植物营养与肥料学报 2015,21(2): 336 - 345 doi: 10.11674/zwyf.2015.0207
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer http://www.plantnutrifert.org

麦-豆和麦/玉/豆体系中大豆的磷肥增产增效作用研究

周 涛[1], 徐开未[1], 王 科[1], 黄 蔚[1], 张朝春[2], 陈远学[1*]
(1 四川农业大学资源环境学院, 四川成都 611130; 2 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要:【目的】小麦/玉米/大豆旱地三熟模式是我国西南山丘区的主要旱作耕作模式,大豆作为该体系中改善土壤环境的核心作物,明确其增产、增效作用,可指导该体系的科学管理。**【方法】**于 2012、2013 年连续 2 年进行田间试验,采用小麦 - 大豆(单作)和小麦/玉米/大豆(套作)两种体系,设置 5 个不同磷水平处理 (SP_1、SP_2、SP_3、SP_4、SP_5),调查了大豆在与玉米共生期和玉米收获后的生物量变化,以及收获期籽粒产量、全株养分含量和养分利用效率的差异。**【结果】**1)玉米收获前大豆植株地上部生长率,单作为 1.52 g/(m^2 · d),套作为 1.18 g/(m^2 · d),单作比套作高 28.8%;玉米收获后,大豆植株地上部生长率,单作为 4.15 g/(m^2 · d),套作为 5.60 g/(m^2 · d),套作显著高于单作 34.9%。2) 大豆籽粒产量套作平均比单作高 20.3%。单作、套作大豆籽粒产量均随土壤磷含量的增加呈先增加后降低的变化趋势,2 年平均产量最高均在 SP_4 处理,套作为 2923 kg/hm^2,单作为 2400 kg/hm^2。SP_4 处理产量与 SP_2 和 SP_3 差异不显著,与 SP_1 和 SP_5 差异显著。3)收获期大豆籽粒氮、磷、钾含量套作高于单作,茎、荚含量套作低于单作;各部位的氮含量随土壤磷含量的增加先增高后降低,磷、钾含量有随土壤磷含量的增加而增加的趋势。4)小麦 + 大豆种植带的植株氮、钾积累量,套作体系明显高于轮作体系,且随土壤磷含量的增加先增加后减少。5)小麦 + 大豆种植带磷肥当季利用率随土壤磷含量的增加而逐渐减小,SP_2、SP_3、SP_4、SP_5 处理套作体系比单作体系分别高 44.6%、74.9%、66.9%、109.5%,平均高 74.0%。**【结论】**套作大豆相比单作大豆具有产量和营养优势,套作大豆茎、荚氮、磷、钾养分相比单作大豆可更多地向籽粒转运,大幅提高其对磷肥当季利用效率。合理施用磷肥也可提高大豆产量。

关键词: 大豆; 套作; 轮作; 磷; 产量; 养分利用效率
中图分类号: S344.2; S565.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2015)02-0336-10

Effect of phosphate fertilizer on the improvement of yield and nutrient use efficiency of soybean in wheat-soybean and wheat/maize/soybean systems

ZHOU Tao[1], XU Kai-wei[1], WANG Ke[1], HUANG Wei[1], ZHANG Chao-chun[2], CHEN Yuan-xue[1*]
(*1 College of Resource and Environmental Sciences, Sichuan Agricultural University, Chengdu Sichuan 611130, China; 2 College of Resource and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China*)

Abstract:【Objectives】 The wheat/maize/soybean intercropping system has become the mainly farming mode in the hilly area of southwest China. Soybean, as the core of the intercropping system, should be researched on its higher yield and efficiency for the scientific management of the system. **【Methods】** A two-years' field investigation was conducted in the long-term experiment of intercropping system for the comparison of the growth of soybean grown in the wheat/maize/soybean intercropping (IS) and rotation systems (SS). The biomass accumulation and grain yield, nutrient content and nutrient utilization efficiency in the harvest stage were measured in the two systems. **【Results】** 1) The dry matter accumulation rate (DMAR) of soybeans in IS was significantly lower than in SS before maize harvest, with respective value of 1.18 g/(m^2 · d) in IS and 1.52 g/(m^2 · d) in SS; the DMAR in IS became higher than in SS after maize harvest with value of 5.60 g/(m^2 · d) in IS and 4.15 g/(m^2 · d) in

收稿日期: 2014-01-20 **接受日期:** 2014-05-27
基金项目: 国家自然科学基金重大国际(地方)合作项目(31210103906),国家现代农业玉米产业技术体系项目(CARS-02-24)资助。
作者简介: 周涛(1987—),男,四川遂宁人,硕士研究生,主要从事土壤肥力和植物营养研究。E-mail: 364462907@qq.com
* 通信作者 Tel: 028-86291179, E-mail: cyxue2002@aliyun.com

SS. 2) Soybean grain yield was affected by the soil available P contents. The highest yield was in treatment SP_4 (in IS was 2923 kg/ha, in SS was 2400 kg/ha), which was significantly higher than in SP_1 and SP_5, but not significantly than in SP_2 and SP_3. The yield in IS was 20.3% higher than in SS. 3) The nitrogen, phosphorus and potassium contents in soybean grain in IS was higher than those in SS, those in stems and pods in IS were lower than in SS. The phosphorus and potassium contents in soybean plants were increased with the increase of soil available P, nitrogen contents was increased first and then decreased with the highest N contents in treatment SP_4. 4) Nitrogen and potassium accumulation of the planting strip of wheat and soybean plants (WSPS) in IS were significantly higher than in SS, and decreased after the first increasing with the increase of soil available phosphorus. 5) Although the P fertilizer use efficiency (PUF) of WSPS gradually decreased with the increased soil available P contents, PUF of WSPS in IS were always higher than in SS in the same P inputs, as from P2 to P5 those in IS were 44.6%, 74.9%, 66.9% and 109.5% higher than in SS. 【**Conclusions**】Compared with in wheat-soybean rotation, soybeen in wheat/maize/soybean intercropping shows yield and nutritional advantage. In the intercropping system, more nitrogen, phosphorus and potassium are transported from pods and stems to seeds, leading to higher yield and nutrient use efficiency.

