

发展功能农业解决“隐性饥饿”

梁龙¹, Bradley G. Ridoutt², 谢斌¹, 张洒洒¹, Awekey M. Gelaw³, 孟伟婷¹, 王丽媛⁴, 郭岩彬¹, 赵桂慎¹

1. 中国农业大学功能农业研究中心, 北京 100193
2. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Victoria 3169, Australia
3. International Center for Biosaline Agriculture, Dubai 10660, United Arab Emirates
4. 上海市农业科学院, 上海 201403

摘要 据估算,全世界有20亿人口由于微量营养素缺乏处于“隐性饥饿”状态,“隐性饥饿”正成为胁迫人体健康的重大隐患,在发展中国家表现尤为明显。欧美国家建议通过生产功能食品解决这一世界难题。研究表明,众多国家和国际组织很早就通过食品强化、工业强化、膳食多元化和食品增补等措施尝试消除“隐性饥饿”,但因为经济、管理、基础设施等多种原因,迄今无法从根本上解决全球尤其是发展中国家面临的“隐性饥饿”问题。随着科学技术的发展,通过作物育种、农艺等生物强化技术生产功能农产品已成为新的热点,与传统技术手段相比经济可行、技术可靠、公众接受度高,已经取得初步成果,具有较好发展前景。为此,中国有关专家提出发展功能农业的战略,得到国家相关部门重视,开展了功能农业关键技术的研发和示范,一些技术取得重要突破。综合国内外经验和研究成果,要从根本上解决“隐性饥饿”问题,需要以全产业链方式发展功能农业产业,技术研究和制度建设同步进行,前者包括育种、农艺、微生物强化等6大技术体系的研发,后者重点是建立多主体、多部门联合实施机制。可以预见,功能农业有望在未来解决国内外“隐性饥饿”过程中发挥重要作用,借助“一带一路”的战略机遇,还可为中国农业供给侧结构性改革和国际化发展战略提供新思路和新策略。

关键词 微量营养素;生物强化;功能农业;隐性饥饿

长期以来,粮食短缺和食品安全一直威胁着人类的生存和发展。19世纪开始,先后通过4次农业革命,即19世纪90年代的农业机械革命,20世纪初的农业化学革命,20世纪前半叶的杂交育种革命以及20世纪下半叶的“绿色革命”,粮食生产得到快速发展,目前,人类温饱问题在很大程度上得到缓解。根据联合国粮农组织(FAO)2015年统计年鉴,世界人均日摄入膳食热量从1990年的2597 Kcal提高到2014年的2903 Kcal,平均膳食能量供应充裕度分别是113和123,这意味着膳食供给已超过人体生存的能量需求^[1]。然而,早在2001年,Gillespie等^[2]就指出,世界大多数国家面临营养过剩和营养不良的双重威胁。世界卫生组织(WHO)和联合国粮农组织把膳食中缺乏维生素、矿物质称为“隐性饥饿”(hidden hunger)。2014年,联合国粮农组织和世界卫生组织共同举办的第二届国际营养大会指出,全球约有20亿人在遭受“隐性饥饿”,即摄入足够碳水化合物、脂类、蛋白质等大量营养素外,微量元素、维生素等营养物质摄入不足。世界卫生

组织在2015年报告中指出:世界有近50亿人存在不同形式的微量营养素缺乏。大约有20亿人患有贫血症,大部分是因为缺铁所致。有近20亿人缺碘,缺锌人口占世界总人口的17.3%。世界上有2.5亿学前儿童饱受维生素A缺乏的困扰,还有相当多的孕妇因为缺乏维生素A而面临风险^[3-4]。Valencia等^[5]发现,非洲大陆缺少钙、锌、硒、碘和铁的人分别占其总人口的54%、40%、28%、19%和5%。2016年,国际食品政策研究所(IFPRI)发布的《2016年全球营养报告》中指出,世界上每3人之中就有1人营养不良,表现为发育不良、个体消瘦、过度肥胖、缺乏重要的维生素或矿物质等,营养不良已成为一种全球“新常态”。在亚洲和非洲,每年营养不良造成的经济损失相当于11%的国内生产总值(GDP),超过2008—2010年金融危机期间的经济损失。在美国,当家庭中有1人患有肥胖症时,该家庭每年需支付的额外医疗费用相当于其年收入的8%。在中国,糖尿病患者每年会因患病损失16.3%的收入。现代医学发现,70%的慢性疾病包括糖尿病、心血管

收稿日期:2017-08-07;修回日期:2017-09-28

基金项目:农业部软科学委员会委托课题(K201714-2);国家公益性行业(农业)科研专项(201303106)

作者简介:梁龙,博士,研究方向为生态循环农业、功能农业、生态评价,电子信箱:txws0109@126.com;赵桂慎(通信作者),副教授,研究方向为经济生态、生态农业与规划设计、生物多样性与复杂系统管理、富硒功能农业,电子信箱:zhgsh@cau.edu.cn

引用格式:梁龙, Bradley G. Ridoutt, 谢斌, 等. 发展功能农业解决“隐性饥饿”[J]. 科技导报, 2017, 35(24): 82-89; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.24.011

