

模拟增温对寒温带兴安落叶松林土壤及空气温湿度影响¹⁾

吴天龙 马秀枝 梁芝 高伟 刘洋 张晓璞
(内蒙古农业大学 呼和浩特 010019) (内蒙古根河市气象局) (内蒙古农业大学)

摘要 采用开顶室(OTC)模拟增温的方法,设置增温组(OTC模拟增温)和对照组(CK,无处理),通过连续1 a(2019年11月—2020年10月)的野外原位观测试验,探讨了模拟增温对兴安落叶松(*Larix gmelinii*)林内各层土壤(5、10、15、20 cm)以及地上1.5 m处空气温湿度的影响。结果表明:(1)与对照相比,OTC内地下5~20 cm土壤年均温度依次增幅1.18、1.83、1.69、1.29 °C,地上空气温度增幅1.18 °C;土壤年均湿度较CK依次降低2.31%、1.85%、1.14%、5.07%,空气湿度降低2.15%。土壤年均温度在各层次间无显著差异。20 cm的土壤湿度最高,且显著高于其他土层。(2)土壤和空气月均温度在模拟增温和对照处理下均呈“先下降后上升”的趋势;增温处理下的空气温度高于对照。土壤湿度月变化呈现出生长季(6—9月)变化波动大,非生长季(10月—翌年5月)变化波动小的趋势。(3)模拟增温处理下,5、10 cm土壤湿度在秋季具有显著差异。(4)模拟增温和对照处理下,夏季夜间的15、20 cm土壤湿度与5、10 cm间的差异具有显著性。综上,开顶室能够有效改变微气候环境,对地上1.5 m、地下5、10、15、20 cm土壤有一定的增温降温效应。

关键词 多年冻土;模拟增温;土壤温度;土壤湿度

分类号 S705

Effect of Simulated Warming on Soil and Air Temperature and Humidity in *Larix gmelinii* Forest in Cold Temperate Zone // Wu Tianlong, Ma Xiuzhi, Liang Zhi (Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, P.R. China); Gao Wei (Inner Mongolia Genhe Meteorological Bureau); Liu Yang, Zhang Xiaopu (Inner Mongolia Agricultural University) // Journal of Northeast Forestry University 2023 51(1): 74-81.

The method of simulated warming in open top chambers (OTC) is used, and the two groups are set up, which are the warming group of the open top chamber (OTC) and the control group of the control (CK). Through the continuous field in-situ observation and experiment over one year (Nov 2019–Oct 2020), the effects of simulated warming on soil layer (5, 10, 15 and 20 cm) and air temperature and humidity at 1.5 m above ground in *Larix gmelinii* forest are researched. The results show that: (1) Compared with CK, the average annual soil temperature ranging from 5 to 20 cm underground in OTC shows an increase of 1.18, 1.83, 1.69, and 1.29 °C while the aboveground air temperature is 1.18 °C higher. The average annual soil humidity is respectively lower than CK at 2.31, 1.85, 1.14, and 5.07% while the air humidity shows a reduction of 2.15%. The average annual soil temperature among different soil layers is similar without significant differences. The soil humidity of the 20 cm soil layer is the highest which is remarkably higher than that of other soil layers. (2) The monthly average temperature of soil and air in OTC and CK suggests a tendency of decreasing before increasing. The air temperature in OTC is higher than that of CK. The monthly average humidity of soil shows that it fluctuates greatly in the growing season (from June to September) and changes little in the non-growing season (from October to May of the following year). (3) Under the simulated warming environment, a wide gap exists in the soil temperature of soil layers at 5 and 10 cm during autumn. (4) In both OTC and CK, it demonstrates an obvious difference between 15–20 and 5–10 cm soil layers in terms of soil humidity on summer nights. In conclusion, the open top chamber can effectively change the microclimate and has a certain influence on increasing temperature and reducing the humidity of the soil layers 1.5 m above ground and 5, 10, 15 and 20 cm underground.

Keywords Permafrost; Simulated warming; Soil temperature; Soil humidity

DOI:10.13759/j.cnki.dlxb.2023.01.001

近年来,全球气候变化导致的气候变暖已引起人们的广泛关注^[1]。IPCC(2021)^[2]在第六次评估报告《气候变化2021:自然科学基础》中指出:2011年以来,大气中温室气体含量持续上升,预测到21世纪末全球表面温度将增高1.5~2.0 °C,且陆地生态系统地上和地下部分的生态过程对温度增高响应明显^[3-4]。1961—2015年内蒙古大兴安岭地区温度

呈逐渐升高趋势。英国Hadley气候预测与研究中的结果表明,东北大兴安岭地区的温度将在2015—2050年升高1.44~1.89 °C^[5-6]。在诸多生态系统中,冰冻圈是对气候系统响应最直接和最敏感的圈层^[7]。

全球气候变暖影响着地上和地下部分的生态过程,当前已经有许多对陆地生态系统模拟增温的研究。李娜等^[8]的研究结果表明,增温可以增加高寒草甸的土壤温度。高福光等^[9]在荒漠草原的研究认为,增温显著提高了土壤各层温度,呈现出随着土壤深度的增加,增温幅度相对减小的趋势。有相似的试验也表明,增温也可以提高羊草草甸的土壤温

1) 内蒙古引进国外智力成果示范项目(2022YFYZ0003)。

第一作者简介:吴天龙,男,1997年9月生,内蒙古农业大学林学院,硕士研究生。E-mail: 2608720240@qq.com。

通信作者:马秀枝,内蒙古农业大学林学院,教授。E-mail: luck-mxy@imau.edu.cn。

收稿日期:2022年3月26日。

责任编辑:潘华。

度^[10]。在高寒地区,土壤温度与水分密切相关,水分变化受温度的影响,增温不仅会改变土壤的水力参数,并且土壤水分也会依据温度梯度产生运移^[11]。研究表明,不同温度下土壤水分随温度增加而降低^[12]。石福孙等^[13]的研究发现,增温会增加高寒草甸气温。权欣等^[14]的研究也发现,增温能提高地上的空气温度。但是,根据开顶室(OTC)所采用的材质、形状、高度等的不同,增温效应也会有所不同^[15-16]。这些研究很大程度上促进了学术界关于对土壤温湿度与气候变暖响应的认识。然而,过往的研究主要集中在干旱和高海拔地区,对来自冻土地带的证据较少^[17]。大兴安岭北部地处欧亚大陆冻土带南缘,是气候变化的敏感区域。

