中国农业大学学报 2013,18(6):68-79
Journal of China Agricultural University
http://xuebao.cau.edu.cn
DOI:10.11841/j.issn.1007-4333.2013.06.09

四川轮套作体系的干物质积累、产量及氮素利用效率研究

陈远学[1] 刘 静[1] 陈新平[2] 张朝春[2] 黄 蔚[1] 唐义琴[1] 徐开未[1*]
(1.四川农业大学 资源环境学院,成都 611130;2.中国农业大学 资源与环境学院,北京 100193)

摘 要 以"小麦/玉米/大豆"、"小麦/玉米/甘薯"2种三熟套作体系和"小麦-大豆"、"小麦-甘薯"、"蚕豆-玉米"3种两熟轮作体系为研究对象,通过2011和2012年2年的田间试验,探讨了不同种植模式下小麦、玉米干物质积累分配、产量、氮素利用效率和体系产量产值的变化。结果表明:套作小麦各时期地上部干物质积累量从拔节期后均显著高于单作小麦,套作玉米各时期干物质积累量与对应单作相比略有降低,但差异不显著;2种三熟套作模式中小麦/玉米、玉米/大豆和玉米/甘薯套作体系的土地当量比(LER)均大于1,具有明显的产量优势;与相应单作相比,玉米/大豆套作提高了体系的氮素利用效率($\Delta NUE_{ms}>0$),平均提高38.5%,玉米/甘薯套作降低了体系的氮素利用效率($\Delta NUE_{ms}<0$),平均降低46.0%;全年总收益2年平均以三熟套作"麦/玉/薯"体系最高,比三熟套作"麦/玉/豆"体系高13.1%,比两熟轮作体系小麦-甘薯、小麦-大豆和蚕豆-玉米分别高14.7%、2.4%和41.2%。综上,三熟套作相对两熟轮作能提高体系产量和产值,与大豆套作能提高体系氮素吸收利用效率。

关键词 小麦;玉米;轮作;套作;产量;干物质积累;氮素利用效率
中图分类号 S 344 **文章编号** 1007-4333(2013)06-0068-12 **文献标志码** A

Dry matter accumulation, yield and nitrogen use efficiency of crops rotation and intercropping systems in Sichuan

CHEN Yuan-xue[1], LIU Jing[1], CHEN Xin-ping[2], ZHANG Chao-chun[2], HUANG Wei[1], TANG Yi-qin[1], XU Kai-wei[1*]
(1. College of Resources and Environmental Sciences, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China;
2. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract Crop intercropping or relay-cropping is very popular and there are dozens of planting patterns in Sichuan province. The wheat/maize/sweet potato and wheat/maize/soybean relay-cropping systems are two main intercropping systems. To assess the effect of different planting patterns on crops grain yield, dry matter accumulation, output value and nitrogen use efficiency, two field experiments were conducted in 2011 and 2012 at SCAU experimental base in Sichuan, the experiment treatments included two triple-harvest intercropping systems as "wheat/maize/soybean" and "wheat/maize/sweet potato" and three double-harvest crop rotation systems as "wheat-soybean", "wheat-sweet potato" and "faba bean-maize". The results showed that: Dry matter accumulation of intercropping wheat was significantly higher than that of monoculture wheat after the jointing stage, while dry matter accumulation of relay-cropping maize slightly decreased comparing to monoculture maize but with no significant difference during the whole growth period. The wheat/maize, maize/soybean and maize/sweet potato intercropping systems in the wheat/maize/soybean and wheat/maize/sweet potato relay-cropping systems had obvious production advantages with a LER (Land equivalent ratio) > 1. Comparing to the relevant sole cropping, nitrogen use efficiency of the maize/soybean intercropping system increased ($\triangle NUE_{ms}>0$) by 38.5% but nitrogen use efficiency of the maize/sweet potato intercropping system decreased ($\triangle NUE_{ms}<0$) by 46.0%. The highest average annual revenue for 2011 and 2012 was obtained from wheat/maize/sweet potato triple-harvest intercropping system. Comparing to the other four systems (wheat/maize/soybean triple-harvest intercropping system, and the wheat-sweet potato, wheat-soybean, faba bean-maize

收稿日期:2013-04-11
基金项目:国家现代农业玉米产业技术体系项目(CARS-02);国家自然科学基金重大国际(地区)合作研究项目(31210103906);四川省科技支撑计划项目(2012RZ0018)
第一作者:陈远学,副教授,博士,主要从事土壤肥力、植物营养及养分管理研究,E-mail:cyxue2002@aliyun.com
通讯作者:徐开未,副教授,博士,主要从事生物固氮及养分高效利用研究,E-mail:xkwei@126.com

double-harvest rotation systems), it added values by 13.1%, 14.7%, 2.4% and 41.2% respectively. In conclusion, triple-harvest intercropping systems was much better than double-harvest rotation systems since it could improve yield and output value, and intercropping system with soybean could enhance nitrogen absorption and use efficiency.

Key words　wheat; maize; rotation; intercropping; yield; dry matter accumulation; N use efficiency

随着人口增长和耕地面积减少，资源、环境、粮食等全球性问题逐渐现显。间套作体系作为传统农业的精华，在资源高效利用、环境友好和可持续发展的现代农业中仍起着重要作用。作物间套作体系利用不同作物在空间、时间和资源需求差异等方面的互补，更有效的利用各种生长因子来获得产量优势[1-2]。特别是豆科与禾本科间作具有明显的间作优势，能显著提高禾本科作物的产量和吸氮量以及对前作的残留氮素利用和后作作物的氮素利用效率[3-6]。近年来，众多学者对间套作体系的增产机理已有较多研究，尤其是各作物间作的种间作用关系，地上部与地下部相互作用对间作优势的贡献，对光照、水分、各种养分的竞争与利用以及养分的高效利用机理等方面进行了系统而深入的研究[7-8]。但这些研究大多集中在一年一熟或一年两熟制上，对我国西南地区多熟间套作体系涉及较少。

小麦、玉米是四川旱地种植范围最广、产量最大的 2 种谷类作物。四川盆地因光、热、水资源的特殊性，具有两季有余、三季不足的生产特点，所以两熟轮作和三熟间套作在四川广泛存在。据调查，川渝地区旱地作物的间套作面积占旱地种植面积的 54%，种植模式多达几十种，其中以玉米为中心的三熟间套作体系“小麦/玉米/甘薯”和“小麦/玉米/大豆”2 种种植模式最多。近年来对这 2 种多熟间套作模式的群体配置、氮肥运筹、土壤微生物多样性及作物产量等已有一些研究[9-12]，但缺乏周年体系的干物质积累分配、产量产值及养分利用效率的相关研究。为此，本研究以小麦、玉米为中心的 2 种三熟间套作体系“小麦/玉米/大豆”、“小麦/玉米/甘薯”和三种两熟轮作体系“蚕豆-玉米”、“小麦-甘薯”、“小麦-大豆”为研究对象，探讨不同种植模式中小麦、玉米干物质积累分配，周年体系产量产值及氮素利用效率，为当地旱地作物间套复种，完善和改进种植模式，实现高产高效和农业可持续发展提供依据。

