

网络出版时间:2022-05-27 13:28

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2022.12.002

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20220525.1605.011.html

水磷组合对紫花苜蓿根颈抗氧化特性及越冬率的影响

孙明雪¹, 张玉霞¹, 丛百明², 夏全超¹, 田永雷³, 张庆昕¹, 张冬梅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 通辽市农牧科学研究所, 内蒙古 通辽 028000; 3 内蒙古自治区农牧业科学院, 内蒙古 呼和浩特 010010)

【摘 要】【目的】探究不同水磷组合对科尔沁沙地紫花苜蓿抗寒生理特性的影响, 筛选适宜的水磷组合。【方法】以紫花苜蓿品种‘骑士 T’和‘公农 1 号’为试验材料, 采用两因素裂区试验设计, 以水分处理为主区, 设置灌水时间间隔分别为 4、8 和 12 d(用 W_1 、 W_2 和 W_3 表示), 灌水方式为指针式喷灌, 每次灌溉量为水分入渗到距土表 30 cm 处; 以磷肥施用量为副区, 设置 P_2O_5 施用量为 50、100 和 150 kg/hm²(用 P_1 、 P_2 、 P_3 表示), 并设置不施磷肥为对照(CK), 于封冻前期挖取紫花苜蓿根颈材料, 测定丙二醛(MDA)含量, 过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)活性和可溶性蛋白(SP)含量, 翌年测定越冬率, 并对上述指标进行相关性分析。【结果】在相同灌水时间间隔处理下, ‘骑士 T’和‘公农 1 号’根颈 MDA 含量随着磷肥施用量的增加表现为先降低后升高的变化趋势, CAT、POD、SOD 活性和越冬率则表现为先上升后下降的变化趋势(‘公农 1 号’根颈在 P_3 处理下的 POD 活性除外), ‘骑士 T’根颈 SP 含量表现为持续增长的变化趋势, 而‘公农 1 号’根颈 SP 含量则表现为先增加后减少的变化趋势; 在相同磷肥施用量处理下, ‘骑士 T’和‘公农 1 号’根颈 MDA 含量随着灌水时间间隔的增加表现为持续增长的变化趋势, POD、SOD 活性以及 SP 含量和越冬率则均表现为先上升后下降的变化趋势, ‘骑士 T’根颈 CAT 活性呈先上升后下降的趋势, ‘公农 1 号’根颈 CAT 活性呈持续增加的趋势。 W_2P_2 处理的总体效果最好, 其‘骑士 T’根颈 MDA 含量较 CK 降低 51.84%, CAT、POD 和 SOD 活性、SP 含量及越冬率较 CK 分别增加了 45.12%, 58.11%, 21.98%, 38.18% 和 59.50%; ‘公农 1 号’根颈 MDA 含量较 CK 降低 51.18%, CAT、POD 和 SOD 活性、SP 含量及越冬率较 CK 分别增加了 83.56%, 59.65%, 42.03%, 62.06% 和 55.03%。相关性分析结果显示, CAT、POD、SOD 活性、SP 含量和越冬率相互之间多为显著正相关关系, 上述各指标与 MDA 含量多呈显著负相关关系。【结论】科尔沁沙地种植紫花苜蓿时适宜的水磷组合为灌水时间间隔 8 d、磷肥(P_2O_5)施用量 100 kg/hm², 其降低紫花苜蓿丙二醛含量、增强抗氧化酶活性、提高可溶性蛋白含量的效果总体最优, 并可明显提高紫花苜蓿的越冬率。

【关键词】紫花苜蓿; 水磷组合; 抗寒性; 抗氧化特性; 科尔沁沙地

【中图分类号】S551⁺.7

【文献标志码】A

【文章编号】1671-9387(2022)12-0009-09

Effect of water and phosphorus combination on alfalfa root crown antioxidant characteristics and overwintering rate

SUN Mingxue¹, ZHANG Yuxia¹, CONG Baiming², XIA Quanchao¹, TIAN Yonglei³,
ZHANG Qingxin¹, ZHANG Dongmei¹

(1 College of Agriculture, Inner Mongolia Minzu University/Inner Mongolia Autonomous Region Feedstuff Engineering Technology Research Center, Tongliao, Inner Mongolia 028041, China; 2 Tongliao Agricultural and Animal Husbandry

Research Institute Tongliao, Inner Mongolia 028000, China;

3 Academy of Agriculture and Animal Husbandry, Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot, Inner Mongolia 010010, China)

【收稿日期】2021-11-25

【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(2021GG0109)

