

中国苹果化肥减量增效技术途径与展望

葛顺峰*, 朱占玲*, 魏绍冲, 姜远茂**

(山东农业大学园艺科学与工程学院, 作物生物学国家重点实验室, 山东泰安 271018)

摘要: 在中国贫瘠的果园土壤条件下, 化肥在苹果增产过程中发挥了重要作用, 同时不合理的化肥使用也带来了肥料利用率低、果实品质下降、土壤质量降低、水体富营养化和温室气体排放等问题。因此, 科学施肥提高化肥利用率, 减少由于化肥损失带来的环境污染是关系到苹果产业能否实现绿色可持续发展的重大科技问题。分析了中国苹果养分管理中存在的问题, 综述了当前已有的苹果化肥减量增效技术, 主要包括障碍性土壤改良与培肥地力、最佳养分管理、根层养分调控和新型肥料与“大配方、小调整”区域配肥技术, 并对今后苹果化肥减量增效技术的研究进行了展望。

关键词: 苹果; 化肥减量增效; 土壤改良与培肥地力; 最佳养分管理; 根层养分调控

中图分类号: S 661.1

文献标志码: A

文章编号: 0513-353X (2017) 09-1681-12

Technical Approach and Research Prospect of Saving and Improving Efficiency of Chemical Fertilizers for Apple in China

GE Shunfeng*, ZHU Zhanling*, WEI Shaochong, and JIANG Yuanmao**

(College of Horticulture Science and Engineering, Shandong Agricultural University, State Key Laboratory of Crop Biology, Tai'an, Shandong 271018, China)

Abstract: Chemical fertilizer plays an important role in apple production under the poor soil condition in China. At the same time, improper use of chemical fertilizer resulted in low utilization efficiency and negative impact on fruit quality, soil quality, eutrophication, and greenhouse gas emissions. Therefore, scientific use of nutrient resources and improvement in chemical fertilizer use efficiency is an important scientific issue related to the green and sustainable development of apple industry. This paper analyzed current status on the nutrient management in apple orchard and overviewed current technologies of saving and improving efficiency of chemical fertilizer. The technologies include soil amelioration and soil fertility improvement, best nutrient management, root-zone nutrient regulation, newly emerging fertilizer, and regional formulation fertilizer technology based on ‘Regional Fertilizer Formula and Site Specific Adjustment’. Future research prospect related to saving and improving efficiency of chemical fertilizers for apple is also discussed.

Keywords: apple; saving and improving efficiency; soil amelioration and soil fertility improvement; best nutrient management; root-zone nutrient regulation

收稿日期: 2017-06-06; **修回日期:** 2017-08-30

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFD0201100; 2017YFD0200208); 国家现代农业产业技术体系建设专项资金项目 (CARS-27); 国家自然科学基金项目 (31501713); 山东省自然科学基金项目 (ZR2015PC001)

* 共同第一作者

** 通信作者 Author for correspondence (E-mail: ymjjiang@sdau.edu.cn)

苹果作为近 20 年来效益稳定的经济作物,在推进农业结构调整,转变农业经济增长方式,促进农民增收过程中作用巨大。20 世纪 80 年代以来,中国苹果产业较快发展,至 2014 年全国苹果种植面积达 227 万 hm^2 ,总产量 4 092 万 t,均居世界首位(FAO)。但受“施肥越多,产量越高”、“要高产就必须多施肥”等传统观念的影响,果农通过投入大量肥料来获得高产,不仅导致生产成本剧增,而且也带来了地表和地下水污染、温室气体排放增加和土壤质量下降等生态环境问题(Zhang et al., 2013; 葛顺峰, 2014)。因此,如何通过技术措施在保证苹果丰产稳产优质的前提下,同时提高养分资源利用效率来减少过量施肥造成的资源和环境负担成为关注的热点。

1 苹果养分管理中存在的问题

1.1 土壤管理粗放,土壤障碍加重,根系生长不良

调查发现,20 世纪 80 年代经常采用的深翻土壤和秸秆覆盖措施仅有大约 5% 的果园继续采用,采用人工生草或自然生草的果园仅占 20% 左右,接近 75% 的果园地面管理以清耕为主。果园生草是发达国家已普遍采用的一项现代化、标准化的果园管理技术,欧美及日本实施生草果园面积占果园总面积的 80% 以上,产生了良好的经济效益、社会效益和生态效益(陈学森 等, 2010)。而中国苹果园普遍采用的清耕措施不但增加了劳动力投入,而且还造成了果树根系分布表层化和表层土壤水肥气热条件的剧烈变化(孙霞 等, 2011)。另外,近年来土壤酸化、板结等障碍性因素越来越多,其中胶东半岛果园土壤酸化趋势非常明显,土壤 pH 平均仅为 5.21,超过 56.46% 的苹果园土壤 pH 低于 5.50(葛顺峰 等, 2014a)。粗放的地面管理和障碍性因素的增多显著影响了果树根系的正常生长发育,显著降低了根系总长度、总表面积和总体积,根尖数和根系活力也明显下降,同时也限制了叶片制造的光合产物向根系的运输(葛顺峰 等, 2014a; 孙文泰 等, 2016)。

1.2 建园条件差,有机肥投入不足,土壤有机质含量低

20 世纪中后期,中国果树的发展大都遵循“上山下滩,不与粮棉争夺良田”的发展方针,建园条件差,主要表现为土壤有机质含量低。土壤有机质含量与土壤肥力质量呈显著正相关关系,其变化相对稳定,常被作为评价果园土壤质量动态变化的重要指标(Canali et al., 2004; Wienhold et al., 2004)。土壤有机质含量的高低对于果园可持续生产非常重要,欧美日等水果生产强国都非常注重土壤有机质含量的提升,使其维持在较高的水平。如荷兰果园土壤有机质含量平均在 $20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上,日本和新西兰等国苹果园土壤有机质含量达到了 $40 \sim 80 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Goh et al., 2000)。然而,中国大部分果园土壤有机质含量在 $15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下,仅南方一些果园和集约化水平较高的北方果园(北京、天津等)在 $15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上(姜远茂 等, 2001; 郭宏 等, 2013; 葛顺峰 等, 2014a)。当前果园土壤有机质含量偏低的另一主要原因是有机肥施用量较低,中国果园有机肥施用量在 $2 \sim 15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间(包雪梅 等, 2003; 刘加芬 等, 2011; 魏绍冲和姜远茂, 2012),而国外优质果园一般要求有机肥施用量在 $50 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以上(Glover et al., 2000; Canali et al., 2004; James & Topper, 2010)。

1.3 化肥施用过量和不平衡,生理性病害普遍发生

在中国贫瘠的苹果园土壤条件下,化肥作为增产的决定因子发挥了举足轻重的作用。但近年来,中国苹果园化肥用量持续高速增长,农业部统计资料显示,中国苹果园纯氮用量已经由 2008 年的 $360 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增加到 2014 年 $490 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,其中苹果产量较高的山东胶东半岛产区施氮量高达 837