1　材料与方法

1.1　试验地点

试验于 2010 年 11 月—2012 年 10 月（2011 和 2012 年生长季）在四川农业大学雅安试验农场进行，试验地土壤为紫色湿润雏形土，土壤质地为黏质重壤土，0～20 cm 耕层土壤 pH 5.6、有机质 25.2 g/kg、全氮 1.13 g/kg、碱解氮 164 mg/kg、有效磷 28.5 mg/kg（NH_4F-HCl 法）[13]、速效钾 104 mg/kg。

1.2　试验材料

供试蚕豆品种为汉源大白豆，购买于雅安农贸市场。小麦品种 2011 年为川农 26，为四川农业大学小麦研究所选育；2012 年为川麦 37，由四川省农业科学院作物所选育。玉米品种为川单 418，由四川农业大学玉米研究所选育。大豆品种为贡选 1 号，由四川省自贡市农科所选育。甘薯品种为川薯 164，由四川省农业科学院作物所选育。供试氮肥为尿素（含 N 量 46%），磷肥为过磷酸钙（含 P_2O_5 量 12%），钾肥为氯化钾（含 K_2O 量 60%），均购于当地农资公司。

1.3　试验设计与实施

1.3.1　试验设计

共设置 5 种种植模式，分别是蚕豆-玉米轮作（T1）、小麦-甘薯轮作（T2）、小麦-大豆轮作（T3）、小麦/玉米/大豆间套作（T4）和小麦/玉米/甘薯间套作（T5）。作物施肥量一致，小麦施氮（N）120 kg/hm^2，磷（P_2O_5）90 kg/hm^2，钾（K_2O）90 kg/hm^2；玉米施 N 195 kg/hm^2，P_2O_5 75 kg/hm^2，K_2O 105 kg/hm^2；其中 P、K 肥全作底肥一次性施入，小麦的 N 肥 50%作底肥，20%作分蘖期追肥，30%作拔节期追肥，玉米的 N 肥 30%作底肥，30%作拔节期追肥，40%作大喇叭口期追肥，小麦底肥均匀撒施于播种沟，玉米底肥穴施，小麦追氮在小雨天撒施，玉米追氮均兑清水冲施。蚕豆、大豆和甘薯均不施肥。

1.3.2　试验实施

2011 和 2012 年按同一试验方案在相同地块上进行。5 个试验处理，重复 3 次，田间随机区组排列，小区面积 4.6 m×4.0 m＝18.4 m^2。T1、T2 和 T3 处理为单作（轮作）小区。T4 和 T5 处理为间套作小区，其中 4 个带幅，带幅宽 1 m，规格为 1 m 小麦：1 m 预留行：1 m 小麦：1 m 预留行（图 1），小麦带幅中于 11 月初条播冬小麦 4 行，行距 0.25 m，用种量 225 kg/hm^2，基本苗 3.3×10^6 株/hm^2；1 m 预留行中于 4 月中旬前后移栽 2 行玉米，窄行距

0.5 m(宽行距 1.5 m),窝距 0.4 m,每窝植苗 2 株,密度 5.0×10^4 株/hm^2;小麦收获后于小麦茬地种 2 行大豆或甘薯(图 1),大豆行距 0.5 m,窝距 0.35 m,点播,每窝留苗 2 株,密度 57 145 株/hm^2,甘薯移栽前先进行土地人工起垄,垄宽 0.5 m,垄高 0.3 m,垄上种植单行甘薯,行距 0.5 m,窝距 0.3 m,每窝 1 株,密度 33 335 株/hm^2。T1 处理蚕豆行距 0.8 m,窝距 0.3 m,点播,每窝留苗 2 株,密度 83 337 株/hm^2,收获鲜食蚕豆后移栽玉米,行距 0.8 m,窝距 0.4 m,每窝植 2 株,密度 6.25×10^4 株/hm^2;T2 和 T3 处理中小麦、大豆、甘薯的种植规格与 T4、T5 相同。各作物的施肥水平在单作与间套作中相同。各作物按当地正常季节种植,播种(移栽)和收获时间如表 1 。所有小区的一半用于中期采样,一半用于收获测产。

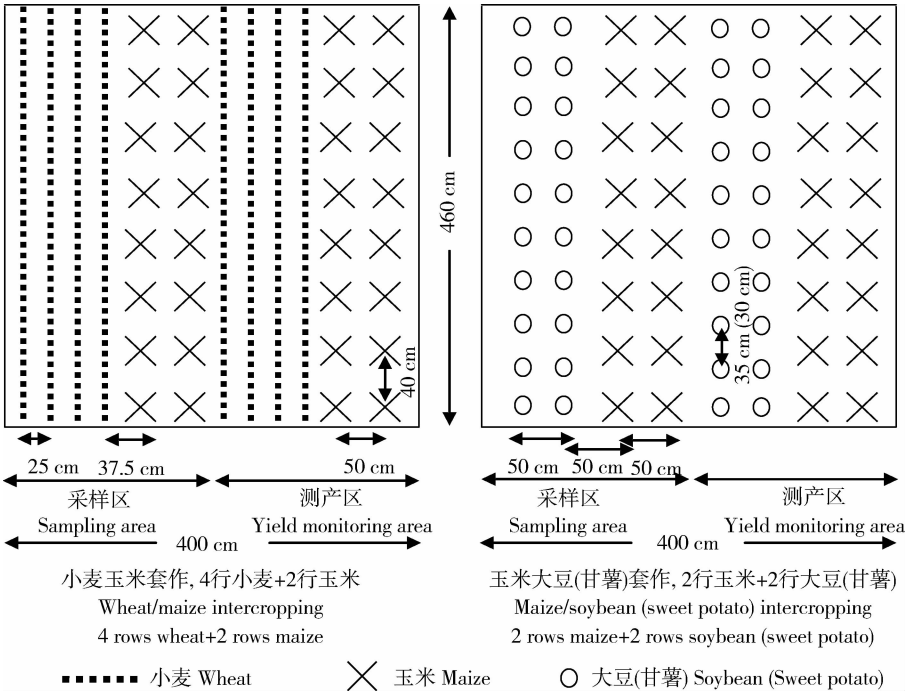


图 1 套作小区的田间布置图

Fig. 1 Diagram showing the arrangement of the crops in the relay-cropping plots

表 1 作物播种和收获日期

Table 1 Dates of the crops sowing and harvest

处理 Treatment	播种日期(month/day) Sowing date					收获日期(month/day) Harvest date				
	蚕豆 Faba bean	小麦 Wheat	玉米 Maize	大豆 Soybean	甘薯 Sweet potato	蚕豆 Faba bean	小麦 Wheat	玉米 Maize	大豆 Soybean	甘薯 Sweet potato
T1	11/12	—	4/29	—	—	5/08	—	8/10	—	—
	11/10		4/05			5/06		8/05		
T2	—	11/12	—	—	6/25	—	5/25	—	—	10/19
		11/10			6/12		5/28			10/31
T3	—	11/12	—	6/15	—	—	5/25	—	10/19	—
		11/10		6/12			5/28		10/31	
T4	—	11/12	4/06	6/15	—	—	5/25	8/10	10/19	—
		11/10	4/05	6/12			5/28	8/05	10/31	
T5	—	11/12	4/06	—	6/25	—	5/25	8/10	—	10/19
		11/10	4/05		6/12		5/28	8/05		10/31

注:上行日期为 2010—2011 年度,下行日期为 2011—2012 年度。

Note: The date at the previous line are for 2010—2011 year, the date at the next line are for 2011—2012 year.

