



SCIENTIFIC PANEL  
ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Issue Brief 08 – March 2025

# 新型肥料及其作用模式

by the Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition



SCIENTIFIC PANEL  
ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

# 内容

- 3 要点
- 5 问题是什么？
- 6 农业养分利用效率
- 10 新型高效肥料候选技术
- 19 新型肥料技术广泛商业应用的障碍
- 21 评估新型肥料产品
- 26 谁需要做什么？
- 27 成功是什么样的？
- 28 参考文献
- 32 作者，引用和联系方式



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

# 要点

由于淋溶和挥发造成的损失，传统肥料的氮肥养分回收率通常低于 60%，而磷肥和微量营养元素的养分回收率甚至更低，因为土壤对其有很强的滞留作用。

通过创新肥料及其应用来提高肥料效率的潜力巨大。这些所谓的新型肥料是先进的配方，旨在提高养分利用效率和作物产量，并减少对环境的影响。随着农业对可持续发展的重视，开发这些肥料对于同时实现生产率和环境成果至关重要。

增效技术（图 1）包括抑制剂处理肥料、缓释和控释配方、微生物涂层、纳米肥料和载体技术（如石墨烯、层状双氢氧化物和金属有机框架）。虽然前景广阔，但许多创新技术在成本、可扩展性以及长期环境和农艺性能方面面临挑战。

采用新型肥料往往受到成本较高、农艺效益不一致、物流问题、制造复杂性和监管障碍等因素的限制。此外，许多创新产品缺乏有力的田间试验，无法为农民展示明显的经济和环境优势。要评估新的肥料配方，应记录以下四个方面：

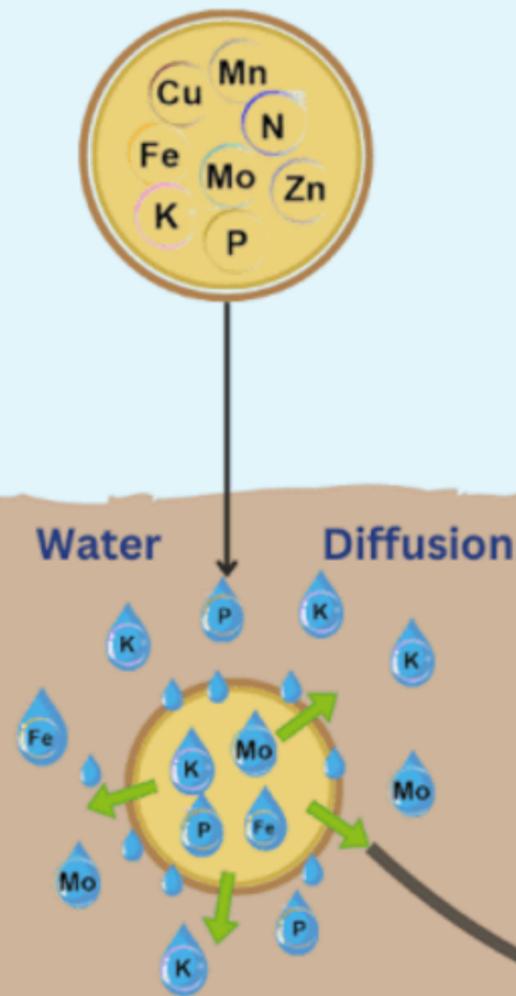
（1）作用模式；（2）农艺和环境效益；（3）处理和物流的便利性；（4）制造成本、复杂性和环境足迹。在田间条件下进行严格的测试和标准化的实验方案对于验证至关重要。

政府、行业、研究人员和农民必须通力合作，共同创新、评估和采用可持续肥料技术。有必要制定政策、激励措施和简化监管框架，以促进可持续肥料技术的开发和广泛使用。要想取得成功，就必须使用温室气体排放量更低、效率更高、农艺性能更好、环境足迹更小的肥料。

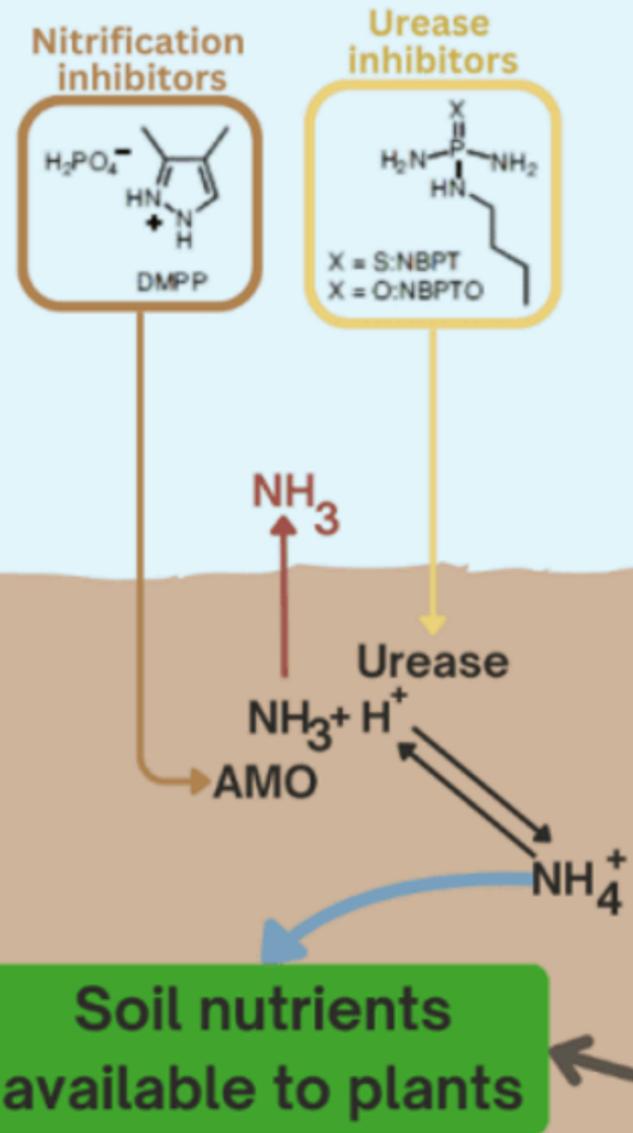


# Novel fertilizers and their modes of action

## Coated fertilizers



## Inhibitor-treated fertilizers



## Metal-organic frameworks

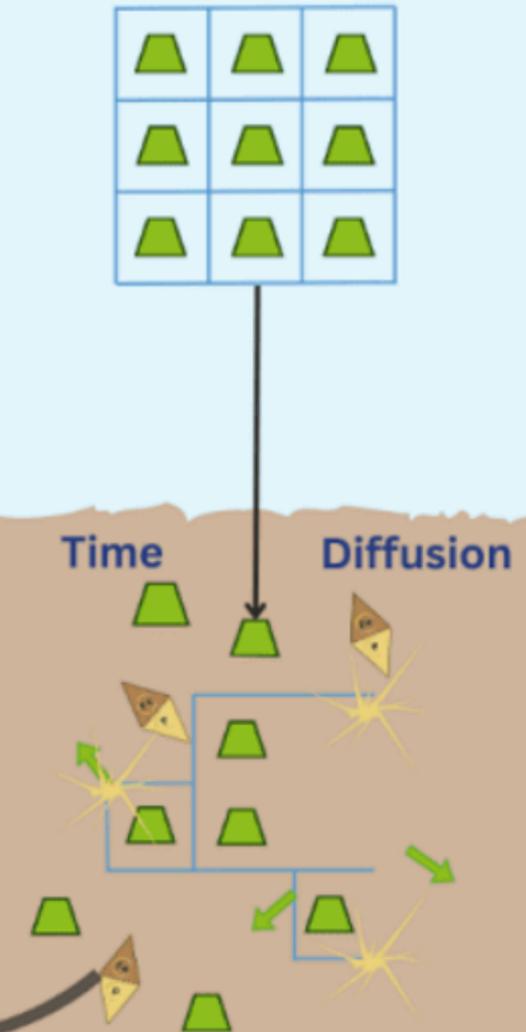


图 1. 增效肥料技术及其田间应用实例。



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

# 问题是什么？

新型肥料是包括涂层、载体、抑制剂、微生物、纳米材料等在内的配方，专门用于提高养分利用效率 (NuUE)、提高作物产量或质量和/或减少对环境的影响。这些制剂旨在改善植物生长所需的各种基本或有益元素的供应 (1)。

它们基于不同的作用机制，用于不同的目的。随着全球推动农业生产实践的可持续发展，与新型肥料技术相关的出版物、专利和产品的数量显著增加。了解新型肥料的作用模式，制定适当的评估方案，并用适当的指标清楚地记录性能结果，对于为这些产品的最终用户提供知情决策至关重要。

随着市场上新型肥料的数量和种类不断增加，明确界定产品类别、其功效以及如何对其进行最佳评估以支持相关声明已成为当务之急。在此，我们将对提高养分利用效率所需的主要作用模式、新型肥料的类型以及评估其性能的可靠方法进行综述。我们的重点是合成或矿物来源的无机肥料，而不考虑纯有机肥料、微生物产品或其他生物刺激剂。





SCIENTIFIC PANEL  
ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

# 农业养分利用效率

作物的养分利用效率有多种定义和测量方法(2)。农艺效率 (AE) 是指施用单位肥料所能增加的作物产量。对农民来说，农艺效率是一个非常重要的衡量标准，因为它既考虑了肥料养分吸收效率，也考虑了肥料养分转化为收获物的效率。要比较不同作物和环境下添加特定肥料、产品或施肥方法的效率，肥料回收效率 (RE) 是首选的衡量标准。其计算方法是，与未施肥的对照组相比，每施用一个单位的养分，作物地上生物量吸收养分的增加量 (2)



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

田间研究是量化肥料 AE 和 RE 的首选方法，因为施用到土壤或叶片中的肥料养分的吸收效率因养分、施用方法和位置、施用时间、施用量、土壤和作物类型以及环境条件而异。由于这些干扰因素，对 AE 和 RE 值的解释需要谨慎。要了解新型肥料的作用模式，特别是植物对养分的吸收、转运、分配和再分配效率，还需要更多的作物指标 (2)。

