

网络出版时间:2022-07-13 12:10 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2023.01.001
网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20220712.1100.014.html

末次刈割时间和低温处理对苜蓿根颈抗寒性的影响

张庆昕¹, 张玉霞^{1,2}, 陈卫东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】【目的】探究科尔沁沙地生境中不同末次刈割时间紫花苜蓿抗寒性及其与低温胁迫下糖类物质含量变化的关系, 为科尔沁沙地苜蓿抗寒越冬提供理论依据和技术指导。【方法】以农农 1 号紫花苜蓿为材料, 于 2020 年 8 月 25 日—11 月 5 日进行不同末次刈割时间处理, 每处理间隔 10 d, 以未刈割为对照; 于封冻前期(11 月 15 日)挖取不同处理苜蓿越冬器官(根颈)分别进行-10, -15, -20, -25, -30 °C 低温冷冻处理, 以 4 °C 处理为对照, 测定各处理紫花苜蓿根颈的相对电导率及可溶性糖、蔗糖、果糖和淀粉含量, 利用相对电导率根据 logistic 回归方程计算苜蓿的半致死温度, 并对半致死温度与糖类物质含量进行相关性分析。【结果】未刈割和 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 日及 11 月 5 日末次刈割处理苜蓿的半致死温度分别为-18.03, -17.61, -17.03, -16.59, -15.80, -15.82, -16.83, -16.34 和-17.12 °C, 表明在科尔沁沙地生境下不同末次刈割时间苜蓿的抗寒性表现为: 未刈割>8 月 25 日刈割>11 月 5 日刈割>9 月 5 日刈割>10 月 15 日刈割>9 月 15 日刈割>10 月 25 日刈割>10 月 5 日刈割>9 月 25 日刈割; 随着处理温度的降低, 苜蓿根颈可溶性糖含量呈先升高后降低的变化趋势, 蔗糖含量变化因刈割时间不同表现有别, 果糖含量呈增加—降低—增加的双峰型变化趋势, 淀粉含量呈逐渐降低的变化趋势; 紫花苜蓿根颈的半致死温度与-10, -20, -30 °C 下的可溶性糖含量呈极显著负相关($P<0.01$), 与-15 和-20 °C 下的蔗糖含量呈显著或极显著负相关($P<0.05$ 或 $P<0.01$), 与-15 °C 下果糖含量呈极显著负相关($P<0.01$), 与-15 和-20 °C 下淀粉含量呈极显著正相关。【结论】末次刈割时间可调控苜蓿根颈淀粉向可溶性糖的转化, 进而通过蔗糖和果糖等可溶性糖协同作用来维持细胞的渗透压, 进而提高苜蓿的抗寒性。

【关键词】 苜蓿; 刈割时间; 抗寒性; 糖类物质

【中图分类号】 S551⁺.7

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2023)01-0001-08

Effect of last cutting dates and low temperature treatment on cold resistance of alfalfa root neck

ZHANG Qingxin¹, ZHANG Yuxia^{1,2}, CHEN Weidong¹, LIU Tingyu¹,
WANG Xianguo³, WANG Dongru⁴

(1 College of Agriculture, Inner Mongolia Minzu University, Tongliao, Inner Mongolia 028041, China; 2 Inner Mongolia Autonomous Region Forage Crop Engineering Technology Research Center in Hohhot, Tongliao, Inner Mongolia 028000, China; 3 College of Grassland Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 4 Seed Industry Development Section, Agricultural and Animal Husbandry Technology Extension Center of Hohhot, Hohhot, Inner Mongolia 010000, China)

Abstract: 【Objective】 This study explored the cold resistance of alfalfa at different dates of last mowing in Horqin sandy land and its relationship with changes in sugar contents under low temperature stress to provide basis and guidance for resisting cold and overwintering of alfalfa in Horqin sandy land. 【Method】

【收稿日期】 2021-12-27

【基金项目】 内蒙古自治区自然科学基金项目(2020MS03081); 国家牧草产业技术体系项目(CARS-34); 内蒙古自治区科技计划项目(2021GG0109); 内蒙古民族大学研究生科研创新项目(NMDSS2161)

【作者简介】 张庆昕(1997—), 女, 内蒙古通辽人, 实验师, 硕士, 主要从事牧草栽培与抗性生理研究。E-mail: gezi1011@126.com

【通信作者】 张玉霞(1965—), 女, 内蒙古赤峰人, 教授, 博士, 主要从事牧草栽培与抗性生理研究。E-mail: yuxiazhang685@163.com

The last cutting dates of Gongnong No. 1 alfalfa were assigned from Aug. 25 to Nov. 5, 2020 with an interval of 10 d using unharvested as the control. On Nov. 15 before the early freezing period, root necks of alfalfa with different treatments were excavated and treated at -10 , -15 , -20 , -25 , and -30 °C, using 4 °C as the control. The relative conductivity and contents of soluble sugar, sucrose, fructose and starch were measured and the half-lethal temperature was calculated using relative electrical conductivity according to the logistic regression equation. The correlations between half-lethal temperature and sugar contents were also analyzed. **【Result】** The lethal temperatures of alfalfa in treatments of control, Aug. 25, Sept. 5, Sept. 15, Sept. 25, Oct. 5, Oct. 15, Oct. 25 and Nov. 5 were -18.03 , -17.61 , -17.03 , -16.59 , -15.80 , -15.82 , -16.83 , -16.34 and -17.12 °C, respectively. The cold resistance was in the decreasing order of control > Aug. 25 > Nov. 5 > Sept. 5 > Oct. 15 > Sept. 15 > Oct. 25 > Oct. 5 > Sept. 25. With the decrease of treatment temperature, the content of soluble sugar in root necks of alfalfa increased first and then decreased, the change of sucrose content varies with cutting time, the content of fructose showed a bimodal trend of increase—decrease—increase, while the content of starch showed a decreasing trend. The half-lethal temperature of alfalfa root necks had significantly negative correlation with soluble sugar content at -10 , -20 and -30 °C ($P < 0.01$) and significant correlation with it at -15 and -20 °C. It also had significantly ($P < 0.05$) or extremely significantly ($P < 0.01$) negative correlation with sucrose content, extremely significantly negative correlations with fructose content at -15 °C ($P < 0.01$), and extremely significantly positive correlations with starch content at -15 and -20 °C. **【Conclusion】** The last mowing date can regulate the conversion of starch and soluble sugar in root necks of alfalfa and maintain the osmotic pressure of cells through synergistic effects of soluble sugars, so as to improve the cold resistance of alfalfa.

