

播种量和施氮量对不同基因型冬小麦干物质累积、转运及产量的影响

张小涛, 黄玉芳, 马晓晶, 叶优良*

河南农业大学资源与环境学院, 郑州450002

摘要: 本文以多穗型品种‘豫麦49-198’ (YM49-198)和大穗型品种‘周麦16’ (ZM16)为试验材料, 采用裂区试验, 研究了在施氮量为0、180、360 kg·hm⁻²和播种量为75、150、225、300 kg·hm⁻²条件下对冬小麦干物质累积、转运、分配及产量的影响。结果表明: 施氮量和播种量对小麦干物质累积量影响显著, 增加施氮量或播种量均有利于小麦干物质累积量的升高, 播种量对干物质累积的影响大于施氮量, 多穗型品种YM49-198各生育时期干物质累积量均高于大穗型品种ZM16。在最低播种量75 kg·hm⁻²下, 花前干物质转运量、转运率及对籽粒的贡献率显著高于其他播种量处理; 在播种量为150、225和300 kg·hm⁻²的小麦花后光合同化量、对籽粒的贡献率均高于花前干物质转运量和贡献率, 且均随播种量的增加而降低。施氮量和播种量对产量及构成要素的影响均达显著水平。综合考虑经济效益, 为达到9 000 kg·hm⁻²产量水平, YM49-498和ZM16的优化施氮量为180~220 kg·hm⁻², 播种量分别为150~192和213~225 kg·hm⁻²。

关键词: 小麦; 氮肥; 播种量; 干物质; 产量

小麦是我国最重要的粮食作物之一, 如何保证小麦的高产稳产是关乎国家粮食安全的重要问题。氮肥运筹和播种量调控是小麦生产过程中重要的栽培环节。曹倩等(2012)等指出高产小麦栽培可通过调节播种量和施氮量, 利用氮密互作效应, 改善群体光合效率, 从而获得高产。合适的氮肥用量可以提高分蘖成穗数, 增加光合产物的积累, 提高穗粒数和千粒重, 从而实现高产(王晨阳等1998), 而过高的氮肥投入则使无效分蘖增多, 贪青晚熟, 不利于碳水化合物向籽粒的转移, 灌浆不足而导致减产(姜丽娜等2011; 陆增根等2006; 王小燕和于振文2008); 大量试验研究表明, 种植密度对于小麦的群体结构构建、干物质累积和产量要素之间的协调发展有显著调控效应, 而不同区域、不同品种的最佳播种量却不尽相同(郭天财等2007; 廖江等2012; 师日鹏等2011; 张永丽等2004; 赵永萍等2009)。张娟(2014)、师日鹏等(2012)对氮密互作效应研究指出, 提高播种量和施氮量可显著增加小麦开花-成熟阶段干物质累积量, 在中低施氮量条件下籽粒产量随播种量的增加而增加; 高施氮量条件下, 高播种量与中播种量相比, 籽粒产量无显著差异, 但均显著大于低播种量处理。本课题组研究(叶优良等2012)表明, 施氮量270 kg·hm⁻²能实现多穗型品种‘豫麦49-498’的干物质累积量、转运和籽粒产量的最优, 大穗型品种‘兰考矮早八’则在施氮量180 kg·hm⁻²为最优。石玉和于振文(2006)认为施氮量168 kg·hm⁻²可获得较高的产量和氮肥利用率。张维军等(2014)研究指出,

‘宁冬11号’小麦施氮量为270 kg·hm⁻², 播种密度为600万粒·hm⁻²为最佳氮密组合。当前农业的高产高效更多依靠多因素之间的高效协调作用, 而前人研究多为对施氮量或播种量的单因素试验, 对施氮量、播种量、基因型互作综合效应的研究较少, 在最佳经济效益下不同基因型小麦所匹配的施氮量和播种量及产量构成要素的研究鲜见报道。因此, 本文拟通过3个氮水平、4个播种量对2个基因类型的小麦品种干物质累积、转运、分配和产量的影响分析, 探索不同施氮量和播种量对小麦生长特性的协作和补偿机制及其在不同品种间的差异, 找到最优氮密组合及最佳经济效益下的产量构成特征, 为实现小麦高产高效栽培提供理论依据。

材料与方法

1 试验地点

本试验于2014~2015年和2015~2016年在河南省禹州市顺店镇康城村(34.27° N, 113.34° E)进行, 土壤为潮土粘壤, 耕层土壤pH值为8.2, 耕层土壤N_{min}为54 kg·hm⁻², 全氮为1.04 g·kg⁻¹, 有机质含量为16.3 g·kg⁻¹, 速效钾为83.67 g·kg⁻¹, 速效磷为20.0 g·kg⁻¹, 种植模式为小麦-玉米轮作。

2 试验设计

试验设2个小麦(*Triticum aestivum* Linn)基因

收稿 2016-12-09 修定 2017-04-20

资助 国家自然科学基金(31471935)。

* 通讯作者(E-mail: ylye2004@163.com)。

型:多穗型品种‘豫麦49-198’(YM49-198)和大穗型品种‘周麦16’(ZM16);4个播种量:75、150、225和300 kg·hm⁻²,分别用D1、D2、D3和D4表示;3个施氮水平:0、180和360 kg·hm⁻²,分别用N1、N2和N3表示。氮肥为尿素(含纯氮46.4%),1/2氮肥作基施,1/2拔节期追施。磷肥为过磷酸钙(含P₂O₅12%),用量为90 kg·hm⁻²。钾肥为氯化钾(含K₂O60%),用量为90 kg·hm⁻²,磷、钾肥全部做底肥。重复3次,随机区组排列,小区面积30 m²,共计72个小区。2014年10月17日播种,2015年6月12日收获;第二季2015年10月13日播种,2016年6月7日收获。

3 样品采集及测定

3.1 干物质累积量测定

分别在小麦出苗后63 d(越冬)、128 d(返青)、158 d(拔节)、187 d(开花)和232 d(收获)5个时期采集采样区中长势均匀的20株小麦植株样品,其中10株分成茎鞘、叶、颖壳和籽粒,剩下10株保留整株。105°C杀青30 min,70°C烘干后称重。

3.2 收获期产量测定

收获期在小区收获区选择长势均匀的6 m²小麦,人工收获,晒干后脱粒称重,按13%的水分折算籽粒产量。对试验小区1 m双行单独收获进行穗数、穗粒数、千粒重的考种计算。

4 数据处理及分析方法

花前干物质转运量=开花期营养器官(叶+茎鞘)干重-成熟期营养器官(叶+茎鞘)干重;

花前干物质转运率=花前干物质转运量/开花期营养器官(叶+茎鞘)干重×100%;

花后光合同化量(输入籽粒部分)=成熟期籽粒干重-花前干物质转运量;

花前干物质转运量(花后光合同化量)对籽粒的贡献率=花前干物质转运量(花后光合同化量)/成熟期籽粒干重×100%;

