

缓控释肥发展现状及其土壤改良的研究进展

钟卓妍^{1*}, 董玲玲^{2#}

¹贵州大学农学院, 贵州 贵阳

²贵州省环境工程评估中心, 贵州 贵阳

收稿日期: 2023年3月10日; 录用日期: 2023年5月30日; 发布日期: 2023年6月13日

摘要

缓控释肥是一种新型肥料, 其在施用后能够减慢养分释放速率或控制养分释放时间, 延缓其养分被作物吸收与利用, 能满足作物整个生长期对于养分的需求, 具有提高肥料利用率和作物产量、减少环境污染等优点, 同时, 缓控释肥为一次性施肥, 从而大大减少劳动力, 在农业生产中具有积极意义, 因此对于缓控释肥的研究是非常必要的。本文以缓控释肥为研究对象, 在总结缓控释肥定义、缓控释肥的作用机制、缓控释肥的分类、缓控释肥对土壤改良作用的基础上, 为缓控释肥目前存在的问题提供解决对策。为助力农业发展, 推进未来缓控释肥的研究进程, 本文提出缓控释肥的发展前景可着力于开发不同作物的专用缓控释肥、开发新型包膜材料及开发具有附加功能的缓控释肥品种, 以期缓控释肥的研究提供理论依据。

关键词

缓控释肥, 发展现状, 土壤改良

Development Status of Slow and Controlled Fertilizer and Research Progress of Soil Improvement

Zhuoyan Zhong^{1*}, Lingling Dong^{2#}

¹College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang Guizhou

²Guizhou Environmental Engineering Assessment Center, Guiyang Guizhou

Received: Mar. 10th, 2023; accepted: May 30th, 2023; published: Jun. 13th, 2023

Abstract

Slow and controlled release fertilizer is a new type of fertilizer that can slow down or control the

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 钟卓妍, 董玲玲. 缓控释肥发展现状及其土壤改良的研究进展[J]. 有机化学研究, 2023, 11(2): 49-56.
DOI: 10.12677/jocr.2023.112006

release of nutrients. The nutrients contained in it can delay the absorption and utilization of crops after fertilization, which can meet the demand for nutrients during the whole growing period of crops. It has the advantages of improving fertilizer utilization rate, crop yield, reducing environmental pollution, etc. At the same time, slow and controlled release fertilizer is used for one-time fertilization, thus greatly reducing the labor force. It has positive significance in agricultural production, so it is very necessary to study slow and controlled release fertilizer. This paper takes slow and controlled release fertilizer as the research object, summarizes the definition of slow and controlled release fertilizer, the mechanism of slow and controlled release fertilizer, the classification of slow and controlled release fertilizer, and the effect of slow and controlled release fertilizer on soil improvement, and provides solutions to the existing problems of slow and controlled release fertilizer. In order to help agricultural development and promote the research process of slow release fertilizer in the future, this paper proposes that the development prospect of slow release fertilizer could focus on the development of special slow release fertilizer for different crops, the development of new coating materials, and the development of slow release fertilizer varieties with additional functions in order to provide a theoretical basis for the research of slow release fertilizer.

Keywords

Slow and Controlled Release Fertilizer, Current Situation of Development, Improvement of Soil

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

国家提倡推进农业绿色转型发展, 从农业粗放式发展到农业精细化发展再到农业绿色转型发展, 实现农业由粗放消耗型向环境友好型转变[1] [2]。中国是农业生产大国, 也是世界上化肥施用量最大的国家[3]。化肥作为重要的农业投入要素之一, 对粮食增产以及维持粮食安全具有重要意义。但过度依赖化肥追求增产的同时也导致了一系列生态环境问题, 各界十分关注肥料利用率低及其导致的问题, 因此, 发展以包膜控释肥料掺混型的复合肥料是我国肥料业的必然发展趋势之一[4]。随着化肥减量增效工作的推进, 缓控释肥成为新型肥料的热点, 是未来肥料产业的发展的重要方向之一[5]。

缓释控肥的养分释放符合作物各生长期对于养分的需求, 同时缓控释肥具有一次性施肥的优点, 可以大大减少劳动力。此外, 缓释和控释肥料还可以提供氮、磷、钾等养分, 可以满足作物养分的充分吸收, 并且降低肥料淋洗渗透如肥料浸出、渗透和挥发, 减产减排。这使得缓控释肥成为肥料领域研究的热点[6]。

