

# 葡萄光合速率对光及 CO<sub>2</sub> 浓度的响应特征

刘洪波,白云岗,张江辉,冯 杰,丁 平

(新疆水利水电科学研究院,新疆 乌鲁木齐 830049)

**摘要:**为深入研究吐鲁番地区葡萄管理和节水灌溉技术,采用 CIRAS-3 型便携式光合仪对新疆吐鲁番地区葡萄光合作用进行的测定。结果表明:当光合有效辐射在 0~600  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  时,净光合速率迅速上升;光合有效辐射在 600~1 500  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  时,净光合速率升幅减弱;而光强在 1 500~2 000  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  时,净光合速率随着光照强度的增加而出现下降。CO<sub>2</sub> 浓度在 800  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  之前,光合速率迅速增加;在 800  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  之后,光合速率缓慢上升。利用非直角双曲线模型和直角双曲线模型拟合葡萄光响应曲线和 CO<sub>2</sub> 响应曲线,决定系数分别为 0.996 2 和 0.988 5。

**关键词:**葡萄;光合作用;光合速率;CO<sub>2</sub> 浓度;响应曲线

**中图分类号:**S663.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-2767(2015)07-0077-04 DOI:10.11942/j.issn1002-2767.2015.07.0077

光合作用是植物生长发育的基础,其效率与自身因素如叶绿素含量、叶片厚度和叶片成熟程度密切相关,又受外界环境因子如光强度、气温、空气相对湿度和土壤含水量等影响<sup>[1-3]</sup>。光照强度是植物光合作用的能量来源,也是影响光合作用生态生理因子的最根本因素;CO<sub>2</sub> 是光合作用的主要原料,对光合速率高低有着重要的影响。光合作用光响应曲线和 CO<sub>2</sub> 响应曲线分别反映净光合速率随光强和 CO<sub>2</sub> 浓度改变而变化的规律<sup>[4-7]</sup>。国内外学者对不同植物光合作用面进行了诸多研究,如叶子飘<sup>[8-13]</sup>等人对不同作物如冬小麦、三叶鬼针草和毛白杨等作物的光合作用进行了研究;刘宇锋<sup>[14-18]</sup>等人利用直角双曲线模型和非直角双曲线模型、二项式等方法对光强响应曲线和 CO<sub>2</sub> 响应曲线进行了拟合,均取得了非常好的效果;房玉林<sup>[19-21]</sup>等人对甘肃、陕西等地的红地球、巨峰等葡萄品种的光合特性进行了研究,而对于极端干旱的吐鲁番地区,对葡萄光合特性及光合响应方面的研究不多,本文旨在通过对葡萄光合响应特征的研究,为吐鲁番地区的葡萄管理以及节水灌溉等相关研究提供基本的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验点位于火焰山以南,吐鲁番市东南部的葡萄乡铁提尔村,土壤为粘壤土,质地较均一。距吐鲁番市区 12 km,地理坐标:N42°56',E89°13',海拔-68.8 m。年均降雨量为 16.6 mm,年均蒸发量为 3 300 mm,地下水位为 30 m,年均气温为 14.4℃,多年最高气温、最低气温分别为 48.3℃, -28.8℃,10℃以上活动积温为 5 455℃,全年年均日照时数为 3 095 h,无霜期达 210 d。

### 1.2 材料

葡萄品种为无核白(*Thompson Seedless*),中晚熟品种,所需大于 10℃ 的活动积温在 3 300℃ 左右。所用仪器为 CIRAS-3 型便携式光合仪(美国 PP-systems 公司)。

### 1.3 方法

无核白葡萄从 1998 年开始定植,栽培沟为东西走向,沟长为 60 m,沟宽为 1.0~1.2 m,沟深约为 0.5 m;株距为 1.2~1.5 m,行距 3.5~4.5 m,栽培方式为小棚架栽培,棚架前段高 2.0 m,后端高 0.8 m,平均高 1.2 m。在葡萄果粒膨大期 7 月份选择晴朗天气,选取生长一致的健壮植株进行测定,温度设置为(25±1)℃,空气相对湿度(RH)60%~70%,通过控光、控 CO<sub>2</sub> 浓度进行光响应曲线和 CO<sub>2</sub> 响应曲线的测定。

