

太空诱变膜荚黄芪种质资源 表型特征变异分析

李红玲¹, 陈 垣¹, 郭凤霞¹, 许宏亮², 李瑞霞¹

(1. 甘肃农业大学农学院/甘肃农业大学生命科学技术学院/甘肃省干旱生境作物学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730070;

2. 天津市现代中药资源研究企业重点实验室/天津天士力现代中药资源有限公司, 天津 300410)

摘要:以膜荚黄芪太空搭载种子建立的33D、22H群体及未搭载原种(CK)群体的SP₂代成药株为研究对象,对19个表型性状进行特征变异及多样性分析,以筛选具有优异性状的膜荚黄芪种质资源。结果表明:诱变后代群体的19个性状变异幅度、遗传多样性存在不同程度差异,33D、22H群体及CK群体地上部分的4个质量性状的变异系数CV范围分别为0.35~0.78、0.38~0.84、0.41~0.64,即变异幅度表现为22H>33D>CK,遗传多样性指数H'范围分别为1.67~2.13、1.66~2.02、1.44~2.21,即变化幅度为CK>33D>22H;7个数量性状的CV范围分别为0.17~0.62、0.17~0.67、0.20~0.83,H'范围分别为1.47~2.01、1.72~2.04、1.59~2.11,即变异幅度表现均为CK>22H>33D;8个产量构成性状的CV范围分别为0.09~0.53、0.15~0.55、0.09~0.97,即变化幅度为CK>22H>33D,H'范围分别为1.81~2.09、1.73~2.06、1.59~2.03,即变化幅度为33D>22H>CK。通过主成分因子分析将诱变后代群体植株的12个数量性状指标简化为4个主因子,33D和22H群体数量性状累计贡献率均大于CK,分别达68.669%和70.414%,并筛选出二级分枝数、单根干质量、有效根长、侧根数、根长、折干率可作为膜荚黄芪评价代表性指标;诱变后SP₂代地上部性状隶属函数值小于CK,产量构成性状隶属函数值大于CK。通过隶属函数和聚类分析将诱变后SP₂代的2个群体分别归为3类不同类型植株(即I、II和III型),第I类群为良好类、第II类群为优势类、第III类群为后备类,综合评价筛选出性状优异种质39份、产量构成性状优异种质16份、矮株型高产种质3份。

关键词:膜荚黄芪;太空诱变;表型特征;变异分析;种质筛选

中图分类号:S567; S335 **文献标志码:**A

Mutation analysis of phenotypic characteristics of *Astragalus membranaceus* germplasm resources induced by space mutagenesis

LI Hongling¹, CHEN Yuan¹, GUO Fengxia¹, XU Hongliang², LI Ruixia¹

(1. College of Agronomy, College of Life Sciences and Technology, Gansu Provincial State Key Lab of Aridland Crop Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China; 2. Tianjin Key Lab of Modern Chinese Medicine Resource Research Enterprise, Tianjin Tianshili Modern Chinese Medicine Resources Co., Ltd, Tianjin 300410, China)

Abstract: The 33D and 22H populations established by *Astragalus membranaceus* with seeds in space and the SP₂-generation adult strains without seeds in space were selected as the research objects. The characteristic variation and diversity of 19 phenotypic characters were analyzed to screen the germplasm resources of *Astragalus membranaceus* with excellent characters. The results showed that the variation amplitude and genetic diversity of 19 traits in mutagenic progeny population were different to various degrees. The variation coefficient CV of four quality traits in the 33D, 22H and CK populations were 0.35 to 0.78, 0.38 to 0.84, and 0.41 to 0.64, respectively, and the variation range was 22H>33D>CK. The range of genetic diversity index H' was 1.67 to 2.13, 1.66 to 2.02, and 1.44 to 2.21, respectively, and the variation range was CK>33D>22H. CV of the seven quantitative traits ranged from 0.17~0.62, 0.17~0.67 and 0.20~0.83, respectively. H' of genetic diversity index ranged from 1.47 to 2.01, 1.72

收稿日期:2023-07-11

修回日期:2023-10-07

基金项目:甘肃省农业农村厅(2022GSCYJQ07-33);甘肃省农牧厅(GARS-ZYC-1);校企合作企业项目(XDZY-(2017~2022)115)

作者简介:李红玲(1996-),女,甘肃渭源人,硕士研究生,研究方向为药用植物资源与利用。E-mail: 1744213372@qq.com

通信作者:陈垣(1963-),男,甘肃通渭人,教授,主要从事药用植物栽培与育种研究。E-mail: chenyan@gsau.edu.cn

郭凤霞(1963-),女,甘肃陇西人,教授,主要从事药用植物栽培与育种研究。E-mail: guofx@gsau.edu.cn

to 2.04, and 1.59 to 2.11, respectively, indicating the range of variation was CK>22H>33D. The variation coefficients of the eight yield components ranged from 0.09 to 0.53, 0.15 to 0.55, and 0.09 to 0.97, respectively, and the variation range was CK>22H>33D, the H' of genetic diversity index ranged from 1.81 to 2.09, 1.73 to 2.06 and 1.59 to 2.03, respectively, and the range of variation was 33D>22H>CK. By principal component factor analysis, 12 quantitative traits of mutant progeny plants were simplified into 4 principal factors. The cumulative contribution rate of quantitative traits in 33D and 22H populations was higher than those in CK, reaching 68.669% and 70.414%, respectively. The secondary branch number, single stem mass, effective root length, lateral root number, root length and drying rate were selected as the representative indexes for the evaluation of *Astragalus membranaceus*. After mutagenesis, membership function value of above-ground traits in SP₂-generation was less than CK, and membership function value of yield constituent traits was greater than CK. By membership function and cluster analysis, the two populations of SP₂-generation after mutagenesis were classified into three different types of plants-types I, II and III. Group I was the good type, Group II was the dominant type, and Group III was the reserve type. A comprehensive evaluation found 39 germplasm with excellent traits, 16 germplasm with excellent yield composition traits, and 3 high-yielding germplasm with dwarf type.

Keywords: *Astragalus membranaceus*; space mutagenesis; phenotypic characteristics; variation analysis; germplasm screening

膜荚黄芪 (*Astragalus membranaceus* (Fisch.) Bge.) 为豆科多年生草本药用植物, 以干燥根入药, 具有补气升阳、脱毒排脓、固表止汗、利水消肿、活血生津等多重功效, 主要用于气虚乏力、食少便溏等症, 为传统大宗药食同源中药材之一^[1-2]。人工栽培的膜荚黄芪主要分布于内蒙古、河北、甘肃、青海、吉林等省(自治区)^[3]。该植物体型高大, 根部分叉多且较为松散, 引种后易变鸡爪型散根而降低其商品价值^[4]。随着人为定向选择和中药材种源质量的下降, 出现种植模式杂乱和管理水平参差不齐等诸多问题, 使膜荚黄芪耐逆性、稳定性和品质降低。

航天育种, 又叫太空诱变育种, 是指利用航天器将农作物种子、组织、器官等诱变材料送入太空, 利用空间特殊环境的诱变作用, 使其产生变异, 再返回地面选育新种质、新材料、培育新品种的作物育种新技术。太空诱变主要通过空间微重力、辐射以及空间环境综合因素带来的复合效应^[5-6], 对药用植物的生长发育、生理生化、细胞结构、分子水平、药效成分等方面产生影响^[7-8]。目前, 经过太空诱变的药用植物共有 59 种, 例如丹参、黄芩、人参、三七、当归、甘草、肉苁蓉和枸杞等^[9], 多为经济价值较高的大宗药材。研究表明, 经太空诱变后, 药用植物株高、叶片数量和形状、药材产量和生育周期等生物学特性会发生改变, 如经太空诱变后丹参的茎秆变矮, 叶片增大^[10]。太空诱变后菘蓝 SP₄代的主根较对照显著增粗, 侧根变细、增长, 单根干质

量增加^[11]。还有研究表明, 太空诱变对当归种苗的物候特征、抗逆性、产量及质量具有显著影响^[12]。相比于传统育种方法, 太空诱变育种具有突变频率高、突变种类丰富、育种周期短和安全性高等优势, 在基因型复杂的中药材育种方面有巨大应用潜力^[13-16], 是积累和丰富新种质资源遗传多样性的有效途径, 也是培育新种质和选育新品种的现代育种技术^[17]。

