

林窗大小对白背三七生长及营养成分的影响

毛玉明¹, 乔卫阳¹, 武克壮¹, 虞木奎², 成向荣²

(1. 浙江省开化县林场, 浙江 开化 324300; 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: 林菜复合经营模式构建对促进山区林下经济发展具有重要意义。为探明林窗大小对白背三七 *Gynura divaricata* 生长及品质变化的影响, 在浙江开化开展了杉木 *Cunninghamia lanceolata* 大林窗(平均光照强度 $763 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), 小林窗(平均光照强度 $245 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)和林下(平均光照强度 $89 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)3种生境对白背三七生长、光合及营养成分影响的研究。结果表明: 相对于无林窗的杉木林下, 生长在较大林窗内(面积 $12\sim 16 \text{ m}^2$)的白背三七叶片光合速率、株高、地径、分枝数, 叶片钾、磷、维生素 C 以及缬氨酸、蛋氨酸和赖氨酸等水溶性氨基酸质量分数显著增加($P<0.05$), 而较小的林窗(面积小于 9 m^2)对白背三七生长及品质没有显著影响($P>0.05$)。由此可见, 林窗大小对白背三七生长和营养品质有重要影响。但在郁闭度大于 0.8 的杉木林下并不适宜直接套种白背三七, 对现有杉木人工林进行适度间伐, 提高林下光照条件, 将有利于林菜复合经营系统发展。图 2 表 3 参 23

关键词: 植物学; 白背三七; 林窗; 光合作用; 生长; 营养成分

中图分类号: S759.8

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2016)01-0088-06

Growth, photosynthesis, and nutrition of *Gynura divaricata* with forest gap treatments

MAO Yuming¹, QIAO Weiyang¹, WU Kezhuang¹, YU Mukui², CHENG Xiangrong²

(1. Kaihua Forest Farm, Kaihua 324300, Zhejiang, China; 2. Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, Zhejiang, China)

Abstract: It is important to construct a mixed forest-vegetable system to promote economic development in mountainous areas. To determine the size of forest gap impact on growth, nutrition characteristics of *Gynura divaricata* in a Chinese fir plantation of Kaihua, Zhejiang Province. Growth, photosynthesis, and nutrition of *G. divaricata* were studied in three habitats types having: a large gap (area from 12 m^2 to 16 m^2 , average light intensity of $763 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), a small gap (area $< 9 \text{ m}^2$, average light intensity of $245 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), and no gap (average light intensity of $89 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$); three or four gaps or no gap site for each treatment were randomly selected in this study. Results showed that the photosynthetic rate, plant height, ground diameter, number of branches, potassium (K), phosphorus (P), Vitamin C (Vc), and content of some water-soluble amino acids (e.g. valine, methionine, and lysine) for the large gap treatment were significantly greater than no gaps ($P < 0.05$). However, growth, photosynthesis, and nutrition with small gap treatments were not significantly different than those with no gap treatments ($P > 0.05$). Therefore, due to the forest gap influence on growth and nutrition of *G. divaricata*, it was not suitable to plant under Chinese fir plantations with a high canopy coverage (> 0.8) unless thinning was conducted to improve understory light conditions thereby allowing development of the mixed forest-vegetable system. [Ch, 2 fig. 3 tab. 23 ref.]

Key words: botany; *Gynura divaricata*; forest gap; photosynthesis; growth; nutrition

收稿日期: 2015-03-04; 修回日期: 2015-04-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31300519)

作者简介: 毛玉明, 高级工程师, 从事森林经营与管理研究。E-mail: fychxr@126.com。通信作者: 成向荣, 副研究员, 博士, 从事生态工程研究。E-mail: chxr@caf.ac.cn

