

# 小麦间作蚕豆体系作物生长曲线 动态模拟与分析

李伟琦<sup>1</sup>, 孙建好<sup>1</sup>, 李春杰<sup>2</sup>, 赵建华<sup>1</sup>, 汤莹<sup>1</sup>, 吴科生<sup>1</sup>, 陈亮之<sup>1</sup>, 杨新强<sup>1</sup>

(1. 甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所, 甘肃 兰州 730070;

2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

**摘要:** 利用小麦间作蚕豆体系作物生长动态数据和 Logistic 生长曲线, 为小麦和蚕豆单作与间作体系下作物间相互作用提供科学依据。对不同氮水平下小麦、蚕豆单作和间作体系的生物量动态变化规律模拟分析, 结果表明, 间作处理因作物间的竞争生长速率比均呈竞争恢复的抛物线趋势, 2种施肥处理的单作蚕豆均早于间作蚕豆达到最大生长速率, 小麦成熟后对蚕豆的竞争减小, 蚕豆的生长速率增强; 相同种植模式下施氮处理对蚕豆的生物量累积起关键作用, 间作和氮缺乏的环境下, 能激发蚕豆的生物固氮效应, 促进蚕豆地下部生长和根瘤数量增多。综上所述, 施氮和间作改变了小麦、蚕豆生物量的积累, 在小麦间作蚕豆生长前期, 小麦有较强的氮肥利用优势, 进而对蚕豆的地上部和地下部生物量累积产生影响, 反映了作物的生长潜力及对养分资源的利用能力。

**关键词:** 氮水平; 小麦/蚕豆间作; 生物量; 生长曲线模拟

中图分类号: S512.1; S643.6 文献标志码: A 文章编号: 2097-2172(2025)01-0047-06

doi:10.3969/j.issn.2097-2172.2025.01.008

## Dynamic Simulation and Analysis of Crop Growth Curves in Wheat and Faba Bean Intercropping System

LI Weiqi<sup>1</sup>, SUN Jianhao<sup>1</sup>, LI Chunjie<sup>2</sup>, ZHAO Jianhua<sup>1</sup>, TANG Ying<sup>1</sup>, WU Kesheng<sup>1</sup>,  
CHEN Liangzhi<sup>1</sup>, YANG Xinqiang<sup>1</sup>

(1. Institute of Soil Fertilizer and Water-saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou Gansu 730070, China; 2. College of Resources and Environment Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract:** By utilizing dynamic growth data of crops in the wheat/faba bean intercropping system and Logistic growth curves, this study provides scientific evidence for the interactions between wheat and faba bean in monoculture and intercropping systems. The dynamic changes in biomass under different nitrogen levels were simulated and analyzed for wheat and faba bean in monoculture and intercropping systems. Results indicated that in intercropping treatments, the competitive accumulation rate ratio between crops exhibited a parabolic trend of competitive recovery. Under both fertilization treatments, monoculture faba bean reached its maximum growth rate earlier than intercropped faba bean. After wheat maturity, the competition from wheat decreased, allowing the growth rate of faba bean to recover. Under the same planting pattern, nitrogen application played a critical role in biomass accumulation of faba bean. In intercropping and nitrogen-deficient environments, the biological nitrogen fixation effect of faba bean was stimulated, promoting below-ground growth and increasing the number of nodules. In summary, nitrogen application and intercropping altered the biomass accumulation of wheat and faba bean. During the early growth stage of faba bean in the wheat intercropping system, wheat showed a strong advantage in nitrogen utilization, which affected the above-ground and below-ground biomass accumulation of faba bean. This reflects the growth potential of the crops and their capacity to utilize nutrient resources.