氮 (N) 是最容易通过淋溶、径流或大气损失而从根区流失的宏量营养元素。氮的淋溶损失很高，因为无论以哪种形式向土壤中添加氮肥，化学、微生物和酶的作用都会将添加的氮转化为可能流失的形式。土壤中的微生物和酶过程会将添加的氮转化为铵 ( $\text{NH}_4^+$ ) 或硝酸盐 ( $\text{NO}_3^-$ )。硝酸盐是阴离子，在土壤中的保留力不强，因为胶体颗粒表面一般都带净负电荷。氨 ( $\text{NH}_3$ ) 是由尿素和以铵为基础的肥料通过化学和酶解过程产生的，容易流失到大气中 (挥发)。此外，微生物可将  $\text{NO}_3^-$  转化为其他气态形式 (如  $\text{N}_2$  和氧化亚氮,  $\text{N}_2\text{O}$ )，并很容易散失到大气中。这些气态氮的产生取决于所添加的氮肥形式和当前的土壤条件，从而导致微生物或酶将一种氮转化为另一种氮(3)。

氮肥设计的创新通常集中在缓释或控释配方上，但这两种选择不宜混淆。缓释肥料的定义是 "通过水解和/或生物降解和/或有限的溶解度，与'参考可溶性'产品相比，植物可获得的养分在一段时间内分散的肥料" (5)。控释肥料的定义是 "一种养分释放受到控制的肥料，在特定温度下达到规定的养分释放率和规定的释放时间" (5)。这种可控的养分释放率是通过利用公认的物理机制 (如涂层、闭塞或其他类似手段) 改变现成的养分形式来实现的。这两种方法的目的是使肥料的养分释放与作物的养分需求更加同步 (图 2)，从而减少损失，提高回收效率。

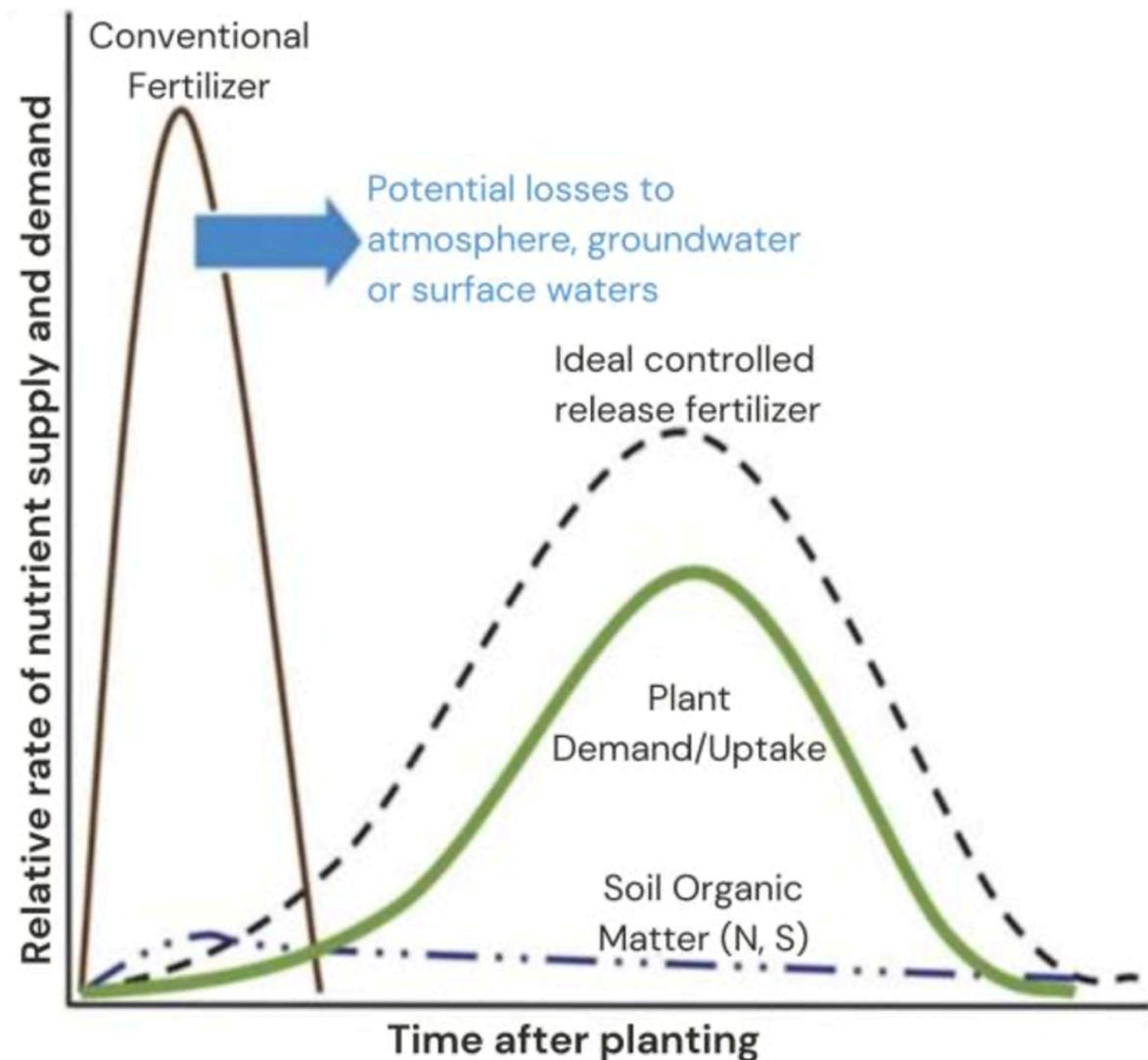


图 2.作物对养分（如氮）的需求量与不同来源供应量的相对比率。控释肥料旨在延迟养分释放，使其与作物养分需求更加同步。来源：改编自 Lam 等人，2024 (6)。

磷主要以阴离子正磷酸盐或多磷酸盐的形式添加到土壤中。与硝酸盐不同，磷酸盐离子与土壤中的铝 (Al)、铁 (Fe)、钙 (Ca) 和镁 (Mg) 等阳离子发生强烈反应，形成溶解性很差的沉淀物或结合力很强的表面复合物。在大多数土壤中，流失到大气中的磷微乎其微，流失到沥滤或地表径流中的磷也相对较少。施肥当年，作物对化肥钾的回收率较低，一般为 3%-35% (2、7、8)。不过，土壤中大量保留的化肥钾并非完全不能被作物利用。随着时间的推移，作物可以获得一部分保留下来的 P，通常称为“遗留 P” (9)。在缺钾的土壤中持续施用钾，施用钾的可再生利用率就会上升，在有大量遗留钾的土壤中，可再生利用率可超过 90% (10)。

在缺钾土壤上，旨在提高钾肥利用效率的产品应增加施用钾肥在土壤中的流动性。在钾肥施用量超过作物清除量的土壤上，目标应是改善植物对遗留钾肥的利用，以达到 RE 高的新状态，同时降低土壤中的钾贮存水平。在实践中，这需要以略低于作物清除量的施肥量施肥数年，然后再恢复到替代率。应针对这些土壤开发新的化学或微生物产品，释放部分遗留的钾供作物吸收。

对钾肥使用效率的研究较少，但根据作物养分吸收数据，RE 一般在 30%-50% 之间。有报告称，在温室条件下使用同位素标记技术，RE 值高达 80% (11)。



## SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

有关次生营养元素（如钙、镁）和微量营养元素肥料回收效率的数据相对较少。在施肥当年，RE 可能会有很大的不同，尤其取决于肥料的形式以及是土壤施肥还是叶面施肥。例如，微量元素阳离子铜（Cu）、锰（Mn）、铁（Fe）和锌（Zn）的RE值特别低，这是因为它们在土壤中的滞留能力很强，而直接叶面施肥可能会导致更高的RE值。然而，与钾肥一样，土壤施用的微量营养元素也有持续的农艺效应（12），每年施用量超过作物需求量可能是不必要的。因此，为了提高这些养分的肥料利用率，新型微量营养元素肥料应着眼于提高在土壤中的流动性，或将养分直接施用到叶面上，其配方应能确保植物有效吸收和/或在整个植株中的流动。

叶面施肥可以绕过不利的土壤过程，补充土壤中的植物营养。然而，实施叶面施肥需要矿物质元素能很好地穿透叶片屏障并有效地进行养分转移（13）。由于叶面肥的效果持续时间较短，而且只能将少量养分施用到叶片上，因此通常需要反复施用才能维持养分水平。此外，高浓度叶面肥或在炎热、阳光充足的条件下施用叶面肥会造成叶片灼伤或损坏。此外，在早期生长阶段，树冠尚未闭合时，叶面施肥可能效果不佳。一些养分也会从叶片中流失，尤其是在降雨量大的情况下。

鉴于许多养分在施用当年的可再生利用率通常较低，通过新技术提高肥料利用效率（EEFs）的空间很大。在此，我们总结了生产新型肥料的主要技术和最新创新发展。





SCIENTIFIC PANEL  
ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

# 新型高效肥料候选技术

随着纳米化学、材料科学、高分子化学、机械化学、生物化学和绿色制造方法的进步，利用新开发的材料生产更高效肥料的方案不断涌现。下文将讨论一些经过广泛研究的创新技术，同时也考虑到最近在其他地方发表的有关这些技术及其他技术的大量科学评论（13-17）。



