壤湿度敏感性
郁闭度	0.196	0.095	-0.361	0.276
平均树高	-0.303	-0.087	0.310	-0.264
平均胸径	-0.309	-0.268	0.090	-0.173
土壤容重	-0.622**	-0.478*	0.018	-0.048
土壤含水量	0.548**	0.068	-0.426*	0.187
pH	-0.040	-0.265	-0.166	-0.106
电导率	0.192	0.199	-0.103	-0.087

注: \*\* 表示在 0.01 水平相关性极显著, \* 表示在 0.05 水平相关性显著。

### 2.4 方差分解分析和冗余分析

如图 3 所示,土壤性质对土壤碳截获稳定性变化的解释量最大(55.8%),其次是林分结构,解释量为 41.0%,二者的共同影响解释量仅为 3.1%。土壤性质对碳截获稳定性的解释力是林分结构的 1.36 倍。

冗余分析简单效应结果表明,土壤容重 BD 对碳截获稳定性的解释能力最大( $P<0.05$ ),解释量为 15.5%;其次是土壤含水量,解释量为 13.0% ( $P<0.05$ )。条件效应结果表明,土壤容重 BD 依然是对多样性变化贡献最大的( $P<0.05$ ),解释量与单独作用相等(表 3)。

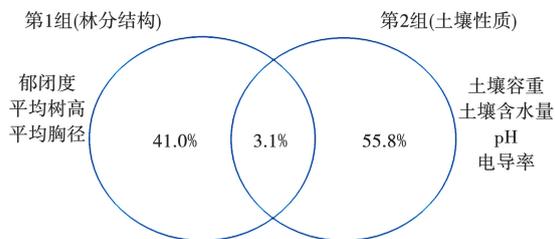


图 3 区分林分结构和土壤性质的方差分解分析

表 3 简单效应和条件效应统计

简单效应				条件效应			
项目	解释量/%	Pseudo-F	P	项目	解释量/%	Pseudo-F	P
土壤容重	15.5	4.0	0.012	土壤容重	15.5	4.0	0.014
土壤含水量	13.0	3.3	0.016	土壤含水量	9.2	2.6	0.068
平均树高	6.6	1.6	0.218	平均树高	8.3	2.5	0.052
郁闭度	6.3	1.5	0.194	郁闭度	2.4	0.7	0.570
平均胸径	5.1	1.2	0.312	平均胸径	7.2	2.2	0.108
pH	2.8	0.6	0.614	pH	1.6	0.5	0.770
电导率	2.4	0.5	0.716	电导率	1.2	0.4	0.808

### 3 讨论

就土壤有机碳含量而言,本研究发现阔叶林土壤有机碳含量和针叶林差异显著,阔叶林土壤有机碳含量比针叶林高 31.49%。这和前人研究表明阔叶林对有机碳积累起到促进作用相一致。如 Wei 等<sup>[19]</sup>研究表明阔叶林土壤有机碳含量和全氮含量较针叶林高 30%~50%,土壤团聚体的贡献率占阔叶林土壤碳氮积累量的 75%~77%。耿玉清等<sup>[20]</sup>对北京山地针、阔叶林土壤有机碳库研究表明,阔叶林土壤有机碳含量显著高于针叶林土壤;其中,在 0~10 cm 土壤中,阔叶林有机碳含量较针叶林高 19.65%;在 10~20 cm 土壤中,阔叶林有机碳含量较针叶林高 10.97%。王文杰等<sup>[13]</sup>对东北地区针阔叶林地上生物量碳汇也进行了系统研究,结果表明针叶林的地上碳储量较阔叶林高 25.54% ( $P < 0.05$ )。本研究表明阔叶林土壤异养呼吸速率  $R_s$  较针叶林高出 17.88%,但未达到统计学显著水平,在前人研究结果的基础上丰富了黑龙江寒冷地区针阔叶林间的呼吸速率差异。

