

# 紫色辣椒夏季坐果率及其主要光合特性分析

隋益虎<sup>1,2</sup>, 钱春桃<sup>1</sup>, 陈劲枫<sup>1,\*</sup>, 史建磊<sup>1</sup>, 胡能兵<sup>2</sup>, 曹玉杰<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>南京农业大学园艺学院, 作物遗传与种质创新国家重点实验室, 南京 210095; <sup>2</sup>安徽科技学院生命科学学院, 安徽凤阳 233100)

**摘要:** 夏季在塑料日光温室中采用人工蕾期授粉法, 对 18 份紫色和 21 份绿色辣椒进行自交, 并选择其中 10 份紫色和 9 份绿色材料做完全随机相互杂交, 统计坐果率; 选择叶片颜色具有代表性的 5 个品种, 绿色品种 7035、浓紫 7033、中紫 7037、略紫 7034 (叶脉为紫色) 和略紫 7039 (叶脉为绿色), 检测其叶片色素含量、主要光合过程指标和叶绿素荧光参数。结果表明: (1) 紫色品种平均自交坐果率 (72.19%) 高于绿色品种 (37.12%), 紫色品种×绿色品种坐果率 (55.99%) 高于绿色品种×紫色品种和 (21.60%)。 (2) 紫色品种叶片花青素 (An) 含量、叶绿素 a、b 比值 (Chl.a/b) 都显著高于绿色品种, 但两者 Chl.b 含量无差异; 多数紫色品种的 Chl.a 及类胡萝卜素 (Car) 含量高于绿色品种。 (3) 所有品种的蒸腾速率 ( $T_r$ )、气孔导度 ( $G_s$ ) 及  $P_n$  日变化趋势一致, 紫色品种  $P_n$  达极大值时的光合有效辐射 (PAR)、光补偿点 (LCP) 和光饱和点 (LSP) 以及一天中的高温时段实际  $P_n$  都显著地高于绿色品种, 而表观量子效率 (AQY) 低于绿色品种。 (4) 绿色辣椒只在光系统 II (PSII) 的“反应中心水平”减轻过剩能量的伤害, 紫色辣椒除此之外还在“天线水平”防止太阳能被原初反应过多吸收; 与绿色品种相比, 7033 和 7034 所吸收 (ABS/CS)、捕获 ( $TR_o/CS$ ) 和传递 ( $ET_o/CS$ ) 的能量总量较低, 但同时耗散 ( $DI_o/CS$ ) 也低, 而最大荧光 ( $F_m$ )、最大光化学效率 ( $F_v/F_m$ )、潜在光化学效率 ( $F_v/F_o$ ) 和电子传递效率 ( $ET_o/TR_o$ ) 等都很高。

**关键词:** 紫色辣椒; 花青素; 坐果率; 光合作用; 叶绿素荧光

**中图分类号:** S 641.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0513-353X (2011) 01-0077-10

## Fruit Setting Rate and Major Photosynthetic Characteristics of Purple Chili Peppers During Summer Conditions

SUI Yi-hu<sup>1,2</sup>, QIAN Chun-tao<sup>1</sup>, CHEN Jin-feng<sup>1,\*</sup>, SHI Jian-lei<sup>1</sup>, HU Neng-bing<sup>2</sup>, and CAO Yu-jie<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>College of Horticulture, State Key Laboratory of Crop Genetics and Germplasm Enhancement, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; <sup>2</sup>College of Life Science, Anhui Science and Technology University, Fengyang, Anhui 233100, China)

**Abstract:** An experiment was conducted in a plastic greenhouse to assess fruit setting rate and major photosynthetic and chlorophyll characteristics of purple and green chili pepper varieties in summer. For self fruit setting studies, 18 and 21 purple and green varieties, respectively were hand pollinated at blossom bud stage. Similarly, 10 purple and 9 green chili peppers were randomly selected for reciprocal hybridization to evaluate cross fruit setting rate. Main parameters of photosynthesis and chlorophyll fluorescence were measured from 5 varieties of chili pepper with diverse leaf colours, green 7035, high

收稿日期: 2010-02-01; 修回日期: 2010-12-23

基金项目: 国家“863”计划项目(2008AA10Z150); 安徽省科技厅重点项目(05023120); 安徽省教育厅青年人才基金项目(2009SQRZ110)

\* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: jfchen@njau.edu.cn)

purple 7033, medium purple 7037, slight purple 7034 (with purple veins), and slight purple 7039 (with green veins) to assess the pigment content. The following results were obtained: (1) significantly higher fruit self-setting rate of purple (72.19%) than the green chili peppers (37.12%), significantly higher fruit cross-setting rate was recorded. The fruit cross setting rate was 55.99 and 21.60% when purple and green chili pepper varieties were used as female parents respectively. (2) the amount anthocyanin ( $A_n$ ) and ratio of chlorophyll a and b (Chl. a/b) were significantly higher in leaves of purple chili than the green ones, amount Chl. a and carotenoid (Car) were also higher in most purple chili peppers, but insignificantly in amount Chl. b. (3) transpiration rate ( $T_r$ ), stomatal conductance ( $G_s$ ) and net photosynthetic rate ( $P_n$ ) of purple and green chili pepper showed a similar trend of double peak curve. Light compensation point (LCP), light saturation point (LSP) and actual  $P_n$  during the day time of high temperatures were significantly higher while apparent quantum efficiency (AQY) were lower in all purple varieties than the green ones. (4) purple chili pepper could prevent excessive absorption of solar energy by pigment antennas besides by partly reversible inactivation of the reaction center (RC) of photosystem II (PS II) to reduce the harm of excess energy absorbed, the only strategy found in green pepper. The energy of dissipation ( $DI_o/CS$ ) as well as absorption ( $ABS/CS$ ), capture ( $TR_o/CS$ ) and delivery ( $ET_o/CS$ ) in purple varieties 7033 and 7034 was lower, while the maximum of fluorescence ( $F_m$ ), maximum of photochemical efficiency ( $F_v/F_m$ ), potential photochemical efficiency ( $F_v/F_o$ ) and electron transport efficiency ( $ET_o/TR_o$ ) were higher than the green pepper.

