

# 温州地区主栽蓝莓品种叶片饱和光强的研究

康华靖, 余宏傲\*, 叶朝军, 曾光辉, 谢拾冰, 王法格

(温州市农业科学研究院, 浙江 温州 325006)

**摘要:** 为探讨温州地区蓝莓(*Vaccinium darrowi*×*V. corymbosum*)叶片的光饱和点, 对 2 个蓝莓品种(‘奥尼尔’和‘薄雾’)叶片的光合速率和电子传递速率的光响应曲线进行拟合。结果表明, 直角双曲线修正模型能较好地拟合光合速率和电子传递速率对光的响应曲线, 给出的光饱和点值与实际观测值接近; 而直角双曲线模型、非直角双曲线模型及指数方程模型拟合结果远低于实际观测值。在全光和遮荫下, ‘奥尼尔’叶片的光饱和点分别为 656.32~806.17 和 605.83~756.22  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ; 而‘薄雾’叶片的分别为 1 034.63~1 641.25 和 933.09~988.18  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ , 说明这 2 个品种均为半阳生植物。

**关键词:** 蓝莓; 光合作用; 光强; 光响应模型

doi: 10.11926/jtsb.3845

## Studies on Light Saturation Point of Main Blueberry Cultivars in Wenzhou

KANG Hua-jing, YU Hong-ao\*, YE Chao-jun, ZENG Guang-hui, XIE Shi-bing, WANG Fa-ge

(Wenzhou Academy of Agricultural Sciences, Wenzhou 325006, Zhejiang, China)

**Abstract:** In order to explore the light saturation point of blueberry (*Vaccinium darrowi*×*V. corymbosum*) leaves in Wenzhou area, the light-response curves of electron transport rate and photosynthesis of blueberry cultivars ‘O’neal’ and ‘Misty’ under shading and full sunlight were fitted by four models, such as modified rectangular hyperbolic model (model I), rectangular hyperbola model (model II), nonrectangular hyperbolic model (model III) and exponential equation model (model IV). The results showed that the light response curves could be fitted well by the model I. The fitted values of light saturation point by model I were close to measure values, however, those fitted by model II, model III and model IV were lower than measure values. The light saturation points of ‘O’neal’ were 656.32–806.17 (full light) and 605.83–756.22  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  (shading); and those of ‘Misty’ were 1 034.63–1 641.25 (full light) and 933.09–988.18  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  (shading). In conclusion, the two blueberry cultivars were semi-heliophyte.

**Key words:** Blueberry; Photosynthesis; Light saturation point; Light-response model

蓝莓(*Vaccinium darrowi*×*V. corymbosum*)属杜鹃花科(Ericaceae)越橘属植物, 原产于北美、苏格兰和俄罗斯, 是世界上少见的真正蓝色浆果。蓝莓鲜果含有丰富的蛋白质、维生素、SOD、微量元素、花青素、尼克酸和黄酮类物质等, 具有强心、抗癌、

预防高血压、疏通毛细血管和缓解视觉疲劳等功用, 是上等保健食品<sup>[1]</sup>。由于具有极高的营养价值, 已被国际粮农组织列为人类五大健康食品之一, 并被誉为“水果皇后”、“美瞳之果”等<sup>[2]</sup>。自 20 世纪 90 年代以来, 对蓝莓在国内外的的发展趋势、品种选育、

收稿日期: 2017-11-02

接受日期: 2018-01-08

基金项目: 中央财政林业科技推广示范资金项目(2016TS13); 浙江省特色经济植物生物技术重点实验室开放基金项目(2016kfj010); 温州市重点科技创新团队项目(C20150008)资助

This work was supported by the Project for Central Financial Forestry Science and Technology Promotion Demonstration (Grant No. 2016TS13), the Open Fund Project for Key Laboratory of Special Economic Plant Biotechnology Research in Zhejiang Province (Grant No. 2016kfj010), and the Project for Key Scientific and Technological Innovation Team in Wenzhou (Grant No. C20150008).

作者简介: 康华靖, 男, 博士, 副教授, 主要从事植物生理生态学研究。E-mail: kanghuajing@126.com

\* 通信作者 Corresponding author. E-mail: 54853591@qq.com

栽培地土壤改良<sup>[3-6]</sup>以及光合生理<sup>[7-12]</sup>等方面开展了研究,推动了蓝莓产业在国内的发展。然而整体来看,我国蓝莓基础研究薄弱,难以为其在全国的引种栽培提供技术支撑。蓝莓叶片的饱和光强范围目前尚不明确,光饱和点是植物光合能力的重要体现,反映了光合机构暗反应过程对同化力的最大需求量,能够反映不同品种对强光的适应能力<sup>[13-14]</sup>。另外,了解光饱和点对于深入探讨植物最大羧化速率等光合参数,以及指导植物的引种栽培等都具有重要意义。因此,了解和确定光饱和点是深入探讨植物光合生理过程及引种栽培的基础。

