

## 不同水培条件对绞股蓝生长及总皂苷含量的影响

李莹, 黄雪彦, 余丽莹, 姚李祥, 周芸伊, 王春丽, 蓝祖栽, 张占江, 潘春柳\*

广西壮族自治区药用植物园/广西中药资源普查与整理研究重点实验室, 广西南宁 530023

**摘要:** 绞股蓝是一种重要的药食同源植物, 因含有人参皂苷类物质而享有“南方人参”的美誉。由于野生绞股蓝资源日益枯竭, 人工引种栽培绞股蓝已成为必然趋势。然而, 受土壤灌溉、施肥、农药使用等因素影响, 绞股蓝药材品质不稳定、重金属含量超标等问题时有发生, 严重影响其规范化种植和药材质量安全。水培生产具有周期短、产量高、无连作障碍、可有效避免重金属污染等优点, 被广泛应用于多种中药材生产中。对绞股蓝幼苗进行不同营养液、不同温度、不同光照强度和光周期处理, 研究各处理对绞股蓝生长和总皂苷积累的影响, 以期得到适合绞股蓝生长和有效成分积累的最优水培条件, 研究表明, pH 为 6.0 的日本园试营养液是绞股蓝水培的最佳营养液。相关性分析结果显示, 不同营养液条件下, 绞股蓝单株总皂苷量与株高、叶长、叶宽、叶片数、单株鲜重及单株干重呈高度正相关, 表明培育高生物量植株是提高绞股蓝药材质量的关键。在环境温度为 20~30 °C, 光周期为每天光照 10~14 h, 光照强度为 100  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  条件下, 绞股蓝幼苗生长较好, 且干样品总皂苷含量超过 3%, 高于现有标准。

**关键词:** 绞股蓝; 水培条件; 绞股蓝皂苷

中图分类号: S567.237 文献标识码: A

## Effects of Different Hydroponic Conditions on the Growth and Total Saponin Accumulation of *Gynostemma pentaphyllum*

LI Ying, HUANG Xueyan, YU Liying, YAO Lixiang, ZHOU Yunyi, WANG Chunli, LAN Zuzai, ZHANG Zhanjiang, PAN Chunliu\*

Guangxi Botanical Garden of Medicinal Plant / Guangxi TCM Resources General Survey and Data Collection Key Laboratory, Nanning, Guangxi 530023, China

**Abstract:** *Gynostemma pentaphyllum* is an important medicine-food homology plant. It enjoys the reputation of ‘Southern ginseng’ as it contains compounds of ginsenosides. As wild resources of *G. pentaphyllum* depleted gradually, artificial introduction and cultivation of *G. pentaphyllum* has become an inevitable trend. However, due to soil irrigation, fertilization, and pesticide use, problems such as unstable quality of medicinal materials and excessive heavy metal content in *G. pentaphyllum* occur from time to time, which seriously affects its standardized cultivation and the quality and safety of medicinal materials. Hydroponic production has the advantages of short cycle, high yield, no continuous cropping obstacles, and can effectively avoid heavy metal pollution, so it is widely used in the production of various Chinese medicinal materials. In this study, *G. pentaphyllum* seedlings were treated with different nutrient solution, temperature, light intensity and photoperiod. After that, growth characteristics and accumulation of total saponins of *G. pentaphyllum* were examined to obtain the most suitable hydroponics conditions, and thus provide reference and technical support for the large-scale production and organic cultivation of *G. pentaphyllum*. The results showed that Japanese Yamzaki formula with pH value 6.0 was the best nutrient solution for hydroponics of *G. pentaphyllum*. Correlation analysis showed that under different nutrient solution conditions, the total saponin content of single plant was highly positively correlated with plant height, leaf length, leaf width, number of leaves, fresh weight per plant and dry weight per plant, indicating that the cultivation of

收稿日期 2022-04-24; 修回日期 2022-06-21

基金项目 广西自然科学基金项目 (No. 2021GXNSFAA196027); 2022 年区域特色药材品种关键技术研究推广项目 (No. GXZYZZ-202201); 中央本级重大增减支项目 (No. 2060302)。

作者简介 李莹 (1984—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 药用植物资源学和植物生理学。\*通信作者 (Corresponding author): 潘春柳 (PAN Chunliu), E-mail: pchunliu@126.com。

high-biomass plants was the key of the cultivation of high-quality plants of *G. pentaphyllum*. Under variable temperature of 20 to 30 °C, photoperiod of 10 to 14 hours of light per day, and light intensity of 100  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ , seedlings of *G. pentaphyllum* grew well and the total saponin content of the dry samples exceeded 3%, which was higher than the existing standards. This study would provide a scientific basis for the realization of double precise control of production and quality of *G. pentaphyllum*, and lay the foundation for the future research on large-scale production and quality standards of it.

**Keywords:** *Gynostemma pentaphyllum*; hydroponic culture conditions; *Gynostemma* saponin

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.03.015

绞股蓝 [*Gynostemma pentaphyllum* (Thunb.) Makino] 为葫芦科 (Cucurbitaceae) 绞股蓝属 (*Gynostemma*) 多年生草质攀援植物, 主要分布于我国陕西南部 and 长江以南各省区<sup>[1]</sup>。绞股蓝应用历史悠久, 是一种重要的药食同源植物。绞股蓝之名始载于明代《救荒本草》, 被作为野菜食用。现代研究表明, 绞股蓝具有益气健脾、补肾温阳、养心安神等功效<sup>[2]</sup>, 其主要活性成分为绞股蓝皂苷<sup>[3]</sup>, 此外还含有黄酮、多糖、氨基酸和微量元素等化学成分。因含有人参皂苷, 绞股蓝被称为“南方人参”, 并于 1986 年被科技部“星火计划”列为待开发的第一位“名贵中药材”, 于 2002 年被卫生部纳入保健食品原料目录<sup>[4]</sup>。近年来绞股蓝作为重要的中药和保健品原料, 被广泛应用于医药和保健领域, 具有广阔的市场开发前景, 其应用价值巨大。

由于野生绞股蓝资源日益枯竭, 为了满足日益增长的市场需求, 人工引种栽培绞股蓝已成为必然趋势。然而, 由于土壤灌溉、施肥、农药使用等因素影响, 绞股蓝药材品质不稳定、重金属含量超标等问题时有发生, 严重影响其规范化种植和药材质量安全。水培作为无土栽培的一种方式, 具有周期短、产量高、品质好、省地、省水、省肥、省工、病虫害少、无连作障碍等优点, 并且可以有效避免重金属污染, 有利于中药材有机种植<sup>[5]</sup>, 被广泛应用于蒲公英<sup>[6]</sup>、益母草<sup>[7]</sup>、鱼腥草<sup>[8]</sup>、桔梗<sup>[9]</sup>、人参<sup>[10]</sup>等中药材生产中, 已成为近年来中药材生产的重要技术手段之一。本研究以绞股蓝为试验材料, 通过设置不同营养液、不同温度、不同光照强度和光周期条件开展绞股蓝水培对比实验, 以筛选出适合绞股蓝生长和有效成分积累的最优水培方式, 为绞股蓝规模化生产和有机种植提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

于 2020 年 10—11 月采集绞股蓝成熟果实,

采集地为广西金秀县。植物材料经广西药用植物园余丽莹研究员鉴定。

### 1.2 方法

1.2.1 播种育苗 将果实置于阴凉通风处晾干, 取出种子, 以珍珠岩为基质进行播种育苗。育苗期间每天喷水 1~2 次, 以保证珍珠岩湿度。待幼苗长出后, 选取 3~5 叶期长势较好且生长一致的绞股蓝幼苗进行水培移栽。

