

网络出版时间:2013-06-20 16:17

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20130620.1617.023.html>

磷胁迫对油茶幼苗光合生理指标的影响

张雪洁¹, 谭晓风¹, 袁 军², 叶思诚¹, 刘美兰¹, 李 泽¹

(1 中南林业科技大学 经济林培育与保护教育部重点实验室, 湖南 长沙 410004;

2 北京林业大学 林学院, 北京 100083)

【摘要】【目的】探讨不同磷浓度胁迫条件下油茶叶片的光合生理参数、光合色素含量、RuBP 羧化酶及 PEP 羧化酶活性等指标的变化规律, 为耐低磷油茶品种的选育和高产栽培提供参考。【方法】选择油茶良种“湘林 XLC15”和“华硕”为试材进行不同磷浓度沙培盆栽处理, 测定不同叶龄的光合生理参数、光合色素含量及 RuBP 和 PEP 羧化酶活性, 并采用 Duncan 新复极差法进行各生理指标与净光合速率(P_n)之间的相关性分析。【结果】“湘林 XLC15”叶片的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、光合色素含量及 RuBP 羧化酶活性均在磷浓度为 1.0 mmol/L 时达到最高, 而“华硕”则在磷浓度为 0.1 mmol/L 时已达到较高值, 且在磷浓度为 0.1~1.0 mmol/L 时变化幅度不大。相关性分析表明, 磷胁迫条件下油茶幼苗叶片的气孔导度、蒸腾速率、总叶绿素含量、类胡萝卜素含量、RuBP 羧化酶及 PEP 羧化酶活性与净光合速率呈正相关, 胞间 CO_2 浓度、叶绿素 a/b 与净光合速率呈负相关。【结论】与“湘林 XLC15”相比, 低磷胁迫条件下“华硕”的光合色素含量较高, RuBP 羧化酶活性较强, 从而有利于保持较高的净光合速率。

【关键词】 油茶; 磷胁迫; 净光合速率; RuBP 羧化酶活性; PEP 羧化酶活性

【中图分类号】 S794.401

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2013)07-0125-08

Effects of phosphorous stress on photosynthetic physiological indexes of *Camellia oleifera* Abel seedlings

ZHANG Xue-jie¹, TAN Xiao-feng¹, YUAN Jun², YE Si-cheng¹, LIU Mei-lan¹, LI Ze¹

(1 The Key Lab of Non-wood Forest Nurturing and Protection of the National Ministry of Education,
Central South University of Forestry and Technology, Changsha, Hunan 410004, China;

2 Forestry College, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: 【Objective】The study was performed to explore the variation of photosynthetic physiological parameters, photosynthetic pigment contents, the enzyme activities of RuBPCase and PEPCase and other indexes of *Camellia oleifera* Abel leaves under phosphorus stress conditions, to improve breeding and high-yield cultivation of low phosphorus tolerance *C. oleifera* varieties. 【Method】Using two superior varieties, *C. oleifera* ‘Xianglin XLC15’ and ‘Huashuo’ as experimental materials, sand culture pot experiment with different phosphorus levels were conducted and photosynthetic physiological parameters, photosynthetic pigment contents, the enzyme activities of RuBPCase and PEPCase and other indicators of *C. oleifera* were measured. Correlation analysis between the various physiological indicators and net photosynthetic rates (P_n) was conducted using the Duncan new multiple range method. 【Result】Net photosynthetic rates (P_n), stomatal conductance (G_s), transpiration rates (Tr), photosynthetic pigments contents and RuBP-

* [收稿日期] 2012-11-16

[基金项目] 国家“十一五”科技支撑计划项目(2009BADB1B02)

[作者简介] 张雪洁(1987—), 女, 河北石家庄人, 在读硕士, 主要从事经济林栽培育种研究。E-mail: zxxj@163.com

[通信作者] 谭晓风(1956—), 男, 湖南茶陵人, 教授, 博士, 主要从事经济林栽培育种与林业生物技术研究。

E-mail: tanxiaofengcn@126.com

Case activities of *C. oleifera* ‘Xianglin XLC15’ reached the highest values in 1.0 mmol/L phosphorus concentration, whereas those of ‘Huashuo’ reached higher values in 0.1 mmol/L phosphorus concentration and changed slightly in 0.1–1.0 mmol/L. Correlation analysis showed that stomatal conductance (G_s), transpiration rates (Tr), total chlorophyll contents, carotenoid contents, the enzyme activities of RuBPCase and PEPCase of two *C. oleifera* species were positively correlated to net photosynthetic rates under phosphorus stress, while intercellular CO_2 concentrations, chlorophyll a/b and net photosynthetic rates showed a negative correlation. 【Conclusion】 Compared with *C. oleifera* ‘Xianglin XLC15’, ‘Huashuo’ had higher contents of chlorophyll, stronger activity of RuBPCase, and higher net photosynthetic rate.

