

冉文昊,徐芳森,史仕军,等.我国酸性土壤区油菜耐酸高产技术与综合利用模式[J].华中农业大学学报,2025,44(4):1-10.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.04.001

主持人语:耕地是粮食生产的命根子。中低产耕地在我国耕地面积中约占2/3,其改良培肥是确保国家粮食安全、生态安全和农业可持续发展的重要保障。目前,我国中低产耕地存在障碍因素多元、基础设施薄弱、种植管理方式粗放低效等突出问题。这些低产耕地制约了粮食产量的提升,也对国家粮食安全保障形成挑战。为积极探索新材料、新方法和新技术在中低产耕地培肥改良方面的应用推广,聚焦土壤改良工艺、设备及系统智能化、精准土壤培肥技术与装备、培肥效果信息表征等重点领域,积极推动中低产耕地提质增效,助力产业绿色高质量发展,《华中农业大学学报》推出低产耕地改良培肥专题,旨在汇聚前沿研究成果,为低产耕地改良培肥提供理论与技术支撑。专题征集以来,得到诸多同行的关注和支持。经同行评议和主编审核,共采纳8篇综述和研究论文,内容涵盖土壤改良、培肥技术、障碍因素治理等多个方面。在土壤改良上,剖析了酸性低产耕地土壤的化学与作物改良方法,如生物炭、蚯蚓粪肥等的降酸改土,以及油菜耐酸机制研究;培肥机理方面,介绍了腐殖质氧化还原能力的评价方法,为土壤有机质管理提供了科学依据;针对不同类型低产耕地障碍因素,如团聚体稳定性、碱化盐土等,提出了针对性治理措施。这些研究成果是众多科研人员智慧与汗水的结晶,部分成果已在多地开展田间试验与示范推广,显著提升了我国低产耕地质量与作物产量,产生了可观的经济效益。期望专题能为农业科研工作者、农技推广人员、农业生产者提供新思路、新方法,促进低产耕地改良培肥技术创新与应用。希望借此专题,凝聚各方力量,共同推进低产耕地改良培肥工作,让更多低产耕地变为高产沃土,为我国农业高质量发展和粮食安全保障作出更大贡献。

我国酸性土壤区油菜耐酸高产技术与综合利用模式

冉文昊¹,徐芳森¹,史仕军¹,孙明珠²,戴志刚³,张洁⁴,丁广大¹

1.华中农业大学资源与环境学院/微量元素研究中心/农业农村部长江中下游耕地保育重点实验室,
武汉 430070; 2.江西省农业技术推广中心,南昌 330046; 3.湖北省耕地质量与肥料工作总站,武汉 430070;
4.湖北省咸宁市咸安区土壤肥料工作站,咸宁 430070

摘要 酸性土壤产能低是制约我国粮食安全和农业可持续发展的主要问题之一。在我国土壤酸化问题日趋严峻的背景下,亟需提高油菜对酸性土壤的适应性,实现油菜耐酸高产。为提高油菜产能,实现油菜产业绿色发展,本文提出了5项酸性土壤区提高油菜产能的技术措施,包括筛选耐酸油菜品种、研制耐酸促生种子丸粒化配方、研发耐酸高产配方肥、配施有机肥、使用酸性土壤调理剂等。在此基础上,针对弱酸性土壤、中等酸性土壤和强酸性土壤,提出了区域性油菜耐酸高产技术与综合利用模式,以达到缓解土壤酸化、增加油菜籽粒产量、实现增产增效的目的。阐述了油菜高产抗逆的栽培管理措施,并针对我国农田酸化的趋势,提出了未来酸性土壤区油菜产业高质量发展的实现路径,旨在为保障我国食用油安全提供重要支撑。

关键词 油菜;酸性土壤;耐酸高产;种子丸粒化;配方肥;土壤调理剂;综合利用

中图分类号 S565.4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2025)04-0001-10

收稿日期:2024-11-08

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFD1900705)

冉文昊,E-mail:Ranwenhao@webmail.hzau.edu.cn

通信作者:丁广大,E-mail:dgd@mail.hzau.edu.cn

油菜是全世界重要的油料作物,我国国产植物油第一大油源,第二大饲用蛋白源^[1]。近年来,我国油菜的播种面积超过667万hm²,总产量超过1500万t,均居世界前列^[2]。然而,我国当前食用油自给率仅为30%左右,所依赖进口的来源地、品种、供应渠道高度集中,已成为农业生产领域的最大短板之一,严重威胁我国食用油供给安全^[3]。2021年“中央一号”文件强调“提升粮食和重要农产品供给保障能力”“十四五”要“多措并举发展油菜、花生等油料作物”。2022年“中央一号”文件明确提出“在长江流域开发冬闲田扩种油菜”,2023年“中央一号”文件再一次强调推行稻油轮作,大力开发利用冬闲田种植油菜。因此,大力发展油菜产业是国家的重大需求。

我国油菜分冬油菜和春油菜两大产区,其中冬油菜产区主要分布在长江流域、黄淮流域等区域,种植面积占全国油菜总面积的90%以上^[4]。然而,我国冬油菜主产区与全国酸性土壤的分布区域高度重合。土壤酸化对农作物生长的主要障碍是酸、毒、瘠,即高浓度H⁺的酸害,高活性的铝、锰、铁等金属离子毒害,氮、磷、钾、镁、硼等必需养分匮乏^[5]。研究表明,土壤酸化会严重抑制油菜的生长和产量的形成^[6]。本文对我国酸性土壤区油菜的生产现状进行分析,梳理酸性土壤区油菜生产存在的主要问题,提出酸性土壤区油菜耐酸高产的技术措施,构建酸性土壤区油菜耐酸高产技术的综合利用模式,探讨该技术模式的应用前景及实施路径,以期为我国酸性土壤区油菜产业高质量发展提供理论和技术支撑。

1 我国酸性土壤区油菜的生产现状

1.1 我国土壤酸化现状

土壤酸化是全球范围内普遍存在的农业问题之一,世界约50%耕地和潜在可耕地属于酸性土壤^[7]。酸性土壤在我国南方湿润地区分布较为广泛,遍及15个省(区),总面积达2.18亿hm²,约占全国陆地面积的22.7%^[8]。酸性土壤面积前10位的省级行政区依次为湖南、江西、黑龙江、安徽、广东、四川、湖北、重庆、福建、山东^[9]。近年来,我国部分地区土壤酸化现象尤为突出。调查发现,近30 a我国有约22%的农田严重酸化,pH平均下降了0.85个单位^[10],其中湖南、江西和广西等地农田酸化面积增加30%以上,呈现“酸上加酸”的发展趋势^[11-12]。酸性土壤产能低是制约我国粮食安全和农业可持续发展的主要问题