1.2.2 营养液对比实验 将供试绞股蓝幼苗移植至清水中, 缓苗 2 d 后进行水培处理。温度条件为 25 °C, 光照强度为 20  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ , 光周期为每天 8 h 光照/16 h 黑暗。分别选用不同 pH 的 4 种水培营养液 (改良 Hoagland、日本山崎、日本园试和华南农业大学叶菜 A) 进行培养, 使用 HCl 或 NaOH 调整营养液 pH。营养液配方见表 1 和表 2<sup>[11-12]</sup>。实验共设 13 个处理, 分别为: (1) CK: 清水; (2) H<sub>6</sub>: pH 6.0 的 Hoagland 营养液; (3) H<sub>7</sub>: pH 7.0 的 Hoagland 营养液; (4) H<sub>8</sub>: pH 8.0 的 Hoagland 营养液; (5) S<sub>6</sub>: pH 6.0 的日本山崎营养液; (6) S<sub>7</sub>: pH 7.0 的日本山崎营养液; (7) S<sub>8</sub>: pH 8.0 的日本山崎营养液; (8) Y<sub>6</sub>: pH 6.0 的日本园试营养液; (9) Y<sub>7</sub>: pH 7.0 的日本园试营养液; (10) Y<sub>8</sub>: pH 8.0 的日本园试营养液; (11) A<sub>6</sub>: pH 6.0 的华南农业大学叶菜 A 营养液; (12) A<sub>7</sub>: pH 7.0 的华南农业大学叶菜 A 营养液; (13) A<sub>8</sub>: pH 8.0 的华南农业大学叶菜 A 营养液。以清水为对照 (CK), 每处理 3 个重复, 每重复 25 株。每天用通气泵进行通气, 每 7 d 更换一次营养液。处理 30 d 后测定绞股蓝植株存活率、生长指标及理化指标。

1.2.3 光照对比实验 将供试绞股蓝幼苗移植到清水中, 缓苗 2 d 后移栽至上述最优营养液中进行培养。为明确绞股蓝幼苗对光照条件的要求进行不同光周期 (每天 8 h 光照/16 h 黑暗、10 h 光照/14 h 黑暗、12 h 光照/12 h 黑暗、14 h 光照/10 h 黑暗) 以及不同光强 [弱光 20  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、中光

表 1 4 种不同营养液大量元素配方

Tab. 1 Formula of four different nutrient solutions

序号 No.	盐类 Salt	改良 Hoagland Modified Hoagland formula	日本山崎 Japanese Yamzaki formula	日本园试 Japanese Garden for- mula	华南农业大学叶菜 A South China Agricultural University formula A for leafy vegetables
1	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	945	236	945	
2	KNO <sub>3</sub>	607	404	809	322
3	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>				150
4	MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	493	123	493	150
5	NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	115	57	153	
6	CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O				750

表 2 营养液微量元素通用配方 (各营养液通用)

Tab. 2 Common formula for nutrient micronutrient (for each nutrient solution)

序号 No.	化合物 Compound	营养液中化 合物含量 Compound content in nutrient solution	营养液中 元素含量 Element content in nutrient solution
1	EDTA-NaFe(含铁 14%)	30.0	5.60
2	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	2.86	0.50
3	MnSO <sub>4</sub> ·4H <sub>2</sub> O	2.13	0.50
4	ZnSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	0.22	0.05
5	CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O	0.08	0.02
6	(NH <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> Mo <sub>7</sub> O <sub>24</sub> ·4H <sub>2</sub> O	0.02	0.01

100 μmol/(m<sup>2</sup>·s)、强光 200 μmol/(m<sup>2</sup>·s)]条件下的对比实验。光周期实验中温度条件为 25 °C, 光照强度为 100 μmol/(m<sup>2</sup>·s); 光强实验中温度条件为 25 °C, 光周期为每天 12 h 光照/12 h 黑暗。每处理设置 3 个重复, 每重复 25 株。每天用通气泵进行通气, 每 7 d 更换一次营养液。处理 30 d 后进行绞股蓝生长指标及理化指标测定。

1.2.4 温度对比实验 将供试绞股蓝幼苗移植到清水中, 缓苗 2 d 后按照上述最优营养液和光照条件进行移栽, 然后分别置于 15 °C、20 °C、25 °C、30 °C、15 °C/25 °C、20 °C/30 °C 共 6 种不同温度条件下进行培养。每处理设置 3 个重复, 每重复 25 株。每天用通气泵进行通气, 每 7 d 更换一次营养液。处理 30 d 后进行绞股蓝生长指标及理化指标测定。

### 1.3 指标测定

1.3.1 成活率 观察记录不同营养液处理中叶片生长及植株成活情况, 统计植株死亡率及叶片枯黄萎蔫率。

死亡率=处理 30 d 后死亡的植株数/该处理的总植株数×100%

枯黄萎蔫率=处理 30 d 后半数及以上叶片出现枯黄或萎蔫的植株数/该处理的总植株数×100%

1.3.2 生长指标 统计不同营养液处理、光照强度处理及温度处理的株高、茎粗、叶长、叶宽、根长、叶片数。在每个处理中随机选取 10 株长势均一的植株, 将根系表面水分充分吸干, 测定植株鲜重。将植株放入 80 °C 烘箱中烘干至恒重, 测定植株干重。

1.3.3 理化指标 根系活力采用氯化三苯基四氮唑 (TTC) 法进行测定<sup>[13]</sup>。用复合酶提取法测定总皂苷含量<sup>[14]</sup>。每处理 3 个重复。

### 1.4 数据处理

使用 Microsoft Excel 2013 软件对数据进行整理, 使用 IBM SPSS Statistics 22.0 软件对数据进行统计分析。利用 SPSS 软件中的 ANOVA 方法进行方差分析, 采用 Duncan's 法进行显著性检验 (检验水平为 0.05)。结果表示为平均值±标准误 (SE)。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同营养液对绞股蓝生长及总皂苷积累的影响

2.1.1 不同营养液对幼苗生长指标的影响 从表 3 可以看出, 不同营养液条件下绞股蓝的成活情况存在明显的差异。水培 30 d 后, 以 S<sub>7</sub>、Y<sub>6</sub> 和 A<sub>7</sub> 营养液培养的绞股蓝植株长势较好, 培养后无死亡和叶片枯黄萎蔫现象。其次是 H<sub>7</sub>、S<sub>8</sub>、A<sub>6</sub> 和 A<sub>8</sub> 营养液, 培养后绞股蓝植株无死亡现象, 仅部分植株的叶片有枯黄或萎蔫现象。而使用 H<sub>6</sub>、H<sub>8</sub>、S<sub>6</sub>、Y<sub>7</sub> 或 Y<sub>8</sub> 营养液进行培养时, 会导致绞股蓝植株死亡, 其中 H<sub>8</sub> 营养液培养后植株死亡株数最多, 死亡率达 24%; H<sub>8</sub> 和 S<sub>6</sub> 培养后多个植株出现叶片枯黄或萎蔫。此外, 营养液对绞股蓝茎的伸长有促进作用。清水对照组的株高最小, 仅

为 3.99 cm。Y<sub>6</sub> 处理的绞股蓝平均株高最高, 达 22.03 cm, 与其他处理相比有显著性差异。H<sub>7</sub>、S<sub>8</sub>、Y<sub>7</sub>、A<sub>6</sub>、A<sub>7</sub> 处理的绞股蓝株高较高, 均在 15 cm 以上。H<sub>6</sub>、H<sub>8</sub> 和 S<sub>6</sub> 处理对绞股蓝株高影响不大, 平均值均在 5 cm 以下。营养液对绞股蓝茎的增粗也有促进作用。其中, H<sub>6</sub> 培养的绞股蓝平均茎粗最大, 为 1.98 mm; A<sub>6</sub> 营养液培养次之, H<sub>7</sub>、S<sub>7</sub>、Y<sub>6</sub>、A<sub>7</sub> 处理后茎粗无显著性差异, 且均显著高于对照; A<sub>8</sub> 和 Y<sub>8</sub> 处理后茎粗最小, 与对照相比无显著性差异。从根长上看, 除 H<sub>8</sub>、Y<sub>8</sub> 外, 其余营养液处理对绞股蓝根长生长均有显著的促进作用。其中 A<sub>7</sub> 营养液处理的绞股蓝平均根长最长, 为 12.44 cm; A<sub>6</sub>、A<sub>8</sub> 和 S<sub>8</sub> 次之, 均在 9 cm 以上。由此可见, 适当的营养液可促进绞股蓝植株生长。

表 3 不同营养液培养条件下绞股蓝生长指标

Tab. 3 Growth indexes of *G. pentaphyllum* under different nutrient solution conditions

