



姚春娟, 熊光康, 杨肖华, 等. 施肥对掌叶覆盆子叶绿素荧光参数和生理特性的影响[J]. 华南农业大学学报, 2017, 38(6): 51-57.

施肥对掌叶覆盆子叶绿素荧光参数和生理特性的影响

姚春娟¹, 熊光康², 杨肖华¹, 赖晓莲¹, 郭圣茂¹, 李兆双¹

(1 江西农业大学 园林与艺术学院, 江西 南昌 330045; 2 中国林业科学院 亚热带林业实验中心, 江西 分宜 336600)

摘要:【目的】探讨掌叶覆盆子 *Rubus chingii* 的需肥特性, 为其优质高产栽培提供理论参考和指导。【方法】以掌叶覆盆子为材料, 通过盆栽试验研究不同肥料的低 (L)、中 (M) 和高 (H) 水平处理对掌叶覆盆子的叶绿素、株高、叶绿素荧光参数及相关生理指标的影响。【结果】随着施肥量的增加, 掌叶覆盆子的叶绿素含量、株高、叶绿素荧光参数和生理指标均呈上升趋势。NPK 肥 L、M 和 H 条件下叶绿素含量增幅稳定, 依次增加 36.3%、41.3% 和 53.4%, 且各水平间差异显著; 复合肥能迅速提高叶绿素含量, 但各施肥水平无显著性差异; 有机肥在 M 与 H 水平, 叶绿素含量差异不明显。NPK 肥与株高存在极显著相关性, 且长势最优, L、M 和 H 水平依次增高 40.5%、50.2% 和 64.4%; 有机肥次之, 依次增高 18.3%、44.0% 和 56.2%; 复合肥稍弱, 依次增高 16.1%、20.3% 和 40.7%。NPK 肥在各施肥量下, F_v/F_m 、 Φ_{psII} 、 qP 均为最高水平, 复合肥和有机肥与 4 个叶绿素荧光参数存在显著相关性, 但复合肥处理下, qP 在 3 种肥料中处于最低水平, 有机肥处理下的 F_v/F_m 和 Φ_{psII} 最低。NPK 肥与 4 种生理指标存在显著相关性, 各施肥处理下可溶性蛋白、可溶性糖、脯氨酸的含量达最高水平, 丙二醛含量最低; 复合肥在 H 水平, 可溶性蛋白、可溶性糖含量增幅分别为 8.4% 和 2.1%, 处于最低水平; 有机肥在 H 水平处理下丙二醛含量增幅 36.8%, 达到最高水平。【结论】随着施肥量的递增, NPK 肥处理下的掌叶覆盆子叶绿素含量和株高差异显著, 叶绿素荧光参数和生理指标也表现出优良的特性。

关键词: 掌叶覆盆子; 施肥; 叶绿素荧光参数; 生理特性; 相关性
中图分类号: S567.19 文献标识码: A 文章编号: 1001-411X(2017)06-0051-07

Effects of fertilization on chlorophyll fluorescence parameters and physiological characteristics of *Rubus chingii*

YAO Chunjuan¹, XIONG Guang kang², YANG Xiaohua¹, LAI Xiaolian¹, GUO Shengmao¹, LI Zhaoshuang¹
(1 College of Landscape and Art, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China;
2 Experiment Center for Subtropical Forestry, Academy of Forestry, Fenyi 336600, China)

Abstract: 【Objective】To explore the fertilizer requirement of *Rubus chingii*, and provide a theoretical reference and guidance for its high quality and high yield cultivation in the future. 【Method】The effects of different fertilizers fertilizing amounts [low (L), medium (M) and high (H) levels] on the chlorophyll, plant height, chlorophyll fluorescence parameters and related physiological indexes of *R. chingii* were studied by pot experiment. 【Result】Chlorophyll content, plant height, chlorophyll fluorescence parameters and physiological

收稿日期: 2016-12-28 优先出版时间: 2017-11-06
优先出版网址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20171106.1412.020.html>
作者简介: 姚春娟 (1990—), 女, 硕士研究生, E-mail: 1105876426@qq.com; 通信作者: 郭圣茂 (1970—), 男, 副教授, 博士, E-mail: shmguo@163.com
基金项目: 中央财政林业科技推广示范项目 (JXTG [2013] 11 号); 江西省科技支撑计划 (20133BBF60012); 江西省教育厅科技项目 (GJJ13279)