兴安落叶松(*Larix gmelinii*)林是我国北方针叶林的主要代表,分布于大兴安岭寒温带山地,由于其对全球气候变化具有高度敏感性,是国内研究全球气候变化与区域响应等问题最受关注的区域之一。多年以来,大兴安岭北部地区气候变暖趋势明显,在过去 30 a 间,该地区气温增长速率约为全球平均水平的 2 倍。开顶室(OTC)模拟增温方法被认为是在地处偏僻、缺乏电源供给环境下的理想方法之一^[18]。研究模拟增温小室中空气和土壤温湿度变化趋势以及对土壤温湿之间的相关性进行分析,旨在探讨和认识全球气候变化背景下冻土区兴安落叶松林土壤和空气温湿度变化趋势,有助于理解该地区气候条件的改变对森林生态系统产生的影响,为开展高寒地区对气候变化响应方面的研究提供依据。

1 研究区概况

试验地位于内蒙古呼伦贝尔根河市大兴安岭国家森林公园生态站试验区,地理位置为东经 120°12′~122°55′,北纬 50°20′~52°30′。气候属寒温带湿润型森林气候,气候寒冷湿润,低温时间长,高温时间短,春秋相连,无霜期平均为 90 d。年平均气温-5.3℃,年平均降水量 414 mm,多集中在植物生长季节。土壤冻结期从 10 月至次年的 5 月,土壤以棕色针叶林土(表潜棕色针叶林土)为主,表层枯枝落叶厚度达 5~8 cm,并且由于滞水性强,土壤在生长季处于湿润状态。

2 材料与方法

2.1 模拟增温试验

国际冻原计划(ITEEX)的模拟增温试验是研究气候变暖与陆地生态系统关系的重要方法之一,目前最常使用的增温方法就是开顶室(OTC)。OTC

增温装置的最大优势就是成本低、方法便捷、易重复、干扰低,可以适用长期的野外观测试验。

本文基于此方法,在内蒙古大兴安岭杜香-兴安落叶松林内安装了模拟增温的野外试验平台,在林内选取地形、植被相对比较一致的生境,设置 3 个 10 m×10 m 的样方,每个样方靠近中心位置设置一个开顶式温室作为增温处理,增温装置是以聚碳酸酯(透光率为 90%)为制作材料的八面体开顶式温室,其规格为底部直径 2.75 m,顶部直径 1.50 m,高 2.42 m。在每个样方内设置 OTC 增温处理的对照小区。该试验布设增温与对照两个处理,每个处理 3 次重复。

2.2 土壤和空气温湿度测定

在试验样地架设和安装 HOBO、Watchdog 小型气象站,可以连续观测开顶室内外土壤及空气温湿度,并且分别在室内外地上 1.5 m、地下 5、10、15、20 cm 处安置温湿度传感器,自动监测,数据采集频率 1 次/h。本文研究模拟增温及对照环境下 2019 年 11 月—2020 年 10 月的土壤和空气温湿度的相应变化情况。

2.3 数据处理

将采集到的空气、土壤温湿度数据进行整理,分析模拟增温和对照处理下空气与不同土层(5、10、15、20 cm)土壤湿度和土壤温度的年变化、月变化以及昼夜变化趋势以及不同处理间的差异显著性。数据采用 Sigmaplot 12.5 软件作图,采用 SPSS 23.0 对模拟增温和对照处理下的土壤和空气温湿度进行单因素方差分析和相关性分析,统计极显著水平为 $P < 0.01$,显著水平为 $P < 0.05$ 。

3 结果与分析

3.1 模拟增温处理下土壤与空气温度的变化

3.1.1 土壤与空气温度年变化

由表 1 可知,模拟增温和对照处理下,土壤温度总体变化趋势相同,均表现为“先上升后下降”,且各层土壤温度间无显著差异;不同温度处理下空气温度有显著差异。模拟增温处理下,5、10、15、20 cm 土层温度均高于对照,且土壤温度年均变化较对照依次增高 1.18、1.83、1.69、1.29℃。综上,模拟增温有利于提高 10~15 cm 的土壤温度。空气年均温度在增温处理下同样高于对照,为 1.18℃。

3.1.2 土壤与空气温度月变化

由表 2 可知,模拟增温和对照处理下,不同深度(5、10、15、20 cm)的土壤温度变化趋势一致,均表现为“先下降后上升”的变化规律。模拟增温和对照处理下,5、15 cm 土壤温度在各月间无显著差异;10

cm 土壤层中,模拟增温与对照在 5、8、9、10 月间具有显著性,且 8 月土壤温度最高;20 cm 土壤层中,在 9 月具有显著性。试验期间增温处理土壤各层温度均高于对照,因而开顶式温室改变了冻土区的土壤温度。从温度的动态变化分析,7—9 月的土壤各

层温度最高,12 月—翌年 2 月的温度最低。5、10、15、20 cm 的土壤温度在增温处理下均高于对照。模拟增温处理下,在 4 个土壤层中,8 月温度最高,分别为 12.58、14.97、14.30、11.25 °C。4 月和 10 月土壤温度在增温与对照处理下的差异较大。

表 1 增温处理下土壤与空气温度年变化

°C

处理	不同土层土壤温度				空气温度
	5 cm 土层	10 cm 土层	15 cm 土层	20 cm 土层	
OTC	(0.42±1.21) Aa	(1.24±2.04) Aa	(1.04±2.60) Aa	(0.12±2.02) Aa	(-2.65±0.03) a
CK	(-0.76±0.91) Aa	(-0.59±1.78) Aa	(-0.65±0.87) Aa	(-1.17±0.96) Aa	(-3.83±0.09) b

注:表中数据为平均值±标准差。同行不同大写字母表示同一处理下,各土层间差异显著($P<0.05$);同列不同小写字母表示同一土壤和空气水平下,不同处理间的差异显著($P<0.05$);OTC.模拟增温处理;CK.对照处理。

模拟增温处理下的空气温度与对照的变化趋势一致,均表现为“先下降后上升”的趋势,并且增温处理下的空气温度始终高于对照。模拟增温处理下,空气温度在 2019 年 12 月和 2020 年 8 月与对照呈显著差异。增温处理下,7 月空气温度最高,为

19.54 °C,12 月空气温度最低,为-27.81 °C;对照处理下,7 月空气温度最高,为 18.03 °C,12 月空气温度最低,为-28.67 °C。空气月平均温度较对照提高 1.05 °C,4 月空气温度在对照和增温处理下差异较大。

