

鞠乐,胡卫丽,牛银亭,等. 绿豆种质资源萌发期抗旱性评价及抗旱指标筛选[J]. 江苏农业科学,2026,54(8):130-139.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2026.08.015

# 绿豆种质资源萌发期抗旱性评价及抗旱指标筛选

鞠乐<sup>1</sup>,胡卫丽<sup>1</sup>,牛银亭<sup>1</sup>,朱旭<sup>1</sup>,秦娜<sup>2</sup>,李拴柱<sup>1</sup>,源朝政<sup>1</sup>,曹双<sup>1</sup>,强学兰<sup>3</sup>

(1. 南阳市科学院,河南南阳 473000; 2. 河南省农业科学院粮食作物研究所,河南郑州 450000;

3. 南阳市宛城区农业农村发展服务中心,河南南阳 473000)

**摘要:**为了构建绿豆种质资源萌发期的抗旱性鉴定体系,为绿豆种质创新提供理论依据,以 12 份绿豆种质资源为材料,用不同浓度 PEG-6000(聚乙二醇 6000)模拟干旱胁迫。依据各项指标的变异系数,确定适宜用于抗旱性鉴定的 PEG-6000 浓度;采用隶属函数法进行绿豆种质资源的抗旱性评价;运用因子分析、相关性分析、灰色关联度分析、逐步回归分析等方法对 19 项指标(抗旱系数)进行评价分析。结果表明,(1)在干旱胁迫下,随着 PEG-6000 溶液浓度的增加,供试绿豆种质幼苗生长受到的抑制越显著。用 12% PEG-6000 模拟干旱胁迫,是绿豆种子萌发期比较适宜的抗旱性鉴定处理。(2)采用隶属函数法进行抗旱性综合评价,筛选出抗旱型材料宛绿 8 号;筛选出 4 份中间型材料宛绿 5 号、冀科绿 4 号、L101、保绿 2016 等;筛选出 4 份干旱较敏感型材料郑绿 8 号、中绿 5 号、L97、品绿 2016-17 等;筛选出 3 份干旱敏感型材料冀绿 13 号、宛黑绿 1 号、宛绿 10 号等。(3)相对芽长、相对株高、相对下胚轴鲜重、相对芽鲜重、相对芽干重、相对根冠比 2 等 6 个指标可作为绿豆种质萌发期抗旱性鉴定的主要指标,相对下胚轴长、相对植株鲜重、相对下胚轴干重、相对植株干重、相对根冠比 1 等 5 个指标为抗旱性鉴定的次要指标。

**关键词:**绿豆;抗旱性;隶属函数法;因子分析;灰色关联度;回归分析

**中图分类号:**S522.037 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2026)08-0130-10

随着全球气候变暖,水资源短缺等问题日益突

出。水资源缺乏会造成干旱,而干旱是影响农作物产量、品质的主要非生物因素之一<sup>[1]</sup>。我国是水资源紧缺大国,有近 38% 的耕地处于干旱、半干旱地区,干旱是造成我国粮食减产的主要灾害因素。因此,不断提高农作物的抗逆性、加强抗旱性新品种的培育,是我国亟需解决的重要课题<sup>[2]</sup>。绿豆(*Vigna radiata* L.)具有生育期短、耐贫瘠、耐旱、耐盐碱、广适性等特点<sup>[3-4]</sup>,也是典型的救灾储备作物<sup>[5]</sup>,为保障我国的粮食安全发挥了重要作用。种子萌发期是农作物整个生命周期中比较脆弱的阶

收稿日期:2025-03-25

基金项目:河南省重点研发专项(编号:231111110300);国家食用豆产业技术体系建设专项(编号:CARS-08-Z13);河南省甘薯杂粮产业技术体系建设专项(编号:HARS-25-04-S)。

作者简介:鞠乐(1987—),女,河南南阳人,硕士,助理研究员,主要从事杂粮遗传育种与栽培技术研究。E-mail:jule521@163.com。

通信作者:朱旭,研究员,主要从事食用豆种质资源鉴定利用与新品种选育研究,E-mail:zhuxu315@126.com;秦娜,博士,副研究员,主要从事谷子、绿豆杂粮作物新种质创制与新品种选育研究,E-mail:qinna2004@126.com。

定及综合评价[J]. 榆林学院学报,2024,34(2):56-62.

[13] 彭玉琳,崔晓漫,张沥曼玲,等. 不同生育期大麦抗旱性鉴定及抗旱指标筛选[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2024,52(8):36-48,59.

[14] 李诗晴,王素华,张耀文,等. 769 份绿豆种质资源萌发期耐盐性鉴定[J]. 植物遗传资源学报,2025,26(4):672-682.

[15] 李亚萍,苏剑,周发明,等. 干旱和盐胁迫对金花菜种子萌发及幼苗抗氧化保护酶活性的影响[J]. 草学,2019(3):24-35.

[16] 苏小雨,高桐梅,张鹏钰,等. 基于主成分分析及隶属函数法对芝麻苗期耐热性综合评价[J]. 作物杂志,2023(4):52-59.

[17] 安霞,金关荣,陈常理,等. 红麻、亚麻和黄麻种子萌发期的耐旱性比较[J]. 浙江农业科学,2019,60(1):49-50,54.

[18] 檀嘉琦,张鲜花,李思媛,等. 7 份梯牧草种质材料的种子萌发期抗旱性综合评价[J]. 草原与草坪,2024,44(2):226-236.

[19] 彭去回,钱晓刚. 14 个荞麦种质材料萌芽期的抗旱性能初步研究[J]. 山地农业生物学报,2011,30(6):483-486,546.

[20] 贾婷. 干旱胁迫对荞麦种子萌发及苗期生理特性的影响[D]. 雅安:四川农业大学,2013.

[21] 石艳华,张永清,罗海婧. 化学调节物质浸种对不同水分条件下苦荞生长及其生理特性的影响[J]. 西北植物学报,2013,33(1):123-131.

[22] 赵少迪,胡传伟,张玉莲,等. 苦荞种质资源萌发期抗旱性综合评价[J]. 干旱地区农业研究,2024,42(3):13-21.

[23] 吕小旭,杨璐,王大成,等. 15 个宁夏枸杞品种叶片抗旱指标的筛选和比较研究[J]. 干旱地区农业研究,2025,43(1):42-53.

[24] 景晨娟,陈雪峰,王端,等. 三个李子品种叶片结构差异及其抗旱性分析[J]. 北方园艺,2021(15):27-34.

段,该阶段的农作物对水分比较敏感,因此种子萌发期是进行抗旱性鉴定的重要阶段<sup>[6]</sup>。

目前,虽然已有不少关于绿豆种质资源萌发期抗旱性方面的研究,但是与玉米、麦类等大宗作物的研究相比相对较少。徐溶蔓研究发现,用外源壳寡糖、褪黑素浸种或者进行叶面喷施可以有效缓解绿豆萌发期或幼苗期因干旱胁迫造成的损伤<sup>[7]</sup>;武泉栋等研究发现,在干旱或盐胁迫下,绿豆种质萌发期的幼苗生长受到抑制<sup>[8]</sup>;张思雨等用 15% PEG-6000(聚乙二醇 6000)模拟干旱胁迫,发现发芽势、活力指数可以作为绿豆种质萌发期的抗旱性鉴定指标<sup>[9]</sup>;郭容秋用 20% PEG-6000 模拟干旱胁迫,并用隶属函数法对 67 份绿豆种质进行抗旱性评价,共鉴定出 7 份抗旱型品种<sup>[10]</sup>。但是,目前研究者关于绿豆种质资源萌发期 PEG-6000 抗旱性鉴定浓度、抗旱性鉴定指标、抗旱性评价方法等尚未达成共识。用绿豆种质资源在实验室内进行抗旱性鉴定试验具有周期短、试验条件稳定、可控性强等优点。本研究拟用不同浓度 PEG-6000 溶液模拟干旱胁迫,并测定绿豆种质资源萌发期的形态指标,借助因子分析、相关性分析、灰色关联度分析、逐步回归分析等多种方法,以期构建绿豆种质资源萌发期抗旱性鉴定体系,为绿豆种质创新、提高抗旱能力提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试的 12 份绿豆种质为宛绿 5 号、冀绿 13 号、宛黑绿 1 号、郑绿 8 号、宛绿 10 号、中绿 5 号、L97、L101、冀科绿 4 号、品绿 2016-17、保绿 2016、宛绿 8 号。