之一^[13]。土壤酸化的主要危害包括抑制植物生长、影响作物品质、破坏生态环境等多个方面,严重威胁我国农业可持续发展^[8]。酸性土壤的形成主要有自然因素和人为因素两大方面,在土壤正常形成和发育过程中,土壤酸化是一个非常缓慢的过程,在自然条件下需数百年土壤pH才会出现显著下降,而人为因素是加快土壤酸化的主要原因^[14]。对于农田土壤来说,诸多因素会加速土壤酸化进程,例如酸沉降^[15]、氮肥施用^[16]、深耕扰动土壤等。在这些因素中,氮肥的施用被认为是农田土壤酸化的重要诱因^[8, 17-18]。

1.2 土壤酸化对油菜生长的影响

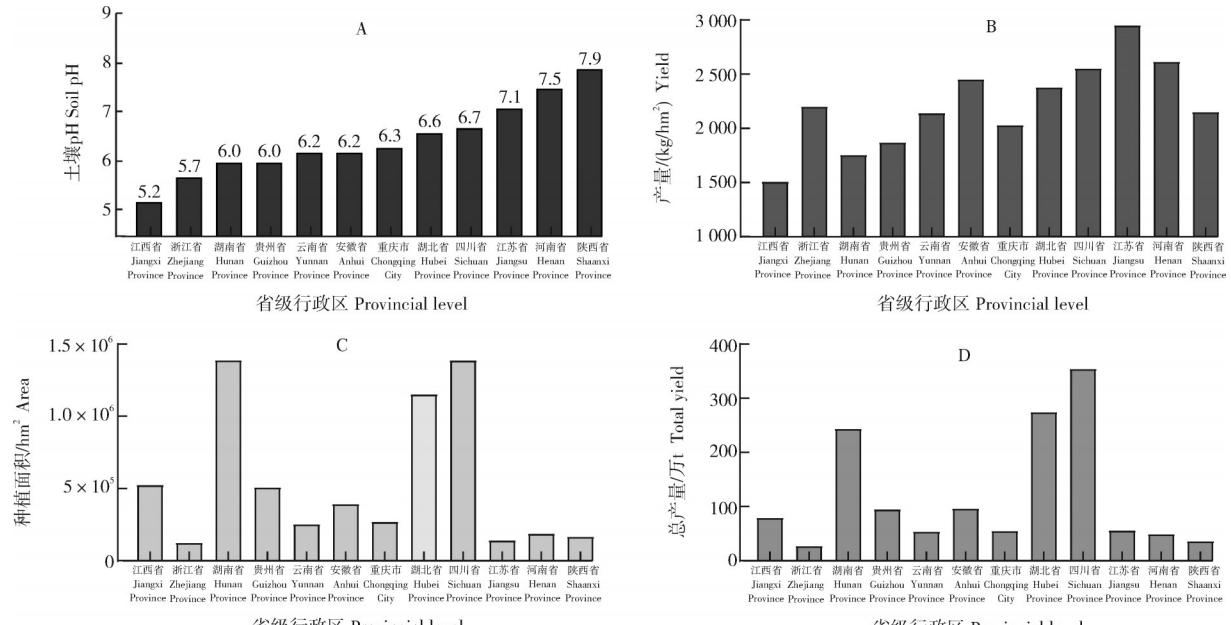
土壤酸化对油菜的生长有诸多不利影响。首先,土壤酸化会导致磷、钾、镁、硼等营养元素减少,铝、锰、铁等离子活性增加,使油菜无法获取足够的养分。土壤中铝、锰、铁等含量过高时,会显著抑制油菜根系的发育,降低根系活力,严重时出现烂根,导致油菜水分和养分吸收能力下降,最终影响植株的生长和产量的形成^[19-20]。其次,油菜的生理代谢过程会受到土壤酸化的干扰。在低pH条件下,油菜的光合效率下降,生长缓慢,植株发育不良,表现为矮小、分枝少,最终产量显著下降^[21]。再次,油菜在酸性土壤中更容易遭受病虫害的侵袭,酸性环境下根腐病、黑斑病等病害的发生率大幅提高,进一步加剧了油菜生长抑制和产量损失^[22]。研究表明,适宜油菜生长的土壤pH水平在6.0~7.0,pH大于7或者小于6时,油菜根系活力显著降低^[23-24]。研究表明,油菜的酸害阈值为pH 6.0左右,种植油菜要获得最佳籽粒产量,种植土壤的pH最好维持在6.0以上的弱酸性环境^[6, 9, 25]。油菜籽粒产量与土壤酸度显著相关,土壤pH 6.4时油菜籽粒产量达到最高,pH降至5.5时减产达20%,pH降至4.5时减产60%以上^[9]。随着我国南方耕地土壤酸化的不断加剧,土壤酸化对油菜生产的影响日趋突出,如江西省泰和县典型红壤区(pH 4.76)油菜平均单产不足1100 kg/hm²,远低于全国平均水平(1877 kg/hm²)^[26]。因此,提高油菜适应酸性土壤的能力、消减酸性土壤的障碍因子,是我国冬油菜产区油菜高产的重要途径与保障。

1.3 我国冬油菜主产区土壤pH及油菜生产情况

我国冬油菜主产区分布在湖北、四川、安徽、江苏、湖南、河南、贵州、江西、浙江、陕西、云南、重庆等12个省(直辖市)^[27]。根据全国农业技术推广服务中心

心编著的《测土配方施肥土壤基础养分数据集(2015—2020)》可知,我国冬油菜主产区土壤平均pH≤6的有4个,≤6.5的有7个,其中以江西省的土壤平均pH最低,约为5.2^[28]。以2023年我国冬油菜主产区油菜生产情况为例,四川、湖南、湖北为我国冬油菜种植面积最大、产量最高的3个省份。总体而言,当土壤pH<7时,随着土壤pH值下降,油菜籽的

平均单产除安徽省和浙江省降幅较小外,整体呈现出明显的下降趋势,其中以江西省最低,平均单产为1 507 kg/hm²。四川、湖北和湖南同为油菜种植大省,前两者油菜籽的平均单产(四川2 554 kg/hm²,湖北2 379 kg/hm²)明显高于湖南省(1 756 kg/hm²)和江西省(图1)。这些数据表明油菜籽单产与土壤酸碱性存在较大关联。



图中数据来自《中国统计年鉴2023》及《测土配方施肥土壤基础养分数据集(2015—2020)》。Data in the figure are from the China Statistical Yearbook 2023 and Soil Testing Formula Fertilization Soil Basic Nutrient Dataset (2015—2020).

