植物营养与肥料学报 2012,18(4):1006-1012
Plant Nutrition and Fertilizer Science

# 玉米与马铃薯的间作优势和种间关系对氮投入的响应

吴开贤,安瞳昕,范志伟,贺 佳,周 峰,薛国峰,吴伯志*
(云南农业大学农学与生物技术学院,昆明 650201)

**摘要:** 氮是农业生产投入最大的土壤养分资源,有研究表明,氮投入影响间作体系的生产力优势。然而作为重要的旱地间作模式,玉米与马铃薯间作体系对氮投入的响应机理并不清楚。本研究通过大田试验,探讨氮投入下玉米与马铃薯间作的生产力优势特征、种间关系和作物生长以及地上部生物量的分配规律,结果表明:施氮降低玉米和马铃薯间作的土地当量比(LER);在初花期显著增加间作玉米的竞争能力,抑制间作马铃薯的竞争能力;收获期则增加间作玉米的叶生物量、叶面积和茎叶比,降低间作马铃薯的叶面积、叶生物量、茎生物量和茎叶比,但对两种作物的比叶面积均无影响。综合以上结果,尽管该间作模式在氮投入下产量增加,但种间竞争加剧,间作优势呈现降低趋势。

**关键词:** 氮;竞争;互利;间作优势;生物量分配
**中图分类号:** S344.2;S143.1　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1008-505X(2012)-04-1006-07

# Effects of nitrogen input on yields advantage and interaction of the maize and potato intercropping

WU Kai-xian, AN Tong-xin, FAN Zhi-wei, HE Jia, ZHOU Feng, XUE Guo-feng, WU Bo-zhi*
(*College of Agronomy and Biotechnology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China*)

**Abstract:** Evidence suggests that nitrogen, the highest input nutrition in agriculture, affects the yield advantage of many intercropping systems. However, it is unclear that how crop respond to nitrogen input in the maize and potato intercropping system which is an overyielding and widespread system in the world. A field experiment was conducted to explore productivity, shoot biomass, interaction and growth of the intercropped maize and potato under the nitrogen input condition. The results show that the nitrogen input could reduce the land equivalent ratio(LER) in the maize and potato intercropping, and the competition ability of maize is significantly strengthened at the early flowering stage for maize under the nitrogen input condition. At the harvest time, the leaf biomass, leaf area and ratio of stem and leaf are significantly increased for intercropped maize under the nitrogen input condition, while those of potato are decreased. There is no statistically significant difference on the specific leaf area for both crops. These findings suggest that the interspecies competition between maize and potato increase under the nitrogen input condition reduces the yield advantage.

**Key words:** nitrogen; competition; facilitation; yield advantage; biomass allocation

玉米和马铃薯是主要粮食作物,玉米间作马铃薯是重要的旱地非豆科间作模式,在国内外均有着悠久的历史,其显著的增产效果已在世界的许多地区得到证实[1-3]。其增产原因主要是由于两作物在

**收稿日期:** 2011-11-01　　**接受日期:** 2012-04-03
**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2011CB100402)资助。
**作者简介:** 吴开贤(1983—),男,贵州德江人,博士研究生,主要从事可持续农业发展方面的研究。E-mail: wukaixian2004@163.com
* 通讯作者 E-mail: Bozhiwu@hotmail.com

生物学特征上存在差异，能够在时间和空间尺度上互补性地利用环境资源；其次被改善的群体微气候环境有利于作物生长。例如，间作条件下相对冷凉的群体环境有利于马铃薯生长和块茎形成[4]；此外，生态地控制作物病害也是重要原因，例如 He 等人发现间作显著抑制马铃薯的晚疫病和玉米的青枯病[5]。然而，目前研究和关注该模式对环境因子和农艺措施的响应还较少，尽管相关研究对于间作设计和田间管理十分重要。

氮是作物生产力的主要限制因子之一，氮肥是当前农业生产中投入量最大的肥料。间作能够提高氮的利用效率[6-10]，因此对氮肥的需求量可能不如单作高，适合低投入农业。但在实际生产中，为了最大程度地获得土地产出，在间作农田投入了大量的氮[11]。Li[11]等研究了氮肥对小麦套作玉米产量优势的影响，发现施肥量从 150 增至 225 kg/hm$^2$ 时，土地当量比（LER）从 1.06 增加到 1.38。但另有一些研究报道，氮肥投入反而降低间作的土地当量比，如大麦和紫云英间作[12]，豌豆和春小麦间作[9]，甘蓝和洋葱间作[13]。显然，间作优势对氮投入的响应在不同间作模式中存在差异。