Key words: *Camellia oleifera* Abel; phosphorus stress; net photosynthetic rate; RuBPCase activity; PEPCase activity

油茶(*Camellia oleifera* Abel)是中国南方重要的木本食用油料树种,兼经济效益、社会效益和生态效益于一体,在保障国家粮油安全、促进山区农业经济发展中具有十分重要的地位^[1]。目前,全国油茶栽培面积达 366.6 万 hm^2 ,年产茶油 20 多万 t,而茶油平均产量仅 45~90 kg/hm^2 ^[2]。油茶林低产低效严重限制了油茶产业的发展,其中林地养分缺乏是油茶低产的主要原因之一。磷是植物生长和发育必需的营养元素,在光合作用、呼吸作用、核酸和膜脂合成等生理代谢过程中具有重要作用^[3]。然而油茶主要分布在酸性红壤地区^[4-5],该区域土壤中有效磷含量很低(仅为 1.75 mg/kg 左右)^[6],同时施用的磷肥大部分转化为难以利用的磷形式而不能被油茶利用^[7],因此缺磷成为油茶增产的主要限制因子之一。目前,关于植物适应磷胁迫机理的研究在小麦、水稻等重要农作物上取得了一系列成果^[8-10],而对油茶在磷胁迫条件下生理生化反应的报道甚少,仅对其根系活力^[11]、酸性磷酸酶活性^[12]等进行了少量研究。本试验研究了不同磷水平下,油茶良种“湘林 XLC15”和“华硕”叶片净光合速率、光合色素含量、RuBP 羧化酶及 PEP 羧化酶活性等光合生理指标的变化,拟探索油茶对磷胁迫的光合生理响应机制,为油茶耐低磷种质资源筛选、品种改良和丰产栽培提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

2011-09,选择苗高和长势基本一致的油茶良种“湘林 XLC15”和“华硕”2 年生芽苗砧嫁接苗,将幼苗根系用清水冲洗干净,再用蒸馏水清洗后,移植到装有细沙的塑料盆(直径 10 cm,高 20 cm)中进行遮雨露天培养。试验采用随机区组设计,3 次重复,每重复 5 株。

1.2 方法

采用 Hoagland+Arnon 营养液培育油茶苗木,设 0, 0.1, 1.0, 10 mmol/L 4 个磷浓度处理,其中 P 由 KH_2PO_4 提供,营养液中缺少的 K^+ 用等量的 KCl 替代,用 $Ca(OH)_2$ 或稀 H_2SO_4 将营养液 pH 值调整到 5.5 左右,在进行磷处理时,各处理的其他元素控制在同一正常供应水平。每 3 d 浇 1 次营养液,每次 200 mL/盆,炎热天气时傍晚浇蒸馏水 100 mL,以保证苗木的水分需求。

1.3 测定项目与方法

2012-03,选择植株新梢自上而下第 2~3 片完全展开的新叶挂牌,标记为试验材料。每隔 10 d,即分别于 04-28, 05-07 和 05-16 共测定 3 次相关指标,每次测定光合参数后,立即摘取叶片于 $-20\text{ }^{\circ}C$ 保存,统一进行光合色素含量及光合羧化酶活性的测定。

采用便携式光合作用系统(型号:LI-6400, LI-COR, 美国)测定叶片净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(Tr)和胞间 CO_2 浓度(C_i),测定时间为上午 09:00—11:00,每次测定 3 个叶片,重复 5 次。

采用王学奎^[13]的方法测定光合色素含量。以体积分数 80% 丙酮为空白,采用紫外/可见分光光度计(型号:UV-9100D, 莱伯泰科, 中国)在波长 663, 646 和 470 nm 下测定吸光度,并计算叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素及类胡萝卜素含量(mg/g)。

RuBP 羧化酶、PEP 羧化酶的提取与纯化参照马冬云等^[14]的方法。将叶片冰浴研磨离心后,取上清液置 $0\text{ }^{\circ}C$ 保存待测。RuBP 羧化酶活性的测定按 Racker^[15]分光光度法并略加修改,PEP 羧化酶活性的测定参照施教耐等^[16]的方法。将反应混合液摇匀,放入 $30\text{ }^{\circ}C$ 恒温水浴中保温 15 min,倒入比色皿,以蒸馏水为空白,于波长 340 nm 处测定吸光度,以

测定开始第 1 分钟内吸光度下降的绝对值计算酶活性,酶活性单位为“ $\mu\text{mol}/(\text{min} \cdot \text{g})$ ”。

1.4 统计分析

用 Microsoft Excel 2003 对试验数据进行描述性分析,采用 DPS v7.05 数据分析软件进行方差及相关性分析。

2 结果与分析

2.1 磷胁迫对油茶叶片 P_n 的影响

由图 1 可以看出,随着油茶叶龄的增加,其 P_n 值逐渐增大,而随着磷浓度的升高,油茶叶片 P_n 值呈现出先增后降的趋势。“湘林 XLC15”各叶龄不

同磷浓度处理间的差异均达显著水平,各叶龄 P_n 值均在 1.0 mmol/L 磷浓度达到最高,最高值分别为 $-1.05, 8.42$ 和 $10.29 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;而“华硕”各叶龄在 0.1 mmol/L 磷浓度时 P_n 即达到最高值,分别为 $-0.85, 6.00$ 和 $9.53 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。在 10 mmol/L 磷浓度时,2 个油茶品种 P_n 值均降低,说明油茶并不适宜较高磷浓度的生长条件。采用 Duncan 新复极差法进行品种间差异显著性检验,结果表明,1.0 和 10 mmol/L 磷浓度处理 2 个油茶品种间 P_n 差异不显著,但在 0 和 0.1 mmol/L 磷浓度处理下 2 个油茶品种间 P_n 差异达到显著水平,说明 2 个油茶品种对低磷胁迫的适应机制存在差异。

