

油用牡丹‘凤丹’不同生育期矿质元素的动态变化

徐桢楠^{1,2}, 宋程威^{1,2}, 张利霞^{1,2}, 郭丽丽^{1,2}, 段祥光^{1,2}, 刘曙光^{1,2}, 侯小改^{1,2}

(1. 河南科技大学 农学院/牡丹学院, 河南 洛阳 471023; 2. 河南科技大学 河南省油用牡丹工程技术研究中心, 河南 洛阳 471023)

摘要: 【目的】研究油用牡丹‘凤丹’*Paeonia ostii* ‘Feng Dan’不同生育期矿质元素动态变化规律, 为油用牡丹的科学施肥提供依据。【方法】以8年生油用牡丹‘凤丹’为材料, 测定根、茎、叶以及不同生育期果荚和种子的矿质元素, 分析矿质元素积累分配特性以及矿质元素分配的相关性。【结果】生育期内油用牡丹‘凤丹’根、茎、叶中的磷持续下降, 根和叶中的氮持续降低, 钾和镁在不同器官内变化趋势不同。铁在不同器官内的质量分数均大于其他微量元素, 除铜外, 其他微量元素在根中呈先升高后降低的趋势。果荚和种子中的氮逐渐升高, 果荚中钾和种子中磷呈先下降后升高再下降的趋势。矿质元素的变化表现出不同程度的相关性, 其中氮、磷、钾、铁、锰与其他元素间相关性较高; 同种矿质元素在‘凤丹’营养器官和生殖器官之间表现出不同程度的相关性。【结论】在生育期内, 油用牡丹‘凤丹’从展叶期到现蕾期之前对氮、磷元素需求量大, 应在植株展叶前追施氮肥和磷肥; 结实期对氮、磷、钾需求量大, 建议在开花后追施氮磷钾肥; 在植株现蕾期前(3月上旬)追施铁肥, 在5-7月种子发育期追施硼、锌肥, 满足‘凤丹’植株对这3种微量元素的需求。表7参36

关键词: 植物学; 油用牡丹; 矿质元素; 生育期; 组织器官; 分配规律

中图分类号: S685.11 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2021)01-0128-10

Dynamic analysis of mineral elements across the growth cycle of *Paeonia ostii* ‘Feng Dan’

XU Ya'nan^{1,2}, SONG Chengwei^{1,2}, ZHANG Lixia^{1,2}, GUO Lili^{1,2}, DUAN Xiangguang^{1,2},
LIU Shuguang^{1,2}, HOU Xiaogai^{1,2}

(1. College of Agriculture/College of Tree Peony, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, Henan, China; 2. Henan Province Oil Peony Engineering Technology Research Center, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, Henan, China)

Abstract: [Objective] With the changes of main mineral element contents in the annual growth cycle of the *Paeonia ostii* ‘Feng Dan’ measured, the current study is aimed at an analysis of the fertilizer requirement and nutrient diagnosis for the oil peony. [Method] With ‘Feng Dan’ (eight years old), an oil peony cultivar selected as the study subjects, the mineral elements content of roots, stems and leaves were measured across the growth stages of the oil peony. [Result] The content of P in roots, stems and leaves, and the content of N in roots and leaves decreased gradually as the growth cycle of the peony proceeds, while the changes of K and Mg vary from part to part. The content of Fe was significantly more than any other trace elements in the roots, stems and leaves, and increased first and then decreased across the growth cycle. All of the trace elements, except for Cu, have showed first an increase and then a decrease in content in the roots. As the process of fruit development advanced, the content of N increased, with the content of K in fruit pods and P in seeds displaying

收稿日期: 2020-05-04; 修回日期: 2020-09-15

基金项目: 河南省高校重点科研项目(19A180002); 国家自然科学基金资助项目(U1804233)

作者简介: 徐桢楠, 从事牡丹生理生态研究。E-mail: 790170940@qq.com。通信作者: 侯小改, 教授, 从事牡丹生理生态与分子生物学研究。E-mail: hkdhxg@haust.edu.cn

a trend of decrease, increase and decrease. The changes of mineral elements in roots, stems and leaves of the peony showed different degrees of correlation across the peony's growth cycle, with N、P、K、Fe and Mn closely related to most of the other mineral elements. The same mineral elements displayed different correlations with vegetative organs and reproductive organs. [Conclusion] Throughout one growth cycle, the oil peony 'Feng Dan' has a large demand for N and P from the leaf-growth stage to the current bud stage, and N and P fertilizers should be applied before the leaf-growth stage; and there is a large demand for N, P and K during the fruiting period, and it is recommended to apply N, P and K fertilizer after the flowering of the peony. Fe fertilizer should be applied before the budding stage (early March) while B and Zn fertilizers should be applied during the seed development stage from May to July to meet the demand of 'Feng Dan' plants for these three microelements. [Ch, 7 tab. 36 ref.]

Key words: botany; oil peony; mineral element; growth stage; tissues and organs; distribution rule