indexes increased with the increase of fertilization amount. Compared with control, the increases of chlorophyll content under NPK fertilization were stable, being 36.3%, 41.3% and 53.4% under L, M and H levels of NPK fertilization, and differences among NPK levels were significant. Compound fertilization significantly increased chlorophyll content, but there was no significant difference among different levels of compound fertilizer. Chlorophyll content was not significantly different between M and H levels of organic fertilizer. There was highly significant correlation between NPK fertilization levels and plant height. Plant heights under NPK fertilization were the highest, the increases were 40.5%, 50.2% and 64.4%, followed by 18.3%, 44.0% and 56.2% with organic fertilization, and then 16.1%, 20.3% and 40.7% with compound fertilization. At different fertilization levels, NPK fertilization resulted in the highest levels of F_v/F_m , $\Phi_{ps II}$ and qP. Compound fertilization and organic fertilization levels had significant correlation with four chlorophyll fluorescence parameters. Among three fertilization treatments, qP was the lowest under compound fertilization, while F_v/F_m and $\Phi_{ps II}$ were the lowest under organic fertilization. NPK fertilization level had significant correlation with four physiological indexes. At different fertilization levels, NPK fertilization resulted in the highest contents of soluble protein, soluble sugar and proline, and the lowest MDA content. At H level of compound fertilization, the increases of soluble protein and soluble sugar contents were 8.4% and 2.1% respectively, which were the lowest. At H level of organic fertilization, the increases of MDA content was 36.8%, which was the highest.

【Conclusion】 With the increase of fertilization levels, the chlorophyll content and plant height of *R. chingii* significantly increased under NPK fertilization, and the chlorophyll fluorescence parameters and physiological indexes also had desirable values.

Key words: *Rubus chingii*; fertilization; chlorophyll fluorescence parameter; physiological characteristic; correlation

掌叶覆盆子 *Rubus chingii* 又称华东覆盆子, 是蔷薇科悬钩子属的一种藤状落叶灌木, 自然分布以江西、安徽、福建、浙江、江苏等华东地区为主, 主产区为江西德兴的三清山, 其根、叶、果均可入药。掌叶覆盆子果实味甘酸、性温、归肾、膀胱经, 有益肾、固精、缩尿、壮阳等功能, 用于肾虚遗尿、小便频数、阳痿早泄、遗精滑精等症状; 成熟的果实富含氨基酸、维生素 E、维生素 C、维生素 B、维生素 PP 等多种维生素, 同时含有超氧化物歧化酶 (SOD)、天然抗癌物质 (鞣化酸)、天然阿司匹林 (水杨酸) 及大量天然减肥物质覆盆子酮等, 是具有抗衰老、保健、美容等功效的“新型第 3 代水果”^[1-3]。

近年来, 以江西省作为主产区的南方地区覆盆子栽培规模快速发展, 面积日益增加, 但以往关于掌叶覆盆子的报道侧重于果实化学成分的研究, 对植株栽培需肥特性的研究却鲜有报道。药农和果农没有可参考的施肥标准, 为了追求产量, 混乱施肥, 对植物生长和土壤的持续利用造成不利的影响, 所以合理施肥显得尤为紧迫。叶绿素荧光技术作为一种新型的探测技术, 能准确反映植物的光合生理机理, 而且对植物毫无损伤^[4]。植物的可溶性糖、脯氨酸、可溶性蛋白、丙二醛作为植物体系统代谢平衡

的调节者, 具有维持细胞渗透压, 减缓外界胁迫的能力, 同时也客观反映植物生长的健康状况^[5]。本文开展了不同施肥量对掌叶覆盆子叶绿素荧光参数和生理特性的影响试验, 以期以后掌叶覆盆子的优质高产栽培提供理论参考和指导。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试掌叶覆盆子: 种子从江西省德兴市中药种植基地取回后进行播种, 于 2016 年 4 月 15 日移栽于江西农业大学中药园内, 采用上口径为 27 cm、下口径为 17 cm、高 22 cm 的塑料盆进行盆栽育苗, 每盆 1 株。

供试肥料: 来源于江西赣丰肥业股份公司, 复合肥[w(N) 为 15%, w(P₂O₅) 为 15%, w(K₂O) 为 15%]、有机肥[w(有机质) 为 45%, w(N+P₂O₅+K₂O) ≥ 7%]、NPK 肥[w(N) 为 12%, w(P₂O₅) 为 10%, w(K₂O) 为 5%, w(CaO) 为 17%]。

供试土壤: 每盆装入等量 (7 kg) 园内风干黏壤土, 基础养分状况为有机质 17.8 g·kg⁻¹、碱解氮 72.3 mg·kg⁻¹、速效磷 55.5 mg·kg⁻¹、速效钾 86.8 mg·kg⁻¹, 土壤 pH 为 6.15。

