

徐彦红,李 斌,席 溢,等. 多花黑麦草对磷胁迫的响应及耐磷指标的筛选[J]. 江苏农业科学,2019,47(10):176-180.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.10.039

# 多花黑麦草对磷胁迫的响应及耐磷指标的筛选

徐彦红,李 斌,席 溢,许钟丹,左意才

(贵州大学动物科学学院,贵州贵阳 550025)

**摘要:**对不同供磷水平下多花黑麦草(*Lolium multiflorum*)生长初期生长特性的变化进行分析,筛选耐磷指标,为多花黑麦草耐磷机制的研究和生产实践提供基础理论依据。利用主成分分析和模糊数学隶属函数分析 6 个不同供磷水平(0、2.5、5.0、10.0、25.0、50.0 mg/kg)对多花黑麦草生长特性的影响并进行综合评价;用株高、叶宽、叶绿素 a 含量等 8 个指标的耐磷系数和综合评价价值(*D*)进行灰色关联分析。结果表明,随着磷水平的增加,株高、叶宽、叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、类胡萝卜素含量、脯氨酸含量呈现先上升后下降的趋势,丙二醛含量和超氧化物歧化酶(SOD)活性呈现先下降后上升的趋势;多花黑麦草最适生长的磷水平为 10.0 mg/kg;与耐磷性最相关的指标为超氧化物歧化酶活性、脯氨酸含量、株高、叶绿素 a 含量。

**关键词:**多花黑麦草;磷胁迫;主成分分析;隶属函数;灰色关联分析

**中图分类号:** Q945.78;S543+.601 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)10-0176-05

多花黑麦草(*Lolium multiflorum*)为一年生(越年生)禾本科牧草,具有产量高、品质高、适于饲喂等优点。大力发展多花黑麦草种植,能有效缓解人畜争粮问题,促进节粮型畜牧业发展,并能发挥其生态功能。磷是植物生长的必需营养元素,同时也是土壤中普遍缺乏的元素。喀斯特地区土壤瘠薄,保水保肥能力差,且贵州省气候温暖,雨量充沛<sup>[1]</sup>,是极易造成营养元素淋溶流失的地区之一。因此,探讨磷素对多花黑麦

草生长特性的影响,确定其适宜种植的磷水平、筛选其耐磷指标对指导多花黑麦草生产种植和研究多花黑麦草耐磷机制有重要意义。

植物各生长指标对营养元素的响应差异较大,仅用单项指标来反映植物对某一营养元素的响应效果局限性较大。因此,探讨元素对植物的处理效果,应用尽可能多的指标来综合评定,从而可以减少单项指标对处理效果评价所造成的片面性。此外,目前关于植物耐磷指标筛选的研究较少<sup>[2]</sup>,多集中于抗旱、耐盐等指标的筛选<sup>[3-7]</sup>,关于多花黑麦草耐磷指标筛选的研究也较少。因此,设置不同的供磷水平,研究其对多花黑麦草形态和生理指标的影响,利用主成分分析和模糊数学隶属函数法对各指标进行综合评价,旨在确定多花黑麦草适合生长的磷水平,为多花黑麦草的种植提供理论依据;用灰色关联分析法对株高、叶宽、叶绿素 a 含量等 8 个指标进行排序,旨在为耐磷指标的筛选提供理论基础。

收稿日期:2018-04-09

基金项目:贵州省科技合作计划(编号:黔科合 LH 字[2016]7450 号);贵州大学引进人才研究项目[编号:贵大人基合字 2015(68)号]。

作者简介:徐彦红(1993—),女,贵州毕节人,硕士研究生,主要从事植物生理生态学研究。E-mail:1064633822@qq.com。

通信作者:席 溢,博士,副教授,主要从事植物生理生态学和草地生态学研究。E-mail:xyii2000@126.com。

## 3.3 鳅苗气泡病及其防治方法

目前,气泡病的有效应急控制措施主要有加注新水、泼洒净水改底药物和开启增氧机等。综合本研究结果,我们认为综合采用施肥调水、换注新水、泼洒药物和开启增氧机等完全可以防控鳅苗气泡病,提高鳅苗培育成活率。现针对鳅苗气泡病提出“调水控病”生态防治方案如下:一是保持培育池适宜水位,控制池水肥度,保持培育池水质肥、活、嫩、爽,切忌肥水压塘;二是加注新水要求水温较低、水质清新,严防浮游植物繁殖过盛;三是气泡病暴发时,可用 5 kg/hm<sup>2</sup> 食盐化水后全池泼洒或开启增氧机,待病情减轻后,再大量换注水;四是建议规模化的鳅苗培育场设生态池专门培育鳅苗适口的浮游生物,待鳅苗水花下塘后收集提供鳅苗摄食。

## 参考文献:

[1] Marsh M C, Gorham P F. The gas disease in fishes[J]. Rep US Bur

Fish, 1905:343-376.