Key words: alfalfa; cutting period; cold resistance; carbohydrates

紫花苜蓿 (*Medicago sativa* L.) 是豆科 (Leguminosae) 苜蓿属多年生草本植物^[1], 因其生产性能高、适口性好, 且兼具高蛋白、低纤维的营养特点, 在全球广泛种植^[2]。紫花苜蓿抗寒性较强, 在中原一带、甘肃地区甚至有积雪覆盖的黑龙江地区均可安全稳定越冬, 但在内蒙古科尔沁沙地, 因冬季少雪, 冬春土壤温湿度变化剧烈, 因此紫花苜蓿面临着严重的低温冷冻和倒春寒问题^[3-5], 冻害是限制内蒙古科尔沁沙地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^[6], 秋季末次刈割时间是决定苜蓿安全越冬的关键栽培技术之一^[7]。王伟东等^[8]研究表明, 2年生紫花苜蓿在8月23日进行末次刈割处理, 其越冬率最高, 最有利于越冬。武瑞鑫等^[9]研究表明, 北京平原区紫花苜蓿秋季末次刈割的最佳时期大致为10月29日—11月5日。Bertrand等^[10]研究发现, 苜蓿越冬前根内可溶性糖含量积累与苜蓿安全越冬和春季返青有着密切联系。张玉霞等^[11]和朱爱民等^[12]研究表明, 淀粉与可溶性糖在根颈中的互相转化对紫花苜蓿越冬和翌年春季返青具有重要作用, 且不同苜蓿品种表现不同。陈卫东等^[13]研究表明, 蔗糖、

果糖等可溶性糖可以提高苜蓿的抗寒性。然而, 有关秋季末次刈割时间对苜蓿越冬抗寒影响的研究尚少^[14-15]。目前关于科尔沁沙地生境下不同末次刈割时间处理苜蓿的抗寒性是否存在差异, 以及刈割时间对低温胁迫下苜蓿糖类物质含量的影响尚不清楚。因此, 本研究通过大田试验, 于秋末对紫花苜蓿进行不同刈割时间处理, 越冬前期挖取不同刈割时间处理紫花苜蓿的根颈, 进行低温冷藏 (4 °C) 和低温冷冻 (-10 , -15 , -20 , -25 , -30 °C) 处理, 研究紫花苜蓿根颈糖类物质含量的变化, 分析紫花苜蓿在不同刈割时间处理下适应低温冷冻的抗寒保护机制, 确定科尔沁沙地紫花苜蓿秋季是否刈割或刈割最佳时间, 以期为提高科尔沁沙地紫花苜蓿安全越冬提供理论依据。

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 ($43^{\circ}37' N$, $121^{\circ}34' E$), 年平均气温 6.2 °C, ≥ 10 °C 年活动积温 3 137 °C, 年平均日照时数 3 000 h, 无霜期 135~145 d, 年平均降水量 376.1 mm, 蒸

发量是降水量的 4.8 倍,年平均风速 3.1~4.3 m/s,为典型的温带大陆性季风气候。试验田为新开垦沙化草地,土壤为沙土,0~20 cm 土层土壤理化性质为:pH 8.2,有机质 6.3 g/kg,全氮 0.37 g/kg,碱解氮 36.17 mg/kg,速效钾 76.78 mg/kg,速效磷 3.68 mg/kg。

1.2 试验材料

供试农 1 号紫花苜蓿种子,由吉林省农业科学院草原所提供。

1.3 试验设计

农 1 号紫花苜蓿种子于 2019 年 7 月 30 日播种,播种方式为条播,播种量为 22.5 kg/hm²,行距 15 cm,小区试验面积 16 m²(4 m×4 m),3 次重复,共设 27 个小区,小区之间设 0.5 m 过道。施肥量为 75 kg/hm² K₂O,100 kg/hm² P₂O₅;翌年再次施入 150 kg/hm² K₂O、200 kg/hm² P₂O₅,K₂O 均分为 2 次施入,分别为 4 月 3 日和 6 月 3 日,P₂O₅ 于 4 月 3 日一次性施入。分别于 2020 年 5 月 1 日和 7 月 3 日对所有小区进行第一茬与第二茬刈割。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。

采用随机区组试验设计,于 2020 年 8 月 25 日—11 月 5 日,每处理间隔 10 d,分别为 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 日和 11 月 5 日,共设置 8 个刈割时间处理,以未刈割为对照。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 株粗细均匀一致的根系,平均分成 6 份。将其中 1 份放在 4 ℃冰箱进行低温冷藏处理,剩余 5 份于程式恒温恒湿试验箱模拟低温冷冻处理,处理

时先将根系用脱脂棉包裹,加水适量,再用锡纸包裹,注明编号,处理温度分别为 -10,-15,-20,-25,-30 ℃,以 0 ℃为起点,4 ℃/h 的速率降温,到达预设温度后保持 6 h;再以 4 ℃/h 的速率升温至 0 ℃,取出置于 4 ℃下保持 12 h。分别切取根颈及根颈下主根 1 cm,测定其相对电导率及糖类物质含量。

