

李祥栋, 陆秀娟, 郭超, 等. 薏苡种间杂种 F_1 主要农艺和总苞性状的杂种优势特征[J]. 山西农业科学, 2025, 53(5): 58-66.

LI X D, LU X J, GUO C, et al. Main agronomic and involucre traits heterosis of F_1 interspecific hybrids in *Coix* L.[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2025, 53(5): 58-66.

doi:10.26942/j.cnki.issn.1002-2481.2025.05.07

薏苡种间杂种 F_1 主要农艺和总苞性状的杂种优势特征

李祥栋¹, 陆秀娟¹, 郭超², 魏心元¹, 曾涛¹, 潘虹¹, 高爱农³, 石明¹

(1. 黔西南州农业林业科学研究院, 贵州 兴义 562400; 2. 四川农业大学 玉米研究所, 四川 成都 600031;

3. 中国农业科学院 作物科学研究所, 北京 100081)

摘要:为探究野生一栽培薏苡种间 F_1 杂种在主要农艺性状和总苞性状的杂种优势特征, 选取六谷、安薏1号、义县薏苡和锦州薏米等4份栽培型材料为母本, 六谷珠子、钢城念珠薏苡、铁薏苡和六角芦素等4份野生种为父本, 按照NC II 遗传设计共配置16个种间杂交组合, 分析其8个主要农艺性状及5个总苞性状的中亲优势及超亲优势特点。结果表明, 16个野生一栽培薏苡种间 F_1 杂种8个农艺性状的中亲优势值为-35.1%~80.1%, 超高亲优势为-50.0%~53.3%, 在株高、着粒层、主茎粗、叶长、叶宽和主茎节数性状上的中亲优势和超亲优势更为明显, 分枝节位倾向于高值亲本, 而分蘖数则表现为负向超亲优势。5个总苞性状的中亲优势值为-13.7%~69.8%, 超高亲优势值为-45.1%~27.5%, 总苞性状的百粒质量、长度、宽度和周长表现出较强的中亲优势; 但是, 总苞性状圆度具有超高亲优势, 使杂种 F_1 更为接近圆形。与双亲相比, 野生一栽培薏苡种间 F_1 杂种植株的主要农艺性状表现出更强生长势, 而且以南方亚热带栽培种为母本更容易出现超亲组合, 总苞性状则更倾向于野生种而且表现超中亲优势特点。

关键词: F_1 杂种; 中亲优势; 超亲优势; NC II; 薏苡

中图分类号: S519

文献标识码: A

文章编号: 1002-2481(2025)05-0058-09

Main Agronomic and Involucre Traits Heterosis of F_1 Interspecific Hybrids in *Coix* L.

LI Xiangdong¹, LU Xiujuan¹, GUO Chao², WEI Xinyuan¹, ZENG Tao¹,

PAN Hong¹, GAO Ainong³, SHI Ming¹

(1. Southwest Guizhou Institute of Agricultural and Forestry Sciences, Xingyi 562400, China;

2. Institute of Maize, Sichuan Agricultural University, Chengdu 600031, China;

3. Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to illustrate the heterosis of main agronomic and involucre traits of F_1 interspecific hybrids of wild and cultivar lines in (*Coix* L.), in this study, four cultivar lines including Liugu, Anyi 1, Yixianyi, and Jinzhouyimi were selected as the female parents, four wild lines including Liuguzhuzi, Gangchengnianshu adlay, Tie adlay, and Liujiaolusu were selected as the male parent, 16 interspecific hybrid combinations were obtained by NC II genetic design To analyze the mid-parent heterosis and over-parent heterosis of 8 agronomic traits and 5 involucre traits. The results revealed that the values of mid-parent heterosis(MPH) of 8 agronomic traits in 16 F_1 interspecific hybrids of wild and cultivar lines in adlay ranged -35.1%~80.1% and the values of over-parent heterosis(HPH) were -50.0%~53.3%. Plant height(PH), grain layer(GL), main stem diameter(MSD), length of leaf(LL), width of leaf(WL), and nodes on main stem(NMS) had obviously mid-parent and over-parent heterosis and branching node(BN) tended to high-value parents, while total tillers per plant(TT) trait had negative heterosis. MPH values in five involucre traits ranged -13.7%~69.8%, and the HPH were -45.1%~27.5%. It demonstrated that involucre traits of 100-fruit weight(HFW) and length(IL), width(IW), perimeter(IP) showed strong MPH. But the involucre roundness had higher HPH values, which showed that the F_1 hybrids involucre could be more roundness than their parent lines. In conclusion, compared with the parents, the interspecific F_1 hybrids had strong growth vigor in agronomic traits,

收稿日期: 2025-03-18

基金项目: 贵州省级财政种业发展项目(黔财农[2024]14号); 四川省自然科学基金(2023NSFSC0216)

作者简介: 李祥栋, 正高级农艺师, 硕士, 主要从事植物生理学与分子调控研究, E-mail: lixiangdongsiji@163.com

the female parents of southern subtropical cultivated lines probably created super parent combinations, and the involucre traits tended to their wild parental lines and displayed evident MPH.

Keywords: F₁ hybrids; mid-parent heterosis; over-parent heterosis; NC II; *Coix* L.

