

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

马心灵 朱启林 耿川雄 鲁泽刚 龙光强* 汤 利

(云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201)

摘 要 玉米与马铃薯间作是重要的间作种植模式, 具有较突出的资源利用和产量优势, 但养分吸收和利用对作物产量优势的贡献及这种贡献对施氮量的响应机制尚不清楚. 本研究采用玉米单作、马铃薯单作和玉米与马铃薯间作3种植模式, 分别设置 N_0 ($0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、 N_1 ($125 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、 N_2 ($250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 和 N_3 ($375 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 4个氮水平, 通过2年田间小区试验, 研究不同氮水平下间作产量优势的营养基础. 结果表明: 随着施氮量的增加, 氮、磷、钾的单作加权平均吸收量逐渐增加, 间作则先增加后减少. 间作在 N_1 水平时具最高的养分吸收优势, 分别较单作加权平均值增加氮吸收 14.9%、磷吸收 38.6%、钾吸收 27.8%; 间作在 N_0 和 N_3 时具有更高的养分利用效率, 较单作可提高氮利用效率 3.5%~14.3%、磷利用效率 3.5%~18.5%、钾利用效率 10.6%~31.6%. N_0 和 N_1 时玉米与马铃薯间作具有显著产量优势, 其营养基础在 N_0 时主要是提高了作物养分利用效率, 而 N_1 时则是促进养分吸收的结果. 充分发挥间作促进养分吸收对玉米与马铃薯间作产量优势的贡献, 需要合理控制氮肥的投入.

关键词 玉米与马铃薯间作; 养分吸收; 养分利用; 间作优势

Contribution of nutrient uptake and utilization on yield advantage in maize and potato intercropping under different nitrogen application rates. MA Xin-ling, ZHU Qi-lin, GENG Chuan-xiong, LU Ze-gang, LONG Guang-qiang*, TANG Li (College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China).

Abstract: Intercropping of maize and potato, as an important intercropping planting pattern, has a prominent advantage of resource utilization and yield. However, contribution of nutrient uptake and utilization to crop yield advantage and its response to N application rates remain unclear. Through a 2-year plot experiment, including maize monoculture, potato monoculture and maize intercropping with potato at 4 N-fertilized levels of N_0 ($0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), N_1 ($125 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), N_2 ($250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) and N_3 ($375 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), nutritional contribution of yield advantage of intercropping was studied. The results showed that weighted average uptake of nitrogen, phosphorus and potassium was gradually increased with N application rate in monocultures, but increase followed by a decrease in intercropping. Compared with monoculture at the same N level, nutrient uptake advantage of intercropping was the highest at N_1 , which increased nitrogen, phosphorus and potassium uptake by 14.9%, 38.6% and 27.8%, respectively. However, the nutrient use efficiencies were highest in intercropping at N_0 and N_3 with increment of 3.5%–14.3% for nitrogen, 3.5%–18.5% for phosphorus and 10.6%–31.6% for potassium. Maize and potato intercropping had a significant yield advantage at N_0 and N_1 . Yield advantage in intercropping attributed to improvement of nutrient use efficiency at N_0 while to increase of nutrient uptake at N_1 . To utilize the yield advantage from nutrient uptake, controlling input of nitrogen fertilizer is necessary in intercropping.

Key words: maize and potato intercropping; nutrient uptake; nutrient utilization; intercropping advantage.

本文由国家自然科学基金项目(41201289, 41361065)资助 This work was supported by the Natural Science Foundation of China (41201289, 41361065).

2016-08-01 Received, 2017-01-16 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ynaulong2316@163.com

玉米和马铃薯均是重要的粮食作物,其间作种植是重要的旱地禾谷类与薯类作物间作模式,在我国亚热带地区广泛种植^[1].生产实践和研究报道已证实,玉米马铃薯间作具有显著的产量优势^[2-4].作物间作后具有比单作更高的土地当量比(产量优势)^[5],主要在于间作更好的病虫害控制效应^[6-7]、更高的地上部光热资源利用^[8]和地下部养分吸收与利用^[9].小麦与大豆间作中发现,作物养分吸收因子为正值而利用因子为负值,即间作优势主要源于养分吸收效率的提高^[10].不同作物与棉花间作发现,间作优势的营养基础主要是间作养分吸收效率的提高,而非来自于利用效率^[11].就玉米马铃薯间作有研究表明,间作水分捕获量和水分利用效率高与单作,间作系统有明显生物学产量和经济产量的优势^[3].何国艳等^[12]研究结果表明,与单作相比,间作增加玉米、马铃薯地上部干物质量及玉米产量,土地当量比为 1.58.此外,也有关于玉米马铃薯间作提高病害控制的报道^[13-15].然而,养分吸收和利用对产量优势的贡献机制仍不清楚.

另一方面,氮投入显著影响间作体系的生产力优势^[16].Li 等^[17]在研究氮肥用量对玉米小麦间作产量优势的影响时发现,土地当量比随施氮量增加而增加.但春小麦与豌豆^[18]、大麦与紫云英^[19]、甘蓝与洋葱间作^[20]的土地当量比因氮肥投入增加反而降低.同时,氮投入量也影响作物氮、磷、钾的吸收和利用^[21].在玉米花生间作中,施氮处理促进了间作体系氮、磷积累,提高了氮、磷吸收总量及磷吸收利用效率^[22].对番茄^[23]、小麦^[24]、棉花^[25]等作物研究表明,在一定范围内施氮可促进作物钾吸收和利用.目前,玉米与马铃薯间作对氮投入的响应研究中,Lal 等^[26]主要关注玉米与马铃薯间作对氮的需求;吴开贤等^[16]重点探讨了不施氮和施氮 276 kg · hm⁻²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等,结果表明,尽管氮投入增加了间作产量,但种间竞争加剧导致了间作优势降低.因此,不同供氮水平的养分吸收利用差异及其对间作优势的贡献需要进一步研究.