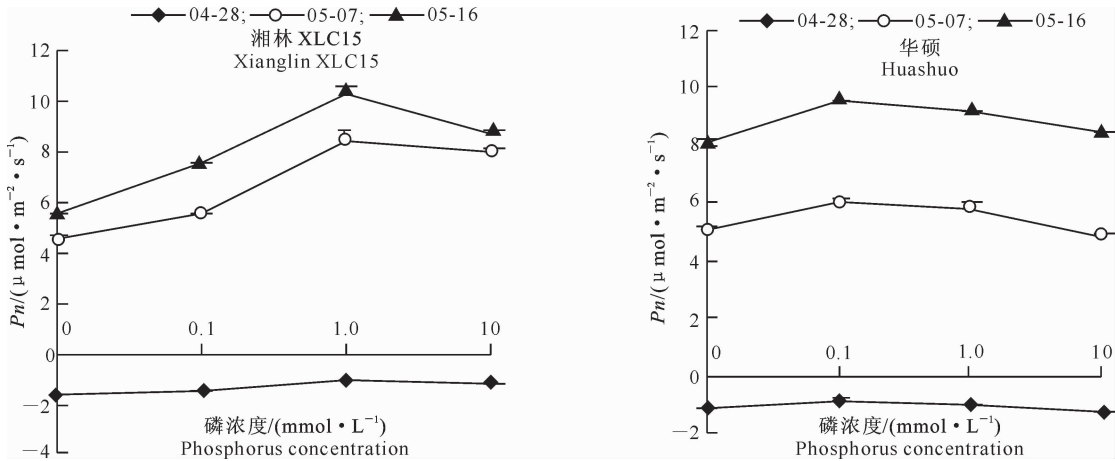


图 1 磷胁迫对油茶叶片净光合速率的影响动态

Fig. 1 Dynamic impacts on P_n of *C. oleifera* leaf under of phosphorus stress

2.2 磷胁迫对油茶叶片 G_s 、 C_i 和 Tr 的影响

由图 2 可以看出,随着磷浓度的增加,油茶叶片 G_s 表现出先增后降的变化趋势;随着叶龄的增加,“湘林 XLC15”的 G_s 表现为低-高-低的变化趋势,“华硕”则表现为逐渐升高的趋势。“湘林 XLC15”

的 G_s 峰值出现在 1.0 mmol/L 磷浓度处理时,为 $0.1667 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;“华硕”的 G_s 较高值出现在 0.1 和 1.0 mmol/L 磷浓度处理时,且两处理间差异不大,但在 10 mmol/L 磷浓度处理时明显下降,最大降幅达 74.2%。

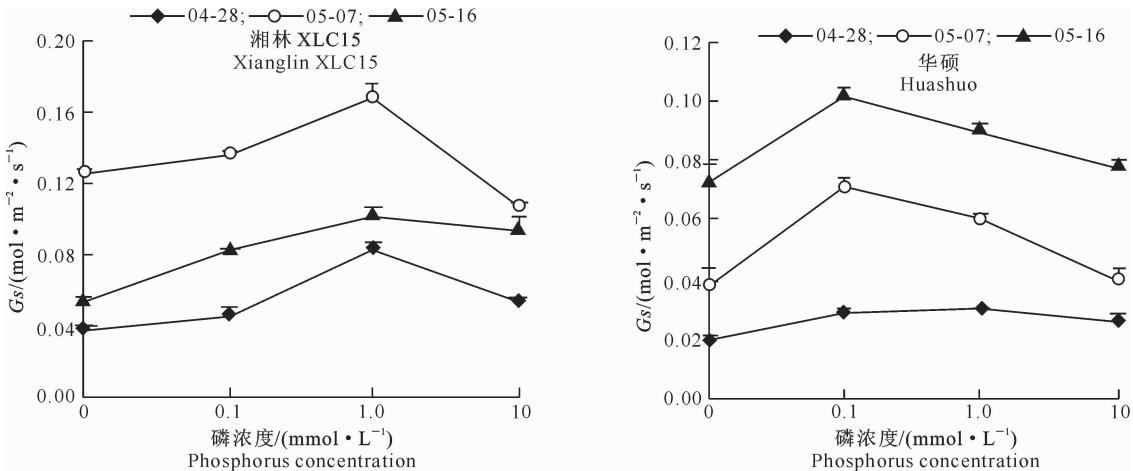


图 2 磷胁迫对油茶叶片气孔导度的影响动态

Fig. 2 Dynamic impacts on G_s of *C. oleifera* leaf under phosphorus stress

图 3 显示,不同磷浓度处理下 2 个油茶品种各叶龄 C_i 变化不大,品种间与处理间均无显著性差异,但随着叶片的发育成熟, C_i 值表现为下降趋势。

由图 4 可知,低磷胁迫降低了油茶的 Tr ,0 和 0.1 mmol/L 磷浓度处理下,“湘林 XLC15”的 Tr 明

显低于 1.0 mmol/L 磷浓度处理,最大降幅分别为 71.59%和 46.98%,随着磷胁迫程度的加剧, Tr 降低越明显。“华硕”的 Tr 在 0,0.1 和 1.0 mmol/L 磷浓度处理间差异不大,在 10 mmol/L 磷浓度处理下 Tr 明显降低,最高降幅达 54.98%。