种间作用是间作群体响应氮投入的重要过程[14-15]。间作作物因共同利用空间和各种资源，因而发生竞争，但也由于间作作物对群体微环境的改善，使资源的可利用性增加，从而产生互利。竞争和互利关系同时存在，两者的相对大小及其重要性随作物的生长发育进程改变[16]。在作物的整个生育期内，当总的竞争关系大于互利关系时，群体对资源的利用能力下降，反之，群体对资源的利用增加，具有间作优势[17]。因此，氮投入主要通过对作物种间关系的调控来影响间作优势。可见，如何利用和调控种间关系对间作优势大小有决定作用[17]。目前，玉米与马铃薯这一间作模式对氮投入的响应研究仅有一例[18]，但该研究重点关注玉米与马铃薯间作对氮的需求，对间作优势和种间关系未作深入探讨。

通常，个体作物通过改变生物学特征和生物量分配调控种间关系，进而适应氮有效性的变化[19-20]。在农田间作系统中，生物量分配不仅反映间作作物的竞争策略和资源获取能力[14]，更直接地决定作物的经济系数。可见，在关注间作最终的产量或生物量基础上，结合作物个体水平上的生长响应，有助于揭示间作群体对氮投入的响应机制。因此，本研究采用大田试验，结合群体和个体水平，探索玉米和马铃薯间作优势对氮投入的响应；分析两作物种间关系的性质、强度及其动态；探讨作物的生长表现和生物量分配。

## 1　材料与方法

### 1.1　试验地概况

试验地位于云南农业大学农场试验基地，东经 102°2′，北纬 25°22′，海拔 1987 m，具有典型的高原气候特征，年均温 14.7 ℃，年降水量 960 mm，最低降水量 702.7 mm，最高降水量 1274 mm，降水量主要集中在 7、8、9 三个月；年蒸发量 2384 mm，年日照时数 2617.4 h，无霜期 301 d；试验地土壤为山地红壤，土壤有机质含量 24.14 g/kg，全氮 1.4 g/kg，氨态氮 4.34 mg/kg，硝态氮 5.38 mg/kg，全磷 3.21 g/kg，速效磷 17.0 g/kg，全钾 4.47 g/kg，速效钾 113.6 mg/kg，pH 值 5.7。

### 1.2　材料与方法

供试玉米品种为“云瑞 6 号”，马铃薯为“会 -2 号”，该品种组合在云南地区的实际生产中应用广泛。试验采用裂区设计，主区为施肥处理，设施氮处理（N）（N276 kg/ha）和不施氮对照（CK）两个水平，氮肥为尿素；副区为种植方式，设玉米单作、马铃薯单作、玉米与马铃薯间作 3 个处理，重复 4 次，随机区组排列。间作设计选用替代方案（replacement design）[21]，不论间作和单作，两作物的种内和种间行距均为 40 cm，株距均 30 cm。玉米和马铃薯单作时密度均为 83333 株/hm$^2$，间作时均为 41666 株/hm$^2$。间作含 3 个组合带，行比 2∶2，两作物分别占 50% 面积比例，带幅 1.6 m；单作均为 7 行，副区间的间隔 0.5 m，主区面积 43.32 m$^2$（11.4 m × 3.8 m）。2010 年 3 月 23 日播种马铃薯，播种深度 20 cm，5 月 18 日播种玉米，播种深度 8 cm。氮肥分基肥和 2 次追肥，基肥在马铃薯播种前混入 20 cm 土壤中（30 kg/hm$^2$），追肥分别在玉米苗期和大喇叭口期（15 kg/hm$^2$）施入。基肥中施入普钙 800 kg/hm$^2$，硫酸钾 200 kg/hm$^2$。试验期间灌水保持土壤含水量在 50% 左右，在作物苗期，开花期和收获期进行人工除草和病虫害防治。

在作物初花期和收获期采集样品及测定。各作物初花期时在 1/3 小区内随机选 6 株样，测定自然株高后，齐地面取样，将茎叶分离，利用图像法测定

全株叶面积[22]，然后将茎叶鲜样于105℃杀青30 min，70℃烘至恒重，称量干物重，用于作物的生长和竞争关系分析；收获期测定玉米茎叶和穗干重，测定马铃薯地上部和块茎干重，用于种间关系和产量优势分析。