本文设置不同施氮量处理的玉米马铃薯间作田间小区试验,以等施氮量下的玉米单作、马铃薯单作为对照,分析作物养分吸收利用对玉米马铃薯间作产量优势的贡献大小及其对施氮量的响应,以期阐明玉米马铃薯间作体系中产量优势的植物营养基础,为通过氮肥调控提高间作作物产量、充分发挥间作优势提供理论支撑.

1 材料与方法

1.1 供试材料与试验地概况

试验于 2014 年和 2015 年在云南农业大学农场试验基地(23°32' N、102°2' E,海拔 1953.5 m)开展.该基地位于云南省昆明市东北部,属北亚热带季风气候,年平均日照时数 2617.4 h,无霜期为 301 d.2014 年和 2015 年年均温分别为 16.7 和 16.8 °C,年降水量分别是 862 和 1150 mm,降水主要集中在夏季(7—9 月).试验土壤为山地红壤,有机质 10.53 g · kg⁻¹,速效氮 34.7 mg · kg⁻¹,速效磷 5.8 mg · kg⁻¹,速效钾 51.29 mg · kg⁻¹,pH 为 7.75.

1.2 材料与方法

供试材料选用昆明地区广泛应用的玉米(*Zea mays*,耕源寻单 7 号)和马铃薯(*Solanum tuberosum*,会泽 2 号)为间作作物.研究设置 4 个氮水平和 3 种植植模式的随机区组田间小区试验.每个处理设 3 次重复,分别对应 3 个区组.种植模式分别是玉米单作、玉米与马铃薯间作、马铃薯单作.4 个施氮水平分别是 N₀、N₁(比 N₂ 减 50%)、N₂、N₃(比 N₂ 高 50%).玉米具体施氮量为:N₀(0 kg · hm⁻²)、N₁(125 kg · hm⁻²)、N₂(250 kg · hm⁻²)、N₃(375 kg · hm⁻²),分基肥、小喇叭口期追肥和大喇叭口期追肥 3 次施入,分别占总施氮量的 40%、25%、35%;各处理中玉米磷、钾肥均以基肥施入,分别施磷肥(P₂O₅) 75 kg · hm⁻²,钾肥(K₂O) 75 kg · hm⁻².马铃薯的 4 个施氮量分别是 N₀(0 kg · hm⁻²)、N₁(62.5 kg · hm⁻²)、N₂(125 kg · hm⁻²)、N₃(187.5 kg · hm⁻²),分基肥 60%、现蕾期 40%两次施入.马铃薯施磷肥(P₂O₅) 75 kg · hm⁻²,钾肥(K₂O) 125 kg · hm⁻²,磷、钾肥均以基肥形式施入.

试验小区面积 32.5 m²(5 m × 6.5 m).玉米株距 25 cm,马铃薯株距 35 cm,行距均为 50 cm,间作为 2 行玉米、2 行马铃薯的等面积替代种植方式,株距、行距与单作一致.小区周边种植 1 m 宽的玉米保护行.

1.3 采样与测定方法

作物成熟时选取小区中间两个条带进行产量、生物量测定.同时每个小区采集 5 株玉米(按籽粒、茎叶、根),5 株马铃薯(按块茎、茎叶)植株样品,于 105 °C 杀青 30 min,70 °C 烘干至恒量,称量后粉碎用于养分测定.所有植株样品含氮量采用凯氏定氮法,含磷量采用钒钼黄比色法,含钾量采用火焰光度计

法测定^[27].

1.4 计算公式

1)单位面积产量的分解^[28].产量/单位面积=(产量/养分吸收量)×(养分吸收量/单位面积).式中:产量/养分吸收量即养分利用效率;养分吸收量/单位面积为养分吸收效率.

2)养分吸收量的比较.运用文献给出的公式^[29],计算间作系统养分吸收量、单作养分吸收量以及间作相对于单作的变化.这里的单作养分吸收量指单作玉米和单作马铃薯的养分吸收量以间作比例为权重的加权平均值.以氮为例:

$$\Delta N = \{ [N_i / (F_m N_m + F_p N_p)] - 1 \} \times 100\% \quad (1)$$
式中: N_i 为间作中玉米和马铃薯的总吸氮量; N_m 和 N_p 分别为单作玉米和单作马铃薯的吸氮量; F_m 和 F_p 分别为间作中玉米和马铃薯的比例,用公式 $F_m = D_m / (D_m + D_p)$ 计算得到, D_m 和 D_p 分别为间作中玉米和马铃薯相对于单作玉米和单作马铃薯种植密度的比率,本研究中 $F_m = 0.5$ 、 $F_p = 0.5$. $(F_m N_m + F_p N_p)$ 即为单作玉米和单作马铃薯的氮吸收量(以间作比例为权重的加权平均值).间作吸氮量相对于单作的增减由 ΔN 的正负决定.磷和钾的计算方法相同.

3)养分利用效率的比较.养分利用效率可基于经济产量和生物学产量计算,分别称经济产量养分利用效率和生物学产量养分利用效率.以氮为例,经济产量氮利用效率指单位氮吸收量所能生产的经济产量.间作相对于单作的经济产量氮利用效率增减(ΔNUE)采用如下公式计算^[29]:

$$\Delta NUE = [(Y_i / N_i) / (F_m Y_m NU_m + F_p Y_p / NU_p) - 1] \times 100\% \quad (2)$$

式中: Y 为产量,下标与上式中意义相同. 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.磷和钾的利用效率增减计算类似.生物学产量养分利用效率增减(以氮为例,记为 $\Delta NUEB$)计算与经济产量养分利用效率增减的计算方式相似,将产量替代为生物量即可.

