

DOI:10.11686/cyxb2021379

http://cyxb.magtech.com.cn

陈卫东, 张玉霞, 张庆昕, 等. 末次刈割时间对苜蓿根颈抗氧化系统及抗寒性的影响. 草业学报, 2022, 31(9): 129—138.

CHEN Wei-dong, ZHANG Yu-xia, ZHANG Qing-xin, *et al.* The effect of last cutting time on the antioxidant system and cold resistance of alfalfa root-neck. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(9): 129—138.

末次刈割时间对苜蓿根颈抗氧化系统及抗寒性的影响

陈卫东¹, 张玉霞^{1,2*}, 张庆昕¹, 刘庭玉¹, 王显国³, 王东儒⁴

(1. 内蒙古民族大学农学院, 内蒙古 通辽 028041; 2. 内蒙古自治区饲用作物工程中心, 内蒙古 通辽 028000; 3. 中国农业大学草业科学与技术学院, 北京 100193; 4. 呼和浩特市农牧技术推广中心种业发展科, 内蒙古 呼和浩特 010000)

摘要:为探究不同末次刈割时间对科尔沁沙地生境下紫花苜蓿抗寒性的影响及其与低温冷冻胁迫下抗氧化系统变化的关系,以‘公农1号’紫花苜蓿为材料,于翌年秋季进行不同末次刈割时间处理,越冬前期挖取越冬器官并进行-10、-15、-20、-25和-30℃低温冷冻胁迫处理,以低温冷藏(4℃)为对照,测定紫花苜蓿根颈的相对电导率及丙二醛(MDA)含量、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性的变化,利用相对电导率根据 Logistic 回归方程计算半致死温度,并对半致死温度与抗氧化特性进行相关分析。结果表明,末次刈割和8月25日、9月5日、9月15日、9月25日、10月5日、10月15日、10月25日、11月5日末次刈割的苜蓿半致死温度分别为-18.03、-17.61、-17.03、-16.59、-15.80、-15.82、-16.83、-16.34、-17.12℃;紫花苜蓿根颈的半致死温度与-10℃低温冷冻胁迫条件下的POD活性呈显著负相关($P<0.05$),与-20℃低温冷冻胁迫条件下的CAT活性呈显著负相关($P<0.05$),与-15、-20、-25℃低温冷冻胁迫条件下的SOD活性呈显著或极显著负相关,与-15、-20、-25、-30℃低温冷冻胁迫条件下的MDA含量呈显著或极显著正相关。不同末次刈割时间的苜蓿抗寒性强弱为末次刈割>8月25日>11月5日>9月5日>10月15日>9月15日>10月25日>10月5日>9月25日;末次刈割时间通过调控苜蓿根颈的SOD、POD、CAT活性,协同作用清除活性氧、过氧化物和过氧化氢,从而降低膜脂过氧化程度,提高抗寒性,因此在科尔沁沙地地区建议9月5日之前或11月5日之后进行末次刈割。

关键词:苜蓿;末次刈割时间;抗寒性;抗氧化特性

The effect of last cutting time on the antioxidant system and cold resistance of alfalfa root-neck

CHEN Wei-dong¹, ZHANG Yu-xia^{1,2*}, ZHANG Qing-xin¹, LIU Ting-yu¹, WANG Xian-guo³, WANG Dong-ru⁴

1. Agricultural College, Inner Mongolia University for Nationalities, Tongliao 028041, China; 2. Inner Mongolia Autonomous Region Forage Crop Engineering Technology Research Center, Tongliao 028000, China; 3. College of Grassland Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 4. Seed Industry Development Section, Hohhot Agriculture And Animal Husbandry Technology Promotion Center, Hohhot 010000, China

Abstract: This research explored the effect of different last cutting time on the cold resistance of alfalfa (*Medicago sativa*) cultivar ‘Gongnong No. 1’ in the Horqin sandy land habitat and the relationship between the last cutting time and changes in the antioxidant system under low temperature stress. The experiment included last cutting times of August 25, September 5, September 15, September 25, October 5, October 15, October 25, and November 5.

收稿日期:2021-10-19;改回日期:2021-12-06

基金项目:内蒙古自然科学基金项目(2020MS03081),国家牧草产业技术体系(CARS-34),内蒙古自治区科技计划项目(2021GG0109)和内蒙古民族大学研究生科研创新资助项目(NMDSS2161)资助。

作者简介:陈卫东(1997-),男,内蒙古赤峰人,在读硕士。E-mail: 1416386697@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: yuxiazhang685@163.com

The crowns were excavated in early winter and subjected to low temperature freezing stress treatments of -10 , -15 , -20 , -25 , and -30 $^{\circ}\text{C}$, with low temperature storage (4 $^{\circ}\text{C}$) as the control. Measurements after low temperature storage included the relative electrical conductivity, malondialdehyde (MDA) content, and superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD) and catalase (CAT) activities. The semi-lethal temperature was calculated from the relative conductivity following a logistic regression equation, and the correlations between the semi-lethal temperature and the antioxidant properties were analyzed. It was found that the semi-lethal temperature for alfalfa last mowed on August 25, September 5, September 15, September 25, October 5, October 15, October 25, and November 5 was, respectively, -18.03 , -17.61 , -17.03 , -16.59 , -15.80 , -15.82 , -16.83 , -16.34 , -17.12 $^{\circ}\text{C}$; The semi-lethal temperature of alfalfa root neck and the POD and CAT activities under -10 $^{\circ}\text{C}$ low-temperature freezing stress were significantly negatively correlated ($P < 0.05$); The semi-lethal temperature and SOD activities under -15 , -20 , and -25 $^{\circ}\text{C}$ low temperature stress were significantly or extremely significantly negatively correlated. There was also a significant or very significant positive correlation between semi-lethal temperature and MDA content under low temperature freezing stress of -15 , -20 , -25 , and -30 $^{\circ}\text{C}$. For the different last cutting times, the cold resistance of alfalfa ranked $\text{uncut} > \text{August 25} > \text{November 5} > \text{September 5} > \text{October 15} > \text{September 15} > \text{October 25} > \text{October 5} > \text{September 25}$. The last cutting time regulates the SOD, POD, and CAT enzyme activities in the root neck of alfalfa. An appropriate last cutting time results in lowered active oxygen levels, a reduced degree of membrane lipid peroxidation, and improved cold resistance. Therefore, it is recommended to carry out the last mowing of alfalfa stands before September 5 or after November 5 in the Horqin sandy area.

