

小麦蚕豆间作体系氮素吸收累积动态及其种间氮素竞争关系

刘振洋¹, 吴鑫雨¹, 汤利¹, 郑毅^{1,2}, 李海叶¹, 潘浩男¹, 朱东宇¹,
王静静¹, 黄少欣¹, 覃潇敏¹, 肖靖秀^{1*}

(1 云南农业大学资源与环境学院, 云南昆明 650201; 2 云南开放大学, 云南昆明 650599)

摘要: 【目的】通过研究小麦//蚕豆间作地上部的氮含量和吸收量, 明确不同氮水平下小麦//蚕豆间作的氮吸收累积特征, 解析间作小麦和蚕豆种间氮素竞争关系。【方法】田间试验采用两因素随机区组试验设计, 设置3个种植模式(单作小麦, 单作蚕豆及小麦//蚕豆间作)及4个氮水平(N0, N1, N2, N3), 其中小麦的4个施氮量依次为0、90、180、270 kg/hm², 蚕豆的4个施氮量依次为0、45、90、135 kg/hm²。测定了单间作小麦和蚕豆的产量、地上部氮累积含量, 利用 Logistic 模型模拟小麦蚕豆的氮吸收关键参数及氮吸收动态, 分析了间作小麦和蚕豆的氮素竞争关系。【结果】小麦//蚕豆间作整体平均提高小麦产量 33.4% (除 N3 外)、降低蚕豆产量 20.7%, N0 和 N1 水平下, 间作具有显著产量优势。通过 Logistic 模型分析发现, 间作条件下小麦的氮吸收高峰比蚕豆晚 12~19 天。4 个氮水平下, 间作主要提高了小麦最大氮累积量 (A)、最大氮吸收速率 (R_{max}) 和初始氮吸收速率 (r), 却降低了蚕豆的 A 、达到最大氮吸收速率所需的时间 (T_{max}) 和 R_{max} 。在营养生长阶段, 小麦的氮素竞争力低于蚕豆, 施氮可提高小麦的氮素吸收量。从施氮水平和种植模式共同作用角度分析, N0、N1 和 N2 水平下, 间作分别提高小麦的 R_{max} 34.1%、44.6% 和 21.0%。因此, 当小麦达到氮吸收高峰后, 间作分别提高小麦氮吸收速率和氮素累积量 15.1%~48.4% 和 9.2%~28.9%, 却降低蚕豆氮吸收速率和氮素累积量 7.3%~28.4% 和 7.9%~14.0%。此时, 间作小麦氮素竞争力大于蚕豆, 在 N1 水平下小麦的氮素竞争力最强。【结论】小麦//蚕豆间作提高了小麦的初始及最大氮素吸收速率 (r 和 R_{max}), 提高了小麦生殖生长阶段的氮素吸收和累积, 是间作小麦产量优势的基础。优化氮肥投入量, 可调控小麦和蚕豆的种间竞争及互补关系, 是小麦//蚕豆间作体系产量优势形成、氮素高效吸收利用的关键。

关键词: 小麦蚕豆间作; 产量优势; Logistic 模型; 氮吸收关键参数; 氮素竞争力

Dynamics of N acquisition and accumulation and its interspecific N competition in a wheat-faba bean intercropping system

LIU Zhen-yang¹, WU Xin-yu¹, TANG Li¹, ZHENG Yi^{1,2}, LI Hai-ye¹, PAN Hao-nan¹, ZHU Dong-yu¹,
WANG Jing-jing¹, HUANG Shao-xin¹, QIN Xiao-min¹, XIAO Jing-xiu^{1*}

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

2 Yunnan Open University, Kunming 650599, China)

Abstract: 【Objectives】 We studied the nitrogen (N) content and N uptake of intercropping wheat and faba bean to clarify the relationship in nitrogen competition and accumulation between wheat and faba bean under different N application levels, so to propose a scientific nitrogen management for the intercropping system. 【Methods】 A field experiment of two factors with randomized block design was conducted under wheat monocropped, faba bean monocropped and wheat and faba bean intercropping conditions, and the four N levels were 0, 90, 180 and 270 kg/hm² for wheat and 0, 45, 90, 135 kg/hm² for faba bean. Both grain yield and above-ground N accumulation of wheat and faba bean were measured, and Logistic model was used to simulate the key N uptake parameters and N uptake dynamics. The N competition capacity between intercropping wheat and faba bean was analyzed.

收稿日期: 2019-11-18 接受日期: 2020-03-17

基金项目: 国家自然科学基金 (31760611, 31560581); 云南农业基础联合专项 (2018FG 001-071)。

联系方式: 刘振洋 E-mail: zhenyangliu0621@163.com; * 通信作者 肖靖秀 E-mail: xiaojingxiuxjx@126.com

【 Results 】 The yield of wheat was increased by 33.4%, but faba bean yield was decreased by 20.7% in the intercropping system, as compared to corresponding mono-cropping. However, the intercropped wheat and faba bean had a yield advantage under N0 and N1 levels ($LER > 1$). Through Logistic model analysis, the peak N uptake of wheat was 12–19 days later than that of faba bean. Intercropping increased the maximum N accumulation (A), the maximum N uptake rate (R_{max}) and the initial N uptake rate (r) of wheat, but decreased the A , the time needed to reach the maximum N uptake rate (T_{max}) and R_{max} of faba bean under the four N levels. During the vegetative growth stage, intercropping tended to decrease N uptake and accumulation of wheat, and the N competitiveness of wheat was lower than that of faba bean in intercropping, but N application could improve the N competitiveness of wheat. Intercropping increased R_{max} of wheat by 34.1%, 44.6%, 21.0% under N0, N1 and N2 levels due to the interaction between N level and planting pattern, respectively. Thus, when wheat reached its N uptake peak, intercropping increased the N uptake rate and N accumulation of wheat by 15.1%–48.4% and 9.2%–28.9%, but decreased those values of faba bean by 7.3%–28.4% and 7.9%–14.0%, respectively. During reproductive growth stage, the N competitiveness of wheat was greater than that of faba bean, and the strongest N competitiveness of wheat was under N1 level. **【 Conclusions 】** The yield advantage of intercropping is due to the increased initial and maximum N uptake rate of wheat (r and R_{max}), and the increased wheat N uptake rate and N accumulation in the reproductive stage. Reasonable N input could relieve the competition and increase the synergistic role for the N nutrition of wheat and faba bean, to achieve high yield and high nitrogen efficiency.

