

◆生物多样性及其保育◆

漓江流域常见植物叶片非结构性碳水化合物动态及其生态适应性^{*}钟艺倩^{1,2}, 王 斌², 吴森锐^{2,3}, 杨美雪^{1,2}, 徐泽帅^{2,3}, 陶旺兰², 李健星², 赵弘明², 李先琨^{2**}

(1. 广西师范大学生命科学院, 广西桂林 541006; 2. 广西壮族自治区中国科学院广西植物研究所, 广西喀斯特植物保育与恢复生态学重点实验室, 广西桂林 541006; 3. 桂林理工大学旅游与风景园林学院, 广西桂林 541006)

摘要:非结构性碳水化合物(Non-Structural Carbohydrates, NSC)能够有效揭示植物对外界环境的适应性机制。为探究漓江流域常见植物在喀斯特与非喀斯特生境中不同降水季节的适应性变化,通过分析木本植物叶片中 NSC 及其主要组分含量的动态变化与差异,为不同生境下的适生植物筛选提供科学依据。在旱季与雨季分别采集 12 种代表性木本植物的叶片,测定其 NSC、可溶性糖和淀粉的含量。建立贝叶斯多元回归模型,定量分析不同降水季节、生境条件、植物生活型及生长型等因素对植物叶片 NSC 及其主要组分含量的影响。结果表明:(1)12 种植物叶片中,NSC 旱季和雨季的平均含量为(114.80±62.84) mg/g,其组成以可溶性糖为主[(84.23±57.04) mg/g],显著高于淀粉[(30.60±23.06) mg/g]。(2)不同降水季节之间,12 种植物叶片的可溶性糖、淀粉含量存在显著的动态转换关系,雨季淀粉含量显著高于旱季,可溶性糖含量显著低于旱季。(3)喀斯特山坡与非喀斯特山坡生境植物叶片的淀粉、可溶性糖含量有显著性差异,而喀斯特洼地、垭口与非喀斯特山坡植物叶片的 NSC 及其主要组分含量无显著差异。(4)不同生活型植物叶片的 NSC 及其主要组分含量差异显著,其中落叶植物叶片的 NSC 及其主要组分含量均显著高于常绿植物;不同生长型间,乔木植物叶片淀粉含量显著高于灌木,而可溶性糖含量显著低于灌木。漓江流域常见植物叶片的 NSC、可溶性糖和淀粉含量与自身生物学特性、生境条件密切相关,同时还受到不同降水季节的影响,叶片 NSC 含量的季节变化是一个较为复杂的动态过程。

关键词:非结构性碳水化合物;淀粉;可溶性糖;不同降水季节;生态适应性

中图分类号:Q945.79 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2024)06-1121-11

DOI:10.13656/j.cnki.gxkx.20241207.006

收稿日期:2024-08-09

修回日期:2024-10-21

* 广西重点研发计划项目(桂科 AB22080057)和国家重点研发计划课题(2019YFC0507503)资助。

【第一作者简介】

钟艺倩(1999—),女,在读硕士研究生,主要从事植物生态学研究。

【**通信作者简介】

李先琨(1967—),男,研究员,主要从事生物多样性保育与喀斯特生态系统研究,E-mail:xiankunli@163.com。

【引用本文】

钟艺倩,王斌,吴森锐,等.漓江流域常见植物叶片非结构性碳水化合物动态及其生态适应性[J].广西科学,2024,31(6):1121-1131.

ZHONG Y Q,WANG B,WU M R,et al.Dynamics and Ecological Adaptability of Non-Structural Carbohydrates in Leaves of Common Plants in the Lijiang River Basin [J].Guangxi Sciences,2024,31(6):1121-1131.

非结构性碳水化合物(Non-Structural Carbohydrates, NSC)是植物光合作用的产物之一,也是参与植物生长和代谢过程的重要物质,其含量大小可以反映植物整体碳收支平衡情况^[1]。NSC主要由可溶性糖(Soluble sugars)和淀粉(Starch)组成,它们在能量供给上承担着不同的角色:可溶性糖是可被植物直接利用的光合产物之一,淀粉则是植物长期储存的物质之一。可溶性糖和淀粉之间可以相互转化,且两者之间的动态转化机制是植物应对环境胁迫的关键^[2]。因而,NSC及其组分在不同器官中的分配规律是植物适应环境变化的重要策略的体现^[3]。

当植物光合速率较高时,碳水化合物供应充足,多余的碳水化合物会以NSC的形式积累在叶片或其他器官中;反之,叶片中NSC含量会相应减少。因此,植物叶片是研究NSC含量的理想器官^[4]。植物叶片NSC含量受温度^[5]、光照强度^[6]、CO₂浓度^[7]等多种环境因子的共同影响,呈现出复杂的动态变化。刘万德等^[8]通过对云南普洱市季风常绿阔叶林20个物种NSC含量差异进行研究,指出物种的生物学特性差异会对其NSC的含量产生影响。时间尺度内的季节变化也会影响植物NSC的含量及其分配。章异平等^[9]通过对秦岭东段高海拔和低海拔处的栓皮栎(*Quercus variabilis*)进行研究,发现不同海拔间叶片的NSC及其组分含量随着季节变化差异显著,但巨尾桉(*Eucalyptus grandis* × *E. urophylla*)叶片NSC及其组分含量在旱季和雨季均无显著性差异^[10]。此外,同一时间段内植物叶片NSC的含量因生长型、生活型的不同也会存在明显差异^[11]。

植物在遭遇水分胁迫时,会启动复杂的生理适应机制,其中包括对叶片NSC合成的调节。这种调节导致的NSC及其组分含量变化因胁迫强度、物种和生境的不同而有所差异,尤其在喀斯特和干旱区域更为显著。研究发现,干旱胁迫下整株连翘(*Forsythia suspensa*)幼苗的可溶性糖含量增加,重度胁迫下淀粉含量降低^[12];而在内蒙古科尔沁沙地,樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongholica*)针叶和枝条中的NSC及可溶性糖含量随干旱加剧而显著降低^[13]。此外,干旱林线区不同树种NSC含量的季节格局受局地气候条件影响显著^[14]。喀斯特地貌由岩石长期被侵蚀沉积形成,其高透水性导致地下水系发达,地表水稀缺。因此,喀斯特区域表现出地质性干旱和季节性干旱的特征,岩溶裂隙存在与否都会抑制桢楠(*Phoebe zhenan*)幼苗各器官的可溶性糖含量,岩溶

