

引用格式: 曹建杰, 辉朝茂, 向自乾, 等. 竹丛覆盖对甜龙竹笋非结构性碳水化合物和化学计量特征的影响[J]. 西北植物学报, 2025, 45(2): 0000-0000. [CAO J J, HUI C M, XIANG Z Q, *et al.* Effects of bamboo clump mulching on non-structural carbohydrates and stoichiometric characteristics of *Dendrocalamus brandisii* shoots[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2025, 45(2): 0000-0000.] DOI:10.7606/j.issn.1000-4025.20240555

竹丛覆盖对甜龙竹笋非结构性碳水化合物和化学计量特征的影响

曹建杰^{1,2}, 辉朝茂^{1,2}, 向自乾^{1,2}, 刘蔚漪^{1,2}

(1 西南林业大学 竹藤科学研究所, 昆明 650224; 2 国家林业和草原局 丛生竹工程技术中心, 昆明 650224)

摘要 【目的】探究竹丛覆盖对甜龙竹笋非结构性碳水化合物(NSC)和碳氮磷化学计量特征的影响, 明确竹笋养分分布对覆盖措施的响应, 提高培育技术和经济效益。【方法】以云南省保山市勐统镇 10 年生甜龙竹为对象, 按随机区组试验, 设计 6 个双层覆盖处理(BM、JM、YK、LN、GC、CK), 分析不同覆盖处理竹笋营养元素含量分布及特征差异。【结果】(1)覆盖造成 NSC、可溶性糖和糖淀粉比一定程度的下降。(2)覆盖显著影响碳氮磷含量及化学计量比($P < 0.05$)。(3)NSC 与碳氮磷化学计量特征存在显著相关关系($P < 0.05$)。(4)综合分析评价中, CK 处理表现最佳, 化学计量特征可塑性高, 适应性强。【结论】覆盖抑制了甜龙竹生长, 通过促进其对养分利用, 调整可溶性糖和淀粉的转化和碳氮磷元素分配格局, 形成多元素间耦合与协同作用的适应策略以增强对极端环境的抵抗力和适应性。

关键词 竹丛覆盖; 增温保湿; 甜龙竹笋; 非结构性碳水化合物; 化学计量特征

中图分类号 S795 **文献标志码** A

Effects of bamboo clump mulching on non-structural carbohydrates and stoichiometric characteristics of *Dendrocalamus brandisii* shoots

CAO Jianjie^{1,2}, HUI Chaomao^{1,2}, XIANG Ziqian^{1,2}, LIU Weiyi^{1,2}

(1 Institute of Bamboo and Rattan Science, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 2 Clumping Bamboo Engineering Technology Center, National Forestry and Grassland Administration, Kunming 650224, China)

Abstract [Objective] This study aims to investigate the effects of bamboo clump mulching on non-structural carbohydrate (NSC) and carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry of *Dendrocalamus brandisii* shoots, in order to clarify the response of shoot nutrient distribution to mulching measures and to improve the cultivation technology and economic benefits. [Methods] A 10-year-old *D. brandisii* plantation in Mengtong Town, Baoshan City, Yunnan Province, was selected for the study. A randomized block design experiment was conducted with six dual-layer mulching treatments (BM, JM, YK, LN, GC, and CK). The nutrient element distribution and characteristic differences in bamboo shoots under different mulching treatments were analyzed. [Results] (1) Mulching reduced in some decrease NSC, soluble sug-

收稿日期: 2024-10-11; 修改稿收到日期: 2024-10-30

基金项目: 国家“十四五”重点研发计划项目(2023YFD220120302, 2021YFD2200501); 云南省基础研究项目(202201AT070053); 云南省农业联合专项项目(202301BD070001-123)

作者简介: 曹建杰(1997—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事竹类培育研究。E-mail: Jianjiecao@163.com

通信作者: 刘蔚漪, 副教授, 硕士生导师, 主要从事竹类植物研究。E-mail: weiyiliu651@126.com

ars, and sugar-to-starch ratio. (2) Mulching had a significant effect on the contents of carbon, nitrogen, and phosphorus, as well as their stoichiometric ratios ($P < 0.05$). (3) There was a significant correlation between NSC and the stoichiometric characteristics of C, N, and P ($P < 0.05$). (4) The CK treatment performed best in the comprehensive analytical evaluation, and the stoichiometric profile was highly plastic and adaptable. [Conclusion] Mulching inhibited the growth of *D. brandisii*. By promoting its nutrient utilization, adjusting the conversion of soluble sugars and starch and the distribution pattern of carbon, nitrogen, and phosphorus, the adaptation strategy of multi-element coupling and synergy was formed to enhance its resistance and adaptability to extreme environments.

Key words bamboo clump mulching; warming and moisturizing retention; *Dendrocalamus brandisii* shoots; non-structural carbohydrates; stoichiometric characteristics

植物通过光合作用产生的非结构性碳水化合物 (non-structural carbohydrate, NSC), 主要由可溶性糖和淀粉组成, 是植物生长繁殖的能量物质^[1]。可溶性糖能参与植物生理活动, 帮助其在不同外界环境下生长, 而淀粉调节碳供需和代谢水平, 研究 NSC 含量变化有助于了解植物碳收支状况及其对环境变化的响应^[2]。短期增温处理在春季显著降低可溶性糖、淀粉、NSC 含量, 增温也改变了氮代谢与 NSC 含量间的关系, 从而维持植株体内渗透调节能力^[3]。Du 等^[4]基于 275 种植物的研究发现, 增温导致淀粉和可溶性碳含量的减低。缺水会打破植物有机碳的供需平衡, 迫使植物生长和 NSC 储存间进行权衡^[5]。“碳饥饿”假说中, 当植物处于逆境时, NSC 含量通常会降低, 当生长所需超过平衡点时会发生“碳饥饿”, 导致植株死亡^[6]。在对硬头黄竹 (*Bambusa rigida*) 的研究中, 母竹各器官快速生长过程中对碳的需求较高, 发现 NSC 是竹类植物快速生长过程中的关键因素^[7]。因此, 研究非结构性碳水化合物变化情况对于预测植物生长具有一定参考价值。

植物体内 C、N、P 元素的组成和分配与环境密切相关, 影响养分吸收水平^[8]。不同植物因环境差异而表现出不同的养分利用策略^[9], 通过分析 C、N、P 的化学计量特征可以判断影响生长的营养元素类型。植物不同器官承担着不同的生理功能, 其营养元素分布也不同, 导致生态化学计量学特征的变化^[10]。温度或水分的变化会显著影响植物养分元素分配的格局^[11]。当前, 生态化学计量学主要研究 C、N、P 间的耦合关系, 化学计量特征探究 C、N、P 在植物器官中的相互关系及植物对环境的响应^[12]。竹类植物在维持体内元素平衡方面具有较强能力, 能灵活调整营养元素的化学计量特征。目前研究主要集中在毛竹 (*Phyllostachys edulis*)、雷竹 (*P. praecox*)、慈竹 (*Neosinocalamus affinis*)、麻竹 (*Dendrocalamus latiflorus*) 等竹种, 关注点多

