

油菜机械直播同步分层施肥对根系构型和抗倒伏能力影响

高丽萍¹, 陈 慧³, 刘嘉诚¹, 秦永豪¹, 廖庆喜^{1,2}, 廖宜涛^{1,2*}, 王天尧⁴

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070;

3. 西华大学能源与动力工程学院, 成都 610039; 4. 荆州市农业科学院, 荆州 434000)

摘 要: 为探明油菜精量联合直播同步分层施肥机械作业条件下, 深浅层施肥比例对油菜根系生长、植株抗倒伏能力和产量等农艺性状的影响, 该研究选用“华油杂 62”油菜品种作为供试作物, 在施肥量 600 kg/hm² 条件下, 以 10 cm 定位侧深施肥 CK1 和机械旋耕浅层混施 CK2 作为对照, 设置机械旋耕浅层混施-定位侧深施肥量分层比例为 1:3 (FL)、1:1 (FM) 和 3:1 (FH) 3 个施肥处理, 于 2020 年和 2021 年在长江中游冬油菜区开展田间试验, 研究不同分层施肥处理对油菜根系分布、耕层土壤坚实度变化、倒伏指数和产量的影响。结果表明, 分层深施处理能显著 ($P<0.05$) 改善油菜根系构型并促进根系下移, 平均根表面积、根体积、根干质量和主根长分别是 CK1 处理的 1.58、1.47、1.29 和 1.16 倍, 是 CK2 处理的 3.63、2.79、1.46 和 1.28 倍, 且土壤坚实度相较于 CK1 和 CK2 处理平均分别降低 4.91% 和 15.25%。不同分层施肥处理的油菜主根长、根表面积、根体积和根干质量在处理间从大到小依次均为: FM、FH、FL; FH 处理植株的根茎粗、倒伏角度、抗折力分别是 FM 处理的 1.11、1.25 和 1.31 倍, 倒伏指数相较于 FM 处理平均降低了 26.90%, 但植株田间倒伏角度比 FM 处理增加了 25.14%。分层深施肥处理的产量、单株分枝数、角果数和千粒质量均显著 ($P<0.05$) 大于定位深施和机械混施处理, 其中 FM 处理平均产量与 FL、FH、CK1 和 CK2 相比, 分别提高 9.85%、16.35%、26.88% 和 37.75%。综合考虑不同施肥处理下冬油菜根系分布、土壤坚实度、倒伏指数和籽粒产量, 分层深施肥处理中 FM 处理为田间机械化直播冬油菜实现高产且抗倒伏的较优施肥方式, 研究为提升油菜机械直播农机农艺融合和肥料运筹策略提供了理论依据和技术支撑。

关键词: 油菜; 机械直播; 分层施肥; 根系; 土壤坚实度; 倒伏指数

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202302025

中图分类号: S275

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2023)-11-0087-11

高丽萍, 陈慧, 刘嘉诚, 等. 油菜机械直播同步分层施肥对根系构型和抗倒伏能力影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(11): 87-97. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202302025 <http://www.tcsae.org>

GAO Liping, CHEN Hui, LIU Jiacheng, et al. Effects of synchronous layered fertilization with machinery on the root architecture and lodging resistance of rape[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(11): 87-97. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202302025 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

油菜是中国重要的植物油来源之一, 约 45% 的国产食用植物油来自油菜, 此外还具有饲、肥、菜、蜜及旅游观花等多种功能用途, 在中国农业经济中发挥着重要作用。长江流域是中国最重要的油菜产区, 常年种植面积与总产量均占全国的 90% 以上, 该产区以稻-油轮作模式为主^[1-2]。目前国内油菜机械化综合水平为 61.92%, 其中机械播栽水平为 38.81%, 以机械直播为主^[3]。油菜精量联合直播可一次性完成所有油菜种植工序、实现种肥同播, 是油菜规模化、轻简化种植实现节本增效的重要途径, 近年来在生产中得到广泛应用^[4]。多年生产实践及研究表明, 机械化直播模式下, 高产、抗倒是确保

油菜直播种植效益的两个重要前提条件; 其中倒伏会显著降低油菜植株的光合能力及碳水化合物、营养物质和水分的运输, 导致产量和品质的损失, 此外还会导致收获问题, 最终增加油菜生产成本^[5-6]。

油菜的倒伏分为茎倒和根倒两种类型, 茎倒伏是指茎秆基节间的弯曲或断裂, 根倒伏是指根系受到外界干扰, 使笔直茎秆发生倾斜^[7]; 直播油菜主要以茎倒为主, 但根系倒伏的风险高于茎秆倒伏^[8-9]。目前, 关于栽培因素对作物倒伏的研究发现, 倒伏是一个多因素现象, 受到各种环境因素和农艺措施的显著影响, 如肥料管理、植物品种和密度、土壤质地、地形、植物病害和气候因素等^[10-11]。植株茎秆基节间下部的形态和力学属性 (茎粗、抗弯强度、维管束厚度等) 在抗茎秆抗倒伏方面起着至关重要的作用, 而根系倒伏的主要原因是根系-土壤锚固系统的失效。根据作物对养分的需求调整肥料施用量和种类、优化施肥方式, 改善根系分布和植株构型, 增加根系与土壤间的锚固力, 可以有效提高作物抗倒伏能力的同时增加肥料利用率^[12-15]。

施肥模式成为增产和减轻倒伏的重要措施之一, 许多学者在油菜需肥特性^[16]、根系分布^[17]、倒伏性^[18]、产

收稿日期: 2023-02-07 修订日期: 2023-05-08

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFD1600503); 国家油菜产业技术体系专项 (CARS-12)

作者简介: 高丽萍, 博士生, 研究方向为油菜播种技术与装备。Email: gaoliping@webmail.hzau.edu.cn

※通信作者: 廖宜涛, 教授, 博士生导师, 研究方向为现代农业装备设计与测控。Email: liaoetao@mail.hzau.edu.cn

量构成^[19]等方面已有较多深入研究,发现种肥同层会抑制植株的出苗率和干物质积累,随种肥施用量的增加对植株出苗率及干物质积累量的降低更为明显^[20];而肥料深施、种肥分层,可有效提高作物产量和收获指数^[21-22],且能提高成苗率并改善根系分布,促进根部和地上部干物质同步增长,促使根系下扎并提高深层土壤中根系密度、活力以及茎秆力学特性^[23];更精准的肥料分层深施处理中,分层减量施肥对根系生长的促进效果优于分层施肥,且肥料用量减少 10%~20% 条件下,肥料分两层或三层施用时根系表面积、体积、根干质量及地上部鲜质量与分层不减肥处理无显著差异^[24]。

长江中下游地区受前茬水稻秸秆量大、土壤黏重板结等因素的制约,施肥装置易黏附、缠草、堵塞,难以实现深施肥作业,因而机械播种作业中肥料通常采用先撒在地表,再由旋耕装置旋入耕层,形成厢面浅层混施。前期研制的包络式深施肥装置基于主动防堵切削原理,解决了稻茬田肥料难以深层施用的问题^[25]。本研究拟在现有机械直播同步深施肥技术研究上,结合机械分层施肥作业,设置分层施肥处理下不同深浅层施肥比例,拟从油菜植株根系生长特性、根系分布对土壤坚实度影响及茎秆力学特性等方面探讨机械分层施肥比例与油菜抗倒伏性和产量间的联系,为长江中游稻油轮作区机械轻简化栽培模式下,冬油菜机械化直播农机农艺融合提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

油菜机械直播同步分层施肥应用播种机为装配有主动防堵深施肥铲的油菜精量联合分层深施肥播种机^[25-26],其主要由机架、仿形地轮、旋耕部件、排肥系统、排种系统、开畦沟装置、平土板、双圆盘开沟器等组成。机具工作时由拖拉机牵引前进,两侧的前后组合式开沟犁开出畦沟,旋耕部件在拖拉机动力输出轴驱动下细碎疏松并抛撒土壤,确保根系养分和水分的吸收面扩大。排肥器由仿形地轮驱动,前侧肥箱盛放浅层施用的缓释肥颗粒,通过排肥器排出后经导肥管撒至地表,再由旋耕机旋入耕层浅层;后侧肥箱盛放的缓释肥用于定位条施,其经排肥器排出再由深施肥铲导入肥沟中。其中,试验机具所用排肥器为有效工作长度为 60 mm 的标准外槽轮排肥器^[27],试验前通过播种机测试平台标定排肥器槽轮不同有效工作长度下的排肥量;田间试验中通过改变排肥轮工作长度实现深浅层不同施肥量调节。基于已有研究结果^[19,28],本研究采用 10 cm 定位侧深施肥;平土板镇压并平整厢面,形成适宜油菜生长的良好种床条件,机具作业示意图如图 1 所示。

