



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

植物营养学新范式

2020年11月发布

概述:

养分投入在作物和畜牧生产中发挥着关键作用,因此对于保障粮食安全、人类营养健康以及实现生物经济其他用途至关重要。为了更有效地为作物提供营养、减少养分损失对环境的负面影响,恢复土壤健康,必须改变当前肥料生产和养分管理策略。植物营养学新范式需遵循食物系统的方法,以保障社会、经济、环境和营养健康等多目标的协同实现(图1)。

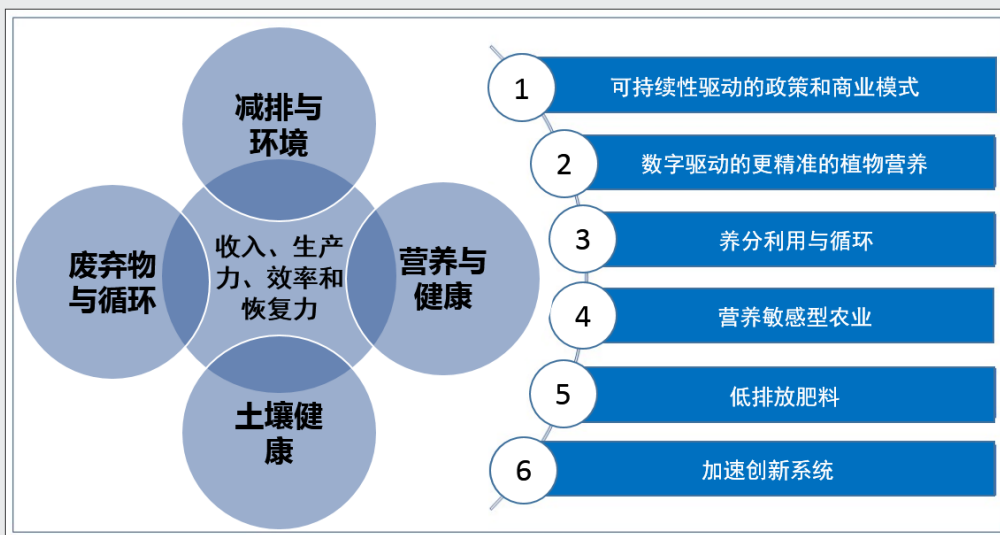


图1. 植物营养新范式中五大相互关联的目标和六大行动

未来10-20年将是全球食物系统转型的最关键时期,在此转型过程中,所有参与方都需要从食物系统的整体性及其系统解决方案来审视食物和养分的关系,包括潜在的环境、健康和社会经济成本。由于农民以及服务农民的相关行业没有能力单独实施所有这些必要的行动,消费者、政府和其他利益相关方均需要采取行动来支持这一重要转变。

这种转变的结果将是一种全新的以最佳社会效益为目标的植物营养管理,而不是单纯以最佳经济效益为目标。新的营养经济将成为低碳排放、环境友好和循环经济不可或缺的组成部分,能够支撑不断增长的全球人口对食物和营养的需求,并改善世界各地农民的收入和生计。本简报结束部分描述了植物营养学新范式未来是否成功的九大要点。

目前面临的主要问题是什么?

在过去60年里,尽管各国间存在巨大差异,但世界农业谷物产出仍以平均每年约2.2%的速度增长(1)。在未来还需要保持同样的增长速度来养活不断增长的世界人口和改善农村生计。在此过程中,从长远来看,减缓人口增长、改变饮食结构、减少食物损失和浪费、以及增加养分循环效率可以缓解食物生产和自然资源高消耗所带来的压力。

从历史上看,世界上经济发展较快的地区也是化肥使用和农作物产量同步增长(2)。矿质肥料的日益普及已成为养活迅速增长的世界人口的主要因素之一(3)。农作物单产的快速增加也阻止了农业向自然生态系统的更大规模的土地扩张,否则这将是不可避免的(4)。另一方面,在许多区域,为了支撑新的食物消费模式而进行的集约化农业导致了与养分有关的难以管理的外在后果,例如土地退化、生物多样性丧失、不可持续地消耗水资源、淡水和沿海海洋生态系统的富营养化、温室气体排放增加、或农民之间收入的不平等(5)。

人类活动对全球氮素和磷素流动的干预可能已经超过人类安全空间的极限(6)。尽管农田温室气体(GHG)排放仅占人类活动所有温室气体排放量的9-14%，但全球食物系统(包括土地利用变化和化肥生产等)GHG的排放占比可高达21-37%(7)。自20世纪80年代以来，人类活动引起的氧化亚氮(N₂O)排放量增加了30%，其主要原因是农田施肥(8)。当前食物系统更加倾向于种植主要粮食作物，并以之替代了那些富含更多微量元素的粮食作物。虽然近几十年来全球饥饿和营养不良现象显著减少，但仍在非洲撒哈拉以南和其他一些地区长期存在，微量营养元素的缺乏直接影响着这些地区妇女和儿童的健康(9)。地区冲突、极端气候、经济衰退或疾病爆发也可能导致全球无法获得充足营养食物的人数再次上升(10)。

