

外源锌对气生铁兰抗寒生理特征的影响

丁久玲¹, 孟海涛², 郑凯^{1*}

(1. 江苏农林职业技术学院生物工程中心, 江苏句容 212400; 2. 江苏句容慢生活生态农业有限公司, 江苏句容 212400)

摘要 为研究外源锌对气生铁兰抗寒生理特征的影响, 自然低温下, 以 6 个品种为供试材料, 设置 0、100、150、200、250、300、350 mg/L 7 个锌浓度处理, 结果表明: 随着外源锌浓度的升高, 各品种叶绿素含量(Chl)、渗透调节物质含量(Pro)、抗氧化酶活性(SOD、POD)均呈先增加后减少的变化趋势, 膜脂过氧化指标(MDA、REC)则相反; 适宜浓度的外源锌(200~300 mg/L)可使低温胁迫下气生铁兰细胞膜的过氧化程度减轻, 抗氧化能力增强, 细胞内外的渗透压稳定, 光合生理状态良好, 植物生长健康, 低温胁迫受到的伤害亦明显减弱, 抗寒性明显提高, 具体表现为 Chl 含量、PRO 含量、抗氧化酶活性均较高, MDA 含量和 REC 均较低。

关键词 气生铁兰; 抗寒性; 外源锌; 生理特征

中图分类号 S682.39 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2024)22-0093-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2024.22.018



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Effect of Exogenous Zinc on Physiological Characteristics of Cold Resistance in *Tillandsia*

DING Jiu-ling¹, MENG Hai-tao², ZHENG Kai¹ (1. Bioengineering Technology Center of Jiangsu Agriculture and Forestry Vocational and Technical College, Jurong, Jiangsu 212400; 2. Jiangsu Jurong Slow Life Ecological Agriculture Co., Ltd., Jurong, Jiangsu 212400)

Abstract To explore the effect of exogenous zinc on physiological characteristics of cold resistance in *Tillandsia* under natural low temperature, this study is based on six species of *Tillandsia* as experimental material with seven zinc treatments, respectively 0, 100, 150, 200, 250, 300, 350 mg/L. The results showed that with the increase of zinc concentration, the changes of chlorophyll content (Chl), proline content (Pro), activity of antioxidant enzymes (SOD and POD) all increased first and then decreased, the membrane lipid peroxidation index (MDA and REC) was opposite; when the concentration of zinc was 200~300 mg/L, the membrane peroxidation was reduced, the antioxidant ability of the cells was enhanced, the osmotic pressure was stable, the photosynthetic physiological state was good, the plant grew healthily, the damage caused by low temperature stress was also obviously weakened, and the cold resistance was significantly improved, such as the content of Chl, Pro and antioxidant enzyme activity were higher, the content of MDA and REC were lower.

Key words *Tillandsia*; Cold resistance; Exogenous zinc; Physiological characteristics

气生铁兰(*Tillandsia*)是食用菠萝的近亲, 同属于凤梨科(Bromeliaceae)的草本植物, 其形态和种类具有多样性。生长方式奇特, 是不需要泥土栽培、完全生长在空气中的植物。因其独有的外形和生长方式, 有吸收空气污染物的特性, 目前在市场上的关注度和需求量较高。国内外关于气生铁兰的研究多集中于作为空气污染指示植物和环境污染的修复^[1-3]、分布^[4]、养护^[5-6]和繁殖^[7-8]等方面, 但关于抗寒性的研究较少。郑桂灵等^[9]研究认为, 贝可丽和硬叶铁兰虽可耐受-5℃低温, 但会出现失绿和萎蔫现象。鲍静荣等^[10]从通过测定低温胁迫下 3 种气生铁兰的相对电导率和成活率, 发现其抗寒性有所差异。因气生铁兰大部分原产于热带和亚热带地区, 这就造成了其抗寒性较弱的特性。另外, 在气生铁兰养护管理中, 笔者发现大部分品种冬季需要在温室大棚过冬, 抗寒性较弱。这会影响气生铁兰在市场上规模化的应用, 因此有必要开展气生铁兰抗寒性的探索。

研究表明, 外源物质铜、脱落酸、锌、油菜素内酯、褪黑素等可以有效缓解低温对植物造成的伤害。锌是植物生长的必需微量元素, 主要用作酶的金属活化剂, 对碳水化合物代谢、生长素的合成、植物光合作用起着主要作用, 当植物遭受逆境胁迫时, 锌与硒、铁、镁、铜等配合使用, 可使某些植物

