

小麦蚕豆间作及氮肥调控对蚕豆赤斑病和锈病复合危害及产量损失的影响

马连坤¹, 董坤², 朱锦惠¹, 董艳^{1*}

(1 云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201; 2 云南农业大学动物科学技术学院, 昆明 650201)

摘要: 【目的】研究不同施氮水平下蚕豆单作、小麦与蚕豆间作种植模式下蚕豆赤斑病和锈病复合危害及蚕豆产量损失的差异, 量化赤斑病和锈病复合危害导致的产量损失, 定量评估间作控病对产量优势的贡献。

【方法】于 2016 年进行了田间试验, 设置蚕豆单作和蚕豆小麦间作 2 种植模式, 防治病害和不防治病害 2 种处理, 4 个施氮水平 (N₀、45、90、135 kg/hm², 依次记为 N₀、N₁、N₂、N₃)。调查蚕豆赤斑病和锈病复合危害程度的差异, 测定蚕豆的百粒重和产量。【结果】施氮 (N₁、N₂、N₃) 使单作蚕豆赤斑病和锈病病情进展曲线下面积 (AUDPC) 平均增加 33.9% 和 39.6%, 使间作蚕豆平均增加 27.1% 和 69.3%, 均以 N₃ 水平增加最高。所有施氮水平下, 与单作相比, 间作显著降低赤斑病 AUDPC 49.1%~53.6%, 降低锈病 AUDPC 39.6%~56.8%。施氮 (N₁、N₂、N₃) 加剧蚕豆赤斑病和锈病的危害, 单作蚕豆百粒重损失 28.1~32.4 g, 间作损失 16.3~16.8 g, 单作籽粒产量损失 1441~1770 kg/hm², 间作籽粒产量损失 815~1263 kg/hm², 间作比单作平均减少百粒重 46.8% 和籽粒产量 36.9%, 减少效果表现为 N₃ > N₂ > N₁ > N₀。蚕豆病害复合危害与籽粒产量的回归分析表明, 赤斑病和锈病的 AUDPC 每增加一个单位可导致 1.7 kg/hm² 的蚕豆籽粒产量损失, 赤斑病对蚕豆产量损失的影响大于锈病。【结论】施氮加重赤斑病和锈病的复合危害, 加剧蚕豆产量损失。小麦与蚕豆间作能显著减轻赤斑病和锈病的复合危害程度, 减少产量损失。合理施用氮肥能够充分发挥间作的控病增产效果, 有利于间作的产量优势最大化。本试验条件下, 兼顾间作的控制病害增产效果和间作产量优势其他效应, 推荐蚕豆的适宜施氮量为 45 kg/hm²。

关键词: 间作; 氮水平; 蚕豆赤斑病; 蚕豆锈病; 产量损失

Effect of N management on the combined damage of chocolate spot and rust diseases and yield loss of faba bean in wheat–faba bean intercropping system

MA Lian-kun¹, DONG Kun², ZHU Jin-hui¹, DONG Yan^{1*}

(1 College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;

2 College of Animal Science and Technology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: 【Objectives】The objectives were to explore differences of the degree of chocolate spot and rust combined disease and yield loss between faba bean monoculture and wheat with faba bean intercropping under different nitrogen levels, quantify yield loss caused by the combined damage of chocolate spot and rust, and evaluate contribution of intercropping control disease to yield advantage. 【Methods】In 2016, a field experiment was designed by using a randomized block design. There were four nitrogen levels, N₀ (0 kg/hm²), N₁ (45 kg/hm²), N₂ (90 kg/hm²) and N₃ (135 kg/hm²), two planting modes, faba bean monoculture and wheat with faba bean intercropping, and disease control and no control. The damage degree of chocolate spot and rust on faba bean and the yield loss were investigated. 【Results】The nitrogen application (N₁, N₂ and N₃) increased the chocolate spot and rust area under disease progression curve (AUDPC) 33.9% and 39.6% on average in the monoculture,

收稿日期: 2018-09-10 接受日期: 2018-10-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31560586, 31860596)。

联系方式: 马连坤 E-mail: maliankun92@163.com; * 通信作者 董艳 E-mail: dongyanx@163.com

increased the chocolate spot and rust AUDPC 27.1% and 69.3% on average in the intercropping, and the AUDPC was the highest under the N_3 level. Compared with the monocropping, the intercropping significantly reduced the chocolatespot and rust AUDPC 49.1%–53.6% and 39.6%–56.8% under N_0 – N_3 levers, respectively. The nitrogen application (N_1 , N_2 and N_3) aggravated the harm of the chocolate spot and rust and caused faba bean 100-seed weight loss 28.1–32.4 g (monocropping) and 16.3–16.8 g (intercropping), grain yield loss of 1441–1770 kg/hm² (monocropping) and 815–1263 kg/hm² (intercropping), ranked as follows: $N_3 > N_2 > N_1 > N_0$. Compared with the monoculture, the intercropping could recover 46.8% 100-seed weight loss and 36.9% grain yield loss of faba bean. Regression analysis of the combined damage of faba bean diseases and grain yield showed that for each unit increase in percent of the chocolate spot and rust AUDPC, there was a grain yield loss of 1.7 kg/hm². The chocolate spot was the main disease causing yield loss of faba bean, followed by rust. Appropriate nitrogen application could exert the advantage of intercropping better. **【 Conclusions 】** Nitrogen application aggravates the combined damage of the chocolate spot and rust, and increases the yield loss of faba bean. Wheat with faba bean intercropping could significantly reduce the combined damage of the chocolate spot and rust and recover the yield loss. The effect of the intercropping could control disease and increase yield under full realization at appropriate rate of nitrogen fertilizer, and other effects of yield advantage of the intercropping could be maximized. In this experiment, considering the effects of disease control and yield increase and other effects of intercropping, the recommended nitrogen application rate of faba bean was 45 kg/hm².

