白慧媛,张文珍,陈凤,等.不同施肥量和种植密度对紫锥菊质量的影响[J].山西农业大学学报(自然科学版),2024,44(3):24-36.
Bai H Y, Zhang W Z, Chen F, et al.Effects of different fertilizer application rates and planting densities on the quality of *Echinacea purpurea*[J].Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2024,44(3):24-36.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202402024

不同施肥量和种植密度对紫锥菊质量的影响

白慧媛[1],张文珍[1],陈凤[1],杨平林[2],穆素杰[3],徐进[4],张跃进[1],杨建东[5],马亚团[1*]

(1.西北农林科技大学 化学与药学院,陕西 杨凌 712100;2.西安交通大学第二附属医院,陕西 西安 710000;
3.宝鸡市陈仓农业技术推广服务中心,陕西 宝鸡 721000;4.镇巴县科学技术局,陕西 镇巴 723600;
5.杨凌百川禾美农业有限公司,陕西 杨凌 712100)

摘　要:[目的]探究紫锥菊(*Echinacea purpurea* (L.) Moench)在陕西省凤县的应用潜力及栽培技术。[方法]于2022—2023年开展大田试验,采用二裂式裂区试验设计,以施肥量为主区,共设5个处理F_0～F_4(施肥量依次为酵母源烟茎生物有机肥:0、1200、2100、3000、3900 kg·hm^{-2};酵母源有机无机复混肥:0、360、630、900、1170 kg·hm^{-2});移栽密度为裂区,设置2个水平,D1(63 000窝·hm^{-2})和D2(31 500窝·hm^{-2}),平均每窝种植3株,分别在2022年10月、2023年7月和2023年10月采样,测定不同处理紫锥菊株高、茎粗、开花枝条数、叶绿素含量、地上部分干重、根干重等生物学性状,以及地上部分和地下部分菊苣酸、单咖啡酰酒石酸、黄酮、多糖含量和紫锥菊药材产量等指标。[结果]在同一施肥条件下,随着种植密度的增加,紫锥菊的各生物学性状指标降低,除多糖含量以外其它有效成分含量及药材产量随种植密度的增加而增加;在同一栽培密度下,随着施肥量的增加,各生物学性状指标、有效成分含量及药材产量呈现先升高后降低的趋势。施肥量、种植密度以及施肥量和种植密度的互作效应对紫锥菊菊苣酸、单咖啡酰酒石酸、黄酮、多糖含量和紫锥菊药材产量有显著影响($P<0.05$)。紫锥菊地上部分菊苣酸、单咖啡酰酒石酸、黄酮含量高于地下部分,而地下部分多糖含量高于地上部分,并且以2023年7月采收的紫锥菊质量及产量最佳。其中F_1D_1、F_2D_1处理组有较高的产量及有效成分含量。[结论]推荐紫锥菊种植时施1200～2100 kg·hm^{-2}酵母源烟茎生物有机肥和360～630 kg·hm^{-2}酵母源有机无机复混肥,种植密度为每公顷63 000窝(种植株距为30 cm,行距为60 cm),以获得较高品质和产量的紫锥菊药材。

关键词:紫锥菊; 种植密度; 施肥量; 菊苣酸; 单咖啡酰酒石酸; 多糖; 黄酮
中图分类号:R931.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-8151(2024)03-0024-13

紫锥菊(*Echinacea purpurea* (L.) Moench)是一种多年生菊科草本植物,起源于加拿大南部和北美,是西方著名的"免疫刺激剂"[1-2]。其主要活性成分有菊苣酸、绿原酸、咖啡酸、紫锥菊苷等酚类物质,烷基酰胺、多糖、挥发油和黄酮类等化合物[3-5],具有免疫调节、抗炎、抗氧化、抗病毒、抗菌、护肝及抗增殖的药理作用[6-9]。20世纪90年代,我国开始对紫锥菊进行引种研究,在广州、北京、陕西等地引种成功。紫锥菊作为免疫调节剂日益受到国内外研究人员的关注,其种植规模也逐渐扩大。规范化种植是促进紫锥菊等药材优质生产的关键因素,陈斌[10]以乌拉尔甘草和胀果甘草为试验材料,探究不同种植密度和氮磷钾施肥量对2种药用甘草生长及药材产量与品质的影响,结果表明胀果甘草在中密度种植条件下根的总产量最高,且根系药用成分的总量最高;随着氮肥、磷肥施用量的增加,胀果甘草单株地上部分的生长得到显著促进,高钾肥处理下,药用成分含量较高。韩琳娜

收稿日期:2024-02-22　　**修回日期**:2024-04-04
基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD1000203);陕西省农业科技创新计划项目(NYKJ-2022-YL(XN)-13);镇巴县天然药物研究与开发项目(K4050423491);秦创元"科学家+工程师"队伍建设(2024QCY-KXJ-105);重大科技创新专项(L2023-ZDKJ-QCY-SXGG-GY-013)
作者简介:白慧媛(ORCID:0009-0000-0550-090X),硕士,研究方向:中药材质量评价,E-mail:2662457540@qq.com
*通信作者:马亚团(ORCID:0009-0005-3903-2485),副教授,博士生导师,研究方向:中药材质量评价,E-mail:yatuanma@nwsuaf.edu.cn

等[11]研究氮磷钾施肥对紫锥菊有效成分含量的影响,结果表明氮磷钾分别对紫锥菊有效成分含量有不同程度的影响,不施磷肥,450 mg·L^{-1}的氮肥,78 mg·L^{-1}的钾肥最有利于植株中主要有效成分菊苣酸的积累。化肥是种植紫锥菊等药材的常用肥料,由于其速效营养浓度高、肥效好,可保证药材的正常生长发育,但由于长时间大量施用化肥,造成土壤结构变劣、功能衰退、土壤的团粒结构遭到损伤以及天然有机质浓度降低,从而导致土壤板结,进而严重影响药材的产量与品质。而有机肥的施用可改善土壤环境,活化土地养分,使药材种植向更加绿色、健康的生态农业方面推进,是未来紫锥菊等中药材可持续发展的重要途径。目前有关紫锥菊有机肥施肥量和种植密度的研究较少,因此本研究采用二裂式裂区试验设计,探究紫锥菊最佳种植方式,旨在为紫锥菊绿色种植的推广提供理论依据。

1　材料和方法

1.1　试验地概况

试验在陕西省宝鸡市凤县平木镇西山村紫锥菊试验基地(33°59′N,106°59′E)进行,平木镇地处秦岭南麓,为岩溶地貌,自然资源丰富,平均海拔约1250 m,气候属暖温带湿润大陆性季风气候,雨量充沛,阳光充足,十分适宜发展中药材种植业。其特点是夏季多雨温热,冬季干旱稍寒,雨热同季,四季分明。多年平均气温7.9～11.4 ℃,年平均日照时数为1840 h,年平均降水量为613.2 mm,降雨主要集中在每年的5-10月,7月最多[12]。

供试土壤化学性质如表1所示。

表1　供试土壤化学性质

Table 1　Tested soil chemistry

化学性质 Characteristic	含量 Concentration
全磷/(g·kg^{-1})	0.81
全钾/(g·kg^{-1})	22.62
全氮/(g·kg^{-1})	1.49
有效磷/(mg·kg^{-1})	33.46
速效钾/(mg·kg^{-1})	352.00
碱解氮/(mg·kg^{-1})	105.11
有机质/(mg·kg^{-1})	25.71
硝态氮/(mg·kg^{-1})	19.64
pH	7.62

1.2　试验材料

供试肥料为安琪酵母股份有限公司生产的酵母源烟茎生物有机肥(有机质≥60%,有效活菌数≥5×10^8 个·g^{-1})和酵母源有机无机复混肥(硫酸钾型,总养分≥30%,有机质≥15%,N-P_2O_5-K_2O:13-8-9)。