### 1.3 数据处理与统计

间作优势评估　土地当量比(LER)用于衡量相同面积下的间作优势[23]，公式如下：

$$LER = \frac{Y_{ai}}{Y_{as}} + \frac{Y_{bi}}{Y_{bs}}$$

式中：$Y_{ai}$和$Y_{bi}$分别表示间作时a和b作物收获期的单株生物量或产量；$Y_{as}$和$Y_{bs}$分别表示单作时a和b作物收获期的单株生物量或产量。当LER值>1时，间作有产量优势。为分析生物量当量比和产量当量比的差异，进一步比较两作物的收获系数，即作物产量与总生物量的比值。

竞争关系评估　初花期可以反映作物苗期和代谢高峰期的生长情况，而收获期反映整个生育期和初花期后的生长情况。为探讨玉米和马铃薯的竞争动态，以初花期和收获期两作物的生物量为基础，采用相对关系指数RII(relative interaction index)[24]衡量间作条件下作物的竞争能力，该指数对种间竞争试验的取代设计(replacement design)有较好的统计性能，计算公式如下：

$$RII = \frac{B_I - B_S}{B_I + B_S}$$

式中：$B_I$表示某作物在间作条件下的生物量；$B_S$表示某作物在单作条件下的生物量。当RII>0时，表示作物在间作中得到的互利效应大于受到的竞争效应，当RII<0时，则竞争效应大于互利效应，RII=0时，作物在间作中没有受到影响。为了比较玉米和马铃薯的相对竞争能力，在参考已有研究的基础上[23]，采用相对竞争能力参数RC(relative competition ability)进行评估：

$$RC = \frac{B_{mi} \times B_{ps}}{B_{ms} \times B_{pi}}$$

式中：$B_{mi}$和$B_{Pi}$分别表示间作玉米和马铃薯的生物量；$B_{ms}$和$B_{Ps}$分别表示单作玉米和马铃薯的生物量。当RC>1时，表示玉米的相对竞争能力比马铃薯强，反之则马铃薯比玉米有竞争优势。

生长分析　利用初花期的株高，叶面积，茎生物量和叶生物量及其换算参数茎叶比(茎生物量/叶生物量)，比叶面积(叶生物量/叶面积)和地上生物量进行评估，这些性状的可塑性变化反映出作物在竞争下对资源的获取能力和方式。

数据分析　采用SPSS17.0对所有指标进行两因素的方差分析和处理均值间的多重比较(LSD法)，显著水平均为$P<0.05$，对方差不齐的变量进行自然对数转换，但文中显示的均值为实测值。

## 2 结果与分析

### 2.1 收获期作物产量与间作优势

比较分析发现，施氮增加单作时马铃薯的生物量和块茎产量，但在间作时反而降低，这可能是因为施氮条件下玉米对马铃薯的竞争作用增强。不论单作还是间作，施氮均可增加玉米的产量和生物量，其中玉米生物量在单作条件下显著提高，而在间作时增加的则不显著(表1)。说明氮肥投入对间作玉米的影响比马铃薯大。

间作优势评估表明，不论是否在施氮条件下，玉米马铃薯间作的生物量和产量的土地当量比(LER)值均大于1，因此具有间作优势，能提高土地产出。然而，比较对照和施氮处理后发现，施氮处理下LER值明显降低，其中生物量当量比分别为1.072和1.009，产量当量比分别为1.135和1.120(图1)。说明氮投入降低间作优势，并且同时降低生物量和产量当量比。

但施氮处理对产量当量比的影响弱于生物量当量比，这可能是因为施氮条件下间作马铃薯比单作马铃薯收获系数显著提高(表1)。

### 2.2 整个生育期中两种作物间的竞争关系

玉米和马铃薯种间关系随生育期进程而改变，氮不仅调节玉米和马铃薯的竞争能力，也改变作物间的相对竞争能力(图2)。收获期时氮处理在初花期显著提高了玉米的竞争能力($P=0.017$)，抑制马铃薯的竞争能力，说明在初花期前氮投入有利于提高玉米对马铃薯的相对竞争能力(RC)；但初花期后，氮投入对玉米的竞争能力影响不显著，而对照处理下玉米的竞争能力则显著提高($P=0.003$)，相应地，在氮处理下马铃薯的竞争能力变化不显著，但对照处理的竞争能力则显著降低($P<0.001$)。说明在初花期后氮投入会降低玉米对马铃薯的相对竞争能力(RC)。总体上，不论施氮还是对照处理，玉米的竞争能力在初花期后逐渐增强，而马铃薯逐渐