【作者简介】孙明雪(1996—), 女(蒙古族), 内蒙古通辽人, 在读硕士, 主要从事牧草种质资源利用研究。

E-mail: 1533019981@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

Abstract: 【Objective】 The effects of different water and phosphorus combination treatments on cold resistance physiological characteristics of alfalfa in Horqin sandy land were explored and the suitable water and phosphorus combinations were screened. 【Method】 A two-factor split-zone test was used for ‘Knight T’ and ‘Gongnong No. 1’. The main area of water treatments included irrigation time intervals of 4, 8 d and 12 d (W_1 , W_2 and W_3), the irrigation method was pointer sprinkler irrigation, and each irrigation was 30 cm away from the soil surface. Phosphate fertilizer application rates in the sub-zone were 50, 100 and 150 kg/hm^2 P_2O_5 (P_1 , P_2 and P_3), and no phosphate fertilizer was used as the control (CK). The alfalfa root crown material was excavated in the pre-freezing period to determine malondialdehyde content (MDA), catalase activity (CAT), peroxidase activity (POD), superoxide dismutase activity (SOD), and soluble protein content (SP). The overwintering rate was determined in the following year, and correlation analysis was conducted. 【Result】 Under same irrigation time intervals, MDA in root crown of ‘Knight T’ and ‘Gongnong No. 1’ showed a trend of first decreasing and then increasing with the increase of phosphate fertilizer application rate, while CAT, POD, SOD and overwintering rate showed an opposite trend (except for POD of ‘Gongnong No. 1’ root crown in P_3 treatment). SP in root crown of ‘Knight T’ showed a trend of continuous increase, while that of ‘Gongnong No. 1’ showed a trend of first increase and then decrease. Under same phosphate fertilizer application rates, MDA in root crown of ‘Knight T’ and ‘Gongnong No. 1’ showed a continuous increasing trend with the increase of irrigation time interval, while POD, SOD, SP and wintering rate showed a trend of first increase and then decrease. CAT in root crown of ‘Knight T’ showed a trend of first increase and then decrease, while that of ‘Gongnong No. 1’ showed a continuous increasing trend. The treatment of W_2P_2 had the best overall effect. Compared with CK, MDA in root crown of ‘Knight T’ decreased by 51.84%, while CAT, POD, SOD, SP and overwintering rate increased by 45.12%, 58.11%, 21.98%, 38.18% and 59.50%, respectively. MDA in root crown of ‘Gongnong No. 1’ decreased by 51.18%, while CAT, POD, SOD, SP and overwintering rate increased by 83.56%, 59.65%, 42.03%, 62.06% and 55.03%, respectively. In correlation analysis, CAT, POD, SOD, SP and overwintering rate had significantly positive correlations with each other, and they had significantly negative correlation with MDA. 【Conclusion】 The suitable combination of water and phosphorus for alfalfa in Horqin sandy land was irrigation interval of 8 d with phosphorus fertilizer (P_2O_5) of 100 kg/hm^2 , which could significantly improve overwintering rate of alfalfa by reducing MDA, enhancing activity of antioxidant enzymes, and increasing SP.

Key words: alfalfa; water and phosphorus combination; cold resistance; antioxidant properties; Horqin sandy land

紫花苜蓿 (*Medicago sativa* L) 作为世界上栽培最为广泛的豆科牧草, 具有营养价值高、适口性好等特点^[1]。受温带大陆性季风气候的影响, 我国内蒙古地区降水主要集中在夏季, 冬季寒冷少雪, 极易发生倒春寒^[2]。内蒙古赤峰市阿鲁科尔沁旗为我国紫花苜蓿生产机械化、规模化、集约化程度最高的地区, 被誉为“中国草都”^[3], 但在 2012—2020 年, 阿鲁科尔沁旗优质紫花苜蓿生产基地多次出现返青率低的问题^[4]。

水分是植物生长过程中必要的环境条件和限制因子, 更是植物生命过程中的基础物质, 植物体内各种生理生化反应、有机物的代谢均有水分参与^[5]。

干旱胁迫会导致植物活性氧代谢失衡, 进而导致膜脂氧化, 此时植物体内的一系列抗氧化系统会通过清除活性氧保护细胞结构^[6-7]。磷作为植物生命过程中必要的三大元素之一, 其在土壤中的移动性较差, 且极易被土壤固定, 大量施用会导致土壤板结和污染^[8], 无法被植物大量吸收, 所以磷素目前已被视为限制植物生长及牧草产量的重要因素^[9]。水肥组合是指将施肥和灌水融为一体以达到作物高品质高产的农业技术^[10], 有研究表明, 磷素可显著改善土壤干旱条件下植株的水分状况, 增强膜的稳定性, 维持植株正常的生命活动, 且能够在一定程度上弥补因水分不足造成的影响^[11]; 有关水磷互作对小麦叶

影响的研究表明,干旱条件下,施用磷肥可明显增强叶片过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)活性,降低了丙二醛(MDA)含量,从而延缓由于干旱造成的细胞衰老^[12]。研究表明,高磷与轻度水分胁迫组合能有效地诱导冬小麦从形态与生理代谢两方面作出响应,通过增强根系生长适合度及抗氧化酶活性,使水分的利用率提高,进而增强抗旱能力^[13];也有研究表明,适量的灌水能提高苗期玉米对磷肥的吸收利用效率,说明适当的水磷组合配比可以达到水磷协同效应^[14]。目前,关于水磷组合对其他作物生长及生理特性方面的研究很多,但关于其对紫花苜蓿抗寒生理特性影响的研究甚少。为此,本研究在科尔沁沙地分析了不同水磷组合处理下紫花苜蓿根颈的生理指标(CAT、POD、SOD活性和MDA、可溶性蛋白(SP)含量)及越冬率,以期为该地区紫花苜蓿生产中水磷的科学管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于内蒙古赤峰市阿鲁科尔沁旗岩峰农业公司(北纬 43°21',东经 119°02'),属于温带大陆性气候,四季分明,降水集中。年平均气温 3℃,10℃以上积温 3 000℃,无霜期 150 d,年平均降水量 400 mm,蒸发量是降水量的 4~5 倍,年平均风速 3.7 m/s。土壤有机质含量 63.4 mg/kg,碱解氮含量 34.89 mg/kg,全氮含量 36.02 mg/kg,速效磷含量 3.71 mg/kg,速效钾含量 77.98 mg/kg。

