罗清清,董欢,曹蔚,等.不同施肥处理下沙苑子产量及质量的变化[J].山西农业大学学报(自然科学版),2024,44(6):68-77.
Luo Q Q, Dong H, Cao W, et al.Changes in yield and quality of Astragali complanati Semen under different fertilization treatments[J].Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2024,44(6):68-77.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202405023

不同施肥处理下沙苑子产量及质量的变化

罗清清[1],董欢[1],曹蔚[1],邢小军[2],高淑丽[2],郭康雅[1],郭媛[1],徐培华[2],杨欣[2],段琦梅[1*]

(1.西北农林科技大学 化学与药学院,陕西 杨凌 712100;2.陕西利君现代中药有限公司,陕西 渭南 714000)

摘　要:[目的]豆科植物扁茎黄芪(*Astragalus complanatus* R. Br.)的干燥成熟种子沙苑子有丰富的药用及营养价值,其市场需求量逐年增长、种植规模不断扩大,考察N、P、K配方施肥对沙苑子产量和质量的影响,可为沙苑子人工栽培合理施肥提供参考。[方法]在陕西省大荔县开展大田试验,通过三因素二次D—饱和最优设计对沙苑子进行施肥试验,统计不同小区的产量并以产量为指标建立产量肥效方程,以水溶性浸出物、总黄酮、毛蕊异黄酮葡萄糖苷、沙苑子苷及芒柄花苷的含量为指标测定不同施肥处理下沙苑子的质量。采用熵权法结合灰色关联—TOPSIS法综合评价沙苑子的质量,以综合评价结果为指标建立质量肥效方程。采用频率分析法对产量及质量肥效方程进行优化筛选,综合二者的最佳施肥量交集得到沙苑子的推荐施肥量。[结果]不同施肥处理下沙苑子的产量增加9.11%～61.80%,其中F10($N_3P_3K_1$;N:135 kg•hm^{-2},P_2O_5:140 kg•hm^{-2},K_2O:47.84 kg•hm^{-2})对其产量促进作用最为显著。研究发现NPK肥料对沙苑子产量的影响程度为:P>N>K。F7(N_2P_2;N:80.50 kg•hm^{-2},P_2O_5:83.48 kg•hm^{-2},K_2O:0 kg•hm^{-2})处理下,沙苑子药材品质最佳。NPK肥料对沙苑子质量的影响程度为:N>P>K。综合产量与质量的最佳施肥量得到沙苑子种植时的推荐施肥量为N:69.19～87.28 kg•hm^{-2},P_2O_5:82.43～103.89 kg•hm^{-2},K_2O:0.00～67.68 kg•hm^{-2}。[结论]不同施肥配比对种植沙苑子的产量与质量具有不同程度的影响,适当的NPK肥配合施肥可明显提高沙苑子的产量与质量。

关键词:沙苑子;三因素二次D—饱和最优设计;配方施肥;质量评价
中图分类号:R931.2;S365　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-8151(2024)06-0068-10

沙苑子(Astragali Complanati Semen)是豆科植物扁茎黄芪(*Astragalus complanatus* R. Br.)的干燥成熟种子,味甘,性温,归肝、肾经,具有补肾助阳,固精缩尿,养肝明目等功效[1]。沙苑子具有丰富的药用及营养价值[2],早在唐代民间便有以沙苑子代茶饮的习俗,其在陕西种植历史悠久,古代主要产于陕西沙苑、潼关一带[3],还曾成为贡品,随着社会的发展,其价值愈来愈受到人们的广泛重视。药理学研究成果显示,沙苑子具备多方位的药理作用[4-5],能发挥保护肝脏、降血脂[6]、降血压、抑制血小板聚集、抗炎作用[7]以及增强机体免疫功能等生物活性。因沙苑子功能广泛且疗效显著,更兼其具有开发运动补剂等保健品及营养药膳的巨大潜力[8-9],因此其市场需求量逐年增长,种植规模也随之不断扩大,现为大荔、潼关的著名特产道地药材[10]。

目前中药材可持续供应和质量稳定性很大程度上取决于中药材的规范化种植,如何同时提高栽培中药材产量与质量已成为研究热点[11]。配方施肥是中药材规范化种植中一个关键技术环节,药用植物生长过程中N、P、K可直接参与植物生命活动,通过参与化合物的合成与代谢,进而影响次生代谢产物的形成与积累,影响到药材有效成分的含量[12]。N、P、K肥的合理施用可提高栽培药材产量和有效成分含量,提升药材商品规格[13]。

利用NPK肥提高中药材产量和有效成分含量

收稿日期:2024-05-18　　**修回日期**:2024-06-30
基金项目:陕西省重点研发计划(2021SF-384);西北农林科技大学科技创新专项(2452021090);杨陵区区校一体开展农村人才振兴项目(TG20220068);沙苑子规范化种植关键技术研究与推广示范(TG20221121);陕西省技术创新引导专项(2024QCY-KXJ-067)
作者简介:罗清清(ORCID:0009-0001-7943-1852),硕士,研究方向:中药材规范化生产和质量评价,E-mail:coriolus_luo@163.com
*通信作者:段琦梅,副教授,研究方向:中药材规范化生产和质量评价,E-mail:duanqimei1969@163.com

的研究已在许多大宗药材上取得了显著成效[14-15]，但对沙苑子施肥的研究较少，对其NPK配方施肥还未见报道。因此本研究通过沙苑子在其道地产区大荔县的大田栽培试验，探究了不同施肥配比对沙苑子产量及质量的影响，对不同施肥处理的沙苑子进行质量综合评价及质量排序；同时以产量和质量为指标建立沙苑子NPK配方施肥肥效方程，研究沙苑子最适宜的施肥方案，旨在为指导沙苑子的规范化施肥提供理论依据。

1　材料和方法

1.1　试验地概况

试验在陕西省渭南市大荔县赵渡镇平民村试验基地(34°75′63″N，110°16′03″E)进行，试验基地平均海拔约332 m，属于暖温带大陆性季风气候类型，其年均气温为14.4 ℃，降水量514 mm，全年无霜期约214 d。试验基地土壤为沙壤土，耕层土(0～20 cm)碱解N含量为11.87 mg·kg^{-1}，速效K含量为80.79 mg·kg^{-1}，有效P含量为10.94 mg·kg^{-1}，全N含量为430 mg·kg^{-1}，有机质含量为9.43 g·kg^{-1}，pH值为8.035。