就土壤碳稳定性而言,本研究表明针阔叶林间土壤温度敏感性差异显著,针叶林土壤是阔叶林的 1.17 倍;阔叶林土壤湿度敏感性是针叶林的 1.26 倍,但差异不显著。一般认为土壤碳质量能够影响温度敏感性,土壤碳质量越高其温度敏感性就越低<sup>[21]</sup>。针阔叶林间土壤微生物种类、数量及酶活性的差异可能也是针阔叶林温度敏感性差异的原因<sup>[22]</sup>。Wang 等<sup>[23]</sup>对我国东部森林土壤有机碳温度敏感性的分布格局及主要影响因素进行了研究,结果表明阔叶林温度敏感性低于针叶林,这与本研究结果一致。本研究表明阔叶林土壤湿度敏感性较针叶林高 25.60%,但未达到统计学显著水平。王文杰等<sup>[13]</sup>研究表明,针叶林地上耐分解稳定性较阔叶林高 43.24% ( $P < 0.05$ ),但阔叶林地上环境稳定性较针叶林高 8% ( $P < 0.05$ )。

本研究分析了土壤理化性质指标与碳截获稳定性指标的相关性,结果表明土壤有机碳与土壤容重显著负相关,土壤有机碳和土壤含水量显著正相关,土壤呼吸速率与土壤容重显著负相关。曹小玉等<sup>[24]</sup>研究了杉木林土壤有机碳含量和理化性质的相关性,表明土壤有机碳和土壤容重显著负相关,与土壤 pH 相关性不大,这与本研究结果一致。冗余分析结果也表明土壤容重对碳汇稳定性的影响最大。本研究发现土壤温度敏感性和

土壤含水量显著负相关。土壤水分能够影响土壤的通透性、底物的溶解性和土壤比热容等,进而影响土壤温度敏感性<sup>[25]</sup>。本研究选取小兴安岭典型林分(如黑龙江凉水国家级自然保护区),通过探究针、阔叶林对土壤碳汇稳定性的差异,可以为小兴安岭地区天然林生态服务功能的提升提供数据支撑。

### 4 结论

通过对小兴安岭地区针、阔叶林土壤碳汇稳定性的分析得出以下结论:阔叶林比针叶林土壤有机碳含量显著高出 31.49% ( $P < 0.05$ ),土壤异养呼吸速率针阔叶林间差异不显著。针叶林土壤温度敏感性比阔叶林显著高 16.82%,但湿度敏感性针阔叶林间差异不显著。与针叶林相比,阔叶林土壤有机碳含量更高,且阔叶林温度敏感性更低。冗余分析结果表明土壤容重对小兴安岭地区森林土壤碳汇稳定性影响最大。

### 参考文献:

- [1] ZANINI A M, MAYRINCK R C, VIEIRA S A, et al. The effect of ecological restoration methods on carbon stocks in the Brazilian Atlantic Forest [J]. *Forest Ecology and Management*, 2021, 481: 118734.
- [2] 朱建华,田宇,李奇,等. 中国森林生态系统碳汇现状与潜力[J]. *生态学报*, 2023, 43(9): 3442-3457.
- [3] 陈科屹,林田苗,王建军,等. 天保工程 20 年对黑龙江大兴安岭国有林区森林碳库的影响[J]. *生态环境学报*, 2023, 32(6): 1016-1025.
- [4] 秦文宽,张秋芳,敖古凯麟,等. 土壤有机碳动态对增温的响应及机制研究进展[J]. *植物生态学报*, 2024, 48(4): 403-415.
- [5] 杨阳,王宝荣,窦艳星,等. 植物源和微生物源土壤有机碳转化与稳定研究进展[J]. *应用生态学报*, 2024, 35(1): 111-123.
- [6] DAVIDSON E A, JANSSENS I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change [J]. *Nature*, 2006, 440(7081): 165-173.
- [7] QIN S Q, CHEN L Y, FANG K, et al. Temperature sensitivity of SOM decomposition governed by aggregate protection and microbial communities [J]. *Science Advances*, 2019, 5(7): eaau1218.
- [8] 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.
- [9] 陈滇雄,张超,李全,等. 土壤有机碳分解温度敏感性的影响机制研究进展[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(9): 2575-2584.
- [10] 富利,张勇勇,赵文智. 荒漠-绿洲区不同土地利用类型土壤呼吸对温湿度的响应[J]. *生态学报*, 2018, 37(9): 2690-2697.

