



问题简报 03, 2022 年 1 月

推进 4R 养分管理

by the Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition



内容

- 3 要点
- 5 问题所在?
- 7 4R 概念在不同地区产生了哪些成果?
- 11 哪些障碍限制了 4R 的采用和量化效益?
- 13 4R 框架如何适应未来的农业系统?
- 16 4R (恰当的来源、用量、时间和地点) 需要哪些新的核心原则?
- 20 4R 如何促进可持续性绩效报告?
- 23 谁需要做什么?
- 25 成功将是怎样的?
- 26 参考文献
- 31 作者、引用与联系方式



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

要点

未来 4R（即：恰当的来源、用量、时间和地点）养分管理的实施需要与不断变化的农业目标相结合，以支持更广泛的可持续发展成果。

负责任植物营养的新范式为这种整合提供了视角。我们建议对4R原则进行修改，使其与未来的耕作制度相一致，以提高生产强度、改善人类营养、保护和加强生物多样性、减少环境和碳足迹，并使养分流更加循环。

尽管 4R 养分管理已获得全球认可，但其影响力仍受到各种障碍的限制。有益的成果不仅取决于良好的 4R 实践，还取决于农业系统各个方面的实践。图 1 (1) 所示的 12 项成果的优先顺序因地区和国家而异，具体的 4R 养分施用决策也不尽相同。不过，在许多地方，都有机会更多地利用数据驱动的数字解决方案来支持决策，并利用农场适应性管理来加快创新。养分来源的选择需要包含更多循环和气候智能属性，施用量、时间和地点也需要变得更加精确和动态。

绩效问责制要求向农业价值链中的所有参与者（包括最终用户、环保机构和行业）通报进展情况。先进的绩效报告包括跟踪 4R 实践、衡量农场一级的经济成果以及评估土壤、环境和社会效益。迫切需要更好的方法来监测采用情况和关键成果，包括基于科学的目标和更深入的数字技术应用。化肥行业需要进一步与农业食品行业合作，制定并采用农业系统管理的可持续性标准，其中包括整体 4R 实践和绩效指标。



SCIENTIFIC PANEL
ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

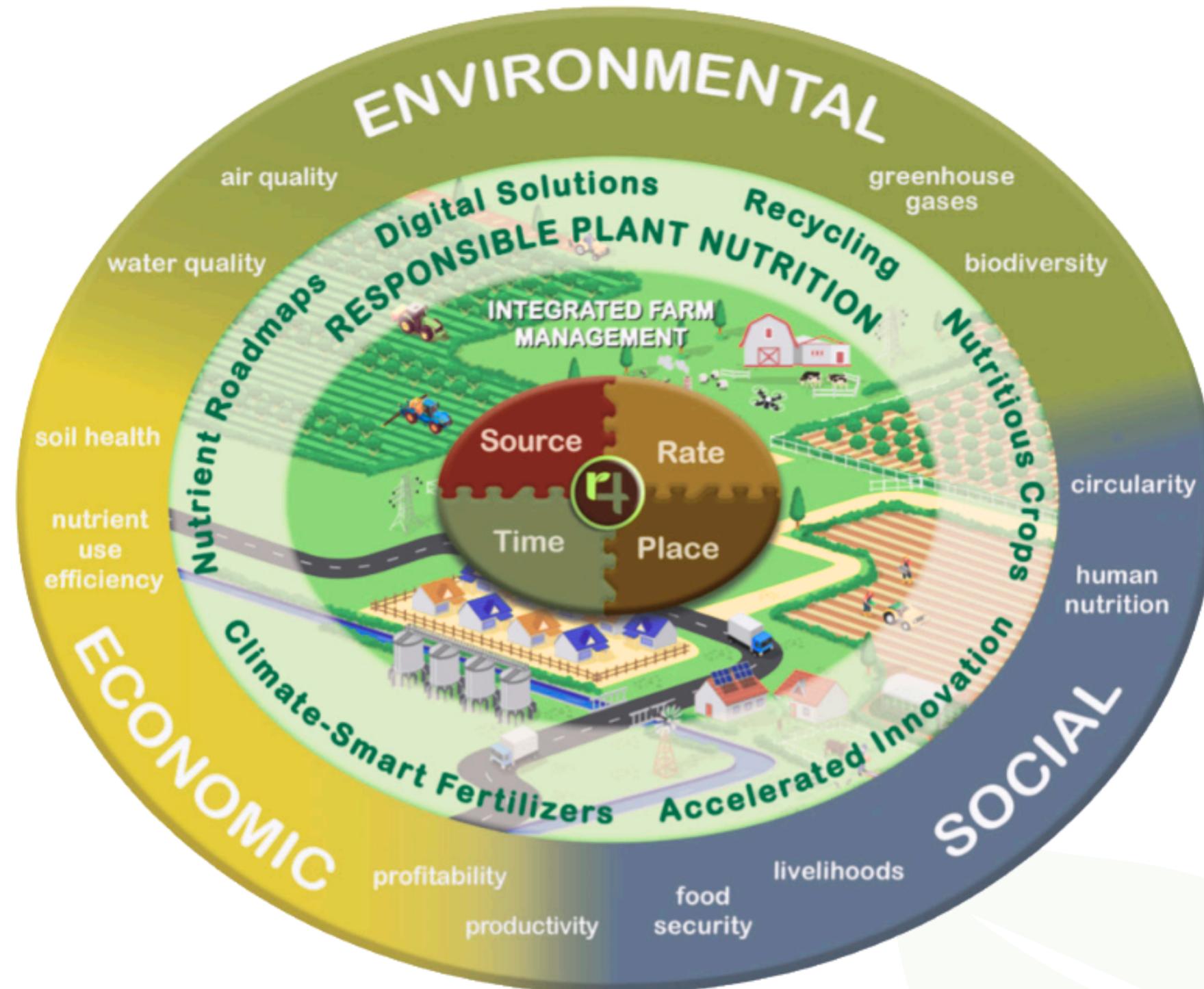


图 1. 推进 4R 养分管理需要与农业系统相结合，以支持“责任的植物营养”的六项行动，并报告可持续发展成果。



问题所在？

养分施用在大多数农业系统的养分流中占很大比例，由农民及其服务提供商直接管理

因此，4R 养分管理的原始框架将 4 项 "恰当" 作为养分施用实践的 4 个全球相关管理目标，需要通过适配地区和种植系统的具体解决方案来落地实施（图 2）。对于做出正确养分施用决策的四个要素中的每一个要素，都定义了核心原则，总结了基本的科学认识。

负责任植物营养的新范式拓宽了养分管理的范围 (2)。对养分施用的来源、用量、时间和地点的关注仍然与这一新范式密切相关，但 4R 的最初设计和以往的应用并未完全与其所有目标相联系。这种联系可以改进，以扩大 4R 在新范式中的相关性。