1.2 试验材料

供试紫花苜蓿品种为‘骑士 T’(‘Knights T’)和‘公农 1 号’(‘Gongnong No. 1’),由北京正道有限公司提供。

1.3 试验方法

于 2017 年 7 月 1 日播种,播种量为 22.5 kg/hm²,播种前一次性施入 KCl(K₂O 含量为 60%) 150 kg/hm² 作为基肥。试验设置土壤水分和施磷量 2 个试验因子,采用两因素裂区试验设计。以水分处理为主区,设置灌水时间间隔分别为 4 d(W₁)、8 d(W₂)和 12 d(W₃),每次灌溉到水分入渗至距土壤表面 30 cm 处(挖开土层目测),灌水处理时间从播种后第 3 天(2017 年 7 月 4 日)至取样前(2017 年 11 月 14 日),灌水方式为指针式喷灌。以磷肥施用量(以 P₂O₅ 计)水平为副区,设置 50 kg/hm²(P₁)、100 kg/hm²(P₂)、150 kg/hm²(P₃) 3 个水平,并设置

不施磷肥为对照(CK),供试肥料为过磷酸钙(P₂O₅ 含量为 44%)。2 个因素共组合成 12 个处理,每个处理 3 次重复,共 36 个小区,3 个主区间隔 15 m;副区小区试验面积 20 m²(4 m×5 m),小区间隔为 1 m。试验期间其他田间管理按常规方法进行。

1.4 样品采集

11 月 15 日前后(封冻前期),每个处理挖取供试材料 50 株,带回室内洗净,切取根颈部分测定相关生理指标。取样后的试验田参照孙洪仁等^[3]的灌水方法进行田间冬季灌水管理,翌年测定紫花苜蓿越冬率。

1.5 测定指标及方法

1.5.1 根颈生理指标 MDA 含量采用硫代巴比妥酸法^[15]测定,POD 活性采用愈创木酚法^[15]测定,SOD 活性采用氮蓝四唑法^[15]测定,CAT 活性采用紫外吸收法^[15]测定,SP 含量采用考马斯亮蓝比色法^[15]测定。

1.5.2 越冬率(winter survival rate,WSR) 于播种当年 2017 年 10 月 26 日,每小区随机设 1 个 1 m² 样方,统计越冬前植株数。2018 年 3 月 26 日出苗至 2018 年 4 月 1 日返青全部出苗后(5 d 内无新增出苗),统计样方内返青植株数,计算越冬率。越冬率=返青植株数/越冬前植株数×100%^[16]。

1.6 数据分析

试验数据用 Microsoft Excel 软件处理并制作表格,用 DPS 7.0 软件进行方差显著性分析及相关性分析,采用 Duncan's 新复极差法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 水磷组合对紫花苜蓿根颈 MDA 含量的影响

如表 1 所示,不同磷肥施用量处理下,随着灌水时间间隔的延长,‘骑士 T’和‘公农 1 号’的根颈 MDA 含量逐渐增加,在 W₃ 处理下达到最大值。在不同的灌水时间间隔处理下,‘骑士 T’和‘公农 1 号’根颈的 MDA 含量在各施磷处理下均显著低于 CK(P<0.05),其中 P₂ 处理对‘骑士 T’和‘公农 1 号’根颈 MDA 含量的降低效果最显著,该处理‘骑士 T’的根颈 MDA 含量在 W₁、W₂、W₃ 处理下较 CK 分别降低了 54.03%、51.84%和 53.62%,‘公农 1 号’的根颈 MDA 含量较 CK 分别降低了 51.52%、51.18%和 49.72%。结果表明,施用磷肥能降低不同灌水时间间隔处理下紫花苜蓿根颈的 MDA 含量,且在 P₂O₅ 施用量为 100 kg/hm²(P₂ 处理)时 MDA 含量最低。

表 1 水磷组合对不同品种紫花苜蓿根颈 MDA 含量的影响

Table 1 Effect of water and phosphorus combination on root crown MDA of different alfalfa varieties nmol/g

品种 Varieties	磷肥用量处理 Phosphate fertilizer dosage treatment	灌水时间间隔处理 Irrigation time interval treatment		
		W ₁	W ₂	W ₃
骑士 T Knights T	CK	2.48±0.11 aC	3.53±0.11 aB	4.42±0.31 aA
	P ₁	1.73±0.06 bB	2.82±0.10 bA	3.09±0.22 bA
	P ₂	1.14±0.12 cC	1.70±0.15 dB	2.05±0.14 cA
	P ₃	1.37±0.25 cB	2.15±0.19 cA	2.37±0.05 cA
公农 1 号 Gongnong No. 1	CK	1.98±0.20 aB	3.38±0.11 aA	3.52±0.21 aA
	P ₁	1.32±0.12 bB	2.49±0.17 bA	2.58±0.15 bA
	P ₂	0.96±0.05 cB	1.65±0.14 dA	1.77±0.17 cA
	P ₃	1.56±0.09 bC	2.08±0.15 cC	2.80±0.12 bA

注:同列数据后标不同小写字母表示在相同灌水时间间隔下不同磷肥施用量处理间差异显著($P<0.05$),同行数据后标不同大写字母表示在相同磷肥施用量下不同灌水时间间隔处理间差异显著($P<0.05$)。下表同。

Note:Different lowercase letters indicate significant differences among treatments with different phosphate fertilizer application rates under same irrigation time interval ($P<0.05$),while different capital letters indicate significant differences between treatments with different irrigation time intervals under same phosphate fertilizer application rate ($P<0.05$). The same below.