$\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (魏绍冲和姜远茂, 2012), 陕西苹果产区的施氮量也超过了全国平均水平, 达到了 $558 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (赵佐平等, 2012; 王小英等, 2013)。而世界上苹果生产发达国家的施肥量普遍较低, N、 P_2O_5 和 K_2O 的推荐施用量分别为 $150 \sim 200$ 、 $100 \sim 150$ 和 $150 \sim 200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (Nielsen et al., 2003; Cheng & Rada, 2009; Siddique et al., 2009)。化肥的过量主要集中在氮磷钾大量元素肥料, 果农对中微量元素的使用不够重视, 长期不平衡施肥造成了植株根际营养元素失衡和土壤质量下降, 导致了苦痘病、黑点病、缩果病、黄叶病、小叶病和粗皮病等生理性病害的普遍发生。2008 年对山东省 760 户苹果园调查发现, 72.6% 的果园存在生理性病害 (赵林, 2009)。

1.4 科学施肥技术普及率低, 到位率低

科学施肥是基于作物养分需求规律、生长发育规律和土壤养分供应规律而制定的施肥策略, 即有利于果树高产稳产优质, 同时又最大限度降低施肥对环境的负面影响。生产上的施肥不科学主要表现为重无机肥轻有机肥, 重大量元素轻微量元素, 重氮轻钾, 不重视秋季施肥, 春季肥料“一炮轰”等。

目前农户的生产经验是确定化肥施用量的主要影响因素之一 (史恒通等, 2013)。Pan 等 (2017) 调查发现, 进行一次传统的理论培训, 农户的技术到位率只有 4% 左右, 而采用实地指导的方法能够显著提高技术到位率 (17%)。然而, 当前国家农化推广服务系统不健全, 果农即使接受了科学施肥技术的培训, 在具体操作中也很难得到详细的技术服务, 因此技术到位率较低。

2 苹果化肥减量增效技术

2.1 障碍性土壤改良与培肥地力

苹果园土壤条件差, 肥料损失严重, 再加上果农对大果和高产的片面追求, 形成了化肥用量不断增加与土壤质量不断下降的恶性循环, 这是化肥过量施用和肥料利用率偏低的重要原因 (葛顺峰和姜远茂, 2016)。因此, 要实现化肥减量增效, 就要通过克服土壤障碍因素来提升土壤质量, 进而提高养分的生物有效性。如渤海湾产区苹果园土壤酸化趋势不断加重, 显著影响了植株生长, 尤其是根系, 同时也显著影响了植株的碳氮代谢, 降低了氮肥利用效率 (葛顺峰等, 2013a)。王桂华等 (2005)、姜翰等 (2014) 和 Rossini-Oliva 等 (2017) 的研究表明, 施用石灰、硅钙镁肥等土壤改良剂后显著促进了苹果根系的生长, 提高了土壤养分有效性和氮素利用效率。黄土高原产区年降雨量大多集中在 $430 \sim 560 \text{ mm}$, 并且呈现出年际和月际间降雨分布不均的特点, 土壤干旱是制约该产区土壤养分有效性的限制因素。苏一鸣等 (2013) 和李佳旻等 (2017) 研究发现, 采用微垄覆膜集雨保墒技术, 显著改善了旱地苹果园的土壤水分条件, 提高叶片相对含水量和光合酶类的活性, 促进了根系生长, 提高了根系吸收能力。苹果园有机质含量低, C/N 偏低, 表层土壤环境变化剧烈, 土壤物理结构差造成根系发育不良, 进而影响了根系对养分的高效吸收。彭玲等 (2015a, 2015b) 发现果园生草可明显改善根际土壤环境, 提高根层土壤养分含量和有效性, 显著提高了氮素利用效率, 同时减少了氮的深层淋失和地表径流以及磷的土壤固定。葛顺峰等 (2013b, 2013c, 2014b) 系统研究了添加作物秸秆、生物质炭和腐殖酸等土壤增碳技术, 结果表明苹果园适宜的土壤 C/N 为 $20 \sim 25$, 在此范围内既能促进植株的生长发育, 又可以促进植株对肥料氮的吸收, 减少氮肥的气态损失和深层淋失。

2.2 苹果最佳养分管理技术

2.2.1 氮肥“总量控制，分期调控”

不同养分的资源特征和对果树产量、品质的效应不同，管理上应分类进行（表1）。

表1 不同养分资源的特征差异与管理策略

Table 1 Resource characteristics and management strategy for different nutrients

养分 Nutrients	资源特性 Resource characteristics	管理策略 Management strategy
N	来源广；去向多；环境危害大；果实敏感性高 Diverse resource; multidirectional losses; serious environmental harm; high fruit sensitivity	总量控制、分期调控 Limiting the total N, applying N in split doses
P, K	资源有限；土壤库存大但有效性低；有效性长；果实敏感性低 Limited resources; large soil pools but low effectiveness; long-term effects; low fruit sensitivity	恒量监控 Building-up and maintenance approach
中微量元素 Micronutrients or trace elements	不足会导致减产甚至绝产；过量则会导致毒害 Yield failure with deficiency; too much causing toxicity	因缺补缺、矫正施肥 Correction when deficiency, just meeting crop demand

注：修改自 Zhang 等（2012）。

Note: Adapted from Zhang et al. (2012).

氮素是把“双刃剑”。一方面，氮作为果树生长所需量最大的元素，在产量和品质形成中发挥重要作用，其缺乏会产生不利影响；另一方面，氮供应过多也会对产量和果实品质产生不利影响，同时还会产生一系列环境问题（如土壤硝酸盐积累、温室气体排放等）。由于氮素资源具有来源的多样性、去向的多向性及其环境危害性、产量和品质的敏感性等特征，对氮素养分应进行精确管理，管理原则概括为“总量控制，以果定量，重视基肥，追肥后移，少量多次”。

总量控制，以果定量：氮素具有强烈的时空变异特征，其来源广、转化复杂、损失途径多、环境影响大，施用总量应进行控制。果实干物质质量占苹果树当年新生器官总量的 50%~70%，因此氮肥用量的确定可依据目标产量（近 3 年平均产量的 1.2 倍）来确定。姜远茂等（2007）对盛果期苹果树整株解析结果表明，每形成 100 kg 苹果的需 N 量是 0.6~1.0 kg。

重视基肥：早春器官发生期是苹果年周期中需氮最多的时期，此期的萌芽、开花、坐果、新梢生长、幼果膨大以及根系生长等所需养分主要来源于树体内的贮藏营养。氮素示踪试验结果表明，此期新生器官建造所需的氮大约 60%~90%来源于树体内的贮藏氮（Cheng et al., 2004）。秋季落叶前施肥有利于提高树体贮藏氮含量，尤其是精氨酸含量（Cheng et al., 2002）。因此建议，生产上要重视秋季施肥，施用量应占全年总量的 60%左右，最佳施用时期为 9 月中旬至 10 月中旬，晚熟品种采收后应尽早施用。

