

网络出版时间:2024-08-20

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20240819.1737.022

## 播种季节及地点对大麦苗粉抗氧化酶活性的影响

官秀娇<sup>1,2</sup>, 杨晓梦<sup>2</sup>, 赵塔<sup>1,2</sup>, 杨丽娥<sup>2</sup>, 普晓英<sup>2</sup>, 李霞<sup>2</sup>, 杨砚斌<sup>1,2</sup>, 杨加珍<sup>2</sup>, 曾亚文<sup>2</sup>

(1. 云南大学资源植物研究院, 云南昆明 650504; 2. 云南省农业科学院生物技术与种质资源研究所, 云南昆明 650205)

**摘要:**为探究不同种植季节及试点对大麦苗粉抗氧化酶活性的影响,以48个云南大麦品种连续两年在滇源镇春、夏、秋、冬四个不同季节播种及滇源、小街、研和镇3个不同地点播种,采用酶标仪测定大麦苗粉超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、多酚氧化酶(PPO)的活性并进行差异分析。结果表明,不同季节和不同地点播种的大麦抗氧化酶活性差异明显,夏播大麦苗粉SOD和CAT活性显著大于春播、秋播和冬播,而夏播PPO活性略小于秋播,但大于春播与冬播。不同地点播种的大麦苗粉SOD和CAT活性均表现为低海拔的研和镇最高,高海拔的滇源镇最低;PPO活性则表现为小街镇最高,研和镇最低。大麦苗粉抗氧化酶活性主要受播种季节的影响。结合隶属函数法和聚类分析对大麦抗氧化性进行评价,初步筛选出抗氧化酶活性强的大麦优良品种(云啤22号、矮思500、云裸1号、云饲麦7号)。

**关键词:**大麦;苗粉;抗氧化酶;播种季节;试点

中图分类号:S512.3;S352.1

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2025)05-0608-11

## Effects of Sowing Season and Site on the Antioxidant Enzyme Activity of Barley Grass Powder

GUAN Xiujiao<sup>1,2</sup>, YANG Xiaomeng<sup>2</sup>, ZHAO Ta<sup>1,2</sup>, YANG Li'e<sup>2</sup>,  
PU Xiaoying<sup>2</sup>, LI Xia<sup>2</sup>, YANG Yanbin<sup>1,2</sup>, YANG Jiazhen<sup>2</sup>, ZENG Yawen<sup>2</sup>

(1. Institute of Resources and Plants, Yunnan University, Kunming, Yunnan 650504, China;

2. Biotechnology and Germplasm Resources Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming, Yunnan 650205, China)

**Abstract:** To explore the effects of sowing season and site on the antioxidant enzyme activity of barley, 48 barley varieties from Yunnan were sown continuously for two years in Dianyuan town during the four different seasons of spring, summer, autumn, and winter, and also sown at three different altitudes in Dianyuan, Xiaojie, and Yanhe town. The antioxidant enzyme activities of superoxide dismutase(SOD), catalase(CAT), and polyphenol oxidase(PPO) in barley grass powder were determined by microplate reader and differential analysis was conducted. The results showed that there were significant differences in the antioxidant enzyme activity of barley planted in different seasons and at different sites. Under the conditions of four-season planting, the SOD and CAT activities of summer-planted barley grass powder were significantly higher than those of spring, autumn, and winter planting, while the PPO activity of summer planting was slightly lower than that of autumn planting, but higher than that of spring and winter planting. The SOD and CAT activities of barley grass powder at different sites were all highest at the low altitude of Yanhe town but lowest at the high altitude of Dianyuan town. The PPO activity was highest at Xiaojie town but lowest at Yanhe town. The antioxidant enzyme activity of barley grass powder was mainly affected by the planting season. Com-

收稿日期:2024-04-16 修回日期:2024-05-13

基金项目:云南省基础研究计划项目面上项目(202201AT070126);云南省农业生物技术重点实验室开放项目(2020);现代农业产业技术体系建设专项(CARS-05-01A-04)

第一作者 E-mail:gaunxiujiao@163.com(官秀娇);yxm89ccf@126.com(杨晓梦)

通讯作者 E-mail:zengyw1967@126.com(曾亚文)

binning the membership function method and cluster analysis, the antioxidant activity of barley was evaluated, and high-quality barley varieties with high antioxidant enzyme activities were preliminarily screened (Yunpi 22, Aisi 500, Yunke 1, Yunsimai 7).

**Keywords:** Barley; Grass powder; Antioxidant enzymes; Sowing season; Trial sites

大麦 (*Hordeum vulgare*) 是禾本科大麦属的一种重要谷类作物, 在全球范围内广泛栽种。大麦的适应性强, 在中国各地均有栽培。云南是中国大麦种质资源最大的遗传多样性中心区<sup>[1]</sup>和种植面积最大的省份之一<sup>[2]</sup>。大麦苗粉是指在大麦拔节期, 将 15~30 cm 的嫩苗收割, 采用割青、清洗、杀青、干燥、粉碎等加工工艺制成的粉末, 含水量较低, 一般在 4%~5% 之间<sup>[3]</sup>。大麦苗含有超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶 (catalase, CAT)、多酚氧化酶 (polyphenol oxidase, PPO) 等 300 多种抗氧化酶<sup>[4]</sup>。SOD 是一类能催化超氧阴离子自由基歧化为 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub> 的酶, 清除对机体有害的超氧阴离子自由基, 是抵御 ROS 的第一道酶防线, Cu/Zn-SOD 在大麦中起主要作用<sup>[5]</sup>。CAT 能将 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 催化分解为 H<sub>2</sub>O 和 O<sub>2</sub><sup>[6]</sup>, 从而使细胞免受过氧化氢的毒性作用, 是生物防御体系的关键酶之一。PPO 可催化酚类物质氧化为高活性邻醌, 被认为与呼吸链末端的电子传递有关, 能消除氧自由基的伤害<sup>[7]</sup>, 从而达到抗病的目的。此外, 抗氧化酶在生物体内起着非常重要的作用, SOD 具有抗糖尿病、抗炎、抗氧化、抗痛风和高尿酸血症、抗癌、预防心血管疾病、改善认知等作用<sup>[4,8]</sup>; CAT 作为内源性氧清除剂, 能保护细胞膜结构, 有抗衰老、高血压、肿瘤作用<sup>[9]</sup>; PPO 对植物生物合成、光合作用以及抵御外界胁迫等起重要作用<sup>[10]</sup>。

目前, 国内外学者对大麦抗氧化酶研究以温度<sup>[11-12]</sup>、干旱<sup>[13]</sup>、盐<sup>[14-15]</sup>、臭氧<sup>[16]</sup>、金属元素<sup>[17]</sup>、病害<sup>[18]</sup>等环境因素胁迫与抗氧化特性的关系为主, 在胁迫中植株抗氧化酶活性随胁迫强度的增加一般表现为先升后降的趋势。但在不同播种季节下大麦品种的抗氧化酶活性差异国内外鲜见研究。与传统的分光光度法比较, 酶标仪因具有检测速度快、高通量、灵敏度高、测定准确、重现性好及耗样量少等优点, 在酶活性检测中被广泛应用<sup>[19-20]</sup>。本研究选取 48 个云南大麦品种, 设置四个播种季节 (春、夏、秋、冬) 及三个不同播种地点 (滇源、小街、研和镇), 测定大麦苗粉抗氧化酶 (SOD、CAT、PPO) 活性并进行差异分析, 揭示播