Key words: intercropping; N rate; chocolate spot; rust; yield loss

据世界粮农组织 (FAO) 统计, 2014 年, 全世界蚕豆种植面积 239.5 万 hm², 总产量 434.3 万 t; 其中我国种植面积 92.5 万 hm², 总产量 159.5 万 t, 分别占世界蚕豆总生产面积和总产量的 38.6% 和 36.7%, 位列第一^[1,2]。云南是中国最大的蚕豆主产区, 云南蚕豆种植面积近年平均稳定在 30 万公顷以上, 占全国蚕豆播种面积的 1/3 左右, 在全省 116 个县皆有种植^[3]。

蚕豆赤斑病 (*Botrytis fabae*) 和锈病 [*Uromyces fabae* (Pers.) Schar] 是对蚕豆生产危害最大的两种主要叶部真菌病害, 二者在世界范围内的广泛发生导致了严重的蚕豆产量损失^[4-7]。赤斑病和锈病在云南蚕豆生产中也普遍发生且危害严重, 往往在早春时节随着气温回升, 雨量增多, 两种病害便在田间混合大面积发生^[8], 当病害大面积爆发时, 往往造成蚕豆患病叶片大量干枯脱落, 降低植株光合作用, 造成蚕豆产量损失。

20 世纪 30 年代绿色革命之前, 农学家已经认识到大面积种植单一作物品种具有潜在病害流行的后果。现代农业追求高产品种大面积单一种植和农药化肥的大量施用造成农田生态系统日趋简单和脆弱, 使作物病害发生频繁, 病害流行周期越来越短, 作物病害的发生流行也愈演愈烈^[9]。农业生物多样性是植物病害流行的天然屏障, 而间作是增加农田生物多样性的有效措施^[10]。

间作是一种历史悠久, 且在我国传统农业和现代农业中都做出过巨大贡献的种植体系, 几千年来一直被劳动人民所采用, 其最重要的原因之一就是其具有明显的产量优势, 产量优势已在多种间作体系得到证实^[11]。间作产量优势的形成主要来自两方面: 一是间作控制作物病害, 减少由病害造成的产量损失, 即间作的控病增产效果^[12-14]; 二是间作利用作物自身特性, 通过田间合理布局高效利用光热资源, 提高作物光合效率^[5], 提高作物养分资源利用效率^[16]及改善水分条件^[17], 而增加作物产量, 即间作增产其他效应。但有关间作的控病增产效果和间作增产其他效应对间作产量优势的贡献尚不清楚, 如何定量评估二者对间作产量优势的贡献度已成为重要的科学问题。氮肥不合理使用导致作物病害流行是长期存在的普遍现象, 最近研究显示, 间作系统氮肥调控显著影响作物病害发生流行及间作控病增产效果, 如陈远学等^[18]的研究表明, 施氮加剧了小麦条锈病的发生, 而间作能够减轻条锈病的危害; 朱锦惠等^[19]的研究指出, 施氮加重小麦白粉病的危害, 间作能够有效减轻小麦白粉病病害危害, 氮肥调控影响间作产量优势。但此前的研究仅限于间作系统对作物单一主要病害的控制效果及控病机理, 有关间作系统氮肥调控对病害复合危害及产量损失的影响尚未见报道。

云南具有丰富的生物资源优势, 小麦与蚕豆间

作也一直是云南及西南普遍的种植模式, 在农业生产中占有重要地位, 种植面积大, 增产、增收、抗病效果显著^[3,20]。本研究以小麦与蚕豆间作系统为研究对象, 采用田间小区试验, 在田间自然发病条件下, 研究间作系统氮肥调控对赤斑病和锈病复合危害及产量损失的影响, 基于复合发生角度分析病害危害与产量损失的关系, 定量评估间作控病对产量优势的贡献程度; 明确间作系统病害复合危害对氮肥调控的响应特征, 探讨蚕豆赤斑病、锈病复合危害与蚕豆产量损失的关系, 揭示间作控病与产量优势的互作关系。研究结果对解决单一化学防治带来的环境及农产品污染问题提供理论基础和新途径, 可为充分发挥间作减氮控病、提高作物产量、减少化肥和农药的施用量, 实现农业可持续发展提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 供试材料与试验点概况

小麦品种为云麦 53(*Tricum aestivum*)、蚕豆品种为 89-147(*Vicia faba*), 购于云南省农科院粮作所。

试验时间及地点: 田间试验于 2016 年 10 月—2017 年 5 月在云南省玉溪市峨山县峨峰村(102°24'24"E, 24°11'5"N, 海拔 1540m) 进行, 土壤类型为水稻土。田间试验供试土壤理化性质为有机质 28.9 g/kg、全氮 2.2 g/kg、全磷 0.75 g/kg、全钾 18.3 g/kg、碱解氮 102 mg/kg、速效磷 36.9 mg/kg、速效钾 100 mg/kg、pH 6.7。

1.2 试验设计

试验为种植模式、施氮水平和防治模式 3 因素设计, 随机区组排列。种植模式为蚕豆单作(MF), 蚕豆与小麦间作(IF); 施 N 0、45、90、135 kg/hm² 4 个水平(N₀、N₁、N₂、N₃), 病害防治分为防病、不防病 2 种。每处理 3 次重复, 共 48 个小区, 小区面积均为 32.4 m²(5.4 m × 6 m)。间作小区按 6 行小麦、2 行蚕豆的方式种植, 小麦条播, 行距 0.2 m, 蚕豆点播, 行距 0.3 m, 株距 0.15 m, 间作小区内有 3 个小麦种植带和 4 个蚕豆种植带, 单作小区蚕豆种植株行距与间作小区相同。

防病和不防病小区蚕豆赤斑病和锈病均为田间自然发生, 其中不防病小区用于调查蚕豆病害发生情况及相应的作物实际产量。为明确蚕豆不受病害危害可达到的最高产量, 则以防病小区作为对照小区, 防治小区通过喷施农药控制病害保证蚕豆整个生育期均不发病, 用于测定蚕豆可实现产量。

单、间作小区小麦和蚕豆磷肥施用量均为 90 kg/hm² (P₂O₅), 钾肥施用量为 90 kg/hm² (K₂O)。单、间作蚕豆氮肥、磷肥和钾肥作为基肥一次性施入。单、间作小麦磷肥和钾肥作为基肥一次性施入, 小麦氮肥施用量为蚕豆氮肥用量的 2 倍, 小麦氮肥分底肥和追肥(各 50%) 两次施用, 追肥于小麦拔节期兑水浇施。

1.3 蚕豆赤斑病和锈病调查

于蚕豆幼苗期、分枝期、现蕾期、盛花期、结荚期、鼓荚期、成熟期进行赤斑病和锈病调查, 整个生育期共调查 7 次。病害调查方法: 蚕豆单作小区沿对角线随机选择 5 点, 每点调查 2 株, 共调查 10 株。间作小区在第一个种植带内选 3 点, 相邻另一个带内再选 2 点, 每点调查 2 株蚕豆。调查每株蚕豆所有完全展开叶片的赤斑病和锈病的发病情况。病害分级标准参考 Abomostafa 等^[21]的分级方法并进行改进, 赤斑病及锈病均以 6 级标准记载: 0 级为蚕豆叶片上无病斑; 1 级为病斑面积占叶面积 ≤ 5%; 3 级为病斑面积占叶面积 6%~25%; 5 级为病斑面积占叶面积 26%~50%; 7 级为病斑面积占叶面积 51%~75%; 9 级为病斑面积占叶面积 ≥ 75%。调查完成后计算赤斑病和锈病的病情指数和病情进展曲线下的面积(The area under disease progress curve, AUDPC), 计算公式如下:

病情指数 = \sum (各级病叶数 × 相应级值) × 100/(调查叶片总数 × 最高级值)^[19]

