

网络出版时间:2022-04-27 15:13 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2022.11.007  
网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.s.20220426.1601.006.html

# 施磷深度对低温胁迫苜蓿根颈糖类物质含量及抗寒性的影响

夏全超<sup>1</sup>,张玉霞<sup>1</sup>,孙明雪<sup>1</sup>,张庆昕<sup>1</sup>,杜晓艳<sup>1</sup>,王显国<sup>2</sup>,王东儒<sup>3</sup>

(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;

3 呼和浩特市农牧技术推广中心,内蒙古 呼和浩特 010000)

**【摘要】**【目的】探讨磷肥施用深度对低温胁迫处理苜蓿根颈活力和糖类保护物质的影响,旨在为苜蓿抗寒高产栽培中磷肥的高效管理提供依据。【方法】以‘北极熊’紫花苜蓿作为供试材料,采用大田试验,磷肥( $P_2O_5$ )施用量为225 kg/hm<sup>2</sup>,设置5个磷肥施用深度处理,分别为施于地表和距离地表7.5,15.0,22.5,30.0 cm,分别以S<sub>0</sub>、S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub>、S<sub>3</sub>、S<sub>4</sub>表示,以不施用磷肥作为对照(CK),于封冻前期对以上5个处理苜蓿根颈进行4,-10,-20和-30℃低温胁迫处理,测定不同处理苜蓿的根颈活力和糖类物质(可溶性糖、果糖、蔗糖、淀粉)含量,分析不同低温胁迫处理下苜蓿根颈活力与糖类物质含量的相关性。【结果】在同一磷肥施用深度处理下,随着胁迫温度的降低,苜蓿根颈活力持续降低,可溶性糖、果糖、蔗糖含量则呈先增加后降低的变化趋势,且均以-20℃下最高,淀粉含量则呈先降低后增加的变化趋势,且在-20℃下最低。在同一胁迫温度下,不同磷肥施用深度处理的苜蓿根颈活力以及可溶性糖、果糖、蔗糖和淀粉含量均明显高于CK,其中以S<sub>2</sub>处理的上述指标总体高于其他处理。相关性分析表明,在不同低温胁迫处理下,苜蓿根颈活力与可溶性糖、果糖、蔗糖和淀粉含量均呈正相关。【结论】施用磷肥能提高低温胁迫苜蓿的根颈活力,其中磷肥施用深度为距离地表15.0 cm处理最有利于提高苜蓿糖类物质含量,增强苜蓿根颈活力,提高苜蓿抗寒性。

**【关键词】** 苜蓿抗寒性;磷肥;施肥深度;根茎活力

**【中图分类号】** S551<sup>+</sup>.706.2

**【文献标志码】** A

**【文章编号】** 1671-9387(2022)11-0053-08

## Effects of phosphate fertilizer application depth on carbohydrate content and cold resistance of alfalfa root crown under low temperature stress

XIA Quanchao<sup>1</sup>,ZHANG Yuxia<sup>1</sup>,SUN Mingxue<sup>1</sup>,ZHANG Qingxin<sup>1</sup>,  
DU Xiaoyan<sup>1</sup>,WANG Xianguo<sup>2</sup>,WANG Dongru<sup>3</sup>

(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; 3 Hohhot Agricultural and Animal Husbandry Technology Extension Center, Hohhot, Inner Mongolia 010000, China)

**Abstract:** 【Objective】 This study explored the effects of phosphate fertilizer application depth on root crown vitality and carbohydrate protective substance content of alfalfa under low temperature stress to pro-

**【收稿日期】** 2021-11-22

**【基金项目】** 内蒙古自然科学基金项目(2020MS03081);国家自然科学基金项目(31960352);内蒙古自治区科技计划项目(2021-GG0109)

**【作者简介】** 夏全超(1997-),男,内蒙古通辽人,硕士,主要从事牧草种质资源与利用研究。E-mail:1329195930@qq.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

vide basis for efficient management of phosphate fertilizer in cold-resistant and high-yield cultivation of alfalfa. 【Method】 With Gibraltar alfalfa as test material, the field experiment was adopted with phosphate fertilizer ( $P_2O_5$ ) application rate of  $225 \text{ kg/hm}^2$ . The 5 depth treatments included ground surface and 7.5, 15.0, 22.5 and 30.0 cm from the ground surface and they were expressed as  $S_0, S_1, S_2, S_3$  and  $S_4$ , respectively. No phosphate fertilizer application was used as the control (CK). In the early stage of freezing, the root crown was treated with 4, -10, -20 and -30 °C low temperature stress. Then, root crown vigor and sugar contents (soluble sugar, fructose, sucrose and starch) were determined and correlations between them were analyzed. 【Result】 With same phosphate fertilizer application depth, the root crown vitality of alfalfa decreased continuously with the decrease of temperature. The contents of soluble sugar, fructose and sucrose showed a trend of first increasing and then decreasing with peaks at -20 °C, while starch content showed opposite trend with the lowest value at -20 °C. With same stress temperature, the root crown vitality and soluble sugar, fructose, sucrose and starch contents of alfalfa in different phosphate fertilizer treatments were significantly higher than those of CK, and treatment  $S_2$  was the best. Correlation analysis showed alfalfa root crown vigor was positively correlated with soluble sugar, fructose, sucrose and starch contents. 【Conclusion】 Phosphate fertilizer increased the root crown vitality of alfalfa under low temperature stress and the suggested application depth of phosphate fertilizer was 15.0 cm from ground surface.