裂隙存在时则会抑制叶片的淀粉含量^[15]。

漓江流域是喀斯特地貌的典型代表之一,整体地势特点是东部、北部高而南部低,中间低四周高的谷地地势呈狭长带状分布,海拔62.0—2 141.5 m,流域内的猫儿山是华南第一峰,也是漓江的源头^[16]。漓江流域生物多样性丰富,地带性植被类型为典型常绿阔叶林。漓江中下游喀斯特地貌极为发育,是世界自然遗产——中国南方喀斯特的重要组成部分,主要包括峰丛和峰林两个片区,峰丛片区分布的洼地数量有上千处之多。受喀斯特区干旱地质背景影响,在该区域喀斯特山地分布的植被类型为常绿落叶阔叶混交林,优势树种有青冈(*Quercus glauca*)、樟(*Camphora officinarum*)、枫香树(*Liquidambar formosana*)、欆木(*Loropetalum chinense*)、齿叶黄皮(*Clausena dunniana*)和粗糠柴(*Mallotus philippensis*)等喀斯特生境木本植物^[17,18]。目前,在漓江流域开展的研究,主要集中在植物生态位与种间关联^[18]、土壤碳氮磷储量分布特征^[19]、水陆交错带植物物种多样性及土壤养分变异^[20]等,而关于漓江流域植物NSC含量的研究鲜有报道。漓江流域喀斯特植物如何调控NSC分配,以适应不同生境和不同季节水分供给的生态机制尚不清楚。在石漠化山地植被修复过程中,如何根据不同生境筛选适生性植物进行群落配置,以更好地提升植被生产力,需要深入了解主要植物的生态适应策略。基于此,本研究选取广西漓江流域常见木本植物作为研究对象,对其叶片NSC及其主要组分(可溶性糖、淀粉)含量的差异性和季节动态进行分析,探讨以下科学问题:(1)漓江流域常见木本植物叶片的NSC及其主要组分含量变化受哪些因素影响?(2)漓江流域常见木本植物如何通过NSC及其主要组分的分配,适应不同生境(喀斯特与非喀斯特)和不同季节(旱季与雨季)水分供给?研究结果可为漓江流域不同生境植被修复过程中的适生植物选择及其群落配置提供科学依据,也可为漓江流域植被的固碳能力评估提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

桂林喀斯特世界自然遗产地的面积为700.64 km²,其中核心区253.84 km²,缓冲区446.80 km²,包括最具代表性的漓江峡谷峰丛片区和葡萄峰林片区^[21]。本研究选取的采样点分别位于桂林喀斯特世界自然遗产地漓江峡谷峰丛片区的暗崮村(110°41′

E, 25°03'N)和外围非喀斯特区域的桂林植物园(110°17'E, 25°01'N)。暗崮村喀斯特岩溶地貌特征明显, 为峰丛-洼地类型, 山坡及顶部土壤零星分布于岩石沟槽中, 植被以灌木为主, 下垫面条件简单; 洼地土壤为第四系红黏土, 覆盖厚度不均, 覆盖厚度 1—5 m^[22]; 在峰丛-洼地的中下坡、垭口和洼地等位置分布着常绿落叶阔叶混交林。桂林植物园为起伏较大的低丘土岭, 形成许多小气候环境, 生态环境良好。两个采样点均位于桂林市雁山区, 属亚热带季风气候, 全年光照充足, 四季分明, 年均降水量约 1 800 mm, 降水量年内分配不均, 3—8 月为汛期, 9 月至翌年 2 月为旱季, 年均蒸发量约 1 400 mm, 年均气温为 19 °C, 无霜期长达 300 d^[19, 23]。暗崮村植被类型中, 乔木层包括青冈、乌柏 (*Triadica sebifera*)、枫杨 (*Pterocarya stenoptera*) 等, 灌木层则主要由冻绿 (*Rhamnus utilis*)、水团花 (*Adina pilulifera*)、红背山麻秆 (*Alchornea trewioides*)、红背桂 (*Excoecaria cochinchinensis*) 等构成, 草本层主要有细风轮菜 (*Clinopodium gracile*)、天名精 (*Carpesium abrotanoides*)、酢浆草 (*Oxalis corniculata*) 等。桂林植物园植被丰富, 种类繁多, 常见植物有桂花 (*Osmanthus fragrans*) 和樟等^[24]。

1.2 样品采集

喀斯特山地植物在旱季易受干旱胁迫影响^[25], 少数年份甚至出现原生性植被大面积枯死的现象^[26]。由于季节性干旱和地质性干旱叠加影响, 桂林喀斯特山地植物于 10 月整体进入落叶期, 因此选择 9 月下旬采集旱季样品。为揭示漓江流域木本植

物叶片 NSC 及其主要组分(可溶性糖和淀粉)在旱季和雨季的变化规律, 选定 2023 年的旱季(9 月下旬)与 2024 年的雨季(5 月)进行采样。采样区域分为喀斯特区(暗崮村)与非喀斯特区(桂林植物园), 前者细分为喀斯特洼地、喀斯特山坡、喀斯特垭口 3 种生境, 后者则为土山山坡。在各生境中, 选取代表性植物群落的优势物种作为研究对象, 涵盖乔木、灌木、常绿及落叶等多种植物类型, 共确定 12 种采样木本植物。喀斯特区喀斯特洼地采样植物为水团花、冻绿、枫杨和乌柏, 喀斯特山坡为青冈、粗糠柴和狭基润楠 (*Machilus attenuata*), 喀斯特垭口则为欆木、化香树 (*Platycarya strobilacea*) 和齿叶黄皮。非喀斯特区采样植物为樟、枫香树、乌柏和青冈。乌柏和青冈在两个区域均有分布。

为尽可能降低光照因素对采样植株的影响, 每个物种选定 5 株长势相似且乔木胸径在 15—25 cm、灌木胸径在 2—4 cm 的植株, 在旱季和雨季分别对其叶片进行取样, 每个季节分别采集 70 份植物样品。取样方法如下: 采用高枝剪在植株冠层中上部向阳面获取健康成熟、外形良好的叶片, 每份样品取 50 g 左右。采好的叶片样品即刻放入密封袋中保存, 同时在密封袋上标记好种名、采样点及采样编号, 并将密封袋放入低温保温箱中, 随后带回实验室处理。回到室内对叶片进行简单筛选, 并擦净表面污物。依据文献^[27]、^[28], 将采样植物按照生长型划分为乔木和灌木, 按照生活型划分为常绿和落叶。采样物种信息见表 1。

表 1 采样物种基本信息

Table 1 Basic information of sampling species

编号 No.	物种 Species	科 Family	生长型 Growth form	生活型 Life form	生境类型 Habitat type
sp01	<i>Adina pilulifera</i>	Rubiaceae	Shrub	Evergreen tree	Karst depression
sp02	<i>Rhamnus utilis</i>	Rhamnaceae	Shrub	Deciduous tree	Karst depression
sp03	<i>Pterocarya stenoptera</i>	Juglandaceae	Tree	Deciduous tree	Karst depression
sp04	<i>Triadica sebifera</i>	Juglandaceae	Tree	Deciduous tree	Karst depression
sp05	<i>Quercus glauca</i>	Fagaceae	Tree	Evergreen tree	Karst slope
sp06	<i>Mallotus philippensis</i>	Juglandaceae	Shrub	Evergreen tree	Karst slope
sp07	<i>Machilus attenuata</i>	Lauraceae	Tree	Evergreen tree	Karst slope
sp08	<i>Loropetalum chinense</i>	Hamamelidaceae	Shrub	Evergreen tree	Karst pass
sp09	<i>Platycarya strobilacea</i>	Juglandaceae	Tree	Deciduous tree	Karst pass
sp10	<i>Clausena dunniana</i>	Rutaceae	Shrub	Deciduous tree	Karst pass
sp11	<i>Camphora officinarum</i>	Lauraceae	Tree	Evergreen tree	Non-karst slope
sp12	<i>Liquidambar formosana</i>	Altingiaceae	Tree	Deciduous tree	Non-karst slope
sp13	<i>Triadica sebifera</i>	Juglandaceae	Tree	Deciduous tree	Non-karst slope
sp14	<i>Quercus glauca</i>	Fagaceae	Tree	Evergreen tree	Non-karst slope

