

施磷对紫花苜蓿光合作用及抗蓟马的影响

彭 然^{1,2}, 曾文芳^{1,2}, 李亚姝^{1,2}, 崔晓宁^{1,2}, 胡桂馨^{1,2*}

(1. 甘肃农业大学草业学院, 兰州 730070; 2. 草业生态系统教育部重点实验室, 中—美草地畜牧业可持续发展研究中心, 兰州 730070)

摘要 为了明确施磷对苜蓿抗蓟马的影响及其相关的光合机制,本试验以西北广泛种植的感蓟马苜蓿品种‘甘农3号’和抗蓟马苜蓿品种‘甘农9号’为材料,在大田蓟马为害高峰期,调查评价了不同施磷水平下苜蓿的受害指数、生长指标和蓟马出口数量,测定了不同施磷水平下苜蓿的光合气体交换参数、可溶性糖含量。结果表明:施磷后,‘甘农3号’和‘甘农9号’苜蓿的受害指数均显著降低,株高和产量显著增加,蓟马出口数量无显著变化;净光合速率(P_n)和水分利用率(WUE)显著升高,蒸腾速率(T_r)和气孔导度(G_s)显著降低;苜蓿心叶可溶性糖含量显著升高,但可溶性糖含量与蓟马出口密度间无相关性,而与受害指数之间存在极显著的负相关关系。施磷有效地增强了苜蓿的光合作用,进而增强了苜蓿对蓟马的耐害性。在大田条件下,通过增施磷肥来控制苜蓿蓟马的危害是一种经济有效的绿色防控措施。

关键词 紫花苜蓿; 磷; 光合作用; 可溶性糖; 抗性

中图分类号: S 435.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16688/j.zwbh.2018501

Effects of phosphorus application on alfalfa photosynthesis and resistance to thrips (Thysanoptera: Thripidae)

PENG Ran^{1,2}, ZENG Wenfang^{1,2}, LI Yashu^{1,2}, CUI Xiaoning^{1,2}, HU Guixin^{1,2}

(1. College of Prataculture, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. Laboratory of Grassland Ecosystem, Ministry of Education, Sino-U. S. Centers for Grazingland Ecosystem Sustainability, Lanzhou 730070, China)

Abstract The aim of this research was to investigate the effects of phosphorus application on the mechanism of photosynthesis in the alfalfa *Medicago sativa* and its resistance to thrips. Two alfalfa varieties were chosen for this study: ‘Gannong No. 3’ (thrip-susceptible) and ‘Gannong No. 9’ (thrip-resistant). During the peak period of thrips infection, the damage index, thrips’ number and growth index of alfalfa at different phosphorus levels were investigated and evaluated, and the photosynthetic gas exchange parameter and the content of soluble sugars were determined. The results showed that the damage index was significantly reduced, but the plant height and yield were significantly increased with the increase of phosphorus level. There was no significant change in the number of thrips. The photosynthetic rate (P_n) and efficiency of water application (WUE) were significantly increased but the transpiration rate (T_r) and stomatal conductance (G_s) were reduced with the increase of phosphorus level. The soluble sugar content in the heart leaves was significantly increased with the increase of phosphorus level. There was no correlation between soluble sugar content in the heart leaves and the density of insect population, but there was a highly significant negative correlation between soluble sugar content and the damage index. The alfalfa photosynthesis and its tolerance to thrips were enhanced after the application of phosphorus. It is an economical and effective ecological control measure against thrips to apply phosphorus fertilizer in the field.

Key words alfalfa; phosphorus; photosynthesis; soluble sugar content; resistance to insect

紫花苜蓿 *Medicago sativa* 属多年生豆科牧草, 为“牧草之王”^[1]。近年来,苜蓿种植面积逐年扩大,具有营养价值高,适口性好,抗逆性强等特点,被誉为“牧草之王”。近年来,苜蓿种植面积逐年扩大,苜蓿虫害的发生愈发频繁,以牛角花齿蓟马 *Odon-*

收稿日期: 2018-12-05 修订日期: 2019-02-20

基金项目: 甘肃农业大学科技创新基金(学科建设基金)(GAU-XKJS-2018-012);国家自然科学基金(31260579)

* 通信作者 E-mail: huguixin@gsau.edu.cn

tothrips loti 为优势种的蓟马类害虫已成为我国北方苜蓿产业发展的一大障碍^[2]。在苜蓿营养生长阶段,蓟马主要为害心叶和嫩叶,被害植株矮小,生长不良,严重影响苜蓿草的产量和质量,绝大部分苜蓿品种受害率在 95% 以上,造成的产量损失由 5% 到 100% 不等^[3-4]。在生产中,化学防治仍为主要防治手段,但由于蓟马虫体小、为害隐蔽、繁殖快、易产生抗药性的特点,化学防治难以达到理想的控制效果,且造成环境污染。相对于单一的化学防治,通过土壤施肥管理改变作物的生长环境和增强作物抗虫性,无疑是经济又安全的生态调控措施。