牡丹 *Paeonia suffruticosa* 是芍药科 Paeoniaceae 芍药属 *Paeonia* 的多年生落叶灌木，是中国特有的植物资源^[1-2]。牡丹作为中国的传统名花，花可供观赏，根可作为丹皮入药，牡丹籽油是一种新型木本植物油，具有极高的生态、经济和社会价值^[3-4]。油用牡丹‘凤丹’ *Paeonia ostii* ‘Feng Dan’ 具有结籽多、出油高、适应范围广、易于管理等优点^[5-6]。其籽粒富含不饱和脂肪酸，多项指标均优于现有食用油，具有改善心血管、调节免疫、消炎、抗肿瘤等多种医疗保健功能^[7-9]。矿质元素是植物体的重要组成成分，对维持正常的生命活动、调节生理功能具有重要作用^[10-11]。矿质元素是植物生长的物质基础，对作物的产量与品质具有重要影响^[12-13]。梁芳等^[14]研究发现：氮、磷、钾、铜、铁对文冠果 *Xanthoceras sorbifolia* 新梢发育具有重要影响。何国庆等^[15]研究表明：氮、钾是山核桃 *Carya cathayensis* 果实发育过程中最重要的矿质营养，其中种仁氮、钾与脂肪酸组分的相关性最高。目前，对油用牡丹产量的研究主要集中在栽培方式、施肥方法、根际微生物^[16-21]等方面。此外，对不同肥料元素的施用水平和配比进行科学平衡施肥，提高‘凤丹’种子产量和品质的研究也已取得了一定的进展^[22-24]。张阁^[18]发现：宁夏地区‘凤丹’增产的首要影响因子是氮肥，其次为钾肥和磷肥。朱丹等^[25]建立了‘凤丹’产量与养分施用量的回归方程，获得了氮、磷、钾的最佳施肥量。而关于‘凤丹’生育期内营养器官和生殖器官对矿质元素的吸收及转运规律，尤其是微量元素的研究鲜有报道。了解植株矿质营养元素动态变化及营养水平是合理施肥的基础。本研究对油用牡丹‘凤丹’矿质营养元素及变化进行了动态分析，全面了解油用牡丹‘凤丹’对矿质元素的吸收、利用状况以及营养元素间的平衡关系，以期对油用牡丹合理施肥及高产栽培提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 材 料

于 2016 年在河南科技大学农场牡丹种植试验基地，选择长势健壮、一致、芽饱满、无病虫害的 8 年生油用牡丹‘凤丹’植株为材料。施肥和生产上与牡丹正常管理保持一致，2015 年 11 月底施入有机肥 ($2.25 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 作为冬储肥，当年 3 月初施 $600 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，质量比为 20:20:10 的氮肥 [主要成分为氮 (N)]-磷肥 [主要成分为五氧化二磷 (P_2O_5)]-钾肥 [主要成分为氧化钾 (K_2O)] 的复合肥作为促花肥；5 月中旬施 $375 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 氮肥-磷肥-钾肥 (质量比为 15:15:10) 的复合肥，施肥时均匀撒施，施完肥浇水。株距×行距分别为 $60 \text{ cm} \times 75 \text{ cm}$ ，密度约 $2.25 \times 10^4 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

1.2 试 验 设 计

2016 年 2 月下旬至 8 月上旬分别取油用牡丹的根、茎、叶、果荚、种子。每次取样 3 个重复。取样时间：2 月 26 日 (展叶期)、3 月 12 日 (现蕾期)、3 月 27 日 (立蕾期)、4 月 11 日 (盛花期)、4 月 28 日、5 月 12 日、6 月 1 日、6 月 29 日、7 月 18 日 (4 月 28 日至 7 月 18 日为结实期)、8 月 4 日 (果熟期)。样品带回实验室后，先用自来水冲洗干净，再用蒸馏水浸洗，滤纸吸干水分后将样品置于烘箱内 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 杀青 30 min，然后在 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 下烘干至恒量，不锈钢粉碎机粉碎样品，储存于带塞的玻璃瓶内备用。

1.3 研究方法

采用 ZDDN-II 自动型凯氏定氮仪(托普仪器, 浙江), 用半微量蒸馏法测定样品全氮质量分数, 具体参照温云杰等^[26]的方法。采用 Agilent 5 100 ICP-OES 电感耦合等离子质谱仪(Agilent 公司, 美国), 测定样品中磷、钾、镁、铁、锰、锌、铜、硼质量分数, 具体参照贺春玲等^[27]的方法。

1.4 数据处理

利用 Excel 2010 和 SPSS 20.0 对数据进行处理和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 油用牡丹‘凤丹’不同生育期营养器官矿质元素质量分数的变化

2.1.1 根矿物质元素质量分数 ‘凤丹’根中矿质元素的测定发现: 氮质量分数为 9.76~14.08 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 展叶期(2月26日)至结实期前期(5月12日)氮逐渐下降, 展叶期氮的质量分数高于其他时期。磷质量分数为 6.95~9.81 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 在展叶期到结实期(7月18日)逐渐下降, 果熟期上升。钾质量分数为 2.68~5.02 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 呈先下降后上升的趋势, 结实期后期(6月29日至8月4日)出现下降趋势。镁质量分数为 1.04~1.85 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 呈先升高后降低, 在立蕾期(3月27日)达最大值。微量元素铁质量分数最高, 铜最低。锰、铁、锌和硼元素的质量分数均呈先升高后降低的趋势。铁、硼在立蕾期(3月27日)达到峰值, 分别为 167.5 和 64.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 锰在盛花期(4月11日)达到峰值, 为 61.4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 锌在结实期(4月28日)达到峰值, 为 63.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。铜的变化趋势不明显(表1)。

表 1 不同生育期油用牡丹‘凤丹’根矿质元素变化

Table 1 Elements change of *P. ostii* ‘Feng Dan’ roots in different growth stages

日期(月-日)	氮($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	磷($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	钾($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	镁($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	铁($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	锰($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	锌($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	铜($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	硼($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
02-26	14.08	9.81	4.99	1.10	122.81	25.46	19.16	14.99	42.45
03-12	12.79	9.54	3.90	1.47	145.62	46.52	26.21	12.12	56.94
03-27	12.43	9.32	2.68	1.85	167.46	56.52	34.76	11.65	64.47
04-11	11.22	8.89	3.28	1.65	145.65	61.40	47.54	8.65	56.47
04-28	10.36	8.72	3.33	1.36	138.61	52.76	63.47	7.79	34.98
05-12	9.76	8.58	3.92	1.24	113.77	43.00	52.18	9.50	25.43
06-01	10.21	8.26	4.15	1.22	99.21	36.81	32.05	8.45	21.91
06-29	10.25	7.85	5.02	1.23	82.99	30.55	34.67	8.97	23.67
07-18	10.14	6.95	4.97	1.20	75.44	31.80	37.08	10.72	28.33
08-04	10.25	7.78	4.63	1.04	69.96	21.01	39.26	11.50	36.77

