

土壤增温隔水处理对杉木幼林材管胞形态的影响

盛佳乐¹, 吴小莲¹, 刘 猷¹, 杨智杰², 杨玉盛², 关 鑫¹, 林金国^{1*}

(1. 福建农林大学 材料工程学院, 福建 福州 350100; 2. 福建师范大学 地理科学学院, 福建 福州 350007)

摘 要:采用地下管道进行土壤增温 5℃ 与透明 U 型管隔离降水 50% 的方法, 人工模拟 21 世纪末全球气候变暖大环境下闽西北中亚热带地区杉木的生长环境。借助生物数码显微图像分析系统测定了土壤增温隔水处理对杉木幼林材管胞形态的影响规律。结果表明, 土壤增温 5℃ 极显著降低了杉木幼林材管胞长度、宽度、腔径和长宽比, 显著提高了杉木幼林材管胞壁腔比, 而对杉木幼林材管胞壁厚影响不显著; 隔离降水 50% 极显著降低了杉木幼林材管胞宽度、壁厚和腔径, 极显著提高了杉木幼林材管胞长宽比, 而对杉木幼林材管胞长度、壁腔比影响不显著; 土壤增温 5℃ 且隔离降水 50% 极显著降低了杉木幼林材管胞的壁厚, 显著降低了杉木幼林材管胞的长宽比; 土壤增温对杉木幼林材管胞形态的影响总体上大于隔离降水。研究结果为全球变暖大环境下杉木人工林木材品质定向培育及其合理利用提供理论依据。

关键词:杉木幼林材; 土壤增温; 隔离降水; 管胞形态

中图分类号:S781.82 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2021)03-0210-08

Effects of Soil Warming and Precipitation Exclusion on Tracheid Morphology of Young Chinese Firwood

SHENG Jia-le¹, WU Xiao-lian¹, LIU Cai¹, YANG Zhi-jie², YANG Yu-sheng², GUAN Xin¹, LIN Jin-guo^{1*}

(1. College of Material Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350100, Fujian, China;
2. School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, Fujian, China)

Abstract: The methods of using underground pipeline to increase soil temperature by 5℃ and transparent U-shaped pipe to exclude precipitation by 50% were used to simulate the growth environment of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) in the middle subtropical region of Northwestern Fujian Province under the global warming environment at the end of the 21st century. The effects of soil warming and precipitation exclusion on the tracheid morphology of young Chinese fir wood were studied by using the system of biological digital micro image analysis. The results showed that when the soil temperature increased by 5℃, the tracheid length, width, cavity diameter and length-width ratio decreased extremely and significantly, and the tracheid wall-cavity ratio increased significantly, no significant effect was observed on the tracheid wall thickness. When the precipitation was excluded by 50%, the tracheid width, wall thickness and cavity diameter decreased extremely and significantly, while the tracheid length-width ratio increased extremely and significantly, no significant effect on the tracheid length and wall-cavity ratio was found. When both methods were adopted, the thickness of tracheids were extremely and significantly reduced, and the ratio of length to width of tracheids reduced significantly. The impact of soil warming on tracheid morphology of young Chinese fir was overall greater than that of precipitation exclusion. The results provide theoretical basis for the directional cultivation and rational utilization of wood quality of Chinese Fir in the global warming environment.

收稿日期:2020-03-16 修回日期:2020-03-25
基金项目:国家自然科学基金(31500408);国家重大科学研究项目(2014CB954003)。
作者简介:盛佳乐。研究方向:木材科学。E-mail:393431410@qq.com
* 通信作者:林金国,博士,教授,博士生导师。研究方向:木材科学。E-mail:fjlinjg@126.com

Key words: *Cunninghamia lanceolata* wood; soil warming; precipitation exclusion; tracheid morphology

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是我国南方重要的速生用材树种^[1]。杉木木材组成分子简单,排列规则,其中,轴向管胞是构成杉木木材的最主要组成分子,占木材体积的 95%,对杉木木材的材性和利用具有十分重要的影响,在立木时则起着输导水分和机械支持的双重作用。针叶树材管胞的长度、宽度、长宽比、壁厚、腔径、腔径比等形态特征是木材纤维利用的重要依据,是决定木材物理力学性质及其利用的基础^[2],管胞长度、宽度、壁腔比等性状与针叶树材的顺纹抗压强度、抗弯强度等 11 项力学性质存在极显著的相关关系^[3-4]。包括管胞形态在内的木材解剖性质的变异是木材的固有特性,同一树种不同种源、不同家系木材的解剖性质会有差异,而且相同种源家系无性系在不同环境下生长的木材解剖性质均有较大的差异。20 世纪以来,大量温室气体排放造成的全球气候变暖直接或间接影响着林木的生长,杨玉盛^[5]、冯建新等^[6]研究分析了土壤增温对杉木幼苗细根生理生态性质的影响^[5]、增温和降雨减少对杉木幼林土壤酶活性的影响^[7],以及杉木 N、P 代谢对模拟土壤增温及隔离降雨的响应^[8],揭示了土壤增温及隔离降雨对林地土壤和杉木生长的影响规律,为全球气候变暖下杉木数量培育提供理论依据;聂少凡等^[9]研究了人工杉木林木材纤维形态随林龄、立地条件、林分密度的变异规律;姜鹏等^[10]研究了不同生长势杉木成熟林的生物量生长模型;周国强等^[11]研究认为,气候变化会影响杉木的功能结构、物质代谢等生长指标。然而,迄今为止关于土壤增温和隔离降水处理对杉木木材管胞形态在内的解剖特性影响规律的研究尚未见报道。本研究以闽西北中亚热带地区杉木为对象,采用地下管道进行土壤增温 5℃与透明 U 型管隔离降水 50%的方法,人工模拟 21 世纪末全球气候变暖大环境下杉木的生长环境,利用 Laica DM2500 生物数码显微镜及其图像处理系统测定分析不同增温、隔水处理条件下杉木幼林材管胞形态的变化规律,旨在为全球气候变暖下杉木木材品质定向培育和合理利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于福建省三明市森林生态系统与全球变化研究站陈大观测点(26°19'N,117°36'E)。地处中亚热带季风气候,平均海拔 300 m,年平均气温 19.1℃,年平均降水量 1 749 mm(主要集中在 3—8