Key words: alfalfa; last cutting time; cold resistance; antioxidant properties

紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 作为优质的多年生豆科牧草, 是我国种植面积最大的牧草之一, 在我国畜牧业生产中发挥着至关重要的作用^[1-2]。科尔沁沙地位于中国农牧交错带东段, 频繁的风沙灾害加之不合理的人为活动导致科尔沁沙地成为中国北方地区沙漠化最典型的地区之一^[3-4]。近几十年来农耕界限不断北移, 大面积草原被开垦为农田, 昔日波状起伏的疏林沙质草原逐渐变为今日典型的农牧交错区^[5]。在“十三五”期间通过机械播种、切割压扁搂晒、打捆机械化技术、节水灌溉体系, 在科尔沁沙地稳固地建立了 700 hm^2 苜蓿生产基地^[6]。科尔沁沙地冬季少雪, 冬春土壤温湿度变化剧烈^[7-8], 在科尔沁沙地种植苜蓿面临严重的低温冷冻和倒春寒问题^[9-10]。冻害是限制这一地区苜蓿持续稳定生产的关键问题, 安全越冬是我国北方干旱地区实现苜蓿稳产高产的基础。影响苜蓿越冬率的因素有很多, 如气温、降水、土壤质地与肥力、品种选择、刈割制度、灌溉措施等, 其中末次刈割时间是影响苜蓿越冬率的重要栽培管理因素之一^[11-14], 目前关于苜蓿的末次刈割时间, 许多学者有不同见解, 有学者认为第1次“杀霜(气温首次降至 -20 $^{\circ}\text{C}$)”之前4~6周是中、高纬度地区苜蓿刈割秋季敏感期(fall critical period), 此时期刈割将降低苜蓿草地的持久性和来年的草产量^[15-16]; 也有一些学者的研究表明, 如果苜蓿品种秋眠和抗病性强、土壤肥力高、刈割次数和生育时期(或间隔期)适宜, 秋季刈割就不会造成草地持久性和产草量降低^[17-18]。这种有关末次刈割做法的争议, 究竟孰是孰非, 还是需要因地制宜, 还有待于更多的研究去佐证。根系是植物吸收养分、转化和储藏营养物质的重要器官^[19], 研究表明, 根颈中抗氧化系统与植物抗逆性存在密切关系^[20]。孙浩等^[21]研究表明, 末茬秋季敏感期刈割导致阿鲁科尔沁旗苜蓿越冬率降低, 但未对苜蓿根颈中抗氧化系统做深入研究, 苜蓿根系中的抗氧化酶活性在植物越冬期间存在怎样的变化规律及其与越冬有无直接联系还需进一步探究。为此, 开展末次刈割时间调控科尔沁沙地苜蓿越冬的生理机制研究, 探究苜蓿根颈抗氧化系统变化, 分析科尔沁沙地秋末是否应该刈割及最佳刈割时期, 对确定该地区适宜的末次刈割时间, 确保苜蓿安全越冬, 指导苜蓿生产具有重要意义, 亦可为苜蓿抗寒越冬研究提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于内蒙古通辽市开鲁县东风镇林辉草业公司(43°37' N, 121°34' E), 年平均气温为 6.2 °C, 最低气温为 -30~-25 °C, >10 °C 年活动积温为 3137 °C, <0 °C 的天数为 86~98 d, 年平均日照时数为 3000 h, 无霜期为 135~145 d, 年平均降水量为 376.1 mm, 蒸发量是降水量的 4.8 倍, 年平均风速为 3.1~4.3 m·s⁻¹, 为典型的温带大陆性季风气候。试验田土壤为沙土, 新开垦沙化草地, 0~20 cm 土层土壤理化性质为: pH 值 8.2, 有机质含量 6.3 g·kg⁻¹, 全氮含量 0.37 g·kg⁻¹, 碱解氮含量 36.17 mg·kg⁻¹, 速效钾含量 76.78 mg·kg⁻¹, 速效磷含量 3.68 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验材料为农农 1 号紫花苜蓿品种, 来自吉林省农业科学院草原所。于 2019 年 7 月 30 日进行播种, 播种量 22.5 kg·hm⁻², 条播行距 15 cm, 试验小区面积为 16 m² (4 m×4 m), 3 次重复, 共设 30 个小区, 小区之间设 0.5 m 过道。施肥量为 75 kg·hm⁻² K₂O, 100 kg·hm⁻² P₂O₅, 翌年再次施入 150 kg·hm⁻² K₂O 与 200 kg·hm⁻² P₂O₅, K₂O 分两次施入, 分别为 4 月 3 日和 6 月 3 日各施入 75 kg·hm⁻², P₂O₅ 于 4 月 3 日一次性施入, 磷肥为过磷酸钙(P₂O₅ 含量为 44%), 钾肥为氯化钾(K₂O 含量为 60%), 所有小区分别于 2020 年 5 月 1 日和 7 月 3 日进行第一与二茬刈割。采用随机区组试验设计, 于 2020 年 8 月 25 日—11 月 5 日, 每 10 d 一个刈割时间, 分别为 8 月 25 日, 9 月 5、15、25 日, 10 月 5、15、25 日, 11 月 5 日, 共设置 8 个刈割时间, 以未刈割为对照(CK)。紫花苜蓿生长过程中进行适时喷灌、除草、防治病虫害等田间管理。于封冻前期(11 月 15 日)挖取紫花苜蓿越冬材料(苜蓿根系), 每个小区挖取 90 株(粗细均匀一致), 平均分成 6 份。将其中 1 份越冬材料放在 4 °C 冰箱进行低温冷藏处理, 剩余 5 份于可程式恒温恒湿试验箱(东莞市昊昕仪器设备有限公司)模拟低温冷冻处理, 处理时将根系先用脱脂棉包裹, 加适量水, 再用锡纸包裹, 注明编号, 处理温度分别为 -10, -15, -20, -25 和 -30 °C, 以 0 °C 为起点, 4 °C·h⁻¹ 的速率降温, 到达预设温度后保持 6 h, 再以 4 °C·h⁻¹ 的速率升温至 0 °C, 取出置于 4 °C 下保持 12 h。低温处理结束后, 分别切取根颈(根颈及根颈下主根 1 cm), 测定相对电导率及抗氧化特性。

