中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

不同供氮水平下玉米/大豆间作体系干物质 积累和氮素吸收动态模拟

王雪蓉，张润芝，李淑敏，许宁，牟尧，张春怡

引用本文:
王雪蓉, 张润芝, 李淑敏, 等. 不同供氮水平下玉米/大豆间作体系干物质 积累和氮素吸收动态模拟[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(9): 1354–1363.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190075

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

减量施氮与间作大豆对华南地区甜玉米 农田氮平衡的影响

Effect of nitrogen reduction and soybean intercropping on nitrogen balance in sweet maize fields in South China

中国生态农业学报. 2018, 26(11): 1643–1652 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180121

减氮对华南地区甜玉米//大豆间作系统 产量稳定性的影响

Effect of nitrogen reduction on yield stability of sweet maize//soybean inter– cropping system in South China

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(9): 1332–1343 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190129

玉米/大豆、玉米/花生间作对作物氮素 吸收及结瘤固氮的影响

Effects of maize/soybean and maize/peanut intercropping systems on crops nitrogen uptake and nodulation nitrogen fixation

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(8): 1183–1194 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.181055

减量施氮与间作模式对甜玉米AMF侵染和大豆结瘤及作物氮磷吸收的影响

Effects of reduced nitrogen application and intercropping on sweet corn AMF colonization, soybean nodulation and nitrogen and phosphorus absorption

中国生态农业学报. 2017, 25(8): 1139–1146 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170050

减量施氮与间作大豆对华南地区甜玉米连作农田 N2O 排放的影响

Effect of reduced N application and soybean intercropping on soil N2O emission in sweet corn fields in South China

中国生态农业学报. 2015(12): 1529–1535 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.150417

中国生态农业学报(中英文) 2019 年 9 月 第 27 卷 第 9 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Sep. 2019, 27(9): 1354−1363

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190075

王雪蓉, 张润芝, 李淑敏, 许宁, 牟尧, 张春怡. 不同供氮水平下玉米/大豆间作体系干物质积累和氮素吸收动态模拟[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(9): 1354−1363

WANG X R, ZHANG R Z, LI S M, XU N, MU Y, ZHANG C Y. Simulation of dry matter accumulation and nitrogen absorption in a maize/soybean intercropping system supplied with different nitrogen levels[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(9): 1354−1363

不同供氮水平下玉米/大豆间作体系干物质积累和氮素吸收动态模拟*

王雪蓉, 张润芝, 李淑敏**, 许 宁, 牟 尧, 张春怡

(东北农业大学资源与环境学院 哈尔滨 150030)

摘 要: 玉米/大豆间作具有一定的养分利用优势, 但是不同供氮水平对玉米/大豆间作体系干物质累积和氮素吸收的调控作用不同。本试验采用田间裂区设计, 运用 Logistic 模型分析, 模拟了 4 个氮水平下玉米/大豆间作作物干物质积累和氮素吸收的动态变化。结果表明, 玉米、大豆干物质累积和氮素吸收动态符合 Logistic 模型, 相关系数 R^2 均在 0.9 以上。在 N0(不施氮肥)、N1(180 kg·hm^{-2})、N2(240 kg·hm^{-2})和 N3(300 kg·hm^{-2})供氮水平时, 间作玉米最大生长速率($I_{max\text{-}B}$)分别比单作提高 34.2%、46.7%、25.9%和 25.1%, 而相应的供氮水平下, 大豆的 $I_{max\text{-}B}$ 分别降低 27.7%、30.3%、16.5%和 23.7%, 但整个间作系统的 $I_{max\text{-}B}$ 平均增加 32.1%; 玉米和大豆干物质的其他模拟参数与 $I_{max\text{-}B}$ 规律一致。氮素吸收动态与干物质积累表现出同步的变化特点, 在 N1 水平下, 单位面积间作玉米的氮素最大吸收量($K_{\text{-}N}$)、最大吸收速率($I_{max\text{-}N}$)和瞬时吸收速率($r_{\text{-}N}$)比相应单作分别提高 18.4%、48.9%和 25.8%, 而间作大豆的 $K_{\text{-}N}$、$I_{max\text{-}N}$ 和 $r_{\text{-}N}$ 值比单作处理分别降低 15.9%、29.9%和 16.69%, 整个间作系统氮素分别提高 0.4%、13.7%和 7.8%; 施氮水平对大豆 $r_{\text{-}N}$ 无显著性影响。间作显著地提高了氮素当量比(LER_N>1), 其中 N0 水平下 LER_N 值最高, 随着施氮量的增加, LER_N 有下降趋势。在本试验条件下, N2 供氮水平下玉米/大豆间作体系干物质积累量和氮素吸收量最高, 间作优势最明显。

关键词: 玉米/大豆间作; 干物质累积; 氮素吸收量; 间作优势; Logistic 模型

中图分类号: S344.2

文章编号: 2096-6237(2019)09-1354-10 **开放科学码(资源服务)标识码(OSID):**

Simulation of dry matter accumulation and nitrogen absorption in a maize/soybean intercropping system supplied with different nitrogen levels*

WANG Xuerong, ZHANG Runzhi, LI Shumin**, XU Ning, MU Yao, ZHANG Chunyi

(College of Resources and Environmental Sciences, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Maize/soybean intercropping has yield advantages to an extent. However, different nitrogen supply levels have different effects on dry matter accumulation and nitrogen uptake in the maize/soybean intercropping system. A field experiment with a split design and logistic model were used to simulate dynamic changes in dry matter accumulation and nitrogen uptake in a maize/soybean intercropping system supplied with four nitrogen levels. Simulation results showed that dry matter accu-

* 国家重点研发计划项目(2016YFD030020204)资助

** 通信作者: 李淑敏, 主要研究方向为作物营养与施肥。E-mail: lishumin113@126.com
王雪蓉, 主要研究方向为植物营养学。E-mail: 1647141854@qq.com

收稿日期: 2019-01-23 接受日期: 2019-05-08

* This study was supported by the National Key Research and Development Project of China (2016YFD030020204).

** Corresponding author, E-mail: lishumin113@126.com

Received Jan. 23, 2019; accepted May 8, 2019

mulation and nitrogen uptake dynamics in maize and soybean were consistent with the logistic model, with correlation coefficients (R^2) higher than 0.9 at the four nitrogen levels. The maximum growth rate ($I_{max\text{-}B}$) of intercropped maize compared with monoculture increased by 34.2%, 46.7%, 25.9% and 25.1% when the nitrogen supply levels were N0 (without N supply), N1 (180 kg·hm^{-2}), N2 (240 kg·hm^{-2}), and N3 (300 kg·hm^{-2}), respectively. The $I_{max\text{-}B}$ of the soybean decreased by 27.7%, 30.3%, 16.5%, and 23.7%, respectively. However, the average $I_{max\text{-}B}$ in the intercropping system was increased by32.1%. The other dry matter simulation parameters of maize and soybean were consistent with the $I_{max\text{-}B}$. Additionally, nitrogen uptake dynamics showed synchronous changes with dry matter accumulation. Under N1 treatment, the maximum nitrogen uptake ($K_{\text{-}N}$), maximum uptake rate ($I_{max\text{-}N}$), and instantaneous uptake rate ($r_{\text{-}N}$) of intercropped maize was 18.4%, 48.9%, and 25.8% higher than that of the monoculture, while the $K_{\text{-}N}$, $I_{max\text{-}N}$, and $r_{\text{-}N}$ of the intercropped soybean was 15.9%, 29.9%, and 16.69% lower than that of the monoculture, respectively. The simulation parameters of $K_{\text{-}N}$, $I_{max\text{-}N}$, and $r_{\text{-}N}$ in the intercropping system were 0.4%, 13.7%, and 7.8% higher than those of monoculture, respectively. Nitrogen supply had no significant effect on $r_{\text{-}N}$ of soybean. A significant advantage of nitrogen in the intercropping system was observed with nitrogen land equivalent ration (LER_N) > 1, and the LER_N value under N0 treatment was the highest. With the increase in nitrogen application, the LER_N exhibited a downward trend. In the present experiment, the highest dry matter accumulation and nitrogen uptake were observed under N2 treatment, which had obvious advantages for intercropping.

