农 业 资 源 与 环 境 学 报
2019年7月·第36卷·第4期：471-479

Journal of Agricultural Resources and Environment
July 2019·Vol.36·No.4:471-479

钱韩玲，朱启林，周　龙，等. 间作促进作物磷吸收的氮素调控效应[J]. 农业资源与环境学报，2019，36(4)：471-479.

QIAN Han-ling, ZHU Qi-lin, ZHOU Long, et al. Regulation effect of nitrogen application on promotion of phosphorus uptake of crops under intercropping [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(4): 471-479.

间作促进作物磷吸收的氮素调控效应

钱韩玲，朱启林，周　龙，龙光强，汤　利*

（云南农业大学资源与环境学院，昆明 650201）

摘　要：为探讨通过氮素调控促进间作作物磷吸收利用的效果，阐明间作的氮磷交互作用机理。设置3种种植模式（玉米马铃薯间作、玉米单作和马铃薯单作）、4个施氮水平（N0：不施氮、N1：1/2常规量、N2：常规量、N3：3/2 常规量）的田间小区定位试验，研究玉米马铃薯间作对作物磷吸收和利用的影响，并分析磷吸收对施氮量的响应。结果表明：施氮量显著影响间作产量，低氮（N1）水平间作产量优势最大。间作玉米和马铃薯的磷吸收量均随施氮量增加而降低，在N2水平达到最大。在低氮条件下，间作玉米磷吸收量较单作平均提高了42.03%，马铃薯提高了13.46%。随施氮量的增加，玉米马铃薯间作的单位面积磷吸收的优势呈先增加后下降的趋势，在N1水平优势最强。在N1水平中，与单作相比，间作玉米籽粒磷吸收量平均增加86.26%，间作马铃薯块茎磷吸收量平均增加14.28%。因此，在保证作物产量和提高氮磷肥利用率的前提下，合理施入氮肥能够促进间作作物对磷素的吸收与利用。

关键词：玉米；马铃薯；间作；氮水平；磷吸收；磷利用

中图分类号：S344；S143　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：2095-6819(2019)04-0471-09　　**doi**: 10.13254/j.jare.2018.0108

Regulation effect of nitrogen application on promotion of phosphorus uptake of crops under intercropping

QIAN Han-ling, ZHU Qi-lin, ZHOU Long, LONG Guang-qiang, TANG Li*

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

Abstract: It is of great significance to explore how nitrogen regulation promotes phosphorus absorption and utilization in intercropped crops for elucidating interaction mechanism of nitrogen and phosphorus and nitrogen management in intercropping. Effects of intercropping on absorption and utilization of phosphorus, and its response to nitrogen were analyzed through field plot experiment with 3 planting patterns (maize and potato intercropping and corresponding monoculture) and 4 nitrogen levels including no nitrogen fertilizer(N0), 50% of regular nitrogen amount(N1), regular nitrogen amount(N2) and 150% of regular nitrogen amount(N3). The results showed that nitrogen application significantly affected yield advantage of intercropping, and low nitrogen(N1) had the greatest yield advantage. Phosphorus uptake of intercropped maize and potato decreased with the increase of nitrogen application rates, and phosphorus uptake was the largest at N2 level. Compared with corresponding monoculture at N1 level , phosphorus uptake in intercropped maize and intercropped potato increased 42.03% and 13.46%, respectively. Advantages of phosphorus absorption per unit area in intercropping system increased firstly and then decreased with the increase of nitrogen application rates, and the advantages were the strongest at N1. Absorbed phosphorus by maize concentrated mainly in grain, followed by straw and root, while phosphorus by potato in tubers. Compared with monoculture at N1 level, grain phosphorus in intercropped maize increased averagely 86.26% while averaged uptake by tubers of intercropped potato increased 14.28%. Therefore, the rational nitrogen application can promote the increasing effect of intercropping on phosphorus absorption and utilization on the premise of ensuring crop yield and improving the utilization rate of nitrogen and phosphate fertilizer.

Keywords: maize; potato; intercropping; nitrogen levels; phosphorus absorption; phosphorus utilization

收稿日期：2018-05-07　　**录用日期**：2018-07-25

作者简介：钱韩玲(1992—)，女，云南曲靖人，硕士研究生，主要从事施肥与作物养分吸收利用研究。E-mail：1546956457@qq.com

***通信作者**：汤　利　E-mail：ltang@ynau.edu.cn

基金项目：国家重点研发计划项目(2017YFD0200207)；国家自然科学基金项目(41361065，31760615)

Project supported: The National Key Research & Development Program of China(2017YFD0200207); The National Natural Science Foundation of China (41361065，31760615)

目前，许多研究证实，合理间作能够充分利用空间结构和水热光温，进而促进作物增产，提高养分吸收利用效率及土地利用率，并有效控制农作物病虫害的发生[1-2]。据估计，间作在世界范围内种植面积达1亿hm^2之多，我国的种植面积也达到了0.2亿hm^2[3-4]。玉米（*Zea mays* L.）是高秆、深根系禾本科作物，马铃薯（*Solanum tuberosum* L）是矮秆、喜阴茄科作物，在时间和空间上两者具有资源互补优势。玉米马铃薯间作是旱地间作种植的主要模式之一，在我国西南、东北和西北等地大量应用。早在20世纪90年代初云南省玉米马铃薯间作种植面积就超过13.34万hm^2[5]，2∶2行比种植模式占较大比例，主要分布于滇中、滇东北及滇西等地，被云南省作为提高粮食产量的主要措施加以示范推广。许多研究表明间作玉米马铃薯具有较高的土地当量比[6]，促进氮[7]、钾[8]养分吸收和利用，对改善土壤微生物丰度、活性和功能多样性有积极效应[9]。