磷是植物生长发育必需的营养元素,其不仅是构成植物有机化合物的重要成分,还参与植物体的代谢,包括糖代谢、碳水化合物的运输以及作物的光合调节、信息传导等,对作物的生长发育、抗逆性、产量品质都有重要影响^[5-6]。增施磷肥可促进植物的光合作用^[7],而植物光合作用能力的变化和光合产物的分配不仅会在短时间内影响植物各个器官的相对生长速率^[8],还影响植物的叶面积、根系吸收养分、水分的速率和根系碳周转^[9-10],进而影响植物对植食性昆虫的耐受性^[11-14]。植物内的可溶性糖在植物和植食性昆虫的关系中起着重要的作用,其含量变化对于植物抗虫性的表达以及取食昆虫的生长发育、寿命、繁殖力均有影响^[15-17]。因此,人为调节植物营养解决植物与植食性昆虫二者之间的营养互作关系,探寻环境友好型的生态调控措施,可为害虫的综合防治提供新的思路与途径^[18]。

目前国内已育成登记抗蓟马苜蓿品种—‘甘农 9 号’紫花苜蓿,但其大面积推广应用需要较长时间。对于北方已广泛种植的感蓟马苜蓿品种而言,如何减轻蓟马危害同时又减少杀虫剂的施用,是生产中迫切需要解决的问题。本研究以西北地区广泛种植但对蓟马抗性较低的丰产品种‘甘农 3 号’紫花苜蓿和抗蓟马品种‘甘农 9 号’紫花苜蓿为材料,在大田蓟马为害高峰期(6 月下旬至 8 月下旬),研究不同施磷水平处理下,两个苜蓿品种对蓟马的抗性表现和蓟马的虫口密度,并测定其光合气体交换参数和叶片碳水化合物含量,探索施磷对苜蓿抗蓟马性的光合作用机理,为营养-苜蓿-蓟马的互作深入研究奠定基础,同时为苜蓿害虫的生态防控提供可行的理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验于 2018 年 5 月—9 月,在甘肃省兰州市甘肃农业大学校内进行。试验点位于兰州市西北部,地处黄土高原西端,地理坐标为 105°41'E,34°05'N,海拔 1 525 m,属温带半干旱大陆性气候,年均降水量 327 mm,年均气温 10.3℃。区内地势平坦,肥力均匀,土壤类型为黄绵土,黄土层较薄;经作者测定:土壤有机质含量 0.88%,pH 7.5,土壤含盐量 0.27%,碱解氮 88.34 mg/kg,有效磷 8.02 mg/kg,有效钾 74.9 mg/kg。

1.2 试验材料

紫花苜蓿品种:‘甘农 3 号’*Medicago sativa* ‘Gannong No. 3’,‘甘农 9 号’*M. sativa* ‘Gannong No. 9’。

供试虫源:苜蓿大田自然发生的以牛角花齿蓟马为优势种的蓟马复合种群。

1.3 试验设计

试验采用随机区组设计。设 3 个重复大区,大区面积为 240 m²,每个大区下设 4 个磷水平处理小区(分别为 6、12、18 和 24 g/m² (P₂O₅),文中用‘P6’、‘P12’、‘P18’、‘P24’表示)和 1 个农药处理小区(小区不施磷,3%吡虫啉乳油(1:1 500,河北野田农用化学有限公司生产)喷洒苜蓿植株,文中用‘I’表示),以喷洒清水的不施磷小区作为对照(CK),每个小区面积均为 20 m² (5 m×4 m)。所有小区均匀地施入同一水平的氮肥和钾肥,分别为 12 g/m² K₂O 和 7.5 g/m² N。试验所用磷肥为过磷酸钙(含 P₂O₅ 12%,湖北吉顺磷化有限公司生产),钾肥为硫酸钾(含 K₂O 60%,新疆罗布泊钾盐有限责任公司生产),氮肥为尿素(含 N 46%,重庆建峰化工股份有限公司生产)。小区之间埋入高 40 cm 的 PVC 板隔离,大区之间埋入高 60 cm 的 PVC 板隔离,每个小区一半播种‘甘农 3 号’,一半播种‘甘农 9 号’。两个品种均于 2017 年 5 月初播种。2018 年 5 月 20 日第一茬苜蓿刈割后测土施磷肥。2018 年 6 月 22 日第二茬苜蓿蕾期,调查苜蓿上蓟马虫口数,计算受害指数;同时采集测定苜蓿植株叶片,在实验室测定相关生物学、气体交换参数及营养指标。

