

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.016

施肥深度对冬油菜产量、根系分布和养分吸收的影响

谷晓博 李援农 杜娅丹 任全茂 吴国军 银敏华

(西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为了确定冬油菜较优的施肥深度,通过2 a桶栽试验,设置5个施肥深度:地表施肥和地下5、10、15、20 cm施肥,分别记为CK、D₅、D₁₀、D₁₅和D₂₀,并另设不施肥处理(F₀),研究不同施肥深度处理对冬油菜地上部干物质量、不同土层的主根干质量和侧根干质量、侧根长、侧根体积和侧根表面积及冬油菜地上部植株的养分吸收情况和籽粒产量的影响。结果表明,D₁₅处理在冬油菜花期能显著增加5~20 cm和20 cm以下土层的主根干质量以及主根总干质量,而0~5 cm土层的主根干质量与CK和D₅处理相比降低幅度不大;D₁₅处理在冬油菜苗期和花期10~20 cm土层的侧根干质量、侧根长、侧根体积和侧根表面积均为最大,且均显著大于CK和D₅处理。在冬油菜花期和收获时D₁₅处理的地上部干物质量及地上部植株的氮、磷、钾吸收量最大,且D₁₅处理的油菜籽粒产量及籽粒中的氮、磷、钾吸收量最大,并显著大于CK、D₅和D₁₀处理;收获时,2 a D₁₅处理地上部植株中的氮、磷、钾的平均吸收量与CK相比分别增加48.07%、52.18%和62.96%,与D₅相比分别增加25.75%、30.19%和33.41%,与D₁₀相比分别增加10.59%、15.33%和17.06%。D₁₅处理2 a的平均产量与CK、D₅和D₁₀处理相比,分别提高85.10%、45.47%和31.26%;与D₂₀处理相比提高了3.89%。综合考虑不同施肥处理冬油菜的根系分布、养分吸收量和籽粒产量,地表下15 cm(D₁₅处理)为冬油菜较优的施肥深度。

关键词: 冬油菜; 施肥深度; 根系分布; 养分吸收; 产量

中图分类号: S565.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)06-0120-09

Effects of Fertilization Depth on Yield, Root Distribution and Nutrient Uptake of Winter Oilseed Rape (*Brassica napus* L.)

Gu Xiaobo Li Yuannong Du Yadan Ren Quanmao Wu Guojun Yin Minhua

(Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to determine an optimal fertilization depth for winter oilseed rape (*Brassica napus* L.), barrel experiment was conducted in 2013—2014 and 2014—2015 with six treatments, including no fertilizer (F₀), and fertilization depths of 0 cm (CK), 5 cm (D₅), 10 cm (D₁₀), 15 cm (D₁₅) and 20 cm (D₂₀). The effects of different fertilization depths on above-ground dry weight of taproot and lateral root, and the length, volume, area of lateral root, nutrient uptake and yield of winter oilseed rape were systematically analyzed and compared. The results showed that D₁₅ treatment significantly increased the taproot dry weight in 5~20 cm and deeper than 20 cm soil depths, while the reduction of taproot dry weight in 0~5 cm soil depth was not great compared with CK and D₅, thus the total taproot dry weight was significantly increased. The maximum lateral root dry weight, length, volume and area in the 10~20 cm soil layer at both seedling stage and flowering stage were found in D₁₅ treatment, which were also significantly higher than those in CK and D₅. Above-ground dry matter and shoot nutrient uptake in D₁₅ were the highest at both flowering and harvest stages of all the treatments, and D₁₅ treatment achieved the

收稿日期: 2015-08-06 修回日期: 2015-09-23

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503105、201503125)和国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2011AA100504)

作者简介: 谷晓博(1989—),男,博士生,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: gxb123027@163.com

通信作者: 李援农(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: liyuannong@163.com

greatest rapeseed yield and the most N, P, K uptakes in the seed at harvest, while the above-ground dry matter, shoot nutrient uptake, rapeseed yield in CK and D₅ were significantly lower than those in D₁₅ treatment. Compared with CK, the N, P, K uptakes of shoot at harvest in D₁₅ treatment across the two growing seasons were increased by 48.07%, 52.18%, 62.96% and 25.75%, 30.19%, 33.41% in comparison with D₅ treatment, respectively. In two growing seasons, the yield in D₁₅ treatment was 85.10%, 45.47% and 31.26% higher than those in CK, D₅ and D₁₀, respectively. Considering the root distribution, nutrient uptake and yield of winter oilseed rape among all the treatments, fertilization depth of 15 cm (D₁₅) could be recommended as the optimal fertilization depth in oilseed rape cultivation.

Key words: winter oilseed rape; fertilization depth; root distribution; nutrient uptake; yield

引言

化肥是提高作物产量、实现农业可持续发展的物质保证,施用化肥是最快、最有效、最重要的增产措施^[1]。据报道,我国化肥的施用总量从1980年以年均5%的速度增长^[2],目前,我国已成为世界上最大的化肥生产国和消费国,每公顷耕地面积的化肥施用量接近世界平均化肥施用量的4倍^[3]。我国化肥的大量使用在提高农业生产的同时,也带来了肥料利用效率偏低、农业生产成本提高、施肥经济效益下降等一系列问题。尤其是传统的地表撒施化肥方式,大部分养分随地表径流、挥发而流失,肥料利用率很低,并造成严重的环境污染问题^[1,4]。

化肥深施是将肥料施到土壤特定层次,易于作物根系吸收利用的一项施肥措施,能够达到高效、增产、节肥、环保的目的^[5-6]。段文学等^[7]研究表明,施氮深度20 cm与氮肥表面撒施相比,旱地小麦产量提高7.2%~9.8%,氮肥偏生产力提高8.0%~10.9%。于晓芳等^[8]研究表明氮肥深施(5~25 cm)能明显增加玉米单株根质量、根体积和根表面积,显著提高根系活力,促使根系下移,明显提高深层根系的比重,进而提高玉米产量和氮肥利用效率。张晓雪等^[9]试验结果表明施肥深度6 cm时大豆产量最高,有利于大豆苗期氮肥吸收,提高肥料利用率。舒时富等^[5]研究发现深施超级稻专用肥与面施相比,能显著增加土壤有机质和氮、磷、钾质量分数及大团聚体组成,提高土壤脲酶、过氧化氢酶和蔗糖酶活性,增加水稻产量。

化肥深施的重点和难点在于把肥料施在作物根系密集、活力最强的土层,而不同作物根系生长适宜的施肥深度存在较大差异,且最优施肥深度随着不同的土壤肥力、耕作方式以及作物品种等也有所不同。张永清等^[10]研究发现深层施肥(20~30 cm)有利于小麦根系生长,提高根系活力,增加根长密度;而浅层施肥则对烟草^[11]、水稻^[12]的根系生长有利。

油菜是我国重要的油料作物之一,据联合国粮

农组织(FAO)统计,2013年我国油菜收获面积达750万hm²,油菜籽总产量达144万t^[13]。冬油菜是需肥量较多的作物,但其适宜的施肥深度目前还不明确。本文基于2a桶栽试验,系统分析比较不同施肥深度对冬油菜地上部干物质量积累、产量、不同土层的根系分布和养分吸收的影响,以期选择出冬油菜较优的施肥深度,为冬油菜合理施肥提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