追肥后移，少量多次：丰产稳产树和变产树叶片全氮含量均呈“迅速下降—缓慢下降—迅速下降”的变化趋势，丰产稳产树叶片全氮含量缓慢下降阶段较长，在果实采收后才迅速下降，而变产树叶片全氮含量缓慢下降时间较短，在第一次果实膨大期开始迅速下降，表明果实膨大期至采收前这段时间叶片氮素养分状况是造成产量水平变化的主要原因（赵林 等，2010）。因此，在中国果园土壤瘠薄、保水保肥能力弱的情况下，进行氮肥后移，维持果实膨大后期土壤养分的充足供应是实现丰产稳产的保证。同时此期正处雨季，氮素极易发生径流和深层淋洗，采用少量多次的氮肥施用策略可有效降低土壤氮素含量的变化，有利于保证果实膨大后期养分的稳定供应（丁宁 等，2012）。

2.2.2 磷、钾肥“恒量监控”

磷和钾在果园土壤中移动性相对较小，更容易在土壤中保持和固定，损失也较少，在土壤中可

以维持较长时间的有效性, 且在适量施用范围内增加或减少一定用量不会对果树生长和产量造成很大的波动 (Zhang et al., 2012)。在不同类型土壤上研究发现, 耕层 (0 ~ 20 cm) 土壤全磷含量每累积 100 kg · hm⁻², 土壤速效磷仅增加 1.44 ~ 5.74 mg · kg⁻¹。因此, 磷钾肥的管理可采取“恒量监控”的方法, 根据土壤测试值和养分平衡计算法, 将土壤速效磷和钾含量持续控制在既能够获得高产又不造成环境风险的适宜范围内 (Li et al., 2011; Zhang et al., 2012)。要定期 (一般 3 ~ 5 年) 进行苹果园土壤磷钾的测试, 在测试值基础上依据土壤磷钾含量范围 (低、中、高) 结合果树目标产量的磷钾养分需要量来制定今后一定时期 (3 ~ 5 年) 内的磷钾施用量。若土壤磷钾养分含量处于低水平, 则磷钾肥施用不仅要满足果树的需求, 还应通过施肥使土壤磷钾含量逐步提高到较为适宜的水平, 因此磷钾肥推荐量一般超过果树目标产量的需求量; 如果土壤磷钾养分含量适宜, 则施用量即为果树对磷钾的需求量; 如果土壤磷钾含量很高, 则应逐步减少磷钾肥用量, 使土壤磷钾含量通过果树的吸收、消耗最终维持在一个适宜的范围内。

2.2.3 中、微量元素肥“因缺补缺”

相对于大量元素氮、磷和钾, 果树对中、微量元素的需求量相对较少, 正常条件下土壤所含有的中、微量元素可满足其生长的需要 (姜远茂 等, 2007)。但在高产和有土壤障碍发生或土壤中、微量元素含量低的地区, 以及大量元素肥料施用不合理的地区, 往往会产生中、微量元素缺乏问题。由于需求量少, 是否需要施用中、微量元素主要取决于土壤特性、果树品种和产量水平。因此, 中、微量元素的管理应采取“因缺补缺、矫正施肥”的技术模式, 以土壤、植株监测为主要手段, 对于缺素土壤或作物, 通过施用适量肥料进行矫正, 使其成为非产量和品质限制因子 (姜远茂 等, 2017)。对于并非因土壤养分缺乏而造成的果树中、微量元素缺素现象, 则应通过增施有机肥, 调节土壤理化性状等加以解决。

2.3 根层调控施肥技术

土壤中肥料养分的供应空间、时间和含量与果树需求不匹配是造成肥料养分低效的根本原因。果树根系与根层养分供应之间存在互馈机制, 适宜的根层养分含量有利于促进根系生长和合理根型建造, 而合理的根系构型和有节奏的根系生长反过来又促进养分生物有效性的提高 (杨洪强和束怀瑞, 2007)。因此, 通过根层养分调控把根层土壤有效养分调控在既能满足苹果的养分需求, 又不至于造成养分过量累积而向环境中迁移的范围内, 尽可能使来自土壤、肥料和环境的养分供应与苹果养分需求在数量上匹配、在时间上同步、在空间上耦合, 是提高肥料利用效率的重要途径。不同施肥深度和位置、水肥一体化、土壤根际注射等根层调控施肥技术试验表明, 将肥料准确施入根系密度较高的根层, 氮素利用率可提高 10.21 ~ 16.36 个百分点 (李红波 等, 2011; 张大鹏 等, 2012; 许海港 等, 2015; 张林森 等, 2015)。

2.4 新型肥料与“大配方, 小调整”区域配肥技术

除了通过提高施肥水平来提高肥料利用率外, 如何通过优化肥料自身性能来提高利用率是中国肥料未来研究的重点, 也是中国农业实现减肥增效的重要途径。目前国内外发展较快的新型肥料有缓/控释肥料、功能性肥料 (腐殖酸、黄腐酸等)、全水溶性肥料、有机无机复合肥料、微生物肥料 (菌剂) 等。经过近年来的发展和应用, 新型肥料不但能够直接或间接地为作物提供必需的营养成分, 还具有调节土壤酸碱度, 改良土壤结构, 改善土壤理化性质和生物学性质, 调节或改善作物生长机制等作用, 显著提高了作物产量、品质和肥料利用率 (赵秉强 等, 2004)。如邵蕾等 (2007) 和沙建川等 (2017) 研究发现, 控释肥料的养分释放时间和强度与苹果养分吸收规律基本吻合, 一

定程度上能够协调植物养分需求,保障养分供给,同时减少肥料损失,提高肥料利用率。

李亮科等(2011)对中国6个省的农户调查研究显示,当前的复合(混)肥产品设计部分地脱离了土壤和作物需求,造成了肥料投入的不断增长和效率的不断下降。因此,通过优化区域复合肥配方以匹配作物的需求和土壤的属性,对于实现肥料高效利用具有重要意义。通过区域大配方可以有效解决区域间不合理施肥的问题,然而在实际生产中,气候、土壤肥力和产量水平等都存在一定变异,需要在区域“大配方”的基础上进行“小调整”,将肥料用量控制到最佳,以实现养分供需的时空一致,达到最大的经济效益和环境效益。目前“大配方,小调整”区域配肥技术已成为国家测土配方施肥项目的主推技术之一,在小麦、玉米、水稻上已取得显著成效(吴良泉,2014)。综合渤海湾和黄土高原苹果园植株叶片和土壤的DRIS营养诊断结果(王富林等,2013)以及土壤有效养分与苹果产量的关系和苹果年周期养分需求规律,姜远茂等(2017)提出了中国苹果通用大配方为 $N-P_2O_5-K_2O=17-10-18$,同时根据两大产区的气候资源和土壤特点,提出了不同的基肥(18-13-14或16-15-14)和追肥配方(第1次膨果肥22-5-18或20-5-15,第2次膨果肥12-6-27或16-6-26)。

