

中国马铃薯化肥农药减施的现状与挑战

仲乃琴^{1,4*}, 刘宁^{1*}, 赵盼¹, 蔡冬清², 宋双伟^{1,3}, 钞亚鹏¹

1. 中国科学院微生物研究所, 植物基因组学国家重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院合肥物质科学研究院, 合肥 230031;

3. 云南农业大学植物保护学院, 昆明 650201;

4. 宁夏大学农学院, 银川 750021

* 联系人, E-mail: nqzhong@im.ac.cn; liuning@im.ac.cn

2017-12-18 收稿, 2018-01-31 修回, 2018-02-02 接受, 2018-06-05 网络版发表

中国科学院科技服务网络计划(STS 计划)重点项目(KFJ-STZ-ZDTP-027, KFJ-FP-23)和国家自然科学基金(31772109, 31601622)资助

摘要 马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)在维系我国粮食安全过程中起着至关重要的作用, 然而当前生产中过度依赖化学肥料和农药, 不仅导致资源浪费和生产成本增加, 而且引发耕地肥力下降、土壤生态退化、农田面源污染、肥药残留超标等严重的生态环境和食品安全问题, 致使马铃薯产业的可持续发展受到限制. 针对我国马铃薯种植中化肥农药使用的现状, 本文详细剖析了肥药使用过量、利用率低下的原因, 介绍了国内外减施增效技术的研究进展和发展趋势, 并借鉴先进国家的有益经验, 提出了加快制定肥药限量国家标准、研发肥料农药高效利用及替代技术、研制智能精准控施机械以及开展区域性技术集成研究等具体应对策略和产业发展建议.

关键词 马铃薯, 化肥农药减施增效, 化肥农药利用率

人口持续增加、耕地面积下降、存在气候变化风险、抵御自然灾害能力不足、科技增产愈发困难等因素孕育着我国潜在的粮食安全风险^[1,2]. 三大主粮作物中, 水稻(*Oryza sativa*)和小麦(*Triticum aestivum*)的历年播种面积呈下降趋势, 单位面积产量增幅趋缓, 甚至停滞(图1), 我国粮食增产压力持续加大, 如何维护未来粮食安全成为一项严峻的战略性任务^[3].

马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)作为我国的第四大作物, 是增粮的最大潜力所在, 在保障国家粮食安全、缓解资源环境压力、实现农业可持续发展等方面发挥着重要作用^[4]. 在农业部“马铃薯主粮化”政策推动下, 2016年, 我国马铃薯种植面积发展到近600万 hm^2 , 总产量超1亿t, 分别约占世界的1/3和1/4^[5]. 马铃薯是一种特别高产的作物, 发达国家单位面积产量约45 t hm^{-2} (图2(a)). 然而我国马铃薯生产技术

相对落后, 单产水平仅为16.9 t hm^{-2} 左右, 成为限制产业发展的一项“短板”(表1). 以目前马铃薯种植面积概算, 若单产能达到国际先进水平, 则全国至少可额外增加9000万 t a^{-1} 的鲜薯供应. 同时马铃薯具有适应性广、耐贫瘠和干旱、喜冷凉气候等特点, 可以在耕地质量相对较差的边际农田和高海拔山区种植, 从而在不与主粮作物争地的条件下, 有效提高我国粮食供给^[6]. 由此可见, 马铃薯的种植面积和单产均具有极大提升空间, 是未来维系我国粮食安全的关键产业之一.

1 中国马铃薯化肥农药的使用现状

在诸多影响作物产量的因素中, 施用化学肥料是最快、最有效、最重要的增产措施, 而化学农药作为防治病虫害侵袭、保护作物的主要手段, 也在农

引用格式: 仲乃琴, 刘宁, 赵盼, 等. 中国马铃薯化肥农药减施的现状与挑战. 科学通报, 2018, 63: 1693–1702

Zhong N Q, Liu N, Zhao P, et al. Current status and challenges for potato chemical fertilizer & pesticide reductions in China (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 63: 1693–1702, doi: 10.1360/N972017-01325

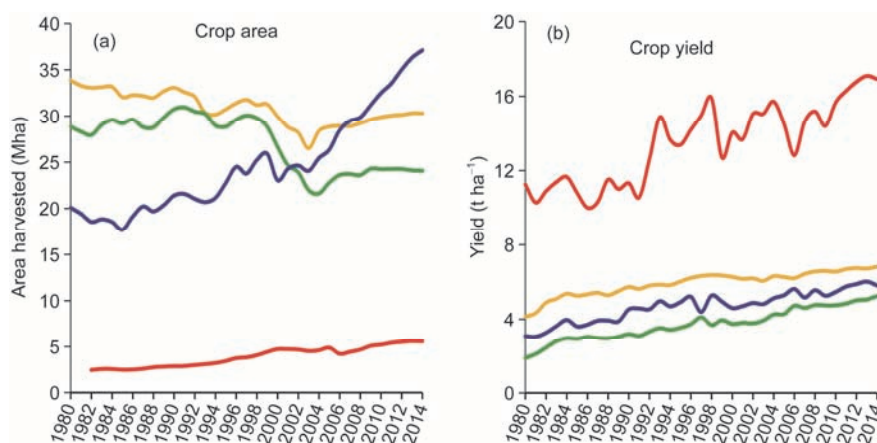


图1 我国三大主粮作物与马铃薯历年播种面积(a)和产量(b)的变化趋势. 黄、绿、蓝和红色曲线分别代表水稻、小麦、玉米(*Zea mays*)和马铃薯(根据FAO数据绘制)

Figure 1 Trends in annual area harvested and yield of major grain crops and potato in recent years. Yellow, green, blue and red represent rice, wheat, maize and potato, respectively (data source: FAO)

表1 2014年三大主粮作物及马铃薯单产与世界平均水平的对比^{a)}

Table 1 Yield comparisons of three major grain crops and potato with the world average level

	中国平均 (kg ha ⁻¹)	世界平均 (kg ha ⁻¹)	与世界水平的 差距(%)
马铃薯	16920.3	19985.1	-15.3
水稻	6815.2	4556.9	49.6
小麦	5243.5	3307.4	58.5
玉米	5808.9	5615.7	3.4

a) 根据FAO统计数据测算

58%, 80%~90%的农业病虫害依赖化学农药防治^[7-9]. 目前尚未见化肥农药对我国马铃薯增产影响的具体调查数据, 但化肥和农药是马铃薯产量的决定性因素已经成为业内共识.