1.2　试验材料

大田试验选用大荔县赵渡镇一年生扁茎黄芪(*Astragalus complanatus* R. Br.)的干燥成熟种子，根据试验设计方案于2023年3月28日种植，于2023年11月24日在赵渡试验区采集不同处理小区的供试样品。

1.3　试验设计

在赵渡试验田采用小区试验探讨不同施肥处理对沙苑子产量及质量的影响，依据试验地的实际面积，设计小区的规格为长度5 m、宽度3 m，每3个小区组成1组处理单元，整个试验共计30个此类小区，均采用平地条播方式种植。供试肥料N肥选用尿素，N含量不低于46%；P肥选用$Ca(H_2PO_4)_2·H_2O$，含P_2O_5量不低于16%；K肥选用K_2SO_4，含K_2O量不低于52%。

采用N、P、K三因素二次D-饱和最优设计[16]设置10个不同肥料施用处理，每个处理重复3次；由于未见有沙苑子配方施肥相关文献报道，参考当地常规施肥量施用NPK三元复合肥(N∶P_2O_5∶K_2O=1∶1∶1，N≥15%)约15～20 kg，以及同科属植物且同样收获果实的豆科植物大豆的肥料施用量来确定所施肥料的最大量和最小量[17]，见表1；设计方案见表2；由表2可计算出各小区的施肥量，见表3。计算得试验共需要尿素6.005 kg，$Ca(H_2PO_4)_2·H_2O$肥17.904 kg，K_2SO_4肥5.312 kg。于2023年11月24日收获采样，采样方式为每小区随机采取3株。

表1　N、P、K三因素二次D－饱和最优设计肥料用量的最大值和最小值

Table 1　The maximum and minimum fertilizer amount in N, P, K three factor quadratic two times D－saturation optimal design　　单位：**kg·hm^{-2}**

施肥元素 Fertilizer element	最大量 Maximum quantity	最小量 Minimum quantity	变化区间 Change interval
N	135	0	67.5
P_2O_5	140	0	70.0
K_2O	135	0	67.5

1.4　试验方法

1.4.1　水分含量的测定

取样品2 g，精密称定，开启瓶盖在105 ℃干燥5 h，将瓶盖盖好，移置干燥器中，放30 min，精密称定，再在上述温度干燥1 h，放冷，称重，至连续2次称重的差异不超过5 mg为止。根据减失的重量，计算样品中含水量(%)[18]。

1.4.2　总灰分含量的测定

样品粉碎后使之通过二号筛，精密称定3 g，置炽灼至恒重坩埚中，称定重量，缓缓炽热至完全碳化时，逐渐升高温度至500 ℃，完全灰化并至恒重。根据残渣重量，计算供试品中总灰分含量(%)[18]。

1.4.3　酸不溶性灰分含量的测定

根据1.4.2所得的灰分，在坩埚中缓慢加入稀盐酸约10 mL，用表面皿覆盖坩埚，置水浴上加热10 min，表面皿用热水5 mL冲洗，洗液并入坩埚，用无灰滤纸滤过，坩埚内的残渣用水洗于滤纸上，并洗涤至洗液不显氯化物反应为止。滤渣连同滤纸移置同一坩埚中，干燥，炽灼至恒重。根据残渣重量，计算供试品中酸不溶性灰分的含量(%)[18]。

1.4.4　千粒重的测定

采取“百粒法”测定沙苑子种子的千粒重[19]，将经过净度分析后的种子采用“四分法”随机取样8份(每份100粒)，万分之一天平称重，计算8份试样的平均重量乘以10即得沙苑子种子的千粒重。

表2 N、P、K三因素二次D－饱和最优设计方案

Table 2 N, P, K three factor two times D saturation optimal design scheme

处理 Treatment	编码 Code	水平编码值 Horizontal code value			施肥总量/(kg·hm^{-2}) Fertilizer amount		
		X_1(N)	X_2(P_2O_5)	X_3(K_2O)	N	P_2O_5	K_2O
F1	$N_0P_0K_0$	－1	－1	－1	0.00	0.00	0.00
F2	$N_3P_0K_0$	1	－1	－1	135.00	0.00	0.00
F3	$N_0P_3K_0$	－1	1	－1	0.00	140.00	0.00
F4	$N_0P_0K_3$	－1	－1	1	0.00	0.00	135.00
F5	$N_0P_2K_2$	－1	0.192 5	0.192 5	0.00	83.48	80.50
F6	$N_2P_0K_2$	0.192 5	－1	0.192 5	80.50	0.00	80.50
F7	$N_2P_2K_0$	0.192 5	0.192 5	－1	80.50	83.48	0.00
F8	$N_1P_3K_3$	－0.291 2	1	1	47.84	140.00	135.00
F9	$N_3P_1K_3$	1	－0.291 2	1	135.00	49.62	135.00
F10	$N_3P_3K_1$	1	1	－0.291 2	135.00	140.00	47.84

注：水平编码为1时，施肥量为最大量；水平编码为－1时，施肥量为最小量

Note: The horizontal code being 1 indicated the maximum amount of fertilization; while the horizontal code being －1 indicated the minimum amount of fertilization

表3 N、P、K三因素二次D－饱和最优设计方案各小区试验施肥量

Table 3 N, P, K three factor two times D saturation optimal design for fertilizer amount in each plot

处理 Treatment	大田施肥总量/(kg·hm^{-2}) Fertilizer amount			各小区施肥总量/(g·m^{-2}) Fertilizer amount		
	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O
F1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
F2	135.00	0.00	0.00	13.50	0.00	0.00
F3	0.00	140.00	0.00	0.00	14.00	0.00
F4	0.00	0.00	135.00	0.00	0.00	13.50
F5	0.00	83.48	80.50	0.00	8.35	8.05
F6	80.50	0.00	80.50	8.05	0.00	8.05
F7	80.50	83.48	0.00	8.05	8.35	0.00
F8	47.84	140.00	135.00	4.78	14.00	13.50
F9	135.00	49.62	135.00	13.50	4.96	13.50
F10	135.00	140.00	47.84	13.50	14.00	4.78