**Key words:** cold resistance of alfalfa; phosphate fertilizer; fertilization depth; root crown vitality

随着我国畜牧业的发展,苜蓿(*Medicago sativa* L.)因具有适口性好、产量高、营养丰富、适应能力强等优点,已成为发展草牧业的首选牧草<sup>[1]</sup>。我国内蒙古科尔沁沙地是近年来发展起来的新型现代化草业生产区,优质牧草种植面积已超过 4.933 万  $\text{hm}^2$ ,但是科尔沁地区冬季寒冷少雪,且极易出现极端低温和倒春寒的现象,因此低温成为该地区苜蓿越冬的主要限制因素<sup>[2]</sup>。磷素在植物生长发育和营养物质积累中占有极其重要的地位<sup>[3]</sup>,其既参与肌醇六磷酸、核酸、核蛋白及磷脂的形成,又是多种酶的主要构成成分和底物,也是细胞核和细胞质的主要成分之一<sup>[4]</sup>。由磷脂所构成的植物细胞膜,在植物抗寒方面有极其重要的作用,磷脂亲水头部或疏水尾部能与蛋白、糖类等物质相互作用,以抵抗低温引起的脱水,维持生物膜的稳定性<sup>[5]</sup>。此外土壤磷素水平还会影响植物碳代谢,而可溶性糖、淀粉及蔗糖作为含碳化合物,均对植物的生长发育有重要作用<sup>[6]</sup>。目前,我国有近 70% 的农田土壤处于磷素亏缺状态<sup>[7]</sup>,且磷肥施入土壤后,极易在转化为磷酸盐后迅速被土壤矿物质吸附固定或被微生物固持,使其在当季不能被长期利用或利用率较低,并造成资源浪费和环境污染<sup>[8]</sup>。韩建国等<sup>[9]</sup>认为,由于磷肥在土壤中移动性差,因此在磷肥的施用方式中,沟施比撒施好,可使磷的固定量降低,以供给草木樨更多的未被固定的磷。姜宗庆等<sup>[10]</sup>研究表明,适宜磷素可增加小麦不同生长时期的淀粉含量及小麦叶片的

蔗糖含量;闫恒辉<sup>[11]</sup>的研究表明,施磷可提高冬小麦花后 0~40 cm 土层的根系活力;王天等<sup>[12]</sup>研究表明,在低温胁迫下,增施磷肥可有效提高油橄榄的生理活性,缓解低温对油橄榄幼苗的损伤,进而增强植株的抗寒性;沈祥军等<sup>[13]</sup>的研究也表明,施用磷肥可以增加苜蓿根颈中可溶性糖等抗寒性物质的含量,而可溶性糖能降低细胞质的结冰点,增强植物抗寒性<sup>[14]</sup>。由此可知,前人在磷肥对作物生理特性的影响方面已有深入研究,但对于磷肥施用深度对低温胁迫苜蓿糖类物质及抗寒性影响的研究尚较为少见。为此,本研究针对苜蓿栽培生产中磷素与苜蓿根系空间与分布匹配性差的问题,探讨不同施磷深度对低温胁迫苜蓿根颈活力和糖类物质含量的影响,旨在为苜蓿抗寒高产栽培中磷肥的高效管理提供依据。

## 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( $43^{\circ}60'N, 121^{\circ}31'E$ ),该地区属于温带大陆性半干旱气候,四季分明,夏季炎热多雨,冬季干旱少雪, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 年积温为 3 000~3 200 °C,年平均气温 5.8 °C,无霜期 140~150 d,年平均降水量约 370 mm,年平均风速 3.1~4.3 m/s。土壤有机质含量 64.10 mg/kg,碱解氮含量 35.88 mg/kg,全氮含量 44.01 mg/kg,速效磷含量 3.59 mg/kg,速效

钾含量 77.89 mg/kg。

## 1.2 试验方法

1.2.1 大田试验设计 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。该品种的休眠级为 2.0 级,幼苗强壮、根系发达、多叶率高,是抗寒性能非常突出的苜蓿品种。

本研究采用大田试验,采用随机区组设计,于 2020 年 7 月 1 日播种,播种量为 22.5 kg/hm<sup>2</sup>,行距为 20 cm,小区面积为 15 m<sup>2</sup>(3 m×5 m)。当磷肥(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)施用量为 225 kg/hm<sup>2</sup>时,设置施于地表及距离地表 7.5,15.0,22.5,30.0 cm 共 5 个磷肥施用深度处理,分别以 S<sub>0</sub>、S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub>、S<sub>3</sub>、S<sub>4</sub> 表示,以不施磷肥为对照(CK),每个处理均施用钾肥,钾肥(K<sub>2</sub>O)用量为 150 kg/hm<sup>2</sup>。每处理设置 3 次重复,共 18 个小区。磷肥、钾肥分别为过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量为 44%)和氯化钾(K<sub>2</sub>O 含量为 60%),均作为种肥于播种时一次性施入,施肥方式为开沟条施。试验田灌水使用指针式喷灌,并正常进行田间管理。于封冻前期(11 月 15 日)在每个小区挖取长势一致的苜蓿越冬器官即根颈,带回室内进行低温胁迫处理。