Key words: soybean; relay-intercropping; rotation; phosphorus; yield; nutrition use efficiency

大豆是我国除油菜以外的第二大油料作物,西南山丘区是我国大豆主产区之一。近年由于农业产业结构调整及生态农业发展,南方山丘区大豆种植面积逐年增加,在全国大豆产业中占有举足轻重的地位。在川渝地区,春大豆主要种植在田埂和边坡上,而秋大豆相比春大豆种植面积更大,其主要与玉米等作物以间套作方式种植于山丘区旱坡耕地。近年来,川渝地区在传统三熟制"小麦/玉米/甘薯"基础上大力推广"小麦/玉米/大豆"新三熟套作模式[1],麦/玉/豆体系成为该区旱作制研究的重点。大豆作为该体系中增效和改善土壤环境的核心作物,已作了较多研究。无论是从玉米与大豆带状复合种植时玉米株型的选择[2-3],还是玉米大豆带幅与行株距田间配置对大豆生长、农艺性状及产量的影响[4-5],最终发现套作大豆前期生长都会受到共生玉米的抑制。通过选择紧凑型或半紧凑型玉米品种、合理配置玉米大豆的行株距、适期播种等措施可以有效减轻玉米对大豆的竞争抑制,而使套作大豆产量高于单作大豆[6-7]。在小麦/玉米、小麦/大豆的套作体系中研究也发现,前期受小麦抑制的玉米、大豆最终的产量均高于对应单作[8]。也有研究指出,在麦/玉/豆体系中大豆可充分利用小麦季肥料残效而基本不施肥,即使在不施肥情况下若土壤基础肥力高还可能造成大豆徒长而影响产量[9]。所以针对轮、套作体系下大豆增产特性研究具有重要的实践意义。

间套作体系中,套作作物后期恢复生长的能力受施肥量的影响较大[10],而磷肥的当季利用率低、肥效长,在麦/玉/豆体系中小麦相比于大豆对磷肥施用更敏感,对磷肥的依赖性高[11]。基于我们前期对大豆利用小麦季肥料残效生长,提高肥料利用效率的研究[9],本试验在 2011 年基础上于 2012、2013 年连续两年在四川雅安麦/玉/豆定位试验基地开展,设置 5 个磷水平,用以比较小麦 - 大豆和小麦/玉米/大豆两种体系中,不同土壤磷含量对单作、套作大豆生长动态、产量、养分含量和养分利用效率的影响,以期掌握不同体系下大豆的生长特性和养分利用规律,为当地大豆高产高效种植提供依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料

试验于 2012、2013 年在四川农业大学雅安试验农场进行,土壤为紫色湿润雏形土,质地粘重,俗称紫色大土,0—20 cm 耕层土壤 pH 6.27,有机质 33.4 g/kg、全氮 2.10 g/kg、碱解氮 112 mg/kg、有效磷 18 mg/kg、速效钾 71 mg/kg。

小麦选用高抗优质品种"川麦 37",由四川省农业科学院作物研究所选育;玉米选用"川单 418",由四川农业大学玉米研究所选育;大豆选用秋豆品种"贡选 1 号",由四川省自贡市农业科学研究所选育。

1.2　试验设计与方法

1.2.1 试验设计　利用小麦/玉米/大豆周年间套作体系长期定位试验进行。该试验开始于 2011 年,试验采用裂区设计,5 个磷水平为大区,大区内设 4 个小区作为 4 次重复,大区间隔 2 m,重复间无间隔。

磷肥施在小麦和玉米上,小麦5个磷水平分别为P_2O_5 0、45、90、135、180 kg/hm^2(以WP_1、WP_2、WP_3、WP_4、WP_5表示),氮、钾用量一致,N 120 kg/hm^2、K_2O 90 kg/hm^2。玉米5个磷水平,分别为P_2O_5 0、37.5、75、112.5、150 kg/hm^2(记为MP_1、MP_2、MP_3、MP_4、MP_5),氮、钾施用量一致,N 195 kg/hm^2、K_2O 105 kg/hm^2。大豆作为小麦的后作,不施肥,以大豆播种时土壤速效磷含量作为磷水平,分别记为SP_1、SP_2、SP_3、SP_4、SP_5;经测定,大豆播种前各施磷处理的土壤速效磷含量2012年单作小区分别为11、20、35、41、44 mg/kg,套作小区分别为11、15、31、32、36 mg/kg;2013年单作小区分别为9、10、30、37、39 mg/kg,套作小区分别为7、9、30、33、35 mg/kg。

轮作小区面积2 m×3.6 m=7.2 m^2,间套作为2 m×5.4 m=10.8 m^2,小麦/玉米间作田间配置见图1。2012年的小麦于2011年11月11日播种,2012年5月30日收获;玉米2012年4月6日育苗,4月15日移栽,8月6日收获;大豆2012年6月14日播种,10月30日收获。2013年的小麦于2012年11月10日播种,2013年5月11日收获;玉米2013年3月26日育苗,4月7日移栽,8月6日收获;大豆2013年6月12日播种,11月5日收获。小麦条播,行距0.25 m,密度为2.4×10^6 plant/hm^2;小麦扬花时,在隙地中移栽2行玉米,玉米宽窄行种植,窄行距60 cm(宽行距140 cm),窝距40 cm(图1),每窝栽壮苗2株,密度5.0×10^4 plant/hm^2。大豆点播于小麦茬地,行距40 cm,穴距35 cm(图1),每穴留2株,套作大豆密度5.71×10^4 plant/hm^2,单作大豆密度1.43×10^5 plant/hm^2。