病情进展曲线下的面积 (AUDPC)^[19]:

$$AUDPC = \sum_{i=1}^n 1/2(X_i + X_{i-1})(T_i - T_{i-1})$$

式中, X_i 和 X_{i-1} 分别表示后一次和前一次调查时的病情指数。 T_i 和 T_{i-1} 分别表示后一次调查时间与前一次调查时间 (d)。

1.4 蚕豆产量测定

为减少边行效应的影响, 成熟期单作蚕豆在除去边行 3 行后再收获连续 6 行; 间作蚕豆收获与小麦间作的带幅(2 行), 间作小麦收获中间的一个完整带幅(6 行); 收获后蚕豆自然风干, 称量百粒重与籽粒产量, 防治小区和不防治小区的收获方法一致。

根据以上原始测定数据计算相关二次参数:

产量损失 = 防治小区产量 - 不防治小区产量

间作产量优势总效应(病害控制效应 + 间作产量优势其他效应) = 间作不防治小区产量 - 单作不防治小区产量

间作产量优势其他效应(无病害发生时间作其他

因素促成的增产效应) = 间作防治小区产量 - 单作防治小区产量

间作控病增产效应 = (间作不防治小区产量 - 单作不防治小区产量) - (间作防治小区产量 - 单作防治小区产量)

1.5 土地当量比计算方法

通过土地当量比 (land equivalent ratio, LER) 来衡量间作优势^[22]:

$$LER = (Y_{iw}/Y_{mw}) + (Y_{if}/Y_{mf})$$

式中: Y_{iw} 和 Y_{mw} 分别表示间作小麦和单作小麦的籽粒产量; Y_{if} 和 Y_{mf} 分别表示间作蚕豆和单作蚕豆的产量。当 LER 值大于 1 时, 表明该间作体系具有间作产量优势; 若 LER 小于 1, 则表明该体系没有间作产量优势。

1.6 数据处理

采用 EXCEL2010 软件进行数据整理、初步分析及作图, SAS 9.0 (SAS Institute, USA) 软件进行双因素方差分析, 最小显著差法 (LSD) 检验各处理间的差异显著性 ($\alpha = 0.05$), SPSS 22.0 软件进行原始数据标准化、相关分析和回归分析。

2 结果与分析

2.1 间作及施氮对蚕豆赤斑病和锈病病害复合危害的影响

单、间作蚕豆赤斑病和锈病的 AUDPC 均随施氮量的增加而增加, 均以 N_0 处理最低, N_3 处理最高。与 N_0 相比, N_2 、 N_3 处理显著增加单作蚕豆赤斑病 AUDPC 41.0%、45.7%, 显著增加锈病 AUDPC

46.8%、63.1%, N_1 与 N_0 处理相比无显著差异。与 N_0 相比, 施氮 (N_1 、 N_2 、 N_3) 平均增加间作蚕豆赤斑病 AUDPC 27.1%, 平均增加锈病 AUDPC 69.3%, 总体上施氮对间作蚕豆 AUDPC 无显著影响。表明施氮加重了蚕豆赤斑病和锈病的危害程度, 尤其在 N_2 和 N_3 水平下的增幅较大, 施氮对单作蚕豆赤斑病和锈病危害程度的影响大于间作蚕豆, 且施氮对赤斑病发病程度的影响大于锈病, 赤斑病的整体危害程度比锈病更加严重 (表 1)。

与单作相比, 不同施氮水平下间作均显著降低了蚕豆赤斑病和锈病的 AUDPC ($P < 0.05$)。与单作相比, $N_0 \sim N_3$ 水平下, 间作显著降低蚕豆赤斑病 AUDPC 49.1%、51.4% 53.6% 和 50.0%; 显著降低蚕豆锈病 AUDPC 56.8%、50.2%、54.8% 和 39.6%。说明间作对蚕豆赤斑病和锈病均有显著的控制效果, 能够有效减轻赤斑病和锈病的危害程度。

2.2 间作及施氮对蚕豆产量损失的影响

2.2.1 间作及施氮对蚕豆籽粒产量损失的影响 防病条件下, 不同施氮处理对单、间作蚕豆籽粒产量均无显著性影响; 与单作相比, 间作增加了蚕豆籽粒产量, 但与单作无显著性差异。

不防病条件下, 与 N_0 相比, N_1 、 N_2 、 N_3 水平下单作蚕豆籽粒产量损失分别增加 20.4%、26.6% 和 48.0%, N_3 与 N_0 相比差异显著; 间作蚕豆籽粒产量损失分别增加 14.6%、33.1% 和 77.6%, N_2 和 N_3 与 N_0 相比差异显著。单、间作蚕豆籽粒产量损失量均随施氮量的增加而增加, 高氮 (N_3) 处理显著增加蚕豆籽粒产量损失。4 个施氮水平 ($N_0 \sim N_3$) 下单作蚕豆

表 1 间作及不同施氮水平下蚕豆赤斑病和锈病病情进展曲线下面积

Table 1 Area under disease progression (AUDPC) of the chocolate spot and rust of faba bean affected by N application levels and intercropping

氮水平 N level (kg/hm ²)	赤斑病 Chocolate spot			锈病 Rust		
	单作 Mono-cropping	间作 Intercropping	平均 Mean	单作 Mono-cropping	间作 Intercropping	平均 Mean
0 (N_0)	1115 ± 175 b	568 ± 232 a*	842 ± 106 b	389 ± 120 b	168 ± 44 b*	278 ± 58 b
45 (N_2)	1282 ± 385 ab	623 ± 62 a*	953 ± 221 ab	424 ± 67 b	211 ± 36 b*	317 ± 34 b
90 (N_3)	1572 ± 46 a	730 ± 205 a*	1151 ± 80 a	570 ± 127 a	258 ± 53 b*	414 ± 89 ab
135 (N_4)	1625 ± 207 a	812 ± 192 a*	1219 ± 174 a	633 ± 26 a	382 ± 87 a*	508 ± 41 a
平均 Mean	1399 ± 203	683 ± 173*		504 ± 85	255 ± 55*	

注 (Note): 数据为平均值 ± 标准差, 数值后不同字母表示相同种植模式下不同施氮处理间差异显著; *表示相同施氮水平下单作和间作处理间差异显著。Values are means ± SD. Values followed by different letters indicate significant differences among N treatments under the same planting patterns at the 0.05 level; * means significant difference between mono-cropping and intercropping system at the same N application rate at the 0.05 level.