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

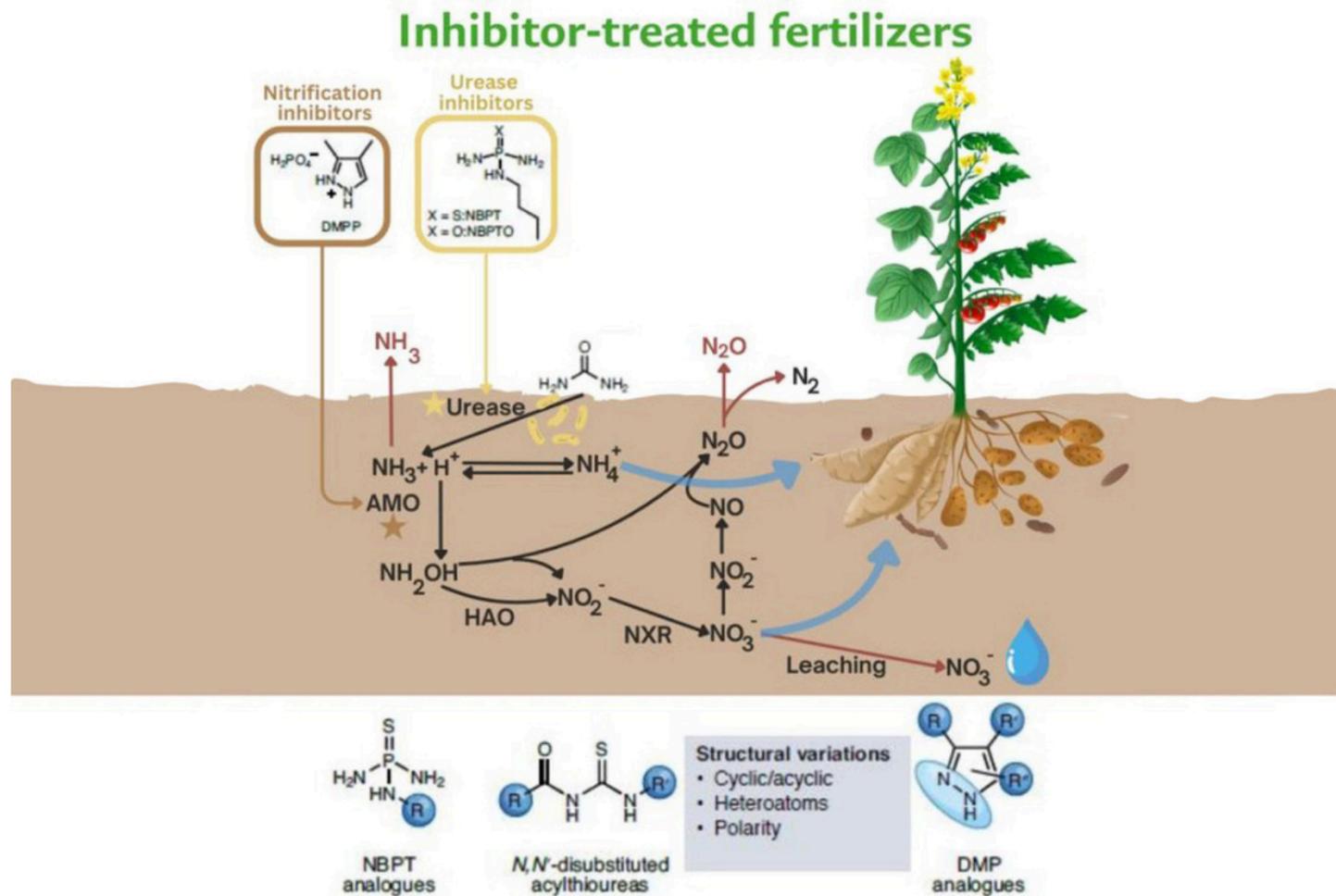


图 3.当前和下一代化学抑制剂。化学抑制剂所针对的过程用星号表示（黄色为脲酶抑制剂，以 NBPT 为例；蓝色为硝化抑制剂，以 DMPP 为例）。资料来源：改编自 Lam 等人，2022 (16)。

## 抑制剂处理肥料

这一类肥料有时也被称为稳定肥料，本身并不是新技术，但却是最成熟、最具商业价值的先进肥料配方，旨在提高氮的利用效率。氮抑制剂技术的重点是利用脲酶抑制剂减缓尿素向铵的转化和/或利用硝化抑制剂减缓铵向硝酸盐的转化（图 3）。

硝化和脲酶抑制剂早在 60 多年前就已发现 (18, 19)，市场上的许多产品都基于几种关键的活性成分。NBPT (N-(正丁基\*) 硫代磷酸三酰胺) 和 2-NPT (N-(2-硝基苯基) 磷酸三酰胺) 是常用的脲酶抑制剂。双氰胺 (DCD)、硝基吡啶和 3,4-二甲基吡唑磷酸盐 (DMPP) 是最常见的硝化抑制剂。过去十年中，新的抑制剂进入了市场，例如：DMPSA (20) 和代森锌 (20)、不过，这些抑制剂主要用于液态尿素硝酸铵\* (UAN) 或无水氨。

一般来说，化学氮抑制剂具有众所周知的作用模式，是减少氨挥发损失和一氧化二氮等温室气体排放的特别有用的选择 (3)。对脲酶和硝化抑制剂结合使用的研究表明，有可能大幅减少气态氮的损失 (30-75%)，而作物产量 (1-9%) 和氮利用效率 (8-15%) 的提高幅度不大 (6)。目前正在对几种化合物的硝化抑制能力进行研究 (16、22-24)，其他新的抑制剂可能很快就会出现商业市场上。重要的是要确保该领域的任何新化学物质不会对土壤质量或食品安全造成任何威胁 (25)。



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

## 涂层

涂层通常与高溶解性颗粒肥料一起使用，以控制养分从颗粒中的释放（图 4），并最大限度地减少养分从土壤向大气（氮）、沥滤或径流（氮、磷和硒）的流失（26）。

与抑制剂技术一样，肥料涂层本身并不新颖，因为对它的研究已有几十年的历史（27，28）。涂层可由各种材料组成，包括养分或土壤改良剂（如硫磺、石膏、石灰等）、硫磺、石膏、石灰）、合成化学品（如沥青、热塑性塑料、聚氨酯、树脂、聚合物）、天然有机材料（如蜡、油、生物炭、生物基聚合物、水凝胶）或微生物接种剂（如细菌、真菌）。

制造商通常青睐涂层技术，因为基础肥料产品的基本制造过程不需要任何改变。因此，通过在基础产品中添加其他养分、生物刺激剂或微生物，最终的肥料配方可以更加灵活。这样，涂层可以分散到更靠近使用点的地方，降低运输过程中涂层降解的风险。新包衣技术商业化的关键要求是：i) 包衣材料成本低；ii) 包衣技术具有成本效益和可扩展性；iii) 可在土壤中生物降解；iv) 养分释放时间与作物需求同步；v) 温控释放，以及 vi) 适宜的颗粒物理质量和稳定性（例如，在加工、运输或应用过程中无裂纹）。

由于担心聚合物包膜肥料中使用难降解化合物会对土壤造成塑料污染（29），最近肥料包膜（图 5）的创新更多地集中在生物基聚合物、水凝胶包膜材料、刺激响应型包膜或在土壤中降解性更强的材料上（14、15、17、30）。

