

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2015.00448

## 玉米–大豆套作模式下氮肥运筹对玉米产量及干物质积累与转运的影响

文熙宸 王小春\* 邓小燕 张 群 蒲 甜 刘国丹 杨文钰\*

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

**摘 要:** 玉米–大豆套作是西南地区玉米的主要种植模式之一, 研究该模式下玉米适宜的氮肥运筹方式, 对该区玉米生产具有重要指导意义。通过 2 年田间试验, 研究了施 90、180、270 和 360 kg N hm<sup>-2</sup> 及底肥 拔节肥 穗肥=5 0 5、3 2 5、5 2 3 对玉米–大豆套作模式下玉米产量及干物质积累与转运的影响。结果表明, 在相同底追比条件下, 玉米产量及干物质积累量随施氮量增加呈先增后减的变化趋势。施 180 kg N hm<sup>-2</sup> 可以显著促进玉米穗粒数、千粒重及有效穗数的增加, 提高花前干物质转运量和花后干物质同化量, 植株干物质积累量和最大增长速率亦达到最大; 相同施氮量条件下, 不同底追比对玉米产量及干物质积累的影响表现为: 3 2 5 > 5 0 5 > 5 2 3。氮肥后移(3 2 5)可以促进花后干物质积累和向籽粒中转运, 增大干物质最大增长速率, 改善玉米穗部性状, 与传统施肥方式(5 0 5)相比, 氮肥后移处理 2 年平均产量提高了 4.11%。施氮量及底追比对产量的交互影响显著, 2010 年以施 270 kg N hm<sup>-2</sup> 并按 3 2 5 底追比处理玉米产量最高, 与相同底追比条件下施 180 kg N hm<sup>-2</sup> 处理差异不显著; 2011 年玉米产量以施 180 kg N hm<sup>-2</sup> 按 3 2 5 底追比处理显著高于其他处理, 达到 7803 kg hm<sup>-2</sup>。在本试验研究范围内, 施 180 kg N hm<sup>-2</sup> 及底追比为 3 2 5 的处理是获得玉米–大豆套作模式下玉米高产的最佳氮肥运筹方式。

**关键词:** 氮肥运筹; 产量; 干物质积累; 玉米; 玉米–大豆套作

## Effects of Nitrogen Management on Yield and Dry Matter Accumulation and Translocation of Maize in Maize–Soybean Relay-Cropping System

WEN Xi-Chen, WANG Xiao-Chun\*, DENG Xiao-Yan, ZHANG Qun, PU Tian, LIU Guo-Dan, and YANG Wen -Yu\*

College of Agronomy, Sichuan Agricultural University / Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System in Southwest China, Ministry of Agriculture, Wenjiang 611130, China

**Abstract:** Maize-soybean relay-cropping system is an important planting pattern in southwest China, in which the proper nitrogen management plays a key role for improving maize production. A field experiment was conducted in two consecutive seasons (2010–2011) with different treatments of nitrogen (N) application rates (90, 180, 270, 360 kg ha<sup>-1</sup>) and ratios of base fertilizer, jointing fertilizer and earing fertilizer (5:0:5, 3:2:5, 5:2:3) to study the effects of nitrogen management on yield and dry matter accumulation and translocation of maize in maize-soybean relay-cropping system. The results showed that, maize yield and dry matter accumulation increased with increasing N application rates up to 270 kg N ha<sup>-1</sup> under the same ratio of base fertilizer to topdressing, and then decreased when N application rate was 360 kg N ha<sup>-1</sup>. The N application rate of 180 kg ha<sup>-1</sup> significantly increased kernels per ear, 1000-kernel weigh, ear number, and help increase translocation efficiency, post anthesis assimilation, plant dry matter accumulation, and the maximum increasing rate, while the N application rate of 360 kg ha<sup>-1</sup> had negative effect. The effects of different ratios of base fertilizer to topdressing on maize yield and dry matter accumulation were 3:2:5>5:0:5>5:2:3, postponed N application (B2, 3:2:5) was beneficial to improve dry matter accumulation and translocation to grain, increased the maximum increasing rate and improved ear traits. Compared with conventional ratio of base fertilizer to topdressing (B1, 5:0:5), B2 treatment (3:2:5) had a higher yield of 4.11% than B1 (5:0:5) on average of two years. The interaction between N application

本研究由国家公益性行业(农业)科研专项(201103001), 四川省育种攻关项目(2011NZ0098-15-2)和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)资助。

\* 通讯作者(Corresponding authors): 王小春, E-mail: xchwang@sicau.edu.cn, Tel: 028-86290960; 杨文钰, E-mail: mssiyangwy@sicau.edu.cn Tel: 0835-2882004

第一作者联系方式: E-mail: wenxichen0812@sina.com

Received(收稿日期): 2014-07-07; Accepted(接受日期): 2014-09-30; Published online(网络出版日期): 2014-11-11.

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20141111.1557.011.html>

rates and ratios of base fertilizer to topdressing was significant on maize yield, N application rates of  $270 \text{ kg ha}^{-1}$  and the ratio of 3:2:5 reached to the highest yield in 2010 year. No significant difference between 180 and  $270 \text{ kg N ha}^{-1}$  with the same ratio of base fertilizer to topdressing (3:2:5) in maize yield was found. In 2011, the yield under N application rate at  $180 \text{ kg ha}^{-1}$  and ratio of 3:2:5 treatment was significantly higher than that under other nitrogen management. Therefore, the most appropriate nitrogen management is N application rate of  $180 \text{ kg ha}^{-1}$  and ratio of base fertilizer to topdressing 3:2:5.

**Keywords:** Nitrogen management; Yield; Dry matter accumulation; Maize; Maize-soybean relay-cropping

间套作在中国具有 2000 多年的悠久历史, 对农业可持续发展具有重要作用。玉米-大豆套作模式是我国西南地区近年来迅速发展起来的一种新型旱地种植模式。该模式集禾本科作物与豆科作物为一体, 有效地提高了土地复种指数和资源利用效率, 最终获得套作体系作物高产或稳产, 具有明显的经济、社会和生态效益<sup>[1-3]</sup>。西南地区是我国三大玉米主产区之一, 玉米单产  $3750 \sim 4500 \text{ kg hm}^{-2}$  左右<sup>[4]</sup>, 较全国平均产量低  $300 \text{ kg hm}^{-2}$ , 年缺口 1500 万吨, 如何提高单产, 增加总产是缓解该地区玉米供需矛盾的主要途径。前人对氮肥用量及施氮时期对单作玉米已做了大量研究, 发现施氮有利于提高玉米产量, 分次施氮尤其是增加穗肥比例可以增加玉米群体干物质积累量, 提高最大增长速率, 有利于花后干物质的积累及向籽粒转移<sup>[5-6]</sup>。但与单作玉米相比, 禾豆间套作体系由于作物结构与配置差异, 玉米产量和养分吸收利用特性发生改变。Kenneth 等<sup>[7]</sup>在玉米-绿豆间套作体系中发现氮素从绿豆向玉米植株转移的现象, 同时王小春等<sup>[8]</sup>和雍太文等<sup>[9]</sup>也研究发现玉米-大豆套作体系中存在着明显的种间氮素促进与竞争作用, 玉米各生育时期地上部生物量及产量均表现套作高于单作, 并且套作有利于玉米植株对氮素的吸收和向籽粒转运。玉米套作大豆后, 适宜施氮量和底追比与传统施肥方式相比是否有差异, 目前还未见报道, 为此, 本文在玉米-大豆套作模式下设计不同施氮量和底追肥比, 研究其对玉米产量及干物质积累与分配的影响, 以期西南地区该模式下玉米高产高效生产提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料与试验田概况