确定饱和光强有 2 种方法:一是根据光响应曲线的走势进行估计;二是运用光响应模型对光响应曲线进行拟合而得到。根据光响应曲线的走势只能粗略估算光饱和点,精确到百位数,而运用光响应模型拟合估算光饱和点则可精确到个位数,并同时给出其他相关光合参数等<sup>[15]</sup>。植物光合作用光响应曲线模拟已广泛应用在植物生理研究中<sup>[16-17]</sup>,目前,光合作用光响应模型主要有直角双曲线模型、非直角双曲线模型、指数模型和直角双曲线修正模型等。由于各模型的推导机理不同,各种模型存在一定的优缺点<sup>[16,18]</sup>,导致模型的拟合效果及其所估算的相关光合参数有所差异。刘兆玲等<sup>[7]</sup>运用指数方程拟合了杭州临安地区‘园蓝’、‘夏普蓝’和‘奥尼尔’3 个蓝莓品种叶片的光饱和点,分别为 288.76、332.27 和 382.00  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ;宋雷等<sup>[10]</sup>运用非直角双曲线估算不同土壤 pH 对南高丛蓝莓‘薄雾’光合特性的影响,认为其光饱和点为 158.68~307.84  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ;而贾晓鹰等<sup>[8]</sup>运用非直角双曲线估算石河子地区引种栽培的 3 个北高灌蓝莓品种光饱和点只有 7.41~15.88  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。孙山等<sup>[9]</sup>、李根柱等<sup>[11]</sup>认为蓝莓的光饱和点为 600~800  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ;吴思政等<sup>[12]</sup>运用直角双曲线修正模型估算的湖南长沙地区‘美登’、‘蓝丰’、‘库帕’和‘梯芙蓝’4 个蓝莓品种光饱和点相对较高,分别为 994.45、919.73、706.43 和 747.06  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。可见,蓝莓的饱和光强普遍较低,且差异极大,这对实际生产应用较为不利。

为此,本文选用温州地区主栽的 2 个高丛蓝莓品种(‘奥尼尔’和‘薄雾’),测量叶片的光合速率和电子传递速率对光的响应曲线,分别用 4 种光响应模型对光响应曲线进行拟合,以期准确估算蓝莓叶片光饱和点,从而为蓝莓的引种栽培提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料和试验设计

供试蓝莓(*Vaccinium darrowi* × *V. corymbosum*)选用温州主栽品种‘奥尼尔’(‘O’neal’)和‘薄雾’(‘Misty’)。蓝莓苗均为 3 年生组培苗,统一种植在口径为 12 cm,高度 15 cm 的营养钵中。大棚外露天种植为全光处理。由于蓝莓叶片的光饱和点较低<sup>[7-12]</sup>,本试验设计了遮荫处理,2016 年 3 月 25 日,选取长势一致的植株置于温州市农业科学研究院智能大棚,夏季晴天中午大棚中的光强为全光强的 40%左右。每个处理 3 个重复(容器苗呈方形摆放),每个重复 15 株。常规管理。2016 年 6 月 21-24 日树高 50 cm 左右,长势旺盛,选取植株中上部无损伤的成熟叶片进行测量。每株植株选取 1 片叶子,共 5~7 株。

### 1.2 数据测量

利用便携式光合仪(LI-6400-40, LI-COR INC., USA)于晴天的 9:00-16:00 进行测量,先进行开机检查及预热,叶片在自然光下诱导 1.5~2 h,设定测量叶室( $T_{\text{block}}$ )温度为 39°C,流速为 500  $\mu\text{mol s}^{-1}$ ,空气相对湿度控制在 50%~80%。 $\text{CO}_2$ 浓度设置为 400  $\mu\text{mol mol}^{-1}$ ,由内置  $\text{CO}_2$ 小钢瓶提供,经校对后使用。光合有效辐射(PAR)设置为 2 000、1 800、1 600、1 400、1 200、1 000、800、600、400、200、150、100、50 和 0  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ,应用自动测量程序自动记录气体交换参数和荧光参数,得到光合速率(Pn)和电子传递速率(ETR)对光合有效辐射的响应曲线。每次记录最小间隔为 2 min,最大间隔为 3 min,数据记录之前仪器均自动进行参比室和样品室之间的匹配。

### 1.3 数据处理

根据光合计算软件 4.1(井冈山大学生命科学学院/数理学院),每组实测光响应曲线数据分别用直角双曲线修正模型(模型 I)、直角双曲线模型(模型 II)、非直角双曲线模型(模型 III)和指数方程模型(模型 IV)进行拟合。4 种模型的表达式见王荣荣等<sup>[19]</sup>描述。除直角双曲线修正模型外,其余模型拟合的饱和光强计算参考王荣荣等<sup>[19]</sup>方法。采用 SPSS 12.5 (SPSS, Chicago, IL)软件对数据进行计算、处理和方差差异显著性分析。每个处理选取 5

个重复, 采用 Excel 2010 作图。

## 2 结果和分析

### 2.1 光合速率对光响应的拟合效果和光饱和点

从测量值来看, ‘奥尼尔’品种叶片在全光(A<sub>0</sub>)和遮荫处理(A<sub>1</sub>)下的光合速率先随光强的升高而逐渐增大, 分别在 700 和 400  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  时达到最大, 之后随着光强的增加呈明显下降趋势; 同样, ‘薄雾’品种叶片在全光(B<sub>0</sub>)和遮荫处理(B<sub>1</sub>)下的光合速率也先随光强的升高而增加, 且均在 1 000  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$

时达到最大; 之后, 遮荫处理的光合速率也呈明显下降趋势, 而全光下的光合速率下降趋势则不明显(图 1)。

从 4 种光合模型拟合的效果图来看, 直角双曲线修正模型(I)能较好拟合 2 个蓝莓品种不同光强下光合速率的变化趋势, 其余 3 种模型的拟合效果相对较差。从确定系数(R<sup>2</sup>)来看(表 1), 直角双曲线修正模型(I)均大于 0.90; 直角双曲线模型(II)为 0.50~0.92; 非直角双曲线模型(III)为 0.82~0.93; 指数方程模型(IV)为 0.80~0.92。由此判断, 直角双曲线修正模型的拟合效果最好。