油菜机械直播同步分层施肥采用油菜品种为长江流域广泛种植的“华油杂 62”,具有双低、高产、抗病等特点;播施肥料采用油菜专用缓释配方肥“宜施壮”,其中肥料总养分 $\geq 40.0\%$, $N-P_2O_5-K_2O$ -中微量元素质量比为 25-7-8-5 (%),中微量元素养分主要包含 B、Ca、

Mg、Zn、S。

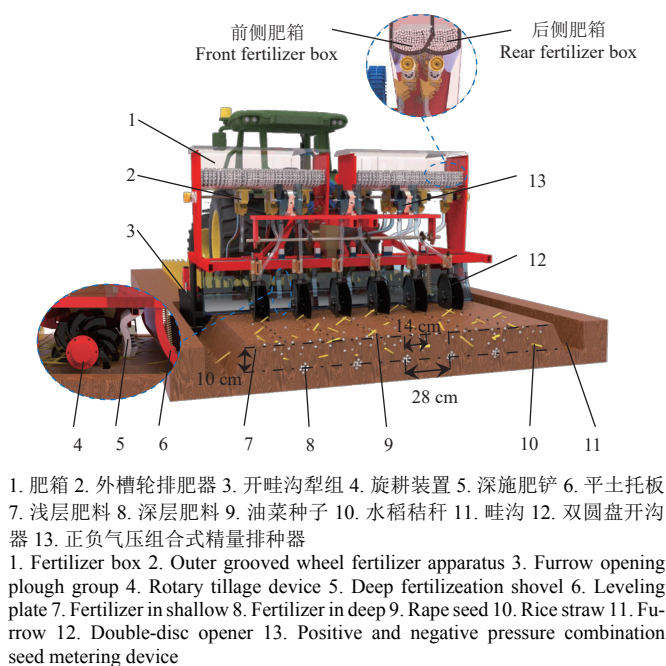


图 1 油菜播种机分层混施作业示意图
Fig.1 Schematic diagram of layered and mixed fertilizer application of rape seeder

1.2 试验地概况

试验于 2020—2021 和 2021—2022 年在湖北省荆州市沙市区农业科学院油菜机械化生产示范基地 (112°15'18"E, 30°18'36"N) 进行,该试验点属于亚热带季风气候;生育期内的两年平均气温分别为 9.07 和 11.17 °C,日平均降水量分别为 1.67 和 2.08 mm,总降雨量 479.7 和 528.8 mm;两年油菜生育期内逐日气温和降雨量动态变化如图 2 所示,气象资料来源于试验点气象站。两年试验地块均为全喂入联合收获机收获后稻茬田地,土壤质地均为沙壤土,肥力均匀,试验前测定地表秸秆留茬高度平均分别为 42.3 和 40.1 cm,秸秆残余量分别为 1.39 和 1.44 kg/m²,0~30 cm 耕层土壤坚实度分别为 1 868 和 2 035 kPa,土壤容重分别为 1.53 和 1.49 g/cm³,土壤含水率分别为 19.8% 和 22.3%,土壤中全氮、全磷、全钾含量分别为 1.185、0.844、4.456 g/kg 和 1.365、0.844、4.572 g/kg。

1.3 试验设计

参照宜施壮和分层深施肥的节肥增效科学施肥指导意见,本研究按照当地推荐施肥量 (600 kg/hm²),机械同步分层深施肥设置浅层与深层施肥比例分别为 1:3、1:1 和 3:1 的 3 个施肥水平,分别记为 FL、FM 和 FH;其中,浅层为机械混施,深层为 10 cm 定位侧深条施;以相同施肥量下的 10 cm 定位侧深施肥 (CK1) 和机械混施 (CK2) 作为对照,共计 5 个处理;试验时,机具前进速度 1.65 km/h,对应排肥轮转速为 18 r/min,FL、FM 和 FH 处理时前后侧排肥器排肥轮工作长度分别为 15 与 25 mm、20 与 20 mm 和 25 与 15 mm;而 CK1 处理时前侧肥箱各行排肥舌闭合,后侧肥箱排肥轮长度为

40 mm，CK2 处理时后侧肥箱各行排肥舌闭合，前侧肥箱排肥轮长度为 40 mm，对应各处理深浅层氮、磷和钾养分含量如表 1 所示。两年试验均在同一地块开展，分别于 2020 年 10 月 20 日和 2021 年的 10 月 14 日播种，2021 年 5 月 8 日和 2022 年 5 月 5 日收获，全生育期分别为 200 和 203 d；每个处理 3 个重复，采用完全随机设计。一厢作为一个重复，每厢采样有效面积（去除播种机启停阶段区域）为 60 m²（30 m×2 m），播种量为 4.5 kg/hm²。为保证各试验处理间一致性，所有试验小区在种植当天进行一次性机械联合作业完成播种施肥，肥料仅在播种时同步施用，整个生育期不再进行追肥，播种完成后当天和第 70 天人工喷施土壤封闭处理剂（精异丙甲草胺），后期大田油菜生长发育过程中不再进行其他人工干预和田间管理。

1.4 测定项目及分析方法

1.4.1 土壤坚实度

土壤坚实度受根系构型与耕作措施影响，为减轻耕作措施的影响，使根系构型有效反映对土壤坚实度的影响规律，各处理间整个生育期田间管理措施均保持一致，且在油菜播种后每隔 30 d 测定一次农田土壤坚实度，采样当天从各小区按“S”型取样法随机选取 3 点，利用托普云农 TJSD-750-IV 土壤坚实度测定仪测定 0~30 cm 耕层土壤坚实度，每隔 5 cm 记录一次数据。

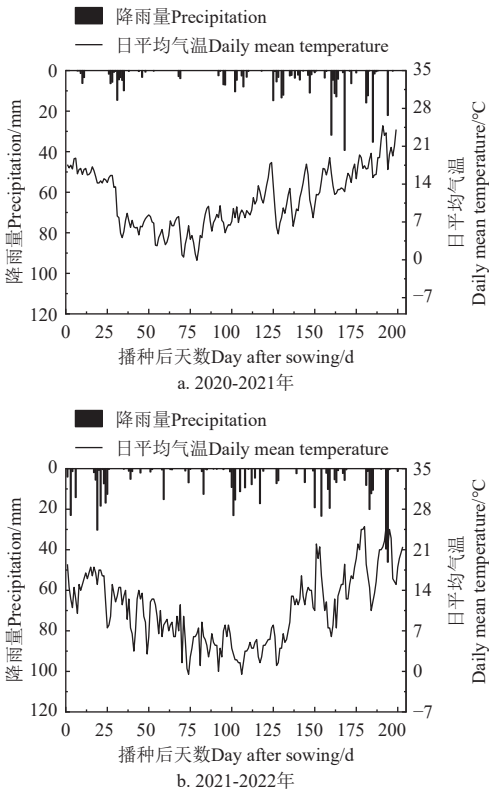


图 2 两年试验点冬油菜生育期逐日气温和降雨量变化
Fig.2 Daily air temperature and precipitation changes during winter rapeseed growth period at the experimental site of two years

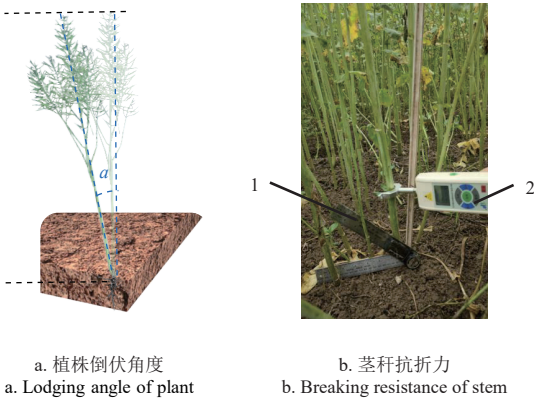
表 1 不同施肥处理下深浅层氮、磷和钾养分含量

Table 1 Nitrogen, phosphorus and potassium nutrient content under different fertilizer treatments (kg·hm ⁻²)								
处理 Treatment	施肥方式 Fertilizer method	N		P ₂ O ₅		K ₂ O		
		浅层 Shallow layer	深层 Deep layer	浅层 Shallow layer	深层 Deep layer	浅层 Shallow layer	深层 Deep layer	
CK1	10 cm 定位侧深施	0	150.0	0	42.0	0	48	
FL	浅层：深层=1:3	37.5	112.5	10.5	31.5	12	36	
FM	浅层：深层=1:1	75.0	75.0	21	21	24	24	
FH	浅层：深层=3:1	112.5	37.5	31.5	10.5	36	12	
CK2	机械混施	150.0	0	42.0	0	48	0	

