植物营养与肥料学报 2015,21(4): 873 - 883 doi: 10.11674/zwyf.2015.0406
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer http: //www.plantnutrifert.org

施氮量对四川盆地小麦生长及灌浆的影响

李朝苏[1], 汤永禄[1*], 吴 春[1], 吴晓丽[1], 黄 钢[1], 何 刚[2], 郭大明[2]
(1 四川省农业科学院作物研究所, 农业部西南地区小麦生物学与遗传育种重点实验室,
四川成都 610066; 2 江油市农业局,四川江油 621700)

摘要:【目的】施氮量对小麦光合产物的积累、转运和分配影响明显,氮肥运筹是调控小麦物质生产的重要手段。为进一步发挥四川盆地小麦的增产潜力,2011 ～2013 年,在四川省江油市开展了施氮量对两个高产小麦品种物质生产及灌浆特性影响的研究。**【方法】**试验采用裂区设计,品种为主区,施氮量为副区,参数品种为内麦 836 和川麦 104,施氮(N)水平分别为 0、90、135、180、225 kg/hm^2,在小麦生长期间和收获后分别测试了个体和群体生物量、产量、产量结构和灌浆参数。**【结果】**施氮量、品种以及年际间气候条件均对产量、产量结构以及干物质积累量、叶面积指数有明显影响,两因素或三因素互作效应因指标不同而异。同一施氮水平下,川麦 104 的籽粒产量高于内麦 836,氮空白区内麦 836 平均产量 6638.9 kg/hm^2,川麦 104 为 6717.7 kg/hm^2。135 kg/hm^2 施氮水平下,两个品种的生物产量和籽粒产量分别超过 18000 和 9000 kg/hm^2,与 180 kg/hm^2 和 225 kg/hm^2 处理差异不显著。两个品种产量与施氮量之间的关系符合一元二次函数关系($P<0.05$),川麦 104 $y=-0.1056x^2+44.023x+6724.6$,内麦 836 $y=-0.0934x^2+35.991x+6651.5$,理论最高产量以及最高产量施氮量川麦 104 均高于内麦 836。增加施氮量利于各生育期干物质积累量的增加,但在 135 ～225 kg/hm^2 施氮范围变幅较小,且 135 kg/hm^2 处理在花后物质积累量更多。随着施氮量的增加,花前贮存物质对产量的贡献率呈先降低后升高的趋势,135 kg/hm^2 处理的产量形成更多的依靠花后物质生产。增施氮肥虽然可促进公顷穗数和穗粒数的增加,但平均灌浆速率下降,内麦 836 最大灌浆速率在施氮量达到 N 180 kg/hm^2,川麦 104 在施氮量达到 N 225 kg/hm^2 时即有大幅下降,千粒重也随之有不同程度的降低。**【结论】**花后干物质积累量的差异是两个品种对氮肥响应出现差异的重要原因。在目前生产条件下,稻茬小麦高产施氮量在 N 135 ～150 kg/hm^2,即可确保小麦的产量,又可提高花前群体质量和花后物质生产量及转运效率。因此,在土壤肥力高、保水保肥力强的四川盆地,施氮量为 135 ～150 kg/hm^2 可提升该地小麦的生产效益。

关键词: 氮; 小麦; 物质生产; 灌浆特性
中图分类号: S147.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2015)04-0873-11

Effect of N rate on growth and grain filling of wheat in Sichuan Basin

LI Chao-su[1], TANG Yong-lu[1*], WU Chun[1], WU Xiao-li[1], HUANG Gang[1], HE Gang[2], GUO Da-ming[2]
(*1 Crop Research Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Biology and Genetic Breeding in Wheat (Southwest), Ministry of Agriculture, Chengdu 610066, China;*
2 Agricultural Bureau of Jiangyou City, Jiangyou Sichuan 621700, China)

Abstract:【Objectives】Nitrogen (N) has a significant effect on the accumulation, transport and distribution of photosynthetic products of wheat. In order to improve wheat yield potential in Sichuan Basin, effects of different N rates on dry matter production and grain filling of high-yield wheat cultivars were studied in Jiangyou City, Sichuan Province from 2011 to 2013. **【Methods】** A randomized block design with a split plot experiment was laid out and two cultivars, CM 104 and NM 836, were used as the main plot factors. Five N rates were set as sub plots: 0, 90, 135, 180 and 225 kg/hm^2. Individual and population biomass, yield, yield components and filling parameters of the two cultivars were tested. **【Results】** The yield, yield components, dry matter accumulation and leaf area index

收稿日期: 2014-06-09 **接受日期:** 2014-09-10 **网络出版日期:** 2015-06-01
基金项目: 国家小麦产业技术体系(CARS-3);四川省科技计划项目(2011NZ0098-15);四川省农业科学院优秀论文基金资助。
作者简介: 李朝苏(1980—),男,山东巨野人,副研究员,主要从事作物高产栽培技术研究。Tel: 028-84504560, E-mail: xiaoli1755@163.com
* 通信作者 Tel: 028-84504601, E-mail: ttyycc88@163.com

are all significantly affected by the N rates, cultivars and interannual climatic conditions. In the same N rate, the yield of CM 104 is higher than that of NM836. In the control, the average yield of NM 836 and CM 104 is 6638.9 and 6717.7 kg/hm^2. In the N 135 kg/hm^2 treatment, the yields of two cultivars are more than 9000 kg/hm^2 and dry matter accumulation is more than 18000 kg/hm^2. When the N rate is higher than 135 kg/hm^2, the yield and dry matter accumulation increment become less. The relationship of yields and N rates can be described with a quadratic function, for CM104, $y = -0.1056x^2 + 44.023x + 6724.6$ and for NM836, $y = -0.0934x^2 + 35.991x + 6651.5$ ($P < 0.05$). The theoretical maximum yield and the N rate for the highest yield for CM104 are higher than for NM 836. The increased N rates lead to the increment of dry matter accumulation at all the growing stages, but the differences in increment range are not significant from N rate of 135 to 225 kg/hm^2 and the highest dry matter accumulation after flowering and the contribution of dry matter translocation is in N rate of 135 kg/hm^2. Although higher N rate is beneficial for the formation of effective spikes per hectare and grain numbers per spike, especially for the cultivar of CM 104, but not for the grain filling. The maximum grain-filling rate is decreased substantially in N rate of 180 kg/hm^2 for NM836, 225 kg/hm^2 for CM104. The 1000-grain weights in all the N treatments are lower than in control, and negative with N application rate increasing. **【Conclusions】** The difference in the dry matter accumulation after flowering is the main reason for the different response to N rate for the two cultivars. Appropriate N application rate is very important for achieving high population biomass, increasing the dry matter accumulation and translocation to the grains after flowering. Under the fertile and less N loss paddy soil condition in Sichuan Basin, the suitable N rate for high yield is 135 –150 kg/hm^2.