Key words: wheat and faba bean intercropping; yield advantage; Logistic models; key parameters of N absorption; N competitiveness

多样性种植是降低农业生产环境成本、提高农田生产力、实现农业可持续发展的重要手段^[1-2]。其中, 豆科作物参与的种植模式在世界范围内广泛分布^[3], 尤其在维持低投入/资源有限的农业系统生产力方面发挥了重要作用^[4]。前人从多样性种植降低病虫害^[5-6], 时空生态位差异促进水分、养分、光、热资源高效利用^[7-9], 根土互作改变根际微生态系统^[10-11], 种间竞争补偿机制^[12-13]等方面系统揭示多样性种植维持生态系统稳定性、提高作物产量的机制。

豆科作物具备生物固氮功能, 可减少对土壤资源的利用, 也能将部分固定的氮贡献给相邻的作物以增加作物氮来源的多样性^[14], 对减少氮肥投入、减轻环境压力有重要意义^[15]。多数禾本科作物的资源耗竭性、竞争能力强于豆科作物。因此, 豆科禾本科作物间作是较佳的种植模式, 广泛应用于我国各地, 例如玉米//大豆^[16]和玉米//花生^[17]在华北及东北地区广泛分布; 西北地区分布有小麦//大豆^[18]、小麦//蚕豆和玉米//蚕豆等^[19]。在此系统中, 前人围绕氮的固定和转移开展了大量研究工作, 但是作物较长的共生期内, 氮素吸收累积的动态特征并未引起足够重视。虽然前人研究明确了豆科禾本科间作促进了豆科作物对氮素的固定, 并将部分固定的氮素转移

到相邻作物^[20-21]。但是, 在豆科作物固氮能力较弱的生长前期, 豆科禾本科作物种间是否也存在氮素的竞争关系, 其对氮肥施用的响应如何尚不清楚。

小麦//蚕豆间作是云南乃至西南地区普遍采用的小春作物种植体系^[14, 22], 具有显著的产量优势^[14, 23]、能提高养分资源利用效率^[24]、降低病害^[23, 25]。赵平等^[24]发现小麦//蚕豆间作提高了小麦的氮素吸收速率, 改变了小麦对氮肥施用的响应, 但两作物共生期内的氮素吸收速率、累积动态及氮素竞争未见深入报道。我们在前期研究中已经证实, 小麦和蚕豆虽然生育期相近、株高相似, 但两者生育高峰错开^[22]。那么, 两者是否也存在氮素错峰吸收的差异? 肖焱波等^[14]通过盆栽试验定量分析了小麦蚕豆间作的种间互补关系。但是在蚕豆生长的早期, 其固氮能力较弱, 此时两者之间也存在氮素竞争关系, 氮肥施用会如何影响两者之间的互动, 目前尚不清楚。为此, 拟通过田间定位试验, 研究不同氮水平下小麦//蚕豆间作体系中氮素吸收与累积的动态变化规律, 解析小麦和蚕豆共生期内种间互作关系, 阐明不同氮水平下小麦//蚕豆间作体系氮吸收累积-种间互作-产量的关系, 以为豆科禾本科间作体系氮肥合理施用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点与试验材料

田间试验在云南省昆明市寻甸县大河桥试验基地进行, 地理坐标为 N 23°32'、E103°13', 地处北亚热带季风气候带, 年平均降水量 1020 mm, 年平均气温 14.7℃。

田间试验于 2014 年 10 月建立, 前茬作物为水稻, 供试土壤为熟化程度较高的红壤。2014 年田间试验建立时土壤有机质含量 35.05 g/kg、全氮含量 1.4 g/kg, 碱解氮 80 mg/kg, 速效钾 146 mg/kg, 速效磷 17 mg/kg, pH 7.18。每年田间试验于 10 月中下旬播种, 4 月中旬收获, 收获后秸秆移出实验田, 5—9 月保持休耕。本研究分析 2017 和 2018 两年田间试验, 试验期内的温度和降水量如图 1 所示。2018 年田间试验布置前, 各试验处理和种植模式下土壤有效氮含量见图 1。

供试品种: 小麦品种为云麦 52 (*Triticum aestivum* L.), 蚕豆品种为玉溪大粒豆 (*Vicia faba* L.)。

供试肥料: 尿素 (含 N 46.0%), 普通过磷酸钙 (含 P₂O₅ 16.0%), 硫酸钾 (含 K₂O 50.0%)。

1.2 试验设计

试验为两因素设计 (A、B): A 为 3 种植模式, 分别为小麦单作 (MW)、蚕豆单作 (MF) 和小麦//蚕豆间作 (W//F, 其中间作小麦 IW; 间作蚕豆 IF); B 因素为 4 个氮水平: N0、N1、N2 和 N3; 其中 N0 为不施氮; N1 为低氮处理, 小麦施氮量 90 kg/hm², 蚕豆施氮量 45 kg/hm²; N2 为正常施氮处理, 小麦施氮

量 180 kg/hm², 蚕豆施氮量 90 kg/hm²; N3 为高氮处理, 小麦施氮量 270 kg/hm², 蚕豆施氮量 135 kg/hm²。

所有处理中, 间作蚕豆和小麦的施氮量与其单作一致。田间试验采用随机区组布置, 每处理设 3 次重复, 共 36 个小区, 小区面积为 5.4 m × 6 m = 32.4 m²。

1.3 田间管理

本研究小麦蚕豆于 2017 和 2018 年 10 月 20—22 日播种, 于次年 4 月 20 日收获。小麦条播, 行距 0.2 m; 蚕豆点播, 行距 0.3 m, 株距 0.1 m。小麦蚕豆间作小区的种植参照当地推荐种植模式, 小区分为 3 个种植条带, 小麦蚕豆行数比例为 3:1, 即 6 行小麦//2 行蚕豆//6 行小麦//2 行蚕豆//6 行小麦//2 行蚕豆。单作小麦每小区 27 行 (中间 9 行为产区); 单作蚕豆每小区 18 行 (其中 6 行为产区); 间作小区小麦共 18 行 (中间条带 6 行为产区), 蚕豆 6 行 (中间 2 行为产区), 间作小麦和蚕豆播种密度同单作。

试验处理磷、钾肥施用量均为 90 kg/hm², 作为基肥一次性施入。小麦的氮肥施用分两次, 1/2 作为基肥施入, 1/2 在小麦拔节期作为追肥施入。蚕豆不追氮肥, 一次施入, 田间试验日常管理参照当地田间常规管理。

1.4 样品采集与测定

小麦生物量采集与测定: 小麦采样以点计, 每点采样面积 0.2 m × 0.2 m, 每小区采集 3 点, 在小麦 (分蘖、拔节、抽穗、灌浆、成熟) 和蚕豆 (分枝期、开花期、结荚期、籽粒膨大期、成熟期) 5 个关键生育期采集植株地上部样品, 采样后在 105℃ 下杀青 30 min, 75℃ 烘干称重。

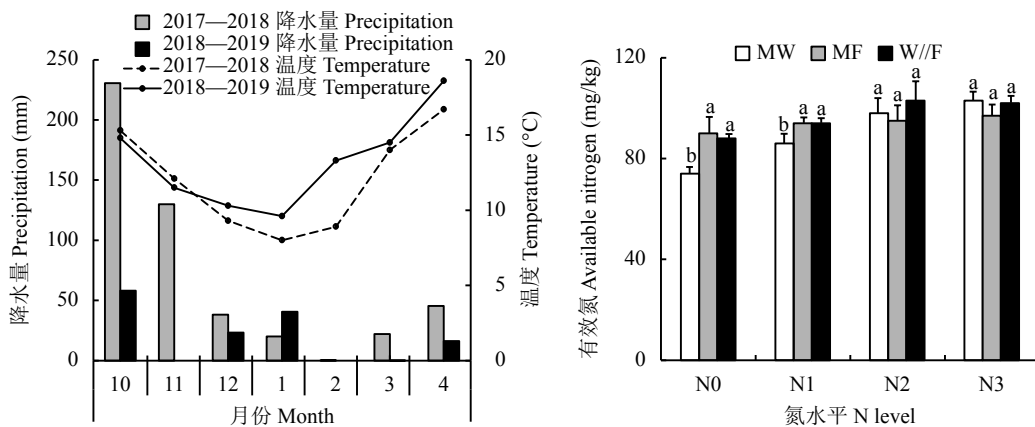


图 1 2017—2018 年田间试验月均温度和降水量及 2018 年田间试验播种前土壤有效氮含量

Fig. 1 Monthly average temperature and precipitation during the field experiment period in 2017 and 2018 and available nitrogen content before sowing in field trials in 2018

[注 (Note): 方柱上不同字母表示同一氮水平不同处理间差异 ($P < 0.05$)

Different letters above the bars indicate significant difference among different treatments under the same nitrogen level ($P < 0.05$.)

