植物营养与肥料学报 2014,20(2):271 -279
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2014.0202

施氮量对四川盆地机播稻茬麦生长发育及氮素利用的影响

李朝苏[1,2], 汤永禄[1,2*], 吴 春[1], 吴晓丽[1], 黄 钢[1]
(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 南方丘陵区节水农业研究四川省重点实验室,四川成都 610066)

摘要: 2010～2012 年,在四川省广汉市开展了施氮量对机播稻茬小麦生长发育和氮素利用效率影响的研究,试验设置 0、105、150、195 kg/hm^2 4 个施氮水平。结果表明,施氮量增加有利于稻茬麦分蘖力、有效穗数的提高以及单穗小穗数、穗粒数的增加,但对籽粒灌浆充实不利。不同年份和土壤质地,单产均以施氮量为 150 kg/hm^2 时达到最高水平,继续增加氮素用量产量增幅变小进而下降。氮素供应量增加,植株氮素含量和积累量均有不同程度升高,但氮素农学利用率、氮素生产效率、氮素吸收效率、氮素利用效率等参数呈下降趋势,氮素收获指数、氮素表观回收率在各施氮处理间变幅相对较小。在四川盆地目前生产水平下,施氮 150 kg/hm^2 可以获得较高的产量和经济效益。

关键词: 氮; 稻茬麦; 产量; 氮素利用
中图分类号: S147. 22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2014)02-0271-09

Effect of N rates on growth, development and N utilization of mechanical sowing wheat in rice-wheat cropping system in Sichuan Basin

LI Chao-su[1,2], TANG Yong-lu[1,2*], WU Chun[1], WU Xiao-li[1], HUANG Gang[1]
[*1 Crop Research Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Biology and Genetic Breeding of Wheat (Southwest), Ministry of Agriculture, Chengdu, Sichuan 610066, China; 2 Key Laboratory of Water-saving Agriculture for Hilly Areas of Southern China in Sichuan Province, Chengdu, Sichuan 610066, China*]

Abstract: The effects of different N application rates on the growth, development and N utilization of mechanical sowing wheat in rice-wheat cropping system were studied from 2010 to 2012 in Guanghan City, Sichuan Province. Four N rates were designed: 0, 105, 150 and 195 kg/ha in the experiments. The results show that the increase of N rate is good for increasing the tillering ability, the numbers of effective spike, spikelet and grain per spike, but a bit of unfavorate to the grain filling. The highest yield were achieved when the N rate was 150 kg/ha in the two growing seasons and all the experimental sites with different soils textures., When the N application rate were higher than 150 kg/ha, the yield increase less or even start to decline. Although the N accumulation and N content in the plants are continuing increase, the corresponding N agricultural use efficiency, N productivity efficiency, N uptake efficiency and N utilization efficiency are all declined, and the N harvest index and apparent N recovery efficiency have no significantly changes from 105 kg/ha to 195 kg/ha. Therefore, applying 150 kg/ha is recommended for higher yield and highest profit in the current production levels of Sichuan Basin.

Key words: N; wheat after rice; yield; N use efficiency

收稿日期: 2013-05-02 **接受日期:** 2013-09-24
基金项目: 国家小麦产业技术体系(CARS-3); 四川省科技支撑计划项目(2011NZ0098-15,2010NZ0104)资助。
作者简介: 李朝苏(1980—),男,山东菏泽人,副研究员,主要从事作物高产栽培技术研究。E-mail: xiaoli1755@163.com
* 通信作者 Tel: 028-84504601, E-mail: ttyycc88@163.com

氮是作物生长发育所必需的大量元素,一定范围内,随着施氮量增加,小麦干物质积累量及产量均呈上升趋势[1-7]。受生态条件、土壤质地、耕作方式、品种特性等因素影响,不同环境下小麦高产所需外源氮量及氮素利用效率存在明显差异[4-13]。主要分布于黄淮地区的旱茬小麦的氮素营养生理研究较为深入,而主要分布于长江流域的稻茬麦相关研究相对较少。稻茬麦区光热资源丰富,降雨较多,地下水位高,生长期受水资源限制作用小,是我国小麦增产潜力最大的区域[14-16]。

位于长江上游的四川盆地是稻茬麦集中分布区,本区稻茬田质地粘重,适耕性差,缺乏配套播种机具,目前生产中多采用人工免耕撒播方式播种,群体质量差,产量潜力低。为有效扭转稻茬麦生产的不利局面,四川省农业科学院联合农机部门研制成功了重量轻、适应性强的2BMFDC-6型免耕播种机,配合前作水稻采用半喂入式收割机收获、稻草粉碎还田,免耕条件下,一次作业就可以完成播种、施肥、盖种、覆草过程,效率1.2 hm^2/d 以上[17]。该机具已在四川盆地主要县市以及重庆、湖北的部分县市示范推广。以该播种机为基础,于2010～2012年在四川省广汉市开展了不同施氮量对机播稻茬麦生长发育及氮素利用效率影响的研究,为稻茬麦高产高效栽培技术的熟化完善提供理论和技术依据。

1 材料和方法

1.1 试验设计

试验于2010～2012年在四川省广汉市连山镇的两种质地土壤中进行,试验地0—20 cm土壤基础肥力见表1。前作水稻采用久保田PRO-488型半喂入式收割机收获,收获时稻草被切碎成5～8 cm小段,自然分散于田间,免耕条件下采用2BMFDC-6型播种机施肥播种。