**Key words:** Nitrogen level; Wheat/faba bean intercropping; Biomass; Growth curve simulation

间作套种一直以生态位互补、提高农田生物多样性及资源利用率为优势, 是一种合理的可持续农业发展的重要模式, 禾豆之间的相互作用中豆科的固氮作用对自然和农业植物群落的影响得

收稿日期: 2024-05-13

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFD1900200)。

作者简介: 李伟琦(1985—), 女, 甘肃白银人, 副研究员, 主要从事作物栽培及节水灌溉研究工作。Email: liweiqi99@qq.com。

通信作者: 孙建好(1972—), 男, 甘肃永登人, 副研究员, 主要从事作物栽培及土壤肥料研究工作。Email: sunjianhao@126.com。

到了广泛的关注。小麦/蚕豆间作是我国西北地区广泛种植的模式之一,研究表明,蚕豆能够显著增加小麦的吸氮量,而蚕豆的生物固氮作用也有显著的增强<sup>[1-3]</sup>;小麦对小麦/蚕豆间作体系的土壤氮具有较强的竞争能力<sup>[4-6]</sup>。在植物群落中,物种的时空生态位对植物群落的种间竞争和资源利用取决于物种生长、生存和繁殖的环境因素<sup>[4-7]</sup>。一种作物相对于另一种作物对土壤资源竞争能力大小与作物生长指标密切相关,植物的相互竞争作用在生长过程中会发生动态变化。间作作物对资源的利用存在时间和空间上的差异,他们达到最大生长速率的时间不同,时空生态位的分化可能会减少竞争,增加间作物种的资源捕获总量<sup>[8-9]</sup>。因此,最初的增长率反映了植物的生长潜力和资源的可利用性。资源获取能力强的植物其生长速度也较快,往往属于优势竞争对手。通过使用动态数据和显式增长模型<sup>[8,10-12]</sup>,如 Logistic 生长曲线可以模拟植物从出苗到死亡或收获的生长过程,量化增长和种间竞争的动态,从而帮助我们理解种间相互作用的动态,并为改进间作系统做出预测。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验区概况

试验在甘肃省张掖市甘州区九公里甘肃省农业科学院张掖节水农业试验站开展(38° 56' N, 100° 26' E)。试验站属典型的大陆性干旱气候,无霜期 153 d,年均气温 7 °C, ≥0 °C 积温 3 388 °C, ≥10 °C 积温 2 896 °C,海拔 1 490 m,平均年降水量 139.2 mm,蒸发量 2 291 mm,年日照时数 2 800 ~ 3 300 h。土壤以灌漠土为主,耕层土壤含有机质 17.98 g/kg、全氮 0.77 g/kg、全磷 1.41 g/kg、全钾 13.97 g/kg,容重 1.39 g/cm<sup>3</sup>,pH 8.5。

### 1.2 供试材料

供试蚕豆品种为临蚕 5 号,小麦品种为陇春 25 号,均由甘肃省农业科学院作物研究所提供。供试氮肥为尿素(N 46%),由红四方肥业有限公司生产;磷肥为重过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 44%),由云南云天化有限公司生产。

### 1.3 试验设计

试验采用两因素裂区设计,主区为种植模式,分别为单作小麦(SW),行距 15.0 cm;单作蚕豆

(SF),行距 22.5 cm,株距 20.0 cm;小麦/蚕豆间作(IW/IF),带幅 1.8 m,小麦带 0.9 m,种植 6 行,蚕豆带 0.9 m,种植 4 行。副区为施氮水平,分别为不施氮处理(N0)、施氮量 225 kg/hm<sup>2</sup>(N1)。氮肥 2/3 基施,1/3 小麦拔节期追施;重过磷酸钙 120 kg/hm<sup>2</sup>,全部基施。试验随机区组排列,重复 3 次,小区面积为 39.875 m<sup>2</sup>(5.500 m × 7.250 m)。蚕豆、小麦于 3 月 23 日同期播种。以小区出苗 50%计,小麦 4 月 3 日出苗,出苗后 10 d 为出苗期、20 d 为分蘖期、50 ~ 60 d 为拔节孕穗期、70 d 为开花期、90 d 为灌浆期,7 月 22 日收获;蚕豆 4 月 9 日出苗,出苗后 10 d 为出苗期、30 d 为分枝期、60 ~ 70 d 为开花期、80 d 为结荚期、90 d 为鼓粒期,8 月 13 日收获,两种作物共生期自 4 月 9 日至 7 月 22 日共 104 d。

