

施钾对紫花苜蓿苗期光合特性及抗蓟马的影响

李亚姝¹, 温雅洁¹, 赵晓东¹, 周生英¹, 胡桂馨¹, 孙尧德²

(1. 甘肃农业大学草业学院, 草业生态系统教育部重点实验室, 甘肃省草业工程实验室, 中-美草地畜牧业可持续发展研究中心, 甘肃 兰州 730070; 2. 民勤县草原工作站, 甘肃 民勤 73399)

摘要:为了探索施钾对苗期紫花苜蓿抗蓟马的影响及其光合机制,以甘农9号(*Medicago sativa* cv. Gannong No. 9)和甘农3号(*M. sativa* cv. Gannong No. 3)紫花苜蓿为材料,设置40,60,80和100 mg/kg 4个钾水平,以不施钾为对照(CK),评价了各钾水平下不同蓟马为害时间的苜蓿的受害程度,并测定了不同施钾水平下苜蓿功能叶片的光合特性和叶绿素含量。结果表明:施钾后,苜蓿受蓟马为害的程度显著减轻;苜蓿叶片叶绿素含量升高,但随着蓟马为害时间的延续,苜蓿的叶绿素含量较受害前期降低。为害7 d时,甘农3号苜蓿净光合速率(P_n)和水分利用率(WUE)升高、气孔导度(G_s)显著升高,除K1水平外,胞间 CO_2 浓度(C_i)在其他施钾水平下均显著升高,除K4水平外,蒸腾速率(T_r)在其他施钾水平下均降低;甘农9号苜蓿的净光合速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度均显著升高,水分利用率升高,蒸腾速率降低。为害14 d时,两个苜蓿品种的净光合速率、气孔导度均显著升高,蒸腾速率降低;甘农3号的水分利用率升高不显著,甘农9号的水分利用率显著升高;除K3水平外,甘农3号的胞间 CO_2 浓度在其他钾水平下均升高,除K4水平外,甘农9号的胞间 CO_2 浓度在其他钾水平下均显著降低。施钾使苜蓿叶片的叶绿素含量增加,提高了苜蓿的光合能力,进而增强了苜蓿对蓟马的抗性。

关键词:钾元素;苜蓿;牛角花齿蓟马;光合生理;抗虫性

中图分类号:S541 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2021)04-0042-08

DOI: 10.13817/j.cnki.cyycp.2021.04.006



钾是作物生长发育所必需的矿质元素之一,它不仅在维持细胞内正常代谢、改善气孔运动、优化光合性能、增强抗逆性等方面具有重要作用^[1-5],在降低植物病虫害发生率方面的作用也尤为突出^[6]。植物缺钾时,往往表现出植株矮小、叶面积下降、下部叶片失绿、叶缘黄化凋萎等症状,最终抑制植株生长和产量形成^[7]。大量研究表明,钾素的供应不足会导致叶片的光合速率下降^[4,8];而充足的钾素供应能增大气孔孔径、改善气孔功

能,还可以改变叶片结构、叶绿体结构和分布,加速同化产物的合成及向根部的运输,提高根瘤利用同化产物(氨基酸)的效率,从而提高苜蓿再生期间的固氮率,为苜蓿高产提供了条件^[9]。苜蓿的产草量随着施钾量的增加而增加^[10-11]。一般认为我国北方土壤中钾含量较高,在北方苜蓿田施钾肥不必要^[12]。但由于近年来农田钾素投入与支出严重不平衡以及土壤水分含量对 K^+ 移动的影响,使北方地区土壤的速效钾或缓效钾含量呈显著下降的趋势^[13]。因此,在我国北方苜蓿主产区,钾素在苜蓿产业发展过程中尤为重要。

紫花苜蓿(*Medicago sativa*)为多年生豆科草本植物,其高产优质、利用年限长、抗逆性强,是支撑我国北方草产业发展的重要牧草^[14]。而随着苜蓿利用年限的增加,草地生境稳定,苜蓿上的病虫害发生日益严重,其中牛角花齿蓟马(*Odontothrips loti*)是我国北方苜蓿生产中的重要害虫之一^[15]。在苜蓿营养生长阶段,蓟马成虫和若虫以特有的锉吸式口器吸食顶端幼

收稿日期:2020-10-19; **修回日期:**2021-04-08

基金项目:国家自然科学基金(31960350);甘肃省自然科学基金(20JR5RA021)

作者简介:李亚姝(1995-),女,甘肃定西人,硕士研究生。

E-mail:330563152@qq.com

胡桂馨为通讯作者。E-mail:huguixin@gsau.

edu.cn。孙尧德为并列通讯作者。E-mail:

381274787@qq.com

嫩组织汁液,使苜蓿叶片卷曲、皱缩^[16-17],光能利用能力下降,光合效率降低^[18]。王小珊等^[19]研究表明,苜蓿在受到牛角花齿蓟马危害后,叶片中的粗蛋白、粗脂肪和可消化蛋白含量均显著降低。张晓燕等^[20]的研究表明抗蓟马苜蓿品种的补偿生长能力及生长指标高于感蓟马品种。研究发现施钾可以提高播种当年苜蓿叶片的光合速率和蒸腾速率^[21]。但关于施钾后苜蓿对蓟马为害的反应与苜蓿光合作用的关系,尚不明确。

因此,本研究以抗蓟马品种甘农 9 号紫花苜蓿和西北地区广泛种植的品种甘农 3 号紫花苜蓿为材料,在不同施钾水平下,评价两个苜蓿品种对牛角花齿蓟马的抗性表现,并测定其光合气体交换参数和功能叶片的叶绿素含量,揭示施钾对苜蓿抗蓟马的光合机制。

1 材料和方法

1.1 试验材料

1.1.1 供试苜蓿品种 甘农 3 号紫花苜蓿(*M. sativa* cv. Gannong No. 3),甘农 9 号紫花苜蓿(*M. sativa* cv. Gannong No. 9)。

1.1.2 供试虫源 牛角花齿蓟马(*Odontothrips loti*)成虫。

1.2 试验设计

试验于 2020 年 5—7 月在甘肃农业大学牧草实训基地网室中进行。取河滩淤积沙土,待其自然风干后测定土壤氮磷钾含量,土壤速效氮为 31.14 mg/kg,速效磷 3.68 mg/kg,速效钾 22.27 mg/kg,全氮含量为 0.94 g/kg,全磷含量为 0.52 g/kg,全钾含量为 0.07 g/kg。试验采用高×直径为 25 cm×30 cm 的塑料花盆,每盆装 5 kg 土,半埋于网室中。于 2020 年 5 月 30 日施肥播种,N 为 5 mg/kg,P(P₂O₅)为 50 mg/kg(按耕层折算相当于施氮肥和磷肥(P₂O₅)114 kg/hm²和 57 kg/hm²),K 肥(以 K₂O 含量计)设置分 4 个钾量处理,分别为 40,60,80 和 100 mg/kg(按耕层折算分别相当于施钾肥 90,135,180 和 225 kg/hm²),依次记做 K1,K2,K3,K4,另设一个不施 K 肥的对照处理,记 K0。管理过程中每次浇水以等体积、不渗漏为准,以确保各处理花盆中肥料不外流以及苜蓿苗水分条件的均一性。每个苜蓿品种每钾处理 9 盆重复,于 4 叶期间苗,选取长势一致的植株,每盆保留 25 株。苜蓿 6 叶期,按 3 头/株接入牛角花齿蓟马成虫,分别于蓟马为害 7 d 和 14 d 时,评价苜蓿的受害程度,测定苜蓿的

光合参数,并取苜蓿功能叶片(倒 4 叶),测定苜蓿叶片的叶绿素含量。

1.3 试验方法

1.3.1 受害程度评价 两个苜蓿品种每处理随机取植株 30 株,根据苜蓿受蓟马危害的叶片分级标准^[22],统计每枝条上部 1/3 所有>4 mm 叶片的受害级别,按下式计算受害指数:

$$\text{受害指数} = \frac{\sum(\text{受害级叶片数} \times \text{受害级值})}{\text{调查总叶片数} \times \text{受害最高级值}} \times 100\%$$

1.3.2 气体交换参数的测定 苜蓿植株接虫 7 d 和 14 d 后,采用 GFS-3000 光合仪(Walz,Germany)对甘农 3 号和甘农 9 号功能叶片倒 4 叶(心叶往下数第 4 片叶子)的光合气体交换参数进行测定,时间为 9:00~11:00,空气中 CO₂ 浓度固定为 400 μmol/mol,光照强度设定为 1 400 μmol/(m²·s),光强设定后,最小稳定时间设定为 120 s,当测量结果变异率小于 0.5 时,记录测定指标。测定指标包括:净光合速率[P_n, μmol/(m²·s)],蒸腾速率[T_r, mmol/(m²·s)],气孔导度[G_s, mmol/(m²·s)],胞间 CO₂ 浓度(C_i, μmol/mol),并计算水分利用效率(WUE, mmol/mol),计算公式为 WUE=P_n/T_r。