1.3 样品处理与成分测定

将叶片样品在 105 °C 条件下杀青 30 min, 然后于 65 °C 烘干 48 h 至恒重。将烘干的样品进行研磨、粉碎, 过 80 目筛后储存在自封袋中用于可溶性糖含量和淀粉含量的测定。NSC 含量为可溶性糖含量和淀粉含量之和。可溶性糖和淀粉的含量测定采用改进的苯酚-硫酸法^[29], 具体实验操作参考文献^[30]。测定方法如下。

蔗糖标准液的制作: 将分析纯蔗糖在 80 °C 烘箱中烘干至恒重, 称取 0.1 g 样品(精确至 0.000 1 g), 加少量水溶解后转入 100 mL 容量瓶中, 并用蒸馏水定容成不同浓度的蔗糖标准液。

可溶性糖的提取: 称取 60 mg 样品, 加入 10 mL 80% 乙醇, 静置萃取 24 h 后以 4 000 r/min 离心 10 min, 将上清液转入适当的容量瓶, 再在残余物中加入 5 mL 80% 乙醇, 离心 5 min, 获取上清液, 将获取的上清液再次转入容量瓶中, 定容至恒定体积, 装入离心管。

淀粉的提取: 首先将上述提取可溶性糖后的残余物于 65 °C 烘干, 加入 10 mL 蒸馏水, 混匀后放置在沸水浴中糊化 15 min, 冷却至 60 °C 以下; 然后加入 1 mL 0.5% 淀粉酶溶液, 于 60 °C 恒温水浴锅保温 1 h, 使淀粉充分分解, 再将其加热至沸腾使酶失活; 最后将其以 2 000 r/min 离心 5 min, 压滤并定容至适量容量瓶, 装入离心管。

可溶性糖和淀粉含量的测定: 取 1 mL 的待测液放入玻璃管, 加入 1 mL 28% 苯酚溶液(溶于 80% 乙醇), 然后立即加入 5 mL 浓硫酸, 摇晃玻璃管 1 min, 静置 15 min, 采用紫外分光光度计(SPECORD 50

PLUS, 德国耶拿分析仪器股份公司)在 490 nm 处比色, 测定吸光度值, 再根据蔗糖的标准曲线分别计算出可溶性糖和淀粉的含量。

1.4 数据分析

采用单因素方差分析法(One-way ANOVA)对 12 种植物叶片 NSC 及其主要组分含量在旱季、雨季的差异进行分析。若方差齐性, 采用最小显著差数法(LSD)进行多重比较; 若方差不齐性, 则采用非参数检验法(Tamhane's T2)进行多重比较。采用多元线性回归模型, 评估不同降水季节(旱季、雨季)、生境(喀斯特洼地、喀斯特山坡、喀斯特垭口、非喀斯特山坡)、生长型(乔木、灌木)、生活型(落叶、常绿)等因素对 NSC 及其主要组分含量的影响。借助 R 4.3.3 软件^[31]中的 brms 包^[32], 以贝叶斯方法精确估算模型中的各项参数^[33]。在模型设置中, 指定响应变量遵循高斯分布(即 family = gaussian()), 自变量最终被转换为包含 1 和 0 的二分类数据。对于每个构建的模型, 基于 3 条独立的马尔可夫链进行参数的后验总结, 每条链均包含 200 000 个迭代样本, 并剔除前 10 000 次迭代作为预热阶段。利用后验样本的轨迹图以及 Gelman-Rubin 收敛统计量(确保 R-hat 值小于 1.01)监控马尔可夫链的收敛情况。统计分析均在 R 4.3.3 软件^[31]中完成。

2 结果与分析

2.1 植物叶片 NSC 及其主要组分含量的季节动态

12 种常见植物叶片在不同降水季节的 NSC、可溶性糖以及淀粉含量见表 2。

表 2 植物叶片在不同降水季节的 NSC 及其主要组分含量(平均值±标准差)

Table 2 Content of NSC and its main components in plant leaves during different precipitation seasons (mean±standard deviation)

编号 No.	物种 Species	Unit: mg/g					
		非结构性碳水化合物 NSC		可溶性糖 Soluble sugars		淀粉 Starch	
		旱季 Dry season	雨季 Rainy season	旱季 Dry season	雨季 Rainy season	旱季 Dry season	雨季 Rainy season
sp01	<i>Adina pilulifera</i>	156.65± 9.37Ac	158.71± 17.13Aa	150.62± 8.26Ab	115.94± 11.76Ba	6.04± 1.42Bd	42.77± 7.60Ac
sp02	<i>Rhamnus utilis</i>	214.37± 7.82Ab	181.12± 14.62Ba	185.88± 10.42Ab	106.36± 11.47Bab	28.50± 4.06Ba	74.76± 18.82Aa
sp03	<i>Pterocarya stenoptera</i>	173.69± 47.29Ac	117.03± 12.29Bb	166.02± 46.49Ab	80.01± 8.08Bcd	7.67± 1.30Bcd	37.02± 6.38Ad
sp04	<i>Triadica sebifera</i>	299.69± 41.44Aa	192.84± 16.18Ba	269.39± 42.44Aa	114.66± 15.54Ba	30.30± 3.90Ba	78.17± 9.53Aa
sp05	<i>Quercus glauca</i>	32.92± 8.23Bh	68.44± 9.37Ad	27.35± 8.23Af	30.12± 4.79Af	5.57± 0.65Bd	38.32± 5.69Ad