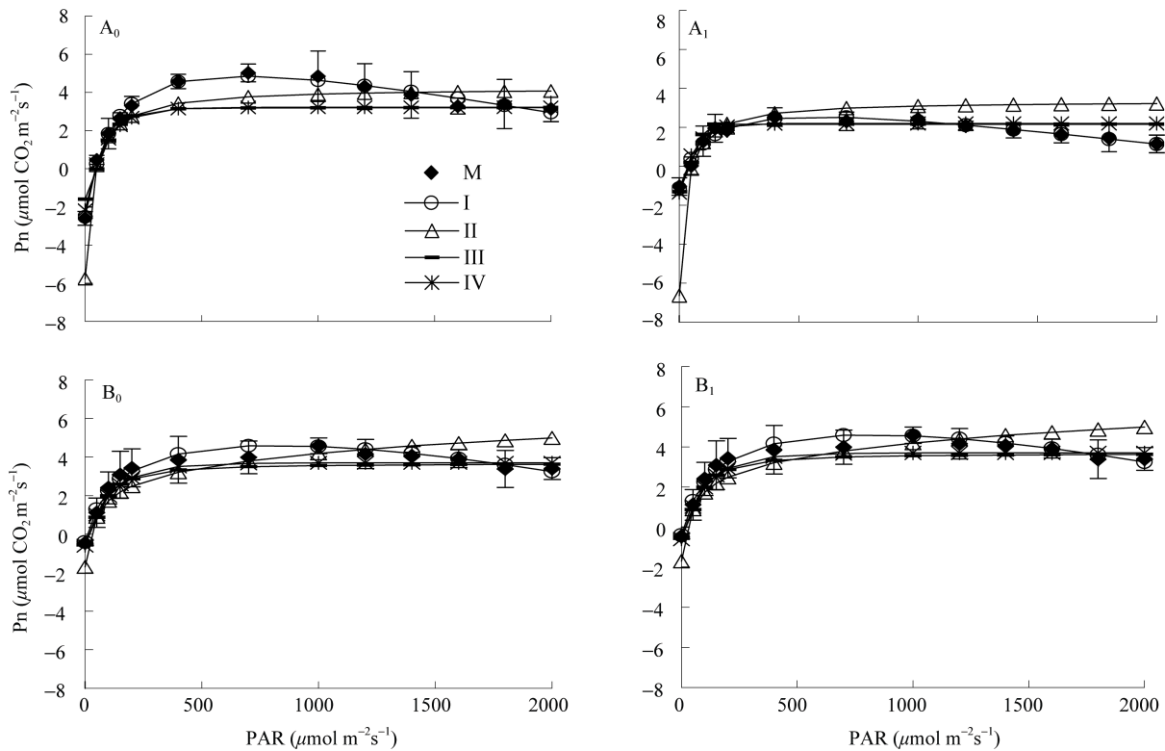


图 1 直角双曲线修正模型(I)、直角双曲线模型(II)、非直角双曲线模型(III)和指数方程模型(IV)对光合速率(Pn)-光响应曲线的拟合和测量值(M)。A<sub>0</sub>: 全光下‘奥尼尔’; A<sub>1</sub>: 遮荫下‘奥尼尔’; B<sub>0</sub>: 全光下‘薄雾’; B<sub>1</sub>: 遮荫下‘薄雾’; PAR: 光合有效辐射; Pn: 净光合速率。下图同。

Fig. 1 Light-response curves of photosynthesis of blueberry fitted by modified rectangular hyperbolic model (model I), rectangular hyperbola model (model II), nonrectangular hyperbolic model (model III), and exponential equation model (model IV), and measured value (M). A<sub>0</sub>: ‘O’neal’ under full light; A<sub>1</sub>: ‘O’neal’ under shading; B<sub>0</sub>: ‘Misty’ under full light; B<sub>1</sub>: ‘Misty’ under shading; PAR: Photosynthetically active radiation; P<sub>n</sub>: Net photosynthetic rate. The same is following Figures.

从 4 种模型拟合的光饱和点来看, 直角双曲线修正模型的光饱和点最高, 分别为 656.32 (A<sub>0</sub>)、605.83 (A<sub>1</sub>)、1034.63 (B<sub>0</sub>)和 933.09 (B<sub>1</sub>)  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ , 与其他模型相比, 差异均达显著水平(P<0.05); 而非直角双曲线模型的光饱和点最低。

### 2.2 电子传递速率对光响应的拟合效果和光饱和点

‘奥尼尔’品种叶片在全光和遮荫处理下的电子传递速率测量值的变化趋势同光合速率一样, 先随光强的升高呈线性增大, 分别在 700 和 400  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  时达到最大, 之后随着光强的增加呈明显下降趋

表 1 光合作用-光响应曲线的饱和光强( $I_{sat}$ )和确定系数( $R^2$ )

Table 1 Saturation irradiance ( $I_{sat}$ ) estimated by different models and determination coefficient ( $R^2$ )

		$A_0$	$A_1$	$B_0$	$B_1$
实测值	Measure value ( $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ )	$\approx 700$	$\approx 400$	$\approx 1000$	$\approx 1000$
模型 I	$I_{sat}$ ( $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ )	$656.32 \pm 82.85a$	$605.83 \pm 68.20a$	$1\ 034.63 \pm 188.72a$	$933.09 \pm 76.74a$
Model I	$R^2$	$0.93 \pm 0.07$	$0.95 \pm 0.02$	$0.99 \pm 0.01$	$0.96 \pm 0.08$
模型 II	$I_{sat}$ ( $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ )	$424.09 \pm 39.74b$	$555.95 \pm 132.16b$	$444.11 \pm 84.80b$	$543.45 \pm 41.10b$
Model II	$R^2$	$0.77 \pm 0.12$	$0.58 \pm 0.23$	$0.92 \pm 0.12$	$0.50 \pm 0.15$
模型 III	$I_{sat}$ ( $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ )	$299.12 \pm 28.34c$	$259.92 \pm 65.17d$	$392.38 \pm 41.13bc$	$280.47 \pm 49.58c$
Model III	$R^2$	$0.87 \pm 0.03$	$0.82 \pm 0.14$	$0.93 \pm 0.16$	$0.89 \pm 0.13$
模型 IV	$I_{sat}$ ( $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ )	$334.57 \pm 34.82c$	$317.29 \pm 67.71c$	$352.17 \pm 42.78c$	$302.58 \pm 47.69c$
Model V	$R^2$	$0.82 \pm 0.13$	$0.86 \pm 0.10$	$0.92 \pm 0.19$	$0.90 \pm 0.13$

同列数值后不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。下表同。

Data followed different letter within column indicate significant differences at 0.05 level. The same is following Tables.