根据经济学原理,经济效益达到最佳需满足边际产值等于边际成本,即施氮量和播种量需

满足最佳经济效益计算式,公式如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{Y}}{\partial N} = \frac{C_N}{P_Y} \\ \frac{\partial \bar{Y}}{\partial D} = \frac{C_D}{P_Y} \end{cases}$$

其中, $\frac{\partial \bar{Y}}{\partial N}$ 、 $\frac{\partial \bar{Y}}{\partial D}$ 是N、D的边际产量,C_N、C_D表示每千克纯氮和每千克种子的价格,P_Y表示每千

克小麦售价。按试验进行时市场价格每千克纯氮为3.48元,每千克YM49-198种子为6元,每千克ZM16种子为4.2元,每千克小麦保护价为2.32元计算(曹倩等2012;郭天财等2007;肖俊璋等1986;叶优良等2012)。

因2年实验结果规律基本一致,采用2年数据的平均值进行分析。数据采用OriginPro 2015进行分析作图,SPSS 20进行统计分析,5%显著水平。

实验结果

1 施氮量与播种量互作对小麦干物质积累、转运与分配的影响

1.1 不同施氮量和播种量组合对小麦干物质累积的影响

由表1可知,两基因型小麦干物质累积量均随生育时期的延长而不断增加,返青期后增幅明显加快,干物质累积量增长幅度以拔节-开花期最大,开花-收获期次之。一定范围内,增加施氮量和播种量均可显著提高小麦干物质累积量。高氮(N3)与中氮(N2)处理的干物质累积量则在不同播种量下存在差异,较低播种量(D1、D2)时,N2和N3处理间差异不显著;播种量增加至D3、D4时,N3处理干物质累积量显著高于N2处理。YM49-198各个生育时期干物质累积量均大于ZM16,表现出了多穗型品种的群体优势。YM49-198在收获期的干物质累积量最大的处理为D4N2,ZM16则在D3N3达到最大。高播种量D4处理下,施氮量由N3减少至N2,小麦收获期干物质累积量并没有显著降低;施氮量N3处理下,播种量D3和D4的小麦收获期干物质累积量差异不显著,说明在较高干物质累积量的基础上存在减氮减密的空间。

1.2 不同施氮量和播种量组合下小麦成熟期干物质在各器官中的积累和分配

收获期两基因型小麦各器官的干物质累积量及分配比例符合籽粒>茎鞘>穗轴+颖壳>叶片的规律(表2)。播种量和施氮量对不同基因型小麦营养器官干物质累积的影响不同。播种量小于D2时,增加施氮量显著增加了叶片、茎鞘的干物质累积量;播种量大于D3时,增加施氮量对其干物质的累积无显著影响。两个基因型小麦籽粒干重随施氮量增加均表现为N3≥N2>N1。

表1 不同施氮量和播种量组合对小麦干物质累积的影响

Table 1 Effects of different combinations of nitrogen level and seeding rate on dry matter accumulation of wheat

处理	小麦干物质累积量/kg·hm ²									
	YM49-198					ZM16				
	越冬	返青	拔节	开花	收获	越冬	返青	拔节	开花	收获
D1N1	1 633.7 ^b	2 306.9 ^j	4 269.4 ⁱ	14 379.7 ^e	15 986.7 ^f	1 078.7 ^f	1 346.0 ^f	3 598.4 ^g	12 189.4 ^h	16 976.1 ^f
D1N2	2 402.4 ^g	3 840.1 ^h	5 390.8 ^h	15 606.0 ^{cd}	17 653.4 ^e	1 229.6 ^f	1 534.8 ^{ef}	3 710.8 ^g	13 312.1 ^g	17 554.5 ^{de}
D1N3	2 529.0 ^g	4 655.9 ^g	5 658.6 ^h	16 002.5 ^{cd}	19 300.4 ^d	1 306.0 ^f	1 941.8 ^e	3 938.0 ^g	14 846.7 ^{ef}	20 679.5 ^{ab}
D2N1	5 158.3 ^f	6 130.6 ^f	10 167.1 ^g	15 154.6 ^{de}	19 610.4 ^d	3 737.9 ^e	5 523.2 ^d	8 634.0 ^f	14 529.7 ^f	18 717.1 ^{cd}
D2N2	5 982.3 ^e	6 402.7 ^{ef}	11 535.8 ^f	16 447.2 ^c	21 205.0 ^c	4 472.9 ^d	6 529.2 ^c	9 039.2 ^{ef}	16 196.4 ^d	19 092.9 ^c
D2N3	6 976.7 ^c	7 349.2 ^c	11 997.0 ^{ef}	16 506.4 ^c	22 129.5 ^{bc}	5 029.3 ^c	6 798.5 ^c	9 430.0 ^e	17 338.0 ^{bc}	19 534.8 ^{bc}
D3N1	5 189.7 ^f	6 321.5 ^f	12 747.4 ^{de}	15 552.3 ^{cd}	21 479.1 ^c	4 659.6 ^d	5 776.2 ^d	9 257.6 ^{ef}	15 263.2 ^c	19 071.7 ^c
D3N2	6 686.3 ^c	7 256.2 ^{cd}	13 503.8 ^{cd}	17 768.0 ^b	21 074.7 ^c	5 592.6 ^b	6 850.4 ^c	11 140.1 ^c	16 762.4 ^{cd}	18 788.0 ^{cd}
D3N3	7 752.7 ^b	8 158.3 ^{ab}	14 025.6 ^{bc}	18 485.1 ^{ab}	23 076.2 ^{ab}	6 087.2 ^a	7 526.4 ^b	12 226.7 ^b	18 352.5 ^a	21 285.9 ^a
D4N1	6 163.6 ^{de}	6 829.8 ^{de}	13 962.8 ^c	16 533.3 ^c	22 627.7 ^{ab}	4 704.8 ^{cd}	6 622.9 ^c	10 080.6 ^d	15 475.0 ^e	19 588.1 ^{bc}
D4N2	6 597.1 ^{cd}	8 052.6 ^b	14 700.6 ^{ab}	18 135.5 ^b	23 697.3 ^a	5 620.1 ^b	7 568.1 ^b	11 291.3 ^c	17 527.1 ^b	20 199.8 ^{abc}
D4N3	8 444.6 ^a	8 586.1 ^a	15 491.7 ^a	19 406.2 ^a	23 613.1 ^a	6 165.5 ^a	8 127.3 ^a	13 069.2 ^a	18 588.4 ^a	20 630.4 ^{ab}

同列中不同小写字母表示在5%水平上差异显著, 下表同此。

表2 不同施氮量和播种量组合下小麦成熟期干物质在各器官中的积累和分配

Table 2 The accumulation and distribution of mature dry matter in organs of wheat under different combinations of nitrogen level and seeding rate

