doi：10.11838/sfsc.20180305

密度和施氮量对油菜生长发育及产量的影响

田效琴[1]，李　卓[1,2*]，刘永红[1]

（1．四川省农业科学院作物研究所，四川　成都　610066；
2．南方丘区节水农业研究四川省重点实验室，四川　成都　610066）

摘　要：为探讨密度和施氮量互作效应对油菜生长发育及产量的影响，以甘蓝型油菜品种华油杂9号为材料，在施氮120、240和360 kg·hm^{-2}的条件下，分别设密度15万、30万和45万株·hm^{-2}处理，分析了施氮量与密度对油菜生长发育动态、产量构成因素和产量的影响，及三者之间的相关关系。结果表明，油菜生育期随施氮量增加略呈延长趋势，而与密度无显著相关。株高随密度增大而下降，随施氮量增加表现出先升后降趋势。在油菜整个生育期中，随着施氮量和密度的增加，单位面积群体根颈粗、绿叶数、功能叶叶绿素、干物质积累量、角果分配比例、有效分枝数、有效角果数大体均显著增大，并与油菜产量呈显著正相关，且密度的影响总体大于氮肥的影响。随着施氮量和密度的增加，各相邻处理间差异总体呈逐渐变小趋势。120 kg·hm^{-2}施氮量和45万株·hm^{-2}种植密度组合不仅可以达到360 kg·hm^{-2}施氮量和15万株·hm^{-2}种植密度组合的产量，同时每公顷可以节省120 kg的氮肥投入，在实际生产中适量减少氮肥并适度提高密度依然可以获得高产。

关键词：油菜；种植密度；施氮量；生长发育；产量

中图分类号：S143.1；S634.3　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1673－6257（2018）03－0026－10

油菜是我国主要的油料作物之一，我国食用植物油中约55%为菜籽油，大力发展油菜生产不仅可以有效缓解我国食用油的供给矛盾，而且能保证食用油的供给安全[1]。目前，国内许多地区继续采用传统的育苗移栽技术，费时费工导致农民种植积极性不高，严重制约着油菜生产的发展[2－4]。探索和创新节本增效、大力发展直播油菜并结合机械化生产，使投入发挥到最大的经济价值，是从根本上改变油菜生产现状，增加农民收入和维护社会稳定的重要措施[5－6]。直播油菜因个体发育相对较差，获得高产需要建立适宜的群体结构[7]，而群体的发育和产量的形成又主要受氮肥和密度的影响，研究证明适宜密度是控制油菜群体结构、实现高产的重要因子，合理施氮能有效促进油菜生长发育和产量形成[8－11]。有关不同密度和施氮水平对油菜的影响研究多集中在产量和经济性状上[12－17]，在生长发育方面鲜有报道，且均以单株或群体（相同株数）为研究对象展开[18－19]。而生产应用中农作物产量均以公顷为衡量尺度，单位面积则是公顷的最小分度单位，较单株和群体（相同株数）用来阐述作物产量将更直观、更准确。

本文以影响油菜群体发育和产量的两个最重要的因素－密度和氮肥互作为出发点，在不同密度水平下，对不同施氮水平直播油菜单位面积群体的生长发育动态、产量构成因素、产量等进行了研究，并分析了油菜单位面积群体生长发育动态和产量构成因素的具体表现及与产量之间的关系，为油菜高产高效种植提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验概况

供试材料为‘华油杂9号’油菜。供试肥料为尿素（N 46%）、过磷酸钙（P_2O_5 12%）、氯化钾（K_2O 60%）、硼砂。2015～2016年在四川省简阳市玉成乡街邻村开展有关试验。试验地前作夏玉

收稿日期：2017－07－20；**最后修订日期：**2017－09－29

基金项目：四川省农业科学院青年基金项目（2017QNJJ－006）；四川省财政创新能力提升工程旱地油菜－玉米两熟模式精简高效节水及机械化栽培关键技术研究（2016GYSH－007）；四川省财政创新能力提升工程专项甘蓝型油菜种质资源创新和突破性新品种培育（2016ZYPZ－013）；公益性科研（农业）专项西南丘陵旱地主要粮油农作节水节肥节药综合技术集成与示范（20150312701）；国家科技支撑计划油菜高产高效关键技术研究与示范（2014BAD11B03）。

作者简介：田效琴（1989－），女，湖北荆州市人，硕士，主要研究作物栽培与农业资源环境。E－mail：865257025@qq.com。

通讯作者：李卓，E－mail：lizhuo_2000@sina.com。

米，肥力中等，土壤类型为紫色土，土壤有机质含量为1.63%，碱解氮为25.44 mg·kg^{-1}，有效磷为6.78 mg·kg^{-1}，速效钾为86.64 mg·kg^{-1}。

1.2　试验设计

试验采用裂区设计，3种施氮水平为主区，3种密度为副区。重复3次，共27个小区。处理内容如下：

（1）3个氮肥用量分别为120、240和360 kg·hm^{-2}，分别用N1、N2、N3表示。

（2）3个密度分别为15万、30万和45万株·hm^{-2}，分别用D1、D2、D3表示。

播种期9月29日，采用直播方式，小区面积18 m^2（2 m×9 m）。试验区四周设宽1 m走道，走道外围设置保护行。撬窝点播，行距30 cm，即每小区30行，株距依据密度调节。各小区磷、钾、硼肥一致，除钾肥1/2作基肥，1/2作薹肥分两次施入外，其余均作基肥一次性施入，P_2O_5、K_2O施用量均为150 kg·hm^{-2}，硼砂用量15 kg·hm^{-2}，氮肥按基、苗、薹肥比例5∶2∶3进行施用。具体氮肥用量及密度规格见表1。

表1　氮肥、密度处理水平及施肥与小区定苗方案

氮肥处理（kg·hm^{-2}）	N（kg·hm^{-2}）			P_2O_5（kg·hm^{-2}）	K_2O（kg·hm^{-2}）		密度		
	基肥	苗肥	薹肥	基肥	基肥	薹肥	每公顷株数（株·hm^{-2}）	株距（cm）	每行株数
120	60	24	36	150	75	75	15×10^4	22	9
240	120	48	72	150	75	75	30×10^4	11	18
360	180	72	108	150	75	75	45×10^4	7	27

1.3　测定项目与方法

1.3.1　植物指标测定

全生育期记载：播种至成熟的天数。

农艺、生理指标测定：分别于越冬期、初花期、终花期、角果期和成熟期在每小区内同一行，连续选取10株（15万株·hm^{-2}试验一行不足10株，在连续的两行中取，每行连续5株）定株测定植株生理指标，包括株高（用卷尺测定各株子叶节至全株最高部分的长度）、绿叶数（成熟期未记载）、叶绿素（每株选取同叶龄叶片用叶绿素仪测定叶片的上中下部，取其平均值）、根颈直径（用游标卡尺测定各株子叶节至出生侧根之间最粗处直径）。

