

不同发育时期勃氏甜龙竹叶片植硅体含量及型态变化特征

谢东伯 段思源 陈哲 王曙光 王昌命 詹卉

Variation of the Phytolith Content and Morphology in *Dendrocalamus brandisii* Leaf at Different Growth Stages

Xie Dongbo, Duan Siyuan, Chen Zhe, Wang Shuguang, Wang Changming, Zhan Hui

引用本文:

谢东伯, 段思源, 陈哲, 王曙光, 王昌命, 詹卉. 不同发育时期勃氏甜龙竹叶片植硅体含量及型态变化特征[J]. 西南林业大学学报, 2025, 45(1):198–204. doi: 10.11929/j.swfu.202403018

Xie Dongbo, Duan Siyuan, Chen Zhe, Wang Shuguang, Wang Changming, Zhan Hui. Variation of the Phytolith Content and Morphology in *Dendrocalamus brandisii* Leaf at Different Growth Stages[J]. Journal of Southwest Forestry University(Natural Science), 2025, 45(1):198–204. doi: 10.11929/j.swfu.202403018

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11929/j.swfu.202403018>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同物候期龙竹植硅体含量及型态变化

Variation of the Phytolith Content and Morphology of *Dendrocalamus giganteus* at Different Phenological Periods

西南林业大学学报. 2022, 42(5): 71–77 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.202107007>

苦竹向茶园扩张后不同年龄立竹叶片的功能性状变化特征研究

Response of Leaf Functional Traits of *Pleioblastus amarus* at Different Ages During the Expansive Process into the Tea Plantations

西南林业大学学报. 2024, 44(5): 25–34 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.202311059>

碱处理对慈竹竹叶膳食纤维提取效果的研究

Study on Extraction of Dietary Fiber from *Neosinocalamus affinis* Leaves by Alkali Treatment

西南林业大学学报. 2021, 41(1): 161–166 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.201911030>

不同种源刨花润楠苗期生长及叶片性状变异的研究

The Variation of Growth Traits and Leaf Morphological Characters from Different Provenances of *Machilu spauhoi* at Seedling Stage

西南林业大学学报. 2020, 40(5): 32–39 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.201909008>

4种彩叶树春季叶片转色期色素含量变化研究

A Study on Changes of Pigment Content in Leaves of 4 Color-leafed Species During Color Changing Period in Spring

西南林业大学学报. 2022, 42(6): 158–163 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.202108009>

基于贝叶斯法估计龙竹人工林叶面积指数模型

Estimation of Leaf Area Index Model of *Dendrocalamus giganteus* Plantation Based on Bayesian Method

西南林业大学学报. 2022, 42(6): 114–121 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.202109059>

不同发育时期勃氏甜龙竹叶片植硅体含量及形态变化特征

谢东伯¹ 段思源¹ 陈哲² 王曙光¹ 王昌命¹ 詹卉¹

(1. 西南林业大学林学院, 云南昆明 650233; 2. 云南林业调查规划院, 云南昆明 650051)

摘要: 为了解不同发育时期勃氏甜龙竹叶片植硅体的含量及形态变化, 对不同秆龄及相同秆龄不同发育时期的勃氏甜龙竹叶片硅和植硅体含量进行测定, 并对植硅体形态进行显微观察。结果显示: 不同秆龄勃氏甜龙竹叶片中硅含量表现为1年生(5.93%)<2年生(10.30%)<3年生(15.25%), 各秆龄中老叶硅含量均显著高于成熟叶和嫩叶; 植硅体含量与硅含量变化趋势一致; 不同秆龄及相同秆龄不同发育时期叶片均观察到尖型、方型、杆型、扇型、哑铃型、鞍型6种类型植硅体; 哑铃型、杆型和鞍型植硅体占比超过植硅体总数的70%以上; 除哑铃型植硅体, 其他5种类型植硅体占比均随着秆龄增大呈增加趋势; 哑铃型和鞍型植硅体长宽值变化差异不显著, 是较稳定的植硅体形态。

关键词: 勃氏甜龙竹; 竹叶; 硅含量; 植硅体; 形态

中图分类号: S795.6

文献标志码: A

文章编号: 2095-1914(2025)01-0198-07

引文格式: 谢东伯, 段思源, 陈哲, 等. 不同发育时期勃氏甜龙竹叶片植硅体含量及形态变化特征[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2025, 45(1): 198-204. Xie D B, Duan S Y, Chen Z, et al. Variation of the Phytolith Content and Morphology in *Dendrocalamus brandisii* Leaf at Different Growth Stages[J]. Journal of Southwest Forestry University, 2025, 45(1): 198-204. DOI: [10.11929/j.swfu.202403018](https://doi.org/10.11929/j.swfu.202403018)



Variation of the Phytolith Content and Morphology in *Dendrocalamus brandisii* Leaf at Different Growth Stages

Xie Dongbo¹, Duan Siyuan¹, Chen Zhe², Wang Shuguang¹, Wang Changming¹, Zhan Hui¹

(1. College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan 650233, China; 2. Yunnan Institute of Forest Inventory and Planning, Kunming Yunnan 650051, China)