2013—2014年和2014—2015年2a冬油菜桶栽试验在西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室遮雨棚下进行。该区地处34°20'N、108°24'E,海拔高度521 m,属暖湿带季风半湿润气候区,年均日照时数2 163.8 h,无霜期210 d。供试土壤为取自实验站农田的0~20 cm耕层土壤,质地为壤土,田间持水率为24%(质量含水率,下同),凋萎含水率为8.5%。土壤经自然风干、磨细、过5 mm筛后备用。供试土壤基本理化性状(质量比)为:有机质11.36 g/kg,全氮0.83 g/kg,硝态氮60.27 mg/kg,速效磷18.30 mg/kg,速效钾135.73 mg/kg, pH值8.13。

1.2 试验材料与设计

供试冬油菜品种为“陕油107号”,由西北农林科技大学农学院提供。供试氮肥为尿素(含N质量分数在46%以上),磷肥为过磷酸钙(含P₂O₅质量分数在16%以上),钾肥为农业用硫酸钾(含K₂O质量分数在51%以上)。试验用塑料桶规格为:上边缘内径47.5 cm,下边缘内径41 cm,高54 cm。

试验共设5个施肥深度:CK(地表施肥)、D₅(地下5 cm施肥)、D₁₀(地下10 cm施肥)、D₁₅(地下15 cm施肥)、D₂₀(地下20 cm施肥),并另设不施肥处理(F₀),共6个处理,各处理分别12桶,随机区组排列,分苗期、花期和收获期3个阶段取样分析测试,每个阶段4个重复(4桶)。每桶施肥量为:纯N

3.2 g(180 kg/hm²)、P₂O₅ 1.8 g(100 kg/hm²)、K₂O 2.1 g(120 kg/hm²)。

试验前在桶底部均匀打9个半径约1 cm的小孔,并在底部铺上纱网和1 500 g细砂,以调节下层土壤通气状况和水分条件。播种前2 d装土施肥,每桶装土85 kg,装土时控制土壤干容重为1.35 g/cm³,并在桶中插2根长50 cm、直径约1.5 cm的PVC管用于灌水,PVC管距桶底部约10 cm,管周围打有均匀小孔(孔直径5 mm,孔间距:横向1.5 cm,竖向3 cm),并沿管壁裹一层网孔直径1 mm的纱网。将肥料混匀后,按设计深度进行施肥,施肥后在各桶表面覆盖500 g蛭石。在距桶中心10 cm处均匀种植4窝油菜,播种深度5 cm,为保证油菜正常出苗,播种后灌水至90% FWC(田间持水率,Field water capacity),待冬油菜长出3片真叶后(2013年9月27日、2014年9月30日)定苗,每窝留苗1株,每桶4株油菜。油菜生育期内用称量法进行灌水,各桶灌水量一致,并保证各桶土壤含水率均在60%~80% FWC。2013年9月11日播种,2014年5月18日收获;2014年9月20日播种,2015年5月22日收获。

1.3 测定项目与方法

(1)地上部干物质:分别于苗期(75 DAS,DAS:播种后天数)、花期(202 DAS)和收获期(2013—2014年249 DAS,2014—2015年244 DAS)随机选取4桶冬油菜,齐地切断油菜地上部,将所取冬油菜的茎、叶和角果分开后,放入干燥箱,105℃杀青30 min后于70℃干燥至质量恒定,用电子天平称其质量。

(2)主根性状和侧根分布:在苗期和花期齐地切断油菜地上部后,将土柱从塑料桶中完整取出,切分为0~5 cm、5~10 cm、10~15 cm和15~20 cm 4个土层,分别挑取各土层中所有根系,将其冲洗干净后,剪去主根上的侧根,将不同土层的所有侧根用根系扫描仪(EPSON Perfection V700型)进行扫描,扫描时将根样放入透明的托盘内,注入1~3 mm深的清水,用镊子将根系充分展开,避免互相缠绕。将不同土层的主根和扫描后的侧根装入档案袋在75℃干燥至质量恒定,称取根干质量。利用WinRHIZO Pro软件对扫描后的图像进行分析,得到侧根的总根长、根表面积和根体积。

(3)各器官全氮、全磷、全钾的测定:将苗期、花期和收获期的干样粉碎后,过0.5 mm筛,用H₂SO₄-H₂O₂消煮后,消煮液用于养分的测定;全氮含量用凯氏定氮仪(FOSS 2300型)测定,全磷含量用钒钼黄吸光光度法测定,全钾含量用火焰分光光度法

测定。

各器官氮(磷、钾)吸收量为各器官全氮(磷、钾)含量与器官干物质质量的乘积,单位为mg/株;地上部氮(磷、钾)素积累量为各器官氮(磷、钾)吸收量之和,单位为mg/株。

(4)籽粒产量和构成要素:待油菜收获时,分别测定每株冬油菜的一次有效分枝数量和角果数,晒干后测定籽粒产量和千粒质量。

1.4 数据处理与分析

利用Excel 2010处理试验数据;PASW Statistics 18.0进行方差分析,多重比较采用Duncan新复极差法,显著性水平为 $\alpha=0.05$;并用OriginPro 8.5作图。

2 结果与分析

2.1 施肥深度对冬油菜地上部干物质质量的影响

不同施肥深度下冬油菜地上部干物质质量的变化如表1所示。由表1可知,施肥深度对冬油菜地上部干物质质量有显著影响。施肥处理冬油菜的地上部干物质质量均显著大于不施肥处理F₀,冬油菜在苗期、花期和收获时的地上部干物质质量均随施肥深度的增加先增加后降低,苗期D₁₀处理最大,而花期和收获时D₁₅处理最大。苗期D₁₀处理地上部干物质质量略大于D₅,二者不存在显著差异,但均显著大于其他处理;花期和收获期D₂₀处理地上部干物质质量略小于D₁₅,二者不存在显著差异,但均显著大于其他处理。

表1 不同施肥深度下冬油菜的地上部干物质质量
Tab.1 Above-ground dry matter of winter oilseed rape at different fertilization depths g/株

处理	2013—2014年			2014—2015年		
	苗期	花期	收获	苗期	花期	收获
F ₀	5.51 ^d	13.59 ^d	19.93 ^c	5.66 ^d	14.14 ^d	20.68 ^c
CK	7.15 ^c	24.55 ^c	35.62 ^d	7.52 ^c	26.31 ^c	38.83 ^d
D ₅	11.23 ^a	29.92 ^{bc}	44.58 ^c	11.96 ^a	31.67 ^{bc}	46.49 ^c
D ₁₀	11.81 ^a	34.76 ^b	51.38 ^b	12.37 ^a	36.73 ^b	52.82 ^b
D ₁₅	9.41 ^b	42.15 ^a	61.21 ^a	9.65 ^b	47.90 ^a	66.70 ^a
D ₂₀	8.16 ^c	41.14 ^a	60.17 ^a	8.32 ^c	44.29 ^a	63.01 ^a

注:同列数据后不同字母表示处理间达到显著性差异($P < 0.05$),下同。

收获时,D₁₅处理的地上部干物质质量与CK处理相比,2 a平均提高71.81%;与D₅处理相比,2 a平均提高37.43%。可见,D₁₅处理与CK或D₅处理相比,冬油菜能获得更高的地上部干物质质量。