近年来, 国内外学者对膜荚黄芪的研究大多集中于栽培技术、化学成分^[18]、药效成分^[19]等方面, 种质创新、表型性状变异特征及遗传多样性等方面研究较少。因此, 本研究以太空中特殊诱变环境条件对膜荚黄芪种子进行不同搭载时长诱变建立的 SP₂代群体(33D 和 22H) 及未搭载原种(CK) 为研究对象, 从生物学性状、变异特征及稳定性、性状多样性和种质资源创新等角度深入综合分析, 揭示太空诱变搭载后膜荚黄芪的性状变异及多样性特征, 并筛选出一批膜荚黄芪特异以及优异种质资源, 以期与分子育种技术相结合选育出高产稳产、适应性广和药效高的新品种, 为西北特色黄芪新品种选育与后续产业发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于甘肃省定西市陇西县巩昌镇园艺村(104°62'E、35°1.7'N, 海拔 1 766 m), 年降水量 445 mm 左右, 为温带大陆季风气候。该地属黄芪道

地产区,土壤为黄绵土,土质肥沃松软。种植地用 RC-4HC 记录仪测定土壤温湿度,测定土壤中最高温度为 20.9℃,最低温度为-10.5℃,平均温度为 20.6℃,最大湿度 99.9%,最低湿度为 6.2%,平均湿度 56.3%。

1.2 试验材料

膜荚黄芪种子于 2016 年由天津天士力现代中药资源有限公司申请国家航天管理局搭载,根据搭载要求将种子分成 3 份,一份留作地面对照(CK),一份(100 g)搭载“神州十一号”太空运行 33 d(33D),一份(20 g)搭载“长征 7 号”太空运行 22 h(22H),种子返回地面后封装于牛皮纸袋,在 4℃ 冰箱干燥保存。

搭载后的诱变种子(33D 和 22H)在 2017 年条播育苗产生 SP₁代,于冬前幼苗移栽鉴定,2019 年 SP₁代 3 年生植株采种获得 SP₂代种子,经甘肃农业

大学陈垣教授鉴定为膜荚黄芪种子,2020 年 SP₂代育苗并在 11 月鉴定筛选移栽,2021 年春季返青后得到 SP₂代 2 年生成药群体用于性状变异多样性分析及优异种质筛选。

1.3 表型性状指标

参照《植物新品种特异性、一致性和稳定性测试指南》NY/T2592-2014^[20]规定,分别在 33D、22H 和 CK 群体选种圃中随机选取表型性状明显的植株各 44 株,在 5—9 月中旬对地上部分进行表型性状观测和调查,数量性状包括株高、株幅、茎粗、基高、一级分枝数、二级分枝数和复叶数,质量性状包括茎秆茸毛、叶片茸毛、茎秆颜色和叶尖形状,其性状赋值见表 1。11 月中旬成药采挖测定产量,性状包括根长、根粗、单根鲜质量、单根干质量、折干率、有效根长(芦头到第一个侧根长度)、侧根数、芽数。

表 1 膜荚黄芪质量性状及其赋值

Table 1 Code designed for quality traits in *Astragalus membranaceus*

序号 No.	部位 Part	性状 Character	赋值 Assignment value for quality character
1	茎 Stem	茎秆表面茸毛(茸毛) Surface fuzz (fuzz)	无=0;疏=1;中=2;密=3 None =0; Sparse =1; Medium =2;Dense =3
2		花青苷显色(茎色) Anthocyanin color (stem color)	绿=0;1/4 紫=1;2/4 紫=2;3/4 紫=3;全紫=4 Green =0;1/4 purple =1;2/4 purple =2;3/4 purple =3;Full purple =4
3	叶 Leaf	上表面茸毛(叶毛) Upper surface fuzz(leaf fuzz)	无毛=1;有毛=2 Hairless =1; Less hair =2;
4		小叶顶部形状(叶片顶部尖形状) Apical shape of lobule(tip shape of leaf)	凹=0;平=1;圆=2;尖=3 Concave =0; Flat =1; Circle =2; Tip =3

1.4 综合分析

采用 Shannon-Weaver 多样性指数分析各项性状指标,利用公式(1)计算遗传多样性指数 H' ^[21]。

$$H' = - \sum P_i \ln P_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

式中, n 为某一性状表型级别数; P_i 为某性状第 i 级别内材料份数占总份数的百分比; \ln 为自然对数。数量性状划分为 10 个等级,1 级 $\leq X - 2\sigma$, 10 级 $> X + 2\sigma$, 每 0.5σ 为一级, X 为平均值, σ 为标准差。

采用隶属函数分析农艺性状,利用公式(2)计算各个指标的隶属值^[22]。

$$R(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (2)$$

式中, X_i 为指标测定值, X_{\min} 和 X_{\max} 分别为所有参试材料某一指标的最小值和最大值。

1.5 数据统计分析

利用 Excel 2010 对各性状数据进行整理、绘图、变异遗传多样性及隶属函数分析,用 SPSS 22.0 软

件处理数据并进行方差分析、因子分析和聚类分析。

2 结果与分析

2.1 多样性分析

2.1.1 膜荚黄芪地上部分生长发育动态变异分析 膜荚黄芪返青后生长发育动态如图 1 所示。在 5—8 月返青~营养生长阶段,3 个群体的株高、株幅、茎粗、一级分枝数、二级分枝数和复叶数均随生长发育进程推进快速增长,但一级分枝数返青结束后不再增加。与 CK 相比,33D、22H 群体的株高、株幅和复叶数增长缓慢,且搭载时间越长,增幅越小,即 CK>22H>33D;而 33D 和 22H 群体的茎粗、基高、一级分枝数和二级分枝数增加幅度显著高于 CK。8 月份膜荚黄芪进入生殖生长阶段,地上部分生长减缓,8 月中旬株高、株幅、茎粗、复叶数和二级分枝数达到峰值,进入地下部分药材根干物质积累与转化,地上部分停止生长,逐渐凋零,茎秆干枯。

2.1.2 地上部分质量性状多样性分析 如表 2 所示,33D 群体较 CK、22H 群体叶尖形状差异显著($P < 0.05$),其变异系数为 0.78,遗传指数为 1.88,即其性状在群体中表型较多,分布均匀。如图 2 所示,各群体质量性状变异频率各不相同,其 33D、22H 群体茎秆和叶片茸毛均浓密型占比最多,茎秆茸毛浓密型分别为 81.40% 和 76.74%,叶片茸毛浓密型分别为 62.79% 和 42.51%,均大于 CK 群体。33D 群体茎

秆颜色变异分布中半紫型占比最多,其频率为 44.19%,其次为绿茎、1/4 紫色、全紫,频率为 16.28%;22H 群体中茎秆颜色变异分布中绿茎型占比最多,其频率为 27.91%,其次 1/4 紫色、2/4 紫色、全紫,频率为 20.93%;CK 群体中半紫色及全紫色型占比最多,频率为 29.17%。叶尖形状变异分布情况中,其 33D 群体频率大小依次为圆、凹、尖、平,22H 和 CK 群体均为圆、尖、凹、平。