1.2 试验设计

选取自然生长、健康状况良好的 30 盆掌叶覆盆子幼苗进行施肥试验, 试验设计处理根据相似习性植物对肥料的吸收量, 每肥每盆的每次施肥量分为 3 个梯度: 2.4 (低, L)、4.8 (中, M) 和 7.2 g(高, H),

不施肥作为对照 (CK), 如表 1 所示。移植前施以基肥, 拔节期进行追肥, 共施肥 2 次, 田间管理措施按常规进行。待生长期结束后, 于 2016 年 7 月 15 日进行测量。

表 1 试验处理设计
Tab. 1 Experimental treatment design

处理	处理水平	施肥量	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	有机质	CaO
复合肥	L	2.4	0.360	0.360	0.360	0	0	0
	M	4.8	0.720	0.720	0.720	0	0	0
	H	7.2	1.080	1.080	1.080	0	0	0
有机肥	L	2.4	0.120	0.048	0.048	0	1.08	0
	M	4.8	0.240	0.096	0.096	0	2.16	0
	H	7.2	0.360	0.144	0.144	0	3.24	0
NPK肥	L	2.4	0.288	0.240	0.144	0.12	0	0.408
	M	4.8	0.576	0.480	0.288	0.24	0	0.816
	H	7.2	0.864	0.720	0.432	0.36	0	1.224
CK		0	0	0	0	0	0	0

1.3 测定项目与方法

1.3.1 叶绿素含量测定 采用日本柯尼卡美能达 SPAD-502PLUS 叶绿素仪进行 SPAD 值测定, 测定时选取无叶脉的部位, 每片叶至少选择 15 个点进行测量, 叶片面积较大的, 适当增加其 SPAD 的采集点, 求其平均值。

1.3.2 株高测定 用钢卷尺测量根茎部到顶部之间的距离作为株高, 对于部分倒伏植株拉直后进行准确测量。

1.3.3 叶绿素荧光参数测定 采用德国 WALZ 公司生产的便携式调制荧光仪 PAM-2500, 于 2016 年 7 月 15 日上午 09:00—12:00 对每株中上部、外围的叶片进行测定。测定前叶片进行暗适应 20 min, 用笔做出标记, 保证每次能夹到相同位置, 每 2 h 测 1 次, 每株重复测定 3 片叶。测定的荧光参数主要有: PS II 最大化学量子产量 (F_v/F_m)、光合电子传递量子效率 (Φ_{psII})、非光化学淬灭系数 (NPQ)、光化学淬灭系数 (qP), 其计算公式如下:

$$F_v/F_m=(F_m-F_0)/F_m,$$
 (1)

$$\Phi_{psII}=(F'_m-F)/F'_m,$$
 (2)

$$NPQ=(F_m-F'_m)/F'_m=F_m/F'_m-1,$$
 (3)

$$qP=(F'_m-F)/F'_v=1-(F-F_0)/(F'_m-F_0),$$
 (4)

式中: F_v 表示可变荧光; F_m 表示暗适应下最大荧光; F_0 表示最小初始荧光; F 表示实时荧光值;
<http://xuebao.scau.edu.cn>

F'_m 表示光下最大荧光; F'_v 表示光下可变荧光; F'_0 表示光下最小荧光。

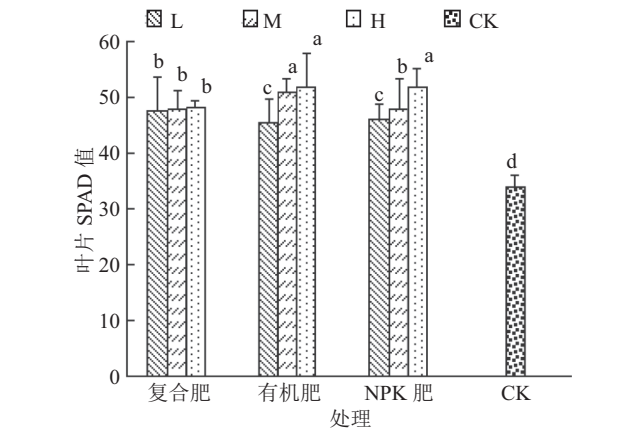
1.3.4 生理指标测定 可溶性蛋白含量测定采用考马斯亮蓝染色法; 可溶性糖含量测定采用蒽酮比色法; 脯氨酸含量测定采用酸性茚三酮法; 丙二醛含量测定采用硫代巴比妥酸法^[6]。