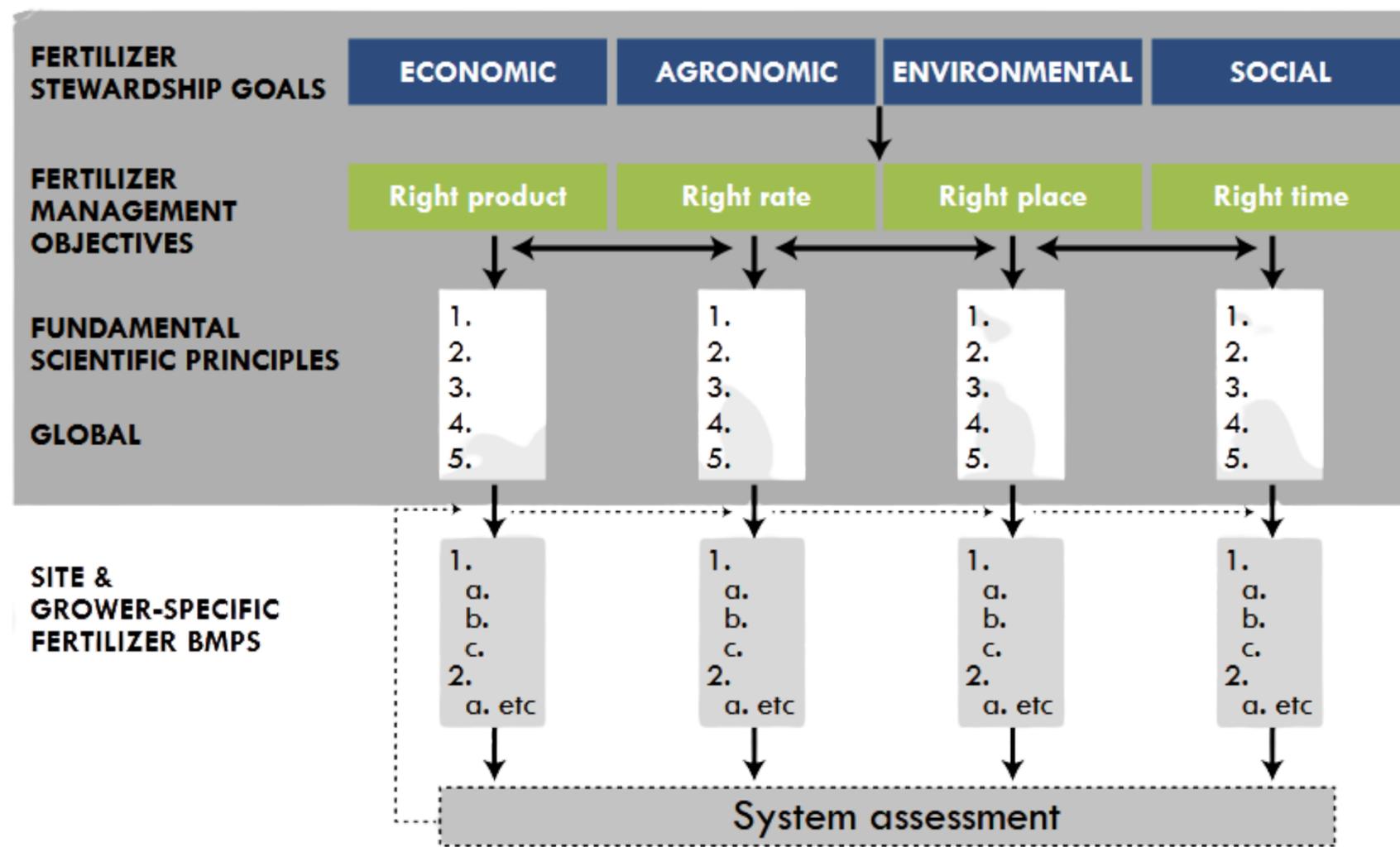


图 2. 2007 年提出的 4R 养分管理原始框架 (Fixen, 2020 年)。



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

实施 "负责任的植物营养" 的六项关键行动为 4R 实施计划提供了需求和机会。

这些行动包括：

1. 营养路线图：将 4R 实践纳入政策、商业模式、平台和验证可持续性的计划中。
2. 数字化解决方案：提供数据驱动的、更精确、更动态的 4R 营养决策。
3. 循环利用：优化可再生营养资源的利用需要选择 "正确来源"，在可行的情况下考虑回收形式。
4. 营养更丰富的作物：作物养分应用可改善人类营养和健康。
5. 气候智能型肥料：考虑养分来源的碳足迹，包括其生产和使用过程中的排放。
6. 加速创新：在适应性管理系统中测试 4R 要素，以便更快地转化为实践

发生了什么？

4R 养分管理概念已得到全球认可，但其在更大范围内的影响仍然有限。联合国粮食及农业组织 (FAO) 将 4R 养分管理原则纳入了《化肥可持续使用和管理国际行为守则》(3)。《4R 植物营养手册》(IPNI, 2016 年) (1) 是一份 130 页的文件，详细介绍了 4R 养分管理的总体原则，已被翻译成八种语言，并在美洲、亚洲、非洲和大洋洲广泛分发。



图 3: 4R 的多种语言



SCIENTIFIC PANEL
ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

4R 概念在不同地区产生了 哪些成果？

世界各地实施 4R 的经验和推进 4R 所面临的挑战大不相同。其中一些实施方案以 4R 为品牌，而另一些则不以 4R 为品牌，但采用了类似的方法。土壤肥力和植物营养方面的研究历史悠久，为 4R 实践选择提供了依据，即使这些研究不是在 4R 品牌下进行的。



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

北美

4R 养分管理首先在化肥行业内，然后在研究农业养分问题的农业环境科学家中，逐渐发展成为一个备受认可的概念（4）。使用 4R 实践被认为可以减少温室气体排放。加拿大艾伯塔省政府于 2010 年认可了 4R 养分管理，这是首个为减少农业氧化亚氮排放而实施的量化协议（5）。对加拿大自然气候解决方案的评估结论显示，到 2030 年，推广 4R 实践可使加拿大每年额外减少 630 万吨二氧化碳当量的温室气体排放，占加拿大对《巴黎协定》承诺的 3%（6）。美国首个“4R 养分管理认证计划”自 2014 年启动以来，在短短两年内就对伊利湖西部流域近 40% 的耕地养分施用产生了影响（7），限制了导致藻类大量繁殖的磷流失。虽然养分利用效率在过去几十年中不断提高，但量化氧化亚氮排放和磷流失的实际减少量仍是一项挑战。

南亚

从 2009 年到 2019 年，4R 养分管理概念已被纳入多个国家的国家研究和推广计划，并成为化肥行业农艺培训和实地计划的一部分。然而，在试验小区之外更广泛的农场实施仍是一项挑战。要为次大陆的多种作物和耕作制度确定肥料的恰当—的来源、用量、时间和地点，这不仅超出了大多数小农及其顾问的能力范围，也超出了许多研究人员的能力范围

由于需要一种简单易用的决策支持工具，将 4R 概念转化为针对具体田块的肥料建议，因此开发了“养分专家”软件（8），该软件沿用了 20 世纪 90 年代首次开发的针对具体地点的养分管理新方法（9）。“养分专家”软件使用一个强大的农场信息数据库，其中包括可达到的产量、肥料和粪肥使用情况、养分平衡以及其他生长条件。在农场使用该工具产生了可持续发展效益，包括对产量、盈利能力、土壤健康、养分利用效率、能源和水利用效率以及温室气体排放的影响（10）。

东南亚

国际植物营养研究所对大田作物（水稻、玉米）和种植园作物（油棕、咖啡、可可）的大量研究和推广工作提供了支持，直至 2019 年。出版了油棕、水稻、甘蔗、木薯、橡胶、芒果、西瓜和葡萄的 4R 原则田间手册。印度尼西亚的可可小农户在肥料管理能力方面差异很大（11）。对油棕进行的肥料管理研究发现，施肥时间对养分利用效率没有影响，但施肥量对其有很大影响（12）。基于 4R 养分管理的肥料建议帮助木薯种植者从肥料投资中获益（13）。2011 年制定了水稻可持续生产标准，其中包括无机和有机肥料来源、施肥时间和施肥量的原则（14）。



