

文章编号:1000-8551(2019)11-2294-09

施氮和间作对蚕豆锈病发生及田间微气候的影响

郭增鹏¹ 董坤² 朱锦惠^{1,3} 董艳^{1,*}

(¹云南农业大学资源与环境学院,云南 昆明 650201; ²云南农业大学动物科学技术学院,云南 昆明 650201; ³滇西应用技术大学普洱茶学院,云南 普洱 665000)

摘要:为研究不同施氮水平和间作对蚕豆锈病发生及田间微气候的影响,探讨间作系统氮肥调控下田间微气候变化与蚕豆锈病发生的关系,以小麦蚕豆间作体系为研究对象,通过田间小区试验,设 $N_0(0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2})$ 、 $N_1(45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2})$ 、 $N_2(90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2})$ 、 $N_3(135 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2})$ 4 个氮水平,调查蚕豆锈病发病率和病情指数,测定蚕豆不同冠层的温度、相对湿度和风速。结果表明,无论单作还是间作,施氮对蚕豆产量均无显著影响,但施氮增加了蚕豆锈病的发病率和病情指数,其中发病盛期,施氮($N_1 \sim N_3$)蚕豆锈病发病率较不施氮(N_0)处理增加 1.7~7 个百分点,病情指数增加 10.2%~143.8%,且病情指数受施氮水平的影响较发病率明显;与 N_0 相比,施氮使蚕豆冠层温度降低 0.1~1.8℃和风速降低 7.2%~80.0%,冠层相对湿度增加 0.2%~19.0%。与单作相比,间作蚕豆产量平均增加 34.4%。发病盛期,间作蚕豆锈病发病率降低 7.5~10.6 个百分点、病情指数降低 26.9%~51.0%;整个发病期,间作蚕豆的冠层温度和风速均高于单作蚕豆,相对湿度低于单作蚕豆。相关分析表明,发病盛期和发病末期,蚕豆锈病发病率和病情指数与相对湿度呈极显著正相关,与冠层温度、风速呈极显著负相关。总体来看,施氮水平和间作模式对蚕豆产量、冠层温度、相对湿度和风速均有影响,且间作的影响大于施氮水平。综上,小麦与蚕豆间作及控制氮肥用量是改善农田小气候且有效控制蚕豆锈病发生的有效措施。本研究结果为间作系统合理施用氮肥和发挥间作控病增产优势提供了指导和理论依据。

关键词:氮水平;间作;蚕豆锈病;田间微气候

DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2019.11.2294

蚕豆(*Vicia faba* L.)因富含蛋白质和碳水化合物以及具有药用价值和保健作用,作为粮食、蔬菜、饲料等在世界范围内广泛种植。中国是世界上蚕豆种植面积和产量最大的国家,其中云南省的种植面积和产量均居我国首位^[1]。蚕豆锈病是由蚕豆单孢锈菌(*Uromyces fabae*)引起的一种蚕豆主要病害,该病具有传播范围广、繁殖速度快的特点,尤其对秋播蚕豆产生较大的危害,严重影响蚕豆产量。云南省也是该病高发区之一,流行爆发年份蚕豆可减产 70%~80%,个别田块甚至绝收^[1]。

氮素是农作物生长发育必需的营养元素,施氮是提高作物产量的有效措施。在实际生产中,为了最大程度地获得高产,在农田投入了大量的氮^[2]。然而,

大量施用氮肥使专性寄生物(如锈病、病毒病等)的感染性增强,从而加剧了病害的发生^[3]。这是由于氮素通过满足植物营养来调节作物的冠层结构,进而影响作物冠层光照、湿度、温度、风速等农田小气候的变化,以及植物病害的侵染及流行^[4]。雷恩等^[5]研究表明,随着施氮量的增加,水稻群体田间小气候发生显著变化,导致水稻稻瘟病、纹枯病的发病程度增加。

合理间作能有效改善作物群体结构,使作物充分利用水分、养分和光热,抑制病虫害的发生。间作控病已在多种体系得到证实,如马铃薯玉米间作能够控制马铃薯晚疫病和玉米大、小斑病^[6];前期试验也发现蚕豆小麦间作能有效降低蚕豆枯萎病和小麦白粉病的发生^[7-8]。近年来,关于氮、锰、硅等养分高效吸收利

收稿日期:2018-08-08 接受日期:2018-11-20

基金项目:国家自然科学基金项目(31560586,31360507)

作者简介:郭增鹏,男,主要从事间作与病害控制研究。E-mail:guozp1993@163.com

* 通讯作者:董艳,女,主要从事间作控病与养分高效利用研究。E-mail:dongyanyx@163.com

用^[9-11]、病原菌的阻隔和稀释作用^[12]、作物抗病物质变化^[13-14]等方面对间作控病机制的研究已有大量报道。间作能影响田间小气候从而降低多种病害的发生^[15-16],但前人研究主要集中在间作不同行比对田间微气候的影响及其与病害发生的关系等方面,而有关间作体系中不同氮肥施用量对田间微气候的影响及其与气传病害发生的关系鲜见报道。本试验以云南滇中地区小麦蚕豆间作体系为研究对象,探究间作体系不同氮肥施用量对蚕豆锈病发生、不同冠层温度、相对湿度和风速的影响,旨在明确间作系统蚕豆冠层微气候变化与锈病发生的关系及其对氮肥施用的响应,揭示氮肥施用影响间作控病效果及机理,为间作系统合理施用氮肥和发挥间作控病增产优势提供指导和理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况与试验材料

试验在云南省玉溪市峨山县峨峰村(24°11'N, 102°24'E)进行,于2016年10月播种,2017年4月收获。土壤类型为水稻土,前茬为韭菜,质地为砂壤土,耕层土壤基本理化性质为有机质 28.9 g·kg⁻¹、全氮 2.2 g·kg⁻¹、全磷 0.8 g·kg⁻¹、全钾 18.3 g·kg⁻¹、碱解氮 102.0 mg·kg⁻¹、有效磷 36.9 mg·kg⁻¹、速效钾 100.5 mg·kg⁻¹、土壤 pH 值 7.1。

