

张明伟,马 泉,陈京都,等. 缓控释肥在冬小麦上的应用研究进展及展望[J]. 江苏农业科学,2022,50(2):15-21.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.02.003

# 缓控释肥在冬小麦上的应用研究进展及展望

张明伟<sup>1</sup>, 马 泉<sup>2</sup>, 陈京都<sup>1</sup>, 唐建鹏<sup>1</sup>, 姚 义<sup>1</sup>, 成洁旻<sup>3</sup>

(1. 江苏省扬州市农业农村局, 江苏扬州 225000;

2. 扬州大学江苏省作物遗传生理国家重点实验室/扬州大学小麦研究中心, 江苏扬州 225009; 3. 南京晓庄学院, 江苏南京 210017)

**摘要:**缓控释肥作为环境友好和增效型肥料,在增产增效、减少氮素损失和缓解农业氮素污染等方面具有明显的优势。为推动缓控释肥在冬小麦上的广泛应用,本文在总结缓控释肥定义、作用原理、分类和研究进展的基础上,探究缓控释肥在冬小麦上的主要施用技术及其增产增效机制,分析缓控释肥在小麦生产应用中存在的问题并提出相应建议,为推动缓控释肥在冬小麦产业中的安全、可靠和广泛应用提供参考。

**关键词:**缓控释肥;冬小麦;施肥技术;增产增效;环境友好;氮素污染

**中图分类号:**S512.1+10.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)02-0015-07

根据预测,世界人口在 2050 年前后将达到 95 亿<sup>[1]</sup>,粮食在当前产量水平下提高 70% 以上才能满足全球人口的粮食需求<sup>[2]</sup>,但由于城市化、工业化、荒漠化等多方面原因,耕地面积在不可避免地减少<sup>[3]</sup>。我国作为一个人口大国,为尽可能满足粮食自给自足,提高粮食单位面积产量在未来相当长的时间内将一直是我国农业发展的重要政策和目标之一。氮素作为作物生长发育过程中必不可少的营养元素,长期以来在农业生产中发挥着重要的作用,世界上 50% 的粮食产量来自于氮肥的贡献<sup>[4]</sup>。全球每年尿素消耗量超过 2 亿 t,由于其养分含量高,成本低,是农民最能接受和喜爱的氮肥<sup>[5]</sup>。但由于尿素快速水解的特性,加之不合理的施用方式,至少有 50% 的氮素在施用过程中流失,不仅导致氮肥利用率低下,肥料成本投入增加,并且限制了作物产量潜力的最大化发挥,加剧粮食安全问题<sup>[5]</sup>。此外,大量流失的氮素通过淋溶、矿化、渗漏、径流等方式进入环境中,加剧了温室气体排放、地表水体富营养化、地下水污染和耕地土壤退化等问题<sup>[6-7]</sup>。为满足不断增长的人口粮食需求,如何优化氮肥类型和施用技术,以实现促进作物增产增效、控制肥料氮素损失和减轻环境负担之间的平

衡,是现代农业迫切需要克服的难题。

在过去的几十年里,为提高肥料利用率,科学家们从多个方面进行了不断的探索,包括平衡施肥<sup>[8]</sup>、精确定量施肥<sup>[9]</sup>、灌溉施肥、氮肥后移<sup>[10]</sup>等施肥技术的研究,以及生物炭肥<sup>[11]</sup>、水溶肥<sup>[12]</sup>、微生物肥<sup>[13]</sup>和缓控释肥<sup>[14]</sup>等新型肥料类型的探索。其中缓控释肥通过延缓甚至是控制养分释放到土壤中的速率,保证养分更多地被用来供应作物生长,以尽可能减少淋失和挥发损失,减轻对环境的影响<sup>[15]</sup>,被认为是“环境友好型”<sup>[16-17]</sup>和“增效型”肥料<sup>[18]</sup>。缓控释肥料由于其能提高肥料利用率、减轻农业氮素污染以及减少施肥次数等潜在优点,已经成为未来肥料发展的重要趋势<sup>[19-20]</sup>。实现作物一次性施肥即增产增效是缓控释肥发展的核心目标,并且目前在水稻、玉米和马铃薯等生育期较短的作物上已经取得较好的应用效果,但在冬小麦上,由于生育期较长和越冬期生长停滞等生育特性,缓控释肥一次性施用的应用效果存在争议。本文在总结缓控释肥研究进展的基础上,综合分析了缓控释肥在冬小麦上的主要施用技术及其产量、氮效率和环境等效应,探讨了当前缓控释肥发展和应用存在的问题,并对未来缓控释肥在小麦上的研究和推广提出建议,为推动缓控释肥在冬小麦上的广泛应用具有重要意义。