图1 我国冬油菜主产区土壤pH平均值及2023年冬油菜生产情况

Fig. 1 The average soil pH value in the main winter rapeseed producing areas of China and the rapeseed production situation in 2023

2 提高酸性土壤区油菜产能的技术措施

酸性土壤的主要障碍因子是酸害、铝锰铁等金属离子毒害和磷钾镁硼等必需养分缺乏等。油菜耐酸高产技术应从改良酸性土壤和提高油菜耐酸促生能力两大方面着手,以增强土壤-作物系统的耐酸、抗毒和养分高效能力,从而实现酸性土壤下油菜的高产优质高效。针对我国酸性土壤对油菜生产影响的现状,提出如下技术措施:

1)筛选推广耐酸高产品种。通过筛选并推广在酸性土壤中优质高产的油菜品种,提高油菜对酸性土壤的适应性。

2)研发油菜耐酸促生技术。应用种子丸粒化技术,保护幼苗期油菜根系的生长,增强种子在酸性土壤中的早生快发能力,实现作物根际调酸促生,从而

提升油菜抗酸性。

3)研发耐酸高产配方肥。针对酸性土壤的供肥特点,研发油菜耐酸高产配方肥,满足油菜在酸性土壤中的养分需求,促进油菜的根系发育与养分高效吸收利用,增强油菜抗酸性并提高籽粒产量。

4)配施有机肥。通过配合施用有机肥来培肥土壤,或部分替代化肥,以维持土壤健康,提高油菜对逆境的适应性。

5)使用酸性土壤调理剂。通过使用土壤调理剂改善土壤的酸碱平衡,钝化土壤金属离子尤其是铝离子,改善土壤环境,减少土壤酸化对油菜生长的负面影响。

基于上述技术措施,提出“耐酸高产品种+种子丸粒化促生+专用肥配合+有机肥培肥+土壤调理剂改土”的技术综合利用模式,并根据实际生产情况加以应用(图2)。

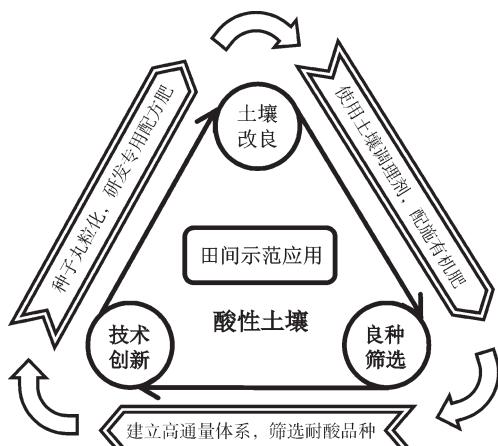


图2 酸性土壤区油菜耐酸高产的应对策略

Fig. 2 Coping strategies for acid resistant and high-yielding rapeseed in acidic soils

2.1 油菜耐酸高产品种的筛选与应用

作物不同品种的耐酸能力存在显著的基因型差异。20世纪90年代,国际玉米小麦改良中心(CIMMYT)在拉丁美洲、亚洲和非洲应用推广耐酸玉米品种,研究发现在酸性土壤中耐酸玉米品种的产量比常规品种平均高出19.5%^[14]。我国具有丰富的油菜种质资源,农业农村部结合区域特点每年向全国各油菜产区推荐多个高产油菜品种^[29]。因此,可收集各地和农业农村部推荐的高产油菜品种,利用高通量酸性土壤微区初筛^[30]和大田验证相结合的方法,筛选耐酸抗铝的高产优质油菜品种^[31]。高通量酸性土壤微区初筛耐酸指数>0.5、大田验证耐酸指数>0.2的高产品种可作为耐酸品种,推荐农业农村部在酸性土壤区推广应用。

2.2 油菜耐酸促生种子丸粒化技术的研发与应用

油菜对酸铝毒害最初的反应部位为根尖^[32-33]。有效保护根尖生长能实现油菜根系发育,达到出苗壮苗和高产优质。种子丸粒化是指在种子表面包裹多层特殊物质以形成丸粒状种子的种子前处理技术^[34]。该技术目前主要应用于病虫害防治、抗旱、防寒和补充营养等方面^[35],有关耐酸促生的种子丸粒化技术尚未见报道。针对酸性土壤研制了油菜种子丸粒化配方,该配方以氢氧化钙和生物炭为核心调酸组分,同时整合了硼酸、纳米氧化硅等营养元素,以及酵母代谢物、芸苔素内酯和吲哚乙酸等植物生长调节物质。利用该配方制备的耐酸促生型油菜丸粒化种子,其抗压强度达4.39 N,种子萌发率为93%~96%,千粒重为8~9 g,各项物理指标均符合相关行业标准。丸粒化种子播种后能够调节种子周

边微区土壤的pH值,消减根际有毒离子(Al^{3+} 、 Mn^{2+}),减轻土壤酸化对油菜种子萌发和幼根生长的抑制作用,同时活化土壤中的矿质养分或直接提供油菜生长必需的养分,促进根系生长发育,显著增强了油菜在酸性土壤环境中的适应能力,最终有利于油菜出苗壮苗和高产优质^[36]。我们利用丸粒化处理后的种子与未丸粒化的种子开展盆栽和大田小区试验,以评价种子丸粒化的耐酸促生和增产效果,结果发现,在强酸性土壤(盆栽试验,供试土壤为取自湖北省咸宁市贺胜桥镇的红壤,土壤pH 4.9)条件下,种子丸粒化能有效提高油菜的单株产量,对酸敏感品种的增产效果更为显著,增产率达47.9%。在中等酸性土壤(大田小区试验,试验地点位于湖北省咸宁市马桥镇油稻轮作基地,土壤pH 5.6)条件下,种子丸粒化对油菜产量提高效果也十分显著,耐受和敏感品种的籽粒产量比对照分别增加6.7%和12.2%^[37](表1)。基于该技术进行量化生产后,田间丸粒化种子飞播量为12~15 kg/hm²,直播量为10~14 kg/hm²(丸粒化种子千粒重约为正常种子的2倍)。

表1 种子丸粒化在酸性土壤中对油菜产量的影响

Table 1 Effects of seed pelletization on rapeseed yield in acidic soils

品种 Cultivar	处理 Treatment	盆栽试验 (pH 4.9) Pot trial		田间试验 (pH 5.6) Field trial	
		籽粒 产量/ (g/plant) Seed yield	增产 率/% Increase rate	籽粒产量/ (kg/hm ²) Seed yield	增产 率/% Increase rate
敏感品种 Sensitive cultivar	对照 CK Pelletisation	1.44		1 022	
	丸粒化 Pelletisation	2.13	47.9	1 146	12.2
耐受品种 Tolerant cultivar	对照 CK Pelletisation	2.66		1 664	
	丸粒化 Pelletisation	3.10	16.5	1 745	6.7

