

利用灰色关联度分析筛选朝天椒适宜的植物抗旱剂

郭振锋¹, 董利萍¹, 杜瑞卿²

(1. 河南林业职业学院园林系 河南洛阳 471002; 2. 南阳师范学院生命科学与农业工程学院 河南南阳 473061)

摘要:为提高朝天椒生长的抗旱能力,筛选出适合朝天椒的抗旱剂及其最佳施用浓度。选择不同浓度的富里酸、多效唑和烯效唑3种抗旱剂,分别采用叶面喷洒方式,设置了土壤含水量正常组、干旱组以及抗旱剂处理的干旱组,共11组。检测了朝天椒17项生理生长指标,采用灰色关联度法进行综合分析。与干旱组比较,使用不同浓度的3种抗旱剂,不同程度地提高了朝天椒的抗旱能力。与正常组比较,朝天椒12个生理指标和5个生长指标的关联度序值(综合分析)大小不同,但综合分析表明,300 mg·L⁻¹富里酸组(R₄)抗旱功能最好,其次为24 mg·L⁻¹烯效唑组(R₁₀),再次为24 mg·L⁻¹多效唑组(R₇),达到甚至超过正常组的生理机能。灰色关联分析法具有信息损失小、计算简便、综合性强等优势,值得借鉴应用。

关键词:朝天椒;植物抗旱剂;灰色关联度分析法

中图分类号:S641.3

文献标识码:A

文章编号:1673-2871(2022)02-072-06

Selection of suitable drought tolerance agents for *Capsicum frutescens* by grey correlation analysis

GUO Zhenfeng¹, DONG Liping¹, DU Ruiqing²

(1. Department of landscape architecture, Henan Forestry Vocational College, Luoyang 471002, Henan, China; 2. School of Life Science and Agricultural Engineering, Nanyang Normal University, Nanyang 473061, Henan, China)

Abstract: Different concentration of fulvic acid, paclobutrazol and uniconazole were sprayed on leaves for selecting suitable agent and optimal concentration for improving drought tolerance of Chaotian pepper (*Capsicum frutescens* var. *conoides*). There were 11 groups including normal soil water, drought and drought treated with drought tolerance agent, for the experiment. Seventeen physiological growth indexes of *Capsicum frutescens* were assayed. The grey correlation method is used for comprehensive analysis. Compared with the drought group, the drought tolerance was improved by using different concentrations of three drought tolerance agents. Compared with the normal group, the order of correlation degree of 12 physiological indexes was $R_4 > R_{10} > R_7 > R_2 > R_8 > R_6 > R_5 > R_9 > R_1 > R_3$. The order correlation degree of the five growth indexes was $R_4 > R_{10} > R_7 > R_3 > R_9 > R_6 > R_2 > R_8 > R_5 > R_1$. The results showed that fulvic acid 300 mg·L⁻¹ Group (R₄) had the best drought tolerance, followed by uniconazole 24 mg·L⁻¹ Group (R₁₀), paclobutrazol 24 mg·L⁻¹ Group (R₇), the physiological function reached or even exceeded normal group. The grey correlation analysis method has the advantages of less information loss, simple calculation and strong comprehensiveness, especially suitable for the comprehensive analysis of multi-index and multi research object.

Key words: *Capsicum frutescens* var. *conoides*; Plant drought tolerance agent; Grey relational grade analysis

朝天椒(*Capsicum frutescens* var. *conoides*), 辣椒变种, 属茄科辣椒属多年生半木质性植物, 常作一年生栽培。我国从泰国、韩国等国家引进朝天椒。尽管我国种植朝天椒起步晚, 但是面积迅速扩大, 目前已经成为河南省重要经济作物之一。河南省朝天椒种类多样, 在全国保持着推广优势^[1]。

抗旱剂是指施在土壤中或作物上以减少蒸发、

蒸腾或增强自身抗旱性的一类化学物质的总称。抗旱剂能够使作物气孔开张、增加叶绿素含量、抑制蒸腾作用、提高根系活力、减缓土壤水分消耗, 从而增强其抗旱能力, 使其在干旱条件下保持正常的生长发育, 并且相对提高作物的产量^[2]。朝天椒是喜温作物, 根系一般分布在浅土层, 耐旱性较差。目前河南种植范围比较广泛, 主要分布在商丘、