1.4.2 倒伏相关性状

油菜成熟期，从各小区选择 10 株代表性植株，首先测定倒伏相关性状（茎粗、株高、倒伏角度和抗折力），用游标卡尺测定油菜植株基部的粗度，即根茎粗；利用卷尺测定株高，即茎秆基部至茎秆最高点的距离；倒伏角度以冠层最高点至子叶节连线与垂直方向夹角 α 表示（图 3a）；抗折力用 YYD-1 型茎秆强度测量仪（浙江托普仪器有限公司生产）测定将油菜植株推至与地面呈 45°角时茎秆基部 10 cm 处所受的力（图 3b），通过式（1）计算倒伏指数^[23]。然后将油菜植株分为地上部和地下部两部分，其中油菜地上部分为茎秆、叶片和果荚三部分，并数取记录每株分枝数（第一分枝和第二分枝）和角果数；地下部根系以植株为中心，将带有土体的根系整株挖起带回实验室用自来水冲洗使其完整露出后，检出植株活根样，最大程度保持根系完整，再用流水冲洗干净后切分为 0~5，>5~10，>10~15，>15~20，>20~25，>25~30 cm 6 个耕层根系样本，然后利用扫描仪（中晶 ScanMaker i800 PLUS）扫描成根系图像，并

用万深 LA-S 系列植物根系分析软件进行分析，获得各深度耕层根表面积、根体积数据指标。



1. 角度尺 2. YYD-1 型茎秆强度测量仪
1. Angle ruler 2. YYD-1 stem strength measuring instrument

图 3 油菜植株倒伏角度及抗折力测定
Fig.3 Determination of rape plant lodging angle and breaking resistance

随后，将地上部和地下部鲜样置 105 ℃ 杀青 30 min、80 ℃ 烘干至恒质量后，测定各部分干物质质量并计算根冠比（地下部分和地上部分干物质质量的比值）。

$$I = \frac{h \times m}{N_i}$$
(1)

式中 I 表示倒伏指数， $\text{cm} \cdot \text{g}/\text{N}$ ； h 表示油菜植株株高， cm ； m 表示油菜植株地上部鲜质量， g ； N_i 表示油菜植株茎秆抗折力， N 。

1.4.3 产 量

采用五点取样法测定油菜产量，每个点面积 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 。用网袋收集这 5 点的油菜冠层进行晒干、脱粒、称质量等工序，得到各小区籽粒产量；同时采用拓普云农数粒仪（SLY-C plus）数取 1 000 粒种子并用电子天平称量，每个处理重复 3 次取平均值作为该处理的千粒质量。

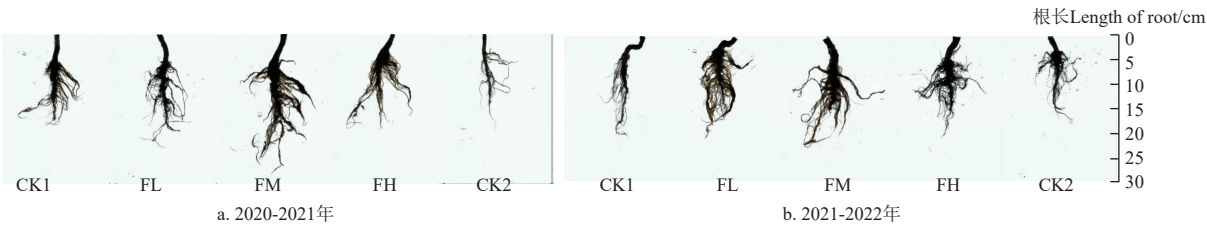


图 4 不同施肥处理对油菜根系形态影响
Fig.4 Effects of different fertilization treatments on root structure of rapeseed

两年重复试验表明，不同年份、不同施肥处理下油菜平均主根长、根表面积、根体积和根干质量由大到小依次为：FM、FH、FL、CK1、CK2。施肥处理对主根长、根表面积、根体积和根干质量影响显著，试验年份

1.5 数据分析

用 Microsoft Excel 2013 对试验数据进行基础处理，用 SPSS Statistics 22.0（SPSS Inc.Chicago,IL,USA）统计软件进行数据统计和方差分析，以 Duncan 新复极差法检验显著性，并用 OriginPro 2022 软件作图。

2 结果与分析

2.1 分层施肥对冬油菜根系形态及分布的影响

不同施肥处理下油菜根系形态特征如图 4 所示。深施肥处理（CK1、FL、FM 和 FH）相较于机械混施 CK2 能明显促进油菜主根下扎和根系生长发育，分层施肥处理的根系须根数量明显高于定位深施 CK1 处理，且随浅层施肥量的增加，油菜根系主根长度、根表面积、根体积、根干质量均呈先增后减的趋势。

对根表面积和根体积影响显著（ $P < 0.05$ ），且 2021—2022 年试验成熟期油菜主根长、根表面积、根体积和根干质量高于 2020—2021 年试验，平均分别增加 0.13%、20.86%、46.45% 和 6.69%（表 2）。

表 2 不同施肥处理冬油菜根系生长特性及方差分析

Table 2 Factors of root growth characteristics of winter rapeseed under different fertilization treatments					
年份 Year	施肥处理 Fertilizer treatments	主根长 Taproot length/cm	根表面积 Root surface area/cm ²	根体积 Root volume/cm ³	根干质量 Dry weight of root/g
2020-2021	CK1	20.97 c	267.24 d	30.10 c	7.25 c
	FL	23.49 b	324.32 c	33.59 bc	8.62 b
	FM	25.83 a	479.07 a	47.22 a	10.90 a
	FH	22.87 b	418.22 b	43.30 ab	9.28 b
	CK2	18.97 d	116.71 e	13.53 d	6.35 d
2021-2022	CK1	20.67 c	307.46 c	39.57 c	8.00 c
	FL	23.07 b	322.51 c	48.16 bc	8.53 c
	FM	25.52 a	623.31 a	73.60 a	11.78 ab
	FH	23.97 b	553.94 b	61.13 ab	9.80 b
	CK2	18.65 d	133.19 d	23.21 d	7.13 d
年份 Year (Y)		Ns	**	**	Ns
施肥处理 Fertilizer treatments (F)		**	**	**	**
年份×施肥处理 Y×F		Ns	**	Ns	Ns

注：不同小写字母代表处理间差异显著。Ns 代表不显著；*代表显著（ $P < 0.05$ ）；**代表极显著（ $P < 0.01$ ），下同。
Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments. Ns means not significant; * means significant ($P < 0.05$); ** means extremely significant ($P < 0.01$). The same as below.

对比发现，分层深施肥处理（FL、FM 和 FH）相较于 CK1 和 CK2 分别提高油菜主根长度 16.19% 和 28.61%（表 2）。此外，各处理根表面积、根体积和根干质量间具有显著差异（ $P < 0.05$ ），分层深施肥处理中油菜的根表面积、根体积和根干质量平均是 CK1 处理的 1.58、1.47 和 1.29 倍，是 CK2 处理的 3.63、2.79 和 1.46 倍（表 2）。不同分层施肥处理中，FM 处理的主根长、根表面积、根体积、根干质量均高于 FL 和 FH 处理；相较于 FL 处理分别提高 9.35%、70.43%、47.79% 和 32.24%，相较于 FH 处理分别提高 9.63%、13.39%、

15.69% 和 18.87%。说明分层深施肥可以有效改善油菜根系构型，提高油菜植株对土壤养分的吸收能力。

图 5 为 0~30 cm 耕层各层根系分布情况，由图可知两年大田试验不同施肥处理对油菜根系在耕层中的分布影响基本一致。现以 2021—2022 年度为例进行分析。由图 5b 可知，成熟期油菜根系主要分布在 0~10 cm 耕层，各施肥处理该耕层中根表面积、根体积和根干质量平均分别占总根的 65.38%、76.33% 和 79.19%。分层深施肥各处理间，0~5 cm 耕层中 FH 处理的根表面积显著（ $P < 0.05$ ）大于其他处理，分别高出 FL 和 FM 处理

157.27% 和 28.81%；根体积和根干质量均是 FM 处理显著大于其他处理，相比于 FL 和 FH 处理分别高出 57.51%、34.67% 和 7.38%、43.28%。

5~10 cm 耕层中根表面积、根体积和根干质量最大

均为 FH 处理，且与 FM 和 FL 处理之间存在显著差异 ($P < 0.05$)，与 FM 相比各指标分别增加 35.63%、15.53% 和 16.71%；与 FL 相比各指标分别增加了 135.78%、41.48% 和 66.67%。