1.3.3 叶绿素含量 叶绿素含量测定采用乙醇-丙酮(5:5,V/V)浸提液提取法。称取剪碎的苜蓿鲜样 0.2 g,放入 10 mL 离心管中,然后向试管中加入 10 mL 浸提液,放入暗处提取 24 h,期间摇动数次,混合均匀,即得到叶绿素的提取液。以乙醇-丙酮浸提液为空白,在波长 646,663 和 470 nm 下测定吸光值,根据以下公式计算叶绿素含量:

$$C_a(\text{叶绿素 a 浓度;mg/L}) = 12.21 D_{663 \text{ nm}} - 2.81 D_{646 \text{ nm}};$$

$$C_b(\text{叶绿素 b 浓度;mg/L}) = 20.13 D_{646 \text{ nm}} - 5.03 D_{663 \text{ nm}};$$

$$C_c(\text{类胡萝卜素浓度;mg/L}) = (1\ 000 D_{470 \text{ nm}} - 3.27 C_a - 104 C_b) / 229。$$

$$C_T(\text{叶绿素总量;mg/L}) = C_a + C_b = 7.18 D_{663 \text{ nm}} + 17.32 D_{646 \text{ nm}}$$

$$\text{叶绿素含量(mg/g)} = (\text{色素的浓度} \times \text{提取液体积} \times \text{稀释倍数}) / \text{样重}$$

1.4 数据处理

运用 SPSS 20.0 软件进行 One-way ANOVA 单

因素方差分析对所测数据进行统计分析(Duncan氏新复极差法),采用 Microsoft Excel 2016 进行图表的绘制。

2 结果与分析

2.1 不同施钾水平下苜蓿受害指数的变化

随着施钾水平的提高,两个苜蓿品种的受害指数均下降;随着受害时间的持续,苜蓿的受害指数升高。受害 7d 时,随着施钾水平的提高,甘农 3 号的受害指

数呈先降后升的趋势,甘农 9 号的受害指数呈下降的趋势,甘农 3 号和甘农 9 号分别在 K3 和 K4 水平下受害指数最低,分别较对照 CK 处理显著下降了 41.00% 和 32.07% ($P < 0.05$)。受害 14 d 时,两个苜蓿品种的受害指数均随施钾水平的提高而呈持续降低的趋势,均在 K4 水平下最低,甘农 3 号和甘农 9 号分别较 CK 处理显著下降了 42.95% 和 34.99% ($P < 0.05$)。在同一受害时期、同一施钾水平下,甘农 9 号的受害指数均低于甘农 3 号(表 1)。

表 1 不同施钾水平下苜蓿的受害指数

Table 1 The damage index of alfalfa infested by *Odontothrips loti* under different levels of potassium application

受害时间/d	品种	CK	K1	K2	K3	K4	%
7	G3	23.95±1.02 ^a	16.67±1.09 ^b	14.47±0.81 ^b	14.13±0.65 ^b	15.41±1.08 ^b	
	G9	16.40±1.15 ^a	13.92±1.13 ^{ab}	12.55±0.71 ^b	13.12±0.66 ^b	11.14±0.85 ^b	
14	G3	44.45±1.50 ^a	33.66±1.05 ^b	29.86±1.58 ^{bc}	25.78±1.45 ^c	25.36±1.69 ^c	
	G9	35.47±0.97 ^a	27.09±0.72 ^b	24.10±0.66 ^{bc}	23.37±1.04 ^c	23.06±0.98 ^c	

注:不同小写字母表示同一品种不同水平间差异显著($P < 0.05$);G3 表示甘农 3 号,G9 表示甘农 9 号。下同

2.2 不同施钾水平下苜蓿光合气体交换参数的比较

2.2.1 蓟马为害 7 d 时苜蓿光合气体交换参数的比较 施钾后,两个苜蓿品种的净光合速率(P_n)均升高,甘农 3 号在 K2 处理下净光合速率最大但不显著($P > 0.05$),甘农 9 号苜蓿的净光合速率在 K3 处理下最大,较 CK 处理显著增加了 31.34% ($P < 0.05$);两个苜蓿品种的蒸腾速率均在 K3 处理最小,但变化不显著($P > 0.05$);甘农 3 号苜蓿的气孔导度(G_s)在 K3

处理最大,较 CK 处理显著增加 106.46% ($P < 0.05$),甘农 9 号苜蓿在 K2 处理下气孔导度最大,较 CK 处理显著增加 46.99% ($P < 0.05$);甘农 3 号和甘农 9 号苜蓿的胞间 CO_2 浓度(C_i)均在 K2 处理最大,分别较 CK 处理显著增加 50.35% 和 28.53% ($P < 0.05$);甘农 3 号苜蓿的水分利用率在 K2 处理最大,甘农 9 号苜蓿的水分利用率在 K3 处理最大,但各处理间均无显著差异($P > 0.05$)(表 2)。

表 2 蓟马为害 7d 时不同施钾水平下苜蓿的气体交换参数

Table 2 Gas exchange parameters of alfalfa infested by *Odontothrips loti* for 7 days under different levels of potassium application