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

中国

中国大部分地区的农业是典型的小农农业。通过高肥料投入实现高产的做法损害了中国的环境可持续性 (15)。在 4R 实践中使用 "养分专家" 数字工具, 在提高养分利用效率的同时, 保持了产量和盈利能力 (16、17)。实施 4R 养分管理, 同时改进农艺管理, 有助于减少氮过剩, 确保粮食安全, 提高氮利用效率, 同时改善环境可持续性和经济回报 (18)。遵循 4R 原则的技术和管理方法的区域实施必须经过精心设计, 以适应具体地点的生物物理环境 (19)。2005 年至 2015 年期间, 中国 2000 多万农民采用土壤-作物系统综合管理方法, 提高了氮素利用效率和作物产量 (20)。

撒哈拉以南非洲

2006 年阿布贾化肥峰会认识到, 撒哈拉以南非洲小农耕作系统的作物产量需要提高, 以应对这些社区面临的诸多生计挑战, 因此呼吁增加化肥养分的使用。非洲绿色革命联盟将这一呼吁纳入其土壤战略, 重点围绕土壤肥力综合管理 (ISFM)。ISFM 是一套土壤肥力管理方法 (其中包括肥料、有机投入和改良种质的使用), 以及如何使这些方法适应当地条件的指南, 旨在最大限度地提高所施用养分的农艺利用效率, 提高作物产量。所有投入都需要遵循合理的农艺学原则进行管理 (21)。因此, ISFM 包含 4R 原则, 同时增加了良好的农艺实践。使用 ISFM 方法, 包括杂交品种和有机投入与肥料的结合, 可将每公斤施用氮的农艺效率提高到 40 公斤, 而当地的做法仅为 17 公斤 (22)。

在参与的小农社区中, "完全 ISFM" 的采用率通常在 10-25% 左右 (23)。最近, 还在撒哈拉以南非洲开发并测试了用于水稻、玉米和木薯特定地点养分管理的 "养分专家" 和其他工具 (24)。

未来还有很多机会实现更大规模的应用





SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

澳大利亚-新西兰

澳大利亚有几项计划采用了 4R 原则，但并不一定标明是 4R 原则。在昆士兰，由于担心沿海集水区的养分径流对大堡礁的影响，制糖业制定了 "六步工具箱" 养分管理计划 (25)。化肥行业的 Fertcare 计划明确采用 4R 养分管理方法。该计划对近 4000 名专业人员进行了肥料管理方面的培训，旨在提高生产率、最大限度地减少环境问题并确保食品安全。乳制品和谷物行业在其肥料使用建议中采用了 4R 方法。养分管理还得益于协调研究，以 "更好的作物肥料决策" 为目标，对作物和牧草对肥料的反应信息进行了整理，为农场定制养分建议提供了有据可依的依据 (26)。在以牧业系统为主的新西兰，在有关地表水和地下水质量的环境立法的推动下，超过 11,000 个农场使用了 OverseerFM 支持的养分预算 (27)。

拉丁美洲

巴西目前对作物的磷投入大大超过作物吸收量，但田间试验表明，结合使用免耕、覆盖作物和采用 4R 实践可提高磷的总体利用效率 (28)。相比之下，阿根廷和玻利维亚的作物养分平衡处于亏损状态 (29)。4R 实践与轮作、覆盖种植和均衡施肥相结合，不仅能提高农业生产率，还能保护和养护土壤 (30)。对阿根廷潘帕斯地区玉米的实地研究表明，"生态密集型" 管理方法--包括氮源、施肥量和施肥时间的 4R 方法--提高了玉米的生产率，却没有增加氧化亚氮的排放量 (31)。

阿根廷的另一项研究发现，与大豆单一种植相比，与谷物轮作的大豆单位产量的氧化亚氮排放量更低 (32)。在厄瓜多尔的安第斯地区，一套包括氮肥管理在内的保护性农业实践被发现可以减少土壤侵蚀，改善土壤健康，提高作物生产的利润率 (33)。

欧洲

欧洲的农业环境政策方法与北美明显不同，农业养分的使用趋势也是如此。与自愿方法相比，欧洲更强调监管方法 (34)。从历史上看，西欧的养分盈余要大于美国。过去一个世纪中，欧洲累积的磷过剩量相当于目前 63 年的作物去除量，而美国的这一数字为 18 年 (35)。过去 25 年中，欧盟在法规驱动下进行的变革减少了农业硝酸盐对水生环境的负荷，提高了养分利用效率，但这些问题仍是推动农业发展的环境和农业政策的重点。例如，欧洲的水质正受到氮磷比增加的威胁 (36)。欧洲化肥行业将 4R 纳入其 "无限养分管理" 理念，并制定了符合国家和欧盟政策目标的措施，包括精准耕作技术、估算化肥生产碳足迹的工具 (37)、循环经济行动计划，以及对氮利用效率指标实施的支持 (38)。



SCIENTIFIC PANEL
ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

哪些障碍限制了 4R 的采用和量化效益？

尽管上述 4R 养分管理的实施存在地区差异，但其共性也是显而易见的，特别是需要更好地与农艺、土壤保持和环境管理的良好实践相结合。



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

最初的 4R 框架包括对可持续性成果进行评估，并通过适应性管理不断完善，如图 2 所示。虽然《4R 植物营养手册》(1) 第 9.3 节介绍了此类评估的衡量标准，但报告方面的进展有限。在一些地区，行业组织能够统计出耕地面积以及实施某种程度 4R 养分管理的农民或顾问人数，仅此而已。

迄今为止，采用该方法的主要驱动力是盈利能力和降低风险--给农场带来的经济效益。有必要通过奖励采用 4R 实践的农民，提高人们对 4R 更广泛的环境和社会效益的认识。

衡量采用 4R 实践对这些成果的贡献面临诸多挑战，包括：

- 缺乏可用于深入监测和评估的资源
- 影响特定农田4个 "恰当 "选择的多重因素
- 隐私问题限制了农业零售商和农民共享数据的意愿和能力
- 记录具体 4R 实践影响的研究不足 (4)
- 衡量标准跨度大，权衡和协同作用难以评估 (39)

能提高种植系统可持续性的养分来源、用量、时间和地点的组合是因地制宜的，因为

- 土壤的养分供应能力和其他特性不同
- 作物对养分的需求不同
- 作物对养分施用的反应因土壤、气候、天气和农民的管理水平而异
- 影响养分损失的过程以及潜在损失的程度因土壤、地貌、气候和天气而异
- 养分流失造成的环境危害因流失养分的形式和流入生态系统的特点而异
- 农民的生产目标因其规模和社会经济条件而异
- 利益相关者对受养分施用影响的结果的优先考虑因地区而异，取决于社会经济状况、文化价值观、政策以及感知和实际风险



SCIENTIFIC PANEL
ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

4R 框架如何适应未来的农业系统？



在制定未来实施 4R 养分管理的计划时，应重点考虑以下因素。



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

与转型期耕作制度相结合

未来的综合耕作体系将包括 4R 实践，但许多其他组成部分（包括农艺、作物多样性、排水、牲畜、病虫害、种子、土壤保持和水（图 1））的管理选择也会影响农场养分的流动。土壤保持对于满足仍在不断发展的再生农业定义标准（40）尤为重要，与畜牧系统的整合也是如此（41）。通过轮作、间作和覆盖作物利用生物固氮的耕作系统也能提高氮的利用效率。在景观层面，应整合并优化耕地、牧场和畜牧生产系统之间的养分流（42）。在中国（43）和其他地区，重建畜牧业与耕地之间的联系为农业的可持续集约化提供了机遇。机械化、灌溉和施肥为扩大农民在管理养分施用方面的选择范围、提高整个系统的生产率和养分利用效率提供了大量机会。这对于当前的小农耕作制度尤为重要。