## 1 缓控释肥研究进展

缓释肥一词在 20 世纪 20 年代被首次提出,但直到 20 世纪 50 年代后,缓控释肥的概念才逐渐明

收稿日期:2021-04-27

基金项目:扬州市“绿扬金凤计划”(2018)。

作者简介:张明伟(1989—),男,江苏扬州人,博士,农艺师,主要从事农作物栽培技术的研究与推广。E-mail: yztgz@163.com。

通信作者:姚 义,博士,高级农艺师,主要从事农作物栽培技术的研究与推广。E-mail: yztgz@163.com。

确<sup>[21]</sup>。在广义上,缓控释肥是指利用物理、化学、生物等调控手段,使养分释放速率远小于速效肥料的一类新型肥料,在土壤中养分能延缓释放,养分释放速率与农作物需肥特性实现基本同步<sup>[14]</sup>。狭义上,缓释肥被定义为通过对肥料中养分的化学复合或物理作用,延长有效养分的释放时间的一种肥料;控释肥是指通过各种调控机制预先设定养分的释放模式(释放速率和释放时间),使其养分释放与作物的养分吸收同步<sup>[22]</sup>。控释肥是缓释肥的高级阶段,理想的控释肥除强调控释期的长效性,还应具有可调控性、阶段性和连续性等特性<sup>[23]</sup>。

自 1955 年美国首先研制出第 1 款脲醛缓释肥产品开始,在过去的几十年里各国纷纷开始高效缓释技术或缓释材料及其作用机制的研究,开发了一系列养分释放机理不尽相同的缓控释肥产品<sup>[6,24]</sup>。截至 2018 年,全球缓控释肥的需求量超过 150 万 t,且每年增长率超过 6%,当前我国是缓控释肥的主要消费市场,用量约占全球总量的 46%<sup>[25]</sup>。

### 1.1 缓控释肥作用原理

缓控释肥主要通过物理、化学或生物等方法或技术来实现氮素的缓释或控释,以实现养分释放和作物养分需求规律一致,主要包括采用涂层、包裹或添加抑制剂等不同的技术或工艺<sup>[5]</sup>。从氮素在土壤中的形态转化形式来看,缓控释肥提高肥料氮肥利用率的作用原理主要有以下 2 种:(1)调节尿素水解的速率,降低  $\text{NH}_4^+$  形成的速率,这个过程主要是通过通过在肥料中添加人工合成或天然脲酶抑制剂,或采用聚合物涂层或纳米技术等来实现,最终的目标是减少  $\text{NH}_3$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的损失;(2)降低  $\text{NH}_4^+$  通过硝化作用转化为  $\text{NO}_3^-$  的速率,实现控制  $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{NO}$  排放和  $\text{NO}_3^-$  反硝化作用的目的,这一过程可以通过添加人工或合成硝化抑制剂实现。这 2 种机制的核心目标都是促使氮素在土壤中停留的时间更长,满足作物对  $\text{NH}_4^+$  的同步吸收,从而提高氮肥利用率,减少氮肥施用量<sup>[5]</sup>。

### 1.2 缓控释肥分类及养分释放机制

1.2.1 包膜/涂层型缓控释肥 包膜/涂层型缓控释肥通过在肥料颗粒表面喷涂 1 层或者多层疏水性材料形成隔水涂层,阻碍水分直接接触肥料内核,以此减缓涂层内养分在土壤中的释放<sup>[1]</sup>。包膜肥料施用到土壤后,涂层经由微生物、化学和物理等过程缓慢分解,膜壳逐渐出现空隙或破裂后尿素溶解释放出养分<sup>[23]</sup>。包膜缓控释肥的养分释放速率

主要由包膜材料性质、厚度、颗粒大小以及土壤温湿度等因素的耦合控制。包膜肥料由内核颗粒和包膜层 2 个部分组成,依据包膜材料的不同,可将其进一步划分为无机物包膜和有机聚合物包膜 2 类<sup>[26]</sup>。

常见的无机物包膜材料主要有硫磺、沸石、硅藻土、硅酸盐、生物碳等,这类包膜材料一般需采用黏结剂将其粘连在肥料内核的表面,可通过涂层的数量和厚度实现养分释放速率的调控<sup>[27]</sup>。其中技术最为成熟、应用最广泛的是硫包膜尿素。肥料施用后,土壤水分经过渗透作用穿过包膜,在肥料内核凝结并溶解养分,在包膜内部形成压力,当内部压力超过膜的承受能力时,膜壳破裂,养分一次性释放出来,这一释放机制被称为“破裂机制”<sup>[1]</sup>。在理想情况下,硫包膜能有效延缓尿素在土壤中的溶解,但由于纯硫涂层质地较脆,膜层易在运输或施肥途中破裂,导致缓释性能下降<sup>[26]</sup>。为提高硫包膜材料的缓释性能,常采用的方法是用沥青、石蜡等作物为密封剂二次包膜<sup>[23]</sup>,或采用有机树脂等对纯硫涂层改性,以降低其高度脆性,从而提高硫包膜材料的强度和耐磨性<sup>[28]</sup>。无机物包膜材料的优点是材料来源广泛,制造成本低,在土壤中易降解,并且可以改善土壤结构,但存在膜层易脱落、控释效果差等缺点<sup>[23]</sup>。

