

杨玉珍,王国霞,张志浩. 油用牡丹凤丹光合作用对光照度及胞间 CO<sub>2</sub> 浓度的季节响应[J]. 江苏农业科学,2018,46(18):119-122.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.18.029

# 油用牡丹凤丹光合作用对光照度及胞间 CO<sub>2</sub> 浓度的季节响应

杨玉珍<sup>1</sup>, 王国霞<sup>1</sup>, 张志浩<sup>2</sup>

(1. 郑州师范学院生命科学学院,河南郑州 450044; 2. 郑州大学生命科学学院,河南郑州 450001)

**摘要:**采用 LI-6400XT 便携式光合测量系统研究了大田条件下油用牡丹主要栽培种凤丹的光合作用对光合有效辐射及胞间 CO<sub>2</sub> 浓度的季节响应。结果表明,春季凤丹的光饱和点低于夏季,说明在夏季凤丹对强光的适应能力更强,而夏季光补偿点高于春季,说明凤丹在春季对弱光的利用能力大于夏季。在最大净光合速率、表观量子效率及暗呼吸速率方面,夏季均高于春季。对于 CO<sub>2</sub> 浓度的季节响应显示,在春季凤丹具有较高的 1,5-二磷酸核酮糖(RuBP)羧化效率、光呼吸速率、CO<sub>2</sub> 补偿点及最大净光合速率,而夏季 CO<sub>2</sub> 饱和点高于春季,说明夏季凤丹对 CO<sub>2</sub> 浓度的适应范围更宽。

**关键词:**油用牡丹凤丹;光合作用;光照度;胞间 CO<sub>2</sub> 浓度;季节响应

**中图分类号:** Q945.11;S685.110.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)18-0119-03

牡丹(*Paeonia suffruticosa* Andr.)原产于中国,为芍药科(Paeoniaceae)芍药属(*Paeonia*)多年生木本落叶小灌木,在我国已有 1 600 多年的栽培历史<sup>[1]</sup>,素有“国色天香”“花中之王”的美称。油用牡丹为近几年新兴的一种优质木本油料作物,籽油是其主要产品之一,具有极高的营养价值。2011 年 3 月,牡丹籽油被卫生部正式批准为新资源食品<sup>[2]</sup>。目前,油用牡丹在全国已大面积推广种植,以凤丹(*Paeonia ostii*)和紫斑(*Paeonia rockii*)为主要栽培种。其中,凤丹牡丹具有耐湿热、株型高大、结实率高、适应性强的特性,分布于全国大部分地区,特别是在河南、安徽、山东等省份已有大面积种植;紫斑牡丹由于耐寒抗旱性很强,主要分布在四川、甘肃、陕西等西部地区<sup>[3]</sup>。

在油用牡丹的引种栽培中,光和 CO<sub>2</sub> 是重要的生态因子,直接影响着光合作用及最终产量。在关于光合作用的研究中,光合作用的响应是研究植物生理和植物生态学的重要途径。由光响应曲线可以确定植物的光补偿点、光饱和点、表观量子效率及最大净光合速率;由 CO<sub>2</sub> 响应曲线可以确定植物的 CO<sub>2</sub> 补偿点、饱和点、RuBP 羧化作用以及最大净光合作用。这些指标对了解植物的生理特性具有指导作用,因此,确定植物光合作用对主要生态因子如光照和胞间 CO<sub>2</sub> 浓度在不同季节里的响应,对于研究植物的光合特性、指导农业生产方面具有重要意义<sup>[4]</sup>。目前,植物光合作用的光响应模型有很多,各有优劣,有直角双曲线模型<sup>[5]</sup>、非直角双曲线模