作物多样性和粮食系统也需要转型，以更好地满足人类健康和营养安全的需求（44）。谷物买家、加工商和政府需要提供激励措施，以提高所生产作物的营养价值，例如芬兰在硒方面所做的工作（45）。通过农艺学方法为粮食作物施肥，补充目标微量营养素，可以为消费者的健康带来多种益处（46）。作物开花期和开花后叶面施肥对谷物蛋白质有特别的效果（47）。花后叶面喷施微量营养元素也会影响谷物中锌、硒和碘的浓度，被认为是解决发展中国家人口隐性饥饿问题的一种非常有效的策略（48）。研究还表明，要成功地对小麦（49）和青贮玉米（50）进行锌和铁的生物强化，就必须施足氮肥。HarvestPlus 计划已经开发出对锌、铁和维生素 A 进行生物强化的作物新品种，目前已有 2 000 多万人受益，并有望扩大到 10 亿人（51）。这也需要有针对性基于肥料的微量元素生物强化解决方案。

利用数据驱动的数字解决方案支持决策

现在，许多国家的肥料经销商和其他服务提供商都提供全球定位系统引导的养分施用以及田间分区土壤采样和作物监测。这些技术可提供更精确的施肥、最小的重叠和更高的田间效率。许多农业企业还提供利用产量监测数据和卫星或航空图像指导养分管理决策的服务。这些技术通常侧重于养分施用量和施用时间，但也可能需要改变养分来源和施用位置。将这些技术和解决方案有效结合，最大化利用所有可用数据为农场决策提供支撑，是大有可为的（52）。不同的技术适用于不同规模的农业。使用“营养专家”或类似的决策支持工具，提供了一个与小农相关的数字解决方案的实例。澳大利亚的旱地农民也使用了基于模型的氮管理决策支持系统 APSIMd（53）。利用数字支持的咨询系统和机械化以及激光土地平整等适当的规模中性技术（54），对数百万小农具有潜在意义。



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

利用适应性管理进行创新

参与开放式创新系统的农场适应性管理和应用研究可加速开发和完善实用技术，从而带来经济和环境效益 (55)。例如，北美最近正在完善的创新包括利用天气驱动作物模型来预测氮肥最佳施用量的逐年变化。拜耳公司的 Climate Fieldview、Corteva 公司的 Encirca Premium 和雅苒公司的 Adapt-N 使种植者能够利用实时天气数据，帮助根据田地和季节的具体作物需求对氮肥施用量进行微调 (56)。虽然这些也可被视为数据驱动的数字解决方案，但将一个地区内许多生产者的数据汇总起来，可以更快地创新和完善决策算法，支持适应性管理。共享作物对养分反应数据的公共与私营企业合作伙伴关系有助于支持这些目标 (57)。





4R（恰当的来源、用量、时间和地点）需要哪些新的核心原则？

四个组成部分（来源、用量、时间、地点）的原则最直接适用于田间和农场规模。遵循这些原则做出的具体决定需要针对特定的土壤、作物、气候、耕作制度甚至价值链。它们还应考虑农场类型、风险规避和金融资本。我们在此提出了新的 4R 原则，以弥补之前发现的在实现负责任的植物营养方面存在的不足，并提供支持性理由。IPNI (2016) (1) 中也列出了其余的原有原则，但对其进行了更详细的描述。



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

恰当来源的新原则

1. 以可量化和可用的形式提供养分。 施用的养分形式可以是速效或缓释的植物可用养分，但如果要满足作物的要求，就必须知道其养分含量。商业肥料是根据等级和溶解度标准出售的；可以对粪肥和回收肥料进行养分含量和可用性分析，或使用适当的养分含量表（58）。

2. 使用气候智能型肥料。 气候智能型肥料需要在生产和施用后减少温室气体排放。肥料在施用单位养分时的环境足迹差别很大（59）。生产太阳能肥料（60）、绿色氨和蓝色尿素（61）的行业创新可能会减少未来氮的足迹（62）。硝化抑制剂、尿素水解抑制剂和肥料涂层已有几十年的历史，但其应用却很有限。一个主要原因是它们在提高产量和养分利用效率方面的性价比（63），使用这些抑制剂能减少氧化亚氮排放 20% 至 40%（64），而对提高产量和养分利用率的效果则相对较小。未来的创新包括养分的纳米颗粒形式、灵敏剂和对植物信号敏感的涂层，这些构成了“智能肥料”，可根据微生物活动和植物需求释放养分（65）。选择低排放形式有助于减少化肥行业的范畴 3 排放。

3. 在可行的情况下使用再循环形式。 粪便、生物固体和堆肥的土地应用减少了对人造肥料的需求，有助于减少农业的总体环境足迹。然而，在进口牲畜饲料的农场，粪便中的养分可能会超过作物对现有土地的需求。从粪便中以更浓缩的形式回收养分的技术，如硬石膏（66）或磷酸钙（67），可使养分的运输距离更远。已经提出了开发此类生物基肥料技术的指南和路线图（68）。将不同废物流加工成具有良好应用潜力的新型肥料的创新工作正在取得进展。例如，Ostara 硬石膏工艺目前可从亚特兰大、埃德蒙顿和萨斯卡通的污水处理厂以及全球总共 22 个系统中回收磷，每年可生产 25,000 吨控释磷酸铵镁肥料。佛罗里达州的 Anuvia 公司销售由食物垃圾制成的有机植物营养素。其他著名的公司包括 Ductor（利用沼气装置生产生物能源和液体氮肥）、Elemental（利用英国各种形式的食物垃圾生产肥料）和 Grassland Fertilisers（利用牛饲养场垃圾生产低分析颗粒肥料）。

恰当来源的最初原则

1. 适合土壤的物理和化学特性。
2. 认识营养元素和营养源之间的协同作用。
3. 认识到材料的混合兼容性。
4. 认识到相关元素的益处和敏感性。
5. 控制非营养元素的影响。



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

4. **考虑使用生物接种剂。**对于豆科作物来说，使用各种根瘤菌菌株是众所周知的，也是确保大量氮素生物固氮的一种方法，其优化对可持续集约化至关重要（69）。生物肥料被定义为活体微生物，通过调动或增加土壤中的养分来提高植物营养（70）。目前，各种有益细菌和真菌被用作生物肥料，并可成功定殖于根圈、根面或根系内部。尽管生物肥料具有潜力，但在商业化农业中，生物肥料尚未取代传统化肥。接种丛枝菌根真菌后的生长反应总体上并不一致（71）。

恰当用量的新原则

1. **应对作物反应的变异性。**逐年的天气变化、田地内部和之间的空间变化以及它们之间的相互作用，都会导致作物对施用养分反应的差异（72, 73）。天气是作物养分需求的重要驱动因素，但传统的建议通常不会因年而异。事实证明，在北美玉米生产（74）、澳大利亚经济作物（53）和华北平原小麦-玉米系统（75）的氮肥施用决策过程中纳入天气因素，可改善结果。

恰当用量的初始原则

1. 评估植物养分需求。
2. 评估土壤养分供应。
3. 预测肥料使用效率。
4. 考虑土壤资源的影响。
5. 考虑经济学和收益递减规律。

适时的新原则

1. **应对生长季养分需求的变化。**在许多种植系统中，包括油棕（76）、玉米（77）、施肥棉花（78）和小麦（79、80），已证明在生长季节动态调整养分施用量是可行的。一种使用当季气象数据的机器学习方法在预测加利福尼亚杏仁生产（81）和加拿大东部油菜籽生产（82）的氮需求方面显示出前景。利用叶色图、智能手机或视觉缺素症状等简单工具，也可进行此类动态调整。