(烟草、核桃、黄瓜、仁用杏)抵御低温伤害的能力有所提高^[11-14]。以上多是将锌与其他外源物配合使用, 单独使用外源锌的研究较少, 关于锌作为外源物质应用于气生铁兰, 提高其抗寒性的研究尚鲜见报道。笔者以 6 种气生铁兰为材料, 比较低温环境下不同浓度外源锌对气生铁兰抗寒生理特性的影响, 以期为解决低温对气生铁兰造成伤害的问题提供行之有效的方法, 并为其推广提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 供试材料 6 种供试气生铁兰植物材料 *T. ionantha* (小精灵)、*T. usneoides* (松萝)、*T. stricta* (斯垂科)、*T. velutina* (维路缇)、*T. brachycaulos* (贝克立)和 *T. houston* (休斯顿)由江苏句容慢生活生态农业有限公司提供, 为驯化近 3 年的成苗。

1.2 试验方法 试验于冬季在气生铁兰生产基地进行。每种材料大小一致, 剪除植株基部枯叶, 在温室中培养 15 d 后进行外源锌处理。温室设有自动控温、鼓风、遮阳、喷淋等设备, 空气湿度控制在 75%~90%。

用化学纯 ZnSO₄·7H₂O 对气生铁兰进行处理, Zn²⁺ 浓度设为 0 (CK)、100 mg/L (Zn1)、150 mg/L (Zn2)、200 mg/L (Zn3)、250 mg/L (Zn4)、300 mg/L (Zn5)、350 mg/L (Zn6) 共 7 个处理。供试材料在 Zn²⁺ 溶液中浸泡 0.5 h 后取出控水, 置于室外自然低温环境中(室外最低温度为-5~5℃, 最高温度为 10~15℃), 上面搭设透光率为 40%~60% 遮阳网, 每隔 7 d 喷水(pH 6.0~7.0)1 次, 以完全湿润为准。

1.3 测定项目 气生铁兰于室外低温环境下放置 90 d, 采样, 测定抗寒生理指标, 包括电解质渗出率(REC)^[15]、叶绿

基金项目 江苏农林职业技术学院项目“空气凤梨离体再生快繁技术体系的建立及应用”(2021kj51)。

作者简介 丁久玲(1978—), 女, 河南许昌人, 副研究员, 硕士, 从事园林植物应用及抗性生理研究。* 通信作者, 副研究员, 高级工程师, 从事植物优质种质资源的收集、筛选及应用研究。

收稿日期 2023-12-20; 修回日期 2024-01-16

素含量 (Chl)^[15]、游离脯氨酸含量 (Pro)、丙二醛含量 (MDA)、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD),后 4 个指标均用苏州科铭生物技术有限公司的分光光度计试剂盒法测定。

2 结果与分析

2.1 不同外源锌处理下气生铁兰 Chl 含量的变化 叶绿素是植物进行光合作用的必备条件,其含量是研究植物光合生理和抗逆性的重要指标^[16]。由表 1 可知,不同外源 Zn²⁺ 处理下供试气生铁兰 Chl 含量有所不同,除 Zn6 处理外,其他处

理的 Chl 含量均高于 CK;Zn3、Zn4 和 Zn5 处理的 Chl 含量较高(明显高于其他处理)。随着 Zn²⁺ 浓度的升高,Chl 含量整体表现为先增加后减少。其中,*T. usneoides*、*T. velutina*、*T. brachycaulos* 和 *T. houston* 在 Zn4 处理下 Chl 含量达最高;*T. ionantha* 和 *T. stricta* 在 Zn3 处理下最高。低温胁迫引起气生铁兰叶绿体的降解,从而导致叶绿含量减少,适宜浓度的外源锌(200~300 mg/L)明显缓解了叶绿素的降解,Chl 含量明显增加。当 Zn²⁺ 浓度>250 mg/L,其 Chl 含量不增反而明显减少,致使气生铁兰的光合作用和生长受到不良影响。