磷是植物生长过程中必需的营养元素之一，也是保障产量、提高作物品质的重要因素[10-11]。近年来，随着大量磷肥的施入，土壤有效磷增加，但在土壤中磷素存在固定性强、移动性弱的特点[12]，磷素的当季利用率仅为10%~25%[13]。现有研究表明合理间作可以提高土壤的有效磷[14]和作物根际速效氮、磷[15]，并促进磷的吸收利用[16]。小麦//蚕豆[17]、玉米//大豆[18]、玉米//紫花苜蓿[19]、小麦//大豆[20]等豆科与禾本科间作体系已有许多研究报道，但有关玉米马铃薯间作的磷吸收利用特征尚研究较少，因此，本文以云南典型春季作物间作模式——玉米马铃薯间作模式为研究对象，通过与单作玉米和单作马铃薯比较，探讨在不同施氮水平下间作种植模式对作物磷素吸收与利用的影响，以期为利用合理间作模式提高磷养分利用效率，促进减肥增效提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验时间为2015年和2016年，地点为云南农业大学现代农业教育科研基地，位于昆明市东北部（23°32′N，103°13′E），海拔1 953.5 m，属于北亚热带季风气候，两年的年平均气温19.8 ℃，5—10月为雨季，年降水量1084 mm。试验土壤为山地红壤，土壤类型为红壤，有机质含量25.06 g·kg^{-1}，全氮1.11 g·kg^{-1}，碱解氮87.37 mg·kg^{-1}，速效磷23.31 mg·kg^{-1}，速效钾207.82 mg·kg^{-1}，pH 6.79。

1.2 材料与方法

玉米品种为耕源寻单7号；马铃薯品种为会泽2号（2015）和合作88号（2016年）。本研究采用3种种植模式和4个氮水平的裂区区组试验设计，小区试验设计3种种植模式：单作玉米（MM）、单作马铃薯（MP）及玉米马铃薯间作（IM/IP），设置4个施氮水平：不施氮（N0）、1/2常规施氮（N1）、常规施氮（N2）和3/2常规施氮（N3），共12个处理，每个处理3次重复，共计36个小区，小区面积为32.5 m^2（5 m×6.5 m）。间作和单作行株距一致，玉米株距25 cm，马铃薯株距35 cm，行距均为50 cm；每行种植玉米19株，马铃薯14株，单作小区中，种植12行玉米或马铃薯，间作中分别种植6行玉米和6行马铃薯。玉米马铃薯间作以行比为2∶2等面积替代种植，间作与单作种植密度一致。小区四周设置1 m的保护行，种植玉米。

单作玉米、马铃薯施肥量如表1所示，玉米氮肥分3次施入（基肥40%、小喇叭口期25%和大喇叭口期35%），马铃薯施氮量为基肥60%，现蕾期40%，磷钾肥均以基肥形式施入；间作中玉米和马铃薯条带的施肥量分别与同一施氮水平下的单作玉米和单作马铃薯相同。整个玉米马铃薯生育期，中耕、培土、除草、病虫害防治等田间管理，单、间作不同处理保持一致。于每年4月5日和5月11日播种马铃薯和玉米，均采用打塘播种方式，并且基肥均与塘土混合后随作物播种一起施入。6月7日马铃薯现蕾期追肥，6月24日玉米小喇叭口期追肥（第1次），7月17日玉米大喇叭口期追肥（第2次），追肥时期尽量避免阴雨天气，且均采用肥料兑水浇施的方式。8月11日收获马铃薯，10月6日收获玉米，整个生育期内共观测时长达214 d。

1.3 采样与测定方法

土壤样品：种植前采集试验田0~20 cm土层样品作为初始土样，土壤全氮采用凯式定氮法；土壤有机质采用重铬酸钾容量法-外加热法；碱解氮采用碱解

表1 田间试验常规施肥量（kg·hm^{-2}）

Table 1 Conventional fertilizers application rate（kg·hm^{-2}）

作物 Crops	基肥 Base fertilizer			追肥1 First topdressing	追肥2 Second topdressing	合计 Total		
	N	P_2O_5	K_2O	N	N	N	P_2O_5	K_2O
玉米 Maize	100	75	75	62.5	87.5	250	75	75
马铃薯 Potato	75	75	125	50	—	125	75	125

扩散法；速效磷采用0.5 mol·L^{-1} $NaHCO_3$浸提-钼锑抗比色法；速效钾采用火焰光度计法；液土比2.5∶1测定土壤pH。

植株样品：考虑边际效应，在玉米和马铃薯成熟期，单作和间作均取中间2行进行测产。每个小区的玉米（根、秸秆、籽粒）和马铃薯（块茎、茎叶）取3株植株样品，105 ℃杀青30 min，70 ℃烘干至恒质量，测定质量，粉碎。所有植株样品含磷量均采用钒钼黄法进行测定。

1.4 计算公式

（1）土地当量比（Land equivalent ratio，LER）

$$LER = (Y_{im}/Y_{mm})+(Y_{ip}/Y_{mp})$$

式中：Y_{im}和Y_{ip}分别为间作玉米和马铃薯的产量；Y_{mm}和Y_{mp}分别为单作玉米和单作马铃薯的产量。LER>1时为间作优势，LER<1时为间作劣势[3]。

（2）磷素吸收当量比

$$PLER=(P_{im}/P_{mm})+(P_{ip}/P_{mp})$$

式中：P_{im}和P_{ip}分别为间作玉米和马铃薯的磷素吸收量；P_{mm}和P_{mp}分别为单作玉米和单作马铃薯的磷素吸收量。PLER>1时为磷素吸收间作优势，PLER<1时为磷素吸收间作劣势。

（3）用ΔP_u表示玉米、马铃薯磷素吸收量的比较[21]：

$$\Delta P_u = \{[P_{uit}/(F_m\times P_{um}+F_p\times P_{up})]-1\}\times 100\%$$

式中：P_{uit}为间作玉米马铃薯的磷吸收量；P_{um}为单作玉米吸磷量；P_{up}为单作马铃薯吸磷量；F_m和F_p分别为间作玉米和马铃薯的种植比例；$F_m\times P_{um}+F_p\times P_{up}$为单作的加权平均磷吸收量；间作吸磷量相对于单作的增加或减少由ΔP_u的正值或负值反映。