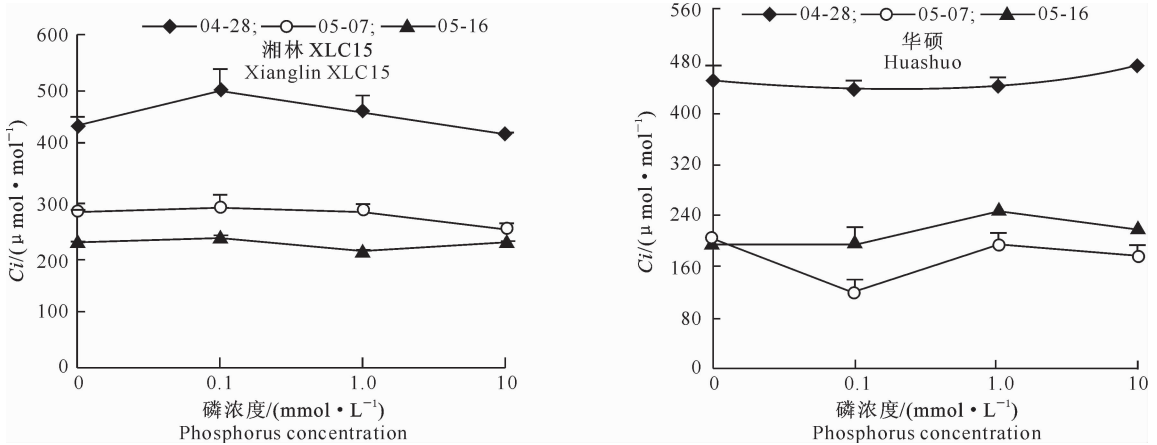


图 3 磷胁迫对油茶叶片胞间 CO_2 浓度的影响动态
Fig. 3 Dynamic impacts on C_i of *C. oleifera* leaf under phosphorus stress

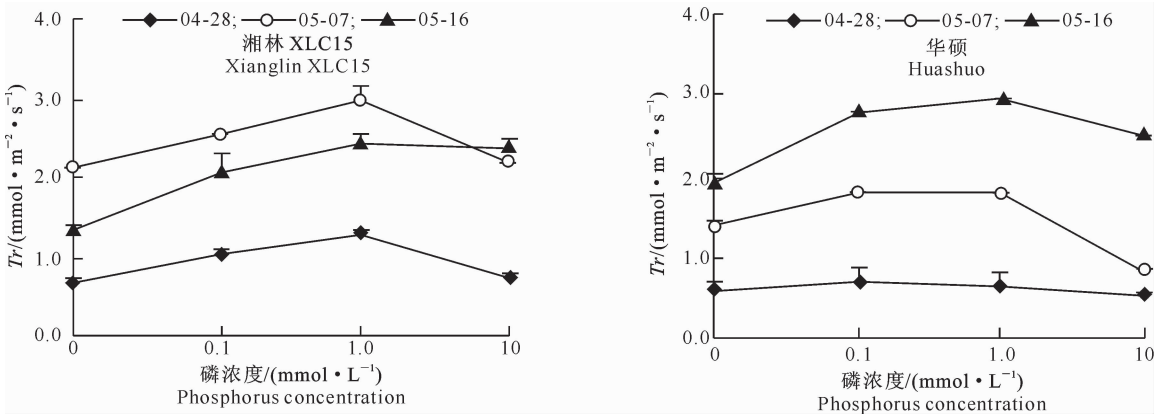


图 4 磷胁迫对油茶叶片蒸腾速率的影响动态
Fig. 4 Dynamic impacts on Tr of *C. oleifera* leaf under phosphorus stress

2.3 磷胁迫对油茶叶片光合色素含量的影响

由表 1 可知,高磷或低磷胁迫抑制了油茶叶片光合色素的合成,且低磷处理的影响大于高磷处理,其中“湘林 XLC15”油茶幼苗叶片的总叶绿素、类胡萝卜素含量均在 1.0 mmol/L 磷浓度处理时达到较大值,而在 0 mmol/L 磷浓度下含量偏低;“华硕”叶片的总叶绿素含量、类胡萝卜素含量在 0.1 mmol/L 磷浓度处理已达到较高值,与 1.0 mmol/L 磷浓度处理的含量变化相差甚微,说明在 0.1~1.0 mmol/L 磷浓度胁迫下,油茶可能进入了一个适应调整期。

2.4 磷胁迫对油茶叶片 RuBP 和 PEP 羧化酶活性的影响

由表 2 可以看出,随着磷浓度的升高,2 个油茶

品种叶片 RuBP 羧化酶的活性均表现出先升后降的变化趋势,与 P_n 的变化趋势基本一致。在 0 和 0.1 mmol/L 磷浓度处理下,“湘林 XLC15”的 RuBP 羧化酶活性显著低于 1.0 mmol/L 磷浓度处理,其活性降幅分别为 17.69%~33.85%和 12.11%~15.91%,在 10 mmol/L 磷浓度处理下 RuBP 羧化酶活性亦极显著低于 1.0 mmol/L 磷浓度处理;方差分析表明,0,0.1 和 10 mmol/L 磷浓度处理与 1.0 mmol/L 磷浓度处理间 RuBP 羧化酶活性差异达显著水平。“华硕”的 RuBP 羧化酶活性在 0.1 与 1.0 mmol/L 磷浓度处理间无显著差异,0 和 10 mmol/L 磷浓度处理则会明显降低 RuBP 羧化酶活性,与 1.0 mmol/L 磷浓度处理相比,降幅分别为 19.22%~

30.75%和 35.92%~41.34%,表明“华硕”对高磷胁迫更为敏感。

由表 2 还可知,低磷胁迫会促使油茶幼苗叶片 PEP 羧化酶活性增强。与 1.0 mmol/L 磷浓度处理相比,0 和 0.1 mmol/L 磷浓度处理下“湘林 XLC15”的 PEP 羧化酶活性显著增强,最大增幅分别达 218.69%和 84.77%,随磷胁迫程度的加重,

