

沿海沙地高节竹叶片生理特征的季节变化

陈振华¹, 张迎辉², 蔡 星¹, 何天友³, 陈凌艳³, 李云鸽¹, 荣俊冬¹, 郑郁善¹

1. 福建农林大学林学院, 福建福州 350002; 2. 福建农业职业技术学院, 福建福州 350303; 3. 福建农林大学风景园林与艺术学院, 福建福州 350002

摘 要: 本研究以东山沿海沙地三年生高节竹 (*Phyllostachys prominens*) 为研究对象, 测定不同季节高节竹叶片的叶绿素 (Chl)、可溶性蛋白 (SP)、可溶性糖 (SS)、脯氨酸 (Pro)、丙二醛 (MDA) 含量。探究各季节环境条件下高节竹叶片的生理指标差异, 分析其在沿海沙地不同季节环境下的适应情况, 为构建更为完善、丰富且经济价值更高的沿海防护林生态体系提供理论依据。研究表明: (1) 叶绿素 a (Chla)、叶绿素 b (Chlb) 含量随季节变化趋势一致, 均在夏季达到最高, 夏季总叶绿素含量分别较秋、冬、春季高 24.54%、11.39%、21.2%。(2) 冬季 SP 含量最高, 夏季最低, 冬季含量比春、夏、秋季分别高 50.65%、131.42%、18.52%; 夏季 SS 含量显著高于其他季节, 分别比春、秋、冬季高 269.83%、112.65%、99.93%; MDA 含量从秋季到夏季逐渐降低, 各季节间差异显著; Pro 含量夏季最高, 分别较春、秋、冬季高 18.37%、44.06%、23.13%。(3) 温度和降水量对可溶性糖、可溶性蛋白和丙二醛含量有显著影响。东山沿海地区温度与降水同期, 各指标在温度(降水)最高时期与最低时期相比, 可溶性糖含量增加 99.93%, 可溶性蛋白含量降低 56.79%, 丙二醛含量降低 52.72%。综上所述, 高节竹可以通过调节叶绿素含量, 确保光合作用顺利进行, 并通过调节渗透物质含量来适应季节变化, 光合作用与渗透调节系统是高节竹适应逆境环境的关键机制之一。

关键词: 高节竹; 生理特征; 季节变化; 沿海沙地

中图分类号: S795 文献标志码: A

Seasonal Variations in Physiological Characteristics of Leaves of *Pleioblastus amarus* in Coastal Sandy Land

CHEN Zhenhua¹, ZHANG Yinghui², CAI Xing¹, HE Tianyou³, CHEN Lingyan³, LI Yunge¹, RONG Jundong¹, ZHENG Yushan¹

1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China; 2. Fujian Agricultural Vocational and Technical College, Fuzhou, Fujian 350303, China; 3. College of Landscape Architecture and Art, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China

Abstract: The three-year-old *Phyllostachys prominens* in the coastal sandy land of Dongshan was used to determine the contents of chlorophyll (Chl), soluble protein (SP), soluble sugar (SS), proline (Pro), and malondialdehyde (MDA) in the leaves in different seasons, and to explore the difference of physiological indexes of bamboo leaves under different seasonal environmental conditions, and analyze its adaptation in different seasonal environments in coastal sandy land, provide theoretical basis for constructing a more complete, abundant and economically valuable coastal shelter forest ecosystem. The chlorophyll a (Chla) and chlorophyll b (Chlb) had the same seasonal variation trend, and reached the highest content in summer. The total chlorophyll content in summer was 24.54%, 11.39% and 21.2% higher than that in autumn, winter and spring, respectively. The content of SP was the highest in winter and the lowest in summer. The content of SP in winter was 50.65%, 131.42% and 18.52% higher than that in spring, summer and autumn, respectively. The content of SS in summer was significantly higher than that in other seasons, which was 269.83%, 112.65% and 99.93% higher than that in spring, autumn and winter, respectively. The content of MDA decreased gradually from au-

收稿日期 2025-01-07; 接受日期 2025-03-03

基金项目 福建省自然科学基金项目 (No. 2022J01396); 福建省区域发展项目 (No. 2015N3015)。

作者简介 陈振华 (1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 沿海防护林。*通信作者 (Corresponding author): 郑郁善 (ZHENG Yushan), E-mail: zys1960@163.com。

tumn to summer, and the difference between seasons was significant. The content of Pro was the highest in summer, which was 18.37%, 44.06% and 23.13% higher than that in spring, autumn and winter, respectively. Temperature and precipitation had significant effects on soluble sugar, soluble protein and malondialdehyde content. In the coastal area of Dongshan, during the same period of temperature and precipitation, compared with the highest and lowest periods of temperature (precipitation), the content of soluble sugar increased by 99.93%, the content of soluble protein decreased by 56.79%, and the content of malondialdehyde decreased by 52.72%. In summary, *P. prominens* ensures the smooth progress of photosynthesis by regulating chlorophyll content, and adapts to seasonal changes by regulating the content of osmotic substances. Photosynthesis and osmotic adjustment system are the key mechanisms for *P. prominens* to adapt to adversity environment.