月),年均蒸发量 1 585 mm,相对湿度 81%^[6]。试验田设置了 4 种不同处理的小区,分别为 W(相对土壤实时温度 + 5℃)、CK(对照)、P(隔离降水 50%)、WP(相对土壤实时温度 + 5℃,隔离降水 50%),每个小区的面积 2 m×2 m,每种处理重复 5 个小区^[12]。每个小区用 4 块 PVC 板隔开,以防相邻小区间土壤干扰。试验地土壤均采自林场内杉木林地。土壤分层(0~10、10~20、20~60 cm)取回,剔除土壤中的粗根、石块和其他杂物后,再混合均匀,并按照顺序重填回试验小区内,同时采用压实法调整土壤容重与原位土壤容重接近,最大程度消除样地间的质异性^[7]。

于 2013 年 5 月安装加热电缆(4 种处理共计 20 个小区都布设相同电缆),间距 20 cm,深度为 10 cm,平行布设,并在最外围环绕一圈,以保证样地增温的均匀性。通电增温在电缆布设完成后 5 个月(2013 年 10 月)开始。为保证获得数据的统一性,每隔 30 min 测量 1 次土壤含水量和土壤温度数据并储存(图 1)。2013 年 11 月,每个 2 m×2 m 试验小区均匀种植 4 棵 1 年生 2 代半短侧枝杉木幼苗,杉木幼苗均匀栽种于 2 条电缆线之间^[12]。隔水处理的人工林杉木在每棵树的林冠处每隔 0.05 m 安放 0.05 m×5 m 的透明 U 型管,以此达到 P(隔水 50%)组和 WP(相对土壤实时温度 + 5℃、隔水 50%)组隔水的目的。

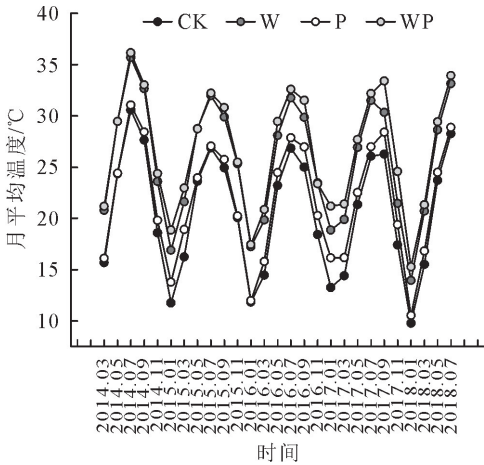


图 1 土壤增温效果

Fig. 1 Effect of soil warming treatment

1.2 试验材料

2018 年上半年参照国家标准《木材物理力学试材采集方法(GB/T 1927—2009)》先在杉木样木树干标明北向,于试验地伐取 W、P、WP 及 CK 4 种不同处理条件下的杉木人工林样木各 3 株;在每株人工林杉木样木离地 1.3 m 的胸高处向下取厚 5 cm

的杉木圆盘置于实验室通风处风干待用。

1.3 试验方法

用高精度微型台锯沿图 2 中虚线锯取各圆盘上北向径向木块(10 mm 宽×20 mm 高)作为解剖试

样待用,将试样均匀分成 3 段(图 2)。去除髓心后将木块编号后置于烧杯中,加入适量的水放入数显恒温水浴锅中水浴,煮至沉水,使木材内空气逸出,材质得到软化后倾去水分待用。