收稿日期: 2021-02-16; 修回日期: 2021-07-12

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(31300168); 南阳师范学院 STP 项目

作者简介: 郭振锋, 男, 副教授, 主要研究方向为园林植物栽培和野生植物资源保护与利用。E-mail: 752225978@qq.com

通信作者: 杜瑞卿, 男, 副教授, 主要从事生物统计及实验设计的研究。E-mail: duruiqing8@163.com

安阳、洛阳、三门峡、南阳等地,面积达 13 万 $\text{hm}^{2[3]}$ 。如今由于温室效应、全球气候变暖的加剧、干旱范围在不断的扩大^[4],河南较多地方也经常遭受干旱。因此,干旱成为影响朝天椒产量和品质的主要限制因素之一。研究朝天椒抗旱性以及植物抗旱剂对其的影响,筛选出较好的抗旱剂,具有重要的现实意义。

灰色关联度分析法(Grey relational grade analysis, GRA)是一种重要统计分析方法,可对参试对象的主要性状进行综合描述和量化评估,能够克服单一性状两两比较的局限性,可较全面地评价参试对象的优劣,因而应用在不同植物中^[5-7]。

目前有关朝天椒抗旱性研究的文献报道较少^[8],而且多为单一指标的逐一分析,缺少多指标的综合性,所以笔者以土壤正常含水量栽培的朝天椒各项指标为标准参考系,利用改进的灰色关联度分析法进行综合分析,旨在研究朝天椒的抗旱性及抗旱剂对其的影响,为朝天椒种植、学术研究提供科学的参考。

1 材料与方 法

1.1 材料及处理

试验于 2019 年 4—8 月在南阳师范学院实验室及大棚内进行。

试验材料为朝天椒(洛研 9 号),种子由洛阳市种子公司提供。朝天椒种子精选后,经浸泡、消毒播种在含有锯末培养基的生长盘中。将生长盘置于人工气候箱中,于 20~25 $^{\circ}\text{C}$ 温度条件下,暗培养催芽萌发,2 周后进行光培养,光照时间 12 $\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$,光照度 360 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。培养至 5 叶 1 心或 6 叶 1 心时开始移栽。选择大小一致,生长健壮的 5 叶 1 心或 6 叶 1 心辣椒幼苗进行移栽。盆栽容器为聚乙烯塑料营养钵(高 18 cm ,内径 18 cm),每钵移栽 3 株苗。每个营养钵内盛放自然风干后的营养土(壤土,取自于麦田)5 kg ,盆底铺 2 cm 厚的粗粒基质($V_{\text{菜园土}}:V_{\text{炉渣}}=3:1$)。基础肥料选用尿素(N, 46%)、过磷酸钙(P_2O_5 , 18%)、硫酸钾(K_2O , 50%),按照 N、P、K 质量比 10:10:10,每钵施用 5.0 g 。移栽前营养土充分吸水,移栽后于温室缓苗培养 3 周,然后开始进行抗旱剂处理^[9-10]。

1.2 试验设计

试验分组:土壤含水量正常组(营养钵内营养土相对含水量稳定到 70%~80%)(组别 0 号),干旱组(营养钵内营养土相对含水量稳定到 35%~45%,

组别 1 号),富里酸组(营养钵内营养土相对含水量稳定到 35%~45%)浓度设置 3 个水平(组别依次为 2、3、4 号),多效唑组(营养钵内营养土相对含水量稳定到 35%~45%)浓度设置 3 个水平(组别依次为 5、6、7 号),烯效唑组(营养钵内营养土相对含水量稳定到 35%~45%)浓度设置 3 个水平(组别依次为 8、9、10 号),共有 11 个处理。每天下午 5:00 称取土壤质量,并及时补充当天土壤失去的水分,保持土壤相对含水量控制在规定范围内。每个处理 5 盆(即 5 次重复),共计 55 盆,置于透明的防雨棚中。

1.3 抗旱剂的使用

根据常规用量,将富里酸抗旱剂分别配制成 100、200、300 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 水溶液,喷洒叶面;将多效唑抗旱剂分别配制成 8、16、24 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 水溶液,喷洒叶面。将烯效唑抗旱剂分别配制成 8、16、24 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 水溶液,喷洒叶面。