聚合物包膜材料研发的难点主要在于既要实现养分在预定时间内的缓释,又要求包膜材料能够完全降解,对土壤或环境无害<sup>[26]</sup>。和硫包膜的破裂机制不同,聚合物包膜一般能承受膜内的内部压力而不会直接破裂,养分顺着浓度梯度或化学势压力梯度缓慢渗透到膜外,养分释放遵循“扩散机制”<sup>[1]</sup>。聚合物包膜材料根据来源不同可分为合成聚合物和生物大分子 2 类。常见的合成聚合物包括聚乙烯、双氰胺、聚烯烃、醛类、聚氨酯和聚丙烯腈等<sup>[1,29]</sup>;用于包膜材料的生物大分子主要有木质素、纤维素、壳聚糖、海藻酸钠和腐殖酸等<sup>[30-31]</sup>。生物大分子主要来自动植物等天然材料,相比于人工合成聚合物具有低成本、易于获取和可生物降解等优势<sup>[32-33]</sup>。由于其疏水性能和养分扩散机制,聚合物包膜尿素的养分释放效果一般优于硫包膜尿素。

1.2.2 稳定性氮肥 稳定性氮肥主要通过添加天然或人工合成脲酶抑制剂或硝化抑制剂改变土壤细菌氮代谢酶的生物活性来改变养分释放模式,前者主要抑制尿素的水解过程,而后者则通过抑制硝

化作用来延缓  $\text{NH}_4^+$  向  $\text{NO}_3^-$  的转化<sup>[15,34]</sup>。用于缓控释肥的脲酶抑制剂主要有环己基磷酸三酰胺、硫代硫酸铵、对苯二酚和硫代硫酸钙等;常见的硝化抑制剂有双氰胺、3,4-二甲基吡唑磷酸盐、硫代磷酸三胺等<sup>[5]</sup>。温度、土壤类型和土壤 pH 值等因素协同影响脲酶或硝化抑制剂的实际效果。稳定性氮肥具有广泛的应用前景,但值得注意的是,脲酶和硝化抑制剂对尿素的附着力有限,且不稳定,容易发生水解,难以长期储存。此外,在土壤中添加脲酶或硝化抑制剂对土壤微生物带来的影响有待进一步探究。

**1.2.3 微溶型有机氮肥** 微溶型有机氮肥主要是通过共价键或离子键直接或间接将肥料养分结合到预先合成的高分子有机化合物上,形成含氮微溶或难溶性有机化合物<sup>[23]</sup>。这一类肥料主要以醛类缩合产物为基础,包括脲甲醛、丁烯叉二脲、异丁烯叉二脲、脲乙醛(环二脲)聚磷酸铵和草酰胺等<sup>[23]</sup>。养分释放主要取决于聚合物的化学结构、共价键或离子键的强弱和聚合度的大小等,也强烈依赖于微生物活性、黏粒含量、pH 值等土壤性质和外界温、湿度的变化<sup>[35]</sup>。微溶型有机氮肥缓控释性能较好,但过高的生产成本限制其在大田作物上的应用,目前主要应用于园艺花卉、大棚蔬菜或专业草坪等。

## 2 缓控释肥在小麦上的施用技术研究

缓控释肥是以肥料养分释放与作物需肥规律相吻合、少次甚至 1 次施肥即满足作物的生长需求为生产理念,实现与传统施肥相比省工节肥、增产增效等目的<sup>[36]</sup>。当前冬小麦生产上普遍存在以下几个难题:劳动力短缺促使小麦简化种植过程,减少施肥次数;实现稳产高产的前提下稳定甚至减少氮肥用量;改进施肥技术、提高氮肥利用率以缓解农业氮素对环境的负面效应<sup>[37]</sup>。基于缓控释肥的冬小麦一次性施肥技术为解决以上问题提供了重要思路<sup>[19,38]</sup>,但受技术和成本等因素限制,当前缓控释肥的养分释放很难做到与冬小麦的需肥规律完全同步,易造成作物生育前后期养分供应不均衡的问题,并且昂贵的肥料成本也限制了经济效益的提升<sup>[39]</sup>。为克服这些难题,实现冬小麦省工节肥和高产高效种植,前人在缓控释肥的合理施用技术上进行了大量的探索。

### 2.1 单种缓控释肥一次性基施

缓控释肥在小麦上最初的应用多采用一次性

基施的施肥方式。有研究指出,缓释尿素基施尽管土壤中保持的硝态氮含量水平并不高,但由于能有效减少土壤氮素的剖面迁移和淋失,肥料中的养分能被作物及时并充分吸收而减少了在土壤中淋失浪费的机会,提高小麦氮肥农学效率和氮肥偏生产力<sup>[20,40]</sup>。与普通尿素相比,基施缓控释氮肥,有利于氮素后移,在生育后期延缓土壤硝态氮、铵态氮的下降,维持更高的土壤无机氮水平,降低土壤氮素依存率,在满足小麦氮素生长需求的同时提高氮肥利用率,单位面积穗数、穗粒数及千粒质量均有不同程度的提高,进而提高产量<sup>[41]</sup>。不同养分释放类型的包膜尿素对小麦生育前后期土壤养分的供应存在显著差异,硫包膜尿素能有效供应小麦生育前期耕层土壤硝态氮需求,而树脂包膜尿素更有利于维持小麦生育后期耕层土壤铵态氮水平<sup>[40]</sup>。树脂包膜尿素在小麦穗数、穗粒数、粒质量和氮肥利用率等方面的提升效果均优于硫包膜尿素,主要原因是树脂包膜尿素在田间条件下养分释放呈“S”型曲线<sup>[19]</sup>,释放速率较慢,更有利于防止硝态氮淋失和氨挥发损失,增强对肥料氮的吸收利用,从而促进小麦氮吸收量,有效提高肥料氮素利用率<sup>[41]</sup>。研究认为在用量相同的情况下,施用缓控释氮可比速效氮增产 10% ~ 20%,氮肥利用率可提高 10% ~ 30%;在目标产量相同的情况下,施用缓控释氮用量可减少 10% ~ 40%<sup>[19,42]</sup>。但也有研究指出,基施缓控释肥虽然基本能够获得与 2 次施用尿素相等的产量,但并未实现产量和氮肥利用率的显著提升,限制缓控释肥肥料利用率的原因是基施单一缓释控肥,其养分释放速率很难与小麦的需肥规律一致,难以完全满足小麦全生育期的氮素需求<sup>[38]</sup>。在实际生产应用中,缓控释肥一次基施难以保证达到常规尿素高产栽培的产量水平,虽然实现了省时省工的目的,但由于肥料成本较高,经济效益低下,限制了缓控释肥的大面积推广<sup>[43]</sup>。