[2] 彭天辉,潘连德,唐绍林. 大口黑鲈慢性气泡病的组织病理观察以及水体分层对发病的影响[J]. 大连海洋大学学报,2013,28(6):578-584.

[3] 刘晓敏,王 妹. 生态浮床对大鳞副泥鳅仔稚鱼气泡病及池塘生态的影响研究[J]. 水产科技情报,2017,44(3):138-142.

[4] 王志远. 对池塘鱼苗气泡病的初步研究[J]. 动物学杂志,1960(7):318.

[5] Weitkamp D E, Katz M. A review of dissolved-gas supersaturation literature[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 1980, 109(6):659-702.

[6] 史为良. 冰下溶氧过高引起亲鱼气泡病一例[J]. 淡水渔业, 1978(6):41-42,47.

[7] 汪文忠. 泥鳅气泡病的防治措施[J]. 病害防治,2016(1):35-36.

[8] 张振早. 泥鳅夏花鱼种培育过程中气泡病的防治方法[J]. 渔业致富指南,2012(4):58.

## 1 材料与方法

### 1.1 试验时间、地点

试验于 2017 年 3 月开始,在贵州大学南校区校内进行。

### 1.2 试验设计

以多花黑麦草安格斯 1 号为材料,采用砂培法进行种植。

石英砂用水浸泡,除去黏土和有机质,至洗涤的水呈无色透明为止;再用 3% 盐酸浸泡 7 d;然后用霍格兰营养液浸泡,每天 2 次,至 pH 值稳定为止。将处理好的石英砂装入直径 29.5 cm、深 21.5 cm 的花盆中,每盆装 9.0 kg。

挑选均匀饱满的黑麦草种子,将其置于 2%  $H_2O_2$  溶液中浸泡 10 min 进行消毒,再用蒸馏水冲洗 6 遍,晾干备用,将处理后的种子置床培养。待种子发芽,苗长 7 cm 以上时,选择高度近似、生长情况相近的幼苗移栽花盆中,移栽深度为 2 cm。为确保植株有足够的养分,每周定期为植株浇灌霍格兰营养液。

共设置 6 个磷水平 (0、2.5、5.0、10.0、25.0、50.0 mg/kg),分别用 CK、 $P_{2.5}$ 、 $P_{5.0}$ 、 $P_{10.0}$ 、 $P_{25.0}$ 、 $P_{50.0}$  表示,磷源为  $NaH_2PO_4$ ,试验开始时溶解在水中,施入石英砂中。每个磷水平有 3 盆重复,每盆定苗 3 株黑麦草。

### 1.3 指标测定

从 3 月 31 日开始,每周测量 1 次株高和最宽叶宽,直到 4 月底结束。收割多花黑麦草,测定其他生理指标。

光合色素的测定参照高俊风的方法<sup>[8]</sup>;丙二醛(MDA)含量的测定采用硫代巴比妥酸(TBA)显色法;脯氨酸(Pro)含量的测定采用酸性茚三酮法<sup>[9]</sup>;超氧化物歧化酶(SOD)活性的测定采用氮蓝四唑(NBT)光化还原法<sup>[10]</sup>。

### 1.4 数据处理与分析

根据所得数据,求各指标的相对值,具体见公式(1)。加权隶属函数相关公式见式(2)~式(5)。

$$\text{各指标相对值}(X) = \frac{\text{磷处理各指标测定值}}{\text{对照各指标测定值}}; \quad (1)$$

$$\text{正隶属函数}: U(Z_j) = (Z_j - Z_{j\min}) / (Z_{j\max} - Z_{j\min}); \quad (2)$$

$$\text{反隶属函数}: U(Z_j) = 1 - (Z_j - Z_{j\min}) / (Z_{j\max} - Z_{j\min}); \quad (3)$$

$$W_j = P_j / \sum_{j=1}^n P_j; \quad (4)$$

$$D = \sum_{j=1}^n [U(Z_j) \times W_j]. \quad (5)$$

式中: $Z_j$  为各处理第  $j$  个主成分的得分; $Z_{j\max}$ 、 $Z_{j\min}$  分别表示所有处理中第  $j$  个主成分得分的最大值和最小值; $P_j$  为综合指标  $j$  的贡献率; $W_j$  为综合指标  $j$  的权重; $D$  为综合评价值。