叶面喷施:用喷雾器将抗旱剂喷洒于幼苗叶正面,喷洒时,喷头面平行于叶水平面 6 cm ,喷头正对心叶,用力均匀。每棵苗每次喷洒 3 下,每天于早晚各喷洒 1 次,每周连续喷洒 2 d ,连续喷洒 2 周。

1.4 指标测定

1.4.1 土壤自然含水量测定 土壤自然含水量采用烘干法测定^[11-13]。

1.4.2 生理指标测定 相对电导率用 DDS-307 电导率仪测定^[14]。叶绿素含量采用浸提法测定^[14]。净光合速率用英国 PP systems 公司生产的 TPS-1 便携式光合仪(人工光源,大气 CO_2 ,光照度 350~400 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)测定,每天上午 10:00 左右进行,每处理重复测定 5 次,取其平均值。脯氨酸含量采用酸性茚三酮比色法测定^[14]。CAT 活性采用高锰酸钾滴定法测定^[15-16]。POD 活性采用愈创木酚法测定^[15-16]。SOD 活性采用淡蓝四唑光还原法测定^[15-16]。MDA 含量采用硫代巴比妥酸法测定^[15-16]。可溶性糖含量采用硫代巴比妥酸法测定^[16]。可溶性蛋白质含量采用考马斯亮蓝 G-250 比色法测定^[17]。

1.4.3 产量指标测定 在朝天椒果实最终收获期(幼苗移栽后 15 周),采摘全部朝天椒果实,带回实验室,测定单株果数、单果质量、单株鲜果质量、单株茎叶质量、单株生物质量。

1.5 改进的灰色关联度分析法

在系统发展过程中,若两个因素变化的趋势具有一致性,即同步变化程度较高,即可谓二者关联程度较高;反之,则较低。灰色关联分析方法,就是

根据因素之间发展趋势的相似或相异程度,亦即“灰色关联度”,作为衡量因素间关联程度的一种方法。具体原理及方法(结合本试验加以论述)如下:

(1)建立正常组各项指标观察值数据矩阵,作为比较的标准系统。

$$X_0(k) = \begin{bmatrix} x_0(1) \\ \vdots \\ x_0(m) \end{bmatrix}。m \text{ 表示观察指标数。公式[1]}$$

(2)建立被比较观察组及观察指标组成的目标数据矩阵。

$$X(k) = \begin{bmatrix} x_1(1) & \cdots & x_n(1) \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ x_1(m) & \cdots & x_n(m) \end{bmatrix}。m \text{ 表示观察指}$$

标数, n 表示观察组数。

公式[2]

(3)计算关联系数

$$r_{0i}(k) = \frac{\min|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max|x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max|x_0(k) - x_i(k)|}$$

公式[3]

ρ 为分辨系数, $0 < \rho < 1$, 通常 ρ 取 0.5。

(4)依据关联系数建立关联系数矩阵

$$r_0(k) = \begin{bmatrix} r_{01}(1) & \cdots & r_{0n}(1) \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ r_{01}(m) & \cdots & r_{0n}(m) \end{bmatrix}。 \text{公式[4]}$$

依据关联系数矩阵 $r_0(k)$ 的每一行计算出相应的标准差 $S_0(k)$ 。

(5)计算各指标权重

$$w(k) = \frac{S_0(k)}{\sum_{k=1}^m S_0(k)}。 \text{公式[5]}$$

(6)计算各观察对象(组)的关联序

$$R_i = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m w(k) r_{0i}(k)。 \text{公式[6]}$$

(7)依据各观察对象(组)的关联序,分析得出结果。

用 Microsoft Excel 软件或在线 SPSSAU 软件进行数据处理。

2 结果与分析

2.1 生理指标观察值及分析

从表 1 可以看出,以干旱组为参照,正常组叶

绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素(a+b)的含量、净光合速率,可溶性蛋白、可溶性糖和脯氨酸含量均明显高于干旱组,SOD 活性、POD 活性、CAT 活性、MDA 含量和相对电导率均低于干旱组。

富里酸组,随着富里酸浓度的增大,叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素(a+b)的含量、净光合速率、可溶性蛋白含量、可溶性糖含量、脯氨酸含量、SOD 活性、POD 活性、CAT 活性也在增大,均高于干旱组,最高值近似于正常组。其中,SOD 活性、POD 活性、CAT 活性高于正常组;MDA 含量和相对电导率随着富里酸浓度的增大而减小,最小值低于干旱组。