### 1.4 样品采集及测量

共生期每 5 d 采集干物质 1 次,小麦每次取 3 行 20 cm,蚕豆每次取样 4 穴,样品采回后分离茎和叶。蚕豆取根称根瘤重,数根瘤数。样品茎、叶、果实分别在 105 °C 下烘 30 min 杀青后在 85 °C 下烘干至恒重,干样品称重后存于小袋中。作物完全成熟后,按小区单收计产。

### 1.5 数据分析

生长动态曲线模拟利用 Originpro 8.0 的 Logistic 方程模拟整个生育期作物的生长动态曲线<sup>[13]</sup>。

$$y = K / \{1 + \exp[r \times (T_{\max} - t)]\}$$

式中, $y$  表示作物生长至  $t$  天时的地上部生物量, $K$  表示地上部最大生物量, $r$  表示最初生长速率, $T_{\max}$  表示作物达到最大生长速率所需要的时间。当时间为  $T_{\max}$  时, $y = K/2$ ,此时作物达到最大生长速率( $R_{\max}$ ),且  $R_{\max} = rK/4$ 。对生长动态曲线函数关于时间进行求导,得出各处理作物的瞬时生长速率。对同一施氮量水平下单作小麦与单作蚕豆,间作小麦与间作蚕豆的瞬时生长速率进行求比,即为生长速率比。瞬时生长速率表示单位生长时间内地上部生物量的变化率。小麦/蚕豆生长速率比 = 小麦瞬时生长速率 / 蚕豆瞬时生长速率。

### 1.6 数据处理

用 Microsoft Excel 和 SAS 统计软件对数据进行整理和统计分析,用 Origin8.0 软件进行生长曲线拟合作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同氮水平小麦/蚕豆地上部生物量累积

运用 Logistic 方程对小麦 / 蚕豆间作体系地上生物量累积进行拟合, 各处理方程决定系数( $R^2$ )小麦 0.712 ~ 0.868、蚕豆 0.899 ~ 0.947, 各处理差异均不显著 ( $P>0.05$ )(表 1)。不同氮水平和种植模式对小麦、蚕豆的生长参数中种植模式、氮水平及各交互作用均无显著影响, 但间作施氮处理增加了蚕豆达到最大生长速率所需的时间。从图 1 看出, 2 种施氮水平下蚕豆、小麦地上部生物量累积变化趋势较一致。N1 处理的小麦生物量累积均高于 N0 处理, 其中 N1 处理中, 小麦苗期到拔节期 IWN1 处理高于 SWN1 处理, 从开花期之后 SWN1 处理逐渐高于 IWN1 处理; N0 处理中, 小麦苗期表现为 IWN0 处理大于 SWN0 处理, 拔节期之后 SWN0 逐渐超过 IWN0, 小麦最终生物量表现为 SWN1>IWN1>SWN0>IWN0, 说明在同等施氮量条件下单作的生物量高于间作, 间作体系随着蚕豆生长对小麦的竞争越来越强。

蚕豆单作生物量表现为 N1 处理高于 N0 处理, 间作受小麦竞争影响生物量累积低于单作, 其中分枝期、开花期 IFN0 处理的蚕豆生物量累积高于 IFN1 处理, 开花期之后 IFN1 处理逐渐高于 IFN0 处理, 至出苗后 100 d IFN0 处理又高于 IFN1 处理, 说明由于间作竞争和氮肥供应较少延长了蚕豆的生育期, 蚕豆最终生物量表现为 IFN0>IFN1>SFN1>SFN0, 可见间作体系对蚕豆的生物量累积有先竞争后恢复的影响。