灰色关联相关分析的公式见式(6)~式(8)。

$$x'_i = \frac{x_i(k) - \bar{x}_i}{S_i}; \quad (6)$$

$$V(k) = \frac{\min_i \min_k |x'_o(k) - x'_i(k)| + \rho_i^{\max} \max_k |x'_o(k) - x'_i(k)|}{|x'_o(k) - x'_i(k)| + \rho_i^{\max} \max_k |x'_o(k) - x'_i(k)|}; \quad (7)$$

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n V(k). \quad (8)$$

式中: $x_i$  为原始数据; $x'_i$  为无量纲处理后的数据; $\bar{x}_i$ 、 $S_i$  分别为同一指标的平均值和标准差; $i$  为某个指标; $k$  为比较数列对参考数列  $X_0$  在  $k$  点的关联系数; $\rho$  为分辨系数, $\rho \in (0, 1]$ ,此处采取折中的办法,取  $\rho = 0.5$ 。 $r_i$  为比较数列与参考数列的关联度。

利用 Excel 13.0 软件整理数据和绘制图像,SPSS 19.0 软件分析数据。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同磷水平处理对多花黑麦草形态的影响

株高和叶宽是反映禾本科植物生物性状的重要指标。由表 1 可知,在 3 月 31 日、4 月 21 日和 4 月 28 日时,各磷水平处理对株高的影响没有显著性差异;随着磷水平的增加,株高整体呈现先增加后降低的趋势;在 4 月 21 日时,磷水平为 5、10 mg/kg 时,株高相对较高;同一磷水平处理,生长后期株高显著高于生长前期( $P < 0.05$ ),如  $P_{50.0}$  处理在 4 月 28 日、4 月 21 日所测株高显著高于 4 月 14 日、4 月 7 日和 3 月 31 日。

表 1 不同磷水平处理株高的变化

磷水平处理	株高(cm)				
	3 月 31 日	4 月 7 日	4 月 14 日	4 月 21 日	4 月 28 日
CK	4.77 ± 0.70Ca	5.25 ± 0.96Cb	6.15 ± 1.40Cb	10.45 ± 1.83Ba	13.47 ± 2.13Aa
$P_{2.5}$	4.65 ± 1.49Ca	5.00 ± 0.40Cb	6.48 ± 1.70Cb	11.42 ± 2.32Ba	13.38 ± 1.87Aa
$P_{5.0}$	4.78 ± 1.49Ca	5.73 ± 1.18Cab	9.47 ± 1.46Ba	13.12 ± 2.76Aa	15.18 ± 3.11Aa
$P_{10.0}$	5.17 ± 0.85Da	6.52 ± 1.35CDa	9.68 ± 1.87BCa	12.50 ± 4.10ABa	14.82 ± 5.91Aa
$P_{25.0}$	4.83 ± 0.76Ca	5.30 ± 0.78Cb	7.26 ± 2.11Cab	10.55 ± 2.84Ba	14.03 ± 3.92Aa
$P_{50.0}$	5.18 ± 0.68Ba	5.82 ± 0.66Bab	7.30 ± 3.11Bab	11.07 ± 3.03Aa	13.55 ± 2.97Aa

注:同行数据后不同大写字母表示同一处理在不同时间差异显著( $P < 0.05$ );同列数据后不同小写字母表示不同处理在同一时间差异显著( $P < 0.05$ )。表 2 同。

由表 2 可知,不同磷水平处理在同一时间和同一磷水平处理在不同时间对叶宽的影响差异都显著。总体来说,磷水平 5、10 mg/kg 对叶宽的促进作用最显著。

### 2.2 不同磷水平处理对多花黑麦草生理特性的影响

从图 1 可知,磷水平为 2.5 mg/kg,叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素含量均为最高,显著高于对照及其他处理,与其他处理间存在显著性差异( $P < 0.05$ );随着磷水平的增加,叶绿素 a、叶绿

