

氮磷钾配施对红花产量及其有效成分在器官中分配的影响

胡喜巧^{1,2},陈红芝³,邬佩宏¹,路瑶瑶¹,周保英¹,杨文平¹,孟丽¹

(1.河南科技学院生命科学院,河南 新乡 453003;2.现代生物育种河南省协同创新中心,河南 新乡 453003;
3.新乡工程学院生物与化学工程系,河南 新乡 453700)

摘要:于2018—2019年在河南科技学院试验田,以百农红花1号为材料,设计氮、磷、钾三因素和无肥(N0、P0、K0)、低肥(N1、P1、K1)、中肥(N2、P2、K2)、高肥(N3、P3、K3)四水平试验,以T1(N0P0K0)为对照,T2(N0P2K2)、T3(N1P2K2)、T4(N2P2K2)、T5(N3P2K2)、T6(N2P0K2)、T7(N2P1K2)、T8(N2P3K2)、T9(N2P2K0)、T10(N2P2K1)、T11(N2P2K3)为不同施肥水平,共11个处理,研究氮、磷、钾肥用量及配比对红花产量的影响,探讨氮、磷、钾不同用量及配比下红花生育期各器官中有效成分分配规律。结果表明:红花花产量随氮肥用量的增加而增加,以T5最高,与T1相比增加59.44%,随磷肥和钾肥用量的增加呈先上升后下降趋势,均以T4最大,与T1相比增加42.87%;红花种子产量随氮、磷、钾肥用量的增加呈先上升后下降的趋势,均以T4最高,与T1相比增加116.52%。氮、磷、钾肥不同用量及配比对红花生育期各器官中黄酮含量影响有相同规律,从苗期到成熟期,叶和茎黄酮含量均表现为先下降后上升的趋势,根中黄酮含量逐渐增加,红花营养器官中黄酮含量均表现为叶>茎>根;氮和钾抑制了营养器官黄酮向花中的分配与累积,磷促进了红花黄酮向花中分配与累积,单株花黄酮累积量以T9最高,其次为T4,花中黄酮累积量占单株黄酮累积量的比例以T3最高,其次是T2,花中有效成分羟基红花黄色素A以无氮、低磷、低钾时含量相对较高,山奈素含量与氮、磷、钾用量及配比无关;氮、磷、钾促进了种子内黄酮的分配与累积,以T4表现较好。综合考虑产量性状和品质,红花生产中氮、磷、钾用量及配比以T4(N 225 kg · hm⁻², P₂O₅ 150 kg · hm⁻², K₂O 150 kg · hm⁻²)表现最佳。

关键词:红花;氮;磷;钾;产量;黄酮;羟基红花黄色素A;山奈素

中图分类号:S567.2;S143 **文献标志码:**A

Effects of combined application of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers on yield and distribution of active ingredient in organs of *C. tinctorius*

HU Xiqiao^{1,2}, CHEN Hongzhi³, WU Peihong¹, LU Yaoyao¹, ZHOU Baoying¹, YANG Wenping¹, MENG Li¹

(1. College of Life Science and Technology of Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang, Henan 453003, China;

2. Collaborative Innovation Center of Modern Biological Breeding, Xinxiang, Henan 453003, China;

3. Department of Biological and Chemical Engineering, Xinxiang Institute of Technology, Xinxiang, Henan 453700, China)

Abstract: Field trials were carried out in the experimental site of Henan Institute of Science and Technology in 2018 and 2019. The study used nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers with four levels including no fertilizer (N0, P0, K0), low fertilizer (N1, P1, K1), medium fertilizer (N2, P2, K2) and high fertilizer (N3, P3, K3). The treatments were T2 (N0P2K2), T3 (N1P2K2), T4 (N2P2K2), T5 (N3P2K2), T6 (N2P0K2), T7 (N2P1K2), T8 (N2P3K2), T9 (N2P2K0), T10 (N2P2K1) and T11 (N2P2K3), and T1 (N0P0K0) as a control group. Bainong *C. tinctorius* No.1 was used as the trial material. The effects of nitrogen, phosphorus and potassium dosage and ratios on yield of *C. tinctorius* and distribution of active ingredient in different organs at different growth

收稿日期:2021-11-23

修回日期:2022-04-21

基金项目:国家自然科学基金(31540040);河南省科技攻关项目(222102110415);2018年中医药公共卫生服务补助专项“全国中药资源普查项目”(财社[2017]183号);2019年医疗服务与保障能力提升补助资金“全国中药资源普查项目”(财社[2019]39号);新乡市科技攻关(GG2021023)

作者简介:胡喜巧(1971-),女,河南原阳人,硕士,高级实验师,主要从事土壤和红花种质资源开发与利用研究。E-mail:hxqiao1@163.com

通信作者:杨文平(1971-),男,河南淇县人,副教授,硕士生导师,主要从事作物高产栽培生理研究。E-mail:yangwenping1971@126.com

stages of *C. tinctorius* were investigated. The results showed that the flower yield of *C. tinctorius* increased with the increase of nitrogen dosage, and T5 was the largest, which increased by 59.44% compared with T1. With the increase of phosphorus and potassium dosage, the flower yield showed a trend of first increasing and then decreasing, and T4 was the largest, which increased by 42.87% compared with T1. The seed yield of *C. tinctorius* increased with the increase of nitrogen, phosphorus and potassium dosage showed a trend of first increasing and then decreasing, and T4 was the highest, which increased by 116.52% compared with T1. The dosage of nitrogen, phosphorus and potassium and the ratio of flavonoids in different organs in different growth stages of *C. tinctorius* had the same regularity. The flavonoid content in the leaves and stems showed a trend of first declining and then rising, while the flavonoid content in the root gradually increased. The content of flavonoids was leaf > stem > root from seedling stage to mature stage. Nitrogen and potassium inhibited the distribution and accumulation of vegetative organ flavonoids into flowers, and phosphorus promoted the distribution and accumulation of *C. tinctorius* flavonoids into flowers. The accumulation of flavonoids per flower was the highest in T9, followed by T4, and the ratio of the accumulation of flavonoids in flowers to the accumulation of flavonoids per plant was highest in T3, followed by T2. The content of hydroxyl safflower yellow A was relatively high when there was no nitrogen, phosphorus and potassium, and kaempferol had nothing to do with the level and ratio of nitrogen, phosphorus and potassium. Nitrogen, phosphorus and potassium promoted distribution and accumulation of flavonoids in the seeds and T4 was the best. With comprehensive consideration of *C. tinctorius* yield traits and quality, T4 ($N 225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $P_2O_5 150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, and $K_2O 150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) was the best fertilization plan for nitrogen, phosphorus and potassium levels and ratios in *C. tinctorius* production.

