植物营养与肥料学报 2016, 22(6): 1485–1493
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer
doi: 10.11674/zwyf.15474
http://www.plantnutrifert.org

施氮与间作对玉米和马铃薯钾吸收与分配的影响

周 龙，吕 玉，朱启林，龙光强，汤 利*
（云南农业大学资源与环境学院，云南昆明 650201）

摘要:【目的】探讨不同氮水平下间作对作物钾吸收、分配与利用的影响，为高效施肥提供依据。**【方法】**采用两年田间小区试验，以常规玉米施氮量 N 250 kg/hm^2 为基础，设：不施氮(N0)、1/2 常规量(N1)、常规量(N2)、3/2 常规量(N3)四个处理，调查了间作玉米和马铃薯对钾素的吸收、分配及利用效率。**【结果】**随施氮量增加，单作玉米、间作玉米和单作马铃薯产量逐渐增加，以 N2、N3 产量最高，而间作马铃薯产量在 N1 水平达到最高，氮肥用量增加到 N2 反而下降；玉米马铃薯有间作增产优势，土地当量比 (LER) 随着施氮水平增加逐渐降低。单作和间作玉米吸钾量随着施氮水平提高先增加后减少，在 N1 或 N2 水平钾吸收达到最大，单作马铃薯吸钾量随施氮量增加逐渐增加，间作马铃薯则先增加后减少，分别在 N3 和 N1 水平达到最大。不同施氮水平下，间作玉米较单作玉米提高钾吸收量 15.7～20.0 kg/hm^2 (2013 年) 和 22.6～78.3 kg/hm^2 (2014 年)，在低氮 (N0、N1) 水平下增加显著；玉米钾吸收量主要集中在秸秆，占钾吸收总量的 64.5%～75% (2013 年) 和 61.6%～74.5% (2014 年)，间作增加的钾主要分配到了籽粒中，钾吸收量的分配在马铃薯中没有明显差异。间作提高了玉米钾利用效率，对马铃薯没有显著影响，随着施氮量增加，钾吸收土地当量比逐渐降低。**【结论】**施氮水平和种植模式对玉米马铃薯钾吸收有极显著交互作用；在施氮肥为常规水平的一半，即 N 62.5 kg/hm^2 时，间作增产和促进钾吸收潜力达最大，随着施氮量的增加，交互作用对钾的吸收优势逐渐减弱。因此，适当施氮可充分发挥间作促进钾吸收的优势。

关键词: 间作；玉米；马铃薯；氮水平；钾吸收
中图分类号: S147.2; S344.2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1008–505X(2016)06–1485–09

Effects of N application on potassium absorption and distribution of maize and potato in intercropping system

ZHOU Long, LÜ Yu, ZHU Qi-lin, LONG Guang-qiang, TANG Li*
(*College of Resources and Environmental Sciences, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China*)

Abstract:【Objectives】The study aimed to explore the effects of the intercropping of maize and potato on potassium absorption, distribution and utilization of crops in different N application levels. **【Methods】**A 2-year field experiment, included four N levels (unfertilized, N0; 1/2 conventional fertilized, N1; conventional fertilized, N2 and 3/2 conventional fertilized, N3), was conducted to study the effects of the nitrogen fertilization and intercropping on potassium absorption and distribution as well as absorption of maize and potato. **【Results】**The yields of maize and potato were increased with the increase of N application in monoculture maize, and intercropping of maize and potato and monoculture potato, the yields were the maxima in the N2 and N3 levels. However, yields of intercropping potato first increased then reduced, the maximum was in the N1 level. Intercropping of maize and potato had advantage of the yield increases, and land equivalent ratio (LER) reduces with the increased of N application. The potassium uptakes of monoculture maize and intercropping maize were first increased and then decreased with the increase of nitrogen application, and reached the maxima in the N1 or N2 levels. The potassium uptakes of potato were increased with the rise of N application in monoculture, and

收稿日期：2015–11–25　　**接受日期：**2016–03–11
基金项目：国家自然科学基金项目（41361065, 41201289, 31210103906）资助。
作者简介：周龙（1990—），男，云南楚雄人，硕士研究生，主要从事施肥与作物养分吸收利用研究。E-mail：287834727@qq.com
* 通信作者 Tel: 0871-65227650, E-mail: tangli7650@163.com

first increased then reduced in the intercropping, reached the maxima in the N3 and N1 levels, respectively. The intercropping increased potassium uptakes of maize by 15.7–20.0 kg/hm^2 (2013) and 22.6–78.3 kg/hm^2 (2014) than those of the monoculture, and the difference was significant in the low N levels (N0 and N1). The potassium uptakes of maize were mainly concentrated in the straw, accounting for 64.5%–75% of the total potassium absorption (2013) and 61.6%–74.5% (2014), and the increased potassium was mainly allocated to the grain. However, potassium distribution of potato was no significantly different. The intercropping raised potassium use efficiency of maize, and had no significant effect on potato. Potassium absorption of LER was decreased with the increase of N application. 【**Conclusions**】There is very significant interaction between the nitrogen application and the intercropping on potassium uptakes of maize and potato. When the N application level is 50% of currently used level (62.5 kg/hm^2), the potential of increasing yields and potassium uptakes in the intercropping is the maximum. The potassium uptakes of the interaction will gradually be weakened with the increase of N application. Therefore, appropriate N application is neccessary for promoting potassium uptakes in the intercropping system of maize and potato.