据估计，与全球粮食系统有关的隐性健康、环境和社会经济成本高达12万亿美元，超过了当前粮食系统产出的价值(11)。鉴于2050年人口预计将达到95亿(12)，提高作物和畜牧生产力对于保障食物安全仍非常重要，但这不再是唯一的目标。未来向更可持续的全球食物系统过渡需要各个利益相关方从全局出发和整个生命周期的角度来对养分进行综合管理。未来的植物营养管理必须解决与食物系统营养相关的全球和区域多个挑战。

在此背景下，未来20年内需要解决的10个更高层次的问题是：

1. 如何克服目前全球养分不平衡问题？

几十年来，作物和畜牧生产的增长与氮素和其他养分投入以及饲料和食品的国际贸易密切相关，但也导致了全球范围内的分化。一些地区养分投入严重过剩并造成环境污染，而另一些地区则养分严重亏缺(图2)。在全球范围内，未来如何实现主要作物产量增长与化肥用量增长之间的脱钩？为了实现这一目标，各个国家针对化肥使用和养分利用效率的具体目标和技术路线是什么？

2. 哪些关键措施可使非洲通过增加和平衡养分投入将作物产量增加一到两倍？

非洲存在普遍的养分亏缺，必须克服这些问题才能在短期内提高作物产量同时实现更高水平的粮食安全(13)。撒哈拉以南非洲地区的平均养分投入量约为每公顷20 kg，只有少数国家超过每公顷50 kg的养分投入，这远低于提高作物产量和补充过去几十年消耗的土壤肥力所需的养分量。单靠肥料不足以提高作物产量，但它是引发非洲农业绿色革命的关键要素(14)，这场革命必须基于良好的信息，激励更高效的养分利用，同时要采取具

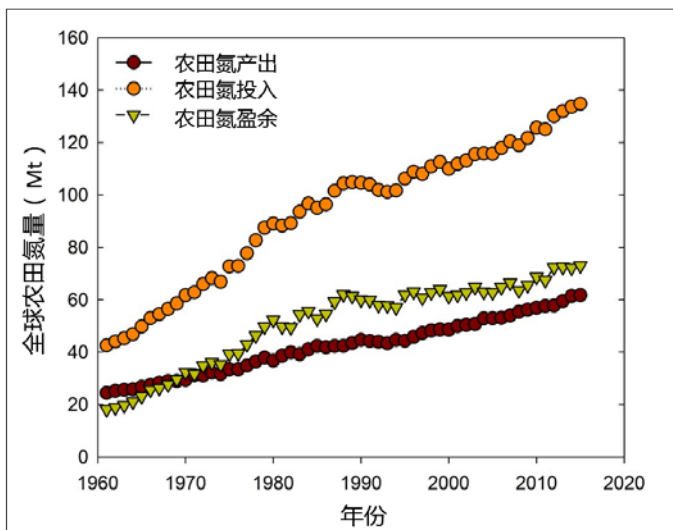
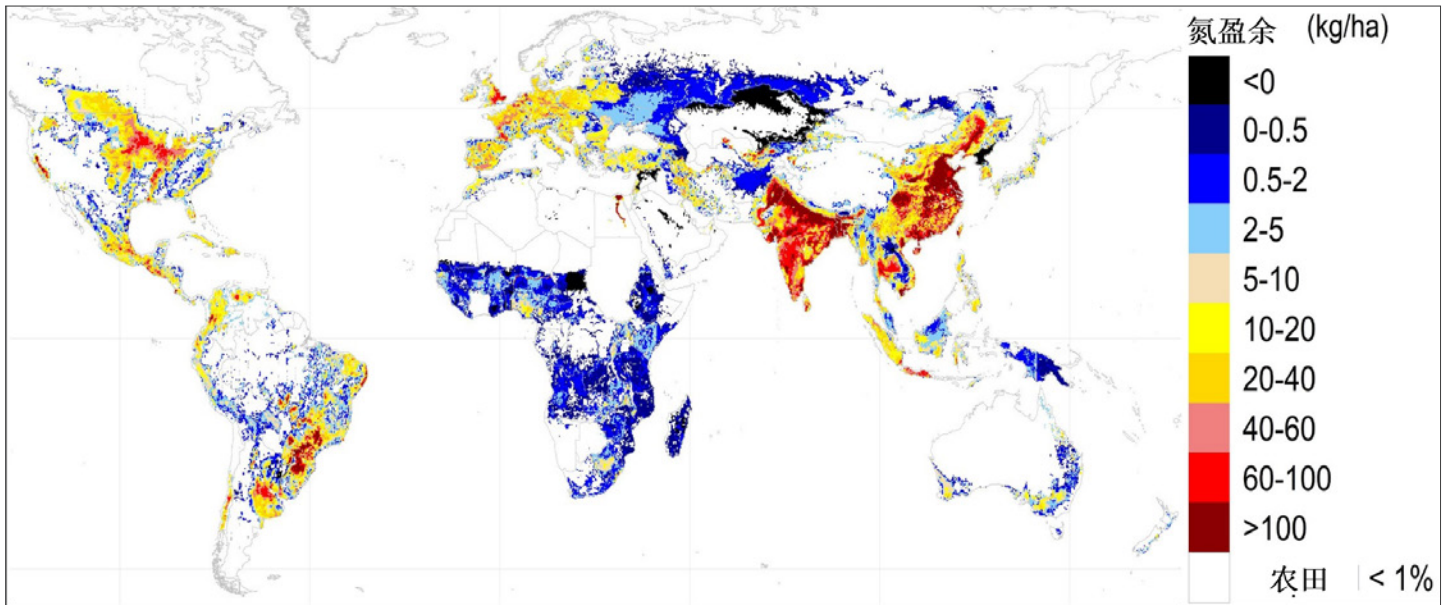