Keywords: *Phyllostachys prominens*; physiological characteristics; seasonal changes; coastal sandy land

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.07.018

季节变化会引起温度、光照、降水等环境因子发生变化,植物的生理特征会因为环境因子的变化而产生适应性变化,可以凭借植物对季节变化而导致的生理特征变化的程度和规律来反映植物适应能力的强弱以及对环境的适应策略^[1]。研究发现滨海沙地植物形成了适应季节性环境变化的生理机制,通过对光合作用、渗透调节机制以及酶系统等功能的调节,使其能够适应环境因子的变化进而生存繁衍^[2]。叶片是植物进行光合作用的主要场所,对季节变化引起环境变化的响应较为敏感,在抗氧化特征和渗透调节方面体现尤为明显,其生理特性变化可以较好地反映其对环境变化的适应性及调控机制^[3]。通过对高节竹叶片生理特征的研究来探究高节竹对沿海沙地环境的适应机制。

高节竹 (*Phyllostachys prominens*) 属禾本科刚竹属,竹笋的产量高、品质好,笋期主要集中在每年的 4—5 月,地下鞭系粗壮,延伸生长能力强,竹材的径级大,质地坚硬适宜进行生产加工,是优良的笋材兼用竹种,广泛分布在安徽、浙江等省份^[4]。福建东南沿海沙地土壤为滨海沙土,保水保肥能力差,生态环境恶劣,大多数植物难以存活^[5]。沿海沙地极端干旱、贫瘠的生态环境对于植物容易形成胁迫^[6],植物要度过胁迫环境,需要具备一种保护机制,或者一种对破坏进行修复的机制,亦或是这二者的结合^[7]。目前在东南沿海沙地主要以木麻黄和湿地松为主要防护林树种,存在对环境变化的抵抗能力不足、生态功能单一的状况。在沿海沙地引种竹子、营造竹林,具有一定的前景,是解决目前沿海防护林存在问题的出路之一。近年来开展了不少关于沿海沙地竹子相关的研究,例如吴君等^[8]探究了施肥对沿海沙地鼓节竹叶片建成成本及适应性的影响,发

现配施能提升叶片碳氮含量等,氮肥用量影响最大,采用“小麦秸秆生物炭(400 g/丛)+氮肥(900 g/丛)”的施肥处理组合效果最佳,可以使鼓节竹具有更高的生长发育潜能和适应能力。张洋洋等^[9]探究了林冠环境对沿海沙地竹子叶功能性状的影响,发现直角双曲线修正模型最适宜用于研究淡竹 (*Phyllostachys glauca*) 和四季竹 (*Oligostachyum lubricum*) 的光合-光响应特性,这 2 种植物光补偿点较低、光饱和点较高,能够补植于沿海木麻黄 (*Casuarina equisetifolia*) 和桉树 (*Eucalyptus robusta*) 等林下。但关于高节竹季节变化的生理响应机制的研究较少。因此,本研究以福建东山赤山国有林场沿海沙地高节竹为研究对象,探究不同季节对沿海沙地高节竹生理特征的影响,对高节竹沿海沙地的栽培管理具有重要意义,为构建更为完善、丰富,经济价值更高的沿海防护林生态体系提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

研究区位于漳州市东山县南部的东山赤山国有防护林场(23°63'35"N, 117°40'33"E),海拔 36 m。东山县的气候类型属于亚热带海洋性季风气候,年日照平均时数为 2174.5 h,年平均气温为 20.8 °C,极端高温一般常见于每年的 7—8 月,极端低温常见于 12 月和 1 月,为 3.8 °C,终年无霜冻;雨季通常集中在夏季,年平均降水量为 1103.8 mm,年平均蒸发量为 2027.9 mm。东山县多发的自然灾害主要为台风和干旱,每年 7—8 月易发台风^[10]。土壤类型主要为滨海风积沙土,土壤结构较为疏松,厚度为 80~100 cm,保水肥的能力差,沙地地形较为平缓,坡度为 2~10°,海拔为 5~10 m。以湿地松 (*Pinus elliottii*) 和木

麻黄 (*Casuarina equiseti folia*) 等抗逆性较强的树种为主要防护林种, 常见林下植物有马缨丹 (*Lantana camara* L.)、龙舌兰 (*Agave ameri-*

cana)、蔓荆 (*Vitex trifolia*)、鼠刺 (*Itea chinensis*) 等灌木和零星或小块状分布的草本^[11]。东山县 2018 年各季度平均降水量及平均气温如表 1。

表 1 2018 年东山县降水及气温季节性变化
Tab. 1 Seasonal variations in precipitation and temperature in Dongshan county in 2018

