第42卷 第6期　　华 中 农 业 大 学 学 报　　Vol.42 No.6
2023年 11月　　Journal of Huazhong Agricultural University　　Nov. 2023,18～25

鲁剑巍,任涛,李小坤,等.我国冬油菜养分精准调控策略与高效施肥技术体系[J].华中农业大学学报,2023,42(6):18-25.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2023.06.004

我国冬油菜养分精准调控策略与高效施肥技术体系

鲁剑巍,任涛,李小坤,丛日环,陆志峰,张洋洋,刘诗诗,廖世鹏,朱俊

华中农业大学资源与环境学院/微量元素研究中心,武汉430070

摘要　冬油菜是我国重要的油料作物和南方主要的冬季轮作作物,发展油菜生产对保障我国粮油安全供给具有重要的战略意义。进入21世纪以来,由于油菜移栽种植转变为直播轻简种植,过去的施肥技术不再适合新的生产模式,油菜产业发展对施肥理论和技术提出了新要求。本文总结了近20年来我国油菜施肥技术领域的研究进展。经过协同攻关,我国农业科技工作者提出了冬油菜"氮磷钾硼镁全营养配合与前促后稳"的养分精准调控策略,建立了冬油菜前期"精准施肥壮苗保群体促丰产"和后期"依靠土壤养分稳供促高效保稳产"的养分调控方法,创新了"精准种类、精准配伍、精准用量、精准时期、精准位置"为核心的"五精准"油菜高效施肥技术,创制了油菜专用全营养配方肥、专用缓释肥和专用控释尿素等系列新肥料产品,优化建立了轻简高效施肥模式并实现规模化应用,支撑了油菜产业的绿色高质高效发展。最后针对我国冬油菜生产面临的新机遇和新挑战,从施肥技术角度提出了展望:加强南方短生育期油菜高效施肥技术、油菜多功能利用的配套施肥技术、应对气候多变的抗灾养分管理技术等研究,进一步加强与现代农业发展相匹配的新型高效专用肥料产品研发与施肥技术创新,重视养分高效油菜品种的选育与应用。

关键词　直播冬油菜;养分调控;养分高效;精准施肥;轻简种植

中图分类号　S565.406.2　　**文献标识码**　A　　**文章编号**　1000-2421(2023)06-0018-08

油菜是我国第一大油料作物,常年种植面积超过667万hm^2,其中冬油菜占油菜总种植面积的85%以上,近年来种植面积呈不断扩大趋势,是提高我国油脂和饲料蛋白自给率最具潜力的作物。国产菜籽油占油料作物产油量的半壁江山,是我国居民普遍食用的大宗优质油脂,发展油菜生产是保障我国食用油供给安全和人民健康生活的需求[1]。科学施肥是保障粮油安全供给、生态环境安全和农业可持续发展战略实施的关键技术[2]。21世纪以来,我国油菜生产从精耕细作的育苗移栽转变为直播轻简化生产,轻简、高效、高产和高质是油菜产业发展的新趋势。与移栽油菜相比,直播油菜个体偏弱,对养分胁迫更加敏感[3]。相比新的种植方式,传统的施肥技术存在针对性差、施肥环节多、肥料利用率低、施肥成本比国外高等问题,严重制约了我国油菜生产效益和产量潜力的发挥,精准高效的施肥技术和轻简实用的专用肥料产品成为油菜产业健康发展亟待解决的关键难题[4-5]。针对直播油菜养分需求特性和土壤养分供应时空规律不清、轻简高效施肥技术关键要素缺失等理论和技术难题,立足于我国冬油菜主产区土壤条件、轮作制度、种植方式和主导品种,华中农业大学养分综合管理团队与全国油菜施肥领域的同行一起经过近20年的联合攻关,创建了我国直播冬油菜养分精准调控策略,创新了轻简高效施肥技术和专用肥系列新产品,优化建立了油菜轻简高效施肥模式并实现了规模化应用。本文将我国冬油菜科学施肥领域主要进展结果作系统总结,以期为进一步推动我国油菜产业丰产及绿色高效发展提供科学依据。

1　我国冬油菜养分精准调控策略的建立

我国冬油菜主产区种植制度(一年两熟或三熟)和立地条件与加拿大、澳大利亚、欧洲等世界其他油菜主产国或地区完全不同,导致我国冬油菜物质、养分积累以及土壤养分供应规律不同于其他国家,无

收稿日期:2023-10-12
基金项目:财政部和农业农村部"国家现代农业产业技术体系"(CARS-12);"十三五"国家重点研发计划项目(2018YFD0200900);中央高校基本科研业务费专项(2662021ZH001)
鲁剑巍,E-mail:lunm@mail.hzau.edu.cn

