



崔虎亮, 黄弄璋, 闫海川, 等. 油用牡丹单株产量和主要表型性状的相关性[J]. 华南农业大学学报, 2017, 38(2): 86-91.

# 油用牡丹单株产量和主要表型性状的相关性

崔虎亮<sup>1</sup>, 黄弄璋<sup>1</sup>, 闫海川<sup>2</sup>, 刘建鑫<sup>1</sup>

(1 北京林业大学 园林学院, 北京 100083; 2 北京恒欣源农业有限公司, 北京 100074)

**摘要:**【目的】探讨油用牡丹 *Paenonia suffruticosa* 主要表型性状和单株产量的变异特征及相关关系, 确定牡丹单株产量的构成因素。【方法】以 25 份牡丹种质资源为材料, 对其主要表型性状进行相关性、主成分、多元线性回归和通径分析。【结果】供试材料表型性状的变异系数为 11.36% ~ 82.57%, 单株产量与单株果实质量、单株果实数、单株有效果实数、出籽率、蓇葖宽、冠幅面积、单株新枝数、单株 2 年生枝数、单株花朵数和小叶数等性状存在极显著正相关 ( $P < 0.01$ ); 单株产量与聚合蓇葖果直径、复叶宽、复叶叶长叶柄比等性状存在显著正相关 ( $P < 0.05$ ); 单株产量与种子含水量、顶小叶长和顶小叶叶形指数存在显著负相关 ( $P < 0.05$ )。主成分分析发现共有 5 个主成分特征根大于 1, 累计贡献率 69%; 多元线性回归和通径分析表明单株产量与单株果实质量、单株果实数、单株有效果实数、出籽率、千粒质量和顶小叶叶形指数等性状显著相关。【结论】对单株产量贡献最大的表型性状依次为单株果实质量、单株有效果实数和出籽率, 应在油用牡丹品种选育和种质创新中予以重视。

**关键词:** 油用牡丹; 单株产量; 表型性状; 主成分分析; 通径分析

中图分类号: S685.11

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2017)02-0086-06

## Correlation between yield per plant and main phenotypic traits of *Paenonia suffruticosa* for oil production

CUI Huliang<sup>1</sup>, HUANG Nongzhang<sup>1</sup>, YAN Haichuan<sup>2</sup>, LIU Jianxin<sup>1</sup>

(1 College of Landscape and Horticulture, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2 Beijing Heng Xin Yuan Agricultural Co., Ltd., Beijing 100074, China)

**Abstract:**【Objective】To analyze the variation of main phenotypic traits and yield per plant of oil peony (*Paenonia suffruticosa*), study the correlation between yield per plant and phenotypic traits, and determine the components of yield per plant.【Method】Twenty five peony varieties were selected. Correlation analysis, principal component analysis, multiple regression analysis and path analysis were performed on their main phenotypic traits.【Result】The variation coefficients of all the investigated phenotypic traits ranged from 11.36% to 82.57%. Yield per plant was significantly ( $P < 0.01$ ) positively correlated with 10 traits including fruit mass per plant, fruit number per plant, valid fruit number per plant, seed rate, follicle width, crown area, new branch number per plant, two-year-old branch number per plant, flower number per plant and leaflet number. Yield per plant was significantly ( $P < 0.05$ ) positively correlated with three traits including aggregate follicle diameter, compound leaf width and compound leaf length to petiole length ratio. Yield per plant was significantly ( $P < 0.05$ ) negatively correlated with three traits including seed moisture content, top leaflet length and top leaflet shape index. The principal component analysis showed that there were five common factors with eigen values above 1, and the accumulative contribution rate was 69%. The multiple linear regression analysis and path analysis showed that yield per

收稿日期: 2016-04-12 优先出版时间: 2017-01-10

优先出版网址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/44.1110.s.20170110.1424.046.html>

作者简介: 崔虎亮 (1986—), 男, 博士研究生, E-mail: cuihuliang2005@126.com

基金项目: 863 计划 (2011AA100207)

<http://xuebao.scau.edu.cn>

plant was significantly correlated with six traits including fruit mass per plant, fruit number per plant, valid fruit number per plant, seed rate, thousand-seed mass and top leaflet shape index. 【Conclusion】 The key traits influencing yield per plant of oil peony in order were fruit mass per plant, valid fruit number per plant and seed rate. The three traits should be paid more attention in oil peony breeding and germplasm innovation.