供试品种:蚕豆品种为玉溪大粒豆(*Vicia faba* L cv. Yuxidalidou),小麦品种为云麦 52(*Triticum aestivum* Lev. Yunmai-52),均购自云南省农业科学院粮食作物研究所。

1.2 试验设计

试验为 2 因素设计(即 A、B),其中 A 因素为 2 种植模式,分别为蚕豆单作(MF)、蚕豆小麦间作(IF);B 因素为 4 个施氮水平,分别为不施氮(N₀)、低氮(N₁)、常规施氮(N₂)和高氮处理(N₃),相应的蚕豆施氮量分别为 0、45、90、135 kg·hm⁻²,小麦施氮量为蚕豆施氮量的 2 倍。组合为 8 个处理,每处理 3 次重复,共计 24 个小区,完全随机区组排列,小区面积为 32.4 m²(5.4 m×6 m)。蚕豆点播,行间距 0.3 m,株距 0.15 m,小麦条播,行间距 0.2 m,间作小区按 2 行蚕豆、6 行小麦种植,间作小区内 3 个小麦种植带和 4 个蚕豆种植带。蚕豆在单作小区的种植方式、株距、行距和施肥量与间作完全相同。

试验用肥料为尿素(N, 46%)、普通过磷酸钙(P₂O₅, 16%)和硫酸钾(K₂O, 50%),磷肥施用量为 90

kg·hm⁻²,钾肥施用量为 90 kg·hm⁻²,磷、钾肥均作为基肥一次性施入。小麦氮肥分底肥和追肥(各 1/2)2 次施用,全生育期内不施有机肥。田间日常管理按照当地常规管理进行,整个生育期不喷施农药,蚕豆锈病为田间自然发生。

1.3 蚕豆锈病调查

分别在蚕豆锈病(*Uromyces fabae*)发病初期(蚕豆分枝期)、发病盛期(蚕豆鼓荚期)、发病末期(蚕豆成熟期)对每个小区病害危害情况进行调查。单作小区沿对角线方向随机选取 5 点,每点 2 株,共调查 10 株;间作小区在第一个种植带内选 3 点,第二个带内选 2 点,每点调查 2 株,共 10 株,每株蚕豆调查所有完全展开叶的发病情况,分别记录叶片上锈病病斑面积占整个叶片面积的百分数,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%~10%;5 级为病斑面积占叶面积 11%~20%;7 级为病斑面积占叶面积 21%~50%;9 级为病斑面积占叶面积≥55%。调查完成后按照公式分别计算发病率和病情指数:

$$\text{发病率} = \frac{\text{发病叶数}}{\text{调查总叶数}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{病情指数} = \frac{\sum(\text{各级病叶数} \times \text{相应级值})}{(\text{最高级值} \times \text{调查总叶数})} \times 100 \quad (2)$$

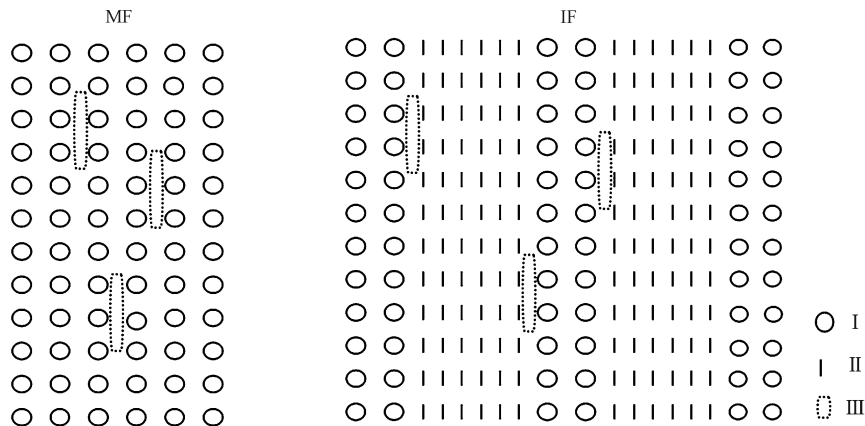
1.4 田间小气候测定

1.4.1 冠层温度、湿度测定 采用 TPJ-20 型温湿度记录仪(浙江托普云农科技公司)进行温度、相对湿度的测定,选择晴天无云时进行信息采集,相对湿度、温度采集时间分别为 9:00~10:00、13:00~14:00 时段内。田间小气候测定位置:单作蚕豆选取除边行外长势均匀行的随机三点测定;间作蚕豆选取小麦、蚕豆相邻行的随机三点测定(图 1)。测定部位选择在单作蚕豆、蚕豆与小麦植株群体内距地面 0.2 m(下层)、2/3 株高(中层)和冠顶(上层)。测定时期为蚕豆锈病发病初期(蚕豆分枝期)、发病盛期(蚕豆鼓荚期)、发病末期(蚕豆成熟期)。

1.4.2 冠层风速测定 采用 TPJ-30-G 型风向风速记录仪(浙江托普云农科技公司)进行风速测定,选择晴天无云时进行信息采集,采集时间为 13:00~14:00 时间段内,测定位置、测定部位和测定时期同温度、相对湿度测定。

1.5 数据处理

采用 Microsoft Office Excel 2010 整理数据;SPSS 21.0 软件进行双因素方差分析和相关分析,最小显著差异法(LSD)检验各处理间的差异显著性($\alpha=0.05$)。



注:MF:单作蚕豆;IF:间作蚕豆。I :蚕豆; II :小麦; III :测定位置。

Note:MF:Monocropped faba bean. IF:Intercropped faba bean. I :Faba bean. II :Wheat. III :Measure place.