近年来, 林下经济的发展日益受到关注。大力发展林下栽植, 充分利用林下资源是提高林地产出和增加林农收入的有效途径之一。如东北地区林下栽植人参 *Panax ginseng* 取得了非常好的效益, 但林菜复合经营研究较少, 仍处于探索阶段^[1]。相对于传统蔬菜, 林下山野菜生态适应能力强, 受污染较轻, 富含多种微量元素, 营养丰富, 风味独特, 具多种保健功能。随着人们生活水平提高和保健意识的不断加强, 山野菜日益成为人们的消费取向^[2]。白背三七 *Gynura divaricata* 是菊科 Compositae 三七草属 *Gynura* 的多年生宿根草本植物, 又称白子菜、富贵菜, 高 30~50 cm, 是一种药食兼用型的保健型野生蔬菜^[3-4], 主要分布在中国亚热带地区。白背三七不仅营养成分丰富, 维生素 C、蛋白质、可溶性糖, 以及钙、铁、铜、锌等微量元素含量都比较高, 而且具有极强的降血压, 降血脂, 抑制糖尿病的功效, 其营养价值和药用价值越来越受到人们的重视和亲睐^[4-5]。它适应性强, 病虫害少, 管理相对粗放, 极易栽培^[5]。目前, 白背三七主要通过田间和设施栽培发展^[5-6]。研究表明: 白背三七具有一定耐阴性, 可以在林下种植^[7], 但不同光环境对其营养品质的影响尚缺乏系统研究。林窗对林下生境有重要影响, 其中林下光照和温度的变化最明显^[8], 尤其是林下光照随林窗面积增加显著增大^[9], 而土壤养分的变化相对缓和^[10]。光照是影响林下植物生长和更新最重要的环境因子。杉木 *Cunninghamia lanceolata* 作为中国南方地区最主要的人工林, 构建适宜的林菜复合经营模式是强化人工林培育的有益探索。为此, 在浙江省开化县杉木人工林内开展了不同林窗大小对白背三七生长及营养成分影响的研究, 为林菜复合经营模式构建提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于浙江省开化县林场城关分场小桥头林区(29°09'N, 118°25'E)。试验区年平均气温为 16.4 ℃, 年平均降水量 1 814.0 mm, 无霜期 252 d, 年日照总时数 1 334.1 h, 气候属亚热带季风气候。土壤为红黄壤, pH 4.5~4.9。

供试林分为 21 年生杉木纯林, 初植密度为 3 000 株·hm⁻², 经过 2 次间伐后, 现保留密度为 1 246 株·hm⁻², 平均郁闭度 0.85 以上。2014 年 3 月在杉木林下沿水平带进行带状整地, 水平带宽 0.5 m 左右, 带间距 1.0 m, 尽量保持带面平整。将 1 年生白背三七种苗栽植在水平带上, 1 条水平带种植 1 行白背三七, 株间距 0.3 m, 栽植后抚育 3~4 次。

1.2 试验设计

受前期雪灾的影响, 杉木林内形成一些林窗。本试验选择杉木大林窗(面积 12~16 m²)和小林窗(6~9 m²)各 3~4 个, 研究大林窗(L₁, 平均光照强度 763 μmol·m⁻²·s⁻¹), 小林窗(L₂, 平均光照强度 245 μmol·m⁻²·s⁻¹)和无林窗(L₃, 平均光照强度 89 μmol·m⁻²·s⁻¹)下白背三七的生长及营养品质变化特征。

1.3 光合作用参数测定

光合作用光响应曲线的测定采用 LI-COR 公司生产的 LI-6400 便携式光合测定仪。测定时选择 Li-6400 红蓝光源, 设置空气流速为 0.5 L·min⁻¹, 控制相对湿度、气温和二氧化碳摩尔分数与外界环境一致。测定时光照强度从 2 000 μmol·m⁻²·s⁻¹ 开始, 依次降为 1 500, 1 000, 800, 500, 200, 100, 80, 50, 20, 0 μmol·m⁻²·s⁻¹。各处理选择 5~6 片成熟、健康的叶片进行测定。这些测定在晴天上午 9:00~11:30 进行。

