

DOI: 10.11686/cyxb2025094

http://cyxb.magtech.com.cn

白美婷, 李应德, 陈倩华, 等. 春季黑茎病和蚜虫复合发生对紫花苜蓿产量和饲用价值的影响. 草业学报, 2025, 34(12): 195—205.

BAI Mei-ting, LI Ying-de, CHEN Qian-hua, et al. Effect of co-attack of spring black stem and leaf spot disease and aphids on the yield and forage value of alfalfa. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(12): 195—205.

春季黑茎病和蚜虫复合发生对紫花苜蓿产量和饲用价值的影响

白美婷^{1*}, 李应德², 陈倩华³, 冯艳丽¹, 冯海明⁴, 段廷玉²

(1. 甘肃开放大学, 甘肃 兰州 730030; 2. 草种创新与草地农业生态系统全国重点实验室, 农业农村部草牧业创新重点实验室, 兰州大学草地农业教育部工程研究中心, 兰州大学草地农业科技学院, 甘肃 兰州 730020; 3. 陕西建设技师学院, 陕西 西安 710119; 4. 酒泉开放大学, 甘肃 酒泉 735000)

摘要:病虫害是限制紫花苜蓿生产的重要因素, 春季黑茎病和豌豆蚜是我国苜蓿种植区广泛发生的病虫害, 二者复合发生对产量和品质的影响如何尚不得知。本试验在兰州大学景泰草地农业观测研究站设置紫花苜蓿春季黑茎病、豌豆蚜、春季黑茎病+豌豆蚜复合发生、喷施高效氯氟氰菊酯溶液等处理, 以田间自然生长为对照。研究发现病原菌处理和病虫害复合发生处理的春季黑茎病发病率和病情指数分别为54.67%~82.67%和20.93%~40.93%, 显著高于对照和药剂处理; 相较于对照和药剂处理, 病原菌和病虫害复合发生下, 紫花苜蓿产量降低20.87%和22.17% ($P < 0.05$)。病虫害对苜蓿叶片营养元素、饲喂价值的影响大于其对茎秆、地上部全株相应指标的影响, 尤其以病虫害复合发生情况下影响更为显著。与对照相比, 病原菌处理显著降低了苜蓿叶片钙和硫含量, 显著增加了叶片钾含量 ($P < 0.05$); 与药剂处理相比, 病原菌、蚜虫及病虫害复合发生苜蓿叶片蛋白含量均显著降低; 病虫害复合发生较对照具有更高的单糖含量, 较病原菌处理, 苜蓿叶片乙酸和乳酸的含量降低 ($P < 0.05$)。本研究为紫花苜蓿春季黑茎病和豌豆蚜损失评定提供了理论依据, 为后续病虫害防治提供了理论指导。

关键词: 损失评价; 病虫害; 饲喂价值; 病虫害管理

Effect of co-attack of spring black stem and leaf spot disease and aphids on the yield and forage value of alfalfa

BAI Mei-ting^{1*}, LI Ying-de², CHEN Qian-hua³, FENG Yan-li¹, FENG Hai-ming⁴, DUAN Ting-yu²

1. Gansu Open University, Lanzhou 730030, China; 2. State Key Laboratory of Herbage Improvement and Grassland Agro-ecosystems, Key Laboratory of Grassland Livestock Industry Innovation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Engineering Research Center of Grassland Industry, Ministry of Education, College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China; 3. Shaanxi Construction Technology Institute, Xi'an 710119, China; 4. Jiuquan Open University, Jiuquan 735000, China

Abstract: Pests and diseases significantly constrain *Medicago sativa* (alfalfa) production. Spring black stem disease, caused by the fungal pathogen *Phoma medicagonis* and pea aphid (*Acyrtosiphon pisum*), is widespread in alfalfa-growing regions of China. However, the impact of the combined occurrence of this pathogen and the aphid on alfalfa yield and quality remains unclear. To address this knowledge gap, we conducted a field experiment at the Jingtai Field Scientific Observation and Research Station of Grassland Agro-Ecosystems, Lanzhou University. The

收稿日期: 2025-03-21; 改回日期: 2025-04-21

基金项目: 2024年高校教师创新基金(2024A-223)资助。

作者简介: 白美婷(1980—), 女, 陕西咸阳人, 副教授, 硕士。E-mail: 675132057@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: 675132057@qq.com

treatments included spring black stem inoculation, pea aphid disease infestation, combined spring black stem disease inoculation and pea aphid infestation, and spraying with β -cyfluthrin solution. Naturally grown alfalfa served as the control. The results show that the incidence and disease index of spring black stem disease in the pathogen treatment and pathogen+aphid treatment groups reached 54.67%–82.67% and 20.93%–40.93%, respectively, significantly higher than those in the control and insecticide-protected groups. Compared with the control and insecticide groups, the pathogen treatment group and pathogen+aphid treatment group showed decreases in alfalfa yield (decreases of 20.87%–22.17%). Pests and diseases had a greater impact on the nutrient contents and feeding value of alfalfa leaves than on stems or the entire aboveground part, especially in the pathogen+aphid treatment group. Compared with the control, the pathogen treatment group showed significantly reduced calcium and sulfur contents in the leaves and significantly increased potassium content ($P<0.05$). The protein content in alfalfa leaves was significantly lower in the pathogen treatment group, aphid treatment group, and pathogen+aphid treatment group than in the insecticide group. The monosaccharide content in leaves was higher in the pathogen+aphid treatment group than in the control ($P<0.05$), and the acetic acid and lactic acid contents in alfalfa leaves were lower in the pathogen+aphid treatment group than in the pathogen-only treatment group ($P<0.05$). The results of this study provide a theoretical basis for assessing alfalfa crop losses caused by spring black stem disease and pea aphid, and offer theoretical guidance for the development and refinement of pest and disease control strategies.