4)养分收获指数可反映作物生长后期养分由茎叶向收获器官转移的强度,以地上部养分总累积总量中收获器官的养分累积量的占比衡量^[29].养分收获指数=收获器官中养分累积量/全植株养分总累积量.

5)养分吸收和利用效率对产量优势的贡献.土地当量比(LER)经常被作为间作优势的指标:

$$LER = Y_{im} / Y_{sm} + Y_{ip} / Y_{sp} \quad (3)$$

式中: Y_{im} 和 Y_{ip} 分别为间作中玉米和马铃薯的产量; Y_{sm} 和 Y_{sp} 分别为单作玉米和单作马铃薯的产量.LER大于1,表示有间作产量优势;LER小于1,则无间作产量优势.

以氮为例,定义玉米在间作和单作中的吸收量和利用效率分别为 A_{im} 、 A_{sm} 和 E_{im} 、 E_{sm} ;相应马铃薯分别为 A_{ip} 、 A_{sp} 和 E_{ip} 、 E_{sp} .则 $LER = (A_{im} / A_{sm}) \times (E_{im} / E_{sm}) + (A_{ip} / A_{sp}) \times (E_{ip} / E_{sp})$.令 $am = (A_{im} / A_{sm}) - 1$, $ap = (A_{ip} / A_{sp}) - 1$; $em = (E_{im} / E_{sm}) - 1$, $ep = (E_{ip} / E_{sp}) - 1$,则 $LER = 1 + (1 + am + ap) + (em + ep) + (am \times em + ap \times ep)$.式中: $1 + am + ap$ 为由于间作引起的相对于单作养分吸收量增减对间作产量优势的贡献; $em + ep$ 是由间作引起的相对于单作养分利用效率的变化对间作产量优势的贡献; $am \times em + ap \times ep$ 则是养分吸收和利用效率交互作用对间作优势的贡献^[29].磷和钾按同法计算.

1.5 数据处理

利用 SPSS 17.0 软件进行单因素方差分析,采用最小差异显著法(LSD)进行不同处理间多重比较($\alpha = 0.05$).图表绘制用 Excel 软件完成.

2 结果与分析

2.1 不同体系和氮肥水平下经济学产量比较

施氮量影响了玉米和马铃薯的经济学产量(图1).当施氮量小于 N_3 时,单作的加权平均产量随着施氮量的增加而增加.间作产量与玉米单作时的规律一致,在 N_2 水平下最大.间作具有产量优势,在相同氮水平下间作经济学产量高于两种作物单作加权平均经济学产量.

2.2 氮、磷、钾吸收量比较

从两年的数据来看,间作显著影响作物氮素吸收量,但这种影响因施氮量不同而各异(图1,表1). N_0 和 N_1 水平下,间作相对于单作氮吸收量提高了5%~15%,且以 N_1 下氮吸收量增幅最高; N_2 下间作无显著影响, N_3 下间作反而降低了作物氮吸收量,降幅高达9%~19%.同一种植模式下, $N_0 \sim N_2$ 范围内随施氮量增加,间作和单作的加权平均氮吸收量均逐渐增加,而 N_3 与 N_2 两年结果不同.

一定的施氮量下,间作具有增加作物磷吸收量的优势.相对于单作加权平均,间作在 N_0 、 N_1 、 N_2 下均有吸收优势,其中 N_1 水平间作增幅最大,两年平均增加 $17.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,增幅为38.5%,而 N_3 水平间作磷吸收量无优势甚至降低(图1).同时,间作、单作加权平均磷吸收量均受施氮水平的显著影响,两

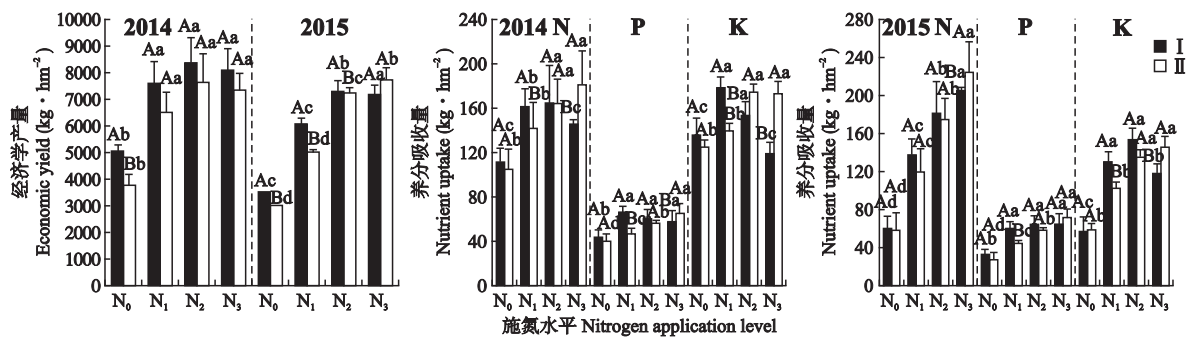


图 1 间作和单作系统的经济学产量以及氮、磷、钾吸收量

Fig.1 Economic yield and N, P and K uptake in intercropping and monoculture systems.