PEP 羧化酶活性增强趋势愈明显,且各处理间差异达到显著性水平;0.1 和 1.0 mmol/L 磷浓度处理下,“华硕”的 PEP 羧化酶活性变化不大,而在 0 和 10 mmol/L 磷浓度处理下 PEP 羧化酶的活性明显增强,与 0.1 和 1.0 mmol/L 磷浓度处理相比,增幅分别为 31.01%~56.45%和 4.57%~14.12%。

表 1 磷胁迫对油茶叶片光合色素含量的影响

Table 1 Effects of phosphorus stress on photosynthetic pigment contents of <i>C. oleifera</i> leaves										
品种 Variety	磷浓度/ (mmol·L ⁻¹) Phosphorus concentration	总叶绿素含量/(mg·g ⁻¹) Total chlorophyll content			叶绿素 a/b Chlorophyll a/b			类胡萝卜素含量/(mg·g ⁻¹) Carotenoids content		
		04-28	05-07	05-16	04-28	05-07	05-16	04-28	05-07	05-16
湘林 XLC15 Xianglin XLC15	0	0.59 d	0.57 d	1.05 c	4.08 a	3.41 a	3.76 a	0.14 c	0.10 d	0.21 b
	0.1	0.89 b	0.73 c	1.18 b	3.72 b	2.39 d	3.48 c	0.17 a	0.12 c	0.22 a
	1.0	0.95 a	1.19 a	1.19 a	3.03 d	2.94 c	3.33 d	0.16 b	0.21 a	0.21 b
	10	0.62 c	0.90 b	0.95 d	3.62 c	3.34 b	3.53 b	0.14 c	0.17 b	0.17 c
华硕 Huashuo	0	0.81 c	0.91 c	1.01 d	3.15 b	2.93 c	3.33 a	0.19 b	0.18 bc	0.19 b
	0.1	0.89 b	0.94 b	1.50 a	3.39 a	2.57 d	2.47 d	0.18 c	0.17 c	0.22 a
	1.0	0.94 a	1.22 a	1.31 b	3.12 b	3.11 b	2.76 b	0.21 a	0.19 b	0.20 ab
	10	0.76 d	0.89 c	1.13 c	3.14 b	3.38 a	2.70 c	0.17 d	0.25 a	0.20 ab

注:同一品种同列数据后标不同大写字母表示差异极显著($P<0.01$),不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。表 2 同。
Note: Different uppercase letters mean significant difference ($P<0.01$) and different lowercase letters indicate significant difference ($P<0.05$). The same for table 2.

表 2 磷胁迫对油茶叶片 RuBP 和 PEP 羧化酶活性的影响

Table 2 Variations of RuBP and PEP activities under phosphorus stress							
品种 Variety	磷浓度/ (mmol·L ⁻¹) Phosphorus concentration	RuBP 羧化酶活性/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$) RuBPCase activity			PEP 羧化酶活性/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$) PEPCase activity		
		04-28	05-07	05-16	04-28	05-07	05-16
湘林 XLC15 Xianglin XLC15	0	53.81 Bc	86.29 Cc	98.80 Bb	34.47 Aa	52.52 Aa	65.06 Aa
	0.1	71.49 Ab	97.97 ABb	105.42 ABb	19.39 Cc	28.92 Bb	38.34 Bb
	1.0	81.34 Aa	116.51 Aa	120.04 Aa	14.64 Dd	16.48 Cc	20.75 Cc
	10	57.88 Bc	95.55 BCb	95.67 Bb	30.35 Bb	27.22 Bb	44.67 Bb
华硕 Huashuo	0	72.91 Bb	97.89 Bb	103.37 BCb	28.74 Aa	44.53 Aa	71.10 Aa
	0.1	97.48 Aa	113.88 ABa	123.31 ABa	18.39 Bb	36.75 Bb	55.29 Cc
	1.0	105.28 Aa	121.18 Aa	135.34 Aa	18.76 Bb	33.99 Bb	53.60 Cc
	10	61.76 Bb	77.65 Cc	86.30 Cc	19.21 Bb	38.42 Bb	62.41 Bb

2.5 不同磷浓度胁迫下油茶各光合生理生化指标与 P_n 的相关性

由表 3 可以看出,不同磷浓度胁迫下,2 个油茶品种除 C_i 及叶绿素 a/b 值外,其余各光合生理生化指标与 P_n 均表现为正相关关系。2 个油茶良种在不同磷浓度胁迫下相关性的显著水平有所差异:“湘林 XLC15”的 G_s 与 P_n 在 10 mmol/L 磷浓度下相关性达到显著水平,“华硕”则是在 0.1 和 1.0 mmol/L 磷浓度处理达到显著或极显著水平;“湘林 XLC15”的 Tr 与 P_n 呈正相关,仅在 10 mmol/L 磷浓度处理时相关性达到极显著水平,“华硕” Tr 与 P_n 呈正相关,且随着磷浓度的升高,相关性逐渐减弱。0 和 0.1 mmol/L 磷浓度处理时,“湘林

XLC15”的总叶绿素含量、类胡萝卜素含量与 P_n 的相关性不显著,而 1.0 和 10 mmol/L 磷浓度处理下,“湘林 XLC15”的总叶绿素含量、类胡萝卜素含量与 P_n 呈显著或极显著正相关;“华硕”除 0.1 mmol/L 磷浓度外,其余磷浓度处理的总叶绿素含量与 P_n 均呈显著或极显著正相关,而类胡萝卜素含量仅 10 mmol/L 磷浓度处理与 P_n 呈极显著正相关,其余磷浓度下与 P_n 相关性不大。不同磷浓度下,2 个油茶良种的 RuBP 羧化酶活性与 P_n 的相关性显著或极显著,而 1.0 和 10 mmol/L 磷浓度下,“湘林 XLC15”的 PEP 羧化酶活性与 P_n 的相关性不显著。