2.1.2 茎矿物质元素质量分数 ‘凤丹’茎中矿质元素分析发现: 氮质量分数为 8.34~10.94 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 生育期内呈先降低后升高的变化趋势。磷质量分数为 4.06~7.72 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 不同生育期持续下降。钾质量分数为 8.32~13.58 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 不同生育期持续下降, 7月18日达最低值, 果熟期(8月4日)上升。镁质量分数为 1.04~1.42 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 生育期内变化趋势不明显。微量元素中铁质量分数最高, 呈先升高后降低, 在盛花期(4月11日)达到峰值, 为 176.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。锌随着‘凤丹’的生长发育持续上升。硼呈先升高后降低的趋势, 4月28日达最大值, 为 32.9 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。生育期内锰和铜含量无显著变化(表2)。

2.1.3 叶片矿物质元素质量分数 ‘凤丹’叶片矿质元素测定发现: 氮质量分数为 14.67~35.84 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 生育期内持续下降, 在现蕾期(3月12日)到结实期前期(5月12日)急剧下降。磷质量分数为 6.05~8.75 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 生育期内持续下降。钾质量分数为 8.63~10.17 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 从现蕾期(3月12日)到结实期前期(4月11日)持续下降, 花谢后出现急剧上升的趋势, 而在结实期(4月28日至8月4日)持续下降。镁质量分数为 2.24~5.51 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 在不同生育期持续升高。微量元素中铁最高。铁、锰、锌呈先升高后降低趋势, 分别在5月12日、4月11日和4月28日达最大值。铜无显著变化, 硼呈先升高后降低再升高的趋势(表3)。

2.1.4 根、茎、叶中矿质元素间的相关性分析 从表4可见: 根中氮与磷、铜, 磷和铁、硼, 铁和硼, 镁和锰、铁、硼, 锰和铁均呈极显著正相关($P<0.01$); 钾和镁、锰、铁均呈极显著负相关($P<0.01$);

表 2 不同生育期油用牡丹‘凤丹’茎矿质元素变化

Table 2 Elements change of *P. ostii* ‘Feng Dan’ stems in different growth stages

日期(月-日)	氮/(mg·g ⁻¹)	磷/(mg·g ⁻¹)	钾/(mg·g ⁻¹)	镁/(mg·g ⁻¹)	铁/(mg·kg ⁻¹)	锰/(mg·kg ⁻¹)	锌/(mg·kg ⁻¹)	铜/(mg·kg ⁻¹)	硼/(mg·kg ⁻¹)
02-26	9.95	7.72	13.58	1.14	125.92	18.31	17.48	13.74	25.80
03-12	8.44	7.11	13.27	1.09	138.05	17.93	19.59	9.62	26.70
03-27	8.75	6.83	11.98	1.13	156.47	16.40	25.47	10.24	28.81
04-11	8.76	6.35	11.62	1.04	176.47	16.40	29.49	9.24	31.81
04-28	8.34	6.24	10.52	1.05	172.30	14.78	31.58	9.78	32.90
05-12	8.75	6.08	9.25	1.37	166.78	17.20	46.23	10.38	23.76
06-01	8.72	5.56	9.01	1.42	164.68	13.57	41.98	7.58	23.57
06-29	9.01	4.86	8.66	1.39	148.32	12.60	45.72	8.01	21.08
07-18	10.23	4.06	8.37	1.29	142.84	10.11	52.22	9.76	20.16
08-04	10.94	5.74	8.32	1.18	182.32	15.15	50.40	12.10	20.20

表 3 不同生育期油用牡丹‘凤丹’叶片矿质元素变化

Table 3 Elements change of *P. ostii* ‘Feng Dan’ leaves in different growth stages

日期(月-日)	氮/(mg·g ⁻¹)	磷/(mg·g ⁻¹)	钾/(mg·g ⁻¹)	镁/(mg·g ⁻¹)	铁/(mg·kg ⁻¹)	锰/(mg·kg ⁻¹)	锌/(mg·kg ⁻¹)	铜/(mg·kg ⁻¹)	硼/(mg·kg ⁻¹)
03-12	35.84	8.75	9.94	2.24	117.80	12.50	36.80	3.80	23.60
03-27	31.45	8.24	9.03	2.50	125.20	17.00	39.20	14.10	32.50
04-11	24.52	7.52	8.63	3.24	134.91	25.02	47.05	9.96	40.03
04-28	21.59	6.82	10.17	3.50	148.73	20.17	56.08	10.09	32.91
05-12	18.29	6.46	9.81	4.46	159.42	19.61	53.48	9.81	31.93
06-01	17.59	6.38	9.62	3.78	142.57	16.65	48.24	8.26	41.40
06-29	15.93	6.12	9.47	3.92	135.43	9.64	43.94	7.21	44.58
07-18	14.96	6.05	9.16	4.69	132.85	10.03	41.48	10.03	48.44
08-04	14.67	6.35	9.02	5.51	147.02	10.01	45.01	10.01	55.04

氮与硼，磷和硼呈显著正相关 ($P < 0.05$)；氮与锌，锌和铜呈显著负相关 ($P < 0.05$)。茎中磷和钾、锰，钾和锰，镁和锌均呈极显著正相关 ($P < 0.01$)；磷和锌，钾和镁、锌，镁和硼，锰和锌，锌和硼呈极显著负相关 ($P < 0.01$)；氮与硼呈显著负相关 ($P < 0.05$)。在叶片中磷和镁，磷和铁、硼均呈极显著负相关 ($P < 0.01$)；镁和铁、硼，铁和锌均呈显著正相关 ($P < 0.05$)。

2.2 油用牡丹‘凤丹’不同生育期生殖器官矿质元素的变化

2.2.1 果荚矿质元素 对果荚中矿质元素的分析发现：大量元素氮、磷、钾和镁元素在结实期初期均下降，在 5 月 12 日达最低值，分别为 12.71、7.40、9.91 和 2.26 mg·g⁻¹。氮和钾在结实期持续上升，在 8 月 4 日和 7 月 18 日分别达最大值，为 30.44 和 8.75 mg·g⁻¹，钾在果熟期下降。磷和镁在 5 月 12 日下降到最低值，在结实期无明显变化。锌和锰先上升后下降，结实期后期 (7 月 18 日) 骤然下降，铜和铁呈先下降后上升的趋势，硼持续上升 (表 5)。