Keywords: *C. tinctorius*; nitrogen; phosphorus; potassium; yield; flavonoid; HYSA; kaempferol

红花(*Carthamus tinctorius*)是1~2 a生菊科草本植物^[1],以花入药,具有通经、活血、散瘀止痛之功效^[2-3]。其主要药用成分为黄酮类羟基红花黄色素A(HYSA)^[4-6],产量和品质除受品种自身遗传特性影响外,还与其生长环境密切相关,特别是红花籽粒产量具有较低的遗传率且受环境影响较大。氮、磷、钾是植物产量形成的关键因子,是植物体内重要有机化合物的组成元素,可以调控植株生长发育,参与酶系统的活化,促进植物光合作用、蛋白质和碳水化合物合成及同化产物的运输等,氮、磷、钾供应水平直接影响植物的产量和品质。目前,氮磷钾施肥方案在黄芪^[7]、半夏^[8]、甘草^[9]、金盏花^[10]、山药^[11]、杭白菊^[12]和大黄^[13]等研究中发挥了较好的作用,不同作物在当地产区适宜的氮磷钾用量及配比已逐渐明确。近年来,国内外学者在红花重金属含量^[14-15]、遗传^[16-17]和抗性^[18-19]等方面研究较多,在红花栽培和施肥等方面也进行了一些研究,如李宗林等^[20]研究了密度和施肥方式与红花产量的关系,谭勇等^[21]研究了不同栽培方式与红花产量和品质的关系,王兆木等^[22]研究了新疆塔额盆地红花高产肥料配比,张欣旸^[23]研究了红花产量与灌水量和施氮量的关系,李小静^[24]研究了新品系大果红花品质与氮磷钾配比及密度的关系,贾宏涛等^[25]研究了施肥对红花生长和产量的影响,胡喜巧等^[26]研

究了红花对氮磷钾的吸收与累积规律。上述研究局限于栽培方式、施肥方式或灌水量与产量的关系,未涉及氮磷钾不同用量及配比下红花产量性状与有效成分黄酮类物质变化及分配情况。且红花产区常采用单质肥料单施或混配或复合肥“一炮轰”的不合理施肥方式,而市场上肥料种类繁多,花农选购时主要受传统施肥观念和自身经济状况的影响,氮用量偏大或氮磷钾施用比例不科学,从而造成土壤氮磷钾比例失调,严重的可导致土壤板结,不利于红花产量和品质的提升。因此,研究合理的氮磷钾用量及配比,优化肥料减施方案,提高养分利用率,成为提升红花生产水平和药效及品质的重要途径。本试验采用“3414”试验设计优化方案,研究了氮磷钾不同施用量及配比对红花农艺性状的影响,检测了氮磷钾不同用量及配比下红花生育期各器官中有效成分黄酮分配与转运、花中羟基红花黄色素A和山奈素含量,旨在为红花产区合理施肥及药材质量评价提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为河南科技学院红花种质资源开发利用工程技术中心选育的百农红花1号(BH-1,豫中药品鉴2019010)。

1.2 试验设计

试验于2018年10月9日—2019年6月30日在河南科技学院试验田进行,土壤为潮土,试验前茬作物为玉米,试验田基础土壤理化性状如下:pH 8.01,有机质含量 $15.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效氮含量 $92.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷含量 $8.92 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾含量 $132.53 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。试验为三因素(氮、磷、钾)四水平(无肥、低肥、中肥、高肥)施肥试验,氮素的无肥($\text{N}0$)、低肥($\text{N}1$)、中肥($\text{N}2$)、高肥($\text{N}3$)施用量分别为0、 112.5 、 225.0 、 $337.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;磷素(P_2O_5)和钾素(K_2O)的无肥($\text{P}0, \text{K}0$)、低肥($\text{P}1, \text{K}1$)、中肥($\text{P}2, \text{K}2$)、高肥($\text{P}3, \text{K}3$)的施用量相同,分别为0、 75 、 150 、 $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。本文采用“3414试验方案”的优化方案,结合农田土壤供养标准和传统施肥观念,重点研究氮、磷、钾三因素中两因素为中等施肥量条件下,另一主因素不同施用量对红花产量和品质的影响,以T1($\text{N}0\text{P}0\text{K}0$)为对照,设T2($\text{N}0\text{P}2\text{K}2$)、T3($\text{N}1\text{P}2\text{K}2$)、T4($\text{N}2\text{P}2\text{K}2$)、T5($\text{N}3\text{P}2\text{K}2$)、T6($\text{N}2\text{P}0\text{K}2$)、T7($\text{N}2\text{P}1\text{K}2$)、T8($\text{N}2\text{P}3\text{K}2$)、T9($\text{N}2\text{P}2\text{K}0$)、T10($\text{N}2\text{P}2\text{K}1$)、T11($\text{N}2\text{P}2\text{K}3$)不同肥料配施水平,共11个处理,重复3次,小区面积为 30 m^2 ($10 \text{ m} \times 3 \text{ m}$),株行距为 $15 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$,四周设保护行,完全随机排列。氮肥为尿素(含N 46%),磷肥为过磷酸钙(含 P_2O_5 12%),钾肥为硫酸钾(含 K_2O 52%),60%氮肥、全部磷肥作为基肥一次施入,40%氮肥和全部钾肥定苗后追肥施入;越冬前和返青前各灌水1次,结合灌水中耕2次,其他田间管理措施相同。

1.3 测定项目与方法

分别在红花苗期(2019-03-24)、花蕾期(2019-05-26)、成熟期(2019-06-27),每个小区随机选取红花10株带回室内,调查单株花产量和单株种子产量,将每个单株的根、茎、叶、花、蕾、苞叶、种子分器官包装,置入 105°C 烘箱内杀青40 min, 60°C 恒温箱内烘至恒重,按器官称重后混匀,粉碎过筛备用;采用分光光度法重复4次测定黄酮含量^[27]。产量=(单株花产量或单株种子产量)×种植密度,单株花黄酮累积量=花中黄酮含量×单株花产量,单株黄酮累积量=Σ(单株各器官黄酮含量×对应器官重量),采用HPLC法检测羟基红花黄色素A和山奈素含量^[3]。

1.4 数据处理

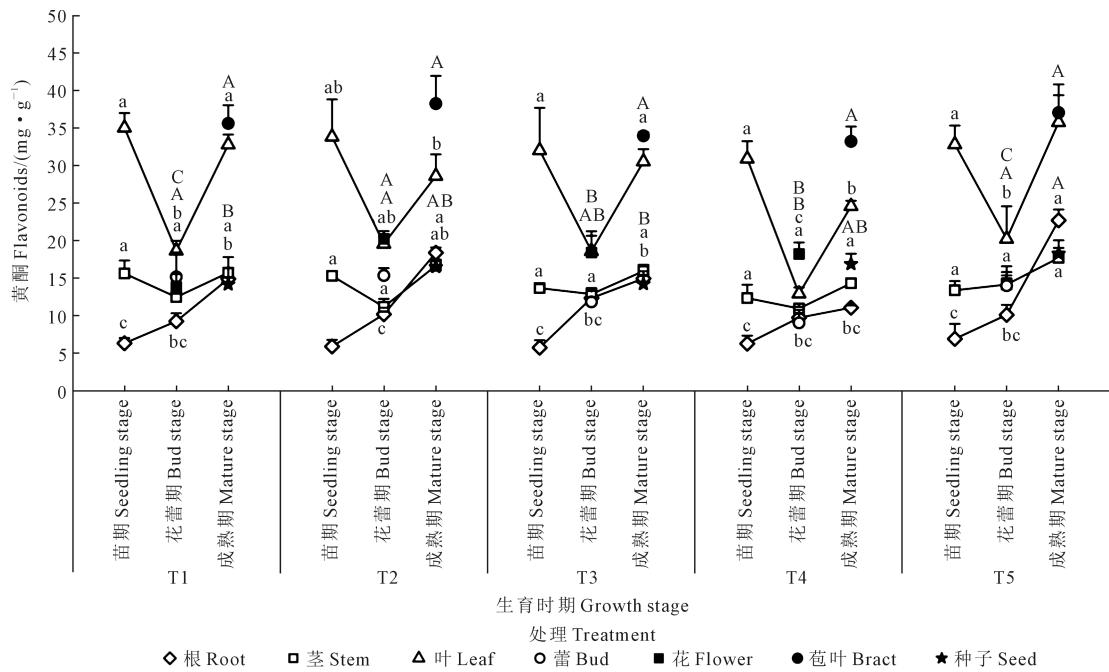
采用Microsoft Excel 2016和DPS 14.5(Data Processing System)进行数据处理和统计分析。