1.2.2 低温胁迫处理 参照朱爱民等<sup>[15]</sup>的试验方法,每个小区取 60 株长势均匀一致的苜蓿根颈,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 份苜蓿用蒸馏水冲洗干净,整齐排放在 20 cm×30 cm 的脱脂纯棉布上,包裹好后用 3 mL 蒸馏水均匀喷洒,使棉布保持湿润,最后用 30 cm×30 cm 的锡箔纸包裹,放入程式恒温恒湿试验箱分别进行-10,-20 和-30 ℃的低温处理(低温冷冻)。程式恒温恒湿试验箱设置为:以 4 ℃为起点,先以 4 ℃/h 的速率降温,在目标温度下保持 6 h,然后以 4 ℃/h 的速度升温至 4 ℃,取出后在 4 ℃

下放置 12 h,与冷藏处理材料同时测定根颈活力和可溶性糖、果糖、蔗糖、淀粉含量。

## 1.3 测定指标及方法

根颈活力采用氯化三苯基四氮唑(TTC)法<sup>[16]</sup>测定,可溶性糖和淀粉含量均采用蒽酮比色法<sup>[16]</sup>测定,蔗糖和果糖含量分别采用二硝基水杨酸法和间苯二酚法<sup>[17]</sup>测定。

## 1.4 数据处理

试验数据采用 WPS 2019 软件进行整理并绘制图表,用 DPS 7.0 软件进行方差显著性分析及相关性分析,采用 Duncan's 检验方法的新复极差法进行多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 磷肥施用深度对苜蓿根颈活力的影响

由表 1 可见,在同一低温胁迫处理下,不同磷肥施用深度处理的苜蓿根颈活力总体上均高于 CK。在 4 和-10 ℃低温胁迫下,S<sub>0</sub>、S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub> 和 S<sub>3</sub> 处理苜蓿的根颈活力均显著高于 CK 和 S<sub>4</sub> 处理( $P < 0.05$ );在-30 ℃低温胁迫下,S<sub>0</sub>、S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub> 处理苜蓿的根颈活力均显著高于 CK、S<sub>3</sub> 和 S<sub>4</sub> 处理( $P < 0.05$ );在-20 ℃条件下,只有 S<sub>2</sub> 处理苜蓿的根颈活力显著高于 CK,其余处理与 CK 之间均无显著差异。在 4,-10,-20,-30 ℃条件下,S<sub>2</sub> 处理的苜蓿根颈活力总体均高于其他处理,较 CK 显著增加了 83.43%,48.91%,57.78%和 181.58%( $P < 0.05$ ),说明 S<sub>2</sub> 处理最有利于提高苜蓿的根颈活力。在同一磷肥施用深度处理下,苜蓿根颈活力随着温度的降低而下降,且不同低温胁迫处理间的苜蓿根颈活力均有显著性差异( $P < 0.05$ ),其中-30 ℃处理苜蓿的根颈活力最小,说明胁迫温度越低,苜蓿根颈细胞受损越严重,苜蓿根颈活力越低。

表 1 磷肥施用深度对低温胁迫处理苜蓿根颈活力的影响

Table 1 Effect of phosphate fertilizer application depth on root crown vigor of alfalfa under low temperature stress

处理 Treatment	根颈活力/( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ) Root crown vitality			
	4 ℃	-10 ℃	-20 ℃	-30 ℃
CK	1.69±0.19 cA	1.37±0.14 bB	0.90±0.09 bC	0.38±0.05 bD
S <sub>0</sub>	2.35±0.18 bA	1.98±0.18 aB	0.94±0.18 bC	0.84±0.22 aC
S <sub>1</sub>	3.02±0.21 aA	2.02±0.29 aB	1.16±0.18 abC	0.94±0.08 aC
S <sub>2</sub>	3.10±0.20 aA	2.04±0.15 aB	1.42±0.10 aC	1.07±0.05 aD
S <sub>3</sub>	2.13±0.19 bA	2.11±0.32 aA	1.11±0.10 abB	0.43±0.11 bC
S <sub>4</sub>	1.73±0.24 cA	1.55±0.29 bA	1.06±0.05 bB	0.31±0.17 bC

注:数据后的小写字母表示相同低温胁迫处理下不同磷肥施用深度处理间差异显著,不同大写字母表示相同磷肥施用深度处理下不同低温胁迫处理间差异显著。下表同。

Note:Lowercase letters indicate significant difference among fertilizer treatments under same temperature stress,and capital letters indicate significant difference among temperature stress treatments under same phosphate fertilizer treatment. The same below.