Key words: loss evaluation; disease and insect pests; feeding value; disease and insect pests management

紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 是全球种植面积最大的豆科牧草, 全年为家畜提供干草和青贮饲料。据估计, 2014 年全球紫花苜蓿种植面积超过 2380 万 hm^2 , 其中美国、中国和加拿大是三大生产国^[1]。由苜蓿茎点霉 (*Phoma medicaginis*) 引起的春季黑茎病和叶斑病是紫花苜蓿最常见的病害之一, 发生在美国^[2–3]、加拿大^[4–5]、中国^[6]、意大利^[7]、印度^[8]和突尼斯^[9]等国家。该病害可导致 19%~40% 的产量损失^[10–11], 并使受感染的紫花苜蓿叶片的粗蛋白含量降低 22%^[11]。该病原菌可侵染美国、加拿大、中国和澳大利亚种植的 40 多个紫花苜蓿品种^[6, 12–13]。

蚜虫是主要的农业害虫, 通常以孤雌生殖或胎生方式繁殖, 从而快速扩大种群^[14]。豌豆蚜 (*Acyrtosiphon pisum*) 通过直接吸食韧皮部汁液、破坏韧皮部, 以及作为多种有害病毒的传播媒介, 对全球的豆类作物造成严重的经济损失^[15–17]。豌豆蚜侵染多个属的豆科作物, 如蚕豆 (*Vicia faba*)、羽扇豆 (*Lupinus albus*)、紫花苜蓿和豌豆 (*Pisum sativum*)^[18–19]等。

蚜虫和春季黑茎病及叶斑病通常同时为害紫花苜蓿, 造成严重损害^[20]。但很少有研究关注豌豆蚜侵染和春季黑茎病联合发生对苜蓿产量和品质的影响。在有害生物—牧草—经济系统中, 了解有害生物的危害特性和牧草的受害反应, 厘清有害生物对牧草产量构成因素的影响, 是进行经济损失估计的基础。病虫害暴发不仅破坏生态, 也造成经济损失, 有效防治对保障苜蓿草地健康至关重要。若不能准确评估损失并权衡防治成本, 可能导致资源错配甚至产生负面影响。因此, 在苜蓿病虫害防治中, 如何精准评估损失, 并以此为基础制定合理策略, 实现防治效益最大化, 是当前的重要挑战。

目前, 国际上对于作物 (包括牧草) 病虫害损失评定的研究多见于同一有害生物^[21]; 少数学者研究了同一类型有害生物, 如苜蓿锈病 (*Uromyces striatus*) 和白粉病 (*Leveillulla leguminosarum* & *Erysiphe pisi*) 对苜蓿产量的影响^[22], 而有关病虫害危害牧草的研究, 目前尚未见报道。本研究在田间设置了紫花苜蓿春季黑茎病和豌豆蚜单独及复合发生, 同时建立药剂处理, 旨在研究明确春季黑茎病和豌豆蚜危害对紫花苜蓿产量和品质的影响, 评估其引致损失, 为紫花苜蓿病虫害防治提供指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 植物材料 本试验供试植物为陇东紫花苜蓿(*M. sativa* cv. Longdong),种子购买于甘肃创绿草业种子有限公司。

1.1.2 供试病原菌和蚜虫 供试病原菌为苜蓿茎点霉,由兰州大学草种创新与草地农业生态系统国家重点实验室草地保护研究所分离鉴定所得。供试蚜虫为豌豆蚜,从兰州大学榆中校区苜蓿地捕捉,经形态学和分子生物学鉴定,在培养箱中饲养备用。

1.2 试验设计

1.2.1 小区设置 2024年4月,在兰州大学景泰草地农业观测研究站种植紫花苜蓿,品种为陇东苜蓿,建立不同病虫处理试验小区,小区长5.0 m、宽4.0 m,间距1.0 m。设病原菌处理(pathogen, P)、蚜虫处理(aphid, A)、病虫复合发生处理(pathogen+aphid, PA),药剂处理(fungicide, DZ),设无处理为对照(CK),每个处理设5个重复,共计25个小区,采用随机区组分布。种子播种方式为条播,行距30 cm,播种深度为1.0~1.5 cm,播种量为25.5 kg·hm⁻²,按常规进行浇水处理管理。

1.2.2 试验处理 病原菌处理:先制备病原菌的分生孢子菌悬液,调节分生孢子数至 1×10^8 CFU·mL⁻¹。采用喷雾法进行病原菌接种,将病原菌分生孢子菌悬液均匀喷于植物叶表面;对照则喷等量无菌水代替^[23]。蚜虫处理:将含有已知蚜量的蚕豆叶片放置在已标记紫花苜蓿植株的最上部生长点上,人工接虫均在1 d内完成,每个小区选择5个点进行接虫,每个点选择5个枝条,每个枝条接种10头蚜虫。通过人工控制的方法调整初期蚜量,无蚜处理小区使用药剂控制蚜虫密度为接近于0的水平。药剂处理:使用5%高效氯氟氰菊酯和25%丙环唑,施用量为375 mL·hm⁻²^[24]。病虫复合发生:病原菌处理1 d后进行蚜虫处理。

1.2.3 病害监测 各样地内采用“Z”型五点取样法确定调查样点,选取长势较一致的紫花苜蓿30株,在“上、中、下”3个空间上进行春季黑茎病发生情况调查。调查时间为植物生长季。按照如下公式计算发病率和病情指数:

$$\text{发病率}(\%) = (\text{发病叶片数} \div \text{总叶片数}) \times 100$$

$$\text{病情指数} = 100 \times (\text{各级病叶数} \times \text{各级代表值}) \div (\text{调查总叶片数} \times \text{最高级代表值})$$

1.2.4 产量及品质指标测定 选取长势均匀的1 m×1 m样方的紫花苜蓿进行刈割,刈割后将鲜草烘干并计算紫花苜蓿干草产量。

每个小区随机选取3个点收集地上苜蓿样品,每个点收集30个枝条,其中20个枝条将茎秆和叶片分离,将样品放至在65℃的烘箱中烘48 h,后用多功能粉碎机磨成粉末用于品质指标测定。利用可见/近红外光谱仪(XDS-RCA, Foss NIRSystems Inc., 丹麦)测定紫花苜蓿干草品质指标,分为全株、茎秆和叶片三部分,测定指标包括粗蛋白(crude protein, CP)、粗脂肪(ether extract, EE)、粗灰分(crude ash, CA)、中性洗涤纤维(neutral detergent fiber, NDF)、酸性洗涤纤维(acid detergent fiber, ADF)、木质素(lignin)、乳酸(lactic acid)含量等^[25]。

1.3 数据分析

采用Microsoft Excel 2019进行数据整理和计算。每个处理均采用5个重复的平均值及其标准误,利用JMP Pro 16(SAS Institute Inc., 美国)student *t* test($P < 0.05$)进行统计分析。采用GraphPad Prism 8(Dotmatics Ltd, 英国)作图。

2 结果与分析

2.1 田间病虫害发生情况

田间调查发现,接种病原菌后,病害发生较为严重,病原菌处理和病虫复合发生处理的春季黑茎病发病率和病情指数分别达到54.67%~82.67%和20.93%~40.93%(图1)。相较于对照,病原菌和病虫复合发生处理下,

春季黑茎病发病率和病情指数显著增加($P < 0.05$)。相较于对照,蚜虫处理春季黑茎病发病率和病情指数无显著差异。药剂处理下,春季黑茎病发病率显著低于对照,蚜虫处理下发病率显著高于药剂处理($P < 0.05$),但病情指数无显著差异(图1)。