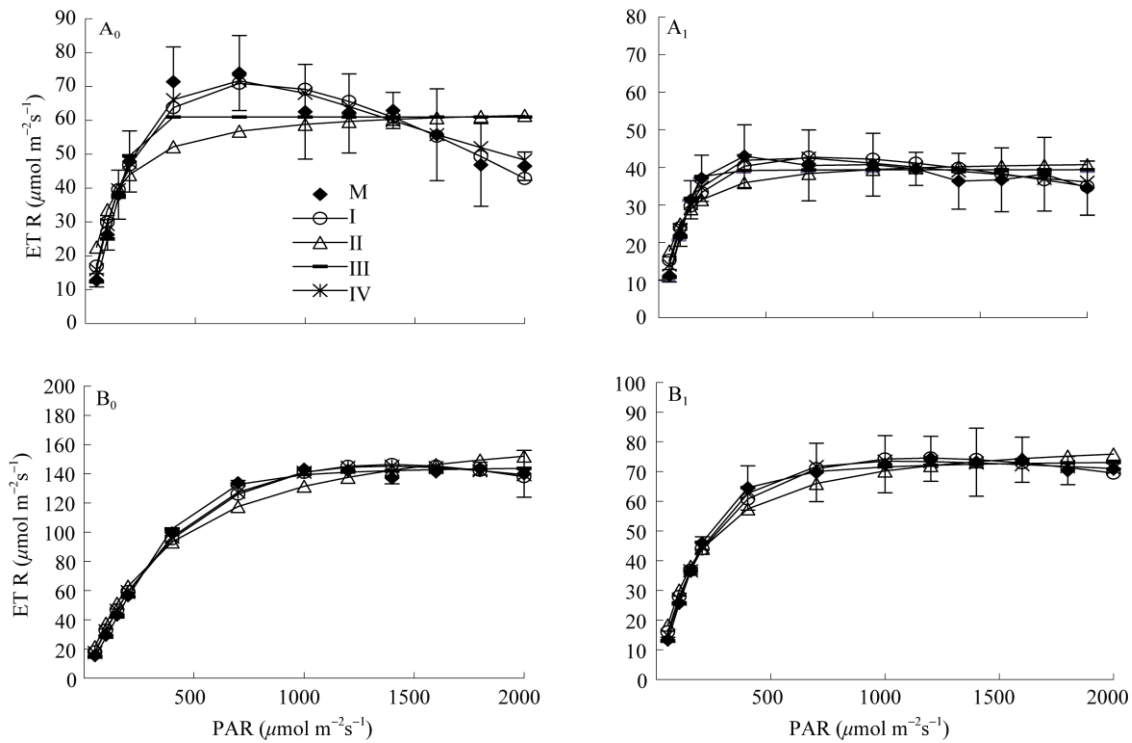


图 2 直角双曲线修正模型(I)、直角双曲线模型(II)、非直角双曲线模型(III)和指数方程模型(IV)对电子传递速率(ETR)-光响应曲线的拟合和测量值(M)

Fig. 2 Light-response curves of electron transport rate fitted by modified rectangular hyperbolic model (model I), rectangular hyperbola model (model II), nonrectangular hyperbolic model (model III), exponential equation model (model IV) and measure values (M) for blueberry.

势。‘薄雾’品种叶片在全光和遮荫处理下的电子传递速率测量值先随光强的升高呈线性增加，分别在 1 000 和 1 200  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  时达到最大；之后，电子传递速率略有下降(图 2)。从 4 种光合模型拟合的效果图来看，直角双曲线修正模型和双指数方程能较好地拟合蓝莓叶片的电子传递速率的变化趋势，直角双曲线修正模型的确定系数( $R^2$ )分别为 0.91( $A_0$ )、0.91 ( $A_1$ )、0.99 ( $B_0$ )和 0.97 ( $B_1$ )；双指数方程分别为 0.93 ( $A_0$ )、0.87 ( $A_1$ )、0.99 ( $B_0$ )和 0.99 ( $B_1$ )；直角双

曲线模型的最低。

4 种模型拟合或计算的电子传递速率对应的光饱和点来看，直角双曲线修正模型拟合的光饱和点分别为 806.17 ( $A_0$ )、756.22 ( $A_1$ )、1641.25 ( $B_0$ )和 988.18 ( $B_1$ )  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ；双指数方程模型分别为 672.76 ( $A_0$ )、570.02 ( $A_1$ )、1581.10 ( $B_0$ )和 931.72 ( $B_1$ )  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。拟合值与测量值整体上较为接近，但远高于直角双曲线模型和非直角双曲线模型拟合的光饱和点。

表2 电子传递速率-光响应曲线的饱和光强(PAR<sub>sat</sub>)和确定系数(R<sup>2</sup>)Table 2 Saturation irradiance (PAR<sub>sat</sub>) estimated by different models and determination coefficient (R<sup>2</sup>)