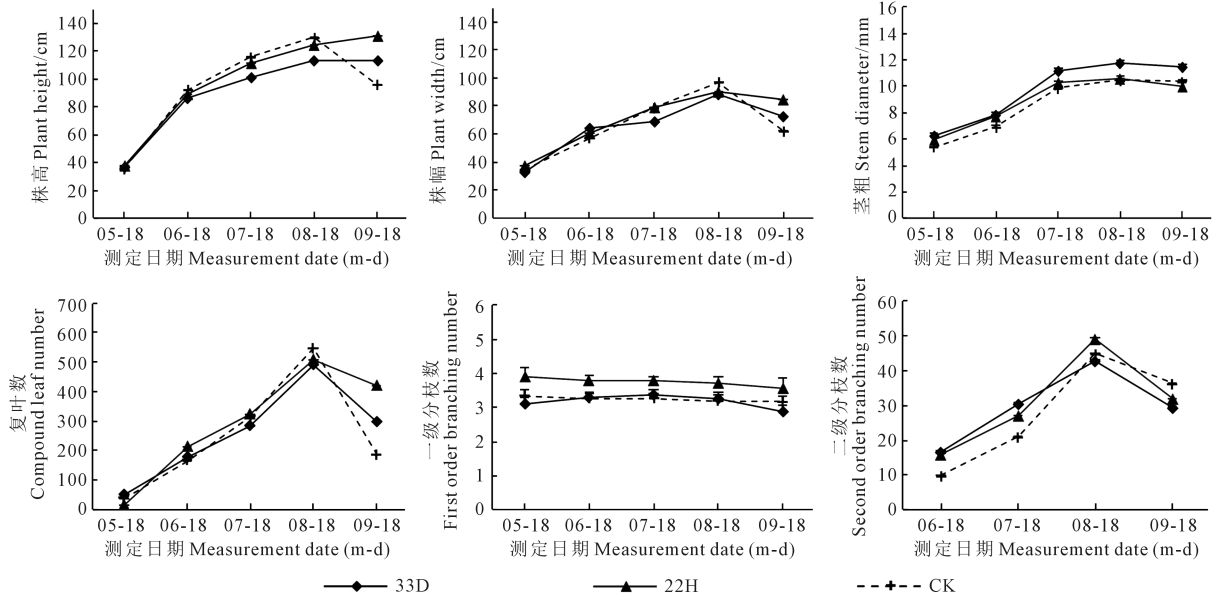


图 1 膜荚黄芪 SP₂ 代群体生长动态分析

Fig.1 Growth dynamics of *Astragalus membranaceus* in SP₂ generation

表 2 地上部分质量性状变异分析

Table 2 Variation analysis of quality traits in above-ground parts

指标 Index	处理 Treatment	平均值 Mean	最小值 Min	最大值 Max	变异 系数 CV	遗传 多样性 H'
茎秆茸毛 Stem fuzz	33D	2.61±0.14a	0	3	0.35	1.67
	22H	2.46±0.16a	0	3	0.44	1.77
	CK	2.18±0.18a	0	3	0.53	2.07
叶片茸毛 Leaf fuzz	33D	2.39±0.13a	1	3	0.36	1.89
	22H	2.09±0.15a	0	3	0.46	2.02
	CK	2.20±0.14a	0	3	0.41	2.01
茎秆颜色 Stem color	33D	1.96±0.19a	0	4	0.65	2.13
	22H	1.77±0.23a	0	4	0.84	1.87
	CK	2.25±0.22a	0	4	0.64	2.21
叶尖形状 of leaf	33D	1.39±0.16b	0	3	0.78	1.88
	22H	2.11±0.12a	0	3	0.38	1.66
	CK	1.93±0.13a	0	3	0.44	1.44

注:同列不同小写字母代表同一指标不同处理间差异显著($P < 0.05$),下同。

Note: Different lowercase letters in the same column represent significant differences between different treatments of the same index ($P < 0.05$), the same below.

2.1.3 地上部分数量性状多样性分析 8月中旬地上部分性状生长发育达到峰值,其数量性状变异分析如表 3 所示,33D、22H 与 CK 群体的株高、株幅、基高和二级分枝数间差异显著($P < 0.05$),诱变后代群体与 CK 的二级分枝数间差异显著($P < 0.05$);3 个群体间茎粗、一级分枝数和复叶数均差异不显著($P > 0.05$)。从变异程度看,33D、22H 和 CK 群体 CV 范围分别为 0.17~0.62、0.17~0.67 和 0.20~0.83,其 CV 大小依次为复叶数、二级分枝数、一级分枝数、基高、株高、株幅(茎粗);复叶数、二级分枝数、一级分枝数、茎粗(基高、株幅、株高;二级分枝数、复叶数、株幅、一级分枝数、基高、茎粗、株高。从遗传多样性指数看,33D、22H 和 CK 群体数量性状遗传指数 H' 范围分别为 1.47~2.01、1.72~2.04 和 1.59~2.11,其 H' 大小依次为茎粗、株高、株幅、基高、二级分枝数、复叶数、一级分枝数;株高、基高、株幅、二级分枝数、一级分枝数、茎粗、复叶数;株高、株幅、茎粗、复叶数、二级分枝数、基高、复叶数、一级分枝数。

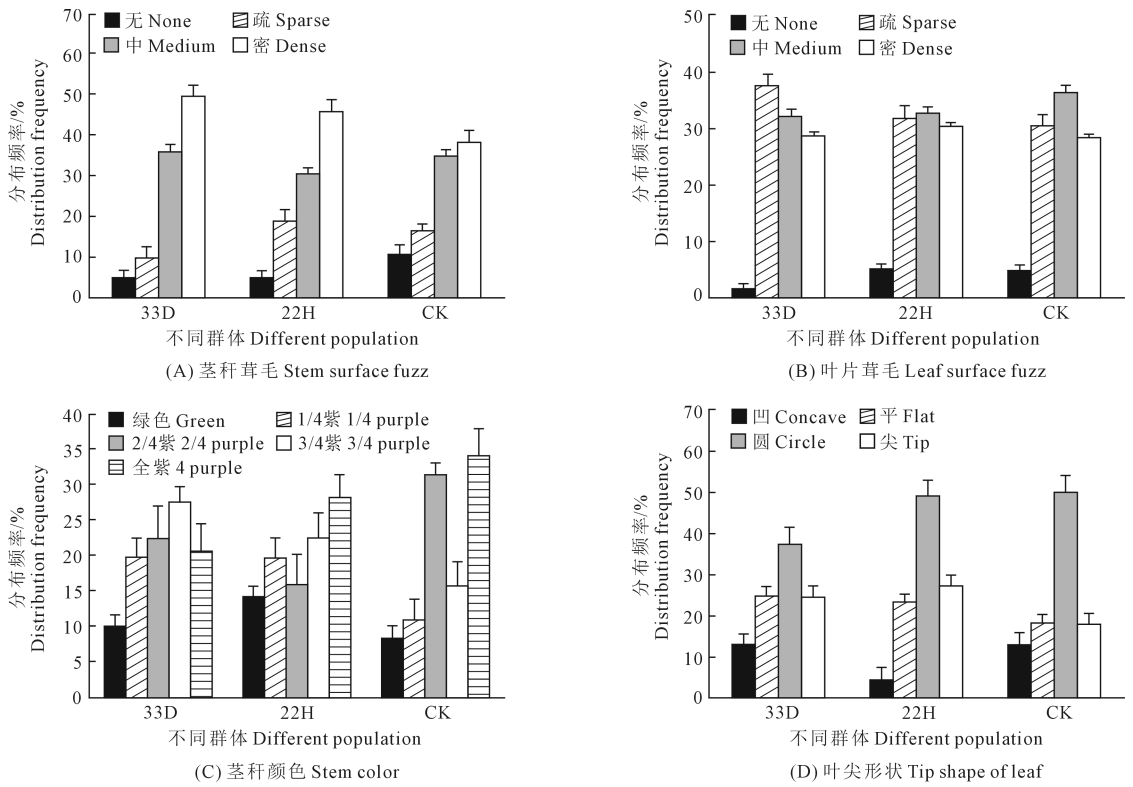


图 2 地上部分质量性状级别分布频率

Fig.2 Grade distribution frequency of quality traits in above-ground parts

表 3 地上部分性状遗传多样性指数变异分析

Table 3 Analysis of genetic diversity index variation of above-ground characters

指标 Index	处理 Treatment	均值 Mean	最小值 Min	最大值 Max	变异系数 CV	遗传多样性 H'
株高 Plant height /cm	33D	114.25±3.09b	71.80	164.30	0.18	1.98
	22H	125.80±3.16a	70.80	172.50	0.17	2.04
	CK	130.38±3.96a	71.50	205.30	0.20	2.11
株幅 Plant width/cm	33D	77.87±2.04b	56.20	674.00	0.17	1.94
	22H	91.46±3.17a	56.50	148.20	0.23	1.88
	CK	97.28±5.62a	26.50	192.30	0.40	2.01
基高 Based height /mm	33E	3.21±0.13a	2.30	5.60	0.21	1.90
	22H	3.67±0.13ab	2.10	5.60	0.23	2.00
	CK	3.38±0.14b	1.60	5.50	0.27	1.76
茎粗 Stem diameter/mm	33D	8.91±0.23a	6.12	12.27	0.17	2.01
	22H	9.09±0.32a	4.71	18.10	0.23	1.76
	CK	9.29±0.34a	4.73	14.18	0.24	1.91
一级分枝数 Basal branch	33D	3.34±0.18a	1.00	7.00	0.36	1.47
	22H	3.75±0.30a	1.00	11.00	0.54	1.82
	CK	3.31±0.19a	1.00	6.00	0.39	1.59
二级分枝数 Secondary branch	33D	31.18±2.51b	8.00	95.00	0.53	1.82
	22H	26.43±2.35b	0.00	76.00	0.59	1.87
	CK	41.37±5.20a	2.00	143.00	0.83	1.78
复叶数 Compound leaf number	33D	518.11±48.19a	112.00	1330.00	0.62	1.80
	22H	519.79±52.33a	38.00	1824.00	0.67	1.72
	CK	555.88±47.22a	97.00	1623.00	0.56	1.85

