网络出版时间:2025-08-07 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.02.010

2 和 3 年生轻木生长及非结构性碳水化合物在雨季的变化特征

顾建尧[a],吴俊文[a],杜官本[b],刘成尧[a],段怀娇[a],肖建冬[a]
(西南林业大学 a 林学院,b 材料科学与工程学院,云南 昆明 650224)

[摘 要] 【目的】探究 2 和 3 年生轻木(*Ochroma lagopus*)在雨季的生长变化以及非结构性碳水化合物(NSC)及其组分在各器官(叶、根)的分配随雨季的变化特征,以揭示不同林龄轻木在雨季的碳分配机制。【方法】从西双版纳 2 和 3 年生轻木人工林中选取 20 m×20 m 代表性样地各 6 块,每木检尺后从每块样地选择 3 株标准木,分别于 6、7、8、10 月测定标准木的树高、胸径,同时取叶样和根样测定 NSC 及其组分(可溶性糖、淀粉)含量,对所测数据进行双因素方差分析、Person 相关性分析以及主成分分析,探究其在雨季(6-10 月)的动态变化特征。【结果】①在 6-10 月,2 和 3 年生轻木树高增长量分别为 2.22 和 1.03 m,胸径增长量分别为 3.04 和 1.36 cm,2 年生轻木树高和胸径增长量分别是 3 年生的 2.16 和 2.24 倍。②林龄、采样时间、器官(叶、根)、采样时间与器官的交互作用对轻木可溶性糖、淀粉、NSC 含量及可溶性糖/淀粉值具有显著或极显著影响;雨季期间,2 和 3 年生轻木叶和根的可溶性糖、淀粉和 NSC 含量及可溶性糖/淀粉值均表现出显著的季节性变化,其中 2 和 3 年生轻木叶的可溶性糖含量与 NSC 含量的变化规律大致相同。③2 年生轻木树高增长量与根可溶性糖含量呈极显著正相关($P<0.01$),胸径增长量与叶、根可溶性糖含量和叶 NSC 含量呈显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)正相关;3 年生轻木树高增长量与叶淀粉含量呈显著正相关($P<0.05$),胸径增长量与根可溶性糖含量呈显著正相关($P<0.05$)。④主成分分析结果显示,根 NSC 含量对主成分 1 的方差贡献度最高,叶 NSC 和叶淀粉含量对主成分 2 的方差贡献度较高。【结论】2 和 3 年生轻木在雨季的生长和碳水化合物分配存在差异。2 年生轻木具有较强的生长潜力,其根部和叶部的可溶性糖及 NSC 积累与生长发育密切相关;3 年生轻木则在碳水化合物的分配上表现出不同模式,叶部淀粉和根部可溶性糖对其生长有重要影响。总体而言,根部的 NSC 在碳分配中起关键作用,而叶部的 NSC 和淀粉则在碳水化合物的转化和储存过程中具有重要作用。

[关键词] 轻木;非结构性碳水化合物;雨季;碳分配
[中图分类号] S792.99 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)02-0095-10

Growth of 2- and 3-year-old *Ochroma lagopus* and change characteristics of non-structural carbohydrates in the rainy season

GU Jianyao[a], WU Junwen[a], DU Guanben[b], LIU Chengyao[a],
DUAN Huaijiao[a], XIAO Jiandong[a]
(a *College of Forestry*, b *College of Materials Science and Engineering*, *Southwest Forestry University*, *Kunming*, *Yunnan* 650224, *China*)

Abstract: 【Objective】 The growth changes of 2- and 3-year-old *Ochroma lagopus* and the allocation variations of non-structural carbohydrates (NSCs), specifically their components, in organs (leaves and roots) were investigated during the rainy season to reveal carbon partitioning mechanisms in *O. lagopus* trees of different ages. 【Method】 Six representative 20 m×20 m plots were selected from the 2- and 3-year-

[收稿日期] 2024-09-13 [修回日期] 2024-12-10
[基金项目] 国家自然科学基金项目(32071688)
[作者简介] 顾建尧(1999-),男,云南昆明人,在读硕士,主要从事森林培育研究。E-mail:gu13099973120@163.com
[通信作者] 吴俊文(1990-),男,云南昆明人,副教授,硕士生导师,主要从事植物生理生态研究。E-mail:wujunwen@swfu.edu.cn

old forest plantations of *O. lagopus* in Xishuangbanna. After measurements of each tree, three standard trees were chosen from each plot. The height and diameter at breast height of the standard trees were measured in June, July, August, and October. Concurrently, leaf and root samples were also collected to quantify non-structural carbohydrates (NSCs) and their components (soluble sugars and starch). The data were analyzed by two-way ANOVA, Person correlation analysis, and principal component analysis to explore their dynamics during the rainy season (June to October).【Result】①From June to October, the tree height increments of 2- and 3-year old *O. lagopus* were 2.22 and 1.03 m, and diameter at breast height (DBH) increments were 3.04 and 1.36 cm, respectively. The height and DBH increments of 2-year-old trees were 2.16-fold and 2.24-fold higher than those of 3-year-old trees, respectively. ②Stand age, sampling time, organ (leaves and roots), and the interaction between sampling time and organ have significant or highly significant effects on the soluble sugar, starch, NSC content, and soluble sugar/starch ratio of *O. lagopus*. During the rainy season, both 2-year-old and 3-year-old *O. lagopus* exhibited significant seasonal changes in the soluble sugar, starch, and NSC content, as well as their soluble sugar/starch ratio across leaves and roots. Notably, the patterns of changes in the soluble sugar content and NSC content in the leaves of both 2-year-old and 3-year-old *O. lagopus* were generally consistent. ③The height increments of 2-year-old *O. lagopus* showed a highly significant positive correlation with root soluble sugar content ($P<0.01$), and the DBH increments were significantly or highly significantly positively correlated with leaf and root soluble sugar content ($P<0.05$) and leaf NSC content ($P<0.01$). For 3-year-old trees, the height increments exhibited a significant positive correlation with leaf starch content ($P<0.05$), and the DBH increments were significantly positively correlated with root soluble sugar content ($P<0.05$). ④Principal component analysis showed that root NSC content contributed the most to the variance of principal component 1, whereas leaf NSC content and leaf starch content contributed relatively more to the variance of principal component 2.【Conclusion】This study revealed the differences in growth and carbohydrate allocation between 2-year-old and 3-year-old *O. lagopus* during the rainy season. The 2-year-old *O. lagopus* exhibited stronger growth potential, with the accumulation of soluble sugars and NSC in the roots and leaves being closely related to their growth. In contrast, the 3-year-old *O. lagopus* exhibited a different pattern in carbohydrate allocation, with leaf starch and root soluble sugars playing important roles in its growth. Overall, root NSC content was pivotal in carbon allocation, whereas leaf NSC and starch were essential for carbohydrate transformation and storage.