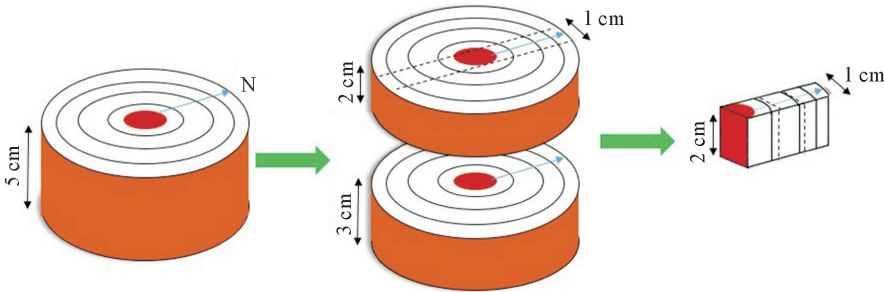


图 2 解剖试样选取示意

Fig. 2 Schematic diagram of wood anatomical sample

1.3.1 杉木木材管胞壁厚及腔径的测定 选取不同增温隔水处理条件下的杉木木块,用滑走式切片机(REM-710 日本大和光机工业株式会社)制取厚 12 mm 左右的杉木木材标准横切面样品。经酒精逐级脱水用番红试剂染色 4 h 后,用中性树脂封片,制取永久切片。置于生物数码显微镜(Laica DM2500 德国 Laica 公司)400 倍下观察,并利用其配套图像识别软件(Laica Application Suite V4.5)测量其壁厚与腔径,壁厚指相邻细胞的双壁厚。每段径向木条随机选取至少 100 根杉木管胞进行测量,其中管胞腔径以弦径为准。

1.3.2 杉木木材管胞长度及宽度的测定 将制取横切面试样剩下的各组杉木试样用美工刀劈成火柴杆大小的小木梗,混合均匀后采用许尔兹法($V_{\text{氯酸钾}}:V_{60\% \text{硝酸}}:V_{\text{水}}=1:2:1$)对杉木木材试样进行解离^[13],并用番红试剂染色,用一次性滴管吸取少量纤维,制成离析纤维临时切片;置于生物数码显微镜 200 倍下观察测量管胞的长度和宽度;自上而下、从左到右随机测量 300 根以上完整管胞。

1.4 数据分析

杉木幼林材管胞受环境因素影响生长模式较为复杂,组内个体之间存在一定的差异,为了准确比较 4 种不同增温隔水处理条件下杉木幼林材管胞形态的差异,以处理内所有个体管胞形态数据为大样本,比较分析 4 种不同处理条件下杉木幼林材管胞的组间差异;数据处理与方差分析采用 Excel 2013 与 SPSS 22.0 进行。

2 结果与分析

2.1 对杉木木材管胞长度的影响

纤维长度与木材品质和利用有着极强的相关性,是衡量纸浆材性能好坏的一个重要参数^[14]。在

试验周期内,4 种不同增温隔水处理组杉木幼林材管胞长度存在组内差异(图 3a)。对数据进行汇总处理,得出 4 种不同增温隔水处理组杉木幼林材管胞长度的组间差异(图 3b),CK 对照组杉木幼林材管胞长度均值最大,为 2 007 μm 。增温与隔水处理不同程度地降低了杉木幼林材的管胞长度,P 组降低了 0.50%,W 组降低了 3.80%,WP 组降低了 4.04%,土壤增温处理对杉木幼林材管胞长度影响大于隔水处理。这可能是由于土壤升温 and 水分供给减少不利于杉木形成层纺锤形原始细胞分生出来的管胞的纵向伸长^[15],形成较短的输导细胞(管胞)有利于防止水分流失^[16],且有利于应对增温可能使树木蒸腾作用引起的比土壤水分供给减少更严重的水分流失;而土壤增温和隔离降水共同胁迫对抑制管胞的纵向伸长是叠加的。

根据多重分析及单因素方差分析结果(表 1)显示,WP 组、W 组杉木与 CK 对照组杉木幼林材管胞长度差异极显著($P<0.01$),P 组杉木与 CK 对照组杉木幼林材管胞长度差异不显著。土壤增温 5℃能极显著抑制杉木幼林材管胞长度,隔离降水 50%对杉木幼林材管胞长度影响不显著。

2.2 对杉木木材管胞宽度的影响

4 种不同土壤增温隔水处理组杉木幼林材管胞宽度存在组内差异(图 4a)。对各组数据进一步汇总处理,得出各处理组杉木幼林材管胞宽度的组间差异(图 4b),4 种不同增温隔水处理杉木幼林材管胞宽度变化趋势与杉木幼林材管胞长度的变化趋势相一致,CK>P>W>WP;CK 组管胞宽度均值最大(32.2 μm),与对照组相比,P 组降低了 3.29%,W 组则降低了 5.62%;在增温 5℃、隔离降水 50%共同胁迫下,WP 组管胞宽度最小。这可能是由于土壤升温 and 水分供给减少不利于杉木形成层纺锤形

原始细胞分生出来的管胞的直径扩大^[15],形成宽度较小的输导细胞(管胞)有利于防止水分流失^[16],且有利于应对增温可能使树木蒸腾作用引起的比土壤水分供给减少更严重的水分流失;而土壤增温和隔离降水共同胁迫下输导细胞(管胞)应对水分流失的响应是叠加的。