2.1.4 产量构成性状多样性分析 膜荚黄芪 SP₂代群体产量构成性状指标分析如表 4 所示,与 CK 相比,33D、22H 群体根长、单根鲜质量、单根干质量、折干率、侧根数和芽数均无显著变化 ($P>0.05$),根粗显著增加,有效根长显著降低 ($P<0.05$)。33D、22H、CK 群体变异系数 CV 范围分别为 0.09~0.53、0.15~0.55、0.09~0.97,即变化幅度 CK>22H>33D,遗传多样性指数 H' 范围分别为 1.81~2.09、1.73~2.06、1.59~2.03,分别表现为根长>根粗>芽数>单根鲜质量=折干率>侧根数>有效根长>单根干质量、根长>芽数>单根干质量>根粗>有效根长>单根鲜质量>折干率>侧根数、芽数>根粗>单根鲜质量>折干率>根长>单根干质量>侧根数>有效根长,诱变群体 33D、22H 根部形态变异方向基本一致,而与 CK 群体均不一致。

2.2 主成分因子分析

对膜荚黄芪 SP₂代群体性状进行主成分因子分析,提取特征值大于 1 的主成分,将 12 个指标简化为 4 个因子,诱变后代 33D、22H 群体累计贡献率均大于 CK 群体,分别达 68.669% (33D)、70.414% (22H)、66.637% (CK),包含了形态性状指标的绝大部分信息(表 5)。33D 群体第 1 主成分特征值为 4.219,贡献率为 35.160%,株高、株幅、茎粗、二级分枝数、复叶数、根粗、单根鲜质量、单根干质量、折干

率、侧根数在因子 1 中占最大载荷量,在因子 2 中有效根长占最大载荷量,根长在因子 4 中占最大载荷量;22H 群体的第 1 主成分特征值为 3.900,贡献率为 32.500%,株幅、二级分枝数、复叶数、根粗、单根干质量、侧根数在主因子 1 中占最大载荷量,株高、茎粗、有效根长在因子 2 中占最大载荷量,在因子 3 中单根鲜质量、折干率占最大载荷量,根长在因子 4 中占最大载荷量;CK 群体第 1 主成分特征值为 3.402,贡献率为 28.352%,株高、株幅、茎粗、二级分枝数、复叶数、根粗、单根鲜质量、单根干质量、折干率、侧根数在因子 1 中占最大载荷量,在因子 2 中根长、侧根数占最大载荷量,折干率、有效根长分别在因子 3、因子 4 中占最大载荷量。

2.3 隶属函数分析

诱变后代群体表型性状按平均隶属函数值排序综合分析如表 6 显示,诱变后代群体地上部分性状隶属函数值整体小于 CK,产量构成性状隶属函数值整体均大于 CK。33D 群体产量性状综合排名第一的为 33D-6,其隶属函数值为 0.680,排名 2~10 的种质隶属函数值介于 0.456~0.595 之间;22H 群体产量性状综合排名第一的为 22H-2,前 5 名种质平均隶属函数值较为接近,均大于 0.6,排名 6~10 的种质隶属函数值介于 0.548~0.565 之间。

表 4 产量构成性状遗传多样性指数变异分析

Table 4 Analysis of genetic diversity index variation of yield component characters

指标 Index	处理 Treatment	均值 Mean	最小值 Min	最大值 Max	变异系数 CV	遗传多样性 H'
根长 Root length/cm	33D	35.01±1.15a	18.60	51.40	0.22	2.09
	22H	35.46±1.26a	17.80	51.00	0.24	2.06
	CK	36.88±1.36a	11.20	62.10	0.26	1.84
根粗 Root diameter/mm	33D	24.39±0.64a	12.82	33.35	0.17	2.03
	22H	25.47±0.85a	14.21	36.59	0.22	1.96
	CK	21.40±0.77b	11.14	37.24	0.24	1.97
单根鲜质量 Fresh mass per root/g	33D	170.80±11.54a	59.45	438.24	0.45	1.89
	22H	188.79±12.97a	49.79	390.72	0.46	1.87
	CK	173.95±13.10a	19.90	432.42	0.53	1.92
单根干质量 Dry mass per root/g	33D	54.19±3.43a	22.34	152.26	0.42	1.81
	22H	60.84±4.16a	14.11	115.96	0.45	1.98
	CK	62.25±4.98a	5.33	188.32	0.56	1.79
折干率/% Drying rate	33D	67.12±0.92a	54.42	87.51	0.09	1.89
	22H	66.67±1.55a	25.95	82.87	0.15	1.77
	CK	64.34±0.82a	48.35	77.01	0.09	1.91
有效根长 Effective root length/cm	33D	3.31±0.27b	0.00	11.30	0.53	1.82
	22H	3.69±0.30b	1.00	9.00	0.55	1.92
	CK	5.05±0.74a	0.30	27.60	0.97	1.59
侧根数 Lateral root number	33D	12.48±0.74a	4.00	26.00	0.39	1.84
	22H	9.91±0.75b	3.00	33.00	0.50	1.73
	CK	11.34±0.76ab	4.00	30.00	0.44	1.76
芽数 Bud number	33E	12.32±0.88a	0.00	24.00	0.47	1.98
	22H	13.79±1.01a	1.00	29.00	0.49	2.00
	CK	11.82±0.89a	2.00	27.00	0.50	2.03

表 5 膜荚黄芪 12 个数量性状主成分分析

Table 5 Principal component analysis of 12 quantitative characters of *Astragalus membranaceus*

性状 Trait	33D				22H				CK			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
株高 Plant height	0.550	-0.152	-0.028	0.135	0.509	0.640	-0.093	-0.036	0.501	-0.618	0.062	0.346
株幅 Plant width	0.336	-0.551	0.286	-0.045	0.591	0.279	0.348	0.242	0.553	-0.223	-0.597	0.095
茎粗 Stem diameter	0.506	0.121	-0.651	-0.007	0.371	0.430	0.071	0.259	0.671	-0.260	0.015	0.242
二级分枝数 Secondary branch number	0.818	-0.197	-0.064	0.128	0.798	0.315	-0.206	-0.227	0.618	-0.229	-0.384	-0.137
复叶数 Compound leaf number	0.683	0.009	-0.491	0.157	0.818	0.233	-0.324	-0.151	0.739	-0.067	-0.066	-0.143
根长 Root length	0.377	0.478	0.194	0.592	0.381	-0.307	-0.009	0.757	0.112	0.583	-0.376	0.384
根粗 Root diameter	0.509	0.258	-0.060	-0.528	0.522	-0.616	-0.044	0.088	0.417	0.266	0.269	-0.471
单根鲜质量 Fresh mass per root	0.791	0.130	0.503	-0.201	0.606	-0.242	0.660	-0.098	0.731	0.323	0.469	0.193
单根干质量 Dry mass per root	0.776	-0.208	0.471	0.057	0.834	-0.399	0.071	0.001	0.777	0.400	0.275	0.115
折干率 Drying rate	0.234	0.633	0.099	-0.526	-0.412	0.184	0.781	-0.039	-0.100	-0.257	0.639	0.318
有效根长 Effective root length	-0.334	0.538	0.262	0.391	-0.144	0.689	0.127	0.321	-0.332	0.167	-0.112	0.740
侧根数 Lateral root number	0.785	0.180	-0.135	0.188	0.424	0.000	0.359	-0.383	0.148	0.712	-0.161	0.012
特征值 Eigenvalue	4.219	1.457	1.365	1.199	3.900	2.027	1.481	1.042	3.402	1.833	1.467	1.295
贡献率 Eigenvalue/%	35.160	12.145	11.372	9.992	32.500	16.890	12.339	8.685	28.352	15.272	12.221	10.793
累计贡献率 Cumulative contribution rate/%	35.160	47.305	58.677	68.669	32.500	49.390	61.729	70.414	28.352	43.623	55.844	66.637

2.4 聚类分析

由图 3 可知,在欧氏距离为 5 处,33D、22H 和 CK 这 3 个群体的各 44 份样品均聚为 3 大类群,各类群的性状特征见表 7。33D、22H 群体第 I 类群分别包含 27 份、28 份材料,与 CK 各类群相比,其性状特征为植株矮小紧凑,分枝较少,复叶稀疏,根形粗长,侧根数及芽数较少。33D、22H 群体第 II 类群分别包含 12 份、14 份材料,与 CK 相比,其植株矮小松散,分枝较少,根部粗长,且 22H 根形粗大、侧根数少,优于 33D。33D、22H 群体第 III 类群分别包含 5 份、2 份材料,与 CK 及其余各类群相比,33D 植株高大紧凑,分枝、复叶浓密,根部粗大,侧根数较多,根长较长;22H 群体植株高大,复叶稀疏,根形细小,侧根数少。

诱变后代 33D、22H 各类群依性状平均隶属值排名分为良好类(第 I 类)、优势类(第 II 类)及后备类(第 III 类),其中地上部分性状排名后 10 位的材料均分布在第 I 类群。33D 群体地下性状排名前 10 位的材料,在第 I 类群分布 4 份,第 II 类群分布 3 份,第 III 类群分布 3 份;排名后 10 位的材料,在第 I 类群分布 8 份,第 II 类群分布 1 份,1 份种质分布在第 III 类群。22H 群体地下性状排名前 10 位的材料,5 份分布在第 I 类群,4 份分布在第 II 类群,1 份分布在第 III 类群;排名后 10 位的材料,在第 I 类群分布 7 份,第 II 类群分布 3 份,第 III 类群没有分布。