法直接引用国外油菜施肥技术。随着现代农业发展，油菜种植方式发生明显改变，生产目标由追求高产向轻简、优质、高产、高效、环保并重转变，这些变化使我们无法照搬传统施肥经验。因此，建立适应我国冬油菜生产的养分精准调控策略进而指导肥料的合理施用极其重要。经过多年研究，我国农业科技工作者创建了冬油菜“氮磷钾硼镁全营养配合与前促后稳”的养分调控策略，提出了冬油菜前期“精准施肥壮苗保群体促丰产”和后期“依靠土壤养分稳供促高效保稳产”的养分调控新思路。

1.1　冬油菜氮磷钾硼镁全营养配合的养分调控策略

华中农业大学养分综合管理团队（下文简称团队）研究建立了直播冬油菜的土壤养分丰缺新指标体系，明确了在油菜籽产量 2.25～3.00 t/hm^{2}时的有效磷、速效钾、有效硼和有效镁缺乏的临界值分别为 25、135、0.79 和 200 mg/kg[6]。团队对我国冬油菜主产区 8 万多个耕作土壤样品进行养分测试，结果发现土壤养分肥力较 20 年前有所改善[7]，主要表现为：①土壤有机质、全氮含量有所上升，属于中等偏上水平，氮缺乏比例占 1/3；②土壤有效磷含量也有一定升幅，多数耕地土壤有效磷含量属于中等含量水平，磷缺乏比例大约占 1/3；③土壤速效钾含量变幅不大，仍处于中低水平，土壤钾处于缺乏的比例占 2/3；④土壤有效镁和硼缺乏的面积不断扩大，比例分别为 64.2% 和 83.5%[8]。通过大范围大规模的田间肥效试验，明确了我国油菜种植土壤中氮、磷和钾对产量的贡献率平均分别为 57.5%、75.2% 和 83.9%[9]，证实镁成为我国冬油菜生产必须通过施肥来补充的又一种养分，施镁平均增产 10.8%[6]；研究表明直播油菜对硼缺乏更加敏感，合理施用硼肥平均增产 23.7%[10]。在明晰冬油菜种植土壤养分特征和建立直播油菜土壤关键养分丰缺指标体系的基础上，明确了我国冬油菜主产区普遍缺镁现象和施镁增产提质效果，提出了油菜氮磷钾硼镁全营养配合的养分调控策略。

1.2　冬油菜生长前期“精准施肥壮苗保群体促丰产”的养分调控策略

我国农业科技工作者研究发现冬油菜苗期植株养分高浓度和高物质积累量是高产的物质基础，高产（>3 t/hm^2）油菜苗期干物质积累平均占总生育期的 1/3 以上，氮、磷和钾养分积累量分别占总生育期的 3/4、2/5 和 1/2 以上，具有明显的养分贮藏特征[11]。明确了苗期贮藏营养的生理功能及临界浓度[12-13]。①当苗期植株氮含量低于 4.11% 时，油菜密度急剧下降，说明苗期较高的氮养分含量能够保障直播油菜的群体密度。②当叶片氮含量低于 3.38% 时光合速率开始下降，而含量低于 3.27% 时叶片停止扩张，当叶片钾含量分别低于 2.06% 和 1.52% 时叶片扩张和光合能力先后降低，说明只有保持适宜的叶片养分浓度才能协调叶片扩张和高光合效率的维持。③高产油菜生殖器官中 62.1%～87.6% 的氮来自于花前茎叶贮藏养分的转移，说明前期较高的养分吸收积累为薹期-角果期油菜结实器官形成保障了足够的转移再利用养分。研究人员量化了油菜越冬期叶片数和产量的关系，明确了冬至油菜叶片数在 5～10 范围内每增加 1 片叶每公顷可增产 300 kg 左右油菜籽[14]；研究阐明了高产冬油菜营养的“前期贮藏、后期转移”特性，明确了油菜苗期贮藏营养的生理功能及临界浓度，提出了冬油菜前期“精准施肥壮苗保群体促丰产”的养分精准调控策略。

1.3　冬油菜生长后期“依靠土壤养分稳供促高效保稳产”的养分调控策略

团队研究揭示了油菜种植土壤养分供应受气候环境、轮作和秸秆还田等影响呈现明显季节性变化特征，即油菜种植土壤养分具有“前期供应不足、后期供应充分”的时效性规律。油菜薹期之前土壤养分供应能力弱，土壤矿化氮仅占油菜养分吸收的 10% 左右[15]，且水稻-油菜轮作的水旱交替和前茬作物秸秆还田增强了苗期土壤氮的固持能力，进入蕾薹-开花期后随着温度上升和前茬残茬分解，土壤中氨氧化细菌和古菌等与氮转化相关的功能微生物活性明显提高，土壤养分供应量大幅度增加，占油菜养分吸收量的 1/3[16]。土壤活性有机碳、秸秆碳等介导的微生物对氮、磷养分转化以及团聚体结构变化提升土壤保肥与供肥能力是导致油菜种植土壤养分时效性差异的主要机制[17-18]。根据土壤养分时效性特点，团队设计了养分精准调控策略：前期通过合理施肥培育建立油菜强大的根群，后期控制化肥养分投入，发挥根系潜力充分利用土壤养分，促进花后油菜体内养分转移再利用，实现丰产稳产[19]；明确了油菜-水稻轮作周年秸秆还田的养分供应特征及土壤供肥保肥机制；提出了冬油菜后期“依靠土壤养分稳供促高效保稳产”的养分调控策略。