1.4 数据处理

采用 SPSS 17.0 软件进行数据处理, 用 Duncan's 法检验分析显著性, Pearson 相关分析法进行统计分析, 运用 WPS Office Microsoft Excel 2016 制作图表。

2 结果与分析

2.1 施肥处理对掌叶覆盆子叶绿素含量的影响
叶绿素是植物光合作用能力和生长发育阶段的指示器, 是检测植物生长健康状况的重要指标之一^[7]。如图 1 所示, 施肥处理水平下掌叶覆盆子叶片叶绿素含量增多, 与 CK 均呈现出显著性差异, 而且各肥料处理水平下叶绿素含量均表现为 H>M>L>CK。施用 NPK 肥后, 掌叶覆盆子的叶绿素含量在 L、M 和 H 水平下分别提高 36.3%、41.3% 和 53.4%, 效果最佳。复合肥能迅速提高叶绿素含量, 在 L 水平下增幅达到 40.7%, 但随后再逐渐增加施肥量, 掌叶覆盆子的叶绿素含量却没有显著提高。当有机肥在 M 水平时, 掌叶覆盆子的叶绿素含量显著增加, 再增加施肥量至 H, 叶绿素含量却不能显

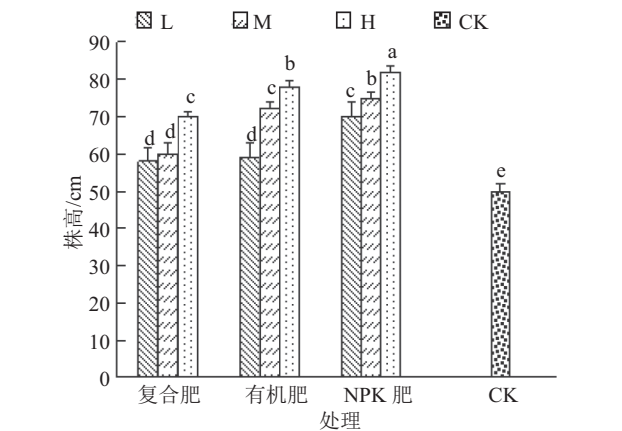


柱子上方凡是具有一个相同字母者表示处理间差异不显著 ($P>0.05$, Duncan's 法)。

图 1 施肥处理下掌叶覆盆子叶片的 SPAD 值
Fig. 1 The SPAD values of *Rubus chingii* leaves under different fertilization treatments

表 2 不同施肥处理与掌叶覆盆子各测定指标的相关性分析 ¹⁾						
Tab. 2 Analysis of correlation between different fertilization and measured indexes of <i>Rubus chingii</i>						
指标	复合肥		有机肥		NPK 肥	
	Pearson 相关系数	<i>P</i>	Pearson 相关系数	<i>P</i>	Pearson 相关系数	<i>P</i>
叶绿素	0.561*	0.049	0.765*	0.043	0.788*	0.037
株高	0.536*	0.031	0.756*	0.012	0.995**	0.000
最大光合效率(F_v/F_m)	0.708*	0.032	0.577*	0.044	0.782*	0.027
实际光合效率(Φ_{psII})	0.653*	0.035	0.725*	0.018	0.739*	0.013
非光化学淬灭(NPQ)	0.417*	0.026	0.322*	0.039	0.251	0.075
光化学淬灭(qP)	0.519*	0.047	0.584*	0.034	0.678*	0.026
可溶性糖	0.361*	0.034	0.471*	0.020	0.520*	0.015
可溶性蛋白	0.492*	0.029	0.426*	0.045	0.567*	0.024
脯氨酸	0.324	0.072	0.488	0.066	0.673*	0.034
丙二醛	0.421*	0.026	0.611*	0.023	0.348*	0.035

1) **和*分别表示极显著相关($P<0.01$)和显著相关($P<0.05$), $n=9$ 。



柱子上方凡是具有一个相同字母者表示处理间差异不显著 ($P>0.05$, Duncan's 法)。

图 2 施肥处理对掌叶覆盆子株高的影响
Fig. 2 Effects of fertilization treatments on plant height of *Rubus chingii*

著增加,这与施用复合肥的情况相同。由表 2 可知,3 种肥料都与叶绿素含量呈显著的相关性,从相关系数看出,影响掌叶覆盆子叶绿素含量的肥效排序为:NPK 肥>有机肥>复合肥。