光响应曲线的拟合模型选择文献[11]的方法, 通过模型拟合得出最大净光合速率、表观量子效率、光饱和点和光补偿点等参数。

1.4 白背三七生长及营养元素质量分数测定

2014 年 8 月中旬在 3 种处理下各选择 30~40 株白背三七苗, 分别测定苗高、地径和分枝数。采集 3 种处理下枝条上部的叶片鲜样进行营养成分分析。维生素 C 采用分光光度计测定, 蛋白质用凯氏定氮仪测定, 可溶性糖采用蒽酮法测定, 水溶性氨基酸用日立 L-8900 氨基酸分析仪测定^[12], 营养成分质量分数用鲜质量表示。钾、钙、铁、磷采用湿灰化法制备样品, 利用三酸([V(HNO₃):V(HClO₄):V(H₂SO₄)] = 8:1:1)消化, 用原子吸收光谱仪测定。

1.5 数据处理

所有数据用 Excel 2003 和 SPSS 17.0 进行分析处理, 白背三七生长、光合及营养成分在 3 种生境下的差异采用单因素方差分析来检验, 并进行 Duncan 多重比较。

2 结果与讨论

2.1 林窗大小对生长及产量的影响

从表 1 可以看出: 3 种生境下白背三七的生长具有较大差异, 株高、地径和分枝数随林窗面积的减小逐渐降低。株高 L_1 处理显著高于 L_2 和 L_3 处理($P<0.05$), 分别比 L_2 和 L_3 处理增加 29.9%和 47.9%; 地径和分枝数 L_1 处理显著高于 L_3 处理($P<0.05$)。 L_1 和 L_2 处理白背三七产量分别比 L_3 处理增加 56.7%和 19.4%, 仅 L_1 处理显著高于 L_3 处理($P<0.05$), L_2 与 L_3 处理之间没有统计上的显著差异。

表 1 林窗和林下白背三七生长特征及产量的比较

Table 1 Compare of growth characteristics and yield of *Gynura divaricata* in forest gaps and understory

处理	株高/cm	地径/mm	分枝数/个	产量/(kg·hm ⁻²)
L_1	34.2 ± 4.6 a	8.3 ± 1.2 a	17.7 ± 3.4 a	1 906.5 ± 297.1 a
L_2	26.1 ± 3.8 b	7.1 ± 1.5 ab	14.8 ± 3.9 ab	1 452.3 ± 221.5 ab
L_3	23.8 ± 4.1 b	6.4 ± 1.3 b	12.2 ± 3.8 b	1 216.8 ± 269.4 b

植物在变化光环境下具有不同的生长响应。已有的一些研究表明: 植物幼苗高生长随光照有效性的增加而增大^[13-14], 而 POORTER^[15]指出耐阴植物幼苗在中等光照强度下(25%~50%相对光照)生长速率最高。本研究也发现: 白背三七生长和产量随林下光照有效性的增加而增大, 但是仅大林窗内白背三七生长和产量得到显著增加。这可能是因为较小林窗的小气候与林内接近^[16], 而较大的林窗内光照和土壤温度较高, 有利于白背三七生长。尽管一些研究表明, 林窗内晴天土壤湿度降低, 雨天土壤湿度增加^[17]。本研究中林窗面积相对较小, 加之研究区雨水充沛, 林窗对土壤湿度的影响较弱。这表明白背三七具有一定的耐阴性, 在大林窗下生长较好, 而在郁闭度较高的杉木林下生长受到一定程度抑制。

2.2 林窗大小对光合特性的影响

光是影响植物生长发育和形态建成的最重要生态因子。植物光合效率的大小直接影响植物生长。光合-光响应曲线拟合结果显示, 随光照强度减弱, 白背三七叶片最大净光合速率($P_{\max}$)逐渐降低, 其中 L_1 处理 $P_{\max}$ 显著高于 L_3 处理($P<0.05$), L_2 处理白背三七的 $P_{\max}$ 与其他 2 种处理之间没有显著差异($P>0.05$)。白背三七叶片表观量子效率(A_{QY})在 3 种处理之间差异不显著($P>0.05$)。白背三七叶片光补偿点(P_{LC})随林下光照强度减弱显著降低($P<0.05$)。3 种生境下, 白背三七光饱和点(P_{LS})变化趋势与 $P_{\max}$ 类似, 随光照强度降低, P_{LS} 逐渐减小(表 2)。