### 2.2 不同氮水平小麦/蚕豆地上部生长速率

从两种作物瞬时生长速率可以更直观地看到作物生物量累积的状况 (图 2)。对于小麦来说, 施氮加速了小麦的生物量累积, N1 处理达到最大生长速率的时间较 N0 处理提前 5 d, 且 IWN1、SWN1 处理的最大生长速率均高于 SWN0、IWN0 处理。对于蚕豆来说, 间作小麦的竞争强度使蚕豆生长速率积累高峰后移, SFN1 和 SFN0 处理均早于 IFN0 和 IFN1 处理达到最大生长速率。

表 1 不同氮水平下小麦和蚕豆的 Logistic 参数

施氮量	种植 <sup>①</sup> 模式	小麦(W)					蚕豆(F)				
		$R^2$	$K$ /(g/m <sup>2</sup> )	$r$ /(×10 <sup>2</sup> /d)	$T_{max}$ /d	$R_{max}$ /(g/m <sup>2</sup> d)	$R^2$	$K$ /(g/m <sup>2</sup> )	$r$ /(×10 <sup>2</sup> /d)	$T_{max}$ /d	$R_{max}$ /(g/m <sup>2</sup> d)
N0	S	0.868 a	1 135 a	0.10 a	51.39 a	27.65 a	0.928 a	1 133 a	0.09 a	74.16 a	22.90 a
	I	0.712 a	1 091 a	0.14 a	53.78 a	36.25 a	0.916 a	1 289 a	0.07 a	82.69 a	21.88 a
N1	S	0.820 a	1 239 a	0.11 a	49.85 a	31.74 a	0.947 a	1 182 a	0.09 a	73.53 b	25.07 a
	I	0.777 a	1 116 a	0.12 a	46.39 a	32.01 a	0.899 a	1 261 a	0.07 a	82.72 a	23.12 a
P	施氮量	0.168	0.077	0.784	0.114	0.593	0.155	0.423	0.727	0.874	0.189
	种植模式	0.866	0.650	0.820	0.309	0.334	0.953	0.939	0.777	0.929	0.231
	施氮量*种植模式	0.081	0.562	0.499	0.900	0.196	0.128	0.420	0.167	0.036	0.289