I : 间作 Intercropping; II : 单作 Monoculture. 不同小写字母代表同一种植模式下的不同氮水平间差异显著 ($P<0.05$) Different lowercase letters meant significant difference among different N levels at 0.05 level in the same planting pattern. 不同大写字母代表同一施氮水平下间作和单作之间差异显著 ($P<0.05$) Different capital letters meant significant difference between monoculture and intercropping at 0.05 level at the same N level. 下同 The same below.

表 1 氮、磷、钾吸收量和利用效率的增减

Table 1 Changes of nutrient uptake and N, P and K use efficiency

养分 Nutrient	处理 Treatment	养分吸收量的增减 Change of nutrient uptakes by intercrops relative to monoculture (%)		生物学产量养分利用效率的增减 Change of nutrient use efficiency of biological yield (Δ NUEB, Δ PUEB, Δ KUEB, %)		经济产量养分利用效率的增减 Change of nutrient use efficiency of economic yield (Δ NUEY, Δ PUEY, Δ KUEY, %)	
		2014	2015	2014	2015	2014	2015
N	N ₀	7	5	0	7	26	12
	N ₁	14	15	-1	-1	2	6
	N ₂	1	3	4	6	9	-2
	N ₃	-19	-9	23	6	28	10
P	N ₀	9	16	-1	-3	24	1
	N ₁	40	37	-19	-17	-16	-11
	N ₂	8	12	-2	-2	2	-10
	N ₃	-11	-10	11	7	17	4
K	N ₀	8	-2	-1	10	24	19
	N ₁	28	28	-13	-11	-8	-5
	N ₂	-11	14	19	-4	24	-11
	N ₃	-31	-19	44	19	51	15

年结果一致.当施氮量低于 N₁时,随着施氮量增加,玉米马铃薯间作磷吸收量逐渐增加;在 N₁基础上再增加施氮量后,间作对磷的吸收量不再显著增加.而对于单作加权平均来说,两种作物磷吸收量的加权平均值一直随施氮量的增加而增加,以 N₃最高.

不同施氮量下的间作钾吸收量在 N₀、N₃下最低,N₁或 N₂下达最大;单作加权平均钾吸收量随施氮量增加而增加,在 N₂下达最大值,N₃与 N₂无显著差异(图 1). Δ K 计算结果表明,相对于单作加权平均,间作钾吸收量在 N₁下增幅达 28%,N₂下有年度差异,而 N₀和 N₃均无吸收优势或表现出更低的吸收量.

总体上,无论是氮、磷还是钾,两年数据结果均显示,在 N₃处理下,间作相对于单作的吸收量的增减值为负,过量施氮使间作氮、磷、钾吸收不如单作,表现为间作吸收劣势;当施氮水平为 N₁时,间作具

有显著氮、磷、钾吸收优势,增幅达 14%~40%.

2.3 间作与单作物氮、磷、钾利用效率

2.3.1 生物学产量利用效率

如图 2 所示,施氮量对间作和单作加权平均生物学产量氮利用效率无促进作用.4 个氮水平下,两年的单作加权平均生物学产量氮利用效率无显著差异,甚至在 N₃下出现降低;而单作加权平均则随施氮量增加呈逐渐下降趋势.单、间作之间,在 N₃处理下差异显著,间作的氮利用效率分别提高 23%(2014)和 6%(2015).

从两年数据来看,随施氮量增加,基于生物学产量计算的磷利用效率在间作和单作加权平均下均无显著差异.然而对单作和间作进行比较发现,在 N₁、N₂处理下,间作磷生物学产量利用效率低于单作,表现为间作劣势;而在 N₃下间作磷利用效率显著高于单作 7%~11%,体现出磷利用的间作优势.2014 年,

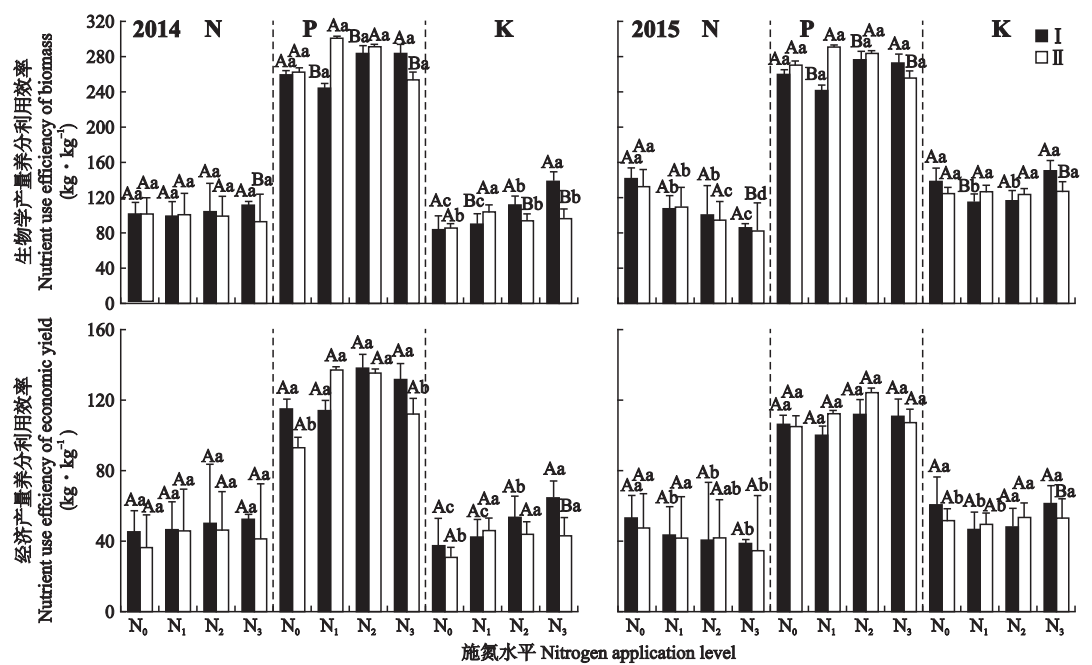


图2 间作和单作系统中生物学产量和经济学产量的氮、磷、钾利用效率
Fig.2 N, P and K use efficiency for dry matter and grain yield in intercropping and monoculture systems.

