植物营养与肥料学报 2015,21(1):46-57
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2015.0105

玉米/大豆和玉米/甘薯模式下玉米干物质积累与分配差异及氮肥的调控效应

王小春[1], 杨文钰[1*], 邓小燕[1], 张 群[1], 雍太文[1], 刘卫国[1], 杨 峰[1], 毛树明[2]
(1 四川农业大学农学院, 农业部西南作物生理生态与耕作重点实验室, 四川温江 611130;
2 仁寿县农业局, 四川仁寿 620500)

摘要:【目的】西南山地玉米区是我国第三大玉米主产区,但单产比全国低近 750 kg/hm^2。由于该区特殊的气候条件,玉米以多熟间套种植为主,如何利用多熟种植中各作物的间套优势和茬口特性,寻求提高本区玉米产量的新途径,是农业科技工作者研究的热点。本文在四川的两个玉米主产区,通过四年的田间小区试验,对比研究了西南玉米主要的两种套作模式—玉米/大豆和玉米/甘薯模式下玉米干物质积累分配、转运差异及施氮量对其的调控效应,以探讨种植模式和氮肥管理的增产效应。**【方法】**2008 年设置玉米/大豆和玉米/甘薯两个套种田间试验,分析比较两种模式玉米干物质积累、分配和转运的差异;2009～2010 年在前一年的基础上分带轮作,即玉米分别种在大豆或甘薯茬上,分析套作和轮作效应对玉米干物质积累的影响;2011 年,在前三年的基础上,采用小区套微区的方式,研究两种模式下不同施氮水平(N0、N90、N180、N270、N360)对玉米干物质积累和转运的调控。**【结果】**1)在玉米/大豆模式下, 玉米干物质积累量从蜡熟期开始显著高于玉米/甘薯模式,茎鞘输出率也显著高于玉米/甘薯模式,最终产量增加 2.4%～3.2%,但差异未达显著水平;2)分带轮作后,从拔节期开始, 玉米/大豆模式下玉米干物质积累量就显著高于玉米/甘薯模式,到成熟期两套种模式下玉米单株干物质积累两试验点平均相差达 26.8 g,茎秆向籽粒的输出率和贡献率也显著高于玉米/甘薯模式,收获指数玉米/大豆模式平均较玉米/甘薯模式提高 3.9%,最终玉米/大豆模式下玉米产量较玉米/甘薯模式增幅加大,两年两个试验点分别增加了 7.4% 和 14.4%;3)氮肥对两种模式下玉米干物质积累分配和产量的调控效应显著,玉米/大豆模式下,玉米以施氮 180 kg/hm^{2}处理,而玉米/甘薯模式下 270 kg/hm^2 处理与同一模式下其他氮素水平相比,增加了光合产物的积累,提高了干物质增长速率,延长了灌浆持续天数,有利于茎鞘和叶片的干物质向籽粒转移,显著提高收获指数,进而提高玉米的增产潜能,玉米/大豆模式下低氮处理(0～180 kg/hm^2)对玉米的增产效应比较明显,在高施氮水平(270～360 kg/hm^2)下两种模式间玉米产量差异不显著。**【结论】**西南丘陵旱地应选择玉米与大豆套作,采用分带轮作种植方式,既有利于提高玉米产量,又可避免大豆的连作障碍;且氮肥管理措施应因种植模式不同而有所差异,在中高等肥力条件下,与大豆套作玉米施氮 180 kg/hm^2,与甘薯套作施氮应提高至 270 kg/hm^2。

关键词: 玉米/大豆(甘薯); 玉米; 施氮量; 干物质积累分配
中图分类号: S513.01; S344.13 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2015)01-0046-12

Differences of dry matter accumulation and distribution of maize and their responses to nitrogen fertilization in maize/soybean and maize/sweet potato relay intercropping systems

WANG Xiao-chun[1], YANG Wen-yu[1*], DENG Xiao-yan[1], ZHANG Qun[1], YONG Tai-wen[1], LIU Wei-guo[1], YANG Feng[1], MAO Shu-ming[2]
(*1 Agronomy College of Sichuan Agricultural University/Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System in Southwest China, Ministry of Agriculture, Wenjiang Sichuan 611130, China; 2 Agricultural Bureau of Renshou County, Renshou Sichuan 620500, China*)

收稿日期: 2013-12-17 **接受日期:** 2014-09-11
基金项目: 国家公益性行业(农业)科研专项(201103001);四川玉米单季稻大面积均衡增产技术集成研究与示范项目(2012BAD04B13-2);四川省育种攻关项目(2011NZ0098-15-2)资助。
作者简介: 王小春(1973—), 女, 四川罗江人, 博士, 副教授, 主要从事耕作制度与玉米栽培技术研究。E-mai: xchwang@sicau.edu.cn
* 通信作者 Tel: 0835-2882004, E-mail: mssiyangwy@sicau.edu.cn

Abstract:【**Objectives**】The southwest region is the third major maize producing area in China where the maize yield is 750 kg/ha lower than the national average yield. Due to exceptional weather conditions in this region, intercropping is the main planting pattern of maize. How to use intercropping advantages and previous crop stubble features is a new approach to increase maize yield in this region. In order to explore a new way to improve maize yield and a reasonable nitrogen management to keep a sustainable yield increase of intercropped maize, a field experiment was conducted to investigate dry matter accumulation, distribution, transportation and their responses to nitrogen fertilization under maize/soybean (MS) and maize/sweet potato (MSP) relay strip intercropping systems from 2008 to 2011 in two major maize producing areas in Sichuan.【**Methods**】A single factor experiment including maize/soybean and maize/sweet potato relay strip intercropping systems was developed to explore effects of different planting patterns on maize dry matter accumulation, distribution and transportation in 2008. From 2009 to 2010, the experiment was set up by strip rotation, which made the two intercropped crops strips be exchanged, including growing maize on the strips of land which were soybean (or sweet potato) strips the previous year, so did soybean (or sweet potato) to explore effects of intercropping and crop rotation on maize dry matter accumulation. In 2011, effects of different nitrogen application rates (N0, N90, N180, N270 and N360) on maize dry matter accumulation and distribution and their responses to nitrogen fertilization were studied using the micro-plot experiment.【**Results**】1) From the dough stage, the dry matter accumulation of maize and dry matter transportation efficiency in stem-sheath in the maize/soybean intercropping system are significantly higher than those in the maize/sweet potato intercropping system with a yield increasing of 2.4% –3.2%, however, the yield difference is insignificant. 2) After the strip rotation, as a result of the rotation effect and intercropping advantages, the maize dry matter accumulation in maize/soybean is significantly higher than that in maize/sweet potato from the jointing stage, and the difference reaches to 26.8 g/plant at the maturing stage. The transportation efficiency and contribution rate in stem-sheath and the harvest index in the maize-soybean intercropping system are also significantly higher than those in the maize-sweet potato intercropping system, with the harvest index increased by 3.9%. Eventually, there are bigger increases of maize yield in maize-soybean intercropping with increases of 7.4% and 14.4% according to the 2-yr field experiments of the two experimental sites. 3) The maize dry matter accumulation and distribution and yield responding to the nitrogen fertilization are significantly different between the maize/soybean and maize/sweet potato intercropping systems. Application of nitrogen fertilizer of 180 kg/ha in the maize-soybean intercropping and of 270 kg/ha in the maize-sweet potato intercropping could help to increase the accumulation of photosynthate and dry matter increasing rate and also extend the length of the continuous filling days. And at the same time, the dry matter transportation from stem-sheath and leaf to grain and the harvest index are increased significantly and then the potential for increasing maize yield is improved. The maize/soybean intercropping increases maize yield significantly under low nitrogen treatment (0–180 kg/ha), however, yield difference is insignificant between the two intercropping systems under the high nitrogen treatments.【**Conclusions**】Optimization of planting patterns is one of the way to increase the yield of maize in the southwest, and maize intercropped with soybean and growing with crop rotation can increase maize yield and avoid continuous cropping barrier. Nitrogen management is different with different cropping systems, the nitrogen fertilizer of 180 kg/ha has an obvious effect of increasing maize yield in the maize/soybean relay strip intercropping system in moderate-fertility and high-fertility soil. However, the nitrogen application rate should be raised to 270 kg/ha when maize intercropped with sweet potato.