### 1.2 试验设计

本研究的预试验结果表明,当 PEG-6000 溶液浓度 $\geq 15\%$ 时,下胚轴致畸严重,且幼芽基本无法正常生长。因此,本试验用不同质量体积分数(0%、3%、6%、9%、12%)的 PEG-6000 溶液模拟干旱胁迫。本试验自 2024 年 10 月起至 2025 年 3 月初在南阳市科学院 6 楼实验室内进行。绿豆发芽试验参照 GB/T 3543.4—1995《农作物种子检验规程 发芽试验》,略有改动。绿豆种子先用超纯水清洗数次,随后用 75% 乙醇消毒 1 min,再用 5% 次氯酸钠消毒 15 min,最后用超纯水清洗 4 次。12 cm $\times$ 12 cm $\times$ 6 cm 的发芽盒用 75% 乙醇进行消毒后,放

置 3 层滤纸,再加入 20 mL 溶液(以超纯水为对照),以排出空气泡。选取 30 粒籽粒饱满的绿豆种子均匀摆放在滤纸上。试验设置 3 次重复,将发芽盒均匀放置在 25 $^{\circ}\text{C}$  恒温人工智能气候培养箱内,先进行 3 d 暗培养,再进行光照培养,每天光照 14 h,湿度为 60%,7 d 后发芽试验结束。

### 1.3 测定指标与方法

培养 5 d 时,以主根长超过种子长度为发芽标准统计发芽势。在培养 7 d 时,从每个发芽盒内挑取具有代表性的 10 株幼苗,清洗干净后去掉子叶,测其主根长、下胚轴长、芽长,称量植株鲜重、下胚轴鲜重、芽鲜重,然后将材料放置在烘箱内,80 $^{\circ}\text{C}$  恒温烘干至恒重,称量根干重、下胚轴干重、芽干重。相关计算公式如下:

株高 = 下胚轴长 + 芽长;

根冠比 1 = (下胚轴鲜重 + 芽鲜重) / 根鲜重;

根冠比 2 = (下胚轴干重 + 芽干重) / 根干重;

相对值(抗旱系数) = 胁迫处理的指标值 / 对照处理的指标值;

含水量 = (鲜重 - 干重) / 鲜重  $\times 100\%$ 。

### 1.4 数据统计分析

用 Excel 2010 进行数据整理,用 DPSv 7.05 进行方差分析、相关性分析、因子分析、灰色关联度分析、逐步回归分析等。本研究采用隶属函数法与标准差系数赋予权重法对绿豆种质进行抗旱性评价,权重系数与隶属函数值的计算参照赵海明等的方法<sup>[11]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 PEG-6000 模拟干旱胁迫对绿豆种子萌发的影响

在 PEG-6000 模拟干旱胁迫条件下,绿豆种质对干旱胁迫的敏感性存在差异。由表 1 可以看出,相对发芽势仅在 PEG-6000 浓度间存在显著差异( $P < 0.05$ );相对主根长、相对根鲜重、相对根干重、相对根含水量等指标在品种与 PEG-6000 浓度互作间差异不显著;相对下胚轴干重在品种间差异不显著;除上述之外,其他各项指标在品种间或 PEG-6000 浓度间或品种与 PEG-6000 浓度互作间均差异显著或极显著。

由表 2 可知,在干旱胁迫下,随着 PEG-6000 溶液浓度的增加,供试绿豆种质幼苗生长受到的抑制越显著,并且在不同浓度 PEG-6000 胁迫下,大部分

表 1 方差分析结果

指标	变异来源	均方	F 值	P 值	指标	变异来源	均方	F 值	P 值
A <sub>1</sub>	品种间	3.149 5	9.774 0	0.000 1	X <sub>1</sub>	品种间	0.001 0	1.750 0	0.093 5
	PEG 浓度间	1.591 7	4.940 0	0.001 0		PEG 浓度间	0.001 7	3.078 0	0.025 5
	品种×PEG 浓度	0.476 5	1.479 0	0.049 7		品种×PEG 浓度	0.000 6	1.070 0	0.377 7
A <sub>2</sub>	品种间	14.160 9	13.703 0	0.000 1	X <sub>2</sub>	品种间	0.107 6	5.565 0	0.000 1
	PEG 浓度间	21.283 5	20.595 0	0.000 1		PEG 浓度间	0.373 1	19.293 0	0.000 1
	品种×PEG 浓度	1.033 4	2.339 0	0.000 1		品种×PEG 浓度	0.019 3	1.452 0	0.058 3
A <sub>3</sub>	品种间	6.556 5	8.516 0	0.000 1	X <sub>3</sub>	品种间	0.122 7	4.677 0	0.000 1
	PEG 浓度间	38.261 9	49.699 0	0.000 1		PEG 浓度间	1.331 2	50.760 0	0.000 1
	品种×PEG 浓度	0.769 9	6.383 0	0.000 1		品种×PEG 浓度	0.026 2	5.331 0	0.000 1
A <sub>4</sub>	品种间	5.349 8	18.622 0	0.000 1	X <sub>4</sub>	品种间	0.202 4	6.355 0	0.000 1
	PEG 浓度间	28.284 3	98.455 0	0.000 1		PEG 浓度间	3.537 0	111.054 0	0.000 1
	品种×PEG 浓度	0.287 3	4.187 0	0.000 1		品种×PEG 浓度	0.031 8	3.642 0	0.000 1
A <sub>5</sub>	品种间	22.403 6	16.416 0	0.000 1	X <sub>5</sub>	品种间	0.132 6	6.044 0	0.000 1
	PEG 浓度间	128.258 9	93.980 0	0.000 1		PEG 浓度间	1.926 1	87.803 0	0.000 1
	品种×PEG 浓度	1.364 7	4.730 0	0.000 1		品种×PEG 浓度	0.021 9	4.459 0	0.000 1
A <sub>6</sub>	品种间	6 231.400 2	10.613 0	0.000 1	X <sub>6</sub>	品种间	0.052 5	4.256 0	0.000 3
	PEG 浓度间	46 650.132 2	79.454 0	0.000 1		PEG 浓度间	1.549 0	125.680 0	0.000 1
	品种×PEG 浓度	587.136 2	4.056 0	0.000 1		品种×PEG 浓度	0.012 3	2.268 0	0.000 2
A <sub>7</sub>	品种间	1 856.479 4	12.654 0	0.000 1	X <sub>7</sub>	品种间	0.054 2	4.709 0	0.000 1
	PEG 浓度间	29 487.050 2	200.994 0	0.000 1		PEG 浓度间	2.562 5	222.564 0	0.000 1
	品种×PEG 浓度	146.706 3	2.475 0	0.000 1		品种×PEG 浓度	0.011 5	1.960 0	0.002 2
A <sub>8</sub>	品种间	5 408.475 5	17.295 0	0.000 1	X <sub>8</sub>	品种间	0.169 2	9.134 0	0.000 1
	PEG 浓度间	9 911.398 3	31.695 0	0.000 1		PEG 浓度间	0.561 2	30.289 0	0.000 1
	品种×PEG 浓度	312.715 2	3.031 0	0.000 1		品种×PEG 浓度	0.018 5	1.318 0	0.121 8
A <sub>9</sub>	品种间	24 322.293 3	16.694 0	0.000 1	X <sub>9</sub>	品种间	0.044 7	6.376 0	0.000 1
	PEG 浓度间	230 455.727 9	158.181 0	0.000 1		PEG 浓度间	1.362 0	194.253 0	0.000 1
	品种×PEG 浓度	1 456.914 4	2.771 0	0.000 1		品种×PEG 浓度	0.007 0	1.779 0	0.007 5
A <sub>10</sub>	品种间	52.325 8	22.224 0	0.000 1	X <sub>10</sub>	品种间	0.019 1	1.638 0	0.121 4
	PEG 浓度间	114.192 4	48.500 0	0.000 1		PEG 浓度间	0.649 1	55.564 0	0.000 1
	品种×PEG 浓度	2.354 5	3.259 0	0.000 1		品种×PEG 浓度	0.011 7	1.970 0	0.002 0
A <sub>11</sub>	品种间	15.644 6	8.566 0	0.000 1	X <sub>11</sub>	品种间	0.064 2	5.870 0	0.000 1
	PEG 浓度间	222.198 9	121.667 0	0.000 1		PEG 浓度间	1.591 9	145.485 0	0.000 1
	品种×PEG 浓度	1.826 3	3.167 0	0.000 1		品种×PEG 浓度	0.010 9	2.400 0	0.000 1
A <sub>12</sub>	品种间	21.775 9	39.693 0	0.000 1	X <sub>12</sub>	品种间	0.038 6	5.955 0	0.000 1
	PEG 浓度间	12.789 1	23.312 0	0.000 1		PEG 浓度间	0.152 3	23.495 0	0.000 1
	品种×PEG 浓度	0.548 6	1.774 0	0.007 7		品种×PEG 浓度	0.006 5	0.823 0	0.766 7
A <sub>13</sub>	品种间	186.676 2	25.545 0	0.000 1	X <sub>13</sub>	品种间	0.022 3	4.101 0	0.000 4
	PEG 浓度间	827.354 2	113.217 0	0.000 1		PEG 浓度间	0.721 4	132.530 0	0.000 1
	品种×PEG 浓度	7.307 7	2.838 0	0.000 1		品种×PEG 浓度	0.005 4	1.699 0	0.012 6
A <sub>14</sub>	品种间	0.874 2	7.511 0	0.000 1	X <sub>14</sub>	品种间	0.082 9	4.567 0	0.000 1
	PEG 浓度间	4.375 9	37.598 0	0.000 1		PEG 浓度间	0.876 1	48.288 0	0.000 1
	品种×PEG 浓度	0.116 4	4.139 0	0.000 1		品种×PEG 浓度	0.018 1	2.124 0	0.000 7
A <sub>15</sub>	品种间	0.695 4	5.998 0	0.000 1	X <sub>15</sub>	品种间	0.055 5	4.415 0	0.000 2
	PEG 浓度间	4.684 1	40.405 0	0.000 1		PEG 浓度间	0.553 9	44.075 0	0.000 1
	品种×PEG 浓度	0.115 9	2.865 0	0.000 1		品种×PEG 浓度	0.012 6	1.883 0	0.003 7