品种	处理	叶片		穗轴+颖壳		茎+叶鞘		籽粒	
		干重/ kg·hm ⁻²	分配比 例/%	干重/ kg·hm ⁻²	分配比 例/%	干重/ kg·hm ⁻²	分配比 例/%	干重/ kg·hm ⁻²	分配比 例/%
		YM49-198	D1N1	1 612.0 ^e	10.1 ^d	1 308.2 ^d	8.0 ^f	5 557.5 ^f	34.8 ^a
	D1N2	1 773.7 ^e	10.0 ^d	1 574.8 ^d	8.9 ^f	5 965.0 ^{ef}	33.8 ^{ab}	8 339.9 ^d	47.3 ^a
	D1N3	2 165.9 ^d	11.2 ^{cd}	1 464.1 ^d	7.6 ^f	6 806.7 ^{cd}	35.3 ^a	8 863.7 ^c	45.9 ^{ab}
	D2N1	2 307.5 ^{cd}	11.8 ^{abc}	1 430.0 ^d	7.3 ^f	7 019.3 ^{cd}	35.8 ^a	8 853.6 ^c	45.2 ^{ab}
	D2N2	2 684.7 ^{ab}	12.7 ^{ab}	1 558.3 ^d	7.4 ^f	7 505.7 ^{bc}	35.4 ^a	9 456.3 ^{ab}	44.6 ^{abc}
	D2N3	2 870.3 ^a	13.0 ^a	1 811.2 ^d	8.1 ^f	7 796.3 ^{ab}	35.2 ^a	9 651.7 ^a	43.7 ^{bc}
	D3N1	2 511.3 ^{bc}	11.7 ^{abc}	2 110.1 ^d	9.8 ^{de}	7 907.9 ^{ab}	36.8 ^a	8 949.7 ^c	41.7 ^{cd}
	D3N2	2 540.0 ^b	11.8 ^{abc}	2 965.0 ^e	13.8 ^{bc}	6 470.0 ^{de}	30.1 ^c	9 519.7 ^a	45.2 ^{ab}
	D3N3	2 562.2 ^{abc}	11.1 ^{cd}	3 957.1 ^b	17.1 ^{bc}	6 960.4 ^{cd}	30.1 ^c	9 596.5 ^a	41.6 ^{cd}
	D4N1	2 557.9 ^{abc}	11.3 ^{cd}	3 008.2 ^c	13.3 ^{cd}	8 256.1 ^a	36.5 ^a	8 805.5 ^c	38.9 ^d
	D4N2	2 688.8 ^{ab}	11.3 ^{bcd}	4 181.7 ^b	17.6 ^b	7 398.6 ^{bc}	31.2 ^{bc}	9 428.1 ^{ab}	39.8 ^d
	D4N3	2 607.1 ^{abc}	11.0 ^{cd}	5 085.8 ^a	21.5 ^a	6 776.0 ^{cd}	28.7 ^c	9 144.3 ^{bc}	38.7 ^d
ZM-16	D1N1	1 508.1 ^d	8.9 ^d	1 719.2 ^c	10.0 ^{bc}	5 792.3 ^{bc}	34.1 ^b	7 956.4 ^c	47.0 ^{abc}
	D1N2	1 539.5 ^d	8.8 ^d	1 979.8 ^c	11.2 ^{bc}	5 392.8 ^c	30.7 ^{cd}	8 642.3 ^d	49.3 ^{ab}
	D1N3	2 031.0 ^{bc}	9.8 ^{cd}	2 166.0 ^{bc}	10.3 ^{bc}	7 546.1 ^a	36.5 ^a	8 936.4 ^d	43.4 ^c
	D2N1	1 922.5 ^c	10.3 ^{bc}	1 878.5 ^c	10.0 ^{bc}	6 009.1 ^{bc}	32.1 ^{bc}	8 907.1 ^d	47.6 ^{abc}
	D2N2	2 034.9 ^{bc}	10.7 ^{abc}	1 785.6 ^c	9.4 ^c	5 881.3 ^{bc}	30.8 ^{cd}	9 391.2 ^{bc}	49.2 ^{ab}
	D2N3	2 108.9 ^{bc}	10.8 ^{abc}	2 225.6 ^{bc}	11.4 ^{bc}	5 651.6 ^{bc}	28.9 ^{de}	9 548.7 ^{ab}	48.9 ^{ab}
	D3N1	1 991.9 ^c	10.4 ^{abc}	1 956.5 ^c	10.2 ^{bc}	6 039.0 ^{bc}	31.6 ^{bc}	9 084.3 ^{cd}	47.7 ^{abc}
	D3N2	1 952.5 ^c	10.4 ^{abc}	1 921.0 ^c	10.2 ^{bc}	5 337.1 ^c	28.3 ^{de}	9 577.5 ^{ab}	51.1 ^a
	D3N3	1 907.7 ^c	9.0 ^d	3 441.3 ^a	16.2 ^a	6 050.0 ^{bc}	28.4 ^{de}	9 886.9 ^a	46.5 ^{bc}
	D4N1	2 069.5 ^{bc}	10.5 ^{abc}	2 147.6 ^{bc}	11.0 ^{bc}	6 412.4 ^b	32.7 ^{bc}	8 958.7 ^d	45.7 ^{bc}
	D4N2	2 287.6 ^{ab}	11.4 ^{ab}	2 312.0 ^{bc}	11.5 ^{bc}	5 837.5 ^{bc}	29.0 ^{de}	9 682.6 ^{ab}	48.1 ^{ab}
	D4N3	2 392.1 ^a	11.6 ^a	3 029.6 ^{ab}	14.7 ^{ab}	5 714.4 ^{bc}	27.7 ^e	9 494.3 ^{abc}	46.0 ^{bc}

从各器官的干物质分配比例来看, 播种量为D1、D2时, 随施氮量的增加, 两基因型小麦叶片干重的占比显著提高; 播种量为D3、D4显著增加了穗轴+颖壳的干重占比, 茎鞘干重占比则显著下降。总体来说, 小麦籽粒干重及占比在各器官中均为最高, YM49-198籽粒占比达38.7%~47.3%, ZM16籽粒占比达43.4%~51.1%。YM49-198在D2N3处理籽粒干重最高, ZM16则为D3N3。YM49-198低播种量处理D1与高播种量D4相比, 籽粒占比平均下降7.7%, 茎鞘占比平均下降2.5%, 穗轴+颖壳占比平均升高9.3%, 叶片占比平均升高0.8%, 说明高密度下主要增加了群体中穗轴+颖壳和叶片的比重, 空壳秕粒增多, 茎干质量下降, ZM16的趋势相同。

1.3 不同施氮量和播种量组合对小麦干物质转运及其对籽粒贡献率的影响

由表3可知, 对小麦花前干物质转运特征来说, D1播种量下两基因型小麦花前干物质转运量、转

运率及对籽粒的贡献率均显著高于其他播种量处理, 且随施氮量的增加先升高后降低。同一施氮量下, YM49-198在播种量为D2、D3、D4的花前干物质转运量、转运率及对籽粒的贡献率均随播种量的增加呈现先升高后降低的趋势; ZM16在不同播种量处理间则差异不显著。在播种量为D2时, YM49-198花前干物质转运量、转运率及对籽粒的贡献率, 表现为 $N1 \geq N2 > N3$; 当播种量为D3时, 则为 $N2 \geq N3 > N1$ 。ZM16花前干物质转运量、转运率及对籽粒的贡献率在播种量为D2、D3时随施氮量升高而降低; 当播种量为D4时, 两基因型小麦花前干物质转运特征与施氮量无关。