- [11] 郝龙飞, 王庆成, 刘婷岩. 东北地区 4 种林分土壤呼吸及温、湿度敏感性对氮添加的短期响应[J]. 生态学报, 2020, 40(2): 560-567.
- [12] ANGST G, MUELLER K E, EISSENSTAT D M, et al. Soil organic carbon stability in forests: Distinct effects of tree species identity and traits[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(4): 1529-1546.
- [13] 王文杰, 王凯, 王媛媛, 等. 东北针叶林与阔叶林乔灌草组成特征及碳汇功能对比研究[J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(10): 52-67.
- [14] 王文杰, 杜红居, 肖路, 等. 凉水自然保护区 3 种森林类型的植物组成和林分结构特征[J]. 林业科学, 2019, 55(9): 166-176.
- [15] 余丹琦, 张喜亭, 肖路, 等. 小兴安岭凉水国家级自然保护区植物 beta 多样性及其影响因素[J]. 生物多样性, 2022, 30(3): 12-23.
- [16] 路嘉丽, 沈光, 王琼, 等. 落叶松、水曲柳、樟子松和农田土壤指标差异及其综合比较[J]. 生态学报, 2017, 37(10): 3543-3552.
- [17] ZHAI C, WANG W J, HE X Y, et al. Urbanization drives SOC accumulation, its temperature stability and turnover in forests, Northeastern China [J]. *Forests*, 2017, 8(4): 130.
- [18] WANG W J, QIU L, ZU Y G, et al. Changes in soil organic carbon, nitrogen, pH and bulk density with the development of larch (*Larix gmelinii*) plantations in China [J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(8): 2657-2676.
- [19] WEI C H, WANG Q, REN M L, et al. Soil aggregation accounts for the mineral soil organic carbon and nitrogen accrual in broadleaved forests as compared to that of coniferous forests in Northeast China: cross-sites and multiple species comparisons [J]. *Land Degradation & Development*, 2021, 32(1): 296-309.
- [20] 耿玉清, 余新晓, 岳永杰, 等. 北京山地针叶林与阔叶林土壤活性有机碳库的研究[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(5): 19-24.
- [21] CONANT R T, RYAN M G, ÅGREN G I, et al. Temperature and soil organic matter decomposition rates—synthesis of current knowledge and a way forward [J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(11): 3392-3404.
- [22] 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.
- [23] WANG Q K, LIUS G, TIAN P. Carbon quality and soil microbial property control the latitudinal pattern in temperature sensitivity of soil microbial respiration across Chinese forest ecosystems [J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(7): 2841-2849.
- [24] 曹小玉, 李际平. 杉木林土壤有机碳含量与土壤理化性质的相关性分析[J]. 林业资源管理, 2014(6): 104-109.
- [25] 罗伶书, 杜盛. 降雨梯度对林地土壤呼吸温度敏感性影响研究进展[J]. 西北林学院学报, 2023, 38(2): 76-83, 112.

## Differences on Sensitivity of Soil Temperature and Humidity in Coniferous-Leaved and Broad-Leaved Forests in Xiaoxing'an Mountains

ZHANG Xiting<sup>1</sup>, YANG Ming<sup>1</sup>, YANG Yanbo<sup>2</sup>, FENG Peng<sup>1</sup>, ZHONG Zhaoliang<sup>3</sup>, LIANG Zi<sup>1</sup>, WU Hongyuan<sup>1</sup>

(1. College of Life Science, Leshan Normal University, Leshan 614000, China; 2. College of Chemistry, Chemistry Engineering and Resource Utilization, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 3. College of Resources and Environment, Jiujiang University, Jiujiang 332000, China)

**Abstract:** In order to explore the differences in soil carbon stability between coniferous-leaved forests and broad-leaved forests in Xiaoxing'an Mountains. This study investigated and collected 0–20 cm soil samples from coniferous-leaved forests and broad-leaved forests in Liangshui Nature Reserve, Xiaoxing'an Mts., and measured soil organic carbon content (SOC), soil heterotrophic respiration rate (Rs), temperature sensitivity (Q<sub>10</sub>), humidity sensitivity (Hs), and soil physicochemical properties. The soil organic carbon content in broad-leaved forests was significantly higher than that in coniferous-leaved forests by 31.49% ( $P < 0.05$ ), and there was no significant difference in soil heterotrophic respiration rate between coniferous-leaved forests and broad-leaved forests. The Q<sub>10</sub> of soil temperature sensitivity in coniferous-leaved forests was significantly higher than that in broad-leaved forests by 16.82% ( $P < 0.05$ ), but there was no significant difference in humidity sensitivity. Compared with coniferous-leaved forests, broad-leaved forests had higher soil organic carbon content and lower temperature sensitivity. Redundancy analysis indicated that soil bulk density had the greatest impact on carbon capture stability.

**Keywords:** coniferous-leaved forest; broad-leaved forest; soil organic carbon; temperature sensitivity; humidity sensitivity