

钾肥种类及用量对低温胁迫下苜蓿根颈糖类物质含量及抗寒性的影响

孙明雪¹, 张玉霞¹, 夏全超¹, 王显国², 张庆昕¹, 刘庭玉¹, 张永亮¹

(1. 内蒙古民族大学农学院, 内蒙古自治区饲用作物工程技术研究中心, 内蒙古 通辽 028041;

2. 中国农业大学草业科学与技术学院, 北京 028000)

摘要:为探讨钾肥种类及用量对苜蓿越冬器官抗寒性的影响及根颈糖类保护物质代谢的生理机制,本研究对‘北极熊’紫花苜蓿(*M. sativa* ‘Gibraltar’)施用 KCl、K₂SO₄和 KH₂PO₄ 3种钾肥,设置 100、200、300 kg·hm⁻²K₂O(分别用 K₁、K₂和 K₃表示)3个施用量,以不施钾肥为对照(CK),于封冻前期挖取苜蓿越冬器官模拟低温冷冻胁迫处理(4℃、-10℃、-20℃和 -30℃),测定根颈活力、可溶性糖、蔗糖、果糖和淀粉含量。结果表明,随着低温冷冻胁迫温度的降低,KCl、K₂SO₄和 KH₂PO₄处理的首蓿根颈活力和淀粉含量表现为持续降低的变化趋势,在-30℃下达到最小值,且与4℃处理呈显著差异($P<0.05$),分别较4℃处理降低了86.25%~91.59%和45.47%~66.07%;可溶性糖、蔗糖和果糖含量则表现为先升高后降低的变化趋势,且均在-20℃下达到最大值,分别达到431.00~513.93 mg·g⁻¹、235.23~329.05 mg·g⁻¹和185.75~243.79 μg·g⁻¹。随着钾肥施用量的增加,KCl、K₂SO₄和 KH₂PO₄处理的首蓿根颈活力、可溶性糖、蔗糖、果糖和淀粉含量均表现为先升高后降低的趋势;且在不同低温胁迫处理下以 K₂SO₄处理效果最明显,并且在施用量为200 kg·hm⁻²K₂O时,苜蓿根颈活力、可溶性糖、蔗糖、果糖和淀粉含量均与CK差异显著($P<0.05$),分别较CK增长了56.03%~197.26%、16.38%~48.77%、24.13%~46.22%、30.53%~59.95%和35.73%~67.87%。因此,科尔沁沙地建植苜蓿宜施用 K₂SO₄种类钾肥,建议施用量为200 kg·hm⁻²K₂O,更有利于提高苜蓿越冬器官的抗寒性。

关键词:苜蓿;根颈;钾肥种类;糖类物质;抗寒性

中图分类号:S551⁺.7;S365;Q945.78 **文献标志码:**A

Effects of potash fertilizer types and rates on alfalfa root crown saccharides content and cold resistance under low temperature stress

SUN Mingxue¹, ZHANG Yuxia¹, XIA Quanchao¹, WANG Xianguo²,

ZHANG Qingxin¹, LIU Tingyu¹, ZHANG Yongliang¹

(1. College of Agriculture, Inner Mongolia Minzu University, Inner Mongolia Autonomous Region Feedstuff Engineering Technology Research Center, Tongliao, Inner Mongolia 028041, China;

2. College of Grassland Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 028000, China)

Abstract: This study applied 3 types of KCl, K₂SO₄ and KH₂PO₄ potash fertilizers to alfalfa (*M. sativa* ‘Gibraltar’) to explore the effects of potash fertilizer types and dosages on cold resistance of alfalfa overwintering organs and the physiological mechanism of carbohydrate protection. Three application rates including 100 kg·hm⁻²K₂O, 200 kg·hm⁻²K₂O and 300 kg·hm⁻²K₂O (indicated by K₁, K₂ and K₃, respectively), and the control (CK) group without potash fertilizer were used. The overwintering organs of alfalfa were excavated in the pre-freezing period to simulate low temperature freezing stress (4℃, -10℃, -20℃ and -30℃), and the root crown vitality, soluble sugar, sucrose, fructose and starch content were measured. With the decrease of low temperature and freezing stress, the root crown vitality and starch content of alfalfa treated with KCl, K₂SO₄ and KH₂PO₄ showed a

continuous decreasing trend, with minimum value reaching at -30°C . The root crown activity and starch content of alfalfa treated at 4°C were significantly different, which were 86.25%~91.59% and 45.47%~66.07% lower than those treated at 4°C , respectively. The content of soluble sugar, sucrose and fructose showed a trend of first increasing and then decreasing, and all reached the maximum at -20°C , and they were $431.00\sim 513.93\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, $235.23\sim 329.05\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ and $185.75\sim 243.79\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, respectively. With the increase of the amount of potash fertilizer, the root crown vitality, soluble sugar, sucrose, fructose, and starch content of alfalfa treated with 3 potash fertilizers of KCl , K_2SO_4 , and KH_2PO_4 showed a trend of first increasing and then decreasing, and under different low temperature stress treatments, the effect of K_2SO_4 treatment on alfalfa root crown vitality, soluble sugar, sucrose, fructose, and starch content was the most obvious. When the application rate was $200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\text{K}_2\text{O}$, the alfalfa root crown vitality, soluble sugar, sucrose, fructose, and starch content were significantly different from CK ($P<0.05$), and compared with CK, it increased by 56.03%~197.26%, 16.38%~48.77%, 24.13%~46.22%, 30.53%~59.95% and 35.73%~67.87%, respectively. It indicated that the application of K_2SO_4 with a dosage of $200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\text{K}_2\text{O}$ was more conducive to regulating the osmotic potential of alfalfa root crown cells, lowering the freezing point of cytoplasm, protecting biofilm, and improving the cold resistance of alfalfa overwintering organs.

Keywords: alfalfa; root crown; types of potash fertilizer; saccharides; cold resistance

近年来,在国家深化体制改革、政策落实和项目实施的引领下,以阿鲁科尔沁旗为核心的科尔沁苜蓿 (*Medicago sativa* L.) 种植区已成为“机械化作业、标准化生产、规模化发展、市场化经营、社会化服务”的新兴现代化草业生产区,截止至2019年,优质牧草种植面积已达到 $4.933\text{ 万 hm}^{2[1-2]}$ 。但是科尔沁沙地受温带大陆性季风气候的影响,冬季寒冷风大,且冬末春初时期常出现倒春寒等现象,以至于苜蓿越冬器官受到低温胁迫的伤害、细胞受损,不能安全越冬^[3]。2012—2020年间,阿鲁科尔沁旗优质苜蓿生产基地就出现过多次返青率低的现象^[4],因此极端低温已成为限制科尔沁沙地苜蓿高产的主要因素。苜蓿根颈是苜蓿吸收、运输、储存养分和水分的重要器官,也是形成芽和分枝的重要部位,同时还是联接苜蓿地上部和根系的关键部位^[5];苜蓿根颈是冬季苜蓿植物体最上部的休眠器官,是对冻害最敏感的部位,与苜蓿的抗寒性、再生性等均有密切关系,因此在苜蓿越冬和春季返青时的发枝萌芽过程中发挥着极其重要的作用^[6]。