Key words: maize/soybean (or sweet potato) relay strip intercropping; maize; nitrogen application amount; dry matter accumulation and distribution

间套作种植具有高效利用耕地、光、热、水分等资源,减少病虫害,实现农业高产高效等优点[1],西南山地玉米区是我国第三大玉米主产区,由于该区光热资源丰富,三熟不足,两熟有余,因此玉米多以多熟套作种植为主,与大豆和甘薯套作是其主要种植模式。已有研究发现,玉/豆模式作为西南地区

近几年发展起来的一种新型玉米套作种植模式,相对于传统的玉/薯模式,具有明显的增产节肥优势[2-9]。而且玉/豆模式下玉米籽粒、秸秆和地上部总生物量显著或极显著高于玉/薯模式[2],但对两种模式下玉米的干物质积累分配、产量差异及多年种植后产量效应缺乏系统研究。

作物籽粒产量的高低是生育期内干物质积累、分配与转移特性所决定的[10-14],干物质积累量与产量呈显著正相关;苞叶和茎鞘中干物质向籽粒运转率较高,对玉米籽粒的贡献率最大。干物质在各器官的分配随生长中心的转移而变化,小喇叭口期以前干物质主要分配在叶片,之后转为茎、叶,吐丝后各器官干物质开始向籽粒转移,高产玉米籽粒产量主要来源于生育后期叶片制造的光合产物[14],吐丝后干物质的积累与分配对经济产量的影响最大[15],占总干物质的60%以上[16]。合理的套作群体和水肥调控可增加干物质积累,协调物质转运速率,进而获得高产[17-19]。国内外已对玉米干物质积累与分配规律进行大量研究,但关于不同套作群体下氮肥调控的研究鲜有报道。

据此,本研究以西南丘陵旱地新型种植模式玉/豆和传统模式玉/薯为研究对象,进行连续四年的大田试验,系统研究了两种套作系统中玉米产量、干物质积累与分配规律,在此基础上,通过研究两种套作体系下不同的氮肥用量对玉米产量和干物质积累分配的影响,为建立两种套作模式下玉米高产高效氮肥管理技术,进一步挖掘玉米增产潜力、科学施肥,实现农业环境友好化、可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料与试验地概况

试验于2008年3月～2011年8月分别在四川农业大学雅安教学农场(29°98′N,103°0′E)和射洪县瞿河乡新华村(30°87′N,105°38′E)进行,土壤类型为紫色土,质地雅安为重壤土,射洪为中壤土,具体肥力水平见表1。试验采用的玉米(*Zea mays*)、大豆(*Glycine max*)、甘薯(*Ipomoea batatas*)品种依次为川单418、贡选1号、川薯164。

表1 供试土壤基础肥力

Table 1 Basic fertility of soils used for the experiment

地点 Experiment site	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 Available N (mg/kg)	速效磷 Available P (mg/kg)	速效钾 Available K (mg/kg)
雅安 Ya'an	7.4	27.9	1.8	0.9	29.8	115.9	37.9	136.6
射洪 Shehong	7.8	17.3	0.9	1.1	30.1	62.5	26.9	164.3

1.2 试验设计

两种套作模式定位试验于2008～2010年进行。2008年为单因素设计,设两个种植模式:玉米/大豆(MS)和玉米/甘薯(MSP),采用1 m/1 m田间配置,玉米每带种2行,带长5 m,每小区10带,重复三次,6个小区,小区面积100 m^2,全生育期玉米共施氮N 240 kg/hm^2,按底肥∶穗肥=5∶5施用。

2009年和2010年在上一年的基础上,换茬分带轮作,即玉米种在原大豆(或甘薯)茬口上。

2011年在前三年定位试验研究的基础上,采用两因素裂区试验设计,开展了两种套作模式下的不同施氮量试验,主处理为不同套种模式,即:玉/豆(MS)和玉/薯(MSP);副处理为不同的施氮量,设5个施氮水平:1)不施氮,对照(N0);2)施氮N 90 kg/hm^2(N 90);3)N 180 kg/hm^2(N180);4)N 270 kg/hm^2(N270);5)N 360 kg/hm^2(N360);氮肥用尿素,50%作底肥,50%作穗肥追施;每处理3次重复,30个小区,带长5 m,每小区种2带,小区面积20 m^2。

玉米密度均按当地该品种高产适宜密度设计,为52500 plant/hm^2,穴植双株,3月23～25日育苗,二叶一心移栽。底肥每公顷配施过磷酸钙600 kg,氯化钾150 kg。大豆和甘薯均于6月10～12日播栽在玉米预留行中,大豆免耕直播,每带种2行,种植密度为120000 plant/hm^2,穴距为25 cm,穴留3株;甘薯每带起单垄,垄宽0.6 m,垄栽双行单株,垄高0.5 m,株距0.17 m,其他管理同大田。