我国马铃薯生产过度依赖化学肥料和农药以及肥料和农药不合理使用的现象非常普遍^[10]. 从全国来看, 2014年中国的化肥使用总量(折纯)为5974.7万t, 占全球化肥施用量的30.9%, 农药使用量约180.7万t, 约占世界总用量的1/2. 然而中国耕地面积仅占世界的8.6%, 意味着我国化肥农药施用强度显著高于世界平均水平. 根据联合国粮食与农业组织(Food and Agriculture Organization, FAO)统计, 2014年, 中国耕

业生产中起着不可替代的作用. 依据不同学者的研究, 化肥在我国粮食作物增产中的贡献率达21%~

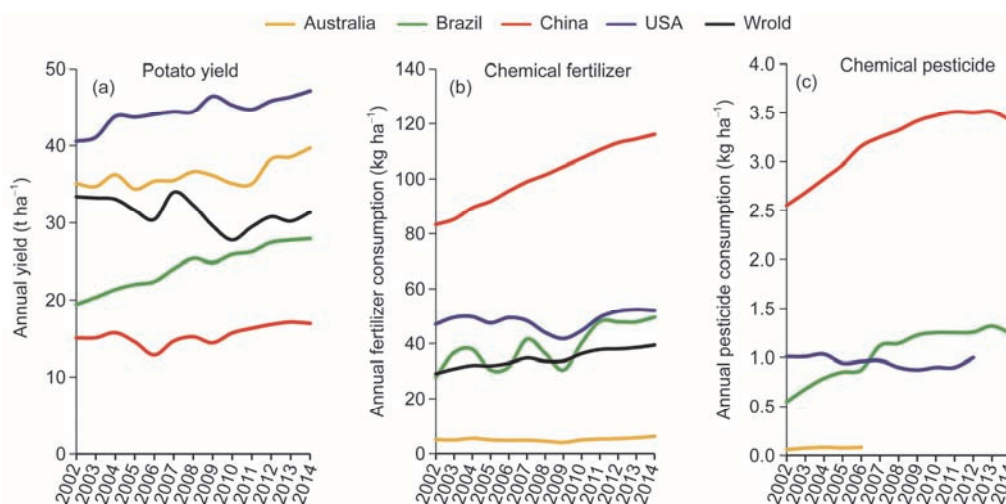


图2 世界主要马铃薯生产国的单位面积产量(a)、化学肥料(b)和农药(c)使用强度的年度变化情况(根据FAO统计资料绘制)

Figure 2 Annual changes in potato yield (a) and chemical fertilizer (b) pesticide (c) consumption of major potato producing countries (data source: FAO)

地单位面积化肥使用量(折纯)为 116.1 kg ha^{-1} , 分别是美国和世界平均水平的2.2和2.9倍(图2(b)); 2014年农药用量达到峰值, 使用强度约为美国2012年水平的3.4倍(图2(c)). 若以上述肥药强度粗略估算, 我国在马铃薯生产中每年至少需要消耗65.5万t化肥和1.9万t农药. 然而实际生产中, 马铃薯作为一种化肥农药密集型作物, 肥药过量问题尤为突出. 据调查, 在北方集约化规模化种植区, 马铃薯企业的化肥用量普遍在 $160\sim 240 \text{ kg 亩}^{-1}$ (1亩=0.067 ha), 农药7~10次/生长期. 超量使用肥药在提高马铃薯产量的同时, 也导致严重的流失问题, 引发耕地酸化和肥力下降、土壤生态退化、药害严重等经济、生态环境难题. 南方主产区由于坡耕地较多、气候温暖、降雨量大、晚疫病易流行等特点, 化肥和农药极易通过地表径流、土壤侵蚀、淋溶、蒸发等途径迁移至周边环境, 导致养分无效流失、水体富营养化和农药残留超标等农田面源污染难题. 环保机构的调查数据显示, 2.5亿亩耕地已受到农药污染, 约占全国耕地总面积的15%, 对532条河流的抽样检测也发现, 82%的河流被污染, 其中44%的污染是农业生产所致^[11].

我国肥药利用效率远低于欧美发达国家是导致过量使用的关键原因之一^[12]. 经农业部宏观测算, 2015年中国粮食作物的化肥和农药利用率分别为35.2%和36.6%^[13], 本研究组2016年在宁夏利用 ^{15}N 示踪技术测定表明, 当地马铃薯氮肥(尿素)利用率约为20.5%, 而美国粮食作物氮肥利用率约为50%, 欧洲主要国家粮食作物利用率大体在65%^[14], 均显著高于我国. 考虑到我国马铃薯产业现状及与农业先进国家间的巨大差距, 化肥农药减施行动已势在必行.

2 国外马铃薯化肥农药的减施现状

化肥和农药对于提升马铃薯产量发挥着重要作用, 联合国粮食与农业组织从宏观上估算两者在作物增产过程中的贡献率为40%~60%. 为了提高作物产量, 欧美发达国家在农业生产中化肥和农药的投入量曾有过飞速增长, 引发了严重的环境污染、生态失衡和边际递效应递减问题. 20世纪70~80年代始, 各国针对两者使用过量的现状, 相继提出了化肥农药减量、提高利用效率、生态环境并重、合理费效比等可持续发展的农业新理念, 并以此指导农业生产, 取得了巨大成就. 欧盟国家在氮磷用量分别下降了30%和50%的情况下实现了粮食稳产, 美国在化肥农

药零增长条件下, 粮食产量持续增加^[15].