1.4 测定指标及方法

参考邹琦^[16]的方法测定生理指标,其中相对电导率采用 DDS-302 电导率仪测定,可溶性糖和淀粉含量采用蒽酮比色法测定,蔗糖和果糖含量采用间苯二酚法测定,相关性分析数据选择半致死温度与不同温度处理下所有刈割处理的均值进行分析。

1.5 数据处理

试验数据采用 Microsoft Excel 2010 软件进行处理、绘图和制作表格,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 SPSS17.0 软件拟合 logistic 回归方程^[17-18] $y = k / (1 + ae^{-bx})$,其中 y 为相对电导率, x 为处理温度, k 为 x 趋于无穷大时的值, a 、 b 为方程参数。相对电导率极大值与极小值的中位数对应的温度为低温半致死温度(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

由表 1 可知,不同末次刈割时间苜蓿受不同低温胁迫后,用其根颈相对电导率拟合的 logistic 回归方程不同,差异显著水平均小于 0.05。

表 1 不同末次刈割时间处理苜蓿根颈相对电导率拟合的 logistic 回归方程及 LT₅₀

Table 1 The logistic regression equations of relative conductivity of alfalfa root necks and the LT₅₀ values in different treatments

末次刈割时间(月-日) Last mowing date (Month-Day)	logistic 回归方程 logistic equation	显著性 Sig.	半致死温度(LT ₅₀) / ℃ Half lethal temperature
未刈割 Uncut	$y = 1 / (0.013 52 + 0.119 68 \times T^{1.132 34})$	0.011	-18.03
8 月 25 日 August 25th	$y = 1 / (0.013 60 + 0.096 69 \times T^{1.125 80})$	0.013	-17.61
9 月 5 日 September 5th	$y = 1 / (0.013 40 + 0.088 34 \times T^{1.125 22})$	0.013	-17.03
9 月 15 日 September 15th	$y = 1 / (0.013 31 + 0.090 98 \times T^{1.130 87})$	0.007	-16.59
9 月 25 日 September 25th	$y = 1 / (0.012 39 + 0.058 09 \times T^{1.119 03})$	0.010	-15.80
10 月 5 日 October 5th	$y = 1 / (0.012 95 + 0.066 25 \times T^{1.121 57})$	0.007	-15.82
10 月 15 日 October 15th	$y = 1 / (0.013 38 + 0.091 64 \times T^{1.128 87})$	0.009	-16.83
10 月 25 日 October 25th	$y = 1 / (0.013 24 + 0.095 64 \times T^{1.133 82})$	0.006	-16.34
11 月 5 日 November 5th	$y = 1 / (0.013 02 + 0.099 86 \times T^{1.132 32})$	0.010	-17.12

由表 1 还可知,在未刈割和 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 日进行末次刈割时,苜蓿根颈的半

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 ℃。表明苜蓿在不同末次刈割时间的抗寒

能力强弱依次为:未刈割>8月25日末次刈割>11月5日末次刈割>9月5日末次刈割>10月15日末次刈割>9月15日末次刈割>10月25日末次刈割>10月5日末次刈割>9月25日末次刈割。

2.2 不同末次刈割时间苜蓿根颈在低温处理下的可溶性糖含量

由表 2 可知,在同一末次刈割时间下,随着处理温度的降低,苜蓿根颈可溶性糖含量呈先升高后降低的变化趋势,在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下苜蓿根颈的可溶性糖含量最高,且均与其他温度处理差异显著($P<0.05$),说明在低温胁迫下,苜蓿根颈受到伤害,通过提高可溶性糖的含量来保护细胞的稳定性。

由表 2 还可知,在 -10 、 -20 和 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下,9月25日末次刈割时间处理苜蓿根颈的可溶性糖含量最低,其中在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下苜蓿根颈可溶性糖含量显著

低于未刈割、8月25日刈割和11月5日刈割处理($P<0.05$), $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 处理显著低于除10月5日刈割处理外的其他刈割处理($P<0.05$), $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 处理则显著低于8月25日刈割处理($P<0.05$)。说明不同刈割时间处理苜蓿根颈的可溶性糖含量在低温冷冻胁迫下存在明显差异,9月25日和10月5日末次刈割处理苜蓿根颈的可溶性糖含量相对较低;未刈割及8月25日、9月5日、10月15日、11月5日末次刈割处理则相对较高。进一步说明,9月25日和10月5日刈割苜蓿的抗寒性较弱,与其在低温冷冻胁迫下的可溶性糖含量较低有关,反之抗寒性较强的未刈割处理、8月25日和11月5日末次刈割处理也与其在低温冷冻胁迫下可溶性糖含量较高密切相关。

表 2 不同末次刈割时间苜蓿根颈在低温处理下的可溶性糖含量

Table 2 Change of soluble sugar content in root necks of alfalfa on different last cutting dates

末次刈割时间 Last mowing date	under low temperature treatments						mg/g
	低温处理/ $^{\circ}\text{C}$ Low temperature treatment						
	4(CK)	-10	-15	-20	-25	-30	
未刈割 Uncut	109.38±5.56 aE	147.10±11.84 aD	170.63±8.49 aBC	316.37±22.29 aA	175.83±14.99 abB	151.37±5.66 abCD	
8月25日 August 25th	112.62±5.31 aD	137.50±5.27 abC	155.97±9.02 abcBC	276.87±14.77 bcA	168.17±3.59 abcB	160.63±8.64 aB	
9月5日 September 5th	117.02±2.98 aD	129.57±5.58 abcCD	158.47±13.38 abB	267.97±8.73 bcA	156.20±9.25 bcdB	149.27±10.43 abBC	
9月15日 September 15th	106.18±4.52 aC	117.90±3.78 bcBC	131.47±14.98 cB	260.47±10.59 cA	138.87±10.93 dB	137.40±8.21 abB	
9月25日 September 25th	95.93±7.18 aD	112.63±8.97 cCD	142.90±8.21 bcB	195.63±6.87 dA	150.83±2.67 cdB	133.70±5.24 bBC	
10月5日 October 5th	114.75±4.55 aD	115.33±3.24 bcD	153.33±12.76 abcBC	205.87±6.50 dA	160.00±15.36 abcdB	134.50±7.50 bCD	
10月15日 October 15th	98.63±2.82 aD	118.57±9.58 bcCD	150.03±5.00 abcB	266.57±17.90 bcA	144.50±7.17 cdB	140.17±6.78 abBC	
10月25日 October 25th	94.63±5.10 aD	118.03±3.33 bcC	159.13±6.16 abB	264.50±15.08 cA	141.90±7.22 dB	141.87±6.59 abB	
11月5日 November 5th	99.47±6.21 aD	144.50±8.89 aC	159.10±8.68 abC	289.17±20.72 bA	183.20±7.18 aB	148.70±5.56 abC	