**Key words:** chili pepper; purple; pigment; fruit setting rate; photosynthesis; chlorophyll fluorescence

普通绿色辣椒为不耐高温、强光和干旱的蔬菜作物, 生产上常因栽培环境条件不适而落花落果(吴韩英等, 2001; 李修燕等, 2005)。设施蔬菜或露地喜温蔬菜生产中时常遭受中午高温、久阴乍晴天气或高温闷棚等骤然胁迫(高玉等, 2009), 培育新的抗性品种成为解决这一问题的关键。

紫色辣椒是我国稀有的种质资源, 自然或半野生状态下具有良好的耐逆(高温、干旱)、抗病(病毒病)等综合抗性特征(滕有德等, 1997)。隋益虎等(2004a, 2004b, 2005)研究了温度和盐胁迫对紫色辣椒氧化酶活性等方面的影响, 表明紫色辣椒的氧化酶活性强, 抗性优于绿色辣椒。目前关于紫色辣椒的研究较少(隋益虎等, 2007, 2009a, 2009b; 胡能兵等, 2008), 既不深入也不系统, 重要的基础性研究如光合、水分代谢过程还未见报道, 因此使得这一稀有抗性资源难以有效地开发与利用。

本试验中选择了有代表性的温室条件和具有较大环境压力的夏季, 在对环境响应最敏感的花果期研究紫色辣椒与绿色辣椒重要产量构成要素—坐果率的差异, 并从光合作用角度, 探索造成两者坐果差异的发生机制, 为进一步利用紫色辣椒的优良性状选育适于夏秋高温栽培的高光效辣椒品种提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料及其坐果率测定

18份紫色辣椒材料为4个亲本聚合杂交后代经9代自交定向选择的品种或纯系, 适于干制或鲜食。紫色性状来自同一祖先‘永宁紫椒’, 各品种(系)植株紫色程度不同。21份绿色材料为南京农业大学园艺学院作物遗传与种质创新国家重点实验室保存的常规辣椒种质(小果类型), 编号见

表 1、表 2。

试验于 2007 年 3—9 月在南京农业大学园艺实验站塑料日光温室中进行。温室的围裙设有防虫网, 全程覆盖顶膜, 不设遮阳网。全部 39 份材料均做自交授粉, 同时选择 10 份紫色、9 份绿色材料做相互杂交授粉。自交与杂交采用严格的人工蕾期授粉法完全随机进行。穴盘育苗, 每份材料选取 3 株(用于自交)或 6 株(同时做自交和杂交)于 4 月 2 日单株定植于 25 cm × 30 cm(直径 × 高)花盆中, 以后每 10~15 d 挪换花盆位置 1 次, 使温光等环境因子尽量一致, 其它按常规管理。5 月 20 日开始授粉挂牌, 8 月 15 日授粉结束。9 月上旬分别统计紫色辣椒与普通绿色辣椒的自交坐果率, 紫色辣椒 × 绿色辣椒及绿色辣椒 × 紫色辣椒的杂交坐果率。

## 1.2 色素含量与光合特性测定

选择叶片颜色具有代表性的 5 个辣椒品种各 3 株, 用打孔器打取“八面风”叶的圆片 20 枚(在光合和荧光参数测定后进行), 按隋益虎等(2009b)方法测定花青素(An)含量。另取 20 枚, 按李合生等(2001)方法测定叶绿素(Chl.a、Chl.b)和类胡萝卜素(Car)的含量。

利用 CI-310 便携式光合仪及 CI-301LA 控光装置(CID 公司, 美国)于生长盛期测定上述 5 个辣椒品种植株“八面风”叶片的主要光合指标。

光响应曲线: 叶室光合有效辐射(PAR)梯度设置为 10、60、110、160、210、410、610、810、1 010、1 210、1 410、1 610  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 在室温(25 ± 2) °C 和开放模式下测定。光补偿点(LCP)、光饱和点(LSP)以及表观量子效率(AQY)按睦晓蕾等(2005)方法求算。光合日变化: 6 月下旬从 7: 00—18: 00 每小时测定 1 次, 温室内气温(离地面 50 cm 处)变化范围为 21.3~40.9 °C, CO<sub>2</sub> 浓度为 331.5~493.2  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 空气相对湿度(RH)为 35.7%~65.2%。测定指标包括净光合速率( $P_n$ )、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度( $C_i$ )、蒸腾速率( $T_r$ )及气孔导度( $G_s$ )等。每次测量取 2~3 个叶样, 每个叶片记录 3 次数据, 取平均值。

分别在晴天的 7: 30—19: 30 每 2 h 用 Handy PEA 脉冲式叶绿素荧光分析仪(Hansatech 公司, 英国)测定上述 5 个品种(各选 3 片功能叶)荧光参数指标 1 次: 初始荧光( $F_0$ )、最大荧光( $F_m$ )、潜在光化学效率( $F_v/F_0$ )、最大光化学效率( $F_v/F_m$ )、每个反应中心吸收能量( $ABS/CS$ )、捕获能量( $TR_0/CS$ )、耗散能量( $DI_0/CS$ )、电子传递能量( $ET_0/CS$ )、 $F_0 - F_m$  荧光曲线面积(Area)、单位激发横截面有活性反应中心的浓度( $RC/CS_m$ )、综合活力指数 PI 等参数由仪器自动测得, 计算电子传递效率( $ET_0/TR_0$ )并对最高温时刻进行快速叶绿素荧光动力学分析(OJIP-test)。测定前各个叶片暗适应 30 min。

数据分析采用软件 SPSS 13.0 for Windows; OJIP-test 图由软件 Handy PEA V1.30 生成。

## 2 结果与分析

### 2.1 紫色辣椒与绿色辣椒夏季自交和杂交坐果的差异

在夏季高温强光下, 所有参试辣椒品种的总体平均自交坐果率低, 只有 52.54%(表 1), 而紫色品种平均自交坐果率(72.19%)几乎是绿色品种(37.12%)的 2 倍,  $\chi^2$  测验表明前者极显著地高于后者。

所有参试辣椒品种总体平均杂交坐果率只有 37.82%, 但以紫色品种为母本平均杂交坐果率(55.99%)约是以绿色品种为母本平均杂交坐果率(21.60%)的 2.6 倍,  $\chi^2$  测验表明前者也极显著高于后者(表 2)。