Key words: *Ochroma lagopus*; non-structural carbohydrates; rainy season; carbon allocation

非结构性碳水化合物(non-structural carbohydrates, NSC)是植物体内的主要能量来源。LIU 等[1]研究表明,NSC 是植物光合作用的主要产物,其主要成分为可溶性糖和淀粉,且二者之间可以相互转化,这些碳水化合物可以为植物生长发育提供所需的能量,以维持植物的生长、分化和代谢活动[2]。同时,NSC 作为植物体内一类重要的渗透调节因子,在植物受到胁迫时能够维持细胞膨压。有研究表明,在干旱胁迫下,植物为了维持代谢活动会大量消耗各器官的 NSC,而调动储备的 NSC 资源可能成为植物生存的必要条件[3]。

随着季节的变化,环境条件也随之改变,植物会灵活调整 NSC 的分配和利用策略,以维持生长和生存[4]。在春季,植物光合作用活跃,会合成大量的可溶性糖,这些可溶性糖被优先分配到新生的叶片和枝条中,以支持其生长和发育;同时,根系中的淀粉储备也会被动用,以满足生长所需的能量[5]。进入夏季,随着气温升高和水分的变化,植物的 NSC 含量会出现波动。研究表明,夏季华山松叶片和根系的 NSC 含量通常较高,而茎部的 NSC 含量相对较低,这种分配模式有助于华山松在干旱或高温条件下维持生理活动,确保水分和养分的有效利用[6]。秋冬季节,植物生长活动减缓,NSC 的分配主要集中在根系,以支持植物在低温和缺水条件下的生存。研究显示,根系中的 NSC 含量通常在冬季达到高峰,反映出植物在寒冷季节的适应策略[6-7];樊志颖

等[8]也发现，低温等不良环境是导致非生长季植物可溶性糖与淀粉比值较生长季明显升高的主要因素。有研究发现，植物不同器官、不同年龄枝叶中 NSC 的季节变化具有差异性[8-9]，在王欣等[10]的研究中，科尔沁沙地油松 NSC 含量随季节变化在 1 年生叶和枝中先降后升，在 2 年生叶中逐渐下降，在 2 年生枝中无显著变化；章异平等[11-12]对秦岭东段栓皮栎各器官 NSC 含量的季节变化进行研究发现，栓皮栎叶片和粗根 NSC 及其组分季节变化差异显著，但枝条 NSC 含量随季节变化并不显著。另外，不同生活型的物种间 NSC 季节变化规律也会存在差异，如蒙古栎（*Quercus mongolica*）、春榆（*Ulmus davidiana* var. *japonica*）等落叶树种枝中淀粉含量随季节变化波动较常绿树种大[13-14]，HOCH 等[15]对欧洲温带 10 种常见树种枝条 NSC 含量的季节性变化进行研究也得出类似结果。研究 NSC 对于深入了解植物生长发育、生理代谢等方面的机制具有重要意义，有助于进一步理解环境变化背景下植物的生存机制。

轻木（*Ochroma lagopus*）是木棉科中等大小的常绿乔木，原产于热带美洲（西印度群岛、墨西哥南部至秘鲁、玻利维亚等热带国家的低海拔地区），是一种典型的热带速生树种，其木材是世界上最轻的商品材，目前在云南省西双版纳有大规模种植的轻木人工林[16]。轻木木材具有容重小、体积稳定、材质均匀、易加工、隔热等特点，常作为各种轻型结构物的重要材料，并且由于轻木具有生长速度快的特点，通常在栽植第 4 年就可进行采伐。目前，关于轻木的研究主要集中在种子萌发[17]、复合材料[18]、组织培养[19]、细胞壁超微结构与力学性能的关系[20]、木材吸声性能[21]等方面，而针对轻木 NSC 含量季节动态变化的研究还相对有限。因此，本研究通过野外调查采样与室内分析相结合的方法，以 2 和 3 年生轻木人工林为研究对象，分析其生长情况及 NSC 的雨季动态变化特征，为探讨轻木应对雨季碳分配提供数据支持，以揭示雨季降水量变化背景下轻木的生长适应机制，并为轻木造林策略的制定及经营管理提供理论参考。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

试验地位于云南西双版纳州勐腊县勐仑镇勐醒农场轻木人工林场，地理坐标为东经 101°10′～101°30′、北纬 21°54′～21°55′，海拔约 550 m。气候受西南季风的强烈影响，有干湿分明的旱季和雨季。1959－2018 年，该地年平均气温 21.9 ℃，年均降水量 1 482 mm；土壤为砖红壤，pH 4.28，含有机质 23.6 g/kg、全氮 1.59 g/kg、全磷 0.32 g/kg、全钾 12.0 g/kg。此处均为不同林龄轻木纯林，林地中布满半人高的杂草，但会定期除草。

1.2　样地设置

2022 年 8 月和 10 月，在试验林场 2 和 3 年生轻木人工林中分别随机选取人为干扰小、具有代表性的样地（不包括山顶及山脚路边）各 6 块，样地面积 20 m×20 m，株行距 3 m×5 m。在样地内进行每木检尺，记录乔木层所有林木的树高和胸径，并且在每块样地中选取 3 株标准木挂牌标记。

1.3　样品采集

2023 年 6 月、7 月、8 月和 10 月，对每块样地中 3 株标准木的叶、根进行观测采样。采集叶样时选择树木朝阳一侧树冠中层的叶片，每株树采集 2～3 片成熟、健康的完全展开叶片，具体数量依据叶片大小而定。在距离轻木树干 50 cm 范围内采用挖掘法进行根系采样，每株树采集直径 5～7 mm 根系 2～3 根。将从每株标准木上采集的叶样和根样分别放入信封中并做好标记，以备后续测定相关指标。

1.4　测定指标与方法

1.4.1　生长指标测定　2023 年 6 月、7 月、8 月、10 月采集叶样和根样的同时，用测高器测定每块样地中 3 株标准木的树高，用围尺测定胸径。

1.4.2　非结构性碳水化合物的测定　将采集的标准木叶样和根样分类标记装入信封后，以 80 ℃高温杀青并烘干至恒质量，称质量后粉碎、过筛、储存。用苯酚-硫酸法[22]测定可溶性糖和淀粉含量。NSC 包括可溶性糖和淀粉，二者含量之和即为 NSC 含量。

1.5　数据处理

使用 Excel 2016 和 SPSS 27.0 进行试验数据处理，采用双因素方差分析（two-way ANOVA）检验林龄、测定时间、器官及其交互作用对可溶性糖、淀粉、NSC 含量及可溶性糖/淀粉的影响，用 t 检验比较 2 和 3 年生轻木幼树各指标的差异，用 Person 相关性分析比较雨季不同林龄轻木幼树生长指标和不同器官 NSC 及其组分含量间的相关性，在 SPSS 27.0 中对 2 和 3 年生轻木的所有指标进行主成分分析，用 OriginPro 9.0 绘图。

2　结果与分析

2.1　不同林龄轻木生长情况在雨季的变化

由表 1 可知，林龄和测定时间均对轻木树高、胸

径的变化具有极显著影响($P<0.01$);林龄与测定时间的交互作用对轻木树高的变化具有显著影响($P<0.05$),但对胸径变化影响不显著($P>0.05$)。

表 1 雨季 2 和 3 年生轻木生长指标变异来源分析

Table 1 Analysis of sources of variation in growth indicators of 2- and 3-year-old *Ochroma lagopus* in rainy season

变异来源 Source of variation	指标 Index	离差平方和 Sum of squares of deviations	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F 值 F value
林龄 Stand age	树高 Tree height	330.028	1	330.028	434.359**
	胸径 Diameter at breast height	257.335	1	257.335	139.769**
测定时间 Measurement time	树高 Tree height	52.646	3	17.549	23.096**
	胸径 Diameter at breast height	98.694	3	32.898	17.868**
林龄×测定时间 Stand age×Measurement time	树高 Tree height	7.431	3	2.477	3.260*
	胸径 Diameter at breast height	13.519	3	4.506	2.448

注:** 和 * 分别表示有极显著($P<0.01$)或显著($P<0.05$)影响。表 3 同。

Note: ** and * represent extremely significant($P<0.01$) or significant ($P<0.05$)effects, respectively. The same as table 3.