**Key words:** oil peony; yield per plant; phenotypic trait; principal component analysis; path analysis

牡丹 *Paeonia suffruticosa* 为多年生亚灌木,是我国观赏名花,栽培广泛<sup>[1]</sup>。已有研究表明牡丹种子含油量较高( $w$  为 27% ~ 33%),牡丹籽油中不饱和脂肪酸尤其是  $\alpha$ -亚麻酸相对含量较高( $w > 39%$ ),具有较高的营养价值<sup>[2-4]</sup>。2011年,卫生部发布《关于批准元宝枫籽油和牡丹籽油作为新资源食品的公告》,标志着油用牡丹正式成为一种新型木本油料作物。至2015年,全国油用牡丹栽培面积已超过 667 万  $m^2$ ,以凤丹和紫斑牡丹类群为主,这些材料遗传多样性丰富,品质不稳定,无法满足油用牡丹产业健康发展的需求<sup>[5]</sup>。牡丹生长周期长,新品种选育困难,因此,研究牡丹现有种质材料表型性状的变异特征及其与产量的构成关系,对于合理评价和挖掘现有种质资源,进而优选油用品种具有重要的参考价值。

作物产量的形成与相关农艺性状密不可分<sup>[6]</sup>。玉米 *Zea mays* 产量与行粒数、千粒质量和穗长存在显著正相关关系<sup>[7]</sup>;穗粒数是影响小麦 *Triticum aestivum* 产量的主要因素<sup>[8]</sup>;油菜 *Brassica campestris* 产量与单位面积有效角果数、每角粒数和千粒质量密切相关<sup>[9]</sup>;扁蓿豆 *Melissitus ruthenica* 产量与单株花序数和花序种子数显著正相关<sup>[10]</sup>;单株绿叶质量、单株薯数和单薯质量对甘薯 *Dioscorea esculenta* 单株产量影响较大<sup>[11]</sup>。木本作物表型性状的相互关系更为复杂,但提高木本作物种子或果实产量同样依赖于对产量构成性状的不断改良和调整。文冠果 *Xanthoceras sorbifolium* 高产单株与果实鲜质量、结果个数和出籽率等性状的改良有密切关系<sup>[12]</sup>;可可 *Theobroma cacao* 果实性状育种要关注单粒质量、每果粒数和果质量<sup>[13]</sup>;平均每果枝座果数、座果枝率和单果质量是影响早实核桃 *Juglans regia* 产量的主要因子<sup>[14]</sup>。牡丹生长习性独特,与单株产量有密切关系的主要性状尚不明确。目前,油用牡丹的研究主要集中在自然种质资源筛选、油脂成分鉴定等方面<sup>[15-17]</sup>,鲜见关于牡丹产量构成及主要农艺性状的研究。本研究采用多种统计分析方法,对 25 份牡丹种质单株产量及主要表型性状的相关性进行研究,旨

在明确单株产量与主要性状的构成关系,为油用牡丹品种选育和种质创新提供理论参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材 料

本研究选择具有代表性的牡丹种质 25 份,其中凤丹、紫斑牡丹野生型、卵叶牡丹野生型各 1 份,中原品种、西北品种各 10 份,育种品系 2 份。所选品种(系)均引种栽培于北京小汤山种质资源圃 6 年以上。田间调查试验于 2015 年 8—9 月进行。

### 1.2 方 法

各单株果实均单采单收。每份材料随机调查 5 株牡丹相关的生物学性状。

产量性状包括单株产量( $Y$ )、单株果实质量( $X_1$ )、单株果实数( $X_2$ )、单株有效果实数( $X_3$ )、出籽率( $X_4$ )、千粒质量( $X_5$ )和种子含水量( $X_6$ )。

牡丹的果实是由 5~6 个离生心皮发育形成的聚合蓇葖果。每株牡丹随机选取 5 个聚合果进行调查,调查内容包括聚合蓇葖果直径( $X_7$ )、蓇葖长( $X_8$ )、蓇葖宽( $X_9$ )和蓇葖果果形指数( $X_{10}$ )。

生长性状包括株高( $X_{11}$ )、冠幅面积( $X_{12}$ )、单株新枝数( $X_{13}$ )、单株 2 年生枝数( $X_{14}$ )、单株花朵数( $X_{15}$ )、芽位高( $X_{16}$ )、芽位数( $X_{17}$ )、退梢长( $X_{18}$ )、小叶数( $X_{19}$ )、复叶长( $X_{20}$ )、复叶宽( $X_{21}$ )、叶柄长( $X_{22}$ )、顶小叶长( $X_{23}$ )、顶小叶宽( $X_{24}$ )、复叶叶长叶柄比( $X_{25}$ )、复叶叶形指数( $X_{26}$ )和顶小叶叶形指数( $X_{27}$ )。 $X_{16}$ ~ $X_{18}$ 等指标随机选择 3 个主要枝干测量取平均值, $X_{19}$ ~ $X_{24}$ 等指标选取当年枝分蘖痕下数第 2 或第 3 个复叶进行测量。