Abstract: To investigate the variation of phytolith content and morphotypes in *Dendrocalamus brandisii* at different growth stages, the silicon and phytolith contents in the leaves of *D. brandisii* at different culm ages and leaves of different growth stages at the same culm age were analyzed, and the phytoliths were observed and identified under microscope. The results showed the silicon content in *D. brandisii* leaves at different culm ages varied in the order of the 1st-year(5.93%)<2nd-year(10.30%)<3rd-year(15.25%). The silicon content of the old leaves in each culm age group was significantly higher than that of mature and young leaves. The phytolith content demonstrated the same variation trend as that silicon content. Phytolith morphotypes in *D. brandisii* leaves at different growth stages were identical and grouped into 6 morphotypes, viz. acute bulbosus, blocky, elongate entire, bulliform flabellate, bilobate and saddle. The phytolith assemblage was all characterized by a high frequency of bilobate, elongate entire and saddle, accounting for more than 70% of the total. Except bilobate phytolith, the pro-

收稿日期: 2024-03-07; 修回日期: 2024-06-28

基金项目: 云南省农业联合基础研究面上项目(202101BD070001-114)资助; 国家自然科学基金项目(32160415)资助; “云南省兴滇英才支持计划”项目资助。

第1作者: 谢东伯(1997—), 男, 硕士研究生。研究方向: 竹类植物。Email: 2505946339@qq.com。

通信作者: 詹卉(1982—), 女, 博士, 教授。研究方向: 竹类植物。Email: 790558953@qq.com。

portion of other 5 phytolith morphotypes increased with the increase of culm age. The variation for the size of bilobate and saddle phytoliths was insignificant, indicating bilobate and saddle phytoliths were considerably stable phytolith morphotypes.

Key words: *Dendrocalamus brandisii*; leaf; silicon content; phytolith; morphology

硅在地壳中含量为 27.6%，是仅次于氧的第二大元素，但能被植物吸收的有效硅仅为 50~250 mg/kg^[1]。硅被植物根系吸收后，经维管束向地上部运输，在植物不同组织的细胞内腔或细胞之间以水合硅（ $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ）即植硅体型态存在^[2]。植硅体含量因物种而异，同时还受植株部位、栽培方式及环境条件等因素影响^[3-4]。硅及植硅体能调节植物的光合作用和蒸腾作用，增强植物抗倒性和抗旱性；同时，对真菌孢子的萌发和菌丝的生长有抑制作用，能够提高植物对病虫害的抗性，降低病虫害的发生^[5]。植硅体广泛分布于土壤及各类沉积物中，能够反映植物的组成，具有较高的生态学意义^[6]。

竹子是含硅较丰富的禾本科植物之一，其表皮组织含有高达 70% 的有机硅^[7]，大部分硅沉积形成植硅体。硅是竹子生长的一种必要营养元素，对提高竹笋产量、品质起重要作用，硅沉积形成植硅体是影响竹材加工利用的重要因素。同一竹种不同组织器官的硅含量存在明显差异，植硅体型态和数量不同^[8-9]。竹叶的硅含量最高，是根系含量的 37 倍^[10]。竹亚科植物植硅体类型主要有长鞍型、扇型、方型、棒型、塔型、尖型、硅化气孔型和毛刺型等^[2,7]。竹叶的植硅体含量最高且与叶片发育程度有关^[4]。慈竹（*Bambusa emeiensis*）成熟叶以哑铃型植硅体为主，随着叶片发育，植硅体体积增大^[11]；苦竹（*Pleioblastus amarus*）竹叶的植硅体含量随竹龄的增长逐渐增加。植硅体含量峰值出现在 4 年生竹叶中，之后植硅体的含量逐渐下降，苦竹进入衰老阶段^[12]。目前，国内外关于竹亚科植物植硅体的研究多集中在型态描述，对于不同发育时期硅及植硅体含量及类型的变化规律缺乏系统的研究。

勃氏甜龙竹（*Dendrocalamus brandisii*）隶属竹亚科牡竹属，属大型丛生型竹类植物，其竹秆壁厚、通直且强度大，被广泛用于建筑、造纸及各种其他用途，是云南分布面积较广的笋材两用经济竹种^[13]。本试验通过测定不同发育时期勃氏甜龙竹叶片的硅及植硅体含量，并观察植硅体型态，总结不同发育时期勃氏甜龙竹硅含量及植硅

体迁移及型态变化规律，为阐释竹类植物植硅体发生机理及古生物学研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 取材与预处理

试验样品采自西南林业大学竹园。分别采集 1 年生、2 年生和 3 年生勃氏甜龙竹竹冠中部的嫩叶、成熟叶以及老叶各 30 g。幼叶呈淡绿色，卷曲或还未伸展完全，生长于枝条顶端；成熟叶呈深绿色，生长于枝条中部；老叶呈黄绿色，叶梢或边缘发枯，生长于枝条基部；平行取 3 株。将实验材料洗净后放入 80 ℃ 烘箱中脱水杀青后，烘干至恒质量贮存备用。

1.2 试验方法

灰分含量按照国家标准 GB/T 2677.3—1993^[14]方法测定。选取 1 g 样品，放入恒质量过的瓷坩埚中燃烧至炭化后移到马弗炉中，600 ℃ 高温灼烧 2 h。取出坩埚在干燥器皿中冷却 0.5 h 后称量，坩埚增加质量即为灰分质量。

