植物遗传资源学报

Journal of Plant Genetic Resources

ISSN 1672-1810,CN 11-4996/S

《植物遗传资源学报》网络首发论文

题目： 薏苡种质资源异地多年表型鉴定与优异种质筛选

作者： 谢志玉，许妍，何鹏亮，尹伟丹，揭红东，唐璇，揭雨成

DOI： 10.13430/j.cnki.jpgr.20251107003

收稿日期： 2025-11-07

网络首发日期： 2026-01-04

引用格式： 谢志玉，许妍，何鹏亮，尹伟丹，揭红东，唐璇，揭雨成．薏苡种质资源异地多年表型鉴定与优异种质筛选[J/OL]．植物遗传资源学报．https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20251107003

植物遗传资源学报
Journal of Plant Genetic Resources　DOI:10.13430/j.cnki.jpgr.20251107003

薏苡种质资源异地多年表型鉴定与优异种质筛选

谢志玉[1,2]，许妍[1,2]，何鹏亮[1,2]，尹伟丹[4]，揭红东[3]，唐璇[1,2]，揭雨成[1,2]

（[1]湖南农业大学苎麻研究所，长沙 410128；[2]湖南省草类作物种质创新与利用工程技术研究中心，长沙 410128；[3]湖南省作物研究所，长沙 410128，[4]怀化市农业农村局，湖南怀化 418000）

摘要：为系统开展薏苡种质资源异地多年表型鉴定与优异种质筛选，本研究于2023—2024年在低海拔石门（320 m）和高海拔泸阳（750 m）两个生态差异显著的试验点，对70份薏苡种质进行了连续两年的田间评价。通过系统测定株高、茎粗、分蘖数、每株实粒数、结实率、千粒重及籽粒产量等关键农艺性状，并综合运用变异分析、相关性分析、主成分分析和聚类分析等方法对种质表型多样性及适应性进行系统鉴定。结果表明，70份薏苡种质在两地均表现出丰富的表型变异，其中低海拔点平均变异系数（16.38%）显著高于高海拔点（12.63%），表明低海拔环境更易引发表型分化。高海拔点在多数性状上表现更优，显示出更好的生态适应性。通过主成分分析确定了分蘖数、结实率、千粒重及籽粒产量为影响综合表现的关键性状。基于隶属函数与综合评价体系，筛选出11份在双海拔环境下均表现优异的广适性种质，其中YY17-33（G70）表现最为突出，在泸阳点年均籽粒产量达307.14 kg/667 m²，结实率63.74%。本研究建立了薏苡种质资源异地多年表型鉴定体系，筛选出的优异种质为不同生态区薏苡遗传改良与品种选育提供了重要的材料基础。

关键词：薏苡；表型鉴定；异地评价；优异种质；综合评价

Phenotypic Identification of Coix Germplasm Resources Across Multiple Locations and Years and Screening of Elite Germplasm

XIE Zhiyu[1,2], XU Yan[1,2], HE Pengliang[1,2], YIN Weidan[4], JIE Hongdong[3], TANG Xuan[1,2], JIE Yucheng[1,2]

([1]Ramie Institute of Hunan Agricultural University, Changsha 410128; [2]Hunan Provincial Research Center of Engineering Technology for Grass Crop Germplasm Innovation and Utilization, Changsha 410128; [3],Crop Research Institute of Hunan Province, Changsha 410128; [4]Huaihua Municipal Bureau of Agriculture and Rural Affairs , Huaihua 418000 , Hunan)

Abstract: To systematically evaluate coix germplasm across diverse environments and years, this study conducted a two-year field experiment (2023–2024) with 70 accessions at two contrasting altitude sites: Shimen (320 m, low altitude) and Luyang (750 m, high altitude). Seven key agronomic traits—plant height, stem diameter, tiller number, grains per plant, seed-setting rate, thousand-grain weight, and grain yield—were analyzed using variation, correlation, principal component, and cluster analyses. The results revealed rich phenotypic variation, with a significantly higher mean coefficient of variation at the low-altitude site (16.38%) than at the high-altitude site (12.63%), indicating greater phenotypic plasticity under lower altitude conditions. Most traits performed better at the high-altitude

收稿日期：2025-11-07

第一作者研究方向为作物种质创新与利用，E-mail：2755736396@qq.com
通信作者：揭雨成，研究方向为作物种质创新与利用，E-mail: ibfcjyc@vip.sina.com
基金项目：国家饲草与饲纤兼用作物资源分库（NCGRC-2023-48）
Foundation project : National forage and forage fiber combined crop resource sub-bank(NCGRC-2023-48)

site, reflecting stronger ecological adaptability. Principal component analysis identified tiller number, seed-setting rate, thousand-grain weight, and grain yield as key traits influencing overall performance. Using a membership function-based comprehensive evaluation, 11 accessions with high adaptability across both altitudes were selected, among which YY17-33 (G70) performed most outstandingly, achieving an average annual grain yield of 307.14 kg/667 m² and a seed-setting rate of 63.74% at Luyang. This study establishes a robust framework for multi-site, multi-year phenotypic evaluation of coix germplasm and provides elite genetic resources for breeding programs targeting different ecological regions.

Key words: coix; phenotypic identification; multi-location evaluation; elite germplasm; comprehensive evaluation

薏苡（*Coix lacryma-jobi* L.）为禾本科薏苡属一年生或多年生植物，是兼具药用、食用和饲用价值的重要作物[1]。我国作为薏苡的起源地与驯化中心之一，其种植历史超过 6000 年，栽培区域横跨多个气候带，海拔分布范围从数十米至两千米以上[2]。这种广泛的生态适应性使得薏苡种质资源蕴含着丰富的遗传多样性。

作物的农艺性状是基因型与环境互作的综合表现[3]。海拔作为一个关键的环境梯度因子，通过改变温度、光照、降水等气象条件，形成独特的小气候生境，深刻影响作物的生长发育、产量形成及品质代谢[4]。例如，位于不同海拔高度的麦田，其小麦全生育期水分利用效率随海拔高度的上升而提高[5]。随着海拔高度的增加，作物的生育期延长[6]。王晓春等[7]研究了不同海拔对青贮玉米产量和品质的影响，发现株高、鲜重等生产性能在不同海拔差异显著。吴锋[8]通过将福建省认定的 4 个品种薏苡种植在不同海拔高度的 3 块试验地，得出不同种植海拔对薏苡的产量、总抗氧化能力、抑制轻自由基能力、多糖和油脂的含量都存在极显著作用。敖茂宏等[2]等通过对小白壳薏苡、安薏 1 号、仁薏 1 号 3 个试验材料分别在 758 m、1250 m、1553 m 三个不同海拔区域的主要农艺性状指标比较分析，发现其植株高度和生育期都是随着海拔的升高而呈现递增趋势，产量呈现先增后降趋势，这与营养生长旺盛抑制生殖生长有关[9]。因此，系统鉴定与评价不同生态条件下薏苡种质资源的表型变异，对于揭示其环境适应性机制及发掘特异性状资源至关重要。