续表

Continued table

Unit: mg/g

编号 No.	物种 Species	非结构性碳水化合物 NSC		可溶性糖 Soluble sugars		淀粉 Starch	
		旱季 Dry season	雨季 Rainy season	旱季 Dry season	雨季 Rainy season	旱季 Dry season	雨季 Rainy season
sp06	<i>Mallotus philippensis</i>	38.34± 3.73Bh	65.27± 6.35Ad	32.82± 3.43Aef	34.55± 4.81Af	5.51± 0.91Bd	30.72± 4.04Ad
sp07	<i>Machilus attenuata</i>	26.70± 5.39Bh	70.55± 3.44Acd	19.98± 5.66Bf	34.00± 3.85Af	6.72± 0.65Bcd	36.56± 4.38Ad
sp08	<i>Loropetalum chinense</i>	79.12± 6.35Afg	85.94± 7.12Abcd	68.37± 5.79Acde	33.72± 2.14Bf	10.76± 1.44Bc	52.22± 7.67Abcd
sp09	<i>Platycarya strobilacea</i>	101.59± 4.96Bef	120.32± 14.67Ab	92.41± 5.74Ac	87.90± 12.16Abc	9.18± 0.98Bcd	32.43± 3.78Ad
sp10	<i>Clausena dumiana</i>	55.24± 15.25Bgh	92.43± 8.80Abcd	49.66± 14.84Adef	44.81± 5.71Aef	5.58± 0.52Bd	47.63± 4.51Acd
sp11	<i>Camphora officinarum</i>	77.05± 11.19Bfg	105.28± 20.20Abc	70.04± 10.75Acde	63.38± 12.23Ade	7.01± 0.94Bcd	41.90± 9.46Acd
sp12	<i>Liquidambar formosana</i>	78.00± 7.04Bfg	94.17± 6.50Abcd	71.01± 6.79Acde	59.40± 4.66Bde	6.99± 0.76Bcd	34.77± 4.74Ad
sp13	<i>Triadica sebifera</i>	129.59± 8.10Bde	179.72± 24.84Aa	105.88± 7.28Ac	109.60± 12.50Aab	23.71± 2.31Bb	70.12± 17.27Aab
sp14	<i>Quercus glauca</i>	105.33± 10.81Aef	114.30± 37.39Ab	82.56± 8.96Acd	52.04± 21.22Bef	22.76± 3.48Bb	62.25± 16.27Aab
	Average	112.01± 76.85A	117.58± 45.09A	99.42± 70.56A	69.04± 33.25B	12.59± 9.20B	48.55± 18.18A
	Total average	114.80±62.84A		84.23±57.04B		30.60±23.06C	

Note: different uppercase letters in the same row indicate significant differences in plant leaves NSC and its main component content between different seasons, while different lowercase letters in the same column indicate significant differences in plant leaves NSC and its main component content between different plants ($P < 0.05$).

叶片 NSC 旱季和雨季平均含量为(114.80 ± 62.84) mg/g, 其中旱季平均含量为(112.01 ± 76.85) mg/g, 叶片 NSC 含量最高的是喀斯特洼地的乌桕, 为(299.69 ± 41.44) mg/g, 最低的是喀斯特山坡的狭基润楠, 为(26.70 ± 5.39) mg/g; 雨季平均含量为(117.58 ± 45.09) mg/g, 叶片 NSC 含量最高的是喀斯特洼地的乌桕, 为(192.84 ± 16.18) mg/g, 最低的是喀斯特山坡的粗糠柴, 为(65.27 ± 6.35) mg/g。水团花、欆木、青冈(非喀斯特山坡)叶片的 NSC 含量在不同降水季节间差异不显著($P \geq 0.05$), 其他物种叶片的 NSC 含量在不同降水季节差异显著($P < 0.05$)。

叶片可溶性糖旱季和雨季平均含量为(84.23 ± 57.04) mg/g, 其中旱季平均含量为(99.42 ± 70.56) mg/g, 喀斯特洼地的乌桕叶片可溶性糖含量最高, 为(269.39 ± 42.44) mg/g, 喀斯特山坡的狭基润楠最低, 为(19.98 ± 5.66) mg/g; 雨季平均含量为(69.04 ± 33.25) mg/g, 喀斯特洼地的水团花叶片可

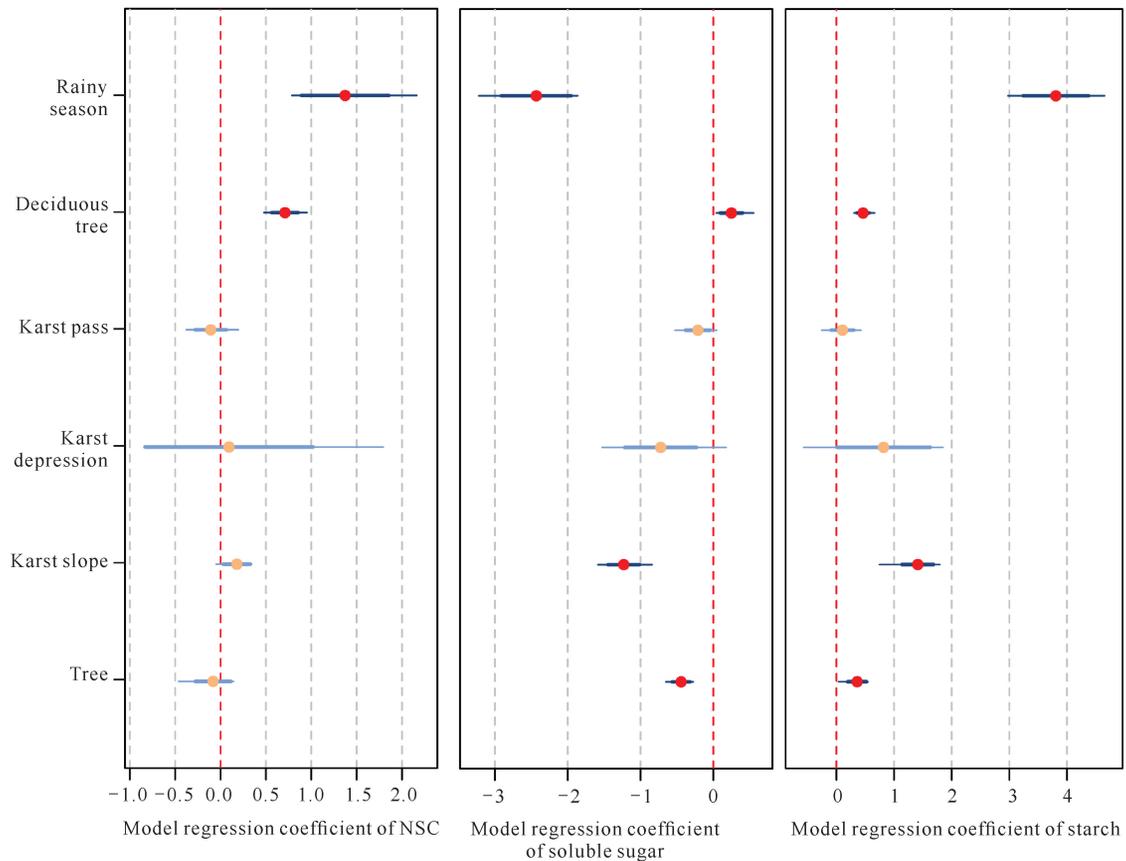
溶性糖含量最高, 为(115.94 ± 11.76) mg/g, 喀斯特山坡的青冈最低, 为(30.12 ± 4.79) mg/g。青冈(喀斯特山坡)、粗糠柴、化香树、齿叶黄皮、樟、乌桕(非喀斯特山坡)叶片的可溶性糖含量在不同降水季节差异不显著($P \geq 0.05$), 其他物种叶片的可溶性糖含量在不同降水季节差异显著($P < 0.05$)。

叶片淀粉旱季和雨季平均含量为(30.60 ± 23.06) mg/g, 其中旱季平均含量为(12.59 ± 9.20) mg/g, 喀斯特洼地的乌桕叶片淀粉含量最高, 为(30.30 ± 3.90) mg/g, 含量最低的是粗糠柴, 为(5.51 ± 0.91) mg/g; 雨季平均含量为(48.55 ± 18.18) mg/g, 喀斯特洼地的乌桕叶片淀粉含量最高, 为(78.17 ± 9.53) mg/g, 喀斯特山坡的粗糠柴含量最低, 为(30.72 ± 4.04) mg/g。12种植物叶片的淀粉含量在不同降水季节变化明显, 均差异显著($P < 0.05$)。

2.2 植物叶片 NSC 及其主要组分含量的影响因素

植物叶片 NSC、可溶性糖以及淀粉含量的影响

因素见图1。降水季节、生活型、生境类型、生长型对叶片淀粉、可溶性糖和 NSC 含量有显著影响, 但影响方式不完全相同。



The red dots in the figure represent the average value of the regression coefficients; the thick blue line represents the standard error of the regression coefficient; the thin blue line represents the confidence interval of 5% to 95% for the regression coefficient, with the dark blue line indicating $P < 0.05$ and the light blue line indicating $P \geq 0.05$.