供试玉米(*Zea mays*)品种为川单 418, 四川农业大学玉米研究所提供; 大豆(*Glycine max*)品种为贡选 1 号, 四川省自贡市农业科学研究所提供。

四川省射洪县瞿河乡新华村( $30^{\circ}87'N$ ,  $105^{\circ}38'E$ )试验点属于亚热带湿润季风气候区, 试验前已连续分带轮作玉米-大豆3年。土壤类型为紫色土, 质地为

中壤土, 试验前耕层(0~20 cm土壤) pH 7.6, 土壤含有机质  $12.65 \text{ g kg}^{-1}$ 、速效氮  $44.14 \text{ mg kg}^{-1}$ 、速效磷  $26.79 \text{ mg kg}^{-1}$ 、速效钾  $139.00 \text{ mg kg}^{-1}$ 。

### 1.2 试验设计

于 2010—2011 年采用两因素随机区组试验设计, 玉米-大豆套作模式下玉米不同施氮量为 A 因素, 底肥 拔节肥 穗肥不同底肥追肥比为 B 因素。设计 A 因素 4 个水平, A1 为  $90 \text{ kg N hm}^{-2}$  (尿素, 含 N46%), A2 为  $180 \text{ kg N hm}^{-2}$ , A3 为  $270 \text{ kg N hm}^{-2}$  (传统施氮量), A4 为  $360 \text{ kg N hm}^{-2}$ ; B 因素包括 3 个水平, B1 为 5 0 5 (传统施氮方式), B2 为 3 2 5 (氮肥后移), B3 为 5 2 3 (氮肥前移), 共 12 个处理, 3 次重复。采用宽窄行田间配置, 每小区分别种植两带玉米和大豆, 带长 4 m, 小区面积  $16 \text{ m}^2$ 。玉米密度为  $52500 \text{ 株 hm}^{-2}$ , 窄行行距 40 cm, 宽行行距 160 cm, 穴植双株, 株距 38 cm, 育苗移栽, 各处理均基施磷肥(过磷酸钙, 含  $P_2O_5$  12%)  $600 \text{ kg hm}^{-2}$ 、钾肥(氯化钾, 含  $K_2O$  60%)  $90 \text{ kg hm}^{-2}$  以及配施猪粪水  $24000 \text{ kg hm}^{-2}$  (含 N 0.18%、 $P_2O_5$  0.12%、 $K_2O$  0.08%)。大豆密度为  $12000 \text{ 株 hm}^{-2}$ , 行距 40 cm, 穴留 3 株, 穴距 25 cm, 大豆基肥施尿素  $60 \text{ kg hm}^{-2}$ 、过磷酸钙  $450 \text{ kg hm}^{-2}$ 、氯化钾  $60 \text{ kg hm}^{-2}$ , 追肥为初花期后施纯氮  $27.5 \text{ kg hm}^{-2}$ 。于 2010 年 4 月 10 日播种玉米, 8 月 3 日收获, 于 6 月 15 日播种大豆, 11 月 7 日收获。第 2 年在第 1 年的基础上分带轮作, 即在大豆带播种玉

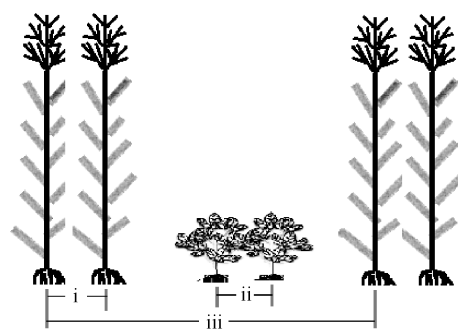


图 1 玉米-大豆套作模式田间布局  
Fig. 1 Arrangement plan of maize and soybean in the field  
i: 玉米窄行行距(40 cm); ii: 大豆行距(40 cm);  
iii: 玉米-大豆带宽(200 cm).  
i: narrow row spacing of maize; ii: row spacing of soybean;  
iii: strip-width in maize-soybean relay-cropping system.

米,玉米茬口播种大豆,其他管理措施与大田管理一致。

### 1.3 测定项目与方法

1.3.1 干物质重 分别于玉米拔节期、吐丝期、灌浆中期、成熟期每小区连续选取长势一致的植株4株,按茎、叶、籽粒等器官分开,105℃下杀青30 min,80℃下烘干至恒重,用百分之一电子天平称重。

1.3.2 产量及构成因素 玉米成熟期,调查每小区空秆数、有效穗,从每小区选取有代表性的20个玉米穗考察穗长、秃尖长、穗粒数及千粒重,分小区单收单晒测产。

### 1.4 相关计算

营养器官花前干物质转运量 = 开花期营养器官干重 - 成熟期营养器官干重<sup>[10]</sup>

营养器官花前干物质转运率(%) = (开花期营养器官干重 - 成熟期营养器官干重)/开花期营养器官干重×100%<sup>[10]</sup>

营养器官花前干物质对籽粒的贡献率(%) = (营养器官花前干物质转运量/成熟期籽粒干重)×100%<sup>[10]</sup>

花后干物质同化量 = 成熟期籽粒干重 - 营养器官花前干物质转运量<sup>[11]</sup>

收获指数 = 籽粒产量/地上部生物量<sup>[12]</sup>

### 1.5 数据处理

运用Microsoft Excel 2007软件计算并作图,DPS7.05数据处理软件进行方差分析和显著性检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 氮肥运筹对玉米产量及产量构成的影响

施氮量及底肥追肥比显著影响套作玉米的产量,且两因素对产量的互作效应显著(表1)。相同施氮量条件下,不同底追比处理对玉米产量两年均表现为B2>B1>B3,处理间差异达显著水平。2010年和2011年数据显示,B2处理较B1和B3处理分别平均增产3.15%、8.54%和4.79%、7.17%;相同底追比条件下,不同施氮量对玉米产量的影响两年变化规律一致,均表现为随施氮量增加玉米产量呈先增后减的趋势,A2和A3处理玉米产量显著高于其他施氮处理。不同施氮量和底追比两因素交互影响显著,两年玉米产量数据表现为,按B1施肥方式,低氮(90~180 kg N hm<sup>-2</sup>)处理高于高氮(360 kg N hm<sup>-2</sup>)处理;按B2施肥方式,适量施氮(180~270 kg N hm<sup>-2</sup>)处理显著高于其他施氮处理。2010年具体表现为组合间以A3B2处理产量最高,与传统氮肥运筹A3B1(270 kg N hm<sup>-2</sup>, 5:0:5)相比,产量提高了8.64%;2011年产量结果有所改变,以A2B2处理最大,并与其他处理差异达显著水平,比A3B1处理提高了10.35%。