试验设4个施氮水平,分别为0、105、150、195 kg/hm^2,重复4次,每个处理面积200 m^2。两年的氮肥分配比例略有不同,2010～2011年,施氮处理在播种时施化学纯氮90 kg/hm^2,在分蘖期追施不同比例氮素以达到设计氮量。2011～2012年,各处理氮肥基追比例均为6∶4,分蘖期追肥。施氮各处理磷钾用量保持一致。底肥用三元复合肥(N、P_2O_5、KO_2含量均为15%,成都市新都化工有限公司生产),追肥用尿素。参试品种为川麦42,各处理播种量和播种期一致。其他田间管理同当地高产田。

表1 试验地土壤基础肥力

Table 1 Basic soil fertility of the experimental fields

年度 Year	土壤质地 Soil texture	有机质 OM (%)	全氮 Total N (%)	全磷 Total P (%)	全钾 Total K (%)	速效氮 Avail. N (mg/kg)	速效磷 Avail. P (mg/kg)	速效钾 Avail. K (mg/kg)
2011	粘壤 Clay loam	4.24	0.25	0.10	1.60	222.8	8.31	116.8
2012	粘壤 Clay loam	4.86	0.26	0.11	1.72	185.3	11.11	130.4
	砂壤 Sandy loam	4.05	0.20	0.14	1.70	166.3	16.80	92.2

1.2 测定项目及方法

1.2.1 群体茎蘖变化 小麦出苗后每小区沿对角线方向随机确定3点,每点1.1 m^2,将边界确定,在完全出苗后、最高分蘖期以及灌浆后期调查样方内的总茎数或穗数,并计算单株分蘖数和成穗率,具体计算方法如下:

单株分蘖数=最高分蘖期茎蘖数/基本苗

成穗率=灌浆后期有效穗数/最高分蘖期茎蘖数×100%

1.2.2 产量和成熟期农艺性状 于成熟期在茎蘖调查点附近挖方测产,同时取连续的30个有效茎调查植株农艺性状。挖方面积4.0 m^2,将穗子晒干后脱粒称重,用PM-8188型谷物水分测定仪测定籽粒含水率,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,根据实际含水率计算标准水分(13%)下的产量和千粒重。穗部农艺性状调查内容包括穗粒数、小穗数、结实小穗数,调查结束后将籽粒和营养器官分开于70℃下烘干称重计算经济系数。

1.2.3 成熟期植株氮素积累和分配 成熟期农艺性

状调查结束后,同一处理的Ⅰ与Ⅱ重复、Ⅲ与Ⅳ重复同部位样品等量混合,采用常规方法测试氮、磷、钾含量。2011 年,分营养器官和籽粒两部分测试;2012 年,分茎鞘、叶片、穗轴 + 颖壳以及籽粒四部分测试。根据各器官干物质积累量和氮素质量分数计算氮素积累量。

1.2.4 氮素利用效率　根据成熟期产量、氮素积累量计算氮素利用效率相关参数,具体计算方法如下[18]:

氮肥农学利用率 =(施氮区的籽粒产量 - 氮空白区籽粒产量)/施氮量

氮肥生产效率 = 籽粒产量/施氮量

氮素吸收效率 = 植株氮素积累量/施氮量

氮素利用效率 = 籽粒产量/植株氮素积累量

氮素收获指数 = 籽粒氮素积累量/植株氮素积累量

氮素表观回收率 =(施氮区的植株氮素积累量 - 氮空白区植株氮素积累量)/施氮量

1.3　数据分析

采用 Excel 2003 和 DPS v 12.50 软件对数据进行整理、统计分析和作图。

2　结果与分析

2.1　施氮量对机播稻茬麦生长发育和产量的影响

2.1.1 分蘖和成穗　在基本苗一致的情况下,机播小麦的分蘖力随施氮量的增加而增强,但增幅因年份和土壤质地不同而异。2010 ~ 2011 年,分蘖期温度较常年偏低,施氮处理的单株分蘖数比空白对照高 42.0% ~ 68.6%,在 195 kg/hm^2 处理时达到最大值。2011 ~ 2012 年,施氮处理的单株分蘖数和最高分蘖数也显著高于空白对照,但同一氮量下砂壤分蘖力不及粘壤(表 2)。

施氮量增加也利于群体穗数的增加。2011 年,处理间成穗率差异虽不显著,但施氮处理的有效穗数较空白对照增加 40.1% ~ 56.7%,在 195 kg/hm^2 处理时达到最大值,且显著高于 105 kg/hm^2 处理。2012 年,两类土壤上施氮处理的成穗率和有效穗均显著高于空白对照,其中粘壤穗数增加 39.1% ~ 51.6%,砂壤增加 32.9% ~ 46.4%。同一氮素水平下,砂壤的成穗率高于粘壤,但两者有效穗数差异较小。

表 2　施氮量对机播稻茬小麦分蘖、成穗的影响

Table 2　Effect of nitrogen fertilization rate on tillering and spike formation of mechanical sowing wheat after rice