2 结果与分析

2.1 氮磷钾对不同生育时期红花各器官黄酮含量的影响

2.1.1 氮素用量对红花不同生育时期各器官黄酮含量变化的影响 通过分析磷钾施肥水平相同条件下,不同氮素用量对红花生育期各器官黄酮含量的影响可知(图1),从苗期到成熟期,红花器官中黄酮含量均表现为叶>茎>根。随生育期推进,根中黄酮含量逐渐增加,增幅以T5和T2相对较大,成熟期含量分别是苗期的3.28倍、3.11倍;茎和叶中黄酮含量均呈先下降后上升的趋势,T4花蕾期与苗期相比,其叶中黄酮含量下降幅度最大,达58.14%,成熟期与苗期相比回升幅度仅20.46%,说明花蕾期黄酮更利于向生长中心分配;T2与T1相比,花中黄酮含量增加了46.53%。磷钾施肥水平相同条件下,随氮素用量增加,各处理花中黄酮含量表现为下降趋势且均高于对照;花蕾中黄酮稍有增加,随氮素用量增加呈现先下降后上升的趋势,T4下降幅度最大,与T1相比下降40.39%,说明氮素为中肥水平有利于黄酮向花中分配;成熟期各处理苞叶中黄酮含量均高于种子,随氮素用量增加,苞叶中黄酮含量呈先下降后上升的趋势,以T2和T5相对较大,与T1相比分别增加了7.43%、6.28%,T3、T4与T1相比分别下降了4.63%、6.76%;随氮素用量增加,成熟期种子中黄酮含量均高于T1且呈先下降后上升的趋势,以T5、T4和T2相对较高,与T1相比分别增加了28.98%、19.19%、16.29%。由此可见,在无氮条件下,磷钾肥促进了花中黄酮含量的分配与累积;磷钾施肥水平相同条件下,氮素用量增加不利于花中黄酮含量的提升,有利于种子中黄酮含量的提升。

2.1.2 磷素用量对红花不同生育时期各器官黄酮含量变化的影响 通过分析氮钾施肥水平相同条件下,不同磷素用量对红花生育期各器官黄酮含量的影响可知(图2),从苗期到成熟期,器官中黄酮含量变化规律与氮素基本相同,除T8外,均表现为叶>茎>根。随生育期推进,根中黄酮含量逐渐增加,增幅以T8和T6相对较大,成熟期分别为苗期的2.79倍、2.13倍,叶中黄酮含量表现为先下降后上升的趋势;T6和T7茎中黄酮含量逐渐增加,其他处理呈现先下降后上升的趋势;同为无磷素用量处理,T6较T1花中黄酮含量下降了36.78%。氮钾施肥水平相同条件下,随磷素用量增加,花中黄酮含量表现为先下降后急剧上升的趋势,特别是T4、T8显著高于T1,与T1相比分别增加了31.86%、86.13%;花



注:图中小写字母表示根、茎、叶同一器官不同生育时期 0.05 水平上差异显著性,大写字母表示蕾、花、苞叶、种子不同处理下 0.05 水平上差异显著性;花蕾期字母自上而下分别表示花、蕾、叶、茎、根的显著性,成熟期字母自上而下分别表示苞、叶、种子、茎、根的显著性。下同。

Note: The lowercase letters in the figure indicate the significance of difference at 0.05 level in the same organ of root, stem and leaf at different reproductive stages. The capital letters in the figure indicate the significance of difference at 0.05 level in bud, flower, bract and seed under different treatments. The letters of bud stage refer to the significance of flowers, buds, leaves, stems and roots respectively from top to bottom, while the letters of mature stage refer to the significance of bracts, leaves, seeds, stems and roots respectively from top to bottom. The same below.

图 1 不同氮素用量下红花生育期各器官黄酮含量变化

Fig.1 Change of flavonoids content in different *C. tinctorius* organs in different growth stages under different nitrogen amounts

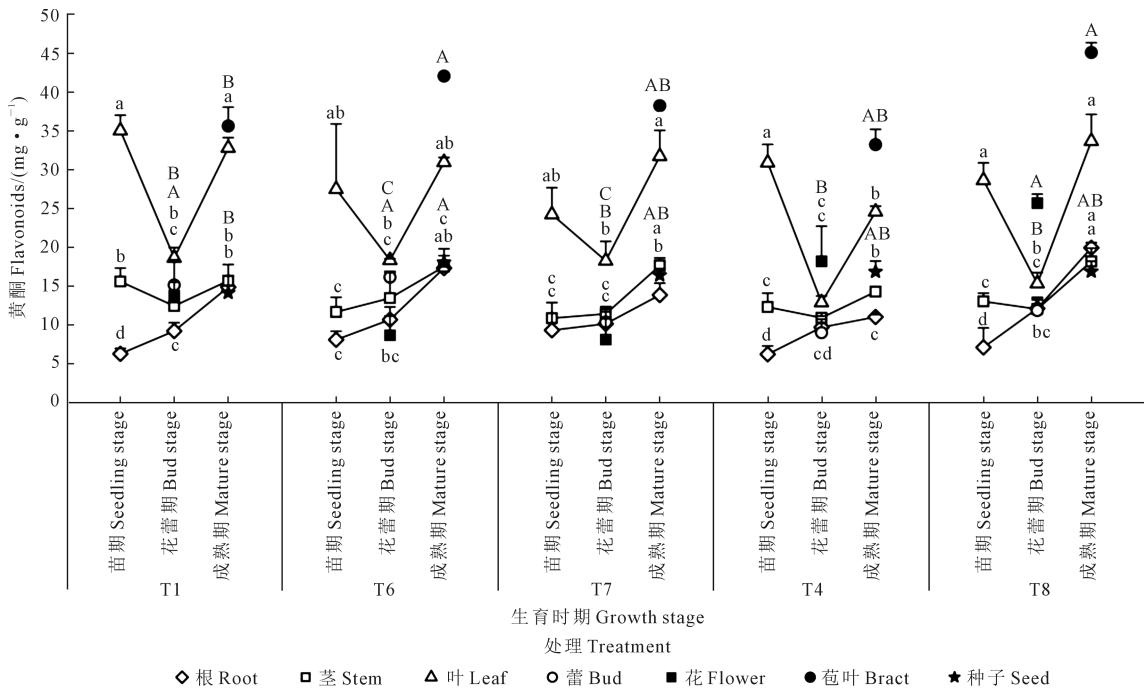


图 2 不同磷素用量下红花生育期各器官黄酮含量变化

Fig.2 Change of flavonoids content in different *C. tinctorius* organs in different growth stages under different phosphorus amounts