种季节及地点对大麦抗氧化酶活性的影响, 期为选育高抗氧化酶大麦品种及高抗氧化酶苗粉开发提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

48 份供试材料由云南省农业科学院生物技术与种质资源研究所选育或收集的大麦品种, 其中 35 个已完成国家非主要农作物品种登记 (表 1), 哈铁系裸退化二棱是由中国农业科学院提供的哈铁系变异单株选拔而成, 宽颖大麦为云南本地品种。

### 1.2 试验设计

48 份大麦材料于 2020 和 2021 连续两年在昆明市盘龙区滇源镇试验点 (26°16'N, 102°52'E, 海拔 1 973 m) 进行四季播种, 在拔节期进行割苗, 成熟时收获秸秆, 并对每一阶段的材料进行处理制成粉末。具体播种时间为春播 (5 月 1 日)、夏播 (8 月 1 日)、秋播 (11 月 1 日)、冬播 (2 月 1 日); 割苗时间为春播 (5 月 30 日)、夏播 (9 月 1 日)、秋播 (1 月 9 日)、冬播 (3 月 23 日)。此外, 2021 年在昆明市嵩明县小街镇 (25°21'N, 103°06'E, 海拔 1 918 m)、玉溪市红塔区研和镇 (24°15'N, 102°29'E, 海拔 1 638 m) 试验点进行秋播 (2020 年 11 月), 拔节期割苗 (2021 年 1 月)。大麦种植期间的气候条件如图 1、图 2 所示。试验地土壤肥力中等 (表 2), 试验采用随机区组设计, 每份材料种植 2 行, 每行 150 粒, 行长 2 m, 行距 0.3 m, 3 次重复, 常规田间管理。

### 1.3 测定指标与方法

#### 1.3.1 SOD 活性的测定

采用试剂盒 (A001-3, WST-1 法, 南京建成生物工程研究所) 测定大麦苗粉 SOD 活性。具体方法如下, 取 0.1 g 样品粉末, 加入 0.9 mL 磷酸盐缓冲液 (pH=7.2), 混匀后 3 500 r·min<sup>-1</sup> 离心 10 min, 得到上清液。取 0.1 mL 上清液加入 0.9 mL 磷酸盐缓冲液 (pH=7.2) 进行稀释, 按照试剂盒说明书在酶标板中按顺序添加待测样本液及试

表 1 供试材料  
Table 1 Test materials

序号 Code	名称 Name	序号 Code	名称 Name	序号 Code	名称 Name
1	云啤 9 号 Yunpi 9	17	云饲麦 4 号 Yunsimai 4	33	云啤 22 号 Yunpi 22
2	云啤 10 号 Yunpi 10	18	云啤 12 号 Yunpi 12	34	云饲麦 11 号 Yunsimai 11
3	云啤 11 号 Yunpi 11	19	云啤 14 号 Yunpi 14	35	云饲麦 12 号 Yunsimai 12
4	云饲麦 1 号 Yunsimai 1	20	云玉麦 1 号 Yunyumai 1	36	云啤 3 号 Yunpi 3
5	云饲麦 2 号 Yunsimai 2	21	云稞 1 号 Yunke 1	37	云饲麦 13 号 Yunsimai 13
6	云饲麦 3 号 Yunsimai 3	22	云啤 15 号 Yunpi 15	38	云饲麦 14 号 Yunsimai 14
7	矮思秆 4 Aisigan 4	23	云靖麦 2 号 Yunjingmai 2	39	昆啤 4 号 Kunpi 4
8	云啤 7 号 Yunpi 7	24	云啤 17 号 Yunpi 17	40	矮思 82 秆 1 Aisi82gan 1
9	云啤 5 号 Yunpi 5	25	云饲麦 7 号 Yunsimai 7	41	云啤 24 号 Yunpi 24
10	盐麦 2 号 Yanmai 2	26	云饲麦 8 号 Yunsimai 8	42	云功麦 1 号 Yungongmai 1
11	澳选 3 号 Aoxuan 3	27	云啤 18 号 Yunpi 18	43	云功麦 2 号 Yungongmai 2
12	云啤 2 号 Yunpi 2	28	云啤 20 号 Yunpi 20	44	云功麦 3 号 Yungongmai 3
13	云啤 4 号 Yunpi 4	29	腾云麦 4 号 Tengyunmai 4	45	哈铁系裸退化二棱 Hatietuihuaerleng
14	云稞 4 号 Yunke 4	30	云饲麦 9 号 Yunsimai 9	46	宽颖大麦 Kuanyingdamai
15	浙云 1 号 Zheyun 1	31	云饲麦 10 号 Yunsimai 10	47	矮思 500 Aisi 500
16	昆啤 2 号 Kunpi 2	32	云啤 21 号 Yunpi 21	48	V43

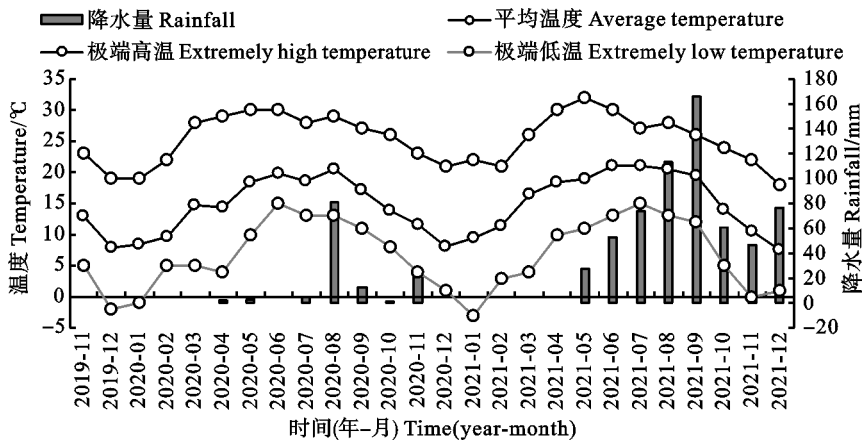
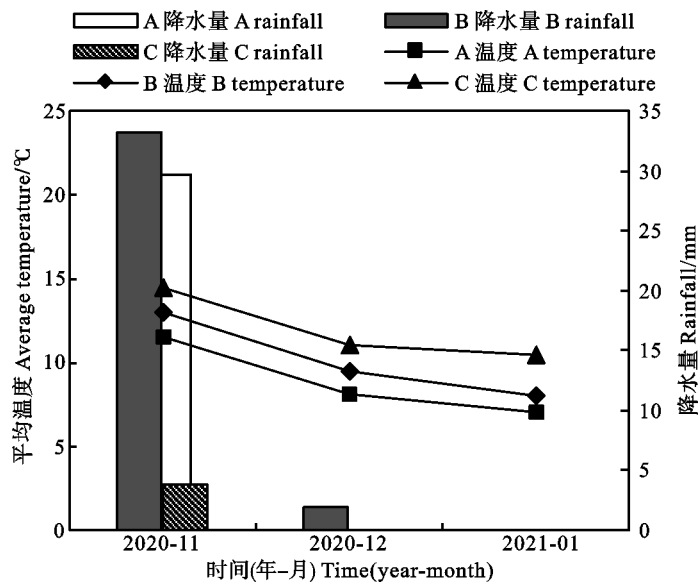


图 1 滇源镇两年四季播种的气候条件

Fig. 1 Climatic conditions for planting at Dianyuan town in four seasons over two years



A: 滇源镇; B: 小街镇; C: 研和镇。

A: Dianyuan Town; B: Xiaojie Town; C: Yanhe Town.