表 2 林窗和林下白背三七光合参数特征

Table 2 Photosynthesis parameters of *G. divaricata* in forest gaps and understory

处理	最大净光合速率 ($P_{\max}$)/(μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	表观量子效率 (A_{QY})/(μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	光补偿点 (P_{LC})/(μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	光饱和点 (P_{LS})/(μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)
L_1	6.31 ± 0.39 a	0.044 ± 0.003 a	31.25 ± 3.41 a	659.76 ± 49.64 a
L_2	5.78 ± 0.46 ab	0.041 ± 0.006 a	20.33 ± 0.92 b	603.42 ± 60.35 ab
L_3	4.96 ± 0.37 b	0.043 ± 0.005 a	8.16 ± 2.81 c	540.91 ± 31.41 b

白背三七叶片 $P_{\max}$, P_{LS} 和 P_{LC} 均随光照有效性减弱逐渐降低, 这可能是植物对弱光环境的一种适应。这些光合参数在 L_1 和 L_2 处理之间没有显著差异(除 P_{LC} 外), L_3 处理光合参数显著低于 L_1 处理。表明白背三七具有一定的耐阴性, 在弱光下生长受到一定影响。通常在适宜的生长条件下, 植物实测光合量子效率为 0.03~0.05^[18]。3 种生境下白背三七叶片表观量子效率基本处于上述范围, 表明白背三七利用弱光的能力较强, 在本试验条件下受外界环境因子的胁迫较轻。此外, 光补偿点代表了植物的需光特性和需光量。有研究指出: 阴生植物的 P_{LC} 在 20 μmol·m⁻²·s⁻¹ 以下, 阳生植物的 P_{LC} 一般为 50~100 μmol·m⁻²·s⁻¹^[19]。白背三七具有较低的光补偿点, 说明在弱光环境下具有较高的光利用效率; 而不同生境下 P_{LC}

具有较大的变异，说明白背三七具有某种内在调节机制，增加光合器官对不同光环境的适应。

2.3 林窗大小对白背三七品质的变化

蔬菜中钾、磷、钙、铁和维生素 C 等营养物质对于维持人体正常的生理代谢具有重要作用。生境的变化往往影响植物不同营养物质储存和转化。

由图 1 可见：随光照强度减弱，白背三七叶片中钾和磷质量分数降低，其中 L_1 和 L_2 处理钾和磷质量分数没有显著差异($P>0.05$)， L_3 处理显著降低($P<0.05$)。叶片中铁和蛋白质质量分数在 3 种处理之间没有显著变化($P>0.05$)。叶片中钙质量分数以 L_2 处理最高，其次为 L_1 处理， L_3 处理钙质量分数最低，分别比 L_1 和 L_2 处理减少 48.4%和 57.6%。维生素 C 质量分数也随光照强度减弱逐渐降低， L_3 处理维生素 C 质量分数显著低于 L_1 处理($P<0.05$)， L_2 处理维生素 C 与其他 2 种处理之间没有显著差异($P>0.05$)。 L_2 和 L_3 处理可溶性糖质量分数均显著低于 L_1 处理($P<0.05$)，分别是 L_1 处理的 23.0%和 21.3%(图 2)。由此可见：光环境差异对白背三七叶片钾、钙、磷、维生素 C 和可溶性糖质量分数有显著影响，而对铁和蛋白质质量分数影响较小。蒲公英 *Taraxacum mongolicum* 遮光试验表明：不同光照条件下可溶性糖质量分数的大小为 75%光强>100%自然光强>50%光强和 25%光强，维生素 C 质量分数也以 75%光强下最高，其他 3 种光强下维生素 C 质量分数没有显著差异^[20]。这表明不同植物对光照强度的适应性范围不同，导致在其营养成分积累特征不一致。