图1 植物叶片 NSC 及其主要组分含量的影响因素

Fig. 1 Factors affecting the content of NSC and its main components in plant leaves

在不同降水季节方面, 所有树种雨季的 NSC 含量和淀粉含量显著高于旱季, 可溶性糖含量显著低于旱季 ($P < 0.05$), 表明不同降水季节对叶片 NSC 及其主要组分含量均有显著影响。

对于不同的生活型, 落叶植物的 NSC、可溶性糖以及淀粉含量均显著高于常绿植物 ($P < 0.05$), 表明落叶植物对叶片 NSC 及其主要组分含量的影响大于常绿植物。

喀斯特垭口、洼地与非喀斯特山坡植物叶片的 NSC 及其主要组分含量未发现明显差异 ($P \geq 0.05$); 喀斯特山坡植物叶片的淀粉含量显著高于非喀斯特山坡, 可溶性糖含量则显著低于非喀斯特山坡 ($P < 0.05$), 而 NSC 含量在喀斯特山坡和非喀斯特山坡之间并未表现出显著差异 ($P \geq 0.05$), 表明生境类型对植物叶片 NSC 及其主要组分含量有一定影响, 但不

同生境间的影响程度有差别。

乔木叶片的淀粉含量显著高于灌木, 而乔木叶片的可溶性糖含量显著低于灌木, 乔木叶片与灌木叶片之间的 NSC 含量无明显差异 ($P \geq 0.05$), 表明生长型对植物叶片淀粉和可溶性糖含量有影响。

3 讨论

3.1 植物叶片 NSC 及其主要组分含量在不同物种间的变化特征

不同树种的生物学特性差异会影响叶片中 NSC 及其组分含量的高低^[8]。本研究中漓江流域 12 种植物叶片 NSC 及其主要组分含量变化在旱季、雨季的变化特征不完全相同 (表 2), 例如旱季 NSC 含量最高的是喀斯特洼地的乌桕, 含量最低的是喀斯特山坡的狭基润楠; 雨季 NSC 含量最高的也是喀斯特洼地

的乌桕,而含量最低的是喀斯特山坡的粗糠柴。植物的叶片功能属性、叶片物候等存在差异,可能是导致不同物种叶片 NSC 含量呈现复杂动态变化的原因,也反映了不同植物在生长策略和生理代谢上的差异。于丽敏等^[30]通过对比分析温带森林 3 个树种 NSC 含量的种间种内变异,发现 NSC 及其组分含量在树种间差异显著。同样,邹青勤等^[34]通过研究 5 种水土保持树种 NSC 含量在不同器官和物种之间的差异,也发现 NSC 含量在树种间差异显著。本研究喀斯特生境中的水团花、冻绿、枫杨、乌桕、欆木以及非喀斯特生境中的枫香树、青冈,其叶片的可溶性糖、淀粉含量在旱季和雨季均存在显著性差异,并且 NSC 含量也处于较高水平。而 NSC 及其组分的分配是植物适应环境变化策略的体现,可溶性糖是植物忍受干旱和水淹胁迫的重要渗透调节物质,淀粉是 NSC 的主要储存形式^[3,35]。因此从植物对环境抗逆性的角度分析,水团花、冻绿、枫杨、乌桕、青冈、欆木、枫香树等是本研究区域中适应能力相对较强的植物。

本研究还发现无论是旱季还是雨季,叶片可溶性糖含量的平均值均高于淀粉,这一发现与章异平等^[9]、陈轶群等^[6]的研究结果一致,进一步证实了植物叶片更倾向于以可溶性糖的形式储存 NSC。此现象还可能与植物叶片的器官功能性有关,植物叶片通过光合作用产生的大量糖分大部分被运输到植物的其他部位以供植物生长和新陈代谢,少部分可溶性糖则转化为淀粉,临时储存在叶片中,因此叶片中淀粉含量较低^[36]。此外,由于叶片是植物最活跃的器官之一,具有较高的代谢速率,相对较高的可溶性糖含量有助于维持正常的细胞膨压^[37]。

3.2 植物叶片 NSC 及其主要组分含量的季节动态变化

植物叶片 NSC 含量受到季节动态的影响^[9]。通过对漓江流域 12 种常见植物的叶片 NSC 及其主要组分含量在不同降水季节间进行比较(表 2),发现除水团花、欆木、青冈(非喀斯特山坡)外,大部分物种叶片的 NSC 含量差异显著($P < 0.05$);除青冈(喀斯特山坡)、粗糠柴、化香树、齿叶黄皮、樟、乌桕(非喀斯特山坡)外,其他物种叶片的可溶性糖含量差异显著($P < 0.05$);12 种植物叶片的淀粉含量在不同降水季节变化明显,均差异显著($P < 0.05$)。进一步分析发现雨季 12 种植物叶片的 NSC 含量和淀粉含量显著高于旱季,而可溶性糖含量显著低于旱季(图 1),表明从旱季到雨季,NSC 含量和淀粉含量增加,而可

溶性糖含量减少。旱季 12 种植物叶片的 NSC 含量低于雨季(图 1),其原因可能是在干旱胁迫初期,植物停止生长先于停止光合作用,因此 NSC 含量在旱前期会有所升高,但在后期由于植物进行生理代谢过程被消耗,NSC 含量将会下降^[38]。研究表明可溶性糖和淀粉的相互转化可以增强植物的抗逆性,以更好地应对外界环境的变化,其中可溶性糖是可以被植物直接利用的能源物质,并参与细胞渗透压的调节,而淀粉则作为能量储存物质^[1,2]。这可能也是导致漓江流域常见植物叶片可溶性糖和淀粉含量在不同降水季节波动的原因。同时,植物叶片中可溶性糖在维持叶片膨压方面也具有重要作用^[36]。当土壤含水量减少时,喀斯特地区常见植物青冈可以通过积累叶片中可溶性糖等有机渗透调节剂调控质膜的渗透势,保持细胞中酶和细胞膜的稳定,以维持叶片膨压^[39]。因此从旱季到雨季,随着干旱胁迫的下降,叶片中可溶性糖减少,反映了植物不需要再依赖较多的可溶性糖来参与细胞中的渗透调节^[3]。此外,从旱季到雨季,植物叶片中可溶性糖含量减少而淀粉含量增加,还反映了当外界水分供应逐渐充足时,植物可能将可溶性糖转化为淀粉进行储存,用于生长消耗的比例减少,用于储存的比例增加^[40]。