1.3 测定指标及方法

采用 DDS-302 电导率仪(产地: 成都)测定电导率^[22], 采用硫代巴比妥酸比色法测定丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量^[22], 采用愈创木酚比色法测定过氧化物酶(peroxidase, POD)活性^[22], 采用氮蓝四唑比色法测定超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性^[22], 采用紫外吸收法测定过氧化氢酶(catalase, CAT)活性^[22]。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 软件进行数据处理、作图和制作表格, 结果用“平均值±标准差”表示, 各低温处理下的相对电导率数据使用 SPSS 17.0 软件拟合 Logistic 回归方程^[23-24]: $y=k/(1+ae^{-bx})$, 其中 y 为相对电导率值, x 为处理温度, k 为当 x 趋于无穷大时的值, a 与 b 为方程参数, 相对电导率的极大值与极小值的中位数对应的温度为低温半致死温度(semi-lethal temperature, LT₅₀)。

2 结果与分析

2.1 不同末次刈割时间对苜蓿根颈半致死温度(LT₅₀)的影响

不同末次刈割时间的苜蓿受不同低温胁迫后相对电导率拟合 Logistic 回归方程均不同, 差异显著水平均小于 0.05(表 1)。结果显示, 在未刈割、8 月 25 日、9 月 5 日、9 月 15 日、9 月 25 日、10 月 5 日、10 月 15 日、10 月 25 日、11 月 5 日进行末次刈割时, 半致死温度分别为 -18.03、-17.61、-17.03、-16.59、-15.80、-15.82、-16.83、-16.34、-17.12 °C。由此说明, 在不同末次刈割时间的苜蓿抗寒能力强弱为: 未刈割>8 月 25 日>11 月 5 日>9 月 5 日>10 月 15 日>9 月 15 日>10 月 25 日>10 月 5 日>9 月 25 日。

2.2 不同末次刈割时间的苜蓿根颈在不同低温处理下 MDA 含量的变化

随着温度的降低, 苜蓿根颈的 MDA 含量呈逐渐升高的变化趋势(表 2), 在 -30 °C 下 MDA 含量最高, 且均

表1 不同末次刈割时间苜蓿根颈相对电导率拟合 Logistic 回归方程及 LT_{50} Table 1 The Logistic regression equation and LT_{50} of relative conductivity of alfalfa root-neck under different last cutting time

刈割时间 Cutting time (Month-day)	Logistic 回归方程 Logistic regression equation	显著性 Significance	半致死温度 Semi-lethal temperature (°C)
未刈割 Uncut	$y=1/(0.01352+0.11968 \times T^{1.13234})$	0.011	-18.03
08-25	$y=1/(0.01360+0.09669 \times T^{1.12580})$	0.013	-17.61
09-05	$y=1/(0.01340+0.08834 \times T^{1.12522})$	0.013	-17.03
09-15	$y=1/(0.01331+0.09098 \times T^{1.13087})$	0.007	-16.59
09-25	$y=1/(0.01239+0.05809 \times T^{1.11903})$	0.010	-15.80
10-05	$y=1/(0.01295+0.06625 \times T^{1.12157})$	0.007	-15.82
10-15	$y=1/(0.01338+0.09164 \times T^{1.12887})$	0.009	-16.83
10-25	$y=1/(0.01324+0.09564 \times T^{1.13382})$	0.006	-16.34
11-05	$y=1/(0.01302+0.09986 \times T^{1.13232})$	0.010	-17.12

T: 处理温度 Treatment temperature.

表2 不同末次刈割时间苜蓿根颈在低温处理下 MDA 含量的变化

Table 2 Changes of MDA content in alfalfa root-neck at different last cutting times under low temperature treatment (nmol·g⁻¹FW)

刈割时间 Cutting time (Month-day)	处理温度 Treatment temperature (°C)					
	4	-10	-15	-20	-25	-30
未刈割 Uncut	0.46±0.02aD	0.53±0.03abcD	0.67±0.05bcdC	0.90±0.04cdB	1.00±0.08eAB	1.05±0.01gA
08-25	0.45±0.01aE	0.46±0.03bcE	0.62±0.03dD	0.77±0.08dC	1.13±0.03eB	1.58±0.05eA
09-05	0.41±0.03aD	0.48±0.01bcD	0.63±0.02cdC	0.89±0.04cdB	1.35±0.05dA	1.42±0.04fA
09-15	0.53±0.05aE	0.54±0.03abcE	0.79±0.04bD	0.95±0.04abcC	1.58±0.04bcB	1.98±0.08eA
09-25	0.50±0.03aD	0.60±0.03abD	0.96±0.02aC	1.07±0.10aC	1.59±0.05bB	2.39±0.10bA
10-05	0.48±0.01aF	0.62±0.02aE	0.76±0.03bcdD	1.04±0.07abC	2.27±0.13aB	2.90±0.10aA
10-15	0.46±0.01aE	0.47±0.02bcE	0.71±0.03bcdD	0.90±0.05cC	1.44±0.05dB	1.67±0.07eA
10-25	0.44±0.02aE	0.46±0.02cE	0.69±0.02bcdD	0.95±0.07abcC	1.45±0.05cdB	1.61±0.09eA
11-05	0.50±0.04aE	0.50±0.03abcE	0.73±0.03bcdD	0.92±0.03bcC	1.41±0.04dB	1.84±0.08dA

注: 不同小写字母表示相同温度, 不同末次刈割时间之间差异显著 ($P<0.05$), 不同大写字母表示相同末次刈割时间, 不同温度间差异显著 ($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among different last cutting time at the same temperature ($P<0.05$), and different capital letters indicate significant differences among different temperature at the same cutting time ($P<0.05$). The same below.