Key words: nitrogen; wheat; dry matter production; grain filling

小麦是全球最重要的粮食作物之一,受生态条件、生产水平的制约,区域间小麦产量差异极大,虽有小面积单产突破9000 kg/hm^2[1-4],但全世界平均单产仅有2800 kg/hm^2,我国也不足5000 kg/hm^2,即使生产条件较好的区域,大面积单产也仅有6000 kg/hm^{2}左右,和根据各地光温资源估算的产量潜力仍有较大的差距[5-7]。

干物质积累的速率和总量是产量形成的基础条件,以往研究表明,小麦籽粒产量约10%～30%来自花前储藏物质的再分配,而70%～90%来自花后光合生产,虽然花前物质贡献率相对较低,但它是决定花后能否进行高效物质生产的前提条件,且随着品种的改良,花前储藏物质转移贡献率还呈上升趋势[8-10]。作物产量提升的过程也是干物质的积累、转运和分配不断优化的过程,因此通过品种改良和栽培技术的运筹,可以最大限度地调控物质生产、分配进程,促使高产到更高产的不断跨越。氮是作物必需的大量元素,国内外针对氮肥对小麦产量和干物质积累的影响开展了大量的研究。由于小麦品种特性、生产生态条件的差异,区域间高产施氮量也有明显差异,且不同施氮条件下干物质积累和分配规律也不尽一致。

西南麦区是我国第三大小麦优势产区,常年播种面积210×10^4hm^2,受生态条件所限,生产水平和黄淮、长江中下游等区域有明显差距,有关高产技术探索虽已有30余年,但直至本世纪初才在育种和栽培技术上有所突破,选育出一批以川麦104、川麦42为代表的具超高产潜力的新品种,实产验收屡次突破9000 kg/hm^2[4, 10-11]。本研究选择近年通过国家审定、并在长江上游区域有着广泛种植的两个新品种川麦104和内麦836,研究施氮量对其物质生产和灌浆特性的影响,以明确西南地区高产、超高产小麦群体的规律特点,为完善西南地区小麦高产栽培技术提供理论和技术依据。

1 材料和方法

1.1 试验设计

试验于2011～2012(简称2012)、2012～2013(简称2013)年在江油市大堰乡泉水村同一块田连续进行,前作水稻。2012年试验前耕层土壤有机质30.0 g/kg、全氮2.2 g/kg、碱解氮190 mg/kg、有效磷57 mg/kg、速效钾88 mg/kg;2013年试验前土壤有机质33.8 g/kg、全氮2.0 g/kg、碱解氮184 mg/kg、有效磷41.1 mg/kg、速效钾73 mg/kg。参试品种为内麦836(NM836)和川麦104(CM104),内麦836于2008年通过国家审定,免疫条锈病和白粉病,2011年入选全国小麦主导品种,在川中丘陵区有着广泛应用。川麦104于2012年通过国家审定,

高抗白粉病和条锈病,产量潜力突出,2012 年和 2013 年实产验收分别达 10324.5 和 10440.0 kg/hm^2,连续两年创造四川省最高产量记录,2013 年入选四川省小麦主导品种。

试验采用裂区设计,品种为主区,施氮量为副区,施氮水平分别为 0、90、135、180、225 kg/hm^2,小区面积 12 m^2,3 次重复。每年的 10 月 30 日播种,免耕撬窝点播,行距 24 cm,窝距 13 cm,每窝播 12 粒种子,播种后覆盖粉碎的稻草。出苗后匀苗,基本苗保持在 220 苗/m^2 左右,2012 年内麦 836 的田间出苗率较低,其各小区基本苗在 170 苗/m^2 左右。施氮处理底肥和拔节期追肥比例分别是 60% 和 40%,五氧化二磷和氧化钾用量按 75 kg/hm^2 作底肥施用,氮、磷、钾分别由尿素、过磷酸钙和氯化钾提供,施肥时将尿素和氯化钾溶于少量水中浇施,其他时间不再灌溉。在苗期化学除草,孕穗和灌浆期防治蚜虫。

1.2　测定项目及方法

1.2.1 茎蘖变化　匀苗后,每小区沿对角线方向确定 3 个代表性样点,每点 1 行连续的 5 窝,调查基本苗,并于分蘖盛期、拔节始期、开花期和成熟期调查样点内的茎蘖数或穗数,换算群体茎蘖数及穗数。

1.2.2 个体和群体质量　在分蘖盛期、拔节初期、开花期和成熟期,每小区取代表性的 4 窝植株,将地下部分剪掉,在分蘖盛期和拔节期将植株分为叶片和茎鞘两部分,开花期分为绿叶、黄叶 + 茎鞘、穗三部分,成熟期分为叶片、茎鞘、穗和籽粒四部分烘干称重,并用干重法测定叶面积。根据各时期调查的群体数量计算群体干物质积累量、叶面积指数,并按照周玲等[12]的方法计算花前干物质转移量、转移物质贡献率等指标,具体计算方法如下:

花前干物质转移量(kg/hm^2) = 开花期地上部分干物质积累量 - 成熟期地上部分营养器官干物质量

转移物质贡献率(%) = 干物质转移量/籽粒产量 ×100

1.2.3 产量和穗部农艺结构　各小区收获全部穗,晾晒后用小区脱粒机脱粒并称重,用 PM - 8188 New 型谷物水分测定仪测试称重时的籽粒水分含量。各小区取样损失面积为 0.5 m^2,根据小区籽粒产量、含水量以及实际收获面积折算 13% 含水量下的单产和氮素农学利用效率。具体计算方法如下:

产量(kg/hm^2) = 小区实收产量 ×(1 - 籽粒称重时含水量) ×10000/[(12-0.5) ×0.87]

氮素农学利用效率(kg/kg) = (施氮区籽粒产量 - 空白区籽粒产量)/施氮量

收获籽粒混合均匀后随机数出两个 500 粒称重计算千粒重,两份样品重量差数与平均数之比保持在 5% 以内。在成熟期干物质测定的样本中随机取 30 个穗调查穗部农艺性状,包括穗长、小穗数、退化小穗数和穗粒数等。

1.2.4 灌浆参数　初花期每个小区标记长势一致且同一天开花的 100 个穗,在开花 7 d 后每隔 5 d 取 10 穗,将每穗粒剥出,统计数目后烘干称重。采用 Logistic 方程[$W = K/(1 + e^{A+Bx})$]对其干物质积累过程进行模拟(决定系数 R^2 均在 0.99 以上),其中 W 为观测的籽粒质量,x 为开花至观测时的天数,A 和 B 为方程对不同处理确定的参数,K 为拟合最大籽粒质量[13]。