图2. 作物氮产出、化肥及其他来源的氮投入、氮素盈余量的全球变化趋势(上图), 以及2015年氮素盈余或亏缺图(上图, kg N/ha)。氮盈余定义为农田总氮投入减去作为作物产品收获的氮(15);左图为百万吨(Mt), 上图为kg 每单位土地面积, 表示作物生产中氮素损失的潜在压力。资料来源:Zhang Xin and Yao Guolin, 美国马里兰大学环境科学中心。

3. 哪些数字驱动的技术解决方案和政策能加快农民采用更精确的养分管理方案?

在许多国家,农民施用太多的肥料养分,因为肥料相对便宜,或者他们不想冒产量下降的风险。此外,由于缺乏经济支付能力,或者获取知识与数据的途径有限,农民可能没有使用足够的养分或使用了错误的施肥配方。在如何克服这一问题上,世界上有许多成功的案例,但只有少数在较大的规模上取得了突破。

4. 能否在一代人的时间内将整个农业食物链中的养分损失和浪费减半?

据估计,目前全球施用的氮肥大约只有20%能够转化到有用的农产品中,而高达80%的氮素以不同的形式流失到环境中(16)。不同国家及其食物系统养分损失存在巨大差异,解决养分损失的途径多样,比如从各种废弃物中更大程度地回收养分,并使其安全地循环于农作物生产。

5. 如何实现作物种植业和畜牧业的养分闭环?

全球产业运营需求和供应链驱动了种植业和牲畜养殖的分离和集中,造成了空间上分割和养分循环的泄露。畜牧业的大规模增长导致了养分利用效率下降、废弃物增加和大量温室气体排放。全球畜牧养殖业供应链占所有人活性氮排放的三分之一(17)。可持续畜牧业生产应更多地以牧场为基础,重新整合种植业和畜牧业,充分利用畜牧业的优势,即将食物系统和饲料资源的副产品转化为有价值的食物和粪肥(18)。

为实现这一目标,未来的农业结构、技术和供应链应当如何调整?

6. 如何改善土壤健康?

土壤对作物生长至关重要,同时也支撑其他生态系统服务,如水的净化、碳固定、养分循环和为生物多样性提供栖息地等。碳和养分输入是作物生产中改善土壤健康的重要因素,这也增加了农业生态系统对极端气候的适应能力。将大气中的二氧化碳固定在土壤中有利于减缓全球变暖、改善土壤健康,但需要持续输入有机质和养分(特别是氮和磷)以形成稳定的土壤有机质。如何采用全面的植物营养管理方法管理大量和微量元素养分,在提高作物生产力和养分利用效率的同时,利用生物固氮,优化碳固定和转化,提高土壤生物多样性,避免土壤酸化或其他形式的退化?

7. 在气候不断变化的情景下,我们应如何管理农作物的营养?

气候变化对作物的营养品质既有积极的影响,也有消极的影响,其中许多尚未得到充分理解(19)。大气中二氧化碳(CO₂)的增加可能会增加作物产量,但也会导致粮食作物养分浓度和养分利用效率的下降。全球变暖将增加作物遭受干旱、高温或高辐射胁迫的风险,而平衡的植物营养在缓解这些胁迫方面发挥特定的作用。季候变化、降水和极端天气事件也将影响作物对养分吸收时间和效率,因此需要将养分管理建议与早期预警和气候信息系统整合起来。

8. 对于减少与肥料相关的温室气体排放的现实选择和目标是什么?