2.2 施肥深度对冬油菜主根性状的影响

冬油菜不同土层的主根干质量及主根总干质量受施肥深度的影响显著,施肥处理不同土层的主根

干质量及主根总质量均显著大于 F_0 (表2)。由表2可知, 苗期和花期 0~5 cm、5~10 cm 和 10~15 cm 土层的主根干质量均随施肥深度的增加先增加后降低。

苗期和花期 0~5 cm 土层的主根干质量均为 D_5 处理最大, 苗期 D_5 处理显著大于其他处理, 花期 D_5 与 D_{10} 处理间不存在显著差异, 但 D_5 显著大于其他处理。 D_{10} 处理苗期和花期 5~10 cm 土层的主根干质量均为最大, 苗期 D_{10} 处理显著大于其他处理,

花期 D_{10} 处理略大于 D_{15} 处理, 且二者显著大于其他处理。苗期 10~15 cm 土层的主根干质量 D_{10} 处理最大, 2013—2014 年显著大于 CK 处理, 2014—2015 年显著大于 CK 和 D_{20} 处理; 花期 10~15 cm 土层的主根干质量 D_{15} 处理最大, 除与 D_{20} 处理无显著差异外, 显著大于其他处理。 D_{15} 处理花期 15~20 cm 土层的主根干质量显著大于其他处理, 大于 20 cm 土层的主根干质量 D_{20} 处理最大, 并显著大于其他处理。

表2 不同施肥深度下不同土层的主根干质量

Tab.2 Taproot dry weight at different soil depths of different fertilization depths

g/株

年份	处理	苗期				花期					
		0~5 cm	5~10 cm	10~15 cm	合计	0~5 cm	5~10 cm	10~15 cm	15~20 cm	大于20 cm	合计
2013—2014 年	F_0	0.65 ^e	0.43 ^c	0.14 ^c	1.22 ^e	1.14 ^c	0.81 ^e	0.52 ^e	0.21 ^d	0.03 ^d	2.71 ^e
	CK	1.09 ^e	0.79 ^d	0.18 ^b	2.05 ^{cd}	1.95 ^b	1.03 ^d	0.59 ^d	0.32 ^c	0.06 ^c	3.42 ^d
	D_5	1.49 ^a	1.06 ^b	0.21 ^{ab}	2.83 ^a	2.06 ^a	1.30 ^c	0.73 ^c	0.35 ^c	0.08 ^c	4.19 ^c
	D_{10}	1.35 ^b	1.11 ^a	0.25 ^a	2.66 ^b	2.01 ^{ab}	1.58 ^a	1.00 ^b	0.37 ^c	0.11 ^b	5.01 ^b
	D_{15}	1.16 ^c	0.86 ^c	0.23 ^a	2.24 ^c	1.73 ^c	1.52 ^a	1.06 ^a	0.51 ^a	0.13 ^b	5.26 ^a
	D_{20}	0.92 ^d	0.75 ^d	0.21 ^{ab}	1.87 ^d	1.62 ^d	1.46 ^b	1.02 ^{ab}	0.43 ^b	0.19 ^a	5.11 ^b
2014—2015 年	F_0	0.63 ^e	0.39 ^e	0.15 ^c	1.17 ^e	1.13 ^e	0.78 ^e	0.54 ^e	0.19 ^e	0.03 ^e	2.67 ^e
	CK	1.13 ^c	0.76 ^d	0.19 ^b	2.08 ^{cd}	1.98 ^b	1.00 ^d	0.60 ^d	0.29 ^d	0.07 ^d	3.36 ^d
	D_5	1.53 ^a	0.96 ^b	0.23 ^{ab}	2.79 ^a	2.03 ^a	1.32 ^c	0.76 ^c	0.37 ^c	0.1 ^c	4.25 ^c
	D_{10}	1.32 ^b	1.03 ^a	0.28 ^a	2.56 ^b	2.00 ^{ab}	1.60 ^a	0.99 ^b	0.37 ^c	0.11 ^{bc}	5.05 ^b
	D_{15}	1.19 ^c	0.81 ^c	0.24 ^{ab}	2.24 ^c	1.81 ^c	1.51 ^a	1.05 ^a	0.50 ^a	0.14 ^b	5.23 ^a
	D_{20}	0.91 ^d	0.69 ^d	0.21 ^b	1.81 ^d	1.66 ^d	1.45 ^b	1.03 ^{ab}	0.41 ^b	0.21 ^a	5.10 ^b

苗期 D_5 处理的主根总干质量显著大于其他处理, 花期 D_{15} 处理的主根总干质量显著大于其他处理。可见, D_{15} 处理在冬油菜生育后期能显著增加 5~20 cm 和 20 cm 以下土层的主根干质量以及主根总干质量, 而 0~5 cm 土层的主根干质量与 CK 和 D_5 相比降低幅度不大。花期 D_{15} 处理与 CK 和 D_5 相比, 2 a 0~5 cm 土层的主根干质量平均分别降低 13.45% 和 11.72%; 5~10 cm 土层的主根干质量平均分别增加 49.26% 和 15.65%; 10~15 cm 土层的主根干质量平均分别增加 77.31% 和 41.61%; 15~20 cm 土层的主根干质量平均分别增加 65.57% 和 40.28%; 20 cm 以下土层的主根干质量平均分别增加 107.69% 和 50.00%; 主根总干质量平均分别增加 54.72% 和 24.29%。

2.3 施肥深度对冬油菜侧根分布的影响

作物的侧根形成于主根, 是作物根系的主体, 侧根的位置和数量是构成成熟根系的基础, 其分布状况与其生长环境密切相关。2 a 中施肥深度对冬油菜不同土层的侧根分布的影响基本一致, 现以 2014—2015 年为例进行分析。

2.3.1 冬油菜侧根干质量

施肥深度对冬油菜不同土层的侧根干质量有显

著影响, 施肥处理不同土层的侧根干质量均显著大于 F_0 , 且 0~5 cm、5~10 cm 和 10~15 cm 土层的侧根干质量均随施肥深度的增加先增加后降低, 而 15~20 cm 土层的侧根干质量在 D_{20} 处理达到最大, 各处理侧根干质量随土层深度加深呈递减趋势 (图 1)。由图 1 可知, 苗期和花期 0~5 cm 土层的侧根干质量分别占 0~20 cm 土层侧根干质量的 50.13% 和 53.91%。

苗期和花期 D_5 处理 0~5 cm 土层的侧根干质量均显著大于其他施肥处理, D_{15} 处理与 CK 和 D_5 处理相比, 苗期 0~5 cm 土层的侧根干质量分别降低 21.65% 和 16.48%, 花期分别降低 19.48% 和 12.24%。

D_{10} 处理苗期和花期 5~10 cm 土层的侧根干质量均显著大于其他施肥处理, 苗期 D_{15} 处理 5~10 cm 土层的侧根干质量显著大于 CK、 D_5 和 D_{20} 处理, 花期显著大于 CK 和 D_{20} 处理, D_{15} 处理苗期和花期 5~10 cm 土层的侧根干质量与 D_{10} 相比, 分别降低 16.92% 和 14.47%; D_{15} 处理与 CK 和 D_5 处理相比, 苗期 5~10 cm 土层的侧根干质量分别增加 10.20% 和 20.00%, 花期分别增加 15.25% 和 38.78%。