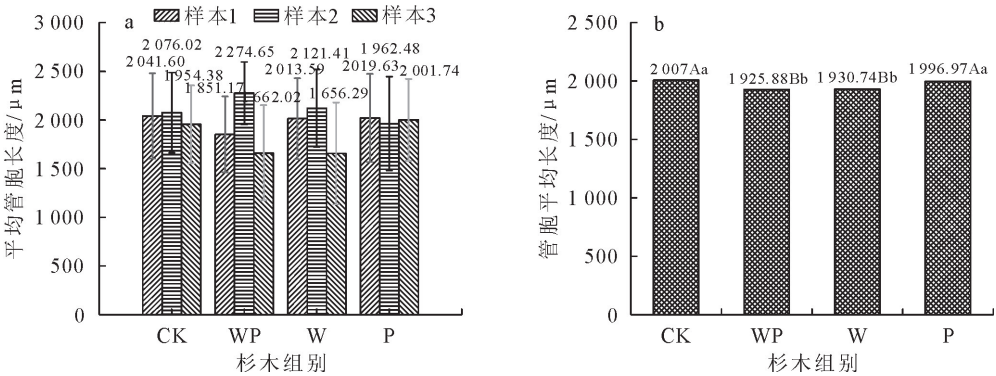
通过对杉木幼林材管胞宽度的单因素方差分析(表 2)以及多重分析(图 4b)可知,WP、W、P 组杉木与对照组杉木幼林材管胞宽度差异极显著($P<0.01$),但 WP 组与 W 组杉木幼林材管胞宽度差异不显著。土壤增温 5℃和隔离降水 50%对于杉木幼林材管胞宽度均有极显著的抑制作用且土壤增温 5℃对杉木幼林材管胞宽度的影响较隔水 50%大。

2.3 对杉木木材管胞长宽比的影响

4 种不同增温隔水处理组杉木幼林材管胞长宽

比存在组内差异(图 5a)。对各组数据进一步汇总处理,得出各处理组杉木幼林材管胞长宽比的组间差异(图 5b),4 种不同处理杉木幼林材管胞长宽比大小表现为 $P>CK>WP>W$ 。对比 P 与 CK、WP 与 P 可知,隔离降水 50%处理对杉木幼林材管胞长宽比有促进作用。对比 W 与 CK、P 与 WP 可知,土壤增温 5℃对杉木幼林材管胞长宽比有抑制作用;与对照组相比,P 组杉木幼林材管胞长宽比提高了 2.86%,WP 组降低了 2.81%,W 组降低了 5.05%。

通过对杉木幼林材管胞长宽比的多重分析(图 5b)与单因素方差分析(表 3)可知,隔离降水对杉木幼林材管胞长宽比的促进作用极显著,土壤增温 5℃处理对杉木幼林材管胞长宽比的抑制作用也极显著($P<0.01$)。土壤增温且隔水对杉木幼林材管胞长宽比抑制作用显著($P<0.05$)。



注:根据 S-N-K 多重分析检验(ANOVA),A、B、C 表示列中的平均值之间差异是否极显著($P<0.01$),a、b、c 表示列中的平均值之间差异是否显著($P<0.05$)。下同。

图 3 4 种不同处理杉木幼林材管胞长度

Fig. 3 Length of tracheid in young Chinese firwood under four different treatments

表 1 4 种不同处理杉木幼林材管胞长度单因素方差分析

Table 1 Variance analysis of tracheid length of young Chinese fir wood under four different treatments

因素	平方和 SS	自由度 df	均方 MS	F	显著性
组间	8 646 994.935	3	2 882 331.645	8.973	0.000
组内	1 523 247 816.719	4 742	321 224.761		
总计	1 531 894 811.653	4 745			

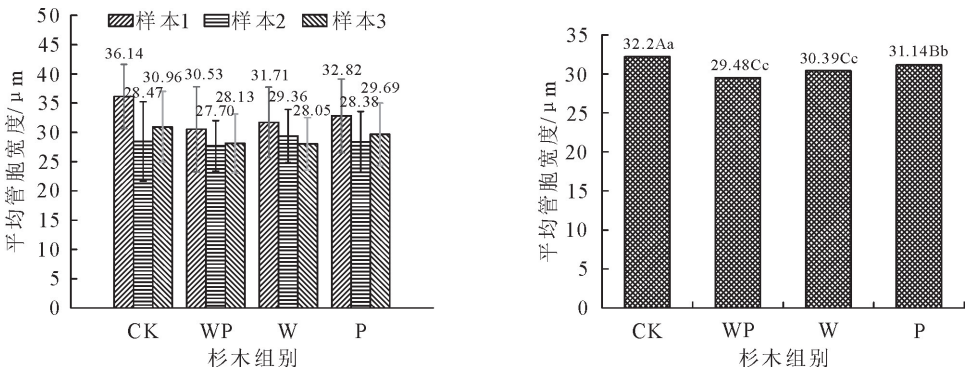


图 4 4 种不同处理杉木幼林材管胞宽度

Fig. 4 Width of tracheid in young Chinese fir wood under four different treatments

表 2 4 种不同处理杉木幼林材管胞宽度单因素方差分析

Table 2 Variance analysis of tracheid width of young Chinese fir wood under four different treatments