表 1 (续)

指标	变异来源	均方	F 值	P 值	指标	变异来源	均方	F 值	P 值
A <sub>16</sub>	品种间	6.116 9	12.848 0	0.000 1	X <sub>16</sub>	品种间	0.000 4	7.643 0	0.000 1
	PEG 浓度间	27.509 0	57.782 0	0.000 1		PEG 浓度间	0.003 4	60.859 0	0.000 1
	品种 × PEG 浓度	0.476 1	2.877 0	0.000 1		品种 × PEG 浓度	0.000 1	1.590 0	0.025 4
A <sub>17</sub>	品种间	14.337 0	18.406 0	0.000 1	X <sub>17</sub>	品种间	0.000 9	9.042 0	0.000 1
	PEG 浓度间	10.762 4	13.817 0	0.000 1		PEG 浓度间	0.001 2	12.161 0	0.000 1
	品种 × PEG 浓度	0.778 9	2.265 0	0.000 2		品种 × PEG 浓度	0.000 1	1.092 0	0.346 6
A <sub>18</sub>	品种间	1.682 1	2.293 0	0.025 5	X <sub>18</sub>	品种间	0.000 5	5.401 0	0.000 1
	PEG 浓度间	58.751 3	80.074 0	0.000 1		PEG 浓度间	0.006 8	74.169 0	0.000 1
	品种 × PEG 浓度	0.733 7	4.495 0	0.000 1		品种 × PEG 浓度	0.000 1	2.928 0	0.000 1
A <sub>19</sub>	品种间	15.380 5	10.342 0	0.000 1	X <sub>19</sub>	品种间	0.000 6	2.892 0	0.006 0
	PEG 浓度间	165.938 4	111.575 0	0.000 1		PEG 浓度间	0.021 3	109.130 0	0.000 1
	品种 × PEG 浓度	1.487 2	2.134 0	0.000 6		品种 × PEG 浓度	0.000 2	1.623 0	0.020 6

注: A<sub>1</sub> 表示发芽势, A<sub>2</sub> 表示主根长, A<sub>3</sub> 表示下胚轴长, A<sub>4</sub> 表示芽长, A<sub>5</sub> 表示株高, A<sub>6</sub> 表示下胚轴鲜重, A<sub>7</sub> 表示芽鲜重, A<sub>8</sub> 表示根鲜重, A<sub>9</sub> 表示植株鲜重, A<sub>10</sub> 表示下胚轴干重, A<sub>11</sub> 表示芽干重, A<sub>12</sub> 表示根干重, A<sub>13</sub> 表示植株干重, A<sub>14</sub> 表示根冠比 1, A<sub>15</sub> 表示根冠比 2, A<sub>16</sub> 表示植株含水量, A<sub>17</sub> 表示根含水量, A<sub>18</sub> 表示下胚轴含水量, A<sub>19</sub> 表示芽含水量, X<sub>1</sub> 表示相对发芽势, X<sub>2</sub> 表示相对主根长, X<sub>3</sub> 表示相对下胚轴长, X<sub>4</sub> 表示相对芽长, X<sub>5</sub> 表示相对株高, X<sub>6</sub> 表示相对下胚轴鲜重, X<sub>7</sub> 表示相对芽鲜重, X<sub>8</sub> 表示相对根鲜重, X<sub>9</sub> 表示相对植株鲜重, X<sub>10</sub> 表示相对下胚轴干重, X<sub>11</sub> 表示相对芽干重, X<sub>12</sub> 表示相对根干重, X<sub>13</sub> 表示相对植株干重, X<sub>14</sub> 表示相对根冠比 1, X<sub>15</sub> 表示相对根冠比 2, X<sub>16</sub> 表示相对植株含水量, X<sub>17</sub> 表示相对根含水量, X<sub>18</sub> 表示相对下胚轴含水量, X<sub>19</sub> 表示相对芽含水量。下表同。

绿豆种质的各项指标的相对值(抗旱系数)整体上小于 1。分析供试绿豆种质幼苗的 38 个形态指标可知,对照处理的根鲜重、根干重这 2 个指标的变异系数分别为 20.54%、16.51%,均最大;在 6% PEG-6000 模拟干旱胁迫处理下,主根长、相对主根长的变异系数分别为 17.51%、17.38%,均最大;在 9% PEG-6000 模拟干旱胁迫处理下,根冠比 1、相对发芽势、相对芽鲜重、相对根鲜重等 4 个指标的变异系数分别为 19.48%、2.13%、21.18%、16.71%,均最大。除以上指标外,下胚轴长、芽长、株高、芽鲜重、植株鲜重、根冠比及含水量等 30 个指标(占所有指标的 15/19)在 12% PEG-6000 模拟干旱胁迫处理下的变异系数最大。由此可知,在 12% PEG-6000 模拟干旱胁迫处理下,供试绿豆种质幼苗的生长状况差异较大。综上所述,12% PEG-6000 是绿豆种子萌发期比较适宜的抗旱性鉴定浓度。