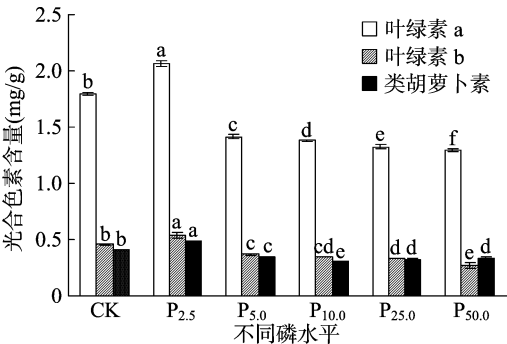
素 b、类胡萝卜素含量整体呈现出先上升后下降的趋势。

从图 2 可知,磷水平为 50.0 mg/kg 时,丙二醛含量与对照组相比没有显著性差异( $P > 0.05$ ),但显著高于其他处理。

由图 3 可知,磷水平为 5.0 mg/kg 时,脯氨酸含量最高,与磷水平为 10.0 mg/kg 时相比没有显著性差异( $P > 0.05$ ),但均高于其他处理。在磷水平为  $< 5.0$  mg/kg 时,脯氨酸含量呈现上升的趋势。

表 2 不同磷水平处理叶宽的变化

磷水平处理	叶宽(mm)				
	3 月 31 日	4 月 7 日	4 月 14 日	4 月 21 日	4 月 28 日
CK	0.80 ± 0.25Db	0.88 ± 0.26DCb	1.20 ± 0.20Cc	1.60 ± 0.41Bb	2.22 ± 0.34Ab
P <sub>2.5</sub>	1.00 ± 0.11Cab	1.10 ± 0.11Ca	1.25 ± 0.28Cbc	1.80 ± 0.36Bb	2.25 ± 0.65Ab
P <sub>5.0</sub>	0.97 ± 0.08Cab	1.07 ± 0.10Cab	1.73 ± 0.19Ba	3.15 ± 0.79Aa	3.48 ± 0.73Aa
P <sub>10.0</sub>	1.12 ± 0.12Ca	1.15 ± 0.10Ca	1.62 ± 0.21Cab	2.88 ± 0.58Ba	3.63 ± 0.93Aa
P <sub>25.0</sub>	0.83 ± 0.19Cb	0.98 ± 0.04Cb	1.35 ± 0.48BCbc	2.32 ± 1.21Bab	3.07 ± 1.06Aab
P <sub>50.0</sub>	0.92 ± 0.12Bb	1.03 ± 0.16Bb	1.32 ± 0.35Bbc	2.65 ± 1.17Aab	3.22 ± 1.08Aab