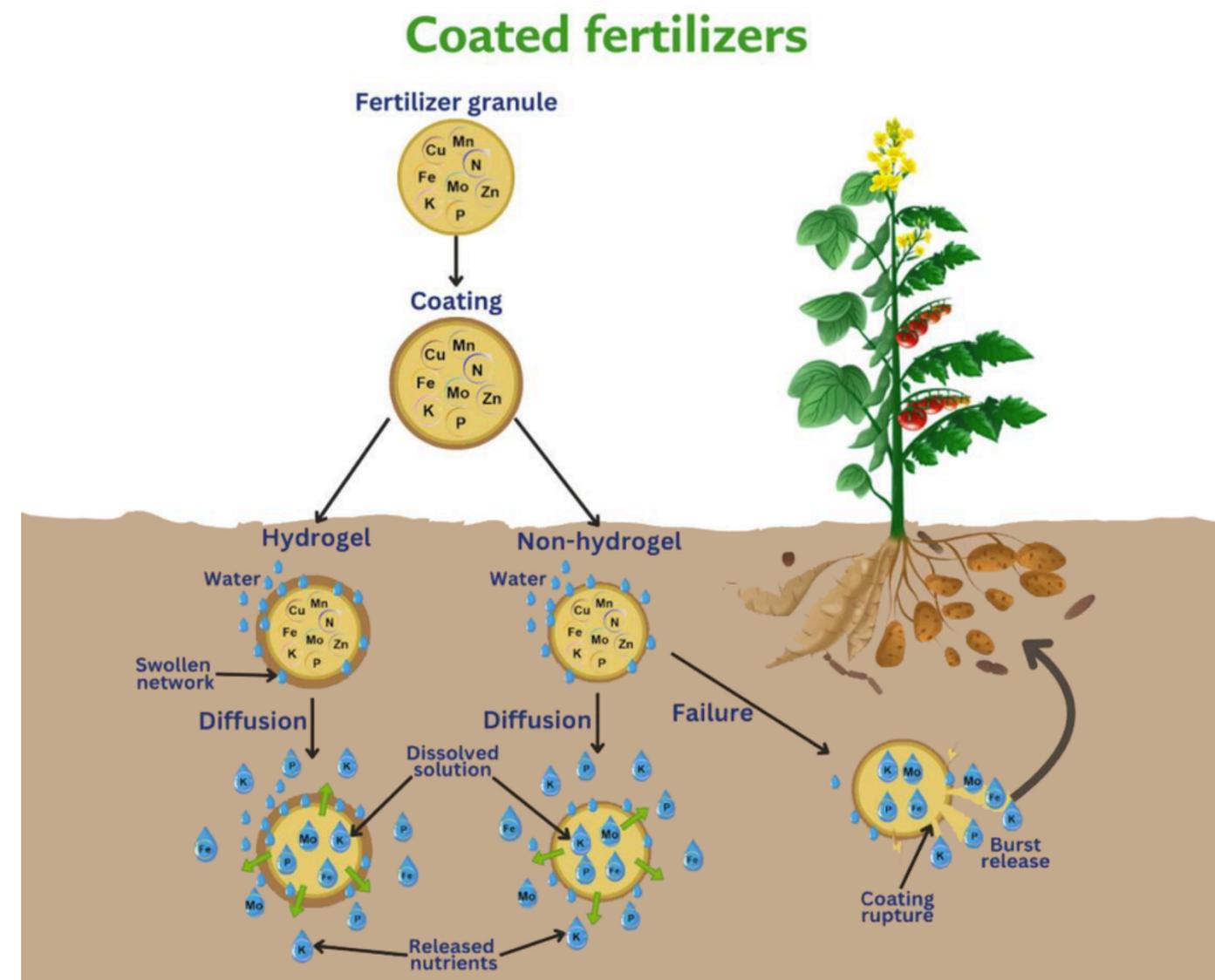


图 4. 包膜可溶肥料的养分释放机制。来源：改编自 Kassem 等人 2024 (15)。

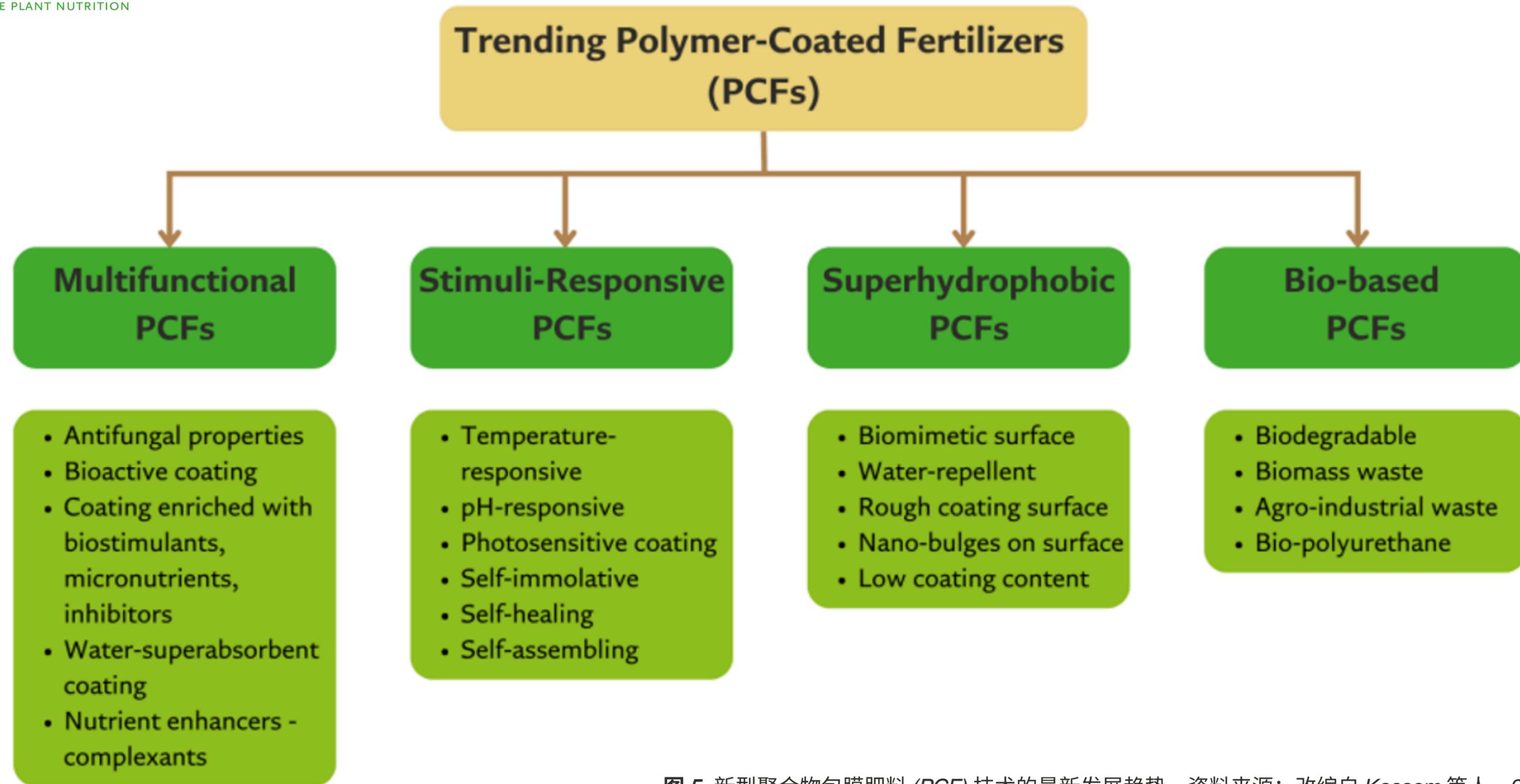


图 5. 新型聚合物包膜肥料 (PCF) 技术的最新发展趋势。资料来源: 改编自 Kassem 等人, 2024 (15)。



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

值得注意的是，其目的并不是减缓释放本身，而是控制释放，使养分供应与作物需求更好地同步。值得注意的是，“智能”肥料涂层旨在根据根圈化学或土壤温度的变化，或根部发出的影响根部或微生物功能的信号化合物（图6），释放封装的可溶性养分（16、31-33）。迄今为止，这些主要是已提出的观点。利用这种作用模式生产更高效肥料的可行性还有待在科学和商业上实现。

此外，还开发出了聚合物涂层，声称可通过与降低磷供应量的土壤成分（铝、铁或钙）发生化学作用来增加 NuUE，但关于这些涂层的农艺功效还存在大量的科学争议（34-37），而且其声称的作用模式尚未在商业施用量下得到明确验证（38, 39）。

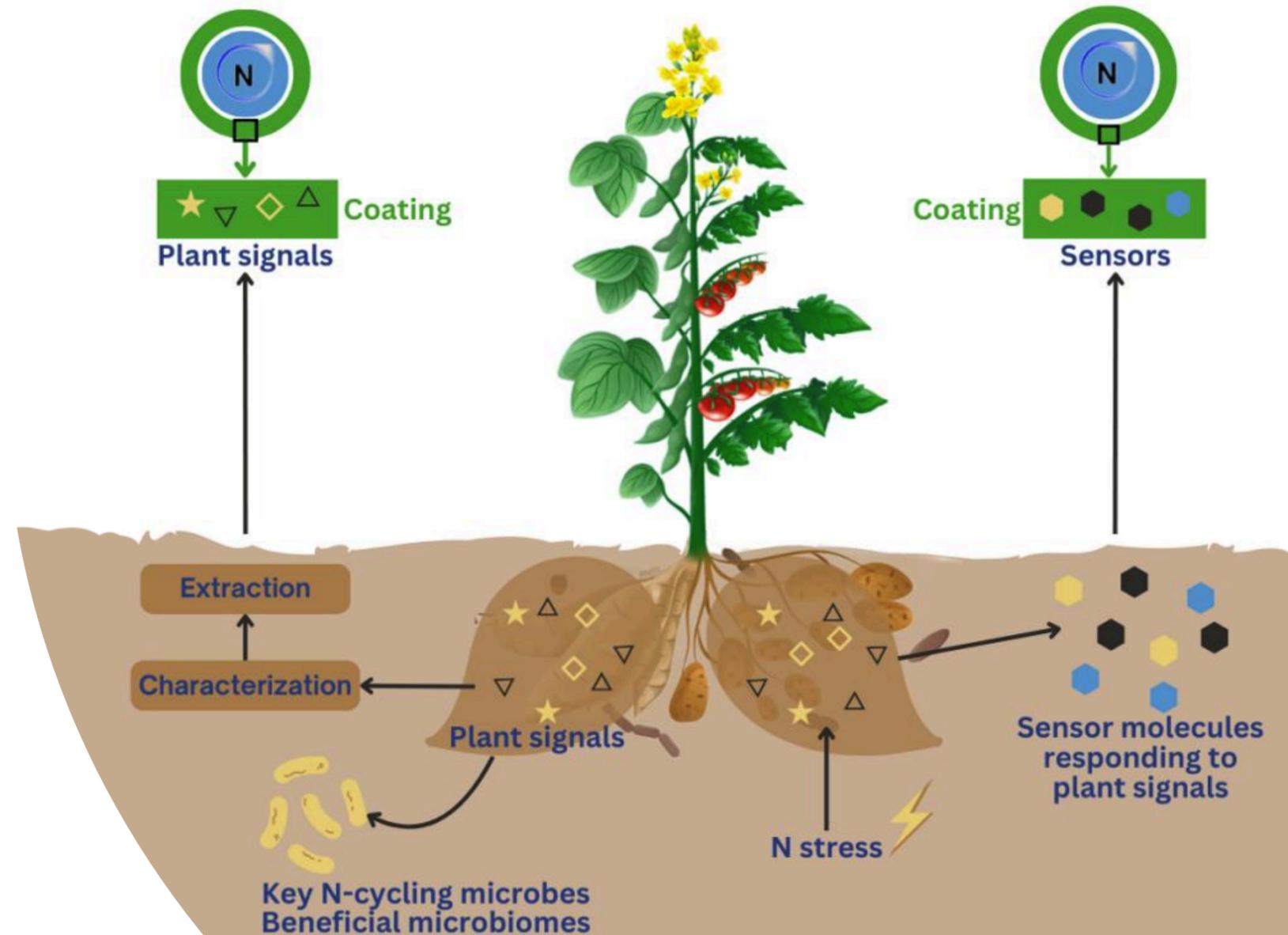
最近的一个进步是生物涂层的商业开发，其配方适用于传统颗粒肥料（如尿素、磷酸一铵 (MAP)、磷酸二铵 (DAP)、三过磷酸钙 (TSP)) 或液体肥料（如尿素硝酸铵 (UAN)、聚磷酸铵 (APP)、液体微量元素）。其中一些甚至声称能提高基础产品的 NuUE。这些成分可以是活细菌、真菌或其孢子，也可以是酶。关于这些微生物在施用到土壤中后是否存活或酶是否保持活性、其作用方式或对作物产量的影响，目前公开发表的信息很少（40）。可溶性肥料颗粒或肥料液体（如尿素硝酸铵、聚磷酸铵、液体微量元素）加入土壤后，其周围土壤孔隙水的化学环境不利于微生物存活，因为溶液离子强度高，溶液 pH 值通常不利于微生物存活，在某些情况下，潜在有毒元素如锌的浓度也很高（41）。针对常用水溶性肥料的微生物涂层创新需要开发出能最大限度提高微生物存活和生长的配方。例如，Burke 等人（42）的研究表明，自组装纳米涂层可以保护微生物肥料。

图 6. 未来的“智能”肥料可能含有涂层，可根据植物信号释放养分。资料来源：改编自 Lam 等人，2022 (16)。

## Plant signal-derived fertilizers

Incorporating plant signals into fertilizer coatings

Incorporating sensors for plant signals into fertilizer coatings





SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

## 载体技术

这组技术所依据的原理是，可以将营养物质装载到 "载体" 结构上，而 "载体" 结构可能由营养物质或非营养元素组成。通常情况下，载体基质会以某种方式改变养分的释放，从而使肥料具有不同于高溶解性肥料的释放特性。下面我们将介绍三类载体材料。

### 层状双氢氧化物

层状双氢氧化物 (LDH) 是由带正电荷的金属氢氧化物层组成的一类材料。在层间，带负电荷的离子和水分子平衡电荷。这一类材料通常被称为 "阴离子粘土"，因为它们可以交换层间阴离子，因此可用作肥料 (43)。层状双氢氧化物的通式为



其中 M 是金属，A 是阴离子。最初，这些天然或合成矿物质被用于去除水源中的阴离子污染物，包括磷酸盐 (44, 45)。很快，人们开始将载钾材料用作肥料，最近又用于开发新型缓释钼肥 (46)。研究发现，P-负载型 LDH 肥料的 P 释放缓慢，但在酸性土壤中的农艺效率比可溶性 P 肥料高出 4.5 倍 (47, 48)，但 RE 值仍然极低 (<3%)。后来人们发现，LDH 的农艺性能更好是因为 LDH 在土壤中溶解后起到了石灰化剂的作用，而不是因为肥料的钾释放特性。

与许多缓释钾源一样，肥料的形态和施用量对溶解和作物吸收的有效性至关重要。粉末状材料的颗粒化大大降低了溶解度和作物对养分的吸收 (48)。因此，农艺学评估需要使用农民最有可能使用的产品形态。LDH 的另一个局限性是最终产品的养分含量，因为载体骨架通常包括通常不添加到土壤中的非营养元素 (如 Al、Fe)，导致肥料养分含量较低，如 P 含量小于 10% (49)。