①单作为 S, 间作为 I。

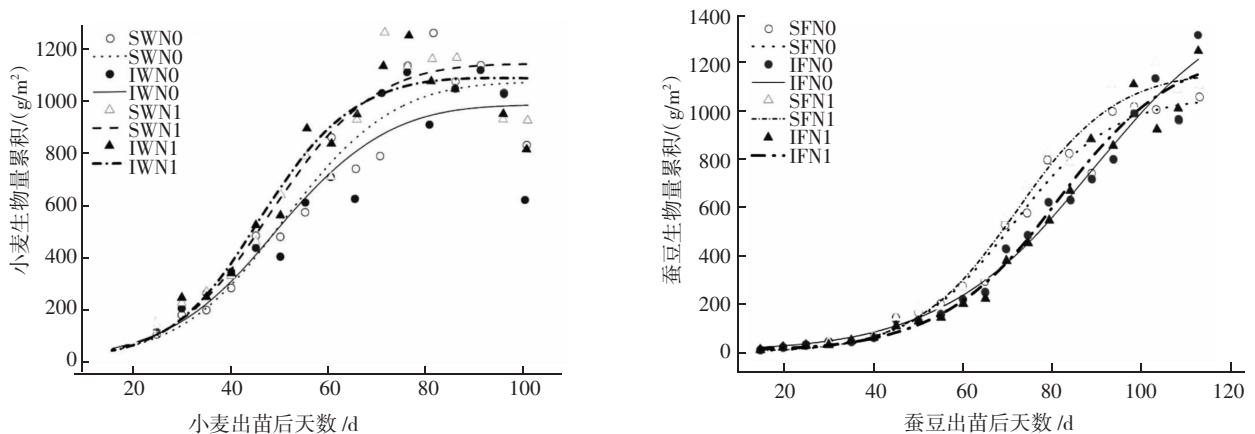


图 1 不同氮水平下小麦、蚕豆地上部生物量累积

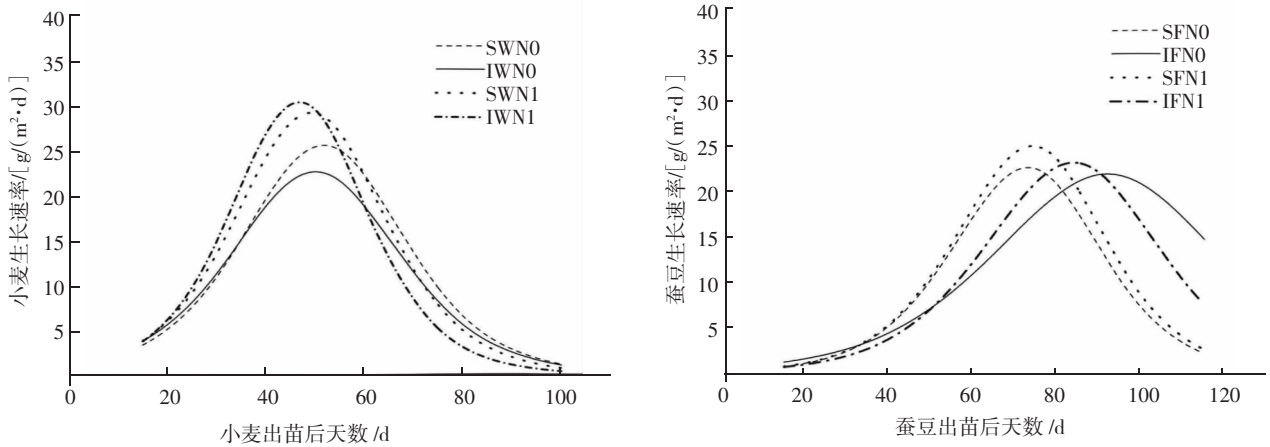


图2 不同氮水平下小麦、蚕豆地上部生长速率

### 2.3 小麦/蚕豆生长速率比

如图3所示,生长前期(从播种到出苗70 d左右)小麦/蚕豆生长速率比大于1,说明生长前期以小麦生长占主导地位,小麦灌浆收获期对蚕豆竞争降低,由于竞争恢复理论蚕豆生物量增加。不论单作还是间作,N1处理养分充足加速了小麦的生长,生长速率比均高于N0处理,2种氮水平下,SN0、SN1处理生长速率比均呈平缓下降趋势,因作物间的竞争积累,IN0、IN1处理的生长速率比均呈现出一个竞争恢复的抛物线趋势,前期小麦的竞争力相对较弱,苗期蚕豆的竞争力较强,随着生长时间推移,出苗35 d左右(小麦进入旺盛的营养生长阶段)有较强的竞争优势,出苗后70 d速率比出现拐点,此后小麦/蚕豆生长速率比小于1,蚕豆的生长速率增强而小麦灌浆收获生物量累积速率减弱。