表 3 不同磷浓度胁迫下油茶各光合生理生化指标与 P_n 的相关性分析
Table 3 Correlation analysis of photosynthetic physiological and biochemical indicators and P_n

品种 Variety	磷浓度/ (mmol·L ⁻¹) Phosphorus concentration	G_s	C_i	T_r	叶绿素 a/b Chlorophyll a/b	总叶绿素 含量 Total chlorophyll content	类胡萝卜素 含量 Carotenoids content	RuBP 羧化 酶活性 RuBPCase activity	PEP 羧化 酶活性 PEPCase activity
湘林 XLC15 Xianglin XLC15	0	0.55	-0.98 *	0.75	-0.94	0.57	0.32	0.99 *	0.96 *
	0.1	0.67	-1.00 * *	0.86	-0.45	0.38	0.23	1.00 * *	0.96 *
	1.0	0.55	-0.99 * *	0.89	0.44	0.99 *	0.99 *	1.00 * *	0.83
	10	0.96 *	-1.00 * *	1.00 * *	-0.89	1.00 * *	1.00 * *	1.00 * *	0.41
华硕 Huashuo	0	0.92	-0.96 *	0.99 * *	0.26	0.97 *	0.14	1.00 * *	0.94
	0.1	0.99 * *	-0.84	0.98 *	-0.97 *	0.80	0.64	0.99 * *	0.98 *
	1.0	0.98 *	-0.86	0.97 *	-0.76	1.00 * *	0.15	1.00 * *	0.96 *
	10	0.91	-0.87	0.86	-0.51	0.96 *	1.00 * *	0.95 *	0.98 *

注: * 表示显著相关($P<0.05$), * * 表示极显著相关($P<0.01$)。
Note: * indicates significant at $P=0.05$ level, * * indicates extremely significant at $P=0.01$ level.

3 结论与讨论

磷是植物生长发育的必需元素,作为底物或调节物直接参与光合作用的各个环节,包括光能吸收、卡尔文循环、同化产物的运输以及对一些关键酶的活性起调节作用等^[17-18]。磷胁迫通过降低叶片气孔导度、PSⅡ实际光化学量子效率及光合电子传递速率^[19]、Rubisco 活性及 RuBP 的再生速率^[20]、抑制光合色素及可溶性蛋白的合成^[21]等降低植物的净光合速率。在本研究中,与 1.0 mmol/L 磷浓度处理相比,0,0.1 mmol/L 磷浓度处理油茶幼苗叶片净光合速率下降,说明低磷胁迫抑制了油茶叶片的光合作用,这与前人在玉米^[22]、籼稻^[23]、山核桃^[24]、豇豆^[25]上的研究结果一致。

RuBP 羧化酶是 C3 植物光合作用的关键酶,而 Pi(无机磷)是 RuBP 羧化酶羧化的先决条件^[26], RuBP 羧化酶的数量和活性强弱直接影响着光合作用暗反应中 CO₂ 的同化速率,同时 Pi 也是 RuBP 羧化酶的一个竞争性抑制剂^[27],磷过量也会因抑制 RuBP 羧化酶活性而引起光合作用降低。本研究中亦观测到低磷和高磷条件下油茶幼苗叶片 RuBP 羧化酶活性降低,这与潘晓华等^[28]、李宾兴等^[29]的研究结果一致。PEP 羧化酶是植物体中广泛存在的一种细胞质酶,在植物细胞中参与植物的光合碳同化等重要代谢途径。本研究中,与 1.0 mmol/L 磷浓度处理相比,低磷(0,0.1 mmol/L)胁迫条件下油茶 PEP 羧化酶活性增强,这是由于在低磷胁迫条件下,PEP 羧化酶和 PEP-APase 协同作用,可以绕过三磷酸循环 TCA(三磷酸循环)环中依赖 Pi 和 ADP(二磷酸腺苷)的丙酮酸激酶,从而在 Pi 饥饿条件下继续呼吸代谢以固定 CO₂^[30-31],是油茶通过自身调

节适应低磷环境的表现。

本研究结果表明,“湘林 XLC15”叶片的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、光合色素含量及 RuBP 羧化酶活性均在磷浓度为 1.0 mmol/L 时达到最高,而“华硕”则在磷浓度为 0.1 mmol/L 时已达到较高值,且在磷浓度为 0.1~1.0 mmol/L 时变化幅度不大,表明油茶“华硕”更适宜于在低磷环境下生长,这可能是由于“华硕”高亲和力磷转运蛋白 K_m 值高于“湘林 XLC15”。在 10 mmol/L 磷浓度下,2 个油茶品种的净光合速率、光合色素含量等指标降低,说明油茶并不适宜较高磷浓度的生长条件。

[参考文献]

[1] 庄瑞林. 中国油茶 [M]. 北京:中国林业出版社,1988.
Zhuang R L. Chinese camellia [M]. Beijing: China Forestry Publishing House,1988. (in Chinese)

[2] 国家林业局. 全国油茶产业发展规划(2009—2012) [M]. 北京:中国林业出版社,2009:2-9.
State Forestry Administration. National camellia industry development plan (2009—2012) [M]. Beijing: China Forestry Publishing House,2009:2-9. (in Chinese)

[3] Buchanan B B, Gruissen W, Jones R L. Biochemistry and molecular biology of plants [R]. Beijing: The American Society of Plant Physiologist,2000:2-50,260-310,568-628.