因素	平方和 SS	自由度 <i>df</i>	均方 MS	<i>F</i>	显著性
组间	6 787.514	3	2 262.505	39.947	0.000
组内	268 572.586	4 742	56.637		
总计	275 360.100	4 745			

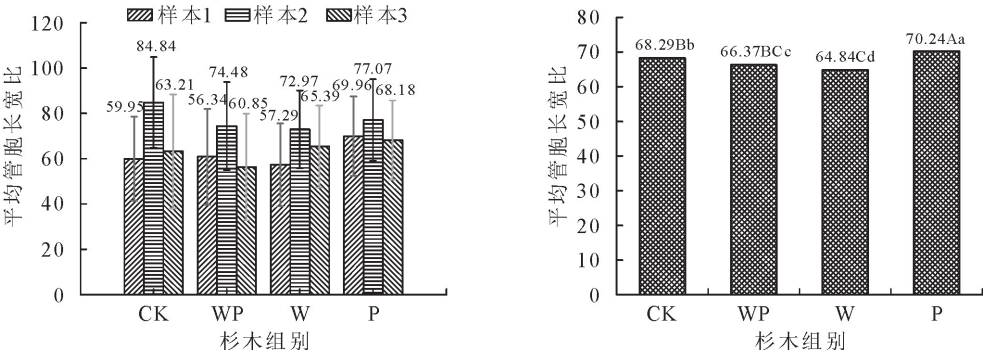


图 5 4 种不同处理杉木幼林材管胞长宽比

Fig. 5 Ratio of length to width of tracheid in young Chinese fir wood under four different treatments

表 3 4 种不同处理杉木幼林材管胞长宽比单因素方差分析

Table 3 Variance analysis of length-width ratio of tracheid in young Chinese fir wood under four different treatments

因素	平方和 SS	自由度 <i>df</i>	均方 MS	<i>F</i>	显著性
组间	23 894.692	3	7 964.897	15.065	0.000
组内	2 511 251.914	4 750	528.685		
总计	2 535 146.606	4 753			

2.4 对杉木木材管胞腔径的影响

4 种不同增温隔水处理组杉木幼林材管胞腔径存在组内差异。对各组数据进一步汇总处理,得出各处理组杉木幼林材管胞腔径的组间差异(图 6b),4 种不同处理杉木幼林材管胞腔径变化趋势与管胞长度、管胞宽度相一致,皆为 CK>P>W>WP。与对照组杉木相比,P 组杉木管胞幼林材腔径降低了 9.89%,W 组则降低了 12.01%;增温 5℃对杉木幼林材管胞腔径的抑制作用较隔离降水 50%大;在 2 个环境因子的共同胁迫下,WP 组杉木幼林材管胞腔径最小,与对照组杉木相比降低了 15.55%。这可能是由于土壤升温 and 水分供给减少不利于杉木形成层纺锤形原始细胞分生出来的管胞的腔径扩大^[15],形成腔径较小的输导细胞(管胞)有利于防止水分流失^[16],且有利于应对增温可能使树木蒸腾作用引起比土壤水分供给减少更严重的水分流失;而土壤增温和隔离降水共同胁迫下输导细胞(管胞)应对水分流失的响应是叠加的。

通过对杉木幼林材管胞腔径的多重分析(图 6b)与单因素方差分析(表 4)可知,CK 组与 WP 组、W 组、P 组幼林材管胞腔径差异均极显著($P<0.01$),W 组与 P 组幼林材管胞腔径差异显著($P<0.05$)。土壤增温 5℃与隔离降水 50%对杉木幼林材管胞腔径均有极显著的抑制作用,且土壤增温

5℃对杉木幼林材管胞腔径的抑制作用较隔离降水 50%大。这与 J. Xu *et al*^[17]对云杉(*Picea crassifolia*)所做研究相一致:管胞腔径与温度呈负相关,与降水呈正相关。

2.5 对杉木木材管胞壁厚的影响

4 组不同增温隔水处理组杉木幼林材管胞壁厚存在组内差异(图 7a)。对各组数据进一步汇总处理,得出各处理组杉木幼林材管胞壁厚的组间差异(图 7b),4 种不同处理杉木幼林材管胞壁厚变化趋势为:CK>W>P>WP。与对照组比较,W 组杉木幼林材管胞壁厚降低了 2.21%,P 组降低了 7.13%。隔离降水对杉木幼林材管胞壁厚的抑制作用比土壤增温强。在 2 个因子共同胁迫下,WP 组杉木幼林材管胞壁厚最小,较对照组降低了 11.54%。这是由于木材细胞在生长发育过程中历经分生、扩大和胞壁加厚等阶段而达到成熟,木材的厚壁细胞的成熟过程一般几周内就完成,当形成层分生的木质部细胞完成或接近完成细胞形体的增大时,细胞中的原生质转化成胞壁物质添加在新细胞的胞壁上。土壤升温 and 水分供给减少可能不利于杉木形成层纺锤形原始细胞分生出来的管胞腔内原生质转化成胞壁物质,形成壁厚较小的管胞;而土壤增温和隔离降水共同胁迫对管胞壁厚的响应是叠加的。