3 实现苹果化肥减量增效的技术途径展望

3.1 苹果生长年周期关键节点养分调控限量标准

当前推荐施肥系统中推荐的肥料用量往往是整季的总用量,但是苹果年周期中不同生长发育阶段对养分的需求量不同,极易造成某个阶段施肥过量和某个阶段不足的现象。因此,研究和明确年周期关键节点的养分需求特征,是确定该节点肥料用量的基础。过去,果树营养与施肥领域研究的重点主要集中在施肥对产量或品质的效应,关注的是施肥带来的经济效益,而施肥所造成生态和环境效益研究较少。而国外许多国家为了保护环境、保障农民利益,都有与肥料相关的法律或条例,其核心内容之一就是明确了不同作物体系、不同土地类型、不同地下水硝酸盐含量下的肥料施用限量标准(彭世琪,2014)。因此,将来苹果不同生长阶段的肥料推荐用量的确定必须基于该阶段树体的养分需求特征和该阶段施肥的环境效益特征,协同实现苹果高产与肥料高效。

3.2 氮、磷养分损失途径及其阻遏技术

提高肥料利用效率一方面要提高植株养分吸收量,同时也要有效地阻控农田养分的损失。姜远茂等(2007)利用地表径流池、渗漏池、土壤氮循环仪等技术研究了山东省中产苹果园山丘地条件下养分平衡,发现传统施肥条件下(N和 P_2O_5 施用量分别为450和230 $kg \cdot hm^{-2}$)氮和磷损失量高达319和123 $kg \cdot hm^{-2}$,损失率高达71%和54%。葛顺峰等(2011)在幼龄苹果园上的研究表明,肥料氮的利用率为19.38%~31.28%,而损失率高达39.59%~59.12%。因此,对于土壤氮、磷累积量过高、淋洗径流损失大的集约化生产苹果园来说,研究和明确养分损失途径和养分损失阻遏技术是减少肥料用量的重要途径。为此,需要继续深入研究苹果园高氮、磷投入条件下土壤氮、磷库形态特征、氮、磷在土壤中的转化过程,明确其损失途径和迁移阈值,进而提出阻控氮、磷无效化技术途径;同时如何充分利用植株对土壤中矿质氮、有效磷的竞争吸收能力,以提高利用率并削弱导致氮、磷损失的各个转化和迁移过程的强度,也需要进一步研究。

3.3 苹果根层分布特征及根层调控高效施肥技术

对大田作物的研究表明,根层调控施肥技术节肥增效效果显著(Chen et al., 2010; Cui et al.,

2013), 但对于根系密度低、分布广的苹果来说, 根系—土壤—养分—水分间的互作机制仍不清。因此需要继续深入研究苹果根层分布特征、阶段肥水需求特性和根土肥水互作机制, 来明确以下问题: 苹果不同时期不同层次根系吸收养分的最佳养分含量范围是多少, 养分供应的弹性空间有多大, 施肥量、施肥位点变化如何影响苹果根系的生长、根构型和养分吸收效率, 不同生育时期养分供应强度与苹果产量和品质的关系。另外, 尽管深层土壤中苹果根系比例较少, 但其对水分吸收以及营养元素的运输却发挥着非常重要的作用, 如何合理利用这部分根系仍需深入研究。

3.4 综合土壤和环境养分的推荐施肥技术

土壤养分作为作物生长重要的营养来源, 是养分管理的重点之一, 环境中的一些养分能通过大气干湿沉降、灌溉水、生物固氮等途径进入作物生产系统, 也是养分资源的重要组成部分。作物对来自土壤和环境养分的依存程度可以用相对产量(无肥区作物养分吸收量/施肥区作物养分吸收量 \times 100%) 这个指标来表示。近年来大田作物试验表明, 水稻、小麦和玉米成熟期, 氮的相对产量均达到了 70% 以上, 磷和钾的相对产量也达到了 70%~80% (张福锁 等, 2008)。Xu 等 (2017) 发现采用基于目标产量和环境养分的 Nutrient Expert system 能够实现节氮 31.6%, 节磷 15.5%, 同时玉米增产 3.3%。因此, 在综合考虑土壤肥力和环境养分来源的基础上, 重新制定推荐施肥策略, 对于实现苹果化肥减量具有重要意义。

3.5 精准施肥技术

精准施肥是根据土壤养分数据和作物需肥规律, 运用 GIS 作出农田空间属性的差异性, 再根据变量施肥决策分析系统结合作物生长模型和养分需求规律得到施肥决策, 最后通过差分式全球定位系统和变量施肥控制技术实现精确施肥, 节肥增效环保效果显著 (Bongiovanni & Lowenberg-Deboer, 2004)。在小麦、水稻等作物上的应用表明, 氮肥精准管理技术可节约氮肥投入 10%~80%, 氮素利用效率最高提高了 3.68 倍, 减少土壤氮残留的 30%~50% (Pampolino et al., 2007; Diacono et al., 2013)。Aggelopoulou 等 (2011) 将精准施肥技术应用于苹果生产, 发现相比传统施肥, 精准施肥可减少 38% 的氮素损失。但是考虑到中国一家一户分散经营的模式仍将在相当长时间内占主导, 国外现有的精准施肥技术在中国并不适用, 必须探索适合中国的精准养分管理模式。以下几方面亟待解决: 一是一家一户分散经营, 果园土壤养分变异较大, 如何高密度快速准确地获取土壤和叶片养分信息; 二是怎样解决现有施肥决策专家系统实用性和通用性的问题; 三是研发适合小地块的小型变量施肥机械, 使精准变量施肥在小规模经营的中国农户中得以实现。

3.6 技术物化及轻简化的水肥一体化技术

近年来中国苹果从业人员老龄化问题凸显, 果农对新技术的理解和接受能力不高, 再加上社会化服务和推广体系不够健全, 对果农进行纯技术理论层面的推广效果不理想。因此, 将富含科学性的高效施肥技术物化成具体产品, 以物化产品为抓手, 有助于加快技术扩散, 方便果农应用和提高技术的到位率。随着劳动力资源的短缺和劳动力成本的不断增加, 化肥减量增效技术在保证技术效果的同时还需要考虑技术使用的轻简化问题。水肥一体化技术是精确施肥和精确灌溉相结合的产物, 有利于促进树体生长, 提高产量和品质, 同时能够提高水肥利用效率和劳动效率 (Castellanos et al., 2013), 还能减少温室气体排放和地下水的污染 (Abalos et al., 2014; Cameira et al., 2014; Li et al., 2017)。但是中国苹果产区分布广, 地形复杂, 同时自然气候 (尤其是降雨) 条件差异较大, 水肥一体化技术的具体参数的确定以及设备的选择仍需进行细致研究。