疾病、癌症、肥胖症、亚健康等都与人体营养元素摄取的不均衡有关,“隐性饥饿”正成为人们健康的致命杀手^[6]。

就中国而言,国家卫生和计划生育委员会下属的中国疾病预防控制中心将中国居民营养状况概括为:面临“能量过剩”和“微量营养素缺乏”双重挑战。2002年卫生部在全国范围内开展了中国居民营养状况调查,结果表明:中国城乡粮食供应充足,居民能量需要已经满足,温饱得到保障,但仍存在亟待解决的微量营养素缺乏问题,主要表现在贫血症患者众多,钙、维生素A、叶酸摄入不足^[7]。据估算,中国有1140万6岁以下儿童缺乏维生素A,微量元素锌和铁摄入不足群体分别是8600万和2.09亿,2.6亿人因叶酸摄入不足健康受到影响,食物源营养素摄入不足导致慢性病高发的问题备受关注^[8]。2002年至2012年10年间,中国肥胖症、心脑血管疾病、糖尿病、慢性呼吸系统疾病等慢性病和癌症的发病率呈上升趋势。《中国居民营养与慢性病状况报告(2015年)》提供了2010—2013年营养与健康状况监测情况:中国居民三大营养素(蛋白质、脂肪、碳水化合物)供能充足,能量需要得到满足。目前存在的营养不良主要包括3种形式,即营养不足、发育迟缓和消瘦,微量营养素缺乏症,超重和肥胖^[9]。

根据FAO和中国农业科学院公布的数据,全世界有20亿以上的人遭受由微量营养素缺乏导致的“隐性饥饿”,中国则有3亿,还存在几亿潜在群体,例如中国有2/3的人口存在不同程度的硒摄入不足^[10]。可见,“隐性饥饿”是全世界当前和未来亟待解决的共同问题。2008年,欧盟提出发展功能食品策略^[11],中国以赵其国院士领导的中国科学院农业领域战略研究组编纂的《中国至2050年农业科技发展路线图》中首次提出“功能农业”,具体是指通过生物营养强化技术或其他生物工程生产具有健康改善功能的农产品,例如富含硒、锌、钙、铁、碘和维生素等明确为人体健康所需营养物质的功能农产品,从而解决因微量营养素缺乏导致的“隐性饥饿”。功能农业被视为继高产农业、绿色农业之后的第3个发展阶段,把农业从“吃饭产业”变为了“健康产业”,带动“农业增效、农村增力、农民增收、人民增寿”^[12]。在中国主要农产品持续增产、农业效益增长乏力的大形势下,功能农业为农业供给侧结构性改革提供了一条新的发展路径。

1 解决“隐性饥饿”的技术研究与应用

1.1 传统技术手段及应用

事实上,隐性饥饿很早就引起了各国政府、国际组织、研究机构的高度关注,并一直在试图解决。为消除由于微量营养素缺乏导致的隐性饥饿,从世界范围来看,在国家和国际组织层面上大致采取了食物强化、工业强化、食物增补及食品多元化等策略。

发达国家较早认识到微量营养素缺乏问题,并采取相应措施解决,因此在这方面的研究与实践值得借鉴。在工业化国家,食物强化被认为是最成功的策略之一,所谓食物强化就是在食品中添加矿物质和维生素。碘盐是最为成功的食

物强化事例之一。食盐加碘强化1922年始于瑞士,而现在为了控制碘缺乏性疾病,WHO推荐碘盐的广泛性强化。最近公布的数据显示,全球控制碘缺乏已取得了实质性进展。在面包和牛奶中添加不同矿物质和维生素也在工业化国家取得成功^[13]。工业强化是指那些消费量大的主要食品在加工过程中进行微量营养素添加,然后通过市场机制输送给需要的受众群体,这种方法在发达国家也获得成功。最为明显的例子是全球市场流通的小麦面粉26%被加以工业强化,受益群体达到18亿人^[14]。食品增补被认为是短期内最有效提高营养健康的方式,包括药丸和即食矿物质营养液的生产 and 配送。发达国家在国家层面取得成功的策略还包括农艺措施,例如硒具有预防和治疗心血管疾病、提高免疫力功能,芬兰通过农田施用富硒肥,成功提高食品作物中硒含量和公众日均摄入量,从而提高全民血清中的硒含量。土耳其通过施用富锌肥等农艺措施解决农业土壤和主要粮食作物中锌缺乏的问题^[15]。

20世纪90年代开始,中国政府利用后发优势,汲取发达国家经验,实施了多项政策并启动若干营养干预项目。统计数据显示,这些政策和干预项目成效显著,为其他面临相似问题的亚洲国家树立了良好榜样。20世纪90年代中国第一个启动的是食盐加碘工程,其后又启动了补充维生素A项目。2003年先后启动了西部省份的面粉添加维生素A和B项目,5省2市、14个厂家参与大豆酱加微量元素铁。这些活动取得巨大成就。食盐加碘工程通过10年努力,中国甲状腺患者急剧减少,从最初的超过50%降低到不到5%。1998年对维生素A添加工程评估,结果显示仅此1项每年挽救近7万儿童生命,使同样数量的人免于永久性失明^[15]。

1.2 现代技术研究与路径

在技术研究层面,科技工作者更加注重的是生物强化、微生物干预、农艺强化或干预等。生物强化是指通过基因工程和传统育种等手段提高农作物微量营养素含量。微生物干预就是通过技术手段,将有益细菌移植到植物根部,通过一系列机理促进作物生长。农艺干预是通过一系列农艺措施促进作物对微量营养素的吸收^[13]。生物强化是目前研究的热点。1993年前后,国际农业研究磋商组织(CGIAR)下属的研究中心首先提出培育富含微量营养素作物新品种的思想。1995—2002年,这些工作在CGIAR微量营养素项目支持下得以启动,富铁水稻、高维生素A玉米、富铁大豆及高维生素A甘薯成为主要目标。2003年生物强化挑战项目启动,随后更名为“Harvest Plus”,Plus不仅指在高产的基础上,作物新品种富含更多营养,还是为联合多学科与多部门共同解决隐性饥饿问题而搭建的一座桥梁^[16]。Saltzman等^[17]对国际生物强化工程做了阶段性总结,认为生物强化工程包括传统育种强化和转基因强化,前者实施的作物包括小麦、水稻、玉米等粮食作物,以及橙色甜土豆、木薯、小米、豆类、小扁豆、豇豆、香蕉、高粱和土豆;后者包括黄金大米、木薯、香蕉和非洲高粱。通过对非洲莫桑比克和乌干达橙色甜土豆项目进行