型<sup>[6]</sup>、直角双曲线的修正模型<sup>[7]</sup>等,而在对油用牡丹的光响应研究中应用最多的是非直角双曲线模型<sup>[7-8]</sup>,本试验采用该模型拟合。CO<sub>2</sub> 响应模型主要有生化模型<sup>[9]</sup>、直角双曲线模型<sup>[10]</sup>、直角双曲线修正模型<sup>[11]</sup>等,本研究首次将直角双曲线模型应用于油用牡丹的 CO<sub>2</sub> 响应。本研究以油用牡丹主要优良栽培品种凤丹为研究对象,通过比较不同季节条件下其光合作用对光合有效辐射和胞间 CO<sub>2</sub> 浓度响应的差异,旨在为油用牡丹在河南地区的大面积推广栽培以及生产管理提供理论指导。

## 1 材料与与方法

### 1.1 材料

供试材料为 5 年生凤丹白品种(*Paeonia ostii* T. Hong et J. X. Zhang ‘Phoenix White’),种植于郑州师范学院黄河滩实习实训基地。试验地处北温带大陆性季风气候区,34°51′N,113°38′E,海拔 110 m,冷暖适中、四季分明,春季干旱少雨,夏季炎热多雨,秋季晴朗日照长,冬季寒冷少雪,年平均气温在 14~14.3℃之间,平均降水量 640.9 mm,无霜期 220 d,全年日照时间约 2 400 h。植物材料大田种植,水肥条件良好,常规管理。周边无高大遮挡物,处全光照环境。原位随机选取测定长势基本一致、无病虫害的健康植株,顶端往下第 3 张或第 4 张向阳功能叶,尽量保持叶片正常生长角度不变。

### 1.2 方法

1.2.1 光响应曲线的测定 分别于 2016 年 5 月下旬(春季)和 2016 年 7 月下旬(夏季)连续晴天运用 LI-6400XT 便携式光合测量系统(LI-COR,USA)进行瞬时光合速率的测定。测定时间为 09:00—11:00。试验重复 3 次,每次选择 1 个典型植株。以 CO<sub>2</sub> 注入系统为气源,浓度设定为接近于大气 CO<sub>2</sub> 浓度 400 μmol/mol。测定前打开 2 000 μmol/(m<sup>2</sup>·s)的

收稿日期:2017-04-28

基金项目:河南省科技攻关项目(编号:142102110178);河南省郑州市科技攻关项目(编号:141PPTGG426);郑州师范学院科技创新团队支持计划资助。

作者简介:杨玉珍(1965—),女,河南罗山人,博士,教授,主要从事植物生理生态研究。E-mail:yzhyang@163.com。

6400-02B型LED灯进行光诱导。光照度设置为2000、1800、1600、1400、1200、1000、800、600、400、200、100、80、60、40、20、0  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,共16个梯度值。程序设定完成后,仪器自动记录数据。数据导出后,依据非直角双曲线模型进行光响应曲线拟合<sup>[6]</sup>,拟合数据取3次重复的平均值,拟合公式如下:

$$P_n = \frac{\phi Q + P_{n,\max} - \sqrt{(P_{n,\max} + \phi Q)^2 - 4\phi Q P_{n,\max}}}{2k} - R_d \quad (1)$$

式中: $P_n$ 为净光合速率, $P_{n,\max}$ 为最大净光合速率, $Q$ 为光合有效辐射, $\phi$ 为表观量子效率(apparent quantum yield,AQY), $k$ 为拟合曲线曲角, $R_d$ 为暗呼吸速率。将光照度在200  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 以下阶段以直线回归作补充,与非直角双曲线模型下计算出的 $P_{n,\max}$ 及对应的光照度,即光饱和点(light saturation point,LSP)相接,与 $x$ 轴的交点即为光补偿点(light compensation point,LCP),直线斜率即为AQY。