对小麦花后干物质转运来说, 播种量D1下两基因型小麦花后光合同化量及对籽粒的贡献率显著低于其他播种量。播种量大于D2时, 同一施氮量下, 花后光合同化量及对籽粒的贡献率随播种量的变化表现为 $D2 \geq D4 > D3$; 同一播种量下, 两基

表3 不同施氮量和播种量组合对小麦干物质转运及对籽粒贡献率的影响

Table 3 Effects of different combinations of nitrogen level and seeding rate on dry matter translocation of wheat and its contribution to grain

品种	处理	花前干物质转运量/kg·hm ⁻²	花前干物质转运率/%	花前干物质对籽粒贡献率/%	花后光合同化量/kg·hm ⁻²	花后光合同化量对籽粒贡献率/%	经济系数
YM49-198	D1N1	4 232.2 ^{bc}	37.1 ^{ab}	56.5 ^b	3 276.8 ^{fg}	43.5 ^d	0.47 ^a
	D1N2	5 906.3 ^a	43.3 ^a	70.8 ^a	2 433.6 ^g	29.2 ^e	0.47 ^a
	D1N3	5 059.3 ^{ab}	35.9 ^{abc}	57.1 ^b	3 804.4 ^f	42.9 ^d	0.46 ^{ab}
	D2N1	2 049.2 ^{de}	18.0 ^{de}	23.2 ^{de}	6 804.4 ^{bcd}	76.8 ^{ab}	0.45 ^{ab}
	D2N2	1 929.5 ^{de}	15.9 ^{de}	20.4 ^{de}	7 526.8 ^{ab}	79.6 ^{ab}	0.45 ^{abc}
	D2N3	1 390.2 ^f	11.5 ^f	14.4 ^e	8 261.5 ^a	85.6 ^a	0.44 ^{bc}
	D3N1	2 682.9 ^d	20.5 ^d	29.9 ^{cd}	6 266.8 ^{cde}	70.1 ^{bc}	0.42 ^{cd}
	D3N2	4 025.2 ^{bc}	31.8 ^{bc}	42.3 ^c	5 494.6 ^e	57.7 ^c	0.45 ^{ab}
	D3N3	3 819.8 ^c	28.5 ^c	39.8 ^c	5 776.7 ^{de}	60.2 ^c	0.42 ^{cd}
	D4N1	2 024.2 ^{de}	15.6 ^{de}	22.9 ^{de}	6 781.3 ^{bcd}	77.1 ^{ab}	0.39 ^d
	D4N2	1 809.5 ^{de}	15.2 ^{de}	19.2 ^{de}	7 618.6 ^{ab}	80.8 ^{ab}	0.40 ^{cd}
	D4N3	2 054.8 ^{de}	17.7 ^{de}	22.4 ^{de}	7 089.4 ^{bc}	77.6 ^{ab}	0.39 ^d
ZM-16	D1N1	3 842.7 ^a	34.4 ^a	48.2 ^a	4 113.7 ^e	51.8 ^c	0.47 ^{abc}
	D1N2	3 457.2 ^{abc}	33.1 ^{ab}	40.0 ^{ab}	5 185.1 ^{de}	60.0 ^{bc}	0.49 ^{ab}
	D1N3	3 656.9 ^{ab}	27.4 ^{abc}	41.1 ^{ab}	5 279.5 ^{cde}	58.9 ^{bc}	0.43 ^c
	D2N1	2 241.8 ^{bcd}	21.6 ^c	25.2 ^{bc}	6 665.3 ^{abcd}	74.8 ^{ab}	0.48 ^{abc}
	D2N2	2 156.8 ^{cd}	21.8 ^c	20.4 ^c	7 467.8 ^{ab}	79.6 ^a	0.49 ^{ab}
	D2N3	1 802.1 ^d	18.9 ^c	18.9 ^c	7 746.6 ^a	81.1 ^a	0.49 ^{ab}
	D3N1	2 334.0 ^{bcd}	22.4 ^{bc}	25.6 ^{bc}	6 750.3 ^{abc}	74.4 ^{ab}	0.48 ^{abc}
	D3N2	2 254.9 ^{bcd}	23.8 ^{abc}	23.6 ^c	7 322.5 ^{ab}	76.4 ^a	0.51 ^a
	D3N3	1 994.5 ^d	19.7 ^c	20.2 ^c	7 892.4 ^a	79.8 ^a	0.46 ^{bc}
	D4N1	2 846.3 ^{abcd}	25.2 ^{abc}	31.8 ^{bc}	6 112.5 ^{bcd}	68.2 ^{ab}	0.46 ^{bc}
	D4N2	3 138.9 ^{abcd}	27.6 ^{abc}	32.4 ^{bc}	6 543.7 ^{abcd}	67.6 ^{ab}	0.48 ^{ab}
	D4N3	2 932.1 ^{abcd}	26.3 ^{abc}	30.9 ^{bc}	6 562.2 ^{abcd}	69.1 ^{ab}	0.46 ^{bc}

因型小麦花后干物质转运特征在各施氮量间的变化不显著。

两基因型小麦在播种量D1时, 花前干物质转运量、转运率及对籽粒的贡献率均高于其他播种量, 花后光合同化量及其对籽粒的贡献率均小于其他播种量。D2、D3、D4播种量时, YM49-198和ZM16花前干物质对籽粒的贡献率为14.4%~42.3%和18.9%~32.4%, 花后光合同化物对籽粒的贡献率为57.7%~85.6%和67.6%~81.1%, 说明花后同化物是籽粒干物质累积的主要来源。在同一播种量下, 随施氮量的增加, 两个基因型小麦的经济系数均呈现先升高后降低的趋势; 同一施氮量下,

YM49-198的经济系数随播种量的升高逐渐降低, ZM16的经济系数则随播种量的变化不显著。

2 施氮量与播种量互作对小麦籽粒产量及构成要素的影响

2.1 不同施氮量和播种量组合对小麦产量的影响

由表4可知, YM49-198在D2N3处理时籽粒产量最高, 达9 651.72 kg·hm⁻², ZM16在D3N3处理时籽粒产量最高, 达9 886.93 kg·hm⁻², 而D2N3与D2N2、D3N2、D3N3和D4N2之间没有显著差异。两基因型小麦籽粒产量均随播种量的增加先升高后降低; 同一播种量下, 籽粒产量随施氮量增加表现为N3≥N2>N1。

表4 不同施氮量和播种量组合对小麦产量要素的影响

Table 4 Effects of different combinations of nitrogen level and seeding rate on grain yield components of wheat