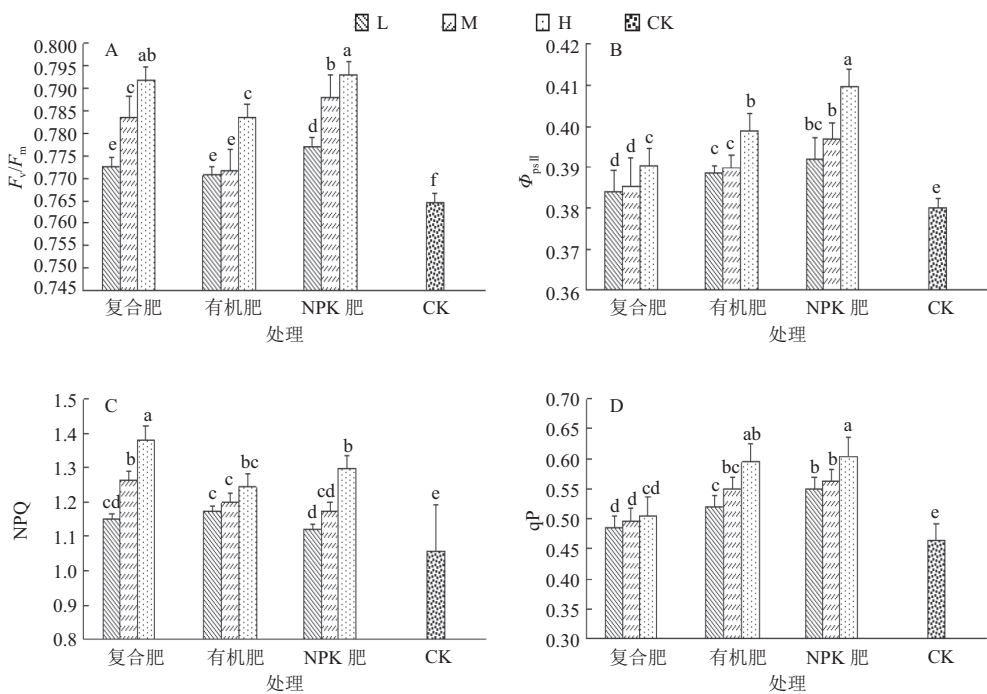
2.2 施肥处理对掌叶覆盆子株高的影响

植物的株高能具体反映植物生长速度,是一个衡量植物生长状况的重要指标^[8]。如图 2 所示,掌叶覆盆子的株高在施肥后均高于 CK,且与 CK 差异显著,随着施肥量的增加,株高也逐渐增加。施用不同量的 NPK 肥,掌叶覆盆子的株高表现出显著性差异,且株高长势最优, L、M 和 H 水平下依次增高 40.5%、50.2% 和 64.4%,说明 NPK 肥的各元素或配比更有利于掌叶覆盆子的株高生长。复合肥的增高效果较慢,复合肥在 L 水平下增高 16.1%,在

M 水平下增高 20.3%,二者间差异不明显,直到 H 水平时,株高增高 40.7%,与 L、M 呈显著性差异,这说明复合肥的施用量在 H 水平下对掌叶覆盆子增高效果最好,施肥量从 M 减至 L 时,株高不会显著降低。有机肥在各施肥水平下能显著增加掌叶覆盆子株高,施肥 L、M 和 H 水平下依次增高 18.3%、44.0% 和 56.2%,稍弱于 NPK 肥各水平。相关性分析(表 2)表明,施肥处理与掌叶覆盆子的株高均存在显著相关性,其中 NPK 肥与株高存在极显著的相关性。

2.3 施肥处理对掌叶覆盆子叶绿素荧光参数的影响

叶绿素荧光参数能反映植物光合系统反应中心 PS II 的适应机制,从而掌握植物适应环境的能力^[9]。由图 3 可知,随着施肥量的增加,掌叶覆盆子



各图柱子上方凡是具有一个相同小写字母者表示处理间差异不显著 ($P>0.05$, Duncan's 法)。

图 3 施肥处理对掌叶覆盆子叶绿素荧光参数的影响

Fig. 3 Effects of fertilization treatments on chlorophyll fluorescence parameters of *Rubus chingii*

的 F_v/F_m 、 Φ_{psII} 、NPQ、qP 呈上升趋势, 但 3 种肥料处理下各参数的增幅却不尽相同。就 NPK 肥而言, 随着施肥量的增加, 掌叶覆盆子的 F_v/F_m 、 Φ_{psII} 和 qP 趋于最高, 其中 H 水平较 CK 的增幅分别为 3.6%、7.2% 和 23.3%, 掌叶覆盆子 PS II 反应中心活性随施肥量的增加而增强。由图 3A 可知, 复合肥处理下的 F_v/F_m 大于有机肥, 其潜在的最大光能转换效率较有机肥更大。NPQ 反映了植物光保护的能力, 在图 3C 中 L 水平时有机肥 NPQ 最高, 但随着施肥量的增加, 到 H 水平时复合肥 NPQ 领先, 增幅达 23.6%, 表明复合肥耗散过剩光能为热的能力随施肥量的增加而变强。