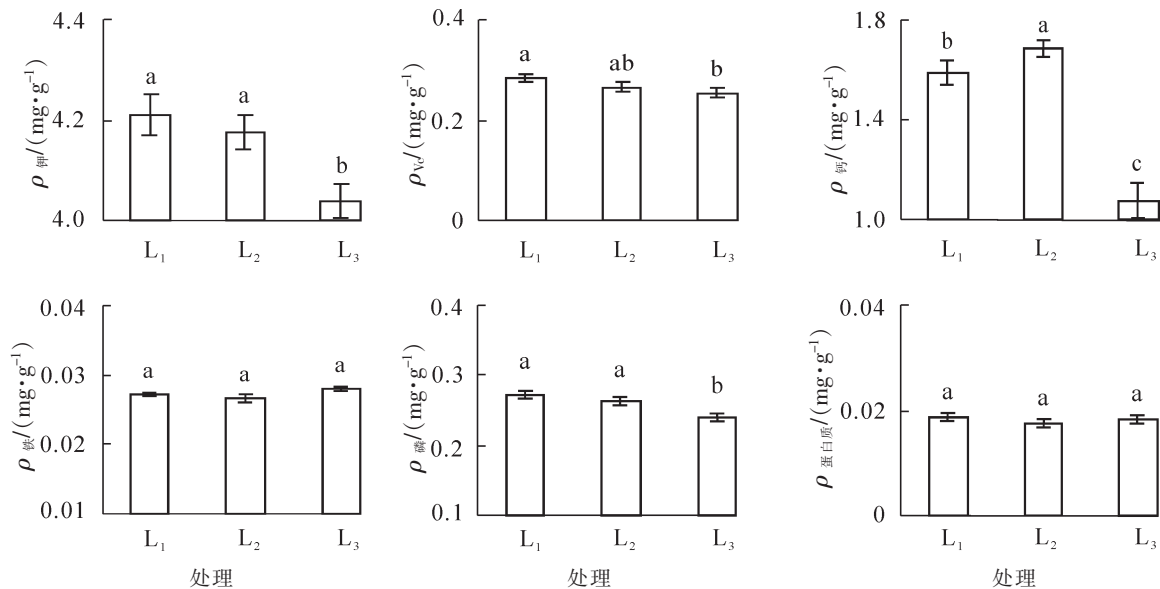


图 1 林窗和林下白背三七营养元素和蛋白质质量分数特征
Figure 1 Nutrient elements and protein contents of *Gynura divaricata* in forest gaps and understory

氨基酸不仅可以消化和吸收蛋白质，同时参与构成酶、激素、部分维生素，其在调节生理机能、催化代谢过程中起着十分重要的作用。对 3 种生境下白背三七叶片水溶性氨基酸含量的分析显示(表 3)，随光照强度减弱，丙氨酸、谷氨酸、缬氨酸、蛋氨酸、赖氨酸和精氨酸质量分数逐渐降低，其他氨基酸质量分数在 3 种生境下没有显著差异。 L_2 和 L_3 处理谷氨酸质量分数分别比 L_1 降低 15.6%和 15.5%，蛋氨酸质量分数分别比 L_1 降低 57.1%和 66.7%。 L_3 处理缬氨酸含量比 L_1 处理减少 22.1%， L_2 处理缬氨酸质量分数与其他 2 种处理之间没有显著差异($P>0.05$)。 L_3 处理赖氨酸质量分数比 L_1 和 L_2 处理降低 15.0%和 16.7%。这表明弱光环境导致白背三七部分水溶性氨基酸质量分数显著降低，在一定程度上影响了白背三七营养品质。对云雾‘乌王’茶树 *Camellia sinensis* ‘Niaowang’ 鲜叶的研究表明，氨基酸的质量分数在阴坡处理显著降低，阳坡、林下、半阳半阴坡处理之间差异不显著^[21]。由此可见，不同植物叶片氨基酸质