### 2.4 不同施氮处理蚕豆地下部生物量动态变化

从蚕豆地下部生物量变化(图4、图5)可以看

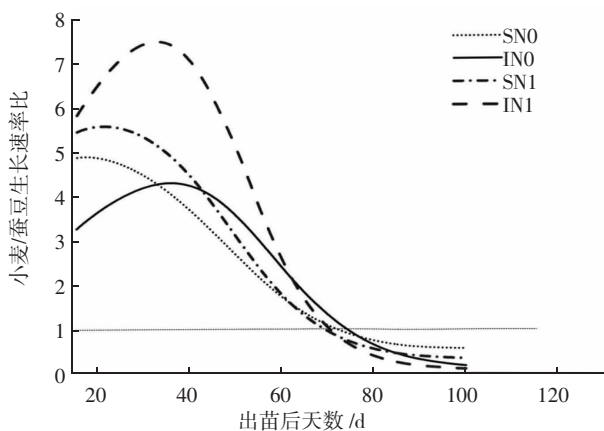


图3 不同氮水平下小麦与蚕豆地上部生长速率比

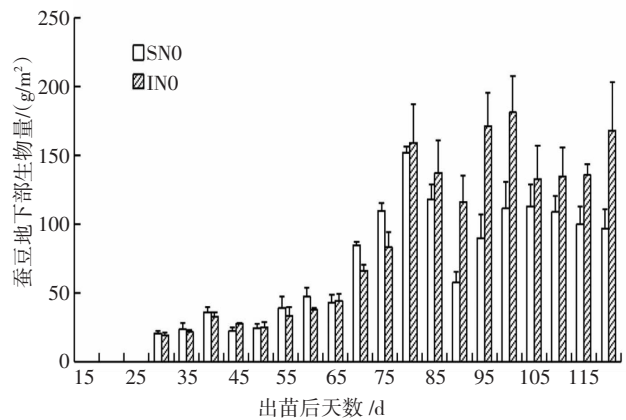


图4 N0处理蚕豆地下部生物量动态

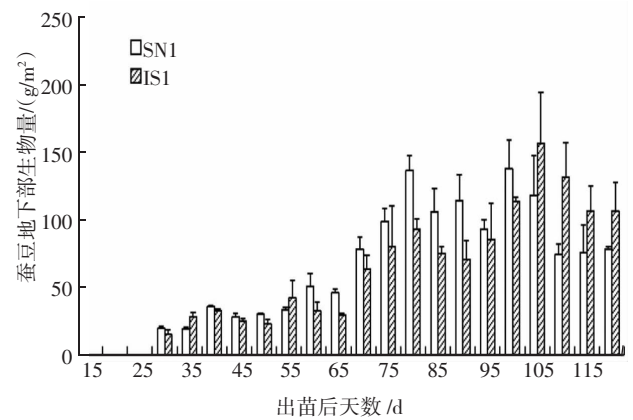


图5 N1处理蚕豆地下部生物量动态

出,2种施氮水平下,间作蚕豆地下部生物量均在生长后期超越了单作。IN0处理下蚕豆地下部生物量在出苗后80 d超过SN0处理,而IN1处理的地下部生物量在出苗后105 d超过SN1处理。另外,N0处理下蚕豆地下部生物量整体高于N1处理。从2种施氮水平下蚕豆整个生育期的平均根瘤数量(图6)可知,N1处理的平均根瘤数低于N0处