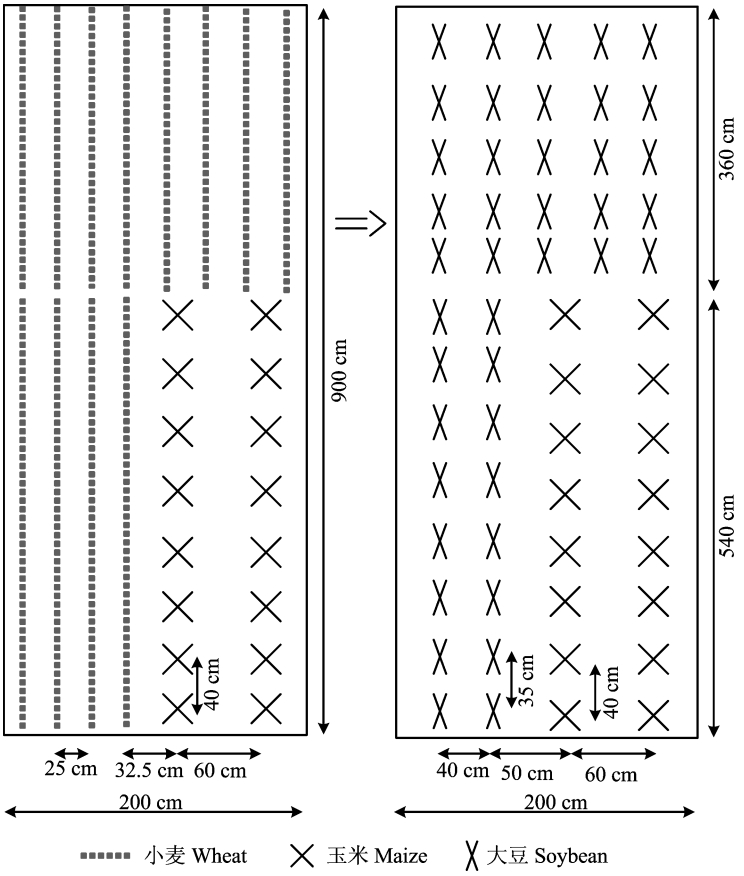

图1 小麦、玉米、大豆的田间布设图

Fig.1 Arrangement of wheat, maize, soybean in the field

1.2.2 施肥方法 小麦播种时开深5 cm左右的沟,30%的氮和全部磷、钾肥撒于沟内基施,于分蘖期追施30%的氮,于拔节期追施40%的氮。玉米打塘施底肥,窝深15 cm左右,30%的氮和全部磷、钾肥作底肥施于窝内,于玉米拔节期追施30%的氮,大喇叭口期追施40%的氮。

1.2.3 测定项目与方法　试验前整个试验地多点采集 0—20 cm 耕层混合土样,分析基础肥力特征[12]。小麦收获后大豆播种前,在小麦茬地各小区分别多点采集 0—20 cm 耕层混合土样,测定土壤速效磷含量[12]。小麦、玉米收获时分别计产,采样并测定氮、磷、钾含量。为评估大豆生物量积累动态,分别于大豆初花期(玉米收获时)、盛花期、收获期每小区随机采 6 株样品,分茎、叶、豆荚、籽粒(收获期大豆叶基本掉完,故不计叶)称重制样,分别计算各个时期的干物质积累量,计算生长率,计算公式: CGR [kg/(m^2 · d)] = ($Wt_2 - Wt_1$)/($t_2 - t_1$),式中 Wt_1、Wt_2 分别为 t_1、t_2 时间的干物质量[13],大豆收获指数 HI = 籽粒/(籽粒 + 茎 + 荚)。大豆实收计产,样品粉碎过 0.25 mm 筛,分析氮、磷、钾含量[12]。

1.3　数据处理与分析

数据采用 Excel 2010 进行处理和作图,利用 SPSS 13.0 进行差异显著性检验。

2　结果与分析

2.1　不同土壤供磷条件下轮作、套作大豆生长量及生长率

2.1.1 大豆干物质积累动态　图 2 显示,大豆的干物质积累主要在玉米收获以后,花前生物量是单作明显高于套作,而花后套作大豆的生物量相比单作增加更快,以致于逐渐超越了单作大豆,收获期大豆生物量套作比单作高 17.6%。

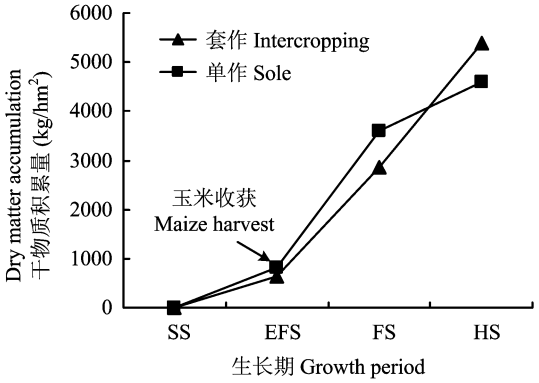

图 2　大豆干物质积累动态

Fig. 2　Dynamics of dry matter accumulation of soybean

[注(Note): 图中数据为 2012、2013 两年 5 个磷水平的平均值 All the values in the figure are the average of the five treatments in 2012 and 2013; SS—播种期 Seed stage; EFS—初花期 Early flowering stage; FS—盛花期 Flowering stage; HS—收获期 Harvest stage.]

2.1.2 不同土壤供磷条件下大豆不同部位、不同时期的生长率　表 1 显示,在大豆与玉米共生期间,套作大豆茎、叶生长率明显低于单作大豆;从玉米收获时至大豆盛花期间,套作大豆生长率仍明显低于单作大豆;在大豆盛花期至收获期,套作大豆全株的生长率显著高于单作大豆。

不论在玉米大豆共生期,还是在玉米收获后至盛花期和从盛花期至收获期,单、套作大豆各部位的生长率均随土壤磷含量的增大呈先增加后降低的趋势,多在 SP_4 处理为最高,但 SP_2、SP_3 和 SP_4 处理间差异较小,SP_2、SP_3、SP_4 与 SP_1 和 SP_5 处理间差异较明显。如从盛花期至收获期,SP_4 处理套作大豆籽粒生长率比 SP_1、SP_2、SP_3、SP_5 处理分别高 62.2%、38.0%、16.2%、47.0%,单作大豆分别高 19.8%、26.5%、13.8%、42.3%。

随着大豆生育进程的发展,在玉米大豆共生期、玉米收获后至大豆盛花期、盛花期至收获期,大豆茎叶的生长率在玉米收获至大豆盛花期这个阶段内最大,玉米大豆共生期间大豆茎叶的生长率约只有玉米收获至大豆盛花期间的十分之一,在不计叶的情况下,盛花期至收获期间大豆茎叶的生长率总体上是负值。说明玉米大豆共生期这段时间内大豆生长较慢,在玉米收获至大豆盛花期这段时间内大豆生长十分迅速,而盛花期后茎叶逐渐衰老,并将干物质从茎叶运输给籽粒。