目前，针对薏苡种质资源的研究多集中于单一地点或有限数量的种质，缺乏在明确海拔梯度下对大规模种质群体进行多性状的综合比较与筛选。本研究以 70 份来源广泛的薏苡种质为材料，在海拔 320 m（石门）和 750 m（泸阳）两个试验点开展连续两年的田间试验，旨在阐明高低海拔条件下薏苡主要农艺性状的变异规律，解析关键农艺性状与产量的相互关系。通过多方法综合评价，筛选出分别适应不同海拔及兼具广适性的优异薏苡种质。旨在为薏苡的生态区划、品种定向选育及遗传改良提供种质基础与理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料包括 70 份薏苡种质，主要由湖南农业大学湖南省草类作物种质创新与利用工程技术研究中心资源圃收集与保存。其中，63 份来源于湖南省内不同生态区，7 份来源于重庆、四川、贵州和云南等周边省份，以涵盖较广泛的遗传背景与地域适应性。供试种质主要为我国薏苡主产区的地方农家品种，并包含部分现代育成品种，种质名称及来源信息详见表 1。

表 1 供试 70 份薏苡种质来源信息

Table 1 Origin information of the 70 coix germplasms used in the study

序号 No.	名称 Name	来源地 Origin	序号 No.	名称 Name	来源地 Origin
1	YY1701	湖南省邵阳市城步县	36	YY2105	湖南省郴州市市辖区*
2	YY1702	湖南省岳阳市临湘市	37	YY2106	湖南省郴州市市辖区*
3	YY1707	湖南省岳阳市临湘市	38	YY2109	湖南省郴州市市辖区*
4	YY1708	湖南省岳阳市临湘市	39	YY1728	湖南省岳阳市华容县
5	YY1709	湖南省郴州市汝城县	40	YY1729	湖南省岳阳市华容县
6	YY1710	湖南省怀化市沅陵县	41	YY1731	湖南省岳阳市华容县
7	YY1711	湖南省怀化市沅陵县	42	YY04	湖南省株洲市茶陵县
8	YY1712	湖南省衡阳市常宁市	43	YY07	湖南省株洲市茶陵县
9	YY1713	湖南省怀化市新晃县	44	YY08	湖南省株洲市炎陵县
10	YY1715	湖南省岳阳市临湘市	45	YY16	湖南省郴州市市辖区*
11	YL3	湖南省湘西土家族苗族自治州州辖区*	46	YY29	湖南省郴州市市辖区*
12	YL7	湖南省湘西土家族苗族自治州保靖县	47	YY33	湖南省郴州市市辖区*
13	YL8	湖南省湘西土家族苗族自治州保靖县	48	YY0301	四川省眉山市仁寿县
14	YL9	湖南省湘西土家族苗族自治州龙山县里耶镇	49	YY2110	湖南省郴州市市辖区*
15	YL10	湖南省湘西土家族苗族自治州龙山县里耶镇	50	YY2111	湖南省郴州市市辖区*
16	YL11	湖南省湘西土家族苗族自治州龙山县里耶镇	51	YY2112	湖南省郴州市市辖区*
17	YY1901	湖南省郴州市安仁县	52	YY2114	湖南省郴州市市辖区*
18	YY1902	湖南省郴州市安仁县	53	隆回薏苡	湖南省邵阳市隆回县
19	YY1903	湖南省长沙市浏阳市	54	YY2125	湖南省郴州市市辖区*
20	YY1904	湖南省益阳市沅江市	55	YY2126	湖南省郴州市市辖区*
21	YY1717	湖南省郴州市桂东县	56	YY2127	湖南省郴州市市辖区*
22	YY1719	湖南省衡阳市衡阳县	57	YY21	湖南省邵阳市市辖区*
23	YY1720	湖南省衡阳市衡阳县	58	YY2130	湖南省郴州市市辖区
24	YY1721	湖南省岳阳市平江县	59	YY0302	云南省西双版纳州景洪市嘎酒镇
25	YY1722	湖南省常德市石门县	60	YY0303	云南省西双版纳州景洪市嘎酒镇
26	YY1723	湖南省常德市桃源县	61	YY0304	云南省西双版纳州景洪市嘎酒镇
27	YY1724	湖南省常德市桃源县	62	YY0306	贵州省黔东南州锦屏县
28	YY1725	湖南省常德市桃源县	63	YY0307	重庆市合川区肖家镇
29	YY1726	湖南省岳阳市临湘市	64	YY2120	湖南省郴州市市辖区*
30	YY1727	湖南省岳阳市临湘市	65	YY0309	四川省成都市锦江区
31	YY1905	湖南省怀化市洪江市	66	YY182	湖南省邵阳市隆回县

32	YY1906	湖南省株洲市炎陵县	67	小黑壳	湖南省邵阳市隆回县
33	YY1907	湖南省怀化市洪江市	68	YY1913	湖南省娄底市新化县
34	YY1911	湖南省岳阳市临湘市	69	YY2108	湖南省郴州市市辖区*
35	YY1912	湖南省娄底市新化县	70	YY1733	湖南省娄底市新化县

*表示部分种质来源信息仅记录至市级，表中统一标注为市辖区；湘西自治州来源标注为州辖区

* Indicates that the geographic origin information for some germplasm accessions was only recorded at the municipal level; these are uniformly labeled as municipal district in the table. Accessions from Xiangxi Autonomous Prefecture are labeled as prefectural district

1.2 试验设计

试验于 2023-2024 年设置两个海拔试验点：怀化市鹤城区石门基地(海拔 320m)和中方县泸阳镇鸡公坡基地(海拔 750m)，旨在综合评估种质在不同生态区（尤其是海拔相关的气候复合因子影响下）的表型响应与适应性。2023-2024 年各试验点关键月份降雨量记载如表 2 所示，温度记载如图 1 所示。各试验点土壤类型为红壤，肥力中等，前茬作物为水稻。试验采用随机区组设计，3 次重复。小区面积 8m²，行株距 0.5m×0.4m，每小区 4 行，每行定苗 10 株，共 40 株。性状调查时于每小区中间两行连续取样 15 株，3 次重复，共 45 株/份。所有试验点均于 4 月下旬至 5 月上旬播种，采用穴盘育苗移栽方式，每穴保留 1 株。田间管理措施统一，按当地高产栽培模式进行水肥管理和病虫害防治。

表 2 2023 年和 2024 年试验点位置和关键月份降雨量记载

Table 2 Records of test site locations and precipitation in key months in 2023 and 2024

地址 Adress	海拔高度（m）Altitude	经度 Longitude	纬度 Latitude	月度总降雨量（mm）（2023/2024）Monthly total rainfall				
				6 月	7 月	8 月	9 月	10 月
湖南省怀化市鹤城区石门基地 Shimen Base, Hecheng District, Huaihua City, Hunan Province	320	109.95°E	27.55°N	140.9/319.1	89.1/343.8	138.3/45.3	64.5/73.7	54.8/74.7
湖南省怀化市中方县泸阳镇鸡公坡 Jigongpo, Luyang Town, Zhongfang County, Huaihua City, Hunan Province	750	110.15°E	27.29°N	269.6/481.2	134.1/233.4	209/192.3	76.3/100.6	63.8/72.3

地址 Adress	海拔高度（m）Altitude	经度 Longitude	纬度 Latitude	月度总降雨量（mm）（2023/2024）Monthly total rainfall				
				6 月	7 月	8 月	9 月	10 月