1.3　试验设计

本试验采用二裂式裂区试验设计,将有机肥施肥量设置为主区,移栽密度设置为裂区,有机肥施用量共设5个水平F_0～F_4(施肥量依次为酵母源烟茎生物有机肥:0、1200、2100、3000、3900 kg·hm^{-2};酵母源有机无机复混肥:0、360、630、900、1170 kg·hm^{-2});移栽密度设置2个水平,D_1(63 000 窝·hm^{-2})和D_2(31 500 窝·hm^{-2}),平均每窝种植3株。试验共计10个小区,每小区20窝,每个小区设3次重复。肥料作为底肥一次性施入,第1年施肥于2022年5月初进行,第2年于2023年3月进行,2年施肥量保持一致。紫锥菊生长中期视情况进行田间除草,第1年于2022年10月采收紫锥菊全株,每小区随机选取3株,第2年于2023年7月及10月进行2次采收。采收后带回实验室晒干,粉碎至65目,低温干燥条件下保存。

1.4　试验方法

1.4.1　紫锥菊生物学性状测定

(1)株高:每个小区随机选取3窝,用卷尺量取植株茎基部到最顶端的高度。

(2)茎粗:每个小区随机选取3窝,用游标卡尺量取茎基部的直径。

(3)叶绿素含量:每个小区随机选取3窝,用便捷式叶绿素测定仪测定植株中部叶片的SPAD值。

(4)开花枝条数:每个小区随机选取3窝,对每窝紫锥菊开花枝条数进行计数。

(5)根长:每个小区随机选取3窝,用卷尺量取主根的长度。

(6)根粗:每个小区随机选取3窝,用游标卡尺量取主根的直径。

(7)地上部分干重:每个小区随机选取3窝,将每窝紫锥菊地上部分阴干后,称量其质量。

(8)地下部分干重:每个小区随机选取3窝,将每窝紫锥菊地下部分阴干后,称量其重量。

1.4.2 紫锥菊菊苣酸、单咖啡酰酒石酸含量测定

采用HPLC测定，色谱柱型号为Agilent ZORBAX-C18(4.6×250 mm，5 μL)，柱温35 ℃，检测波长330 nm，进样量5 μL，流速1.0 mL·min^{-1}，流动相A为0.1%磷酸，流动相B为乙腈，进行梯度洗脱，具体洗脱方法见表2。

表2 梯度洗脱方法

Table 2 Gradient elution method

时间/min Time	A(0.1%磷酸)/% A (0.1% Phosphoric acid)	B(乙腈)/% B (Acetonitrile)
0	90	10
13	22	78
16	90	10
20	90	10

称取0.05 g紫锥菊粉末(65目)，放入10 mL容量瓶，加8 mL 70%甲醇(含0.1%磷酸)，超声45 min，取出放冷至室温，定容，离心，过0.22 μm微孔滤膜得待测样品溶液，进行HPLC测定。

1.4.3 紫锥菊多糖含量的测定

称取紫锥菊粉末(65目)0.2 g于锥形瓶中，加入80%乙醇20 mL，在60 ℃下，功率400 W超声30 min，趁热过滤，弃去上清液，滤渣用热乙醇洗涤3次，每次5 mL，滤渣(连同滤饼)放入锥形瓶中，加入20 mL蒸馏水在60 ℃下，功率400 W超声30 min，过滤，滤渣用热的蒸馏水洗涤3次，每次10 mL，合并滤液，定容至100 mL，待测。吸取紫锥菊多糖提取液1 mL于20 mL试管内，加蒸馏水至2 mL，摇匀，置冰水浴中加入新配制的7%苯酚水溶液1.00 mL，混匀，迅速滴加浓硫酸7.00 mL，沸水水浴加热10 min，冰水浴迅速冷却至室温。以2 mL蒸馏水作为空白对照，按上述方法操作，在486 nm处测定吸光度。

1.4.4 紫锥菊黄酮含量测定

称取紫锥菊粉末(65目)0.1 g，放置于10 mL容量瓶中，加入70%乙醇8 mL，在功率400 W条件下超声30 min，冷却到室温后定容，离心，取上清液待测。吸取1 mL紫锥菊黄酮提取液，加入0.1 mol·L^{-1}的$AlCl_3$溶液2 mL，加入pH为5.4的醋酸-醋酸钠缓冲液5 mL，蒸馏水定容到10 mL，静置30 min后，于417 nm处测定吸光度。

1.4.5 紫锥菊产量的测定

紫锥菊地上部分干重产量＝每窝地上部分平均干重×种植密度；紫锥菊根干重产量＝每窝根平均干重×种植密度。

1.5 统计分析

试验数据采用Excel 2019和SPSS 26.0软件进行处理与分析。

2 结果与分析

2.1 施肥量和种植密度对紫锥菊生物学性状的影响

如表3～表6所示，紫锥菊的生物学性状包括株高、茎粗、开花枝条数、地上部分干重、根长、根粗、根干重等指标均表现为二年生7月采样＞二年生10月采样＞一年生10月采样，而叶绿素含量则表现为一年生10月采样＞二年生10月采样＞二年生7月采样。在同一施肥条件下，随着种植密度的增加，紫锥菊的各生物学性状指标都显著降低；在同一栽培密度下，随着施肥量的增加，相比于不施肥的对照组，各生长指标均呈现先升高后降低的趋势。栽培密度为D_1水平时，F_2处理组的各项生长指标达到最大值，一年生10月、二年生7月和二年生10月采样株高最高分别为100.00、158.67、111.67 cm；茎粗最大分别为8.33、10.76、9.05 cm；开花枝条数最多分别为12.67、58.67、35.33条；叶绿素含量SPAD值最高为77.53、27.30、33.50；地上部分干重最高为122.20、253.33、233.33 g。一年生10月和二年生10月采样根长最长分别为22.33、24.00 cm；根粗最粗分别为7.46、10.09 mm；根干重最大为41.23、75.00 g。栽培密度为D_2水平时，一年生10月采样为F_1处理组的各项生长指标达到最大值，二年生7月采样和二年生10月采样均为F_2处理组的各项生长指标达到最大值，一年生10月、二年生7月和二年生10月采样株高最高分别为104.00、161.00、121.00 cm；茎粗最粗分别为9.69、13.40、10.19 cm；开花枝条数最多分别为23.33、80.67、50.00条；叶绿素含量SPAD值最高为87.60、29.67、34.07；地上部分干重最高位为215.8、383.33、336.67 g。一年生10月和二年生10月采样根长最长分别为23.67、27.33 cm；根粗最粗分别为9.40、12.58 mm；根干重最大为52.40、99.10 g。综上所述，种植密度越小越有利于紫锥菊植株生长，其各生长指标均比较大密度种植的紫锥菊更高；适量施酵母源

烟茎生物有机肥和有机无机复混肥有利于紫锥菊植株生长,但施肥量过大会抑制紫锥菊植株的生长,且二年生7月采收的紫锥菊各生物学性状最佳。

表3　不同施肥量和种植密度条件下紫锥菊的株高和茎粗

Table 3　Plant height and stem diameter of *E. purpurea* under different fertilization and planting densities

施肥 Fertilizer	密度 Density	株高/cm Plant height			茎粗/mm Stem diameter		
		2022年10月 October 2022	2023年7月 July 2023	2023年10月 July 2023	2022年10月 October 2022	2023年7月 July 2023	2023年10月 July 2023
F_0	D_1	90.67±3.06cA	156.67±1.53abA	95.67±2.52cB	6.42±0.37cB	10.63±0.71aA	7.63±0.28aA
	D_2	94.33±0.04bcA	159.00±1.00aA	113.33±5.51aA	8.44±0.59bA	11.67±0.46cA	9.14±1.41aA
F_1	D_1	97.33±2.08abB	156.33±2.52abA	101.33±5.86bcA	7.59±0.56bB	10.18±0.17aB	8.05±1.11aA
	D_2	104.00±0.06aA	157.33±3.06aA	114.67±10.12aA	9.69±0.52aA	13.17±0.61abA	9.47±0.42aA
F_2	D_1	100.00±2.65aA	158.67±2.52aA	111.67±3.51aB	8.33±0.43aA	10.76±0.54aB	9.05±0.69aA
	D_2	98.00±0.04bA	161.00±2.65aA	121.00±3.61aA	9.12±0.50abA	13.40±1.24aA	10.19±0.54aA
F_3	D_1	99.33±1.53abA	154.00±2.65bA	108.33±5.03abA	7.89±0.13abB	10.22±0.83aB	8.38±1.11aA
	D_2	95.00±0.02bcB	158.33±1.53aA	114.00±1.00aA	8.92±0.43abA	11.98±0.49cA	9.06±0.59aA
F_4	D_1	95.67±0.58bA	155.33±2.08abA	100.67±4.16bcA	7.52±0.23bB	10.53±0.51aA	8.97±0.60aA
	D_2	92.00±0.10cA	157.67±2.08aA	112.00±6.51aA	8.83±0.25abA	11.16±0.26cA	9.18±0.76aA