**表 1　氮处理和种植方式对玉米和马铃薯生产力性状的影响**

**Table 1　The effects of the nitrogen input and the intercropping on productivity of maize and potato**

| 作物 Crop | 生产力性状 Productivity parameter | 间作 Intercropping | | 单作 Monocropping | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | CK | N | CK | N |
| 玉米 Maize | 产量 Yield (kg/hm²) | 20583 ±1320 b | 21666 ±800 a | 15833 ±1060 c | 18833 ±940 b |
| | 生物量 Biomass (kg/hm²) | 40666 ±1901 a | 35083 ±980 a | 25083 ±1160 b | 28583 ±1400 a |
| | 收获系数 Harvest index | 0.72 ±0.007 a | 0.71 ±0.010 a | 0.63 ±0.018 b | 0.66 ±0.009 b |
| 马铃薯 Potato | 产量 Yield (kg/hm²) | 3512 ±330 a | 2911 ±290 a | 3192 ±270 a | 2961 ±280 a |
| | 生物量 Biomass (kg/hm²) | 4682 ±270 a | 3692 ±28 b | 4042 ±280 ab | 4249 ±27 ab |
| | 收获系数 Harvest index | 0.75 ±0.014 a | 0.79 ±0.016 a | 0.79 ±0.015 a | 0.69 ±0.026 b |

注(Note)：同行数据后不同小写字母表示处理间差异显著(LSD 检验，$P \leq 0.05$) Values followed by different letters in a row are significantly different among treatments (LSD test, $P \leq 0.05$).

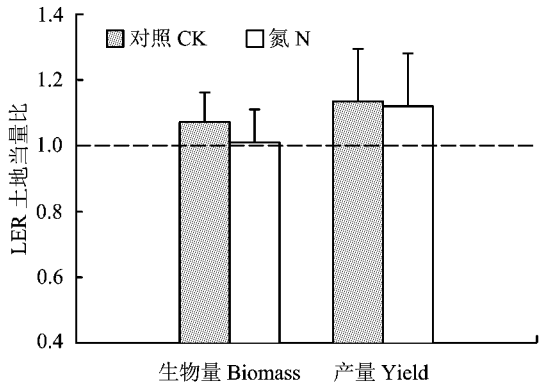


**图 1　氮处理对玉米与马铃薯间作土地当量比的影响**

**Fig. 1　The land equivalent ratio (LER) values under different nitrogen inputs in the maize and potato intercropping system**

降低，氮投入使两种作物的竞争能力随时间的变化曲线平缓，保持竞争关系的动态变化相对稳定。此外，不论对照还是施氮处理，玉米在初花期的相对关系指数(RII 值)接近于 0，而收获期的 RII 值 >0，说明间作玉米在生长前期受到马铃薯的竞争抑制，而后期则在间作中获利；而马铃薯在生长前期的 RII 值 >0，后期则在间作中处于不利。

间作效应的比较分析发现，对照处理下，间作玉米比单作玉米的叶生物量，茎生物量和地上生物量显著降低，株高显著增加，茎叶比则变化不显著；施氮处理间作玉米的叶面积，茎叶比显著高于单作玉米，其他参数变化不显著。说明初花期前马铃薯对玉米有竞争抑制，氮投入能促进间作玉米的生长。