2. 缓控释肥概述

2.1. 缓控释肥的概念

缓控释肥料的概念分为广义概念与狭义概念[7] [8]。广义上, 缓控释肥料是指以各种调控机制使其养分最初释放延缓, 延长植物对其有效养分吸收利用的有效期, 实现养分按照设定的释放率和释放期缓慢或控制释放的肥料。狭义上, 缓控释肥分为控释肥料和缓释肥料。缓释肥料(Slow release fertilizer): 采用物理、化学和生物化学方法制造的能使肥料中养分(主要是氮和钾)在土壤中缓慢释放, 使其作物有效性明显延长的肥料。控释肥料(Controlled release fertilizer): 采用聚合物包膜, 可定量控制肥料中养分释放数量

和释放期, 使养分供应与作物各生育期需肥规律吻合的包膜复合肥和包膜尿素。缓释期和缓释量无定量规定[4]。

2.2. 缓控释肥的作用机制

扩散机制是缓控释肥的养分释放的主要途径, 当作物吸收土壤中的养分时, 在肥料膜内外侧形成浓度差, 促进肥料养分的释放[9]。控释肥料中养分的释放和供应速度不受微生物活性大小、环境 pH 值高低、土壤含水量多少等环境因素的影响。包膜内的养分会在接触到空气中的水汽时溶解, 并在养分势的驱动下从膜内向膜外扩散。在缓控释肥养分释放后, 水分是养分运输的必要条件, 当土壤中水分比较充分时, 养分运输到植物根系的方式为质流或扩散, 当土壤中水分不足时, 养分但难以被植物吸收利用, 扩散后会聚集在膜外(养分释放了), 或作物根系通过截获吸收少量的养分。

2.3. 缓控释肥的分类

对于缓控释肥料的分类有所差异。陈冠霖[7]等将缓控释肥分为物理阻碍控释型肥料、微溶有机化合物肥料、微溶无机化合物肥料和稳定性氮肥四大类。高捷等[10]将缓控释肥分为物理型和化学型。Fu 等[11]根据缓控释肥分类的发展历史, 提出了改进的物理、化学和化合物分类。目前运用较为普遍的分类方法是将缓控释肥分为包膜缓控释肥、包裹材料缓控释肥和具有有限水溶性的合成型微溶态缓控释肥三种类型[12]。

3. 缓控释肥对土壤的改良作用

3.1. 缓控释肥提升土壤肥力

土壤作为农业生产的基础, 控释氮肥的长期一次性基施可维持或提高土壤肥力, 有利于农业可持续发展。研究发现, 缓控释肥不是直接改善树木的性能, 而是通过提高土壤肥力改善树木的性能[13]。控释氮肥能持续释放氮素, 能够满足作物整个生长期对氮素的需求, 提高土壤肥力与固氮能力, 长期施用有利于土壤中养分的持续累积, 实现土壤培肥[14] [15]。在单施氮肥和氮肥与秸秆配施条件下, 与尿素处理相比, 施用缓控释肥提升了土壤肥力[16]。

针对盐碱地, 王靖荃等[17]开展基于缓控释肥结合施用脱硫石膏和苜蓿还田进行土壤改良, 发现缓控释肥可显著改善土壤肥力状况, 韩飞等[18]发现缓控释氮肥和有机肥替代可显著提高盐碱地土壤肥力。

3.2. 缓控释肥对土壤氮、磷、钾的影响

施用缓/控释肥料能显著降低氮素流失量[19]、提高土壤固氮能力[14]。在控释氮肥的处理下, 盛花期以后土壤能保持较高硝态氮和铵态氮含量[20]。Silva 等[13]发现, 到秋季, 缓控释肥处理显示土壤中无机氮含量较高。张阳阳[16]发现施用缓控释肥或缓控释肥与秸秆配施, 都增加了培养后期土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和可溶性氮浓度, 降低了整个培养过程的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度。胡雪荻等[21]发现缓控释肥可以提高茶园土壤铵态氮的含量, 同时还能减少土壤氮素的流失, 将氮素的利用率提高到 55%~80%。Mi 等[22]研究表明, 双季稻连续 7 d 施用硫加树脂包膜尿素后, 0~60 cm 土层的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量显著高于尿素分次施肥处理。