		A <sub>0</sub>	A <sub>1</sub>	B <sub>0</sub>	B <sub>1</sub>
实测值 Measure value (μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )		≈700	≈400	≈1 400	≈1 200
模型 I Model I	PAR <sub>sat</sub> (μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	806.17±109.64a	756.22±75.33a	1 641.25±117.12a	988.18±135.06a
	R <sup>2</sup>	0.91±0.04	0.91±0.04	0.99±0.01	0.97±0.03
模型 II Model II	PAR <sub>sat</sub> (μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	335.58±24.74c	340.72±18.27c	778.90±62.40b	643.25±1 118.90b
	R <sup>2</sup>	0.53±0.16	0.52±0.10	0.98±0.01	0.96±0.04
模型 III Model III	PAR <sub>sat</sub> (μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	314.43±27.01c	307.42±14.79c	656.74±50.07c	587.75±150.55b
	R <sup>2</sup>	0.79±0.14	0.88±0.11	0.99±0.01	0.98±0.02
模型 IV Model IV	PAR <sub>sat</sub> (μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	672.76±59.46b	570.02±45.55b	1 581.10±169.72a	931.72±126.42a
	R <sup>2</sup>	0.93±0.03	0.87±0.15	0.99±0.01	0.99±0.01

### 2.3 不同模型对蓝莓叶片光补偿点的拟合

由表3可见,不同模型给出的光补偿点整体差异相对较小。以直角双曲线修正模型为例,全光和

遮荫下,‘奥尼尔’品种叶片的光补偿点分别为45.99和32.64 μmol m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>;而‘薄雾’品种叶片的光补偿点分别为58.95和36.92 μmol m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>。

表3 不同模型对光补偿点的拟合

Table 3 Light compensation point estimated by different models

	A <sub>0</sub>	A <sub>1</sub>	B <sub>0</sub>	B <sub>1</sub>
模型 I Model I (μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	45.99±8.39a	32.64±9.35b	58.95±7.60a	36.92±9.29b
模型 II Model II (μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	45.66±10.88a	47.44±12.60a	55.43±19.70a	32.69±27.24b
模型 III Model III (μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	46.75±9.89a	43.09±11.35a	60.05±14.14a	32.15±12.74b
模型 IV Model IV (μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	47.29±10.19a	43.96±13.67a	52.02±10.31a	42.23±13.87a

## 3 讨论

光饱和点范围的确定是植物栽培管理的重要理论依据。随着数学方法及统计软件的发展,用于拟合光合-光响应曲线的模型逐渐增多,且得到广泛应用<sup>[19-20]</sup>。许多学者采用不同的植物材料对不同的光响应模型进行了比较<sup>[19,21-23]</sup>,从而更加深入而准确地了解了植物的光合特性。本试验运用了4种模型从光合速率和电子传递速率两个角度分别对两个蓝莓品种叶片光饱和点进行了探讨。从光合速率对光响应的拟合结果来看,除直角双曲线修正模型给出的光饱和点与实际观测值较为接近外,其他模型拟合的光饱和点值均显著较低,其中以非直角双曲线模型给出的光饱和点最低,分别为299.12 (A<sub>0</sub>)、259.92 (A<sub>1</sub>)、392.38 (B<sub>0</sub>)和280.47 (B<sub>1</sub>) μmol m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>,这与宋雷<sup>[10]</sup>等运用非直角双曲线估算蓝莓叶片光饱和点的结果(158.68~307.84 μmol m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>)相近。另外,指数方程给出的光饱和点也显著低于实际观测值,分别为334.57 (A<sub>0</sub>)、317.29 (A<sub>1</sub>)、352.17 (B<sub>0</sub>)和302.58 (B<sub>1</sub>) μmol m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>,这与刘兆玲等<sup>[7]</sup>用指数方程拟合3个蓝莓品种的光饱和点(288.76、332.27和382.00 μmol m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>)结果相近。直角双曲线模型拟合

的结果虽显著高于非直角双曲线模型和指数方程拟合结果,但整体远低于实际观测值。这主要是由于直角双曲线模型、非直角双曲线模型和指数模型3种模型均为没有极值的函数,故不能很好地拟合光响应曲线光抑制过程,其估算结果通常小于实测值<sup>[19,24-25]</sup>。而直角双曲线修正模型函数存在极值,并且能较好地拟合光抑制阶段的光响应过程<sup>[19,26]</sup>。从实际观测值来看,在高光强下2个蓝莓品种叶片的光合速率存在明显的光抑制现象。因此,直角双曲线修正模型能很好地拟合蓝莓的光合速率对光的响应曲线。这与王荣荣等<sup>[9]</sup>用不同光合模型对杠柳(*Periploca sepium*)的研究结果一致。

同样,从电子传递速率对光响应的拟合结果来看,直角双曲线修正模型和双指数方程模型可很好地拟合两个蓝莓品种电子传递速率对光的响应曲线,拟合结果与实际观测值较为接近;而直角双曲线模型和非直角双曲线模型的拟合效果较差,拟合结果整体上远小于实际观测值。由此可见,光饱和点的估算与所采用的模型有极大的关系,如用直角双曲线模型、非直角双曲线模型以及指数方程拟合光合速率对光的响应曲线,将严重低估光饱和点。然而,现有关于蓝莓光饱和点的研究大多运用非直

角双曲线模型及指数方程模型<sup>[7-8,10]</sup>。因此,本文采用直角双曲线修正模型(模型 I)拟合结果来确定蓝莓叶片光饱和点。

从光合速率对光强响应的拟合结果来看,全光和遮荫下,‘奥尼尔’叶片的光饱和点分别为 656.32 和 605.83  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ; 而‘薄雾’叶片的显著较高,分别为 1 034.63 和 933.09  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。同样,从电子传递速率对光强响应的拟合结果来看,全光和遮荫下,‘薄雾’叶片的光饱和点(1 641.25 和 988.18  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ )同样显著高于‘奥尼尔’(806.17 和 756.22  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ )。这与品种的生物特性有关,‘薄雾’为常绿品种,叶片颜色较绿,且革质化程度相对较高。从全光和遮荫的比较来看,除基于电子传递速率拟合的‘薄雾’叶片光饱和点外,整体上差异并不显著。有研究表明<sup>[27-28]</sup>,对光适应性较强的植物,其光饱和点、光补偿点在遮荫下将有所降低,以提高对弱光的利用率。薛伟等<sup>[29]</sup>对疏叶骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)的研究表明,遮荫后叶片的光补偿点和光饱和点显著降低,且植株死亡率明显偏高,认为疏叶骆驼刺属于专性阳生植物不耐阴品种。结合本研究结果认为,蓝莓叶片对光的适应能力较弱,蓝莓的饱和光强远远低于温州平原及低海拔地区夏季中午正常光强(1 700  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 左右)。陈彦君等<sup>[30]</sup>的研究表明,在春夏秋三季适度遮荫可增强‘兔眼’蓝莓的光合作用,这与本文的研究结果相一致。