Keywords: Maize/soybean intercropping; Dry matter accumulation; Nitrogen uptake; Intercropping advantage; Logistic model

间作作为传统农业的精华，对于农业生产的可持续发展具有重要的作用。已有研究表明，选择合理的作物搭配进行间作，发挥种间促进作用，有利于间作体系生产力的提高[1]。比如在小麦(*Triticum aestivum* L.)/大豆[*Glycine max* (Linn.) Merr]间作[2]、蚕豆(*Vicia faba* L.)/玉米(*Zea mays* L.)间作[3]、玉米/大豆间作[4]等作物上都获得较高的产量，提高了作物土地利用效率。在众多的间作模式中，禾本科/豆科间作，尤其玉米/大豆间作具有明显的产量优势，并且已被大量研究所证实[5-6]。

但是不同的供氮水平下间作体系的养分利用效率和产量优势表现不同。王晓维等[7]在江西省进行了玉米/大豆间作和施氮对产量影响试验发现，与不施氮相比，施氮量 150 kg·hm^{-2} 处理显著地提高了春、秋两季间作玉米的产量(23.81%和 40.99%)。有研究表明，不同水氮处理可调控玉米/大豆间作群体内光能截获，提高了玉米叶片中叶绿素的含量，从而影响了间作玉米干物质累积和产量[8]。还有研究表明，间作可以显著地改善农作物的氮素营养，进而提高系统氮素吸收量[9]。小麦/玉米间作系统中小麦和玉米对氮素的吸收总量显著地高于相应单作小麦和玉米之和[10]。玉米/马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)间作研究表明[11]，相对于单作，在施氮量为 125 kg·hm^{-2} 水平下，间作体系对氮素的吸收量提高了 15%；间作在施氮量 375 kg·hm^{-2} 时，系统具有更高的养分利用效率，并且较单作可提高氮素利用效率 14.3%左右。由此可见，施用氮肥对间作体系干物质累积和养分的利用有调控作用。肖春华等[12]和何萍等[13]通过 Logistic 方程模拟发现，玉米氮素的积累动态与干物质积累动态基本同步。柏文恋等[14]运用 Logistic 分析模拟了小麦/蚕豆间作和不同磷水平下作物生长动态及模式，结果表明，与单作相比，间作提高了小麦的最大生长速率和瞬时生长速率，并且小麦、蚕豆的最大吸收速率受施肥的影响。但是不同氮水平对玉米/大豆间作体系中干物质累积和氮素利用的影响等方面还缺乏详细的报道。

本研究通过设置 4 个供氮水平，利用 Logistic 模型模拟分析在不同氮素供应水平下，玉米/大豆间作体系玉米、大豆地上部分干物质累积和氮素吸收的动态变化，探讨不同供氮水平下间作与单作对玉米、大豆氮素利用效率的影响，比较 Logistic 模型中各参数在单作与间作之间的差异。为玉米/大豆间作体系优化氮肥用量提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验设计

试验设在黑龙江省哈尔滨市阿城区东北农业大学试验基地。供试土壤为典型黑土，耕层土壤有机质含量 29.8 g·kg^{-1}，全氮 1.47 g·kg^{-1}，碱解氮 125 mg·kg^{-1}，有效磷 29.1 mg·kg^{-1}，有效钾 122.55 mg·kg^{-1}，pH 6.11，土壤容重为 1.23 g·cm^{-3}。采用裂区设计，设置 4 个氮水平和 3 种种植模式。种植模式分别为单作玉米(M)、单作大豆(S)、玉米/大豆间作[间作玉米(IM)、间作大豆(IS)]。单作玉米设 N0(0 kg·hm^{-2})、N1(180 kg·hm^{-2})、N2(240 kg·hm^{-2})、N3(300 kg·hm^{-2})4 个施氮水平，单作大豆设 N0(0 kg·hm^{-2})、N1(40 kg·hm^{-2})、N2(80 kg·hm^{-2})、N3(120 kg·hm^{-2})4 个施氮水平。玉米大豆为 2∶2 间作模式即 2 行玉米间作 2 行大豆，相应的肥料用量为单作的一半，所以间作模式下 4 个施氮水平分别为不施氮肥、施氮

为 110 kg·hm^{-2}、160 kg·hm^{-2}、210 kg·hm^{-2}(分别记作 N0、N1、N2、N3); 总共 12 个处理, 每个处理 3 次重复, 共计 36 个小区, 每个小区面积为 48 m^2(10 m×4.8 m), 小区间有 0.6 m 宽的山脊隔开。试验种植的玉米品种为‘先玉 335’, 大豆品种为‘东农 252’。玉米的行距为 60 cm、株距为 17 cm, 密度为 9.8 万株·hm^{-2}。大豆行距为 60 cm、株距为 8.5 cm, 密度为 19.6 万株·hm^{-2}。间作模式下玉米和大豆行距、株距与单作一致, 种植密度相同。间作模式为两行玉米与两行大豆间作组成一个间作条带, 每个小区有 2 个间作条带。

所有处理基肥氮素用量为 0 kg(N)·hm^{-2}、40 kg(N)·hm^{-2}、80 kg(N)·hm^{-2}、120 kg(N)·hm^{-2}, 采用尿素作为氮素肥料; 各处理的磷、钾施用量一致, 磷施用量为 120 kg·hm^{-2}, 采用重过磷酸钙, 钾施用量为 100 kg·hm^{-2}, 采用硫酸钾, 于玉米和大豆播种前一天施入各处理小区, 各处理其余的氮肥于玉米大喇叭口期追施。2017 年 5 月 8 日玉米和大豆同时进行播种。

1.2 样品采集方法和测定方法

分别在玉米出苗后的 34 d(出苗期)、48 d(拔节期)、70 d(抽雄期)、99 d(灌浆期)和 126 d(成熟期), 以及大豆出苗后的 40 d(苗期)、54 d(开花期)、76 d(结荚期)、109 d(鼓粒期)、132 d(成熟期)在取样区进行随机取样, 每个小区 8 根垄, 其中 4 条垄为取样区。玉米样品在每次采样时随机抽取 3 株, 大豆样品每次随机抽取 5 株, 收获植株地上部分带回实验室。先将样品放置在 105 ℃烘箱杀青 30 min, 然后在 80 ℃条件下烘至恒重称重, 然后将样品粉碎后供植株含氮量的测定。样品含氮量采用凯氏定氮法测定。

1.3 作物干物质累积以及氮素吸收动态模拟方法

本试验采用 Logistic 模型模拟不同供氮水平下玉米/大豆间作中玉米和大豆干物质累积曲线以及氮素吸收动态变化的过程。利用 Logistic 模型模拟作物从出苗到收获的生长以及氮素吸收动态曲线, 公式如下[15]:

$$Y_t = \frac{K}{1+\exp[r\times(t_{\max}-t)]} \tag{1}$$

干物质积累曲线: Y_t(×10^3 kg·hm^{-2})表示在生长季节作物于第 t 天在单位面积上的生物累积量, K(×10^3 kg·hm^{-2})代表最大生物量, r(d^{-1})代表瞬时生长速率, $t_{\max}$(d)代表达到最大生长速率需要的时间。$I_{\max}=r\times K/4$代表作物最大瞬时增长率。