### 1.3 数 据 分 析

利用 Microsoft Excel 2007 整理原始数据,并计算变异系数(CV)。利用 R 语言(x64. 3. 2. 1)对所调查数据进行皮尔逊(Pearson)相关分析、主成分分析和通径分析等。文中计算公式如下:

$$CV = \text{标准差}(\text{SD}) / \text{平均值} \times 100\%;$$

$$\text{单株产量} = \text{单株种子质量};$$

种子含水量 = (种子鲜质量 - 种子干质量) / 种子鲜质量 × 100% ;

复叶叶长叶柄比 = 复叶长 / 叶柄长 ;

复叶叶形指数 = 复叶长 / 复叶宽 ;

顶小叶叶形指数 = 顶小叶长 / 顶小叶宽 ;

蓇葖果果形指数 = 蓇葖长 / 蓇葖宽。

## 2 结果与分析

### 2.1 表型性状的变异特征

供试材料中,有3份果实败育,有4份果实发育

正常但种子育性较低,所以千粒质量、种子含水量、聚合蓇葖果直径、蓇葖长、蓇葖宽和蓇葖果果形指数等6个性状仅有18份有效数据,其余性状数据完整。在R语言环境下通过加载psych包,调用describe()函数,得到各性状变异特征(表1)。表1可以看出所调查材料中,单株产量范围为0~675.2g,变异系数最大(82.57%),均值209.9g;单株有效果实数和单株果实质量的变异程度同样较高,分别达到76.88%和74.10%;复叶叶形指数变异系数最小,为11.36%。

表1 试验单株表型性状的变异分析<sup>1)</sup>

Tab.1 Analysis of variation in phenotypic traits among individual plants

性状	平均值	标准差	中位数	最小值	最大值	偏态	峰度	正态分布标准	变异系数/%
Y	209.88	173.29	185.61	0	675.19	0.61	-0.42	16.16	82.57
X <sub>1</sub>	584.35	433.03	500.00	10.00	1727.78	0.55	-0.62	40.39	74.10
X <sub>2</sub>	24.94	16.60	21.00	1.00	68.00	0.66	-0.40	1.55	66.57
X <sub>3</sub>	22.42	17.23	20.00	0	68.00	0.56	-0.50	1.61	76.88
X <sub>4</sub>	30.75	14.81	35.32	0	53.71	-1.05	-0.09	1.38	48.17
X <sub>5</sub>	378.66	58.61	377.65	214.90	559.90	0.31	0.62	6.25	15.48
X <sub>6</sub>	27.92	16.77	25.72	12.93	100.00	3.53	12.59	1.79	60.05
X <sub>7</sub>	7.69	1.26	7.70	4.60	10.90	-0.00	-0.23	0.13	16.41
X <sub>8</sub>	4.19	0.64	4.20	2.40	5.87	-0.06	0.77	0.06	15.31
X <sub>9</sub>	1.67	0.25	1.70	0.70	2.25	-1.02	2.64	0.02	14.68
X <sub>10</sub>	0.44	0.17	0.45	0.18	1.25	1.07	3.44	0.02	38.25
X <sub>11</sub>	93.78	12.47	90.00	65.00	120.00	0.12	-0.46	1.16	13.29
X <sub>12</sub>	1.16	0.41	1.10	0.30	2.10	0.20	-0.44	0.04	35.06
X <sub>13</sub>	30.82	15.07	30.00	6.00	68.00	0.46	-0.62	1.41	48.91
X <sub>14</sub>	16.56	8.99	16.00	4.00	47.00	0.86	0.86	0.84	54.29
X <sub>15</sub>	26.50	16.04	24.00	1.00	68.00	0.57	-0.30	1.50	60.55
X <sub>16</sub>	10.24	4.97	9.00	2.33	30.00	1.45	2.80	0.46	48.55
X <sub>17</sub>	3.39	0.90	3.33	1.00	6.00	0.67	0.62	0.08	26.59
X <sub>18</sub>	17.89	3.25	17.33	12.00	29.33	0.73	0.76	0.30	18.15
X <sub>19</sub>	16.24	3.76	15.67	9.00	30.33	1.13	2.25	0.35	23.16
X <sub>20</sub>	32.63	5.45	32.33	21.33	56.67	1.02	2.65	0.51	16.71
X <sub>21</sub>	24.48	4.85	24.33	13.33	38.00	0.42	0.15	0.45	19.81
X <sub>22</sub>	11.47	2.61	11.00	6.67	21.67	1.06	1.70	0.24	22.77
X <sub>23</sub>	5.49	1.35	5.30	3.63	12.00	2.75	10.25	0.13	24.63
X <sub>24</sub>	5.17	1.69	5.00	2.17	13.00	1.61	4.91	0.16	32.63
X <sub>25</sub>	2.90	0.39	2.87	2.00	4.21	0.46	0.44	0.04	13.60
X <sub>26</sub>	1.35	0.15	1.34	1.07	1.76	0.44	-0.34	0.01	11.36
X <sub>27</sub>	1.12	0.30	1.03	0.74	2.33	1.63	2.68	0.03	26.91