（4）磷素收获指数（HI）=成熟期植株收获部位磷素积累量/植株磷素积累量×100%

（5）磷素利用率（PUTE，kg·kg^{-1}）=籽粒（块茎）产量/整株吸磷量

2 结果与分析

2.1 玉米马铃薯间作产量和土地当量比

两年的田间试验表明，在不同施氮水平下间作模式对玉米、马铃薯产量均有影响，间作具有明显的优势，在N1水平，间作显著增加玉米产量，平均增幅25%（P<0.05）。如表2所示，低氮（N1）水平下，间作玉米产量比单作平均增加25.35%，间作马铃薯平均增加8.40%。随着施氮量的增加，单作玉米产量随施氮水平的增加而增加，间作呈先增加后降低的趋势，与N0处理相比，单作N1、N2、N3处理玉米产量平均分别提高了45.86%、109.50%、111.84%；间作提高了86.26%、138.61%、114.36%。从2015和2016年的数据可以看出，不同施氮水平间作玉米马铃薯相对于单作玉米和单作马铃薯有增加产量的潜力，间作优势在N1处理时最优，土地当量比为1.19和1.16。

2.2 间作和施氮对玉米马铃薯磷素累积吸收的影响

玉米马铃薯间作磷吸收的结果（表3）表明，在2015年和2016年，间作玉米磷吸收量均随施氮量的增加呈先升高后降低的变化趋势，在N2水平达到最大。与N0相比，N1、N2、N3处理下，间作玉米磷吸收量分别提高了39.09、48.33、31.90 kg·hm^{-2}。2015年，单作玉米磷吸收量随着施氮量的增加而增加，较N0

表2 间作和施氮水平对产量和土地当量比的影响

Table 2 Effects of intercropping and nitrogen levels on yield and land equivalent ratio

年份 Year	氮水平 N levels	产量 Yield/t·hm^{-2}				土地当量比 LER
		MM	IM	MP	IP	
2015	N0	4.48±0.23e	5.48±0.37d	1.52±0.12b	1.54±0.04b	1.12
	N1	7.20±0.55c	9.01±0.69b	2.82±0.21a	3.19±0.14a	1.19
	N2	11.48±0.59a	11.78±0.73a	2.93±0.29a	2.83±0.24a	1.00
	N3	12.43±0.51a	11.60±0.29a	2.97±0.27a	2.84±0.44a	0.94
2016	N0	5.31±0.19d	4.13±0.05e	4.17±0.01d	4.20±0.03d	0.89
	N1	7.08±0.04c	8.89±0.37ab	7.90±0.22ab	8.43±0.06a	1.16
	N2	9.03±0.28ab	11.15±0.38a	7.62±0.15b	7.07±0.20bc	1.08
	N3	8.31±0.46b	9.00±0.99ab	6.48±0.11c	6.31±0.05c	1.03

注：MM表示单作玉米；IM表示间作玉米；MP表示单作马铃薯；IP表示间作马铃薯。同年份同种作物的不同小写字母代表处理间差异显著（P<0.05）。下同。

Notes: MM-Monocropped maize; IM-Intercropped maize; MP-Monocropped potato; IP-Intercropped potato. Values followed by different lowercase letters of maize or potato in the same year indicate significant difference among treatments at the 0.05 level. The same below.

表3 不同施氮水平玉米马铃薯间作磷素累积吸收量

Table 3 Phosphorus uptakes of intercropped maize and potato under different N levels

年份 Year	氮水平 N levels	磷素累积吸收量 Phosphorus uptakes/kg·hm^{-2}				磷吸收当量比 PLER
		MM	IM	MP	IP	
2015	N0	52.69±1.33d	52.10±1.06d	44.66±1.42e	46.71±1.36e	1.03
	N1	62.33±1.23cd	99.82±0.66ab	59.59±1.26d	68.18±1.64c	1.38
	N2	74.03±1.08c	110.17±1.61a	99.08±1.41a	101.72±1.84a	1.27
	N3	100.35±1.76ab	95.25±1.84b	78.40±1.39b	71.27±1.55bc	0.93
2016	N0	45.39±1.02d	50.35±1.53d	47.47±1.33e	51.33±0.36e	1.10
	N1	64.85±1.31c	80.81±0.92b	78.35±1.29d	88.32±0.67bc	1.19
	N2	83.75±1.02ab	88.93±0.34a	110.25±1.21a	104.41±1.45a	1.01
	N3	66.13±0.96c	70.99±1.09c	93.24±1.72b	86.07±0.94c	1.00

处理，磷吸收量在N1、N2、N3水平分别增加9.64、21.34 kg·hm^{-2}和47.66 kg·hm^{-2}，而2016年磷吸收量随着施氮量的增加呈先增加后降低的趋势，磷吸收量在N1、N2、N3水平分别比N0增加19.46、38.36 kg·hm^{-2}和20.74 kg·hm^{-2}。两年的试验表明间作有显著增加玉米磷吸收的潜力（P<0.05），随着施氮量增加，间作优势逐渐减弱。

在2015年和2016年整个马铃薯生长季中，无论单作还是间作，随着施氮量的增加，马铃薯磷吸收量均呈现先增加后降低的趋势，均在N2水平达到最大。与不施氮处理相比，N1、N2、N3施氮水平单作马铃薯磷吸收量平均增加49.72%、127.21%、86.30%；间作马铃薯磷吸收量平均增加59.63%、110.25%、60.49%。在不施氮和低氮条件下，马铃薯间作与单作相比磷吸收量平均增加6.41%和13.46%，高氮下间作优势减弱。