发达国家减施增效的主要调控措施包括: (i) 制订肥药限量标准和科学规程, 引导种植者合理使用. 20世纪90年代初, 欧盟正式通过相关法规(Council Regulation 315/93/EEC), 明确规定了包括硝酸盐在内的10类农田化学污染物的限量标准及其测量方法, 控制肥料使用量. 比利时、荷兰等国进一步将肥料、土壤改良剂、污水污泥用量等纳入政府监管范围, 对施用时间、用量上限等用肥措施做出明确规定, 实现对肥料种类、用量和使用频率的全程监管. 配方施肥技术在美国普及率已经达到80%以上^[16], 以“4R Principles”为基础开发的多个专家系统能为各州农民合理施肥提供决策依据, 以实现化肥控量使用^[17]. 英国农业部门出版了《推荐施肥技术手册》, 对肥料使用进行分区和分类指导. 在农药方面, 发达国家对农药的生产、登记和使用均有严格的法律规定, 并出台了农药残留标准, 严格控制农药用量. 1976年, 欧盟颁布了43种农药活性成分在农产品的最大残留标准, 其核心目标就是通过减量使用, 以减轻残留导致的环境污染^[18]. (ii) 使用高效新型肥料和高效低毒农药. 美国、德国、日本、加拿大等发达国家陆续推出尿甲醛型、包膜型、脲酶抑制型等系列缓释肥, 实现养分释放与作物营养需求规律相匹配, 有效提高肥料利用率、降低用量, 促进作物增产^[19~21]. 以微胶囊为代表的农药新技术能有效控制释放速率、提高利用率, 在农药减量中发挥了关键作用^[22~24]. (iii) 普及化肥农药绿色替代技术. 发达国家通常将生物方法和产品作为替代传统化学肥药的首选, 其中微生物菌肥产品和有机肥是国外绿色替代产品的研究热点之一. 美国、澳大利亚等国利用固氮菌(*Azotobacter* sp.)、解磷菌等有益菌开发出微生物菌肥, 广泛用于农业生产, 表现出良好的改良土壤、促进生长以及增产5%~30%的效果^[25]. 秸秆还田是保持农业持续性的关键技术, 能在降低化肥用量中发挥重要作用. 据美国农业部统计, 全美年生产作物秸秆4.5亿t, 其中68%的秸秆实现直接还田, 减少了肥料的使用, 有效弥补农田土壤有机质缺失, 保障了耕地综合产能的稳步提升^[26]. 农药替代则是通过使用阿维菌素、苏云金杆菌(*Bacillus thuringiensis*)、除虫菊素、枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)等环境友好型生物农药, 实现化学农药的部分替代, 大幅降低农药的使用量^[27]. (iv) 推广智能化农机, 实现精准施肥

给药. 使用高效自动化智能机械, 实现精准施药施肥是一项技术性强、影响因子多的复杂系统工程, 发达国家多为农场化经营, 在此方面具有较为丰富的经验. 其中, 水肥一体化技术在发达国家农业中应用最为普遍, 美国、以色列、日本等国家率先研发和使用智能喷灌系统, 实现水肥一体化使用, 取得明显的节水、增产、减肥效果, 减施达40%以上^[28]. 发达国家基本普及了大型高杆喷雾设备、无人机(车)或大型飞机喷洒, 施药规模大, 且由专业技术人员操作, 因此农药利率较高, 达到50%以上^[29,30].

3 中国马铃薯化肥农药的减施现状

在宏观政策层面, 中国政府已经将“减施增效”确定为国家战略, 明确提出肥料农药减量20%的总体目标. 2016年中央农村工作会议和全国农业工作会议提出“转方式、调结构、绿色发展、节本增效、质量安全”等农业供给侧结构性改革的基本要求, 为我国农业指明了发展方向和路径. 近2年, 我国化肥农药减施增效政策相继出台, 农业部发布了《到2020年化肥使用量零增长行动方案》和《到2020年农药使用量零增长行动方案》, 科技部推出“马铃薯化肥农药减施技术集成研究与示范”试点专项, 支持对马铃薯“两减”技术的基础和应用研究, 推进化肥农药减施工作. 然而与先进国家相比, 我国的肥药减施意识较为薄弱, 基础理论研究较为匮乏, 核心技术储备明显不足. 在切实降低肥料和农药用量的条件下, 如何实现整个马铃薯产业的提质增效, 是当前农业领域面临的一项重大科学任务.

在减施技术层面, 我国科研机构也开展了大量的研究工作, 引进、吸收和消化国外技术, 并通过自主创新, 取得了一定进展. (i) 在肥料减施方面, 尹洪斌和石元亮^[31]、武志杰和周健民^[32]研发了多种脲酶抑制剂型、包膜型缓释肥料, 通过抑制化肥降解速率, 有效提高了肥料的利用效率. 吴正岩研究组^[33,34]以天然纳米黏土为材料, 研制出控失肥料, 主要通过减少肥料淋溶损失, 提高利用效率. 仲乃琴研究组^[35]也利用微生物代谢物为核心成分, 研制出马铃薯专用肥料增效剂, 在宁夏、内蒙古等地使用, 取得基肥减量20%、马铃薯不减产的良好效果. 其他研究团队也进行了大量有益探索, 研发出多种缓控释化肥、马铃薯专用肥、生物菌肥、肥药兼用肥等新产品, 可以有效减少化肥施用量, 提高产量. 李浩然和孟庆