1.4　测定项目及方法

1.4.1　干物质积累量和养分含量

小麦于分蘖期、拔节期、扬花期、收获期随机采 40 cm 长，100 cm 宽（4 行小麦）样段植株，玉米于拔节期、大喇叭口期、吐丝期、灌浆期和收获期采代表性植株 5 株，大豆于收获期随机取长势一致的植株 6 株。样品分茎（包括叶鞘或叶柄）、叶、穗（小麦扬花期为整个麦穗，收获期为穗壳；玉米吐丝期、灌浆期为整个玉米苞，收获期为苞叶和穗轴；大豆为荚）、籽粒（收获期测定）分开，在 105 ℃下杀青 30 min 后 75 ℃下烘干至恒重后称重，样品粉碎过 60 目筛制样，测定 N 含量[13]。

1.4.2　产量

蚕豆全部收获测定籽粒鲜重，小麦在测产区随机选取长势一致 2 m 长 1 m 宽（4 行小麦）的植株用脱粒机脱粒后测定籽粒风干重，玉米测产区全部收获脱粒后测定籽粒风干重，大豆在测产区选取长势一致的 12 株植株脱粒后测定籽粒风干重，甘薯测产区全部收获测定甘薯块根鲜重。

1.4.3　产值及经济效益

各作物产值按当年收购价格计算，2011 年的单价是蚕豆 2.80 元/kg，小麦 2.15 元/kg，玉米 2.10 元/kg，大豆 3.94 元/kg，甘薯 0.58 元/kg；2012 年的单价是蚕豆 3.00 元/kg，小麦 2.20 元/kg，玉米 2.20 元/kg，大豆 4.59 元/kg，甘薯 0.62 元/kg。各作物种子价格按 2 年平均价格计算，蚕豆 3.60 元/kg，小麦 10.00 元/kg，玉米 20.00 元/kg，大豆 15.00 元/kg，甘薯种苗 3.50 元/kg。肥料价格按当年购买价格计算，2011 年尿素 2.45 元/kg，过磷酸钙 0.45 元/kg，氯化钾 4.15 元/kg；2012 年尿素 2.65 元/kg，过磷酸钙 0.50 元/kg，氯化钾 4.25 元/kg。

1.4.4　各指标的计算

1）植株地上部吸氮量（kg/hm^2）＝∑收获期地上部各部分器官生物量（kg/hm^2）×各部分器官含氮量（%）；

2）氮素收获指数（%）＝籽粒吸氮量/植株地上部吸氮量×100%；

3）氮素养分利用效率（kg/kg）＝籽粒产量/植株地上部吸氮量；

4）氮肥偏生产力（kg/kg）＝籽粒产量/施氮量；

5）百 kg 籽粒需氮量（kg）＝植株地上部吸氮量/籽粒产量×100kg；

6）土地当量比[14] $LER = Y_{ia}/Y_{sa} + Y_{ib}/Y_{sb}$。

式中，Y_{ia} 和 Y_{ib} 分别为套作中作物 a 和作物 b 产量，Y_{sa} 和 Y_{sb} 为单作作物 a 和作物 b 产量，当 LER＞1 时，表明套作具有产量优势；当 LER＜1 时，则表明套作无产量优势。

7）套作相对于单作氮利用效率[15] $\Delta NUE = \{(Y_{iC}/NU_{ic})/[(F_a Y_{sa}/NU_{sa}) + (F_b Y_{sb}/NU_{sb})]\} - 1$

式中，Y_{iC} 为套作中 2 种作物的总产量，NU_{ic} 为套作中 2 种作物吸收氮的总量，NU_{sa} 和 NU_{sb} 是作物 a 和作物 b 单作时的吸氮量；F_a 和 F_b 分别指套作中作物 a 和作物 b 所占的面积比例，ΔNUE 反应了套作后养分利用效率的增加或减小。ΔNUE 为正说明间作后养分利用效率增加，ΔNUE 为负，说明间作后养分利用效率减小。

8）种间资源相对竞争能力[14] $A_{ab} = Y_{ia}/Y_{sa} - Y_{ib}/Y_{sb}$

式中，A_{ab} 为作物 a 相对于作物 b 对资源的竞争能力；Y_{ia} 和 Y_{ib} 分别指套作总面积上作物 a 和作物 b 的产量；Y_{sa} 和 Y_{sb} 分别指作物 a 和作物 b 的单作产量，当 A_{ab}＞0 时，表明作物 a 对资源的竞争能力比作物 b 强；A_{ab}＜0 表明作物 b 的资源竞争力比作物 a 强。

9）种间氮营养竞争比率[16] $NCR_{ab} = (NU_{ia}/NU_{sa})/(Nu_{ib}/NU_{sb})$

式中，NU_{ia} 和 NU_{ib} 是作物 a 和作物 b 套作时的吸氮量；NU_{sa} 和 NU_{sb} 是作物 a 和作物 b 单作时的吸氮量，当 NCR_{ab}＞1，表明作物 a 比作物 b 的氮营养竞争能力强；反之 NCR_{ab}＜1，表明作物 a 比 b 的氮营养竞争能力弱。

1.5　数据处理

作物生物量、产量的计算方法是：在分别阐述小麦、玉米的干物质量和产量时，为便于套作与单作间比较，干物质量和产量数据是以小麦、玉米实际占用面积计算的；而在评估周年体系的产量、产值及计算 LER、比较种间关系时，间套小麦、玉米、大豆、甘薯的产量产值数据是以折算面积计算的（小麦、大豆、甘薯以 50%折算，玉米以 100%折算），因为在整个间套作小区中小麦、大豆、甘薯作为矮秆作物分别只占了一半的面积，而玉米作为高秆作物覆盖了整个小区面积。