## 2.2 磷肥施用深度对苜蓿根颈可溶性糖含量的影响

由表 2 可以看出,在同一低温胁迫处理下,不同磷肥施用深度处理苜蓿根颈的可溶性糖含量均明显高于 CK。在 4 和 -10 °C 低温条件下, $S_1$ 、 $S_2$  处理苜蓿根颈的可溶性糖含量均显著高于 CK 和  $S_4$  处理 ( $P < 0.05$ );在 -20 和 -30 °C 条件下,不同磷肥施用深度处理苜蓿根颈可溶性糖含量均显著高于 CK ( $P < 0.05$ )。在 4, -10, -20 和 -30 °C 条件下, $S_2$  处理的可溶性糖含量总体较高,较 CK 分别显著增

加了 25.81%,30.96%,39.43% 和 123.84%,说明  $S_2$  处理对苜蓿根颈可溶性糖含量有明显的提高效果。在同一磷肥施用深度处理下,不同低温胁迫处理苜蓿根颈可溶性糖含量几乎均有显著差异 ( $P < 0.05$ ),其中以 -20 °C 低温条件下最大,4 °C 下最小。与 4 °C 处理相比,-20 °C 条件下  $S_0$ 、 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$  处理苜蓿的根颈可溶性糖含量分别增加了 140.63%,140.32%,172.37%,178.62% 和 161.56%,说明适当的低温胁迫可以促进苜蓿根颈可溶性糖含量的增长。

表 2 磷肥施用深度对低温胁迫处理苜蓿根颈可溶性糖含量的影响

Table 2 Effect of phosphate fertilizer application depth on soluble sugar content of alfalfa root crown under low temperature stress

处理 Treatment	可溶性糖含量/(mg·g <sup>-1</sup> ) Soluble sugar content			
	4 °C	-10 °C	-20 °C	-30 °C
CK	85.37±5.20 bC	138.67±9.65 cB	209.80±15.75 dA	69.50±7.10 cD
$S_0$	99.53±5.75 abD	165.47±7.96 bB	239.50±9.77 cA	139.47±2.67 bC
$S_1$	108.30±6.95 aD	180.57±7.81 aB	260.27±10.27 bA	148.67±5.84 abC
$S_2$	107.40±9.08 aD	181.60±6.75 aB	292.53±13.33 aA	155.57±6.88 aC
$S_3$	97.80±9.04 abD	177.47±5.87 abB	272.50±8.31 bA	157.30±3.80 aC
$S_4$	87.13±3.58 bC	148.67±6.10 cB	227.90±13.01 bA	136.10±10.75 bB

## 2.3 磷肥施用深度对苜蓿根颈果糖含量的影响

由表 3 可知,在同一低温胁迫处理下,不同磷肥施用深度处理苜蓿根颈的果糖含量均明显高于 CK。在 4 °C 低温条件下, $S_1$  和  $S_2$  处理苜蓿根颈的果糖含量显著高于 CK、 $S_3$  和  $S_4$  处理 ( $P < 0.05$ );在 -10, -20 和 -30 °C 条件下,各施磷深度处理的苜蓿根颈果糖含量均显著高于 CK ( $P < 0.05$ )。在 4, -10, -20, -30 °C 条件下, $S_1$  和  $S_2$  处理苜蓿根颈的果糖含量整体均高于其他处理,且较 CK 分别显著增加 43.66%,22.31%,19.96%,48.44% 和

36.18%,40.73%,30.53%,61.51%,说明  $S_1$  和  $S_2$  处理有利于提高苜蓿根颈中的果糖含量。在同一磷肥施用深度处理下,不同低温胁迫处理间苜蓿根颈果糖含量均有显著差异,其中苜蓿根颈果糖含量在 -20 °C 下最大,4 °C 下最小。与 4 °C 处理相比,-20 °C 下  $S_0$ 、 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$  处理的果糖含量分别增长了 233.02%,174.08%,214.61%,251.97% 和 241.10%,说明适当的低温胁迫可以增加苜蓿根颈中的果糖含量。

表 3 磷肥施用深度对低温胁迫处理苜蓿根颈果糖含量的影响

Table 3 Effect of phosphate fertilizer application depth on fructose content of alfalfa root crown under low temperature stress

处理 Treatment	果糖含量/(μg·g <sup>-1</sup> ) Fructose content			
	4 °C	-10 °C	-20 °C	-30 °C
CK	65.76±8.01 cD	129.62±6.33 cB	215.84±6.22 dA	113.01±8.37 dC
$S_0$	76.37±5.33 bcD	146.36±6.17 bC	254.33±10.17 bA	164.24±6.77 bB
$S_1$	94.47±5.42 aC	158.54±7.48 bB	258.92±14.06 bA	167.75±6.82 bB
$S_2$	89.55±5.34 abC	182.41±7.10 aB	281.73±6.53 aA	182.52±10.05 aB
$S_3$	72.02±2.81 cD	187.07±6.38 aB	253.49±7.41 bA	166.14±8.84 bC
$S_4$	69.90±4.68 cD	151.08±11.32 bB	238.43±10.47 cA	136.46±11.97 cC