## 2.2 12% PEG-6000 模拟干旱胁迫条件下各项指标间的相关性分析

本研究采用绿豆种质各指标的抗旱系数来进行指标间的相关性分析,以消除绿豆品种(系)间的遗传背景差异。由表 3 可知,相对发芽势与相对根鲜重呈显著负相关,相关系数为 -0.64;相对主根长、相对根干重等 2 个指标与其他指标之间不存在显著相关性。除上述之外,其他指标之间存在显著或极显著的正相关关系。例如,相对下胚轴长与相

对芽长、相对株高、相对下胚轴鲜重、相对芽鲜重、相对植株鲜重、相对下胚轴干重、相对芽干重、相对植株干重、相对根冠比 1、相对根冠比 2 等 10 个指标呈极显著正相关关系,相关系数分别为 0.89、0.99、0.88、0.89、0.92、0.87、0.80、0.84、0.73、0.84。相对芽干重与相对下胚轴长、相对芽长、相对株高、相对下胚轴鲜重、相对芽鲜重、相对植株鲜重、相对下胚轴干重、相对植株干重、相对根冠比 1、相对根冠比 2 等 10 个指标呈显著或极显著正相关关系,相关系数分别为 0.80、0.90、0.86、0.66、0.96、0.72、0.83、0.97、0.68、0.72。

## 2.3 12% PEG-6000 模拟干旱胁迫下各项指标的因子分析

对 12% PEG-6000 模拟干旱胁迫条件下的各项指标进行因子分析,由表 4 可以看出,主因子数为 4,累计贡献率为 92.06%。其中,主因子 1 的贡献率达 49.38%,相对下胚轴长、相对芽长、相对株高、相对下胚轴鲜重、相对芽鲜重、相对植株鲜重、相对下胚轴干重、相对芽干重、相对植株干重、相对根冠比 1、相对根冠比 2 等指标起到主要作用,主要反映地上部分生长情况及地上地下部分物质积累情况。主因子 2 的贡献率达 18.48%,其中相对植株含水量起主要作用。主因子 3 的贡献率达 15.74%,其中相对根鲜重、相对芽干重起主要作用。主因子 4 的贡献率达 8.46%,其中相对芽含水量起主要作用。

表 2 PEG-6000 模拟干旱胁迫对绿豆种子萌发特性的影响

PEG-6000 浓度 (%)	指标	A <sub>1</sub> (%)	A <sub>2</sub> (cm)	A <sub>3</sub> (cm)	A <sub>4</sub> (cm)	A <sub>5</sub> (cm)	A <sub>6</sub> (mg)	A <sub>7</sub> (mg)	A <sub>8</sub> (mg)	A <sub>9</sub> (mg)	A <sub>10</sub> (mg)	A <sub>11</sub> (mg)	A <sub>12</sub> (mg)	A <sub>13</sub> (mg)	A <sub>14</sub>	A <sub>15</sub>	A <sub>16</sub> (%)	A <sub>17</sub> (%)	A <sub>18</sub> (%)	A <sub>19</sub> (%)
0	最小值	29.00	6.06	4.96	2.19	7.14	130.19	84.64	93.44	320.28	9.33	10.31	6.40	26.60	1.74	2.45	90.39	90.43	91.22	87.83
	最大值	30.00	9.70	6.36	3.84	10.20	229.79	121.20	171.79	505.96	16.07	13.83	11.30	39.60	3.01	3.28	92.80	94.68	93.01	90.84
	变异系数(%)	1.11	14.00	8.22	16.85	9.86	18.78	10.87	20.54	14.03	16.16	9.60	16.51	12.26	18.15	10.64	0.85	1.32	0.61	0.96
3	最小值	28.30	5.42	4.43	1.21	5.76	127.75	59.06	83.63	296.43	9.49	8.26	6.60	26.00	1.48	2.18	90.70	91.24	91.54	85.72
	最大值	30.00	9.39	6.26	3.63	9.89	201.24	102.43	162.87	438.54	16.00	13.00	10.30	39.00	2.55	3.00	92.52	94.93	92.66	89.60
	变异系数(%)	1.51	17.49	9.55	38.91	16.58	15.26	19.29	16.03	12.19	17.05	13.49	14.67	12.50	15.12	10.18	0.61	1.02	0.36	1.48
6	最小值	29.00	4.87	4.09	0.73	5.09	106.73	44.59	77.11	239.05	8.86	7.01	6.50	24.40	1.40	2.19	89.62	91.54	90.65	83.60
	最大值	30.00	8.32	6.05	3.50	9.55	184.00	93.51	151.74	371.40	15.97	11.75	10.20	36.50	2.12	3.12	92.08	94.85	91.95	88.52
	变异系数(%)	1.47	17.51	11.06	47.70	19.65	15.85	20.95	16.19	12.26	17.59	14.66	15.23	13.34	15.33	10.85	0.80	1.06	0.44	1.65
9	最小值	27.70	4.06	2.38	0.41	2.80	94.89	36.15	73.78	220.51	8.64	5.73	6.10	21.30	1.24	2.07	89.25	90.56	89.45	83.14
	最大值	30.00	7.19	6.12	3.11	9.23	144.72	82.53	135.21	333.33	14.00	10.07	9.90	31.90	2.33	2.79	91.29	94.12	91.20	87.80
	变异系数(%)	2.32	16.57	27.16	69.43	35.06	13.27	24.91	16.79	12.49	16.10	16.00	15.18	12.45	19.48	10.12	0.68	1.11	0.54	1.42
12	最小值	27.30	4.08	1.62	0.25	1.89	75.33	22.19	60.96	136.34	5.49	3.78	5.90	15.40	0.97	1.54	87.88	89.71	87.70	81.49
	最大值	30.00	7.10	5.86	2.00	7.86	119.13	52.84	114.44	278.69	11.74	7.67	8.90	27.30	1.61	2.46	90.75	93.68	90.21	85.41
	变异系数(%)	2.90	16.46	41.21	90.35	48.34	24.64	27.47	17.30	19.48	20.51	21.45	14.74	16.29	17.90	14.83	1.03	1.28	0.94	1.33
PEG-6000 浓度 (%)	指标	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>	X <sub>10</sub>	X <sub>11</sub>	X <sub>12</sub>	X <sub>13</sub>	X <sub>14</sub>	X <sub>15</sub>	X <sub>16</sub>	X <sub>17</sub>	X <sub>18</sub>	X <sub>19</sub>
0	最小值	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	最大值	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	变异系数(%)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	最小值	0.98	0.74	0.85	0.46	0.72	0.88	0.56	0.86	0.81	0.92	0.72	0.83	0.88	0.69	0.85	0.99	0.98	0.99	0.96
	最大值	1.01	1.12	1.04	0.94	0.97	1.10	0.88	1.40	1.07	1.04	0.95	1.07	0.99	1.03	1.10	1.01	1.03	1.00	0.99
	变异系数(%)	0.91	12.14	6.20	24.24	10.23	7.55	12.97	15.57	8.13	4.00	8.84	0.07	3.62	10.80	7.58	1.00	1.00	1.00	1.02
6	最小值	0.97	0.72	0.75	0.30	0.60	0.76	0.47	0.67	0.70	0.92	0.63	0.85	0.83	0.71	0.82	0.98	0.98	0.98	0.94
	最大值	1.01	1.12	1.04	0.92	0.94	1.01	0.77	1.24	0.94	1.00	0.97	1.03	0.95	1.06	1.09	1.00	1.02	1.00	0.98
	变异系数(%)	1.32	17.38	9.74	33.35	14.54	9.23	16.06	16.23	10.33	2.27	11.83	0.06	4.27	12.90	8.77	1.01	1.00	1.00	1.03
9	最小值	0.92	0.58	0.46	0.16	0.36	0.57	0.35	0.68	0.55	0.76	0.51	0.83	0.69	0.57	0.73	0.98	0.98	0.96	0.94
	最大值	1.00	0.98	0.96	0.81	0.90	0.89	0.68	1.16	0.80	1.03	0.91	1.09	0.92	0.99	1.09	1.00	1.02	0.99	0.97
	变异系数(%)	2.13	15.71	24.50	53.01	28.82	13.87	21.18	16.71	11.38	8.19	16.89	0.09	8.15	17.04	11.36	1.01	1.00	1.02	1.05
12	最小值	0.94	0.59	0.30	0.09	0.23	0.32	0.22	0.57	0.40	0.51	0.34	0.72	0.52	0.41	0.56	0.96	0.97	0.95	0.93
	最大值	1.01	0.87	0.92	0.52	0.77	0.67	0.44	0.93	0.61	0.93	0.69	0.97	0.83	0.87	0.97	0.99	1.01	0.98	0.96
	变异系数(%)	1.97	12.34	35.21	67.14	38.17	23.31	20.34	13.86	14.23	17.96	22.54	0.09	13.61	21.80	17.68	1.02	1.01	1.03	1.06