Key words: intercropping; maize; potato; N level; potassium uptake

营养物质之间的相互关系影响作物对营养元素的吸收利用和产量形成。氮和钾是作物大量吸收的重要营养元素，它们之间的相互影响及其作物吸收利用一直受到人们的关注[1−3]。其中，氮对钾吸收利用主要表现在：一方面，NO_3^--N 和 K^+ 离子互为相反电荷，作物在吸收 NO_3^--N 的时候可以通过电荷补偿机制促进对 K^+ 的吸收[4]；另一方面，NH_4^+-N 与 K^+ 因其有相同的化合价，相似的离子半径，对土壤的吸附具有代替作用，使其能够在土壤胶体上竞争同一吸附位点，从而可以促进作物根系对 K^+ 的吸收。作物吸收大量的 NH_4^+-N 后，根际的酸化效应明显，有利于根区微域土壤 K^+ 的释放，增加了土壤中的有效钾含量，更有利于作物对 K^+ 的吸收[1]。对番茄[5]、超高产夏玉米[6]、小麦[7]、烤烟[8]等多种作物研究表明，随着施氮量的增加，作物的钾吸收量逐渐增加，但过量施入氮肥后，不仅氮素利用效率降低，还会影响钾的吸收和利用[9−10]。

间作被认为是一种可以提高植物营养物质吸收利用的种植模式。已有报道关于小麦和蚕豆、小麦和大豆间作体系显著提高了钾吸收 32%～69% 和 24%～64%[11−12]。当作物由单作变为间作，农田生态系统中作物之间的关系除了种内关系，还增加了种间关系，这种关系既有互惠，也有竞争[13−14]。此外，间作体系中作物对钾素的吸收和利用还受氮素供应的影响。肖靖秀等[15]对小麦蚕豆间作研究表明，间作和施氮水平均不能显著提高小麦钾吸收量，在油菜蚕豆间作中也表明，在不同施氮条件下，单作和间作对油菜地上部钾吸收量没有显著差异[16]。藉此，本文设置不同氮水平试验，选用我国大面积应用的玉米马铃薯间作体系，探讨不同氮素供应和间作种植模式对作物钾素吸收、分配和利用的影响，以期为阐明间作体系中营养元素相互作用及其吸收利用的机制奠定基础，为间作中通过氮肥调控促进钾肥利用的生产实践提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

试验设在云南农业大学寻甸大河桥实验基地，地处昆明市东北部，N23°32′，E103°13′，海拔 1953.5 m，属于北亚热带季风气候，试验土壤为山地红壤，其土壤理化性质和当地气象数据如表 1。2014 年因试验区进行整体填土改造，试验地改换为同一区域的另一相邻地块。填土改造后土质偏粘，肥力较低。

1.2 材料与方法

供试玉米 (*Zea mays* L)品种为耕源寻单 7 号；马铃薯 (*Solanum tuberosum* L)品种为会泽 2 号，该间作模式在云南地区的实际生产中应用广泛。小区试验采用裂区区组设计，以种植模式为主处理，施氮量为副处理，每个处理设 3 次重复，共 3 种种植模式，4 个施氮量水平，12 个处理，36 个小区，小区面积 32.5 m^2。三种种植模式分别为玉米//马铃薯 (I)，马铃薯单作 (MP)，玉米单作 (MM)。单作的玉米株距 25 cm，马铃薯株距 35 cm，行距均为 50 cm；间作和单作行株距一致，实行 2 行玉米、2 行马铃薯的种植方式。小区周边设置 1 米的保护行，种植玉米。

表 1　0—20 cm 土壤理化性状和气象数据

Table 1　Physical and chemical properties at the 0–20 cm deep soil and meteorological data

年份 Year	pH	有机质 OM (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	全磷 Total P (g/kg)	全钾 Total K (g/kg)	速效氮 Alkail. N (mg/kg)	速效磷 Olsen P (mg/kg)	速效钾 Avail. K (mg/kg)	年均气温 AAT (℃)	降水量 An. recip. (mm/a)	年日照 Sunshine (h/a)	无霜期 Frost-free day (d)
2013	6.8	25.1	1.1	17.0	11.1	87.4	23.3	207.8	15.7	796.4	2195.6	243
2014	7.8	10.5	0.4	6.3	4.5	34.7	5.8	51.3	16.1	969.2	2178.2	252

注（Note）：AAT—Annal average temperature. 气象数据来源于云南省寻甸县气象局 Meteorological data was from Meteorological Bureau of Xundian County, Yunnan Province.

4 个施氮水平分别是不施肥 (N0)、低氮量 (N1, 比常规施氮减 50%)、常规氮量 (N2)、高氮量 (N3, 比常规施氮高 50%)。单作玉米常规施氮为 250 kg/hm^2，分基肥、小喇叭口期追肥和大喇叭口期追肥三次施入，分别占总施氮量 40%、25%、35%。玉米磷钾肥均以基肥施入，分别施磷 (P_2O_5) 75 kg/hm^2、钾 (K_2O) 75 kg/hm^2。单作马铃薯常规施氮为 125 kg/hm^2，两次施入，基肥 60%、现蕾期 40%。马铃薯施磷 (P_2O_5) 75 kg/hm^2、钾 (K_2O) 125 kg/ hm^2，磷、钾肥均以基肥形式施入。不同氮水平间作处理的施肥按条带进行，每一条带的施肥量与相应单作相同。试验中所用氮、磷、钾肥分别为 46% 尿素、14% 普钙和 50% 硫酸钾。

1.3　采样与测定方法

1.3.1 植株样品　在作物成熟期对作物整个小区实收测产，每个小区另取 3 株，玉米按籽粒、茎叶、根，马铃薯按块茎、茎叶收集植株样品，然后将收集的样品在 105℃ 杀青 30 min，65～70℃ 烘干至恒重，称重，粉碎。所有植株样品含钾量均采用火焰光度计法进行测定。

1.3.2 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，以液土比 2.5∶1 测定土壤 pH；土壤有机质采用重铬酸钾容量法—外加热法；土壤全氮采用凯式定氮法；全磷采用钼锑抗比色法；全钾采用火焰光度计法；速效氮采用碱解扩散法；速效磷采用 0.5 mol/L $NaHCO_3$ 浸提—钼锑抗比色法；速效钾采用火焰光度计法。

1.4　计算公式

土地当量比 (LER) = $(Y_{im}/Y_{mm}) + (Y_{ip}/Y_{mp})$

式中，Y_{im} 和 Y_{ip} 分别代表间作玉米和间作马铃薯的产量，Y_{mm} 和 Y_{mp} 分别代表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[17]。