1.4 方 法

1.4.1 受害程度及虫口密度调查

田间苜蓿受蓟马为害的叶片分级标准及蓟马虫

口密度调查方法参照贺春贵等^[19]的方法,并略有改动。按照五点取样方法每品种每处理随机选取 20 个枝条,调查枝条最上部 20 cm 内所有蓟马的成虫和若虫数量,并统计枝条最上部(20 cm)全部叶片(叶片长度大于 0.4 cm)的受害级别。虫口数量统计方法为将苜蓿植株上部叶片放入白色塑料方盒内抖落蓟马成、若虫,统计其数量。受害指数按下式计算:

受害指数 = $[\sum(\text{受害级叶片数} \times \text{受害级值}) / (\text{调查总叶片数} \times \text{最高受害级值})] \times 100\%$ 。

1.4.2 生长指标的测定

株高:每品种处理小区采用五点取样法,每样点随机选取 10 株,测定株高。

产量:每品种处理小区去除边际 40 cm,留茬 3~5 cm,刈割后称取鲜重;然后取样 200 g 鲜草,先在烘箱内(105℃)杀青 15 min,再烘干至恒重(65℃),称取干重。每处理重复 5 次。

产量增长率 = $(\text{处理小区产量} - \text{对照小区产量}) / \text{对照小区产量} \times 100\%$ 。

1.4.3 气体交换参数的测定

参照寇江涛等^[20]的测定方法,利用 GFS-3000 光合仪(Walz, Germany)进行气体交换参数的测定。选择倒 5 叶(心叶开始往下数第 5 片叶)为测定对象,时间为上午 9:00—11:00,空气中的 CO₂ 浓度稳定在 440 μmol/mol,若 10:00 后空气中的 CO₂ 浓度有所变化,则重新调平。为保证光照强度一致,选用 LED 光源代替自然光进行测定,光照强度设定为 1 400 μmol/(m²·s),测定时,当测量结果变异率小于 0.5 时,光合仪测定程序自动采集数据并记录,每个处理设 3 次重复。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 $WUE = P_n / T_r$ 。

1.4.4 心叶可溶性糖含量测定

取同一小区内同一品种的苜蓿心叶共 100 g,包于锡箔纸袋中,液氮速冻,采用蒽酮比色法^[21]测定可溶性糖含量。每处理重复 3 次。

1.5 数据处理

采用 SPSS 20.0 软件对所测数据进行统计分析,用平均值±标准误差表示测定结果。利用单因素方差分析(Duncan 法,显著性水平为 $\alpha = 0.05$)比较不同施

磷水平下苜蓿植株的受害指数、虫口数、气体交换参数、株高、产量、可溶性糖含量等指标的差异,并对受害指数、可溶性糖和总虫口三个指标两两之间进行相关性分析(Pearson);采用 Excel 2016 进行图表绘制。

2 结果与分析

2.1 施磷对苜蓿受害指数的影响

由表 1 可知,苜蓿植株被蓟马为害后,在 4 个施磷处理水平下,两个苜蓿品种(‘甘农 3 号’和‘甘农 9 号’)的受害指数均显著低于对照($P < 0.01$)。‘甘农 3 号’的受害指数在 P18 水平下最小,‘甘农 9 号’的受害指数随着施磷量的增加逐渐降低,在 P24 水平下受害指数最小。在相同的施磷水平下,‘甘农 9 号’的受害指数均低于‘甘农 3 号’的受害指数,但施磷后‘甘农 3 号’的受害指数均低于未施磷‘甘农 9 号’的受害指数。

表 1 不同施磷水平下苜蓿的受害指数¹⁾

Table 1 Damage indexes of alfalfa infested by thrips under different phosphorus levels

处理 Treatment	受害指数/% Damage index	
	甘农 3 号 Gannong No. 3	甘农 9 号 Gannong No. 9
CK	(44.62±0.89) a	(42.21±0.99) a
P6	(41.02±1.85) b	(38.52±1.24) b
P12	(40.26±1.03) b	(37.43±1.61) b
P18	(35.26±1.25) c	(34.65±1.32) bc
P24	(35.66±1.33) c	(32.95±1.03) c
P	<0.001	<0.001

1) 数据为平均值±标准误差,同列数据后的小写字母表示不同处理间的显著性差异($P < 0.05$),下同。

Data are means±SE. Different letters in the same column indicate significant difference among different treatments ($P < 0.05$). The same below.

