

直播和移栽冬油菜生长和产量形成对 氮磷钾肥的响应差异

王寅^{1,2}, 汪洋¹, 鲁剑巍^{1*}, 李小坤¹, 任涛¹, 丛日环¹

(1 华中农业大学资源与环境学院, 农业部长江中下游耕地保育重点实验室, 湖北武汉 430070;

2 吉林农业大学资源与环境学院, 吉林长春 130118)

摘要: 【目的】直播和移栽是目前长江流域冬油菜的两种主要种植方式,其发展状况对我国油菜产业发展和油料供应安全具有重要意义。直播和移栽冬油菜的栽培过程和植株密度存在显著差异,因此两者的个体形态、生长发育及产量形成有所差异,对养分的施用响应也可能不同。本研究利用大田试验研究施肥和种植方式对冬油菜生长发育和产量形成的影响,比较不同种植方式下冬油菜的生长特点及其差异。【方法】采用大田试验,研究氮磷钾肥配施(NPK)、不施氮(-N)、不施磷(-P)和不施钾(-K)处理下直播和移栽冬油菜各生育期的株高、根颈粗和叶片数。越冬期低温和干旱逆境发生时测定顶四叶的生理生化指标,包括硝酸还原酶活性、过氧化物酶活性、过氧化氢酶活性、可溶性蛋白含量、可溶性糖含量、游离脯氨酸含量和丙二醛含量。角果期调查菌核病的发病率。成熟期调查产量构成因素,包括密度、分枝数、单株角果数、主序角果数、角粒数和千粒重,最后进行实产统计。【结果】直播冬油菜前期株高相比移栽冬油菜增长较快,薹期后则明显降低,根颈粗和叶片数在各生育时期均显著较低。直播冬油菜越冬期叶片生理生化水平较移栽冬油菜偏低,丙二醛含量显著较高。直播冬油菜角果期菌核病的发病率平均为21.8%,远高于移栽冬油菜的8.5%。两种种植方式冬油菜成熟期表现出显著不同的产量构成,相比移栽冬油菜,直播冬油菜的植株密度显著较高,而个体分枝数、角果数和角粒数则显著较少,而且主序角果的比例明显较高。最终,直播和移栽冬油菜在NPK处理的产量非常接近,分别为2019和2081 kg/hm²,但直播冬油菜在缺素条件下的产量较移栽冬油菜均显著偏低。相比NPK处理,任一养分缺乏均显著阻碍直播和移栽冬油菜的生长发育和产量形成,其中氮素影响最为显著和全面,其次是磷素,钾素影响相对较小。与移栽冬油菜不同,直播冬油菜成熟期的植株密度在缺素时出现下降,氮、磷缺乏导致直播冬油菜密度分别降低53.6%和18.7%。养分缺乏条件下较差的个体生长和降低的植株密度是导致直播冬油菜产量降幅偏高的主要原因。【结论】当前栽培方式下,直播冬油菜起始阶段个体发育较差,导致生育期内生长表现和产量形成对养分缺乏更为敏感。相比移栽冬油菜,直播冬油菜应更重视氮磷钾养分的平衡施用,以促进个体健壮和群体稳定而获得高产。直播冬油菜的养分管理研究需进一步加强,尤其是应对逆境发生的施肥调控技术与措施。

关键词: 冬油菜; 直播; 移栽; 氮磷钾; 生长发育; 发病率; 产量

中图分类号: S565.403 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2016)01-0132-11

Response differences in growth and yield formation of direct-sown and transplanted winter oilseed rape to N, P and K fertilization

WANG Yin^{1,2}, WANG Yang¹, LU Jian-wei^{1*}, LI Xiao-kun¹, REN Tao¹, CONG Ri-huan¹

[1 College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Key Laboratory of Arable Land Conservation (Middle and Lower Reaches of Yangtze River), Ministry of Agriculture, Wuhan 430070, China; 2 College of Resources and Environmental Sciences, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China]

Abstract: 【Objectives】 Direct-sowing (DOR) and transplanting (TOR) are the two dominated planting methods of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) in the Yangtze River Basin, China. The establishment processes and

收稿日期: 2014-09-06 接受日期: 2015-01-07 网络出版日期: 2015-07-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(31471941); 国家油菜产业技术体系建设专项(CARS-13); 长江学者和创新团队发展计划项目(IRT1247)资助。

作者简介: 王寅(1986—),男,陕西咸阳市人,博士,讲师,主要从事作物养分管理与施肥研究。E-mail: wy1986410@163.com

* 通信作者 E-mail: lunm@mail.hzau.edu.cn

planting density are contrasting between the two types of oilseed rape, which might lead to their differences in the individual morphology, growth process, and yield formation, as well as the fertilization responses. In this study, a field experiment was conducted to evaluate effects of fertilizers' application and establishment methods on growth and yield formation of winter oilseed rape, and to compare characters and differences of the establishment methods.

【Methods】 The field experiment included four treatments: balanced NPK fertilizers (NPK), no N (-N), no P (-P) and no K (-K). The plant height, rootstock diameter and leaf number of oilseed rapes at different growth stages were investigated. When low temperature and drought occurred at the over-wintering stage, physiological and biochemical properties were measured by sampling the top four leaves, including the activities of nitrate reductase (NR), peroxidase (POD) and catalase (CAT), and the concentrations of soluble protein, soluble sugar, proline and malondialdehyde (MDA). The incidences of sclerotinia were investigated at the pod-development stage. The seed yield was weighed at maturity and the yield components were investigated. **【Results】** Compared with transplanting, the individual plant height of direct-sowing oilseed rape is higher at the early stages and obviously decreased after the bolting stage, and the rootstock diameter and leaf number are significantly lower throughout the growing seasons. The physiological and biochemical index levels of DOR are lower than that of TOR, while the MDA concentration is significantly higher. At the pod-development stage, the incidence of sclerotinia is 21.8% for DOR, which is significantly higher than that of TOR (8.5%). The yield components of DOR and TOR at maturity are different. Compared with TOR, the DOR planting density is significantly higher, but its individual plant produces significantly fewer branches, pods/plant, and seeds/pod. Furthermore, the proportion of pod number on main racemes of DOR is higher than that of TOR. The seed yields in the NPK treatment are equal between DOR and TOR, which are 2019 and 2081 kg/ha. However, under the nutrient deficiency condition, DOR shows significantly low seed yields compared with TOR. The growth and yield formation are limited by the deficiency of any kind of nutrients, and the N deficiency shows the most comprehensive and strongest negative effects, and followed by P deficiency, while the negative effect is relatively lower for K deficiency. Contrary to TOR performance, DOR planting density is reduced in the nutrient deficiency treatments. The density reductions are 53.6% and 18.7% in the -N and -P treatments, respectively. The limited individual growth and reduced population density together result in the higher yield decreases for direct sowing oilseed rape under the nutrient deficiency condition. **【Conclusion】** The growth and yield formation of winter oilseed rape are more sensitive to nutrient deficiency when they are established by direct-sowing, due to the weaker individual growth at the initial stage under the current cultivation pattern. Compared with transplanting, nutrient management for direct sowing oilseed rape should pay more attention on the balanced N, P and K fertilizers application to enhance individual growth and obtain stable population density for high seed yield at maturity. The direct sowing oilseed rape nutrient management strategy should be further explored, especially for fertilization regulating practices to environmental stress.