图 1 单作蚕豆和间作蚕豆田间小气候测定位置示意图

Fig.1 Schematic diagram of measure place of field microclimate of monocropped and intercropped faba bean

2 结果与分析

2.1 施氮和间作对蚕豆产量的影响

由表1可知,蚕豆单、间作条件下,施氮有降低蚕

豆产量的趋势,但与 N_0 相比,施氮 (N_1 、 N_2 、 N_3) 对蚕豆产量均无显著影响。与单作比较, N_0 、 N_1 、 N_2 、 N_3 水平下间作蚕豆产量分别显著提高 22.9%、42.4%、37.5%、39.3%,随着施氮水平提高,间作增产效应降低。

表 1 施氮和间作对蚕豆产量的影响

Table 1 Effect of nitrogen application and intercropping on faba bean yield / ($\times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

处理 Treatments	施氮水平 Nitrogen application level				平均值 Mean
	N_0	N_1	N_2	N_3	
单作 MF	3.5±0.4a	3.3±0.6a	3.2±0.4a	2.8±0.4a	3.2
间作 IF	4.3±0.3a*	4.7±0.5a*	4.4±0.5a*	3.9±0.4a*	4.3*
平均值 Mean	3.9a	4.0a	3.8a	3.4a	

注:同行不同小写字母表示同种植模式下不同施氮水平间差异显著 ($P < 0.05$); * 表示在相同施氮水平下单作和间作处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same row indicate significant difference between nitrogen applicant rates under the same planting patterns at 0.05 level. * means significant difference between monocropping and intercropping systems at the same nitrogen application rates at 0.05 level.

2.2 施氮和间作对蚕豆锈病发生的影响

由表 2 可知,随着施氮水平的增加,单、间作蚕豆锈病发病率和病情指数呈逐渐升高的趋势。发病初期,施氮对单、间作蚕豆锈病发病率和病情指数均无显著影响;发病盛期,与 N_0 相比, N_1 、 N_2 、 N_3 水平下单、间作蚕豆锈病的发病率分别增加 1.7、4.7、7 和 4.8、6.2、7 个百分点,平均增加 4.5 和 6 个百分点;病情指数分别增加 10.2%、44.9%、63.3%和 33.3%、64.6%、143.8%,平均增加 39.5%和 80.6%;发病末期, N_1 、 N_2 、 N_3 水平下单、间作蚕豆锈病的发病率分别较 N_0 增加 2.5、2.6 和 5.3、8.7、7.6 个百分点,平均增加 4.4 和 7.2 个百分点;病情指数分别增加 4.3%、44.3%、

64.3%和 35.9%、61.5%、156.4%,平均增加 37.6%和 84.6%。表明施氮加剧了蚕豆锈病的发生,尤其在高水平下蚕豆锈病发病率和病情指数的增幅最大,且病情指数对氮肥 4 种施氮的响应大于发病率。与单作相比,发病初期,4 种施氮水平下间作蚕豆锈病发病率显著降低 4.7、2.6、2.5 和 2.3 个百分点、病情指数降低 30.8%~58.3%;发病盛期,间作蚕豆锈病发病率显著降低 10.6、7.5、9.1 和 10.6 个百分点,病情指数降低 26.9%~51.0%;发病末期,间作蚕豆锈病发病率降低 12.1、8.8、8.6 和 10.5 个百分点,病情指数降低 13.0%~44.3%。表明间作能够有效减轻蚕豆锈病的

发生和危害。

表 2 施氮和间作对蚕豆锈病发生的影响

Table 2 Effects of nitrogen application and intercropping on occurrence of faba bean rust

发病时期 Infection stage	施氮水平 Nitrogen application level	发病率 Disease incidence/%		病情指数 Disease severity index	
		单作 MF	间作 IF	单作 MF	间作 IF
		发病初期 Initial infection stage	N ₀	7.7±0.8a	3.0±2.6a*
	N ₁	7.2±1.0a	4.6±0.3a*	1.3±0.5a	0.8±0.1a
	N ₂	6.7±0.9a	4.2±0.3a*	1.2±0.7a	0.7±0.2a
	N ₃	6.9±0.6a	4.6±0.7a*	1.3±0.3a	0.9±0.2a
发病盛期 Peak infection stage	N ₀	27.3±4.5b	16.7±4.4a*	9.8±3.6b	4.8±1.9b
	N ₁	29.0±0.6ab	21.5±2.9a*	10.8±2.6ab	6.4±1.4b
	N ₂	32.0±4.7ab	22.9±3.2a*	14.2±3.7ab	7.9±1.7b
	N ₃	34.3±1.7a	23.7±5.0a*	16.0±1.8a	11.7±2.0a*
发病末期 Late infection stage	N ₀	23.4±4.6a	11.3±3.2a*	7.0±2.0b	3.9±1.9b
	N ₁	25.4±4.6a	16.6±4.8ab	7.3±1.9b	5.3±1.2ab
	N ₂	28.6±6.3a	20.0±3.4a	10.1±2.7ab	6.3±2.2ab
	N ₃	29.4±4.3a	18.9±0.2a	11.5±0.5a	10.0±4.0a

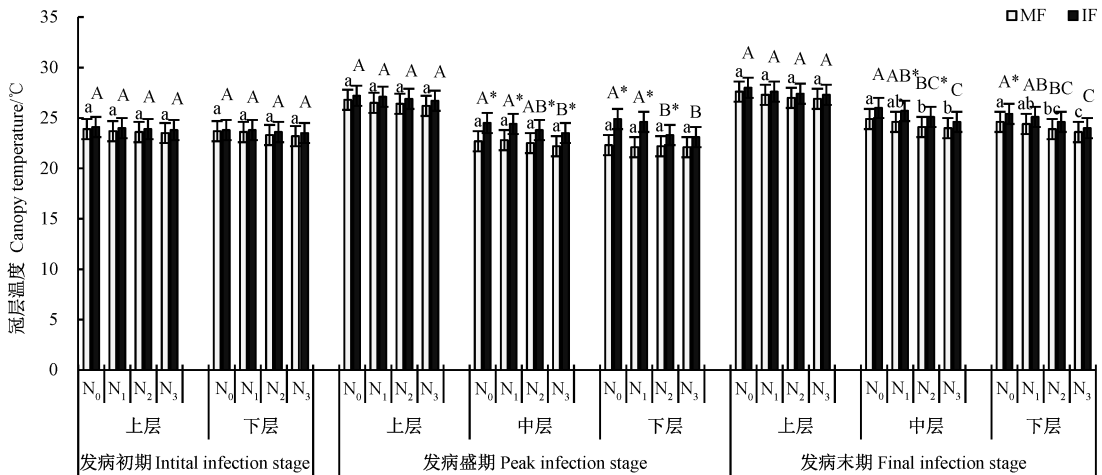
注: 同列不同字母表示相同发病时期同种植模式下不同施氮水平间差异显著 ($P < 0.05$); * 表示在相同施氮水平下单作和间作处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different letters in the same column indicate significant difference between different N levels under the same planting pattern in the same disease period at 0.05 level. * means significant difference between monocropping and intercropping systems at the same nitrogen application rates at 0.05 level.