表 1 紫色与绿色辣椒材料编号及其蕾期自交坐果情况

Table 1 Code of accessions and fruit setting of self-pollinated green and purple chili pepper

| 材料编号/植株颜色<br>Code of accessions /<br>plant colour | 授粉花数<br>Number flower<br>self-pollinated | 坐果数/率/%<br>Number/Percentage<br>fruit set | 材料编号/植株颜色<br>Code of accessions /<br>Plant colour | 授粉花数<br>Number flower<br>self-pollinated | 坐果数/率/%<br>Number / Percentage<br>fruit set |
|---|--|---|---|--|---|
| 7001 /Green                                       | 36                                       | 2/ 5.6                                    | 7038 /Green                                       | 12                                       | 9/ 75.0                                     |
| 7002 /Green                                       | 13                                       | 6/ 46.2                                   | 7039 /Purple                                      | 33                                       | 19/ 57.6                                    |
| 7008 /Green                                       | 10                                       | 2/ 20.0                                   | 7040 /Purple                                      | 20                                       | 20/ 100.0                                   |
| 7009 /Green                                       | 38                                       | 17/ 44.7                                  | 7042 /Purple                                      | 21                                       | 10/ 47.6                                    |
| 7012 /Green                                       | 8  | 2/ 25.0                                   | 7043 /Purple                                      | 33                                       | 24/ 72.7                                    |
| 7013 /Green                                       | 9  | 6/ 66.7                                   | 7045 /Purple                                      | 31                                       | 24/ 77.4                                    |
| 7015 /Green                                       | 19                                       | 3/ 15.8                                   | 7046 /Purple                                      | 55                                       | 37/ 67.3                                    |
| 7016 /Green                                       | 25                                       | 24/ 96.0                                  | 7047 /Green                                       | 36                                       | 7/ 19.4                                     |
| 7018 /Green                                       | 21                                       | 12/ 57.1                                  | 7049 /Green                                       | 20                                       | 12/ 60.0                                    |
| 7019 /Green                                       | 35                                       | 12/ 34.3                                  | 7050 /Purple                                      | 8  | 5/ 62.5                                     |
| 7020 /Green                                       | 20                                       | 0/ 0.0                                    | 7051 /Green                                       | 13                                       | 10/ 76.9                                    |
| 7024 /Green                                       | 20                                       | 3/ 15.0                                   | 7054 /Purple                                      | 4  | 4/ 100.0                                    |
| 7025 /Green                                       | 12                                       | 3/ 25.0                                   | 7056 /Purple                                      | 2  | 2/ 100.0                                    |
| 7028 /Green                                       | 16                                       | 7/ 43.8                                   | 7058 /Purple                                      | 23                                       | 18/ 78.3                                    |
| 7031 /Green                                       | 23                                       | 7/ 30.4                                   | 7059 /Purple                                      | 2  | 2/ 100.0                                    |
| 7032 /Green                                       | 24                                       | 8/ 33.3                                   | 7068 /Purple                                      | 2  | 2/ 100.0                                    |
| 7033 /Purple                                      | 5  | 3/ 60.0                                   | 7076 /Purple                                      | 3  | 3/ 100.0                                    |
| 7034 /Purple                                      | 27                                       | 17/ 63.0                                  | 7078 /Purple                                      | 4  | 4/ 100.0                                    |
| 7035 /Green                                       | 21                                       | 8/ 38.1                                   | 总计 Total  | 769                                      | 404/ 52.54                                  |
| 7036 /Purple                                      | 28                                       | 23/ 82.1                                  | 紫色 Purple   | 338                                      | 244/ 72.19                                  |
| 7037 /Purple                                      | 37                                       | 27/ 73.0                                  | 绿色 Green  | 431                                      | 160/ 37.12                                  |

表 2 紫色与绿色辣椒的杂交组合及其蕾期正反交坐果情况

Table 2 Reciprocal hybridization combinations between green and purple chili pepper and their fruit setting

| 亲本 1 编号<br>Code of<br>parent 1 | 亲本 2 编号<br>Code of<br>parent 2 | 正交 Parent 1 as female and parent 2 as male |   | 反交 Parent 2 as female and parent 1 as male |   |
|--------------------------------|--------------------------------|--|---|--|---|
|                                |                                | 授粉花数 Number<br>flower pollinated           | 坐果数/率/%<br>Number/Percentage<br>fruit set | 授粉花数 Number<br>flower pollinated           | 坐果数/率/%<br>Number / Percentage<br>fruit set |
| 7009 /Green                    | 7033 /Purple                   | 13   | 1/ 7.7                                    | 14   | 8/ 57.1                                     |
| 7009 /Green                    | 7036 /Purple                   | 22   | 1/ 4.5                                    | 8  | 7/ 87.5                                     |
| 7009 /Green                    | 7037 /Purple                   | 10   | 2/ 20.0                                   | 7  | 1/ 14.3                                     |
| 7009 /Green                    | 7039 /Purple                   | 3  | 2/ 66.7                                   | 3  | 3/ 100.0                                    |
| 7009 /Green                    | 7043 /Purple                   | 14   | 2/ 14.3                                   | 6  | 6/ 100.0                                    |
| 7009 /Green                    | 7045 /Purple                   | 15   | 0/ 0.0                                    | 3  | 3/ 100.0                                    |
| 7009 /Green                    | 7046 /Purple                   | 2  | 1/ 50.0                                   | 4  | 4/ 100.0                                    |
| 7009 /Green                    | 7076 /Purple                   | 3  | 1/ 33.3                                   | 7  | 4/ 57.1                                     |
| 7009 /Green                    | 7078 /Purple                   | 4  | 2/ 50.0                                   | 4  | 4/ 100.0                                    |
| 7012 /Green                    | 7033 /Purple                   | 2  | 0/ 0.0                                    | 8  | 5/ 62.5                                     |
| 7018 /Green                    | 7043 /Purple                   | 6  | 0/ 0.0                                    | 5  | 1/ 20.0                                     |
| 7018 /Green                    | 7033 /Purple                   | 7  | 1/ 14.3                                   | 8  | 5/ 62.5                                     |
| 7019 /Green                    | 7033 /Purple                   | 0  | -   | 13   | 8/ 61.5                                     |
| 7020 /Green                    | 7033 /Purple                   | 33   | 0/ 0.0                                    | 21   | 5/ 23.8                                     |
| 7020 /Green                    | 7036 /Purple                   | 2  | 0/ 0.0                                    | 5  | 3/ 60.0                                     |
| 7020 /Green                    | 7042 /Purple                   | 20   | 0/ 0.0                                    | 1  | 1/ 100.0                                    |
| 7020 /Green                    | 7045 /Purple                   | 7  | 0/ 0.0                                    | 1  | 0/ 0.0                                      |
| 7032 /Green                    | 7033 /Purple                   | 7  | 0/ 0.0                                    | 11   | 4/ 36.4                                     |
| 7032 /Green                    | 7037 /Purple                   | 7  | 5/ 71.4                                   | 15   | 3/ 20.0                                     |
| 7032 /Green                    | 7042 /Purple                   | 23   | 2/ 8.7                                    | 9  | 1/ 11.1                                     |
| 7032 /Green                    | 7045 /Purple                   | 22   | 4/ 18.2                                   | 16   | 12/ 75.0                                    |
| 7032 /Green                    | 7046 /Purple                   | 22   | 7/ 31.8                                   | 38   | 12/ 31.6                                    |
| 7035 /Green                    | 7033 /Purple                   | 11   | 2/ 18.2                                   | 9  | 4/ 44.4                                     |
| 7035 /Green                    | 7036 /Purple                   | 3  | 2/ 66.7                                   | 2  | 1/ 50.0                                     |
| 7035 /Green                    | 7037 /Purple                   | 22   | 14/ 63.6                                  | 18   | 5/ 27.8                                     |
| 7035 /Green                    | 7042 /Purple                   | 32   | 15/ 46.9                                  | 27   | 17/ 63.0                                    |
| 7035 /Green                    | 7043 /Purple                   | 9  | 1/ 11.1                                   | 6  | 3/ 50.0                                     |
| 7035 /Green                    | 7045 /Purple                   | 16   | 10/ 62.5                                  | 30   | 25/ 83.3                                    |
| 7035 /Green                    | 7046 /Purple                   | 13   | 0/ 0.0                                    | 42   | 36/ 85.7                                    |
| 7047 /Green                    | 7033 /Purple                   | 0  | -   | 6  | 3/ 50.0                                     |
| 7047 /Green                    | 7037 /Purple                   | 9  | 0/ 0.0                                    | 6  | 5/ 83.3                                     |
| 7047 /Green                    | 7042 /Purple                   | 11   | 1/ 9.1                                    | 8  | 5/ 62.5                                     |
| 7047 /Green                    | 7045 /Purple                   | 10   | 0/ 0.0                                    | 11   | 10/ 90.9                                    |
| 7047 /Green                    | 7046 /Purple                   | 16   | 0/ 0.0                                    | 12   | 9/ 75.0                                     |
| 7049 /Green                    | 7033 /Purple                   | 18   | 0/ 0.0                                    | 10   | 3/ 30.0                                     |
| 7049 /Green                    | 7037 /Purple                   | 11   | 5/ 45.5                                   | 11   | 3/ 27.3                                     |
| 7049 /Green                    | 7042 /Purple                   | 18   | 6/ 33.3                                   | 12   | 6/ 50.0                                     |
| 7049 /Green                    | 7043 /Purple                   | 16   | 3/ 18.8                                   | 3  | 0/ 0.0                                      |
| 7049 /Green                    | 7045 /Purple                   | 34   | 12/ 35.3                                  | 13   | 10/ 76.9                                    |
| 7049 /Green                    | 7046 /Purple                   | 21   | 9/ 42.9                                   | 26   | 12/ 46.2                                    |
| 总计 Total                       |                                | 514  | 111/ 21.6                                 | 459  | 257/ 56.0                                   |