注:同列数据后标不同小写字母表示相同温度下不同末次刈割处理间差异显著($P<0.05$);同行数据后标不同大写字母表示相同末次刈割时间处理下不同温度间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference among treatments at same temperatures ($P<0.05$), and different capital letters indicate significant difference among temperatures ($P<0.05$). The same below.

2.3 不同末次刈割时间苜蓿根颈在低温处理下的蔗糖含量

由表 3 可知,随着处理温度的降低,在8月25日、9月5日、10月5日、10月15日以及10月25日末次刈割时间处理下,苜蓿根颈的蔗糖含量呈增加—降低—增加—降低的双峰型变化趋势,其中在 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下蔗糖含量达到最高,且与对照($4\text{ }^{\circ}\text{C}$)、 -15 及 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 处理差异显著($P<0.05$),说明苜蓿根颈在低温胁迫下,通过增加蔗糖含量来保护细胞的稳定性,且在 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下,蔗糖在细胞中的调节能力最

强,表明蔗糖亦是苜蓿抵御低温冷冻胁迫的渗透调节物质之一。

由表 3 还可知,在 -15 和 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下,未刈割处理苜蓿根颈的蔗糖含量最高,其中在 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下,未刈割处理苜蓿根颈的蔗糖含量显著高于9月5日、9月25日、10月5日、10月15日末次刈割处理($P<0.05$); $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下未刈割处理苜蓿根颈的蔗糖含量均显著高于其他刈割处理(8月25日末次刈割处理除外)($P<0.05$)。说明不同末次刈割时间处理下苜蓿根颈的蔗糖含量在低温冷冻胁迫下存在明显差

异,9月25日和10月5日末次刈割处理苜蓿根颈的蔗糖含量相对较低,未刈割、8月25日、9月5日、10月15日、11月5日末次刈割处理则相对较高。进一步说明9月25日和10月5日末次刈割处理的

苜蓿抗寒性较弱,这与其在低温冷冻胁迫下蔗糖含量较低有关,反之抗寒性较强的未刈割处理和8月25日、11月5日末次刈割处理与其在低温冷冻胁迫下蔗糖含量较高密切相关。

表 3 不同末次刈割时间苜蓿根颈在低温处理下的蔗糖含量

Table 3 Changes of sucrose content in alfalfa root necks on different last cutting dates under low temperature treatments

末次刈割时间 Last mowing date	低温处理/°C Low temperature treatment					
	4(CK)	-10	-15	-20	-25	-30
未刈割 Uncut	66.79±1.17 bcD	75.39±3.24 cdC	86.68±5.20 aB	96.20±4.48 aA	102.20±4.79 abA	89.23±1.04 abB
8月25日 August 25th	64.10±2.75 cC	98.57±3.75 aA	85.90±1.68 abB	89.89±0.83 abB	97.93±3.78 abcA	91.02±1.36 aB
9月5日 September 5th	76.62±3.06 aD	95.16±1.47 aA	78.49±0.70 cdCD	86.87±1.14 bcB	95.78±4.13 bcA	83.33±1.47 bcBC
9月15日 September 15th	77.51±4.24 aBC	72.76±2.28 dC	85.70±0.68 abA	80.77±1.20 cdAB	86.05±2.45 dA	75.91±1.73 dBC
9月25日 September 25th	76.02±3.73 aB	64.28±3.14 eC	76.46±4.44 dB	77.23±1.04 dB	86.48±2.19 dA	74.48±1.71 dB
10月5日 October 5th	74.30±1.93 aB	80.52±2.29 bcAB	67.24±1.21 eC	80.12±3.10 cdAB	86.00±2.06 dA	79.42±3.46 cdB
10月15日 October 15th	74.05±1.32 aD	85.66±2.05 bB	79.22±2.49 bcdCD	83.12±1.51 bcdBC	94.21±3.61 cA	77.09±2.44 cdCD
10月25日 October 25th	63.40±3.53 cC	100.22±3.37 aA	85.27±3.18 abcB	67.88±1.42 eC	102.63±10.83 abA	89.53±1.09 abB
11月5日 November 5th	72.19±1.27 abD	70.30±4.20 deD	83.72±1.67 abcC	88.42±2.19 bBC	103.38±4.38 aA	94.74±1.81 aB

2.4 不同末次刈割时间苜蓿根颈在低温处理下的果糖含量

由表 4 可知,随着处理温度的降低,苜蓿根颈的果糖含量呈增加—降低—增加的双峰型趋势,其中在-15 °C下果糖含量达到最高,且与其他温度处理

差异较大,说明在低温胁迫下,苜蓿通过增加根颈果糖含量来保护细胞的稳定性,且以-15 °C下果糖在细胞中的调节能力最强,表明果糖亦是苜蓿抵御低温冷冻胁迫的渗透调节物质之一。

表 4 不同末次刈割时间苜蓿根颈在低温处理下的果糖含量

Table 4 Changes of fructose content in alfalfa root necks on different last cutting dates under low temperature treatments