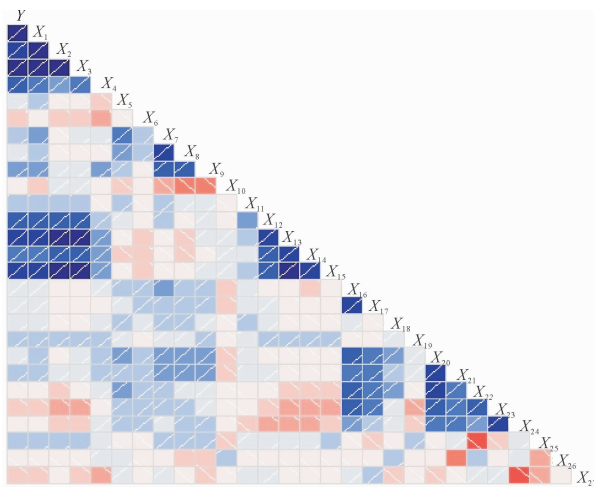
1) Y表示单株产量/g; X<sub>1</sub>:单株果实质量/g; X<sub>2</sub>:单株果实数; X<sub>3</sub>:单株有效果实数; X<sub>4</sub>:出籽率/%; X<sub>5</sub>:千粒质量/g; X<sub>6</sub>:种子含水量(w); X<sub>7</sub>:聚合蓇葖果直径/cm; X<sub>8</sub>:蓇葖长/cm; X<sub>9</sub>:蓇葖宽/cm; X<sub>10</sub>:蓇葖果果形指数; X<sub>11</sub>:株高/cm; X<sub>12</sub>:冠幅面积/m<sup>2</sup>; X<sub>13</sub>:单株新枝数; X<sub>14</sub>:单株2年生枝数; X<sub>15</sub>:单株花朵数; X<sub>16</sub>:芽位高/cm; X<sub>17</sub>:芽位数; X<sub>18</sub>:退梢长; X<sub>19</sub>:小叶数; X<sub>20</sub>:复叶长/cm; X<sub>21</sub>:复叶宽/cm; X<sub>22</sub>:叶柄长/cm; X<sub>23</sub>:顶小叶长/cm; X<sub>24</sub>:顶小叶宽/cm; X<sub>25</sub>:复叶叶长叶柄比; X<sub>26</sub>:复叶叶形指数; X<sub>27</sub>:顶小叶叶形指数。

### 2.2 产量与各性状的皮尔逊(Pearson)相关性分析

调用R语言中的cor()函数计算皮尔逊相关系数(method="pearson"),然后加载corrgram包中的corrgram()函数将各变量相关值图形化,从而将各性

状间的相互关系直观化(图1)。分析结果表明供试材料各性状的相互关系较为复杂,其中单株产量与16个性状存在显著或极显著相关性,单株产量与单株果实质量、单株果实数、单株有效果实数、出籽率、蓇

葵宽、冠幅面积、单株新枝数、单株2年生枝数、单株花朵数和小叶数等性状极显著正相关( $R$ 为0.28~0.96,  $P < 0.01$ ),与聚合蓇葖果直径、复叶宽和复叶叶长叶柄比等性状显著正相关( $R$ 为0.19~0.21,  $P < 0.05$ ),与种子含水量、顶小叶长和顶小叶叶形指数显著负相关( $R$ 为-0.15~-0.21,  $P < 0.05$ ),说明单株产量与果实质量、果实数量、出籽率、花朵数量以及分枝数等性状有直接关系。此外,千粒质量与单株产量、单株果实质量等性状不存在显著关系,与聚合蓇葖果直径、蓇葖长、复叶长、叶柄长、顶小叶长等存在极显著关系( $R$ 为0.27~0.44,  $P < 0.01$ )。可见各性状间相互制约,仅根据产量与各性状间的相关系数并不能完全解释其真实规律。