在土壤性质、经营措施等方面, 对其他竹种的研究相对缺乏^[13]。

甜龙竹 (*D. brandisii*) 是一种大型丛生竹, 竹秆高可达 20~25 m, 茎粗达 15~25 cm, 是笋材两用竹种, 广泛分布在云南滇西至滇南地区^[14]。其笋肉质鲜嫩, 营养成分丰富, 具有“鲜、甜、嫩、脆”四大特点, 适于鲜食或加工成保鲜笋, 是世界品质一流的特优笋用竹种, 具有巨大的生态经济效益^[15]。在农业生态系统中, 覆盖经营能有效改善土壤温湿度和质量, 促进植株生长, 提升效能^[16]。竹林覆盖技术分为单层覆盖和多层覆盖, 具有增温和保湿的效果^[17]。通过覆盖薄膜、稻草和木屑等, 笋用竹林可显著提高土壤温、湿度, “强迫性”短期内增加土壤温度和竹子生理积温, 促进竹笋提前萌发, 提升产能和经济效益^[18]。林覆盖技术已被广泛应用于毛竹、雷竹、黄甜竹 (*Acidosasa edulis*)、白哺鸡竹 (*P. dulcis*) 等部分散生竹种, 研究主要集中在土壤理化性质、笋产量、植物内源激素等方面^[12, 19]。然而, 针对覆盖经营措施对竹笋 NSC 和碳氮磷化学计量学特征的影响, 尤其是营养元素分布格局和变化规律, 尚未有明确的认识。因此, 选择经过长期覆盖处理的甜龙竹笋为对象, 分析其营养元素分布规律及特征差异, 以期为研究竹笋早发高产模式提供理论支持, 进一步完善甜龙竹高效培育技术体系, 推动笋用竹产业的高质量、高效益与生态可持续发展。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

研究地位于云南省保山市昌宁县勐统镇甜龙竹基地内 (99°39'E, 24°31'N), 该地区平均海拔 1 205 m, 属于亚热带季风气候, 土壤多以红壤为主, 年均气温为 19 °C, 降水多集中在 7—10 月, 年均降水约 1 320 mm, 该地区因其优质的甜龙竹资源被称为“中国甜笋之乡”, 也是唯一的国家级良种“云甜 1

号'种源地(良种编号:国 S-SV-DB-016-2021)。该区域分布的人工植被主要有云南松(*Pinus yunnanensis*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、龙竹(*D. giganteus*)等,自然植被主要有西南木荷(*Schima wallichii*)、滇橄榄(*Phyllanthus taxodifolius*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)等。

1.2 试验设计

1.2.1 样地选择

试验样地布设在勐统镇芒东村人工经营的甜龙竹基地,选用人工种植 10 年生的甜龙竹为材料,在立地条件、林分内部密度和龄级一致的人工纯林中进行筛选,通过踏查确定坡度较缓的地块作为试验区,试验前对地块杂草进行清理和疏伐作业,同时翻土扒晒竹箨,砍除老竹,截秆去梢,每丛留竹 5~6 秆,平均胸径 8.1 cm,平均秆高 2.5 m。试验设计以“丛”为单位,共选取 120 丛甜龙竹,竹林土壤基本理化性质:土壤容重 1.28 g/cm³,总孔隙度 51.80%,田间持水量 35.71%,自然含水量 0.17%,pH 4.92,有机质含量 17.80 g/kg,全氮含量 1.26 g/kg,全磷含量 0.43 g/kg,全钾含量 3.40 g/kg,碱解氮含量 103.00 mg/kg,有效磷含量 54.70 mg/kg,速效钾含量 65.80 mg/kg。

1.2.2 样地设置

试验采用完全随机区组设计,共设置 6 个区组,每组包含 20 丛竹子。覆盖方法为双层覆盖:上层覆盖保湿材料白色聚乙烯薄膜,下层为不同增温材料。所用增温材料油枯和滤泥来自当地榨糖厂,厚度根据当地农户在农业生产中的实践确定,锯末和干草厚度则参考王海霞等^[20]、郭子武等^[21]和余远国等^[22]对雷竹的覆盖试验研究,由于甜龙竹为大型丛生竹种,且多种植在山地,受地形条件限制无法实现到全覆盖,因此根据实际情况进行调整,覆盖前对样地充分浇水,并设置不同厚度的增温材料进行,下层覆盖物沿竹丛边缘向外延伸 0.5 m,上层薄膜延伸至 1 m,以确保竹丛短期内实现增温保湿效果。具体设计:BM,覆盖薄膜;JM,薄膜上层+20 cm 厚锯末下层覆盖;YK,薄膜上层+10 cm 厚油枯(核桃、油菜籽榨油剩余物)下层覆盖;LN,薄膜上层+10 cm 厚滤泥(甘蔗榨糖后已发酵剩余物渣)下层覆盖;GC,薄膜上层+20 cm 厚干草[竹林内生长的黄茅(*Heteropogon contortus*)、五节芒(*Miscanthus floridulus*)、里白(*Hicriopteris glauca*)、紫茎泽兰(*Ageratina adenophora*)等晒干杂草]下层覆盖;CK,为对照组,不处理。试验于 2023 年 12 月 25

日—2024 年 1 月 20 日进行,并持续观测数据。

1.3 样品采集

在 2024 年 7 月 6 日发笋旺季,选定生长健康,无病虫害影响的标准竹丛,从中挖取鲜笋,统一按照鲜笋出土高度 5~6 cm 的标准。去除笋壳后,将鲜笋基部、中部和尖部混合作为样品。每处理采集 3 头竹笋样品,共 18 份样品,用于非结构性碳水化合物和碳氮磷化学计量学特征分析。样品用密封袋包装,立即带回实验室进行后续工作。样品洗净后,在 105 °C 烘箱中杀青 30 min 后,在 80 °C 下烘至恒重,用玛瑙研钵研磨粉碎,过 120 目筛,装入锡箔纸袋中标注备用。采用苯酚比色法^[23]测定可溶性糖和淀粉含量;采用重铬酸钾氧化-外加加热法测定 C 含量;采用凯氏定氮法测定全 N 含量;采用钼锑抗比色法^[24]测定全 P 含量;其中 NSC 含量是可溶性糖含量和淀粉含量的总和^[25],糖淀粉比(SS:S)、C:N、C:P、N:P 均用质量比。

1.4 数据分析

用 Excel 2010 对数据进行处理;采用 SPSS 26.0 对数据进行单因素方差分析(one-ANOVA)和模糊隶属函数评价;用 Origin 9.1 进行差异相关性分析、主成分分析和绘图。表型可塑性指数=(某变量平均值的最大值-最小值)/某变量平均值的最大值^[25]。

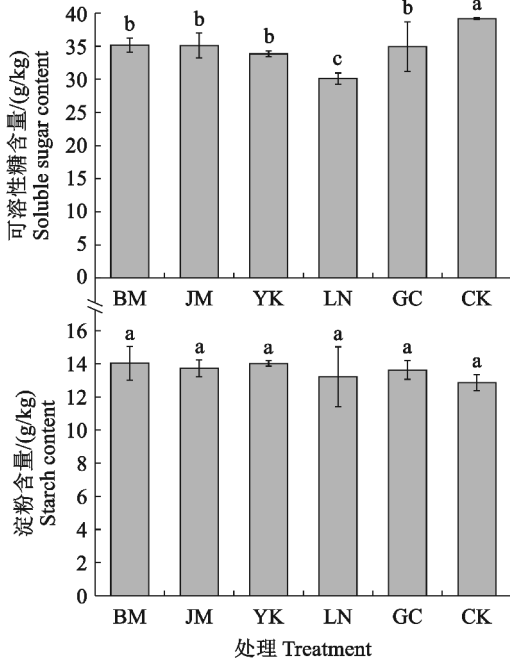
2 结果与分析

2.1 不同覆盖处理对甜龙竹笋非结构性碳水化合物的影响

2.1.1 可溶性糖和淀粉含量变化特征

不同处理下甜龙竹笋的可溶性糖和淀粉含量如图 1 所示。可溶性糖含量变化在 BM 处理下为 33.95~35.97 g/kg;在 JM 处理下为 33.01~36.57 g/kg;在 YK 处理下为 33.44~34.27 g/kg;在 LN 处理下为 29.48~31.06 g/kg;在 GC 处理下为 30.63~37.63 g/kg;在 CK 处理下为 39.04~39.32 g/kg。各覆盖处理间,CK 处理可溶性糖含量最高,LN 处理最低,且与其他 5 个处理间差异显著($P < 0.05$)。BM、JM、YK 和 GC 处理之间则无显著差异($P > 0.05$)。不同处理下甜龙竹笋的可溶性糖含量表现为 CK>BM>JM>GC>YK>LN。与 CK 相比,BM、JM、YK、LN 和 GC 处理分别降低 10.31%、10.39%、13.39%、23.12% 和 10.87%。淀粉含量变化在 BM 处理下为 12.88~14.81 g/kg;在 JM 处理下为 13.14~14.06 g/kg;在 YK 处理下为 13.86~14.18 g/kg;在 LN 处理下为 12.01~15.30