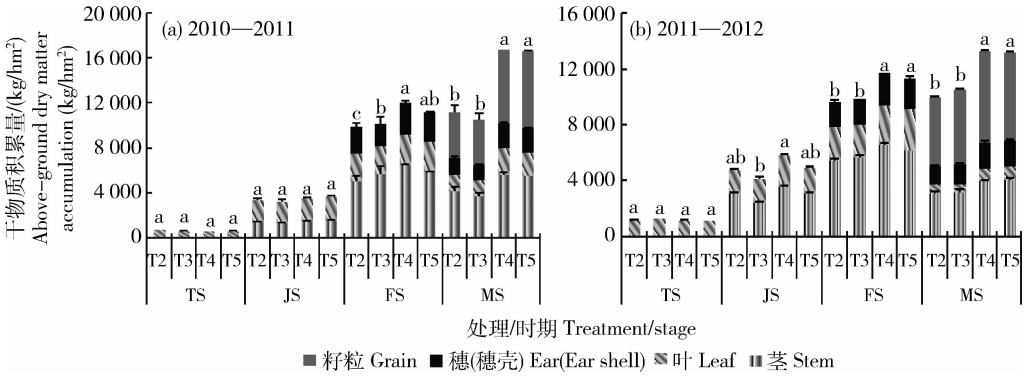
采用 Excel 2007 软件进行数据处理，利用 DPS 7.05 软件进行数据的统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同种植模式下小麦玉米的干物质积累量及分配

2.1.1 小麦干物质积累量及分配

从图2可以看出，不同种植模式下小麦干物质积累量和分配有显著差异。小麦地上部干物质积累量随着生育期的推进不断增加，在收获期达到最大，茎、叶干物质积累量均在扬花期达到最大，而后逐渐减小。2010—2011年度小麦各处理干物质积累量在拔节期以前差异不大，拔节期以后开始出现差异，套作处理显著高于轮作（单作）处理，随着生育进程的推进和间套作共生时间的增加，小麦套作优势越加明显；2011—2012年度，小麦干物质积累规律与上年度基本一致，各处理之间差异较上一年提前，在拔节期即开始出现差异，其中以大豆茬口种植的小麦（T4处理）最高，其优势一直延续到收获期。平均2年干物质积累量来看（图2），扬花期T4处理比T1、T2处理分别高19.0%、18.4%，比T5处理高5.6%；收获期T4处理比T1、T2处理分别高41.6%、42.3%，比T5处理只高0.6%。小麦不同生育期各器官干物质分配不尽相同（图2），在营养生长阶段前期叶干物质积累量大于茎，后期茎干物质积累加快，其占植株干物质重比例增加，而叶占植株干物质重比例开始下降；在生殖生长阶段，穗的干物质积累量迅速增加，而茎叶的干物质积累量逐渐下降，这是由于茎叶干物质逐渐向籽粒转运。小麦各器官干物质重占植株地上部总干物质重的比例在间套作体系与轮作（单作）体系间并无较大差异。



TS，分蘖期；JS，拔节期；FS，扬花期；MS，收获期。Ear（Ear shell），穗（扬花期为穗壳＋未成熟的籽粒，收获期为穗壳）；图上不同小写字母表示同一时期不同处理间总生物量差异达5%显著水平，下同。

TS，Tillering stage；JS，Jointing stage；FS，Flowering stage；MS，Maturity stage；Ear（Ear shell），In flowering stage meant ear shell and immature seeds but in maturity stage meant ear shell；Different small letters given by bars meant significant difference for total dry matter yields among treatments in the same stage at 5% level，The same below.

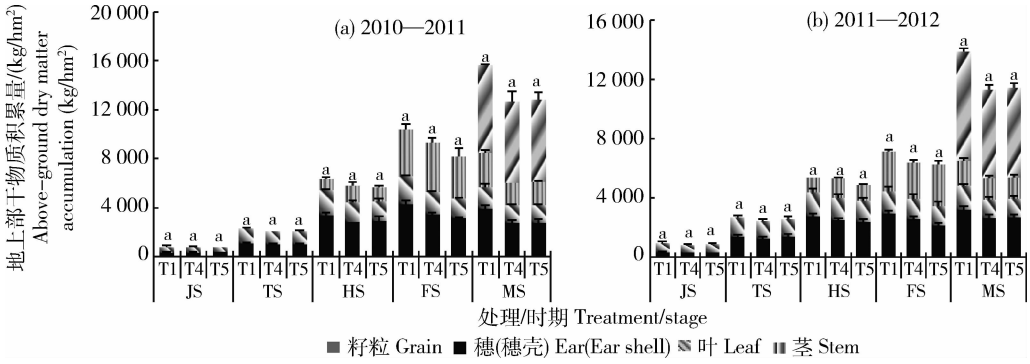
图2 不同种植模式的小麦各时期地上部干物质积累动态与分配

Fig. 2 Dry matter accumulating dynamic and distribution of wheat in different growth stage under various cropping systems

2.1.2 玉米干物质积累量及分配

从图3可以看出，不同种植模式对玉米干物质积累量无显著影响。玉米从出苗到收获期总干物质积累量不断增加，在收获期达到最大；茎、叶的干物质积累量在吐丝期达到最大，后期有逐渐减小的趋势；籽粒的干物质积累量从吐丝期开始增加，灌浆期以后迅速增加。轮作（单作）玉米总生物量相对套作玉米在整个生育期均存在一定优势，这是由于单作玉米的种植密度要大于套作玉米。玉米整个生育期各器官干物质分配不均（图3，图4b），从出苗到拔节期，玉米干物质积累量增加较小，其中叶干物质积累量高于茎，2年平均T1、T4、T5处理分别高67.8%、59.2%、58.7%；拔节期以后，叶干物质积累量占植株总干物质比例随生育期的推进逐渐下降，茎干物质重占植株总干物质比例则逐渐增加，到吐丝期达到最大。在营养生长阶段，套作玉米的叶干

物质重的分配比率下降，在拔节期和大喇叭口期 T4、T5 分别比 T1 处理(2 年平均)低 1.9%、2.2%，2.6%、7.4%；在玉米生殖生长阶段，套作玉米穗和籽粒干物质分配比率增加，在吐丝期、灌浆期和收获期 T4、T5 处理分别比 T1 处理(2 年平均)高 45.0%、26.9%，11.8%、17.4%，6.9%、6.5%，说明套作相比单作更能促进玉米干物质向生殖器官的转运。