植物分类学通常将用于不同种、属或亲缘关系更远的植物类型间所进行的杂交称为远缘杂交,而利用野生资源和栽培品种进行远缘杂交和基因渐渗也是提高作物抗性、产量和品质的重要手段之一。薏苡作为重要的药食同源作物,通过远缘杂交提高抗性并实现杂种优势利用也是其提升产量和品质的重要途径^[1]。薏苡是禾本科薏苡属的一年生或多年生植物,其根、茎、叶和籽粒均可入药,籽粒脱壳之后的产品称为薏米或薏仁米。薏苡仁不仅营养价值高而且富含保健滋养成分,集食用价值和药用价值为一体,因此,也作为中药材被用于多种药膳和食疗药方的重要配伍^[2-3]。我国薏苡的种植生产地主要分布在黔、滇、桂、闽、浙、台等地区,安徽、山东、河北及东北三省也有少量种植。目前,已发展成为极具区域特色的小宗作物,成为主粮作物的重要补充。但是,在种植生产上薏苡品种均是常规种,而且由于缺少可用的雄性不育系,并未像玉米、水稻等主粮作物一样实现杂种优势利用和绿色革命来突破产量瓶颈。

薏苡的远缘杂交起步于20世纪90年代,山西农业大学等单位的学者利用薏苡野生资源(川谷)和栽培薏苡杂交,遗传分析结果均表明,川谷和栽培薏苡的杂种F₁表现出较强杂种优势甚至超亲优势特征^[4-7],F₂也表现出远缘杂交特征并能提高植株抗性^[8]。段桃利等^[9]利用玉米与薏苡、摩擦禾进行跨物种杂交研究,结果显示,薏苡花粉粒在玉米柱头也能萌发,花粉管能伸入花柱,但玉米与薏苡杂交代生殖隔离较摩擦禾严格,为胚囊不亲和或花

柱不亲和,也反映出了玉米与摩擦禾更近的亲缘关系。黔西南州农业林业科学研究院薏苡研究团队在前期研究中初步揭示了薏苡叶片颜色^[10]、柱头颜色^[11]及总苞性状(颜色、质地、喙和纵长条纹)^[12]几个重要农艺性状的遗传方式和遗传规律,并分析了薏苡雌性不育株FS2106育性性状的遗传规律^[13]。LIU等^[14]和GUO等^[15]分别破译了薏苡野生种和栽培种的基因组,并探讨了薏苡的遗传演化和驯化过程,其中,栽培种相比于野生种表现出了较强的驯化瓶颈。上述种间杂交试验和遗传分析暗示,薏苡野生—栽培杂种F₁可能存在较为普遍的杂种优势现象和极高杂交渐渗改良育种潜力。

杂种优势作为生物界普遍存在的生物学现象,在众多种作物(玉米、水稻、油菜等)中实现利用并极大幅度地提升了粮食产量和品质,而野生种与栽培种的远缘杂交渐渗改良也在作物育种中起到了举足轻重的作用。薏苡在育种层面更多的是地方常规栽培型资源的优中选优和系统选择,关于种间杂种F₁的杂种优势特点仍不清晰。

本研究在前期探索的基础上,开展不同类型薏苡栽培种和野生种间的系统杂交试验,并分析其杂种F₁主要农艺性状的杂种优势特征,旨在为优良亲本的选择、种间渐渗改良及杂种优势利用提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试亲本材料信息如表1所示。

表1 供试亲本材料信息
Tab.1 Details of tested parental lines

编号	Number	名称	Name	植物学分类	Taxonomy	类型	Type	来源	Origin
20221075		六谷		薏米	<i>C. chinensis</i> var. <i>chinensis</i> Tod.	栽培种		中国四川	
	L28	安薏1号		薏米	<i>C. chinensis</i> var. <i>chinensis</i> Tod.	栽培种		中国贵州	
	JZYM	锦州薏米		薏米	<i>C. chinensis</i> var. <i>chinensis</i> Tod.	栽培种		中国辽宁	
	YXY	义县薏苡		薏米	<i>C. chinensis</i> var. <i>chinensis</i> Tod.	栽培种		中国辽宁	
20221018		六谷珠子		薏苡	<i>C. lacryma-jobi</i> var. <i>lacryma-jobi</i>	野生种		中国江苏	
20221083		铜城念珠薏苡		念珠薏苡	<i>C. lacryma-jobi</i> var. <i>maxima</i> Makino	野生种		中国山东	
20221088		铁薏苡		念珠薏苡	<i>C. lacryma-jobi</i> var. <i>maxima</i> Makino	野生种		中国山东	
	2136	六角芦荟		薏苡	<i>C. lacryma-jobi</i> var. <i>lacryma-jobi</i>	野生种		中国江苏	

以经多年单株提纯的 8 份薏苡遗传材料为亲本,其中,六谷、安薏 1 号、义县薏苡和锦州薏米 4 份栽培型材料为母本材料,六谷珠子、钢城念珠薏苡、铁薏苡和六角芦素 4 份野生材料为父本材料。

1.2 试验方法

2023 年冬季,在海南省乐东县黄流镇南繁育种基地进行大田种植,按照 NC II 遗传交配设计共配制 16 个杂交组合,种间杂交参照薏苡定向杂交方法^[16]进行。2024 年 4 月,在贵州省兴义市木贾试验地,采用随机区组试验方法对亲本及杂交种 F_1 进行大田种植,小区面积 4 m²,每小区种植单株留苗不低于 10 株,施肥、除草等田间管理按照统一方式进行。

1.3 田间调查

于抽穗一开花期,对每份亲本及杂种 F_1 选取 3~5 株进行套袋,以保证种子单株自交。成熟期参照《薏苡种质资源描述规范和数据标准》^[17]对株高(PH)、着粒层(GL)、主茎粗(MSD)、叶长(LL)、叶宽(LW)、总分蘖数(TT)、主茎节数(NMS)和分枝节位(BN)8 个主要农艺性状进行田间调查和测量。套袋种子单打单收,晒干,去杂和室内烤种。

总苞性状的主要考种指标包括百粒质量(HFW)、总苞长度(IL)、总苞宽度(IW)、总苞周长(IP)、总苞圆度(IR)及其形状、颜色、条纹及喙的有无等性状。

1.4 数据分析

采用 Excel 2003 进行数据整理和统计。杂种 F_1 主要性状的中亲优势(MPH)和超亲优势(HPH)用式(1)(2)进行计算。

$$\text{中亲优势} = (F_1 - MP) / MP \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{超亲优势} = (F_1 - HP) / HP \times 100\% \quad (2)$$