评价,认为项目达到预期效果。中国关于生物强化的技术研究开始于20世纪90年代末,重点研究如何提高小麦、水稻、玉米等主要粮食作物中的铁、锌和维生素A含量的技术,中国是世界上少数几个大规模开展植物育种工程的国家^[15]。2004年,中国农业科学院与康奈尔大学、国际热带农业研究所、国际食品政策研究所共同启动了中国生物强化项目。截至2016年,中国参与该项目的专家团队已经育成18个含铁、锌和维生素A的作物新品种/品系,涉及铁、锌、维生素A源、叶酸等多种微量营养素及玉米、甘薯、小麦、水稻等作物,部分项目达到国际先进水平^[5,14-16]。

在微生物干预方面,Rana等^[18]发现,促进植物生长的根际细菌由于能够减少化肥、农药和其他农业化学品的应用,已经广泛应用于农业生产,主要粮食作物和大部分蔬菜、水果作物都利用丛枝菌根来促进作物对土壤中微量矿物质元素的吸收。此外,Kumar^[19]发现植酸、酚和多酚、血凝素类及因为重金属污染土壤导致种子和籽粒中富集的重金属,都能抑制植物类食品中微量元素的生物利用率。Graham等^[20]、Welch^[21]、White等^[22]在一些食物中发现了一些促进微量营养素富集的物质,例如存在于新鲜蔬菜水果中的有机酸(维生素C、延胡索酸、苹果酸盐、柠檬酸);存在于深色蔬菜和橙色蔬菜中的类胡萝卜素;存在于菊苣、大蒜、洋葱、全小麦、洋姜中的菊粉和非益生菌等,存在于肉类中的蛋氨酸、半胱氨酸、组氨酸等。如何消除抑制因子的不利影响,充分发挥促进因子的积极作用成为今后微生物强化的研究重点。

除了育种强化和微生物干预,农艺强化同样受到学术界高度重视。Cakmak^[23]认为农艺生物强化和基因生物强化是提升谷物微量营养素富集的关键。基因工程育种虽然具有持续性和高效性,但周期长、投入大,因此通过农艺措施和传统育种方式更加切实可行。Saltzman等^[17]认为,农艺生物强化主要是通过微生物肥的开发和使用,对于水稻作物能够实现大部分预定目标,而叶面肥在玉米微量营养素强化中的效果不明显。因此,农艺生物强化可以作为植物育种的补充,进一步加强研究。Valenca等^[5]关注非洲隐性饥饿问题,认为虽然从长期来看,基因生物强化可能成本更低,但就非洲目前情况来看,农艺强化尤其是微量元素肥与化肥、有机肥结合,是提高主要农作物产量和微量营养素富集度、缓解非洲面临的大面积微量营养素缺乏的最有效措施。Alloway等^[24]认为,相对于固态肥,液态肥在提高主要食品作物产量和微量营养素富集方面更具有优势。Wang等^[25]通过实验发现,富锌叶面肥能够增加谷物产量和籽粒的锌富集,叶面肥与杀虫剂同时使用对作物生长没有不良影响。李丽霞^[26]发现微肥能够提高谷物、蔬菜、水果的产量和微量营养素的富集,但需要加强对环境影响的研究。此外,科学家还探讨了间套作等其他农艺措施。Cakmak^[27]发现,谷物和大豆套种,能够增加作物根部、叶和籽粒对Fe和Zn的吸收。李可懿^[28]研究发现,翻压绿肥、增加施氮量,小麦籽粒氮、硫、钙、铁、铜的富集呈现增加趋势。Singh等^[13]提出了畜禽饲料的生物强化,即通过培育

高产优质的饲料作物和加强对生物强化作物的非食用部分的饲料化,提高畜禽对微量营养素的吸收,进而通过食物链使人类受益。Díazgómez等^[29]发现强化后的食品在后续加工和储存过程中都会造成微量营养素的流失,提出加强后续环节研究。

值得关注的是,中国微量营养素的技术研究和实践推广应用结合日益紧密。2013年,中国农业部启动了国家公益性行业(农业)科研专项“优质高效富硒农产品关键技术研究示范”,该项目由中国农业大学主持,包括16家科研单位、18家地方政府及企业和农业合作社参与课题研究和示范。截至2017年,该项目围绕粮食作物、经济作物、畜禽养殖、农产品精深加工等,已经开发出100多项富硒技术及作物专用肥,申请20多项专利,在硒强化剂领域,如化学纳米硒和生物纳米硒领域取得关键性突破,为中国居民定量化科学补硒提供了可行性技术支持,目前已在全国建立了20多个富硒产业园区和示范基地,累计示范面积超过20万亩。2015年成立了拥有上百家企业参与的“中国富硒农业产业技术创新联盟”,并从2015年开始每年发布《中国富硒农业发展蓝皮书》^[30]。功能农业的首创者赵其国院士带领其团队围绕锌、硒等微量元素开展研究,针对关键技术展开攻关,相关技术已经在水稻、小麦、茶、果蔬、水产、禽蛋等30个大宗农副产品中得到应用。此外,还制定了20多项产品技术标准和5项地方种植标准,并在全国建立了一系列示范基地^[12]。

综上所述,生物强化、微生物干预、农艺强化和畜禽饲料的生物强化等系列技术都是注重通过技术手段实现作物、畜禽和食品对微量营养素的富集,达到解决“隐性饥饿”的根本目标,以上技术实质上都是功能农业的主要技术路径,属于功能农业范畴。就目前的技术研究而言,国内外学术界注重前端品种培育、作物栽培等,而对功能农产品的后续加工和微量营养素的定量化补充技术重视不足。因此,功能农业必须扩展其内涵和外延,从品种选育、农田栽培和管理扩展到产品精深加工、标准制定、功能产品质量及实施效果的监测和评估、废弃物处理和循环利用等,功能农业需要以全产业链的方式解决“隐性饥饿”问题,为人类健康发挥应有的作用。