表 2 增温处理下土壤与空气温度月变化

°C

时间	处理	不同土层土壤温度				空气温度
		5 cm 土层	10 cm 土层	15 cm 土层	20 cm 土层	
2019 年 11 月	OTC	(-3.79±0.98) a	(-3.08±0.07) a	(-3.26±8.53) a	(-3.01±1.49) a	(-19.03±2.33) a
	CK	(-5.32±7.91) a	(-4.55±8.63) a	(-3.56±1.41) a	(-3.69±8.72) a	(-19.75±2.16) a
2019 年 12 月	OTC	(-11.22±6.96) a	(-10.92±6.90) a	(-9.76±7.33) a	(-8.97±7.58) a	(-27.81±0.09) a
	CK	(-12.46±0.63) a	(-12.13±0.70) a	(-10.49±0.55) a	(-9.96±0.47) a	(-28.67±0.04) b
2020 年 1 月	OTC	(-11.42±4.54) a	(-10.85±4.57) a	(-10.94±4.24) a	(-10.53±4.20) a	(-25.66±2.41) a
	CK	(-12.23±1.98) a	(-11.00±2.81) a	(-11.01±2.20) a	(-10.93±1.49) a	(-26.53±2.35) a
2020 年 2 月	OTC	(-10.14±0.76) a	(-9.87±0.80) a	(-9.82±1.28) a	(-9.78±0.52) a	(-19.34±2.54) a
	CK	(-10.66±1.20) a	(-9.79±1.96) a	(-9.95±0.58) a	(-9.79±1.11) a	(-20.40±2.55) a
2020 年 3 月	OTC	(-5.83±2.14) a	(-5.73±2.22) a	(-5.64±2.21) a	(-5.6±2.14) a	(-8.70±1.07) a
	CK	(-6.32±1.10) a	(-6.23±1.38) a	(-6.02±1.16) a	(-5.98±1.20) a	(-10.24±1.18) a
2020 年 4 月	OTC	(-0.76±0.11) a	(-1.11±0.10) a	(-1.37±0.09) a	(-1.32±0.08) a	(3.42±0.85) a
	CK	(-2.31±2.36) a	(-2.25±1.84) a	(-2.15±1.27) a	(-2.38±1.25) a	(1.42±0.72) a
2020 年 5 月	OTC	(2.70±0.50) a	(2.18±0.11) a	(1.93±1.01) a	(0.64±0.38) a	(10.98±1.64) a
	CK	(2.20±0.44) a	(1.70±0.03) b	(1.55±0.08) a	(0.54±0.06) a	(9.10±1.48) a
2020 年 6 月	OTC	(7.50±0.35) a	(7.81±2.18) a	(7.33±0.11) a	(5.88±0.44) a	(14.03±0.83) a
	CK	(7.44±1.45) a	(7.00±0.74) a	(6.92±0.40) a	(5.34±0.58) a	(12.53±0.98) a
2020 年 7 月	OTC	(12.18±2.04) a	(13.40±1.34) a	(11.9±0.68) a	(9.54±0.59) a	(19.54±0.56) a
	CK	(12.01±0.94) a	(11.52±0.32) a	(11.32±0.50) a	(9.03±0.80) a	(18.03±0.25) a
2020 年 8 月	OTC	(12.58±0.01) a	(14.97±0.68) a	(14.30±1.17) a	(11.25±0.14) a	(14.37±0.17) a
	CK	(12.18±1.32) a	(12.72±0.45) b	(13.62±0.40) a	(10.63±0.38) a	(13.56±0.08) b
2020 年 9 月	OTC	(10.10±0.38) a	(11.68±0.96) a	(11.92±1.77) a	(9.22±0.25) a	(9.06±0.33) a
	CK	(9.87±0.92) a	(10.18±1.20) a	(10.91±0.73) a	(8.17±0.02) b	(8.26±0.65) a
2020 年 10 月	OTC	(4.14±0.19) a	(6.38±1.66) a	(6.35±1.73) a	(4.14±0.51) a	(-2.61±0.33) a
	CK	(-4.51±3.31) a	(-4.24±3.36) b	(-2.71±3.52) a	(-5.07±4.46) a	(-3.34±0.34) a

注:表中数据为平均值±标准差。同列不同小写字母表示同一土壤和空气水平下,不同处理间的差异显著($P<0.05$)。

3.1.3 土壤与空气温度昼夜变化

由表 3 可以看出,5、10、15、20 cm 土壤温度昼夜变化均表现为“先增高后降低”的趋势,且白天的土壤温度均大于夜间。春季,模拟增温处理下,无论白天夜间,5 cm 的土壤温度最高,且显著高于其他土层;对照处理下的土壤温度无显著差异。夏季,对照处理下,20 cm 的白天土壤温度最低,且显著低于其他土层,其余处理下的土壤温度并无显著差异。秋季,模拟增温处理下,无论白天夜间,5、10 cm 土壤

温度间具有显著差异;对照处理下,各层土壤温度间无显著差异。冬季,对照处理下,5 cm 的白天土壤温度最低,且显著低于其他土层;其余处理下的土壤温度无显著差异。春季、秋季、冬季,模拟增温和对照处理下,白天夜间的各层土壤温度无显著差异;在夏季,对照处理下,白天和夜间的 10 cm 土壤温度之间具有显著差异。在模拟增温和对照处理下,白天夜间空气温度在四季都有显著性。从地下 5 和 10 cm 土壤温度变化分析,增温后的白天土壤温度高于

对照 均在夏季达到最大, 为 12.85 和 13.82 °C。15 与 20 cm 土壤温度在夏季的白天和夜间均是增温高于对照, 白天温度分别为 13.03、9.73 °C, 比对照高 0.89 和 0.29 °C; 夜间温度为 11.52 和 9.19 °C, 分别比

对照高 1.92、0.26 °C。地下 5 和 10 cm 土壤温度, 受增温影响较大, 但总体上模拟增温和对照处理的土壤各层次昼夜增温效果相差不大, 增温幅度基本一致。