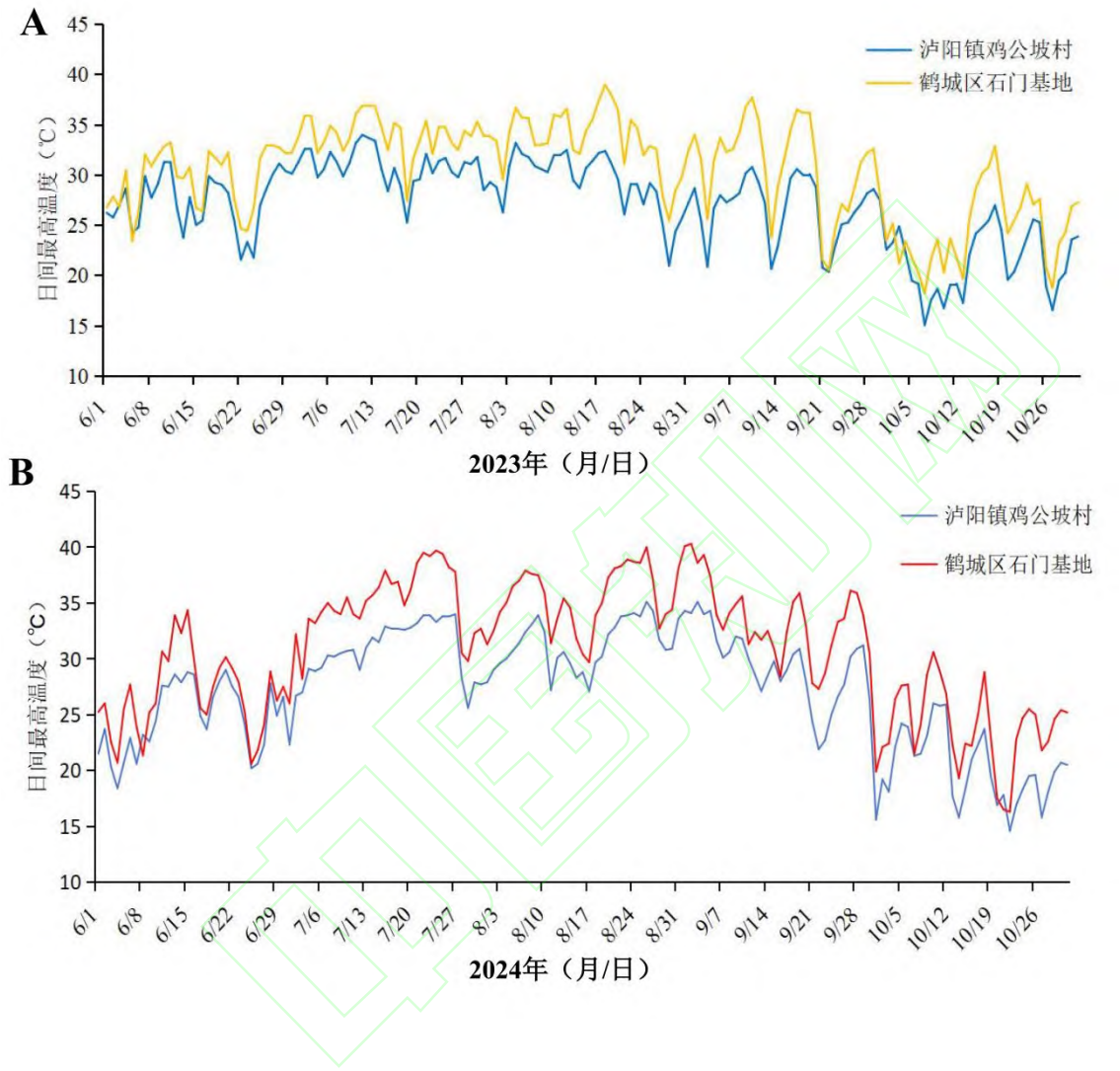


图 1 2023–2024 年两试验点关键月份温度变化

Fig. 1 Temperature variations during key months at two experimental sites from 2023 to 2024

1.3 调查性状

表型数据采集严格按照《薏苡种质资源描述规范和数据标准》[10]执行。于薏苡成熟期每小区随机选取 15 株进行农艺性状调查：主要包括株高、茎粗：主茎地上部第一节间中部的长度、有效分蘖数、单株实粒数、结实率、千粒重、籽粒产量等。

1.4 数据处理与分析

数据处理采用 Excel 2007 和 Origin 软件进行相关性分析、主成分分析和聚类分析。

参照杨涛等[11]和孙东雷等[12]方法，通过隶属函数法对 70 份薏苡种质的 7 个农艺性状进行综合评价，计算公式如下。

$$U_{ij} = (X_{ij} - X_{jmin})/(X_{jmax} - X_{jmin})$$

式中，Uij 表示隶属函数值，Xij 为品种 i 在指标 j 的测定值，Xjmin 与 Xjmax 分别为指标 j 的最小值和最大值。

$$W_j = p_j / \sum_{j=1}^{m} p_j \qquad j = 1, 2, 3, \cdots, n$$

式中，Wj 表示第 j 个综合指标在所有综合指标中的权重，pj 为材料的第 j 个综合指标的贡献率，$\sum_{j=1}^{m} p_j$ 为材料主成分的累计贡献率

$$D = \sum_{j=1}^{m} [(U_{ij}) \times (W_j)] \qquad j = 1, 2, 3, \cdots, n$$

式中，D 表示各品种优异性状的综合评价值。

2 结果与分析

2.1 薏苡农艺性状遗传变异分析

在两年两点的试验中，各农艺性状变异系数存在明显差异，总体上低海拔试验点（石门）的表型变异更为显著（平均变异系数：2023 年 16.69%，2024 年 16.06%）（表 3），而高海拔试验点（泸阳）性状表达较为稳定（平均变异系数分别为 12.97%与 12.28%）。所有环境中，籽粒产量的变异系数均为最高（石门：22.45%–26.19%；泸阳：17.05%–17.33%），说明产量在群体中变异最为丰富；千粒重和茎粗等性状变异相对较小，表现出较高的稳定性。不同年份间各性状变异程度排序略有差异，反映出环境对表型可塑性的影响。综合来看，在低海拔条件下，薏苡种质表型变异更为显著（平均变异系数 16.38%），而较高海拔环境下其性状表达则更趋稳定（变异系数 12.63%）。除少数指标外，多数农艺性状变异系数均超过 10%，展现出丰富的遗传多样性。较高海拔试验点在株高、分蘖数、穗部性状及产量方面普遍优于低海拔，仅茎粗略低，表明薏苡更适宜在较高海拔生态区生长。

表 3 70 份薏苡种质农艺性状的表型数据

Table 3 The agronomic traits of 70 coix germplasms

试验点 Site	年份 Year	性状 Traits	范围 Range	平均值±标准差 Mean±SD	变异系数 CV（%）
石门（320m）	2023	株高(cm) PH	133.63-242.57	186.78±19.36	10.36
		茎粗(mm) PD	8.16-13.56	11.23±1.14	10.15
		分蘖数（株）TN	7.28-12.78	9.61±1.31	13.61
		每株实粒数（粒）PNFG	18.25-60.15	40.18±8.96	22.3
		结实率(%) STR	25.66-70.98	47.02±10.55	22.45