由表 2 可知,不同林龄轻木幼树 4 个月以来树高、胸径均有所增长,与 6 月相比,10 月 2 年生轻木树高、胸径分别增长了 32.36%和 32.76%,3 年生轻木分别增长了 9.81%和 10.68%。2 年生轻木树高和胸径增长量较 3 年生大,分别是 3 年生的 2.16 和 2.24 倍(表 2)。

表 2 轻木幼树生长指标在雨季的变化

Table 2 Changes in growth indicators of *Ochroma lagopus* in rainy season

林龄/年 Stand age	树高/m Tree height				
	6 月 June	7 月 July	8 月 August	10 月 October	增长量 Increment
2	6.86±1.00	8.02±0.69	8.24±0.68	9.08±0.73	2.22±0.69
3	10.50±0.77	10.81±0.59	11.20±0.48	11.53±0.47	1.03±0.74
林龄/年 Stand age	胸径/cm Diameter at breast height				
	6 月 June	7 月 July	8 月 August	10 月 October	增长量 Increment
2	9.28±1.08	10.76±1.39	11.32±1.58	12.33±1.84	3.04±1.44
3	12.73±1.15	13.14±1.17	13.66±1.24	14.09±1.24	1.36±0.18

2.2 不同林龄轻木 NSC 含量在雨季的变化

2.2.1 轻木 NSC 及其组分含量的变异来源分析

由表 3 可知,林龄对轻木可溶性糖、淀粉及 NSC 含量有极显著影响($P<0.01$),对可溶性糖/淀粉值有显著影响($P<0.05$);采样时间、器官(叶、根)、采样时间与器官的交互作用对轻木可溶性糖、淀粉、NSC 含量及可溶性糖/淀粉值均具有极显著影响($P<0.01$);林龄与采样时间的交互作用对轻木可溶性糖、NSC 含量及可溶性糖/淀粉值具有极显著影响($P<0.01$),但对淀粉含量影响不显著($P>0.05$);林龄与器官的交互作用对轻木 NSC 及其组分含量、可溶性糖/淀粉值的影响均不显著($P>0.05$)。

表 3 雨季 2 和 3 年生轻木 NSC 及其组分含量变异来源分析

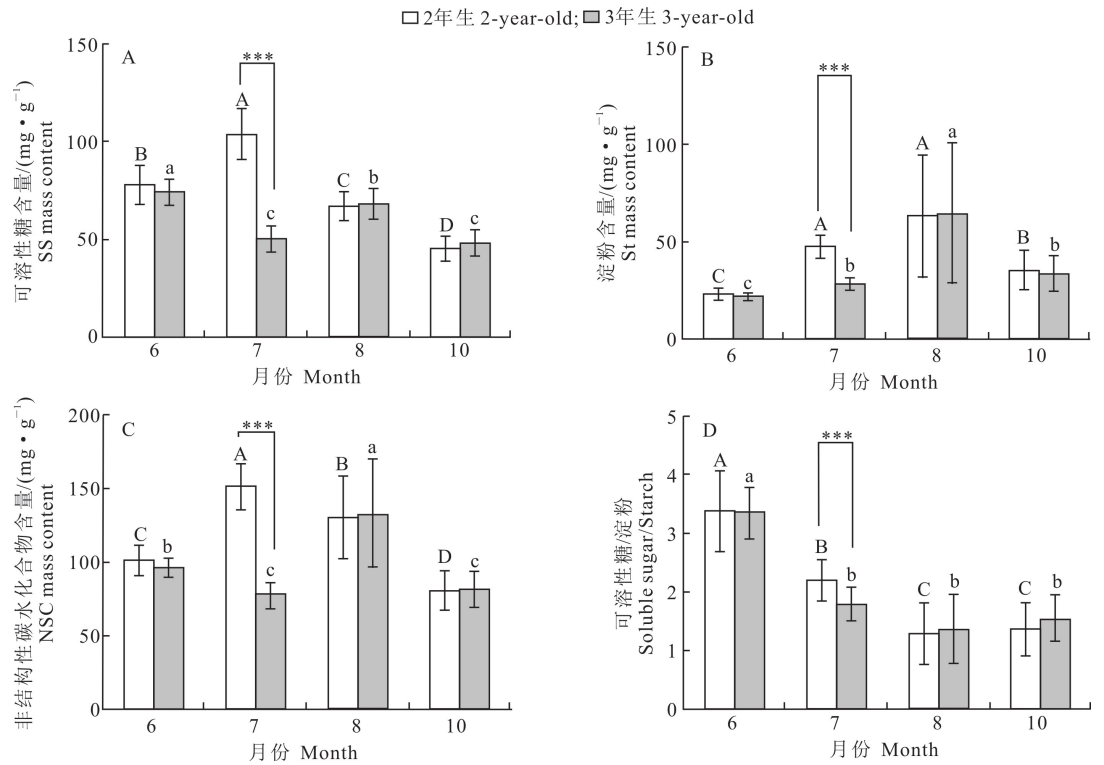
Table 3 Analysis of sources of variation in the content of NSC and its fractions in 2- and 3-year-old *Ochroma lagopus* in rainy season

变异来源 Source of variation	指标 Index	离差平方和 Sum of squares of deviations	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F 值 F value
林龄 Stand age	可溶性糖含量 Soluble sugar content	11 104.941	1	11 104.941	128.243**
	淀粉含量 Starch content	1 987.791	1	1987.791	9.758**
	NSC 含量 NSC content	22 489.391	1	22 489.391	76.019**
	可溶性糖/淀粉 Ratio of sugar to starch	1.090	1	1.090	4.388*
采样时间 Sampling time	可溶性糖含量 Soluble sugar content	41 012.197	3	13 670.732	157.874**
	淀粉含量 Starch content	22 780.686	3	7 593.562	37.275**
	NSC 含量 NSC content	68 977.598	3	22 992.533	77.720**
	可溶性糖/淀粉 Ratio of sugar to starch	55.683	3	18.561	74.736**
器官 Organ	可溶性糖含量 Soluble sugar content	9 956.592	1	9 956.592	114.982**
	淀粉含量 Starch content	1 684.922	1	1 684.922	8.271**
	NSC 含量 NSC content	19 833.236	1	19 833.236	67.041**
	可溶性糖/淀粉 Ratio of sugar to starch	8.099	1	8.099	32.610**
林龄×采样时间 Stand age×Sampling time	可溶性糖含量 Soluble sugar content	36 205.428	3	12 068.476	139.371**
	淀粉含量 Starch content	1 010.499	3	336.833	1.653
	NSC 含量 NSC content	49 181.860	3	16 393.953	55.415**
	可溶性糖/淀粉 Ratio of sugar to starch	13.792	3	4.597	18.511**

表 3(续)　Table 3(continued)