表 3 增温处理下土壤与空气温度昼夜变化

季节	处理	时间	不同土层土壤温度				空气温度
			5 cm 土层	10 cm 土层	15 cm 土层	20 cm 土层	
春季	OTC	白天	(1.82±0.58) Ba	(0.14±1.6) ABa	(0.04±0.81) ABa	(-0.26±0.18) Aa	(11.16±6.34) a
		夜间	(1.71±0.23) Ba	(-0.01±1.28) Aa	(0.01±0.46) Aa	(-0.74±0.59) Aa	(-1.75±3.68) b
	CK	白天	(-0.87±0.61) Aa	(-1.21±1.17) Aa	(-1.49±1.26) Aa	(-1.42±1.77) Aa	(7.94±6.49) a
		夜间	(-1.18±1.30) Aa	(-1.44±1.49) Aa	(-1.72±1.86) Aa	(-1.57±2.11) Aa	(-2.30±3.89) b
夏季	OTC	白天	(12.85±3.62) Aa	(13.82±2.66) Aa	(13.03±0.77) Aa	(9.73±1.49) Aa	(25.49±2.72) a
		夜间	(12.34±3.99) Aa	(13.61±2.60) Aa	(11.52±1.95) Aa	(9.19±1.70) Aa	(14.72±1.82) b
	CK	白天	(12.81±1.34) Ba	(12.52±0.03) Bb	(12.14±0.42) Ba	(9.44±1.08) Aa	(22.99±1.56) a
		夜间	(12.17±1.47) Aa	(11.61±0.36) Aa	(9.60±2.61) Aa	(8.93±1.37) Aa	(13.90±2.12) b
秋季	OTC	白天	(2.11±2.30) Aa	(4.87±0.73) Ba	(3.20±0.23) ABa	(2.50±0.65) ABa	(-0.24±0.02) a
		夜间	(2.07±2.33) Aa	(4.86±0.81) Ba	(3.08±0.29) ABa	(2.48±0.58) ABa	(-7.57±0.32) b
	CK	白天	(1.15±0.02) Aa	(2.76±1.23) Aa	(1.21±1.99) Aa	(1.65±0.85) Aa	(-2.09±0.56) a
		夜间	(1.07±0.18) Aa	(2.43±1.00) Aa	(1.16±1.92) Aa	(1.58±0.90) Aa	(-8.85±0.58) b
冬季	OTC	白天	(-11.25±0.76) Aa	(-10.65±0.89) Aa	(-10.67±1.39) Aa	(-10.19±1.55) Aa	(-25.70±1.54) a
		夜间	(-11.48±1.00) Aa	(-10.84±1.40) Aa	(-10.77±1.73) Aa	(-10.37±0.62) Aa	(-31.20±2.59) b
	CK	白天	(-11.93±0.58) Aa	(-10.84±0.70) Ba	(-10.75±0.27) Ba	(-10.63±0.46) Ba	(-26.66±1.71) a
		夜间	(-12.10±1.54) Aa	(-10.89±2.49) Aa	(-10.91±3.25) Aa	(-10.67±1.00) Aa	(-32.20±2.25) b

注: 表中数据为平均值±标准差。同行不同大写字母表示同一处理下, 各土层间差异显著 ($P<0.05$); 同列不同小写字母表示同一土壤和空气水平下, 不同处理间的差异显著 ($P<0.05$)。

3.2 模拟增温处理下土壤与空气湿度的变化

3.2.1 土壤与空气湿度年变化

由表 4 可知, 在模拟增温和对照处理下, 土壤湿度随土层深度呈现“持续升高”的趋势。模拟增温和对照处理下, 20 cm 的土壤湿度最高, 且显著高于

其他土层; 增温处理下, 15 cm 的土壤湿度与其他 3 个土层之间有显著差异; 模拟增温和对照处理对空气湿度无显著差异。OTC 内土壤湿度在 5、10、15、20 cm 处较 CK 分别降低了 2.31%、1.85%、1.14%、5.07%, 空气湿度降低了 2.15%。

表 4 增温处理下土壤与空气湿度年变化

处理	不同土层土壤湿度				空气温度
	5 cm 土层	10 cm 土层	15 cm 土层	20 cm 土层	
OTC	(3.20±0.05) Aa	(3.54±0.69) Aa	(7.20±2.96) Ba	(11.14±0.64) Ca	(69.03±3.70) a
CK	(5.50±1.73) Aa	(5.39±3.93) Aa	(8.33±3.21) Aa	(16.22±2.89) Bb	(71.18±3.93) a

注: 表中数据为平均值±标准差。同行不同大写字母表示同一处理下, 各土层间差异显著 ($P<0.05$); 同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

3.2.2 土壤与空气湿度月变化

由表 5 可以看出, 土壤各层湿度的月变化状态。在 5、10、15、20 cm 的土层中, 无论增温与否, 土壤湿度总体变化趋势一致, 均显现为“非生长季变化波动较小, 生长季变化波动较大”。在 5、10 cm 土壤层中, 模拟增温与对照在各月间无显著差异; 15 cm 土壤层中, 在 12 月具有显著性; 20 cm 土壤层中, 在 4、8、10 月间具有显著性。土壤各层湿度总体呈升高的趋势。对照处理下, 土壤各层湿度均高于 OTC 内相同土层的土壤湿度。模拟增温处理下 5、10 和 20 cm 土层的土壤湿度与对照相比差异变化明显。

空气湿度的月变化情况。无论增温与否, 空气湿度的变化基本保持一致, 呈“先降低后增高”的趋势。模拟增温与对照处理在各月份间无显著性。增温处理下, 空气湿度在 8 月达到最高, 为 88.18%, 在

4 月最低, 为 46.91%; 对照处理下, 8 月空气湿度最高, 为 90.06%, 4 月空气湿度最低, 为 48.24%。与对照相比, 增温处理下空气月平均湿度降低了 2.9%。

3.2.3 土壤与空气湿度昼夜变化

春季, 模拟增温处理下, 无论白天夜间, 20 cm 的土壤湿度最高, 且显著高于其他土层; 对照处理下的土壤湿度无显著差异。夏季, 模拟增温和对照处理下, 夜间的 15、20 cm 土壤湿度与 5、10 cm 间具有显著性; 20 cm 土壤湿度在白天最高, 且与 5 cm 间具有显著性。秋季, 模拟增温和对照处理下, 无论白天夜间, 20 cm 土壤湿度最高, 且显著高于其他土层。冬季, 模拟增温处理下, 20 cm 土壤湿度在白天夜间均为最高, 且显著高于其他土层; 对照处理下, 5、20 cm 土壤湿度间具有显著差异。四季, 模拟增温和对照处理下, 白天夜间的各层土壤湿度无显著差异。