缓释/控释肥料可以防止养分的流失以及 P 的固定[23]。

孙瀚[20]将缓控释肥施用于棉花, 试验表明, 一次性基施包膜控释氯化钾肥较普通钾肥能显著提高棉花初花期、盛花期、始絮期及收获期的土壤速效钾含量。杨修一[24]在研究包膜肥料对棉花生长发育交互作用的试验时, 施用树脂包膜尿素(PCU)和树脂包膜氯化钾(PCPC)两种肥料, 发现施用 PCU + PCPC80 为肥料最优组合, 增加了土壤钾素含量。

3.3. 缓控释肥增加土壤有机质

王靖荃等[17]发现在轻度盐碱地上将缓控释肥与脱硫石膏和苜蓿结合施用还田,缓控释肥能在一定程度上提升土壤有机质,同时,缓控释肥有助于保护土壤免受侵蚀从长远来看,可以使农业系统受益的方面[13]。Zheng 等[25]发现,在中等肥力产田上应用控释掺混肥后,小麦收获季表层(0~20 cm)的土壤有机质有所增加。

3.4. 缓控释肥对土壤 pH 的影响

应用硫包膜尿素能降低轻度盐碱地土壤 pH 值[26]。Qi 等[27]研究指出,缓释/控释肥料都可以调节红壤土和粉质壤土的 pH 值。Zheng 等[25]在中等肥力产田上连续应用 7 d 控释掺混肥后,小麦收获季表层(0~20 cm) pH 较尿素分施处理提高 0.17 个单位。

3.5. 保水能力

保水性是农业土壤的重要特性,因为它有助于减少灌溉频率,并通过在缺水期间增加植物可用水量来促进植物生长。施用缓释/控释肥提高了土壤的保水能力。高吸水性水凝胶基肥料是一种缓释/控释肥料,可以吸收和保留大量的水分,从而提高土壤保水能力[23]。

4. 缓控释肥存在的问题及对策

4.1. 缓控释肥存在的问题

4.1.1. 缓控释肥的成本高

由于缓控释肥料的包膜材料通常为石化材料,导致缓控释肥料的价格较农户平常施用的肥料高[28][29]。同时由于包膜材料制造工艺流程较复杂,生产成本较高,因此在大田中应用包膜肥料价格偏高,通常为普通肥料的 2~4 倍。

4.1.2. 种植户对缓控释肥认知不足

农户不会辨别、不信任包膜肥料因此对缓控释肥的需求量少[30]。缓控释肥占据化肥市场的销售份较小,有调查发现 70%以上农户对缓控释肥这一新型肥料了解甚少、热情不足,多持保守观望的态度[31]。农户追求高产而不在意土壤造成的污染,会更多的选择施用化肥。

4.1.3. 包膜工艺不成熟

连续式缓控释肥生产工艺主要分为原料给料工序、包膜工序以及包装工序。在整个生产工艺中,包膜工序是最重要的部分[32]。国内生产包膜肥料所用的工艺设备多为流化床、包衣锅、转鼓等,虽然设备种类多样且适用广泛,但存在自动化、智能化程度低,包膜精度差的问题,与国外成熟包膜工艺相比仍存在较大差距。

4.1.4. 包膜材料残留导致土壤污染

环境友好型的肥料是可持续农业发展的方向之一,其可以通过延缓甚至控制养分向土壤中的释放来减少养分流失对环境的污染[33],但随着对缓控释肥认知的不断深入,发现部分缓控释肥的包膜在土壤中不易降解,例如聚合物包膜材料,会对土壤环境造成负面影响[9][31]。

4.1.5. 缓控释肥的性能评价没有统一体系

缓控释肥料的养分控释效果是反映缓控释肥料质量的重要评价指标。静水或盐溶液中溶出率法、土壤培养法、土柱淋溶法、电超滤法、同位素示踪法、生物学评价法等几种是常用的缓控释肥料的养分释

放性能的评价方法。但由于缓控释肥料的包膜材料、控释途径和释放机理各不同, 目前尚无一套统一的评价标准与方法[34]。

4.2. 相应对策及建议

4.2.1. 降低缓控释肥成本

缓控释肥的成本偏高是农户不施用缓控释肥的关键因素之一。因此, 开发来源广泛、成本低廉的包膜材料是一个重要的研究方向[7]。使缓控释肥更加大众化, 增加农户对缓控释肥的应用。从生产环节开始, 肥料生产商在选择包膜材料时, 应选择性价比高、环境友好的包膜材料, 同时要学习国外成熟生产工艺, 改进我国生产工艺流程和生产设备, 降低生产成本, 缩小与传统肥料的价格差距。例如赵萧汉等[35]发现, 天然及半合成高分子材料廉价易得、安全环保, 可作为一种新型包膜材料, 近年来还被广泛应用于各个行业。其次, 政府部门需要发挥政策引导和财政补贴的作用。对缓控释肥料的生产企业、流通企业给予一定的优惠政策或补贴。