干物质指标：于越冬期、初花期、终花期、角果期和成熟期分别采集样品。从边2行开始取样，连续选取10株（15万株·hm^{-2}试验一行不足10株，在连续的两行中取，每行连续5株），根系取样挖取20 cm深度的土壤剖面，整株取出，用自来水冲洗根系，分根、叶、茎枝、角果称取鲜重，烘干后称取干物质重（成熟期考种完后再分器官烘干称取干物质重）。

经济性状及产量：结合成熟期干物质测定取样，对10个样株进行室内考种，考察项目包括有效分枝数、有效角果数、每角粒数、千粒重、单株产量。每小区单独收获后晒种测定实际籽粒产量。

1.3.2　土壤养分

在试验点油菜播种未施用底肥前用土钻采用五点取样法对试验田块耕作层土壤进行分层（0～20、20～40 cm）取样，测定全氮、碱解氮、硝态氮、铵态氮、有效磷、速效钾、有机质含量。

全氮用微量凯氏定氮法；有机质用重铬酸钾容量法；碱解氮用碱解扩散法；铵态氮用2 mol·L^{-1} KCl浸提－靛酚蓝比色法；硝态氮用酚二磺酸比色法；有效磷用0.5 mol·L^{-1} $NaHCO_3$浸提－钼锑抗比色法；速效钾用1 mol·L^{-1} NH_4OAc浸提－火焰光度法。

1.3.3　有关指标计算

单位面积群体根颈粗、绿叶数、功能叶叶绿素、整株和各器官干重、有效分枝数、有效角果数、产量＝单株（取样10株中经方差分析后较小差异各数据的平均值）根颈粗、绿叶数、功能叶叶绿素、整株和各器官干重、有效分枝数、有效角果数、产量×各处理单位面积群体株数（D1：15株；D2：30株；D3：45株）。

1.4　数据统计

数据处理及相关分析采用Excel 2007软件进行，方差分析、多重比较和相关性分析采用SPSS 17.0软件进行，多重比较采用LSD法。

2　结果与分析

2.1　密度和施氮量对油菜生长发育动态的影响

2.1.1　对全生育期的影响

由图1可以看出，相同氮水平下密度由D1提高到D3，全生育期均略呈缩短趋势，而处理间差异均不显著；相同密度下施氮量由N1提高到N3，全生育期均呈延长趋势，且低密度D1条件下N1与N3间全生育期天数达到显著差异，两者相差2 d。从而可以得出密度越低，氮肥量越高，全生育期越长。全生育期持续最长为227.5 d，最短为224.5 d，两者相差3 d，对应处理分别为N1－D3和N3－D1处理。以上分析可以看出，施氮量对全生育期的影响大于密度。

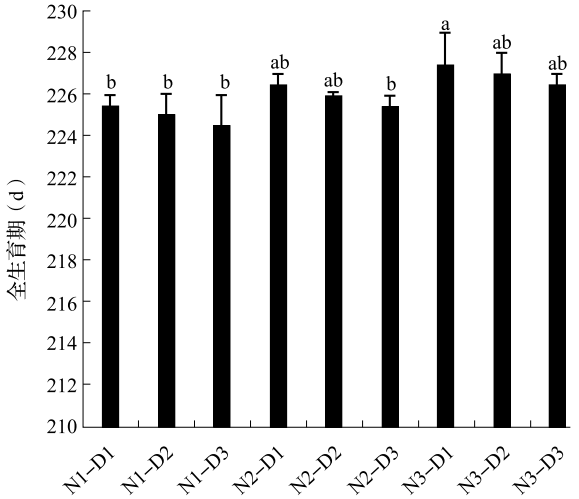

图1　密度和施氮量对油菜全生育期的影响

注：D1、D2、D3分别为种植密度15、30、45万株·hm^{-2}，N1、N2、N3分别为施氮量120、240、360 kg·hm^{-2}，不同小写字母表示各处理全生育期在0.05水平下差异显著，下同。

2.1.2　对株高、单位面积群体根颈粗、绿叶数和功能叶叶绿素的影响

如图2，在油菜整个生育期过程中，同密度下株高随施氮量的增加呈先升高后下降的趋势，而同氮肥用量下株高随密度的增大大体呈下降趋势。综合表现为N2－D2处理最高，N3－D3处理最低。

如图3、4、5所示，在油菜整个生育期过程中，单位面积群体根颈粗、绿叶数和功能叶叶绿素均随施氮量的增加和密度的增大而增大，密度含量的影响总体大于施氮量，且随着施氮量的增加和密度的提高，各相邻处理间的差异总体呈逐渐变小趋势，说明当施氮量和密度达到一定程度时，无论增加氮肥或提高密度对单位面积上群体根颈粗、绿叶数和功能叶叶绿素均无大的影响。本试验9个处理中，单位面积群体根颈粗、绿叶数和功能叶叶绿素均以N3－D3最大，N1－D1最小。

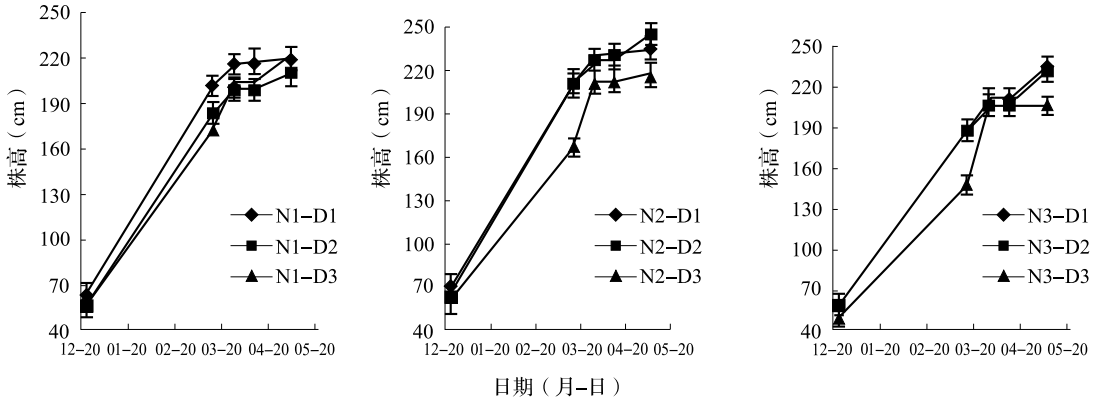

图2　密度和施氮量对油菜株高的影响

具体表现为同氮肥用量处理，单位面积群体根颈粗、绿叶数、功能叶叶绿素含量总体上均随种植密度逐步增加，而同密度下增加氮肥用量对单位面积群体根颈粗、绿叶数、功能叶叶绿素含量影响总体上不显著。施氮量从N1提高到N3，D3较D1的单位面积群体根颈粗平均高出38.8、36.6、38.3 cm（图3）；在油菜整个生育期内，单位面积群体绿叶数和功能叶叶绿素含量均随植株生长呈先增加后降低的变化趋势，在3月14日初花期时单位面积群体绿叶数和功能叶叶绿素含量均达到最高，随后迅速降低（图4、5），单位面积群体绿叶数初花期施氮量从N1提高到N3，D3较D1分别多出348、399、402片，单位面积群体功能叶叶绿素含量初花期施氮量从N1到N3，每增加15万株·hm^{-2}密度，单位面积群体SPAD值平均升高702.0、725.3、732.8。