春季、夏季、秋季不同处理间的白天夜间空气湿度有显著差异。

表5 增温处理下土壤与空气湿度月变化

%

时间	处理	不同土层土壤湿度				空气湿度
		5 cm 土层	10 cm 土层	15 cm 土层	20 cm 土层	
2019年11月	OTC	(0.34±0.09) a	(0.85±0.03) a	(1.96±0.57) a	(3.83±0.85) a	(69.72±3.46) a
	CK	(0.28±0.16) a	(2.59±1.50) a	(2.15±0.12) a	(6.49±1.15) a	(70.28±4.20) a
2019年12月	OTC	(0.04±0.01) a	(0.14±0.08) a	(1.33±0.02) a	(3.41±0.12) a	(72.57±0.39) a
	CK	(0.02±0.01) a	(0.58±0.33) a	(2.11±0.10) b	(3.51±0.18) a	(74.48±0.76) a
2020年1月	OTC	0a	(0.30±0.18) a	(1.27±0.05) a	(3.09±0.04) a	(72.79±1.27) a
	CK	0a	(1.96±1.13) a	(1.58±0.25) a	(3.68±0.47) a	(74.87±0.10) a
2020年2月	OTC	0a	(0.34±0.20) a	(1.43±0.01) a	(3.24±0.02) a	(66.76±2.32) a
	CK	0a	(2.08±1.20) a	(1.63±0.25) a	(3.71±0.42) a	(68.97±2.65) a
2020年3月	OTC	(0±0.01) a	(0.49±0.29) a	(1.41±0) a	(3.10±0.14) a	(61.63±2.46) a
	CK	(0.63±0.35) a	(2.36±1.37) a	(1.71±0.25) a	(4.14±0.47) a	(63.93±2.49) a
2020年4月	OTC	(1.84±0) a	(1.34±0) a	(3.55±0) a	(5.25±0) a	(46.91±5.85) a
	CK	(3.48±0.79) a	(4.34±1.76) a	(3.88±1.66) a	(7.99±0.33) b	(48.24±5.97) a
2020年5月	OTC	(4.41±0.05) a	(5.12±0.55) a	(8.86±1.79) a	(11.71±0.04) a	(49.68±10.83) a
	CK	(8.50±7.26) a	(8.45±3.72) a	(10.19±11.17) a	(14.86±8.43) a	(52.64±10.95) a
2020年6月	OTC	(4.60±1.23) a	(5.92±0.15) a	(12.23±5.18) a	(19.42±1.50) a	(69.68±3.92) a
	CK	(8.70±4.00) a	(10.82±2.43) a	(12.57±8.13) a	(22.84±9.86) a	(74.02±2.70) a
2020年7月	OTC	(4.97±1.37) a	(5.37±0.19) a	(11.35±4.97) a	(19.37±1.33) a	(73.17±6.56) a
	CK	(6.73±3.10) a	(11.21±3.47) a	(11.80±3.29) a	(25.53±4.30) a	(77.42±5.44) a
2020年8月	OTC	(7.68±1.03) a	(7.69±1.42) a	(13.89±2.90) a	(20.76±0.15) a	(88.18±3.07) a
	CK	(10.11±0.95) a	(12.21±6.56) a	(14.66±0.71) a	(32.23±0.04) b	(90.06±2.08) a
2020年9月	OTC	(7.36±0.24) a	(7.88±1.10) a	(13.92±3.25) a	(20.79±0.09) a	(80.87±1.89) a
	CK	(10.41±1.97) a	(13.41±7.21) a	(15.07±1.02) a	(31.93±0.71) b	(82.39±1.67) a
2020年10月	OTC	(6.27±2.28) a	(6.20±3.12) a	(12.93±1.69) a	(20.21±0.11) a	(76.45±2.81) a
	CK	(7.09±1.11) a	(6.92±0.92) a	(13.53±1.88) a	(31.49±0.42) b	(76.92±1.78) a

注:表中数据为平均值±标准差。同行不同大写字母表示同一处理下,各土壤水平间的差异显著($P<0.05$);同列不同小写字母表示同一土壤和空气水平下,不同处理间的差异显著($P<0.05$)。

在白天,OTC内空气湿度都处于降湿状态,其中秋季降湿最明显,为5.91%;在黑夜,CK内空气湿度在各月份都在增加,其中秋季增湿最明显,为5.71%。从土壤湿度的昼夜变化分析,5、10、15、20

cm土壤湿度的降湿效果不同,但在模拟增温和对照处理下的变化趋势一致。对照处理下,各层土壤湿度均在秋季夜间达到最大,分别为8.34%、8.97%、20.04%、32.47%。

表6 增温处理下土壤与空气湿度昼夜变化

%

季节	处理	时间	土壤湿度				空气湿度
			5 cm 土层	10 cm 土层	15 cm 土层	20 cm 土层	
春季	OTC	白天	(1.62±0.35) Aa	(1.19±0.15) Aa	(3.30±1.48) Ba	(4.91±0.47) Ca	(33.93±10.7) a
		夜间	(1.68±0.23) Aa	(1.21±0.12) Aa	(3.35±1.57) Ba	(4.95±0.49) Ca	(60.26±7.46) b
	CK	白天	(4.58±2.54) Aa	(5.19±3.93) Aa	(4.34±2.03) Aa	(8.25±0.04) Aa	(34.14±13.15) a
		夜间	(5.01±2.92) Aa	(5.22±3.94) Aa	(5.00±1.42) Aa	(8.33±0.11) Aa	(61.26±7.90) b
夏季	OTC	白天	(5.06±2.68) Aa	(5.43±4.34) Aa	(12.14±5.36) ABa	(18.98±2.95) Ba	(62.31±14.72) a
		夜间	(5.10±2.67) Aa	(5.56±4.46) Aa	(12.78±4.85) Ba	(19.26±2.71) Ba	(84.07±5.78) b
	CK	白天	(6.39±6.02) Aa	(6.44±0.45) Aa	(17.05±3.53) ABa	(25.54±8.81) Ba	(66.83±11.64) a
		夜间	(6.51±5.95) Aa	(6.55±0.55) Aa	(18.00±2.88) Ba	(26.18±8.42) Ba	(89.74±2.20) b
秋季	OTC	白天	(6.33±0.26) Aa	(6.00±1.14) Aa	(13.51±2.77) Ba	(19.92±0.53) Ca	(67.98±6.65) a
		夜间	(6.56±0.23) Aa	(6.10±1.17) Aa	(14.38±2.19) Ba	(19.94±0.53) Ca	(82.93±5.68) b
	CK	白天	(8.14±5.63) Aa	(8.86±5.99) Aa	(19.99±0.82) Ba	(32.41±0.79) Ca	(68.73±5.08) a
		夜间	(8.34±5.48) Aa	(8.97±5.69) Aa	(20.04±0.75) Ba	(32.47±1.00) Ca	(84.06±4.59) b
冬季	OTC	白天	0Aa	(0.30±0.30) Aa	(1.17±0.83) Ba	(2.98±0.14) Ca	(71.73±2.58) a
		夜间	0Aa	(0.50±0.50) ABa	(1.19±0.83) Ba	(2.98±0.14) Ca	(72.03±0.57) a
	CK	白天	0Aa	(1.94±1.68) ABa	(1.60±0.24) ABa	(3.67±0.84) Ba	(73.77±2.11) a
		夜间	0Aa	(1.97±1.66) ABa	(1.70±0.33) ABa	(3.69±0.85) Ba	(75.00±1.00) a

注:表中数据为平均值±标准差。同行不同大写字母表示同一处理下,各土层间差异显著($P<0.05$);同列不同小写字母表示同一土壤和空气水平下,不同处理间的差异显著($P<0.05$)。