同一光合色素不同浓度处理柱上的不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。下同

图 1 不同磷水平处理光合色素含量的变化

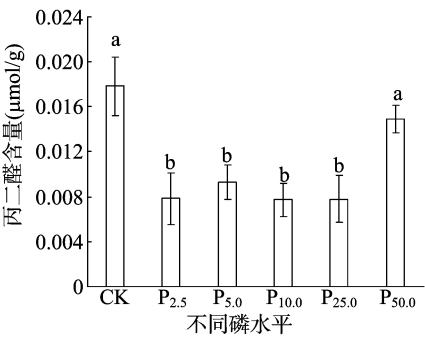


图 2 不同磷水平处理丙二醛含量的变化

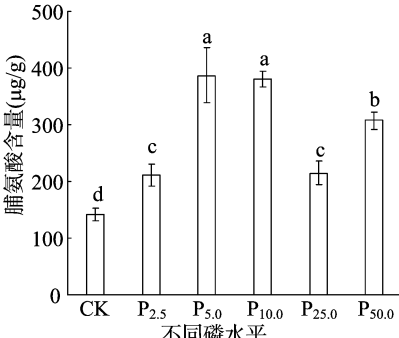


图 3 不同磷水平处理脯氨酸含量的变化

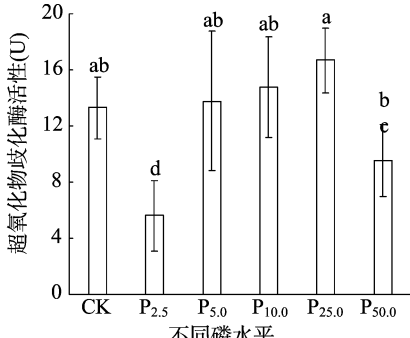


图 4 不同磷水平处理超氧化物歧化酶活性的变化

表 3 不同磷水平处理多花黑麦草 8 个鉴定指标的相对值

磷水平处理	株高 ( $X_1$ )	叶宽 ( $X_2$ )	叶绿素 a 含量 ( $X_3$ )	叶绿素 b 含量 ( $X_4$ )	类胡萝卜素含量 ( $X_5$ )	丙二醛含量 ( $X_6$ )	脯氨酸含量 ( $X_7$ )	超氧化物歧化酶活性 ( $X_8$ )
P <sub>2.5</sub>	0.99 ± 0.14a	1.02 ± 0.29b	1.14 ± 0.01a	1.18 ± 0.06a	1.17 ± 0.01a	0.44 ± 0.13b	0.42 ± 0.19c	1.48 ± 0.13c
P <sub>5.0</sub>	1.13 ± 0.23a	1.57 ± 0.33a	0.79 ± 0.01a	0.80 ± 0.02b	0.82 ± 0.01b	0.52 ± 0.09b	1.03 ± 0.37ab	2.72 ± 0.34a
P <sub>10.0</sub>	1.10 ± 0.44a	1.64 ± 0.42a	0.77 ± 0.002c	0.76 ± 0.00bc	0.74 ± 0.00d	0.43 ± 0.08b	1.11 ± 0.27ab	2.66 ± 0.10a
P <sub>25.0</sub>	1.04 ± 0.29a	1.38 ± 0.48ab	0.74 ± 0.01d	0.73 ± 0.01c	0.78 ± 0.01c	0.44 ± 0.12b	1.25 ± 0.18a	1.51 ± 0.14c
P <sub>50.0</sub>	1.01 ± 0.22a	1.45 ± 0.49ab	0.72 ± 0.01d	0.59 ± 0.04d	0.79 ± 0.04bc	0.84 ± 0.07a	0.72 ± 0.19bc	2.16 ± 0.10b
最大值	1.130	1.640	1.140	1.180	1.170	0.840	1.250	2.720
最小值	0.990	1.020	0.720	0.590	0.740	0.430	0.420	1.480
平均值	1.054	1.412	0.832	0.812	0.860	0.534	0.906	5.265
标准差	0.058	0.243	0.177	0.230	0.177	0.173	0.335	0.599

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。

最合适的综合指标是十分必要的。对 8 个评价指标进行相关性分析发现,有些评价指标间相关性显著或极显著(表 4),如  $X_5$  与  $X_3$  之间相关性极显著( $r = 0.978, P < 0.01$ ),可认为  $X_5$  与  $X_3$  的耐磷性共同信息量为 97.8%,且其余具有相关性的评价指标间也存在信息重叠现象。因此,筛选出既能有效代

表所有单项评价指标,又彼此独立且没有信息重叠的综合指标来评价多花黑麦草对磷的胁迫响应是十分必要的。

2.3 不同磷水平处理对多花黑麦草生长特性的综合评价

不同磷水平处理对多花黑麦草 8 个评价指标(株高、叶宽、叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、类胡萝卜素含量、丙二醛含量、脯氨酸含量和超氧化物歧化酶活性,其相对值分别用  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$ 、 $X_5$ 、 $X_6$ 、 $X_7$ 、 $X_8$  表示)的影响存在不一致性(表 3),仅利用单一指标评价不同磷水平处理对多花黑麦草的影响存在片面性。因此,通过对所有评价指标进行系统分析,筛选出

表所有单项评价指标,又彼此独立且没有信息重叠的综合指标来评价多花黑麦草对磷的胁迫响应是十分必要的。

对 8 个评价指标进行主成分分析,结果如表 5 所示。根据特征值大于 1 及累积贡献率大于 85%的原则,选取前 2 个主成分作为综合指标,可有效反映 8 个评价指标 87.332% 的

表 4 不同磷水平处理多花黑麦草 8 个指标相对值的简单相关性

指标	相关系数							
	株高 ( $X_1$ )	叶宽 ( $X_2$ )	叶绿素 a 含量 ( $X_3$ )	叶绿素 b 含量 ( $X_4$ )	类胡萝卜素含量 ( $X_5$ )	丙二醛含量 ( $X_6$ )	脯氨酸含量 ( $X_7$ )	超氧化物歧化酶活性 ( $X_8$ )
株高( $X_1$ )	1.000							
叶宽( $X_2$ )	0.808	1.000						
叶绿素 a 含量( $X_3$ )	-0.472	-0.849	1.000					
叶绿素 b 含量( $X_4$ )	-0.304	-0.770	0.973 **	1.000				
类胡萝卜素含量( $X_5$ )	-0.580	0.916 *	0.978 **	0.923 *	1.000			
丙二醛含量( $X_6$ )	-0.288	0.151	-0.390	-0.579	-0.244	1.000		
脯氨酸含量( $X_7$ )	0.671	0.740	-0.766	-0.604	-0.829	-0.285	1.000	
超氧化物歧化酶活性( $X_8$ )	0.831	0.847	-0.489	-0.435	-0.573	0.156	0.348	1.000