		千粒重(g) TGW	126.08-218.56	172.19±20.94	12.16
		籽粒产量(kg/667 ㎡) OP	89.95-295.74	194.24±50.21	25.85
		株高(cm) PH	140.33-245.32	188.05±18.51	9.84
		茎粗(mm) PD	8.87-14.12	11.78±1.23	10.48
		分蘖数（株）TN	7.92-12.79	9.82±1.11	11.31
	2024	每株实粒数（粒）PNFG	18.98-69.68	41.86±9.36	22.35
		结实率(%) STR	26.34-72.34	48.62±10.42	21.43
		千粒重(g) TGW	127.91-212.51	174.12±18.85	10.83
		籽粒产量(kg/667 ㎡) OP	91.65-293.57	195.54±51.21	26.19
		株高(cm) PH	164.15-262.07	221.74±22.59	10.19
		茎粗(mm) PD	7.24-14.92	10.61±1.72	16.21
		分蘖数（株）TN	8.19-13.12	11.05±1.07	9.66
	2023	每株实粒数（粒）PNFG	30.58-69.69	52.89±7.88	14.9
		结实率(%) STR	39.48-78.89	56.99±8.03	14.09
		千粒重(g) TGW	146.05-236.88	198.65±17.28	8.7
泸阳		籽粒产量(kg/667 ㎡) OP	131.26-317.64	245.66±41.88	17.05
（750m）		株高(cm) PH	165.42-254.73	219.24±20.97	9.56
		茎粗(mm) PD	7.91-14.29	11.35±1.67	14.69
		分蘖数（株）TN	8.67-13.25	11.21±0.97	8.66
	2024	每株实粒数（粒）PNFG	31.64-71.48	54.5±7.94	14.57
		结实率(%) STR	40.17-77.36	58.69±7.66	13.06
		千粒重(g) TGW	149.25-231.05	198.6±16.13	8.12
		籽粒产量(kg/667 ㎡) OP	109.89-310.85	244.85±42.43	17.33

Notes: PH:Plant Height;PD:Plant Diameter;TN:Tiller Number;PNFG:Plant Number of filled grains;STR:Seed setting rate;TGW:Thousand grain weight;OP:Output

2.2 薏苡农艺性状相关性分析

根据表 4 分析结果，两年两点试验中薏苡籽粒产量与分蘖数、每株实粒数、结实率及千粒重均呈极显著正相关（$P<0.01$），而与株高、茎粗无显著关联。影响产量的四类性状中，千粒重相关性最高，其次为结实率和分蘖数，每株实粒数作用相对较弱。该相关模式在不同海拔和年份间表现一致，说明薏苡产量构成性状间的关联具有较强环境稳定性。因此，在育种中应优先协同提升千粒重与结实率，并优化分蘖结构，以建立高产群体。

表 4 薏苡农艺性状各指标间的相互关系矩阵

Table 4 Correlation matrix among agronomic traits of coix

性状 Traits	株高 PH	茎粗 PD	分蘖数 TN	每株实粒数 PNFG	结实率 STR	千粒重 TGW	籽粒产量 OP
2023 年石门							
株高 PH	1						
茎粗 PD	0.001	1					
分蘖数 TN	0.044	0.12	1				

每株实粒数 PNFG	0.124	0.053	0.229	1			
结实率 STR	0.033	0.205	0.201	0.337**	1		
千粒重 TGW	0.16	0.162	0.185	0.165	0.213	1	
籽粒产量 OP	0.178	0.202	0.673**	0.438**	0.743**	0.797**	1
2023 年泸阳							
株高 PH	1						
茎粗 PD	0.222	1					
分蘖数 TN	0.112	0.019	1				
每株实粒数 PNFG	-0.037	0.014	0.024	1			
结实率 STR	0.042	0.201	0.202	0.307**	1		
千粒重 TGW	0.195	0.185	0.162	0.084	0.195	1	
籽粒产量 OP	0.165	0.208	0.558**	0.323**	0.501**	0.65**	1
2024 年石门							
株高 PH	1						
茎粗 PD	0.081	1					
分蘖数 TN	0.036	0.077	1				
每株实粒数 PNFG	0.047	-0.031	0.096	1			
结实率 STR	0.018	0.179	0.203	0.308**	1		
千粒重 TGW	0.156	0.149	0.179	0.146	0.207	1	
籽粒产量 OP	0.167	0.203	0.597**	0.369**	0.748**	0.779**	1
2024 年泸阳							
株高 PH	1						
茎粗 PD	0.124	1					
分蘖数 TN	0.042	-0.053	1				
每株实粒数 PNFG	-0.046	0.122	-0.062	1			
结实率 STR	-0.017	0.124	0.209	0.397**	1		
千粒重 TGW	0.167	0.113	0.125	0.06	0.196	1	
籽粒产量 OP	0.094	0.14	0.477**	0.344**	0.536**	0.644**	1

*, **分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平达到显著相关和极显著相关

*, ** significance at $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively

2.3 薏苡农艺性状聚类分析

如图 2 聚类分析所示，在欧式距离为 80 时，两年两点 70 份薏苡种质均划分为 3 类。类群Ⅰ在石门和泸阳分别包含 35 份（50%）和 33 份（47.14%）种质，各农艺性状及籽粒产量均表现最优（表 5）。类群Ⅱ在两试验点分别包括 27 份（38.57%）与 25 份（35.71%）种质，性状表现中等。类群Ⅲ包含综合性状最差的种质，石门 8 份（11.43%）、泸阳 12 份（17.14%）。各类群种质数量分布及性状表现差异，为针对性育种与资源利用提供了分类依据。

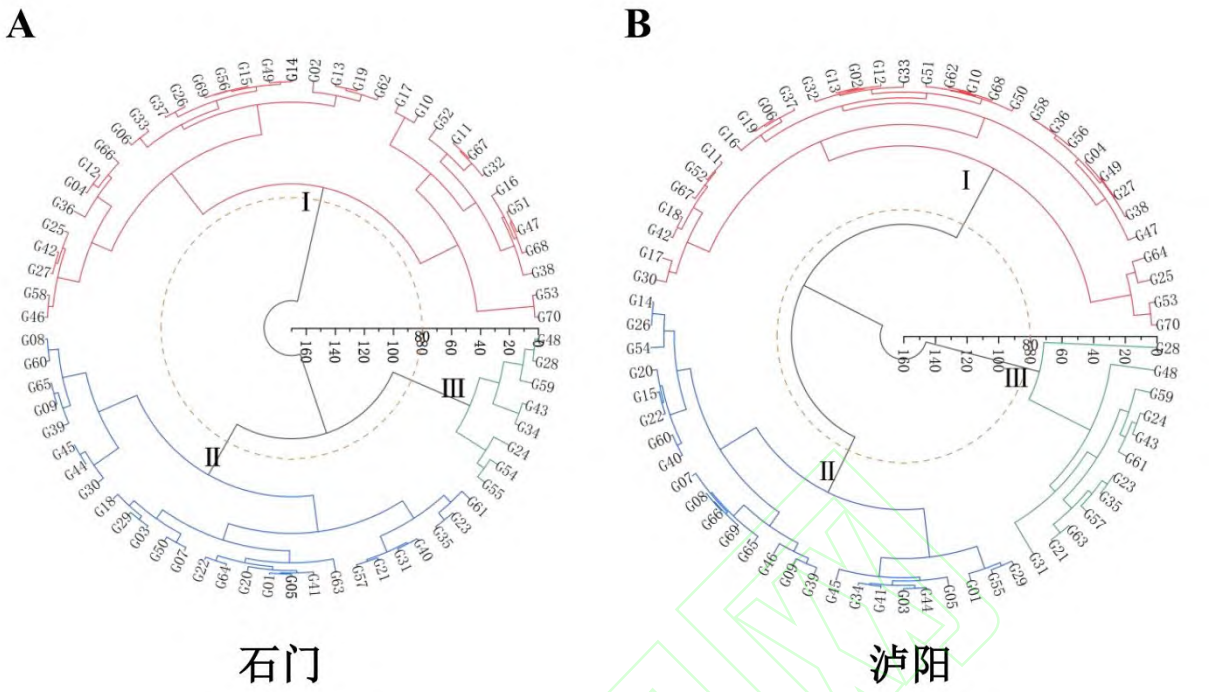


图 2 基于籽粒产量的 70 份薏苡种质聚类分析的点谱系图.