图 2 三个试验点秋播的气候条件

Fig. 2 Climate conditions for autumn sowing at three experimental sites

表2 供试土壤基础理化性状

Table 2 Physical and chemical properties of the tested soils

地点 Site	pH	有机质 Organic matter /(g · kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total N/%	有效磷 Available phosphorus /(mg · kg <sup>-1</sup> )	速效钾 Available K /(mg · kg <sup>-1</sup> )
滇源 Dianyuan	6.25	30.70	1.80	72.8	115.1
小街 Xiaojie	6.84	43.06	1.70	79.84	100.3
研和 Yanhe	6.56	24.80	0.15	74.2	161.0

剂盒试剂,37 °C 孵育 20 min,450 nm 酶标仪读取吸光度数值。根据公式(1)和(2)计算待测样品 SOD 活性。

$$\text{SOD 活性抑制率} = \frac{(A_{\text{对照}} - A_{\text{对照空白}}) - (A_{\text{测定}} - A_{\text{测定空白}})}{(A_{\text{对照}} - A_{\text{对照空白}})} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{SOD 活性} = \text{SOD 活性抑制率} \div 50\% \times 10 \times \frac{0.1}{0.9} \cdot \frac{W_{\text{组织称重}}}{V_{\text{匀浆缓冲液体积}}} \quad (2)$$

式中  $A$  为吸光值,  $W$  为质量,  $V$  为体积。以下公式均相同。

### 1.3.2 CAT 活性的测定

采用试剂盒(A007-1-1, 钼酸铵法, 南京建成生物工程研究所)测定大麦苗粉 CAT 活性。具体方法如下, 取 0.1 g 样品粉末, 加入 0.9 mL 生理盐水, 混匀后以 2 500 r · min<sup>-1</sup> 离心 10 min, 取 0.1 mL 上清液加入 0.9 mL 生理盐水进行稀释, 按试剂盒说明书按顺序添加待测样本液及试剂盒试剂并严格控制 60 s 的反应时间, 405 nm 酶标仪读取吸光度值。根据公式(3)计算待测样品 CAT 活性。

$$\text{CAT 活性} = (A_{\text{对照}} - A_{\text{测定}}) \times 235.65 \div V_{\text{取样量}} \div T_{\text{反应时间}} \div \frac{0.1}{1} \quad (3)$$

### 1.3.3 PPO 活性的测定

采用测定试剂盒(A136-1-1, 分光光度测定法, 南京建成生物工程研究所)测定大麦苗粉 PPO 活性。具体方法如下, 取 0.1 g 样品粉末, 加入 1 mL 试剂盒提取液, 混匀后 4 000 r · min<sup>-1</sup> 离心 10 min, 取部分上清液于 90 °C 沸水浴中反应 5 min 作为对照的非处理的粗酶液上清, 按试剂盒说明书按顺序添加待测样本液及试剂盒试剂, 37 °C 孵育 10 min 后立即转入 90 °C 沸水浴 5 min, 取出后流水冷却, 1 000 r · min<sup>-1</sup> 离心 10 min, 取上清于 420 nm 酶标仪读取吸光度值。根据公式(4)计算待测样品 PPO 活性。

$$\text{PPO 活性} = \frac{A_{\text{测定管}} - A_{\text{对照管}}}{0.01} \times \frac{V_{\text{提取液}}}{W_{\text{样本质量}}} \times$$

$$\frac{V_{\text{反应体系}}}{V_{\text{取样量}}} \times \frac{1}{V_{\text{反应体系}}} \div T_{\text{反应时间}} \quad (4)$$

## 1.4 数据处理与统计分析

利用 Excel 2013、SPSS 26 和 Origin 2021 Pro 软件进行数据整理分析及作图。用 Origin 2021 Pro 软件分析 3 种抗氧化酶活性的隶属函数值, 选择平均值聚类方法, 距离度量为 euclidean, 按行聚类绘制聚类热图。隶属函数值计算参照王美琦等<sup>[21]</sup>的方法, 具体如下:

当指标性状值与抗氧化性呈正相关时:

$$\bar{X}_{ij} = (X_{ij} - X_{j\min}) / (X_{j\max} - X_{j\min}) \quad (5)$$

当指标性状值与抗氧化性呈负相关时:

$$\bar{X}_{ij} = 1 - (X_{ij} - X_{j\min}) / (X_{j\max} - X_{j\min}) \quad (6)$$

总隶属函数的计算:

$$D = \bar{X}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \bar{X}_{ij} \quad (7)$$

式中,  $i$  为某个品种,  $j$  为某个性状,  $n$  为指标性状数量,  $\bar{X}_{ij}$  为隶属函数值,  $X_{ij}$  为性状值,  $X_{j\min}$  为性状最小值,  $X_{j\max}$  为性状最大值,  $X_i$  为某个品种抗氧化隶属函数平均值。将品种的各个性状具体抗氧化隶属函数值累加后求平均值, 平均值越大, 抗氧化性则越强。

## 2 结果与分析

### 2.1 播种季节、品种对大麦苗粉抗氧化酶活性的影响

对滇源镇数据进行方差分析, 结果(表 3)表明, 播种季节对大麦苗粉的 SOD 和 CAT 活性影响均达到极显著水平, 品种只对大麦苗粉 CAT 活性有极显著影响, 播种季节、品种对 PPO 活性及二者互作对三种酶活性的影响均不显著。由此可见, 播种季节对大麦苗粉抗氧化酶活性调节作用较大, 品种的影响较小且与酶种类有关。

表 3 不同播种季节、品种对大麦苗粉抗氧化酶活性影响的方差分析

Table 3 Analysis of variance for the antioxidant enzyme of barley grass powder in different sowing seasons and varieties

抗氧化酶 Antioxidase enzyme	变异来源 Variations	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F 值 F value
SOD/(U · g <sup>-1</sup> )	播种季节 Season	5 445 875.864	3	1 815 291.955	29.327**
	品种 Variety	3 794 794.605	47	80 740.311	1.163
	季节×品种 Season×Variety	5 933 875.415	141	42 084.223	0.637
	误差 Deviation	12 221 932.229	192	63 655.897	
CAT/(U · g <sup>-1</sup> )	播种季节 Season	1 758.696	3	586.232	6.156**
	品种 Variety	11 950.474	47	254.265	2.164**
	季节×品种 Season×Variety	14 372.826	138	104.151	0.861
	误差 Deviation	16 316.015	146	111.754	
PPO/(U · g <sup>-1</sup> )	播种季节 Season	1 898.624	3	632.875	2.236
	品种 Variety	18 203.212	47	387.302	1.299
	季节×品种 Season×Variety	30 690.434	97	303.866	1.292
	误差 Deviation	30 690.434	101	121.306	

\* : P<0.05; \*\* : P<0.01.