与-20℃及以上温度处理差异显著 ($P<0.05$)。除9月5日刈割时间处理下-30与-25℃处理差异不显著外 ($P>0.05$), 其他刈割时间处理二者均差异显著 ($P<0.05$), 由此说明在低温胁迫下, 苜蓿根颈会受到伤害, 且低温胁迫温度越低, 苜蓿根颈受伤害程度越大, 说明MDA含量可以评价苜蓿受伤害程度。

在-15与-20℃处理下, 9月25日末次刈割时间处理根颈的MDA含量最高, 其中-15℃处理下均显著高于其他刈割时间处理, -20℃处理下显著高于未刈割、8月25日、9月5日、10月15日、11月5日刈割 ($P<0.05$); 在-25与-30℃低温胁迫处理下, 10月5日末次刈割时间处理根颈的MDA含量最高, 且均显著高于其他刈割时间 ($P<0.05$), 未刈割处理苜蓿根颈的MDA含量最低, 除8月25日末次刈割时间处理外均显著低于其他刈割时间处理 ($P<0.05$); 由此说明, 不同刈割时间处理下的苜蓿根颈的MDA含量在低温胁迫下存在明显差异, 9月25日与10月5日刈割处理MDA含量较高, 未刈割、8月25日、9月5日、10月15日、11月5日刈割处理的MDA含量较低。由此进一步说明, 9月25日与10月5日刈割的苜蓿抗寒性较弱, 与其在低温胁迫下MDA含量较多有关,

反之未刈割、8月25日、9月5日、10月15日、11月5日刈割处理抗寒性较强与其在低温胁迫下MDA含量较少密切相关;因此,苜蓿根颈的MDA含量可以反映其抗寒性强弱。

2.3 不同末次刈割时间苜蓿根颈在不同低温处理下SOD活性变化

随着温度的降低,苜蓿根颈的SOD活性呈逐渐升高的变化趋势(表3),在-30℃低温胁迫下SOD活性最强,且均与-20℃及以上温度处理差异显著($P<0.05$),除9月25日、10月25日、11月5日刈割处理-30与-25℃低温胁迫处理差异不显著外($P>0.05$),其他刈割时间处理二者均差异显著($P<0.05$),由此说明在低温胁迫下,苜蓿根颈受到伤害从而产生超氧阴离子,植株通过增强SOD活性,清除超氧阴离子,维持活性氧平衡,且在-30℃低温冷冻胁迫处理下,仍具有较强的清除能力,由此说明SOD是苜蓿抵御低温冷冻胁迫的抗氧化酶之一。

表3 不同末次刈割时间苜蓿根颈在低温处理下SOD活性的变化

Table 3 Changes of superoxide dismutase activity in alfalfa root-neck with different last cutting time under low temperature treatment ($\text{U}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$)

刈割时间 Cutting time (Month-day)	处理温度 Treatment temperature ($^{\circ}\text{C}$)					
	4	-10	-15	-20	-25	-30
未刈割 Uncut	109.87 $\pm$ 1.90aF	126.69 $\pm$ 6.06aE	162.05 $\pm$ 2.36aD	194.72 $\pm$ 4.88abC	235.08 $\pm$ 7.61aB	261.62 $\pm$ 11.13abA
08-25	110.20 $\pm$ 4.78aF	127.63 $\pm$ 3.43aE	153.35 $\pm$ 7.23abD	205.06 $\pm$ 4.37aC	229.83 $\pm$ 10.31aB	249.36 $\pm$ 8.47bcA
09-05	108.09 $\pm$ 4.16aD	118.14 $\pm$ 5.88aD	148.32 $\pm$ 3.17abcC	192.83 $\pm$ 2.78abB	205.23 $\pm$ 11.04bB	236.28 $\pm$ 10.58cA
09-15	116.38 $\pm$ 10.24aE	123.46 $\pm$ 7.98aE	143.08 $\pm$ 4.96bcD	182.61 $\pm$ 1.89bC	204.92 $\pm$ 3.91bB	238.92 $\pm$ 10.94cA
09-25	106.33 $\pm$ 2.33aD	126.14 $\pm$ 5.68aC	131.50 $\pm$ 3.36cC	160.17 $\pm$ 3.49cB	202.45 $\pm$ 6.09bA	204.48 $\pm$ 10.44dA
10-05	104.39 $\pm$ 2.65aE	113.62 $\pm$ 5.96aE	143.53 $\pm$ 6.16bcD	181.92 $\pm$ 4.21bC	209.20 $\pm$ 8.57bB	273.26 $\pm$ 7.04aA
10-15	103.37 $\pm$ 7.42aE	119.10 $\pm$ 5.18aE	148.63 $\pm$ 4.15abcD	186.65 $\pm$ 2.40bC	229.71 $\pm$ 8.09aB	257.07 $\pm$ 12.29abA
10-25	109.68 $\pm$ 2.08aD	112.21 $\pm$ 5.66aD	146.00 $\pm$ 3.09abcC	191.85 $\pm$ 4.13abB	207.41 $\pm$ 10.53bAB	211.57 $\pm$ 10.31dA
11-05	115.56 $\pm$ 3.70aD	114.19 $\pm$ 1.20aD	134.83 $\pm$ 5.97cC	191.49 $\pm$ 3.60abB	227.29 $\pm$ 9.80aA	239.51 $\pm$ 8.77cA

在-30~-15℃低温胁迫下,9月25日末次刈割处理苜蓿根颈的SOD活性最弱,在-15℃低温胁迫处理下显著低于未刈割、8月25日刈割处理,-20℃处理下显著低于其他刈割处理($P<0.05$),-25℃处理下则显著低于未刈割、8月25日、10月15日、11月5日刈割处理($P<0.05$),-30℃处理下显著低于除10月25日刈割外的其他处理($P<0.05$),由此说明,不同刈割时间苜蓿根颈的SOD活性在低温胁迫下存在明显差异,9月25日刈割处理相对较弱,未刈割、8月25日、10月15日、11月5日刈割则相对较强。由此进一步说明,9月25日刈割的苜蓿抗寒性较弱,与其在低温胁迫下SOD活性较弱有关,反之未刈割处理、8月25日、10月15日、11月5日刈割处理抗寒性较强与其在低温胁迫下SOD活性较强密切相关。

2.4 不同末次刈割时间的苜蓿根颈在不同低温处理下POD活性变化

随着温度的降低,苜蓿根颈的POD活性呈先升高后降低的变化趋势(表4),在-25℃下POD活性最强,其中未刈割、9月5日、9月25日、10月5日、10月25日、11月5日刈割处理均与其他低温差异显著($P<0.05$),由此说明在低温胁迫下,苜蓿根颈受到伤害会产生过氧化物,植株通过增强POD活性,清除过氧化物,维持活性氧平衡,且在-25℃处理下,清除能力最强,在-30℃处理下,POD活性减弱,说明苜蓿根颈清除过氧化物的能力减弱,由此说明POD亦是苜蓿抵御低温冷冻胁迫的抗氧化酶之一。