其中, $MP = (P_1 + P_2) / 2$, F_1 为后代平均值; MP 为中亲值; HP 为高亲表型值; P_1 、 P_2 分别为双亲的表型值。

2 结果与分析

2.1 薏苡亲本的农艺性状及总苞性状表现

8 个杂交亲本的株高、叶长、叶宽、着粒层、主茎粗变异范围分别为 65.0~168.3、65.0~141.0、26.0~40.7、2.8~4.0 cm 和 5.9~9.4 mm,单株分蘖数为 6.7~16.0 个/株,主茎节数为 6.0~10.3 节,分枝节位在第 2~4 节(表 2)。

表 2 双亲材料的农艺性状变异

Tab.2 Variance of agronomic traits in parental lines

亲本	Parental lines	PH/cm	GL/cm	MSD/mm	LL/cm	LW/cm	TT/个	NMS/节	BN/节
	20221075	168.3	139.3	9.4	40.7	3.6	6.7	10.3	4.0
	L28	155.0	141.3	9.4	35.3	3.2	9.7	9.0	3.0
	JZYM	138.7	132.8	7.3	34.3	3.5	7.3	6.3	2.0
	YXYY	107.7	107.7	6.8	31.3	2.8	14.3	7.7	2.0
	20221018	110.7	105.8	9.1	38.3	4.2	10.3	6.7	2.0
	20221083	74.0	67.8	6.0	28.3	4.0	16.0	6.0	2.0
	20221088	65.0	65.0	5.9	26.0	3.3	12.0	6.0	2.0
	2136	103.0	96.2	8.8	38.2	3.9	8.0	7.3	2.0
平均	Mean	115.3	107.0	7.8	34.1	3.6	10.5	7.4	2.4
标准差	SD	36.6	30.0	1.5	5.2	0.5	3.4	1.6	0.7
变异系数/%	CV	31.8	28.1	19.2	15.2	12.8	31.8	20.9	31.3

从表 2 可以看出,4 份母本材料中,20221075 和 L28 表现为植株高大、茎秆粗壮、叶片宽大及高分枝节位的特点;JZYM 和 YXYY 则表现为矮秆、低分枝节位的特点。4 份父本材料整体上表现为矮秆、多分蘖及低分枝节位的生长特征。母本材料的总苞为甲壳质地、黄白色或深褐色,卵圆形,具喙和纵长条纹(图 1),百粒质量、总苞长度、总苞

宽度和总苞周长的变异范围分别为 8.8~14.3 g 和 9.7~10.9、5.7~6.6、27.8~30.8 mm,圆度值为 0.5~0.7,长/宽值为 1.6~2.0,属于典型的栽培型种质(表 3);4 份父本材料总苞珙琅质地、棕色或深褐色、卵圆形或近圆形,表面光滑无纵长条纹,百粒质量、总苞长度、总苞宽度和总苞周长的变异范围分别为 28.6~43.6 g 和 11.4~12.6、8.3~9.2、