2.2 不同播种季节间大麦苗粉抗氧化酶活性的差异

对滇源镇南营村两年四季播种条件下 48 份大麦品种的抗氧化酶活性进行频率分布直方图分析(图 3),三种抗氧化酶活性分布频率均呈中间高两边低的分布趋势,数据分布范围较大,说明大麦品种间存在较广泛的遗传变异。

滇源镇南营村四季播种条件下 48 个大麦品种的苗粉中 3 种抗氧化酶活性变异显著(表 4)。

2020 年 48 个品种 SOD 活性平均为 991.31 ± 205.64 U · g<sup>-1</sup>, 低于 2021 年平均值(1 198.31 ± 282.16 U · g<sup>-1</sup>); CAT 活性则表现为 2020 年平均值(26.21 ± 12.19 U · g<sup>-1</sup>) 高于 2021 年平均值(23.13 ± 10.85 U · g<sup>-1</sup>)。48 个大麦品种中,云啤 22 号的 SOD 活性最高(1 811.56 U · g<sup>-1</sup>),云玉麦 1 号最低(138.4 U · g<sup>-1</sup>);云啤 3 号 CAT 活性最高(76.47 U · g<sup>-1</sup>),盐麦 2 号最低(2.97 U · g<sup>-1</sup>);哈铁系裸退化二棱 PPO 活性最高(69.53

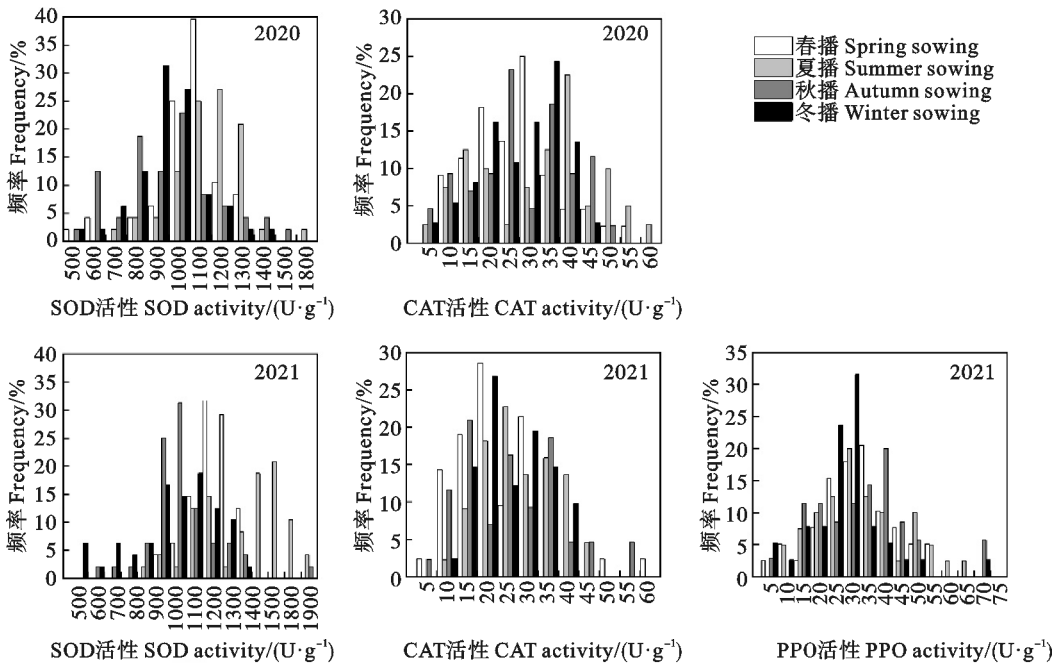


图 3 大麦苗粉抗氧化酶活性频率分布直方图

Fig. 3 Histogram of frequency distribution of antioxidant enzyme activities in barley grass powder

U · g<sup>-1</sup>), 云啤 17 号最低(4.0 U · g<sup>-1</sup>), 说明大麦苗粉中的抗氧化酶活性存在明显的基因型差异。从不同播种季节看, 2020 年大麦苗粉 SOD 活性平均值表现为夏播 > 春播 > 秋播 > 冬播, 夏播与春播、秋播、冬播差异极显著 ( $P < 0.01$ ); CAT 酶活性平均值表现为夏播 > 秋播 > 冬播 > 春播, 四个播种季节之间差异均不显著。2021 年大麦苗粉 SOD 活性平均值表现为夏播 > 春播 > 秋播 > 冬播, 夏播、春播与秋播、冬播差异极显著 ( $P < 0.01$ ); CAT 活性平均值表现为夏播 > 秋播 > 冬播 > 春播, 夏播与春播、秋播、冬播差异极显著 ( $P < 0.01$ ), 春播、秋播、冬播之间不显著; PPO 活性平均值表现为秋播 > 夏播 > 春播 > 冬播, 但四个季节间差异均不显著(图 4)。综合来看, 夏季播种的大麦苗粉抗氧化酶活性较高, 因而夏季可以作为大麦苗粉生产上获取较高抗氧化酶含量的最佳播种季节。

### 2.3 不同地点间大麦苗粉抗氧化酶活性的差异

对 2021 年秋播条件下滇源镇、小街镇、研和镇的大麦苗粉抗氧化酶活性进行比较, 结果(表 5 和图 6)表明, SOD 活性平均含量表现为研和镇(1 303.45 ± 191.22 U · g<sup>-1</sup>) > 小街镇(1 174.25 ± 142.2 U · g<sup>-1</sup>) > 滇源镇(1 063.15 ± 209.29 U · g<sup>-1</sup>), 且三个地点间差异均达到极显著水平 ( $P < 0.01$ ); CAT 活性平均含量也表现为研和镇(24.23 ± 13.16 U · g<sup>-1</sup>) > 小街镇(23.72 ± 11.56 U · g<sup>-1</sup>) > 滇源镇(23.65 ± 12.04 U · g<sup>-1</sup>), 但差异未达到显著水平; PPO 活性平均含量表现为小街镇(32.46 ± 14.94 U · g<sup>-1</sup>) > 滇源镇(31.12 ± 14.41 U · g<sup>-1</sup>) > 研和镇(27.99 ± 12.51 U · g<sup>-1</sup>), 但三个地点差异未达到显著水平。这表明地点对大麦苗粉抗氧化酶含量有一定的影响。三个地点中, 研和镇低海拔高温条件在一定程度上有利于 SOD 和 CAT 活性的升高。