2.3 施氮和间作对田间小气候的影响

2.3.1 施氮和间作对冠层温度的影响 冠层温度作物群体的一个综合性指标,是作物群体内、外因素共同作用的结果。由图 2 可知,蚕豆整个发病期,单、间作蚕豆上、中、下层冠层温度均随着施氮量的增加呈降低

趋势,依次表现为 $N_3 < N_2 < N_1 < N_0$ 。发病初期,与 N_0 相比, N_1 、 N_2 、 N_3 水平下单、间作蚕豆上、下层冠层温度分别降低 0.2~0.4、0.1~0.3℃ 和 0.1~0.5、0.0~0.3℃。发病盛期,与 N_0 相比, N_1 、 N_2 、 N_3 水平下对单作蚕豆上、中、下层冠层温度均无显著影响; N_2 水平间作下层



注: 不同大、小写字母分别表示间作和单作模式下不同施氮水平间差异显著 ($P < 0.05$);

* 表示在相同施氮水平下单作和间作处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Note: Different capital and lowercase letters indicate significant difference between different N levels at 0.05 level in intercropping and monocropping, respectively. * means significant difference between monocropping and intercropping systems at the same nitrogen application rates at 0.05 level. The same as following.

图 2 施氮和间作对蚕豆冠层温度的影响

Fig.2 Effects of nitrogen application and intercropping on canopy temperature

冠层温度显著降低 1.0℃, N_3 水平下间作中、下层冠层温度显著降低 1.6、1.8℃, N_1 与 N_0 水平间冠层温度无显著差异。发病末期, 与 N_0 相比, N_1 对单作蚕豆上、中、下层冠层温度均无显著影响; N_2 、 N_3 水平下间作中、下层冠层温度显著降低 0.9、1.4℃和 0.8℃、1.4℃。

相同施氮水平下, 间作蚕豆冠层不同高度的温度均高于单作。发病初期, $N_0 \sim N_3$ 水平下, 间作对蚕豆上、下层冠层温度均无显著影响; 发病盛期, $N_0 \sim N_3$ 水平下, 间作对蚕豆上层冠层温度均无显著影响, 但中层冠层温度较单作显著提高 1.8、1.6、1.3 和 1.3℃, N_0 、 N_1 、 N_2 水平下间作较单作下层冠层温度显著提高 2.6、2.5 和 1.1℃; 发病末期, $N_0 \sim N_3$ 水平下, 间作对蚕豆上层温度均无显著影响, N_1 、 N_2 水平下间作中层冠层温度较单作显著提高 1.1 和 1.0℃, N_0 水平下间作下层冠层温度较单作显著提高 0.8℃。

2.3.2 施氮和间作对冠层相对湿度的影响 由图 3 可知, 蚕豆整个发病时期, 单、间作蚕豆不同冠层的相对湿度均随着施氮量的增加呈升高趋势, 依次表现为 $N_3 > N_2 > N_1 > N_0$; 在垂直方向上, 单、间作蚕豆冠层相对

湿度随着冠层高度的升高依次表现为下层 > 中层 > 上层。与 N_0 相比, 发病初期, N_3 水平下间作蚕豆上、下层相对湿度分别增加了 1.8% 和 2.2%; 发病盛期, $N_1 \sim N_3$ 水平下单、间作蚕豆上、中、下层相对湿度分别较 N_0 增加 0.5% ~ 6.0%、0.2% ~ 1.8%、0.6% ~ 3.2% 和 1.9% ~ 6.2%、0.7% ~ 1.9%、0.7% ~ 3.1%; 发病末期, $N_1 \sim N_3$ 处理单、间作蚕豆上、中、下层的相对湿度较 N_0 分别增加 3.0% ~ 9.1%、3.3 ~ 6.8%、2.4% ~ 9.7% 和 6.9% ~ 19.0%、4.2% ~ 14.1%、2.9% ~ 10.0%。

与单作相比, 整个发病时期, 相同施氮水平下, 间作蚕豆冠层不同高度的相对湿度均低于单作, 尤其在发病盛期和发病末期, $N_0 \sim N_3$ 水平下, 与单作相比, 间作发病盛期蚕豆上、中、下层相对湿度分别显著降低 9.0%、7.9%、8.9%、8.8%、8.3%、7.8%、8.4%、8.2% 和 5.5%、5.4%、5.8%、5.6%, 发病末期蚕豆上、中、下层相对湿度显著降低 16.7%、13.5%、15.2%、9.1%、15.1%、14.3%、11.9%、9.3% 和 12.6%、12.1%、11.8%、12.4%。在发病盛期, 间作整个冠层(上、中、下层)相对湿度大于 90% 的占比, 较单作低 66.6%。