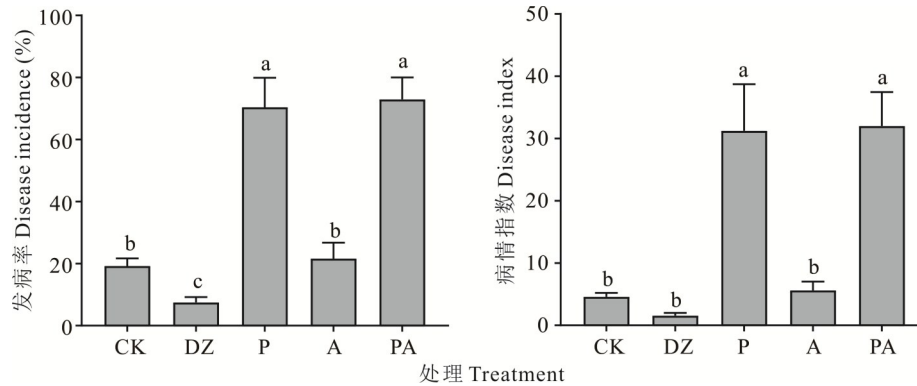


图1 紫花苜蓿春季黑茎病发生情况

Fig. 1 The occurrence of alfalfa spring black stem disease

不同小写字母表示各处理间差异显著($P < 0.05$),下同。Different lowercase letters mean the significant differences among different treatments at $P < 0.05$. The same below.

2.2 不同处理对紫花苜蓿草产量的影响

相较于对照和药剂处理,病原菌和病虫复合发生下,紫花苜蓿地上生物量降低 20.87%~22.61% ($P < 0.05$),蚜虫处理降低了 7.83% 和 13.04% ($P > 0.05$, 图2)。与对照相比,蚜虫造成损失可达 2397.60 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,病原菌造成损失 4155.84 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,病虫复合发生造成损失 4075.92 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;药剂处理与对照接近,未表现出产量优势。

2.3 不同处理对紫花苜蓿营养元素含量的影响

除钠元素外,病虫害及药剂处理均不同程度影响了紫花苜蓿叶片营养元素的含量。尤其是病原菌处理,对苜蓿叶片各营养元素含量影响最为显著,与对照相比,病原菌处理显著降低了苜蓿叶片钙和硫含量,显著增加了叶片钾含量($P < 0.05$,表1);虫害、病虫复合发生对苜蓿叶片营养元素含量无显著影响。药剂处理提高了叶片磷含量($P < 0.05$,表1)。

病虫害和药剂处理对苜蓿茎秆营养元素含量影响小于其对苜蓿叶片营养元素含量影响,所测定的7种营养元素中,仅药剂处理较对照、蚜虫、病虫复合发生提高了茎秆磷含量($P < 0.05$);病虫复合发生较病原菌发生降低了茎秆氯含量($P < 0.05$,表2)。其他营养元素含量在各处理间无显著差异。

病虫害处理未显著影响紫花茎叶营养元素含量(表3)。所有处理中,仅药剂处理下,茎叶氯含量低于病原菌、蚜虫分别为害($P < 0.05$,表3)。

2.4 不同处理对紫花苜蓿饲用价值的影响

病虫害处理对紫花苜蓿叶片饲用价值存在不同程度的影响。与药剂处理相比,病原菌、蚜虫及其复合发生均显著降低了苜蓿叶片蛋白含量。几种蛋白质中,病虫复合发生较对照降低了过瘤胃蛋白、中性洗涤不溶蛋白含量($P < 0.05$,表4),不可溶和酸性洗涤不溶蛋白含量在病虫害不同处理下与对照无显著差异(表4)。

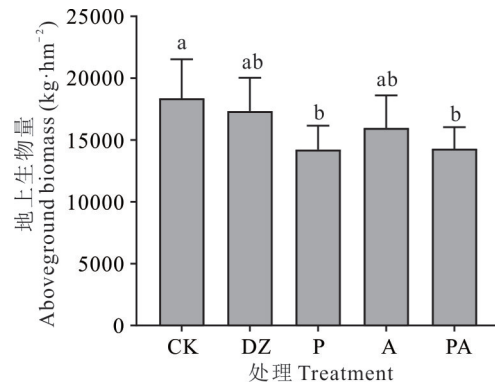


图2 不同处理对紫花苜蓿地上生物量的影响

Fig. 2 The aboveground biomass of alfalfa under different disease and aphid treatment

表 1 不同处理下苜蓿叶片营养元素含量

Table 1 Nutrient element contents in alfalfa leaves under different treatments (%)

指标 Index	对照 CK	药剂 DZ	病原菌 Pathogen (P)	蚜虫 Aphid (A)	病虫复合发生 P+A
磷 P	0.37±0.06b	0.44±0.02a	0.37±0.04b	0.34±0.05b	0.38±0.02b
钙 Ca	1.30±0.33ab	1.40±0.06ab	0.94±0.20c	1.02±0.27bc	1.12±0.21abc
钠 Na	0.13±0.12a	0.17±0.01a	0.03±0.06a	0.04±0.05a	0.08±0.10a
镁 Mg	0.40±0.07a	0.38±0.02ab	0.32±0.06b	0.35±0.05ab	0.36±0.03ab
氯 Cl	2.82±0.58a	1.99±0.21b	3.09±0.29a	2.77±0.54a	2.62±0.48a
硫 S	0.21±0.04ab	0.23±0.01ab	0.18±0.02c	0.19±0.02bc	0.20±0.02abc
钾 K	2.12±0.45b	2.27±0.12ab	2.71±0.52a	2.54±0.50ab	2.30±0.46ab

注：同行数据后不同小写字母表示不同处理下同一元素在 $P<0.05$ 水平存在显著差异。下同。

Note: Different lowercase letters in the same row mean the significant differences for the same nutrients elements among different treatments at $P<0.05$ levels. The same below.

表 2 不同处理下苜蓿茎秆营养元素含量

Table 2 Nutrient element contents in alfalfa stems under different treatments (%)

指标 Index	对照 CK	药剂 DZ	病原菌 Pathogen (P)	蚜虫 Aphid (A)	病虫复合发生 P+A
磷 P	0.27±0.01b	0.31±0.02a	0.29±0.03ab	0.27±0.02b	0.26±0.02b
钙 Ca	0.62±0.16a	0.63±0.08a	0.70±0.12a	0.62±0.03a	0.62±0.03a
钠 Na	0.11±0.04a	0.12±0.04a	0.13±0.04a	0.09±0.03a	0.08±0.05a
镁 Mg	0.18±0.15a	0.15±0.01a	0.20±0.04a	0.18±0.02a	0.17±0.03a
氯 Cl	1.09±0.34ab	0.98±0.17b	1.29±0.24a	1.13±0.15ab	0.88±0.12b
硫 S	0.19±0.01a	0.18±0.00b	0.19±0.00a	0.18±0.00ab	0.19±0.01a
钾 K	2.39±0.19a	2.46±0.10a	2.53±0.45a	2.61±0.43a	2.67±0.56a