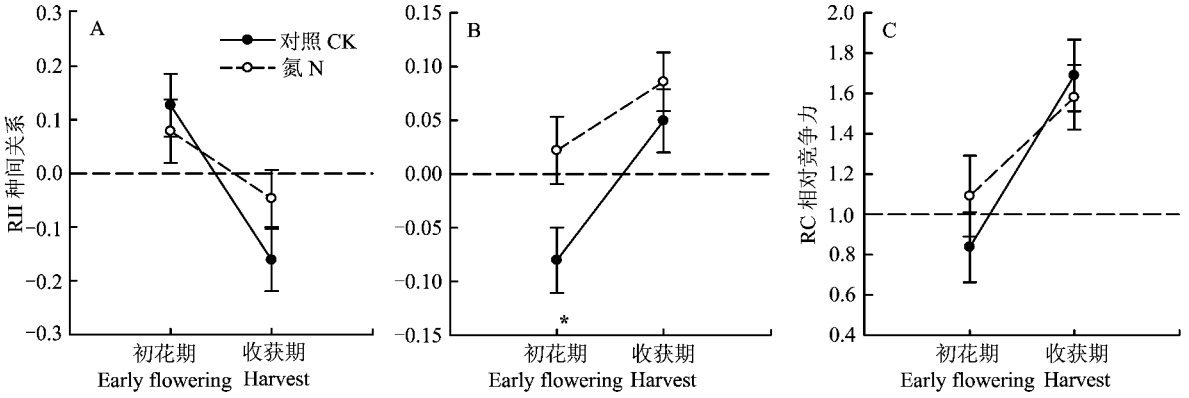


**图 2　氮对间作玉米和马铃薯种间关系和相对竞争能力的影响**

**Fig. 2　The dynamic of interspecific interactions (RII) and relative competition ability (RC) under different nitrogen inputs in the maize and potato intercropping system**

[注(Note)：A—马铃薯 Potato；B—玉米 Maize；C—玉米相对马铃薯的竞争能力 Relative competition ability on maize to potato. * 表示施氮和对照间在 $P \leq 0.05$ 水平差异显著 * indicates significant difference between CK and the nitrogen treatment ($P \leq 0.05$).]

对照处理下,间作马铃薯的株高,叶面积,叶生物量,茎生物量,茎叶比均显著高于单作马铃薯;施氮处理下,间作马铃薯除株高和总生物量(地上生物量)显著高于单作,其他参数变化不显著。说明初花期前氮投入提高间作马铃薯的生长优势不明显。氮处理和种植方式对玉米和马铃薯的比叶面积均无显著影响,可能说明初花期前两作物的地上竞争弱,玉米和马铃薯间的竞争主要为地下竞争。

### 2.3 初花期作物生物学特征与生物量分配

氮投入和间作均改变玉米和马铃薯地上部分的生物学特征和地上生物量分配(表2)。施氮降低单作玉米的茎生物量,茎叶比和地上生物量,对间作玉米则有增加作用,但变化不显著,对叶面积影响不显著;氮处理显著增加了单作马铃薯的叶面积和叶生物量,对间作马铃薯无显著影响。这可能是因为单作条件下玉米种内竞争主要为地上竞争,而氮增加玉米的种内地上竞争,而间作下玉米的地上竞争小,玉米所受到的竞争主要为地下竞争,单作和间作条件下马铃薯的地上和地下竞争相对未发生较大变化。上述结果说明,与单作相比,氮投入能够提高初花期前间作玉米的生长能力,而对马铃薯没有影响,这进一步表明,初花期前马铃薯对玉米有竞争抑制,而氮投入可以提高玉米的相对竞争能力。

**表2 氮处理和种植方式下玉米和马铃薯初花期的生长性能和生物量分配比较**

**Table 2 The effects of the nitrogen input and the intercropping on aboveground growth and biomass allocation of maize and potato at the early flowering stage**

| 作物 Crop | 种植 Cropping system | 处理 Treat. | 株高 Plant height (cm/plant) | 叶面积 Leaf area ($m^2$) | 叶生物量 Leaf biomass (g/plant) | 茎生物量 Stem biomass (g/plant) | 茎叶比 Stem leaf ration (g/g) | 总生物量 Total biomass (g/plant) | 比叶面积 Specific leaf area ($m^2$/g) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 玉米 Maize | 间作 IC | CK | 217.8 ±3.20 c | 0.70 ±0.13 a | 26.4 ±1.11 bc | 63.2 ±3.54 b | 2.45 ±0.10 a | 90.8 ±4.86 b | 0.024 ±0.001 a |
| | | N | 230.9 ±4.06 b | 0.59 ±0.02 a | 27.1 ±1.13 b | 67.4 ±3.45 b | 2.42 ±0.10 a | 92.6 ±4.72 b | 0.027 ±0.001 a |
| | 单作 MC | CK | 253.1 ±3.75 a | 0.69 ±0.19 a | 30.8 ±1.05 a | 76.6 ±3.40 a | 2.46 ±0.09 a | 107.5 ±4.41 a | 0.023 ±0.001 a |
| | | N | 235.7 ±4.53 b | 0.64 ±0.29 a | 29.4 ±1.13 ab | 57.1 ±3.50 b | 1.93 ±0.10 b | 85.6 ±4.82 b | 0.024 ±0.001 a |
| 马铃薯 Potato | 间作 IC | CK | 90.75 ±1.33 a | 0.51 ±0.04 a | 13.7 ±0.81 a | 22.1 ±1.47 a | 1.48 ±0.04 a | 35.8 ±2.25 a | 0.033 ±0.001 a |
| | | N | 90.16 ±1.35 a | 0.42 ±0.04 a | 13.8 ±0.85 a | 19.0 ±1.44 a | 1.37 ±0.04 ab | 33.4 ±2.31 a | 0.032 ±0.001 a |
| | 单作 MC | CK | 83.13 ±1.35 b | 0.33 ±0.04 b | 10.1 ±0.81 b | 12.4 ±1.40 b | 1.33 ±0.04 b | 23.1 ±2.22 b | 0.032 ±0.001 a |
| | | N | 80.05 ±1.33 b | 0.41 ±0.04 a | 12.8 ±0.89 a | 14.1 ±1.40 ab | 1.25 ±0.05 b | 25.7 ±2.25 b | 0.032 ±0.001 a |