基于生物学产量的钾素利用效率在间作中随施氮量增加而提高,在单作中则表现为先增加后降低,以 N_1 下最大.2015 年,由于不施氮产量较低,钾素生物学产量利用效率在间作和单作中均较高.就单、间作比较而言,在 N_1 下,间作利用效率明显低于单作,两年平均降低 12%;在 N_3 下,则间作高于单作,体现出较强的间作钾素利用优势.

2.3.2 经济学产量利用效率 施氮量对间作和单作加权平均氮素利用效率影响不显著,仅在 2015 年 N_0 下较高(图 2).在同一氮水平下,在 N_0 和 N_3 下间作有提高籽粒氮利用效率的趋势,而在 N_1 和 N_2 下则与单作加权平均值十分接近.

除了 2014 年单作外,施氮量对间作籽粒产量磷利用效率及单作相应加权平均值无显著影响.在同一氮水平下,单、间作之间差异不显著.与氮、磷不同,籽粒钾利用效率在间作和单作加权平均下均表现出随施氮量增加而上升的趋势.对比单、间作,在 N_3 水平下间作籽粒钾利用效率显著高于单作,两年平均高 37.5%,而其余氮水平下两者差异不显著.

2.4 作物氮、磷、钾养分收获指数

如表 2 所示,单、间作之间氮收获指数除 2014 年在 N_0 水平下单作高于间作外,其余均无显著差异.施氮量对间作氮收获指数影响不显著,2015 年单作氮收获指数随着施氮量的增加而降低, N_3 处理下达最低值,而 2014 年单作氮收获指数受施氮量的影

响不显著.
磷收获指数在 N_0 和 N_1 处理下,间作高于单作,两年分别高 0.03~0.08(N_0)和 0.06(N_1 两年一致).而在 N_2 和 N_3 处理下,磷的收获指数间作低于单作,2015 年差异较显著,单作较间作分别高 0.07(N_3)和 0.08(N_2).施氮量的变化对单作的磷收获指数影响不大,间作磷收获指数随施氮量的增加而逐渐降低,

表 2 间作与单作条件下作物的氮、磷、钾收获指数
Table 2 Harvest indices of N, P and K in intercropping and monoculture systems

养分 Nutrient	处理 Treatment	间作 Intercropping		单作加权平均 Weighted mean for monoculture	
		2014	2015	2014	2015
N	N_0	0.54Aa	0.47Aa	0.44Ba	0.49Aa
	N_1	0.49Aa	0.46Aa	0.52Aa	0.43Aab
	N_2	0.48Aa	0.44Aa	0.52Aa	0.45Aab
	N_3	0.50Aa	0.42Aa	0.48Aa	0.41Ab
P	N_0	0.51Aa	0.46Aa	0.43Aa	0.43Aa
	N_1	0.51Aa	0.45Aa	0.45Aa	0.39Aa
	N_2	0.49Aa	0.40Ba	0.54Aa	0.48Aa
	N_3	0.47Aa	0.36Bb	0.49Aa	0.43Aa
K	N_0	0.35Aa	0.33Aa	0.27Bb	0.21Ba
	N_1	0.31Ab	0.29Ab	0.31Aa	0.26Aa
	N_2	0.32Ab	0.25Ab	0.34Aa	0.28Aa
	N_3	0.37Aa	0.30Aa	0.31Ba	0.22Ba

不同小写字母代表同一年份的不同氮水平间差异显著 ($P<0.05$) Different lowercase letters meant significant difference under different N levels at 0.05 level in the same year. 不同大写字母代表同一施氮水平下两年间差异显著 ($P<0.05$) Different capital letters meant significant difference between 2014 and 2015 at 0.05 level at the same N level.

表 3 氮、磷、钾吸收和利用效率对间作优势的贡献
Table 3 Contribution of N, P and K uptake, utilization and interaction factors to the land equivalent ratio (LER)

养分 Nutrient	处理 Treatment	土地当量比 LER		吸收因子 Uptake factor		利用因子 Utilization factor		交互因子 Interaction factor	
		2014	2015	2014	2015	2014	2015	2014	2015
N	N ₀	1.29	1.12	0.20	0.07	0.37	0.10	-0.28	-0.05
	N ₁	1.10	1.19	0.15	0.31	-0.09	-0.08	0.04	-0.04
	N ₂	0.95	1.01	0.01	0.05	-0.16	-0.08	0.10	0.04
	N ₃	0.91	0.94	-0.15	-0.07	0.17	0.05	-0.01	-0.03
P	N ₀	1.29	1.12	0.04	0.20	0.50	-0.05	-0.25	-0.03
	N ₁	1.10	1.19	0.31	0.34	-0.29	-0.02	0.08	0.05
	N ₂	0.95	1.01	-0.02	0.12	-0.09	-0.02	0.06	0.09
	N ₃	0.91	0.94	-0.23	-0.08	0.32	0.06	-0.18	-0.04
K	N ₀	1.29	1.12	0.07	0.04	0.41	0.24	-0.19	-0.17
	N ₁	1.10	1.19	0.30	0.29	-0.27	-0.15	0.07	-0.05
	N ₂	0.95	1.01	-0.12	0.19	0.12	-0.29	-0.05	0.10
	N ₃	0.91	0.94	-0.29	-0.18	0.63	0.30	-0.43	-0.18