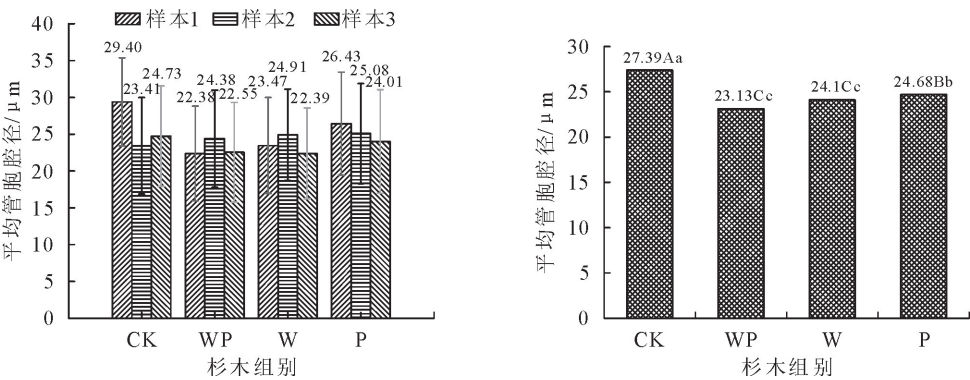


图 6 4 种不同处理杉木幼林材管胞腔径

Fig. 6 Cavity diameter of tracheid in young Chinese fir wood under four different treatments

表 4 4 种不同处理杉木幼林材管胞腔径单因素方差分析

因素	平方和 SS	自由度 df	均方 MS	F	显著性
组间	12 871.836	3	4 290.612	89.102	0.000
组内	228 972.142	4 755	56.637		
总计	241 843.977	4 758			

通过对杉木幼林材管胞壁厚的多重分析(图 7b)与单因素方差分析(表 5)可知,CK 组与 WP 组、P 组管胞壁厚差异极显著($P<0.01$),CK 组与 W 组管胞壁厚差异不显著;隔离降水 50%对杉木幼林

材管胞壁厚有极显著的抑制作用,而土壤增温 5℃对杉木幼林材管胞壁厚影响不显著,在 2 个环境因子共同作用下,极显著降低了杉木幼林材管胞的壁厚。

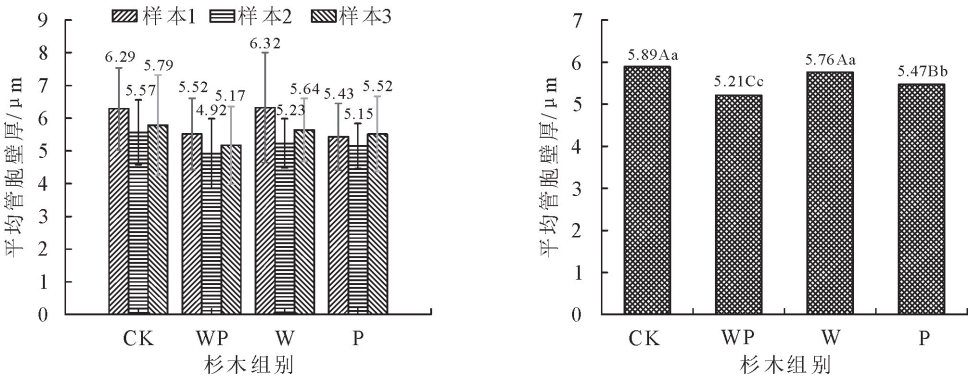


图 7 4 种不同处理杉木幼林材管胞壁厚

Fig. 7 Wall thickness of tracheid in young Chinese fir wood under four different treatments

表 5 4 种不同处理杉木幼林材管胞壁厚单因素方差分析

因素	平方和 SS	自由度 df	均方 MS	F	显著性
组间	12 871.836	3	4 290.612	89.102	0.000
组内	228 972.142	4 755	48.154		
总计	241 843.977	4 758			

2.6 对杉木木材管胞壁腔比的影响

4 种不同增温隔水处理组杉木幼林材管胞壁腔存在组内差异(图 8a)。对各组数据进一步汇总处理,得出 4 种不同增温隔水处理组杉木幼林材管胞壁腔比的组间差异(图 8b),CK 对照组壁腔比为 0.238,P 组壁腔比提高了 1.26%,WP 组壁腔比提

高了 3.36%,W 组提高了 5.46%。4 种不同处理杉木幼林材管胞壁腔比均 <1.0 ,壁腔比符合纸浆造纸行业对木材原料的需求。通过对杉木幼林材管胞壁腔比的多重分析(图 8b)与单因素方差分析(表 6)可知,仅 CK 组与 W 组杉木幼林材管胞壁腔比差异显著($P<0.05$),说明土壤增温 5℃对杉木幼林材管胞