年份 Year	土壤质地 Soil texture	施氮量 N rate (kg/hm^2)	基本苗数 Basic seedlings (×10^4/hm^2)	最高分蘖数 Maximum tillers (×10^4/hm^2)	有效穗数 Productive spikes (×10^4/hm^2)	单株分蘖数 Tillers per plant	成穗率(%) Productive spike percent.
2010 ~ 2011	粘壤 Clay loam	0	237.8 a	669.4 c	303.1 c	2.83 c	45.3 a
		105	225.2 a	905.5 b	424.5 b	4.02 b	47.3 a
		150	229.3 a	997.0 ab	454.4 ab	4.37 ab	45.6 a
		195	218.4 a	1040.6 a	475.0 a	4.77 a	45.8 a
2011 ~ 2012	粘壤 Clay loam	0	286.2 a	556.9 c	298.5 c	1.95 c	53.7 b
		105	284.0 a	640.7 b	415.1 b	2.26 b	64.8 a
		150	268.9 a	727.3 a	452.6 a	2.71 a	62.5 a
		195	280.4 a	680.2 ab	436.7 ab	2.43 ab	64.2 a
	砂壤 Sandy loam	0	285.3 a	455.4 b	300.8 c	1.60 b	66.3 c
		105	290.7 a	560.2 a	399.8 b	1.93 a	71.4 bc
		150	272.3 a	554.1 a	431.1 ab	2.03 a	77.8 a
		195	280.4 a	571.4 a	440.2 a	2.04 a	77.1 ab

注(Note):同列数据后不同字母表示同一年度同一土壤质地数据间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column mean significantly different at the 5% level in the same year and the same soil texture.

2.1.2 成熟期干物质分配　以2012年数据为例(表3),两种土壤中,施氮处理各器官的干物质积累量均显著高于空白对照,但各施氮处理在营养器官的干物质积累量差异不显著。粘壤中,150 kg/hm^2 施氮处理的籽粒干重显著高于空白对照和105 kg/hm^2 处理;砂壤中各施氮处理间籽粒干重差异不显著。

从各器官分配比例来看,粘壤在不施氮或者施氮水平较低(105 kg/hm^2)时,干物质更多的积累在叶片和茎鞘中,增加施氮量有利于提高干物质在籽粒中的分配比例。砂壤中,氮空白处理叶片干物质分配比例略低于施氮处理,其他器官分配比例与施氮处理差异较小。

表3　施氮量对机播稻茬小麦成熟期干物质分配的影响(2012)

Table 3　Dry matter distribution in different organs at the maturity stage for mechanical sowing wheat after rice

土壤质地 Soil texture	施氮量 N rate (kg/hm^2)	分配量 Distribution amount (kg/hm^2)				分配比例 Distribution proportion(%)			
		叶片 Leaf	茎鞘 Stem & sheath	穗轴颖壳 Spike axis & husk	籽粒 Kernel	叶片 Leaf	茎鞘 Stem & sheath	穗轴颖壳 Spike axis & husk	籽粒 Kernel
粘壤 Clay loam	0	882.6 b	3770.7 b	1265.2 b	4139.6 c	8.8	37.5	12.6	41.2
	105	1491.3 a	5659.9 a	2013.8 a	6679.8 b	9.4	35.7	12.7	42.2
	150	1394.9 a	5788.0 a	2183.0 a	7738.5 a	8.2	33.8	12.8	45.2
	195	1426.3 a	5620.9 a	2075.8 a	7356.7 ab	8.7	34.1	12.6	44.6
砂壤 Sandy loam	0	658.7 b	3296.7 b	1248.2 b	4120.8 b	7.1	35.4	13.4	44.2
	105	1491.1 a	5465.0 a	2077.9 a	7020.9 a	9.3	34.0	13.0	43.8
	150	1357.4 a	5383.5 a	2034.3 a	6937.8 a	8.6	34.3	12.9	44.1
	195	1507.7 a	5889.5 a	2198.1 a	7577.6 a	8.8	34.3	12.8	44.1

注(Note):同列数据后不同字母表示同一年度同一土壤质地数据间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column mean significantly different at the 5% level in the same year and the same soil texture.

2.1.3 产量和穗粒结构　两种土壤中,随着施氮量增加籽粒产量均呈上升趋势(表4)。粘壤中,两年结果均以150 kg/hm^2 处理籽粒产量显著高于空白和105 kg/hm^2 处理,与195 kg/hm^2 处理差异不显著,砂壤中各施氮处理籽粒产量无显著差异,但都显著高于氮空白处理,增幅73.2%～85.7%。

施氮量对穗粒结构的影响因指标不同而异。增加施氮量利于有效穗数的增加及单穗小穗数、结实小穗数、穗粒数的提高,但千粒重呈下降趋势,尤其是粘壤,两年处理间千粒重差异均达显著水平,在倒伏较早的2012年,千粒重随施氮量增加降幅更大。粘壤中,增加施氮量利于经济系数的提高,砂壤中各处理间经济系数差异不显著。

2.2　施氮量对机播稻茬麦氮素利用效率的影响

2.2.1 氮积累分配　各器官氮素积累量随施氮量增加呈显著上升趋势,尤其是茎鞘、籽粒部位,两种土壤表现基本一致。氮素分配比例因器官和土壤质地不同而异,粘壤中,茎鞘中氮素分配比例随施氮量的增加呈上升趋势,而籽粒中呈下降趋势。砂壤中,空白处理氮在叶片、茎鞘中分配比例较低,籽粒中分配比例较高;而施氮各处理的氮更多积累在营养器官中,在籽粒中分配比例相对较低,尤其是105 kg/hm^{2}处理(表5)。