2　我国冬油菜精准高效施肥技术体系的建立

我国冬油菜生产中施肥的养分靶向不准、氮磷

钾养分用量大、中微量元素养分缺失或不足、施肥时期和位置不当、肥料利用率低等问题突出，严重制约了油菜产业绿色高产高质高效发展。在直播油菜养分精准调控原理的指导下，以精准养分种类和用量实现“氮磷钾硼镁全营养配合”，通过养分形态配比、施肥时期和施肥位置的精准匹配挖掘直播油菜根系潜力，实现“前促后稳”的理想调控目标。

2.1 冬油菜施肥的养分种类、配比及形态

团队研究明确了冬油菜施肥的养分种类、施用量、形态比例等关键技术参数。根据土壤养分特征和高产油菜对养分的需求规律，结合近5 000个田间试验和示范数据，确定了我国冬油菜需要通过施肥补充氮、磷、钾、硼和镁5种必需营养成分，部分区域还需要适当补充钙、硫和锌3种养分[20-22]；优化了油菜丰产的区域氮磷钾施肥比例，由原来的1∶0.5∶0.7调整为1∶(0.30～0.35)∶(0.3～0.4)[23]。提出了优化氮、磷和钾肥料形态方案，改变单一尿素、高浓度水溶性磷肥和水溶性钾肥为氮肥铵(或酰铵)硝比3∶1、水溶性磷肥与枸溶性磷肥1∶3配施、水溶性钾与枸溶性钾肥4∶1配比[14, 24]。

2.2 冬油菜主产区和县域尺度平均适宜肥料用量

团队在1 200多次大田试验基础上，基于肥料效应模型确定了我国冬油菜主产区平均产量2.5 t/hm^2(比目前平均单产高15%)条件下，适宜肥料用量平均为每公顷160 kg N、60 kg P_2O_5、70 kg K_2O、1.0 kg B和30 kg MgO，根据区域土壤、轮作制度、产量水平等因素进一步量化了5个典型主产区肥料适宜用量以及县域尺度精准肥料用量[23]。与区域习惯施肥相比，推荐施肥平均节肥10.2%，增产9.2%，氮、磷和钾肥料利用率分别提高6.7、7.3和9.2百分点。油菜区域适宜肥料用量成为农业农村部每年发布“油菜科学施肥指导意见”的重要支撑，高产(>3 t/hm^2)冬油菜氮磷钾养分推荐用量由2008年首次发布指导意见时的最高420 kg/hm^{2}下降到2020年的288 kg/hm^2，指导方案也由初期的全国统一推荐量转变为精确细化“分区定肥”推荐。团队研究量化了我国冬油菜主产区和县域尺度平均适宜肥料用量，显著降低了肥料养分投入量，提高油菜籽产量和肥料利用率。

2.3 冬油菜适宜施肥时期

我国农业科技工作者通过试验研究明确了冬油菜适宜施肥时期，创建了油菜苗期营养高光谱诊断预警预报及快速精准追肥技术。在“前促后稳”养分调控原理的基础上，提出了冬油菜“专用肥—基肥—追肥”或“缓控肥一次性施用”的施肥方案。明确了直播冬油菜适宜的氮肥施用时期为基肥和薹肥，运筹比例为4∶1；通过控释氮肥可以实现油菜化学氮肥的一次性施用[25]。基于不同田块土壤养分供应的差异和苗期由于气候因素导致的养分供应异常，建立了油菜苗期营养高光谱快速诊断与预警预报技术，利用采集的910条冠层光谱数据筛选出精确识别氮、磷、钾养分亏缺的10个特征光谱波段，建立了基于集成模型的冬油菜养分胁迫状态诊断模型，诊断精度达80.1%[26]。利用光谱参数RVI(764，657)与丰缺程度及推荐追肥量联动模型，及时指导精确追肥，与习惯盲目追施氮肥相比，氮肥追施量减少15.5%，产量提高8.3%[27]。

2.4 冬油菜精准施肥位置

团队研究揭示了肥料施于地表下10 cm左右能够显著增加油菜根长和生物量，进而提高菜籽产量[28]，结合肥料养分在土壤中的运移特点，确定了直播油菜适宜的施用方法和施肥位置，通过正位或侧深施肥(播种行侧8～10 cm)的方式将肥料施于土表下7～10 cm。农机企业利用该关键参数研发了油菜机械化生产配套的施肥铲，解决了直播油菜轻简化生产中肥料深施的问题。与肥料表面撒施相比，机械侧深施肥增产10.2%～23.8%，肥料利用率提高5～8百分点。团队探明了冬油菜精准的施肥位置，优化了肥料深施机械化关键参数并引导机械升级。