通过以上分析,筛选出产量构成性状优异株型材料 16 份,矮株型高产的种质 3 份(22H-28、22H-42 和 33D-17)作为新品种选育材料进一步筛选鉴定。

2.5 综合评价

性状指标值与 F 值进行相关性分析,如表 8 所示,除根粗、折干率外,诱变群体 22H 各性状指标与 F 值呈极显著正相关($P < 0.01$);33D 群体中根长、单根鲜质量、侧根数与 F 值呈极显著正相关($P < 0.01$),二级分枝数、单根干质量与 F 值呈显著正相关($P < 0.05$);CK 除株幅外,其余性状指标与 F 值均有相关性,茎粗、单根干质量、单根鲜质量与 F 值均呈极显著相关性($P < 0.01$)。

对膜荚黄芪诱变后代群体的 12 个性状指标值进行标准化处理,求得各种质的 4 个主成分得分,将 4 个主成分进行归一化处理,计算出 33D 群体各成分权重系数分别为 0.670、0.185、0.072、0.074,22H 群体权重系数分别为 0.440、0.152、0.275、0.132,最后求得每份种质材料的综合得分 F 值进行综合评价, F 值的变化范围分别介于 0.291~1.146 和 0.204~0.642。如表 9 所示,根据 F 值进行排序得出 46 份诱变种质的综合得分大于 0.5,其中包含 33D 种质 36 份(第 I 类群 20 份,第 II 类群 11 份,第 III 类群 5 份)、22H 种质 10 份(第 I 类群 3 份,第 II 类群 5 份,第 III 类群 2 份),结合聚类分析可知,39 份种质综合评价最佳,可作为优异育种资源加以利用。

表 6 膜荚黄芪表型性状隶属函数值

Table 6 Membership function values of phenotypic traits of *Astragalus membranaceus*

排序 No.	地上部分性状指标平均隶属值 Average membership value of above-ground character index						产量构成性状指标平均隶属值 Average membership value of yield composition character index					
	株号 Code	均值 Mean	株号 Code	均值 Mean	株号 Code	均值 Mean	株号 Code	均值 Mean	株号 Code	均值 Mean	株号 Code	均值 Mean
1	33D-6	0.760	22H-38	0.736	CK-32	0.780	33D-6	0.680	22H-2	0.649	CK-33	0.614
2	33D-3	0.592	22H-37	0.573	CK-46	0.654	33D-17	0.595	22H-37	0.637	CK-11	0.563
3	33D-18	0.569	22H-34	0.556	CK-38	0.594	33D-26	0.581	22H-12	0.631	CK-44	0.559
4	33D-32	0.554	22H-2	0.540	CK-43	0.582	33D-11	0.563	22H-8	0.614	CK-40	0.542
5	33D-16	0.547	22H-1	0.482	CK-26	0.563	33D-28	0.554	22H-7	0.608	CK-45	0.523
6	33D-34	0.507	22H-12	0.460	CK-14	0.539	33D-22	0.545	22H-6	0.565	CK-28	0.515
7	33D-11	0.505	22H-6	0.458	CK-11	0.536	33D-16	0.517	22H-1	0.561	CK-20	0.479
8	33D-13	0.495	22H-14	0.457	CK-48	0.535	33D-33	0.510	22H-28	0.552	CK-10	0.477
9	33D-33	0.477	22H-11	0.457	CK-6	0.514	33D-8	0.465	22H-20	0.551	CK-17	0.471
10	33D-9	0.465	22H-9	0.443	CK-49	0.509	33D-34	0.456	22H-42	0.548	CK-38	0.466
35	33D-2	0.290	22H-21	0.283	CK-37	0.250	33D-12	0.339	22H-27	0.387	CK-36	0.302
36	33D-19	0.279	22H-42	0.279	CK-2	0.245	33D-18	0.332	22H-36	0.385	CK-23	0.297
37	33D-35	0.277	22H-30	0.275	CK-15	0.239	33D-42	0.329	22H-15	0.380	CK-29	0.291
38	33D-17	0.271	22H-25	0.269	CK-44	0.237	33D-36	0.316	22H-31	0.373	CK-15	0.287
39	33D-10	0.264	22H-29	0.258	CK-42	0.237	33D-35	0.309	22H-17	0.310	CK-18	0.282
40	33D-39	0.256	22H-40	0.238	CK-8	0.236	33D-20	0.284	22H-22	0.306	CK-32	0.263
41	33D-7	0.254	22H-28	0.231	CK-16	0.215	33D-39	0.267	22H-35	0.273	CK-34	0.258
42	33D-14	0.235	22H-5	0.178	CK-40	0.190	33D-7	0.223	22H-21	0.256	CK-21	0.233
43	33D-38	0.200	22H-22	0.147	CK-5	0.179	33D-5	0.176	22H-32	0.239	CK-30	0.232
44	33D-5	0.156	22H-43	0.092	CK-21	0.067	33D-37	0.099	22H-33	0.185	CK-5	0.194