### 2.2 缓控释肥与尿素配施

为克服缓控释肥高成本以及小麦生育前期养分供应不足等问题,许多学者开展了缓控释肥与尿素掺混基施的应用效果研究。有研究认为,缓控释肥与尿素恰当的掺混比例既可有效提供作物生育前期的养分需求,又能通过控释氮肥延长在作物关键时期的氮素供应,相比单施尿素和缓释氮肥,缓释氮肥与尿素掺混在株高、叶面积指数、地上部干物质积累量等方面均表现出促进效应<sup>[44-45]</sup>。缓控

释肥与尿素配施的优势主要在于调控小麦的分蘖生长,促进冬前有效分蘖的发生,增加成熟期穗数<sup>[36,46]</sup>。也有研究指出,缓控释肥与尿素掺混导致拔节后期分蘖过多,控释氮和土壤氮无法保证充足的氮素供应,分蘖成穗率显著低于尿素追施处理,但由于前期分蘖基数较大,成熟期穗数仍处于较高水平,但千粒质量有所下降<sup>[36]</sup>。关于缓控释肥与尿素的掺混比例,前人做了大量的研究,张敬昇等认为,小麦穗数和产量与控释氮的占比均呈抛物线关系,和常规尿素处理相比,控释氮占总氮 20% 以上均能显著提高小麦产量,增幅可达 6% ~ 14%,当控释氮肥占总氮 40% 时产量达到峰值,此时对生物量增加效果也最明显,有利于个体和群体库容的同步提升,提高小麦的增产潜力<sup>[44]</sup>;董燕等研究表明,掺混 40% 以上控释氮肥能显著提高土壤微生物生物量氮库容,增强土壤氮循环的缓冲与调控性,减少氮素损失并提高氮利用率<sup>[47]</sup>;张晨阳等指出,缓释氮肥与尿素以质量比 6 : 4 掺混不仅提高了籽粒干物质累积量,还能促进花后氮素向籽粒的转运量和转移率,促进小麦花后物质积累和籽粒灌浆<sup>[45]</sup>;宋攀等认为,70% 不同控释期包膜尿素与 30% 尿素配合基施与普通尿素 2 次分施相比平均可增产 11.33% ~ 15.80%,提高氮肥利用率 14.60% ~ 23.43%<sup>[48]</sup>。出现不同的研究结果可能是由不同的生态条件、土壤基础条件、施氮量和缓控释肥类型等诸多因素导致的。此外,在选择缓控释肥与尿素的掺混比例时,肥料成本和经济效益也是需要重点考虑的因素,一般而言,缓控释氮占总氮的比例在 40% ~ 60% 之间,能够在满足小麦生长的同时协调肥料成本与经济效益之间的矛盾。

### 2.3 不同类型缓控释肥配施

在当前工业发展水平下,缓控释肥的养分释放曲线多为抛物线形、“倒 L”形或“S”形,不同类型的缓控释肥养分释放高峰可能出现释放周期的前期或中后期,但都遵循单峰释放的规律。而冬小麦在分蘖至越冬期和拔节至孕穗期共有 2 个氮素需求高峰,从养分同步的角度,单一缓控释肥难以完全满足小麦 2 个氮素需求高峰的养分需求,一定程度上会造成小麦前期或后期养分供应不足<sup>[39]</sup>。为实现缓控释肥养分供应和冬小麦氮素需求的同步,有学者提出了长效与短效缓控释肥配施<sup>[49]</sup>、不同养分释放特征缓控释肥配施<sup>[38]</sup>以及包膜尿素与脲酶或硝化抑制剂配施<sup>[50]</sup>等不同缓控释肥配施的思路。将

不同类型缓控释肥合理配施,弥补了单一肥料品种在实际应用过程中养分供应不均衡的问题,更容易满足冬小麦整个生育期对养分的需求,和单施尿素相比,有效协调穗数、穗粒数和千粒质量,可显著提高产量<sup>[49,51]</sup>。不同类型缓控释肥配施在协调小麦不同生育期氮素供应上表现出优势,但肥料高成本的矛盾仍然是需要解决的问题。