有研究认为植物叶片的光补偿点与光饱和点一样,也可反映植物对光的利用能力<sup>[31-32]</sup>。如果光补偿点与光饱和点均比较低,植物可很好地利用弱光,这类植物属典型的阴生植物;光补偿点较低而光饱和点较高的植物对光照的要求低,对光环境的适应能力较强;光补偿点较高而光饱和点低的植物对光要求高,对光适应能力弱。直角双曲线修正模型的拟合结果表明,全光下‘奥尼尔’和‘薄雾’叶片的光补偿点分别为 45.99 和 58.95  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。该值高于典型的阳生植物叶片光补偿点,如张振文等<sup>[33]</sup>报道 29 个葡萄(*Vitis vinifera*)品种开花期叶片的光补偿点约为 20  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ;魏晓慧等<sup>[34]</sup>报道 7 个沙棘(*Hippophae rhamnoides*)品种的光补偿点为 5.72~36.39  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。结合光饱和点范围认为,供试两个蓝莓品种属于半阳生植物。因此,建议该品种蓝莓在温州地区种植时,特别是在苗期,夏季晴天中午应对蓝莓进行适当的遮荫;或在选择种植地时避开完全的向阳坡,则会更加有利于蓝莓植株

的生长发育。

## 参考文献

- [1] HU Y Q, LI J, HUI B D. Study on major nutrition and anthocyanins of blueberry [J]. Food Sci, 2006, 27(10): 600-603. doi: 10.3321/j.issn:1002-6630.2006.10.154.  
胡雅馨, 李京, 惠伯棣. 蓝莓果实中主要营养及花青素成分的研究 [J]. 食品科学, 2006, 27(10): 600-603. doi: 10.3321/j.issn:1002-6630.2006.10.154.
- [2] KADER F, ROVEL B, GIRARDIN M, et al. Fractionation and identification of the phenolic compounds of highbush blueberries (*Vaccinium corymbosum* L.) [J]. Food Chem, 1996, 55(1): 35-40. doi: 10.1016/0308-8146(95)00068-2.
- [3] HE Y, WANG X D. Effect of nitrogen form on the leaf element content of blueberry [J]. N Hort, 2009(9): 58-59.  
和阳, 王兴东. 不同氮素形态对蓝莓叶片矿质元素含量的影响 [J]. 北方园艺, 2009(9): 58-59.
- [4] WANG D P. Study on rooting culture techniques of *Vaccinium ashei* read shoots *in vitro* [J]. N Hort, 2010(16): 140-142.  
王大平. 兔眼蓝莓试管苗生根培养的研究 [J]. 北方园艺, 2010(16): 140-142.
- [5] HE Y, YANG W, LIU S, et al. Method and function of soil improvement in blueberry culture [J]. N Hort, 2010(14): 46-48.  
和阳, 杨巍, 刘双, 等. 蓝莓栽培中土壤改良的方法及作用 [J]. 北方园艺, 2010(14): 46-48.
- [6] SHANG Y L, LIU H W, ZHANG S H, et al. Impact of soil acidity addition on the introduced plantation of *Vaccinium uiginosum* [J]. For By-prod Special China, 2010(3): 35-36. doi: 10.3969/j.issn.1001-6902.2010.03.015.  
商永亮, 刘红伟, 张淑华, 等. 土壤进行增酸对蓝莓引种栽培的影响 [J]. 中国林副特产, 2010(3): 35-36. doi: 10.3969/j.issn.1001-6902.2010.03.015.
- [7] LIU Z L, WEN G S, HU L. Study on the photosynthetic characteristics of 3 blueberry varieties [J]. S China Fruit, 2011, 40(5): 59-61.  
刘兆玲, 温国胜, 胡莉. 3 个蓝莓品种光合特性的比较研究 [J]. 中国南方果树, 2011, 40(5): 59-61.
- [8] JIA X Y, LÜ G H, SHAO L P, et al. Comparative study of photosynthetic characteristics of different blueberry cultivars [J]. J Shihezi Univ (Nat Sci), 2012, 30(4): 339-443. doi: 10.3969/j.issn.1007-7383.2012.04.009.  
贾晓鹰, 吕国华, 邵丽萍, 等. 不同蓝莓品种光合特性的比较 [J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2012, 30(4): 339-443. doi: 10.3969/j.issn.1007-7383.2012.04.009.