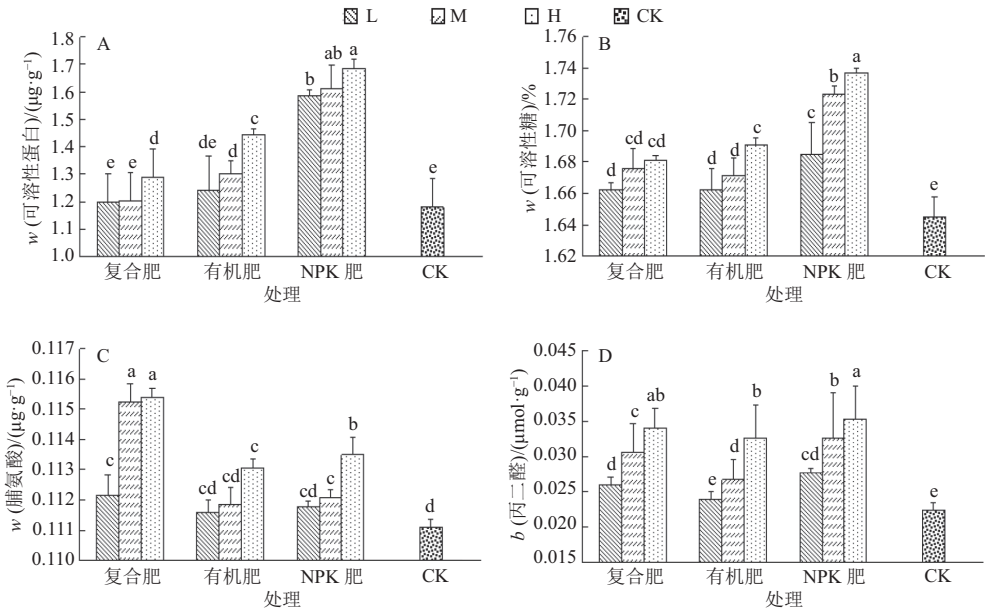
相关性分析 (表 2) 表明: 掌叶覆盆子的叶绿素荧光参数 F_v/F_m 、 Φ_{psII} 、NPQ、qP 与 3 种肥料存在显著相关性。由表 2 可以看出, 影响 F_v/F_m 的 3 种肥料相关系数排序为: NPK 肥>复合肥>有机肥; 影响 Φ_{psII} 和 qP 的 3 种肥料相关系数排序均为: NPK 肥>有机肥>复合肥; 影响 NPQ 的肥料中, NPK 肥与 NPQ 无显著相关性, 其他 2 种肥料相关系数排序为: 复合肥>有机肥。

2.4 施肥量对掌叶覆盆子生理特性的影响

植物体内的可溶性蛋白、可溶性糖、脯氨酸、丙二醛参与调节植物的生命活动, 对细胞的生命物质及生物膜起到保护作用^[10]。由图 4 可知, 在施肥量增加的情况下, 掌叶覆盆子的可溶性蛋白、脯氨

酸、可溶性糖和丙二醛的含量也随之上升, 但增长量不同。NPK 肥处理下, H 水平较 CK 而言, 可溶性蛋白和可溶性糖的含量分别上升 42.5% 和 5.6%, 达最高水平, 表明掌叶覆盆子体内渗透调节增强、物质代谢旺盛。同时, 丙二醛含量较其他 2 种肥料高, 但随着施肥量的增加, 其增幅较小, 表明随着 NPK 肥的增加, 掌叶覆盆子产生较强的抗膜脂过氧化能力。在图 4A、4B 中, 随着施肥量的增加, 复合肥处理下的掌叶覆盆子的可溶性蛋白和可溶性糖, 在 H 水平分别上升了 9.1% 和 2.2%, 在 3 种肥料中处于最低水平, 这有可能是复合肥处理下的掌叶覆盆子受到了逆境胁迫。在图 4C、4D 中, H 水平时有机肥处理下的脯氨酸和丙二醛含量增幅分别为 1.8%、46.3%, 在 3 种肥料中持最低水平, 表明有机肥处理下掌叶覆盆子的逆境胁迫和膜脂过氧化程度稍弱。