## 2.2 紫色辣椒与绿色辣椒夏季叶片色素含量的差异

从叶片外观颜色看, 7033 浓紫, 7037 中紫, 7039 和 7034 略紫 (7039 叶脉为绿色), 而 7035 绿色 (图 1)。方差分析表明, 叶片花青素含量 ( $A_n$ ) 从高到低依次是 7033>7037>7039、7034>7035, 最高紫色品种 7033 的  $A_n$  达 21.6 个浓度单位, 绿色品种 7035 几乎检测不出  $A_n$  (仅 0.125 个单位)。叶绿素含量差异也显著, 其中 Chl.a 含量以 7033、7034、7039 (无显著差异) 显著高于 7035 和 7037; Chl.b 含量紫色与绿色品种间无显著差异, 但 7035 的 Chl. (a/b) 值为 3.67, 显著低于 7033 (4.51)、7039 (4.54)、7034 (4.35) 和 7037 (4.41); Car 含量则 7034、7039 和 7033 显著高于 7035。由此可知, 在紫色辣椒的花青素含量高于绿色辣椒的同时, 叶绿素及 Car 含量未必低于绿色的品种。另外, 紫色辣椒叶片中花青素的多少与 Chl.a、Chl.b 及 Car 等光合色素的含量没有显著的相关关系。

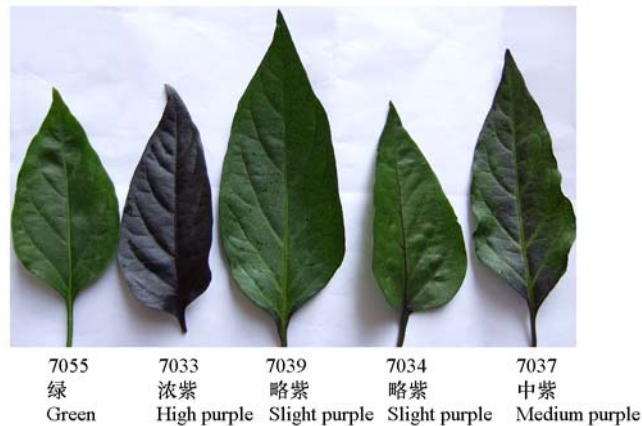


图 1 不同辣椒品种的叶片颜色

Fig. 1 Leaf color of different chili pepper varieties

## 2.3 紫色辣椒与绿色辣椒夏季叶片光合特性比较

$P_n - PAR$  响应曲线 (图 2) 显示: 5 个辣椒品种的  $P_n$  随  $PAR$  增大呈现先增加后下降趋势, 其中紫色品种 7033、7039、7034 和 7037 的  $P_n$  达极大值时的  $PAR$  较绿色品种 7035 大。结合表 3 可知, 所有紫色品种的  $LCP$  和  $LSP$  都显著地高于绿色品种, 而  $AQY$  显著地低于 7035。因此说明紫色品种耐强光的能力高于绿色品种。

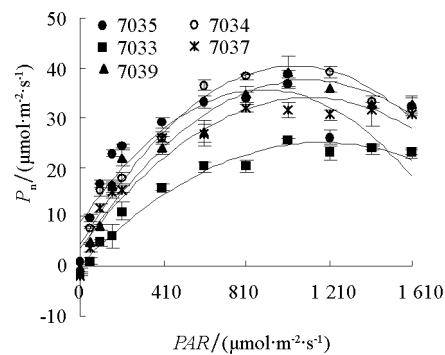


图 2 辣椒净光合速率 ( $P_n$ ) 的光响应曲线

Fig. 2 Light response curves of net photosynthetic rate ( $P_n$ ) in chili pepper