表 3 不同处理下苜蓿茎叶营养元素含量

Table 3 Nutrient element contents in alfalfa stems and leaves under different treatments (%)

指标 Index	对照 CK	药剂 DZ	病原菌 Pathogen (P)	蚜虫 Aphid (A)	病虫复合发生 P+A
磷 P	0.29±0.03a	0.33±0.01a	0.31±0.03a	0.29±0.03a	0.31±0.05a
钙 Ca	0.64±0.07a	0.72±0.06a	0.73±0.06a	0.70±0.15a	0.75±0.16a
钠 Na	0.09±0.04a	0.09±0.01a	0.07±0.04a	0.08±0.05a	0.09±0.05a
镁 Mg	0.21±0.04a	0.21±0.01a	0.24±0.01a	0.22±0.05a	0.24±0.03a
氯 Cl	1.17±0.13ab	1.01±0.04b	1.39±0.15a	1.30±0.31a	1.24±0.33ab
硫 S	0.20±0.01a	0.20±0.00a	0.20±0.00a	0.20±0.00a	0.21±0.01a
钾 K	2.67±0.37a	2.86±0.11a	2.85±0.23a	2.73±0.54a	2.76±0.25a

病虫害及药剂处理未显著影响紫花苜蓿叶片酸性洗涤纤维、中性洗涤纤维、木质素含量,所有处理中,仅药剂处理下中性洗涤纤维含量低于病原菌及病虫复合发生处理($P<0.05$,表4)。与对照相比,各处理未显著影响苜蓿叶片水溶性碳水化合物、灰分、脂肪及乳酸和乙酸含量,但病虫复合发生较药剂和病原菌侵染处理具有更高的水溶性碳水化合物含量,病虫复合发生较对照具有更高的单糖含量,药剂处理较对照灰分含量更高;病虫复合发生较病原菌处理,降低了苜蓿叶片乙酸和乳酸的含量($P<0.05$,表4)。

与对照相比,病虫害及药剂处理未显著影响紫花苜蓿总可消化养分、24 h-体外干物质消化率、30 h-体外干物质消化率、48 h-体外干物质消化率,但病、虫单独侵染显著降低了24 h-中性洗涤纤维消化率,病原菌处理显著增

加了 48 h-中性洗涤纤维消化率。病原菌处理较药剂处理降低了苜蓿叶片 24 h-体外干物质消化率,但增加了 30 h-体外干物质消化率($P<0.05$,表 4)。

表 4 不同处理下苜蓿叶片饲用价值

Table 4 Feeding value of alfalfa leaves under different treatments (%)

指标 Index	对照 CK	药剂 DZ	病原菌 Pathogen (P)	蚜虫 Aphid (A)	病虫复合发生 P+A
蛋白质 Protein	23.91±2.93bc	23.72±0.39a	22.02±1.62c	21.57±2.81c	23.28±3.65c
不可溶蛋白 Insoluble protein	14.22±0.59a	14.20±0.36a	13.86±0.58a	12.38±0.97a	12.54±2.03a
过瘤胃蛋白 Bypass protein	9.66±0.97a	8.36±0.20b	10.04±0.69a	9.08±1.01ab	8.49±1.14b
酸性洗涤不溶蛋白 ADIP	2.44±0.33a	2.58±0.18a	2.08±0.27a	2.04±0.46a	2.13±0.39a
中性洗涤不溶蛋白 NDIP	6.45±0.18ab	6.70±0.06a	6.39±0.15ab	5.96±0.42bc	5.84±4.92c
中性洗涤纤维 NDF	48.72±6.49ab	45.96±1.05b	53.07±3.45a	50.34±5.49ab	47.32±4.19a
酸性洗涤纤维 ADF	35.03±2.47a	35.02±0.50a	35.76±1.98a	36.31±2.60a	35.02±2.16a
木质素 Lignin	8.71±1.28a	7.85±0.51a	8.01±0.91a	8.21±0.81a	7.88±0.73a
水溶性碳水化合物 Soluble carbohydrates	2.79±1.72ab	1.16±0.19b	1.63±0.99b	2.80±1.29ab	3.84±0.52a
单糖 Monosaccharides	1.23±0.70b	1.20±0.47b	1.35±1.33b	2.31±1.33ab	2.80±1.26a
粗脂肪 Ether extract	2.89±0.20a	3.06±0.24a	2.93±0.43a	2.89±0.69a	2.71±0.10a
粗灰分 Crude ash	11.39±0.82b	13.69±0.93a	12.23±1.80ab	12.85±1.05ab	12.99±1.36ab
乳酸 Lactic acid	4.95±1.81ab	3.92±0.23b	6.29±1.07a	5.56±1.17a	4.95±1.22b
乙酸 Acetic acid	3.00±1.42ab	2.10±0.26b	3.62±0.78a	3.14±0.96ab	2.29±0.76b
总可消化养分 TDN	66.15±1.44a	65.28±0.44a	65.56±0.73a	65.04±1.15a	65.54±1.66a
24h-体外干物质消化率 24 h-IVDMD	67.15±6.43ab	71.31±1.62a	65.09±3.06b	66.07±4.97ab	68.59±4.82ab
30 h-体外干物质消化率 30 h-IVDMD	78.47±3.79ab	75.45±1.81b	81.86±3.15a	80.56±3.44a	80.67±3.18a
48 h-体外干物质消化率 48 h-IVDMD	72.82±2.51a	75.12±2.49a	72.50±2.61a	73.95±4.05a	73.84±2.07a
24 h-中性洗涤纤维消化率 24 h-NDFD	17.31±6.69a	23.25±1.78b	15.11±3.22b	16.65±3.86b	18.83±4.99ab
30 h-中性洗涤纤维消化率 30 h-NDFD	25.15±5.72b	31.14±2.04a	23.84±3.35b	24.96±3.34b	26.56±4.94ab
48 h-中性洗涤纤维消化率 48 h-NDFD	47.72±3.36b	46.99±1.39ab	51.04±2.71a	49.84±3.47ab	48.49±2.44ab

ADIP: Acid detergent insoluble protein; NDIP: Neutral detergent insoluble protein; NDF: Neutral detergent fiber; ADF: Acid detergent fiber; TDN: Total digestible nutrients; IVDMD: *In vitro* dry matter digestibility; NDFD: Neutral detergent fiber digestibility. 下同 The same below.

