

程睿, 乔一娜, 蔡星, 等. 水肥耦合处理对毛竹叶片生理特性的影响[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(7): 1312-1319.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.07.007

## 水肥耦合处理对毛竹叶片生理特性的影响

程睿<sup>1</sup>, 乔一娜<sup>2</sup>, 蔡星<sup>1</sup>, 陈清专<sup>3</sup>, 陈礼光<sup>1</sup>, 荣俊冬<sup>1</sup>, 郑郁善<sup>1</sup>

(1. 福建农林大学林学院, 福建 福州 350000; 2. 陕西省林业科学院, 陕西 西安 710000; 3. 漳平市林业局, 福建 漳州 363000)

**摘要:** 本研究为探讨水肥耦合处理对毛竹叶片生理特性的影响, 运用主成分分析法筛选毛竹林最优水肥耦合模式, 以期为毛竹的规模化生产和高效栽培提供理论依据。以福建省漳平市溪南镇金菊村毛竹林为研究对象, 采用裂区试验设计, 依据土壤含水量设置 3 个灌水水平, 分别以田间最大持水量的 85%±5% 作为土壤高含水量处理 (W1)、田间最大持水量的 65%±5% 作为土壤中等含水量处理 (W2)、田间最大持水量的 50%±5% 作为土壤低含水量处理 (W3); 3 种施肥水平, 分别以 1.25×10<sup>5</sup> kg/hm<sup>2</sup> 氮、磷、钾比例为 26:10:12 的复合肥作为高肥处理 (F1)、6.25×10<sup>4</sup> kg/hm<sup>2</sup> 氮、磷、钾比例为 1:1:1 的复合肥作为中肥处理 (F2)、3.13×10<sup>4</sup> kg/hm<sup>2</sup> 氮、磷、钾比例为 1:1:1 的复合肥作为低肥处理 (F3), 共 9 个处理。分析在不同水肥耦合和生长月份条件下毛竹叶片养分含量和渗透调节物质含量的差异, 结果表明, T4 (W2F1) 处理毛竹叶片氮、磷、钾含量的均值和淀粉含量的均值均分别优于其他处理。综合毛竹叶片养分含量与叶片渗透调节物质等各项生理指标, 运用主成分分析法评价毛竹叶片的生理特性, 结果显示, T4 (W2F1) 处理的综合得分排名第一。综上, 土壤含水量为田间最大持水量的 65%±5%, 施肥量为 1.25×10<sup>5</sup> kg/hm<sup>2</sup> 氮、磷、钾比例为 26:10:12 的复合肥是毛竹田间最优水肥耦合组合。

**关键词:** 水肥耦合; 毛竹; 叶片; 生理特性

**中图分类号:** S795.9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4440(2025)07-1312-08

## Effects of water and fertilizer coupling treatment on physiological characteristics of *Phyllostachys edulis* leaves

CHENG Rui<sup>1</sup>, QIAO Yina<sup>2</sup>, CAI Xing<sup>1</sup>, CHEN Qingzhuan<sup>3</sup>, CHEN Liguang<sup>1</sup>, RONG Jundong<sup>1</sup>, ZHENG Yushan<sup>1</sup>

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350000, China; 2. Shaanxi Academy of Forestry, Xi'an 710000, China; 3. Zhangping Forestry Bureau, Zhangzhou 363000, China)

**Abstract:** This study investigated the effects of water-fertilizer coupling treatments on physiological characteristics of *Phyllostachys edulis* leaves. Principal component analysis was employed to screen optimal water-fertilizer coupling models for *Phyllostachys edulis* forests, aiming to provide theoretical foundations for scaled production and efficient cultivation of *Phyllostachys edulis*. The study was conducted in a *Phyllostachys edulis* forest at Jinju Village, Xi'nan Town, Zhangping City, Fujian Province, employing a split-plot experimental design with nine treatments. Three irrigation levels were established

收稿日期: 2024-10-24

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目 (2016YFD0600902); 福建省科技创新团队项目 (KLA18069A)

作者简介: 程睿 (1998-), 男, 云南昭通人, 硕士研究生, 研究方向为森林培育理论与技术。(E-mail) 487878675@qq.com

通讯作者: 郑郁善, (E-mail) zys1960@163.com

based on soil moisture content: 85%±5% of field capacity (W1), 65%±5% of field capacity (W2), 50%±5% of field capacity (W3). Concurrently, three fertilization levels were applied: 1.25×10<sup>5</sup> kg/hm<sup>2</sup> compound fertilizer (F1), 6.25×10<sup>4</sup> kg/hm<sup>2</sup> compound fertilizer (F2), 3.13×10<sup>4</sup> kg/hm<sup>2</sup> compound fertilizer (F3). The nitrogen, phosphorus, and potassium ratio in the compound fertilizer

was 26 : 10 : 12. The study analyzed the differences in nutrient content and osmotic adjustment substances in *Phyllostachys edulis* leaves under different water-fertilizer coupling and growth month conditions. The results showed that the mean nitrogen, phosphorus, and potassium content, as well as the mean starch content in the leaves of *Phyllostachys edulis* treated with T4 (W2F1), were superior to those of other treatments. Comprehensively considering the nutrient content in *Phyllostachys edulis* leaves and various physiological indicators such as osmotic adjustment substances in leaves, the physiological characteristics of *Phyllostachys edulis* leaves were evaluated using principal component analysis. The results revealed that the treatment T4 (W2F1) ranked first in the comprehensive score. In conclusion, the optimal water-fertilizer coupling combination for *Phyllostachys edulis* under field conditions was a soil water content of  $65\% \pm 5\%$  of field capacity and a fertilizer application rate of  $1.25 \times 10^5$  kg/hm<sup>2</sup> of compound fertilizer (N : P : K = 26 : 10 : 12).