表 4 不同季节播种的大麦苗粉抗氧化酶活性差异

Table 4 Differences in antioxidant enzyme activities of barley grass powder in different seasons

年份 Year	抗氧化酶 Antioxidase enzyme	播种季节 Season	平均值 Mean/(U · g <sup>-1</sup> )	变化范围 Range/(U · g <sup>-1</sup> )	变异系数 CV/%
2020	SOD	春季 Spring	986.95 ± 191.24BC	138.40 ~ 1 255.07	19.38
		夏季 Summer	1 098.11 ± 177.79A	648.48 ~ 1 758.54	16.19
		秋季 Autumn	981.91 ± 238.08BC	491.47 ~ 1 551.45	24.25
		冬季 Winter	898.29 ± 162.46C	412.64 ~ 1 333.54	18.09
		平均 Average	991.31 ± 205.64	138.40 ~ 1 758.54	20.74
	CAT	春季 Spring	23.84 ± 10.85a	5.76 ~ 50.40	45.53
		夏季 Summer	30.05 ± 14.77a	4.48 ~ 56.32	49.15
		秋季 Autumn	25.68 ± 12.20a	2.97 ~ 47.54	47.51
		冬季 Winter	25.51 ± 9.89a	3.90 ~ 40.78	38.77
		平均 Average	26.21 ± 12.19	2.97 ~ 56.32	46.49
2021	SOD	春季 Spring	1 268.96 ± 116.94B	916.90 ~ 1 470.07	9.22
		夏季 Summer	1 445.75 ± 254.66A	880.88 ~ 1 808.81	17.61
		秋季 Autumn	1 063.15 ± 209.29C	575.54 ~ 1 811.56	19.69
		冬季 Winter	1 015.39 ± 284.16C	153.57 ~ 1 430.22	27.99
		平均 Average	1 198.31 ± 282.16	153.57 ~ 1 811.56	23.55
	CAT	春季 Spring	19.16 ± 9.95B	4.48 ~ 55.28	51.95
		夏季 Summer	26.47 ± 11.63A	6.00 ~ 76.47	43.93
		秋季 Autumn	23.65 ± 12.04AB	3.61 ~ 53.50	50.90
		冬季 Winter	22.88 ± 8.28AB	6.22 ~ 37.13	36.17
		平均 Average	23.13 ± 10.85	3.61 ~ 76.47	46.92
	PPO	春季 Spring	29.66 ± 12.02a	4.00 ~ 54.67	40.51
		夏季 Summer	30.16 ± 13.21a	7.63 ~ 60.07	43.82
		秋季 Autumn	31.12 ± 14.41a	4.90 ~ 69.53	46.31
		冬季 Winter	25.44 ± 11.73a	4.73 ~ 68.30	46.09
	平均 Average	28.88 ± 14.15	4.00 ~ 69.53	48.98	

相同年份和酶同列数据后不同大、小写字母表示播种季节间差异极显著 ( $P < 0.01$ ) 和显著 ( $P < 0.05$ )。表 4 和表 5 同。

Different capital and lowercase letters following data in the same columns of same year and enzyme mean significant difference among different sowing seasons at 0.01 and 0.05 levels, respectively. The same in table 4 and table 5.

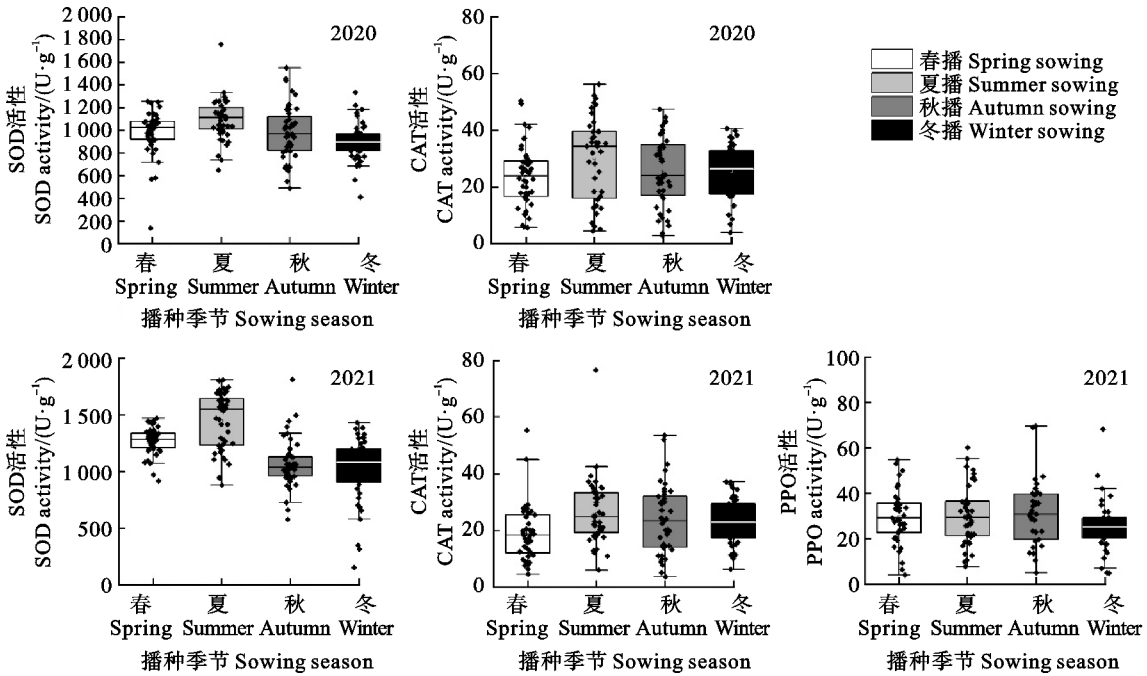


图 4 不同季节播种大麦苗粉抗氧化酶活性箱线图

Fig. 4 Box plot of antioxidant enzyme activities of barley grass powder in different seasons

表 5 不同地点播种大麦苗粉抗氧化酶活性的差异

Table 5 Differences in antioxidant enzyme activities of barley grass powder sown at different sites

抗氧化酶 Antioxidase enzyme	播种地点 Site	平均值 Mean/(U·g <sup>-1</sup> )	变化范围 Range/(U·g <sup>-1</sup> )	变异系数 CV/%
SOD	滇源 Dianyuan	1 063.15±209.29C	575.54~1 811.56	19.69
	小街 Xiaojie	1 174.25±142.20B	654.42~1 534.68	12.11
	研和 Yanhe	1 303.45±191.22A	709.09~1 626.91	14.67
CAT	滇源 Dianyuan	23.65±12.04a	3.61~53.50	50.90
	小街 Xiaojie	23.72±11.56a	4.56~58.90	48.75
	研和 Yanhe	24.23±13.16a	3.68~55.90	54.32
PPO	滇源 Dianyuan	31.12±14.41a	4.90~69.53	46.31
	小街 Xiaojie	32.46±14.94a	5.63~75.03	46.01
	研和 Yanhe	27.99±12.51a	5.33~62.67	44.68