1.3 测定项目与方法

苗期标记长势一致有代表性的植株,在四叶期(移栽后30 d)、拔节期(移栽后45 d)、大喇叭口期

(移栽后 60 d)、抽雄期(移栽后 75 d)、灌浆期(移栽后 90 d)、蜡熟期(移栽后 105 d)、成熟期(移栽后 120 d),各处理分别取样 5 株(四叶期取 10 株),按叶片、茎鞘、籽粒等器官分开,105℃杀青 60 min 后继续在 80℃恒温烘干,测定各部分干物质量。计算各时期各器官中的物质分配量、干物质转运量、转运率、生物产量及经济系数。成熟期,每小区单收单晒计实产。

1.4　数据处理和计算方法

用 Microsoft Excel 2003 软件进行数据处理,用 SPSS 16.0 作统计分析, LSD 法($P<0.05$)进行显著性检验。

茎鞘叶物质转运量 = 抽穗期茎鞘叶干重 - 成熟期茎鞘叶干重

茎鞘叶物质转运率(%) = (茎鞘叶物质转运量/抽穗期茎鞘叶干重) ×100

茎鞘叶物质贡献率(%) = (茎鞘叶物质转运量/成熟期籽粒干重) ×100

2　结果与分析

2.1　两种套作模式下玉米干物质积累分配与转移比较

2.1.1 干物质积累　由表 2 可以看出,2008 年两种模式下玉米干物质积累量从蜡熟期开始,玉/豆模式显著高于玉/薯模式,蜡熟期和成熟期分别较玉/薯的平均值增加了 4.4%、3.9%,两个试验点的结果趋势一致;两种模式下玉米产量差异未达显著水平,但表现为玉/豆模式高于玉/薯模式。

表 2　两种模式下玉米单株干物质积累和产量比较

Table 2　The differences of dry matter accumulation per plant and yield of maize under the two intercropping systems

地点 Experiment site	处理 Treatment	单株干物质积累 ($\times10^{-3}$ kg/plant) Dry matter accumulation per plant							产量 Grain yield (kg/hm^2)
		FL	JS	SS	AS	FS	DS	HS	
					2008				
雅安 Ya'an	MS	1.4 a	10.2 a	43.6 a	119.5 a	185.7 a	265.4 a	284.7 a	7843 a
	MSP	1.5 a	9.9 a	44.7 a	117.8 a	183.5 a	256.7 b	276.4 b	7658 a
射洪 Shehong	MS	0.9 a	7.6 a	30.9 a	109.7 a	172.8 a	260.9 a	277.1 a	7127 a
	MSP	0.8 a	7.2 a	29.8 a	99.2 a	168.4 a	247.6 b	264.5 b	6904 a
					2009～2010				
雅安 Ya'an	MS	0.6 a	7.7 a	47.0 a	123.3 a	176.0 a	279.2 a	290.9 a	7895 a
	MSP	0.5 a	6.5 b	44.7 b	118.8 b	166.8 b	256.8 b	266.6 b	7349 b
射洪 Shehong	MS	0.5 a	6.2 a	43.9 a	115.6 a	164.6 a	273.3 a	282.7 a	7732 a
	MSP	0.4 a	5.8 b	42.3 a	110.4 b	150.1 b	245.9 b	253.4 b	6760 b

注(Note):FL—四叶期 4th leaf age;JS—拔节期 Jointing stage;SS—大喇叭口期 Spike formation stage;AS—抽雄期 Anthesis stage;FS—灌浆期 Filling stage;DS—蜡熟期 Dough stage;HS—收获期 Harvest stage. 同列数据后不同小写字母表示同一试验点不同种植模式间差异达5%显著水平 Values within the same column followed by different small letters indicate significant differences at the 5% level between different intercropping systems in the same experimental site.

2009 年和 2010 年分带轮作后,从拔节期开始各时期玉米干物质积累量均表现为玉/豆模式显著高于玉/薯,到成熟期,雅安试验点和射洪试验点玉/豆模式下玉米的干物质量分别较玉/薯的增加了 9.1% 和 11.6%;两种模式下玉米产量差异也达显著水平,两个试验点玉/豆模式下的玉米产量分别较玉/薯模式下玉米产量提高了 546 kg/hm^2 和 972 kg/hm^2,分别增产 7.4% 和 14.4%。轮作前后相比较,两模式间干物质积累量和产量差异明显加大,表明玉米与大豆套作不仅具有套作优势,还具有轮作优势。

2.1.2 干物质分配与转移　由表 3 可以看出,两种套作模式下玉米茎鞘、叶片和籽粒中干物质积累量差异不显著,收获期玉米籽粒的干物质积累量为玉/豆模式高于玉/薯模式,两个试验点分别高出 6.7 和 10.0 g/plant;两试验点玉/豆模式下玉米茎鞘的输

表3 两种种植模式下玉米各器官干物质分配与转移比较

Table 3 The differences of dry matter accumulation and transportation of maize in the two intercropping systems

地点 Experiment site	处理 Treatment	茎鞘 Stem-sheath				叶片 Leaf				籽粒 Grain		收获指数 Harvest index
		抽雄期 AS (g/plant)	收获期 HS (g/plant)	输出率 TE (%)	贡献率 CR (%)	抽雄期 AS (g/plant)	收获期 HS (g/plant)	输出率 TE (%)	贡献率 CR (%)	灌浆期 FS (g/plant)	收获期 HS (g/plant)	
						2008						
雅安 Ya'an	MS	68.5 a	54.5 a	20.5 a	9.8 a	56.0 a	46.7 a	16.7 a	6.5 a	20.8 a	143.0 a	0.50 a
	MSP	64.4 b	52.5 a	18.6 b	8.8 a	57.3 a	49.0 a	14.5 b	6.1 a	19.9 a	136.3 a	0.49 a
射洪 Shehong	MS	60.1 a	45.4 a	24.5 a	10.1 a	49.7 a	38.8 a	22.0 a	7.5 a	18.8 a	145.3 a	0.52 a
	MSP	57.2 b	44.3 a	22.6 b	9.6 a	41.9 b	32.8 b	21.7 a	6.7 a	16.8 a	135.3 b	0.51 a
						2009～2010						
雅安 Ya'an	MS	65.5 a	53.1 a	18.9 a	8.3 a	52.2 a	43.2 a	17.1 a	6.0 a	27.6 a	149.7 a	0.51 a
	MSP	62.1 b	52.5 a	15.4 b	7.2 b	47.0 b	39.6 b	15.9 b	5.6 a	22.9 b	133.3 b	0.50 b
射洪 Shehong	MS	67.3 a	50.0 a	25.7 a	11.4 a	50.7 a	39.8 a	21.5 a	7.2 a	26.2 a	151.9 a	0.54 a
	MSP	62.5 b	48.8 a	21.9 b	10.6 b	47.8 b	37.9 b	20.8 a	7.7 a	19.5 b	129.0 b	0.51 b

注(Note): AS—Anthesis stage; HS—Harvest stage; TE—Transportation efficiency; CR—Contribution rate; FS—Filling stage. 同列数据后不同小写字母表示同一试验地点不同套作模式间差异达5%显著水平 Values within the same column followed by different small letters indicate significant differences at the 5% level between different intercropping systems in the same experimental site.