在小麦和蚕豆成熟期采集并测定产区产量。小麦蚕豆地上部氮含量采用凯氏定氮法^[26]测定。

1.5 数据分析

1.5.1 氮素吸收动态曲线模拟 逻辑斯蒂 (Logistic) 增长模型通过拟合数据可以很好的模拟植物生长过程中的即时数据^[27-28]。采用 Origin 8.0 软件通过 Logistic 模拟单间作小麦蚕豆氮吸收参数、氮累积动态及氮吸收速率动态。模型如下^[27,29]:

$$y_t = \frac{A}{1 + \exp[r \times (T_{max} - t)]}$$

$$r_t = r \times y_t (1 - y_t / A)$$

其中, y_t 表示小麦蚕豆整个生育期中第 t 天的地上部氮累积量, 单位: kg/hm^2 ; A 表示小麦蚕豆地上部最大氮累积量, 单位: kg/hm^2 ; r 为小麦蚕豆的初始氮吸收速率, 代表小麦的氮素吸收潜力, 单位: $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$; T_{max} 表示小麦蚕豆达到最大氮吸收速率需要的时间, 单位: d ; t 表示小麦蚕豆生长的时间, 单位: d ; r_t 表示小麦蚕豆整个生育期中第 t 天的氮吸收速率, 单位: $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ 。

1.5.2 小麦蚕豆种间作用 本研究以土地当量比 (LER) 作为间作优势指标, 公式如下^[30]:

$$\text{LER} = \frac{Y_{IW}}{Y_{MW}} + \frac{Y_{IF}}{Y_{MF}}$$

式中: Y_{IW} 和 Y_{IF} 分别为间作小麦和间作蚕豆小区产区产量; Y_{MW} 和 Y_{MF} 则分别为单作小麦和单作蚕豆小区产区产量。LER > 1 表示间作相比单作具有产量优势; LER < 1 表示间作相比单作没有产量优势。

同时, 以相对竞争力 (RC) 作为衡量间作体系中

作物的氮营养竞争力指标, 公式如下^[30]:

$$\text{RC} = \frac{N_{IW}}{N_{MW}} - \frac{N_{IF}}{N_{MF}}$$

式中: N_{IW} 和 N_{MW} 分别代表等面积上间作小麦和单作小麦地上部氮累积量; N_{IF} 和 N_{MF} 分别代表等面积上间作蚕豆和单作蚕豆地上部氮累积量。RC > 0 表示间作小麦的竞争能力强于间作蚕豆; RC = 0 表示间作小麦和蚕豆竞争力等同; RC < 0 表示间作小麦的竞争力弱于间作蚕豆。

1.5.3 方差分析 数据采用 Excel 2010 软件进行处理。采用 SPSS 20.0 软件对产量、LER 和 RC 进行单因素方差分析, 用两因素方差分析小麦蚕豆的氮吸收累积参数, 采用独立样本 T 检验对不同氮水平在同一时期的氮累积量及氮吸收速率进行差异性分析, 用最小显著差异法 (Duncan) 检验各处理的差异显著性 ($P = 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同氮水平下间作对小麦和蚕豆产量的影响

两年产量结果 (图 2) 表明, 随着施氮量的增加, 土地当量比 (LER) 显著降低。除 N3 水平外, 小麦蚕豆间作的 LER 均大于 1, N0、N1、N2 水平下, LER 两年平均分别为 1.31、1.13、1.04。与单作相比, N0 和 N1 水平下, 间作具有产量优势。

相比单作小麦 (MW), N0、N1、N2 水平下间作两年平均提高小麦产量 54.7%、28.7%、16.8% (图 2)。同时发现, 间作小麦氮肥施用量 $90 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 仍然能维持与单作小麦正常施氮量 ($180 \text{ kg}/\text{hm}^2$) 一致的产量。

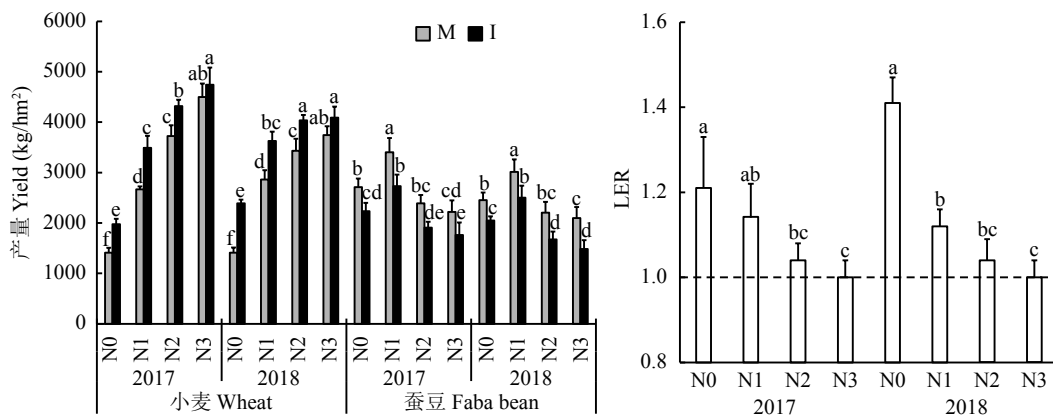


图 2 不同氮水平下间作小麦蚕豆的产量及其产量的土地当量比

Fig. 2 The yield and land equivalent ratio (LER) for yield of inter- and mono-cropped wheat and faba bean under different nitrogen levels

[注 (Note): M—单作 Mono-cropping; I—间作 Intercropping; 方柱上不同字母表示同一年份不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different letters above the bars indicate significant difference among different treatments in the same year ($P < 0.05$).]

就蚕豆而言, 两年试验都显示单、间作蚕豆均在低氮时 (N1) 产量最高, 且随施氮量的增加而降低。N0~N3 水平下间作蚕豆 (IF) 两年平均产量分别比单作蚕豆 (MF) 降低 17.1%、18.3%、22.2%、25.0%。综上, 小麦//蚕豆间作体系整体平均提高小麦产量 33.4% (除 N3 外), 降低蚕豆产量 20.7%。

2.2 不同氮水平下间作对小麦和蚕豆地上部氮吸收参数的影响

Logistic 模型较好的模拟了单间作小麦和蚕豆的氮素吸收累积规律 ($R^2 = 0.9293 \sim 0.9938$)。由表 1 来看, 小麦关键生长参数 A 、 r 和 R_{max} 均受施氮水平和种植模式的影响。但仅 r 和 R_{max} 受施氮水平 \times 种植模式交互作用的影响。随氮水平的提高, 小麦的 A 、 r 和

R_{max} 显著提高。不考虑氮肥施用水平, 与单作相比, 间作平均提高小麦的 A 、 r 和 R_{max} 13.1%、10.6% 和 24.9%。由于氮水平 \times 种植模式交互作用显著, N0~N3 水平下, 间作分别提高小麦的 R_{max} 34.1%、44.6%、21.0%、13.7%, N0、N1、N2 水平下间作提高小麦 r 15.8%、17.0%、11.5%, N3 水平下单间作小麦 r 无显著差异。从表 1 还可看出, 间作小麦正常氮肥用量 (N2) 减少 50%, 即低氮用量 (N1) 条件下, 仍能维持与单作正常氮肥用量下相当的 R_{max} 和更高的 r 。