对该方程求一阶导数 W′,可得籽粒生长速率方程,并可得到以下积累特征参数:

籽粒生长起始势 $C_0 = K/(1 + e^A)$;

籽粒最大灌浆速率出现的时间 $T_{max}(d) = -A/B$;

最大灌浆速率

$R_{max}[g/(1000\ 粒 \cdot d)] = -KB/4$。

灌浆速率曲线的 2 个拐点:

$t_{1,2} = -(A \pm 1.317)/B$;

有效灌浆期 $T_{0.99K} = -(4.59512 + A)/B$;

渐增期灌浆速率 $R_1 = K/(1 + e^{A-Bt1})/t_1$;

快增期灌浆速率 $R_2 = [K/(1 + e^{A-Bt2}) - K/(1 + e^{A-Bt1})]/(t_2 - t_1)$;

缓增期灌浆速率 $R_3 = [K/(1 + e^{A-BT0.99K}) - K/(1 + e^{A-Bt2})]/(T_{0.99K} - t_2)$;

平均灌浆速率 $R = K/(1 + e^{A-BT0.99K})/T_{0.99K}$。

1.3　数据分析

采用 Excel 2003 和 DPS v12.50 软件对数据进行整理、统计分析和作图。

2　结果与分析

2.1　主要性状的联合方差分析

试验产量、产量结构及不同生育期干物质积累量、叶面积指数的联合方差分析结果(表 1 和表 2)表明,施氮水平、品种以及年际间气候条件均对产量及各构成因子有显著的影响,施氮水平对产量的影响大于品种和年份,品种对穗粒数的影响效应大于施氮量和年份,而年份对有效穗数、千粒重、收获指数的影响更大。两因素互作对产量、有效穗数、单位

面积粒数和收获指数均无明显影响,但施氮量与品种、品种与年份互作对穗粒数和千粒重有显著或极显著影响。施氮量、品种与年份三者无明显的互作效应(表1)。

施氮水平、品种以及年份对分蘖、拔节期的干物质积累量和叶面积指数有极显著影响,尤其是年份影响效应更大。2012年小麦分蘖阶段雨水充沛,群体数量大,干物质积累量多;而2013年分蘖期降雨较常年明显偏低,分蘖数受影响,干物质积累量也明显低于2012年。虽然施氮量、年份对开花期、成熟期的干物质积累量也有显著影响,但品种间差异已不显著,而且年份的影响也低于分蘖和拔节阶段。除拔节期干物质积累量和叶面积指数具有施氮量和年份互作效应、开花期叶面积指数存在品种与年份互作效应外,其他生育期的干物质积累量和叶面积指数无两者或三者的互作效应(表2)。

表1 产量和产量结构的联合方差分析

Table 1 Combined analysis of variances of grain yield and yield components

项目 Item	*df*	产量 Yield	有效穗 Fertile spike	穗粒数 Grains per spike	单位面积粒数 Unit area grains	千粒重 1000-grain weight	收获指数 Harvest index
氮 Nitrogen(N)	4	104.8**	79.6**	8.0**	83.0**	41.9**	4.9**
品种 Cultivar(C)	1	31.4**	68.4**	38.9**	12.4**	23.6**	23.4**
年份 Year(Y)	1	28.8**	145.4**	7.4**	76.3**	66.6**	57.7**
N×C	4	2.3	0.4	2.7*	0.2	3.3*	0.6
N×Y	4	0.9	1.2	0.7	0.9	1.6	2.4
C×Y	1	7.7	3.0	10.6**	0.1	22.1**	0.1
N×C×Y	4	1.32	0.3	0.4	0.1	1.2	0.9

注(Note): * —$P<0.05$; ** —$P<0.01$.

表2 不同生育期干物质积累量和叶面积指数的联合方差分析

Table 2 Combined analysis of variances of dry matter accumulation and leaf area index in different growth stages

项目 Item	*df*	生物重 Dry matter accumulation				叶面积指数 Leaf area index		
		分蘖期 Tillering	拔节期 Jointing	开花期 Flowering	成熟期 Maturity	分蘖期 Tillering	拔节期 Jointing	开花期 Flowering
氮 Nitrogen (N)	4	7.1**	19.6**	27.2**	32.2**	2.7*	16.2**	50.1**
品种 Cultivar (C)	1	30.0**	41.6**	0.9	3.6	28.5**	45.7**	2.9
年份 Year (Y)	1	599.0**	188.1**	126.3**	18.7**	960.5**	2046**	24.4**
N×C	4	1.4	0.3	0.2	0.6	0.7	1.7	1.9
N×Y	4	0.2	2.9*	1.9	0.3	1.3	3.8*	2.0
C×Y	1	0.1	0.3	0.7	0.6	1.1	1.7	6.4*
N×C×Y	4	0.2	0.9	0.9	0.1	1.9	0.7	1.4

注(Note): * —$P<0.05$; ** —$P<0.01$.

2.2 产量和产量结构

虽然年际间产量和各构成因子有明显变化,但随着施氮量的增加多数参数值均呈上升趋势。同一施氮水平下CM104的产量高于NM836,两个品种均在N 135 kg/hm^{2}处理时产量达到较高水平,与N 180 kg/hm^{2}和N 225 kg/hm^{2}处理差异不显著,且较90 kg/hm^{2}处理有大幅升高。依据两年平均产量(y)和施氮量(x)的关系分别对NM836和CM104建立一元二次方程,其中NM836: $y = -0.0934x^2 + 35.991x + 6651.5$ ($P<0.01$),最高产量施氮量为

192.7 kg/hm^2，理论最高产量为 10118.7 kg/hm^2。川麦 104：$y = -0.1056x^2 + 44.023x + 6724.6$（$P < 0.01$），最高产量施氮量为 208.4 kg/hm^2，理论最高产量为 11312.8 kg/hm^2。随着施氮量的增加，氮素农学利用效率呈明显下降趋势，NM836 的降幅大于 CM104。

产量是各构成因子变化的综合结果，增施氮肥提高了有效穗数，尤其是雨水丰沛的 2012 年度增幅更为明显。穗粒数随施氮量增加的变化趋势因品种不同而异，NM836 在 90 kg/hm^2 处理时低于氮空白处理，而在 135～225 kg/hm^2 的施氮范围内保持相对稳定；CM104 随着施氮量的增加呈不断上升趋势。而千粒重随着施氮量的增加下降趋势明显，两年、两个品种表现一致。施氮量的增加还使得倒伏风险增大，尤其在 225 kg/hm^2 处理，两年 CM104 均发生了小面积的倒伏（表 3）。

表 3　施氮量对不同品种产量、产量结构及氮素农学利用效率的影响

Table 3　Effect of the N rates on yield, yield components and nitrogen agricultural utilization efficiency