3.3 土壤温湿度耦合关系

对全年土壤温湿度进行对比分析,通过图1、2双Y轴可知,不论增温与否,土壤各层温、湿度在

2019年11月—2020年10月1a间的变化趋势一致,进入冻结期后,土壤温、湿度总体保持在相对稳定的范围内;在6—9月,土壤温湿度呈现相反的变

化趋势, 即当温度上升时, 湿度下降; 在春、秋过渡时期, 土壤温湿度的变化明显, 秋季向冬季过渡时, 土

壤温湿度呈明显降低趋势, 之后冬季向春季过渡时, 土壤温湿度呈明显升高趋势, 土壤进入解冻期。

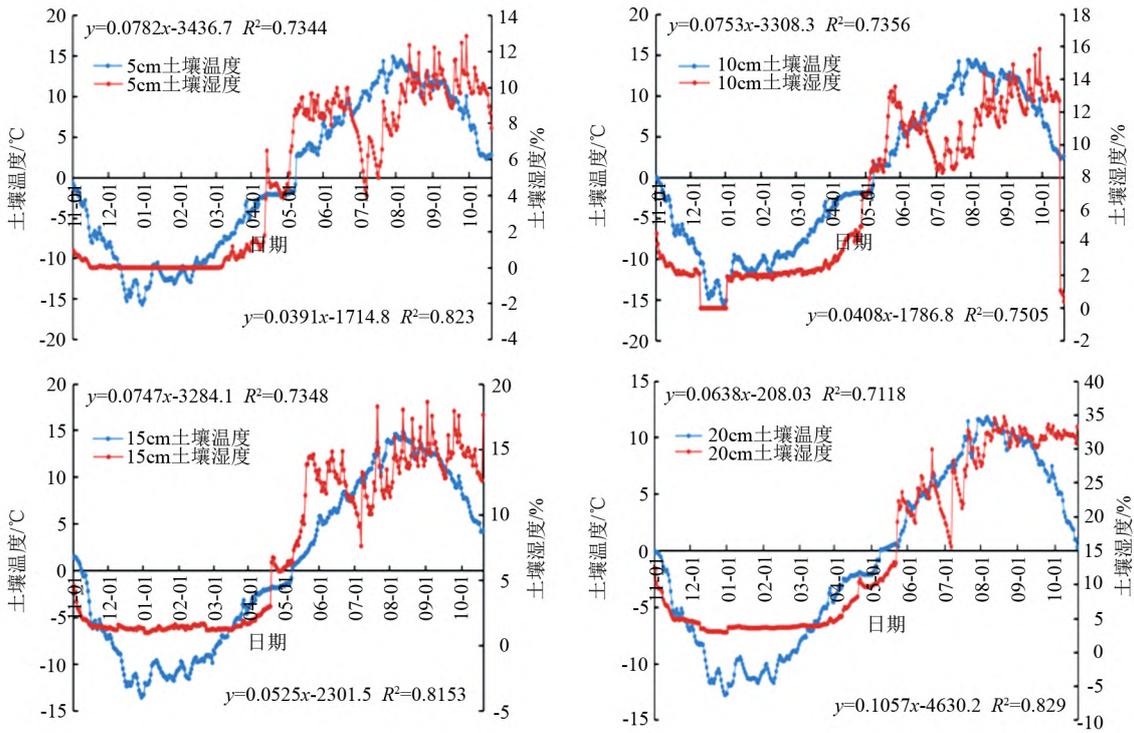


图 1 OTC 模拟增温室外土壤温湿特征

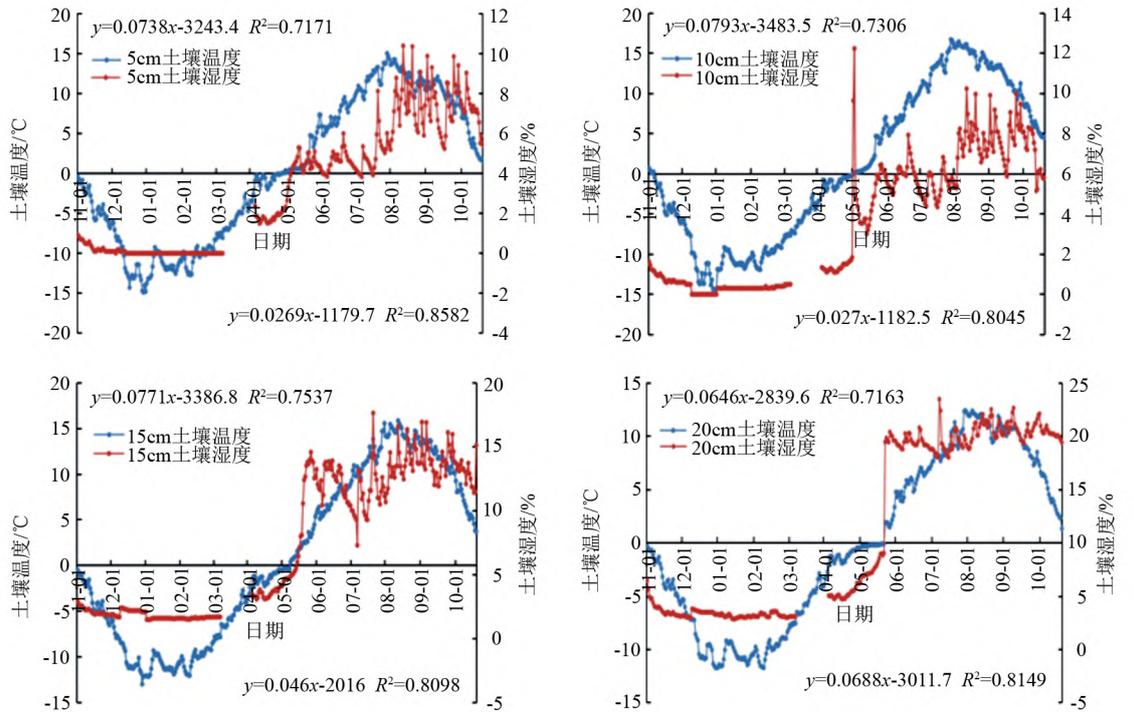


图 2 OTC 模拟增温室内(T)土壤温湿特征

4 讨论与结论

4.1 模拟增温对土壤和空气湿度的影响

开顶室(OTC)对于研究高海拔地区自然环境条件下土壤对全球变暖的响应是便捷的工具^[18]。本研究发现模拟增温对高寒冻土区不同土层土壤、空

气温湿度都有一定的影响。模拟增温能够显著提高OTC内气温^[8]。5~20 cm的土壤温度较对照依次增加了1.18、1.83、1.69、1.29 °C,对10~15 cm土层温度的增温幅度明显;同时,增温处理导致土壤湿度显著下降,与对照相比,5~20 cm土壤湿度分别降低了2.31%、1.85%、1.14%和5.07%,说明开顶室内土

壤温度高于室外,土壤湿度低于小室外^[14,19-22]。刘美、马志良^[23]研究发现:利用开顶式增温箱模拟增温使青藏高原高寒灌丛大气温度与土壤温度增加,土壤湿度降低。