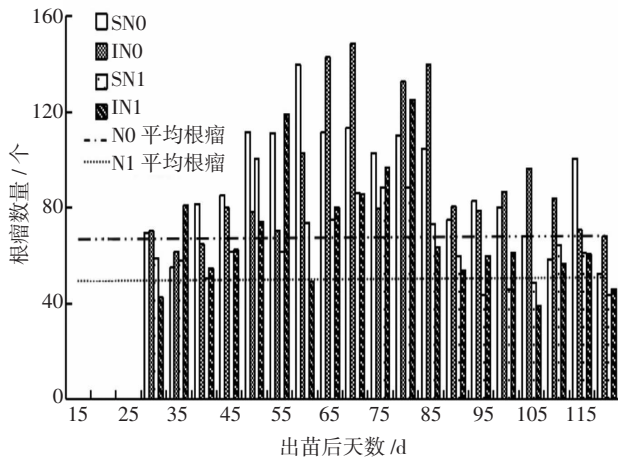


图 6 蚕豆单株根瘤数动态

理。说明在间作和不施氮的环境下, 能激发蚕豆的生物固氮效应, 促进蚕豆地下部生长和根瘤数量增多。

### 3 讨论与结论

相关研究表明, 间作体系中由于作物对资源的利用会发生竞争和补偿效应<sup>[6-7, 14]</sup>。在各种禾豆间作模式中, 小麦蚕豆间作的互作时间长, 两种作物的共生期超过总生育期的 80%, 是研究禾豆间作体系氮素营养竞争和互补的理想模式<sup>[9, 15]</sup>。本研究用 Logistic 方程估算了小麦和蚕豆在两种氮水平下在田间共生期的生长模式和关键生长参数, 呈现了单作与间作作物的生长差异, 对小麦/蚕豆间作时间、空间生态位差异的种间竞争和资源利用的研究具有重要意义<sup>[13-16]</sup>。间作体系的两种作物可以错峰利用资源, 提高养分利用效率。本试验中, 两种氮肥处理的小麦和蚕豆存在着不同的生长速率和生长峰, 小麦的竞争使蚕豆生长速率积累高峰后移。间作处理因作物间的竞争生长速率比均呈竞争恢复的抛物线趋势, 苗期蚕豆的竞争力较强, 随着生长时间推移, 小麦进入旺盛的营养生长阶段, 而出苗 70 d 后小麦生物量累积速率减弱而蚕豆的生长速率增强。瞬时生长速率是衡量作物竞争能力的关键属性, 反映了作物的生长潜力及对养分资源的利用能力<sup>[17]</sup>。本试验中小麦在生长中期瞬时生长速率比蚕豆高, 表明此时小麦在与蚕豆的间作体系中占主导地位, 证实了在小麦间作蚕豆体系中小麦处于竞争优势地位, 其对养分的吸收能力高于蚕豆。这与前人研究结果一致<sup>[1, 8, 18]</sup>, 与柏文恋等<sup>[13]</sup>在云南的研究不同,

但同样证实了虽然小麦、蚕豆株高相似, 共生期较长, 但他们对资源利用的能力不同使得生长曲线在不同时期存在差异。

由于间作竞争, 小麦的主导地位有时导致蚕豆间作生长速度降低。然而, 竞争和互补在生长中后期并存, 不断刺激蚕豆的生长。研究表明, 小麦根系的延展性较蚕豆根系更强, 因此小麦具有更强的吸收土壤氮的能力<sup>[14, 19-20]</sup>, 另一方面小麦间作蚕豆体系中的产量优势主要是种间氮营养生态位的分化, 土壤中有限的氮素水平限制了作物对氮的吸收利用, 间作优势降低, 但优势仍然存在。肖焱波等<sup>[21]</sup>研究发现, 小麦的根系竞争促进了与之间作的蚕豆共生固氮, 蚕豆通过生物固氮来吸收养分, 而减少了对土壤有效氮的吸收, 从而将土壤中的有效氮更多地留给小麦利用<sup>[16, 19-23]</sup>。增量施肥模式虽然使间作体系吸收了较多地氮素, 但过量的氮肥不利于氮素的有效利用<sup>[24]</sup>。本研究中间作和不施氮激发了蚕豆的生物固氮效应, 促进了蚕豆下部的生长和根瘤数的增加, 这表明生态系统中资源短缺时, 小麦和蚕豆间作对氮的互补利用, 使得单位资源的边际报酬达到最大化<sup>[25-28]</sup>。

本研究表明, 施氮和间作改变了小麦、蚕豆生物量的积累, 不论单作与间作, 施氮加速了小麦的生物量累积, 生长速率比均高于不施氮处理; 在小麦/蚕豆间作前期, 小麦有较强的氮肥利用优势, 进而对蚕豆的地上部和地下部生物量累积产生影响, 间作处理因作物间的竞争生长速率比均呈现竞争恢复的抛物线趋势, 2 种施肥处理的单作蚕豆均早于间作蚕豆达到最大生长速率, 小麦成熟期后对于蚕豆的竞争减小, 蚕豆的生长速率增强, 反映了作物的生长潜力及对养分资源的利用能力。相同种植模式下施氮处理对于蚕豆的生物量累积起关键因素, 间作和氮缺乏的环境下, 更能激发蚕豆的生物固氮效应, 促进蚕豆地下部生长和根瘤数量增多。这为小麦和蚕豆间作对有效资源的利用和节约氮肥提供了科学依据。

### 参考文献:

- [1] XIAO J, YIN X, REN J, 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.