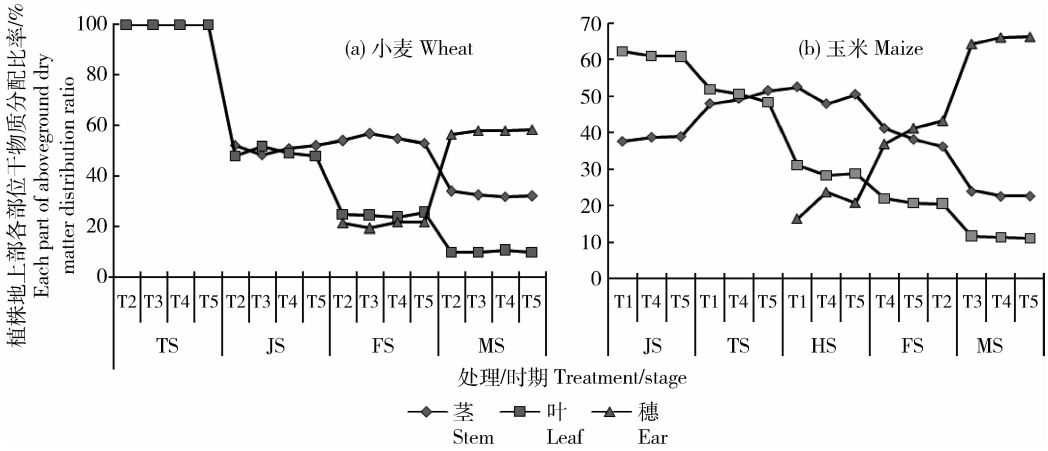


JS，拔节期；TS，大喇叭口期；HS，吐丝期；FS，灌浆期；MS，成熟期；BCS，苞(吐丝期、灌浆期包含苞叶＋穗轴＋未成熟的籽粒，收获期为苞叶和穗轴)。

JS，Jointing stage；TS，Trumpeting stage；HS，Heading stage；FS，Filling stage；MS，Maturity stage；BCS，In heading stage and filling stage BCS indicate cob bracts and immature seeds but in maturity stage meant cob and bracts.

图 3　不同种植模式的玉米各时期地上部干物质积累动态与分配

Fig. 3　Dry matter accumulating dynamic and distribution of maize in different growth stage under various cropping systems



数据为 2 年的平均值。Values are average of two years.

图 4　不同种植模式下小麦、玉米各时期地上部各部位干物质积累分配比率

Fig. 4　Dry matter accumulating distribution ratio of wheat and maize in different growth stage under various cropping systems

2.2　不同种植模式下小麦玉米的籽粒产量和氮素利用效率

2.2.1　小麦籽粒产量和氮素利用效率

从表 2 可知，不同的种植模式对小麦产量、吸氮量、氮素养分利用效率有显著影响。两个年度小麦产量、地上部吸氮量、籽粒吸氮量均为套作处理显著高于轮作(单作)处理，2 年平均套作比单作分别高 29.1%(单作小麦产量平均为 5 500 kg/hm²，间作小麦产量平均为 7 102 kg/hm²)、31.0%、31.5%，而 T2 与 T3、T4 与 T5 之间差异不显著。小麦氮素收获指数、氮素养分利用效率和百公斤籽粒需氮量 2 年总的表现在处理间差异不大，平均值分

别为69.8%、32.7 kg/kg和3.29 kg。小麦的氮肥偏生产力两个年度均为套作处理(平均为59.7 kg/kg)显著高于单作处理(平均为45.8 kg/kg),平均高出30.3%。2011—2012年经过换茬种植,表现为甘薯茬口下小麦的氮素收获指数和氮素养分利用效率略低于大豆茬口,而百公斤籽粒需氮量则甘薯茬口高于大豆茬口;氮肥偏生产力也表现为套作>单作,大豆茬口>甘薯茬口,以T4处理最高,比T1、T2处理分别高30.8%、26.1%,比T5高10.0%。

表2 不同种植模式下小麦籽粒产量和氮素利用效率

Table 2 Grain yield and nitrogen use efficiency of wheat under different cropping systems

年度 Year	处理 Treatment	籽粒产量/(kg/hm²) Grain yield	地上部吸氮量/(kg/hm²) TNU	籽粒吸氮量/(kg/hm²) GNU	氮素收获指数/% NHI	氮素养分利用效率/(kg/kg) NUE	氮肥偏生产力/(kg/kg) PFP-N	百kg籽粒需氮量/(kg) NR
2010—2011	T2	4 729 c	210.78 b	109.80 b	52.03 a	22.59 b	39.42 c	4.48 a
	T3	5 383 b	216.58 b	129.91 b	60.01 a	25.00 ab	44.86 c	4.03 ab
	T4	6 499 a	277.24 a	156.59 a	56.62 a	23.44 b	54.16 b	4.26 ab
	T5	7 524 a	276.30 a	162.24 a	58.75 a	27.22 a	62.70 a	3.68 b
2011—2012	T2	5 799 b	140.00 b	116.87 b	83.44 ab	41.53 ab	48.32 d	2.41 ab
	T3	6 089 b	141.12 b	119.11 b	84.41 a	43.22 a	50.74 c	2.32 b
	T4	7 676 a	191.21 a	158.32 a	82.80 ab	40.15 ab	63.96 a	2.49 ab
	T5	6 978 a	183.08 a	148.15 a	80.88 b	38.16 b	58.15 b	2.62 a
平均 AVG	T2	5 264 b	175.39 b	113.34 b	67.73 a	32.06 a	43.87 c	3.45 a
	T3	5 736 b	178.85 b	124.51 b	72.21 a	34.11 a	47.80 b	3.17 a
	T4	7 088 a	234.23 a	157.45 a	69.71 a	31.80 a	59.06 a	3.38 a
	T5	7 116 a	229.69 a	155.20 a	69.82 a	32.69 a	60.43 a	3.15 a

注:TNU,Total nitrogen uptake of aboveground wheat;GNU,Grain nitrogen uptake;NHI,Nitrogen harvest index;NUE,Nitrogen utilization efficiency;PFP-N,Partial factor productivity of Nitrogen;NR,Nitrogen requirement per 100 kg grain;AVG,Average;不同小写字母表示同一年份处理间差异显著($P<0.05$)。下表同。小麦产量按小麦实际占地面积计算。

Note:Different small letters meant significant difference among treatments at 0.05 level for the same year. The same below. Wheat yield was counted according to its actual land area.

2.2.2 玉米籽粒产量和氮素养分利用效率

如表3所示,2010—2011年套作玉米产量高于轮作(单作)玉米,大豆茬口高于甘薯茬口,以T4处理最高,比轮作处理(T1)高8.0%,比甘薯茬口(T5)高7.2%;2011—2012年度玉米换茬种植后,套作玉米产量比轮作玉米产量有所降低,套作玉米产量依然是大豆茬口(T4)高于甘薯茬口(T5);但2年玉米产量各处理间均无显著差异,平均产量为6 702 kg/hm²。2年平均地上部植株吸氮量和籽粒吸氮量均为轮作玉米高于套作玉米;玉米氮素收获指数均是套作大于单作,在第2年度玉米换茬种植后以大豆茬口最高,但处理间差异不达显著,玉米氮素收获指数平均为69.0%。玉米氮素养分利用效率也是套作明显大于单作,T4、T5分别比T1高16.9%、7.1%,其中T4与T1间差异达显著;玉米氮素养分利用效率平均值为50.4 kg/kg。玉米氮肥偏生产力在各处理间无明显差异,平均为34.6 kg/kg。综合2年结果来看,玉米百公斤籽粒需氮量有套作玉米小于轮作(单作)玉米的趋势,其中大豆茬口又小于甘薯茬口;玉米百公斤籽粒需氮量平均为2.07 kg。综合说明套作玉米的氮素利用效率比轮作(单作)玉米高。

表 3　不同种植模式下玉米籽粒产量和氮素利用效率

Table 3　Grain yield and nitrogen use efficiency of maize under different cropping systems