g/kg;在 GC 处理下为 13.07~14.20 g/kg;在 CK 处理下为 12.36~13.30 g/kg,各覆盖处理间差异均不显著($P>0.05$)。不同处理下甜龙竹笋的淀粉含量表现为 $BM>YK>JM>GC>LN>CK$ 。与 CK 相比,BM、JM、YK、LN 和 GC 处理分别增加 8.33%、10.39%、8.20%、2.65%和 5.58%。



BM. 薄膜覆盖竹丛;JM. 薄膜上层+20 cm 锯末下层覆盖竹丛;
YK. 薄膜上层+10 cm 油枯下层覆盖竹丛;LN. 薄膜上层+10 cm
滤泥下层覆盖竹丛;GC. 薄膜上层+20 cm 干草下层覆盖竹丛;
CK. 对照组,不处理。不同小写字母表示不同覆盖处理间
差异显著($P<0.05$)。下同。

图 1 不同覆盖处理下甜龙竹笋可溶性糖和淀粉含量变化

BM, bamboo clumps covered with film. JM, bamboo clumps covered with a top layer of film and a 20 cm layer of sawdust. YK, bamboo clumps covered with a top layer of film and a 10 cm layer of oil cake. LN, bamboo clumps covered with a top layer of film and a 10 cm layer of filter mud. GC, bamboo clumps covered with a top layer of film and a 20 cm layer of hay. CK, control group, no treatment. Different lowercase letters indicate significant differences among different covering treatments ($P<0.05$). The same as below.

Fig. 1 Changes in soluble sugar and starch content in *D. brandisii* shoots under different cover treatments

2.1.2 NSC 含量和糖淀比变化特征

不同覆盖处理下甜龙竹笋的 NSC 含量变化如图 2 所示。各处理 NSC 含量在 BM 处理下为 46.83~50.40 g/kg;在 JM 处理下为 47.00~49.83 g/kg;在 YK 处理下为 47.30~48.31 g/kg;在 LN 处理下为 41.82~46.36 g/kg;在 GC 处理下为 43.70~51.83 g/kg;在 CK 处理下为 51.68~52.47

g/kg。LN 处理的 NSC 含量最低,与其他处理间差异显著($P<0.05$)。不同处理下甜龙竹笋的 NSC 含量表现为 $CK>BM>JM>GC>YK>LN$ 。与 CK 相比,BM、JM、YK、LN 和 GC 处理的 NSC 含量分别降低 5.50%、6.13%、7.99%、16.72%和 6.66%。各处理下甜龙竹笋的糖淀比均大于 1,但分配比例不同,在 BM 处理下为 2.40~2.64,在 JM 处理下为 2.36~2.78;在 YK 处理下为 2.39~2.44;在 LN 处理下为 2.03~2.48;在 GC 处理下为 2.34~2.68;在 CK 处理下为 2.95~3.18。CK 处理的糖淀比与其他处理间差异显著($P<0.05$)。CK 处理比值最高,LN 处理比值最低,整体表现为: $CK>JM=GC>YK>BM>LN$ 。与对照组 CK 相比,BM、JM、YK、LN 和 GC 处理下糖淀比分别降低 17.70%、16.07%、16.07%、20.98%、24.59%。

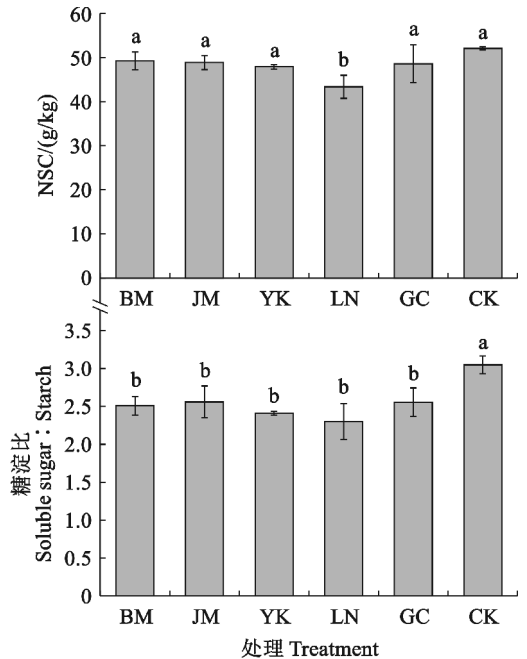


图 2 不同覆盖处理下甜龙竹笋 NSC 和糖淀比变化

Fig. 2 Variation in NSC and sugar-starch ratio of *D. brandisii* shoots under different covering treatments

2.2 不同覆盖处理对甜龙竹笋 C、N、P 化学计量学特征的影响

2.2.1 C、N、P 含量变化特征

不同处理对甜龙竹笋 C、N、P 含量变化如图 3 所示。各处理下 C 含量差异不显著($P>0.05$),C 含量变化在 BM 处理下为 375.75~394.48 g/kg;在 JM 处理下为 368.55~386.97 g/kg;在 YK 处理下为 359.06~408.94 g/kg;在 LN 处理下为 388.05~395.62 g/kg;在 GC 处理下为 371.89~389.99 g/kg;

在 CK 处理下为 371.89~389.99 g/kg。各处理下 N 含量在 CK 对照组与 5 个处理均差异显著 ($P < 0.05$), LN 处理与 BM、JM 和 CK 处理差异显著 ($P < 0.05$)。N 含量变化在 BM 处理下为 19.67~29.93 g/kg; 在 JM 处理下为 20.77~23.37 g/kg; 在 YK 处理下为 19.61~27.05 g/kg; 在 LN 处理下为 28.56~33.46 g/kg; 在 GC 处理下为 22.54~38.58 g/kg; 在 CK 处理下为 53.42~55.86 g/kg。CK 处理下 N 含量最高, 表现为: CK > LN > GC > YK > BM > JM。各处理下 P 含量在 LN 处理与其他处理差异显著 ($P < 0.05$), P 含量变化在 BM 处理下为 4.08~4.84 g/kg; 在 JM 处理下为 3.93~4.68 g/kg; 在 YK 处理为 3.44~5.03 g/kg; 在 LN 处理下为 5.05~6.48 g/kg; 在 GC 处理下为 3.42~5.17 g/kg; 在 CK 处理下为 3.79~4.54 g/kg。其中 LN 处理下 P 含量最高, 整体表现为 LN > BM > CK > GC > JM > YK。