Key words: oilseed rape; direct-sowing; transplanting; nitrogen, phosphorus and potassium; individual growth; incidence; seed yield

油菜是我国重要的油料作物,占国产油料作物产油的57%^[1]。长江流域作为我国冬油菜主产区,常年油菜种植面积和总产量占全国的80%以上^[2]。该区域冬油菜当前种植方式主要为移栽和直播,两种栽培模式的比例和面积基本一致^[3]。育苗移栽过程繁琐且劳动力需求高,经济效益相对较差。直播种植操作简单,轻简高效,相对经济效益较好。直播冬油菜在大田环境直接出苗极易受到各种不良气候或环境因素影响而导致个体生长较弱^[4-6],因此

一般要提高种植密度,发挥群体优势而获得高产^[7-8]。研究显示,长江流域直播冬油菜的适宜种植密度为 $30 \times 10^4 \sim 45 \times 10^4$ plant/hm²^[9-13],远高于移栽冬油菜的 $9 \times 10^4 \sim 12 \times 10^4$ plant/hm²^[13-16]。种植密度差异显著影响作物的个体形态和生长发育进程,进而可能影响产量形成及对养分施用的响应^[8, 17-19]。矿质养分是植物生长和发育的基础,施肥则是保障作物健壮生长、获得高产的重要栽培措施^[20]。大量研究表明,合理施肥可有效促进油菜生

长发育,增加养分吸收和籽粒产量^[11, 16, 19]。长期以来,长江流域冬油菜的施肥效果及养分管理研究是以移栽方式为主,直播方式的相关研究则相对滞后。为此,我们设置直播和移栽冬油菜的氮磷钾肥同田对比试验,研究施肥和种植方式对冬油菜生育期内个体生长动态和成熟期产量及产量构成因素的影响,明确两种种植方式下冬油菜生长发育和产量形成对养分的响应特点及其差异,以期为直播和移栽冬油菜的高产栽培和养分调控提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

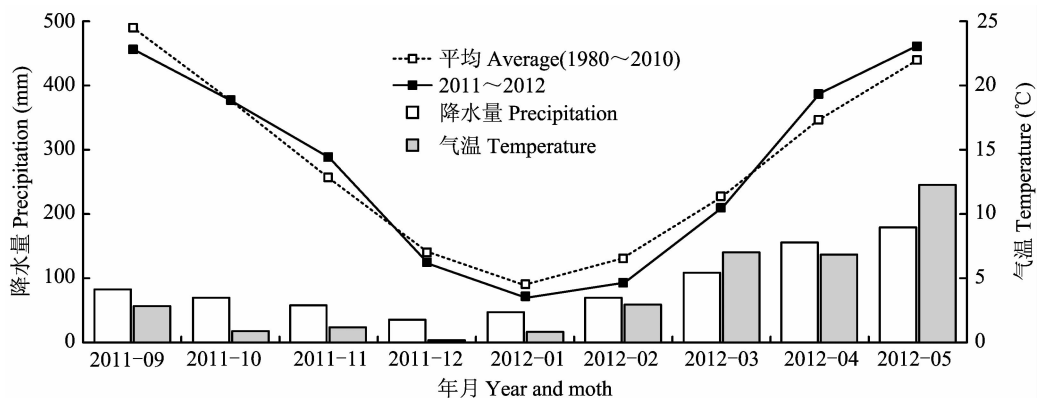


图1 冬油菜生育期天气状况(湖北蕲春,2011~2012)

Fig.1 Precipitation and temperature during the winter oilseed rape growth season of 2011-2012 in Qichun City, Hubei

1.2 试验设计

田间试验分为两个区组,即直播和移栽两种种植方式。两区组内均设4个施肥处理:1)NPK(氮磷钾肥配施);2)-N(PK,即不施氮);3)-P(NK,即不施磷);4)-K(NP,即不施钾)。除各缺素处理不施相应养分外,其它处理的养分施用量均保持一致:N 180 kg/hm²、P₂O₅ 90 kg/hm²、K₂O 120 kg/hm²、硼砂 15 kg/hm²^[13, 16, 21]。直播冬油菜于2011年9月27日播种,播种量为4.5 kg/hm²;移栽冬油菜于2011年9月27日播种育苗,苗床中基础的氮、磷养分供应量分别为N 20 kg/hm²和P₂O₅ 5 kg/hm²,11月3日(五叶期)进行移栽,移栽密度为11.3 × 10⁴ plant/hm²。试验田所有小区于2012年5月7日进行收获,直播和移栽冬油菜的生育期均为222天。

田间试验所有小区的磷肥和硼砂全部作基肥施用。直播冬油菜的氮、钾肥分别施用40%和60%作基肥,4叶期追施氮肥的30%,越冬期分别追施氮、钾肥的15%和20%,剩余氮、钾肥在抽薹前作第3次追肥。移栽冬油菜的氮、钾肥均施用60%作基肥,越冬

田间试验于2011~2012年设置在湖北省蕲春县向桥乡(30°20'N,115°46'E),试验田土壤基本理化性状为:pH 4.9,有机质34.3 g/kg,碱解氮128.1 mg/kg,有效磷8.4 mg/kg,速效钾46.8 mg/kg,有效硼0.15 mg/kg。供试油菜品种为华油杂9号,前茬作物为水稻。供试肥料品种分别为尿素(含N 46%)、过磷酸钙(含P₂O₅ 12%)、氯化钾(含K₂O 60%)、硼砂(含B 11%)。

冬油菜生育期内逐月天气状况及多年平均状况见图1。试验年度秋冬季(2011年9月至2012年2月)降水较常年明显偏少,冬季(2012年1~2月份)气温也相对偏低。

期追施氮、钾肥的20%,剩余氮、钾肥在抽薹前作第2次追肥。所有处理均设3次重复,随机区组排列,小区面积20 m²。除种植方式和施肥措施外,其它田间管理措施与当地农民习惯保持一致。

1.3 测定指标和方法

试验田基础土壤样品在基肥施用前采集,均匀布点15个取0—20 cm耕层土壤于实验室风干磨细过筛。常规法测定土壤基本理化性质^[22],包括pH(水土比2.5:1)、有机质(重铬酸钾容量法)、碱解氮(碱解扩散法)、有效磷(Olsen法)、速效钾(NH₄OAc浸提法)和有效硼(姜黄素比色法)。

生育期内对冬油菜个体生长指标进行田间调查,包括株高、根颈粗和叶片数。株高和根颈粗在苗期(播种后77天)、越冬期(播种后137天)、薹期(播种后166天)、终花期(播种后192天)和成熟期(播种后222天)进行调查,而叶片数在苗期、越冬期和薹期进行调查。每小区选20株有代表性的植株进行调查,取平均值作为该小区调查结果。越冬期调查结束后对冬油菜叶片(顶4叶)进行取样,

以冰盒保存迅速带回实验室。按常规法测定生理生化指标^[23],包括硝酸还原酶活性(磺胺比色法)、过氧化物酶活性(愈创木酚法)、过氧化氢酶活性(紫外吸收法)、可溶性蛋白含量(考马斯亮兰 G-250 染色法)、可溶性糖含量(蒽酮比色法)、游离脯氨酸含量(茚三酮法)和丙二醛含量(硫代巴比妥酸法)。角果成熟期(播种后 210 天)调查菌核病发病情况,以 1/3 分枝发病或主茎病斑超过 3 cm 为标准确定发病植株数,发病率(%)=(小区病株数/小区总株数)×100^[24]。