硅含量按照国家标准 GB 7978—1987^[15]方法测定。在灰分含量测定后，加入 5 mL 的 6 mol/L 浓盐酸，沸水浴上蒸干；再加入 6 mol/L 浓盐酸 5 mL，再蒸干，重复 3 次。加入蒸馏水溶解残渣，用定量滤纸过滤，以蒸馏水洗涤至洗液中不含有氯化物为止，将残渣连同滤纸移入瓷坩埚，在 600 ℃ 高温灼烧 2 h 后取出，放置于干燥器中冷却 0.5 h 后称量，坩埚增加的质量即为硅含量。

植硅体的提取采用湿式氧化法^[16]。称量样品 0.1 g 放入 20 mL 试管中，加入 67% 的 HNO_3 溶液 10 mL，沸水浴加热硝解 2~4 h，直至硝解液澄清。硝解过程中可加入少量硝酸钠以加快硝解。硝解结束后，将溶液转入 15 mL 离心管，1000 r/min 离心 5 min 后倒去上清液，加入 10 mL 蒸馏水摇匀，继续离心，重复 3 次。然后加入 5 mL 无水乙醇，充分震荡，1000 r/min 离心 5 min，倒去上清液；加入 1 mL 丙酮洗涤后沉淀，振荡摇匀。

植硅体的计数。用移液枪从离心管吸取 100 μL

滴于载玻片上晾干,再用中性树脂固定制片,每个样品制片 3 片,分别在显微镜(凤凰牌 PH100-3B41I-IPL)下统计植硅体数量,记录各类型植硅体的占比,并用二维测量软件 DS-3000 拍摄测量其长宽值。

2 结果与分析

2.1 不同发育时期勃氏甜龙竹叶片灰分及硅含量变化

不同秆龄勃氏甜龙竹叶片灰分含量存在差异。由表 1 可知,叶片灰分平均含量从低到高依次为 1 年生(9.17%)、2 年生(13.41%)和 3 年生(18.82%),不同秆龄立竹叶片灰分含量呈显著差异。随着叶片发育,竹叶灰分含量呈增加趋势,即老叶>成熟叶>嫩叶,除 1 年生立竹成熟叶和嫩叶外,各秆龄立竹不同发育时期的叶片灰分含量均呈显著差异。

表 1 不同发育时期勃氏甜龙竹叶片灰分与硅含量

Table 1 Variation of the ash and silicon content in *D. brandisii* leaf at different growth stages

秆龄	叶	灰分/%	SiO ₂ / %
1年生	嫩叶	8.87 ± 0.26 ^a	4.62 ± 0.06 ^a
	成熟叶	8.53 ± 0.25 ^a	6.04 ± 0.16 ^b
	老叶	10.42 ± 0.56 ^b	7.12 ± 0.64 ^c
	均值	9.17 ± 0.36 ^A	5.93 ± 0.25 ^A
2年生	嫩叶	8.42 ± 0.61 ^a	5.18 ± 0.54 ^a
	成熟叶	14.54 ± 0.89 ^b	11.16 ± 0.77 ^b
	老叶	18.18 ± 0.27 ^c	14.58 ± 0.17 ^c
	均值	13.41 ± 0.59 ^B	10.30 ± 0.49 ^B
3年生	嫩叶	14.27 ± 0.56 ^a	10.87 ± 1.11 ^a
	成熟叶	17.07 ± 1.14 ^b	13.52 ± 1.22 ^b
	老叶	25.12 ± 0.59 ^c	21.35 ± 0.55 ^c
	均值	18.82 ± 0.76 ^C	15.25 ± 0.96 ^C

注:数据为平均值±标准差。同列不同小写字母表示在同一秆龄不同发育阶段叶片存在显著差异($P < 0.05$),不同大写字母表示在不同秆龄间叶片存在显著差异($P < 0.05$)。

不同秆龄勃氏甜龙竹叶片硅含量同灰分含量变化趋势一致,呈现 1 年生(5.93%)<2 年生(10.30%)<3 年生(15.25%),不同秆龄立竹叶片硅含量呈显著差异。随着叶片发育,各秆龄立竹叶片硅含量均呈增加趋势,即老叶>成熟叶>

嫩叶,不同发育时期的叶片硅含量差异显著。(表 1)。

2.2 不同发育时期勃氏甜龙竹叶片植硅体类型及含量变化

不同发育时期勃氏甜龙竹叶片植硅体形态类型多样。根据国际植硅体命名规范 ICPN 1.0^[17]和 ICPN 2.0^[18],不同发育时期勃氏甜龙竹叶片中均观察到:尖型、方型、杆型、扇型、哑铃型和鞍型 6 种类型植硅体(图 1)。占比最高的植硅体类型是哑铃型、杆型和鞍型,3 种类型植硅体占植硅体总数 70% 以上,尖型和扇型占比次之,方型植硅体的占比较少(表 2)。