1.4.5 产量的测定

小区内沙苑子经脱粒后晾干，再经净选后统计产量。

1.4.6 水溶性浸出物含量的测定

采用“热浸法”测定沙苑子水溶性浸出物的含量[1]。样品粉碎后使之能通过二号筛，精密称定3 g，置100 mL具塞锥形瓶中，精密加入水50 mL，塞紧，称定重量，静置1 h后，连接回流冷凝管，加热至沸腾，并保持微沸1 h。冷却后，再次称重并用水补足失重，摇匀后过滤。取滤液25 mL，放入已恒重的蒸发皿。水浴蒸干后，于105 ℃干燥3 h，冷却30 min，精确称重，据此重量与恒重蒸发皿重量之差计算样品中水溶性浸出物的含量(%)。

1.4.7 总黄酮含量的测定

取沙苑子样品(过三号筛)约0.5 g，精密称重，置具塞锥形瓶中，加入60%乙醇25 mL，称重并加热回流1 h，冷却，再次称重，用60%乙醇补足减失的重量，摇匀，过滤，即得待测溶液。精密量取待测溶液0.5 mL加入1 mL 1%三氯化铝，用60%乙醇定容至10 mL，在270 nm处检测吸光度。

1.4.8 毛蕊异黄酮葡萄糖苷、沙苑子苷及芒柄花苷含量的测定

参考2020版《中国药典》沙苑子项下有效成分测定方法[18]，HPLC测定，Hypersil ods2 C18色谱柱

(4.6 mm×250 mm,5 μm),检测波长266 nm,柱温30 ℃,体积流量0.8 mL·min^{-1},进样量20 μL;流动相为乙腈:0.1%磷酸水溶液(21:79),等度洗脱。

取沙苑子样品(过三号筛)约0.5 g,精密称重,置具塞锥形瓶中,加入60%乙醇25 mL,称重并加热回流1 h,冷却,再次称重,用60%乙醇补足减失的重量,摇匀,过滤,即得待测样品溶液,进行HPLC测定。

1.5　统计分析

采用Excel 2019进行数据整理与处理;运用单因素方差分析(ANOVA)中的最小显著性差异(LSD)法进行显著性差异分析;采用IBM SPSS Statistics 26软件进行多项式回归分析与频率分析;采用Origin Pro 2019软件进行图形绘制。

2　结果与分析

2.1　水分、总灰分及酸不溶性灰分含量

根据2020版《中国药典》沙苑子检查项[18],测定不同施肥处理沙苑子样品中的水分、总灰分及酸不溶性灰分含量(表4)。沙苑子样品水分范围为7.43%~8.81%,总灰分含量范围为3.14%~3.51%,酸不溶性灰分含量范围为0.13%~0.38%,均符合2020版《中国药典》沙苑子水分不超过13.00%、总灰分含量不超过5.00%、酸不溶性灰分含量不超过2.00%的要求。

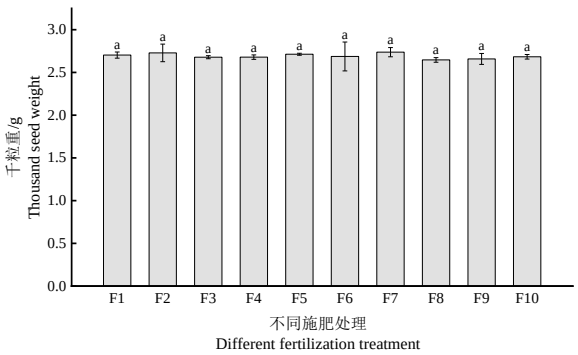
表4　不同施肥处理的沙苑子水分、总灰分及酸不溶性灰分含量($\bar{x}$±SD, n=3)

Table 4　Content of water, total ash and acid-insoluble ash of *A. complanati* Semen in different fertilization treatments($\bar{x}$±SD, n=3)　　单位:%

处理 Treatment	水分 Water content	总灰分 Total ash	酸不溶性灰分 Acid-insoluble ash
F1	8.46±0.68	3.26±0.01	0.15±0.01
F2	7.58±0.44	3.36±0.13	0.16±0.03
F3	8.48±0.54	3.15±0.22	0.17±0.01
F4	7.89±0.59	3.35±0.24	0.30±0.21
F5	8.20±0.76	3.14±0.12	0.13±0.00
F6	8.81±1.16	3.42±0.18	0.14±0.00
F7	8.04±0.40	3.26±0.03	0.25±0.02
F8	7.43±0.47	3.41±0.08	0.33±0.02
F9	7.67±0.43	3.16±0.06	0.26±0.01
F10	8.56±1.19	3.51±0.34	0.38±0.34

2.2　不同施肥处理下沙苑子千粒重

测定不同施肥处理下沙苑子的千粒重,结果如图1所示。可见,不同的施肥处理组对沙苑子的千粒重无显著性影响。



F1~F10的施肥量见表3;不同字母代表任意2组样品间具有显著性差异($P<0.05$),下同

The amount of fertilizer applied in F1 to F10 treatments was shown in Table 3. Distinct letters indicated notable disparities between any two sample groups ($P<0.05$), The same as below

图1　不同施肥处理下沙苑子的千粒重

Fig.1　1000-grain weight of *A. complanati* Semen in different fertilization treatments

2.3　不同施肥处理下沙苑子产量

统计不同施肥处理下沙苑子的产量如图2所示。可见不同施肥处理组对沙苑子产量具有一定程度的影响,对照组F1产量低于其它肥料处理组,各施肥处理组的产量分别增加9.11%~61.80%,其中F10处理显著增加了沙苑子的产量,说明NPK肥料均能提高种植沙苑子的产量。

单因素组中F3(P_3)的产量较F2(N_3)、F4(K_3)更高,F2(N_3)与F4(K_3)无显著性区别;二因素组中F7(N_2P_2)的产量较高;三因素组中F10($N_3P_3K_1$)的产量较F8($N_1P_3K_3$)、F9($N_3P_1K_3$)有显著性提高;同时,对比各不同施肥处理发现F10($N_3P_3K_1$)对沙苑子的产量提高作用最为显著。