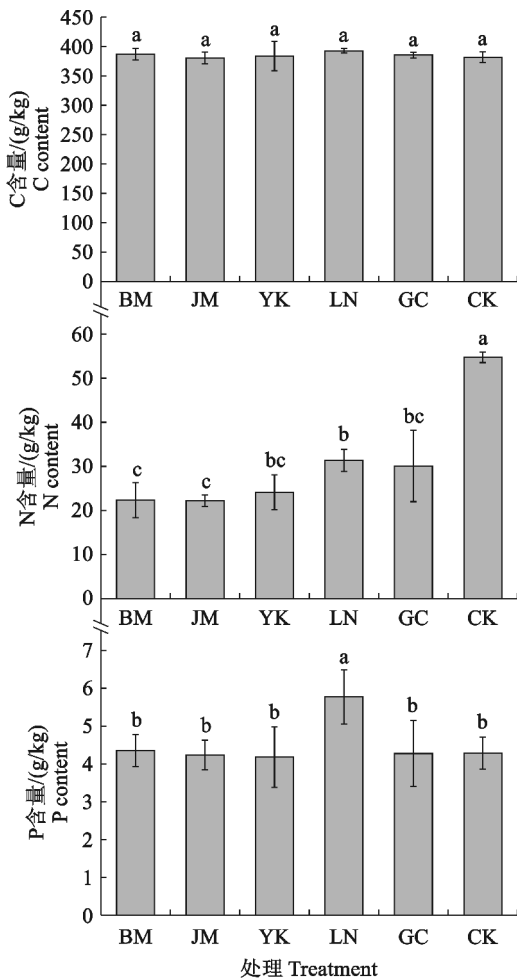


图3 不同覆盖处理下甜龙竹笋 C、N、P 含量变化
Fig. 3 Changes in C, N, and P content in *D. brandisii* shoots under different cover treatments

2.2.2 C、N、P 计量比变化特征

不同处理中 C、N、P 计量比特征如图 4 所示。不同处理下甜龙竹笋的 C : N 在 BM 处理下为 14.65~19.79; 在 JM 处理下为 16.48~17.75; 在 YK 处理下为 13.96~20.85; 在 LN 处理下为 11.83~13.59; 在 GC 处理下为 9.85~17.27; 在 CK 处理下为 6.67~7.16。部分处理间显著差异 ($P < 0.05$)。其中, CK 与其他处理差异均显著 ($P < 0.05$), LN 与 BM 之间存在显著差异 ($P < 0.05$), BM 处理比值最高, CK 处理比值最低。

不同处理下甜龙竹笋的 C : P 在 BM 处理下为 81.53~95.48; 在 JM 处理下为 82.69~98.07; 在 YK 处理下为 71.35~118.88; 在 LN 处理下为 61.09~77.95; 在 GC 处理下为 74.72~111.01; 在 CK 处理下为 81.92~100.85。LN 处理值最低, 但各处理间差异不显著 ($P > 0.05$)。

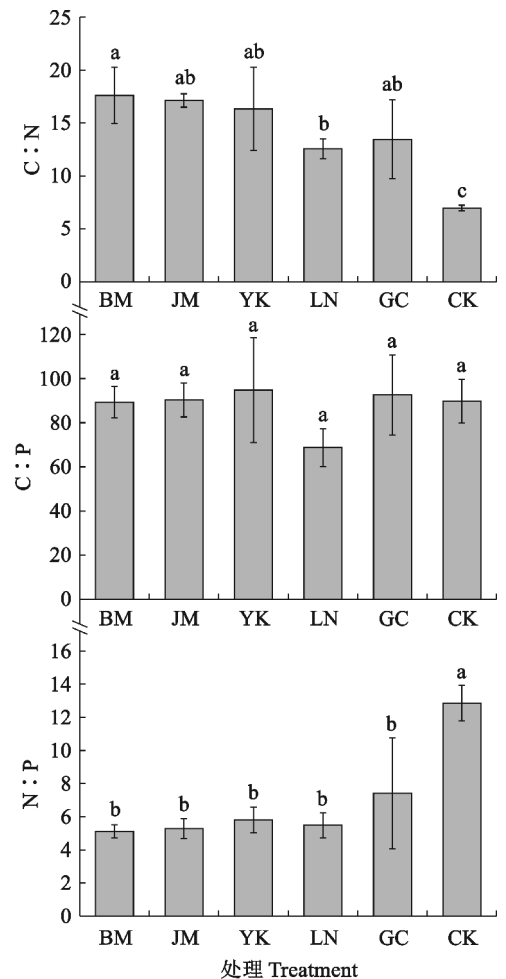


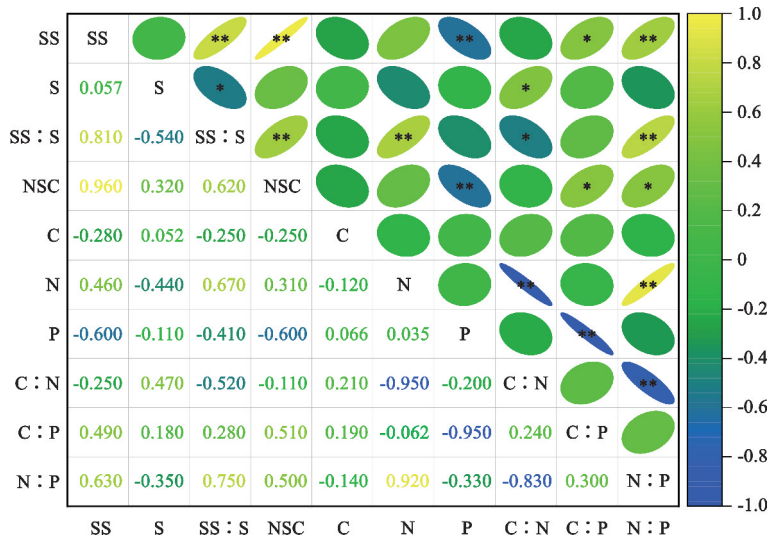
图4 不同覆盖处理下甜龙竹笋 C、N、P 计量比变化
Fig. 4 Changes in C, N, and P stoichiometric ratios in *D. brandisii* shoots under different cover treatments

不同处理下甜龙竹笋的 N : P 在 BM 处理下为 4.82~5.57;在 JM 处理下为 4.82~5.95;在 YK 处理下为 5.11~6.64;在 LN 处理下为 4.94~6.35;在 GC 处理下为 5.33~11.27;在 CK 处理下为 12.19~14.09。CK 处理比值最大,且与其他处理间存在显著差异($P < 0.05$)。

2.3 不同覆盖处理下甜龙竹笋非结构性碳水化合物与化学计量学特征的关系

不同覆盖处理下,甜龙竹笋 NSC 与 C、N、P 化学计量特征之间存在显著相关关系(图 5)。非结构性碳水化合物方面,可溶性糖与糖淀粉比和 NSC 存在极显著正相关($P < 0.01$),淀粉与糖淀粉比呈显著负

相关($P < 0.05$)。糖淀粉比与 NSC 呈极显著正相关($P < 0.01$)。在化学计量学方面,N 与 N : P 呈极显著正相关($P < 0.01$),但 N 与 C : N 和 P 与 C : P 以及 C : N 和 N : P 均呈极显著负相关($P < 0.01$)。非结构性碳水化合物与化学计量学特征的关系中,可溶性糖与 P 呈极显著负相关($P < 0.01$),与 C : P 呈显著正相关($P < 0.05$),与 N : P 呈极显著正相关($P < 0.01$);淀粉与 C : N 呈显著正相关($P < 0.05$);糖淀粉比与 N 和 N : P 均呈极显著正相关($P < 0.01$),与 C : N 呈显著负相关($P < 0.05$)。NSC 与 C : N 和 N : P 均呈显著正相关($P < 0.05$),与 P 呈极显著负相关($P < 0.01$)。C 与所有指标间未见明显相关性。



SS. 可溶性糖;S. 淀粉;SS : S. 糖淀粉比;NSC. 非结构性碳水化合物。* 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$ 。绿色表示正相关,颜色越浅,相关性越显著;蓝色表示负相关,颜色越深,相关性越显著;圆形代表无相关性;椭圆形代表有相关性,椭圆越小,相关性越显著。

图 5 不同覆盖处理下甜龙竹笋 NSC 和 C、N、P 化学计量之间的相关系数

SS, soluble sugar. S, starch. SS : S, sugar-starch ratio. NSC, non-structural carbohydrate. * indicates $P < 0.05$.