编号 No.	死亡率 Mortality rate/%	枯黄萎 蔫率 Wilting rate/%	株高 Plant height/cm	茎粗 Stem diame- ter/mm	根长 Root length/cm
CK	0 <sup>e</sup>	0 <sup>f</sup>	3.99±0.17 <sup>e</sup>	1.51±0.07 <sup>def</sup>	4.23±0.37 <sup>e</sup>
H <sub>6</sub>	8 <sup>c</sup>	8 <sup>d</sup>	4.60±0.56 <sup>c</sup>	1.98±0.18 <sup>a</sup>	6.05±0.54 <sup>d</sup>
H <sub>7</sub>	0 <sup>e</sup>	4 <sup>e</sup>	17.29±0.74 <sup>b</sup>	1.79±0.16 <sup>abc</sup>	5.74±0.75 <sup>d</sup>
H <sub>8</sub>	24 <sup>a</sup>	44 <sup>b</sup>	4.21±0.59 <sup>e</sup>	1.71±0.15 <sup>bcd</sup>	4.63±0.28 <sup>e</sup>
S <sub>6</sub>	12 <sup>b</sup>	56 <sup>a</sup>	4.02±0.28 <sup>e</sup>	1.66±0.10 <sup>bed</sup>	6.23±0.68 <sup>d</sup>
S <sub>7</sub>	0 <sup>e</sup>	0 <sup>f</sup>	14.03±0.69 <sup>c</sup>	1.78±0.12 <sup>abc</sup>	7.79±0.68 <sup>c</sup>
S <sub>8</sub>	0 <sup>e</sup>	8 <sup>d</sup>	17.51±0.73 <sup>b</sup>	1.60±0.06 <sup>cde</sup>	9.66±0.45 <sup>b</sup>
Y <sub>6</sub>	0 <sup>e</sup>	0 <sup>f</sup>	22.03±1.03 <sup>a</sup>	1.79±0.07 <sup>abc</sup>	7.82±0.72 <sup>c</sup>
Y <sub>7</sub>	4 <sup>d</sup>	0 <sup>f</sup>	16.44±0.68 <sup>b</sup>	1.64±0.14 <sup>bcd</sup>	5.77±0.55 <sup>d</sup>
Y <sub>8</sub>	4 <sup>d</sup>	8 <sup>d</sup>	5.53±0.46 <sup>c</sup>	1.36±0.07 <sup>f</sup>	5.24±0.35 <sup>de</sup>
A <sub>6</sub>	0 <sup>e</sup>	8 <sup>d</sup>	18.68±0.61 <sup>b</sup>	1.85±0.09 <sup>ab</sup>	10.45±0.57 <sup>b</sup>
A <sub>7</sub>	0 <sup>e</sup>	0 <sup>f</sup>	17.04±0.54 <sup>b</sup>	1.80±0.15 <sup>abc</sup>	12.44±0.76 <sup>a</sup>
A <sub>8</sub>	0 <sup>e</sup>	12 <sup>c</sup>	10.17±0.83 <sup>d</sup>	1.44±0.05 <sup>ef</sup>	10.12±0.20 <sup>b</sup>

注: 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。

Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference ( $P<0.05$ ).

由表 4 可以看出, 清水对照组的叶长和叶宽最小, 分别为 2.94 cm 和 3.25 cm。使用不同营养液进行培养, 除 H<sub>6</sub>、H<sub>8</sub> 和 S<sub>6</sub> 之外, 均可显著促进绞股蓝叶片生长。其中, A<sub>7</sub> 处理的绞股蓝叶片最长, 平均值为 4.98 cm; A<sub>6</sub> 和 H<sub>7</sub> 次之。S<sub>7</sub> 处理的绞股蓝叶片最宽, 平均值为 6.35 cm; H<sub>7</sub> 和 Y<sub>7</sub> 次之。不同营养液处理后叶片数也存在明显差异。

Y<sub>6</sub> 和 A<sub>7</sub> 营养液处理的水培绞股蓝叶片数最多, S<sub>8</sub> 和 Y<sub>7</sub> 次之。H<sub>6</sub>、H<sub>8</sub> 和 S<sub>6</sub> 处理的叶片数最少, 且均低于对照, 表明这 3 种培养液不利于绞股蓝叶片分化。

表 4 不同营养液培养条件下绞股蓝叶片生长情况  
Tab. 4 Leaf growth of *G. pentaphyllum* under different nutrient solution conditions

编号 No.	叶长 Leaf length /cm	叶宽 Leaf width /cm	叶片数 Number of leaves
CK	2.94±0.11 <sup>e</sup>	3.25±0.10 <sup>f</sup>	5.60±0.22 <sup>e</sup>
H <sub>6</sub>	3.06±0.17 <sup>c</sup>	3.74±0.31 <sup>e</sup>	4.90±0.43 <sup>ef</sup>
H <sub>7</sub>	4.71±0.18 <sup>abc</sup>	5.98±0.21 <sup>ab</sup>	9.80±0.49 <sup>abc</sup>
H <sub>8</sub>	2.97±0.20 <sup>e</sup>	3.97±0.20 <sup>de</sup>	4.20±0.39 <sup>f</sup>
S <sub>6</sub>	2.87±0.16 <sup>c</sup>	3.78±0.23 <sup>e</sup>	4.40±0.31 <sup>f</sup>
S <sub>7</sub>	4.65±0.19 <sup>bc</sup>	6.35±0.15 <sup>a</sup>	9.00±0.52 <sup>cd</sup>
S <sub>8</sub>	4.54±0.16 <sup>bc</sup>	5.86±0.16 <sup>b</sup>	10.00±0.63 <sup>ab</sup>
Y <sub>6</sub>	4.45±0.15 <sup>c</sup>	5.74±0.25 <sup>bc</sup>	10.70±0.73 <sup>a</sup>
Y <sub>7</sub>	4.44±0.18 <sup>c</sup>	5.96±0.29 <sup>ab</sup>	10.00±0.39 <sup>ab</sup>
Y <sub>8</sub>	3.52±0.18 <sup>d</sup>	4.33±0.29 <sup>d</sup>	8.30±0.63 <sup>d</sup>
A <sub>6</sub>	4.85±0.17 <sup>ab</sup>	5.65±0.23 <sup>bc</sup>	9.90±0.55 <sup>abc</sup>
A <sub>7</sub>	4.98±0.18 <sup>a</sup>	5.36±0.27 <sup>c</sup>	10.70±0.65 <sup>a</sup>
A <sub>8</sub>	4.65±0.20 <sup>bc</sup>	5.43±0.24 <sup>c</sup>	9.30±0.45 <sup>bc</sup>

注: 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。

Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference ( $P<0.05$ ).

由表 5 可以看出, 与对照相比, 除 H<sub>6</sub>、H<sub>8</sub> 和 S<sub>6</sub> 外, 其余营养液均显著提高绞股蓝鲜重和干重。其中, Y<sub>6</sub> 营养液处理的绞股蓝单株鲜重和单株干重最大, 平均值分别为 1849.63 mg 和 136.97 mg; A<sub>7</sub> 营养液次之, S<sub>7</sub>、S<sub>8</sub>、Y<sub>7</sub>、A<sub>6</sub> 和 A<sub>8</sub> 鲜重均在 1500 mg 以上, 干重均在 100 mg 以上。H<sub>6</sub>、H<sub>8</sub> 和 S<sub>6</sub> 营养液处理的绞股蓝重量较小, 且 H<sub>6</sub> 处理的单株鲜重、S<sub>6</sub> 和 H<sub>8</sub> 处理的单株鲜重和单株干重均低于对照, 表明这 3 种培养液不利于绞股蓝生物量积累。