2.5 冬油菜绿色高产高效综合技术模式

我国农业科技工作者优化完善了施肥技术和肥料产品与栽培、植保、机械的技术融合，集成建立了以肥密协同、肥水耦合、施肥与控草防病互补等为主要内容，适合不同区域油菜生产的绿色高产高效综合技术模式8套。通过增加播种量进行适度密植，可减少15%～30%肥料投入，实现“以密省肥”和“以密增产”的双重目标[29-30]。构建的联合除草(化学除草、前期促壮苗与增密抑草、秸秆覆盖压草)技术可提高氮肥利用率5～12百分点、磷肥利用率6～8百分点[31]。通过抗旱及排渍的方式实现水肥协同，在相同产量水平下，开深沟排渍减少氮肥投入20%～25%。将轻简高效施肥技术和肥料产品与区域特色生产技术相融合，集成建立了包括针对南方渍害严重区域的“窄厢深沟稻草全量还田肥料一次深施油菜绿色高产高效综合技术模式”、针对劳动力少、机械化程度低的丘陵山区以及茬口衔接紧区域的“油菜免耕飞播稻草全量还田综合技术模式”等适合全

国主要油菜产区的区域油菜绿色高产高效综合技术模式18套，有效解决了施肥与其他农艺措施不匹配的问题，推动了轻简高效施肥技术在油菜绿色高产高效生产中的广泛应用。

3　油菜专用全营养配方肥创制与规模化应用

尽管市场上肥料供应种类很多，但缺少油菜专用肥料产品，导致农民选肥盲目性大、施肥技术与肥料产品脱节、施肥环节多等技术难落地的问题，研制“实用、好用和愿用”专用肥料产品是直播油菜轻简化生产的迫切需求，也是油菜轻简高效施肥技术落地的重要技术抓手。

3.1　制定冬油菜专用肥配方

我国油菜养分管理科技人员与技术推广人员制定了区域专用肥生产大配方与县域精准配肥方案相结合的油菜高效施肥配方。制定了区域尺度的油菜专用肥大配方5个和县域尺度的冬油菜专用肥配方34个，率先向全国发布，推动了油菜施肥的配方化、精准化和科学化[14]。指导引领优势和大型肥料企业如湖北宜施壮农业科技有限公司、新洋丰农业科技股份有限公司、湖北祥云(集团)化工股份有限公司、成都云图控股股份有限公司、河南心连心化学工业集团股份有限公司等按照区域大配方生产油菜专用肥，一些中小型肥料企业按县域配方就地生产专用肥或掺混配肥直供油菜种植专业合作社和种植大户，改变了肥料企业的生产理念。农业农村部自2020年起发布的“油菜科学施肥指导意见”已经将原来的养分推荐量转变为区域油菜专用肥推荐量，进一步引导肥料企业生产专用肥和指导农民科学施用专用肥。

3.2　研制油菜专用全营养配方肥

按照油菜氮磷钾硼镁全营养配合的养分调控原理和冬油菜“一基一追”施肥方案，根据区域氮磷钾肥适宜用量配方和养分形态配比原则，立足于肥料生产企业的现有加工设备，采用高塔喷浆或转鼓造粒工艺，我国肥料企业生产出油菜专用全营养配方肥，产品含有氮、磷、钾、硼、镁5种养分(部分区域产品还含有钙、硫、锌)，氮肥包括硝铵形态(部分产品含控释尿素)，满足不同区域的差异化需求：一袋肥料满足了油菜生长发育所有必需养分供给。

3.3　研制油菜专用缓(控)释肥

根据区域大配方原则，我国农业科技工作者研发生产了油菜专用缓释肥和专用控释尿素等系列长效肥料新产品。油菜专用缓释肥采用中微量元素与腐殖酸螯合技术、氮肥缓释长效技术、钙镁磷肥与硫酸镁添加技术、肥料转鼓造粒技术，具有肥料中的养分间无拮抗、养分释放长短互补、肥料养分供应与油菜需求同步、一次性施用前期不烧苗后期不脱肥等优点。油菜专用控释尿素采用植物油包膜方式实现了氮素控释期达80～100 d，与油菜氮素需求吻合，应用方式灵活[32]。新产品突破了一次性施肥可能造成油菜苗期肥害而后期养分不足的技术瓶颈问题，克服了油菜生育周期长而肥料养分(尤其是氮素养分)在田间保持时间短的矛盾。肥料投入成本低、施用轻简化，并在油菜生产中大面积应用，实现了一次基肥施用满足油菜全生育期(200 d以上)生长的营养需求。