季节 Season	平均温度 Average temperature/℃	变化范围 Change range/℃	平均降水 Average precipitation/mm	变化范围 Change range/mm
春	19.1	14.9~23.2	176.8	115.4~246.0
夏	26.7	25.8~27.3	296.2	260.4~331.7
秋	24.2	19.7~26.6	88.1	32.8~192.1
冬	13.8	12.9~15.5	49.1	30.4~82.7

1.2 方法

1.2.1 样地设置 于漳州市东山县赤山国有林场设置高节竹纯林样地, 样地面积为 10 m×10 m, 设置 3 个重复。样地的竹林密度为 14 300 株/hm², 平均胸径 15.78 mm, 平均株高 3.81 m。由于受东山沿海沙地恶劣自然环境条件限制, 试验期间对东山样地只能采取简单的除草和雨天施肥等管理措施, 于 2018 年 9 月和次年 3 月使用适量的复合肥进行施肥, 以确保满足样地高节竹对养分的需求。

1.2.2 样品采集 分别于 2018 年 10 月 5 日, 次年 1 月 3 日、4 月 5 日、7 月 6 日进行 4 次样品采集, 每个样地随机选取 5 株 3 年生标准竹。选取东、南、西、北 4 个方向中上层生长良好的成熟功能叶片, 装入自封袋于采样盒低温保存带回实验室, 用超纯水轻轻擦拭叶片表面的灰尘, 去除中脉, 剪碎, 加液氮于磨样机充分研磨, 用于各项生理指标的测定。

1.2.3 指标测定 各项生理指标测定参照李合生^[12]的方法, 采用丙酮法测定叶绿素含量; 采用蒽酮

比色法测定可溶性糖含量; 采用考马斯亮蓝法测定可溶性蛋白含量; 采用酸性茚三酮法测定脯氨酸含量; 采用硫代巴比妥酸法测定丙二醛含量, 各项生理指标均重复测定 3 次。

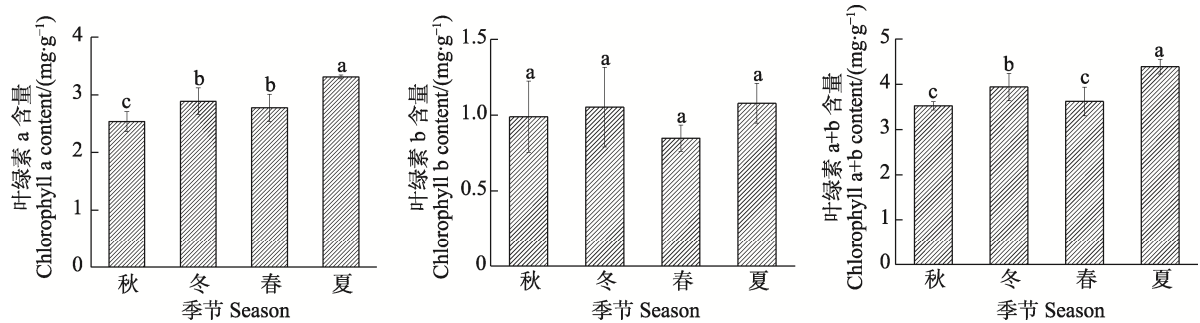
1.3 数据处理

使用 Excel 2019、SPSS 27.0 软件进行数据整理分析, Origin 2024 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 不同季节高节竹叶片叶绿素含量变化

高节竹叶片叶绿素 a 含量在夏季和冬季出现 2 个波峰, 夏季显著高于另外 3 个季节 ($P<0.05$), 较春、秋、冬季分别高 19.35%、30.6%、14.68%。叶绿素 b 含量在 4 个季节差异不显著, 在夏季最高, 春季最低。叶绿素 a+b 含量在不同季节差异显著 ($P<0.05$), 在夏季最高, 秋季最低, 夏季较秋季高 24.54%。叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 a+b 含量的变化趋势相同, 从秋季到第二年夏季均呈先增后减再增的趋势 (图 1)。



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 ($P<0.05$).