氮素吸收动态曲线: Y_t(kg·hm^{-2})表示在生长季节作物于第 t 天在单位面积上吸收的氮素总量, K(kg·hm^{-2})代表氮素最大吸收量, r(d^{-1})代表作物氮素瞬时吸收速率, $t_{\max}$(d)代表氮素达到最大吸收速率需要的时间。$I_{\max}=r\times K/4$代表作物氮素最大瞬时吸收率。

1.4 氮素吸收量的比较

计算间作系统氮素吸收量相对于单作的变化(ΔN)[16]:

$$\Delta N = \left(\frac{N_{\mathrm{t}}}{F_{\mathrm{m}}\times N_{\mathrm{m}}+F_s\times N_s}-1\right)\times 100\% \tag{2}$$

式中: N_{t}为间作中玉米和大豆的总吸氮量, N_{m}和 N_{s}分别为单作玉米和单作大豆的吸氮量; F_{m}和 F_{s}分别为间作中玉米和大豆的比例, 在本试验中 F_{m}、F_{s}为 0.5。ΔN>0, 表示相对于单作, 间作的氮吸收量增加; ΔN<0, 表示相对于单作, 间作的氮吸收量减少。

1.5 氮素利用效率的比较

养分利用效率分为经济产量养分利用效率和生物学产量养分利用效率[16]。间作相对单作的经济产量氮素利用效率变化(ΔNUE)采用下式计算:

$$\Delta\mathrm{NUE} = \left(\frac{Y_{\mathrm{t}}/N_{\mathrm{t}}}{\dfrac{F_{\mathrm{m}}\times Y_{\mathrm{m}}}{N_{\mathrm{m}}}+\dfrac{F_{\mathrm{s}}\times Y_{\mathrm{s}}}{N_{\mathrm{s}}}}-1\right)\times 100\% \tag{3}$$

式中: Y_{t}表示间作籽粒总产量; N_{t}表示间作总吸氮量; Y_{m}、Y_{s}分别表示在单作中玉米、大豆的籽粒产量; N_{m}、N_{s}分别表示单作中玉米、大豆的吸氮量; F_{m}和 F_{s}分别为间作中玉米和大豆的比例, 本试验中 F_{m}、F_{s}为 0.5。ΔNUE 的正负反映间作氮素利用效率相对于单作加权平均的增加或减少, 绝对值大小指示增减的幅度。

生物学产量氮素利用效率计算方式与其相似, 只需将经济学产量都替代为生物学产量即可。

1.6 氮素当量比

定义玉米在间作和单作中吸氮量分别为 A_{im} 和 A_{m}, 相应大豆分别为 A_{is}和 A_{s}, F_{m}和 F_{s}分别为间作中玉米和大豆的比例(0.5), 则氮素当量比($\mathrm{LER_N}$)的计算公式[17]为:

$$\mathrm{LER_N} = (A_{\mathrm{im}}/A_{\mathrm{m}})\times F_{\mathrm{m}} + (A_{\mathrm{is}}/A_{\mathrm{s}})\times F_{\mathrm{s}} \tag{4}$$

1.7 数据分析

采用 OriginPro 8 软件的 Slogistic1 程序估算。采用 SPSS 22.0 软件进行分析, 双因素方差分析多重比较级采用最小显著差异法。

2 结果与分析

2.1 不同供氮水平玉米干物质积累和关键生长参数

由图 1 可见, 不同供氮水平下单、间作玉米的生长动态符合 Logistic 模型, 模拟的相关系数(R^2)为 0.986~0.999(P<0.001)。模拟结果表明不同供氮水平下单、间作玉米的生长曲线参数有显著性差异(表

1)。氮水平、间作模式及其交互作用对玉米的单位面积最大干物质量($K_{\text{-B}}$)、达到最大生长速度所需时间($t_{\text{max-B}}$)、瞬时生长速率($r_{\text{-B}}$)以及最大生长速率($I_{\text{max-B}}$)具有显著影响。

玉米干物质积累 $I_{\text{max-B}}$ 与 $K_{\text{-B}}$ 表现出相同的变化趋势。玉米 $K_{\text{-B}}$ 和 $I_{\text{max-B}}$ 主要受供氮水平的影响, 在 4 个供氮水平中, N2 处理的玉米 $K_{\text{-B}}$ 以及 $I_{\text{max-B}}$ 值显著高于 N0、N1 处理, 施氮量最高的 N3 处理的 $K_{\text{-B}}$ 以及 $I_{\text{max-B}}$ 值低于 N2 处理。不同供氮水平下, 间作种植模式可以显著地提高玉米 $K_{\text{-B}}$ 和 $I_{\text{max-B}}$, 且间作在 N0、N1、N2 和 N3 水平下玉米的 $I_{\text{max-B}}$ 分别提高 34.2%、46.7%、25.9%和 25.1%, 其中 N2IM 处理 $K_{\text{-B}}$ 达到最大值, 并与其他处理间具有显著差异。不同供氮水平下, 间作玉米 $t_{\text{max-B}}$ 均显著少于单作玉米, 并且 N2、N3 水平相对于 N1 平均缩短 3~4 d, 其中 N2IM 处理的玉米在播种后 84 d 达到 $I_{\text{max-B}}$。间作玉米 $r_{\text{-B}}$ 明显大于单作, 且玉米于 N3 水平下 $r_{\text{-B}}$ 最高, 并且和其他氮水平之间差异显著。

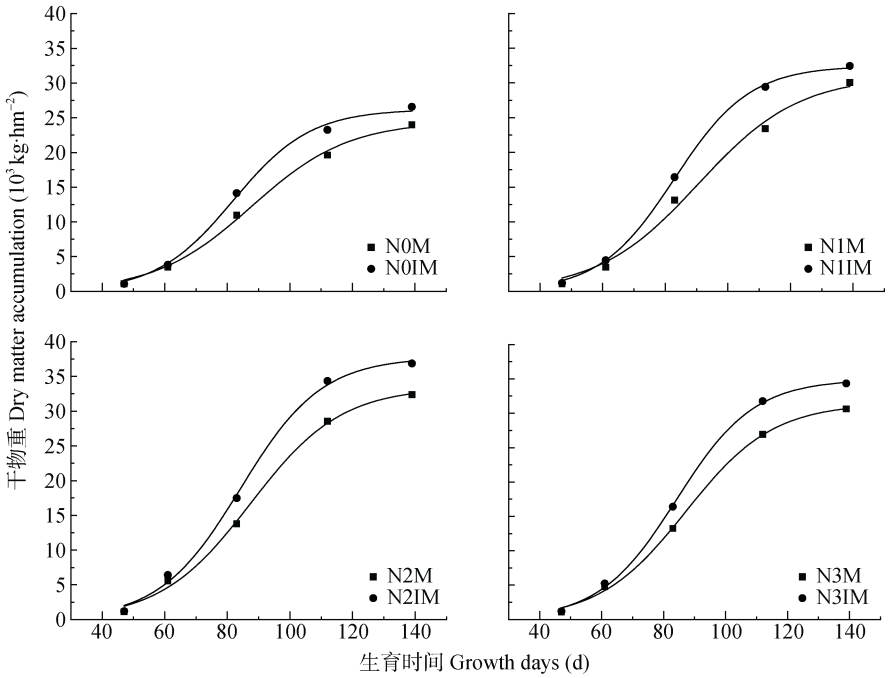

图 1　不同供氮水平下单作玉米和与大豆间作的玉米的干物质积累动态

Fig. 1　Dynamics of dry matter accumulation of maize monocultured and intercropped with soybean at different N levels

M 和 IM 分别代表单作玉米和与大豆间作的玉米; N0、N1、N2 和 N3 代表施氮量分别为 0 kg·hm^{-2}、180 kg·hm^{-2}、240 kg·hm^{-2}、320 kg·hm^{-2}。M and IM represent monocultured maize and intercropped maize. N0, N1, N2 and N3 respectively represent N supply levels of 0 kg·hm^{-2}, 180 kg·hm^{-2}, 240 kg·hm^{-2} and 320 kg·hm^{-2}.