1.2.2  $\text{CO}_2$ 响应曲线的测定 分别于2016年5月下旬(春季)和2016年7月下旬(夏季)连续晴天运用LI-6400XT便携式光合测量系统测定凤丹 $\text{CO}_2$ 响应曲线。测定时间在09:00—11:00,试验重复3次,每次选择1个典型植株。光照度设定在1000  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,由6400-02B型红蓝光源提供。叶室温度设定为25  $^{\circ}\text{C}$ 。 $\text{CO}_2$ 浓度设定为50、100、200、300、400、600、800、1000、1200、1500、1800、2000  $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 共计12个梯度值,每个梯度下最小等待时间为120 s,最大等待时间为300 s。程序设定完成后,仪器自动记录数据。数据导出后,利用直角双曲线<sup>[10]</sup>拟合细胞间 $\text{CO}_2$ 浓度 $C_i$ 与净光合速率 $P_n$ ,拟合数据取3次重复的平均值,拟合公式如下:

$$P_n = \frac{CE \times P_{n,\max} \times C_i}{CE \times C_i + P_{n,\max}} - R_p \quad (2)$$

式中: $C_i$ 为胞间 $\text{CO}_2$ 浓度, $CE$ 为RuBP羧化效率, $R_p$ 为光呼吸速率(由于光下暗呼吸速率很小,可近似等于光下叶片向外界释放 $\text{CO}_2$ 浓度的速率)。将低 $\text{CO}_2$ 浓度在200  $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 以下阶段以直线回归作补充,与直角双曲线模型下计算出的 $P_{n,\max}$ 及对应的 $\text{CO}_2$ 浓度即 $\text{CO}_2$ 饱和点( $\text{CO}_2$  Saturation Point,CSP)相接,则与 $x$ 轴的交点即为 $\text{CO}_2$ 补偿点( $\text{CO}_2$  compensation point,CCP),截距为 $R_p$ , $\text{CO}_2$ 浓度200  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 以下阶段直线斜率即为RuBP羧化效率 $CE$ 。

### 1.3 数据处理

试验数据采用Excel 2003及SPSS 20.0软件进行分析,Origin 8.0作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 凤丹净光合速率对光合有效辐射的季节响应

#### 2.1.1 不同季节光响应初始斜率比较 AQY作为叶片光能

表2 不同季节凤丹光合-光照度响应主要参数拟合值

季节	$P_{n,\max}$ [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]	$R_d$ [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]	LSP [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]	LCP [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]
春季	24.421 ± 5.273b	0.968 ± 0.107b	908.547 ± 20.091b	36.087 ± 10.389b
夏季	41.059 ± 3.387a	1.711 ± 0.139a	1355.527 ± 134.930a	54.083 ± 2.644a

### 2.2 凤丹净光合速率对细胞间 $\text{CO}_2$ 浓度的季节响应

#### 2.2.1 不同季节 $\text{CO}_2$ 响应初始斜率比较 RuBP羧化效率

利用效率重要参数之一,反映了植物在进行光合作用时对弱光的利用效率,可用光响应曲线的初始斜率[0~200  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 光照度范围]计算得到。一般情况下,植物的AQY值在0.03~0.07之间<sup>[12]</sup>。由表1可以看出,在春季,大田条件下凤丹光响应曲线的初始斜率略小于一般值,而夏季数值在正常范围,表明凤丹在夏季较春季对弱光的利用效率高。

表1 不同季节凤丹光响应曲线的初始斜率及相应的回归方程

季节	回归方程	AQY	决定系数 $r^2$
春季	$y = 0.028x - 0.968$	0.028 ± 0.006b	0.942
夏季	$y = 0.031x - 1.711$	0.031 ± 0.003a	0.991