图中  $Y$  表示单株产量;  $X_1$ : 单株果实质量;  $X_2$ : 单株果实数;  $X_3$ : 单株有效果实数;  $X_4$ : 出籽率;  $X_5$ : 千粒质量;  $X_6$ : 种子含水量;  $X_7$ : 聚合蓇葖果直径;  $X_8$ : 蓇葖长;  $X_9$ : 蓇葖宽;  $X_{10}$ : 蓇葖果果形指数;  $X_{11}$ : 株高;  $X_{12}$ : 冠幅面积;  $X_{13}$ : 单株新枝数;  $X_{14}$ : 单株2年生枝数;  $X_{15}$ : 单株花朵数;  $X_{16}$ : 芽位高;  $X_{17}$ : 芽位数;  $X_{18}$ : 退梢长;  $X_{19}$ : 小叶数;  $X_{20}$ : 复叶长;  $X_{21}$ : 复叶宽;  $X_{22}$ : 叶柄长;  $X_{23}$ : 顶小叶长;  $X_{24}$ : 顶小叶宽;  $X_{25}$ : 复叶叶长叶柄比;  $X_{26}$ : 复叶叶形指数;  $X_{27}$ : 顶小叶叶形指数。蓝色和“/”表示单元格中2个变量呈正相关,红色和“\”表示负相关;颜色越深表示相关性越大。

图1 性状间的皮尔逊相关系数

Fig. 1 The correlogram of pearson coefficients for different traits

### 2.3 主成分分析

首先使用 psych 包中的函数 fa.parallel() 判断主成分数,如图2所示,共有5个主成分特征根大于1,因此提取5个主成分,然后调用函数 principal() 进行主成分分析并进行方差极大旋转(rotate = “varimax”),结果表明5个主成分累计贡献率达到69%,基本覆盖所有性状的主要信息(表3)。

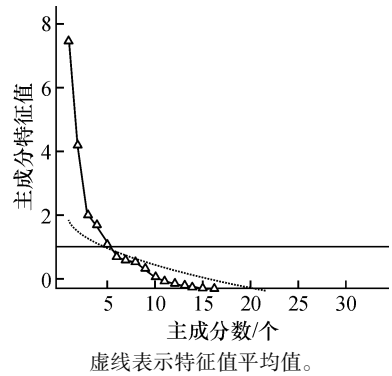


图2 主成分特征值碎石图

Fig. 2 Scree plot of principal component characteristic value

表3 表型性状的主成分分析<sup>1)</sup>

Tab. 3 The principal component analysis of phenotypic traits

性状	特征向量				
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
$Y$	0.89	0.03	0.24	0.16	-0.02
$X_1$	0.88	0.04	0.34	0.08	-0.03
$X_2$	0.96	-0.06	-0.06	0.05	-0.05
$X_3$	0.96	-0.02	-0.01	0.09	-0.04
$X_4$	0.52	0.03	0.05	0.57	0.08
$X_5$	-0.02	0.21	0.48	-0.16	0.45
$X_6$	-0.24	0.30	0.07	-0.06	-0.06
$X_7$	0.04	0.22	0.84	-0.07	0.11
$X_8$	-0.11	0.19	0.85	0.07	0.01
$X_9$	0.12	0.15	0.76	0.27	-0.01
$X_{10}$	0.04	-0.09	-0.63	0.07	0.13
$X_{11}$	0.23	-0.07	0.30	-0.32	0.16
$X_{12}$	0.78	-0.05	0.13	-0.27	0.02
$X_{13}$	0.94	-0.13	-0.07	-0.09	-0.03
$X_{14}$	0.79	-0.16	-0.16	-0.05	-0.05
$X_{15}$	0.95	-0.09	-0.07	0.02	-0.06
$X_{16}$	0	0.83	0.12	-0.03	0.03
$X_{17}$	0.01	0.75	0.11	-0.31	-0.12
$X_{18}$	-0.02	0.08	0.28	0.18	0.60
$X_{19}$	0.27	-0.25	0.33	0.09	-0.01
$X_{20}$	0.06	0.82	0.26	0.26	0.24
$X_{21}$	0.09	0.76	0.34	0.19	-0.24
$X_{22}$	-0.06	0.81	-0.03	0	0.49
$X_{23}$	-0.31	0.80	0.02	0.15	0.02
$X_{24}$	-0.23	0.53	0.04	0.67	0.05
$X_{25}$	0.12	-0.30	0.43	0.32	-0.52
$X_{26}$	-0.06	-0.17	-0.25	0.07	0.76
$X_{27}$	-0.07	0.10	-0.09	-0.86	-0.08
贡献率/%	25	16	13	8	7
累计贡献率/%	25	42	55	62	69