2.3 油菜耐酸高产配方肥的研发与应用

根据酸性土壤的主要障碍因子及其在土壤中的迁移转化特征,以及油菜高产优质生产中养分的需求规律,设计出既能调节土壤pH、又能有效提供油菜矿质养分的专用配方肥,是酸性土壤条件下实现油菜高产优质的重要途径。基于此,我们研发出一款油菜耐酸高产配方肥,并在湖北省农业农村厅备案(备案号HBCHFL2023—01024)。该配方肥氮磷钾养分配比为27-8-7,肥料中同时含有控释尿素、硫酸钾钙镁和颗粒硼等中微量元素,肥料为弱碱性,pH 7.8左右。该肥料可一次性基施600~675 kg/hm²,后

期无需追肥,在充分满足油菜养分需求的同时,对酸性土壤也具有较好的改土作用。

我们将该油菜耐酸高产配方肥(27-8-7,一次性施用,600 kg/hm²)与当地习惯用肥(15-7-8,施用600 kg/hm²,越冬期追施150 kg/hm²尿素)的实际应用效果在强酸性土壤(盆栽试验,供试土壤为取自湖北省咸宁市贺胜桥镇的红壤,土壤pH 4.9)和中等酸性土壤(大田小区试验,试验地点位于湖北省咸宁市马桥镇油稻轮作基地,土壤pH 5.6)上进行对比。结果发现,在强酸性土壤中,该油菜耐酸高产配方肥能显著提高油菜的单株产量,对酸敏感品种的增产效果更为显著,增产率高达182.6%,表明该款配方肥能够有效解决强酸性土壤地区油菜生长受到严重抑制的问题。田间试验结果表明,在中等酸性土壤上,该款配方肥对实现油菜耐酸高产具有良好效果,酸耐受和敏感品种的产量比对照分别提高19.3%和19.0%(表2)。

表2 油菜耐酸高产配方肥在酸性土壤中对油菜产量的影响

Table 2 Effects of special formula fertilizer on rapeseed yield in acidic soils

品种 Cultivar	处理 Treatment	盆栽试验(pH 4.9) Pot trial		田间试验(pH 5.6) Field trial	
		籽粒 产量/ (g/plant)	增产 率/% Increase rate	籽粒 产量/ (kg/hm ²)	增产 率/% Increase rate
		Seed yield		Seed yield	
敏感品种 Sensitive cultivar	当地习惯用肥 Local fertilizer	1.44		1 022	
	配方肥 Formula fertilizer	4.07	182.6	1 216	19.0
耐受品种 Tolerant cultivar	当地习惯用肥 Local fertilizer	2.66		1 664	
	配方肥 Formula fertilizer	4.67	75.6	1 985	19.3

2.4 有机肥的配合施用

增施有机肥一方面可以有效补充土壤养分,减少化肥的投入,同时能显著增加土壤中的有机质、腐植酸等,改善土壤的团粒结构和通透性,促进植物根际微生物的活动,促使土壤中难溶性矿质元素的转化,达到培肥的作用^[38-39]。另一方面,有机肥能减少氮的硝化,并能中和土壤酸度,络合铝离子,降低土壤活性铝的含量^[40]。我国有机肥种类众多,需要根据不同种类有机肥的特性及土壤酸度,推荐适宜的有机肥施用量。(1)秸秆。油-稻水旱轮作系统中,油

菜季前茬水稻秸秆全量还田,旱作系统中秸秆鲜质量1.2~1.8 t/hm²,适当减施氮肥^[41-42]。(2)粪肥。牛粪、羊粪、猪粪等经过充分腐熟的粪肥用量1.5 t/hm²左右,适当减施氮肥^[43-44]。(3)堆肥。施用量1.5~3.0 t/hm²,适当减施氮肥^[45]。(4)商品有机肥。根据产品说明书中推荐的用量施用,并适当减少氮肥的施用。

2.5 酸性土壤调理剂的使用

土壤活性铝离子浓度与pH呈极显著负相关^[46],在酸性土壤上施用碱性土壤调理剂能显著提高土壤pH,进而降低酸害和铝离子毒害。可用于改良酸性土壤的调理剂种类较多,包括石灰、生物炭、钙镁磷肥、有机硅钙镁、炼钢炉渣、窑灰钾、草木灰等^[47]。施用时需要根据土壤的酸度推荐适宜的施用量。

1)石灰。石灰包括生石灰、熟石灰、碳酸石灰等,是提高土壤pH效果最好的一类土壤调理剂。施用石灰是中和土壤酸、控制土壤酸化和提高土壤pH的重要措施,主要用于中等酸性及强酸性土壤的改良。以CaO计算,土壤pH 5.0~5.5时施用量600~900 kg/hm²,pH 4.5~5.0时施用量750~1500 kg/hm²^[48-49]。可以根据具体的土壤酸度,通过中和滴定方法计算石灰用量^[50],每隔1~2 a施用1次。

2)生物炭。对于酸性土壤,生物炭的施用量需要根据土壤pH和质地而定,土壤pH 5.0~6.0时施用量1.50~2.25 t/hm²,pH 4.0~5.0时施用量1.8~3.0 t/hm²^[51-53]。

3)其他土壤调理剂。钙镁磷肥施用225~300 t/hm²,有机硅钙镁施用600~750 kg/hm²,草木灰施用1 125~1 500 kg/hm²。这些土壤调理剂呈碱性,用于弱酸性或中等酸性土壤,既能调节土壤酸度,还能提供钙、镁、磷等矿质养分。

3 油菜耐酸高产技术的综合利用模式

3.1 农田酸害等级及配套的技术集成模式

随着我国油菜主产区土壤酸化问题日益严重,如何治理不同类型的酸性土壤,并推广适宜的生产技术,成为实现油菜高产、稳产的关键。虽然油菜主产区土壤酸化现象较为普遍,但是由于区域环境、土壤类型和酸化程度的差异,不同产区的酸性土壤表现出不同的特征。因此,有必要根据土壤酸度、土壤质地和地理分布进行细化分类,并制定有针对性的调控方案。根据冬油菜产区农田土壤酸化的实际情况及油菜对酸性土壤的反应,将冬油菜产区农田酸

度分为3个等级:pH<5.5为强酸性,pH 5.5~6.0为中等酸性,pH 6.0~6.5为弱酸性。pH>6.5为非酸性土壤。针对各土壤酸度等级推荐对应的油菜耐酸高产技术综合利用模式。

1)弱酸性土壤(pH 6.0~6.5)的高产技术综合利用模式。耐酸品种+耐酸高产配方肥+秸秆还田,或耐酸品种+习惯施肥+有机肥(秸秆还田)。有条件的地区可优先选用耐酸促生的油菜丸粒化种子,在施用有机肥的前提下相应减施化肥,各产品用量及施用方法参考前述单项技术。