2.1.2 不同季节光响应曲线及相关参数比较 光饱和点和补偿点能反映植物对强光和弱光的利用能力,是反映植物光响应的重要指标<sup>[13]</sup>。由图1可知,凤丹叶片在不同季节的光响应曲线变化趋势相同。在光合有效辐射为0  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,“凤丹”的净光合速率均为负值,在0~200  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 光照度范围内,随着光合有效辐射(Photosynthetically active radiation,PAR)的增加, $P_n$ 近乎直线增长,直到接近 $P_{n,\max}$ ,此时对应的PAR值为LSP。通过对0~200  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 光照度范围内曲线进行线性回归及用非直角双曲线模型对>200  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 光照度范围曲线进行拟合(表2),经计算发现,在春季和夏季的LSP分别为908.547、1355.527  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。净光合速率为0  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,光合有效辐射为LCP,在春季和夏季分别为36.087、54.083  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,说明凤丹在春季对弱光的利用能力强于夏季。最大净光合速率 $P_{n,\max}$ 为植物在饱和光照度下的净光合速率,是叶片的最大净光合速率,能够反映叶片的光合效率和光合潜能。该值在2个季节具有明显差别,分别为24.421、41.059  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。暗呼吸速率 $R_d$ 可以反映呼吸速率,在春季和夏季分别为0.968、1.711  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

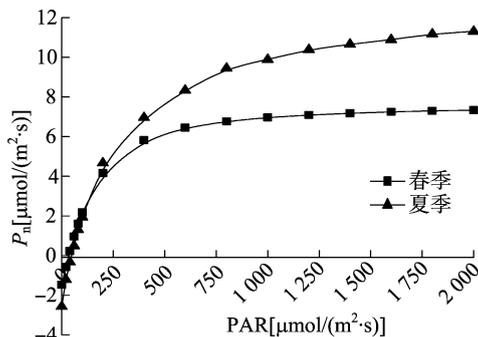


图1 不同季节凤丹光合-光照度响应曲线

$CE$ 是指低 $\text{CO}_2$ 浓度(0~200  $\mu\text{mol}/\text{mol}$ )的净光合速率与胞间 $\text{CO}_2$ 浓度拟合的一次方程的斜率,是衡量植物对叶片中 $\text{CO}_2$

利用效率的重要指标<sup>[14]</sup>。CE值越大,说明在低CO<sub>2</sub>浓度条件下能够更高效地利用CO<sub>2</sub>进行光合作用。由表3可知,凤丹在春季CE值显著高于夏季,说明在春季对低CO<sub>2</sub>浓度的利用高于夏季。

表3 不同季节凤丹CO<sub>2</sub>响应曲线的初始斜率及相应的回归方程

季节	回归方程	RuBP羧化效率CE	决定系数
春季	$y = 0.083x - 8.664$	$0.083 \pm 0.005a$	0.988
夏季	$y = 0.039x - 5.610$	$0.039 \pm 0.006b$	0.993

2.2.2 不同季节CO<sub>2</sub>响应曲线比较 CO<sub>2</sub>作为光合作用的底物,其浓度在一定范围内直接影响着光合作用的进程。图2显示,随着C<sub>i</sub>值的增大,净光合速率增大,且春季增幅明显大于夏季。在低C<sub>i</sub>浓度(小于200 μmol/mol)时,P<sub>n</sub>上升速度较快,一般认为,此时1,5-二磷酸核酮糖羧化酶(rubsico)对P<sub>n</sub>的限制起主要作用。此后,随着C<sub>i</sub>浓度的增大,P<sub>n</sub>增幅减小,直至接近饱和状态,此阶段的1,5-二磷酸核酮糖羧化酶再生速率是制约P<sub>n</sub>的主要原因。在不同季节分别达到

相应的CO<sub>2</sub>饱和点(1 152.506、1 425.059 μmol/mol)时,春季的最大净光合速率P<sub>n,max</sub>显著高于夏季。然而,夏季相对较低的CO<sub>2</sub>补偿点说明在夏季凤丹对低CO<sub>2</sub>浓度的利用效率高,可见凤丹在夏季具有较宽的CO<sub>2</sub>适应性。与此同时,在春季还伴随着较高的光呼吸速率(表4)。