国内外学者对苜蓿抗寒性研究较多^[7-9],其中糖类物质与苜蓿抗寒性相关性研究表明,除可溶性糖是抗寒保护物质外,果糖、蔗糖也可以作为苜蓿衡量抗寒性强弱的敏感指标,同样是苜蓿越冬抗寒保护物质。Bertrand等^[10]对低温驯化后苜蓿根颈可溶性糖、淀粉、蔗糖等碳水化合物含量的研究表明,与未经低温驯化相比,经低温驯化后根颈可溶性糖含量显著提高,其中蔗糖、棉子糖等越冬保护性糖显著增加,而在低温驯化期间,淀粉含量减少,是由于淀粉转化成为越冬保护性糖,淀粉含量越低,则

苜蓿越冬率越高。张玉霞、朱爱民等^[11-12]研究也表明,可溶性糖与淀粉在苜蓿根颈中互相转化,对苜蓿越冬和翌年春季返青具有重要作用。

近年来,随着农业生产水平的提高和长期对钾肥施用的忽视,导致土壤养分长期失衡,钾素亏缺逐年严重^[13],为此合理施钾肥变得尤为重要。而目前市场上常见的钾肥种类主要有 KCl 、 K_2SO_4 和 KH_2PO_4 ^[14]。 KCl 是农业生产中常用的速效肥料,但是 KCl 肥料的含氯量偏高,易造成植物烧苗的影响; KH_2PO_4 属于磷肥和钾肥的复合肥料, K_2SO_4 属于硫肥和钾肥的复合肥料。这其中的钾、硫和磷元素皆是能对植物生命活动起到调节作用的重要元素^[15-17];在前人对3种钾肥(KCl 、 K_2SO_4 和 KH_2PO_4)的研究中,李倩等^[18]的研究结果表明,不同类型钾肥处理的花生产量较对照均有增加,以 K_2SO_4 处理的产量最高,其次为 KCl 处理, KH_2PO_4 处理最低;魏树伟等^[19]的研究结果表明, K_2SO_4 处理的果实果糖、葡萄糖、蔗糖含量均为最高,分别比 KCl 处理提高了 15.96%、27.32%、52.81%;陈卫东等^[20]的研究表明,在冷冻处理条件下,施用 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\text{K}_2\text{SO}_4(\text{K}_2\text{O})$ 处理苜蓿的根颈活力、可溶性糖、蔗糖、果糖含量均高于施用 KCl 处理。前人的研究多集中在单一类型钾肥对果实、蔬菜类作物的糖类物质含量影响方面,针对不同种类钾肥和用量对苜蓿根颈部位糖类物质含量的影响研究尚显不足。为此,本研究选择 KCl 、 K_2SO_4 和 KH_2PO_4 3种钾肥对苜蓿进行施肥处理,越冬前期挖取苜蓿越冬器官,模拟低温胁迫处理,测定4个钾肥施用水平下苜蓿根颈活力及糖类物质(果糖、蔗糖、可溶性糖、淀

粉)含量的变化,探究其变化的规律及糖类物质对低温胁迫的响应机制,探究增强苜蓿抗寒性的最适钾肥种类及用量,以期为科尔沁沙地苜蓿抗寒高产栽培中钾肥的高效利用提供依据。

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基地(43°61' N, 121°30' E),该地区属于温带大陆性半干旱气候,四季分明,降水主要集中在夏季,冬季干旱少雪,≥10℃年积温为 3 000~3 200℃,年平均气温 5.6℃,无霜期 138~153 d,年平均降水量约 375 mm,年平均风速 3.0~4.4 m·s⁻¹,土壤有机质含量为 6.41 g·kg⁻¹,速效磷含量 3.62 mg·kg⁻¹,速效钾含量 77.85 mg·kg⁻¹,碱解氮含量 35.84 mg·kg⁻¹,全氮含量 40.03 g·kg⁻¹。

1.2 试验设计

供试材料为‘北极熊’紫花苜蓿品种(*M. sativa* ‘Gibraltar’),由北京百斯特有限公司提供。该品种的秋眠级为 2.0 级,幼苗强壮、根系发达,是抗寒性能非常突出的苜蓿品种。钾肥为 KCl(K₂O ≥ 60%)、K₂SO₄(K₂O ≥ 52%)和 KH₂PO₄(K₂O ≥ 34%),分别来源于中化化肥有限公司、国投新疆罗布泊钾盐有限责任公司和四川省绵竹市汉旺无机盐化工有限公司;试验地土壤类型为沙壤土,该土壤类型保水保肥能力较差,透气性好,土壤持水量小,土温变幅较大,易耕作。播种前一次性施入过磷酸钙(P₂O₅含量为 44%) 200 kg·hm⁻²作为基肥。于 2020 年 7 月 1 日播种,播种量为 22.5 kg·hm⁻²,行距为 20 cm,播种深度 1.5~2 cm。钾肥采用随机区组设计,3 种钾肥用量均分别设 100、200、300 kg·hm⁻² K₂O(分别用 K₁、K₂和 K₃表示)施肥量处理,并设置不施钾肥作为对照(CK),每个处理设置 3 次重复,共 30 个小区,小区面积为 3 m×5 m=15 m²,钾肥均作为种肥于播种时一次性施入,施肥方式为沟施。试验田灌水使用指针式喷灌,期间进行正常的田间管理。

于封冻前期(2020 年 11 月 15 日)挖取长势一致的苜蓿越冬器官,带回室内进行低温胁迫处理。参照朱爱民等^[21]的低温处理方法,每个小区取 60 株长势均匀一致的苜蓿根颈,用蒸馏水洗净擦干后平均分成 4 份,其中 1 份放入 4℃冰箱中储存(低温冷藏),将另外 3 份苜蓿根系整齐排放在 20 cm×30 cm 的脱脂纯棉布上包裹好,用适量蒸馏水将卷好的脱脂纯棉布均匀喷洒,使棉布保持湿润,最后用 30 cm×30 cm 的锡箔纸包裹好,放入可程式恒温恒湿试

验箱(TCJS-100L)分别进行-10℃、-20℃、-30℃低温处理(低温冷冻)。可程式恒温恒湿试验箱设置为:以 4℃为起点,先以 4℃·h⁻¹的速率降温,达到目标温度后保持 6 h,然后以 4℃·h⁻¹的速度升温至 4℃,取出后在 4℃下放置 12 h,与冷藏处理材料一同取苜蓿根颈及以下 1 cm 长度,切为薄片后测定根颈活力、蔗糖、果糖、可溶性糖和淀粉含量。

1.3 测定指标及方法

根颈活力采用 TTC(氯化三苯基四氮唑)法测定^[22],可溶性糖和淀粉含量采用蒽酮比色法测定^[22];蔗糖和果糖含量采用二硝基水杨酸法和间苯二酚法测定^[23]。

1.4 统计分析方法

试验数据用 Microsoft Excel 软件处理、制作表格,用 DPS 7.0 软件进行方差显著性分析及相关性分析,采用二因素试验统计分析 Duncan 新复极差法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 钾肥种类及用量对苜蓿根颈 K 含量的影响