末次刈割时间 Last mowing date	低温处理/°C Low temperature treatment					
	4(CK)	-10	-15	-20	-25	-30
未刈割 Uncut	59.17±3.00 abcD	74.05±1.80 abC	93.22±2.89 aA	70.84±3.14 aC	70.55±1.19 aC	83.12±3.10 aB
8月25日 August 25th	57.45±1.47 abcdD	69.02±0.93 bcC	92.69±6.37 aA	68.35±1.09 aC	65.82±1.67 abC	76.51±2.27 abB
9月5日 September 5th	55.76±2.68 bcdD	68.34±1.86 bcBC	89.13±4.01 abA	65.09±0.97 abC	54.89±1.04 cD	73.74±2.54 bB
9月15日 September 15th	64.52±3.83 aCD	63.98±1.24 cCD	81.02±0.76 cA	66.54±1.72 aBC	58.41±2.06 bcD	71.77±2.68 bB
9月25日 September 25th	51.41±5.26 dB	70.42±0.91 abcA	76.71±4.87 cA	57.49±4.36 bB	58.19±2.12 bcB	73.36±7.63 bA
10月5日 October 5th	52.98±2.62 cdD	74.42±2.50 abB	82.74±1.60 bcA	65.53±5.73 aC	60.75±0.46 bcC	76.77±3.27 abAB
10月15日 October 15th	60.59±4.62 abcD	72.17±1.59 abBC	81.26±4.37 cA	68.65±4.06 aC	61.53±0.72 bcD	77.56±1.69 abAB
10月25日 October 25th	51.03±3.32 dC	70.88±3.39 abcB	89.40±1.10 abA	65.18±2.06 abB	65.73±1.66 abB	82.96±3.38 aA
11月5日 November 5th	63.35±3.39 abD	77.87±0.98 aB	93.27±4.52 aA	72.81±1.96 aBC	70.22±1.19 aCD	79.40±1.39 abB

由表 4 还可知,在-15 和-20 °C下,9月25日末次刈割处理苜蓿根颈的果糖含量最低,其中在-15 °C下,9月25日末次刈割处理苜蓿根颈的果糖含量显著低于未刈割和8月25日、9月5日、10月

25日、11月5日末次刈割处理($P<0.05$);在-20 °C下,9月25日末次刈割处理苜蓿根颈的果糖含量均显著低于除9月5日和10月25日刈割处理外的其他处理($P<0.05$)。说明不同末次刈割时间处理

苜蓿根颈的果糖含量在低温冷冻胁迫下存在明显差异,9月25日末次刈割处理苜蓿根颈的果糖含量相对较低,未刈割和8月25日、11月5日末次刈割苜蓿根颈的果糖含量则相对较高。由此进一步说明,9月25日刈割苜蓿的抗寒性较弱,与其在低温冷冻胁迫下果糖含量较低有关;反之抗寒性较强的未刈割处理和8月25日、11月5日末次刈割处理与其在低温冷冻胁迫下果糖含量较高密切相关。

2.5 不同末次刈割时间苜蓿根颈在低温处理下的淀粉含量

由表 5 可知,随着处理温度的降低,苜蓿根颈的淀粉含量呈逐渐降低趋势,其中在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下淀粉含量达到最低,且与其他温度处理差异较大,说明在低温胁迫下,苜蓿根颈通过促进淀粉向糖的转化,从而保护细胞的稳定性。

表 5 不同末次刈割时间苜蓿根颈在低温处理下的淀粉含量

Table 5 Changes of starch content in alfalfa root necks on different last cutting dates

末次刈割时间 Last mowing date	under low temperature treatments						mg/g
	低温处理/ $^{\circ}\text{C}$ Low temperature treatment						
	4(CK)	-10	-15	-20	-25	-30	
未刈割 Uncut	89.25±3.34 aA	76.23±7.64 cB	51.24±3.85 dC	40.81±4.13 bCD	36.76±3.29 aD	12.19±1.85 aE	
8月25日 August 25th	89.28±4.25 aA	83.46±7.20 abcA	56.33±5.91 cdB	45.65±4.89 abBC	40.13±4.18 aC	15.19±2.07 aD	
9月5日 September 5th	100.07±4.22 aA	86.85±6.47 abcB	76.89±5.42 abB	45.21±0.95 abC	39.12±6.23 aC	18.87±2.29 aD	
9月15日 September 15th	94.12±2.43 aA	89.07±5.69 abAB	80.30±4.22 aB	49.24±1.76 abC	40.59±1.92 aC	19.01±1.77 aD	
9月25日 September 25th	94.80±5.95 aA	83.08±7.50 abcB	76.37±6.30 abB	55.93±3.28 aC	40.45±3.51 aD	17.19±1.79 aE	
10月5日 October 5th	90.84±5.02 aA	85.57±7.52 abcAB	77.47±4.36 abB	46.79±4.14 abC	37.75±5.76 aC	16.30±1.40 aD	
10月15日 October 15th	89.45±7.46 aA	93.57±4.62 aA	67.11±2.30 bcB	50.91±3.30 abC	38.40±4.24 aD	18.96±1.93 aE	
10月25日 October 25th	89.10±5.69 aA	83.57±10.01 abcAB	73.02±4.74 abB	50.39±5.78 abC	38.48±7.57 aD	17.03±0.85 aE	
11月5日 November 5th	90.59±2.50 aA	77.97±4.91 bcB	67.44±5.48 bcB	44.92±1.14 abC	40.36±3.64 aC	14.96±2.05 aD	

2.6 苜蓿根颈的半致死温度与其糖类物质含量的相关性

由表 6 可知,在不同低温冷冻胁迫下,紫花苜蓿根颈的半致死温度均与淀粉含量呈正相关,且在 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下呈极显著正相关;与可溶性糖、蔗糖和