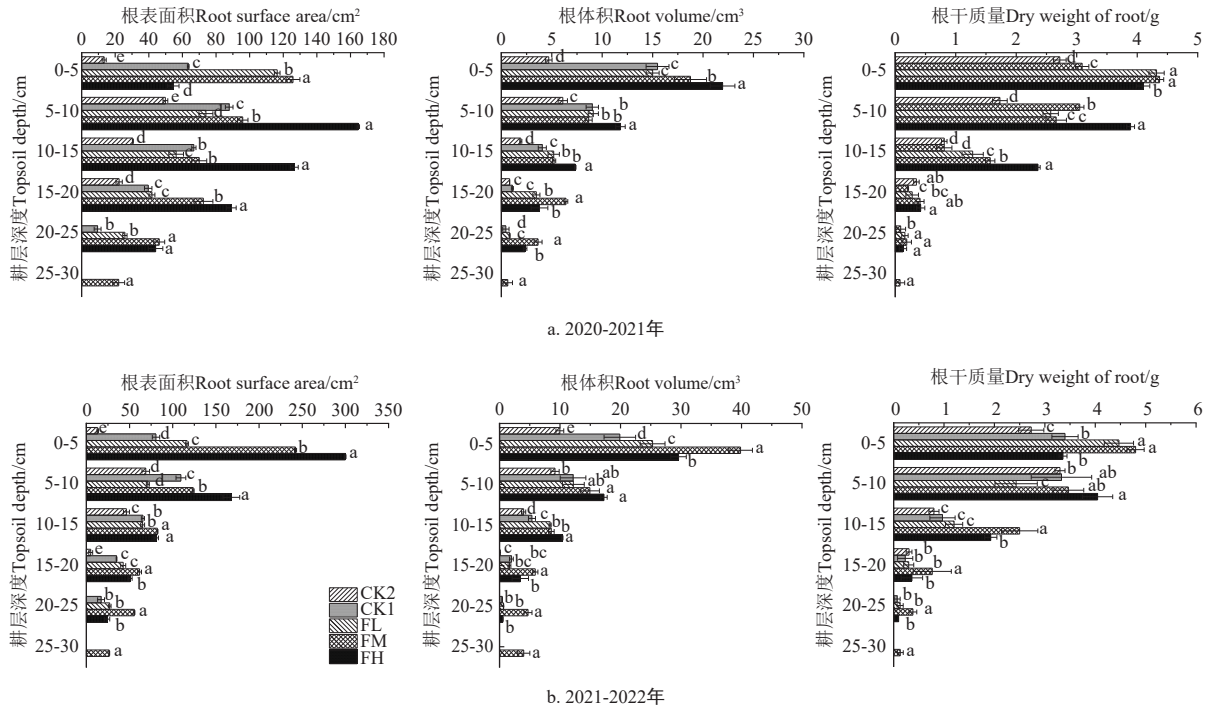


图 5 不同施肥处理下不同耕层深度油菜根系分布

Fig.5 Root distribution of rapeseed at different topsoil depths under different fertilization treatments

10~15 cm 耕层中，根表面积和根干质量均为 FM 处理最大，FM 和 FH 处理间根表面积无显著差异，但根干质量之间存在显著差异；FM 相比与 FL 和 FH 处理，根表面积和根干质量分别增加 26.27%、108.33% 和 1.74%、29.53%。根体积在 10~15 cm 耕层为 FH 处理最大，且显著大于其他处理，相较于 FL 和 FM 处理，分别增加 23.21% 和 20.33%。

15~20 cm 耕层中，根表面积、根体积和根干质量均为 FM 处理最大，且显著大于其他处理。FM 相较于 FL 和 FH 处理，根表面积分别增加 44.39% 和 21.56%，根体积增加 260.37% 和 72.30%，根干质量分别增加 153.33% 和 105.41%。大于 20 cm 耕层中根表面积、根体积和根干质量最大仍均为 FM 处理，且显著大于其他处理。由此可见，分层深施肥中合理的深浅层施肥比例能有效促进根系生长。

2.2 分层施肥对土壤坚实度的影响

播种后 30、60、90、120、150、180 d 时各施肥处理下土壤坚实度随耕层深度变化如图 6 所示。同一试验点、不同施肥处理下的田间土壤坚实度从苗期到成熟期有所增加，且随耕层深度的增加而增加。由于播种作业中对种床进行了旋耕作业，两年试验播种后 30 d 不同施肥处理下 0~30 cm 耕层土壤坚实度无显著差异 ($P < 0.05$)；60~90 d 的平均土壤坚实度最小为 FL 处理，最大为 CK-2 处理，其余各处理间差异不显著。120~150 d 分层深施肥各处理的土壤坚实度显著小于 CK1 和 CK2 处理，其

中 FM 处理的土壤坚实度小于 FL 和 FH 处理。至 150~180 d 根系构型基本定形，分层深施肥处理的平均土壤坚实度小于 CK1 和 CK2 处理，且 FM 处理的 0~30 cm 耕层平均土壤坚实度显著小于其他处理 ($P < 0.05$)。

对比两年试验 5 个不同施肥处理间 0~30 cm 耕层平均土壤坚实度由小到大依次为 FM、FL、FH、CK1、CK2。其中，分层施肥处理下试验田 0~30 cm 耕层平均土壤坚实度相较于 CK1 和 CK2 处理分别降低了 4.91% 和 15.25%。结合图 4 可知，各深度耕层的土壤坚实度与根系在各耕层的分布密度有关，各耕层的根表面积、根体积越大，该耕层的土壤坚实度越小。分层深施肥中 FL、FM 和 FH 处理的土壤坚实度相较于 CK1 处理分别降低 3.81%、9.85% 和 1.42%，相较于 CK2 处理分别降低 14.05%、20.68% 和 11.41%。

结合图 4 和图 5 油菜根系的生长形态和分布可知，0~5 cm 耕层中主要为主根根茎，侧根分布较少，因此该耕层的土壤坚实度标准差较小；侧根主要分布在 5~20 cm 耕层，因而该耕层中各施肥处理的土壤坚实度标准差较大。试验结果表明，分层深施肥处理在 5~10 cm 和 10~15 cm 耕层中土壤坚实度从小到大依次为 FM、FH、FL，且 FM 处理的各层土壤坚实度比 FL 和 FH 处理分别降低 12.59%、5.07% 和 16.12%、5.77%；15~30 cm 耕层中土壤坚实度从小到大依次为 FM、FL、FH，FM 处理的土壤坚实度相较于 FL 和 FH 处理分别降低 11.52% 和 19.18%。

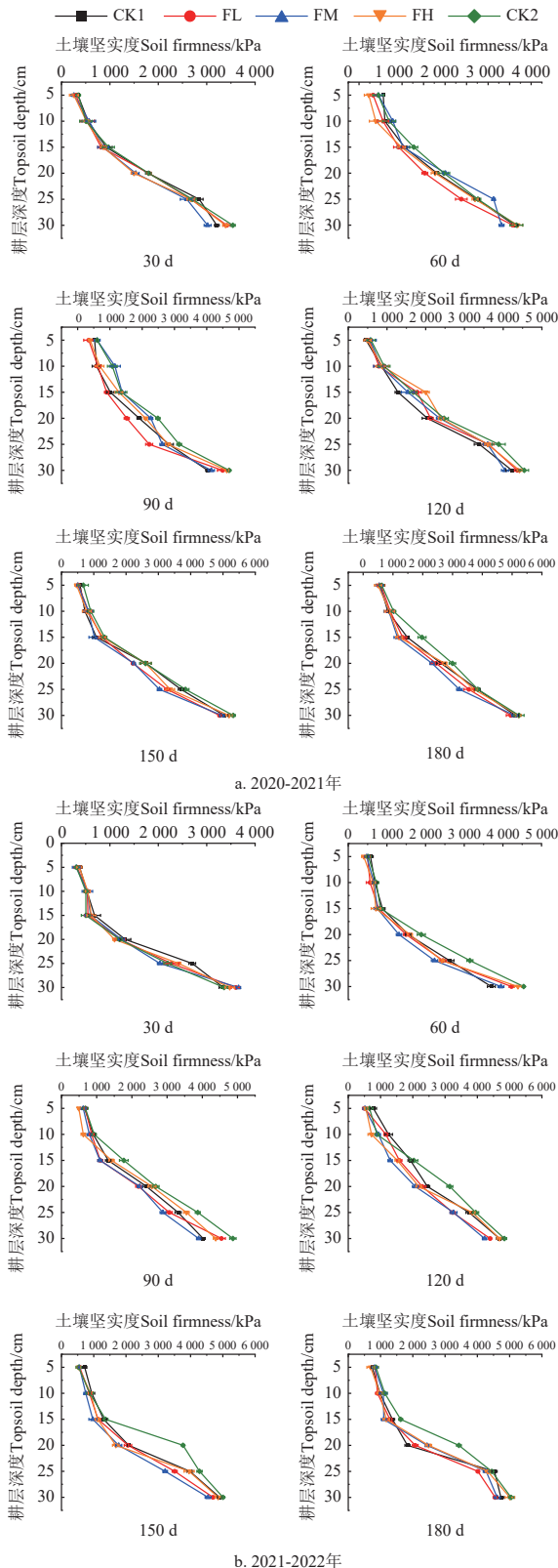


图6 不同施肥处理下0~30 cm 耕层播种后不同长时的土壤坚实度变化

Fig.6 Variation of soil firmness of 0~30 cm topsoil under different fertilization treatments after different seed days