年度 Year	品种 Cultivar	施氮量 N rate (kg/hm^2)	产量 Yield (kg/hm^2)	有效穗数 ES (×10^4/hm^2)	穗粒数 GNS	单位面积粒数 GNH (×10^4/hm^2)	千粒重 TGW (g)	收获指数 HI	倒伏率 LR (%)	氮农学效率 NAUE (kg/kg)
2012	NM836	0	7292 c	298.4 b	49.1 a	14648 c	51.6 a	0.46 a	0	
		90	9870 b	452.7 a	45.5 b	20621 b	48.6 b	0.45 ab	0	28.6
		135	10248 ab	471.2 a	49.2 a	23225 ab	46.0 c	0.44 ab	0	21.9
		180	10739 a	501.6 a	48.4 ab	24288 a	45.0 c	0.43 b	0	19.2
		225	10534 ab	512.3 a	49.6 a	25360 a	42.5 d	0.43 b	0	14.4
	CM104	0	6352 c	369.1 c	42.4 b	15627 c	50.6 a	0.48 a	0	
		90	9992 b	487.5 b	45.4 ab	22115 b	47.5 b	0.46 ab	0	40.4
		135	11319 a	529.1 ab	47.1 a	24944 ab	46.7 b	0.45 b	0	36.8
		180	11528 a	528.9 ab	48.8 a	25820 a	45.0 c	0.44 b	0	28.8
		225	11563 a	563.9 a	48.6 a	27403 a	44.1 c	0.46 ab	10	23.2
2013	NM836	0	5985 c	228.3 b	49.7 a	11384 b	53.0 a	0.48 a	0	
		90	8533 b	364.9 a	49.6 a	18100 a	47.9 b	0.47 a	0	28.3
		135	9211 ab	369.0 a	53.8 a	19854 a	47.9 b	0.45 a	0	23.9
		180	9494 a	383.2 a	54.2 a	20759 a	46.2 b	0.48 a	0	19.5
		225	9519 a	380.9 a	53.7 a	20427 a	44.8 c	0.46 a	0	15.7
	CM104	0	7083 c	298.7 b	41.3 b	12394 c	53.0 a	0.48 a	0	
		90	9622 b	423.7 a	46.3 ab	19601 b	52.0 ab	0.49 a	0	28.2
		135	10452 a	450.3 a	45.8 ab	20541 ab	50.7 ab	0.48 a	0	25.0
		180	10570 a	462.9 a	48.3 a	22322 a	50.7 ab	0.48 a	10	19.4
		225	11132 a	460.4 a	48.9 a	22493 a	50.1 b	0.48 a	30	18.0

注（Note）：同列数值后面不同小写字母表示同一年度、同一品种处理间差异达到 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant within the same year and cultivar among different treatments at the 5% level; ES—Effective spikes, GNS—Grain numbers per spike, GNH—Grain number per hectare; TGW—1000-grain weight; HI—Harvest index; LR—Lodging ratio; NAUE—Nitrogen agricultural utilization efficiency.

2.3　群体干物质积累量变化

干物质积累量是群体数量和个体质量的综合反映，也是产量形成的基础。随着施氮量的增加，两个品种各生育期干物质量均呈上升趋势，但 135～225

kg/hm² 范围内差异不显著。CM104 和 2012 年 NM836 在 135 kg/hm² 施氮水平下成熟期干物质量超过 18000 kg/hm²。同一施氮水平下，CM104 的干物质积累量高于 NM836，两者之间的差距生育前期大于生育后期，这可能是 CM104 分蘖力强，苗期长势旺盛所致。氮肥水平对干物质积累的影响还受气候条件影响，2012 年雨水丰沛，各生育期干物质量普遍高于 2013 年（表 4）。

表 4 施氮量对不同品种干物质积累量的影响（kg/hm²）

Table 4 Effect of the N rates on dry matter accumulation

品种 Cultivar	施氮量（kg/hm²）N rate	分蘖期 Tillering		拔节期 Jointing		开花期 Flowering		成熟期 Maturity	
		2012	2013	2012	2013	2012	2013	2012	2013
NM836	0	589.0 a	179.9 a	1530.0 b	900.9 ab	9557.5 b	7875.6 b	13475.3 b	11615.1 b
	90	719.5 a	248.3 a	2173.0 a	1132.2 ab	13265.1 a	9952.5 a	17338.8 a	15867.4 a
	135	648.2 a	248.0 a	2264.0 a	1293.0 ab	13081.4 a	10528.9 a	18892.1 a	17248.3 a
	180	691.5 a	245.1 a	2350.2 a	1275.1 ab	14088.6 a	10235.4 a	19101.6 a	16318.8 a
	225	712.1 a	264.1 a	2501.3 a	1489.0 a	13917.8 a	9753.6 a	19508.6 a	16479.3 a
CM104	0	651.5 b	237.8 c	1731.3 b	1259.9 b	9500.5 c	7956.6 b	13132.6 b	11354.5 b
	90	727.5 ab	315.9 b	2798.4 a	1414.4 b	12731.9 b	10429.5 a	17476.0 a	16745.6 a
	135	791.5 ab	363.6 ab	2685.8 a	1836.7 a	13791.7 ab	10220.6 a	19925.8 a	18399.8 a
	180	824.9 a	405.8 a	2836.7 a	1782.8 a	14604.3 a	10963.0 a	19980.7 a	18467.2 a
	225	819.2 a	369.8 ab	2743.3 a	2109.5 a	13382.9 ab	11092.6 a	20127.2 a	18267.9 a

注（Note）：同列数据后不同小写字母表示同一品种不同处理间差异达到 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significantly different among different treatments for the same cultivar at 5% level.

2.4 不同生育阶段干物质积累量

图 1 反映了各处理在不同生育阶段干物质积累量的变化，从中可以看出，拔节～开花阶段是干物质积累的高峰期。受气候条件的影响，年际间不同阶段干物质积累数量有明显差异，2012 年分蘖～开花期间的积累量高于 2013 年，但开花～成熟阶段的积累量低于 2013 年。出苗～分蘖阶段，群体小，对养分需求少，施氮量的差异并不会影响干物质积累的