如表 1 所示,KCl、K₂SO₄和 KH₂PO₄处理的苜蓿根颈 K 含量在不同施肥量处理下均显著高于 CK,说明施用钾肥能增加苜蓿根颈部位的钾素含量;KCl 处理的苜蓿根颈 K 含量在不同施用量处理下均高于 K₂SO₄和 KH₂PO₄处理,其中与 KH₂PO₄处理的苜蓿根颈的 K 含量达到显著性差异,在 K₁、K₂和 K₃处理下分别增长了 28.07%、32.86%和 36.99%,且在 K₃处理下较 K₂SO₄处理的苜蓿根颈 K 含量显著增长了 58.73%。以上说明 KCl 最有利于提高苜蓿根颈中的 K 含量。

表 1 不同处理下苜蓿根颈的 K 含量/%

Table 1 K content in alfalfa root crown under different treatments

施肥量 Fertilizer amount	钾肥种类 Potash type		
	KCl	K ₂ SO ₄	KH ₂ PO ₄
CK	0.47±0.05c/a	0.47±0.05c/a	0.47±0.05c/a
K ₁	0.73±0.05b/a	0.70±0.08b/a	0.57±0.05b/b
K ₂	0.93±0.05a/a	0.90±0.00a/a	0.70±0.00a/b
K ₃	1.00±0.00a/a	0.63±0.05b/c	0.73±0.05a/b

注:/前小写字母表示在相同种类钾肥处理下不同钾肥施用量处理间的差异显著性(P<0.05);/后小写字母表示在相同钾肥施用量处理下不同种类钾肥处理间的差异显著性(P<0.05)。下同。

Note: The lowercase letter in front of / indicates the significant difference between different potash fertilizer rates under the same potash fertilizer types (P<0.05); the lowercase letter in the back indicates the significant difference between different potash fertilizer types under the same potash fertilizer rate (P<0.05). The same below.

2.2 钾肥种类及用量对低温胁迫下苜蓿根颈活力的影响

如表2所示,4℃、-10℃和-30℃低温胁迫处理下,KCl处理的苜蓿根颈活力在K₁和K₂处理下均高于CK,其中4℃和-10℃下的K₁处理,-30℃下的K₂处理的根颈活力与CK有显著性差异($P<0.05$),分别较CK增长了15.01%、34.84%和30.00%;-20℃低温胁迫处理下,KCl处理的苜蓿根颈活力在K₁、K₂和K₃处理下均显著高于CK($P<0.05$),其中在K₁处理下达到最大值,较CK增长了154.05%。4℃、-10℃、-20℃和-30℃低温胁迫处理下,K₂SO₄处理的苜蓿根颈活力在不同钾肥施用量处理下均显著高于CK(-30℃的K₁处理除外, $P<0.05$),且在4℃、-10℃和-30℃下的K₂处理,-20℃下的K₁处理下与CK差异最大($P<0.05$),分别较CK增长了56.03%、68.78%、100.00%和202.74%。4℃、-10℃、-20℃和-30℃低温胁迫处理下,KH₂PO₄处理的苜蓿根颈活力在不同钾肥施用量处理下均高于CK(-30℃的K₁处理除外),且均在K₂处理下与CK差异最显著($P<0.05$),在4℃、-10℃、-20℃和-30℃下分别较CK增长了30.29%、51.58%、182.19%和57.50%。3种钾肥处理下,K₂SO₄处理的苜蓿根颈活力在4℃、-10℃、-20℃和-30℃处理下均数值最高(-30℃的K₁处理除外)。以上说明K₂SO₄处理下增强苜蓿根颈活力的效果最明显,且以K₂处理的200 kg·hm⁻² K₂O施用量为宜。

2.3 钾肥种类及用量对低温胁迫下苜蓿根颈可溶性糖含量的影响

如表3所示,-30℃低温胁迫处理下,KCl处理的苜蓿根颈可溶性糖含量在K₂处理下与CK达到显著性差异($P<0.05$),较CK增长了14.50%;-10℃和-20℃低温胁迫处理下,KCl处理的苜蓿根颈可溶性糖含量在不同钾肥施用量处理下均高于CK,且在K₁处理下与CK达到显著性差异($P<0.05$),在-10℃和-20℃分别较CK增长了36.53%和22.89%。4℃、-10℃、-20℃和-30℃低温胁迫处理下,K₂SO₄处理的苜蓿根颈可溶性糖含量在不同钾肥施用量处理下均显著高于CK(4℃和-30℃的K₁处理除外, $P<0.05$),且均在K₂处理下达到最大值,在4℃、-10℃、-20℃和-30℃下分别较CK增长了16.38%、48.77%、22.89%和30.30%。-10℃和-20℃低温胁迫处理下,KH₂PO₄处理苜蓿根颈可溶性糖含量在不同钾肥施用量处理下均显著高于CK($P<0.05$),且均在K₂处理下达到最大值,在-10℃和-20℃下分别较CK增长了30.78%和11.56%。不同钾肥处理中,K₂SO₄处理的苜蓿根颈可溶性糖含量在4℃、

-10℃、-20℃和-30℃处理下均达到最大值(-30℃的K₁处理除外),且与KCl和KH₂PO₄的K₂和K₃处理下的数值达到显著性差异(-10℃的K₃处理除外, $P<0.05$)。说明K₂SO₄种类钾肥处理较KCl和KH₂PO₄更有利于提高可溶性糖含量,以维持细胞渗透势的平衡,且以200 kg·hm⁻² K₂O施用量下积累可溶性糖的效果更明显。

2.4 钾肥种类及用量对低温胁迫下苜蓿根颈蔗糖含量的影响

如表4所示,4℃、-20℃和-30℃低温胁迫处理下,KCl处理的苜蓿根颈蔗糖含量在不同钾肥施用

表2 钾肥种类和用量对低温胁迫处理下苜蓿根颈活力的影响/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)

处理温度/℃ Processing temperature	施肥量 Fertilizer amount	钾肥种类 Potash type		
		KCl	K ₂ SO ₄	KH ₂ PO ₄
4	CK	3.73±0.34b/a	3.73±0.34c/a	3.73±0.34b/a
	K ₁	4.29±0.39a/b	4.93±0.24b/a	4.64±0.20a/ab
	K ₂	3.82±0.14ab/c	5.82±0.43a/a	4.86±0.42a/b
	K ₃	3.43±0.37b/c	5.07±0.31b/a	4.39±0.37a/b
-10	CK	2.21±0.24b/a	2.21±0.24c/a	2.21±0.24b/a
	K ₁	2.98±0.24a/a	3.01±0.30b/a	2.73±0.38b/a
	K ₂	2.29±0.34b/b	3.73±0.35a/a	3.35±0.36a/a
	K ₃	2.00±0.31b/b	3.70±0.26a/a	2.48±0.28b/b
-20	CK	0.73±0.14c/a	0.73±0.14b/a	0.73±0.14b/a
	K ₁	1.84±0.34a/ab	2.21±0.29a/a	1.71±0.22a/b
	K ₂	1.43±0.27ab/b	2.17±0.17a/a	2.06±0.34a/a
	K ₃	1.31±0.29b/b	2.11±0.23a/a	2.04±0.26a/a
-30	CK	0.40±0.01b/c/a	0.40±0.01c/a	0.40±0.01b/a
	K ₁	0.47±0.04ab/a	0.46±0.10c/a	0.39±0.06b/a
	K ₂	0.52±0.03a/c	0.80±0.07a/a	0.63±0.09a/b
	K ₃	0.34±0.03c/b	0.56±0.04b/a	0.49±0.06b/a