3.4　技术及专用肥规模化应用

在国家相关政策的支持下，在农业农村部及各油菜主产省(市、区)农业生产主管部门的协调和组织下，冬油菜科学施肥技术及相应的专用肥产品得到大面积推广应用。油菜轻简高效施肥关键技术作为国家油菜产业技术体系绿色高产高效全程机械化关键技术的组成部分、油菜优势产区绿色高效生产的支撑技术、长江流域油菜轮作关键技术和农业农村部油菜生产关键技术与推荐产品，在全国油菜生产中得到大面积推广应用。经过10多年的推广应用，在全国范围内解决了油菜生产中1/4的田块因施肥不足导致减产和1/3的田块因施肥过量导致效益降低的问题。关键技术成果自2008年以来连续被农业农村部列为“油菜科学施肥指导意见”的主要推广技术在全国应用。综合技术模式推广应用以来，我国冬油菜氮磷钾施肥总量由2008年的平均324 kg/hm^{2}下降到2020年的288 kg/hm^2(下降11.1%)，肥料利用率由32.4%增至40.3%，油菜籽产量提高8.1%，纯收益增加17.8%，在化肥减量、资源高效利用、菜籽增收、减少用工、节本增效上效果显著，有力支撑了油菜产业的绿色高质高效发展。

4　展　望

得益于国家的科技政策和产业政策支持及全国相关同行的通力协作，经过20年的联合攻关，我国油菜精准高效施肥理论和技术均得到了长足的进步，为油菜丰产高效绿色发展提供了技术和物质支撑。随着国家油料作物种植政策的加强和农业相关技术

的进步，我国冬油菜生产将面临新的机遇和挑战，也会对油菜施肥技术提出新的要求。我们从技术需求的角度提出如下建议。

4.1 南方冬闲稻田种植油菜的养分管理特殊性

提高国产食用植物油自给率是我国当前农业生产的重大政策，其中有效利用冬闲田扩种油菜是其中的关键。我国能够利用的冬闲田多数分布在三熟制区域，当前冬季种植油菜会挤占双季稻的生产时间，只能发展短生育期油菜，而生育期短往往伴随着产量不高造成农户收益下降进而导致种植积极性不高，因此，提高短生育期油菜的单产水平是开发利用冬闲田的前提条件。目前我国已经有一批170～190 d成熟的短生育期油菜品种，田间产量潜力可达2.3～2.5 t/hm^2，在大田生产中既做到生育期短又能获得丰产稳产是冬闲田扩种油菜政策落实的关键。就养分管理技术而言，短生育期冬油菜的生长基本没有明显的停滞期，养分的吸收特征与一般冬油菜不同，同时由于其分布区域一年三熟且雨热强度大而导致土壤中的有效养分含量低及缺素种类多，其施肥的养分种类和数量、养分间的比例及肥料运筹方式均会与现有的技术不同。目前的研究结果表明，短生育期油菜的丰产稳产更加依赖施用肥料，一旦品种确定后养分调控成为最容易实施和最有效的措施。团队初步提出了短生育期油菜的施肥策略为“前期重肥促长促发保高产、中期调肥抗逆抗灾保稳产、后期控肥促早熟促适机”。相关研究已启动，国家油菜产业技术体系及南方各油菜主产省有关部门正在组织科技人员在较大范围内边研究边示范应用。

4.2 养分高效油菜品种的选育应用

随着分子育种技术（基因工程育种技术）的快速发展和日益成熟，尤其是我国近期在分子育种领域技术端与产业端相结合的政策开始推进，包括分子标记辅助选择、转基因、基因编辑等分子生物学技术将会在育种中广泛应用。目前已经发现多种植物养分高效吸收与运转和利用的基因[33]，养分高效的油菜品种将会在生产中出现，这类品种的应用可能与传统的养分管理与施肥理论技术不相适应。因此，一要继续加强油菜养分高效的分子生物学研究，挖掘可用的有针对性基因，目前主要是氮、磷、钾、硼等容易成为油菜产量和品种形成限制因子的高效吸收基因及各种必需营养元素的高效运转和利用基因，并将这些高效基因用于高产优质油菜品种中，让其发挥作用；二要研究养分高效油菜品种的科学施肥技术。

4.3 与现代农业发展配套的新型高效施肥技术研发

我国农业现代化进程加快，规模化种植发展迅速，农业机械化普及率不断提高，智慧农业研究与应用成为热点[34]。施肥技术现代化是农业现代化的重要组成部分，油菜耕种施喷一体机的应用为根区分层集中施肥提供了条件，相应地就需要有能适应机械的油菜专用肥（如颗粒均匀、不吸潮、机械强度较大，上层肥以氮硼为主含有一定量的磷钾镁、下层肥以磷钾为主含有一定量的硼镁）；而载质量大的农用无人机应用为生长过程中依据作物长势而施肥成为可能；加上多光谱、高光谱遥感等诊断技术的发展，快速无损监测生长过程和诊断植株养分丰缺状况等技术将在作物生长预警预报中广泛应用，加强相关研究、建立可靠可用的预测模型及研究相应的机载变量追肥方案和新型高效肥成为今后的一个研究方向。