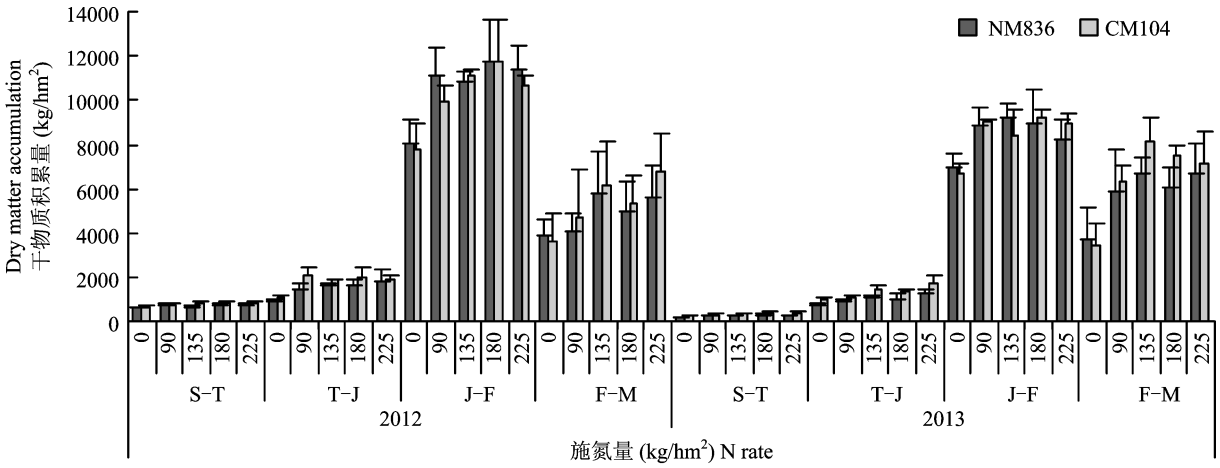

图 1 不同生育阶段干物质积累量

Fig. 1 Dry matter accumulation at different growth stages

［注（Note）：S－T—播种至分蘖期 From seeding to tillering，T－J—分蘖至拔节期 From tillering to jointing；J－F—拔节至开花期 From jointing to flowering；F－M—花期至成熟期 From flowering to maturity.］

差异,随着生育进程的推进,处理间干物质积累量差异逐渐加大,尤其是开花后,且 N 135 kg/hm^2 处理花后干物质积累量高于其他处理。

品种之间,出苗~拔节阶段,CM104 的干物质积累量要高于 NM836,但在拔节~开花阶段,两个品种差异缩小,甚至部分处理 NM836 还略有优势,但在开花后同一施氮量下 CM104 干物质积累量均高于 NM836,这可能是两个品种产量出现差异的重要原因。

2.5　开花前物质转移量及转移贡献率

籽粒产量的物质来源一是开花期储存的物质再分配,二是花后光合产物的积累,两个来源对籽粒的贡献因区域、品种、栽培措施不同而异。2012 年度,花前干物质积累量大,其在花后转移量也较高,其中 N 135 kg/hm^2 处理处于一个较低水平,而 N 90 kg/hm^{2}处理和 N 180 kg/hm^2 处理处于一个较高水平,两个品种转移的量因处理不同互有高低。2013 年,开花期干物质积累量相对较少,花后干物质转移量也较少,但和其他处理相比,N 135 kg/hm^2 处理仍处于一个较低水平, 不施氮处理和 N 90 kg/hm^2 处理处于一个较高水平(图 2)。

从转移物质对籽粒的贡献率来看(图 3),不施氮处理因籽粒绝对产量低,其花前储存物质对籽粒的贡献率较高,N 90 kg/hm^2 处理转移量大,其贡献率也较高,而 N 135 kg/hm^2 处理无论品种和年度均处于一个较低水平。除 2013 年 CM104 外,N 225 kg/hm^2 处理的转移物质贡献率也处于一个较低水平。

2.6　对灌浆特性的影响

灌浆特性的相关研究结果表明,千粒重与灌浆速率、灌浆时间均有显著或极显著的相关性,而与灌浆起始势仅有弱的相关性,籽粒初始大小并不是影

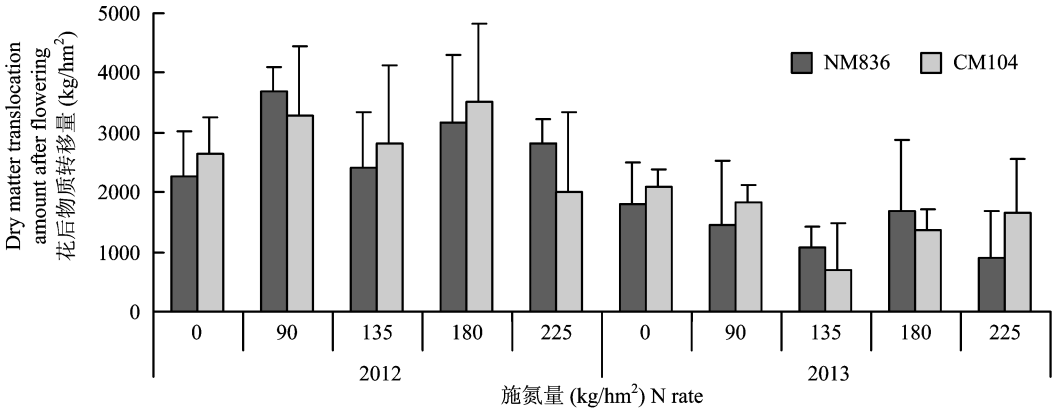

图 2　施氮量对花后物质转移量的影响

Fig. 2　Effect of the N rates on dry matter translocation amount after flowering

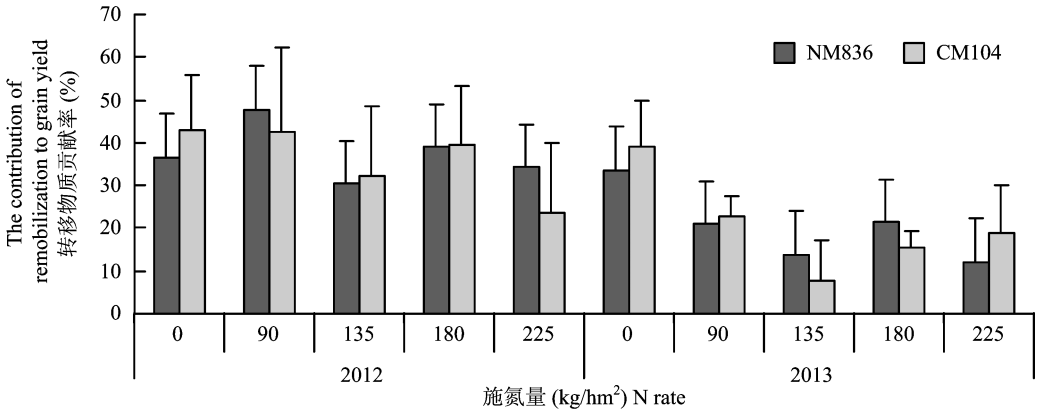

图 3　施氮量对转移物质贡献率的影响

Fig. 3　Effect of the N rates on the contribution of remobilization to grain yield