表3 钾肥种类和用量对低温胁迫处理下苜蓿根颈可溶性糖含量的影响/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)

处理温度/℃ Processing temperature	施肥量 Fertilizer amount	钾肥种类 Potash type		
		KCl	K ₂ SO ₄	KH ₂ PO ₄
4	CK	149.83±8.26a/a	149.83±8.26c/a	149.83±8.26ab/a
	K ₁	150.30±6.07a/a	155.43±4.56bc/a	153.93±6.14a/a
	K ₂	154.87±6.64a/b	174.37±6.66a/a	147.07±3.95ab/b
	K ₃	131.77±6.72b/b	164.50±8.87b/a	139.90±6.50b/b
-10	CK	136.70±6.32c/a	136.70±6.32l/a	136.70±6.32c/a
	K ₁	186.63±4.89a/a	192.47±3.28b/a	156.97±6.74b/b
	K ₂	172.77±6.29b/b	203.37±7.89a/a	178.77±4.35a/b
	K ₃	169.63±6.19b/ab	174.23±6.11c/a	162.07±5.20b/b
-20	CK	418.20±8.57b/a	418.20±8.57c/a	418.20±8.57b/a
	K ₁	458.40±3.28a/a	466.10±8.40b/a	458.77±17.23a/a
	K ₂	436.43±13.55b/c	513.93±6.18a/a	466.53±14.52a/b
	K ₃	431.00±7.05b/c	498.73±11.12a/a	453.53±15.43a/b
-30	CK	136.53±5.36b/a	136.53±5.36c/a	136.53±5.36c/a
	K ₁	150.67±7.94a/a	150.63±4.02b/a	146.67±5.71b/a
	K ₂	156.33±10.93a/b	177.90±9.97a/a	159.20±7.80a/b
	K ₃	127.27±9.61b/b	141.30±3.81c/a	129.17±6.51c/b

量处理下均高于 CK, 且均在 K_1 处理下达到最大值, 在 4°C 、 -20°C 和 -30°C 下分别较 CK 显著增长了 40.48%、10.62% 和 30.87% ($P < 0.05$)。 4°C 、 -10°C 、 -20°C 和 -30°C 低温胁迫处理下, $K_2\text{SO}_4$ 处理的苜蓿根颈蔗糖含量在不同钾肥施用量处理下均显著高于 CK (-10°C 的 K_1 处理除外, $P < 0.05$), 且均在 K_2 处理下达到最大值, 在 4°C 、 -10°C 、 -20°C 和 -30°C 处理下分别较 CK 增长了 24.13%、29.77%、46.22% 和 43.03%。 4°C 、 -10°C 、 -20°C 和 -30°C 低温胁迫处理下, KH_2PO_4 处理的苜蓿根颈蔗糖含量在不同钾肥施用量处理下均高于 CK, 且均在 K_2 处理下达到最大值; 其中 -10°C 、 -20°C 和 -30°C 的 K_2 处理下的苜蓿根颈蔗糖含量与 CK 达到显著性差异 ($P < 0.05$), 分别较 CK 增长了 20.25%、23.26% 和 39.85%。 3 种钾肥处理下, $K_2\text{SO}_4$ 处理的苜蓿根颈蔗糖含量在 -10°C 、 -20°C 和 -30°C 处理下均数值最高 (-10°C 和 -30°C 的 K_1 处理除外, $P < 0.05$), 且均高于 KCl 和 KH_2PO_4 处理的蔗糖含量, 其中与 KCl 处理下的数值达到显著性差异。 以上说明 $K_2\text{SO}_4$ 钾肥种类处理最有利于提高苜蓿根颈中的蔗糖含量, 当施用量为 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \text{K}_2\text{O}$ 时苜蓿根颈中的蔗糖积累效果最明显。

2.5 钾肥种类及用量对低温胁迫下苜蓿根颈果糖含量的影响

如表 5 所示, KCl 处理的苜蓿根颈果糖含量在 4°C 、 -20°C 和 -30°C 的 K_1 处理下显著高于 CK ($P < 0.05$), 分别较 CK 增长了 17.22%、20.63% 和 26.84%;

表 4 钾肥种类和用量对低温胁迫处理下苜蓿根颈蔗糖含量的影响/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)

Table 4 Effects of potash fertilizer types and rates on sucrose content in alfalfa root crowns under low temperature stress

处理温度/ $^\circ\text{C}$ Processing temperature	施肥量 Fertilizer amount	钾肥种类 Potash type		
		KCl	K_2SO_4	KH_2PO_4
4	CK	87.07±1.57c/a	87.07±1.57b/a	87.07±1.57a/a
	K_1	122.32±7.75a/a	101.07±4.16a/b	78.77±3.84b/c
	K_2	110.67±5.55b/a	108.08±6.71a/a	89.42±6.09a/b
	K_3	108.56±5.45b/a	103.81±6.34a/a	87.31±4.24a/b
-10	CK	134.68±7.18b/a	134.68±7.18c/a	134.68±7.18c/a
	K_1	136.18±10.62ab/b	137.92±6.86c/b	150.19±1.87b/a
	K_2	147.21±3.06a/c	174.78±9.36a/a	161.95±11.15a/b
	K_3	122.79±11.46c/b	152.05±8.9b/a	144.31±11.19bc/a
-20	CK	225.03±5.16b/a	225.03±5.16c/a	225.03±5.16b/a
	K_1	248.93±8.49a/b	279.34±9.24b/a	273.33±13.42a/a
	K_2	246.72±7.65a/c	329.05±12.84a/a	277.37±6.87a/b
	K_3	235.23±5.93ab/c	293.36±16.25b/a	268.53±10.04a/b
-30	CK	121.47±2.53c/a	121.47±2.53d/a	121.47±2.53c/a
	K_1	158.97±8.34a/a	135.53±4.15c/b	128.11±7.31bc/b
	K_2	144.47±4.82b/b	173.74±5.53a/a	169.87±8.89a/a
	K_3	127.21±7.04c/c	162.62±6.56b/a	138.38±8.55b/b