表 3 12%PEG-6000 模拟干旱胁迫下各项指标间的相关性分析结果

指标	相关系数																			
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>	X <sub>10</sub>	X <sub>11</sub>	X <sub>12</sub>	X <sub>13</sub>	X <sub>14</sub>	X <sub>15</sub>	X <sub>16</sub>	X <sub>17</sub>	X <sub>18</sub>	X <sub>19</sub>	
X <sub>1</sub>	1.00																			
X <sub>2</sub>	-0.41	1.00																		
X <sub>3</sub>	-0.28	0.36	1.00																	
X <sub>4</sub>	-0.10	0.22	0.89**	1.00																
X <sub>5</sub>	-0.23	0.36	0.99**	0.94**	1.00															
X <sub>6</sub>	-0.33	0.32	0.88**	0.68**	0.82**	1.00														
X <sub>7</sub>	-0.11	0.33	0.89**	0.92**	0.94**	0.70**	1.00													
X <sub>8</sub>	-0.64*	0.55	0.34	0.06	0.28	0.28	0.21	1.00												
X <sub>9</sub>	-0.42	0.50	0.92**	0.71**	0.88**	0.93**	0.79**	0.56*	1.00											
X <sub>10</sub>	-0.30	0.19	0.87**	0.82**	0.86**	0.92**	0.81**	0.21	0.88**	1.00										
X <sub>11</sub>	-0.12	0.27	0.80**	0.90**	0.86**	0.66*	0.96**	0.12	0.72**	0.83**	1.00									
X <sub>12</sub>	-0.35	0.42	0.15	0.20	0.21	0.05	0.42	0.48	0.31	0.22	0.50	1.00								
X <sub>13</sub>	-0.24	0.28	0.84**	0.87**	0.87**	0.77**	0.93**	0.24	0.82**	0.91**	0.97**	0.53	1.00							
X <sub>14</sub>	0.11	-0.03	0.73**	0.75**	0.73**	0.79**	0.69**	-0.33	0.58*	0.79**	0.68**	-0.19	0.68*	1.00						
X <sub>15</sub>	-0.01	-0.02	0.84**	0.82**	0.82**	0.85**	0.73**	-0.10	0.71**	0.89**	0.72**	-0.19	0.73**	0.94**	1.00					
X <sub>16</sub>	-0.54	0.34	0.26	-0.06	0.15	0.43	-0.15	0.51	0.42	0.19	-0.27	-0.31	-0.11	-0.02	0.12	1.00				
X <sub>17</sub>	-0.51	0.27	0.18	-0.14	0.07	0.21	-0.20	0.70**	0.32	0.02	-0.35	-0.24	-0.21	-0.29	-0.05	0.90**	1.00			
X <sub>18</sub>	-0.38	0.42	0.63*	0.29	0.53	0.84**	0.35	0.32	0.73**	0.57*	0.23	-0.17	0.35	0.54	0.56*	0.68**	0.45	1.00		
X <sub>19</sub>	-0.02	0.12	0.33	0.14	0.28	0.19	0.08	0.24	0.24	0.01	-0.16	-0.44	-0.15	0.07	0.16	0.57*	0.61*	0.42	1.00	

注：\*、\*\*分别表示在0.05、0.01水平上显著相关。表6同。

表 4 各项指标因子分析的因子载荷矩阵(方差极大正交旋转)

指标	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4
X <sub>1</sub>	-0.076 7	-0.587 7	0.583 9	0.244 7
X <sub>2</sub>	0.204 7	0.216 5	-0.673 0	0.114 4
X <sub>3</sub>	0.923 8	0.218 8	-0.188 1	0.217 2
X <sub>4</sub>	0.937 2	-0.134 7	-0.089 6	0.133 8
X <sub>5</sub>	0.944 5	0.084 3	-0.202 7	0.206 6
X <sub>6</sub>	0.844 4	0.509 4	-0.030 9	-0.059 7
X <sub>7</sub>	0.936 4	-0.182 3	-0.267 5	0.066 9
X <sub>8</sub>	0.049 7	0.405 7	-0.840 2	0.167 8
X <sub>9</sub>	0.813 1	0.407 4	-0.370 0	0.057 5
X <sub>10</sub>	0.922 2	0.257 1	-0.070 6	-0.179 7
X <sub>11</sub>	0.917 8	-0.252 7	-0.239 9	-0.161 1
X <sub>12</sub>	0.184 2	-0.333 2	-0.803 7	-0.392 6
X <sub>13</sub>	0.921 3	-0.074 3	-0.286 6	-0.220 4
X <sub>14</sub>	0.877 4	0.095 5	0.438 1	-0.079 1
X <sub>15</sub>	0.913 1	0.201 3	0.313 9	0.024 8
X <sub>16</sub>	-0.023 2	0.916 7	-0.142 8	0.305 0
X <sub>17</sub>	-0.171 5	0.765 1	-0.306 4	0.460 7
X <sub>18</sub>	0.491 3	0.765 8	0.003 7	0.102 7
X <sub>19</sub>	0.088 2	0.335 7	0.037 9	0.897 0
方差贡献	9.382 9	3.509 8	2.990 6	1.608 4
累计贡献率(%)	49.380 0	67.860 0	83.600 0	92.060 0

2.4 绿豆种质的抗旱性评价

2.4.1 隶属函数法抗旱性评价 本研究采用隶属函数法、标准差系数赋予权重法对绿豆种质进行抗旱性评价。由表 5 可以看出,12 份绿豆种质的加权隶属函数值在 0.069 8 ~ 0.932 0 之间,平均值为 0.346 6。依据作物抗旱性分级标准,由表 5 可知,宛绿 8 号为抗旱型材料,宛绿 5 号、冀科绿 4 号、L101、保绿 2016 等为中间型材料,郑绿 8 号、中绿 5 号、L97、品绿 2016 - 17 等为干旱较敏感型材料,冀绿 13 号、宛黑绿 1 号、宛绿 10 号等为干旱敏感型材料。12 份绿豆品种(系)的抗旱性强弱排序为宛绿 8 号(0.932 0) > 宛绿 5 号(0.574 8) > 冀科绿 4 号(0.458 3) > 保绿 2016(0.426 3) > L101(0.419 1) > 郑绿 8 号(0.335 6) > 品绿 2016 - 17(0.313 8) > L97(0.216 3) > 中绿 5 号(0.205 3) > 宛绿 10 号(0.127 3) > 冀绿 13 号(0.080 1) > 宛黑绿 1 号(0.069 8)。

2.4.2 筛选抗旱性鉴定指标 本研究对 12 份绿豆种质的各项指标与加权隶属函数值进行相关性分析、灰色关联度分析、逐步回归分析。由表 6 可以看出,相对下胚轴长、相对芽长、相对株高、相对下胚