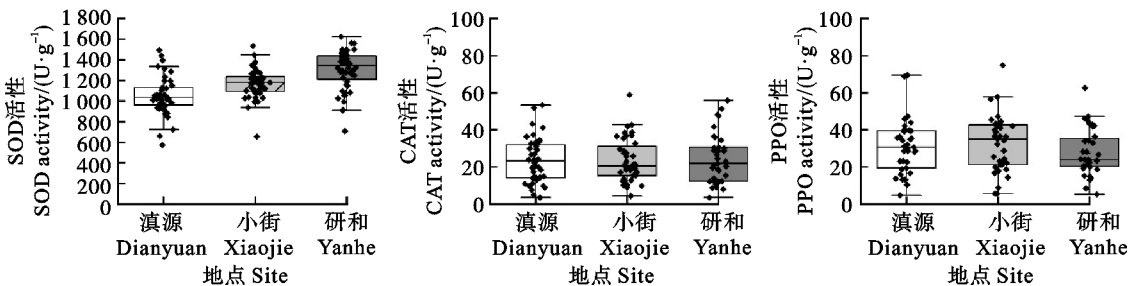


图 5 不同地点播种大麦苗粉抗氧化酶活性箱线图

Fig. 5 Box plot of antioxidant enzyme activity of barley grass powder sown at different sites

2.4 48 份大麦品种的抗氧化酶活性聚类分析及极端材料的筛选

对 48 份大麦品种的 3 种抗氧化酶活性的隶

属函数值进行归一化处理并绘制聚类热图(图 6)。由图 6 可知,48 份品种可以分为五类:第一类(I)包括 5 个品种,其 SOD 和 PPO 活性最高,

CAT 活性相对较高;第二类(Ⅱ)包括 6 个品种,其 SOD 活性中等,CAT 活性较高,PPO 活性相对偏低;第三类(Ⅲ)包括 10 个品种,其 SOD、PPO 活性相对偏低,CAT 活性中等;第四类(Ⅳ)包括 15 个品种,其 SOD 活性相对较高,CAT、PPO 活性中等;第五类(Ⅴ)包括 12 个品种,其 SOD、CAT、PPO 活性均相对偏低。

根据滇源镇两年四季播种的大麦苗粉抗氧化

酶活性,综合分析 48 份大麦品种三种抗氧化酶活性的隶属函数值,综合排名前 4 的品种分别为云啤 22 号、矮思 500、云稞 1 号、云饲麦 7 号(表 6),与图 6 中第 I 类群的品种一致,表明筛选出的品种材料比较可靠。这些大麦品种具有较高的 SOD、CAT、PPO 活性,可能具有较显著抗逆境特性和较强的环境适应能力,可为后续大麦抗逆性育种和优质苗粉开发提供种质资源。

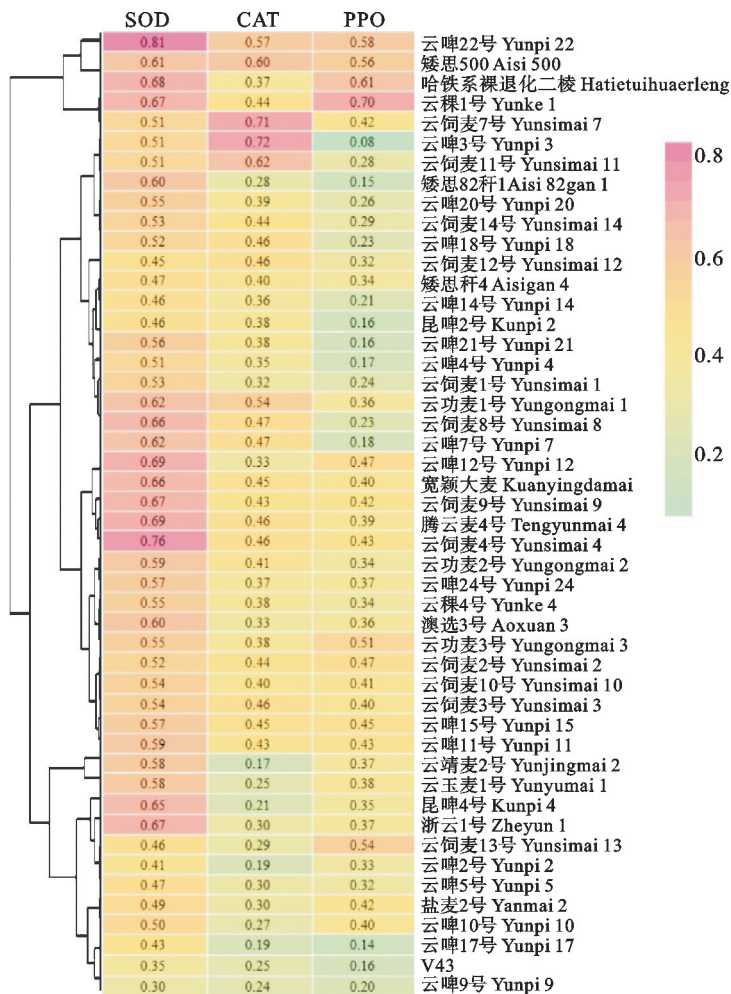


图 6 48 份大麦品种聚类热图

Fig. 6 Heat map of 48 barley varieties

表 6 排名前五的大麦品种抗氧化酶的隶属函数值及综合评价值(D 值)

Table 6 Membership function values and comprehensive values(D value) of antioxidant enzymes in the top five barley varieties

品种 Variety	抗氧化酶隶属函数值 Value of antioxidant enzyme membership function			D 值 D value	排名 Rank
	SOD	CAT	PPO		
云啤 22 号 Yunpi 22	0.811	0.565	0.585	0.667	1
矮思 500 Aisi 500	0.609	0.598	0.561	0.595	2
云稞 1 号 Yunke 1	0.672	0.442	0.698	0.585	3
云饲麦 7 号 Yunsimai 7	0.513	0.709	0.420	0.573	4
云饲麦 4 号 Yunsimai 4	0.755	0.456	0.431	0.571	5