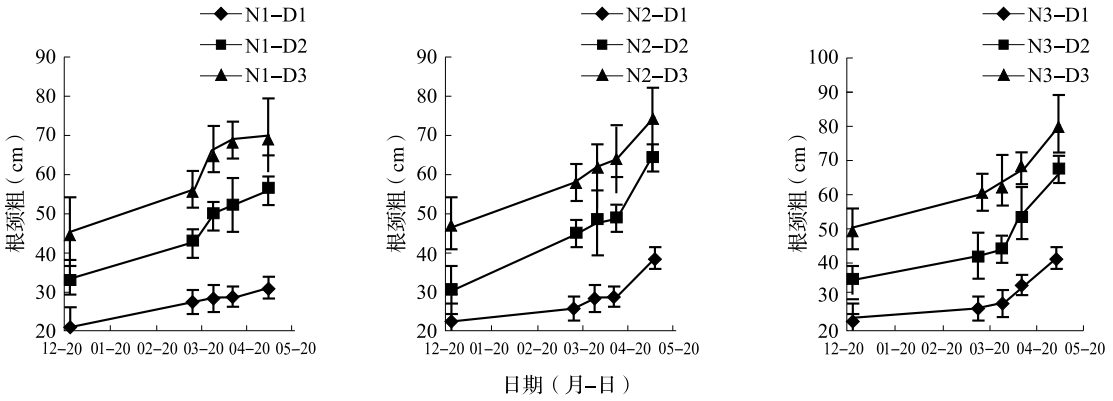

图 3　密度和施氮量对油菜单位面积群体根颈粗的影响

注：D1、D2、D3 分别表示 15、30、45 万株/hm^2 1 m^2 油菜根颈粗之和，下同。

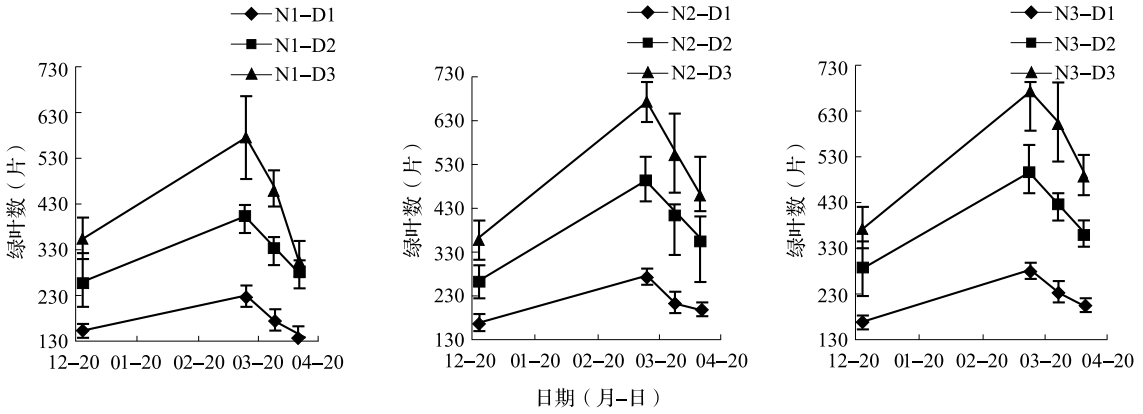

图 4　密度和施氮量对油菜单位面积群体绿叶数的影响

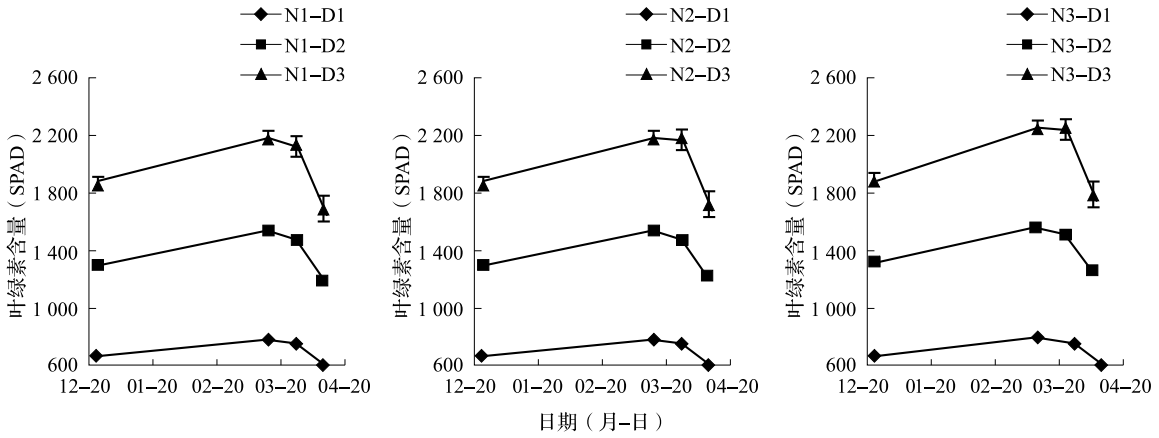

图 5　密度和施氮量对油菜单位面积群体功能叶叶绿素含量的影响

2.1.3　对干物质积累分配的影响

2.1.3.1　对干物质积累分配绝对量的影响　同单位面积群体根颈粗、绿叶数和功能叶叶绿素影响规律一致（图 6），都表现为在整个生育期过程中单位面积群体干物质积累量均随施氮量的增加和密度的增大而增大，密度影响总体上大于施氮量，且随着施氮量的增加和密度的提高，相邻处理间干物质积累量的差异总体呈逐渐变小趋势。同样说明当施氮量和种植密度达到一定程度时，无论增加氮肥或提高密度，对干物质积累已无大的作用。本试验 9 个处理中，单位面积群体干物质积累量也以 N3 – D3 最大，N1 – D1 最小。