在 -10°C 低温胁迫处理下, KCl 处理的苜蓿根颈果糖含量在不同钾肥施用量下均显著高于 CK ($P < 0.05$), 且在 K_2 施用量处理下达到最大值。 4°C 、 -10°C 、 -20°C 和 -30°C 低温胁迫处理下, K_2SO_4 处理的苜蓿根颈果糖含量在不同钾肥施用量处理下均显著高于 CK ($P < 0.05$), 其中 4°C 和 -20°C 的 K_2 处理下苜蓿根颈果糖含量最高, 分别较 CK 增长了 59.95% 和 47.35%。 4°C 、 -10°C 、 -20°C 、 -30°C 低温胁迫处理下, KH_2PO_4 处理的苜蓿根颈果糖含量在不同钾肥施用量处理下均显著高于 CK (4°C 和 -30°C 的 K_3 处理除外, $P < 0.05$), 且均在 K_2 处理下达到最大值, 在 4°C 、 -10°C 、 -20°C 和 -30°C 下分别较 CK 增长了 44.28%、34.21%、34.51% 和 32.87%。 3 种钾肥处理下, K_2SO_4 处理的苜蓿根颈果糖含量在 4°C 、 -20°C 和 -30°C 处理下均高于 KCl 和 KH_2PO_4 处理 (-20°C 的 K_1 处理除外), 且与 KCl 处理的果糖含量达到显著性差异 ($P < 0.05$)。 以上说明在供试 3 种钾肥中, K_2SO_4 处理最有利于果糖含量的增长, 且以 K_2 处理的 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \text{K}_2\text{O}$ 为宜。

2.6 钾肥种类及用量对低温胁迫下苜蓿根颈淀粉含量的影响

如表 6 所示, KCl 处理的苜蓿根颈淀粉含量在 4°C 、 -20°C 和 -30°C 的 K_1 处理下显著高于 CK ($P < 0.05$), 分别较 CK 增长了 42.88%、17.40% 和 25.41%; 在 -10°C 低温胁迫处理下, KCl 处理的苜蓿根颈淀粉含量在不同钾肥施用量处理下均显著高于 CK ($P < 0.05$), 且在 K_2 施用量处理下达到最大值,

表 5 钾肥种类和用量对低温胁迫处理下苜蓿根颈果糖含量的影响/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)

Table 5 Effects of potash fertilizer types and rates on fructose content in alfalfa root crowns under low temperature stress

处理温度/ $^\circ\text{C}$ Processing temperature	施肥量 Fertilizer amount	钾肥种类 Potash type		
		KCl	K_2SO_4	KH_2PO_4
4	CK	84.03±7.95b/a	84.03±7.95c/a	84.03±7.95b/a
	K_1	98.50±9.34a/b	126.24±5.82a/a	110.80±8.27a/b
	K_2	83.19±7.35b/c	134.41±12.19a/a	121.24±6.63a/b
	K_3	61.75±8.02c/c	106.64±3.90b/a	88.90±4.93b/b
-10	CK	108.07±7.58c/a	108.07±7.58c/a	108.07±7.58c/a
	K_1	127.56±10.80b/b	131.32±2.60b/b	144.64±8.53a/a
	K_2	144.46±4.85a/a	141.06±9.70ab/a	145.04±7.42a/a
	K_3	123.41±9.60b/b	144.64±8.43a/a	126.30±9.79b/b
-20	CK	165.45±7.46b/a	165.45±7.46c/a	165.45±7.46c/a
	K_1	199.59±13.04a/b	187.42±8.9b/b	218.59±12.39a/a
	K_2	192.04±13.91a/c	243.79±6.24a/a	222.54±11.05a/b
	K_3	186.82±9.27a/b	240.82±9.60a/a	185.75±9.29b/b
-30	CK	90.58±5.41b/a	90.58±5.41c/a	90.58±5.41b/a
	K_1	114.89±5.48a/b	128.58±5.23a/a	119.55±3.54a/ab
	K_2	72.22±5.31c/b	127.09±5.48a/a	120.35±5.19a/a
	K_3	57.35±1.94d/c	115.11±8.42b/a	82.75±3.80b/b

较CK增长了30.32%。4℃、-10℃、-20℃和-30℃低温胁迫处理下,K₂SO₄处理的苜蓿根颈淀粉含量在不同钾肥施用量处理下均显著高于CK($P < 0.05$),且均在K₂处理下达到最大值,分别较CK增长了64.75%、67.87%、44.14%和35.73%。KH₂PO₄处理的苜蓿根颈淀粉含量,在4℃和-30℃的K₂处理下显著高于CK($P < 0.05$),分别较CK增长了36.00%和20.54%;在-10℃和-20℃低温胁迫处理下,KH₂PO₄处理的苜蓿根颈淀粉含量在不同钾肥施用量处理下均显著高于CK($P < 0.05$),且在K₂施用量处理下达到最大值,分别较CK增长了67.87%和32.19%。3种钾肥处理下,K₂SO₄的K₂处理苜蓿根颈淀粉含量在4℃、-10℃、-20℃和-30℃低温胁迫处理下均达到最大值,且与KCl和KH₂PO₄处理间达到显著性差异($P < 0.05$)。以上说明施用K₂SO₄种类钾肥最有利于提高苜蓿根颈淀粉含量,当施用量为200 kg·hm⁻²K₂O时苜蓿根颈中的淀粉含量最高。

2.7 苜蓿根颈活力与糖类物质含量的相关性分析

如表7所示,在4℃、-10℃、-20℃和-30℃低温胁迫处理下,苜蓿根颈活力与可溶性糖含量呈极显著正相关($P < 0.01$);苜蓿根颈活力与淀粉含量在4℃和-10℃低温胁迫处理间呈显著正相关($P < 0.05$),在-20℃和-30℃低温胁迫处理间呈极显著正相关($P < 0.01$);在-10℃、-20℃和-30℃低温胁迫处理下,苜蓿根颈活力与蔗糖含量呈极显著正相关($P < 0.01$);在4℃和-20℃低温胁迫处理下,苜蓿

表6 钾肥种类和用量对低温胁迫处理下苜蓿根颈淀粉含量的影响/(mg·g⁻¹)

Table 6 Effects of potash fertilizer types and rates on starch content of alfalfa root crowns under low temperature stress

处理温度/℃ Processing temperature	施肥量 Fertilizer amount	钾肥种类 Potash type		
		KCl	K ₂ SO ₄	KH ₂ PO ₄
4	CK	46.55±2.70c/a	46.55±2.70c/a	46.55±2.70c/a
	K ₁	66.51±3.60a/a	58.78±1.96b/b	50.71±3.22c/c
	K ₂	65.75±2.02a/b	76.69±2.28a/a	63.31±1.84a/b
	K ₃	54.57±1.46b/a	58.03±3.61b/a	58.40±1.32b/a
	CK	44.42±3.41c/a	44.42±3.41c/a	44.42±3.41c/a
-10	K ₁	56.14±1.58a/a	55.73±0.98b/a	48.87±4.15b/b
	K ₂	57.89±2.91a/b	74.57±1.50a/a	58.29±2.04a/b
	K ₃	50.15±2.55b/b	52.9±2.83b/b	57.81±1.99a/a
	CK	37.65±1.37b/a	37.65±1.37c/a	37.65±1.37b/a
	K ₁	44.20±2.82a/b	52.41±2.89ab/a	45.99±1.12a/b
-20	K ₂	39.35±1.34b/c	54.27±3.57a/a	49.77±3.63a/b
	K ₃	38.53±3.16b/b	48.70±3.59b/a	48.30±2.54a/a
	CK	21.13±0.29b/a	21.05±0.29c/a	21.13±0.29b/a
	K ₁	26.50±1.33a/a	26.05±2.75b/a	22.83±0.60b/b
	K ₂	22.43±1.84b/c	28.68±1.27a/a	25.47±0.88a/b
-30	K ₃	21.12±1.79b/b	25.15±2.73b/a	20.99±1.65b/b