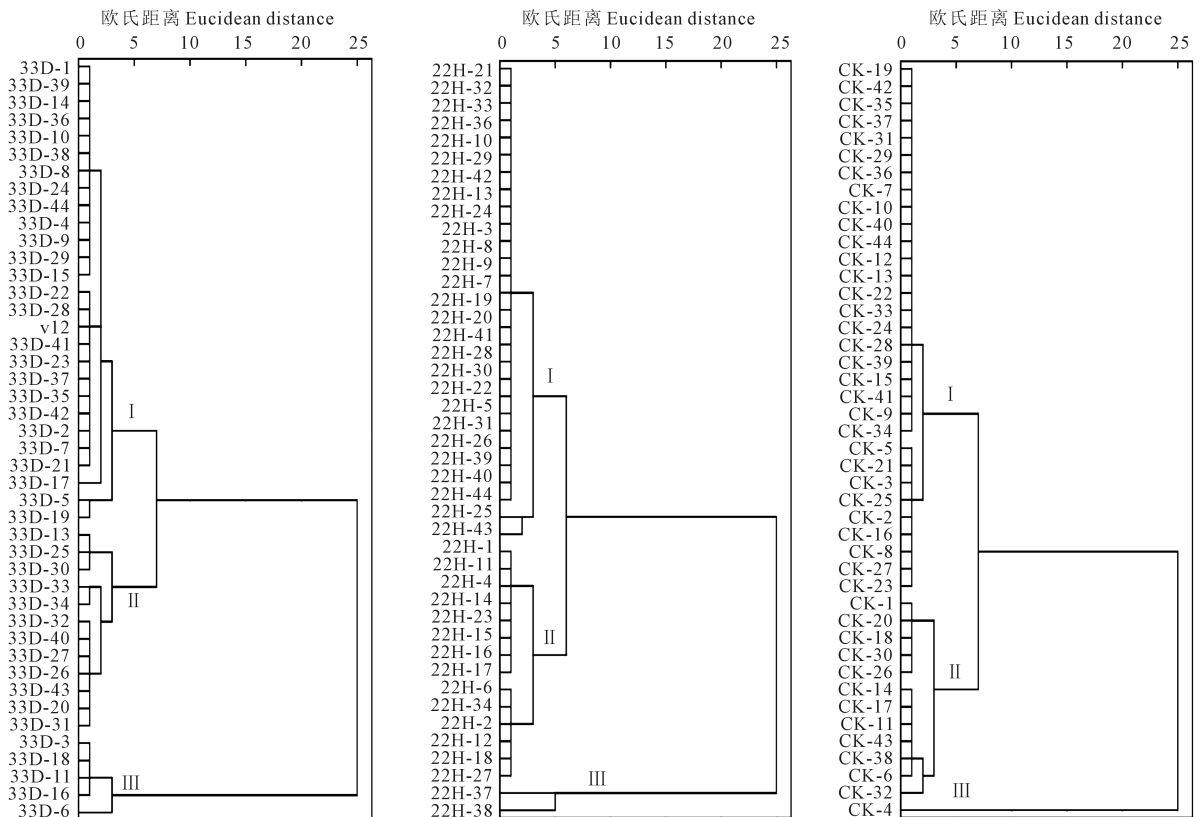


图 3 33D、22H 和 CK 群体表型性状聚类结果

Fig.3 Cluster dendrogram based on phenotypic traits in 33D, 22H and CK groups

表7 各类群种质的农艺性状特征

Table 7 Agronomic character characteristics of germplasm of each group

指标 Index	项目 Item	33D-I	33D-II	33D-III	22H-I	22H-II	22H-III	CK-I	CK-II	CK-III
株高/cm	均值 Mean	110.54	114.78	133.04	120.91	128.94	165.10	128.14	139.07	106.80
Plant height	变异系数 CV	0.16	0.22	0.13	0.16	0.15	0.06	0.22	0.12	
株幅/cm	均值 Mean	75.34	82.53	80.34	84.74	102.31	78.32	102.08	93.19	86.50
Plant width	变异系数 CV	0.12	0.23	0.21	0.25	0.18	0.54	0.38	0.52	
基高/cm	均值 Mean	3.87	3.75	4.32	3.65	3.64	3.90	3.19	3.93	3.60
Plant base high	变异系数 CV	0.23	0.21	0.39	0.27	0.16	0.22	0.29	0.15	
茎粗/mm	均值 Mean	8.52	8.56	10.77	8.81	9.54	7.40	8.89	8.89	10.08
Stem diameter	变异系数 CV	0.16	0.26	0.09	0.28	0.13	0.53	0.25	0.42	
一级分枝数	均值 Mean	3.26	4.08	3.20	3.35	4.14	3.43	3.19	3.43	3.00
Basal branch number	变异系数 CV	0.42	0.43	0.41	0.65	0.39	0.57	0.35	0.47	
二级分枝数	均值 Mean	23.70	40.25	49.80	16.50	39.57	30.71	43.08	49.21	42.00
Secondary branch number	变异系数 CV	0.52	0.24	0.52	0.40	0.22	0.66	0.92	0.91	
复叶数	均值 Mean	311.11	691.42	1220.00	302.23	782.79	601.52	420.77	634.57	1623.00
Compound leaf number	变异系数 CV	0.31	0.17	0.07	0.34	0.22	0.77	0.38	0.54	
根长/cm	均值 Mean	34.39	34.43	39.80	34.72	34.29	28.11	37.33	32.37	43.10
Root length	变异系数 CV	0.23	0.18	0.21	0.24	0.23	0.57	0.31	0.40	
根粗/mm	均值 Mean	23.92	24.23	27.35	24.70	26.41	20.83	21.02	19.26	24.58
Root diameter	变异系数 CV	0.21	0.10	0.10	0.23	0.21	0.54	0.19	0.43	
单根鲜质量/g	均值 Mean	90.14	110.62	157.14	106.31	148.08	121.54	108.66	141.18	163.65
Fresh mass per root	变异系数 CV	0.64	0.54	0.71	0.64	0.49	0.69	1.01	0.84	
单根干质量/g	均值 Mean	50.86	56.06	67.65	53.02	71.91	99.16	55.61	71.99	69.64
Dry mass per root	变异系数 CV	0.34	0.33	0.48	0.47	0.39	0.12	0.60	0.50	
有效根长/cm	均值 Mean	3.68	2.81	2.54	3.63	3.71	2.99	4.43	5.19	3.50
Effective root length	变异系数 CV	0.55	0.40	0.39	0.59	0.52	0.64	1.04	1.20	
侧根数	均值 Mean	10.89	13.67	18.20	9.23	11.21	9.25	11.54	12.29	9.00
Lateral root number	变异系数 CV	0.41	0.30	0.29	0.35	0.65	0.72	0.46	0.50	
芽数	均值 Mean	11.78	12.92	13.80	12.19	16.57	14.50	13.19	12.30	6.00
Bud number	变异系数 CV	0.53	0.42	0.35	0.51	0.40	0.57	0.44	0.48	

注:CK-III仅有1株,故不能计算CV。

Note: CK-III has only one plant, so CV cannot be calculated.

表8 性状指标性值与综合得分(F值)的相关系数

Table 8 Correlation coefficient between trait index value and composite score

指标 Index	33D	22H	CK
株高 Plant height	0.196	0.557 **	0.203
株幅 Plant width	0.112	0.798 **	-0.029
茎粗 Stem diameter	0.069	0.515 **	0.397 **
二级分枝数 Secondary branch number	0.298 *	0.507 **	0.014
复叶数 Compound leaf number	0.277	0.460 **	0.293
根长 Root length	0.650 **	0.430 **	0.325 *
根粗 Root diameter	0.018	0.091	0.240
单根鲜质量 Fresh mass per root	0.421 **	0.589 **	0.885 **
单根干质量 Dry mass per root	0.373 *	0.447 **	0.816 **
折干率 Drying rate	0.208	0.137	0.277
有效根长 Effective root length	-0.001	0.354 *	0.219
侧根数 Lateral root number	0.483 **	0.298 *	0.321 *

注:*代表差异显著($P<0.05$), **代表差异极显著($P<0.01$)。Note: * represents significant differences ($P<0.05$), ** represents extremely significant differences ($P<0.01$).

3 讨论

3.1 太空诱变膜荚黄芪 SP₂ 代种质资源多样性分析

多样性分析对新品种培育以及植物种质资源评价与利用具有重要的意义,是植物遗传、育种、保护和进化的重要组成部分^[23]。表型性状变异是生物遗传多样性在形态学水平上的表现^[24],同一植物不同品种甚至不同个体间表型性状也会出现不同程度的差异,其个体间性状差异直接影响品种改良的效果^[25]。相对于分子标记,基于植物表型性状对个体进行鉴定和分类更为直观且简便,可从整体上反映植物的多样性程度,该方法已被广泛应用于各类作物种质资源的研究中^[26]。本研究对太空诱变33D、22H群体及CK群体SP₂代植株地上部分17个性状进行动态观测发现,与CK相比,诱变后群体地上部分长势减弱,较迟进入生殖生长阶段,且植株较矮,株型紧凑,复叶稀疏,茎秆较粗,分枝数较多,根部粗大,特别是22H群体在返青期个体间形态差异尤为显著。

表 9 性状指标综合得分 (F 值)Table 9 Comprehensive score of character index (F value)

类群 Group	株号 Code	F 值 F value	类群 Group	株号 Code	F 值 F value	类群 Group	株号 Code	F 值 F value	类群 Group	株号 Code	F 值 F value
I	33D-10	0.891	I	33D-12	0.725	II	33D-13	0.829	I	22H-7	0.572
I	33D-5	0.887	I	33D-42	0.680	II	33D-25	0.810	I	22H-13	0.549
I	33D-14	0.860	I	33D-41	0.679	II	33D-27	0.746	I	22H-41	0.513
I	33D-15	0.856	I	33D-39	0.642	II	33D-40	0.742	II	22H-1	0.642
I	33D-8	0.846	I	33D-24	0.625	II	33D-31	0.577	II	22H-12	0.617
I	33D-2	0.827	I	33D-23	0.603	II	33D-34	0.535	II	22H-2	0.584
I	33D-7	0.824	I	33D-28	0.578	II	33D-20	0.524	II	22H-14	0.517
I	33D-22	0.818	I	33D-29	0.529	III	33D-6	1.146	II	22H-6	0.517
I	33D-1	0.817	II	33D-32	0.911	III	33D-16	0.872	III	22H-37	0.585
I	33D-21	0.806	II	33D-33	0.906	III	33D-11	0.809	III	22H-38	0.505
I	33D-17	0.785	II	33D-43	0.863	III	33D-3	0.669			
I	33D-9	0.765	II	33D-26	0.846	III	33D-18	0.557			

遗传多样性指数是评价不同种质间性状变异程度的综合指标,其数值越高说明变异类型越多、变异程度越高、变异幅度越大,遗传多样性越丰富^[27]。本研究通过对膜荚黄芪诱变后 19 个性状的 Shannon-Wiener 遗传多样性指数 (H') 分析发现,变异系数 CV 和遗传多样性指数 H' 表现规律不一致,诱变后代群体的数量性状变异幅度较小,且地下部分数量性状存在丰富的遗传多样性,这与谢向誉等^[28]对 48 份广西地方核心食用木薯种质资源的 41 个表型性状变异系数和多样性指数分析结果一致。本研究中诱变后代群体的各性状变异幅度、遗传多样性存在一定差异,其质量性状大于 CK,数量性状小于 CK;且 22H 群体各性状变异幅度大于 33D,其地上部分性状遗传多样性小于 CK,地下部分性状遗传多样性大于 CK,表明膜荚黄芪诱变群体后代性状表现较为稳定,是优良品种选育的最佳种质,为膜荚黄芪优良性状的遗传改良与新品种选育提供可靠依据。