2.2 水磷组合对紫花苜蓿根颈 CAT 活性的影响

如表 2 所示,不同磷肥施用量处理下,‘骑士 T’和‘公农 1 号’苜蓿根颈 CAT 活性均以 W₂ 处理显著高于 W₁ 处理($P<0.05$),其中‘骑士 T’CAT 活性在 P₁、P₂ 和 P₃ 处理下较 W₁ 处理分别提高了 25.17%,17.91%和 15.38%,‘公农 1 号’较 W₁ 处理分别提高了 30.95%,32.86%和 37.18%。在不同的灌水时间间隔处理下,‘骑士 T’和‘公农 1 号’

根颈 CAT 活性在不同磷肥用量处理下均高于 CK,其中以 P₂ 磷肥用量处理最高,均显著高于 CK($P<0.05$),其中‘骑士 T’CAT 活性在 W₁、W₂、W₃ 处理下较 CK 分别提高了 57.43%,45.12%和 34.75%,‘公农 1 号’较 CK 分别提高了 43.97%,83.56%和 83.53%。结果表明,施用磷肥能显著增强不同灌水时间间隔处理下紫花苜蓿根颈的 CAT 活性,且在 P₂O₅ 施用量为 100 kg/hm² 时 CAT 活性最强。

表 2 水磷组合对不同品种紫花苜蓿根颈 CAT 活性的影响

Table 2 Effects of water and phosphorus coupling on CAT activity in root crown of different alfalfa varieties U/(g·min)

品种 Varieties	磷肥用量处理 Phosphate fertilizer dosage treatment	灌水时间间隔处理 Irrigation time interval treatment		
		W ₁	W ₂	W ₃
骑士 T Knights T	CK	34.44±2.69 cB	43.11±2.04 cA	39.83±2.95 bAB
	P1	44.67±1.44 bB	52.67±4.11 bA	44.46±3.83 bB
	P2	54.22±3.33 aB	62.56±1.10 aA	53.67±0.72 aB
	P3	51.33±1.44 aB	61.56±3.86 aA	51.56±0.63 aB
公农 1 号 Gongnong No. 1	CK	36.89±3.28 cA	38.44±1.13 cA	40.44±2.11 cA
	P1	43.78±1.66 bB	57.33±3.40 bA	59.56±1.50 bA
	P2	53.11±3.62 aB	70.56±3.13 aA	74.22±1.91 aA
	P3	50.22±1.66 aB	68.89±1.57 aA	72.22±3.82 aA

2.3 水磷组合对紫花苜蓿根颈 POD 活性的影响

如表 3 所示,不同磷肥施用量处理下,‘骑士 T’和‘公农 1 号’的根颈 POD 活性均在 W₂ 处理下最高,说明灌水时间间隔为 8 d 时 POD 活性最强。在不同的灌水时间间隔处理下,‘骑士 T’和‘公农 1 号’的根颈 POD 活性在不同磷肥用量处理下均显著高于 CK($P<0.05$),其中以 P₂ 磷肥用量处理最高,该处理‘骑士 T’在 W₁、W₂、W₃ 处理下的 POD 活性较 CK 分别提高了 34.59%,58.11%和 38.19%,‘公农 1 号’较 CK 分别提高了 14.60%,59.65%和

9.91%。以上结果说明,施用磷肥能提高不同灌水时间间隔处理下紫花苜蓿根颈的 POD 活性,且在 P₂O₅ 施用量为 100 kg/hm² 时 POD 活性最强。

2.4 水磷组合对紫花苜蓿根颈 SOD 活性的影响

如表 4 所示,不同磷肥施用量处理下,‘骑士 T’和‘公农 1 号’根颈 SOD 活性均在 W₂ 处理下最高,说明灌水时间间隔为 8 d 时 SOD 活性最强。在不同的灌水时间间隔处理下,‘骑士 T’和‘公农 1 号’的根颈 SOD 活性在各磷肥用量处理下均显著高于 CK($P<0.05$),其中以 P₂ 处理最高,其‘骑士 T’在

W₁、W₂、W₃ 处理下根颈 SOD 活性较 CK 分别提高了 34.64%,21.98%和 42.18%,‘公农 1 号’较 CK 分别提高了 52.02%,42.03%和 26.71%,说明施用

磷肥能增强不同灌水时间间隔处理下紫花苜蓿根颈的 SOD 活性,且在 P₂O₅ 施用量为 100 kg/hm² 时 SOD 活性最强。

表 3 水磷组合对不同品种紫花苜蓿根颈 POD 活性的影响

Table 3 Effect of water and phosphorus combination on root crown POD activity of		different alfalfa varieties			U/(g · min)
品种 Varieties	磷肥用量处理 Phosphate fertilizer dosage treatment	灌水时间间隔处理 Irrigation time interval treatment			
		W ₁	W ₂	W ₃	
骑士 T Knights T	CK	1.33±0.10 cB	1.48±0.22 dA	1.10±0.08 bA	
	P ₁	1.53±0.11 bB	1.71±0.08 cA	1.44±0.07 aAB	
	P ₂	1.79±0.03 aB	2.34±0.09 aA	1.52±0.08 aC	
	P ₃	1.73±0.08 aB	2.14±0.05 bA	1.12±0.12 bC	
公农 1 号 Gongnong No. 1	CK	1.37±0.04 aB	1.14±0.13 cB	1.11±0.10 aA	
	P ₁	1.54±0.16 aB	1.84±0.14 aA	1.18±0.13 aC	
	P ₂	1.57±0.06 aB	1.82±0.02 aA	1.22±0.03 aC	
	P ₃	1.51±0.09 aA	1.52±0.11 bA	1.23±0.15 aB	