蚕豆的 A 、 T_{max} 和 R_{max} 受氮水平和种植模式的影响 (表 2)。随氮水平的提高, T_{max} 有所下降, 而 A 和 R_{max} 则是先提高后下降, 其中 N2 水平最高。间作使蚕豆的 A 、 T_{max} 和 R_{max} 分别降低 11.5%、3.3%

表 1 2017—2018 年不同氮水平下单间作小麦的氮素吸收关键参数

Table 1 Key parameters of N absorption by inter- and mono-cropped wheat at different nitrogen levels from 2017 to 2018

| 氮水平 N level | 种植模式 Cropping pattern | 2017 | | | | | 2018 | | | | |
|--------------------------------|--------------------------|---------------|---------|-----------|----------|-----------|---------------|---------|-----------|----------|-----------|
| | | Adjust- R^2 | A | T_{max} | r | R_{max} | Adjust- R^2 | A | T_{max} | r | R_{max} |
| N0 | M | 0.9778** | 82.5 a | 85 a | 0.054 d | 1.1 g | 0.9719** | 73.0 a | 87 a | 0.046 d | 0.8 f |
| | I | 0.9676** | 92.2 a | 89 a | 0.057 cd | 1.3 f | 0.9665** | 84.7 a | 91 a | 0.058 c | 1.2 e |
| N1 | M | 0.9875** | 116.9 a | 90 a | 0.057 cd | 1.7 e | 0.9326** | 98.3 a | 79 a | 0.055 c | 1.3 e |
| | I | 0.9631** | 139.3 a | 92 a | 0.066 ab | 2.3 d | 0.9756** | 124.7 a | 82 a | 0.065 ab | 2.0 d |
| N2 | M | 0.9751** | 166.6 a | 83 a | 0.059 c | 2.5 d | 0.9667** | 164.3 a | 81 a | 0.055 c | 2.3 d |
| | I | 0.9772** | 183.9 a | 85 a | 0.064 b | 2.9 c | 0.9938** | 180.5 a | 80 a | 0.063 b | 2.9 c |
| N3 | M | 0.9761** | 201.3 a | 90 a | 0.068 a | 3.4 b | 0.9740** | 198.9 a | 80 a | 0.064 ab | 3.2 b |
| | I | 0.9751** | 226.6 a | 91 a | 0.067 ab | 3.8 a | 0.9759** | 219.9 a | 82 a | 0.068 a | 3.7 a |
| 平均 Average | | | | | | | | | | | |
| N0 | | | 87.3 d | 87 b | 0.056 c | 1.2 d | | 78.9 d | 89 a | 0.052 c | 1.0 d |
| N1 | | | 128.1 c | 91 a | 0.062 b | 2.0 c | | 111.5 c | 81 b | 0.060 b | 1.7 c |
| N2 | | | 175.2 b | 84 b | 0.062 b | 2.7 b | | 172.4 b | 81 b | 0.059 b | 2.6 b |
| N3 | | | 213.9 a | 90 a | 0.068 a | 3.6 a | | 209.4 a | 81 b | 0.066 a | 3.5 a |
| 线性 Linear | | | *** | ns | *** | *** | | ** | ns | *** | *** |
| 平均 Average | | | | | | | | | | | |
| | M | | 142 b | 87 a | 0.060 b | 2.2 b | | 134 b | 82 a | 0.055 b | 1.9 b |
| | I | | 160 a | 89 a | 0.064 a | 2.6 a | | 152 a | 84 a | 0.063 a | 2.5 a |
| 氮水平 N level (N) | | | *** | *** | *** | *** | | *** | *** | *** | *** |
| 种植模式 Cropping pattern (C) | | | *** | ns | *** | *** | | *** | ns | *** | *** |
| 氮水平 \times 种植模式 N \times C | | | ns | ns | ** | * | | ns | ns | * | * |

注 (Note): M—单作 Mono-cropping; I—间作 Intercropping; A —最大氮素累积量 The maximum nitrogen accumulation; r —最初氮素吸收速率 The initial nitrogen uptake rate; T_{max} —达到最大氮吸收速率所需的天数 The days needed to reach the maximum nitrogen uptake rate; R_{max} —最大氮吸收速率 The maximum nitrogen uptake rate; 同列数据后不同字母表示不同处理间显著差异 (双因素方差分析, $P < 0.05$) Values followed by different letters in the same column mean significant difference among treatments (two-way ANOVA, $P < 0.05$). ***— $P < 0.001$; **— $P < 0.01$; *— $P < 0.05$; ns—不显著 Not significant.

表 2 2017—2018 年不同氮水平下单间作蚕豆的氮素吸收关键参数
Table 2 Key parameters of N absorption by inter- and mono-cropped faba bean under different nitrogen levels from 2017 to 2018

| 氮水平 N level | 种植模式 Cropping pattern | 2017 | | | | | 2018 | | | | |
|---------------------------|--------------------------|-----------------------|---------|------------------|---------|------------------|-----------------------|---------|------------------|---------|------------------|
| | | Adjust-R ² | A | T _{max} | r | R _{max} | Adjust-R ² | A | T _{max} | r | R _{max} |
| N0 | M | 0.9894** | 165.3 a | 81 a | 0.079 a | 3.3 a | 0.9867** | 173.4 a | 78 a | 0.073 a | 3.2 a |
| | I | 0.9718** | 143.4 a | 75 a | 0.079 a | 2.8 a | 0.9559** | 152.5 a | 74 a | 0.073 a | 2.8 a |
| N1 | M | 0.9873** | 183.3 a | 79 a | 0.076 a | 3.5 a | 0.9948** | 188.2 a | 71 a | 0.076 a | 3.6 a |
| | I | 0.9923** | 161.0 a | 77 a | 0.077 a | 3.1 a | 0.9824** | 170.0 a | 69 a | 0.075 a | 3.2 a |
| N2 | M | 0.9857** | 221.9 a | 74 a | 0.078 a | 4.3 a | 0.9882** | 229.9 a | 71 a | 0.075 a | 4.3 a |
| | I | 0.9805** | 204.1 a | 73 a | 0.077 a | 3.9 a | 0.9780** | 202.9 a | 67 a | 0.075 a | 3.8 a |
| N3 | M | 0.9538** | 208.3 a | 72 a | 0.076 a | 4.0 a | 0.9506** | 197.9 a | 69 a | 0.076 a | 3.7 a |
| | I | 0.9762** | 185.3 a | 72 a | 0.081 a | 3.7 a | 0.9293** | 170.3 a | 68 a | 0.074 a | 3.2 a |
| 平均 Average | | | | | | | | | | | |
| N0 | | | 154.4d | 78 a | 0.079 a | 3.1d | | 162.9 c | 76 a | 0.073 a | 3.0 c |
| N1 | | | 172.1 c | 78 a | 0.076 a | 3.3 c | | 179.1 b | 70 b | 0.076 a | 3.4 b |
| N2 | | | 213.0 a | 73 b | 0.077 a | 4.1 a | | 216.4 a | 69 b | 0.075 a | 4.1 a |
| N3 | | | 196.8 b | 72 b | 0.078 a | 3.9 b | | 184.1 b | 69 b | 0.075 a | 3.5 b |
| 线性 Linear | | | ns | ** | ns | ns | | ns | ** | ns | ns |
| 平均 Average | | | | | | | | | | | |
| | M | | 195 a | 77 a | 0.079 a | 3.7 a | | 197 a | 72 a | 0.075 a | 3.7 a |
| | I | | 173 b | 74 b | 0.079 a | 3.4 b | | 174 b | 70 b | 0.074 a | 3.2 b |
| 氮水平 N level (N) | | | *** | ** | ns | *** | | *** | *** | ns | *** |
| 种植模式 Cropping pattern (C) | | | *** | * | ns | *** | | *** | ** | ns | *** |
| 氮水平 × 种植模式 N × C | | | ns | ns | ns | ns | | ns | ns | ns | ns |

注 (Note): M—单作 Mono-cropping; I—间作 Intercropping; A—最大氮素累积量 The maximum nitrogen accumulation; r—最初氮素吸收速率 The initial nitrogen uptake rate; T_{max}—达到最大氮吸收率所需的天数 The days needed to reach the maximum nitrogen uptake rate; R_{max}—最大氮吸收速率 The maximum nitrogen uptake rate; 同列数据后不同字母表示不同处理间显著差异 (双因素方差分析, P < 0.05) Values followed by different letters in the same column mean significant difference among treatments (two-way ANOVA, P < 0.05). ***—P < 0.001; **—P < 0.01; *—P < 0.05; ns—不显著 Not significant.