### 2.4 缓控释肥 2 次分施

冬小麦生育期一般在 210 d 左右,缓控释肥一次性施肥所依赖的肥料养分释放受到土壤水分、温度等因素的影响,不同区域气候和土壤条件下的效果不稳定,实际养分控释期很难达到小麦的生育周期,在小麦生育后期易造成缺氮早衰,影响小麦后期产量形成。并且由于肥料成本等因素,缓控释肥一次性施用仍存在一定争议,在稻麦生产的实际应用中受到很大限制<sup>[52]</sup>,目前已有部分学者展开缓控释肥基施加追施或缓控释肥基施结合尿素追施等 2 次施肥技术的效果研究<sup>[53]</sup>。宁运旺等研究认为,基施缓释氮肥结合拔节期追施尿素可以有效提高小麦茎蘖成穗率,减少无效分蘖的发生<sup>[54]</sup>,拔节期适当追氮保证了小麦后期的氮素来源,提高了旗叶的叶绿素含量和净光合速率,促进小麦灌浆后期体内氮素的吸收与同化,提高小麦粒质量和产量<sup>[36,39]</sup>。杨雯玉等研究认为,基施尿素、追施缓控释肥在提高籽粒产量和蛋白质含量的同时能有效降低土壤中的硝态氮残留,提高氮肥利用率,且在减氮 30% 时效果更为显著<sup>[55]</sup>。马泉等研究认为,树脂包膜或硫包膜尿素 2 次施用,有利于满足小麦在 2 个氮素需求高峰的养分供应,协调穗数和粒质量的形成,实现产量和氮肥利用率的提升;树脂包膜尿素与普通尿素掺混 2 次施用在实现增产的同时降低了肥料成本,有利于实现效益最大化<sup>[43,56]</sup>。总体而言,2 次施肥技术虽然没有实现施肥次数的最简化,但在产量和效益提升方面效果显著,相比于普通尿素施用 3 ~ 4 次,在很大程度上协调了简化施肥和粮食增产之间的矛盾。

## 3 缓控释肥在小麦上施用的环境效应

缓控释肥除了具有省时省工、增产增效等优势之外,在缓解农业环境污染和改善耕地质量等方面也具有非常高的潜在价值,这也是其成为未来肥料发展主要趋势的重要原因之一。合理施肥的原则是通过施肥调控将土壤中的有效养分含量控制在适

量水平,既保证了较高产量又不至于引起环境污染的风险<sup>[57]</sup>。速效肥料中氮素大量损失造成了严重的水污染、空气污染和土壤退化等负面影响<sup>[58]</sup>。通过延缓氮素释放,施用缓控释肥能降低土壤中的硝化和反硝化作用,从而有效减少氨气( $\text{NH}_3$ )和氮氧化物( $\text{NO}$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ )等含氮气体的形成,缓解大气污染和温室气体效应;此外,大量施用速效氮肥,特别是铵态或尿素态氮,会加剧土壤酸化,降低土壤有机质含量,影响微生物的种类和活性,限制养分循环,阻碍水分入渗和作物根系发育<sup>[58]</sup>。缓控释肥一方面通过延缓氮素释放缓解土壤 pH 值的快速下降,调节微生物群落丰度和稳定性,另一方面,部分缓释材料本身也具有调节土壤 pH 值、保水性和持水性等效果<sup>[59]</sup>。汪强等研究表明,施用缓控释肥能避免高浓度盐分对作物根系的危害,节约劳动量,降低农业生产成本;减少肥料养分与土壤接触,增加局部土壤的盐基饱和度,减少因土壤物理、化学或生物作用对氮素的固定或分解,从而提高氮效率,节约能源和资源;控制小麦籽粒内硝酸盐含量的积累,有利于保障食品安全;并且可使养分的淋溶和挥发降低到最小程度,防止多余养分对农业环境的污染<sup>[38]</sup>。

## 4 缓控释肥在小麦上应用的局限性

### 4.1 肥料成本

缓控释肥的生产成本一直以来都是困扰其行业发展和限制大田作物广泛应用的主要原因。由于缓释材料价格、加工工艺、人工成本和产业规模等多方面因素的影响,缓控释肥的价格一般是传统肥料的 2.5~8.0 倍,目前多应用于大棚果蔬、茶园、草坪和花卉等经济效益较高的产业中<sup>[60]</sup>。缓控释肥在大田作物上的应用普通农民普遍难以接受,大面积推广一直难以进行<sup>[23]</sup>。因此,通过开发来源广泛、成本低廉、控释性能好的缓释材料,改进生产工艺和简化制造流程,降低缓控释肥的生产成本是目前研究的重点,进而推动廉价高效的缓控释肥在大田作物上的推广应用<sup>[23]</sup>。

### 4.2 缓控释肥的有效性和稳定性

缓控释肥的养分缓控释性能是影响其应用效果的决定性因素,当前研发的缓控释肥在实验室条件下基本上都能实现长效和稳定的养分释放。不同类型缓控释肥对于外界环境的耐受性主要由缓释材料的特性和加工工艺等控制,在实际田间施用