具体表现为单位面积群体干物质量随植株生长逐渐增大，花期增速较慢，角果期增速最大。相同施氮水平，密度越高，其增幅越大。至成熟期，差异达最大值，施氮量从 N1 提高到 N3，D3 较 D1 干

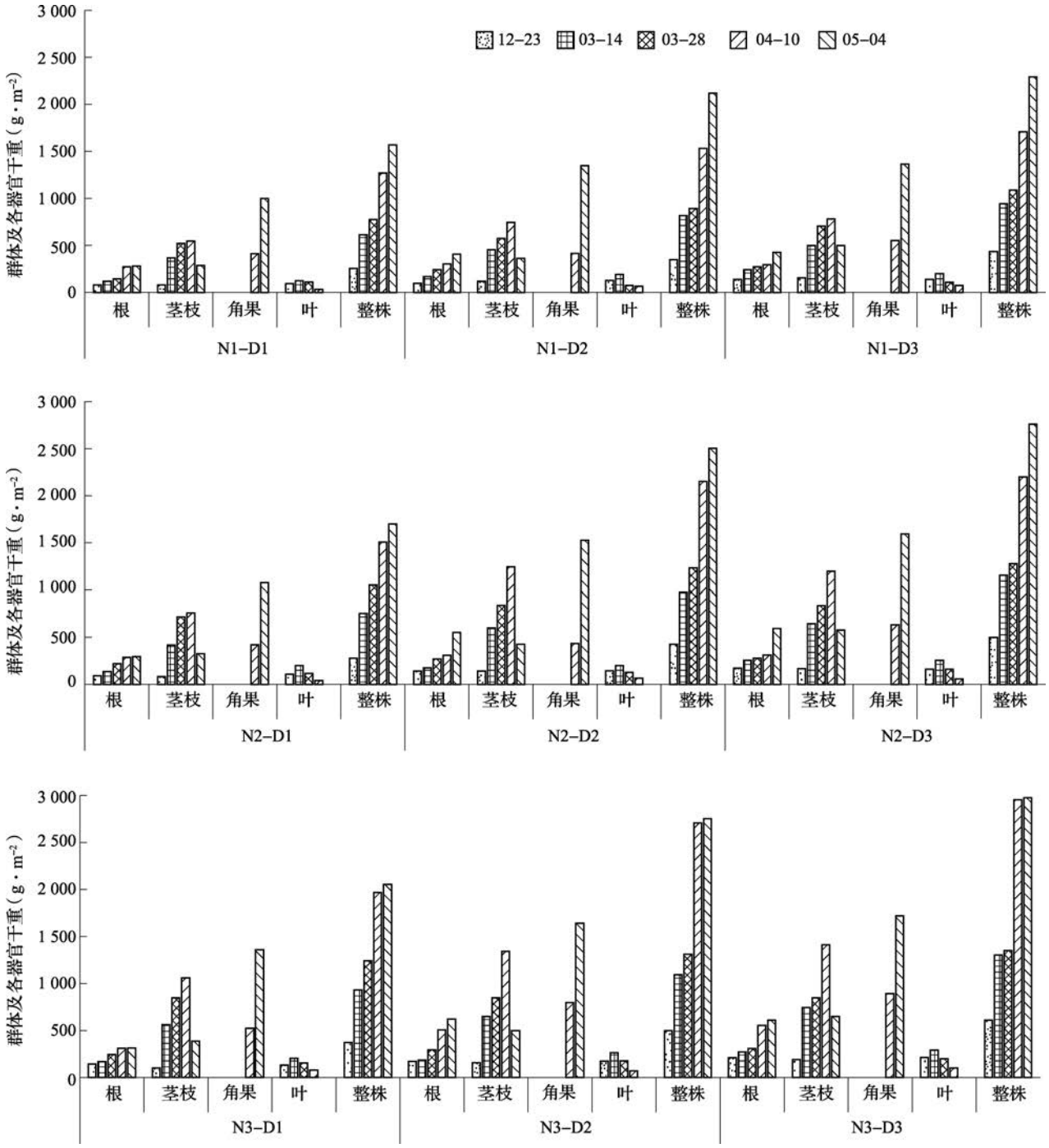

图 6　密度和施氮量对油菜单位面积群体及各器官干物质积累的影响

物质量平均高出 725.5、1 063.5、922.5 g，密度从 D1 增加到 D3，N3 较 N1 平均高出 480.0、632.0、680.0 g；同整株规律相同，根干重随油菜生育期不断增加，到油菜成熟时最大，施氮量从 N1 提高到 N3，D3 较 D1 根干重平均增加 144.0、298.5、297.0 g，密度从 D1 增加到 D3，N3 较 N1 平均增加 27.0、210.0、180.0 g；叶片和茎干重均随油菜的生长先增加后降低。在 3 月 14 日（初花期）叶片干重达到最大值，随后开始下降，在 4 月 10 日（角果期）下降至低谷。从 12 月 23 日开始，不同处理间差异越来越明显，至初花期，施氮量从 N1 增大到 N3，密度每升高 15 万株·hm^{-2}，单位面积群体叶片干重分别平均增加 38.3、27.5、42.0 g，随密度增大，施氮量每增加 120 kg·hm^{-2}，叶片干重分别平均增加 39.0、34.0、43.0 g。到角果期时，不同处理的差异发生改变，施氮量从 N1 增加

到 N3，密度每增加 15 万株·hm^{-2}，叶片干重分别平均增加 21.0、9.0、10.5 g，密度从 D1 增加到 D3，氮每增加 120 kg·hm^{-2}，叶片干重分别平均增加 22.0、1.5、11.5 g。茎枝重在角果期（4 月 10 日）达到最大值，施氮量由 N1 增大到 N3，密度每增加 15 万株·hm^{-2}，茎枝干重平均增加 117.0、219.0、176.8 g，密度由低到高，施氮量每增加 120 kg·hm^{-2}，茎枝干重平均增加 254.3、297.0、314.0 g。角果后期茎枝干重显著下降，此时的生长中心为角果，光合作用产物主要用于充实籽粒。至收获期（5 月 4 日），各处理间总体差异变小，施氮量从 N1 增加到 N3，密度每提高 15 万株·hm^{-2}，茎枝干重平均增加 106.5、125.3、132.0 g，密度由低到高，施氮量每增加 120 kg·hm^{-2}，茎枝干重平均增加 48.8、66.0、74.3 g；角果期时单位面积群体角果干重各处理差异已很明显，施氮量从 N1 提高到 N3，密度 D3 比 D1 分别增加 139.5、213.0、369.0 g，密度从低到高，施氮量 N3 比 N1 处理平均增加 108.0、380.0、337.5 g。至 5 月 4 日，施氮量从 N1 提高到 N3，每增加 15 万株·hm^{-2}密度，角果干重平均升高 184.3、257.3、180.8 g，密度从 D1 增加到 D3，氮每增加 120 kg·hm^{-2}，角果干重平均升高 179.3、145.0、175.8 g。