**Key words:** water and fertilizer coupling; *Phyllostachys edulis*; leaf; physiological characteristics

在农林业生产中,水分和肥料是影响作物产量和品质的关键要素<sup>[1-2]</sup>。毛竹(*Phyllostachys edulis*)作为中国重要的经济竹种之一,广泛分布于福建、江西、浙江与安徽等地<sup>[3-4]</sup>,具有繁殖能力强、产量较高、用途较广等优点<sup>[5]</sup>,且竹笋的营养价值高,具有较高的经济效益和生态效益。在毛竹生长发育过程中,叶片的养分含量与渗透调节物质受生境影响最大,如灌水和施肥<sup>[6-8]</sup>。水分能够促进毛竹竹笋萌发、新竹生长、母竹换叶,同时也能对叶片的光合速率产生显著影响;施肥能直接增加土壤中养分含量,快速提高竹林土壤肥力<sup>[9]</sup>。因此,水分和肥料的不同组合配比的相互作用即水肥耦合是保证竹林丰产的重要措施<sup>[10]</sup>。王虎兵等<sup>[11]</sup>指出,灌水和施肥能显著影响番茄(*Solanum lycopersicum*)对养分的吸收,灌水量与氮、钾吸收效率成正比。Wang等<sup>[12]</sup>研究发现,小麦(*Triticum aestivum*)籽粒的水磷交互作用能极显著影响其磷积累、全磷含量、磷脂含量和磷素生产效率。郑恩楠等<sup>[13]</sup>研究发现,水稻(*Oryza sativa*)不同器官含氮量与施氮量成正比,其碳、氮含量随着灌水量的增加呈现先增加后减少的趋势。杨静宜<sup>[14]</sup>、张洁瑕等<sup>[15]</sup>对西芹(*Apium graveolens*)的研究结果均表明,适量灌水和施肥处理可提升西芹可溶性蛋白含量,过量施肥则会抑制可溶性蛋白的合成。胡云平等<sup>[16]</sup>研究发现,不同水肥耦合模式对

春小麦叶片生理特性及产量的影响均达到了显著水平,且水分处理的小麦叶片中可溶性糖含量、可溶性蛋白含量的增加幅度要高于氮素处理的增加幅度。可见,水肥耦合对作物的养分、渗透调节物质含量以及产量等指标具有一定的促进作用。

目前关于毛竹灌水和施肥方面的研究主要集中在氮磷钾配比<sup>[17]</sup>、复合肥和有机无机复混肥施用<sup>[18-19]</sup>、灌水时间<sup>[20]</sup>等方面,通过水肥耦合效应分析其对毛竹生理指标影响的研究较少。因此,本研究设置不同的水肥耦合处理综合研究其对毛竹生长特性的影响,这将有助于全面揭示增加毛竹生长指标与经济效应的途径。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

本试验位于福建省漳平市溪南镇金菊村(25°3'N, 117°41'E),海拔 580 m,属南亚热带季风气候,年平均气温 20.3 °C,年平均降水量 1 200~1 500 mm,年平均相对湿度 78%,全年无霜期 235 d。试验地土壤类型为山地酸性土壤,土层深厚,有机质含量丰富。主要的伴生植物有桃金娘(*Rhodomyrtus tomentosa*)、杂色榕(*Ficus variegata*)、水同木(*Ficus fistulosa*)等。试验地土壤的主要理化性质见表 1。

表 1 试验地土壤主要理化性质

Table 1 Main physical and chemical properties of the soil in the test site

土壤 pH 值	全氮含量 (g/kg)	全磷含量 (g/kg)	全钾含量 (g/kg)	水解性氮含量 (mg/kg)	有效磷含量 (mg/kg)	速效钾含量 (mg/kg)
4.16±0.15	0.05±0.01	0.10±0.05	5.42±0.09	36.5±4.04	0.13±0.03	26.8±2.13

表中数据为平均值±标准差。

### 1.2 研究方法

1.2.1 试验设计 选择立地条件、竹林结构基本一致

的毛竹林,于 2018 年 9 月设立 20 m×20 m 标准样地,同年 10 月铺管。本试验采用裂区试验设计,土壤含

水量作为主处理,灌水水平主要依据样地的田间最大持水量(36.8%)来设定,分别为 W1(田间最大持水量的85%±5%)、W2(田间最大持水量的65%±5%)、W3(田间最大持水量的50%±5%);施肥量作为副处理,设 3 个水平,分别为 F1(施肥量为  $1.25 \times 10^5$  kg/hm<sup>2</sup>)、F2(施肥量为  $6.25 \times 10^4$  kg/hm<sup>2</sup>)、F3(施肥量为  $3.13 \times 10^4$  kg/hm<sup>2</sup>)。水肥耦合设置 9 个处理,分别以 T1~T9 表示,试验重复 3 次,共 27 个处理小区。每个小区之间设置 1 m 的阻隔带。施肥方法采用沟施,施肥时间选择在毛竹生理活动旺盛,容易发生养分亏缺的关键生理期,于 2019 年 7 月上旬施入氮、磷、钾比例为 26:10:12 的红四方牌复合肥。灌水方式采用喷灌形式,灌溉时间根据土壤水分速测仪检测的土壤平均含水量来确定,检查周期为每周 1 次。当土壤含水量低于各处理设定的土壤含水量下限(表 2)时及时进行灌水。