2 解决“隐性饥饿”的经济和社会成本

2.1 传统技术推行的成本与障碍

在国家层面,虽然食品强化、工业强化、膳食多元化、食物补充等策略在发达国家和地区取得成功,但普遍认为这些方法均存在缺陷(表1),不适合广大发展中国家和贫困地区。国家和国际组织在消除隐性饥饿方面不成功的案例同样值得反思和借鉴。印度从1970年开始就推行“营养性贫血控制方案”,结果由于管理混乱、缺乏配套资金、物流不畅等问题而收效甚微。此后又在全国推行铁-叶酸增补计划,也仅仅覆盖30%孕妇和10%成年女性。1990年世界儿童峰会,包括世界银行(World Bank)、世界卫生组织、联合国粮农

组织、联合国发展署(UNDP)等采取行政强制和传统的公共健康干预策略,共同发起消除微量营养素缺乏活动,计划在2000年消除或者明显减少铁、维生素A和碘的缺乏状况,结果以失败告终。在2001年,联合国大会制定“千禧年目标”,计划到2015年通过消除微量营养素缺乏从而消灭极端贫困和饥饿,减少儿童死亡率,提高母亲健康,微量营养素补充是主要措施,但同样没达到预期效果。最为典型的是世界卫生组织和世界银行发起的泰国一缅甸边境地区的维生素A增

补计划,每颗维生素A成本是0.1美元,但加上物流和人力投入,最终其成本上升到每粒1美金,该项活动的年支出成本是5亿美金。其后采取作物生物强化措施,10年成本为400万美金,年均成本仅为原来的0.2%^[31]。可见,不做好经济和社会成本评估,没有完善的基础设施、系统组织和物流网络,即便是联合国和政府组织实施的活动,同样也会付出昂贵的经济、社会成本,却达不到预期效果。

表1 传统技术消除隐性饥饿方法存在的缺陷

Table 1 Defects of eliminating hidden hunger by conventional technologies

传统技术	存在缺陷	参考文献
食物强化	对食品加工水平要求较高,需要完善的基础设施构建分配网络,提高了食品价格;单一微量营养素添加与多元成分添加成本一致	[14],[31]
工业强化	加工过程中导致微量营养素流失,影响食品质量;依托市场实施,需要相关技术和完善的物流网络	[13],[29]
膳食多元化	对经济和环境条件要求较高,贫困家庭可以利用的资源有限;成本昂贵,难以大规模实施	[13]
食品增补	不适合大规模群体,而且应该在第一时间被其他强化措施替代,否则时间越长,成本越高	[13],[32-33]

2.2 现代技术推行的成本与障碍

目前,对于消除隐性饥饿的成本效益定量分析,失能调整生命年(disability-adjusted life years, DALY;表示某人因为疾病或者意外事件而失去的生命年数)成为医学界和学者普遍使用的一个指标。一般认为,在某一特定情况,比如硒元素缺乏所引起的患病、残疾及早亡等所有疾病负担的总和,以失去的生命年数来表示就是DALY。世界卫生组织等通过计算“每挽回1个失能调整生命年的费用”(cost per DALY saved),评价各种营养干预措施的成本效益。他们认为,如果挽回1个DALY的费用低于每年的人均国民收入,该措施“非常经济有效”;如果是年人均国民收入的1~3倍,则为“经济有效”^[16]。相关研究人员对消除隐性饥饿不同方式也做了相应经济评价。Valença等^[5]发现基因生物强化成本远高于农艺强化。Gregory等^[34]对包括农艺强化、育种、食品增补等方法减缓锌和铁缺乏进行了定量评价(表2)。可以看出,作

物育种是最经济的方法,其次则是施用叶面肥等措施。

Saltzman等^[7]发现,通过转基因技术强化的作物在非洲受到普遍抵制。Van等^[41]认为,通过基因工程实现作物生物强化从理论上已经得到证实,但对于政策制定者和利益相关者而言,还面临社会经济、健康、伦理道德等多方面的挑战。De等^[42]发现,通过基因工程实现的作物强化并没有被大部分潜在受益群体所接收,即便是在一些发达国家,贸易保护主义和不科学的规则使得基因工程强化的作物难以推广。除了消除贸易障碍,建立完整的基础设施和供应链也是非常必要的。

由此可见,以国家和国际组织作为实施主体,采取食品强化、工业强化、食品增补在内的措施经济成本不低,对基础设施和运行机制要求相对较高,不适合发展中国家和贫困地区。相对而言,现代育种技术、农艺强化是消除隐性饥饿的有效措施,成效显著,前景较为乐观。然而,就基因技术而

表2 减缓Zn和Fe缺乏不同食品系统方法的DALY成本评估

Table 2 Estimated cost per DALY saved for a range of food system approaches to alleviate Zn and Fe deficiencies

技术名称	每挽回单位DALY成本/US \$	实施地域	资料来源
施用颗粒肥	773~6457	撒哈拉以南非洲	[35]
施用叶面肥	81~575	撒哈拉以南非洲	[35]
改良土壤+叶面肥	256~549	巴基斯坦	[36]
施叶面肥+杀虫剂	41~594	中国	[37]
作物育种技术	0.7~7.3	印度	[38]
食品增补技术	65~2758	世界77个国家	[39]
面粉强化技术	401	赞比亚	[40]

言,国际学术界主流群体对于通过基因技术实现作物强化解决“隐性饥饿”不持反对态度,但在具体实施中面临系列社会、政治、法律阻力。因此,面对“隐性饥饿”,学术界普遍认为,对于发展中国家和贫困地区,传统育种、农艺强化性价比最高、可持续性最强,因此,今后重点应该围绕食品作物开展各种生物强化技术研究。但无论哪种措施,都必须对经济、社会等系列成本做充分评估,否则,即便是联合国等相关机构组织的活动也难以达到预期目标,所以,在研发相应技术体系的基础上,有效的制度建设尤为重要。