多效唑组,随着多效唑浓度的增大,叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、叶绿素(a+b)含量、净光合速率、可溶性蛋白含量、可溶性糖含量、脯氨酸含量、SOD 活性、POD 活性、CAT 活性也在增大,均高于干旱组,但最高值低于正常组。其中,SOD 活性、POD 活性、CAT 活性高于正常组;MDA 含量和相对电导率随着多效唑浓度的增大而减小,最小值低于干旱组。

烯效唑组,随着烯效唑浓度的增大,叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、叶绿素(a+b)含量、净光合速率、可溶性蛋白含量、可溶性糖含量、脯氨酸含量、SOD 活性、POD 活性、CAT 活性也在增大,均高于干旱组,最高值略低于于正常组。其中,SOD 活性、POD 活性、CAT 活性高于正常组;MDA 含量和相对电导率随着烯效唑浓度的增大而减小,最小值低于干旱组。

如果对表 1 进行单因素方差分析及多重比较,需要按照每个生理指标分别进行,需要进行 13 次的分析,所得结果也是每个单指标分析结果,缺少 13 个指标的综合分析结果。

根据表 1 和公式[3],得出公式[4],见表 2。依据公式[5]得出表 2 最后 1 列。依据公式[6]得出表 2 最后一行。

表 2 表明:叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、叶绿素(a+b)含量、净光合速率、可溶性蛋白含量、可溶性糖含量、脯氨酸含量的关联系数在富里酸 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 组是 1,最大,说明 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 富里酸处理后,朝天椒的这些生理指标值与正常组最相近,提高了朝天椒的抗旱能力,达到或甚至超过正常组的生理机能。SOD 活性、POD 活性、CAT 活性反应植物受干旱胁迫的自我保护的反应能力,一般值越大,受胁迫程度越大。

表1 朝天椒各组各项生理指标观察值

指标	正常组	干旱组	ρ (富里酸)/(mg·L ⁻¹)			ρ (多效唑)/(mg·L ⁻¹)			ρ (烯效唑)/(mg·L ⁻¹)		
			100	200	300	8	16	24	8	16	24
w(叶绿素 a) / (mg·g ⁻¹)	1.218	0.599	0.701	0.811	1.227	0.683	0.816	1.099	0.724	0.766	1.157
w(叶绿素 b) / (mg·g ⁻¹)	0.837	0.404	0.498	0.537	0.848	0.427	0.500	0.717	0.522	0.595	0.775
w(叶绿素 a+b) / (mg·g ⁻¹)	2.055	1.003	1.199	1.349	2.075	1.110	1.316	1.816	1.246	1.361	1.932
净光合速率 / (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	6.394	3.157	3.513	4.105	6.201	3.355	3.838	5.415	3.502	4.035	5.762
SOD 活性 / (U·g ⁻¹ ·min ⁻¹)	4.944	5.235	5.765	6.858	10.216	5.511	6.380	8.938	5.667	6.559	9.503
POD 活性 / (U·g ⁻¹ ·min ⁻¹)	28.191	30.268	33.299	39.414	59.063	31.790	36.400	51.554	32.749	37.848	54.563
CAT 活性 / (U·g ⁻¹ ·min ⁻¹)	3.081	3.214	3.623	4.245	6.346	3.470	3.924	5.512	3.476	4.089	5.813
b(MDA) / (μmol·g ⁻¹)	30.017	32.198	29.988	29.070	28.342	30.679	29.686	29.042	29.691	29.307	28.985
相对电导率 / %	40.886	43.950	40.893	39.649	38.750	41.803	40.484	39.567	40.504	40.074	39.576
w(可溶性蛋白) / (mg·g ⁻¹)	2.237	1.006	1.204	1.406	1.969	1.115	1.247	1.746	1.160	1.289	1.851
w(可溶性糖) / (μg·g ⁻¹)	190.042	94.924	104.496	123.405	185.139	99.756	113.986	161.390	102.554	118.728	170.924
w(脯氨酸) / (μg·g ⁻¹)	6.283	3.072	3.389	4.011	6.026	3.281	3.738	5.232	3.345	3.936	5.588

SOD 活性、POD 活性、CAT 活性的关联系数在干旱组是 1,最大,说明干旱组受干旱胁迫最为严重,其他使用了富里酸、多效唑、烯效唑等植物抗旱剂后能减轻干旱胁迫。