表 2 水肥耦合试验设计

Table 2 Experimental design for water-fertilizer coupling

处理	组合	土壤水分	施肥量 (kg/hm <sup>2</sup> )
T1	W1F1	田间最大持水量的 85%±5%	$1.25 \times 10^5$
T2	W1F2	田间最大持水量的 85%±5%	$6.25 \times 10^4$
T3	W1F3	田间最大持水量的 85%±5%	$3.13 \times 10^4$
T4	W2F1	田间最大持水量的 65%±5%	$1.25 \times 10^5$
T5	W2F2	田间最大持水量的 65%±5%	$6.25 \times 10^4$
T6	W2F3	田间最大持水量的 65%±5%	$3.13 \times 10^4$
T7	W3F1	田间最大持水量的 50%±5%	$1.25 \times 10^5$
T8	W3F2	田间最大持水量的 50%±5%	$6.25 \times 10^4$
T9	W3F3	田间最大持水量的 50%±5%	$3.13 \times 10^4$

1.2.2 项目测定 在施肥后每隔 2 周进行一次取样,采样时随机在每块试验样地选择 3 株生长健壮、长势一致的 3~5 年生毛竹,从不同方向采集毛竹上、中、下 3 个部位健康、成熟的叶片,每个部位至少采集 10 片叶,称重并装入自封袋,带回实验室用于测定毛竹叶片的养分与渗透调节物质含量。叶片全氮、全磷和全钾含量分别采用半微量凯氏定氮法、钼锑抗吸光度法、火焰原子吸收分光光度法进行测定<sup>[21]</sup>。叶片可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝法进行测定,可溶性糖和淀粉含量采用蒽酮比色法<sup>[22]</sup>进行测定。

1.2.3 数据处理 试验数据采用 Excel 2019 和 SPSS 27.0 进行处理和统计分析;采用 One-way

ANOVA 法和 LSD 多重比较法分析检验组间差异,显著性水平设定为 0.05,试验数据以平均值±标准差表示;用主成分分析法进行因子筛选及综合评价。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同水肥耦合处理毛竹叶片养分分配动态变化

2.1.1 毛竹叶片全氮含量的动态变化 从表 3 可知,不同水肥耦合处理下,T4 处理毛竹叶片含氮量均值为 31.39 g/kg,7 月 T4 处理毛竹叶片含氮量显著高于 T2、T3、T6、T8 处理;8~9 月 T4 处理毛竹叶片含氮量显著高于其他处理。T3 处理不同月份间,毛竹叶片全氮含量呈持续增加趋势,9 月达最高值;其他水肥耦合处理不同月份间,毛竹叶片全氮含量变化趋势一致,均为先增加后降低,在 8 月达到最高。综上,在 7~9 月,T4 处理为不同水肥耦合处理中毛竹叶片含氮量最优的处理。

表 3 不同水肥耦合处理毛竹叶片全氮含量

Table 3 Total nitrogen content of *Phyllostachys edulis* leaves under different water and fertilizer coupling treatments

处理	全氮含量(g/kg)			均值
	7 月	8 月	9 月	
T1	23.80±1.73ab	30.79±1.38b	30.31±2.72b	28.30
T2	21.24±1.29cd	29.01±2.19bc	27.39±1.14bc	25.88
T3	21.48±1.77cd	26.17±0.24c	28.24±3.16bc	25.30
T4	24.22±0.63a	35.09±3.93a	34.86±2.17a	31.39
T5	23.89±0.92ab	29.53±2.02bc	26.42±2.31bc	26.61
T6	21.86±0.77bcd	27.59±0.41bc	27.31±3.12bc	25.59
T7	23.03±0.97abc	27.21±0.69c	26.51±1.70bc	25.58
T8	20.57±0.78d	28.36±0.21bc	27.68±1.15bc	25.53
T9	23.41±1.12abc	26.17±0.41c	24.70±1.30c	24.76

处理 T1~T9 见表 2。同列不同小写字母表示不同水肥耦合处理毛竹叶片全氮含量差异显著( $P < 0.05$ )。数据为平均值±标准差。

2.1.2 毛竹叶片全磷含量的动态变化 从表 4 可知,7 月和 9 月不同水肥耦合处理下,T4 处理毛竹叶片全磷含量显著高于其他处理( $P < 0.05$ ),8 月不同水肥耦合处理下,T4 处理毛竹叶片全磷含量显著高于除 T1 处理之外的其他处理。T4 处理毛竹叶片全磷含量均值为 1.19 g/kg,与全磷含量均值最低的 T9 处理相比增幅达到 142.86%。7~9 月所有水肥耦合处理毛竹叶片全磷含量均呈现先上升后下降的趋势,其中 8 月含磷量最高。综上,7~9 月 T4 处理为不同水肥耦合处理中毛竹叶片含磷量最优的处理。

表4 不同水肥耦合处理毛竹叶片全磷含量

Table 4 Total phosphorus content of *Phyllostachys edulis* leaves under different water and fertilizer coupling treatments