在-30和-15℃处理下,10月5日刈割处理苜蓿根颈的POD活性最弱,在-15℃处理下显著低于8月25日、9月5日、9月15日、10月25日刈割($P<0.05$),但在-20和-25℃处理下与其他处理差异不显著($P>0.05$),在-30℃处理下显著低于8月25日、9月5日、9月15日、9月25日刈割处理($P<0.05$)。由此说明,在不同刈割时间处理下的苜蓿根颈的POD活性在-15和-30℃低温胁迫下存在明显差异,但在-20和-25℃间差异不明显,说明POD活性在-20℃及以下温度处理下对刈割时间的响应不明显。

表4 不同末次刈割时间苜蓿根颈在低温处理下POD活性的变化

Table 4 Changes of peroxidase activity in alfalfa root-neck with different last cutting time under low temperature treatment ($U \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$)

刈割时间 Cutting time (Month-day)	处理温度 Treatment temperature ($^{\circ}\text{C}$)					
	4	-10	-15	-20	-25	-30
未刈割 Uncut	516.70 $\pm$ 29.41aD	654.90 $\pm$ 37.23aC	637.60 $\pm$ 20.65bcC	746.30 $\pm$ 23.49abB	827.60 $\pm$ 24.51aA	692.40 $\pm$ 25.78bcBC
08-25	494.00 $\pm$ 19.08abD	525.80 $\pm$ 11.22cdD	727.70 $\pm$ 17.32aB	655.70 $\pm$ 11.39dC	836.60 $\pm$ 20.24aA	795.00 $\pm$ 41.52aAB
09-05	414.45 $\pm$ 46.80cD	601.00 $\pm$ 32.82abC	737.50 $\pm$ 20.46aB	729.60 $\pm$ 13.23abcdB	853.70 $\pm$ 15.38aA	753.60 $\pm$ 35.54abB
09-15	417.00 $\pm$ 24.72cD	501.80 $\pm$ 24.25cdC	668.40 $\pm$ 16.27abB	766.00 $\pm$ 15.91aA	795.30 $\pm$ 28.57aA	775.80 $\pm$ 30.67aA
09-25	406.75 $\pm$ 40.49cD	466.00 $\pm$ 30.80dD	648.70 $\pm$ 22.27bcC	762.00 $\pm$ 21.65abB	847.10 $\pm$ 29.98aA	742.80 $\pm$ 9.20abB
10-05	463.20 $\pm$ 17.55abcE	521.50 $\pm$ 35.37cdDE	581.70 $\pm$ 53.95cCD	732.20 $\pm$ 18.85abcB	803.40 $\pm$ 18.18aA	636.50 $\pm$ 16.52cC
10-15	410.00 $\pm$ 42.94cE	531.00 $\pm$ 15.88bcdD	623.20 $\pm$ 19.84bcC	755.02 $\pm$ 34.90abAB	806.90 $\pm$ 25.36aA	697.60 $\pm$ 14.66bcB
10-25	423.55 $\pm$ 41.72bcD	545.30 $\pm$ 16.59bcC	663.60 $\pm$ 21.61abB	671.00 $\pm$ 81.99cdB	833.90 $\pm$ 3.97aA	656.90 $\pm$ 12.16cB
11-05	501.40 $\pm$ 27.92aC	637.50 $\pm$ 15.79aB	647.00 $\pm$ 26.86bcB	691.20 $\pm$ 57.01bcdB	803.80 $\pm$ 32.30aA	684.70 $\pm$ 23.07bcB

2.5 不同末次刈割时间苜蓿根颈在不同低温处理下CAT活性的变化

随着温度的降低,苜蓿根颈的CAT活性呈先升高后降低的变化趋势(表5),在 -20°C 下CAT活性最强,且均与其他温度处理差异显著($P<0.05$),由此说明在低温胁迫下,苜蓿根颈受到伤害产生 H_2O_2 ,通过增强CAT活性,清除 H_2O_2 ,维持活性氧平衡,且在 -20°C 低温胁迫下,清除能力最强,在 -20°C 以下,CAT活性减弱,说明苜蓿根颈清除 H_2O_2 的能力减弱,由此说明CAT亦是苜蓿抵御低温冷冻胁迫的抗氧化酶之一。

表5 不同末次刈割时间苜蓿根颈在低温处理下CAT活性的变化

Table 5 Changes of catalase activity in alfalfa root-neck with different last cutting time under low temperature treatment ($U \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$)

刈割时间 Cutting time (Month-day)	处理温度 Treatment temperature ($^{\circ}\text{C}$)					
	4	-10	-15	-20	-25	-30
未刈割 Uncut	60.94 $\pm$ 4.20aD	72.96 $\pm$ 1.99aC	83.17 $\pm$ 6.54aB	116.50 $\pm$ 2.76aA	65.07 $\pm$ 3.55bcD	67.18 $\pm$ 2.07bcCD
08-25	57.47 $\pm$ 1.71aD	70.12 $\pm$ 1.24abC	77.33 $\pm$ 10.96abBC	122.55 $\pm$ 3.60aA	71.59 $\pm$ 2.72abBC	78.19 $\pm$ 3.28aB
09-05	54.14 $\pm$ 2.17aE	61.65 $\pm$ 4.29cDE	79.74 $\pm$ 2.11abB	118.00 $\pm$ 5.42aA	68.74 $\pm$ 2.10abCD	74.23 $\pm$ 1.94abBC
09-15	56.89 $\pm$ 2.68aD	68.97 $\pm$ 4.48abcBC	73.83 $\pm$ 2.38bcB	98.67 $\pm$ 3.74deA	56.63 $\pm$ 1.81deD	61.54 $\pm$ 3.88cdCD
09-25	58.88 $\pm$ 3.22aD	68.33 $\pm$ 1.97abcC	77.25 $\pm$ 1.79abB	98.67 $\pm$ 0.82deA	75.47 $\pm$ 1.78aBC	58.19 $\pm$ 2.13dD
10-05	57.58 $\pm$ 2.82aCD	61.17 $\pm$ 2.57cBC	67.96 $\pm$ 2.77cB	96.55 $\pm$ 2.09eA	53.33 $\pm$ 3.05eD	65.02 $\pm$ 2.05cdBC
10-15	58.00 $\pm$ 2.00aD	71.99 $\pm$ 1.77abC	80.41 $\pm$ 3.37abB	107.55 $\pm$ 3.90bcA	55.72 $\pm$ 1.60deD	79.47 $\pm$ 2.19aBC
10-25	53.33 $\pm$ 2.62aD	72.63 $\pm$ 1.37abBC	77.79 $\pm$ 1.92abB	114.72 $\pm$ 2.96abA	57.00 $\pm$ 4.74cdeD	68.57 $\pm$ 1.18bcC
11-05	52.92 $\pm$ 1.67aD	64.55 $\pm$ 1.48bcC	73.68 $\pm$ 1.49bcB	106.26 $\pm$ 2.36cdA	63.52 $\pm$ 1.66bcdD	46.35 $\pm$ 2.44eD