2.2.2 种子矿质元素 对种子中的矿质元素分析发现：氮在结实期不断升高。钾在结实期持续下降，结实期前期明显降低，在结实期后期 (6 月 1 日后) 下降较为平缓。磷在结实期前期下降，结实后期持续上升，在 6 月 29 日后维持在较高水平。镁没有明显变化。微量元素铁在结实期呈先升高后降低的趋势，其他元素均表现出先降低后升高的趋势，锰在 7 月 18 日达最大值，之后骤然下降 (表 6)。

2.2.3 不同器官间矿质元素的相关性 对同种矿质元素在不同器官中的相关性分析表明 (表 7)：营养器官 (根、茎、叶) 与生殖器官 (果荚、种子) 相同元素之间存在一定的相关性。其中，磷、钾、铁在根与种子间存在显著的相关性 ($P < 0.05$)；锰在根与果荚间存在显著的相关性 ($P < 0.05$)；氮、钾、锰、硼在叶片与果荚之间有显著的相关关系 ($P < 0.05$)；氮、钾、锰、锌、硼在叶片与种子间有显著的相关关系 ($P < 0.05$)；氮在茎与果荚间有显著相关性 ($P < 0.05$)；氮、钾、镁在茎与种子间存在显著的相关性 ($P < 0.05$)。

表4 油用牡丹‘凤丹’根、茎、叶中9种元素的相关性

Table 4 Correlation among 9 elements of *P. ostii* ‘Feng Dan’ roots, stems and leaves

元素	氮根	磷根	钾根	镁根	锰根	铁根	锌根	铜根	硼根
氮根	1								
磷根	0.810**	1							
钾根	-0.090	-0.467	1						
镁根	0.281	0.443	-0.860**	1					
锰根	0.075	0.419	-0.910**	0.888**	1				
铁根	0.570	0.824**	-0.831**	0.831**	0.833**	1			
锌根	-0.651*	-0.249	-0.456	0.145	0.471	0.096	1		
铜根	0.796**	0.434	0.310	-0.145	-0.416	0.081	-0.745*	1	
硼根	0.686*	0.662*	-0.625	0.772**	0.580	0.786**	-0.184	0.394	1

元素	氮茎	磷茎	钾茎	镁茎	锰茎	铁茎	锌茎	铜茎	硼茎
氮茎	1								
磷茎	-0.278	1							
钾茎	-0.335	0.887**	1						
镁茎	0.097	-0.607	-0.683*	1					
锰茎	-0.267	0.943**	0.766**	-0.499	1				
铁茎	-0.051	-0.207	-0.478	-0.065	-0.075	1			
锌茎	0.421	-0.887**	-0.983**	0.680*	-0.735*	0.422	1		
铜茎	0.587	0.526	0.386	-0.407	0.505	-0.232	-0.303	1	
硼茎	-0.652*	0.588	0.625	-0.739*	0.482	0.199	-0.694*	-0.027	1

元素	氮叶	磷叶	钾叶	镁叶	锰叶	铁叶	锌叶	铜叶	硼叶
氮叶	1								
磷叶	-0.331	1							
钾叶	-0.803	0.003	1						
镁叶	-0.265	-0.858**	-0.176	1					
锰叶	0.081	0.276	-0.046	-0.359	1				
铁叶	-0.658	-0.682*	0.231	0.674*	0.270	1			
锌叶	0.574	-0.497	0.371	0.349	0.547	0.885**	1		
铜叶	-0.700	-0.112	-0.471	0.160	0.325	0.250	0.202	1	
硼叶	0.433	-0.730*	-0.556	0.811**	-0.430	0.271	0.016	0.233	1

说明：*表示在0.05水平上显著相关，**表示在0.01水平上极显著相关

表5 不同生育期油用牡丹‘凤丹’果荚矿质元素变化

Table 5 Elements change of *P. ostii* ‘Feng Dan’ pods in different growth stages

日期(月-日)	氮/(mg·g ⁻¹)	磷/(mg·g ⁻¹)	钾/(mg·g ⁻¹)	镁/(mg·g ⁻¹)	铁/(mg·kg ⁻¹)	锰/(mg·kg ⁻¹)	锌/(mg·kg ⁻¹)	铜/(mg·kg ⁻¹)	硼/(mg·kg ⁻¹)
04-28	14.81	9.12	13.12	2.53	46.86	14.67	39.13	13.01	26.05
05-12	12.71	7.40	9.91	2.26	15.85	9.66	38.93	9.66	19.30
06-01	16.66	8.73	13.75	2.08	17.07	4.95	12.32	12.32	27.17
06-29	20.70	8.65	17.57	2.72	8.89	26.76	33.47	10.05	33.53
07-18	28.36	8.55	24.24	2.62	13.71	33.79	33.92	6.78	30.43
08-04	30.44	8.08	21.09	3.63	23.70	10.30	15.46	10.30	41.22

3 结论与讨论

本研究中，‘凤丹’在展叶期(2月26日)营养器官(根、茎、叶)中氮、磷、钾3种大量元素质量分数均维持在较高水平，且从展叶期到立蕾期(3月27日)3种大量元素质量分数均明显下降，说明展叶

表 6 不同生育期油用牡丹‘凤丹’种子矿质元素变化

Table 6 Elements change of *P. ostii* ‘Feng Dan’ seeds in different growth stages