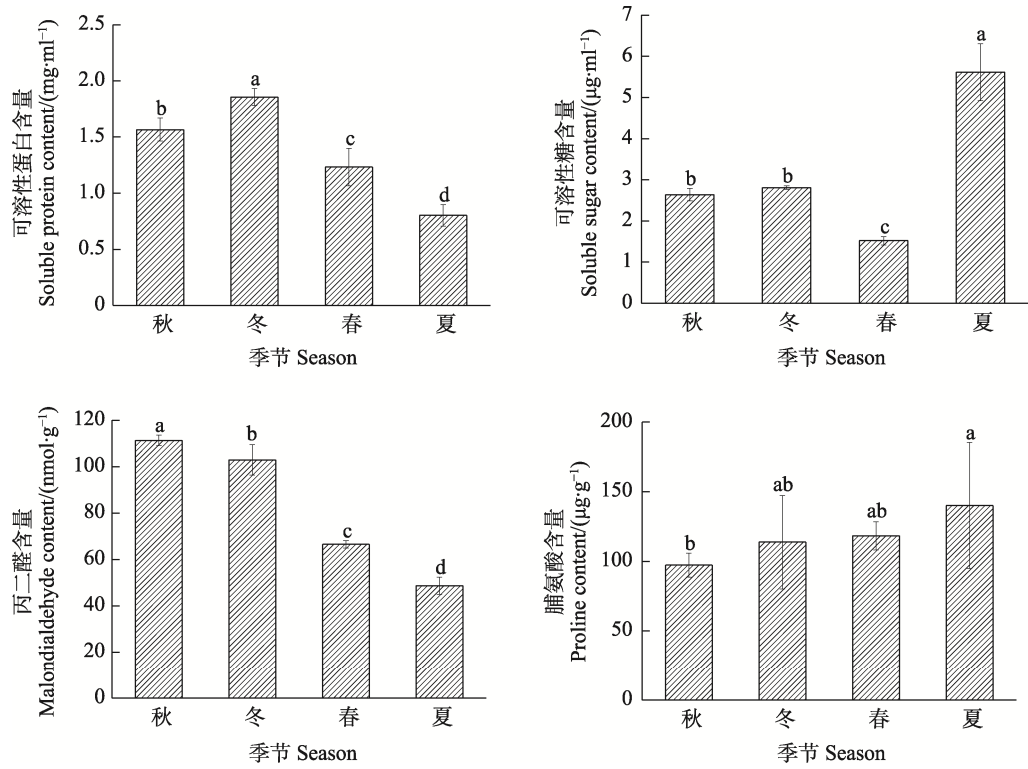
图 1 不同季节高节竹叶片叶绿素含量季节变化

Fig. 1 Seasonal variation of chlorophyll content in *P. prominens* leaves in different seasons

2.2 不同季节高节竹叶片渗透调节物质含量变化

不同季节高节竹叶片可溶性蛋白含量从秋季到春季呈先增后减的趋势（图 2），其含量冬季显著高于春、夏、秋季（ $P<0.05$ ），分别高 50.65%、131.42%、18.52%。其原因为冬季低温干旱胁迫下，可溶性蛋白大量合成积累，增强了高节竹的保水能力。可溶性糖含量夏季显著高于其他 3 季

（ $P<0.05$ ）^③，且秋、冬季差异不显著，夏季较春、秋、冬季分别高 269.83%、112.65%、99.93%。丙二醛含量从秋季到夏季呈现下降的趋势，其含量秋季显著高于其他 3 季（ $P<0.05$ ），较春、夏、冬季分别高 67.42%、128.97%、8.25%。脯氨酸含量从秋季到夏季呈现上升的趋势，其含量夏季最高，但与冬、春季差异不显著，较春、秋、冬季高分别 18.37%、44.06%、23.13%。



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 不同季节高节竹叶片渗透调节物质含量的季节变化

Fig. 2 Seasonal variations in the content of osmoregulatory substances in *P. prominens* leaves in different seasons

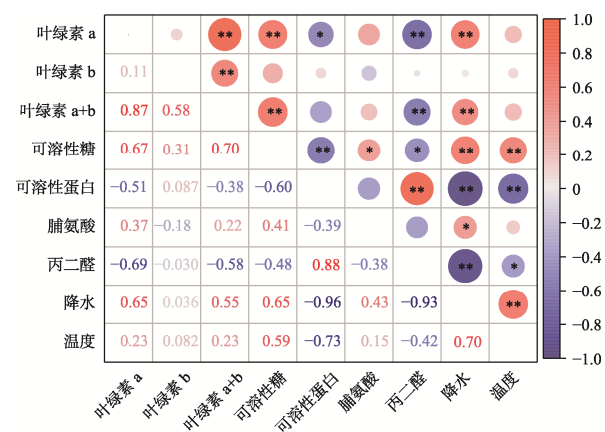
2.3 高节竹叶片生理特征与环境因子相关性分析

高节竹叶片的多项生理指标之间存在相关性，16 对指标的相关性达到极显著（ $P<0.01$ ），5 对指标的相关性达到显著（ $P<0.05$ ）。叶绿素 a、叶绿素 a+b、可溶性糖、可溶性蛋白、丙二醛含量与降水之间存在极显著相关（ $P<0.01$ ），可溶性糖、可溶性蛋白含量与温度之间存在极显著相关（ $P<0.01$ ）。其中与降水呈极显著正相关的有叶绿素 a（0.65）、叶绿素 a+b（0.55）、可溶性糖（0.65）；呈极显著负相关的有可溶性蛋白（-0.96）、丙二醛（-0.93）。可溶性糖（0.59）与温度呈极显著正相关，可溶性蛋白（-0.73）与

温度呈极显著负相关。此外，各项生理指标之间也存在不同程度的正负相关。由此可见，不同季节温度、降水对高节竹渗透调节物质具有显著影响，且不同指标之间存在一定的相互关系（图 3）。