过程中,由于土壤条件(土壤类型、pH 值、微生物活性等)、温度和降水等环境条件多变且存在显著的年度间差异,很大程度上会影响缓控释肥控释周期和养分释放速率<sup>[58,61-62]</sup>。另一方面,当前的大部分缓控释肥功能单一,其作用机制仅仅停留在养分缓释的层面,并不能够根据作物的实际养分需求和外界环境的变化来实现对养分的控制释放,难以实现与作物生长需肥规律同步<sup>[26]</sup>。

### 4.3 缓释材料的安全性

缓控释肥在小麦上的应用已经展现出诸多环境效益,但是缓控释材料对环境潜在的负面效应也引起人们的广泛关注。目前缓释效果较好,价格相对便宜的缓控释材料多为合成聚合物,但其难降解的缺点对环境的潜在危害较大,因此聚合物缓控释肥的应用还存在很大争议<sup>[63]</sup>。以淀粉、木质素和纤维素等天然高分子为原料的缓释材料相对便宜,生物可降解,可再生,具有较高的应用价值,但存在疏水性和控释效果差以及材料不易得等缺点<sup>[58]</sup>。硫包膜缓控释肥由于硫的易降解性被认为是比较理想的环境友好型缓控释肥,但纯硫包膜缓释效果不佳,生产上广泛采用密封剂、黏合剂、增塑剂和保护剂等改善其控释效果,不仅增加了工艺的复杂性和成本,也增加了施用后土壤残留的风险<sup>[1]</sup>。抑制剂型缓控释肥由于缓释性能好、土壤残留低而受到一部分人的青睐,但对土壤条件敏感,且施用后可以通过降低土壤微生物多样性和活性来影响土壤微生物系统和作物根系代谢,其对环境和食品安全的影响还有待进一步研究<sup>[64]</sup>。

## 5 总结与展望

缓控释肥在冬小麦上的应用已经展现出协调养分供应和小麦氮素吸收,促进增产增效,减少氮素损失和减轻环境污染等多方面的优势。但是由于缓控释技术和政策等原因,缓控释肥在小麦产业的推广应用还面临很多挑战,未来缓控释肥的研究和推广应重点解决以下几点问题。

### 5.1 提升缓释性能,开发小麦专用缓控释肥

开发纳米材料等新型缓控释材料,改进加工工艺,实现缓释性能的提升和稳定,并继续加强缓控释肥不同种类或与速效氮组合配比的效果研究,推动养分同步性高、性能稳定、环境友好和成本廉价的小麦专用缓控释肥的开发和应用。

### 5.2 推动缓控释肥配套技术的研究与推广

强化缓控释肥合理施用技术以及与之配套的

耕整地、播种等技术的研究,加强对农民施用缓控释肥的农艺指导以及增产增效的效果宣传,提高农民采用缓控释肥的积极性,促进小麦产业增产增收。

### 5.3 完善缓控释肥应用评价体系

当前我国缓控释肥的性能检测和评价指标尚不健全,经济效益、社会和生态效益等方面的综合评价体系基本处于空白,迫切需要制定和完善相关的国标和行业体系标准,强化市场规范,以推动缓控释肥安全、可靠的应用。

### 5.4 强化政策和资金扶持

加大缓控释肥研发、生产和应用过程中的政策和资金扶持,推动产业化和规模化发展,降低肥料生产成本,推动缓控释肥在大田作物上的广泛应用。

### 参考文献:

- [1] Azeem B, KuShaari K, Man Z B, et al. Review on materials & methods to produce controlled release coated urea fertilizer [J]. *Journal of Controlled Release*, 2014, 181(1): 11–21.
- [2] Santos B R D, Bacalhau F B, Pereira T D S, et al. Chitosan – Montmorillonite microspheres: a sustainable fertilizer delivery system [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2015, 127: 340–346.
- [3] FAO. World fertilizer trends and outlook to 2020 [M]. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2017: 1–38.
- [4] Erisman J W, Sutton M A, Galloway J, et al. How a century of ammonia synthesis changed the world [J]. *Nature Geoscience*, 2008, 1(10): 636–639.
- [5] Dimkpa C O, Fugice J, Singh U, et al. Development of fertilizers for enhanced nitrogen use efficiency – Trends and perspectives [J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 731: 139113.
- [6] Linquist B A, Adviento – Borbe M A, Pittelkow C M, et al. Fertilizer management practices and greenhouse gas emissions from rice systems: A quantitative review and analysis [J]. *Field Crops Research*, 2012, 135: 10–21.
- [7] Coskun D, Britto D T, Shi W M, et al. Nitrogen transformations in modern agriculture and the role of biological nitrification inhibition [J]. *Nature Plants*, 2017, 3: 17074.
- [8] 李 科, 韩 萍. 陇东黄土高原旱作区冬小麦平衡施肥模式研究 [J]. *土壤通报*, 2019, 50(6): 1409–1417.
- [9] 凌启鸿, 张洪程, 戴其根, 等. 水稻精确定量施氮研究 [J]. *中国农业科学*, 2005, 38(12): 2457–2467.
- [10] 吴进东, 李金才, 魏凤珍, 等. 氮肥后移对花后受渍小麦灌浆特性及产量构成的影响 [J]. *西北植物学报*, 2013, 33(3): 570–576.
- [11] Ronga D, Caradonia F, Parisi M, et al. Using digestate and biochar as fertilizers to improve processing tomato production sustainability [J]. *Agronomy*, 2020, 10(1): 138.
- [12] 魏启辉, 郭成宝, 周 影, 等. 增施不同氨基酸水溶肥对白菜生长的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2020, 48(22): 160–164.