表 1 Zn²⁺处理下气生铁兰叶片 Chl 含量

Table 1 Chl content in *Tillandsia* under Zn²⁺ treatment

单位:μg/g

处理 Treatment	<i>T. ionantha</i>	<i>T. usneoides</i>	<i>T. stricta</i>	<i>T. velutina</i>	<i>T. brachycaulos</i>	<i>T. houston</i>
CK	517.85	544.40	383.04	373.47	408.70	344.39
Zn1	522.55	577.84	426.59	409.02	452.85	402.80
Zn2	597.74	586.90	470.15	456.31	482.00	516.08
Zn3	768.82	783.70	714.59	607.49	606.70	542.75
Zn4	765.52	795.28	646.52	677.53	667.98	567.79
Zn5	718.70	760.06	640.78	643.09	640.59	524.49
Zn6	396.97	278.38	306.18	367.14	401.47	331.40

2.2 不同外源锌处理下气生铁兰 Pro 含量的变化 逆境胁迫下,植物体内 Pro 含量增加,稳定原生质胶体及植物组织内的代谢过程,有效防止细胞过度脱水,其作为主要的渗透调节物质对植物抗寒性起着一定作用^[17]。由表 2 可知,不同外源锌处理下气生铁兰 Pro 含量发生了变化,除 *T. ionantha* 外,CK 的 Pro 含量明显低于 Zn3、Zn4 和 Zn5 处理,稍低于 Zn1 和 Zn2 处理,稍高于 Zn6 处理,CK、Zn1、Zn2 和 Zn6 处理

间 Pro 含量差异不明显。这说明 Zn²⁺ 浓度为 200~300 mg/L 时,低温胁迫下供试气生铁兰 Pro 含量的积累达到最高,明显高于 CK,提高气生铁兰抗寒性。外源锌浓度过低(≤150 mg/L)或过高(≥350 mg/L),不利于低温胁迫下气生铁兰 Pro 含量的积累;过高时甚者明显低于对照,这可能与过高浓度的锌对植物造成了重金属伤害有关。

表 2 Zn²⁺处理下气生铁兰 Pro 含量

Table 2 Pro content in *Tillandsia* under Zn²⁺ treatment

单位:μg/g

处理 Treatment	<i>T. ionantha</i>	<i>T. usneoides</i>	<i>T. stricta</i>	<i>T. velutina</i>	<i>T. brachycaulos</i>	<i>T. houston</i>
CK	4.49	6.73	8.04	6.59	6.89	7.75
Zn1	4.76	6.76	8.15	6.85	7.18	7.78
Zn2	5.11	9.03	8.39	6.81	8.94	7.91
Zn3	9.25	13.76	12.96	11.82	9.89	10.19
Zn4	9.76	12.36	12.12	12.12	11.02	10.05
Zn5	9.68	11.89	13.43	11.29	10.14	10.27
Zn6	4.59	5.65	5.60	5.45	4.78	6.57

2.3 不同外源锌处理下气生铁兰细胞膜系统的变化

2.3.1 MDA 含量的变化。一定程度的低温可使植物的细胞膜系统受到损害,MDA 作为脂质过氧化作用的产物,其积累的多少一定程度上反映了植物细胞受伤害的程度,从而影响植物的抗逆性^[18]。由表 3 可知,与 CK 相比,不同浓度外源锌处理会对气生铁兰 MDA 含量造成影响。随着外源锌浓度的升高,气生铁兰 MDA 含量逐渐降低,Zn3、Zn4 和 Zn5 处理较低,明显低于 CK 和其他处理,处理 Zn6 最大。CK 的 MDA 含量明显高于 Zn3、Zn4 和 Zn5 处理,稍高于 Zn1 和 Zn2 处理(除 *T. brachycaulos*),稍低于 Zn6 处理。其中,CK、Zn1、Zn2 和 Zn6 处理间 MDA 含量差异不明显。故可认为,一定浓度的

Zn²⁺可使气生铁兰 MDA 含量有所下降,但并不是外源锌浓度越高,越利于气生铁兰 MDA 含量的降低,只有浓度适宜,才可以使气生铁兰 MDA 含量明显降低,提高抗寒性。该研究发现,当 Zn²⁺ 浓度为 200~300 mg/L 时,供试气生铁兰 MDA 含量明显低于 CK 和其他处理;当 Zn²⁺ 浓度过低(≤150 mg/L)时,MDA 含降低不明显;当 Zn²⁺ 浓度过高时(≥350 mg/L),其 MDA 含量反而急剧增加,说明植物受到的危害性更大。