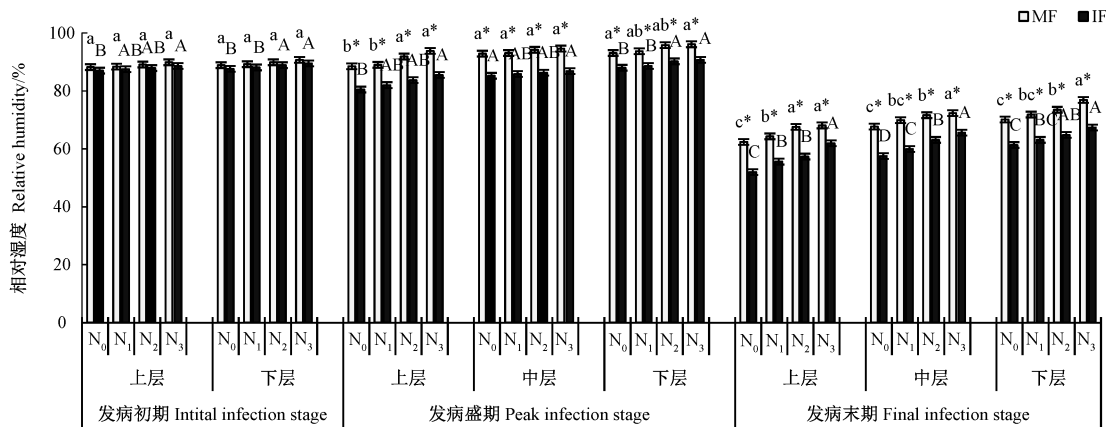


图 3 施氮和间作对蚕豆冠层相对湿度的影响

Fig.3 Effects of nitrogen application and intercropping on canopy relative humidity

2.3.3 施氮和间作对冠层风速的影响 由图 4 可知, 总体上单、间作蚕豆冠层风速均随施氮量的增加呈降低的趋势; 在垂直方向上, 单、间作蚕豆冠层风速大小表现为上层 > 中层 > 下层。发病初期, 与 N_0 相比, N_1 、 N_2 、 N_3 水平下单作蚕豆上、下层冠层风速分别显著降低 8.3%、8.1%、16.8% 和 6.7%、20.0%、28.6%, N_2 、 N_3 水平下间作蚕豆上、下层冠层风速分别显著降低 12.3%、13.2% 和 12.6%、19.6%; 发病盛期, 与 N_0 相比, N_2 、 N_3 水平下间作蚕豆上、中、下层冠层风速分别显著降低 11.2%、12.2%、15.1%、30.1% 和 28.0%、40.0%; 发病末期, N_1 、 N_2 、 N_3 水平下单作蚕豆上、中、

下层冠层风速分别显著降低 11.0%、16.5%、16.5%、12.4%、27.3%、38.0% 和 19.4%、26.7%、36.9%, 间作蚕豆上、中、下层冠层风速分别显著降低 4.8%、9.6%、11.3%、12.0%、21.1%、23.0% 和 11.6%、14.9%、34.8%。表明施氮对蚕豆中、下冠层风速的影响大于上层, 即施氮显著降低了蚕豆中、下层的的风速, 尤其在高氮条件下冠层风速降幅更大。

与单作相比, 整个发病期, $N_0 \sim N_3$ 水平下, 间作均提高了蚕豆冠层不同高度的风速。发病初期, $N_0 \sim N_3$ 水平下, 间作蚕豆上、下层冠层风速分别提高 8.1% ~ 18.4% 和 18.2% ~ 33.0%; 发病盛期, $N_0 \sim N_3$ 水平下,

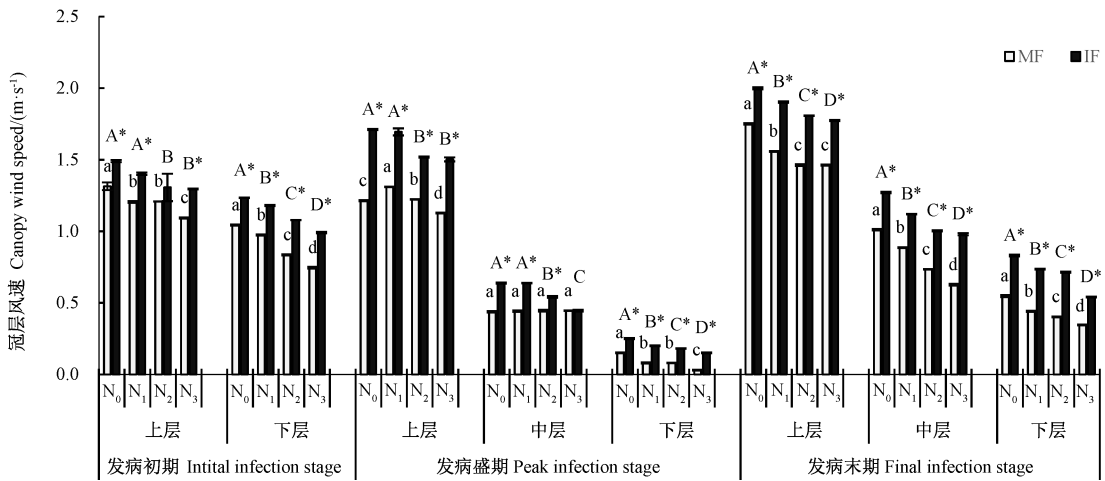


图4 施氮和间作对蚕豆冠层风速的影响

Fig.4 Effects of nitrogen application and intercropping on canopy wind speed

间作蚕豆上、下层冠层风速分别显著提高 40.9%、29.3%、24.2%、33.4% 和 66.7%、150.0%、125.0%、400.0%， N_0 、 N_1 、 N_2 水平下，间作蚕豆中层冠层风速分别显著提高 45.8%、44.4%、21.6%；发病末期， $N_0 \sim N_3$ 水平下，间作蚕豆上、中、下层冠层风速分别显著提高 14.2%、22.1%、23.6%、21.3%，25.8%、26.4%、36.6%、56.4% 和 51.7%、66.4%、78.1%、56.8%。表明间作对中、下冠层的通风改善作用明显高于上层，同时中、高氮水平下间作对通风的改善作用高于不施氮和低氮水平。