树木的 NSC 含量也会因光照这一光合作用重要因子的固有季节变化而呈现出明显的季节动态变化,如在热带气候区,由于干湿季变化的影响,植物叶片 NSC 含量和淀粉含量波动较为明显,而可溶性糖含量变化较小^[1]。在温带地区,王欣等^[40]通过对油松(*Pinus tabulaeformis*)和赤松(*P. densiflora*)不同器官 NSC 含量的季节动态研究,发现两个树种一年生叶片的淀粉含量从 4 月至 10 月均呈下降趋势,可溶性糖含量则表现为先下降后上升,但 10 月可溶性糖含量仍低于 4 月。本研究的研究区域位于亚热带,淀粉含量和可溶性糖含量在不同降水季节间也存在显著差异,表明漓江流域常见植物通过调整叶片可溶性糖和淀粉的含量以应对不同降水季节的变化。

3.3 生境条件对植物叶片 NSC 含量的影响

NSC 的分配也与树种在各自生境中的长期生存策略密切相关^[30]。本研究中,喀斯特山坡和非喀斯特山坡生境对植物叶片中的淀粉含量和可溶性糖含量均产生显著性影响,表现为喀斯特生境喀斯特山坡植物叶片的淀粉含量显著高于非喀斯特山坡,可溶性糖含量低于非喀斯特山坡,揭示了生境条件在调控植物 NSC 利用与储存策略中的重要作用。喀斯特生境

具有水分难以储存、土层浅薄、水分蒸发率高、植被容易遭受干旱胁迫的特点^[15],并且除钙、镁外,土壤养分总量较少^[25]。在非喀斯特土山生境,因为没有喀斯特地区的二元水文结构,水分条件相对稳定,水分胁迫相对较弱^[25,41],水分对植物叶片光合作用具有重要作用。因此喀斯特山坡植物可能积累较多的淀粉以应对喀斯特干旱的环境,以增强抗逆性^[36]。而桂林植物园为低丘土岭,其非喀斯特生境条件则可能为植物提供进行稳定光合作用的基础,植物从而固定含量相对稳定的 NSC,积累较多的可溶性糖为生长、呼吸等生理过程提供底物和能量,不需要像喀斯特生境植物那样通过积累较多的淀粉来增强抗旱能力^[42]。此外,当植物遭遇干旱胁迫时,会打破植物碳获取与支出平衡,进而造成 NSC 含量的波动。通过 3 种落叶植物叶片 NSC 含量在喀斯特与非喀斯特生境间的对比,发现喀斯特生境植物的 NSC 含量显著高于非喀斯特生境,反映了喀斯特生境植物会通过积累更多的 NSC 防止因碳供应不足而导致的生长限制^[43]。在研究喀斯特季节性雨林不同生境优势树种叶片功能性状时,Geekiyana 等^[44]发现干旱山顶优势树种叶片的可溶性糖含量是低海拔湿润生境优势树种的 4 倍。在秦岭东段,栓皮栎叶片 NSC 及其组分含量在不同的生境条件下也有所不同,表现为低海拔略高于高海拔^[9]。因此,生境条件的差异,尤其是喀斯特和非喀斯特生境之间因土壤可利用水分引起的差异^[45],通过影响植物的光合作用、水分利用能力及土壤养分等方面,间接影响了植物叶片中 NSC 的含量。喀斯特生境植物叶片淀粉含量较多而非喀斯特生境植物叶片可溶性糖较多的现象是植物对不同环境条件适应的结果,这进一步表明植物 NSC 的积累、分配与生境条件密切相关。

3.4 生活型和生长型对植物叶片 NSC 及其主要组分含量的影响

通常认为在生长季节,常绿植物和落叶植物都可以利用叶片进行光合作用生成和储存 NSC;而在非生长季节,落叶植物因其叶片脱落,植物呼吸作用消耗的能源物质大部分来自生长季储存的 NSC,而常绿植物则可以继续利用老叶进行光合作用^[14]。本研究中,落叶植物叶片的 NSC 及其主要组分含量均高于常绿植物且差异显著,说明不同生活型植物对 NSC 的储存和利用策略有所差异。同样,栓皮栎作为落叶植物也需要储存较多 NSC 为来年展叶提供能量^[46]。因此,由于落叶植物在春季展叶前缺乏光合

组织,可能在落叶之前通过叶片生成更多 NSC 运输到枝条和根系(落叶植物重要的非结构性碳库)进行储存^[46],有助于减少养分流失,以用于来年植物萌芽、展叶等过程。此外,落叶植物比常绿植物具有更高的光合作用能力,主要是因为落叶植物在光合作用过程中可能具有更高的气体交换效率,并且还与其气孔导度和叶肉导度增加有关^[47]。因此落叶植物相较于常绿植物在生长季节内能够实现较高的光合速率,合成更多的光合产物,进而积累更多的 NSC,这也是落叶植物和常绿植物叶片 NSC 及其主要组分含量存在差异的原因之一。本研究中,乌桕作为落叶植物的典型代表,其叶片 NSC 及其主要组分含量在旱季和雨季均处于较高水平,体现出落叶植物在 NSC 积累上的优势,且落叶植物叶片的 NSC 含量在旱季和雨季均高于常绿植物,表明漓江流域常见植物叶片 NSC 含量在生活型之间的分布规律基本符合已知的常绿植物和落叶植物叶片 NSC 含量的分布规律。不同生活型植物叶片 NSC 及其主要组分含量的差异,揭示出植物自身的生物学特性对植物 NSC 储存策略的影响显著。

本研究中,乔木叶片的淀粉含量显著高于灌木,而可溶性糖含量显著低于灌木,NSC 含量在灌木和乔木间无明显差异。在漓江流域喀斯特地区植被不同恢复阶段植物叶片的化学计量特征中,灌木植物叶片碳含量显著高于原生乔木和次生乔木,氮、磷含量也处于较高水平^[48],而碳为植物提供了结构基础,氮对叶绿素的合成至关重要,氮、磷含量越高,叶片光合作用越强^[49,50],这表明灌木植物可能具有较高的固碳能力。此外,灌木植物通常具有较低的比叶面积,叶片气孔小而多,可以更灵活地调整气孔导度,在减少水分消耗的同时,保证了二氧化碳的吸收和碳的固定^[51],从而通过光合作用积累较多的可溶性糖。同时,灌木、乔木植株生物量越大,对水分和养分的需求量也越大^[52],而植物根系中 NSC 最重要的生理功能则是为植物吸收土壤养分和水分提供能量^[53],因此,相较于灌木,乔木可能将叶片中更多的可溶性糖运输到根系中,为植物吸收土壤养分、水分等过程提供能量,导致乔木中叶片的可溶性糖含量较少。因此漓江流域灌木层植物叶片可能比乔木层植物叶片具有更高的可溶性糖含量。