表 2 的相关性分析表明: NPK 肥处理与掌叶覆盆子的可溶性蛋白、可溶性糖、脯氨酸及丙二醛含量存在显著相关性, 其他 2 种肥料与可溶性蛋白、丙二醛和可溶性糖含量也存在显著相关性, 而与脯氨酸含量不存在显著相关性。根据相关系数 (表 2) 可以判断, 影响可溶性蛋白含量的肥料排序为: NPK 肥>复合肥>有机肥; 影响丙二醛含量的肥料排序为: 有机肥>复合肥>NPK 肥; 影响可溶性糖含量的肥料排序为: NPK 肥>有机肥>复合肥。



各图柱子上方凡是具有一个相同小写字母者表示处理间差异不显著 ($P>0.05$, Duncan's 法)。

图 4 施肥处理对掌叶覆盆子生理指标的影响

Fig. 4 Effects of fertilization treatments on physiological indexes of *Rubus chingii*

3 讨论与结论

叶绿素作为植物光合作用的主要色素,其含量能反映出植物体内能量的传递转化和干物质积累能力。本试验测定了 3 种肥料低、中、高 3 个水平处理下掌叶覆盆子的叶绿素含量,结果显示,NPK 肥处理下,随着施肥量的增加掌叶覆盆子的叶绿素含量上升得最快,各施肥量间差异显著,与叶绿素含量呈显著性相关,这与前人的研究结果一致^[11-12],说明 NPK 肥对叶绿素含量的影响最大。这可能是因为 NPK 肥中添加了 MgO, Mg 是叶绿素的主要组成成分,在叶绿素分子中居于卟啉环的中央,充当叶绿素的头部,为叶绿素的合成提供了物质基础。株高测量中,NPK 肥与株高存在极显著相关性,且 NPK 肥与其他肥料相比各处理水平下株高都是最大值,各处理水平下株高存在显著性差异,说明 N、P₂O₅、K₂O 的配比施肥更有利于掌叶覆盆子植株的生长。

叶绿素荧光作为一种内在的探针,与植物的光合作用密切相关,任何外界对光合作用的影响都能通过叶绿素荧光参数的变化反映出来。一般认为暗适应下植物的 F_v/F_m 在 0.75~0.85 之间,不易受施肥的影响^[13-14],但也有研究认为,施肥能够显著提高玉米和马铃薯等作物的 F_v/F_m 值^[15]。相关研究认为, F_v/F_m 值越大,作物最大光化学量子产量越高; Φ_{psII} 值越大,作物 PS II 天线叶绿素吸收的光能越高比例地转化为化学能;NPQ 值越大,作物耗散过

剩光能为热的能力越强;qP 值越大,PS II 核心对光化学反应越开放,作物获得最大光能转换效率越高^[16-17]。本试验中,NPK 肥与 F_v/F_m 、 Φ_{psII} 和 qP 存在显著相关性,在各施肥水平下, F_v/F_m 、 Φ_{psII} 、qP 趋于最高值,NPQ 偏低,说明 NPK 肥随着施肥量的增加,PS II 反应中心的开放程度与活性显著增强,PS II 光合电子传递能力和最大光能转换效率提高,光合色素能有效地把光能转化为化学能,热耗散掉的光能较少,从而保障光合作用的高效进行,这与前人的研究结果^[18]一致。

可溶性蛋白、可溶性糖、脯氨酸、丙二醛含量的变化体现了植物抗逆性的强弱。可溶性蛋白是重要的渗透调节物质和营养物质,其增加和积累能提高细胞的保水能力;可溶性糖作为小分子物质参与渗透调节,其增加能提高细胞液浓度,降低水势;脯氨酸作为一种渗透物质,其增加能防止细胞脱水,保持细胞与环境平衡;丙二醛是膜脂过氧化最重要的产物之一,其增加能加剧膜的损伤。本试验中,NPK 肥与 4 种生理指标均存在显著性正相关,随施肥水平提高,可溶性蛋白、可溶性糖含量逐渐增加,趋于最高水平,表明随着施肥量的增加,细胞的渗透调节加强,细胞液浓度上升,水势降低,保水能力增强,使细胞与环境保持平衡,同时,丙二醛含量随着施肥量的逐渐增加,其增长趋势较弱,表明随着元素配比量的增加对掌叶覆盆子的膜脂过氧化产生抑制作用,这与前人的研究结果^[19-21]一致。