3.2 太空诱变膜荚黄芪 SP_2 代种质资源因子分析

因子分析作为一种多元分析方法,能够分析变量之间相关系数矩阵内部结构,从而将多个相关变量综合为少数几个可以涵盖原始变量的主因子^[29]。本研究对膜荚黄芪 SP_2 代性状进行主成分因子分析(表 5),提取特征值大于 1 的主成分,将 12 个指标简化为 4 个因子,诱变后代 33D、22H 群体及 CK 群体第 1 主成分因子累计贡献率分别为 35.160%、32.500%、28.352%,包含了形态性状指标的绝大部分信息。在主因子 1 中 33D、22H 群体及 CK 群体分别解释了 10 个、6 个、8 个性状指标,占载荷量最大的指标分别为二级分枝数(0.818)、单根干质量(0.834)、单根干质量(0.777);在主因子 2 上分别解释了 1 个(有效根长)、3 个(株高、茎粗、有效根长)、2 个(根长、侧根数)性状指标,占载荷量最大

的分别为有效根长(0.538)、有效根长(0.689)、侧根数(0.712);主因子 3 上解释的性状指标分别为 0、2 个(单根鲜质量、折干率)、1 个(折干率),在主因子 4 上解释的性状分别为根长、根长、有效根长;这与赵宝军等^[30]对 53 个核桃杂交后代单株的 16 个产量性状进行变异性、相关性、因子分析和综合评价的结果相一致。综上可知,二级分枝数、单根干质量、有效根长、侧根数、根长、折干率是造成诱变群体种质表型差异的主要性状因子,也可作为膜荚黄芪种质的性状评价指标。

3.3 太空诱变膜荚黄芪 SP_2 代性状隶属函数及聚类综合评价

聚类分析和隶属函数分析是种质资源综合评价的必要手段,已在种质资源研究中广泛应用^[31-33]。使用隶属函数对多指标进行综合评价,提高了种质资源综合评价的准确性,使试验结果更加可靠^[33]。本研究利用隶属函数平均值对太空诱变膜荚黄芪 SP_2 代地上部分性状和产量构成性状进行分析发现(表 7),与 CK 相比,33D 和 22H 群体地上部分长势减弱,地上部性状表现优良植株显著减少,而产量构成性状表现优异的植株显著增加,但由于表型性状易受环境条件和人为因素影响,使其数值型和质量型性状变异具有不确定性,应结合分子标记技术对太空诱变膜荚黄芪种质性状进行更加深入的鉴定和验证。本研究基于 9 个产量构成性状隶属函数值,共筛选膜荚黄芪产量性状表现优良种质 22 份;同时对 33D、22H 及 CK 群体各 44 份单株样本 15 个数量性状进行聚类及特征分析,将其各群体分别归为 3 大类,每个类群包含植株的类型和数量各不相同。利用综合评价 F 值对膜荚黄芪诱变后代进行数量核心性状综合评价,筛选出数量性状综合评价表现最好的种质 39 份,这与许兰杰等^[34]在艾草种质资源农艺性状的综合评价结果相

似。本研究结果可与分子育种技术相结合,用于揭示太空诱变对性状遗传多样性的影响机制,以期选育出高产稳产、适应性广、药效高的中药材新品种。

4 结 论

1)对太空诱变膜荚黄芪 33D、22H 群体植株的 19 个性状进行特征变异分析发现,诱变后代 33D、22H 群体植株地上部分质量性状的变异系数 CV 范围分别为 0.35~0.78、0.38~0.84,遗传多样性指数 H' 范围分别为 1.67~2.13、1.66~2.02;数量性状的 CV 范围分别为 0.17~0.62、0.17~0.67, H' 范围分别为 1.47~2.01、1.72~2.04;产量构成性状的 CV 范围分别为 0.09~0.53、0.15~0.55, H' 范围分别为 1.81~2.09、1.73~2.06,各数量性状变异相对稳定,但存在丰富的遗传多样性。而株高($H'_{22H}=2.04$)、基高($H'_{22H}=2.00$)、茎粗($H'_{33D}=2.01$)、茎色($H'_{33D}=2.13$)、叶毛($H'_{22H}=2.02$)、根长($H'_{33D}=2.09$ 、 $H'_{22H}=2.06$)、根粗($H'_{33D}=2.03$)和芽数($H'_{22H}=2.00$)等性状的多样性指数较高,表明群体植株在这些性状上具有较大的优选潜力,群体结构性较好。

2)太空诱变膜荚黄芪 33D、22H 群体的 88 份种质中筛选出综合表现优良的种质 39 份,产量构成性状表现优异种质 16 份,矮株型高产理想型优异种质 3 份(22H-28、22H-42、33D-17)可为品种改良、选育优异株型提供候选亲本或备选核心材料,并筛选出二级分枝数、单根干质量、有效根长、侧根数、根长、折干率作为膜荚黄芪评价代表性指标。

致谢:感谢陇西县巩昌镇园艺村郭志军、郭天明、牟晓红和郭太平提供试验地并参与田间试验管理,感谢甘肃农业大学博士生王红燕、董鹏斌及硕士生周洋、付晓和高雅参与试验指标测定。

参 考 文 献:

[1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典一部[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020: 315-316.
Chinese Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of the People's Republic of China[M]. Beijing: China Medical Science and Technology Press, 2020: 315-316.

[2] YANG D D, CHEN Y, GUO F X, et al. Comparative analysis of chemical composition, antioxidant and antimicrobial activities of leaves, leaf tea and root from *Codonopsis pilosula*[J]. Industrial Crops and Products, 2019, 142: 111844.

[3] 赵佳琛, 王艺涵, 金艳, 等. 经典方名中黄芪的本草考证[J]. 中国实验方剂学杂志, 2022, 28(10): 337-346.
ZHAO J C, WANG Y H, JIN Y, et al. Herbal textual research on astragalus radix in famous classical formulas[J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2022, 28(10): 337-346.

[4] 陈永中, 陈垣, 郭凤霞, 等. 太空搭载膜荚黄芪 SP2 代 2 年生群体遗传变异分析[J]. 中国现代中药, 2022, 24(4): 687-695.
CHEN Y Z, CHEN Y, GUO F X, et al. Genetic variation of SP2 biennial population from *Astragalus membranaceus* seeds carried in space[J]. Modern Chinese Medicine, 2022, 24(4): 687-695.

[5] 胡洁, 石凤翎, 高翠萍. 紫羊茅空间诱变 SP_1 代单株材料田间农艺性状的变异分析[J]. 中国草地学报, 2022, 44(8): 46-51.
HU J, SHI F L, GAO C P. Variation analysis of single plant agronomic traits of space-induced mutant SP1 in *Festuca rubra*[J]. Chinese Journal of Grassland, 2022, 44(8): 46-51.

[6] 李华盛, 鹿金颖, 王思涵, 等. 中药资源空间诱变育种研究进展[J]. 世界中医药, 2021, 16(7): 1036-1040.
LI H S, LU J Y, WANG S H, et al. Research progress on space mutation breeding of traditional Chinese medicine resources[J]. World Chinese Medicine, 2021, 16(7): 1036-1040.

[7] KORDIUM E L, CHAPMAN D K. Plants and microgravity: patterns of microgravity effects at the cellular and molecular levels[J]. Tsitologiia i Genetika, 2017, 51(2): 47-58.

[8] GAN Y, YUANLI W U, ZENG J, et al. Effects of space radiation mutation on germination and growth of sugarcane hybrid seeds [J]. Agricultural Biotechnology, 2019, 8(6): 15-18.

[9] 彭亮. 丹参种质资源及其遗传多样性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
PENG L. Study on germplasm resources and genetic diversity of *Salvia miltiorrhiza bunge*[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016.

[10] 毛仁俊, 梁宗锁, 韩蕊莲等. 药用植物航天诱变育种研究的现状与展望[J/OL]. 分子植物育种: 1-10[2023-03-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20211118.1941.005.html>.
MAO R J, LIANG Z S, HAN R L, et al. Present situation and prospect of spaceflight-subjected mutagenesis breeding of medicinal plants [J/OL]. Molecular plant breeding: 1-10[2023-03-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20211118.1941.005.html>.

[11] 刘宇晓, 郭凤霞, 陈垣, 等. 航天诱变种苗大小对当归物候特征、抗逆生理特性及药材产量的影响[J]. 西北农业学报, 2022, 31(3): 335-344.
LIU Y X, GUO F X, CHEN Y, et al. Effect of seedlings sizes by space mutagenesis on phenology, stress physiological characteristics and medicinal yield of *Angelica sinensis*[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2022, 31(3): 335-344.

[12] 王雪婷, 张振伟, 龙泽雄, 等. 一号灵芝航天诱变菌株的筛选与鉴定[J]. 食品科技, 2022, 47(8): 1-7.
WANG X T, ZHANG Z W, LONG Z X, et al. Screening and identification of a space mutation strain of *Ganoderma lucidum*[J]. Food Science and Technology, 2022, 47(8): 1-7.