表1 氮肥运筹对玉米产量的影响  
Table 1 Effect of nitrogen management on maize yield in maize-soybean relay-intercropping system

处理 Treatment	A1	A2	A3	A4	平均 Mean
2010					
B1	6632.04 b	7336.52 a	7097.30 ab	7021.65 a	7021.88 b
B2	6805.39 a	7520.69 a	7710.67 a	6965.26 b	7250.50 a
B3	6327.92 c	6991.08 b	7129.36 b	6076.00 c	6631.09 c
平均 Mean	6588.45 c	7282.76 a	7312.44 a	6687.64 b	
F 值 F-value	A=57.12**	B=64.10**	A×B=6.74**		
2011					
B1	6983.40 a	7438.56 b	7071.86 b	6538.76 b	7008.15 b
B2	7098.60 a	7803.79 a	7528.30 a	6992.15 a	7355.71 a
B3	6598.61 b	7087.43 c	7171.99 b	6485.97 b	6836.00 c
平均 Mean	6893.54 b	7443.26 a	7257.38 ab	6672.29 c	
F 值 F-value	A=47.98**	B=62.25**	A×B=2.94*		

数据均为3个重复的平均值,同列数据后不同小写字母表示达0.05显著水平。\*在 $P<0.05$ 差异显著;\*\*在 $P<0.01$ 差异显著。A1、A2、A3和A4分别为施90、180、270和360 kg N hm<sup>-2</sup>;B1、B2和B3分别为底肥:拔节肥:穗肥=5:0:5、3:2:5和5:2:3。

Data are the averages of three replicates. Values within the same column followed by different small letters are significantly different at  $P<0.05$ . \* Significant difference at  $P<0.05$ ; \*\* Significant difference at  $P<0.01$ . Treatment A1, A2, A3, and A4 represent with treatments of nitrogen (N) application rates 90, 180, 270, and 360 kg N hm<sup>-2</sup>; B1, B2, and B3 represent with treatments of ratios of base fertilizer, jointing fertilizer and earing fertilizer 5:0:5, 3:2:5, and 5:2:3.

不同施氮量和底肥追肥比对玉米有效穗的影响各处理间差异均达显著水平(表 2)。氮肥过少(90 kg N hm<sup>-2</sup>)或过多(360 kg N hm<sup>-2</sup>)均降低了玉米有效穗数, 氮肥过少玉米空秆率增多, 氮肥过多容易造成苗期“烧苗”, 影响玉米生长发育, 最终降低有效穗; 相同施氮量条件下, 不同底追比处理对有效穗的影响两年变化一致, 均表现为 B2>B1>B3, 各处理间差异显著。不同施氮量和底追比对玉米有效穗的交互影响显著, 低氮(90 kg N hm<sup>-2</sup>)时, 传统施肥有利于前期玉米生长, 减少空秆率, 增加玉米有效穗; 适当的施氮量(180~270 kg N hm<sup>-2</sup>)下氮肥后移有利于增加玉米有效穗数。

表 2 氮肥运筹对玉米产量构成及穗部性状的影响  
Table 2 Effects of nitrogen management on maize yield component and ear traits in maize-soybean relay-intercropping system

处理 Treatment	2010					2011				
	穗长 Ear length (cm)	秃尖长 Bald length (cm)	有效穗 Ear numbers (No. hm <sup>-2</sup> )	穗粒数 Kernels per ear	千粒重 1000-kernel weight (g)	穗长 Ear length (cm)	秃尖长 Bald length (cm)	有效穗 Ear number (No. hm <sup>-2</sup> )	穗粒数 Kernels per ear	千粒重 1000-kernel weight (g)
A1B1	16.66 f	1.57 ab	46032.38 e	534.27 f	279.46 ab	16.98 b	1.55 a	45419.31 d	528.47 b	270.17 b
A1B2	17.08 e	1.43 c	45002.00 i	556.33 de	278.81 b	16.96 b	1.61 a	47502.39 b	534.60 b	273.05 b
A1B3	17.02 e	1.59 a	44502.38 j	535.66 f	274.04 b	16.45 b	1.60 a	45002.38 e	509.00 c	273.80 b
A2B1	17.06 e	1.45 bc	50416.69 b	577.60 bc	285.34 a	18.08 a	1.48 ab	50502.38 a	551.40 a	279.06 a
A2B2	18.46 a	1.33 cd	51669.19 a	598.60 a	290.34 a	18.40 a	1.45 ab	51502.53 a	565.73 a	288.58 a
A2B3	18.19 b	1.43 c	45418.94 g	542.20 ef	278.18 b	17.05 b	1.56 a	46920.88 c	522.13 ab	281.45 ab
A3B1	18.43 a	1.23 de	45668.94 f	561.33 cde	286.94 a	17.97 a	1.50 a	47085.69 c	530.73 b	287.29 a
A3B2	18.31 ab	1.35 cd	49368.81 c	589.87 ab	289.26 a	18.04 a	1.43 b	49837.56 ab	535.87 b	286.42 a
A3B3	18.08 bc	1.33 cd	49579.14 c	558.23 cde	283.66 a	17.92 a	1.41 b	48585.56 ab	533.07 b	283.46 a
A4B1	17.90 c	1.14 e	45252.31 h	554.00 def	277.68 b	16.52 b	1.21 c	45585.44 d	527.27 b	282.05 a
A4B2	17.25 de	1.33 cd	45068.65 i	568.40 cd	287.08 a	16.84 b	1.43 b	47752.44 b	537.13 ab	280.22 ab
A4B3	17.41 d	1.33 cd	46085.69 e	534.93 f	277.91 b	16.75 b	1.37 c	46254.19 d	525.73 ab	280.36 ab
A1-avg.	16.92 d	1.53 a	45178.92 d	542.09 b	277.44 b	16.79 b	1.59 b	45974.69 b	524.02 b	272.34 c
A2-avg.	17.90 b	1.40 b	49168.28 a	572.80 a	284.62 a	17.85 a	1.50 bc	49641.93 a	546.42 a	283.03 ab
A3-avg.	18.27 a	1.30 c	48205.63 b	569.81 a	286.62 a	17.97 a	1.45 cd	48502.94 ab	533.22 a	285.72 a
A4-avg.	17.52 c	1.27 c	45468.88 c	552.44 b	280.89 ab	16.70 b	1.34 d	46530.69 b	530.04 a	280.87 b
B1-avg.	17.52 a	1.35 a	46842.58 b	556.80 b	282.35 a	17.39 ab	1.43 a	47148.20 b	534.47 a	279.64 a
B2-avg.	17.78 a	1.36 a	47777.16 a	578.30 a	286.37 a	17.56 a	1.48 a	49148.73 a	543.33 a	282.07 a
B3-avg.	17.68 a	1.42 a	46396.54 c	542.76 c	278.45 a	17.04 b	1.49 a	46690.75 b	522.48 b	279.77 a
F 值 F-value										
A	21.89**	27.29**	9.43**	11.99**	2.46	19.37**	10.24**	10.83**	4.53*	11.23**
B	1.53	2.01	7.53**	23.77**	3.11	3.94*	1.06	8.45**	7.38**	0.83
A×B	4.99**	4.75**	3.89**	1.41	0.33	1.62	1.68	1.60	1.57	0.96