不同的施肥条件会导致植株生长的小气候不

同, 进而影响植株体内生理代谢。NPK 肥处理在试验中表现出较高的叶绿素含量和优良的株高, 叶绿素荧光参数和生理指标也达最佳水平, 这可能是其元素配比使土壤环境发生了变化, 化肥被更好地转化利用, 确保了掌叶覆盆子的生长代谢的协调均衡, 从而增强了光合作用, 提高了细胞渗透调节和物质代谢。但未涉及到最适合掌叶覆盆子 NPK 肥的施肥水平, 这与本研究设计的施肥量有关, 具体到达何种施肥量, 掌叶覆盆子的生长效果最佳, 有待进一步探讨。

参考文献:

[1] 郭启雷, 杨峻山, 刘建勋. 掌叶覆盆子的化学成分研究[J]. 中国药学杂志, 2007, 42(15): 1141-1143.

[2] XIE Y H, LIAN B, GONG J H, et al. Preparation of magnetic chitosan hyamine microspheres and separation of phenolic acids from *Rubus chingii* Hu[J]. Adv Mater Res, 2013, 634: 1347-1351. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.634-638.1347.

[3] 程丹, 李洁, 周斌, 等. 覆盆子化学成分与药理作用研究进展[J]. 中药材, 2012, 35(11): 1873-1876.

[4] 侯娜. 3 种乔木树种的叶温和叶绿素荧光参数对土壤水分胁迫的响应[D]. 郑州: 河南农业大学, 2012.

[5] 马小丽. 三种植物生长调节剂复配剂对盐胁迫下草地早熟禾生长的影响研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.

[6] 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: 83-145.

[7] NEDOMA J, NEDBALOVÁ L. Chlorophyll content of Plešné lake phytoplankton cells studied with image analysis[J]. Biologia, 2006, 61(20): 491-498.

[8] 申巍, 杨水平, 姚小华, 等. 施肥对油茶生长和结实特性的影响[J]. 林业科学研究, 2008, 21(2): 239-242.

[9] XIE Y F, CAI X L, LIU W L, et al. Effects of lanthanum nitrate on growth and chlorophyll fluorescence characteristics of *Alternanthera philoxeroides* under perchlorate

stress[J]. J Rare Earths, 2013, 31(8): 823-829.

[10] 高暎, 李毅, 种培芳, 等. 渗透胁迫下不同地理种源白刺的生理响应[J]. 草业学报, 2011, 20(3): 99-107.

[11] 姚春娟, 郭圣茂, 杨肖华, 等. 干旱胁迫下决明属植物光合生理特性日变化研究[J]. 江西农业大学学报, 2016, 38(4): 687-694.

[12] 周琳, 张会慧, 魏殿文, 等. 施肥对蓝莓植株生长、叶片叶绿素荧光特性和果实品质的影响[J]. 植物研究, 2015, 35(6): 854-859.

[13] 陈辰, 何小定, 秦金舟, 等. 4 种含笑叶片叶绿素荧光参数 F_v/F_m 特性的比较[J]. 安徽农业大学学报, 2013, 40(1): 32-37.

[14] 王俊忠, 张超男, 赵会杰, 等. 不同施肥方式对超高产夏玉米叶绿素荧光特性及产量性状的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2008, 14(3): 479-483.

[15] 田再民, 杨立军, 冯琰, 等. 不同施肥方式对马铃薯生长及产量的影响[J]. 西南农业学报, 2013, 26(4): 1741-1743.

[16] 王刚, 侍瑞, 努尔尼萨, 等. 氮磷钾施肥对比对骏枣叶绿素荧光参数的影响[J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2012, 40(9): 187-194.

[17] 胡新振, 董云龙, 陈建纲, 等. 封育与施肥对高寒草甸 4 种优势植物叶绿素荧光特征的影响[J]. 草地学报, 2014, 22(6): 1239-1244.

[18] 罗栋, 钱永强, 韩蕾, 等. 生理整合对营养分布格局下野牛草相连分株 PSII 叶绿素荧光参数的影响[J]. 核农学报, 2014, 28(7): 1320-1326.

[19] 张金恩, 肖洪, 郑有飞, 等. 开顶式气室内外冬小麦光合特性差异比较[J]. 生态学报, 2015, 35(21): 6993-7002.

[20] 袁颖红, 樊后保, 黄欠如, 等. 长期不同施肥对水稻叶片光合特性和部分保护酶活性及产量的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2011, 38(2): 299-304.

[21] 钱永生, 朱江敏, 吴剑丙, 等. 施肥对沟叶结缕草生长及生理特性的影响[J]. 草业学报, 2012, 21(3): 234-241.

【责任编辑 李晓卉】