- [9] SUN S, LI P M, LIU Q Z, et al. Response of photosynthesis to some environmental factors of high-bush blueberry cultivars [J]. *Acta Hort Sin*, 2007, 34(1): 67–70. doi: 10.3321/j.issn:0513-353X.2007.01.014.  
孙山, 李鹏民, 刘庆忠, 等. 高灌蓝莓光合作用对若干环境因子的响应 [J]. *园艺学报*, 2007, 34(1): 67–70. doi: 10.3321/j.issn:0513-353X.2007.01.014.
- [10] SONG L, BO W F, LIANG W B, et al. Effects of soil pH on the growth and photosynthesis of blueberries [J]. *Hunan For Sci Technol*, 2015, 42(1): 6–11, 26. doi: 10.3969/j.issn.1003-5710.2015.01.002.  
宋雷, 柏文富, 梁文斌, 等. 土壤 pH 对蓝莓生长及光合作用的影响 [J]. *湖南林业科技*, 2015, 42(1): 6–11, 26. doi: 10.3969/j.issn.1003-5710.2015.01.002.
- [11] LI G Z, ZHANG Z C, WANG H X, et al. Characteristics of photosynthesis in six southern highbush blueberry varieties [J]. *S China Fruit*, 2014, 43(2): 17–21.  
李根柱, 张自川, 王贺新, 等. 南高丛蓝莓 6 个品种的光合特征 [J]. *中国南方果树*, 2014, 43(2): 17–21.
- [12] WU S Z, NIE D L, LIANG W B, et al. Comparison of photosynthetic characteristics of four blueberry cultivars [J]. *Nonwood For Res*, 2015, 33(3): 1–6. doi: 10.14067/j.cnki.1003-8981.2015.03.001.  
吴思政, 聂东伶, 梁文斌, 等. 4 个蓝莓品种光合特性的比较 [J]. *经济林研究*, 2015, 33(3): 1–6. doi: 10.14067/j.cnki.1003-8981.2015.03.001.
- [13] LIU L, LIU S M, SUN B Y. Research of the photosynthetic characteristics of *Zanthoxylum bungeanum* seedlings in different producing areas [J]. *Acta Agric Boreali-Occid Sin*, 2009, 18(3): 160–165. doi: 10.3969/j.issn.1004-1389.2009.03.036.  
刘玲, 刘淑明, 孙丙寅. 不同产地花椒幼苗光合特性研究 [J]. *西北农业学报*, 2009, 18(3): 160–165. doi: 10.3969/j.issn.1004-1389.2009.03.036.
- [14] ZHANG Q D, LU C M, KUANG T Y. Effects of the rising CO<sub>2</sub> levels on photosynthesis [J]. *Bull Bot*, 1992, 9(4): 18–23.  
张其德, 卢从明, 匡廷云. 大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高对光合作用的影响 [J]. *植物学通报*, 1992, 9(4): 18–23.
- [15] YE Z P, KANG H J, TAO Y L, et al. Some problems on photosynthetic parameters calculated by photosynthesis assistant [J]. *Plant Physiol Commun*, 2010, 46(1): 67–70.  
叶子飘, 康华靖, 陶月良, 等. 以“光合助手”计算光合参数的一些问题 [J]. *植物生理学通讯*, 2010, 46(1): 67–70.
- [16] YE Z P. A new model for relationship between irradiance and the rate of photosynthesis in *Oryza sativa* [J]. *Photosynthetica*, 2007, 45(4): 637–640. doi: 10.1007/s11099-007-0110-5.
- [17] LANG Y, ZHANG G C, ZHANG Z K, et al. Light response of photosynthesis and its simulation in leaves of *Prunus sibirica* L. under different soil water conditions [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, 31(16): 4499–4508.  
郎莹, 张光灿, 张征坤, 等. 不同土壤水分下山杏光合作用光响应过程及其模拟 [J]. *生态学报*, 2011, 31(16): 4499–4508.
- [18] LU P L, YU Q, LUO Y, et al. Fitting light response curves of photosynthesis of winter wheat [J]. *Chin J Agrometeor*, 2001, 22(2): 12–14. doi: 10.3969/j.issn.1000-6362.2001.02.003.  
陆佩玲, 于强, 罗毅, 等. 冬小麦光合作用的光响应曲线的拟合 [J]. *中国农业气象*, 2001, 22(2): 12–14. doi: 10.3969/j.issn.1000-6362.2001.02.003.
- [19] WANG R R, XIA J B, YANG J H, et al. Comparison of light response models of photosynthesis in leaves of *Periploca sepium* under drought stress in sand habitat formed from seashells [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2013, 37(2): 111–121. doi: 10.3724/SP.J.1258.2013.00012.  
王荣荣, 夏江宝, 杨吉华, 等. 贝壳砂生境干旱胁迫下杠柳叶片光合响应模型比较 [J]. *植物生态学报*, 2013, 37(2): 111–121. doi: 10.3724/SP.J.1258.2013.00012.
- [20] YE Z P, HU W H, YAN X H, et al. Photosynthetic characteristics of different plant species based on a mechanistic model of light-response of photosynthesis [J]. *Chin J Ecol*, 2016, 35(9): 2544–2552. doi: 10.13292/j.1000-4890.201609.032.  
叶子飘, 胡文海, 闫小红, 等. 基于光响应机理模型的不同植物光合特性 [J]. *生态学杂志*, 2016, 35(9): 2544–2552. doi: 10.13292/j.1000-4890.201609.032.
- [21] HUANG Y T, FAN Z L, HUANG Z J, et al. The choice of the optimal model and correlation analysis of photosynthetic parameters for *Carpesium abrotanoides* L. [J]. *Acta Agric Shanghai*, 2017, 33(4): 29–34. doi: 10.15955/j.issn1000-3924.2017.04.06.  
黄艳婷, 范曾丽, 黄紫筠, 等. 天名精光响应最适模型的选择及其光合参数相关性分析 [J]. *上海农业学报*, 2017, 33(4): 29–34. doi: 10.15955/j.issn1000-3924.2017.04.06.
- [22] NI X, CAO Y H, ZHOU B Z, et al. Light response of *Phyllostachys edulis* under drought stress: Based on 4 models [J]. *For Res*, 2017, 30(3): 465–471. doi: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2017.03.015.  
倪霞, 曹永慧, 周本智, 等. 干旱处理对毛竹光响应的影响: 基于 4 种模型比较分析 [J]. *林业科学研究*, 2017, 30(3): 465–471. doi: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2017.03.015.
- [23] ZHOU D D, JIANG S W, WU G L, et al. Comparison of light response models of photosynthesis in *Populus euphratica* Oliv. grown under contrasting groundwater conditions [J]. *Plant Sci J*, 2017, 35(3): 406–412. doi: 10.11913/PSJ.2095-0837.2017.30406.  
周多多, 蒋少伟, 吴桂林, 等. 不同水分条件下胡杨光响应曲线拟