成熟期收获前对冬油菜产量构成因素进行田间调查,包括密度、分枝数、单株角果数、主序角果数、角粒数和千粒重。直播冬油菜每小区选密度均匀的 1 m² 样方调查,移栽冬油菜选 3 行植株(株距 33 cm)调查 1 m 长度内个体数量。每小区选 20 株有代表性植株进行个体产量构成因素调查,取平均值作为该小区调查结果。各小区收获后对其产量进行单收单打并测定含水率,以干重表示籽粒产量。

1.4 统计分析

试验数据均采用 Excel 软件计算,用 SPSS 软件

统计分析。利用两因素方差分析研究施肥和种植方式对各项指标的影响,以 LSD 法检验处理间 $P < 0.05$ 水平的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 氮磷钾肥对直播和移栽冬油菜株高的影响

施肥和种植方式显著影响冬油菜不同生育期的株高,且两者表现出显著交互作用(图 2)。氮、磷、钾肥施用显著增加直播和移栽冬油菜生育期内的植株高度。直播冬油菜株高在所有生育期均表现为 NPK 和 -K 处理显著高于 -P 处理,而 -N 处理最低。移栽冬油菜苗期和越冬期的株高在施肥处理间无显著差异,薹期开始则以 NPK 和 -K 处理显著高于 -N 和 -P 处理。相比移栽冬油菜,直播冬油菜苗期和越冬期的株高较高,尤其在 NPK 和 -K 处理。冬油菜生长进入薹期后,两种植植方式的株高在 NPK 和 -K 处理无明显差异,而直播方式在 -N 和 -P 处理的株高开始显著低于移栽方式。终花期和成熟期内,直播冬油菜各施肥处理的株高均低于移栽冬油菜,尤其在 -N 和 -P 处理显著偏低。

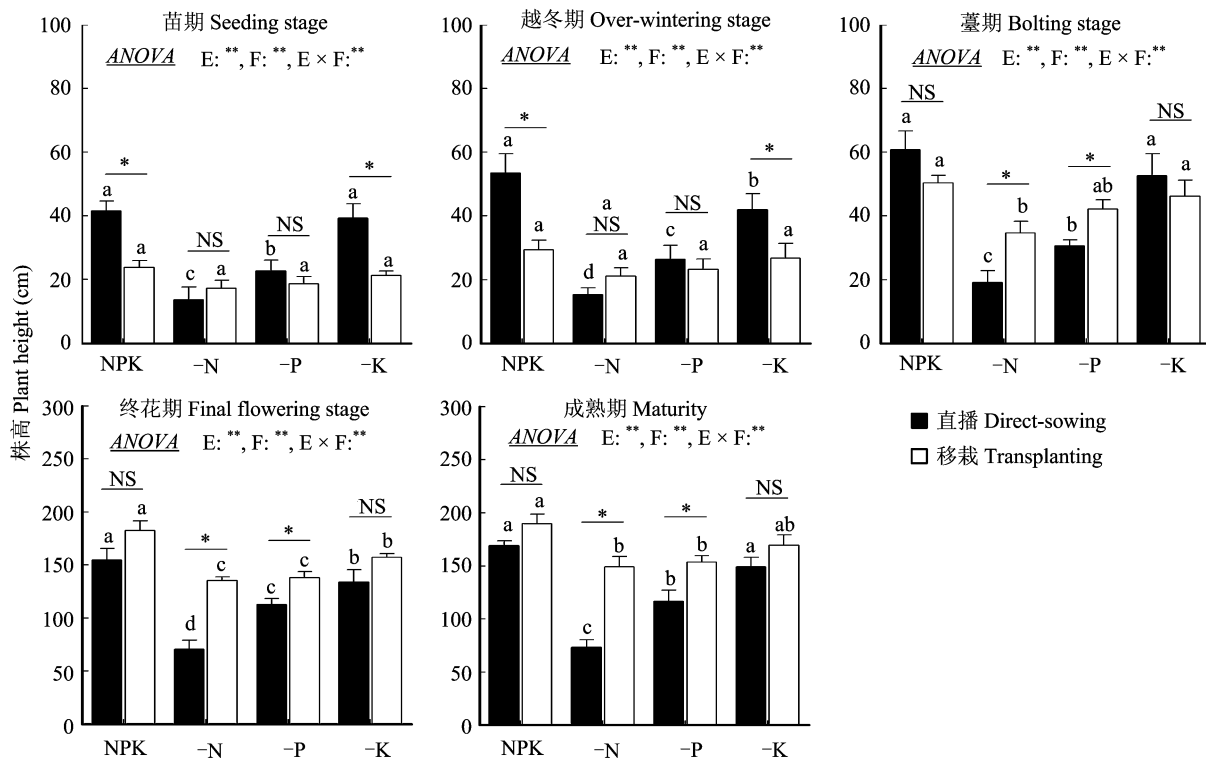


图 2 施肥和种植方式对冬油菜不同生育期株高的影响

Fig. 2 Effects of fertilization and establishment method on plant heights of winter oilseed rape at different growth stages

[注 (Note): E—种植方式 Establishment method; F—施肥处理 Fertilization treatment; 同一种植方式方柱上的不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$); 同一处理的两个柱子上的符号表示两种植植方式之间的差异显著性 In the same planting method, the different lowercases above the bars are significantly different at $P < 0.05$; In the same treatment, the symbols above bars indicate the significant differences between planting methods. *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$; NS—表示差异不显著 No significance.]

2.2 氮磷钾肥对直播和移栽冬油菜根颈粗的影响

施肥和种植方式对冬油菜各生育期的根颈粗均有显著影响,而两者仅在苗期表现出显著交互作用(图3)。所有生育期内,直播冬油菜的根颈粗均以 NPK 和 -K 处理显著高于 -P 处理,再显著高于 -N 处理,而移栽冬油菜苗期各施肥处理间的根颈粗差异较小,仅 -N 处理显著较低。随生育进程推进,移

栽冬油菜缺素处理的根颈粗较 NPK 处理显著下降,以缺氮最为严重,其次是缺磷。两种种植方式下 NPK 和 -K 处理冬油菜的根颈粗在苗期无显著差异,而 -N 和 -P 处理则以直播冬油菜显著较低。从越冬期至成熟期,直播冬油菜各施肥处理的根颈粗较移栽冬油菜均显著偏低。