处理	全磷含量(g/kg)			均值
	7月	8月	9月	
T1	0.40±0.04b	1.78±0.03a	1.16±0.06b	1.11
T2	0.33±0.05c	1.42±0.12b	0.92±0.01d	0.89
T3	0.17±0.04d	1.11±0.08c	0.67±0.05ef	0.65
T4	0.51±0.04a	1.82±0.08a	1.25±0.05a	1.19
T5	0.17±0.04d	1.30±0.09b	1.00±0.03c	0.82
T6	0.13±0.03d	0.98±0.07c	0.75±0.02e	0.62
T7	0.27±0.03c	1.37±0.15b	0.85±0.05d	0.83
T8	0.10±0.03d	1.04±0.06c	0.59±0.01f	0.57
T9	0.10±0.01d	0.98±0.06c	0.40±0.10g	0.49

处理 T1~T9 见表 2。同列不同小写字母表示不同水肥耦合处理毛竹叶片全磷含量差异显著 ( $P<0.05$ )。数据为平均值±标准差。

2.1.3 毛竹叶片全钾含量的动态变化 从表 5 可知,不同水肥耦合处理下,T4 处理毛竹叶片全钾含量均值最高,为 9.57 g/kg,与全磷含量最低的 T9 处理相比增加 19.92%。7 月,T1~T5 处理、T7 处理、T8 处理的毛竹叶片全钾含量均较高,且这 7 个处理间差异不显著;8 月,T1、T2、T4、T5、T7 处理的毛竹叶片全钾含量均较高,且这 5 个处理间差异不显著;9 月,T4 处理的毛竹叶片全钾含量显著高于 T2、T6、T8、T9 处理。7-9 月在所有水肥耦合处理中,毛竹叶片全钾含量表现趋势一致,即呈现先上升后下降的变化趋势,其中 8 月毛竹叶片全钾含量最高。综上,在 7-9 月,T4 处理为不同水肥耦合处理中毛竹叶片全钾含量最优的处理。

表5 不同水肥耦合处理毛竹叶片全钾含量

Table 5 Total potassium content of *Phyllostachys edulis* leaves under different water and fertilizer coupling treatments

处理	全钾含量(g/kg)			均值
	7月	8月	9月	
T1	8.06±0.22a	10.91±0.39a	9.54±0.10ab	9.50
T2	8.08±0.24a	10.40±0.34a	8.69±0.44cd	9.05
T3	7.95±0.10a	9.46±0.32b	9.20±0.04abc	8.87
T4	8.07±0.03a	10.95±0.79a	9.70±0.36a	9.57
T5	8.01±0.32a	10.66±0.42a	9.19±0.11abc	9.29
T6	6.36±0.17b	9.56±0.37b	8.95±0.71bcd	8.29
T7	7.99±0.22a	10.44±0.27a	9.13±0.39abc	9.18
T8	7.85±0.14a	9.32±0.31b	8.39±0.20d	8.52
T9	6.10±0.62b	9.46±0.46b	8.37±0.08d	7.98

处理 T1~T9 见表 2。同列不同小写字母表示不同水肥耦合处理毛竹叶片全钾含量差异显著 ( $P<0.05$ )。数据为平均值±标准差。

## 2.2 不同水肥耦合处理毛竹叶片渗透调节物质含量的动态变化

2.2.1 毛竹叶片可溶性蛋白含量的动态变化 从表 6 可知,不同水肥耦合处理,T2、T3 处理为毛竹叶片可溶性蛋白含量较优的处理,均值为 1.63 g/kg,与可溶性蛋白含量最高的 T9 处理相比降幅达到 35.83%。不同月份下,毛竹叶片可溶性蛋白含量存在显著差异。7 月,T9 处理毛竹叶片可溶性蛋白含量显著高于 T1、T2、T4、T5、T6、T7 处理,与含量最低的 T1 处理相比增加了 64.84%;8 月,T9 处理毛竹叶片可溶性蛋白含量显著高于 T1~T7 处理,与含量最低的 T6 处理相比增加了 101.68%;9 月,T9 处理毛竹叶片可溶性蛋白含量显著高于 T1~T8 处理,与含量最低的 T3 处理相比增加了 154.63%。7-9 月 T6 处理毛竹叶片可溶性蛋白含量呈先上升后企稳的趋势,其他水肥耦合处理毛竹叶片可溶性蛋白含量表现趋势一致,即呈现先上升后下降的变化趋势,其中 7 月可溶性蛋白含量最低。综上,在 7-9 月,T2、T3 处理为不同水肥耦合处理中毛竹叶片可溶性蛋白含量较优的处理。

表6 不同水肥耦合处理毛竹叶片可溶性蛋白含量

Table 6 Soluble protein content of *Phyllostachys edulis* leaves under different water and fertilizer coupling treatments

处理	可溶性蛋白含量(g/kg)			均值
	7月	8月	9月	
T1	0.91±0.04e	2.81±0.06bc	1.66±0.13cd	1.79
T2	1.11±0.15cde	2.04±0.18d	1.73±0.03cd	1.63
T3	1.31±0.11abc	2.52±0.25c	1.08±0.02e	1.63
T4	1.14±0.07cd	2.88±0.18b	2.13±0.12b	2.05
T5	1.06±0.11de	2.90±0.13b	1.52±0.06d	1.83
T6	1.06±0.13de	1.79±0.09d	1.79±0.07c	1.55
T7	1.23±0.06bcd	2.55±0.13c	2.19±0.12b	1.99
T8	1.41±0.07ab	3.36±0.10a	1.60±0.07cd	2.21
T9	1.50±0.16a	3.61±0.24a	2.75±0.31a	2.54