2.2.2 氮素利用率　随着施氮量的增加,植株氮素积累量呈上升趋势,在195 kg/hm^2 处理时达到最大值,处理间差异显著,不同年际、不同土壤质地中表现一致。而氮素生产效率、氮素吸收效率和氮素利用效率等参数随着施氮量的增加呈下降趋势,处理间差异显著。2011年,粘壤中氮素农学利用率处理间差异不显著;但在2012年,两种土壤中随着施氮量的增加也呈显著下降趋势。氮素收获指数、氮素表观回收率等参数处理间差异相对较小(表6)。

表 4　施氮量对机播稻茬小麦产量和穗粒结构的影响

Table 4　Yield and ear kernel component of mechanical sowing wheat after rice

年份 Year	土壤质地 Soil texture	施氮量 N rate (kg/hm^2)	单产 Yield (kg/hm^2)	有效穗 ES (×10^4/hm^2)	穗粒数 GNS	千粒重 TGW (g)	小穗数 SS	结实小穗 FSS	经济系数 HI	倒伏比例 LR (%)
2011	粘壤 Clay loam	0	3876.2 c	303.1 c	27.5 c	52.8 a	19.8 c	14.2 c	0.36 b	0
		105	5621.2 b	424.5 b	30.1 bc	50.8 b	21.2 b	15.6 b	0.37 b	0
		150	6465.1 a	454.4 ab	32.7 ab	49.9 c	21.7 b	16.2 ab	0.40 a	10
		195	6826.3 a	475.0 a	34.9 a	48.9 d	22.4 a	16.9 a	0.40 a	50
2012	粘壤 Clay loam	0	4579.2 c	298.5 c	32.0 c	51.6 a	19.0 c	14.3 c	0.41 b	10
		105	7248.1 b	415.1 b	38.4 b	48.9 b	20.9 b	16.7 b	0.42 b	30
		150	7734.9 a	452.6 a	39.5 b	46.0 c	21.5 ab	17.5 ab	0.45 a	60
		195	7490.7 ab	436.7 ab	42.5 a	43.3 d	22.2 a	18.5 a	0.45 a	100
	砂壤 Sandy loam	0	4170.5 b	300.8 c	33.0 b	49.9 a	16.8 b	13.2 b	0.44 a	0
		105	7226.4 a	399.8 b	38.9 a	49.7 a	20.2 a	16.7 a	0.44 a	10
		150	7554.4 a	431.1 ab	38.1 a	48.5 a	20.2 a	16.6 a	0.44 a	30
		195	7744.6 a	440.2 a	40.7 a	46.1 b	20.9 a	17.3 a	0.44 a	70

注(Note): ES—Effective spikes; GNS—Grain numbers per spike; TGW—1000-grain weight; SS—Spikelets per spike; FSS—Fertile spikelets per spike; HI—Harvest index; LR—Lodging ratio. 同列数据后不同字母表示同一年度同一土壤质地数据间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column mean significantly different at the 5% level in the same year and the same soil texture.

表 5　施氮量对机播稻茬小麦各器官氮积累和分配的影响(2012)

Table 5　N distribution in different organs at the maturity stage of wheat after rice under different N fertilization rates

土壤质地 Soil texture	施氮量 N rate (kg/hm^2)	分配量 Distribution amount (kg/hm^2)				分配比例 Distribution proportion (%)			
		叶片 Leaf	茎鞘 Stem & sheath	穗轴颖壳 Spike axis & husk	籽粒 Kernel	叶片 Leaf	茎鞘 Stem & sheath	穗轴颖壳 Spike axis & husk	籽粒 Kernel
粘壤 Clay loam	0	6.5 a	7.7 d	5.9 c	57.1 d	8.4	10.0	7.6	74.0
	105	12.9 b	14.4c	8.3 b	96.2 c	9.8	10.9	6.3	73.0
	150	14.3 b	17.5 b	11.9 a	119.1 b	8.8	10.7	7.3	73.2
	195	18.6 c	26.4 a	13.1 a	130.3 a	9.8	14.0	7.0	69.2
砂壤 Sandy loam	0	4.3 a	9.3 c	5.6 c	51.9 c	6.1	13.1	7.9	72.9
	105	13.8 b	20.0 b	11.5 ab	91.6 b	10.1	14.6	8.4	66.9
	150	13.1 b	22.7 ab	9.9 b	101.8 b	8.9	15.4	6.7	69.0
	195	16.4 b	24.3 a	12.0 a	116.4 a	9.7	14.4	7.1	68.9

注(Note): 同列数据后不同字母表示相同质地土壤上不同施氮量处理间差异达 5% 显著水平 Different letters mean values in a column significantly different at the 5% level in same soil texture.