注:不同小写字母代表相同D因素(种植密度)下不同F因素(施肥水平)差异显著($P<0.05$);不同大写字母代表相同F因素(施肥水平)下不同D因素(种植密度)差异显著($P<0.05$);下同

Note: Different lowercase letters indicated significant differences at $P<0.05$ level in different F factors (fertilization levels) under the same D factor (planting density), while different capital letters indicated significant differences at $P<0.05$ in different D factors (planting density) under the same F factor (fertilization level); The same below

表4　不同施肥量和种植密度条件下紫锥菊的开花枝条数和叶绿素含量

Table 4　Number of flowering shoots and chlorophyll content of *E. purpurea* under different fertilization and planting densities

施肥 Fertilizer	密度 Density	开花枝条数/条 Number of flowering shoots			叶绿素含量SPAD值 Chlorophyll content SPAD		
		2022年10月 October 2022	2023年7月 July 2023	2023年10月 July 2023	2022年10月 October 2022	2023年7月 July 2023	2023年10月 July 2023
F_0	D_1	10.67±1.15aA	45.67±6.66bA	31.33±2.52abA	66.13±3.56cdB	22.57±1.14cB	24.30±1.78cA
	D_2	12.00±2.00bA	59.00±7.00bA	33.00±2.00cA	83.67±2.72bA	25.67±0.87cA	26.43±2.05cA
F_1	D_1	12.00±2.00aB	50.67±4.51abA	33.33±1.53abB	72.43±1.07bB	25.27±1.59abA	27.57±1.27bB
	D_2	23.33±4.16aA	60.67±7.51bA	43.00±2.65bA	87.60±2.31aA	28.03±1.53abA	31.20±0.96abA
F_2	D_1	12.67±2.31aA	58.67±5.51aB	35.33±5.03aB	77.53±3.06aA	27.30±1.25aA	33.50±1.05aA
	D_2	15.33±2.31bA	80.67±7.51aA	50.00±2.65aA	81.47±1.08bA	29.70±1.61aA	34.07±1.46aA
F_3	D_1	12.00±2.00aA	52.33±6.11abB	28.67±2.08bB	68.00±0.96cB	23.77±1.19bcA	29.37±2.70bA
	D_2	13.33±4.16bA	70.00±4.58abA	45.67±3.51abA	77.63±2.53cA	26.17±0.65bcA	30.20±2.19abcA
F_4	D_1	10.67±1.15aA	46.00±5.57bB	27.33±3.79bB	63.03±2.15dB	23.60±0.61bcA	27.60±0.96bA
	D_2	12.67±1.15bA	65.67±6.11bA	43.33±1.53bA	75.00±0.82cA	24.33±0.80cA	27.93±3.61bcA

2.2　施肥量和种植密度对紫锥菊有效成分含量的影响

2.2.1　施肥量和种植密度对紫锥菊菊苣酸含量的影响

由表7可知,施肥量、种植密度和施肥量与种植密度的交互效应均对紫锥菊菊苣酸含量有显著影响($P<0.05$)。紫锥菊地上部分菊苣酸含量随着种植密度的增加而上升,且随着施肥量的增加紫锥菊地上部分菊苣酸含量呈先升高后降低的趋势。一年生紫锥菊地上部分菊苣酸含量最高为F_3D_1组2.64%,最低为F_4D_2组1.82%;二年生7月采样含量最高为F_2D_1组4.63%,最低为F_4D_2组3.01%;二年生10月采样含量最高为F_2D_1组3.01%,最低为F_4D_2组2.10%。紫锥菊地下部分

表5 不同施肥量和种植密度条件下紫锥菊的地上部分干重和根干重

Table 5 Dry weight of above-ground parts and root dry weight of *E. purpurea* under different fertilization and planting densities

单位:g

施肥 Fertilizer	密度 Density	地上部分干重 Dry weight of above-ground parts			根干重 Root dry weight		
		2022年10月 October 2022	2023年7月 July 2023	2023年10月 July 2023	2022年10月 October 2022	2023年7月 July 2023	2023年10月 July 2023
F_0	D_1	90.83±6.10cB	213.33±11.55bA	206.67±20.21bA	31.37±2.27bB	—	46.50±13.29bA
	D_2	139.77±4.60cA	326.67±61.10aA	238.33±50.08bA	48.50±1.25aA	—	65.43±2.05bA
F_1	D_1	112.50±7.41 abB	233.33±68.07abA	220.00±18.03bB	38.03±1.77aB	—	45.97±1.87bA
	D_2	215.80±27.47aA	310.00±36.06aA	326.67±23.09aA	52.40±1.82aA	—	67.70±22.15bA
F_2	D_1	122.20±12.99aB	283.33±5.77aB	226.67±16.07aB	41.23±2.29aB	—	75.00±19.74aA
	D_2	176.03±18.86bA	383.33±25.17aA	336.67±12.58aA	47.67±2.81bA	—	99.10±6.80aA
F_3	D_1	111.83±6.95abB	210.00±10.00bB	211.67±10.41bB	31.57±2.40 bB	—	60.16±2.71abA
	D_2	150.57±5.84bcA	313.33±36.86aA	311.67±15.28aA	45.20±2.57bA	—	76.03±13.05bA
F_4	D_1	98.73±5.59cB	206.67±15.28bA	201.67±50.58bA	30.47±2.12bB	—	47.61±6.71bB
	D_2	136.57±4.88cA	303.33±66.58aA	308.33±16.07aA	44.43±3.37bA	—	74.10±7.23bA

表6 不同施肥量和种植密度条件下紫锥菊的根长和根粗

Table 6 Root length and root diameter weight of *E. purpurea* under different fertilization and planting densities

施肥 Fertilizer	密度 Density	根长/cm Root length			根粗/mm Root diameter		
		2022年10月 October 2022	2023年7月 July 2023	2023年10月 July 2023	2022年10月 October 2022	2023年7月 July 2023	2023年10月 July 2023
F_0	D_1	19.17±2.25aA	—	23.67±1.53aA	6.65±0.76abB	—	8.72±0.59aA
	D_2	20.67±1.15abA	—	25.33±1.53aA	9.17±0.06abA	—	9.68±0.80bA
F_1	D_1	20.33±1.15aA	—	24.00±1.00 aA	7.05±0.26abB	—	9.60±1.09aA
	D_2	23.67±2.08aA	—	27.00±2.65aA	9.40±0.55aA	—	9.92±1.00bA
F_2	D_1	22.33±2.52aA	—	24.00±1.00aB	7.46±0.95aA	—	10.09±0.73aA
	D_2	22.83±1.53aA	—	27.33±1.53aA	8.41±0.39bcA	—	12.58±1.80aA
F_3	D_1	15.67±1.15bA	—	23.33±1.53aA	6.11±0.21bB	—	8.56±1.48aA
	D_2	20.33±2.89abA	—	26.67±2.08aA	8.13±0.62cA	—	10.31±2.47bA
F_4	D_1	14.67±1.53bB	—	22.67±1.15aA	5.94±0.33bB	—	9.60±1.09aA
	D_2	18.67±1.53bA	—	24.33±1.53aA	8.05±0.60cA	—	9.92±1.00bA

菊苣酸含量低于地上部分,一年生紫锥菊地下部分菊苣酸含量随种植密度的增加而降低,二年生紫锥菊地下部分菊苣酸含量随种植密度的增加而增加,一年生含量最高为F_3D_2组1.70%,最低为F_4D_1组1.09%;二年生含量最高为F_2D_1组1.91%,最低为F_4D_2组1.36%。

结果表明,适量施酵母源烟茎生物有机肥和有机无机复混肥有利于紫锥菊菊苣酸含量积累,施肥过多不利于菊苣酸积累;适量增加种植密度有利于紫锥菊地上部分菊苣酸积累。紫锥菊地上部分菊苣酸含量二年生7月采样最高,一年生和二年生10月采样含量相差不大;二年生紫锥菊地下部分菊苣酸含量高于一年生紫锥菊。