适时的初始原则

1. 评估植物吸收的时间。
2. 评估土壤养分供应动态。
3. 认识土壤养分流失的动态。
4. 评估田间作业的后勤工作。



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

恰当施肥位置的新原则

1. **定点施肥，避免流失。**在整个地形中恰当施肥位置可以最大限度地减少养分的场外损失。许多公司正在开发遥感或近距离传感系统，利用变速施肥技术预测养分的最佳施用位置 (83)。与统一施肥量相比，根据坡度和作物覆盖情况对野生蓝莓施用变速肥料可减少磷的径流损失，同时不降低产量 (84)。在爱荷华州的玉米-大豆系统中，研究发现变速施肥可减少磷的投入和土壤测试水平的空间变化，从而降低磷流失的可能性 (85)。在 pH 值较高的土壤中，将尿素施入土壤而不是将其留在地表可减少氨的损失 (86, 87)。将磷肥置于土壤表层以下可降低排水中溶解磷的浓度和负荷 (88)，尤其是在保护性耕作系统中 (89)。

恰当施肥位置的初始原则

1. 考虑植物根系的生长位置。
2. 考虑土壤化学反应。
3. 适合耕作系统的目标。
4. 管理空间变异性。

综上所述，养分来源需要更加循环和适应气候，施肥量、时间和地点需要更加精确和动态。



SCIENTIFIC PANEL
ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

4R 如何促进可持续性绩效报告？

农民、工业、民间社会和政府监测和报告可持续发展绩效以实现科学目标方面的需求不断增加，但又各不相同。



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

在实施 4R 并获得一定程度认可的地方，其驱动力往往是利益相关者的重点期望。例如，伊利湖 4R 认证计划的重点是在保持作物生产盈利的同时，减少磷的损失和藻类大量繁殖的做法。土壤肥力综合管理的重点是通过提高盈利能力和降低小农风险来提高作物产量和粮食安全。每个地区和每个种植系统都有不同的利益相关者优先事项。

然而，确定利益相关者的优先事项所涉及的层面远远超出了农场的范围，基本上是“从田间到市场”等可持续发展平台或其他具有适合代表利益相关者利益的管理结构的组织的工作。为此，我们介绍了作为 4R 框架的一些核心普遍问责内容，以及这些内容如何与任何现有的可持续发展平台相联系。该框架要求在农场一级跟踪 4R 实践和经济效益。在农场层面无法直接衡量的环境和社会影响，将在地区或计划层面的合作计划和倡议中报告，这些计划和倡议涉及以科学为基础的估算方法和模型。要量化这些影响，通常需要有关农场采用的具体做法和特定土壤特性的详细数据。

跟踪农场层面的 4R 实践和经济效益

在农场层面实施 4R 的核心框架包括跟踪四项实践内容及其直接的农场层面经济成果。跟踪 4R 实践的一种方法是使用根据专家意见制定的表格，该表格描述了特定种植系统在基本、中级和高级管理水平下的源-率-时-地实践的具体套件

(90)。图 1 中可在农场层面衡量的四个绩效指标包括生产率、盈利能力、养分利用效率和土壤健康。

- 生产率，指可销售产品的产量。
- 盈利能力，即收入与支出之间的差额，为农民的生计提供支持。
- 养分利用效率可追踪为产出与投入的比率，或盈余或亏损。
- 土壤健康可侧重于土壤肥力，但也包括支持生产力、可用持水量和碳储存的土壤生物和物理方面。

这四个绩效领域的信息是为农场管理人员提供的，但如果在适当保护隐私的情况下与信息聚合器共享，也有助于环境和社会绩效的报告。其中一些指标因其与提供生态系统服务的相关性而受到推崇。例如，土壤测试磷浓度已被提议作为衡量农业对生物多样性、土壤健康以及与新西兰牧场生产力相关的水污染风险影响的指标 (39)。此外，还提出将氮盈余作为氧化亚氮排放的指标，供食品供应链公司和其他公司用于量化区域范围内温室气体排放的总体变化 (91)。



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

将氮平衡保持在安全范围内的定制方法有助于避免在氧化亚氮排放和作物高产之间进行权衡 (92)。荷兰与一家提供决策支持的咨询公司共享了 1 万多个田间年的农场数据组合，对这些数据进行的分析表明，如何利用管理和天气对产量和氮利用效率的影响来评估生产、经济和环境绩效 (93)。

共享跟踪数据以报告绩效

关键物质成果的量化为价值链中从农民到消费者的每个参与者提供了重要信息。并非所有跟踪的数据都需要共享和报告，但这些成果的量化与关键实践相关。如图 1 所示，在农业系统中与 4R 相关的重要环境成果包括生物多样性 (94)、温室气体净排放（包括土壤碳汇）以及空气和水质。4R 计划可以为相关的可持续发展平台提供所需的农场活动信息的重要部分，这些平台是农业食品行业的合作机构，其中已包括许多化肥生产商和零售商，它们向利益相关者报告环境成果。

例如，"从田间到市场可持续农业联盟" (Field to Market Alliance for Sustainable Agriculture) 在其 Fieldprint Platform (95) 中认可了用于计算美国玉米和小麦种植系统一氧化二氮排放量的特定 4R 氮素实践套件。它要求 4R 养分实践数据包含其八项指标中的四项：生物多样性、温室气体、能源和水质。生态系统服务市场联盟 使用更详细的 4R 实践数据，利用经过验证的减少温室气体排放的有效性模型，生成可销售的信用额度。其他一些平台也在不断发展，包括 Indigo Ag、Truterra、拜耳、Nutrien、雅苒 等行业主导的自愿碳农业平台。目前，许多食品公司和农业投入品供应商都在努力界定并减少其 "范畴 3" 排放和足迹，其中可能包括与供应链中农业生产相关的该类别中的所有指标。

4R 计划--甚至是整个农场管理计划--与粮食安全、人类营养、生计和循环性等社会影响的直接关系较小 (图 1)，但这些影响是单个农场和整个供应链活动的集体结果。因此，通过合作平台和政府清单建立联系至关重要。粮农组织、各国政府和其他组织公布了全球和国家层面的粮食安全和人类营养指标。生计反映了农民收入因采用支持社会效益的奖励做法而获得的收益，还包括农业企业在支持推进 4R 的新创新活动中创造的就业机会。在实施 4R 计划时，还可以考虑提高参与和获益的公平性 (96)。养分的循环性 是一个相对较新的指标，旨在通过增加再利用和再循环来反映对循环经济的贡献，从而减少有限资源的消耗。循环过渡指标的计算方法已经公布 (97)。具体如何衡量、计算或与农场层面的养分使用相关，还需要讨论，但它应反映出牲畜粪便和其他生物废弃物在最需要养分的土壤中的更优化分配，以及养分的安全循环利用，以降低有限自然资源的损耗率 (98)。



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

谁需要做什么？

以下指导方针概述了各利益相关群体在推进 4R 养分管理方面的作用。它们以联合国粮农组织 (3) 和负责任植物营养科学小组 (2) 概述的作用为基础。具体建议和行动因国家而异，取决于地区优先事项和技术发展水平。

化肥行业:

根据 4R 原则，实施决策支持系统，并就来源-用量-时间-地点的选择提出建议。在恰当的时间提供恰当的来源。向包括农民在内的购买者提供有关肥料产品环境足迹的信息。与研究机构、政府和民间社会组织合作，为农业价值链制定可持续发展标准，并纳入 4R 实践标准和绩效指标。对零售商、农艺师和农民进行 4R 原则、针对具体地点的 4R 实践以及负责的耕作制度实践方面的培训。推动创新并提供资源，开发养分再利用和回收技术作为肥料安全使用。以地区为基础，为有关 4Rs 关键问题的公共研究提供杠杆支持。

化肥零售商、农业服务提供商和作物顾问:

向农民提供有关具体 4R 实践和负责任农艺实践的实证信息。与农民合作，支持农场适应性管理和研究，评估肥料产品和添加剂以及相关的施肥时间-地点实践对产量、养分利用效率和土壤健康的影响。确保施肥服务符合 4R 实践和质量标准。支持并促进安全、适当地使用从回收资源中提取的养分。