2.4　不同施肥处理下沙苑子水溶性浸出物

测定不同施肥处理下沙苑子的水溶性浸出物含量,如图3所示,不同施肥处理对沙苑子水溶性浸出物的含量影响显著($P<0.05$),其中F7(N_2P_2)对沙苑子的水溶性浸出物含量提高作用最为显著,其含量相较于未施肥对照组F1增加5.10%,其它处理的水溶性浸出物含量无显著差异。

2.5　不同施肥处理下沙苑子总黄酮含量

测定不同施肥处理下沙苑子的总黄酮含量,

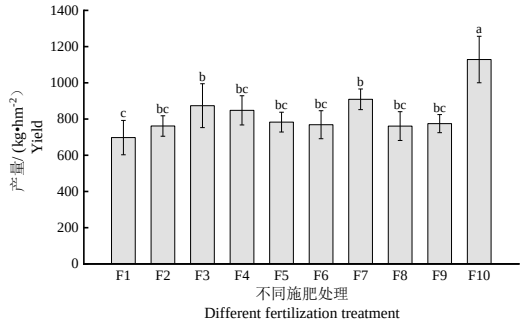


图2 不同施肥处理下沙苑子的产量

Fig.2 Yield of *A. complanati* Semen in different fertilization treatments

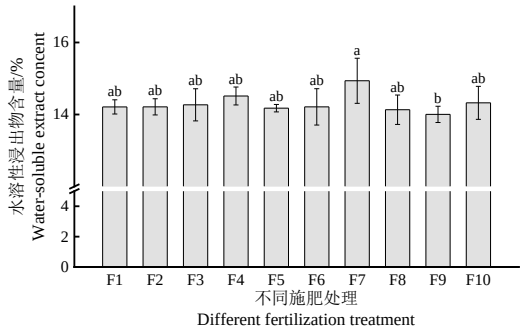


图3 不同施肥处理下沙苑子的水溶性浸出物含量

Fig.3 Water-soluble extract content of *A. complanati* Semen in different fertilization treatments

结果如图4所示。可见,不同施肥处理对沙苑子总黄酮的含量影响显著($P<0.05$),其中F9($N_3P_1K_3$)对沙苑子总黄酮含量的提高作用最为明显,F4(K_3)相较于对照组F1则显著降低了总黄酮含量。

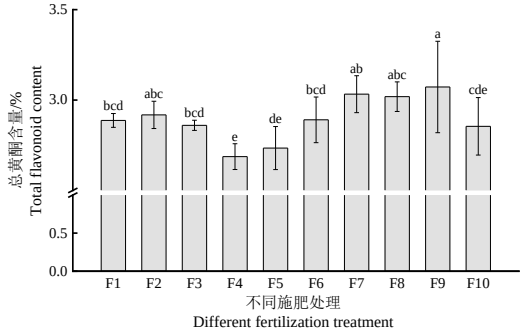


图4 不同施肥处理下沙苑子的总黄酮含量

Fig.4 Total flavonoid content of *A. complanati* Semen in different fertilization treatments

2.6 不同施肥处理下沙苑子有效成分含量

不同施肥处理下沙苑子中毛蕊异黄酮葡萄糖苷、沙苑子苷及芒柄花苷含量如图5所示,毛蕊异黄酮葡萄糖苷含量范围为0.086 6%~0.104 6%,沙苑子苷含量范围为0.037 8%~0.047 9%,芒柄花苷含量范围为0.133 0%~0.168 0%。

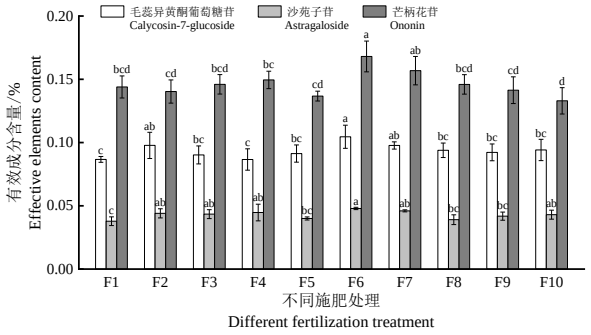


图5 不同施肥处理下沙苑子有效成分含量

Fig.5 Contents of active components in *A. complanati* Semen in different fertilization treatments

由图5可见,不同施肥处理下沙苑子有效成分含量具有显著性差异($P<0.05$),其中F6(N_2K_2)毛蕊异黄酮葡萄糖苷、沙苑子苷及芒柄花苷含量均最高,F7(N_2P_2)次之,其它处理组无明显差异。

2.7 不同施肥处理下沙苑子综合质量评价

本试验共有10个评价对象,5个质量评价指标,利用熵权法结合灰色关联-TOPSIS法[20]对不同施肥处理的沙苑子进行质量综合评价分析。通过熵权法计算各指标权重如表5所示,质量综合评价结果见表6。

试验结果表明,不同施肥处理下沙苑子整体质量具有一定的差异,其中F7(N_2P_2)质量最优。单因素组中,F2(N_3)排名靠前与F3(P_3)、F4(K_3)相同均能提高沙苑子的质量;两因素组中,F7(N_2P_2)与F6(N_2K_2)排名相近均能显著提高沙苑子的质量,而F5(P_2K_2)对沙苑子的质量具有降低作用;三因素配施均能提高沙苑子的质量,其中F8($N_1P_3K_3$)效果较为显著。

2.8 沙苑子产量肥效方程的建立

根据三因素二次D-饱和最优设计方案产量效应函数编码表,通过多元回归分析得到沙苑子产量与各因素之间的回归方程为:

$$Y=829.26+61.03X_1+82.60X_2-46.20X_3+72.48X_1X_2-43.44X_1X_3-77.98X_2X_3+16.41X_1^2+19.90X_2^2-21.63X_3^2$$

该方程 $R^2=0.739$,$F=6.29>F_{0.01}(9,20)=3.32$,$P=0.000<0.01$,方程的回归拟合达到极显

表5　质量评价各指标信息熵e_j及权重w_j

Table 5　The information entropy and weight of each index were evaluated

指标 Item	e_j	ω_j
水溶性浸出物	0.863 5	0.232 4
总黄酮	0.917 4	0.140 6
毛蕊异黄酮葡萄糖苷	0.853 9	0.248 7
沙苑子苷	0.899 2	0.171 6
芒柄花苷	0.878 6	0.206 7