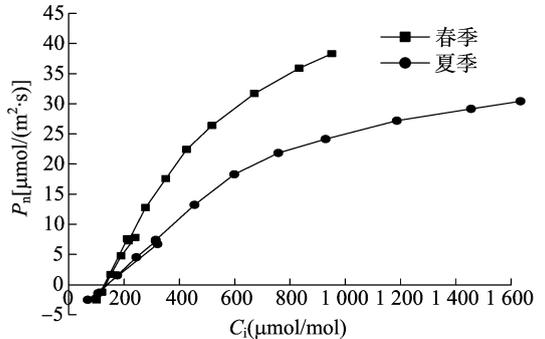


图2 不同季节凤丹CO<sub>2</sub>响应曲线

表4 不同季节凤丹光合-C<sub>i</sub>响应主要参数拟合值

季节	P <sub>n,max</sub> [μmol/(m <sup>2</sup> ·s)]	R <sub>p</sub> [μmol/(m <sup>2</sup> ·s)]	CSP (μmol/mol)	CCP (μmol/mol)
春季	86.603 ± 3.573a	8.664 ± 2.871a	1 152.506 ± 43.834b	138.184 ± 25.703a
夏季	54.256 ± 5.254b	5.610 ± 0.278b	1 425.059 ± 226.508a	54.256 ± 5.254b

### 3 结论与讨论

光合作用于地球上的各种生物提供了赖以生存和发展的食物、空气和能量,是一个十分复杂的生理过程。不同植物叶片的光合特性既受自身遗传因素影响,也与光照等环境因子有关。掌握凤丹在不同季节条件下的生长规律,有助于提高产量,具有重要的理论和指导意义。

#### 3.1 凤丹光合作用对光的季节响应

光饱和条件下的净光合速率有时被称为光合能力,或光合潜力<sup>[10]</sup>。光饱和点和补偿点分别反映植物对强光和弱光的利用情况,同时也与植物的生长阶段和适应对策以及不同季节的气候条件密切相关。本试验中夏季凤丹具有较高的光饱和点,说明其对强光利用能力优于春季,而较高的光补偿点伴有较高的暗呼吸速率也说明凤丹对弱光的利用能力低于春季。光合机构每吸收1个光子固定的CO<sub>2</sub>或释放的O<sub>2</sub>分子数被称为光合碳同化的量子效率。AQY不考虑叶片光透射和反射(15%左右),而是按照入射的光量子数计算得到的量子效率<sup>[14]</sup>。植物的表现量子效率越高,其对光能的利用能力就越强。本研究中夏季凤丹AQY值大于春季,说明其在夏季对光能的利用能力较强。光补偿点在农业生产实践中有很大的意义。在间作和套作中选择搭配的作物种类,林带树种的配置等都与光补偿点有关。栽培过密或水肥过多,容易造成徒长,使得封行提前,作物中下部叶片接受的光照匮乏,低于光补偿点,叶片不但不能制造有机物,反而会消耗自身养分,导致作物减产。另外,毕玉伟等以盆栽条件下的凤丹为研究对象得出的光饱和点和补偿点范围均大于本研究结果,推测盆栽和田间气候因子的差异可能是造成这种不符情况的主要原因,也可能与P<sub>n</sub>-PAR数据拟合的方法<sup>[15]</sup>有关。

#### 3.2 凤丹光合作用对胞间CO<sub>2</sub>浓度的季节响应

普通空气中的CO<sub>2</sub>浓度偏低,制约了光合作用。CO<sub>2</sub>是光合作用的原料,是RuBP羧化酶的主要底物,其补偿点和饱和点是植物是否具有潜在高光合效率的重要指标。大田条件下凤丹在春季和夏季的CCP分别为138.184、54.256 μmol/mol,属一般C<sub>3</sub>植物范畴,说明在夏季凤丹对低浓度CO<sub>2</sub>的利用能力优于春季;春季的羧化效率高于夏季,表明凤丹在春季对低CO<sub>2</sub>浓度适应性更强。在达到远高于大气CO<sub>2</sub>浓度值400 μmol/mol左右的CSP时,凤丹的最大P<sub>n,max</sub>可分别达86.603、54.256 μmol/(m<sup>2</sup>·s),远大于同时期自然条件下的最高净光合速率,说明凤丹还具有巨大的光合潜力。在一定的CO<sub>2</sub>浓度范围内,适当增施CO<sub>2</sub>肥会极大促进油用牡丹产量。