根颈果糖含量与根颈活力和可溶性糖含量均呈极显著正相关($P < 0.01$);在-20℃和-30℃低温胁迫处理下,苜蓿根颈淀粉含量与可溶性糖、蔗糖和果糖含量均呈极显著正相关($P < 0.01$);4℃处理下,苜蓿根颈蔗糖与淀粉含量间呈显著正相关($P < 0.05$);-10℃低温胁迫处理下,苜蓿根颈果糖含量与根颈活力呈显著正相关($P < 0.05$),与可溶性糖和蔗糖含量均呈极显著正相关($P < 0.01$);-10℃低温胁迫处理下,苜蓿根颈淀粉含量与可溶性糖和蔗糖含量均呈极显著正相关($P < 0.01$),与果糖含量呈显著正相关($P < 0.05$);-20℃低温胁迫处理下,苜蓿根颈蔗糖含量与可溶性糖和果糖含量均呈极显著正相关($P < 0.01$);-30℃低温胁迫处理下,苜蓿根颈可溶性糖含量与果糖含量间呈显著正相关($P < 0.05$),与蔗糖含量间呈极显著正相关($P < 0.01$)。以上说明苜蓿根颈中可溶性糖、蔗糖、果糖和淀粉含量越高,苜蓿渗透调节能力越强,生物膜结构更稳定,根颈活力越高,即表现为抗寒能力越强。

表7 苜蓿的根颈活力与糖类物质含量相关性分析

Table 7 Correlation analysis of alfalfa root crown vitality and saccharides content

处理温度/℃ Processing temperature	生理指标 Physiological indicators	根颈活力 Root crown vitality	可溶性糖 Soluble sugar	果糖 Fructose	蔗糖 Sucrose
4	可溶性糖 Soluble sugar	0.74**			
	果糖 Fructose	0.93**	0.71**		
	蔗糖 Sucrose	0.12	0.19	0.02	
	淀粉 Starch	0.65*	0.47	0.55	0.68*
-10	可溶性糖 Soluble sugar	0.72**			
	果糖 Fructose	0.68*	0.71**		
	蔗糖 Sucrose	0.79**	0.53	0.70**	
	淀粉 Starch	0.67*	0.86**	0.64*	0.76**
-20	可溶性糖 Soluble sugar	0.87**			
	果糖 Fructose	0.77**	0.92**		
	蔗糖 Sucrose	0.86**	0.97**	0.89**	
	淀粉 Starch	0.93**	0.90**	0.75**	0.93**
-30	可溶性糖 Soluble sugar	0.83**			
	果糖 Fructose	0.54	0.64*		
	蔗糖 Sucrose	0.88**	0.73**	0.55	
	淀粉 Starch	0.77**	0.83**	0.80**	0.84**

注: * 和 ** 分别表示不同种类钾肥与不同钾肥施用量处理下根颈活力与糖类物质含量呈显著($P < 0.05$)、极显著($P < 0.01$)相关。

Note: * and ** indicate that the root crown vitality and saccharides content under different types of potash fertilizers and different potash fertilizer application rates are significant correlated ($P < 0.05$) and extremely significant correlated ($P < 0.01$), respectively.

3 讨 论

植物根颈与植物芽的生长以及根系的生长密切相关,根颈活力的高低,能反映植物的生长状况与生理功能^[24];有研究表明,植物根颈活力会随着低温胁迫的加剧明显下降,因此根颈活力可用作评价植物耐寒性强弱^[25]。本研究结果表明,KCl、K₂SO₄和KH₂PO₄处理的苜蓿根颈活力均随着温度的降低表现为持续降低的变化趋势,可能由于温度降低时苜蓿根颈细胞膜透性变大,细胞液外渗程度加重,细胞膜受损严重,细胞内正常生命活动遭到破坏。并且本研究中,苜蓿根颈活力随着钾肥施用量的增加呈先升高后降低的趋势,与陈凤真^[26]的研究结果一致,且本研究中,苜蓿根颈活力在100 kg·hm⁻²K₂O和200 kg·hm⁻²K₂O施用量处理下均高于CK,说明适量增施钾肥有利于提高苜蓿根颈活力,但钾元素过多积累于土壤中将抑制根系产生胁迫,抑制根系发育^[27];且在本研究中,K₂SO₄处理的苜蓿根颈活力在不同低温胁迫处理下均明显高于KCl和KH₂PO₄处理,可能由于K₂SO₄类钾肥中的S元素是谷胱甘肽、金属硫蛋白等物质的组成成分,谷胱甘肽、金属硫蛋白均具有调节低温胁迫下植物细胞中产生的H₂O₂、·OH和抗坏血酸水平的功能,可减轻膜脂过氧化程度,达到提高根颈活力的效果^[16]。

植物受到低温胁迫后,细胞会积累大量有渗透调节功能的物质来调节渗透势,通过提高细胞的持水能力来降低细胞冰点,加大细胞质浓度,以达到提高植物抗寒能力的效果^[28]。可溶性糖作为植物体内重要的代谢产物,其含量的多少与植物抗寒性有显著的正相关关系^[29]。有研究表明,植物内的可溶性糖随着温度的降低其含量增加,且淀粉通过低温诱导水解酶活性降解,也会导致可溶性糖含量的提高;此外,可溶性糖还能与其他与植物抗寒性有关的生理生化反应提供碳源和代谢底物^[30]。本研究结果表明,随着低温胁迫温度的降低,KCl、K₂SO₄和KH₂PO₄处理的苜蓿根颈可溶性糖含量均表现为先升高后降低的变化趋势(CK除外),这与马俊丽等^[31]的研究结果一致。并且在本研究中,K₂SO₄处理的苜蓿根颈可溶性糖含量在不同低温胁迫处理下均明显高于KCl和KH₂PO₄处理,且随着钾肥施用量的增加呈先升高后降低的变化趋势,但是KCl处理的苜蓿根颈K含量高于K₂SO₄,而刘丽君^[32]的研究结果表明,大豆始花期、盛花期、结荚期、鼓粒期和成熟期的茎秆和叶片中可溶性糖含量均随着

施硫量的增加而增加,因此,K₂SO₄处理比KCl和KH₂PO₄处理更能促进可溶性糖含量积累的原因可能是,除了适量的K素能促进可溶性糖的积累外,K₂SO₄类钾肥中的S元素也有促进可溶性糖含量增加的作用。