病虫害处理对苜蓿茎秆饲用价值的影响小于其对苜蓿叶片影响。与对照相比,所有处理未显著影响紫花苜蓿蛋白质、过瘤胃蛋白、酸性洗涤不溶蛋白、中性洗涤不溶蛋白含量,但病虫复合发生较病原菌处理降低了不可溶蛋白、中性洗涤不溶蛋白含量($P<0.05$,表 5)。

与对照相比,各处理亦未显著影响苜蓿茎秆中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维、木质素含量。病虫复合发生较对照和病原菌处理提高了苜蓿茎秆水溶性碳水化合物含量($P<0.05$,表 5);与对照相比,各处理均未显著影响苜蓿茎秆单糖、脂肪、灰分、乳酸和乙酸含量,仅蚜虫、病虫复合发生较药剂处理具有更高的乙酸含量($P<0.05$,表 5)。与对照相比,病虫害及药剂处理等未显著影响苜蓿茎秆总可消化养分、不同时间段体外干物质消化率和中性洗涤纤维消化率,仅蚜虫和病虫复合发生较药剂处理降低了 24 h、30 h-中性洗涤纤维消化率($P<0.05$,表 5)。

病虫害处理对苜蓿地上部(茎叶)饲用价值的影响与其对苜蓿茎秆的影响相似。与对照相比,各处理未显著影响苜蓿地上部分蛋白质(包括不可溶蛋白、过瘤胃蛋白、酸性洗涤不溶蛋白、中性洗涤不溶蛋白)含量,仅蚜虫及病虫复合发生处理较药剂处理降低了酸性洗涤不溶蛋白($P<0.05$)含量;病虫害亦未显著影响苜蓿地上部纤维(中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维)、木质素、水溶性碳水化合物、脂肪及灰分含量,但病原菌处理显著增加了苜蓿地

表 5 不同处理下苜蓿茎秆饲用价值

Table 5 Feeding value of alfalfa stems under different treatment (%)

指标 Index	对照 CK	药剂 DZ	病原菌 Pathogen (P)	蚜虫 Aphid (A)	病虫复合发生 P+A
蛋白质 Protein	12.78±1.96a	13.69±1.70a	14.13±0.81a	13.41±0.61a	12.63±1.19a
不可溶蛋白 Insoluble protein	5.72±1.45ab	6.66±1.45a	6.66±0.87a	5.97±0.62ab	5.01±0.92b
过瘤胃蛋白 Bypass protein	3.18±0.95a	3.97±0.68a	3.73±0.64a	3.50±0.48a	2.96±0.32a
酸性洗涤不溶蛋白 ADIP	2.14±0.29a	2.01±0.15a	2.10±0.17a	2.09±0.21a	2.02±0.18a
中性洗涤不溶蛋白 NDIP	2.91±0.45ab	3.26±0.31a	3.21±0.38a	3.00±0.18ab	2.62±0.27b
中性洗涤纤维 NDF	66.83±4.94a	66.32±3.96a	63.41±1.88a	64.37±2.60a	64.60±4.07a
酸性洗涤纤维 ADF	57.15±3.50a	56.16±3.05a	54.73±1.03a	55.65±2.17a	55.57±2.79a
木质素 Lignin	12.03±0.77a	11.54±0.70a	11.31±0.36a	11.66±0.78a	11.87±0.77a
水溶性碳水化合物 Soluble carbohydrates	4.58±0.83b	4.08±0.13b	4.28±0.45b	4.72±0.81ab	5.47±0.77a
单糖 Monosaccharides	3.42±1.27a	3.10±1.05a	2.81±1.03a	3.49±1.13a	4.28±1.18a
粗脂肪 Ether extract	1.35±0.11a	1.42±0.14a	1.46±0.06a	1.35±0.14a	1.44±0.26a
粗灰分 Crude ash	6.82±0.82a	6.59±0.50a	7.30±0.88a	7.21±1.98a	7.22±1.93a
乳酸 Lactic acid	0.07±0.06a	0.06±0.02a	0.09±0.01a	0.05±0.02a	0.04±0.03a
乙酸 Acetic acid	0.31±0.32ab	0.02±0.06b	0.41±0.25ab	0.55±0.50a	0.42±0.52a
总可消化养分 TDN	48.99±2.67a	49.38±1.93a	50.92±1.03a	49.93±1.29a	49.86±1.90a
24 h-体外干物质消化率 24 h-IVDMD	52.22±3.02a	53.67±2.57a	54.25±1.39a	52.86±2.80a	53.39±3.12a
30 h-体外干物质消化率 30 h-IVDMD	57.40±2.86a	58.22±1.74a	59.60±2.52a	59.03±3.38a	59.56±4.26a
48 h-体外干物质消化率 48 h-IVDMD	47.44±3.84a	47.73±3.13a	50.51±2.33a	49.33±4.00a	48.68±5.21a
24 h-中性洗涤纤维消化率 24 h-NDFD	19.33±2.72ab	21.70±1.34a	19.24±1.21ab	18.03±3.81b	17.80±2.87b
30 h-中性洗涤纤维消化率 30 h-NDFD	26.49±2.94ab	29.32±1.22a	26.21±1.40ab	24.99±3.96b	24.55±3.20b
48 h-中性洗涤纤维消化率 48 h-NDFD	40.68±0.95a	40.91±0.86a	41.29±2.07a	40.88±2.84a	40.64±1.86a

上部分乳酸含量($P<0.05$),另外,蚜虫及病虫复合侵染较药剂处理均显著增加了苜蓿地上部水溶性碳水化合物含量($P<0.05$)。各处理均未显著影响紫花苜蓿地上部总可消化养分、不同时间段体外干物质消化率及中性洗涤纤维消化率($P>0.05$,表 6)。

3 讨论

评定病虫害等有害生物对作物造成的产量、品质和经济效益损失,进而制定精准的防治措施是有害生物防控的前提和基础。国内外有害生物致损评定的研究始于 20 世纪 30—40 年代,牧草病虫害损失的研究日益引起研究者的关注,国内外学者陆续开展了紫花苜蓿蚜(*Acyrtosiphon kondoi*)、苜蓿豌豆蚜、马铃薯叶蝉(*Empoasca fabae*)、苜蓿潜叶蝇(*Agromyza frontella*)、苜蓿象鼻虫(*Hypera postica*)等害虫,及蚜虫传播的苜蓿花叶病毒病对苜蓿产量造成的危害及致损评定等相关研究^[26-31],为害虫防控工作提供了理论参考。但这些研究无一例外,都是针对单一病害或虫害引致的作物损失开展的研究,针对病虫两种不同类型有害生物致损的研究较少。本研究建立了田间小区试验,通过人工接种,构建了不同病虫害处理,探讨了春季黑茎病和豌豆蚜单独及复合发生对紫花苜蓿产量和品质的影响,并与药剂处理进行比较,研究发现,病原菌处理和病虫复合发生处理显著提高了春季黑茎病的发病率和病情指数,显著降低了紫花苜蓿产量,并对苜蓿叶片的营养元素和饲喂价值产生了影响。