MDA 含量和相对电导率是植物受到干旱胁迫损害程度的标志,一般值越大受损害程度越大。MDA 含量和相对电导率的关联系数在 100 mg·L⁻¹ 富里酸处理组是 1,最大,说明此时 MDA 含量和相对电导率是低于正常组中的最大值,以后随富里酸、多效唑、烯效唑等植物抗旱剂浓度增加而 MDA 含量和相对电导率下降,说明植物抗旱剂随浓度的增加能够降低干旱对朝天椒的胁迫损害。

从 $S_0(k)$ 值来看,每行基本都是在 0.2 左右,说明各生理指标值的关联系数波动幅度基本相同,相

互间差异不大。

表 2 最后一行的关联序值,300 mg·L⁻¹ 富里酸处理组是 0.062 2,最大,其次是 24 mg·L⁻¹ 烯效唑处理组,0.056 2,第三是 24 mg·L⁻¹ 多效唑处理组,0.051 5。 R_i 是依据公式[6]计算的关联序,其大小反映了比较组与正常组(标准组)的相近程度,越大越相近。从大到小的排序: $R_4 > R_{10} > R_7 > R_2 > R_8 > R_6 > R_5 > R_9 > R_1 > R_3$ 。也说明 300 mg·L⁻¹ 富里酸、24 mg·L⁻¹ 烯效唑、24 mg·L⁻¹ 多效唑处理组的抗旱效果最好,达到与正常组相近的生理状况。

2.2 生长指标观察值及分析

从表 3 可以看出,以干旱组为参照,正常组单株收果数、单果质量、单株果质量、单株茎叶质量、单株生物量质量均明显大于干旱组。

表2 朝天椒各组各项生理指标观察值的关联系数及观察组的关联序

指标	干旱组	ρ (富里酸)/(mg·L ⁻¹)			ρ (多效唑)/(mg·L ⁻¹)			ρ (烯效唑)/(mg·L ⁻¹)			$S_0(k)$	$w(k)$
		100	200	300	8	16	24	8	16	24		
叶绿素 a 含量	0.343 0	0.385 4	0.444 5	1.000 0	0.377 1	0.447 6	0.743 3	0.396 4	0.418 3	0.859 6	0.235 1	0.091 7
叶绿素 b 含量	0.350 3	0.409 5	0.440 5	1.000 0	0.363 1	0.411 0	0.676 1	0.428 0	0.496 2	0.816 9	0.219 1	0.085 5
叶绿素(a+b)含量	0.346 0	0.395 1	0.443 2	1.000 0	0.371 2	0.431 6	0.713 7	0.409 0	0.447 5	0.841 3	0.227 7	0.088 8
净光合速率	0.373 1	0.402 6	0.463 6	1.000 0	0.388 9	0.433 9	0.697 4	0.401 6	0.455 4	0.804 9	0.215 9	0.084 2
SOD 活性	1.000 0	0.846 7	0.643 3	0.370 1	0.913 8	0.718 8	0.441 5	0.871 4	0.688 5	0.406 8	0.223 8	0.087 3
POD 活性	1.000 0	0.852 5	0.656 9	0.378 2	0.920 0	0.740 7	0.451 4	0.875 9	0.697 9	0.418 9	0.221 2	0.086 3
CAT 活性	1.000 0	0.811 9	0.631 3	0.360 5	0.873 4	0.713 2	0.434 5	0.870 8	0.668 6	0.404 5	0.219 9	0.085 8
MDA 含量	0.342 2	1.000 0	0.549 4	0.404 8	0.638 8	0.787 5	0.542 0	0.790 3	0.621 8	0.527 4	0.195 8	0.076 4
相对电导率	0.334 9	1.000 0	0.555 8	0.419 6	0.628 4	0.795 8	0.539 8	0.804 1	0.656 6	0.541 5	0.196 7	0.076 7
可溶性蛋白含量	0.478 5	0.535 9	0.610 8	1.000 0	0.508 5	0.550 3	0.798 5	0.522 0	0.565 1	0.882 2	0.181 3	0.070 7
可溶性糖含量	0.367 7	0.394 1	0.459 4	1.000 0	0.380 6	0.424 4	0.688 4	0.388 5	0.441 3	0.786 8	0.216 8	0.084 5
脯氨酸含量	0.386 7	0.413 9	0.480 3	1.000 0	0.404 2	0.448 7	0.701 1	0.4099	0.471 2	0.809 6	0.210 8	0.082 2
R_i	0.044 3	0.051 2	0.044 2	0.062 2	0.047 0	0.047 6	0.051 5	0.049 6	0.045 9	0.056 2		