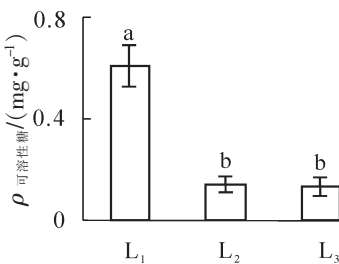


图 2 林窗和林下白背三七可溶性糖质量分数特征
Figure 2 Soluble saccharide of *G. divaricata* in forest gaps and understory

表 3 林窗和林下白背三七水溶性氨基酸质量分数比较

Table 3 Compare of hydrolyzable amino acids of *Gynura divaricata* in forest gaps and understory

水溶性氨基酸	不同处理下氨基酸质量分数/(mg·g ⁻¹)			水溶性氨基酸	不同处理下氨基酸质量分数/(mg·g ⁻¹)		
	L ₁	L ₂	L ₃		L ₁	L ₂	L ₃
天冬氨酸	1.51 ± 0.07 a	1.42 ± 0.03 a	1.30 ± 0.05 a	异亮氨酸	0.75 ± 0.03 a	0.68 ± 0.02 a	0.61 ± 0.04 a
苏氨酸	0.75 ± 0.02 a	0.69 ± 0.01 a	0.64 ± 0.02 a	亮氨酸	1.22 ± 0.06 a	1.11 ± 0.09 a	1.03 ± 0.05 a
丝氨酸	0.70 ± 0.04 a	0.64 ± 0.02 a	0.59 ± 0.04 a	酪氨酸	0.38 ± 0.02 a	0.39 ± 0.01 a	0.28 ± 0.02 a
谷氨酸	2.13 ± 0.12 a	1.82 ± 0.06 b	1.80 ± 0.08 b	苯基丙氨酸	0.74 ± 0.03 a	0.70 ± 0.02 a	0.66 ± 0.03 a
甘氨酸	0.86 ± 0.03 a	0.76 ± 0.06 a	0.72 ± 0.04 a	赖氨酸	1.00 ± 0.04 a	1.02 ± 0.05 a	0.85 ± 0.02 b
丙氨酸	0.96 ± 0.05 a	0.87 ± 0.02 ab	0.79 ± 0.03 b	组氨酸	0.29 ± 0.01 a	0.27 ± 0.02 a	0.25 ± 0.01 a
缬氨酸	0.95 ± 0.02 a	0.85 ± 0.03 ab	0.74 ± 0.02 b	精氨酸	0.82 ± 0.04 a	0.75 ± 0.03 ab	0.63 ± 0.04 b
蛋氨酸	0.21 ± 0.01 a	0.09 ± 0.01 b	0.07 ± 0.01 b	脯氨酸	0.67 ± 0.02 a	0.56 ± 0.03 a	0.59 ± 0.03 a

量分数对异质光环境的响应存在较大差异。

随光照有效性增加，白背三七茎叶产量增大，营养品质也有很大程度提升。对西洋参 *Panax quinquefolius* 的研究发现，光照强度从 10% 自然光照增加到 40% 自然光照，西洋参产量逐渐增加，但总皂苷和氨基酸质量分数在 20%~30% 自然光照下最高^[22]。梁银丽等^[23]研究表明：相对于 100% 自然光照条件，适度遮光(70% 自然光照)有利于辣椒 *Capsicum annuum* 产量的提高，同时维生素 C、可溶性糖、游离氨基酸和可溶性蛋白质质量分数也较高。这表明随光环境的变化，不同植物产量与主要营养成分呈现不同的变化趋势。本研究仅对一定光照范围内白背三七茎叶产量及其营养品质进行分析，随着光照有效性进一步增大，白背三七产量及营养品质的变化还有待深入研究。