注(Note):IC—Intercropping; MC—Monocropping. 同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平(LSD法) Values followed by different letters in a column are significantly different among treatments at the 5% level(LSD test).

## 3 讨论

### 3.1 氮投入下种间作用与间作优势的关系

氮投入条件下,玉米和马铃薯的间作优势并未增加,反而有降低的趋势,显然,尽管氮投入可以增加间作的产量,但间作优势呈降低趋势(图1)。可见,不鼓励对该间作模式进行高氮投入,同时,也表明单作对氮有较高的依赖性。主要原因可能是高氮投入增加了种间的竞争关系(图2),这一发现支持胁迫梯度学说(stress-gradient hypothesis),即种间竞争随非生物环境压力梯度的减小而加强[25]。在自然生态系统中已发现,空气氮沉降导致植物间的竞争加剧[14,26]。如引言中所述,在农田间作系统中,许多间作模式的作物种间竞争在高氮投入下加剧[9,13]。尽管氮投入降低间作马铃薯的生物量和产量,但增加玉米的生物量和产量,使间作群体生产力提高。说明在中等生产力和最大生产力间,群体生产力与竞争强度成反比[27-28],这种情况下最大生产力不是来自多样性最高的群体,而是来自最适生态环境的优势群体。因此,在较丰富的环境资源下,植物间的竞争促进优势物种的生长,从而间作群体中的优势作物有一定的增产空间,群体生产力得以提高,这说明氮投入对玉米和马铃薯间作模式的增产是必然的,但考虑到养分的利用效率有下降的

趋势，进一步研究探讨适宜施肥量具有重要意义。从竞争来源的角度看，单作下作物面对的竞争是种内竞争，而间作后竞争由种内竞争和种间竞争组成，间作优势的下降意味着氮投入增加了种间竞争而降低了种内竞争，理论上，由于生态位的高度重叠，种内竞争应大于种间竞争，因此氮投入会促进间作优势。解释这一矛盾需要关注种间互利，然而氮投入如何降低玉米和马铃薯的互利有待进一步的研究，这对深入揭示该间作模式对氮投入的响应机制十分必要。

### 3.2　氮投入调控作物种间关系的机制

尽管氮投入对种间关系的影响研究较多，但目前对相关的调控机制没有统一的认识。总的来看，氮的供需平衡是氮投入调控种间关系的关键。从供应方面看，氮投入降低竞争和提高间作优势与较低的土壤氮环境相关[11, 29]，当土壤贫瘠时，氮投入可以增加生产力优势。例如许多自然植被的土壤肥力较低，氮沉降几乎总是增加植物生产力[30-31]。从需求上看，氮投入是否增加竞争关系取决于作物对氮的相对需求。Li 等[11]研究发现，禾本科与禾本科的间作模式比豆科与禾本科间作模式耐高氮，这可能是因为禾本科作物对氮的需求量大。理论上，玉米与马铃薯间作模式是非豆科的物种组合，对氮的需求量较大，因此能耐受一定的高氮投入，本研究中的数据一定程度地证实了这一点，因为土地当量比的变化并不十分大，但是竞争关系的数据表明氮投入加剧了种间竞争。我们认为，这可能是因为氮投入导致其他资源的限制性作用增强，即需要考虑氮本身是否为系统的限制性生态因子，这不仅有助于理解氮投入调控作物种间关系的机制，也有利于探讨作物间的竞争形式和竞争过程。例如，从地上部的光能资源和地下的养分资源来看，根据“资源比率”假说[32]，当光资源不足，氮添加促进地上生长，增加对光的竞争，反之，土壤其他资源（如磷）不足时，增加地下竞争。可见，胁迫梯度学说[25]在用于解释非生物环境变化对植物种间关系的调控时，适应于那些不具有限制作用的非生物环境压力：如果减轻的是非限制因子压力，会导致对限制性因子的竞争加剧，而不是促进互利。因而，在农田间作系统中，任何单一资源（养分，水分，光照）的大幅度增加都可能降低间作优势，与单作相比，间作对资源的协同管理具有更高的要求。所以高投入下间作模式的设计和田间管理需综合考虑土壤肥力和冠层结构。