2.1.3.2　对干物质积累分配率的影响　油菜根所占比重在越冬期（12 月 23 日）后越来越低，地上部分器官所占比重越来越高（图 7）。根和叶所占比重在终花期（3 月 28 日）之前随密度增大而降低的规律很明显，且地上部器官叶片随生育进程的推进逐渐下降，植株叶片到收获时（5 月 4 日）几乎完全脱落。角果期（4 月 10 日），施氮量由 N1 增加到 N3，不同密度根比重分别平均为 16.3%、16.5%、17.7%，叶片比重平均为 3%、3%、3%；依密度增大，根比重分别平均为 17.1%、15.9%、17.5%，叶片比重平均为 3%、3%、3%，可以看

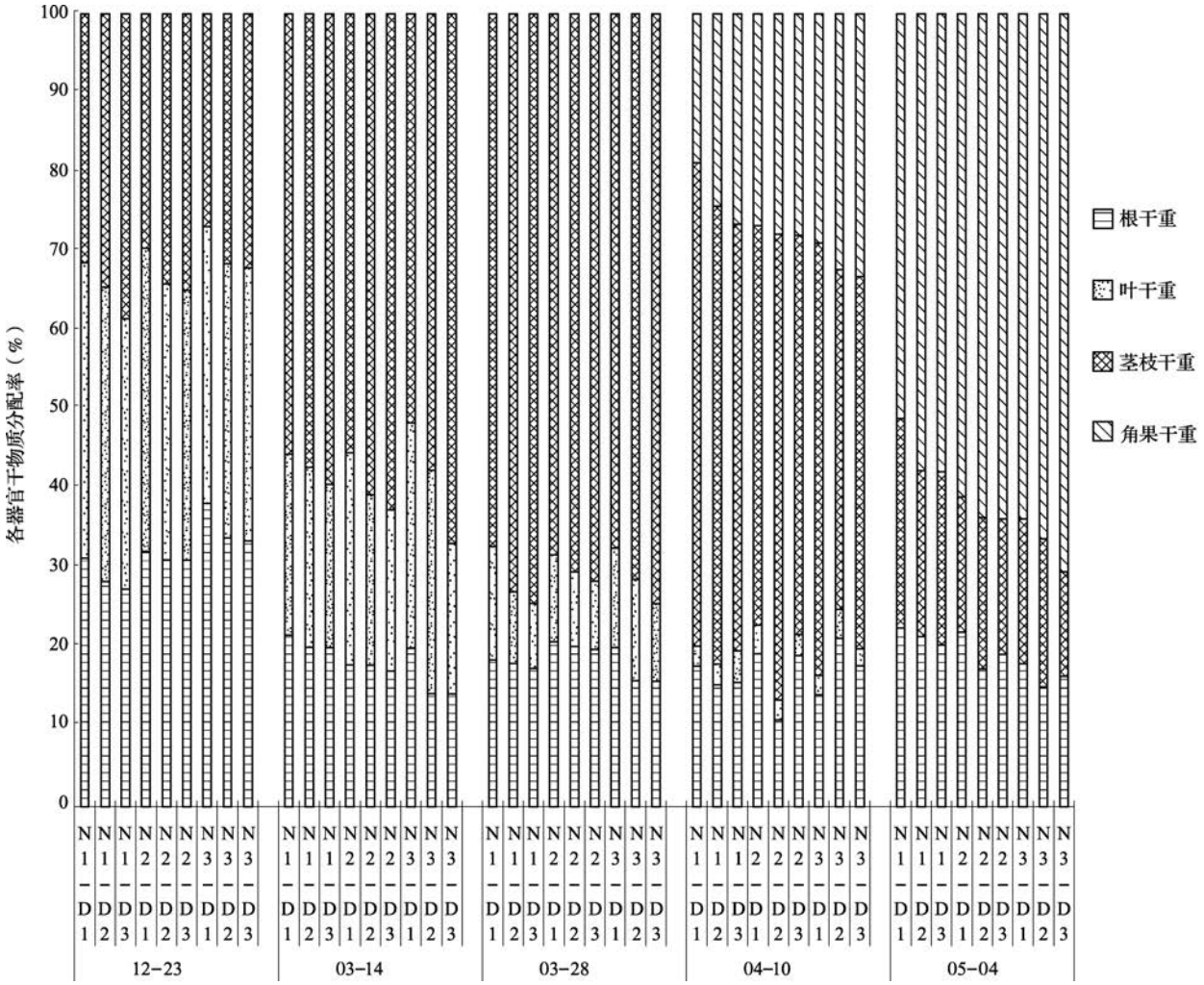

图 7　密度和施氮量对油菜各器官干物质分配的影响

出，角果期叶片比重各处理基本无差异，均为3%左右。越冬后茎枝开始生长，茎枝所占比重随生育期推进呈先上升后下降的趋势。终花期（3月28日）前，随密度增大，茎枝比重增大，之后减小。终花期茎枝比重达到最大值，茎枝比重随施氮量的升高分别平均为71.5%、70.0%、71.0%；密度从低到高，茎枝比重分别平均为67.6%、71.5%、73.4%。茎枝比重到成熟期有所降低，施氮量由N1提高到N3，茎枝所占比重分别平均为23.0%、17.8%、16.7%；密度从低到高，茎枝比重分别平均为20.5%、19.6%、17.4%。花期过后，油菜开始结角果，角果重所占植株的比例越来越高，角果所占比例随施氮量增加和密度增大而增大。到成熟期（5月4日），随施氮量增大，角果比重分别平均为55.5%、62.7%、66.7%；随密度增大，角果比重分别平均为58.6%、62.4%、63.9%。

本试验9个处理中，角果分配比例以N3－D3最大，N1－D1最小。但由图7可以看出，随着施氮量的增加和密度的提高，相邻处理间各器官干物质分配比例的差异总体呈逐渐减小趋势，说明当施氮量和种植密度达到一定程度时，无论增加氮肥或提高密度，这种差异将逐渐消失。