3 功能农业产业体系的发展策略

3.1 技术研发是基础

从目前来看,为解决“隐性饥饿”问题,国际社会以农业为主体在酝酿“第二次绿色革命”,既要解决食品数量的问题,又要解决质的问题。为此,欧盟有关机构提出“功能食品”概念,即“一种食品如果可以令人信服地证明对身体某种或多种机能有益处,有足够营养效果改善健康状况或能减少患病,即可被称为功能食品^[11]”。王瑛等提出发展“功能蔬菜”,指出要实现功能蔬菜的可持续发展必须解决其产业化过程中的关键技术问题,包括功效性与安全性评价,以及良种培育和规模化生产配套技术。经过学术界的大力提倡,已得到政府及相关部门的回应。2017年中央一号文件强调“加强现代生物和营养强化技术研究,挖掘开发具有保健功能的食品。”2017年2月,农业部在《“十三五”农业科技发展规划》中强调,要突破“品质与营养功能成分识别评价鉴定技术”,要求主要食用农产品营养功能评价体系基本建立,营养功能组分基本摸清。同年3月,农业部在印发的《关于深入实施主食加工业提升行动的通知》中要求:加强现代生物和营养强化技术研究,针对老人、儿童、学生、孕妇、“三高”病人等特定人群,开发营养均衡、药食同源等功能性主食产品^[12]。科技部在2017年5月公布的《“十三五”食品科技创新专项规划》中指出:在功能保健型营养健康食品与特殊膳食食品开发等方面迫切需要科技引领,“研发和创制适用于肥胖症、糖尿病等代谢综合征类、婴幼儿和其他特定(特需)人群,以及特殊环境工作人员的营养强化食品和专用型膳食健康食品”^[13]。2017年6月,科技部在发布的《“十三五”农业农村科技创新专项规划》中要求:深入实施转基因生物新品种培育重大专项和加快部署种业自主创新重大工程,加快突破新一代系统设计育种、合成生物学等农业重大科学与前沿技术问题^[14]。2017年6月,国务院办公厅印发《国民营养计划(2017—2030年)》的通知,通知指出以改革创新驱动营养型农业,加大力度推进营养型优质食用农产品生产,提升优质农产品的营养水平,创立营养型农产品推广体系,促进优质食用农产品的营养升级扩版等。2017年9月8日,国务院办公厅在《关于加快推进农业供给侧结构性改革大力发展粮食产业经济的意见》中强调,开发绿色优质、营养健康的粮油新产品,增加功能性淀粉糖、功能性蛋白等食品,加大对营养健康等领域相

关基础研究和急需关键技术研发。可见,加强功能农业的技术研发和产业体系的建立已经受到国家的高度重视^[17]。

从国内外的经验看,就技术角度而言,实现功能食品向功能农业转化势在必行,即建立集研发、生产、消费、监测于一体,一二三产结合的功能农业产业链。功能农业应该是以农艺生物强化技术研发为核心,建立完整的技术体系,为功能农业产业体系奠定基础,具体包括以下6种技术。

1) 育种强化技术。以高产、富集微量营养成分、抗病、提高种子活性、发芽率、抗非生物胁迫和耐受性为目标,采取传统植物育种、突变育种、分子育种等多种方式,有选择地发展基因工程,培育适合不同地域、气候条件富集微量营养素的种子,包括高能量和单项营养素富集、多项微量营养素富集的品种。育种既包括水稻、小麦、玉米等主要粮食作物,也要有针对性地选择具有地域特色、适应能力强、推广潜力大、经济价值高的豆类、蔬菜类、菌类、药材类作物。

2) 农艺强化技术。土壤施肥改良技术的改进。建立不同区域土壤基本要素数据库,包括土壤质地、温湿度、酸碱度、养分交互机制、有机质、氧化态、粘粒含量、根际层等,掌握各地区土壤中微量元素基本状况,通过增施微量元素肥,使缺乏微量元素的土壤整体得到改善。

加强微量元素叶面肥、水溶肥技术研发。根据不同区域和作物种类及微量营养素富集目标,研发相应的叶面肥和水溶肥。同时研究将传统土杂肥、畜禽粪便肥转化为微量元素肥的技术。

优化施肥技术研发。根据作物品种、环境、土壤物理和生物化学机制和其他要素,建立相应优化施肥技术。通过优化宏量元素肥和中量、微量元素肥之间的平衡施肥,测土配方施肥,作物残余循环利用,减少元素之间的拮抗作用,提高土壤肥力,促进作物对微量营养素的吸收,以及可食用部分微量营养素的富集。

标准化、规范化种植管理技术的研究。根据不同作物生产体系和模式,建立与之相配套的标准化、规范化的整地、播种、施肥、灌溉、病虫害防控、采收、存储技术,建立不同地区和不同作物的技术标准和生产流程。

间套种技术、立体栽培技术和无土栽培技术研究。研究谷物和豆科作物的间套种对提高土壤生产力和微量营养素富集机制。通过发展立体栽培和无土栽培技术,实现富集微量营养素的食用菌、蔬菜瓜果、药材等大规模生产。

3) 微生物强化技术。通过分子生物技术,降低植物体内植酸含量,减缓植酸、酚和多酚、纤维等抑制因子(inhibitors)对微量营养素的抑制作用,提高作物对土壤中不需要和有毒重金属的耐受性,发现潜在的抑制因子。

研究通过植物和动物体内的促进因子(promoters,包括根际细菌、AM菌根菌、维生素C、延胡索酸、苹果酸盐、柠檬酸、类胡萝卜素、蛋氨酸、半胱氨酸、组氨酸等),减缓和消除各种抑制因子的抑制作用,强化作物对微量营养素的吸收,促进食物链的微量营养素富集,同时发现潜在的促进因子并探索