## 2.4 磷肥施用深度对苜蓿根颈蔗糖含量的影响

由表 4 可知,在同一低温胁迫处理下,除了  $S_4$  处理,其他磷肥施用深度处理苜蓿根颈的蔗糖含量均显著高于 CK ( $P < 0.05$ )。在 4 °C 低温条件下,不同磷肥施用深度处理中以  $S_3$  处理苜蓿根颈的蔗糖含量最大,较 CK 增长了 84.62%;在 -10 和 -20

°C 下,以  $S_2$  处理苜蓿根颈的蔗糖含量最大,较 CK 分别增长了 38.55% 和 41.12%;在 -30 °C 下, $S_1$  处理苜蓿根颈的蔗糖含量最大,较 CK 增长了 42.49%。以上结果说明,施用适宜深度的磷肥能提高苜蓿根颈的蔗糖含量。在同一磷肥施用深度处理下,苜蓿根颈蔗糖含量均以 -20 °C 下最大,4 °C 下最

小,且均与其他低温胁迫处理间存在显著差异( $P < 0.05$ )。与 4 °C 处理相比,−20 °C 下  $S_0$ 、 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$  处理苜蓿根颈的蔗糖含量分别增长了 322.76%,

262.70%,247.91%,220.71%和 252.06%,说明适当的低温胁迫能促使苜蓿根颈蔗糖含量的增加。

表 4 磷肥施用深度对低温胁迫处理苜蓿根颈蔗糖含量的影响

Table 4 Effect of phosphate fertilizer application depth on sucrose content of alfalfa root crown under low temperature stress

处理 Treatment	蔗糖含量/(mg·g <sup>-1</sup> ) Sucrose content			
	4 °C	−10 °C	−20 °C	−30 °C
CK	59.95±7.18 dD	147.48±9.56 cB	265.63±5.93 dA	115.35±7.72 cC
$S_0$	80.06±3.74 cD	197.00±4.96 aB	338.46±11.29 cA	145.59±9.57 bC
$S_1$	94.65±15.33 bD	201.99±8.13 aB	343.30±6.13 bcA	168.61±8.75 aC
$S_2$	107.75±3.07 abD	204.34±5.32 aB	374.87±13.28 aA	158.94±9.57 abC
$S_3$	110.68±7.17 aD	175.24±11.95 bB	354.96±9.16 bA	149.02±3.75 bC
$S_4$	75.99±10.03 cD	144.21±6.96 cB	267.53±9.22 dA	122.20±10.66 cC

## 2.5 磷肥施用深度对苜蓿根颈淀粉含量的影响

由表 5 可见,在同一低温胁迫处理下,不同磷肥施用深度处理的苜蓿根颈淀粉含量均高于 CK。在 4 °C 下,不同磷肥施用深度处理中, $S_1$  处理苜蓿根颈淀粉含量最大,较 CK 增长了 56.48%;在−10 和−30 °C 下, $S_2$  处理苜蓿根颈淀粉含量均最大,较 CK 分别增长了 67.23%和 66.13%;在−20 °C 下, $S_3$  处理苜蓿根颈淀粉含量最大,较 CK 增长了

147.17%,说明在不同低温条件下,适宜深度施用磷肥均能有效提高苜蓿根颈的淀粉含量。在同一磷肥施用深度处理下,不同低温胁迫处理之间苜蓿根颈淀粉含量总体均存在显著性差异( $P < 0.05$ ),其中以−20 °C 处理苜蓿根颈的淀粉含量最小,4 °C 处理的淀粉含量最大。与 4 °C 处理相比,−20 °C 下  $S_0$ 、 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$  处理苜蓿根颈的淀粉含量分别降低了 75.74%,74.78%,65.18%,52.08%和 74.38%。

表 5 磷肥施用深度对低温胁迫处理苜蓿根颈淀粉含量的影响

Table 5 Effect of phosphate fertilizer application depth on starch content of alfalfa root crown under low temperature stress

处理 Treatment	淀粉含量/(mg·g <sup>-1</sup> ) Starch content			
	4 °C	−10 °C	−20 °C	−30 °C
CK	49.40±6.17 cA	32.01±1.65 dB	11.30±1.69 dD	21.61±1.10 cC
$S_0$	75.05±7.60 aA	35.73±3.89 cdB	18.21±1.74 cD	24.73±2.31 bcC
$S_1$	77.30±6.64 aA	42.31±5.42 bcB	19.65±4.98 bcD	29.50±2.33 abC
$S_2$	73.04±5.21 aA	53.53±5.13 aB	25.43±2.87 abD	35.90±2.94 aC
$S_3$	58.29±1.83 bA	48.25±3.53 abB	27.93±1.40 aC	30.10±3.24 abC
$S_4$	58.01±3.75 bA	36.01±2.18 cdB	14.86±0.92 cdD	24.81±1.21 bcC