2.3 不同施氮量对玉米马铃薯各器官磷素分配的影响

2.3.1 玉米根、秸秆和籽粒磷素的分配

从图1可以看出，合理施入氮肥可以促进玉米磷吸收量。4个氮水平下，玉米的磷吸收量主要集中在籽粒，N0、N1、N2和N3水平下单作玉米籽粒磷分配比例分别为47.40%、48.61%、57.85%和54.89%，间作分别为40.87%、63.79%、54.80%和52.98%。秸秆磷分配比例单作为34.31%~41.12%，间作为28.35%~47.65%。根的磷分配比例单作为7.32%~11.86%，间作为6.78%~11.48%。在低氮（N1）处理下，间作玉米籽粒磷吸收量平均比单作高86.26%。玉米秸秆在常规施氮（N2）处理中磷吸收量比单作提高41.30%。

2.3.2 马铃薯地上和地下部磷素的分配

高氮水平抑制了马铃薯的生长和对磷素的吸收。如图1所示，从马铃薯块茎和茎叶磷吸收量所占百分比来看，无论单作还是间作，马铃薯对磷的吸收主要集中于块茎，占磷吸收总量的68.86%~78.90%。

随着施氮量的增加，单作和间作马铃薯块茎磷吸收量呈现先增加后降低的趋势，在N2水平下间作显著高于单作，提高了10.66%。马铃薯茎叶N1、N2、N3水平磷吸收量均高于N0，N3水平间作马铃薯磷吸收量较单作有所降低。

2.4 间作对玉米马铃薯磷素吸收利用的影响

在4个氮水平下，玉米马铃薯间作体系中磷吸收量与单作加权平均磷吸收量见表4。在N0、N1水平下，间作系统单位面积磷吸收量高于单作的加权磷吸收量，即ΔP_u>0，而在高氮（N3）时ΔP_u<0，表明与单作玉米马铃薯相比，间作在低氮水平有增加磷吸收的优势，随着施氮量的增加，间作从吸收优势变为劣势，降低了对磷的吸收利用。

2015年，单、间作马铃薯磷素利用率均随施氮量

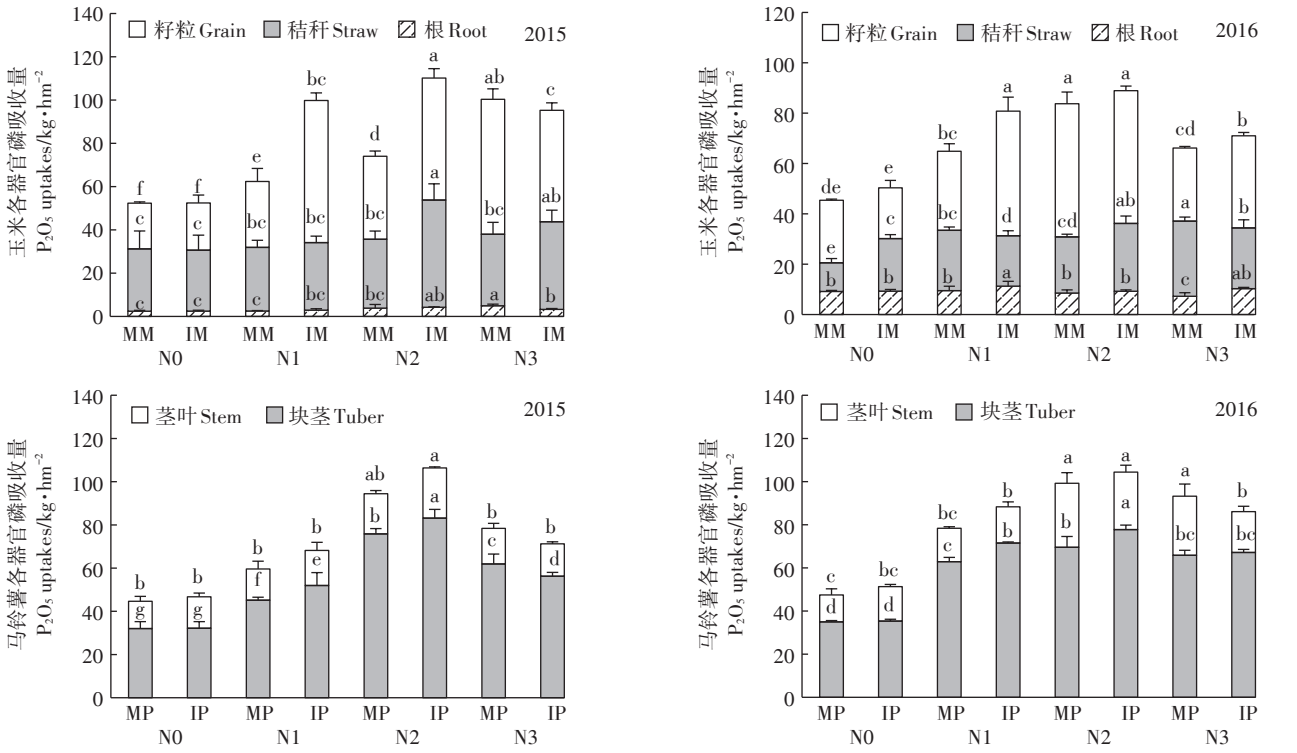
表4 不同施氮水平玉米马铃薯间作对磷素利用的影响

Table 4 Effect of different N application levels and intercropping on phosphorus use of maize and potato

年份 Year	氮水平 N levels	磷吸收量 P_2O_5 Uptake/kg·hm^{-2}		ΔP_u/%
		间作 Intercropping	单作加权平均 Weighted mean for monoculture	
2015	N0	49.41±1.58d	48.68±1.33d	1.50
	N1	84.00±1.64b	60.96±1.33c	37.80
	N2	105.94±1.68a	86.55±1.33b	22.40
	N3	83.26±1.69b	89.37±1.33b	−6.84
2016	N0	50.84±1.38e	46.43±0.24e	9.50
	N1	84.57±2.03b	71.60±1.39d	18.11
	N2	96.67±1.29a	97.00±1.11a	−0.34
	N3	78.53±0.41c	79.69±0.75bc	−1.46

注：同年不同小写字母表示处理间差异显著（P<0.05）。

Note: Different lowercase letters in the same year indicate significant differences（P<0.05）.