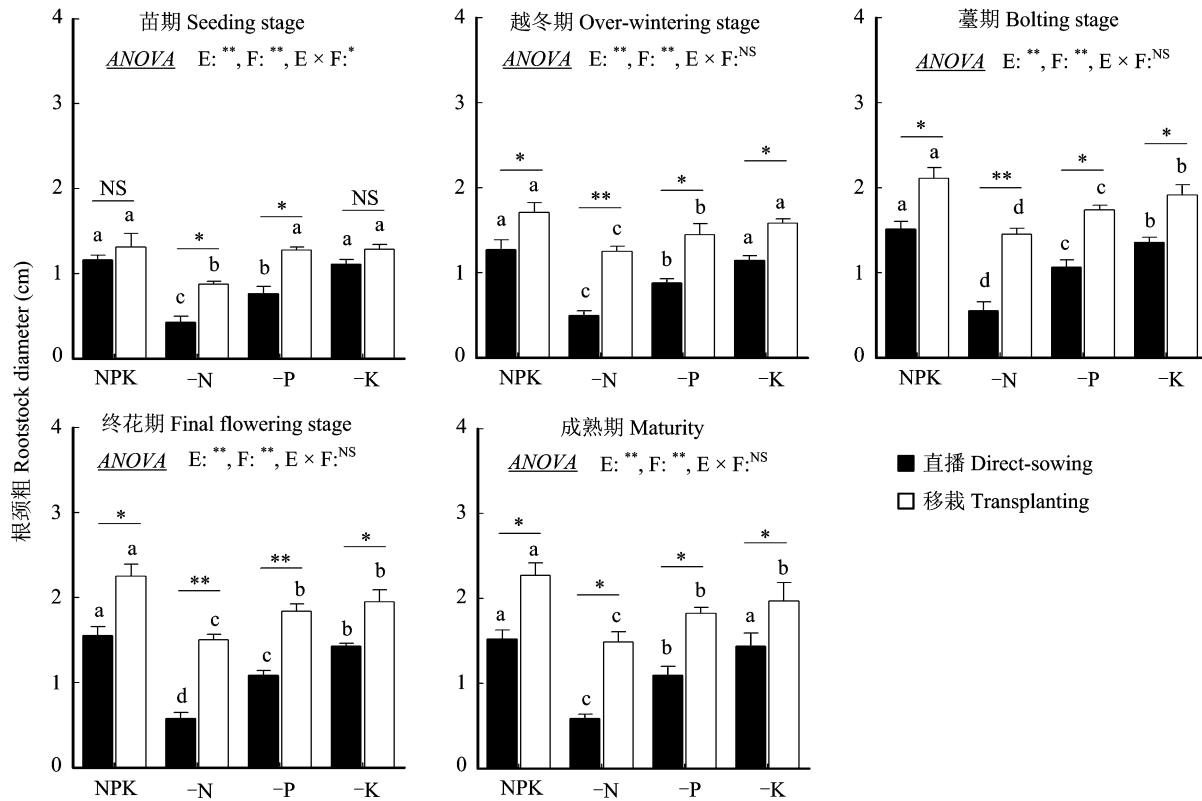


图3 施肥和种植方式对冬油菜不同生育期根颈粗的影响

Fig. 3 Effects of fertilization and establishment method on rootstock diameters of winter oilseed rape at different growth stages

[注 (Note): E—种植方式 Establishment method; F—施肥处理 Fertilization treatment; 同一种植方式方柱上的不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$); 同一处理的两个柱子上的符号表示两种种植方式之间的差异显著性 In the same planting method, the different lowercases above the bars are significantly different at $P < 0.05$; In the same treatment, the symbols above bars indicate the significant differences between planting methods. *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$; NS—表示差异不显著 No significance.]

2.3 氮磷钾肥对直播和移栽冬油菜叶片数的影响

冬油菜苗期至薹期的叶片数受施肥和种植方式显著影响,但两者无显著交互作用(图4)。直播冬油菜的叶片数在各生育期中均以 -N 处理最少,其余处理在苗期和越冬期无显著差异,薹期以 NPK 处理显著较高。移栽冬油菜苗期叶片数在各处理间无明显差别,越冬期和薹期以 -N 和 -P 处理明显少于 NPK 和 -K 处理。除苗期 NPK 处理,各处理直播冬油菜在 3 个生育期的叶片数均显著少于移栽冬油菜。

2.4 氮磷钾肥对直播和移栽冬油菜越冬期生理生化指标的影响

表 1 显示,施肥和种植方式显著影响越冬期冬油菜叶片的各项生理生化指标,但无显著交互作用。直播冬油菜在 NPK 处理的硝酸还原酶活性、过氧化物酶活性、过氧化氢酶活性、可溶性蛋白含量、可溶性糖含量及脯氨酸含量均最高,其后为 -K 和 -P 处理,-N 处理的各项指标则均最低。对于移栽冬油菜,过氧化氢酶活性和可溶性糖含量在各施肥处理间无显著差异,其它指标的高低顺序表现为

NPK > -K > -P > -N。相比 NPK 处理,直播冬油菜缺素处理的丙二醛含量显著较高,尤其是-N 处理,而移栽冬油菜在-N 和-P 处理的丙二醛含量相对较高。直播种植方式下,冬油菜越冬期叶片的各

项生理生化指标较移栽种植方式相对偏低,但是其丙二醛含量则明显较高,而且缺素处理下两者差异更为明显。结果说明,直播冬油菜越冬期的植株抗逆性较差,养分缺乏时逆境对植株的损伤更为严重。

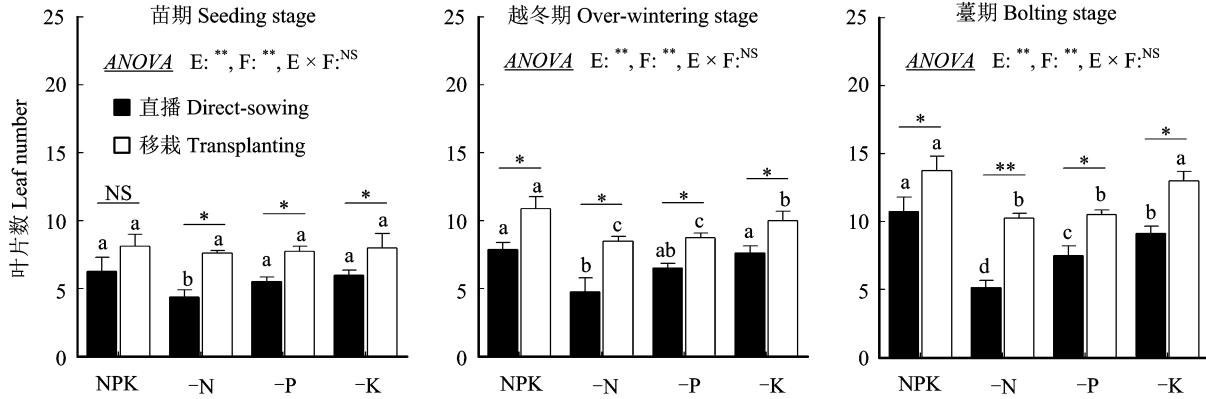


图 4 施肥和种植方式对冬油菜不同生育期叶片数的影响

Fig. 4 Effects of fertilization and establishment method on leaf number of winter oilseed rape at different growth stages

[注 (Note): E—种植方式 Establishment method; F—施肥处理 Fertilization treatment; 同一种植方式方柱上的不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$); 同一处理的两个柱子上的符号表示两种种植方式之间的差异显著性 In the same planting method, the different lowercases above the bars are significantly different at $P < 0.05$; In the same treatment, the symbols above bars indicate the significant differences between planting methods. *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$; NS—表示差异不显著 No significance.]