2.4 高节竹叶片生理特征的主成分分析

由表 2 可知，主成分 3 的累积贡献率为 86.602%（>85%），可以反映其指标之间的重要性和相互关系。在主成分 1 中，叶绿素 a、可溶性糖、丙二醛的因子载荷高，对主成分 1 的影响较大；在主成分 2 中，叶绿素 b、脯氨酸影响较大；在主成分 3 中，脯氨酸、可溶性蛋白的影响较大。因此，可以发现光合作用与渗透调节系统在高节竹的逆境适应机制发挥着重要作用。



数值表示相关性大小，数值越大相关性越大；*表示显著相关（ $P<0.05$ ），**表示极显著相关（ $P<0.01$ ）。

Value represents the magnitude of the correlation. The larger the value is, the greater the correlation is; * indicates significant correlation ($P<0.05$), ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

图 3 高节竹叶片生理指标间的相关性分析热图

Fig. 3 Correlation analysis of physiological indexes of *P. prominens* leaves

表 2 高节竹叶片生理指标初始因子载荷矩阵

Tab. 2 Correlation analysis of physiological indexes of *P. prominens* leaves

生理指标 Physiological index	主成分 1 Principal component 1	主成分 2 Principal component 2	主成分 3 Principal component 3
叶绿素 a	0.883	0.055	0.035
叶绿素 b	0.253	0.881	0.022
叶绿素 a+b	0.848	0.478	0.040
可溶性糖	0.829	0.143	0.213
可溶性蛋白	-0.774	0.415	0.346
脯氨酸	0.509	-0.479	0.659
丙二醛	-0.844	0.271	0.371
贡献率/%	54.563	21.465	10.574
累计贡献率/%	54.563	76.028	86.602

3 讨论

叶绿素含量是影响光合作用的重要指标，可以在一定程度上反映植物抵抗胁迫的能力^[13]。一般认为植物逆境胁迫下会抑制叶绿素的合成，导致叶绿素含量较低。也有研究表明，抗逆性强的植物在受到逆境胁迫时叶片叶绿素含量反而会升高^[14-15]。本研究发现叶绿素 a、叶绿素 b 含量呈现出明显的季节性变化特征，其含量在夏季最高，冬季次之，春、秋季相对减少，与孙龙等^[16]的研究结果相类似。可能是因为东山沿海沙地夏、冬季容易发生干旱，在缺水的条件下，植物的叶片延伸生长受到抑制，叶片的含水率降低，可能会

导致叶片中的叶绿素出现“浓缩”现象^[17]，由于叶片生长受限且含水率降低，叶绿素在叶片中的相对含量增加^[18]，从而导致叶绿素含量夏季较高。秋季植物逐渐进入生长末期，植物会将养分从叶片转移到根部或其他储存器官。春、秋季时期光照强度和时间较少，温度较低，导致叶绿素的合成逐渐减少，同时分解速度加快^[19]，说明高节竹在面对逆境压力时所做出的生理调整。

当植物遭受逆境胁迫时，渗透调节可以使植物保持体内的水分平衡^[20-21]。丙二醛是衡量植物质膜透性的重要指标，可以判断质膜的受损程度，可间接推断植物抗逆性的强弱^[22]。在本研究中，高节竹丙二醛含量在秋、冬季节较高，春、夏季较低，夏季最低，这与金贇等^[2]的研究结果相类似。原因可能是秋、冬季气温降低、光照缩短，生理活动减缓，酶活性受到影响导致自由基增加、膜脂过氧化作用增强^[23]，进而使丙二醛含量升高。而春、夏气温升高，光照增强，光合作用产生更多抗氧化物质，能够清除自由基，降低膜脂过氧化程度，进而使丙二醛含量下降。脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白是重要的渗透调节物质，可衡量植物抵抗胁迫的能力^[24]。本研究发现，可溶性蛋白、可溶性糖、脯氨酸的含量在 4 个季节均有不同的变化趋势。可溶性蛋白在夏季含量最低，其原因可能是高节竹在夏季生长旺盛，环境温度较高，水分蒸发快，植物可能面临高温和一定程度的干旱胁迫^[25]。此时高节竹主要通过积累可溶性糖和脯氨酸等物质来调节渗透压和应对逆境，对可溶性蛋白的依赖较小，这与姜恒等^[26]、吴秀宁等^[27]的研究结果一致。高节竹为适应高温环境，通过可溶性糖积累来调节细胞渗透压、降低水势，增强水分吸收能力，防止细胞脱水，还可作为能量储备物质维持生命活动，同时，夏季面临干旱、强光等逆境，积累较多的脯氨酸^[28]。脯氨酸亲水性强，能稳定原生质胶体及代谢过程，协助植物在逆境中生存。此外，高温影响代谢途径，促使更多碳水化合物转化为可溶性糖，且可能激活脯氨酸合成途径，使其含量增加。韩蕊莲等^[29]、冯芳芳等^[30]研究发现随着干旱时间的增加，可溶性糖、脯氨酸迅速积累，植物抗旱性增强。王海珍等^[31]研究发现，胡杨幼苗可以通过积累大量可溶性糖和可溶性蛋白，灰胡杨幼苗通过积累大量游离脯氨酸和可溶性蛋白来适应极端环境。张迎辉等^[32]研究发现，绿竹通过积累大量可溶性糖、