表 3 紫色与绿色辣椒的光补偿点 ( $LCP$ )、光饱和点 ( $LSP$ )、光饱和光合速率 ( $PR_{L,S}$ ) 和表观量子效率 ( $AQY$ )  
Table 3 Light compensation point ( $LCP$ ), light saturation point ( $LSP$ ), photosynthetic rate at light saturation point ( $PR_{L,S}$ ) and apparent quantum yield ( $AQY$ ) of purple and green chili pepper

| 材料编号 Code of accessions | $LCP/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$ | $LSP/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$ | $PR_{L,S}/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$ | $AQY/(\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1})$ |
|-------------------------|---|---|--|--|
| 7035                    | 10.50 ± 0.62 d  | 906.04 ± 10.74 d  | 36.55 ± 2.44 b   | 0.1176 ± 0.0012 d                      |
| 7033                    | 20.01 ± 1.23 a  | 1 173.98 ± 22.26 a  | 24.96 ± 1.87 d   | 0.0593 ± 0.0008 a                      |
| 7039                    | 14.61 ± 1.31 b  | 1 110.75 ± 23.53 b  | 37.51 ± 1.65 b   | 0.1109 ± 0.0008 c                      |
| 7034                    | 11.65 ± 0.78 c  | 1 043.49 ± 18.39 c  | 40.45 ± 1.95 a   | 0.0923 ± 0.0021 b                      |
| 7037                    | 14.80 ± 1.14 b  | 1 111.57 ± 14.89 b  | 33.94 ± 2.13 c   | 0.0903 ± 0.0014 b                      |

注: 表中数据为平均值 ± 标准误; 同一列内不同小写字母表示差异达 0.05 显著水平。

Note: Values are means ± SE. The different small letters in a column denote significant difference at  $P = 0.05$  level.

$P_n$ 总体呈现双峰曲线,最高峰出现在12:00前后,次高峰在14:00—15:00;绿色品种7035在中午前后的高温时段(10:00—15:00)  $P_n$ 比所有的紫色品种低。

$G_s$ 变化趋势基本与  $P_n$ 一致;绿色品种7035在高温时段10:00后迅速降低,然后平稳变化,而紫色品种12:00后才迅速降低,14:00—15:00快速上升,变幅也大(图3)。

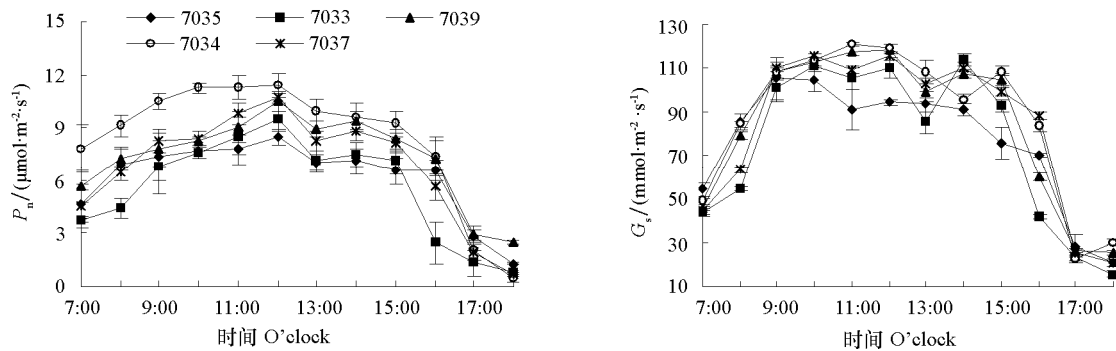


图3 紫色与绿色辣椒叶片净光合速率 ( $P_n$ ) 和气孔导度 ( $G_s$ ) 的日变化  
Fig. 3 The diurnal variation of net photosynthetic rate ( $P_n$ ) and stomatal conductance ( $G_s$ ) in the leaves of purple and green chili pepper

$T_r$ 变化总体呈双峰曲线,在13:00并没有持续增加,这正是在低湿(RH约36%)高温(约41℃)下的生理适应性反应,可能部分气孔关闭,从而降低水分损失,尤其是紫色品种。 $C_i$ 没有显示与  $P_n$  相一致的变化规律。

进一步相关分析结果表明,  $A_n$  相对含量与  $T_r$  和  $P_n$  日平均值(极)显著负相关(相关系数  $R$  分别为  $-0.649^{**}$  和  $-0.629^*$ , 下同), 与  $G_s$  ( $-0.489$ )、 $C_i$  ( $0.245$ ) 相关性弱。因此,辣椒叶片紫色越浓,蒸腾速率、气孔导度越小,这有利于抵抗高温和干旱;若过浓,虽然胞间  $CO_2$  浓度有增加趋势,但净光合速率会下降。

## 2.4 紫色辣椒与绿色辣椒夏季叶片叶绿素荧光参数比较

由图4可见,紫色最浓的辣椒品种7033随着温室白天光强、温度、湿度等微生态环境变化,其初始荧光( $F_0$ )、最大荧光( $F_m$ )、单位光合机构吸收的能量( $ABS/CS$ )、捕获能量( $TR_0/CS$ )、耗散能量( $DI_0/CS$ )、电子传递能量( $ET_0/CS$ )、有活性反应中心的浓度( $RC/CS_m$ )等指标均处于最低水平。而其最大光化学效率( $F_v/F_m$ )、潜在光化学效率( $F_v/F_0$ )、与暗反应相关的电子传递效率( $ET_0/TR_0$ )等指标均处于很高或最高水平,这些参数情况通过活力(驱动力)指数  $PI$  得到综合反应。

荧光曲线面积( $Area$ )反应的是电子传递从反应中心到醌池受阻情况,在上午随温度升高略变小,表明受阻变大,下午随温度下降而恢复变大,并且在几个辣椒品种中处于中等变化水平。

绿色品种7035的  $F_0$ 、 $ABS/CS$ 、 $TR_0/CS$ 、 $DI_0/CS$  等指标均处于很高或最高水平,而  $F_m$ 、 $F_v/F_m$ 、 $F_v/F_0$ 、 $ET_0/CS$ 、 $ET_0/TR_0$ 、 $RC/CS_m$ 、 $PI$  等指标几乎处于最低水平,尤其在综合环境最不利的中午13:30前后。但7035的  $Area$  与7033的无差异。略紫品种7034的结构性参数( $F_v/F_m$ 、 $F_v/F_0$ 、 $ET_0/TR_0$ 、 $RC/CS_m$ )及部分功能性参数( $F_m$ 、 $ET_0/CS$ 、 $Area$ )主体上尤其是中午前后处于最高水平,其它参数水平适中。