由表 5 还可知,在 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下,未刈割处理苜蓿根颈的淀粉含量最低,其中在 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下,未刈割处理苜蓿根颈的淀粉含量显著低于其他处理(除8月25日刈割处理外)($P<0.05$), $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下,未刈割处理苜蓿根颈的淀粉含量显著低于9月25日刈割处理($P<0.05$)。表明不同末次刈割时间处理下苜蓿根颈的淀粉含量在低温冷冻胁迫下存在明显差异,9月25日刈割处理苜蓿根颈的淀粉转化相对较弱,未刈割、8月25日刈割处理苜蓿根颈的淀粉转化则相对较强。进一步说明,9月25日末次刈割苜蓿的抗寒性较弱,与其在低温冷冻胁迫下淀粉转化成可溶性糖的能力较弱有关,反之抗寒性较强的未刈割处理、8月25日刈割处理,与其低温冷冻胁迫下淀粉转化为可溶性糖的能力较强密切相关。

果糖含量呈负相关(除 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的蔗糖含量外);紫花苜蓿根颈的 LT_{50} 与 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的可溶性糖含量呈极显著负相关($P<0.01$);与 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的蔗糖含量呈显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)负相关,与 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的果糖含量呈极显著负相关($P<0.01$)。

表 6 苜蓿根颈的半致死温度与其糖类物质含量的相关性

Table 6 Correlation between semi-lethal temperature of alfalfa root necks and carbohydrate contents

糖含量 Sugar content	低温处理/ $^{\circ}\text{C}$ Low temperature treatment					
	4(CK)	-10	-15	-20	-25	-30
可溶性糖 Soluble sugar	-0.32	-0.89**	-0.58	-0.92**	-0.58	-0.87**
蔗糖 Sucrose	0.45	-0.19	-0.69*	-0.82**	-0.59	-0.63
果糖 Fructose	-0.52	-0.10	-0.78**	-0.73	-0.56	-0.39
淀粉 Starch	0.22	0.39	0.84**	0.77**	0.21	0.55

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 significant correlation ($P<0.05$) and ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

3 讨论与结论

3.1 末次刈割时间对苜蓿抗寒性的影响

在冬季寒冷的北方地区,末次刈割时间的选择对于苜蓿的抗寒性至关重要^[19],LT₅₀为苜蓿抗寒性的评价指标^[20]。本研究通过对不同末次刈割时间处理苜蓿根颈在不同低温胁迫下的相对电导率进行测定,协同 logistic 方程计算苜蓿 LT₅₀,发现末次刈割至9月25日刈割处理,苜蓿的抗寒性逐渐降低;9月25日末次刈割处理后苜蓿抗寒性有所增强,说明在初霜期(9月25日左右)来临之前对苜蓿进行末次刈割,苜蓿抗寒性较低,而在初霜期之后进行末次刈割,则对苜蓿越冬无显著影响。这可能是因为苜蓿刈割后,即开始利用根系根颈中贮藏的物质进行再生,此时根系营养物质为新生茎叶提供了大量的营养物质,导致根系营养物质减少;而早期(9月5日前)刈割后,苜蓿仍有很长的生长时间,新生的茎叶到了一定阶段就开始进行光合积累,营养物质又开始返还地下,所以早期刈割的苜蓿根系营养物质更丰富,有助于越冬;随着刈割时间的推迟,苜蓿地上部分生长时间越来越短,营养物质返还较少甚至还未来得及返还就已经进入休眠状态;因此10月25日末次刈割处理苜蓿的抗寒性有所下降。但11月5日刈割苜蓿的抗寒性反而增强,主要是由苜蓿的生理特性决定的,因为苜蓿到了寒冷时期,就会停止地上部分的生长而将养分转移至地下根系,用作越冬储备。

3.2 末次刈割时间对苜蓿糖类物质含量的影响

Haagenson 等^[21]研究表明,秋末刈割冬季苜蓿根颈的淀粉含量明显减少,但可溶性糖含量提高,同时抗寒性减弱。在逆境胁迫下,植物体内可溶性糖大量积累,一方面作为能量储存,另一方面作为植物体内的主要渗透调节物质,用于缓解逆境对植物造成的伤害^[8,22-23]。果糖、蔗糖和葡萄糖总称为可溶性糖,郝培彤等^[24]和孙明雪等^[25]的研究结果表明,可溶性糖中的蔗糖和果糖含量与苜蓿抗寒性有关。本研究结果表明,末次刈割时间处理苜蓿的半致死温度与其蔗糖、果糖等可溶性糖含量呈负相关,且在一定低温冷冻胁迫处理下达到极显著水平,进一步说明苜蓿根颈的蔗糖、果糖等可溶性糖含量是苜蓿安全越冬的关键所在。王伟东等^[8]研究了末次刈割时间对苜蓿抗寒性的影响,发现随着末次刈割时间的推迟,苜蓿根颈中淀粉含量呈下降趋势,苜蓿的越冬存活率也随之下降,因此,越冬前苜蓿根颈积累的

淀粉越多,其越冬存活率越高。表明淀粉虽然未直接发挥越冬苜蓿的抗寒保护作用,但淀粉是植物体内果糖和蔗糖等可溶性糖的来源。本研究中,不同末次刈割时间处理抗寒性强的苜蓿淀粉含量明显低于抗寒性弱的处理,表明在低温处理下淀粉转化为蔗糖、果糖等可溶性糖,从而提高了苜蓿根颈对低温冷冻伤害的抵御能力。