表 1 氮磷钾肥对直播和移栽冬油菜越冬期生理生化指标的影响

Table 1 Effects of N, P and K fertilization on physiological and biochemical properties of direct-sown and transplanted winter oilseed rape at the over-wintering stage

处理 Treatment	硝酸还原酶 活性 NR activity [$\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})$, FW]	过氧化物酶 活性 POD activity [$\text{U}/(\text{g} \cdot \text{min})$, FW]	过氧化氢酶 活性 CAT activity [$\text{U}/(\text{g} \cdot \text{min})$, FW]	可溶性蛋白 Soluble protein (mg/g, FW)	可溶性糖 Soluble sugar (%)	脯氨酸 Proline (mg/g, FW)	丙二醛 MDA ($\mu\text{mol}/\text{g}$, FW)
	直播 Direct-sowing						
NPK	18.6 ± 2.5 a*	567 ± 47 a*	7.5 ± 0.4 a ^{NS}	10.2 ± 1.3 a ^{NS}	0.99 ± 0.04 a ^{NS}	1.30 ± 0.08 a*	6.5 ± 0.6 d ^{NS}
-N	3.3 ± 0.3 c**	108 ± 19 c**	1.0 ± 0.1 c**	1.5 ± 0.3 c**	0.29 ± 0.06 c*	0.11 ± 0.07 c*	68.3 ± 1.9 a**
-P	13.5 ± 2.5 b ^{NS}	261 ± 57 b*	2.8 ± 0.8 b*	6.8 ± 0.8 b*	0.88 ± 0.15 ab ^{NS}	1.10 ± 0.18 ab ^{NS}	16.7 ± 4.2 c ^{NS}
-K	16.7 ± 2.6 ab*	308 ± 39 b**	6.0 ± 0.2 a ^{NS}	5.6 ± 0.9 b*	0.63 ± 0.08 b ^{NS}	0.72 ± 0.17 b*	24.7 ± 4.8 b*
移栽 Transplanting							
NPK	36.6 ± 5.0 a	792 ± 52 a	7.0 ± 0.6 a	13.5 ± 1.0 a	0.90 ± 0.17 a	2.03 ± 0.09 a	5.3 ± 1.4 b
-N	8.8 ± 0.5 c	454 ± 102 b	5.4 ± 0.1 a	7.4 ± 0.9 b	0.88 ± 0.02 a	0.47 ± 0.06 c	7.6 ± 0.3 ab
-P	15.3 ± 2.1 b	511 ± 27 b	5.6 ± 1.4 a	10.8 ± 2.0 ab	0.87 ± 0.08 a	1.39 ± 0.18 b	9.4 ± 1.5 a
-K	33.9 ± 1.3 a	648 ± 79 ab	5.2 ± 0.4 a	12.4 ± 1.2 a	0.86 ± 0.05 a	1.77 ± 0.06 ab	5.2 ± 0.4 b
方差分析 ANOVA							
E	**	**	**	**	**	**	**
F	**	**	**	**	**	**	**
E × F	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

注 (Note): 同一种植方式下,平均值后的不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$); 同一处理中,平均值后的符号表示两种种植方式之间的差异显著性 Under the same planting method, the averages in a row followed by different lowercases are significantly different at $P < 0.05$; In the same treatment, the symbols after the averages indicate the significant differences between planting methods. *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$; NS—表示差异不显著 No significance.

2.5 氮磷钾肥对直播和移栽冬油菜角果期菌核病的影响

施肥和种植方式显著影响冬油菜角果期菌核病

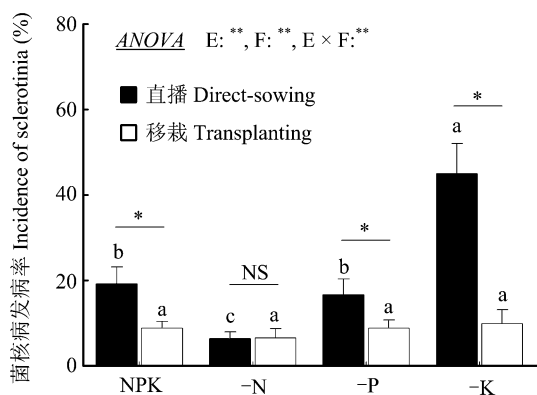


图5 施肥和种植方式对冬油菜角果期菌核病发病率的影响
Fig.5 Effects of fertilization and establishment method on incidence of sclerotinia winter oilseed rape at pod-development stage

[注 (Note): E—种植方式 Establishment method; F—施肥处理 Fertilization treatment; 同一种植方式方柱上的不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$); 同一处理的两个柱子上的符号表示两种种植方式之间的差异显著性 In the same planting method, the different lowercases above the bars are significantly different at $P < 0.05$; In the same treatment, the symbols above bars indicate the significant differences between planting methods. *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$; NS—表示差异不显著 No significance.]

发生率,且存在显著交互影响(图5)。直播冬油菜菌核病的发病率平均为21.8%,而移栽冬油菜平均仅为8.5%。除-N处理外,直播冬油菜各施肥处理的菌核病发病率均显著高于移栽冬油菜。直播冬油菜-K处理的菌核病发病率显著最高,其次为NPK和-P处理,-N处理相对较低,而移栽冬油菜在各施肥处理间均无显著差异,这可能是由于其较低的密度降低了菌核病的发生。直播冬油菜-N处理的植株密度也较低,因此其发病率也较低。钾素缺乏降低了直播冬油菜的抗病性,再加上植株密度较高,因而发病率显著较高。

2.6 氮磷钾肥对直播和移栽冬油菜产量及产量构成因素的影响

施肥和种植方式显著影响冬油菜的籽粒产量,且两者表现出显著交互作用(表2)。直播冬油菜的产量水平整体上显著低于移栽冬油菜,但NPK处理两者产量基本一致,说明养分平衡配施条件下直播冬油菜可达到移栽冬油菜的产量水平。相比NPK处理,直播冬油菜在不施氮、磷、钾时分别减产1850 kg/hm² (96.9%)、1601 kg/hm² (78.1%)和695 kg/hm² (33.8%),移栽冬油菜则分别减产1465 kg/hm² (70.4%)、1365 kg/hm² (65.6%)和336 kg/hm² (16.0%)。可见,直播冬油菜在缺素条件下的减产较移栽冬油菜显著更高,说明其对养分缺乏更为敏感。

表2 氮磷钾肥对冬油菜产量及单株产量构成因素的影响

Table 2 Effects of N, P and K fertilization on seed yields and yield components of individual winter oilseed rape plant

处理 Treatment	产量 Seed yield (kg/hm ²)	密度 Plant (No./m ²)	分枝数 Branch No.	单株角果数 Pod No.	主序角果数 Main raceme pod No.	角粒数 Seed No.	千粒重 (g) 1000-seed weight
直播 Direct-sowing							
NPK	2049 ± 73 a ^{NS}	46.4 ± 1.6 a ^{**}	6.1 ± 0.4 a ^{**}	122.6 ± 6.1 a ^{**}	58.3 ± 2.8 a ^{**}	16.8 ± 0.4 a ^{**}	2.74 ± 0.08 b ^{NS}
-N	64 ± 11 d ^{**}	21.6 ± 4.1 c [*]	0.0 ± 0.0 d ^{**}	11.5 ± 1.3 d ^{**}	11.5 ± 1.3 d ^{**}	12.2 ± 0.8 c [*]	2.82 ± 0.06 a ^{NS}
-P	448 ± 48 c [*]	37.8 ± 1.8 b ^{**}	3.1 ± 0.1 c ^{**}	44.4 ± 4.9 c ^{**}	28.8 ± 2.5 c ^{**}	14.6 ± 0.4 b ^{**}	2.52 ± 0.07 c ^{NS}
-K	1354 ± 55 b [*]	42.9 ± 1.7 ab ^{**}	4.6 ± 0.1 b ^{**}	99.5 ± 7.5 b ^{**}	45.8 ± 2.0 b ^{**}	14.3 ± 0.5 b ^{**}	2.81 ± 0.11 a ^{NS}
移栽 Transplanting							
NPK	2081 ± 30 a	11.3 ± 0.02 a	10.8 ± 0.3 a	385.8 ± 6.0 a	88.3 ± 3.5 a	22.8 ± 0.4 a	2.51 ± 0.06 b
-N	616 ± 35 c	11.2 ± 0.03 a	5.6 ± 0.4 c	122.8 ± 5.3 d	52.0 ± 2.3 b	18.5 ± 0.1 c	2.68 ± 0.02 a
-P	716 ± 41 c	11.3 ± 0.02 a	5.1 ± 0.4 c	152.5 ± 8.0 c	59.8 ± 3.3 b	21.3 ± 0.2 b	2.35 ± 0.06 c
-K	1745 ± 90 b	11.3 ± 0.02 a	8.6 ± 0.1 b	297.6 ± 11.6 b	82.9 ± 1.6 a	22.5 ± 0.1 ab	2.49 ± 0.04 b
方差分析 ANOVA							
E	**	**	**	**	**	**	NS
F	**	**	**	**	**	**	**
E × F	**	**	**	**	NS	NS	NS