2.2　不同供氮水平大豆干物质积累和关键生长参数

氮水平以及单间作种植模式下, 大豆的生长曲线符合 Logistic 模型(图 2、表 2), 模拟的相关系数(R^2)为 0.990~0.999(P<0.001)。从图 2 可以得出, 大豆生育初期生长迅速, 然后增长缓慢并于成熟时停止。因此, 大豆地上部分生物积累量逐渐升高, 且在结荚期积累速度较快。4 个供氮水平中, N2 水平大豆的干物质积累量明显地高于 N0、N1、N3 水平的积累。

如表 2 所示, 不同处理下大豆的干物质积累曲线参数具有差异。其中, 氮水平、间作种植模式对大豆单位面积最大干物质量($K_{\text{-B}}$)、达到最大生长速度所需时间($t_{\text{max-B}}$)以及最大生长速率($I_{\text{max-B}}$)有显著影响。相对于单作, 间作在 N0、N1、N2 和 N3 水平下大豆的 $I_{\text{max-B}}$ 分别降低 27.7%、30.3%、16.5%和 23.7%。N2S 处理 $K_{\text{-B}}$ 最高, 为 10.6×10^3 kg·hm^{-2}, 而 N0IS 处理 $K_{\text{-B}}$ 最低, 为 6.7×10^3 kg·hm^{-2}。施氮量显著地影响大豆的关键生长参数, 相较于 N0 水平, N2、N3 水平下, 单作大豆 $K_{\text{-B}}$ 值分别提高 14.43%和 9.28%。间作显著地缩短大豆 $t_{\text{max-B}}$, 且间作大豆在出苗 71 d 左右达到 $I_{\text{max-B}}$。氮水平以及间作种植模式对大豆瞬时生长速率($r_{\text{-B}}$)无显著影响。

2.3　不同氮水平玉米氮素吸收和关键吸收参数

从表 3 可知, 玉米对氮素的吸收动态与干物质累积同步, 也符合 Logistic 模型, 其相关系数(R^2)为 0.950~0.995(P<0.001)。同一种植模式下, 通过对玉米氮素吸收曲线在不同氮水平下的比较可知, 单、

表 1 不同供氮水平下单作玉米和与大豆间作的玉米的干物质累积的 Logistic 函数参数

Table 1 Dry matter accumulation parameters estimated by Logistic function of maize monocultured and intercropped with soybean at different N levels

处理 Treatment	最大干物质积累量($K_{\text{-B}}$) Maximum dry matter accumulation ($\times10^3$ kg·hm^{-2})	达到最大生长速率需要的时间($t_{\text{max-B}}$) Time to maximum dry matter accumulation (d)	瞬时生长速率($r_{\text{-B}}$) Instantaneous dry matter accumulation rate (g·hm^{-2}·d^{-1})	最大瞬时生长率($I_{\text{max-B}}$) Maximum instantaneous dry matter accumulation rate (kg·hm^{-2}·d^{-1})
N0M	24.5±0.3dB	87.8±0.7cA	64.6±2.0bB	395.1±7.5dB
N0IM	26.2±0.1dA	81.9±0.1cB	80.9±0.5bA	530.1±4.0dA
N1M	31.3±0.3cB	90.8±0.6aA	58.8±1.3bB	460.6±6.3cB
N1IM	32.5±0.2cA	83.0±0.2aB	83.3±2.0bA	675.6±3.1cA
N2M	33.4±0.2aB	87.4±0.6bA	69.1±1.1bB	577.9±5.9aB
N2IM	37.7±0.4aA	84.2±0.4bB	77.1±0.5bA	727.7±3.2aA
N3M	31.5±0.3bB	87.2±0.6bA	71.2±3.2aB	559.7±5.0bB
N3IM	34.9±0.4bA	84.2±0.2bB	80.2±0.5aA	699.6±3.2bA
氮水平 N level (N)	**	**	**	**
间作方式 Planting pattern (P)	**	**	**	**
氮水平×间作方式 N × P	**	**	**	**

不同大写字母表示在同一供氮水平不同种植模式间差异显著(P<0.05), 不同小写字母表示同一种植模式不同供氮水平间差异显著(P<0.05)。**表示在 P<0.01 水平差异显著。M 和 IM 分别代表单作玉米和与大豆间作的玉米; N0、N1、N2 和 N3 代表施氮量分别为 0 kg·hm^{-2}、180 kg·hm^{-2}、240 kg·hm^{-2}、320 kg·hm^{-2}。Different capital letters mean significant differences between monoculture and intercropping at 0.05 level at the same N level. Different lowercase letters mean significant differences among different N levels at 0.05 level in the same planting pattern. ** shows significant differences at 0.01 level. M and IM represent monocultured maize and intercropped maize. N0, N1, N2 and N3 respectively represent N levels of 0 kg·hm^{-2}, 180 kg·hm^{-2}, 240 kg·hm^{-2} and 320 kg·hm^{-2}.

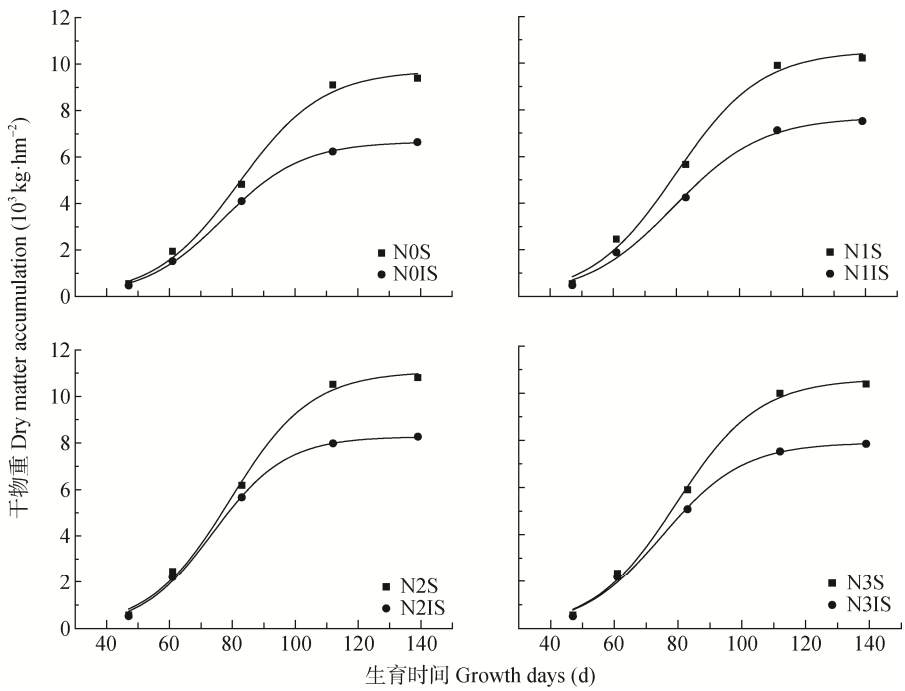

图 2 不同供氮水平下单作大豆和与玉米间作的大豆的干物质积累动态

Fig. 2 Dynamics of dry matter accumulation of soybean monocultured and intercropped with maize at different N levels

S 和 IS 分别代表单作大豆和与玉米间作的大豆; N0、N1、N2 和 N3 代表施氮量分别为 0 kg·hm^{-2}、40 kg·hm^{-2}、80 kg·hm^{-2}、120 kg·hm^{-2}。M and IM represent monocultured soybean and intercropped soybean. N0, N1, N2 and N3 represent N levels of 0 kg·hm^{-2}, 40 kg·hm^{-2}, 80 kg·hm^{-2} and 120 kg·hm^{-2}, respectively.