日期(月-日)	氮/(mg·g ⁻¹)	磷/(mg·g ⁻¹)	钾/(mg·g ⁻¹)	镁/(mg·g ⁻¹)	铁/(mg·kg ⁻¹)	锰/(mg·kg ⁻¹)	锌/(mg·kg ⁻¹)	铜/(mg·kg ⁻¹)	硼/(mg·kg ⁻¹)
04-28	25.97	23.60	20.23	1.93	20.46	30.09	34.03	28.87	21.02
05-12	27.87	14.95	12.23	1.46	30.85	14.44	19.60	22.44	9.66
06-01	30.63	15.11	9.25	1.40	29.37	12.78	25.70	17.97	10.25
06-29	31.95	18.61	8.31	1.50	17.78	26.73	29.16	17.01	12.15
07-18	33.97	18.70	8.01	1.55	22.43	40.71	40.74	16.27	11.38
08-04	38.37	16.83	7.56	1.63	10.46	19.01	38.02	19.01	28.52

表 7 油用牡丹‘凤丹’不同器官间矿质元素的相关性

Table 7 Correlation of elements in different organs of *P. ostii* ‘Feng Dan’

器官	根氮	茎氮	叶氮	果荚氮	种子氮	器官	根锰	茎锰	叶锰	果荚锰	种子锰
根氮	1					根锰	1				
茎氮	-0.029	1				茎锰	0.287	1			
叶氮	0.952**	-0.579	1			叶锰	0.826**	0.493	1		
果荚氮	0.331	0.951**	-0.821*	1		果荚锰	-0.878*	-0.657	-0.898*	1	
种子氮	0.197	0.942**	-0.907*	0.931**	1	种子锰	-0.622	-0.851*	-0.861*	0.843*	1
器官	根磷	茎磷	叶磷	果荚磷	种子磷	器官	根锌	茎锌	叶锌	果荚锌	种子锌
根磷	1					根锌	1				
茎磷	0.971**	1				茎锌	0.324	1			
叶磷	0.876**	0.845**	1			叶锌	0.869**	0.267	1		
果荚磷	-0.053	-0.190	0.162	1		果荚锌	-0.403	0.052	-0.211	1	
种子磷	-0.845*	-0.701	-0.755	-0.002	1	种子锌	-0.773	0.815*	-0.871*	-0.180	1
器官	根钾	茎钾	叶钾	果荚钾	种子钾	器官	根铜	茎铜	叶铜	果荚铜	种子铜
根钾	1					根铜	1				
茎钾	-0.362	1				茎铜	0.792**	1			
叶钾	0.023	0.078	1			叶铜	-0.037	0.361	1		
果荚钾	0.769	-0.691	-0.838*	1		果荚铜	-0.706	-0.235	-0.171	1	
种子钾	-0.888*	0.981**	0.888*	-0.585	1	种子铜	-0.541	0.237	0.464	0.617	1
器官	根镁	茎镁	叶镁	果荚镁	种子镁	器官	根硼	茎硼	叶硼	果荚硼	种子硼
根镁	1					根硼	1				
茎镁	-0.480	1				茎硼	0.598	1			
叶镁	-0.828**	0.459	1			叶硼	-0.449	-0.612	1		
果荚镁	-0.721	-0.459	0.746	1		果荚硼	0.142	-0.841*	0.944**	1	
种子镁	0.384	-0.963**	-0.182	0.297	1	种子硼	0.415	-0.656	0.874*	0.943**	1
器官	根铁	茎铁	叶铁	果荚铁	种子铁						
根铁	1										
茎铁	-0.060	1									
叶铁	-0.375	0.672*	1								
果荚铁	0.177	0.750	0.247	1							
种子铁	0.862*	-0.122	0.403	-0.303	1						

说明：*表示在0.05水平上显著相关，**表示在0.01水平上极显著相关

期到花蕾形成这段时间，‘凤丹’植株初叶舒展、花芽萌发，正处于开花前的准备阶段，根、茎中积累的氮、磷、钾营养元素迅速通过叶片向花中转移，以保证花的发育过程中对氮、磷、钾养分的需求。从

立蕾期(3月27日)到结实初期(4月28日),‘凤丹’经历花蕾形成、圆桃透色期、初花期、盛花期、末花期及结实初期,该阶段是‘凤丹’生殖生长的关键时期,为‘凤丹’后续籽粒物质积累与产量形成奠定基础;此时,‘凤丹’根与叶中氮元素质量分数急剧下降,磷元素缓慢降低,钾元素临近结实期持续增加;茎中氮元素与钾元素持续下降,磷元素变化幅度较小。由此说明,此阶段‘凤丹’根、茎、叶将积累的氮、磷元素源源不断地输送到生殖器官;同时‘凤丹’植株在生殖器官发育过程中对钾元素需求量较大,促使根系不断从土壤中吸收钾元素,通过茎、叶转运至生殖器官。

从结实初期(4月28日)到果熟期(8月4日),‘凤丹’植株根与果荚中氮元素质量分数呈先上升后下降的趋势,均在5月12日出现转折点;植株茎与种子中的氮元素均呈持续上升趋势;植株叶片中氮元素呈下降趋势,说明种子在发育过程中对氮元素的需求较高,结实初期根系、叶片与果荚中积累的氮元素不断向种子转移,导致此时期叶片与果荚氮下降;随着植株根系从土壤中大量吸收氮元素并通过茎不断向上输送,叶片作为生理代谢重要器官,不断将根、茎输送的氮元素转移至果荚,其转移量大于积累量,致使种子发育过程中,叶片中氮元素不断下降,从而确保果荚及种子中氮元素持续上升、不断积累,为籽粒膨大及内含物充实提供物质基础。从结实初期(4月28日)到果熟期(8月4日),‘凤丹’植株根与茎中磷元素呈先下降后上升的趋势,均在结实末期(7月18日)出现最低值;叶片中磷元素呈缓慢下降趋势,果荚与种子中磷元素呈现不规则动态变化,说明‘凤丹’果实在发育过程中对磷元素需求量受具体发育阶段的影响,结实末期(7月18日)之前对磷元素需求较大,根、茎、叶中的磷元素持续向果实转移,从结实末期(7月18日)至果熟期(8月4日)对磷元素需求量减小,根与茎中磷元素开始积累。从结实初期(4月28日)到果熟期(8月4日),‘凤丹’植株根中钾元素先上升后下降,在结实末期(7月18日)出现峰值;植株茎、叶与种子中钾元素均不断下降,果荚中钾元素呈先下降、再上升、又下降的趋势,说明‘凤丹’籽粒发育过程需要大量钾元素,营养器官吸收与积累的钾元素不断转运至果实,为种子膨大、产量形成提供物质基础。张阁^[18]研究发现:‘凤丹’萌芽期和花期需要大量氮和磷,果实发育期需要大量氮、磷和钾,这与本研究的结果一致。本研究发现:‘凤丹’种子发育过程中氮在果荚和种子中持续上升,与牡丹‘小胡红’*Paeonia suffruticosa* ‘Hu Hong’种子中的变化规律一致^[28]。结实期前期(4月28日至5月12日)果荚和种子磷、钾和镁质量分数均下降,磷和钾元素下降幅度非常明显,而同期茎和叶片中磷和钾同样下降,这与香榧*Torreya grandis* ‘Merrillii’种子发育前期矿质元素变化一致^[29],说明‘凤丹’种子处于发育前期。本研究表明:‘凤丹’结实期需氮、磷、钾量大,是氮素、磷素和钾素营养的最大效率时期,应在花谢后种子发育前追施氮磷钾肥。