富里酸组,随着富里酸浓度的增大,单株收果数、单果质量、单株果质量、单株茎叶质量、单株生物量质量也在增大,均大于干旱组,最大值近似于正常组。

表3 朝天椒各组各项生长指标观察值

指标	正常组	干旱组	$\rho(\text{富里酸})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$			$\rho(\text{多效唑})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$			$\rho(\text{烯效唑})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$		
			100	200	300	8	16	24	8	16	24
单株收果数	35.85	17.93	21.52	23.74	35.96	18.97	20.71	30.72	20.76	21.83	34.10
单果质量/g	1.89	1.25	1.50	1.81	2.01	1.35	1.72	1.93	1.34	1.76	2.23
单株果质量/g	67.77	22.41	32.27	42.94	72.27	25.61	35.60	59.29	27.82	38.32	76.05
单株茎叶质量/g	237.10	117.40	140.88	152.92	235.28	123.36	135.43	199.61	135.45	141.30	223.15
单株生物量质量/g	277.97	137.80	165.36	179.20	275.85	145.00	158.57	234.38	158.74	165.51	262.14

多效唑组,随着多效唑浓度的增大,单株收果数、单果质量、单株果质量、单株茎叶质量、单株生物量质量也在增大,均大于干旱组,但最大值小于正常组。

烯效唑组,随着烯效唑浓度的增大,单株收果数、单果质量、单株果质量、单株茎叶质量、单株生物量质量也在增大,均大于干旱组,最大值近似于正常组。

如果对表3进行单因素方差分析及多重比较,

需要按照每个生理指标分别进行,需要进行5次的分析,所得结果也是每个单指标分析结果,缺少5个指标的综合分析结果。

根据表3和公式[3],得出公式[4],见表4。依据公式[5]得出表4最后1列。依据公式[6]得出表4最后一行。

表4表明:单株收果数、单果质量、单株果质量、单株茎叶质量、单株生物量质量的关联系数在 $300\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 富里酸组是1,最大,说明 $300\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 富

表4 朝天椒各组各项生长指标观察值的关联系数及观察组的关联序

指标	干旱组	$\rho(\text{富里酸})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$			$\rho(\text{多效唑})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$			$\rho(\text{烯效唑})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$			$S_0(k)$	$w(k)$
		100	200	300	8	16	24	8	16	24		
单株收果数	0.337 0	0.388 9	0.429 9	1.000	0.350 6	0.375 9	0.642 8	0.376 6	0.394 2	0.845 9	0.234 7	0.209 8
单果质量	0.580 4	0.726 8	1.056 6	1.000 0	0.631 6	0.933 6	1.125 0	0.626 1	0.980 3	0.766 0	0.199 2	0.178 0
单株鲜果质量	0.399 6	0.467 3	0.572 3	1.000 0	0.419 3	0.495 6	0.872 6	0.434 1	0.521 6	0.877 9	0.222 8	0.199 2
单株茎叶质量	0.343 5	0.395 1	0.428 2	1.000 0	0.355 2	0.381 8	0.633 5	0.381 8	0.396 2	0.835 6	0.230 6	0.206 1
单株生物量质量	0.343 4	0.395 3	0.427 7	1.000 0	0.355 6	0.381 1	0.635 2	0.381 4	0.395 6	0.840 5	0.231 5	0.206 9
R_i	0.079 1	0.093 5	0.113 8	0.200 0	0.083 3	0.100 3	0.154 2	0.086 9	0.104 9	0.167 0		

里酸处理后,朝天椒的这些生长指标值与正常组最相近,朝天椒生长状况相近或略高于正常组,没有受到干旱胁迫的影响。

表4最后一行的关联序值, $300\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 富里酸处理组是0.200 0,最大,其次是 $24\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 烯效唑处理组,0.167 0,第三是 $24\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 多效唑处理组,0.154 2。 R_i 从大到小的排序: $R_4>R_{10}>R_7>R_3>R_9>R_6>R_2>R_8>R_5>R_1$ 。也说明 $300\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 富里酸、 $24\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 烯效唑、 $24\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 多效唑处理组的抗旱效果最好,达到与正常组相近的生长状况。