2)中等酸性土壤(pH 5.5~6.0)的高产技术综合利用模式。耐酸品种+耐酸高产配方肥+有机肥或弱碱性土壤调理剂,或耐酸品种+习惯施肥+有机肥(秸秆还田)+弱碱性土壤调理剂。有条件的地区可优先选用耐酸促生的油菜丸粒化种子,在施用有机肥的前提下相应减施化肥,土壤调理剂可2~3 a施用1次,各产品用量及施用方法参考前述单项技术。

3)强酸性土壤(pH<5.5)的高产技术综合利用模式。耐酸品种+耐酸高产配方肥+有机肥(秸秆还田)+弱碱性土壤调理剂,或耐酸品种+习惯施肥+有机肥+强碱性土壤调理剂。有条件的地区可优先选用耐酸促生的油菜丸粒化种子,在施用有机肥的前提下相应减施化肥,土壤调理剂可根据实际情况隔年施用1次,各产品用量及施用方法参考前述单项技术。

3.2 油菜耐酸高产技术综合利用的配套栽培管理措施

作物产量是农业综合因素协同调控的结果。要实现油菜耐酸高产,除了进行品种选用、养分管理和土壤改良外,还需要综合考虑水分、气温、病虫害、杂草等因素的影响。依据农业农村部发布的《2024年冬油菜春季田间管理技术意见》《2023年全国油菜秋冬种技术意见》《2017—2018年度冬油菜生产技术指导意见》等相关文件,总结出如下的田间配套管理措施。

1)适时种植与收获。选择适宜的播种时期和密度。在酸性土壤条件下,可适当密植,以提高单位面积的产量,充分利用土地资源。适期播种的人工撒播播种量约5.0~7.0 kg/hm²,机械条播约4.5~6.0 kg/hm²,无人机飞播约6.0~7.5 kg/hm²。在适宜播期范围内,迟播适当增加播种量,丸粒化种子需增加播种量,免耕直播(飞播)适当增加播种量,以确保油菜高产群体的基本要求。全田油菜2/3以上角果呈

黄色、全株70%~80%角果呈黄绿至淡黄、主序角果转黄、种皮由绿转为红褐色时进行人工或机械割倒摊晒,摊晒5 d左右,待油菜籽成熟度达到95%以上时采用人工或油菜捡拾机和油菜联合收割机进行脱粒。适时割晒,适时捡拾,以防油菜籽发芽或霉烂。

2)水分管理。油菜对水分缺乏或过量都很敏感,冬油菜生长周期长,从9月底持续到次年5月初,可能频繁遭遇苗期和越冬期的秋冬干旱胁迫、春夏时花蕾期和成熟期的多雨渍害、甚至整个生育期的干旱或雨水胁迫。因此,油菜地的厢沟、腰沟、围沟要严格做到“三沟”配套。实行科学的灌溉制度,确保油菜在酸性土壤中获得适量的水分,避免水分过多或不足。有灌溉条件的地区,筑牢田间排水缺口,直播油菜播种后大水漫灌至接近厢面,但不能覆盖厢面,以免排水时水分带走种子,然后排干确保齐苗壮苗,越冬期视旱情发展及时浇水。

3)低温冻害管理。冬油菜虽是冬种作物,但低温、寡照、冻雨、冰雪等灾害性天气,也会给油菜生长造成损害,使油菜产量下降,对油菜生产造成严重损失。越冬前或低温冻害出现前,建议追施磷钾和硼肥以增强抗冻害能力。油菜受冻后,叶片和根系受到损伤,需及时补充养分,可以根据苗情适当增施磷、钾肥,避免过量施用氮肥,促进油菜快速恢复生长。

4)病虫害防控和杂草管理。酸性土壤容易滋生病虫害,会对油菜产量和品质造成较大威胁。优先选用抗菌核病、抗根肿病的油菜耐酸高产品种,应用种子处理剂防治苗期病虫害,以及在花期采用新型药剂防治菌核病、蚜虫等,提高油菜的遗传抗性。直播或移栽前施用化学除草剂1次,或在移栽油菜栽后7~10 d、直播油菜6~8叶期施用化学除草。油菜苗期天气干旱,需要防治菜青虫、地老虎(旱地)等虫害危害,盛花期和成熟期的雨季需要防治油菜菌核病。

4 油菜耐酸高产技术综合利用模式的应用展望

4.1 大力推广油菜耐酸高产品种

近年来,针对我国农业生产面临日益严峻的非生物胁迫,如土壤干旱、盐害和养分贫瘠等,选育出农作物抗逆能力强、养分利用效率高的作物新品种并推广应用,有越来越多成功的案例。然而,针对我国大面积耕地酸化及其对油菜生长的障碍,涉及耐酸高产油菜品种的筛选鉴定与推广应用鲜有报道。

在油菜品种的大家庭中增添“耐酸”的新成员,符合我国油菜产业可持续发展需求,在我国酸性耕地上有广阔的应用前景。为加速我国耐酸油菜品种的推广应用,应加强科企交流合作。一方面,加强种业企业和育种单位间的交流合作,通过市场主推油菜品种鉴选与科研单位推荐相结合,实现将耐酸高产品种的适时高效地推荐给农民使用。另一方面,提高种业企业和育种单位对耐酸油菜品种培育和应用的意识,推动我国耐酸高产作物品种的选育和产业化。

4.2 建立土壤酸化阻控的多技术协同调控体系

土壤是“生命之基,万物之母”,在实现油菜高产优质目标的同时,也亟需构建“源头阻控-过程修复-养分协同”的酸性土壤综合治理技术体系。针对传统石灰改良易导致土壤板结、肥力退化等问题,建议通过构建多技术协同调控体系以实现精准治理。在油菜种植环节,种子丸粒化技术实现了“种剂同播”,精准调控了油菜种子萌发的土壤微环境,有效减少土壤改良过程中改良剂过度使用造成的资源浪费,同时降低环境污染的风险;在油菜生长管理环节,配合耐酸高产配方肥的施用,在满足油菜养分需求的同时,也在一定程度上阻控了土壤酸化;同时,根据土壤的酸度情况,科学配施有机肥和/或土壤改良剂,以调节土壤pH,提高土壤肥力。建议耐酸促生的油菜种子丸粒化加工生产及其销售环节能得到政府财政支持,这样才能得到有效地推广应用。然而,针对不同区域土壤质地和pH环境的差异,如何快速推出准确科学的配套技术方案,防治土壤酸化、保障土壤健康,还有待进一步研究。