2.2.2 施肥量和种植密度对紫锥菊单咖啡酰酒石酸含量的影响

由表8可知,施肥量、种植密度和施肥量与种植密度的交互效应均对紫锥菊单咖啡酰酒石酸含量有显著影响($P<0.05$)。紫锥菊地上部分单咖啡酰酒石酸含量随着种植密度的增加而上升,且随着施肥量的增加,紫锥菊地上部分单咖啡酰酒石酸含量呈先升高后降低的趋势。一年生紫锥菊地上部分单咖啡酰酒石酸含量最高为F_2D_1组1.24%,最低为F_4D_2组0.89%;二年生7月采样含量最高为F_3D_2组1.91%,最低为F_2D_1组1.00%;

表7　不同施肥量和种植密度下紫锥菊菊苣酸的含量

Table 7　Chicoic acid content of *E. purpurea* at different fertilization and planting densities

施肥 Fertilizer	密度 Density	地上部分菊苣酸含量/% The content of chicory acid in the aerial parts			地下部分菊苣酸含量/% The content of chicory acid in roots	
		2022年10月 October 2022	2023年7月 July 2023	2023年10月 July 2023	2022年10月 October 2022	2023年10月 July 2023
F_0	D_1	2.34±0.03 dA	3.22±0.03bA	2.33±0.04dA	1.34±0.07bA	1.91±0.02aA
	D_2	2.26±0.04dB	3.11±0.09dA	2.33±0.04cA	1.46±0.04bA	1.65±0.02aB
F_1	D_1	2.51±0.02bA	4.04±0.02aA	2.86±0.02bA	1.25±0.03bA	1.85±0.08aA
	D_2	2.43±0.06bA	3.99±0.06bA	2.55±0.03aB	1.67±0.02aB	1.37±0.05cB
F_2	D_1	2.41±0.02 cA	4.63±0.01aA	3.01±0.06aA	1.33±0.01aA	1.91±0.03aA
	D_2	2.26±0.04 cB	4.07±0.04aB	2.41±0.05bB	1.64±0.02aB	1.51±0.02bB
F_3	D_1	2.64±0.04 aA	3.02±0.01cA	2.48±0.01cA	1.52±0.06aA	1.53±0.07bA
	D_2	2.47±0.02 aB	3.22±0.01cB	2.41±0.01cB	1.70±0.08aB	1.51±0.02bA
F_4	D_1	2.21±0.01 eA	3.53±0.05bA	2.54±0.02cA	1.09±0.01cA	1.42±0.01bA
	D_2	1.82±0.10 eB	3.01±0.02eB	2.10±0.04dB	1.29±0.02cB	1.36±0.02cB
方差分析	F	0.095	0.000	0.000	0.000	0.000
	D	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
	F×D	0.978	0.000	0.000	0.000	0.000

二年生11月采样含量最高为F_2D_1组1.27%,最低为F_4D_2组0.89%。紫锥菊地下部分单咖啡酰酒石酸含量低于地上部分,一年生紫锥菊地下部分单咖啡酰酒石酸含量随种植密度的增加而降低,二年生紫锥菊地下部分单咖啡酰酒石酸含量随种植密度的增加而增加,一年生含量最高为F_3D_2组0.78%,最低为F_0D_1组0.57%;二年生含量最高为F_1D_1组0.54%,最低为F_4D_2组0.31%。

结果表明,适量施酵母源烟茎生物有机肥和有机无机复混肥有利于紫锥菊单咖啡酰酒石酸含量积累,施肥过多不利于单咖啡酰酒石酸积累;适量增加种植密度有利于紫锥菊地上部分单咖啡酰酒石酸积累。紫锥菊地上部分单咖啡酰酒石酸含量二年生7月采样最高,一年生和二年生10月采样含量相差不大;二年生紫锥菊地下部分单咖啡酰酒石酸含量低于一年生紫锥菊。

表8　不同施肥量和种植密度下紫锥菊单咖啡酰酒石酸的含量

Table 8　Caftaric acid content of *E. purpurea* at different fertilization and planting densities

施肥 Fertilizer	密度 Density	地上部分单咖啡酰酒石酸含量/% The content of caftaric acid in the aerial parts			地下部分单咖啡酰酒石酸含量/% The content of caftaric acid in roots	
		2022年10月 October 2022	2023年7月 July 2023	2023年10月 July 2023	2022年10月 October 2022	2023年10月 July 2023
F_0	D_1	1.08±0.01bA	1.35±0.01dA	1.10±0.01cA	0.57±0.02dA	0.54±0.01aA
	D_2	0.96±0.01cB	1.19±0.03eB	1.08±0.01abB	0.59±0.01dA	0.49±0.01aB
F_1	D_1	1.21±0.01aA	1.39±0.02aA	1.17±0.01bA	0.67±0.02bA	0.54±0.01bA
	D_2	1.09±0.03bB	1.34±0.01cB	1.05±0.01bB	0.70±0.02bA	0.44±0.02bB
F_2	D_1	1.24±0.06aA	1.00±0.01bA	1.27±0.01aB	0.63±0.01cA	0.52±0.01cA
	D_2	1.15±0.02aB	1.81±0.02aB	1.08±0.02abB	0.65±0.02cA	0.32±0.03dB
F_3	D_1	1.11±0.02bA	1.57±0.01eA	1.26±0.01aA	0.75±0.03aA	0.40±0.01eA
	D_2	1.06±0.01bB	1.91±0.02bB	1.10±0.01aB	0.78±0.03aA	0.44±0.05bB
F_4	D_1	1.02±0.01cA	1.78±0.01cA	1.03±0.02dA	0.63±0.01cA	0.43±0.06dA
	D_2	0.89±0.06dA	1.50±0.02dB	0.89±0.02cB	0.69±0.04bcA	0.31±0.04cB
方差分析	F	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	D	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	F×D	0.227	0.000	0.000	0.000	0.000

2.2.3 施肥量和种植密度对紫锥菊黄酮含量的影响

由表9可知,施肥量、种植密度和施肥量与种植密度的交互效应均对紫锥菊黄酮含量有显著影响($P<0.05$)。紫锥菊地上部分黄酮含量随着种植密度的增加而上升,且随着施肥量的增加,紫锥菊地上部分黄酮含量呈先升高后降低的趋势。一年生紫锥菊地上部分黄酮含量最高为F_3D_1组2.46%,最低为F_4D_2组1.33%;二年生7月采样含量最高为F_2D_2组2.37%,最低为F_3D_1组1.56%;二年生11月采样含量最高为F_2D_1组3.02%,最低为F_4D_2组2.50%。紫锥菊地下部分黄酮含量低于地上部分,一年生紫锥菊地下部分黄酮含量随种植密度的增加而降低,二年生紫锥菊地下部分黄酮含量随种植密度的增加而增加,一年生含量最高为F_3D_2组0.88%,最低为F_0D_1组0.61%;二年生含量最高为F_0D_1组1.09%,最低为F_3D_1组0.70%。

结果表明,适量施酵母源烟茎生物有机肥和有机无机复混肥有利于紫锥菊黄酮含量积累,施肥过多不利于黄酮积累;适量增加种植密度有利于紫锥菊地上部分黄酮积累。紫锥菊地上部分黄酮含量二年生10月采样最高,一年生和二年生7月采样含量相差不大。

表9 不同施肥量和种植密度下紫锥菊黄酮的含量

Table 9 Flavone content of *E. purpurea* at different fertilization and planting densities