**1.3.1 光响应曲线测定** 设定 CO<sub>2</sub> 浓度为 400  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ,光照强度设置为 0、50、100、150、200、300、400、600、800、1 000、1 200、1 400、

收稿日期:2015-01-20

基金项目:新疆维吾尔自治区自然科学基金资助项目(2014 211A050)

第一作者简介:刘洪波(1982-),男,湖北省天门市人,硕士,工程师,从事水分高效利用研究。E-mail:lh090@163.com。

通讯作者:白云岗(1974-),男,新疆维吾尔自治区奇台县人,高级工程师,从事农业水土工程方面的研究及技术推广工作。Email:xjbaiyg@yahoo.com.cn。

1 600、1 800、2 000  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。随机选择生长良好的健康成熟叶片进行 2 次重复测定。

1.3.2  $\text{CO}_2$  响应曲线测定 将有效光辐射强度(PAR)控制在 1 200  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 参比室  $\text{CO}_2$  浓度设置为 50、100、150、200、400、600、800、1 000、1 200、1 400、1 600、1 800  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 同样进行 2 次重复测定。

1.3.3 数据统计 应用统计分析软件 SPSS22 对研究对象的光响应曲线和  $\text{CO}_2$  浓度响应曲线进行拟合, 用 Excel 2010 绘图。

2 结果与分析

2.1 葡萄光合作用的光响应曲线

植物的光响应曲线可以用非直角双曲线模型进行拟合<sup>[13,15]</sup>, 非直角双曲线模型为:

$$A = \frac{\varphi Q + A_{\max} - \sqrt{(\varphi Q + A_{\max})^2 - 4k\varphi Q A_{\max}}}{2k} - R_{\text{day}} \tag{1}$$

式中,  $A$  为净光合速率,  $\varphi$  为表观量子效率,  $A_{\max}$  为最大净光合速率,  $Q$  为光合有效辐射,  $k$  为光响应曲线曲角,  $R_{\text{day}}$  为暗呼吸速率。

光饱和点(LSP)和光补偿点(LCP)的拟合公式为:

$$A = \varphi Q - R_{\text{day}} \quad (Q \leq 200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}) \tag{2}$$

当  $A = 0$  时的  $Q$  即为光补偿点(LCP); 将 200  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  以下的线性方程式(2)与非直角双曲线模型计算出的  $A_{\max}$  值这条平行直线( $y = A_{\max}$ )相交, 得出交点, 该交点在  $x$  轴上的数值即为近光饱和点; 当  $A = A_{\max}$  时的  $Q$  则为光饱和点(LCP); 表观量子效率( $\varphi$ )用光响应曲线中光强在 200  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  以下时的初始直线部分的斜率表示(见图 1)。

从图 1 可看出, 光合有效辐射在 200  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  以下的线性方程拟合效果很好, 决定系数  $R^2$  为 0.996 2。

由图 2 可看出, 光合有效辐射在 0~600  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 净光合速率迅速上升, 光合速率随光照强度的增加而增加。当光合有效辐射在 600~1 500  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 净光合速率升幅减弱。当光合有效辐射在 1 500~2 000  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 净光合速率随着光合有效辐射的增加而出现下降, 表现出光抑制现象, 即植物叶片接受的光能超