2.2　密度和施氮量对油菜产量及经济性状的影响

2.2.1　密度和施氮量对经济性状的影响

本试验9个处理中，单位面积群体有效分枝数和有效角果数、单位面积产量也以N3－D3最大，N1－D1最小。由表2可以看出，单位面积群体有效分枝数和有效角果数、单位面积产量均随施氮量的增加和密度的增大而增大，密度影响总体上大于施氮量，且随着施氮量的增加和密度的提高，各相邻处理间差异总体呈逐渐变小趋势，也说明当施氮量和种植密度达到一定程度时，无论增加氮肥或提高密度，这种差异将逐渐减小。

表2　密度和施氮量对油菜经济性状和产量影响多重比较

处理	单位面积群体有效分枝数（个·m^{-2}）	单位面积群体有效角果数（个·m^{-2}）	每角粒数（粒）	千粒重（g）	单位面积产量（g·m^{-2}）	标准产量（kg·hm^{-2}）
N1－D1	146±1.0g	7 331±36.1i	17.6±0.8a	2.66±0.10bc	293.18±1.81h	2 265.2±10.9g
N1－D2	240±3d	9 810±20.0g	12.2±0.2c	2.97±0.10a	309.46±1.50f	2 474.4±12.7e
N1－D3	270±6.4c	9 887±26.9f	14.7±0.5b	2.51±0.10bcd	314.78±1.33e	2 617.8±15.5c
N2－D1	150±1.5f	8 790±34.1h	14.7±0.3b	2.69±0.12b	297.58±2.00g	2 278.7±10.9fg
N2－D2	270±3.8c	13 980±18.2d	10.9±0.1f	2.39±0.03d	319.19±1.99d	2 514.9±22.0d
N2－D3	315±4.7b	14 054±27.0c	10.9±0.1f	2.47±0.07cd	328.36±0.67c	2 678.4±17.6b
N3－D1	180±2.5e	11 985±15.0e	11.2±0.1e	2.70±0.11b	310.43±0.82f	2 297.4±13.6f
N3－D2	270±4c	14 241±57.7b	10.9±0.1f	2.49±0.10bcd	330.51±0.55b	2 625.5±18.0c
N3－D3	329±6.4a	14 657±98.2a	11.5±0.1d	2.32±0.03d	341.04±3.96a	2 776.8±23.0a

具体表现为单位面积群体有效分枝数和有效角果数、单位面积产量均随施氮量的增加和密度的增大而增大，施氮量从低到高，密度D3比D1分别平均高出146个、3 497个和27.7 g；密度从低到高，施氮量N3比N1分别平均高出41个、4 618.5个和21.5 g，各处理间差异均达到显著水平。每角粒数和千粒重不同施氮水平、不同密度间变化无明显规律，说明其主要受遗传因素影响，而栽培环境对其影响不大。

2.2.2　密度和施氮量对油菜产量的影响

从表2可以看出，本试验9个处理中，产量以N3－D3最大，N1－D1最小。施氮量从低到高，密度D3比D1分别高出352.6、399.7、479.4 kg·hm^{-2}；密度从低到高，施氮量N3比施氮量N1分别高出32.2、151.1、159.0 kg·hm^{-2}，各处理间差异基本达到显著水平（表2）。施氮量与种植密度对油菜产量的影响规律同对单位面积群体油菜生长发育动态、产量构成因素、产量的影响规律一致，随施氮量的增加和密度的增大而增大，密度影响总体上大于施氮量，且随着施氮量的增加和密度的提高，各相邻处理间油菜产量差异总体呈逐渐变小趋势，也说明当施氮量和密度达到一定程度时，无论增加氮肥或提高密度，这种差异将逐渐减小。

2.3　油菜产量与生长发育、产量构成因素相关性分析

从表3产量与单位面积群体生长发育和经济性状相关分析可以看出，油菜单位面积群体根颈粗、绿叶数、叶绿素、干物质积累量（整株）、有效分

枝数、有效角果数均与产量存在显著正相关；每角粒数和千粒重除与单位面积群体绿叶数、干物质积累量、有效角果数呈显著负相关外，与其他各个指标关系均不大；叶绿素和有效角果数不显著外，单位面积群体根颈粗、绿叶数、叶绿素、干物质积累量（整株）、有效分枝数、有效角果数相互之间关系均显著。

表 3　油菜产量与单位面积群体生长发育指标和经济性状的相关性

单位面积群体生长发育指标与性状	产量	根颈粗	绿叶数	叶绿素	干物质积累量	有效分枝数	有效角果数	每角粒数	千粒重
产量	1.000	0.981**	0.967**	0.949**	0.935**	0.977**	0.734*	−0.541	−0.641
根颈粗		1.000	0.956**	0.965**	0.946**	0.990**	0.784*	−0.633	−0.648
绿叶数			1.000	0.901**	0.964**	0.965**	0.854**	−0.682*	−0.681*
叶绿素				1.000	0.851**	0.959**	0.619	−0.449	−0.585
干物质积累量					1.000	0.952**	0.925**	−0.768*	−0.685*
有效分枝数						1.000	0.796*	−0.650	−0.618
有效角果数							1.000	−0.891**	−0.675*
每角粒数								1.000	0.294
千粒重									1.000

注：* 和 ** 分别表示在 0.01 和 0.05 水平上 F 检验显著。

总之，油菜生长发育和经济性状均与产量之间存在一定的相关关系，通过密度与氮肥二者相互作用促进油菜前期生长发育与经济性状的形成，最终获得高产。高产下的油菜生长发育和产量构成因素具体表现为单位面积群体根颈粗、绿叶数、功能叶叶绿素、整株及各器官干物质积累量、角果分配比例、有效分枝数、有效角果数和产量均较大。