2.3 分层施肥对冬油菜抗倒伏性的影响

图7给出了两年田间试验成熟期不同施肥处理的油菜地上部鲜质量和根冠比。结果表明,地上部鲜质量受施肥方式影响显著,其不同施肥处理间从大到小依次

为: FH、FM、FL、CK1、CK2; 分层深施肥处理 (FL、FM 和 FH) 显著提高了油菜地上部鲜质量, 与定位深施和机械混施相比, 增幅分别平均达到 33.89% 和 42.63%。分层深施肥处理中, FM 和 FH 处理间 2 a 平均地上部鲜质量无显著差异, 但均显著高于 FL 处理, 且分别是 FL 处理的 1.15 和 1.24 倍。而根冠比在不同施肥处理间从大到小依次为: FL、FM、CK1、CK2、FH, 分层深施肥处理 (FL、FM 和 FH) 相较于定位深施和机械混施根冠比分别提高 0.45% 和 6.31%; 其中, 分层施肥处理中随浅层施肥量的增加根冠比逐渐减小, FL 和 FM 之间无显著差异, 但均显著高于 FH 处理 ($P<0.05$)。

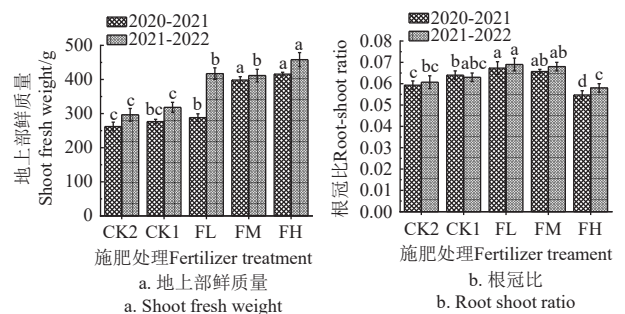


图7 不同施肥处理的冬油菜地上部鲜质量和根冠比
Fig.7 Shoot fresh weight of winter rape under different fertilization treatment

两年试验中油菜株高在处理间从大到小依次为: FM、FL、FH、CK1、CK2 (图8), 分层深施肥处理 (FL、FM 和 FH) 的油菜株高较定位深施肥和机械混施处理显著增加了 7.31% 和 16.22%, 且 FM 处理的油菜株高显著高于 FL 和 FH 处理, 但 FL 和 FH 处理间未表现出显著差异 ($P<0.05$, 表3)。

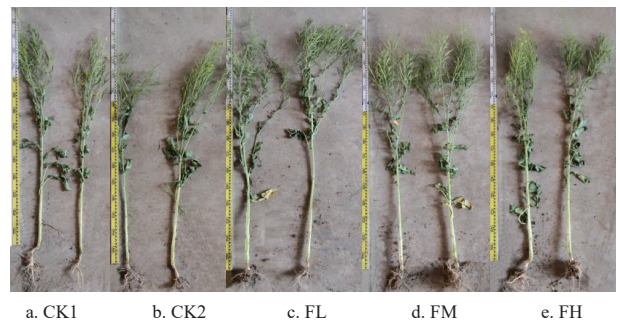


图8 不同施肥处理下油菜植株株高
Fig.8 Plant height of rapeseed under different fertilization treatments

油菜根茎粗、倒伏角度和抗折力受试验年份和施肥处理影响显著 ($P<0.05$, 表3)。两年田间试验, 分层深施肥处理显著增加了根茎粗、倒伏角度和抗折力, 相较于定位深施平均分别增加了 22.87%、44.80% 和 85.24%, 与机械混施处理相比平均分别增加了 36.10%、111.00% 和 249.14%。分层深施肥处理中随浅层施肥量的增加, 根茎粗、倒伏角度和抗折力均随之增加, FH 处理的根茎粗、倒伏角度和抗折力分别是 FL 处理的 1.20、1.57 和 1.81 倍, 分别是 FM 处理的 1.11、1.25 和 1.31 倍。

施肥处理均对油菜植株的抗倒伏性能产生显著影响

($P<0.05$, 表 3), 两年试验分层深施肥处理 (FL、FM 和 FH) 的倒伏指数相较于定位深施和机械混施处理平均降低了 18.81% 和 124.61%, 说明分层施肥可以增强油菜抗倒伏性。分层深施肥处理中随浅层施肥量的增加,

植株倒伏指数逐渐降低, 其中 FH 处理的倒伏指数相较于 FL 和 FM 处理分别降低 48.49% 和 26.90%; 而植株倒伏角度逐渐增大, FH 处理的植株田间倒伏情况比 FL 和 FM 处理严重, 不利于油菜后期生长和最终产量。

表 3 不同施肥处理下冬油菜倒伏性相关性状及方差分析

Table 3 Effects and variance analysis of different fertilizer treatments on lodging related indices of winter rapeseed						
年份 Year	施肥处理 Fertilizer treatments	株高 Plant height/cm	倒伏角度 Lodging angle/ (°)	根茎粗 Stem diameter/mm	抗折力 Breaking resistance/N	倒伏指数 Lodging index
2020-2021	CK1	166.48 c	9.07 d	14.78 d	11.53 d	4.39 bc
	FL	180.69 b	10.92 c	16.52 c	14.44 c	5.25 b
	FM	188.78 a	14.25 b	17.71 b	20.03 b	3.89 bc
	FH	179.87 b	18.82 a	19.37 a	26.62 a	3.11 c
	CK2	161.60 c	4.94 d	13.15 e	4.94 e	10.47 a
2021-2022	CK1	186.63 b	9.83 c	14.86 d	12.84 d	4.01 b
	FL	192.73 ab	10.55 bc	16.76 c	17.84 c	3.14 bc
	FM	201.67 a	12.68 ab	18.36 b	24.55 b	3.28 bc
	FH	193.00 ab	14.88 a	20.54 a	31.95 a	2.54 c
	CK2	164.43 c	8.03 c	13.61 e	7.99 e	5.41 a
年份 Year (Y)		Ns	*	*	**	**
施肥处理 Fertilizer treatments (F)		**	**	**	**	**
年份×施肥处理 Y×F		Ns	*	Ns	Ns	Ns

2.4 分层施肥对冬油菜产量及产量构成要素的影响

油菜产量和抗倒伏性均以干物质积累为基础, 干物质是光合作用的产物, 而油菜冠层是光物质的重要器官。不适宜的施肥方式虽增加了冠层重量和结构, 但也增加了倒伏的风险, 因而产量和抗倒伏是两个相互制约的因子, 为提高油菜机械生产效率, 需同时提高产量和抗倒伏性。由图 9 分析可知, 两年试验分层深施肥处理 (FL、FM 和 FH) 的油菜产量、单株分枝数、角果数和千粒质量均显著 ($P<0.05$) 大于定位深施 (CK1) 和机械混施处理 (CK2); 且随浅层施肥量的增加, 油菜产量、单株分枝数和角果数均呈先增后减的趋势, 而千粒质量则随之逐渐增大。

FL 和 FH 处理的产量和千粒质量之间存在显著差异, 而单株分枝数和角果数之间无显著差异 ($P<0.05$)。

分层深施肥处理两年的平均产量相较于定位深施和机械混施处理, 分别提高 17.14% 和 27.11%; 且 FM 处理与 FL、FH、CK1 和 CK2 处理相比分别提高了 9.85%、16.35%、26.88% 和 37.75%。分层深施肥处理 2a 的千粒质量相较于定位深施和机械混施处理, 分别提高 11.32% 和 13.65%, 且 FH 处理与 FL 和 FM 处理相比分别提高了 12.51% 和 8.01%。可见, 分层深施肥与定位深施和机械混施相比, 能显著提高冬油菜产量, 其中 FM 与 FH 处理相比, 虽然倒伏指数增加了 26.90%, 但倒伏角度降低了 25.14% 且产量提高了 16.35%。