品种	处理	籽粒产量/kg·hm ⁻²	穗数/10 ⁴ ·hm ⁻²	穗粒数/粒	千粒重/g	成穗率/%
YM49-198	D1N1	7 509.01 ^e	493.50 ^h	36.70 ^b	48.21 ^a	64.85 ^a
	D1N2	8 339.90 ^d	526.67 ^g	39.57 ^a	46.62 ^{ab}	60.41 ^{abc}
	D1N3	8 863.73 ^c	560.33 ^f	40.33 ^a	46.13 ^{abc}	56.71 ^{cde}
	D2N1	8 853.56 ^c	677.33 ^e	31.87 ^{cde}	44.67 ^{abcd}	61.98 ^{ab}
	D2N2	9 456.30 ^{ab}	707.33 ^d	33.63 ^{cd}	42.47 ^{cde}	59.91 ^{bc}
	D2N3	9 651.72 ^a	743.50 ^c	34.33 ^{bc}	42.15 ^{cde}	51.78 ^{fg}
	D3N1	8 949.75 ^c	760.67 ^{bc}	30.60 ^e	43.98 ^{bcd}	57.55 ^{cd}
	D3N2	9 519.71 ^a	779.67 ^{ab}	31.83 ^{cde}	42.19 ^{cde}	55.61 ^{cdef}
	D3N3	9 596.46 ^a	793.00 ^a	32.23 ^{cde}	41.69 ^{de}	52.35 ^{efg}
	D4N1	8 805.50 ^c	776.83 ^{ab}	30.30 ^e	42.53 ^{cde}	54.77 ^{defg}
	D4N2	9 428.13 ^{ab}	783.50 ^{ab}	31.80 ^{cde}	41.51 ^{de}	52.14 ^{efg}
	D4N3	9 144.27 ^{bc}	798.00 ^a	31.33 ^{cde}	40.60 ^e	50.57 ^g
	ZM16	D1N1	7 956.41 ^e	430.83 ^g	43.40 ^{ab}	51.97 ^a
D1N2		8 642.29 ^d	460.00 ^g	46.13 ^a	48.56 ^b	63.92 ^a
D1N3		8 936.40 ^d	540.83 ^f	45.98 ^a	47.46 ^{bc}	58.35 ^{ab}
D2N1		8 907.05 ^d	553.67 ^f	38.07 ^c	48.73 ^b	50.98 ^{bc}
D2N2		9 391.18 ^{bc}	581.33 ^{ef}	39.47 ^c	44.42 ^e	47.80 ^{cd}
D2N3		9 548.72 ^{ab}	634.83 ^{cd}	40.07 ^{bc}	42.18 ^{fg}	41.13 ^d
D3N1		9 084.25 ^{cd}	621.17 ^{de}	37.63 ^c	46.42 ^{cd}	45.27 ^{cd}
D3N2		9 577.46 ^{ab}	652.50 ^{bcd}	38.00 ^c	43.57 ^{ef}	44.96 ^{cd}
D3N3		9 886.93 ^a	701.67 ^{ab}	38.87 ^c	41.54 ^g	41.30 ^d
D4N1		8 958.74 ^d	677.00 ^{abc}	28.53 ^e	44.89 ^{de}	43.04 ^{cd}
D4N2		9 682.59 ^{ab}	692.50 ^{ab}	32.53 ^d	41.92 ^{fg}	41.12 ^d
D4N3		9 494.27 ^{abc}	719.83 ^a	33.97 ^d	40.68 ^g	39.40 ^d

播种量或施氮量的升高能够促进小麦穗数的增加。播种量小于D2时, 小麦的穗数随着施氮量的增加而显著增加; 播种量大于D3, 不同施氮量下小麦的穗数无显著差异。在同一施氮量下, 小麦的穗数变化为D1<D2<D3≤D4。YM49-198和ZM16的穗数均在D4N3处理达到最高。

两基因型小麦穗粒数随播种量的增加而降低, 随施氮量增加而增加。同一施氮量下, 两个基因型小麦穗粒数表现为D1>D2≥D3≥D4。同一播种量下, YM49-198穗粒数表现为N3≥N2>N1; ZM16穗粒数差异不显著。YM49-198和ZM16穗粒数在D1N3与D1N2处理达到最高。

同一播种量下,两基因型小麦千粒重随施氮量增加显著降低,成穗率无显著变化。同一施氮量下,YM49-198、ZM16千粒重和成穗率均随播种量的增加显著降低。

总体而言,YM49-198和ZM16在D4N2的籽粒产量远高于D1N3处理,但与D2N3、D3N3的产量差异不明显;ZM16中的D4N2的籽粒产量远高于D1N3处理,但与D2N3的产量差异不明显,说明在降低施氮量的同时,可适当提高播量,以增加亩穗数,提高小麦生物量的积累,使籽粒产量得到维持甚至提高。两个基因型小麦在D4N3处理的籽粒产量均小于D2N3,则表明在充足氮营养下,过高播种量不仅不会增产,反而会造成籽粒产量的降低。

2.2 基因型、播种量和施氮量及其交互作用对小麦产量及构成要素影响的显著性分析

由表5可知,基因型、施氮量和播种量单因素对小麦产量及构成要素的影响均达极显著水平。小麦的产量和千粒重主要受施氮量和播种量的影响,其中播种量的影响效应大于施氮量;小麦的穗数、穗粒数和分蘖成穗率则主要受基因型和播种量的影响,受施氮量的影响相对较小。基因型和播种量的交互作用对小麦穗数、穗粒数及分蘖成穗率的影响均达极显著水平,施氮量和播种量的交互作用对小麦产量的影响极显著;全因素的交互作用对产量各项指标影响均不显著。

表5 基因型、播种量和施氮量及其交互作用对小麦产量及要素影响的显著性分析

Table 5 Significance test analysis of interaction effects of genotypes, seeding rate, nitrogen level on grain yield components

因素	产量	穗数	穗粒数	千粒重	分蘖成穗率
基因型	10.48**	320.36**	123.72**	17.48**	90.40**
施氮量	87.69**	47.72**	12.26**	30.10**	18.41**
播种量	93.11**	416.44**	102.99**	46.39**	52.87**
基因型×施氮量	0.13	3.66*	0.17	4.45*	0.34
基因型×播种量	2.02	9.79**	10.99**	0.69	13.10**
施氮量×播种量	3.88**	1.83	0.49	0.27	1.03
基因型×施氮量×播种量	0.69	0.29	0.74	0.13	0.20

*和**分别表示5%和1%的显著水平。

3 小麦产量与施氮量、播种量函数模型的建立

为更清楚地表达小麦产量与播种量和施氮量之间的数量关系,以小麦成熟期籽粒产量和要素为因变量,播种量和施氮量为自变量,建立二元二次回归方程(表6)。

由表6可知,2个基因型小麦籽粒产量二元二

次函数模型中D和N均为二次项且系数为负,说明在本试验范围内籽粒产量随着播种量和施氮量的增加呈先升高后降低的抛物线,过高的播种量和施氮量并不能持续提高小麦产量,且播种量效应远大于施氮量效应。YM49-198的交互项系数较小且为负值,说明播种量和施氮量对YM49-198的交