2.4 田间小气候与蚕豆锈病发生的相关分析

为明确田间小气候变化与蚕豆锈病发生的关系，

将蚕豆冠层温度、相对湿度和风速与锈病发病率和病情指数进行相关性分析。由表 3 可知，发病初期，蚕豆锈病发病率和病情指数与冠层风速呈极显著负相关，病情指数与冠层相对湿度呈极显著正相关；发病盛期和发病末期，发病率和病情指数与冠层相对湿度呈极显著正相关，与冠层温度、风速呈极显著负相关。说明蚕豆锈病的发生及其严重程度与蚕豆田间冠层温度、相对湿度和风速密切相关，且冠层温度、相对湿度和风速与发病率的相关系数大于病情指数，即田间冠层相对湿度越高，蚕豆锈病的发病越普遍，而冠层温度越高，冠层风速越大，则蚕豆锈病的发病率和危害程度越低。

表3 田间小气候与锈病发病率和病情指数的相关分析

Table 3 Correlation coefficients between microclimate with incidence and severity index of faba bean rust

项目 Items	发病初期 Initial infection stage			发病盛期 Peak infection stag			发病末期 Late infection stage		
	冠层温度	冠层相对湿度	冠层风速	冠层温度	冠层相对湿度	冠层风速	冠层温度	冠层相对湿度	冠层风速
发病率 DI	-0.140	0.367	-0.599**	-0.809**	0.833**	-0.854**	-0.698**	0.867**	-0.833**
病情指数 DS	-0.233	0.460**	-0.531**	-0.626**	0.781**	-0.817**	-0.776**	0.651**	-0.706**

注：* 表示在 0.05 水平相关性显著；** 表示在 0.01 水平相关性极显著。

Note: * means difference at 0.05 level. ** means extremely significant difference at 0.01 level.

3 讨论

3.1 施氮和间作对蚕豆产量和锈病发生的影响

氮是农业生产中影响作物生长发育和限制作物产量的重要因素。研究发现，一定范围内，随着施氮量的增加，作物的产量随之增加^[8,17-18]。本试验中，无论单

作还是间作蚕豆产量对氮肥的响应均不敏感，随着施氮量增加，蚕豆产量并未显著增加。这与鲁耀等^[10]的研究结果相似，可能是由于蚕豆作为豆科作物，自身具有生物固氮功能，能够调控对氮的需求量，因而对氮肥不是特别敏感。

间作是中国传统农业中的精髓，我国现存的 100 多种间作体系中，豆科作物参与的组合达到 70%。禾

本科与豆科作物间作体系不仅具有一般间作体系增加作物产量、资源高效利用和控制病虫害的特点,更重要的是还能充分发挥豆科作物的生物固氮潜力而减少氮肥施入,被认为是农业可持续发展的重要模式之一^[19]。大量研究表明,多种间作体系具有显著增产增效的优势,如玉米//大豆^[20]、玉米//花生^[21]等。本研究中,小麦//蚕豆也具有明显的产量优势,与小麦间作的蚕豆产量较单作平均增加 34.4%。研究发现氮投入增加影响间作体系的产量优势。吴开贤等^[2]研究表明,氮投入增加条件下,玉米和马铃薯的间作产量优势并未增加,反而降低。本研究中,不同施氮水平(N_0 、 N_1 、 N_2 、 N_3)下,间作蚕豆产量较单作蚕豆分别显著增加 22.9%、42.4%、37.5%和 39.3%,表现为施氮(N_1 、 N_2 、 N_3)条件下间作蚕豆产量更高,原因可能是小麦蚕豆间作是一个既相互竞争又相互促进的体系,在氮缺乏时,小麦和蚕豆表现为强竞争,一定量的氮供应缓解了这种竞争,从而表现为施氮条件下小麦与蚕豆间作增产优势更明显。

关于氮在病害发生中作用的相关研究已有大量报道。对专性寄生菌而言,随着施氮量增加,多种病害如蚕豆赤斑病^[10]、小麦白粉病^[8,22]、小麦条锈病^[23]等的危害程度也随之增加。这与本研究结果类似。本研究中,随着施氮量的增加,蚕豆锈病的发病率与病情指数均显著增加,特别是发病盛期,高氮(N_3)处理较不施氮(N_0)的发病率平均增加 7 个百分点,病情指数平均增加 103.6%。Chen 等^[9]研究表明,小麦单作条件下,施氮显著增加了白粉病的发病率和病情指数,小麦//蚕豆条件下,小麦白粉病发生受氮营养和田间气候条件的联合影响,氮营养不足时植株生长稀疏,这时氮营养对小麦白粉病发生起主要作用;当氮营养较充足、适宜或过量时,小麦植株生长较繁茂,田间微气候差异对小麦白粉病发生起主要影响作用,表明间作系统氮肥施用水平对作物冠层结构、田间小气候的影响是改变病害流行危害的重要原因之一。本研究中, $N_0 \sim N_3$ 水平下,整个发病阶段,间作蚕豆锈病的发病率和病情指数均低于单作蚕豆,尤其在发病盛期,间作蚕豆发病率显著降低 10.6、7.5、9.1 和 10.6 个百分点,病情指数降低 26.9%~51.0%。由此可见,小麦和蚕豆间作能够有效控制锈病危害,增加作物产量。