综合考虑冬油菜根系分布状况、耕层土壤坚实度、植株抗倒伏性能及油菜籽产量, 确定 10 cm 深度分层施肥处理中 FM 处理 (1:1) 为冬油菜大田机械直播较优分层施肥比例。

3 讨 论

3.1 施肥处理对根系构型的调控效应

作物根系的生长发育不仅决定植株获得水分和养分的能力, 还影响冠层构建、产量构成因素的分配和最终产量的形成^[22-23, 29]。根系具有趋肥性, 肥料在土壤中的不同施用位置和施用量不但影响肥料养分在土壤中的运移和转化, 也影响养分在作物体内的运移和积累, 进而影响作物产量和肥料利用效率^[14, 19]。本研究发现, 肥料分层深施肥较定位深施和机械混施增加了油菜主根长、根表面、根体积及根干质量 (表 2), 其中分层深施肥处理下油菜的主根长、根表面积、根体积和根干质量平均是定位深施处理的 1.16、1.58、1.47 和 1.29 倍, 是机械混施处理的 1.28、3.63、2.79 和 1.46 倍, 这与已有研究结论一致^[30-31]。产生这种现象的主要原因一方面是分层施肥满足作物需肥规律, 减小了化肥的损失, 保证了油菜“前促后稳”的供肥需求, 特别是越冬期前壮苗和后期生长土壤养分供应, 为根系向深层扩展提供了良好

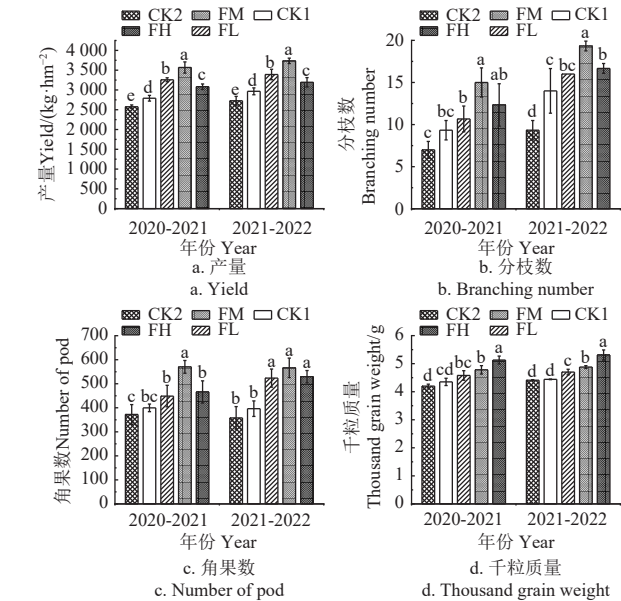


图 9 不同施肥方式下冬油菜产量及产量构成因素
Fig.9 Yield and yield components of winter rape under different fertilization treatments

两年试验中, 除 2021—2022 年的单株角果数外, FM 处理产量、单株分枝数和角果数显著大于 FL 和 FH 处理; 而千粒质量为 FH 处理显著大于 FL 和 FM 处理。

条件; 另一方面是根区不同耕层较高的养分含量利于根系的增殖, 增加了油菜须根数量, 提高根系表面积和体积, 利于油菜根系对土壤中养分的吸收, 进而提高肥料利用率。

分层深施肥可以改善根系构型, 为作物地上部器官的生长发育提供更多的水分和养分, 利于干物质质量积累和养分吸收利用。LIU 等^[12]研究表明, 相较于表层施肥, 分层施肥处理显著提高冬小麦产量 6.3%~20.6%, 磷肥使用效率提高 10.8%~14.7%, 且能有效减少表层土壤根系分布 14.7%~21.1%, 增加深层土壤根系 14.7%~21.1%; 李奔等^[13]研究表明, 在相同灌水和施肥量条件下, 分层施肥相较于常规施肥处理水分利用率高出 3.0%~11.2%, 最终提高产量 19.8%; 孔洁等^[24]研究表明, 分层施肥相较于地表撒施显著增加了花生总根长、根表面积和根体积, 且 20~40 cm 耕层根系生长的促进效果显著优于 0~20 cm 耕层。以上研究与本文研究结果相一致: 分层深施肥相较于定位深施和机械混施地上部鲜质量平均分别增加 33.89% 和 42.63% (图 7), 且在根须量最大的耕层中, 土壤坚实度最小。以 2021—2022 年度田间试验进行分析, 发现分层深施肥处理的根表面积、根体积和根干质量显著高于定位深施和机械混施处理, 其中 10~15 cm 耕层中, 各指标分别是定位深施处理的 1.16、1.77 和 1.93 倍, 是机械混施处理的 1.64、2.78 和 2.35 倍; 15 cm 以上耕层中, 各指标分别是定位深施处理的 1.85、2.91 和 2.42 倍, 是机械混施处理的 1.92、6.88 和 2.37 倍。通过测定 0~30 cm 耕层平均土壤坚实度, 分层深施肥相较于定位深施和机械混施处理分别降低了 4.91% 和 15.25%; 且在对应耕层具有较大的根表面积、根体积和根干质量时, 该耕层的土壤坚实度相应较小 (图 6)。说明根系对土壤坚实度的影响与土壤养分状况密切相关, 合理的施肥处理能有效改善根系构型, 并提高土壤理化性状, 为作物根系的生长提供良好的种床条件。

3.2 施肥处理对油菜抗倒伏性的调控效应

倒伏不仅引起群体成熟后无法机械收获, 增加生产成本, 而且致使群体内部阴闭、通风透光条件变差, 使得有效光合面积减少、籽粒灌浆受阻, 造成作物减产^[32]。在农业耕作措施的影响与地上部生长发育的变化中, 根系系统起到了桥梁纽带作用^[33]。根系锚固对茎秆特性的影响是造成倒伏的主要原因, 因为根系-土壤的松动会导致植株整株倾斜, 所以茎秆抗折力和倒伏角度通常被作为抗倒伏的指标^[34]。此外, 根系锚固力与根茎粗、主根长和根体积等指标间存在线性关系, 根系锚固力随根茎粗、主根长度和根体积的增加而增加^[35]; 因而发达的根系不仅有助于油菜吸收水分和养分, 且能提高油菜抗倒伏能力, 降低油菜因倒伏而造成的减产^[22]。不同施肥处理下, 油菜主根越长、根干质量越重、根茎越粗 (表 2, 表 3), 根系的锚固力越强, 使得对作物地上部的支持力越大, 根系抗倒伏能力增强、倒伏指数降低。此外, 作物茎秆抗倒性与茎秆形态指标、茎秆力学特性、栽培措施等诸多因素有关, 其中施肥方式是影响直播油菜茎

秆抗倒性的关键要素^[36]。不同营养元素在土壤中的移动和转化不同, 氮素的移动性较强且浅施易挥发, 磷在土壤中的移动性较小且易被固定^[20]。分层施肥能够减少因养分的淋失、挥发和固定等造成的损失, 改变传统施肥方式造成的土壤“肥瘦不均”的现象, 为根系的生长和地上部养分的积累提供良好条件^[37]。

本研究发现, 分层深施肥条件下油菜株高、根茎粗、茎秆抗折力、地上部鲜质量等 (表 3、图 7) 均有所提高, 且倒伏指数低, 表明分层深施肥可以提高油菜抗倒伏性。产生这种现象的原因是分层深施肥处理下油菜根茎粗和茎秆抗折力显著增加, 而倒伏指数与根茎粗、抗折力呈显著负相关, 根茎越粗、抗折力越大, 弯曲力矩越小, 倒伏指数就越低 (表 3)。两年田间试验, 分层深施肥处理下的根茎粗、抗折力, 相较于定位深施和机械混施处理平均分别增加了 22.87%、85.24% 和 36.10%、249.14%。但 3 个不同分层深施肥处理中, 虽然 FH 处理的油菜株高略低、根茎略粗、抗折力略大, 使其倒伏指数低于 FL 和 FM 处理, 但其产量分别比 FL 和 FM 处理低 9.85% 和 16.35%。原因在于, 分层深施肥中浅层施肥过多会抑制根系的生长发育, 不利于根系下延, 当受环境气候 (强降雨、大风等) 影响, 油菜植株根系锚固力不足以支撑地上部重量, 造成群体倒伏严重、油菜茎秆倒伏角度过大 (表 3), 致使植株群体间通风和透光性变差, 严重时菌核病发病率升高, 最终导致油菜产量降低。

