

毛竹林下多花黄精构件生物量分配特征的年际效应

李建新¹, 徐 森², 杨丽婷², 陈双林², 郭子武^{2*}

(1. 江山市林业技术推广站, 浙江 江山 324100; 2. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江 杭州 311400)

摘要:【目的】多花黄精(*Polygonatum cyrtoneura*)是竹药复合经营中主栽物种之一, 研究种植年限对毛竹(*Phyllostachys edulis*)林下多花黄精生长及生物量分配特征的影响, 为毛竹-多花黄精高效复合经营提供理论参考。【方法】选取毛竹林下种植 1、2 和 3 a 的多花黄精, 调查不同种植年限多花黄精种群生长特征和秆、叶、根、果、块茎生物量, 分析多花黄精种群生长特征及构件生物量积累、分配、异速生长关系的差异。【结果】随种植年限增加, 毛竹林下多花黄精基径、高度、冠长、果粒数、种群密度总体上均显著升高, 而叶片数呈先下降后升高趋势; 各构件生物量、地上生物量/地下生物量和秆、叶、果生物量分配比例及秆-总生物量、叶-总生物量、果-总生物量异速生长指数均升高, 块茎、根生物量分配比例和块茎-总生物量异速生长指数则降低, 而根-总生物量异速生长指数呈先升高后下降趋势。【结论】种植年限对多花黄精生长、种群特征、生物量积累与分配及其异速增长关系产生了明显影响, 多花黄精可通过权衡资源分配适应不同种植年限种群密度差异引起的资源限制, 毛竹林下种植 2 a 的多花黄精块茎生物量增速最快, 种植 3 a 的块茎生物量增长速率明显下降, 宜予以采收。

关键词:竹药复合经营; 多花黄精; 种植年限; 异速生长; 生物量积累与分配

中图分类号: S759

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1000-2006(2023)05-0121-08



Interannual effects of growth, module biomass accumulation and allocation of *Polygonatum cyrtoneura* under *Phyllostachys edulis* forest

LI Jianxin¹, XU Sen², YANG Liting², CHEN Shuanglin², GUO Ziwu^{2*}

(1. Jiangshan Forestry Technology Promotion Station, Jiangshan 324100, China; 2. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, China)

Abstract: 【Objective】*Polygonatum cyrtoneura* is the main plant used in the compound management of bamboo forests and in Chinese medicine. This study examined the effects of planting years on the growth and biomass allocation characteristics of *Polygonatum cyrtoneura* in the understory of *Phyllostachys edulis* forest to provide a theoretical reference for the efficient management of *Phyllostachys edulis* and *Polygonatum cyrtoneura*. 【Method】*Polygonatum cyrtoneura* plants grown in *Phyllostachys edulis* for one, two and three years were selected to investigate the growth characteristics and biomass of stems, leaves, roots, fruits and tubers during different planting years. Allometric growth of the module biomass was also analyzed. 【Result】With the increasing planting time, basal diameter, height, crown length, fruit number and population density increased significantly, whereas the number of leaves first decreased and then increased. The module biomass, aboveground biomass/underground biomass, the allocation proportion of stems, leaves, fruits and allometric growth index of stem, leaf and fruit-total biomass increased, whereas the allocation proportion of tuber and root biomass and the allometric growth index of tuber-total biomass decreased. Additionally, the allometric growth index of root-total biomass initially increased and then decreased. 【Conclusion】Planting year significantly affected the growth, population characteristics, biomass accumulation and allocation, and allometric growth of *Polygonatum cyrtoneura*. *Polygonatum cyrtoneura* could regulate its resource allocation to adapt to the resource limitations of different population densities. Tuber biomass increased the fastest for the plants grown for two years, but decreased obviously for the plants

收稿日期 Received: 2022-01-17

修回日期 Accepted: 2022-04-16

基金项目: 浙江省林业科技推广项目(2020B01)。

第一作者: 李建新(jsljlx@163.com), 工程师。* 通信作者: 郭子武(hunt-panther@163.com), 研究员。

引文格式: 李建新, 徐森, 杨丽婷, 等. 毛竹林下多花黄精构件生物量分配特征的年际效应[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2023, 47(5): 121-128. LI J X, XU S, YANG L T, et al. Interannual effects of growth, module biomass accumulation and allocation of *Polygonatum cyrtoneura* under *Phyllostachys edulis* forest[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2023, 47(5): 121-128. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202201028.

grown for three years, which could be considered the optimal harvesting time.

Keywords: compound management of bamboo forests and Chinese medicine; *Polygonatum cyrtoneura*; cultivation years; allometric growth; biomass accumulation and allocation