34.2~38.0 mm,圆度值为0.7~0.8,长/宽值为1.4~1.5,属于典型的温带野生型种质(表3)。

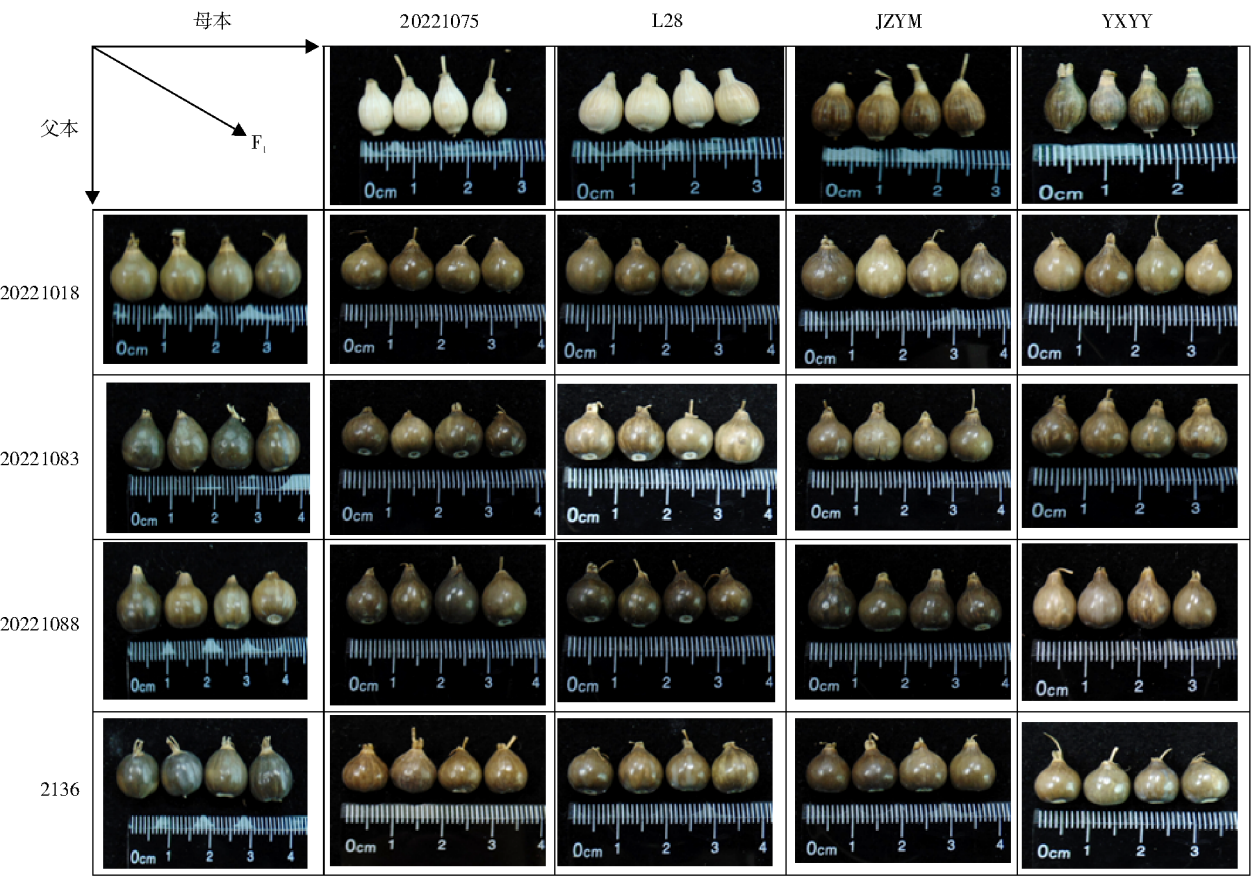


图1 亲本及其杂种F₁的总苞形态特征

Fig.1 Morphological characters of involucre in parental lines and their F₁ hybrids

表3 双亲材料的总苞性状变异

Tab.3 Variance of involucre traits in parental lines

亲本 Parental lines	HFW/g	LL/ mm	LW/ mm	LP/ mm	LR	LL/ LW	亲本 Parental lines	HFW/g	LL/ mm	LW/ mm	LP/ mm	LR	LL/ LW
20221075	8.8	9.8	5.8	27.9	0.6	1.8	20221088	33.8	11.5	8.8	35.3	0.8	1.4
L28	11.2	9.7	6.2	27.8	0.7	1.6	2136	43.6	12.3	9.2	38.0	0.8	1.4
锦州薏米 JZYM	14.3	10.9	6.6	30.8	0.6	1.7	平均 Mean	24.0	11.1	7.4	32.6	0.7	1.6
义县薏苡 YXYY	9.5	10.8	5.7	30.1	0.5	2.0	标准差 SD	14.8	1.0	1.5	4.0	0.1	0.2
20221018	28.6	11.4	8.3	34.2	0.8	1.5	变异系数/% CV	61.8	9.4	20.0	12.2	13.2	13.0
20221083	42.5	12.6	8.8	36.8	0.7	1.5							

2.2 薏苡杂种F₁农艺性状的中亲优势特征

通过对16个杂种F₁的中亲优势进行分析发现(表4),8个农艺性状的中亲优势值为-35.1%~80.1%,株高、着粒层、主茎粗、叶长、主茎节数均表现出较强的中亲优势;叶宽性状的中亲值为-11.2%~27.6%,其中,组合L28×2136和JZYM×20221088表现为负向优势,其他组合均表现为正向优势;分蘖数的中亲优势值为-35.1%~65.5%,其中,

6个组合(L28×2136、JZYM×20221018、JZYM×20221083、JZYM×20221088、JZYM×2136和YXYY×20221018)表现为正向优势,其余则表现为负向优势;分枝节位的中亲值为0~33.3%,整体倾向于较高的分枝节位。综上,野生一栽培薏苡种间杂种F₁在株高、着粒层、主茎粗、叶长、叶宽和主茎节数的中亲优势更为明显,总分蘖数的中亲优势不明显,分枝节位则更倾向于高值亲本。

表 4 蕙苡杂种 F_1 的农艺性状中亲优势Tab.4 Mid-parent heterosis of agronomic traits of adlay F_1 hybrids

%

组合	Combination	PH	GL	MSD	LL	LW	TT	NMS	BN
20221075×20221018		46.2	32.4	45.6	49.4	15.3	-25.5	29.4	33.3
20221075×20221083		35.1	47.4	23.6	33.5	20.4	-29.4	22.4	0.0
20221075×20221088		80.0	80.1	35.4	58.0	14.8	0.0	26.5	0.0
20221075×2136		68.8	36.1	50.2	58.1	19.8	-18.2	28.3	0.0
L28×20221018		28.7	17.9	15.5	31.2	1.3	-3.3	27.7	20.0
L28×20221083		63.9	67.7	26.0	69.9	24.0	-35.1	33.3	20.0
L28×20221088		59.4	53.2	32.1	51.1	19.4	-13.8	33.3	20.0
L28×2136		57.1	32.5	4.9	40.6	20.6	5.7	18.4	20.0
JZYM×20221018		5.5	6.9	39.4	29.4	-8.2	1.9	18.5	0.0
JZYM×20221083		40.1	43.6	36.4	31.0	11.0	31.4	18.4	0.0
JZYM×20221088		29.6	33.5	12.3	14.9	-11.2	65.5	18.4	0.0
JZYM×2136		10.6	16.7	29.7	19.5	18.4	52.2	12.7	0.0
YXYY×20221018		37.4	40.5	8.3	44.5	25.5	10.8	6.7	0.0
YXYY×20221083		28.8	33.4	13.2	37.6	0.2	-12.1	16.8	0.0
YXYY×20221088		46.3	42.5	4.7	53.5	27.6	-6.3	12.4	0.0
YXYY×2136		43.0	35.1	18.8	38.1	22.2	-1.5	23.7	0.0

2.3 蕙苡杂种 F_1 农艺性状的超亲优势特征

16 个杂种 F_1 的超亲优势分析发现(表 5), 株高、着粒层、主茎粗、叶长、叶宽和总分蘖数的超亲

优势为-50.0%~53.3%, 株高、着粒层、主茎粗、叶长和叶宽整体表现为正向超亲优势, 而分蘖数和分枝节位则表现为负向超亲优势。

表 5 蕙苡杂种 F_1 的超高亲优势Tab.5 Over-parent heterosis of agronomic traits of adlay F_1 hybrids