4.2.2. 开展农户相关知识的培训

陈小奔[36]通过调查发现, 从施肥量看, 了解过农业面源污染的农户比不知道农业面源污染的农户施肥量低, 在接受过职业技术培训后的农户, 进行农业生产时会降低施肥量。因此, 企业和政府相关部门可以通过组织农户进行培训, 提高农民对缓控释肥产品的认知水平, 让农户学习缓控释肥料的相关知识和施肥技术, 了解缓控释肥料带来的经济效益和环境效益, 使农户选择环保型的缓控释肥, 使化肥使用量零增长。

4.2.3. 改进包膜肥的制备方法

克服现有包衣技术的不足, 减少包衣数量, 节约生产成本。学习借鉴不同种类包膜肥料的制备方法, 针对不同包膜肥料生产方式进行技术上的改良。

4.2.4. 开发优质缓控释肥包膜

国内由于缓控释肥使用的包膜材料多为高分子合成材料, 残留在土壤中的包膜材料极易造成严重的土壤污染, 因此迫切需要开发无污染的包膜肥[37]。理想的缓控释肥料是由一种天然或半天然的高分子包衣而成, 这种材料可以将肥料的施放速度减缓, 以至于在土壤中施用一次就能满足作物整个生育期的要求[16]。因此, 开发天然及半合成高分子材料成为防治土壤污染的主要研究方向。

目前李涛等[38][39]已发现, 使用天然高分子木质素和海藻酸钠作为原料, 能减轻土壤环境的污染, 改善肥料的降解性能, 30 天时降解率达到 55.6%。硫包膜残留会导致土壤酸化, Hou 等[40]分析了直播稻和移栽种植下缓控释肥对水稻产量的影响, 发现两种种植模式下树脂掺混控释肥的增产效果均优于硫包衣肥料。Firmanda 等[41]使用纤维素生物聚合物作为复合基质的缓控释-释放肥料是一种可持续的前景, 它们丰富、可再生和可生物降解。此外, 纤维素含有易于改性的表面化学性质, 在肥料释放中发挥作用, 高纤维素亲水性还有助于保持土壤水分, 利于植物生长。Marta 和 Patryk [42]发现生物炭具有较高的比表面积和孔隙度以及各种官能团, 可作为创造养分缓慢释放的肥料(缓释肥和控释肥)的优良基质。胡钰[43]发现施用沸石包膜肥料可以显著提高大豆的产量。庞敏晖等[44]研究将纳米材料用于改性缓控释肥。油涂层膜是天然高分子材料之一, Yuan 等[45]将油包肥作为缓释肥料, 不仅可以减缓养分流失, 而且在控制养分释放方面具有突出的优势。

4.2.5. 建立适用于不同缓控释肥的评价体系

由于缓控释肥使用的包膜材料各不相同、肥料类型也各不相同以及释放的时间也各不相同, 因此应

针对不同类型的缓控释肥建立不同的评价体系, 而不是所有的缓控释肥都使用相同的评价体系。

5. 总结与展望

缓控释肥一次施用, 对于作物来说缓控释肥能满足作物不同生长期对于养分的需求, 对于种植户来说缓控释肥便于施用, 减少了劳动力, 增加了经济价值, 是一种值得开发利用的优质肥料。现有的研究中发现, 缓控释肥施用于不同的土壤, 对于土壤肥力、土壤 N; P; K、土壤有机质、土壤 pH 以及土壤保水能力有一定的作用。未来针对土壤改良, 缓控释肥也是热点之一。

针对缓控释肥的研究是很有必要的, 为助力农业发展, 推进未来缓控释肥的研究进程, 科研人员应加强以下三个方面的研究。

5.1. 开发专用缓控释肥

目前美国、欧洲、日本等发达国家对缓控释肥施用量较大, 但大都只限于高经济作物和草坪等种植中, 在非农业领域, 缓控释肥主要用于草坪、植物景观、高端园林、高尔夫球场等, 在农业领域, 缓控释肥主要用于价值较高的水果、蔬菜等高经济作物[46]。不同作物对养分的吸收存在差异, 有必要开发专用肥, 以满足特定植物的需求, 实现养分释放速率与植物吸收速率的匹配。开发针对不同作物的专用缓控释肥, 可作为接下来缓控释肥的研发方向, 使得各种植物能更高效地利用养分。