### 金属有机框架

金属有机框架（MOFs，图7）是一种多孔分子结构，由有机分子连接的金属离子（如铜、铁、锌等）组成。结构中的孔隙可用于保留气体或离子，因此MOFs 适合应用于许多行业。MOFs 在肥料配方中的潜在应用最近已有报道（50，51）。这些材料的作用模式是在孔隙结构中捕获或保持养分，并随着有机连接体在土壤中的缓慢降解而缓慢释放养分。

与LDH材料类似，如果结构中的金属是植物养分（通常要求在土壤中施用），则会带来好处，使制剂的养分含量高。最近已证明了扩大MOF肥料生产规模的可行性（52）。不过，与传统产品相比，使用这些材料作为肥料能带来明显的产量优势或成本节约，这一点尚未得到广泛证实。

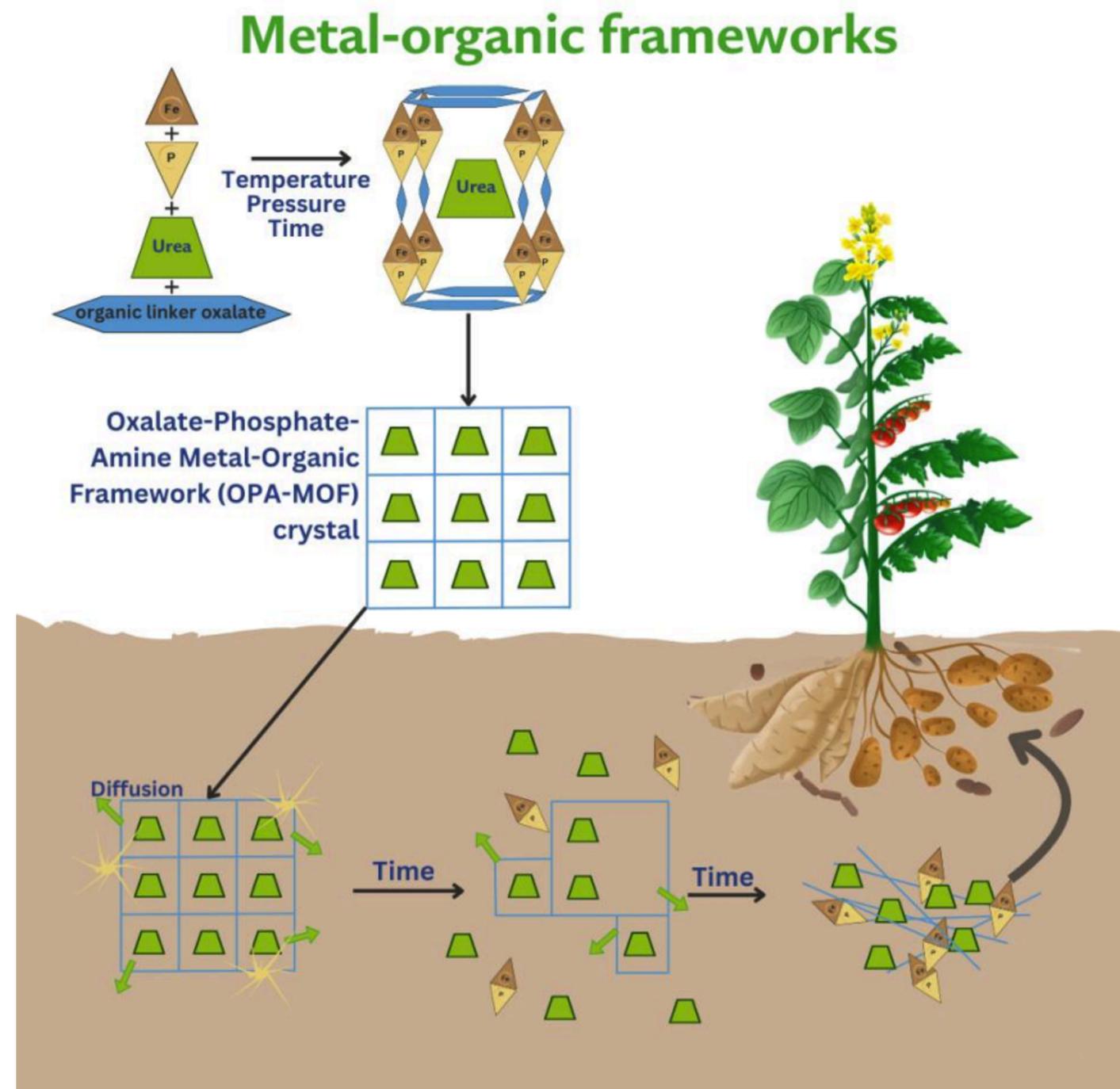


图7. 基于氮、磷和铁的金属有机框架的基本设计及其加入土壤后的作用模式。资料来源：改编自 Anstoetz 等人 2015 (50)。



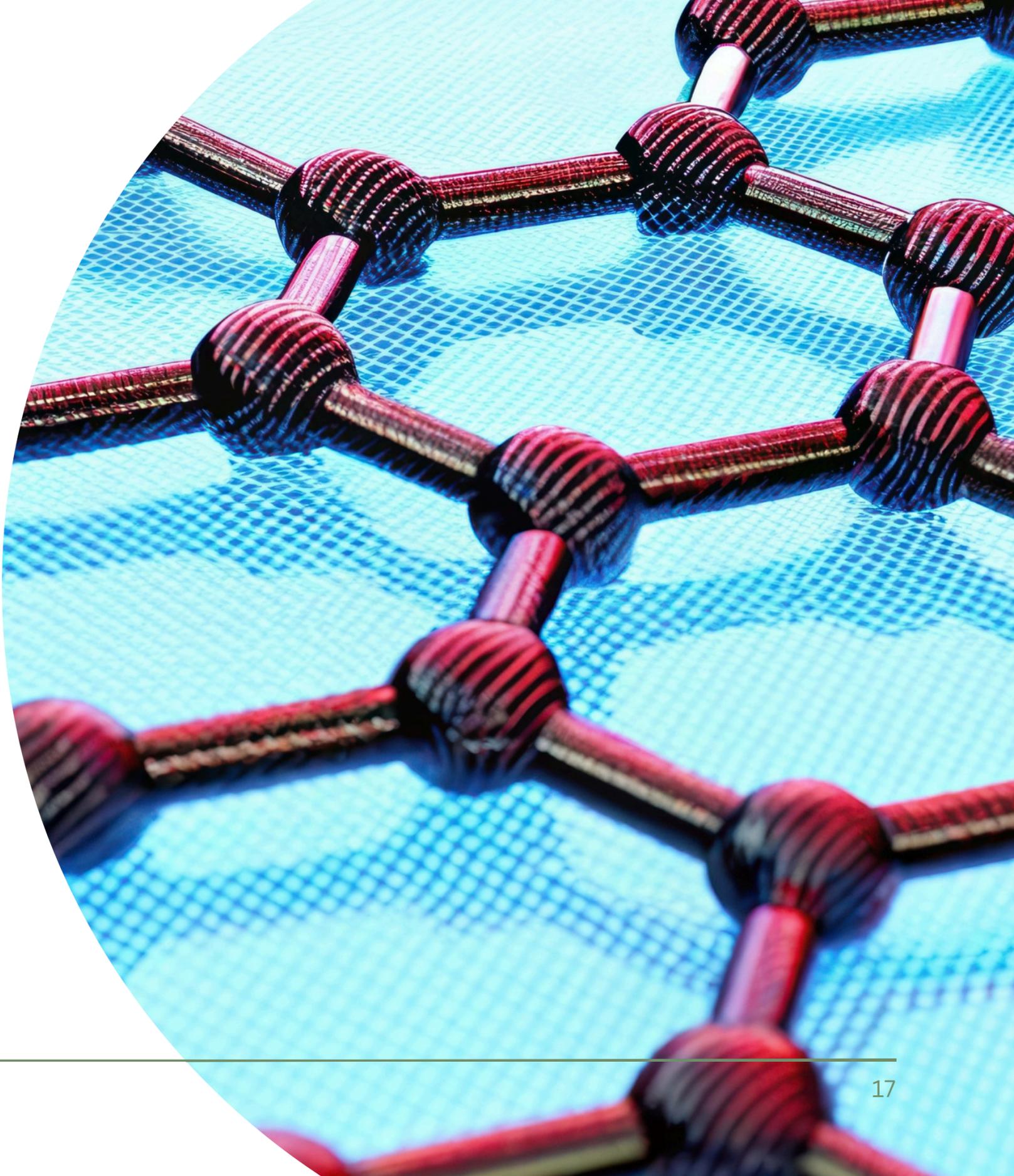
SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

### 石墨烯基材料

石墨烯是 2004 年发现的一种材料，由超薄的二维碳原子片组成，具有独特的化学和物理特性，因此在工业中得到广泛应用。石墨烯可氧化成氧化石墨烯，使材料表面带上强负电荷，从而通过阳离子桥保留阳离子养分或附着阴离子养分。Zhang 等人 (53) 首次使用氧化石墨烯作为硝酸钾 ( $\text{KNO}_3$ ) 颗粒的涂层材料，以赋予肥料缓释特性。此后，又有多项研究考察了石墨烯基材料作为养分载体 (54、55)、涂层以减缓养分释放 (56) 或改善肥料物理质量 (57) 的能力。

与其他载体技术一样，将石墨烯基材料用作肥料的一个问题是，载体材料中的 C 会稀释最终配方中的养分含量。从肥料中提取石墨烯基碳不太可能有益于土壤健康，因为它不是微生物的碳源，而且可能因在土壤中的持久性而引起关注 (58)。此外，原材料和扩大生产规模的成本可能会阻碍这种肥料技术的商业应用。最后，任何新配方的功效测试都需要从实验室/温室转移到制造厂和田间地头，才能获得商业认可并付诸实施。





## 纳米材料

纳米材料是指含有 50% 或更多微粒或成分的材料，其至少有一个维度在 1-100 纳米范围内 (59)。纳米材料之所以有趣，是因为纳米级材料的表面积与体积比非常大，因此其行为与相同体积的材料有很大不同。此外，由于纳米材料尺寸小，且取决于表面电荷，因此在土壤中的流动性可能比离子形式的等效养分更高 (60)。因此，它们进入植物体内的途径可能与离子形式的养分不同 (13、61、62)。在过去的 15 年中，有几篇综述研究了纳米材料在肥料设计中的潜在应用，无论是作为纳米材料还是作为养分的纳米载体 (61、63-67)。这些都是悬浮固体纳米化的新型悬浮肥料。一些纳米肥料可作为生物刺激剂为植物生长提供非营养益处，例如，它们可通过扩大叶绿体的光响应范围和加强电子穿梭提高光合作用的效率 (68)。由于只能通过叶面途径向植物叶片施用少量养分，纳米级微量元素肥料在农艺学上可能比纳米级大量元素叶面肥更成功。