4.2 模拟增温对增温幅度大小的影响

开顶室增温幅度易受自然条件限制^[24],例如太阳辐射强弱能够明显影响其增温幅度的大小,在高海拔地区,如极端低温、暴雨等极端天气会造成数据的差别。研究结果显示,在不同月份模拟增温的效果不同,试验地最高温度出现在7—8月份,8月中旬之后随气候变冷,这一时段温度增加缓慢。本研究发现土壤和空气昼夜增温幅度随着月份的不同呈现出不规则的分布规律,在炎热的月份增温幅度迅速递增,随着天气逐渐变冷,增温幅度也随之减小,这也与自然条件的变化有关。另外,增温幅度与植物生长状况有关,OTC内各层土壤温度在生长后期增温不明显,这可能的原因是在OTC内植物生长速度较快,植被覆盖面积大,太阳辐射到地面的热量变少,以至于热量无法从地表传导到更深层的土壤中,造成温度相对较低。对对照地和OTC内的植物种类和植被遮盖度有差别,也会对数据造成影响。

4.3 影响土壤温湿度的主要因素

影响浅层土壤温度升高或降低的两个主要因素是蒸发和降水^[25]。早有前人在亚高山草甸短期增温试验中发现,土壤含水量会在温度最高的时段里,由于土壤蒸发作用而达到最低值^[26];姜炎彬等^[27]在藏北高寒草甸短期增温试验发现,由于温度增高,土壤水分的蒸发,使得土壤含水量降低;王军等^[28]在紫花针茅草原试验中也得到了相同的结论,本文通过分析土壤温湿度耦合关系发现,在温度最高的时段里,土壤湿度也有明显下降趋势。另外,李岩^[29]、王瑞^[30]等研究也发现增温处理下土壤湿度降低。另外,在本研究中,受日照影响,白天的土壤湿度要低于夜间,可能是由于植物生长需水和土壤水分蒸发较强烈导致。秋季雨水较多,土壤湿度相较于其他季节变化较为舒缓,也不难看出温度较低时,模拟增温作用对土壤湿度的影响更为明显。此外,在寒温带半湿润气候区,降水是土壤水分的主要来源,当降水入渗保留在土壤表层中的水量超过蒸发量时,土壤水分增加。根河市地处大兴安岭北段,6月开始进入生长季,9月植物开始枯黄,每年降雨集中在7—8月,降雨增加了土壤含水量,尤其是表层土壤增加明显,影响表层及深层土壤水分的变化,增温使植物更加适宜生长,发达的根系使土壤水分聚集。另外,由于兴安落叶松林以及地表腐殖质的

截留作用,从而表现出不同土层水分变化的差异。

大兴安岭是我国北方生态屏障,对于维持国家生态安全、调节气候稳定等方面具有重要的意义。本研究虽然仅在大兴安岭冻土区研究了大气和土壤温湿度对模拟增温的响应机制,但对进一步探讨土壤温湿与气候因子之间的耦合机制奠定了理论基础,对探讨未来气候变化背景下土壤温湿对气候变化的响应作用有重要意义。

本研究利用开顶式增温箱模拟在大兴安岭地区的增温试验,增温降湿效果与大多数学者的研究结论一致。但因各种增温装置在不同区域的局限性以及各装置对增温降湿效果的不同,所以本研究数据具有一定的局限性。因此,在今后的研究中,将不断进一步充实和完善该方面的数据,结合现代技术手段进行更加深入的研究。

本研究中模拟增温和对照处理下,20 cm的土壤湿度最高,且显著高于其他土层;空气年均温度间有显著性。模拟增温和对照处理下,夏季夜间的15、20 cm土壤湿度与5、10 cm间具有显著性;5、10 cm土壤温度在秋季具有显著差异。与对照相比,OTC内地下5~20 cm土壤年均温度依次增幅1.18、1.83、1.69、1.29 °C,地上空气温度增幅1.18 °C;土壤年均湿度较CK依次降低2.31%、1.85%、1.14%、5.07%,空气湿度降低2.15%。模拟增温处理下,土壤湿度月变化呈现出生长季变化波动大,非生长季变化波动小的规律。对土壤温湿度耦合关系分析,不论增温与否,呈现出生长季变化趋势相反,非生长季总体趋势保持相对稳定。

参 考 文 献

- [1] 周广胜,张新时,郑元润.中国陆地生态系统对全球变化的反应模式研究进展[J].地球科学进展,1997,12(3):270-275.
- [2] NASRAT A, NADHIR A A, VAROUJAN S. Climate Change 2021: The physical science basis. contribution of working group i to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [3] GORISSE N, COTRUF O. Elevated carbon dioxide effects on nitrogen dynamics in grasses, with emphasis on rhizosphere processes[J]. Soil Science Society of America Journal, 1999, 63(6): 1695-1702.
- [4] KANDELE R, TSCHERK O, BARDGET T, et al. The response of soil microorganisms and roots to elevated CO₂ and temperature in a terrestrial model ecosystem[J]. Plant and Soil, 1998, 202(2): 251-262.
- [5] 高永刚,赵慧颖,高峰,等.大兴安岭区域未来气候变化趋势及其对湿地的影响[J].冰川冻土,2016,38(1):47-56.
- [6] 杨志刚,卓玛,路红亚,等.1961—2010年西藏雅鲁藏布江流域降水量变化特征及其对径流的影响分析[J].冰川冻土,2014,36(1):166-172.
- [7] 秦大河,效存德,丁永建,等.国际冰冻圈研究动态和我国冰冻圈研究的现状与展望[J].应用气象学报,2006,17(6):649-656.
- [8] 李娜,王根绪,高永恒,等.模拟增温对长江源区高寒草甸土壤养分状况和生物学特性的影响研究[J].土壤学报,2010,47(6):1214-1224.