#### 2.1.2 不同营养液对绞股蓝幼苗根系活力的影响

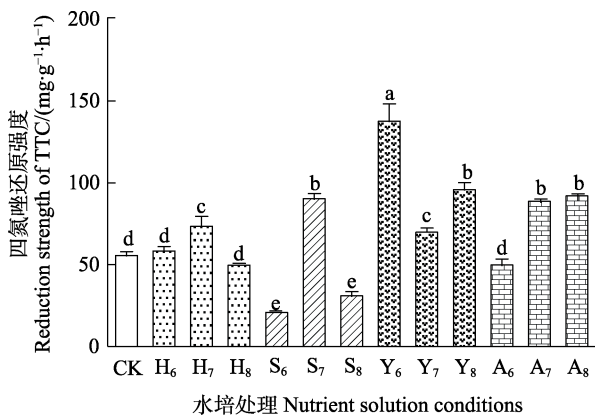
从图 1 可以看出, 不同营养液培养条件下绞股蓝的根系活力差异显著。其中, Y<sub>6</sub> 培养的绞股蓝根系活力最高, 四氮唑还原强度达 139.06 mg/(g·h); 其次为 S<sub>7</sub>、Y<sub>8</sub>、A<sub>7</sub> 和 A<sub>8</sub> 处理, 四氮唑还原强度在 90 mg/(g·h) 以上; 而 S<sub>6</sub>、S<sub>8</sub> 处理后绞股蓝根系活力较低, 分别为 23.98 mg/(g·h) 和 33.65 mg/(g·h), 显著低于对照。

表 5 不同营养液培养条件下绞股蓝的重量指标  
Tab. 5 Weight index of *G. pentaphyllum* under different nutrient solution conditions mg

编号 No.	单株鲜重 Fresh weight per plant	单株干重 Dry weight per plant
CK	370.03±11.10 <sup>b</sup>	33.72±1.01 <sup>b</sup>
H <sub>6</sub>	342.52±10.28 <sup>b</sup>	34.05±1.02 <sup>b</sup>
H <sub>7</sub>	815.18±24.46 <sup>f</sup>	95.06±2.85 <sup>f</sup>
H <sub>8</sub>	184.14±5.52 <sup>j</sup>	18.36±0.55 <sup>i</sup>
S <sub>6</sub>	266.29±7.99 <sup>i</sup>	30.66±0.92 <sup>b</sup>
S <sub>7</sub>	1598.82±47.96 <sup>c</sup>	117.45±3.52 <sup>d</sup>
S <sub>8</sub>	1515.68±45.47 <sup>c</sup>	107.26±3.22 <sup>c</sup>
Y <sub>6</sub>	1849.63±55.49 <sup>a</sup>	136.97±4.11 <sup>a</sup>
Y <sub>7</sub>	1585.02±47.55 <sup>cd</sup>	119.42±3.58 <sup>cd</sup>
Y <sub>8</sub>	732.12±21.96 <sup>e</sup>	49.75±1.49 <sup>e</sup>
A <sub>6</sub>	1644.50±49.33 <sup>c</sup>	123.11±3.69 <sup>c</sup>
A <sub>7</sub>	1784.05±53.52 <sup>b</sup>	129.43±3.88 <sup>b</sup>
A <sub>8</sub>	1525.70±45.77 <sup>dc</sup>	103.72±3.11 <sup>c</sup>

注: 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference ( $P < 0.05$ ).



不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ( $P < 0.05$ ).

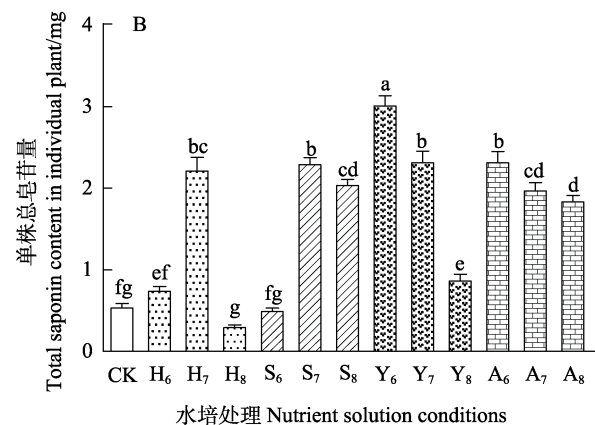
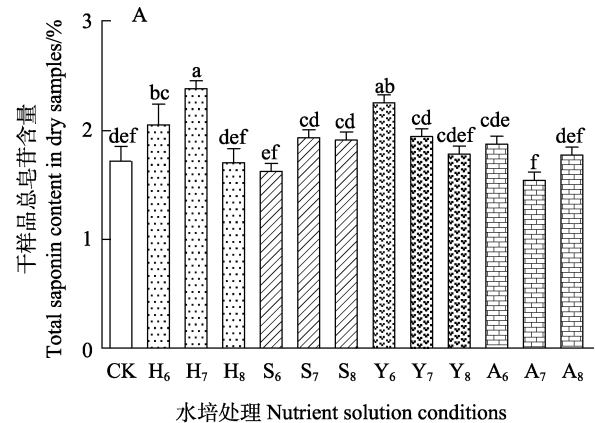
图 1 不同营养液培养条件下绞股蓝根系活力

Fig. 1 Root activity of *G. pentaphyllum* under different nutrient solution conditions

### 2.1.3 不同营养液对绞股蓝总皂苷积累的影响

从图 2A 可以看出, 不同营养液处理后绞股蓝总皂苷含量差异较大。清水培养的绞股蓝 (CK) 总皂苷含量仅 1.73%, 而 H<sub>6</sub>、H<sub>7</sub>、Y<sub>6</sub> 处理后绞股蓝总皂苷含量均超过 2.00%, 其中以 H<sub>7</sub> 处理的总皂苷含量最高, 为 2.40%。A<sub>7</sub> 处理的总皂苷含量显著低于对照, 其余处理的总皂苷含量与对照无显著性差异。由于不同营养液处理后绞股蓝单株干重

存在明显差异, 因此对绞股蓝单株总皂苷量进行了计算。由图 2B 可知, Y<sub>6</sub> 处理后绞股蓝单株总皂苷量最高, 达 3.03 mg, 显著高于其他处理。其次为 H<sub>7</sub>、S<sub>7</sub>、Y<sub>7</sub> 和 A<sub>6</sub> 处理, 其单株总皂苷量在 2 mg 以上。清水对照 (CK)、H<sub>6</sub>、H<sub>8</sub>、S<sub>6</sub> 及 Y<sub>8</sub> 处理的绞股蓝单株总皂苷量较低, 均低于 1 mg。



不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ( $P < 0.05$ ).

图 2 不同营养液培养条件下绞股蓝干样品总皂苷含量及单株总皂苷量

Fig. 2 Total saponin content in dry samples and total saponin content in individual plant of *G. pentaphyllum* under different nutrient solution conditions

对各测定指标进行相关性分析发现, 绞股蓝单株总皂苷量与株高、叶长、叶宽、叶片数、单株鲜重、单株干重呈高度正相关 (相关系数大于 0.9,  $P < 0.01$ ) (表 6)。因此, 在绞股蓝水培过程中培育高生物量植株是获取高活性成分植株的关键。对绞股蓝水培后植株的生长情况、总皂苷含量等多项指标进行综合分析, 认为 pH 为 6.0 的日本园试营养液能够促进绞股蓝生长及主要活性物质积累, 是绞股蓝水培生产的最佳营养液。

表 6 不同营养液培养条件下绞股蓝各测定指标的相关性分析  
Tab. 6 Correlation analysis of *G. pentaphyllum* under different nutrient solution conditions

指标 Index	单株总皂苷量 Total saponin content	株高 Plant height	茎粗 Stem diameter	根长 Root length	叶长 Leaf length	叶宽 Leaf width	叶片数 Number of leaves	根系活力 Root activity	单株鲜重 Fresh weight	单株干重 Dry weight
单株总皂苷量	1	0.961**	0.256	0.562*	0.907**	0.925**	0.921**	0.551	0.910**	0.967**
株高	0.961**	1	0.326	0.594*	0.891**	0.884**	0.914**	0.421	0.871**	0.940**
茎粗	0.256	0.326	1	0.191	0.160	0.178	0.047	-0.0032	0.092	0.196
根长	0.562*	0.594*	0.191	1	0.742**	0.541	0.626*	0.199	0.757**	0.711**
叶长	0.907**	0.891**	0.160	0.742**	1	0.929**	0.936**	0.433	0.910**	0.952**
叶宽	0.925**	0.884**	0.178	0.541	0.929**	1	0.860**	0.396	0.854**	0.909**
叶片数	0.921**	0.914**	0.047	0.626*	0.936**	0.860**	1	0.555*	0.911**	0.946**
根系活力	0.551	0.421	-0.032	0.199	0.433	0.396	0.555*	1	0.541	0.523
单株鲜重	0.910**	0.871**	0.092	0.757**	0.910**	0.854**	0.911**	0.541	1	0.975**
单株干重	0.967**	0.940**	0.196	0.711**	0.952**	0.909**	0.946**	0.523	0.975**	1

注：\*表示显著相关 ( $P<0.05$ )，\*\*表示极显著相关 ( $P<0.01$ )。

Note: \* indicates significant correlation ( $P<0.05$ ), \*\* indicates extremely significant correlation ( $P<0.01$ ).