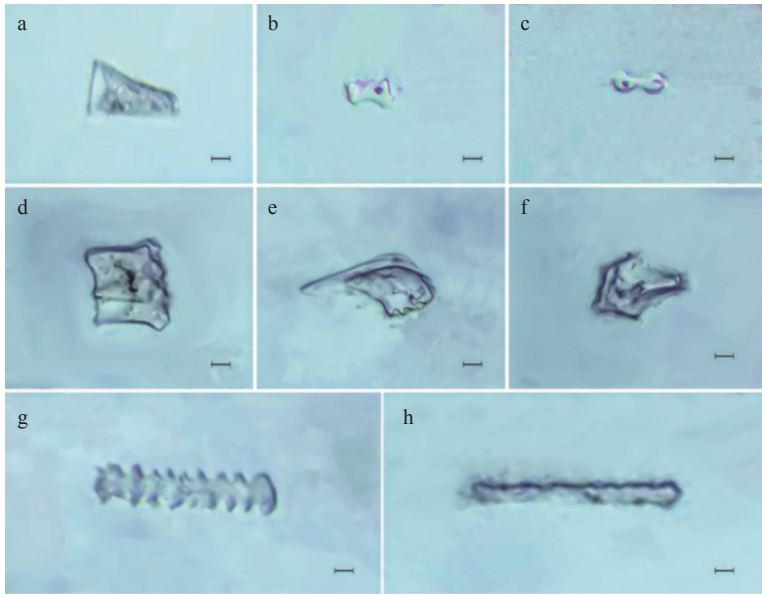
不同秆龄勃氏甜龙竹立竹叶片各类型植硅体占比存在差异,尖型和方型植硅体呈相同的变化趋势。1 年生立竹叶片中尖型和方型植硅体占比均较低,随着立竹秆龄增加,尖型和方型植硅体占比呈现上升趋势。2~3 年生立竹叶片的尖型和方型植硅体占比显著高于 1 年生立竹。在不同秆龄立竹中,随着叶片发育,尖型和方型植硅体占比呈现上升趋势,即老叶>成熟叶>嫩叶,老叶的尖型和方型植硅体数量显著高于嫩叶(表 2)。随着立竹秆龄增加,杆型植硅体占比先呈快速上升趋势,2 年生立竹竹叶中杆型植硅体占比达到最高值(29.00%),之后逐渐下降。3 年生立竹叶片杆型植硅体占比略高于 1 年生立竹,但差异不显著。各秆龄立竹中,随着叶片发育,杆型植硅体占比呈上升趋势。1 年生和 3 年生立竹老叶杆型植硅体数量显著高于嫩叶和成熟叶(表 2)。1 年生秆龄立竹嫩叶中未观察到扇型植硅体。随着立竹秆龄增加,扇型植硅体占比呈现上升趋势。3 年生立竹叶片中扇型植硅体数量显著高于 1~2 年生立竹。各秆龄立竹中,随着叶片发育,扇型植硅体占比呈现上升趋势,即老叶>成熟叶>嫩叶。3 年生立竹老叶的扇型植硅体占比最高(9.01%)(表 2)。

哑铃型植硅体在 1 年生立竹叶片中占比最高(73.46%),随着竹子的生长,哑铃型植硅体占比呈下降趋势,即 1 年生>2 年生>3 年生立竹。2 年生和 3 年生立竹叶片中哑铃型植硅体数量显著低于 1 年生立竹。各秆龄立竹中,随着叶片发育,哑铃型植硅体占比同样呈下降趋势,老叶的哑铃型植硅体占比显著低于嫩叶(表 2)。随着立竹秆龄的增加,鞍型植硅体占比呈上升趋势,即 3 年生>2 年生>1 年生立竹。3 年生立竹叶片中鞍型植硅体占比最高(20.68%),显著高于 1

年生和 3 年生立竹。各秆龄立竹不同发育阶段叶片中，鞍型植硅体占比未发现明显的变化规律（表 2）。

不同秆龄立竹叶片中各类型植硅体总量存在差异。1 年生立竹叶片植硅体总量最少，随着立

竹秆龄增加，植硅体总量逐渐增加，呈现出 1 年生<2 年生<3 年生立竹的变化趋势。3 年生立竹叶片植硅体总量显著高于 1 年生和 2 年生立竹。2 年生和 3 年生立竹植硅体的总量随着叶片发育呈增加趋势，即老叶>成熟叶>嫩叶（表 2）。



比例尺=10 μm；a,d. 方型；b. 鞍型；c. 哑铃型；e. 尖型；f. 扇型；g,h. 杆型。

图 1 勃氏甜龙竹叶片植硅体类型

Fig. 1 Phytolith morphotypes in *D. brandisii* leaf

表 2 不同发育时期勃氏甜龙竹叶片不同类型植硅体占比

Table 2 Percentage of different phytolith morphotypes in *D. brandisii* leaf at different growth stages