变异来源 Source of variation	指标 Index	离差平方和 Sum of squares of deviations	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	*F* 值 *F* value
林龄×器官 Stand age×Organ	可溶性糖含量 Soluble sugar content	33.374	1	33.374	0.385
	淀粉含量 Starch content	1.375	1	1.375	0.007
	NSC 含量 NSC content	48.296	1	48.296	0.163
	可溶性糖/淀粉 Ratio of sugar to starch	0.379	1	0.379	1.527
采样时间×器官 Sampling time×Organ	可溶性糖含量 Soluble sugar content	4 702.426	3	1 567.475	18.102**
	淀粉含量 Starch content	20 991.584	3	6 997.195	34.348**
	NSC 含量 NSC content	41 047.314	3	13 682.438	46.250**
	可溶性糖/淀粉 Ratio of sugar to starch	51.654	3	17.218	69.329**

2.2.2　轻木叶 NSC 含量变化　如图 1 所示,2 和 3 年生轻木叶 NSC 及其组分含量在雨季均有显著变化,其中 7 月份 2 年生轻木叶可溶性糖、淀粉、NSC 含量及可溶性糖/淀粉值均极显著高于 3 年生轻木($P<0.001$)。雨季 2 年生轻木叶可溶性糖、淀粉和 NSC 含量均随时间推移呈现先上升后下降的趋势,其中可溶性糖及 NSC 含量 7 月最高,10 月最低;淀粉含量在 8 月最高,6 月最低,8 月淀粉含量显著高于 6 和 10 月($P<0.05$)。2 年生轻木叶可溶性糖/淀粉值随时间呈现下降趋势,6 月最高,10 月最低,6 月可溶性糖/淀粉值显著高于其他月份($P<0.05$)。



图柱上标不同大写字母表示 2 年生轻木在不同月份间差异显著($P<0.05$),标不同小写字母表示 3 年生轻木在不同月份间差异显著($P<0.05$)。* 表示 $P<0.05$,** 表示 $P<0.01$,*** 表示 $P<0.001$。图 2 同。

Different uppercase letters above the bars indicate significant differences among months for 2-year-old *O. lagopus* ($P<0.05$), while different lowercase letters indicate significant differences among months for 3-year-old *O. lagopus* ($P<0.05$).

* denotes $P<0.05$, ** denotes $P<0.01$, and *** denotes $P<0.001$. The same as in Fig. 2.

图 1　2 和 3 年生轻木叶中可溶性糖、淀粉、NSC 含量和可溶性糖/淀粉值在雨季的变化

Fig. 1　Changes in soluble sugar, starch, NSC content and soluble sugar/starch values in leaves of 2- and 3-year-old *Ochroma lagopus* in rainy season

雨季 3 年生轻木叶可溶性糖及 NSC 含量均随时间推移呈现先下降后上升再下降的趋势;6 月可溶性糖含量最高,10 月最低,6 月可溶性糖含量显著高于其他月份($P<0.05$);8 月 NSC 含量最高,10 月最低,8 月 NSC 含量显著高于其他月份($P<0.05$)。雨季 3 年生轻木叶淀粉含量均随时间推移

呈现先上升后下降趋势,其中 8 月淀粉含量最高,6 月最低,8 月淀粉含量显著高于其他月份($P<0.05$)。3 年生叶可溶性糖/淀粉值随时间推移呈下降趋势,6 月显著高于其他月份($P<0.05$),其他月份间无显著差异($P>0.05$)。雨季期间,2 和 3 年生轻木叶的可溶性糖、淀粉和 NSC 含量及可溶性糖/淀粉值均表现出显著的季节性变化,其中可溶性糖含量与 NSC 含量的变化规律大致相同,这表明轻木叶的非结构性碳水化合物含量的变化可能主要与可溶性糖含量的变化有关。

2.2.3 轻木根 NSC 含量变化 图 2 显示,雨季 2 和 3 年生轻木根 NSC 及其组分含量均有显著变化($P<0.05$),其中 7 月 2 年生轻木根可溶性糖、NSC 含量及可溶性糖/淀粉值均极显著高于 3 年生轻木($P<0.001$),且 6 和 7 月 2 年生轻木根淀粉含量显著高于 3 年生轻木(6 月 $P<0.01$,7 月 $P<0.05$)。雨季 2 年生轻木根可溶性糖含量呈先上升后下降趋势,7 月可溶性糖含量最高,10 月最低,7 月可溶性糖含量显著高于 8 和 10 月;淀粉含量呈先下降后上升再下降趋势,6 月淀粉含量最高,10 月最低,6 月淀粉含量显著高于 7 和 10 月($P<0.05$);NSC 含量呈下降趋势,6 月 NSC 含量最高,10 月最低,6 月 NSC 含量显著高于 8 和 10 月($P<0.05$);可溶性糖/淀粉值呈先上升后下降再上升趋势,其中 7 月最高,8 月最低,7 月可溶性糖/淀粉值显著高于 6 和 8 月($P<0.05$)。雨季 3 年生轻木根可溶性糖、淀粉及 NSC 含量均呈先下降后上升再下降趋势,且上述指标均以 6 月显著高于其他月份($P<0.05$);3 年生轻木根可溶性糖/淀粉值呈先下降后上升趋势,其中 10 月最高,7 月最低,10 月根可溶性糖/淀粉值显著高于 7 和 8 月($P<0.05$)。上述结果表明,2 和 3 年生轻木在雨季期间根部非结构性碳水化合物的积累和转化存在显著差异,且与生长季节的不同阶段密切相关。