3　讨论

3.1　种植密度与施氮量对油菜生长发育的影响

不同施氮量、种植密度对油菜生长发育都有一定的调节作用。增施氮肥或降低密度能延长油菜全生育期天数，且氮肥对全生育期的影响大于密度，此结果与已有报道一致[19]。油菜株高随密度增大大体呈下降趋势，随施氮量增加表现出先升后降趋势，这种变化规律在其它作物上也有体现[20-21]，当肥力较低时，增施氮肥能够有效促进作物生长，但当氮肥能够满足作物生长要求时，再增施氮肥反而会起反作用，导致作物株高降低。但此结果与曾宇[19]试验结果得出的株高随密度先升高后降低的结论相反，这或许与肥力水平有关，当作物处于低肥环境时，土壤养分远远不能满足密度较大群体植株的个体发育，而肥力较高时，虽然能够满足相对较高密度群体的株型生长，但其能满足的密度群体也有一定限度，若密度过大，光温、空间条件有限，群体植株个体将生长较小。适宜的种植密度是以培育高光效的群体结构为目的，从而增加单位面积产量，最终实现高产[22]。随着油菜种植密度的增加，单株根颈粗、绿叶数等一些生长指标会受到抑制，但是会充分发挥群体效应，大幅度提高群体的叶面积指数和光能利用率，从而实现油菜高产[23-24]，同时氮肥对油菜生长也具有促进作用，油菜长势在高氮条件下表现较好，说明适量增施氮肥有利于油菜植株的生长。本研究结果表明，随着种植密度和施氮量的增加，单位面积油菜群体生理特性指标值（如根颈粗、绿叶数、功能叶叶绿素、各器官干物质积累量）均有所提高，从而实现了高产。有研究指出油菜要想获得高产，必须有一定水平相适应的土壤环境，分布在土壤中深且多的纵向根系有利于增强群体地上部光合作用，从而获得高产[25]。直播油菜无需断根处理，在生长发育后期因主根发达，吸收养分的能力较强，同时适度增加密度可以大大增加根层群体结构，更能加强对土壤养分的吸收能力[5,26]。本研究结果表明，随着种植密度的提高，单位面积群体根颈粗也随之增大，大大提高了油菜对养分的吸收量。油菜育苗移栽技术费时费工导致的农民种植积极性不高的基本现状下，积极发展高密度直播油菜加之机械化生产，能最大化地提高油菜单位面积产量。

3.2　种植密度与施氮量对油菜产量的影响

种植密度与施氮量交互作用对油菜产量的影响报道较多，但不同试验条件下得到的结论不尽相同。何应荣等[27]表明密度 30～45 万株·hm^{-2} 和氮 180 kg·hm^{-2} 处理产量最高，左青松等[28]则得出密

度45万株·hm^{-2}和氮240 kg·hm^{-2}处理产量最高，韩自行等[29]研究结果表明，密度增加到45万株·hm^{-2}和氮225 kg·hm^{-2}可获得3 750 kg·hm^{-2}以上的高产，本试验得出密度45万株·hm^{-2}和氮360 kg·hm^{-2}处理产量最高，为2 776.8 kg·hm^{-2}。栽培方式、生态气候和地理位置等的不同，造成油菜高产的种植密度和施氮量组合相差较大。总体而言，本试验条件下高密处理（45万株·hm^{-2}）平均产量优于中密（30万株·hm^{-2}）、低密（15万株·hm^{-2}）处理，结果与左青松等[28]和韩自行等[29]报道一致。本研究也可以看出，高密低氮组合可以实现低密高氮组合相同的目标产量，这与前人研究结果相一致[17]。此研究中120 kg·hm^{-2}施氮量和45万株·hm^{-2}种植密度组合不仅可以实现360 kg·hm^{-2}施氮量和15万株·hm^{-2}种植密度组合的产量，增产13.9%，同时每公顷土地节约120 kg的氮肥用量，这为适量减少化肥用量，降低油菜种植成本提供了理论支持。

油菜高产的实现是前期生长发育与有效分枝数、有效角果数、每角粒数和千粒重等产量构成因素共同作用的结果。本试验结果表明，每角粒数和千粒重不同施氮水平、不同密度间变化无明显规律，可能其主要受遗传因素影响，而栽培环境对其影响不大，这与以往的研究是一致的[30-33]。因此产量高低主要由有效分枝数和有效角果数来决定。本研究表明随种植密度和施氮量的增加，单位面积群体有效分枝数和有效角果数显著增加，相关分析表明产量与单位面积群体有效分枝数和群体有效角果数呈显著正相关，在一个试验因子（氮肥/密度）相同的条件下，随着另一个试验因子（密度/氮肥）水平的增加，单位面积群体有效分枝数和群体有效角果数增加，产量增加。但氮肥过多或密度过大会造成土壤湿度增大，菌核病严重，从而影响产量。此次试验中随着氮肥增加和种植密度增大，产量也随之增大，未出现减产，但各处理间差异总体呈变小趋势，说明氮肥用量和种植密度达到某个水平后将稳定甚至出现减产，具体还有待进一步研究。

4　结论

不同施氮水平下密度对油菜生育期无显著影响，而在低密度下施氮量120与360 kg·hm^{-2}全生育期天数达到显著性差异。株高随施氮量增加先升后降，随种植密度增大大体呈下降趋势。

随着施氮量和密度的增加，单位面积群体绿叶数、根颈粗、功能叶叶绿素、整株及各器官干物质积累量、角果分配比例、有效角果数、有效分枝数和产量均增大，密度对它们的影响总体上均大于施氮量，且随着施氮量的增加和种植密度的提高，各相邻处理间差异总体呈变小趋势。直播油菜千粒重、每角粒数与密度和施氮量的关系不大。

单位面积群体绿叶数、根颈粗、功能叶叶绿素、整株及各器官干物质积累量、角果分配比例、有效角果数、有效分枝数均与产量呈显著相关。

密度对产量的影响总体上大于氮肥，适量减少氮肥同时适度提高密度依然可以获得高产。本试验若以360 kg·hm^{-2}施氮量和15万株·hm^{-2}种植密度组合的经济产量为目标产量，120 kg·hm^{-2}施氮量和45万株·hm^{-2}种植密度组合不仅可以实现目标产量，同时每公顷可以节省120 kg的氮肥投入。

参考文献：

[1]　殷艳，廖星，余波，等．我国油菜生产区域布局演变和成因分析［J］．中国油料作物学报，2010，32（1）：147－151.

[2]　张春雷．双低油菜高产新技术［M］．北京：中国农业科学技术出版社，2006.

[3]　王汉中．我国油菜产业发展的历史回顾与展望［J］．中国油料作物学报，2010，32（2）：300－302.

[4]　沈金雄，傅廷栋，涂金星，等．中国油菜生产及遗传改良潜力与油菜生物柴油发展前景［J］．华中农业大学学报，2007，26（6）：894－899.

[5]　官春云．改变冬油菜栽培方式提高和发展油菜生产［J］．中国油料作物学报，2006，28（1）：83－85.

[6]　张春雷，李俊，余利平，等．油菜不同栽培方式的投入产出比较研究［J］．中国油料作物学报，2010，32（1）：57－64.

[7]　宋稀，刘凤兰，郑普英，等．高密度种植专用油菜重要农艺性状与产量的关系分析［J］．中国农业科学，2010，43（9）：1800－1806.

[8]　赵继献，程国平，任廷波，等．不同氮水平对优质甘蓝型黄籽杂交油菜产量和品质性状的影响［J］．植物营养与肥料学报，2007，13（5）：882－889.

[9]　Rathke G W，Behrensb T，Diepenbrock W．Integrated nitrogen management strategies to improve seed yield oil content and nitrogen efficiency of winter oilseed rape（*Brassica napus* L.）：A review［J］．Agriculture，Ecosystem and Environment，2006，117：80－108.