## 2.2 不同光照条件对绞股蓝生长及总皂苷积累的影响

2.2.1 不同光周期对绞股蓝生长及总皂苷积累的影响 为明确水培过程中绞股蓝幼苗对光照条件的要求，开展了光周期及光照强度对比实验。由表 7 可以看出，当光周期为每天 8 h 光照/16 h 黑暗时，绞股蓝株高和茎粗较高，但根长、叶长、叶宽、叶片数、单株鲜重及单株干重均显著低于其他光周期处理。10 h 光照/14 h 黑暗、12 h 光照/12 h 黑暗、14 h 光照/10 h 黑暗 3 种光周期处理对绞股蓝株高、茎粗、根长、叶长、叶宽、叶片数、单株鲜重及单株干重无显著性影响。

对绞股蓝干样品进行总皂苷含量测定，发现 8 h 光照/16 h 黑暗处理的总皂苷含量平均为 2.3%；10 h 光照/14 h 黑暗、12 h 光照/12 h 黑暗、14 h 光照/10 h 黑暗处理的绞股蓝干样品中总皂苷含量平均值达 4.0% 以上，且各处理间无显著性差

异(图 3A)。从单株总皂苷量上看，10 h 光照/14 h 黑暗、12 h 光照/12 h 黑暗、14 h 光照/10 h 黑暗 3 种光周期处理显著高于 8 h 光照/16 h 黑暗处理(图 3B)。因此，绞股蓝水培生长过程中适宜的光周期为每天光照 10~14 h。

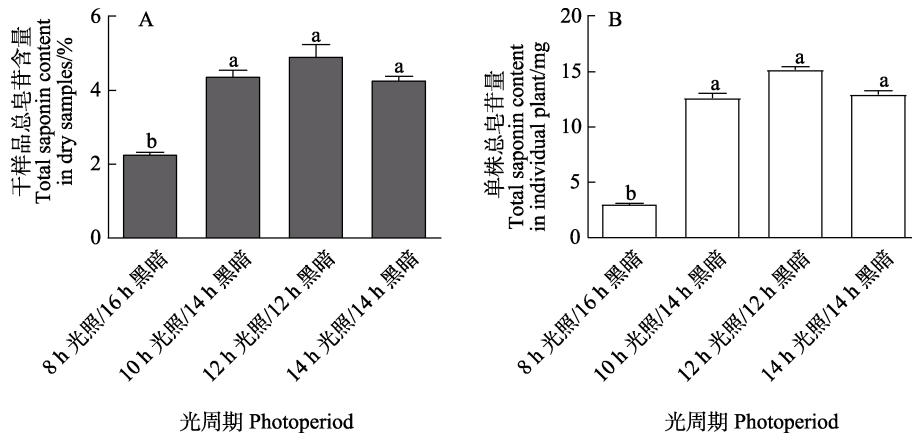
2.2.2 不同光照强度对绞股蓝生长及总皂苷积累的影响 从表 8 可以看出，光照强度对绞股蓝生长有显著性影响。在 20  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$  和 100  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$  条件下，绞股蓝株高较高，二者之间无显著性差异。从茎粗、根长、叶长、叶宽、叶片数、单株鲜重及单株干重来看，以 100  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$  处理最高，表明 100  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$  更适合绞股蓝生物量积累。由图 4A 可以看出，各光照处理对绞股蓝干样品总皂苷积累无显著性影响。从单株皂苷量来看，以 100  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$  处理最高，且显著高于 20  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$  和 200  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$  的光照处理。(图 4B)。

表 7 不同光周期条件下绞股蓝的生长指标  
Tab. 7 Growth index of *G. pentaphyllum* under different photoperiod

处理 Treatment	株高 Plant height/cm	茎粗 Stem diameter/mm	根长 Root length/cm	叶长 Leaf length/cm	叶宽 Leaf width/cm	叶片数 Number of leaves	单株鲜重 Fresh weight/mg	单株干重 Dry weight/mg
8 h 光照/16 h 黑暗	22.03±1.03 <sup>a</sup>	1.79±0.07 <sup>a</sup>	7.82±0.72 <sup>b</sup>	4.45±0.15 <sup>b</sup>	5.74±0.25 <sup>b</sup>	10.70±0.73 <sup>b</sup>	1849.63±55.49 <sup>b</sup>	136.97±4.11 <sup>b</sup>
10 h 光照/14 h 黑暗	20.24±0.59 <sup>a</sup>	1.53±0.14 <sup>b</sup>	12.33±0.44 <sup>a</sup>	6.12±0.25 <sup>a</sup>	5.94±0.12 <sup>a</sup>	17.15±1.36 <sup>a</sup>	4377±52.62 <sup>a</sup>	298.40±10.54 <sup>a</sup>
12 h 光照/12 h 黑暗	20.09±1.21 <sup>a</sup>	1.56±0.07 <sup>b</sup>	12.26±0.54 <sup>a</sup>	6.63±0.21 <sup>a</sup>	6.05±0.20 <sup>a</sup>	17.57±1.68 <sup>a</sup>	4578±54.30 <sup>a</sup>	307.73±13.44 <sup>a</sup>
14 h 光照/10 h 黑暗	19.97±0.62 <sup>b</sup>	1.50±0.22 <sup>b</sup>	12.34±0.12 <sup>a</sup>	6.61±0.46 <sup>a</sup>	5.99±0.31 <sup>a</sup>	17.71±2.06 <sup>a</sup>	4468±55.83 <sup>a</sup>	309.37±11.47 <sup>a</sup>

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。

Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference ( $P<0.05$ ).



不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ( $P<0.05$ ).

图 3 不同光周期条件下绞股蓝干样品总皂苷含量及单株总皂苷量

Fig. 3 Total saponin content in dry samples and total saponin content in individual plant of *G. pentaphyllum* under different Photoperiod

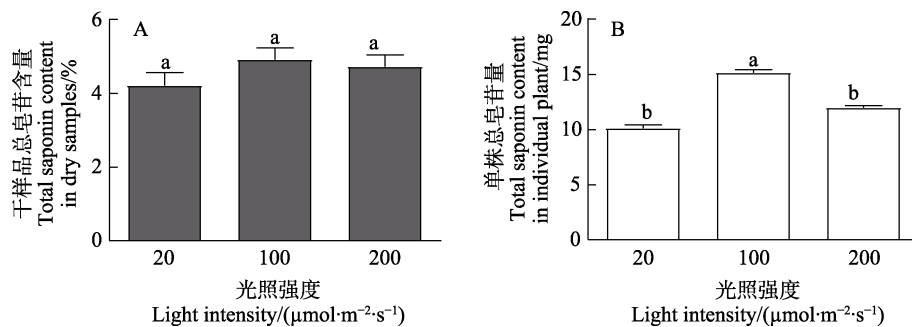
表 8 不同光照强度下绞股蓝的生长指标

Tab. 8 Growth index of *G. pentaphyllum* under different light intensity

光照处理 Light treatment/ ( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	株高 Plant height/cm	茎粗 Stem diame- ter/mm	根长 Root length/cm	叶长 Leaf length/cm	叶宽 Leaf width/cm	叶片数 Number of leaves	单株鲜重 Fresh weight/mg	单株干重 Dry weight/mg
20	21.06±1.04 <sup>a</sup>	1.23±0.05 <sup>b</sup>	10.74±0.53 <sup>b</sup>	4.14±0.36 <sup>b</sup>	5.80±0.14 <sup>b</sup>	16.70±2.33 <sup>b</sup>	3585±53.22 <sup>b</sup>	240.13±14.83 <sup>b</sup>
100	20.09±1.21 <sup>a</sup>	1.56±0.07 <sup>a</sup>	12.26±0.54 <sup>a</sup>	6.63±0.21 <sup>a</sup>	6.05±0.20 <sup>a</sup>	17.57±1.68 <sup>a</sup>	4578±54.30 <sup>a</sup>	307.73±13.44 <sup>a</sup>
200	14.17±1.44 <sup>b</sup>	1.20±0.11 <sup>b</sup>	11.37±0.32 <sup>b</sup>	6.58±0.31 <sup>a</sup>	5.74±0.20 <sup>b</sup>	15.30±2.47 <sup>b</sup>	3756±58.76 <sup>b</sup>	253.57±12.56 <sup>b</sup>

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。

Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference ( $P<0.05$ ).