4.4 油菜多功能利用的配套施肥技术研发

油菜除主要作为油用外，作为油菜薹（菜用）、青饲料（饲用）、观花旅游（花用）、蜂蜜蜜源（蜜用）、绿肥及培肥地力（肥用）等功能得到拓展开发，并形成了一定的规模，随着人民对美好生活的追求，油菜的多功能用途将会得到更广泛的重视[35]。目前轻简高效施肥主要针对的是油菜油用功能，即尽量获得高的油菜籽产量和产油量，而针对油菜其他功能的科学施肥技术较少涉及，生产上基本上是参照油用油菜施肥模式，往往造成油菜的其他功能得不到充分利用，这也是今后油菜施肥需要重点研究的内容。

4.5 针对气候多变的应变式抗灾养分管理技术研发

近年来冬油菜种植季节里气候逆境频繁发生，例如播种及苗期的干旱或涝渍、冬季的冻害、春季的倒春寒和冷害、花期的渍害、关键生育期的阴雨寡照、成熟期的高温，这些自然灾害严重影响油菜生长发育而导致减产，而施肥往往是各种灾害发生后重要的救灾措施。不同的气候灾害对油菜生长发育的影响机制不同，不同灾害发生后的营养救灾措施应随之变化，但目前应对各种气候灾害的施肥补偿措施基本相同，如一般都是建议施用尿素。同时现代气象预报技术的发展为提前预测气候变化提供了条件，根据可能会发生的灾害有针对性地提前采取相

应的措施可以更有效地抵御灾害带来的危害，将灾害带来的损失降到最低，在灾害发生后能使受害作物快速恢复正常生长。目前已经开展了一些应对气象灾害的养分管理措施研究，例如，如果预测会出现冷害和冻害可以提前加强钾素营养即比一般年份加大钾肥用量；如果预测会出现干旱则需要增加磷肥和硼肥用量；预测到生育期阴雨寡照天气较多时则需要加大氮肥的用量；预测到成熟期会遇到高温则可以通过提前喷施钾肥和镁肥促进籽粒饱满。尽管目前开展了一些研究，但是总体上，气候逆境与养分互作机制研究不深入、相应的灾前预防和灾后补救施肥技术不系统，突发性逆境条件下油菜应变施肥技术与产品的研究与应用仍需要加强。

后记：华中农业大学养分综合管理团队是在王运华先生的亲切关怀和直接指导下建立的，团队20年的发展和在油菜施肥技术研究上取得的成果与先生的支持和帮助分不开，特撰此文感恩和缅怀恩师王运华先生。

参考文献 References

[1] 殷艳，尹亮，张学昆，等.我国油菜产业高质量发展现状和对策[J].中国农业科技导报，2021，23(8)：1-7.YIN Y，YIN L，ZHANG X K，et al.Status and countermeasure of the high-quality development of rapeseed industry in China[J].Journal of agricultural science and technology，2021，23(8)：1-7 (in Chinese with English abstract).

[2] 张福锁.科学认识化肥的作用[J].中国农技推广，2017，33(1)：16-19.ZHANG F S.Scientific understanding of the role of chemical fertilizer[J].China agricultural technology extension，2017，33(1)：16-19 (in Chinese).

[3] WANG Y，LIU T，LI X K，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.

[4] 徐洋，杨帆，张卫峰，等.2014—2016年我国种植业化肥施用状况及问题[J].植物营养与肥料学报，2019，25(1)：11-21.XU Y，YANG F，ZHANG W F，et al.Status and problems of chemical fertilizer application in crop plantations of China from 2014 to 2016[J].Journal of plant nutrition and fertilizers，2019，25(1)：11-21 (in Chinese with English abstract).

[5] 唐晶，刘成，喻璨聪，等.我国油菜生产中化肥投入的经济分析与评价[J].中国油料作物学报，2023，45(4)：654-663.TANG J，LIU C，YU C C，et al.Economic analysis and evaluation of chemical fertilizer input in rape production in China[J].Chinese journal of oil crop sciences，2023，45(4)：654-663 (in Chinese with English abstract).

[6] 陆志峰，任涛，鲁剑巍.我国冬油菜种植区土壤有效镁状况与油菜施镁效果[J].华中农业大学学报，2021，40(2)：17-23.LU Z F，REN T，LU J W.Soil available magnesium status and effects of magnesium application on rapeseed yield in main producing area of China[J].Journal of Huazhong Agricultural University，2021，40(2)：17-23 (in Chinese with English abstract).

[7] 张智，任意，鲁剑巍，等.长江中游农田土壤微量养分空间分布特征[J].土壤学报，2016，53(6)：1489-1496.ZHANG Z，REN Y，LU J W，et al.Spatial distribution of micronutrients in farmland soils in the mid-reaches of the Yangtze River[J].Acta pedologica sinica，2016，53(6)：1489-1496 (in Chinese with English abstract).