Fig. 2 Dot dendrograms from cluster analysis of 70 coix seed accessions based on grain yield.

表 5 三个类群资源主要农艺性状指标的平均值

Table 5 The average values of the index of the main agronomic traits of three groups

试验点 Site	类群 Groups	株高（cm） PH	茎粗（mm） PD	分蘖数（株） TN	每株实粒数（粒）PNFG	结实率（%）STR	千粒重（g） TGW	籽粒产量（kg/667 ㎡）OP
石门 Shimen	Ⅰ	188.49A	11.75A	10.43A	43.57A	55.31A	187.32A	238.50A
	Ⅱ	189.79A	11.24A	9.19B	40.40B	41.31B	163.54B	163.69B
	Ⅲ	174.93B	11.13A	8.36C	31.78C	36.47C	144.05C	109.59C
泸阳 Luyang	Ⅰ	221.61A	11.35A	11.50A	54.86A	61.89A	206.57A	282.30A
	Ⅱ	218.72A	10.46B	11.28A	53.10A	55.83B	199.17B	230.81B
	Ⅲ	221.22A	10.98AB	9.84B	51.79B	50.78C	175.16C	176.24C

2.4 薏苡农艺性状主成分分析

对 70 份薏苡种质资源的 7 个农艺性状进行主成分分析，在两年两点数据中均提取出 3 个主成分（PC），累计贡献率为 68.5%–75.8%，可有效代表原始性状的主要变异信息（表 6，表 7）。PC1 贡献率最高（35.5%–47.4%），其载荷结构一致指向“产量-库容”因子，分蘖数、结实率、千粒重和籽粒产量均呈较高正向载荷（≥ 0.44），表明 PC1 得分越高，种质的有效穗数、结实能力和籽粒充实度越优，印证了产量构成性状的协同作用。PC2（14.9%–17.7%）主要反映株高与茎粗的形态特征，但其载荷方向受年份影响：2023 年石门点茎粗为负向（-0.45），提示“高秆细茎”类型在当年低海拔条件下亦表现良好；2024 年两地茎粗均转为正向，体现海拔与年份互作对株型选择的影响。PC3（13.4%–15.3%）对环境变化最敏感，其中每株实粒数在 2023 年

泸阳点呈强正向载荷（0.63），表明在高海拔环境下实粒数对产量具有独立贡献，可作为针对性育种的辅助指标。综上，分蘖数、结实率、千粒重与产量是薏苡高产育种的核心稳定指标，株高、茎粗和实粒数可依据目标环境在 PC2 与 PC3 中辅助筛选。

表 6 石门试验点 7 个农艺性状在 2 年中的特征向量及贡献率

Table 6 Eigenvectors and contribution rates of 7 agronomic traits at the Shimen trial site over two years

性状 Trait	主成分 Principle factor					
	2023			2024		
	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3
株高 PH	0.102	0.809	0.452	0.101	0.600	0.694
茎粗 PD	0.147	-0.448	0.864	0.142	0.698	-0.352
分蘖数 TN	0.441	-0.140	-0.193	0.415	-0.070	-0.267
每株实粒数 PNFG	0.282	0.312	-0.053	0.245	-0.377	0.538
结实率 STR	0.460	-0.159	-0.083	0.470	-0.079	-0.171
千粒重 TGW	0.471	0.029	-0.048	0.484	-0.002	0.056
籽粒产量 OP	0.510	0.033	-0.024	0.532	0.001	0.023
特征值 Eigenvalue	3.321	1.086	1.042	2.624	1.132	1.073
贡献率（%）Contribution rate	47.44%	14.95%	13.37%	44.16%	15.12%	14.21%
累计贡献率（%）Cumulstive percentage	47.44%	62.39%	75.76%	44.16%	59.28%	73.49%

表 7 泸阳试验点 7 个农艺性状在 2 年中的特征向量及贡献率

Table 7 Eigenvectors and contribution rates of 7 agronomic traits at the Luyang trial site over two years

性状 Trait	主成分 Principle factor					
	2023			2024		
	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3
株高 PH	0.217	0.589	-0.307	0.114	0.005	0.858
茎粗 PD	0.224	0.658	0.362	0.157	0.626	0.335
分蘖数 TN	0.455	-0.325	-0.320	0.452	-0.427	-0.070
每株实粒数 PNFG	0.096	-0.301	0.626	0.092	0.535	-0.320
结实率 STR	0.366	0.032	0.470	0.399	0.319	-0.178
千粒重 TGW	0.517	-0.076	-0.239	0.536	-0.192	0.063
籽粒产量 OP	0.534	-0.134	0.042	0.551	0.037	-0.095
特征值 Eigenvalue	3.091	1.058	1.001	2.488	1.238	1.067
贡献率（%）Contribution rate	37.49%	16.17%	15.33%	35.54%	17.68%	15.25%
累计贡献率（%）Cumulstive percentage	37.49%	53.66%	68.99%	35.54%	53.23%	68.48%

同列数字后大写字母不同代表($P<0.01$)水平差异显著

Different capital letters in the same column indicate significant differences at $P<0.01$ level

2.5 薏苡种质性状综合评价分析

基于前期主成分分析提取的三个主要成分（PC1-PC3）构建了薏苡种质农艺性状综合评价体系，通过标准化性状数据计算各主成分得分，并依据方差贡献率权重（0.626、0.197、0.177）得到综合评价值 D（D=0.626×PCA1+0.197×PCA2+0.177×PCA3），其值越高表明种质综合性状越优。两年两点的综合评分结果显示（表 8、表 9），石门试验点（320m）连续两年 D 值排名前 20 的稳定优异种质共 18 份，泸阳试验点（750m）同样筛选出 18 份。其中，YL-8、YL-9、YL-11、YY19-06、YY21-09、YY21-12、YY21-30、YY03-06、YY18-2、小黑壳及 YY17-33 等 11 份种质在两地均表现优异，表明其具备广泛的生态适应性，是跨海拔育种的重要候选材料。该综合评价体系为系统筛选具有高产、稳产和广适性的薏苡优异种质提供了理论依据与方法支撑。

表 8 薏苡农艺性状的综合评价（石门）

Table 8 Comprehensive Evaluation of Agronomic Traits in Coix (Shimen)