表6 施氮量、播种量与产量要素的关系分析

Table 6 Analysis of yield components as affected by seeding rate and nitrogen level

品种	产量要素	效应方程	决定系数(R^2)
YM49-198	籽粒产量	$y=5\ 814.142+27.605D+7.337N-0.058D^2-0.008N^2-0.012DN$	0.983
	亩穗数	$y=226.028+4.146D+0.248N-0.008D^2-0.001N^2$	0.996
	穗粒数	$y=43.987-0.114D+0.02N+0.0002D^2-2.303\times 10^{-5}N^2-3.196\times 10^{-5}DN$	0.990
	千粒重	$y=52.385-0.069D-0.006N+0.000125D^2$	0.942
ZM16	籽粒产量	$y=6\ 882.608+18.918D+4.575N-0.04D^2-0.007N^2$	0.982
	亩穗数	$y=270.445+2.348D+0.21N-0.003D^2+0.0004N^2-0.001DN$	0.997
	穗粒数	$y=48.933-0.062D+3.958\times 10^{-5}DN$	0.924
	千粒重	$y=57.036-0.077D-0.024N+0.000128D^2+2.674\times 10^{-5}N^2$	0.976

互效应比较小且为负效应, ZM16的交互效应不显著。由方程计算可知, YM49-198最大籽粒产量 $9\ 779.13\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的施氮量为 $302.8\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 播种量为 $206.65\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; ZM16最大籽粒产量 $9\ 866.95\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的施氮量为 $326.79\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 播种量为 $236.48\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

根据经济学原理, 对两基因型小麦进行最佳经济效益时的施氮量和播种量计算。对YM49-198来说, 当施氮量为 $220.13\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、播种量为 $192.91\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时的经济效益最佳, 此时产量为 $9\ 698.84\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。对ZM16来说, 当施氮量为 $219.64\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、播种量为 $213.85\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时的经济效益最佳, 此时产量为 $9\ 766.11\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

将最佳经济效益下的施氮量和播种量带入产量要素效应方程, 可得达到最佳经济效益时两基因型小麦所匹配的产量结构。YM49-198穗数为 $742.43\ \text{万}\cdot\text{hm}^{-2}$, 穗粒数为31.3粒, 千粒重为42.37 g。ZM16穗数为 $650.12\ \text{万}\cdot\text{hm}^{-2}$, 穗粒数为37.8粒, 千粒重为42.54 g。

讨 论

较高的小麦干物质累积量是实现小麦高产的基础(张维城等1998), 播种量在很大程度上决定了小麦群体发展动态, 氮素则是小麦超高产栽培的营养限制因子(王林林等2013; 吴光磊等2012; 叶优良等2012; 赵会杰等2002)。前人研究表明, 小麦开花-成熟期的光合生产和转运能力对获得较高的灌浆水平和籽粒产量具有重要的意义(Ye等2011; 徐恒永等2002; 许振柱等2000)。刘万代等(2009)认为, 小麦适播期内中低密度处理可使个体充分生长, 提高花前营养器官干物质累积量。胡卫丽等(2014)则认为, 适当增加施氮量和种植密度可以提高大穗型品种干物质累积, 而种植密度过大则会抑制多穗型品种生长, 造成干物质累积量降低。在本试验中, 播种量为D1时, 小麦的花前干物质转运量、转运率及对籽粒的贡献率明显高于其他处理, 其拔节-开花期干物质累积量占比达55.0%~64.6%, 开花-成熟期干物质累积增幅较小。这可能是低播种量处理使小麦个体获得了充足的空间和养分, 分蘖特性得到充分的发挥, 并在生长后期得到了维持, 因而获得了较高的千粒重和分蘖成穗

率。2个基因型小麦籽粒产量的高峰与成熟期干物质累积特征并不同步, 说明高密高氮虽然获得了较高的生物产量, 但却降低了花前营养器官干物质向籽粒转运, 过多的养分消耗在营养生长, 导致贪青晚熟, 籽粒干重占比下降。

施氮或增加种植密度均可提高小麦籽粒产量, 且施氮量、种植密度的交互作用同样对小麦籽粒产量影响显著(Ellis等1999), 不同的施氮量显著影响种植密度对产量的影响效应(Gooding等2002)。张娟(2014)研究结果表明, 当施氮量由 $240\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 减少到 $180\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 提高种植密度可在一定程度弥补氮肥减少, 使籽粒产量下降不显著。张维军等(2014)研究表明, 分蘖成穗率、有效穗数、穗粒质量均随播种密度的增加而降低; 在施氮量为 $90\sim 270\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, 分蘖成穗率和有效穗数随施氮量的增加而增加, 施氮量达到 $360\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时则降低, 合适的播种密度和施氮量有利于提高籽粒产量。房琴等(2015)研究结果表明, 基本苗在 $150\ \text{万}\cdot\text{hm}^{-2}$, 施氮量为 $240\sim 300\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时小麦产量最高, 低密度下建议适当增施氮肥, 高密度下应适当减少氮肥投入, 以实现小麦的高产高效。本研究显示, 基因型、施氮量和播种量对小麦产量及构成要素影响均达显著水平。其中施氮量和播种量的调控是实现高产的关键。对YM49-498来说, 播种量D1时, 施氮量N1可达到 $7\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 产量水平; 增施氮肥可增加产量水平至 $8\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 且N3显著高于N2处理, 即在播种量D1施氮量N3可获得较为合适的产量。当播种量为D2、D3和D4时, 施氮量N1即可达到 $8\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的产量水平; 增加施氮量至N2、N3, 产量提高到 $9\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 但N2、N3处理间产量差异不显著, 所以在播种量为D2、D3和D4时, 施氮量为N2可满足 $9\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 产量水平。ZM16在播种量D1时, N1处理可达到 $7\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 产量水平; 随施氮量的增加, 产量升高至 $8\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以上, 但N2、N3处理间产量差异不显著; 播种量为D2、D3和D4时则与YM49-198规律一致。

参考文献

- Cao Q, He MR, Dai XL, Jia DY (2012). Effects of interaction between nitrogen and density on photosynthetic characteristics after anthesis and grain yield of winter wheat. *Acta Agric Boreali Sin*, 27 (4): 206–212 (in Chinese with English abstract) [曹倩, 贺明荣, 代兴龙, 贾殿勇(2012). 氮密互作对小麦花后光合特性及