毛竹林经营是山区竹农增收致富的重要途径,在区域社会经济发展和生态保障方面起重要作用。我国毛竹(*Phyllostachys edulis*)林面积达430余万公顷,占竹林总面积的70%以上^[1]。毛竹林下环境阴凉、湿润,生境多样化^[2-3],且多为纯林经营,林地空间利用率较低,为开展林下种养提供了良好的立地环境,因此如毛竹与多花黄精(*Polygonatum cyrtoneura*)、苦参(*Sophora flavescens*)、决明(*Senna tora*)等药用植物复合经营模式已逐步推广应用^[4-5],既可利用林下生境改善林地环境,也在一定程度上提高了毛竹林的经济效益。竹药复合经营可通过林下小环境的温、光、水等资源数量与质量的调控来影响林下药用植物的生长^[4-8],改变其生物量积累与分配特征,从而获得良好的产出与经济效益。研究表明,柠条(*Caragana korshinskii*)-甘草(*Glycyrrhiza uralensis*)复合经营对甘草地上部分生物量和总生物量无明显影响,但却降低了其根、茎生物量及其分配比例^[9];而锥栗(*Castanea henryi*)-多花黄精复合经营,以及锥栗-多花黄精-三叶崖爬藤(*Tetrastigma hemsleyanum*)三者复合经营下多花黄精块茎产量则明显提高^[10],但林下多花黄精生物量积累与分配亦与毛竹林密度、坡位和海拔等密切相关^[6-7, 11]。由此可见,不同林分类型、种植方式、药用植物种类复合经营模式中,林下药用植物生长发育、生物量积累及产量形成均差异明显。因此,开展毛竹与药用植物的复合经营模式研究,揭示林下药用植物生长发育特征、产量形成的环境因子制约作用及其机制,阐明毛竹-药用功能植物互作机制与增产效应,对于毛竹林经济效益提升和竹产业转型升级均具有重要意义。

多花黄精隶属百合科黄精属,为多年生草本植物,是中国传统药食同源型中药材^[12]。多花黄精块茎具有补气养阴、健脾润肺、降三高、抗肿瘤等多种功效,在食品、保健品及免疫类药品等方面有较高的开发利用价值^[13]。鉴于其广阔的市场开发应用前景和较高的生态适应性,一些毛竹主产区开展了毛竹-多花黄精复合经营技术的推广应用。目前,毛竹林下多花黄精的相关研究主要集中在林分结构^[7]、坡位^[6]、海拔^[11]等环境因素对多花黄精生长及其活性成分的影响及摘花打顶增效^[14]等方

面,种植年限对多花黄精生长及生物量积累与分配影响的研究尚鲜见报道。多花黄精为多年生植物,块茎是其主要的药用部位,且块茎生长状态、生物量及品质等均与种植年限密切相关,种植年限过短,块茎生物量较小且有效成分含量低,经济效益不明显;而种植年限过长,则会导致地下块茎腐烂,造成产量和质量的损失^[15-16],因此适宜的种植年限与采收时间对毛竹-多花黄精复合经营产量与效益提升均有重要影响。为此,本研究以立地条件和经营措施基本一致的毛竹林下多花黄精为研究对象,测定了毛竹林下栽培1、2和3a的多花黄精种群特征、生长状况、生物量积累分配格局,分析其构件异速生长关系的差异,旨在阐明不同种植年限多花黄精资源分配特征,明确毛竹林下多花黄精适宜的采收年限,为毛竹-多花黄精高效复合经营提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验区地处浙江省江山市保安乡(118°22'~118°48'E, 28°15'26"~28°53'N),年均气温17.2℃,年均降水量1640~2300mm,日照时间2063h,年均无霜期255d左右。试验区土壤为黄红壤,土层厚度60cm以上。区域内毛竹资源丰富,面积超过2000hm²,且多为毛竹纯林,但以材用林经营为主,经营相对粗放。供试毛竹林林地坡度12°,坡向为半阴坡,平均海拔为530m;林分结构为立竹密度(1675±105)株/hm²,立竹胸径(9.12±1.01)cm,1~3度竹占比(年龄结构)3.24:3.67:2.09。

1.2 试验处理及指标测定

1.2.1 试验处理

2018年12月、2019年12月及2020年12月在试验区分别选择水肥条件好、土壤疏松的区块状毛竹林各1块,面积均不小于2.2hm²,进行多花黄精块茎种植,初植密度3000kg/hm²左右,成活率(95.32±2.61)%,长势良好。2021年9月多花黄精地上部分枯萎前,分别在种植1、2及3a的多花黄精试验林中布设20m×20m样地和1m×1m的样方各3个,用于竹林结构调查及多花黄精构件生物量分配特征研究。

1.2.2 生物量测定方法

采用样方法进行多花黄精生物量测定。将

1 m×1 m 样方内多花黄精全部整株连根挖出,注意保持植株完整,去除附着于块茎上的泥土等杂物,逐株测量多花黄精的基径(mm)、高度(cm)、冠长(自下而上第 1 片叶片着生位置至植株顶端的长度,cm)、果粒数(单株多花黄精果粒数量,粒)、叶片数(单株多花黄精叶片数量,片)等生长状况指标,并计算多花黄精密度(密度为 1 m×1 m 样方内多花黄精株数除以样方面积),后将秆、叶、果、根、块茎分离后装于取样袋中并做好标记,置于冰盒中带回实验室,冲洗干净泥土后,用天平(0.01 g)称量秆、叶、果、根、块茎鲜质量(g),于烘箱内 105 ℃杀青 30 min 后 85 ℃烘至恒定质量,测定各器官生物量干质量(g),并计算总生物量及各构件生物量分配比例。

1.2.3 生物量异速生长分析

采用基于 R 语言的 Smatr 模块对不同种植年限多花黄精构件生物量进行标准化主轴回归分析(standardized major axis, SMA)。各构件生物量异速生长关系用方程 $Y = ax^b$ 来描述,其中, x 与 Y 分别代表各种植年限构件(秆、叶、根、果、块茎)生物量和总生物量; a 为异速常数,即性状关系截距; b 为异速生长指数。若 $|b|$ 与 1.00 差异显著,则表明 x 和 Y 间呈异速生长关系;若不同种植年限时 $|b|$ 无显著差异,则计算共同 $|b|$,并采用 Wald 检验各