1)  $Y$ 表示单株产量/g;  $X_1$ : 单株果实质量/g;  $X_2$ : 单株果实数;  $X_3$ : 单株有效果实数;  $X_4$ : 出籽率/%;  $X_5$ : 千粒质量/g;  $X_6$ : 种子含水量( $w$ );  $X_7$ : 聚合蓇葖果直径/cm;  $X_8$ : 蓇葖长/cm;  $X_9$ : 蓇葖宽/cm;  $X_{10}$ : 蓇葖果果形指数;  $X_{11}$ : 株高/cm;  $X_{12}$ : 冠幅面积/m<sup>2</sup>;  $X_{13}$ : 单株新枝数;  $X_{14}$ : 单株2年生枝数;  $X_{15}$ : 单株花朵数;  $X_{16}$ : 芽位高/cm;  $X_{17}$ : 芽位数;  $X_{18}$ : 退梢长;  $X_{19}$ : 小叶数;  $X_{20}$ : 复叶长/cm;  $X_{21}$ : 复叶宽/cm;  $X_{22}$ : 叶柄长/cm;  $X_{23}$ : 顶小叶长/cm;  $X_{24}$ : 顶小叶宽/cm;  $X_{25}$ : 复叶叶长叶柄比;  $X_{26}$ : 复叶叶形指数;  $X_{27}$ : 顶小叶叶形指数。

主成分1(PC1)中载荷值较高的性状是单株产量、单株果实质量、单株果实数、单株有效果实数、冠幅面积、单株新枝数、单株2年生枝数、单株花朵数,且特征向量值均为正,表明该主成分主要反映植株的单株产量、果实数量以及分枝数,称为“产量分枝因子”;主成分2(PC2)中载荷值较高的性状是芽位高、芽位数、复叶宽、叶柄长、顶小叶长,且特征向量值均为正,表明该主成分主要反映植株当年生长量和复叶等性状,称为“芽叶因子”;主成分3(PC3)中载荷值较高且特征向量为正的是千粒质量、聚合果直径、萼萼长、萼萼宽、小叶数,载荷值较高且特征向量值为负的是萼萼果果形指数,说明该主成分主要反映植株籽粒和果实等性状,称为“籽粒果实因子”;主成分4(PC4)中载荷值较高且特征向量为正的是出籽率、顶小叶宽,特征向量为负的是株高、顶小叶叶形指数,说明该主成分主要反映单株出籽率、株高和顶小叶形态等性状,称为“综合因子”;主成分5(PC5)中载荷值较高且特征向量为正的是退梢长、复叶叶形指数,特征向量为负的是复叶叶长叶柄比,说明该主成分主要反映复叶形态,称为“复叶因子”。

#### 2.4 多元线性回归分析及通径分析

以单株产量为因变量,其他性状为自变量,利用lm()函数进行回归分析,发现所建回归方程不显著,因此加载 MASS 包中的 stepAIC() 函数进行逐步回归(step),剔除不显著项后仅余6个性状,得到回归方程  $Y = -190.80 + 0.39X_1 + 4.09X_2 - 4.55X_3 +$

$6.64X_4 - 0.10X_5 - 22.04X_{27}$  ( $R^2 = 0.9833$ ,  $P < 0.0001$ )。

为进一步明确多元线性回归所确定的6个性状对产量的作用,在R语言中加载agricolae包中的函数path.analysis()进行通径分析(表4)。结果表明,6个性状对单株产量的相对重要性依次为:单株果实质量( $P=0.901$ ) > 单株有效果实数( $P=0.218$ ) > 出籽率( $P=0.164$ ) > 顶小叶叶形指数( $P=0.040$ ) > 千粒质量( $P=-0.060$ ) > 单株果实数( $P=-0.224$ ),说明单株果实质量、单株有效果实数和出籽率对单株产量的正直接效应最大;而单株果实数负效应较高,千粒质量也是负效应但效应值较低;此外,顶小叶叶形指数的直接效应值也较低。

单株果实数和单株有效果实数通过单株果实质量的间接效应分别达到0.793和0.802,说明这2个性状均以间接正效应对单株产量产生贡献,而单株有效果实数通过单株果实数的间接效应为-0.220,说明它们的作用相反,但是有效果实数的直接贡献和间接贡献均大于单株果实数。出籽率通过单株果实质量的间接效应( $P=0.433$ )同样高于直接效应( $P=0.164$ ),表明出籽率的增加可间接提高产量。千粒质量和顶小叶叶形指数的直接效应绝对值较小,且均低于通过单株果实质量的间接效应绝对值,说明这2个性状主要是通过影响单株果实质量对产量施加间接影响,这在一定程度上可直接抵消其负影响。