佳^[36]、孙宁科和索东让^[37]研究发现, 将有机肥、农家肥和无机化学肥料混合施用, 可以改善土壤性状和肥力, 减少化肥的施用, 增强保肥性能. (ii) 在农药减施方面, 我国科研人员在马铃薯常见病虫害的发生规律及防治策略研究方面都取得了重要突破. 以徐建飞和金黎平^[38]、王一航研究组^[39]为代表的多个育种团队选育出中薯、陇薯、青薯等不同系列的抗病马铃薯新品种, 提高作物自身抗病性, 减少农药的使用量. 宋宝安研究组^[40,41]创制出我国第一个自主知识产权高效低毒生物源农药毒氟磷, 赵小明和杜显光^[42]开发出寡糖生物农药及谭红等人^[43]研制的S-诱抗素, 都是通过提高作物自身的抗病性, 达到减少农药使用的效果, 上述产品部分替代了马铃薯晚疫病防治中的农药使用^[44]. 植物提取物(如苦皮藤素、杜仲皮蛋白等)等生物农药, 在病害防控中也表现出良好的效果, 一定程度上替代了化学农药^[45-47]. 有机硅、表面活性剂等增效农药助剂配合传统化学农药使用, 对减少使用量、提高防效也起到了重要作用^[48]. 此外, 农艺措施、病害预警预报、物理诱虫等技术的应用, 也取得了较好的杀灭病虫害的效果, 有助于农药减量目标的实现. (iii) 在肥药机具方面, 肥料深施技术和作业机械是研究重点之一, 基肥、种肥和追肥的深施较传统方法, 能减少化肥随地表径流、挥发等损失, 从而显著提高肥料利用率. 罗锡文研究组^[49,50]对同步开沟起垄精量直播技术进行了深入研究, 并首先试制出相应的深施机具, 取得较好的节肥增产效果. 近几年, 安龙哲^[51]、李兵等人^[52]也研制出适合中国国情的小型深施肥机械, 能显著降低化肥用量, 增产增收效果显著. 高效喷雾技术因其对目标覆盖率高、雾滴均匀性好, 是近些年较为流行的施药装备发展方向. 闻建龙等人^[53]设计使用了普通压力雾化喷头、采用环状感应电极, 提高了雾滴的均匀度, 贾卫东等人^[54]针对德国ST110-01喷头, 升级了双平板感应式充电装置, 能有效提高叶片背面的雾滴密度, 增强农药附着力, 提高农药利用率. 自动对靶喷雾、超低量喷雾、喷雾系统压力自调控、喷杆自平衡和变量喷施等技术, 也在高效精准施药、节本增效过程中发挥了重要作用. 近10年来, 我国马铃薯减施增效技术取得了长足的进步, 但在智能程度、自动化水平、技术效果、使用成本等方面仍与欧美马铃薯生产强国存在明显差距.

在模式创建层面, 我国“两减”措施以“单打独斗”

为主,多学科和多技术交叉、分地区/目标的技术模式较为因乏。中国科学院微生物研究所仲乃琴研究组^[35,55]在宁夏、内蒙古、黑龙江等省区,通过将多项化肥农药减施新技术与传统马铃薯栽培手段结合,进行了部分探索,初步建立起本区的马铃薯减施增效技术模式。然而就全国范围而言,适宜不同气候类型、地域条件、耕作制度等的产区性马铃薯肥药减施技术体系仍然存在空白,这也是导致我国马铃薯化肥农药利用效率偏低、使用量居高不下的重要原因之一。

4 中国马铃薯减施增效的策略

针对我国马铃薯化肥农药高效利用产品创新和集成不足、精准施用装备研发落后、肥药科学使用标准缺失及减施技术普及率低等问题,迫切需要通过科技创新,发展肥料农药减施增效技术,构建区域性马铃薯绿色丰产技术体系,走出肥药高施低效的困境,弥补技术短板,以保障马铃薯产业可持续发展。在农业供给侧改革的经济新时期,马铃薯减施工作应从以下5个方面实现重点突破。

4.1 充分认识肥药减施在引领我国未来马铃薯产业健康发展中的重大意义,制定相关产业扶持政策

从宏观角度科学看待化肥农药与马铃薯增产增效的关系,切实减少种植过程中肥药的使用量,提高利用效率,是保障马铃薯产业高质量、可持续发展的必由之路。一方面,减肥减药能最大程度地降低马铃薯生产对周边自然生态平衡的不良影响,使绿水青山成为“金山银山”,贯彻国家的绿色发展的理念;另一方面,我国农产品的生产成本普遍高于发达国家,国际市场竞争力较低,肥药减施有助于降低马铃薯生产成本,有效提高生产效益,具有生态和经济双重意义。

在具体政策方面,由于普通用户(农民)对于有助于缓解面源污染的新型环保肥料农药增效技术,认知和接受度的提高是一个缓慢过程,需要政府出台生态补偿、农机补贴、组织化经营奖补等优惠政策给予扶持,以激励企业和农民改善化肥农药使用习惯。同时,政府还需要加强示范推广和宣传力度,探索建立技术培训效果考评与反馈机制,并及时制定肥料农药企业和行业新标准,加快技术的推广应用进程,

保证产品质量,维护健康的市场秩序。

4.2 化肥、农药使用限量标准的制定是化肥农药减施增效的核心

迄今,我国尚未出台全国性的马铃薯肥料和农药的限量标准。我国《农业法》中仅有2处条文与肥料有关,且界定模糊。《肥料登记管理办法》和《农药管理条例》主要关注点在于化肥和农药的生产过程,对于具体的使用时间、强度和限量并无相关细致规定。2015年,我国的化肥农药零增长行动开始实施,部分省区的化肥和农药用量自改革开放以来首次负增长。我国在“两减”工作中取得了巨大的成就,但对不同作物肥料和农药迁移规律及其高效利用机理仍缺乏深入了解,对不同种植区的肥料农药减施参数、流失阻控和增效途径尚未明晰,各产区气候、地理条件存在异质性,制订全国统一的肥药限量标准颇为困难。

确定肥料农药限量标准是减施增效工作的第一步。目前国家仅对化肥和农药总量提出了控制目标,但是具体到不同地区和不同栽培制度条件下,马铃薯肥药施用阈值和相应减施举措尚无统一标准。科技部于2016年启动了“肥料养分推荐方法与限量标准”“化学农药在我国不同种植体系的归趋特征与限量标准”等国家重点研发计划,先期展开关于肥药限量科学指标的研究。未来可利用研究成果,提出马铃薯化肥、农药的国家和省区的限量标准,从源头上对肥药使用进行有效的法制规范和管理。