响籽粒重量的主要因素。

从整穗来看,随着施氮量的增加,平均灌浆速率和渐增期的灌浆速率呈下降趋势(图4)。对于最大灌浆速率,NM836在180 kg/hm^{2}处理时即有大幅下降,而CM104在225 kg/hm^{2}才有大幅下降。施氮对CM104灌浆时间的影响相对较小,但有降低NM836快增期和缓增期的趋势。

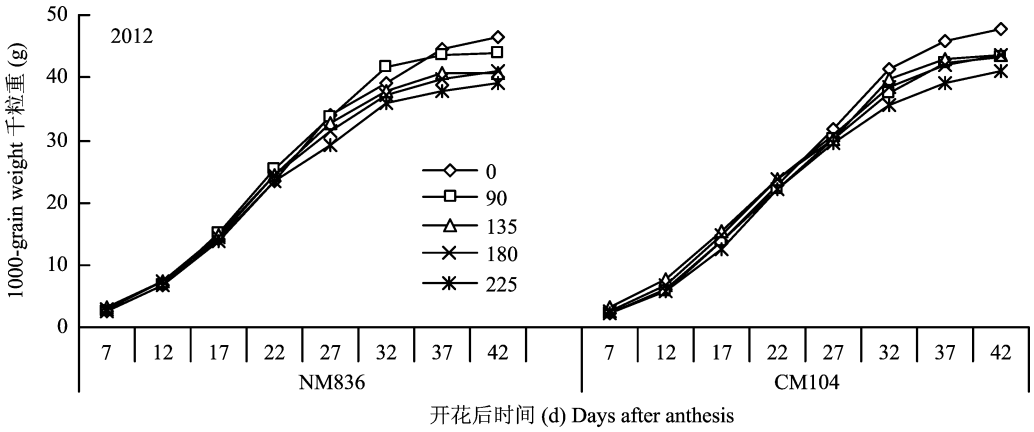

图4 施氮量对籽粒灌浆的影响

Fig. 4 Effect of the N rates on grain filling of whole spike grains

3 讨论

施氮量对光合产物的积累、转运和分配有明显影响,氮肥运筹是调控小麦物质生产的重要手段。目前生产水平下,干物质积累极值一般在18000～21000 kg/hm^2,产量一般9500～11000 kg/hm^2[2-4]。而达到极值的施氮水平区域间差异明显,黄淮地区施氮量一般240～270 kg/hm^2[14-16],长江中下游地区施氮量也需达到250 kg/hm^{2}以上[3, 17-18],较低的施氮量难以达到较高的产量目标。本研究中,随着施氮量的增加,两个品种小麦干物质积累量和产量均呈上升趋势,在135 kg/hm^{2}处理时单产即超过10000 kg/hm^2,施氮量继续增加产量增幅变小且倒伏风险增大。从干物质积累量来看,施氮135 kg/hm^{2}小麦各生育期干物质积累量均在四川盆地小麦超高产范围内[4],继续增加施氮量,干物质积累量增幅变小,相同产量目标下施氮水平较黄淮及长江中下游地区低100 kg/hm^{2}左右。

氮肥的增产效应与土壤肥力密切相关,低肥力土壤增产率高于高肥力土壤[19-20]。上世纪90年代以来,四川稻茬麦推广了以免耕和稻草覆盖为核心的保护性耕作技术,土壤肥力改善明显,典型区域土壤有机质平均含量37.7 g/kg,全氮2.2g/kg,速效氮152.3 mg/kg[21],本试验田土壤肥力也接近这一平均值,空白对照的产量达6000～7000 kg/hm^2,高于全国其他麦区[23]。虽然土壤肥力高,但本研究中氮肥的农学利用效率和偏生产率亦维持在一个较高的水平,高于多数麦区[23]。这与本区气候土壤条件、耕作栽培方式等都有关系。四川盆地水稻土保肥力强,氮肥利用效率高,在水稻、小麦上都有体现[23-24]。四川盆地小麦生长季降雨量在200 mm左右,在不灌溉的条件下即可满足小麦生长基本的需要,且地下水位低,通过地表径流和淋溶方式损失的氮素少。小麦采用免耕稻草覆盖方式栽培,这种保护性耕作技术除有保墒效果外,也可减少氮素损失[25]。以往相关研究所用的小麦品种产量潜力在7500 kg/hm^{2}左右,本试验的参试品种的生产潜力和氮肥利用效率有了进一步提升,尤其是川麦104,生物生产率高、收获指数高,在165 kg/hm^{2}的施氮量下产量可稳定突破9000 kg/hm^2[10],这些因素都利于四川稻茬麦以较少的氮肥投入获得较高的产量。大田的地力均衡性以及管理精细度都不如小区试验,四川盆地近年验收的超高产田的实际施氮量比本试验最佳施氮量135 kg/hm^{2}多10%～15%。结合高产攻关实践,四川盆地稻茬小麦9000 kg/hm^{2}的产量目标施氮量应控制在150 kg/hm^{2}上下,不宜超过180 kg/hm^2。

品种的遗传背景不同,其对氮肥的响应亦有差异。本研究中,和空白对照相比,施氮后两个品种均有不同程度增产,但同一施氮水平内麦836产量不及川麦104,且达到理论最大产量的施氮量也低于

川麦 104。以往研究表明,花后的光合产物是产量的主要来源,在营养充足的条件下花后光合产物对产量的贡献可达 90% 以上[16],品种改良的结果也是降低拔节~开花阶段的物质积累量,增加花后物质生产量[26]。本研究中,花后光合产物对产量的贡献率 NM836 平均 71.2%,CM104 平均 73.9%,两者干物质积累量的差距也主要出现在开花以后,同一施氮水平下,川麦 104 花后干物质积累量较内麦 836 高 9.7%～13.9%,川麦 104 花后叶绿素含量高、光合作用更强[27],这可能是两个品种产量出现差异的重要原因。

虽然花前物质积累对最终产量的贡献率低,但拔节~开花阶段的干物质积累量与产量也呈显著的正相关关系,尤其是对穗粒数和单位面积粒数的贡献更大。和其他区域相比,四川盆地冬小麦分蘖期较短,仅有 30～40 d,再加上寡日照等因素,群体相对较小,无论基本苗高低,花后有效茎数很难突破 $500\times10^4/hm^2$[4],产量的提升更多依靠穗粒数和千粒重的增加,拔节~开花阶段是穗分化的主要时期,干物质积累量也在一定程度上影响穗分化质量。此外,在花前建立一个高效的群体结构,也利于花后光合物质生产,增强抗逆能力,促进产量进一步提升[10]。本研究中,2012 年花前干物质积累量高,转运的储存物质对籽粒形成的贡献大(平均 36.9%),产量较花前干物质积累量较低的 2013 年有大幅增加。因此,四川盆地也需重视小麦花前物质的积累。