4.3 全面推广酸性土壤区油菜耐酸高产技术综合利用模式

酸性土壤区油菜耐酸高产技术综合利用模式的全面推广,对提升油菜生产效率、优化资源配置和促进油菜产业可持续发展,保障我国食用油供给安全具有重要意义。然而,当前该技术体系的应用推广仍面临诸多挑战:不同区域施肥措施和土壤改良方式缺乏规范,化肥过量施用导致的土壤酸化问题日益严峻,各类改良剂和有机肥的应用标准亟待完善。针对这些问题,未来应进一步根据酸性土壤区的区域性特征和酸化程度,建立分级分类技术推广体系,深化各地的农技推广部门与企业的合作,因地制宜,精准推广不同酸害情况对应的综合技术模式,联合制定标准化的酸性土壤区油菜耐酸高产生产技术规

程,实现油菜产业绿色高效可持续发展。

参考文献 References

- [1] 李谷成,牛秋纯,冷博峰,等.新时代十年:我国油菜产业发展与路径选择[J].中国油料作物学报,2024,46(2):228-235.
LI G C, NIU Q C, LENG B F, et al. Ten years in the new era: development and path selection of rapeseed industry in China [J/OL]. China industrial economics, 2024, 46(2): 228-235 (in Chinese with English abstract).
- [2] 国家统计局.中国统计年鉴2023[M].北京:中国统计出版社, 2023. National Bureau of Statistics. China statistical yearbook 2023 [M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2023 (in Chinese).
- [3] 冯海棠,王汉中.新形势下的我国食用植物油供给安全对策[J].中国油料作物学报,2024,46(2):221-227.
FENG H T, WANG H Z. Security strategy for the nation's edible vegetable oil supplies under the new circumstances [J]. Chinese journal of oil crop sciences, 2024, 46 (2) : 221-227 (in Chinese with English abstract).
- [4] 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 sciences, 2010, 32(2): 300-302 (in Chinese with English abstract).
- [5] ZHAO X Q, CHEN R F, SHEN R F. Coadaptation of plants to multiple stresses in acidic soils [J]. Soil science, 2014, 179 (10/11):503-513.
- [6] 闫志浩,胡志华,王士超,等.石灰用量对水稻油菜轮作区土壤酸度、土壤养分及作物生长的影响[J].中国农业科学, 2019, 52(23): 4285-4295.
YAN Z H, HU Z H, WANG S C, et al. Effects of lime content on soil acidity, soil nutrients and crop growth in rice-rape rotation system [J]. Scientia agricultura sinica, 2019, 52 (23) : 4285-4295 (in Chinese with English abstract).
- [7] NGOUNE TANDZI L, MUTENGWA C S, NGONKEU E L M, et al. Breeding maize for tolerance to acidic soils: a review [J/OL]. Agronomy, 2018, 8(6):84 [2024-11-08]. <https://doi.org/10.3390/agronomy8060084>.
- [8] 赵学强,潘贤章,马海艺,等.中国酸性土壤利用的科学问题与策略[J].土壤学报,2023,60(5):1248-1263.
ZHAO X Q, PAN X Z, MA H Y, et al. Scientific issues and strategies of acid soil use in China [J]. Acta pedologica sinica, 2023, 60 (5) : 1248-1263 (in Chinese with English abstract).
- [9] 红黄壤利用改良区划协作组.中国红黄壤地区土壤利用改良区划[M].北京:农业出版社,1985.
Red and Yellow Soil Utilization Improvement Regional Cooperation Group. Regionalization of soil use improvement in red and yellow soil areas of China [M]. Beijing: Agriculture Press, 1985 (in Chinese).
- [10] 国土资源部中国地质调查局.中国耕地地球化学调查报告[EB/OL].(2015-06-26)[2024-11-08]. <https://www.cgs.gov.cn/>