### 3 讨论

不同播期下,作物各生长阶段遇到的温度和光照会存在差异,其光合作用和营养物质的分配也会发生变化,从而影响作物的产量和品质<sup>[22]</sup>,后期播种大麦会受到如温度较高、生育期较短、病害等诸多不利因素的影响<sup>[23]</sup>。杨砚斌等<sup>[24]</sup>、卢映吉等<sup>[25]</sup>研究发现,延迟播种会降低大麦功能成分的品质,秋播大麦的营养功能成分和农艺性状表现最优良。Almeselmani 等<sup>[26]</sup>报道,在晚播和极晚播条件下,植物的抗氧化酶活性均有所提高。本研究中,不同季节播种条件下,夏播大麦苗粉抗氧化酶如 SOD、CAT 活性处于较高水平。夏季播种时平均温度(20.5 °C)和月平均降水量(96.8 mm)均高于春播、秋播和冬播,温度湿度较高条件下植物体内氧自由基积累、质膜相对透性增加,SOD、CAT 等抗氧化酶在植物体内协同作用抵抗逆境胁迫,SOD 活性升高歧化产生更高的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 浓度,从而诱导 CAT 活性升高,说明在一定程度上,高温高湿条件下有利于大麦苗抗氧化酶活性升高,这与 Jakovljević 等<sup>[27]</sup>、安兵壮等<sup>[11]</sup>的研究结果较一致。

杨晓梦等<sup>[28]</sup>、白婷等<sup>[29]</sup>研究认为,在不同的海拔播种条件下大麦的品质、农艺性状、营养成分等都会存在不同程度的差异。本研究中,3 个试验点的土壤理化性质及大麦整个生育期施肥量基本相近,环境的影响差异主要体现在海拔和气候上,不同海拔和气候因素对大麦抗氧化酶活性有较大的影响。大麦苗粉 SOD 和 CAT 活性均表现为研和镇最高,滇源镇最低,PPO 活性则表现为小街镇最高,研和镇最低,且 SOD 活性地点差异极显著。这说明在一定程度上,研和镇低海拔高温条件(海拔 1 638 m,平均温度 12 °C)有利于 SOD 和 CAT 活性升高,小街镇高海拔冷凉条件(海拔 1 918 m、平均温度 10.2 °C)有利于 PPO 活性升高。大麦抗氧化酶活性受其基因与生态环境条件的共同影响<sup>[30-31]</sup>。本研究中大麦不同抗氧化酶受基因型、环境以及环境与基因型互作的影响程度大小不同,其中播种季节即环境对 SOD 和 CAT 活性的影响达到了极显著水平,品种和地点分别对 CAT 和 SOD 活性的影响达到极显著水平。综合来看,大麦抗氧化酶活性主要受播种季节的影响。因此,在大麦育种生产中应考虑基因型与环境的共同作用,根据不同大麦品

种对不同生态环境的适应特点,选择具有一定环境压力的次适宜生态环境,以达到利于抗氧化酶积累的目的。

抗氧化酶与作物的抗逆等性能密切相关<sup>[11-15]</sup>。在植物大部分生长阶段各种抗氧化酶活性与叶绿素含量存在显著的正相关关系<sup>[26-27]</sup>,叶片中的抗氧化酶活性会高于其他非叶器官<sup>[27,32]</sup>,叶片中的抗氧化酶活性对植物适应环境胁迫具有重要作用,因此测定大麦苗粉的抗氧化酶活性对于研究大麦抗逆性具有一定的代表性。采用隶属函数法和聚类热图筛选重要鉴定指标进行作物的综合评价已有较多的应用,如粳稻品质<sup>[33]</sup>、甜瓜高温高湿耐受性<sup>[34]</sup>、油菜高光利用效率<sup>[35]</sup>等。本研究采用两种方法进行综合评价,综合考虑聚类热图分析和隶属函数综合 D 值能更好地评价不同大麦品种的抗氧化酶活性,为选育高抗氧化酶活性的大麦品种奠定一定的基础。

### 4 结论

不同季节及不同地点播种的大麦抗氧化酶活性差异明显。综合来看,夏播大麦苗粉抗氧化酶活性表现出较高水平。不同地点大麦苗粉 SOD 活性表现为高海拔的研和镇最高,大麦抗氧化酶活性主要受播种季节的影响。通过综合评价,初步筛选出高抗氧化酶活性的大麦优良品种为云啤 22 号、矮思 500、云裸 1 号和云饲麦 7 号。

#### 参考文献:

- [1]张京,曹永生.我国大麦基因库的群体结构和表型多样性研究[J].中国农业科学,1999,32(4):20.  
ZHANG J,CAO Y S. Population structure and phenotypic diversity of barley in China's gene bank [J]. *Scientia Agricultura Sinica*,1999,32(4):20.
- [2]曾亚文,张京,普晓英,等.云南大麦产业发展综合研究与利用[J].浙江农业学报,2011,23(3):455.  
ZENG Y W,ZHANG J,PU X Y, et al. Utilization and synthesis research on industrial development of barley in Yunnan [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*,2011,23(3):455.
- [3]卢伟,耿楠,陆宁.大麦苗粉营养成分及其制品研究进展[J].包装与食品机械,2018,36(1):63.  
LU W,GENG N,LU N. Research progress of nutritional components and products of barley leaf powder [J]. *Packaging and Food Machinery*,2018,36(1):63.
- [4]ZENG Y,PU X,YANG J, et al. Preventive and therapeutic role of functional ingredients of barley grass for chronic diseases in human beings [J]. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*,2018,2018:3232080.