在 $-25\sim-10^{\circ}\text{C}$ 低温冷冻处理下,10月5日末次刈割时间处理苜蓿根颈的CAT活性最弱,在 -10°C 处理下显著低于未刈割、8月25日、10月15日、10月25日刈割处理($P<0.05$), -15°C 处理则显著低于未刈割、8月25日、9月5日、9月25日、10月15日、10月25日刈割处理($P<0.05$), -20°C 处理显著低于未刈割、8月25日、9月5日、10月15日、10月25日刈割处理($P<0.05$), -25°C 处理下显著低于未刈割、8月25日、9月5日、9月25日、11月5日刈割处理($P<0.05$),但均与9月15日刈割处理差异不显著($P>0.05$)。由此说明,不同刈割时间处理下的苜蓿根颈的CAT活性在低温胁迫下存在明显差异,9月15日和10月5日刈割相对较弱,未刈割、8月25日、9月5

日、10月15日、10月25日刈割则相对较强。由此进一步说明,9月15日和10月5日刈割的苜蓿抗寒性较弱,与其在低温胁迫下CAT活性较弱有关,反之未刈割处理、8月25日、9月5日刈割处理抗寒性较强与其在低温胁迫下CAT活性较强密切相关。

2.6 苜蓿根颈的半致死温度与其抗氧化系统的相关性

由表6可知,不同低温胁迫下紫花苜蓿根颈的LT₅₀均与MDA含量呈正相关,且在-15℃及以下温度呈显著或极显著正相关,与抗氧化酶活性呈负相关(除-20℃的POD活性);紫花苜蓿根颈的半致死温度与-10℃低温条件下的POD活性呈显著负相关($P<0.05$),与-20℃下的CAT活性呈显著负相关($P<0.05$),与-15、-20和-25℃条件下SOD活性呈显著或极显著负相关。

表6 不同末次刈割时间苜蓿根颈的半致死温度与其抗氧化系统的相关性
Table 6 Correlation between the semi-lethal temperature of alfalfa root-neck and its antioxidant system in different last cutting times

指标 Index	处理温度 Treatment temperature (°C)					
	4	-10	-15	-20	-25	-30
丙二醛 Malondialdehyde (MDA)	0.33	0.58	0.71*	0.83**	0.84**	0.85**
过氧化物酶 Peroxidase (POD)	-0.65*	-0.71*	-0.42	0.27	-0.10	-0.30
过氧化氢酶 Catalase (CAT)	-0.16	-0.34	-0.61	-0.75*	-0.25	-0.25
超氧化物歧化酶 Superoxide dismutase (SOD)	-0.34	-0.41	-0.73*	-0.77**	-0.78**	-0.37

注: *表示相关性达显著水平($P<0.05$), **表示相关性达极显著水平($P<0.01$)。
Note: * indicates that the correlation reaches a significant level ($P<0.05$), ** indicates that the correlation reaches an extremely significant level ($P<0.01$).

3 讨论与结论

关于末次刈割处理对苜蓿抗寒性的研究主要采用田间自然降温胁迫处理的方法^[25],通过测定翌年的越冬率衡量苜蓿抗寒性的强弱,抗氧化系统指标通过越冬期不同自然降温处理时期取样测定,这种方法易受外界环境影响,且冬季取样困难。近年来,末次刈割处理对苜蓿抗寒性的研究开始采用程式恒湿恒温试验箱人工模拟低温处理的方法^[26],利用半致死温度衡量苜蓿的抗寒性强弱,这种方法能够有效避免外部环境因素的影响,取样测定抗寒生理指标简单方便且更加准确。为此,本试验通过大田培养紫花苜蓿材料,采用人工模拟低温胁迫的方法,获得半致死温度判定不同末次刈割时间处理紫花苜蓿抗寒性的差异。结果表明,不同末次刈割时间处理的紫花苜蓿抗寒性强弱为:未刈割>8月25日>11月5日>9月5日>10月15日>9月15日>10月25日>10月5日>9月25日;因此,在科尔沁沙地9月5日之前与11月5日之后进行末次刈割为相对安全期,9月5日-9月25日与10月5日-11月5日进行末次刈割为相对危险期,9月25日-10月5日进行末次刈割为危险期。

植物受到低温胁迫时,会导致细胞内活性氧增加^[27-28],植物细胞膜系统在受到氧化伤害后产生MDA,其含量多少可反映细胞膜脂过氧化的程度,也常用来反映细胞膜受破坏的程度^[29]。有研究表明,植物在逆境条件下,其细胞可通过多种途径产生超氧阴离子、H₂O₂等活性氧,超氧阴离子和H₂O₂可进一步反应生成毒性更强的羟自由基(OH⁻),它能转化脂肪酸为有毒的过氧化物,使得生物膜被破坏,造成MDA的累积^[30]。本研究中,紫花苜蓿根颈的MDA含量随着温度的降低均增加,这与徐洪雨等^[31]、程嘉惠等^[32]的研究结果一致,且在-15、-20、-25与-30℃处理下,紫花苜蓿根颈在9月25日或10月5日末次刈割时MDA含量最高,表明此时紫花苜蓿根颈细胞膜破坏最严重,受伤程度最大,因此,此时刈割处于危险期。