表4 单株产量显著性状的通径分析<sup>1)</sup>

Tab.4 Path analysis of traits significantly influencing yield per plant

性状	相关系数	直接效应	间接效应						
			总计	$X_1 \rightarrow Y$	$X_2 \rightarrow Y$	$X_3 \rightarrow Y$	$X_4 \rightarrow Y$	$X_5 \rightarrow Y$	$X_{27} \rightarrow Y$
$X_1$	0.96**	0.901	0.059		-0.197	0.194	0.079	-0.011	-0.006
$X_2$	0.85**	-0.224	1.074	0.793		0.213	0.069	0.004	-0.005
$X_3$	0.88**	0.218	0.662	0.802	-0.220		0.084	0.002	-0.006
$X_4$	0.61**	0.164	0.446	0.433	-0.094		0.111	0.011	-0.014
$X_5$	0.08	-0.060	0.140	0.162	0.013	-0.006		-0.029	0.001
$X_{27}$	-0.15*	0.040	-0.244	-0.126	-0.027	-0.030	-0.059		-0.001

1) Y: 单株产量;  $X_1$ : 单株果实质量;  $X_2$ : 单株果实数;  $X_3$ : 单株有效果实数;  $X_4$ : 出籽率;  $X_5$ : 千粒质量和;  $X_{27}$ : 顶小叶叶形指数。

### 3 讨论与结论

长期以来对牡丹的研究主要集中在观赏和药用方面<sup>[18-19]</sup>。随着油用牡丹产业的迅速发展,研究者开始重视油用牡丹品种专项育种以及栽培体系的建立<sup>[20]</sup>。本研究所选牡丹材料既有不同地理分布区的野生种,也有不同地区的主栽品种,因此供试材料具有广泛的代表性,测定的表型性状的变异范围为11.36%~82.57%,说明牡丹种质表现出较为丰富的遗传多样性。

本研究调查性状较多,但与单株产量相关的性

状仅有16个,而达到极显著水平( $P < 0.01$ )的仅有单株果实质量、单株果实数、单株有效果实数、出籽率、萼萼宽、冠幅面积、单株新枝数、单株2年生枝数、单株花朵数和小叶数等10个性状。通过主成分分析,将所调查性状分为5个主要因子,即“产量分枝因子”、“芽叶因子”、“籽粒果实因子”、“综合因子”和“复叶因子”,而反映单株产量的因子为“产量分枝因子”,该因子还反映了单株果实数、单株有效果实数、冠幅面积、单株新枝数、单株2年生枝数、单株花朵数等8个性状,这与相关分析结果基本一致。逐步回归分析发现仅有6个性状,即单株果实质量、

http://xuebao.scau.edu.cn

单株有效果实数、出籽率、顶小叶叶形指数、千粒质量、单株果实数与单株产量存在显著关系,可认为是影响牡丹产量的主要性状;通径分析进一步明确了这些性状对产量的贡献,其中单株果实质量和单株有效果实数的贡献最大,而单株果实数存在负效应,表明果实数量无法真实反映产量水平。这是因为牡丹果实是聚合蓇葖果,在生殖生长阶段果实的发育与种子的发育并不同步。在本研究中,有4份材料果实发育正常但内部种子败育,同时,在不同个体中也存在聚合蓇葖果无种子的现象。因此,种子饱满的有效果实数量是构成单株产量的真实因子,在选种工作中,仅考虑果实数量而忽略发育正常的有效果实不利于产量增加。

本研究还发现,牡丹单株产量与千粒质量不存在显著相关关系,而通径分析表明千粒质量对产量的直接效应为负效应,这与可可等果实性状的相关研究规律相似<sup>[13]</sup>。而汪灿等<sup>[21]</sup>认为苦荞 *Fagopyrum tataricum* 单株产量与单株粒数的相关性要高于千粒质量,可见不同植物单粒质量对产量的影响规律并不一致,这主要是因为不同植物在生殖生长阶段种子发育规律不同。有研究表明,单粒质量与单果种子数之间的负相关关系是由生理因素决定的<sup>[22]</sup>。出籽率是重要的经济性状,反映了果壳质量与种子质量的比例,出籽率高说明植株光合产物主要分配在种子中,从而得到较高的种子产量。本研究中,出籽率与单株产量和单株果实质量均存在极显著正相关,且出籽率对产量具有直接贡献,因此通过育种手段提高出籽率是提高油用牡丹产量的有效途径。