- [9] 高福光,韩国栋,石凤翎,等.短花茅生殖物候和光合作用对增温和施氮的响应[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2010,31(2):104-108.
- [10] 高嵩.增温和氮素添加对松嫩草原羊草群落结构和功能的影响[D].长春:东北师范大学,2012.
- [11] 张富仓,张一平,张君常.温度对土壤水分保持影响的研究[J].土壤学报,1997,36(2):160-169.
- [12] 张一平,白锦麟,张君常,等.温度对土壤水势影响的研究[J].土壤学报,1990,27(4):454-458.
- [13] 石福孙,吴宁,罗鹏.川西北亚高山草甸植物群落结构及生物量对温度升高的响应[J].生态学报,2008,28(11):5286-5293.
- [14] 权欣,芦光新,李希来,等.三江源区高寒草甸 OTCs 模拟增温效应的研究[J].草业与畜牧,2016(1):19-24,30.
- [15] 李娜,王根绪,杨燕,等.短期增温对青藏高原高寒草甸植物群落结构和生物量的影响[J].生态学报,2011,31(4):895-905.
- [16] 杨月娟,周华坤,姚步青,等.长期模拟增温对矮嵩草甸土壤理化性质与植物化学成分的影响[J].生态学杂志,2015,34(3):781-789.
- [17] 谭俊,李秀华.气候变暖影响大兴安岭冻土退化和兴安落叶松北移的探讨[J].内蒙古林业调查设计,1995(1):25-31.
- [18] NORBY N, EDWARDS N, RIGGS J, et al. Temperature controlled open-top chambers for global change research [J]. Global Change Biology, 1997, 3(3): 259-267.
- [19] ZAVALA E S, THOMAS B D, CHIARIELLO N R, et al. Plants reverse warming effect on ecosystem water balance [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2003, 100(17): 9892-9893.
- [20] JORGENSEN M T, RACINE C H, WALTERS J C. Permafrost degradation and ecological changes associated with a warming in central Alaska [J]. Climatic Change, 2001, 48(4): 551-579.
- [21] BREMER C L, WHEELER H, OWENSBY W L. Effect of elevated atmospheric carbon dioxide and open-top chambers on transpiration in a tall grass prairie [J]. Journal of Environmental Quality, 1996, 25(4): 691-701.
- [22] 姚世庭,芦光新,李欣,等.模拟增温对青海省玉树州称多县高寒草甸土壤水分的影响研究[J].生态环境学报,2019,28(11):2176-2184.
- [23] 刘美,马志良.模拟增温对青藏高原东部高寒灌丛土壤氮转化的影响[J].应用生态学报,2021,32(6):2045-2052.
- [24] LEADLEY P W, DRAKE B G. Open top chambers for exposing plant canopies to elevated CO₂ concentration and for measuring net gas exchange [J]. Vegetatio, 1993, 104/105: 3-15.
- [25] 李韵,侯玉宾,杨斯农.非饱和带土壤水分及温度的关系[J].作物研究,2015,29(4):406-410.
- [26] 欧阳青,任健,代微然,等.短期增温对亚高山草甸生物量和土壤呼吸速率的影响[J].草原与草坪,2019,39(1):75-82.
- [27] 姜炎彬,范苗,张扬建.短期增温对藏北高寒草甸植物群落特征的影响[J].生态学杂志,2017,36(3):616-622.
- [28] 王军,王冠钦,李飞,等.短期增温对紫花针茅草原土壤微生物群落的影响[J].植物生态学报,2018,42(1):116-125.
- [29] 李岩,干珠扎布,胡国铮,等.增温对青藏高原高寒草原生态系统碳交换的影响[J].生态学报,2019,39(6):2004-2012.
- [30] 王瑞.模拟增温和降水变化对高寒草甸土壤和植被碳、氮的影响[D].兰州:甘肃农业大学,2016.

(上接 73 页) 分数 结果发现鞣花酸在 0.049 5~989.4 mg/L 呈良好线性关系,平均加样回收率为 99.4%,相对标准偏差为 1.2%,该方法简单,准确,重复性好,具有良好的稳定性,可用于猴枣药材中鞣花酸质量分数的分析测定。本研究利用 HPLC 法测定核桃内种皮鞣花酸的质量分数,其方法简单、重复性和稳定性均较好,结果可靠,说明该法可用于测定核桃内种皮中鞣花酸的质量分数。

参 考 文 献

- [1] 王丽,毛鑫,谯天敏,等.黄单孢杆菌胞外多糖对核桃生理代谢的影响[J].东北林业大学学报,2020,48(5):107-111,138.
- [2] 杜香莉,郭军战,冯汀.我国核桃资源的综合利用研究[J].西北林学院学报,2003,18(3):82-85.
- [3] 王文娟.核桃内生菌发酵产物生物活性及花序的化学成分研究[D].兰州:兰州理工大学,2015.
- [4] 李笑笑.核桃内种皮多酚的提取及核桃油与核桃蛋白粉的稳定性的研究[D].无锡:江南大学,2016.
- [5] ANGELI D F, MALFA G A, GAROZZO A, et al. Antimicrobial, antioxidant, and cytotoxic activities of *Juglans regia* L. pellicle extract [J]. Antibiotics, 2021, 10(2): 159-179.
- [6] 张泽生,王霄然,王田心,等.核桃内种皮提取物的体内抗氧化活性研究[J].中国食品添加剂,2017(1):110-114.
- [7] ZHANG Y G, KAN H, CHEN S X, et al. Comparison of phenolic compounds extracted from *Diaphragma juglandis* fructus, walnut pellicle, and flowers of *Juglans regia* using methanol, ultrasonic wave, and enzyme assisted-extraction [J]. Food Chemistry, 2020, 321: 126672.
- [8] 冯兵.鞣花酸的合成及含量测定方法研究[D].贵阳:贵州大学,2019.
- [9] 肖玉欣,王楠,王婧,等.鞣花酸和尿素类代谢产物的生物活性及其对肠道健康的作用研究进展[J].食品科学,2022,43(9):275-284.
- [10] 孙勋.应用鞣花酸治疗亨廷顿舞蹈病转基因小鼠的研究[D].北京:中国科学院大学,2020.
- [11] WUBSHET S G, MORESCO H H, TAHTAH Y, et al. High-resolution bioactivity profiling combined with HPLC-HRMS-SPE-NMR: α -Glucosidase inhibitors and acetylated ellagic acid rhamnositides from *Myrcia palustris* DC. (Myrtaceae) [J]. Phytochemistry, 2015, 116(1): 246-252.
- [12] 冯兵,罗志军,罗波,等.高效液相法测定鞣花酸含量的研究进展[J].基因组学与应用生物学,2019,38(12):5616-5620.
- [13] 王天星.代代花中有效成分的分离纯化、鉴定及其活性研究[D].广州:华南理工大学,2018.
- [14] 周晔,王伟,陶冉,等.超声波提取核桃内种皮多酚的响应面优化及其抗氧化研究[J].林产化学与工业,2013,33(4):73-78.
- [15] 杨媛,石磊,杨建军,等.超高效液相色谱-质谱联用法测定草莓中鞣花酸[J].分析测试学报,2016,35(12):1591-1595.
- [16] 邹园生,黄韬,江英桥,等.HPLC 法测定猴枣中鞣花酸的含量[J].中国药品标准,2018,19(2):126-129.
- [17] 杨笑笑,邢晓平,纪白慧,等.水解法制备石榴皮鞣花酸工艺研究[J].食品工业科技,2013,34(12):284-288.
- [18] 程悦,陈嘉升,陈建萍,等.地榆提取物中不同类型鞣质的测定[J].中成药,2011,33(5):852-857.
- [19] 陈筋鸿,吴冬梅,汪咏梅,等.紫外分光光度法测定鞣花酸含量的研究[J].生物质化学工程,2007,41(3):18-20.
- [20] 周本宏,吴振华,李小军,等.高效毛细管电泳法测定石榴皮中鞣花酸的含量[J].中国药房,2005,16(24):1893-1894.
- [21] 潘遐,才让草,李魁,等.HPLC 法测定藏药石榴莲散中鞣花酸和胡椒碱的含量[J].中国民族民间医药,2019,28(19):37-41.