%

组合	Combination	PH	GL	MSD	LL	LW	TT	NMS	BN
20221075×20221018		21.2	16.5	43.4	45.1	7.1	-38.7	6.5	0.0
20221075×20221083		-2.8	9.6	1.6	13.1	15.6	-50.0	-3.2	-25.0
20221075×20221088		24.8	32.1	10.2	29.5	20.0	-22.2	0.0	-25.0
20221075×2136		36.0	15.1	46.0	53.3	15.3	-25.0	9.7	-25.0
L28×20221018		10.3	3.1	13.7	36.8	-11.0	-6.5	11.1	0.0
L28×20221083		21.1	24.1	3.6	52.8	12.2	-47.9	11.1	0.0
L28×20221088		13.1	11.8	7.5	31.1	17.0	-22.2	11.1	0.0
L28×2136		30.8	11.3	2.0	46.2	9.3	-3.4	7.4	0.0
JZYM×20221018		-5.2	-4.0	25.4	22.6	-16.1	-12.9	15.5	0.0
JZYM×20221083		7.5	8.4	24.9	19.4	4.6	-4.2	15.3	0.0
JZYM×20221088		-4.8	-0.6	1.7	1.0	-13.3	33.3	15.3	0.0
JZYM×2136		-3.6	0.7	18.1	13.5	11.9	45.8	5.0	0.0
YXYY×20221018		39.3	39.3	-5.5	31.3	4.7	-4.7	-0.4	0.0
YXYY×20221083		8.7	8.7	7.1	30.9	-13.9	-16.7	3.9	0.0
YXYY×20221088		17.3	14.2	-2.2	40.4	18.0	-14.0	0.0	0.0
YXYY×2136		39.9	27.9	5.0	25.8	5.1	-23.3	20.8	0.0

在以 20221075 和 L28 为母本的 8 个杂交组合中, 除了组合 20221075×20221083 株高和 L28×

20221018 叶宽的超高亲优势为负值, 其余组合的株高、着粒层、主茎粗、叶长、叶宽和主茎节数均表

现为正向超亲优势,总分蘖数和分枝节位的超高亲优势则均为负值。以JZYM为母本的4个组合中,有3个组合在株高性状上表现为负向超亲优势,1个组合表现为正向超亲优势;在着粒层、叶宽和总分蘖数性状上有2个组合表现为负向超亲优势,2个组合表现为正向超亲优势;而在主茎粗、叶长和主茎节数上均为正向超亲优势。在以YXYY为母本的4个杂交组合中,在株高、着粒层和叶长性状均为正向超亲优势,在总分蘖数性状上均为负向超亲优势;在主茎粗性状上2个组合表现为正向超亲优势,2个组合表现为负向超亲优势;叶宽和主茎节数均有3个组合表现为正向超亲优势,1个组合表现为负向超亲优势。上述结果表明,野生一栽培薏苡种间杂种F₁在株高、着粒层、主茎粗、叶长和叶宽性状上整体表现出较强的超亲优势,而在总分蘖数性状上,除个别组合外,整体上超亲优势较弱;分枝节位则更倾向于质量性状遗传方式,与高值亲本基本一致。

2.4 薏苡杂种F₁总苞性状的中亲优势特征

16个杂种F₁的中亲优势分析发现(表6),5个总苞性状的中亲优势值为-13.7%~69.8%,百粒质量、总苞宽度和总苞圆度性状的中亲优势整体表现为正值,而总苞长度和总苞周长性状的中亲优势则整体表现为负值。在所有的16个杂交组合中,11个组合在百粒质量性状上超过亲中值,5个组合低于亲中值;在总苞长度性状上,5个组合超过亲中值,11个组合低于亲中值;总苞宽度性状上1个组合略高于亲中值,15个组合均低于亲中值;在总苞周长性状上,6个组合高于亲中值,10个组合低于亲中值;在总苞圆度性状上16个组合全部高于亲中值。上述结果显示,野生一栽培种间杂种F₁在总苞的百粒质量、宽度和圆度性状上的中亲优势较强,而总苞长度和总苞周长性状的中亲优势较弱,而且总苞的百粒质量、宽度和圆度更倾向于高值亲本。

表6 薏苡杂种F₁的总苞性状中亲优势

Tab.6 Mid-parent heterosis of involucre traits of adlay F₁ hybrids

%

组合 Combination	HWF	IL	IW	IP	IR
20221075×20221018	62.2	0.1	12.7	3.5	19.5
20221075×20221083	14.0	-5.7	11.6	-0.6	20.9
20221075×20221088	37.1	-2.7	13.7	1.2	18.4
20221075×2136	-2.4	-9.9	5.9	-6.7	17.3
L28×20221018	29.7	-4.3	4.1	-0.3	15.0
L28×20221083	-6.7	-11.2	4.2	-4.4	17.9
L28×20221088	24.0	-4.5	6.8	-0.6	13.6
L28×2136	-2.7	-10.3	-0.2	-6.7	10.2
锦州薏米×20221018 JZYM×20221018	69.8	7.5	20.0	12.7	18.1
锦州薏米×20221083 JZYM×20221083	28.5	0.3	17.3	6.3	17.9
锦州薏米×20221088 JZYM×20221088	30.1	6.4	12.7	8.0	5.0
锦州薏米×2136 JZYM×2136	10.6	-3.9	8.9	-0.3	14.5
义县薏苡×20221018 YXYY×20221018	32.5	-4.8	2.3	-1.8	14.7
义县薏苡×20221083 YXYY×20221083	-10.2	-13.7	3.2	-9.0	19.5
义县薏苡×20221088 YXYY×20221088	22.9	1.7	6.6	3.6	7.3
义县薏苡×2136 YXYY×2136	-3.4	-10.6	7.4	-7.7	20.7