苗期和花期 10~15 cm 土层的侧根干质量, D_{15}

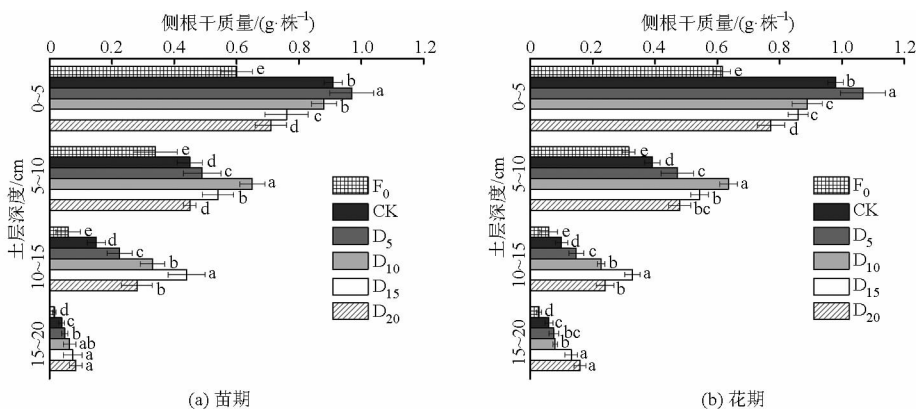


图1 2014—2015年不同施肥深度下不同土层的侧根干质量

Fig.1 Lateral root dry weight of different soil depths under different fertilization depths in 2014—2015

处理显著大于其他处理。D₁₅处理苗期和花期10~15 cm土层的侧根干质量分别比CK增加193.33%和228.00%，比D₅增加95.56%和121.62%。

苗期和花期D₂₀处理15~20 cm土层的侧根干质量最大，D₁₅处理略小于D₂₀，但二者不存在显著差异。苗期和花期15~20 cm土层的侧根干质量最大，D₁₅处理与CK相比，分别提高89.74%和120.00%，与D₅相比，分别提高51.02%和73.68%。

2.3.2 冬油菜侧根长

冬油菜不同土层的侧根长受施肥深度的影响显著，施肥处理不同土层的侧根长均显著大于F₀(图2)。由图2可知，D₅处理苗期和花期0~5 cm土层的侧根长均显著大于其他处理，且CK处理显著大于D₁₅，D₁₅处理苗期和花期0~5 cm土层的侧根长比CK分别降低15.13%和22.78%，比D₅分别降低29.68%和32.41%。

D₁₀处理苗期和花期5~10 cm土层的侧根长均显著大于其他处理，且D₁₅处理显著大于CK和D₅，苗期D₁₅处理5~10 cm土层的侧根长与CK和D₅相比，分别增加22.26%和13.48%，花期D₁₅处理5~10 cm土层的侧根长比CK和D₅分别增加37.18%和25.74%。

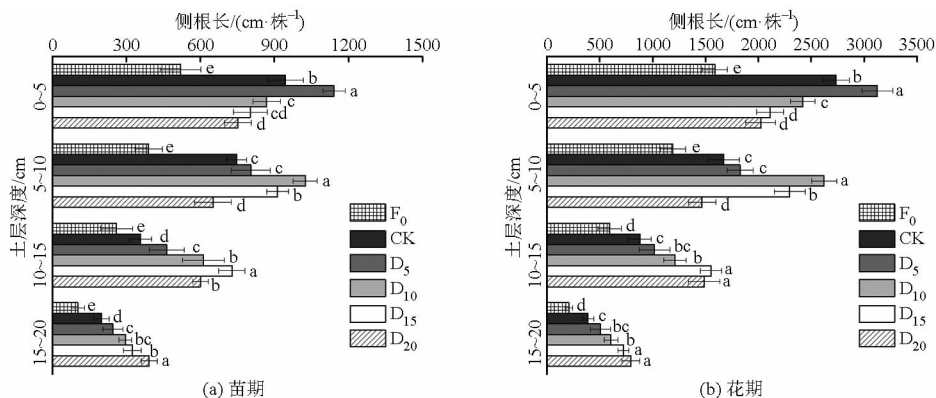


图2 2014—2015年不同施肥深度下不同土层的侧根长

Fig.2 Lateral root length of different soil depths under different fertilization depths in 2014—2015

10~15 cm土层深度的侧根长，苗期D₁₅处理显著大于其他处理，花期D₁₅处理与D₁₀、D₂₀间无显著差异，但均显著大于CK和D₅处理。苗期D₁₅处理10~15 cm土层深度的侧根长比CK和D₅分别增加78.67%和41.87%，花期D₁₅处理10~15 cm土层深度的侧根长比CK和D₅分别增加58.50%和27.48%。

D₂₀处理苗期15~20 cm土层的侧根长显著大于其他处理，花期与D₁₅处理间不存在显著差异，但均显著大于其他处理。D₁₅处理苗期15~20 cm土层的侧根长分别比CK和D₅增加63.43%和13.92%，花期分别比CK和D₅增加86.45%和43.49%。

2.3.3 冬油菜侧根体积

施肥深度对冬油菜不同土层深度的侧根体积也有显著影响，施肥处理不同土层的侧根体积均显著大于F₀，各处理苗期和花期的侧根体积均随土层深度的增加而逐渐递减(图3)。由图3分析可知，D₅处理苗期和花期0~5 cm土层的侧根体积显著大于其他处理，CK处理也显著大于D₁₅和D₂₀处理，D₁₀处理苗期和花期5~10 cm土层的侧根体积显著大于其他处理，D₁₅和D₅间不存在显著差异，但二者均显

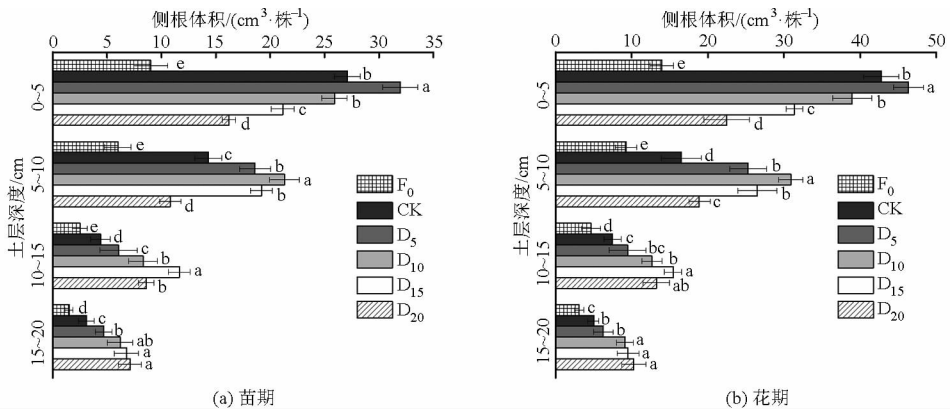


图 3 2014—2015 年不同施肥深度下不同土层的侧根体积

Fig. 3 Lateral root volume of different soil depths under different fertilization depths in 2014—2015

著大于 CK 处理。D₁₅ 处理苗期和花期 0 ~ 10 cm 土层的侧根体积, 与 CK 相比分别降低 2.54% 和 2.36%, 与 D₅ 相比分别降低 20.18% 和 19.26%。

D₁₅ 处理苗期和花期 10 ~ 15 cm 土层的侧根体积最大, 且显著大于其他处理; D₂₀ 处理苗期和花期 10 ~ 15 cm 土层的侧根体积最大, 但 D₂₀ 处理与 D₁₅ 和 D₁₀ 间不存在显著差异, 且 D₁₅ 处理显著大于 D₅ 和 CK 处理。D₁₅ 处理苗期和花期 10 ~ 20 cm 土层的侧根体积, 与 CK 相比分别增加 146.00% 和 99.60%, 与 D₅ 相比分别增加 71.63% 和 58.41%。