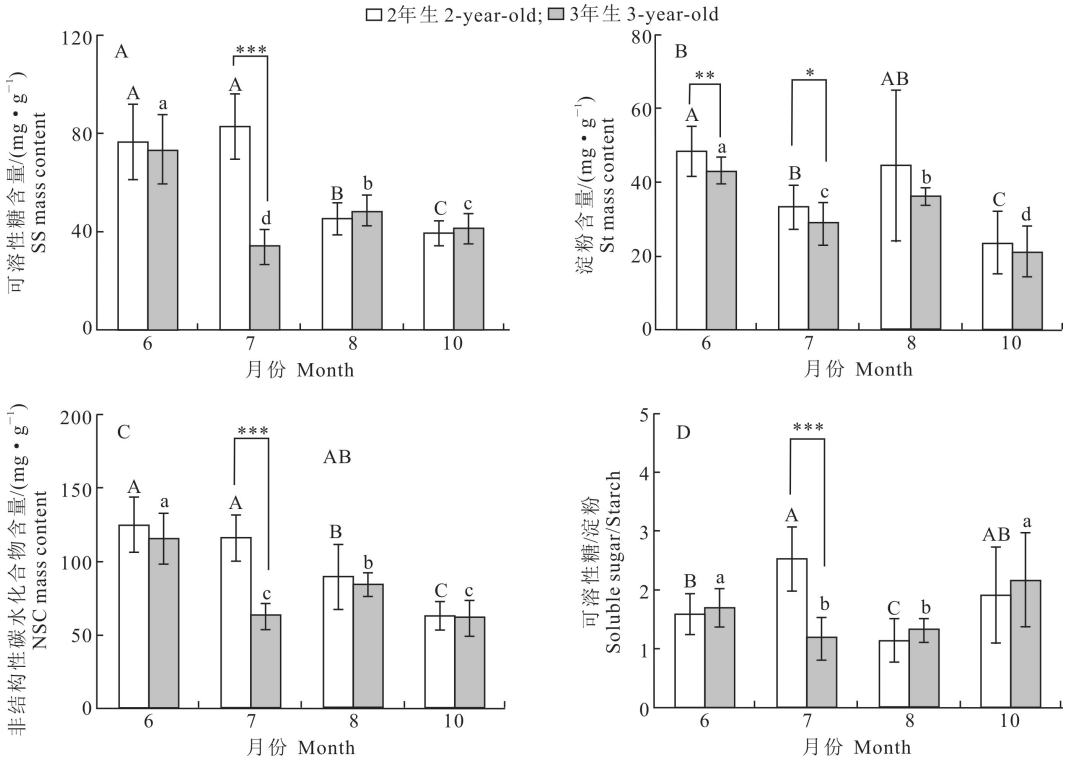


图 2 2 和 3 年生轻木根中可溶性糖、淀粉、NSC、可溶性糖/淀粉值在雨季的变化

Fig. 2 Changes in soluble sugars, starch, NSC, and soluble sugar/starch values in roots of 2- and 3-year-old *Ochroma lagopus* in rainy season

2.3 雨季不同林龄轻木幼树生长指标与不同器官 NSC 含量的相关性

对 2 和 3 年生轻木幼树生长指标和不同器官 NSC 含量进行 Person 相关性分析,结果(表 4 和表 5)显示,2 年生轻木树高增长量与根可溶性糖含量呈极显著正相关($P<0.01$),与根淀粉含量呈显著负相关($P<0.05$);胸径增长量与叶、根可溶性糖含量($P<0.05$)和叶 NSC 含量($P<0.01$)呈显著或极显著正相关;根可溶性糖含量与叶可溶性糖和 NSC 含量均呈极显著正相关($P<0.01$)。3 年生轻木树高增长量与叶淀粉含量呈显著正相关($P<0.05$),胸径增长量与根可溶性糖含量呈显著正相关($P<$

0.05)；3 年生轻木 NSC 及其组分含量在各器官之间均具有显著的正相关关系($P<0.05$)。综合分析以上结果可以看出，非结构性碳水化合物在 2 和 3 年生轻木的生长过程中发挥着关键作用，并且这些碳水化合物在不同器官之间有着密切的相互作用，影响着树木的生长发育。

表 4　2 年生轻木幼树雨季生长指标与不同器官 NSC 含量间的相关性

Table 4　Correlations between growth indicators and NSC content in different organs of 2-year-old *Ochroma lagopus* in rainy season

指标 Indicator	树高增长量 Tree height increment	胸径增长量 DBH increment	叶可溶性糖含量 Leaf soluble sugars content	叶淀粉含量 Leaf starch content	根可溶性糖含量 Root soluble sugars content	根淀粉含量 Root starch content	叶 NSC 含量 Leaf NSC content	根 NSC 含量 Root NSC content
树高增长量 Tree height increment	1							
胸径增长量 DBH increment	0.253	1						
叶可溶性糖含量 Leaf soluble sugars content	0.224	0.308*	1					
叶淀粉含量 Leaf starch content	−0.231	0.058	0.098	1				
根可溶性糖含量 Root soluble sugars content	0.474**	0.316*	0.824**	−0.052	1			
根淀粉含量 Root starch content	−0.336*	−0.173	0.176	0.114	0.074	1		
叶 NSC 含量 Leaf NSC content	0.248	0.373**	0.795**	0.456**	0.696**	0.048	1	
根 NSC 含量 Root NSC content	0.132	0.197	0.253	−0.139	0.440**	0.464**	0.115	1

注：* 表示 $P<0.05$，* * 表示 $P<0.01$。表 5 同。

Note: * indicates $P<0.05$ and * * indicates $P<0.01$. The same as in table 5.

表 5　3 年生轻木幼树雨季生长指标及不同器官 NSC 含量间的相关性

Table 5　Correlations between growth indicators and NSC content in different organs of 3-year-old *Ochroma lagopus* in rainy season

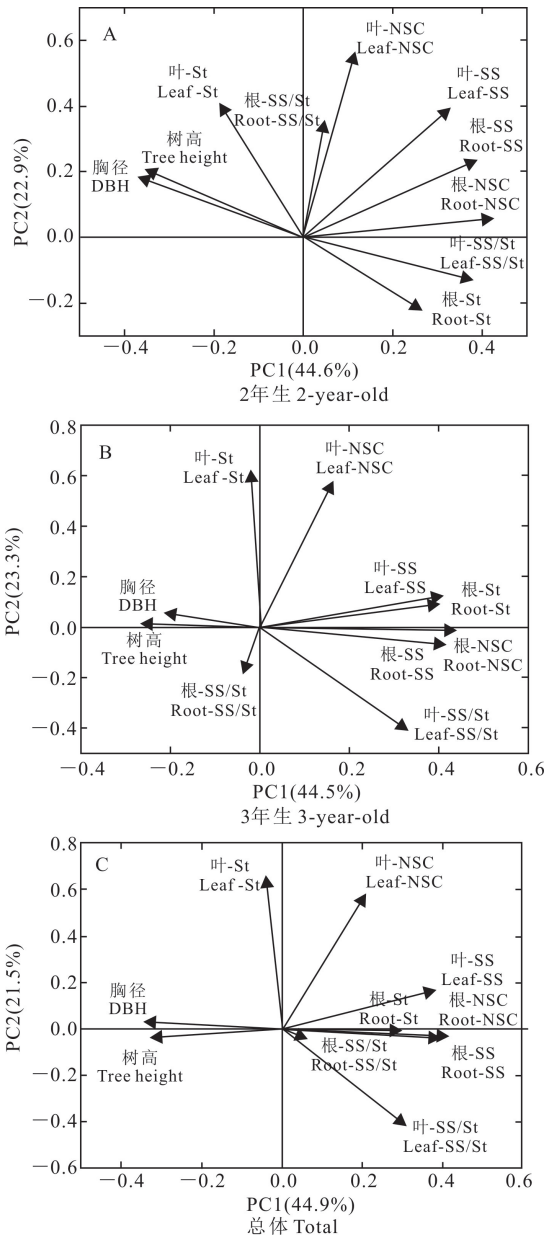
指标 Indicator	树高增长量 Tree height increment	胸径增长量 DBH increment	叶可溶性糖含量 Leaf soluble sugars content	叶淀粉含量 Leaf starch content	根可溶性糖含量 Root soluble sugars content	根淀粉含量 Root starch content	叶 NSC 含量 Leaf NSC content	根 NSC 含量 Root NSC content
树高增长量 Tree height increment	1							
胸径增长量 DBH increment	−0.064	1						
叶可溶性糖含量 Leaf soluble sugars content	0.155	0.195	1					
叶淀粉含量 Leaf starch content	0.277*	0.101	0.480**	1				
根可溶性糖含量 Root soluble sugars content	0.164	0.280*	0.592**	0.522**	1			
根淀粉含量 Root starch content	−0.036	0.098	0.592**	0.370**	0.341*	1		
叶 NSC 含量 Leaf NSC content	0.231	0.176	0.675**	0.746**	0.409**	0.613**	1	
根 NSC 含量 Root NSC content	0.018	0.217	0.605**	0.595**	0.731**	0.538**	0.598**	1