3.2 施氮和间作对田间小气候的影响及其与蚕豆锈病发生的关系

氮肥的施用量直接导致作物群体内光照、温度、空气流动性的差异,从而影响病原菌生长和孢子萌发,进而影响作物病害的发生^[24-26]。本研究中,随着施氮量

的增加,单、间作蚕豆冠层温度、风速均降低,表现为 $N_0 > N_1 > N_2 > N_3$,而冠层相对湿度升高,表现 $N_3 > N_2 > N_1 > N_0$,其中,发病盛期、发病末期, N_3 单、间作蚕豆冠层平均温度较 N_0 分别降低 0.4、1.1℃和 0.9、1.2℃,冠层平均风速分别降低 28.5%、27.4%和 30.5%、23.0%,冠层平均相对湿度分别增加 4.7%、8.0%和 8.5%、14.4%,且越往下层,冠层温度越低,冠层风速越小,相对湿度越大,表明增施氮肥能显著影响蚕豆群体内部微环境。蚕豆冠层温度、相对湿度和冠层风速与锈病的相关性分析显示,发病率和病情指数与冠层相对湿度呈极显著正相关,与冠层温度、风速呈极显著负相关,说明蚕豆诱病的发生及其严重程度与蚕豆冠层温、相对湿度和风速密切相关,原因可能是氮肥施用过多使蚕豆分枝数、叶片数增多,蚕豆植株冠层对地表的覆盖率增大,从而使蚕豆冠层的光照减少,枝、叶蒸腾作用增强^[27],对气流的阻尼作用提高^[28],进而使蚕豆冠层温度、风速降低,相对湿度升高。杨国涛等^[28]对水稻的研究也发现相似的结论,即低氮条件下,由于水稻植株的分蘖数目均较少,相对植株间隙较大,使水稻群体具有良好的通透性(包括透光性和透气性),随着施氮水平的升高,水稻的分蘖数增多,叶片生长更茂盛,因此中、高氮条件下的群体通透性显著降低,从而使冠层温度降低,湿度增加,这一系列群体小气候的恶化导致纹枯病发病程度增加。

间作系统中,由于作物各自的生育期、株高、株型等方面都存在一定的差异,形成的复合群体往往是立体植株群落,与单作相比,这种群落结构有利于作物冠层空气流通,降低复合群体内的空气湿度,同时减少叶片持露量,从而削弱了发病条件,控制了作物病害的发生与流行^[29]。如万寿菊和番茄间作通过改变冠层微气候条件,尤其是显著降低一天中 $\geq 92\%$ 的相对湿度持续时间,从而显著抑制了番茄早疫病分生孢子的萌发和繁殖^[15]。本研究中, $N_0 \sim N_3$ 水平下间作冠层不同高度的温度、风速均高于单作,相对湿度均低于单作,其中,发病盛期上、中、下层冠层温度分别升高 0.4~0.6、1.3~1.8、1.0~2.6℃,上、中、下层冠层风速分别提高 24.2%~40.9%、0.0%~45.8%、66.7%~400.0%,上、中、下层冠层相对湿度分别显著降低 7.9%~9.0%、7.8%~8.4%、5.4%~5.9%,且在发病盛期冠层相对湿度大于 90%的占比间作较单作降低 66.6%。对不同品种水稻(感病糯稻与抗病杂交稻)间栽系统的研究也发现,间栽增加了植株间的通风透光效果,使植株冠层中、下部的空气流动增强,降低冠层中下部的空气相对湿度^[28],从而对减少病菌的萌发、

侵入及减缓病害的蔓延速度有极大的作用,最终使间作糯稻的稻瘟病得到有效控制^[13]。本研究中,蚕豆、小麦是两种株型、株高、叶型都不同的作物,它们在田间形成了疏密相间、高低搭配的冠层结构,改善了单一种植作物均匀的冠层结构,形成了通风透气的“走廊”,增加蚕豆冠层的温度和风速,降低冠层相对湿度,特别是在发病盛期和发病末期,小麦与蚕豆间作增加了植株间的空气流动性,解决了田间密闭,通风不良的问题,有利于降低病菌的滋生和传播。

4 结论

本研究结果表明,无论单作还是间作,随着施氮量的增加,蚕豆锈病发病率和病情指数基本呈增加趋势,在高氮(N₃)水平下锈病发病率和病情指数最大,施氮降低了蚕豆冠层温度、风速、增加了相对湿度。与单作相比,蚕豆小麦间作增加了蚕豆的产量和冠层温度、风速,降低了相对湿度,创造了有利于蚕豆生长而不利于锈病发生的微生态环境,有效减轻了蚕豆锈病的发生。因此,小麦与蚕豆间作并控制氮肥用量可有效控制蚕豆锈病的发生和蔓延。

参考文献:

[1] 李月秋,彭宏梅,梁仙,羊国安,包世英,王丽萍. 我国蚕豆品种资源对蚕豆锈病的抗性鉴定[J]. 植物遗传资源科学, 2002, 3(1): 45-48

[2] 吴开贤,安瞳昕,范志伟,贺佳,周峰,薛国峰,吴伯志. 玉米与马铃薯的间作优势和种间关系对氮投入的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(4): 1006-1012

[3] Dordas C. Role of nutrients in controlling plant diseases in sustainable agriculture: A review [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2008, 28(1): 33-46

[4] 刘玲玲,彭显龙,刘元英,王诺. 不同氮肥管理条件下钾对寒地水稻抗病性及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(8): 2258-2262

[5] 雷恩,黄晓惠,马太芳,刘艳红,郭建伟,鲁海菊. 氮素对哈尼梯田水稻冠层温、光生态因子及稻瘟病的影响[J]. 中国农学通报, 2015, 31(9): 44-50

[6] He X H, Zhu S S, Wang H N, Xie Y, Sun Y, Gao D, Yang J, Liu L, Li Q X, Zhang G H, Hu M C, Jiang K M. Crop diversity for ecological disease control in potato and maize [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2010, 1(1): 45-50

[7] 董艳,董坤,杨智仙,郑毅,汤利. 间作减轻蚕豆枯萎病的微生物和生理机制[J]. 应用生态学报, 2016, 27(6): 1984-1992

[8] 朱锦惠,董艳,肖靖秀,郑毅,汤利. 小麦与蚕豆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

[9] Chen Y X, Zhang F S, Tang L, Zheng Y, Li Y J, Peter Christie,

Li L. Wheat powdery mildew and foliar N concentrations as influenced by N fertilization and belowground interactions with intercropped faba bean [J]. *Plant and Soil*, 2007, 291(1/2): 1-13

[10] 鲁耀,郑毅,汤利,赵平,董艳,段宗颜,张福锁. 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

[11] 吴瑕,吴凤芝,周新刚. 分蘖洋葱伴生对番茄矿质养分吸收及灰霉病发生的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(3): 734-742