4 结 论

在不同低温冷冻胁迫处理下,不同末次刈割时间的苜蓿抗寒能力强弱依次为:未刈割>8月25日末次刈割>11月5日末次刈割>9月5日末次刈割>10月15日末次刈割>9月15日末次刈割>10月25日末次刈割>10月5日末次刈割>9月25日末次刈割。低温冷冻胁迫下,不同末次刈割时间对苜蓿根颈的可溶性糖、蔗糖、果糖、淀粉含量均有明显影响,在相同低温胁迫处理下,抗寒性强的末次刈割处理苜蓿根颈的蔗糖、果糖等可溶性糖含量明显提高,淀粉含量降低,因此,建议在科尔沁沙地应于9月5日之前或11月5日之后进行苜蓿末次刈割,以提高苜蓿的安全越冬率。

[参考文献]

- [1] 刘建宁,胡跃高,王运琦,等. 紫花苜蓿休眠类型与生长特性及生产性能的研究 [J]. 草业科学,2003,4(10):29-32.
Liu J N, Hu Y G, Wang Y Q, et al. Study on dormancy types, growth characteristics and production performance of alfalfa [J]. Pratacultural Science, 2003, 4(10): 29-32.
- [2] Coblenz W K, Ogden R K, Akins M S, et al. Nutritive value and fermentation characteristics of alfalfa-mixed grass forage wrapped with minimal stretch film layers and stored for different lengths of time [J]. Journal of Dairy Science, 2017, 100(7): 5293-5304.
- [3] 张彩枝,高明文. 阿鲁科尔沁旗牧草基地紫花苜蓿越冬情况调查与分析 [J]. 草原与草业, 2014, 26(1): 28-29.
Zhang C Z, Gao M W. A survey on over-winter rate of alfalfa crop in Aluhorqin Banner [J]. Grassland and Grass Industry, 2014, 26(1): 28-29.
- [4] 郭桐林,宋学钰. 紫花苜蓿冻害的温度条件分析及其防御 [J]. 中国农业气象, 1991, 12(2): 42-45.
Guo T L, Song X Y. Analysis of temperature conditions of alfalfa freezing injury and its defense [J]. Chinese Agricultural Meteorology, 1991, 12(2): 42-45.
- [5] 李向林,万里强. 紫花苜蓿秋眠性及其与抗寒性和产量的关系 [J]. 草业学报, 2004, 13(3): 57-61.
Li X L, Wan L Q. Alfalfa fall dormancy and its relationship to winter hardiness and yield [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2004, 13(3): 57-61.

- [6] 陈卫东,张玉霞,丛百明,等. 钾肥对紫花苜蓿根颈丙二醛、可溶性蛋白含量与抗氧化系统的影响 [J]. 草地学报, 2021, 29(4): 717-723.
Chen W D, Zhang Y X, Cong B M, et al. Effect of potassium fertilizer on MDA, SP content and antioxidant system of alfalfa root neck [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(4): 717-723.
- [7] 孙洪仁,王显国,王梅荣,等. 阿鲁科尔沁旗紫花苜蓿高产、优质、高效和安全越冬栽培技术 [J]. 中国奶牛, 2021(3): 58-62.
Sun H R, Wang X G, Wang M R, et al. Cultivation technology of alfalfa in Aluhorqin Banner [J]. *China Dairy Cattle*, 2021(3): 58-62.
- [8] 王伟东,邓波,王显国,等. 末次刈割时间对科尔沁沙地苜蓿越冬率及根系营养物质含量的影响 [J]. 草地学报, 2017, 25(4): 810-813.
Wang W D, Deng B, Wang X G, et al. Effect of the harvest time on over-winter rate and root nutrient content of alfalfa in Horqin Sandy Land [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2017, 25(4): 810-813.
- [9] 武瑞鑫,孙洪仁,孙雅源,等. 北京平原区紫花苜蓿最佳秋季刈割时期研究 [J]. 草业科学, 2009, 26(9): 113-118.
Wu R X, Sun H R, Sun Y Y, et al. Research on the optimum time of fall cutting of alfalfa in Beijing Plain [J]. *Pratacultural Science*, 2009, 26(9): 113-118.
- [10] Bertrand A, Castonguay Y. Oxygen deficiency affects carbohydrate reserves in overwintering forage crops [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2003(388): 1721-1730.
- [11] 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 [J]. 草业学报, 2020, 29(4): 73-80.
Zhang Y X, Wang X G, Tian Y L, et al. Effect of sowing time on cold resistance of different alfalfa varieties in Horqin Sandy Land [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(4): 73-80.
- [12] 朱爱民,张玉霞,王显国,等. 秋末刈割处理对沙地冬季根颈非结构碳氮的影响 [J]. 草业学报, 2018, 27(1): 86-96.
Zhu A M, Zhang Y X, Wang X G, et al. Effects of autumn cutting on the nonstructural carbon and nitrogen content in the root collar of alfalfa [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(1): 86-96.
- [13] 陈卫东,张玉霞,丛百明,等. 钾肥对紫花苜蓿抗寒性及糖类物质变化的影响 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(3): 67-74.
Chen W D, Zhang Y X, Cong B M, et al. Effect of potassium fertilizer on alfalfa's cold tolerance and carbohydrate changes [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2022, 50(3): 67-74.
- [14] 巩皓,杨柳,李丹丹,等. 寒地黑土农区紫花苜蓿生产与品质对施肥和刈割频次的响应及效益分析 [J]. 中国农业科学, 2020, 53(13): 2657-2667.
Gong H, Yang L, Li D D, et al. Responses of alfalfa production and quality to fertilization and cutting frequency and benefit analysis in mollisol agricultural area in cold regions [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(13): 2657-2667.
- [15] 朱爱民,张玉霞,王显国,等. 秋末刈割对沙地苜蓿冬季根颈抗
氧化酶活性及脯氨酸含量的影响 [J]. 草地学报, 2018, 26(1): 222-230.
Zhu A M, Zhang Y X, Wang X G, et al. Effects of cutting treatments in late autumn on antioxidant enzyme activity and proline content in crown of sandy land alfalfa in winter [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2018, 26(1): 222-230.
- [16] 邹琦. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 60-63, 110-114.
Zou Q. Experimental guidance of plant physiology [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 60-63, 110-114.
- [17] 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 [J]. 广西林业科学, 2009, 38(2): 75-78.
Liu J, Xiang D Y, Chen J B, et al. Low temperature LT₅₀ of three eucalyptus with electrical conductivity method and Logistic equation [J]. *Guangxi Forestry Science*, 2009, 38(2): 75-78.
- [18] 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 [J]. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(10): 69-71, 78.
Liu Y P, Zhu Y L, Kang X Y, et al. Cold resistance determination of different types of magnolia with synergistic electrical conductivity method and logistic equation [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2012, 32(10): 69-71, 78.
- [19] 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 [J]. 草地学报, 2020, 28(2): 446-453.
Zhu A M, Han G D, Zhang Y X, et al. Influence and analysis of different sowing time on overwintering rate of alfalfa [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2020, 28(2): 446-453.
- [20] 朱爱民,张玉霞,王显国,等. 8 个苜蓿品种抗寒性的比较 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(1): 45-52.
Zhu A M, Zhang Y X, Wang X G, et al. Comparison of cold resistance of 8 alfalfa varieties [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2019, 47(1): 45-52.
- [21] Haagensohn D M, Cunningham S M, Volenec J J. Root physiology of less fall dormant, winter hardy alfalfa selections [J]. *Crop Science*, 2003, 43(4): 1441-1447.
- [22] 王鑫,刘丹,陈婧婷,等. 外源 BR 对盐碱胁迫下甜菜内源激素含量及保护酶活性的影响 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(7): 20-30, 41.
Wang X, Liu D, Chen J T, et al. Effects of exogenous BR on endogenous hormone and protective enzyme activities in sugar beet under saline-alkali stress [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2021, 49(7): 20-30, 41.
- [23] 茹刚,陈学林,于文惠,等. 外源 NO 对低温胁迫下伏毛铁棒锤种子萌发及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), 2021, 49(2): 137-144, 154.
Ru G, Chen X L, Yu W H, et al. Effects of exogenous NO on seed germination and seedling physiological characteristics of *Aconiyum flavum* Hand. -Mazz under low temperature stress [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2021, 49(2): 137-144, 154.