表 2　不同供氮水平下单作大豆和与玉米间作的大豆干物质累积 Logistic 函数参数

Table 2　Dry matter accumulation parameters of soybean estimated by Logistic function of soybean monocultured and intercropped with maize at different N levels

处理 Treatment	最大干物质积累量 ($K_{\text{-B}}$) Maximum dry matter accumulation ($\times 10^3$ kg·hm^{-2})	达到最大生长速率需要的时间($t_{\text{max-B}}$) Time to maximum dry matter accumulation (d)	瞬时生长速率($r_{\text{-B}}$) Instantaneous dry matter accumulation rate (g·hm^{-2}·d^{-1})	最大瞬时生长率($I_{\text{max-B}}$) Maximum instantaneous dry matter accumulation rate (kg·hm^{-2}·d^{-1})
N0S	9.7±0.1cA	82.0±1.0aA	75.1±3.0abA	182.7±6.3cA
N0IS	6.7±0.2cB	77.0±1.3aB	79.4±0.8abA	132.1±4.2cB
N1S	10.5±0.1bA	79.8±1.0aA	74.7±5.5bA	196.5±4.6bcA
N1IS	7.7±0.1bB	79.2±0.2aB	71.3±3.3bA	137.1±5.0bcB
N2S	11.1±0.1aA	79.1±1.0bA	78.6±3.8aA	217.6±4.3aA
N2IS	8.3±0.2aB	73.8±1.0bB	87.7±2.6aA	181.6±3.1aB
N3S	10.6±0.2bA	79.4±0.9bA	77.1±3.4abA	204.6±5.2bA
N3IS	7.9±0.2bB	75.1±0.5bB	78.9±3.1abA	156.1±3.9bB
氮水平 N level (N)	**	**	ns	**
间作方式 Planting pattern (P)	**	**	ns	**
氮水平×间作方式 N × P	ns	**	ns	ns

不同大写字母表示在同一供氮水平不同种植模式间差异显著(P<0.05), 不同小写字母表示同一种植模式不同供氮水平间差异显著(P<0.05)。ns 和**分别表示差异不显著和在 P<0.01 水平差异显著。S 和 IS 分别代表单作大豆和与玉米间作的大豆; N0、N1、N2 和 N3 代表施氮量分别为 0 kg·hm^{-2}、40 kg·hm^{-2}、80 kg·hm^{-2}、120 kg·hm^{-2}。Different capital letters mean significant differences between monoculture and intercropping at 0.05 level at the same N level. Different lowercase letters mean significant differences among different N levels at 0.05 level in the same planting pattern. ns and ** mean not significant difference and significant differences at P < 0.01, respectively. S and IS represent monocultured soybean and intercropped soybean. N0, N1, N2 and N3 respectively represent N levels of 0 kg·hm^{-2}, 40 kg·hm^{-2}, 80 kg·hm^{-2} and 120 kg·hm^{-2}.

表 3　不同供氮水平下单作玉米和与大豆间作的玉米的氮素吸收 Logistic 函数参数

Table 3　Parameters of N absorption Logistic functions of maize monocultured and intercropped with soybean at different N levels

处理 Treatment	Logistic 方程 Logistic function	氮素最大吸收量 ($K_{\text{-N}}$) Maximum nitrogen uptake (kg·hm^{-2})	氮素达到最大吸收速率需要的时间 ($t_{\text{max-N}}$) Time to maximum nitrogen absorption (d)	氮素瞬时吸收速率 ($r_{\text{-N}}$) Instantaneous nitrogen absorption rate (g·hm^{-2}·d^{-1})	氮素最大瞬时吸收率 ($I_{\text{max-N}}$) Maximum instantaneous nitrogen absorption rate (kg·hm^{-2}·d^{-1})
N0M	$Y_t = 221.5/\{1+\exp[86.9\times(74.9-t)]\}$	221.5±5.0dB	74.9±1.5bA	86.9±0.5aB	4.8±0.6bB
N0IM	$Y_t = 260.3/\{1+\exp[103.1\times(72.0-t)]\}$	260.3±0.9dA	72.0±0.5bB	103.1±2.4aA	6.7±0.1bA
N1M	$Y_t = 290.9/\{1+\exp[79.5\times(75.4-t)]\}$	290.9±6.7cB	75.4±0.4babA	79.5±0.6abB	5.8±0.1aB
N1IM	$Y_t = 344.3/\{1+\exp[100.1\times(72.6-t)]\}$	344.3±5.9cA	72.6±0.9abB	100.1±3.2abA	8.6±0.6aA
N2M	$Y_t = 343.2/\{1+\exp[76.6\times(75.3-t)]\}$	343.2±2.6aB	75.3±1.2aA	76.6±1.8cB	6.6±0.1aB
N2IM	$Y_t = 421.6/\{1+\exp[77.5\times(74.1-t)]\}$	421.6±2.6aA	74.1±0.2aB	77.5±2.5cA	8.2±0.2aA
N3M	$Y_t = 316.7/\{1+\exp[80.2\times(76.2-t)]\}$	316.7±6.8bB	76.2±0.5aA	80.2±1.3bcB	6.4±0.2aB
N3IM	$Y_t = 373.9/\{1+\exp[86.7\times(73.8-t)]\}$	373.9±5.7bA	73.8±0.1aB	86.7±1.7bcA	8.1±0.2aA
氮水平 N level (N)		**	*	**	**
间作方式 P Planting pattern (P)		**	**	**	**
氮水平×间作方式 N × P		**	ns	*	*

不同大写字母表示在同一供氮水平不同种植模式间差异显著(P<0.05), 不同小写字母表示同一种植模式不同供氮水平间差异显著(P<0.05)。ns 和*、**分别表示差异不显著和在 P<0.05 和 P<0.01 水平差异显著。M 和 IM 分别代表单作玉米和与大豆间作的玉米; N0、N1、N2 和 N3 代表施氮量分别为 0 kg·hm^{-2}、180 kg·hm^{-2}、240 kg·hm^{-2}、300 kg·hm^{-2}。Different capital letters mean significant differences between monoculture and intercropping at 0.05 level at the same N level. Different lowercase letters mean significant differences among different N levels at 0.05 level in the same planting pattern. ns, * and ** mean not significant difference, significant differences at P < 0.05 and P < 0.01, respectively. M and IM represent monocultured maize and intercropped maize. N0, N1, N2 and N3 respectively represent N levels of 0 kg·hm^{-2}, 180 kg·hm^{-2}, 240 kg·hm^{-2}, 300 kg·hm^{-2}.