植物微量元素也直接影响果实的产量和品质^[30-31]。本研究中,‘凤丹’根、茎、叶中铁质量分数远高于锰、锌、铜、硼,与‘小胡红’^[28]、北京景山栽培牡丹和‘洛阳红’*Paeonia suffruticosa* ‘Luoyang Red’^[32-33]结果一致,并且铁呈先升高后降低的趋势,表明‘凤丹’生长发育过程中需要大量的铁。本研究中铁质量分数大于硼,与张阁^[18]在宁夏地区所测的‘凤丹’硼质量分数高于铁的结果不一致,推测其主要原因可能是取样地理环境的差异所致。‘凤丹’根中微量元素呈先升高后降低的趋势,与茎和叶中微量元素变化规律不相同,但整体上也表现为先升高后降低的趋势,并且在盛花期(4月11日)前达到最大值,说明随着花朵开放、叶片展开,植株的光合能力不断增强,叶片中高水平的矿质元素有利于光合作用合成更多的有机物以及光合产物的运输。在花期之后到果熟期(8月4日),‘凤丹’根、茎、叶中微量元素整体表现出不同程度降低,说明‘凤丹’结实期是各种微量元素的高需求期,可在结实前期对其进行微肥的补充。硼和锌元素在种子发育过程中表现出先下降后升高的趋势,尤其是在种子成熟期(7月18日至8月4日)急剧上升,与魏双雨等^[11]对‘凤丹’施加硼锌肥,显著增大了光合产物积累的结果一致。推测‘凤丹’种子成熟期是植株体内有机物剧烈变化期,同时也伴随着微量元素的大量积累。‘凤丹’生育期内铁远高于其他微量元素,在种子发育后期硼和锌大幅上升,可在种子发育过程中增施铁、硼和锌,以满足‘凤丹’种子微量元素的积累。

植物不同生育期对矿质元素的需求量不同,矿质元素吸收转运相互影响,植物体内矿质元素呈现一定的消长规律,矿质元素在不同器官的动态分布规律也存在一定的相关性^[34-35]。本研究测定的不同元素间具有一定的相关性,有些达到极显著水平,不同器官的不同矿质元素之间的变化规律相关性并不相

同,表明不同生育期‘凤丹’器官对不同矿质元素的需求规律存在差异。氮、磷、钾、铁、锰与其他元素间表现出更加密切的相关性,说明它们可能调节‘凤丹’生育期内不同元素的吸收转运。不同元素在营养器官(根、茎、叶)和生殖器官(果荚、种子)间均存在相关性,如本研究发现:在发育过程中,果荚锌呈先升高后下降的趋势,而种子锌则呈先下降后升高的趋势。氮在叶与果荚、种子间,磷在叶与果荚间,硼在叶与果荚间呈显著负相关。‘凤丹’种子可能与果荚及邻近的营养器官间存在同化物分配的源库关系^[36]。种子发育初期果荚或营养器官积累大量的营养元素,当种子发育进入中后期,干物质大量积累,营养元素由果荚或营养器官转运到果实,表明‘凤丹’种子成熟过程中,矿质元素在植物体内存在着从营养器官到生殖器官的分配和积累规律。

综上所述,油用牡丹‘凤丹’花期需补充大量的氮、磷养分,种子发育过程中对氮、磷、钾需求量较大,开花前(3月中旬)宜追施氮、磷肥,花后结实期之前(5月上旬)追施氮、磷、钾肥。现蕾期(3月27日)到花期(4月)铁快速积累,之后迅速下降,种子发育后期对硼、锌需求量增加,可在5-7月种子发育期追施铁、硼、锌等微肥。