出率较玉/薯模式分别增加了 10.2% 和 8.4%,对于籽粒贡献率,玉/豆模式分别较玉/薯模式提高 11.4% 和 5.2%,差异未达显著水平;叶片输出率玉/豆模式较玉/薯模式平均提高了 8.3%;籽粒的分配比率即收获指数在玉/豆模式下较玉/薯模式均高出 0.01。

分带轮作后,两种模式间玉米茎鞘、叶片和籽粒的积累量各时期差异达显著水平,玉/豆模式显著高于玉/薯模式,两试验点变化趋势一致,灌浆期和收获期玉/豆模式下玉米籽粒干重分别较玉/薯模式平均高出 5.7 g/plant 和 19.7 g/plant,提高了 27.4% 和 15.0%;玉/豆模式下的玉米茎鞘输出率和贡献率均也显著高于玉/薯模式,两试验点的结果趋势一致,雅安试验点玉米茎鞘输出率和贡献率玉/豆模式较玉/薯模式分别提高 22.7% 和 15.3%,射洪试验点高 17.4% 和 7.5%;玉米叶片输出率和贡献率两模式间差异未达显著水平;玉米的收获指数在两个模式下差异达显著水平,变幅为 0.50～0.54 之间,玉/豆模式下玉米收获指数较玉/薯高出 0.01～0.03。

与轮作前比较,玉米各器官干物质积累量、茎鞘输出率和贡献率,包括籽粒在植株中的分配比例,玉/豆模式较玉/薯模式的提高比率显著增加,表明玉/豆模式下玉米籽粒产量的提高除与干物质积累量显著增加有关外,还与干物质分配与转移的显著提高有关。

2.2　种植模式与施氮量对玉米产量和干物质积累分配的影响

2.2.1 籽粒产量　两种套作模式下玉米产量差异达显著水平(图 1),玉/豆模式显著高于玉/薯模式,两试验点平均高出 691 kg/hm^2 和 809 kg/hm^2,增产 11.2% 和 12.6%。雅安试验点,在 N0、N90 和 N180 处理下,玉/豆模式玉米产量分别较玉/薯模式在同施氮水平下增产 15.0%、15.6% 和 22.0%;射洪试验点增产 15.0%、21.8% 和 11.0%,而高氮处理(N180 和 N270)下差异不显著,表明玉/豆模式下较玉/薯模式能显著提高玉米产量,在低施氮水平(N0、N90、N180)下对玉米产量的调控作用更明显。

由图 1 可知,玉/豆模式下,两个试验点均以 N180 处理的产量最高,雅安试验点 N180 处理的产量显著高于其他各处理,而射洪试验点的 N180 处理与 N270 处理的产量差异不显著;玉/薯模式下,两试验点均以 N270 处理产量最高。两试验点的试验结果表明,两因素的组合产量两个试验点均以玉/豆模式下施 N180 kg/hm^2 时最高,其次为玉/豆模式下施 N 270 kg/hm^2。

2.2.2 干物质积累　种植模式和施氮量对玉米群体干物质积累量的影响各处理间差异达显著水平(表 4),表现为玉/豆模式高于玉/薯模式,随着施氮量的增加,群体干物质积累呈先增后降的变化趋势。成熟期,干物质积累量玉/豆模式下仍以施 N 180 kg/hm^2 时达到最高值,而玉/薯模式下 N270 处理的值最大,射洪试验点的结果与之相近。各处理的群体干物质积累量(Y)随栽后天数(x)的增长过程可较好地拟合为 Logistic 方程 $Y = K/(1 + ae^{-bx})$,决定系数 R^2 均在 0.98 以上,并可根据该方程求得其最大增长速率、平均增长速率及干物质快增期的持续时间。平均增长速率、最大增长速率和干物质快增期持续时间玉/豆模式均高于玉/薯模式,两个试验点的趋势一致。雅安试验点,玉/豆模式下玉米最大增长速率和平均增长速率均分别较玉/薯模式高 14.1 kg/(hm^2·d)、13.6 kg/(hm^2·d),干物质积累最大增长速率出现的时间推迟 2.1 d,快速积累期持续时间平均增加 1.7 d;射洪试验点,玉/豆模式下玉米最大增长速率和平均增长速率均分别较玉/薯模式高 12.9 kg/(hm^2·d)、10.3 kg/(hm^2·d),干物质积累最大增长速率出现的时间推迟 1.3 d,快速积累期持续时间平均增加 1.3 d。

最大增长速率、平均增长速率和快增期持续时间均有随施氮量的增加呈“先增后降”的变化趋势。N0 的最大增长速率出现的日期虽较早,但快速积累期持续时间较短,并且最大增长速率和平均增长速率较小,所以干物质积累总量最低;N180 和 N270 处理的平均增长速率和最大增长速率均较高,且快增期持续时间长,所以干物质积累总量也较高。但两种模式下氮肥调控效应有差异,两个试验点均表现为玉/豆模式下以 N180 处理的最大增长速率和平均增长速率最高,两试验点平均分别较对照高 14.2% 和 24.2%,而玉/薯模式下以 N270 处理的两指标值较高,分别较对照平均高 17.6% 和 28.5%,可见,种植模式和施氮量可通过影响干物质的平均增长速率、最大增长速率和快增期持续时间进而影响干物质的积累量,最终影响籽粒产量。

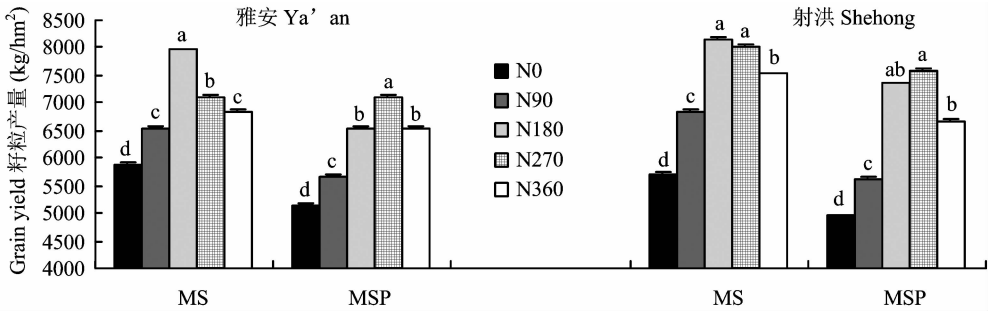

图1 种植模式和施氮量对玉米产量的影响

Fig. 1 Effect of the intercropping systems and nitrogen rates on grain yield of maize

[注(Note):柱上不同小写字母表示同一套作模式不同氮水平下差异达5%显著水平

Different small letters above the bars indicate significant differences at the 5% level between the treatments within an intercropping system.]