2.5 薏苡杂种F₁总苞性状的超亲优势特征

16个杂种F₁的超亲优势分析发现(表7),5个总苞性状的超高亲优势为-41.5%~27.5%,百粒质量、总苞长度、总苞宽度和总苞周长均表现为负向超亲优势,而总苞圆度则表现为正向超亲优势。在所有的16个杂交组合中,百粒质量、总苞周长和

总苞宽度分别有2个组合超过高值亲本,14个组合低于高值亲本;在总苞长度性状上,1个组合超过高值亲本,15个低于高值亲本;在总苞圆度性状上,13个组合超过高值亲本,3个组合低于高值亲本。上述结果显示,野生一栽培薏苡种间杂种F₁的总苞的百粒质量、长度、宽度和周长的超亲优势

较弱,整体介于双亲之间;但是总苞圆度超亲优势 较强,与双亲相比杂种 F_1 更接近圆形。

表 7 薏苡杂种 F_1 的超高亲优势Tab.7 Over-parent heterosis of involucre traits of adlay F_1 hybrids

组合 Combination	HWF	IL	IW	IP	IR	%
20221075×20221018	6.0	-6.9	-7.1	-6.0	8.4	
20221075×20221083	-31.2	-16.3	-7.1	-12.6	11.6	
20221075×20221088	-13.7	-10.0	-5.5	-9.3	5.1	
20221075×2136	-41.4	-19.1	-13.3	-19.1	4.7	
L28×20221018	-9.7	-11.3	-12.4	-9.7	7.4	
L28×20221083	-41.1	-21.4	-11.3	-16.1	12.0	
L28×20221088	-17.4	-11.8	-9.3	-11.2	3.8	
L28×2136	-38.8	-19.7	-16.5	-19.3	1.1	
锦州薏米×20221018 JZYM×20221018	27.5	5.5	3.8	7.1	7.6	
锦州薏米×20221083 JZYM×20221083	-14.1	-6.3	2.6	-2.3	9.3	
锦州薏米×20221088 JZYM×20221088	-7.3	3.9	-1.7	1.1	-6.4	
锦州薏米×2136 JZYM×2136	-26.5	-9.1	-6.4	-9.8	2.7	
义县薏苡×20221018 YXYY×20221018	-11.8	-7.0	-16.6	-7.6	-1.3	
义县薏苡×20221083 YXYY×20221083	-45.1	-19.6	-15.1	-17.2	4.5	
义县薏苡×20221088 YXYY×20221088	-21.3	-1.1	-12.5	-4.0	-9.5	
义县薏苡×2136 YXYY×2136	-41.2	-15.8	-13.0	-17.3	2.3	

3 结论与讨论

薏苡属在其起源演化、表型特性及药用特性方面均是极为特殊的存在^[18],也是没有被充分开发的功能性作物^[19]。尽管如此,薏苡属种质资源地理分布却极为广泛,在中国,南至海南北至黑龙江均有薏苡资源(包括野生资源和地方栽培种)的分布,大致分为 3 个生态型^[20],在植物表型^[21-22]、品质^[23]及分子标记^[24-25]水平均具有丰富的遗传多样性。在分类学层面,我国薏苡属经历了多种分类学系统的演变,根据《中国植物志》^[26],在植物学分类上主要有 7 个种(变种),其中,5 个属于野生类群,仅有薏米变种 *C. chinensis* var. *chinensis* Tod. 和台湾薏苡变种 *C. chinensis* var. *formosana* (Ohwi) L. 属于栽培类型。通过野生型川谷和栽培型薏苡的杂交试验表明,杂种 F_1 在植株高度、单株叶面积、生长势、光合特性以及生物产量等方面具有杂种优势^[5,7]。本研究则利用不同来源的薏苡变种 *C. chinensis* var. *chinensis* 为母本,以薏苡变种 *C. lacryma-jobi* var. *lacryma-jobi* 和念珠薏苡变种 *C. lacryma-jobi* var. *maxima* Makino 为父本进行的杂交组配,结果表明,杂种 F_1 在株高、着粒层、主茎粗、叶长和叶宽整体表现为正向超亲优势。值得一提的是,关于杂种优势的形成机制在水稻、玉米、棉花等方

面往往表现出显性、超显性和上位性特点,而且在不同作物和不同的遗传背景表现均有不同,一些与产量等相关的 QTL 位点也已经被挖掘出来^[27-28];而本研究主要分析了薏苡种间杂种农艺性状及总苞性状的遗传特征,其杂种优势形成机制仍不清晰,需要从基因组、转录组、代谢组等多组学层面进行深入探讨。

在薏苡育种和应用层面,由于大众关注度低,在相当长的一段时间里薏苡属作物很少被刻意的定向改良,更多的是无意识的驯化选择。对于薏苡野生类群的利用主要是在我国西南少数民族聚集地区,一方面利用南方薏苡资源高大的植物茎秆与生物量,用于青贮饲草及饲料粉混掺^[29-31];另一方面选取其珧琅质总苞做成首饰、项链等工艺品。用野生资源对栽培品种进行遗传改良,是提高作物抗性、产量和品质的重要手段之一。本研究团队前期也提出了利用北方薏苡种质矮秆和短生育期基因实现品种矮化,利用薏苡属野生资源基因或远缘杂交渐渗提高植物抗逆性的设想^[1],经多年努力也选育出了部分优良品系,进一步印证了野生-栽培种间杂交渐渗育种的可行性。薏苡杂种优势首次在生产上的成功利用是在饲草领域,周树峰等^[32]利用水生薏苡进行了饲用型薏苡创制,获得了具有营养生长和杂种优势双重优势的