秆龄	叶	不同类型植硅体占比/%						总数/ (个·g ⁻¹)
		尖型	方型	杆型	扇型	哑铃型	鞍型	
1年生	嫩叶	1.13 ± 0.51 ^a	0.37 ± 0.10 ^a	4.87 ± 1.94 ^a	—	84.89 ± 1.95 ^c	4.25 ± 0.61 ^a	6 785 ^b
	成熟叶	0.88 ± 0.10 ^a	0.63 ± 0.31 ^a	12.25 ± 0.20 ^b	0.38 ± 0.31 ^a	75.88 ± 2.55 ^b	10.38 ± 1.94 ^c	4 059 ^a
	老叶	5.24 ± 1.01 ^b	1.88 ± 0.71 ^b	28.00 ± 2.65 ^c	3.25 ± 0.81 ^b	59.53 ± 1.12 ^a	6.13 ± 0.51 ^b	7 244 ^b
	均值	2.41 ± 2.11 ^A	0.96 ± 0.80 ^A	15.04 ± 9.83 ^A	1.21 ± 1.53 ^A	73.46 ± 10.63 ^B	6.91 ± 2.83 ^A	6 029 ^A
2年生	嫩叶	3.50 ± 1.63 ^a	3.38 ± 0.10 ^b	28.13 ± 3.16 ^a	3.63 ± 1.12 ^a	54.00 ± 2.45 ^b	7.38 ± 2.75 ^a	3 917 ^a
	成熟叶	6.00 ± 0.20 ^b	1.50 ± 0.20 ^a	31.38 ± 5.82 ^b	2.75 ± 0.61 ^a	50.00 ± 5.51 ^b	8.38 ± 0.31 ^a	12 011 ^b
	老叶	19.50 ± 1.43 ^c	5.38 ± 3.98 ^c	27.50 ± 8.57 ^a	7.50 ± 5.31 ^b	24.38 ± 4.59 ^a	15.75 ± 5.30 ^b	9 989 ^b
	均值	9.67 ± 7.13 ^B	3.42 ± 2.79 ^B	29.00 ± 6.48 ^B	4.63 ± 3.76 ^A	42.79 ± 13.83 ^A	10.50 ± 5.08 ^B	8 639 ^B
3年生	嫩叶	4.50 ± 0.61 ^a	4.88 ± 0.71 ^a	8.25 ± 0.20 ^a	1.63 ± 0.51 ^a	61.00 ± 5.51 ^c	19.75 ± 3.87 ^a	14 892 ^a
	成熟叶	12.13 ± 2.75 ^b	6.38 ± 0.71 ^b	12.50 ± 3.06 ^b	6.38 ± 1.94 ^b	39.75 ± 2.04 ^b	22.88 ± 1.12 ^b	20 351 ^b
	老叶	12.19 ± 3.11 ^b	9.19 ± 0.66 ^c	31.09 ± 1.56 ^c	9.01 ± 0.21 ^c	19.12 ± 0.09 ^a	19.41 ± 5.02 ^a	22 435 ^b
	均值	9.60 ± 4.35 ^C	6.81 ± 1.92 ^C	17.28 ± 5.11 ^A	5.67 ± 3.27 ^B	39.96 ± 7.43 ^A	20.68 ± 4.03 ^C	19 226 ^C

注：数据为平均值 ± 标准差。同列不同小写字母表示在同一秆龄不同发育阶段叶片存在显著差异（*P* < 0.05），不同大写字母表示在不同秆龄间叶片存在显著差异（*P* < 0.05）；“—”表示未观察到或偶见此类植硅体。

2.3 不同发育时期勃氏甜龙竹竹叶植硅体的长宽变化

不同秆龄勃氏甜龙竹叶片各类型植硅体大小存在差异。从表 3 可知,随着立竹秆龄增加,尖型植硅体长宽均值呈增加趋势,3 年生立竹叶片中的尖型植硅体长宽值显著高于 1 年生立竹。各秆龄立竹中,随着叶片发育,尖型植硅体的宽度不断增加,老叶的尖型植硅体宽度显著高于嫩叶。方型植硅体长宽均值随着立竹秆龄增加,先呈增加趋势,后逐渐减小。各秆龄立竹中,老叶

的方型植硅体长度显著高于成熟叶。2 年生和 3 年生立竹中,不同发育时期叶片的方型植硅体宽度变化不显著。秆型和扇型植硅体变化趋势相同,均随着立竹秆龄增加呈增大趋势,2 年生、3 年生立竹叶片的秆型和扇型植硅体的长度均值显著高于 1 年生立竹。各秆龄立竹中,老叶的秆型和扇型植硅体长度均显著高于成熟叶。但不同发育时期叶片的秆型植硅体的宽度变化不显著,不同秆龄及各秆龄不同发育时期勃氏甜龙竹叶片的哑铃型和鞍型植硅体长宽值变化差异不显著。

表 3 不同发育时期勃氏甜龙竹叶片不同类型植硅体长宽
Table 3 Length and width of different phytolith morphotypes in *D. brandisii* leaf at different growth stages μm