表 5 12%PEG-6000 模拟干旱胁迫下各项指标的隶属函数值

品种(系)	隶属函数值												排序								
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>	X <sub>10</sub>	X <sub>11</sub>	X <sub>12</sub>		X <sub>13</sub>	X <sub>14</sub>	X <sub>15</sub>	X <sub>16</sub>	X <sub>17</sub>	X <sub>18</sub>	X <sub>19</sub>	
宛绿 5 号	0.142 9	0.892 9	0.564 5	0.372 1	0.518 5	0.742 9	0.590 9	0.590 9	0.722 2	0.904 8	0.761 9	1.000 0	0.741 9	0.347 8	0.365 9	0.666 7	0.500 0	0.666 7	0.000 0	0.574 8	2
冀绿 13 号	0.714 3	0.035 7	0.032 3	0.046 5	0.037 0	0.114 3	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.142 9	0.028 6	0.280 0	0.129 0	0.282 6	0.333 3	0.250 0	0.000 0	0.000 0	0.080 1	11
宛黑绿 1 号	0.571 4	0.607 1	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.114 3	0.000 0	0.194 4	0.047 6	0.047 6	0.047 6	0.000 0	0.280 0	0.000 0	0.152 2	0.000 0	0.666 7	0.500 0	0.333 3	0.069 8	12
郑绿 8 号	0.714 3	0.785 7	0.354 8	0.093 0	0.277 8	0.714 3	0.181 8	0.527 8	0.714 3	0.452 4	0.085 7	0.320 0	0.290 3	0.369 6	0.292 7	1.000 0	0.750 0	1.000 0	0.666 7	0.335 6	6
宛绿 10 号	0.857 1	0.750 0	0.112 9	0.046 5	0.111 1	0.000 0	0.181 8	0.472 2	0.500 0	0.333 3	0.261 9	0.114 3	0.360 0	0.064 5	0.000 0	0.333 3	0.500 0	0.000 0	0.333 3	0.127 3	10
中绿 5 号	1.000 0	0.000 0	0.193 5	0.093 0	0.166 7	0.200 0	0.272 7	0.500 0	0.222 2	0.238 1	0.261 9	0.228 6	0.560 0	0.290 3	0.108 7	0.333 3	0.500 0	0.000 0	0.333 3	0.205 3	9
L97	0.714 3	0.392 9	0.112 9	0.023 3	0.111 1	0.285 7	0.363 6	0.222 2	0.363 6	0.222 2	0.238 1	0.261 9	0.371 4	0.800 0	0.387 1	0.347 8	0.000 0	0.333 3	0.000 0	0.216 3	8
L101	0.857 1	1.000 0	0.419 4	0.232 6	0.407 4	0.514 3	0.500 0	0.444 4	0.619 0	0.309 5	0.457 1	0.800 0	0.483 9	0.391 3	0.170 7	0.333 3	0.250 0	0.666 7	0.000 0	0.419 1	5
冀科绿 4 号	0.857 1	0.464 3	0.612 9	0.325 6	0.537 0	0.628 6	0.500 0	0.194 4	0.571 4	0.404 8	0.314 3	0.040 0	0.290 3	0.652 2	0.536 6	0.666 7	0.500 0	1.000 0	1.000 0	0.458 3	3
品绿 2016 - 17	0.714 3	0.250 0	0.322 6	0.046 5	0.203 7	0.771 4	0.181 8	0.222 2	0.523 8	0.547 6	0.200 0	0.000 0	0.290 3	0.652 2	0.609 8	0.666 7	0.500 0	1.000 0	1.000 0	0.313 8	7
保绿 2016	0.000 0	0.750 0	0.596 8	0.186 0	0.481 5	0.657 1	0.363 6	1.000 0	0.809 5	0.404 8	0.200 0	0.560 0	0.354 8	0.173 9	0.219 5	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.666 7	0.426 3	4
宛绿 8 号	0.714 3	0.571 4	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.277 8	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.520 0	1.000 0	1.000 0	0.333 3	0.250 0	0.666 7	0.333 3	0.932 0	1
平均值	0.654 8	0.541 7	0.360 2	0.205 4	0.321 0	0.478 6	0.344 7	0.398 1	0.492 1	0.382 9	0.304 8	0.460 0	0.360 2	0.373 2	0.296 7	0.527 8	0.458 3	0.555 6	0.305 6	0.346 6	
变异系数(%)	45.060 0	59.630 0	82.150 0	135.410 0	88.670 0	67.500 0	81.180 0	68.570 0	68.600 0	75.060 0	94.710 0	66.480 0	77.680 0	74.760 0	98.810 0	56.860 0	56.170 0	73.850 0	108.680 0	70.290 0	
权重系数	0.006 3	0.036 5	0.105 0	0.200 9	0.114 1	0.069 5	0.062 3	0.041 3	0.042 2	0.033 9	0.067 7	0.027 4	0.041 1	0.066 1	0.052 8	0.002 8	0.003 1	0.003 8	0.003 2	0.003 2	

表 6 各项指标与加权隶属函数值的相关性分析及灰色关联度分析

指标	相关性分析	灰色关联度分析	
	相关系数	关联系数	排序
$X_1$	-0.24	0.347 4	19
$X_2$	0.36	0.413 9	4
$X_3$	0.97 **	0.536 0	2
$X_4$	0.94 **	0.483 8	3
$X_5$	0.98 **	0.549 0	1
$X_6$	0.87 **	0.379 1	11
$X_7$	0.94 **	0.406 4	5
$X_8$	0.26	0.395 2	6
$X_9$	0.90 **	0.381 4	10
$X_{10}$	0.93 **	0.355 7	14
$X_{11}$	0.90 **	0.390 2	8
$X_{12}$	0.27	0.386 2	9
$X_{13}$	0.93 **	0.394 6	7
$X_{14}$	0.77 **	0.377 0	12
$X_{15}$	0.85 **	0.359 5	13
$X_{16}$	0.12	0.350 1	18
$X_{17}$	0.01	0.351 4	16
$X_{18}$	0.55	0.350 6	17
$X_{19}$	0.16	0.353 4	15

轴鲜重、相对芽鲜重、相对植株鲜重、相对下胚轴干重、相对芽干重、相对植株干重、相对根冠比 1、相对根冠比 2 等 11 个指标与加权隶属函数值呈极显著正相关关系,相关系数分别为 0.97、0.94、0.98、0.87、0.94、0.90、0.93、0.90、0.93、0.77、0.85。各项指标与加权隶属函数值的关联度排序为相对株高(0.549 0) > 相对下胚轴长(0.536 0) > 相对芽长(0.483 8) > 相对主根长(0.413 9) > 相对芽鲜重(0.406 4) > 相对根鲜重(0.395 2) > 相对植株干重(0.394 6) > 相对芽干重(0.390 2) > 相对根干重(0.386 2) > 相对植株鲜重(0.381 4) > 相对下胚轴鲜重(0.379 1) > 相对根冠比 1(0.377 0) > 相对根冠比 2(0.359 5) > 相对下胚轴干重(0.355 7) > 相对芽含水量(0.353 4) > 相对根含水量(0.351 4) > 相对下胚轴含水量(0.350 6) > 相对植株含水量(0.350 1) > 相对发芽势(0.3474)。以各项指标为自变量、加权隶属函数值为因变量进行逐步回归分析,建立最优化的回归模型,得到如下回归方程: $Y = 0.361\ 432\ 082\ 00 - 0.190\ 360\ 652\ 89X_1 + 0.096\ 039\ 481\ 19 X_2 + 0.468\ 807\ 608\ 90X_4 + 0.320\ 145\ 632\ 20X_5 + 0.560\ 637\ 044\ 30X_6 + 0.659\ 184\ 605\ 40X_7 + 0.392\ 525\ 932\ 10X_9 +$