2.4　不同林龄轻木幼树雨季响应特征的主成分分析

对 2 和 3 年生轻木的所有指标进行主成分分析，该分析展示了轻木树高、胸径、叶和根中 NSC 及其组分等指标的总体相互关系。雨季时 2 年生轻木主成分 1 和主成分 2 累计方差贡献率为 67.5%，主成分 1 方差贡献率为 44.6%，其中贡献度较大的有树高、胸径、叶可溶性糖含量、叶可溶性糖/淀粉、根 NSC 含量、根可溶性糖含量 6 个指标，载荷权数均≥0.7，其中根 NSC 含量正向载荷权数最大；主成分 2 方差贡献率为 22.9%，其中贡献度较大的有叶可溶性糖、叶淀粉、叶 NSC 含量、根可溶性糖/淀粉 4 个指标，载荷权数均≥0.5，其中叶 NSC 含量正向载荷权数最大(图 3-A)。

雨季 3 年生轻木主成分 1 和主成分 2 累计方差

贡献率为 67.8%,主成分 1 方差贡献率为 44.5%,其中贡献度较大的有叶可溶性糖含量、叶可溶性糖/淀粉以及根可溶性糖、根 NSC、根淀粉含量 5 个指标,载荷权数均≥0.7,其中根 NSC 含量正向载荷权数最大;主成分 2 方差贡献率为 23.3%,其中贡献度较大的有叶淀粉、叶 NSC 含量、叶可溶性糖/淀粉 3 个指标,载荷权数均≥0.6,其中叶淀粉、叶 NSC 含量正向载荷权数较大(图 3-B)。



SS. 可溶性糖含量;St. 淀粉含量。

SS. Soluble sugars content; St. Starch content.

图 3 2 和 3 年生轻木雨季响应特征的主成分分析

Fig. 3 Principal component analysis of rainy season response characteristics of 2- and 3-year-old *Ochroma lagopus*

总体来看(图 3-C),雨季轻木主成分 1 和主成分 2 累计方差贡献率为 66.4%,主成分 1 方差贡献率为 44.9%,其中贡献度较大的有树高、胸径、叶可溶性糖、根可溶性糖、根 NSC 含量 5 个指标,载荷权数均≥0.7,其中根 NSC 含量正向载荷权数最大;主成分 2 方差贡献率为 21.5%,其中贡献度较大的有叶 NSC 和叶淀粉含量 2 个指标,载荷权数均≥0.8,其中叶淀粉含量正向载荷权数最大。

以上结果表明,根部的 NSC 积累对轻木生长(尤其是树高和胸径)具有重要作用,而叶部的 NSC 和淀粉则在非结构性碳水化合物的转化和储存过程中发挥了关键作用。

3 讨 论

3.1 2 和 3 年生轻木雨季生长变化

西双版纳在雨季通常伴随着较高的降水量以及较高的气温。刘启军[23]研究发现,6 月份较高的降水量及高温共同促进了四川红杉的生长,这与本研究中不同林龄轻木在雨季的生长情况相似。在本研究中,2 年生轻木增长速度较快,其树高增长量及胸径增长量分别是 3 年生的 2.16 和 2.24 倍,这与章进峰[24]研究中檫树早期生长速度较快、后期生长速度较慢的结果类似。石建周等[25]研究发现,不同胸径的青海云杉生长速率不同,胸径较大的青海云杉比胸径小的生长速率更快,这与本研究结果相反,造成这种差异的原因可能是受树种类型、地形以及当年降水和温度的影响。

3.2 雨季 2 和 3 年生轻木各器官 NSC 及其组分变异来源分析

雨季轻木各器官 NSC 及其组分含量受自身和采样时间的影响。各器官的可溶性糖、淀粉、NSC 含量主要受采样时间的影响,林龄的影响次之。MARTÍNEZ-VILALTA 等[26]汇总了 121 项研究的数据,对自然生境下 177 个物种 NSC 及其组分的季节性变化特征进行了分析,结果显示,可溶性糖/淀粉值受季节与器官间交互作用的影响最大,其次是受季节影响;而在本研究中,可溶性糖/淀粉值受采样时间影响最大,其次是采样时间与器官间的交互作用。王晨等[27]研究表明,器官对林木可溶性糖、淀粉及 NSC 总量的变化有极显著影响,这与本研究结果类似。林木不同器官间 NSC 分配存在差异,体现了林木自身的碳供需平衡,不同器官间形成的特定 NSC 分配格局,一方面是为了适应所处的生境、气候等生存条件,另一方面也与林木自身年龄以及植物体内营养元素分配紧密相关。王凯等[28]研究

发现，降水增加会导致储存在杨树体内的淀粉发生转化并运输到相应器官进行生理代谢活动，并且土壤水分增加会使植物对氮素的利用加强，从而使植物碳吸收增加，并进一步加大植物体内 NSC 的储存，为抵御不良环境条件提供充足的物质基础。

3.3　2 和 3 年生轻木雨季 NSC 变化

植物器官中 NSC 及其组分的季节变化能够反映树种对外界环境的响应，叶和根是植物重要的碳库，可为植物生长提供大量能量。本研究中，2 年生轻木叶和根的可溶性糖含量以 7 月最高、10 月最低，3 年生轻木根的可溶性糖含量以 6 月最高、10 月最低，说明轻木在生长季初期可溶性糖累积量大于消耗量，这与 HOCH 等[15]发现温带常见落叶阔叶树种叶片 NSC 及其组分含量在生长初期较高、至 10 月落叶前最低的研究结果类似，积累下来的可溶性糖可能成为轻木后期生长的能量来源之一。内蒙古白音敖包地区沙地云杉叶中可溶性糖、NSC 含量随季节发生变化，在生长初期含量较低，7 月开始上升并维持在一个较高水平[29]；而本研究中 2 和 3 年生轻木叶和根中 NSC 及其组分含量均在雨季来临前后达到最大值，在生长末期出现下降趋势，这与生长于秦岭东段的栓皮栎叶片中 NSC 含量的季节变化动态类似[11]。植物叶片在夏季快速增长，通过光合作用生产大量 NSC 供树木生长所需[6,30]。西双版纳雨热同期，能够让轻木在雨季来临时更多地进行光合作用，提高 NSC 的产量，本研究中不同林龄轻木叶的 NSC 含量在 7 或 8 月达到最高，这可能与轻木结实期在 5－6 月有关。虽然轻木引种多年，但其繁育所需种子更多还是依靠购买，目前观测轻木人工林结实量并不多，种子品质也不达标，并没有自然条件下孕育的轻木植株出现，因结实需要消耗更多养分，因此导致轻木叶 NSC 含量在 7 或 8 月才达到最高。王凯等[31]对科尔沁沙地针叶树 NSC 季节变化规律的研究结果表明，叶是主要的碳获取器官，叶片生产的 NSC 不仅用于自身消耗，而且还要为当年生叶提供碳，以促进叶片形态建成和生理构建。本研究中，不同林龄轻木所有器官的可溶性糖/淀粉值均大于 1，这表明轻木在生长季节中不同器官的可溶性糖含量始终高于淀粉含量；并且各林龄轻木叶中可溶性糖含量高于根中可溶性糖含量，说明叶也是轻木主要的碳源器官。