将全球变暖限制在1.5°C或远低于2°C的所有途径都需要涉及土地管理的温室气体减排措施和土地利用方式的转变(20)。植物养分管理的各个环节都为减少与养分有关的CO₂和N₂O的排放提供了许多机会,比如低碳排放的“绿色”肥料生产和运输技术,新型肥料配方,抑制剂,抑制硝化或固氮的遗传改良方案,以及更精确的养分施用和农田农艺管理等。但是前提是合适的配套政策和市场条件能够利用这些机会。

9. 种植系统如何提供高质量、更有营养的食物?

世界上有超过20亿人受到各种形式的微量营养素缺乏的影响。世界上主要的种植系统都旨在提供热量、蛋白质和其他一些营养物质或生物活性物质。少数几种微量营养素贫乏的作物在全球粮食和饲料链中占据了主导地位,而且它们通常还减少了作物多样性或取代了豆类等传统作物。什么样的农业措施和植物营养解决方案可以全面改善人类营养(21)?

10. 如何更好地监控养分并实施高水平的可持续发展管理?

数字技术为更好地监测、分析、基准测试、报告和认证整个养分链的可持续性提供了巨大的潜力。这将提高整个食品部门的透明度、可追溯性、质量控制和可持续性评估,对公共部门参与和以证据为基础的政策制定也至关重要。例如,《肥料可持续使用和管理国际行为准则》(22)或《环境、社会和治理标准》(ESG)能否在各个国家和行业实施?是否需要有一个关于养分可持续生产和使用的新标准?

可以做什么?

人类发展和生物过程的需求,以及质量守恒的原则都明确表明,包括化肥在内的矿质养分仍将是未来食物系统的主要成分。至关重要的是要制定综合和有针对性的植物养分管理战略与落地方案,最大限度地减少提高生产力与保护环境之间的矛盾,并确保其不同地区、国家和地方的农业和商业系统中具有可行性。在这一背景下的整合应包括几个维度,如关注多种养分的食物系统途径、更大程度的回收和利用所有可用的养分来源、增强与其他农业和管理实践的一致性,以及遵循可持续性高标准等。

负责任的植物营养新范式涵盖一系列科学和工程知识、技术、农艺实践、商业模式和政策,它们直接或间接地影响农业食物系统中矿质养分的生产和利用。遵循食品系统方法,负责任的植物营养旨在:

- A. 提高农民及相关企业的收入、生产力、养分效率和复原力
- B. 增加废弃物和其他未充分利用的资源的养分回收和循环利用
- C. 提升和维持土壤健康
- D. 通过营养敏感型农业促进人类营养和健康
- E. 尽量减少温室气体排放、过量养分引起的污染和生物多样性损失

简而言之,负责任的植物养分管理将有助于实现更益于自然的食物生产和消费方式。它的目标不是盲目照搬自然生态系统,而是遵循科学,因地制宜地调整和整合关键的农业生态原则(23)。实施新模式涉及六个相互依赖的行动:

行动1:以可持续发展为导向的养分管理政策、技术路线、商业和投资模式,为养分链中的所有参与者和受益者创造附加值。养分管理政策和技术路线必须适合每个国家特定的粮食系统,包括设立养分利用、损失和效率方面的宏伟目标。养分管理的具体目标和重点将因各个国家的发展历史和可持续发展的优先顺序而异。以科学为基础的渐进式监测、管理(24)和认证计划将指导绩效,

并奖励农民和企业的创新、减少养分损失、改善土壤健康、增强生物多样性和提供其它生态系统服务。差异化战略还将导致全球肥料使用的区域转移,减少养分盈余,确保将更多的养分转移到最缺乏的地方,尤其是非洲的许多地区(25)。

行动2:数字驱动、更精确的作物营养解决方案。知识驱动的数字解决方案和颠覆性技术将允许以越来越精确的方式为当地需求量身定制养分管理策略。除了商业化农业的高科技解决方案外,一些因地制宜的“低技术含量”养分管理方法已在亚洲和非洲小农户作物种植中显示出在作物产量、利润和养分利用效率持续大幅提高的效果(26, 27)。现在需要通过数字支持的咨询系统和业务解决方案,将这些方法推广到数百万农民。

行动3:提高养分回收和循环利用的循环经济解决方案。种养一体化、减少食物浪费、利用副产品和增加养分回收及循环利用是优化整个食物链养分利用效率的关键措施(图3)。政治激励、新技术和行为转变将推动从多种废弃物流动中更大程度地回收养分,为循环型生物经济做出重要贡献。这种循环系统必须对动物、人类和环境安全和健康,但也允许创造新的商业模式,包括对农业部门内部的副产品所用材料及其所含养分的回收和再利用。为支持此类解决方案的开发,需要提高全链条养分流监测、生命周期分析、基准设定和认证。