** indicates $P < 0.01$. Green color indicates a positive correlation, and the lighter the color, the more significant the correlation.

Blue color indicates a negative correlation, and the darker the color, the more significant the correlation. Circle represents no correlation. Ellipse represents a correlation, and the smaller the ellipse, the more significant the correlation.

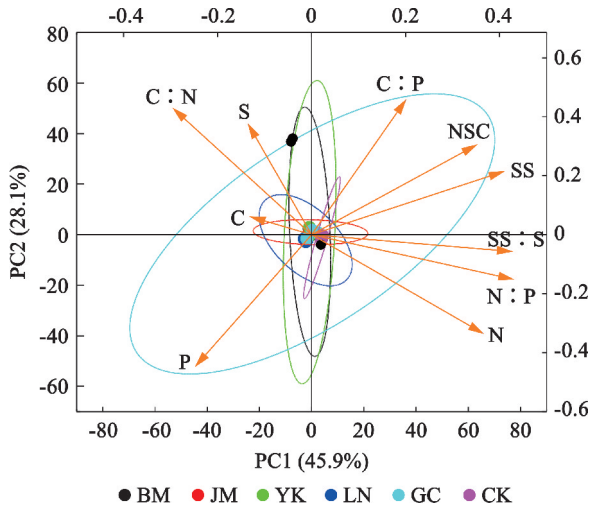
Fig. 5 Correlation coefficients between NSC and the stoichiometry of C, N, and P in the shoots of *D. brandisii* under different cover treatments

2.4 主成分分析

对不同覆盖处理下的甜龙竹笋的非结构性碳水化合物和化学计量学参数进行主成分分析(PCA),结果如图 6 所示,前 2 个主成分 PC1 和 PC2 的累计方差贡献率为 74%,因此选择这 2 个主成分作为有效成分能够较好地反映甜龙竹笋对各覆盖处理的响应。在 PC1 中 N : P 和可溶性糖及糖淀粉比的权重系数较大,PC2 中 P 和 C : N 及 C : P 的权重系数也较大,这表明可溶性糖、糖淀粉比、P、C : N、C : P、N : P 是甜龙竹笋的主要贡献者,反映出在不同增温保湿措施下的适应特征。

2.5 表型可塑性分析

由图 7 可知,所有可塑性指标中,C 含量的可塑性指数最低,而 C : P 可塑性指数最高,表明其具有最大可塑性。化学计量学特征方面,除 C 的可塑性指数低于 0.2 外,其余各指标均在 0.2 以上,显示出较大可塑性。从非结构性碳水化合物特征方面,各指标的可塑性指数均小于 0.15,其中可溶性糖可塑性指数最小,而糖淀粉比的可塑性指数最高。这些结果表明,在覆盖增温保湿措施的影响下,甜龙竹笋的化学计量学特征能较好地反映各处理的覆盖影响,唯有 C 例外。



SS. 可溶性糖; S. 淀粉; SS : S. 糖淀粉比; NSC. 非结构性碳水化合物。

图中点的颜色代表不同覆盖处理; 椭圆为不同覆盖处理下各参数的置信区间; 箭头代表各指标与主成分的关系。

图 6 不同覆盖处理下甜龙竹笋 NSC 和 C、N、P 化学计量的主成分分析

SS, soluble sugar. S, starch. SS : S, sugar-starch ratio.

NSC, non-structural carbohydrate. The color of the points in the figure represents different cover treatments. Ellipses indicate the confidence intervals of each parameter under various treatments. Arrows represent the relationships between the indicators and the principal components.

Fig. 6 Principal component analysis of NSC and the stoichiometry of C, N, and P in the shoots of *D. brandisii* under different cover treatments

表 1 甜龙竹笋 NSC 和 C、N、P 化学计量学特征养分含量隶属度分析

Table 1 Nutrient content affiliation analysis of NSC and the stoichiometric characteristics of C, N, and P in the shoots of *D. brandisii*

处理 Treatment	BM	JM	YK	LN	GC	CK
可溶性糖含量 Soluble sugar content	0.554	0.552	0.412	0.000	0.530	1.000
淀粉含量 Starch content	1.000	0.735	0.983	0.299	0.650	0.000
糖淀粉比 SS : S	0.280	0.347	0.147	0.000	0.347	1.000
NSC	0.671	0.633	0.522	0.000	0.599	1.000
C 含量 C content	0.515	0.000	0.280	1.000	0.414	0.097
N 含量 N content	0.004	0.000	0.058	0.281	0.242	1.000
P 含量 P content	0.107	0.031	0.000	1.000	0.057	0.063
C : N	1.000	0.956	0.880	0.526	0.611	0.000
C : P	0.789	0.829	1.000	0.000	0.917	0.808
N : P	0.000	0.022	0.092	0.049	0.297	1.000
均值 Mean	0.490	0.410	0.440	0.320	0.470	0.600
排序 Sort	2	5	4	6	3	1

3 讨论

3.1 不同覆盖处理对甜龙竹笋非结构性碳水化合物的影响

作物覆盖是一种可持续的农业管理模式,通过适

2.6 模糊隶属函数评价分析

根据甜龙竹笋 NSC 和 C、N、P 化学计量学特征各指标测定结果,经模糊隶属函数分析得出结果如表 1 所示。

6 个覆盖处理下甜龙竹笋 NSC 和 C、N、P 化学计量学特征各指标的平均隶属函数值大小表现为 CK>BM>GC>YK>JM>LN。结果最好的是 CK 处理,各覆盖处理均值与 CK 相比差距较大,表现不佳。说明覆盖措施抑制了甜龙竹的整体生长。

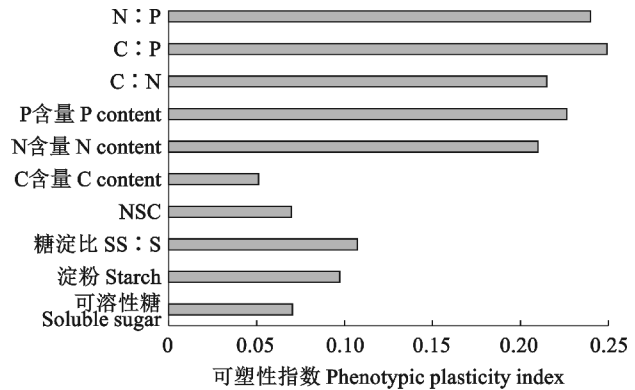


图 7 不同覆盖处理下甜龙竹笋 NSC 和 C、N、P 化学计量的表型可塑性指数

Fig. 7 Phenotypic plasticity index of NSC and the stoichiometry of C, N, and P in the shoots of *D. brandisii* under different mulching treatments

当的覆盖有机物质来提高水分摄入和土壤温度^[26]。不同有机物质和厚度的覆盖影响竹林的土壤温湿度,从而对植株产生胁迫。碳水化合物代谢是植物最基本的代谢过程,植物在逆境下,生长受到抑制,碳水化物的需求量小于供给量,进而导致非结构性