种植年限多花黄精沿共同主轴位移差异的显著性^[17-18]。

1.3 数据处理

试验数据在 Excel 2010 和 Origin 2018 中进行数据整理和图表制作,采用 SPSS 19.0 统计软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA),分析不同年龄多花黄精生长状况和构件生物量积累及分配的差异($\alpha=0.05$)。其中多花黄精构件生物量均以各样方内单块块茎上秆、叶、根、块茎及总生物量的均值进行分析。

2 结果与分析

2.1 毛竹林下不同年龄多花黄精生长状况

随种植年限延长,毛竹林下多花黄精基径、高度、冠长、果粒数、种群密度均呈升高趋势,且不同种植年限多花黄精高度、冠长、果粒数和种群密度间差异显著($P<0.05$),而种植 1、2 a 的多花黄精基径无显著差异($P>0.05$),但均显著低于种植 3 a 的多花黄精;多花黄精叶片数呈先下降后升高变化趋势,种植 1、3 a 的多花黄精叶片数无显著差异,但均显著高于种植 2 a 的多花黄精(表 1)。可见,种植年限延长明显提高毛竹林下多花黄精种群生长状况,增强种群的繁衍能力。

表 1 不同种植年限多花黄精生长状况

Table 1 Growth status of *Polygonatum cyrtoneura* with cultivation years under *Phyllostachys edulis* forest

种植年限/a planting year	基径/mm basal diameter	高度/cm height	冠长/cm crown length	果粒数/粒 fruit number	叶片数量/片 leaf number	植株密度/(株·m ⁻²) density
1	6.68±0.55 b	52.31±2.34 c	25.86±2.85 c	2.00±1.73 c	15.62±2.00 a	8.00±1.00 c
2	6.11±0.97 b	68.59±5.30 b	31.84±2.64 b	13.89±5.51 b	11.93±1.72 b	17.33±4.73 b
3	9.31±0.31 a	103.84±2.32 a	55.67±1.35 a	22.30±6.84 a	18.52±0.87 a	32.67±1.15 a

注:试验数据均为平均值±标准误;不同小写字母表示同一性状不同年限间差异显著($P<0.05$)。下同。The test data are mean±standard error. Different letters in the same traits mean significant difference at 0.05 level. The same below.

2.2 毛竹林下不同年龄多花黄精构件生物量积累及分配特征

随种植年限延长,毛竹林下多花黄精秆、叶、根、果、块茎、总生物量及地上生物量/地下生物量均呈升高趋势(表 2),且多花黄精秆、叶、果、块茎和总生物量及地上生物量/地上生物量不同种植年限间均差异显著($P<0.05$);而种植 1、2 a 多花黄精根生物量间无显著差异($P>0.05$),但均显著低于种植 3 a 多花黄精。

随种植年限延长,毛竹林下多花黄精秆、叶、果生物量分配比例均呈升高趋势(图 1),其中多花黄精秆、果生物量分配比例不同种植年限间差异显

著,而种植 2、3 a 多花黄精叶生物量分配比例间无显著差异,但均显著高于种植 1 a 多花黄精;多花黄精根和块茎生物量分配比例均呈降低趋势,其中多花黄精块茎生物量分配比例不同种植年限间差异显著,而种植 1、2 a 多花黄精根生物量分配比例间无显著差异,但均显著高于种植 3 a 多花黄精(图 1)。

可见,种植年限对毛竹林下多花黄精各构件生物量积累与分配影响明显,种植年限延长显著促进了多花黄精生物量的积累,且提高了地上生物量的比例。

表 2 不同种植年限多花黄精构件生物量
Table 2 Module biomass of *Polygonatum cyrtonea* with cultivation years under *Phyllostachys edulis* forest

种植年限/a planting year	秆生物量/g stem biomass	叶生物量/g leaf biomass	根生物量/g root biomass	果生物量/g fruit biomass	块茎生物量/g tuber biomass	地上/地下生物量比 ratio of above biomass to below biomass	总生物量/g total biomass
1	1.48±0.36 c	1.33±0.22 c	1.51±0.23 b	0.43±0.11 c	20.12±2.63 c	0.14±0.01 c	24.87±3.22 c
2	3.01±0.56 b	3.44±0.38 b	1.82±0.26 b	2.57±0.36 b	27.46±2.33 b	0.19±0.02 b	38.29±2.69 b
3	9.49±1.22 a	9.08±1.36 a	3.48±0.39 a	12.74±1.29 a	61.79±4.16 a	0.48±0.04 a	96.58±6.33 a

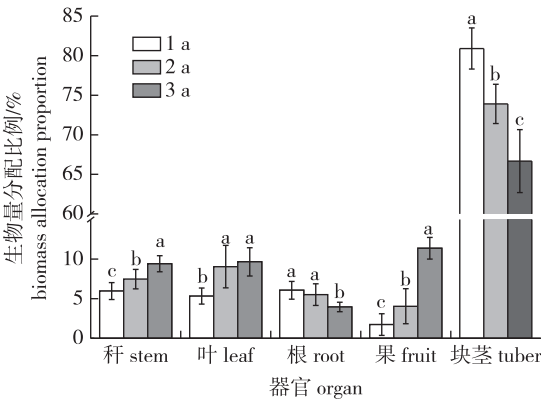


图 1 不同种植年限多花黄精构件生物量分配比例
Fig. 1 Biomass allocation of *Polygonatum cyrtonea* with different cultivation years under *Phyllostachys edulis* forest