2.2.3 干物质转移与分配 由表5可以看出,两种套作模式下玉米各器官干物质积累量差异显著,玉/薯模式下玉米各器官干物质积累量均显著低于玉/豆模式。雅安和射洪试验点,在成熟期玉/薯模式下茎鞘的干物质积累量分别较玉/豆模式减少了9.1%和12.2%,叶片干物质积累量分别减少了7.8%和3.9%;籽粒干物质积累量和差异也较大,在灌浆期,雅安和射洪试验点玉/豆模式下玉米籽粒的干物质积累量较玉/薯分别增加了10.7%和32.2%,成熟期增加了10.8%和10.5%。氮肥用量对玉米各器官干物质积累量的影响均表现为随着施氮量的增加呈先增后减的趋势,雅安试验点玉米各器官干物质积累量高于射洪试验点。

茎鞘和叶片的干物质输出率和贡献率在两种模式间差异不显著,氮肥用量对两者的影响差异均达显著水平,均有随施氮量的增加输出率和贡献率显著降低的趋势。雅安试验点,与不施氮(N0)相比,N90、N180、N270和N360处理的茎鞘输出率分别降低了16.8%、18.7%、20.9%和33.3%,贡献率降低了8.3%、13.6%、13.1%和24.3%;叶片的输出率N90、N180、N270、N360处理与N0相比分别降低了22.2%、36.3%、43.9%和45.3%,贡献率降低了17.7%、21.8%、29.9%和30.6%,射洪试验点与雅安试验点的趋势一致。收获指数呈随施氮量的增加先增后降的趋势,均以N90和N180处理较高。

3 讨论与结论

3.1 两种套作模式下玉米干物质积累分配差异

研究表明,间套作有利于促进作物增产,但不同作物形成的间套作体系种间关系不一致。豆科与大多数禾本科作物间套作时,表现出禾本科的间作优势,禾本科与禾本科间套作,间套优势仍然存在,只不过优势作物与劣势共同存在[3,20-21]。本研究得出,玉/豆和玉/薯模式下,玉米大喇叭口期在其行间分别套作了甘薯和大豆,与大豆套作的玉米在蜡熟期干物质积累量表现出明显优势,并且向籽粒的转运量和转运速率提高,有利于玉米产量的增加,结果表现为玉/豆模式中玉米产量较玉/薯模式中的玉米产量提高2.4%~3.2%,这与雍太文等人的研究结果一致[2]。

昝亚玲等[22]、许艳丽等[23]、田秀萍等[24]、任广鑫等[25]的研究表明,轮作有利于作物产量的提高,但不同的轮作方式对作物产量的影响较大,普遍认为豆科作物与禾本科作物间的轮作是最有益的。本研究也表明,分带轮作后,玉米前茬分别是大豆和甘薯,由于轮作效应和套作优势同时存在,使玉/豆模式下在玉米生长前期干物质积累量就显著高于玉/薯模式,到成熟期两种模式下玉米单株干物质积累相差达26.8 g/plant,茎秆和叶片向籽粒的输出率和贡献率也高于与甘薯套作,收获指数玉/豆模式平均比玉/薯模式高0.02,最终玉/豆模式下玉米产量较玉/薯模式增幅加大,两年两个试验点分别增加7.4%和14.4%。

3.2 两种套作模式下玉米干物质积累分配的氮肥调控效应差异

有研究表明,不同的间套作模式下作物适宜的施氮量差异较大[26],但也有研究得出,不同种植模式下施氮水平对作物产量的影响差异不显著[27]。本研究结果也表明,两种套作模式在适宜的施氮水平下,与同一模式其他施氮水平相比,提高了干物质增长速率,延长了灌浆持续天数,有利于茎鞘和叶片的干物质向籽粒转移,显著提高收获指数,进而提高玉米的增产潜能,玉/豆模式下N180处理的两试验点平均产量达最高为8066 kg/hm²,玉/薯模式下N270处理

表 4　两种模式中不同施氮量处理下玉米群体干物质积累和 Logistic 方程分析

Table 4　Logistic equation analysis and accumulation for dry matter of different nitrogen rates under the two intercropping systems

地点 Site	处理 Treatment		群体干物质积累 Dry matter accumulation per plant (t/hm^2)						最大增长速率 MIR [$kg/(hm^2 \cdot d)$]	平均增长速率 AIR [$kg/(hm^2 \cdot d)$]	t_0 (d)	△t (d)
	套种模式 Intercrop. syst.	施氮量 N rate	JS	SS	AS	FS	DS	HS				
雅安 Ya'an	MS	N0	0.36 c	2.6 c	5.7 c	8.3 e	10.3 e	11.5 e	246.9	143.4	86.9	36.4
		N90	0.39 b	3.2 b	6.3 b	9.3 d	11.8 d	12.4 d	266.0	158.9	86.5	37.9
		N180	0.46 a	3.7 a	6.9 a	10.2 a	13.1 a	14.7 a	287.7	176.3	86.9	38.9
		N270	0.44 a	3.4 b	6.8 a	9.9 b	12.7 b	14.0 b	279.0	174.7	88.2	40.0
		N360	0.41 b	3.4 b	6.5 b	9.6 c	12.1 c	13.4 c	269.2	163.4	86.4	38.3
	MSP	N0	0.34 c	2.4 c	4.7 d	6.8 d	9.3 d	9.7 d	235.3	131.2	83.3	34.2
		N90	0.37 b	3.1 b	6.0 c	8.8 c	10.2 c	10.9 c	242.7	140.6	83.8	35.8
		N180	0.44 a	3.3 a	6.7 a	9.3 b	12.4 a	13.1 b	269.6	158.0	85.4	37.1
		N270	0.42 a	3.5 a	6.6 a	9.5 a	12.6 a	14.2 a	272.1	163.8	86.5	38.4
		N360	0.41 a	3.2 a	6.4 b	9.2 b	11.7 b	13.0 b	258.7	155.1	85.5	37.6
射洪 Shehong	MS	N0	0.31 c	2.1 c	5.2 c	8.1 c	9.7 c	10.7 c	256.9	134.5	83.0	32.9
		N90	0.37 b	2.6 b	5.8 b	9.1 b	11.7 b	12.6 b	275.3	152.4	84.4	35.1
		N180	0.38 b	2.7 a	6.7 a	9.8 a	12.6 a	14.6 a	287.3	168.8	85.8	37.6
		N270	0.41 a	2.7 a	6.5 a	9.7 a	12.3 a	14.5 a	286.9	167.2	85.4	37.1
		N360	0.37 b	2.6 b	5.9 b	9.1 b	11.5 b	14.5 a	272.4	161.6	85.6	37.6
	MSP	N0	0.24 b	1.7 c	4.8 c	6.9 d	8.4 d	9.1 e	235.4	121.2	82.0	31.5
		N90	0.34 a	2.5 b	5.4 b	8.4 b	9.6 c	10.6 d	254.7	139.6	82.4	34.0
		N180	0.37 a	2.5 b	6.0 a	8.9 a	11.8 b	14.1 b	275.4	156.4	84.6	35.8
		N270	0.38 a	2.6 a	6.3 a	8.5 b	12.4 a	14.9 a	281.5	160.1	84.4	36.1
		N360	0.36 a	2.5 b	6.2 a	8.2 c	11.5 b	13.1 c	267.1	155.9	84.2	36.6