4 参考文献

- [1] 洪德元,潘开玉.芍药属牡丹组的分类历史和分类处理[J].植物分类学报,1999,37(4):351-368.
HONG Deyuan, PAN Kaiyu. Taxonomical history and revision of *Paeonia* sect. Moutan (Paeoniaceae) [J]. *Acta Phytotaxonomica Sin*, 1999, 37(4): 351-368.
- [2] 蓝保卿,李嘉珏,段全绪.中国牡丹全书[M].北京:中国科学技术出版社,2002:1-4.
- [3] 陈慧玲,杨彦伶,张新叶,等.油用牡丹研究进展[J].湖北林业科技,2013,42(5):41-44.
CHEN Huiling, YANG Yanling, ZHANG Xinye, et al. Research progress on *Paeonia suffruticosa* Andr. for oil [J]. *Hubei For Sci Technol*, 2013, 42(5): 41-44.
- [4] 王汉中.我国食用油供给安全形势分析与对策建议[J].中国油料作物学报,2007,29(3):347-349.
WANG Hanzhong. Analysis and strategy for current domestic edible oil supply [J]. *Chin J Oil Crop Sci*, 2007, 29(3): 347-349.
- [5] 史国安,焦封喜,焦元鹏,等.中国油用牡丹的发展前景及对策[J].中国粮油学报,2014,29(9):124-128.
SHI Guoan, JIAO Fengxi, JIAO Yuanpeng, et al. Development prospects and strategies of oil tree peony industry in China [J]. *J Chin Cereals Oils Association*, 2014, 29(9): 124-128.
- [6] 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.
LI Yucai. The strategy on the oil tree peony industry in China [J]. *Eng Sci*, 2014, 16(10): 58-63.
- [7] WANG Xiaojing, LIANG Haiying, GUO Dalong, et al. Integrated analysis of transcriptomic and proteomic data from tree peony (*P. ostii*) seeds reveals key developmental stages and candidate genes related to oil biosynthesis and fatty acid metabolism [J]. *Hortic Res*, 2019, 6: 111. doi:10.1038/s41438-019-0194-7.
- [8] 李凯,周宁,李赫宇.牡丹花、牡丹籽成分与功能研究进展[J].食品研究与开发,2012,33(3):228-230.
LI Kai, ZHOU Ning, LI Heyu. Composition and function research of peony flowers and peony seeds [J]. *Food Res Dev*, 2012, 33(3): 228-230.
- [9] 韩雪源,张延龙,牛立新,等.不同产地‘凤丹’牡丹籽油主要脂肪酸成分分析[J].食品科学,2014,35(22):181-184.
HAN Xueyuan, ZHANG Yanlong, NIU Lixin, et al. Fatty acid composition of ‘Fengdan’ peony seed oils from different growing regions [J]. *Food Sci*, 2014, 35(22): 181-184.
- [10] 王磊彬,陈兴望,李天宇,等.江苏丰县地区丰县‘富士’苹果生产园叶片矿质营养元素适宜值的研究[J].江西农业大学学报,2018,40(1):56-65.
WANG Leibin, CHEN Xingwang, LI Tianyu, et al. Appropriate content of leaf mineral element in ‘Fuji’ apple orchards of Fengxian, Jiangsu Province [J]. *Acta Agric Univ Jiangxi*, 2018, 40(1): 56-65.
- [11] 魏双雨,吉文丽,杨丹怡.叶施硼、锌对油用牡丹‘凤丹’光合特性和矿质元素含量的影响[J].西北林学院学报,2019,34(2):140-147.
WEI Shuangyu, JI Wenli, YANG Danyi. Effects of boron and zinc foliar application on photosynthetic characteristics and mineral elements of oil tree peony *Paeonia ostii* ‘Feng Dan’ [J]. *J Northwest For Univ*, 2019, 34(2): 140-147.

- [12] KÄNKÄNEN H, ERIKSSON C. Effects of under sown crops on soil mineral N and grain yield of spring barley [J]. *Eur J Agronomy*, 2007, **27**(1): 25 – 34.
- [13] BERTIC B, LONCARIC Z, VUKADINOVIC V, *et al.* Winter wheat yield responses to mineral fertilization [J]. *Cereal Res Commun*, 2007, **35**(2): 245 – 248.
- [14] 梁芳, 卫旭芳, 白永超, 等. 文冠果新梢发育过程中不同部位矿质元素的变化特性[J]. *浙江农林大学学报*, 2018, **35**(4): 624 – 634.
LIANG Fang, WEI Xufang, BAI Yongchao, *et al.* Mineral elements for new shoot development in *Xanthoceras sorbifolia* new shoots [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2018, **35**(4): 624 – 634.
- [15] 何国庆, 俞春莲, 饶盈, 等. 山核桃果实成熟过程中矿质元素及脂肪酸组分变化[J]. *浙江农林大学学报*, 2019, **36**(6): 1208 – 1216.
HE Guoqing, YU Chunlian, RAO Ying, *et al.* Dynamic changes in composition of mineral elements and fatty acids for hickory nuts (*Carya cathayensis*) during maturity [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2019, **36**(6): 1208 – 1216.
- [16] 郭丽丽, 侯小改, 李军, 等. 盆栽和地栽牡丹叶片与花芽中矿质元素含量的变化[J]. *中国农学通报*, 2014, **30**(25): 239 – 244.
GUO Lili, HOU Xiaogai, LI Jun, *et al.* Changes of mineral elements content in leaves and flower buds of potted and field *Paeonia suffruticosa* [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2014, **30**(25): 239 – 244.
- [17] 张利霞, 李明月, 魏冬峰, 等. 平衡施肥对油用牡丹生长与种子产量的影响[J]. *甘肃农业大学学报*, 2018, **53**(5): 58 – 68.
ZHANG Lixia, LI Mingyue, WEI Dongfeng, *et al.* Effects of balanced fertilization on growth and seed yield of *Paeonia ostii* [J]. *J Gansu Agric Univ*, 2018, **53**(5): 58 – 68.
- [18] 张阁. 油用牡丹‘凤丹’需肥规律和平衡施肥研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2018.
ZHANG Ge. *Research on Fertilizer Requirement and Balanced Fertilization of Tree Peony*[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2018.
- [19] 徐文静. 牡丹根际土壤酶活性及微生物群落的研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2014.
XU Wenjing. *The Study of Tree Peony Rhizosphere Soil Enzyme Activity and Microbial Community*[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2014.
- [20] HAN Chenjing, WANG Qi, ZHANG Hongbao, *et al.* Seed development and nutrient accumulation as affected by light shading in oilseed peony (*Paeonia ostii* ‘Feng Dan’) [J]. *Sci Hort*, 2019, **251**: 25 – 31.
- [21] HAN Chenjing, WANG Qi, ZHANG Hongbao, *et al.* Light shading improves the yield and quality of seed in oil-seed peony (*Paeonia ostii* ‘Feng Dan’) [J]. *J Integrative Agric*, 2018, **17**(7): 1631 – 1640.
- [22] 段祥光, 张利霞, 刘伟, 等. 施氮量对油用牡丹‘凤丹’光合特性及产量的影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2018, **42**(1): 48 – 54.
DUAN Xiangguang, ZHANG Lixia, LIU Wei, *et al.* Effects of nitrogen application on photosynthetic characteristics and yields of oil tree peony *Paeonia ostia* ‘Feng Dan’ [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2018, **42**(1): 48 – 54.
- [23] 魏冬峰, 张利霞, 常青山, 等. 氮磷钾平衡施肥对凤丹光合特性的影响[J]. *核农学报*, 2016, **30**(11): 2265 – 2273.
WEI Dongfeng, ZHANG Lixia, CHANG Qingshan, *et al.* Effects of N, P and K balanced fertilization on photosynthetic characteristics of *Paeonia ostii* ‘Feng Dan’ [J]. *J Nucl Agric Sci*, 2016, **30**(11): 2265 – 2273.
- [24] 刘曙光, 段佩玲, 张利霞, 等. 氮素形态对‘凤丹’表型性状、光合及产量的影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2019, **43**(4): 161 – 168.
LIU Shuguang, DUAN Peiling, ZHANG Lixia, *et al.* Effects of different nitrogen forms on phenotypic traits, photosynthesis and yield of *Paeonia ostia* ‘Feng Dan’ [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2019, **43**(4): 161 – 168.
- [25] 朱丹, 刘芳, 吴三林, 等. 氮磷钾不同施用量对‘凤丹’牡丹产量的影响[J]. *乐山师范学院学报*, 2016, **31**(12): 43 – 48.
ZHU Dan, LIU Fang, WU Sanlin, *et al.* The influence of different application rate of N, P and K on the yield of *Paeonia ostii* [J]. *J Leshan Norm Univ*, 2016, **31**(12): 43 – 48.
- [26] 温云杰, 李桂花, 黄金莉, 等. 连续流动分析仪与自动凯氏定氮仪测定小麦秸秆全氮含量之比较[J]. *中国土壤与肥料*, 2015(6): 146 – 151.
WEN Yunjie, LI Guihua, HUANG Jinli, *et al.* Determination nitrogen in the Kjeldahl digests of plant samples by