[10]　高娜，张玉龙，曲晶，等．水氮联合调控对小油菜生长、产量及品质的影响［J］．中国土壤与肥料，2016，（4）：84－89.

[11]　韩上，武际，吴新民，等．安徽省直播冬油菜氮磷钾硼肥施用效果研究［J］．中国土壤与肥料，2015，（1）：38－43.

[12]　曾宇，雷雅丽，李京，等．氮、磷、钾用量与种植密度对油菜产量和品质的影响［J］．植物营养与肥料学报，2012，18（1）：146－153.

[13]　Claudia A，Poreellil，Flavio H，et al．The K/Na and Ca/Na ratios and rapeseed yield，under soil salinity or sodicity［J］．Plant and Soil，1995，175：251－255.

[14] Egesel M，Kemal G，Fatih K. Changes in yield and seed quality traits in rapeseed genotypes by sulphur fertilization [J]. Eur Food Res Technol，2009，229：505－513.
[15] Daren C，Mark A，Patrick F，et al. Inheritance of long chain fatty acid content in rapeseed（*Brassica napus* L.）[J]. Euphytica，2008，164：583－592.
[16] 王翠翠，陈爱武，王积军，等. 湖北双季稻区免耕直播油菜生长及产量形成 [J]. 作物学报，2011，37（4）：694－702.
[17] 张晓龙，何俊龙，宋海星，等. 播期、密度和施肥量对直播油菜重要农艺性状与产量的影响 [J]. 中国土壤与肥料，2014，（5）：70－74.
[18] 郑红裕. 播期、密度与施氮量对油菜收获指数的影响研究 [D]. 武汉：华中农业大学，2015.
[19] 曾宇. 不同施肥量、种植密度对油菜生长及产量的影响 [D]. 武汉：华中农业大学，2011.
[20] Chen W P，Hou Z A，Wu L S，et al. Effects of salinity and nitrogen on cotton growth in arid environment [J]. Plant and Soil，2010，326（1/2）：61－73.
[21] 曾文冶，徐驰，黄介生，等. 土壤盐分与施氮量交互作用对葵花生长的影响 [J]. 农业工程学报，2014，30（3）：86－94.
[22] 官春云. 世界油菜生产的发展和我国长江流域油菜带的开发 [J]. 作物研究，1997，11（1）：125.
[23] 刘后利. 实用油菜栽培学 [M]. 上海：上海科学技术出版社，1987. 345.
[24] Diepenbronck W. Yield analysis of winter oilseed rape（*Brassica napus* L.）：A review [J]. Filed Crops Res，2000，67：35－49.
[25] 凌启鸿，陆卫平. 水稻根系分布与叶角关系的研究初报 [J]. 作物学报，1989，15（2）：123－131.
[26] 苏伟，鲁剑巍，周广生，等. 免耕及直播密度对油菜生长、养分吸收和产量的影响 [J]. 中国农业科学，2011，44（7）：1519－1526.
[27] 何应荣，向凤玲. 播期、种植密度及施氮水平对稻茬免耕直播油菜产量的影响 [J]. 作物研究，2014，28（7）：787－791.
[28] 左青松，曹石，杨士芬，等. 不同氮肥和密度对油菜机械收获损失率的影响 [J]. 作物学报，2014，40（6）：1109－1116.
[29] 韩自行，张长生，王积军，等. 氮肥运筹对稻茬免耕油菜农艺性状及产量的影响 [J]. 作物学报，2011，37（12）：2261－2268.
[30] 刁操铨. 作物栽培学各论（南方本）[M]. 北京：中国农业出版社，1996. 304－341.
[31] 宋明丹，李正鹏，冯浩. 不同水氮水平冬小麦干物质积累特征及产量效应 [J]. 农业工程学报，2016，32（2）：119－126.
[32] 赵雪飞，王丽金，李瑞奇，等. 不同灌水次数和施氮量对冬小麦群体动态和产量的影响 [J]. 麦类作物学报，2009，29（6）：1004－1009.
[33] Karam F，Kabalan R，Breidi J，et al. Yield and water－production functions of two durum wheat cultivars grown under different irrigation and nitrogen regimes [J]. Agricultural Water Management，2009，96（4）：603－615.

Effects of densities and nitrogen fertilizer rates on growth and yield of rapeseed

TIAN Xiao-qin[1]，LI Zhuo[1,2*]，LIU Yong-hong[1]（1. Crop Research Institute，Sichuan Academy of Agricultural Sciences，Chengdu Sichuan 610066；2. Provincial Key Laboratory of Water-Saving Agriculture in Hill Areas of Southern China，Chengdu Sichuan 610066）

Abstract：Planting density and nitrogen（N）fertilizer rate are two important factors to affect rapeseed growth and production，and suitable planting density and N fertilizer application are efficient to improve both rape growth and yield. One popular variety（Huayouza 9）was used in a field experiment in Yucheng village，Jianyang city，Sichuan province in 2015～2016. The experiment was arranged using a split-plot design with three replicates，and the main plots had three N fertilizer level（120 kg·hm^{-2} N1，240 kg·hm^{-2} N2，360 kg·hm^{-2} N3），while three plant densities（15×10^4 plants·hm^{-2} D1，30×10^4 plants·hm^{-2} D2，45×10^4 plants·hm^{-2} D3）were set up in subplots. The objective of this study was to evaluate effect of interaction between different fertilizer levels and density levels on growth period and process，biomass accumulation and distribution，yield and component，and the relationship among them. The results showed that the growth period of rape was delayed with the increase of N fertilizer rates. Density had no significant effect on rape growth period under the different N fertilizer rates. Plant height went up first and then down with the increase of N fertilizer，but a downward trend was observed with the increase of planting density. Furthermore，unit area root stout，leaf number，chlorophyll，dry weight of per plant and each organs，pod proportion，branch number，effective siliques were increased significantly with the increasing density and N fertilizer，and effect of fertilization was larger than density. The differences between each adjacent treatment were gradually decreasing with increased nitrogen fertilizer and density. Correlation analysis found that yield had significant positive relationship with unit area root stout，leaf number，chlorophyll，dry weight of per plant and each organs，pod proportion，branch number，effective siliques. The influence of transplanting density on yield was larger than N fertilizer，thus the less usage of N fertilizer and proper increasing density could achieve high yield. In this study，the target yield with 360 kg·hm^{-2} N fertilizer and 15×10^4 plants·hm^{-2} planting density could be achieved by 120 kg·hm^{-2} N fertilizer and 45×10^4 plants·hm^{-2} planting density，and the latter also saved 120 kg·hm^{-2} N fertilizer.

Key words：rapeseed；planting density；nitrogen fertilizer；growth；yield