品种	处理	净光合速率/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	蒸腾速率/ ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	气孔导度/ ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	胞间 CO_2 浓度/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)	水分利用率/ ($\text{mmol} \cdot \text{mol}^{-1}$)
G3	CK	5.76±1.49 ^a	4.08±0.71 ^a	116.18±27.41 ^c	221.40±21.89 ^b	1.41±0.20 ^a
	K1	5.96±1.32 ^a	4.03±0.19 ^a	172.16±14.74 ^{bc}	209.21±11.56 ^b	1.47±0.29 ^a
	K2	6.82±0.45 ^a	3.84±0.32 ^a	186.00±21.48 ^{ab}	332.88±44.03 ^a	1.78±0.28 ^a
	K3	6.00±1.02 ^a	3.38±0.66 ^a	239.87±20.17 ^a	314.22±58.80 ^a	1.77±0.50 ^a
	K4	6.32±0.84 ^a	4.86±0.88 ^a	172.02±15.40 ^{bc}	284.03±30.06 ^{ab}	1.62±0.38 ^a
G9	CK	6.19±0.73 ^c	5.34±1.00 ^a	155.62±22.61 ^b	221.31±23.37 ^b	1.20±0.18 ^a
	K1	7.25±1.00 ^{abc}	4.79±1.01 ^a	204.63±32.21 ^{ab}	261.19±35.33 ^{ab}	1.51±0.30 ^a
	K2	7.99±0.41 ^{ab}	4.88±0.58 ^a	228.75±28.17 ^a	284.44±30.22 ^a	1.64±0.26 ^a
	K3	8.13±0.76 ^a	4.22±0.53 ^a	197.53±30.88 ^{ab}	232.91±20.54 ^b	1.93±0.45 ^a
	K4	6.62±0.59 ^{bc}	4.24±0.17 ^a	172.53±22.26 ^b	281.95±30.01 ^a	1.56±0.14 ^a

2.2.2 蓟马为害 14 d 时苜蓿光合气体交换参数的比较 施钾后,甘农 3 号的净光合速率升高,在 K4 处理下较 CK 处理显著增加 46.93% ($P < 0.05$),甘农 9 号苜蓿的净光合速率在 K2 处理下最大,较 CK 处理显著增加 176.99% ($P < 0.05$);甘农 3 号的蒸腾速率随施钾水平升高呈先下降再升高的趋势,在 K2 处理最小,甘农 9 号的蒸腾速率在 K4 处理最小,但变化均不显

著 ($P > 0.05$);甘农 3 号和甘农 9 号苜蓿的气孔导度分别在 K3 和 K1 处理最大,分别较 CK 处理显著增加 118.75% 和 164.30% ($P < 0.05$);甘农 3 号和甘农 9 号苜蓿的胞间 CO_2 浓度均在 K3 处理最小,但甘农 3 号的变化不显著 ($P > 0.05$);两个苜蓿品种的水分利用率均在 K2 处理下最大,甘农 9 号的水分利用率升高显著 ($P < 0.05$)。

表 3 蓟马为害 14d 时不同施钾水平下苜蓿的气体交换参数

Table 3 Gas exchange parameters of alfalfa infested by *Odontothrips loti* for 14 days under different levels of potassium application

品种	处理	净光合速率/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	蒸腾速率/ ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	气孔导度/ ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	胞间 CO_2 浓度/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)	水分利用率/ ($\text{mmol} \cdot \text{mol}^{-1}$)
G3	CK	5.86±0.45 ^b	2.47±0.26 ^{ab}	76.11±8.84 ^b	179.47±15.84 ^a	2.37±0.22 ^a
	K1	6.16±0.54 ^b	2.33±0.23 ^b	86.19±8.40 ^b	192.63±17.72 ^a	2.64±0.50 ^a
	K2	6.10±0.62 ^b	2.16±0.19 ^b	92.09±8.82 ^b	176.67±21.24 ^a	2.82±0.57 ^a
	K3	6.51±0.50 ^b	2.97±0.50 ^{a,b}	166.49±22.72 ^a	163.87±20.16 ^a	2.66±0.59 ^a
	K4	8.61±0.90 ^a	3.26±0.31 ^a	139.39±18.68 ^a	191.27±15.93 ^a	2.64±0.31 ^a
G9	CK	4.26±0.69 ^c	2.64±0.42 ^a	107.34±17.64 ^b	255.01±30.45 ^a	1.61±0.22 ^d
	K1	8.88±0.74 ^{ab}	2.52±0.27 ^a	283.70±37.81 ^a	173.50±13.28 ^b	3.52±0.58 ^c
	K2	11.80±1.39 ^a	2.21±0.22 ^a	223.01±25.61 ^a	151.87±14.06 ^b	5.34±0.84 ^a
	K3	11.49±1.61 ^a	2.35±0.35 ^a	230.12±48.77 ^a	138.38±11.10 ^b	4.89±0.44 ^{ab}
	K4	7.51±1.26 ^{bc}	2.04±0.27 ^a	119.38±30.25 ^b	204.64±33.50 ^{ab}	3.68±0.62 ^{bc}