MM表示单作玉米;IM表示间作玉米;MP表示单作马铃薯;IP表示间作马铃薯。下同。同一器官不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)
MM-Monocropped maize; IM-Intercropped maize; MP-Monocropped potato; IP-Intercropped potato. The same below. Different lowercase letters for the same organ indicate significant differences(P<0.05)

图1 施氮量和间作对玉米和马铃薯各器官磷素分配的影响

Figure 1 Phosphorus distribution in intercropped maize and potato under different N levels

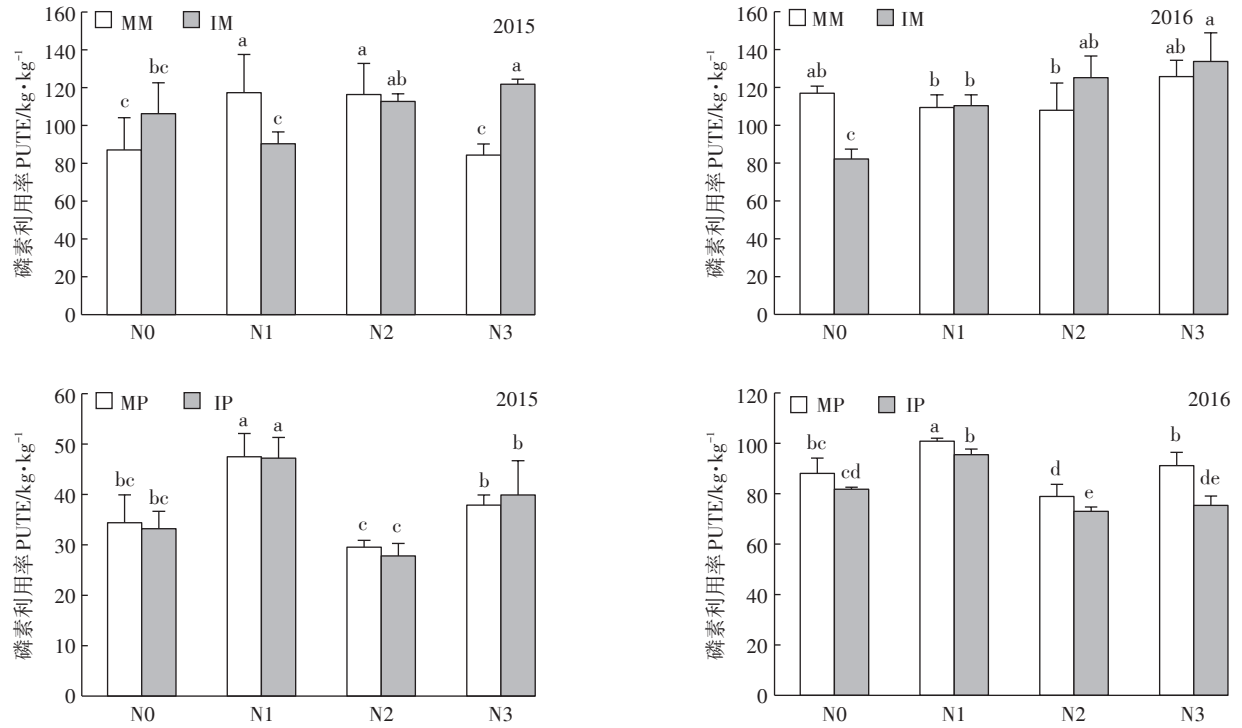
的增加呈先增加后降低的趋势,均在N1水平达到最大,分别比N0、N2、N3处理在单作中增加了38.02%、60.74%和25.36%,在间作中分别增加了42.15%、69.74%和18.27%;随施氮量的增加,单作玉米磷素利用率先增加后降低,间作玉米磷素利用率在N0、N2水平下无显著差异(图2)。

2.5 间作对玉米马铃薯磷素收获指数的影响

2015年,单作中不同处理马铃薯磷收获指数72.06%~79.13%,平均为75.88%,玉米40.90%~62.20%,平均为50.93%,玉米的磷素收获指数低于马铃薯(图3)。间作中不同处理马铃薯磷收获指数69.07%~81.75%,平均为76.41%,玉米42.35%~65.82%,平均为53.40%。2016年,随着施氮量增加,单、间作马铃薯磷收获指数先增加后降低,均在N1水平达到最大;间作玉米的磷素收获指数亦先增加后降低,在N1水平达到最大,单作玉米磷素收获指数在N2水平达到最大值。

3 讨论

本研究中,玉米磷素的吸收累积主要集中在籽粒,其次是秸秆和根,马铃薯对磷的吸收主要集中于块茎;除2015年N3水平外,磷吸收当量比PLER均大于1,说明间作促进作物磷吸收;N1水平下,间作玉米磷吸收量较单作平均提高了42.03%,马铃薯提高了13.46%。李隆[1]研究表明小麦大豆间作种植模式显著提高磷吸收量,同样有研究表明在玉米甘薯[16]、小麦蚕豆[14,17]和玉米大豆[18]间作模式下,相比单作,有效磷含量提高了1.84%~59.66%,磷的当季利用率平均提高了7.81%,产量也有所增加。同样,本研究在低氮和常规施氮水平时,间作具有促进磷吸收的效应,这与李隆等[22]和党小燕等[23]的研究结果类似。这主要是由于间作具有种间相互作用,即一种作物对另一种作物的养分吸收和利用有促进效应,尤其是豆科作物能提高禾本科作物的产量,促进养分吸收[20,24-25],玉米马铃薯间作对养分吸收利用也存在着种间的竞争促进作用,并且玉米对氮的竞争能力比马铃薯强[5]。另有研究发现在低磷土壤中间作较单作能显著提高根系周围的磷含量,进而提高作物产量和磷素积累[26-27]。姜玉超[28]研究发现玉米花生间作的磷收获指数增加了11.48%,同样,本研究中,N1水平间作玉米