3.7 区域苹果化肥减量增效技术模式的集成

近年来中国苹果化肥高效施用技术的研究取得了丰硕成果,但是仍以单项技术为主,缺乏学科交叉的综合技术以及分地区分目标的技术模式,这也是导致科学施肥技术针对性差、技术到位率低的原因之一(葛顺峰和姜远茂,2016)。为此,应依据区域自然气候特征、立地条件、栽培方式和经营目标等对区域化肥减施增效模式进行分类,因地制宜地进行技术的筛选、组装与改进,集成针对性强、简单易行的减肥增效技术模式,进而简化成周年营养套餐或全程解决方案,最终实现苹果化肥减量增效技术的大面积应用。

References

- Abalos D, Sanchez-Martin L, Garcia-Torres L, van Groenigen J W. 2014. Management of irrigation frequency and nitrogen fertilization to mitigate GHG and NO emissions from drip-fertigated crops. *Science of The Total Environment*, 490: 880 - 888.
- Aggelopoulou K D, Pateras D, Fountas S, Gemtos T A, Nanos G D. 2011. Soil spatial variability and site-specific fertilization maps in an apple orchard. *Precision Agric*, 12: 118 - 129.
- Bao Xue-mei, Zhang Fu-suo, Ma Wen-qi, Xu Wen-hua. 2003. Change of farmyard manure application in Shaanxi Province. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 14 (10): 1669 - 1672. (in Chinese)
- 包雪梅, 张福锁, 马文奇, 徐文华. 2003. 陕西省有机肥料施用状况分析评价. *应用生态学报*, 14 (10): 1669 - 1672.
- Bongiovanni R, Lowenberg-Deboer J. 2004. Precision agriculture and sustainability. *Precision Agriculture*, 5: 359 - 387.
- Cameira M R, Pereira A, Ahuja L, Ma L. 2014. Sustainability and environmental assessment of fertigation in an intensive olive grove under Mediterranean conditions. *Agricultural Water Management*, 146: 346 - 360.
- Canali S, Trincher A, Intrigliolo F, Pompili L, Nisini L, Mocali, S, Torrasi B. 2004. Effect of long term addition of composts and poultry manure on soil quality of citrus orchards in southern Italy. *Biology and Fertility of Soils*, 40 (3): 206 - 210.
- Castellanos M T, Tarquis A M, Ribas F, Cabello M J, Arce A, Cartagena M C. 2013. Nitrogen fertigation: an integrated agronomic and environmental study. *Agricultural Water Management*, 120: 46 - 55.
- Chen X P, Zhang F S, Cui Z L, Li F, Li J L. 2010. Optimizing soil nitrogen supply in the root zone to improve maize management. *Soil Science Society of America Journal*, 74 (4): 1367 - 1373.
- Chen Xue-sen, Han Ming-yue, Su Gui-lin, Liu Feng-zhi, Guo Guo-nan, Jiang Yuan-mao, Mao Zhi-quan, Peng Fu-tian, Su Huai-rui. 2010. Discussion on today's world apple industry trends and the suggestions on sustainable and efficient development of apple industry in China. *Journal of Fruit Science*, 27 (4): 598 - 604. (in Chinese)
- 陈学森, 韩明玉, 苏桂林, 刘凤之, 过国南, 姜远茂, 毛志泉, 彭福田, 束怀瑞. 2010. 当今世界苹果产业发展趋势及我国苹果产业优质高效发展意见. *果树学报*, 27 (4): 598 - 604.
- Cheng L, Dong S, Fuchigami L H. 2002. Urea uptake and nitrogen mobilization by apple leaves in relation to tree nitrogen status in autumn. *Hortscience A Publication of the American Society for Horticultural Science*, 35 (3): 181 - 197.
- Cheng L, Ma F W, Ranwala D. 2004. Nitrogen storage and its interaction with carbohydrates of young apple trees in response to nitrogen supply. *Tree Physiology*, 31 (222): 91 - 98.
- Cheng L L, Raba R. 2009. Accumulation of macro- and micronutrients and nitrogen demand-supply relationship of 'Gala' / 'Malling 26' apple trees grown in sand culture. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 134 (1): 3 - 13.
- Cui Z L, Shan C Y, Guiliang W, Zhang F S, Chen X P. 2013. In-season root-zone N management for mitigating greenhouse gas emission and reactive N losses in intensive wheat production. *Environmental Science Technology*, 47: 6015 - 6022.
- Diacono M, Rbino P, Montemurro F. 2013. Precision nitrogen management of wheat. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33 (1), 219 - 241.
- Ding Ning, Jiang Yuan-mao, Peng Fu-tian, Wei Shao-chong, Chen Ru, Chen Q ian. 2012. Studies on leaf senescence and ¹⁵N-urea absorption and utilization of 'Fuji' apple in response to topdressing nitrogen application. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 18 (3): 758 - 764. (in Chinese)