表6 施氮量对机播稻茬小麦氮素利用效率的影响

Table 6 Effect of nitrogen fertilization rate on nitrogen utilization efficiency of mechanical sowing wheat after rice

年份 Year	土壤质地 Soil texture	施氮量 N rate (kg/hm²)	植株氮素积累量 PNAA (kg/hm²)	氮素农学利用率 NAFUE (kg/kg)	氮素生产效率 NPE (kg/kg)	氮素吸收效率 NUE (kg/kg)	氮素利用效率 NUtE (kg/kg)	氮素收获指数 NHI (kg/kg)	氮素表观回收率 ANRE (kg/kg)
2011	粘壤 Clay loam	0	110.6 d				35.0 ab	0.62 a	
		105	155.0 c	16.6 a	53.5 a	1.72 a	36.3 a	0.65 a	0.49 a
		150	193.8 b	17.3 a	43.1 b	1.29 b	33.3 ab	0.62 a	0.55 a
		195	209.6 a	15.1 a	35.0 c	1.07 c	32.6 b	0.62 a	0.51 a
2012	粘壤 Clay loam	0	77.2 d				59.4 a	0.74 a	
		105	131.8 c	25.4 a	69.0 a	1.46 a	55.2 b	0.73 a	0.61 a
		150	162.7 b	21.0 b	51.6 b	1.08 b	47.6 c	0.73 a	0.57 a
		195	188.4 a	14.9 c	38.4 c	0.97 b	39.8 d	0.69 b	0.57 a
	砂壤 Sandy loam	0	71.1 c				59.5 a	0.73 a	
		105	136.9 b	29.1 a	68.8 a	1.52 a	52.8 b	0.67 b	0.73 a
		150	147.6 b	22.6 b	50.4 b	0.98 b	51.2 b	0.69 b	0.51 b
		195	169.1 a	18.3 b	39.7 c	0.87 b	45.9 c	0.69 b	0.50 b

注(Note): PNAA—Plant nitrogen accumulation amount; NAFUE—Nitrogen agricultural fertilizer utilization efficiency; NPE—Nitrogen productivity efficiency; NUE—Nitrogen uptake efficiency; NUtE—Nitrogen utilization efficiency; NHI—Nitrogen harvest index; ANRE—Apparent nitrogen recovery efficiency. 同列数据后不同字母表示同一年度同一土壤质地数据间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column mean significantly different at the 5% level in the same year and the same soil texture.

3 讨论

适量增施氮肥具有提高小麦籽粒产量和改善蛋白质质量的双重作用[1-5,10,13],但若氮肥投入过量,不仅氮肥利用率降低,还会导致硝态氮在根区以下土层的无效积累,成为土壤、水体和大气污染的重要来源[19-20]。国内外学者广泛研究了不同生产环境下适宜的施氮水平及施氮方式[1-13, 21-26]。已有结果表明,7000～8000 kg/hm² 产量目标下,黄淮麦区施氮量一般在180～270 kg/hm²[5, 21-23],长江中下游麦区在210～300 kg/hm²[24-26],即使在较高肥力条件下,施氮量仍需达到202.5 kg/hm²[24],而四川盆地稻茬麦高产田施氮范围在135～165 kg/hm²[27]。本研究中,150 kg/hm² 施氮水平下单产已超过7500 kg/hm²,继续增加氮量增产幅度变小,倒伏风险增加。同一产量目标下施氮量较黄淮和长江中下游麦区低30 kg/hm² 以上。叶优良等研究也表明,四川小麦总产与氮肥用量的相关系数远低于山东、河南、安徽等地,且两者无显著相关关系[28]。究其原因,一方面可能源于土壤肥力的差异,另一方面可能和四川盆地小麦生育特性有关。黄淮麦区土壤有机质多在1.5%以下,全氮0.1%以下,速效氮100 mg/kg 以下;长江中下游有机质多在1.5～2.5%,全氮0.1～0.15%,速效氮100 mg/kg 左右[20, 24-25, 29]。而四川盆地稻茬麦以水稻土为主,土壤肥力相对较高,典型区域土壤有机质平均含量3.8%,全氮0.22%,速效氮152.3 mg/kg[30],本试验中两种土壤以上参数还高于平均水平。小麦一生吸收的氮肥仅1/3来源于肥料氮,2/3来源于土壤氮,培肥地力是获得小麦高产优质的基础[3, 31],四川盆地稻茬麦土壤肥力高,土壤矿质氮源丰富,较少的施氮量即可实现较高的产量目标。施入的外源氮除了被植物吸收外,30%以上会通过淋溶、挥发等途径损失掉[32-33]。四川盆地小麦全生育期较黄淮和长江中下游麦区短20～40 d,氮损失时间相应减少,且在免耕和秸秆覆盖还田条件下播种,也利于减少氮素损失和提高氮素利用率。本研究中氮素生产效率、吸收效率以及氮素利用效率等反应氮素利用率的指标均高于黄淮和长江中下游麦区的多数研究结果。

不同播种方式及施肥方式均会导致小麦根系所处的微域环境产生差异，进而影响养分吸收利用和生长发育。四川盆地生态条件下，小麦采用免耕露播方式播种，种子贴于地表，可以充分发挥其分蘖特性，施氮量一般不超过 135 kg/hm^2，以防止群体过大倒伏[27,34]。而机播小麦采用带式开沟方式播种，分蘖节处于地表以下，分蘖力相对较弱，且由于机播方式更利于秸秆腐解消耗速效养分[35]，因此需要适当增加施氮量特别是拔节期以前氮量以保证机播小麦正常的生长发育。本研究结果表明，增加施氮量可增强小麦分蘖能力，这在分蘖期温度较低，分蘖时间较长的 2010 ～2011 年表现的更为明显。由于群体数量扩大，成熟期穗数也有不同程度升高。四川小麦分蘖期短，穗容量相对较小，通过氮肥的合理施用提高分蘖力和成穗率，对于提高机播小麦单产有重要意义。