2.3 不同施钾水平下苜蓿叶绿素含量的变化

2.3.1 蓟马为害 7 d 时不同施钾水平下苜蓿叶绿素含量的变化 施钾后,两个苜蓿品种叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素 a+b 的含量及甘农 9 号的类胡萝卜素的含量均增加,甘农 3 号的类胡萝卜素含量减少。甘农 3 号的叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素 a+b 的含量分别在 K2、K4、K2 处理最大,分别较 CK 处理显著增加了 32.99%、53.57% 和 33.87% ($P < 0.05$),类胡萝卜素在 CK 和 K1 处理下含量最大,但不显著。在 K2 处理下,甘农 9 号叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素 a+b 含量最大,类胡萝卜素含量在 K3 处理下最大,但变化均不显著 ($P > 0.05$) (图 1)。

2.3.2 蓟马为害 14 d 时不同施钾水平下苜蓿叶绿素含量的变化 施钾后,在 K2 处理下,甘农 3 号叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 a+b 和类胡萝卜素含量均最大,分别较 CK 处理显著增加了 114.55%、123.53%、97.22% 和 257.14% ($P < 0.05$)。甘农 9 号叶绿素 a 在 K2 处理含量最高,叶绿素 b、叶绿素 a+b 和类胡萝

卜素含量在 K1 处理下最大,但增加均不显著 ($P > 0.05$) (图 2)。

3 讨论

钾在改善植物虫害发生及耐害性方面有着积极的作用^[23]。吴晖等^[24]研究表明,土壤的速效钾含量越高,锥栗品种对栗瘿蜂 (*Dryocosmus kuriphilus*) 的抗性越强,李刘杰^[25]等研究发现适量供钾可增强小麦对蚜虫的抗性。不同的植物种类或同种作物的不同品种(品系)对昆虫的抗性程度有较大的差异^[26-27]。本试验中,施钾后,甘农 3 号和甘农 9 号的受害指数均下降,说明施钾可增强苜蓿对蓟马的抗性;在同一受害时期、同一施钾水平下,甘农 9 号的受害指数均低于甘农 3 号,说明甘农 9 号抗蓟马性强于甘农 3 号,但从施钾后受害指数的下降率来看,施钾对于感蓟马品种甘农 3 号的抗性增强效果高于甘农 9 号。