大豆不同部位的生长率有明显差异。在玉米大豆共生期,不同磷处理下叶生长率明显高于茎;在玉米收获后至大豆盛花期,叶生长率与茎差不多或明显高于茎;盛花期至收获期,大豆茎叶总体生长率为负值,而籽粒和荚皮的生长率迅速增加,套作大豆籽粒生长率大于荚皮,单作与荚皮相当或大。大豆玉米共生期间单、套作大豆叶的生长率分别占全株生长率的 58.4%、60.7%,而玉米收获至大豆盛花期单、套作大豆叶的生长率占全株生长率的 63.1%、59.8%;套作大豆叶的生长率占总生长率的比重随土壤磷含量的增加呈先增加后降低的趋势(各处理依次为 57.6%、54.1%、61.4%、62.6%、59.6%),而单作大豆叶的生长率占总生长率的比重则呈逐渐增加的趋势(各处理依次为 61.1%、62.3%、62.7%、60.2%、63.2%)。

2.2　不同土壤供磷条件下单、套作大豆籽粒产量

表 2 显示,不论单作大豆还是套作大豆,不同土壤供磷条件下籽粒产量 2012 和 2013 年都是随土壤磷含量的增加有先增高后降低的变化趋势,基本上都是 SP_4 处理最大,其中 SP_2、SP_3、SP_4 处理间差异不显著,SP_4 与 SP_1 和 SP_5 间差异显著。与 SP_1 相

表1 不同土壤磷含量对大豆生长率的影响 [g/(m^2·d)]

Table 1 Effect of phosphorus on soybean growth rate

处理 Treatment	器官 Organs	初花期 Early flowering stage		盛花期 Flowering stage		收获期 Harvest stage	
		套作 Intercropping	单作 Sole	套作 Intercropping	单作 Sole	套作 Intercropping	单作 Sole
SP_1	茎 Stem	0.34 b	0.43 b*	3.10 b	4.08 bc	0.39 a*	-0.08 a
	叶 Leaf	0.48 c	0.72 c*	4.81 c	7.49 c*		
	荚 Pod					2.00 a	1.69 b
	籽粒 Seed					3.49 b	2.47 a
	全株 Plant	0.81 b	1.15 c	7.91 b	11.57 b	5.88 c*	4.08 ab
SP_2	茎 Stem	0.53 a	0.58 ab	4.60 a	3.24 c	0.26 ab*	-0.05 a
	叶 Leaf	0.70 b	0.81 bc	5.82 b	7.73 c*		
	荚 Pod					2.35 a	1.94 b
	籽粒 Seed					4.10 b*	2.34 a
	全株 Plant	1.23 ab	1.39 b	10.41 a	10.96 b	6.71 bc*	4.21 ab
SP_3	茎 Stem	0.52 a	0.58 ab	3.71 b	4.52 b	0.17 b*	-0.10 a
	叶 Leaf	0.84 a	0.91 b	6.87 a	10.53 a*		
	荚 Pod					2.33 a	1.76 b
	籽粒 Seed					4.87 ab*	2.60 a
	全株 Plant	1.35 a	1.49 b	10.58 a	15.04 a	7.36 b*	4.26 ab
SP_4	茎 Stem	0.51 a	0.66 a*	3.66 b	5.97 a	0.27 ab*	-0.05 a
	叶 Leaf	0.79 a	1.15 a*	6.83 a	11.52 a*		
	荚 Pod					2.50 a	2.29 a
	籽粒 Seed					5.66 a*	2.96 a
	全株 Plant	1.29 a	1.84 a	10.49 a	17.49 a	8.52 a*	5.20 a
SP_5	茎 Stem	0.47 ab	0.62 a*	4.16 ab	3.89 bc	0.03 c	-0.06 a
	叶 Leaf	0.75 ab	1.15 a*	6.58 a	8.39 b*		
	荚 Pod					2.05 a	1.48 b
	籽粒 Seed					3.85 b*	2.08 a
	全株 Plant	1.22 ab	1.77 ab	10.74 a	12.28 b	5.93 c*	3.49 b
	平均 Mean	1.18	1.52*	10.02	13.47*	6.88*	4.25

注(Note):表中数据为2012、2013两年均值 All the values in the table are the average of 2012 and 2013;同列不同字母表示相同器官不同处理间的差异显著($P<0.05$) Different letters in the same column indicate significantly different among treatments for the same organs ($P<0.05$),*—表示间作和单作间差异显著($P<0.05$) Indicate significantly different between intercropping and sole for the same organs ($P<0.05$).

比,SP_4 处理籽粒产量2012年套作、单作大豆分别增加64.0%、14.5%,2013年套作、单作大豆分别增加30.3%、22.0%,磷对套作大豆籽粒产量的增加幅度相对比单作大豆大;与 SP_4 相比,SP_5 处理籽粒产量2012年套作、单作大豆分别降低24.8%、15.2%,2013年套作、单作大豆分别降低44.3%、37.2%。2年平均产量均在 SP_4 处理最高,套作大豆为2923 kg/hm^2,比 SP_1、SP_2、SP_3、SP_5 处理分别高42.9%、2.5%、7.2%、56.0%;单作大豆为2400 kg/hm^2,比 SP_1、SP_2、SP_3、SP_5 处理分别高19.0%、18.3%、10.7%、40.4%。

从总体上看,2012和2013年各磷处理下套作大豆的籽粒产量都比单作大豆高,2年平均产量 SP_1、SP_2、SP_3、SP_4、SP_5 处理套作大豆比单作大豆

分别高 1.4%、40.6%、25.7%、21.8%、9.6%,平均套作比单作高 20.3%。

在不计叶的情况下,大豆收获指数受磷的影响在不同种植模式中变化不一致。对于套作大豆,其收获指数随土壤磷含量的增加呈先增大后减小的变化趋势,2 年平均结果 SP_1、SP_2、SP_3、SP_4、SP_5 处理收获指数从 0.45 增加到 0.49 后又降至 0.42;对于单作大豆,其收获指数随土壤磷含量的增加呈逐渐减小的变化趋势,2 年平均结果 SP_1、SP_2、SP_3、SP_4、SP_5 处理收获指数从 0.51 逐渐降至 0.43。总体上,大豆收获指数在单作、套作间无明显差异,平均分别为 0.464、0.466。