注 (Note): 同一种植方式下,平均值后的不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$); 同一处理中,平均值后的符号表示两种种植方式之间的差异显著性 Under the same planting method, the averages in a row followed by different lowercases are significantly different at $P < 0.05$; In the same treatment, the symbols after the averages indicate the significant differences between planting methods. *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$; NS—表示差异不显著 No significance.

直播和移栽冬油菜的产量构成因素存在显著差异(表2)。直播冬油菜的群体密度显著较高,比移栽冬油菜平均多 25.9 株/m²。但是,直播冬油菜个体产量构成因素明显较差,其单株分枝数、角果数和角粒数比移栽冬油菜平均分别少 4.1、170.2 和 6.8 个。两种种植方式间冬油菜的千粒重未表现出显著差异。直播和移栽冬油菜的主序角果数平均分别为 36.1 和 70.7 个,主序角果占单株总角果的比例平均分别为 64.6% 和 33.1%。尽管直播冬油菜的主序角果数较少,但是其主序角果对产量的贡献率明显较高。

施肥显著影响冬油菜各项产量构成因素。直播和移栽冬油菜的个体产量构成因素在各施肥处理表现一致,均以 NPK 处理最好。相比氮磷钾配施,缺氮对个体产量构成因素的影响最显著,降低了除千粒重外的所有指标;缺磷对分枝数、角果数和角粒数表现出较强负面影响,而且显著降低千粒重;缺钾的影响相对较小,主要降低分枝数和角果数。与移栽冬油菜显著不同的是,直播冬油菜的植株密度也受到施肥的显著影响。直播冬油菜的收获密度在 -N 和 -P 处理显著降低,较 NPK 处理分别下降 53.6% 和 18.7%。可见,养分缺乏条件下植株密度减少和个体生长减弱共同导致直播冬油菜出现产量大幅下降。

3 讨论与结论

本研究显示,直播和移栽冬油菜生育期内的个体生长发育过程存在显著差异。移栽种植方式下,油菜秧苗在苗床中具有较好的生长环境和养分供应,而移入大田后在较低种植密度下具有较大的个体发展空间^[13],再加上育苗阶段形成的物质和养分基础,因而植株生长健壮发育出较粗的根颈和较多叶片。直播种植时,冬油菜高密条件下激烈的种内竞争和狭小的个体空间使植株横向扩展严重受限^[13, 25]。因此,直播冬油菜表现出较快的纵向生长,前期植株较高,但个体细瘦且叶片偏少。除种植方式外,养分施用也显著影响冬油菜生育期各方面表现,其中两因素对株高和根茎粗还有显著交互作用。研究表明,氮、磷、钾养分供应不足会限制冬油菜光合器官建成和光合性能,减少物质生产而减缓个体发育^[26-28]。本研究中,各养分缺乏对直播和移栽冬油菜生长均产生抑制作用,尤其是氮和磷缺乏的影响更为明显。

长江流域冬油菜越冬过程中时常有干旱、低

温、涝渍等环境胁迫发生。环境胁迫条件下冬油菜的正常生长发育受阻,严重时甚至会造成植株死亡^[5, 29-30]。本研究所在年份越冬期内发生的持续低温和干旱严重影响了冬油菜生长,降低了叶片中硝酸还原酶、过氧化物酶和过氧化氢酶的活性,以及可溶性蛋白、可溶性糖和脯氨酸的含量,最终导致细胞组织受到损伤,丙二醛含量增加。直播冬油菜由于前期个体长势较弱,不良环境因素和养分缺乏的双重逆境导致植株各项生理生化指标的下降更明显,明显升高的丙二醛含量说明其叶片组织细胞受到了更严重的损伤。氮磷钾配施条件下,较好的营养状况使直播冬油菜植株维持了较高的生理生化水平,过氧化氢酶活性、可溶性蛋白和可溶性糖含量与移栽冬油菜接近,而丙二醛含量也相对较低。

苗期生长不佳和越冬期逆境进一步限制了直播冬油菜的春后生长,株高自薹期开始显著低于移栽冬油菜,而根颈粗和叶片数的差距也更为明显。胡立勇等^[31]研究指出,冬油菜前期营养生长不良会限制其后期的角果发育及籽粒充实。本研究结果表明,不良的前期生长造成直播冬油菜个体产量构成因素显著差于移栽冬油菜,而且弱小植株的死亡还降低了成熟期的群体密度,最终导致产量偏低。养分缺乏加重了直播冬油菜产量的下降,尤其是缺氮条件下产量极低,甚至不及移栽冬油菜的 1/9。本研究试验田块土壤碱解氮含量为 128.1 mg/kg,处于较丰富水平,分析此条件下缺氮导致产量极低的原因可能包括以下几个方面。首先,直播冬油菜在大田环境下直接出苗,不像移栽冬油菜经过苗床育苗的精细管理,因而缺氮导致其起始生长就很差。其次,充足合理的氮素供应对直播冬油菜的物质生产和养分吸收尤其是苗期阶段的发育尤为重要^[32],缺氮导致其临界期氮素需求无法满足,发育严重受阻,从而影响后期发育与产量形成。而且,本研究区域主要为水稻-油菜的水旱轮作种植,油菜作为旱季作物生长在冬季,其个体对氮素及其它养分的缺乏更为敏感。因此,尽管试验田块土壤碱解氮含量较高,但不施氮肥时仍导致直播冬油菜的氮素营养供应不足,苗期生长严重受限,抗性下降,植株大量死亡,因此最终产量表现极差。另外,目前一些研究认为碱解氮只能作为衡量土壤供氮水平的定性指标,并不能代表作物实际可吸收利用的土壤氮素^[33-34],对于这方面还需进一步的研究和探讨。

本研究所所在年份冬油菜生育后期的气温较高同时降水较多,为菌核病发生创造了有利条件。直播

冬油菜在高密种植条件下群体大而叶片多,通风条件较差,因此菌核病发病率较高。李银水等^[35]研究发现,磷、钾营养缺乏会降低油菜植株抗病性,易于菌核病的侵染与发生。本研究中,直播冬油菜较弱的个体长势和较高的植株密度导致其在缺磷和缺钾条件下菌核病的发生更为严重。而缺氮条件下,直播冬油菜植株个体较小,群体密度也显著下降,因而发病率反而较低,与移栽冬油菜差异不明显。