- upload/201506/20150626/gdbg.pdf. China Geological Survey.China cropland geochemical survey report[EB/OL].(2015-06-26) [2024-11-08]. <https://www.cgs.gov.cn/upload/201506/20150626/gdbg.pdf>(in Chinese).
- [11] 徐明岗,张文菊,黄绍敏,等.中国土壤肥力演变[M].2版.北京:中国农业科学技术出版社,2015.XU M G, ZHANG W J, HUANG S M. Evolution of soil fertility in China [M]. 2nd ed. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2015(in Chinese).
- [12] 周晓阳,徐明岗,周世伟,等.长期施肥下我国南方典型农田土壤的酸化特征[J].植物营养与肥料学报,2015,21(6):1615-1621.ZHOU X Y, XU M G, ZHOU S W, et al. Soil acidification characteristics in Southern China's croplands under long-term fertilization [J]. Journal of plant nutrition and fertilizer, 2015,21(6):1615-1621 (in Chinese with English abstract).
- [13] 于天一,孙秀山,石程仁,等.土壤酸化危害及防治技术研究进展[J].生态学杂志,2014,33(11):3137-3143.YU T Y, SUN X S, SHI C R, et al. Advances in soil acidification hazards and control techniques [J]. Chinese journal of ecology, 2014,33(11):3137-3143 (in Chinese with English abstract).
- [14] KRUG E C, FRINK C R. Acid rain on acid soil: a new perspective[J]. Science, 1983,221(4610):520-525.
- [15] 余倩,段雷,郝吉明.中国酸沉降:来源、影响与控制[J].环境科学学报,2021,41(3):731-746.YU Q, DUAN L, HAO J M. Acid deposition in China: sources, effects and control [J]. Acta scientiae circumstantiae, 2021, 41 (3) : 731-746 (in Chinese with English abstract).
- [16] TIAN D S, NIU S L. A global analysis of soil acidification caused by nitrogen addition [J/OL]. Environmental research letters, 2015, 10(2) : 024019 [2024-11-08].<https://doi.org/10.1088/iopscience/1748-9326/10/2/024019>.
- [17] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands [J]. Science, 2010, 327 (5968) : 1008-1010.
- [18] LIANG L Z, ZHAO X Q, YI X Y, et al. Excessive application of nitrogen and phosphorus fertilizers induces soil acidification and phosphorus enrichment during vegetable production in Yangtze River Delta, China [J]. Soil use and management, 2013,29(2):161-168.
- [19] KOCHIAN L V. Cellular mechanisms of aluminum toxicity and resistance in plants [J]. Annual review of plant physiology and plant molecular biology, 1995,46:237-260.
- [20] 韩德鹏,刘星月,王馨悦,等.铝胁迫对油菜根系形态和生理指标的影响[J].核农学报,2019,33(9):1824-1832.HAN D P, LIU X Y, WANG X Y, et al. Effects of aluminum stress on morphology parameters of roots and physiological indexes in *Brassica napus* L [J]. Journal of nuclear agricultural sciences, 2019,33(9):1824.-1832 (in Chinese with English abstract).
- [21] 王志颖,刘鹏,李锦山,等.铝胁迫对油菜生长及叶绿素荧光参数、代谢酶的影响[J].浙江师范大学学报,2010,33(4): 452-458.WNG Z Y, LIU P, LI J S, et al. Effect of Al stress on growth and chlorophyll fluorescence parameters, metabolizing enzymes of oil rape [J]. Journal of Zhejiang Normal University, 2010,33(4): 452-458 (in Chinese with English abstract).
- [22] 张福锁.我国农田土壤酸化现状及影响[J].民主与科学, 2016(6): 26-27.ZHANG F S. Present situation and influence of farmland soil acidification in China [J]. Democracy & science, 2016(6):26-27 (in Chinese).
- [23] 马成仓,洪法水.pH对油菜种子萌发和幼苗生长代谢的影响[J].作物学报,1998,24(4):509-512.MA C C, HONG F S. Effect of pH on seed germination and seedlings growth and metabolism in rape [J]. Acta agronomica sinica, 1998, 24(4) : 509-512 (in Chinese with English abstract).
- [24] 吴礼树.土壤肥料学[M].2版.北京:中国农业出版社,2011. WU L S. Soil fertilizer science [M]. 2nd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2011(in Chinese).
- [25] 孟赐福,傅庆林,水建国,等.土壤酸度对大豆、油菜生长和产量的影响[J].中国农业科学,1994,27(3):63-70.MENG C F, FU Q L, SHUI J G, et al. Effects of soil acidity on growth and yield of soybean and rape [J]. Scientia agricultura sinica, 1994,27(3):63-70 (in Chinese with English abstract).
- [26] 王寅,鲁剑巍,李小坤,等.施肥对红壤地区直播油菜生长、产量及养分吸收的影响[J].中国土壤与肥料,2012(1):38-42, 52.WANG Y, LU J W, LI X K, et al. Effects of fertilizers application on growth, seed yield, NPK absorption and accumulation of direct-seeding rapeseed in red soil [J]. Soil and fertilizer sciences in China, 2012(1) : 38-42, 52 (in Chinese with English abstract).
- [27] 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 J W, REN T, CONG R H, 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).
- [28] 全国农业技术推广服务中心.测土配方施肥土壤基础养分数据集:2015—2020[M].北京:中国农业出版社,2024.National Agricultural Technology Promotion Service Center. Data set of soil basic nutrients for soil testing and formula fertilization-2015—2020 [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2024 (in Chinese).
- [29] 宋先锋,贾志远.农业农村部首次发布《国家农作物优良品种推广目录》[J].乡村科技,2023,14(6):4-5.SONG X F, JIA Z Y. The Ministry of Agriculture and Rural Affairs issued the *National Catalogue for the Promotion of Excellent Crop Varieties* for the first time [J]. Rural science and technology, 2023, 14(6):4-5 (in Chinese).
- [30] 丁广大,张鹏超,徐芳森,等一种环境可变式耐瘠抗逆作物品种高通量筛选装置:ZL 202322123448. X [P]. 2024-03-01. DING G D , ZHANG P C, XU F S , et al. High-throughput screening device for environmentally variable, nutrient-resistant, and stress-resistant crop varieties: ZL 202322123448. X [P].2024-03-01(in Chinese).

- [31] 张鹏超,张雯,黄益丹,等.甘蓝型油菜苗期耐酸性综合评价及耐酸种质筛选[J].华中农业大学学报,2023,42(6): 164-174.ZHANG P C, ZHANG W, HUANG Y D, et al. Comprehensive evaluation of acid -tolerance and screening of acidtolerant germplasm in *Brassica napus* at seedling stage [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2023, 42 (6) : 164-174 (in Chinese with English abstract).
- [32] KOCHIAN L V, PIÑEROS M A, HOEKENGA O A. The physiology, genetics and molecular biology of plant aluminum resistance and toxicity [J]. Plant and soil, 2005, 274 (1) : 175-195.
- [33] 张雯,黄益丹,张鹏超,等.甘蓝型油菜耐铝极端品种筛选及耐铝生理机制初步解析[J].华中农业大学学报,2023,42(6): 154-163.ZHANG W, HUANG Y D, ZHANG P C, et al. Screening extreme varieties with aluminum tolerance and analyzing physiological mechanisms of aluminum tolerance in *Brassica napus* [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2023, 42 (6) : 154-163 (in Chinese with English abstract).
- [34] PEDRINI S, MERRITT D J, STEVENS J, et al. Seed coating: science or marketing spin? [J]. Trends in plant science, 2017, 22(2):106-116.
- [35] JIA Z C, OU C M, SUN S J, et al. A novel approach using multispectral imaging for rapid development of seed pellet formulations to mitigate drought stress in alfalfa[J/OL].Computers and electronics in agriculture, 2023, 212: 108136[2024-11-08].<https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108136>.
- [36] RAN W H, XU F S, ZHANG Y, et al. Development of acid-resistant seed pelletization formula and its effects on improving rapeseed growth in acidic soil[J].Plant and soil, 2024, 504(1): 147-165.
- [37] 徐芳森,冉文昊,张玥,等.一种具有耐酸促生作用的种子包衣剂及其应用:CN2023 1 1090850.0[P].2024-05-24.XU F S, RAN W H, ZHANG Y, et al. A seed coating agent with acid resistance and growth promotion and its application:CN2023 1 1090850.0[P].2024-05-24(in Chinese).
- [38] GUO S, TAO C Y, JOUSSET A, et al. Trophic interactions between predatory protists and pathogen-suppressive bacteria impact plant health[J].The ISME journal, 2022, 16(8): 1932-1943.
- [39] WANG H X, XU J L, LIU X J, et al. Effects of long-term application of organic fertilizer on improving organic matter content and retarding acidity in red soil from China [J/OL].Soil and tillage research, 2019, 195: 104382[2024-11-08].<https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104382>.
- [40] 沈仁芳,王超,孙波.“藏粮于地、藏粮于技”战略实施中的土壤科学与技术问题[J].中国科学院院刊,2018,33(2):135-144.SHEN R F, WANG C, SUN B. Soil related scientific and technological problems in implementing strategy of “Storing grain in land and technology”[J]. Bulletin of Chinese Academy Of Sciences, 2018, 33 (2) : 135-144 (in Chinese with English abstract).
- [41] WU H C, ZHANG Z, HU C, et al. Short-term straw return combined with nitrogen fertilizer alters the soil nitrogen supply in rice - rapeseed planting systems [J/OL].Agronomy, 2024, 14 (6) : 1226 [2024-11-08].<https://doi.org/10.3390/agronomy14061226>.
- [42] 王昆昆,刘秋霞,朱芸,等.稻草覆盖还田对直播冬油菜生长及养分积累的影响[J].植物营养与肥料学报,2019,25(6): 1047-1055.WANG K K, LIU Q X, ZHU Y, et al. Effects of straw mulching on growth and nutrients accumulation of direct-sown winter oilseed rape[J].Journal of plant nutrition and fertilizers, 2019, 25(6) : 1047-1055 (in Chinese with English abstract).
- [43] 周璇,杜森,徐洋,等.我国三大粮食作物粪肥还田推广应用路径探索[J/OL].中国农业资源与区划,2024: 1-10(2024-07-17) [2024-11-08]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3513.S.20240716.1043.002.html>.ZHOU X, DU S, XU Y, et al. Exploration on the popularization and application path of manure returning to the field of three major grain crops in China[J/OL].Chinese journal of agricultural resources and regional planning, 2024: 1-10 (2024-07-17) [2024-11-08].<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3513.S.20240716.1043.002.html> (in Chinese with English abstract).
- [44] 余居华,王利民,丁洪,等.畜禽粪便施用对红壤铝胁迫下油菜幼苗生长及光合荧光特性的影响[J].福建农业学报, 2024, 39(2): 206-215.YU J H, WANG L M, DING H, et al. Growth and photosynthesis of *Brassica napus* seedlings affected by organic manure application on acid red soil under aluminum stress[J].Fujian journal of agricultural sciences, 2024, 39 (2): 206-215 (in Chinese with English abstract).
- [45] 刘国梁,吴伟,李素艳,等.园林绿化废弃物堆肥配施化肥对土壤腐殖质碳组分的影响[J/OL].中国土壤与肥料,2024 (12) : 27-35.LIU G L, WU W, LI S Y, et al. Effect of green plant waste compost combined with chemical fertilizer on carbon composition of soil humus [J/OL].Soil and fertilizer sciences in China, 2024(12) : 27-35 (in Chinese with English abstract).
- [46] BOJÓRQUEZ-QUINTAL E, ESCALANTE-MAGANA C, ECHEVARRÍA-MACHADO I, et al. Aluminum, a friend or foe of higher plants in acid soils[J/OL].Frontiers in plant science, 2017, 8: 1767 [2024-11-08].<https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01767>.
- [47] 徐仁扣.土壤酸化及其调控研究进展[J].土壤,2015,47(2): 238-244.XU R K. Research progresses in soil acidification and its control [J].Soils, 2015, 47 (2) : 238-244 (in Chinese with English abstract).
- [48] 胡敏,向永生,鲁剑巍.石灰用量对酸性土壤pH值及有效养分含量的影响[J].中国土壤与肥料,2017(4):72-77.HU M, XIANG Y S, LU J W. Effects of lime application rates on soil pH and available nutrient content in acidic soils[J].Soil and fertilizer sciences in China, 2017(4):72-77 (in Chinese with English abstract).
- [49] 闫志浩.稻-油轮作区土壤酸度对作物生长的影响机制[D].