- [13] Billah M, Khan M, Bano A, et al. Phosphorus and phosphate solubilizing bacteria: Keys for sustainable agriculture [J]. *Geomicrobiology Journal*, 2019, 36(10): 904–916.
- [14] Shaviv A. *Advances in controlled – release fertilizers* [M]// *Advances in agronomy*. Amsterdam: Elsevier, 2001: 1–49.
- [15] Timilsena Y P, Adhikari R, Casey P, et al. Enhanced efficiency fertilisers: a review of formulation and nutrient release patterns [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2015, 95(6): 1131–1142.
- [16] Shaviv A. Environmental friendly nitrogen fertilization [J]. *Science in China (Series C: Life Sciences)*, 2005, 48(S2): 937–947.
- [17] Lü S Y, Feng C, Gao C M, et al. Multifunctional environmental smart fertilizer based on l – aspartic acid for sustained nutrient release [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2016, 64(24): 4965–4974.
- [18] Chalk P M, Craswell E T, Polidoro J C, et al. Fate and efficiency of <sup>15</sup>N – labelled slow – and controlled – release fertilizers [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2015, 102(2): 167–178.
- [19] 郑文魁, 李成亮, 窦兴霞, 等. 不同包膜类型控释氮肥对小麦产量及土壤生化性质的影响 [J]. *水土保持学报*, 2016, 30(2): 162–167, 174.
- [20] 卢艳丽, 白由路, 王 磊, 等. 华北小麦—玉米轮作区缓控释肥应用效果分析 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(1): 209–215.
- [21] Oertli J J, Lunt O R. Controlled release of fertilizer minerals by encapsulating membranes: I. factors influencing the rate of release [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1962, 26(6): 579–583.
- [22] Shaviv A, Mikkelsen R L. Controlled – release fertilizers to increase efficiency of nutrient use and minimize environmental degradation – A review [J]. *Fertilizer Research*, 1993, 35(1/2): 1–12.
- [23] 王兴刚, 吕少瑜, 冯 晨, 等. 包膜型多功能缓/控释肥料的研究现状及进展 [J]. *高分子通报*, 2016(7): 9–22.
- [24] Pan B B, Lam S K, Mosier A, et al. Ammonia volatilization from synthetic fertilizers and its mitigation strategies: a global synthesis [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 232: 283–289.
- [25] Fertahi S, Ilsouk M, Zeroual Y, et al. Recent trends in organic coating based on biopolymers and biomass for controlled and slow release fertilizers [J]. *Journal of Controlled Release*, 2021, 330: 341–361.
- [26] Naz M Y, Sulaiman S A. Slow release coating remedy for nitrogen loss from conventional urea: a review [J]. *Journal of Controlled Release*, 2016, 225: 109–120.
- [27] 王 超, 杨子明, 焦 静, 等. 包膜控释肥及其膜材的研究进展 [J]. *高分子通报*, 2020(9): 37–42.
- [28] Liu Y H, Wang T J, Qin L, et al. Urea particle coating for controlled release by using DCPD modified sulfur [J]. *Powder Technology*, 2008, 183(1): 88–93.
- [29] Shoji S, Delgado J, Mosier A, et al. Use of controlled release fertilizers and nitrification inhibitors to increase nitrogen use