4　结　论

随时间变化，雨季（6－10 月）西双版纳不同林龄轻木幼树的树高和胸径均有增长，且 2 年生轻木增长速度更快，这表明 2 年生轻木在雨季的生长潜力更强，可能与其生长发育阶段和碳水化合物的积累密切相关。2 和 3 年生轻木的可溶性糖、淀粉和 NSC 含量以及可溶性糖/淀粉值均呈现出显著的季节性变化，雨季期间，叶和根部的 NSC 在各器官之间的分配发生了变化，且 2 和 3 年生轻木的叶部可溶性糖含量与 NSC 含量变化趋势相似，这表明非结构性碳水化合物的动态变化可能与轻木的生长需求密切相关，尤其是在雨季这一生长高峰期。2 年生轻木根部可溶性糖和 NSC 的积累与其生长（尤其是树高和胸径的增长）密切相关，而 3 年生轻木的碳水化合物分配更加依赖于叶部淀粉和根部可溶性糖，反映了轻木在不同成熟期的生长需求和碳水化合物使用模式。综上所述，本研究揭示了 2 和 3 年生轻木在雨季生长和碳分配机制方面的差异性，为理解不同林龄轻木在雨季碳水化合物的动态变化及其生长机制提供了重要依据。

[参考文献]

[1] LIU Y，REN X X，JEONG B R. Supplementary light source affects growth，metabolism，and physiology of *Adenophora triphylla*（Thunb.）A. DC. seedlings[J]. BioMed Research International，2019，2019：6283989.

[2] 梁士才，王缓，何珊，等. 非结构性碳水化合物参与茶树逆境胁迫响应的生理生化机制研究进展[J]. 中国茶叶，2023，45(10)：1-8.
LIANG S C，WANG H，HE S，et al. Advances in physiological and biochemical mechanisms of non-structural carbohydrates involved in stress response of tea plant(*Camellia sinensis*)[J]. China Tea，2023，45(10)：1-8.

[3] 王云霞，刘莹，付雨辰，等. 干旱胁迫对连翘幼苗非结构性碳分配和水力特性的影响[J]. 生态学报，2024，44(11)：4698-4707.
WANG Y X，LIU Y，FU Y C，et al. Effects of drought on non-structural carbon allocation and hydraulic characteristics of *Forsythia suspensa* seedlings[J]. Acta Ecologica Sinica，2024，44(11)：4698-4707.

[4] 陈轶群，王艺颖，于耀泓，等. 热带次生林不同林层植物叶片非结构性碳水化合物的季节变化及其对氮磷添加的响应[J]. 生态学报，2022，42(1)：255-265.
CHEN Y Q，WANG Y Y，YU Y H，et al. Seasonal changes of leaf non-structural carbohydrate of plants in different layers and its responses to nitrogen and phosphorus additions in a secondary tropical forest[J]. Acta Ecologica Sinica，2022，42(1)：255-265.

[5] 李菊艳. 不同林龄胡杨组织非结构性碳水化合物含量变化规律[J]. 干旱区资源与环境，2021，35(9)：185-192.
LI J Y. Changes of nonstructural carbohydrate in organs of *Populus euphratica* at different ages[J]. Journal of Arid Land

Resources and Environment,2021,35(9):185-192.

[6] 李志琪,吴俊文,陈刚,等. 中幼龄林华山松非结构性碳水化合物季节变化[J]. 西北植物学报,2024,44(5):782-791.
LI Z Q,WU J W,CHEN G,et al. Seasonal variations of non-structural carbohydrates of young and middle-age *Pinus armandii* plantations[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2024,44(5):782-791.

[7] 章异平,师志强,竹磊,等. 秦岭东段不同海拔栓皮栎粗根非结构性碳水化合物含量的季节动态[J]. 生态学杂志,2021,40(3):712-720.
ZHANG Y P,SHI Z Q,ZHU L,et al. Seasonal variations of non-structural carbohydrate contents in coarse roots of *Quercus variabilis* Blume at different altitudes in the eastern Qinling Mountain[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(3): 712-720.

[8] 樊志颖,李江荣,陈康,等. 藏东南色季拉山林线植物非结构性碳水化合物的季节变动[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2022,50(3):40-48.
FAN Z Y,LI J R,CHEN K,et al. Seasonal variation in non-structural carbohydrates of timberline plants in the Sygera Mountain, southeast Tibet[J]. Journal of Northwest A&F University(Nat Sci Ed),2022,50(3):40-48.

[9] 上官淮亮,刘鸿雁,胡国铮,等. 干旱林线区不同树种非结构性碳水化合物的季节格局及其主导因子[J]. 北京大学学报(自然科学版),2019,55(3):553-560.
SHANGGUAN H L,LIU H Y,HU G Z,et al. Seasonal patterns and their determinants of non-structural carbohydrates in different tree species at xeric timberline[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis,2019,55(3):553-560.

[10] 王欣,王凯,张日升,等. 科尔沁沙地油松和赤松非结构性碳水化合物的季节变化[J/OL]. 生态学杂志(2024-06-12)[2024-07-03]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20240611.1845.014.html.
WANG X,WANG K,ZHANG R S,et al. Seasonal variations in non-structural carbohydrate of *Pinus tabuliformis* and *Pinus densiflora* in Horqin Sandy Land[J/OL]. Chinese Journal of Ecology(2024-06-12)[2024-07-03]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20240611.1845.014.html.

[11] 章异平,曹鹏鹤,徐军亮,等. 秦岭东段栓皮栎叶片非结构性碳水化合物含量的季节动态[J]. 生态学报,2019,39(19):7274-7282.
ZHANG Y P,CAO P H,XU J L,et al. Seasonal dynamics of non-structural carbohydrate contents in leaves of *Quercus variabilis* growing in the east Qinling Mountain range[J]. Acta Ecologica Sinica,2019,39(19):7274-7282.

[12] 章异平,海旭莹,徐军亮,等. 秦岭东段栓皮栎枝条非结构性碳水化合物含量的季节动态[J]. 植物生态学报,2019,43(6):521-531.
ZHANG Y P,HAI X Y,XU J L,et al. Seasonal dynamics of non-structural carbohydrate content in branch of *Quercus variabilis* growing in east Qinling Mountain range[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2019,43(6):521-531.

[13] 欧阳明,杨清培,祁红艳,等. 亚热带落叶与常绿园林树种非结构性碳水化合物的季节动态比较[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2014,38(2):105-110.
OUYANG M,YANG Q P,QI H Y,et al. A comparison of seasonal dynamics of nonstructural carbohydrates for deciduous and evergreen landscape trees in subtropical region, China[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition),2014,38(2):105-110.

[14] 张海燕,王传宽,王兴昌. 5 个温带树种冠层枝叶非结构性碳水化合物浓度的空间变异[J]. 生态学报,2015,35(19):6496-6506.
ZHANG H Y,WANG C K,WANG X C. Within-crown variation in concentrations of non-structural carbohydrates of five temperate tree species[J]. Acta Ecologica Sinica,2015,35(19):6496-6506.

[15] HOCH G,RICHTER A,KÖRNER C. Non-structural carbon compounds in temperate forest trees[J]. Plant,Cell & Environment,2003,26(7):1067-1081.