施肥 Fertilizer	密度 Density	地上部分黄酮含量/% The content of flavone in the aerial parts			地下部分黄酮含量/% The content of flavone in roots	
		2022年10月 October 2022	2023年7月 July 2023	2023年10月 July 2023	2022年10月 October 2022	2023年10月 July 2023
F_0	D_1	1.98±0.02cA	2.10±0.10aA	2.75±0.07bA	0.61±0.02bA	1.09±0.27aA
	D_2	1.88±0.04bB	1.79±0.10bB	2.88±0.08aA	0.77±0.07bcA	0.90±0.02aA
F_1	D_1	2.27±0.15bA	1.84±0.04bA	2.80±0.07bA	0.69±0.11bA	0.87±0.02abA
	D_2	2.10±0.08aA	2.00±0.04bB	2.77±0.14abA	0.85±0.01abA	0.73±0.02bB
F_2	D_1	2.39±0.03abA	2.07±0.06aA	3.02±0.11aA	0.68±0.01bA	0.91±0.02abA
	D_2	2.10±0.06aB	2.37±0.02aB	2.72±0.11abcB	0.81±0.02abB	0.73±0.03bB
F_3	D_1	2.46±0.11aA	1.56±0.05cA	2.70±0.14bA	0.83±0.02aA	0.70±0.01bA
	D_2	2.19±0.04aB	1.82±0.26bA	2.59±0.13bcA	0.88±0.07aA	0.71±0.02bA
F_4	D_1	1.94±0.06cA	2.15±0.08aA	2.83±0.14abA	0.63±0.01bA	0.77±0.02bA
	D_2	1.33±0.06cB	1.82±0.07bB	2.50±0.16cA	0.70±0.01cB	0.73±0.01bB
方差分析	F	0.000	0.000	0.015	0.000	0.000
	D	0.000	0.717	0.009	0.000	0.004
	F×D	0.000	0.000	0.015	0.000	0.222

2.2.4 施肥量和种植密度对紫锥菊多糖含量的影响

由表10可知,施肥量、种植密度和施肥量与种植密度的交互效应均对紫锥菊多糖含量有显著影响($P<0.05$)。紫锥菊地上部分多糖含量随着种植密度的增加而下降,且随着施肥量的增加,紫锥菊地上部分多糖含量呈先升高后降低的趋势。一年生紫锥菊地上部分多糖含量最高为F_2D_2组3.58%,最低为F_4D_1组0.74%;二年生7月采样含量最高为F_0D_2组2.23%,最低为F_1D_2组1.39%;二年生11月采样含量最高为F_2D_2组3.03%,最低为F_4D_1组2.01%。紫锥菊地下部分多糖含量高于地上部分,地下部分多糖含量随种植密度的增加而降低,一年生含量最高为F_2D_2组27.51%,最低为F_0D_1组20.31%;二年生含量最高为F_1D_2组20.56%,最低为F_4D_1组12.18%。

结果表明,适量施酵母源烟茎生物有机肥和有机无机复混肥有利于紫锥菊多糖含量积累,施肥过多不利于多糖积累;适量减小种植密度有利于紫锥菊地上部分多糖积累。紫锥菊地下部分多糖含量高于地上部分。

2.3 施肥量和种植密度对紫锥菊产量的影响

如表11所示,紫锥菊地上部分产量表现为二年生7月采样>二年生10月采样>一年生10月采样,且产量随种植密度的增加而增加,随施肥量的增加呈现先升高后降低的趋势,一年生紫锥菊地上部分

表10　不同施肥量和种植密度下紫锥菊多糖的含量

Table 10　Polysaccharide content of *E. purpurea* at different fertilization and planting densities

施肥 Fertilizer	密度 Density	地上部分多糖含量/% The content of polysaccharide in the aerial parts			地下部分多糖含量/% The content of polysaccharide in roots	
		2022年10月 October 2022	2023年7月 July 2023	2023年10月 July 2023	2022年10月 October 2022	2023年10月 July 2023
F_0	D_1	2.07±0.27bA	2.12±0.04aA	2.75±0.17bA	20.31±0.87dA	14.35±0.75bA
	D_2	2.36±0.15bB	2.23±0.16aA	2.57±0.24abA	22.43±0.55bB	12.73±0.53cB
F_1	D_1	2.45±0.07aA	1.74±0.09bcA	2.92±0.47aA	25.07±0.33abA	19.80±0.17aA
	D_2	3.56±0.14aB	1.39±0.08cB	2.93±0.32aB	24.39±1.68bA	20.56±0.14aB
F_2	D_1	2.52±0.14aA	1.67±0.08bcA	2.73±0.10bA	25.97±0.36aA	19.17±0.11aA
	D_2	3.58±0.24aB	1.83±0.18bA	3.03±0.37aA	27.51±1.16aA	16.64±1.06bA
F_3	D_1	1.20±0.17cA	1.54±0.07cA	2.71±0.24bA	22.42±0.29cA	20.13±0.25aA
	D_2	2.68±0.15aB	1.98±0.06bB	2.74±0.11aA	24.68±1.64bA	20.32±0.28aA
F_4	D_1	0.75±0.20dA	1.84±0.30bA	2.01±0.05cA	24.83±0.69bA	12.18±1.77cA
	D_2	3.50±0.32aB	1.74±0.15bA	2.16±0.17bA	22.40±0.89bB	15.94±4.24bcA
方差分析	F	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	D	0.000	0.337	0.001	0.130	0.842
	F×D	0.000	0.001	0.000	0.000	0.018

产量最大的处理组为F_2D_1,7699 kg·hm^{-2},最低为F_4D_2处理组4302 kg·hm^{-2};二年生7月采收紫锥菊地上部分产量最大为F_2D_1处理组17 850 kg·hm^{-2},最低为F_4D_2处理组9555 kg·hm^{-2}二年生10月采收紫锥菊地上部分产量最大为F_2D_1处理组14 280 kg·hm^{-2},最低为F_0D_2处理组7580 kg·hm^{-2}。结果表明,适量增加种植密度、适量施用酵母源烟茎生物有机肥和有机无机复混肥有利于紫锥菊地上部分产量的提升,施肥量过大会降低紫锥菊的产量。

紫锥菊地下部分产量表现为二年生>一年生,且产量随种植密度的增加而增加,随施肥量的增加呈现先升高后降低的趋势,一年生紫锥菊地下部分产量最大的处理组为F_2D_1,2598 kg·hm^{-2},最低为F_4D_2处理组1400 kg·hm^{-2};二年生紫锥菊地下部分产量最大为F_2D_1处理组4725 kg·hm^{-2},最低为F_0D_2处理组2061 kg·hm^{-2}。结果表明,适量增加种植密度、适量施用酵母源烟茎生物有机肥和有机无机复混肥有利于紫锥菊根产量的提升,施肥量过大会降低紫锥菊根的产量。

2.4　不同施肥量和种植密度条件下紫锥菊主要指标间的相关性分析

由表12所示,紫锥菊产量与株高(X_1)、开花枝条数(X_3)、单株地上部分干重(X_5)、菊苣酸含量(X_6)、单咖啡酰酒石酸含量(X_7)呈显著性正相关关系,单株地上部分干重(X_5)与株高(X_1)、茎粗(X_2)、开花枝条数(X_3)、叶绿素含量(X_4)、菊苣酸含量(X_6)、单咖啡酰酒石酸含量(X_7)呈显著性正相关关系,说明适宜的肥密条件通过促进紫锥菊生长及有效成分的积累,进而增加紫锥菊药材的质量和产量。

综上所述,当行距为60 cm时,株距30 cm比株距60 cm条件下的紫锥菊有效成分含量更高,产量更大;施肥量在F_1、F_2水平(酵母源烟茎生物有机肥1200~2100 kg·hm^{-2}、酵母源有机无机复混肥360~630 kg·hm^{-2})时较合适。

3　讨论

3.1　施肥量对药材生长和产量的影响

合理的施肥有利于植物的生长发育。哏玉响宝等[13]研究结果表明施肥对云南红豆杉生长有积极的影响,总体上,随着施肥总量的增加,云南红豆杉地径、树高、冠幅及产量均呈现显著增加趋势。刘耀玺等[14]研究结果显示配方施肥可以显著提高肥效并且促进牡丹的产量,但过量施用某种肥料便会影响产量。贾袭伟等[15]研究发现磷酸二氢钾的的合理使用有利于款冬植株生长,促进药材产量及品质的提升。

本研究结果表明,紫锥菊的株高、茎粗、开花枝条数、叶绿素含量、单株生物量均随施肥量的增加呈现先增加后降低的趋势,说明适量施用酵母

表11 不同施肥量和种植密度下紫锥菊的产量

Table 11 Yield of *E. purpurea* at different fertilization and planting densities 单位:kg·hm^{-2}