蕾中黄酮随磷素用量增加呈现先下降后上升的趋势,同样以T4下降幅度最大;成熟期各处理苞叶中黄酮含量均高于种子,随磷素用量增加,苞叶中黄酮含量呈现先下降后上升的趋势,以T8、T6、T7相对较高,与T1相比分别增加了26.53%、18.00%、7.32%,T4则较T1下降了6.76%,说明T4有利于苞叶中黄酮向种子内转移;成熟期种子中黄酮含量随磷素用量的增加呈现先下降后上升趋势,T6、T7、T4、T8与T1相比分别增加了27.64%、16.08%、19.18%、19.32%。由此可见,氮钾施肥水平相同条件下,磷素增加有利于花蕾期花中黄酮含量的提升,成熟期种子中黄酮含量虽有提高,但不同磷素用量之间无差异显著。

2.1.3 钾素用量对红花不同生育时期各器官黄酮含量变化的影响 通过分析氮磷施肥水平相同条件下,不同钾素用量对红花生育期各器官黄酮含量的影响可知(图3),从苗期到成熟期,器官中黄酮含量变化规律与氮素基本一致,均表现为叶>茎>根。随生育期推进,根中黄酮含量逐渐增加,增幅以T9和T10相对较大,成熟期分别是苗期的2.76倍、2.71倍;叶和茎中黄酮含量均表现为先下降后上升的趋势,T4叶中黄酮向生长中心转移能力强;T9与T1相比花中黄酮含量增了2.27倍。氮磷施肥水平相同条件下,随钾素用量增加,花中黄酮含量先急剧下降后平稳上升,T10、T4、T11与T1相比分别增加了35.04%、31.86%、38.29%,3个处理中T4含量最低;花蕾中黄酮含量随钾素用量增加呈现先上升后

下降再上升趋势,同样以T4最低;成熟期各处理苞叶中黄酮含量均高于种子,随钾素用量增加,苞叶中黄酮含量呈现先上升再下降再上升趋势,以T11、T10相对较高,与T1相比分别增加了18.28%、1.12%,T4与T1相比下降了6.76%;随钾素用量增加,种子中黄酮含量均高于T1且呈现先上升趋势,T10、T4和T11与T1相比分别增加了14.81%、19.18%、30.75%。上述分析表明,氮磷施肥水平相同条件下,钾素增加有利于花和种子中黄酮含量提升。

2.2 氮磷钾对红花单株产量及黄酮分配比例的影响

2.2.1 氮磷钾对红花单株花产量及黄酮分配比例的影响 表1表明,磷钾施肥水平相同条件下,红花单株花产量随氮素用量增加呈上升趋势,即T5>T4>T3>T2,其中T5、T4与T1相比分别增加了59.76%、44.29%;花中黄酮含量随氮素用量增加呈下降趋势,而花中黄酮累积量呈先上升后下降趋势,花中黄酮累积量、单株黄酮累积量均以T4最大,与T1相比分别增加了104.49%、35.69%,花中黄酮累积量占单株黄酮累积量的比例以T3最高,其次是T2,说明氮素抑制了营养器官黄酮向花中的分配与累积。氮钾施肥水平相同的条件下,随磷素用量增加,单株花产量、单株花黄酮累积量及其占单株黄酮累积量的比例均呈先上升后下降趋势,即T6<T7、T8<T4,以T4表现最佳,说明磷素适量增加促进了植株黄酮向花中分配与累积。氮磷施肥水平相同的条件下,随钾素用量增加,单株花中黄酮含量呈下降趋

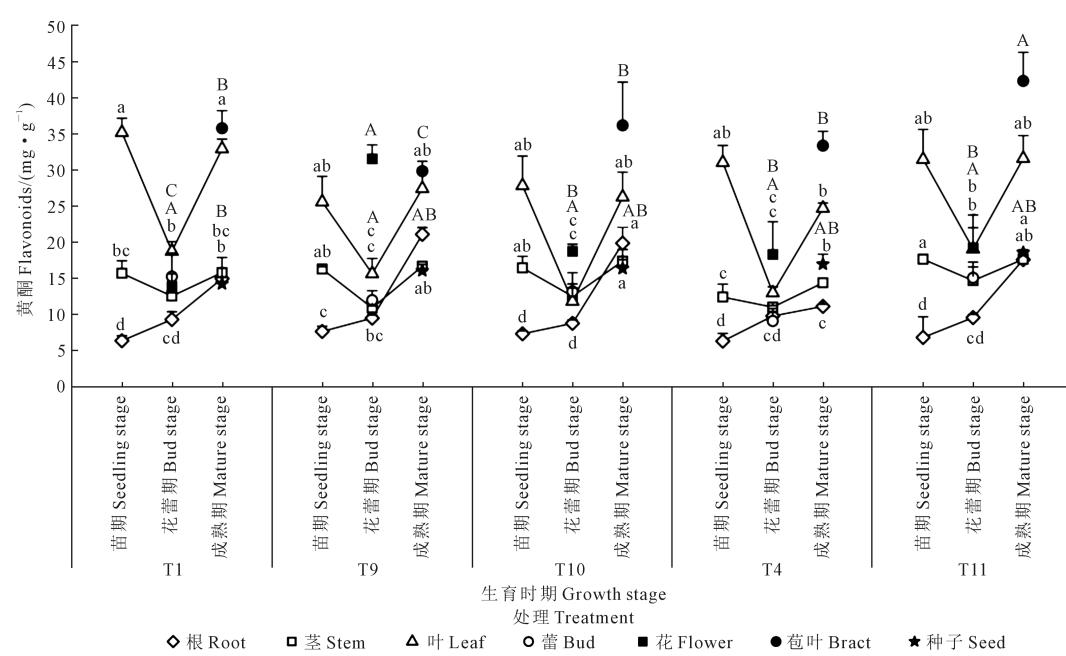


图3 不同钾素用量下红花生育期各器官黄酮含量变化

Fig.3 Change of flavonoids content in different *C. tinctorius* organs in different growth stages under different potassium amounts

表 1 不同氮磷钾用量及配比下红花单株花产量及黄酮分配比例

Table 1 The yield and distribution of flavonoids of *C. tinctorius* flower per plant under different amount and proportion of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers

处理 Treatment	单株花产量/g Flower yield per plant	花黄酮含量/(mg·g ⁻¹) Flower flavonoid content	花黄酮累积量/mg Flower flavonoid accumulation	单株黄酮累积量/mg Flavonoid accumulation per plant	所占比例/% Percentage
T1	1.64±0.13cd	13.84±1.73cd	22.73±3.19d	867.88±18.73ab	2.62
T2	2.00±0.08bc	20.28±1.01bc	40.54±1.88abc	851.20±17.37ab	4.76
T3	2.20±0.39ab	18.44±5.24c	43.52±10.66abc	751.71±10.43b	5.79
T4	2.35±0.33ab	18.25±4.52c	46.48±6.11ab	1177.65±36.43a	3.95
T5	2.62±0.13a	14.35±5.02cd	44.51±0.94abc	1094.52±11.40ab	4.07
T6	1.24±0.36d	8.75±3.61d	15.86±4.90d	871.03±14.54ab	1.82
T7	1.93±0.19bc	8.19±3.87d	24.12±1.79d	992.68±8.06ab	2.43
T8	1.33±0.32d	25.76±1.14ab	34.49±9.13c	1203.10±13.02a	2.87
T9	1.58±0.25cd	31.46±1.89a	50.03±10.13a	1064.35±21.85ab	4.70
T10	1.91±0.21bc	18.69±0.99c	35.57±2.65bc	971.79±21.81ab	3.66
T11	1.25±0.13d	19.14±4.54c	23.47±2.95d	977.12±12.20ab	2.40

注:数据格式是平均值±标准差,样本数为 10。同列数据后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),所占比例是花或种子中黄酮累积量与单株黄酮累积量之比,下表同。

Note: The data format is mean ± standard deviation, the number of samples is 10. Different lowercase letters within each column mean significant difference ($P<0.05$). The percentage is the ratio of the cumulative amount of flavonoids in flowers or seeds to the cumulative amount per plant, the same below.