表 4 水磷组合对不同品种紫花苜蓿根颈 SOD 活性的影响

Table 4 Effect of water and phosphorus combination on SOD activity in root crown of		different alfalfa varieties			U/(g · min)
品种 Varieties	磷肥用量处理 Phosphate fertilizer dosage treatment	灌水时间间隔处理 Irrigation time interval treatment			
		W ₁	W ₂	W ₃	
骑士 T Knights T	CK	138.31±7.15 cB	160.28±6.99 bA	131.64±7.76 bB	
	P ₁	169.56±4.89 bB	186.37±11.31 aA	183.57±5.83 aA	
	P ₂	186.22±4.46 aA	195.51±7.32 aA	187.16±1.94 aA	
	P ₃	180.43±2.47 abA	187.21±3.79 aA	186.53±3.79 aA	
公农 1 号 Gongnong No. 1	CK	118.18±8.06 cB	131.11±9.65 cA	121.31±7.52 cAB	
	P ₁	167.06±9.43 bA	176.07±8.76 abA	152.27±2.27 aB	
	P ₂	179.66±4.87 aA	186.22±6.37 aA	153.71±6.24 aB	
	P ₃	162.42±6.28 bA	171.20±6.53 bA	138.46±2.75 bB	

2.5 水磷组合对紫花苜蓿根颈 SP 含量的影响

如表 5 所示,不同磷肥施用量处理下,‘骑士 T’和‘公农 1 号’的根颈 SP 含量均在 W₂ 处理下最高,说明灌水时间间隔为 8 d 的处理促进根颈中 SP 积累的效果最显著。在不同的灌水时间间隔处理下,‘骑士 T’和‘公农 1 号’的根颈 SP 含量在各磷肥用

量处理下均高于 CK,其中 P₂ 和 P₃ 处理的 SP 含量均显著高于 CK($P<0.05$),说明适量的施用磷肥,能提高不同灌水时间间隔处理下紫花苜蓿根颈的 SP 含量,且在 P₂O₅ 施用量为 100 和 150 kg/hm² 时效果最佳。

表 5 水磷组合对不同品种紫花苜蓿根颈可溶性蛋白(SP)含量的影响

Table 5 Effect of water and phosphorus combination on soluble protein content in root crown of		different alfalfa varieties			mg/g
品种 Varieties	磷肥用量处理 Phosphate fertilizer dosage treatment	灌水时间间隔处理 Irrigation time interval treatment			
		W ₁	W ₂	W ₃	
骑士 T Knights T	CK	16.11±1.54 cB	20.85±1.13 cA	19.12±1.22 bA	
	P ₁	18.70±1.08 bB	23.46±0.67 bA	21.45±0.38 bA	
	P ₂	20.66±0.88 abC	28.81±1.23 aA	24.14±0.79 aB	
	P ₃	21.79±1.28 aC	29.69±1.98 aA	25.16±0.96 aB	
公农 1 号 Gongnong No. 1	CK	19.22±1.26 cA	21.93±1.06 cA	19.64±1.59 cA	
	P ₁	23.79±1.51 bB	27.33±1.28 bA	25.96±1.12 bAB	
	P ₂	27.79±0.88 aB	35.54±0.83 aA	29.78±0.90 aB	
	P ₃	23.90±1.12 bB	28.63±1.60 bA	25.58±2.37 bB	

2.6 水磷组合对紫花苜蓿越冬率的影响

如表 6 所示,不同磷肥施用量处理下,‘骑士 T’和‘公农 1 号’均以 W₂ 处理下的越冬率最高。在不同的灌水时间间隔处理下,‘骑士 T’和‘公农 1 号’的越冬率在不同磷肥用量(‘骑士 T’W₂P₁ 处理除外)处理下显著高于 CK($P<0.05$),其中以 P₂ 处理

的越冬率最高,其‘骑士 T’的越冬率在 W₁、W₂、W₃ 处理下较 CK 分别提高 95.77%,59.50% 和 58.38%,‘公农 1 号’较 CK 分别提高 70.09%,55.03%和 62.52%,说明施用磷肥能提高不同灌水时间间隔处理下紫花苜蓿的越冬率,且在 P₂O₅ 施用量为 100 kg/hm² 时越冬率最高。

表 6 水磷组合对不同品种紫花苜蓿越冬率的影响

Table 6 Effect of water and phosphorus coupling on overwintering rate of different alfalfa varieties		%		
品种 Varieties	磷肥用量处理 Phosphate fertilizer dosage treatment	灌水时间间隔处理 Irrigation time interval treatment		
		W ₁	W ₂	W ₃
骑士 T Knights T	CK	33.56±3.93 cB	46.22±4.76 cA	41.11±0.73 cA
	P1	48.37±4.48 bA	53.63±2.31 cA	50.52±4.68 bA
	P2	65.70±4.37 aB	73.72±0.46 aA	65.11±3.93 aB
	P3	58.52±2.46 aA	61.63±2.63 bA	57.56±4.11 bA
公农 1 号 Gongnong No. 1	CK	39.85±2.00 cA	46.30±4.45 cA	40.02±2.36 cA
	P1	52.01±4.73 bA	56.81±1.11 bA	54.52±2.06 bA
	P2	67.78±2.13 aAB	71.78±3.93 aA	65.04±1.41 aB
	P3	47.33±2.37 bB	58.23±3.64 bA	52.52±2.10 bAB

2.7 紫花苜蓿根颈中生理指标及越冬率间的相关性分析

由表 7 可知,‘骑士 T’根颈 MDA 含量与 SP 含量无显著相关关系,与 CAT、POD、SOD 活性和越冬率均呈显著负相关($P<0.05$),POD 活性与 SOD 活性和 SP 含量均呈显著正相关($P<0.05$),其余指标之间均呈极显著正相关($P<0.01$);‘公农 1 号’根颈 MDA 含量与 CAT 活性、SP 含量相关性不显

著,CAT 活性与 POD 和 SOD 活性相关性不显著,MDA 含量与 POD、SOD 活性和越冬率均呈显著负相关($P<0.05$),POD 活性与 SP 含量呈显著正相关($P<0.05$),其余指标之间均呈极显著正相关($P<0.01$)。结果表明,苜蓿根颈中抗氧化酶活性、SP 含量越高,MDA 含量就越低,植物受伤害的程度越轻,苜蓿越冬能力越强。