著水平,表明该方程能反映沙苑子产量与NPK施肥水平间的关系,故模型能够预测沙苑子产量。

2.8.1　产量肥效方程主因素效应分析

采用已经过量纲化处理的N、P、K编码值建立产量回归模型,偏回归系数已经标准化,因此该模型方程中的各一次项偏回归系数的绝对值可以反映NPK施肥水平对沙苑子产量的影响。

本试验产量肥效方程中N、P、K一次项偏回归系数绝对值分别为61.03、82.60、46.20,说明N、P、K施肥水平对沙苑子产量影响为P>N>K。

2.8.2　N、P、K肥效方程产量寻优

对有同等重要性的试验指标,通过频率出现高低可优先排序,频率高的因素水平可被优先选择,从而获得最佳置信区间和配比方案[21]。将N、P、K三因素下4个编码水平组合可得到64个处理组,筛选出前20%产量的编码值组合,对这些组合进行频率分析,以对产量肥效方程进行寻优(表7)。沙苑子目标产量为908.53~1 227.67 kg·hm^{-2}时,95%置信区间下,N的优化施肥量为69.19~140.45 kg·hm^{-2},P的优化施肥量为82.43~148.88 kg·hm^{-2},K的优化施肥量为0.00~67.68 kg·hm^{-2}。

2.9　沙苑子质量肥效方程的建立

以熵权法结合灰色关联-TOPSIS法得到的表示沙苑子质量的综合贴近度为指标,根据三因素二次D-饱和最优设计方案,通过多元回归分析得到沙苑子质量与各因素之间的回归方程为:

$$Y=0.618+0.065X_1-0.053X_2-0.044X_3-0.024X_1X_2-0.008X_1X_3-0.086X_2X_3-0.251X_1^2-0.005X_2^2+0.007X_3^2$$

该方程$R^2=0.809$,$F=9.405>F_{0.01}(9,20)=3.32$,$P=0.000<0.01$,方程的回归拟合达到极显著水平,表明该方程能反映沙苑子质量与NPK施肥水平之间的关系。

2.9.1　质量肥效方程主因素效应分析

采用已经过量纲化处理的N、P、K编码值建立质量回归模型,偏回归系数已经标准化,因此该模型方程中的各一次项偏回归系数的绝对值可以反映NPK施肥水平对沙苑子质量的影响。

本试验质量肥效方程中N、P、K一次项偏回归

表6　不同施肥处理下沙苑子质量综合评价排序

Table 6　Ranking of comprehensive evaluation of quality of *A. complanati* Semen in different fertilization treatments

处理 Treatment	$r_{(s)}$	$r_{(t)}$	r_i	D^+	D^-	C_i	T_i	排名 Rank
F1	0.078 0	0.155 4	0.334 2	0.384 8	0.109 7	0.221 8	0.278 0	9
F2	0.097 6	0.111 9	0.465 9	0.274 8	0.215 8	0.439 9	0.452 9	3
F3	0.088 2	0.120 2	0.423 1	0.309 3	0.160 5	0.341 7	0.382 4	6
F4	0.091 4	0.135 8	0.402 3	0.327 1	0.198 5	0.377 7	0.390 0	5
F5	0.076 2	0.147 4	0.340 6	0.369 6	0.090 6	0.196 8	0.268 7	10
F6	0.158 1	0.087 9	0.642 6	0.192 0	0.376 9	0.662 5	0.652 6	2
F7	0.148 2	0.078 7	0.653 2	0.120 9	0.363 8	0.750 6	0.701 9	1
F8	0.092 5	0.126 0	0.423 5	0.319 6	0.177 9	0.357 6	0.390 6	4
F9	0.096 6	0.133 7	0.419 3	0.344 2	0.180 0	0.343 4	0.381 4	7
F10	0.087 5	0.128 2	0.405 5	0.316 2	0.169 2	0.348 6	0.377 1	8

注:$r_{(s)}$为最优加权关联度;$r_{(t)}$为最差加权关联度;r_i为相对关联度;D^+为各评价对象与正理想解的欧氏距离;D^-为各评价对象与负理想解的欧式距离;C_i为相对贴近程度;T_i为综合贴近度

Note: $r_{(s)}$ is the optimal weighted correlation degree; $r_{(t)}$ is the worst weighted correlation degree; r_i is the relative correlation degree; D^+ is the Euclidean distance between each evaluation object and the rational solution; D^- is the Euclidean distance between each evaluation object and the negative ideal solution; C_i represents the degree of relative closeness; T_i represents the comprehensive closeness

表7 沙苑子产量寻优因素取值频率分布表

Table 7 Table of frequency distribution of optimal factors for yield of *A. complanati* Semen

编码值 Code	X_1		X_2		X_3	
	次数 Times	频率/% Rate	次数 Times	频率/% Rate	次数 Times	频率/% Rate
−1	0	0	0	0	6	46.2
−0.291 2	2	15.4	1	7.7	4	30.8
0.192 5	4	30.8	4	30.8	3	23.1
1	7	53.8	8	61.5	0	0
加权均值	0.552 9		0.652 2		−0.506 7	
SD	0.527 9		0.474 6		0.509 3	
最优施肥量/(kg·hm^{-2})	69.19～140.45		82.43～148.88		0.00～67.68	

表8 沙苑子质量寻优因素取值频率分布表

Table 8 Table of frequency distribution of optimal factors for quality of *A. complanati* Semen

编码值 Code	X_1		X_2		X_3	
	次数 Times	频率/% Rate	次数 Times	频率/% Rate	次数 Times	频率/% Rate
−1	0	0.00	5	38.46	6	46.15
−0.291 2	3	23.08	3	23.08	3	23.08
0.192 5	10	76.92	3	23.08	2	15.38
1	0	0.00	2	15.38	2	15.38
加权均值	0.080 9		−0.253 5		−0.345 3	
SD	0.212 1		0.737 7		0.751 6	
最优施肥量/(kg·hm^{-2})	58.64～87.28		0.62～103.89		0.00～94.92	