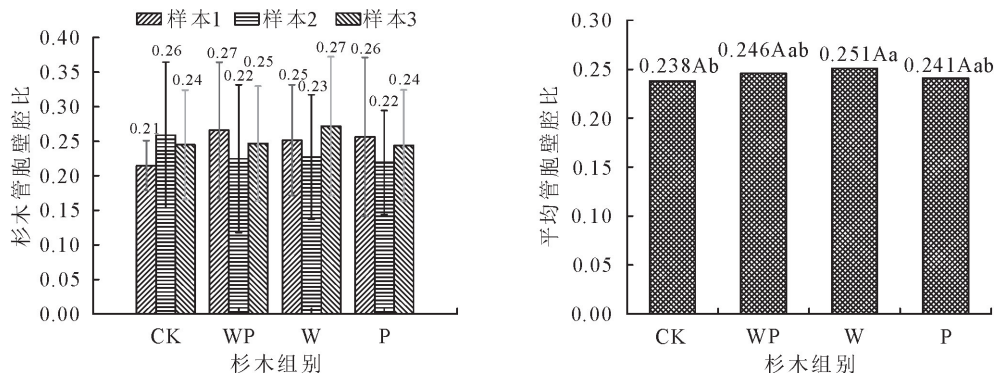


图 8 4 种不同处理杉木幼林材管胞壁腔比

Fig. 8 Ratio of cell wall to cavity of tracheid in young Chinese fir wood under four different treatments

表 6 4 种不同处理杉木幼林材管胞壁腔比单因素方差分析

Table 6 Variance analysis of ratio of cell wall to cavity of tracheid in young Chinese fir wood under four different treatments

因素	平方和 SS	自由度 df	均方 MS	F	显著性
组间	0.075	3	0.025	3.151	0.024
组内	35.782	4 502	0.008		
总计	35.857	4 505			

壁腔比促进作用显著;而 CK 组与 WP 组、P 组之间差异不显著,说明隔离降水对杉木幼林材管胞壁腔比影响不显著。

3 结论与讨论

土壤增温 5℃ 极显著降低杉木幼林材管胞长度,隔离降水 50% 对杉木幼林材管胞长度影响不显著;土壤增温 5℃ 和隔离降水 50% 对于杉木幼林材管胞宽度均有极显著的抑制作用,且土壤增温 5℃ 对杉木幼林材管胞宽度的影响较隔水 50% 大;降水不足使树木细胞分裂速率降低,缩短细胞分化时间,导致生长季的持续时间缩短,同时抑制细胞伸展,导致管胞宽度减小;隔离降水对杉木幼林材管胞长宽比的促进作用极显著,土壤增温 5℃ 处理对杉木幼林材管胞长宽比的抑制作用也极显著 ($P<0.01$),土壤增温且隔水对杉木幼林材管胞长宽比抑制作用显著 ($P<0.05$)。隔离降水 50% 对杉木幼林材管胞壁厚有极显著的抑制作用,而土壤增温 5℃ 对杉木幼林材管胞壁厚影响不显著,在 2 个环境因子共同作用下,极显著降低了杉木幼林材管胞的壁厚;土壤增温 5℃ 与隔离降水 50% 对杉木幼林材管胞腔径均有极显著的抑制作用,且土壤增温 5℃ 对杉木幼林材管胞腔径的抑制作用较隔离降水 50% 大。土壤增温 5℃ 对杉木幼林材管胞壁腔比促进作用显著;而 CK 组与 WP 组、P 组之间差异不显著,说明隔离降水对杉木幼林材管胞壁腔比影响不显著。总体来看,在闽西北中亚热带地区,杉木幼林材管胞形态特征指标与土壤温度呈负相关,与降水呈正相关,土壤

增温 5℃ 对杉木幼林材管胞形态的影响较隔离降水 50% 大。

大量温室气体排放造成的全球气候变化史无前例,植物根本来不及改变遗传结构,其反应主要依赖于对新的生长环境起积极作用的结构或生理反应^[18]。在预计随全球气候变化而变化的环境因素中,土壤温度升高与缺水已被确定为影响植物生长、发育和生产力的主要因素。木材细胞在生长发育过程中历经分生、扩大和胞壁加厚等阶段而达到成熟,木材厚壁细胞的成熟过程一般几周内就完成,当形成层分生的木质部细胞完成或接近完成细胞形体的增大时,细胞中的原生质转化成胞壁物质添加在新细胞的胞壁上。土壤增温和隔离降水对杉木幼林材管胞形态的影响是由于土壤升温 and 水分供给减少,不利于杉木形成层纺锤形原始细胞分生出来的管胞的形体扩大(包括直径增加和长度伸长),以及原生质转化成胞壁物质。形成尺寸和壁厚均较小的输导细胞(管胞)有利于防止水分流失,且土壤增温和隔离降水共同胁迫对管胞形态的响应是叠加的。

参考文献:

[1] 李坚,刘一星,崔永志,等. 人工林杉木幼龄材与成熟材的界定及材质早期预测[J]. 东北林业大学学报,1999(4):24-28.
[2] 石江涛,丁笑红,王旭军. 湿地松 7 个无性系木材管胞形态和木材密度的研究[J]. 西北林学院学报,2018,33(2):188-192.
SHI J T, DING X H, WANG X J. Wood tracheid morphology and wood density in seven clones of *Pinus elliotti*[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33 (2): 188-192. (in Chinese)