表 2　磷对大豆籽粒产量(kg/hm²)及收获指数的影响

Table 2　Effect of phosphorus on soybean grain yield and harvest index

处理 Treatment		2012		2013		平均 Mean	
		籽粒产量 Grain yield	收获指数 Harvest index	籽粒产量 Yield	收获指数 Harvest index	籽粒产量 Yield	收获指数 Harvest index
套作 Intercropping	SP_1	1534 b	0.43	2556 bc	0.47	2045	0.45
	SP_2	2266 a	0.48	3439 a	0.51	2853	0.49
	SP_3	2292 a	0.47	3161 ab	0.50	2726	0.49
	SP_4	2516 a	0.46	3331 a	0.51	2923	0.48
	SP_5	1891 ab	0.41	1857 c	0.43	1874	0.42
单作 Sole	SP_1	1608 a	0.53	2426 ab	0.48	2017	0.51
	SP_2	1607 a	0.47	2451 ab	0.48	2029	0.48
	SP_3	1746 a	0.47	2590 a	0.44	2168	0.46
	SP_4	1841 a	0.45	2960 a	0.43	2400	0.44
	SP_5	1561 a	0.44	1860 b	0.41	1710	0.43

注(Note): 同列不同字母表示不同处理间的差异显著 Different letters in the same column indicate significant differences among treatments($P < 0.05$).

2.3　不同土壤供磷条件下单、套作大豆的养分含量及吸收利用效率

2.3.1 磷对大豆养分含量的影响　由收获期大豆各部位的养分含量可看出,套作和单作对收获期大豆氮、磷、钾养分含量的影响均较小(表 3)。不同部位间,套作大豆籽粒的氮、磷、钾养分含量高于单作,茎和荚则相反。籽粒氮含量在一定土壤磷含量范围内随含磷量的增加而增加,最大出现在 SP_3 或 SP_4 处理;茎、荚氮含量施磷处理均大于不施磷处理,但不同磷处理间差异不大。籽粒、茎和荚磷、钾含量均有随土壤磷含量的增加而增加的趋势。套作大豆籽粒氮、磷、钾养分含量大于单作,茎、荚的养分含量是套作小于单作,说明生育后期套作大豆茎、荚的养分较单作大豆更多地向籽粒进行了运输。大豆各部位对磷、钾的吸收均随土壤磷含量的增加而增加,磷的吸收不同磷处理水平间差异显著,钾的差异小于磷。

2.3.2 施磷对小麦 + 大豆种植带养分积累及磷利用率的影响　不论是小麦 - 大豆轮作体系还是小麦/玉米/大豆间套作体系,小麦、大豆是同一种植带上的前作和后作,由于大豆不施肥,大豆主要利用的是小麦季的肥料后效,因此计算了小麦 + 大豆种植带的养分积累及磷利用效率。结果显示(表 4),两种种植方式植株氮、磷、钾积累量均随土壤磷含量的增加先增加后减少,套作小麦 + 大豆植株地上部氮、磷、钾积累量高于单作体系。两年平均,从 P_1、P_2、P_3、P_4、P_5 处理套作体系的小麦 + 大豆种植带的氮积累量比单作体系分别增加 8.0%、27.9%、26.4%、21.6%、20.5%,钾积累量分别增加 6.7%、24.4%、10.8%、12.9%、12.0%。套作体系的小麦 + 大豆种植带氮积累量 P_2、P_3、P_4、P_5 处理比 P_1 分别增加 30.3%、41.2%、48.6%、11.7%,钾积累量分别增加 22.6%、46.4%、53.9%、32.8%;单作体系的小麦 + 大豆种植带氮积累量 P_2、P_3、P_4、P_5 处理比 P_1 分别增加 10%、20.7%、32%、0.1%,钾积累量分别增加 17.8%、29.2%、35.6%、17.3%。套作小麦 + 大豆种植带磷肥表观利用效率从 P_2 到 P_5 处

表3 大豆收获期氮、磷、钾养分含量(%)

Table 3 The total N、P and K contents of soybean seed, stem and pod in harvest stage

处理 Treatment		籽粒 Seed			茎 Stem			荚 Pod		
		N	P	K	N	P	K	N	P	K
套作 Intercropping	SP_1	7.42 b	0.68 b	1.57 b	0.90 c	0.07 c	0.85 b	1.14 b	0.11 b	0.87 b
	SP_2	7.78 ab	0.77 a	1.63 ab	0.96 bc	0.11 b	0.83 b	1.30 a	0.11 b	0.85 b
	SP_3	8.18 a	0.79 a	1.65 a	0.98 b	0.17 ab	0.81 b	1.25 ab	0.14 ab	0.87 b
	SP_4	7.22 b	0.79 a	1.67 a	1.12 a	0.14 ab	0.88 b	1.30 a	0.15 ab	0.89 b
	SP_5	6.43 c	0.84 a	1.66 a	1.14 a	0.20 a	1.06 a	1.22 ab	0.18 a	0.98 a
	平均 Mean	7.40	0.77	1.63	1.02	0.14	0.88	1.24	0.14	0.90
单作 Sole	SP_1	7.15 ab	0.68 c	1.56 a	0.93 c	0.10 c	0.76 c	1.25 c	0.12 b	0.97 b
	SP_2	7.60 a	0.72 bc	1.57 a	1.05 b	0.11 c	0.92 b	1.46 ab	0.13 b	1.02 b
	SP_3	7.38 a	0.73 b	1.55 a	1.04 b	0.15 bc	0.93 b	1.40 b	0.16 ab	0.97 b
	SP_4	7.68 a	0.80 a	1.59 a	1.17 a	0.21 ab	1.10 a	1.50 a	0.19 a	1.18 a
	SP_5	6.81 b	0.82 a	1.60 a	1.19 a	0.24 a	1.14 a	1.36 bc	0.20 a	1.02 b
	平均 Mean	7.32	0.73	1.57	1.07	0.16	0.97	1.39	0.16	1.03

注(Note):表中数据为2012、2013两年均值 All the values in the table are the average of 2012 and 2013. 同列不同字母表示不同处理间的差异显著 Different letters in the same column indicate significant differences among treatments($P<0.05$).