此外, 试验数据显示试验年份对油菜根系和抗倒伏性相关指标具有一定影响 (表 2、表 3), 分析其主要原因在于根系 (根表面积、根体积、根干质量等) 和茎秆抗倒伏性 (倒伏角度、根茎粗、抗折力) 相关指标除受可控的栽培措施影响外, 还受环境气候条件 (日照、气温、降雨、风速等) 等诸多不可控因素影响^[18,23,31], 因此根系和抗倒伏性测试数据的年份表现不同, 但两年大田试验中各处理下的油菜根系构型和茎秆倒伏性相关指标的变化规律基本一致, 说明机械直播条件下合理的深浅层施肥比例能够有效改善油菜根系生长并提高抗倒伏性。由此可见, 表层施肥与深层施肥相结合、浅层和深层施肥比例适宜, 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, 才是最理想的高效丰产策略。此外, 本文仅分析了 10 cm 施肥深度条件下油菜成熟期根系分布性状和倒伏指数, 机械直播不同分层深施肥条件下冬油菜根系生长性状和群体倒伏动态变化, 有待进一步研究探讨。

4 结 论

1) 较定位深施和机械混施, 肥料分层深施显著促进油菜根系生长发育及扎根深度下移, 使得耕层土壤坚实度分别降低 4.91% 和 15.25%; 并且提高油菜根干质量、地上部干物质积累及茎秆抗折力, 使根冠比分别增加 0.45% 和 6.31%, 倒伏指数分别降低 18.81% 和 124.61%,

最终分别提高油菜产量 17.14% 和 27.11%; 分层深施肥技术增强了油菜抗倒性并具有显著的增产效应。

2) 分层施肥处理中, FM 处理的主根长、根表面积、根体积、根干质量和产量均高于 FL 和 FH 处理; 相较于 FL 处理分别提高 9.35%、70.43%、47.79%、32.24% 和 9.85%, 相较于 FH 处理分别提高 9.63%、13.39%、15.69%、18.87% 和 16.35%。综合考虑冬油菜根系分布状况、耕层土壤坚实度、植株抗倒伏性能及油菜籽产量, 10 cm 深度分层施肥处理中 FM 处理 (1:1) 为冬油菜大田机械直播较优分层施肥比例。

本文试验条件下, 机械直播分层深施肥在显著增加油菜产量同时能有效改善根系构型并适当提高油菜的抗倒伏性能, 是实现油菜高产高效的轻简化机械种植方式; 但不同施肥深度条件下分层施肥比例对机械直播冬油菜根系分布状况、抗倒伏的生理机制及冠层结构和产量差异有待进一步探究。

【参 考 文 献】

- [1] 鲁剑巍, 任涛, 丛日环, 等. 我国油菜施肥状况及施肥技术研究展望[J]. 中国油料作物学报, 2018, 40(5): 712-720.
LU Jianwei, REN Tao, CONG Rihuan, et al. Prospects of research on fertilization status and technology of rapeseed in China[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2018, 40(5): 712-720. (in Chinese with English abstract)
- [2] 刘成, 冯中朝, 肖唐华, 等. 我国油菜产业发展现状、潜力及对策[J]. 中国油料作物学报, 2019, 41(4): 485-489.
LIU Cheng, FENG Zhongchao, XIAO Tanghua, et al. Development, potential and adaptation of Chinese rapeseed industry[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2019, 41(4): 485-489. (in Chinese with English abstract)
- [3] 中华人民共和国国家统计局. 油菜播种 [EB/OL]. 2023-01-07. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/>.
- [4] 张青松, 廖庆喜, 肖文立, 等. 油菜种植耕整地技术装备研究与发展[J]. 中国油料作物学报, 2018, 40(5): 702-711.
ZHANG Qingsong, LIAO Qingxi, XIAO Wenli, et al. Research process of tillage technology and equipment for rapeseed growing[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2018, 40(5): 702-711. (in Chinese with English abstract)
- [5] ADNAN N S, MOHSIN T, ATIQUEUR R, et al. Lodging stress in cereal-effects and management: An overview[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017(24): 5222-5237.
- [6] 李宝军, 任奕林, 李猛, 等. 基于茎秆生物力学特性的油菜抗倒调控机制研究[J]. 中国农业科技导报, 2020, 22(12): 68-76.
LI Baojun, REN Yilin, LI Meng et al. Regulation mechanisms of lodging resistance in rapeseed based on stems biomechanical properties[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2020, 22(12): 68-76. (in Chinese with English abstract)
- [7] WU W, MA B L, FAN J J, et al. Management of nitrogen fertilization to balance reducing lodging risk and increasing yield and protein content in spring wheat[J]. Field Crops Research, 2019, 241: 107584.
- [8] 袁圆, 汪波, 周广生, 等. 播期和种植密度对油菜产量和茎秆抗倒性的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54(8): 1613-1626.
YUAN Yuan, WANG Bo, ZHOU Guangsheng, et al. Effects of different sowing dates and planting densities on the yield and stem lodging resistance of rapeseed[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(8): 1613-1626. (in Chinese with English abstract)
- [9] WU W, SHAH F, DUNCAN R W, et al. Grain yield, root growth habit and lodging of eight oilseed rape genotypes in response to a short period of heat stress during flowering[J]. Agricultural and Forest Meteorology. 2020, 287(15): 107954.
- [10] WU W, SHAH F, MA B L. Understanding of crop lodging and agronomic strategies to improve the resilience of rapeseed production to climate change[J]. Crop and Environment, 2022, 1(2): 133-144.
- [11] 冯雷, 徐万里, 唐光木, 等. 生物炭配施氮素对陆地棉盛花期根系形态与构型的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(3): 241-249.
FENG Lei, XU Wanli, TANG Guangmu, et al. Effects of biochar combined with nitrogen on root morphology and system architecture during *Gossypium hirsutum* L. Full-bloom stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 241-249. (in Chinese with English abstract)
- [12] LIU C H, YAN H H, WANG W Y, et al. Layered application of phosphate fertilizer increased winter wheat yield by promoting root proliferation and phosphorus accumulation[J]. Soil and Tillage Research, 2023, 225: 105546.
- [13] 李奔, 王贵彦, 陈召月, 等. 不同灌水条件下分层施肥对冬小麦产量和水分利用效率的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(3): 326-332.
LI Ben, WANG Guiyan, CHEN Zhaoyue, et al. Effects of layered fertilization on yield and water use Efficiency of winter wheat under different irrigation conditions[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(3): 326-332. (in Chinese with English abstract)
- [14] 张万锋, 杨树青, 娄帅, 等. 耕作方式与秸秆覆盖对夏玉米根系分布及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(7): 117-124.
ZHANG Wanfeng, YANG Shuqing, LOU Shuai, et al. Effects of tillage methods and straw mulching on the root distribution and yield of summer maize[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2020, 36(7): 117-124. (in Chinese with English abstract)
- [15] BADR M A, ABOU-HUSSEIN S D, EI-TOHAMY W A. Tomato yield, nitrogen uptake and water use efficiency as affected by planting geometry and level of nitrogen in an arid region[J]. Agricultural Water Management, 2016, 169: 90-97.
- [16] 冯军, 石超, LINNA Cholidah, 等. 不同覆盖类型下减量施肥对油菜产量及水肥利用效率影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(15): 85-93.