可溶性糖组分主要包括蔗糖、葡萄糖和果糖等,这些糖不仅可以通过调节细胞渗透势来降低细胞水势、提高细胞的持水能力、降低细胞液冰点温度,还能稳定酶和蛋白的构象,防止冷冻变性,以维持其在低温下的功能^[33]。其中蔗糖的生物学活性较低,在植物体内的含量变化迅速,不仅能通过脂质磷酸化直接保护细胞膜、降低膜的渗透性,还能通过调节细胞代谢影响基因的表达。而果糖则可提高单磷脂和磷脂双分子层的稳定性^[27]。本研究结果表明,3种钾肥施用下,苜蓿根颈蔗糖、果糖含量均随温度的降低表现为先升高后降低的变化趋势;董文科等^[34]的研究结果表明,低温胁迫可引起青海扁茎早熟禾中蔗糖含量的上升,与本研究结果一致。本研究结果还表明,随着钾肥施用量的增加,苜蓿根颈蔗糖、果糖含量均表现为先升高后降低的趋势,且K₂SO₄钾肥处理的苜蓿根颈蔗糖、果糖含量均明显高于KCl和KH₂PO₄处理,但是本研究中K₂SO₄肥处理的苜蓿根颈K含量少于KCl处理,祝小捷、王东等^[35-36]的研究表明,施硫有利于增加小麦叶片中的可溶性糖、蔗糖含量以及蔗糖合成酶活性;因此,本研究中K₂SO₄处理与KCl和KH₂PO₄处理相比果糖、蔗糖含量更高,可能是因为硫元素同样能促进果糖、蔗糖积累。

淀粉作为植物体内积累的一种主要非结构性多糖,在维持细胞的膨压、卸载和代谢,促进光合产物的运输等生理活动方面均有重要作用^[37]。淀粉虽然不是直接参与渗透调节的抗寒保护物质,但是淀粉水解的产物,即可溶性糖、蔗糖等物质却有能调节细胞渗透势、降低冰点的作用,因此淀粉含量也是衡量苜蓿根颈抗寒性强弱的重要指标^[9]。本研究中,不同类型钾肥处理的苜蓿根颈淀粉含量随温度的降低表现为持续降低,这是由于低温胁迫下淀粉水解酶活性增强,将淀粉水解为可溶性糖以调节细胞渗透势,保护细胞膜结构;陈卫东等^[20]的研究结果表明,-20℃冷冻处理下的苜蓿根颈淀粉含量显著低于4℃冷藏处理,与本研究结果一致。本研究结果还表明,不同类型钾肥处理的苜蓿根颈淀粉含量均随着钾肥施用量的增加表现为先升高后降低的变化趋势,其中K₂SO₄处理的苜蓿根颈淀粉含量均明显高于KCl和KH₂PO₄处理,但是本研究

结果显示 K_2SO_4 处理的苜蓿根颈 K 含量少于 KCl 处理,而 Tao 等^[38]认为,施用硫肥可显著提高小麦籽粒总蛋白和淀粉含量,刘丽君^[32]的研究结果也表明硫肥能提高大豆结荚期和鼓粒期茎秆和叶片淀粉含量,以上有可能说明 K_2SO_4 中的 K 和 S 元素均有促进淀粉积累的功能,导致与 KCl 和 KH_2PO_4 处理相比, K_2SO_4 处理下的淀粉积累效果最明显,有助于维护生物膜结构的稳定性,增强苜蓿抗寒能力。

4 结 论

综上所述,KCl、 K_2SO_4 和 KH_2PO_4 对低温胁迫下苜蓿根颈活力、可溶性糖、蔗糖、果糖和淀粉含量均有明显的影响;随着低温胁迫温度的降低,不同类型钾肥处理的苜蓿根颈活力和淀粉含量表现为持续降低的变化趋势,可溶性糖、蔗糖和果糖含量则表现为先升高后降低的变化趋势;随着钾肥施用量的增加,苜蓿根颈活力、可溶性糖、蔗糖、果糖和淀粉含量均表现为先升高后降低的变化趋势。 K_2SO_4 处理在提高根颈活力、可溶性糖、蔗糖、果糖和淀粉含量方面优于 KCl 和 KH_2PO_4 处理,且以施用量为 $200\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}\text{K}_2\text{O}$ 时,苜蓿根颈细胞中可溶性糖、蔗糖、果糖和淀粉含量积累效果最明显,因此建议科尔沁沙地建植苜蓿,宜施用 K_2SO_4 钾肥 $200\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}\text{K}_2\text{O}$,有利于苜蓿安全越冬。

参 考 文 献:

- [1] 哈斯巴特尔,高博.阿鲁科尔沁旗草业发展现状、存在问题与对策[J].草原与草业,2020,32(2):53-56.
HASBATER, GAO B. Analysis on the development concepts and countermeasures of grassland industry in Arukorqin Banner[J]. Grassland and Prataculture, 2020, 32(2): 53-56.
- [2] 赵力兴,王琳,李天琦,等.科尔沁沙地二龄紫花苜蓿草地土壤养分及化学计量特征研究[J].草原与草坪,2020,40(5):76-82.
ZHAO L X, WANG L, LI T Q, et al. Study on soil nutrients and stoichiometry of 2nd year alfalfa pasture in Horqin sandy land[J]. Grassland and Turf, 2020, 40(5): 76-82.
- [3] 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.
- [4] 徐洪雨.水分亏缺和骤然降温对紫花苜蓿抗寒性的影响机理[D].北京:中国农业科学院,2020.
XU H Y. The mechanism of cold tolerance in alfalfa (*Medicago sativa* L.) as affected by water deficit and abrupt chilling[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020.
- [5] 张如清,马永祥.紫花苜蓿冻害及其综合防御技术[J].草业科学,2005,22(7):29-30.
ZHANG R Q, MA Y X. Frozing damage and its comprehensive control measures for alfalfa[J]. Pratacultural Science, 2005, 22(7): 29-30.
- [6] 韩清芳,吴新卫,贾志宽,等.不同休眠级数苜蓿品种根颈变化特征分析[J].草业学报,2008,(4):85-91.
HAN Q F, WU X W, JIA Z K, et al. Analysis on dynamic variety of crown characteristics of different fall dormancy *Medicago sativa* cultivars[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2008,(4): 85-91.
- [7] TRISCHUK R G, SCHILLING B S, LOW N H, et al. Cold acclimation, de-acclimation and re-acclimation of spring canola, winter canola and winter wheat: the role of carbohydrates, cold-induced stress proteins and vernalization[J]. Environmental and Experimental Botany, 2014, 106: 156-163.
- [8] TARKOWSKI Ł P, VAN DEN ENDE W. Cold tolerance triggered by soluble sugars: a multifaceted countermeasure[J]. Frontiers in Plant Science, 2015, 6: 203.
- [9] 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 in cold resistance of different alfalfa and its correlation with carbohydrate content[J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(2): 303-308.
- [10] BERTRAND A, BIPFUBUSA M, CLAESSENS A, et al. Effect of photoperiod prior to cold acclimation on freezing tolerance and carbohydrate metabolism in alfalfa (*Medicago sativa* L.) [J]. Plant Science, 2017, 264: 122-128.
- [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 date 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苜蓿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 non-structural carbon and nitrogen content in the root collar of alfalfa[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2018, 27(1): 86-96.
- [13] 杜彩艳,曹继雄,孙曦,等.钾肥种类及用量对三七养分吸收和产量及品质的影响[J].中国土壤与肥料,2022,(4):192-200.
DU C Y, PU J X, SUN X, et al. Effect of different potassium fertilizers and dosing on nutrient absorption, yield and quality of *Panax notoginseng* [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2022, (4): 192-200.
- [14] 龚成文,冯守疆,赵欣楠,等.不同钾肥品种对甘肃中部地区马铃薯产量及品质的影响[J].干旱地区农业研究,2013,31(3):112-117.
GONG C W, FENG S J, ZHAO X N, et al. Effects of different potassium fertilizers on yield and quality of potato in central Gansu province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(3): 112-117.
- [15] SCHACHTMAN D P, SHIN R. Nutrient sensing and signaling: NPKS [J]. Annual Review of Plant Biology, 2007, 58: 47-69.
- [16] 张野.两种黄芪幼苗对缺硫胁迫的生理响应机制[D].哈尔滨:东北林业大学,2020.
ZHANG Y. Physiological responses of two *Astragalus membranaceus* seedlings to sulfur deficiency[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2020.
- [17] 陈钢.磷水平对西瓜产量、品质、养分吸收及幼苗耐冷性影响的研究[D].武汉:华中农业大学,2008.