表4 小麦+大豆种植带周年氮、磷、钾养分积累总量(kg/hm^2)

Table 4 Total N、P and K accumulation of the planting strip of wheat and soybean

年度 Year	体系 System	养分 Nutrient	WP_1+SP_1	WP_2+SP_2	WP_3+SP_3	WP_4+SP_4	WP_5+SP_5
2012	小麦/(玉米)/大豆 Wheat/(Maize)/Soybean	N	304.9 c	399.7 b	461.7 a	498.6 a	372.7 b
		P	60.3 c	72.6 b	87.3 b	98.8 a	85.9 b
		K	88.4 d	119.8 c	132.4 bc	170.9 a	153.7 ab
	小麦-大豆 Wheat-Soybean	N	292.2 d	322.1 c	358.4 b	403.2 a	303.7 cd
		P	56.6 d	69.1 bc	74.7 ab	79.4 a	63.6 c
		K	96.0 c	112.4 c	138.7 b	165.3 a	140.9 b
2013	小麦/(玉米)/大豆 Wheat/(Maize)/Soybean	N	435.4 b	565.0 a	584.0 a	601.7 a	454.1 b
		P	67.3 c	84.8 a	99.5 a	97.5 a	83.6 b
		K	168.1 c	220.1 a	223.2 a	239.7 a	193.3 b
	小麦-大豆 Wheat-Soybean	N	393.0 b	431.7 ab	468.8 a	501.5 a	382.3 b
		P	59.2 b	67.3 ab	74.9 a	77.5 a	72.2 a
		K	144.3 d	160.8 cd	182.1 ab	198.1 a	168.9 bc
平均 Mean	小麦/(玉米)/大豆 Wheat/(Maize)/Soybean	N	370.2 d*	482.3 b*	522.8 ab*	550.2 a*	413.4 c*
		P	63.8 d	78.7 c*	93.4 ab*	98.2 a*	84.7 c*
		K	128.2 c	169.9 b*	177.8 b	205.3 a*	173.5 b
	小麦-大豆 Wheat-Soybean	N	342.6 c	376.9 c	413.6 b	452.3 a	343.0 c
		P	57.9 c	68.2 b	74.8 a	78.5 a	67.9 b
		K	120.2 c	136.6 c	160.4 b	181.7 a	154.9 b

注(Note):同行不同字母表示不同处理间的差异显著 Different letters in the same row indicate significant differences among treatments($P<0.05$). *—表示同一处理间作和单作间差异显著($P<0.05$) Indicate significant differences between intercropping and sole for the same treatment($P<0.05$).

理分别为 75.2%、74.7%、57.9%、26.4%,单作分别为 52.0%、42.7%、34.7%、12.6%(表 5)。随着施磷量的增加,小麦 + 大豆磷肥表观利用效率呈降低趋势,但套作依然高于轮作,P_2、P_3、P_4、P_5 处理套作比轮作分别高 44.6%、74.9%、66.9%、109.5%,总体平均高 74.0%。

综上说明,随着施磷量的增加作物的养分积累量呈先升高后降低的趋势,而磷的表观利用率随施磷量的增加依次下降,小麦/玉米/大豆套作体系相比小麦 - 大豆轮作体系能提高作物的养分积累量,从而提高作物的养分利用效率。

表 5　小麦 + 大豆种植带周年磷表观利用率

Table 5　P use efficiency of the planting strip of wheat and soybean (%)

年度 Year	体系 System	$WP_1 + SP_1$	$WP_2 + SP_2$	$WP_3 + SP_3$	$WP_4 + SP_4$	$WP_5 + SP_5$
2012	套作 Intercroping	—	62.1	68.2	64.8	32.3
	单作 Sole	—	63.1	45.7	38.4	8.8
2013	套作 Intercroping	—	88.4	81.3	50.8	20.6
	单作 Sole	—	40.9	39.6	30.8	16.4
平均 Mean	套作 Intercroping	—	75.2	74.7	57.9	26.4
	单作 Sole	—	52.0	42.7	34.7	12.6

3　讨论

在小麦/玉米/大豆间套作体系中,大豆与玉米的共生期为 50 ~ 55 天,占玉米整个生育期的 48%,占大豆整个生育期的 39%,玉米收获后大豆生长约 80 ~ 90 天。大豆与玉米共生期间,玉米的地上部干物质积累量占收获期总生物量的 50% 以上(图 3),且大豆播种时玉米的叶面积指数、株高、茎、叶干物质积累量都处于整个生育期的较高水平[14]。同时相关研究显示,单作玉米或麦/玉/豆体系中套作玉米的氮、磷、钾积累量从吐丝期以后迅速增加[15-17],说明在麦/玉/豆间套作体系中,玉米与大豆之间存在强烈的种间竞争作用。在大豆与玉米共生期,套作大豆植株地上部生长率为 1.18 g/(m^2 · d),而单作大豆为 1.52 g/(m^2 · d),单作比间作高 28.8%;玉米收获后套作大豆植株地上部生长率为 5.60 g/(m^2 · d),高于单作大豆 34.9%(图 4)。即使套作大豆生长前期受到玉米种间竞争的影响,但通过后期恢复生长,使套作大豆的产量和养分积累量均高于单作大豆(表 2、表 4),同样的现象在我们以前的研究中也得到证实[6]。这种前期受抑制后期快速生长的现象,称为"竞争 - 恢复"生长[8]。研究显示小麦/玉米或小麦/大豆套作体系中,在小麦收获前,玉米、大豆的生长和养分吸收都受到小麦的抑制。但当小麦收获后,间作玉米或大豆的养分积累量和生长速率均快于单作[18]。同样的现象在其他禾本科和豆科的套作中也存在[19-20]。为此我们可以得出,在小麦/玉米/大豆间套作体系中,套作大豆的产量优势,主要得益于玉米收获后大豆的恢复性生长,且恢复生长的强弱程度也受土壤磷含量多少的影响。

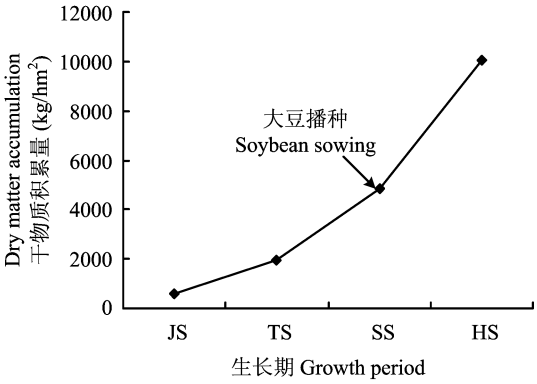

图 3　玉米干物质积累动态

Fig. 3　Dynamics of dry matter accumulation of maize

[注(Note): 图中数据为 2011 - 2013 年平均值 All the values in the figure are the average of the date in 2011, 2012 and 2013; JS—拔节期 Jointing stage; TS—大喇叭口期 Trumpeting stage; SS—吐丝期 Silking stage HS—收获期 Harvest stage.]