钾养分吸收当量比 (KLER) = $(K_{im}/K_{mm}) + (K_{ip}/K_{mp})$

式中，K_{im} 和 K_{ip} 分别代表间作玉米和间作马铃薯钾吸收量，K_{mm} 和 K_{mp} 分别代表单作玉米和单作马铃薯钾吸收量，KLER > 1 时为钾素吸收间作优势，KLER < 1 时为钾素吸收间作劣势。

间作相对于单作钾吸收量的变化用 ΔKU 表示：

$\Delta KU = \{[KU_{it}/(F_m \times KU_m + F_p \times KU_p)] - 1\} \times 100\%$

式中，KU_{it} 为间作玉米马铃薯的总吸钾量；KU_m 和 KU_p 分别为单作玉米和单作马铃薯的吸钾量；F_m 和 F_p 分别为间作中玉米和马铃薯的占地比例，因此，$F_m = 0.5$，$F_p = 0.5$。ΔKU 的正或负反映间作吸钾量相对于单作的增加或减少。单作加权平均为单作玉米和马铃薯钾吸收量乘以间作中玉米和马铃薯的占地比例之和。

钾素利用效率 (KUTE) = 籽粒(块茎)产量/整株吸钾量 (kg/kg)

2　结果与分析

2.1　产量及土地当量比

施氮和间作影响玉米和马铃薯产量。在玉米中，单作和间作玉米产量均随着氮水平的提高呈增加趋势，且间作较单作提高玉米产量，但仅在低氮 (N0、N1) 水平时处理间差异显著。在马铃薯中，随着施氮量的增加，单作马铃薯产量逐渐增加，间作马铃薯产量呈现先增加后降低的趋势；在低氮水平，单作和间作马铃薯产量没有显著差异，在 N2 (2014 年) 水平和 N3 (2013 年、2014 年) 水平间作马铃薯产量显著低于单作。尽管马铃薯在间作中处于劣势，间作仍具有增产优势，在 N0 水平间作优势最强，间作土地当量比两年分别为 1.63 和 1.29，随着氮水平的提高，玉米马铃薯间作土地当量比逐渐降低，两年趋势一致。

2.2　玉米马铃薯钾素吸收

施氮影响了玉米和马铃薯对钾的吸收。在单作中，随着施氮量的增加，两年玉米钾吸收量呈现先增加后降低的趋势，马铃薯钾吸收量则随施氮量的

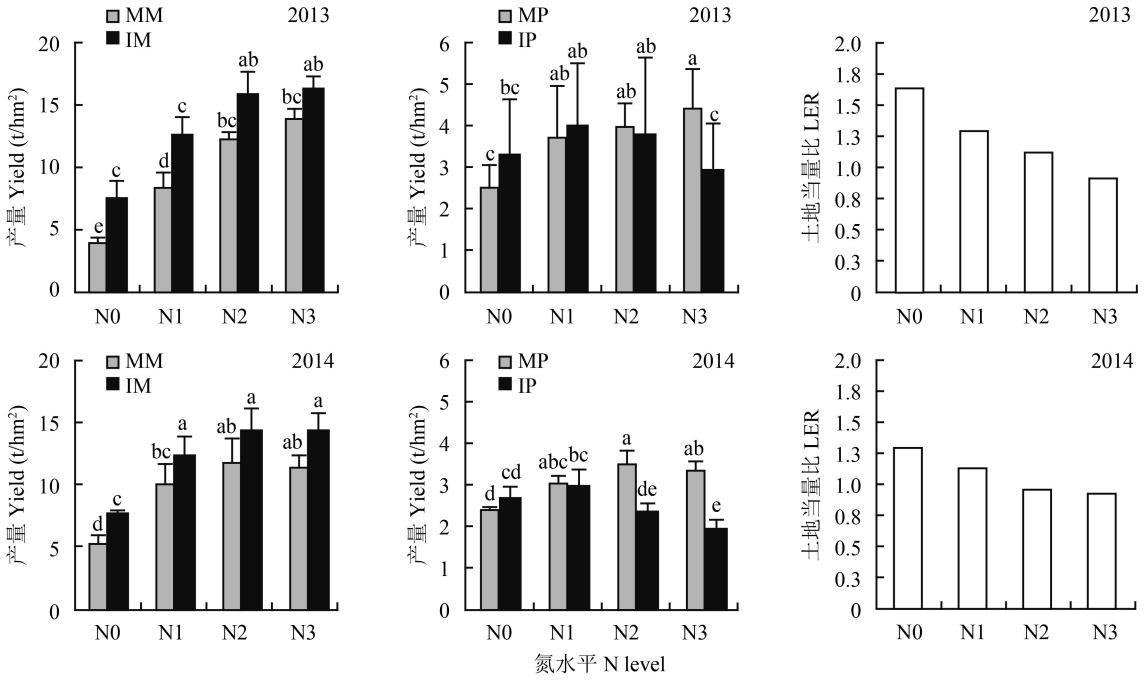

图 1 不同氮水平下玉米、马铃薯间作产量及土地当量比

Fig. 1 Yields and land equivalent ratio (LER) of intercropped maize and potato under different N levels

[注（Note）：MM—单作玉米 Monocropped maize; MP—单作马铃薯 Monocropped potato; IM—间作玉米 Intercropped maize; IP—间作马铃薯 Intercropped potato; 不同小写字母代表处理间差异达到 0.05 显著水平 Values followed by different lowercase letters are significantly different among treatments at the 0.05 level.]