不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ( $P<0.05$ ).

图 4 不同光照强度条件下绞股蓝干样品总皂苷含量及单株总皂苷量

Fig. 4 Total saponin content in dry samples and total saponin content in individual plant of *G. pentaphyllum* under different Light intensity

### 2.3 不同温度条件对绞股蓝生长及总皂苷积累的影响

从表 9 可以看出, 温度对绞股蓝幼苗生长有显著性影响。在恒温处理 (15 °C、20 °C、25 °C 和 30 °C) 中, 以 25 °C 和 30 °C 处理的绞股蓝株高、单株鲜重和单株干重较高。在变温条件下, 20 °C/30 °C 变温处理的绞股蓝的株高、根长、叶片数、

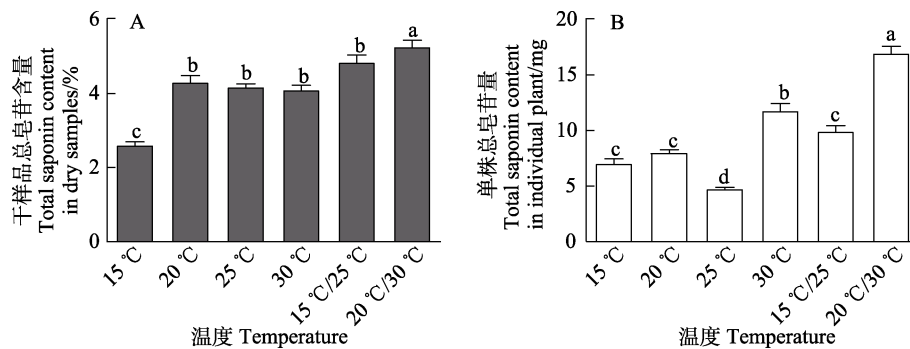
单株鲜重及单株干重均显著高于 15 °C/25 °C 变温处理。从总皂苷含量上看 (图 5A), 以 20 °C、25 °C、30 °C、15 °C/25 °C 和 20 °C/30 °C 处理较高, 其中 20 °C/30 °C 处理最高, 达 5.26%。从单株皂苷量来看 (图 5B), 以 20 °C/30 °C 处理最高, 达 16.96 mg。综合绞股蓝生长及有效成分积累情况, 认为 20 °C/30 °C 是绞股蓝水培的最适温度。

表 9 不同温度条件下绞股蓝的生长指标  
Tab. 9 Growth index of *G. pentaphyllum* under different temperatures

处理 Treatment	株高 Plant height/cm	茎粗 Stem diame- ter/mm	根长 Root length/cm	叶长 Leaf length/cm	叶宽 Leaf width/cm	叶片数 Number of leaves	单株鲜重 Fresh weigh/mg	单株干重 Dry weight/mg
15 °C	9.00±0.41 <sup>b</sup>	1.65±0.07 <sup>b</sup>	6.47±0.74 <sup>c</sup>	5.96±0.28 <sup>cd</sup>	5.47±0.22 <sup>b</sup>	10.50±0.70 <sup>c</sup>	1837.6±14.92 <sup>d</sup>	114.57±9.44 <sup>e</sup>
20 °C	11.44±1.39 <sup>b</sup>	1.47±0.07 <sup>bc</sup>	10.83±1.89 <sup>ab</sup>	7.39±0.26 <sup>a</sup>	6.94±0.25 <sup>a</sup>	9.10±0.84 <sup>c</sup>	2224.4±22.71 <sup>c</sup>	186.18±10.36 <sup>c</sup>
25 °C	21.06±1.04 <sup>a</sup>	1.23±0.05 <sup>c</sup>	10.74±0.53 <sup>b</sup>	4.14±0.36 <sup>d</sup>	5.80±0.14 <sup>b</sup>	16.70±2.33 <sup>b</sup>	3585±53.22 <sup>b</sup>	240.13±14.83 <sup>b</sup>
30 °C	20.12±2.79 <sup>a</sup>	1.40±0.09 <sup>c</sup>	9.12±0.56 <sup>bc</sup>	5.98±0.32 <sup>cd</sup>	5.48±0.29 <sup>b</sup>	17.40±2.08 <sup>a</sup>	3461.2±36.85 <sup>b</sup>	287.48±5.63 <sup>b</sup>
15 °C/25 °C	10.56±1.26 <sup>b</sup>	1.90±0.10 <sup>a</sup>	9.36±0.83 <sup>abc</sup>	6.51±0.24 <sup>b</sup>	5.77±0.26 <sup>b</sup>	7.80±0.95 <sup>c</sup>	2434±44.32 <sup>c</sup>	205.22±14.89 <sup>b</sup>
20 °C/30 °C	21.21±1.79 <sup>a</sup>	1.61±0.08 <sup>bc</sup>	12.38±0.61 <sup>a</sup>	6.79±0.22 <sup>b</sup>	6.22±0.25 <sup>b</sup>	18.30±1.54 <sup>a</sup>	4790±69.40 <sup>a</sup>	322.47±15.37 <sup>a</sup>

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。

Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference ( $P<0.05$ ).



不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ( $P<0.05$ ).

图 5 不同温度条件下绞股蓝干样品总皂苷含量及单株总皂苷量

Fig. 5 Total saponin content in dry samples and total saponin content in individual plant of *G. pentaphyllum* under different temperatures

### 3 讨论

无土栽培中营养液是植物赖以生存的根际环境，也是植物生长的主要营养来源。研究发现，不同营养液对植株产量和品质的影响不同<sup>[15-16]</sup>。田雅楠等<sup>[17]</sup>研究发现，日本山崎茄子配方对潮汐式育苗的番茄植株各项生理指标均有促进作用，处理后壮苗指数比霍格兰和阿农配方、日本园试配方高 28.26%和 81.53%。韦秀叶等<sup>[18]</sup>利用标准霍格兰营养液 (1H) 和自主设计的营养液配方 (1Z、1/2Z、1/4Z 和 1/8Z) 对大麻幼苗进行处理，结果表明 1/4Z 和 1/8Z 为大麻水培的适宜营养液配方。此外，水培植物的生长还与营养液的酸碱度有关。崔佳维等<sup>[19]</sup>研究发现，生菜、奶白菜、青菜和杭白菜 4 种叶菜的产量和营养品质在不同营养液 pH 条件下表现不同。随着水培液酸碱度增加，柳枝稷不同品种 (系) 幼苗的分蘖数、株高、苗鲜重、根冠比、根系活力以及净光合速率均显著降低<sup>[20]</sup>。本研究对绞股蓝水培的营养液条件进行探索，发现绞股蓝生长及有效成分积累不

仅与营养液种类有关，还与营养液的 pH 密切相关。使用 pH 为 6.0 的日本园试营养液进行培养可以获得高生物量和高总皂苷含量的绞股蓝植株。相关性分析结果显示，绞股蓝单株总皂苷量与株高、叶长、叶宽、叶片数、单株鲜重、单株干重呈高度正相关。因此，在绞股蓝水培过程中培育高生物量植株是提高绞股蓝药材质量的关键。

钙、镁、磷、钾是植物生长发育和形态建成所必须的矿质元素。有研究表明，低浓度的磷和适当浓度的钾有利于红椿水培幼苗生长<sup>[21]</sup>。在低钙浓度范围内，增加钙浓度能够促进烟草水培幼苗对钾的吸收<sup>[22]</sup>；当镁浓度低于 40 mg/L 时，烟草水培幼苗中钙、镁、磷、钾的积累量与营养液中镁浓度呈正相关关系。本研究中不同营养液配方中钙、镁、磷、钾含量不同，但 4 种矿质元素的含量对绞股蓝幼苗生长的影响未呈现明显的规律性，其原因可能与绞股蓝生长周期较长而幼苗培养时间较短，导致植株形态特征差异不明显有关。氮素水平和氮素形态配比不但影响植物生长，