2.3.2 REC 的变化。低温使植物的细胞膜通透性增大,电解质大量向细胞外渗透,导致 REC 增加。REC 越高,说明植物细胞膜透性越大,植物受到的胁迫越大,其抗性就越低;反之

亦然。表 4 表明,与 CK 相比,不同浓度外源锌处理的气生铁兰 REC 均有所变化,变化趋势基本与 MDA 含量一致。随着外源锌浓度的升高,REC 逐渐减小,在 Zn3、Zn4 和 Zn5 处理的 REC 较低,Zn6 处理的 REC 又增大,达到最大。其中,CK、

Zn1、Zn2 和 Zn6 处理间的 REC 差异不明显。各品种的 REC 与 MDA 含量呈较强的相关性,其相关系数分别为 *T. ionantha* 0.963、*T. usneoides* 0.930、*T. stricta* 0.978、*T. velutina* 0.954、*T. brachycaulos* 0.933 和 *T. houston* 0.968。

表 3 锌处理下气生铁兰 MDA 含量
Table 3 Content of MDA in *Tillandsia* under Zn²⁺ treatment

处理 Treatment	<i>T.ionantha</i>	<i>T.usneoides</i>	<i>T.stricta</i>	<i>T.velutina</i>	<i>T.brachycaulos</i>	<i>T.houston</i>
CK	10.06	9.87	8.63	10.83	8.02	11.24
Zn1	9.75	9.44	8.19	10.57	8.60	10.24
Zn2	9.41	9.30	8.05	10.21	5.81	8.11
Zn3	6.12	5.86	4.85	6.41	4.51	7.35
Zn4	5.83	5.87	4.65	6.19	4.98	7.25
Zn5	6.11	5.46	5.46	6.29	5.64	7.29
Zn6	11.32	10.55	9.62	12.36	11.92	12.46

由此可知,一定浓度的外源锌可使气生铁兰 REC 有所下降,但并不是外源锌浓度越高,越利于气生铁兰 REC 的降低,只有浓度适宜,才可使气生铁兰 REC 明显降低,抗寒性明显增强。研究表明:当外源锌浓度为 200~300 mg/L 时,供

试气生铁兰 REC 明显低于 CK 和其他处理;当 Zn²⁺ 浓度过低(≤150 mg/L)时,REC 降低不明显;当 Zn²⁺ 浓度高于一定浓度时(≥350 mg/L),其 REC 不但没有降低,反而急剧增加,植物受到的伤害明显增大。

表 4 锌处理下气生铁兰 REC
Table 4 REC of *Tillandsia* under Zn²⁺ treatment

处理 Treatment	<i>T.ionantha</i>	<i>T.usneoides</i>	<i>T.stricta</i>	<i>T.velutina</i>	<i>T.brachycaulos</i>	<i>T.houston</i>
CK	10.73	9.65	10.56	12.38	11.28	12.06
Zn1	9.78	9.83	10.22	11.33	10.16	10.83
Zn2	10.58	9.66	10.10	10.23	7.18	8.88
Zn3	6.83	6.29	6.69	7.42	6.26	7.16
Zn4	5.73	5.71	6.11	7.17	6.68	7.45
Zn5	6.57	7.09	7.33	7.18	7.75	8.10
Zn6	11.90	11.20	11.08	13.69	12.47	13.03

2.4 不同外源锌处理下气生铁兰抗氧化酶活性的变化

2.4.1 SOD 活性的变化。植物在低温环境下,过多的活性氧积累会使其遭受不良伤害。为了减轻伤害,植物抗氧化系统就会积累 SOD 和 POD 进行应激,故抗氧化酶活性的高低可以反映植物有效消除活性氧自由基能力大小^[19]。不同浓度外源锌均引起供试气生铁兰 SOD 活性的变化。随着 Zn²⁺ 浓度的升高,SOD 活性逐渐增加,Zn3、Zn4 和 Zn5 处理较高,Zn6 处理急剧减少。大部分品种(*T.usneoides*、*T.stricta*、*T.velutina* 和 *T.brachycaulos*)的 SOD 活性以 Zn4 处理较大,与 Zn5 比较差异不明显;*T.ionantha* 和 *T.houston* 2 个品种,Zn4 处理

与 Zn3、Zn5 处理相比,其 SOD 活性有所降低,但差异不明显。CK 的 SOD 活性低于 Zn1 和 Zn2 处理,高于 Zn6 处理,几个处理的 SOD 活性差异不明显。据以上分析可知,一定浓度外源锌可使气生铁兰的 SOD 活性有所增强,但并不是越高其增强效果越明显。外源锌浓度≤150 mg/L 时,SOD 活性增加不明显;外源锌浓度≥350 mg/L 时,SOD 活性下降明显,不利于低温胁迫下气生铁兰抗氧化。外源锌浓度为 200~300 mg/L 时 SOD 活性明显增强,可有效缓解活性氧对气生铁兰造成的不良伤害(表 5)。