表 7 紫花苜蓿根颈丙二醛与抗氧化酶活性、可溶性蛋白含量及越冬率的相关性分析

Table 7 Correlation analysis of alfalfa root crown malondialdehyde with antioxidant enzyme activity,soluble protein content and winter survival rate						
品种 Varieties	测定指标 Measurement index	MDA	CAT	POD	SOD	可溶性蛋白 Soluble protein
骑士 T Knights T	CAT	-0.55 *				
	POD	-0.57 *	0.79 **			
	SOD	-0.63 *	0.86 **	0.61 *		
	可溶性蛋白 Soluble protein	-0.26	0.91 **	0.66 *	0.74 **	
	越冬率 Overwintering rate	-0.63 *	0.94 **	0.71 **	0.87 **	0.79 **
公农 1 号 Gongnong No. 1	CAT	-0.21				
	POD	-0.61 *	0.20			
	SOD	-0.66 *	0.51	0.81 **		
	可溶性蛋白 Soluble protein	-0.44	0.82 **	0.57 *	0.81 **	
	越冬率 Overwintering rate	-0.56 *	0.74 **	0.53	0.82 **	0.95 **

注:数据后标 * 表示相关性显著($P<0.05$),标 * * 表示相关性极显著($P<0.01$)。
Note: * indicates significant correlation ($P<0.05$),and * * indicates very significant correlation ($P<0.01$).

3 讨 论

植物受到逆境胁迫后,体内会产生活性氧、自由基等对植物有伤害作用的物质,继而会开启植物体内的抗氧化酶系统,抗氧化酶系统中的 CAT、POD、SOD 等酶可清除这些有害物质^[17]。本研究表明,在

施磷量相同的条件下,随着灌水时间间隔的延长,紫花苜蓿根颈 CAT、POD 和 SOD 活性大多呈现出先升高后降低的变化趋势,说明轻度水分胁迫能诱导抗氧化酶活性增强;在相同灌水时间间隔处理下,随着磷肥施用量的增加,‘骑士 T’和‘公农 1 号’苜蓿根颈中 CAT、POD 和 SOD 活性大多表现为先升高

后降低的变化趋势,说明在水分胁迫条件下适量增施磷肥,可增强紫花苜蓿根颈中的抗氧化酶活性,进而减缓细胞膜脂过氧化,延缓细胞衰老。

可溶性蛋白是能对生物膜和细胞质起到保护作用的渗透调节物质,具有较强的亲水特性,可提高细胞的保水能力^[18],是分析植物抗寒性的重要指标。李佳欢等^[19]的研究表明,适度干旱胁迫处理可增加苜蓿根颈中的可溶性蛋白含量,本试验结果与其一致,可能是因为适度延长灌水时间间隔使植物细胞中蛋白水解酶类活性增强,导致不可溶蛋白质向可溶性蛋白质转化^[20],进而使可溶性蛋白含量增加。另外,随着磷肥施用量的增加,‘骑士 T’苜蓿根颈可溶性蛋白含量在相同灌水时间间隔处理下均呈增长的趋势,‘公农 1 号’苜蓿根颈可溶性蛋白含量在相同灌水时间间隔处理下呈先增长后降低的趋势,说明水分胁迫条件下适量增施磷肥能促进根系生长及养分吸收,缓解水分胁迫对植物正常生命活动的限制,并且磷作为植物体内蛋白质的重要组成部分,促进了紫花苜蓿根颈中可溶性蛋白的积累,而过量的磷肥则对可溶性蛋白的积累有抑制作用。

MDA 是细胞膜脂氧化过程中产生的一种高活性的过氧化产物,可以与细胞中的多种物质发生反应,进而影响细胞活性氧的代谢过程^[21-22]。当土壤的水肥条件不利于植物生长时,会导致细胞中的 MDA 大量积累,所以 MDA 含量可作为反映植物伤害程度的指标^[23]。本研究结果表明,随着灌水时间间隔的延长,‘骑士 T’和‘公农 1 号’苜蓿根颈的 MDA 含量表现为持续增长,说明干旱胁迫时间的延长会导致细胞膜脂氧化过程加重,这与陈雅婷等^[24]和张银敏^[25]的研究结果一致;且随着磷肥施用量的增加,紫花苜蓿根颈的 MDA 含量在相同灌水时间间隔处理下均表现为先降低后升高的趋势,说明适量增施磷肥,可提高抗氧化酶活性及可溶性蛋白含量,进而增强紫花苜蓿抵御水分胁迫的能力。

本研究结果表明,随着灌水时间间隔的延长和磷肥施用量的增加,‘骑士 T’和‘公农 1 号’紫花苜蓿的越冬率均呈先升高后降低的趋势,且在相关性分析中,越冬率与 CAT、POD、SOD 活性和可溶性蛋白含量均呈显著正相关关系,与 MDA 含量呈显著负相关关系,说明轻度水分胁迫与适量磷肥组合处理,能促进紫花苜蓿根颈中的抗氧化酶活性及可溶性蛋白含量的增加,进而降低 MDA 含量,缓解细胞膜脂氧化,保证生物膜系统的完整性及生理代谢的正常进行^[26],降低紫花苜蓿对不良环境的敏感