[8] 任涛，郭丽璇，张丽梅，等.我国冬油菜典型种植区域土壤养分现状分析[J].中国农业科学，2020，53(8)：1606-1616.REN T，GUO L X，ZHANG L M，et al.Soil nutrient status of oilseed rape cultivated soil in typical winter oilseed rape production regions in China[J].Scientia agricultura sinica，2020，53(8)：1606-1616 (in Chinese with English abstract).

[9] 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 (in Chinese with English abstract).

[10] 耿国涛，陆志峰，张洋洋，等.硼肥用量对双低油菜籽产量和品质的影响[J].植物营养与肥料学报，2023，29(5)：924-934.GENG G T，LU Z F，ZHANG Y Y，et al.Effects of boron application rate on double-low rapeseed yield and quality[J].Journal of plant nutrition and fertilizers，2023，29(5)：924-934 (in Chinese with English abstract).

[11] 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 (in Chinese with English abstract).

[12] LIU T，REN T，WHITE P J，et al.Storage nitrogen co-ordinates leaf expansion and photosynthetic capacity in winter oilseed rape[J].Journal of experimental botany，2018，69(12)：2995-3007.

[13] HU W S，LU Z F，GU H H，et al.Potassium availability influences the mesophyll structure to coordinate the conductance of CO_2 and H_2O during leaf expansion[J].Plant，cell & environment，2022，45(10)：2987-3000.

[14] 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 fertil-

ization status and technology of rapeseed in China[J].Chinese journal of oil crop sciences,2018,40(5):712-720 (in Chinese with English abstract).

[15] ZHU D D,ZHANG J L,WANG Z,et al.Soil available potassium affected by rice straw incorporation and potassium fertilizer application under a rice-oilseed rape rotation system[J].Soil use and management,2019,35(3):503-510.

[16] REN T,BU R Y,LIAO S P,et al.Differences in soil nitrogen transformation and the related seed yield of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) under paddy-upland and continuous upland rotations[J].Soil and tillage research,2019,192:206-214.

[17] BU R Y,REN T,LEI M J,et al.Tillage and straw-returning practices effect on soil dissolved organic matter,aggregate fraction and bacteria community under rice-rice-rapeseed rotation system[J/OL].Agriculture,ecosystems & environment,2020,287: 106681 [2023-10-12]. https://doi. org/10.1016/j.agee.2019.106681.

[18] 张磊,张维乐,鲁剑巍,等.秸秆还田条件下不同供钾能力土壤水稻、油菜、小麦钾肥减量研究[J].中国农业科学,2017,50(19):3745-3756.ZHANG L,ZHANG W L,LU J W,et al. Study of optimum potassium reducing rate of rice,wheat and oilseed rape under different soil K supply levels with straw incorporation[J].Scientia agricultura sinica,2017,50(19):3745-3756 (in Chinese with English abstract).

[19] 任涛,鲁剑巍.中国冬油菜氮素养分管理策略[J].中国农业科学,2016,49(18):3506-3521.REN T,LU J W.Integrated nitrogen management strategy for winter oilseed rape(*Brassica napus* L.) in China[J].Scientia agricultura sinica,2016,49(18):3506-3521 (in Chinese with English abstract).

[20] REN T,ZOU J A,LU J W,et al.On-farm trials of optimal fertilizer recommendations for the maintenance of high seed yields in winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) production [J].Soil science and plant nutrition,2015,61(3):528-540.

[21] WANG Y,LI J F,GAO X Z,et al.Winter oilseed rape productivity and nutritional quality responses to zinc fertilization[J]. Agronomy journal,2014,106(4):1349-1357.

[22] ZHANG Z,LU J W,CONG R H,et al.Evaluating agroclimatic constraints and yield gaps for winter oilseed rape (*Brassica napus* L.):a case study[J/OL].Scientific reports,2017,7:7852 [2023-10-12].https://doi.org/10.1038/s41598-017-08164-x.

[23] LI H,LU J W,REN T,et al.Nutrient efficiency of winter oilseed rape in an intensive cropping system:a regional analysis [J].Pedosphere,2017,27(2):364-370.

[24] REN T,ZOU J,WANG Y,et al.Estimating nutrient requirements for winter oilseed rape based on QUEFTS analysis[J]. The journal of agricultural science,2016,154(3):425-437.

[25] 张亚伟,刘秋霞,朱丹丹,等.油菜专用控释尿素用量对冬油菜产量和氮素吸收的影响[J].中国农业科学,2018,51(1):139-148.ZHANG Y W,LIU Q X,ZHU D D,et al.Effects of different special controlled release urea dosages on yield and nitrogen uptake of oilseed rape[J]. Scientia agricultura sinica,2018,51(1):139-148 (in Chinese with English abstract).