碳水化合物含量累积^[27]。在外界压力下,植物通常会增加对储存碳的利用,储存碳主要由可溶性糖和淀粉组成,这些物质的储量变化反映了植物的生化反应和适应能力^[28]。本研究分析了不同覆盖处理下甜龙竹笋的可溶性糖和淀粉含量,发现经过半年的覆盖处理,对照组的可溶性糖含量最高,其余处理则不同程度降低,表明甜龙竹笋在覆盖影响下,通过消耗可溶性糖来应对环境变化。这与赵楠等^[29]和王昕等^[30]研究发现干旱胁迫导致植物各器官可溶性糖含量均显著低于对照组的结果一致。这可能受覆盖增温保湿影响,同化的可溶性糖减少,加之呼吸消耗,造成植物体内可溶性糖含量下降。淀粉含量在对照组最低,其余处理虽有所增加但无显著变化,说明植物在外界压力下,通常将淀粉水解为可溶性糖以维持生理特性,作为对环境变化适应策略的响应^[31],同时淀粉在降解时可以产生能量、代谢物质和糖类等,以此增强植物受胁迫时的恢复能力^[32]。甜龙竹笋的 NSC 含量与可溶性糖含量呈正相关,表现出 CK>BM>JM>GC>YK>LN 的特征,这一结果与 Hartmann 等^[33]和韦兴兰等^[31]的研究发现相反,在适宜的土壤水分条件下,植物 NSC 含量普遍低于土壤水分胁迫下的含量。这可能是由于覆盖影响下,甜龙竹通过消耗积累的 NSC 应对环境变化。各处理的糖淀比均低于对照组,长期覆盖抑制光合作用,导致光合产物降低。在增温增湿的环境中,植物消耗大量碳水化合物来维持代谢活动,导致 NSC 储备显著降低,覆盖处理下可溶性糖被迫转化为淀粉,从而出现“碳源”和“碳汇”关系的不平衡^[34]。

3.2 不同覆盖处理对甜龙竹笋 C、N、P 化学计量学特征的影响

植物元素含量与自身生长节律密切相关,C 是结构性物质,而 N 和 P 则是功能性物质。植物的结构性物质受环境和生长发育阶段的影响相对较小,而功能性和贮藏性物质的含量变化较大^[35]。通过对不同覆盖物和厚度的甜龙竹笋分析发现,各处理 C、N、P 含量及化学计量关系显著不同。C 分配均匀且占比较高,显示其在植物生长中的重要性^[36]。N、P 含量在各处理间的平均值均高于全球植物(17.7 g/kg 和 1.58 g/kg)^[37],这可能与不同区域元素可利用性及研究区小生境类型多样化有关^[38]。CK 处理的 N 含量远高于其他处理,表明覆盖影响了甜龙竹笋对 N 利用效率,植物在吸收营养物质后,会根据自身需求选择性吸收,从而引起养分含量的差异^[39]。

生态化学计量学认为,生物元素的内平衡需求

与环境供应间的适配与错配是生命发展的根本动力,同时也是环境变化的重要原因。环境中的元素会影响生物的内平衡和生长速率,而生物也通过吸收和释放元素改变环境,影响自身^[40]。植物体 C : N 和 C : P 能反映出植物吸收和利用 N 和 P 养分和同化 C 的能力^[34]。研究发现,CK 处理下 C : N 最低,表明覆盖增强了甜龙竹对养分的利用,相比之下,各覆盖处理表现出更高的竞争优势。C : P 和 N : P 反映植物内部调节机制与外界环境进行权衡,生长速率高时,这些比值通常较低^[41],表明甜龙竹在覆盖处理下生长适应性下降。生长速率假说中,高生长速率对应着高 C : N 和 C : P 及较低的 N : P^[42]。研究结果支持这一假说,CK 处理下甜龙竹表现低生长速率,出现最小 C : N 和最高 N : P。根据 Güsewell 等的研究,植物叶片中 N : P 可用来判定限制性元素^[43]。对各覆盖处理 N : P 分析发现均受 N 限制,尽管前人主要基于叶片 N : P 大小作为限制性元素的判定指标,但很少有学者将植物其他器官或各器官养分的平均值作为判定指标。虽然叶的养分含量最能体现植物营养情况,但只用植物叶片的养分作为判定指标可能存在一定局限性。因此,在今后工作中有必要开展对植物其他器官的限制性元素的判断研究,以便能够更全面理解限制性元素的影响。

3.3 甜龙竹笋适应覆盖增温保湿的主要策略

植物的生长发育、土壤条件及降水等因素会影响 NSC 及 C、N、P 化学计量特征的整体分布规律,植物各器官通过对多种养分元素吸收,响应外界环境变化,形成平衡机制以平衡内部营养^[44]。本研究表明,甜龙竹笋的 NSC 与 C、N、P 化学计量之间存在着关联性。NSC 与 P、C : N 和 N : P 之间存在显著相关性,说明 N 和 P 是 NSC 变化的关键因素,这与刘元玺等^[45]和郭子武等^[46]的研究结果一致。可溶性糖与 P、C : P 和 N : P 显著相关,而淀粉与 C : N 显著相关;糖淀比与 N、C : N 和 N : P 显著相关,表明多元素之间的耦合与协同作用是甜龙竹笋在覆盖下适应环境的策略^[13]。NSC 含量随 N、P 含量增加而增加,这表明甜龙竹笋中 N 和 P 含量变化对 NSC 含量的波动具有重要影响,能在一定程度上影响可溶性糖和淀粉转化,进一步证实了非结构性碳水化合物与化学计量学特征的相关性。植物在发育过程中因环境变化会不断适应与进化,形成多种适应策略,并依赖自身的表型可塑性调整个体对环境中资源的获取与消耗,以维系正常生命活动^[25]。

主成分分析和表型可塑性分析中发现,C 和可溶性糖在不同覆盖处理下的可塑性小,而 N、P、C : N、C : P、N : P 可塑性塑相对较高,主成分上载荷也较大,表明这些元素在生态系统中能更好适应环境变化,具有更大的适应潜力^[47],说明植物对环境的响应源于自身的表型可塑性的调整能力,当受到环境影响时,通过调节自身对资源获取和消耗来维持正常生命活动^[20]。

4 结 论

(1)各覆盖处理下的可溶性糖含量显著低于 CK 处理($P < 0.05$),而淀粉含量相较于 CK 处理均有增加进而导致各处理 NSC 含量下降。说明在增温增湿的环境下,甜龙竹消耗了大量的 NSC 来应对环境变化,导致竹笋中的可溶性糖被迫转化为淀粉,以维持自身生命活动。

(2)各覆盖处理显著影响甜龙竹笋的 C、N、P 含量及化学计量比($P < 0.05$)。在对照组 CK 中,N 含量最高,N : P 最高,C : N 则最低,并且与各覆盖处理之间差异显著($P < 0.05$)。这表明覆盖处理增

强了甜龙竹对养分的利用效率,促进其生长速率,并表现出较高的竞争优势。

(3)各覆盖处理下,甜龙竹笋的 NSC 与 C、N、P 化学计量特征之间存在显著相关性($P < 0.05$)。其中,NSC 与 P、C : N 和 N : P 之间表现出显著相关性,并且 NSC 含量随 N、P 含量增加而增加,表明 N 和 P 是影响 NSC 变化的关键因素,能在一定程度上影响可溶性糖和淀粉转化。此外,可溶性糖与 P、C : P 和 N : P 显著相关,淀粉与 C : N 显著相关,而糖淀比与 N、C : N 和 N : P 也显著相关,这些结果表明,多元素之间的耦合与协同作用是甜龙竹笋在覆盖下适应环境的一种策略。

(4)在隶属函数综合评价下,对照组 CK 甜龙竹生长最佳,说明覆盖抑制了甜龙竹生长。主成分分析和表型可塑性分析中,C : N、C : P、N : P、糖淀比可塑性指数高,适应性强。这一发现强调了甜龙竹在环境变化下的调节能力,在逆境中能依靠自身的生理特性和代谢调控来增强对环境压力的适应能力。未来可进一步探讨不同覆盖条件下甜龙竹的生理机制,以指导其栽培管理和保护策略。