不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下同

Different lowercase letters indicate significant differences(P<0.05). The same below

图2 不同施氮水平下间作对玉米马铃薯磷素利用率的影响

Figure 2 Effect of intercropping on the utilization of phosphorus in maize and potato at different nitrogen levels

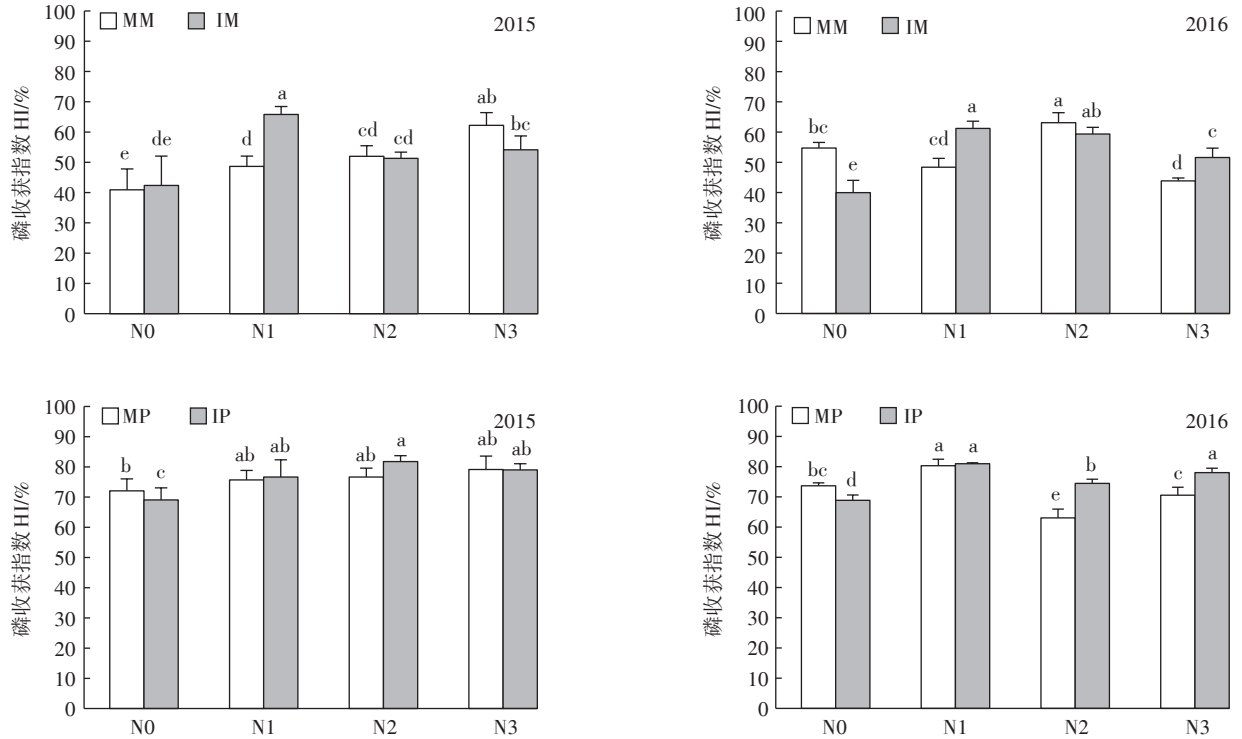


图3 不同施氮水平下间作对玉米马铃薯磷收获指数的影响

Figure 3 Effect of intercropping on maize and potato phosphorus harvest index under different nitrogen levels

的磷收获指数高于单作,说明低氮间作有利于作物收获器官对磷素的利用。但马铃薯单、间作之间收获指数差异较小,说明间作尽管提高了磷吸收,但可能主要用于增加生物量,而并未改变磷素向收获部分转移的比例。

本研究表明,相对于单作,不同氮水平会影响玉米马铃薯间作体系中磷吸收和利用的间作效应,从N0到N1水平,间作显著促进作物对磷养分吸收,在此基础上进一步增施氮肥,间作对养分吸收的促进效应下降,N3水平时表现为间作降低养分吸收。随着施氮水平提高,单作和间作玉米籽粒磷吸收量呈现先增加后降低的趋势。单作和间作马铃薯块茎磷吸收量都随施氮水平的提高先增加后降低。单作马铃薯块茎N1、N2、N3水平磷吸收量均高于N0,间作马铃薯较单作磷吸收量增加了1.03%~12.05%;间作相对于单作加权磷吸收的计算结果ΔP_u表明,随施氮量增加,间作系统单位面积磷吸收的优势先增加后下降,在N1时表现为优势最强,这与张玉龙等[29]的研究结果一致,在一定施肥范围内,增施氮肥有利于磷素效应的发挥,可以有效节约氮肥[30-31]。有研究发现使用NH_4^+-N可提高植物对难溶性磷的吸收,而且在小麦、菜豆等作物上得到了证明[32-33]。也有学者认为NO_3^--N和NH_4^+-N同时供应更利于植株吸收利用介质中磷[34],促进从根系向地上部的运输[35]。在本研究中,作物是在等养分等面积条件下种植,可以有效地保证间作种植密度与单作一致,植株磷养分累积量的不同,可能是因为间作使得玉米和马铃薯的根系分泌特性发生相应的改变,改善了根区土壤的微生态环境和养分状况,从而促进作物地上部对磷的吸收累积。

玉米和马铃薯产量受到施氮和间作影响。单作和间作玉米随施氮水平的增加,产量先增加后降低,与N0处理相比,单作N1、N2、N3处理提高了45.86%~111.84%;间作玉米在不施氮处理中处于间作劣势,而随施氮量增加,间作玉米逐渐显现优势。随着施氮量的增加,间作马铃薯产量先增加后降低的原因是马铃薯对氮肥用量较敏感,过量的施氮不仅会造成氮肥的浪费,降低氮肥利用效率,而且还会造成产量下降[36-37]。