- [20] 方强恩,张 勃,师尚礼,等. 紫花苜蓿根颈芽发育成枝过程中叶元的发生模式研究 [J]. 草业学报,2015,24(12):146-154.
Fang Q E,Zhang B,Shi S L,et al. Development of phytomers produced by root crown shoots in *Medicago sativa* [J]. Acta Prataculturae Sinica,2015,24(12):146-154.
- [21] 刘香萍,崔国文,李国良,等. 紫花苜蓿主根内非结构性碳水化合物累积及其与抗寒性的关系 [J]. 中国草地学报,2010,32(2):113-115,120.
Liu X P,Cui G W,Li G L,et al. Relationships between non-structure carbohydrates accumulation in taproot of alfalfa and cold hardiness [J]. Chinese of Journal of Grassland,2010,32(2):113-115,120.
- [22] 孙予璐,李建东,孙 备,等. 不同品种紫花苜蓿主要抗寒生理指标对低温的响应 [J]. 沈阳农业大学学报,2017,48(5):591-596.
Sun Y L,Li J D,Sun B,et al. Responses of cold resistance physiological indices of different alfalfa varieties to cold stress [J]. Journal of Shenyang Agricultural University,2017,48(5):591-596.
- [23] 陈卫东,张玉霞,丛百明,等. 低温胁迫对不同苜蓿品种生理特性的影响 [J]. 中国草地学报,2021,43(7):115-120.
Chen W D,Zhang Y X,Cong B M,et al. Effects of cold stress on different alfalfa varieties' physiological characteristics [J]. Chinese of Journal of Grassland,2021,43(7):115-120.
- [24] 陶 雅,孙启忠,玉 柱. 游离氨基酸在苜蓿抗寒生理中的作用 [C]//中国畜牧业协会. 第三届中国苜蓿发展大会论文集. 北京:中国学术期刊电子出版社,2010:203-207.
Tao Y,Sun Q Z,Yu Z. Effect of free amino acid on cold resistance of alfalfa [C]//China Animal Husbandry Association. Proceedings of the 3rd China Alfalfa Development Conference. Beijing: China Academic Journal Electronic Publishing House,2010:203-207.
- [25] Krasnuk M,Jung G A,Witham F H. Electrophoretic studies of the relationship of peroxidases,polyphenol oxidase,and indoleacetic acid oxidase to cold tolerance of alfalfa [J]. Cryobiology,1975,12(1):62-80.
- [26] 申晓慧,姜 成,冯 鹏,等. 6 种紫花苜蓿越冬前后几个抗寒生理指标变化研究 [J]. 农学学报,2015,5(12):94-98.
Shen X H,Jiang C,Feng P,et al. Changing of several cold resistance physiological indexes of 6 kinds of alfalfa before and after overwintering [J]. Journal of Agricultural,2015,5(12):94-98.

(上接第 8 页)

- [24] 郝培彤,宁亚明,高 秋,等. 科尔沁沙地不同苜蓿品种越冬期根颈耐寒生理机制的研究 [J]. 草业学报,2019,28(9):87-95.
Hao P T,Ning Y M,Gao Q,et al. Study on physiological mechanism of root neck cold tolerance of different alfalfa varieties during overwintering in Horqin sandy land [J]. Acta Prataculturae Sinica,2019,28(9):87-95.
- [25] 孙明雪,张玉霞,丛百明,等. 不同苜蓿的抗寒性差异及其与糖类物质含量的相关性研究 [J]. 草地学报,2021,29(2):303-308.
Sun M X,Zhang Y X,Cong B M,et al. Study on the difference of cold resistance of different alfalfa and its correlation with sugar content [J]. Acta Agrestia Sinica,2021,29(2):303-308.