3 结论

对林窗和林下 3 种生境中白背三七生长、光合及营养成分的研究发现，相对于无林窗的杉木林下，白背三七在林窗内叶片光合速率较高，生长较好，产量较高，钾、磷、维生素 C 和水溶性氨基酸质量分数也明显增加。林窗面积大小决定了林下有效光照强度的高低，较小的林窗(面积小于 9 m²)对白背三七生长及品质没有显著影响，只有较大的林窗(面积大于 12 m²)可显著促进白背三七生长，提升野菜品质。

4 参考文献

[1] 顾晓君, 曹黎明, 叶正文, 等. 林下经济模式研究及其产业发展对策[J]. 上海农业学报, 2008, **24**(3): 21 – 24.
GU Xiaojun, CAO Liming, YE Zhengwen, *et al.* Studies on the mode of under-forest economy and the development countermeasure of under-forest industry [J]. *Acta Agric Shanghai*, 2008, **24**(3): 21 – 24.

[2] 杨暹, 郭巨先. 华南主要野生蔬菜的基本营养成分及营养价值评价[J]. 食品科学, 2002, **23**(11): 121 – 125.
YANG Xian, GUO Juxian. Assessment study on nutritive compositions and value of main wild vegetables in south China [J]. *Food Sci*, 2002, **23**(11): 121 – 125.

[3] 林谔, 林有润. 中国植物志: 第 77 卷第 1 分册[M]. 北京: 科学出版社, 1999.

[4] 郑华, 许方程, 林世铮, 等. 富贵菜无公害标准化栽培技术[J]. 中国野生植物资源, 2004, **23**(5): 59 – 60.
ZHENG Hua, XU Fangcheng, LIN Shizhen, *et al.* Non-pollution and standardized cultivation techniques for *Gynura divaricata* [J]. *Chin Wild Plant Res*, 2004, **23**(5): 59 – 60.

[5] 李炎林, 熊兴耀, 刘东波, 等. 药用植物富贵菜的研究现状与展望[J]. 中国野生植物资源, 2011, **30**(1): 10 – 14.
LI Yanlin, XIONG Xingyao, LIU Dongbo, *et al.* The research status and prospect of medicinal plant- *Gynura divaricata* [J]. *Chin Wild Plant Res*, 2011, **30**(1): 10 – 14.

[6] 韦宗便, 蒋乃芬, 陈安琪, 等. 11 个新特蔬菜品种引种试验初报[J]. 南方园艺, 2013, **24**(3): 3 – 5.
WEI Zongbian, JIANG Naifen, CHEN Anqi, *et al.* Preliminary report of introduction experiment of new special vegetables [J]. *Southern Horti*, 2013, **24**(3): 3 – 5.

[7] 成向荣, 舒骏, 刘佳, 等. 不同光环境对紫背天葵和白背三七生长及光合荧光特性的影响[J]. 西北植物学报, 2014, **34**(7): 1426 – 1431.