处理 T1~T9 见表 2。同列不同小写字母表示不同水肥耦合处理毛竹叶片可溶性蛋白含量差异显著 ( $P<0.05$ )。数据为平均值±标准差。

2.2.2 毛竹叶片非结构性碳水化合物组分的动态变化 从表 7 可知,不同水肥耦合处理,T5 处理为毛竹叶片可溶性糖含量较优的处理,均值为 0.19 mg/g,与可溶性糖含量最低的 T7 处理相比增加 58.74%。7 月,T1、T5 处理毛竹叶片可溶性糖含量

显著高于T2、T3、T4、T7、T9处理;8月,T5处理毛竹叶片的可溶性糖含量显著高于T1、T3、T7、T8、T9处理;9月,T5、T8处理毛竹叶片的可溶性糖含量显著高于T1、T2、T3、T4、T6、T7、T9处理。7-9月T4处理毛竹叶片可溶性糖含量呈先上升后下降趋势,其他水肥耦合处理毛竹叶片可溶性糖含量表现趋势一致,即呈现持续上升的变化趋势。综上,在7-9月中,T5处理为不同水肥耦合处理中毛竹叶片可溶性糖含量较优的处理。不同水肥耦合处理,T4处理为毛竹叶片淀粉含量的最优处理,均值为0.07 μg/g,

与毛竹叶片淀粉含量最高的T9处理相比降幅达到72.00%。7月,T9处理毛竹叶片淀粉含量显著高于T1、T4、T6、T7、T8处理;8月,T6、T9处理毛竹叶片淀粉含量显著高于T1~T5处理;9月,T9处理毛竹叶片淀粉含量显著高于T1、T2、T4、T8处理。7-9月T2处理毛竹叶片淀粉含量呈先上升后企稳的趋势,其他水肥耦合处理毛竹叶片淀粉含量表现趋势一致,即呈现先上升后下降的趋势,其中8月毛竹叶片淀粉含量最高。综上,7-9月T4处理为不同水肥耦合处理中毛竹叶片淀粉含量最优的处理。

表7 不同水肥耦合处理毛竹叶片可溶性糖、淀粉含量

Table 7 Soluble sugar and starch content in leaves of *Phyllostachys edulis* under different water and fertilizer coupling treatments

处理	可溶性糖含量(mg/g)				淀粉含量(μg/g)			
	7月	8月	9月	均值	7月	8月	9月	均值
T1	0.12±0.01a	0.14±0.01bcd	0.15±0.01d	0.14	0.07±0.01b	0.18±0.13c	0.11±0.03b	0.12
T2	0.06±0.01cde	0.15±0.02abc	0.19±0.02bc	0.13	0.08±0.02ab	0.09±0.05c	0.09±0.01b	0.09
T3	0.07±0.01bcd	0.14±0.01bcd	0.16±0.02cd	0.12	0.08±0.01ab	0.22±0.17bc	0.12±0.06ab	0.14
T4	0.05±0.01e	0.17±0.02ab	0.16±0.02cd	0.13	0.06±0.01b	0.09±0.05c	0.06±0.01b	0.07
T5	0.10±0.02a	0.18±0.02a	0.29±0.03a	0.19	0.08±0.01ab	0.22±0.10bc	0.15±0.06ab	0.15
T6	0.09±0.01ab	0.16±0.01abc	0.22±0.02b	0.16	0.06±0.01b	0.43±0.01a	0.15±0.02ab	0.21
T7	0.08±0.01bc	0.11±0.01d	0.17±0.01cd	0.12	0.07±0.01b	0.36±0.10ab	0.13±0.04ab	0.19
T8	0.09±0.02ab	0.14±0.01cd	0.29±0.02a	0.17	0.07±0.01b	0.39±0.06ab	0.14±0.06b	0.20
T9	0.06±0.01de	0.15±0.02bc	0.16±0.02cd	0.12	0.09±0.01a	0.44±0.01a	0.22±0.11a	0.25

处理T1~T9见表2。同列不同小写字母表示不同水肥耦合处理毛竹叶片可溶性糖含量、淀粉含量差异显著( $P<0.05$ )。数据为平均值±标准差。

### 2.3 毛竹叶片生理特性的综合评价

从表8可见,前2个主成分的累积方差贡献率为71.86%,基本能够反映9个水肥耦合处理毛竹叶片生理特征的全部综合信息,对于叶片生理特征在各主成分上的因子荷载分析可以得出,毛竹叶片全磷含量、毛竹叶片全氮含量这2种生理特性指标分别对第一、第二这2种主成分贡献更大,由此可以得出毛竹叶片全磷含量、毛竹叶片全氮含量在一定程度上可以作为反映毛竹适应所处生境的主要指标。从表9可知,各处理主成分因子得分从大到小排序依次为T4处理>T1处理>T2处理>T5处理>T3处理>T7处理>T8处理>T6处理>T9处理。

## 3 讨论

### 3.1 不同水肥耦合处理对毛竹叶片养分分配动态变化的影响

当水分和肥料不足时会造成土壤养分矿化、植

表8 主成分因子载荷值矩阵及特征值

Table 8 Principal component factor loading matrix and eigenvalues

因子	主成分	
	F1	F2
毛竹叶片全氮含量	0.307	0.854
毛竹叶片全磷含量	0.925	-0.052
毛竹叶片全钾含量	0.931	0.037
毛竹叶片可溶性蛋白含量	-0.449	0.749
毛竹叶片可溶性糖含量	0.424	-0.021
毛竹叶片淀粉含量	0.897	0.108
特征值	3.004	1.308
方差贡献率(%)	50.07	21.80
累积贡献率(%)	50.07	71.86