图3 作物-牲畜-人类循环系统中的主要养分流。红色箭头表述该系统的肥料投入。农田主要用于生产人类的食物和一些牲畜的补充饲料,以及作物残留物(橙色箭头)。草地主要用于饲养牲畜,包括放牧。副产品和废物被回收用于农业或用于制造新的生物基产品(棕色箭头)。最大限度地减少循环系统的泄露。来源:基于(18)重新绘制和修改。

行动4: 营养敏感型农业:生产营养价值更高的粮食作物,以解决持续存在和新出现的矿质营养缺乏问题。除了膳食多样化和饮食干预外,植物营养解决方案也是解决营养不良、微量元素营养不足、超重/肥胖这三重负担以及其他非传染性疾病预防策略中的一部分。根据当地的具体情况,营养敏感型农业可以包括更加多样化的作物轮作,以及通过育种和/或施肥对主粮作物进行微量营养元素生物强化(28)。后者包括有针对性地使用肥料产品,为作物、动物和人类提供重要微量营养元素。除了铁或锌等植物必需的营养元素外,还可能包括碘(29)或硒(30)等对动物和人类特别重要的营养元素。

行动5: 节能、低排放的新型肥料。越来越多地以环境友好的方式生产肥料,包括更多技术含量的养分控释肥料。通过生产低碳排放的肥料,可以显著减少到达农场之前的温室气体排放。目前许多新技术已经在开发中,使用可再生的碳中和能源生产“绿色

氨”,并将其用于能源储存和运输。新的“氨经济”将以一种全新的、分散的方式为世界提供食物和能源(31)。肥料配方的创新将带来环境友好型肥料,使作物最大限度地吸收养分,最大限度地减少养分损失(32)。

行动6: 加速和更加开放的创新体系,更快地将新理念转化为实践。未来的研究和创新体系需要促进知识的共同创造和共享,以便快速开发和应用新的专门知识和技术。这就需要公共和私营部门参与者更加开放和协调行动。科学研究和资助等方面都需要进行大规模的文化变革,转向以问题为导向和更精简的科学方法、跨学科合作、创业精神,以及促进各种类型农户早期参与产品开发。

需要做什么?

负责任的植物营养是一项复杂的全球性挑战,需要养分循环的直接参与者或影响者都采取具体行动,才能应对这一挑战(图4)。

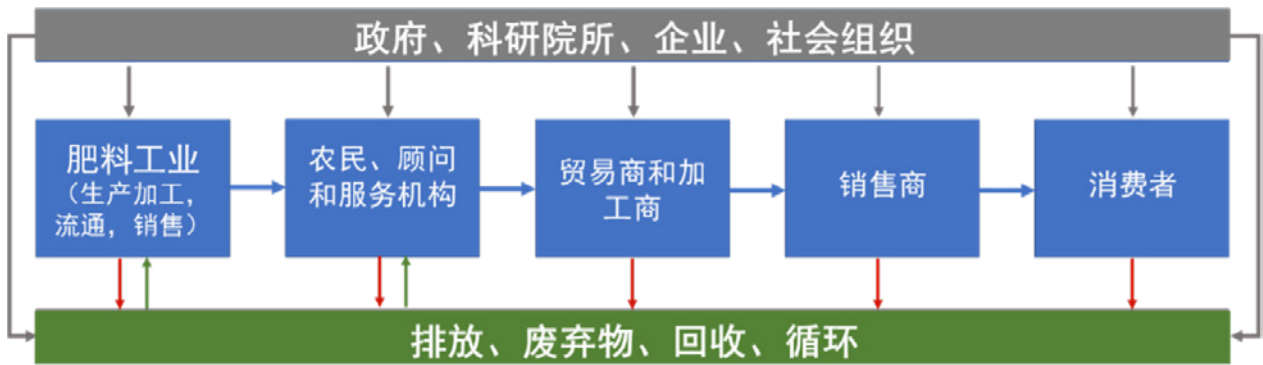


图4. 养分管理视角的“农业-食物链”关系。蓝框代表不同阶段养分利用和导致损失的主体,红色箭头表示全链条中流向环境的温室气体、养分损失及废弃物,绿色箭头代表所有可利用的途径以减少排放与损失、增加向农业和工业的养分回收与循环,灰框代表影响主要参与者、推动创新或制定社会行动框架的机构部门,资料来源(33),略作修改。

各级决策者需要制定明确、科学和统一的养分监管框架,但也需要制定激励技术、实践和商业模式创新的动态政策。他们必须为国家或地区路线图制定清晰的愿景,并为养分、营养和环境指标制定合理的目标。这些政策可以驱动食品消费的变化,并为农民采用更好的养分管理方法提供渐进式的激励。政策的制定需要适当平衡粮食生产和环境目标,必须充分支持技术援助和推广服务,以促进可持续的养分管理方法。政策制定者还需要确保全世界的农民都能用得起互联网和数字服务。