综合各方面表现看出,养分缺乏对直播冬油菜生长的负面影响较移栽冬油菜更为显著,说明当前栽培条件下直播冬油菜的养分反应更为敏感。因此,应重视其生长过程中养分的充足供应,尤其是氮和磷。东南亚地区的一系列研究显示,直播和移栽水稻的光合性能、产量水平以及施肥效果也存在差异,其原因是两种种植方式下水稻个体生长基础和生育进程的差异而导致群体冠层功能发生了变化^[17, 36-37]。本研究中,分析直播冬油菜各方面表现和施肥响应与移栽冬油菜产生差异的原因,主要是由于其不经历育苗过程,在高密和晚播条件下起始生长状况较差,而养分缺乏更抑制了个体生长并加重了群体衰亡,最终影响群体与个体的平衡导致产量降幅显著更高。另外本课题组研究还发现^[38],直播冬油菜的出苗受到养分缺乏的显著影响,较少氮肥基施有利于出苗,而磷素供应不足则可导致出苗率显著下降 2.1%~10.1%,而移栽冬油菜植株密度在不同养分施用条件下均无明显变化。因而可判定,群体密度变化受养分供应影响是直播冬油菜与移栽冬油菜生长发育过程显著不同的重要特征,相应地可通过调整施肥策略对直播冬油菜的群体发展进行调控,其原则为加强前期个体生长缓解植株衰亡,保证成熟期群体数量和个体质量的平衡而获得高产^[39]。

大量研究表明,平衡合理施肥是促进冬油菜生长、提高光合能力和增加产量的重要栽培手段^[21, 40-42]。本研究中,氮磷钾配施显著促进了直播和移栽冬油菜的个体生长发育,提高了植株生理生化水平,降低了菌核病发病率,改善了产量构成因素并最终获得较高产量。而直播和移栽冬油菜在氮磷钾配施处理的产量水平接近,也说明通过合理施肥改善直播冬油菜个体生长而获得高产是可行的。

参 考 文 献:

[1] 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.

- Wang H Z. Review and future development of rapeseed industry in China[J]. Chinese Journal of Oil Crop Science, 2010, 32(2): 300-302.
- [2] 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.
- Yin Y, Liao X, Yu B, et al. Regional distribution evolution and development tendency of Chinese rapeseed production [J]. Chinese Journal of Oil Crop Science, 2010, 32(1): 147-151.
- [3] 徐华丽. 长江流域油菜施肥状况调查及配方施肥效果研究[D]. 武汉: 华中农业大学硕士学位论文, 2012.
- Xu H L. Investigation on fertilization and effect of formulated fertilization of winter rapeseed in Yangtze River basin [D]. Wuhan: MS Thesis of Huazhong Agricultural University, 2012.
- [4] 刘举. 不同播种移栽方式对油菜生长发育及产量的影响[J]. 江西农业学报, 2012, 24(2): 29-30.
- Liu J. Effects of different sowing and transplanting patterns on growth, development and yield of rape [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2012, 24(2): 29-30.
- [5] 王琼, 张春雷, 李光明, 等. 渍水胁迫对油菜根系形态与生理活性的影响[J]. 中国油料作物学报, 2012, 34(2): 157-162.
- Wang Q, Zhang C L, Li G M, et al. Influences of waterlogging stress on roots morphology and physiology for rapeseed [J]. Chinese Journal of Oil Crop Science, 2012, 34(2): 157-162.
- [6] 徐正华, 张晓红, 陈秀斌, 等. 不同栽培措施对油菜抗寒性的影响[J]. 华中农业大学学报, 2012, 31(6): 661-667.
- Xu Z H, Zhang X H, Chen X B, et al. Effect of different cultivation measures on cold resistance of *Brassica napus* L. [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2012, 31(6): 661-667.
- [7] Zhang S J, Liao X, Zhang C L, et al. Influences of plant density on the seed yield and oil content of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) [J]. Industrial Crops and Products, 2012, 40: 27-32.
- [8] 李银水, 余常兵, 胡小加, 等. 直播油菜密度对植株农艺性状和产量的影响[J]. 湖南农业科学, 2012, (15): 22-25.
- Li Y S, Yu C B, Hu X J, et al. Effects of planting density on agronomic characters and yield of direct seeding rape [J]. Hunan Agricultural Sciences, 2012, (15): 22-25.
- [9] 张培杰, 邹照裕, 沈信元, 等. 免耕直播油菜的密度试验[J]. 浙江农业科学, 2000, (4): 12-13.
- Zhang P J, Zou Z Y, Shen X Y, et al. Study on plant density of no-tillage direct-sown oilseed rape [J]. Zhejiang Agricultural Sciences, 2000, (4): 12-13.
- [10] 周安兴, 傅志强, 沈建凯, 等. 直播密度对油菜产量及农艺性状的影响[J]. 作物研究, 2009, 23(3): 170-171.
- Zhou X A, Fu Z Q, Shen J K, et al. Effects of plant density on seed yield and agronomy traits of oilseed rape [J]. Crop Research, 2009, 23(3): 170-171.
- [11] 王寅, 李雅颖, 鲁剑巍, 等. 栽培模式对直播油菜生长、产量和养分吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(3): 597-607.