#### 参考文献:

- [1]李嘉珏,张西方,赵孝庆. 中国牡丹[M]. 北京:中国大百科全书出版社,2011:2-3.
- [2]周琳,王雁. 我国油用牡丹开发利用现状及产业化发展对策[J]. 世界林业研究,2014,27(1):68-71.
- [3]张涛,高天姝,白瑞英,等. 油用牡丹利用与研究进展[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版),2015,32(2):143-149.
- [4]梁文斌,聂东伶,吴思政,等. 短梗大参光合作用光响应曲线及模型拟合[J]. 经济林研究,2014,32(4):38-44.
- [5]Baly E C. The kinetics of photosynthesis [J]. Proceedings of the Royal Society of London Series B (Biological Sciences), 1935, 117 (1):218-239.
- [6]张中峰,黄玉清,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.
- [7]Ye Z P, Yu Q. A coupled model of stomatal conductance and

范博文, 龚教龙, 林俊俊, 等. 碳、氮源对猴头菌菌丝和子实体生长及胞外酶的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(18): 122-126.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.18.030

# 碳、氮源对猴头菌菌丝和子实体生长及胞外酶的影响

范博文, 龚教龙, 林俊俊, 赵莹, 石新新, 唐春双, 王智慧, 李佐同, 杨克军, 赵长江

(黑龙江八一农垦大学农学院/寒地作物种质改良与栽培重点实验室, 黑龙江大庆 163319)

**摘要:**以猴头菌(*Hericium erinaceus*)菌种“RT22”为材料,研究猴头菌菌丝及子实体原基营养生理特性。将猴头菌接种到不同碳、氮源培养基上培养,测定其菌丝生长速度、子实体原基品质及胞外酶活性等相关指标。结果发现:不同碳、氮源对猴头菌菌丝生长速度影响不同,猴头菌菌丝生长速度较快的处理为葡萄糖、果糖2种碳源和酵母膏、酵母浸粉、蛋白胨3种氮源。不同碳、氮源对猴头菌子实体原基形成影响不同,只有葡萄糖、蔗糖2种碳源和酵母膏、酵母浸粉、蛋白胨3种氮源可以形成子实体原基。不同碳、氮源会导致猴头菌胞外酶活性发生变化,且胞外酶活性与菌丝干质量存在着正相关关系。

**关键词:**猴头菌;碳源;氮源;菌丝体;子实体;胞外酶活性

**中图分类号:** S646.906 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)18-0122-05

猴头菌(*Hericium erinaceus*)是我国珍贵的食药兼用真菌<sup>[1]</sup>,属于猴菇目猴菇科猴菇属<sup>[2]</sup>。猴头菌味道鲜美,营养丰富,有“山珍猴头、海味燕窝”之称。近几年,随着市场需求的增大,人们对猴头菌的研究也不断加大。但研究主要集中在栽培技术方面,对猴头菌的生理特性研究较少,且不具有系统性。赵占国等认为猴头菌菌丝生长最适宜的碳源为葡萄糖和甘露糖,麦芽糖、淀粉、乳糖等次之<sup>[3]</sup>。石勇民等认为猴头菌菌丝在蛋白胨作为氮源的培养基中干质量最大,酵母膏次之,并且对于有机氮的利用效果强于无机氮<sup>[4]</sup>。何锦星通过利用棉籽壳和酒渣2种不同培养料栽培猴头菌,将所得到的