2.3 毛竹林下不同年龄多花黄精构件生物量异速生长关系

毛竹林下不同种植年限多花黄精各构件秆、叶、根、果、块茎生物量(x)与总生物量(Y)间存在异速($b \neq 1$)或等速($b = 1$)增长关系(图 2):随种植年限延长,多花黄精秆、叶与总生物量异速生长指数均呈升高趋势,而根与总生物量异速生长指数则呈先升高后下降的变化趋势,且不同种植年限秆、叶、根与总生物量异速生长指数间均差异显著,种植 2 a 的多花黄精秆、叶、根与总生物量异速生长指数与 1.00 均无显著差异,呈等速生长关系;种植 1 和 2 a 的多花黄精块茎与总生物量异速生长指数均显著高于种植 3 a,且前二者间及其与 1.00 间均无显著差异,呈等速生长关系,且存在共同斜率,

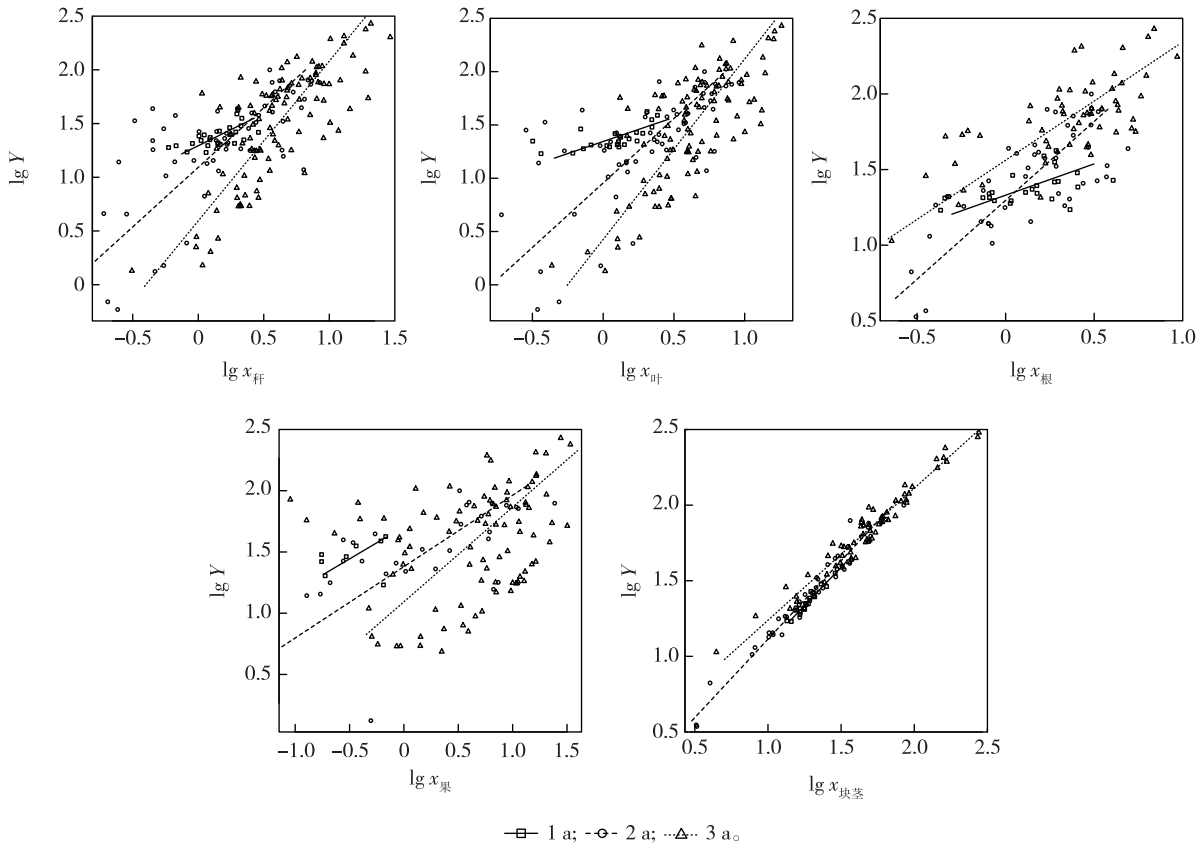


图 2 不同种植年限多花黄精构件生物量异速生长关系
Fig. 2 Allometric growth of module biomass in *Polygonatum cyrtonea* with different cultivation years under *Phyllostachys edulis* forest

Wald 检验显示种植 2 a 的截距显著升高。

随种植年限延长,果与总生物量异速生长指数总体呈升高趋势,且种植 1 和 2 a 果与总生物量异速生长指数并无显著差异,但均显著低于 3 a,即种植 1 和 2 a 的果与总生物量存在共同斜率(表 3),且 Wald 检验显示种植 2 a 的异速常数显著下降。

分析表明,多花黄精种植年限延长明显改变了秆、叶、根、块茎生物量增长关系,种植 2 a 的地下构件生物量增速最快,块茎生物量增量最大,而种植 3 a 后地下生物量增速明显下降,地上部分生物量增长速率则明显增加,因此多花黄精种植 3 a 后适宜采收。