[13] XIONG H C, GUO H J, XIE Y D, et al. RNAseq analysis reveals pathways and candidate genes associated with salinity tolerance in a spaceflight-induced wheat mutant[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 2731.

[14] 李卫东, 崔清宇, 马长华, 等. 我国中草药航天育种研究进展与展望[J]. 中国现代中药, 2020, 22(3): 447-451, 460.
LI W D, CUI Q Y, MA C H, et al. Research progress and prospect of Chinese medicinal herb space breeding in China[J]. Modern Chinese Medicine, 2020, 22(3): 447-451, 460.

[15] 徐红卫, 高润红, 郭桂梅, 等. 源于空间诱变的大麦纯合突变体的氮素吸收利用评价[J]. 植物生理学报, 2022, 58(1): 186-196.
XU H W, GAO R H, GUO G M, et al. Evaluation of nitrogen uptake and utilization in barley homozygous mutants derived from space mutagenesis[J]. Plant Physiology Communications, 2022, 58(1): 186-196.

- [16] YANG C, WU X Y, GUO X, et al. The complete chloroplast genome of *Medicago sativa* cv. Hangmu No.1, a plant of space mutation breeding [J]. *Mitochondrial DNA Part B*, 2019, 4(1): 603-604.
- [17] 尹琼, 吴佳海, 陈超. 航天诱变黔草 1 号高羊茅形态多样性研究 [J]. *耕作与栽培*, 2022, 42(4): 20-23.
- YIN Q, WU J H, CHEN C. The study on the morphological diversity of Qiancao no.1 *Festuca arundinacea* with space mutation [J]. *Tillage and Cultivation*, 2022, 42(4): 20-23.
- [18] PENG Y, DENG X, YANG S S, et al. Progress in mechanism of *Astragalus membranaceus* and its chemical constituents on multiple sclerosis [J]. *Chinese Journal of Integrative Medicine*, 2023, 29(1): 89-95.
- [19] 张艳僊, 刘海龙, 王瑞琼, 等. 黄芪化学成分和药理作用及 Q-marker 预测分析 [J]. *中国新药杂志*, 2023, 32(4): 410-419.
- ZHANG D X, LIU H L, WANG R Q, et al. Chemical constituents and pharmacological effects of *Astragali Radix* and predictive analysis on quality markers [J]. *Chinese Journal of New Drugs*, 2023, 32(4): 410-419.
- [20] 中华人民共和国农业部. 植物新品种特异性、一致性和稳定性测试指南黄芪: NY/T 2592-2014 [S]. 北京: 中国农业出版社, 2014.
- Ministry of Agriculture of the PRC. Guidelines for the conduct of tests for distinctness, uniformity and stability—Milkvetch root (*Astragalus*): NY/T 2592-2014 [S]. Beijing: China Agriculture Press, 2014.
- [21] 李艺潇, 吴迪, 马培芳, 等. 186 份韭菜种质农艺性状遗传多样性分析 [J]. *山东农业科学*, 2020, 52(9): 23-28.
- LI Y X, WU D, MA P F, et al. Genetic diversity of agronomic traits in 186 Chinese chive (*Allium tuberosum*) germplasms [J]. *Shandong Agricultural Science*, 2020, 52(9): 23-28.
- [22] 高志昊, 李雪颖, 兰剑, 等. 干旱胁迫条件下不同饲用燕麦品种种子萌发指标比较与评价 [J]. *草地学报*, 2022, 30(5): 1210-1218.
- GAO Z H, LI X Y, LAN J, et al. Comparison and evaluation of seed germination indexes of different forage-type oat cultivars under PEG-6000 stress [J]. *Acta Agraria Sinica*, 2022, 30(5): 1210-1218.
- [23] 乔东亚, 王鹏, 王淑安, 等. 基于 SNP 标记的紫薇遗传多样性分析 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2020, 44(4): 21-28.
- QIAO D Y, WANG P, WANG S A, et al. Genetic diversity analysis of *Lagerstroemia* germplasm resources based on SNP markers [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)*, 2020, 44(4): 21-28.
- [24] 李艳伟, 施俊生, 汪宝根, 等. 浙江地方瓠瓜种质资源的表型鉴定与遗传多样性分析 [J]. *植物遗传资源学报*, 2020, 21(5): 1135-1147.
- LI Y W, SHI J S, WANG B G, et al. Phenotypic identification and genetic diversity analysis of local germplasm resources of bottle gourd in Zhejiang province [J]. *Journal of Plant Genetic Resource*, 2020, 21(5): 1135-1147.
- [25] 陈文晋, 孔庆全, 赵存虎, 等. 鹰嘴豆种质资源主要农艺性状遗传多样性分析 [J]. *北方农业学报*, 2018, 46(5): 9-18.
- CHEN W J, KONG Q Q, ZHAO C H, et al. Analysis of genetic diversity of the main agronomic traits of chickpea germplasm resources [J]. *Inner Mongolia Agricultural Science and Technology*, 2018, 46(5): 9-18.
- [26] 张锦豪, 王树彦, 杨恩泽, 等. 藜麦种质资源表型性状遗传多样性分析 [J]. *中国草地学报*, 2022, 44(12): 37-46.
- ZHANG J H, WANG S Y, YANG E Z, et al. Genetic diversity analysis of phenotypic traits in *chenopodium quinoa* wild. germplasm resources [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2022, 44(12): 37-46.
- [27] 白羿雄, 郑雪晴, 姚有华, 等. 青稞种质资源表型性状的遗传多样性分析及综合评价 [J]. *中国农业科学*, 2019, 52(23): 4201-4215.
- BAI Y X, ZHENG X Q, YAO Y H, et al. Genetic diversity analysis and comprehensive evaluation of phenotypic traits in hullless barley germplasm resources [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(23): 4201-4215.
- [28] 谢向誉, 尚小红, 严华兵, 等. 广西地方食用木薯种质资源遗传多样性分析 [J]. *核农学报*, 2020, 34(11): 2397-2406.
- XIE X Y, SHANG X H, YAN H B, et al. Genetic diversity analysis of edible cassava landraces in Guangxi [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2020, 34(11): 2397-2406.
- [29] 秦昌鲜, 闭德金, 彭崇, 等. 基于因子分析与聚类分析的甘蔗新品种(系)农艺性状评价 [J]. *南方农业学报*, 2021, 52(2): 317-324.
- QIN C X, BI D J, PENG C, et al. Evaluation of agronomic characters of new sugarcane varieties (lines) based on factor analysis and cluster analysis [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2021, 52(2): 317-324.
- [30] 赵宝军, 刘枫, 张俊佩等. 核桃杂交后代产量性状因子分析与综合评价 [J/OL]. *分子植物育种*: 1-12 [2024-03-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20211015.0513.010.html>.
- ZHAO B J, LIU F, ZHANG J P, et al. Factor analysis and comprehensive evaluation of yield characteristics walnut hybrid progeny [J/OL]. *Molecular Plant Breeding*: 1-12 [2024-03-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20211015.0513.010.html>.
- [31] 曾翰国, 岳佳铭, 张曙恒, 等. 76 份老芒麦种质资源的农艺性状综合评价 [J]. *草地学报*, 2022, 30(11): 3046-3055.
- ZENG H G, YUE J M, ZHANG S H, et al. Comprehensive evaluation of agronomic traits of 76 germplasm resources of *Elymus sibiricus* [J]. *Acta Agraria Sinica*, 2022, 30(11): 3046-3055.
- [32] 李春艳, 王艳, 李欣瑞, 等. 中国野生老芒麦形态多样性研究与种质利用潜力分析 [J]. *草业学报*, 2023, 32(3): 67-79.
- LI C Y, WANG Y, LI X R, et al. Morphological diversity and germplasm utilization potential of wild *Elymus sibiricus* [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(3): 67-79.
- [33] 韩永亮, 李世云, 路正营, 等. 62 份陆地棉种质资源苗期抗旱性综合评价及耐旱种质筛选 [J]. *干旱地区农业研究*, 2021, 39(6): 28-38.
- HAN Y L, LI S Y, LU Z Y, et al. Comprehensive identification and selection of drought resistance of 62 cotton varieties (lines) at cotton seedling stage [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2021, 39(6): 28-38.
- [34] 许兰杰, 余永亮, 梁慧珍, 等. 艾草种质资源农艺性状的综合评价 [J]. *分子植物育种*, 2024, 22(4): 1205-1212.
- XU L J, YU Y L, LIANG H Z, et al. Comprehensive evaluation of agronomic traits in *Artemisia argyi* germplasm resources [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2024, 22(4): 1205-1212.