注: \*、\*\* 分别表示在 0.05、0.01 水平上差异显著。

表 5 2 个主成分的系数、特征值、方差贡献率和累积贡献率

指标	PC1	PC2
株高( $X_1$ )	0.931	0.194
叶宽( $X_2$ )	0.916	-0.357
叶绿素 a( $X_3$ )	-0.700	0.683
叶绿素 b( $X_4$ )	-0.540	0.830
类胡萝卜素( $X_5$ )	-0.806	0.556
丙二醛( $X_6$ )	-0.235	-0.906
脯氨酸( $X_7$ )	0.866	-0.084
超氧化物歧化酶( $X_8$ )	0.754	-0.139
特征值	4.508	2.479
方差贡献率(%)	56.351	30.981
累积贡献率(%)	56.351	87.332

信息。在第 1 主成分(PC1)中, $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_5$ 、 $X_7$ 、 $X_8$  指标的构成载荷较大;在第 2 主成分(PC2)中, $X_4$ 、 $X_6$  指标的构成载荷较大。可见上述鉴定指标与多花黑麦草的耐磷性存在一定关系。利用 2 个综合指标的特征向量建立综合指标与原单项指标的线性组合方程,见式(9)~式(10)。

$$Z_1 = 0.438X_1 + 0.431X_2 - 0.330X_3 - 0.254X_4 - 0.380X_5 - 0.111X_6 + 0.408X_7 + 0.355X_8;$$
 (9)

$$Z_2 = 0.123X_1 - 0.227X_2 + 0.434X_3 + 0.527X_4 + 0.353X_5 - 0.575X_6 - 0.053X_7 - 0.088X_8。$$
 (10)

根据各指标的相对值(表 3)和综合指标的线性组合方程,得到综合指标的值,根据式(2)~式(5)计算多花黑麦草 2 个综合指标的隶属函数值  $U(Z_j)$ 、权重和综合评价值( $D$ ) ,

表 7 8 个指标对耐磷性的关联值

项目	株高 ( $X_1$ )	叶宽 ( $X_2$ )	叶绿素 a 含量 ( $X_3$ )	叶绿素 b 含量 ( $X_4$ )	类胡萝卜素含量 ( $X_5$ )	丙二醛含量 ( $X_6$ )	脯氨酸含量 ( $X_7$ )	超氧化物歧化酶活性 ( $X_8$ )
关联度	0.641 3	0.559 1	0.576 3	0.468 9	0.529 2	0.557 1	0.643 2	0.706 7
关联序	3	5	4	8	7	6	2	1

关联度的大小表示某一项指标对磷的耐受强度。根据表 7 的结果,各项指标对磷的耐受强度排序为超氧化物歧化酶活性>脯氨酸含量>株高>叶绿素 a 含量>叶宽>丙二醛含量>类胡萝卜素含量>叶绿素 b 含量。

3 讨论

3.1 不同磷水平处理对多花黑麦草生长的影响

磷是植物生长发育不可缺少的营养元素之一,不仅是植

物体内许多重要化合物的组分,而且还以多种途径参与植物代谢<sup>[13]</sup>。植物细胞抵抗逆境损伤的重要保护酶系统如 SOD 和过氧化物酶(POD)等是植物体内活性氧的清道夫,在清除植株体内多余的活性氧、避免细胞受到氧损伤等过程中发挥着巨大的作用<sup>[14]</sup>。不同的磷水平处理对植物的生长指标和生理指标有较大的差异,随着磷水平的增加,株高呈现先上升后下降的趋势,与董秋平等的研究结果<sup>[14]</sup>有相似性。本研究中随着磷水平的增加,多花黑麦草的叶绿素含量下降,该结果

表 6 多花黑麦草的综合指标值、隶属函数值、权重、D 值及排序						
磷水平处理	综合指标值		隶属函数值		D	排序
	Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	U(Z <sub>1</sub> )	U(Z <sub>2</sub> )		
P <sub>2.5</sub>	0.402	1.017	0.000	0.128	0.046	3
P <sub>5.0</sub>	1.726	0.242	0.260	0.385	0.305	2
P <sub>10.0</sub>	1.812	0.215	0.335	0.413	0.363	1
P <sub>25.0</sub>	1.326	0.343	0.000	0.000	0.000	5
P <sub>50.0</sub>	1.346	0.014	0.064	0.000	0.041	4
指标权重			0.645	0.355		