5.2. 开发新型包膜材料

包膜材料的选择对于缓控释肥的释放起决定性的作用, 目前缓控释肥的包膜材料多为高分子合成材料, 不仅造价高, 而且易对土壤造成污染。开发新型包膜材料能保护土壤环境以及节约经济成本, 同时, 开发新型的包膜材料对于进一步深入理解施用缓控释肥的调控机理具有重要意义。

5.3. 缓控释肥品种多元化

目前, 缓控释肥的研究主要集中在氮肥控释肥上, 未来针对缓控释肥应开发应用多种核心元素肥料, 使缓控释肥料的品种更为多元化。同时, 可在缓控释肥中加入除虫、除草等附加功能。

参考文献

- [1] 李艳丽. 农户向绿色农产品生产转型的研究——基于吉林省农户样本的分析[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林农业大学, 2019.
- [2] 李翠霞, 许佳彬. 中国农业绿色转型的理论阐释与实践路径[J]. 中州学刊, 2022(9): 40-48.
- [3] 郭进. 保护性耕作技术对化肥利用效率的影响[D]: [硕士学位论文]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2022.
- [4] 樊小林, 刘芳, 廖照源, 等. 我国控释肥料研究的现状和展望[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(2): 463-473.
- [5] 刘娟, 赵晓进. 中国缓、控释化肥的研发进展[J]. 北方园艺, 2011(21): 189-190.
- [6] 宋亚栋. 不同缓控释肥对小麦产量品质与养分利用效率的影响[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京农业大学, 2017.
- [7] 陈冠霖, 赵其国, Ofori, D.P., 等. 包膜型缓/控释肥料研究现状及其在功能农业中的应用展望[J]. 肥料与健康, 2021, 48(3): 1-6.
- [8] 周脉昆. 2020-2021年冬小麦新型肥料肥效试验研究[J]. 农业开发与装备, 2022(2): 140-142.
- [9] 翟彩娇, 崔士友, 张蛟, 等. 缓/控释肥发展现状及在农业生产中的应用前景[J]. 农学学报, 2022, 12(1): 22-27.
- [10] 高捷, 李思宇, 成大宇, 等. 缓控释肥对水稻产量与品质影响的研究进展[J]. 作物杂志, 2022(3): 20-26.
- [11] Fu, J., et al. (2018) Classification Research and Types of Slow Controlled Release Fertilizers (SRFs) Used—A Review. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 49, 2219-2230. <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1499757>
- [12] 程金秋. 缓控释肥类型及运筹对早熟晚粳水稻产量及稻米品质的影响[D]: [硕士学位论文]. 扬州: 扬州大学,