注(Note)：JS—拔节期 Jointing stage；SS—大喇叭口期 Spike formation stage；AS—抽雄期 Anthesis stage；FS—灌浆期 Filling stage；DS—蜡熟期 Dough stage；HS—收获期 Harvest stage；MIR—Maximum increased rate；AIR—Average increased rate. t_0 表示干物质积累最大增长速率出现的时间，△t 表示快速积累期(干物质积累快增期)的时间长短 t_0 and △t are the day of maximum growth rate of dry matter accumulation, and the days of the accumulation quickly (dry matter accumulation increased rapidly). 同列数据后不同小写字母表示同一试验点不同施氮量间差异达5%显著水平 Values within the same column followed by different small letters indicate significant differences at the 5% level between different N application rates in the same experimental site.

表5 两种模式下不同施氮量处理对玉米各器官干物质分配与转移的影响

Table 5 Effect of different treatments on dry matter accumulation and transportation of maize under different nitrogen rates in the two intercropping systems

处理 Treatment		茎鞘 Stem-sheath				叶片 Leaf				籽粒 Grain		收获指数 Harvest index
套种模式 Intercroping system	施氮量 N rate	抽雄期 AS (g/plant)	收获期 HS (g/plant)	输出率 TE (%)	贡献率 CR (%)	抽雄期 AS (g/plant)	收获期 HS (g/plant)	输出率 TE (%)	贡献率 CR (%)	灌浆期 FS (g/plant)	收获期 HS (g/plant)	
						雅安 Ya'an						
MS	N0	56.1 c	42.7 c	23.8 a	10.7 a	37.1 c	28.3 c	23.9 a	7.1 a	29.2 c	125.2 c	0.51 c
	N90	68.3 b	55.0 b	19.5 b	9.3 b	43.8 b	35.5 b	19.0 b	5.8 b	42.4 a	143.6 b	0.53 ab
	N180	73.5 a	59.5 ab	19.0 b	8.6 bc	55.9 a	47.4 a	15.2 c	5.2 b	35.1 bc	163.4 a	0.54 a
	N270	75.1 a	61.3 a	18.4 c	9.0 b	55.6 a	47.7 a	14.1 d	5.1 b	36.1 bc	153.6 ab	0.51 c
	N360	74.0 a	62.8 a	15.1 d	7.8 d	52.8 a	45.4 a	14.0 d	5.2 b	38.5 b	142.8 b	0.51 c
	平均 Average	69.4 a	56.3 a	19.2 a	9.1 a	49.0 a	40.9 a	17.2 a	5.7 a	36.3 a	145.7 a	0.52 a
MSP	N0	52.4 c	40.5 b	22.7 a	9.9 a	34.8 c	25.7 c	26.2 a	7.6 a	23.9 c	120.1 b	0.53 a
	N90	63.2 b	51.1 a	19.2 b	9.6 a	39.8 b	31.8 b	20.0 b	6.3 b	29.9 b	126.6 ab	0.52 a
	N180	66.2 ab	53.8 a	18.8 b	9.2 ab	50.7 a	42.2 a	16.7 c	6.3 b	35.4 ab	135.0 ab	0.50 b
	N270	68.5 a	55.9 a	18.4 b	8.9 b	52.8 a	45.4 a	14.0 d	5.2 c	38.8 a	142.3 a	0.50 b
	N360	65.1 ab	54.7 a	15.9 c	7.8 c	49.6 a	43.0 a	13.4 d	5.0 d	36.0 ab	133.5 ab	0.50 b
	平均 Average	63.1 b	51.2 a	19.0 a	9.1 a	45.5 b	37.6 a	18.1 a	6.1 a	32.8 b	131.5 b	0.51 a

续表 5 Table 5 Continuous

处理 Treatment		茎鞘 Stem-sheath				叶片 Leaf				籽粒 Grain		收获指数 Harvest index
套种模式 Intercroping system	施氮量 N rate	抽雄期 AS (g/plant)	收获期 HS (g/plant)	输出率 TE (%)	贡献率 CR (%)	抽雄期 AS (g/plant)	收获期 HS (g/plant)	输出率 TE (%)	贡献率 CR (%)	灌浆期 FS (g/plant)	收获期 HS (g/plant)	
						射洪 Shehong						
MS	N0	51.2 d	35.5 c	30.6 a	13.0 a	29.5 d	20.6 c	30.3 a	7.4 a	29.5 b	120.4 c	0.53 a
	N90	58.6 b	43.6 b	25.6 b	9.9 b	36.6 c	27.1 b	26.0 b	6.3 b	32.2 ab	138.1 b	0.54 a
	N180	64.2 a	50.0 a	22.0 c	8.9 b	43.3 a	32.6 a	24.8 b	6.8 ab	34.8 a	159.2 a	0.56 a
	N270	65.5 a	51.4 a	21.4 c	8.9 b	42.0 a	31.4 a	25.4 b	6.8 ab	33.0 ab	157.4 a	0.55 a
	N360	55.2 c	45.5 b	17.6 d	6.7 c	39.3 b	30.2 a	23.2 c	6.3 b	28.2 b	144.3 b	0.52 b
	平均 Average	58.9 a	45.2 a	23.4 a	9.5 a	38.1 a	28.4 a	25.9 a	6.7 a	31.5 a	143.9 a	0.54 a
MSP	N0	45.6 d	30.1 c	34.0 a	13.9 a	25.9 c	17.3 c	33.2 a	7.7 a	22.1 c	111.3 c	0.54 a
	N90	54.2 b	40.3 b	25.6 b	10.7 b	39.2 a	30.2 a	23.1 b	7.0 ab	24.6 b	122.5 b	0.53 a
	N180	58.4 a	45.7 a	21.7 c	9.0 c	41.6 a	32.9 a	21.1 c	6.2 b	26.6 a	141.1 a	0.52 b
	N270	55.3 b	43.1 ab	22.1 c	8.8 c	38.5 a	30.4 a	21.1 c	5.8 c	23.6 bc	139.0 ab	0.51 b
	N360	50.8 c	39.5 b	22.2 c	8.2 c	34.1 b	25.9 b	24.2 b	6.0 b	22.6 c	137.2 ab	0.51 b
	平均 Average	52.9 b	39.7 b	25.1 a	10.1 a	35.9 b	27.3 a	24.5 a	6.5 a	23.9 b	130.2 b	0.52 b