数据均为 3 个重复的平均值, 同列数据后不同小写字母表示达 0.05 显著水平。\*在 P<0.05 差异显著; \*\*在 P<0.01 差异显著。缩写同表 1。

Data are the averages of three replicates. Values within the same column followed by different small letters are significantly different at P<0.05. \* Significant difference at P < 0.05; \*\* Significant difference at P < 0.01. Abbreviations are the same as those given in Table 1.

产量各构成因素中, 穗粒数受施氮量和底追比的影响最大。不同底肥追肥比处理下, 两年试验的处理间差异均极显著, 表现为B2>B1>B3; 穗粒数随施氮量增加而先增后减, 以A2处理最大, 各处理间差异未达显著水平。施氮量和底追比二因素对穗粒数的交互影响不显著, 两年均以A2B2处理下玉米穗粒数最多, 2010年和2011年分别为598.60粒和565.73粒。

两年的千粒重在90~270 kg N hm<sup>-2</sup>施氮范围内均随施氮量的增加而显著增加,但氮肥过量(360 kg N hm<sup>-2</sup>)会导致千粒重下降;各处理千粒重变化受底追比影响较小,具体表现为B2处理下千粒重高于其他施氮方式。施氮量和底追比两因素对千粒重的交互影响不显著,2010年和2011年均以A2B2处理下千粒重最大。

相同底追比条件下,施氮能显著降低玉米秃尖长,玉米穗长随施氮量的增加而增加,氮肥过少(90 kg N hm<sup>-2</sup>)或过多(360 kg N hm<sup>-2</sup>)均降低玉米穗长,适量施氮(180~270 kg N hm<sup>-2</sup>)有利于提高玉米穗长;

相同施氮量条件下,底肥追肥比玉米秃尖长和穗长影响不大,氮肥前移有利于增加玉米穗长,缩短秃尖长。2010年施氮量和底追比两因素对穗长的交互影响极显著,低氮(90~180 kg N hm<sup>-2</sup>)水平下,按B2施氮方式玉米穗长显著高于其他处理;高氮(270~360 kg N hm<sup>-2</sup>)水平下,按B1施氮方式有利于提高玉米穗长,组合间以A2B2处理下穗长最长。

## 2.2 氮肥运筹对玉米干物质积累与转运的影响

2.2.1 对单株玉米干物质积累的影响 从表3可知,玉米各生育时期的干物质积累在施氮量处理间表现一致,均随施氮量的增加呈先增后减的变化趋

表3 氮肥运筹对玉米单株干物质积累量的影响

Table 3 Effects of nitrogen management on maize dry matter accumulation per plant in maize-soybean relay-intercropping system (g plant<sup>-1</sup>)

处理 Treatment	2010				2011			
	拔节期 Jointing stage	吐丝期 Silking stage	灌浆中期 Mid-filling stage	成熟期 Mature stage	拔节期 Jointing stage	吐丝期 Silking stage	灌浆中期 Mid-filling stage	成熟期 Mature stage
A1B1	8.55 cde	123.30 f	200.33 b	291.42 g	11.62 ef	125.89 g	203.26 cd	294.88 fg
A1B2	8.26 def	127.27 def	201.04 b	300.27 e	11.33 f	130.44 ef	203.18 cd	305.13 de
A1B3	8.73 cde	130.30 cde	200.16 b	265.58 j	11.62 ef	133.38 de	204.94 c	270.46 i
A2B1	10.24 a	136.40 bc	218.18 a	321.95 b	13.69 a	139.40 b	220.55 ab	325.00 b
A2B2	9.55 abc	140.38 ab	218.56 a	330.80 a	12.53 cd	144.36 a	219.61 ab	335.91 a
A2B3	10.02 ab	143.40 a	217.68 a	296.11 f	13.20 ab	146.18 a	221.74 a	301.67 ef
A3B1	9.78 ab	127.46 def	217.19 a	310.45 c	13.12 abc	130.97 ef	217.89 b	312.87 cd
A3B2	9.04 bcd	131.43 cd	217.57 a	319.30 b	12.23 de	134.95 cd	219.03 ab	322.80 b
A3B3	9.51 abc	134.46 bc	216.69 a	284.61 h	12.57 bcd	137.33 bc	220.91 a	288.98 gh
A4B1	7.95 efg	124.63 ef	198.72 b	304.50 d	11.32 f	127.81 fg	202.16 cd	308.84 de
A4B2	6.99 g	127.60 def	199.10 b	313.35 c	10.07 g	130.73 ef	203.47 cd	317.87 bc
A4B3	7.46 fg	131.63 cd	198.22 b	278.66 i	10.29 g	135.85 bcd	200.62 d	284.00 h
A1-avg.	8.51 b	126.96 c	200.51 b	285.76 d	11.52 c	129.91 c	203.79 b	290.15 c
A2-avg.	9.93 a	140.06 a	218.14 a	316.29 a	13.14 a	143.31 a	220.64 a	320.86 a
A3-avg.	9.44 a	131.12 b	217.15 a	304.79 b	12.64 b	134.41 b	219.28 a	308.22 b
A4-avg.	7.47 c	127.96 bc	198.68 b	298.84 c	10.56 d	131.46 c	202.09 c	303.57 b
B1-avg.	9.13 a	127.95 c	208.61 a	307.08 b	12.44 a	131.02 c	210.97 a	310.40 b
B2-avg.	8.46 b	131.67 b	209.07 a	315.93 a	11.54 c	135.12 b	211.32 a	320.43 a
B3-avg.	8.93 ab	134.95 a	208.19 a	281.24 c	11.92 b	138.18 a	212.05 a	286.28 c
F 值 F-value								
A	29.78**	23.21**	192.24**	439.84**	86.10**	189.44**	297.50**	56.87**
B	3.97*	10.69**	0.45	1180.15**	17.44**	91.00**	1.26	145.30**
A×B	0.22	0.02	0.01	0.01	1.45	0.32	1.79	0.02

数据均为3个重复的平均值,同列数据后不同小写字母表示达0.05显著水平。\*在 $P<0.05$ 差异显著;\*\*在 $P<0.01$ 差异显著。缩写同表1。

Data are the averages of three replicates. Values within the same column followed by different small letters are significantly different at  $P<0.05$ . \* Significant difference at  $P<0.05$ ; \*\* Significant difference at  $P<0.01$ . Abbreviations are the same as those given in Table 1.