多数研究表明，施氮量增加利于稻茬麦光合产物的积累，各生育期叶片和茎鞘干物质积累量均呈显著上升趋势[26,36]。本研究中，增施氮肥也利于单茎叶面积扩大，尤其粘壤中更为明显，但单茎干重变化较小，甚至有下降趋势，增加的氮素更多是用于叶片有机物质的合成，茎鞘积累的干物质量和机械强度均有下降，灌浆阶段倒伏比例升高。由于单茎叶面积和群体数量的扩大，随着施氮量的增加叶面积指数也呈上升趋势，但在拔节～开花期间，不同土壤质地、不同年际处理间群体干重均无显著差异，成熟期处理间差异也仅在籽粒重量上面。造成这种差异的原因可能与区域生态条件有关，四川盆地冬春温度相对较高，小麦不停止生长，无明显越冬和返青期，丰富的氮素营养可促进叶片扩展，但由于植株碳氮比较低，叶片营养物质转运受阻[37]，茎秆物质充实度变差。

氮素对穗粒结构的影响程度因指标不同而异，增施氮素对穗数和穗粒数普遍具有正向作用[2,7,10]。本研究中，增加施氮量也能促进小穗和小花分化，单穗小穗数、结实小穗数以及穗粒数均有不同程度增多。郭文善等人研究表明，适当增加施氮量，并扩大后期施肥比例等能显著促进胚乳细胞分裂增殖，提高胚乳细胞充实度，增加粒重[38]。而本研究中，随着施氮量的增加，千粒重呈显著下降趋势，在一定程度上抵消了穗粒数增加的正向作用。一方面可能因为穗数和穗粒数增加，每一籽粒获得的营养供给量减少；另一方面，籽粒灌浆充实质量与花前物质储藏量和转运效率密切相关[39]，本研究中各施氮处理花前干物质积累量差异较小，且由于茎鞘干物质积累量减少和机械强度下降造成大面积倒伏，导致营养物质转运受阻，粒重下降，在倒伏时间较早的 2012 年千粒重降幅尤其明显。

氮素的吸收、运输和再分配效率是决定其利用效率高低的几个关键环节，增加氮素吸收，促进氮素向小麦籽粒中运输和积累是提高氮素利用效率的重要途径[40]。在较低肥力水平下，随着施氮量的增加，氮肥利用效率呈先升后降趋势[24]。本研究的土壤肥力较高，虽然随着施氮量的增加各器官氮素积累量呈显著上升趋势，尤其是茎鞘、籽粒部位，但氮空白处理也有较高的籽粒产量，氮素农学利用率、氮素生产效率、氮素吸收效率和氮素利用效率等参数呈显著下降趋势，产量增加的比例不及施氮量增加的比例。而氮素收获指数和表观回收率的变幅不及其他指标，这表明在本研究施氮范围内，小麦源库基本平衡，随着施氮量的增加，氮素吸收量同步增加，籽粒和植株氮素含量并可协同增加，但氮素吸收量增加并没有进一步转化为更高的经济产量。

4　结论

增加施氮量利于四川盆地机播稻茬麦分蘖成穗及穗粒数的提高，在目前生产水平下 150 kg/hm^2 施氮水平可以获得较高的产量和经济效益，继续增加氮素用量，产量和氮素利用效率下降。

参 考 文 献：

[1] Wang Q, Li F R, Zhao L *et al*. Effects of irrigation and nitrogen application rates on nitrate nitrogen distribution and fertilizer nitrogen loss, wheat yield and nitrogen uptake on a recently reclaimed sandy farmland[J]. Plant Soil, 2010, 337: 325-339.

[2] 杨晴，李雁鸣，肖凯，等. 不同施氮量对小麦旗叶衰老特性和产量性状的影响[J]. 河北农业大学学报，2002，25(4)：20－24.
Yang Q, Li Y M, Xiao K *et al*. Effect of different amount of nitrogen on flag leaf senescence and yield components of wheat [J]. J. Agric. Univ. Hebei, 2002, 25(4): 20-24.

[3] 王月福，姜东，于振文，等. 氮素水平对小麦籽粒产量和蛋白质含量的影响及其生理基础[J]. 中国农业科学，2003，36(5)：513-520.
Wang Y F, Jiang D, Yu Z W *et al*. Effects of nitrogen rates on grain yield and protein content of wheat and its physiological basis [J]. Sci. Agric. Sin., 2003, 36(5): 513-520.

[4] 石玉，于振文，王东，等. 施氮量和底追比例对小麦氮素吸收转运及产量的影响[J]. 作物学报，2006，32(12)：1860－1866.
Shi Y, Yu Z W, Wang D *et al*. Effects of nitrogen rate and ratio of base fertilizer and topdressing on uptake, translocation of nitrogen

and yield in wheat[J]. Acta Agron. Sin., 2006, 32(12): 1860-1866.

[5] 马兴华, 于振文, 梁晓芳, 等. 施氮量和底追比例对小麦氮素吸收利用及子粒产量和蛋白质含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(2): 150-155.
Ma X H, Yu Z W, Liang X F *et al*. Effects of nitrogen application rate and ratio of base and topdressing on nitrogen absorption, utilization, grain yield, and grain protein content in winter wheat [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2006, 12(2): 150-155.

[6] 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 Nutr. Fert. Sci., 2008, 14(5): 840-844.