过了它所能利用的光量时, 长时间的强光照射可以引起叶片光合活性的降低, 光抑制是植物光合作用非气孔限制因素的主要形式。

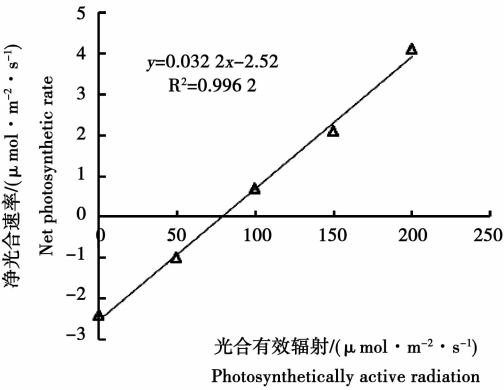


图 1 葡萄低光强响应曲线  
Fig. 1 Low intensity response curve

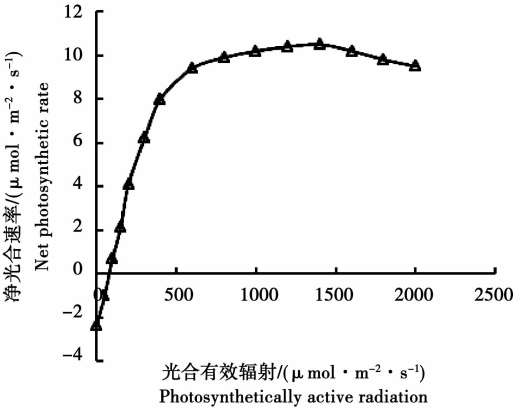


图 2 葡萄光强响应曲线  
Fig. 2 Intensity response curve

从表 1 葡萄光合响应曲线参数中可以看出, 非直角双曲线模型拟合曲线的参数通过公式(1)计算得到的预测值与实测值的决定系数  $R^2$  为 0.996 2, 拟合效果非常好。葡萄最大净光合速率、光饱和点、光补偿点、表观量子效率和暗呼吸速率分别为 12.772、474.907、77.392、0.032 和 2.464  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

2.2 葡萄光合作用的  $\text{CO}_2$  响应曲线

$\text{CO}_2$  响应曲线拟合方程同光响应曲线, 采用直角双曲线模型进行拟合, 即:

$$A = \frac{\alpha A_{\max} C_i}{\alpha C_i + A_{\max}} - R_p \tag{3}$$

式中:  $\alpha$  为初始羧化效率;  $C_i$  为胞间  $\text{CO}_2$  浓度;  $R_p$  为光呼吸速率。

$\text{CO}_2$  浓度饱和点(CSP)和  $\text{CO}_2$  浓度补偿

点(CCP)的拟合公式为:

$$A = \alpha C_i - R_p (C_i \leq 200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}) \quad (4)$$

当  $A = 0$  时的  $C_i$  即为 CO<sub>2</sub> 浓度补偿点(CCP);当  $A = A_{\text{max}}$  时的  $C_i$  则为 CO<sub>2</sub> 浓度饱和点(CSP);初始羧化效率( $\alpha$ )用 CO<sub>2</sub> 响应曲线中 CO<sub>2</sub> 浓度在  $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  以下时的初始直线部分的斜率表示(见图 3)。

表 1 葡萄光合响应曲线特征参数  
Table 1 Photosynthetic response curves parameters

光响应特征参数 Photoresponse characteristics parameters	拟合值 Fitted value	实测值 Measured value
最大光合速率( $A_{\text{max}}$ )/( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	12.772	≈10.5
光饱和点(LSP)/( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	474.907	≈1400
光补偿点(LCP)/( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	77.392	≈80
暗呼吸速率( $R_{\text{day}}$ )/( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	2.464	
表观量子效率( $\varphi$ )	0.0322	
曲线曲角(k)	0.243	
R <sup>2</sup>	0.9962	

从图 3 可看出,CO<sub>2</sub> 浓度在  $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  以下的线性方程拟合效果很好,决定系数  $R^2$  为 0.988 5。

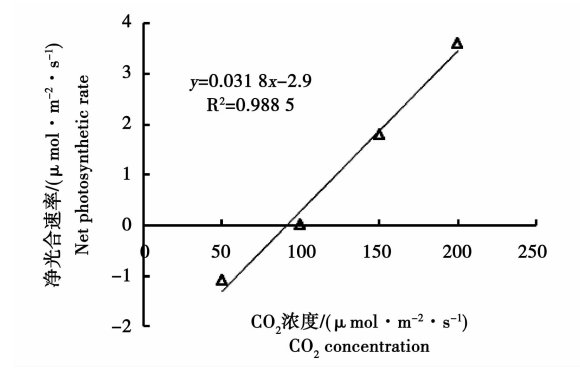


图 3 葡萄低 CO<sub>2</sub> 浓度响应曲线

Fig. 3 Low CO<sub>2</sub> concentration response curve

从图 4 可以看出,在胞间 CO<sub>2</sub> 浓度达到  $800 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  前,随着 CO<sub>2</sub> 浓度的增加,光合速率迅速增加,在  $800 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  之后,光合速率随着 CO<sub>2</sub> 浓度的增加而缓慢上升,升幅逐渐减弱。

CO<sub>2</sub> 浓度与光合速率的关系,也类似于光强与净光合速率的关系,既有 CO<sub>2</sub> 饱和点,又有 CO<sub>2</sub> 补偿点,植物必须在 CO<sub>2</sub> 浓度高于补偿点的条件