间作之间玉米氮素吸收状况的关键参数有显著差异。氮水平、间作模式以及交互作用对玉米的氮素最大积累量($K_{\text{-N}}$)、氮素瞬时吸收速率($r_{\text{-N}}$)和氮素最大瞬时吸收率($I_{\text{max-N}}$)具有显著性影响。间作种植相

对于单作显著地提高了玉米 $K_{\text{-N}}$，其中，N0IM 处理>N0M 处理，N1IM 处理>N1M 处理，N2IM 处理>N2M 处理，N3IM 处理>N3M 处理；玉米在 N2IM 处理下对氮素的吸收量最高，达 421.6 kg·hm^{-2}，与其他氮素水平之间有显著差异；N0IM 处理下玉米对氮素吸收量最低，为 260.3 kg·hm^{-2}。玉米 $I_{\text{max-N}}$ 与 $K_{\text{-N}}$ 表现出了相同的变化趋势。在 N1 水平下，间作玉米 $K_{\text{-N}}$、$I_{\text{max-N}}$ 和 $r_{\text{-N}}$ 比相应单作分别提高 18.4%、48.9%和 25.8%。

氮水平、间作模式对玉米达到最大生育所需时间($t_{\text{max-N}}$)具有显著影响，但是二者之间的交互作用不明显。间作模式显著地缩短了玉米 $t_{\text{max-N}}$，其中，间作相对于单作，$t_{\text{max-N}}$ 缩短 2~3 d，并且在播种后 73 d 左右达到 $I_{\text{max-N}}$。

2.4 不同供氮水平大豆氮素吸收和关键吸收参数

从 Logistic 模型对大豆氮素吸收曲线拟合所得的各参数值(表 4)比较可知，各氮素吸收曲线拟合的相关性都非常高，R^2 的值均在 0.98(P<0.001)以上。氮水平、种植模式以及交互作用对大豆氮素最大吸收量($K_{\text{-N}}$)具有显著性影响。相对于单作，间作模式显著地降低大豆 $K_{\text{-N}}$ 值，施氮量在 N0、N1、N2 和 N3 水平下，间作大豆 $K_{\text{-N}}$ 值分别降低 41%、16%、24%和 27%，其中 N2S 处理的氮素积累量达 354.0 kg·hm^{-2}，并且相较于 N0S，N2S 处理 $K_{\text{-N}}$ 值提高 25%。氮水平、种植模式对大豆氮素最大瞬时吸收率($I_{\text{max-N}}$)有显著性影响，但是二者之间无交互作用。间作种植的大豆 $I_{\text{max-N}}$ 比单作有所降低，其中 N2IS 处理 $I_{\text{max-N}}$ 达 3.7 kg·hm^{-2}·d^{-1}，相较于 N2S 处理，大豆 $I_{\text{max-N}}$ 降低 29%。氮水平显著地影响了大豆达到氮素最大积累量所用的时间($t_{\text{max-N}}$)，其中 N2 水平下大豆所需时间最短，与 N0 处理间无显著性差异，与 N1 处理之间差异显著，间作模式对 $t_{\text{max-N}}$ 没有显著影响。间作模式对大豆氮素瞬时吸收速率($r_{\text{-N}}$)的影响显著，间作降低大豆的 $r_{\text{-N}}$，氮水平对大豆 $r_{\text{-N}}$ 几乎没有显著影响，在 N1 水平下，间作大豆的 $K_{\text{-N}}$、$I_{\text{max-N}}$ 和 $r_{\text{-N}}$ 值比单作处理分别降低 15.9%、29.9%和 16.69%。

表 4 不同供氮水平下单作大豆和与玉米间作的大豆的氮素吸收 Logistic 函数参数

Table 4 Parameters of N absorption Logstic functions of soybean monocropped and intercropped with maize at different N levels

处理 Treatment	Logistic 方程 Logistic function	氮素最大吸收量($K_{\text{-N}}$) Maximum nitrogen uptake (kg·hm^{-2})	氮素达到最大吸收速率需要的时间($t_{\text{max-N}}$) Time to maximum nitrogen absorption (d)	氮素瞬时吸收速率($r_{\text{-N}}$) Instantaneous nitrogen absorption rate (g·hm^{-2}·d^{-1})	氮素最大瞬时吸收率($I_{\text{max-N}}$) Maximum instantaneous nitrogen absorption rate (kg·hm^{-2}·d^{-1})
N0S	$Y_t = 283.3/\{1+\exp[63.5\times(92.3-t)]\}$	283.3±5.1bA	92.3±2.2bA	63.5±4.1aA	4.5±0.2cA
N0IS	$Y_t = 219.9/\{1+\exp[52.5\times(95.0-t)]\}$	219.9±1.4bB	95.0±2.4bA	52.5±2.6aB	2.9±0.2cB
N1S	$Y_t = 319.7/\{1+\exp[58.5\times(91.6-t)]\}$	319.7±2.7aA	91.6±0.7aA	58.5±2.2bA	4.7±0.2bA
N1IS	$Y_t = 268.8/\{1+\exp[48.7\times(98.8-t)]\}$	268.8±5.4aB	98.8±4.3aA	48.7±3.7bB	3.3±0.1bB
N2S	$Y_t = 354.0/\{1+\exp[59.2\times(91.0-t)]\}$	354.0±1.4aA	91.0±0.4bA	59.2±4.9abA	5.2±0.4aA
N2IS	$Y_t = 270.8/\{1+\exp[54.6\times(88.8-t)]\}$	270.8±4.3aB	88.8±3.6bA	54.6±3.2abB	3.7±0.2aB
N3S	$Y_t = 344.2/\{1+\exp[55.7\times(93.6-t)]\}$	344.2±1.1aA	93.6±3.7abA	55.7±5.2bA	4.8±0.1bA
N3IS	$Y_t = 249.8/\{1+\exp[53.2\times(90.5-t)]\}$	249.8±3.3aB	90.5±3.2abA	53.2±5.6bB	3.3±0.2bB
氮水平 N level (N)		**	*	ns	**
间作方式 Planting pattern (P)		**	ns	*	**
氮水平×间作方式 N × P		*	**	ns	ns

不同大写字母表示在同一供氮水平不同种植模式间差异显著(P<0.05)，不同小写字母表示同一种植模式不同供氮水平间差异显著(P<0.05)。ns 和*、**分别表示差异不显著和在 P<0.05 和 P<0.01 水平差异显著。S 和 IS 分别代表单作大豆和与玉米间作的大豆；N0、N1、N2 和 N3 代表施氮量分别为 0 kg·hm^{-2}、40 kg·hm^{-2}、80 kg·hm^{-2}、120 kg·hm^{-2}。Different capital letters mean significant differences between monoculture and intercropping at 0.05 level at the same N level. Different lowercase letters mean significant differences among different N levels at 0.05 level in the same planting pattern. ns, * and ** mean not significant difference, significant differences at P < 0.05 and P < 0.01, respectively. S and IS represent monocultured soybean and intercropped soybean. N0, N1, N2 and N3 respectively represent N levels of 0 kg·hm^{-2}, 40 kg·hm^{-2}, 80 kg·hm^{-2} and 120 kg·hm^{-2}.