势,以 T9 表现最佳,花中黄酮累积量呈先下降后上升趋势,而花中黄酮累积量占单株黄酮累积量的比例以 T9 最佳,其次为 T4,说明无钾或中钾施肥量能够促进单株营养器官黄酮向花中分配与累积。

2.2.2 氮磷钾对红花单株种子产量及黄酮分配比例的影响 表 2 表明,随氮、磷、钾用量增加,红花单株种子产量均表现为先上升后下降趋势,且均以 T4 表现最佳。磷钾施肥水平相同的条件下,种子中黄酮含量随氮素用量增加而增加,以 T5 最高;氮钾施肥水平相同的条件下,种子中黄酮含量随磷素用量增加变化不明显且处理间无显著差异;氮磷施肥水平相同的条件下,种子中黄酮含量随钾素用量的增加而增加,以 T11 最高,处理间无显著差异。随氮素用量增加,单株种子黄酮累积量呈先上升后下降趋势,T4 和 T5 相对较高,与 T1 相比分别增加 184.42%、166.52%;单株种子黄酮累积量占单株黄酮累积量的比例呈上升趋势,T5 和 T4 相对较高,说明提高氮素施用量促进了种子黄酮累积及植株黄酮向其分配。随磷素用量增加,单株种子黄酮累积量呈先上升后下降趋势,以 T4 和 T8 相对较高,与 T1 相比分别增加了 184.42%、162.64%;单株种子黄酮累积量占单株黄酮累积量的比例亦呈先上升后下降趋势,以 T4 和 T8 相对较高,说明适当提高磷素施用量促进了种子内黄酮的分配与累积。随钾素用量增加,单株种子黄酮累积量呈先上升后下降趋势,以 T4 和 T11 相对较高,与 T1 相比分别增加了

184.42%、171.13%;单株种子黄酮累积量占单株黄酮累积量的比例呈上升趋势,以 T11 和 T4 相对较高,说明提高钾素施用量促进了种子内黄酮的分配与累积。

2.3 氮磷钾与红花产量及羟基红花黄色素 A 和山奈素关系

表 3 表明,磷钾施肥水平相同的条件下,随氮素用量增加,红花花产量呈增加趋势,以 T5 和 T4 相对较高,与 T1 相比分别增加 59.44%、42.87%;花中羟基红花黄色素 A 含量呈先下降后上升趋势,以 T2 最高,与 T1 相比增加了 7.00%,处理之间差异不显著。氮钾施肥水平相同的条件下,随磷素用量增加,红花花产量呈先上升后下降趋势,以 T4 表现最佳;花中羟基红花黄色素 A 含量呈先上升后下降趋势,以 T7 最高,与 T1 相比增加了 12.11%。氮磷施肥水平相同的条件下,随钾素用量增加,红花花产量呈先上升后下降趋势,同样以 T4 最高;花中羟基红花黄色素 A 含量呈先上升后下降再上升趋势,以 T10 最高,与 T1 相比增加 8.02%,与 T4、T11 之间差异均未达显著水平。花中山奈素含量在不同氮、磷、钾用量及配比处理之间均无显著差异,符合 2020 版《中华人民共和国药典》规定^[3]。红花种子产量随氮、磷、钾用量增加均呈现先上升后下降趋势,且均以 T4 最大,与 T1 相比增加 116.52%,当氮、磷、钾用量最大时其种子产量反而下降,其羟基红花黄色素 A 和山奈素含量均在检测限以下。

表2 不同氮磷钾用量及配比下红花单株种子产量及黄酮分配比例

Table 2 The yield and distribution of flavonoids of *C. tinctorius* seed per plant under different amount and proportion of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers

处理 Treatment	单株种子产量/g Seed yield per plant	种子黄酮含量/(mg·g ⁻¹) Seed flavonoid content	种子黄酮累积量/mg Seed flavonoid accumulation	单株黄酮累积量/mg Flavonoid accumulation per plant	所占比例/% Percentage
T1	8.70±0.35f	14.17±2.15b	123.81±23.16c	867.88±18.73ab	14.27
T2	10.91±0.58def	16.48±1.02ab	179.52±1.68bc	851.20±17.37ab	21.09
T3	13.41±1.91cd	14.21±1.72b	192.84±50.16bc	751.71±10.43b	25.65
T4	24.16±1.97a	16.90±1.39ab	352.14±88.41a	1177.65±36.43a	29.90
T5	18.01±1.46b	18.28±1.78a	329.98±48.80a	1094.52±11.40ab	30.15
T6	9.79±0.52ef	18.10±0.87a	177.01±6.16bc	871.03±14.54ab	20.32
T7	12.74±2.05cd	16.45±0.85ab	210.08±39.91b	992.68±8.06ab	21.16
T8	19.23±0.58b	16.92±1.33ab	325.18±22.36a	1203.10±13.02a	27.03
T9	11.25±1.87de	16.00±0.88ab	181.11±39.28bc	1064.35±21.85ab	17.02
T10	14.66±0.85c	16.28±2.64ab	238.38±39.26b	971.79±21.81ab	24.53
T11	18.12±1.36b	18.53±0.36a	335.68±21.08a	977.12±12.20ab	34.35

表3 不同氮磷钾用量及配比下红花产量及羟基红花黄色素A和山奈素含量

Table 3 The yield and contents of HYST and kaempferol of *C. tinctorius* under different amount and proportion of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers

处理 Treatment	花 Flower			种子 Seed		
	产量 Yield	羟基红花黄色素 A HYSA	山奈素 Kaempferol	产量 Yield	羟基红花黄色素 A HYSA	山奈素 Kaempferol
	/(kg·667m ⁻²)	/(mg·g ⁻¹)	/(mg·g ⁻¹)	/(kg·667m ⁻²)	/(mg·g ⁻¹)	/(mg·g ⁻¹)
T1	16.42±1.31cd	13.71±0.90de	0.942±0.003a	96.63±3.92e	-	-
T2	20.00±0.76bc	14.67±0.16abc	0.940±0.005a	121.26±6.48def	-	-
T3	22.00±3.85ab	13.77±0.38cde	0.939±0.002a	148.98±21.19cd	-	-
T4	23.46±3.30ab	13.93±0.88bcde	0.938±0.001a	209.22±16.54a	-	-
T5	26.18±1.25a	14.41±0.63bcde	0.935±0.003a	200.11±16.25b	-	-
T6	12.40±3.57d	14.48±0.14abcd	0.945±0.001a	108.90±5.75ef	-	-
T7	19.29±1.94bc	15.37±0.23a	0.942±0.002a	141.54±22.73cd	-	-
T8	13.32±3.17d	14.08±0.73bcde	0.937±0.002a	207.00±6.45b	-	-
T9	15.83±2.49cd	13.51±0.73e	0.935±0.007a	125.02±20.82de	-	-
T10	19.09±2.11bc	14.81±0.25ab	0.948±0.003a	162.88±9.49c	-	-
T11	12.46±1.26d	14.34±0.35bcde	0.937±0.003a	201.36±15.41b	-	-

注:“-”表示在检测限以下。

Note: “-” shows the content below the lower limit.