物根系迁移困难,养分从根到茎叶的吸收和运输中断,进而导致植物对N、P、K吸收量减少,生长发育受限<sup>[23-24]</sup>。本研究结果表明,不同水肥耦合处理条

表9 主成分因子得分及综合排序

Table 9 Principal component factor scores and comprehensive ordering

处理	主成分得分		综合得分	排序
	F1	F2		
T1	0.46	0.24	0.28	2
T2	0.44	0.27	0.28	3
T3	0.30	0.23	0.20	5
T4	0.53	0.35	0.37	1
T5	0.34	0.19	0.21	4
T6	0.18	0.08	0.11	8
T7	0.31	0.10	0.18	6
T8	0.19	0.33	0.17	7
T9	0.10	0.18	0.09	9

处理 T1~T9 见表 2。

件下, T4 处理毛竹叶片全氮、全磷、全钾含量均值最高, T9 处理均值最低。在相同施肥水平处理下, 不同土壤水分含量处理结果显示, 中等土壤含水量水平下毛竹叶片养分含量普遍更高, 即中等土壤含水量能显著提高毛竹对养分的吸收能力, 这与张燕<sup>[25]</sup>的研究结果相似, 而超出此范围会显示出其对毛竹吸收养分的抑制作用, 这可能是由于在中等土壤含水量条件下, 氮、磷、钾三因素对于毛竹叶片生长具有协同作用, 而土壤含水量过高会导致毛竹叶片 N、P、K 积累量下降, 同时也会加剧毛竹叶片中 N、P、K 等元素从基质胶体中解离的程度, 从而限制了根系对养分的有效吸收<sup>[26-28]</sup>, 这与张磊等<sup>[20]</sup>的研究结果一致。相同土壤水分含量下不同肥料水平处理结果显示, 高肥处理毛竹叶片养分含量高于中肥及低肥处理, 即高肥处理对毛竹叶片产生的影响最大, 这可能是由于本试验处于毛竹生长最旺盛时期, 高肥处理为毛竹提供了充足的养分, 同时磷和钾还能参与毛竹糖类代谢, 促进和加强了毛竹对养分的吸收、生物合成以及光合产物的运输, 这与张洁等<sup>[29]</sup>的研究结果一致。说明高施肥量和适宜土壤含水量条件下毛竹对养分吸收能力更强, 毛竹叶片 N、P、K 含量更高, 进而得出高肥适水的水肥耦合处理是毛竹生长的最佳选择。

在毛竹快速生长阶段, 母竹为新竹的快速生长提供了充足的养分, 降低了新竹对周围生态系统中养分的依赖性, 但同时可能会导致母竹自身各器官的营养供给失衡<sup>[30]</sup>。本研究发现, 毛竹叶片 N、P、K 含量在

7-9 月大多呈现先上升后下降的变化趋势。这是由于 7-9 月正处于毛竹对土壤养分消耗最严重时期<sup>[28]</sup>, 7 月随着复合肥的施入, 虽使得毛竹叶片对 N、P、K 需求量减少, 但新竹成熟生长和地下部分营养贮存仍需更多养分<sup>[31]</sup>。毛竹叶片 N、P、K 含量在 8 月达到最高水平, 这可能是由于 8 月份温度较高, 促进和加强了毛竹叶片光合作用, 提高了养分的积累量。说明毛竹在生长过程中不仅受水肥处理影响, 同时也受自然环境的影响, 不同月份气候条件不同, 会导致其对水肥的响应具有一定的差异<sup>[31-32]</sup>。

### 3.2 不同水肥耦合处理对毛竹叶片渗透调节物质的影响

有研究表明, 渗透调节物质参与植物生长发育过程中的物质交换和能量代谢<sup>[33-34]</sup>, 与植物生长环境的水肥调控密切相关, 其中可溶性蛋白与可溶性糖等渗透调节物质的含量能够表征植物体内代谢强度<sup>[35]</sup>。本研究结果表明, T2、T3 处理毛竹叶片可溶性蛋白含量均值为 1.63 g/kg, 高于 T6 处理, 低于其他处理, 综合评价 T2、T3 处理为不同水肥耦合处理中毛竹叶片可溶性蛋白含量较优的处理。本研究在同等施肥水平下, 出现高土壤含水量处理毛竹叶片可溶性蛋白含量低于中土壤含水量处理及低土壤含水量处理的现象, 即毛竹叶片可溶性蛋白含量在水分充足时低于干旱胁迫处理, 这可能是由于逆境下迫使毛竹叶片积累可溶性蛋白, 提高叶片细胞的保水能力, 从而应对干旱胁迫所带来的伤害, 这与舒正悦<sup>[36]</sup>的研究结论相似。在中土壤含水量处理及高土壤含水量处理下毛竹叶片可溶性蛋白含量随着施肥量的增加而增加, 而施肥量较少的 T3、T6 处理叶片可溶性蛋白含量处于低值, 这可能是由于当毛竹处于充足的水分环境时, 通过限制肥料的使用, 能促使其根系更密、下扎更深, 增强了毛竹对养分的吸收能力, 提高其生态耐受性, 这与马新超等<sup>[37]</sup>的研究结论相似; 低土壤含水量处理下, 毛竹叶片可溶性蛋白含量随着施肥量的增加而减少, 这可能是由于在极度缺水条件下, 施肥在一定程度上可以缓解干旱胁迫对毛竹叶片所造成的伤害, 这与祝洋等<sup>[38]</sup>的研究结果一致。说明高土壤含水量和低施肥量为毛竹的健康生长提供了有利的条件, 促进了其在面对不利环境胁迫时的应对能力。