两种子实体与野生猴头菌子实体进行对比,发现三者品质都不同,表明了不同营养对猴头菌子实体品质有一定影响<sup>[5]</sup>。目前,对猴头菌所需不同种类碳、氮源的研究主要集中在菌丝期,原因是按照传统方法单一碳、氮源固体培养很难形成子实体,而吴政声用液体培养在9种食用菌中做出菇试验,成功形成子实体<sup>[6]</sup>。将液体培养与探究碳、氮源对猴头菌营养利用相结合,能更深一步了解不同营养对猴头菌理化性质的影响。本试验通过探究不同碳、氮源对猴头菌菌丝和子实体生长以及胞外酶的影响,为猴头菌营养利用规律提供理论依据。

## 1 材料与与方法

### 1.1 供试菌株

猴头菌(*Hericium erinaceus*)菌株 RT22 由黑龙江省农业科学院牡丹江分院提供。

### 1.2 培养基

基础培养基(蛋白胨葡萄糖琼脂培养基):蛋白胨 2.0 g,葡萄糖 20.0 g,磷酸氢二钾 1.0 g,硫酸镁 0.5 g,磷酸二氢钾 0.5 g,维生素 B<sub>1</sub> 0.5 g,琼脂 20.0 g,水 1 000.0 mL。

碳源固体培养基:将基础培养基中葡萄糖分别用供试碳源(麦芽糖、乳糖、葡萄糖、蔗糖、淀粉、纤维素、果糖)替代,供试碳源浓度为 20 g/L。

碳源液体培养基:去掉固体培养基配方中琼脂,并将基础

收稿日期:2017-03-22

基金项目:中央引导地方科技发展专项(编号:ZY16A06);黑龙江省应用技术与开发计划(编号:GZ13B018);黑龙江省大庆市创新能力建设项目(编号: SJH-2013-35);农垦总局科技攻关项目(编号: HNK135-02-05);黑龙江八一农垦大学研究生创新项目(编号: YJSCX2016-Y01)。

作者简介:范博文(1992—),男,黑龙江克山人,硕士研究生,主要从事食用菌栽培研究。E-mail:1227507946@qq.com。

通信作者:李佐同,博士,教授,博士生导师,研究方向为作物高产栽培技术理论与秸秆循环再生利用, E-mail:lxg6401999@163.com;赵长江,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为作物逆境生理生化及秸秆循环再生利用, E-mail:zhaocj15@126.com。

photosynthesis for winter wheat[J]. Photosynthetica, 2008, 46(4): 637-640.

[8] Farquhar G D, Caemmerers S, Berry J A. A biochemical model of photosynthetic CO<sub>2</sub> assimilation in leaves of C<sub>3</sub> species[J]. Planta, 1980, 149(1): 78-90.

[9] Yu Q, Zhang Y Q, Liu Y F, et al. Simulation of the stomatal conductance of winter wheat in response to light, temperature and CO<sub>2</sub> changes[J]. Annals of Botany, 2004, 93(4): 435-441.

[10] 叶子飘. 光合作用对光和 CO<sub>2</sub> 响应模型的研究进展[J]. 植物生态学报, 2010, 34(6): 727-740.

[11] 邱国雄. 植物光合作用的效率[C]//余文叔. 植物生理学和分子生物学. 北京:科学出版社, 1992: 236-243.

[12] 王富刚, 徐伟洲, 亢福仁, 等. 不同坡向条件下小叶杨光合响应曲线研究[J]. 水土保持研究, 2015, 22(6): 177-182.

[13] 德庆措姆, 高松. 红颜草莓不同距离分株对光强和 CO<sub>2</sub> 浓度的响应特征[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(9): 208-210.

[14] 陈晓亚, 薛红卫. 植物生理与分子生物学[M]. 北京:高等教育出版社, 2012, 6: 267-279.

[15] 毕玉伟, 秦俊, 王奎玲, 等. 不同季节凤丹光合特性的初步研究[J]. 天津农业科学, 2011, 17(1): 18-21.