增加而增加，与不施氮处理相比 N1、N2、N3 处理分别提高了 49.4%、54.4%、76.9% (2013 年) 和 76.0%、77.2%、95.4% (2014 年)。间作时，玉米钾吸收和单作玉米的趋势一致，但马铃薯对钾的吸收量却和单作时明显不同，表现为随施氮量的增加呈现先增加后降低的趋势，以 N1 时较高。与单作相比，间作有增加玉米钾吸收量的趋势，较单作玉米提高钾吸收量 15.7～20.0 kg/hm² (2013 年) 和 22.6～78.3 kg/hm² (2014 年)，在 N0、N1 水平时处理间差异显著。与此不同，马铃薯在间作时具有更低的钾吸收量，且随着施氮量的增加，吸收量差异越大，较单作降低 1.0%～113.6% (2013 年) 和 0.6%～127.8% (2014 年)。两年钾吸收量土地当量比均以不施氮处理达到最大，分别为 1.07 和 1.34，随着施氮量的增加，玉米马铃薯间作钾吸收量土地当量比逐渐减弱。

玉米马铃薯钾吸收量受施肥和间作显著影响，通过施氮水平和种植模式对钾吸收量的交互作用分析表明 (表 2)，施氮水平和种植模式极显著影响玉米、马铃薯钾吸收量 ($P < 0.01$)，交互作用对其影响也达到显著水平 ($P < 0.05$)，施氮水平和间作均对玉米和马铃薯钾吸收有显著影响，两年结果一致。

2.3 玉米马铃薯的钾素分配

由图 3 可知，在玉米吸收的钾主要集中在秸秆中，占钾吸收总量 的 64.5%～75.0% (2013 年) 和 61.6%～74.5% (2014 年)，随着施氮水平提高，单作和间作玉米秸秆钾吸收量呈现先增加后降低的趋势，在 N0 水平 (2013 年) 和 N0、N1、N3 水平 (2014 年) 下间作显著高于单作。玉米籽粒钾吸收量在 2013 年随施氮水平的提高呈现逐渐增加的趋势，而 2014 年则呈现先增加后降低的趋势。间作玉米较单作提高钾吸收量，提高的这一部分钾在 2013 年主要分配到籽粒中，4 个施氮水平分别提高了 7.4%、5.3%、4.0%、3.4%，2014 年主要分配到秸秆中，分别提高了 12.9%、9.6%、3.3%、–0.4%。在马铃薯中，2013 年在块茎和茎叶中钾养分吸收量各占一半，而 2014 年钾 吸收量主要集中在茎叶中，占钾吸收总量的 47.7%～70.0%。

单作马铃薯块茎钾吸收量随施氮水平的提高呈现逐渐增加的趋势，间作马铃薯块茎钾吸收量 2013 年随着氮肥水平提高先增加后降低，2014 年逐渐降低。间作马铃薯茎叶钾吸收量随着施氮水平提高先增加后降低，单作马铃薯茎叶 N1、N2、N3 水平钾吸收量均高于 N0。间作马铃薯较单作降低了钾吸收

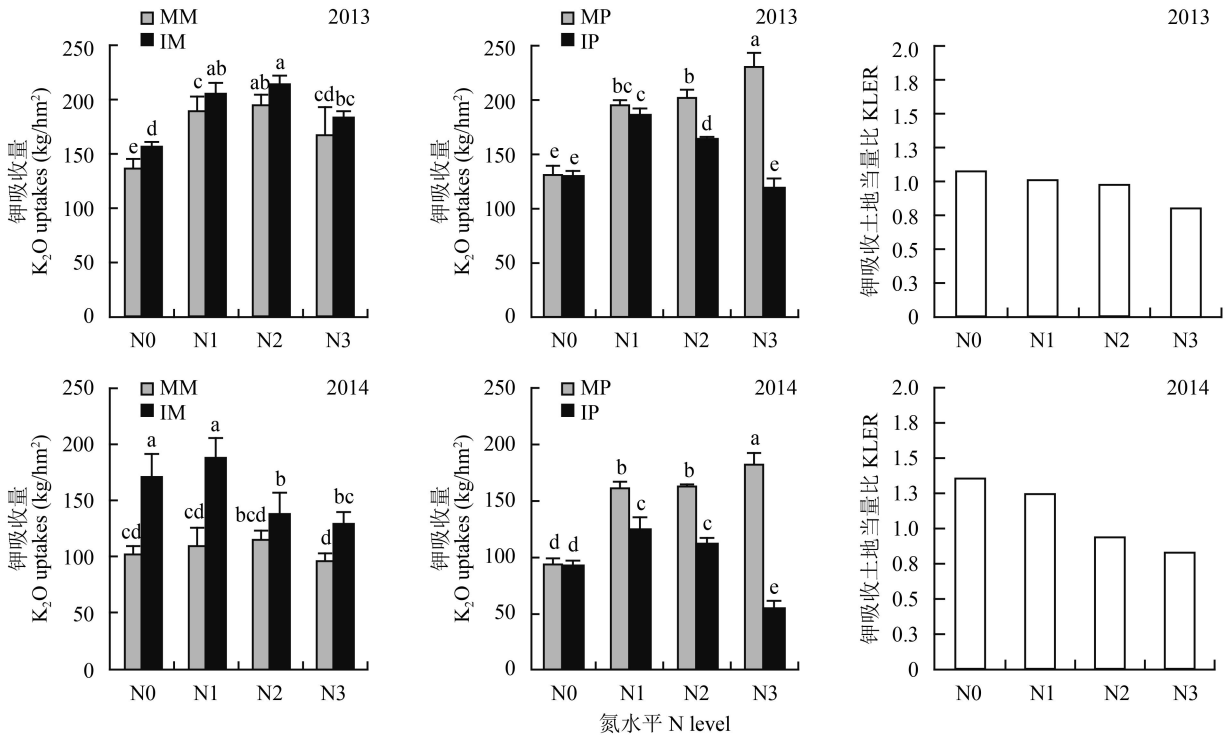

图 2　不同氮水平下玉米、马铃薯间作钾吸收量及钾吸收土地当量比

Fig. 2　Potassium uptakes and the related land equivalent ratio (KLER) of intercropped maize and potato under different N levels

[注（Note）：MM—单作玉米 Monocropped maize; MP—单作马铃薯 Monocropped potato; IM—间作玉米 Intercropped maize; IP—间作马铃薯 Intercropped potato; 不同小写字母代表处理间差异达到 0.05 显著水平 Values followed by different lowercase letters are significantly different among treatments at the 0.05 level.]