在本研究中,我们发现收获期大豆各部位养分含量均随土壤磷含量呈规律变化: 大豆籽粒、茎、荚的氮含量随着土壤磷含量的增加呈先增加后降低的趋势,而磷、钾含量随着土壤磷含量的增加而增加;籽粒的氮、磷、钾养分含量套作高于单作,而茎、荚的氮、磷、钾养分含量套作低于单作。说明套作大豆茎、荚的氮、磷、钾养分相比单作更多的向籽粒运输,从而形成套作大豆的产量优势,这和套作大豆的产量优势来自于生育后期茎、叶的干物质更多地向籽粒运输的理论相吻合[10],同样,在高粱和花生的套

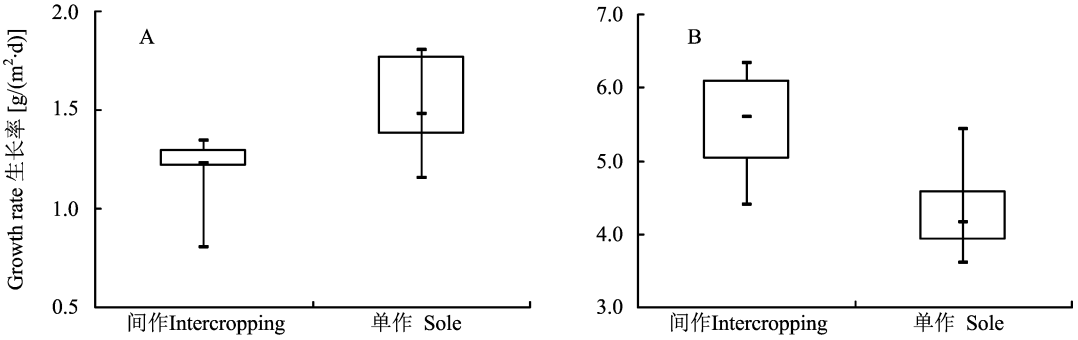

图4 玉米收获前(A)后(B)大豆的生长率变化

Fig. 4 Changes in growth rate of soybean before (A) and after (B) maize harvest

[注(Note):图中数据为2012、2013两年5个磷水平的平均值 All the values in the figure are the average of the five treatments in 2012 and 2013.]

作中也有类似规律[21-22]。我们前期研究发现,在麦/玉/豆间套作体系中土壤磷含量较高时大豆茎对磷存在奢侈吸收,易造成大豆的徒长而影响结荚和鼓粒[9]。本研究中,套作大豆在不同土壤磷浓度梯度下,茎、荚的养分含量均低于单作大豆(表3),同时单作大豆的收获指数随着土壤磷含量的增加呈下降趋势,套作大豆的收获指数随土壤磷含量的增加先增加后降低,除 SP_1 处理外单作的收获指数均低于套作。说明麦/玉/豆体系中,套作大豆后期的恢复生长促进了大豆营养器官的养分向籽粒运输,一定程度上减轻了大豆的徒长。

在麦/玉/豆间套作体系中通过合理调控小麦季施肥,大豆不施肥仅利用小麦季的肥料残效,即可满足生长需要[9]。本研究中,随着土壤磷含量的增加,大豆产量呈先增加后降低的趋势,且套作大豆的产量均高于单作大豆,套作大豆最高产量比最低产量高55.9%,而单作大豆最高产量比最低产量高40.4%。不仅大豆产量有所提高,小麦+大豆种植带的养分利用效率也得到显著提升。小麦+大豆种植带磷肥表观利用效率,套作 P_2、P_3、P_4、P_5 处理分别为75.2%、74.7%、57.9%、26.4%,单作依次为52.0%、42.7%、34.7%、12.6%,套作比单作各个处理分别提高44.6%、74.9%、66.9%、109.5%。本研究中磷肥表观利用率明显高于其他研究[23-24],原因有两方面:第一,该体系中大豆不施肥,其生长所需肥力为小麦季肥料后效,施一季肥供两季作物生长,从而提高了肥料利用效率;第二,该试验为定位试验,2011年试验开始时土壤速效磷含量为18.0 mg/kg,2013年大豆收获时,5个大区耕层土壤速效磷含量 P_1、P_2、P_3、P_4、P_5 处理,套作分别为6.1、8.5、29.8、33.7、34.5 mg/kg,单作为7.9、11.0、28.2、37.6、38.2 mg/kg(未发表),P_1、P_2 处理土壤磷处于耗竭状态,P_4、P_5 土壤磷处于积累状态。土壤供磷能力差异增大,从而导致大豆植株地上部磷积累量差异增大,因此使磷肥的表观利用效率在数值上偏大。但试验证明,大豆利用小麦季肥料后效不仅可以保证大豆正常生长,还可以提高磷肥的当季利用效率。

4 结论

1)小麦/玉米/大豆间套作体系相比小麦-大豆轮作体系,大豆籽粒两年平均增产20.3%。套作大豆的产量优势主要受大豆竞争-恢复生长机制的影响。

2)提高土壤磷含量在一定范围内可以显著提高大豆的产量。

3)套作大豆营养器官的氮、磷、钾养分相比单作大豆更多的向籽粒进行了转运。

4)间套作和轮作大豆可有效地利用小麦季磷肥残效,大幅度提高磷肥的当季利用效率。

参 考 文 献:

[1] 杨文钰,雍太文,任万军,等. 发展套作大豆,振兴大豆产业[J]. 大豆科学,2008,27(1):1-7.
Yang W Y, Yong T W, Ren W J *et al*. Develop relay-cropping soybean, revitalize soybean industry[J]. Soybean Science, 2008, 27(1): 1-7.