- FENG Jun, SHI Chao, LINNA Cholidah, et al. Effects of reducing fertilizer application rate under different mulching types on yield and water-fertilizer utilization efficiency of rapeseed[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(15): 85-93. (in Chinese with English abstract)
- [17] 谷晓博, 李援农, 杜娅丹, 等. 施肥深度对冬油菜产量、根系分布和养分吸收的影响[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(6): 120-128,206.
- GU Xiaobo, LI Yuannong, DU Yadan, et al. Effects of fertilization depth on yield, root distribution and nutrient uptake of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.)[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(6): 120-128,206. (in Chinese with English abstract)
- [18] 陈慧, 高丽萍, 陈勇, 等. 机械直播同步深施肥对冬油菜茎秆抗倒性和产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(5): 20-27.
- CHEN Hui, GAO Liping, CHEN Yong, et al. Effects of mechanical direct seeding synchronous deep fertilization on winter rapeseed stem lodging resistance and yield[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(5): 20-27. (in Chinese with English abstract)
- [19] REN T, LIU B, LU J W, et al. Optimal plant density and N fertilization to achieve higher seed yield and lower N surplus for winter oilseed rape(*Brassica napus* L.)[J]. *Field Crops Research*, 2017, 204: 199-207.
- [20] VILLOWOCK D, KURZ S, HARTUNG J, et al. Effects of stand density and N fertilization on the performance of Maize (*Zea mays* L.) intercropped with climbing beans (*Phaseolus vulgaris* L.)[J]. *Agriculture*, 2022, 12(7): 967.
- [21] 马昕, 杨艳明, 刘智蕾, 等. 机械侧深施控释掺混肥提高寒地水稻的产量和效益[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(4): 1095-1103.
- MA Xin, YANG Yanming, LIU Zhilei, et al. Yield increasing effect of mechanical topdressing of polymer-coated urea mixed with compound fertilizer in cold area rice[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(4): 1095-1103. (in Chinese with English abstract)
- [22] 钟雪梅, 黄铁平, 彭建伟, 等. 机插同步一次性精量施肥对双季稻养分累积及利用率的影响[J]. *中国水稻科学*, 2019, 33(5): 436-446.
- ZHONG Xuemei, HUANG Tieping, PENG Jianwei, et al. Effects of machine-transplanting synchronized with one-time precision fertilization on nutrient uptake and use efficiency of double cropping rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2019, 33(5): 436-446. (in Chinese with English abstract)
- [23] 吕伟生, 肖小军, 肖国滨, 等. 缓释肥侧位深施及用量对油菜产量和肥料利用率的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(19): 19-29.
- LYU Weisheng, XIAO Xiaojun, XIAO Guobin, et al. Effects of lateral deep application and dosage of slow-release fertilizer on yield and fertilizer utilization efficiency of rape(*Brassica napus* L.)[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(19): 19-29. (in Chinese with English abstract)
- [24] 孔洁, 庞茹月, 王铭伦, 等. 分层减量施肥对花生根系生长的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2022(5): 77-83.
- KONG Jie, PANG Ruyue, WANG Minglun, et al. Effects of layered and reduced fertilization on root growth of peanut[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022(5): 77-83. (in Chinese with English abstract)
- [25] 廖宜涛, 高丽萍, 廖庆喜, 等. 油菜精量联合直播机深施肥装置设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(2): 65-75.
- LIAO Yitao, GAO Liping, LIAO Qingxi, et al. Design and test of side deep fertilizing device of combined precision rapeseed seeder[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(2): 65-75. (in Chinese with English abstract)
- [26] 高丽萍, 施彬彬, 廖庆喜, 等. 正负气压组合油菜精量排种器锥孔盘排种性能[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(6): 22-33.
- GAO Liping, SHI Binbin, LIAO Qingxi, et al. Seeding performance of conical-hole seeding plate of the positive and negative pressure combination precision seed metering device for rapeseed[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(6): 22-33. (in Chinese with English abstract)
- [27] 中华人民共和国工业和信息化部. 播种机 外槽轮排种器: JB/T9873-2013[S]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [28] CHEN H, GAO L P, LI M C, et al. Fertilization depth effect on mechanized direct-seeded winter rapeseed yield and fertilizer use efficiency[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2023, 30:2574-2584.
- [29] HOU P F, YUAN W S, LI G H, et al. Deep fertilization with controlled-release fertilizer for higher cereal yield and N utilization in paddies: The optimal fertilization depth[J]. *Agronomy Journal*, 2021, 6(113): 5027-5039.
- [30] 徐萍, 杨宪杰, 邓学斌, 等. 通耕分层施肥对夏玉米产量形成的调控效应[J]. *中国生态农业学报*, 2022, 30(3): 389-398.
- XU Ping, YANG Xianjie, DENG Xuebin, et al. Regulating effect of deep tillage and delamination fertilization on the yield formation of summer maize[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(3): 389-398. (in Chinese with English abstract)
- [31] 白非, 白桂萍, 王春云, 等. 翻耕深度对遮阴油菜根系生长和养分吸收利用的影响[J]. *中国农业科学*, 2022, 55(14): 2726-2739.
- BAI Fei, BAI Guiping, WANG Chunyun, et al. Effects of tillage depth and shading on root growth and nutrient utilization of rapeseed[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(14): 2726-2739. (in Chinese with English abstract)
- [32] LIU P, YAN H H, XU S N, et al. Moderately deep banding of phosphorus enhanced winter wheat yield by improving phosphorus availability, root spatial distribution, and growth[J].

- Soil and Tillage Research*, 2022, 220: 105388.
- [33] KENDALL S L, HOLMES H, WHITE C A, et al. Quantifying lodging-induced yield losses in oilseed rape[J]. *Field Crops Research*, 2017, 211: 106-113.
- [34] MARTINEZ-VAZQUEZ, P. Crop lodging induced by wind and rain[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 22: 265-275.
- [35] JI X D, CONG X, DAI X Q, et al. Studying the mechanical properties of the soil-root interface using the pullout test method[J]. *Journal of Mountain Science*, 2018, 15: 882-893.
- [36] LI J Y, LIU Y, TANG Y F, et al. Optimizing fertilizer management based on controlled-release fertilizer to improve yield, quality, and reduce fertilizer application on apples[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2022, 22: 393-405.
- [37] 沈玉芳, 李世清. 施肥深度对不同水分条件下冬小麦根系特征及提水作用的影响[J]. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 2019, 47(4): 65-73.
- SHENG Yufang, LI Shiqing. Effect of fertilization depth on root characteristics and hydraulic lift of winter wheat under different water treatments[J]. *Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition)*, 2019, 47(4): 65-73. (in Chinese with English abstract)

Effects of synchronous layered fertilization with machinery on the root architecture and lodging resistance of rape

GAO Liping¹, CHEN Hui³, LIU Jiacheng¹, QIN Yonghao¹, LIAO Qingxi^{1,2}, LIAO Yitao^{1,2*}, WANG Tianyao⁴

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China; 3. School of Energy and Power Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China; 4. Jingzhou Academy of Agricultural Sciences, Jingzhou 434000, China)

Abstract: An appropriate fertilizer application can be one of the most important indicators for resistance to the downfall and high yield of direct sowing rape. Among them, the fertilizer placement and application rates can dominate the root and plant growth, development, and lodging resistance of winter rapeseed. This study aims to investigate the effects of the different ratios of layered fertilization in the deep and shallow layers under the precision combined seeder on agronomic characteristics, such as the root growth, plant resistance to lodging, and yield of rapeseed. The agricultural machinery and agronomic techniques were integrated to further improve the mechanical application fertilization of winter rapeseed. "Huayouza 62" rapeseed variety was selected as the test crop at the fertilization rate of 600 kg/hm². The control group was taken as the side deep fertilization of CK1 on the 10 cm positioning under the seed, and the shallow layer mixing fertilization of CK2. Three treatments of deep fertilization were set as the shallow and deep layer fertilization ratios of 1:3 (FL), 1:1 (FM), and 3:1 (FH) experimental groups. A total of five fertilization treatments and field trials were conducted in 2020 and 2021. The experiment site was located in the winter rapeseed area in Jingzhou, Hubei Province in the middle reaches of the Yangtze River basin. A measurement was performed on the root growth characteristics, soil firmness, shoot fresh weight, stem bending resistance and yield of rapeseed during the harvest period. A systematic analysis was then made on the five treatments, in terms of the root distribution, soil penetration resistance of topsoil, lodging index, and yield of rapeseed. The results showed that the layered deep fertilization significantly promoted the root downward migration and the root architecture of rapeseed. The average values of root surface area, root volume, root dry weight, and taproot length were 1.58, 1.47, 1.29, and 1.16 times higher than those in the CK1 treatment, while 3.63, 2.79, 1.46, and 1.28 times higher than those in the CK2 treatment, respectively. Meanwhile, the average soil penetration resistance decreased by 4.91% and 15.25%, respectively, compared with the CK1 and CK2 treatments. The overall performance was ranked in the descending order of the FM > FH > FL, in terms of the taproot length, root surface area, root volume, and root dry weight in the different layered fertilization treatments. The rape plant of root stem diameter, lodging angle, and fracture resistance of the FH treatment were 1.11, 1.25, and 1.31 times higher than those of the FM treatment. The lodging index decreased by 26.90% on average, but the field lodging angle increased by 25.14%, compared with the FM treatment. The yield, number of branches per plant, number of corner fruit, and thousand-grain weight of layered deep fertilization treatment were significantly higher than those of positioned deep fertilization and mechanical mixing fertilization treatment. the average rapeseed yield of FM treatment increased by 9.85%, 16.35%, 26.88%, and 37.75%, respectively, compared with the FL, FH, CK1, and CK2. The root distribution, soil penetration resistance, lodging index, and grain yield of winter rapeseed were considered under different fertilization treatments. The FM treatment was achieved in the better optimal fertilization for the high yield and lodging resistance of field mechanized direct sowing winter rapeseed.

Keywords: rapeseed; mechanical direct sowing; layered fertilizer; root system; soil penetration resistance; lodging index