度^[11],从而提高其抗寒性,有利于其安全越冬。

4 结 论

‘骑士 T’和‘公农 1 号’苜蓿根颈的 POD、SOD 活性、可溶性蛋白含量及越冬率均在灌水时间间隔为 8 d 时达到最大值,CAT 活性在此灌水时间间隔处理下也较高;‘骑士 T’和‘公农 1 号’苜蓿根颈的 POD 和可溶性蛋白含量在 P_2 和 P_3 处理下均显著高于 CK(‘公农 1 号’苜蓿根颈的 W_3P_3 处理除外); W_2P_2 处理的总体效果最好,该处理‘骑士 T’根颈 MDA 含量较 CK 降低 51.84%,CAT、POD、SOD 活性以及可溶性蛋白含量和越冬率较 CK 分别增加了 45.12%,58.11%,21.98%,38.18%和 59.50%;‘公农 1 号’根颈 MDA 含量较 CK 降低 51.18%,CAT、POD、SOD 活性以及可溶性蛋白含量和越冬率较 CK 分别增加了 83.56%,59.65%,42.03%,62.06%和 55.03%。因此建议,科尔沁沙地建植苜蓿,水磷耦合的组合宜为灌水时间间隔为 8 d,磷肥(P_2O_5)施用量为 100 kg/hm²。

[参考文献]

- [1] Min C W, Khan I, Lee B H. Aluminum stress inhibits root growth and alters physiological and antioxidant enzyme responses in alfalfa (*Medicago sativa* L.) roots [J]. Journal of The Korean Society of Grassland and Forage Science, 2019, 39 (4): 298-302.
- [2] 王旭东, 韩润英, 翟天慧, 等. 通辽市紫花苜蓿越冬存在的问题以及提高返青率的措施 [J]. 饲料广角, 2013(2): 47-48.
Wang X D, Han R Y, Zhai T H, et al. Problems in the overwintering of alfalfa in Tongliao City and measures to increase the green rate [J]. Feed Wide Angle, 2013(2): 47-48.
- [3] 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 Alike'rqin Banner [J]. China Dairy Cattle, 2021 (3): 58-62.
- [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] Gemma M, Guillaume T, Regina R, et al. Do metabolic changes underpin physiological responses to water limitation in alfalfa (*Medicago sativa*) plants during a regrowth period [J]. Agricultural Water Management, 2019, 212: 1-11.
- [6] 邓辉茗, 龙聪颖, 蔡仕珍, 等. 不同水分胁迫对绵毛水苏幼苗形态和生理特性的影响 [J]. 西北植物学报, 2018, 38(6): 1099-1108.

- Deng H M, Long C Y, Cai S Z, et al. Morphological and physiological characteristics of *Stachys lanata* seedling under water stress [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2018, 38 (6): 1099-1108.
- [7] Raj K, Vasanthan B, Ajay A. Calcium regulates Gladiolus flower senescence by influencing antioxidative enzymes activity [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2011, 33(5): 15-23.
- [8] Volf M R, Rosolem C A. Soil P diffusion and availability modified by controlled-release P fertilizers [J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2020, 21(1): 162-172.
- [9] 韩圆圆. 吉林省雨养农区玉米水磷耦合施肥技术研究 [D]. 长春: 吉林农业大学, 2017.
- Han Y Y. Study on coupling fertilization of water and phosphorus in maize in rainfed agriculture area of Jilin Province [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2017.
- [10] Zhang Y J, Zhang W, Wu M, et al. Effects of irrigation schedules and phosphorus fertilizer rates on grain yield and quality of upland rice and paddy rice [J]. Environmental and Experimental Botany, 2021, 186: 104465.
- [11] 张岁岐, 山 仑, 薛青武. 氮磷营养对小麦水分关系的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2000(2): 147-151, 165.
- Zhang S Q, Shan L, Xue Q W. Effects of phosphorus and potassium on some physiological and biochemical properties of barley under waterlogging stress [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2000(2): 147-151, 165.
- [12] 曾广伟, 林 琪, 杜金哲, 等. 不同土壤水分条件下施磷量对小麦旗叶衰老及产量的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2010(2): 35-40.
- Zeng G W, Lin Q, Du J Z, et al. Effects of different soil water conditions and different phosphorus supplied on the flag leaf senescence and yield of wheat [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2010(2): 35-40.
- [13] 李万春, 姚雅琴, 于 涛, 等. 水氮磷耦合对拔节期冬小麦根系水分调节特性的影响 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(8): 60-68.
- Li W C, Yao Y Q, Yu T, et al. water regulation characteristics of winter wheat roots at jointing stage in different nitrogen, phosphorus and water coupling [J]. Journal of Northwest A&F University (Nat Sci Ed), 2012, 40(8): 60-68.
- [14] 唐宏亮, 马领然, 张春潮, 等. 水分和磷对苗期玉米根系形态和磷吸收的耦合效应 [J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(5): 582-589.
- Tang H L, Ma L R, Zhang C C, et al. Coupling effects of water and phosphorus on root morphology and phosphorus uptake of maize at seedling stage [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(5): 582-589.
- [15] 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 Agricultural Press, 2000: 129-174.
- [16] 刚永和, 张海博, 牛 勇, 等. 青海东部农业干旱区不同播种方式对紫花苜蓿农艺性状和生产性能的影响 [J]. 草业科学, 2021, 38(2): 327-334.
- Gang Y H, Zhang H B, Niu Y, et al. Effect of different sowing methods on the agronomic traits and production performance of alfalfa in the agricultural arid area of Eastern Qinghai [J]. Pratacultural Science, 2021, 38(2): 327-334.
- [17] 单旭东. 保温和浇水处理对冬季胁迫下结缕草生理生化指标的影响 [D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- Shan X D. Effect of heat preservation and watering treatment on the physiological and biochemical traits of *Zoysia japonica* steud. under winter stress [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.
- [18] 赵 雪, 张秀珍, 牟洪香, 等. 干旱胁迫对不同种源文冠果幼苗水分生理特性及渗透调节物质的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2017, 45(6): 17-21.
- Zhao X, Zhang X Z, Mou H X, et al. Effects of drought stress on the water physiological characteristics and osmotic regulation substances of *Xanthoceras sorbifolia* seedlings from different provenances [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2017, 45(6): 17-21.
- [19] 李佳欢, 刘希强, 吕进英, 等. 基于植株各器官生理响应对 12 种苜蓿抗旱性的综合评价 [J]. 草地学报, 2020, 28(5): 1319-1328.
- Li J H, Liu X Q, Lü J Y, et al. Drought resistance of 12 alfalfa varieties based on the physiological response of four plant organs [J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(5): 1319-1328.
- [20] 康俊梅, 杨青川, 樊奋成. 干旱对苜蓿叶片可溶性蛋白的影响 [J]. 草地学报, 2005(3): 199-202.
- Kang J M, Yang Q C, Fan F C. Effects of drought stress on induced protein in the different drought resistance alfalfa leaf [J]. Acta Agrestia Sinica, 2005(3): 199-202.
- [21] 蒋 花, 王占红, 张小燕. PEG 渗透胁迫下 3 份大麦材料幼苗叶片抗旱生理特性分析 [J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(5): 100-105.
- Jiang H, Wang Z H, Zhang X Y. Analysis on drought resistance of leaves of barley seedling under the condition of PEG osmotic stress [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(5): 100-105.
- [22] 韩志顺, 郑敏娜, 梁秀芝, 等. 干旱胁迫对不同紫花苜蓿品种形态特征和生理特性的影响 [J]. 中国草地学报, 2020, 42(3): 37-43.
- Han Z S, Zheng M N, Liang X Z, et al. Effects of drought stress on morphological and physiological characteristics of different alfalfa cultivars [J]. Chinese Journal of Grassland, 2020, 42(3): 37-43.
- [23] 陈彩霞, 王瑞辉, 吴际友, 等. 淹水胁迫对红椿家系幼苗几种生理生化指标的影响 [J]. 西北林学院学报, 2014, 29(3): 21-26.
- Chen C X, Wang R H, Wu J Y, et al. Effects of waterlogging stress on lipid peroxidation and antioxidant system in leaves of *Toona ciliata* seedlings [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(3): 21-26.
- [24] 陈雅婷, 罗永忠, 申海宁, 等. 新疆大叶苜蓿生物量及抗氧化酶类对土壤水分胁迫的响应 [J]. 甘肃农业大学学报, 2020, 55