年度 Year	处理 Treatment	籽粒产量/(kg/hm²) Grain yield	地上部吸氮量/(kg/hm²) TNU	籽粒吸氮量/(kg/hm²) GNU	氮素收获指数/% NHI	氮素养分利用效率/(kg/kg) NUE	氮肥偏生产力/(kg/kg) PFP-N	百 kg 籽粒需氮量/(kg) NR
2010—2011	T1	6 626 a	183.55 a	111.80 a	60.85 a	35.32 b	33.26 a	2.83 a
	T4	7 157 a	139.37 a	93.50 a	66.31 a	52.22 a	38.00 a	1.95 b
	T5	6 676 a	173.56 a	120.25 a	68.92 a	41.58 b	37.21 a	2.42 a
2011—2012	T1	6 907 a	126.18 a	90.53 a	71.74 a	58.01 a	37.47 a	1.73 a
	T4	6 514 a	105.53 a	78.42 a	74.21 a	56.90 a	30.86 a	1.76 a
	T5	6 329 a	103.24 a	73.99 a	71.80 a	58.36 a	30.91 a	1.71 a
平均 AVG	T1	6 767 a	154.87 a	101.16 a	66.29 a	46.67 b	35.37 a	2.28 a
	T4	6 836 a	124.44 b	85.96 a	70.26 a	54.56 a	34.43 a	1.85 b
	T5	6 503 a	138.40ab	97.12 a	70.36 a	49.97ab	34.06 a	2.07ab

注：玉米产量按小区面积计算。

Note: Maize yield are counted according to the field plot area.

2.3　不同种植模式的套作优势、养分利用及种间营养竞争能力比较

从表 4 可以看出，不同种植模式的套作优势、对氮的利用和竞争能力均不相同。从套作优势来看，2 种套作体系相对轮作而言均表现出较好的套作优势，不同作物间的套作优势又存在一定差异，相对轮作，小麦/玉米间套作的 LER（2 年平均）提高了 63.7%，玉米/大豆间套作提高了 49.5%，玉米/甘薯间套作提高了 47.5%。从体系对氮的利用效率来看，2 种套作模式对氮素利用效率不一致，小麦/玉米套作时对氮的利用效率相对轮作无明显提高，而玉米/大豆套作对氮素利用效率相对于轮作提高

表 4　2 种套作体系的土地当量比、种间资源相对竞争能力、氮的利用效率和氮的营养竞争比率

Table 4　Land equivalent ratio(LER), aggressiveness, nitrogen use efficiency and nutrition competition ratio of two intercropping systems

年度 Year	体系 System	LER_{wm}	LER_{ms}	ΔNUE_{wm}	ΔNUE_{ms}	A_{wm}	A_{ms}	NCR_{wm}	NCR_{ms}
2010—2011	小麦/玉米/大豆 Wheat/Maize/Soybean	1.67	1.61	0.07	0.36	−0.44	0.60	1.69	0.76
	小麦/玉米/甘薯 Wheat/Maize/Sweet potato	1.79	1.59	0.05	−0.44	−0.43	0.59	1.39	0.80
2011—2012	小麦/玉米/大豆 Wheat/Maize/Soybean	1.57	1.38	−0.03	0.41	−0.19	0.39	1.62	1.02
	小麦/玉米/甘薯 Wheat/Maize/Sweet potato	1.52	1.36	−0.02	−0.48	−0.22	0.37	1.60	0.82

注：LER_{wm}、LER_{ms}：分别表示小麦/玉米、玉米/大豆（甘薯）套作体系土地当量比；ΔNUE_{wm}、ΔNUE_{ms}：分别表示小麦/玉米、玉米/大豆（甘薯）套作体系氮素养分利用效率；A_{wm}：小麦相对于玉米的竞争力；A_{wm}：玉米相对于大豆或甘薯的竞争力；NCR_{wm}：小麦相对于玉米的氮营养竞争比率；NCR_{ms}：玉米相对于大豆或甘薯的氮营养竞争比率；各指标计算所需数据均按小区面积计算而得。

Note: LER_{wm}, LER_{ms}: Land equivalent ratio of wheat/maize and maize/soybean(sweet potato) in the relay strip intercropping system; ΔNUE_{wm}, ΔNUE_{ms}: Nitrogen utilization efficiency of wheat/maize and maize/soybean (sweet potato) in the relay strip intercropping system; A_{wm}: The aggressivity of wheat relative to maize; A_{wm}: The aggressivity of maize relative to soybean or sweet potato; NCR_{wm}: Nutrition competition ratio of wheat relative to maize; NCR_{ms}: Nutrition competition ratio of maize relative to soybean or sweet potato; The data needed for calculating each index are counted according to the field plot area.

了38.5%，玉米/甘薯套作对氮素利用效率相对于轮作降低了46%。从种间资源竞争能力来看，“麦/玉/豆”和“麦/玉/薯”体系中小麦、玉米对资源的竞争能力表现为玉米相比小麦有更强的资源竞争能力，而玉米、大豆和甘薯间是玉米有更强的资源竞争力。但从氮的营养竞争比率来看，小麦相比玉米表现出绝对的氮素竞争优势，而玉米相对大豆和甘薯对氮的竞争作用在两个年度表现不一致，2010—2011年度玉米相比大豆和甘薯无氮素竞争优势，但在2011—2012年度玉米相比大豆有了氮素竞争优势，玉米相比甘薯是氮素竞争劣势。

2.4 不同种植模式的周年产量及经济效益分析

从表5、表6可以看出，肥料周年总用量和投入是套作体系要高于轮作体系；作物籽粒产量两个年度间有明显差别，除小麦和单作玉米的产量是2011—2012年度比2010—2011年度有一定增大外，其余作物（蚕豆、套作玉米、大豆、甘薯）的产量都是2011—2012年度比2010—2011年度有明显降低，这是由于2011—2012年度相比2010—2011年度在玉米生长后期和大豆、甘薯生长阶段产生了更多的降雨，造成了相关作物明显减产。各模式的全年总产值不尽相同，以三熟套作T5处理最高（为30 687.0元/hm²），其后依次是T2＞T4＞T1＞T3，T5比T4处理高10.8%，比两熟轮作T1、T2和T3处理分别高16.3%，4.6%和34.2%。从全年的总投入看，三熟套作均高于两熟轮作；但从全年总收益来看，其与总产值变化规律一致，以三熟套作T5处理“麦/玉/薯”体系最高（为18 045.5元/hm²），比三熟套作“麦/玉/豆”体系T4处理高13.1%，比两熟轮作体系T1、T2和T3分别高14.7%、2.4%和41.2%。

表5 不同种植模式下全年施肥量及各作物产量

Table 5 Annual fertilizer rate and crop yield under different cropping systems kg/hm²

年度 Year	处理 Treatment	周年施肥量 Total fertilizer rates			籽粒产量 Grain yield				
		N	P_2O_5	K_2O	蚕豆 Vicia faba	小麦 Wheat	玉米 Maize	大豆 Soybean	甘薯 Sweet potato
2011	T1	195	75	105	4 500	—	6 626	—	—
	T2	120	90	90	—	4 729	—	—	36 403
	T3	120	90	90	—	5 383	—	3 674	—
	T4	255	120	150	—	3 250	7 157	1 997	—
	T5	255	120	150	—	3 762	6 676	—	19 073
2012	T1	195	75	105	3 683	—	6 907	—	—
	T2	120	90	90	—	5 799	—	—	23 610
	T3	120	90	90	—	6 089	—	1 372	—
	T4	255	120	150	—	3 838	6 514	597	—
	T5	255	120	150	—	3 489	6 329	—	10 651

注：所有产量均按小区面积计算。Note: All data of yield are counted according to the field plot area.