3 讨论

3.1 氮磷钾用量及配比与红花产量关系

氮、磷、钾是影响植物生长发育的三大元素,合理施肥是提高中药材产量和品质的关键,高产优质的花和种子是提高红花经济效益的关键目标。前人关于红花产量与施肥量关系研究结论因其试验材料、选择性状或环境因素不同有很大差异。王兆木等^[22]表明新疆塔城地区氮磷配比为1:0.5时红花经济性状与产量最佳;张欣旸^[23]研究表明红花花冠产量与籽粒产量以灌水量3 600 m³·hm⁻²和施氮量180 kg·hm⁻²时表现最佳;李小静^[24]表明红花花蕾期和成熟期对磷的需求量高于氮钾,籽粒代谢库中需求量最大的是磷;贾宏涛等^[25]研究表明施用氮

肥和磷肥对红花的株高和分枝数有增加作用,表现出需氮量最大、磷中等、钾较多的需肥特点,氮、磷、钾的配合施用有利于提高红花的花绒产量和籽粒产量;胡喜巧等^[26]研究表明卫红花花蕾期对磷、钾需求量大,成熟期对磷、氮需求量大;杨晓等^[28]研究表明川红花种子和花丝产量以N 185~196 kg·hm⁻²,P₂O₅ 78~85 kg·hm⁻²,K₂O 160~175 kg·hm⁻²时最佳。本研究表明,不同氮、磷、钾用量及配比对红花花产量和种子产量的影响表现不一,花产量随氮素用量增加而增加,以T5最高,与T1相比增加59.44%,随磷素用量增加,花产量以T4最大,随钾素用量增加,花产量呈先上升后下降趋势;红花种子产量随氮、磷、钾用量增加均呈现先上升后下降趋势,且均以T4表现最佳,当氮、磷、钾用量最大时

种子产量反而下降。由此可见,在本试验条件下,不论是红花花产量还是种子产量均以 N 225 kg · hm⁻², P₂O₅ 150 kg · hm⁻², K₂O 150 kg · hm⁻²时最高。

3.2 氮磷钾用量及配比与红花品质关系

植物体内黄酮类物质的代谢与蛋白质合成关系密切,植物蛋白质合成与氮、磷、钾用量有关,红花有效成分羟基红花黄色素 A、山奈素为黄酮醇类物质^[29],其含量还与研究材料、采收时期^[30]、干燥方式^[31]等有关。学者们关于植物体内黄酮类成分含量与氮、磷、钾用量的关系的研究因植物种类、环境条件不同结论有所不同。鲁泽刚等^[10]表明灯盏花黄酮含量随施氮水平的提高而逐渐下降;臧小云^[32]研究表明荞麦叶片中的黄酮含量随施氮水平上升呈现下降趋势;张硕等^[33]表明朝鲜淫羊藿叶片总黄酮含量随施氮量的增加而下降,随施钾量的增加而升高;而高冬丽^[34]研究表明施肥对荞麦类黄酮含量无影响,王振^[35]研究发现氮、磷、钾配施可提高黄芪总黄酮的含量;宋庆燕^[7]研究表明 N1P2K1 处理下黄芪活性成分总黄酮和总多糖积累较好;郭瑜瑞^[36]表明蒙古黄芪植株干物质的积累与氮磷钾养分的积累呈极显著正相关,说明在一定范围内,氮、磷、钾中任何一种营养元素增加都利于黄芪干物质的积累;刘伟^[37]研究表明全生育期缺氮和缺磷均会增加菊花花与叶片黄酮含量,缺磷首先会引起花中黄酮含量的增加,缺钾明显降低菊花头状花序中黄酮的含量,降幅达 31.4%;曹鲜艳等^[38]研究表明施用磷肥可促进黄芩根中黄酮累积;于曼曼^[39]研究表明施氮能显著提高夏枯草总黄酮含量,且铵硝比 25/75 时为最佳,磷钾则以缺磷缺钾处理总黄酮含量最高;徐松鹤等^[40]研究表明荞麦类植物中黄酮含量与磷肥用量表现为正相关,与氮肥和钾肥用量则表现为先增高后降低的抛物线型关系。

本研究表明,氮、磷、钾配施对红花生育期不同器官中黄酮含量影响有相同规律,同一氮、磷、钾用量下,从苗期到成熟期,叶和茎中黄酮含量均表现为先下降后上升的趋势,根中黄酮含量逐渐增加,红花营养器官中黄酮含量均表现为叶>茎>根。随氮素用量增加,红花花蕾期单株花产量提高,但其黄酮含量却下降,单株黄酮累积量增大,单株花黄酮累积量占单株黄酮累积量比例反而下降,说明氮素促进了红花其他器官中黄酮的累积,不利于黄酮向花中分配与累积;磷素用量的增加促进了红花植株黄酮向花中分配与累积,低钾有利于单株中营养器官黄酮向花中分配与累积,这与前人^[7,32-33,37,40]的研究结论基本一致。本研究还发现,不同氮、磷、

钾用量及配比对花中山奈素含量基本无影响,花中羟基红花黄色素 A 含量随氮素用量增加呈先下降后上升趋势,以 T2(NOP2K2) 最高,随磷素用量增加以 T7(N2P1K2) 最高,随钾素用量增加以 T10(N2P2K1) 最高,说明无氮低磷钾用量有利于花中羟基红花黄色素 A 的合成,但是无论何种氮、磷、钾用量及配比,花中羟基红花黄色素 A 和山奈素含量均符合 2020 版《中华人民共和国药典》规定^[3]。红花种子中黄酮含量随氮、钾用量增加而增加,随磷素用量增加变化不明显;随氮、磷、钾用量增加,单株种子黄酮累积量均呈先上升后下降趋势,单株种子黄酮累积量占单株黄酮累积量的比例基本呈上升趋势;羟基红花黄色素 A 和山奈素含量均在检测限以下,说明增加氮、磷、钾用量促进了种子内黄酮的分配与累积,种子内基本不含羟基红花黄色素 A 和山奈素。另外,在研究中发现幼苗期叶片中与成熟期叶片和苞叶中黄酮含量均高于花和种子,而黄酮类物质具有抗菌、抗病毒、抗炎症、抗过敏、抗氧化等功能,且无毒无害,红花幼苗期茎叶可开发成季节性蔬菜;亦可以红花叶片或红花苞叶为原料,生产加工饲料添加剂,替代抗生素作为养殖业的广普杀菌剂,既保证动物健康,又节约成本,同时延长红花产业链条,提高红花经济效益。本试验测定不同生育时期各器官中的黄酮为红花总黄酮含量,黄酮次生代谢过程复杂,受多种酶的影响,羟基红花黄色素 A 和山奈素含量是否与总黄酮含量存在直接相关性,仍待进一步研究。

4 结 论

1) 不同氮、磷、钾用量及配比对红花花和种子产量影响较为明显,红花花产量随氮素用量增加而增加,以 T5 最高,与 T1 相比增加 59.44%,T4 与 T5 之间差异不显著;随磷素和钾素用量增加花产量呈先上升后下降趋势,均以 T4 最大,与 T1 相比增加 42.87%。红花种子产量随氮、磷、钾用量增加呈先上升后下降趋势,均以 T4 最高,与 T1 相比增加 116.52%。