[4] 何 方,毛献策,王义强,等. 中国油茶林地土坡类型的研究 [J]. 经济林研究,1993,11(2):1-14.
He F, Mao X C, Wang Y Q, et al. The research of Chinese camellia Woodland slopes type [J]. Non-Wood Forest Research, 1993,11(2):1-14. (in Chinese)

[5] 何 方,何 柏. 油茶栽培分布与立地分类的研究 [J]. 林业科学,2002,38(5):64-72.
He F, He B. Study on camellia cultivation distribution and site classification [J]. Science Silvae Sinicae,2002,38(5):64-72. (in Chinese)

[6] 陈 娜,王秀荣,严小龙,等. 酸性土壤上缺磷和铝毒对大豆生

- 长的交互作用[J].应用生态学报,2010,21(5):1301-1307.
- Chen N, Wang X R, Yan X L, et al. Interactive effects of phosphorus deficiency and aluminum toxicity in acidic soils on soybean growth[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(5):1301-1307. (in Chinese)
- [7] 袁 军, 谭晓风, 袁德义, 等. 缺素对普通油茶幼苗根系形态及活力的影响[J]. 湖北农业科学, 2010, 49(2):314-316.
- Yuan J, Tan X F, Yuan D Y, et al. The impact of nutrient deficiency on root morphology and vitality of ordinary camellia seedlings[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2010, 49(2):314-316. (in Chinese)
- [8] 李继云, 孙建华, 刘全友, 等. 不同小麦品种根系生理特性、磷的吸收及利用效率对产量影响的研究[J]. 西北植物学报, 2000, 20(4):503-510.
- Li J Y, Sun J H, Liu Q Y, et al. The impact of root physiological characteristics and phosphorus absorption and utilization efficiency of different wheat varieties on the yield[J]. Journal of Northwest Plant, 2000, 20(4):503-510. (in Chinese)
- [9] 郭程瑾, 李宾兴, 王 斌, 等. 不同磷效率小麦品种的光合特性及其生理机制[J]. 作物学报, 2006, 36(8):1209-1217.
- Guo C J, Li B X, Wang B, et al. Photosynthetic characteristics and relative physiological mechanism of wheat cultivars with different phosphorus efficiencies[J]. Acta Agron Sin, 2006, 36(8):1209-1217. (in Chinese)
- [10] 韩胜芳, 邓若磊, 徐海荣, 等. 缺磷条件下不同磷效率水稻品种光合特性和细胞保护酶活性[J]. 应用生态学报, 2007, 18(11):2462-2467.
- Han S F, Deng R L, Xu H R, et al. Photosynthetic characteristics and cell protective enzyme activity of different phosphorus efficiency rice varieties under phosphorus deficiency conditions[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(11):2462-2467. (in Chinese)
- [11] 谭晓风, 袁 军, 李 泽, 等. 磷对普通油茶根系形态和活力及物质分配的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(12):108-110.
- Tan X F, Yuan J, Li Z, et al. The impact of phosphorus on the root morphology and vitality and material distribution of ordinary camellia[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2011, 31(12):108-110. (in Chinese)
- [12] 陈隆升, 陈永忠, 王 瑞, 等. 磷胁迫对不同油茶优良无性系Apase活性的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27(31):58-63.
- Chen L S, Chen Y Z, Wang R, et al. The impact of phosphorus stress on the Apase activity of different camellia excellent clones[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(31):58-63. (in Chinese)
- [13] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 2版. 北京:高等教育出版社, 2005:134-136.
- Wang X K. Experimental principles and techniques of plant physiology and biochemistry[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2005:134-136. (in Chinese)
- [14] 马冬云, 郭天财, 宋 晓, 等. 施氮对冬小麦旗叶RuBP羧化酶活性及叶绿素荧光参数的影响[J]. 西北植物学报, 2010, 30(11):2197-2202.
- Ma D Y, Guo T C, Song X, et al. Nitrogen fertilization on RuBP carboxylase activity and chlorophyll fluorescence parameters of winter wheat flag leaf[J]. Journal of Northwest Plant, 2010, 30(11):2197-2202. (in Chinese)
- [15] Racker E. Ribulose phosphate carboxylase from spinach leaves[M]//Colowick SPK, Aplan NO. Methods in enzymology. New York: Academic Press, 1962:266-278.
- [16] 施教耐, 吴敏贤, 查静娟. 植物磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶的研究: I. PEP羧化酶同功酶的分离和变构特性的比较[J]. 植物生理学报, 1979, 5(3):225-235.
- Shi J N, Wu M X, Zha J J. Plant phosphoenolpyruvate carboxylase: I. Comparison of PEP carboxylase isoenzyme separation and allosteric properties[J]. Journal of Plant Physiology, 1979, 5(3):225-235. (in Chinese)
- [17] 潘晓华, 石庆华, 郭进耀, 等. 无机磷对植物叶片光合作用的影响及其机理的研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 1997, 3(3):201-208.
- Pan X H, Shi Q H, Guo J Y, et al. Research progress of the impact of inorganic phosphorus on plant leaf photosynthesis and its mechanism[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1997, 3(3):201-208. (in Chinese)
- [18] Terry N, Tao I M. Nutrient and photosynthesis: Iron and phosphorus as carboxylase studies[M]//Porter J R, Lawlor D W. Plant growth: Interaction with nutrition and environment. England: Cambridge University Press, 1991:54-59.
- [19] 朱隆静, 喻景权. 不同供磷水平对番茄生长和光合作用的影响[J]. 浙江农业学报, 2005, 17(3):120-122.
- Zhu L J, Yu J Q. The impact of different phosphate levels on tomato growth and photosynthesis[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2005, 17(3):120-122. (in Chinese)
- [20] 郭延平, 陈屏昭, 张良诚, 等. 不同供磷水平对温州蜜柑叶片光合作用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2):186-191.
- Guo Y P, Chen P Z, Zhang L C, et al. The impact of different phosphate levels on satsuma mandarin leaf photosynthesis[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2002, 8(2):186-191. (in Chinese)
- [21] 夏 钦, 何丙辉, 刘玉民, 等. 磷胁迫对粉带扦插苗生长和生理特征的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(3):228-231.
- Xia Q, He B H, Liu Y M, et al. Phosphorus stress on growth and physiological characteristics of powder with cuttings[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(3):228-231. (in Chinese)
- [22] 张可炜, 王贤丽, 李坤朋, 等. 低磷胁迫对耐低磷玉米自交系幼苗光合特性的影响[J]. 山东大学学报:理学版, 2007, 42(3):89-94.
- Zhang K W, Wang X L, Li K P, et al. The impact of low phosphorus stress on the photosynthetic characteristics of low phosphorous-tolerant maize inbred line seedlings[J]. Journal of Shandong University, 2007, 42(3):89-94. (in Chinese)
- [23] 曹黎明, 潘晓华. 水稻耐低磷机理的初步研究[J]. 作物学报,