- 丁 宁, 姜远茂, 彭福田, 魏绍冲, 陈 汝, 陈 倩. 2012. 分次追施氮肥对红富士苹果叶片衰老及 ^{15}N 吸收、利用的影响. 植物营养与肥料学报, 18 (3): 758 - 764.
- Ge Shun-feng. 2014. Effects of soil C/N ratio on nitrogen balance of plant-soil system in apple orchard [Ph. D. Dissertation]. Tai'an: Shandong Agricultural University. (in Chinese)
- 葛顺峰. 2014. 苹果园土壤碳氮比对植株—土壤系统氮素平衡影响的研究[博士论文]. 泰安: 山东农业大学.
- Ge Shun-feng, Hao Wen-qiang, Jiang Han, Wei Shao-chong, Jiang Yuan-mao. 2014a. Distribution characteristics of soil organic matter and pH and the correlation to soil nutrients in apple orchards of Yantai. Chinese Agricultural Science Bulletin, 30 (13): 274 - 278. (in Chinese)
- 葛顺峰, 郝文强, 姜 翰, 魏绍冲, 姜远茂. 2014a. 烟台苹果产区土壤有机质和 pH 分布特征及其与土壤养分的关系. 中国农学通报, 30 (13): 274 - 278.
- Ge Shun-feng, Ji Meng-meng, Xu Hai-gang, Hao Wen-qiang, Wei Shao-chong, Jiang Yuan-mao. 2013a. Effects of soil pH on growth, sistribution and utilization of carbon and nitrogen of *Malus × domestica* 'Red Fuji'. Acta Horticulturae Sinica, 40 (10): 1969 - 1975. (in Chinese)
- 葛顺峰, 季萌萌, 许海港, 郝文强, 魏绍冲, 姜远茂. 2013a. 土壤 pH 对富士苹果生长及碳氮利用特性的影响. 园艺学报, 40 (10): 1969 - 1975.
- Ge Shun-feng, Jiang Yuan-mao. 2016. Technical approach and research prospect of saving and improving efficiency of chemical fertilizers and pesticides for apple. Plant Physiology Journal, 52 (12): 1768 - 1770. (in Chinese)
- 葛顺峰, 姜远茂. 2016. 苹果化肥农药减施增效技术途径与研究展望. 植物生理学报, 52 (12): 1768 - 1770.
- Ge Shun-feng, Jiang Yuan-mao, Wei Shao-chong, Fang Xiang-ji. 2011. Nitrogen balance under different nitrogen application rates in young apple orchards. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 17 (4): 949 - 955. (in Chinese)
- 葛顺峰, 姜远茂, 魏绍冲, 房祥吉. 2011. 不同供氮水平下幼龄苹果园氮素去向初探. 植物营养与肥料学报, 17 (4): 949 - 955.
- Ge Shun-feng, Peng Ling, Ren Yi-hua, Jiang Yuan-mao. 2014b. Effect of straw and biochar on soil bulk density, cation exchange capacity and nitrogen absorption in apple orchard soil. Scientia Agricultura Sinica, 47 (2): 366 - 373. (in Chinese)
- 葛顺峰, 彭 玲, 任怡华, 姜远茂. 2014b. 生物秸秆和生物质炭对苹果园土壤容重、阳离子交换量和氮素利用、损失的影响. 中国农业科学, 47 (2): 366 - 373.
- Ge Shun-feng, Xu Hai-gang, Ji Meng-meng, Jiang Yuan-mao. 2013b. Effects of soil C : N on growth and distribution of nitrogen and carbon of *Malus hupehensis* seedlings. Chinese Journal of Plant Ecology, 37 (10): 942 - 949. (in Chinese)
- 葛顺峰, 许海港, 季萌萌, 姜远茂. 2013b. 土壤碳氮比对平邑甜茶幼苗生长和碳氮分配的影响. 植物生态学报, 37 (10): 942 - 949.
- Ge Shun-feng, Zhou Le, Men Yong-ge, Li Hong-na, Wei Shao-chong, Jiang Yuan-mao. 2013c. Effect of carbon application on nitrogen and phosphorus leaching in apple orchard soil. Journal of Soil and Water Conservation, 27 (2): 31 - 35. (in Chinese)
- 葛顺峰, 周 乐, 门永阁, 李红娜, 魏绍冲, 姜远茂. 2013c. 添加不同碳源对苹果园土壤氮磷淋溶损失的影响. 水土保持学报, 27 (2): 31 - 35.
- Glover J D, Reganold J P, Andrews P K. 2000. Systematic method for rating soil quality of conventional, organic, and integrated apple orchard in Washington State. Agriculture Ecosystems and Environment, 80 (1 - 2): 29 - 45.
- Goh K M, Bruce G E, Daly M J, Frampton C M A. 2000. Sensitive indicators of soil organic matter sustainability in orchard floors of organic, conventional and integrated apple orchards in New Zealand. Biological Agriculture Horticulture, 17 (3): 197 - 205.
- Guo Hong, Liu Tian-peng, Du Yi-fei, Wang Zhi-kang, Fang Kai-kai, Li Hui-ke. 2013. Spatial variability of soil nutrients in the apple orchards on the scale of county in the loess plateau. Research of Soil and Water Conservation, 22 (3): 21 - 26. (in Chinese)
- 郭 宏, 刘天鹏, 杜毅飞, 王志康, 方凯凯, 李会科. 2013. 黄土高原县域苹果园土壤养分空间变异特征研究. 水土保持研究, 22 (3): 21 - 26.
- James D W, Topper K F. 2010. Utah fertilizer guide. Logan: Utah State University: 24 - 34.
- Jiang Han, Tan Ya-zhong, Zhuang De-yu, Ge Shun-feng, Jiang Yuan-mao. 2014. Effect of acidified soil amendments on seedling growth of *Malus hupehensis*. Shandong Agricultural Sciences, 46 (4): 80 - 82. (in Chinese)
- 姜 翰, 谭雅中, 庄德宇, 葛顺峰, 姜远茂. 2014. 土壤酸化改良剂对平邑甜茶幼苗生长的影响. 山东农业科学, 46 (4): 80 - 82.
- Jiang Yuan-mao, Ge Shun-feng, Mao Zhi-quan, Chen Xue-sen. 2017. Balanced fertilization technology of apple. China Fruits, (4): 1 - 4, 13. (in

Chinese)

姜远茂, 葛顺峰, 毛志泉, 陈学森. 2017. 苹果高效平衡施肥技术. 中国果树, (4): 1 - 4, 13.

Jiang Yuan-mao, Peng Fu-tian, Zhang Hong-yan, Li Xiao-lin, Zhang Fu-suo. 2001. Status of organic matter and nutrients in Shandong orchard soils.

Chinese Journal of Soil Science, 32 (4): 167 - 169. (in Chinese)

姜远茂, 彭福田, 张宏彦, 李晓林, 张福锁. 2001. 山东省苹果园土壤有机质及养分状况研究. 土壤通报, 32 (4): 167 - 169.

Jiang Yuan-mao, Zhang Hong-yan, Zhang Fu-suo. 2007. The northern deciduous fruit trees of nutrient resource integrated management theory and practice. Beijing: China Agricultural University Press: 27 - 30. (in Chinese)

姜远茂, 张宏彦, 张福锁. 2007. 北方落叶果树养分资源综合管理理论与实践. 北京: 中国农业大学出版社: 27 - 30.

Li H, Huang G, Meng Q, Ma L, Yuan L, Wang F, Zhang W, Cui Z, Shen J, Chen X, Jiang R, Zhang F. 2011. Integrated soil and plant phosphorus management for crop and environment in China. A review. Plant Soil, 349: 157 - 167.

Li Hong-bo, Ge Shun-feng, Jiang Yuan-mao, Peng Fu-tian, Wei Shao-chong, Fang Xiang-ji. 2011. Characteristics of absorption, distribution and utilization of ^{15}N -urea applied in different depths in Gala (*Malus hupehensis*). Scientia Agricultura Sinica, 44 (7): 1408 - 1414. (in Chinese)

李红波, 葛顺峰, 姜远茂, 彭福田, 魏绍冲, 房祥吉. 2011. 嘎啦苹果不同施肥深度对 ^{15}N -尿素的吸收、分配与利用特性. 中国农业科学, 44 (7): 1408 - 1414.

Li Jia-yang, Wang Yan-ping, Han Ming-yu, Zhang Lin-sen, Han Wen-she. 2017. Soil moisture dynamics of apple orchards in Loess Hilly area of northern Shaanxi Province. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 25 (5): 749 - 758. (in Chinese)

李佳阳, 王延平, 韩明玉, 张林森, 韩稳社. 2017. 陕北黄土丘陵区山地苹果园的土壤水分动态研究. 中国生态农业学报, 25 (5): 749 - 758.

Li Liang-ke, Zhang Wei-feng, Wang Yan-feng, Chen Xin-ping, Ma Ji, Gao Li-wei, Zhang Fu-suo. 2011. Effectiveness of compound fertilizer on grain yields in China. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 17 (3): 623 - 629. (in Chinese)

李亮科, 张卫峰, 王雁峰, 陈新平, 马 骥, 高利伟, 张福锁. 2011. 中国农户复合(混)肥施用效果分析. 植物营养与肥料学报, 17 (3): 623 - 629.