施肥 Fertilizer	密度 Density	地上部分产量 Aboveground yield			地下部分产量 Root yield	
		2022年10月 October 2022	2023年7月 July 2023	2023年10月 July 2023	2022年10月 October 2022	2023年10月 July 2023
F_0	D_1	5723±182cA	13440±727bA	13020±1273aA	1976±143bA	2930±837bA
	D_2	4403±128cB	10290±1925aA	7580±1578bB	1528±39aB	2061±65bA
F_1	D_1	7088±467abA	14700±4288aA	13860±1136aA	2396±111aA	2896±118bA
	D_2	6798±865aA	9765±1136aA	10290±727aB	1651±57aB	2133±698bA
F_2	D_1	7699±819aA	17850±364aA	14280±1013aA	2598±144aA	4725±1243aA
	D_2	5545±594bB	12075±793aB	10605±396aB	1502±89bB	3122±214aA
F_3	D_1	7046±438abA	13230±630bA	13335±656aA	1989±15bA	3790±171aA
	D_2	4743±184bcB	9870±1161aA	9818±481aB	1424±81bB	2395±411bB
F_4	D_1	6220±352bcA	13020±962bA	12705±3187aA	1919±134bA	2999±423bA
	D_2	4302±154cB	9555±2097aA	9713±506aA	1400±106bB	2334±228bA
方差分析	F	0.000	0.013	0.090	0.000	0.001
	D	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	F×D	0.013	0.645	0.559	0.000	0.540

表12 不同肥密条件下紫锥菊主要指标间的相关性分析

Table 12 Correlation analysis of the main indexes of *E. purpurea* under different fertilization and planting densities

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}
X_1	1	0.865**	0.890**	−0.666**	0.652**	0.802**	0.711**	−0.312	−0.458*	0.587*
X_2		1	0.870**	−0.490**	0.772**	0.766**	0.667**	−0.244	−0.275	0.354
X_3			1	−0.784**	0.894**	0.755**	0.666**	−0.038	−0.286	0.618**
X_4				1	−0.696**	−0.487**	−0.392*	−0.284	0.245	−0.804**
X_5					1	0.537**	0.440*	0.200	−0.033	0.486**
X_6						1	0.936**	−0.109	−0.363**	0.572**
X_7							1	−0.090	−0.312	0.484**
X_8								1	0.296	0.295
X_9									1	−0.144
X_{10}										1

注:X_1:株高;X_2:茎粗;X_3:开花枝条数;X_4:叶绿素含量;X_5:地上部分干重;X_6:菊苣酸含量;X_7:单咖啡酰酒石酸含量;X_8:黄酮含量;X_9:多糖含量;X_{10}:产量。*和**分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平上显著相关

Note:X_1:Plant height,X_2:Stem diameter,X_3:Number of flowering branches,X_4:Chlorophyll content,X_5:Dry weight of aboveground parts,X_6:Chicory acid content,X_7:Caftaric acid content,X_8:Flavonoid content,X_9:Polysaccharide content,X_{10}:Yield. * and ** mean significant differences at $P<0.05$ and 0.01

源生物有机肥和有机无机复混肥能够促进紫锥菊的生长,这与前人[16-18]研究结果类似。

合理的施肥是提高中药材有效成分含量的关键因素。秦梦等[19]研究表明适量施肥可以显著提高板蓝根中表告依春的含量。魏廷邦等[20]研究表明适量施用氮肥可以显著提高绿洲区蒙古黄芪的黄芪甲苷含量及药材产量。唐建楷等[21]研究发现适量施肥可以促进三七叶片生长,且三七根中有效成分积累多,发病率低。陈荣等[22]探讨紫锥菊生物产量和菊苣酸含量受氮磷钾不同配比施肥的影响。研究表明不同施肥配比对紫锥菊主要有效成分菊苣酸含量影响较小;氮肥显著影响其产量,磷肥的影响不显著,而氯化钾的使用却不利于产量的提高。Ahmadi等[23]探究了不同剂量的新型缓释氮肥与尿素2种肥料对紫锥菊的生长和植物化学性质的影响,结果表明紫锥菊中咖啡酸衍生物含量随着氮肥施用量的增加而增加,且呈剂量依赖性,并且施用缓释氮肥的紫锥菊咖啡酸衍生

物含量高于施用尿素的紫锥菊。这可能是由于缓释氮肥释放缓慢,紫锥菊对肥料利用度增加造成的。Attarzadeh等[24]研究结果表明AMF(菌根丛枝真菌)和PFB(荧光假单胞菌细菌)可促进紫锥菊根部咖啡酸衍生物含量的增加,且生物肥料的使用对紫锥菊改善光合指数、生物产量和水分利用率方面有重要作用。Ghasemi等[25]考察叶面喷施氮有机物对紫锥菊数量和品质的影响。研究表明含氮有机化合物(Humiforte和Fosnutren)可以改善紫锥菊的产量和品质,为植物提供更好营养条件,同时减少化学肥料的过量使用,从而最大限度地减少环境问题。

本研究表明,紫锥菊地上部分菊苣酸、单咖啡酰酒石酸、黄酮、多糖含量均随施肥量的增加呈现先增加后降低的趋势,说明适量施用酵母源烟茎生物有机肥和有机无机复混肥有利于提高紫锥菊有效成分含量。

3.2　种植密度对药材生长和产量的影响

种植密度本质上是植物间距决定的,会影响植物生长过程中必需的水分、肥料、光照、温度等环境因子的利用率,从而影响作物的产量和品质。合理的种植密度也是实现中药材优质高产的主要途径之一[26]。研究表明,适度增加种植密度有助于提高作物的品质,合理密植可以提高单位面积的产量,有效控制杂草生长,增加作物的种间竞争和对养分的利用,并依靠作物充分发挥自身的生长潜力实现增产的目的[27],但栽培密度过高时作物冠层内的透光性差,作物之间对光照、水分和土壤营养物质等的争夺激烈,会造成其营养物质或有效成分含量降低[28]。

目前有关紫锥菊种植密度的研究较少,因此探究适宜的种植密度可以促进紫锥菊药材优质高产。本研究结果表明,高密度种植的紫锥菊株高、茎粗、开花枝条数、叶绿素含量、地上部分干重、根干重等生物学性状指标都低于低密度种植的紫锥菊,原因可能是较低密度下植株能获得更多的营养及光照,生长较快;随着密度的增加,个体可利用的环境资源变少,植株生长也会受到一定的影响影响。众多研究表明[29-30],合理控制种植密度能使作物达到高产的目的。徐扬等[31]研究结果表明,合理密植可以通过减少菊花二级分枝数,降低单株产量,从而提高菊花群体产量,当菊花种植密度为12万株·ha^{-1}时产量最高,但随着种植密度继续增加产量会下降。徐博琼等[32]探究了不同栽培密度对蒙古黄芪质量的影响,结果表明,蒙古黄芪的生长发育受种植密度影响显著;蒙古黄芪地上部分生物量随着株距的增加而减小,根冠比增大,但单位面积药材产量下降。王丰青等[33]探究种植密度对地黄发育和质量的影响,结果表明,在低密度条件下地黄的叶片大小、单株叶生物量、块根直径、单株块根数、单株块根生物量更大。在高密度条件下叶中的梓醇和毛蕊花糖苷含量均较高。本试验结果表明,较高密度种植可以显著提高紫锥菊产量,这与前人研究结果[34]相似。

绿色植物光合作用的基础物质是叶绿素,其含量的多少直接影响作物的光合性能。光合作用是植物营养物质积累的重要途径,所以提高光合作用即可增加有机物的积累,从而提高植株生物量。曾新宇等[35]研究结果表明,叶菜行甘薯的光合参数各项指标随种植密度的升高而降低。本研究结果表明,紫锥菊叶绿素含量随种植密度的增加而降低,这可能与单位面积的光照分布及光能利用有关。紫锥菊根长、根粗和根直径都随种植密度的增加而降低,其原因可能是种植密度的增加,降低了植株个体地下部的根系生长空间和地上部的叶片的生长空间及光照条件,个体间竞争营养成分的压力增加,且土壤中营养物质含量是有限的,当种植密度过大时,单株植物均分到的营养元素含量就会降低,植物生长情况也会变差,可能表现为根长缩短、根系干物质量减少等[36]。所以,当密度增加时,根系生长受限,水肥吸收量减少,地上植株营养获取量也相应减少,叶片光合作用减弱,物质积累量减少,由此使根冠发育不协调,影响单株物质积累,这与前人的研究结果[37-38]一致。紫锥菊有效成分包括菊苣酸、单咖啡酰酒石酸、多酚和黄酮含量随种植密度的增加而增加,这与王浩[39]的研究结果类似,较高密度种植条件下有利于何首乌二苯乙烯苷与结合蒽醌含量的增加。

4　结论

有机肥施用量和种植密度以及二者的互作效应对紫锥菊生物学性状及各有效成分含量具有不同程度的影响。总而言之适量施用有机肥和增加种植密度有利于紫锥菊产量的提高。研究结果表

明紫锥菊种植时施1200～2100 kg·ha^{-1}酵母源烟茎生物有机肥和360～630 kg·ha^{-1}有机无机复混肥，种植密度为63 000窝·ha^{-1}(种植株距为30 cm，行距为60 cm)可以获得高品质的紫锥菊药材。

参 考 文 献

[1]Xu W Q, Cheng Y L, Guo Y H, et al. Effects of geographical location and environmental factors on metabolite content and immune activity of *Echinacea purpurea* in China based on metabolomics analysis[J]. Industrial Crops and Products, 2022, 189:115782.