下,才有同化产物的积累。由公式(3)拟合得到羧化效率( $\alpha$ )、最大净光合速率( $A_{\text{max}}$ )和光呼吸速率( $R_p$ )分别为  $0.069$ 、 $27.102$  和  $5.014 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,直角双曲线模型拟合曲线的决定系数  $R^2$  为  $0.988 5$ 。通过 CO<sub>2</sub> 浓度在  $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  以下的线性方程拟合得到 CO<sub>2</sub> 浓度补偿点(CCP)和 CO<sub>2</sub> 浓度饱和点(CSP)分别为  $91.195$  和  $943.459 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (见表 2)。通过实测值与公式(3)计算得到的预测值进行拟合,其决定系数  $R^2$  为  $0.988 5$ 。

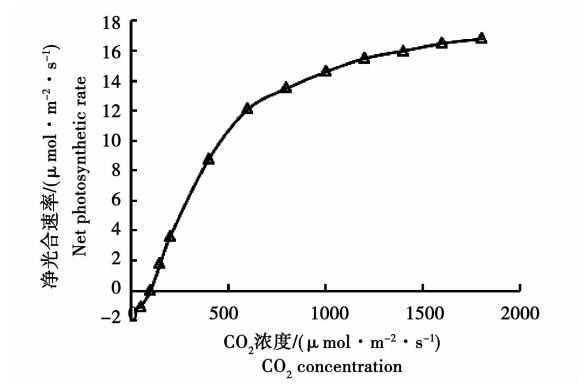


图 4 葡萄 CO<sub>2</sub> 浓度响应曲线

Fig. 4 CO<sub>2</sub> concentration response curve

表 2 葡萄 CO<sub>2</sub> 响应曲线特征参数  
Table 2 Response curve parameters of CO<sub>2</sub> concentration

光响应特征参数 Photoresponse characteristics parameters	拟合值 Fitted value
最大光合速率( $A_{\text{max}}$ )/( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	27.102
CO <sub>2</sub> 饱和点(CSP)/( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	943.459
CO <sub>2</sub> 补偿点(CCP)/( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	91.195
光呼吸速率( $R_p$ )/( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	5.014
羧化效率( $\alpha$ )	0.069
R <sup>2</sup>	0.988 5

3 结论与讨论

最大净光合速率的高低反映出植物对强光的利用能力,通过对吐哈盆地葡萄光响应和 CO<sub>2</sub> 响应特征的分析表明,光合有效辐射在  $0 \sim 600 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  时,净光合速率迅速上升;在  $600 \sim 1\,500 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  时,净光合速率升幅减弱;而在  $1\,500 \sim 2\,000 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  时,净光合速率随着光照强度的增加而出现下降。利用非直角双曲线模型能很好的模拟葡萄光响应曲线,决定系数为

0.996 2, 拟合得到葡萄最大净光合速率、光饱和点、光补偿点、表观量子效率和暗呼吸速率分别为 12.772、474.907、77.392、0.032 和  $2.464 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。 $\text{CO}_2$  浓度在  $800 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  之前, 光合速率迅速增加; 在  $800 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  之后, 光合速率缓慢上升。用直角双曲线对葡萄  $\text{CO}_2$  响应曲线进行拟合, 得到最大净光合速率、 $\text{CO}_2$  浓度补偿点和  $\text{CO}_2$  浓度饱和点分别为  $27.102 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $91.195 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  和  $943.459 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 决定系数为 0.988 5。