4.3 化肥农药高效利用技术和替代技术的研发是减施增效的关键突破方向

针对我国化肥农药“高施低效”的现状,创新高效肥药产品和施用技术是农业生产中一项重要而紧迫的任务。国内学者在提高化肥和农药利用率方面,已经做出很多有益的工作,如包膜缓释和脲酶/硝化抑制剂肥料的开发利用,以天然纳米黏土为基础的肥料和农药增效助剂的推广、秸秆快速腐熟还田技术、有机硅、表面活性剂等增效农药助剂的推广,生物农药等绿色防控技术的应用,以及与部分农艺措施的配合使用等。这些技术对于提高肥药利用率、降低施用量,具有开拓性的贡献。

尽管对肥药高效利用技术的研究已有相当程度的进展,但我国的肥药利用率并没有明显的提高,肥

料损失和农药“跑冒滴漏”问题仍然非常严重. 虽有发达国家的经验可以借鉴, 然而我国人多地少, 规模化经营程度低, 不能完全照搬国外技术. 习近平总书记指出“实施创新驱动发展战略, 最根本的是要增强自主创新能力”. 因此, 在借鉴国外经验的基础上, 中国需要根据本国实际情况、种植习惯、作物肥药需求规律等, 自主研发适合国情的马铃薯化肥农药高效利用和替代技术.

4.4 研发高效精准、定量智能的肥药施用机具及其配套技术能为马铃薯减施增效提供科技支撑

我国马铃薯产业正在加速发展, 农村土地流转催生出一批规模化经营的农场(企业), 而城镇化的推进又导致农村“用工难”, 一定程度上制约了产业的进一步发展, 亟待实施技术创新, 加快智能化“减施增效”农机装备的研发. 在智能施肥方面, 应通过了解马铃薯对养分需求的时空特征, 研制机械化深施装备, 确保基肥精准定量施用, 并结合水肥一体化措

施, 开发水肥耦合机械和配套技术, 以实现养分供应数量匹配、时间和空间同步. 在精准施药方面, 研究雾滴大小、密度对作物吸附农药分子的影响, 利用实时获得农药靶标参数, 结合地理信息技术和自动化控制系统, 研制智能控制机械, 动态地调节施药过程, 以期实现精准用药, 减少无效流失.

4.5 构建区域性马铃薯减施增效综合技术体系

根据马铃薯各优势产区环境、气候及耕作特征, 研究区域性肥料农药利用规律, 明确减施潜力, 将“农学-生物-材料-物理-化学-机械”等学科有机交叉, 集成化肥农药减施增效及其绿色替代技术、精准智能肥药机具, 结合测土配方施肥、水肥药一体化等传统技术, 创建区域性马铃薯减施增效综合技术体系(图3), 制定相应的轻简化技术规程. 设置“两减”技术试验示范区, 建立千亩示范方和万亩示范片, 进而大面积推广, 有效降低化肥农药使用量, 为我国马铃薯产业的转型升级和绿色发展提供坚实的科技支撑.

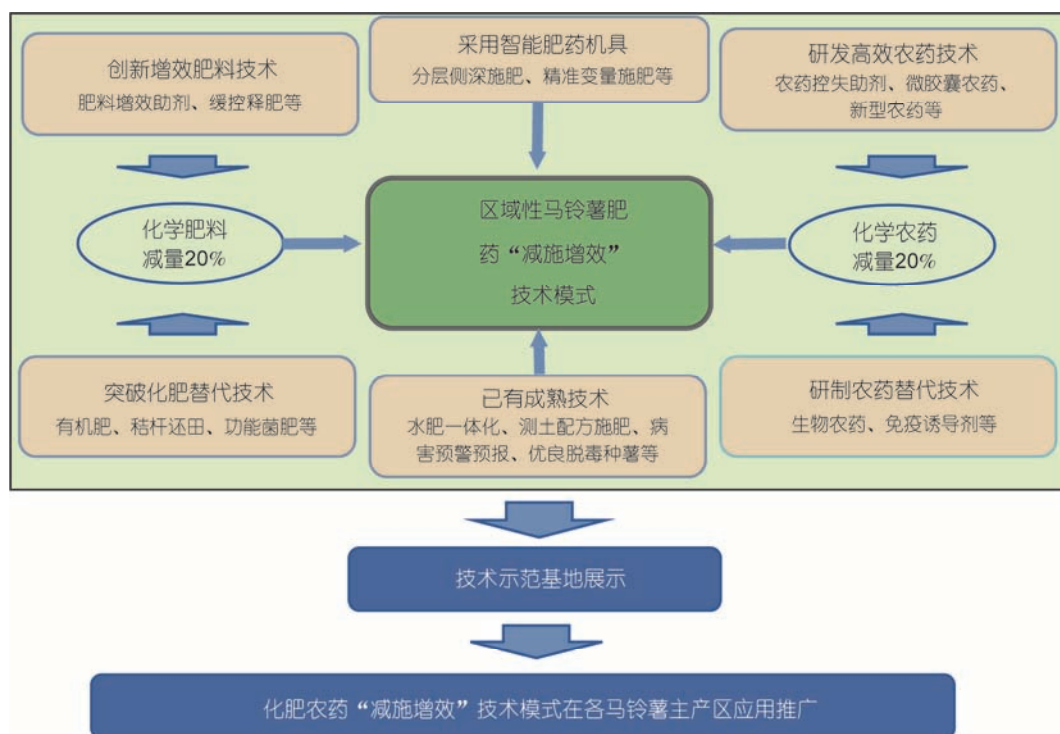


图3 马铃薯“减施增效”技术体系

Figure 3 Potato “chemical fertilizer/pesticide reduction & high-efficiency” cultivation technique system