和 10.8%。

2.3 不同氮水平下小麦和蚕豆的氮素吸收和累积动态

两年试验结果 (图 3) 表明, 在营养生长阶段 (播种后 60 天内), 虽然单间作小麦和蚕豆的氮吸收速率无显著差异 (除 2017 年 N2 下小麦外), 但间作小麦氮吸收速率有降低趋势。当小麦和蚕豆进入氮素吸收高峰期后, 间作显著提高了小麦的氮素吸收速率, 4 个施氮水平下增幅为 15.1%~48.4%, 蚕豆的吸收速率则分别降低 7.3%~28.4%。

小麦和蚕豆的氮素吸收高峰交错出现 (图 3)。间作条件下, 小麦和蚕豆的氮素吸收高峰分别出现在播种后 80~92 天和 67~77 天, 同一氮水平下小麦与蚕豆氮素吸收高峰相差 12~19 天 (图 3、表 1、

表 2)。在小麦达到氮素吸收高峰期前, 蚕豆的氮素吸收速率显著高于小麦; 当小麦达到氮素吸收高峰期后, 小麦的氮素吸收速率则高于蚕豆, 且施氮量越高, 差异越大 (图 3)。

图 4 表明, 在营养生长阶段 (播种后 90 天内), 单间作小麦、蚕豆的氮素累积曲线几乎重合 (除 2017 年的 N2 水平下, MW > IW), 但间作整体有降低小麦氮素累积的趋势。进入生殖生长阶段 (播种后 90 天内), 间作均提高了小麦的氮素累积量, 增幅 9.2%~28.9%; 但间作降低了蚕豆的氮素累积量, 降幅 7.9%~14.0%。

2.4 不同氮水平下小麦和蚕豆的种间竞争力

小麦和蚕豆的氮素竞争力随生育期改变而改

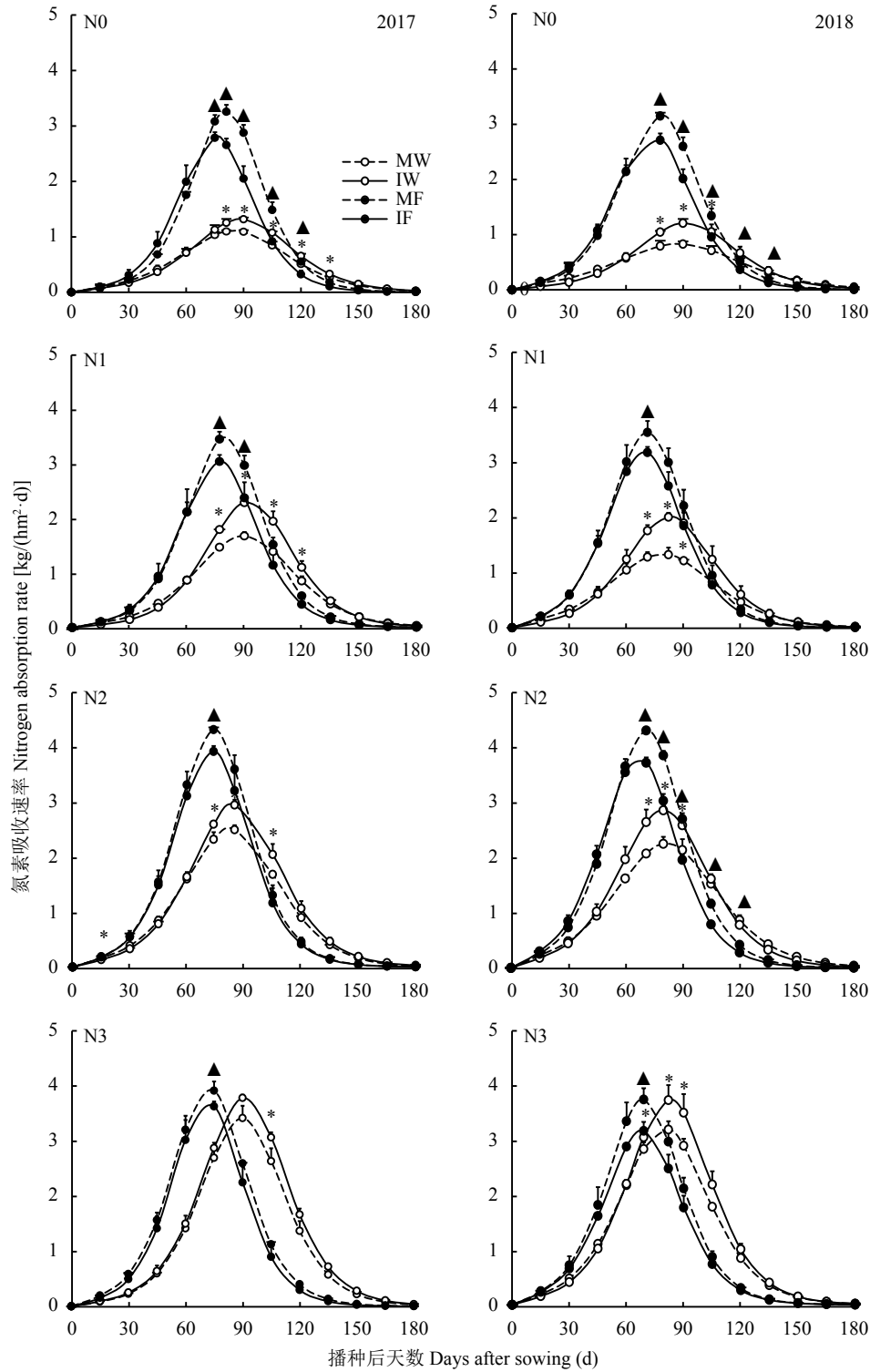


图 3 不同氮水平下小麦和蚕豆氮素吸收速率

Fig. 3 Nitrogen absorption rates of wheat and faba bean under different nitrogen levels

[注 (Note) : ▲表示相同时间单、间作蚕豆差异显著 ($P < 0.05$) ; *表示相同时间单、间作小麦差异显著 ($P < 0.05$) ▲ indicates that there are significant difference between inter- and mono-cropped faba bean at the same time ($P < 0.05$) . * indicates that there is significant difference in inter- and mono-cropped wheat at the same time ($P < 0.05$) .]