2.4 多花黑麦草生长初期耐磷指标的筛选

按灰色系统理论要求,将  $D$  和 8 个指标视为一个整体。数据进行标准化处理,根据关联分析四公理<sup>[11]</sup>,计算各指标与  $D$  的关联系数,然后分别求出各指标与  $D$  的关联度,并按关联度大小排列出关联序。

以  $D$  为参考数据列  $X_0 = (0.046, 0.305, 0.363, 0.000, 0.041)$ ,株高等 8 项指标为比较数列(子序列),记为  $X_i (i = 1, 2, 3 \cdots, 8)$ ,  $X_1 = (0.99, 1.13, 1.10, 1.04, 1.01)$ 、 $X_2 = (1.02, 1.57, 1.64, 1.38, 1.45)$ 、 $\cdots$ 、 $X_8 = (1.48, 2.72, 2.66, 1.51, 2.16)$ 。使用式(5)对数据进行标准化处理<sup>[12]</sup>,使用式(6)~式(7)计算关联系数、关联度,如表 7 所示。

物体体内许多重要化合物的组分,而且还以多种途径参与植物代谢<sup>[13]</sup>。植物细胞抵抗逆境损伤的重要保护酶系统如 SOD 和过氧化物酶(POD)等是植物体内活性氧的清道夫,在清除植株体内多余的活性氧、避免细胞受到氧损伤等过程中发挥着巨大的作用<sup>[14]</sup>。不同的磷水平处理对植物的生长指标和生理指标有较大的差异,随着磷水平的增加,株高呈现先上升后下降的趋势,与董秋平等的研究结果<sup>[14]</sup>有相似性。本研究中随着磷水平的增加,多花黑麦草的叶绿素含量下降,该结果

与前人对类芦、玉米和桉树的研究结果<sup>[12,15-16]</sup>不一致。与之相反,陈秀铃研究发现,邓恩桉叶片叶绿素含量在低磷胁迫下显著增加<sup>[17]</sup>,与本研究结果一致,这说明不同的植物对磷处理的应答具有一定的差异,植物可通过自身调节叶绿素含量来适应。此外,本研究中,随着磷水平的增加,叶绿素 a、叶绿素 b、脯氨酸含量呈现先上升后下降的趋势,超氧化物歧化酶活性呈现先下降后上升的趋势,该结果与余姣姐等对杉木的研究结果<sup>[18]</sup>有相似之处,也有所差别,这表明在磷胁迫下,不同植物的适应机制有差异性。

### 3.2 不同磷水平处理对多花黑麦草影响的综合评价及耐磷指标的筛选

关于植物耐磷的形态及生理指标有很多,笔者选取 8 个指标用于多花黑麦草对不同磷水平处理效果响应的的评价。通过主成分分析可将 8 个原始的单项指标转换成 2 个新的相对独立的综合指标,进一步对 2 个新的综合指标利用隶属函数分析法得到耐磷综合评价价值,避免了利用单个性状指标描述多花黑麦草对磷响应的局限性。张加强等运用灰色关联分析筛选出亚麻芽期的耐镉鉴定指标<sup>[19]</sup>;苏德伟等运用灰色关联分析得出叶片相对含水量、叶绿素含量、丙二醛含量、可溶性多糖含量与抗旱指数的关联度较大<sup>[20]</sup>;崔博文等运用灰色关联分析得出类胡萝卜素质量分数、根系活力、丙二醛质量分数和游离脯氨酸质量分数与马尾松耐低磷性关系密切<sup>[21]</sup>,此法在数据分析上已得到广泛应用<sup>[22-24]</sup>。本试验在主成分分析和隶属函数分析的基础上,利用这 8 个与耐磷性密切相关的形态及生理指标与耐磷综合评价价值进行灰色关联分析,筛选出超氧化物歧化酶活性、脯氨酸含量、株高、叶绿素 a 含量与综合评价值的关联度最大,可作为反映多花黑麦草对磷响应效果的分析指标。由于本试验仅涉及 1 个多花黑麦草品种对磷的生理响应的研究,筛选出的耐磷指标存在一定的局限性,因此,还需进一步研究不同品种多花黑麦草对磷的生理响应,从而筛选出更具有代表性的耐磷指标。