病虫害是制约牧草产量与品质的关键因素。其影响不仅体现于生物量直接损失,更在于多途径干扰牧草营养价值与适口性^[32-33]。病原侵染和害虫取食破坏牧草细胞结构,抑制光合作用,降低干物质积累速率,直接导致产量损失^[34]。病害引发的生理代谢紊乱,如病原毒素抑制关键酶活性、干扰养分吸收转运等,亦限制牧草生长^[23]。

表6 不同处理下苜蓿茎叶饲用价值

Table 6 Feeding value of alfalfa stems and leaves under different treatments (%)

指标 Index	对照 CK	药剂 DZ	病原菌 Pathogen (P)	蚜虫 Aphid (A)	病虫复合发生 P+A
蛋白质 Protein	14.15±1.99a	15.27±0.48a	16.24±1.22a	14.81±2.82a	15.57±3.10a
不可溶蛋白 Insoluble protein	5.94±0.89a	6.20±0.80a	7.20±0.90a	6.34±1.57a	6.57±2.13a
过瘤胃蛋白 Bypass protein	3.72±0.44a	3.92±0.46a	4.79±0.94a	4.23±0.97a	3.97±1.12a
酸性洗涤不溶蛋白 ADIP	2.29±0.07ab	2.46±0.17a	2.23±0.11ab	2.25±0.19b	2.17±0.09b
中性洗涤不溶蛋白 NDIP	3.13±0.41a	3.56±0.30a	3.82±0.42a	3.34±0.61a	3.37±0.74a
中性洗涤纤维 NDF	64.68±5.36a	62.83±0.25a	60.84±2.43a	61.79±6.47a	59.53±5.02a
酸性洗涤纤维 ADF	55.22±4.36a	55.09±0.58a	52.15±3.19a	53.28±5.47a	51.54±4.98a
木质素 Lignin	11.89±1.01a	11.77±0.39a	11.36±1.08a	11.77±1.19a	11.05±1.13a
水溶性碳水化合物 Soluble carbohydrates	4.19±0.42ab	3.25±0.71b	3.84±0.57ab	4.68±0.93a	4.86±0.83a
单糖 Monosaccharides	3.57±1.05a	3.36±0.83a	3.56±0.52a	3.57±1.18a	4.47±1.93a
粗脂肪 Ether extract	1.50±0.32a	1.62±0.06a	1.59±0.23a	1.46±0.35a	1.57±0.24a
粗灰分 Crude ash	7.70±1.75a	8.98±0.25a	9.26±0.83a	7.91±1.62a	8.83±1.06a
乳酸 Lactic acid	0.30±0.60b	0.32±0.16b	1.26±0.77a	0.59±0.57ab	0.57±0.70ab
乙酸 Acetic acid	1.02±0.58a	1.05±0.23a	1.30±0.52a	0.89±0.83a	0.85±0.41a
总可消化养分 TDN	50.45±2.86a	50.66±0.10a	53.04±1.94a	51.90±3.83a	53.17±3.65a
24 h-体外干物质消化率 24 h-IVDMD	52.79±4.56a	53.65±0.75a	55.44±3.55a	53.92±5.20a	56.66±5.19a
30 h-体外干物质消化率 30 h-IVDMD	59.70±5.69a	59.67±1.15a	64.59±3.14a	61.98±6.29a	63.84±5.30a
48 h-体外干物质消化率 48 h-IVDMD	50.63±6.10a	51.81±1.03a	54.96±3.20a	51.31±7.66a	54.97±5.34a
24 h-中性洗涤纤维消化率 24 h-NDFD	15.79±2.39a	16.11±1.35a	15.84±4.00a	15.66±2.66a	17.73±3.79a
30 h-中性洗涤纤维消化率 30 h-NDFD	22.74±2.51a	23.30±1.33a	22.65±4.13a	22.23±2.75a	24.58±3.96a
48 h-中性洗涤纤维消化率 48 h-NDFD	41.30±2.67a	40.81±1.16a	43.30±1.70a	40.98±3.42a	42.19±2.72a

同时,害虫的刺吸式口器或咀嚼式口器造成的机械损伤,为病原菌入侵创造条件,加剧病害的发生,形成复合胁迫^[35]。例如,研究表明,春季黑茎病能够显著降低紫花苜蓿的产量和品质^[23]。另有研究表明,豌豆蚜的危害会导致紫花苜蓿生长受阻,产量下降,品质降低^[10-11]。本研究进一步揭示了春季黑茎病和豌豆蚜复合发生对紫花苜蓿的危害程度高于单一病、虫害,这与一些研究认为病虫复合发生会加剧作物损失的结果一致^[1]。

病虫害对牧草品质的影响主要表现在蛋白含量下降,纤维素、半纤维素含量上升^[32],这是因为病害破坏营养器官,致使营养向非营养器官转移。此外,病害易导致有毒有害物质(如真菌毒素)积累,降低牧草适口性与安全性^[36-37]。害虫取食活动导致牧草粗蛋白含量降低,纤维素含量升高,亦可显著降低牧草品质^[38],这可能源于植物启动防御反应,将更多碳水化合物用于合成防御物质,而非蛋白质。此外,部分害虫(如蚜虫)分泌的蜜露易引发霉变,降低牧草适口性与卫生质量^[38-39]。本研究发现,与对照相比,病原菌处理显著降低了苜蓿叶片钙和硫含量,显著增加了叶片钾含量。这可能是因为病原菌的侵染会破坏叶片细胞的结构,导致钙和硫等元素的流失。同时,为了抵抗病原菌的侵染,紫花苜蓿可能会吸收更多的钾元素,以增强自身的抗病能力。本研究还发现,与药剂处理相比,病原菌、蚜虫及其复合发生均显著降低了苜蓿叶片蛋白含量。这可能是因为病虫害的发生会影响紫花苜蓿的氮代谢,导致蛋白质合成受阻^[1]。此外,病虫害还可能导致叶片中蛋白质的分解,从而降低叶片中的蛋白质含量^[1]。

本研究中,病虫复合发生较对照具有更高的单糖含量,较病原菌处理,降低了苜蓿叶片乙酸和乳酸的含量。这可能是因为蚜虫的取食刺激紫花苜蓿产生更多的单糖,以满足自身的能量需求^[38-39]。同时,病虫复合发生可能改变紫花苜蓿的代谢途径,导致乙酸和乳酸含量降低^[38-39]。药剂处理能够有效减轻春季黑茎病和豌豆蚜的发生,