其工作机理。

4) 养殖强化技术。培育富集微量营养素的牧草,加强富集微量营养素的粮食和经济作物的非食用部分饲料化研究。研究氨基酸微量元素螯合物作为新型饲料添加剂,实现富集微量营养素饲料的多元、高产、优质高效。研究传统和集约化养殖废弃物的综合利用,实现种养循环,发展富集微量营养素的养殖产业链。

5) 精深加工技术。加大产品深加工技术研发力度,通过对富集微量营养素的初级农牧产品的精深加工,发展功能性饮品、果品、美容品、保健品、护肤品等,实现产品的系列化、多元化,实现功能产品的保值增值,研发相应的冷冻冷藏、保鲜、包装、物流配送技术,延长功能农业产业链,实现一二三产业的有效融合。

6) 监测和评估技术。研究和完善监测技术,加强富集微量营养素作物在育种、种植、养殖、加工、使用、废弃物处理和再利用过程全产业链的监督和监控。建立包括对土壤、作物、产品、环境全方位监控评价技术,建立相应质量标准体系。加强对功能农业产业链条上不同群体的监测和评价,检测和评估功能产品的使用效果、防范潜在风险。

3.2 制度建设是保障

从世界各国、国际组织、研究机构的实践来看,传统的依靠单一部门、群体和技术,利用单一渠道无法最终解决庞大群体面临的“隐性饥饿”。因此,国际食物政策研究所在《2016年全球营养报告》认为,技术推广,制度先行,各国政府、资助方和研究人员应当携手合作,与公民和社会团体携手合作并建立跨部门的治理机制尤为重要^[6]。

从中国情况来看,食盐加碘、铁强化等国家和各级政府推行的项目能够取得成功,健全的政治制度、持续的资金支持、完善的基础设施和后续服务等发挥了重要作用^[15]。目前而言,一方面中国存在庞大的“隐性饥饿”群体;另一方面,中国常规农产品普遍供过于求,品质趋同而价格偏低,生产者增产不增收,消费者对优质产品和功能性食品需求强劲,却往往求之不得,农业供给侧结构性改革势在必行。同时,与发达国家、欠发达国家相似,包括转基因技术在内的一系列现代生物技术及产业在中国建设和推广过程中,同样面临系列政治、经济、文化、伦理及生态问题。因此,加强制度建设势在必行。

综合国内外经验,除继续坚持和发扬中国传统的政府引导、集中资金及资源办大事的政治制度优势外,在制度建设方面应该加强以下几个方面:首先,围绕功能农业产业体系,整合农业、科技、食品、环保等相关部门资源,进行中长期整体规划,建立联合实施、监测和考核机制;其次,完善相关法律法规和制度建设,将发展功能农业、保障食品安全,进而保障人体健康提升到法律制度层面^[48];再次,充分发挥高校、企业在功能农业技术研发、产业发展和实施中的创新主体作用。近年来,中国科技大学苏州研究院功能农业实验室、山西功能农业研究院、中国农业大学功能农业研究中心相继成

立,山西农业大学还成立了功能农业专业,功能农业已经引起中国高校关注。另外,中国农业大学功能农业研究中心发现,2000—2015年,科研院校、企业和个人围绕功能农业申请的专利分别是160、846和504项,企业显现出强大的实力和市场敏感性,必然成为构建功能农业产业体系的主体。最后,要加大对功能农业、营养强化等相关知识的宣传和科普,吸引社会组织和社会公众主动参与,让人们正确了解和认识现代生物技术,掌握必要的营养知识,形成健康的生活方式和消费需求,为发展功能农业培养健康的社会土壤和氛围。

4 结论

“隐性饥饿”是全世界面临的共同问题,需要通过“第二次绿色革命”,技术与制度并重,才有可能使问题得到根本解决,这需要多部门、多产业配合,但农业在这次绿色革命中仍将处于核心地位。就中国农业自身而言,农业供给侧结构性改革势在必行,突破技术瓶颈形成三产融合的相关技术体系,建立多部门、多群体的联合履行机制,发展功能农业产业,既能解决中国的隐性饥饿问题,又能为农业供给侧结构性改革提供新的思路和发展策略,还能够借助“一带一路”的战略机遇,为国际社会和国际组织解决国际“隐性饥饿”这一世界级难题提供借鉴和支持,也为中国功能农业产业进入世界市场创建突破口和新路径。

参考文献(References)

- [1] FAO statistical pocketbook: World food and agriculture 2015[R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2016.
- [2] Gillespie S, Haddad L, Allen L, et al. Attacking the double burden of malnutrition in Asia and the Pacific[J]. Manila Philippines Asian Development Bank, 2001, 47: 21-27.
- [3] World Health Organization. Micronutrient deficiencies: Iron deficiency anaemia (2015a)[R]. Geneva: WHO, 2015.
- [4] World Health Organization. Micronutrient deficiencies: Vitamin A deficiency (2015b)[R]. Geneva: WHO, 2015.
- [5] Valença A W D, Bake A, Brouwer I D, et al. Agronomic biofortification of crops to fight hidden hunger in Sub-Saharan Africa[J]. Global Food Security, 2017(12): 8-14.
- [6] Global nutrient report: From promise to impact[R]. Washington DC: International Food Policy Research Institute, 2016.
- [7] 杨晓光, 翟凤英, 朴建华, 等. 中国居民营养状况调查[J]. 中国预防医学杂志, 2010, 11(1): 5-7.
Yang Xiaoguan, Zhai Fengying, Piao Jianhua, et al. Survey on the nutritional status of Chinese Residents[J]. Chinese Preventive Medicine, 2011, 11(1): 5-7.
- [8] Steur H D, Gellynck X, Blanquaert D, et al. Potential impact and cost-effectiveness of multi-biofortified rice in China[J]. New Biotechnology, 2012, 29(3): 432-442.
- [9] 丁钢强, 高洁. 中国居民营养的发展与挑战[J]. 中国食品学报, 2016, 16(7): 1-6.
Ding Gangqiang, Gao Jie. Chinese residents development and challenges of nutrition[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2016, 16(7): 1-6.