种质 Genotypes	综合得分（D) Score		排名 Range		种质 Genotypes	综合得分（D) Score		排名 Range	
	2023	2024	2023	2024		2023	2024	2023	2024
YY17-01	0.814	0.681	43	49	YY21-05	0.929	0.865	30	32
YY17-02	0.930	0.831	29	34	YY21-06	1.022	0.976	25	24
YY17-07	0.685	0.586	51	58	YY21-09	1.317	1.279	4	3
YY17-08	0.826	0.783	41	40	YY17-28	0.881	0.851	34	33
YY17-09	0.813	0.687	44	48	YY17-29	0.622	0.611	58	55
YY17-10	0.943	0.873	27	31	YY17-31	0.682	0.654	52	51
YY17-11	0.653	0.502	54	61	YY-04	0.821	0.780	42	41
YY17-12	0.863	0.807	37	39	YY-07	0.404	0.343	67	68
YY17-13	0.833	0.761	38	43	YY-08	0.783	0.811	45	38
YY17-15	1.226	1.101	9	12	YY-16	0.697	0.707	49	46
YL-3	1.076	1.024	22	20	YY-29	1.105	1.017	18	21
YL-7	1.055	0.959	24	26	YY-33	1.250	1.150	7	9
YL-8	1.255	1.149	6	10	YY03-01	0.325	0.293	70	70
YL-9	1.154	1.048	17	17	YY21-10	0.878	0.928	35	27
YL-10	1.073	1.044	23	18	YY21-11	0.829	0.777	40	42
YL-11	1.211	1.064	13	15	YY21-12	1.225	1.265	10	4
YY19-01	1.083	0.969	21	25	YY21-14	1.229	1.187	8	7
YY19-02	0.585	0.571	59	59	隆回薏苡	1.177	1.068	16	14
YY19-03	1.089	1.010	19	22	YY21-25	0.329	0.339	69	69
YY19-04	0.870	0.829	36	35	YY21-26	0.438	0.429	65	64
YY17-17	0.573	0.554	61	60	YY21-27	0.940	0.905	28	28
YY17-19	0.627	0.595	57	56	YY-21	0.642	0.593	55	57
YY17-20	0.559	0.475	62	62	YY21-30	1.087	1.042	20	19
YY17-21	0.469	0.469	64	63	YY03-02	0.470	0.413	63	66
YY17-22	0.917	0.875	32	30	YY03-03	0.896	0.818	33	36
YY17-23	1.181	1.049	15	16	YY03-04	0.691	0.623	50	53

YY17-24	0.923	0.902	31	29	YY03-06	1.221	1.188	11	6
YY17-25	0.389	0.361	68	67	YY03-07	0.663	0.695	53	47
YY17-26	0.743	0.758	46	44	YY21-20	0.581	0.671	60	50
YY17-27	0.706	0.644	48	52	YY03-09	0.974	0.984	26	23
YY19-05	0.629	0.623	56	54	YY18-2	1.212	1.104	12	11
YY19-06	1.265	1.187	5	8	小黑壳	1.374	1.309	1	1
YY19-07	0.830	0.817	39	37	YY19-13	1.193	1.071	14	13
YY19-11	0.427	0.425	66	65	YY21-08	1.330	1.242	3	5
YY19-12	0.722	0.719	47	45	YY17-33	1.359	1.292	2	2

表 9 薏苡农艺性状的综合评价（泸阳）

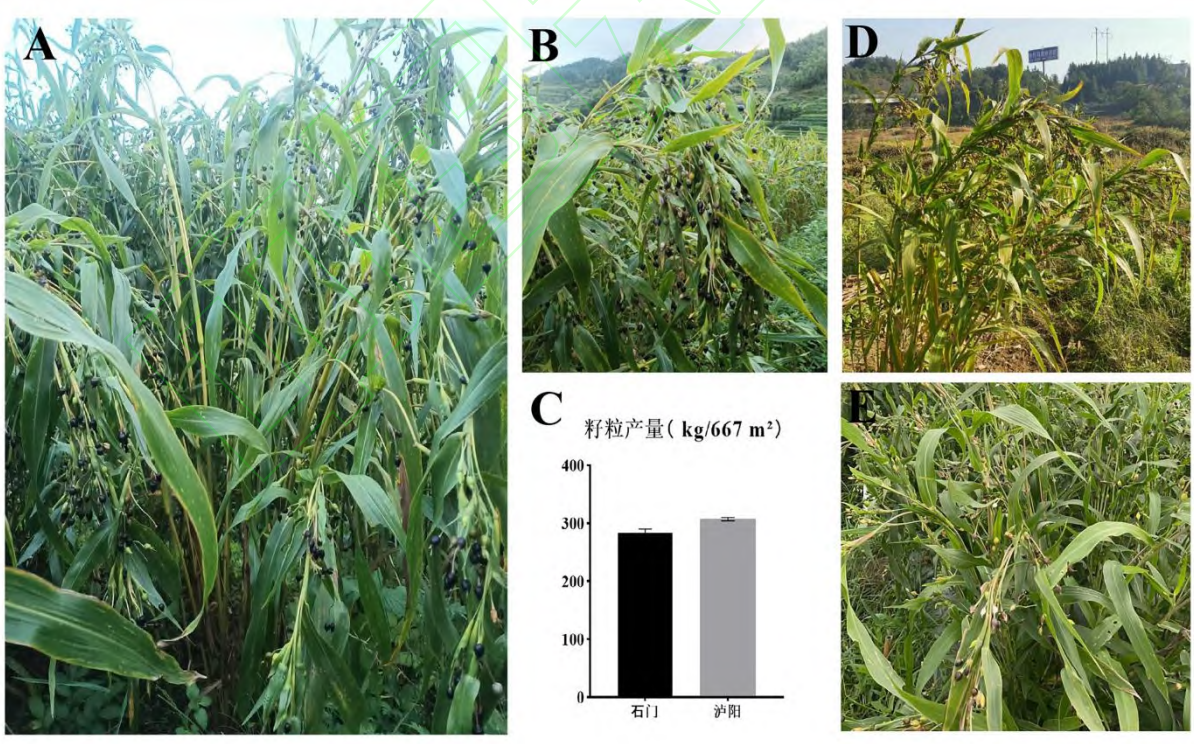
Table 9 Comprehensive Evaluation of Agronomic Traits in Coix (Luyang)

种质 Genotypes	综合得分（D) Score		排名 Range		种质 Genotypes	综合得分（D) Score		排名 Range	
	2023	2024	2023	2024		2023	2024	2023	2024
YY17-01	0.837	0.832	34	43	YY21-05	1.024	1.080	15	17
YY17-02	0.884	0.895	31	35	YY21-06	0.743	0.811	47	45
YY17-07	0.678	0.663	51	61	YY21-09	1.122	1.202	6	7
YY17-08	0.872	0.908	32	34	YY17-28	0.598	0.719	60	56
YY17-09	0.592	0.690	61	58	YY17-29	0.703	0.801	50	47
YY17-10	0.814	0.851	37	40	YY17-31	0.624	0.676	58	59
YY17-11	0.669	0.706	53	57	YY-04	0.796	0.825	38	44
YY17-12	0.533	0.570	64	64	YY-07	0.442	0.526	69	66
YY17-13	0.666	0.740	54	55	YY-08	0.735	0.856	48	39
YY17-15	0.954	1.000	24	27	YY-16	0.650	0.749	56	54
YL-3	1.240	1.212	1	4	YY-29	0.890	0.984	29	28
YL-7	1.106	1.149	8	10	YY-33	0.963	1.037	20	24
YL-8	1.200	1.238	2	3	YY03-01	0.760	0.798	43	48
YL-9	1.086	1.135	10	12	YY21-10	0.823	0.915	36	33
YL-10	0.910	0.930	26	31	YY21-11	0.889	0.974	30	29
YL-11	1.189	1.211	3	5	YY21-12	1.137	1.281	5	1
YY19-01	0.972	1.049	17	21	YY21-14	0.832	0.889	35	36
YY19-02	0.771	0.795	41	49	隆回薏苡	0.957	1.010	22	26
YY19-03	1.084	1.127	12	13	YY21-25	0.774	0.834	40	42
YY19-04	0.743	0.867	46	38	YY21-26	0.576	0.654	63	62
YY17-17	0.458	0.504	67	68	YY21-27	1.085	1.111	11	14
YY17-19	0.706	0.810	49	46	YY-21	0.451	0.496	68	69
YY17-20	0.468	0.558	66	65	YY21-30	0.966	1.102	18	15
YY17-21	0.475	0.521	65	67	YY03-02	0.585	0.619	62	63
YY17-22	0.903	1.019	27	25	YY03-03	0.988	1.101	16	16
YY17-23	0.954	1.039	23	23	YY03-04	0.633	0.776	57	52
YY17-24	0.912	1.053	25	20	YY03-06	0.963	1.060	19	19
YY17-25	0.224	0.272	70	70	YY03-07	0.762	0.880	42	37