## 2.6 苜蓿根颈活力与糖类物质含量的相关性分析

表 6 显示,在 4 °C 下,苜蓿根颈活力与可溶性糖、蔗糖、淀粉含量呈显著或极显著正相关;在−10 °C 下,苜蓿根颈活力与可溶性糖、蔗糖、果糖、淀粉含量呈显著或极显著正相关;在−20 °C 下,苜蓿根颈活力与可溶性糖和蔗糖含量呈显著或极显著正相关;在−30 °C 下,苜蓿根颈活力与蔗糖、果糖含量呈显著正相关。在 4 °C 下,苜蓿根颈可溶性糖含量与蔗糖、淀粉含量呈极显著正相关( $P < 0.01$ );在−10,−20 °C 下,苜蓿根颈可溶性糖含量与蔗糖、果

糖、淀粉含量呈显著或极显著正相关;在−30 °C 下,苜蓿根颈可溶性糖含量与蔗糖、果糖含量呈显著或极显著正相关。在 4,−10 °C 下,苜蓿根颈蔗糖含量与淀粉含量呈显著或极显著正相关;在−20 和−30 °C 下,苜蓿根颈蔗糖含量与果糖和淀粉含量呈显著或极显著正相关。在−20,−30 °C 下,苜蓿根颈果糖含量与淀粉含量呈显著或极显著正相关。以上结果说明,苜蓿根颈中的可溶性糖、蔗糖、果糖和淀粉含量越高,苜蓿渗透调节能力越强,生物膜结构越稳定,根颈活力越高,苜蓿抗寒能力越强。

表 6 苜蓿根颈活力与其糖类物质含量的相关性

Table 6 Correlations between alfalfa root crown vitality and carbohydrate contents

处理温度/°C Processing temperature	测定指标 Measurement index	根颈活力 Root crown vitality	可溶性糖 Soluble sugar	蔗糖 Sucrose	果糖 Fructose
4	可溶性糖 Soluble sugar	0.97**			
	蔗糖 Sucrose	0.97**	0.93**		
	果糖 Fructose	0.67	0.75	0.58	
	淀粉 Starch	0.87*	0.89**	0.86*	0.47

表 6(续) Continued table 6

处理温度/℃ Processing temperature	测定指标 Measurement index	根颈活力 Root crown vitality	可溶性糖 Soluble sugar	蔗糖 Sucrose	果糖 Fructose
-10	可溶性糖 Soluble sugar	0.96**			
	蔗糖 Sucrose	0.79*	0.82*		
	果糖 Fructose	0.85*	0.87*	0.48	
	淀粉 Starch	0.76*	0.85*	0.95**	0.60
-20	可溶性糖 Soluble sugar	0.89**			
	蔗糖 Sucrose	0.85*	0.93**		
	果糖 Fructose	0.69	0.92**	0.90**	
	淀粉 Starch	0.70	0.93**	0.79*	0.89**
-30	可溶性糖 Soluble sugar	0.49			
	蔗糖 Sucrose	0.78*	0.90**		
	果糖 Fructose	0.82*	0.77*	0.91**	
	淀粉 Starch	0.66	0.75	0.86*	0.78*

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 ( $P < 0.05$ ), \*\* indicates very significant correlation ( $P < 0.01$ ).

### 3 讨论

有研究表明,植物根系是最先感受逆境的植物器官,根颈活力常被用以衡量作物生理活性的强弱<sup>[18]</sup>。本研究结果表明,在同一磷肥施用深度处理下,随着胁迫温度的降低,苜蓿根颈活力均持续降低,这是由于随着胁迫温度的降低,苜蓿根颈细胞膜受损程度逐渐加重,细胞液外渗更多,正常的生命活动遭到破坏,导致根颈活力降低。吴立群等<sup>[19]</sup>的研究表明,与对照相比,低温处理水稻幼苗的根系活力均有所下降,与本研究结果一致。温斐斐<sup>[20]</sup>的研究表明,深施磷肥可提高旱地小麦各生育期的根系活力;杨春收<sup>[21]</sup>的研究也表明,磷肥施于距离地表 15 cm 处时能显著增加玉米的根系活力。而本研究结果表明,同一低温胁迫处理下随着磷肥施用深度的增加,苜蓿根颈活力均表现为先升高后降低的变化趋势,其中 S<sub>2</sub> 处理,即磷肥施用深度为 15.0 cm 时的根颈活力总体高于其他处理,说明在距离地表 15.0 cm 处施用磷肥,最有利于苜蓿根颈活力的提高。

可溶性糖是植物体内碳素营养的主要部分,不仅是细胞壁、纤维素、核酸等物质的组成成分,还能作为植物体内各种生命活动提供能量,此外还直接参与调节细胞的渗透压,其含量的多少还对淀粉的积累有重要意义<sup>[22]</sup>。本研究结果表明,在同一磷肥施用深度处理下,随着胁迫温度的降低,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,且在 -20 ℃ 下达到最大值;在同一低温胁迫处理下,不同磷肥施用深度处理苜蓿根颈可溶性糖含量均明显高于 CK,这与杜旭等<sup>[23]</sup>的研究结果一致。本研究

中,在同一低温胁迫处理下,S<sub>2</sub> 处理苜蓿根颈的可溶性糖含量总体较高,说明在距离地表 15.0 cm 处施用磷肥时,可溶性糖含量的积累效果最明显。