农民和其他肥料使用者:

根据作物需求和土壤肥力条件，利用适当的决策支持工具，通过现有的来源-用量-时间-地点组合优化养分管理。参与特定 4R 组合的农场评估。寻求专业认可、经过认证的农业服务提供商的建议。在可行的情况下，共享有关 4R 和农艺实践的数据，以便为报告、认可和奖励可持续发展绩效的提高提供平台。确保当地可用的养分来源（包括动物粪便、堆肥、作物残留物）得到合理利用。

科学家:

与作物顾问和农民合作，定义并描述与再生性更强的农业系统相关的 4R 实践标准。开发、验证和建立预测此类耕作制度变化的环境和社会结果的方法的可信度，并支持将其纳入可持续发展绩效报告平台。调查农民采用 4R 实践的社会经济和生态障碍，并确定解决这些障碍的政策和技术机会。开发对 4R 实施计划进行多层次评估的方法。开发新的更高效、气候智能型和循环经济友好型营养源。



谁需要做什么？

各国政府:

促进收集更详细的统计数据，为报告 4R 实践提供支持。支持科学家和科学研究开发模型，以评估 4R 实践对可持续性绩效的影响。采取政策，激励和奖励 4R 实践的采用、更有营养的食物的生产、气候智能型肥料的开发和使用，以及从废弃物中回收养分的创新。美国环保局与美国农业部联合开展的“下一代肥料合作与竞赛”活动，旨在推动美国农业的可持续发展，是政府与行业合作激励肥料产品开发创新的典范。

食品贸易商、加工商和零售商:

表彰和奖励用于销售产品的 4R 实践。在可持续生产标准中纳入 4R 实践和绩效指标，以加快农民采用改进的 4R 实践。

民间社会组织:

在推进可持续农业的合作平台中，倡导认可和奖励 4R 养分管理。宣传行为改变的成功经验以及由此给生态系统和社会带来的益处。

投资者:

投资支持 4R 的技术、企业和组织，将其作为推进养分管理的公认手段。



成功将是怎样的？

1

通过农业食品行业内的合作，建立了值得信赖的机构，农民愿意与这些机构共享养分施用实践数据，以监测、评估和报告可持续发展成果。

2

肥料和畜牧业合作制定了 4R 实践标准，整合肥料和粪便管理，解决耕地、牧场和牲畜之间的养分循环问题。

3

数字技术在各种规模的农场中的应用日益广泛，既支撑农场研究和适应性管理，也助力共享数据以报告可持续发展成果。

4

保护生物多样性的农产品绿色标签承认并要求 4R 实践和绩效数据。

5

通过技术和管理创新，从粪便和其他生物废弃物中提取的氮和磷已被注册为肥料产品，并以可运输的形式用作肥料。

6

4R 实践建议支持为土壤提供更多绿色覆盖的再生种植系统。

7

采用了可靠的方法和标准，以更好地评估养分管理，并指导加大研究和政策投资，支持在农场、景观和国家层面的加速创新。

8

针对区域种植系统的具体优先事项，制定了有关来源、比例、时间和地点的公认实践标准，这些标准得到了农民的使用和农产品买家的认可。



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

参考文献

1. IPNI. 4R plant nutrition manual: A manual for improving the management of plant nutrition. (International Plant Nutrition Institute, 2016).
2. SPRPN. A new paradigm for plant nutrition. Issue Brief 01. Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition, Paris, France. (2020).
3. FAO. International code of conduct for the sustainable use and management of fertilizers. (2019).
4. Fixen, P. E. A brief account of the genesis of 4R nutrient stewardship. Agron. J. 112, 4511–4518 (2020).
5. Alberta Government. Quantification Protocol for Agricultural Nitrous Oxide Emission Reductions Specified Gas Emitters Regulation, version 2.0. (2015).
6. Drever, C. R. et al. Natural climate solutions for Canada. Sci. Adv. 7, (2021).
7. Vollmer-Sanders, C., Allman, A., Busdeker, D., Moody, L. B. & Stanley, W. G. Building partnerships to scale up conservation: 4R Nutrient Stewardship Certification Program in the Lake Erie watershed. J. Great Lakes Res. 42, 1395–1402 (2016).
8. Pampolino, M. F., Witt, C., Pasuquin, J. M., Johnston, A. & Fisher, M. J. Development approach and evaluation of the Nutrient Expert software for nutrient management in cereal crops. Comput. Electron. Agric. 88, 103–110 (2012).
9. Dobermann, A. et al. Site-specific nutrient management for intensive rice cropping systems in Asia. F. Crop. Res. 74, 37–66 (2002).
10. Sapkota, T. B. et al. Crop nutrient management using Nutrient Expert improves yield, increases farmers' income and reduces greenhouse gas emissions. Sci. Rep. 11, 1564 (2021).
11. Hoffmann, M. P. et al. Fertilizer management in smallholder cocoa farms of Indonesia under variable climate and market prices. Agric. Syst. 178, 102759 (2020).
12. Tao, H.-H. et al. Fertilizer management effects on oil palm yield and nutrient use efficiency on sandy soils with limited water supply in Central Kalimantan. Nutr. Cycl. Agroecosystems 112, 317–333 (2018).
13. Luar, L. et al. Cassava Response to Fertilizer Application. Better Crop. with Plant Food 102, 11–13 (2018).
14. SRP. The SRP Standard for Sustainable Rice Cultivation (Version 2.1), Sustainable Rice Platform. (2020).
15. Wu, Y. et al. Policy distortions, farm size, and the overuse of agricultural chemicals in China. Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. 115, 7010 (2018).
16. Xu, X. et al. Fertilizer recommendation for maize in China based on yield response and agronomic efficiency. F.Crop.Res.157,27–34 (2014).
17. Wang, Y. et al. Agronomic and environmental benefits of nutrient expert on maize and rice in Northeast China. Environ. Sci. Pollut. Res. (2020).
18. Zhang, C., Ju, X., Powlson, D. S., Oenema, O. & Smith, P. Nitrogen surplus benchmarks for controlling N pollution in the main cropping systems of China. Environ. Sci. Technol. (2019).
19. Li, T. et al. Exploring optimal nitrogen management practices within site-specific ecological and socioeconomic conditions. J. Clean. Prod. 241, 118295 (2019).
20. Cui, Z. et al. Pursuing sustainable productivity with millions of smallholder farmers. Nature 555, 363–366 (2018).
21. Vanlauwe, B. et al. Integrated Soil Fertility Management: Operational Definition and Consequences for Implementation and Dissemination. Outlook Agric. 39, 17–24 (2010).
22. Vanlauwe, B. et al. Integrated soil fertility management in sub-Saharan Africa: unravelling local adaptation. SOIL 1, 491–508 (2015).