表 2　施氮水平与间作对玉米、马铃薯钾吸收的交互作用 (*F* 值)

Table 2　Interaction of the intercropping and N levels on K uptakes of maize and potato (*F* value)

因素 Factor	玉米 Maize		马铃薯 Potato	
	2013	2014	2013	2014
种植模式 Cropping pattern	10.54**	71.32**	154.70**	273.51**
施氮水平 N rate	22.82**	6.50**	68.65**	48.68**
种植模式 × 施氮水平 Cropping pattern × N rate	4.28*	5.10*	61.43**	64.95**

注（Note）：*—$P < 0.05$；**—$P < 0.01$.

量。从平均钾吸收分配量来看，13 年单作马铃薯块茎和茎叶中钾吸收量各占一半，间作中块茎钾吸收量更高，增幅为 41.4%。14 年马铃薯钾吸收主要分配到茎叶中，单作和间作马铃薯茎叶钾吸收量分别是块茎的 1.8 倍和 1.9 倍，单间作差异不显著。

2.4　玉米马铃薯的钾素利用效率

单作加权平均是单作作物按间作比例为权重加权平均的养分吸收效率[12]，用于表征单位土地面积不同种植模式养分吸收总量差异。从表 3 可看出，在 N0 和 N1 水平，间作系统单位面积钾吸收量具有显著优势 (除 2013 年 N1 水平不显著)，而在 N2、N3 水平间作系统显著低于单作加权钾吸收量。间作相对于单作加权钾吸收 (ΔKU) 的计算结果也清晰地表明，随施氮量增加，间作系统单位面积钾吸收的优势在逐渐降低，在高氮 (N2、N3) 时已表现为吸收劣势。由此可知，间作系统在低氮水平较单作系统有增加钾吸收的优势，随着氮肥水平的提高，间作优势转为间作劣势，减少了对钾的吸收。

从表 3 还可看出，单作和间作玉米对钾肥的利用效率随施氮水平提高逐渐增加，2013 年间作在低氮 (N0、N1) 水平显著高于对应的单作，随施氮水平

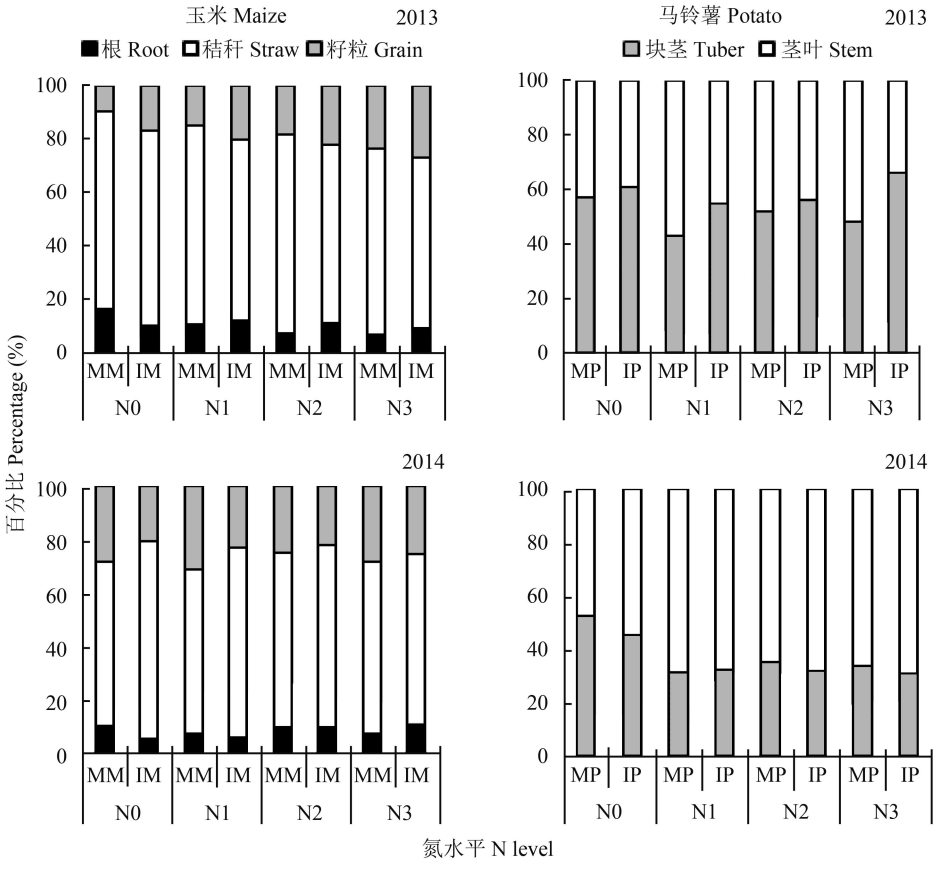

图 3 不同氮水平下间作玉米、马铃薯的钾素分配

Fig. 3 Potassium distribution in the intercropped maize and potato under different N levels

表 3 单位面积钾吸收量和钾素利用效率

Table 3 Potassium uptake and use efficiency per unit area

年份 Year	氮水平 N rate	间作 (kg/hm^2) Intercropping	单作加权平均 (kg/hm^2) Weighted mean for sole crop	ΔKU (%)	钾素利用效率 KUTE (kg/kg)			
					MM	IM	MP	IP
2013	N0	143.1 ± 4.2 bc	133.6 ± 5.4 c	7.1	28.4 ± 3.3 f	48.3 ± 7.2 d	19.6 ± 5.8 ab	25.4 ± 2.8 a
	N1	194.8 ± 7.4 a	191.6 ± 10.4 a	1.6	44.2 ± 3.7 d	61.8 ± 10.4 c	19.1 ± 2.6 b	21.7 ± 1.9 ab
	N2	188.7 ± 4.2 a	198.4 ± 8.3 a	–4.9	62.5 ± 0.3 c	73.8 ± 7.2 bc	19.7 ± 1.5 ab	23.1 ± 2.3 ab
	N3	149.9 ± 2.9 b	198.8 ± 13.9 a	–24.6	83.5 ± 7.3 ab	89.3 ± 8.0 a	19.2 ± 2.3 b	24.9 ± 3.7 ab
2014	N0	130.7 ± 13.1 b	96.6 ± 4.4 c	35.3	51.0 ± 4.1 b	44.8 ± 6.3 b	26.1 ± 2.1 bc	29.3 ± 2.3 b
	N1	155.5 ± 14.4 a	135.2 ± 5.9 b	14.9	94.6 ± 28.6 a	66.4 ± 13.2 b	18.6 ± 1.6 e	23.6 ± 1.2 cd
	N2	123.4 ± 12.2 b	138.6 ± 3.6 b	–10.9	102.3 ± 17.2 a	106.4 ± 17.2 a	21.3 ± 2.1 de	21.1 ± 2.9 de
	N3	90.1 ± 5.3 c	137.5 ± 6.5 b	–34.5	119.5 ± 19.9 a	111.5 ± 9.6 a	18.6 ± 4.5 e	36.4 ± 0.6 a