2.3.4 冬油菜侧根表面积

不同施肥处理苗期和花期的侧根表面积均随土层深度的增加而逐渐递减(图 4)。由图 4 分析可知, 施肥深度对冬油菜不同土层深度的侧根表面积有显著影响, 且施肥处理不同土层的侧根表面积均显著大于 F₀。

0 ~ 5 cm 土层的侧根表面积, D₅ 处理在苗期和花期均显著大于其他处理, 且 CK 显著大于 D₁₅ 处理; 5 ~ 10 cm 土层的侧根表面积, D₁₀ 处理在苗期和花期均显著大于其他处理, D₅ 和 D₁₅ 处理间不存在显著差异, 但 D₁₅ 处理显著大于 CK 处理。D₁₅ 处理苗期和花期 0 ~ 10 cm 土层的侧根表面积, 与 CK 相

比分别降低 6.38% 和 3.53%, 与 D₅ 相比分别降低 15.92% 和 25.09%。

10 ~ 15 cm 土层的侧根表面积, D₁₅ 处理在苗期和花期均显著大于其他处理; 15 ~ 20 cm 土层的侧根表面积, D₂₀ 处理在苗期和花期均最大, 但与 D₁₅ 处理间不存在显著差异, 且 D₁₅ 处理显著大于 CK 和 D₅ 处理。苗期 D₁₅ 处理 10 ~ 20 cm 土层的侧根表面积, 与 CK 和 D₅ 相比分别提高 91.18% 和 60.49%, 花期 D₁₅ 处理 10 ~ 20 cm 土层的侧根表面积, 与 CK 和 D₅ 相比分别提高 99.00% 和 61.79%。

2.4 施肥深度对冬油菜养分吸收的影响

不同施肥处理冬油菜各生育期茎秆及收获时籽粒的氮、磷、钾吸收量如表 3 所示。由表 3 可以看出, 施肥深度对冬油菜养分吸收有显著影响, 且各施肥处理苗期、花期和收获时地上部茎秆及籽粒中的养分吸收量均显著大于 F₀。

2 a 苗期, D₁₀ 处理地上部植株氮、磷、钾的吸收量最大, 其中, D₁₀ 处理氮和钾的吸收量显著大于其他处理, 其磷吸收量与 D₅ 间不存在显著差异, 但显著大于其他处理。D₁₅ 处理的氮和钾的吸收量略小于 D₅, 但显著大于 CK 处理; D₁₅ 处理的磷吸收量显著小于 D₅, 却显著大于 CK。2 a 花期和收获时的地

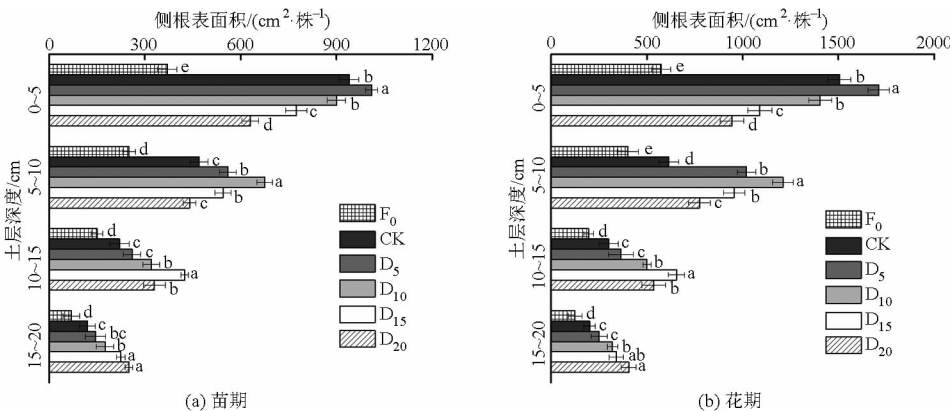


图 4 2014—2015 年不同施肥深度下不同土层的侧根表面积

Fig. 4 Lateral root area of different soil depths under different fertilization depths in 2014—2015

表3 不同处理各生育期冬油菜地上部养分吸收量

Tab.3 Shoot N, P, K uptakes of winter oilseed rape at different growth stages of different treatments mg/株

年份	处理	氮吸收量				磷吸收量				钾吸收量			
		苗期	花期	收获	籽粒	苗期	花期	收获	籽粒	苗期	花期	收获	籽粒
2013—2014年	F ₀	26.9 ^e	82.1 ^e	85.0 ^e	72.5 ^e	1.5 ^d	13.2 ^d	14.0 ^d	12.9 ^d	11.9 ^e	56.9 ^e	83.7 ^e	19.2 ^d
	CK	147.2 ^d	255.6 ^d	264.1 ^d	216.1 ^d	12.7 ^e	39.9 ^e	39.7 ^e	35.9 ^e	77.7 ^d	175.8 ^d	202.1 ^d	43.6 ^e
	D ₅	233.2 ^b	308.4 ^e	330.4 ^e	272.5 ^e	22.6 ^a	47.0 ^b	46.5 ^{bc}	42.3 ^{bc}	134.0 ^b	230.5 ^c	245.0 ^c	57.8 ^b
	D ₁₀	264.6 ^a	333.9 ^b	363.2 ^b	305.9 ^b	24.6 ^a	49.1 ^b	51.4 ^b	46.3 ^b	157.8 ^a	259.5 ^b	276.7 ^b	59.3 ^b
	D ₁₅	212.3 ^b	370.5 ^a	401.7 ^a	339.6 ^a	17.9 ^b	60.6 ^a	61.8 ^a	54.4 ^a	125.0 ^b	281.6 ^a	322.9 ^a	67.6 ^a
	D ₂₀	181.8 ^c	354.1 ^a	393.2 ^a	328.9 ^a	17.3 ^b	57.0 ^a	58.3 ^{ab}	52.6 ^a	109.4 ^c	274.3 ^a	314.5 ^a	65.8 ^a
2014—2015年	F ₀	31.7 ^e	80.5 ^e	90.5 ^e	76.2 ^e	2.3 ^e	17.5 ^d	20.1 ^e	18.2 ^e	17.0 ^e	65.2 ^e	94.3 ^e	20.8 ^d
	CK	167.5 ^d	289.0 ^d	314.0 ^d	267.8 ^d	9.6 ^d	43.8 ^e	47.3 ^d	41.6 ^d	87.1 ^d	197.3 ^d	209.3 ^d	43.8 ^e
	D ₅	252.4 ^b	316.4 ^e	350.3 ^e	288.9 ^e	23.9 ^{ab}	53.4 ^{bc}	55.2 ^c	49.7 ^c	147.0 ^b	243.7 ^c	257.5 ^c	55.2 ^b
	D ₁₀	288.7 ^a	395.8 ^b	410.8 ^b	336.1 ^b	25.5 ^a	60.4 ^b	63.4 ^b	56.7 ^b	165.7 ^a	285.7 ^b	296.0 ^b	61.8 ^b
	D ₁₅	231.9 ^b	437.5 ^a	454.3 ^a	372.0 ^a	21.8 ^b	68.3 ^a	70.6 ^a	61.9 ^a	130.8 ^b	328.2 ^a	347.5 ^a	71.2 ^a
	D ₂₀	200.1 ^c	429.2 ^a	444.7 ^a	358.8 ^a	16.8 ^c	63.9 ^{ab}	68.5 ^{ab}	59.2 ^{ab}	111.0 ^c	312.9 ^{ab}	334.4 ^a	68.7 ^a