全球肥料行业最近已认识到,需要将可持续性和创新驱动的植物营养管理模式作为其核心业务战略(34)。肥料公司必须越来越多地成为综合植物营养解决方案的提供者,这些解决方案应基于为人类和地球有益的新商业模式。可持续发展和创新,包括透明的监测和报告,将驱动整个肥料行业的转型战略,包括整个行业销售的每一个产品和解决方案。收入增长的主要驱动力是为农民和社会提供绩效价值的增长,而不是肥料销售量的增长。

农民、农户顾问和服务提供者承担着在农场层面提高养分利用效率、减少养分流失、循环利用养分和促进土壤健康的主要责任,从而在更大规模上产生巨大影响。他们需要能够充分适应和采用新知识、新技术和新服务,并因采用良好实践方法获得奖励。许多农民是企业家,愿意改变,他们也意识到自己作为土地、水、气候和生物多样性管理者的角色。但改变做法需要降低风险和其他采用障碍。

食品贸易商、加工商和零售商通过影响消费者饮食习惯和生产方式,可以对营养循环产生巨大影响。符合可持续生产标准并减少生产损耗的垂直整合、数据驱动和更透明的供应链将更加普及,包括更多地从农民那里直接采购。这些发展为实施更全面的营养管理方法提供大量机会。将这种可持续生产方式货币化既是一个关键挑战,也是一个机遇。

消费者将通过更健康的饮食以及日益重视以更加可持续方式生产食物,推动植物营养发生重大变化。具体的趋势将因地区和收入群体而异。在全球范围内,饮食行为的改变可能相对缓慢,而且中低收入国家人口和收入的增长所带来的食物消费增长也将部分抵消这种变化。然而,消费者的当务之急是减少过量的肉类消费和食物浪费,并确保对废弃物的回收利用。

公用事业服务提供者和废物处理者是养分循环中重要且相对较新的参与者,但他们的作用在未来几年将大幅增加。特别是在人口稠密地区,他们的需求和行动将越来越多地共同决定农作和养分管理的方式。这就需要深化与其他参与者群体的合作,达成共识并制定共同的标准。

投资者:需要大幅增加对植物营养创新研究的投资,以应对我们面临的复杂挑战。公共、私人 and 慈善投资者应不断增加对支持新范式关键要素的技术、产业和机构的投资,包括创建一个初创公司和其它企业不断增长的生态系统。公共和私人资本混合使用可以降低风险,同时吸引更多的私人投资。

科学家:科学和工程研究将是实现植物营养新范式多重目标的基础,但整个科学文化也必须随之改变,采用新的工作方式,激励新的发现,更快地转化科研成果。需要更加关注农艺应用的明确路径、现实检验和对实用性严格要求,也需要更多地共享技术诀窍和关键资源,更多的开放式创新和创业精神。

民间社会组织通过向公众宣传、基层动员、监督、警示和影响,以及包容性地传播新技术和新做法,在植物营养新范式中发挥着重要作用。这是一项重大责任,应遵循实证方法。与政府、工业界、科学界和农民合作,共同制定具体的解决方案,取代常见的强调单一问题或有争议的辩论方式。

成功的未来会是什么样子?

与2020年相比,到2040年,在一代人的时间内可取得的具体成果包括:

1. 食物供应链中,养分定量和监测标准被广泛接受,从而在整个农业食物系统中激发提高养分总体利用效率、增加养分循环、减少养分浪费的解决方案。雄心勃勃的目标、政策与投资鼓励政府、企业、农民及其他利益相关者采取集体行动,以实现可持续、综合、量身定制的植物营养解决方案。
2. 在全球尺度,作物产量增长满足了粮食、饲料和生物工业需求,并超过化学肥料消费增长,耕地扩张与森林砍伐已经停止,全球作物氮利用率(农作物氮输出占氮投入比例)提高到70%。
3. 通过负责任消费、增加养分循环以及优化养分管理,使食物系统中的养分浪费减少了一半。热点地区的氮和磷盈余降至安全水平,富营养化和其他环境危害降至最低。
4. 土壤养分耗竭和碳流失得到遏制。前瞻性的政策和投资已经引发了耕作制度和管理方法的变革,增进了土壤健康,包括土壤有机质的增加。区域土壤养分亏缺已大幅度减少,特别是在撒哈拉以南非洲,那里的肥料使用量增加了两倍,作物产量至少增加了一倍,营养产出显著改善。通过使用矿质肥料和有机肥以及含有养分的废弃物或副产品等手段,数百万公顷退化的农田得到恢复。
5. 通过综合战略,包括有针对性地使用富含微量营养元素的肥料和营养生物强化作物,消除了极端形式的长期饥饿与营养不良现象。在消费者和市场需求的推动下,越来越多的农民种植新一代营养价值更高的谷物和其他主粮作物。政策制定者和决策者支持矿质施肥战略,以满足市场无法提供所需激励措施的特定人群的营养需求。