- 北京:中国农业科学院,2020.YAN Z H.The effect of soil acidity on crop growth in rice-oilseed rape rotation system [D].Beijing: Academy of Agricultural Sciences, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [50] 徐建明.土壤学[M].4版.北京:中国农业出版社,2019.XU J M. Soil science[M]. 4th ed. Beijing: China Agriculture Press, 2019(in Chinese).
- [51] 兰宇,孟军,韩晓日,等.生物炭基产品及其对土壤培肥改良效应的研究进展[J].植物营养与肥料学报,2024,30(7):1396-1412.LAN Y, MENG J, HAN X R, et al. Advances in research on biochar-based products and their effects on soil fertility improvement[J]. Journal of plant nutrition and fertilizers, 2024,30(7): 1396-1412 (in Chinese with English abstract).
- [52] 董颖,邵捷,徐仁扣,等.不同地区油菜秸秆制备的生物质炭对酸性红壤的改良效果[J].土壤,2020,52(1):134-138. DONG Y, SHAO J, XU R K, et al. Amelioration of ultisol acidity by biochars derived from canola straws from different areas[J]. Soils, 2020, 52(1): 134-138 (in Chinese with English abstract).
- [53] 黄清扬,徐仁扣,俞元春.不同产地油菜秸秆制备的生物质炭对红壤酸度和土壤pH缓冲容量的影响[J].土壤通报,2022, 53(4):821-827.HUANG Q Y, XU R K, YU Y C. Effects of biochars of canola straws from different soils on red soil acidity and pH buffering capacity [J]. Chinese journal of soil science, 2022,53(4):821-827 (in Chinese with English abstract).

Technologies and comprehensive utilization models for rapeseed with acid-resistance and high-yield in acidic soils of China

RAN Wenhao¹, XU Fangsen¹, SHI Shijun¹, SUN Mingzhu², DAI Zhigang³, ZHANG Jie⁴, DING Guangda¹

1. College of Resources and Environment/ Microelement Research Center/ Key Laboratory of Arable Land Conservation (Middle and Lower Reaches of Yangtze River), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. Agricultural Technology Promotion Center of Jiangxi Province, Nanchang 330046, China;

3. General Station of Cultivated Land Quality and Fertilizer Work, Hubei Province, Wuhan 430070, China;

4. Soil and Fertilizer Station in Xian'an District, Xiamen 437000, China

Abstract The low productivity of acidic soil is one of the main problems limiting the food security and sustainable development of agriculture in China. It is urgent to improve the adaptability of rapeseed to acidic soils and develop rapeseed with acid-resistance and high-yield with the severe acidification of soil in China. Five technical measures including screening rapeseed varieties with acid-resistance, developing the formulas of acid-tolerant seed granulation, developing formula fertilizer for rapeseed with acid tolerance and high yield, applying organic fertilizers, and using conditioners for acidic soil were put forward to increase the production capacity of rapeseed and realize the green development of the rapeseed industry. Regional high-yield technologies and comprehensive utilization models for rapeseed with acid-resistance in terms of the slightly, moderately and strongly acidic soils were proposed to alleviate the acidification of soil, increase the yield of rapeseed, and achieve the goal of increasing yield and efficiency. The measures of cultivating and managing rapeseed with high-yield and stress resistance were elaborated. A path for developing rapeseed industry with high-quality in the future in acidic soil areas in response to the trend of farmland acidification in China was proposed to provide important guarantees for ensuring the security of edible oil in China.

Keywords rapeseed (*Brassica napus*); acidic soil; acid-resistance and high-yield; seed granulation; formula fertilizer; conditioners for soil; comprehensive utilization

(责任编辑:张志钰)