- 2018.
- [13] Silva, E., *et al.* (2021) A Controlled-Release Fertilizer Improved Soil Fertility but Not Olive Tree Performance. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **120**, 1-15. (Prepublish) <https://doi.org/10.1007/s10705-021-10134-9>
- [14] 刘楚桐, 陈松岭, 金鑫鑫, 等. 控释氮肥减量配施对土壤氮素调控及夏玉米产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021(2): 108-115.
- [15] 刘仲阳, 吴小宾, 郑福丽, 等. 我国主要粮食作物一次性施肥的长期效应研究进展[J]. 土壤, 2022, 54(4): 667-675.
- [16] 张阳阳. 缓控释肥与秸秆配施对土壤酶活性、NH₃挥发和温室气体排放的影响[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 河南农业大学, 2022.
- [17] 王靖荃, 李云, 王家辉, 等. 有机-无机肥耦合“增碳控盐”模式对中轻度盐碱地的改良效应[J]. 山东农业科学, 2020, 52(5): 70-76.
- [18] 韩飞, 何伟, 张行, 等. 不同施肥模式对盐碱地土壤改良及谷子生长的影响[J]. 土壤通报, 2020, 51(4): 860-865.
- [19] 金树权, 陈若霞, 汪峰, 等. 不同氮肥运筹模式对稻田田面水氮浓度和水稻产量的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(1): 242-248.
- [20] 孙瀚. 控释氯化钾的研制及其对盐渍化土壤化学性质和棉花生长的影响[D]: [硕士学位论文]. 泰安: 山东农业大学, 2021.
- [21] 胡雪荻, 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.
- [22] Mi, W., *et al.* (2019) Medium-Term Effects of Different Types of N Fertilizer on Yield, Apparent N Recovery and Soil Chemical Properties of a Double Rice Cropping System. *Field Crops Research*, **234**, 87-94. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.02.012>
- [23] Sim, D.H.H., *et al.* (2021) Encapsulated Biochar-Based Sustained Release Fertilizer for Precision Agriculture: A Review. *Journal of Cleaner Production*, **303**, Article ID: 127018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127018>
- [24] 杨修一. 控释尿素和氯化钾对盐碱地棉花生长发育及土壤肥力的影响[D]: [博士学位论文]. 泰安: 山东农业大学, 2018.
- [25] Zheng, W., *et al.* (2017) Improving Crop Yields, Nitrogen Use Efficiencies and Profits by Using Mixtures of Coated Controlled-Released and Uncoated Urea in a Wheat-Maize System. *Field Crops Research*, **205**, 106-115. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.02.009>
- [26] 范妮. 我国缓/控释肥的制备及应用研究进展[J]. 陕西农业科学, 2019, 65(4): 92-94.
- [27] Qi, T., *et al.* (2020) Zein Coated Porous Carboxymethyl Starch Fertilizer for Iron Promoting and Phosphate Sustainable Release. *Journal of Cleaner Production*, **258**, Article ID: 120778. (Prepublish) <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120778>
- [28] 连煜阳, 刘静, 金书秦. 农业面源污染治理探析——从新型肥料生产环节视角[J]. 中国环境管理, 2019, 11(2): 18-22.
- [29] 王小嵩. 面向缓/控释肥料应用领域的 PLA 基多孔膜的制备及表征[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
- [30] 何阳, 王秀荣, 陈新平. 缓/控释肥料研究进展及其对农田氮素流失的防控效果[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(21): 7-10+14.
- [31] 黄允, 徐天成, 高恒宽, 等. 缓控释肥应用研究进展[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(S1): 32-36.
- [32] 马海生, 宫锡余, 肖艳, 等. 聚氨酯缓控释肥生产工艺开发[J]. 磷肥与复肥, 2020, 35(5): 15-16+19.
- [33] Chen, J., *et al.* (2018) Environmentally Friendly Fertilizers: A Review of Materials Used and Their Effects on the Environment. *Science of the Total Environment*, **613-614**, 829-839. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.186>
- [34] 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.
- [35] 赵萧汉, 郭好, 陈前林, 等. 高分子包膜缓控释肥养分释放机制及模型研究现状[J]. 高分子材料科学与工程, 2020, 36(10): 170-176.
- [36] 陈小奔. 基于农户施肥行为的肇州县农业面源污染防控研究[D]: [硕士学位论文]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2019.
- [37] 王宇婕, 杨丽平, 应锦岳, 等. 竹材废弃物炭基缓释肥综述[J]. 科学技术创新, 2019(24): 151-152.
- [38] 李涛. 木质素基多功能缓控释肥料的制备及其性能研究[D]: [博士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [39] Chen, J., *et al.* (2020) Research Progress in Lignin-Based Slow/Controlled Release Fertilizer. *ChemSusChem*, **13**,

- 4356-4366. <https://doi.org/10.1002/cssc.202000455>
- [40] Hou, P., *et al.* (2019) Yield and N Utilization of Transplanted and Direct-Seeded Rice with Controlled or Slow-Release Fertilizer. *Agronomy Journal*, **111**, 1208-1217. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.03.0192>
- [41] Afrinal, F., *et al.* (2022) Controlled/Slow-Release Fertilizer Based on Cellulose Composite and Its Impact on Sustainable Agriculture: Review. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, **16**, 1909-1930. <https://doi.org/10.1002/bbb.2433>
- [42] Marta, M. and Patryk, O. (2022) Biochar and Engineered Biochar as Slow- and Controlled-Release Fertilizers. *Journal of Cleaner Production*, **339**, Article ID: 130685. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130685>
- [43] 胡钰. 基于沸石包膜肥料的大豆减肥稳产增效研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2021.
- [44] 庞敏晖, 李丽霞, 董淑祺, 等. 纳米材料在缓控释肥中的应用研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(9): 1708-1719.
- [45] Yuan, S., *et al.* (2022) Characteristics and Preparation of Oil-Coated Fertilizers: A Review. *Journal of Controlled Release*, **345**, 675-684. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2022.03.040>
- [46] 范东升, 赵彦梁, 燕子红. 缓控释肥有机包膜材料的研究进展与趋势[J]. 喀什大学学报, 2020, 41(6): 37-41.