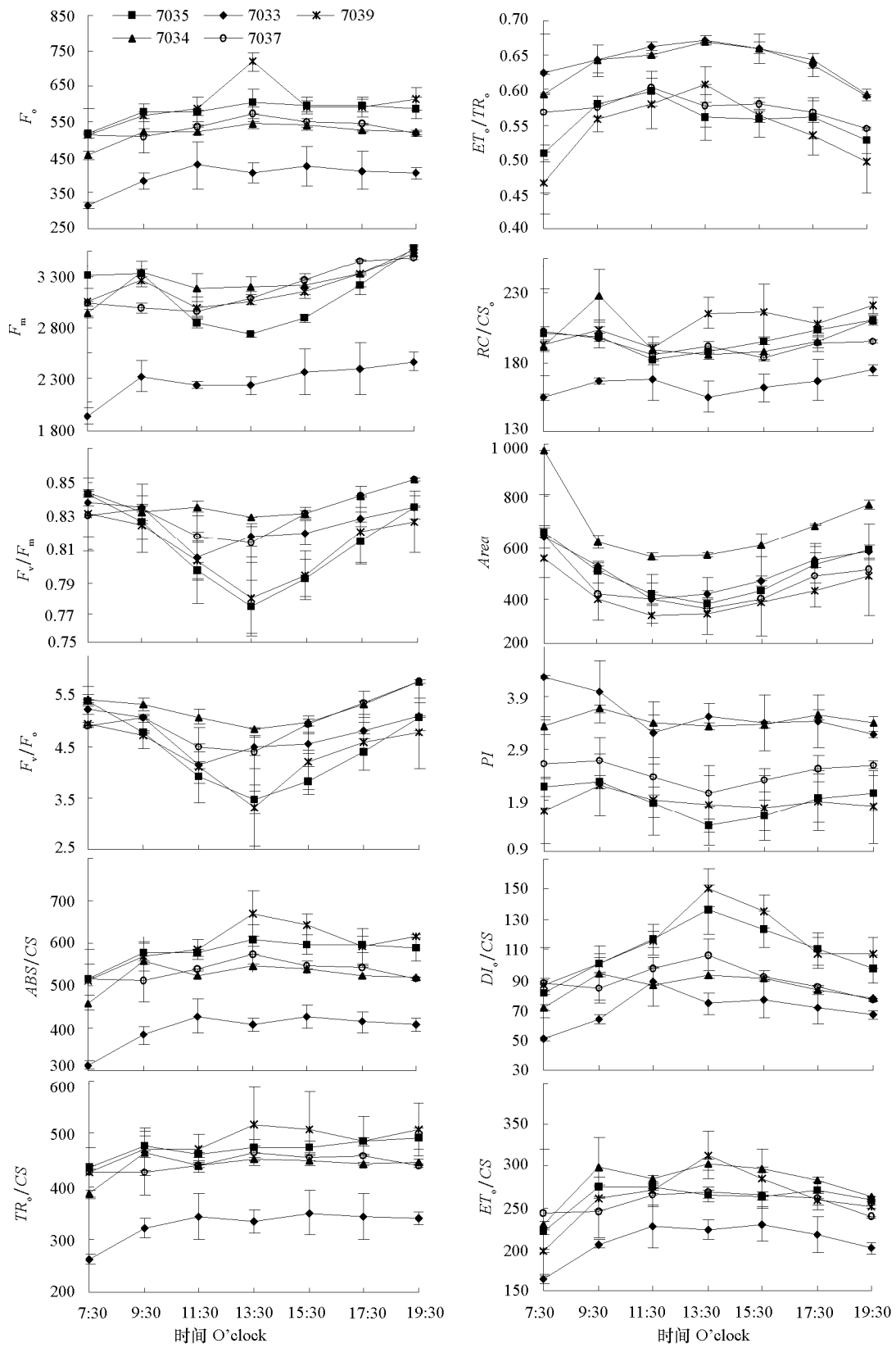


图 4 紫色与绿色辣椒叶片叶绿素荧光参数的日变化

Fig. 4 The diurnal variation of the chlorophyll fluorescence in the leaves of purple and green chili pepper

相关分析表明, An 相对含量与  $F_0$ 、 $F_m$ 、 $ABS/CS$ 、 $TR_0/CS$ 、 $ET_0/CS$ 、 $DI_0/CS$  和  $RC/CS_m$  值分别呈极显著负相关 ( $-0.917^{**}$ 、 $-0.905^{**}$ 、 $-0.921^{**}$ 、 $-0.934^{**}$ 、 $-0.928^{**}$ 、 $-0.804^{**}$  和  $-0.702^{**}$ ), 与  $ET_0/TR_0$  和  $PI$  呈显著正相关 ( $0.582^*$  和  $0.623^*$ ), 与  $F_v/F_m$  ( $0.291$ )、 $F_v/F_0$  ( $0.194$ )、 $Area$  ( $-0.125$ ) 相关性弱。可见, 辣椒叶片紫色越浓, 进入 PS II 一系列过程的能量则越低, 但同时耗散的也越低; 综合看来, 电子传递效率和驱动力较无紫色的显著提高。

快速叶绿素荧光动力学分析 (OJIP-test) (图 5) 表明: 5 个辣椒品种在夏季典型的天气条件下, 温室中最热温度 13: 30 时均未出现 K 相。推测此时环境状态仍为亚适宜状态, 但绿色品种 7035 的 J 相已有所提前, 说明对于 7035 可能已接近高限值, 逼近胁迫状态 (Srivastava et al., 1997)。

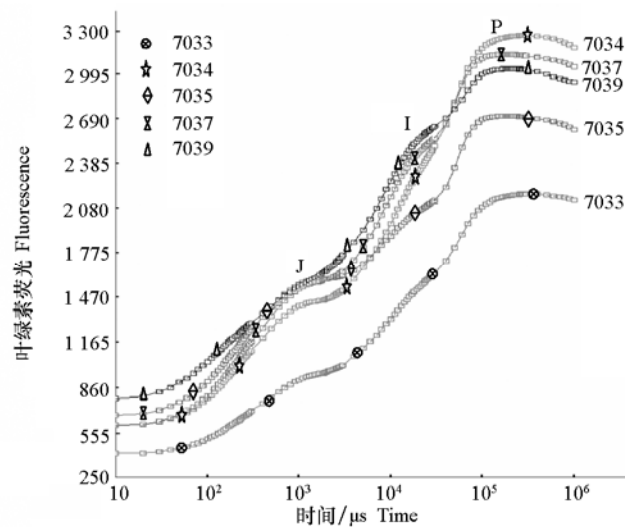


图 5 夏季温室 13: 30 综合环境对不同辣椒品种叶绿素荧光动力学影响

Fig. 5 Effects of summer special microclimate in plastic house at 13: 30 on the chlorophyll fluorescence transient of five varieties of chili pepper