[7] 叶优良, 王桂良, 朱云集, 等. 施氮对高产小麦群体动态、产量和土壤氮素变化的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(2): 351-358.
Ye Y L, Wang G L, Zhu Y J *et al*. Effects of nitrogen fertilization on population dynamics and yield of high-yielding wheat and on alteration of soil nitrogen[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2010, 21(2): 351-358.

[8] Rafael J, López-Bellido, Juan E *et al*. Comparative response of bread and durum wheat cultivars to nitrogen fertilizer in a rainfed Mediterranean environment: soil nitrate and N uptake and efficiency[J]. Nutr. Cycl. Agroecosys., 2008, 80: 121-130.

[9] Yadvinder-Singh, Gupta R K, Gurpreet-Singh *et al*. Nitrogen and residue management effects on agronomic productivity and nitrogen use efficiency in rice-wheat system in Indian Punjab[J]. Nutr. Cycl. Agroecosys., 2009, 84: 141-154

[10] 曹承富, 孔令聪, 汪建来, 等. 施氮量对强筋和中筋小麦产量和品质及养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(1): 46-50.
Cao C F, Kong L C, Wang J L *et al*. Effects of nitrogen on yield, quality and nutritive absorption of middle and strong gluten wheat[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2005, 11(1): 46-50.

[11] 韩胜芳, 李淑文, 吴立强, 等. 不同小麦品种氮效率与氮吸收对氮素供应的响应及生理机制[J]. 应用生态学报, 2007, 18(4): 807-812.
Han S F, Li S W, Wu L Q *et al*. Responses and corresponding physiological mechanisms of different wheat varieties in their nitrogen efficiency and nitrogen uptake to nitrogen supply[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2007, 18(4): 807-812.

[12] 郭胜利, 高会议, 党廷辉. 施氮水平对黄土旱塬区小麦产量和土壤有机碳、氮的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(4): 808-814.
Guo S L, Gao H Y, Dang T H. Effects of nitrogen application rates on grain yield, soil organic carbon and nitrogen under a rainfed cropping system in the loess tablelands of China[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2009, 15(4): 808-814.

[13] 赵广才, 常旭虹, 杨玉双, 等. 追氮量对不同品质类型小麦产量和品质的调节效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(4): 859-865.
Zhao G C, Chang X H, Yang Y S *et al*. Grain yield and quality responding to the nitrogen fertilizer operation in different quality type wheat[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2010, 16(4): 859-865.

[14] 赵俊晔, 于振文. 我国小麦生产现状与发展小麦生产能力的思考[J]. 农业现代化研究, 2005, 26(5): 344-348.
Zhao J Y, Yu Z W. Production status and development of productive capacity of wheat in China[J]. Reas. Agric Modern, 2005, 26(5): 344-348.

[15] 卢布, 丁斌, 吕修涛, 等. 中国小麦优势区域布局规划研究[J]. 中国农业资源与区划, 2010, 31(2): 6-12.
Lu B, Ding B, Lü X T *et al*. Arrangement planning of Chinese wheat ascendant regions[J]. Chin. J. Agric. Resourc. Regin. Plann., 2010, 31(2): 6-12.

[16] 钟永玲, 曹慧. 中国小麦产业发展现状、调控政策及建议[J]. 农学学报, 2011, 1(10): 49-54.
Zhong Y L, Cao H. Developmental status, regulation policy and suggestion of Chinese wheat industry[J]. J. Agric., 2011, 1(10): 49-54.

[17] 李朝苏, 汤永禄, 解立胜, 等. 2BMFDC-6 型稻茬麦半旋播种机设计与性能试验[J]. 西南农业学报, 2011, 24(2): 789-793.
Li C S, Tang Y L, Xie L S *et al*. Design and experiment of 2BMFDC-6 half-tillage seeder of wheat after rice[J]. Southwest China J. Agric. Sci., 2011, 24(2): 789-793.

[18] 于振文. 小麦产量与品质生理及栽培技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006. 92.
Yu Z W. Wheat yield, quality physiology and cultivation technology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006. 92.

[19] 吴金水, 郭胜利, 党廷辉. 半干旱区农田土壤无机氮积累与迁移机理[J]. 生态学报, 2003, 23(10): 2041-2049.
Wu J S, Guo S L, Dang T H. Mechanisms in the accumulation and movement of mineral N in soil profiles of farming land in a semi-arid region[J]. Acta Ecol. Sin., 2003, 23(10): 2041-2049.

[20] 赵俊晔, 于振文. 不同土壤肥力条件下施氮量对小麦氮肥利用和土壤硝态氮含量的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(3): 815-822.
Zhao J Y, Yu Z W. Effects of nitrogen rate on nitrogen fertilizer use of winter wheat and content of soil nitrate-N under different fertility condition[J]. Acta Ecol. Sin., 2006, 26(3): 815-822.

[21] 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 Agron. Sin., 2002, 28(5): 577-585.

[22] 曹倩, 贺明荣, 代兴龙, 等. 密度、氮肥互作对小麦产量及氮素利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 815-822.
Cao Q, He M R, Dai X L *et al*. Effects of interaction between density and nitrogen on grain yield and nitrogen use efficiency of winter wheat[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2011, 17(4): 815-822.

[23] 徐凤娇, 赵广才, 田奇卓, 等. 施氮量对不同品质类型小麦

产量和加工品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2012，18(2)：300-306.
Xu F J, Zhao G C, Tian Q Z *et al*. Effects of nitrogen fertilization on grain yield and processing quality of different wheat genotypes[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2012, 18(2): 300-306.