2.5 不同供氮水平下玉米/大豆间作体系相对于单作的氮素吸收量和利用效率的变化

从表 5 可见，间作玉米和大豆的氮素利用效率均高于单作，其中间作的经济学氮素利用效率在 N0、N1、N2 和 N3 氮水平下均显著增加；N1、N2、N3 水平相对于对照(N0 水平)增幅分别为 11.03%、7.75%和 5.15%，其中，N1 水平下的玉米/大豆间作体系经济产量氮素利用效率最高。

从表 5 可见，随着施氮量增加，间作体系的生物学产量氮素利用率逐渐增加。在 N3 水平下，玉米/大

表 5　供氮水平对玉米/大豆间作体系相对单作的氮素吸收量以及利用效率变化的影响

Table 5　Effects of N levels on changes of N uptake and utilization efficiency of maize/soybean intercropping system compared with the monoculturing systems

处理 Treatment	氮素吸收量变化 Change of N uptake (%)	经济产量氮素利用率 Change of N use efficiency of grain yield (%)	生物学产量氮素利用效率 Change of N use efficiency of biomass (%)	氮素当量比 N land equivalent ratio
N0	12.29	9.19	–5.73	1.13
N1	7.79	20.22	0.39	1.05
N2	14.25	16.94	2.59	1.10
N3	7.72	14.34	6.68	1.04

N0、N1、N2 和 N3 代表施氮量分别为 0 kg·hm^{-2}、110 kg·hm^{-2}、160 kg·hm^{-2}、210 kg·hm^{-2}。N0, N1, N2 and N3 respectively represent N levels of 0 kg·hm^{-2}, 110 kg·hm^{-2}, 160 kg·hm^{-2} and 210 kg·hm^{-2}.

豆间作方式的生物学产量氮素利用率增加最明显(6.68%); 而 N1、N2 水平却没有明显的增加, N0 水平下间作模式降低了生物学产量氮素利用率。

通过计算氮素当量比(LER_N)发现, 间作在各施氮水平下 LER_N>1, 说明间作具有养分优势。随着施氮量的增加, LER_N 有下降趋势, 其中 N0 水平 LER_N 最高, 玉米/大豆间作优势最为显著; N2 水平下氮素 LER_N 值略低于 N0 水平, N1 与 N3 水平下间作优势相近, LER_N 值最低。

如表 5 所示, 相对于单作, 玉米/大豆间作体系提高了系统的氮素吸收量, 并且不同氮水平对间作系统氮素吸收量有不同的影响。N0 水平下, 间作系统比单作种植的氮吸收量提高 12.29%; N2 水平下间作系统对氮素吸收量增幅最高; N1、N3 水平下系统对氮素吸收量有所增加, 但是低于 N2 水平。

3　讨论与结论

本试验结果表明, 间作系统显著提高了玉米干物质积累量, 而间作大豆却与之相反, 但间作系统整体干物质积累量高于单作, 说明了本试验中玉米/大豆间作模式具有间作优势。间作系统对氮素吸收与干物质积累有相同的变化趋势。朱元刚等[18]对鲁西北地区玉米/大豆进行测定也发现了相似的规律, 玉米/大豆间作模式较单作种植有显著的间作优势。间作产量优势在于对养分的吸收[19-20], 本试验也表明间作可以提高玉米和大豆养分的利用效率。间作优势的主要原因是不同株型的作物占据不同的生态位, 有利于提高资源与空间的利用率。玉米/大豆间作系统中, 玉米根系较浅, 大豆根系较深且为直根系, 间作模式充分利用了空间生态位的差异, 提高了整个系统的养分利用率。另外, 大豆通过根瘤固氮, 减少了氮肥施用, 可以降低与间作玉米对土壤氮素的竞争, 从而使玉米氮素吸收量增加[3,10,21-22]; 除此之外, 玉米是高秆作物, 而大豆是矮秆作物, 两种作物可以利用不同层高的光强, 这样间作系统可以充分地利用太阳光能[23]。

本研究通过 Logistic 模型估算了作物干物质积累和氮素吸收参数。间作模式以及施氮量显著地提高了玉米单位面积最大干物质量/吸氮量和最大生长速率/氮素最大吸收量。当施氮量为 240 kg·hm^{-2}(N2)时, 玉米干物质积累量和氮素吸收量达到最大, 更高的施氮量(N3, 300 kg·hm^{-2})下的玉米干物质积累量和氮素吸收量却有所降低, 说明适当施用氮肥可以有效地提高玉米、大豆对养分的吸收与积累, 但过度施肥会造成作物减产, 以及肥料的浪费[2,24]。除此之外, 本试验表明间作玉米和大豆分别在播种后平均第 73 d 和第 88 d 达到氮素最大瞬时吸收率, 说明玉米氮素吸收高峰早于大豆, 而且与单作相比, 间作玉米平均缩短 2~3 d, 大豆平均延迟 1~2 d, 因此, 玉米与大豆对氮素的吸收高峰时间生态位是错开的[25], 玉米对养分竞争强于大豆[26], 这可能是玉米/大豆间作具有养分优势的主要因素。Zhang 等[15,27]也发现, 间作玉米的最大生物量接近或显著地高于单作玉米, 宋海星等[28]认为玉米养分吸收最大速率出现在干物质积累最大速率之前。Logistic 方程模拟出的玉米、大豆干物质积累和氮素吸收的参数与前人的研究结果趋势一致。

通过对玉米/大豆间作体系的氮素吸收量、经济学产量利用率以及生物学养分利用率进行计算分析, 间作系统可以提高玉米对氮素的吸收, 在 N2 水平下间作体系氮素吸收量相对于单作增加幅度达到 14.25%, 龙光强等[29]通过对玉米、马铃薯的测定发现, 随着施氮量的增加, 间作体系氮素的加权平均吸收量呈现先增加后减少的规律。间作系统有提高籽粒经济学利用效率能力, 其中, N1 水平更有利于提高系统对氮肥的利用效率, 其幅度达到了 20.22%。生物学产量养分利用率随着施氮水平的增加而升高, 其中 N3 水平下间作系统生物学效率最

高，相对于单作提高了 6.68%，由此说明，不同供氮水平对间作系统经济学和生物学利用效率不同，有研究指出，不同的配套体系，间作对养分利用的效率并不相同[20]。除此之外，在不同的供氮水平下玉米/大豆间作系统的氮素当量比(LER_N 值)均大于 1，说明在不同的供氮水平下，间作相对于单作种植都具有一定的养分利用优势，随着氮肥用量的增加，氮素 LER_N 值呈下降趋势，其中 N0 水平的 LER_N 值为 1.13，其氮素利用优势最为显著。有研究表明，增施磷肥有利于提高氮和钾的当量比[30]。

由此可见，不同氮素供应水平对间作体系作物的干物质累积和氮素吸收有显著性影响，氮素水平通过调控间作体系的生长参数和养分参数，进而影响作物的生长。在本试验中 160 $kg \cdot hm^{-2}$ 施氮水平下间作体系的养分优势最为明显，为玉米/大豆间作体系中氮素优化施用提供理论依据。

参考文献 References

[1] 徐长帅，商伟，冯雪梅，等. 玉米大豆间作田间配置经济效益研究[J]. 种子科技, 2015, 33(11): 44–46
XU C S, SHANG W, FENG X M, et al. Study on economic benefits of intercropping in corn and soybean[J]. Seed Science & Technology, 2015, 33(11): 44–46

[2] 王佳锐，王科，赵亚妮，等. 小麦施氮后效和种植方式对大豆产量及农艺性状的影响[J]. 草业学报，2016，25(7): 158–167
WANG J R, WANG K, ZHAO Y N, et al. Relationship between nitrogen after-effects and the yield and agronomic traits of monocropped and intercropped soybean[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(7): 158–167