氮素供应不足促使营养体中的含氮、糖物质加速运出,花前储藏物质对籽粒贡献升高;施氮量增加,植株生长后期光合作用能力增强,花后光合物质对籽粒的贡献率增大[28-30],本研究中 0～135 kg/hm^2施氮范围内也有此规律。但施氮量继续增加,花后物质生产量增幅较小甚至下降,对产量的贡献率也不及 135 kg/hm^2 处理,其因主要在于花后物质转运受阻,无论平均灌浆速率、最大灌浆速率以及快增期灌浆速率,内麦 836 在 180 kg/hm^2、川麦 104 在 225 kg/hm^2 处理时均有大幅下降,千粒重随之降低,影响了产量的进一步提升。这一方面可能由于施氮量过多,中下部通风不良,群体结构恶化,光合速率下降,呼吸强度增加所致;二是氮素过量供应,叶片 C/N 下降,氮代谢旺盛,光合产物的输出量下降,对光合器官又产生了反馈抑制[31-32]。因此通过适宜的氮肥运筹,协调花前花后物质积累,保持源库畅通,促进物质向籽粒中快速转移,对于提高作物产量具有重要意义。

参 考 文 献:

[1] 丁晓义, 姜鸿明, 陈永娜, 等. 保障我国粮食安全的小麦育种目标探讨[J]. 山东农业科学, 2008, (3): 14-18.
Ding X Y, Jiang H M, Chen Y N *et al*. Research on wheat breeding aims for food safety in China[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2008, (3): 14-18.

[2] 于振文, 田奇卓, 潘庆民, 等. 黄淮麦区冬小麦超高产栽培的理论与实践[J]. 作物学报, 2002, 28(5): 577-585.
Yu Z W, Tian Q Z, Pan Q M *et al*. Theory and practice on cultivation of super high yield of winter wheat in the wheat fields of Yellow River and Huaihe River districts[J]. Acta Agronomica Sinica, 2002, 28(5): 577-585.

[3] 丁锦峰, 杨佳凤, 王云翠, 等. 长江中下游稻茬小麦超高产群体干物质积累与分配特性[J]. 麦类作物学报, 2012, 32(6): 1118-1123.
Ding J F, Yang J C, Wang Y C *et al*. Accumulation and distribution characteristics of dry matter of super high yield wheat under rice stubble in middle and lower reaches of the Yangtse River[J]. Journal of Triticeae Crops, 2012, 32(6): 1118-1123.

[4] 汤永禄, 李朝苏, 吴春, 等. 四川盆地弱光照生态区小麦超高产技术途径分析[J]. 麦类作物学报, 2013, 33(1): 51-59.
Tang Y L, Li C S, Wu C *et al*. Analysis on the technical measures for super high yield of wheat ($9\ t\cdot hm^{-2}$) in Sichuan Basin with weak light[J]. Journal of Triticeae Crops, 2013, 33(1): 51-59.

[5] 李军, 王立祥, 邵明安, 樊廷录. 黄土高原地区小麦生产潜力模拟研究[J]. 自然资源学报, 2001, 16(2): 161-165.
Li J, Wang L X, Shao M A, Fan T L. Simulation of wheat potential productivity on Loess Plateau Region of China[J]. Journal of Natural Resources, 2001, 16(2): 161-165.

[6] 王学强, 贾志宽, 李轶冰. 基于 AEZ 模型的河南小麦生产潜力研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(7): 85-90.
Wang X Q, Jia Z K, Li Y B. Evaluations on the productive potential of wheat based on AEZ model in Henan Province[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2008, 36(7): 85-90.

[7] 王宏, 陈阜, 石全红, 等. 近 30 a 黄淮海农作区冬小麦单产潜力的影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2010, 26(S1): 90-95.
Wang H, Chen F, Shi Q H *et al*. Analysis of factors on impacting potential productivity of winter wheat in Huanghuaihai agricultural area over 30 years[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(S1): 90-95.

[8] 郑成岩, 于振文, 马兴华, 等. 高产小麦耗水特性及干物质的积累与分配[J]. 作物学报, 2008, 34(8): 1450-1458.
Zheng C Y, Yu Z W, Ma X H *et al*. Water consumption characteristic and dry matter accumulation and distribution in high-yielding wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34(8): 1450-1458.

[9] 田中伟, 王方瑞, 戴廷波, 等. 小麦品种改良过程中物质积累转运特性与产量的关系[J]. 中国农业科学, 2012, 45(4):

801-808.

Tian Z W, Wang F R, Dai T B *et al*. Characteristics of dry matter accumulation and translocation during the wheat genetic improvement and their relationship to grain yield[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(4): 801-808.

[10] 汤永禄, 李朝苏, 吴春, 等. 四川盆地单产9000 kg/hm^{2}以上超高产小麦品种产量结构与干物质积累特点[J]. 作物学报, 2014, 40(1): 134-142.

Tang Y L, Li C S, Wu C *et al*. Yield component and dry matter accumulation in wheat varieties with 9000 kg/ha yield potential in Sichuan Basin[J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(1): 134-142.

[11] 李俊, 魏会廷, 杨粟洁, 等. 川麦42的1BS染色体臂对小麦主要农艺性状的遗传效应[J]. 作物学报, 2009, 35(12): 2167-2173.

Li J, Wei H T, Yang S J *et al*. Genetic effects of 1BS chromosome arm on the main agronomic traits in Chuanmai 42[J]. Acta Agronomica Sinica, 2009, 35(12): 2167-2173.

[12] 周玲, 王朝辉, 李富翠, 等. 不同产量水平旱地冬小麦品种干物质累积和转移的差异分析[J]. 生态学报, 2012, 32(13): 4123-4131.

Zhou L, Wang C H, Li F C *et al*. Analysis of dry matter accumulation and translocation for winter wheat cultivars with different yields on dryland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(13): 4123-4131.

[13] 孙花, 柴守玺, 刘小娥, 常磊. 不同熟期小麦籽粒灌浆特性的研究[J]. 甘肃农业大学学报, 2009, 44(6): 12-18.

Sun H, Chai S X, Liu X E, Chang L. Studies on grain filling characteristics in different maturity type wheat[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2009, 44(6): 12-18.

[14] 于振文, 潘庆民, 姜东, 等. 9000 kg/公顷小麦施氮量与生理特性分析[J]. 作物学报, 2003, 29(1): 37-43.

Yu Z W, Pan Q M, Jiang D *et al*. Analysis of the amount of nitrogen applied and physiological characteristics in wheat of the yield level of 9000 kg per hectare[J]. Acta Agronomica Sinica, 2003, 29(1): 37-43.

[15] 林琪, 侯立白, 韩伟. 不同肥力土壤下施氮量对小麦子粒产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(6): 561-567.