两年均在 N₃处理下达最小值。

在 N₀、N₃处理下,两年间作钾的收获指数均高于单作。在 N₁和 N₂处理下,单、间作钾的收获指数差异不显著。单作钾收获指数随施氮量的增加呈先增后降趋势,在 N₀和 N₂处理时分别为最小和最大值。间作钾收获指数对施氮量的响应较大,随着施氮量的增加呈先降后增趋势,在 N₀基础上增加施氮量至 N₁和 N₂时,间作钾收获指数显著降低,N₁、N₂间差异不显著,当施氮量增至 N₃时,间作钾收获指数又显著增加,2014 年达最大值。

2.5 氮、磷、钾吸收和利用效率对间作优势的贡献

如表 3 所示,在 N₀、N₁施氮水平下,LER>1,间作具有产量优势;N₂下间作产量与单作接近,N₃下 LER<1,间作表现为产量劣势。两年试验结果均显示,随着施氮量增加,玉米马铃薯间作的产量优势逐渐降低,过多氮肥投入甚至导致产量劣势。

通过计算氮、磷、钾吸收和利用对间作产量优势的贡献发现,对于氮素来说,当间作具有产量优势时(N₀、N₁),氮吸收因子为正值;在 N₃水平下间作表现产量劣势情况下,氮吸收因子小于零。氮利用因子在 N₀和 N₃下为正值,N₁和 N₂下接近或小于零。氮吸收和利用的交互因子的绝对值大多接近于零,不同氮水平下差异也较小。总体上,氮吸收因子因施氮量变化而改变,其大小与 LER 值同增同降,变化趋势一致。

各个施氮水平下磷和钾的吸收因子、利用因子与氮类似。当 LER 大于 1(N₀、N₁)时吸收因子为正值,当 LER 小于 1(N₃)时为负值。同样,对于磷和钾的利用因子,在 N₀和 N₃下大多大于零,N₁、N₂下小

于零。磷和钾的吸收与利用交互因子对产量优势的贡献较小,在 N₁、N₂下绝对值接近于零,但在 N₀和 N₃下正好与利用因子相反,表现为负值。

3 讨 论

3.1 间作对作物氮、磷、钾吸收和利用的影响

间作可显著影响作物养分吸收。本研究发现,相比于单作,间作可提高氮吸收 1%~13.2%,磷吸收 7.3%~28.6%,钾吸收 7.8%~21.8%。前期对其他间作系统的研究发现,玉米与大豆间作中玉米苗期和穗期吸氮量较单作平均增加 37%,玉米吸磷量增加 14%~16%^[30],小麦与蚕豆间作小麦氮吸收量平均提高 16%^[31]。这些研究的施氮量高于本研究的 N₁水平,接近 N₂水平,因此与本研究 N₁、N₂时所表现的趋势一致。同样,在本研究 N₁和 N₂水平下,间作相对于单作加权平均具有促进磷和钾吸收的效应,这与之前的研究结论一致^[10-11]。关于间作促进养分吸收的原因,前人提出了作物错峰生长导致的恢复补偿效应机制,并在小麦和玉米间作中得到了证实^[32]。这一理论认为,先出苗的早期优势作物可在共生早期获得更多地上光照资源和地下养分资源空间,该作物收获后另一作物迅速恢复生长并可比单作获得更丰富的光、水、养分等资源。不过,在玉米和马铃薯间作体系中养分吸收量的增加是否缘于此,尚缺乏直接研究证据,仍待进一步证实。

当然,间作并非总是会提高作物养分吸收量,反之,有研究表明间作抑制植物对氮、磷、钾等养分的吸收,从而抑制生长。在紫穗槐大豆间作系统中,间作大豆氮吸收量降低,紫穗槐和大豆生长均受到抑

制^[33];在玉米与花生的间作中,间作降低了花生对氮的吸收量^[22].这些差异可能来源于种植不同的间作作物以及试验地土壤类型和地力水平差异.由此可看出,与大多间作体系相比,玉米与马铃薯间作在养分吸收上具有更优的促进效应,意味着更低的养分损失,是高产高效现代农业值得推广应用的种植模式.

本研究中, N_2 水平下,间作可提高氮和钾的利用率,但对磷利用则有一定的抑制作用.前期研究指出,不同的作物配套体系,间作对养分利用的效应并不相同^[11].进一步分析 N_2 水平下的氮、磷、钾收获指数发现,单、间作之间氮收获指数差异较小,暗示间作尽管提高了氮吸收,但可能主要用于增加生物量,而并未大幅改变其向收获部分的转移比例.而间作的磷和钾收获指数低于单作,说明此时间作反而不利于作物收获器官对磷、钾的利用.

3.2 间作作物氮、磷、钾吸收与利用对施氮量的响应

本研究证实,相对于单作,玉米与马铃薯间作体系中氮、磷、钾吸收和利用的间作效应受施氮水平影响.从 N_0 到 N_1 水平,间作对氮、磷、钾养分吸收的促进效应显著提升,在此基础上进一步增施氮肥,间作促进养分吸收的效应下降,直至 N_3 水平时表现为间作降低养分吸收.肖靖秀等^[34]在蚕豆和油菜间作系统中发现,随施氮量增加,作物生物量逐渐增加,单间作油菜氮吸收均增加,与本研究结果一致.当玉米与花生间作时,间作促进了玉米和花生对氮的吸收,且随施氮量增加而显著增加,但增幅降低^[35].玉米与蚕豆间作的研究则表明,与不施氮相比,施氮可提高间作的促进养分吸收效应,但这种促进优势并不随施氮量变化而具有明显的规律性^[36].总体上,大多研究支持施氮量是影响间作产量优势和养分吸收利用间作效应的重要因素,这为在农业生产上通过调控施氮进而充分发挥间作优势提供了重要依据.