表 3 不同种植年限多花黄精构件生物量的异速增长参数检验

参数 parameter	种植年限/a planting year	R^2	斜率 SMA slope	b 的置信区间 confidence interval of slope b		P
				下限 LowCI	上限 UppCI	
				秆-总生物量 stem-total biomass	1	
2	0.479 2	1.109 4[1.00]	1.351 7		0.910 5	0.298 8
3	0.571 9	1.506 9	1.719 8		1.320 3	0.000 1
叶-总生物量 leaf-total biomass	1	0.403 0	0.452 0	0.632 0	0.323 2	0.000 1
	2	0.440 2	1.209 9[1.00]	1.484 8	0.985 9	0.067 7
	3	0.559 9	1.693 2	1.936 0	1.480 8	0.000 1
根-总生物量 root-total biomass	1	0.247 9	0.414 2	0.602 4	0.284 8	0.000 1
	2	0.589 5	1.003 8[1.00]	1.215 3	0.829 1	0.968 6
	3	0.509 5	0.733 4	0.885 2	0.607 6	0.001 5
果-总生物量 fruit-total biomass	1	0.071 8	0.525 8(0.572 5)	1.235 8	0.223 7	0.130 8
	2	0.302 1	0.582 7(0.572 5)	0.805 8	0.421 4	0.001 5
	3	0.103 2	0.772 8	0.943 2	0.633 2	0.011 5
块茎-总生物量 tuber-total biomass	1	0.961 3	1.013 0([1.00])	1.105 0	0.928 7	0.760 2
	2	0.970 2	1.010 6([1.00])	1.064 2	0.959 6	0.684 9
	3	0.948 4	0.887 4	0.943 1	0.835 1	0.000 2

注:[1.00]表示异速生长指数与 1.00 差异不显著;括号()内数据表示共同异速生长指数;([1.00])表示共同异速生长指数为 1.00。
[1.00] represents no difference between SMA slope and 1.00. The number in parentheses refers to the common slope. ([1.00]) refers that the common slope is 1.00.

3 讨 论

生长状况是植物与环境长期适应的结果,不同时期植物生长状况的差异与其可利用资源水平差异及对资源的获取方式密切相关^[19-20]。本研究中,随种植年限增加,毛竹林下多花黄精基径、高度、冠长、果粒数和种群密度总体上均明显升高,说明种植年限增加,多花黄精资源倾向于繁殖投入,促进种群密度及果粒数的增加;在较高的种群密度下,多花黄精可利用光资源相对不足,其高度的增加有利于其占领较高的采光位置,而冠幅的伸长能扩展光资源的截获空间,有利于其充分截取和利用光资源^[21-22]。叶片是植物光合作用的重要器官,随种植年限延长,多花黄精叶片数呈先下降后升高趋势,而叶生物量则呈升高趋势,其原因可能是种植 1 a 的多花黄精倾向于形成小而多的叶片,但种植 2 a 以上多花黄精则倾向于形成大而少的叶片。研究表明,较小的叶片边缘较薄,其水热交换能力

较弱,在高光照环境下表现出较强的生长优势^[23-24],而种植 1、3 a 的多花黄精叶片数量增加能够提高其对透射光的利用率,增强碳同化能力^[25],同时也说明弱光条件下,多花黄精优先将资源用于叶面积的构建,而非叶片数量的增加。可见,种植年限对毛竹林下多花黄精生长状况有显著影响,进一步体现了不同时期多花黄精生长策略及其生态适应性的差异。

生物量是植物能量和物质积累的直接体现,生物量分配特征则反映了植物对光、水和养分等环境资源的获取能力及对环境的生态适应性^[25],植物不同构件生物量及其比例的差异体现构件间的协调关系和生长策略^[26-27]。地上构件的合理配置能提高植物对光资源的利用效率,促进光合碳同化产物的积累,而地下构件生物量的增加则有利于增强植物对土壤水分、养分等的吸收能力^[28]。本研究表明,种植年限对毛竹林下多花黄精各构件生物量积累与分配影响显著,随种植年限延长各构件

生物量、总生物量及地上生物量与地下生物量比均明显升高,且秆、叶、果生物量分配比例均升高,而根、块茎生物量分配比例则下降,体现了多花黄精通过对地上、地下构件生物量分配的权衡来充分获取及利用有限的资源,从而达到最大生长速率^[29]。多花黄精块茎和果实均为其重要的繁殖体,同时块茎也是其主要的资源储存器官,种植1 a的多花黄精种群密度较低,光照条件相对充足,资源主要投资于地下系统,增加块茎和根的生物量,不仅有利于提高多花黄精对土壤养分、水分的吸收和储存效率,同时也能促进种群的维持和扩大^[7, 30]。最优分配理论认为,在光资源不足的情况下,植物会倾向于增加光获取构件的投入^[31],种植2、3 a的多花黄精由于种群密度提高,导致可利用光资源降低,其通过提高光合构件(叶)和支持构件(秆)的生物量分配比例,以增强对光资源的利用能力,同时在可利用资源相对充足的条件下,果生物量及果生物量分配比例的增加则有利于提高种群的繁衍能力。