系数绝对值分别为0.065、0.053、0.044，说明N、P、K施肥水平对沙苑子质量的影响为：N＞P＞K。

2.9.2 N、P、K肥效方程质量寻优

与产量肥效方程类似，将N、P、K三因素下的4个编码水平组合可得到64个处理组，筛选出前20%质量的编码值组合，对这些组合进行频率分析，以对质量肥效方程寻优(表8)，95%置信区间下，N的优化施肥量为58.64～87.28 kg·hm^{-2}，P的优化施肥量为0.62～103.89 kg·hm^{-2}，K的优化施肥量为0.00～94.92 kg·hm^{-2}。

3 讨论

药用植物的生长需要充足均衡的养分供给，施肥作为人为提供养分的主要措施，适度的N、P、K施肥可以有效提高植物和土壤的养分含量，从而提高作物产量和品质[22]；反之，施肥不足难以满足植物生长的养分需求，施肥过量易对植物造成肥害[23]。此外，过量施肥还会造成土壤酸化，导致土壤养分严重失衡，诱发植物养分失衡，最终影响产量和品质[24]。实际生产中常因缺乏科学配比导致N、P、K比例失衡，影响植物对养分的吸收利用，降低产量和品质，增加养分流失和环境污染的风险。因此，本研究通过三因素二次D-饱和最优设计对沙苑子进行施肥试验，考察N、P、K配方施肥对沙苑子产量和质量的影响，研究沙苑子最适宜的施肥方案。

3.1 配方施肥对沙苑子产量的影响

NPK作为对植物生长发育至关重要的大量营养元素，其合理的施用不仅能显著促进植物生长，优化土壤肥力状况，而且还能直接或间接地提升植物产量[25]。本研究结果表明NPK肥料均对沙苑子产量有促进作用，产量增加9.11%～61.80%，F10($N_3P_3K_1$，N：135 kg·hm^{-2}，P_2O_5：140 kg·hm^{-2}，K_2O：47.84 kg·hm^{-2})对其产量作用最为显著。可能是因为NPK肥的合理配施为沙苑子提供了平衡的养分供应，对其植株生长及产量均有显著提升。

建立沙苑子产量肥效方程，研究发现NPK肥料对沙苑子产量的影响程度为：P＞N＞K，说明N、P是促进沙苑子产量的主要元素。沙苑子作为种子类中药材，花荚期养分的充分供给对其产量的提升具有重要作用，N肥有利于减少花荚脱落，增加果实的生长速度和大小[26]；P肥可以促进植物的花芽分化，增加花蕾的数量和质量，同时P也参与调节植物的生长激素合成和运输，对果实的发育和成熟具有重要影响[27]；因此沙苑子的生长需要重施P肥和N肥，也要适当补充K肥。采用频率分析法对沙苑子前20%目标产量进行优化筛选，得到在95%置信区间下：当沙苑子目标产量在908.53～1 227.67 kg·hm^{-2}时，N的优化施肥量为69.19～140.45 kg·hm^{-2}，P_2O_5的优化施肥量为82.43～148.88 kg·hm^{-2}，K_2O的优化施肥量为0.00～67.68 kg·hm^{-2}。

3.2 配方施肥对沙苑子质量的影响

中药材的内在质量关乎用药安全和临床疗效，配方施肥可以显著的改善中药材的品质[28-29]。测定不同施肥处理下沙苑子的5个指标性成分，发现配方施肥对沙苑子各指标含量影响有显著性差异。

有学者探讨了N、P、K肥对植物生长发育的促进作用,发现NPK肥能显著促进植物细胞分裂与生长,增强植物生长活力,同时有助于提高光合作用效率,进而促使植物次生代谢产物积累显著增加[30]。

采用熵权法结合灰色关联-TOPSIS法对不同施肥处理的沙苑子进行质量综合评价,在F7(N_2P_2, N: 80.50 kg·hm^{-2}, P_2O_5: 83.48 kg·hm^{-2}, K_2O:0 kg·hm^{-2})处理下,沙苑子药材品质最佳,表明沙苑子质量同样受N、P肥影响较大。以综合贴近度作为质量指标建立沙苑子质量肥效方程,本研究发现NPK肥料对沙苑子质量影响程度为:N>P>K,说明N、P是提高沙苑子质量的主要元素。采用频率分析法对沙苑子质量进行优化筛选,得到95%置信区间下优化施肥量N为58.64~87.28 kg·hm^{-2},P_2O_5为0.62~103.89 kg·hm^{-2},K_2O为0.00~94.92 kg·hm^{-2}。

中药材的产量与品质都十分重要,它们共同构成了中药材的价值核心;产量的稳定保证了市场的供应,而品质的优良则直接关系到药材的疗效与安全性[31]。因此在沙苑子的种植过程中,既要注重产量的提升,也要严格把控品质。综上所述,本试验探究和评价了合理配施NPK肥对沙苑子产量和质量的影响,为沙苑子示范化种植中的减肥增效、科学施肥提供了理论依据。

4　结论

不同施肥配比对种植沙苑子的产量与质量具有不同程度的影响。在试验区内施肥方案为N:135 kg·hm^{-2}、P_2O_5:140 kg·hm^{-2}、K_2O:47.84 kg·hm^{-2}时对产量作用最为显著;沙苑子产量肥效方程表明NPK肥料对沙苑子产量的影响程度为:P>N>K,N的优化施肥量为69.19~140.45 kg·hm^{-2},P_2O_5的优化施肥量为82.43~148.88 kg·hm^{-2},K_2O的优化施肥量为0.00~67.68 kg·hm^{-2}。试验区内施肥方案为N:80.50 kg·hm^{-2}、P_2O_5:83.48 kg·hm^{-2}、K_2O:0 kg·hm^{-2}时对质量作用最为显著;沙苑子质量肥效方程表明NPK肥料对沙苑子产量的影响程度为:N>P>K,N的优化施肥量为58.64~87.28 kg·hm^{-2},P_2O_5的优化施肥量为0.62~103.89 kg·hm^{-2},K_2O的优化施肥量为0.00~94.92 kg·hm^{-2}。

综上所述,通过在陕西省渭南市大荔县赵渡试验区沙壤土条件下的大田试验,综合得到沙苑子种植时的推荐施肥量为N的最佳施肥量为69.19~87.28 kg·hm^{-2},P_2O_5的最佳施肥量为82.43~103.89 kg·hm^{-2},K_2O的最佳施肥量为0.00~67.68 kg·hm^{-2}。

参　考　文　献

[1]王秋玲. 沙苑子质量标准研究[D]. 咸阳: 陕西中医学院, 2007.
Wang Q L. *Semen* astragali complanati quality standards studies [D]. Xianyang: Shaanxi University of Chinese Medicine, 2007.