逆境胁迫下,植物会启动一系列生理响应来应对活性氧过量积累所形成的过氧化胁迫,有研究表明,SOD、POD、CAT等抗氧化酶在植物抵御低温氧化损伤方面起着至关重要的作用^[33-34]。李春燕等^[35]研究表明,随低温胁迫持续时间的延长,小麦(*Triticum aestivum*)SOD、POD和CAT活性均呈先上升后下降的变化趋势。本试验

表明,随着温度的下降,紫花苜蓿根颈的POD、CAT活性呈先升高后降低的变化趋势,而SOD活性呈一直增加的趋势,说明低温胁迫可激发紫花苜蓿根颈中POD、CAT、SOD活性,SOD活性的一直升高可能是由于其在低温冷冻下依然起到保护作用,这与亓春宇等^[36]的研究结果一致。通过苜蓿根颈的半致死温度与抗氧化系统的相关分析表明,在4与-10℃处理下,紫花苜蓿根颈的POD活性与其半致死温度呈显著负相关,在-20℃处理下,紫花苜蓿根颈的CAT活性与其半致死温度呈显著负相关,在-15、-20与-25℃处理下,紫花苜蓿根颈的SOD活性与其半致死温度呈显著或极显著负相关,因此末次刈割时间通过调控苜蓿根颈的SOD、POD、CAT活性,协同作用清除活性氧、过氧化物、过氧化氢,降低膜脂过氧化程度,从而提高其抗寒性。

参考文献 References:

- [1] Mccallum M H, Connor D J, O'leary G J. Water use by lucerne and effect on crops in the Victoria Wimmera. *Australian Journal of Agricultural Research*, 2001, 52(2): 193–201.
- [2] Wang X, Liu X J, Zhao Y J, *et al.* Nitrogen utilization and interspecific feedback characteristics of intercropped alfalfa/oat with different root barriers. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(8): 73–85.
汪雪, 刘晓静, 赵雅姣, 等. 根系分隔方式下紫花苜蓿/燕麦间作氮素利用及种间互馈特征研究. *草业学报*, 2021, 30(8): 73–85.
- [3] Wang Y F, Zhang J Q, Ma Q Y, *et al.* Response of aeolian desertification to regional climate change in Horqin sandy land at beginning of 21st century. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(S2): 177–185.
王永芳, 张继权, 马齐云, 等. 21世纪初科尔沁沙地沙漠化对区域气候变化的响应. *农业工程学报*, 2016, 32(S2): 177–185.
- [4] Zhao X Y, Zhang C M, Zuo X A, *et al.* Challenge to the desertification reversion in Horqin Sandy Land. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(7): 1559–1564.
赵学勇, 张春民, 左小安, 等. 科尔沁沙地沙漠化土地恢复面临的挑战. *应用生态学报*, 2009, 20(7): 1559–1564.
- [5] Meng L L, Hu J H, Wan P, *et al.* Desertification issue caused by three productive modes in the Horqin regions. *Pratacultural Science*, 2011, 28(1): 39–46.
孟利利, 胡敬华, 万平, 等. 科尔沁地区3类生产方式下的荒漠化问题研究. *草业科学*, 2011, 28(1): 39–46.
- [6] Liang Q W, Yang X F, Narisu, *et al.* SWOT analysis and suggestions on development of alfalfa industry in Ar Horqin Banner. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2019(22): 7–12.
梁庆伟, 杨秀芳, 娜日苏, 等. 阿鲁科尔沁旗紫花苜蓿产业发展的SWOT分析与建议. *黑龙江畜牧兽医*, 2019(22): 7–12.
- [7] Chu J M, Wang Q, Fan Z P, *et al.* Effects of soil moisture condition and freeze-thaw cycle on soil respiration of different land-use types in Horqin Sandy Land. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(6): 1399–1404.
褚建民, 王琼, 范志平, 等. 水分条件和冻融循环对科尔沁沙地不同土地利用方式土壤呼吸的影响. *生态学杂志*, 2013, 32(6): 1399–1404.
- [8] Zhang Y X, Wang X G, Tian Y L, *et al.* Effect of sowing date on cold resistance of different alfalfa varieties in Horqin sandy land. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(4): 73–80.
张玉霞, 王显国, 田永雷, 等. 科尔沁沙地播种时期对不同紫花苜蓿品种抗寒性的影响. *草业学报*, 2020, 29(4): 73–80.
- [9] Zhu A M, Han G D, Zhang Y X, *et al.* Influence and analysis of different sowing time on overwintering rate of alfalfa. *Acta Agrestia Sinica*, 2020, 28(2): 446–453.
朱爱民, 韩国栋, 张玉霞, 等. 不同播种时期对紫花苜蓿越冬率影响及分析. *草地学报*, 2020, 28(2): 446–453.
- [10] Li X L, Wan L Q. Alfalfa fall dormancy and its relationship to winter hardiness and yield. *Acta Prataculturae Sinica*, 2004, 13(3): 57–61.
李向林, 万里强. 苜蓿秋眠性及其与抗寒性和产量的关系. *草业学报*, 2004, 13(3): 57–61.
- [11] McKenzie J S, Mclean G E. Some factors associated with injury to alfalfa during the 1977–1978 winter at Beaverlodge, Alberta. *Canadian Journal of Plant Science*, 1980, 60(1): 103–112.
- [12] Paquin R, Mehugs G R. Influence of soil moisture on cold tolerance of alfalfa. *Canadian Journal of Plant Science*, 1980(60): 139–147.
- [13] Bélanger G, Kunelius T, McKenzie D, *et al.* Fall cutting management affects yield and persistence of alfalfa in Atlantic Canada. *Canadian Journal of Plant Science*, 1999, 79: 57–63.