秆龄	叶	尖型		方型		秆型		扇型		哑铃型		鞍型	
		长	宽	长	宽	长	宽	长	宽	长	宽	长	宽
1 年生	嫩叶	8.43 ± 4.18 ^a	3.39 ± 1.30 ^a	13.21 ± 4.80 ^a	9.00 ± 3.12 ^{ab}	18.24 ± 10.52 ^b	3.28 ± 1.53 ^a	12.61 ± 5.02 ^a	7.69 ± 2.64 ^a	4.99 ± 1.35 ^a	1.41 ± 0.30 ^a	5.66 ± 1.53 ^a	2.59 ± 0.64 ^a
	成熟叶	12.08 ± 7.38 ^b	4.52 ± 2.11 ^{ab}	11.46 ± 4.39 ^a	7.28 ± 1.79 ^a	11.13 ± 8.32 ^a	3.33 ± 1.35 ^a	15.71 ± 7.28 ^b	8.85 ± 3.57 ^a	5.11 ± 0.97 ^a	1.40 ± 0.30 ^a	6.01 ± 0.78 ^a	2.78 ± 0.71 ^a
	老叶	11.92 ± 5.28 ^b	6.09 ± 2.37 ^b	18.37 ± 6.06 ^b	10.46 ± 3.69 ^b	20.37 ± 8.36 ^b	4.11 ± 1.98 ^a	22.29 ± 8.60 ^c	12.21 ± 3.59 ^b	5.78 ± 1.14 ^a	1.41 ± 0.31 ^a	6.32 ± 1.32 ^a	3.41 ± 0.89 ^a
	均值	10.81 ± 5.61 ^A	4.66 ± 1.92 ^A	14.34 ± 5.08 ^A	8.91 ± 2.86 ^A	16.58 ± 9.06 ^A	3.57 ± 1.62 ^A	16.87 ± 6.96 ^A	9.58 ± 3.26 ^A	5.29 ± 1.15 ^A	1.40 ± 0.30 ^A	5.99 ± 1.21 ^A	2.92 ± 0.74 ^A
	嫩叶	12.44 ± 8.40 ^a	4.60 ± 1.43 ^a	18.17 ± 6.61 ^b	9.98 ± 4.08 ^a	15.49 ± 8.20 ^a	3.32 ± 1.94 ^a	21.40 ± 7.81 ^b	12.67 ± 3.92 ^a	5.21 ± 0.65 ^a	1.41 ± 0.33 ^a	6.10 ± 1.53 ^a	3.50 ± 1.14 ^a
	成熟叶	11.94 ± 7.39 ^a	5.14 ± 1.85 ^{ab}	16.49 ± 6.61 ^a	11.11 ± 3.62 ^a	20.73 ± 10.04 ^b	3.26 ± 1.19 ^a	18.48 ± 5.65 ^a	12.00 ± 3.52 ^a	5.04 ± 0.79 ^a	1.07 ± 0.31 ^a	6.27 ± 1.71 ^a	3.35 ± 0.88 ^a
	老叶	12.20 ± 3.45 ^a	6.25 ± 1.63 ^b	18.87 ± 4.77 ^b	10.72 ± 2.71 ^a	25.68 ± 12.94 ^c	3.72 ± 1.51 ^a	21.39 ± 4.92 ^b	12.96 ± 3.14 ^a	5.45 ± 1.04 ^a	1.55 ± 0.83 ^a	6.15 ± 1.12 ^a	3.62 ± 1.06 ^a
	均值	12.19 ± 6.41 ^B	5.33 ± 1.64 ^B	17.84 ± 5.99 ^B	10.60 ± 3.47 ^B	20.63 ± 10.39 ^B	3.43 ± 1.55 ^A	20.42 ± 6.12 ^B	12.45 ± 3.52 ^B	5.23 ± 0.82 ^A	1.34 ± 0.49 ^A	6.17 ± 1.45 ^A	3.49 ± 1.03 ^A
	嫩叶	14.26 ± 8.65 ^b	4.49 ± 2.16 ^a	13.47 ± 2.04 ^a	10.38 ± 2.36 ^a	19.28 ± 10.50 ^a	3.07 ± 1.00 ^a	15.43 ± 3.40 ^a	10.19 ± 2.85 ^a	4.78 ± 0.81 ^a	1.35 ± 0.42 ^a	5.07 ± 0.90 ^a	3.05 ± 0.69 ^a
	成熟叶	12.75 ± 6.03 ^a	5.53 ± 1.56 ^{ab}	14.98 ± 3.77 ^a	10.18 ± 2.92 ^a	19.29 ± 12.86 ^a	3.14 ± 1.48 ^a	19.27 ± 2.67 ^b	13.42 ± 2.32 ^b	5.95 ± 1.08 ^a	1.40 ± 0.44 ^a	5.13 ± 1.24 ^a	3.55 ± 0.62 ^a
3 年生	老叶	10.77 ± 3.39 ^a	5.94 ± 2.84 ^b	19.19 ± 5.95 ^b	11.08 ± 3.16 ^a	22.51 ± 16.36 ^b	4.83 ± 2.27 ^a	23.74 ± 7.43 ^c	13.13 ± 3.52 ^b	5.90 ± 1.85 ^a	1.78 ± 0.70 ^a	5.95 ± 1.24 ^a	3.43 ± 1.38 ^a
	均值	12.59 ± 7.35 ^B	5.32 ± 2.18 ^B	15.88 ± 3.92 ^A	10.55 ± 2.81 ^B	20.36 ± 13.24 ^B	3.68 ± 1.58 ^A	19.48 ± 4.50 ^B	12.25 ± 2.90 ^B	5.54 ± 1.25 ^A	1.51 ± 0.52 ^A	5.38 ± 1.13 ^A	3.35 ± 0.89 ^A

注:数据为平均值±标准差。同列不同小写字母表示在同一秆龄不同发育阶段叶片存在显著差异($P < 0.05$),不同大写字母表示在不同秆龄间叶片存在显著差异($P < 0.05$)。