$0.190\ 329\ 771\ 44X_{11} + 0.088\ 293\ 412\ 05X_{15} - 0.954\ 062\ 013\ 70X_{18}$ 。由回归方程及表 7 可知,19 个指标中共有 10 个指标与加权函数值呈极显著相关,其中相对主根长、相对芽长、相对株高、相对下胚轴鲜重、相对芽鲜重、相对植株鲜重、相对芽干重、相对根冠比 2 等 8 个指标对加权函数值有直接影响。

表 7 各项指标与加权隶属函数值的逐步回归分析结果

指标	偏相关	$t$ 检验值	$P$ 值	直接通径系数
$X_1$	-0.998 9	21.252 1	0.002 2	-0.016 1
$X_2$	0.999 5	30.389 4	0.001 1	0.035 7
$X_4$	0.999 8	51.249 5	0.000 4	0.230 2
$X_5$	0.999 5	30.577 1	0.001 1	0.202 0
$X_6$	0.999 6	35.106 1	0.000 8	0.260 2
$X_7$	0.999 1	23.792 5	0.001 8	0.166 6
$X_9$	0.999 2	25.758 3	0.001 5	0.114 2
$X_{11}$	0.997 2	13.220 0	0.005 7	0.078 9
$X_{15}$	0.998 6	19.057 6	0.002 7	0.043 6
$X_{18}$	-0.996 5	11.877 6	0.0070	-0.048 2

综上所述,可以将相对芽长、相对株高、相对下胚轴鲜重、相对芽鲜重、相对芽干重、相对根冠比 2 等 6 个指标作为绿豆种质萌发期抗旱性鉴定的主要指标,相对下胚轴长、相对植株鲜重、相对下胚轴干重、相对植株干重、相对根冠比 1 等 5 个指标可以作为次要抗旱性鉴定指标。

### 3 讨论

#### 3.1 绿豆种质萌发期抗旱性鉴定 PEG - 6000 浓度的筛选

绿豆具有生育期短、耐瘠薄、耐旱、耐盐碱、适应性广等特点。作物种子萌发期对水分比较敏感,是比较脆弱的阶段。针对作物种子萌发期的抗旱性鉴定需求,研究者通常会用 PEG 模拟干旱胁迫,因为 PEG 既可以有效降低种子吸水速率以达到抵御干旱胁迫的目的,又不会对植物造成损伤<sup>[12]</sup>。本研究用不同浓度的 PEG - 6000 模拟干旱胁迫,结果表明,在干旱胁迫下,随着 PEG - 6000 溶液浓度的增加,供试绿豆种质幼苗生长受到的抑制越显著,且大部分绿豆种质在不同浓度 PEG - 6000 胁迫下,各项指标的抗旱系数基本小于 1。在供试绿豆种质幼苗的 38 个指标中,有 2 个指标在对照处理下的变异系数最大;有 2 个指标在 6% PEG - 6000 胁迫下的变异系数最大;有 4 个指标在 9% PEG - 6000 胁

迫下的变异系数最大;有30个指标(占有指标的15/19)在12%PEG-6000胁迫下的变异系数最大。由此可以推测,用12%PEG-6000模拟干旱胁迫,是绿豆种子萌发期比较适宜的抗旱性鉴定浓度。本研究结果与其他学者的研究结果存在差异,例如,王兰芬等根据干旱胁迫下发芽率的差异与动态变化,将21.8%PEG作为绿豆种质资源芽期抗旱性鉴定的最适浓度<sup>[13]</sup>;曹志敏等依据发芽率在不同PEG-6000浓度间的显著性,将20%PEG-6000作为绿豆萌发期抗旱性鉴定及评价的最适浓度<sup>[14]</sup>;郭容秋在进行绿豆种质资源萌发期的抗旱性鉴定时,将20%PEG-6000作为适宜浓度<sup>[10]</sup>;武泉栋等研究者则以15%PEG作为绿豆种质资源萌发期适宜的抗旱性鉴定浓度<sup>[8-9,15-16]</sup>。综上所述,目前研究者在绿豆种质资源萌发期采用的适宜PEG抗旱性鉴定浓度方面尚未达成共识,可能与研究者采用的试验方法存在差异有关。

### 3.2 绿豆种质萌发期抗旱性评价及抗旱性鉴定指标的筛选

作物抗旱性与其遗传背景、生长发育阶段、干旱程度等多种因素有关,采用单项指标进行抗旱性评价有片面性,因此研究者常采用多指标进行综合评价<sup>[17-18]</sup>。隶属函数法是研究者常采用的抗旱性评价方法,此评价方法已经在麦类<sup>[19]</sup>、花生<sup>[20]</sup>、玉米<sup>[21]</sup>等作物上被广泛应用。抗旱性鉴定指标的筛选与作物种类、生育阶段等均有关。种子萌发期对水分比较敏感,是鉴定作物抗旱性的重要时期,因此确定种子萌发期的抗旱性鉴定指标对于抗旱品种选育有重要意义<sup>[6]</sup>。张思雨等用15%PEG-6000模拟干旱胁迫,发现发芽势、活力指数可以作为绿豆种质萌发期的抗旱性鉴定指标<sup>[9]</sup>;郭容秋用20%PEG-6000模拟干旱胁迫,运用隶属函数法对67份绿豆种质进行抗旱性评价,鉴定出7份抗旱型品种<sup>[10]</sup>。刘晨旦等采用绿豆种质萌发期的发芽势、发芽率、活力指数、发芽指数、相对根长等5个指标进行抗旱性综合评价(隶属函数法),筛选出1份高抗材料、4份抗性材料<sup>[16-17]</sup>。王兰芬等通过指标间的相关性分析,将相对发芽率、相对发芽势、相对发芽指数、相对活力指数、相对下胚轴长、相对总芽长、相对胚根长、相对鲜重、相对干重等9个指标作为绿豆芽期抗旱性鉴定指标,并采用隶属函数法对113份绿豆种质进行抗旱性评价,筛选出1份高抗材料、16份抗性材料<sup>[13]</sup>。由上述结果可知,目前

研究者对于绿豆种质资源萌发期抗旱性鉴定指标的研究尚未达成共识,可能与试验采用的形态指标相对较少、指标评价方法相对单一有关。

本研究采用隶属函数法与标准差系数赋予权重法对绿豆种质进行抗旱性评价,将12份绿豆种质资源划分为4个等级(抗旱型、中间型、较敏感型、敏感型)。其中,宛绿8号(加权隶属函数值为0.9320)为抗旱型材料,冀绿13号、宛黑绿1号、宛绿10号等3份为干旱敏感型材料。本研究采用因子分析、相关性分析、灰色关联度分析、逐步回归分析等多种方法对12%PEG-6000模拟干旱胁迫条件下的19个指标(抗旱系数)进行统计分析,并对多种分析方法进行相互验证,使抗旱性鉴定指标的筛选结果更加可信、准确。因子分析结果表明,当主因子数为4时,累计贡献率为92.06%。结果显示,主因子1的贡献率达49.38%,相对下胚轴长、相对芽长、相对株高、相对下胚轴鲜重、相对芽鲜重、相对植株鲜重、相对下胚轴干重、相对芽干重、相对植株干重、相对根冠比1、相对根冠比2等11个指标起主要作用。用19个指标(抗旱系数)与加权隶属函数值进行相关性分析,结果表明,相对下胚轴长、相对芽长、相对株高、相对下胚轴鲜重、相对芽鲜重、相对植株鲜重、相对下胚轴干重、相对芽干重、相对植株干重、相对根冠比1、相对根冠比2等11个指标与加权隶属函数值间呈极显著正相关关系,相关系数分别为0.97、0.94、0.98、0.87、0.94、0.90、0.93、0.90、0.93、0.77、0.85,这与因子分析(主因子1)的研究结果一致。19个指标与加权隶属函数值的关联度排序为相对株高(0.5490) > 相对下胚轴长(0.5360) > 相对芽长(0.4838) > 相对主根长(0.4139) > 相对芽鲜重(0.4064) > 相对根鲜重(0.3952) > 相对植株干重(0.3946) > 相对芽干重(0.3902) > 相对根干重(0.3862) > 相对植株鲜重(0.3814) > 相对下胚轴鲜重(0.3791) > 相对根冠比1(0.3770) > 相对根冠比2(0.3595) > 相对下胚轴干重(0.3557) > 相对芽含水量(0.3534) > 相对根含水量(0.3514) > 相对下胚轴含水量(0.3506) > 相对植株含水量(0.3501) > 相对发芽势(0.3474),所得结果与上述相关性分析结果的相似度较高。关联度分析与相关性分析之间相互验证,使结果更为可信。通过逐步回归分析,建立最优化的回归模型,得到如下回归方程: $Y = 0.36143208200 - 0.19036065289X_1 + 0.09603948119X_2 +$