[2]Temerdashev Z, Vinitskaya E, Meshcheryakova E, et al. Chromatographic analysis of water and water-alcohol extracts of *Echinacea purpurea* L. obtained by various methods [J]. Microchemical Journal, 2022, 179:107507.

[3]田新，冯帅，史磊，等.紫锥菊化学成分、药理作用及质量控制研究进展[J].山东中医杂志，2021，40(12)：1384-1391.
Tian X, Feng S, Shi L, et al. Research progress on chemical constituents, pharmacological effects and quality control of zizhuiju (*Echinacea purpurea*) [J]. Shandong Journal of Traditional Chinese Medicine, 2021, 40(12):1384-1391.

[4]Fu R, Zhang P Y, Deng Z B, et al. Diversity of antioxidant ingredients among *Echinacea* species[J]. Industrial Crops and Products, 2021, 170:113699.

[5]Hou R R, Xu T L, Li Q, et al. Polysaccharide from *Echinacea purpurea* reduce the oxidant stress in vitro and in vivo [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 149: 41-50.

[6]Jiang W H, Zhu H K, Liu C, et al. In-depth investigation of the mechanisms of *Echinacea purpurea* polysaccharide mitigating alcoholic liver injury in mice via gut microbiota informatics and liver metabolomics [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 209(Pt A):1327-1338.

[7]Aarland R C, Bañuelos-Hernández A E, Fragoso-Serrano M, et al. Studies on phytochemical, antioxidant, anti-inflammatory, hypoglycaemic and antiproliferative activities of *Echinacea purpurea* and *Echinacea* angustifolia extracts [J]. Pharmaceutical Biology, 2017, 55(1):649-656.

[8]Nagoor Meeran M F, Javed H, Sharma C, et al. Can *Echinacea* be a potential candidate to target immunity, inflammation, and infection - The trinity of coronavirus disease 2019[J]. Heliyon, 2021, 7(2):e05990.

[9]Mohamed Sharif K O, Tufekci E F, Ustaoglu B, et al. Anticancer and biological properties of leaf and flower extracts of *Echinacea purpurea* (L.) Moench[J]. Food Bioscience, 2021, 41:101005.

[10]陈斌.密度和施肥对两种药用甘草生长及药材产量与品质的影响[D].石河子：石河子大学，2021.
Chen B. Effects of density and fertilization on the growth, yield and quality of two medicinal Licorice [D]. Shihezi: Shihezi University, 2021.

[11]韩琳娜，张荣超，周凤琴.氮磷钾配施对紫锥菊有效成分含量的影响[J].中国土壤与肥料，2013(2)：57-61.
Han L N, Zhang R C, Zhou F Q. Influence of nitrogen, phosphorus and potassium combinate fertilization on active ingredient contents of introduced *Echinacea purpurea*[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2013(2):57-61.

[12]邓淑红，吕杰，张红霞，等.凤县大红袍花椒农业文化遗产生态多样性特征及保护利用对策[J].辽宁农业科学，2020(6)：40-44.
Deng S H, Lv J, Zhang H X, et al. Study on the ecological diversity characteristics and protection and utilization of Dahongpao prickly ash agricultural heritage in Fengxian county [J]. Liaoning Agricultural Sciences, 2020(6):40-44.

[13]哏玉响宝，王春胜，寸德志，等.施肥量对西南桦林下幼龄云南红豆杉生长、生物量和紫杉醇含量的影响[J].西部林业科学，2023，52(5)：29-36.
Ken Y X B, Wang C S, Cun D Z, et al. Effects of fertilization on growth, biomass and taxol content for young *Taxus yunnanensis* in *Betula alnoides* forests [J]. Journal of West China Forestry Science, 2023, 52(5):29-36.

[14]刘耀玺，胡志卿，李晗，等.施肥对核桃林间种牡丹生长和丹皮质量的影响[J].经济林研究，2023，41(3)：82-90.
Liu Y X, Hu Z Q, Li H, et al. Effects of fertilization on growth and cortex moutan quality of Paeonia suffruticosa in walnut forest[J]. Non-wood Forest Research, 2023, 41(3):82-90.

[15]贾袭伟，晋小军，李慧，等.磷酸二氢钾施肥量对款冬生长及产量、质量的影响[J].中成药，2022，44(1)：314-317.
Jia X W, Jin X J, Li H, et al. Effects of potassium dihydrogen phosphate fertilization on the growth, yield and quality of farfara[J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2022, 44(1): 314-317.

[16]毛译，杨启良，陈绍民，等.灌溉方式及施肥量对食用玫瑰生长、生理和产量的影响[J].水资源与水工程学报，2023，34(4)：209-216.
Mao Y, Yang Q L, Chen S M, et al. Effects of irrigation method and fertilization rate on growth, physiology and yield of the edible rose (*Rosa rugosa* Thunb.)[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2023, 34(4):209-216.

[17]郭凯斌.生物有机肥不同施肥量对紫花苜蓿生长特性的影响[J].现代园艺，2023，46(15)：9-11.
Guo K B. Effects of different fertilization rates of bio-organic fertilizer on growth characteristics of alfalfa[J]. Contemporary Horticulture, 2023, 46(15):9-11.

[18]郭强，官凤英，辉朝茂，等.密度和施肥调控对巨龙竹新竹生长及生物量特征的影响[J].北京林业大学学报，2022，44(4)：95-106.
Guo Q, Guan F Y, Hui C M, et al. Effects of density and fertilization on growth and biomass characteristics of newly grown *Dendrocalamus sinicus*[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(4):95-106.

[19]秦梦，谢晓亮，温春秀，等.施肥种类和施肥量对菘蓝产量和有效成分含量的影响[J].贵州农业科学，2015，43(11)：147-152.

Qin M, Xie X L, Wen C X, et al. Effects of different fertilizers with different application amount on yield and active ingredient content of *Isatis indigotica* fort [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2015, 43(11): 147-152.

[20]魏廷邦,魏玉杰,杨振华,等. 种植密度及氮肥对绿洲区蒙古黄芪有效成分和产量的影响[J]. 核农学报, 2022, 36(8): 1664-1675.
Wei T B, Wei Y J, Yang Z H, et al. Effects of planting density and nitrogen fertilizer on the content of astragaloside and yields of *Astragalus membranaceus* var. mongholicus in oasis area[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2022, 36(8): 1664-1675.

[21]唐建楷,韩焕豪,刘冰,等.灌水频率和施肥量对三七有效成分积累与发病率的影响[J].农业工程学报,2020,36(24):55-63.
Tang J K, Han H H, Liu B, et al. Effects of irrigation frequency and fertilization amount on active ingredient accumulation and morbidity of *Panax notoginseng* [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(24): 55-63.

[22]陈荣,年海,吴鸿. 氮磷钾配施对紫锥菊产量和质量的影响[J].中草药,2007,38(6):917-921.
Chen R, Nian H, Wu H. Effect of nitrogen, phosphorus, and potassium on yield and quality of *Echinacea purpurea* [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2007, 38(6): 917-921.

[23]Ahmadi F, Samadi A, Rahimi A. Improving growth properties and phytochemical compounds of *Echinacea purpurea* (L.) medicinal plant using novel nitrogen slow release fertilizer under greenhouse conditions[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 13842.

[24]Attarzadeh M, Balouchi H, Rajaie M, et al. Improvement of *Echinacea purpurea* performance by integration of phosphorus with soil microorganisms under different irrigation regimes[J]. Agricultural Water Management, 2019, 221: 238-247.