变。在营养生长阶段 (播种后 90 天内), 间作小麦的氮素竞争力低于蚕豆 ($RC < 0$, 除 2017 年 N3 水

平), 而进入生殖生长阶段后, 间作小麦的氮素竞争力则显著大于蚕豆 ($RC > 0$)。同时, 小麦和蚕豆的氮

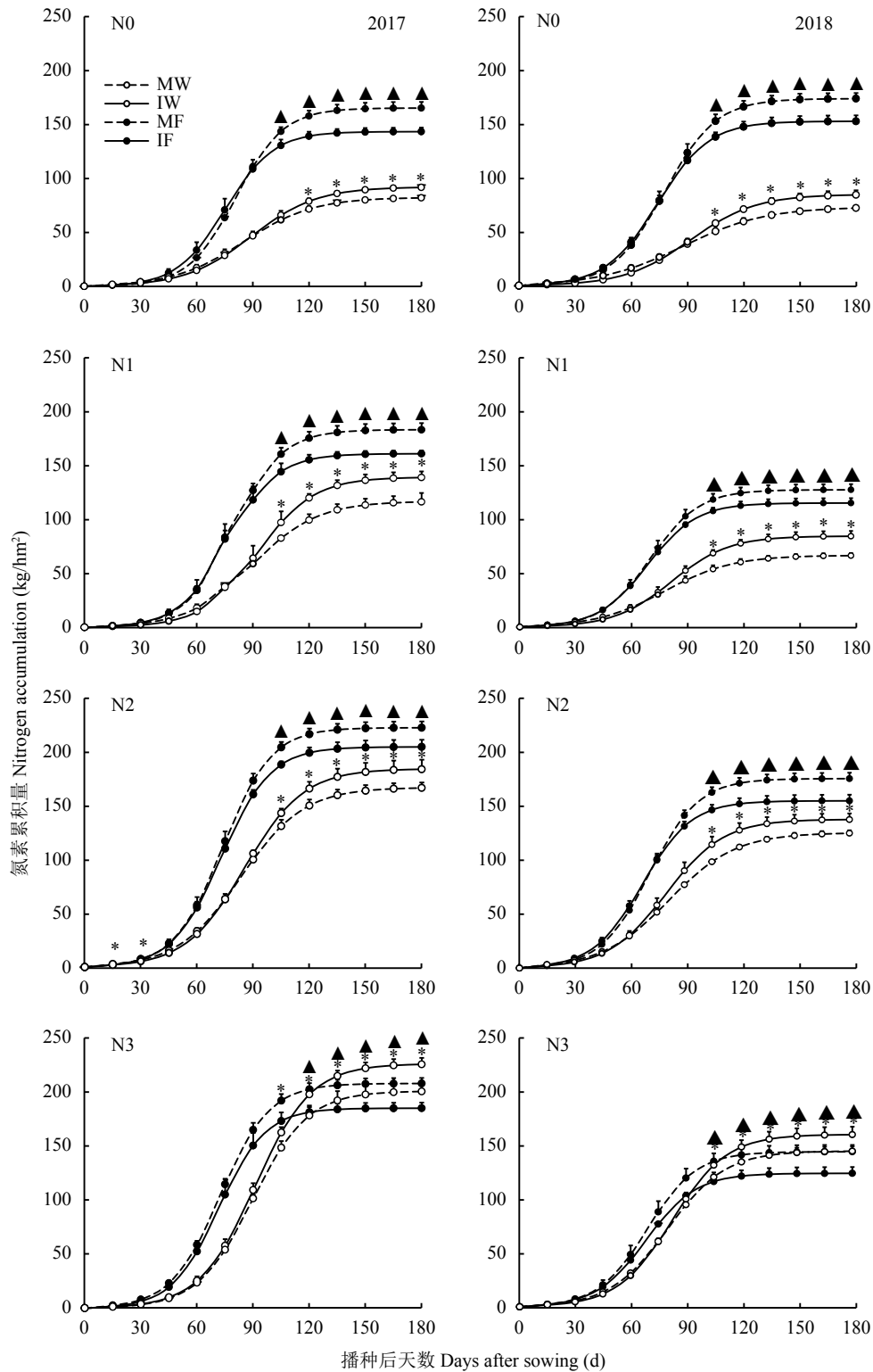


图 4 不同氮水平下小麦和蚕豆氮素累积量

Fig. 4 Nitrogen accumulation of wheat and faba bean under different nitrogen levels

[注 (Note) : ▲表示相同时间单、间作蚕豆差异显著 ($P < 0.05$) ; *表示相同时间单、间作小麦差异显著 ($P < 0.05$) ▲ indicates that there are significant difference between inter- and mono-cropped faba bean at the same time ($P < 0.05$) . * indicates that there is significant difference in inter- and mono-cropped wheat at the same time ($P < 0.05$) .]

素种间竞争力受氮水平的影响。在营养生长阶段, 施氮量提高了间作小麦的氮素竞争力, 进入生殖生

长阶段, N1 水平下小麦的氮素竞争力最强, 其中 2017 年差异达到显著水平 (图 5)。

3 讨论

本试验中, Logistic 方程很好的模拟了小麦和蚕豆氮营养吸收的关键参数 (表 1、表 2), 明晰了不同氮水平下间作小麦和蚕豆的氮素吸收及累积的动态规律。当两种作物时间生态位分离时, 降低种间竞争的同时还会产生互补效应, 从而使资源利用率更高^[31-32]; 因此, T_{max} 是衡量间作作物是否是较佳组合的指标之一^[28, 33]。本研究发现小麦与蚕豆的 T_{max} 在同水平下相差 12~19 天 (表 1、表 2), 证实了我们的推测, 小麦和蚕豆氮素吸收存在生态位的分离。 R_{max} 和 r 作为衡量作物对养分资源利用能力的指标, 也是作物竞争力的关键属性^[34]; 本试验研究表明, 间作显著提高了小麦的 R_{max} 和 r , 提高了间作体系中小麦的氮素竞争力, 促进间作小麦的氮素吸收和累积优势的形成, 为间作产量优势奠定了基础。

小麦//蚕豆间作体系中小麦在生殖生长阶段表现出显著的生长优势^[22]; 本研究也证明, 间作小麦在生殖生长阶段取得了明显的氮素吸收及氮累积优势 (图 3~图 4)。其重要原因除上述种间氮营养生态位分离外, 也与豆科作物的氮转移及氮节约效应有关^[14, 30]。除此之外, Liu 等^[35]在小麦//蚕豆体系盆栽试验中发现, 小麦与蚕豆间作能够提高两者根系黄酮类物质的分泌, 促进蚕豆结瘤固氮; 可见, 小麦对与之间作的蚕豆做出了积极反应, 那么, 是否蚕豆也会分泌某种信号物质来积极响应小麦, 值得探究, 这也会让我们对禾豆间作优势形成有更清晰的认识。

禾本科作物的养分竞争普遍强于豆科作物^[14, 36], 但是在土壤有效氮含量低的情况下, 豆科作物往往具有较强的种间竞争力^[37]。虽然肖焱波等^[38]的研究证实, 蚕豆固定的氮素约有 5% 转移到小麦体内。但是

本研究发现, 在营养生长阶段, 由于蚕豆初始氮素吸收速率大于小麦 (表 1、表 2), 小麦的氮素竞争力反而低于蚕豆 (图 5); 同时, 由于蚕豆根瘤尚未大量形成、固氮能力较弱, 小麦和蚕豆还可能存在氮素的竞争关系。但可能受前期小麦和蚕豆根系伸展空间限制^[39], 间作对小麦和蚕豆的氮素吸收累积影响较小。随着蚕豆固氮能力的增强, 小麦进入氮素吸收高峰期后, 小麦对氮素竞争力增强, 两者也由氮素竞争关系转变为互补关系, 间作才促进了小麦的氮素吸收累积。值得关注的是, 氮肥施用可调控全生育期间作小麦的氮素竞争力。在营养生长阶段, 氮肥施用可以提高间作小麦的氮素竞争力 (图 5); 同样在生殖生长阶段, N1 水平下间作小麦也表现出较强的氮素竞争力 (图 5)。因此, 通过氮肥运筹调控小麦和蚕豆的种间互作关系将有助于促进该间作体系的氮素吸收和利用, 最终影响间作体系的产量构成。