- [3] 黄安民,费本华,刘君良. 杉木木材性质研究进展[J]. 世界林业研究,2006(1):47-52.
- [4] 林金国,郑郁善,董建文,等. 杉木人工林木材力学性质与纤维形态关系的研究[J]. 生物数学学报,2000(3):281-285.
- [5] 杨玉盛. 全球环境变化对典型生态系统的影响研究:现状、挑战与发展趋势[J]. 生态学报,2017,37(1):1-11.
YANG Y S. The impacts of global environmental changes on typical ecosystems: status, challenges and trends [J]. Acta Ecologica Sinica,2017,37 (1):1-11. (in Chinese)
- [6] 冯建新,熊德成,史顺增,等. 土壤增温对杉木幼苗细根生理生态性质的影响[J]. 生态学报,2017,37(1):35-43.
- [7] 江森华,倪梦颖,周嘉聪,等. 增温和降雨减少对杉木幼林土壤酶活性的影响[J]. 生态学杂志,2018,37(11):3210-3219.
JIANG M H, NI M Y, ZHOU J C, *et al.* Effects of warming and precipitation reduction on soil enzyme activity in a young *Cunninghamia lanceolata* plantation[J]. Chinese Journal of Ecology,2018,37(11):3210-3219. (in Chinese)
- [8] 方璇,王健,王彬,等. 杉木 N、P 代谢对模拟土壤增温及隔离降雨的响应[J]. 生态学报,2019,39(10):3526-3536.
FANG X, WANG J, WANG B, *et al.* Effects of simulated soil warming and precipitation exclusion on N and P metabolisms in *Cunninghamia lanceolata* [J]. Acta Ecologica Sinica,2019,39(10):3526-3536. (in Chinese)
- [9] 聂少凡,林金国,林思祖,等. 人工杉木林木材纤维形态变异规律的研究[J]. 西北林学院学报,1998,13(4):11-15.
NIE S F, LIN J G, LIN S Z, *et al.* Study on the variation of wood fiber morphology in Chinese fir plantation [J]. Journal of Northwest Forestry University, 1998, 13(4):11-15. (in Chinese)
- [10] 姜鹏,庞立欣,邵思祺,等. 不同生长势杉木成熟林的生物量生长模型研究[J]. 西北林学院学报,2016,31(3):36-40,49.
JIANG P, PANG L X, SHAO S Q, *et al.* Biomass model of *Cunninghamia lanceolata* with different growth potential [J]. Journal of Northwest Forestry University,2016,31(3):36-40,49. (in Chinese)
- [11] 周国强,陈彩虹,楚春晖,等. 大围山杉木人工林不同海拔直径分布研究[J]. 西北林学院学报,2017,32(1):86-91.
ZHOU G Q, CHEN C H, CHU C H, *et al.* Diameter distribution of Chinese fir in different altitudes in Dawei Mountain [J]. Journal of Northwest Forestry University,2017,32 (1):86-91. (in Chinese)
- [12] 唐偲颀,郭剑芬,张政,等. 增温和隔离降雨对杉木幼林土壤养分和微生物生物量的影响[J]. 亚热带资源与环境学报,2017,12(1):40-45.
TANG C D, GUO J F, ZHANG Z, *et al.* Effects of soil warming and precipitation exclusion on soil nutrients and microbial biomass in young Chinese fir plantation [J]. Journal of Subtropical Resources and Environment,2017,12 (1):40-45. (in Chinese)
- [13] 齐文玉,李清芸,陈孝丑,等. 黄枝润楠木材结构特征的分析[J]. 森林与环境学报,2017,37(4):502-506.
QI W Y, LI Q Y, CHEN X C, *et al.* Analysis of wood structure for *Machilus versicolora* [J]. Jouranal of Forest and Environment,2017,37(4):502-506. (in Chinese)
- [14] 潘彪,徐朝阳,王章荣. 杂交鹅掌楸木材解剖性质及其径向变异规律[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2005,29(1):79-82.
PAN B, XU C Y, WANG Z R. Wood anatom ical properties and its radial variation of *Liriodendron chinense* × *L. tulipifera* [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition,2005,29(1):79-82. (in Chinese)
- [15] 程瑞梅,刘泽彬,封晓辉,等. 气候变化对树木木质部生长影响的研究进展[J]. 林业科学,2015,51(6):147-154.
CHEN R M, LIU Z B, FENG X H, *et al.* Advances in research on the effect of climatic change on xylem growth of trees [J]. Scientia Silvae Sinicae,2015,51(6):147-154. (in Chinese)
- [16] FONTI P, HELLER O, CHERUBINI P, *et al.* Wood anatomical responses of oak saplings exposed to air warming and soil drought[J]. Plant Biology,2013,15(Supp. 1):210-219.
- [17] XU J, LU J, EVANS R, *et al.* Climatic signal in cellulose microfibril angle and tracheid radial diameter of *Picea crassifolia* at different altitudes of the Tibetan Plateau, northwest China[J]. Wood Science & Technology,2015,49(6):1307-1318.
- [18] VALLADARES F, GIANOLI E, JOSÉ M, *et al.* Ecological limits to plant phenotypic plasticity [J]. New Phytologist,2007,176(4):749-763.