表6 不同种植模式周年经济效益比较

Table 6 Annual economic efficiency under different cropping systems 元/hm²

年度 Year	处理 Treatment	总产值 Total output	投入 Input				净收益 Total revenue
			种子 Seed	肥料 Fertilizer	田间管理 Field management	总 Total	
2010—2011	T1	26 515	1 050	2 046	7 270	10 366	16 149
	T2	31 282	2 750	1 599	6 950	11 299	19 983
	T3	26 049	2 600	1 599	5 850	10 049	16 000
	T4	29 885	1 650	2 342	7 620	11 612	18 273
	T5	33 171	1 725	2 342	8 170	12 237	20 934

续 表

年 度 Year	处 理 Treatment	总产值 Total output	投入 Input				净收益 Total revenue
			种子 Seed	肥料 Fertilizer	田间管理 Field management	总 Total	
2011—1012	T1	26 245	1 095	2 099	7 740	10 934	15 311
	T2	27 396	2 525	1 704	7 920	12 149	15 247
	T3	19 693	2 410	1 704	6 020	10 134	9 560
	T4	25 515	1 580	2 423	7 885	11 888	13 627
	T5	28 203	1 638	2 423	8 985	13 046	15 157
平均 AVG	T1	26 380	1 072.5	2 072.5	7 505.0	10 650.0	15 730.0
	T2	29 339	2 637.5	1 651.5	7 435.0	11 724.0	17 615.0
	T3	22 871	2 505.0	1 651.5	5 935.0	10 091.5	12 780.0
	T4	27 700	1 615.0	2 382.5	7 752.5	11 750.0	15 950.0
	T5	30 687	1 681.5	2 382.5	8 577.5	12 641.5	18 045.5

注：田间管理包括耕地、整地、播种、育苗、移栽、除草和病虫害防治。

Note: Field management including plough, soil preparation, planting, breeding, transplanting, weed and plant diseases and insect pests control.

3 讨　论

3.1 小麦、玉米种植模式与产量及干物质积累分配

间套作模式能充分有效的利用各种资源，与对应单作比较具有明显的间作优势，尤其是豆科与禾本科构成的间套作体系的优势更为明显[17]。研究表明，蚕豆/玉米[18]、小麦/蚕豆[19]、小麦/玉米[20]、玉米/大豆[21]、豌豆/小麦[22]等间套作体系能增加系统内各作物的养分吸收和提高作物养分利用效率，实现产量的增加，表现出明显的产量优势和养分利用优势。

土地当量比 LER 通常作为衡量间套作体系产量优势的指标，LER 大于 1，表明间套作与单作相比能更好的利用各种生长因子，体现出间套作优势。这种优势产生的原因可能是由于间套作中各组分占据不同的生态位，对光、水、养分等资源的需求在时间或空间上不同，从而能更加有效的利用环境中的各种资源[23]。本研究通过对“麦/玉/豆”、“麦/玉/薯”2 种三熟套作模式和与其相应对应的 3 种轮作体系中各作物产量变化的研究表明，这 2 种套作模式中小麦/玉米、玉米/大豆和玉米/甘薯套作体系的 LER 均大于 1(表 4)，具有明显的产量优势，这与 Li 等[24]、雍太文等[25]和齐万海等[26]的研究结果一致，即套作相对于单作提高了土地利用率和复种指数，表现出套作的产量优势，其中小麦对体系产量优势的贡献最大。间作小麦有明显的边行优势[27]，这是由于小麦/玉米共生过程中，两者生育期错开了，套作玉米对间作小麦影响较小，而间作小麦的根系在前期可扩展到预留玉米带，吸收玉米带地下部的养分，加上间作小麦的边行能吸收更多的光能，促进了边行优势的形成。套作玉米前期受小麦的竞争抑制作用，小麦收获后套作玉米的生长会逐渐得到一些恢复，综合作用的结果可能使套作玉米与单作玉米相比表现不出明显的优势，也可能表现不出明显的劣势[17,28]。从不同种植模式中小麦、玉米的干物质积累量变化来看，套作群体内小麦各时期地上部干物质积累从拔节期后均显著高于单作小麦，但套作玉米各时期地上部干物质积累量与轮作相比无显著差异。在干物质分配方面，小麦、玉米各部位分配比例均随生育期的推进而发生改变，在生殖生长阶段，套作群体内小麦、玉米的生殖器官(穗)干物质重占植株总重比例均高于对应的单作处理，说明套作有利于茎叶等营养器官的光合产物输出并重新分配到生殖器官(穗)中，这与高阳等[29]对玉米/大豆体系的研究结果基本一致。

3.2 不同种植模式下体系氮素利用效率变化

根据生态位理论[19-20]，只要间套作体系存在对同一资源利用时间上错位和吸收利用不同的资源限制因子，就会降低种间对资源的竞争作用，而表现出“恢复作用”或“促进作用”。在本研究中，“麦/玉/豆”与“麦/玉/薯”的种间关系和氮的利用效率与营养竞争关系不完全相同，在两个体系中小麦相比玉

米均表现出氮素竞争优势($NCR_{wm}>1$);玉米、大豆和甘薯间是玉米有更强的资源竞争力,但玉米相对大豆和甘薯对氮的竞争作用在两个年度表现不一致,2010—2011年度玉米相比大豆和甘薯无氮素竞争优势,但在2011—2012年度玉米相比大豆有了氮素竞争优势,玉米相比甘薯是氮素竞争劣势。雍太文等[24]的相关研究结果表明,玉米相对于大豆表现出氮素竞争优势。结果不尽一致可能是由于不同的田间配置和施氮水平,以及年度间生长条件的差异,使作物生长规律不一致,作物种间互作关系在不同年度发生了改变[24,30],但具体原因值得后续研究。在"麦/玉/豆"体系中,玉米和大豆在氮素吸收形态上占据不同生态位,玉米以吸收无机氮为主,而大豆则更多通过生物固氮获取氮素,在一定程度上缓解了对氮素的竞争;玉米、大豆通过根系间的相互作用,有利于土壤中固结态氮磷化合物转化为可给态的无机化合物,加速氮磷的分解和转移,提高根际土壤的有效养分含量,从而提高体系的养分利用效率[31]。但是在"麦/玉/薯"体系中,玉米和甘薯由于生态位相近,均以吸收无机氮为主,不利于体系对氮素的有效利用。本研究结果也表明,玉米/大豆间套作与对应的单作相比提高了体系的氮素利用效率($\Delta NUE_{ms}>0$),2年平均提高了38.5%,而玉米/甘薯间套作与对应单作相比较降低了体系的氮素利用效率($\Delta NUE_{ms}<0$),2年平均降低了46%。因此,"麦/玉/豆"体系在对养分利用上表现出竞争与互利并存,且种间互利作用大于种间竞争;而"麦/玉/薯"体系则以竞争为主、互利作用相对较弱,玉米生长后期与甘薯共生时,无法像与大豆那样通过种间互利作用来补偿在与小麦共生时损失的氮,最终导致该体系氮素吸收与利用低于"麦/玉/豆"体系。