2.2 施磷对苜蓿蓟马种群数量的影响

由表 2 可知,在不同施磷处理水平下,‘甘农 3 号’上蓟马的虫口数量(成虫、若虫、总虫口)差异不显著;‘甘农 9 号’的若虫虫口数量在 P12 和 P18 水平下低于对照但不显著,在 P6 和 P24 水平下高于对照但不显著,成虫虫口数量差异不显著,总虫口数量在 4 个施磷水平处理下均低于对照,但仅在 P6 和 P18 水平下具有显著性($P < 0.05$),在 P18 水平下虫口数量最少。

2.3 不同施磷水平下苜蓿株高及产量的变化

由图 1 可知,施磷后‘甘农 3 号’和‘甘农 9 号’的株高均显著高于对照($P < 0.05$)。随着磷水平的升高,两个品种的株高都呈现先升高后降低的趋势,‘甘农 3 号’在 P12 水平下达到最高,P18 和 P24 水

平与 P12 水平之间差异不显著;‘甘农 9 号’在 P18 水平下达到最高,P24 水平与 P18 水平之间差异不显著。I(不施磷,喷洒吡虫啉农药)处理后两个品种

的株高均显著高于对照,施磷后‘甘农 3 号’的株高均不显著高于 I 处理,除 P18 水平外,‘甘农 9 号’的株高均高于 I 处理但不显著。

表 2 不同施磷水平下苜蓿单枝条上的蓟马虫口数量

Table 2 The population of thrips on alfalfa single branch under different phosphorus levels

处理 Treatment	甘农 3 号 Gannong No. 3			甘农 9 号 Gannong No. 9		
	成虫数/头·枝条 ⁻¹ Adult number	若虫数/头·枝条 ⁻¹ Nymph number	总虫数/头·枝条 ⁻¹ Total number	成虫数/头·枝条 ⁻¹ Adult number	若虫数/头·枝条 ⁻¹ Nymph number	总虫数/头·枝条 ⁻¹ Total number
CK	(3.50±0.26)a	(0.90±0.41)a	(4.40±0.45)a	(3.55±0.74)a	(0.40±0.70)ab	(3.95±0.92)a
P6	(3.25±0.36)a	(0.75±0.39)a	(4.00±0.50)a	(2.70±0.17)a	(0.45±0.16)a	(3.15±0.13)b
P12	(3.40±0.22)a	(1.00±0.42)a	(4.40±0.34)a	(3.30±0.30)a	(0.20±0.20)b	(3.50±0.27)ab
P18	(3.10±0.22)a	(0.85±0.32)a	(3.95±0.26)a	(2.80±0.29)a	(0.25±0.13)b	(3.05±0.33)b
P24	(3.10±0.34)a	(0.65±0.32)a	(3.75±0.42)a	(2.85±0.17)a	(0.45±0.24)a	(3.30±0.22)ab
P	0.82	0.97	0.73	0.49	0.03	0.04

施磷后,‘甘农 3 号’和‘甘农 9 号’的产量除 P6 水平外均显著高于对照($P<0.05$)。两个品种的产量随着磷水平的变化趋势与株高相同,均为先升后降,且均在 P18 水平下达到最大值,与对照相比‘甘农 3 号’增产 72.7%,‘甘农 9 号’增产 62.4%。I 处

理区的产量均显著高于对照($P<0.05$),‘甘农 3 号’较对照增产 31.3%,‘甘农 9 号’较对照增产 28.1%。施磷处理,‘甘农 3 号’和‘甘农 9 号’两个品种的产量增长率在 P12 和 P18 水平下均显著高于 I 处理($P<0.05$)。

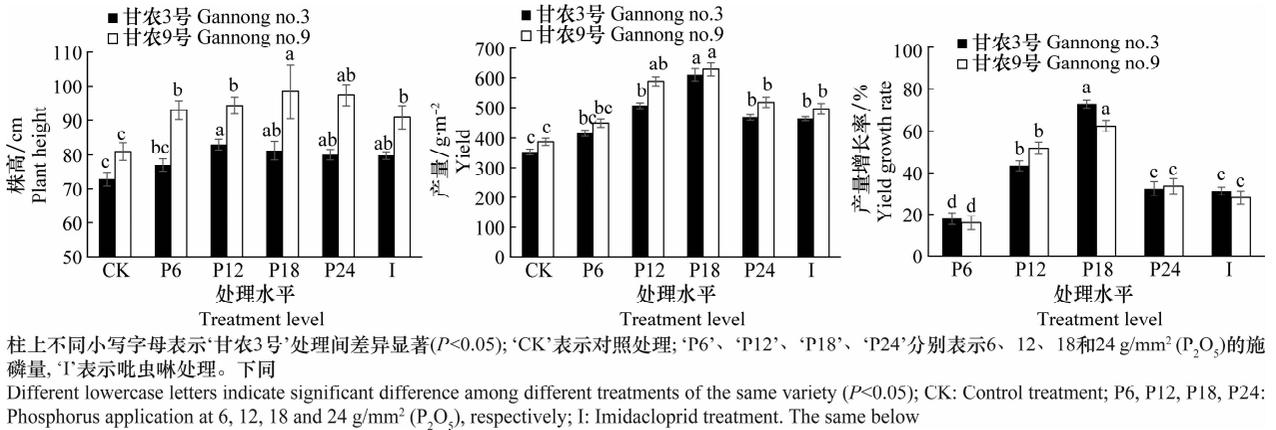


图 1 不同施磷水平下苜蓿的株高、产量及产量增长率¹⁾

Fig. 1 Plant height, yield and yield growth rate of alfalfa under different phosphorus levels