值得注意的是,与吸收量相反,在间作吸收促进效应最好的 N_1 水平,间作利用效率大幅下降,而在吸收促进效应较低甚至为负值的 N_0 和 N_3 水平,间作氮、磷、钾利用率远高于单作加权平均值.即在玉米马铃薯间作中,间作在促进氮、磷、钾吸收和促进其利用上的施氮量难以达到协调.大多研究表明,施氮量在 $170 \sim 200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,玉米产量可达 $9000 \sim 11000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[37-38].施氮对豌豆、玉米间作体系的增产效果显著高于单作,作物产量随施氮量的增加而显著提高,而农户习惯在施氮处理基础上减量

15%氮肥处理和农户习惯施氮处理间无显著性差异^[39].本研究也发现,施氮能提高间作体系的产量,但并非施氮越多产量增加越显著,当地当前农业生产的施氮量是过量的,在此基础上减量50%间作中作物的产量更高.

参考文献

- [1] Opoku-Ameyaw K, Harris PM. Intercropping potatoes in early spring in a temperate climate. I. Yield and intercropping advantages. *Potato Research Journal*, 2001, **44**: 53-61
- [2] Gustave NM, Ledent J, Draye X. Shoot and root competition in potato/maize intercropping: Effects on growth and yield. *Environmental and Experimental Botany Journal*, 2008, **64**: 180-188
- [3] Ebwongu M, Adipala E, Ssekabembe CK, et al. Effect of intercropping maize and solanum potato on yield of the component crops in Central Uganda. *African Crop Science Journal*, 2001, **9**: 83-96
- [4] Lal B, Rana KS, Gautam P. Ethiopian mustard-chickpea intercropping system is a viable option for yield advantage in dryland condition of North India-Part II. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 2016, **3**: 1-10
- [5] Shen Q-R (沈其荣), Chu G-X (褚贵新), Cao J-L (曹金留), et al. Yield advantage of groundnut intercropped with rice cultivated in aerobic soil from the viewpoint of plant nitrogen nutrition. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2004, **37**(8): 1177-1182 (in Chinese)
- [6] Zhu Y-Y (朱有勇), Chen H-R (陈海如), Fan J-H (范静华), et al. Genetic diversity and disease control in rice. *Nature*, 2000, **406**: 718-722
- [7] Shi G-L (师光禄), Zhao L-L (赵莉茜), Miao Z-W (苗振旺), et al. The structure and dynamics of pest insect communities in jujube sites of different intercropped systems. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2005, **25**(9): 2263-2271 (in Chinese)
- [8] Brooker RW, Bennett AE, Cong WF, et al. Improving intercropping: A synthesis of research in agronomy, plant physiology and ecology. *New Phytologist*, 2015, **206**: 107-117
- [9] Blaise D, Bonde AN, Chaudhary RS. Nutrient uptake and balance of cotton + pigeon pea strip intercropping, on rainfed vertisols of central India. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2005, **73**: 135-145
- [10] Li L (李隆), Li X-L (李晓林), Zhang F-S (张福锁), et al. Uptake and utilization of nitrogen, phosphorus and potassium as related to yield advantage in wheat/