- Wang Y, Li Y Y, Lu J W, *et al.* Effects of cultivation pattern on growth, seed yield, nutrient uptake and utilization of direct-sowing oilseed rape (*Brassica napus* L.) [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(3): 597-607.
- [12] 马霓,肖圣元,张明海,等. 栽培方式对油菜中双11生长及收获特性的影响[J]. *湖北农业科学*, 2011, 50(2): 244-247.
- Ma N, Xiao S Y, Zhang M H, *et al.* Effects of cultivation method on the growth and mechanical harvesting properties of zhongshuang No. 11 (*Brassica napus* L.) [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2011, 50(2): 244-247.
- [13] 王寅,鲁剑巍,李小坤,等. 移栽和直播油菜的氮肥施用效果及适宜施氮量[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(21): 4406-4414.
- Wang Y, Lu J W, Li X K *et al.* Study on nitrogen fertilizer effect and optimum fertilizer rate for transplanting and direct-seeding rapeseed [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(21): 4406-4414.
- [14] 左青松,顾芹芹,董召娣,等. 氮素水平对油菜根茎叶氮素输出及角果中氮素积累的影响[J]. *中国油料作物学报*, 2006, 28(2): 151-155.
- Zuo Q S, Gu Q Q, Dong Z D, *et al.* Effect of nitrogen application on nitrogen translocation in roots, stems and leaves and nitrogen accumulation in pods in rapeseed [J]. *Chinese Journal of Oil Crop Science*, 2006, 28(2): 151-155.
- [15] 汪瑞清,杨国正,史茜莎,等. 氮磷钾镁锌混合施用对油菜产油量和蛋白质产量的影响[J]. *湖北农业科学*, 2009, 48(5): 1096-1100.
- Wang R Q, Yang G Z, Shi X S, *et al.* Effects of the mixed application of N, P, K, Mg, Zn on oil and protein yield of rapeseed (*Brassica napus* L.) [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2009, 48(5): 1096-1100.
- [16] 鲁剑巍. 油菜科学施肥技术[M]. 北京: 金盾出版社, 2010.
- Lu J W. Scientific fertilization technology for oilseed rape [M]. Beijing: God Shield Press, 2010.
- [17] Peng S B, Garcia F V, Gines H C, *et al.* Nitrogen use efficiency of irrigated tropical rice established by broadcast wet-seeding and transplanting [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1996, 45(2): 123-134.
- [18] Singh Y, Singh V P, Singh G, *et al.* The implications of land preparation, crop establishment method and weed management on rice yield variation in the rice-wheat system in the indo-gangetic plains [J]. *Field Crops Research*, 2011, 121(1): 64-74.
- [19] 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.
- Zeng Y, Lei Y L, Li J, *et al.* Effects of application amounts of nitrogen, phosphorus, and potassium and planting density on yield and quality of rapeseed [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(1): 146-153.
- [20] 朱兆良,金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(2): 259-273.
- Zhu Z L, Jin J Y. Fertilizer use and food security in China [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(2): 259-273.
- [21] 王寅,鲁剑巍,李小坤,等. 长江流域直播冬油菜氮磷钾硼肥施用效果[J]. *作物学报*, 2013, 39(8): 1491-1500.
- Wang Y, Lu J W, Li X K, *et al.* Effects of nitrogen, phosphorus, potassium, and boron fertilizers on winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) direct-sown in the Yangtze River basin [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(8): 1491-1500.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (3rd ed.) [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2010.
- [23] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术(第二版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- Wang X K. The experiment principle and technique on plant physiology and biochemistry (2nd ed) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [24] 任廷波,赵继献. 氮肥对黄籽双低杂交油菜菌核病的影响[J]. *贵州农业科学*, 2005, 33(6): 43-45.
- Ren T B, Zhao J X. Effects of amount of applied nitrogen on sclerotinia sclerotiorum of yellow seed with double low hybrid rape (*Brassica napus* L.) [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2005, 33(6): 43-45.
- [25] 周玉,田春华,张全国. 种内竞争与个体大小不平等[J]. *生物学通报*, 2011, (7): 11-12.
- Zhou Y, Tian C H, Zhang Q G. Intraspecific competition and the differenced in individual sizes [J]. *Bulletin of Biology*, 2011, (7): 11-12.
- [26] Kappen L, Hammler A, Schultz G. Seasonal changes in the photosynthetic capacity of winter rape plants under different nitrogen regimes measured in the field [J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 1998, 181: 179-187.
- [27] 余利平,田立荣,张春雷,等. 低磷胁迫对油菜不同生育期叶片光合作用的影响[J]. *中国农学通报*, 2008, 24(12): 232-236.
- Yu L P, Tian L R, Zhang C L, *et al.* Effects of low phosphorus stress on photosynthesis of rapeseed leaves in different periods [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(12): 232-236.
- [28] 陆志峰,刘涛,任涛,等. 缺钾胁迫对冬油菜叶片光合作用的限制性因子分析[A]. 2014年中国作物学会学术年会论文集[C]. 南京, 2014.
- Lu Z F, Liu T, Ren T, *et al.* Limited factors analysis on photosynthesis of winter oilseed rape leaves under K deficiency stress [A]. Symposium on Crop Science Society of China 2014 [C]. Nanjing, 2014.
- [29] 张学昆,张春雷,廖星,等. 2008年长江流域油菜低温冻害调查分析[J]. *中国油料作物学报*, 2008, 30(1): 122-126.
- Zhang X K, Zhang C L, Liao X, *et al.* Investigation on 2008' low temperature and freeze injure on winter rape along Yangtze River [J]. *Chinese Journal of Oil Crop Science*, 2008, 30(1): 122-126.

- [30] 蒙祖庆, 宋丰萍, 刘振兴, 等. 干旱及复水对油菜苗期光合及叶绿素荧光特性的影响[J]. 中国油料作物学报, 2012, 34(1): 40-47.
Meng Z Q, Song F P, Liu Z X, *et al.* Effects of drought and rewating at seeding stage on photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics in rapeseed[J]. Chinese Journal of Oil Crop Science, 2012, 34(1): 40-47.
- [31] 胡立勇, 单文燕, 王维金. 油菜结实特性与库源关系的研究[J]. 中国油料作物学报, 2002, 24(2): 38-43.
Hu L Y, Shan W Y, Wang W J. Characteristics of seed set and source-sink relation of *Brassica napus*[J]. Chinese Journal of Oil Crop Science, 2002, 24(2): 38-43.
- [32] 刘晓伟, 鲁剑巍, 李小坤, 等. 直播冬油菜干物质积累及氮磷钾养分的吸收利用[J]. 中国农业科学, 2011, 44(23): 4823-4832.
Liu X W, Lu J W, Li X K, *et al.* Dry matter accumulation and N, P, K absorbtion and utilization in direct seeding winter oilseed (*Brassica napus* L.) [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(23): 4823-4832.
- [33] 胡田田, 李生秀. 土壤供氮能力测试方法的研究. II. 几种测氮方法的测定值与作物吸氮量的关系[J]. 干旱地区农业研究, 1993, 11(S1): 62-67.
Hu T T, Li S X. Studies on methods determing soil nitrogen-supplying capacities. II. The relationships between mineralizable or mineral N determined by different methods and plant uptake nitrogen[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1993, 11(S1): 62-67.
- [34] Wang W N, Lu J W, Ren T, *et al.* Evaluating regional mean optimal nitrogen rates in combination with indigenous nitrogen supply for rice production[J]. Field Crops Research, 2012, 137: 37-48.
- [35] 李银水, 余常兵, 廖星, 等. 施肥对油菜菌核病发生的影响[J]. 中国油料作物学报, 2013, 35(3): 290-294.
Li Y S, Yu C B, Liao X, *et al.* Influence analysis of application of NPK fertilizer on epidemics of rapeseed sclerotinia stem rot [J]. Chinese Journal of Oil Crop Science, 2013, 35(3): 290-294.
- [36] Schnier H F, Dingkuhn M, De-Datta S K, *et al.* Nitrogen-15 balance in transplanted and direct-seeded flooded rice as affected by different methods of urea application[J]. Biology and Fertility of Soils, 1990, 10(2): 89-96.
- [37] Dingkuhn M, De-Datta S K, Javellana C, *et al.* Effect of late-season n fertilization on photosynthesis and yield of transplanted and direct-seeded tropical flooded rice. I. Growth dynamics[J]. Field Crops Research, 1992, 28(3): 223-234.
- [38] Wang Y, Liu T, Li X, *et al.* Nutrient deficiency limits population development, yield formation, and nutrient uptake of direct sown winter oilseed rape [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2015, 14(4): 670-680.
- [39] Wang Y, Liu B, Ren T, *et al.* Establishment method affects oilseed rape yield and the response to nitrogen fertilizer [J]. Agronomy Journal, 2014, 106: 131-142.
- [40] Mathe-Gaspar G, Radimsky L, Mathe P. Changes in growth parameters and water content of young canola in response to N fertilization on two sites[J]. Cereal Research Communications, 2008, 36: 1495-1498.
- [41] 魏文慧, 孙万仓, 郭秀娟, 等. 氮磷钾肥对西北寒旱区冬油菜越冬率、产量及经济性状的影响[J]. 西北农业学报, 2009, 18(2): 122-125.
Wei W H, Sun W C, Guo X J, *et al.* Effects of different proportions of N, P, and K on overwintering rates, yield and economical characters of winter rapeseed on northwest cold and drought region [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2009, 18(2): 122-125.
- [42] Liu H E, Hu C X, Sun X C, *et al.* Interactive effects of molybdenum and phosphorus fertilizers on dry matter accumulation, seed yield and yield components in *Brassica napus* [J]. Journal of Food, Agriculture and Environment, 2012, 10(3-4): 389-392.