利用纳米技术向植物精准输送养分或其他分子的技术仍在发展之中，需要克服重大的科学和社会障碍 (69)。目前有 600 多篇期刊论文标题中包含纳米肥料 (ISI Web of Science, 2025 年 2 月访问)，但除了印度的纳米尿素或纳米磷酸二铵等产品外，其商业应用仍然非常有限。在许多情况下，缺乏对土壤施用纳米肥料在田间条件下的严格农艺学评估，而职业健康问题则对施用纳米肥料 (液体悬浮剂除外) 的物流提出了批评。定期将纳米粒子引入受管理的自然生态系统及其食物链所带来的长期环境或健康风险仍有待全面评估 (70)

在玻璃温室条件下也对纳米肥料进行了评估，但这些研究往往也缺乏严谨性 (71)。尽管对纳米颗粒在土壤中的归宿研究较少，但土壤纳米毒理学研究表明，纳米材料与土壤胶体聚集 (异质聚集) 后，很快就会失去其 "纳米" 形态 (72)。有人认为，叶面纳米肥料比传统叶面肥更有效 (32, 69)。虽然基本机理研究表明，纳米肥料具有进入植物体内和转运的新模式，但与传统产品相比，其功效还没有得到有力的支持 (13, 73)，而且在严格的实地评估方面仍存在很大差距 (13)。如上所述，纳米材料已被提议用作含有有益微生物的肥料的涂层，以提高微生物的存活率 (42)，但商业化应用同样尚未出现。

在这个瞬息万变的领域，早期对纳米肥料与传统产品的功效进行的荟萃分析表明，NuUE 可提高 29% (74)。显然，由于目前传统养分的使用效率在 10% 到 80% 之间，将 NuUE 提高 10 倍以上的空间有限。

首批纳米肥料，特别是纳米尿素和纳米磷酸二铵，最近已在印度实现商业化 (76, 77)，提供了一个可借鉴的案例研究。科学家们提出了一些值得关注的问题 (78)，特别是在对作用模式的基本科学认识以及严格的实地评估方面。虽然水培研究首次表明纳米尿素对氮同化和叶绿素生物合成具有生物刺激作用 (79)，但迄今为止的研究尚未阐明其明确 (可信) 的作用模式。此外，迄今为止进行的许多田间试验在处理设计 (如缺乏适当的对照、缺乏完整的氮反应曲线、使用的氮比率)、测量或数据分析和解释方面都存在方法上的缺陷。最终，对新型纳米产品进行独立的农艺学和经济学评估将决定农民使用哪种纳米肥料既有效又经济 (见下文)。



# 新型肥料技术广泛商业应用的障碍

全球肥料的商业使用仍以 "商品产品" 为主，如尿素、MAP、DAP、钾肥 (MOP) 等，这些产品都是基于上世纪中期开发的技术。除了肥料产品的配方和养分组合日益多样化外，自那时以来，肥料技术中应用最广泛的创新可能是用于 "稳定" 氮产品的抑制剂和用于减缓或控制养分 (主要是氮) 释放的肥料涂层。然而，这些技术仍然只占当今全球肥料市场的一小部分。这是为什么呢？



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

目前的 EEF 往往比传统产品更贵，而且与额外成本相比，农艺或 NuUE 效益往往不大 (80)。除非有其他更广泛的激励措施，否则大多数农民在采用新技术之前都需要证明其具有明显的经济效益。例如，在美国，“环境质量激励计划”（Environmental Quality Incentives Program）和“保护管理计划”（Conservation Stewardship Program）等举措为采用 EEF（包括稳定氮产品）的农民提供资金和技术援助。这些计划旨在减少氮损失，同时支持作物生产力和环境可持续性。在加拿大，由农场气候行动基金（On-Farm Climate Action Fund）支持的“油菜籽 4R 优势计划”（Canola 4R Advantage Program）等举措为实施 4R 养分管理实践提供激励，其中包括使用稳定氮肥等 EEFs。

许多科学出版物都探讨了新型肥料配方的开发。然而，这些建议的技术很少能作为商业产品提供给农民。这是为什么呢？首先，我们需要考虑并缩小“回收效率差距”--植物对肥料中氮、钾的平均回收率为 40%-60%。相比之下，在缺钾的土壤中，肥料的钾回收率小于 10%，而在长期使用肥料的土壤中，钾回收率则大于 80%。在现实的田间条件下进行测试时，许多效率的提高是有限的；因此，应谨慎看待夸大效率提高的说法。

科学文献中描述的许多新兴技术将无法进行商业开发，因为创新技术在产量、NuUE 或环境保护方面的效益不足以证明其增加的生产或施用成本是值得的。此外，任何新技术的有效商业化都需要解决许多与农艺、NuUE 或环境效益无关的问题，如能源和原材料成本、原材料供应安全、生产的新资本要求、生产的可扩展性、运输、处理和应用新产品的物流和成本，以及职业健康和安全考虑。研究出版物很少考虑这些问题 (70)。

最后，采用新技术可能会遇到政策或监管方面的障碍，例如有关微塑料（来自聚合物涂层）、纳米材料、新化学品可能在食物链中转移等方面的环境和人类健康问题 (25)。这些都需要在新产品开发的早期阶段加以考虑，并收集适当的信息和数据，以增强对产品安全的信心。



SCIENTIFIC PANEL  
ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

# 评估新型肥料产品

评估新型肥料配方必须考虑四个方面，包括了解肥料的作用模式，评估其农艺和环境效益，评估新配方的物流和易处理性，以及生产的难易程度、成本和环境足迹。



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION



## 作用模式

声称的作用模式应经过测试、公开（公布）和验证。验证作用方式的实验主要取决于肥料类型和发明的性质。例如，如果一种新的氮肥产品声称可以延迟植物可利用的氮的释放，就需要对氮的释放动力学进行评估，最好是在土壤中，并与农民常用的参考肥料的氮释放进行比较。声称可将土壤中不可利用的钾释放出来的新产品，需要检测土壤中固相的钾溶解/释放到土壤溶液中的情况，最好使用同位素稀释原理，该原理可同时测量溶液中的钾和吸附在与土壤溶液处于平衡状态的固相上的钾(81)。声称能提高作物产量或养分利用效率的纳米肥料需要进行测试，以确定是否涉及任何直接的养分输送效应，以及任何可能影响生长的生物刺激反应（71）。了解作用模式需要利用先进的科学技术进行详细研究。例如，研究纳米粒子在土壤或植物中的移动需要非常小心，并采用多种不同的技术（71），包括不同的标记技术（82）。同样，需要对详细的基因表达和生理测量进行分析，以了解施用产品后的具体（荷尔蒙）反应。



## 农艺和环境效益

农艺和环境效益的提高需要验证。在控制环境或温室条件下，采用适当的实验方法，即与田间使用的产品数量、形式和位置相似，可以获得新产品 RE 的早期指标。在评估新产品时，玻璃温室实验往往使用不适当的生长介质，如蛭石、珍珠岩、盆栽混合物、纯沙以及不具代表性的产品数量、形态和放置方式（如在土壤中均匀混合细粉，而预期产品在田间条件下将呈颗粒状）。

最终，必须尽早在田间条件下对新产品的性能进行评估。最近提出了评估新型植物营养解决方案的一般准则（83）。

### 增效肥料产品评估指南：

- 一个科学委员会制定了以实验设计、作物和土壤测量、环境损失评估和数据管理为重点的规程。
- 指导方针的制定吸收了国际研究人员、行业利益相关者和农业组织的意见，以规范增效肥料研究，促进数据共享，提高对增效肥料的科学认识。

### 核心试验设计组件和最低数据集：

- 试验必须包括对照处理、标准肥料比较和不同的 EEFs 用量。
- 为了获得可靠的结果，必须进行适当的复制、阻断并包含关键元数据（如田间历史、土壤特性）。
- 对基本数据的一致收集可确保各试验之间的可比性和整合性。
- 元数据包括土壤和作物历史、环境条件和试验方法。

### 三层框架：

- 第 1 层：试验设计和元数据。
- 第 2 层：农艺和土壤性能指标。
- 第 3 层：环境损失测量（如养分径流和气体排放）。

### 环境影响测量：

- 本文概述了评估通过水（如硝酸盐沥滤）和气体排放（如一氧化二氮和氨）造成的养分损失的方法。



## SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

田间评估应在多个地点/年份进行，并采用适当的作物类型（适用于该产品）、位置和管理。当然，地点/土壤/作物组合必须缺乏所评估的养分。实验设计需要适当的对照小区（不添加养分）。例如，在评估叶面喷施产品的田间试验中，需要一个只给水的对照，而所有其他养分的投入都相同。同样，要评估叶面喷施的纳米肥料是否也有生物刺激作用，也需要额外的对照，即只叶面喷施溶解的养分，而不添加纳米颗粒。

另一个经常发现的问题是，在施肥量方面应该与什么进行比较。例如，在许多田间试验中，将新型肥料产品与减少或完全“推荐氮肥用量”相结合的施肥与按推荐氮肥用量施肥进行比较。然而，如果推荐的氮肥施用量一开始就过高（在农艺学或经济学上并非最佳），那么无论是否施用了新型产品，降低氮肥施用量都可能导致相同（甚至略高的产量）的结果。这种现象在最近有关纳米肥料和微生物产品的研究中尤为常见。要正确评估这类产品的功效，需要进行田间试验，其中至少包括 4-5 种不同的氮水平，每种氮水平都包括使用和不使用待评估新产品的情况。这样就可以根据氮反应曲线得出的最佳氮含量来估计新产品的性能。

为了对数据进行适当的统计分析，还推荐了其他一些设计要求--随机化、重复和稳健的数据统计分析（84）。将多个地点/土壤/年份的作物对新产品的反应组合成累积概率分布，是评估新产品功效的一种有效方法（85, 86）。正如卡拉马诺斯等人（Karamanos et al.）（87）优雅地证明的那样，不正确的参数化统计分析很容易导致假阳性（1 类错误）。





## 物理质量、处理和安全性

除了产品的农艺效率，新制剂的物流和易处理性也同样重要。还应评估产品与其他肥料混合的兼容性。对于新的液体/悬浮产品，还应确保其物理稳定性，不易沉淀或沉降。新产品的开发还需确保新配方不会因其物理特性（如纳米粉尘或其他有害的可吸入成分）而在生产或农民处理过程中造成职业健康或安全问题。