参考文献:

- [1] 蔡慧颖,李兰慧,林阳,等. 白桦叶片和细根非结构性碳水化合物对火后时间的响应[J]. 植物生态学报, 2024, 48(6): 780-793. CAI H Y, LI L H, LIN Y, *et al.* Responses of non-structural carbohydrates in *Betula platyphylla* leaves and fine roots to time since fire[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2024, 48(6): 780-793.
- [2] 王丽娜,吴俊文,董琼,等. 抚育间伐对云南松非结构性碳和化学计量特征的影响[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(8): 70-82. WANG L N, WU J W, DONG Q, *et al.* Effects of tending and thinning on non-structural carbon and stoichiometric characteristics of *Pinus yunnanensis*[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2021, 43(8): 70-82.
- [3] 吴晨,熊德成,张丽,等. 增温对杉木幼树不同季节叶片非结构性碳水化合物及碳氮同位素的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2022, 28(6): 1564-1570. WU C, XIONG D C, ZHANG L, *et al.* Effects of warming on leaf non-structural carbohydrates and carbon and nitrogen isotopes of *Cunninghamia lanceolata* saplings during different seasons[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2022, 28(6): 1564-1570.
- [4] DU Y, LU R L, XIA J Y. Impacts of global environmental change drivers on non-structural carbohydrates in terrestrial plants[J]. *Functional Ecology*, 2020, 34(8): 1525-1536.

- [5] HUANG J B, HAMMERBACHER A, WEINHOLD A, *et al.* Eyes on the future-evidence for trade-offs between growth, storage and defense in Norway spruce[J]. *New Phytologist*, 2019, 222(1): 144-158.
- [6] MCDOWELL N, POCKMAN W T, ALLEN C D, *et al.* Mechanisms of plant survival and mortality during drought: Why do some plants survive while others succumb to drought? [J]. *New Phytologist*, 2008, 178(4): 719-739.
- [7] 石会宇,蔡春菊,范少辉,等. 采伐方式对硬头黄竹非结构性碳水化合物分配特征的影响[J]. 森林与环境学报, 2024, 44(5): 551-560. SHI H Y, CAI C J, FAN S H, *et al.* Effects of harvesting methods on the distribution characteristics of non-structural carbohydrates in *Bambusa rigida* [J]. *Journal of Forest and Environment*, 2024, 44(5): 551-560.
- [8] 郭樑,王文俊,李莲芳,等. 云南松苗木生长对水分的响应[J]. 南方农业学报, 2015, 46(7): 1259-1264. GUO L, WANG W J, LI L F, *et al.* Response of *Pinus yunnanensis* seedling growth to moisture[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2015, 46(7): 1259-1264.
- [9] 郭浩,庄伟伟,李进. 古尔班通古特沙漠 4 种草本植物不同生长期 C、N、P 化学计量比的动态变化分析[J]. 植物科学学报, 2019, 37(3): 356-366. GUO H, ZHUANG W W, LI J. Dynamic analysis of stoichiometric ratios of C, N, and P during different growth periods in

- four herbaceous plants from Gurbantünggüt Desert[J]. *Plant Science Journal*, 2019, 37(3): 356-366.
- [10] YUAN Z Y, CHEN H Y H, REICH P B. Global-scale latitudinal patterns of plant fine-root nitrogen and phosphorus[J]. *Nature Communications*, 2011, 2: 344.
- [11] 刘焱, 韦廷舟, 龙治坚, 等. 温度和水分对梁山慈竹生态化学计量学特征的影响[J]. *森林与环境学报*, 2018, 38(2): 209-215. LIU Y, WEI T Z, LONG Z J, *et al.* Effects of temperature and different moisture on ecological stoichiometry of *Dendrocalamus farinosus*[J]. *Journal of Forest and Environment*, 2018, 38(2): 209-215.
- [12] 刘思泽, 张小国, 陈露蔓, 等. 覆盖对雷竹细根碳氮磷化学计量特征的影响[J]. *西北植物学报*, 2019, 39(12): 2253-2262. LIU S Z, ZHANG X G, CHEN L M, *et al.* Effect of mulching management on C, N, P stoichiometry characteristics of fine roots of *Phyllostachys praecox*[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2019, 39(12): 2253-2262.
- [13] 郭雯, 漆良华, 雷刚, 等. 毛竹及其变种养分分配格局与化学计量特征[J]. *东北林业大学学报*, 2021, 49(4): 39-44. GUO W, QI L H, LEI G, *et al.* Nutrient distribution patterns and stoichiometry characteristics in *Phyllostachys edulis* and its varieties[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2021, 49(4): 39-44.
- [14] 辉朝茂, 刘蔚漪, 张国学, 等. 甜龙竹优良种质资源发掘和选育研究[J]. *竹子学报*, 2019, 38(4): 26-30. HUI C M, LIU W Y, ZHANG G X, *et al.* Exploitation and breeding of excellent germplasm resources of *Dendrocalamus brandisii*[J]. *Journal of Bamboo Research*, 2019, 38(4): 26-30.
- [15] 辉朝茂, 何霞红, 刘蔚漪, 等. 推进甜龙竹资源产业化开发助推乡村振兴[J]. *世界竹藤通讯*, 2022, 20(1): 66-69. HUI C M, HE X H, LIU W Y, *et al.* Promoting the development of *Dendrocalamus brandisii* industry for rural vitalization[J]. *World Bamboo and Rattan*, 2022, 20(1): 66-69.
- [16] SIEDT M, SCHÄFFER A, SMITH K E C, *et al.* Comparing straw, compost, and biochar regarding their suitability as agricultural soil amendments to affect soil structure, nutrient leaching, microbial communities, and the fate of pesticides[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 751: 141607.
- [17] 翟婉璐. 不同年限覆盖雷竹林土壤性质变化过程及其对生物空间布局的影响[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2017.
- [18] 沈学桂, 申展, 杨邦国, 等. 覆盖雷竹林土壤高温胁迫对竹笋萌发和笋体大小的影响[J]. *江西农业大学学报*, 2020, 42(5): 1013-1021. SHEN X G, SHEN Z, YANG B G, *et al.* Effects of high soil temperature stress on bamboo shoot germination and shoot size in covered *Phyllostachys violascens* cv. *praecox* forest[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2020, 42(5): 1013-1021.
- [19] 刘蔚漪, 辉朝茂, 邹学明, 等. 土壤含水量及温度对甜龙竹提前发笋的影响及增产效应[J]. *竹子学报*, 2019, 38(4): 39-48. LIU W Y, HUI C M, ZOU X M, *et al.* Effects of soil temperature and water content on the early germination and yield improvement of *Dendrocalamus brandisii* bamboo shoots[J]. *Journal of Bamboo Research*, 2019, 38(4): 39-48.
- [20] 王海霞, 曾庆南, 程平. 不同覆盖材料及厚度对雷竹笋生产的影响研究[J]. *南方林业科学*, 2020, 48(4): 34-39. WANG H X, ZENG Q N, CHENG P. Effect of different covering materials and thickness on the yield of *Phyllostachys violascens*[J]. *South China Forestry Science*, 2020, 48(4): 34-39.
- [21] 郭子武, 王为宇, 杨清平, 等. 林地覆盖对雷竹林土壤碳氮磷化学计量特征的影响[J]. *广西植物*, 2013, 33(5): 627-632. GUO Z W, WANG W Y, YANG Q P, *et al.* Effects of mulching management on stoichiometry of soil C, N and P in *Phyllostachys praecox* plantations[J]. *Guihaia*, 2013, 33(5): 627-632.
- [22] 余远国, 江雄波, 肖创伟, 等. 雷竹覆盖栽培技术[J]. *经济林研究*, 2013, 31(4): 198-202. SHE Y G, JIANG X B, XIAO C W, *et al.* Mulching cultivation techniques in *Phyllostachys praecox*[J]. *Nonwood Forest Research*, 2013, 31(4): 198-202.
- [23] 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.
- [24] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [25] 刘元玺, 王丽娜, 吴俊文, 等. 云南松幼苗生物量和非结构性碳水化合物特征的干旱响应[J]. *林业科学*, 2024, 60(6): 71-85. LIU Y X, WANG L N, WU J W, *et al.* Non-structural carbohydrate and biomass characteristics of *Pinus yunnanensis* seedlings under continuous drought stress[J]. *Scientia Silviculturae Sinicae*, 2024, 60(6): 71-85.
- [26] 李文慧, 陈浩楠, 南雄雄, 等. 宁夏旱区枸杞/覆盖作物种植体系对土壤活性有机碳库的影响[J]. *生态学杂志*, 2024, 43(5): 1324-1332. LI W H, CHEN H N, NAN X X, *et al.* Effects of cropping system of *Lycium barbarum* L. and cover crops on soil labile organic carbon pool in an arid region of Ningxia[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2024, 43(5): 1324-1332.
- [27] 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. LIN X Z, LIU L, DONG T T, *et al.* Effects of non-structural carbohydrate and nitrogen allocation on the ability of *Populus deltoides* and *P. cathayana* to resist soil salinity stress[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2021, 45(9): 961-971.
- [28] 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.
- [29] 赵楠, 廖迎春, 黄国敏, 等. 致死性干旱对8种树种幼苗非结构性碳水化合物的影响[J]. *热带生物学报*, 2021, 12(3): 289-295. ZHAO N, LIAO Y C, HUANG G M, *et al.* The effects of