YY17-26	0.670	0.764	52	53	YY21-20	0.901	1.041	28	22
YY17-27	0.745	0.782	45	51	YY03-09	0.794	0.933	39	30
YY19-05	0.663	0.791	55	50	YY18-2	1.112	1.193	7	8
YY19-06	1.061	1.143	13	11	小黑壳	1.040	1.192	14	9
YY19-07	1.095	1.203	9	6	YY19-13	0.960	1.076	21	18
YY19-11	0.609	0.670	59	60	YY21-08	0.861	0.928	33	32
YY19-12	0.754	0.851	44	41	YY17-33	1.139	1.253	4	2

2.6 代表性优异薏苡种质综合评价与育种潜势分析

基于多年多点综合评价体系，本研究遴选出 3 份具有突出农艺性状与产量潜力的薏苡优异种质。G70（YY17-33）源自湖南省新化县，在泸阳点年均籽粒产量达 307.14 kg/667 m²，比种植在石门的最高籽粒产量（288.31kg/667 m²）均值高 18.83%，结实率 63.74%，植株结构优良、籽粒充实度高，表现出显著的高产稳产与广适性，是选育高产抗逆品种的优良亲本（图 3a, b, c，补充表 1, 2）。G66（YY18-2）与 G67（小黑壳）均来源于隆回县，在石门点连续两年产量表现稳定，平均籽粒产量分别为 221.10±0.53 kg/667 m²（G66）与 258.89±1.47 kg/667 m²（G67）（图 3d, e, 补充表 1, 2），群体整齐、穗粒结构协调，尤其适应低海拔高温环境，适用于耐逆性与适应性改良育种。上述种质系统展现了在产量、适应性与籽粒性状方面的综合优势，可为不同生态区薏苡遗传改良与品种选育提供核心种质资源。



A.G70（石门）；B. G70（泸阳）；C. G70 在泸阳与石门两地的产量对比；D.G66（石门）;E. G67（石门）

A. G70 (Shimen); B. G70 (Luyang); C. Comparison of G70 yield between Luyang and Shimen sites; D. G66 (Shimen); E. G67 (Shimen).

图 3 优异种质田间植株及籽粒性状

Fig. 3 Field plant and grain traits of elite germplasms

3 讨论

双海拔均表现优异的 11 份种质（YL-8、YL-9、YL-11、YY19-06、YY21-09、YY21-12、YY21-30、YY03-06、YY18-2、小黑壳、YY17-33）具有显著的广适性，可作为核心亲本用于耐高温、强适应性新品种选育，其分别在两地平均产量达 200.29-309.11kg/667 m²（补充表 1, 2），表现出突出的高产稳产潜力。环境因子与遗传背景的共同作用决定了农艺性状的表型表达，进而影响作物的产量与适应性[13]。海拔作为一个重要的复合生态因子，通过引起光、温、水等条件的变化，对作物生长发育产生深远影响。本研究发现，低海拔石门点（320 m）的农艺性状平均变异系数（16.38%）高于高海拔泸阳点（12.63%），高海拔泸阳（750m）在薏苡株高、分蘖数、每株实粒数、结实率、千粒重及籽粒产量等多数性状上均显著优于低海拔点，这与敖茂宏等[2]报道的薏苡产量随海拔升高而先升高后降低的结论基本一致,在该文中对“小白壳薏苡”、“安薏 1 号”、“仁薏 1 号”3 个试验材料分别在 758 m、1250 m、1553 m 三个不同海拔区域的主要农艺性状指标比较分析，发现其植株高度和生育期都是随着海拔的升高而呈现递增趋势，而产量则呈先增后降趋势，这与营养生长旺盛抑制生殖生长有关[9]。本研究的高海拔点相当于敖茂宏[2]论文中的低海拔点，进一步说明在一定的海拔高度范围内，适当的高海拔区（750m）较低海拔区(320m)能提供更利于薏苡生殖生长的气候条件。

高温胁迫是低海拔地区限制薏苡产量的关键因素，结实率、千粒重和分蘖数是影响作物产量的重要指标。本研究中，石门基地（320m）7-8 月平均气温为 30.09℃，极端高温（≥35℃）频发，导致部分温敏性薏苡种质的结实率显著下降。这与侯昕芳等[14]在玉米中的研究结论一致，即花期高温会破坏花粉活力，降低受精率。而泸阳镇基地（750 m）同期平均气温较低，昼夜温差大，有利于干物质积累。本研究在泸阳镇基地（750 m）筛选出 18 份薏苡优异种质资源，在石门基地（320m）同样筛选出了 18 份优异种质资源，在两个海拔试验点均表现优异的种质有 11 份，这 11 份种质在高低海拔适应性都强，表现出较强的环境缓冲能力，其生理机制可能是因为较高的结实率，表明其花粉发育对高温不敏感[15]。这一结果与小麦耐热品种的筛选标准一致，即茎秆强度和结实稳定性是耐逆性的关键指标[16]。7 份种质在泸阳镇基地（750 m）适应性强而在低海拔适应性弱，这些种质相对于在低海拔，其籽粒产量在高海拔大幅增加，这种环境特异性响应可能与其分蘖调控基因的表达有关，温度能够影响分蘖的发生[17]，环境温度提高时，小麦分蘖数量减少[18]。此外，这种环境特异性响应也可能与结实率和千粒重有关，32℃被广泛认为是影响稻谷、小麦等主要粮食作物生理过程与产量形成的关键高温临界点[19]，持续高于此温度易导致授粉受阻、结实率下降。灌浆期适宜的温度有助于提高结实率，而昼夜温差增大更有利于提高粒重[20]。

参考文献

[1]张璐, 杨学乐, 何世才, 王艳兰, 何录秋, 王素华, 胡丽琴, 李基光. 湖南薏苡种质资源调查及表型评价. 植物遗传资源学报, 2025, 26 (11): 2118-2130

Zhang L,Yang X L,He S C, Wang Y L, He L Q, Wang S H, Hu L Q, Li J G. Investigation and phenotypic evaluation of adlay(*Coix* L.) germplasm resources in Hunan Province.Journal of Plant Genetic Resources,2025,26(11):2118-2130