可溶性糖是植物体糖代谢过程中产生的保护性物质, 可溶性糖不仅能直接参与细胞的生理反应, 还

可促进植物整体的生命活动<sup>[39-44]</sup>;增强植物细胞保水性能,使得植物在逆境条件下能有效阻止原生质膜受到损伤,维护细胞的正常结构与功能,从而提高植物的抗逆性<sup>[45]</sup>。本研究发现,T5(中等土壤含水量、中等施肥水平)处理的毛竹叶片可溶性糖含量均值高于其他处理,这表明毛竹在面临一定的水肥缺乏时,可能具有一定的适应能力;但随着土壤含水量和施肥量的提升,充足的水分和肥料反而会导致毛竹叶片活性降低,增加膜脂的过氧化程度,从而导致毛竹叶片渗透调节物质含量减少,进而引发代谢紊乱<sup>[46]</sup>,这与马新超等<sup>[37]</sup>、冯晓东等<sup>[47]</sup>的研究结果相同。T4处理毛竹叶片淀粉含量均值低于其他处理,这可能是由于充足的施肥量和较高的灌水水平会使其光合产物被高效应用于旺盛的生长和新陈代谢过程,这与冯晓东等<sup>[47]</sup>的研究结果相同。说明适宜的水肥耦合处理不仅能促进可溶性糖的最大积累,还能够促进毛竹快速生长。反之,过量或不足的水肥供应则会对植物的生长产生不利影响,影响其光合作用和能量供应。综上,T4、T5处理为不同水肥耦合处理中毛竹叶片非结构性碳水化合物含量较好的处理。

## 4 结论

本研究以毛竹叶片为研究对象,设置不同的田间持水量与施肥梯度,采用多重比较法和主成分分析法等探究不同水肥耦合条件下不同生长月份毛竹叶片养分含量特征以及渗透调节物质之间的差异,结果表明,7-9月T4处理为不同水肥耦合处理中毛竹叶片氮、磷、钾含量,淀粉含量最优的处理;毛竹叶片生理特性的前2个主成分累积方差贡献率为71.86%,且T4处理的因子综合得分为0.37,高于其他处理,因此土壤水分含量为田间最大持水量的65%±5%,施肥量 $1.25 \times 10^5 \text{ kg/hm}^2$ 是本研究中毛竹叶片养分以及渗透调节物质最优的处理。以上结论可以为毛竹高效利用水肥提供理论参考。

### 参考文献:

- [1] 荣俊冬,凡莉莉,吴君,等.灌溉对毛竹冬笋品质的影响[J].西北植物学报,2021,41(9):1545-1551.
- [2] 朱会芸.不同年份降雨量对毛竹林冬笋生长与经营效益影响[J].林业资源管理,2008(3):90-92.
- [3] 张亚慧,黄宇翔,于文吉,等.我国竹产业的发展历程、现状及趋势[J].中国人造板,2019,26(6):32-36.
- [4] 张国防,缪碧华.毛竹经营管理的研究进展[J].福建林学院学报,2000,20(4):375-379.
- [5] KUEHL Y, LI Y, HENLEY G. Impacts of selective harvest on the carbon sequestration potential in Moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) plantations[J]. Forests, Trees and Livelihoods, 2013, 22(1):1-18.
- [6] 赵文举,马锋,曹伟,等.水肥耦合对基质栽培番茄产量及品质的影响[J].农业工程学报,2022,38(2):95-101.
- [7] 金辉,侯东颖,张曼,等.水肥耦合对大棚西瓜产量、品质及养分吸收的影响[J].中国土壤与肥料,2021(2):141-148.
- [8] 呼红梅,王莉.水肥耦合对谷子幼苗形态和生理指标的影响[J].生态学杂志,2015,34(7):1917-1923.
- [9] 封焕英,范少辉,苏文会,等.竹林专用控释肥对毛竹地上生物量和氮利用率的影响[J].生态学杂志,2014,33(9):2357-2362.
- [10] 陈双林,杨清平,郭子武.主要环境因素对小佛肚竹出笋、成竹和畸形秆率的影响[J].四川农业大学学报,2008(1):117-120.
- [11] 王虎兵,曹红霞,郝舒雪,等.水肥耦合下温室番茄养分动态变化及与生物量和产量的关系[J].干旱地区农业研究,2019,37(5):149-156.
- [12] WANG Y, CHI S Y, NING T Y, et al. Coupling effects of irrigation and phosphorus fertilizer applications on phosphorus uptake and use efficiency of winter wheat[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12(2):263-272.
- [13] 郑恩楠,杨桦,陈鹏,等.水氮管理模式下水稻碳氮吸收、土壤呼吸与产量效应[J].农业机械学报,2018,49(6):287-295.
- [14] 杨静宜.滴灌条件下不同水肥耦合对西芹生长生理、养分吸收、产量及品质的影响[D].兰州:甘肃农业大学,2018.
- [15] 张洁瑕,刘树庆,宁国辉,等.不同水肥耦合对西芹收获期土壤硝酸盐累积的影响[J].土壤,2009,41(4):641-648.
- [16] 胡云平,张静,刘丹.水肥耦合对春小麦叶片生态特性及产量的影响[J].江苏农业科学,2017,45(12):48-52.
- [17] 李静文,刘晓颖,李士坤,等.氮磷钾配施对毛竹出笋及叶片生理特性的影响[J].西南农业学报,2020,33(12):2885-2890.
- [18] 董文慧.复合肥处理对毛竹冬笋品质及其相关基因表达的影响[D].北京:中国林业科学研究院,2020.
- [19] 蔡丽娟.有机无机复混毛竹专用肥的配方研制和施肥试验[D].福州:福建师范大学,2018.
- [20] 张磊,童龙,谢锦忠,等.不同灌水时间下毛竹伐桩根系化学计量及生理特性变化[J].南京林业大学学报(自然科学版),2021,45(5):25-30.
- [21] 国家林业局.森林植物与森林枯枝落叶层全氮、磷、钾、钠、钙、镁的测定:LY/T 1271—1999[S].北京:中国标准出版社,1999.
- [22] 苍晶,赵会杰.植物生理学实验教程[M].北京:高等教育出版社,2013.
- [23] LIU X, LI M, GUO P, et al. Optimization of water and fertilizer