叶绿素是植物进行光合作用的基础物质,而光合作用是植物生长发育的生理基础,是植物主要的生命

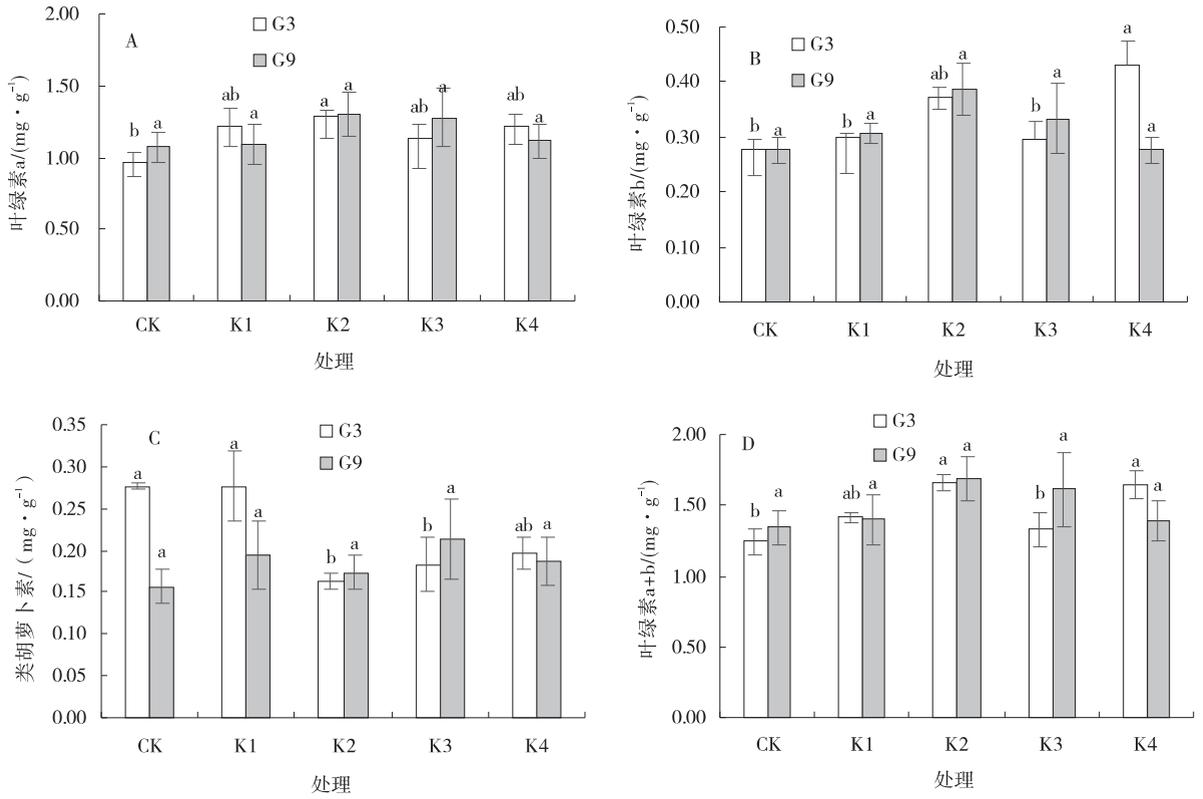


图 1 蓟马为害 7 d 时不同施钾水平下苜蓿的叶绿素含量

Fig. 1 Leaf chlorophyll content of alfalfa infested by *Odontothrips loti* for 7 days under different levels of potassium application

注:不同小写字母表示同一品种不同水平间差异显著($P < 0.05$);G3表示甘农3号,G9表示甘农9号。下同

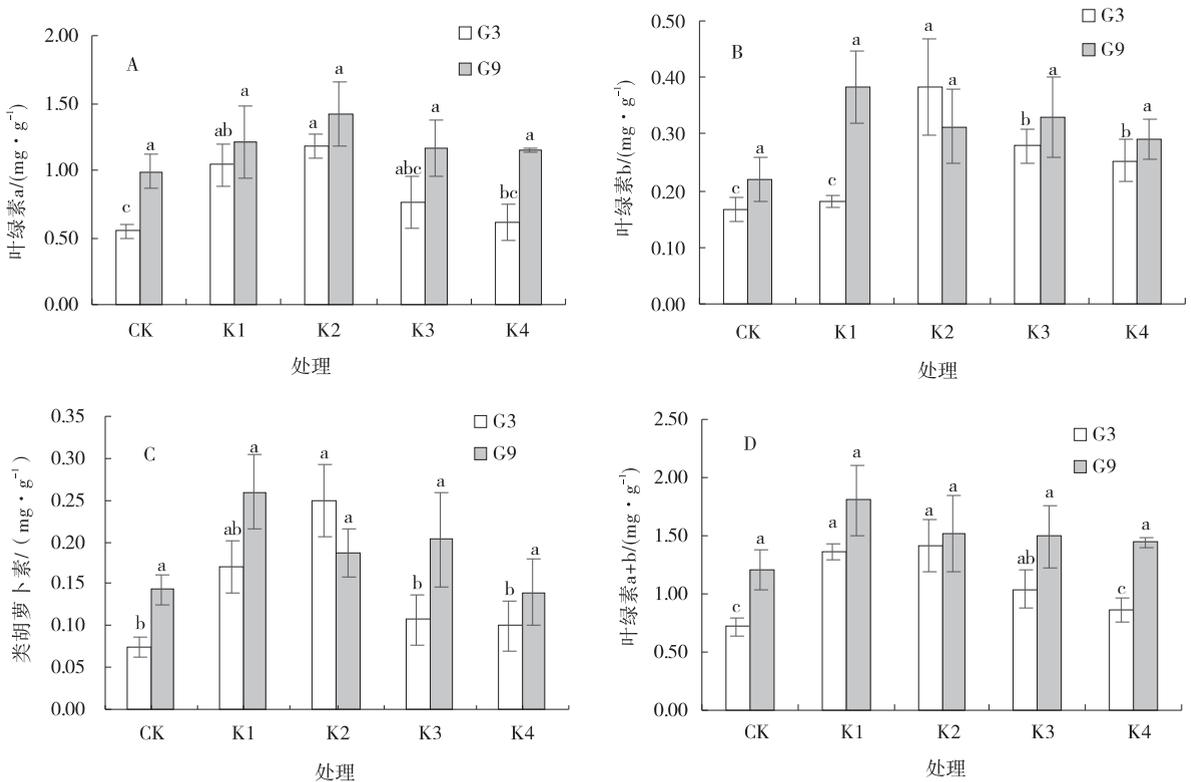


图 2 蓟马为害 14 d 时不同施钾水平下苜蓿的叶绿素含量

Fig. 2 Leaf chlorophyll content of alfalfa infested by *Odontothrips loti* for 14 days under different levels of potassium