上部植株以及收获后籽粒中的氮、磷、钾的吸收量, D₁₅处理均为最大, D₁₅与 D₂₀处理间不存在显著差异,但 D₁₅处理显著大于其他处理。

收获时, 2 a D₁₅处理地上部植株氮、磷、钾的平均吸收量分别比 CK 增加 48.07%、52.18% 和 62.96%, 分别比 D₅ 增加 25.75%、30.19% 和 33.41%, 分别比 D₁₀ 增加 10.59%、15.33% 和 17.06%; 2 a D₁₅处理油菜籽粒氮、磷、钾的平均吸收量与 CK 相比分别增加 44.33%、50.06% 和

58.81%, 与 D₅ 相比分别增加 24.40%、26.41% 和 22.83%, 与 D₁₀ 相比分别增加 8.79%、12.91% 和 14.62%。

2.5 施肥深度对冬油菜产量及其构成要素的影响

施肥深度对冬油菜产量及产量构成要素有显著影响(图5)。由图5分析可知, 2 a 施肥处理冬油菜的产量、单株分枝数和角果数以及千粒质量均显著大于不施肥处理 F₀, 且均随施肥深度的增加先增加后降低。

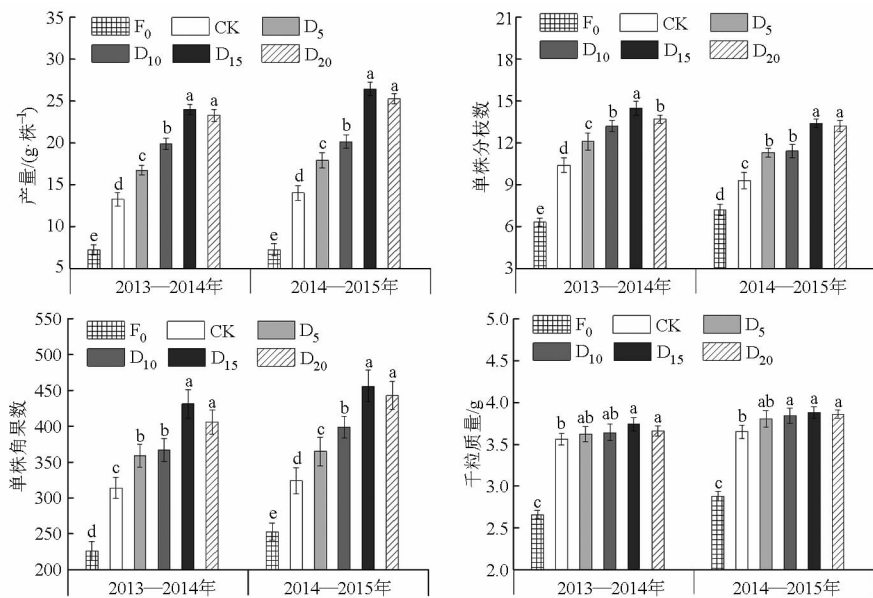


图5 不同施肥深度下冬油菜的产量及产量构成

Fig.5 Yield and yield components of winter oilseed rape under different fertilization depths

D₁₅处理的产量、单株分枝数和角果数以及千粒质量均为最大, 且其产量、单株分枝数和角果数均显著大于 CK、D₅ 和 D₁₀ 处理, 除 2013—2014 年的单株分枝数外, D₁₅处理的产量、单株分枝数和角果数略大于 D₂₀ 处理, 但二者不存在显著差异。2 a D₅、D₁₀、D₁₅ 和 D₂₀ 处理的千粒质量不存在显著差异, 但 D₁₅ 和

D₂₀ 处理的千粒质量均显著大于 CK 处理。

D₁₅ 处理 2 a 的平均产量与 CK、D₅ 和 D₁₀ 处理相比, 分别提高 85.10%、45.47% 和 31.26%; 而且, 与 D₂₀ 处理相比提高了 3.89%。可见, D₁₅ 处理与 CK、D₅ 和 D₁₀ 处理相比, 能显著提高冬油菜的产量; 与 D₂₀ 处理相比, 不仅能节省成本, 而且产量也相对较高。

3 讨论

根系是作物吸收水分和养分以及合成多种生理活性物质的重要器官,其功能的发挥与根系形态和生理特性密切相关,常通过其构型改变和时空分布来适应生境的变化^[14]。作物根系的生长发育状况及其在土壤中的时空分布,不仅决定作物在生长期对水分和养分的吸收利用能力,还直接影响作物地上部冠层的建成、同化物的分配、作物对养分的吸收及最终产量的形成^[15-16]。根系生长具有趋肥性,土壤养分对根系生长具有可塑性^[17],在肥料集中的土层中,一般根系比较密集。于晓芳等^[8]研究发现,深松及氮肥适度深施可明显增加玉米 20 cm 以下土层的根质量、根体积和根表面积,且在各土层分布均匀,氮肥深施促使玉米根系下移,改善了深层根系生长状况,减缓深层根系衰老。石岩等^[18]在对小麦的研究结果中表明,较深层次(20~40 cm)施肥,根的超氧化物歧化酶、过氧化氢酶活性能保持较高水平,根系活力和根可溶性蛋白质含量降低慢,抑制膜脂过氧化产物丙二醛的产生,利于延迟根系衰老;施肥过浅(0~20 cm)和施肥过深(60~80 cm),都会导致根系衰老快,产量较低。本研究中,肥料深施 D₁₅处理显著改善了冬油菜的侧根分布,促使根系下移,且 0~10 cm 土层根系与 CK、D₅处理相比降低幅度不大;D₂₀处理虽然也促使根系下移,使 15~20 cm 土层的侧根干质量、侧根长、侧根体积和表面积最大,但其与 D₁₅处理间不存在显著差异,且 0~10 cm 土层根系与 CK 和 D₅处理相比降低幅度较大,对冬油菜苗期生长发育不利。HAMMER 等^[19]研究表明,作物在深层土壤中的发达侧根有利于作物对深层土壤中水分和养分的吸收利用,使冬油菜在生育后期养分缺乏或水分亏缺时生长良好。主根是冬油菜的一个重要库器官,施肥深度对冬油菜主根干质量也存在显著差异,D₁₅处理在冬油菜生育后期能显著增加 5~20 cm 和 20 cm 以下土层的主根干质量以及主根总干质量,且 0~5 cm 土层的主根干质量与 CK 和 D₅相比降低幅度不大。

发达的根系不仅有助于油菜吸收水分和养分,而且能提高油菜的抗倒伏能力,降低油菜因倒伏而减产的可能性。主根下扎深度与根干质量和油菜的抗倒伏系数显著相关^[20-21],袁金展等^[22]研究发现,花期根干质量是决定油菜籽粒产量的主要因素,根干质量越大,籽粒产量越高,粗壮的根系是油菜获得高产的关键。本研究中,D₁₅处理花期油菜主根和侧根的总干质量最大,且显著大于其他处理,同时,D₁₅处理收获后的最终产量也最大,并显著大于 CK、D₅