- soybean intercropping. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer* (植物营养与肥料学报), 2000, **6**(2): 140–146 (in Chinese)
- [11] Dang X-Y (党小燕), Liu J-G (刘建国), Pani G-L (帕尼古丽), *et al.* Uptake and conversion efficiencies of NPK and corresponding contribution to yield advantage in cotton-based intercropping systems. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2012, **20**(5): 513–519 (in Chinese)
- [12] He G-Y (何国艳), Tang L (汤利), Zheng Y (郑毅). Effect of maize and potato intercropping on the amount of rhizosphere microorganisms. The Twelfth National Congress of the Chinese Soil Association and the Ninth Symposium on Soil Fertilizer Academic Exchange between China and Taiwan, Chengdu, 2012: 65–72 (in Chinese)
- [13] Li Y-J (李勇杰), Tang L (汤利), Zheng Y (郑毅), *et al.* Effects of root separation on nutrient uptake of wheat and occurrence of powdery mildew under wheat-faba bean intercropping. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer* (植物营养与肥料学报), 2007, **13**(5): 929–934 (in Chinese)
- [14] Xiao J-X (肖靖秀), Zhou G-S (周桂夙), Zheng Y (郑毅), *et al.* Effects of nitrogen and potassium nutrition on the occurrence of *Blumeria graminis* (DC). Speer of wheat in wheat and faba bean intercropping. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer* (植物营养与肥料学报), 2006, **12**(4): 517–522 (in Chinese)
- [15] Xiao J-X (肖靖秀), Zheng Y (郑毅). Nutrients uptake and pests and diseases control of crops in intercropping system. *Chinese Agricultural Science Bulletin* (中国农学通报), 2005, **21**(3): 150–154 (in Chinese)
- [16] Wu K-X (吴开贤), An T-X (安童昕), Wu B-Z (吴伯志), *et al.* Effects of nitrogen input on yields advantage and interaction of the maize and potato intercropping. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer* (植物营养与肥料学报), 2012, **18**(4): 1006–1012 (in Chinese)
- [17] Li QZ, Sun JH, Li L, *et al.* Overyielding and interspecific interactions mediated by nitrogen fertilization in strip intercropping of maize with faba bean, wheat and barley. *Plant and Soil*, 2011, **339**: 1–15
- [18] Ghaley BB, Hauggaard-Nielsen HH, Gh-Jensen HAES. Intercropping of wheat and pea as influenced by nitrogen fertilization. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2005, **73**: 201–212
- [19] Mohsenabadi GR, Jahansooz MR, Chaichi MR, *et al.* Evaluation of barley-vetch intercrop at different nitrogen rates. *Agricultural Science*, 2008, **10**: 23–31
- [20] Mutiga SK. Agronomic performance of collards under two intercrops and varying nitrogen application levels as assessed using land equivalent ratios. *Agricultural Science*, 2011, **3**: 22–27
- [21] Chen Y-X (陈远学), Li H-H (李汉邯), Zhou T (周涛), *et al.* Effects of phosphorus fertilization on leaf area index, biomass accumulation and allocation, and phosphorus use efficiency of intercropped maize. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2013, **24**(10): 2799–2806 (in Chinese)
- [22] Jiao N-Y (焦念元), Ning T-Y (宁堂原), Zhao C (赵春), *et al.* Effect of nitrogen application and planting pattern on N and P absorption and use in maize-peanut intercropping system. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2008, **34**(4): 706–712 (in Chinese)
- [23] Tang M-Y (汤明尧), Zhang Y (张炎), Hu W (胡伟), *et al.* Effects of different nitrogen rates on nutrition absorption, distribution and yield in tomato. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer* (植物营养与肥料学报), 2010, **16**(5): 1238–1245 (in Chinese)
- [24] Liu X-J (刘学军), Ju X-T (巨晓棠), Zhang F-S (张福锁), *et al.* Effects of reduced N application on N utilization and balance in winter wheat-summer maize cropping system. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(3): 458–462 (in Chinese)
- [25] Zou F-G (邹芳刚), Zhang G-W (张国伟), Wang Y-H (王友华), *et al.* Effect of nitrogen application amounts on uptake and utilization of potassium in cotton grown in improved coastal saline land regions. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2015, **41**(1): 80–88 (in Chinese)
- [26] Lal SS, Dua VK, Govindakrishnan PM. Nitrogen requirement of maize in potato plus maize intercropping system in Shimla hills. *Potato*, 2005, **32**: 165–166
- [27] Bao S-D (鲍士旦). Soil and Agricultural Chemistry Analysis. Beijing: China Agriculture Press, 1980 (in Chinese).
- [28] Morris RA, Garrity DP. Resource capture and utilization in intercropping: No nitrogen nutrients. *Field Crops Research*, 1993, **34**: 319–334
- [29] Trenbath BR. Multiple Cropping Systems. New York: Macmillan, 1986
- [30] Yin Y-P (尹元萍), Zhang Y-Q (张雅琼), Shen Y-H (申毓晗), *et al.* Characteristics of maize/soybean intercropping system about root traits and absorption of nitrogen and phosphorus nutrient. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences* (西南农业学报), 2014, **27**(6): 2305–2310 (in Chinese)
- [31] Xiao J-X (肖靖秀), Zhu Y-A (朱映安), Zhao P (赵平), *et al.* Effects of intercropping and nitrogen application levels on nitrogen uptake and utilization in wheat.

Jiangsu Agricultural Sciences (江苏农业科学), 2011, **39**(6): 140–142 (in Chinese)

[32] Li L, Sun JH, Zhang FS, *et al.* Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping. II. Recovery or compensation of maize and soybean after wheat harvesting. *Field Crops Research*, 2001, **71**: 173–181

[33] Guo Z-L (郭忠录), Zhong C (钟 诚), Cai C-F (蔡崇法), *et al.* Effect of root interaction on growth and N uptake in a hedgerow and soybean intercropping system. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2008, **14**(1): 59–64 (in Chinese)

[34] Xiao J-X (肖靖秀), Tang L (汤 利), Zheng Y (郑毅). Effects of N fertilization on yield and nutrient absorption in rape and faba bean intercropping system. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer* (植物营养与肥料学报), 2011, **17**(6): 1468–1473 (in Chinese)

[35] Jiao N-Y (焦念元), Ning T-Y (宁堂原), Zhao C (赵春), *et al.* Effect of nitrogen application and planting pattern on N and P absorption and use in maize-peanut intercropping system. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2008, **34**(4): 706–712 (in Chinese)

[36] Li Y-Y (李玉英), Yu C-B (余常兵), Sun J-H (孙建好), *et al.* Nitrogen environmental endurance and economically-ecologically appropriate amount of nitrogen fertilizer in faba bean/maize intercropping system. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2008, **24**(3): 223–227 (in Chinese)

[37] Sun H (孙 浒), Zhang J-W (张吉旺), Jin L-B (靳立斌). Problems and approaches of achieving high yield and high nitrogen use efficiency in maize production. *Journal of Maize Sciences* (玉米科学), 2014, **22**(1): 143–148 (in Chinese)

[38] Gao X-X (高肖贤), Zhang H-F (张华芳), Ma W-Q (马文奇), *et al.* Effects of nitrogen application rates on yield and nitrogen utilization of summer maize. *Journal of Maize Sciences* (玉米科学), 2014, **22**(1): 121–126 (in Chinese)

[39] Shi Z-X (史中欣). Water and Fertilizer Use Efficiency Response of Maize/pea Intercropping to Planting Structure and Nitrogen Application Rate in Oasis Irrigation Area. Master Thesis. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2010 (in Chinese)

作者简介 马心灵,女,1990年生,硕士研究生.主要从事间作养分吸收与氮素淋失研究. E-mail: 1924843961@qq.com

责任编辑 张凤丽