4 结论

为揭示季节、生境、生活型和生长型等因素对不

同植物的影响,本研究对漓江流域 12 种常见木本植物叶片的 NSC 及其主要组分(可溶性糖、淀粉)含量进行研究。结果表明:因生物学特性的差异,在旱季和雨季漓江流域 12 种常见植物叶片 NSC 及其主要组分含量的变化不完全相同,其中水团花、冻绿、枫杨、青冈、榿木等植物在旱季和雨季均有较高的 NSC 含量,对环境变化的适应性较好,可被考虑为喀斯特生境中适应能力相对较强的植物。12 种植物通过调整可溶性糖和淀粉含量来适应旱季到雨季的变化,整体表现为可溶性糖含量下降,而淀粉含量增加。落叶植物叶片 NSC 及其主要组分含量在旱季与雨季均高于常绿植物,揭示了落叶植物在应对季节变化时具有更为高效的 NSC 管理策略。在生长型方面,乔木植物叶片的淀粉含量显著高于灌木,而可溶性糖含量显著低于灌木。研究还揭示了植物通过调整叶片中淀粉和可溶性糖含量的分配来适应喀斯特生境和非喀斯特生境的差异,表现为喀斯特山坡植物叶片有更高的淀粉含量,而非喀斯特山坡植物叶片有更高的可溶性糖含量。综上所述,植物叶片 NSC 含量的动态变化是一个复杂的生态过程,是植物响应内外环境变化的一项重要生理指标。

参考文献

- [1] 杜建会,邵佳怡,李升发,等. 树木非结构性碳水化合物含量多时空尺度变化特征及其影响因素研究进展[J]. 应用生态学报,2020,31(4):1378-1388.
- [2] 林夏珍,刘林,董婷婷,等. 非结构性碳水化合物与氮分配对美洲黑杨和青杨耐盐能力的影响[J]. 植物生态学报,2021,45(9):961-971.
- [3] HARTMANN H, TRUMBORE S. Understanding the roles of nonstructural carbohydrates in forest trees: from what we can measure to what we want to know [J]. *New Phytologist*,2016,211(2):386-403.
- [4] 张林,罗天祥. 植物叶寿命及其相关叶性状的生态学研究进展[J]. 植物生态学报,2004,28(6):844-852.
- [5] 余海霞,曲鲁平,汤行昊,等. 闽楠和木荷非结构性碳水化合物对不同模式热浪的差异化响应[J]. 植物生态学报,2023,47(2):249-261.
- [6] 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.
- [7] 杨靖睿,曹培培,杨凯,等. CO₂ 浓度升高和不同氮肥水平下源库处理对梗稻茎鞘非结构性碳水化合物积累和转运的影响[J]. 生态学杂志,2021,40(3):615-626.
- [8] 刘万德,苏建荣,李帅锋,等. 云南普洱季风常绿阔叶林主要树种非结构性碳水化合物变异分析[J]. 林业科学,2017,53(6):1-9.
- [9] 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.
- [10] 余斐,张水云,华雷,等. 旱季补水对桉树幼龄林叶片非结构性碳水化合物的影响[J]. 中南林业科技大学学报,2021,41(5):42-48.
- [11] WÜRTH M K R, PELÁEZ-RIEDL S, WRIGHT S J, et al. Non-structural carbohydrate pools in a tropical forest [J]. *Oecologia*,2005,143(1):11-24.
- [12] 孟敏. 干旱胁迫对连翘幼苗器官中碳水化合物分配的影响[D]. 咸阳:西北农林科技大学,2019.
- [13] 翟培凤,关家欣,何鹏,等. 沿干旱梯度樟子松人工林针叶和枝条非结构性碳水化合物及氮含量的变化[J]. 应用生态学报,2022,33(6):1518-1524.
- [14] 上官淮亮,刘鸿雁,胡国铮,等. 干旱林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.
- [15] 刘俊婷. 模拟喀斯特岩溶裂隙生境对桉楠幼苗生长、光合及非结构性碳水化合物的影响[D]. 重庆:西南大学,2022.
- [16] 樊千涛,马姜明,于名召,等. 漓江流域喀斯特综合干扰评价及其空间特征[J]. 生态学报,2024,44(4):1404-1417.
- [17] 王雅楠,马姜明,梁月明,等. 喀斯特石山老龄林榿木根际和非根际土壤微生物群落及酶活性的旱、雨季季节变化[J]. 广西植物,2024,44(10):1848-1863.
- [18] 刘润红,陈乐,涂洪润,等. 桂林岩溶石山青冈群落灌木层主要物种生态位与种间联结[J]. 生态学报,2020,40(6):2057-2071.
- [19] 钟建军,李林,魏识广,等. 漓江流域喀斯特森林土壤碳氮磷储量分布特征及其影响因素[J]. 水土保持学报,2023,37(6):180-186,193.
- [20] 王静,潘复静,卢倩倩,等. 漓江水陆交错带不同植被类型及其土壤养分变异规律[J]. 广西植物,2024,44(10):1905-1916.
- [21] 唐果林. 基于 RMP 分析的桂林喀斯特世界自然遗产地生态科普旅游开发研究[D]. 桂林:桂林理工大学,2018.
- [22] 普政功,黄奇波,吴华英,等. 漓江峰丛片区高位岩溶洼地洪涝水文过程及有效治理[J]. 中国岩溶,2024,43(4):831-842.
- [23] 盘远方,卓文花,姜勇,等. 桂林岩溶石山青冈优势种群空间分布格局及关联分析[J]. 广西植物,2023,43(3):527-535.
- [24] 孙涛,黄杨,唐启明,等. 桂林植物园鸟类-果实植物互惠网络研究[J]. 广西师范大学学报(自然科学版),2023,41(4):200-207.
- [25] 倪隆康,顾大彤,何文,等. 岩溶区植物生态适应性研究进展[J]. 生态学杂志,2019,38(7):2210-2217.