表 5 锌处理下气生铁兰超氧化物歧化酶(SOD)活性
Table 5 SOD activity of *Tillandsia* under Zn²⁺ treatment

处理 Treatment	<i>T.ionantha</i>	<i>T.usneoides</i>	<i>T.stricta</i>	<i>T.velutina</i>	<i>T.brachycaulos</i>	<i>T.houston</i>
CK	254.54	277.81	255.80	274.74	285.02	305.51
Zn1	289.54	286.91	269.74	297.92	314.64	312.18
Zn2	297.71	289.44	331.40	289.85	398.64	332.17
Zn3	403.03	449.52	421.01	428.05	435.19	461.48
Zn4	363.22	461.50	435.54	450.19	473.64	455.94
Zn5	413.61	400.59	369.54	351.27	424.68	466.54
Zn6	247.92	269.58	232.16	232.16	236.21	263.92

2.4.2 POD 活性的变化。POD 与 SOD 一样,是植物体内抗氧化系统的重要组成部分^[20]。低温胁迫下,外施锌可引起气生铁兰 POD 活性的变化。随着外源锌浓度的升高,POD 活性逐渐增强,Zn4 处理最大,之后缓慢减小,到 Zn6 处理急剧下降,降至最低水平。其中,Zn3、Zn4 和 Zn5 处理间的

POD 活性差异不明显,明显高于其他处理。Zn1 和 Zn2 处理的 POD 活性稍高于 CK,二者差异不明显。由此可知,外源锌可提高低温胁迫下气生铁兰体内的 POD 活性,浓度为 200~300 mg/L 效果明显,可有效清除活性氧自由基,抵御低温伤害(表 6)。

表 6 锌处理下气生铁兰 POD 活性
Table 6 Activity of POD in Tillandsia under Zn²⁺ treatment

单位:U/g

处理 Treatment	<i>T.ionantha</i>	<i>T.usneoides</i>	<i>T.stricta</i>	<i>T.velutina</i>	<i>T.brachycaulos</i>	<i>T.houston</i>
CK	98.63	111.91	91.97	86.58	83.90	71.91
Zn1	102.59	115.90	94.18	90.18	83.93	73.04
Zn2	106.60	159.71	133.77	95.28	125.99	77.15
Zn3	147.89	173.21	143.85	127.89	150.49	111.89
Zn4	165.20	179.85	151.25	139.82	147.83	115.90
Zn5	142.61	171.87	130.15	122.21	137.98	107.91
Zn6	82.57	94.15	87.94	67.90	58.64	57.28

3 结论与讨论

锌作为活化剂可激活相关酶活性,参与到叶绿素的合成中,维持叶绿素的稳定性。锌是植物所需的微量元素,少量锌可以提高叶绿素的含量,促进气生铁兰健康生长。该研究结果表明,200~300 mg/L 外源锌可有效防止低温胁迫下气生铁兰叶绿素的降解,含量明显增加,植物生长良好,光合代谢增强。Zn²⁺ 浓度 ≥350 mg/L 可诱发植物过氧化作用破坏叶绿体,导致叶绿含量减少,这可能与过高浓度 Zn²⁺ 对植物造成重金属伤害有关。

贾莉芳^[11] 将锌与硒铁配合使用在核桃上,其可溶性蛋白含量和抗氧化酶显著提高,MDA 含量极显著降低,抗寒性得到极大提高。潘珊珊^[12] 研究证明,锌、铁和硒 3 种元素有效提高了低温下烟草幼苗叶绿素含量,硒和锌提高了低温下烟草种子中 Pro 含量,提高其耐寒性。李涛等^[14] 研究表明,低温胁迫下提高 Cu²⁺-Zn²⁺-Mn²⁺ 营养液的浓度,黄瓜幼苗叶片 SOD 活性均显著增强,且低温胁迫时间越长 SOD 活性增强越显著,可见,Cu、Zn 和 Mn 在黄瓜幼苗抗冷性中具有重要作用。以上研究均是为复合使用外源剂提高植物抗寒性的报道。Cakmak 等^[21] 单一使用了锌元素,认为适宜浓度的锌可以降低气温对植物细胞膜和叶绿素的破坏,激发保护酶活性的增强,从而提高植物的抗寒性。