品种丰牧 88, 该品种可以利用茎段或分蘖的形式实现快速繁育。然而, 杂种优势在粒用薏苡上的应用尚存在局限性, 一是野生薏苡珐琅质总苞相对于甲壳质总苞为显性, 其与栽培种杂交获得的 F₁ 总苞质地均为珐琅质, 不易剥壳, 因此, 需要经过多轮次的回交进行核置换以改良其总苞质地或杂交渐渗培育新型自交系。二是目前薏苡缺少可用的雄性不育系及配套制种体系, 尚不能进行大规模的杂交制种或轻简化制种。尽管粒用薏苡的杂种优势利用尚存在局限性, 然而随着基因编辑等生物技术的利用和赋能, 薏苡遗传转化体系已经建立^[33]。本研究结果一定程度上为薏苡工程化育种和杂种优势利用提供了可行性方案。

参考文献:

- [1] 李祥栋, 陆秀娟, 潘虹, 等. 薏米黄酮类物质组成差异与功能分析[J]. 山西农业科学, 2023, 51(12): 1410-1417.
LI X D, LU X J, PAN H, et al. Component differentiation and functional analysis of flavonoids in coix seeds[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2023, 51(12): 1410-1417.
- [2] 黄锁义, 李容, 潘勇, 等. 薏苡研究的新进展[J]. 食品研究与开发, 2012, 33(11): 223-227.
HUANG S Y, LI R, PAN Y, et al. Study new progress of *Coix lachryma-jobi* L[J]. Food Research and Development, 2012, 33(11): 223-227.
- [3] 张聿梅, 杨峻山, 赵杨景, 等. 薏苡化学成分及药理活性研究进展[J]. 中国药学杂志, 2002, 37(1): 8-11.
ZHANG Y M, YANG J S, ZHAO Y J, et al. Research progress on chemical constituents and pharmaceutical activities of *Coix lachryma-jobi*[J]. Chinese Pharmaceutical Journal, 2002, 37(1): 8-11.
- [4] 宋秀英, 赵晓明, 李明山, 等. 薏苡属种间杂种形态的观察和比较[J]. 山西农业大学学报, 1993, 13(3): 199-202.
SONG X Y, ZHAO X M, LI M S, et al. Observation and comparison on interspecific hybrid of Job's tears genus[J]. Journal of Shanxi Agricultural University, 1993, 13(3): 199-202.
- [5] 乔亚科, 李桂兰, 高书国, 等. 两种薏苡及其 F₁ 性状表现[J]. 中草药, 1995, 26(2): 88-91.
QIAO Y K, LI G L, GAO S G, et al. Characteristic performance of F₁ hybrid of jobstears (*Coix lachryma-jobi*) and *C. lachryma-jobi* var. *frumentacea* and inheritance of stigma colour[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 1995, 26(2): 88-91.
- [6] 李贵全, 赵晓明, 宋秀英. 薏苡×川谷远缘杂交的研究[J]. 作物学报, 1997, 23(1): 119-122.
LI G Q, ZHAO X M, SONG X Y. A study on distant hybridization of *Coix lachryma-jobi* var. *frumentacea*×*C. lachryma-jobi* [J]. Acta Agronomica Sinica, 1997, 23(1): 119-122.
- [7] 杜维俊, 赵晓明, 李贵全. 薏苡属种间杂种 F₁ 性状遗传的研究[J]. 山西农业大学学报, 1998, 18(1): 20-23.
DU W J, ZHAO X M, LI G Q. Studies on the morphogenetics of interspecific hybrid of *Coix* L[J]. Journal of Shanxi Agricultural University, 1998, 18(1): 20-23.
- [8] 乔亚科, 李桂兰, 高书国, 等. 薏苡类型间杂交 F₂ 代的性状分离[J]. 河北农业技术师范学院学报, 1993, 7(4): 48-51.
QIAO Y K, LI G L, GAO S G, et al. Characters' separation in F₂ generation of intertype hybridization[J]. Journal of Hebei Normal University of Science & Technology, 1993, 7(4): 48-51.
- [9] 段桃利, 牟锦毅, 唐祈林, 等. 玉米与摩擦禾、薏苡的杂交不亲和性[J]. 作物学报, 2008, 34(9): 1656-1661.
DUAN T L, MOU J Y, TANG Q L, et al. Sexual incompatibility between maize and its wild relatives *Tripsacum* L. and *Coix* L[J]. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34(9): 1656-1661.
- [10] 陆秀娟, 李祥栋, 石明, 等. 薏苡苗期紫叶鞘性状的遗传分析[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(14): 146-149.
LU X J, LI X D, SHI M, et al. Genetic analysis of purple leaf sheath traits of *Coix* seedlings[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48(14): 146-149.
- [11] 陆秀娟, 李祥栋, 石明, 等. 薏苡紫色柱头性状的遗传分析[J]. 种子, 2020, 39(1): 33-35.
LU X J, LI X D, SHI M, et al. Inheritance of purple stigma trait in Job's tears[J]. Seed, 2020, 39(1): 33-35.
- [12] 李祥栋, 潘虹, 陆秀娟, 等. 薏苡总苞性状的遗传分析[J]. 南方农业学报, 2020, 51(8): 1896-1903.
LI X D, PAN H, LU X J, et al. Inheritance of involucre traits in *Coix lachryma-jobi* L[J]. Journal of Southern Agriculture, 2020, 51(8): 1896-1903.
- [13] 李祥栋, 陆秀娟, 魏心元, 等. 薏苡雌性不育株 FS2106 的性状遗传分析[J]. 植物遗传资源学报, 2024, 25(7): 1083-1091.
LI X D, LU X J, WEI X Y, et al. Traits inheritance of female sterile line FS2106 in *adlay* (*Coix* L.) [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2024, 25(7): 1083-1091.
- [14] LIU H B, SHI J P, CAI Z X, et al. Evolution and domestication footprints uncovered from the genomes of *Coix*[J]. Molecular Plant, 2020, 13(2): 295-308.
- [15] GUO C, WANG Y N, YANG A G, et al. The *Coix* genome provides insights into panicoidae evolution and papery hull domestication[J]. Molecular Plant, 2020, 13(2): 309-320.
- [16] 李祥栋, 陆秀娟, 潘虹, 等. 一种薏苡定向杂交方法: CN111264378A[P]. 2020-06-12.
LI X D, LU X J, PAN H, et al. Directional hybridization method for *Coix lachryma-jobi*: CN111264378A[P]. 2020-06-12.
- [17] 石明, 李祥栋, 秦礼康. 薏苡种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京: 中国农业出版社, 2017.
SHI M, LI X D, QIN L K. Descriptors and data standard for Job's tears (*Coix lachryma-jobi* L.) [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2017.
- [18] RAO P N. Coix: an unique and remarkerable genus[J]. The Journal of the Indian Botanical Society, 2012, 91(1-3): 33-43.
- [19] SONI J K, LALRAMHLIMI B, KUMAR A, et al. *Coix*: an underutilized functional food crop of Mizoram[J]. Genetic Resources and Crop Evolution, 2023, 70(7): 2143-2159.
- [20] 黄亨履, 陆平, 朱玉兴, 等. 中国薏苡的生态型、多样性及利