和 D₁₀处理。

与表施或浅施相比,肥料深施能降低肥料因挥发或地表径流而造成的损失。ROCHETTE 等^[23]研究发现深施尿素与表施相比,其氮挥发损失能够减少 52%;而且能够降低从尿素中释放的 N₂O + NO 总量^[24];KIMMELL 等^[25]研究表明磷肥深施能显著降低因径流而造成的损失。将肥料施在作物根区,还能够降低土壤颗粒对养分的吸收固定,而且深层土壤中较高的含水率能够加速肥料溶解,促进作物对肥料的吸收利用^[26-27]。本研究中,施肥深度对冬油菜养分吸收产生显著影响,花期和收获时 D₁₅处理的地上部植株以及收获后籽粒中的氮、磷和钾吸收量均为最大,显著大于 CK、D₅和 D₁₀处理。收获时,2 a D₁₅处理地上部植株氮、磷和钾的平均吸收量分别比 CK 增加 48.07%、52.18% 和 62.96%,比 D₅增加 25.75%、30.19% 和 33.41%,比 D₁₀增加 10.59%、15.33% 和 17.06%;2 a D₁₅处理油菜籽粒对氮、磷和钾的平均吸收量与 CK 相比分别增加 47.06%、50.06% 和 58.81%,与 D₅相比分别增加 26.75%、26.41% 和 22.83%,与 D₁₀相比分别增加 8.79%、12.91% 和 14.62%。鲁飘飘等^[28]研究发现氮肥深施可以显著提高油菜对氮、磷、钾养分的吸收利用,促进油菜产量的增加,氮肥基施深度 16 cm 时,油菜获得了最高的产量、氮肥吸收利用率和农学利用率。这与本研究中油菜的最佳施肥深度基本一致。

表层施肥能够显著增加上层土壤中的根系数量,深层施肥能够显著促进中下层土壤中的根系发育。因此,在条件允许的情况下,可以采取表层施肥与深层施肥相结合的方法,不仅使上层根系生长良好,而且促使下层根量增加,扩大吸收范围,增加下层根系的数量和活力,“以肥促根,以根调水”,提高下层土壤中水分的利用率,最大限度地实现增产的目的,才是最理想的措施。

4 结论

(1) D₁₅处理在冬油菜生育后期能显著增加 5~20 cm 和 20 cm 以下土层的主根干质量以及主根总干质量,而 0~5 cm 土层的主根干质量与 CK 和 D₅相比降低幅度不大。在冬油菜苗期和花期 10~20 cm 土层的侧根干质量、侧根长、侧根体积和侧根表面积 D₁₅处理显著大于 CK 和 D₅。且 D₁₅处理在冬油菜花期和收获时的地上部干物质量及地上部植株的氮、磷、钾吸收量均显著大于 CK 和 D₅处理。

(2) D₁₅处理的籽粒产量显著大于 CK、D₅和 D₁₀处理,D₁₅处理 2 a 的平均产量与 CK、D₅和 D₁₀处理相

比,分别提高 85.10%、45.47% 和 31.26%,与 D₂₀ 处理相比提高了 3.89%。收获时,D₁₅ 处理地上部植株中氮、磷、钾吸收量显著大于 CK、D₅ 和 D₁₀ 处理,2 a D₁₅ 处理地上部植株中的氮、磷、钾的平均吸收量与 CK 相比分别增加 48.07%、52.18% 和 62.96%,与

D₅ 相比分别增加 25.75%、30.19% 和 33.41%,与 D₁₀ 相比分别增加 10.59%、15.33% 和 17.06%。

(3) 综合考虑冬油菜籽粒产量、根系分布状况及养分吸收情况,地表下 15 cm 施肥(D₁₅ 处理)为冬油菜较优的施肥深度。

参 考 文 献

- 1 闫湘,金继运,何萍,等. 提高肥料利用率技术研究进展[J]. 中国农业科学,2008,41(2):450-459.
YAN Xiang, JIN Jiyun, HE Ping, et al. Recent advances in technology of increasing fertilizer use efficiency [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(2): 450-459. (in Chinese)
- 2 张卫峰,季玥秀,马文奇,等. 中国化肥资源供需矛盾及调控策略[J]. 自然资源学报,2008,23(5):754-763.
ZHANG Weifeng, JI Yuexiu, MA Wenqi, et al. The situation and managing strategy of fertilizer supply and consumption in China [J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(5): 754-763. (in Chinese)
- 3 栾江,仇焕广,井月,等. 我国化肥施用量持续增长的原因分解及趋势预测[J]. 自然资源学报,2013,28(11):1869-1878.
LUAN Jiang, QIU Huangang, JING Yue, et al. Decomposition of factors contributed to the increase of China's chemical fertilizer use and projections for future fertilizer use in China [J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(11): 1869-1878. (in Chinese)
- 4 ZHANG Q C, SHAMSI I H, WANG J W, et al. Surface runoff and nitrogen (N) loss in a bamboo (*Phyllostachys pubescens*) forest under different fertilization regimes [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20(7): 4681-4688.
- 5 舒时富,唐湘如,罗锡文,等. 机械深施缓释肥对精量穴直播超级稻生理特性的影响[J]. 农业工程学报,2011,27(3):89-92.
SHU Shifu, TANG Xiangru, LUO Xiwen, et al. Effects of deep mechanized application of slow-release fertilizers on physiological characteristics of precision hill-direct-seeding super rice [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 89-92. (in Chinese)
- 6 陈亚宇,黄凤球,王翠红,等. 化肥深施技术的研究进展[J]. 湖南农业科学,2013(21):29-33.
CHEN Yayu, HUANG Fengqiu, WANG Cuihong, et al. Progresses of deep-applying fertilizer techniques [J]. Hunan Agricultural Sciences, 2013(21): 29-33. (in Chinese)
- 7 段文学,于振文,石玉,等. 施氮深度对旱地小麦耗水特性和干物质积累与分配的影响[J]. 作物学报,2013,39(4):657-664.
DUAN Wenxue, YU Zhenwen, SHI Yu, et al. Effects of nitrogen application depth on water consumption characteristics and dry matter accumulation and distribution in rainfed wheat [J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(4): 657-664. (in Chinese)
- 8 于晓芳,高聚林,叶君,等. 深松及氮肥深施对超高产春玉米根系生长、产量及氮肥利用效率的影响[J]. 玉米科学,2013,21(1):114-119.
YU Xiaofang, GAO Julin, YE Jun, et al. Effects of deep loosening with nitrogen deep placement on root growth, grain yield and nitrogen use efficiency of super high-yield spring maize [J]. Journal of Maize Sciences, 2013, 21(1): 114-119. (in Chinese)
- 9 张晓雪,吴冬婷,龚振平,等. 施肥深度对大豆氮磷钾吸收及产量的影响[J]. 核农学报,2012,26(2):364-368.
ZHANG Xiaoxue, WU Dongting, GONG Zhenping, et al. Effect of fertilization depth on N, P, K absorption and yield in soybean [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2012, 26(2): 364-368. (in Chinese)
- 10 张永清,苗果园. 冬小麦根系对施肥深度的生物学响应研究[J]. 中国生态农业学报,2006,14(4):72-75.
ZHANG Yongqing, MIAO Guoyuan. Biological response of winter wheat root system to fertilization depth [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2006, 14(4): 72-75. (in Chinese)
- 11 贾志红,易建华,李挥文,等. 不同深度施用基肥和追肥对烤烟根系生长的影响[J]. 湖南农业科学,2006(2):45-47.
JIA Zhihong, YI Jianhua, LI Huiwen, et al. Effects of fertilization and additional fertilization at different soil depths on the root growth of flue-cured tobacco [J]. Hunan Agricultural Sciences, 2006(2): 45-47. (in Chinese)
- 12 孙浩燕,李小坤,任涛,等. 浅层施肥对水稻苗期根系生长及分布的影响[J]. 中国农业科学,2014,47(12):2476-2484.
SUN Haoyan, LI Xiaokun, REN Tao, et al. Effects of fertilizer in shallow soils on growth and distribution of rice roots at seedling stage [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(12): 2476-2484. (in Chinese)
- 13 FAO. Statistical databases[S]. Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations, 2015.
- 14 王法宏,王旭清,刘素英,等. 根系分布与作物产量的关系研究进展[J]. 山东农业科学,1997(4):48-51.
- 15 LYNCH J. Root architecture and plant productivity [J]. Plant Physiology, 1995, 109(1): 7-13.
- 16 马守臣,徐炳成,李凤民,等. 根修剪对黄土旱塬冬小麦 (*Triticum aestivum*) 根系分布、根系效率及产量形成的影响[J]. 生态学报,2008,28(12):6172-6179.
MA Shouchen, XU Bingcheng, LI Fengmin, et al. Effect root pruning on root distribution, root efficiency and yield formation of winter wheat in Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(12): 6172-6179. (in Chinese)
- 17 李秧秧,刘文兆. 土壤水分与氮肥对玉米根系生长的影响[J]. 中国生态农业学报,2001,9(1):13-15.
LI Yangyang, LIU Wenzhao. Effects of soil moisture and nitrogen fertilizer on root growth of corn [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2001, 9(1): 13-15. (in Chinese)