- CHEN G. Effect of phosphorus on yield, quality, nutrient absorption and seedling cold tolerance of watermelon [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2008.
- [18] 李倩, 李丽杰, 王斌, 等. 不同类型钾肥对花生叶片生理生化特性及产量的影响[J]. 山东农业科学, 2019, 51(9): 172-176.
- LI Q, LI L J, WANG B, et al. Effects of different kinds of potassium fertilizers on leaf physiological and biochemical characteristics and yield of peanut[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2019, 51(9): 172-176.
- [19] 魏树伟, 王少敏, 董肖昌, 等. 不同类型钾肥对‘新梨 7 号’果实风味品质的影响[J]. 果树学报, 2018, 35(S1): 101-108.
- WEI S W, WANG S M, DONG X C, et al. Effect of different K fertilizers on fruit flavor quality of ‘Xinli No.7’ pears [J]. Journal of Fruit Science, 2018, 35(S1): 101-108.
- [20] 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 cold tolerance and carbohydrate changes of alfalfa [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2022, 50(3): 67-74.
- [21] 朱爱民, 张玉霞, 王显国, 等. 沙地生境不同苜蓿品种形态特征对低温的响应及其与抗寒性关系[J]. 草地学报, 2018, 26(6): 1400-1408.
- ZHU A M, ZHANG Y X, WANG X G, et al. Responses of morphological characteristics of different alfalfa varieties to low temperature and their relationship with cold resistance in sandy habitats [J]. Acta Agrestia Sinica, 2018, 26(6): 1400-1408.
- [22] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 129-174.
- ZOU Q. Experimental guidance of plant physiology [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 129-174.
- [23] 张志良, 瞿伟. 植物学实验实习指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 128-129.
- ZHANG Z L, QU W. Practice guidance of botany experiment [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003: 128-129.
- [24] WANG B, LAI T, HUANG Q W, et al. Effect of N fertilizers on root growth and endogenous hormones in strawberry [J]. Pedosphere, 2009, 19(1): 86-95.
- [25] 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.
- [26] 陈凤真. 钾对黄瓜根系保护酶和光合特性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(7): 127-132.
- CHEN F Z. Effects of potassium on activities of root protective enzymes and photosynthetic characteristics of cucumber (*Cucumis sativus* L.) [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2015, 43(7): 127-132.
- [27] 马晟. 氮、磷、钾用量及施肥方式对茄子生育及产量和品质的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2018.
- MA S. Effects of application amount and fertilization modes of N, P and K on growth, yield and quality of eggplants [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2018.
- [28] 林海馨. 植物冷害与细胞生理[M]. 厦门: 厦门大学出版社, 1994: 131-133.
- LIN H X. Plant chilling injury and cell physiology [M]. Xiamen: Xiamen University Press, 1994: 131-133.
- [29] 欧欢. 不同扁桃品种抗寒性研究[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2019.
- OU H. Study on cold resistance of different almond cultivars [D]. A-lar: Tarim University, 2019.
- [30] 刘慧英, 王祯丽, 王玉华. 不同品种辣椒种子发芽和苗期耐冷性差异的研究[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2002, 6(1): 23-26.
- LIU H Y, WANG Z L, WANG Y H. Studies on the chilling tolerance of different pepper varieties during germination of seeds and seedling [J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2002, 6(1): 23-26.
- [31] 马俊丽, 吉乃喆, 陈洪菲. 低温胁迫对月季生理生化指标的影响试验初报[J]. 南方农业, 2020, 14(34): 64-68, 77.
- MA J L, JI N Z, CHEN H F. Preliminary report on the effect of low temperature stress on the physiological and biochemical indexes of rose [J]. South China Agriculture, 2020, 14(34): 64-68, 77.
- [32] 刘丽君. 硫素营养对大豆产质量影响的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2005.
- LIU L J. Effect of sulfur on yields and quality of soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2005.
- [33] BURBULIS N, JONYTIENE V, KUPRIENE R, et al. Biochemical and physiological factors related to cold de-acclimation and by trehalose-6-phosphate [J]. Plant Physiol, 2012, 149: 1860-1871.
- [34] 董文科, 马祥, 张玉娟, 等. 低温胁迫对不同早熟禾品种糖酵解代谢及其相关基因表达的影响[J]. 草地学报, 2019, 27(6): 1503-1510.
- DONG W K, MA X, ZHANG Y J, et al. Effects of low-temperature stress on glycolysis metabolism and related gene expression of different *Poa pratensis* varieties [J]. Acta Agrestia Sinica, 2019, 27(6): 1503-1510.
- [35] 祝小捷, 朱云集, 刘小平, 等. 施硫对小麦旗叶糖含量和籽粒淀粉积累的影响[J]. 麦类作物学报, 2008, 28(3): 471-475.
- ZHU X J, ZHU Y J, LIU X P, et al. Effects of sulfur application on sugar content of flag leaves and starch accumulation of kernels in wheat [J]. Journal of Triticeae Crops, 2008, 28(3): 471-475.
- [36] 王东, 于振文, 王旭东, 等. 硫营养对小麦籽粒淀粉合成及相关酶活性的影响[J]. 植物生理与分子生物学报, 2003, 29(5): 437-442.
- WANG D, YU Z W, WANG X D, et al. Effects of sulfur nutrition on starch synthesis and related enzymes activity in kernels of wheat [J]. Journal of Plant Physiology and Molecular Biology, 2003, 29(5): 437-442.
- [37] 陆树华, 邓兰生, 张承林, 等. 钾肥施用分配比例对甘蔗生长的影响[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(1): 60-63.
- LU S H, DENG L S, ZHANG C L, et al. Effects of potassium distribution on the growth of sugarcane under drip fertigation [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(1): 60-63.
- [38] TAO Z Q, CHANG X H, WANG D M, et al. Effects of sulfur fertilization and short-term high temperature on wheat grain production and wheat flour proteins [J]. The Crop Journal, 2018, 6(4): 413-425.