蔗糖和果糖是植物体内能调节细胞渗透势、降低细胞冰点、稳定酶和蛋白构象的含碳化合物。有研究表明,蔗糖与果糖是提高苜蓿越冬的抗寒性保护物质<sup>[24]</sup>。本研究结果表明,在同一磷肥施用深度处理下,随着胁迫温度的降低,苜蓿根颈果糖、蔗糖含量均表现为先升高后降低的变化趋势,且 -10, -20 和 -30 ℃ 处理苜蓿根颈的果糖、蔗糖含量均显著高于 4 ℃ 处理。董文科等<sup>[25]</sup>的研究结果表明,低温胁迫可导致青海扁茎早熟禾果糖、蔗糖含量上升,与本研究结果一致。本研究结果还表明,在同一低温胁迫处理下,随着磷肥施用深度的增加,苜蓿根颈蔗糖和果糖含量表现为先升高后降低的趋势,且总体上均高于 CK,这可能是因为磷素是辅酶 I (NAD)、辅酶 II (NADP) 等多种化合物的组成成分,这些化合物在碳水化合物的合成等生理过程中有重要作用,果糖和蔗糖作为植物体内重要的含碳化合物,受到了磷素的显著影响<sup>[26]</sup>。

植物受到低温胁迫后,水解酶活性增强,导致淀粉水解为蔗糖、可溶性糖等具有调节细胞渗透势、降低结冰点能力的物质<sup>[27]</sup>。孙明雪等<sup>[28]</sup>的研究表明,随着胁迫温度的降低,黄花苜蓿和 4 个紫花苜蓿品种根颈中的淀粉含量呈降低趋势。本研究结果表明,在同一磷肥施用深度处理下,苜蓿根颈淀粉含量随着胁迫温度的降低呈先降低后升高的趋势,-30 ℃ 下苜蓿根颈淀粉含量较 -20 ℃ 提高的原因,可能是由于 -30 ℃ 时淀粉水解酶活性减弱,淀粉水解过程受到抑制,进而导致淀粉含量提高。本研究结果

还表明,在同一低温胁迫处理下,随着磷肥施用深度的增加,苜蓿根颈淀粉含量均表现为先升高后降低的趋势,其中  $S_2$  处理的淀粉含量总体较高,说明距离地表 15.0 cm 处施用磷肥,最有利于苜蓿根颈中淀粉的积累。

## 4 结 论

在同一磷肥施用深度处理下,随着胁迫温度的降低,苜蓿根颈活力持续减弱;苜蓿根颈可溶性糖、果糖、蔗糖含量均呈先升高后降低的变化趋势,且均以  $-20\text{ }^\circ\text{C}$  下最大;淀粉含量呈先降低后升高的趋势,在  $-20\text{ }^\circ\text{C}$  下最小。在同一低温胁迫处理下,不同磷肥施用深度处理苜蓿的根颈活力及根颈可溶性糖、果糖、蔗糖、淀粉含量均高于 CK,其中以磷肥施用深度为 15.0 cm 时总体较高。因此建议在科尔沁沙地建植苜蓿时,磷肥施用在距离土壤表面 15.0 cm 处,这有利于促进苜蓿糖类物质含量的增长及根系活力的增强,进而提高苜蓿的抗寒性。

## [参考文献]

- [1] 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 carbohydrates changes of alfalfa[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition),2022,50(3):67-74.
- [2] 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.  
Hasbatar,Gao B. Analysis on the development concepts and countermeasures of grassland industry in Arukorqin Banner[J]. Grassland and Prataculture,2020,32(2):53-56.
- [3] 马红,黎力乙,李宁.不同磷水平对苜蓿生理特征和磷素营养的影响[J].中国草地学报,2021,43(8):34-41.  
Ma H,Li L Y,Li N. Impacts of phosphorus application rates on physiological characteristics and phosphorus accumulation of alfalfa[J]. Chinese Journal of Grassland,2021,43(8):34-41.
- [4] Amruth B,Thippeshappa G N,Harish C. Effect of phosphorus levels through integrated nutrient management (INM) packages on nutrient uptake by groundnut (*Arachis hypogaea* L.)[J]. IJCS,2018,6(3):93-96.
- [5] 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.
- [6] 王刚.土壤有效磷含量对棉花生长发育的影响及其作用机理[D].北京:中国农业科学院,2016.  
Wang G. The effects and mechanism on the cotton growth un-

der the available phosphorus levels [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences,2016.