6. 化肥行业在其产品和业务运营的整个生命周期中遵循严格和透明的可持续性标准。通过提高能源效率、碳捕获和储存以及其它新技术和新产品,化肥生产和使用过程中产生的温室气体排放量至少减少了30%。全球至少10%的肥料氮是由低碳或零碳排放的绿色氨生产的。
7. 公共和私营部门在植物营养研究和创新方面的研发投入比目前增加了两倍。许多公司将总收入的5%或更多用于研究和创新。合作、开放的创新方法使科学发现迅速转化为实用的解决方案和知识。创新的、以价值为导向的商业模式推动了整个行业的增长。
8. 消费者认可植物营养的益处,包括作为主要养分来源的矿质肥料。视觉识别度高的养分足迹标准为消费者的选择提供信息。有关改善土壤健康和养分平衡的信息可广泛获取,它们与缓解空气、水和气候问题的联系得到广泛认可。
9. 全世界的农民都能获得负担得起的、多样化的和适当的植物营养解决方案,他们因实施更好的养分管理和监管措施而获得回报,这些措施使他们摆脱贫困陷阱,更加繁荣。定制式的作物营养产品和解决方案至少占全球作物营养市场价值的30%。

迄今为止,尽管许多科学和技术解决方案已经存在了数十年,但我们仍未能实现上述目标。现在,要在一代人的时间内实现上述目标,需要从化肥工业到农民以及食品和其它农产品消费者的所有相关方更加协调一致的努力。需要以长期可持续性思维为基础,迅速采取行动,向植物营养新范式转型。