平均籽粒产量损失达 1480 kg/hm², 间作蚕豆平均籽粒产量损失达 933 kg/hm², 单作平均损失量显著高于间作 ($P < 0.05$)。与单作相比, N₀~N₃ 水平下, 间作蚕豆籽粒产量损失分别降低 40.6%、43.4%、37.5% 和 28.7%, 平均降低产量损失 36.9%。表明小麦与蚕豆间作能够挽回蚕豆籽粒产量损失, 降低病害危害 (表 2)。

2.2.2 间作及施氮对蚕豆百粒重损失的影响 防病条件下, 不同施氮处理对单、间作蚕豆百粒重均无显著性影响; 与单作相比, 间作显著增加了蚕豆百粒重 ($P < 0.05$) (表 3)。

不防病条件下, 与 N₀ 相比, N₁~N₃ 水平下单作蚕豆百粒重损失达 1.8%~17.6%, 间作蚕豆百粒重

损失达 19.0%~22.7%, 但单、间作蚕豆施氮 (N₁~N₃) 与 N₀ 处理间均未达到显著差异。4 个施氮水平 (N₀~N₃) 下单作蚕豆平均百粒重损失达 29.7 g, 间作蚕豆平均百粒重损失达 15.8 g。表明单、间作蚕豆百粒重损失随施氮的增加而增加, 均以 N₀ 水平最低, N₃ 水平最高。

与单作相比, 在 N₀、N₁ 水平下间作显著降低蚕豆百粒重损失 50.3%、46.6%, 在 N₂、N₃ 下分别降低 41.8% 和 48.2%, 4 个施氮水平平均降低 46.7%。表明小麦与蚕豆间作能够有效降低病害导致的蚕豆百粒重损失, 且间作在不施氮 (N₀) 和低氮水平 (N₁) 下对蚕豆百粒重损失的降低效果优于常规施氮 (N₂) 和高氮水平 (N₃)。

表 2 间作及不同施氮水平下蚕豆籽粒产量和产量损失

Table 2 Grain yield and yield loss of faba bean affected by intercropping and N application levels

氮水平 N level (kg/hm ²)	籽粒产量 Grain yield (kg/hm ²)				籽粒产量损失 (kg/hm ²)	
	防病 Disease control		不防病 No disease control		Grain yield loss	
	单作 Mono-cropping	间作 Intercropping	单作 Mono-cropping	间作 Intercropping	单作 Mono-cropping	间作 Intercropping
0 (N ₀)	4648 ± 579 a	5056 ± 508 a	3452 ± 406 a	4344 ± 328 a*	1196 ± 173 b	711 ± 182 c*
45 (N ₁)	4778 ± 419 a	5519 ± 479 a	3337 ± 621 a	4704 ± 506 a*	1441 ± 215 b	815 ± 32 bc*
90 (N ₂)	4722 ± 453 a	5333 ± 397 a	3207 ± 383 a	4387 ± 515 a*	1515 ± 74 ab	946 ± 118 b*
135 (N ₃)	4574 ± 581 a	5167 ± 453 a	2804 ± 406 a	3904 ± 350 a*	1770 ± 190 a	1263 ± 105 a*
平均 Mean	4680 ± 508	5268 ± 459	3200 ± 454	4334 ± 424 *	1480 ± 76	934 ± 33 *

注 (Note): 数据为平均值 ± 标准差, 数值后不同字母表示相同种植模式下不同施氮处理间差异显著; *表示相同施氮水平下单作和间作处理间差异显著。Values are means ± SD. Values followed by different letters indicate significant differences among N treatments under the same planting patterns at the 0.05 level; * means significant difference between mono-cropping and intercropping system at the same N application rate at the 0.05 level.

表 3 间作及不同施氮水平下蚕豆百粒重及百粒重损失

Table 3 100-seed-weight and 100-seed-weight loss of faba bean affected by intercropping and N application levels

氮水平 N level (kg/hm ²)	百粒重 100-seed weight (g)				百粒重损失 (g)	
	防病 Disease control		不防病 No disease control		100-seed weight loss	
	单作 Mono-cropping	间作 Intercropping	单作 Mono-cropping	间作 Intercropping	单作 Mono-cropping	间作 Intercropping
0 (N ₀)	132.6 ± 10.2 a	143.7 ± 8.4 b*	105.0 ± 5.7 a	130.0 ± 5.5 b	27.6 ± 4.7 a	13.7 ± 3.1 a*
45 (N ₁)	137.6 ± 7.6 a	157.2 ± 7.8 a*	106.9 ± 6.3 a	140.8 ± 5.6 ab*	30.7 ± 1.4 a	16.4 ± 4.7 a*
90 (N ₂)	136.1 ± 3.2 a	159.0 ± 2.8 a*	108.0 ± 9.3 a	142.7 ± 7.3 a*	28.1 ± 6.1 a	16.3 ± 7.7 a
135 (N ₃)	138.5 ± 16.4 a	157.5 ± 6.8 a*	106.1 ± 2.7 a	140.7 ± 5.6 ab	32.4 ± 13.9 a	16.8 ± 5.2 a
平均 Mean	136.2 ± 16.4	154.3 ± 6.5 *	106.5 ± 5.9	138.5 ± 6.0	29.7 ± 3.3	15.8 ± 2.1

注 (Note): 数据为平均值 ± 标准差, 数值后不同字母表示相同种植模式下不同施氮处理间差异显著; *表示相同施氮水平下单作和间作处理间差异显著。Values are means ± SD. Values followed by different letters indicate significant differences among N treatments under the same planting patterns at the 0.05 level; * means significant difference between mono-cropping and intercropping system at the same N application rate at the 0.05 level.

2.3 蚕豆赤斑病和锈病复合危害对蚕豆百粒重和籽粒产量的影响

2.3.1 蚕豆赤斑病和锈病复合危害与蚕豆百粒重和籽粒产量的相关分析 蚕豆赤斑病和锈病的 AUDPC 与百粒重和籽粒产量均呈极显著负相关关系 ($P < 0.01$, 表 4)。表明赤斑病和锈病的发病程度越严重, 蚕豆百粒重和籽粒产量越低, 产量损失越严重。百粒重与籽粒产量呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$), 表明蚕豆百粒重是影响籽粒产量的重要因子, 赤斑病和锈病共同危害显著降低百粒重, 进而导致籽粒产量降低。

2.3.2 蚕豆赤斑病和锈病的 AUDPC 与籽粒产量的回归分析 相关分析表明, 蚕豆赤斑病和锈病均与籽粒产量呈极显著负相关关系 (表 4)。因此采用强制回归分析方法, 将赤斑病 (X_1) 和锈病 (X_2) 与籽粒产量损失 (y) 分别进行线性拟合, 得到对应的回归方程: $y = 5194.001 - 1.194X_1 - 0.485X_2$, $R^2 = 0.604$, $P < 0.01$; 回归方程中 R^2 值大于 0.6, 表明回归方程能解释因变量超过 60.4% 的变异, 线性方程拟合效果较好, 回归方程中赤斑病回归系数大于锈病, 表明赤斑病对蚕豆产量损失的危害大于锈病。