- [2] FAN F L, ZHANG F S, SONG Y N, 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: 275–286.
- [3] 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]. *生态学杂志*, 2017, 28(12): 3985–3993.
- [4] BROKAW N, BUSING R T. Niche versus chance and tree diversity in forest gaps[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2000, 15(5): 183–188.
- [5] HAUGGAARD-NIELSEN H, AMBUS P, JENSEN E S. Interspecific competition, N use and interference with weeds in pea–barley intercropping[J]. *Field Crops Research*, 2001, 70(2): 101–109.
- [6] LI L, SUN J H, ZHANG F S, et al. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping: II.Recovery or compensation of maize and soybean after wheat harvesting[J]. *Field Crops Research*, 2001, 71(3): 173–181.
- [7] LI L, SUN J H, ZHANG F S, et al. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping I. Yield advantage and interspecific interactions on nutrients[J]. *Field Crops Research*, 2001, 71(2): 123–137.
- [8] 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: 227–238.
- [9] HAUGGAARD-NIELSEN H, GOODING M, AMBUS P, et al. Pea–barley intercropping for efficient symbiotic N<sub>2</sub>-fixation, soil N acquisition and use of other nutrients in European organic cropping systems[J]. *Field Crops Research*, 2009, 113(1): 64–71.
- [10] 吕越, 吴普特, 陈小莉, 等. 玉米/大豆间作系统的作物资源竞争[J]. *应用生态学报*, 2014(1): 139–146.
- [11] 赵西宁. 玉米/大豆间作系统的作物资源竞争[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(1): 139–146.
- [12] 雍太文, 杨文钰, 向达兵, 等. 小麦/玉米/大豆套作的产量、氮营养表现及其种间竞争力的评定[J]. *草业学报*, 2012, 21(1): 50–58.
- [13] 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.
- [14] LI L, SUN J H, ZHANG F S, et al. Root distribution and interactions between intercropped species[J]. *Oecologia*, 2006, 147: 280–290.
- [15] 王利立, 朱永永, 赵彦华, 等. 施氮和根间互作对密植大麦间作豌豆氮素利用的协同效应[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(2): 200–210.
- [16] 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, 2018.
- [17] INGERPUU N, KULL K, VELLAK K. Bryophyte vegetation in a wooded meadow: relationships with phanerogam diversity and responses to fertilisation[J]. *Plant Ecology*, 1998, 134: 163–17.
- [18] CORRE-HELLOU G, DIBET A, HAUGGAARD-NIELSEN H, et al. The competitive ability of pea–barley intercrops against weeds and the interactions with crop productivity and soil N availability[J]. *Field Crops Research*, 2011, 122(3): 264–272.
- [19] 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(自然科学版)*, 2017, 32(2): 350–357.
- [20] 张宝时, 李国权, 裴希谦, 等. 休闲期复种绿肥冬油菜对陇中旱地春小麦氮磷利用率和产量的影响[J]. *寒旱农业科学*, 2024, 3(10): 926–930.
- [21] 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(2): 267–271.
- [22] 余丽娜, 郑毅, 朱有勇. 小麦蚕豆间作中作物对氮的吸收利用[J]. *云南农业大学学报*, 2003(3): 256–258; 269.
- [23] 苏海鹏, 汤利, 刘自红, 等. 小麦蚕豆间作系统中小麦的氮同化物动态变化特征[J]. *麦类作物学报*, 2006, 26(6): 140–144.
- [24] 汤莹, 杨君林, 崔云玲, 等. 施肥对小麦/玉米带田养分吸收及土壤硝态氮累积的影响[J]. *寒旱农业科学*, 2022, 1(1): 83–87.
- [25] 肖焱波, 李隆, 张福锁. 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.
- [26] 陈远学. 小麦/蚕豆间作体系中种间相互作用与氮素利用、病害控制及产量形成的关系研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2007.
- [27] 任家兵, 张梦瑶, 肖靖秀, 等. 小麦/蚕豆间作提高间作产量的优势及其氮肥响应[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28(12): 1890–1900.
- [28] 吴鑫雨, 刘振洋, 李海叶, 等. 施氮和间作对蚕豆根瘤形成及氮素吸收累积的影响[J]. *作物杂志*, 2021(5): 120–127.