- 用价值[J]. 作物品种资源, 1995(4): 4-8.
- HUANG H L, LU P, ZHU Y X, et al. Ecotype, diversity and utilization value of *Coix lacryma-jobi* in China[J]. China Seed Industry, 1995(4): 4-8.
- [21] 李春花, 王艳青, 卢文洁, 等. 云南薏苡种质资源农艺性状的主成分和聚类分析[J]. 植物遗传资源学报, 2015, 16(2): 277-281.
- LI C H, WANG Y Q, LU W J, et al. The principal component and cluster analysis of agronomic traits of *Coix* germplasm resources in Yunnan[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2015, 16(2): 277-281.
- [22] 李祥栋, 潘虹, 陆秀娟, 等. 薏苡属种质资源的主要表型性状多样性研究[J]. 植物遗传资源学报, 2019, 20(1): 229-238.
- LI X D, PAN H, LU X J, et al. Analysis of main phenotypic characteristics in *Coix* L. germplasm resources[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2019, 20(1): 229-238.
- [23] 李祥栋, 潘虹, 陆秀娟, 等. 薏苡种质的主要营养成分特征及综合评价[J]. 中国农业科学, 2018, 51(5): 835-850.
- LI X D, PAN H, LU X J, et al. Characteristics and comprehensive assessment of principal nutritional components in adlay landraces[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(5): 835-850.
- [24] MA K H, KIM K H, DIXIT A, et al. Assessment of genetic diversity and relationships among *Coix lacryma-jobi* accessions using microsatellite markers[J]. Biologia Plantarum, 2010, 54(2): 272-278.
- [25] FU Y H, YANG C L, MENG Q Y, et al. Genetic diversity and structure of *Coix lacryma-jobi* L. from its world secondary diversity center, southwest China[J]. International Journal of Genomics, 2019, 1-9.
- [26] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 289.
- Chinese Flora Editorial Committee. Chinese Academy of Sciences. Flora of China[M]. Beijing: Science Press, 1997: 289.
- [27] 商连光, 高振宇, 钱前. 作物杂种优势遗传基础的研究进展[J]. 植物学报, 2017, 52(1): 10-18.
- SHANG L G, GAO Z Y, QIAN Q. Progress in understanding the genetic basis of heterosis in crops[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2017, 52(1): 10-18.
- [28] LIN Z C, QIN P, ZHANG X W, et al. Divergent selection and genetic introgression shape the genome landscape of heterosis in hybrid rice[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2020, 117(9): 4623-4631.
- [29] 周树峰, 郭超, 贺俊, 等. 野生薏苡在我国西南地区的饲用前景、进展与存在问题[J]. 草业科学, 2019, 36(10): 2639-2646.
- ZHOU S F, GUO C, HE J, et al. Advances in the application of *Coix* in perennial grass breeding[J]. Pratacultural Science, 2019, 36(10): 2639-2646.
- [30] 鲁院院, 田刚, 余冰, 等. 晒干大黑山薏苡全株在生长肉兔上的营养价值评定[J]. 草业科学, 2017, 34(5): 1100-1106.
- LU Y Y, TIAN G, YV B, et al. Nutritive value of Sun-cured whole plant of *Coix* 'Daheishan' for growing rabbits[J]. Pratacultural Science, 2017, 34(5): 1100-1106.
- [31] 田刚, 鲁院院, 余冰, 等. 大黑山薏苡草粉替代苜蓿草粉对生长肉兔血清生化指标、肠道免疫和抗氧化功能的影响[J]. 动物营养学报, 2018, 30(7): 2791-2798.
- TIAN G, LU Y Y, YV B, et al. Effects of replacement of alfalfa meal by *Coix lacryma-jobi* cv. Daheishan meal on serum biochemical parameters, intestinal immunity and antioxidant capacity of growing rabbits[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2018, 30(7): 2791-2798.
- [32] 周树峰, 孙福艾, 郭超, 等. 一种通过远源杂交选育多年生饲用薏苡的方法: CN107896972A[P]. 2018-04-13.
- ZHOU S F, SUN F A, GUO C, et al. Method for selectively breeding perennial forage type *Coix lacryma-jobi* L. by distant hybridization: CN107896972A[P]. 2018-04-13.
- [33] 郭超, 王景麟, 杨雅文, 等. 一种薏苡遗传转化方法: CN118562878A[P]. 2024-08-30.
- GUO C, WANG J L, YANG Y W, et al. Genetic transformation method of *Coix lacryma-jobi*: CN118562878A[P]. 2024-08-30.