[3] 李秋祝，余常兵，胡汉升，等. 不同竞争强度间作体系氮素利用和土壤剖面无机氮分布差异[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(4): 777–785
LI Q Z, YU C B, HU H S, et al. Difference of nitrogen utilization and distribution of mineral nitrogen in soil profile by competitive abilities of intercropping systems[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(4): 777–785

[4] 李志贤，王建武，杨文亭，等. 广东省甜玉米/大豆间作模式的效益分析[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(3): 627–631
LI Z X, WANG J W, YANG W T, et al. Benefit of sweet corn/soybean intercropping in Guangdong Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(3): 627–631

[5] 高翔，吴满，潘汝谦，等. 大豆/玉米间作模式及施肥水平对大豆霜霉病及大豆与玉米生长的影响[J]. 大豆科学, 2011, 30(6): 964–967
GAO X, WU M, PAN R Q, et al. Effects of soybean/maize intercropping and fertilization on development of soybean downy mildew and growth of soybean and maize[J]. Soybean Science, 2011, 30(6): 964–967

[6] 周贤玉，唐艺玲，王志国，等. 减量施氮与间作模式对甜玉米 AMF 侵染和大豆结瘤及作物氮磷吸收的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(8): 1139–1146
ZHOU X Y, TANG Y L, WANG Z G, et al. Effects of reduced nitrogen application and intercropping on sweet corn AMF colonization, soybean nodulation and nitrogen and phosphorus absorption[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(8): 1139–1146

[7] 王晓维，杨文亭，缪建群，等. 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
WANG X W, YANG W T, MIAO J Q, et al. Effects of maize-soybean intercropping and nitrogen fertilizer on yield and agronomic traits of maize[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(18): 5275–5282

[8] 高阳，段爱旺，刘祖贵，等. 单作和间作对玉米和大豆群体辐射利用率及产量的影响[J]. 中国生态农业学报，2009, 17(1): 7–12
GAO Y, DUAN A W, LIU Z G, et al. Effect of monoculture and intercropping on radiation use efficiency and yield of maize and soybean[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(1): 7–12

[9] 唐劲驰，MBOREHA I A，佘丽娜，等. 大豆根构型在玉米/大豆间作系统中的营养作用[J]. 中国农业科学, 2005, 38(6): 1196–1203
TANG J C, MBOREHA I A, SHE L N, et al. Nutritional effects of soybean root architecture in a maize/soybean intercropping system[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(6): 1196–1203

[10] 余常兵，孙建好，李隆. 种间相互作用对作物生长及养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(1): 1–8
YU C B, SUN J H, LI L. Effect of interspecific interaction on crop growth and nutrition accumulation[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(1): 1–8

[11] 马心灵，朱启林，耿川雄，等. 不同氮水平下作物养分吸收与利用对玉米马铃薯间作产量优势的贡献[J]. 应用生态学报, 2017, 28(4): 1265–1273
MA X L, ZHU Q L, GENG C X, et al. Contribution of nutrient uptake and utilization on yield advantage in maize and potato intercropping under different nitrogen application rates[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(4): 1265–1273

[12] 肖春华，李少昆，刘景德，等. 不同种植方式下玉米干物质积累、养分吸收动态特点的研究[J]. 石河子大学学报: 自然科学版, 2004, 22(5): 380–382
XIAO C H, LI S K, LIU J D, et al. Studies on dynamics of dry matter and nutrient accumulation in maize under various planting methods[J]. Journal of Shihezi University: Natural Science, 2004, 22(5): 380–382

[13] 何萍，金继运，林葆，等. 不同氮磷钾用量下春玉米生物产量及其组分动态与养分吸收模式研究[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(2): 123–130
HE P, JIN J Y, LIN B, et al. Dynamics of biomass and its components and models of nutrients absorption by spring maize under different nitrogen, phosphorous and potassium application rates[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1998, 4(2): 123–130

[14] 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

[15] 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

[16] FRANCIS C A. Multiple Cropping Systems[M]. New York: Macmillan, 1986

[17] Vandermeer J. The ecology of intercropping[J]. Trends in Ecology&Evolution, 1989, 4(10): 324–325

[18] 朱元刚, 高凤菊. 不同间作模式对鲁西北地区玉米-大豆群体光合物质生产特征的影响[J]. 核农学报, 2016, 30(8): 1646–1655
ZHU Y G, GAO F J. Effects of different maize and soybean intercropping patterns on population characteristics of photosynthetic and matter production in northwest Shandong region[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2016, 30(8): 1646–1655

[19] DONG N, TANG M M, ZHANG W P, et al. Temporal differentiation of crop growth as one of the drivers of intercropping yield advantage[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 3110

[20] 党小燕, 刘建国, 帕尼古丽, 等. 不同棉花间作模式中作物养分吸收和利用对间作优势的贡献[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(5): 513–519
DANG X Y, LIU J G, PANI G L, et al. Uptake and conversion efficiencies of NPK and corresponding contribution to yield advantage in cotton-based intercropping systems[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 20(5): 513–519

[21] 马骥, 马淑云, 程寅生, 等. 玉米大豆间作效应分析[J]. 西北农业大学学报, 1994, 22(4): 80–84
MA J, MA S Y, CHENG Y S, et al. An analysis of effect of intercropping of maize with soybean[J]. Acta University of Agriculture and Boreali-occidentalis, 1994, 22(4): 80–84

[22] LOREAU M. Biodiversity and ecosystem functioning: Recent theoretical advances[J]. Oikos, 2000, 91(1): 3–17

[23] YU Y, STOMPH T J, MAKOWSKI D, et al. Temporal niche differentiation increases the land equivalent ratio of annual intercrops: A meta-analysis[J]. Field Crops Research, 2015, 184: 133–144

[24] 陈远学, 陈晓辉, 唐义琴, 等. 不同氮用量下小麦/玉米/大豆周年体系的干物质积累和产量变化[J]. 草业学报, 2014, 23(1): 73–83
CHEN Y X, CHEN X H, TANG Y Q, et al. Effect of nitrogen fertilizer on dry matter accumulation and yield in wheat/maize/soybean intercropping systems[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2014, 23(1): 73–83

[25] ZHANG L, VAN DER WERF W, BASTIAANS L, et al. Light interception and utilization in relay intercrops of wheat and cotton[J]. Field Crops Research, 2008, 107(1): 29–42

[26] BROKAW N, BUSING R T. Niche versus chance and tree diversity in forest gaps[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2000, 15(5): 183–188

[27] ZHANG W P, LIU G C, SUN J H, et al. Temporal dynamics of nutrient uptake by neighbouring plant species: Evidence from intercropping[J]. Functional Ecology, 2017, 31(2): 469–479

[28] 宋海星, 李生秀. 玉米生长量、养分吸收量及氮肥利用率的动态变化[J]. 中国农业科学, 2003, 36(1): 71–76
SONG H X, LI S X. Dynamics of nutrient accumulation in maize plants under different water and N Supply conditions[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2003, 36(1): 71–76

[29] 赵胜利, 龙光强, 杨超, 等. 施氮对玉米//马铃薯间作作物氮累积和分配的影响[J]. 云南农业大学学报: 自然科学, 2016, 31(5): 886–894
ZHAO S L, LONG G Q, YANG C, et al. Effects of nitrogen application on nitrogen accumulation and distribution of crops in maize and potato intercropping[J]. Journal of Yunnan Agricultural University: Natural Science, 2016, 31(5): 886–894

[30] 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]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2000, 6(2): 140–146