- [10] 谢斌, 吴文良, 郭岩彬, 等. 作物富硒研究进展[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(1): 15-18.
Xie Bin, Wu Wenliang, Guo Yanbin, et al. Advances in research on selenium accumulation in crops[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2014, 42(1): 15-18.
- [11] Alexander J, Stein E R C. Functional food in the European Union[R]. Seville: JRC European Commission, 2008.
- [12] 赵其国, 尹雪斌. 功能农业[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
Zhao Qiguo, Yin Xuebin. Functional agriculture[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [13] Singh U, Praharaj C, Singh S S, et al. Biofortification of food crops[M]. New Delhi: Springer, 2015.
- [14] Horton S. The economics of food fortification[J]. Journal of Nutrition, 2006, 136: 1068-1071.
- [15] Pray C, Huang J. Biofortification for China: Political responses to food fortification and GM technology, interest groups, and possible strategies[J]. Agbioforum, 2007, 10(3): 161-169.
- [16] 郝元峰, 张勇, 何中虎. 作物锌生物强化研究进展[J]. 生命科学, 2015, 27(8): 1047-1054.
Hao Yuanfeng, Zhang Yong, He Zhonghu. Research progress on biological strengthening of crop zinc[J]. Chinese Bulletin of Life Sciences, 2015, 27(8): 1047-1054.
- [17] Saltzman A, Birol E, Bouis H E, et al. Biofortification: Progress toward a more nourishing future[J]. Global Food Security, 2013, 2(1): 9-17.
- [18] Rana A, Joshi M, Prasanna R, et al. Biofortification of wheat through inoculation of plant growth promoting rhizobacteria and cyanobacteria [J]. European Journal of Soil Biology, 2012, 50: 118-126.
- [19] Kumar V, Sinha A K, Makkar H P, et al. Dietary roles of phytate and phytase in human nutrition: a review[J]. Food Chemistry, 2010, 120: 945-959.
- [20] Graham R D, Welch R M, Bouis H E. Addressing micronutrient malnutrition through enhancing the nutritional quality of staple foods: Principles, perspectives and knowledge gaps[J]. Advances in Agronomy, 2001, 70(1): 77-142.
- [21] Welch R M. Breeding strategies for biofortified staple plant foods to reduce micronutrient malnutrition globally[J]. Journal of Nutrition, 2002, 132: 495-499.
- [22] White P J, Broadley M R. Biofortifying crops with essential mineral elements[J]. TRENDS in Plant Science, 2005, 10(12): 586-593.
- [23] Cakmak I. Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification[J]. Plant Soil, 2008, 302: 1-17.
- [24] Alloway B J, Graham R D, Stacey S P. Micronutrient deficiencies in Australian field crops[M]//Alloway J. Micronutrient deficiencies in global crop production. Dordrecht: Springer, 2008: 63-92.
- [25] Wang X Z, Liu D Y, Zhang W, et al. An effective strategy to improve grain zinc concentration of winter wheat, aphids prevention and farmers' income[J]. Field Crops Research, 2015, 184(22): 74-79.
- [26] 李丽霞. 微肥对作物产量、品质的影响及其生态环境效应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2005.
Li Lixia. Effect of trace element fertilizer on crop yield, quality and its environment effect[D]. Yangling: Northwest Agriculture & Forestry Science University, 2005.
- [27] Cakmak I. Agronomic approaches in biofortification of food crops with micronutrients[J]. Proceedings of the International Plant Nutrition Colloquium, 2009. <http://escholarship.org/uc/item/3d46b1th>.
- [28] 李可懿. 黄土高原旱地与豆科绿肥轮作和施氮对小麦产量及籽粒矿质养分的影响及其土壤学机制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
Li Keyi. Effect of rotation with legume and nitrogen application on yield and mineral nutrition of wheat grain and its soil mechanism on dryland of the Loess Plateau[D]. Yangling: Northwest Agriculture & Forestry Science University, 2011.
- [29] Díazgómez J, Twyman R M, Zhu C, et al. Biofortification of crops with nutrients: Factors affecting utilization and storage[J]. Current Opinion in Biotechnology, 2017, 44: 115.
- [30] 中国富硒农业产业技术创新联盟. 中国富硒农业发展蓝皮书[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2016.
China Technology Innovation Alliances of Se-enriched Agriculture. Blue book of program about China's Se-riched agriculture[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2016.
- [31] Mayer J E, Pfeiffer W H, Beyer P. Biofortified crops to alleviate micronutrient malnutrition[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2008, 11(2): 166-170.
- [32] Alavi S, Bugusu B, Cramer G, et al. Rice fortification in developing countries: A critical review of the technical and economic feasibility [M]. Washington, DC: Institute of Food Technologists, 2008.
- [33] Shrimpton R, Schultink W. Can supplements help meet the micronutrient needs of the developing world[J]. Proceedings of the Nutrition Society, 2002, 61: 223-229.
- [34] Gregory P J, Wahbi A, Adu-Gyamfi J, et al. Approaches to reduce zinc and iron deficits in food systems[J]. Global Food Security, 2017, 15: 1-10.
- [35] Joy E J M, Stein A J, Young S D, et al. Zinc enriched fertilisers as a potential public health intervention in Africa[J]. Plant Soil, 2015, 389(1/2): 1-24.
- [36] Joy E J M, Ahmad W, Zia M H, et al. Valuing increased zinc(Zn) fertiliser-use in Pakistan[J]. Plant Soil, 2016, 411: 139-150.
- [37] Wang Y, Zou C, Mirza Z, et al. Cost of agronomic biofortification of wheat with zinc in China[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2016. 36(44): 2-7.
- [38] Stein A J. Re-thinking the measurement of undernutrition in a broader health context: Should we look at possible causes or actual effects [J]. Global Food Security, 2014, 3: 193-199.
- [39] Fink G, Heitner J. Evaluating the cost-effectiveness of preventive zinc supplementation[J]. BMC Public Health, 2014, 14(1): 1-10.
- [40] Fiedler J L, Lividini K, Zulu R, et al. Identifying Zambia's industrial fortification options: Toward overcoming the food and nutrition information gap-induced impasse[J]. Food & Nutrition Bulletin, 2013, 34(4): 480-500.
- [41] Van D S D, Fitzpatrick T B, De S H. Editorial overview: Biofortification of crops: A achievements, future challenges, socio-economic, health and ethical aspects[J]. Current Opinion in Biotechnology, 2017, 44: 7-10.
- [42] De S H, Demont M, Gellynck X, et al. The social and economic impact of biofortification through genetic modification[J]. Current Opinion in Biotechnology, 2017, 44: 161-168.
- [43] 王瑛, 王庆, 梁琼. 功能蔬菜的发掘和利用[J]. 生命科学, 2015, 27(8): 1076-1082.
Wang Ying, Wang Qing, Liang Qiong. Discovery and utilization of functional vegetables[J]. Chinese Bulletin of Life Sciences, 2015, 27(8): 1076-1082.
- [44] 中华人民共和国农业部.“十三五”农业科技发展规划[EB/OL]. (2017- 02- 04) [2017- 09- 19]. <http://www.moa.gov.cn/zwl/m/ghjh/>