势, A2 处理下最大。成熟期, 两年施氮量处理间玉米干物质积累量差异显著, 均以 A2 处理最高, 并显著高于 A3 处理, 2010 年和 2011 年 A2 处理比 A3 处理分别高 3.77% 和 4.10%。底追比处理对玉米各生育时期干物质积累的影响不一致, 吐丝前以氮肥前移(B3)干物质积累量较高, 花后氮肥后移处理(B2)干物质积累显著高于其他处理, 表现为 B2>B1>B3, 两年变化规律一样, 其中成熟期, 两年平均值 B2 处理分别显著高于 B1、B3 处理 3.00% 和 11.18%。2010 年和 2011 年, 传统施氮方式(B1)有利于玉米拔节期干物质积累, 两年均以 A2B1 处理下玉米拔节期干物质显著高于其他处理; 氮肥后移有利于提高花后干物质积累量, 成熟期以 A2B2 处理最高, 且显著高于其他处理。

### 2.2.2 对群体干物质积累 Logistic 方程的影响

回归分析表明, 不同氮肥处理的玉米群体干物质积累量( $Y$ )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 0.99 以上, 并可根据该方程求得其最大增长速率、平均增长速率及最大增长速率出现的时间。由表 4 可见, 不同施氮量处理最大生长速率出现的天数差异不大, 均在 83 d 左右, 但 A1B3 处理由于施氮过少及氮肥前移, 相对于其他施氮处理提早了 5~6 d。不同施氮量处理间的差异主要体现在玉米群体干物质重, 最大增长速率以及平均增长速率。玉米群体干

物质积累量、最大增长速率以及平均增长速率均随施氮量的增加呈先增后减的变化趋势, 均在 A2 处理达到最大。A2 处理与传统施氮量 A3 处理相比, 成熟期群体干物质积累量增加了 3.91%, 最大增长率提高了 2.77%。相同施氮量条件下, 氮肥前移(B3)导致群体干物质最大增长速率出现时间过早, 最大增长速率下降, 成熟期群体干物质积累量降低, 氮肥后移(B2)比其他底追比处理玉米群体干物质积累量、最大增长速率及平均增长速率都高。B2 处理与 B1、B3 处理相比, 玉米群体干物质积累量分别增加了 2.75% 和 18.49%, 最大增长速率分别增加了 5.48  $\text{kg hm}^{-2} \text{d}^{-1}$  和 40.88  $\text{kg hm}^{-2} \text{d}^{-1}$ , 平均增长率分别高出 4.90  $\text{kg hm}^{-2} \text{d}^{-1}$  和 28.63  $\text{kg hm}^{-2} \text{d}^{-1}$ 。说明氮肥后移能促进玉米群体干物质的积累以及提高最大增长速率, 延长玉米干物质积累的快增期, 从而积累更多的光合产物。

2.2.3 对营养器官(茎鞘+叶片)干物质向籽粒转运的影响 表5表明, 在相同底追比条件下, 不同施氮量处理间干物质转移量差异显著, 低氮(90~180  $\text{kg N hm}^{-2}$ )处理下转移量显著高于其他施氮处理, 2011 年施氮 180  $\text{kg N hm}^{-2}$  获得最高转移量, 达 937.30  $\text{kg hm}^{-2}$ , 比施氮 270  $\text{kg N hm}^{-2}$  处理高 12.29%。不同底肥比对干物质转移量影响不显著, 两年变化趋势一致, 均表现为 B3>B2>B1, 两年平均值 B3 分别较 B1、B2 处理高 15.46% 和 11.46%。2010 年和 2011

表 4 各氮肥运筹下群体干物质积累的 Logistic 方程和部分参数(2010 年)

Table 4 Logistic equation and some parameters of maize dry matter accumulation under different nitrogen managements in 2010

处理 Treatment	回归方程 Regression equation	$R^2$	成熟期干物质积累量 Dry matter accumulation of mature stage ( $\text{kg hm}^{-2}$ )	最大增长速率 The maximum increasing rate ( $\text{kg hm}^{-2} \text{d}^{-1}$ )	平均增长速率 Average increasing rate ( $\text{kg hm}^{-2} \text{d}^{-1}$ )	最大增长速率 出现的时间 Days to MIR (d)
A1B1	$Y=15737.77/(1+633.99e^{-0.077x})$	0.996	15334.46	302.95	170.38	83.80
A1B2	$Y=16244.22/(1+613.11e^{-0.076x})$	0.997	15596.96	308.64	173.30	84.50
A1B3	$Y=12935.88/(1+559.34e^{-0.080x})$	0.992	13533.66	259.04	150.37	79.00
A2B1	$Y=17332.78/(1+603.85e^{-0.076x})$	0.998	16800.00	329.32	186.67	84.30
A2B2	$Y=18071.79/(1+586.14e^{-0.075x})$	0.996	17313.19	338.85	192.37	85.00
A2B3	$Y=15167.32/(1+689.31e^{-0.079x})$	0.998	14565.08	299.55	161.83	82.70
A3B1	$Y=16692.98/(1+732.25e^{-0.078x})$	0.999	16201.50	325.51	180.02	84.60
A3B2	$Y=17243.83/(1+657.57e^{-0.077x})$	0.997	16696.31	331.94	185.51	84.30
A3B3	$Y=14263.69/(1+613.73e^{-0.080x})$	0.999	13948.20	284.20	154.98	80.50
A4B1	$Y=16785.87/(1+661.26e^{-0.076x})$	0.997	15940.31	318.93	177.11	85.40
A4B2	$Y=17489.80/(1+547.68e^{-0.073x})$	0.995	16435.13	319.19	182.61	86.40
A4B3	$Y=13920.18/(1+836.06e^{-0.084x})$	0.997	13687.01	292.32	152.08	80.10

$R^2$ : 决定系数; MIR: 最大增长速率。缩写同表 1。

$R^2$ : the coefficient of determination; MIR: the maximum increasing rate. Abbreviations are the same as those given in Table 1.