3 讨论与结论

植物抗旱剂能促进作物根系的发育,增强作物根系的吸水、吸肥能力;减缓土壤水分消耗,尤其是土壤深层的水分和养分;其次是减小叶片的气孔开张度,增加气孔阻力,抑制叶面蒸腾,从而减少叶层水分散失,保持植株体内水分;增加叶绿素含量,加

强光合作用^[4,18]。

叶绿素a、叶绿素b和叶绿素(a+b)的含量及净光合速率,表示植物生长旺盛。冀宪领等^[18]以桑树为研究材料,发现桑树叶片的净光合速率随着干旱胁迫的加剧,降低幅度逐渐增加。植物抗旱剂能保持细胞正常功能,提高光合速率和降低呼吸消耗,使得光合作用在干旱条件下能较长时间维持正常^[19]。本试验表明,植物抗旱剂抑制了朝天椒叶绿素的降解,提高了朝天椒的光合能力。 $300\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 富里酸、 $24\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 烯效唑和 $24\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 多效唑处理下的朝天椒叶绿素含量和净光合速率都高于干旱组,与正常组基本相同。

SOD活性、POD活性、CAT活性反映植物受干旱胁迫后自我保护的反应能力,一般值越大,受胁迫程度越大。植物组织细胞中的酶系统具有清除活性氧的能力,但是在严重干旱胁迫条件下,导致植物细胞受到氧化胁迫,启动膜脂质过氧化作用,

产生MDA,使细胞受到损伤^[20-21]。本试验结果表明,叶面喷施抗旱剂促进了朝天椒保护酶活性的增加,抑制了MDA含量的增加和电导率的上升。

朝天椒12个生理指标的综合分析(灰色关联度分析法中)的关联序值 R_i 从大到小的排序: $R_4(300\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 富里酸组) $>R_{10}(24\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 烯效唑组) $>R_7(24\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 多效唑组) $>R_2(100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 富里酸组) $>R_8(8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 烯效唑组) $>R_6(16\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 多效唑组) $>R_5(8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 多效唑组) $>R_9(16\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 烯效唑组) $>R_1$ (干旱组) $>R_3(200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 富里酸组)。朝天椒5个生长指标的综合分析(灰色关联度分析法中)的关联序值 R_i 从大到小的排序: $R_4(300\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 富里酸组) $>R_{10}(24\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 烯效唑组) $>R_7(24\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 多效唑组) $>R_3(200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 富里酸组) $>R_9(16\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 烯效唑组) $>R_6(16\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 多效唑组) $>R_2(100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 富里酸组) $>R_8(8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 烯效唑组) $>R_5(8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 多效唑组) $>R_1$ (干旱组)。

综合生理指标和生长指标分析结果,300 mg·L⁻¹富里酸组生长状况最好,抗旱能力最强,达到甚至超过正常组的生理机能;其次是24 mg·L⁻¹烯效唑组。富里酸可以刺激植物细胞生长和分裂,促进种子发芽和须根的生长;增强植物循环系统、呼吸系统和运输系统功能,从而提高耐干旱性^[18]。

阴星望等^[22]对三樱椒幼苗多个生理生长指标逐一分析表明,300 mg·L⁻¹富里酸、500 mg·L⁻¹氯化胆碱和20 mg·L⁻¹烯效唑对提高三樱椒抗旱性效果最好,浓度最适宜,且富里酸作用优于氯化胆碱,氯化胆碱作用优于烯效唑。与本试验既有相同之处,又有不同之处,本研究结果综合性、准确性更好。白洁洁^[23]研究表明,80 mg·L⁻¹富里酸可显著提高美乐葡萄抵御干旱胁迫的能力。王竞红等^[24]研究表明,200 mg·L⁻¹的多效唑可以提高多年生黑麦草的抗旱性。袁先峰等^[25]研究表明烯效唑能提高大丽花植株抗旱性,30 mg·L⁻¹比较好。也与本试验结果相似。