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

参考文献

23. Nkonya, E. Replication Data for: Mapping Adoption of ISFM Practices Study - The Case of Kenya, Rwanda & Zambia. (2017).
24. Chivenge, P., Saito, K., Bunquin, M. A., Sharma, S. & Dobermann, A. Co-benefits of nutrient management tailored to smallholder agriculture. Glob. Food Sec. 30, 100570 (2021).
25. Pearson, R. G., Connolly, N. M., Davis, A. M. & Brodie, J. E. Fresh waters and estuaries of the Great Barrier Reef catchment: Effects and management of anthropogenic disturbance on biodiversity, ecology and connectivity. Mar. Pollut. Bull. 166, 112194 (2021).
26. Conyers, M. K. et al. Making Better Fertiliser Decisions for Cropping Systems in Australia (BFDC): knowledge gaps and lessons learnt. Crop Pasture Sci. 64, 539–547 (2013).
27. Murray, W. & Freeman, M. Effective use of Overseer in regulation. In: L. D. Currie and M. J. Hedley, editors, Science and policy: nutrient management challenges for the next generation. Occasional Report No. 30, Fertiliser and Lime Research Centre, Palmerston North, NZ. p. 1-6. (2017).
28. Withers, P. J. A. et al. Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. Sci. Rep. 8, 2537 (2018).
29. Jobbágy, E., Aguiar, S., Garibaldi, L. & Piñeiro, G. Impronta ambiental de la agricultura de granos en Argentina: revisando desafíos propios y ajenos. Cienc. Hoy 29, (2021).
30. Fontana, M. B. et al. Long-term fertilizer application and cover crops improve soil quality and soybean yield in the Northeastern Pampas region of Argentina. Geoderma 385, 114902 (2021).
31. Picone, L. I. et al. Nitrous oxide emissions in maize on mollisols in the Pampas of Argentina. Geoderma Reg. e00362 (2021).
32. Piccinetti, C. F., Bacigaluppo, S., Di Ciocco, C. A., De Tellería, J. M. & Salvagiotti, F. Soybean in rotation with cereals attenuates nitrous oxide emissions as compared with soybean monoculture in the Pampas region. Geoderma 402, 115192 (2021).
33. Barrera, V. H., Delgado, J. A. & Alwang, J. R. Conservation agriculture can help the South American Andean region achieve food security. Agron. J., (2021).
34. van Grinsven, H. J. M. et al. Losses of Ammonia and Nitrate from Agriculture and Their Effect on Nitrogen Recovery in the European Union and the United States between 1900 and 2050. J. Environ. Qual. 44, 356–367 (2015).
35. Bruulsema, T. W., Peterson, H. M. & Prochnow, L. I. The science of 4R nutrient stewardship for phosphorus management across latitudes. J. Environ. Qual. 48, (2019).
36. Bouwman, A. F. et al. Lessons from temporal and spatial patterns in global use of N and P fertilizer on cropland. Sci. Rep. 7, 40366 (2017).
37. Hoxha, A. & Christensen, C. The carbon footprint of fertiliser production: Regional reference values. Proceedings 805. Paper presented to the International Fertiliser Society, Prague, Czech Republic, 8 May 2018.
38. EUNEP. EU Expert Panel, Nitrogen Use Efficiency (NUE). Guidance document for assessing NUE at farm level (Wageningen University, Alterra, Wageningen, NL). (2016).
39. Macintosh, K. A. et al. Transforming soil phosphorus fertility management strategies to support the delivery of multiple ecosystem services from agricultural systems. Sci. Total Environ. 649, 90–98 (2019).
40. Schreefel, L., Schulte, R. P. O., de Boer, I. J. M., Schrijver, A. P. & van Zanten, H. H. E. Regenerative agriculture – the soil is the base. Glob. Food Sec. 26, 100404 (2020).
41. Giller, K. E., Hijbeek, R., Andersson, J. A. & Sumberg, J. Regenerative Agriculture: An agronomic perspective. Outlook Agric. 0030727021998063 (2021).
42. Spiegel, S. et al. Manuresheds: Advancing nutrient recycling in US agriculture. Agric. Syst. 182, 102813 (2020).



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

参考文献

43. Jin, S. et al. Decoupling livestock and crop production at the household level in China. Nat. Sustain. 4, 48–55 (2021).
44. Fears, R., ter Meulen, V. & von Braun, J. Global food and nutrition security needs more and new science. Sci. Adv. 5, eaba2946 (2019).
45. Alfthan, G. 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. J. Trace Elem. Med. Biol. 31, 142–147 (2015).
46. Chen, X.-P. et al. Harvesting more grain zinc of wheat for human health. Sci. Rep. 7, 7016 (2017).
47. Ferrari, M. et al. Comparing Soil vs. Foliar Nitrogen Supply of the Whole Fertilizer Dose in Common Wheat. Agronomy 11, (2021).
48. Zou, C. et al. Simultaneous Biofortification of Wheat with Zinc, Iodine, Selenium, and Iron through Foliar Treatment of a Micronutrient Cocktail in Six Countries. J. Agric. Food Chem. 67, 8096–8106 (2019).
49. Kutman, U. B., Yildiz, B. & Cakmak, I. Effect of nitrogen on uptake, remobilization and partitioning of zinc and iron throughout the development of durum wheat. Plant Soil 342, 149–164 (2011).
50. Grujic, D., Yazici, A. M., Tutus, Y., Cakmak, I. & Singh, B. R. Biofortification of Silage Maize with Zinc, Iron and Selenium as Affected by Nitrogen Fertilization. Plants 10, (2021).
51. Bouis, H. E. & Saltzman, A. Improving nutrition through biofortification: A review of evidence from HarvestPlus, 2003 through 2016. Glob. Food Sec. 12, 49–58 (2017).
52. Basso, B. & Antle, J. Digital agriculture to design sustainable agricultural systems. Nat. Sustain. 3, 254–256 (2020).
53. Carberry, P. S. et al. Re-inventing model-based decision support with Australian dryland farmers. 3. Relevance of APSIM to commercial crops. Crop Pasture Sci. 60, 1044–1056 (2009).
54. Aryal, J. P., Mehrotra, M. B., Jat, M. L. & Sidhu, H. S. Impacts of laser land leveling in rice-wheat systems of the north-western indo-gangetic plains of India. Food Secur. 7, 725–738 (2015).
55. Steinke, J., Ortiz-Crespo, B., van Etten, J. & Müller, A. Participatory design of digital innovation in agricultural research-for-development: insights from practice. Agric. Syst. 195, 103313 (2022).
56. Sela, S., Woodbury, P. B. & van Es, H. M. Dynamic model-based N management reduces surplus nitrogen and improves the environmental performance of corn production. 13, 54010 (2018).
57. Ransom, C. J. et al. Data from a public-industry partnership for enhancing corn nitrogen research. Agron. J. (2021).
58. Havlin, J., Tisdale, S., Nelson, W. & Beaton, J. p 412-420 in Soil Fertility and Fertilizers: an Introduction to Nutrient Management, 8th edition. Pearson. (2014).
59. Hasler, K., Bröring, S., Omta, S. W. F. & Olf, H.-W. Life cycle assessment (LCA) of different fertilizer product types. Eur. J. Agron. 69, 41–51 (2015).
60. Comer, B. M. et al. Prospects and Challenges for Solar Fertilizers. Joule 3, 1578–1605 (2019).
61. Driver, J. G. et al. Blue Urea: Fertilizer With Reduced Environmental Impact. Frontiers in Energy Research 7, 88 (2019).
62. Tallaksen, J., Bauer, F., Hulteberg, C., Reese, M. & Ahlgren, S. Nitrogen fertilizers manufactured using wind power: greenhouse gas and energy balance of community-scale ammonia production. J. Clean. Prod. 107, 626–635 (2015).
63. Abalos, D., Jeffery, S., Sanz-Cobena, A., Guardia, G. & Vallejo, A. Meta-analysis of the effect of urease and nitrification inhibitors on crop productivity and nitrogen use efficiency. Agric. Ecosyst. Environ. 189, 136–144 (2014).