## 4 结论

在一定的磷水平范围内,磷水平的增加对多花黑麦草的生长有促进作用,多花黑麦草各指标对磷的耐受水平也不同。通过主成分分析和隶属函数法对多花黑麦草 8 个鉴定指标的耐磷系数进行综合评价得出,磷水平 10.0 mg/kg 时最适宜多花黑麦草生长;灰色关联相关分析结果表明,在综合评价价值和各耐磷指标的关联度中,超氧化物歧化酶活性、脯氨酸含量、株高、叶绿素 a 含量与综合评价值的关联度较大,可作为多花黑麦草耐磷评价指标。

### 参考文献:

- [1]皇甫江云,卢欣石,赵熙贵,等. 贵州草地资源现状及开发利用对策[J]. 草业科学,2009,26(9):70-76.
- [2]栗振义,张筠芯,仝宗永,等. 不同紫花苜蓿品种对低磷环境的形

- 态与生理响应分析[J]. 中国农业科学,2017,50(20):3898-3907.
- [3]张国伟,路海玲,周治国. 棉花萌发期和苗期耐盐性及耐盐指标评价[C]//中国棉花学会. 中国棉花学会 2010 年年会论文汇编. 2010:243-250.
- [4]张盼盼,冯佰利,王鹏科,等. PEG 胁迫下糜子苗期抗旱指标鉴定研究[J]. 中国农业大学学报,2012,17(1):53-59.
- [5]罗俊杰,欧巧明,叶春雷,等. 重要胡麻栽培品种的抗旱性综合评价及指标筛选[J]. 作物学报,2014,40(7):1259-1273.
- [6]程建峰,潘晓云,刘宜柏,等. 水稻抗旱性鉴定的形态指标[J]. 生态学报,2005,25(11):3117-3125.
- [7]刘光辉,陈全家,吴鹏昊,等. 棉花花铃期抗旱性综合评价及指标筛选[J]. 植物遗传资源学报,2016,17(1):53-62,69.
- [8]高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社,2006:74-77.
- [9]李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社,2000:258-260.
- [10]张志良,瞿伟菁,李小方. 植物生理学实验指导[M]. 4 版. 北京:高等教育出版社,2009:268-269.
- [11]邓聚龙. 灰色预测与决策[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1986:97-98.
- [12]武兰芳. 玉米主要农艺性状的灰色关联度分析[J]. 玉米科学,1997,5(1):72-75.
- [13]梁秀兰,林英春,年海,等. 低磷胁迫对不同基因型玉米主要生理生化特性的影响[J]. 作物学报,2005,31(5):667-669.
- [14]董秋平,赵恢,张小芳,等. 低磷胁迫下不同野生大豆的形态和生理响应差异[J]. 江苏农业科学,2017,45(9):79-83.
- [15]黄勇. 不同桉树品种适应磷胁迫的生理学机制研究[D]. 福州:福建农林大学,2007.
- [16]蔡丽平,吴鹏飞,侯晓龙,等. 磷胁迫对水土保持先锋植物类芦光合特性的影响[J]. 水土保持学报,2012,26(6):281-285.
- [17]陈秀铃. 邓恩桉低磷胁迫下生理生态响应机理研究[D]. 福州:福建农林大学,2009.
- [18]于姣姐,李莹,殷丹阳,等. 杉木对低磷胁迫的响应和生理适应机制[J]. 林业科学研究,2017,30(4):566-575.
- [19]张加强,史小华. 基于灰色关联分析的亚麻芽期耐镉鉴定指标的选取[J]. 浙江农业科学,2017,58(10):1714-1716.
- [20]苏德伟,梅兰,林辉,等. 莱牧 1 号抗旱生理响应及灰色关联度分析[J]. 农业科学与技术(英文版),2017,18(7):1158-1163.
- [21]崔博文,乔光,范付华,等. 不同种源马尾松种质耐低磷的主成分与灰色关联度分析[J]. 西南大学学报(自然科学版),2017,39(8):49-56.
- [22]陈静,沈生元,谢庆春,等. 甜玉米鲜穗产量与主要农艺性状的灰色关联度分析[J]. 江苏农业科学,2017,45(10):48-51.
- [23]胡诚,乔艳,刘友梅,等. 不同施肥管理措施下土壤生物环境的灰色关联度分析[J]. 湖北农业科学,2017,56(7):1228-1231.
- [24]钟丽. 油菜产量与主要性状的灰色关联度分析[J]. 南方农业学报,2012,43(4):421-424.