随着施氮量的增加,间作优势逐渐减弱,可能是由高氮水平下作物发病造成减产所致,说明间作优势的发挥应控制在适当的供氮条件下,过度施氮不仅削弱了间作优势,同时造成氮素的过度浪费,渗入地下或排放到大气中,对环境造成威胁。

4 结论

(1)低氮(1/2常规量)水平间作产量优势最大,与单作相比,玉米间作平均产量增加25.35%,马铃薯平均增加8.40%。

(2)随施氮量增加,间作玉米和马铃薯的磷吸收量逐渐降低,在常规施氮水平下最高。低氮条件下,间作玉米磷吸收量较单作平均增加42.03%,马铃薯增加13.46%。

(3)低氮时,间作玉米籽粒磷吸收量比单作平均增加86.26%,间作马铃薯块茎磷吸收量比单作平均增加14.28%;而在高氮(3/2常规量)水平下,间作马铃薯磷吸收量较单作有所降低。

(4)间作可以增加作物产量,合理施入氮肥能够促进作物对磷素的吸收与利用,实现节肥增效。

参考文献:

[1] 李 隆. 间套作强化农田生态系统服务功能的研究进展与应用展望[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(4):403-415.
LI Long. Intercropping enhances agroecosystem services and functioning:Current knowledge and perspectives[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(4):403-415.

[2] 肖靖秀, 郑 毅. 间套作系统中作物的养分吸收利用与病虫害控制[J]. 中国农学通报, 2005, 21(3):150-154.
XIAO Jing-xiu, ZHENG Yi. Nutrients uptake and pests and diseases control of crops in intercropping system[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(3):150-154.

[3] Willey R W. Intercropping:Its importance and research needs. Part Ⅰ. Competition and yield advantages[J]. *Field Crops Abstract*, 1979, 32:1-10.

[4] Mushagalusa G N, Ledent J F, Draye X. Shoot and root competition in potato/maize intercropping:Effects on growth and yield[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2008, 64:180-188.

[5] 郭华春, 他理才. 间作对马铃薯生长及产量的影响[J]. 马铃薯杂志, 1995, 9(1):35-38.
GUO Hua-chun, TA Li-cai. Effects of intercropping on potato growth and yield[J]. *Chinese Potato Journal*, 1995, 9(1):35-38.

[6] 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 Xin-ling, ZHU Qi-lin, GENG Chuan-xiong, et al. Contribution of nutrition uptake and use on yield advantage in maize and potato intercropping under nitrogen application rates[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(4):1265-1273.

[7] 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 Sheng-li, LONG Guang-qiang, YANG Chao, 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.

[8] 周　龙, 龙光强, 汤　利, 等. 施氮与间作对玉米和马铃薯钾吸收与分配的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(6):1485-1493.
ZHOU Long, LONG Guang-qiang, TANG Li, et al. Effects of N application on potassium absorption and distribution of maize and potato in intercropping system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(6):1485-1493.

[9] Qin X M, Zheng Y, Tang L, et al. Crop rhizospheric microbial community structure and functional diversity as affected by maize and potato intercropping[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2017, 40:2402-2412.

[10] 潘瑞炽, 王小菁, 李娘辉. 植物生理学[M]. 北京:高等教育出版社, 2012:45-50.
PAN Rui-zhi, WANG Xiao-jing, LI Niang-hui. Plant physiology[M]. Beijing:Higher Education Press, 2012:45-50.

[11] 王晓慧, 曹玉军, 魏雯雯, 等. 我国北方40个高产春玉米品种的磷素利用特性[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(3):580-589.
WANG Xiao-hui, CAO Yu-jun, WEI Wen-wen, et al. Phosphorus utilization characteristics of forty spring maize hybrids with high-yielding potential in north of China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2015, 21(3):580-589.

[12] 沈善敏. 中国土壤肥力[M]. 北京:中国农业出版社, 1998:80-83.
SHEN Shan-min. Soil fertility in China[M]. Beijing:China Agricultural Press, 1998:80-83.

[13] 黄　敏, 吴金水, 黄巧云, 等. 土壤磷素微生物作用的研究进展[J]. 生态环境, 2003, 12(3):366-370.
HUANG Min, WU Jin-shui, HUANG Qiao-yun, et al. Process in research on microbiological action of soil phosphorus[J]. *Ecology and Environment*, 2003, 12(3):366-370.

[14] 张德闪, 王宇蕴, 汤　利, 等. 小麦蚕豆间作对红壤有效磷的影响及其与根际pH值的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(1):127-133.
ZHANG De-shan, WANG Yu-yun, TANG Li, et al. Effects of wheat and fababean intercropping on available phosphorus of red soils and its relationship with rhizosphere soil pH[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(1):127-133.

[15] 王宇蕴, 任家兵, 郑　毅, 等. 间作小麦根际和土体磷养分的动态变化[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2011, 26(6):851-855.
WANG Yu-yun, REN Jia-bing, ZHENG Yi, et al. Dynamics of available phosphorus in rhizosphere and bulk soil of wheat under intercropping[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*(*Natural Science*), 2011, 26(6):851-855.

[16] 邓小燕, 王小春, 杨文钰, 等. 玉米/大豆和玉米/甘薯模式下玉米磷素吸收特征及种间相互作用[J]. 作物学报, 2013, 39(10):1891-1898.
DENG Xiao-yan, WANG Xiao-chun, YANG Wen-yu, et al. Phosphorus uptake and utilization of maize and inter-species interactions in maize/soybean and maize/sweet potato relay intercropping systems[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(10):1891-1898.