2) 氮、磷、钾对红花不同生育时期各器官中黄酮含量的影响有相同规律,从苗期到成熟期,叶和茎中黄酮含量均表现为先下降后上升的趋势,根中黄酮含量逐渐增加,红花营养器官中黄酮含量均表现为叶>茎>根;氮和钾抑制了营养器官黄酮向花中分配与累积,磷促进了黄酮向花中分配与累积,单株花黄酮累积量以 T9 最高,其次为 T4,而其占单株黄酮累积量的比例以 T3 最高,其次为 T2 和 T9;花中有效成分羟基红花黄色素 A 以无氮(与高、中、低

量氮差异不显著)、低磷或无磷、低钾(与高、中量磷差异不显著)时含量相对较高,山奈素含量与氮、磷、钾用量及配比无关;单株种子黄酮累积量占单株黄酮累积量比例呈上升趋势,说明提高氮、磷、钾用量均可促进种子内黄酮的累积及植株中黄酮向其分配。

3)本试验条件下,综合考虑红花产量及红花黄酮、羟基红花黄色素A、山奈素等有效成分含量,红花生产过程中氮、磷、钾用量及配比以处理T4(N2P2K2)即N 225 kg·hm⁻², P₂O₅ 150 kg·hm⁻², K₂O 150 kg·hm⁻²为最佳施肥方案,既可提高红花产量又可保障红花品质。

参 考 文 献:

- [1] 王兆木.世界红花种质资源评价与利用[M].北京:中国科学技术出版社,1993: 1-4.
- WANG Z M. Evaluation and utilization of safflower germplasm resources in the world [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1993: 1-4.
- [2] 董顺福,韩丽琴,赵文秀,等.中药红花总黄酮及微量元素含量的分析研究[J].光谱学与光谱分析,2008,28(1): 225-227.
- DONG S F, HAN L Q, ZHAO W X, et al. Analysis and study of total flavone and trace element in *Carthamus tinctorius* L. [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(1): 225-227.
- [3] 国家药典委员会.中华人民共和国药典:一部(2020年版)[M].北京:中国医药科技出版社,2020: 157-158.
- Chinese Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of the People's Republic of China part I: (Version 2020) [M]. Beijing: China Medical Science and Technology Press, 2020: 157-158.
- [4] 李馨蕊,刘娟,彭成,等.红花化学成分及药理活性研究进展[J].成都中医药大学报,2021, 44(1): 102-112.
- LI X R, LIU J, PENG C, et al. Phytochemistry and pharmacology of *Carthamus tinctorius* [J]. Journal of Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, 2021, 44(1): 102-112.
- [5] 杨玉霞,吴卫,郑有良.红花研究进展[J].四川农业大学学报,2004, 22(4): 365-369.
- YANG Y X, WU W, ZHENG Y L. Advances in studies on safflower (*Carthamus tinctorius* L.) [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2004, 22(4): 365-369.
- [6] 何婷,李柯翱,季志红,等.HPLC同时测定红花药材中4种化学成分含量[J].中国中医药信息杂志,2017, 24(4): 79-82.
- HE T, LI K A, JI Z H, et al. Simultaneous determination of four chemical components in *Carthamus tinctorius* L. by HPLC [J]. Chinese Journal of Information on Traditional Chinese Medicine, 2017, 24(4): 79-82.
- [7] 宋庆燕.氮磷钾配施对黄芪产量和质量的影响[D].北京:北京中医药大学,2017.
- SONG Q Y. Effect of the growth and quality of *Astragalus* on nitrogen, phosphorus and potassium [D]. Beijing: Beijing University of Chinese Medicine, 2017.
- [8] 崔晓星,魏英勤,刘鑫欣,等.“3414”设计研究氮磷钾施肥量对半夏产量及品质的影响[J].中国农学通报,2010, 26(15): 257-261.
- CUI X X, WEI Y Q, LIUX X, et al. Influence on yield and quality of *Pinellia ternata* by different NPK fertilizers rate with the method of “3414” fertilizer design [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(15): 257-261.
- [9] 金燕清.氮磷钾配施对甘草产量和质量的影响[D].北京:北京中医药大学,2016.
- JIN Y Q. Effect of the yield and quality of *Glycyrrhiza* on the combined application of nitrogen phosphorus and potassium [D]. Beijing: Beijing University of Chinese Medicine, 2016.
- [10] 鲁泽刚,卢迎春,张广辉,等.氮磷钾配施对灯盏花产量和品质的影响及肥料效应[J].核农学报,2019, 33(3): 616-622.
- LU Z G, LU Y C, ZHANG G H, et al. Effects of combined application of N P K fertilizers on yield and quality of *Erigeron breviscapus* and its fertilizer interaction [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2019, 33(3): 616-622.
- [11] 刘泽斌.山药“3414”肥效试验研究[J].现代农业科技,2013,(1): 77-78, 81.
- LIU Z B. Study on the “3414” fertilization effects of *Dioscorea polystachya* Turcz. [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2013, (1): 77-78, 81.
- [12] 王永慧,陈建平,张萼,等.基于“3414”方案的杭白菊施肥效应研究[J].江西农业学报,2013, 25(4): 88-90.
- WANG Y H, CHEN J P, ZHANG E, et al. Fertilization effect on *Chrysanthemum morifolium* based on “3414” project [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2013, 25(4): 88-90.
- [13] 齐浩.唐古特大黄规范化栽培关键技术研究[D].兰州:甘肃农业大学,2015.
- QI H. Studies on key technology of cultivated standardization for *Rheum Tanguticum* [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2015.
- [14] MORADI L, EHSANZADEH P. Effects of Cd on photosynthesis and growth of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) genotypes [J]. Photosynthetica, 2015, 53(4): 506-518.
- [15] GAUTAM S, ANJANI K, SRIVASTAVA N. In vitro evaluation of excess copper affecting seedlings and their biochemical characteristics in *Carthamus tinctorius* L. (variety PBNS-12) [J]. Physiology and Molecular Biology of Plants, 2016, 22(1): 121-129.
- [16] SUJATHA M, GUPTA S D. Tissue culture and genetic transformation of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) [M]//JAIN S M, GUPTA S D. Biotechnology of Neglected and Underutilized Crops. Dordrecht: Springer, 2013: 297-318.
- [17] PATIAL V, KRISHNA R, ARYA G, et al. Development of an efficient, genotype-independent plant regeneration and transformation protocol using cotyledony nodes in safflower (*Carthamus tinctorius* L.) [J]. Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology, 2016, 25(4): 421-432.
- [18] 郭丽芬,徐宁生,刘旭云,等.云南元谋干热河谷区红花种质资源抗旱性鉴定与评价研究[J].干旱地区农业研究,2011, 29(1): 177-181.
- GUO L F, XU N S, LIU X Y, et al. Evaluation of safflower varieties for drought resistance at dry-hot valley in Yuanmou of Yunnan [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(1): 177-181.
- [19] KHADEMIAN R, GHASSEMI S, ASGHARI B. Bio-fertilizer improves physio-biochemical characteristics and grain yield of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) under drought stress [J]. Russian Agricultural Sciences, 2019, 45(5): 458-463.
- [20] 李宗林,赵文泉,子炳烈,等.秋播红花密度、施肥研究及推广应用[J].云南农业科技,2007,(1): 19-21.
- LI Z L, ZHAO W Q, ZI B L, et al. Experiment and application of planting density and fertilizing for safflower sowed in autumn [J].