(4):128-136.

Chen Y T, Luo Y Z, Shen H N, et al. Response of biomass and antioxidant enzyme activity of *Medicago sativa* cv. Xinjiang daye to soil water stress [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2020, 55(4):128-136.

[25] 张银敏. 行距与施肥对紫花苜蓿和蒙农红豆草种子产量及质量的影响 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.

Zhang Y M. Effect of fertilizer and row spacing on the seed yield and seed quality of *Medicago sativa* L. and *Onobrychis viciaefolia* Scop. cv. Mengnong [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Science, 2010.

[26] 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.

(上接第 8 页)

[21] Nakano A, Nakano R, Nishisouzu R, et al. Prevalence and relatedness of *mcr-1*-mediated colistin-resistant *Escherichia coli* isolated from livestock and farmers in Japan [J]. Front Microbiol, 2021, 12:664931.

[22] Chen K, Chan E W, Xie M, et al. Widespread distribution of *mcr-1*-bearing bacteria in the ecosystem, 2015 to 2016 [J]. Euro Surveill, 2017, 22(39):1-11.

[23] Zhou H W, Zhang T, Ma J H, et al. Occurrence of plasmid- and chromosome-carried *mcr-1* in waterborne *Enterobacteriaceae* in China [J]. Antimicrob Agents Chemother, 2017, 61(8):e00017-17.

[24] Sun P, Bi Z, Nilsson M, et al. Occurrence of *bla_{KPC-2}*, *bla_{CTX-M}* and *mcr-1* in *Enterobacteriaceae* from well water in rural China [J]. Antimicrob Agents Chemother, 2017, 61(4):e02569-16.

[25] Mazb, Liu J, Chen L, et al. Rapid increase in the IS26-mediated *cfr* gene in *E. coli* isolates with *IncP* and *IncX4* plasmids and coexisting *cfr* and *mcr-1* genes in a swine farm [J]. Pathogens, 2021, 10(1):33.

[26] Olkkola S, Nyka S, Raulo S, et al. Antimicrobial resistance and multilocus sequence types of finish *Campylobacter jejuni* isolates from multiple sources [J]. Zoonoses Public Health, 2016, 63(1):10-19.

[27] Kovanen S M, Kivisto R I, Rossi M, et al. A combination of MLST and CRISPR typing reveals dominant *Campylobacter jejuni* types in organically farmed laying hens [J]. J Applied Microbiol, 2014, 117(1):249-257.

[28] 游兴勇, 刘成伟, 朱应飞, 等. 江西省食源性沙门菌血清分型及脉冲场凝胶电泳指纹图谱研究 [J]. 中国食品卫生杂志, 2014, 26(6):528-532.

You X Y, Liu C W, Zhu Y F, et al. Serotyping and PFGE type of *Salmonella* isolates from food in Jiangxi Province [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2014, 26(6):528-532.

[29] Bakhshi B, Kalantar M, Rastegar-Lari A, et al. PFGE genotyping and molecular characterization of *Campylobacter* spp. isolated from chicken meat [J]. Iran J Vet Res, 2016, 17(3):177-183.

[30] Tenover F C, Arbeit R D, Goering R V, et al. Interpreting chromosomal DNA restriction patterns produced by pulsed-field gel electrophoresis: criteria for bacterial strain typing [J]. J ClinMicrobiol, 1995, 33(9):2233-2239.