提高紫花苜蓿的产量和品质。然而,长期依赖化学药剂可能导致病虫害产生抗药性,破坏生态平衡,因此,需要探索更加环保和可持续的病虫害综合防控策略。本研究中,病虫害对苜蓿叶片营养元素、饲喂价值的影响大于其对茎秆、地上部全株相应指标的影响,尤其以病虫复合发生情况下影响更为显著。这可能是因为叶片是紫花苜蓿进行光合作用的主要器官,也是病虫害侵染和为害的主要部位。病虫害的发生会导致叶片组织受损,光合效率降低,从而影响叶片中营养物质的合成和积累^[1]。此外,病虫害还可能改变叶片中的酶活性,影响营养物质的转化和代谢^[36-37]。

另外,本研究表明,病虫复合发生对苜蓿产量和品质的影响相比病虫单独为害有增强或降低的趋势,因指标而异,这可能与病虫在为害过程中存在复杂的互作关系有关^[35]。研究发现,植物病原体通过诱导寄主体内挥发性化合物、可溶性糖、淀粉、游离氨基酸、次生代谢产物以及抗氧化酶的积累,进而影响害虫的取食偏好、产卵行为、生长发育、扩散以及种群动态^[35]。另一方面,昆虫、害虫作为病原体的传播媒介,能够传播病原体;亦可通过直接取食真菌孢子、菌丝体或有毒真菌化合物来降低病害的发生率;或者通过消耗植物组织,为病原体入侵提供便利通道(伤口侵染),从而增加植物对病原体的易感性^[35]。此外,害虫和病原体均可激活植物的防御系统,该过程主要由茉莉酸和水杨酸等防御相关化学物质介导,进而调控防御相关基因的表达^[1]。

有害生物致损评定,是粮食作物、经济作物、果树、林木等的有害生物防治的重要基础^[40-41],国内外对病虫害致损评定的研究逐渐由以单独病、虫、草为对象转向以多种为害方式及混合种群为对象,朝着多元化的方向发展,这为未来农业的持续健康发展提供了有力的指导。其次,使用现代科技手段进行害虫为害致损评定势在必行,如 Jacobs 等^[40]利用地面激光扫描评估舞毒蛾(*Lymantria dispar*)引起的落叶和后续的生长损失^[40]。

本研究虽然取得了一些有意义的结果,如从病虫害防治的角度,本研究发现病虫害显著降低了牧草产量,与对照相比,蚜虫、病原菌及二者互作造成产量损失为 2397.60~4155.84 kg·hm⁻²,病虫复合发生造成产量损失 4075.92 kg·hm⁻²;药剂处理与对照产量接近,未表现出产量优势,说明在病虫害发生比较轻的情况下,不需要采取防治。本研究仅探讨了春季黑茎病和豌豆蚜对紫花苜蓿的影响,田间有零星的白粉病、霜霉病的发生,但本研究未考虑其他病虫害的因素。未来的研究需要考虑在不同地区和不同环境下开展试验,考虑不同生长阶段、不同病虫害危害及不同防治措施对苜蓿产量、品质的影响,探讨更多病虫复合发生对紫花苜蓿的影响,以全面评估病虫害对紫花苜蓿生产的危害,构建病虫害防控技术体系。

4 结论

本研究通过田间试验发现,春季黑茎病与豌豆蚜显著降低了紫花苜蓿产量及品质,且病虫复合发生加剧了此效应。病虫害主要影响叶片光合与营养积累,降低钙硫含量,增加钾含量,并显著降低蛋白含量,从而降低饲用价值。蚜虫、病原菌及病虫复合发生分别导致减产 2397.60、4155.84 和 4075.92 kg·hm⁻²。轻度发生时,药剂防治未见明显增产,提示需审慎评估防治必要性。

参考文献 References:

- [1] Li Y D, Nan Z B, Matthew C, *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungus changes alfalfa (*Medicago sativa*) metabolites in response to leaf spot (*Phoma medicaginis*) infection, with subsequent effects on pea aphid (*Acyrtosiphon pisum*) behavior. *New Phytologist*, 2023, 239: 286–300.
- [2] Rhodes L H. Severity of spring black stem on alfalfa cultivars in Ohio. *Plant Disease*, 1986, 70: 746–748.
- [3] Akamatsu H O, Chilvers M I, Peever T L. First report of spring black stem and leaf spot of alfalfa in Washington State caused by *Phoma medicaginis*. *Plant Disease*, 2008, 92: 833.
- [4] Ginns J H. *Compendium of plant diseases and decay fungi in Canada, 1960–1980*. Ottawa, ON: Canadian Government Publishing Centre, 1986.
- [5] Hilton S. *Canadian plant disease survey*. Agriculture and Agri-Food Canada, 2000, 80: 151.
- [6] Lan Y R, Zhou W N, Duan T Y, *et al.* Alfalfa spring black stem and leaf spot disease caused by *Phoma medicaginis*: Epidemic occurrence and impacts. *Microorganisms*, 2024, 12: 1279.