[2] 敖茂宏,宋智琴.不同海拔高度对薏苡农艺性状及药用品质的影响.时珍国医国药,2022,33(11):2743-2745

Ao M H, Song Z Q. Effects of different altitudes on agronomic traits and medicinal quality of *Coix* seed . Lishizhen Medicine and Materia Medica Research, 2022, 33(11): 2743-2745

[3] Wang Y Y,Wang X L,Sun S,Jin C Z,Su J M,Wei J P. & Liu H.GWAS, MWAS and mGWAS provide insights into precision agriculture based on genotype-dependent microbial effects in foxtail millet.Nature Communications, 2022, 3(1),5913-5913

[4] 黄羌维,陈由强. 薏苡营养成分和产地环境条件的关系. 植物生理学通讯,1987(4):36-39

Huang Q W, Chen Y Q. Relationship between nutritional components of *Coix* seed and environmental conditions of the producing area. Plant Physiology Communications, 1987(4): 36-39

[5] 靖华, 亢秀丽, 马爱平, 王裕智, 崔欢虎, 张建诚. 不同海拔麦田土壤水分变化特征及其对水分利用效率的影响. 干旱气象, 2019, 37 (4): 656-662.

Jing H, Kang X L, Ma A P, Wang Y Z, Cui H H, Zhang J C. Variation characteristics of soil moisture in wheat fields at different altitudes and its effects on water use efficiency. Journal of Arid Meteorology, 2019, 37(4): 656-662

[6] 胡廷会, 吕建伟, 马天进, 侯再芬, 夏延茂, 李正强. 海拔与密度对花生生育期及产量的影响. 贵州农业科学, 2015, 43 (12): 42-44

Hu T H, Lv J W, Ma T J, Hou Z F, Xia Y M, Li Z Q. Effects of altitude and planting density on growth period and yield of peanut. Guizhou Agricultural Sciences, 2015, 43(12): 42-44

[7] 王晓春, 何志军, 于海洋, 金环, 杨天辉, 梁小军. 适宜宁夏南部山区不同海拔青贮玉米品种的筛选研究. 黑龙江畜牧兽医, 2022 (9): 105-109

Wang X C, He Z J, Yu H Y, Jin H, Yang T H, Liang X J. Screening of suitable silage maize varieties for different altitudes in the mountainous areas of Southern Ningxia. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2022(9): 105-109

[8] 吴锋. 影响薏苡产量与种子发芽质量的因子分析. 福州: 福建农林大学,2017.

Wu F. Factor analysis of factors affecting yield and seed germination quality of adlay. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2017

[9] 禾璐, 贾苏卿, 马磊磊, 董冰, 李晓峰, 王志虹, 韩启亮, 王秀明, 李世勇. 不同栽培生境因子对 2 个谷子品种营养品质影响的研究. 种子, 2020, 39 (6): 94-98

He L, Jia S Q, Ma L L, Dong B, Li X F, Wang Z H, Han Q L, Wang X M, & Li S Y. Effects of different cultivation habitat factors on nutritional quality of two millet varieties. Seed, 2020, 39(6): 94-98

[10] 石明, 李祥栋, 秦礼康. 薏苡种质资源描述规范和数据标准. 北京: 中国农业出版社, 2017: 38-59

Shi M, Li X D, Qin L K. Descriptive specifications and data standards for adlay germplasm resources. Beijing: China Agriculture Press, 2017: 38-59

[11] 杨涛,黄雅婕,李生梅,任丹,崔进鑫,庞博,于爽, 高文伟. 海岛棉种质资源表型性状的遗传多样性分析及综合评价.中国农业科学,2021,54(12):2499-2509

Yang T, Huang Y J, Li S M, Ren D, Cui J X, Pang B, Yu S, Gao W W. Genetic diversity analysis and comprehensive evaluation of phenotypic traits in sea island

cotton germplasm resources. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(12): 2499-2509

[12] 孙东雷, 卞能飞, 陈志德, 邢兴华, 徐泽俊, 齐玉军, 王幸, 王晓军, 王伟. 花生种质资源表型性状的综合评价及指标筛选. 植物遗传资源学报, 2018, 19 (5): 865-874

Sun D L, Bian N F, Chen Z D, Xing X H, Xu Z J, Qi Y J, Wang X, Wang X J, Wang W. Comprehensive evaluation and index screening of phenotypic traits in peanut germplasm resources. Journal of Plant Genetic Resources, 2018, 19(5): 865-874

[13]梁煜莹, 张加羽, 姜骁, 王露欢, 张晓吉, 刘齐妹, 薛云云, 迟晓元, 白冬梅. 花生品质与气候环境的关系研究. 植物遗传资源学报, 2024, 25 (02): 227-244

Liang Y Y, Zhang J Y, Jiang X, Wang L H, Zhang X J, Liu Q M, Xue Y Y, Chi X Y, Bai D M. Relationship between peanut quality and climatic environment. Journal of Plant Genetic Resources, 2024, 25(02): 227-244

[14] 侯昕芳, 王媛媛, 黄收兵, 董昕, 陶洪斌, 王璞. 花期前后高温对玉米花粉发育及结实率的影响. 中国农业大学学报, 2020, 25 (3): 10-16

Hou X F, Wang Y Y, Huang S B, Dong X, Tao H B, Wang P. Effects of high temperature around flowering stage on pollen development and seed setting rate in maize. Journal of China Agricultural University, 2020, 25(3): 10-16

[15] Endo M, Tsuchiya T, Hamada K, Kawamura S, Yano K, Ohshima M Kawagishi-Kobayashi M. High temperatures cause male sterility in rice plants with transcriptional alterations during pollen development. Plant Cell Physiology, 2009, 50(11), 1911-1922

[16] 赵小红, 白羿雄, 姚有华, 安立昆, 吴昆仑. 禾谷类作物茎秆特性与茎倒伏关系的研究. 植物生理学报, 2021, 57 (2): 257-264

Zhao X H, Bai Y X, Yao Y H, An L K, Wu K L. Relationship between culm characteristics and stalk lodging in cereal crops. Plant Physiology Journal, 2021, 57(2): 257-264

[17] Patel D, Franklin K A. Temperature-regulation of plant architecture. Plant Signaling Behavior, 2009, 4(7): 577-579

[18] Thorne G N, Wood D W. Effects of radiation and temperature on tiller survival, grain number and grain yield in winter wheat. Annals of Botany, 1987, 59(4): 413-426

[19] 尹朝静,杨坤,孔锋.气候变化下的中国粮食全要素生产率再测度.华中农业大学学报: 社会科学版,2025(3):38-52

Yin C J, Yang K, Kong F. Re-measurement of total factor productivity of grain in China under climate change. Journal of Huazhong Agricultural University : Social Sciences Edition, 2025 (3): 38-52

[20] 冯向前, 徐建强, 沈足金, 王丹英, 徐春梅, 陈松, 章秀福, 肖玉苹. 播期对籼粳杂交稻甬优 1540 产量、品质的影响及其与气候因子的相关性. 中国稻米, 2024, 30 (1): 108-114, 117

Feng X Q, Xu J Q, Shen Z J, Wang D Y, Xu C M, Chen S, Zhang X F, Xiao Y P. Effects of sowing date on yield and quality of indica-japonica hybrid rice Yongyou 1540 and their correlation with climatic factors. China Rice, 2024, 30(1): 108-114, 117