[26] LIU S S,YANG X,GUAN Q F,et al.An ensemble modeling framework for distinguishing nitrogen,phosphorous and potassium deficiencies in winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) using hyperspectral data[J/OL].Remote sensing,2020,12(24):4060[2023-10-12].https://doi.org/10.3390/rs12244060.

[27] LIU S S,BAI X H,ZHU G G,et al.Remote estimation of leaf nitrogen concentration in winter oilseed rape across growth stages and seasons by correcting for the canopy structural effect [J/OL]. Remote sensing of environment, 2023, 284: 113348 [2023-10-12].https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113348.

[28] SU W, LIU B, LIU X W, et al. Effect of depth of fertilizer banded-placement on growth,nutrient uptake and yield of oilseed rape (*Brassica napus* L.)[J].European journal of agronomy,2015,62:38-45.

[29] CONG R H,ZHONG Z J,ZHANG Z,et al.A synthesis-analysis of winter oilseed rape yield response to planting density under intensive cropping system in Yangtze River Basin[J]. Agronomy journal,2023,115(2):503-511.

[30] 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.

[31] WANG L,ZHU D D,LI X K,et al.Six years of different fertilization regimes shift weed community and competition with winter oilseed rape[J/OL].Field crops research,2023,296:108925 [2023-10-12].https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.108925.

[32] LIU Q X,REN T,ZHANG Y W,et al.Evaluating the application of controlled release urea for oilseed rape on *Brassica napus* in a regional scale:the optimal usage,yield and nitrogen use efficiency responses[J/OL].Industrial crops and products,2019, 140: 111560[2023-10-12]. https://doi. org/10.1016/j.indcrop.2019.111560.

[33] 徐国华.提高农作物养分利用效率的基础和应用研究[J].植物生理学报,2016,52(12):1761-1763.XU G H.Basic and applied research on improving crop nutrient utilization efficiency [J]. Plant physiology journal, 2016, 52(12): 1761-1763 (in Chinese).

[34] 赵春江.农业知识智能服务技术综述[J].智慧农业(中英文),2023,5(2):126-148.ZHAO C J.Agricultural knowledge intelligent service technology:a review[J].Smart agriculture,2023,5(2):126-148 (in Chinese with English abstract).

[35] 王汉中.以新需求为导向的油菜产业发展战略[J].中国油料作物学报,2018,40(5):613-617.WANG H Z.New-demand oriented oilseed rape industry developing strategy[J].Chinese journal of oil crop sciences,2018,40(5):613-617 (in Chinese with English abstract).

Strategy of precisely controlling nutrient and system of efficient fertilization technology for winter rapeseed in China

LU Jianwei, REN Tao, LI Xiaokun, CONG Rihuan, LU Zhifeng, ZHANG Yangyang, LIU Shishi, LIAO Shipeng, ZHU Jun

College of Resources and Environment/Microelement Research Center, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, *China*

Abstract　Winter rapeseed (*Brassica napus* L.) is an important oil crop in China and a major winter rotation crop in southern China. Developing rapeseed production is of great strategic significance for ensuring the safe supply of food and oil in China. Since the beginning of the 21st century, the previous fertilization technology is no longer suitable for new production models due to the shift from transplanting rapeseed to direct seeding and light planting. The development of the rapeseed industry has put forward new requirements for the theory and technology of fertilization. This article summarized the progress in the field of rapeseed fertilization technology in China in the past 20 years. The workers from agricultural science and technology in China proposed a precise nutrient regulation strategy for winter rapeseed through collaborative efforts, which involves the combination of nitrogen, phosphorus, potassium, boron, and magnesium, particularly in the promotion of nutrients at the early stage of growth and stabilization of nutrients at the later stages of growth. A nutrient regulation method including "precise fertilization to strengthen seedlings and promote high yield" at the early stage and "relying on stable soil nutrient supply to promote efficient and stable yield" at the later stage for winter rapeseed was established. The "five precision" rapeseed efficient fertilization technology with "precise source, precise ratio, precise rate, precise time, and precise place" as the core was innovated. A series of new fertilizer products including balanced fertilizers with a specialized formula of required nutrients, slow-release fertilizers, and controlled-release urea were developed. A light, simple, and efficient fertilization model was established, optimized and applied at large-scale, supporting the green, high-quality, and efficient development of the rapeseed industry. In response to the new opportunities and challenges faced by winter rapeseed production in China, prospects including strengthening efficient fertilization techniques for short-growth-period rapeseed in southern China, developing fertilization techniques suitable for the multifunctional utilization of rapeseed, exploring nutrient management techniques to cope with climate change, further strengthening the research and development of new high-efficiency specialized fertilizer products and innovation in fertilization technology matching with the development of modern agriculture, and attaching importance to the breeding and application of rapeseed varieties with high nutrient efficiency are proposed from the perspective of fertilization technology.

Keywords　direct seeding of winter rapeseed; nutrient regulation; high nutrient efficiency; precision fertilization; light and simple planting

（责任编辑：张志钰）