[16] 邹寿青,华帅,段柱标,等. 轻木在西双版纳低海拔地区栽培实用技术[J]. 林业调查规划,2019,44(5):112-116.
ZOU S Q,HUA S,DUAN Z B,et al. Cultivation technology of *Ochroma lagopus* in low altitude area of Xishuangbanna[J]. Forest Inventory and Planning,2019,44(5):112-116.

[17] 成统,白雪,钱容,等. 轻木萌发条件、低温耐受性及最适 pH 值条件探索[J]. 四川林业科技,2023,44(4):88-96.
CHENG T,BAI X,QIAN R,et al. Exploration on seed germination conditions,low temperature tolerance and optimum pH value for *Ochroma lagopus* growth[J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology,2023,44(4):88-96.

[18] 严少聪,史慧媛,唐柏鉴,等. GFRP-轻木夹芯结构Ⅰ/Ⅱ混合型界面剥离试验研究[J]. 苏州科技大学学报(工程技术版),2024,37(1):9-14,51.
YAN S C,SHI H Y,TANG B J,et al. Experiments on mixed Ⅰ/Ⅱ interface debonding of GFRP-Balsa sandwich structure[J]. Journal of Suzhou University of Science and Technology (Engineering and Technology Edition),2024,37(1):9-14,51.

[19] 李翠新,何德,孟德中. 轻木植物组织培养研究[J]. 湖北民族大学学报(自然科学版),2020,38(3):253-256.
LI C X,HE D,MENG D Z. Research on plant tissue culture of *Ochroma lagopus*[J]. Journal of Hubei Minzu University (Nat Sci Ed),2020,38(3):253-256.

[20] 李柬龙,陈胜,李海潮,等. 轻木细胞壁超微结构与力学性能关系研究[J]. 北京林业大学学报,2022,44(2):115-122.
LI J L,CHEN S,LI H C,et al. Relationship between cell wall ultrastructure and mechanical properties of Balsa wood[J]. Journal of Beijing Forestry University,2022,44(2):115-122.

[21] 余珊,王军锋,陈悦,等. 轻木木材吸声性能的研究[J]. 林产工业,2018,45(8):33-35.
YU S,WANG J F,CHEN Y,et al. Research on the sound absorption properties of Balsa wood[J]. China Forest Products Industry,2018,45(8):33-35.

(下转第 115 页)

[38] 刘波，张庆费，夏檑. 11 种城市木本植物叶片生理物质对遮荫的响应 [J]. 浙江林业科技，2007，27(6)：15-18.
LIU B，ZHANG Q F，XIA L. Effects of shading on physiological materials of 11 urban ligneous plant leaf[J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology，2007，27(6)：15-18.

[39] 黄永韬，杨好珍，黄永芳，等. 不同遮阴处理对 3 种茶花生理特性的影响[J]. 广东林业科技，2012，28(5)：16-21.
HUANG Y T，YANG H Z，HUANG Y F，et al. Effects of the physiological indices in three varieties of *Camellia* by different shade treatments[J]. Guangdong Forestry Science and Technology，2012，28(5)：16-21.

[40] 潘月，张宪权，叶康，等. 不同八仙花品种对遮阴和强光处理的生理响应与评价[J]. 福建农林大学学报(自然科学版)，2021，50(1)：36-48.
PAN Y，ZHANG X Q，YE K，et al. Physiological responses of ten *Hydrangea macrophylla* cultivars to shading and evaluation of strong light tolerance[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University(Nat Sci Ed)，2021，50(1)：36-48.

[41] 郭品湘，尹婷，粟春青，等. 遮阴对双色木番茄幼苗生理特性的影响[J]. 森林与环境学报，2020，40(1)：76-82.
GUO P X，YIN T，SU C Q，et al. Effects of shade on the physiological characteristics of *Solanum wrightii* seedlings [J]. Journal of Forest and Environment，2020，40(1)：76-82.

(责任编辑：窦春蕊)

(上接第 104 页)

[22] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 2 版. 北京：高等教育出版社，2006.
WANG X K. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment[M]. 2nd ed. Beijing：Higher Education Press，2006.

[23] 刘启军. 四川红杉径向生长对气候变化的响应研究[J]. 绿色科技，2023，25(15)：136-139.
LIU Q J. Response of radial growth of *Larix mastersiana* to climate change[J]. Journal of Green Science and Technology，2023，25(15)：136-139.

[24] 章进峰. 不同林龄杉木檫树混交林内檫树的生长规律[J]. 亚热带农业研究，2023，19(2)：114-119.
ZHANG J F. Growth rhythm of *Sassafras tzumu* in *Cunninghamia lanceolata* and *S. tzumu* mixed forest at different ages[J]. Subtropical Agriculture Research，2023，19(2)：114-119.

[25] 石建周，刘贤德，田青，等. 祁连山中部青海云杉年内径向生长季节变化及其对环境因子的响应[J]. 水土保持学报，2022，36(2)：261-267.
SHI J Z，LIU X D，TIAN Q，et al. Seasonal variation of annual radial growth of *Picea crassifolia* and its response to environmental factors in the central Qilian Mountains[J]. Journal of Soil and Water Conservation，2022，36(2)：261-267.

[26] MARTÍNEZ-VILALTA J，SALA A N，ASENSIO D，et al. Dynamics of non-structural carbohydrates in terrestrial plants：a global synthesis[J]. Ecological Monographs，2016，86(4)：495-516.

[27] 王晨，李耀翔，王子纯，等. 小兴安岭针阔混交天然次生林主要树种 NSC 变异来源分析[J]. 森林工程，2021，37(3)：36-43.
WANG C，LI Y X，WANG Z C，et al. Analysis of NSC variation sources of main tree species in Xiaoxing'an Mountains conifer and broadleaf mixed natural secondary forest[J]. Forest Engineering，2021，37(3)：36-43.

[28] 王凯，雷虹，夏扬，等. 杨树幼苗非结构性碳水化合物对增加降水和氮添加的响应[J]. 应用生态学报，2017，28(2)：399-407.
WANG K，LEI H，XIA Y，et al. Responses of non-structural carbohydrates of poplar seedlings to increased precipitation and nitrogen addition[J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2017，28(2)：399-407.

[29] 王逸然，郑成洋，曾发旭. 内蒙古白音敖包沙地云杉生长季非结构性碳水化合物含量动态[J]. 北京大学学报(自然科学版)，2016，52(5)：967-976.
WANG Y R，ZHENG C Y，ZENG F X. Seasonal dynamic changes of non-structural carbohydrate in tissues of *Picea mongolica* in Baiyinaobao[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis，2016，52(5)：967-976.

[30] 王文娜，李俊楠，王会仁，等. 不同树种叶片非结构性碳水化合物季节动态比较[J]. 东北林业大学学报，2014，42(4)：46-49，108.
WANG W N，LI J N，WANG H R，et al. Seasonal dynamics of leaf nonstructural carbohydrate content in four temperate tree species[J]. Journal of Northeast Forestry University，2014，42(4)：46-49，108.

[31] 王凯，宋琪，张日升，等. 科尔沁沙地防护林主要树种的非结构性碳水化合物分布特征[J]. 林业科学，2020，56(12)：39-48.
WANG K，SONG Q，ZHANG R S，et al. Distribution characteristics of non-structural carbohydrate in main tree species of shelterbelt forests in Horqin sandy land[J]. Scientia Silvae Sinicae，2020，56(12)：39-48.

(责任编辑：窦春蕊)