## 生产

开发新配方需要考虑生产问题，如原材料成本、供应的可用性和安全性、安装新生产设备的资本成本、生产的复杂性和可扩展性、能源投入以及废物流的生产 and 处理。

科学文献中发现的许多新肥料配方之所以无法获得商业成功，是因为它们没有充分考虑上述所有因素，也许只是过于关注其中的一两个关键要求。探索不同的产品设计以及在生产和成本方面的可扩展性，应该成为创新过程中不可或缺的一部分，而且应该比通常的做法更早一些。



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

# 谁需要做什么？

## 政府:

采取政策和制定计划，在政府、行业和学术界等多个部门之间开展合作，激励和奖励肥料技术的创新。改进并简化监管框架，根据国际商定的科学严谨的规程独立证明其有效性。促进知识共享、教育和跨部门合作，激励循环经济方法。适当时，为技术采用提供财政激励。

## 行业:

提供资源并推动内部和外部创新，以开发新的肥料技术。与政府和学术界科学家合作，开发可最大限度减少对环境不利影响的环境经济技术，包括稳定氮肥、智能/控释肥料和颠覆性技术。使用商定的协议评估新产品，使其更加可靠和透明 (83)。设定碳减排目标，致力于实现可持续发展目标。以透明的方式宣传产品特性和优势。

## 研究人员:

创新技术，提高 NuUE 并尽量减少对环境的危害。在早期阶段与行业科学家和工程师更紧密地合作，开发可低成本、低能耗配制和生产的低产品。跨学科合作，在肥料设计中引入新思维和创新。在研究计划的早期阶段评估新产品的成本/效益，并与农民/实践者合作，确定在农场层面最可行、最实用、最安全的配方。对自己的创新提出批评，迅速开展严格的实地评估，并依靠健全的标准评估准则 (83)。在开放获取期刊上发表研究成果（如有可能），并交流负面和正面的农艺和 NuUE 结果。

## 农民和其他从业人员:

参与新肥料产品的田间评估项目，就操作的便利性和在农场的表现提供可靠的反馈。倡导更具可持续性的产品，要求产品性能的透明度，并支持当地的创新者。



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

# 成功是什么样的？

## 1

许多新型肥料能够提高作物产量和养分利用效率，进一步减少温室气体排放和环境中的其他养分损失，提高食品质量，具有更好的处理特性，生产过程中的能源足迹更小，并最大限度地减少废物流的产生。

## 2

各国政府采用循证标准对新肥料产品进行注册和标识，包括对农艺和环境性能进行独立评估。

## 3

工业界增加用于新肥料技术的资源，与政府/学术界建立伙伴关系以推动创新，并更广泛地使用标准化实验方案来评估新肥料产品的农艺和环境性能。政府和其他投资者为多部门研究项目提供激励措施，以开发新的肥料产品，鼓励公私合作以及对新型作用模式、材料、配方等进行更开放的竞争前研究。

## 4

农民可以获得更多性能优势得到证实的肥料产品，并参与使用统一协议的肥料评估计划。产品性能信息更加透明，农民可以做出明智的选择。



## SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

### 参考文献

1. Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition, Plant nutrients are essential for the alleviation of chronic and hidden hunger. *Issue Brief 05* (2023).
2. Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition, Defining nutrient use efficiency in responsible plant nutrition. *Issue Brief 04* (SPRPN, Paris, France, 2023).
3. Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition, Mitigating greenhouse gas emissions through responsible plant nutrition. *Issue Brief 07* (2024).
4. L. You et al., Global mean nitrogen recovery efficiency in croplands can be enhanced by optimal nutrient, crop and soil management practices. *Nat Commun.* 14, 5747 (2023).
5. ISO, International Standard ISO/DIS 7851 Fertilizers, soil conditioners and beneficial substances —Classification (ISO, 2021).
6. S. K. Lam, B. Pan, X. Liang, A. R. Mosier, D. Chen, in Improving nitrogen use efficiency in crop production, J. K. Ladha, Ed. (Burleigh Dodds Science Publishing, Cambridge, UK, 2024), pp. 201–221.
7. T. M. McBeath, M. J. McLaughlin, J. K. Kirby, R. D. Armstrong, The effect of soil water status on fertiliser, topsoil and subsoil phosphorus utilisation by wheat. *Plant Soil.* 358, 337–348 (2012).
8. X. Yu, C. Keitel, F. A. Dijkstra, Global analysis of phosphorus fertilizer use efficiency in cereal crops. *Global Food Security.* 29, 100545 (2021).
9. B. L. Turner, P. J. Kim, Terminology for residual and legacy phosphorus. *Plant Soil.* 501, 237–239 (2024).
10. A. E. Johnston, J. K. Syers, A new approach to assessing phosphorus use efficiency in agriculture. *Better Crops with Plant Food.* 93, 14–16 (2009).
11. X.-Y. Chen et al., Natural potassium (K) isotope fractionation during corn growth and quantification of K fertilizer recovery efficiency using stable K isotope labeling. *ACS Earth and Space Chemistry.* 6, 1876–1889 (2022).
12. R. F. Brennan, Residual value of zinc fertiliser for production of wheat. *Aust. J. Exp. Agric.* 41, 541 (2001).
13. S. Husted et al., What is missing to advance foliar fertilization using nanotechnology? *Trends in Plant Science.* 28, 90–105 (2023).
14. E. Priya, S. Sarkar, P. K. Maji, A review on slow-release fertilizer: Nutrient release mechanism and agricultural sustainability. *Journal of Environmental Chemical Engineering.* 12, 113211 (2024).
15. I. Kassem, E.-H. Ablouh, F.-Z. El Bouchtaoui, M. Jaouahar, M. El Achaby, Polymer coated slow/ controlled release granular fertilizers: Fundamentals and research trends. *Progress in Materials Science.* 144, 101269 (2024).
16. S. K. Lam et al., Next-generation enhanced-efficiency fertilizers for sustained food security. *Nat Food.* 3, 575–580 (2022).
17. S. Govil, N. van Duc Long, M. Escribà-Gelonch, V. Hessel, Controlled-release fertiliser: Recent developments and perspectives. *Industrial Crops and Products.* 219, 119160 (2024).
18. A. M. Hyson, Fertilizer composition comprising urea and dithiocarbamates. *United States Patent Office Patent 3,073,064*, 15th January 1960, assigned to E.I. du Pont de Nemours and Company, USA (1960).
19. C. A. I. Goring, Control of nitrification by 2-chloro-6-(trichloro-methyl)pyridine. *Soil Sci.* 93 (1962).
20. M. Staal et al., Process for obtaining a fertilizer composition comprising a DMPSA nitrification inhibitor via adding DMPSA or the salts thereof into the fertilizer melt. *Patent WO2020127870A1* (2020).



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

## 参考文献

21. K. D. Gabrielson, M. L. Epling, Reaction products and methods for making and using same. United States Patent Office Patent US9440890B2 (2016).
22. T. O. Brito et al., Design, syntheses and evaluation of benzoylthioureas as urease inhibitors of agricultural interest. RSC Adv. 5, 44507–44515 (2015).
23. B. I. Taggert, C. Walker, D. Chen, U. Wille, Substituted 1,2,3-triazoles: a new class of nitrification inhibitors. Sci Rep. 11, 14980 (2021).
24. D. Bobeck, A. A. Iman, S. L. Wertz, Agricultural compositions and methods for making and using same. In: USPTO (ed) *United States Patent Office Patent Application Publication US2023/0112532 A1* (2023).
25. FAO, Food safety implications from the use of environmental inhibitors in agrifood systems. Food Safety and Quality Series, No. 24, FAO. 2023. Food safety implications from the use of environmental inhibitors in agrifood systems. Food Safety and Quality Series, No. 24. Rome. (2023).
26. M. E. Trenkel, Slow-and controlled-release and stabilized fertilizers (International Fertilizer Industry Association (IFA), Paris, 2010).
27. K. Lawton, Fertilizer coatings, the effect of coatings on the dissolution of fertilizers and the uptake of fertilizer potassium by plants. J. Agric. Food Chemistry. 9, 276–280 (1961).
28. A. Shaviv, Advances in controlled-release fertilizers. Adv. Agronomy. 71, 1–49 (2001).
29. I. Sa'adu, A. Farsang, Plastic contamination in agricultural soils: a review. Environmental Sciences Europe. 35, 13 (2023).
30. D. Lawrence et al., Controlled release fertilizers: a review on coating materials and mechanism of release. Plants. 10 (2021).
31. X. Zhang, D. Chabot, Y. Sultan, C. Monreal, M. C. DeRosa, Target-molecule-triggered rupture of aptamer-encapsulated polyelectrolyte microcapsules. ACS Applied Materials & Interfaces. 5, 5500–5507 (2013).
32. C. M. Monreal, M. DeRosa, S. C. Mallubhotla, P. S. Bindrabhan, C. Dimkpa, Nanotechnologies for increasing the crop use efficiency of fertilizer-micronutrients. Biol. Fertil. Soils. 52, 423–437 (2016).
33. H. Mansouri et al., Advances in controlled release fertilizers: cost-effective coating techniques and smart stimuli-responsive hydrogels. Adv. Sustainable Syst. 7, 2300149 (2023).
34. R. E. Karamanos, D. Puurveen, Evaluation of a polymer treatment as enhancer of phosphorus fertilizer efficiency in wheat. Can. J. Soil Sci. 91, 123–125 (2011).
35. S. Cahill, R. J. Gehl, D. Osmond, D. Hardy, Evaluation of an organic copolymer fertilizer additive on phosphorus starter fertilizer response by corn. Crop Management. 12, CM-2013-0322-01-RS (2013).
36. S. H. Chien, D. Edmeades, R. McBride, K. L. Sahrawat, Review of maleic–itaconic acid copolymer purported as urease inhibitor and phosphorus enhancer in soils. Agron. J. 106, 423–430 (2014).
37. B. G. Hopkins, K. J. Fernelius, N. C. Hansen, D. L. Eggett, AVAIL Phosphorus Fertilizer Enhancer: Meta-Analysis of 503 Field Evaluations. Agronomy Journal. 110, 389–398 (2018).
38. F. Degryse, B. Ajiboye, R. D. Armstrong, M. J. McLaughlin, Sequestration of phosphorus-binding cations by complexing compounds is not a viable mechanism to increase phosphorus efficiency. Soil Sci. Soc. Am. J. 77, 2050–2059 (2013).
39. S. Doydora, D. Hesterberg, W. Klysubun, Phosphate solubilization from poorly crystalline iron and aluminum hydroxides by AVAIL copolymer. Soil Science Society of America Journal. 81, 20–28 (2017).