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

参考文献

64. Thapa, R., Chatterjee, A., Awale, R., McGranahan, D. A. & Daigh, A. Effect of Enhanced Efficiency Fertilizers on Nitrous Oxide Emissions and Crop Yields: A Meta-analysis. Soil Sci. Soc. Am. J. 80, 1121–1134 (2016).
65. Monreal, C. M., DeRosa, M., Mallubhotla, S. C., Bindraban, P. S. & Dimkpa, C. Nanotechnologies for increasing the crop use efficiency of fertilizer-micronutrients. Biol. Fertil. Soils 52, 423–437 (2016).
66. do Nascimento, C. A. C., Pagliari, P. H., Faria, L. de A. & Vitti, G. C. Phosphorus Mobility and Behavior in Soils Treated with Calcium, Ammonium, and Magnesium Phosphates. Soil Sci. Soc. Am. J. 82, 622–631 (2018).
67. Szogi, A. A. & Vanotti, M. B. Removal of Phosphorus from Livestock Effluents. J. Environ. Qual. 38, 576–586 (2009).
68. Vaneckhaute, C., Belia, E., Meers, E., Tack, F. M. G. & Vanrolleghem, P. A. Nutrient recovery from digested waste: Towards a generic roadmap for setting up an optimal treatment train. Waste Manag. 78, 385–392 (2018).
69. Mendoza-Suárez, M. A. et al. Optimizing Rhizobium-legume symbioses by simultaneous measurement of rhizobial competitiveness and N₂ fixation in nodules. Proc. Natl. Acad. Sci. 117, 9822 LP – 9831 (2020).
70. Mitter, E. K., Tosi, M., Obregón, D., Dunfield, K. E. & Germida, J. J. Rethinking Crop Nutrition in Times of Modern Microbiology: Innovative Biofertilizer Technologies. Front. Sustain. Food Syst. 5, 29 (2021).
71. Ryan, M. H. & Graham, J. H. Little evidence that farmers should consider abundance or diversity of arbuscular mycorrhizal fungi when managing crops. New Phytol. 220, 1092–1107 (2018).
72. Ichami, S. M., Shepherd, K. D., Sila, A. M., Stoorvogel, J. J. & Hoffland, E. Fertilizer response and nitrogen use efficiency in African smallholder maize farms. Nutr. Cycl. Agroecosystems 113, 1–19 (2019).
73. Sogbedji, J. M., van Es, H. M., Klausner, S. D., Bouldin, D. R. & Cox, W. J. Spatial and temporal processes affecting nitrogen availability at the landscape scale. Soil Tillage Res. 58, 233–244 (2001).
74. Ransom, C. J. et al. Improving publicly available corn nitrogen rate recommendation tools with soil and weather measurements. Agron. J., (2021).
75. Michalczyk, A. et al. Model-based optimisation of nitrogen and water management for wheat–maize systems in the North China Plain. Nutr. Cycl. Agroecosystems 98, 203–222 (2014).
76. Webb, M. A conceptual framework for determining economically optimal fertiliser use in oil palm plantations with factorial fertiliser trials. Nutr. Cycl. Agroecosystems 83, 163–178 (2009).
77. Kabir, T., De Laporte, A., Nasielski, J. & Weersink, A. Adjusting Nitrogen Rates with Split Applications: Modelled Effects on N Losses and Profits Across Weather Scenarios. Eur. J. Agron. 129, 126328 (2021).
78. Bronson, K. F. et al. Improving Nitrogen Fertilizer Use Efficiency in Surface- and Overhead Sprinkler-Irrigated Cotton in the Desert Southwest. Soil Sci. Soc. Am. J. 81, 1401–1412 (2018).
79. Dick, C. D., Thompson, N. M., Epplin, F. M. & Arnall, D. B. Managing Late-Season Foliar Nitrogen Fertilization to Increase Grain Protein for Winter Wheat. Agron. J. 108, 2329–2338 (2016).
80. Kersebaum, K. C. et al. Operational use of agro-meteorological data and GIS to derive site specific nitrogen fertilizer recommendations based on the simulation of soil and crop growth processes. Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C 30, 59–67 (2005).
81. Zhang, Z., Jin, Y., Chen, B. & Brown, P. California Almond Yield Prediction at the Orchard Level With a Machine Learning Approach. Front. Plant Sci. 10, 809 (2019).
82. Wen, G. et al. Machine learning-based canola yield prediction for site-specific nitrogen recommendations. Nutr. Cycl. Agroecosystems 121, 241–256 (2021).
83. Fastellini, G. & Schillaci, C. Chapter 7 - Precision farming and IoT case studies across the world. in Agricultural Internet of Things and Decision Support for Precision Smart Farming (eds. Castrignanò, A. et al.) 331–415 (Academic Press, 2020).



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

参考文献

84. Rashid Saleem, S. et al. Impact of Variable Rate Fertilization on Nutrients Losses in Surface Runoff for Wild Blueberry Fields. Appl. Eng. Agric. 30, 179–185 (2014).
85. Wittry, D. J. & Mallarino, A. P. Comparison of uniform- and variable-rate phosphorus fertilization for corn-soybean rotations. Agron. J. 96, 26–33 (2004).
86. Sheppard, S. C., Bittman, S. & Bruulsema, T. W. Monthly ammonia emissions from fertilizers in 12 Canadian Ecoregions. Can. J. Soil Sci. 90, (2010).
87. Woodley, A. L. et al. Ammonia volatilization, nitrous oxide emissions, and corn yields as influenced by nitrogen placement and enhanced efficiency fertilizers. Soil Sci. Soc. Am. J. n/a, (2020).
88. King, K. W. et al. Phosphorus Transport in Agricultural Subsurface Drainage: A Review. J. Environ. Qual. 44, 467–485 (2015).
89. Jarvie, H. P. et al. Increased soluble phosphorus loads to lake erie: Unintended consequences of conservation practices? J. Environ. Qual. 46, (2017).
90. Snyder CS. Suites of 4R Nitrogen Management Practices for Sustainable Crop Production and Environmental Protection. International Plant Nutrition Institute. (2016).
91. Eagle, A. J. et al. Quantifying On-Farm Nitrous Oxide Emission Reductions in Food Supply Chains. Earth's Futur. 8, e2020EF001504 (2020).
92. Maaz, T. M. et al. Meta-analysis of yield and nitrous oxide outcomes for nitrogen management in agriculture. Glob. Chang. Biol. n/a, (2021).
93. Silva, J. V. et al. Agronomic analysis of nitrogen performance indicators in intensive arable cropping systems: An appraisal of big data from commercial farms. F. Crop. Res. 269, 108176 (2021).
94. SPRPN. Achieving nature-positive plant nutrition: fertilizers and biodiversity. Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition. Paris, France. 12 (2021).
95. Young, K. M. & Thomson, A. Relating agronomic practices to environmental sustainability outcomes: energy use and greenhouse gases. Crop. Soils 52, 14–42 (2019).
96. Farnworth, C. R. et al. Gender and inorganic nitrogen: what are the implications of moving towards a more balanced use of nitrogen fertilizer in the tropics? Int. J. Agric. Sustain. 15, 136–152 (2017).
97. WBCSD. Circular transition indicators v2.0. World Business Council for Sustainable Development. (2021).
98. van der Wiel, B. Z. et al. Restoring nutrient circularity in a nutrient-saturated area in Germany requires systemic change. Nutr. Cycl. Agroecosystems 121, 209–226 (2021).



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

作者、引用与联系方式

贡献作者: Members of the Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition (lead author underlined).

Tom Bruulsema (Plant Nutrition Canada), Ismail Cakmak (Sabanci University, Turkey), Achim Dobermann (International Fertilizer Association, France), Bruno Gerard (UM6P, Morocco), 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)

鸣谢: We appreciate input received from Fernando Garcia, Raul Jaramillo, Luis Prochnow, and Eros Francisco on 4R outcomes in Latin America, and review comments from members of Fertilizer Canada, The Fertilizer Institute, and the International Fertilizer Association.

引文: Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition. 2021. Furthering 4R Nutrient Stewardship. Issue Brief 03. Available at <https://sprpn.org>.

更多信息: Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition, info@sprpn.org