[24] 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]. J. Triticeae Crops, 2010, 30(1): 135-140.

[25] 张铭，蒋达，缪瑞林，等. 稻茬田肥力水平与施氮量对小麦籽粒产量和物质生产的影响[J]. 麦类作物学报，2010，30(2)：330-336.
Zhang M, Jiang D, Miao R L *et al*. Effects of different soil fertility levels and N application rate on wheat yield and matter production after rice. J. Triticeae Crops, 2010, 30(2): 330-336.

[26] 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]. J. Triticeae Crops, 2012, 32(6): 1128-1133.

[27] 农业部小麦专家指导组. 小麦高产创建示范技术[M]. 北京：中国农业出版社，2008. 255-256.
Wheat Expert Steering Group of the Ministry of Agriculture. Wheat high-yield demonstration technology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2008. 255-256.

[28] 叶优良，韩燕来，谭金芳，等. 中国小麦生产与化肥施用状况研究[J]. 麦类作物学报，2007，27(1)：127-133.
Ye Y L, Han Y L, Tan J F *et al*. Wheat production and fertilizer application in China[J]. J. Triticeae Crops, 2007, 27(1): 127-133.

[29] 俞海，黄季，Scott Rozelle，等. 中国东部地区耕地土壤肥力变化趋势研究[J]. 地理研究，2003，22(3)：380-388.
Yu H, Huang J, Scott R *et al*. Soil fertility changes of cultivated land in Eastern China[J]. Geogr. Res., 2003, 22(3): 380-388.

[30] 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.

[31] 王小燕，于振文. 不同施氮量条件下灌溉量对小麦氮素吸收转运和分配的影响[J]. 中国农业科学，2008，41(10)：3015-3024.
Wang X Y, Yu Z W. Effect of irrigation rate on absorption and translocation of nitrogen under different nitrogen fertilizer rate in wheat[J]. Sci. Agric. Sin., 2008, 41(10): 3015-3024.

[32] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境，2000，9(1)：1-6.
Zhu Z L. Loss of fertilizer N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction[J]. Soil. Environ. Sci., 2000, 9(1): 1-6.

[33] 串丽敏，赵同科，安志装，等. 土壤硝态氮淋溶及氮素利用研究进展[J]. 中国农学通报，2010，26(11)：200-205.
Chuan L M, Zhao T K, An Z Z *et al*. Research advancement in nitrate leaching and nitrogen use in soils[J]. Chin. Agric. Sci. Bull., 2010, 26(11): 200-205.

[34] 汤永禄，黄钢，袁立勋. 稻茬麦精量露播稻草覆盖高效栽培技术[J]. 作物杂志，2000，(3)：22-24.
Tang Y L, Huang G, Yuan L X. High-benefit cultivation technique of surface seeding and mulching rice straw for wheat after rice[J]. Crops, 2000, (3): 22-24.

[35] 李朝苏，汤永禄，吴春，等. 播种方式对稻茬小麦生长发育及产量建成的影响[J]. 农业工程学报，2012，28(18)：36-43.
Li C S, Tang Y L, Wu C *et al*. Effect of different sowing patterns on growth, development and yield formation of wheat after rice[J]. Trans. Chin. Soc. Agric. Eng., 2012, 28(18): 36-43.

[36] 张均华，刘建立，吕菲，等. 施氮对稻麦轮作区小麦地上器官干物质及氮素累积运转的影响[J]. 麦类作物学报，2009，29(5)：892-896.
Zhang J H, Liu J L, Lü F *et al*. Effect of nitrogen application on accumulation and transportation of matter and nitrogen in above-ground organs of wheat in rice-wheat rotation area [J]. J. Triticeae Crops, 2009, 29(5): 892-896.

[37] 刘芳，亓新华. 氮肥对冬小麦碳氮营养代谢的影响[J]. 山东农业科学，1989(5)：5-8.
Liu F, Qi X H. Effect of nitrogenous fertilizer on catabolism of carbon and nitrogen in winter wheat[J]. Shandong Agric. Sci., 1989(5): 5-8.

[38] 郭文善，方明奎，王蔚华，等. 氮素对小麦茎鞘物质贮运和籽粒发育的调节效应[J]. 江苏农业研究，2001，22(4)：1-4.
Guo W S, Fang M K, Wang W H *et al*. Effects of nitrogen on accumulation and translocation of temporary reserves in stem and leaf sheath and grain development in wheat[J]. Jiangsu Agric. Res., 2001, 22(4): 1-4.

[39] 王高武，唐建华，吴维中. 小麦抽穗前后干物质生产特点及其对穗重的影响[J]. 江苏农业学报，1988，4(2)：23-29.
Wang G W, Tang J H, Wu W Z. Characters of biomass production before and after heading and its relation to spike weight in wheat[J]. Jiangsu J. Agric. Sci., 1988, 4(2): 23-29.

[40] 赵满兴，周建斌，杨绒，等. 不同施氮量对旱地不同品种冬小麦氮素累积、运输和分配的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2006，12(2)：143-149.
Zhao M X, Zhou J B, Yang R *et al*. Characteristics of nitrogen accumulation, distribution and translocation in winter wheat on dry land[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2006, 12(2): 143-149.