- 合模型比较 [J]. 植物科学学报, 2017, 35(3): 406–412. doi: 10.11913/PSJ.2095-0837.2017.30406.
- [24] LEAKEY A D B, URIBELARREA M, AINSWORTH E A, et al. Photosynthesis, productivity, and yield of maize are not affected by open-air elevation of CO<sub>2</sub> concentration in the absence of drought [J]. *Plant Physiol*, 2006, 140(2): 779–790. doi: 10.1104/pp.105.073957.
- [25] BU X Q, XU X X, KANG B W, et al. Photosynthetic characteristics of *Artemisia sacrorum* in the loess hilly region [J]. *Sci Silv Sin*, 2007, 43(9): 123–127. doi: 10.3321/j.issn:1001-7488.2007.09.022.
- 步秀芹, 徐学选, 康博文, 等. 黄土丘陵区铁杆蒿光合特性 [J]. 林业科学, 2007, 43(9): 123–127. doi: 10.3321/j.issn:1001-7488.2007.09.022.
- [26] ZU Y G, WEI X X, YU J H, et al. Responses in the physiology and biochemistry of Korean pine (*Pinus koraiensis*) under supplementary UV-B radiation [J]. *Photosynthetica*, 2011, 49(3): 448–458. doi: 10.1007/s11099-011-0057-4.
- [27] YAN H Y, DONG R, JIN G X, et al. Effects of shading on photosynthetic characteristics of *Pachysandra terminalis* [J]. *J NE For Univ*, 2013, 41(5): 47–50,60. doi: 10.3969/j.issn.1000-5382.2013.05.011.
- 严海燕, 董然, 金光勋, 等. 遮阴对富贵草光合特性的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(5): 47–50,60. doi: 10.3969/j.issn.1000-5382.2013.05.011.
- [28] CAI Y F, LI S F, WANG J H, et al. Effects of shading on growth and photosynthetic characteristics of oil peony [J]. *Acta Bot Boreali-Occid Sin*, 2016, 36(8): 1623–1631. doi: 10.7606/j.issn.1000-4025.2016.08.1623.
- 蔡艳飞, 李世峰, 王继华, 等. 遮阴对油用牡丹植株生长和光合特性的影响 [J]. 西北植物学报, 2016, 36(8): 1623–1631. doi: 10.7606/j.issn.1000-4025.2016.08.1623.
- [29] XUE W, LI X Y, ZHU J T, et al. Effects of shading on leaf morphology and response characteristics of photosynthesis in *Alhagi sparsifolia* [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 2011, 35(1): 82–90. doi: 10.3724/SP.J.1258.2011.00082.
- 薛伟, 李向义, 朱军涛, 等. 遮阴对疏叶骆驼刺叶形态和光合参数的影响 [J]. 植物生态学报, 2011, 35(1): 82–90. doi: 10.3724/SP.J.1258.2011.00082.
- [30] CHEN Y J, WANG D L, HAO J X, et al. Photosynthetic characteristics of rabbiteye blueberry under shading condition [J]. *J NE For Univ*, 2014, 42(11): 28–31. doi: 10.3969/j.issn.1000-5382.2014.11.007.
- 陈彦君, 王德炉, 郝加孝, 等. 遮阴对兔眼蓝莓光合特性的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(11): 28–31. doi: 10.3969/j.issn.1000-5382.2014.11.007.
- [31] LENG P S, YANG X H, HU Y, et al. Studies on the characteristics of photosynthesis and transpiration of five gardening trees [J]. *J Beijing Agric Coll*, 2000, 15(4): 13–18. doi: 10.3969/j.issn.1002-3186.2000.04.003.
- 冷平生, 杨晓红, 胡悦, 等. 5 种园林树木的光合和蒸腾特性的研究 [J]. 北京农学院学报, 2000, 15(4): 13–18. doi: 10.3969/j.issn.1002-3186.2000.04.003.
- [32] YANG Y H, ZONG J W, YANG F L. Light response characteristics of photosynthesis in three *Juglans regia* cultivars [J]. *Nonwood For Res*, 2014, 32(3): 19–23. doi: 10.3969/j.issn.1003-8981.2014.02.004.
- 杨雨华, 宗建伟, 杨风岭. 3 个核桃品种的光合-光响应特性 [J]. 经济林研究, 2014, 32(3): 19–23. doi: 10.3969/j.issn.1003-8981.2014.02.004.
- [33] ZHANG Z W, ZHANG B Y, TONG H F, et al. Photosynthetic LCP and LSP of different grapevine cultivars [J]. *J NW For Univ*, 2010, 25(1): 24–29.
- 张振文, 张保玉, 童海峰, 等. 葡萄开花期光合作用光补偿点和光饱和点的研究 [J]. 西北林学院学报, 2010, 25(1): 24–29.
- [34] WEI X H, YIN D S, GUO S P. Photosynthetic characteristics of seven introduced sea buckthorn cultivars [J]. *J NE For Univ*, 2014, 42(10): 20–23,43. doi: 10.3969/j.issn.1000-5382.2014.10.005.
- 魏晓慧, 殷东生, 郭树平. 7 个引种沙棘的光合特性 [J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(10): 20–23,43. doi: 10.3969/j.issn.1000-5382.2014.10.005.