[2]Ng Y F, Tang P C T, Sham T T, et al. *Semen* Astragali Complanati: an ethnopharmacological, phytochemical and pharmacological review [J]. Journal of Ethnopharmacology, 2014, 155(1): 39-53.

[3]夏凡, 梁勇满, 许亮, 等. 沙苑子的本草考证及商品规格研究[J]. 中国中医药现代远程教育, 2017, 15(9): 134-139.
Xia F, Liang Y M, Xu L, et al. Herbal textual research on the *Astragalus complanatus* and the study of product specifications [J]. Chinese Medicine Modern Distance Education of China, 2017, 15(9): 134-139.

[4]Sham T T, Zhang H, Mok D K W, et al. Chemical analysis of Astragali Complanati Semen and its hypocholesterolemic effect using serum metabolomics based on gas chromatography-mass spectrometry[J]. Antioxidants, 2017, 6(3): 57.

[5]刘春宇, 顾振纶, 杜崇民, 等. 沙苑子黄酮对H_{22}荷瘤小鼠的肿瘤抑制作用及对免疫功能的影响[J]. 中成药, 2007, 29(11): 1690-1692.
Liu C Y, Gu Z L, Du C M, et al. Inhibitory effect of flavonoids from *Semen* Astragali Complanati on H_{22} tumor-bearing mice and its effect on immune function[J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2007, 29(11): 1690-1692.

[6]唐潇然, 王景霞, 付璐, 等. 沙苑子总黄酮对肾阳虚高脂血症模型大鼠ERα介导的调脂作用机制研究[J]. 中国中药杂志, 2018, 43(11): 2365-2371.
Tang X R, Wang J X, Fu L, et al. Effects of total flavonoids in Astragali Complanati Semen on liver lipid level and ERα expression on liver in hyperlipidemia rats with kidney-Yang deficiency pattern[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2018, 43(11): 2365-2371.

[7]Wang X, Xu X T, Wu P P, et al. Complanatuside alleviates inflammatory cell damage induced by pro-inflammatory cytokines in skin keratinocytes [J]. Frontiers in Chemistry, 2022, 10: 909651.

[8]杨瑾. 沙苑子的生物学效应及其作为运动补剂的应用前景[J]. 现代中药研究与实践, 2015, 29(1): 84-86.
Yang J. Biological effects of *Semen* astragali complanati Semen and its application prospect as sports supplement[J]. Research and Practice on Chinese Medicines, 2015, 29(1): 84-86.

[9]Fan X H, Zhang Q A, Yan Y Y, et al. Physicochemical properties and *in-vitro* antioxidant capacity of *Semen* Astragali Complanati wine[J]. CyTA - Journal of Food, 2017, 15(1):

1-10.

[10]张婷婷，柯创，秦路平，等.沙苑子本草考证[J].中草药，2020，51(16)：4348-4354.
Zhang T T，Ke C，Qin L P，et al. Herbal textual research of *Astragali Complanati Semen* [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs，2020，51(16)：4348-4354.

[11]魏金月.黄芩专用有机肥的肥效及对土壤肥力影响的研究[D].承德：承德医学院，2022.
Wei J Y. Study on fertilizer efficiency of special organic fertilizer for *Scutellaria baicalensis* and its effect on soil fertility [D].Chengde：Chengde Medical College，2022.

[12]古春梅，罗欧，李丽琴，等.药用白及施肥技术研究进展[J].现代农业科技，2021(8)：41-43.
Gu C M，Luo O，Li L Q，et al. Research progress on fertilization technology of medicinal *Bletilla striata*[J]. Modern Agricultural Science and Technology，2021(8)：41-43.

[13]刘惠娟.不同肥料配比对黄芪生长及有效成分积累的影响[D].太谷：山西农业大学，2017.
Liu H J. The effects of different proportion of fertilizer on the *Astragalus* growth and the accumulation of effective components[D]. Taigu：Shanxi Agricultural University，2017.

[14]苏海兰，郑梅霞，陈宏，等.氮磷钾配方施肥提高林下七叶一枝花产量和重楼皂苷含量[J].植物营养与肥料学报，2024，30(1)：128-136.
Su H L，Zheng M X，Chen H，et al. Optimum nitrogen，phosphorus and potassium combination increases the rhizome yield and saponin content of *Paris polyphylla*[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers，2024，30(1)：128-136.

[15]王祥，王育朋，安佳，等.氮磷钾配比施肥对蒙古黄芪药材形成的影响[J].分子植物育种，2023：1-16.
Wang X，Wang Y P，An J，et al. Effect of nitrogen，phosphorus and potassium ratio fertilization on the formation of Radix Astragali[J]. Molecular Plant Breeding，2023：1-16.

[16]罗长浩.不同施肥条件对黄精花椒林下栽培品质及产量的影响[D].杨凌：西北农林科技大学，2017.
Luo C H. Effects of different fertilization conditions on the quality and yield of the *Polygonatum sibiricum* red. under the Zanthoxylum bungeanum maxim. forest [D]. Yangling：Northwest A & F University，2017.

[17]陈伟松，刘均霞.桐梓县大豆“3414”田间肥效试验研究初探[J].耕作与栽培，2023，43(2)：92-93，98.
Chen W S，Liu J X. Study on field fertilization efficiency of "3414" with soybean in Tongzi County [J]. Tillage and Cultivation，2023，43(2)：92-93，98.

[18]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，2020：191.
Chinese Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of the People's Republic of China (Volume 1)[M]. Beijing：China Medical Science Press，2020：191.

[19]耿守保.秦艽、颠茄与丹参种子萌发的水热需求[D].杨凌：西北农林科技大学，2014.
Geng S B. Hydrothermal time model for germination of *Gentiana macrophylla* pall.，*Atropa belladonna* L. and Salvia miltiorrhiza bunge seeds[D]. Yangling：Northwest A & F University，2014.