- 19 李德娟,傅英娟,秦梦华. 纤维素可控接枝聚合技术的研究进展[J]. 中国造纸, 2013, 32(7): 60-66.
LI Dejuan, FU Yingjuan, QIN Menghua. Research progress of cellulose controlled graft copolymerization technology [J]. China Pulp and Paper, 2013, 32(7): 60-66. (in Chinese)
- 20 TIWARI A, SINGH V. Microwave-induced synthesis of electrical conducting gum acacia-graft-polyaniline [J]. Carbohydrate Polymers, 2008, 74(3): 427-434
- 21 SINGH V, KUMAR P, SANGHI R. Use of microwave irradiation in the grafting modification of the polysaccharides—a review [J]. Progress in Polymer Science, 2012, 37(2): 340-364.
- 22 HUACAI G, WAN P, DENGKE L. Graft copolymerization of chitosan with acrylic acid under microwave irradiation and its water absorbency [J]. Carbohydrate Polymers, 2006, 66(3): 372-378.
- 23 王立华,王永利,赵晓胜,等. 秸秆纤维素提取方法比较研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(20): 130-134.
WANG Lihua, WANG Yongli, ZHAO Xiaosheng, et al. Comparative study on the method of extracting straw cellulose [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(20): 130-134. (in Chinese)
- 24 刘亚琦,黄占斌,林杉,等. 10种农用保水剂基本性能的比较研究[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(6): 147-151.
LIU Yaqi, HUANG Zhanbin, LIN Shan, et al. Comparative study on fundamental properties of ten kinds of super absorbent polymers [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(6): 147-151. (in Chinese)
- 25 朱诚身. 聚合物结构分析[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 21-45, 146-209, 469-473.
- 26 于学春. 纤维素基吸水剂的合成及性能的研究[D]. 天津: 天津轻工业学院, 2000.
YU Xuechun. Study on synthesis and properties of cellulose-based absorbent [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2000. (in Chinese)
- 27 虞素飞. 一种纤维素改性土壤保水剂的制备及性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2013.
YU Sufei. Preparation and performance of a soil aquasorb modified by cellulose [D]. Shanghai: Donghua University, 2013. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 128 页)

- 18 石岩,位东斌,于振文,等. 施肥深度对旱地小麦花后根系衰老的影响[J]. 应用生态学报, 2001, 12(4): 573-575.  
SHI Yan, WEI Dongbin, YU Zhenwen, et al. Influence of fertilization depth on root system senescence of upland wheat after anthesis [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(4): 573-575. (in Chinese)
- 19 HAMMER G L, DONG Z, MCLEAN G, et al. Can changes in canopy and/or root system architecture explain historical maize yield trends in the US corn belt? [J]. Crop Science, 2009, 49(1): 299-312.
- 20 马霓,李玲,徐军,等. 甘蓝型油菜抗倒伏性及农艺性状研究[J]. 作物杂志, 2010(6): 36-41.  
MA Ni, LI Ling, XU Jun, et al. Researches on the lodging resistance and agronomic traits of winter rape (*Brassica napus* L.) [J]. Crops, 2010(6): 36-41. (in Chinese)
- 21 陈新军,戚存扣,浦惠明,等. 甘蓝型油菜抗倒性评价及抗倒性与株型结构的关系[J]. 中国油料作物学报, 2007, 29(1): 54-57.  
CHEN Xinjun, QI Cunkou, PU Huiming, et al. Evaluation of lodging resistance in rapeseed (*Brassica napus* L.) and relationship between plant architecture and lodging resistance [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2007, 29(1): 54-57. (in Chinese)
- 22 袁金展,马霓,张春雷,等. 移栽与直播对油菜根系建成及籽粒产量的影响[J]. 中国油料作物学报, 2014, 36(2): 189-197.  
YUAN Jinzhan, MA Ni, ZHANG Chunlei, et al. Effects of direct drilling and transplanting on root system and rapeseed yield [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2014, 36(2): 189-197. (in Chinese)
- 23 ROCHETTE P, ANGERS D A, CHANTIGNY M H, et al. Reducing ammonia volatilization in a no-till soil by incorporating urea and pig slurry in shallow bands [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2009, 84(1): 71-80.
- 24 CHENG W, NAKAJIMA Y, SUDO S, et al. N<sub>2</sub>O and NO emissions from a field of Chinese cabbage as influenced by band application of urea or controlled-release urea fertilizers [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2002, 63(2-3): 231-238.
- 25 KIMMELL R J, PIERZYNSKI G M, JANSSEN K A, et al. Effects of tillage and phosphorus placement on phosphorus runoff losses in a grain sorghum-soybean rotation [J]. Journal of Environmental Quality, 2001, 30(4): 1324-1330.
- 26 FARMAHA B S, FERNÁNDEZ F G, NAFZIGER E D. Distribution of soybean roots, soil water, phosphorus and potassium concentrations with broadcast and subsurface-band fertilization [J]. Soil Science Society of America Journal, 2013, 76(3): 1079-1089.
- 27 MCLAUGHLIN M J, MCBEATH T M, SMERNIK R, et al. The chemical nature of P accumulation in agricultural soils – implications for fertilizer management and design: an Australian perspective [J]. Plant and Soil, 2011, 349(1-2): 69-87.
- 28 鲁飘飘,武际,胡现荣,等. 氮肥基施深度对油菜产量和养分吸收利用的影响[J]. 中国农学通报, 2014, 30(30): 34-37.  
LU Piaopiao, WU Ji, HU Xianrong, et al. Effects of nitrogen application depth on yield and nutrient utilization of rapeseed [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(30): 34-37. (in Chinese)