该研究将单一的外源锌用于低温胁迫的气生铁兰材料,这与 Cakmak 等^[21] 的报道一致。随着外源锌浓度的升高,供试气生铁兰的 Chl、Pro、SOD 和 POD 均呈先增加后减少的变化趋势,MDA 和 REC 则相反;适宜浓度的外源锌(200~300 mg/L)可使低温胁迫下气生铁兰细胞膜的过氧化程度减轻,抗氧化能力增强,细胞内外的渗透压稳定,光合生理状态良好,植物生长健康,低温胁迫受到的伤害亦明显减弱,抗寒性明显提高,具体表现为 Chl 含量、PRO 含量、抗氧化酶活性均较高,MDA 含量和 REC 均较低。

参考文献

[1] 李俊霖,李鹏,王恒蓉,等.特殊植物类群空气凤梨对大气污染物甲醛的

净化[J].环境工程学报,2013,7(4):1451-1458.
[2] 郑桂灵,王思维,李鹏.空气凤梨对气体污染物的监测和修复[J].北方园艺,2011(4):208-210.
[3] 刘再婕,李鹏,郑桂灵.鳞片对维路提拉吸收大气污染物甲醛的影响[J].应用与环境生物学报,2014,20(2):310-314.
[4] PINTO R, BARRÍA I, MARQUET P A.Geographical distribution of *Tillandsia lomas* in the Atacama Desert, northern Chile[J].J Arid Environ, 2006,65(4):543-552.
[5] 丁久玲,郑凯,俞禄生.两种专用肥对空气凤梨生长的影响[J].中国农学通报,2009,25(23):318-322.
[6] 郑凯,丁久玲,俞禄生.不同植物生长调节物质对 2 种空气凤梨生长的影响[J].浙江农业科学,2012,53(10):1416-1419.
[7] 方敏彦,章明,俞禄生.硬叶斯垂科种子组织培养快繁技术探讨[J].浙江农业科学,2011,52(6):1280-1283.
[8] 郑凯,丁久玲,蔡鸿宇.空气凤梨组培快繁技术[J].北方园艺,2016(20):106-109.
[9] 郑桂灵,李鹏.空气凤梨对温度逆境的交叉适应[J].北方园艺,2015(10):82-86.
[10] 鲍荣静,方敏彦,王山中,等.中国引种的铁兰属阿拉提亚属植物抗寒性筛选试验[J].浙江农业科学,2013,54(11):1521-1523.
[11] 贾莉芳.硒铁锌对核桃抗逆生理与果实品质的影响[D].太谷:山西农业大学,2019.
[12] 潘珊珊.锌铁硒引发生提高烟草种子耐寒性的研究[D].杭州:浙江大学,2021.
[13] 田介云,魏安智,刘玉林,等.仁用杏抗寒性研究进展[J].西北林学院学报,2018,33(1):174-178.
[14] 李涛,于贤昌.营养液 Cu²⁺、Zn²⁺ 和 Mn²⁺ 浓度对低温胁迫下黄瓜幼苗叶片 SOD 活性的影响[J].中国农业科学,2008,41(3):772-778.
[15] 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.
[16] 杨碧云,叶丽萍,钟凤林,等.低温处理对紫色小白菜品质及光合特性的影响[J].安徽农业大学学报,2019,46(1):173-180.
[17] 尹健康.外源化学物质与烟草抗寒性关系的研究进展[J].江西农业学报,2013,25(3):67-70,73.
[18] WARREN G J, THORLBY G J, KNIGHT M R.The molecular biological approach to understanding freezing-tolerance in the model plant, *Arabidopsis thaliana*[M]//Cell and molecular response to stress.Vol 1.Amsterdam:Elsevier,2000:245-258.
[19] SMIRNOFF N.Antioxidants and reactive oxygen species in plants[M].Oxford:Blackwell Publishing Ltd,2005.
[20] 梁艳荣,胡晓红,张颖力,等.植物过氧化物酶生理功能研究进展[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2003,24(2):110-113.
[21] CAKMAK I, ÖZTÜRK L, EKER S, et al.Concentration of zinc and activity of copper/zinc-superoxide dismutase in leaves of rye and wheat cultivars differing in sensitivity to zinc deficiency[J].J Plant Physiol, 1997, 151(1):91-95.