[12] Zhu Y Y, Chen H R, Fan J H, Wang Y Y, Li Y, Chen J B, Fan J X, Yang S S, Hu L P, Leung H, Mew T W, Teng P S, Wang Z H, Mundt C C. Genetic diversity and disease control in rice [J]. *Nature*, 2000, 406(6797): 718-722

[13] 杨静,施竹凤,高东,刘林,朱有勇,李成云. 生物多样性控制作物病害研究进展[J]. 遗传, 2012, 34(11): 1390-1398

[14] 卢国理,汤利,楚轶欧,周文利,苏海鹏,刘自红,郑毅. 单/间作条件下氮肥水平对水稻总酚和类黄酮的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(6): 1064-1069

[15] Gómez-Rodríguez O, Zavaleta-Mejía E, González-Hernández V A, Livera-Muñoz M, Cárdenas-Soriano E. Allelopathy and microclimatic modification of intercropping with marigold on tomato early blight disease development [J]. *Field Crops Research*, 2003, 83(1): 27-34

[16] Boudreau M A, Shew B B, Andrako L E. Impact of intercropping on epidemics of groundnut leaf spots: Defining constraints and opportunities through a 7-year field study [J]. *Plant Pathology*, 2016, 65(4): 601-611

[17] Shaheen A, Ali S, Stewart B A, Naeem M A, Jilani G. Mulching and synergistic use of organic and chemical fertilizers enhances the yield, nutrient uptake and water use efficiency of sorghum [J]. *African Journal of Agricultural Research*, 2010, 5(16): 2178-2183

[18] 蒋鹏,熊洪,张林,郭晓艺,朱永川,刘茂,陈琳,徐富贤. 直播条件下氮素调控对超级稻产量和氮肥利用率的影响[J]. 核农学报, 2018, 32(10): 2043-2053

[19] 朱锦惠,董坤,杨智仙,董艳. 间作控制作物病害的机理研究进展[J]. 生态学杂志, 2017, 36(4): 1117-1126

[20] 王晓维,杨文亭,缪建群,徐健程,万进荣,聂亚平,黄国勤. 玉米-大豆间作和施氮对玉米产量及农艺性状的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(18): 5275-5282

[21] 焦念元,宁堂原,杨萌珂,付国占,尹飞,徐国伟,李增嘉. 玉米花生间作对玉米光合特性及产量形成的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(14): 4324-4330

[22] 肖靖秀,周桂凤,汤利,郑毅,李永梅,李隆. 小麦/蚕豆间作条件下小麦的氮、钾营养对小麦白粉病的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(4): 517-522

[23] 陈远学,李隆,汤利,郑毅,李勇杰,张朝春,张福锁. 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

[24] 王波,余海兵,支银娟. 玉米不同种植模式对田间小气候和产量的影响[J]. 核农学报, 2012, 6(3): 623-627

[25] 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
- [26] 张盼盼, 周瑜, 宋慧, 乔治军, 王海岗, 郑殿峰, 冯佰利. 不同肥力水平下糜子生长状况及农田小气候特征比较[J]. 应用生态学报, 2015, 26(2): 473-480
- [27] 宋伟, 赵长星, 王月福, 王铭伦, 程曦, 康玉洁. 不同种植方式对花生田间小气候效应和产量的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(23): 7188-7195
- [28] 杨国涛, 范永义, 卓驰夫, 黎腊梅, 王萌冉, 彭友林, 胡运高. 氮肥处理对水稻群体小气候及其产量的影响[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2017, 39(2): 324-332
- [29] 朱有勇, 李成云. 遗传多样性与作物病害持续控制[M]. 北京: 科学出版社, 2007

Effects of Nitrogen Fertilizer and Intercropping on Faba Bean Rust Occurrence and Field Microclimate

GUO Zengpeng¹ DONG Kun² ZHU Jinhui^{1,3} DONG Yan^{1,*}

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

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

³ College of Tea (Pu'er), West Yunnan University of Applied Sciences, Pu'er, Yunnan 665000

Abstract: To study effect of different N application levels and intercropping on occurrence of faba bean rust and field microclimate, and to explore the relationship between field microclimate change and the occurrence of faba bean rust, the wheat-bean intercropping system was studied and tested by field plot. The temperature, relative humidity and wind speed for the canopy of the plants supplied with 4 N levels [$N_0(0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2})$, $N_1(90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2})$, $N_2(180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2})$, $N_3(270 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2})$] were measured to survey disease incidence and disease severity index of faba bean rust. The results showed that nitrogen application had no significant effect on the yield of faba bean, whether it was monocultured or intercropped, but the application of nitrogen increased the incidence and disease index of faba bean rust. Compared with N_0 treatment, the disease incidence and disease severity index of faba bean rust were averagely increased by 6.2%~41.9% and 10.2%~143.8% with N_1 , N_2 and N_3 treatments in peak stage of disease prevalence, and the disease severity index was more affected by N regulation than the disease incidence. Faba bean canopy temperature and wind speed were reduced by 0.1°C~1.8°C and 7.2%~80.0%, respectively, and the canopy relative humidity was increased by 0.2%~19.0% with N application. Compared with monocultured faba bean, yield of intercropping was averagely increased by 35.5%, while the disease incidence and disease severity index of intercropping were averagely decreased by 25.9%~38.8% and 26.9%~51.0%, respectively. During the whole disease period, the canopy temperature and wind speed of the intercropping were higher than that of monocropping, and the relative humidity was significantly lower than the monocultured faba bean. The correlation analysis showed that the disease incidence and disease severity index of faba bean rust were positively correlated with relative humidity, and significantly negatively correlated with canopy temperature and wind speed in stage of peak infection and late infection. Overall, intercropping patterns and N application levels had effects on faba bean yield, canopy temperature, relative humidity and wind speed, the effects of N application level were less than intercropping. In summary, the intercropping of wheat and faba beans and the control of nitrogen fertilizer were effective measures to improve the field microclimate and effectively control the occurrence of faba bean rust. The results of this study provide guidance and theoretical basis for rational application of N in intercropping system and the advantage of intercropping to control disease and increase yield.

Keywords: nitrogen level, intercropping, faba bean rust, field microclimatic