- [7] Zhang Q,Wang G H,Feng Y K,et al. Changes in soil phosphorus fractions in a calcareous paddy soil under intensive rice cropping [J]. Plant and Soil,2006,288(1/2):141-154.
- [8] 薛小娇,张永清,马星星,等.水分胁迫下新造地施磷深度对苦荞生长及根系分布的影响[J].植物营养与肥料学报,2020,26(8):1481-1491.  
Xue X J,Zhang Y Q,Ma X X,et al. Effects of phosphorus application depth on the growth and root distribution of tartary buckwheat in infertile soil under water stress [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers,2020,26(8):1481-1491.
- [9] 韩建国,李鸿祥,马春晖,等.施肥对草木樨生产性能的影响[J].草业学报,2000,9(1):15-26.  
Han J G,Li H X,Ma C H,et al. Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on sweetclover productivity [J]. Acta Prataculturae Sinica,2000,9(1):15-26.
- [10] 姜宗庆,封超年,刘萍,等.施磷量对不同类型专用小麦产量及剑叶相关生理特性的影响[J].江苏农业科学,2013,41(1):76-80.  
Jiang Z Q,Feng C N,Liu P,et al. Effects of phosphorus application rate on the yield of different types of special wheat and related physiological characteristics of flag leaves [J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2013,41(1):76-80.
- [11] 闫恒辉.不同比例分层施磷对冬小麦产量和磷素利用效率的影响[D].山东泰安:山东农业大学,2019.  
Yan H H. Effects of separated layer phosphorus fertilizer on yield and phosphorus utilization of winter wheat [D]. Tai'an, Shandong:Shandong Agricultural University,2019.
- [12] 王天,宋佳承,闫士朋,等.低温胁迫下磷肥用量对油橄榄生长发育的影响[J].植物营养与肥料学报,2020,26(5):879-890.  
Wang T,Song J C,Yan S P,et al. Growth and development of *Olive europaea* under low temperature stress influenced by phosphate fertilizer application [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers,2020,26(5):879-890.
- [13] 沈祥军,张玉霞,王显国,等.不同水平磷钾肥对沙地紫花苜蓿根颈抗寒性物质的影响[J].内蒙古民族大学学报(自然科学版),2017,32(2):116-121.  
Shen X J,Zhang Y X,Wang X G,et al. Effects of phosphorus and potassium fertilizer on the cold resistance of alfalfa roots and necks in sandy soil [J]. Journal of Inner Mongolia Minzu University (Natural Sciences),2017,32(2):116-121.
- [14] 陈兵兵,石元亮,陈智文.不同P、K、Si肥对玉米苗期抗寒效果的研究[J].中国农学通报,2011,27(3):85-89.  
Chen B B,Shi Y L,Chen Z W. Studies on the effect of different P,K,Si fertilizer of corn cold-resistant [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2011,27(3):85-89.
- [15] 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 morpho-

- logical 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.
- [16] 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.
- [17] 张志良, 瞿伟. 植物学实验指导 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 128-129.
- Zhang Z L, Qu W. Botany experiment guidance [M]. Beijing: Higher Education Press, 2001: 128-129.
- [18] 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.
- [19] 吴立群, 蔡志欢, 张桂莲, 等. 低温对不同耐冷性水稻品种秧苗生理特性及根尖解剖结构的影响 [J]. *中国农业气象*, 2018, 39(12): 805-813.
- Wu L Q, Cai Z H, Zhang G L, et al. Effects of low temperature on physiological characteristics of rice seedlings with different cold tolerance and anatomical structure of root tip [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2018, 39(12): 805-813.
- [20] 温斐斐. 旱地小麦休闲期深松深施磷肥对土壤水分和产量形成的影响 [D]. 山西太谷: 山西农业大学, 2014.
- Wen F F. Effect of deeply applying phosphorus fertilization under the condition of deep scarification in fallow period on soil water moisture and yield formation in dryland wheat [D]. Taigu, Shanxi: Shanxi Agricultural University, 2014.
- [21] 杨春收. 磷肥及施用位置对夏玉米生长发育及产量的影响 [D]. 郑州: 河南农业大学, 2009.
- Yang C S. Effects of phosphorus and its fertilization position on the growth and yield of summer corn (*Zea mays* L.) [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2009.
- [22] 李洪影. 氮磷钾肥对青贮玉米不同形式碳水化合物积累的影响 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2010.
- Li H Y. Effect of nitrogen, phosphorus and potassium fertilization on accumulation of different carbohydrate in silage corn [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2010.
- [23] 杜旭, 黄平升, 杨梅. 不同磷肥对尾巨桉 DH3229 苗木生长及抗性生理的影响 [J]. *森林与环境学报*, 2020, 40(5): 526-533.
- Du X, Huang P S, Yang M. Phosphorus fertilizers on the growth and resistance physiology of *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* DH3229 seedlings [J]. *Journal of Forest and Environment*, 2020, 40(5): 526-533.
- [24] 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.
- [25] 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. Effect 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.
- [26] 李洪影, 焉石, 孙涛, 等. 施磷对不同收获时期青贮玉米碳水化合物积累的影响 [J]. *草业学报*, 2011, 20(4): 90-97.
- Li H Y, Yan S, Sun T, et al. Effect of phosphate on carbohydrate accumulation of silage *Zea mays* in different harvest periods [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2011, 20(4): 90-97.
- [27] 赵红军, 欧欢, 林敏娟, 等. 不同低温处理时间对扁桃枝条抗寒性的影响 [J]. *天津农业科学*, 2019, 25(9): 1-6.
- Zhao H J, Ou H, Lin M J, et al. Changes of physiological characteristics of almond branch under continuous low temperature stress [J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2019, 25(9): 1-6.
- [28] 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.