参考文献

1. K. O. Fuglie, Is agricultural productivity slowing? *Global Food Security*. 17, 73–83 (2018), doi:10.1016/j.gfs.2018.05.001.
2. J. W. McArthur, G. C. McCord, Fertilizing growth: Agricultural inputs and their effects in economic development. *Journal of Development Economics*. 127, 133–152 (2017), doi:10.1016/j.jdeveco.2017.02.007.
3. V. Smil, *Enriching the earth: Fritz Haber, Carl Bosch, and the transformation of world food production* (The MIT Press, Cambridge, MA, London, 2001).
4. J. R. Stevenson, N. Villoria, D. Byerlee, T. Kelley, M. Maredia, Green Revolution research saved an estimated 18 to 27 million hectares from being brought into agricultural production. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 110, 8363–8368 (2013), doi:10.1073/pnas.1208065110.
5. A. Balmford et al., The environmental costs and benefits of high-yield farming. *Nat Sustain.* 1, 477–485 (2018), doi:10.1038/s41893-018-0138-5.
6. W. Steffen et al., Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. *Science*. 347, 1259855 (2015), doi:10.1126/science.1259855.
7. C. Rosenzweig et al., Climate change responses benefit from a global food system approach. *Nat Food*. 1, 94–97 (2020), doi:10.1038/s43016-020-0031-z.
8. H. Tian et al., A comprehensive quantification of global nitrous oxide sources and sinks. *Nature*. 586, 248–256 (2020), doi:10.1038/s41586-020-2780-0.
9. P. Pingali, B. Mittra, A. Rahman, The bumpy road from food to nutrition security – Slow evolution of India's food policy. *Global Food Security*. 15, 77–84 (2017), doi:10.1016/j.gfs.2017.05.002.
10. FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO, *The State of Food Security and Nutrition in the World 2020* (2020) (available at <http://www.fao.org/documents/card/en/c/ca9692en/>).
11. The Food and Land Use Coalition, *Growing better: ten critical transitions to transform food and land use* (2019) (available at <https://www.foodandlandusecoalition.org/global-report/>).
12. S. E. Vollset et al., Fertility, mortality, migration, and population scenarios for 195 countries and territories from 2017 to 2100: a forecasting analysis for the Global Burden of Disease Study. *The Lancet* (2020), doi:10.1016/S0140-6736(20)30677-2.
13. M. K. van Ittersum et al., Can sub-Saharan Africa feed itself? *Proc. Natl. Acad. Sci.* 113, 14964–14969 (2016), doi:10.1073/pnas.1610359113.
14. B. Vanlauwe, A. Dobermann, Sustainable intensification of agriculture in sub-Saharan Africa: first things first! *Front. Agr. Sci. Eng.* 7, 376–382 (2020), doi:10.15302/J-FASE-2020351.
15. X. Zhang et al., Managing nitrogen for sustainable development. *Nature*. 528, 51–59 (2015), doi:10.1038/nature15743.
16. M. A. Sutton et al., Our nutrient world: the challenge to produce more food and energy with less pollution (2012) (available at <https://www.unenvironment.org/resources/report/our-nutrient-world-challenge-produce-more-food-and-energy-less-pollution>).
17. A. Uwizeye et al., Nitrogen emissions along global livestock supply chains. *Nat Food* (2020), doi:10.1038/s43016-020-0113-y.
18. H. H.E. van Zanten, M. K. van Ittersum, I. J.M. de Boer, The role of farm animals in a circular food system. *Global Food Security*. 21, 18–22 (2019), doi:10.1016/j.gfs.2019.06.003.
19. J. C. Soares, C. S. Santos, S. M. P. Carvalho, M. M. Pintado, M. W. Vasconcelos, Preserving the nutritional quality of crop plants under a changing climate: importance and strategies. *Plant Soil*. 443, 1–26 (2019), doi:10.1007/s11104-019-04229-0.
20. IPCC, *Climate change and land. IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* (2019) (available at <https://www.ipcc.ch/srccl/>).
21. R. M. Welch, R. D. Graham, I. Cakmak, Linking agricultural production practices to improving human nutrition and health. Expert paper written for ICN2 Second International Conference on Nutrition Preparatory Technical Meeting, 13-15 November, Rome, Italy (2013) (available at <http://www.fao.org/3/a-as574e.pdf>).
22. FAO, *International code of conduct for the sustainable use and management of fertilizers* (2019) (available at <http://www.fao.org/3/ca5253en/ca5253en.pdf>).
23. FAO, *The 10 elements of agroecology. Guiding the transition to sustainable food and agricultural systems* (2018) (available at <http://www.fao.org/3/i9037en/i9037en.pdf>).
24. International Plant Nutrition Institute, *4R plant nutrition manual: A manual for improving the management of plant nutrition, metric version* (IPNI, Norcross, GA, USA, 2016).
25. X. Zhang, A plan for efficient use of nitrogen fertilizers. *Nature*. 543, 322–323 (2017), doi:10.1038/543322a.
26. A. Dobermann et al., Site-specific nutrient management for intensive rice cropping systems in Asia. *Field Crops Res.* 74, 37–66 (2002).
27. J. Rurinda et al., Science-based decision support for formulating crop fertilizer recommendations in sub-Saharan Africa. *Agric. Syst.* 180, 102790 (2020).
28. I. Cakmak, U. B. Kutman, Agronomic biofortification of cereals with zinc: a review. *Eur. J. Soil Sci.* 69, 172–180 (2018), doi:10.1111/ejss.12437.
29. R. Fuge, C. C. Johnson, Iodine and human health, the role of environmental geochemistry and diet, a review. *Applied Geochemistry*. 63, 282–302 (2015), doi:10.1016/j.apgeochem.2015.09.013.
30. G. Alfthan et al., Effects of nationwide addition of selenium to fertilizers on foods, and animal and human health in Finland: From deficiency to optimal selenium status of the population. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. 31, 142–147 (2015), doi:10.1016/j.jtemb.2014.04.009.
31. K. H.R. Rouwenhorst, A. G.J. van der Ham, G. Mul, S. R.A. Kersten, Islanded ammonia power systems: Technology review & conceptual process design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 114, 109339 (2019), doi:10.1016/j.rser.2019.109339.
32. J. Chen et al., Environmentally friendly fertilizers: A review of materials used and their effects on the environment. *Science of the Total Environment*. 613-614, 829–839 (2018), doi:10.1016/j.scitotenv.2017.09.186.
33. D. R. Kanter et al., Nitrogen pollution policy beyond the farm. *Nat Food*. 1, 27–32 (2020), doi:10.1038/s43016-019-0001-5.
34. International Fertilizer Association (IFA), *IFA 2030 scenarios. Digging deeper, thinking harder, planning further* (2018) (available at https://www.fertilizer.org/Public/About_IFA/IFA2030.aspx).

作者, 引用和联系方式

作者为国际负责的植物营养专家组成员, 名单如下:

Tom Bruulsema (Plant Nutrition Canada), Ismail Cakmak (Sabanci University, Turkey), Achim Dobermann (International Fertilizer Association, France), Bruno Gerard (CIMMYT, Mexico), Kaushik Majumdar (African Plant Nutrition Institute, Morocco), Michael McLaughlin (University of Adelaide, Australia), Pytrik Reidsma (Wageningen University & Research, The Netherlands), Bernard Vanlauwe (International Institute of Tropical Agriculture, Kenya), Eva Wollenberg (CGIAR Climate Change, Agriculture & Food Security Program, USA), Fusuo Zhang (China Agricultural University, China), Xin Zhang (University of Maryland Center for Environmental Science, USA)

引用: Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition. 2020. A new paradigm for plant nutrition. Issue Brief 01.

Available at www.sprpn.org

更多信息请关注:

Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition,
c/o IFA, 49, avenue d'Iéna, 75116 Paris, France; info@sprpn.org