2.4 间作控病对产量优势的贡献

表 5 表明, 防病和不防病条件下, 4 个氮水平下间作土地当量比 (LER) 均大于 1, 范围为 1.12~1.42, 不施氮 (N_0) 和低氮 (N_1) 水平下间作产量优势较为突出, LER 达到最大值。表明适量施氮有利于提高小麦与蚕豆间作土地利用效率, 最大化发挥间作优势。

间作产量优势总效应、间作增产其他效应和间作控病增产效应均随施氮量的增加呈先增后减的趋势 (表 5)。与 N_0 相比, N_1 、 N_2 处理显著提高间作产量优势总效应 53.1% 和 32.2%, 显著提高间作控病增

产效果 29.0% 和 17.2%, 而 N_3 与 N_0 处理相比无显著差异; N_1 、 N_2 、 N_3 处理提高间作增产其它效应 81.8%、50.0% 和 45.5%, 其中 N_1 与 N_0 有显著性差异。表明施氮水平显著影响间作控病增产效应和间作产量优势其它效应, 进而影响间作产量优势总效应, 适宜施氮水平 (N_1 、 N_2) 下间作控病挽回的产量损失最大, 高氮水平下 (N_3) 间作控病挽回的产量损失低于 N_1 、 N_2 水平, 反而不利于间作产量优势的提升。

3 讨论

3.1 间作和施氮对蚕豆赤斑病和锈病发生的影响

从“绿色革命”开始, 氮肥施用使作物产量得到极大的提升, 同时也加重了许多作物的发病程度, 如增施氮肥会加重小麦白粉病^[19]、赤霉病^[23], 水稻稻瘟病^[24]、纹枯病^[25]和蚕豆赤斑病^[26]的发生。本研究中, 单作、间作蚕豆赤斑病和锈病 AUDPC 均随施氮量的增加而增加, 增幅为 9.7%~45.7%(赤斑病) 和 9.1%~128.0%(锈病), 均表现为 $N_3 > N_2 > N_1 > N_0$, 说明施氮加重了赤斑病和锈病的总体危害程度。原因是作物氮素营养过高既会导致植株徒长, 细胞壁木质素与酚类物质合成减少, 细胞中可溶性氮同化物含量增加, 提高作物感病性, 利于病菌侵染; 同时施氮又会增加叶表面的氨基酸及酰胺浓度, 为病原菌孢子萌发和生长提供营养源, 促进病原菌的定殖, 加快病原菌的侵染循环, 从而加重病害的发生与危害^[27-28]。

大量研究证实, 不同作物合理间作能持续控制病害发生, 有利于降低作物产量损失^[13,29]。本研究中, 与单作相比, 4 个施氮水平 (N_0 ~ N_3) 下间作蚕豆赤斑病 AUDPC 显著降低 49.1%~53.6%; 锈病 AUDPC 显著降低 39.6%~56.8%。原因是农田生物

表 4 蚕豆赤斑病和锈病的 AUDPC 与产量及产量因子的相关分析

Table 4 Correlation coefficients (r) between AUDPC of the chocolate spot and rust with 100-seed weight and grain yield of faba bean

项目 Item	赤斑病 Chocolate spot	锈病 Rust	百粒重 100-seed weight	籽粒产量 Grain yield
赤斑病 Chocolate spot	1			
锈病 Rust	0.784**	1		
百粒重 100-seed weight	-0.744**	-0.526**	1	
籽粒产量 Grain yield	-0.794**	-0.666**	0.688**	1

注 (Note): ** — $P < 0.01$.

表 5 施氮对土地当量比 (LER) 及间作控病在间作产量优势中贡献程度的影响
Table 5 Effect of nitrogen application rates on LER and contribution of disease control by intercropping for intercropping yield advantage

氮水平 N level (kg/hm ²)	土地当量比 LER		间作产量优势 Intercropping yield advantage	间作产量优势其它效应 Intercropping yield advantage other effect	间作控病增产效应 Intercropping control disease and increase output
	防病 Disease control	不防病 No disease control			
0 (N ₀)	1.24 ± 0.10 aA	1.42 ± 0.20 aA	893 ± 78 c	407 ± 74 b	485 ± 23 c
45 (N ₁)	1.20 ± 0.10 aB	1.41 ± 0.10 aA	1367 ± 172 a	741 ± 63 a	626 ± 202 a
90 (N ₂)	1.14 ± 0.04 aB	1.34 ± 0.10 aA	1180 ± 185 ab	611 ± 111 ab	569 ± 238 ab
135 (N ₃)	1.12 ± 0.04 aB	1.32 ± 0.02 aA	1100 ± 56 bc	593 ± 170 ab	507 ± 113 bc
平均 Mean	1.18 ± 0.10 B	1.37 ± 0.10 A	1135 ± 122	588 ± 105	547 ± 137

注 (Note): 数值为平均值 ± 标准差, 数值后不同小写字母表示不同施氮处理间差异显著, 不同大写字母表示防病和不防病处理间差异显著。Values are means ± SD. Values followed by different letters indicate significant differences among N treatments ($P < 0.05$), and different capital letters indicate significant differences between disease control and no control treatment ($P < 0.05$).

多样性的增加相对减少了病原真菌寄生作物的数量, 进而减少病原真菌的定殖, 阻碍病原真菌的传播, 从而打破了病害在空间上的侵染循环, 降低病害危害程度^[30]。此外间作改变作物冠层结构, 增加冠层的通风透光, 降低田间郁闭度, 改善作物冠层微气候, 既防止病菌滋生^[13], 又促进作物光合作用, 增加了作物生物量和产量^[31]。通过增加农田生物多样性构建持续、稳定、健康、高产的农田生态系统, 是实现持久控制有害生物, 降低病害导致产量损失的金钥匙^[32]。

3.2 蚕豆赤斑病和锈病病害复合危害与产量损失的关系

病害危害显著影响作物生理性状和生长参数, 进而阻碍作物产量形成, 造成产量损失。王宽等^[33]研究发现, 鞘腐病导致玉米感病品种 (郑 58) 每公顷籽粒产量损失 13.8%~29.5%, 中抗品种 (郑单 958) 每公顷籽粒产量损失 3.99%~16.7%。本研究中, 4 个施氮水平 (N₀~N₃) 下, 赤斑病和锈病复合危害导致单、间作蚕豆百粒重平均损失 29.7 g 和 15.8 g, 籽粒产量平均损失 1480 kg/hm² 和 933 kg/hm², 间作蚕豆籽粒产量损失比单作平均降低 37.5%, 百粒重损失比单作平均降低 46.7%, 间作显著减轻了蚕豆赤斑病和锈病的危害程度, 有效降低了病害造成的产量损失。原因是作物遭受真菌侵染后患病组织的叶绿体含量明显降低^[34], 进而导致植株光合速率下降^[35], 光合物质累积减少, 产量损失增加。Junior 等^[36]的研究发现, 角斑病和锈病复合发生导致菜豆产量损失的原因是叶片净光合速率和气孔导度显著降低。