本研究发现, 小麦//蚕豆间作体系的氮素吸收累积与间作产量的形成密切相关。因为间作体系中小麦和蚕豆的氮素吸收累积与产量的表现是一致的, 即间作促进小麦的氮素吸收累积, 则间作小麦产量提高; 反之, 间作抑制蚕豆的氮素累积, 则间作蚕豆产量降低。此外, 随着施氮量的提高, 间作对小麦氮素吸收关键参数的影响逐步减小, 间作产量优势也逐步消失。由此可见, 合理的氮肥管理可以实现小麦蚕豆间作体系产量、经济和环境效益的最大化。本研究分析 2017—2018 年的田间定位试验, 间作显著提高了不施氮和减氮处理下土壤有效氮含量 (图 1), 同时还具有间作产量优势 (图 2)。说明禾本科对氮素的竞争刺激了豆科作物固氮^[40-41], 提高了土壤肥力。本研究还发现, 正常氮肥用量减氮 50%

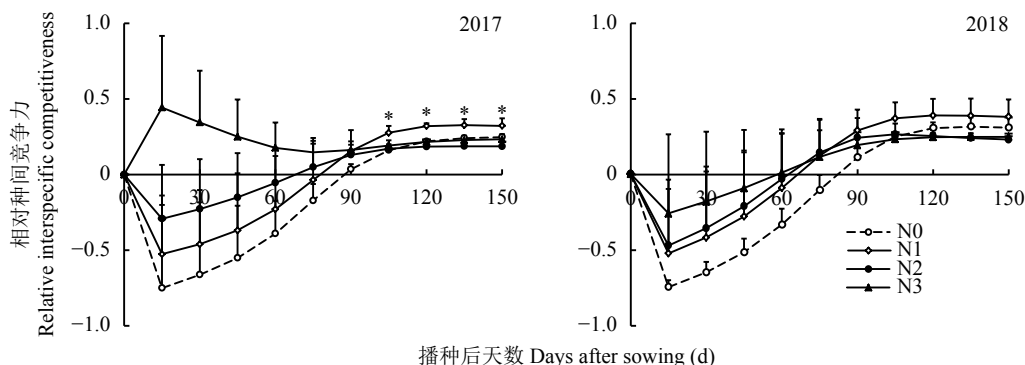


图 5 不同氮水平下小麦与蚕豆种间竞争作用

Fig. 5 Interspecific competition between wheat and faba bean under different nitrogen levels

[注 (Note): *表示相同时间不同氮水平下间作小麦与蚕豆差异显著 ($P < 0.05$) * indicates that there is significant difference between intercropping wheat and faba bean at the same time under different nitrogen levels ($P < 0.05$).]

时, 间作小麦维持了较高的 R_{max} 和 r (表 1), 在生殖生长阶段也具有较强的氮素竞争力, 且还维持着较高产量 (图 2)。这些结果均表明, 间作条件下氮肥减施提高禾本科作物的氮素竞争力, 刺激豆科作物的固氮是豆科禾本科间作节氮、增产、提高地力、维持系统生产力的作用机制。此外, 我们还发现, 蚕豆的产量也与氮肥施用量密切相关 (图 2)。因此, 豆科禾本科间作体系的氮肥管理显得十分重要。如何优化氮肥施用制度, 使豆科作物更好的发挥结瘤固氮功能, 同时提高禾本科作物对氮素的竞争能力, 充分发挥间作优势, 是值得深入探讨的问题。

4 结论

小麦//蚕豆间作体系中, 营养生长阶段小麦和蚕豆存在氮素竞争关系, 间作小麦氮素吸收和累积比单作有所降低。但间作提高了小麦的最大氮吸收速率 (R_{max}) 和初始氮吸收速率 (r) 24.90% 和 10.6%, 促进生殖生长阶段小麦的氮素吸收和累积。与此同时, 间作降低蚕豆的 R_{max} , 抑制了蚕豆的氮素累积。最终间作整体平均提高小麦产量 33.4% (除 N3 外), 降低蚕豆产量 20.7%, 尤其在 N0 和 N1 水平下表现出间作产量优势。随着施氮量的提高, 间作提高小麦氮素吸收累积的优势降低, 间作产量优势也随之消失。但氮肥施用调控了小麦和蚕豆的氮素竞争关系。显然, 间作小麦和蚕豆在氮素吸收上竞争和互补关系共存, 优化间作体系的氮肥投入量, 调控豆科禾本科间作的种间互作, 促进氮素的高效利用, 对农业绿色可持续发展具有现实意义。

参 考 文 献:

- [1] Bedoussac L, Journet E P, Hauggaard-Nielsen H, *et al.* Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercrops in organic farming: A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2015, 35(3): 911–935.
- [2] Brooker R W, Bennett A E, Cong W F, *et al.* Improving intercropping: A synthesis of research in agronomy, plant physiology and ecology[J]. *New Phytologist*, 2015, 206(1): 107–117.
- [3] Martinguy M O, Paquette A, Dupras J, *et al.* The new Green Revolution: Sustainable intensification of agriculture by intercropping [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 615: 767–772.
- [4] Dai J, Qiu W, Wang N, *et al.* From Leguminosae/Gramineae intercropping systems to see benefits of intercropping on iron nutrition [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 605.
- [5] Li L, Li S M, Sun J H, *et al.* Diversity enhances agricultural productivity via rhizosphere phosphorus facilitation on phosphorus-deficient soils[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(27): 11192–11196.
- [6] Lopes T, Hatt S, Xu Q, *et al.* Wheat (*Triticum aestivum* L.) - based intercropping systems for biological pest control[J]. *Pest Management Science*, 2016, 72(12): 2193–2202.
- [7] Zhu J, van der Werf W, Anten N P R, *et al.* The contribution of phenotypic plasticity to complementary light capture in plant mixtures[J]. *New Phytologist*, 2015, 207(4): 1213–1222.
- [8] Mao L, Zhang L, Li W, *et al.* Yield advantage and water saving in maize/pea intercrop[J]. *Field Crops Research*, 2012, 138: 11–20.
- [9] Hauggaard-Nielsen H, Ambus P, Jensen E S. Temporal and spatial distribution of roots and competition for nitrogen in pea-barley intercrops — a field study employing ^{32}P technique[J]. *Plant and Soil*, 2001, 236(1): 63–74.
- [10] 杨亚东, 冯晓敏, 胡跃高, 等. 豆科作物间作燕麦对土壤固氮微生物丰度和群落结构的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(3): 957–965.
Yang Y D, Feng X M, Hu Y G, *et al.* Effects of legume-oat intercropping on abundance and community structure of soil N_2 -fixing bacteria[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(3): 957–965.
- [11] Zhou L, Wang Y, Xie Z, *et al.* Effects of lily/maize intercropping on rhizosphere microbial community and yield of *Lilium davidii* var. unicolor[J]. *Journal of Basic Microbiology*, 2018, 58(10): 892–901.
- [12] 张小明, 来兴发, 杨宪龙, 等. 施氮和燕麦/箭筈豌豆间作比例对系统干物质质量和氮素利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(2): 489–498.
Zhang X M, Lai X F, Yang X L, *et al.* Effects of nitrogen application and intercropping ratio on dry matter production and nitrogen use efficiency of the oat and common vetch intercropping system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(2): 489–498.
- [13] Hauggaard-Nielsen H, Andersen M K, Jeune B, *et al.* Density and relative frequency effects on competitive interactions and resource use in pea-barley intercrops[J]. *Field Crops Research*, 2006, 95(2–3): 256–267.
- [14] 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.* Sparing N response and yields advantage of intercropped wheat and faba bean[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2007, 13(2): 267–271.
- [15] Ashworth A J, Taylor A M, Reed D L, *et al.* Environmental impact assessment of regional switchgrass feedstock production comparing nitrogen input scenarios and legume-intercropping systems[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 87: 227–234.
- [16] 杨峰, 娄莹, 廖敦平, 等. 玉米-大豆带状套作行距配置对作物生物量、根系形态及产量的影响[J]. *作物学报*, 2015, 41(4): 642–650.
Yang F, Lou Y, Liao D P, *et al.* Effects of row spacing on crop biomass, root morphology and yield in maize-soybean relay strip intercropping system[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(4): 642–650.
- [17] 焦念元, 赵春, 宁堂原, 等. 玉米-花生间作对作物产量和光合作用光响应的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(5): 981–985.
Jiao N Y, Zhao C, Ning T Y, *et al.* Effects of maize-peanut intercropping on economic yield and light response of photosynthesis[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(5): 981–985.