- [7] Balmas V, Scherm B, Ghignone S, *et al.* Characterisation of *Phoma tracheiphila* by RAPD-PCR, microsatellite-primed PCR and ITS rDNA sequencing and development of specific primers for in planta PCR detection. *European Journal of Plant Pathology*, 2005, 111: 235–247.
- [8] Alaka P, Rao V G. A compendium of fungi on legumes from India. New Delhi: Scientific Publishers, 1998.
- [9] Djebali N. Aggressiveness and host range of *Phoma medicaginis* isolated from *Medicago* species growing in Tunisia. *Phytopathologia Mediterranea*, 2012, 52: 3–15.
- [10] Nutter F W J, Guan J, Gotlieb A R, *et al.* Quantifying alfalfa yield losses caused by foliage diseases in Iowa, Ohio, Wisconsin, and Vermont. *Plant Disease*, 2002, 86: 269–277.
- [11] Hwang S F, Wang H P, Gossen B D, *et al.* Impact of foliar diseases on photosynthesis, protein content and seed yield of alfalfa and efficacy of fungicide application. *European Journal of Plant Pathology*, 2006, 115: 389–399.
- [12] Wang H, Hwang S F, Chang K F, *et al.* Assessing resistance to spring black stem and leaf spot of alfalfa caused by *Phoma* spp. *Canadian Journal of Plant Science*, 2004, 84: 311–317.
- [13] Barbetti M J. Resistance in annual *Medicago* spp. to *Phoma medicaginis* and *Leptosphaerulina trifolii* and its relationship to induced production of a phytoestrogen. *Plant Disease*, 2007, 91: 239–244.
- [14] Jaouannet M, Morris J A, Hedley P E, *et al.* Characterization of Arabidopsis transcriptional responses to different aphid species reveals genes that contribute to host susceptibility and non-host resistance. *PLoS Pathology*, 2015, 11: e1004918.
- [15] Elbakidze L, Lu L, Eigenbrode S D. Evaluating vector-virus-yield interactions for peas and lentils under climatic variability: a limited dependent variable analysis. *Journal Agriculture Resource Economy*, 2010, 36: 504–520.
- [16] Ng J C K, Perry K L. Transmission of plant viruses by aphid vectors. *Molecular Plant Pathology*, 2004, 5: 505–511.
- [17] Guo S M, Kamphuis L G, Gao L L, *et al.* Identification of distinct quantitative trait loci associated with defence against the closely related aphids *Acyrtosiphon pisum* and *A. kondoi* in *Medicago truncatula*. *Journal Experimental Botany*, 2012, 63: 3913–3922.
- [18] Aznar-Fernández T, Cimmino A, Masi M, *et al.* Antifeedant activity of long-chain alcohols, and fungal and plant metabolites against pea aphid (*Acyrtosiphon pisum*) as potential biocontrol strategy. *Nature Product Research*, 2019, 33: 2471–2479.
- [19] Smith A H, O' Connor M P, Deal B, *et al.* Does getting defensive get you anywhere? Seasonal balancing selection, temperature, and parasitoids shape real-world, protective endosymbiont dynamics in the pea aphid. *Molecular Ecology*, 2021, 30: 2449–2472.
- [20] Stout M J, Thaler J S, Thomma B P H J. Plant-mediated interactions between pathogenic microorganisms and herbivorous arthropods. *Annual Review of Entomology*, 2006, 51: 663–689.
- [21] Dong W Q, Ma Z Y, Li Y D, *et al.* Research progress on assessment of losses in grassland due to diseases, pests, weeds and rodents. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(12): 214–223.
董万清, 马子媛, 李应德, 等. 草地有害生物损失评定研究进展. *草业学报*, 2024, 33(12): 214–223.
- [22] Zhao Z F, Guo Q Y, Zhao L, *et al.* Preliminary study on occurrence of rust and powdery mildew of alfalfa and yield loss of two combined disease. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2011, 48(4): 668–671.
赵宗峰, 郭庆元, 赵莉, 等. 种苜蓿锈病与白粉病发生动态及两病复合产量损失估计初步研究. *新疆农业科学*, 2011, 48(4): 668–671.
- [23] Gao P, Li Y D, Guo Y E, *et al.* Co-inoculation of an AM fungus and a rhizobium reduce alfalfa spring black stem and leaf spot occurrence caused by *Phoma medicaginis*. *Crop and Pasture Science*, 2018, 69: 933–943.
- [24] Xu L, Zhao T H, Xing X, *et al.* Stage-specific economic thresholds for *Aphis glycines* (Matsumura) (Hemiptera: Aphididae). *Journal of Plant Protection*, 2020, 47(3): 517–527.
徐蕾, 赵彤华, 邢星, 等. 大豆蚜阶段特异性经济阈值的制定. *植物保护学报*, 2020, 47(3): 517–527.
- [25] Gao Y L, Sun Y. Quality evaluation of alfalfa hay by the spectroscopic analysis of near infrared reflectance. *Acta Agrestia Sinica*, 2015, 23(5): 1080–1085.
高燕丽, 孙彦. 利用近红外光谱分析预测紫花苜蓿干草品质. *草地学报*, 2015, 23(5): 1080–1085.
- [26] Jensen N F. Powdery mildew of barley: studies of yield losses and the inheritance of disease resistance. Ithaca, USA: Cornell University, 1943.
- [27] Stern V M, Sharma R A J, Summers C. Alfalfa damage from *Acyrtosiphon kondoi* and economic threshold studies in southern California. *Journal of Economic Entomology*, 1980, 73(1): 145–148.
- [28] Cuperus G W, Radcliffe E B, Barnes D K, *et al.* Economic injury levels and economic thresholds for pea aphid, *Acyrtosiphon*

- pisum* (Harris), on alfalfa. *Crop Protection*, 1982, 1(4): 453–463.
- [29] Hendrickson J R M, Day W H. Yield losses caused by alfalfa blotch leafminer (Diptera: Agromyzidae). *Journal of Economic Entomology*, 1986, 79(4): 988–992.
- [30] Lamp W O, Nielsen G R, Dively G P. Insect pest-induced losses in alfalfa: patterns in Maryland and implications for management. *Journal of Economic Entomology*, 1991, 84(2): 610–618.
- [31] Jones R A C. Further studies on losses in productivity caused by infection of annual pasture legumes with three viruses. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1992, 43(5): 1229–1241.
- [32] Nan Z B. Establishing sustainable pasture crops in China. *Acta Prataculturae Sinica*, 2000, 9(2): 1–9.
南志标. 建立中国的牧草病害可持续管理体系. *草业学报*, 2000, 9(2): 1–9.
- [33] Nan Z B. Effects of rust on the growth and nutritive composition of forage legumes. *Acta Prataculturae Sinica*, 1990, 1(1): 83–87.
南志标. 锈病对豆科牧草生长和营养成分的影响. *草业学报*, 1990, 1(1): 83–87.
- [34] Wang Q, Duan T Y, Nan Z B. Isolation and identification of an anthracnose pathogen on *Vicia sativa*. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(6): 127–136.
王琼, 段廷玉, 南志标. 箭筈豌豆炭疽病原菌分离鉴定. *草业学报*, 2020, 29(6): 127–136.
- [35] Li Y D, Li Y Z, Duan T Y. Research progress in the interactions of fungal pathogens and insect pests during host plant colonization. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 2021, 128: 633–647.
- [36] Ding T T, Zhang W Z, Li Y D, *et al.* Effect of the AM fungus *Sieversdingia tortuosa* on common vetch responses to an anthracnose pathogen. *Frontiers in Microbiology*, 2020, 11: 542623.
- [37] Li Y D, Duan T Y, Nan Z B, *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungus alleviates alfalfa leaf spots caused by *Phoma medicaginis* revealed by RNA-seq analysis. *Journal of Applied Microbiology*, 2019, 130: 547–560.
- [38] Wang Y J, Li Y D, Tian Z, *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungus alters alfalfa (*Medicago sativa*) defense enzyme activities and volatile organic compound contents in response to pea aphid (*Acyrtosiphon pisum*) infestation. *Journal of Fungi*, 2022, 8: 1308.
- [39] Li Y D, Nan Z B, Duan T Y. *Rhizophagus intraradices* promotes alfalfa (*Medicago sativa*) defense against pea aphids (*Acyrtosiphon pisum*) revealed by RNA-Seq analysis. *Mycorrhiza*, 2019, 29: 623–635.
- [40] Jacobs M, Hilmers T, Leroy B M, *et al.* Assessment of defoliation and subsequent growth losses caused by *Lymantria dispar* using terrestrial laser scanning (TLS). *Trees*, 2022, 36(2): 819–834.
- [41] Bi J, Song A, Li S, *et al.* Plant physiology, microbial community, and risks of multiple fungal diseases along a soil nitrogen gradient. *Applied Soil Ecology*, 2022, 175: 104445.