- [5] NEFISSI OUERTANI R, ABID G, KARMOUS C, *et al.* Evaluating the contribution of osmotic and oxidative stress components on barley growth under salt stress [J]. *AoB PLANTS*, 2021, 13(4):plab034.
- [6] CHEN C, WANG C, LIU Z, *et al.* Variations in physiology and multiple bioactive constituents under salt stress provide insight into the quality evaluation of apocyni veneti folium [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2018, 19(10):3042.
- [7] VAUGHN K C, LAX A R, DUKE S O. Polyphenol oxidase: The chloroplast oxidase with no established function [J]. *Physiologia Plantarum*, 1988, 72(3):659.
- [8] ZENG Y, PU X, DU J, *et al.* Molecular mechanism of functional ingredients in barley to combat human chronic diseases [J]. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2020, 2020:3836172.
- [9] 李琛. 过氧化氢酶在疾病防治中的研究进展[J]. 内蒙古医学杂志, 2016, 48(11):1321.  
LI C. Recent advances of catalase and effect of catalase on diseases [J]. *Inner Mongolia Medical Journal*, 2016, 48(11):1321.
- [10] 王馨雨, 杨绿竹, 王婷, 等. 植物多酚氧化酶的生理功能、分离纯化及酶促褐变控制的研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(9):222.  
WANG X Y, YANG L, WANG T, *et al.* Recent progress toward understanding the physiological function, purification, and enzymatic browning control of plant polyphenol oxidases [J]. *Food Science*, 2020, 41(9):222.
- [11] 安兵壮, 李博, 徐乐, 等. 大麦幼苗抗氧化酶系统对低高温胁迫的差异响应[J]. 大麦与谷类科学, 2022, 39(5):1.  
AN B Z, LI B, XU L, *et al.* Differential responses of antioxidant enzyme system in barley seedlings to low and high temperatures [J]. *Barley and Cereal Sciences*, 2022, 39(5):1.
- [12] ISLAM M Z, PARK B J, LEE Y T. Influence of temperature conditions during growth on bioactive compounds and antioxidant potential of wheat and barley grasses [J]. *Foods*, 2021, 10(11):2742.
- [13] ZHANASSOVA K, KURMANBAYEVA A, GADILGEREYEVA B, *et al.* ROS status and antioxidant enzyme activities in response to combined temperature and drought stresses in barley [J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2021, 43(8):114.
- [14] NOREEN S, SULTAN M, AKHTER M S, *et al.* Foliar fertilization of ascorbic acid and zinc improves growth, antioxidant enzyme activity and harvest index in barley (*Hordeum vulgare* L.) grown under salt stress [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2021, 158:244.
- [15] MA Y, WANG P, WANG M, *et al.* GABA mediates phenolic compounds accumulation and the antioxidant system enhancement in germinated hullless barley under NaCl stress [J]. *Food Chemistry*, 2019, 270:593.
- [16] MATŁOK N, PIECHOWIAK T, KAPUSTA I, *et al.* Induction of biosynthesis antioxidant molecules in young barley plants by trioxygen [J]. *Molecules*, 2022, 27(21):7195.
- [17] BITARISHVILI S, DIKAREV A, KAZAKOVA E, *et al.* Growth, antioxidant system, and phytohormonal status of barley cultivars contrasting in cadmium tolerance [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2023, 30(21):59749.
- [18] IRAWATI A F C, MUTAQIN K H, SUHARTONO M T, *et al.* The effect of application endophytic fungus *Trichoderma* spp. and *Fusarium* spp. to control bacterial wilt in chilli pepper [J]. *Walailak Journal of Science and Technology (WJST)*, 2020, 17(6):559.
- [19] 柴林山, 李剑梅, 孙翠焕, 等. 一种测定蛹虫草中虫草酸含量的酶标仪微量反应方法[J]. 微生物学杂志, 2022, 42(4):80.  
CHAI L S, LI J M, SUN C H, *et al.* A microplate reader micro-reaction method to determine cordycepic acid content in *Cordyceps militaris* [J]. *Journal of Microbiology*, 2022, 42(4):80.
- [20] 袁国亿, 王春晓, 何宇淋, 等. 酶标仪比色法检测浊米酒中高级醇含量[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(6):221.  
YUAN G Y, WANG C X, HE Y L, *et al.* Detection of higher alcohols content in turbid rice wine by the colorimetric method of microplate reader [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(6):221.
- [21] 王美琦, 刘志萍, 王金波, 等. 二棱大麦种质资源抗氧化能力的筛选鉴定[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2021, 36(4):339.  
WANG M Q, LIU Z P, WANG J B, *et al.* Screening and identification of antioxidant capacity of two rowed barley resources [J]. *Journal of Inner Mongolia Minzu University (Natural Sciences)*, 2021, 36(4):339.
- [22] 赵淮, 齐军仓, 李剑, 等. 播期对青贮大麦产量和青贮品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2020, 40(2):227.  
ZHAO Z, QI J C, LI J, *et al.* Effect of sowing date on biomass yield and silage quality in barley [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2020, 40(2):227.
- [23] 党爱华, 许文芝, 崔永龙, 等. 不同播种时期对大麦产量和品质的影响[J]. 大麦与谷类科学, 2006, 23(3):19.  
DANG A H, XU W Z, CUI Y L, *et al.* Effects of different seedtime on barley yield and quality [J]. *Barley and Cereal Sciences*, 2006, 23(3):19.
- [24] 杨砚斌, 杨晓梦, 卢映吉, 等. 播种季节和割苗期对大麦苗粉营养成分的影响[J]. 麦类作物学报, 2023, 43(8):1013.  
YANG Y B, YANG X M, LU Y J, *et al.* Effect of sowing seasons and cutting stage on nutritional components of seedling powder of barley [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2023, 43(8):1013.
- [25] 卢映吉, 杨晓梦, 普晓英, 等. 不同季节播种和割苗对大麦优良品种农艺性状的影响[J]. 作物杂志, 2023(3):215.  
LU Y J, YANG X M, PU X Y, *et al.* Effects of sowing and seedling cutting in different seasons on agronomic characteristics of superior barley varieties [J]. *Crops*, 2023(3):215.

- [26] ALMESELMANI M, DESHMUKH P S, SAIRAM R K, *et al.* Protective role of antioxidant enzymes under high temperature stress [J]. *Plant Science*, 2006, 171(3): 382.
- [27] JAKOVLJEVIĆ D, MOMČILOVIĆ J, BOJOVIĆ B, *et al.* The short-term metabolic modulation of basil (*Ocimum basilicum* L. cv. 'genovese') after exposure to cold or heat [J]. *Plants*, 2021, 10(3): 590.
- [28] 杨晓梦, 李东, 杜娟, 等. 大麦 RIL 群体籽粒功能成分含量的遗传分析[J]. 麦类作物学报, 2017, 37(3): 337.  
YANG X M, LI D, DU J, *et al.* Genetic analysis of functional components content in barley grains of RIL population [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2017, 37(3): 337.
- [29] 白婷, 靳玉龙, 朱明霞, 等. 海拔差异对青稞品质影响的研究[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(2): 34.  
BAI T, JIN Y L, ZHU M X, *et al.* Effect of altitude difference on quality of highland barley varieties [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2019, 34(2): 34.
- [30] 廖振锋, 刘寒, 沈媛媛, 等. 逆境胁迫下药用植物抗氧化酶系统响应研究进展[J]. 分子植物育种, 2023. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20230613.1233.006.html>.  
LIAO Z F, LIU H, SHEN Y Y, *et al.* Wei K H. Response of antioxidant enzyme system during adversity stress in medicinal plants [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2023. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20230613.1233.006.html>.
- [31] ZHANG X, ZHANG L, CHEN Y, *et al.* Genome-wide identification of the SOD gene family and expression analysis under drought and salt stress in barley [J]. *Plant Growth Regulation*, 2021, 94(1): 49.
- [32] 张英华, 杨佑明, 曹莲, 等. 灌浆期高温对小麦旗叶与非叶器官光合和抗氧化酶活性的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(1): 136.  
ZHANG Y H, YANG Y M, CAO L, *et al.* Effect of high temperature on photosynthetic capability and antioxidant enzyme activity of flag leaf and non-leaf organs in wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(1): 136.
- [33] 冯莹莹, 董立强, 马亮, 等. 基于主成分及聚类分析的东东南部地区优质粳稻品质的综合评价[J]. 食品科学, 2024. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20231229.1441.016.html>.  
FENG Y Y, DONG L Q, MA L, *et al.* Comprehensive evaluation of high-quality japonica rice quality in southern North-east China based on principal component and cluster analysis [J]. *Food Science*, 2024. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20231229.1441.016.html>.
- [34] WENG J, LI P, REHMAN A, *et al.* Physiological response and evaluation of melon (*Cucumis melo* L.) germplasm resources under high temperature and humidity stress at seedling stage [J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 288: 110317.
- [35] WANG R, PENG W, HU L, *et al.* Study on screening of canola varieties with high light use efficiency and evaluation of selecting indices [J]. *Oilseeds and Fats, Crops and Lipids*, 2020, 27: 43.