- coupling system based on rice grain quality[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 221: 34-46.
- [24] 林郑和,陈荣冰,郭少平. 植物对缺磷的生理适应机制研究进展[J]. *作物杂志*, 2010(5): 5-9.
- [25] 张燕. 杨凌温室滴灌施肥番茄水肥耦合效应研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2014.
- [26] 郑风英,蔡宗明,韩永振,等. 施肥与带宽对采伐带毛竹生长及土壤特性的影响[J]. *福建农林大学学报(自然科学版)*, 2023, 52(3): 317-322.
- [27] 真刚胜. 不同方法施肥对毛竹竹笋产量和新竹质量的影响研究[J]. *河北农机*, 2022(11): 124-126.
- [28] 徐秋芳,姜培坤,董郭义. 毛竹林地土壤养分动态研究[J]. *竹子研究汇刊*, 2000, 19(4): 46.
- [29] 张洁,田文仲,黄向荣,等. 半湿润偏旱区水肥耦合对大豆产量的影响[J]. *西北农业学报*, 2024, 33(3): 469-476.
- [30] 徐超. 毛竹快速生长期的生理生态特征[D]. 杭州:浙江农林大学, 2018.
- [31] 胡宋其,王善,汪佑宏. 不同海拔高度与坡向对毛竹干缩性的影响[J]. *安徽林业科技*, 2023, 49(6): 18-21.
- [32] 宋贤芬,赵各进,严夏帆,等. 土壤养分、林分结构和地形因子对毛竹更新的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2023, 51(3): 7-12.
- [33] 俞建妹,唐树生,王凌晖. 水分胁迫对桂花幼苗生长及生理特性的影响[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(4): 2107-2109.
- [34] 陈成升,谢志霞,刘小京,等. 渗透盐分、干旱胁迫下冬小麦叶片部分渗透调节物质的动态变化[J]. *植物研究*, 2009, 29(6): 708-713.
- [35] GONG B, WEN D, VANDENLANGENBERG K, et al. Comparative effects of NaCl and NaHCO<sub>3</sub> stress on photosynthetic parameters, nutrient metabolism, and the antioxidant system in tomato leaves[J]. *Scientia Horticulturae*, 2013, 157: 1-12.
- [36] 舒正悦. 水肥耦合对竹叶花椒幼苗生长和耐涝性的影响[D]. 雅安:四川农业大学, 2018.
- [37] 马新超,轩正英,谭占明,等. 温室沙培黄瓜生产效应的水氮耦合方案优化[J]. *浙江农业学报*, 2023, 35(4): 809-820.
- [38] 祝洋,刘志应,李新苗,等. 水肥耦合对设施番茄叶片酶活性及水肥利用的影响[J]. *节水灌溉*, 2023(12): 18-26.
- [39] 刘玲,钟玉娟,谢大森,等. 多样性苦瓜资源果实品质评价分析[J]. *江苏农业科学*, 2024, 52(12): 160-167.
- [40] 张涛,杨慧,朱盛尧,等. 贵州2个紫芽茶树品系主要生化成分的节季节性变化[J]. *南方农业学报*, 2023, 54(2): 516-524.
- [41] 魏鹏超,杨忠仁,黄修梅,等. 萌发期沙葱种子糖代谢对干旱胁迫的应答反应[J]. *江苏农业科学*, 2024, 52(12): 176-182.
- [42] 李蒙,赵苗苗,王雅琪,等. 晒叶面肥对黄瓜幼苗生长及生理特性的影响[J]. *江苏农业科学*, 2024, 52(10): 153-159.
- [43] 王丽,熊兴耀,蔡柳,等. 我国不同产区马铃薯栽培品种的主要品质性状比较分析[J]. *南方农业学报*, 2023, 54(1): 80-89.
- [44] 许英. 低温胁迫下苗期苕麻响应机理研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2014.
- [45] 李明霞. 桉树光合特性及抗逆性生理生化指标的季节变化研究[D]. 桂林:广西师范大学, 2013.
- [46] 王俊刚,陈国仓,张承烈. 水分胁迫对2种生态型芦苇(*Phragmites communis*)的可溶性蛋白含量、SOD、POD、CAT活性的影响[J]. *西北植物学报*, 2002, 22(3): 561-565.
- [47] 冯晓东,葛芳,常海飞. 不同水肥处理对梨枣几种形态指标的影响[J]. *延安大学学报(自然科学版)*, 2013, 32(3): 41-44.

(责任编辑:黄克玲)