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

## 参考文献

40. W. Overbeek, T. Jeanne, R. Hogue, D. L. Smith, Effects of microbial consortia, applied as fertilizer coating, on soil and rhizosphere microbial communities and potato yield. *Frontiers in Agronomy*. 3 (2021).
41. I. T. Riley, M. H. Ryder, J. R. Rathjen, T. V. Lai, M. D. Denton, In vitro assessment indicates that fertilizers commonly used in legume production differentially inhibit commercial Rhizobial strains. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 56, 687–700 (2025).
42. B. Burke, G. Fan, P. Wasuwanich, E. B. Moore, A. L. Furst, Self-assembled nanocoatings protect microbial fertilizers for climate-resilient agriculture. *JACS Au*. 3, 2973–2980 (2023).
43. G. G. C. Arizaga, K. Satyanarayana, F. Wypych, Layered hydroxide salts: Synthesis, properties and potential applications. *Solid State Ionics*. 178, 1143–1162 (2007).
44. M. C. Hermosin, I. Pavlovic, M. A. Ulibarri, J. Cornejo, Removal of trinitrophenol from water by a layered double hydroxide. *Fresenius Environmental Bulletin*. 4, 41–46 (1995).
45. Y. Seida, Y. Nakano, Removal of phosphate by layered double hydroxides containing iron. *Water Research*. 36, 1306–1312 (2002).
46. M. Everaert et al., Layered double hydroxides as slow-release fertilizer compounds for the micronutrient molybdenum. *J. Agric. Food Chemistry*. 69, 14501–14511 (2021).
47. M. Everaert et al., Phosphate-exchanged Mg–Al layered double hydroxides: a new slow release phosphate fertilizer. *ACS Sustainable Chem. Eng.* 4, 4280–4287 (2016).
48. M. Everaert, F. Degryse, M. J. McLaughlin, D. de Vos, E. Smolders, Agronomic effectiveness of granulated and powdered P-exchanged Mg–Al LDH relative to struvite and MAP. *J. Agricultural Food Chemistry*. 65, 6736–6744 (2017).
49. M. Everaert et al., Enhancing the phosphorus content of layered double hydroxide fertilizers by intercalating polymeric phosphate instead of orthophosphate: A feasibility study. *Journal of Colloid and Interface Science*. 628, 519–529 (2022).
50. M. Anstoetz et al., Novel applications for oxalate-phosphate-amine metal-organic-frameworks (OPA-MOFs): can an iron-based OPA-MOF be used as slow-release fertilizer? *PLoS ONE*. 10, e0144169 (2015).
51. S. Basak et al., Metal-organic framework as nanocarriers for agricultural applications: a review. *Frontiers in Nanotechnology*. 6 (2024).
52. K. Wu, X. Xu, F. Ma, C. Du, Fe-based metal–organic frameworks for the controlled release of fertilizer nutrients. *ACS Omega*. 7, 35970–35980 (2022).
53. M. Zhang et al., Slow-release fertilizer encapsulated by graphene oxide films. *Chemical Engineering Journal*. 255, 107–113 (2014).
54. S. Kabiri et al., Graphene oxide: a new carrier for slow release of plant micronutrients. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 9, 43325–43335 (2017).
55. I. B. Andelkovic et al., Graphene oxide-Fe(III) composite containing phosphate – A novel slow release fertilizer for improved agriculture management. *Journal of Cleaner Production*. 185, 97–104 (2018).
56. T. Li, B. Gao, Z. Tong, Y. Yang, Y. Li, Chitosan and graphene oxide nanocomposites as coatings for controlled-release fertilizer. *Water Air Soil Pollut.* 230, 1–9 (2019).
57. S. Kabiri et al., Cogranulation of low rates of graphene and graphene oxide with macronutrient fertilizers remarkably improves their physical properties. *ACS Sustainable Chem. Eng.* 6, 1299–1309 (2018).
58. D. A. Navarro, M. Kah, D. Losic, R. S. Kookana, M. J. McLaughlin, Mineralisation and release of <sup>14</sup>C-graphene oxide (GO) in soils. *Chemosphere*. 238, 124558 (2020).



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

## 参考文献

59. European Union Observatory for Nanomaterials, Definition of nanomaterial (2024).
60. L. Xiong, P. Wang, P. M. Kopittke, Tailoring hydroxyapatite nanoparticles to increase their efficiency as phosphorus fertilisers in soils. *Geoderma*. 323, 116–125 (2018).
61. R. Nair et al., Nanoparticulate material delivery to plants. *Plant Science*. 179, 154–163 (2010).
62. J. A. Raven, Commentary on the use of nutrient-coated quantum dots as a means of tracking nutrient uptake by and movement within plants. *Plant Soil*. 476, 535–548 (2022).
63. H. Guo, J. C. White, Z. Wang, B. Xing, Nano-enabled fertilizers to control the release and use efficiency of nutrients. *Current Opinion in Environmental Science & Health*. 6, 77–83 (2018).
64. L. Marchiol, M. Iafisco, G. Fellet, A. Adamiano, Nanotechnology support the next agricultural revolution: Perspectives to enhancement of nutrient use efficiency. *Adv. Agronomy*. 161, 27–116.
65. P. M. Kopittke, E. Lombi, P. Wang, J. K. Schjoerring, S. Husted, Nanomaterials as fertilizers for improving plant mineral nutrition and environmental outcomes. *Environmental Science: Nano*. 6, 3513–3524 (2019).
66. R. Liu, R. Lal, Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions. *Sci. Total Environ*. 514, 131–139 (2015).
67. S. Gupta, G. S. Gupta, P. Madheshiya, A. K. Mishra, S. Tiwari, Nano fertilizers for sustaining future farming : A review. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 62, 103446 (2024).
68. Z. Wang et al., Natural xylose-derived carbon dots towards efficient semi-artificial photosynthesis. *Journal of Colloid and Interface Science*. 629, 12–21 (2023).
69. G. V. Lowry et al., Towards realizing nano-enabled precision delivery in plants. *Nat. Nanotechnol*. 19, 1255–1269 (2024).
70. T. Hofmann et al., Technology readiness and overcoming barriers to sustainably implement nanotechnology-enabled plant agriculture. *Nature Food*. 1, 416–425 (2020).
71. S. Husted et al., Nanotechnology papers with an agricultural focus are too frequently published with a superficial understanding of basic plant and soil science. *ACS Nano*. 18, 33767–33770 (2024).
72. G. Cornelis, K. Hund-Rinke, T. Kuhlbusch, N. van den Brink, C. Nickel, Fate and bioavailability of engineered nanoparticles in soils: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 44, 2720–2764 (2014).
73. C. L. Doolette, T. L. Read, N. R. Howell, T. Cresswell, E. Lombi, Zinc from foliar-applied nanoparticle fertiliser is translocated to wheat grain: A <sup>65</sup>Zn radiolabelled translocation study comparing conventional and novel foliar fertilisers. *Science of The Total Environment*. 749, 142369 (2020).
74. M. Kah, R. S. Kookana, A. Gogos, T. D. Bucheli, A critical evaluation of nanopesticides and nanofertilizers against their conventional analogues. *Nature Nanotech*. 13, 677–684 (2018).
75. Y. Su et al., Cost-benefit analysis of nanofertilizers and nanopesticides emphasizes the need to improve the efficiency of nanoformulations for widescale adoption. *Nat. Food*. 3, 1020–1030 (2022).
76. K. N. Tiwari, Y. Kumar, Nano fertilizers for smart agriculture : A review. *Indian Journal of Fertilisers*. 19, 632–653 (2023).
77. Y. Kumar, T. Singh, R. Raliya, K. N. Tiwari, Nano fertilizers for sustainable crop production, higher nutrient use efficiency and enhanced profitability. *Indian Journal of Fertilisers*. 17, 1206–1214 (2021).
78. M. Frank, S. Husted, Is India's largest fertilizer manufacturer misleading farmers and society using dubious plant and soil science? *Plant Soil*. 496, 257–267 (2024).



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

## 参考文献

79. N. Jangir et al., Nano urea outperforms equimolar bulk urea in the hydroponic growth of Arabidopsis thaliana by inducing higher levels of nitrogen assimilation and chlorophyll biosynthesis genes. *Journal of Plant Growth Regulation* (2024).
80. Y. P. Timilsena et al., Enhanced efficiency fertilisers: a review of formulation and nutrient release patterns. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 95, 1131–1142 (2015).
81. D. S. HAYMAN, B. Mosse, Plant growth responses to vesicular-arbuscular mycorrhiza III. Increased uptake of labile P from soil. *New Phytol.* 71, 41–47 (1972).
82. H. Chen et al., Approaches to nanoparticle labeling: a review of fluorescent, radiological, and metallic techniques. *Environment & Health*. 1, 75–89 (2023).
83. S. E. Lyons et al., Field trial guidelines for evaluating enhanced efficiency fertilizers. *Soil Science Society of America Journal* (2024).
84. R. Norton, How do you know that? - The need for evidence. *Better Crops*. 95, 24 (2011).
85. D. C. Edmeades, The agronomic effectiveness of lime-reverted and dicalcic superphosphates: A review. *New Zealand J. Agric. Res.* 43, 1–6 (2000).
86. D. C. Edmeades, The effects of liquid fertilisers derived from natural products on crop, pasture, and animal production: A review. *Aus. J. Agr. Res.* 53, 965 (2002).
87. R. E. Karamanos, D. N. Flaten, F. C. Stevenson, Real differences – A lesson from an agronomist's perspective. *Canadian J. Plant Sci.* 94, 433–437 (2013).

## 作者，引用和联系方式

### 作者为国际责任的植物营养专家组成员，名单如下

Patrick H Brown (University of California-Davis, USA), Tom Bruulsema (Plant Nutrition Canada), Deli Chen (University of Melbourne, Australia), Achim Dobermann (International Fertilizer Association, France), Mariangela Hungria (Embrapa, Brazil), Jian Feng Ma (Okayama University, Japan), Michael McLaughlin (University of Adelaide, Australia), Bernard Vanlauwe (International Institute of Tropical Agriculture, Kenya), Marta Vasconcelos (Universidade Católica Portuguesa, Portugal), Claudia Wagner-Riddle (University of Guelph, Canada), Fangjie Zhao (Nanjing Agricultural University, China),

**引用:** Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition. 2025. Novel fertilizers. Issue Brief 08. Available at <https://sprpn.org>.

**更多信息请关注:** Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition, [info@sprpn.org](mailto:info@sprpn.org)