2.4 不同施磷水平下苜蓿光合气体交换参数的比较

由图 2 可知,‘甘农 3 号’和‘甘农 9 号’苜蓿的净光合速率(P_n)均随着磷水平的升高而增加,所有施磷处理苜蓿的净光合速率均显著高于对照($P<0.05$),‘甘农 3 号’的净光合速率在 P18 水平下达到最大值,‘甘农 9 号’在 P24 水平下达到最大值。I 处理苜蓿的净光合速率与对照差异不显著,但均显著低于磷处理苜蓿(P6 处理除外)。随着磷水平的升高,‘甘农 3 号’和‘甘农 9 号’苜蓿的蒸腾速率(T_r)呈现先降低后升高的趋势,且均在 P18 水平下达到最低值;施磷后两个品种的蒸腾速率均显著低于对

照($P<0.05$)。I 处理苜蓿的蒸腾速率同样显著低于对照($P<0.05$)。

‘甘农 3 号’的气孔导度(G_s)随施磷水平的增加呈逐渐降低的趋势,‘甘农 9 号’的气孔导度随施磷水平的增加呈先下降后升高的趋势,在 P18 水平下达到最低值。施磷后两个品种苜蓿的气孔导度均显著低于对照($P<0.05$)。I 处理的‘甘农 3 号’的气孔导度显著低于对照($P<0.05$),而‘甘农 9 号’与对照差异不显著。

施磷后,‘甘农 3 号’和‘甘农 9 号’苜蓿的水分利用率(WUE)均显著高于对照($P<0.05$)。两个

品种苜蓿的水分利用率随着磷水平的增加均呈现先升高后降低的趋势,且均在 P18 水平下达到最大;在 P24 水平下,‘甘农 3 号’的水分利用率显著低于 P18 水平($P < 0.05$),而‘甘农 9 号’的水分利

用率则与 P18 水平差异不显著。I 处理小区的两个品种苜蓿的水分利用率也显著升高($P < 0.05$)。

两个苜蓿品种的胞间 CO_2 浓度(C_i)与施磷水平以及 I 处理之间没有显著差异。

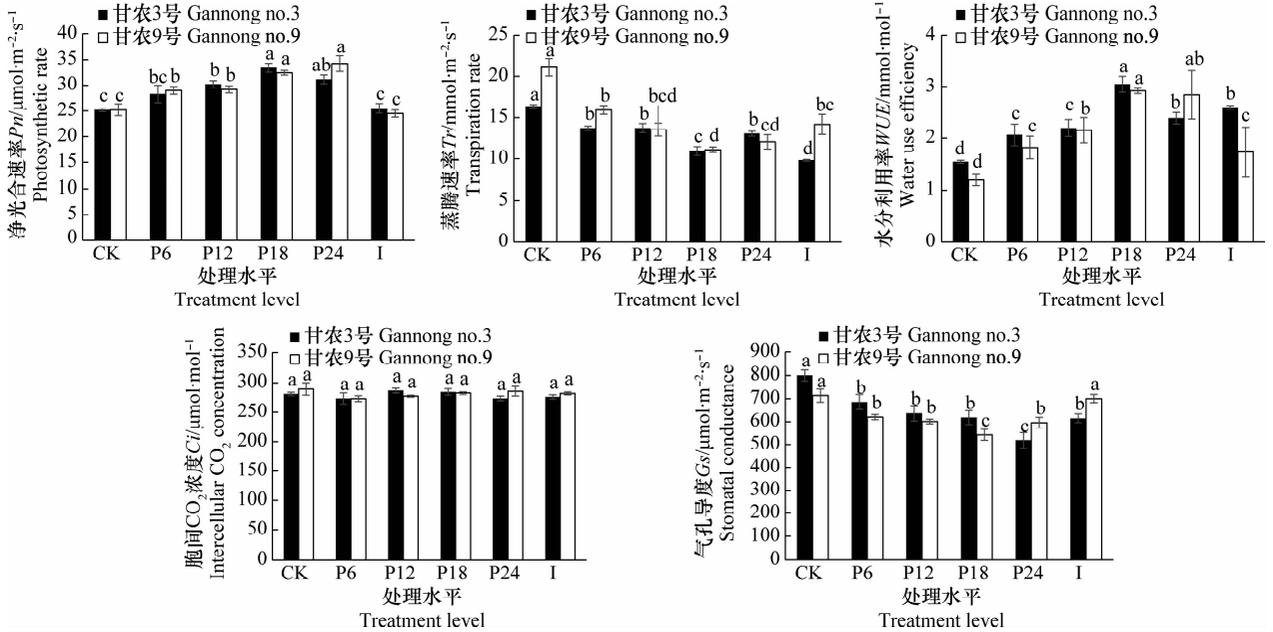


图 2 不同施磷水平下苜蓿的气体交换参数

Fig. 2 Gas exchange parameters of alfalfa infested by thrips under different phosphorus levels