### 3 讨论

#### 3.1 夏季温室微生态环境对紫色与绿色辣椒坐果和光合的影响

通常夏季影响光合作用的首要因子是高温, 同时强光常常伴随着高温影响作物光化学反应速率及光合酶类的活性 (付振书 等, 2005; 薛义霞 等, 2010), 引起 PS II 结构与功能参数可逆及不可逆性变化 (Krüger et al., 1997)。除了高温强光外, 本试验在温室中盆栽进行, 其湿度偏低可能是另一主要影响因子, 因为 RH 实际范围为 35.7% ~ 65.2%, 而辣椒开花期适宜 RH 为 60% ~ 80% (李修燕 等, 2005)。尽管作物开花期对水分最为敏感 (孙海锋 等, 2008), 但在蔬菜生产中为了兼顾对棚室病害的控制, 常常采用低湿管理, 加之盆栽的水分变化特点, 作物常经历失水和复水、高温、强光、低湿/干旱等胁迫过程。Medrano 等 (2002) 认为,  $G_s$  可作为  $C_3$  植物一个很好的干旱诱导不同光合过程的指标, 能够较好地评价干旱的气孔限制和非气孔限制。当  $G_s > 150 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 气孔限制在光合作用的下降中起主要作用; 当  $G_s < 50 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 非气孔限制起主要作用; 当  $G_s$  介于  $50 \sim 150 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 气孔与非气孔限制都很重要。本试验中  $G_s$  多处于两临界值之间, 因此夏季紫色与绿色辣椒一天中主要时段的光合差异存在着气孔与非气孔限制的双重影响。

本研究中紫色辣椒自交坐果率和以紫色辣椒为母本的杂交坐果率高于相应的绿色品种, 两者光



合、荧光参数变化是对温室微生态综合环境长时间反复响应的结果, 并由此推断紫色辣椒对夏季高温、强光、低湿环境的水平抗性强于绿色辣椒。

### 3.2 紫色与绿色辣椒的光合调节机制及其在育种中的应用

紫色辣椒因叶片含有花青素而呈现紫色, 并在可见光区域 540 nm 处有吸收峰(隋益虎等, 2009b), 这意味紫色叶片吸收非高能区域光线多, 导致原初光合量子产量不高; 另一方面花青素在紫外区域 265 nm 处有另一吸收峰(未发表资料), 从而一定程度上抵御了夏季强光/紫外线对光合机构的损伤或对光合酶活性的钝化(隋益虎等, 2009b)。本研究中紫色最浓的辣椒 7033 吸收能量 ( $ABS/CS$ ) 少, 有活性反应中心的浓度 ( $RC/CS_m$ ) 低以及与暗反应相关的电子传递效率 ( $ET_o/TR_o$ )、驱动力指数  $PI$  高恰好证明了这一推断。由此可见紫色辣椒在“天线水平”已经调控, 防止过多能量被吸收。而绿色辣椒 7035 的  $ABS/CS$ 、 $TR_o/CS$  高, 但  $RC/CS_m$  低, 仅存在“反应中心水平”的调控即通过反应中心可逆性失活(因在 13: 30 失活后  $RC/CS_m$  浓度又逐渐增大并恢复到第 2 天 7: 30 时的适宜水平)减轻已吸收的过剩能量对光合机构的伤害。

鉴于紫色最浓的辣椒品种 7033 所吸收、捕获、耗散及电子传递的能量都较低, 但  $F_v/F_m$ 、 $F_v/F_o$  和  $ET_o/TR_o$  都很高, 这些指标几乎与绿色品种 7035 相反, 再结合本试验中综合表现最佳的略紫品种 7034 的各项光合、荧光参数, 说明含有一定量花青素辣椒品种的光合系统对于已捕获能量的利用比绿色辣椒高效。另一方面, 由于含花青素多的紫色植株并不意味着叶绿素含量就降低, 同时光合能力的差异并不是因为叶绿素含量差异, 这在紫叶李(姜卫兵等, 2006)和紫甘蓝(王美玲等, 2008)上也得到证实。因此有望通过杂交手段, 在辣椒分离世代中选择出具有适中的叶绿素与花青素含量比值, 具有高  $ABS/CS$ 、 $F_m$ 、 $ET_o/TR_o$ 、 $P_n$  值和低  $F_o$  值的色素功能互补型植株, 实现在高温、强光和低湿下的高光效辣椒品种选育。

## References

- Fu Zhen-shu, Zhao Shi-jie, Meng Qing-wei, Wei You-ying. 2005. Study on difference of photosynthesis in cabbage (*Brassica oleracea* L.) cultivars (heat-sensitive and heat-tolerant) at high temperature in high light. *Acta Horticulturae Sinica*, 32 (1): 25 - 29. (in Chinese)
- 付振书, 赵世杰, 孟庆伟, 魏佑营. 2005. 高温强光下耐热性不同的两个甘蓝品种幼苗光合作用差异的研究. *园艺学报*, 32 (1): 25 - 29.
- Gao Yu, Gao Zhi-kui, Zhang Xiao-hui, Gao Rong-fu. 2009. Heat shock stress on photosystem II in white cucumbers probed by the fast fluorescence rise OJIP. *Acta Ecologica Sinica*, 29 (6): 3335 - 3341. (in Chinese)
- 高玉, 高志奎, 张晓慧, 高荣孚. 2009. 通过快速荧光动力学曲线探测白黄瓜光系统 II 的热胁迫效应. *生态学报*, 29 (6): 3335 - 3341.
- Hu Neng-bing, Sui Yi-hu, Zhang Zi-xue, Zhang Cong-yu, Cui Guang-rong, Bi Yan-lin. 2008. Establishment of axillary buds regeneration system of purple pepper. *Acta Laser Biology Sinica*, 17 (2): 251 - 255. (in Chinese)
- 胡能兵, 隋益虎, 张子学, 张从宇, 崔广荣, 毕彦林. 2008. 紫色辣椒腋芽增殖离体培养体系的建立. *激光生物学报*, 17 (2): 251 - 255.
- Jiang Wei-bing, Zhuang Meng, Shen Zhi-jun, Song Hong-feng, Cao Jing, Li Gang. 2006. Study on the photosynthetic characteristics of red-leaf peach and purple-leaf plum in different seasons. *Acta Horticulturae Sinica*, 33 (3): 577 - 582. (in Chinese)
- 姜卫兵, 庄猛, 沈志军, 宋宏峰, 曹晶, 李刚. 2006. 不同季节红叶桃、紫叶李的光合特性研究. *园艺学报*, 33 (3): 577 - 582.
- Krüger G H J, Tsimilli-Michael M, Strasser R J. 1997. Light stress provokes plastic and elastic modifications in structure and function of photosystem II in camellia leaves. *Physiologia Plantarum*, 101: 265 - 277.
- Li He-sheng. 2001. The experiment principle and technique for plant physiology and biochemistry. Beijing: Higher Education Press: 134 - 137. (in Chinese)
- 李合生. 2001. 植物生理生化实验原理和测定技术. 北京: 高等教育出版社: 134 - 137.
- Li Xiu-yan, Lu Jian-hua, Qian Ling, Li Wen-feng, Zhou Hai-kuan. 2005. Preventability of pepper cultured in greenhouse from flower and fruit fading. *Journal of China Capsicum*, (1): 28 - 29. (in Chinese)