- continuous flow analyzer in comparison with automated distillation-titration instrument [J]. *Soil Fert Sci Chin*, 2015(6): 146 – 151.
- [27] 贺春玲, 徐珊珊, 张淑霞, 等. 9 种牡丹花粉的蛋白质和矿物元素含量分析[J]. *核农学报*, 2015, 29(11): 2158 – 2164.
HE Chunling, XU Shanshan, ZHANG Shuxia, *et al.* Analysis of the protein and mineral elements content in pollen of nine *Paeonia suffrutisosa* cultivars [J]. *J Nucl Agric Sci*, 2015, 29(11): 2158 – 2164.
- [28] 魏冬峰, 马慧丽, 张利霞, 等. 牡丹植株矿质营养年周期变化规律的研究[J]. *北方园艺*, 2015(12): 66 – 70.
WEI Dongfeng, MA Huili, ZHANG Lixia, *et al.* Dynamic change of mineral element content in different organs of peony [J]. *North Hortic*, 2015(12): 66 – 70.
- [29] 刘萌萌, 曾燕如, 江建斌, 等. 香榧生长期叶片和种子中矿质元素动态变化研究[J]. *浙江农林大学学报*, 2014, 31(5): 724 – 729.
LIU Mengmeng, ZENG Yanru, JIANG Jianbin, *et al.* Mineral elements in leaves and seeds of *Torreya grandis* ‘Merrillii’ during seed development [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2014, 31(5): 724 – 729.
- [30] 龚云池, 徐季娥, 吕瑞江. 梨果实中不同形态钙的含量与品质的关系[J]. *园艺学报*, 1992, 19(2): 129 – 134.
GONG Yunchi, XU Ji’e, LÜ Ruijiang, *et al.* Studies on the content of different forms of calcium compound and their change in the fruit of pear [J]. *Acta Hortic Sin*, 1992, 19(2): 129 – 134.
- [31] 顾曼如, 束怀瑞. 红星苹果果实矿质元素含量与品质的关系[J]. *园艺学报*, 1992, 19(4): 301 – 306.
GU Manru, SHU Huairui. The relationship between fruit quality and mineral element contents in fruit of ‘Starking Delicious’ apples [J]. *Acta Hortic Sin*, 1992, 19(4): 301 – 306.
- [32] 欧国菁. 北京景山栽培牡丹的矿质营养研究[J]. *北京林业大学学报*, 1993, 15(1): 66 – 73.
OU Guojing. A study of mineral nutrients in the cultivated tree peony at Jingshan Park in Beijing [J]. *J Beijing For Univ*, 1993, 15(1): 66 – 73.
- [33] 许刚. 盆栽牡丹和地栽牡丹营养元素年周期变化规律的研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2010.
XU Gang. *Annual Dynamic Changes of the Nutrient Element on Potted and Field Paeonia suffruticosa Andr* [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2010.
- [34] 高启明, 罗淑萍, 郑春霞, 等. 扁桃幼果发育期果实和叶片中矿质元素含量的变化[J]. *果树学报*, 2007, 24(2): 222 – 225.
GAO Qiming, LUO Shuping, ZHENG Chunxia, *et al.* Studies on the variation of mineral element content in almond fruits and leaves during its development [J]. *J Fruit Sci*, 2007, 24(2): 222 – 225.
- [35] 蒋万峰, 崔永峰, 张卫东, 等. 无核白葡萄叶内矿质元素含量年生长季内的变化[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2005, 33(8): 91 – 95.
JIANG Wanfeng, CUI Yongfeng, ZHANG Weidong, *et al.* Annual changes of mineral elements in foliar of thompsons seedless [J]. *J Northwest A&F Univ Nat Sci Ed*, 2005, 33(8): 91 – 95.
- [36] 李合生. 现代植物生理学[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 171 – 188.