在田间自然状态下, 病害常常不是单一发生,

往往是多种病害同时发生、复合危害, 共同引起作物产量损失^[37-38], 若仅将其视为单独病害导致的产量损失难免有失偏颇, 因此需要同时考虑多种病害的致损性。如冯连军等^[39]对烤烟青枯病、气候性斑点病和烟草花叶病与烟叶产量和产值损失量进行研究, 发现烟草青枯病病指分别与产量和产值损失量存在极显著正相关关系, 烟草青枯病是造成产量损失较大的因子, 其次是气候性斑点病。本研究中, 蚕豆赤斑病和锈病的复合 AUDPC 与籽粒产量呈显著负相关关系 (表 3), AUDPC 每增加一个单位可能会造成 1.7 kg/hm² 的籽粒产量损失。强制回归分析表明, 蚕豆赤斑病对产量损失的直接危害作用显著高于锈病, 是产量损失的主要危害。本研究结果还表明, 赤斑病和锈病复合危害显著降低了百粒重, 百粒重又与籽粒产量呈极显著正相关关系 (表 4), 说明蚕豆赤斑病和锈病导致的百粒重损失是造成籽粒产量损失的主要原因。Samuel 等^[40]对蚕豆赤斑病的调查也证明了百粒重下降是造成籽粒产量损失的主要原因。病害发生会减少作物源的面积, 降低源中碳水化合物向库的供给, 染病作物通过早衰、缩短灌浆期等减少库容的行为来适应源面积的减小, 因而表现为产量降低^[41]。

作物同时罹患多种病害时, 由于混发病害间的互相作用, 可能使各病害的严重度和流行速率发生改变, 进而会影响对单一病害损失的评价^[38]。如果作物病害之间产生累加协同效应, 复合病害造成的产量损失理论上会等于或大于单一病害造成的产量损失^[42-43]。反之, 如果作物病害间产生抑制作用, 复合病害造成的产量损失小于单一病害造成的产量损失^[44-45]。

如崔建潮等通过分析比较花生褐斑病和网斑病单独及混合发生的流行过程及对花生产量损失的影响,表明两种病害混合发生所造成产量损失约为各病害单独引起损失之和的 77.2%~85.7%^[38]。由于本研究中病害为田间自然发生,只计算了赤斑病和锈病共同危害导致的蚕豆籽粒产量损失,虽然通过强制分析,得出赤斑病对蚕豆产量的影响大于锈病,但无法明确赤斑病和锈病的互作关系及其对产量损失的影响。

3.3 间作系统产量优势的定量评估

本研究中,不论防病与否,间作土地当量 LER 均大于 1(表 5),表明小麦与蚕豆间作具有明显的产量优势, Xiao 等^[46]的研究中,小麦与蚕豆间作土地当量比平均值为 1.14,与我们的结论相同。本研究中,防治条件下间作 LER 为 1.12~1.24,不防治条件下间作 LER 为 1.32~1.42,换句话说,防病条件下小麦与蚕豆间作较蚕豆单作的土地利用率提高了 12%~24%,不防病条件下提高了 32%~42%,不防病时,间作效果更突出。

本研究中中间作产量优势来源于间作控病带来的增产效果和间作产量优势其他效应带来的增产效果。各施氮水平下的间作产量优势、间作产量优势其他效应和间作控病增产效应均表现为 $N_1 > N_2 > N_3 > N_0$ 。适量施氮有利于发挥间作产量优势,过量施氮反而限制间作产量优势,不能充分发挥间作优势^[19]。高氮水平下蚕豆出现“氮阻遏”现象,限制蚕豆生长,又会导致蚕豆病害多发,降低蚕豆的光合效率,进而降低蚕豆产量,减小间作产量优势。在本研究中 $N_1(45 \text{ kg/hm}^2)$ 水平能够兼顾间作控病效果和间作产量优势其他效应,实现间作蚕豆产量优势总效应优势最大化。

本研究中,4 个施氮水平 ($N_0 \sim N_3$) 下间作控病增产效果平均提升蚕豆籽粒产量 547 kg/hm^2 ,间作产量优势其他效应平均提升蚕豆籽粒产量 588 kg/hm^2 ,说明小麦与蚕豆间作种植是一种比单作更加高效的种植模式。在当前作物单一、大面积种植模式下,作物病害的发生危害程度愈加严重,导致农药施用愈加泛滥,环境和农作物农药残留污染也越来越严重^[47]。间作种植与合理的氮肥调控能够减轻作物病害危害,实现对病害的持续控制,挽回病害导致的产量损失,进而减少农药的滥用,降低农药残留对环境和农产品的污染,是实现农业绿色可持续发展的有效途径。

4 结论

1) 不论单作还是间作,过量施氮会加重蚕豆赤斑病和锈病的危害程度,加重蚕豆籽粒产量和百粒重损失。

2) 间作显著减轻蚕豆赤斑病和锈病的总体危害程度,降低蚕豆籽粒产量和百粒重损失,施 $N 45 \text{ kg/hm}^2$ 可显著增加间作的控病效果,而施 $N 135 \text{ kg/hm}^2$ 则大大降低了氮肥的有效作用。

3) 赤斑病的整体危害程度比锈病更加严重,赤斑病和锈病复合危害下,赤斑病是造成蚕豆籽粒产量损失的主要病害,锈病次之。

4) 合理的氮肥调控能够同时发挥间作控病增产效应和间作产量优势其他效应,最大化提升间作产量优势总效应。本试验中,兼顾间作控病增产效应和其他效应,蚕豆施氮量应为 45 kg/hm^2 。

参 考 文 献:

- [1] 黄燕,朱振东,段灿星,等. 灰葡萄孢蚕豆分离物的遗传多样性[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(12): 2335-2347.
Huang Y, Zhu Z D, Duan C X, et al. Genetic diversity of *Botrytis cinerea* isolates from broad bean[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(12): 2335-2347.
- [2] 杨生华,刘荣,杨涛,等. 蚕豆种质资源种子表型性状精准评估[J]. *中国蔬菜*, 2016, (10): 32-40.
Yang S H, Liu Y, Yang T, et al. Accurate evaluation on seed phenotypic traits of faba bean germplasm resources[J]. *China Vegetables*, 2016, (10): 32-40.
- [3] 肖焱波,段宗颜,金航,等. 小麦/蚕豆间作体系中的氮节约效应及产量优势[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(2): 267-271.
Xiao Y B, Duan Z Y, Jin H, et al. Spared N response and yields advantage of intercropped wheat and faba bean[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(2): 267-271.
- [4] Dagne K, Temam H, Seid A. Management of chocolate spot (*Botrytis fabae* L.) on faba bean in bale highlands, Ethiopia[J]. *Journal of Plant Sciences*, 2017, 5(4): 120-129.
- [5] Villegas-Fernández A M, Sillero J C, Emeranc A A, et al. Multiple-disease resistance in *Vicia faba*: Multi-environment field testing for identification of combined resistance to rust and chocolate spot[J]. *Field Crops Research*, 2011, 124: 59-65.
- [6] 杨进成,刘坚坚,安正云,等. 小麦蚕豆间作控制病虫害与增产效应分析[J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2009, 24(3): 340-348.
Yang J C, Liu J J, An Z Y, et al. Analyses on effect of interplanting on diseases and pests control and yield increase of wheat and faba bean[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 2009, 24(3): 340-348.
- [7] 李月秋,彭宏梅,梁仙. 蚕豆种质资源农艺性状与蚕豆锈病抗性研究[J]. *中国农学通报*, 2002, 18(1): 31-32.
Li Y Q, Peng H M, Liang X. Studies on agronomic characters and resistance to broad bean rust of broad bean germplasm resources[J].

- Chinese Agricultural Science Bulletin, 2002, 18(1): 31–32.
- [8] 徐云. 蚕豆锈病、赤斑病的发生规律及防治[J]. 云南农业科技, 1995, (5): 24–25.
Xu Y. Occurrence and control of faba bean rust and chocolate spot disease[J]. Yunnan Agricultural Science and Technology, 1995, (5): 24–25.
- [9] Savary S, Horgan F, Willocquet L, *et al.* A review of principles for sustainable pest management in rice[J]. *Crop Protection*, 2012, 32: 54–63.
- [10] Costanzo A, Bàrberi P. Functional agrobiodiversity an agroecosystem services in sustainable wheat production. a review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2014, 34: 327–348.
- [11] 李隆. 间套作强化农田生态系统服务功能的研究进展与应用展望[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(4): 403–415.
Li L. Intercropping enhances agroecosystem services and functioning: current knowledge and perspectives[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(4): 403–415.
- [12] 孙雁, 周天富, 王云月, 等. 辣椒玉米间作对病害的控制作用及其增产效应[J]. 园艺学报, 2006, 33(5): 995–1000.
Sun Y, Zhou T F, Wang Y Y, *et al.* Effect of intercropping on disease management and yield of chilli pepper and maize[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2006, 33(5): 995–1000.
- [13] 梁开明, 章家恩, 杨滔, 等. 水稻与慈姑间作栽培对水稻病虫害和产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(7): 757–765.
Liang K M, Zhang J E, Yang T, *et al.* Effect of rice/arrowhead (*Sagittaria Sagittifolia*) intercropping on diseases, pests and yield of rice[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(7): 757–765.
- [14] 向慧敏, 章家恩, 罗明珠, 等. 水稻与水芹间作栽培对水稻病虫害和产量的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2013, 29(1): 58–63.
Xiang H M, Zhang J E, Luo M Z, *et al.* Effects of intercropping rice with *Oenanthe javanica* on diseases pests and weeds hazards and yield of rice[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2013, 29(1): 58–63.
- [15] 冯晓敏, 杨永, 任长忠, 等. 豆科-燕麦间作对作物光合特性及籽粒产量的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(9): 1426–1434.
Feng X M, Yang Y, Ren C Z, *et al.* Effects of legumes intercropping with oat on photosynthesis characteristics of and grain yield[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(9): 1426–1434.
- [16] 宁川川, 杨荣双, 蔡茂霞, 等. 水稻-菠菜间作系统中种间关系和水稻的硅、氮营养状况[J]. 应用生态学报, 2017, 28(2): 474–484.
Ning C C, Yang R S, Cai M X, *et al.* Inter specific relationship and Si, N nutrition of rice in rice-water spinach intercropping system[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(2): 474–484.
- [17] 高砚亮, 孙占祥, 白伟, 等. 辽西半干旱区玉米与花生间作对土地生产力和水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(19): 3702–3713.
Gao Y L, Sun Z X, Bai W, *et al.* Productivity and water use efficiency of maize-peanut intercropping systems in the semi-arid region of western Liaoning province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(19): 3702–3713.
- [18] 陈远学, 李隆, 汤利, 等. 小麦/蚕豆间作系统中施氮对小麦氮营养及条锈病发生的影响[J]. 核农学报, 2013, 27(7): 1020–1028.
Chen Y X, Li L, Tang L, *et al.* Effect of nitrogen addition on nitrogen nutrition and strip rust occurrence of wheat in wheat/faba bean intercropping system[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2013, 27(7): 1020–1028.
- [19] 朱锦惠, 董艳, 肖靖秀, 等. 间作系统氮肥调控对小麦白粉病发生及氮素累积分配的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(12): 3985–3993.
Zhu J H, Dong Y, Xiao J X, *et al.* Effects of N application on wheat powdery mildew occurrence, nitrogen accumulation and distribution in intercropping system[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(12): 3985–3993.
- [20] Li C Y, He X H, Zhu S S, *et al.* Crop diversity for yield increase[J]. *PLoS ONE*, 2009, 4(11): e8049.
- [21] Abomostafa R A L, Zeinab E, Ghareeb, *et al.* Combined and genetic analysis for multiple-disease resistance to chocolate spot and rust on faba bean yield[J]. *International Journal of Plant Breeding and Genetics*, 2014, 8(4): 181–193.
- [22] 刘玉华, 张立峰. 不同作物种植方式产出效果的定量评价[J]. 中国农业科学, 2005, 38(4): 709–713.
Liu Y H, Zhang L F. Quantitative evaluation of output efficiency in different cropping patterns[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(4): 709–713.
- [23] 刘小宁, 刘海坤, 黄玉芳, 等. 施氮量、土壤和植株氮浓度与小麦赤霉病的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 306–317.
Liu X N, Liu H K, Han Y F, *et al.* Relationships between nitrogen application rate soil nitrate-nitrogen, plant nitrogen concentration and wheat scab[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(2): 306–317.
- [24] 唐旭, 郑毅, 汤利, 等. 不同品种间作条件下的氮硅营养对水稻稻瘟病发生的影响[J]. 中国水稻科学, 2006, 20(6): 663–666.
Tang X, Zheng Y, Tang L, *et al.* Effects of nitrogen and silicon nutrition on rice blast occurrence under intercropping with different type varieties[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2006, 20(6): 663–666.
- [25] 丁克坚, 姚俭德, 檀根甲, 等. 影响水稻纹枯病流行、危害的因子分析[J]. 应用生态学报, 1998, 9(1): 47–50.
Ding K J, Yao J D, Tan G J, *et al.* Factorial analysis of prevalence and damage of rice sheath blight[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1998, 9(1): 47–50.
- [26] 鲁耀, 郑毅, 汤利, 等. 施氮水平对间作蚕豆锰营养及叶赤斑病发生的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 425–431.
Lu Y, Zheng Y, Tang L, *et al.* Effects of nitrogen application on manganese nutrition and occurrence of leaf spots of intercropped faba beans[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(2): 425–431.
- [27] 张福锁. 环境胁迫与植物营养[M]. 北京: 中国农业出版社, 1993.
Zhang F S. Environmental stress and plant nutrition[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1993.
- [28] Chen Y X, Zhang F S, Tang L, *et al.* Wheat powdery mildew and foliar N concentrations as influenced by N fertilization and belowground interactions with intercropped faba bean[J]. *Plant and Soil*, 2007, 29(1): 1–13.
- [29] 蓝妮, 向慧敏, 章家恩, 等. 水稻与美人蕉间作对水稻生长、病虫害发生及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(8): 1170–1179.
Lan N, Xiang H M, Zhang J E, *et al.* Effects of rice and *Canna indica*