还影响植物次生代谢产物积累。研究发现,当硝态氮与铵态氮配比为 75:25 时,三七的生物量及皂苷含量较高<sup>[23]</sup>。在水培液中增加氮的浓度可显著增加拟巫山淫羊藿的生物量,并影响黄酮的积累<sup>[24]</sup>。本研究中,日本园试营养液中氮含量最高,华南农业大学叶菜 A 营养液中氮含量最低;改良 Hoagland 营养液中硝态氮与铵态氮的比例最高,其次为日本山崎和日本园试配方。绞股蓝单株总皂苷量与营养液中氮含量的高低无关,但较低的硝态氮与铵态氮配比更有利于绞股蓝皂苷积累,其原因有待进一步研究。

光照和温度是植物生长发育的重要影响因素。前人研究表明,绞股蓝生长及有效成分积累与光照条件和环境温度密切相关。刘世彪等<sup>[25]</sup>研究发现,绞股蓝叶的形态结构受光照强度影响较大,适当遮荫处理有利于植株生长发育;绞股蓝生长发育的最适温度为 25 °C,有效成分积累的最适温度为 25~30 °C<sup>[26]</sup>。邓铭等<sup>[27]</sup>认为 40%~85% 的相对照度有利于绞股蓝生长,相对照度为 70% 左右时其干物质产量和总皂苷含量最高。本研究发现 100  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 光照条件及 20 °C/30 °C 变温处理有利于绞股蓝生物量和皂苷积累,与前人研究结果较为一致。其原因可能与绞股蓝对生境的需求有关,绞股蓝原生境为山谷密林、山坡疏林或路旁草丛,均为荫蔽且阴凉的环境。

多项研究表明,不同产地绞股蓝总皂苷含量存在明显差异。彭亮等<sup>[28]</sup>研究发现,不同产地绞股蓝总皂苷含量相差可达 10 倍以上。马泽刚等<sup>[29]</sup>研究发现,绞股蓝总皂苷含量从高到低的产地排序为:江西>广东>云南>陕西>内蒙古>福建>四川>湖北。潘春柳等<sup>[30]</sup>发现广西不同产地来源的绞股蓝总皂苷含量亦存在明显差别。实现绞股蓝标准化生产是获取高质量药材的关键,然而目前在绞股蓝药材质量控制方面尚无统一定论。《山东省中药材标准》(2002 年版、2012 年版)<sup>[31-32]</sup>、《湖北省中药材标准》(2009 年版)<sup>[33]</sup>规定绞股蓝总皂苷含量分别为 2.0%和 0.18%,其他省区中药材标准未涉及绞股蓝药材质量要求。本研究中,使用 pH 为 6.0 的日本园试营养液对绞股蓝进行水培,在环境温度为 20~30 °C,光周期为每天光照 10~14 h,光照强度为 100  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时,培养 30 d 后其干样品总皂苷含量高于 3%,高于现有标准。因此,使用规范化水培技术可同步实现绞股蓝产量和品质的双精准调控。本研究为今后开展绞股

蓝规模化生产、质量标准研究打下了基础。

## 参考文献

- [1] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志·第七十三卷第一分册[M]. 北京: 科学出版社, 1986: 269-271. Editorial Board of the Chinese Academy of Sciences Flora of China. Flora of China, volume seventy-three, volume 1[M]. Beijing: Science Press, 1986: 269-271. (in Chinese)
- [2] 李仪儒, 李立娜. 绞股蓝的综合研究[J]. 天津药学, 1998(3): 8-10. LI Y R, LI L N. A comprehensive study on *Gynostemma Pentaphyllum*[J]. Tianjin Pharmacy, 1998(3): 8-10. (in Chinese)
- [3] 陈慧娟, 李小芳, 邓茂, 谢龙, 刘凯, 张旭敏. 以绞股蓝皂苷稳定槲皮素纳米混悬剂的制备及体外评价[J]. 中国中药杂志, 2022, 47(16): 4365-4371. CHEN H J, LI X F, DENG M, XIE L, LIU K, ZHANG X M. Preparation and *in vitro* evaluation of gypenosides-stabilized quercetin nanosuspensions[J]. Journal of Chinese Traditional Medicine, 2022, 47(16): 4365-4371. (in Chinese)
- [4] 范冬冬, 匡艳辉, 向世颢, 张东, 朱晶晶, 王智民, 王德勤, 李楚源. 绞股蓝化学成分及其药理活性研究进展[J]. 中国药理学杂志, 2017, 52(5): 342-352. FAN D D, KUANG Y H, XIANG S X, ZHANG D, ZHU J J, WANG Z M, WANG D Q, LI C Y. Advances in studies on chemical constituents and pharmacological activities of *Gynostemma pentaphyllum*[J]. Chinese Journal of Pharmacy, 2017, 52(5): 342-352. (in Chinese)
- [5] 赵家靖, 向增旭. 设施栽培技术在中药材产业的应用与发展[J]. 农业工程技术, 2021, 41(13): 40-45. ZHAO J J, XIANG Z X. Application and development of protected cultivation technique in Chinese medicinal materials industry[J]. Agricultural Engineering Techniques, 2021, 41(13): 40-45. (in Chinese)
- [6] 李常乐. 蒲公英水培技术[J]. 现代园艺, 2019(13): 63-64. LI C L. Hydroponic technique of *Taraxacum mongolicum*[J]. Modern Horticulture, 2019(13): 63-64. (in Chinese)
- [7] 南小航. 益母草药材质量与水培调控研究[D]. 长沙: 湖南中医药大学, 2012. NAN X H. Studies on quality and hydroponic regulation of *Leonurus heterophyllus*[D]. Changsha: Hunan University of Traditional Chinese Medicine, 2012. (in Chinese)
- [8] 金喜梅. 栽培方式与营养液配方对鱼腥草生长及品质的影响[D]. 广州: 华南农业大学, 2017. JIN X M. Effects of cultivation methods and nutrient solution on growth and quality of *Houttuynia cordata* Thunb[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2017. (in Chinese)