表 5 氮肥运筹对营养器官(茎/鞘+叶片)干物质向籽粒转运的影响  
Table 5 Effect of nitrogen management on dry matter (stem/sheath+ leaf) translocation from vegetative organ to grain of maize

指标 Index	处理 Treatment	A1	A2	A3	A4	平均 Mean
2010						
转移量 Translocation amount (kg hm <sup>-2</sup> )	B1	996.98 ab	958.65 b	817.95 b	686.70 b	865.07 b
	B2	964.43 b	925.05 b	918.75 a	757.58 a	891.45 a
	B3	1084.13 a	1114.58 a	837.90 b	726.60 a	940.80 a
	平均 Mean	1015.18 a	999.43 a	858.20 ab	723.63 b	
	F 值 F-value	A=13.71*	B=1.45	A×B=0.21		
转运率 Transportation efficiency (%)	B1	20.06 a	17.33 b	14.28 b	13.33 b	16.25 b
	B2	18.25 b	15.52 c	16.01 a	13.87 b	15.91 b
	B3	21.12 a	20.04 a	15.70 a	16.49 a	18.34 a
	平均 Mean	19.81 a	17.63 ab	15.33 bc	14.56 c	
	F 值 F-value	A=12.44**	B=5.08	A×B=0.24		
贡献率 Contribution rate (%)	B1	13.03 a	12.14 ab	10.12 b	8.60 b	10.97 a
	B2	12.10 a	11.05 a	11.03 a	9.61 b	10.95 a
	B3	14.02 a	13.89 a	10.08 b	9.01 b	11.75 a
	平均 Mean	13.05 a	12.36 a	10.41 ab	9.07 b	
	F 值 F-value	A=11.61**	B=0.92	A×B=0.31		
花后干物质同化量 Post anthesis accumulation (kg hm <sup>-2</sup> )	B1	6657.53 b	6947.85 ab	7281.23 b	7302.23 a	7047.21 b
	B2	6993.00 a	7460.78 a	7425.08 a	7131.60 b	7252.61 a
	B3	6649.13 b	6896.93 b	7511.18 a	7368.90 a	7106.53 ab
	平均 Mean	6766.55 c	7101.85 b	7405.83 a	7267.58 ab	
	F 值 F-value	A=8.57**	B=1.68	A×B=1.50		
收获指数 Harvest index	B1	0.50 b	0.50 b	0.50 b	0.47 b	0.49 b
	B2	0.55 a	0.56 a	0.55 a	0.52 a	0.55 a
	B3	0.48 c	0.50 b	0.51 b	0.48 b	0.49 b
	平均 Mean	0.51 b	0.52 a	0.52 a	0.49 c	
	F 值 F-value	A=28.30**	B=158.13**	A×B=3.44*		
2011						
转移量 Translocation amount (kg hm <sup>-2</sup> )	B1	831.08 b	769.65 c	826.35 a	669.90 b	831.08 b
	B2	868.35 b	923.48 b	852.60 a	810.59 a	868.35 b
	B3	1020.60 a	1118.78 a	825.30 a	716.10 b	1020.60 a
	平均 Mean	906.68 ab	937.30 a	834.75 bc	732.20 c	
	F 值 F-value	A=3.06*	B=2.66	A×B=0.63		
转移率 Transportation efficiency (%)	B1	16.99 b	14.15 ab	14.37 a	12.88 c	14.60 b
	B2	16.40 b	15.32 b	14.75 a	14.79 b	15.31 ab
	B3	20.02 a	19.98 a	15.35 a	16.25 a	17.90 a
	平均 Mean	17.80 a	16.48 ab	14.83 b	14.64 b	
	F 值 F-value	A=4.66	B=8.38*	A×B=0.39		
贡献率 Contribution rate (%)	B1	10.76 b	9.65 c	10.32 a	8.46 b	9.80 a
	B2	11.03 b	11.07 b	10.12 a	10.16 a	10.60 a
	B3	13.33 a	14.10 a	9.98 a	8.94 b	11.59 a
	平均 Mean	11.71 a	11.61 a	10.14 bc	9.19 c	
	F 值 F-value	A=7.69*	B=2.03	A×B=0.78		

(续表 5)

指标 Index	处理 Treatment	A1	A2	A3	A4	平均 Mean
花后干物质同化量 Post anthesis assimilate to accumulation (kg hm <sup>-2</sup> )	B1	6888.53 a	7207.20 ab	7196.70 b	7252.88 a	7136.33 ab
	B2	7011.38 a	7408.80 a	7574.70 a	7167.31 a	7290.55 a
	B3	6632.33 b	6813.45 c	7469.70 a	7315.88 a	7057.84 b
	平均 Mean	6844.08 c	7143.15 b	7413.70 a	7245.35 ab	
	F 值 F-value	A=8.61**	B=2.81	A×B=1.95		
收获指数 Harvest index	B1	0.50 b	0.49 b	0.49 b	0.47 b	0.49 b
	B2	0.54 a	0.55 a	0.54 a	0.50 a	0.53 a
	B3	0.50 b	0.50 b	0.48 b	0.48 b	0.49 b
	平均 Mean	0.51 a	0.51 a	0.50 a	0.48 b	
	F 值 F-value	A=17.85**	B=73.19	A×B=0.31		

数据均为 3 个重复的平均值, 同列数据后不同小写字母表示达 0.05 显著水平。\*在  $P<0.05$  差异显著; \*\*在  $P<0.01$  差异显著。缩写同表 1。

Data are the averages of three replicates. Values within the same column followed by different small letters are significantly different at  $P<0.05$ . \* Significant difference at  $P<0.05$ ; \*\* Significant difference at  $P<0.01$ . Abbreviations are the same as those given in Table 1.

年均以 A2B3 处理下玉米干物质转移量最大, 分别比 A3B1 处理高 36.27% 和 35.39%。

玉米营养器官干物质转移率随施氮量增加逐渐降低, 两年变化趋势一致, 各施氮处理均表现为  $A1>A2>A3>A4$ , 其中 A1 与 A2 之间, A3 与 A4 之间差异不显著。相同施氮量条件下, 不同底追比对干物质转移率影响不显著, 两年均在 B3 处理下转移率最高, 2011 年表现为  $B3>B2>B1$ , B3 与 B2 之间差异不显著。2010 年和 2011 年均以 A1B3 处理下玉米干物质转移率最高, 分别比 A3B1 处理高 47.90% 和 39.32%。不同施氮量及底追比对干物质转移量向籽粒贡献率的影响与转移率变化趋势一致, 两年均在 A1B3 处理下贡献率最大, 分别达到 13.05% 和 11.71%。

相同底追比条件下, 花后干物质同化量随施氮量增加而先增后减, A3 处理下花后干物质同化量最大, 并显著高于其他施氮处理, 两年变化规律一致, 表现为  $A3>A4>A2>A1$ ; 相同施氮量条件下, 氮肥前移可以显著提高玉米花后干物质同化量, 底追比为 B2 时, 施氮 90~180 kg N hm<sup>-2</sup> 可以显著促进花后干物质同化量。2010 年在 A2B2 处理下花后干物质同化量最大, 比 A3B1 处理高 2.47%; 2011 年在 A3B2 处理下最大, 比 A3B1 处理高 5.25%。

收获指数是表示生物产量转化为经济产量的效率。从表 5 可以看出, 不同施氮量及底追比对收获指数的影响均显著, 随施氮量的增加, 玉米收获指数先增加后降低, A2 处理下最高; 相同施氮量条件下, B2 处理的收获指数显著高于 B1 和 B3 处理。2010 年和 2011 年均以 A2B2 处理收获指数最高, 分别达到 0.56

和 0.55。施氮 180 kg hm<sup>-2</sup>, 按 3 2 5 底追比施肥, 有利于促进玉米花前干物质向籽粒转运, 亦提高了花后干物质同化量, 使得花前干物质转运量、转运率及花后干物质同化量对籽粒的贡献率协同提高。