3 结论与讨论

3.1 不同发育时期勃氏甜龙竹叶片硅及植硅体含量变化规律

本研究中,随着勃氏甜龙竹秆龄增加,叶片的灰分、硅及植硅体含量均呈 3 年生>2 年生>1 年生立竹的变化规律。而不同秆龄立竹中,随着叶片发育,叶片的灰分、硅及植硅体含量的分布规

律均为老叶>成熟叶>嫩叶。对不同物候期龙竹(*Dendrocalamus giganteus*)及融安黄竹(*Dendrocalamus ronganensis*)的相关研究也发现类似变化规律^[19-20]。在植物的幼嫩组织中,由于细胞生长伸长期尚未完成,硅沉积不够充分,因此硅含量低于成熟组织。因此,竹子硅含量通常表现为成熟组织大于幼嫩组织,即随着立竹秆龄增加及叶片发育而增加^[8-9,12]。植物体内 90% 以上的硅以植

硅体的形式存在^[21], 植硅体的含量在植物生长的初期较低, 随着植物生长, 其含量逐渐增加, 呈现与硅含量相同的变化趋势。因此, 勃氏甜龙竹叶片硅及植硅体含量随着立竹秆龄增加及叶片发育而增加。另外, 也有研究表明硅沉积是由于植物失水而被动发生的^[22-23], 老叶通常比嫩叶和成熟叶水分含量低, 导致硅及植硅体含量较高。

3.2 不同发育时期勃氏甜龙竹叶片植硅体型态变化规律

李泉等^[6]对竹亚科植物植硅体研究发现, 竹叶的植硅体型态较为多样, 包含长鞍型、扇型、方型、棒型、塔型、尖型、硅化气孔型和毛刺型等, 其中鞍型和哑铃型植硅体在竹叶中占比最大^[6,8-9]。不同发育时期勃氏甜龙竹叶片均观察到尖型、方型、杆型、扇型、哑铃型、鞍型6种类型植硅体。占比最高的植硅体类型是哑铃型、杆型和鞍型, 超过植硅体总数的70%以上, 支持了上述研究结果。植物叶片主要起蒸腾、呼吸和光合等作用。不同型态植硅体起源于不同的细胞, 具有不同的功能。尖型植硅体形状呈针状或钩状, 主要形成于毛状细胞, 在叶片中存在能增加叶片的机械防御, 加大植食者取食的不适^[24-25]。潘丹丹^[26]研究也表明, 硅沉积形成植硅体作为物理屏障增强了总体机械强度和外部保护层, 从而阻碍了真菌侵入和昆虫咀嚼, 促进植物生长。本研究中, 随着勃氏甜龙竹秆龄增加, 尖型植硅体占比增加。随着叶片发育, 尖型植硅体占比同样呈上升趋势, 这与成熟叶片具备较强的物理屏障, 具有更强的机械防御能力相吻合。杆形植硅体形成于长细胞, 长细胞中植硅体的大量产生和紧密排列能够较好地叶片维管组织起保护作用, 也能显著提高植株的光合作用, 并极大改善植株的机械强度及物理性状^[24]。本研究中, 随着勃氏甜龙竹秆龄增加, 杆形植硅体数量快速上升。各秆龄立竹中老叶的杆形植硅体数量显著高于嫩叶, 说明随着叶片成熟, 叶片机械强度和支撑能力不断增强, 叶片茎叶挺立, 受光更充分, 从而使得叶片能够更好进行光合作用。泡状细胞被认为与植物蒸腾作用有关, 方形植硅体主要形成于管形泡状细胞, 而扇形植硅体主要形成于楔形泡状细胞^[24]。在本实验中, 随着勃氏甜龙竹秆龄增加方形和扇形植硅体的占比呈上升趋势。各秆龄立竹中。随着叶片发育, 方形和扇形植硅体占比呈上升趋势, 进一步验证说明成熟叶片的蒸

腾作用较强。勃氏甜龙竹叶片各类型植硅体大小随着秆龄的增加和叶片的发育呈不同变化趋势, 但哑铃型和鞍型植硅体大小变化差异不显著, 说明哑铃型和鞍型植硅体是勃氏甜龙竹叶片中较稳定的型态。以往研究也表明, 哑铃型和鞍型植硅体受到环境影响最小, 是最稳定的型态, 其指标参数可以用于禾本科植物分类^[7-8,19,24,27]。

综上所述, 不同发育时期勃氏甜龙竹叶片硅及植硅体含量随着秆龄增加及叶片发育呈增加趋势。叶片不同发育阶段均观察到尖型、方型、杆型、扇型、哑铃型、鞍型6种类型植硅体。哑铃型、杆型和鞍型植硅体占比超过植硅体总数的70%以上。不同类型植硅体的占比变化与叶片的蒸腾、呼吸和光合作用相关。除哑铃型植硅体, 其他5种类型植硅体占比均随着秆龄增加呈增长趋势, 说明叶片蒸腾、呼吸和光合作用不断增强。不同秆龄及各秆龄不同发育时期勃氏甜龙竹叶片的哑铃型和鞍型植硅体长宽值变化差异不显著, 是较稳定的植硅体型态。