注（Note）：MM—单作玉米 Monoculture maize；IM—间作玉米 Intercropping maize；MP—单作马铃薯 Monoculture potato；IP—间作马铃薯 Intercropping potato. ΔKU—间作系统相对于单作系统加权钾吸收量的变化 Variation of weighted potassium uptakes on intercropped system relative to monocultured system.

提高，差异不显著，而 2014 年施氮量和间作对玉米钾的利用效率差异不显著。不同施氮水平对马铃薯钾肥的利用效率没有显著影响，但间作较单作有增加马铃薯钾利用效率的趋势，在 2014 年缺钾的土壤上更为明显，N1 和 N3 水平处理间差异显著，暗示间作在贫瘠的土壤上更有利于钾的吸收。施氮促进玉米对钾肥的吸收利用，对马铃薯没有显著影响，但间作均有促进玉米和马铃薯对钾吸收的作用。

3　讨论

本研究结果表明，随着施氮量增加，单作和间作玉米、单作马铃薯 (13 年) 产量呈增加趋势，而单作马铃薯 (14 年) 和间作马铃薯则先增加后降低。综合 2 年结果来看，单间作马铃薯产量随施氮量增加呈现先增加后稳定甚至降低的趋势，且间作马铃薯的减产幅度大于单作。主要是马铃薯对氮肥用量较敏感，过量施氮将造成产量下降[18−19]。另外，在玉米马铃薯间作体系中，玉米处于间作优势地位，且需氮量较高，玉米施氮量与马铃薯施氮量同步增加。在高氮处理下，玉米生长得更好，对养分的竞争力更强，抑制了马铃薯生长，从而造成间作马铃薯高氮减产，这也是间作马铃薯减产幅度大于单作的原因。随着施氮量增加，LER 随施氮量增加而逐渐降低，这一现象与小麦蚕豆间作、玉米花生间作的研究报道一致[11, 20]。

施氮有助于土壤中 K^+ 释放和植物对钾的吸收[3]。大量研究证实，在一定施氮范围，棉花[21]、水稻[22]、甜瓜[23]随施氮量增加，作物钾吸收量逐渐增加，但过量施氮后，将影响钾吸收和利用。我们的研究结果与之一致，随施氮量增加，间作玉米、单作玉米、间作马铃薯钾吸收量均呈现先增加后降低的趋势。钾吸收量随施氮量增加而提高主要是由于施氮提高了作物生物量，使地上部带走更多养分，间接地提高了作物对钾的吸收量[24]。过量施氮后，将降低作物对钾的吸收量，这可能是由于过量施氮而供钾不足时，植物蛋白质合成速率下降，积累的更多蛋白质中间产物如腐胺、鲱精胺和多胺等对植物具有毒害作用，造成蛋白质合成受阻，降低氮肥利用效率的同时也减少植物对钾的吸收[25]。

间作影响作物对土壤养分的吸收利用[26−28]，影响程度因作物品种和间作类型而异。前期研究表明[11]，盆栽小麦和蚕豆间作可以提高小麦钾吸收量 32%～69%，而对蚕豆钾吸收量没有明显影响，在玉米和辣椒间作中也显示间作增加了玉米对钾的吸收量，而间作对辣椒吸钾量没有显著影响[29]。本研究中，玉米马铃薯间作提高玉米钾吸收量 15.7～78.3 kg/hm^2，而减少马铃薯钾吸收量 0.6%～127.8%。间作中玉米钾吸收量高于单作而马铃薯钾吸收量低于单作，这可能是由于在玉米马铃薯间作系统中，玉米的空间优势使其获得更多的光热资源，合成更多的碳水化合物供给地下部，促使根系下扎和横向伸展到马铃薯根区，吸收马铃薯根区养分为其所用，因而，造成间作中两种作物的钾吸收差异。李玉英等[30]和漆智平[31]的研究也证实了这一点。

在前期研究中对施氮和种植模式对钾吸收的影响少有报道，本研究对施氮和种植模式对钾的吸收进行交互作用分析，结果表明种植模式、施氮量以及种植模式和施氮量的交互作用均对玉米、马铃薯钾吸收有显著影响。在低氮水平间作优势较显著，而在高氮水平无间作优势，这可能是因为在高氮水平种间互惠转为种间竞争，且马铃薯在后期大量病害发生，致其减产所致。在田间试验过程中，我们也观察到后期马铃薯发生晚疫病现象较严重，尤其在高施氮水平，病害更为突出。

进一步分析单、间作钾吸收量加权平均值，发现间作钾吸收量加权平均值均随施氮水平的提高先增加后减少，单作随施肥量的增加而增加，且间作相对于单作加权平均钾吸收量也随着施氮水平的增加逐渐降低，过多的氮肥施用甚至导致间作优势转变为劣势。研究表明[32]，不同施肥处理下，间作对小麦钾吸收量与对氮的吸收量趋势一致，在低氮水平下间作优势突出，随着氮肥用量的增加间作优势逐渐消失。单作和间作对玉米与马铃薯钾的利用效率大多数情况下没有显著差异，这与李隆等[15]的研究一致。