- L. intercropping on rice growth, disease pest incidence and yield[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(8): 1170–1179.
- [30] Ratnadass A, Fernandes P, Avelino J, *et al.* Plant species diversity for sustainable management of crop pests and diseases in agro-ecosystems: a review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2012, 32: 273–303.
- [31] 贾曼曼, 肖靖秀, 汤利, 等. 不同施氮量对小麦蚕豆间作作物产量及其光合特征的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2017, 32(2): 350–357.
- Jia M M, Xiao J X, Tang L, *et al.* Effects of nitrogen supply on yields and photosynthesis characteristics of crops in wheat and broad bean intercropping[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2017, 32(2): 350–357.
- [32] 高东, 何霞红, 朱有勇. 农业生物多样性持续控制有害生物的机理研究进展[J]. 植物生态学报, 2010, 34(9): 1107–1116.
- Gao D, He X H, Zhu Y Y, *et al.* Review of advances in mechanisms of sustainable management of pests by agro-biodiversity[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(9): 1107–1116.
- [33] 王宽, 曹志艳, 李朋朋, 等. 鞘腐病发生程度与玉米倒伏及产量损失间的相关性分析[J]. 植物保护学报, 2015, 42(6): 949–956.
- Wang K, Cao Z Y, Li P P, *et al.* Analysis of the correlation between diseased-degree of corn sheath rot and corn lodging and yield loss[J]. Journal of Plant Protection, 2015, 42(6): 949–956.
- [34] 曹学仁, 周益林, 段霞瑜, 等. 白粉菌侵染后田间小麦叶绿素含量与冠层光谱反射率的关系[J]. 植物病理学报, 2009, 39(3): 290–296.
- Cao X R, Zhou Y L, Duan X Y, *et al.* Relationships between canopy reflectance and chlorophyll contents of wheat infected with powdery mildew in fields[J]. *Acta Phytopathologica Sinica*, 2009, 39(3): 290–296.
- [35] Lucas I A. Plant pathology and plant pathogens(3rd Ed.)[M]. Oxford, UK: Blackwell Science, 1998.
- [36] Jesus Junior W C, Vale F X R, Coelho R R, *et al.* Effects of angular leaf spot and rust on yield loss of *phaseolus vulgaris*[J]. *Phytopathology*, 2001, 91: 1045–1053.
- [37] 李金堂, 傅俊范, 李海春. 玉米三种叶斑病混发时的流行过程及产量损失研究[J]. 植物病理学报, 2013, 43(3): 301–309.
- Li J T, Fu J F, Li H C. Epidemic processes and yield loss of northern leaf blight (*Exserohilum turcicum*), Curvularia leaf spot (*Curvularia lunata*) and gray leaf spot (*Cercosporaeae-maydis*) of maize when they occurred together in the field[J]. *Acta Phytopathologica Sinica*, 2013, 43(3): 301–309.
- [38] 崔建潮, 周如军, 傅俊范, 等. 花生褐斑病和网斑病田间混发流行过程及其产量损失研究[J]. 植物病理学报, 2016, 46(2): 265–272.
- Cui J C, Zhou R J, Fu J F, *et al.* Epidemic processes and yield losses of early leaf spot and web blotch of peanut occurring together in the field[J]. *Acta Phytopathologica Sinica*, 2016, 46(2): 265–272.
- [39] 冯连军, 朱列书, 朱静娴, 等. 烤烟主要病害与烟叶产量产值损失量间的相关和回归分析[J]. 江西农业大学学报, 2011, 33(4): 650–654.
- Feng L J, Zhu L S, Zhu J X, *et al.* Correlation and stepwise regression analysis on the loss of leaf yields and output value under three main diseases[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2011, 33(4): 650–654.
- [40] Samuel S, Chemed F, Sakhujia P K, *et al.* Yield loss of faba bean (*Vicia faba*) due to chocolate spot (*Botrytis fabae*) in sole and mixed cropping systems in Ethiopia[J]. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, 2010, 43(12): 1144–1159.
- [41] 杨小冰, 曾士迈. 小麦条锈病对小麦产量影响的研究[J]. 中国科学, 1989, (3): 278–284.
- Yang X B, Zeng S M. Study on the effect of wheat stripe rust on wheat yield[J]. *China Science*, 1989, (3): 278–284.
- [42] 马奇祥, 张忠山, 何家泌, 等. 小麦条锈病, 叶锈病和白粉病混合为害对小麦产量的影响[J]. 河南农业大学学报, 1990, 24(3): 340–345.
- Ma Q X, Zhang Z S, He J M, *et al.* Effect of mixed damage of wheat yellow rust, leaf rust and powdery mildew on yield loss[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Henanensis*, 1990, 24(3): 340–345.
- [43] Walkey D G A, Payne C J. The reaction of two lettuce cultivars to mixed infection by beet western yellows virus, lettuce mosaic virus and cucumber mosaic virus[J]. *Plant Pathology*, 1990, 39: 156–160.
- [44] Christophe L M, Gael P, Didier A, *et al.* Plant disease complex: antagonism and synergism between pathogens of the ascochyta blight complex on pea[J]. *Phytopathology*, 2009, 157: 715–721.
- [45] Williams D J, Nyvall R F. Leaf infection and losses caused by brown spot and bacterial blight disease of soybean[J]. *Phytopathology*, 1980, 70: 900–902.
- [46] Xiao J X, Yin X H, Ren J B, *et al.* Complementation drives higher growth rate and yield of wheat and saves nitrogen fertilizer in wheat and faba bean intercropping[J]. *Field Crops Research*, 2018, 221: 119–129.
- [47] 朱有勇. 生物多样性持续控制作物病害理论与技术[M]. 云南: 云南科技出版社, 2004.
- Zhu Y Y. Biodiversity for sustainable crop disease management theory and technology[M]. Yunnan: Yunnan Science and Technology Press, 2004.