$0.468\ 807\ 608\ 90X_4 + 0.320\ 145\ 632\ 20X_5 +$   
 $0.560\ 637\ 044\ 30X_6 + 0.659\ 184\ 605\ 40X_7 +$   
 $0.392\ 525\ 932\ 10X_9 + 0.190\ 329\ 771\ 44X_{11} +$   
 $0.088\ 293\ 412\ 05X_{15} - 0.954\ 062\ 013\ 70X_{18}$ 。由回  
 归方程可知,相对主根长、相对芽长、相对株高、相  
 对下胚轴鲜重、相对芽鲜重、相对植株鲜重、相对芽  
 干重、相对根冠比 2 等 8 个指标对加权函数值有直  
 接影响。综上所述,可以将相对芽长、相对株高、相  
 对下胚轴鲜重、相对芽鲜重、相对芽干重、相对根冠  
 比 2 等 6 个指标作为绿豆种质萌发期抗旱性鉴定的  
 主要指标,可以将相对下胚轴长、相对植株鲜重、相  
 对下胚轴干重、相对植株干重、相对根冠比 1 等 5 个  
 指标作为次要抗旱性鉴定指标。

#### 4 结论

在干旱胁迫下,随着 PEG - 6000 溶液浓度的增  
 加,供试绿豆种质幼苗生长受到的抑制越显著。有  
 30 个指标(占有所有指标的 15/19)在 12% PEG -  
 6000 胁迫下的变异系数值最大,推测 12% PEG -  
 6000 模拟干旱胁迫是绿豆种子萌发期比较适宜的  
 抗旱性鉴定浓度。采用隶属函数法与标准差系数  
 赋予权重法对绿豆种质进行抗旱性综合评价,将 12  
 份绿豆种质资源划分为 4 个等级(抗旱型、中间型、  
 较敏感型、敏感型)。宛绿 8 号为抗旱型材料,宛绿  
 5 号、冀科绿 4 号、L101、保绿 2016 等为中间型材  
 料,郑绿 8 号、中绿 5 号、L97、品绿 2016 - 17 等为干  
 旱较敏感型材料,冀绿 13 号、宛黑绿 1 号、宛绿 10  
 号等为干旱敏感型材料。采用因子分析、相关性分  
 析、灰色关联度分析、逐步回归分析等多种方法对  
 12% PEG - 6000 模拟干旱胁迫条件下的 19 个指标  
 (抗旱系数)进行评价分析。相对芽长、相对株高、  
 相对下胚轴鲜重、相对芽鲜重、相对芽干重、相对根  
 冠比 2 等 6 个指标可作为绿豆种质萌发期抗旱性鉴  
 定的主要指标,将相对下胚轴长、相对植株鲜重、相  
 对下胚轴干重、相对植株干重、相对根冠比 1 等 5 个  
 指标作为次要抗旱性鉴定指标。

#### 参考文献:

- [1]徐奕琳,徐东东,张盼盼,等. PEG 模拟干旱胁迫下不同玉米品  
 种萌芽期及苗期抗旱性鉴定[J]. 中国农学通报,2025,41(1):  
 13 - 18.
- [2]鞠乐,陈培育,牛银亭,等. 不同谷子品种(系)萌发期对干旱  
 胁迫的响应及抗旱性评价[J]. 江苏农业科学,2023,51(23):  
 40 - 46.
- [3]赵芳,高运青,高韶斌,等. 河北省绿豆种质资源主要农艺性  
 状、经济性状遗传多样性分析及综合评价[J]. 中国农学通报,  
 2025,41(5):23 - 29.
- [4]时会影,范保杰,刘长友,等. 绿豆耐盐性研究进展[J]. 植物遗  
 传资源学报,2022,23(6):1594 - 1603.
- [5]武晶,汤沙,王红霞,等. 我国杂粮种质资源创新研究:现状  
 与展望[J]. 植物学报,2023,58(1):6 - 21.
- [6]樊瑀,董淑琦,原向阳,等. 谷子种质资源萌发期抗旱性综合评  
 价及抗旱指标筛选[J]. 中国农业大学学报,2022,27(6):42 -  
 54.
- [7]徐溶蔓. 不同浓度外源褪黑素和壳寡糖对干旱和盐胁迫下绿豆  
 萌发及幼苗生长的影响[D]. 洛阳:河南科技大学,2023:20 -  
 41.
- [8]武泉栋,王新好,姚玲,等. 干旱和盐单一胁迫对绿豆种子萌发  
 期的影响及其种质评价[J]. 江苏农业科学,2024,52(10):  
 120 - 128.
- [9]张思雨,郭亚宁,艾静,等. 绿豆资源萌发期抗旱指标筛选及抗  
 旱性鉴定[J]. 山西农业科学,2023,51(2):143 - 150.
- [10]郭容秋. 绿豆品种资源农艺性状评价与萌发期耐旱性鉴定  
 [D]. 长春:吉林农业大学,2021:22 - 29.
- [11]赵海明,孙桂枝,王学敏,等. 百脉根种质苗期抗旱性鉴定及综  
 合评价[J]. 草原与草坪,2011,31(6):18 - 26.
- [12]王振华,刘鑫,余爱丽,等. 不同谷子品种萌发期对干旱胁迫  
 生理响应的变化及抗旱指标筛选[J]. 中国农业科技导报,  
 2020,22(12):39 - 49.
- [13]王兰芬,武晶,景蕊莲,等. 绿豆种质资源芽期抗旱性鉴定  
 [J]. 植物遗传资源学报,2014,15(3):498 - 503.
- [14]曹志敏,张志肖,侯东生,等. PEG - 6000 溶液胁迫下绿豆萌发  
 期抗旱性的鉴定与评价[J]. 河北农业科学,2015,19(3):27 -  
 31.
- [15]张泽燕,张耀文. 干旱胁迫下 21 份山西地方绿豆品种芽期抗旱  
 性鉴定[J]. 植物遗传资源学报,2011,12(6):1010 - 1013.
- [16]刘晨旦. 绿豆种质遗传多样性研究及芽期抗旱性评价[D]. 太  
 原:山西大学,2018.
- [17]杨维强,张晗,姜吉顺,等. 白三叶抗旱种质资源筛选及抗旱  
 评价指标筛选[J]. 草地学报,2025,33(5):1510 - 1522.
- [18]陈雷,张枫叶,贺群岭,等. 基于隶属函数法和主成分分析评  
 价花生品种花针期抗旱性[J]. 江苏农业科学,2024,52(14):  
 87 - 94.
- [19]常利芳,乔彦玮,陈芳,等. 小偃麦衍生系萌发期和成株期抗  
 旱性综合评价[J]. 植物遗传资源学报,2023,24(5):1321 -  
 1333.
- [20]崔亚男,郝西,刘娟,等. PEG 模拟干旱胁迫下花生品种萌  
 发期抗旱性综合评价[J]. 江苏农业科学,2025,53(1):133 -  
 139.
- [21]邹成林,黄开健,翟瑞宁,等. 基于隶属函数法和主成分分析评  
 价玉米萌发期抗旱性[J]. 江苏农业科学,2022,50(13):7 - 13.