3.3 不同种植模式的周年产值及效益

本研究中不同种植模式下全年总产值和净收益变化趋势一致,都以"麦/玉/薯"三熟套作体系最高(分别为30 687.0和18 045.5元/hm^2),其后依次是"小麦-甘薯">"麦/玉/豆">"蚕豆-玉米">"小麦-大豆",可看出,三熟套作体系"麦/玉/薯"、两熟轮作体系"蚕豆-玉米"和"小麦-甘薯"全年经济效益较高,但前提是收获的鲜食蚕豆和鲜甘薯要能方便卖出,即要交通方便或有相关企业或个人来收购。如果收获的鲜食蚕豆和鲜甘薯不能及时售出,就会影响"麦/玉/薯"、"蚕豆-玉米"和"小麦-甘薯"体系的产值效益。本研究的作物产量、氮素利用效率与雍太文等[24]研究结果存在差异,这是由于种植规格和施肥水平均不尽相同,不同的年际间各作物市场收购价格和收购条件存在不稳定性,本研究较雍太文等的研究提高了小麦、玉米的肥料用量,减少了甘薯和大豆的肥料用量,改变了全年肥料分配比例,提高了作物的产量、体系总产值和氮素利用效率。四川各地生态条件不一致,各地生产习惯也千差万别,虽然"麦/玉/豆"间套作体系近年发展较快[9],但其产值和效益相对麦/玉/薯体系并不稳定,有时还低些,因此,各地或各农户要因地制宜选择适合家庭经济发展的种植模式。

参 考 文 献

[1] 焦念元,宁堂原,赵春.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

[2] Harris D,Natarajan M,Willey R. Physiological basis for yield advantage in a sorghum/groundnut intercrop exposed to drought: Dry-matter production, yield, and light interception [J]. Field Crops Res,1987,17:259-272

[3] Li L, Sun J H, Zhang F S, et al. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping Ⅱ. Recovery or Compensation of maize and soybean after wheat harvesting[J]. Field Crops Res, 2001,71:173-181

[4] Zuo Y M,Zhang F S. Effect of peanut mixed cropping with gramineous species on micronutrient concentrations and iron chlorosis of peanut plants grown in a calcareous soil[J]. Plant Soil,2008,306:23-36

[5] Cardoso E,Nogueira M,Ferraz S. Biological N-2 fixation and mineral N in common bean-maize intercropping or sole cropping in southeastern Brazil[J]. Exp Agric,2007,43:319-330

[6] 张桂国,董树亭,杨在宾.苜蓿+玉米间作系统产量表现及其种间竞争力的评定[J].草业学报,2011,20(1):22-30

[7] Eaglesham A R J, Ayanaba A, Rao V R. Improving the nitrogen nutrition of maize by intercropping with cowpea[J]. Soil Biol Bioch,1981,13:169-171

[8] 雍太文,向达兵,张静,等.小麦/玉米/大豆和小麦/玉米/甘薯套作的氮素吸收利用及氮肥残效研究[J].草业学报,2011,20(6):34-44

[9] 雍太文,杨文钰,王小春,等.两种三熟套作体系中的氮素吸收利用及种间相互作用[J].四川农业大学学报,2009,27(2):167-172

[10] 王小春,杨文钰,樊高琼.小麦不同密度和田间配置对套作玉米苗期素质和产量的影响[J].西南师范大学学报:自然科学版,2010,35(1):63-67

[11] 张含彬,任万军,杨文钰,等.不同施氮量对套作大豆根系形态与生理特性的影响[J].作物学报,2007,33(1):107-112

[12] 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

[13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京：中国农业出版社，2000：263-270

[14] Willey R W. Intercropping-Its importance and research needs. Part 1. Competition and yield advantages[J]. Field Crops Abstr，1979，32(1)：l-10

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

[16] Willey R W，Rao M R A. Competitive ratio for quantifying competition between intercrops[J]. Exp Agric，1980，16：117-125

[17] 肖焱波. 豆科/禾本科间作体系中养分竞争和氮素转移研究[D]. 北京：中国农业大学，2003

[18] Li C Y，He X H，Zhou S S，et al. Crop diversity for yield increase[J]. PLoS ONE，2009，4：e8049

[19] Chen Y X，Zhang F S，Tang L，et al. Wheat powdery mildew and foliar N concentrations as influenced by N fertilization and belowground interactions with intercropped faba bean[J]. Plant Soil，2007，291(1/2)：1-13

[20] 刘会玲，崔江慧，许皞. 小麦-玉米轮作周期内土壤钾素与作物吸收钾动态变化研究[J]. 土壤通报，2010，41(6)：1440-1443

[21] 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

[22] Haugaard-Nielsen H，Ambus P，Jensen E S. Interspecific competition，N use and interference with weeds in pea-barly intercropping[J]. Field Crop Res，2001，70：101-109

[23] Fukai S，Tlenbath B R. Processes determining intercrop productivity and yields of component crop[J]. Field Crop Res，1993，34：247-271

[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，2011，339：147-161

[25] 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

[26] 齐万海，柴强. 不同隔根方式下间作小麦玉米的竞争力及产量响应[J]. 中国生态农业学报，2010，18(1)：31-34

[27] 齐万海，柴强，于爱忠. 间作小麦的边行效应及其与根系空间分布的关系[J]. 甘肃农业大学学报，2010，45(1)：72-76

[28] 叶优良，孙建好，李隆，等. 小麦/玉米间作根系相互作用对氮素吸收和土壤硝态氮含量的影响[J]. 农业工程学报，2005，21(11)：33-37

[29] 高阳，段爱旺，刘祖贵，等. 间作模式对玉米和大豆干物质量与产量组成的影响[J]. 中国农学通报，2009，25(2)：214-221

[30] 张宏，周建斌，刘瑞，等. 不同栽培模式及施氮对半旱地冬小麦/夏玉米氮素累积、分配及氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2011，17(1)：1-8

[31] 刘均霞，陆引罡，远红伟，等. 玉米/大豆间作条件下养分的高效利用机理[J]. 山地农业生物学报，2007，26(2)：105-109

责任编辑：袁文业