注(Note)：AS—Anthesis stage；HS—Harvest stage；TE—Transportation efficiency；CR—Contribution rate；FS—Filling stage. 同列数据后不同小写字母表示同一套作模式下不同施氮水平间差异达 5% 显著水平 Different small letters within the same column indicate significant differences at the 5% level between the N fertilizer treatments within an intercropping system.

的产量才能达到较高水平,平均为7342 kg/hm^2。并且在低施氮量(N0、N90、N180)处理下玉米与大豆套作的产量显著高于玉米与甘薯套作,而高氮处理下,两模式的干物质积累和产量的差异不大,一方面可能与基础肥力有关,大豆和甘薯前作对土壤肥力的影响差异较大,郑伟等[28]、石玉海等[29]、张铭等[30]的研究也表明,在高肥力条件下控制氮肥用量可达到高产,而低肥力条件下增施氮肥才能提高产量和氮肥利用率。另一方面可能是由于低施氮量条件下的大豆固氮能力增加,可转移较多的氮素给玉米,使土壤中的氮含量增加,反硝化作用减弱,这与雍太文等人的研究结果一致[3,6]。对于大豆向玉米转移强度与施氮量之间的数量关系还有待于进一步研究。

据此,要提高西南丘陵旱地的玉米产量,应优化种植模式,选择玉米与大豆套作,并且采用分带轮作的种植方式,既有利于提高玉米产量,又可避免大豆的连作障碍;且氮肥管理措施应因种植模式不同而有所差异。因此,在西南丘陵旱地上的中、高等肥力条件下,与大豆套作的玉米施氮量应为N 180 kg/hm^2,而与甘薯套作的施氮量应提高至N 270 kg/hm^2。

参考文献:

[1] 逄焕成,陈阜. 黄淮平原不同多熟模式生产力特征与资源利用效率研究[J]. 自然资源学报,1998,13(3):198-205.
Pang H C, Chen F. Research on productivity and resources utilization rate of various multiples cropping patterns in Huanghuai plain[J]. Journal of Natural Resources, 1998, 13(3): 198-205.

[2] 雍太文,杨文钰,向达兵,等. 小麦/玉米/大豆套作的产量、氮营养表现及其种间竞争力的评定[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 of wheat-maize-soybean relay strip intercropping system and evaluation of interspecies competition[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2012, 21(1): 50-58.

[3] 雍太文,杨文钰,任万军,等. 两种三熟套作体系中的氮素转移及吸收利用[J]. 中国农业科学,2009,42(9):3170-3178.
Yong T W, Yang W Y, Ren W J *et al*. Analysis of the nitrogen transfer, nitrogen uptake and utilization in the two relay-planting systems[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(9): 3170-3178.

[4] 雍太文,陈小容,杨文钰. 小麦/玉米/大豆三熟套作体系中小麦根系分泌特性及氮素吸收研究[J]. 作物学报,2010,36:(3) 477-485.
Yong T W, Chen X R, Yang W Y. Root exudates and nitrogen uptake of wheat in wheat/maize/soybean relay cropping system [J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(3): 477-485.

[5] 雍太文,杨文钰,任万军,等. 小麦/玉米/大豆套作体系中不同作物间的相互作用及氮素的转移、吸收[J]. 核农学报,2009,23(2):320-326.
Yong T W, Yang W Y, Ren W J *et al*. The reciprocity and nitrogen transfer in inter-cropping system of "wheat/maize/soybean"[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2009, 23(2): 320-326.

[6] 雍太文,杨文钰,向达兵,等. 小麦/玉米/大豆和小麦/玉米/甘薯套作对根际土壤细菌群落多样性及植株氮素吸收的影响[J]. 作物学报,2012,38(2):333-343.
Yong T W, Yang W Y, Xiang D B *et al*. Effect of wheat/maize/soybean and wheat/maize/sweet potato relay strip intercropping on bacterial community diversity of rhizosphere soil and nitrogen uptake of crops[J]. Acta Agronomica Sinica, 2012, 38(2): 333-343.

[7] 雍太文,杨文钰,向达兵,等. 小麦/玉米/大豆和小麦/玉米/甘薯套作对土壤氮素含量及氮素转移的影响[J]. 作物学报,2012,38(1):148-158.
Yong T W, Yang W Y, Xiang D B *et al*. Effect of wheat/maize/soybean and wheat/maize/sweet potato relay strip intercropping on soil nitrogen content and nitrogen transfer[J]. Acta Agronomica Sinica, 2012, 38(1): 148-158.

[8] 雍太文,杨文钰,向达兵,等. 不同种植模式对作物根系生长、产量及根际土壤微生物数量的影响[J]. 应用生态学报,2012,23(1):125-132.
Yong T W, Yang W Y, Xiang D B *et al*. Effects of different cropping modes on crop root growth, yield and rhizosphere soil microbe number[J]. Chinese Journal of Applied Ecology. 2012, 23(1): 125-132.

[9] 王小春,杨文钰,任万军,等. 小麦/玉米/大豆和小麦/玉米/甘薯套作体系中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 differences of nutrient absorption 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.

[10] Saidou A, Janssen B H, Temminghoff E J M. Effects of soil properties, mulch and NPK fertilizer on maize yields and nutrient budgets on ferralitic soils in southern Benin[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2003, 100: 265-273.

[11] 陈国平,杨国航,赵明,等. 玉米小面积超高产创建及配套栽培技术研究[J]. 玉米科学,2008,16(4):1-4.
Chen G P, Yang G H, Zhao M *et al*. Studies on small area super-high yield trails and cultivation technique of maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2008, 16(4): 1-4.