本研究分析了牡丹单株产量与各表型性状的相关关系,通过主成分分析和逐步回归分析明确了影响种子产量的主要因素,对主要影响因素进行了通径分析,结果表明在油用牡丹品种选育和种质创新中,应将单株果实质量、单株有效果实数、出籽率等作为首要指标,然后再对单株2年枝数、单株新枝数等其他性状进行选择。

#### 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, 2011:7-31.
- [2] 周海梅,马锦琦,苗春雨,等. 牡丹籽油的理化指标和脂肪酸成分分析[J]. 中国油脂, 2009, 34(7):72-74.
- [3] LI S S, YUAN R Y, CHEN L G, et al. Systematic qualitative and quantitative assessment of fatty acids in the seeds of 60 tree peony (*Paeonia section Moutan* DC.) cultivars by GC-MS[J]. Food Chem, 2015, 173:133-140.
- [4] 韩继刚,李晓青,刘焯,等. 牡丹油用价值及其应用前景[J]. 粮食与油脂, 2014, 27(5):21-25.
- [5] YUAN J, CHENG F, ZHOU S. The phylogeographic structure and conservation genetics of the endangered tree peony, *Paeonia rockii* (Paeoniaceae), inferred from chloroplast gene sequences[J]. Conserv Genet, 2011, 12(6): 1539-1549.
- [6] 刘子丹,黄洁. 作物栽培学总论[M]. 北京:中国农业科技出版社, 2007: 56-80.
- [7] 岳尧海,周小辉,任军. 夏玉米杂交种产量性状与产量的通径分析[J]. 玉米科学, 2006, 14(6): 59-61.
- [8] 刘朝辉,李江伟,乔庆洲,等. 黄淮南片小麦产量构成因素的相关分析[J]. 作物杂志, 2013(5): 58-61.
- [9] 郭子荣,袁代斌. 油菜产量构成因素分布规律的研究[J]. 中国油料作物学报, 1987(2): 26-30.
- [10] 李鸿雁,李志勇,师文贵,等. 野生扁蓇葖豆单株种子产量与主要农艺性状的通径分析[J]. 草地学报, 2012, 20(3): 479-483.
- [11] 董立峰,王凤宝,付金锋,等. 甘薯主要数量性状对单株产量的通径分析[J]. 中国农学通报, 2005, 21(3): 311-315.
- [12] 敖妍. 因子分析法在文冠果优良单株选择中的应用[J]. 华南农业大学学报, 2009, 30(4):70-73.
- [13] 李付鹏,王华,伍宝朵,等. 可可果实主要农艺性状相关性及其产量因素的通径分析[J]. 热带作物学报, 2014, 35(3):448-453.
- [14] 赵宝军,宫永红. 早实核桃优良单株产量主要影响因子的相关分析及通径分析[J]. 中国果树, 2013(3):27-29.
- [15] 杨勇,刘佳坤,曾秀丽,等. 四川牡丹部分野生居群种子脂肪酸组分比较[J]. 园艺学报, 2015(9):1807-1814.
- [16] 王占营,王二强,郭亚珍,等. 洛阳地区西北品种群油用型牡丹筛选初报[J]. 江西农业学报, 2014, 26(7): 32-34.
- [17] 张延龙,韩雪源,牛立新,等. 9种野生牡丹籽油主要脂肪酸成分分析[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(4):72-75.
- [18] ZHOU H, CHENG F, WANG R, et al. Transcriptome comparison reveals key candidate genes responsible for the unusual reblooming trait in tree peonies[J]. PLoS One, 2013, 8(11): e79996. doi: 10.1371/journal.pone.0079996.
- [19] GUO B L, HONG D Y, XIAO P G. Further research on chemotaxonomy of paeonol and analogs in *Paeonia* (*Ranunculaceae*)[J]. J Syst Evol, 2008, 46(5):724-729.
- [20] 李育才. 中国油用牡丹工程的战略思考[J]. 中国工程科学, 2014, 16(10):58-63.
- [21] 汪灿,胡丹,杨浩,等. 苦荞主要农艺性状与产量关系的多重分析[J]. 作物杂志, 2013(6):18-22.
- [22] CILAS C, MACHADO R, MOTAMAYOR J. Relations between several traits linked to sexual plant reproduction in *Theobroma cacao* L.: Number of ovules per ovary, number of seeds per pod, and seed weight[J]. Tree Genet Genomes, 2010, 6(2): 219-226.

【责任编辑 霍欢】