- [9] 赵姣姣. 桔梗设施无土栽培氮营养与光照条件研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.  
ZHAO J J. Study on nitrogen nutrition and light condition of *Platycodon grandiflorus* under soilless culture[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014. (in Chinese)
- [10] 李哲浩, 高磊. 人参水培种植技术要点及其应用优势分析[J]. 上海农业科技, 2021(3): 69-70, 122.  
LI Z H, GAO L. Main points of *Panax ginseng* hydroponic cultivation technology and its application superiority analysis[J]. Shanghai Agricultural Science and Technology, 2021(3): 69-70, 122. (in Chinese)
- [11] 王瑞. 水培菠菜营养液最佳配比与品质调控试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.  
WANG R. Experimental study on optimal proportion and quality control of nutrient solution for hydroponic *Spinacia oleracea*[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese)
- [12] 李建设. 基于银川平原地下水质的叶菜水培营养液配方研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.  
LI J S. Study on nutrient solution formulation of leaf vegetable hydroponics based on groundwater quality in Yinchuan Plain[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2011. (in Chinese)
- [13] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 119-120.  
LI H S. Principles and techniques of plant physiological and biochemical experiments[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 119-120. (in Chinese)
- [14] 杨婧娟, 何少贵, 赵梦琦, 张希. 不同方法提取绞股蓝总皂苷的比较研究[J]. 食品工业科技, 2016, 37(16): 269-272.  
YANG J J, HE S G, ZHAO M Q, ZHANG X. Comparative study on *Gynostemma pentaphyllum* total saponins extracted by different methods[J]. Science and Technology in the Food Industry, 2016, 37(16): 269-272. (in Chinese)
- [15] 段雪婷, 王璐, 冯晓东. 不同营养液配方对黄瓜幼苗生长的影响[J]. 延安大学学报(自然科学版), 2020, 39(3): 85-89.  
DUAN X T, WANG L, FENG X D. Effects of different nutrient solution on seedling growth of *Cucumis sativus*[J]. Journal of Yan'an University (Natural Science Edition), 2020, 39(3): 85-89. (in Chinese)
- [16] 李政璞, 佟静, 王素娜, 季延海, 王丽萍, 梁浩, 武占会. 植物工厂条件下不同营养液配方对韭菜生长的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(17): 153-157.  
LI Z P, TONG J, WANG S N, JI Y H, WANG L P, LIANG H, WU Z H. Effects of different nutrient solution formulations on the growth of *Allium tuberosum* in plant-factory conditions[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48(17): 153-157. (in Chinese)
- [17] 田雅楠, 曹玲玲, 赵立群, 曹彩红. 不同营养液配方对番茄潮汐式灌溉育苗质量的影响[J]. 中国果菜, 2021, 41(9): 83-87.  
TIAN Y N, CAO L L, ZHAO L Q, CAO C H. Effects of different nutrient solution on quality of *Lycopersicon esculentum* seedlings under tidal irrigation[J]. Chinese Fruit and Vegetable, 2021, 41(9): 83-87. (in Chinese)
- [18] 韦秀叶, 赵信林, 郭媛, 邱财生, 龙松华, 王玉富. 不同营养液配方对工业大麻幼苗生长的影响[J]. 中国麻业科学, 2021, 43(1): 15-20.  
WEI X Y, ZHAO X L, GUO Y, QIU C S, LONG S H, WANG Y F. Effects of different nutrient solution formulations on the growth of *Cannabis sativa* seedlings[J]. Chinese Hemp Science, 2021, 43(1): 15-20. (in Chinese)
- [19] 崔佳维, 余纪柱, 张红梅, 丁小涛, 卜立君, 何立中, 张祥平, 金海军. NFT条件下不同营养液pH值对4种叶菜生长和营养品质的影响[J]. 长江蔬菜, 2021(18): 68-72.  
CUI J W, YU J Z, ZHANG H M, DING X T, BU L J, HE L Z, ZHANG Y P, JIN H J. Effects of different pH values of nutrient solution on growth and nutritional quality of four leafy vegetables under NFT condition[J]. Vegetables of the Yangtze River, 2021(18): 68-72. (in Chinese)
- [20] 徐开杰, 史丽丽, 王勇锋, 李毛, 孙凤丽, 刘曙东, 奚亚军. 水培条件下pH值对柳枝稷幼苗生长发育的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(23): 7690-7698.  
XU K J, SHI L L, WANG Y F, LI M, SUN F L, LIU S D, XI Y J. Effects of pH on growth and development of switchgrass seedlings in water culture[J]. Journal of Ecology, 2015, 35(23): 7690-7698. (in Chinese)
- [21] 罗婷, 杨文忠, 张珊珊. 水培条件下氮磷钾对红椿幼苗生理指标的影响[J]. 西部林业科学, 2022, 51(1): 29-48, 35.  
LUO T, YANG W Z, ZHANG S S. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium on physiological indexes of *Toona ciliata* seedlings under hydroponic culture[J]. Journal of West China Forestry Science, 2022, 51(1): 29-48, 35. (in Chinese)
- [22] 介晓磊, 刘世亮, 李有田, 化党领, 黄元炯, 刘国顺, 张弘韬. 不同浓度钙营养液对烟草矿质营养吸收与积累的影响[J]. 土壤通报, 2005, 36(4): 560-563.  
JIE X L, LIU S L, LI Y T, HUA D L, HUANG Y J, LIU G S, ZHANG H T. Effect of  $Ca^{2+}$  concentrations on absorption and accumulation of mineral nutrients in tobacco[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36(4): 560-563. (in Chinese)
- [23] 霍跃文, 金航, 王馨, 李林玉, 杨雁, 马维思, 李复兴, 杨斌, 李华, 易芳, 刘莉. 硝态氮与铵态氮不同比例配施对文山三七生长及药用成分的影响[J]. 西南农业学报, 2021, 34(11): 2422-2428.

- HUO Y W, JIN H, WANG X, LI L Y, YANG Y, MA W S, LI F X, YANG B, LI H, YI F, LIU L. Effects of different application ratios of ammonium and nitrate nitrogen on growth and medicinal components of *Panax notoginseng*[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2021, 34(11): 2422-2428. (in Chinese)
- [24] 张云凤, 郭宝林, 杨相波, 李砾, 姜志海, 莫玉敏. 水培条件下氮素对拟巫山淫羊藿产量和黄酮类成分的影响[J]. 中国中药杂志, 2017, 42(23): 4574-4581.
- ZHANG Y F, GUO B L, YANG X B, LI L, JIANG Z H, MO Y M. Effects of nitrogen on yields and flavonoids contents of *Epimedium pseudowushanense* in hydroponic conditions[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2017, 42(23): 4574-4581. (in Chinese)
- [25] 刘世彪, 胡正海. 遮荫处理对绞股蓝叶形态结构及光合特性的影响[J]. 武汉植物学研究, 2004(4): 339-344.
- LIU S B, HU Z H. Effects of shading on leaf morphology and photosynthetic characteristics of *Gynostemma pentaphyllum*[J]. Botanical Research in Wuhan, 2004(4): 339-344. (in Chinese)
- [26] 刘世彪, 彭小列, 李馨芸, 王开向. 温度对绞股蓝和五柱绞股蓝生长及总皂苷积累的影响[J]. 广西植物, 2012, 32(2): 253-256.
- LIU S B, PENG X L, LI X Y, WANG K X. Effects of temperature on growth and total gypenosides accumulation in *Gynostemma pentaphyllum* and *Gynostemma pentagynum*[J]. Guihaia, 2012, 32(2): 253-256. (in Chinese)
- [27] 邓铭, 钟山, 任波, 涂知明. 光照强度对绞股蓝总皂甙含量的效应研究[J]. 湖北医科大学学报, 2000(2): 102-103.
- DENG M, ZHONG S, REN B, TU Z M. Effect of light intensity on the content of total saponins of *Gynostemma pentaphyllum*[J]. Journal of Wuhan University School of Medicine, 2000(2): 102-103. (in Chinese)
- [28] 彭亮, 李诒光, 陈杰, 饶毅, 季巧遇, 魏惠珍. 不同产地、不同品种间绞股蓝总皂苷和总多糖含量比较研究[J]. 亚太传统医药, 2015, 11(22): 21-24.
- PENG L, LI Y G, CHEN J, RAO Y, JI Q Y, WEI H Z. Comparison of total saponins and total polysaccharides in *Gynostemma pentaphyllum* from different habitats and varieties[J]. Traditional Medicine in Asia Pacific, 2015, 11(22): 21-24. (in Chinese)
- [29] 马泽刚, 黄春花, 钟辉云, 吴秀丽, 周礼仕, 刘卓. 八个不同产地绞股蓝总皂苷含量及抗氧化活性测定[J]. 湖北农业科学, 2018, 57(14): 109-113.
- MA Z G, HUANG C H, ZHONG H Y, WU X L, ZHOU L S, LIU Z. Determination of total saponins and antioxidant activity of *Gynostemma pentaphyllum* from eight different habitats[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2018, 57(14): 109-113. (in Chinese)
- [30] 潘春柳, 谢月英, 彭玉德, 黄雪彦, 余丽莹. 广西不同种质来源 3 种绞股蓝属植物总皂苷含量比较[C]. 中国植物园, 2019(22): 142-146.
- PAN C L, XIE Y Y, PENG Y D, HUANG X Y, YU L Y. Comparison of total saponin content of three *Gynostemma* species from different *Gynostemma* in Guangxi[C]. China Botanical Garden, 2019(22): 142-146. (in Chinese)
- [31] 山东省药品监督管理局. 山东省中药材标准[M]. 济南: 山东友谊出版社, 2002: 169-171.
- Shandong Provincial Drug Administration Bureau. Shandong provincial standard for Chinese medicinal materials[M]. Jinan: Shandong Friendship Publishing House, 2002: 169-171. (in Chinese)
- [32] 山东省药品监督管理局. 山东省中药材标准[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 2012: 220-223.
- Bureau of Drug Administration of Shandong Province. Shandong provincial standard for Chinese medicinal materials[M]. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 2012: 220-223. (in Chinese)
- [33] 湖北省食品药品监督管理局. 湖北省中药材标准[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2009: 104-106.
- Hubei Food and Drug Administration Bureau. Standard for Chinese medicinal materials of Hubei Province[M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 2009: 104-106. (in Chinese)