Li Y, Wang L, Xue X, Guo W, Chen F. 2017. Comparison of drip fertigation and negative pressure fertigation on soil water dynamics and water use efficiency of greenhouse tomato grown in the North China Plain. Agricultural Water Management, 184: 1 - 8.

Liu Jia-fen, Li Hui-feng, Yu Ting, Wang Yu-xia, Li Fang-dong, Li Lin-guang. 2011. Investigation on the fertilization characteristics of apple orchard in Yi-meng mountainous area. Journal of Fruit Science, 28 (4): 558 - 562. (in Chinese)

刘加芬, 李慧峰, 于 婷, 王玉霞, 李芳东, 李林光. 2011. 沂蒙山区苹果园肥料施入特点调查分析. 果树学报, 28 (4): 558 - 562.

Neilsen G H, Neilsen D, Ferree D C, Warrington I J. 2003. Nutritional requirements of apple//Apples botany production uses, Warrington: CABI Publishing: 267 - 302.

Pampolino M F, Manguiat I J, Ramanathan S, Gines H C, Tan P S, Chi T N. 2007. Environmental impact and economic benefits of site-specific nutrient management (SSNM) in irrigated rice systems. Agricultural Systems, 93 (1 - 3): 1 - 24.

Pan D, Kong F, Zhang N, Ying R. 2017. Knowledge training and the change of fertilizer use intensity: Evidence from wheat farmers in China. Journal of Environmental Management, 197: 130 - 139.

Peng Ling, Ji Meng-meng, Ren Yi-hua, Ge Shun-feng, Jiang Han, Jiang Yuan-mao. 2015a. Effect of grass cultivation on phosphorus uptake and mitigation of accumulation in soil phosphorus status. Journal of Soil and Water Conservation, 29 (1): 121 - 125. (in Chinese)

彭 玲, 季萌萌, 任怡华, 葛顺峰, 姜 翰, 姜远茂. 2015a. 生草栽培对磷吸收及土壤有效磷积累风险缓解状况的影响. 水土保持学报, 29 (1): 121 - 125.

Peng Ling, Wen Zhao, An Xin, Jiang Han, Jiang Yuan-mao. 2015b. Effects of inter planting grass on ^{15}N utilization and soil accumulation in orchard. Acta Pedologica Sinica, 52 (4): 950 - 956. (in Chinese)

彭 玲, 文 昭, 安 欣, 姜 翰, 姜远茂. 2015b. 果园生草对 ^{15}N 利用及土壤累积的影响. 土壤学报, 52 (4): 950 - 956.

Peng Shi-qi. 2014. Study on lawmaking about fertilizer use and management in China. Scientia Agricultura Sinica, 47 (20): 4109 - 4116. (in Chinese)

彭世琪. 2014. 中国肥料使用管理立法研究. 中国农业科学, 47 (20): 4109 - 4116.

Rossini-Oliva S, Mingorance M D, Peña A. 2017. Effect of two different composts on soil quality and on the growth of various plant species in a

- polymetallic acidic mine soil. *Chemosphere*, 168: 183 - 190.
- Siddique M, Ali S, Javed A S. 2009. Macronutrient assessment in apple growing region of Punjab. *Soil Environ.*, 28 (2): 184 - 192.
- Sha Jian-chuan, Ge Shun-feng, Chen Jian-ming, Feng Yan-guang, Jiang Yuan-mao. 2017. Effects of bag-controlled release fertilizer on soil mineral nitrogen and ^{15}N -Urea absorption, utilization and loss of Fuji apple. *Journal of Soil and Water Conservation*, 31 (2): 267 - 271. (in Chinese)
- 沙建川, 葛顺峰, 陈建明, 丰艳广, 姜远茂. 2017. 袋控肥对苹果土壤 N_{min} 及 ^{15}N -氮素吸收利用和损失的影响. *水土保持学报*, 31 (2): 267 - 271.
- Shao Lei, Zhang Min, Chen Xue-sen, Wang Li-xia. 2007. Effects of controlled release nitrogen fertilizer on yield and nitrogen content of soil and apple tree. *Acta Horticulturae Sinica*, 34 (1): 43 - 46. (in Chinese)
- 邵蕾, 张民, 陈学森, 王丽霞. 2007. 控释氮肥对土壤和苹果树氮含量及苹果产量的影响. *园艺学报*, 34 (1): 43 - 46.
- Shi Heng-yong, Zhao Min-juan, Huo Xue-xi. 2013. Farmer's fertilizer input structure and its influencing factors—An empirical analysis on survey data of growers in seven apple main producing provinces. *Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition)*, (2): 1 - 7. (in Chinese)
- 史恒通, 赵敏娟, 霍学喜. 2013. 农户施肥投入结构及其影响因素分析—基于7个苹果主产省的农户调查数据. *华中农业大学学报 (社会科学版)*, (2): 1 - 7.
- Su Yi-ming, Wang Yan-ping, Mao Chen-peng, Han Ming-yu, Zhang Lin-sen. 2013. Effects of different rainwater-collection and soil moisture conserving ways on soil moisture, temperature and leaf physiological characteristics in arid apple orchard. *Water Saving Irrigation*, (6): 22 - 28. (in Chinese)
- 苏一鸣, 王延平, 毛晨鹏, 韩明玉, 张林森. 2013. 集雨保墒措施对旱地苹果园土壤水分、温度及叶片生理的影响研究. *节水灌溉*, (6): 22 - 28.
- Sun Wen-tai, Ma Ming, Dong Tie, Liu Xing-lu, Zhao Ming-xin, Yin Xiao-ning, Niu Jun-qiang. 2016. Response of distribution pattern and physiological characteristics of apple roots grown in the dry area of eastern Gansu to ground mulching. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 27 (10): 3153 - 3163. (in Chinese)
- 孙文泰, 马明, 董铁, 刘兴禄, 赵明新, 尹晓宁, 牛军强. 2016. 陇东旱塬苹果根系分布规律及生理特性对地表覆盖的响应. *应用生态学报*, 27 (10): 3153 - 3163.
- Sun Xia, Chai Zhong-ping, Jiang Ping-an, Jin Jun-xiang, Jia Ma-li, Fang Lei. 2011. Effects of soil managements on soil physical and chemical properties of the apple orchard in the South of Xinjiang. *Pratacultural Science*, 28 (2): 189 - 193. (in Chinese)
- 孙霞, 柴仲平, 蒋平安, 金俊香, 加玛丽, 方雷. 2011. 土壤管理方式对苹果园土壤理化性状的影响. *草业科学*, 28 (2): 189 - 193.
- Wang Fu-lin, Men Yong-ge, Ge Shun-feng, Chen Ru, Ding Ning, Peng Fu-tian, Wei Shao-chong, Jiang Yuan-mao. 2013. Research on soil and leaf nutrient diagnosis of 'Red Fuji' apple orchard in two-dominant producing areas. *Scientia Agricultura Sinica*, 46 (14): 2970 - 2978. (in Chinese)
- 王富林, 门永阁, 葛顺峰, 陈汝, 丁宁, 彭福田, 魏绍冲, 姜远茂. 2013. 两大优势产区'红富士'苹果园土壤和叶片营养诊断研究. *中国农业科学*, 46 (14): 2970 - 2978.
- Wang Gui-hua, Wang Shu-zeng, Chen Lang-bo, Yu Xiao-feng, Cong Ming-liang. 2005. The improvement effect of caustic lime on the acidified soil in apple orchard. *China Fruits*, (4): 11 - 12. (in Chinese)
- 王桂华, 玉树增, 陈浪波, 于晓峰, 丛明亮. 2005. 施用生石灰改良苹果园酸化土壤试验. *中国果树*, (4): 11 - 12.
- Wang Xiao-ying, Tong Yan-an, Liu Fen, Zhao Zuo-ping. 2013. Evaluation of the situation of fertilization in apple fields in Shaanxi Province. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 19 (1): 206 - 213. (in Chinese)
- 王小英, 同延安, 刘芬, 赵佐平. 2013. 陕西省苹果施肥状况评价. *植物营养与肥料学报*, 19 (1): 206 - 213.
- Wei Shao-chong, Jiang Yuan-mao. 2012. Investigation on fertilization status in apple orchards of Shandong province. *Shandong Agricultural Sciences*, 44 (2): 77 - 79. (in Chinese)
- 魏绍冲, 姜远茂. 2012. 山东省苹果园肥料施用现状调查分析. *山东农业科学*, 44 (2): 77 - 79.
- Wienhold B J, Andrews S S, Karlen D L. 2004. Soil quality: a review of the science and experiences in the USA. *Environmental Geochemistry and Health*, 26 (2): 89 - 95.