异速生长关系可以定量描述植物性状特点及其资源分配特征^[32],植物构件间的异速生长关系虽主要由其自身遗传特性所决定,但植株年龄、资源可用性及外界环境也会对其产生重要影响^[33-34]。本研究中,不同种植年限毛竹林下多花黄精各构件生物量与总生物量间既存在异速生长关系,也有等速生长关系,且其异速增长斜率与各构件生物量分配比例基本一致,表明不同种植年限多花黄精各构件生物量分配的差异主要由各构件与个体大小之间相对生长速率的差异所导致^[35]。随种植年限延长,多花黄精秆、叶、果-总生物量异速生长指数均升高,说明在光资源受限情况下,多花黄精会明显提高光合构件及支撑构件的增速,以获取足够的资源满足自身旺盛的生长需求及种群的繁衍与稳定^[36];而块茎-总生物量相对增长速率随种植年限的延长呈降低趋势,且种植1、2 a间无明显差异,其原因是:一方面随种植年限增加,多花黄精将资源优先用于地上部分的投资导致地下部分资源投资比例降低;另一方面则可能与块茎生物量增加引起土壤空间资源的限制密切相关。说明种植年限对多花黄精生物量分配特征有重要影响,多花黄精通过对各构件生物量分配的权衡来充分获取及利用环境资源^[37],从而确保多花黄精向有利于种群繁衍的方向进行。同时,结合药食同源利用的器官(块茎)生物量占比随种植年限延长逐年下降趋势,而种植2 a时块茎增长速率相对较高,

因此为促进毛竹林下多花黄精良好生长和高效产出,并获取较高的经济效益,宜在种植后3 a及时采收块茎。

毛竹林下多花黄精通过权衡资源分配关系,诱发其形态和生物量的可塑性变化,以增强多花黄精对不同种植年限种群密度差异引起的资源限制的适应能力。随种植年限延长,多花黄精种群密度、生长状况及构件生物量显著提高,同时通过降低对地下构件的投入,将更多的资源用于地上构件的生长,利于其对光资源的获取以及种群繁衍能力的增强;种植2 a的多花黄精地下构件生物量增速最快,种植3 a的地下构件生物量增速明显下降,地上构件生物量增长速率则明显增加,因此毛竹-多花黄精复合经营生产中,宜在种植3 a后采收块茎。本试验仅研究了种植年限对多花黄精生长及生物量分配特征的影响,而多花黄精药用活性成分的含量也是制约其价值的重要因素,因此需继续开展种植年限对毛竹林下多花黄精药用活性成分影响的研究。

参考文献(reference):

- [1] 范少辉,刘广路,苏文会,等.竹林培育研究进展[J].林业科学研究,2018,31(1):137-144.FAN S H, LIU G L, SU W H, et al. Advances in research of bamboo forest cultivation[J]. For Res, 2018, 31(1): 137-144. DOI: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2018.01.017.
- [2] 刘子宣,贾存,秦志强,等.华北落叶松林下光环境对白栎幼树生长的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2020,44(6):111-117.LIU Z X, JIA C, QIN Z Q, et al. Effects of light conditions on the growth of understory *Picea meyeri* sapling in *Larix principis-rupprechtii* forest[J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2020, 44(6): 111-117.
- [3] 卢鹏,谢锦忠,童龙,等.麻竹林下竹荪仿野生种植关键技术研究[J].南京林业大学学报(自然科学版),2016,40(4):177-182.LU P, XIE J Z, TONG L, et al. Study on the wild imitation cultivation technique for *Dictyophora indusiata* in *Dendrocalamus latiflorus* stands[J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2016, 40(4): 177-182. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.2016.04.028.
- [4] 樊艳荣,陈双林,杨清平,等.毛竹材用林林下植被群落结构对多花黄精生长的影响[J].生态学报,2014,34(6):1471-1480.FAN Y R, CHEN S L, YANG Q P, et al. The impact of understory vegetation structure on growth of *Polygonatum cyrtoneura* in extensively managed *Phyllostachys edulis* plantation[J]. Acta Ecol Sin, 2014, 34(6): 1471-1480. DOI: 10.5846/stxb201210241476.
- [5] 高平珍,陈双林,郭子武,等.毛竹林下苦参和决明幼苗光合作用光响应模型比较[J].林业科学研究,2018,31(2):156-163.GAO P Z, CHEN S L, GUO Z W, et al. Comparison of photosynthetic light response models of *Sophora flavescens* and *Cassia tora* under *Phyllostachys edulis* seedlings[J]. For Res, 2018, 31(2): 156-163. DOI: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2018.02.022.
- [6] 樊艳荣,陈双林,杨清平,等.陡坡地毛竹林多花黄精种群生长和生物量分配的坡位效应[J].热带亚热带植物学报,2012,20