灰色关联度分析法与典型相关分析、复相关分析相比较,最大的优点在于直接利用数据与参考标准系统比较,减少数据的转换,减少信息的损失;其次利用多个指标进行综合分析,筛选出最好的处理方案(或对象),实际意义明确,克服了典型相关分析和复相关分析数据转换麻烦、缺少参考标准、信息损失较大、结果实际意义不明确的不足。所以灰色关联分析法对于多指标、多对象的比较分析,更具有直接性和综合性的优势,值得推广应用。

参考文献

- [1] 张涛,韩娅楠,张强,等.河南省朝天椒产业现状及发展对策[J].中国瓜菜,2020,33(1):65-68.
- [2] 吴艳艳.抗旱剂的研究进展[J].山东化工,2015,44(3):69-70.
- [3] 陈之欢.水分胁迫对两种旱生花卉生理生化的影响[J].中国农学通报,2002,18(2):20-23.
- [4] 张焕丽,郭晋太,李晓慧,等.极端天气对朝天椒生产的影响及应对措施[J].中国瓜菜,2012,25(1):64-65.
- [5] 袁苗苗,安运华.荆州市18种禾本科观赏草的灰色关联度分析[J].长江大学学报(自然科学版),2018,15(6):24-27.
- [6] 解玮佳,唐毓玮,宋杰,等.基于灰色关联度分析法的高山杜鹃品种综合评价[J].河南农业大学学报,2017,51(4):513-520.
- [7] 纪薇,郭荣荣,王静波,等.无核葡萄胚败育生理生化因子灰色关联分析[J].园艺学报,2019,46(8):1473-1485.
- [8] 梁咪咪,杨建伟,杜瑞卿,等.水分和气温对三樱椒幼苗生理特性的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2015,43(1):111-116.
- [9] 曾化伟.土壤水分含量与施氮量对辣椒部分生理特性及产量品质的影响[D].贵阳:贵州大学,2007.
- [10] 高建芹,陈松,彭琦,等.苗期喷施烯效唑对油菜生长及产量和品质的影响[J].江苏农业学报,2016,32(2):305-312.
- [11] 陈翠玲,姚素梅,肖冰冰,等.新乡市四区六县土壤田间持水量抽样调查[J].河南科技学院学报(自然科学版),2011,39(3):5-9.
- [12] 霍海霞,牛文全,汪有科.灌水控制上限对辣椒生长及耗水量的影响[J].节水灌溉,2012(8):1-7.
- [13] 袁娜娜.室内环刀法测定土壤田间持水量[J].中国新技术新产品,2014,10(9):184-185.
- [14] 路景玲,徐颖,魏晓云,等.螯合剂处理重金属污染底泥研究进展[J].环境保护科学,2010,36(4):36-39.
- [15] 刘萍,李明军.植物生理学实验技术[M].北京:科学出版社,2007:41-42;125-127.
- [16] 张志良,瞿伟菁.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社,2003:123-124;268-269;274-276.
- [17] 王三根.植物生理学[M].北京:科学出版社,2013:302-311.
- [18] 宋凤斌,阎璇玲,徐辰,等.MOC抗旱剂叶面喷施增强玉米耐旱性机理的研究[J].吉林农业大学学报,1999,21(2):24-26.
- [19] 冀宪领,盖英萍,牟志美,等.干旱胁迫对桑树生理生化特性的影响[J].蚕业科学,2004,30(2):117-122.
- [20] 杜金伟,崔世茂,金丽萍,等.水分胁迫对山杏渗透调节物质积累及保护酶活性的影响[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2009,30(2):88-93.
- [21] 刘景辉,赵海超,任永峰,等.土壤水分胁迫对燕麦叶片渗透调节物质含量的影响[J].西北植物学报,2009,29(7):1432-1436.
- [22] 阴星望,杜瑞卿,杨建伟,等.抗旱剂对三樱椒幼苗抗旱力的影响[J].江苏农业科学,2018,46(16):122-127.
- [23] 白洁洁.两种抗蒸腾剂产品对“美乐”葡萄叶片逆境相关指标及果实品质的影响[D].银川:宁夏大学,2018.
- [24] 王竞红,刘素欣,王非,等.多效唑对不同生境多年生黑麦草抗旱性的影响[J].草业科学,2016,33(5):926-934.
- [25] 袁先峰,李晓婉,陈仁彪,等.干旱胁迫及复水条件下烯效唑对大丽花生长与渗透调节物质的影响[J].现代园艺,2020,43(23):9-12.