- 籽粒产量的影响. 华北农学报, 27 (4): 206–212]
- Ellis RH, Salahi M, Jones SA (1999). Yield-density equations can be extended to quantify the effect of applied nitrogen and cultivar on wheat grain yield. *Ann Appl Biol*, 134 (134): 347–352
- Fang Q, Wang HG, Ma BW, Li DX, Li RQ, Li YM (2015). Effect of planting density and nitrogen application rate on population quality and yield formation of super high-yielding winter wheat. *J Triticeae Crops*, 35 (3): 364–371 (in Chinese with English abstract) [房琴, 王红光, 马伯威, 李东晓, 李瑞奇, 李雁鸣(2015). 密度和施氮量对超高产冬小麦群体质量和产量形成的影响. 麦类作物学报, 35 (3): 364–371]
- Gooding MJ, Pinyosinwat A, Ellis RH (2002). Responses of wheat grain yield and quality to seed rate. *J Agric Sci*, 138 (3): 317–331
- Guo TC, Zha FN, Ma DY, Song X, Yue YJ (2007). Effects of plant density on the accumulation and transfer of dry matter and nitrogen and grain yield of two winter wheat cultivars with different spike types. *Acta Agric Boreali Sin*, 22 (6): 152–156 (in Chinese with English abstract) [郭天财, 查菲娜, 马冬云, 宋晓, 岳艳军(2007). 种植密度对两种穗型冬小麦品种干物质和氮素积累、运转及产量的影响. 华北农学报, 22 (6): 152–156]
- Hu WL, Wang YH, Li LX, Xuan HM, Guo TC (2014). Effects of nitrogen and plant density on dry matter accumulation and translocation in main stem and tillers of two spike-types of winter wheat varieties. *J Triticeae Crops*, 34 (6): 808–815 (in Chinese with English abstract) [胡卫丽, 王永华, 李刘霞, 轩红梅, 郭天财(2014). 氮密调控对两种穗型冬小麦品种茎秆干物质积累与转运的影响. 麦类作物学报, 34 (6): 808–815]
- Jiang LN, He Y, Shao Y, Zhao YL, Yu HB, Qi SY, Li CX (2011). Effect of nitrogen application on physiology of flag leaf and grain yield of winter wheat in central henan. *J Triticeae Crops*, 31 (5): 875–881 (in Chinese with English abstract) [姜丽娜, 贺远, 邵云, 赵艳岭, 余海波, 祁诗月, 李春喜(2011). 氮肥运筹对豫中地区冬小麦旗叶生理及籽粒产量的影响. 麦类作物学报, 31 (5): 875–881]
- Liao J, Ma FY, Fan H, Zhang W, Wang YE (2012). Effect of planting density on dry matter accumulation and translocation characteristic of drip irrigated spring wheat. *J Shihezi Univ (Nat Sci)*, 30 (5): 567–571 (in Chinese with English abstract) [廖江, 马富裕, 樊华, 张伟, 王月娥(2012). 密度调控下滴灌春小麦干物质积累及转运特征的分析. 石河子大学学报:自然科学版, 30 (5): 567–571]
- Liu WD, Chen XY, Yin J, Du PX (2009). Effect of sowing date and planting density on population trait and grain yield of winter wheat cultivar Yumai 49-198. *J Triticeae Crops*, 29 (3): 464–469 (in Chinese with English abstract) [刘万代, 陈现勇, 尹钧, 杜沛鑫(2009). 播期和密度对冬小麦豫麦49-198群体性状和产量的影响. 麦类作物学报, 29 (3): 464–469]
- Lu ZG, Dai TB, Jiang D, Jing Q, Qin XD, Cao WX (2006). Effects of different nitrogen rates and dressing ratios on grain yield and quality in weak gluten wheat. *J Triticeae Crops*, 26 (6): 75–80 (in Chinese with English abstract) [陆增根, 戴廷波, 姜东, 荆奇, 秦晓东, 曹卫星(2006). 不同施氮水平和基追比对弱筋小麦籽粒产量和品质的影响. 麦类作物学报, 26 (6): 75–80]
- Shi RP, Shangguan YX, Li N, Zhou F, Han K, Wang LQ (2012). Effects of seeding rate and nitrogen fertilization rate on physiological traits of winter wheat after anthesis in a field with plastic mulched rides and unmulched furrows. *Chin J Appl Ecol*, 23 (3): 758–764 (in Chinese with English abstract) [师日鹏, 上官宇先, 李娜, 周芳, 韩坤, 王林权(2012). 播种量和施氮量对垄沟覆膜栽培冬小麦花后生理性状的影响. 应用生态学报, 23 (3): 758–764]
- Shi RP, Shangguan YX, Ma QR, Wang LQ (2011). Effects of sowing density and N rate on biomass accumulation and yield of winter wheat in furrow and ridge film mulching. *Plant Nutr Fert Sci*, (4): 823–830 (in Chinese with English abstract) [师日鹏, 上官宇先, 马巧荣, 王林权(2011). 密度与氮肥配合对垄沟覆膜栽培冬小麦干物质累积及产量的影响. 植物营养与肥料学报, (4): 823–830]
- Shi Y, Yu ZW (2006). Effects of nitrogen fertilizer rate and ratio of base and topdressing on yield of wheat, content of soil nitrate and nitrogen balance. *Acta Ecol Sin*, 26 (11): 3661–3669 (in Chinese with English abstract) [石玉, 于振文(2006). 施氮量及底追比例对小麦产量、土壤硝态氮含量和氮平衡的影响. 生态学报, 26 (11): 3661–3669]
- Wang CY, Zhu YJ, Xia GJ, Song JY, Li JX, Wang YH, Luo Y (1998). Effects application of nitrogen at the later stage on grain yield and plant physiological characteristics of super-high-yielding winter wheat. *Acta Agron Sin*, 24 (6): 978–983 (in Chinese with English abstract) [王晨阳, 朱云集, 夏国军, 宋家永, 李九星, 王永华, 罗毅(1998). 氮肥后移对超高产小麦产量及生理特性的影响. 作物学报, 24 (6): 978–983]
- Wang LL, Chen W, Xu Y, Li HB, Deng XP (2013). Nitrogen nutrition affects dry matter accumulation and transportation in winter wheat. *Acta Agric Bor-occid Sin*, 22 (10): 85–89 (in Chinese with English abstract) [王林林, 陈炜, 徐莹, 李红兵, 邓西平(2013). 氮素营养对小麦干物质积累与转运的影响. 西北农业学报, 22 (10): 85–89]
- Wang XY, Yu ZW (2008). Effect of irrigation rate on absorption and translocation of nitrogen under different nitrogen fertilizer rate in wheat. *Sci Agric Sin*, 41 (10): 3015–3024 (in Chinese with English abstract) [王小燕, 于振文(2008). 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. 中国农业科学, 41 (10): 3015–3024]
- Wu GL, Guo LY, Cui ZY, Li Y, Yin YP, Wang ZL, Jiang GM (2012). Differential effects of nitrogen managements on nitrogen, dry matter accumulation and transportation in late-sowing winter wheat. *Acta Ecol Sin*, 32 (16): 5128–5137 (in Chinese with English abstract) [吴光磊, 郭立月, 崔正勇, 李勇, 尹燕桦, 王振林, 蒋高明(2012). 氮肥运筹对晚播冬小麦氮素和干物质积累与转运的影响. 生态学报, 32 (16): 5128–5137]
- Xiao JZ, Feng G, He SR, Liang JM (1986). Apply of quadratic regressive saturate D-optimum design study on fertilizer response equation. *Chin J Soil Sci*, (1): 27–30 (in Chinese) [肖俊璋, 冯固, 何尚仁, 梁浚明(1986). 应用二次饱和D—最优设计研究肥料