- 李修燕, 吕建华, 钱 玲, 李文峰, 周海宽. 2005. 棚室辣椒落花落果的预防. 辣椒杂志, (1): 28 - 29.
- Medrano H, Escalona J M, Bota J, Gulias J, Flexas J. 2002. Regulation of photosynthesis of  $C_3$  plants in response to progressive drought: Stomatal conductance as a reference parameter. *Annals of Botany*, 89: 895 - 905.
- Srivastava A, Guishe B, Greppin H, Strasser R J. 1997. Regulation of antenna structure and electron transport in Photosystem II of *Pisum sativum* under elevated temperature probed by the fast polyphasic chlorophyll a fluorescence transient: OKJIP. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1320: 95 - 106.
- Sui Xiao-lei, Zhang Bao-xi, Zhang Zhen-xian, Mao Sheng-li, Wang Li-hao. 2005. Differences of photosynthetic characteristics and low light-tolerance in seedlings of four pepper cultivars. *Acta Horticulturae Sinica*, 32 (2): 222 - 227. (in Chinese)
- 睦晓蕾, 张宝玺, 张振贤, 毛胜利, 王立浩. 2005. 不同品种辣椒幼苗光合特性及弱光耐受性的差异. 园艺学报, 32 (2): 222 - 227.
- Sui Yi-hu, Chen Jin-feng, Yang Xue-ling, Li Jing-jing, Shi Jian-lei. 2009a. Inheritance of anthocyanin contents in leaves of chili pepper. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 32 (3): 19 - 24. (in Chinese)
- 隋益虎, 陈劲枫, 杨学玲, 李晶晶, 史建磊. 2009a. 辣椒叶片花青素含量的遗传分析. 南京农业大学学报, 32 (3): 19 - 24.
- Sui Yi-hu, Chen Jin-feng, Yang Xue-ling, Wei Yue, Qian Chun-tao. 2009b. Extraction and stability of pigment in leaves of purple chili pepper. *Food and Fermentation Industries*, 35 (10): 162 - 166. (in Chinese)
- 隋益虎, 陈劲枫, 杨学玲, 魏 跃, 钱春桃. 2009b. 紫色辣椒叶片色素的提取及其稳定性研究. 食品与发酵工业, 35 (10): 162 - 166.
- Sui Yi-hu, Zhang Zi-xue, Hu Neng-bing, Wang Xia. 2007. Changes of some quality indexes in the process of purple chili mix-pickled with cucumber or mustard. *Journal of Anhui Science and Technology University*, 21 (6): 33 - 37. (in Chinese)
- 隋益虎, 张子学, 胡能兵, 王 霞. 2007. 紫色辣椒与黄瓜、芥菜混合泡制中某些品质指标的变化. 安徽科技学院学报, 21(6): 33 - 37.
- Sui Yi-hu, Zhang Zi-xue, Tao Hong-zhi, Ling Zhong-xin. 2004a. Effects of different temperatures on some physiological and biochemical indexes of several dry chili varieties. *Plant Physiology Communications*, 40 (6): 693 - 695. (in Chinese)
- 隋益虎, 张子学, 陶宏志, 凌中鑫. 2004a. 不同温度对几个干椒品种(系)某些生理生化指标的影响. 植物生理学通讯, 40 (6): 693 - 695.
- Sui Yi-hu, Zhang Zi-xue, Xing Su-zhi, Ling Tong-zhong, Jin Gui-fang. 2004b. Research on some physiologic indexes and germination of purple chili line YN99007 under NaCl stress. *Journal of Anhui Technical Teachers College*, 18 (6): 27 - 29. (in Chinese)
- 隋益虎, 张子学, 邢素芝, 凌同忠, 金桂芳. 2004b. NaCl胁迫紫色辣椒新品系YN99007的发芽生理研究. 安徽技术师范学院学报, 18 (6): 27 - 29.
- Sui Yi-hu, Zhang Zi-xue, Xing Su-zhi, Lu Xiao-ming, Guo Zheng-ming. 2005. Effect of temperature on some physiologic indexes and germination of purple chili line YN 99007. *Seed*, 24 (1): 19 - 23. (in Chinese)
- 隋益虎, 张子学, 邢素芝, 陆晓民, 郭正明. 2005. 温度对紫色辣椒新品系YN99007萌发及某些生理指标的影响. 种子, 24 (1): 19 - 23.
- Sun Hai-feng, Zhan Yong, Lin Hai-rong, Wei Ling-ji, Lei Ming, Pan Xiu-mei, He Neng. 2008. Response of chlorophyll fluorescence to drought stress at flowering in different soybeans. *Soybean Science*, 27 (1): 56 - 60. (in Chinese)
- 孙海锋, 战 勇, 林海容, 魏凌基, 雷 明, 潘秀梅, 何 能. 2008. 花期干旱对不同基因型大豆叶绿素荧光特性的影响. 大豆科学, 27 (1): 56 - 60.
- Teng You-de, Xu Xiang-shang, Chen Xue-qun. 1997. Capsicum germplasm resources in southwest of Sichuan Province. *China Vegetables*, (3): 29 - 32. (in Chinese)
- 滕有德, 徐向上, 陈学群. 1997. 川西南辣椒种质资源. 中国蔬菜, (3): 29 - 32.
- Wang Mei-ling, Ai Xi-zhen, Ding Fei, Wang Hong-tao, Liang Wen-juan. 2008. Comparison of the photosynthetic characteristics of purple cabbage and cabbage. *Acta Horticulturae Sinica*, 35 (4): 547 - 552. (in Chinese)
- 王美玲, 艾希珍, 丁 飞, 王洪涛, 梁文娟. 2008. 紫甘蓝和普通甘蓝光合特性的比较. 园艺学报, 35 (4): 547 - 552.
- Wu Han-ying, Shou Sen-yan, Zhu Zhu-jun, Yang Xin-ting. 2001. Effects of high temperature stress on photosynthesis and chlorophyll fluorescence in sweet pepper (*Capsicum frutescens* L.). *Acta Horticulturae Sinica*, 28 (6): 517 - 521. (in Chinese)
- 吴韩英, 寿森炎, 朱祝军, 杨信廷. 2001. 高温胁迫对甜椒光合作用和叶绿素荧光的影响. 园艺学报, 28 (6): 517 - 521.
- Xue Yi-xia, Li Ya-ling, Wen Xiang-zhen. 2010. Effects of air humidity on the photosynthesis and fruit-set of tomato under high temperature. *Acta Horticulturae Sinica*, 37 (3): 397 - 404. (in Chinese)
- 薛义霞, 李亚灵, 温祥珍. 2010. 空气湿度对高温下番茄光合作用及坐果率的影响. 园艺学报, 37 (3): 397 - 404.