可溶性蛋白和脯氨酸含量来提高对恶劣环境的适应能力。在本研究中, 高节竹秋、冬季的丙二醛含量升高, 春、夏季降低以适应质膜变化。夏季面临高温干旱, 高节竹靠积累可溶性糖和脯氨酸调节渗透压来维持生长, 说明即使在面临沿海沙地不同季节的环境, 高节竹也能够产生对应的适应机制来抵御逆境环境的影响。

4 结论

高节竹叶片各项生理具有显著的季节变化特征, 随着不同的环境因子表现出不同的适应机制。温度和降水会显著影响高节竹叶片可溶性糖、可溶性蛋白和丙二醛的含量。在干旱季节, 高节竹可以通过调节叶绿素含量来保证光合作用顺利进行, 并通过调节渗透物质含量使叶片保持较高的渗透势, 清除胁迫产生的过氧化物来适应季节变化, 具备一定的沿海沙地适应能力。

参考文献

- [1] LI W R, FENG J C, JIANG T R, ZHANG L X, LIU X M. Seasonal changes in photosynthetic characteristics of *Ammopiptanthus mongolicus*[J]. *Acta Botanica Sinica*, 1999(2): 190-193.
- [2] 金赞, 朱栗琼, 招礼军, 化彬, 权佳惠, 刘金炽. 滨海沙地植物厚藤叶片生理特征的季节变化[J]. *广西植物*, 2022(8): 1284-1293.
JIN Y, ZHU L Q, ZHAO L J, HUA B, QUAN J H, LIU J C. Seasonal changes of leaf physiological characteristics of *Ipomoea pes-caprae* in coastal sand[J]. *Guihaia*, 2022, 42(8): 1284-1293. (in Chinese)
- [3] 刘志强, 王建立, 赵景云, 仇永康. 花期干旱对大豆生理及光合特性的影响[J]. *热带农业科学*, 2022, 42(1): 17-21.
LIU Z Q, WANG J L, ZHAO J Y, QIU Y K. Effects of drought on physiological and photosynthetic characteristics of *Soybean* at the flowering stage[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2022, 42(1): 17-21. (in Chinese)
- [4] 时俊帅, 陈双林, 郭子武, 章超. 高节竹立竹干形、冠形和叶形变化的海拔效应[J]. *东北林业大学学报*, 2018, 46(10): 13-17.
SHI J S, CHEN S L, GUO Z W, ZHANG C. Influence of altitude on culm form, crown, phylliform of *Phyllostachys prominens*[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2018, 46(10): 13-17. (in Chinese)
- [5] 荣俊冬, 凡莉莉, 陈礼光, 何天友, 林宇, 郑晶晶, 郑郁善. 不同用量保水剂对沿海沙地麻竹生理特征的影响[J]. *南方农业学报*, 2019(2): 323-329.
- [6] RONG J D, FAN L L, CHEN L G, HE T Y, LIN Y, ZHENG J J, ZHENG Y S. Effects of different dosages of super absorbent polymers (SAP) on physiological indexes of *Dendrocalamus latiflorus* in coastal sand[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2019(2): 323-329. (in Chinese)
- [7] LAWREN S, CHRISTINE S. Measurement of leaf hydraulic conductance and stomatal conductance and their responses to irradiance and dehydration using the evaporative flux method (EFM)[J]. *Journal of Visualized Experiments Jove*, 2012(70): 4179.
- [8] 蒋志荣, 梁旭婷, 朱恭, 宋宇鹏, 丛日亮, 王生鑫, 杨奇奇. 3 树种对季节变化反应的敏感度及其与抗逆能力的关系[J]. *西北林学院学报*, 2008(6): 46-49.
JIANG Z R, LIANG X T, ZHU G, SONG Y P, CONG R L, WANG S X, YANG Q Q. Sensitivity of three tree species reaction to seasonal variation and its relation to antistress ability[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2008(6): 46-49. (in Chinese)
- [9] 吴君, 何天友, 陈凌艳, 江登辉, 施成坤, 荣俊冬, 郑郁善, 陈礼光. 施肥对沿海沙地鼓节竹叶片建成成本及适应性的影响[J]. *福建农业学报*, 2023(1): 90-98.
WU J, HE T Y, CHEN L Y, JIANG D H, SHI C K, RONG J D, ZHENG Y S, CHEN L G. Fertilization for cultivating *Bambusa tuldoidea* on coastal sandy land[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2023(1): 90-98. (in Chinese)
- [10] 张洋洋, 凡莉莉, 荣俊冬, 何天友, 黄晴晴, 叶龙太, 郑郁善. 沿海沙地淡竹和四季竹光合-光响应特性及其最适模型研究[J]. *西部林业科学*, 2020(4): 60-67.
ZHANG Y Y, FAN L L, RONG J D, HE T Y, HUANG Q Q, YE L T, ZHENG Y S. Photosynthetic light response characteristics and optimal models of *Phyllostachys glauca* and *oligostachyum iubicum* in coastal sandy land[J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2020(4): 60-67. (in Chinese)
- [11] 张迎辉, 蔡星, 肖晓梅, 何天友, 李云鸽, 荣俊冬, 陈礼光, 郑郁善. 高节竹表型可塑性对沿海沙地生境的响应[J]. *世界竹藤通讯*, 2024(5): 38-46.
ZHANG Y H, CAI X, XIAO X M, HE T Y, LI Y G, RONG J D, CHEN L G, ZHENG Y S. Response of phenotypic plasticity of *Phyllostachys prominens* to sandy coastal habitats[J]. *World Bamboo and Rattan*, 2024(5): 38-46. (in Chinese)
- [12] 岳新建, 叶功富, 高伟, 陈智勇, 陈梦瑶, 李蝶. 海岸沙地主要森林的凋落物分解及生态化学计量特征[J]. *水土保持研究*, 2021(4): 77-83.
YUE X J, YE G F, GAO W, CHEN Z Y, CHEN M Y, LI D. Characteristics of litter decomposition and ecological stoichiometry of different forests on coastal sandy land in Fujian province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021(4): 77-83. (in Chinese)