### 3 讨论

#### 3.1 施氮量和底肥追肥比例对玉米产量的影响

有研究指出, 适量施氮有利于促进玉米穗粒数和千粒重的增加, 提高产量<sup>[13]</sup>, 但氮肥施用过多玉米产量反而下降<sup>[14-15]</sup>, 与本文研究结果一致。相同施氮量条件下, 十二叶展到吐丝期追肥有利于提高玉米穗粒数和千粒重, 以底追比 1 2 (底肥 十二肥叶=1 2) 较为适宜<sup>[16]</sup>。本研究结果表明, 在氮肥供试范围内, 玉米产量随施氮量增加而先增后减, 施氮 180 kg hm<sup>-2</sup> 时玉米产量显著高于低氮 (90 kg N hm<sup>-2</sup>) 和高氮 (360 kg N hm<sup>-2</sup>) 处理, 两年平均产量均达到 7000 kg hm<sup>-2</sup> 以上; 分次施氮尤其是氮肥后移 (底肥 拔节肥 穗肥=3 2 5) 更有利于玉米增产。玉米-大豆套作体系中, 由于大豆自身可以通过根瘤固氮, 提高土壤含氮量, 减少周年氮肥施用量, 同时存在氮素从豆科作物向玉米植株发生转移的现象, 改变了玉米吸氮特性, 表现出套作优势<sup>[3,17]</sup>。与四川玉米传统施氮 270 kg hm<sup>-2</sup>, 按 5 0 5 施肥方式相比, 套作玉米施氮 180 kg hm<sup>-2</sup>, 按 3 2 5 施肥方式更加有利于改善玉米穗部性状, 增加玉米穗长, 缩短秃尖长, 同时提高穗粒数和千粒重, 2010 和 2011 年产量分别提高了 423.39 kg hm<sup>-2</sup> 和 731.93 kg hm<sup>-2</sup>。



### 3.2 施氮量和底肥追肥比例对玉米干物质积累与转运的影响

作物花后干物质积累与产量呈显著正相关<sup>[18-19]</sup>, 产量依赖于花后干物质积累量。朱新开等<sup>[20]</sup>研究认为, 小麦氮肥后移, 有利于增强花后干物质合成, 提高营养器官向籽粒干物质转移效率, 提高籽粒产量, 这与本文研究结果一致。本文研究发现传统施氮方式(5 0 5)下干物质最大增长速率开始和结束的时间较早, 平均增长速率低于氮肥后移(3 2 5)处理, 花前干物质积累较多, 但是花后干物质增长缓慢, 成熟期籽粒干物质分配比例较低, 营养器官干物质向籽粒转移效率最低, 氮肥后移有利于花后干物质的积累, 与B1、B3处理相比, 群体干物质最大增长速率持续时间长, 平均增长速率较高。这可能是因为该试验点在试验开展前已连续分带轮作种植玉米-大豆3年, 大豆是养地作物, 可以通过根瘤固氮提高土壤含氮量, 使得玉米生育前期有一部分氮素供给, 氮肥后移使得前期氮肥保持合理水平, 同时也保证了灌浆期氮肥供给, 提高花后干物质积累量。另一方面, 随施氮量的增加, 玉米干物质积累量、干物质积累增长速率、花后干物质同化量及收获指数呈先增后减的变化趋势, 这与吴亚男等<sup>[21]</sup>和张恒山等<sup>[22]</sup>研究结果一致。本研究表明, 施氮180 kg hm<sup>-2</sup>较施氮270 kg hm<sup>-2</sup>更加有利于花前营养器官干物质向籽粒转运和贡献, 提高玉米干物质积累量, 这可能是因为套作体系中发生氮素从豆科作物向玉米转移现象以及种间促进作用, 达到氮肥高效利用。

## 4 结论

在本研究条件下, 施180 kg N hm<sup>-2</sup>, 按氮肥后移(底肥 拔节肥 穗肥肥=3 2 5)施肥方式, 有利于玉米穗粒数和千粒重的增加, 改善穗部性状, 提高群体干物质最大增长速率和花后干物质同化量, 促进花后干物质向籽粒转运, 提高籽粒产量。在本试验研究范围内, 施氮量为180 kg hm<sup>-2</sup>及底追比为3:2:5的处理是获得玉米-大豆套作模式下玉米高产的最佳氮肥运筹方式。

## References

- [1] 杨文钰. 旱地三熟“麦/玉/豆”新种植模式. 四川农业科技, 2010, (10): 18-19  
Yang W Y. The main mode of science and technology project of high yield grain production in Sichuan Province. *J Sichuan Agric Sci Tech*, 2010, (10): 18-19 (in Chinese)
- [2] 杨文钰, 雍太文, 任万军, 樊高琼, 牟锦毅, 卢雪兰. 发展套作大豆, 振兴大豆产业. 大豆科学, 2008, 27: 1-7  
Yang W Y, Yong T W, Ren W J, Fan G Q, Mou J Y, Lu X L. Develop relay-planting soybean, revitalize soybean industry. *Soybean Sci*, 2008, 27: 1-7 (in Chinese with English abstract)
- [3] 雍太文, 任万军, 杨文钰, 樊高琼, 牟锦毅. 旱地新三熟“麦/玉/豆”模式的内涵、特点及栽培技术. 耕作与栽培, 2006, (6): 48-50  
Yong T W, Ren W J, Yang W Y, Fan G Q, Mou J Y. Connotation, features and cultivation techniques for the new 3 relay cropping system of “wheat/maize/soybean” on dry land. *Gengzuo yu zaipai* 2006, (6): 48-50 (in Chinese)
- [4] 陈文俊. 中国西南地区玉米生产和杂种优势利用现状及对策. 玉米科学, 2005(增刊-1): 5-6  
Chen W J. Utilization status and countermeasure of maize production and heterosis in Southwest China. *J Maize Sci*, 2005(suppl-1): 5-6 (in Chinese)
- [5] 李青军, 张炎, 胡伟, 孟凤轩, 冯广平, 胡国智, 刘新兰. 氮素运筹对玉米干物质积累、氮素吸收分配及产量的影响. 植物营养与肥料学报, 2011, 17: 755-760  
Li Q J, Zhang Y, Hu W, Meng F X, Feng G P, Hu G Z, Liu X L. Effects of nitrogen management on maize dry matter accumulation nitrogen uptake and distribution and maize yield. *Plant Nutr Fert Sci*, 2011, 17: 755-760 (in Chinese with English abstract)
- [6] 丁民伟, 崔彦宏, 刘梦星, 崔国美, 杨利. 氮肥用量与施用时期及分配比例对夏玉米干物质积累的影响. 河北农业大学学报, 2007, 30(6): 1-4  
Ding M W, Cui Y H, Liu M X, Cui G M, Yang L. Effect of N application rate, time and ratio on dry matter accumulation of summer maize (*Zea mays* L.). *J Agric Univ Hebei*, 2007, 30(6): 1-4 (in Chinese with English abstract)
- [7] Giller K E, Ormesher J, Awah F M. Nitrogen transfer from phaseolus bean to intercropped maize measured using <sup>15</sup>N-enrichment and <sup>15</sup>N-isotope dilution methods. *Soil Biol Biochem*, 1991, 23(4): 339-346
- [8] 王小春, 杨文钰, 任万军, 邓小燕, 张群, 向达兵, 雍太文. 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. 植物营养与肥料学报, 2012, 18: 803-812  
Wang X C, Yang W Y, Ren W J, Deng X Y, Zhang Q, Xiang D B, Yong T W. Study on yield and differences of nutrient absorptions of maize in wheat/maize/soybean and wheat/maize/sweet potato relay intercropping systems. *Plant Nutr Fert Sci*, 2012, 18: 803-812 (in Chinese with English abstract)
- [9] 雍太文, 杨文钰, 任万军, 樊高琼, 向达兵. 两种三熟套作体系中的氮素转移及吸收利用. 中国农业科学, 2009, 42: 3170-3178  
Yong T W, Yang W Y, Ren W J, Fan G Q, Xiang D B. Analysis of the nitrogen transfer, nitrogen uptake and utilization in the two relay-planting systems. *Sci Agric Sin*, 2009, 42: 3170-3178 (in Chinese with English abstract)
- [10] Papakosta D K, Gagianas A A. Nitrogen and dry matter accumulation, remobilization, and losses for mediterranean wheat during grain filling. *Agron J*, 1991, 83: 864-870
- [11] 石玉, 于振文, 王东, 李延奇, 王雪. 施氮量和底追比例对小麦氮素吸收转运及产量的影响. 作物学报, 2006, 32:

- 1860–1866  
Shi Y, Yu Z W, Wang D, Li Y Q, Wang X. Effects of nitrogen rate and ratio of base fertilizer and topdressing on uptake, translocation of nitrogen and yield in wheat. *Acta Agron Sin*, 2006, 32: 1860–1866 (in Chinese with English abstract)
- [12] 邹娟, 鲁剑巍, 陈防, 李银水, 李小坤. 冬油菜施氮的增产和养分吸收效应及氮肥利用率研究. *中国农业科学*, 2011, 44: 745–752  
Zou J, Lu J W, Chen F, Li Y S, Li X Q. Study on yield increasing and nutrient uptake effect by nitrogen application and nitrogen use efficiency for winter rapeseed. *Sci Agric Sin*, 2011, 44: 745–752 (in Chinese with English abstract)
- [13] 叶君, 高聚林, 王志刚, 于晓芳, 孙继颖, 李丽君, 高英波, 王海燕, 贾宁, 高鑫, 崔超. 施氮量对超高产春玉米花粒期叶片光合特性及产量的影响. *玉米科学*, 2011, 19(6): 74–77  
Ye J, Gao J L, Wang Z G, Yu X F, Sun J Y, Li L J, Gao Y B, Wang H Y, Jia L, Gao X, Cui C. Effects of nitrogen on leaf photosynthesis and grain yield of super high-yield spring maize during the flowering and milking stages. *J Maize Sci*, 2011, 19(6): 74–77 (in Chinese with English abstract)
- [14] 王友华, 许海涛, 许波, 张海申, 冯晓曦. 施用氮肥对玉米产量构成及其根系生长的影响. *中国土壤与肥料*, 2010, (3): 55–57  
Wang Y H, Xu H T, Xu B, Zhang H S, Feng X X. Effect of N fertilizer application yield components and root system growth of maize. *China Soils Fert*, 2010, (3): 55–57 (in Chinese with English abstract)
- [15] 申丽霞, 王璞, 兰林旺, 孙西欢. 施氮对夏玉米碳氮代谢及穗粒形成的影响. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13: 1074–1079  
Shen L X, Wang P, Lan L W, Sun X H. Effect of nitrogen supply on carbon-nitrogen metabolism and kernel set in summer maize. *Plant Nutr Fert Sci*, 2007, 13: 1074–1079 (in Chinese with English abstract)
- [16] 张丽丽, 王璞, 陶洪斌. 氮肥运筹对夏玉米生长发育及氮素利用的影响. *华北农学报*, 2010, 25(增刊-1): 177–181  
Zhang L L, Wang P, Tao H B. Effects of nitrogen fertilizer supply way on growth and nitrogen use efficiency (NUE) in summer maize. *Acta Agric Boreali-Sin*, 2010, 25(suppl-1): 177–181 (in Chinese with English abstract)
- [17] 雍太文, 向达兵, 张静, 万燕, 刘卫国, 杨文钰. 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. *草业学报*, 2011, 20(6): 34–44  
Yong T W, Xiang D B, Zhang J, Wan Y, Liu W G, Yang W Y. Analysis of the nitrogen uptake and utilization efficiency and N fertilizer residual effect in the wheat-maize-soybean and wheat-maize-sweet potato relay strip intercropping. *Acta Pratacult Sin*, 2011, 20(6): 34–44 (in Chinese with English abstract)
- [18] Prystupa P, Savin R, Slafer G A. Grain number and its relationship with dry matter, N and P in the spikes at heading in response to N × P fertilization in barley. *Field Crops Res*, 2004, 90: 245–254
- [19] Ye Y L, Wang G, Huang Y F, Zhu Y J, Meng Q F, Chen X P, Zhang F S, Cui Z L. Understanding physiological processes associated with yield-trait relationships in modern wheat varieties. *Field Crops Res*, 2011, 124: 316–322
- [20] 朱新开, 郭凯泉, 郭文善, 封超年, 彭永欣. 氮肥运筹比例对稻田套播强筋小麦籽粒品质和产量的影响. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16: 515–521  
Zhu X K, Guo K Q, Guo W S, Feng C N, Peng Y X. Effects of nitrogen fertilization on grain quality and yield of strong-gluten wheat interplanted with rice. *Plant Nutr Fert Sci*, 2010, 16: 515–521 (in Chinese with English abstract)
- [21] 吴亚男, 齐华, 盛耀辉, 王敬亚, 梁熠, 王晓波, 刘明. 密度、氮肥对春玉米光合特性、干物质积累及产量的影响. *玉米科学*, 2011, 19(5): 124–127  
Wu Y N, Qi H, Sheng Y H, Wang J Y, Liang Y, Wang X B, Liu M. Effects of sowing density and applying nitrogenous fertilizer on the photosynthesis capacity dry matter accumulation and yield of maize. *J Maize Sci*, 2011, 19(5): 124–127 (in Chinese with English abstract)
- [22] 杨恒山, 张玉芹, 徐寿军, 李国红, 高聚林, 王志刚. 超高产春玉米干物质及养分积累与转运特征. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18: 315–323  
Yang H S, Zhang Y Q, Xu S J, Li G H, Gao J L, Wang Z G. Characteristics of dry matter and nutrient accumulation and translocation of super-high-yield spring maize. *Plant Nutr Fert Sci*, 2012, 18: 315–323 (in Chinese with English abstract)