- efficiency and to conserve air and water quality [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2001, 32 (7/8): 1051–1070.
- [30] Behin J, Sadeghi N. Utilization of waste lignin to prepare controlled – slow release urea[J]. International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture, 2016, 5(4): 289–299.
- [31] Wu L, Liu M Z, Liang R. Preparation and properties of a double – coated slow – release NPK compound fertilizer with superabsorbent and water – retention[J]. Bioresource Technology, 2008, 99 (3): 547–554.
- [32] Wezel A, Casagrande M, Celette F, et al. Agroecological practices for sustainable agriculture. A review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2014, 34(1): 1–20.
- [33] Teixeira A S, Deladino L, Zaritzky N. Yerba mate (*Ilex paraguariensis*) waste and alginate as a matrix for the encapsulation of N fertilizer [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2016, 4(4): 2449–2458.
- [34] Chien S H, Prochnow L I, Cantarella H. Chapter 8 recent developments of fertilizer production and use to improve nutrient efficiency and minimize environmental impacts [J]. Advances in Agronomy, 2009, 102(9): 267–322.
- [35] 胡雪获, 耿元波, 梁 涛. 缓控释肥在茶园中应用的研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2018(1): 1–8.
- [36] 杨金宇, 李援农, 王凯瑜, 等. 控释氮肥与普通尿素配比比例和方法对冬小麦灌浆特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(3): 442–452.
- [37] 林海涛, 李 彦, 刘兆辉, 等. 水性树脂包膜尿素氮素释放与冬小麦氮素吸收匹配特征[J]. 中国农业科学, 2018, 51(20): 3852–3862.
- [38] 汪 强, 李双凌, 韩燕来, 等. 缓/控释肥对小麦增产与提高氮肥利用率的效果研究[J]. 土壤通报, 2007, 38(1): 47–50.
- [39] 李 伟, 李絮花, 董 静, 等. 冬小麦控释尿素与普通尿素的最佳配比研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(3): 629–635.
- [40] 郑 沛, 宋付朋, 马富亮. 硫膜与树脂膜控释尿素对小麦不同生育时期土壤氮素的调控及其产量效应[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4): 122–127.
- [41] 马富亮, 宋付朋, 高 杨, 等. 硫膜和树脂膜控释尿素对小麦产量、品质及氮素利用率的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(1): 67–72.
- [42] 黄丽娜, 刘俊松. 我国缓/控释肥发展现状及产业化存在的问题[J]. 资源开发与市场, 2009, 25(6): 528–530.
- [43] 马 泉, 唐紫妍, 王梦尧, 等. 树脂包膜缓释肥与尿素配施对稻茬冬小麦产量、氮肥利用率与效益的影响[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(10): 1202–1210.
- [44] 张敬昇, 李 冰, 王昌全, 等. 控释氮肥与尿素掺混比例对作物中后期土壤供氮能力和稻麦产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(1): 110–118.
- [45] 张晨阳, 张富仓, 郭金金, 等. 缓释氮肥与尿素掺施比例对冬小麦产量及氮素吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(4): 669–680.
- [46] 常 凤, 王海标, 陶静静, 等. 减氮配施控释尿素对冬小麦产量及氮肥效率的影响[J]. 中国农学通报, 2018, 34(25): 1–6.
- [47] 董 燕, 王正银. 缓/控释复合肥料对土壤氮素库的调控作用[J]. 生态学报, 2010, 30(24): 6707–6714.
- [48] 宋 攀, 范仲卿, 于晓东, 等. 不同控释期包膜尿素氮素释放对小麦氮素利用的影响[J]. 山东农业科学, 2020, 52(12): 51–58.
- [49] 王茹芳, 刘俊滨, 张夫道, 等. 掺混型缓释肥对小麦产量及品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2007(2): 35–37, 42.
- [50] 周丽平, 杨俐苹, 白由路, 等. 不同氮肥缓释化处理对夏玉米田间氨挥发和氮素利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(6): 1449–1457.
- [51] 王玉军, 邹应斌, 张夫道. 掺混型缓/控释肥对杂交晚稻产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2009(5): 28–33.
- [52] Chen J N, Cao F B, Xiong H R, et al. Effects of single basal application of coated compound fertilizer on yield and nitrogen use efficiency in double – cropped rice[J]. The Crop Journal, 2017, 5(3): 265–270.
- [53] 魏海燕, 李宏亮, 程金秋, 等. 缓释肥类型与运筹对不同穗型水稻产量的影响[J]. 作物学报, 2017, 43(5): 730–740.
- [54] 宁运旺, 张 辉, 王 磊, 等. 基肥结合抽穗期追肥稳定稻麦产量并提高氮肥利用率及经济效益[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(8): 1407–1419.
- [55] 杨雯玉, 贺明荣, 王远军, 等. 控释尿素与普通尿素配施对冬小麦氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(5): 627–633.
- [56] 马 泉, 王梦尧, 孙 全, 等. 硫包膜尿素施用模式对稻茬冬小麦产量、氮肥利用率和效益的影响[J]. 核农学报, 2021, 35(4): 942–952.
- [57] Raun W R, Johnson G V, Westerman R L. Fertilizer nitrogen recovery in long – term continuous winter wheat[J]. Soil Science Society of America Journal, 1999, 63(3): 645–650.
- [58] Chen J, Lü S Y, Zhang Z, et al. Environmentally friendly fertilizers: a review of materials used and their effects on the environment[J]. Science of the Total Environment, 2018, 613–614: 829–839.
- [59] Wang A S, Angle J S, Chaney R L, et al. Soil pH effects on uptake of Cd and Zn by *Thlaspi caerulescens* [J]. Plant and Soil, 2006, 281(1/2): 325–337.
- [60] Davidson D, Gu F X. Materials for sustained and controlled release of nutrients and molecules to support plant growth[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(4): 870–876.
- [61] 马 泉, 王亚华, 王梦尧, 等. 缓控释肥的发展应用与评价体系研究进展[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(18): 24–29.
- [62] 焦卫平, 李同花, 任先顺, 等. 不同缓释肥料对再生稻生长及产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(4): 84–88.
- [63] Majeed Z, Ramli N K, Mansor N, et al. A comprehensive review on biodegradable polymers and their blends used in controlled – release fertilizer processes[J]. Reviews in Chemical Engineering, 2015, 31(1): 69–95.
- [64] Marsden K A, Scowen M, Hill P W, et al. Plant acquisition and metabolism of the synthetic nitrification inhibitor dicyandiamide and naturally – occurring guanidine from agricultural soils [J]. Plant and Soil, 2015, 395(1/2): 201–214.