[17] 王宇蕴, 郑　毅, 汤　利. 不同抗性小麦品种与蚕豆间作对小麦根际速效养分含量的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(2):466-471.
WANG Yu-yun, ZHENG Yi, TANG Li. Effects of intercropping with different resistant wheat varieties and faba beans on available nutrient content in the rhizosphere[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(2):466-471.

[18] 张雷昌, 汤　利, 郑　毅. 根系互作对玉米大豆间作作物磷吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(5):1142-1149.
ZHANG Lei-chang, TANG Li, ZHENG Yi. Phosphorus aborption of crops affected by root interaction in maize and soybean intercropping system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(5):1142-1149.

[19] 刘忠宽, 曹卫东, 秦文利, 等. 玉米-紫花苜蓿间作模式与效应研究[J]. 草业学报, 2009, 18(6):158-163.
LIU Zhong-kuan, CAO Wei-dong, QIN Wen-li, et al. A study on the pattern and effect of *Zea mays* intercropping with *Medicago sativa*[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2009, 18(6):158-163.

[20] 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 Long, LI Xiao-lin, ZHANG Fu-suo, 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 Fertilizer*, 2000, 6(2):140-146.

[21] Morris R A, Garrity D P. Resource capture and utilization in intrcropping: No nitrogen nutrients[J]. *Field Crops Research*, 1993, 34: 319-334.

[22] 李　隆, 李晓林, 张福锁. 小麦//大豆间作中小麦对大豆磷吸收的促进作用[J]. 生态学报, 2000, 20(4):629-633.
LI Long, LI Xiao-lin, ZHANG Fu-suo. Facilitation of wheat to phosphorus uptake by soybean in the wheat and soybean intercropping[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(4):629-633.

[23] 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 Xiao-yan, LIU Jian-guo, PANI Gu-li, 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*, 2012, 20(5):513-519.

[24] 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(1/2): 147-161.

[25] Li C J, Li Y Y, Yu C B, et al. Crop nitrogen use and soil mineral nitrogen accumulation under different crop combinations and patterns of strip intercropping in northwest China[J]. *Plant & Soil*, 2011, 342(1/2):221-231.

[26] Betencourt E, Duputel M, Colomb B, et al. Intercropping promotes the ability of durum wheat and chickpea to increase rhizosphere phosphorus availability in a low P soil[J]. *Soil Biol Biochem*, 2012, 46: 181-190.

[27] Mei P P, Gui L G, Wang P, et al. Maize/faba bean intercropping with rhizobia inoculation enhances productivity and recovery of fertilizer P in a reclaimed desert soil[J]. *Field Crops Research*, 2012, 130:19-27.

[28] 姜玉超. 玉米花生间作对土壤肥力特性的影响[D]. 洛阳:河南科技大学, 2015.
JIANG Yu-chao. Effect of maize and peanut intercropping on soil fertility characteristics[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2015.

[29] 张玉龙, 杨 丹, 刘鸣达, 等. 北方酸性水稻土上氮磷硅肥配施对水稻产量影响的研究[J]. 土壤通报, 2003, 34(5):432-435.
ZHANG Yu-long, YANG Dan, LIU Ming-da, et al. Combination effects of N, P and Si on rice yield in acid paddy soil of eastern Liaoning [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(5):432-435.

[30] 敖 雪, 孔令剑, 朱 倩, 等. 磷素对不同磷效率基因型大豆根系养分吸收特性的影响[J]. 大豆科学, 2015, 34(4):653-660.
AO Xue, KONG Ling-jian, ZHU Qian, et al. Effect of phosphorus on nutrient absorption characteristics of roots in soybean with different phosphorus efficiencies[J]. *Soybean Science*, 2015, 34(4):653-660.

[31] 范仲学, 王 璞, Boening-Zilkens M, 等. 优化灌溉和施肥对冬小麦产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2003, 23(4):99-103.
FAN Zhong-xue, WANG Pu, Boening-Zilkens M, et al. Effects of optimized irrigation and nitrogen fertilization on grain yield of winter wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2003, 23(4):99-103.

[32] Marschner H, Röemheld V, Cakmak I. Root-induced changes of nutrient availability in the rhizosphere[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1987, 10(9):1175-11841.

[33] 邹春琴, 杨志福. 氮素形态对春小麦根际pH与磷素营养状况的影响[J]. 土壤通报, 1994, 25(4):175-177.
ZOU Chun-qin, YANG Zhi-fu. Effect of nitrogen morphology on root pH and phosphorus nutrition of spring wheat[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1994, 25(4):175-177.

[34] 樊明寿, 孙亚卿, 邵金旺, 等. 不同形态氮素对燕麦营养生长和磷素利用的影响[J]. 作物学报, 2005, 31(1):114-118.
FAN Ming-shou, SUN Ya-qing, SHAO Jin-wang. Influence of nitrogen forms on oat growth and phosphorus uptake[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2005, 31(1):114-118.

[35] 李宝珍, 王松伟, 冯慧敏, 等. 氮素供应形态对水稻根系形态和磷吸收的影响[J]. 中国水稻科学, 2008, 22(6):665-668.
LI Bao-zhen, WANG Song-wei, FENG Hui-min. Effects of nitrogen forms on root morphology and phosphate uptake in rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2008, 22(6):665-668.

[36] 张 欢, 谭 贺, 姜佰文, 等. 施氮模式对玉米氮吸收分配及产量的影响[J]. 玉米科学, 2014(5):127-131.
ZHANG Huan, TAN He, JIANG Bai-wen, et al. Effect of different N application patterns on nitrogen absorption, distribution and yield of maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2014(5):127-131.

[37] 刘润梅, 范茂攀, 付云章, 等. 云南省马铃薯施肥量与化肥偏生产力的关系研究[J]. 土壤学报, 2014, 51(4):753-760.
LIU Run-mei, FAN Mao-pan, FU Yun-zhang, et al. Relationship between fertilization rate and fertilizer partial factor productivity in potato production in Yunnan Province[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(4):753-760.