[2] 刘增禹,伍晓燕,杨文钰,等. 玉米株型对套作大豆氮素积累、转运和籽粒蛋白质产量的影响[J]. 中国油料作物学报,2011,33(6):574-581.
Liu Z Y, Wu X Y, Yang W Y *et al*. Effect of corn plant type on soybean nitrogen accumulation, translocation and seed protein yield under corn/soybean relay-strip cropping system[J]. China Journal of Oil Crop Sciences, 2011, 33(6): 574-581.

[3] 王竹,杨文钰,吴其林. 玉/豆套作荫蔽对大豆光合特性及产量的影响[J]. 作物学报,2007,33(9):1502-1507.
Wang Z, Yang W Y, Wu Q L. Effects of shading in maize/

soybean relay-cropping system on the photosynthetic characteristics and yield of soybean[J]. Acta Agronomica Sinica, 2007, 33(9): 1502-1507.

[4] 王竹, 杨文钰, 伍晓燕, 等. 玉米株型和幅宽对套作大豆初花期形态建成及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(2): 323-329.
Wang Z, Yang W Y, Wu X Y *et al*. Effects of maize plant type and planting width on the early morphological characters and yield of relay planted soybean[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(2): 323-329.

[5] 张正翼. 不同密度和田间配置对套作大豆产量和品质的影响[D]. 雅安: 四川农业大学硕士学位论文, 2008.
Zhang Z Y. Effects of different density and field distribution on yield and quality of relay-cropping soybean[D]. Yaan: Master Thesis, Sichuan Agricultural University, 2008.

[6] 陈远学, 刘静, 陈新平, 等. 四川轮套作体系的干物质积累、产量及氮素利用效率研究[J]. 中国农业大学学报, 2012, 18(6): 68-79.
Chen Y X, Liu J, Chen X P *et al*. Dry matter accumulation, yield and nitrogen use efficiency of crops rotation and intercropping system in Sichuan[J], Journal of China Agricultural University, 2012, 18 (6): 68-79.

[7] 雍太文, 杨文钰, 向达兵, 等. 小麦/玉米/大豆套作的产量、氮营养表现及种间竞争力的评定[J]. 草业学报, 2012, 21(1): 50-58.
Yong T W, Yang W Y, Xiang D B *et al*. Production and N nutrient performance of wheat-maize-soybean relay strip intercropping system and evaluation of interspecies competition [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2012, 21(1): 50-58.

[8] Li L, Sun J B, Zhang F S *et al*. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping II. Recovery of compensation of maize and soybean after wheat harvesting[J]. Field Crops Research, 2001, 71: 173-181.

[9] 陈远学, 周涛, 黄蔚, 等. 小麦玉米大豆间套作体系中小麦施磷后效对大豆产量、营养状况的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19 (2): 331-339.
Chen Y X, Zhou T, Huang W *et al*. Phosphorus after effects on soybean yield and nutrition status in wheat/maize/soybean intercropping system[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19 (2): 331-339.

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

[11] 唐旭. 小麦-玉米轮作土壤磷素长期演变规律研究[D]. 北京: 中国农业科学院博士学位论文, 2009.
Tang X. Long-term change of phosphorus in soils under wheat-maize crop rotation in China[D]. Beijing: PhD dissertation, Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009.

[12] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (Third edition) [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.

[13] 朱元刚, 董树亭, 张吉旺, 等. 种植方式对夏玉米光合生产特征和光温资源利用的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 21(6): 1417-1424.
Zhu Y G, Dong S T, Zhang J W *et al*. Effects of cropping patterns on photosynthesis characteristics of summer maize and its utilization of solar and heat resources. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 21(6): 1417-1424.

[14] 陈远学,李汉邯,周涛,等. 施磷对间套作玉米叶面积指数、干物质积累分配及磷肥利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2013,24(10): 2799-2806.
Chen Y X, Li H H, Zhou T *et al*. Effects of phosphorus fertilization on leaf area index, biomass accumulation and allocation, and phosphorus use efficiency of intercropped maize [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(10): 2799-2806.

[15] 王小春, 杨文钰, 任万军, 等. 小麦/玉米/大豆和小麦/玉米/甘薯套作体系下玉米产量及养分吸收的差异[J]. 植物营养与肥料学报, 2012,18(4): 803-812.
Wang X C, Yang W Y, Ren W J *et al*. Study on yield and nutrient absorptions of maize in wheat/maize/soybean and wheat/maize/sweet potato relay-intercropping systems [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012,18(4): 803-812.

[16] 李潮海, 王群, 梅沛沛, 等. 不同质地土壤上玉米养分吸收和分配特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(4): 561-568.
Li C H, Wang Q, Mei P P *et al*. Characteristics of nutrient absorption and distribution of maize under different soil textures [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13(4): 561-568.

[17] 高聚林, 王志刚, 孙继颖, 等. 青贮玉米对氮磷钾的吸收规律[J]. 作物学报, 2006, 32(3): 363-368.
Gao J L, Wang Z G, Sun J Y *et al*. Nitrogen phosphorus and potassium absorption in ensilage maize[J]. Acta Agronomica Sinica,2006, (3): 363-368.

[18] Li L, Sun J B, Zhang F S *et al*. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping I. Yield advantage and interspecific interaction on nutrients[J]. Field Crops Research, 2001, 71: 123-137.

[19] Dalal R C. Effect of intercropping maize with pigeon peas on grain yield and nutrient uptake [J]. Australian Journal of Experimental Agriculture, 1974, 10: 219-224.

[20] Manson S C, Leihner D E, Vorst J J *et al*. Cassava-cowpea and cassava-peanut intercropping I. Yield and land use efficiency [J]. Agronomy Journal, 1986, 78: 43-46.

[21] Harris D, Natarajan M. Physiological basis for yield advantage in a sorghum/groundnut intercrop exposed to drought. 2. Plant temperature, water status, and components of yield[J]. Field Crops Research, 1987, 17: 273-288.

[22] Natarajan M, Willey R W. Sorghum-pigeonpea intercropping and the effects of plant population density. 1. growth and yield[J]. Journal of Agricultural Science, 1980, 95: 51-58.

[23] Zhang W F, Ma W Q, Ji Y X *et al*. Efficiency, economics, and environmental implications of phosphorus resource use and the fertilizer industry in China [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2008, 80: 131-144.

[24] Zhang L, Werf W V, Bastiaans L *et al*. Light interception and utilization in relay intercrops of wheat and cotton[J]. Field Crops Research, 2008, 107: 29-42.