参考文献

- 1 Foley J A, Ramankutty N, Brauman K A, et al. Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 2011, 478: 337–342
- 2 Qu D Y, Xie K Y, Jin L P, et al. Development of potato industry and food security (in Chinese). *Sci Agric Sin*, 2005, 38: 358–362 [屈冬玉, 谢开云, 金黎平, 等. 中国马铃薯产业发展与食物安全. *中国农业科学*, 2005, 38: 358–362]
- 3 Zhang W, Cao G, Li X, et al. Closing yield gaps in China by empowering smallholder farmers. *Nature*, 2016, 537: 671–674
- 4 Qu D Y, Chen Y L. Potato Industry and Modern Sustainable Agriculture (in Chinese). Harbin: Harbin Map Press, 2015 [屈冬玉, 陈伊里. 马铃薯产业与现代可持续农业. 哈尔滨: 哈尔滨地图出版社, 2015]
- 5 Li W J, Qin J H, Gu J M, et al. Developing potato as a staple food in China based on world potato development (in Chinese). *Food Nutr China*, 2015, 21: 5–9 [李文娟, 秦军红, 谷建苗, 等. 从世界马铃薯产业发展谈中国马铃薯的主粮化. *中国食物与营养*, 2015, 21: 5–9]
- 6 Chen Y L, Qu D Y. Potato Industry and Regional Rural Development (in Chinese). Harbin: Harbin Map Press, 2013 [陈伊里, 屈冬玉. 马铃薯产业与农村区域发展. 哈尔滨: 哈尔滨地图出版社, 2013]
- 7 Fang L P, Meng J. Application of chemical Fertilizer on grain yield in China analysis of contribution rate: Based on principal component regression C-D production function model and its empirical study (in Chinese). *Chin Agric Sci Bull*, 2013, 29: 156–160 [房丽萍, 孟军. 化肥施用对中国粮食产量的贡献率分析——基于主成分回归 C-D 生产函数模型的实证研究. *中国农学通报*, 2013, 29: 156–160]
- 8 Heisey P, Norton G. *Handbook of Agricultural Economics-Fertilizers and Other Farm Chemicals*. Amsterdam: Elsevier, 2007. 2741–2777
- 9 Wang J X, Li Y, Wang X D, et al. Status quo of pesticide use in China and its outlook (in Chinese). *Agric Outlook*, 2017, 13: 56–60 [王佳新, 李媛, 王秀东, 等. 中国农药使用现状及展望. *农业展望*, 2017, 13: 56–60]
- 10 Fang J Y. New developmental model for prataculture in Chinese pasture regions (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2016, 61: 137–138 [方精云. 我国草原牧区呼唤新的草业发展模式. *科学通报*, 2016, 61: 137–138]
- 11 Zhou X Y. The urgency of pesticide use and hazard control and related suggestions (in Chinese). *World Pestic*, 2015, 37: 39–44 [周喜应. 浅析农药减量控害的迫切性及相关建议. *世界农药*, 2015, 37: 39–44]
- 12 Shao Z R, Zhang S. Main measures of improving pesticide using efficiency (in Chinese). *J Agrochem Market*, 2014, 53: 382–385 [邵振润, 张帅. 提高我国农药利用率的主要措施与对策. *农药市场信息*, 2014, 53: 382–385]
- 13 Ministry of Agriculture of China. Report for agricultural point-area pollution control (in Chinese). 2016. 26 [农业部. 农业面源污染治理攻坚战专报. 2016. 26]
- 14 Xiong Y, Wu J. Zero growth of fertilizer: Review and revelation (in Chinese). *Environ Prot*, 2017, 45: 57–60 [熊英, 吴健. 化肥零增长: 回顾与启示. *环境保护*, 2017, 45: 57–60]
- 15 Zhou W. Pathway for chemical fertilizer reduction & using efficiency improvement (in Chinese). *High Effic Fert Appl*, 2016, 37: 3–5 [周卫. 化学肥料减施增效调控途径. *高效施肥*, 2016, 37: 3–5]
- 16 United States General Accounting Office. Pesticides: Options to achieve a single regulatory standard. Washington DC, Report to Congressional Committees, 1994. 34
- 17 4R Plant Nutrition: A manual for improving the management of plant nutrition. Norcross, GA: International Plant Nutrition Institute, 2012
- 18 Li X. The global market profile of the potato agrochemical (in Chinese). *J Agrochem Market*, 2017, 56: 391–394 [李新. 全球马铃薯农药市场概况. *农药市场信息*, 2017, 56: 391–394]
- 19 Azeem B, Kushaari K, Man Z B, et al. Review on materials & methods to produce controlled release coated urea fertilizer. *J Control Release*, 2014, 181: 11–21
- 20 Bandyopadhyay S, Bhattacharya I, Ghosh K, et al. New slow-releasing molybdenum fertilizer. *J Agric Food Chem*, 2008, 56: 1343–1349
- 21 Ito R, Takahashi E, Funamizu N. Production of slow-released nitrogen fertilizer from urine. *Environ Technol*, 2013, 34: 2809–2815
- 22 Chevillard A, Angellier-Coussy H, Guillard V, et al. Controlling pesticide release via structuring agropolymer and nanoclays based materials. *J Hazard Mater*, 2012, 205–206: 32–39
- 23 Handford C E, Elliott C T, Campbell K. A review of the global pesticide legislation and the scale of challenge in reaching the global harmonization of food safety standards. *Integr Environ Assess Manag*, 2015, 11: 525–536
- 24 Horvat C M, Wolfenden R V. A persistent pesticide residue and the unusual catalytic proficiency of a dehalogenating enzyme. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2005, 102: 16199–16202
- 25 Kimpinski J, Gallant C E, Henry R, et al. Effect of compost and manure soil amendments on nematodes and on yields of potato and barley: A 7-year study. *J Nematol*, 2003, 35: 289–293