#### 参考文献:

- [1] 叶子飘, 于强. 光合作用光响应模型的比较[J]. 植物生态学报, 2008, 32(6): 1356-1361.
- [2] Awada T, Radoglou K, Fotelli M N, et al. Ecophysiology of seedlings of three Mediterranean pine species in contrasting light regimes[J]. Tree Physiology, 2003, 23: 33-41.
- [3] Thornley J H M. Mathematical Models in Plant Physiology[M]. New York: Academic Press, 1976.
- [4] 张中峰, 张玉清, 莫凌, 等. 岩溶植物光合—光响应曲线的两种拟合模型比较[J]. 武汉植物学研究, 2009, 27(3): 340-344.
- [5] 陈银华, 蒋建篇. 光照强度对辣椒光合特性与生长发育的影响[J]. 上海农业学报, 1998, 14(3): 46-50.
- [6] 蒋高明, 韩兴国, 林光辉. 大气  $\text{CO}_2$  浓度升高对植物的直接影响[J]. 植物生态学报, 1997, 21(6): 489-502.
- [7] 张宁, 孟庆伟, 赵世杰, 等. 光胁迫下银杏光合作用的光抑制[J]. 西北植物学报, 1999, 19(3): 461-465.
- [8] 叶子飘, 于强. 冬小麦旗叶光合速率对光强度和  $\text{CO}_2$  浓度的响应[J]. 扬州大学学报: 农业与生命科学版, 2008, 29(3): 33-37.
- [9] 叶子飘, 赵则海. 遮光对三叶鬼针草光合作用和叶绿素含量的影响[J]. 生态学杂志, 2009, 28(1): 19-22.

- [10] 叶子飘, 高峻. 丹参羧化效率在其  $\text{CO}_2$  补偿点附近的变化[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2008, 36(5): 160-164.
- [11] 李伟成, 王树东, 钟哲科, 等. 几种经验模型在丛生竹光响应曲线拟合中的应用[J]. 竹子研究汇刊, 2009, 28(3): 20-24.
- [12] 富丰珍, 徐程扬, 李广德, 等. 冠层部位对三倍体毛白杨光合生理特性的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2010, 30(3): 95-99.
- [13] 刘宇锋, 萧浪涛, 童建华, 等. 非直线双曲线模型在光合光响应曲线数据分析中的应用[J]. 中国农学通报, 2005, 121(8): 76-79.
- [14] 刘玉梅, 王云诚, 于贤昌, 等. 黄瓜单叶净光合速率对二氧化碳浓度和光照强度响应模型[J]. 应用生态学报, 2007, 18(4): 883-887.
- [15] 廖小锋, 刘济明, 张东凯, 等. 野生小蓬竹的光合光响应曲线及其模型拟合[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(3): 124-128.
- [16] 陆佩玲, 罗毅, 刘建栋, 等. 华北地区冬小麦光合作用的光响应曲线的特征参数[J]. 应用气象学报, 2000, 11(2): 236-241.
- [17] 钱莲文, 张新时, 杨智杰, 等. 几种光合作用光响应典型模型的比较研究[J]. 武汉植物学研究, 2009, 27(2): 197-203.
- [18] 李熙萌, 卢之遥, 马帅, 等. 沙生植物差巴嘎蒿光合特性及其模拟研究[J]. 草业学报, 2011, 20(6): 293-298.
- [19] 房玉林, 惠竹梅, 陈杰, 等. 水分胁迫对葡萄光合特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2006(02): 135-138.
- [20] 郭继英, 严大义. 巨峰葡萄光合特性的研究[J]. 北京农业科学, 1994, 12(2): 30-32.
- [21] 严巧娣. 不同土壤水分条件下葡萄叶片光合特性的比较[J]. 西北植物学报, 2005, 25(8): 1601-1606.

## Response Characteristics of Photosynthetic Rate to Light Intensity and $\text{CO}_2$ Concentration of Grape

LIU Hong-bo, BAI Yun-gang, ZHANG Jiang-Hui, FENG Jie, DING Ping

(Xinjiang Research Institute of Water Resources and Hydropower, Urumqi, Xinjiang 830049)

**Abstract:** In order to study the management and water-saving irrigation technology for Turpan Grape, photosynthesis of grape was determined in Turpan area with CIRAS-3 portable photosynthesis system. The results showed that when the photosynthetically active radiation in the range of  $0\sim 600 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , the net photosynthetic rate increased rapidly; in  $600\sim 1\ 500 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  the net photosynthetic rate; and in  $1\ 500\sim 2\ 000 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , the net photosynthetic rate increased with the photosynthetically active radiation decreased. The concentration of  $\text{CO}_2$  before  $800 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , the photosynthetic rate increased rapidly; after  $800 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , the photosynthetic rate increased slowly. Light response curve and  $\text{CO}_2$  response curve were fitted with the nonrectangular hyperbola model and the rectangular hyperbola model, the determination coefficient were 0.996 2 and 0.988 5.

**Keywords:** grape; photosynthesis; response curve