- [12] 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.
LI H S. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. (in Chinese)
- [13] 蔡丽平, 吴鹏飞, 侯晓龙, 马祥庆, 张芸. 干旱胁迫对水土保持先锋植物类芦光合特性的影响[J]. 水土保持学报, 2011(6): 237-241.
CAI L P, WU P F, HOU X L, MA X Q, ZHANG Y. Effects of drought stress on photosynthetic characteristics of pioneer plant *neyraudia reynaudiana* on soil and water conservation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011(6): 237-241. (in Chinese)
- [14] FLEXAS J, ESCALONA J M, MEDRANO H. Water Stress induces different levels of photosynthesis and electron transport rate regulation in grapevines[J]. Plant, Cell and Environment, 1999(1): 39-48.
- [15] 姚磊, 杨阿明. 不同水分胁迫对番茄生长的影响[J]. 华北农学报, 1997(2): 103-107.
YAO L, YANG A M. Influences of different water stress on tomato growth[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 1997(2): 103-107. (in Chinese)
- [16] 孙龙, 彭祚登, 王冲, 杨腾. 干旱胁迫对两种沙地灌木能源树种光合特性的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2014(2): 99-104.
SUN L, PENG Z D, WANG C, YANG T. Effect of drought stress on photosynthetic characteristics of two energy resource sandy shrubs[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2014(2): 99-104. (in Chinese)
- [17] 郝树荣, 郭相平, 王为木, 张烈君, 王琴. 水稻拔节期水分胁迫及复水对叶片叶绿体色素的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2006(4): 397-400.
HAO S L, GUO X P, WANG W M, ZHANG L J, WANG Q. Effects of water stress and rewetting at shooting stage of rice on chlorophyll pigments in leaves[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2006(4): 397-400. (in Chinese)
- [18] 代微然, 任健, 墨继光. 干旱胁迫对假俭草叶绿素荧光特性的影响[J]. 草原与草坪, 2010(5): 1-5.
DAI W R, REN J, MO J G. Effects of drought stress on features of chlorophyll fluorescence of *Eremochloa ophiuroides*[J]. Grassland and Turf, 2010(5): 1-5. (in Chinese)
- [19] 彭亮, 杨冰月, 张岗, 赵停, 孙涛, 胡本祥. 干旱胁迫对远志种子萌发及幼苗生长和生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2018(4): 741-749.
PENG L, YANG B Y, ZHANG G, ZHAO T, SUN T, HU B X. Seed germination and seedling growth physiological characteristics of *Polygala tenuifolia* willd. under drought stress[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2018(4): 741-749. (in Chinese)
- [20] 张金菊, 田青, 郭有燕, 张惠云, 包新光, 孔东升, 杜军林. 黑果枸杞根系对干旱胁迫响应的生理机制[J]. 甘肃农业大学学报, 2023, 58(4): 183-191.
ZHANG J J, TIAN Q, GUO Y Y, ZHANG H Y, BAO X G, KONG D S, DU J L. Physiological mechanism of root response to drought stress in *Lycium ruthenicum*[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2023, 58(4): 183-191. (in Chinese)
- [21] MORAN J F, BECANA M, ITURBEORMAETXE I, FRECHILLA S, KLUCAS R V, APARICIOTEJO P. Drought induces oxidative stress in pea-plants[J]. Planta, 1994(3): 346-352.
- [22] 张衡锋, 杨绮, 韦庆翠, 张焕朝. 盐胁迫对 10 个品种紫薇的影响及其耐盐性综合评价[J]. 东北林业大学学报, 2023, 51(9): 34-40.
ZHANG H F, YANG Q, WEI Q C, ZHANG H C. Effects of salt stress and salt tolerance on ten *Lagerstroemia indica* varieties[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2023, 51(9): 34-40. (in Chinese)
- [23] FIDALGO F, SANTOS A, PIMENTA S, MARQUES J, HONRADO J. Regional environmental gradients influence ecophysiological responses of dominant coastal dune plants to changes in local conditions[J]. Journal of Coastal Research, 2014, 30(5): 893-903.
- [24] 张旭丽, 王瑞军, 郗小倩, 冯学金, 李洪. 干旱胁迫及复水对黄芪幼苗生长、生理特性及次生代谢产物积累的影响[J]. 作物杂志, 2024(5): 204-211.
ZHANG X L, WANG R J, XI X Q, FENG X J, LI H. Effects of drought stress and rehydration on growth, physiological characteristics and accumulation of secondary metabolites in *Astragalus mongholicus* seedlings[J]. Crops, 2024(5): 204-211. (in Chinese)
- [25] 拉本, 胡娟, 张旭萍. 干旱胁迫对植物生理的影响以及分子机制的响应研究进展[J]. 青海草业, 2022(4): 31-35.
LA B, HU X, ZHANG X P. Research progress on the effect of drought on plant physiology and the response of molecular mechanism[J]. Qinghai Prataculture, 2022(4): 31-35. (in Chinese)
- [26] 姜恒, 张志刚, 杨建军, 李斌, 王兴胜, 张晓红. 4 种夏栎对低温胁迫的生理响应及抗寒性评价[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2024, 44(4): 406-413.
JIANG H, ZHANG Z G, YANG J J, LI B, WANG X S, ZHANG X H. Physiological response and cold resistance evaluation of four species of *Quercus robur* to low temperature stress[J]. Journal of Hebei University (Natural Science