[20]史丛晶，白浩东，李雨昕，等.基于熵权法结合灰色关联法和TOPSIS法的不同产地知母及盐知母质量评价研究[J].中国现代应用药学，2023，40(7)：873-880.
Shi C J，Bai H D，Li Y X，et al. Study on quality evaluation of Anemarrhenae Rhizoma and salt Anemarrhenae Rhizoma from different producing areas by gray correlation method and TOPSIS method based on entropy weight method[J]. Chinese Journal of Modern Applied Pharmacy，2023，40(7)：873-880.

[21]田艺心，高凤菊，曹鹏鹏.饱和D-最优设计在高蛋白大豆施肥优化中的应用[J].植物营养与肥料学报，2019，25(2)：343-350.
Tian Y X，Gao F J，Cao P P. Application of saturated D-optimal design for optimum fertilization in the production of high protein soybean [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers，2019，25(2)：343-350.

[22]张志伟，王宁，郎文培，等.不同复合肥料对小麦生长发育及肥料利用率的影响[J].农业科技通讯，2023(3)：119-121，142.
Zhang Z W，Wang N，Lang W P，et al. Effects of different compound fertilizers on wheat growth and fertilizer utilization rate[J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology，2023(3)：119-121，142.

[23]汪雪影，秦俊，张宪权，等.氮磷钾肥对盆栽绣球叶片性状的影响[J].浙江农业科学，2022，63(7)：1502-1507.
Wang X Y，Qin J，Zhang X Q，et al. Effect of nitrogen，phosphorus and potassium fertilizer on leaf traits of potted *Hydrangea macrophylla* Hanatemari[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences，2022，63(7)：1502-1507.

[24]Liu J T，Wang D N，Yan X L，et al. Effect of nitrogen，phosphorus and potassium fertilization management on soil properties and leaf traits and yield of *Sapindus mukorossi*[J]. Frontiers in Plant Science，2024，15：1300683.

[25]唐海龙.配方施肥对竹叶花椒生长和产量品质及土壤肥力的影响[D].雅安：四川农业大学，2019.
Tang H L. Effects of formula fertilization on growth，yield，quality and soil fertility of *Zanthoxylum armatum*[D]. Yaan：Sichuan Agricultural University，2019.

[26]Zhu X M，Han B J. Root water uptake and root nitrogen mass distributions of soybean under different nitrogen and water supply[J]. International Journal of Agriculture and Biology，2018，20：52-56.

[27]Barbosa N C，Pereira H S，Arruda E M，et al. Spatial distribution of phosphorus in the soil and soybean yield as function of fertilization methods[J]. Bioscience Journal，2018，34：88-94.

[28]王丹，侯俊玲，万春阳，等.中药材施肥研究进展[J].土壤通报，2011，42(1)：225-228.
Wang D，Hou J L，Wan C Y，et al. Progress of fertilization on Chinese medicinal materials [J]. Chinese Journal of Soil Science，2011，42(1)：225-228.

[29]高星，林云，王渭玲，等.蒙古黄芪对N、P、K的肥效响应

[J]. 西北农业学报, 2017, 26(12): 1845-1852.
Gao X, Lin Y, Wang W L, et al. Response of N, P, K nutrition application to *Astragalus mongholicus* [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2017, 26(12): 1845-1852.
[30]王红林, 左艳春, 严旭, 等. 刈割高度与施氮量对饲料桑全株产量及营养品质的影响[J]. 草业学报, 2021, 30(11): 203-211.
Wang H L, Zuo Y C, Yan X, et al. Effect of cutting height and nitrogen fertilizer rate on yield and nutritive value of whole-plant mulberry (*Morus alba*) [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(11): 203-211.
[31]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 combined application of nitrogen, phosphorus and potassium on yield and quality of *Astragalus* membranaceus [D]. Beijing: Beijing University of Chinese Medicine, 2017.

Changes in yield and quality of *Astragali complanati* Semen under different fertilization treatments

Luo Qingqing[1], Dong Huan[1], Cao Wei[1], Xing Xiaojun[2], Gao Shuli[2], Guo Kangya[1], Guo Yuan[1], Xu Peihua[2], Yang Xin[2], Duan Qimei[1*]

(*1.College of Chemistry and Pharmacy, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2.Shaanxi Lijun Modern Traditional Chinese Medicine Limited Company, Weinan 714000, China*)

Abstract: [Objective] The dry mature seeds of *Astragalus complanatus* R. Br., known as *Astragali complanati* Semen, hold high medicinal and nutritional value, with expanding market demand driving increased cultivation. This research examined the impact of targeted nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K) fertilization on the yield and quality of A. complanati Semen, aiming to provide optimal fertilization guidance for its cultivation. [Methods] Field trials were conducted in Dali County, Shaanxi Province, using a sophisticated three-factor, quadratic D-optimal design to evaluate the fertilization effects. Yield data from different plots informed a yield-based fertilizer efficiency model, while quality assessments based on water-soluble extracts, total flavonoids, calycosin-7-glucoside, astragaloside, and Ononin were performed to Gauge quality differences across treatments. The entropy-weighted gray correlation-TOPSIS method was used to comprehensively assess quality, resulting in a quality-based fertilization efficiency model. Frequency analysis then optimized these models, establishing recommended fertilization levels from the intersection of the optimal yield and quality strategies. [Results] Various fertilization treatments increased yield by 9.11% to 61.80%, with the F10 treatment ($N_3P_3K_1$; N: 135 kg·hm^{-2}, P_2O_5: 140 kg·hm^{-2}, K_2O: 47.84 kg·hm^{-2}) showing the most significant yield enhancement. Fertilization impact on yield ranked as P>N>K. The F7 treatment (N_2P_2; N: 80.50 kg·hm^{-2}, P_2O_5: 83.48 kg·hm^{-2}, K_2O: 0 kg·hm^{-2}) resulted in optimal quality of medicinal components, with N having the strongest effects on quality, followed by P and then K. The recommended fertilization range, balancing both yield and quality, was determined as N: 69.19~87.28 kg·hm^{-2}, P_2O_5: 82.43~103.89 kg·hm^{-2}, and K_2O: 0.00~67.68 kg·hm^{-2}. [Conclusion] Different NPK ratios variably influenced the yield and quality of *A. complanati* Semen. Applying an optimized nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizers combination can significantly enhance both its production and quality.

Keywords: Astragali Complanati Semen, Three factor quadratic D-saturation optimal design, Formula fertilization, Quality evaluation

(编辑:郭玥微)