- (6):555-560.FAN Y R, CHEN S L, YANG Q P, et al. Effects of slope on population growth and biomass allocation of *Polygonatum cyrtonea* in *Phyllostachys edulis* forest [J]. J Trop Subtrop Bot, 2012, 20(6):555-560.
- [7] 樊艳荣,陈双林,杨清平,等.毛竹林下多花黄精种群生长和生物量分配的立竹密度效应[J].浙江农林大学学报,2013,30(2):199-205.FAN Y R, CHEN S L, YANG Q P, et al. Population growth and biomass allocation of *Polygonatum cyrtonea* within a *Phyllostachys edulis* forest utilizing bamboo density treatments [J]. J Zhejiang A&F Univ, 2013, 30(2):199-205.
- [8] 周新华,肖智勇,曾平生,等.林下生境及生长年限对多花黄精生长和药用活性成分含量的影响[J].西南林业大学学报(自然科学),2019,39(4):155-160.ZHOU X H, XIAO Z Y, ZENG P S, et al. Effects of different forest habitats and growth years on the growth of *Polygonatum cyrtonea* and the content of medicinal active components [J]. J Southwest For Univ (Nat Sci), 2019, 39(4):155-160. DOI: 10.11929/j.swfu.201903135.
- [9] 孙志蓉.甘草柠条混生作用机制及其对药材质量的影响[D].北京:北京林业大学,2004.SUN Z R. The interacting mechanism when *Glycyrrhiza uralensis* and *Caragana microphylla* growing together and effects on quality of *Radix glycyrrhizae* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2004.
- [10] 刘跃钧,蒋燕锋,葛永金,等.锥栗-多花黄精不同复合经营模式经济生态效益评价[J].经济林研究,2020,38(4):72-81. LIU Y J, JIANG Y F, GE Y J, et al. Economic and ecological benefits evaluation of different compound management modes of *Castanea henryi* and *Polygonatum cyrtonea* [J]. Non Wood For Res, 2020, 38(4):72-81. DOI: 10.14067/j.cnki.1003-8981.2020.04.009.
- [11] 沈琼桃,黄云鹏,王邦富,等.海拔梯度对多花黄精生长及多糖含量的影响[J].福建林业科技,2016,43(3):157-160.SHEN Q T, HUANG Y P, WANG B F, et al. Effect of different elevation gradients on the growth and polysaccharide content of *Polygonatum cyrtonea* Hua [J]. J Fujian For Sci Technol, 2016, 43(3):157-160. DOI: 10.13428/j.cnki.fjlk.2016.03.032.
- [12] 梁永富,王康才,薛启,等.高温强光胁迫下水杨酸对多花黄精生理及光合特性的影响[J].南京农业大学学报,2018,41(5):839-847.LIANG Y F, WANG K C, XUE Q, et al. Effects of salicylic acid on physiological and photosynthetic characteristics of *Polygonatum cyrtonea* Hua under high temperature and strong light stress [J]. J Nanjing Agric Univ, 2018, 41(5):839-847.
- [13] ZENG T, TANG Y R, LI B, et al. Chemical characterization of constituents from *Polygonatum cyrtonea* Hua and their cytotoxic and antioxidant evaluation [J]. Nat Prod Res, 2020, 34(17):2482-2489. DOI: 10.1080/14786419.2018.1543682.
- [14] 杨清平,陈双林,郭子武,等.摘花和打顶措施对毛竹林下多花黄精块茎生物量积累特征的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2021,45(2):165-170.YANG Q P, CHEN S L, GUO Z W, et al. Responses of tuber biomass accumulation and its allometry to topping and flower plucking measures of *Polygonatum cyrtonea* grown under *Phyllostachys edulis* forests [J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2021, 45(2):165-170. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202003013.
- [15] 崔阔澍, AHMED A, KHAN A, 等.种茎对多花黄精产量和药用品质的影响[J].中国农学通报,2021,37(19):95-99.CUI K S, AHMED A, KHAN A, et al. The influence of stem tuber on *Polygonatum cyrtonea* yield and medicinal quality [J]. Chin Agric Sci Bull, 2021, 37(19):95-99.
- [16] 陈怡,姚云生,陈松树,等.多花黄精不同龄节药材质量研究[J].福建农业学报,2020,35(1):38-43.CHEN Y, YAO Y S, CHEN S S, et al. Medicinal quality relating to age of *Polygonatum cyrtonea* Hua plant sections [J]. Fujian J Agric Sci, 2020, 35(1):38-43. DOI: 10.19303/j.issn.1008-0384.2020.01.006.
- [17] WARTON D I, DUURSMA R A, FALSTER D S, et al. SMART 3-an R package for estimation and inference about allometric lines. Methods Ecol Evol, 2012, 3(2):257-259.
- [18] WARTON D I, WRIGHT I J, FALSTER D S, et al. Bivariate line-fitting methods for allometry [J]. Biol Rev Camb Philos Soc, 2006, 81(2):259-291. DOI: 10.1017/S1464793106007007.
- [19] ZIRBEL C R, BASSETT T, GRMAN E, et al. Plant functional traits and environmental conditions shape community assembly and ecosystem functioning during restoration [J]. J Appl Ecol, 2017, 54(4):1070-1079.
- [20] 郑敏娜,韩志顺,梁秀芝,等.不同生长年限紫花苜蓿根系形态特征分析[J].中国草地学报,2019,41(6):60-66.ZHENG M N, HAN Z S, LIANG X Z, et al. Analysis of root morphology characteristics of *Medicago sativa* in different growth years [J]. Chin J Grassland, 2019, 41(6):60-66. DOI: 10.16742/j.zgdx.20190080.
- [21] 李娜.不同种植密度对玉米生长发育及产量的影响[D].哈尔滨:东北农业大学,2018.LI N. Effects of planting density on yield and growth of different maize varieties [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018.
- [22] 龙嘉翼,赵宇萌,孔祥琦,等.观赏灌木小枝和叶性状在林下庇荫环境中的权衡关系[J].生态学报,2018,38(22):8022-8030.LONG J Y, ZHAO Y M, KONG X Q, et al. Trade-offs between twig and leaf traits of ornamental shrubs grown in shade [J]. Acta Ecol Sin, 2018, 38(22):8022-8030. DOI: 10.5846/stxb201801140102.
- [23] MCDONALD P G, FONSECA C R, OVERTON J M, et al. Leaf-size divergence along rainfall and soil-nutrient gradients: is the method of size reduction common among clades? [J]. Funct Ecol, 2003, 17(1):50-57. DOI: 10.1046/j.1365-2435.2003.00698.x.
- [24] PRESTON K A, ACKERLY D D. Hydraulic architecture and the evolution of shoot allometry in contrasting climates [J]. Am J Bot, 2003, 90(10):1502-1512. DOI: 10.3732/ajb.90.10.1502.
- [25] 史元春,赵成章,宋清华,等.兰州北山刺槐枝叶性状的坡向差异性[J].植物生态学报,2015,39(4):362-370.SHI Y C, ZHAO C Z, SONG Q H, et al. Slope-related variations in twig and leaf traits of *Robinia pseudoacacia* in the northern mountains of Lanzhou [J]. Chin J Plant Ecol, 2015, 39(4):362-370. DOI: 10.17521/cjpe.2015.0035.
- [26] HE Q, HAO Y H, GAO X C, et al. Biomass production of *Moringa oleifera* as affected by N, P, and K fertilization [J]. J Plant Nutr, 2020, 43(10):1458-1467. DOI: 10.1080/01904167.2020.1739305.
- [27] YUE K, FORNARA D A, LI W, et al. Nitrogen addition affects plant biomass allocation but not allometric relationships among different organs across the globe [J]. J Plant Ecol, 2020, 14(3):361-371. DOI: 10.1093/jpe/rtaa100.
- [28] 樊后保,李燕燕,苏兵强,等.马尾松-阔叶树混交异龄林生物量与生产力分配格局[J].生态学报,2006,26(8):2463-2473.FAN H B, LI Y Y, SU B Q, et al. Allocation pattern of biomass and productivity in the mixed uneven-aged stands of *Masson's*