[参 考 文 献]

- [1] 唐旭, 郑毅, 汤利. 高等植物硅素营养研究进展 [J]. 广西科学, 2005, 12(4): 347-352.
- [2] 吕厚远, 贾继伟, 王伟铭, 等. “植硅体” 含义和禾本科植硅体的分类 [J]. 微体古生物学报, 2002, 19(4): 389-396.
- [3] 易晓璇, 马肖, 刘木兰, 等. 硅对植物逆境胁迫耐受能力的影响及其机理研究进展 [J]. 作物研究, 2020, 34(4): 398-404.
- [4] Liu L J, Chang S X, Huang C P, et al. Controls for phytolith accumulation in Moso bamboo leaves across China [J]. *The Science of the Total Environment*, 2023, 893: 164886.
- [5] 苏素苗, 杨春雷, 饶雄飞, 等. 硅对植物抗逆性影响的研究进展 [J]. 华中农业大学学报, 2022, 41(6): 160-168.
- [6] 李泉, 徐德克, 吕厚远. 竹亚科植硅体形态学研究及其生态学意义 [J]. 第四纪研究, 2005, 25(6): 115-122.
- [7] Jones L H, Milne A A, Sanders J V. Tabashir: an opal of plant origin [J]. *Science*, 1966, 151(3709): 464-466.
- [8] Zhan H, Li J, Niu Z H, et al. Silicon variation and phytolith morphology in different organs of *Dendrocalamus brandisii* (Munro) Kurz (Bambusoideae) [J]. *Brazilian Journal of Botany*, 2019, 42(3): 529-541.

- [9] Xu R, He H L, Guo H J, et al. Characteristics of silicon and phytolith distribution in bamboo (*Ferocalamus strictus*): variations between different organs and ages [J]. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2023, 311: 104817.
- [10] 牛兆辉, 何文志, 王昌命, 等. 龙竹竹秆植硅体形态变化研究 [J]. 竹子学报, 2016, 35(3): 9–14, 25.
- [11] 何蕊, 邱坚, 罗蓓, 等. 慈竹植硅体形态及其发育变化研究 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2018, 46(4): 68–74, 84.
- [12] 杨杰, 吴家森, 姜培坤, 等. 苦竹林植硅体碳与硅的研究 [J]. 自然资源学报, 2016, 31(2): 299–309.
- [13] 钱崇澍, 陈焕镛. 中国植物志 [M]. 北京: 科学出版社, 1996: 155.
- [14] 中华人民共和国轻工业部. 造纸原料灰分的测定: GB/T 2677.3—1993[S]. 北京: 中国标准出版社, 1993.
- [15] 中华人民共和国轻工业部. 纸浆酸不溶灰分的测定: GB 7978—1987[S]. 北京: 中国标准出版社, 1987.
- [16] 王永吉, 吕厚远, 衡平. 植物硅酸体的分析方法 [J]. 植物学报, 1994, 36(10): 797–804.
- [17] Madella M, Group I W, Alexandre A, et al. International code for phytolith nomenclature 1.0 [J]. *Annals of Botany*, 2005, 96(2): 253–260.
- [18] International Committee for Phytolith Taxonomy (ICPT). International code for phytolith nomenclature (ICPN) 2.0 [J]. *Annals of Botany*, 2019, 124(2): 189–199.
- [19] 朱方为, 牛兆辉, 李娟, 等. 不同物候期龙竹植硅体含量及形态变化 [J]. 西南林业大学学报 (自然科学), 2022, 42(5): 71–77.
- [20] Li R C, Fan J, Carter J, et al. Monthly variations of phytoliths in the leaves of the bamboo *Dendrocalamus ronganensis* (Poaceae: Bambusoideae) [J]. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2017, 246: 62–69.
- [21] 王刚, 周本智, 李晓靖, 等. 吊丝单竹林生态系统碳储量及其垂直空间分配特征 [J]. 热带亚热带植物学报, 2012, 20(1): 72–77.
- [22] Li R C, Chen X F, Wen M D, et al. Phytolith-occluded carbon in leaves of *Dendrocalamus ronganensis* influenced by drought during growing season [J]. *Physiologia Plantarum*, 2022, 174(5): e13748.
- [23] Matichenkov V V, Bocharnikova E A. Chapter 13 The relationship between silicon and soil physical and chemical properties[M]//Silicon in Agriculture. Amsterdam: Elsevier, 2001: 209–219.
- [24] Gu Y S, Liu H Y, Wang H L, et al. Phytoliths as a method of identification for three Genera of woody bamboos (Bambusoideae) in tropical southwest China [J]. *Journal of Archaeological Science*, 2016, 68: 46–53.
- [25] Zhang X W, Gélín U, Spicer R A, et al. Rapid Eocene diversification of spiny plants in subtropical woodlands of central Xizang [J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 3787.
- [26] 潘丹丹. 水稻吸收、转运 As(Ⅲ) 及其硅营养调控机制 [D]. 广州: 华南农业大学, 2019.
- [27] Gu Y S, Zhao Z J, Pearsall D M. Phytolith morphology research on wild and domesticated rice species in East Asia [J]. *Quaternary International*, 2013, 287: 141–148.

(责任编辑 张 坤)