[12] 黄振喜,王永军,王空军,等. 产量15000 kg·ha^{-1}以上夏玉米灌浆期间的光合特性[J]. 中国农业科学,2007,40(9):1898-1906.
Huang Z X, Wang Y J, Wang K J *et al*. Photosynthetic characteristics during grain filling stage of summer maize hybrids with high yield potential of 15000 kg·ha^{-1}[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(9): 1898-1906.

[13] 郑丕尧. 作物生理学导论[M]. 北京:北京农业大学出版社,

1992.
Zheng P R. Introduction to crop physiology [M]. Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1992.

[14] 黄智鸿，王思远，包岩，等. 超高产玉米品种干物质积累与分配特点的研究[J]. 玉米科学，2007，15(3)：95-98.
Huang Z H, Wang S Y, Bao Y *et al.* Studies on dry matter accumulation and distributive characteristic in super high-yield maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2007, 15(3): 95-98.

[15] 刘伟，张吉旺，吕鹏，等. 种植密度对高产夏玉米登海 661 产量及干物质积累与分配的影响[J]. 作物学报，2011，37(7)：1301-1307.
Liu W, Zhang J W, Lü P *et al.* Effect of plant density on grain yield, dry matter accumulation and partitioning in summer maize cultivar Denghai 661[J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(7): 1301-1307.

[16] 连艳鲜，李潮海，周苏玫. 高产玉米杂交种干物质生产与分配特征[J]. 河南农业科学，2003，(7)：7-9.
Lian Y X, Li C H, Zhou S M. Maize dry matter yield production and distribution characteristic[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2003, (7): 7-9.

[17] 刘伟，吕鹏，苏凯，等. 种植密度对夏玉米产量和源库特性的影响[J]. 应用生态学报，2010，21(7)：1737-1743.
Liu W, Lü P, Su K *et al.* Effects of planting density on the grain yield and source-sink characteristics of summer maize [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(7): 1737-1743.

[18] 马国胜，薛吉全，路海东，张仁和. 陕单 8806 高产高效施肥技术模式研究[J]. 玉米科学，2006，14(4)：134-137.
Ma G S, Xue J Q, Lu H D, Zhang R H. Study on high yield and benefit fertilization technique of Shandan 8806[J]. Journal of Maize Sciences, 2006, 14(4): 134-137.

[19] 韩金玲，李彦生，杨晴，等. 不同种植密度下春玉米干物质积累、分配和转移规律研究[J]. 玉米科学，2008，16(5)：115-119.
Han J L, Li Y S, Yang Q *et al.* The effect of plant density on regularity of accumulation, distribution and transfer of dry matter in spring maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2008, 16(5): 115-119.

[20] 肖焱波，李隆，张福锁. 小麦/蚕豆间作体系中的种间相互作用及氮转移研究[J]. 中国农业科学，2005，38(5)：965-973.
Xiao Y B, Li L, Zhang F S. The interspecific nitrogen facilitation and the subsequent nitrogen transfer between the intercropped wheat and fababean [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(5): 965-973.

[21] Elmore R W, Jaekobs J A. Yield and nitrogen yield of sorghum intercropped wheat and clover[J]. Tropical Agriculture, 1986, 72: 170-172.

[22] 昝亚玲，王朝辉，Lyons G. 不同轮作体系土壤残留硒锌对小麦产量与营养品质的影响[J]. 农业环境科学学报，2010，29(2)：235-238.
Zan Y L, Wang Z H, Lyons G. Effects of soil residual Se and Zn on yield and nutritional quality of wheat in different rotation systems[J]. Journal of Agriculture Environment Science, 2010, 29(2): 235-238.

[23] 许艳丽，李春杰，李兆林，等. 种植顺序对黑土区大豆、玉米、小麦的产量效应[J]. 农业系统科学与综合研究，2002，18(4)：266-268.
Xu Y L, Li C J, Li Z L *et al.* Influence of cropping sequences of soybean, corn and wheat on their yield in black soil region[J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2002, 18(4): 266-268.

[24] 田秀萍，邱泳宁，肖桂才. 茬口对农作物产量影响的研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报，2000，12(1)：19-23.
Tian X P, Qiu Y N, Xiao G C. Study on effect of crop stubble for crop yield [J]. Heilonjiang Bayi Land Reclamation University, 2000, 12(1): 19-23.

[25] 任广鑫，魏其克，闵安成，等. 渭北旱原不同轮作方式比较研究[J]. 干旱地区农业研究，1997，15(3)：12-17.
Ren G X, Wei Q K, Min A C *et al.* Comparisons of different cropping rotation methods on Weibei rainfed highland [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1997, 15(3): 12-17.

[26] 苟久兰，孙锐锋，何佳芳，等. 种植模式和施氮水平对威芋3号产量与品质的影响[J]. 西南农业学报，2011，24(2)：486-489.
Gou J L, Sun R F, He J F *et al.* Effects of cropping pattern and nitrogen level on yield and quality of potato cultivar weiyu3[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2011, 24(2): 486-489.

[27] 李志贤，王建武，杨文亭，等. 甘蔗/大豆间作减量施氮对甘蔗产量、品质及经济效益的影响[J]. 应用生态学报，2011，22(3)：713-719.
Li Z X, Wang J W, Yang W T *et al.* Effects of reduced nitrogen application on the yield, quality and economic benefit of sugarcane intercropped with soybean [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(3): 713-719.

[28] 郑伟，何萍，高强，等. 施氮对不同土壤肥力玉米氮素吸收和利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2011，17(2)：301-309.
Zheng W, He P, Gao Q *et al.* Effect of N application on nitrogen absorption and utilization of spring maize under different soil fertilities[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(2): 301-309.

[29] 石玉海，许东恒，王立春. 吉林省不同肥力黑土玉米平衡施肥研究[J]. 玉米科学，2010，18(5)：108-113.
Shi Y H, Xu D H, Wang L C, Study on the balanced fertilization for maize on the black soil with different fertilities in Jilin province[J]. Journal of Maize Sciences, 2010, 18(5): 108-113.

[30] 张铭，蒋达，缪瑞林，等. 不同土壤肥力条件下施氮量对稻茬小麦氮素吸收利用及产量的影响[J]. 麦类作物学报，2010，30(1)：135-140.
Zhang M, Jiang D, Miao R L *et al.* Effects of N application rate on nitrogen absorption, utilization and yield of wheat under different soil fertility after rice[J]. Journal of Triticeae Crops, 2010, 30(1): 135-140.