- pine and hardwood species[J]. Acta Ecol Sin, 2006, 26(8): 2463–2473.
- [29] 孙涛, 邓斌, 刘志云, 等. 短穗兔耳草生物量分配格局对高寒草甸营养库衰退的响应[J]. 草业科学, 2011, 28(11): 1982–1986. SUN T, DENG B, LIU Z Y, et al. Responses of biomass allocation of *Lagotis brachystachya* to degradation of soil nutrition bank in alpine meadow[J]. Pratacultural Sci, 2011, 28(11): 1982–1986.
- [30] 黄慧敏, 董蓉, 钱凤, 等. 紫耳箭竹克隆形态可塑性对典型冠层结构及光环境的响应[J]. 生态学报, 2018, 38(19): 6835–6845. HUANG H M, DONG R, QIAN F, et al. Response of clonal morphological plasticity of *Fargesia decurvata* to different forest canopy structures and light conditions[J]. Acta Ecol Sin, 2018, 38(19): 6835–6845. DOI: 10.5846/stxb201710161859.
- [31] 李钰, 赵成章, 侯兆疆, 等. 高寒退化草地狼毒种群个体大小与茎、叶的异速生长[J]. 生态学杂志, 2013, 32(2): 241–246. LI Y, ZHAO C Z, HOU Z J, et al. Body size and stem-and leaf allometry of *Stellera chamaejasme* in degraded alpine grassland[J]. Chin J Ecol, 2013, 32(2): 241–246. DOI: 10.13292/j.1000-4890.2013.0133.
- [32] HEINEMAN K D, JENSEN E, SHAPLAND A, et al. The effects of belowground resources on aboveground allometric growth in Bornean tree species[J]. For Ecol Manag, 2011, 261(11): 1820–1832. DOI: 10.1016/j.foreco. 2011.02.005.
- [33] 姚婧, 李颖, 魏丽萍, 等. 东灵山不同林型五角枫叶性状异速生长关系随发育阶段的变化[J]. 生态学报, 2013, 33(13): 3907–3915. YAO J, LI Y, WEI L P, et al. Changes of allometric relationships among leaf traits in different ontogenetic stages of *Acer mono* from different types of forests in Donglingshan of Beijing[J]. Acta Ecol Sin, 2013, 33(13): 3907–3915. DOI: 10.5846/stxb201210011367.
- [34] 毛圆圆, 郝俊, 龙水义, 等. 煤矸石山不同种植年限香根草生物量分配及异速生长分析[J]. 广西植物, 2020, 40(6): 802–811. MAO Y Y, HAO J, LONG S Y, et al. Biomass allocation and allometric analysis of *Vetiveria zizanioides* in different planting years on coal spoil-heaps[J]. Guihaia, 2020, 40(6): 802–811. DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201901023.
- [35] 李鑫, 李昆, 段安安, 等. 不同地理种源云南松幼苗生物量分配及其异速生长[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(4): 41–50. LI X, LI K, DUAN A A, et al. Biomass allocation and allometry of *Pinus yunnanensis* seedlings from different provenances[J]. J Beijing For Univ, 2019, 41(4): 41–50. DOI: 10.13332/j.1000-1522.20180371.
- [36] 张力天, 刘炜, 刘德梅, 等. 青藏高原白草生长期植株器官生物量分配特征[J]. 草地学报, 2021, 29(12): 2694–2702. ZHANG L T, LIU W, LIU D M, et al. Biomass distribution characteristics of organs in the reproductive growth period of *Pennisetum centasiaticum* on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Agrestia Sin, 2021, 29(12): 2694–2702.
- [37] 李西良, 侯向阳, 吴新宏, 等. 草甸草原羊草茎叶功能性状对长期过度放牧的可塑性响应[J]. 植物生态学报, 2014, 38(5): 440–451. LI X L, HOU X Y, WU X H, et al. Plastic responses of stem and leaf functional traits in *Leymus chinensis* to long-term grazing in a meadow steppe[J]. Chin J Plant Ecol, 2014, 38(5): 440–451. DOI: 10.3724/SP.J.1258.2014.00040.

(责任编辑 郑琰琰)