本研究结果在 2013 年和 2014 年存在一定差异，这可能与 2014 年试验区进行整体填土改造有关，填土后土质偏粘，土壤肥力较低。两年的土壤理化指标(表 1)显示，2013 年土壤中的全量养分 (N、P、K) 和速效养分 (N、P、K) 及有机质含量均比 2014 年高。其中，2013 年土壤有机质含量是 2014 年的 2.4 倍，全氮和速效氮含量是 2014 年的 3.1 倍和 2.5 倍，全钾和速效钾含量是 2014 年的 2.5 倍和 4.1 倍，这是导致两年研究结果不同的主要原因。同时，随着施氮量逐渐增加，2014 年产量、钾吸收量峰值呈现前移现象。前期研究[2]表明，在土壤缺钾或施钾较低时，施氮对钾吸收无明显影响，其氮肥施用还会降低作物对钾的吸收；而当施用足量钾或更高施钾量时，氮肥施用量与吸钾量呈正比例增加，这与我们的试验结果一致。尽管如此，两年试验中间作促进钾吸收的效应及其对施氮量的响应趋势仍然一致。不过，我们的研究暗示，间作在低肥力土壤上促进钾吸收的效应更好。针对不同肥力土壤条件下，间作对养分吸收利用影响的相关研究有必要进一步深入。

4 结论

1) 间作和单作马铃薯产量对施氮水平反应不一，单作条件下，马铃薯需要较高的施氮水平 (N 125 或者 187 kg/hm^2)，与玉米间作的在施氮水平较低 (62.5 kg/hm^2) 时产量较高，这是因为较高的马铃薯施氮量进一步促进了玉米的间作优势，反而抑制了马铃薯的生长。

2) 施氮量对玉米和马铃薯钾吸收有显著影响。单作和间作玉米在正常或更高水平的施氮条件下，对钾的吸收较多，单作马铃薯吸钾量与玉米一样，高氮促进钾的吸收，而间作马铃薯在正常施氮水平对钾的吸收最少，当施氮水平为正常水平的 50% (N 62.5 kg/hm^2) 时，吸钾量最多。

3) 在同一施氮水平，间作玉米吸收的钾高于单作，增加的钾主要分配到籽粒中，提高了籽粒偏生产力；间作降低了马铃薯钾吸收，但对钾素分配没有影响。

4) 施氮水平和间作对玉米、马铃薯钾吸收存在显著交互作用。在低氮水平下，玉米、马铃薯钾吸收土壤当量比大于 1；随着施氮量提高，钾吸收土壤当量比逐渐减弱，间作促进钾吸收的优势转为劣势，减少了对钾的吸收。

参 考 文 献：

[1] 祖艳群, 林克惠. 氮钾营养的交互作用及其对作物产量和品质的影响[J]. 土壤肥料, 2000, (2): 3–7.
Zu Y Q, Lin K H. Effect of nitrogen and potassium nutrient on interaction, grain yield and quality [J]. Soil Fertilizer, 2000, (2): 3–7.

[2] 戴平安, 李明德, 郑圣先. 钾、氮平衡及其相互作用对水稻产量和养分吸收的影响[J]. 土壤通报, 1992, 23(4): 162–164.
Dai P A, Li M D, Zheng S X. Effect of potassium, nitrogen balance and interaction on rice yield and nutrient absorption [J]. Chinese Journal of Soil Science , 1992, 23(4): 162–164.

[3] 王正银, 姚建祥. 不同施氮量条件下不同品种水稻对紫色土钾吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(2): 183–187.
Wang Z Y, Yao J X. Effect of nitrogen supplying levels on uptake and utilization of purple soil potassium by various rice varieties [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1998, 4(2): 183–187.

[4] 曹志洪, 周秀如, 李仲林, 等. 我国烟叶含钾状况及其与植烟土壤环境条件的关系[J]. 中国烟草, 1990, (3): 6–13.
Cao Z H, Zhou X R, Li Z L, *et al*. The relationship of tobacco potassium and soil environmental of planting tobacco in our country [J]. China Tobacco, 1990, (3): 6–13.

[5] 汤明尧, 张炎, 胡伟, 等. 不同施氮水平对加工番茄养分吸收、分配及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16 (5): 1238–1245.
Tang M Y, Zhang Y, Hu W, *et al*. Effects of different nitrogen rates on nutrition absorption, distribution and yield in tomato[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(5): 1238–1245.

[6] 景立权, 赵福成, 王德成, 等. 不同施氮水平对超高产夏玉米氮磷钾积累与分配的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(8): 1478–1490.
Jing L Q, Zhao F C, Wang D C, *et al*. Effects of nitrogen application on accumulation and distribution of nitrogen, phosphorus, and potassium of summer maize under super-high yield conditions [J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(8): 1478–1490.

[7] 赵俊晔, 于振文, 李延奇, 王雪. 施氮量对小麦氮磷钾养分吸收利用和产量的影响[J]. 西北植物学报, 2006, 26(1): 98–103.
Zhao J Y, Yu Z W, Li Y Q, Wang X. Effects of different nitrogen rates of fertilization on nitrogen, phosphorous and potassium uptakes and utilizations as well as kernel yield of wheat under high-yield circumstances [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2006, 26(1): 98–103.

[8] 朱贵川, 刁朝强. 不同施氮量对烟株干物质与氮磷钾累积的影响[J]. 山地农业生物学报, 2009, 28(2): 95–98.
Zhu G C, Diao C Q. The effect of nitrogen application on dry matter and nitrogen, phosphorus or potassium nutrient accumulation of tobacco plants [J]. Journal of Mountain Agriculture and Biology, 2009, 28(2): 95–98.

[9] Zhang F S, Niu J F, Zhang W F, *et al*. Potassium nutrition of crops under varied regimes of nitrogen supply[J]. Plant and Soil, 2010, 335 (1–2): 21–34.

[10] 陈波浪, 吴海华, 曹公利, 等. 不同肥力水平下立架栽培甜瓜干物质累积和氮、磷、钾养分吸收特性[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(1): 142–149.
Chen B L, Wu H H, Cao G L, *et al*. Characteristics of dry matter accumulation and N, P and K assimilations of trellis-cultivated melon under different fertility rates [J]. Plant nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(1): 142–149.