活动指标。有利的环境条件与栽培技术能显著提高叶片的光合性能,尤其与施肥量密切相关。合理的施肥能提高叶片的叶绿素含量,延长叶片的光合作用时间,从而提高光合产量^[28],进而影响 ATP 的合成、光合作用关键酶的活化和 CO₂ 的利用等。钾元素也能促进植物对氮素的吸收利用,延缓叶片衰老^[29-31]。绝大部分研究认为,钾素供应不足会显著降低叶片钾浓度,导致光合速率下降^[32-35]。本试验中,施钾后两个品种苜蓿的净光合速率均升高,蒸腾速率降低;受害 7 d 时,甘农 3 号的净光合速率升高但不显著,受害 14 d 时,高钾水平下(K4)甘农 3 号的净光合速率显著升高;在两个受害时间,甘农 9 号的净光合速率均显著升高。说明施钾能增强苜蓿叶片的光合能力,且对抗蓟马苜蓿甘农 9 号的增强效应高于甘农 3 号。施钾后,两个品种苜蓿叶片的叶绿素含量增加,苜蓿的光合速率和光合物质的合成速率提高,促进了苜蓿的补偿生长能力,进而增强了苜蓿对蓟马的耐害性。

水分利用率反映了植物生产过程中的能量转化能力。本试验中,随着施钾水平的升高,两个品种苜蓿的水分利用率均呈现先升高后降低的趋势;受害 7 d 时,两个苜蓿品种水分利用率差别并不明显,但在受害后期(14 d),甘农 9 号的水分利用率显著升高。另外,除了对照,甘农 9 号的水分利用率均高于甘农 3 号,说明适量施钾对甘农 9 号的能量转化能力的增强明显优于甘农 3 号,进而使甘农 9 号苜蓿对蓟马的耐害性表现更好。由于 K⁺ 通过进出保卫细胞调节渗透势起到调节气孔开闭的作用,因此有研究将缺钾条件下光合速率的下降归因于气孔限制^[36]。但有研究发现缺钾条件下乙烯的产生促使气孔导度升高,由此可见,气孔的开闭调节是一个复杂的调节网络,不仅仅只受到钾含量的影响^[37]。本研究中,蓟马为害前期,施钾紫花苜蓿的叶片气孔导度和胞间 CO₂ 浓度随着施钾水平的升高而升高,但在为害后期胞间 CO₂ 浓度的变化与受害前期并不一致。由于气孔的开闭调节极其复杂,因此,施钾量不一定是导致气孔导度降低的原因。由于苜蓿植株在网室中生长,测定光合气体交换参数时将花盆移至室外进行测定,可能是由于网室内外 CO₂ 环境的差别,导致胞间 CO₂ 浓度升高。

4 结论

施钾后,紫花苜蓿的受害指数显著降低,苜蓿叶片的叶绿素含量增加,净光合速率和水分利用率升高。施钾提高了苜蓿叶片的叶绿素含量,增强了苜蓿的净光合速率和光合物质的合成速率,进而增强了苜蓿对蓟马的耐害性。

参考文献:

- [1] Pettigrew W T. Potassium deficiency increases specific leaf weights and leaf glucose levels in field-grown cotton [J]. *Agronomy Journal*, 1999, 91(6): 962-968.
- [2] Jin S H, Huang J Q, Li X Q, *et al.* Effects of potassium supply on limitations of photosynthesis by mesophyll diffusion conductance in *Carya cathayensis* [J]. *Tree Physiology*, 2011, 31(10): 1142-1151.
- [3] Wang M, Zheng Q S, Shen Q R, *et al.* The critical role of potassium in plant stress response [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2013, 14(4): 7370-7390.
- [4] Battie-Laclau P, Laclau JP, Beri C, *et al.* Photosynthetic and anatomical responses of *Eucalyptus grandis* leaves to potassium and sodium supply in a field experiment [J]. *Plant Cell Environment*, 2014, 37(1): 70-81.
- [5] Ellsworth D S, Crous K Y, Lambers H, *et al.* Phosphorus recycling in photo respiration maintains high photosynthetic capacity in woody specie [J]. *Plant Cell Environment*, 2015, 38(6): 1142-1156.
- [6] 张福锁. 植物营养的生态生理学和遗传学[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1993.
- [7] Zörb C, Senbayram M, Peiter E. Potassium in agriculture—status and perspectives [J]. *Plant Physiology*, 2014, 171(9): 656-669.
- [8] Li Y M, Elson M, Zhang D, *et al.* Physiological traits and metabolites of Cacao seedlings influenced by potassium in growth medium [J]. *American Journal of Plant Sciences*, 2013, 4(5): 1074-1080.
- [9] 曾庆飞, 贾志宽, 韩清芳, 等. 施肥对苜蓿生产性能及品质影响的研究综述 [J]. *草业科学*, 2005, 22(7): 8-15.
- [10] 孙浩, 张玉霞, 梁庆伟, 等. 施肥对科尔沁沙地苜蓿产量与品质的影响 [J]. *草原与草坪*, 2020, 40(3): 30-41.
- [11] Dale S. Effects of potassium topdressing a low fertility silt loam soil on alfalfa herbage yields and composition and on soil K values [J]. *Agronomy Journal*, 1975, 67