2.5 不同施磷水平下苜蓿心叶的可溶性糖含量

据图 3 数据可知,与 CK 相比,施磷后‘甘农 3 号’心叶的可溶性糖含量均显著升高($P < 0.05$);‘甘农 3 号’心叶中的可溶性糖含量随着磷水平的增加呈现先升高后降低的趋势,在 P18 水平下达到最大值;‘甘农 9 号’中的可溶性糖含量则随着磷水平的增加逐渐升高。I 处理下,‘甘农 3 号’心叶的可溶性糖含量显著低于对照和施磷处理($P < 0.05$),‘甘农 9 号’的可溶性糖含量与对照之间无显著差异但均低于施磷处理。

2.6 蓟马种群总虫量、受害指数和心叶可溶性糖之间的相关关系

由表 3 可知,‘甘农 3 号’和‘甘农 9 号’上的蓟马总虫口与其相对应的受害指数之间均具有显著的正相关关系(‘甘农 3 号’ $r = 0.539$, $P = 0.038$, ‘甘农 9 号’ $r = 0.623$, $P = 0.013$);两个品种苜蓿的心叶可溶性糖含量与蓟马的总虫口之间均无相关性;‘甘农 3 号’和‘甘农 9 号’的可溶性糖含量与相应受害指数之间为极显著的负相关关系(‘甘农 3 号’ $r = -0.801$, $P = 0.006$, ‘甘农 9 号’ $r = -0.942$, $P = 0.002$)。

3 讨论

耐害性是植物对昆虫取食为害的耐受性,一般耐害品种不会对害虫种群产生影响,也不会因选择压力而导致害虫新的生物型产生,耐害性体现在植物的生长势、补偿生长、受伤补偿以及营养供需差等方面^[22]。可溶性糖是植物光合作用的重要产物,也是植物重要的抗逆调节物质,在植物代谢中有不可替代的作用。Chhabra 等在对 391 个黑绿豆品种进行抗虫筛选时发现抗性品种具有较多的可溶性

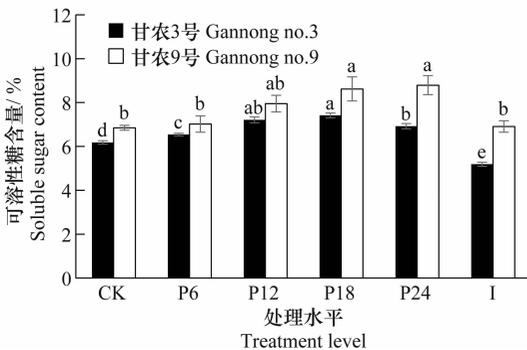


图 3 不同施磷水平下苜蓿心叶的可溶性糖

Fig. 3 The soluble sugar contents of alfalfa heart leaves under different phosphorus application levels

糖^[23]。本试验中,苜蓿心叶可溶性糖含量与蓟马虫口密度间无相关性,但与受害指数之间存在极显著的负相关关系,说明施磷提高了苜蓿对蓟马的耐害

性。在所有处理中,‘甘农 9 号’的可溶性糖含量均大于‘甘农 3 号’,说明‘甘农 9 号’将更多的光合产物转化成单糖(可溶性糖)供叶片进行补偿生长。

表 3 蓟马种群总量、受害指数、可溶性糖之间的相关性¹⁾

Table 3 Correlation among total population, damage index and soluble sugar content of thrips

相关项 Correlation	甘农 3 号 Gannong No. 3		甘农 9 号 Gannong No. 9	
	r	P	r	P
总虫口-受害指数 Total number-Damage index	0.539	0.038*	0.623	0.013*
可溶性糖-总虫口 Soluble sugar content-Total number	-0.296	0.629	-0.549	0.338
可溶性糖-受害指数 Soluble sugar content-Damage index	-0.801	0.006**	-0.942	0.002**

1) “*”表示相关性显著($P < 0.05$),“**”表示相关性极显著($P < 0.01$)。

“*” significant correlation ($P < 0.05$), “**” highly significant correlation ($P < 0.01$)。