[11] 肖靖秀, 周桂夙, 汤利, 等. 小麦/蚕豆间作条件下小麦的氮、钾营养对小麦白粉病的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(4): 517–522.
Xiao J X, Zhou G S, Tang L, *et al*. Effects of nitrogen and potassium nutrition on the occurrence of *Blumeria graminis* (DC). Speer of wheat in wheat and faba bean intercropping [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(4): 517–522.

[12] 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*. Contribution of the intercropping advantage on crop nutrient absorption and using of wheat and soybean intercropping [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Sience, 2000, 6(2): 140–146.

[13] 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.

[14] Xiao Y B, Li L, Zhang F S. Effect of root contact on interspecific competition and N transfer between wheat and fababean using direct and indirect ^{15}N techniques [J]. Plant and Soil, 2004, 262: 45–54.

[15] 肖靖秀, 郑毅, 汤利, 等. 小麦蚕豆间作系统中的氮钾营养对小麦锈病发生的影响[J]. 云南农业大学学报, 2005, 25(5): 640–646.
Xiao J X, Zheng Y, Tang L, *et al*. Effects of potassium and nitrogen

supply on the occurrence of wheat rust in wheat and fababean intercropping system [J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 2005, 25(5): 640–646.

[16] 肖靖秀,汤利,郑毅. 氮肥用量对油菜//蚕豆间作系统作物产量及养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(6): 1468–1473.
Xiao J X, Tang L, Zheng Y, *et al*. Effects of fertilization on yield and nutrient absorption in rape and fababean intercropping system [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(6): 1468–1473.

[17] Willey R W. Intercropping: its importance and research needs. Part I. Competition and yield advantages [J]. Field Crops Research, 1979, 32: 1–10.

[18] 韦剑锋, 宋书会, 韦巧云, 等. 施氮量对冬马铃薯氮素利用和土壤氮含量的影响[J]. 作物杂志, 2015(3): 93–97.
Wei J F, Song S H, Wei Q Y, *et al*. Effects of nitrogen application rates on winter potato nitrogen use efficiency and soil nitrogen content [J]. Crops, 2015(3): 93–97.

[19] 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 R M, Fan M P, Fu Y Z, *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.

[20] 焦念元, 宁堂原, 赵春, 等. 施氮量和玉米-花生间作模式对氮磷吸收与利用的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(4): 706–712.
Jiao N Y, Ning T Y, Zhao C, *et al*. Effect of Nitrogen Application and Planting Pattern on N and P Absorption and Use in Maize-Peanut Intercropping System [J]. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34(4): 706–712.

[21] 邹芳刚, 张国伟, 王友华, 等. 施氮量对滨海改良盐土棉花钾累积利用的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(1): 80–88.
Zou F G, Zhang G W, Wang Y H, *et al*. Effect of nitrogen application amounts on uptake and utilization of potassium in cotton grown in improved coastal saline land regions [J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(1): 80–88.

[22] 侯云鹏, 韩立国, 孔丽丽, 等. 不同施氮水平下水稻的养分吸收、转运及土壤氮素平衡[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 836–845.
Hou Y P, Han L G, Kong L L, *et al*. Nutrient absorption, translocation in rice and soil nitrogen equilibrium under different nitrogen application does [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(4): 836–845.

[23] 胡国智, 冯炯鑫, 张炎, 等. 不同施氮量对甜瓜养分吸收分配利用及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(3): 760–766.
Hu G Z, Feng J X, Zhang Y, *et al*. Effects of nitrogen fertilization on nutrient uptake, assignment, utilization and yield of melon [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013, 19(3): 760–766.

[24] 唐浩, 黄绍文. 氮钾水互作对玉米苗期植株生长及钾素吸收的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2008(6): 46–50.
Tang H, Huang S W. Interactive effects of nitrogen, potassium and water on plant growth and potassium uptake of corn seedling [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2008(6): 46–50.

[25] 胡笃敬, 董任瑞, 葛旦之. 植物钾营养的理论与实践[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1993. 50–80.
Hu D J, Dong R R, Ge D Z. Theory and practice of plant potassium nutrition [M]. Hunan Changsha: Science and Technology Press, 1993. 50–80.

[26] Midmore D J. Agronomic modification of resource use and intercrop productivity [J]. Field crops Research, 1993, 34(3–4): 357–380.

[27] Morris R A, Garrity D P. Resource capture and utilization in intercropping: non-nitrogen nutrients [J]. Field Crops Research, 1993, 34(3–4): 319–334.

[28] Redday M S, Willey R W. Growth and resource use studies in an intercrop of pearl millet/ground nut [J]. Field Crop Research, 1981, 4(1): 13–24.

[29] 赵平, 李少明, 范茂攀, 等. 玉米辣椒间作条件下钾素养分吸收利用研究[J]. 湖北农业科学, 2004, (3): 32–34.
Zhao P, Li S M, Fan M P, *et al*. Studies on uptake and utilization of phosphorous in maize/capsicum intercropping [J]. Hubei Agriculture Sciences, 2004, (3): 32–34.

[30] 李玉英, 胡汉升, 程序, 等. 种间互作和施氮对蚕豆/玉米间作生态系统地上部和地下部生长的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(6): 1617–1630.
Li Y Y, Hu H S, Cheng X, *et al*. Effects of interspecific interactions and nitrogen fertilization rates on above-and below-growth in fababean/mazie intercropping system [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(6): 1617–1630.

[31] 漆智平, 若I M, 豪迈尔J. 木薯-野花生间作的根系分布及营养吸收研究[J]. 土壤肥料, 1999, (6): 15–17.
Qi Z P, R I M, H J. Study of root system distribution and nutrition absorb on cassava-wild peanut intercropping [J]. Soils and Fertilizers, 1999(6): 15–17.

[32] 罗娅婷, 汤利, 郑毅, 董艳. 不同施氮水平下小麦蚕豆间作对作物产量和蚕豆根际镰刀菌的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(4): 826–831.
Luo Y T, Tang L, Zheng Y, Dong Y. Effects of wheat-fababean intercropping on the yield and rhizosphere pathogen in different N application rates [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(4): 826–831.