- CHENG Xiangrong, SHU Jun, LIU Jia, *et al.* Growth, photosynthesis and fluorescence characteristics of *Begonia fimbripulula* and *Gynura divaricata* under different light conditions [J]. *Acta Bot Boreali-Occident Sin*, 2014, **34**(7): 1426 – 1431.
- [8] ZANG Runguo, TAO Jianping, LI Chunyang. Within community patch dynamics in a tropical montane rain forest of Hainan Island, South China [J]. *Acta Oecol*, 2005, **28**(1): 39 – 48.
- [9] RITTER E, DALSGAARD L, EINHORN K S. Light, temperature and soil moisture regimes following gap formation in a semi-natural beech-dominated forest in Denmark [J]. *For Ecol Manage*, 2005, **206**(1/3): 15 – 33.
- [10] 王家华, 李建东. 林窗研究进展[J]. 世界林业研究, 2006, **19**(1): 27 – 30.
WANG Jiahua, LI Jiandong. Advances in study on forest gaps [J]. *World For Res*, 2006, **19**(1): 27 – 30.
- [11] van KOOTEN O, SNEL J F H. The use of chlorophyll fluorescence nomenclature in plant stress physiology [J]. *Photosynth Res*, 1990, **25**(3): 147 – 150.
- [12] 高俊凤. 植物生理学试验技术[M]. 西安: 世界图书出版公司, 2000.
- [13] KUNSTLER G, CURT T, BOUCHAUD M, *et al.* Growth, mortality, and morphological response of European beech and downy oak along a light gradient in sub-Mediterranean forest [J]. *Can J For Res*, 2005, **35**(7): 1657 – 1668.
- [14] STANCIOIU P T, O'HARA K L. Regeneration growth in different light environments of mixed species, multiaged, mountainous forests of Romania [J]. *Eur J For Res*, 2006, **125**(2): 151 – 162.
- [15] POORTER L. Growth responses of 15 rain-forest tree species to a light gradient: the relative importance of morphological and physiological traits [J]. *Funct Ecol*, 1999, **13**(3): 396 – 410.
- [16] 王进欣, 张一平. 林窗微环境异质性及物种的响应[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2002, **26**(1): 69 – 74.
WANG Jinxin, ZHANG Yiping. A review on within-gap micro-environmental heterogeneity and species' response [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2002, **26**(1): 69 – 74.
- [17] 安树青, 洪必恭, 李朝阳, 等. 紫金山次生林林窗植被和环境的研究[J]. 应用生态学报, 1997, **8**(3): 245 – 249.
AN Shuqing, HONG Bigong, LI Zhaoyang, *et al.* Environmental and vegetation studies of the gaps of secondary forests on Zijin Mountain [J]. *Chin J Appl Ecol*, 1997, **8**(3): 245 – 249.
- [18] LARCHER W. *Physiological Plant Ecology* [M]. Berlin: Springer, 1980.
- [19] 夏江宝, 张光灿, 刘京涛, 等. 美国凌霄光合生理参数对水分与光照的响应[J]. 北京林业大学学报, 2008, **30**(5): 13 – 18.
XIA Jiangbao, ZHANG Guangcan, LIU Jingtao, *et al.* Responses of photosynthetic and physiological parameters in *Campsis radicans* to soil moisture and light intensities [J]. *J Beijing For Univ*, 2008, **30**(5): 13 – 18.
- [20] 赵磊, 杨延杰, 林多. 光照强度对蒲公英光合特性及品质的影响[J]. 园艺学报, 2007, **34**(6): 1555 – 1558.
ZHAO Lei, YANG Yanjie, LIN Duo. Effects of light intensity on photosynthetic characteristics and quality of *Taraxacum mongolicum* [J]. *Acta Horti Sin*, 2007, **34**(6): 1555 – 1558.
- [21] 王莹, 贺红早, 任春光, 等. 不同光照水平对云雾“鸟王”茶氨基酸及酶的影响[J]. 广东农业科学, 2013 (13): 32 – 34.
WANG Ying, HE Hongzao, REN Chunguang, *et al.* Effect on enzymes and amino acid of Yunwu “Niaowang” tea under different light conditions [J]. *Guangdong Agric Sci*, 2013(13): 32 – 34.
- [22] 于国华, 苘辉民, 罗文熹. 不同光照强度对西洋参光合特性、营养成分和产量的影响[J]. 应用生态学报, 1994, **5**(1): 57 – 61.
YU Guohua, MAN Huimin, LUO Wenxi. Effect of light intensity on photosynthetic characteristics, nutritive components and yield of American ginseng [J]. *Chin J Appl Ecol*, 1994, **5**(1): 57 – 61.
- [23] 梁银丽, 彭强, 陈晨, 等. 光照强度和土壤水分对辣椒品质和产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2011, **30**(4): 35 – 38.
LIANG Yinli, PENG Qiang, CHEN Chen, *et al.* Effect of light intensity and soil moisture on fruit quality and yield of pepper [J]. *J Irriga Drain*, 2011, **30**(4): 35 – 38.