- [26] 杨宗盛. 广西桂林持续高温干旱 漓江上游水库群联合补水保障通航[EB/OL]. (2022-11-14)[2024-09-30]. <https://www.chinanews.com.cn/gn/shipin/cns-d/2022/11-14/news943089.shtml>.
- [27] 唐赛春, 韦发南. 广西润楠属一新种: 狭基润楠(英文)[J]. 热带亚热带植物学报, 2008, 16(6): 567-570.
- [28] 郑博瀚, 陈鑫瑶, 倪健. 中国维管植物生长型和生活型数据集[J]. 生物多样性, 2024, 32(7): 165-174.
- [29] BUYSE J, MERCKX R. An improved colorimetric method to quantify sugar content of plant tissue [J]. Journal of Experimental Botany, 1993, 44(10): 1627-1629.
- [30] 于丽敏, 王传宽, 王兴昌. 三种温带树种非结构性碳水化合物化合物的分配[J]. 植物生态学报, 2011, 35(12): 1245-1255.
- [31] TEAM R C. R: a language and environment for statistical computing [J]. Computer Science: Mathematics MSOR Connections, 2024, 1: 215755663.
- [32] BÜRKNER P C. Brms: an R package for Bayesian multilevel models using Stan [J]. Journal of Statistical Software, 2017, 80(1): 1-28.
- [33] ZHANG S, XU G R, ZHANG Y X, et al. Canopy height, rather than neighborhood effects, shapes leaf herbivory in a tropical rainforest [J]. Ecology, 2023, 104(5): e4028.
- [34] 邹青勤, 王奕淞, 蒋治岩, 等. 典型黑土区不同水土保持树种的非结构性碳水化合物特征及种间差异[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(10): 1-8.
- [35] 李思源, 张照鑫, 饶良懿. 桑苗非结构性碳水化合物和生长激素对水淹胁迫的响应[J]. 植物生态学报, 2022, 46(3): 311-320.
- [36] HE W Q, LIU H Y, QI Y, et al. Patterns in nonstructural carbohydrate contents at the tree organ level in response to drought duration [J]. Global Change Biology, 2020, 26(6): 3627-3638.
- [37] 胡仪, 吴福忠, 吴秋霞, 等. 三个亚热带森林优势种凋落物非结构性碳水化合物含量的季节动态[J]. 生态学报, 2022, 42(5): 1901-1910.
- [38] ZHANG T, CAO Y, CHEN Y M, et al. Non-structural carbohydrate dynamics in *Robinia pseudoacacia* saplings under three levels of continuous drought stress [J]. Trees, 2015, 29(6): 1837-1849.
- [39] LIU C C, LIU Y G, GUO K, et al. Effect of drought on pigments, osmotic adjustment and antioxidant enzymes in six woody plant species in karst habitats of southwestern China [J]. Environmental and Experimental Botany, 2011, 71(2): 174-183.
- [40] 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]. 生态学杂志, 2024, 43(12): 3615-3623.
- [41] FU P L, ZHU S D, ZHANG J L, et al. The contrasting leaf functional traits between a karst forest and a nearby non-karst forest in south-west China [J]. Functional Plant Biology, 2019, 46(10): 907-915.
- [42] MACNEILL G J, MEHRPOUYAN S, MINOW M A A, et al. Starch as a source, starch as a sink: the bifunctional role of starch in carbon allocation [J]. Journal of Experimental Botany, 2017, 68(16): 4433-4453.
- [43] 孙彰镁, 汤松波, 王淑, 等. 3种落叶栎植物功能性状在喀斯特和非喀斯特生境的异同[J]. 生态学报, 2024, 44(24): 11317-11330.
- [44] GEEKIYANAGE N, GOODALE U M, CAO K, et al. Leaf trait variations associated with habitat affinity of tropical karst tree species [J]. Ecology and Evolution, 2018, 8(1): 286-295.
- [45] TANG S B, LIU J F, LAMBERS H, et al. Increase in leaf organic acids to enhance adaptability of dominant plant species in karst habitats [J]. Ecology and Evolution, 2021, 11(15): 10277-10289.
- [46] 魏龙鑫, 章异平, 李艺杰, 等. 栓皮栎叶片和枝条非结构性碳水化合物调配关系研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, 45(2): 96-102.
- [47] SUN H, ZHANG S B, PEGUERO-PINA J J, et al. Cell-anatomical and physiological mechanisms underlying the faster carbon gain of deciduous trees relative to evergreen trees [J]. Environmental and Experimental Botany, 2023, 209: 105286.
- [48] 罗婷, 黄甫昭, 李健星, 等. 广西漓江流域喀斯特地区植被不同恢复阶段植物优势种叶片和土壤的生态化学计量特征[J]. 植物资源与环境学报, 2024, 33(2): 80-90.
- [49] 郑跃芳, 钟全林, 程栋梁, 等. 亚热带4种林木幼苗的碳氮磷含量及其化学计量比特征[J]. 应用与环境生物学报, 2017, 23(2): 379-383.
- [50] FURZE M E, HUGGETT B A, AUBRECHT D M, et al. Whole-tree nonstructural carbohydrate storage and seasonal dynamics in five temperate species [J]. New Phytologist, 2019, 221(3): 1466-1477.
- [51] 刘长成, 刘玉国, 郭柯. 四种不同生活型植物幼苗对喀斯特生境干旱的生理生态适应性[J]. 植物生态学报, 2011, 35(10): 1070-1082.
- [52] 王进, 朱江, 艾训儒, 等. 湖北星斗山地形变化对不同生活型植物叶功能性状的影响[J]. 植物生态学报, 2019, 43(5): 447-457.
- [53] 王文娜, 高国强, 李俊楠, 等. 去叶对水曲柳苗木根系非结构性碳水化合物分配的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(7): 2315-2322.

Dynamics and Ecological Adaptability of Non-Structural Carbohydrates in Leaves of Common Plants in the Lijiang River Basin

ZHONG Yiqian^{1,2}, WANG Bin², WU Miaorui^{2,3}, YANG Meixue^{1,2}, XU Zeshuai^{2,3},
TAO Wanglan², LI Jianxing², ZHAO Hongming², LI Xiankun^{2* *}

(1. College of Life Sciences, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi, 541006, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Plant Conservation and Restoration Ecology in Karst Terrain, Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuang Autonomous Region and Chinese Academy of Sciences, Guilin, Guangxi, 541006, China; 3. College of Tourism & Landscape Architecture, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi, 541006, China)

Abstract: Non-Structural Carbohydrates (NSC) can effectively reveal the adaptive mechanisms of plants to external environments. With the aim of exploring the adaptive changes of plants in the Lijiang River Basin across karst and non-karst habitats during rainy and dry seasons, the dynamic changes and differences in the content of NSC and its components (soluble sugars and starch) were analyzed. The results are expected to provide a scientific basis for the selection of suitable plants in different habitats. Leaves of 12 representative plant species were collected during both the dry and rainy seasons to measure the content of NSC, soluble sugars, and starch. A Bayesian multivariate regression model was established to quantitatively analyze the effects of rainy and dry seasons, habitat conditions, plant life forms, and plant growth forms on the content of NSC and its components in plant leaves. The results were summarized as follows. (1) Among the 12 plant species, the average content of NSC during rainy and dry seasons was (84.23 ± 57.04) mg/g, in which soluble sugars were the main component, with the average content of (114.80 ± 62.84) mg/g, significantly higher than the starch content of (30.60 ± 23.06) mg/g. (2) Significant dynamic shifts were observed in the content of soluble sugars and starch in the leaves of the 12 plant species between dry and rainy seasons, with starch content being significantly higher and soluble sugar content significantly lower during the rainy season than those during the dry season. (3) There were significant differences in the leaf content of starch and soluble sugars between karst slope and non-karst slope, while no significant differences were observed in the content of NSC and its components in the leaves of plants growing in karst depression, karst pass, and non-karst habitats. (4) The content of NSC and its components varied among plants of different life forms, with deciduous plants showing significantly higher content of NSC and its components than evergreen plants. Additionally, among plants of different growth forms, tree species had significantly higher leaf starch content but significantly lower soluble sugar content than shrubs. In conclusion, the content of NSC, soluble sugars, and starch in the leaves of common plant species in the Lijiang River Basin is closely related to their biological characteristics and habitat conditions, and it is also influenced by dry and rainy seasons. The seasonal variation in leaf NSC content is a complex dynamic process.

Key words: Non-Structural Carbohydrates (NSC); starch; soluble sugars; dry and rainy seasons; ecological adaptability

责任编辑: 陆媛峰