2002,28(2):260-264.

Cao L M,Pan X H. Study on the mechanism of rice tolerance to low phosphorus [J]. Acta Agron Sin, 2002, 28(2): 260-264. (in Chinese)

[24] 李永夫,金松恒,叶正钱,等. 低磷胁迫对山核桃幼苗根系形态和生理特征的影响 [J]. 浙江林学院学报, 2010, 27(2): 239-245.

Li Y F,Jin S H,Ye Z Q,et al. The impact of low phosphorus stress on root morphological and physiological characteristics of pecan seedling [J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2010,27(2):239-245. (in Chinese)

[25] 曹翠玲,毛圆辉,曹朋涛,等. 低磷胁迫对豇豆幼苗叶片光合特性及根系生理特性的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(6): 1373-1378.

Cao C L,Mao Y H,Cao P T,et al. The impact of low phosphorus stress on the photosynthetic characteristics and root physiological characteristics of cowpea seedlings [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(6): 1373-1378. (in Chinese)

[26] Heldt H W,Chon C J,Maronde D,et al. The role of orthophosphate and other factors in the regulation of starch formation in leaves and isolated chloroplasts [J]. Plant Physiology, 1977,59:1145-1155.

[27] Edwards G, Walker D. C3, C4: Mechanisms and cellular and environmental regulation of photosynthesis [M]. London: Oxford, 1983: 156-160.

[28] 潘晓华,刘水英,李 锋,等. 低磷胁迫对不同水稻品种幼苗光合作用的影响 [J]. 作物学报, 2003, 29(5): 770-774.

Pan X H,Liu S Y,Li F,et al. Low phosphorus stress on photosynthesis of different rice varieties [J]. Acta Agron Sin, 2003,29(5):770-774. (in Chinese)

[29] 李宾兴,肖 凯,李雁鸣. 低磷胁迫条件下小麦光合特性的基因型差异 [J]. 河北农业大学学报, 2002, 25(1): 5-9.

Li B X,Xiao K,Li Y M. Genotypic differences in photosynthetic characteristics of wheat under the conditions of phosphorus stress [J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2002, 25(1): 5-9. (in Chinese)

[30] Johnson J F,Vance C P,Allan D L. Phosphorus deficiency in *Lupinus albus*: Altered lateral root development and enhanced expression of phosphoenolpyruvate carboxylase [J]. Plant Physiol, 1996, 112: 31-41.

[31] Pilbeam D J,Cakmak I,Marschner H,et al. Effect of withdrawal of phosphorus on nitrate assimilation and PEP carboxylase activity in tomato [J]. Plant Soil, 1993, 154: 111-117.

(上接第 124 页)

[15] 张丽丛,雷亚芳,常宇婷. 栓皮栎软木主要化学成分的分析 [J]. 西北林学院学报, 2009, 24(2): 163-165.

Zhang L C,Lei Y F,Chang Y T. Contents of the main chemical components of cork from *Quercus variabilis* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(2): 163-165. (in Chinese)

[16] 魏新莉,向仕龙,周蔚红. 3 种栓皮化学成分对其性能的影响 [J]. 木材工业, 2007, 21(6): 17-18.

Wei X L,Xiang S L,Zhou W H. Chemical composition and its effect on properties of cork from three geographical areas [J]. China Wood Industry, 2007, 21(6): 17-18. (in Chinese)

[17] 刘艳贞,雷亚芳,周 伟,等. 欧洲栓皮栎软木构造与物理性质研究进展 [J]. 西北林学院学报, 2007, 22(6): 144-147.

Liu Y Z,Lei Y F,Zhou W,et al. Research and development of the structure and physical properties of cork from *Quercus suber* L. [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2007, 22(6): 144-147. (in Chinese)

[18] 雷亚芳,刘艳贞,周 伟,等. 栓皮栎软木的微观构造 [J]. 林业科学, 2009, 45(1): 167-170.

Lei Y F,Liu Y Z,Zhou W,et al. The microstructure of cork from *Quercus variabilis* [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2009, 45(1): 167-170. (in Chinese)