- 26 Griffin T S, Honeycutt C W. Effectiveness and efficacy of conservation options after potato harvest. *J Environ Qual*, 2009, 38: 1627–1635
- 27 Alyokhin A, Mota-Sanchez D, Baker M, et al. The Red Queen in a potato field: Integrated pest management versus chemical dependency in Colorado potato beetle control. *Pest Manag Sci*, 2015, 71: 343–356
- 28 Min H. Status quo and prospect of chemical pesticide reduction technology in China (in Chinese). *Chin Plant Prot*, 2017, 37: 83–85 [闵红. 我国农药减量控害技术的现状及展望. 中国植保导刊, 2017, 37: 83–85]
- 29 Downer R A, Mueninghoff J C, Viets A K. Pesticide Formulations and Application Systems: A New Century for Agricultural Formulations. 21st volume. West Conshohocken: ASTM, 2001
- 30 Matthews G A. Pesticide Application Methods. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013
- 31 Yi H B, Shi Y L. Preparation of the slow release fertilizer and evaluation of slow release property (in Chinese). *Chin J Soil Sci*, 2006, 37: 411–413 [尹洪斌, 石元亮. 缓释肥料的研制及其缓效性评价. 土壤通报, 2006, 37: 411–413]
- 32 Wu Z J, Zhou J M. Present situation, trend and strategy of control-released fertilizer and slow-released fertilizer in China (in Chinese). *J Agric Sci Technol*, 2001, 3: 73–76 [武志杰, 周健民. 我国缓释、控释肥料发展现状、趋势及对策. 中国农业科技导报, 2001, 3: 73–76]
- 33 Zhou L, Zhao P, Chi Y, et al. Controlling the hydrolysis and loss of nitrogen fertilizer (Urea) by using a nanocomposite favors plant growth. *ChemSusChem*, 2017, 10: 2068–2079
- 34 Cai D, Wu Z, Jiang J, et al. Controlling nitrogen migration through micro-nano networks. *Sci Rep*, 2014, 4: 3665
- 35 Dong Y X, Cai D Q, Huang X Y, et al. Novel fertilizer synergist on saving fertilizer and improving fertilizer efficiency (in Chinese). *J Chin Potato*, 2016, 30: 164–168 [董彦旭, 蔡冬清, 黄新异, 等. 新型肥料增效剂对马铃薯肥料减施增效作用研究. 中国马铃薯, 2016, 30: 164–168]
- 36 Li H R, Meng Q J. Experimental study on organic manure and chemical fertilizer of corn (in Chinese). *Mod Agric Sci Technol*, 2014, 19: 28 [李浩然, 孟庆佳. 玉米有机肥与化肥配施试验研究. 现代农业科技, 2014, 19: 28]
- 37 Sun N K, Suo D R. Effects of long-term mixed use of organic manure and chemical fertilizers on crop yield and indigenous soil nutrients (in Chinese). *Bull Soil Water Conserv*, 2011, 31: 42–46 [孙宁科, 索东让. 有机肥与化肥长期配施对作物产量和灌漠土养分库的影响. 水土保持通报, 2011, 31: 42–46]
- 38 Xu J F, Jin L P. Advances and perspectives in research of potato genetics and breeding (in Chinese). *Sci Agric Sin*, 2017, 50: 990–1015 [徐建飞, 金黎平. 马铃薯遗传育种研究: 现状与展望. 中国农业科学, 2017, 50: 990–1015]
- 39 Zhang R, Wang Y H, Wen G H, et al. Analysis of heterosis and traits combining ability for tuber in potato (in Chinese). *Chin Potato*, 2008, 2: 81–84 [张荣, 王一航, 文国宏, 等. 马铃薯主要块茎性状杂种优势及配合力分析. 中国马铃薯, 2008, 2: 81–84]
- 40 Fan H T, Li X Y, Chen Z. Toxicity and safety evaluation of Dufulin 30% WP to the environmental biology (in Chinese). *Agrochemicals*, 2011, 50: 48–50 [范会涛, 李向阳, 陈卓, 等. 30%毒氟磷可湿性粉剂对环境生物的毒性与安全性评价. 农药, 2011, 50: 48–50]
- 41 Chen Z, Zeng M, Song B A, et al. Dufulin activates HrBP1 to produce antiviral responses in tobacco. *PLoS One*, 2012, 7: e37944
- 42 Zhao X M, Du Y G. Progress of research on oligosaccharide elicitors and mechanism of plant induced resistance by oligosaccharides (in Chinese). *J Agric Sci Technol*, 2006, 8: 26–32 [赵小明, 杜昱光. 寡糖激发子及其诱导植物抗病性机理研究进展. 中国农业科技导报, 2006, 8: 26–32]
- 43 Tan H, Gong G, Li Z D, et al. High-yield ABA production strain obtained by UV irradiation of protoplasts (in Chinese). *Chin J Appl Environ Biol*, 1998, 3: 281–285 [谭红, 龚革, 李志东, 等. 利用原生质体诱变技术筛选脱落酸高产菌株. 应用与环境生物学报, 1998, 3: 281–285]
- 44 Xie Y L, Du J, Shen Z R, et al. Research advance of S-auxin (in Chinese). *J Anhui Agric Sci*, 2013, 41: 1517–1518 [解艳玲, 杜军, 沈振荣, 等. S-诱抗素研究进展. 安徽农业科学, 2013, 41: 1517–1518]
- 45 Huang X Y, Wu D B, Meng J, et al. Progress in plant extracts for control of potato late blight (in Chinese). *J Chin Potato*, 2016, 30: 367–371 [黄新异, 武东波, 蒙静, 等. 植物提取物防治马铃薯晚疫病研究进展. 中国马铃薯, 2016, 30: 367–371]
- 46 Cheng D, Feng M X, Ji Y F, et al. Effects of celangulin IV and V From *Celastrus angulatus* maxim on Na^+/K^+ -ATPase activities of the oriental armyworm (*Lepidoptera: Noctuidae*). *J Insect Sci*, 2016, 16: 59
- 47 Liu S H, Zhao D G, Song B A. Effect of *Eucommia* bark protein against plant pathogenic fungi (in Chinese). *Agrochemicals*, 2007, 46: 848–850 [刘世会, 赵德刚, 宋宝安. 杜仲皮蛋白对植物病原真菌的抑制作用. 农药, 2007, 46: 848–850]
- 48 Zhang W, Zheng S J, Wan X W, et al. Investigation of a new pesticide synergist, JiJian, to pesticide (in Chinese). *Chin Fruit*, 2016, 46: 39–41 [张伟, 郑仕军, 万宣伍, 等. 表面活性剂“激健”对杀虫(螨)剂的增效作用研究. 中国果树, 2016, 46: 39–41]
- 49 Luo X W, Wang Z M. Research progress in rice mechanization technology (in Chinese). *Mod Agric Equip*, 2014, 1: 23–29 [罗锡文, 王在满. 水稻生产全程机械化技术研究进展. 现代农业装备, 2014, 1: 23–29]
- 50 Wang J M, Luo X W, Tang X R, et al. Precision rice hill-direct-seeding technology and machine based on the combination of agricultural