- [14] SchWab P M, Burner D K, Sheaffer C C, *et al.* Factor affecting a laboratory evaluation of alfalfa cold tolerance. *Crop Science*, 1996(36): 318—324.
- [15] Silkett V W, Megee C R, Rather H C. The effect of late summer and early fall cutting on crown bud formation and winter hardiness of alfalfa. *Agronomy Journal*, 1937, 29(1): 53—62.
- [16] Hanson C H. Alfalfa science and technology. Wisconsin: American Society of Agronomy, 1972: 489—490.
- [17] Tesar M B, Yager J L. Fall cutting of alfalfa in the North Central USA. *Agronomy Journal*, 1985, 77: 774—778.
- [18] Sheaffer C C, Wiersma J V, Warnes D D, *et al.* Fall cutting and alfalfa yield, persistence and quality. *Canadian Journal of Plant Science*, 1986, 66: 329—338.
- [19] Zha X, Mimaqionglia. Observation on the root system of four legumes. *Pratacultural Science*, 1987, 4(4): 56—57.
扎西, 米玛穷拉. 四种豆科牧草根系的观测. *草业科学*, 1987, 4(4): 56—57.
- [20] Zhang Y X, Cong B M, Wang X G, *et al.* Correlation analysis of cold resistance and antioxidant enzyme activity in alfalfa roots. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(2): 244—249.
张玉霞, 丛百明, 王显国, 等. 苜蓿抗寒性与根系抗氧化酶活性相关性分析. *草地学报*, 2021, 29(2): 244—249.
- [21] Sun H, Wang X G, Zhang Y X, *et al.* Study on the optimal fall harvesting period of alfalfa in Ar Horqin//Proceedings of Chinese grassland society. Beijing: China Agriculture Press, 2016: 1—8.
孙浩, 王显国, 张玉霞, 等. 阿鲁科尔沁旗苜蓿适宜末次刈割期的研究//中国草学会论文集. 北京: 中国农业出版社, 2016: 1—8.
- [22] Zou Q. Experimental guidance of plant physiology. Beijing: Higher Education Press, 2009: 129—174.
邹琦. 植物生理学实验指导. 北京: 高等教育出版社, 2009: 129—174.
- [23] Liu J, Xiang D Y, Chen J B, *et al.* Low temperature LT₅₀ of three eucalyptus seedlings with electrical conductivity method and Logistic equation. *Guangxi Forestry Science*, 2009, 38(2): 75—78.
刘建, 项东云, 陈健波, 等. 应用 Logistic 方程确定三种桉树的低温半致死温度. *广西林业科学*, 2009, 38(2): 75—78.
- [24] Liu Y P, Zhu Y L, Kang X Y, *et al.* Cold resistance determination of different type *Magnolia grandiflora* with synergistic electrical conductivity method and Logistic equation. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2012, 32(10): 69—71, 78.
刘艳萍, 朱延林, 康向阳, 等. 电导法协同 Logistic 方程确定不同类型广玉兰的抗寒性. *中南林业科技大学学报*, 2012, 32(10): 69—71, 78.
- [25] Shen X H, Jiang C, Feng P, *et al.* Comparison of MDA content and antioxidant enzymes activity of several alfalfa roots in cold region. *Crops*, 2015(4): 88—91.
申晓慧, 姜成, 冯鹏, 等. 寒区 6 个紫花苜蓿品种根系中 MDA 含量及抗氧化酶活性的比较研究. *作物杂志*, 2015(4): 88—91.
- [26] Zhu A M, Zhang Y X, Wang X G, *et al.* Comparison of cold resistance of 8 alfalfa varieties. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2019, 47(1): 45—52.
朱爱民, 张玉霞, 王显国, 等. 8 个苜蓿品种抗寒性的比较. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(1): 45—52.
- [27] Theocharis A, Clément C, Barka E A. Physiological and molecular changes in plants grown at low temperatures. *Planta*, 2012, 235(6): 1091—1105.
- [28] Janská A, Maršík P, Zelenková S, *et al.* Cold stress and acclimation-what is important for metabolic adjustment? *Plant Biology*, 2010, 12(3): 395—405.
- [29] Hu Y, Cao J J, Liu P, *et al.* Protective role of tea polyphenols in combination against radiation-induced haematopoietic and biochemical alterations in mice. *Phytotherapy Research*, 2011, 25(12): 1761—1769.
- [30] Munnik T, Ligterink W, Meskiene I, *et al.* Distinct osmo-sensing protein kinase pathways are involved in signalling moderate and severe hyper-osmotic stress. *Plant Journal*, 1999, 20(3): 381—388.
- [31] Xu H Y, Zhen L L, Li Y Y, *et al.* Effect of freeze-drying environment on freezing tolerance of alfalfa crowns. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(4): 724—733.
徐洪雨, 甄莉丽, 李钰莹, 等. 低温干旱环境对紫花苜蓿根颈耐寒性的影响. *草地学报*, 2021, 29(4): 724—733.
- [32] Cheng J H, Zhang M L, Wang C, *et al.* Effect of low temperature stress on physiological index of four strawberry varieties. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 2021, 46(1): 85—88, 113.
程嘉惠, 张梅丽, 王超, 等. 低温胁迫对 4 个草莓品种生理指标的影响. *东北农业科学*, 2021, 46(1): 85—88, 113.
- [33] Zhang X F, She M Z, Li H Y, *et al.* Growth promotion mechanisms of *Flavobacterium succinicans* and their physiological

regulation on the growth and stress tolerance in *Lolium perenne*. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(8): 1704—1711.

张新飞, 余木子, 李晗玉, 等. 琥珀酸黄杆菌促生机理及其对多年生黑麦草生长和抗逆性的生理调控作用. 草地学报, 2021, 29(8): 1704—1711.

- [34] Zhang X, Yang Y, Liu X Y, *et al.* Effect of exogenous salicylic acid on the antioxidant enzyme activities and fatty acid profiles in seashore paspalum under low temperature stress. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(1): 117—124.

张翔, 杨勇, 刘学勇, 等. 外源水杨酸对低温胁迫下海滨雀稗抗寒生理特征的影响. 草业学报, 2020, 29(1): 117—124.

- [35] Li C Y, Xu W, Liu L W, *et al.* Changes of endogenous hormones contents and antioxidative enzyme activities in wheat leaves under low temperature stress at jointing stage. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(7): 2015—2022.

李春燕, 徐雯, 刘立伟, 等. 低温条件下拔节期小麦叶片内源激素含量和抗氧化酶活性的变化. 应用生态学报, 2015, 26(7): 2015—2022.

- [36] Qi C Y, Liu F Q, Liu J L, *et al.* Cluster analysis of antioxidant enzymes and soluble protein of alfalfa hybrid under low temperature stress. Chinese Journal of Grassland, 2017, 39(2): 53—58, 70.

亓春宇, 刘凤歧, 刘杰淋, 等. 低温胁迫下紫花苜蓿杂交代抗氧化酶及可溶性蛋白的动态聚类分析. 中国草地学报, 2017, 39(2): 53—58, 70.