李跃强等^[24-25]的研究表明,害虫取食为害可使植物体内的细胞分裂素急剧增加,进而促进 mRNA 和蛋白质的合成,提高光合系统关键酶 1,5-二磷酸核酮糖羧化酶的合成,增强未受害部位的光合作用,最终表现出超补偿现象。叶片净光合速率是反映植物光合能力的重要指标。多项研究表明,缺磷条件下,豆科植物的净光合速率会显著低于施磷处理^[26-28]。本试验中,施磷后苜蓿的净光合速率显著增加,可溶性糖含量显著升高,株高和产量也显著增加,受害指数显著下降,这说明施磷有效地提高了苜蓿的补偿生长能力,进而增强了其对蓟马的耐害性。

在光合参数中,气孔导度、蒸腾速率和胞间 CO₂ 浓度也与植物光合特性有关^[29]。通常认为,蒸腾速率较高时,表明叶片通气能力较强,单位时间内 CO₂ 分子进入量较多,净光合速率与蒸腾速率呈正相关关系^[30-31]。本试验中,苜蓿受蓟马为害后,随着施磷量的增加,净光合速率逐渐升高,而蒸腾速率则逐渐降低,即净光合速率与蒸腾速率呈负相关关系。蓟马的锉吸式口器使苜蓿叶片表皮破损,进而增加了苜蓿的蒸腾速率。随着施磷量的增加,苜蓿的净光合速率有所升高,合成的碳水化合物同时用于补偿生长,使苜蓿叶片的受害面积相对减小,其蒸腾速率也相应降低。在本试验中,施磷后随着苜蓿受害程度的降低,其气孔导度也相应降低。寇江涛等^[20]的研究表明,紫花苜蓿叶片受蓟马为害后,其气孔导度会随着受害级别的增加而升高,这与本试验的研究结果相似。

磷是光合作用的基本底物,在植物的光反应阶段参与 ATP 的合成,同时也能作为跨膜运输的载体^[32]。

CO₂ 参与植物的暗反应,且在大田环境下,空气中的 CO₂ 浓度较稳定,故施磷后苜蓿的胞间 CO₂ 浓度没有显著变化。植物水分利用效率指植物消耗单位水分所生产的同化物质的量,水分利用率反映了植物生产过程中的能量转化能率^[33]。本试验中,苜蓿的水分利用率随着施磷水平的升高呈现先升高后降低的趋势。施磷条件下(除 P24 水平),‘甘农 3 号’的水分利用率均高于‘甘农 9 号’,说明在适量施肥对‘甘农 3 号’的光合产物转化能力的提升优于‘甘农 9 号’。

与 I(不施磷,喷洒农药)处理相比,在最佳施磷水平下苜蓿虽然受蓟马为害,但株高和产量表现更好,说明在苜蓿产量方面,施磷管理可以作为减施或不施农药的苜蓿害虫控制措施。

施磷后,‘甘农 3 号’的受害指数均低于未施磷‘甘农 9 号’的受害指数,在 P18 水平下的光合速率高于‘甘农 9 号’,增产率也高于‘甘农 9 号’,说明施磷‘甘农 3 号’的抗虫效应强于‘甘农 9 号’。由此说明,对于北方已广泛种植的感蓟马苜蓿而言,合理施肥可以减轻苜蓿蓟马的危害、减少杀虫剂的施用,是经济可行的生态防治措施。

4 结论

施磷有效地提高了苜蓿对蓟马的抗性。施磷后,‘甘农 3 号’和‘甘农 9 号’紫花苜蓿的受害指数均显著降低,在最佳施磷水平下株高和产量均显著增加,且增产效果显著高于 I(农药)处理。