- Wu Liang-quan. 2014. Fertilizer recommendations for three major cereal crops based on regional fertilizer formula and sites specific adjustment in China[Ph. D. Dissertation]. Beijing: China Agricultural University. (in Chinese)
- 吴良泉. 2014. 基于“大配方、小调整”的中国三大粮食作物区域配肥技术研究[博士论文]. 北京: 中国农业大学.
- Xu Hai-gang, Ji Meng-meng, Ge Shun-feng, Jiang Yuan-mao, Jiang Han, Chen Ru. 2015. Effect of different horizontal fertilizer placements on characteristics of absorption, distribution and utilization of ^{15}N by Gala/*Malus hupehensis*. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 21 (5): 1366 - 1372. (in Chinese).
- 许海港, 季萌萌, 葛顺峰, 姜远茂, 姜 翰, 陈 汝. 2015. 不同水平位置施肥对‘嘎啦’苹果 ^{15}N 吸收、分配与利用的影响. 植物营养与肥料学报, 21 (5): 1366 - 1372.
- Xu X, He P, Zhang J, Pampolino M F, Johnstone A M, Zhou W. 2017. Spatial variation of attainable yield and fertilizer requirements for maize at the regional scale in China. Field Crops Research, 203: 8 - 15.
- Yang Hong-qiang, Shu Huai-rui. 2007. Studies on apple roots. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- 杨洪强, 束怀瑞. 2007. 苹果根系研究. 北京: 科学出版社.
- Zhang Da-peng, Jiang Yuan-mao, Peng Fu-tian, Wei Shao-chong, Ge Shun-feng, Li Yan, Zhou En-da. 2012. Effects of N application with dripping irrigation on N absorption and utilization of apple. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 18 (4): 1013 - 1018. (in Chinese)
- 张大鹏, 姜远茂, 彭福田, 魏绍冲, 葛顺峰, 李 艳, 周恩达. 2012. 滴灌施肥对苹果氮素吸收和利用的影响. 植物营养与肥料学报, 18 (4): 1013 - 1018.
- Zhang F S, Chen X P, Vitousek P. 2013. Chinese agriculture: an experiment for the world. Nature, 497: 33 - 35.
- Zhang F S, Cui Z L, Chen X P, Ju X T, Shen J B, Chen Q, Liu X J, Zhang W F, Mi G H, Fan M S, Jiang R F. 2012. Integrated nutrient management for food security and environmental quality in China. Advances in Agronomy, 116: 1 - 32.
- Zhang Fu-suo, Wang Ji-qing, Zhang Wei-feng, Cui Zhen-ling, Ma Wen-qi, Chen Xin-ping, Jiang Rong-feng. 2008. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement. Acta Pedologica Sinica, 45 (5): 915 - 924. (in Chinese)
- 张福锁, 王激清, 张卫峰, 崔振岭, 马文奇, 陈新平, 江荣风. 2008. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径. 土壤学报, 45 (5): 915 - 924.
- Zhang Lin-sen, Li Xue-wei, Wang Xiao-lin, Zhang Li-xin, Lü Dian-qing, Wang Chao-hui, Han Ming-yu. 2015. Effects of fertilization with injection to the rhizosphere on nitrogen absorption and utilization, fruit yield and quality of apple in the Loess Plateau. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 21 (2): 421 - 430. (in Chinese)
- 张林森, 李雪薇, 王晓琳, 张立新, 吕殿青, 王朝辉, 韩明玉. 2015. 根际注射施肥对黄土高原苹果氮素吸收利用及产量和品质的影响. 植物营养与肥料学报, 21 (2): 421 - 430.
- Zhao Bing-qiang, Zhang Fu-suo, Liao Zong-wen, Xu Xiu-cheng, Xu Qiu-ming, Zhang Fu-dao, Jiang Rui-bo. 2004. Research on development strategies of fertilizer in China. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 10 (5): 536 - 545. (in Chinese)
- 赵秉强, 张福锁, 廖宗文, 许秀成, 徐秋明, 张夫道, 姜瑞波. 2004. 我国新型肥料发展战略研究. 植物营养与肥料学报, 10 (5): 536 - 545.
- Zhao Lin. 2009. Study on the characteristics of utilization of soil nitrogen for apple trees[M. D. Dissertation]. Tai'an: Shandong Agricultural University: 25 - 26. (in Chinese)
- 赵 林. 2009. 苹果对土壤氮利用特性研究[硕士论文]. 泰安: 山东农业大学: 25 - 26.
- Zhao Lin, Jiang Yuan-mao, Peng Fu-tian, Wang Hai-yun, Li Hong-bo. 2010. Study on the difference of nutrients in stable orchard and unstable orchard. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science), 41 (4): 549 - 554. (in Chinese)
- 赵 林, 姜远茂, 彭福田, 王海云, 李洪波. 2010. 稳产与变产果园氮磷钾差异性研究. 山东农业大学学报(自然科学版), 41 (4): 549 - 554.
- Zhao Zuo-ping, Tong Yan-an, Liu Fen, Wang Xiao-ying, Zeng Yan-juan. 2012. Assessment of current conditions of household fertilization of apple in Weibei Plateau. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 20 (8): 1003 - 1009. (in Chinese)
- 赵佐平, 同延安, 刘 芬, 王小英, 曾艳娟. 2012. 渭北旱塬苹果园施肥现状分析评估. 中国生态农业学报, 20 (8): 1003 - 1009.