- machinery and agronomic technology (in Chinese). J S Chin Agric Univers, 2010, 31: 91–95 [王在满, 罗锡文, 唐湘如, 等. 基于农机与农艺相结合的水稻精量穴直播技术及机具. 华南农业大学学报, 2010, 31: 91–95]
- 51 An L Z. Design of rice 2SFJ—1.8 deeply-fertilizing machine (in Chinese). J Agric Mech Res, 2011, 4: 65–66 [安龙哲. 2SFJ—1.8 水稻深施肥机的研究. 农机化研究, 2011, 4: 65–66]
- 52 Li B, Wang J X, Xu W J, et al. Design of 2BF-9 deeply-fertilizing Seeder (in Chinese). Chin Agri Mech, 2008, 5: 75–77 [李兵, 王继先, 徐伟君, 等. 2BF-9 型化肥深施播种机的设计. 中国农机化, 2008, 5: 75–77]
- 53 Wen J L, Wang J F. Uniformity testing on electrostatic spraying technique (in Chinese). Drain Irrig Mach, 2000, 18: 45–47 [闻建龙, 王军峰. 荷电改善喷雾均匀性的实验研究. 排灌机械, 2000, 18: 45–47]
- 54 Jia W D, Hu H C, Chen L, et al. Performance experiment on spray atomization and droplets deposition of wind-curtain electrostatic boom spray (in Chinese). Trans Chin Soc Agric Eng, 2015, 31: 53–59 [贾卫东, 胡化超, 陈龙, 等. 风幕式静电喷杆喷雾喷头雾化与雾滴沉积性能试验. 农业工程学报, 2015, 31: 53–59]
- 55 Xiao Q H, Chen X M, Cai D Q, et al. Effect of novel fungicide loss-control agent on potato late blight and yield (in Chinese). J Chin Potato, 2017, 31: 160–164 [肖庆红, 陈学明, 蔡冬清, 等. 施用新型农药控失剂对马铃薯晚疫病的防治效果和产量的影响. 中国马铃薯, 2017, 31: 160–164]

Summary for “中国马铃薯化肥农药减施的现状与挑战”

Current status and challenges for potato chemical fertilizer & pesticide reductions in China

Naiqin Zhong^{1,4*}, Ning Liu^{1*}, Pan Zhao¹, Dongqing Cai², Shuangwei Song^{1,3} & Yapeng Chao¹

¹ State Key Laboratories of Plant Genomics, Institute of Microbiology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

² Hefei Institutes of Physical Sciences, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

³ College of Plant Protection, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;

⁴ School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

* Corresponding author, E-mail: nqzhong@im.ac.cn; liuning@im.ac.cn

Under the pressures from growing population, arable land diminishment, yield limitation of major grain crops, global climatic change, etc, there is a latent crisis in Chinese food security. Potato, as the fourth major crop, plays a vital role in alleviating food problem considering its great nutritive value, high yield and adaptability. Chemical fertilizers and pesticides (CFPs) are implicated in ensuring stable and high yields of potato. Therefore, CFPs were intensively used for boosting up the yield; however, the use intensity of CFPs exceeds the international recognized standard, resulting in negative impacts on environment quality, agri-ecosystem, land productivity and tuber production cost. Consequently, those obstacles mentioned above jeopardized the sustainability of potato industry. In order to solve the dilemma, this article focuses on the analysis of the major reasons for abuse of CFPs, and further identified that the excessive consumption could be attributed to high application intensity, low utilization efficiency and lack of scientific application methods. Furthermore, this article introduces the technological advances and future trends in chemical fertilizer and pesticide reductions (CFPR) of developed countries. Based on the successful CFPR experiences abroad, the article also provides some development strategies for Chinese potato CFPR. (1) Promote legislation curbing application rate of potato CFPs. Several research projects were initiated to investigate the scientific standard of application amount for CFPs. Once the scientific standards were set, they could be gradually legislated into agricultural laws to stipulate the use of CFPs nationwide. (2) Promote the innovation on high-efficient application technology and encourage the use of green alternatives to chemical controls. Efforts on scientific research and education should be strengthened to speed up the innovation/application of advanced CFPR techniques. In addition, recognized reduction techniques abroad could be transferred to improve our application practices in pursuit of chemical contamination decreases. Some chemical fertilizers could be replaced by organic fertilizer, or they could be used in combination with organic fertilizers to enhance use efficiency. Chemical pesticides, to some extent, could be substituted by efficient, low toxicity/residue pesticides, and green prevention techniques could be employed to avoid pesticide abuse. (3) Promote the invention/improvement of intelligent agro-equipment with precision application capabilities. Unlike developed countries, the majority of Chinese potato production entities is still dispersible, small-scale, traditional family farms. Hence, modern fertilizer/pesticide machinery including deep fertilization and accurate spaying should be developed accordingly to meet specific needs of Chinese farmers. However, in the large-scale and intensive potato-growing area of north China, it is reasonable for the large potato enterprise and cooperatives to introduce advanced equipment and management system overseas. (4) Integration of multiple CR technologies to meet diverse regional needs. Combined with traditional reduction techniques such as soil testing, formulated fertilization, drip-fertigation and integrated pest-control, newly developed reduction technology could be integrated into regional “Potato Chemical Fertilizer and Pesticide Reduction” technique systems according to the diverse ecological, climatic and cultivating factors. Through demonstration zones and potato-grower trainings, popularization of reduction techniques would benefit the potato-growing farmers and cooperatives, which would significantly reduce the use of CFPs in China.

potato, chemical fertilizer/pesticide reduction, fertilizer/pesticide use efficiency

doi: 10.1360/N972017-01325