[25]Ghasemi A, Esfandiari N, Ali Mohammad Modarres-Sanavy S, et al. Foliar application of nitrogenous organic compounds (Humiforte & Fosnutren) on growth parameters and caffeic acid derivatives of *Echinacea purpurea* [J]. Journal of Plant Nutrition, 2019, 42(7): 783-794.

[26]姚绍嫦,明如宏,傅鹏,等. 不同种植密度对积雪草光合特性、产量及品质的影响[J]. 广东农业科学, 2022, 49(7): 16-25.
Yao S C, Ming R H, Fu P, et al. Effects of different planting densities on photosynthetic characteristics, yield and quality of *Centella asiatica* (L.) urban [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2022, 49(7): 16-25.

[27]赵准. 四种栽培措施对青贮大麦产量和品质的影响[D]. 石河子:石河子大学, 2020.
Zhao Z. Effects of four cultivation measures on yield and quality of silage barley[D]. Shihezi: Shihezi University, 2020.

[28]王瑛,苏亚军,吴建平,等. 品种和种植密度对青贮玉米营养品质的影响[J]. 家畜生态学报, 2023, 44(7): 55-63.
Wang Y, Su Y J, Wu J P, et al. Effects of variety and planting density on the nutritional quality of silage maize [J]. Journal of Domestic Animal Ecology, 2023, 44(7): 55-63.

[29]卢发光. 种植密度和施氮量对沿海盐碱地紫花苜蓿生长、生理、产量和品质的影响[D]. 扬州:扬州大学, 2022.
Lu F G. Effects of planting density and nitrogen application rate on growth, physiology, yield and quality of alfalfa in coastal saline- alkali land [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2022.

[30]唐映军,张翔宇,张俊,等. 不同密度和基肥对丹参产量的影响[J]. 湖北农业科学, 2016, 55(16): 4217-4219.
Tang Y J, Zhang X Y, Zhang J, et al. The influence of different plant density and base manure on *Salvia miltiorrhiza* yield[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2016, 55(16): 4217-4219.

[31]徐扬,刘引,郭兰萍,等. 种植密度对菊花产量和品质的影响[J]. 中国中药杂志, 2020, 45(1): 59-64.
Xu Y, Liu Y, Guo L P, et al. Effects of planting density on yield and quality of *Chrysanthemum morifolium* [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2020, 45(1): 59-64.

[32]徐博琼,陈垣,郭凤霞,等. 移栽密度对蒙古黄芪生长发育及产量质量的影响[J]. 中国实验方剂学杂志, 2020, 26(2): 135-143.
Xu B Q, Chen Y, Guo F X, et al. Effect of transplanting densities on growth, development, yield and quality of *Astragalus membranaceus* var. mongholicus [J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2020, 26(2): 135-143.

[33]王丰青,杨超飞,李铭铭,等. 密度对地黄生长及基因转录特性的影响分析[J]. 中国中药杂志, 2021, 46(17): 4367-4379.
Wang F Q, Yang C F, Li M M, et al. Effects of density on growth and gene transcription characteristics of *Rehmannia glutinosa* [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2021, 46(17): 4367-4379.

[34]刘金祥,张涛,许小玉. 种植密度对香根草生长动态及生物量的影响[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(17): 4126-4129.
Liu J X, Zhang T, Xu X Y. Effects of planting density on dynamic growth and biomass of *vetiver*[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2013, 52(17): 4126-4129.

[35]曾新宇,徐茜,李保证,等. 不同密肥及种苗配置对叶菜型甘薯产量、光合特性及品质影响的研究[J]. 中国土壤与肥料, 2023, (1): 110-125.
Zeng X Y, Xu Q, Li B Z, et al. Effects of different density, fertilizer and seedling configuration on yield, photosynthetic characteristics and quality of leafy vegetable sweet potato[J]. Soil and Fertilizer Science in China, 2023, (1): 110-125.

[36]王丹,张永清,张萌,等. 根土空间与种植密度互作对藜麦根系分布及产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(21): 79-86.
Wang D, Zhang Y Q, Zhang M, et al. The effect of the interaction between root soil space and planting density on the root distribution and yield of *Chenopodium quinoa* willd [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(21): 79-86.

[37]王贵,王莹,周振婕,等. 种植密度对根用菊苣表型及营养品质的影响[J]. 分子植物育种, 2022, 20(18): 6253-6260.
Wang G, Wang Y, Zhou Z J, et al. Effect of planting density on the phenotype and nutritional quality of root chicory [J]. Molecular Plant Breeding, 2022, 20(18): 6253-6260.

[38]张庆玲.不同种植密度对春玉米根构型影响的研究[D].太原:山西大学,2014.
Zhang Q L. The research of effects of different planting densities on maize root structure [D]. Taiyuan: Shanxi University,2014.

[39]王浩.何首乌药材生产技术研究[D].广州:广东药科大学,2020.
Wang H. Study on the production technology of *Fallopia multiflora* [D]. Guangzhou: Guangdong Pharmaceutical University,2020.

Effects of different fertilizer application rates and planting densities on the quality of *Echinacea purpurea*

Bai Huiyuan[1], Zhang Wenzhen[1], Chen Feng[1], Yang Pinglin[2], Mu Sujie[3], Xu Jin[4], Zhang Yuejin[1], Yang Jiandong[5], Ma Yatuan[1*]

(*1.College of Chemistry & Pharmacy, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2.The Second Affiliated Hospital of Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710000, China; 3.Chen Cang Agricultural Technology Extension Service Center in Baoji, Baoji 721000, China; 4.Zhenba County Science and Technology Bureau, Zhenba 723600, China; 5.Yangling Baichuan Hemei Agriculture limited company, Yangling 712100, China*)

Abstract: [Objective] This study aimed to explore the application potential and cultivation techniques of *Echinacea purpurea* (L.) Moench in Feng County, Shaanxi Province. [Methods] Field experiments were conducted from 2022 to 2023 using a split plot design with two factors: fertilization and planting densities. Five fertilizer treatments F_0~F_4 were applied based on different levels of yeast tobacco stem bioorganic fertilizer(0, 1200, 2100, 3000, and 3900 kg·ha^{-1}), and yeast organic-inorganic compound fertilizer: 0, 360, 630, 900, 1170 kg·ha^{-1}). Plant densities consisted of two levels (D_1:63000 litters·ha^{-1}, D_2:31500 litters·ha^{-1}), three plants per litter. Sampling was conducted in October 2022, July 2023, and October 2023. Various biological characteristics of *E. purpurea* such as plant height, stem diameter, flowering branch number, chlorophyll content, aboveground dry weight, root dry weight, as well as the content of chicoric acid, caftaric acid, flavonoids, polysaccharides, and the yield of *E. purpurea* medicinal materials were measured. [Results] Under the same fertilization conditions, as the planting density increased, the biological traits of *E. purpurea* decreased, while the content of effective ingredients and medicinal material yield increased, except for the content of polysaccharide. Under the same planting density, increasing fertilization initially increased and then decreased various biological traits, effective ingredients content, and medicinal material yield. The interactions between fertilizer rates, planting densities, and their combinations significantly affected the contents of chicoric acid, caftaric acid, flavonoids, polysaccharides, and the yield of *E. purpurea* medicinal materials($P<0.05$). The content of chicory acid, caftaric acid, and flavonoids in the aboveground part of *E. purpurea* was higher than that in the underground part, while the content of polysaccharides in the underground part were higher than that in the aboveground part. The quality and yield of *E. purpurea* harvested in July 2023 were the best. Among them, the F_1D_1 and F_2D_1 treatment groups had higher yields and contents of effective components. [Conclusion] In summary, it is recommened to apply 1200~2100 kg·ha^{-1} of yeast tobacco stem bioorganic fertilizer and 360~630 kg·ha^{-1} of yeast organic-inorganic compound fertilizer, with a planting density of 63 000 plants·ha^{-1} (plant spacing of 30 cm and row spacing of 60 cm), to obtain higher quality and yield of *E. purpurea* medicinal materials during cultivation.

Keywords: *Echinacea purpurea* (L.) Moench, Planting density, Fertilization amount, Chicory acid, Caftaric acid, Polysaccharides, Flavone

(编辑:吕俊俐)