- [18] 李隆, 李晓林, 张福锁, 等. 小麦大豆间作条件下作物养分吸收利用对间作优势的贡献[J]. *植物营养与肥料学报*, 2000, 6(2): 140–146.
Li L, Li X L, Zhang F S, *et al.* Uptake and utilization of nitrogen, phosphorus and potassium as related to yield advantage in wheat/soybean intercropping[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2000, 6(2): 140–146.
- [19] Fan F, Zhang F, Song Y, *et al.* Nitrogen fixation of faba bean (*Vicia faba* L.) interacting with a non-legume in two contrasting intercropping systems[J]. *Plant and Soil*, 2006, 283(1–2): 275–286.
- [20] Xiao Y, Li L, Zhang F. Effect of root contact on interspecific competition and N transfer between wheat and faba bean using direct and indirect ¹⁵N techniques[J]. *Plant and Soil*, 2004, 262(1–2): 45–54.
- [21] Zang H, Yang X, Feng X, *et al.* Rhizodeposition of nitrogen and carbon by mungbean (*Vigna radiata* L.) and its contribution to intercropped oats (*Avena nuda* L.)[J]. *PLoS ONE*, 2015, 10(3): e0121132.
- [22] 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.
- [23] 肖靖秀, 周桂凤, 汤利, 等. 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.
Xiao J X, Zhou G S, Tang L, *et al.* Effects of nitrogen and potassium nutrition on the occurrence of *Blumeria graminis* (DC). Speer of wheat in wheat and faba bean intercropping[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2006, 12(4): 517–522.
- [24] 赵平, 郑毅, 汤利, 等. 小麦蚕豆间作施氮对小麦氮素吸收、累积的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(4): 742–747.
Zhao P, Zheng Y, Tang L, *et al.* Effect of N supply and wheat/faba bean intercropping on N uptake and accumulation of wheat[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(4): 742–747.
- [25] 朱锦惠, 董艳, 肖靖秀, 等. 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.
Zhu J H, Dong Y, Xiao J X, *et al.* Effects of N application on wheat powdery mildew occurrence, nitrogen accumulation and allocation in intercropping system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(12): 3985–3993.
- [26] 鲍士旦. 土壤农化分析 (3 版)[M]. 北京: 农业出版社, 2000.
Bao S D. Soil and agrochemistry analysis (3rd Edition) [M]. Beijing: Agriculture Press, 2000.
- [27] Trinder C, Brooker R, Davidson H, Robinson D. Dynamic trajectories of growth and nitrogen capture by competing plants[J]. *New Phytologist*, 2012, 193(4): 948–958.
- [28] Zhang W P, Liu G C, Sun J H, *et al.* Growth trajectories and interspecific competitive dynamics in wheat/maize and barley/maize intercropping[J]. *Plant and Soil*, 2015, 397(1–2): 227–238.
- [29] Robinson D. Root proliferation, nitrate inflow and their carbon costs during nitrogen capture by competing plants in patchy soil[J]. *Plant and Soil*, 2001, 232(1–2): 41–50.
- [30] Willey R W. Resource use in intercropping systems[J]. *Agricultural Water Management*, 1990, 17(1): 215–231.
- [31] 李春杰. 种内/种间互作调控小麦/蚕豆间作体系作物生长与氮磷吸收的机制[D]. 北京: 中国农业大学博士学位论文, 2018.
Li C J. The mechanisms of intra and interspecific interaction on regulating growth and N/P acquisition by intercropped wheat and faba bean[D]. Beijing: PhD Dissertation of China Agricultural University, 2018.
- [32] Li B, Li Y Y, Wu H M, *et al.* Root exudates drive interspecific facilitation by enhancing nodulation and N₂ fixation[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(23): 6496–6501.
- [33] 柏文恋, 张梦瑶, 任家兵, 等. 小麦/蚕豆间作作物生长曲线的模拟及种间互作分析[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(12): 4037–4046.
Bai W L, Zhang M Y, Ren J B, *et al.* Simulation of crop growth curve and analysis of interspecific interaction in wheat and faba bean intercropping system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(12): 4037–4046.
- [34] Grime J P. Plant strategies and vegetation processes[M]. Chichester, UK: JohnWiley and Sons, 1979.
- [35] Liu Y C, Qin X M, Xiao J X, *et al.* Intercropping influences component and content change of flavonoids in root exudates and nodulation of faba bean[J]. *Journal of Plant Interactions*, 2017, 12(1): 187–192.
- [36] Zhang F, Li L. Using competitive and facilitative interactions in intercropping systems enhances crop productivity and nutrient-use efficiency[J]. *Plant and Soil*, 2003, 248(1–2): 305–312.
- [37] Hauggaard-Nielsen H, Jensen E S. Evaluating pea and barley cultivars for complementarity in intercropping at different levels of soil N availability[J]. *Field Crop Research*, 2001, 72(3): 185–196.
- [38] 肖焱波, 李隆, 张福锁, 等. 小麦/蚕豆间作体系中的种间相互作用及氮转移研究[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(5): 965–973.
Xiao Y B, Li L, Zhang F S. The interspecific nitrogen facilitation and the subsequent nitrogen transfer between the intercropped wheat and faba bean[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(5): 965–973.
- [39] 高阳, 段爱旺, 孙景生, 等. 玉米大豆条带间作根系分布模式[J]. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(2): 98–104.
Gao Y, Duan A W, Sun J S, *et al.* Crop root distribution model in maize/soybean strip intercropping system[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(2): 98–104.
- [40] Chapagain T, Riseman A. Barley-pea intercropping: Effects on land productivity, carbon and nitrogen transformations[J]. *Field Crops Research*, 2014, 166(9): 18–25.
- [41] 冯晓敏, 杨永, 臧华栋, 等. 燕麦花生间作系统作物氮素累积与转移规律[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(3): 617–498.
Feng X M, Yang Y, Zang H D, *et al.* Characteristics of crop nitrogen accumulation and nitrogen transfer in oat and peanut intercropping system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(3): 617–498.