- 效应方程. 土壤通报, (1): 27-30]
- Xu HY, Zhao ZD, Liu JJ, Liu AF, Zhang CL (2002). Effects of plant population regulation and nitrogen application on grain yield and quality of winter wheat Jinan 17. *J Triticeae Crops*, 22 (1): 56-62 (in Chinese with English abstract) [徐恒永, 赵振东, 刘建军, 刘爱峰, 张存良(2002). 群体调控与氮肥运筹对强筋小麦济南17号产量和品质的影响. 麦类作物学报, 22 (1): 56-62]
- Xu ZZ, Li CR, Chen P (2000). Effect of soil drought on physiological characteristics and dry matter accumulation in winter wheat. *Agric Res Arid Areas*, 18 (1): 113-118 (in Chinese with English abstract) [许振柱, 李长荣, 陈平(2000). 土壤干旱对冬小麦生理特性和干物质积累的影响. 干旱地区农业研究, 18 (1): 113-118]
- Ye Y, Wang G, Huang Y, Zhu Y, Meng Q, Chen X, Zhang F, Cui Z (2011). Understanding physiological processes associated with yield-trait relationships in modern wheat varieties. *Fuel & Energy Abst*, 124 (3): 316-322
- Ye YL, Wang LM, Huang YF, Ma YH, Li HH, Zhu YJ (2012). Effect of nitrogen application on dry matter accumulation and translocation in wheat. *J Triticeae Crops*, 32 (3): 488-493 (in Chinese with English abstract) [叶优良, 王玲敏, 黄玉芳, 马迎辉, 李欢欢, 朱云集(2012). 施氮对小麦干物质累积和转运的影响. 麦类作物学报, 32 (3): 488-493]
- Zhang J (2014). Combined effect of plant density and nitrogen level on grain yield and nitrogen use efficiency in winter wheat [PhD thesis]. Taian: Shandong Agricultural University [张娟(2014). 种植密度和氮肥水平互作对冬小麦产量和氮素利用率的调控效应研究. 泰安: 山东农业大学]
- Zhang WC, Wang ZH, Ren YX, Zhu MZ (1998). Influences of control measures for end of valid tillering on population quality of winter wheat. *Acta Agron Sin*, 24 (6): 903-907 (in Chinese with English abstract) [张维城, 王志和, 任永信, 朱明哲(1998). 有效分蘖终止期控制措施对小麦群体质量影响的研究. 作物学报, 24 (6): 903-907]
- Zhang WJ, Yuan HM, Chen DS, Wang XL, Kang L, He JS, Hui J (2014). Effects of nitrogen application and density on tillers growing into spikes and yield of Ningdong 11. *Acta Agric Bor-occid Sin*, 23 (1): 63-69 (in Chinese with English abstract) [张维军, 袁汉民, 陈东升, 王小亮, 亢玲, 何进尚, 惠建(2014). 氮肥和密度对宁冬11号分蘖成穗及产量的影响. 西北农业学报, 23 (1): 63-69]
- Zhang YL, Yu ZW, Wang D, Jia XC (2004). Effects of different densities on grain quality and yield in winter wheat. *Shandong Agric Sci*, (5): 29-30 (in Chinese with English abstract) [张永丽, 于振文, 王东, 贾效成(2004). 不同密度对冬小麦品质和产量的影响. 山东农业科学, (5): 29-30]
- Zhao HJ, Zou Q, Guo TC, Yu ZW, Wang YH (2002). Regulating effects of density and top - dressing time of nitrogen on characteristics of radiation transmission and photosynthesis in canopy of massive-spike winter wheat variety L906. *Acta Agron Sin*, 28 (2): 270-277 (in Chinese with English abstract) [赵会杰, 邹琦, 郭天财, 于振文, 王永华(2002). 密度和追肥时期对重穗型冬小麦品种L906群体辐射和光合特性的调控效应. 作物学报, 28 (2): 270-277]
- Zhao YP, Zhang BJ, Zhang ZM, Zhu CL, Wang YL, Han SM (2009). Effects of planting density on yield and yield components of winter wheat. *Acta Agric Bor-occid Sin*, 18 (6): 107-111 (in Chinese with English abstract) [赵永萍, 张保军, 张正茂, 朱翠林, 王玉玲, 韩思明(2009). 种植密度对冬小麦产量及其构成因素的影响. 西北农业学报, 18 (6): 107-111]

Effects of seeding rate and nitrogen level on dry matter accumulation, translocation and grain yield in two genotypes of winter wheat (*Triticum aestivum*)

ZHANG Xiao-Tao, HUANG Yu-Fang, MA Xiao-Jing, YE You-Liang*

College of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China

Abstract: Two winter wheat (*Triticum aestivum*) cultivars ‘Yumai 49-198’ (multi-spike) and ‘Zhoumai 16’ (large-spike type) were used to investigate the effects of nitrogen level and seeding rate on dry matter accumulation, translocation and grain yield in two genotypes of winter wheat, and find a balance between nitrogen level and seeding rate for high yield and high efficiency in wheat. The experiment was established as a split-plot design of three nitrogen levels (0, 180, 360 kg·hm⁻²) and four seeding rates (75, 150, 225, 300 kg·hm⁻²). The main results showed that the nitrogen level and seeding rate had significant effect on the dry matter accumulation of wheat, and the increase of nitrogen level or seeding rate was beneficial to the dry matter accumulation in wheat. Moreover, the effect of seeding rate was significantly greater than that of nitrogen. The dry matter accumulation of the multi-spike type cultivar YM49-198 was higher than that of large-spike cultivar ZM16 at each growth stage. At the lowest seeding rate of 75 kg·hm⁻², the dry matter translocation, translocation rate and the contribution rate to grain before anthesis was significantly higher than those of other seeding rate. The translocation of dry matter and its contribution to grain after anthesis were greater than those before anthesis at seeding rates of 150, 225, 300 kg·hm⁻², and both increased with seeding rate decreased. The results showed that the nitrogen level and sowing rate affected the yield and components significantly. Considering the economic benefits, in order to reach the 9 000 kg·hm⁻² yield level, the optimum nitrogen amount was 180–220 kg·hm⁻², and the seeding rate of YM49-498 and ZM16 was 150–192 and 213–225 kg·hm⁻², respectively.

Key words: wheat (*Triticum aestivum*); nitrogen; seeding rate; dry matter; grain yield

Received 2016-12-09 Accepted 2017-04-20

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 31471935).

*Corresponding author (E-mail: ylye2004@163.com).