适量的施磷能有效地提高苜蓿的光合作用能力,促进苜蓿的补偿生长,进而增强了苜蓿对蓟马的抗(耐)性。

本试验中,P18(18 g/m² P₂O₅)为最佳的施磷水平。

参考文献

- [1] 洪绂曾. 苜蓿科学[M]. 北京:中国农业出版社,2009.
- [2] 特木尔布和,乌日图,金小龙,等. 蚜虫对苜蓿危害的初步研究[J]. 草原与草业,2005,17(4):56-59.
- [3] 张蓉,马建华,王进华,等. 宁夏苜蓿病虫害发生现状及防治对策[J]. 草业科学,2003,20(6):40-44.
- [4] 严林,梅洁人. 青海省紫花苜蓿病虫种类及害虫天敌的调查[J]. 植物保护,1996,22(5):24-25.
- [5] JOHN R, ABDUL R. Phosphorus [J]. Encyclopedia of Soil Science, 2002: 1-4.
- [6] JESCHKE W D, KIRKBY E A, PEUKE A D. Effects of P deficiency on assimilation and transport of nitrate and phosphate in intact plants of castor bean (*Ricinus communis* L.) [J]. Journal of Experimental Botany, 1997, 48:75-91.
- [7] 鲁艺芳,严俊鑫,李霜雯,等. 不同光照强度下兴安落叶松对舞毒蛾幼虫生长发育及防御酶的影响[J]. 生态学报,2013,33(22):7125-7131.
- [8] LACONTE A. Carbon allocation among tree organs: A review of basic processes and representation in functional-structural tree models [J]. Annals of Forest Science, 2000, 57(5): 521-533.
- [9] MALHI Y, BAKER T R, PHILLIPS O L, et al. The above-ground coarse wood productivity of 104 neotropical forest plots [J]. Global Change Biology, 2010, 10(5):563-591.
- [10] JACKSON R B, SCHENK H J, JOBBÁGY E G, et al. Below-ground consequences of vegetation change and their treatment in models [J]. Ecological Applications, 2000, 10(2): 470-483.
- [11] 陈建明,俞晓平,程家安,等. 植物耐虫性研究进展[J]. 昆虫学报,2005,48(2):262-272.
- [12] STRAUSS S Y, AGRAWAL A A. The ecology and evolution of plant tolerance to herbivory [J]. Trends in Ecology & Evolution, 1999, 14(5):179.
- [13] 陈建明,俞晓平,陈俊伟,等. 水稻植株光合作用能力的变化与其抗白背飞虱的关系[J]. 核农学报,2003,17(6):423-426.
- [14] THOMSON V P, CUNNINGHAM S A, BALL M C, et al. Compensation for herbivory by *Cucumis sativus* through increased photosynthetic capacity and efficiency [J]. Oecologia, 2003, 134(2): 167-175.
- [15] 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.
- [16] FACKNATH S, LALLJEE B. Effect of soil-applied complex fertiliser on an insect-host plant relationship: *Liriomyza trifolii* on *Solanum tuberosum* [J]. Entomologia Experimentalis et Applicata, 2005, 115(1): 67-77.
- [17] LU Zhongxian, YU Xiaoping, HEONG K, et al. Effect of nitrogen fertilizer on herbivores and its stimulation to major insect pests in rice [J]. Rice Science, 2007, 14(1): 56-66.
- [18] 庞淑婷,董元华. 土壤施肥与植食性害虫发生为害的关系[J]. 土壤,2012,44(5):719-726.
- [19] 贺春贵,王森山,曹致中,等. 40个苜蓿品种(系)对蓟马田间抗性评价[J]. 草业学报,2007,16(5):79-83.
- [20] 寇江涛,师尚礼,胡桂馨,等. 紫花苜蓿对牛角花齿蓟马为害的光合生理响应[J]. 生态学报,2014,34(20):5782-5792.
- [21] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京:中国农业出版社,2003: 113-114.
- [22] 杨群芳,黄玉碧,熊敏,等. 玉米自交系对朱砂叶螨的抗性评价[J]. 玉米科学,2015,23(1):149-152.
- [23] CHHABRA K S, KOONER B S, SAXENA A K, et al. Influence of biochemical components on the incidence of insect pests and yellow mosaic virus in black gram [J]. Indian Journal of Entomology, 1984, 46(2):148-156.
- [24] 李跃强,盛承发. 植物的超越补偿反应[J]. 植物生理学报,1996(6):457-464.
- [25] 李跃强,宣维健,王红托,等. 棉花对棉铃虫为害超补偿作用的生理机制[J]. 昆虫学报,2003,46(3):267-271.
- [26] 陈国兴,夏玄,吕书财,等. 砂培法模拟拟磷素营养水平对大豆光合作用和产量的影响[J]. 大豆科学,2017,36(4):575-582.
- [27] 齐敏兴,刘晓静,张晓磊,等. 不同磷水平对紫花苜蓿光合作用和根瘤固氮特性的影响[J]. 草地学报,2013,21(3):512-516.
- [28] 于海秋,彭新湘,严小龙,等. 缺磷对大豆叶片显微结构及光合作用的影响[J]. 吉林农业大学学报,2006,28(2):127-132.
- [29] 崔伟,邹长明,张晓红,等. 7种豆科作物的光合作用和养分富集特征[J]. 湖南农业大学学报:自然科学版,2017,43(1):7-11.
- [30] 邹长明,王允青,刘英,等. 四种豆科作物的光合生理和生长发育对弱光的响应[J]. 植物生态学报,2015,39(9):909-916.
- [31] 邹长明,王允青,曹卫东,等. 不同品种小豆光合作用和生长发育对弱光的响应[J]. 应用生态学报,2015,26(12):3687-3692.
- [32] 许大全. 光合作用学[M]. 北京:科学出版社,2013.
- [33] 曹生奎,冯起,司建华,等. 植物叶片水分利用效率研究综述[J]. 生态学报,2009,29(7):3882-3890.

(责任编辑:田喆)