- Yunnan Agricultural Science and Technology, 2007, (1) : 19-21.
- [21] 谭勇, 王恒, 高宝博, 等. 不同栽培方式对红花产量和品质的影响[J]. 中国林副特产, 2011, 4(2) : 4-6.
- TAN Y, WANG H, GAO B B, et al. Different cultivation methods on safflower yield and quality of *Carthamus tinctorius* L. [J]. Forest By-Product and Speciality in China, 2011, 4(2) : 4-6.
- [22] 王兆木, 李文生, 吴庆红, 等. 氮磷不同用量及配比对红花产量的研究[J]. 新疆农业科学, 2003, 40(3) : 148-150.
- WANG Z M, LI W S, WU Q H, et al. Amount of nitrogen and phosphorous fertilizer and its mixed ratio[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2003, 40(3) : 148-150.
- [23] 张欣旸. 灌水量与施氮量对红花产量品质的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2012.
- ZHANG X Y. Effect of irrigation volume and nitrogen fertilization on yield and quality of safflower[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2012.
- [24] 李小静. N、P、K 配比及密度对新品系大果红花 BH-1 生长及品质的影响[D]. 新乡: 河南科技学院, 2017.
- LI X J. Effect of *Carthamus tinctorius* L. BH-1 growth for N, P, K ratio and density of fruit varieties[D]. Xinxiang: Henan Institute of Science and Technology, 2017.
- [25] 贾宏涛, 谭勇, 孙霞, 等. 施肥对红花生长和产量的影响[J]. 新疆农业大学学报, 2010, 33(5) : 394-397.
- JIA H T, TAN Y, SUN X, et al. Effect of fertilization on the growth and yield of *Carthamus tinctorius* L. [J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2010, 33(5) : 394-397.
- [26] 胡喜巧, 杨文平, 黄玲, 等. 红花对氮磷钾的吸收与分配规律研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(7) : 32-37, 44.
- HU X Q, YANG W P, HUANG L, et al. Study on absorption and distribution of nitrogen phosphorus and potassium in *Carthamus tinctorius* L. [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2018, 46(7) : 32-37, 44.
- [27] 刘春风. 荞麦中总黄酮的提取及含量测定[J]. 化工技术与开发, 2011, 40(3) : 10-13.
- LIU C F. Extraction and determination of total flavonoid from shepherd's-purse[J]. Technology & Development of Chemical Industry, 2011, 40(3) : 10-13.
- [28] 杨晓, 童文, 黄璐琳, 等. 药用川红花高产优化配方施肥技术研究[J]. 现代农业科学, 2010, (18) : 92, 94.
- YANG X, TONG W, HUANG L L, et al. Research on optimized formula fertilization technology for high yield of medicinal safflower[J]. Modern Agricultural Science, 2010, (18) : 92, 94.
- [29] 李彤彤, 韩红园, 张博, 等. 新疆和河南红花中羟基红花黄色素 A 和山奈素含量分析[J]. 辽宁中医药大学学报, 2017, 19(9) : 67-70.
- LI T T, HAN H Y, ZHANG B, et al. Analysis of hydroxysafflor yellow A and kaempferol in *Carthamus tinctorius* L. by Xinjiang and Henan[J]. Journal of Liaoning University of Traditional Chinese Medicine, 2017, 19(9) : 67-70.
- [30] 丁丽丽, 段陈平, 李芳, 等. 红花不同采收期及不同部位中羟基红花黄色素 A 及山奈素的含量变化[J]. 沈阳药科大学学报, 2015, 32(1) : 65-69.
- DING L L, DUAN C P, LI F, et al. The determination of hydroxysafflor yellow A and kaempferol in *Carthamus tinctorius* L. by different collecting time and parts[J]. Journal of Shenyang Pharmaceutical University, 2015, 32(1) : 65-69.
- [31] 范胜莲, 刘光兴. 不同干燥方法对红花中羟基红花黄色素 A、山奈素及红花黄色素 A 含量的影响[J]. 中国药师, 2020, 23(6) : 1198-1200.
- FAN S L, LIU G X. Effects of different drying methods on the contents of hydroxysafflor yellow A, kaempferol and safflor yellow A in *Carthamus tinctorius* [J]. China Pharmacist, 2020, 23 (6) : 1198-1200.
- [32] 殷小云. 氮素营养对荞麦生长及黄酮代谢的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2006.
- ZANG X Y. Effect of nitrogen nutrition on growth and flavone metabolism in common buckwheat (*F. esculentum* Moench) [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2006.
- [33] 张硕, 张永刚, 杨利民, 等. 氮磷钾配施对朝鲜淫羊藿产量和质量的影响[J/OL]. 吉林农业大学学报: 1-9. (2020-08-05) [2021-07-16]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/22.1100.S.20200804.1656.002.html>. DOI: 10.13327/j.jjlau.2020.5881.
- ZHANG S, ZHANG Y G, YANG L M, et al. Effects of N, P and K fertilizer application on the yield and quality of *Epimedium koreanum* [J/OL]. Journal of Jilin Agricultural University: 1-9. (2020-08-05) [2021-07-16]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/22.1100.S.20200804.1656.002.html>. DOI: 10.13327/j.jjlau.2020.5881.
- [34] 高冬丽. 荞麦类黄酮、蛋白的积累特点及氮磷配比的调控效应研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
- GAO D L. Accumulation of buckwheat flavonoid and protein and regulating effect of nitrogen and phosphorous fertilizer [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2008.
- [35] 王振. 矿质营养对黄芪生长发育和有效成分积累的影响[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2008.
- WANG Z. Effects of mineral nutrition on growth and development and accumulation of active ingredient of *Astragalus membranaceus* [D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2008.
- [36] 郭瑜瑞. 不同矿质元素处理下蒙古黄芪生长和有效成分的差异研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- GUO Y R. Study on differences in growth and active ingredients of *Astragalus membranaceus* Var. mongholicus under different mineral elements processing[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014.
- [37] 刘伟. 不同生育期氮磷钾胁迫对菊花黄酮类化合物的代谢调控研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010.
- LIU W. Effect of nitrogen, phosphorous and potassium deficiency in different growth stages on the second synthesis pathway of flavonoid in *Chrysanthemum morifolium* Ramat[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2010.
- [38] 曹鲜艳, 徐福利, 王渭玲, 等. 氮磷钾对黄芩生长与有效成分累积的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2012, (2) : 56-61.
- CAO X Y, XU F L, WANG W L, et al. Effect of nitrogen, phosphorus and potassium on growth and active principle accumulation of *Scutellaria baicalensis* Georgi[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2012, (2) : 56-61.
- [39] 于曼曼. 氮磷钾对夏枯草生长及其药材品质的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2010.
- YU M M. Effect of nitrogen, phosphorus and potassium on growth and medicinal quality of *Prunella vulgaris* L. [D]. Nanjing: Nanjing Agriculture University, 2010.
- [40] 徐松鹤, 任琴, 曹兴明, 等. 氮磷钾及有机肥不同配施方案对荞麦种子类黄酮含量的影响[J]. 湖北农业科学, 2015, 54 (22) : 5556-5559.
- XU S H, REN Q, CAO X M, et al. The effect of N, P, K and organic fertilizer combined application on buckwheat flavonoids content[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2015, 54(22) : 5556-5559.