Lin Q, Hou L B, Han W. Effects of nitrogen rates on grain yield and quality of wheat in different soil fertility[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(6): 561-567.

[16] 张法全, 王小燕, 于振文, 等. 公顷产10000 kg小麦氮素和干物质积累与分配特性[J]. 作物学报, 2009, 35(6): 1086-1096.

Zhang F Q, Wang X Y, Yu Z W *et al*. Characteristics of accumulation and distribution of nitrogen and dry matter in wheat at yield level of ten thousand kilograms per hectare[J]. Acta Agronomica Sinica, 2009, 35(6): 1086-1096.

[17] 石祖梁, 顾克军, 杨四军. 氮肥运筹对稻茬小麦干物质、氮素转运及氮素平衡的影响[J]. 麦类作物学报, 2012, 32(6): 1128-1133.

Shi Z L, Gu K J, Yang S J. Effect of nitrogen application on translocation of dry matter and nitrogen and nitrogen balance in winter wheat under rice-wheat rotation[J]. Journal of Triticeae Crops, 2012, 32(6): 1128-1133.

[18] 杜世州, 曹承富, 张耀兰, 等. 氮素运筹对淮北地区超高产小麦养分吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(1): 9-15.

Du S Z, Cao C F, Zhang Y L *et al*. Effects of nitrogen application on nitrogen absorption, utilization in super-high-yielding wheat in Huaibei region[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(1): 9-15.

[19] 王月福, 姜东, 于振文, 曹卫星. 高低土壤肥力下小麦基施和追施氮肥的利用效率和增产效应[J]. 作物学报, 2003, 29(4): 491-495.

Wang Y F, Jiang D, Yu Z W, Cao W X. Nitrogen use efficiency and yield of wheat with basal and top-dressed nitrogen fertilizers in soils with different fertility[J]. Acta Agronomica Sinica, 2003, 29(4): 491-495.

[20] 高国华. 不同肥力土壤小麦施氮增产效应及氮肥利用率研究[J]. 河南科技学院学报(自然科学版), 2012, 40(3): 11-15.

Gao G H. Effect of nitrogen application on yield-increasing and nitrogen use efficiency of wheat in different fertility soils[J]. Journal of Henan Institute of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2012, 40(3): 11-15.

[21] 李向东, 陈源泉, 汤永禄, 等. 集约多熟稻田长期保护性耕作条件下土壤养分变化分析[A]. 高旺盛, 孙占祥. 中国农作制度研究进展2008[C]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2008. 392-398.

Li X D, Chen Y Q, Tang Y L *et al*. Soil fertility change analysis of intensive multiple-cropping paddy fields with conservation farming system [A]. Gao W S, Sun Z X. Chinese Farming System Research Progress in 2008[C]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 2008. 392-398.

[22] 王旭, 李贞宇, 马文奇, 张福锁. 中国主要生态区小麦施肥增产效应分析[J]. 中国农业科学, 2010, 43(12): 2469-2476.

Wang X, Li Z Y, Ma W Q, Zhang F S. Effects of fertilization on yield increase of wheat in different agro-ecological regions of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(12): 2469-2476.

[23] 陈安强, 雷宝坤, 鲁耀, 等. 南方山地丘陵区考虑水稻产量和生态安全的容许施氮量[J]. 农业工程学报, 2013, 29(9): 131-139.

Chen A Q, Lei B K, Lu Y *et al*. Study on nitrogen application rate tolerance based on rice yield and ecological security in hilly areas of South China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(9): 131-139.

[24] 范明生, 刘学军, 江荣风, 等. 覆盖旱作方式和施氮水平对稻-麦轮作体系生产力和氮素利用的影响[J]. 生态学报, 2004, 24(11): 2591-2596.

Fan M S, Liu X J, Jiang R F *et al*. Effects of non-flooded

mulching cultivation and N rates on productivity and N utilization in rice-wheat cropping systems [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(11): 2591-2596.

[25] 武际, 郭熙盛, 鲁剑巍, 等. 连续秸秆覆盖对土壤无机氮供应特征和作物产量的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(9): 1741-1749.
Wu J, Guo X S, Lu J W *et al*. Effects of continuous straw mulching on supply characteristics of soil inorganic nitrogen and crop yields [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(9): 1741-1749.

[26] 田中伟, 王方瑞, 戴廷波, 等. 小麦品种改良过程中物质积累转运特性与产量的关系[J]. 中国农业科学, 2012, 45(4): 801-808.
Tian Z W, Wang F R, Dai T B *et al*. Characteristics of dry matter accumulation and translocation during the wheat genetic improvement and their relationship to grain yield [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(4): 801-808.

[27] 汤永禄, 李朝苏, 吴晓丽, 等. 人工合成小麦衍生品种的物质积累、冠层结构及群体光合特性[J]. 中国农业科学, 2014, 47(5): 844-855.
Tang Y L, Li C S, Wu X L *et al*. Accumulation of dry matter, canopy structure and photosynthesis of synthetic hexaploid wheat-derived high-yielding varieties grown in Sichuan Basin, China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(5): 844-855.

[28] 张均华, 刘建立, 张佳宝, 等. 施氮量对稻麦干物质转运与氮肥利用的影响[J]. 作物学报, 2010, 36(10): 1736-1742.
Zhang J H, Liu J L, Zhang J B *et al*. Effects of nitrogen application rates on translocation of dry matter and utilization of nitrogen in rice and wheat [J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(10): 1736-1742.

[29] 孙旭生, 林琪, 李玲燕, 等. 氮素对超高产小麦生育后期光合特性及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(5): 840-844.
Sun X S, Lin Q, Li L Y *et al*. Effects of nitrogen supply on photosynthetic characteristics at later developing stages and yield in super high-yield winter wheat [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14(5): 840-844.

[30] Gaju O, Allard V, Martre P *et al*. Nitrogen partitioning and remobilization in relation to leaf senescence, grain yield and grain nitrogen concentration in wheat cultivars [J]. Field Crops Research, 2014, 155: 213-223.

[31] 肖凯, 张荣铣, 钱维朴. 氮素营养对小麦群体光合碳同化作用的影响及其调控机制[J]. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(3): 235-243.
Xiao K, Zhang R X, Qian W P. The effect and regulating mechanism of nitrogen nutrition on canopy photosynthetic carbon assimilatoin in wheat [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1999, 5(3): 235-243.

[32] 蔡瑞国, 张敏, 戴忠民, 等. 施氮水平对优质小麦旗叶光合特性和子粒生长发育的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(1): 49-55.
Cai R G, Zhang M, Dai Z M *et al*. Effects of nitrogen application rate on flag leaf photosynthetic characteristics and grain growth and development of high-quality wheat [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(1): 49-55.