- lethal drought on non-structural carbohydrates in seedlings of 8 tree species[J]. *Journal of Tropical Biology*, 2021, 12(3): 289-295.
- [30] 王昕, 孙永林, 刘西平. 土壤含水量对刺槐光合能力和碳水化合物分配的影响[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(1): 20-25.
WANG X, SUN Y L, LIU X P. Effects of soil water contents on leaf photosynthesis and carbohydrate partitioning in *Robinia pseudoacacia* [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2015, 30(1): 20-25.
- [31] 韦兴兰, 李树萍, 王元友, 等. 土壤含水量对树番茄苗木生长及非结构性碳水化合物的影响[J]. 经济林研究, 2024, 42(1): 178-188.
WEI X L, LI S P, WANG Y Y, *et al.* Effect of different soil moisture content on growth and non-structural carbohydrates of *Cypomandra betacea* seedlings[J]. *Nonwood Forest Research*, 2024, 42(1): 178-188.
- [32] THALMANN M, SANTELIA D. Starch as a determinant of plant fitness under abiotic stress [J]. *New Phytologist*, 2017, 214(3): 943-951.
- [33] HARTMANN H, ZIEGLER W, KOLLE O, *et al.* Thirst beats hunger-declining hydration during drought prevents carbon starvation in Norway spruce saplings[J]. *New Phytologist*, 2013, 200(2): 340-349.
- [34] 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 suspense* seedlings[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(11): 4698-4707.
- [35] 安钰, 安慧, 李生兵. 放牧对荒漠草原土壤和优势植物生态化学计量特征的影响[J]. 草业学报, 2018, 27(12): 94-102.
AN Y, AN H, LI S B. Effects of grazing on ecological stoichiometry of soil and dominant plants in desert grassland[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(12): 94-102.
- [36] 徐露燕, 田大伦, 王光军, 等. 湘潭锰矿栎树叶片和土壤 N、P 化学计量特征[J]. 生态学报, 2014, 34(9): 2316-2322.
XU L Y, TIAN D L, WANG G J, *et al.* N and P stoichiometry of *Koelreuteria paniculata* leaf and soil in Xiangtan manganese mine wasteland [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(9): 2316-2322.
- [37] 胡聪, 胡刚, 张忠华, 等. 广西澄江喀斯特湿地沉水植物碳、氮、磷化学计量特征[J]. 生态学报, 2021, 41(13): 5300-5308.
HU C, HU G, ZHANG Z H, *et al.* Stoichiometric characteristics of submerged macrophytes in the Chengjiang Karst wetland, Guangxi, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(13): 5300-5308.
- [38] 盘金文, 郭其强, 孙学广, 等. 不同林龄马尾松人工林碳、氮、磷、钾养分含量及其生态化学计量特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(4): 746-756.
PAN J W, GUO Q Q, SUN X G, *et al.* Contents and stoichiometric characteristics of C, N, P and K under different stand ages of *Pinus massoniana* plantations[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(4): 746-756.
- [39] 陈安娜, 王光军, 陈婵, 等. 亚热带不同林龄杉木林叶-根-土氮磷化学计量特征[J]. 生态学报, 2018, 38(11): 4027-4036.
CHEN A N, WANG G J, CHEN C, *et al.* Variation in the N and P stoichiometry of leaf-root-soil during stand development in a *Cunninghamia lanceolata* plantation in subtropical China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(11): 4027-4036.
- [40] 杨清培, 欧阳明, 杨光耀, 等. 竹子生态化学计量学研究: 从生物学基础到竹林培育学应用[J]. 植物生态学报, 2016, 40(3): 264-278.
YANG Q P, OUYANG M, YANG G Y, *et al.* Research on ecological stoichiometry in bamboos: From biological basis to applications in silviculture of bamboo forests [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2016, 40(3): 264-278.
- [41] YU Q, WU H H, HE N P, *et al.* Testing the growth rate hypothesis in vascular plants with above- and below-ground biomass[J]. *PLoS One*, 2012, 7(3): e32162.
- [42] ELSER J J, FAGAN W F, KERKHOFF A J, *et al.* Biological stoichiometry of plant production: Metabolism, scaling and ecological response to global change[J]. *New Phytologist*, 2010, 186(3): 593-608.
- [43] GÜSEWELL S, KOERSELMAN W. Variation in nitrogen and phosphorus concentrations of wetland plants[J]. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 2002, 5(1): 37-61.
- [44] 张雨鉴, 宋娅丽, 王克勤. 滇中亚高山森林乔木层各器官生态化学计量特征[J]. 生态学杂志, 2019, 38(6): 1669-1678.
ZHANG Y J, SONG Y L, WANG K Q. Ecological stoichiometry of various organs in the tree layer of subalpine forests in central Yunnan, China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(6): 1669-1678.
- [45] 刘元玺, 吴俊文, 赵志娟, 等. 云南松幼龄林和中龄林针叶非结构性碳水化合物与碳氮磷化学计量特征分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2024, 52(3): 30-39.
LIU Y X, WU J W, ZHAO Z J, *et al.* Characterization of non-structural carbohydrates and carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry of needles in young and middle-aged *Pinus yunnanensis* forests [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2024, 52(3): 30-39.
- [46] 郭子武, 胡俊靖, 杨清平, 等. 林地覆盖经营对雷竹叶片非结构性碳水化合物与氮、磷关系的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(4): 1064-1070.
GUO Z W, HU J J, YANG Q P, *et al.* Influence of mulching management on the relationships between foliar non-structural carbohydrates and N, P concentrations in *Phyllostachys violascens* stand [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(4): 1064-1070.
- [47] VALLADARES F, GIANOLI E, GÓMEZ J M. Ecological limits to plant phenotypic plasticity[J]. *New Phytologist*, 2007, 176(4): 749-763.