- Edition), 2024, 44(4): 406-413. (in Chinese)
- [27] 吴秀宁, 付鑫鑫, 陈月星, 张军, 敬樊, 王新军. 商洛主栽小麦品种苗期抗旱性综合评价[J]. 西北农业学报, 2024, 33(7): 1225-1234.
- WU X N, FU X X, CHEN Y X, ZHANG J, JING F, WANG X J. Comprehensive evaluation of drought resistance of main wheat varieties at seedling stage in Shangluo[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2024, 33(7): 1225-1234. (in Chinese)
- [28] 徐世健, 安黎哲, 冯虎元, 王勋陵, 李新荣. 两种沙生植物抗旱生理指标的比较研究[J]. 西北植物学报, 2000(2): 224-228.
- XU S J, AN L Z, FENG H Y, WANG X L, LI X R. Comparative study on drought-resistance indexes of two desert plants[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2000(2): 224-228. (in Chinese)
- [29] 韩蕊莲, 李丽霞, 梁宗锁. 干旱胁迫下沙棘叶片细胞膜透性与渗透调节物质研究[J]. 西北植物学报, 2003(1): 23-27.
- HAN R L, LI L X, LIANG Z S. *Seabuckthorn* relative membrane conductivity and osmotic adjustment under drought stress[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2003(1): 23-27. (in Chinese)
- [30] 冯芳芳, 魏清江, 苏受婷, 宁少君, 廖小娜, 辜青青. 干旱胁迫对 2 种柑橘幼苗生长形态、渗透调节物质含量和抗氧化酶活性的影响[J]. 浙江农业学报, 2017, 29(9): 1515-1523.
- FENG F F, WEI Q J, SU S T, NING S J, LIAO X N, GU Q Q. Effect of drought on growth morphology, osmolyte content and antioxidant enzyme activity of two citrus seedlings[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2017, 29(9): 1515-1523. (in Chinese)
- [31] 王海珍, 徐雅丽, 张翠丽, 韩路. 干旱胁迫对胡杨和灰胡杨幼苗渗透调节物质及抗氧化酶活性的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(12): 125-130.
- WANG H Z, XU Y L, ZHANG C L, HAN L. Effects of drought stress on osmotic adjustment substances and antioxidant enzymes activity of *Populus euphratica* and *Populus pruinosa* seedlings[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(12): 125-130. (in Chinese)
- [32] 张迎辉, 陈礼光, 凡莉莉, 荣俊冬, 郑晶晶, 郑郁善. 保水剂与氮肥协同作用对绿竹抗性生理影响的综合评价[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2019, 39(5): 43-50.
- ZHANG Y H, CHEN L G, FAN L L, RONG J D, ZHENG J J, ZHENG Y S. Comprehensive evaluation of physiological effects of water-retaining agent and nitrogen fertilizer on resistance of *Bambusa oldhamii*[J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2019, 39(5): 43-50. (in Chinese)