- (1):60-64.
- [12] 陈新平,张福锁,李晓林.我国北方地区钾素资源管理的研究现状与展望[J].化肥工业,1997(1):18-20.
- [13] 陆景陵.植物营养学.上册[M].北京:中国农业大学出版社,2003.
- [14] 洪绂曾.苜蓿科学[M].北京:中国农业出版社,2009.
- [15] 刘长仲.草地昆虫学[M].北京:中国农业出版社,2009:221-224.
- [16] 吴永敷,李秀娟,赵秀华,等.蓟马对苜蓿的危害[J].中国草原,1988(2):25-27.
- [17] 吴永敷,赵秀华,特木尔布和.蓟马是我国苜蓿生产的主要害虫[J].中国草地,1990(3):65-66.
- [18] 寇江涛,师尚礼,胡桂馨,等.紫花苜蓿对蓟马危害的光合生理响应[J].中国农业科学,2013,46(12):2459-2470.
- [19] 王小珊,杨成霖,王森山,等.蓟马持续为害对苜蓿品质的影响[J].草原与草坪,2014,34(4):31-35.
- [20] 张晓燕,彭然,胡桂馨.牛角花齿蓟马若虫持续为害对苜蓿生长的影响[J].草原与草坪,2017,37(4):8-13.
- [21] 刑月华,谢甫绵,汪仁,等.钾肥对苜蓿光合特性和品质的影响[J].草业科学,2005,22(12):40-43.
- [22] 王茜.牛角花齿蓟马危害对不同苜蓿品种生长的影响[D].兰州:甘肃农业大学,2008.
- [23] 石卫东.氮、钾及其配施对小麦抗蚜性及若干生化指标的影响[D].郑州:河南农业大学,2011.
- [24] 吴晖,陈顺立,黄金聪,等.锥栗品种抗栗瘿蜂性状的评价[J].森林与环境学报,2004,24(4):344-348.
- [25] 李刘杰,汪强,韩燕来,等.钾水平对小麦酚类物质、木质素代谢和接种蚜虫群体动态的影响[J].中国农学通报,2009,25(17):143-148.
- [26] 林克剑,吴孔明,魏洪义,等.寄主作物对B型烟粉虱生长发育和种群增殖的影响[J].生态学报,2003,23(5):870-877.
- [27] 吴青君,徐宝云,朱国仁,等.B型烟粉虱对不同蔬菜品种趋性的评价[J].应用昆虫学报,2004,41(2):152-154.
- [28] 舒翔,范川,李贤伟,等.施肥对香樟幼苗光合生理的影响[J].四川农业大学学报,2013,31(2):157-162.
- [29] 何萍,金继运,李文娟,等.施钾对高油玉米和普通玉米吸钾特性及子粒产量和品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2005,11(5):620-626.
- [30] 李玉影,金继运,刘双全,等.钾对春小麦生理特性、产量及品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2005,11(4):449-455.
- [31] 郭英,孙学振,宋宪亮,等.钾营养对棉花苗期生长和叶片生理特性的影响[J].植物营养与肥料学报,2006,12(3):363-368.
- [32] Pettigrew W T. Potassium influences on yield and quality production for maize, wheat, soybean and cotton [J]. Physiologic Plantarum,2008,133(4):670-681.
- [33] 蒋德安,翁晓燕,洪健,等.低钾营养条件下水稻源叶碳同化物输出的障碍[J].植物生理学报,1994,20(2):137-144.
- [34] 陆志峰,任涛,鲁剑巍,等.缺钾油菜叶片光合速率下降的主导因子及其机理[J].植物营养与肥料学报,2015,22(1):122-131.
- [35] 彭海欢,翁晓燕,徐红霞,等.缺钾胁迫对水稻光合特性及光合防御机制的影响[J].中国水稻科学,2006,20(6):621-625.
- [36] 孙骏威,翁晓燕,李娇,等.缺钾对水稻不同品种光合和能量耗散的影响[J].植物营养与肥料学报,2007,13(4):577-584.
- [37] Benlloch M, Romera J, Cristescu S, *et al.* K⁺ starvation inhibits water-stress-induced stomatal closure via ethylene synthesis in sunflower plants [J]. Journal of Experimental Botany,2010,61(4):1139-1145.

(下转 55 页)