- 201702/t20170207_5469863.htm.
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. The 13th five-year plan for agricultural science and technology development[EB/OL]. (2017-02-04)[2017-09-19]. http://www.moa.gov.cn/zwllm/ghjh/201702/t20170207_5469863.htm.
- [45] 中华人民共和国科学技术部. “十三五”食品科技创新专项规划[EB/OL]. (2017-05-24)[2017-09-19]. http://www.most.gov.cn/mostinfo/xinxifenlei/fgzc/gfxwj/gfxwj2017/201706/t20170602_133347.htm.
Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China. The 13th five-year plan for food science and technology innovation [EB/OL]. (2017-05-24)[2017-09-19]. http://www.most.gov.cn/mostinfo/xinxifenlei/fgzc/gfxwj/gfxwj2017/201706/t20170602_133347.htm.
- [46] 中华人民共和国科学技术部. “十三五”农业农村科技创新专项规划[EB/OL]. (2017-06-14)[2017-09-19]. http://www.most.gov.cn/tztg/201706/t20170614_133523.htm.
Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China. The 13th five-year plan for agricultural and rural science and
- technology innovation[EB/OL]. (2017-06-14)[2017-09-19]. http://www.most.gov.cn/tztg/201706/t20170614_133523.htm.
- [47] 中华人民共和国中央人民政府. 关于加快推进农业供给侧结构性改革大力发展粮食产业经济的意见[EB/OL]. (2017-09-08)[2017-09-19]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-09/08/content_5223640.htm.
Central People's Government of the People's Republic of China. Suggestions on speeding up the reform of agricultural supply side structural reform to develop the grain industry economy[EB/OL]. (2017-09-08)[2017-09-19]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-09/08/content_5223640.htm.
- [48] 文琴, 张春义. 满足健康需求的营养型农业与营养分子育种[J]. 科学通报, 2015(36): 3543-3548.
Wen Qin, Zhang Chunyi. Nutritional agriculture and molecular breeding for health needs[J]. China Science Bulletin, 2015(36): 3543-3548.

Developing functional agriculture to solve "Hidden Hunger" problem

LIANG Long¹, BRADLEY G. Ridout², XIE Bin¹, ZHANG Sasa¹, AWEKEY M. Gelaw³, MENG Weiting¹, WANG Liyuan⁴, GUO Yanbin¹, ZHAO Guishen¹

1. Centre for Functional Agriculture Research of China Agricultural University, Beijing 100193, China
2. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Victoria 3169, Australia
3. International Center for Biosaline Agriculture, Dubai 10660, United Arab Emirates
4. Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201403, China

Abstract There are an estimated 2 billion people suffered from the hidden hunger (HH) with a diet lacking adequate intake of vitamins, minerals and other micronutrients. Improving the nutritional quality of food produced and consumed is therefore an important global priority to improve human health and wellbeing, especially for children, women and families in low-income countries where the HH is prevalent. In China, around 300 million people suffer from the HH, and in this paper, the concept of functional foods is proposed and a new strategy, known as the functional agriculture (FA) is developed to combat the HH. This new approach is now officially accepted by the Chinese government with the emergence of a FA industry. Traditional approaches to combat the HH include the food supplementation, the industrial fortification during the food processing, and the promotion of the dietary diversification. The FA, on the other hand, involves the enhancement of the food nutritional quality through improved agronomic practices, plant breeding, biotechnology and other forms of biofortification in the food system. Already there is evidence that the biofortification of crops can be effective in reducing the HH. Ongoing technology development and institutional improvement are seen as the key actions needed to realize the full potential of the FA. The former includes the developments in genetic engineering, agricultural microbiology, biofortification of feeding for livestock, new processing technology, as well as monitoring and evaluation technology. The latter includes the logistics management as well as the new developments in financing, enterprise development and strengthening of research institutions. The FA is expected to play an important role in combating the HH in China and through the "One Belt One Road" initiative to have a wider impact throughout the world.

Keywords micronutrient malnutrition; biofortification; functional agriculture; hidden hunger

(编辑 王志敏)