### 3.3　氮投入条件下玉米和马铃薯的生长与种间作用的关系

作物个体生长和生物量分配可以为间作优势的形成机制提供生物学的基础解释[14]，有助于解释间作作物生产力对氮投入的响应过程。本文研究表明，尽管氮肥和间作对玉米和马铃薯茎生物量、叶生物量、茎叶比、叶面积和株高均有影响，但对比叶面积均无影响（表 1，表 2），这说明两作物在初花期前的地上竞争较小，而初花期玉米在间作中受到竞争（图 2），因此间作玉米和马铃薯生长特征的变化可能主要因地下资源的竞争引起。尽管本文没有研究地上部和地下部的相互关系以及相应的动态，对该间作模式下两作物地上地下生物量分配，及其在整个生育期中的动态规律的认识有局限性，但是通过竞争关系和生长的综合分析，可以初步推断，初花期氮投入增加了玉米和马铃薯的地下竞争。由于马铃薯先播种先出苗，苗期会消耗一定的氮，具有提前占据领域的竞争优势，而玉米对氮的需求大，因此玉米在初花期前在地下竞争中处于不利地位，此时氮投入可以提高玉米的竞争优势，而降低马铃薯的竞争优势，所以，与单作相比，氮投入增加间作玉米的叶面积、茎叶比，而间作马铃薯在氮投入下降低叶面积、叶生物量、茎生物量和茎叶比。初花期后，玉米的竞争优势越来越明显，然而氮投入抑制玉米的竞争优势，使得玉米对马铃薯的相对竞争能力降低，这可能是因为氮投入加速间作玉米过早地消耗其他土壤资源，使其成为限制因子[30]，抑或是降低了马铃薯产生的互利效应。

## 参 考 文 献：


[1] Gustave N M, Ledent J, Draye X. Shoot and root competition in potato/maize intercropping: Effects on growth and yield [J]. Environ. Exp. Bot., 2008, 64: 180-188.

[2] Ebwongu M, Adipala E, Ssekabembe C K *et al*. Effect of intercropping maize and solanum potato on yield of the component crops in Central Uganda[J]. Afric. Crop Sci. J., 2001, 9: 83-96.

[3] Midmore D J, Berrios D, Roca J. Potato (*Solanum* spp.) in the hot tropics V. Intercropping with maize and the influence of shade on tuber yields[J]. Field Crops Res., 1988, 18: 159-176.

[4] Rk Sharaiha A B. A Study on potato/corn intercropping microclimate modification and yield advantages[J]. Agric Sci., 2002, 16: 97-109.

[5] He X H, Zhu S S, Wang H N *et al*. Crop diversity for ecological disease control in potato and maize[J]. J. Resour. Ecol., 2010, 1: 45-51.

[6] Zhang L, Spiertz J, Zhang S *et al*. Nitrogen economy in relay intercropping systems of wheat and cotton[J]. Plant Soil, 2008, 303: 55-68.

[7] R A S, Van Acker R C. Nitrogen yield and land use efficiency in annual sole crops and intercrops[J]. Agron. J., 2006, 96: 1030-1431.

[8] Rowe E C, Noordwijk M V, Suprayogo D A G. Nitrogen use efficiency of monoculture and hedgerow intercropping in the humid tropics[J]. Plant Soil, 2005, 268: 61-74.

[9] Ghaley B B, Hauggaard-Nielsen H, H Gh-Jensen H A E S. Intercropping of wheat and pea as influenced by nitrogen fertilization[J]. Nutr. Cycl. Agroecosys., 2005, 73: 201-212.

[10] Chen C, Westcott M, Neill K *et al*. Row configuration and nitrogen application for barley-pea intercropping in Montana[J]. Agron. J., 2004, 96: 1730-1738.

[11] Li Q Z, Sun J H, Wei X J *et al*. Overyielding and interspecific interactions mediated by nitrogen fertilization in strip intercropping of maize with faba bean, wheat and barley[J]. Plant Soil, 2011, 339: 1-15.

[12] Mohsenabadi G R, Jahansooz M R, Chaichi M R *et al*. Evaluation of barley-vetch intercrop at different nitrogen rates [J]. J. Agric. Sci., 2008, 10: 23-31.

[13] Mutiga S K. Agronomic performance of collards under two intercrops and varying nitrogen application levels as assessed using land equivalent ratios[J]. J. Agric. Sci., 2011, 3: 22-27.

[14] Pan Q, Bai Y, Wu J *et al*. Hierarchical plant responses and diversity loss after nitrogen addition: Testing three functionally-based hypotheses in the Inner Mongolia grassland [J]. PloS One. 2011, 6: e20078. doi: 10.1371/journal.pone.0020078.

[15] De Schrijver A, De Frenne P, Ampoorter E *et al*. Cumulative nitrogen input drives species loss in terrestrial ecosystems[J]. Glob. Ecol. Biogeogr. 2011.20: 803-816.

[16] Connolly J, Wayne P, Bazzaz F A. Interspecific competition in plants: How well do current methods answer fundamental questions? [J]. Am. Natur., 2001, 157: 107-125.

[17] Zhang F, Li L. Using competitive and facilitative interactions in intercropping systems enhances crop productivity and nutrient-use efficiency[J]. Plant Soil., 2003, 248: 305-312.

[18] Lal S S, Dua V K, Govindakrishnan P M. Nitrogen requirement of maize in potato plus maize intercropping system in Shimla hills [J]. Potato J., 2005, 32: 165-166.

[19] Zhao Y, Qing H, Zhao C *et al*. Phenotypic plasticity of Spartina alterniflora and Phragmites australis in response to nitrogen addition and intraspecific competition[J]. Hydrobiologia, 2010, 637: 143-155.

[20] Berg M P, Ellers J. Trait plasticity in species interactions: a driving force of community dynamics[J]. Evolut. Ecol., 2010, 24: 617-629.

[21] Snaydon R W. Replacement or additive designs for competition studies? [J]. J. Appl. Ecol., 1991, 28: 930-946.

[22] 杨劲峰，陈清，韩晓日，等. 数字图像处理技术在蔬菜叶面积测量中的应用[J]. 农业工程学报，2002，18(4)：155-158.
Yang J F, Chen Q, Han X R *et al*. Measurement of vegetable leaf area using digital image processing techniques[J]. Trans. Chin. Soc. Agric. Eng., 2002, 18(4): 155-158

[23] 王秋杰，曹一平，张福锁. 间套作研究中的统计分析方法[J]. 植物营养与肥料学报，1998，4(2)：176-182.
Wang Q J, Cao Y P, Zhang F S *et al*. The statistical analysis methods in intercropping researches[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 4(2): 176-182.

[24] Armas C, Ordiales R, Pugnaire F I. Measuring plant interactions: a new comparative index[J]. Ecology, 2004, 85: 2682-2686.

[25] Bertness M D, Callaway R. Positive interactions in communities [J]. Trends Ecol. Evol., 1994, 9: 191-193.

[26] Boyer K E, Zedler J B. Nitrogen addition could shift plant community composition in a restored California Salt Marsh[J]. Restor. Ecol., 1999, 7: 74-85.

[27] Rajaniemi T K, Allison V J, Goldberg D E. Root competition can cause a decline in diversity with increased productivity[J]. J. Ecol., 2003, 91(3): 407-416.

[28] Rajaniemi T K. Explaining productivity-diversity relationships in plants[J]. Oikos, 2003, 101: 449-457.

[29] Reynolds M P, Sayre K D, Vivar H E. Intercropping wheat and barley with N-fixing legume species: A method for improving ground cover, N-use efficiency and productivity in low input systems[J]. J. Agric. Sci., 1994, 123: 175-183.

[30] Bragazza L, Tahvanainen T, Kutnar L *et al*. Nutritional constraints in ombrotrophic Sphagnum plants under increasing atmospheric nitrogen deposition in Europe[J]. New Phytol., 2004, 163: 609-616.

[31] Cleland E E, Harpole W S. Nitrogen enrichment and plant communities[J]. Ann. New York Acad. Sci., 2010, 1195: 46-61.

[32] Tilman D. The resource-ratio hypothesis of plant succession[J]. Am. Nat., 1985, 125: 827-852.