

降解包膜缓释化肥的制备及性能研究

王梁彬¹, 李结瑶², 李文光², 胡炜杰¹, 刘义存², 肖乃玉^{2,3}, 罗文翰^{2,3}

(1. 茂名绿色化工研究院, 广东 茂名, 525011; 2. 仲恺农业工程学院, 广州 510225;

3. 广东省岭南特色食品科学与技术重点实验室, 广州 510225)

摘要: **目的** 促进化肥减量增效及发展绿色农业。**方法** 采用全生物降解材料聚碳酸亚丙酯(PPC)、聚己二酸/对苯二甲酸丁二醇酯(PBAT)作为包膜材料,以SBA-15分子筛负载尿素颗粒为芯材,制备缓释肥料。通过对复合膜的力学性能、润湿性、透气透湿性、吸水性进行测定,以及采用水溶出法和土壤溶出法评价尿素的氮累积释放率,对包膜肥料进行综合评定。**结果** 实验表明,复合包膜具有良好的力学性能、保水性、透气性、耐雨冲刷等,可赋予包膜极佳的耐冲击和储水性能。另外,第28天该包膜缓释化肥在水溶出实验和土壤溶出实验得出,尿素的氮含量累积释放率分别为61.5%和55.5%,满足≤80%的国家标准。**结论** 所制备的可降解塑料包膜缓释化肥具有缓慢释放、成本低廉、环境友好等特点,在缓释肥料的工业化应用方面具有巨大潜力。

关键词: 缓释肥; 可降解; 包膜; 分子筛; 尿素

中图分类号: TQ449.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)11-0151-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.11.017

Preparation and Properties of Degradable Embedding Sustained Release Fertilizer

WANG Liang-bin¹, LI Jie-yao², LI Wen-guang², HU Wei-jie¹, LIU Yi-cun²,
XIAO Nai-yu^{2,3}, LUO Wen-han^{2,3}

(1. Maoming Green Chemical Industry Research Institute, Maoming 525011, China; 2. Zhongkai University of Agricultural and Engineering, Guangzhou 510225, China; 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Lingnan Specialty Food Science and Technology, Guangzhou 510225, China)

ABSTRACT: The work aims to reduce the amount and increase the efficiency of chemical fertilizers and develop green agriculture. A novel kind of sustained release fertilizer was developed with biodegradable materials polypropylene carbonate (PPC) and poly (butyleneadipate-co-terephthalate) (PBAT) as coating materials and with urea particles loaded with SBA-15 molecular sieve as the core material. The mechanical properties, wettability, moisture and air permeability, and water absorption of the composite film were determined and the cumulative nitrogen release rate of urea was evaluated by water dissolution and soil dissolution to evaluate the embedding fertilizer comprehensively. The experimental results showed that the composite film had good mechanical properties, water retention, air permeability and rain erosion resistance, which could make the film have excellent impact resistance and water storage properties. Moreover, the cumulative nitrogen release rate on day 28 in the water dissolution experiment and the soil dissolution experiment was 61.5% and

收稿日期: 2022-11-02

基金项目: 民生科技项目(202002020080); 2021年广东省教育厅服务乡村振兴重点领域专项(21031D1); 2021年茂名市大专项(2021S0007)

作者简介: 王梁彬(1994—),男,硕士生,主攻高分子材料。

通信作者: 罗文翰(1990—),男,博士,副教授,主要研究方向为功能高分子材料。

55.5%, respectively, which satisfied with the national standard of $\leq 80\%$. In conclusion, the prepared degradable embedding sustained release fertilizer has excellent controlled release performance, low cost and environmental-friendly features. It has great potential in industrial application of sustained release fertilizers.

KEY WORDS: sustained release fertilizer; biodegradable; embedding; molecular sieve; urea

肥料在促进农作物发展和农业生产方面发挥着重要作用。近年来农用化肥用量逐年递增,但利用率却依然偏低,造成了严重的资源浪费和环境污染^[1]。据农业农村部发布消息,2020 年我国三大粮食作物化肥利用率达 40.2%,与 2015 年相比提高了 5%,但与发达国家 50%~60%的利用率相比还有较大差距。氮(N)肥对全球粮食生产的贡献达到 30%~50%,而我国氮肥流失尤为严重,利用率只有 30%~35%,发展缓释肥料是提高产量,促进农业高质量发展的重要途径^[2]。缓释肥料指通过化学作用或物理复合的方式使养分在特定的模式下进行缓慢释放,实现满足植物生长周期中的养分需求^[3-4]。其中,包膜型肥料属于典型的缓释肥料,可以调控养分的释放速率,有效延长肥料的使用寿命,满足植物的周期生长^[5-6]。近年来,在提高包膜控释肥料生产技术、农学效应和应用技术等方面取得了重大的研究进展。Li 等^[7]通过原位反应层喷涂技术在尿素颗粒上涂覆聚氨酯/SBA-15 复合材料制备缓释化肥。结果表明,在水溶实验中尿素的氮释放持续时间长达 80 d,具有较好的缓释特性。Xia 等^[8]通过熔融涂覆改性聚乳酸/聚己内酯共混物制备缓释尿素包膜材料,使用土壤浸出法 28 d 后尿素累积释放速率为 80.63%。Tao 等^[9]采用熔融法制备了改性聚乳酸/尿素缓释肥,土壤浸出实验表明,28 d 后尿素累积释放率为 81.08%。然而,这些方法仍存在一定的缺陷,比如包膜材料难以降解,污染环境,缓释效果欠佳等。

利用生物降解塑料作为薄膜基体材料可以有效解决废弃物污染问题,具有显著的环境效益。聚碳酸亚丙酯(PPC)是一种由二氧化碳和环氧丙烷交替共聚而成的脂肪族共聚酯,具备良好的生物相容性、阻隔性能,近年来在地膜应用中备受关[10]。聚己二酸/对苯二甲酸丁二醇酯(PBAT)是脂肪族和芳香族的共聚物,兼具脂肪族聚酯优异的降解性能和芳香族聚酯良好的力学性能^[11]。以 PBAT 与 PPC 形成共混材料可以有效改善 PPC 的成膜性能,增强 PPC 的力学性能。为了更好地稳定化肥、延长作用效果,常用多孔材料进行负载。SBA-15 型分子筛是一种以非离子型嵌段共聚物表面活性剂为模板的新型介孔二氧化硅材料。与常规的二氧化硅相比,SBA-15 是一种具备有序的孔隙结构、比面积大、耐磨性好的吸附型材料^[12-13]。

尿素是氮肥品种的主导肥料,在固体氮肥中含氮量(46%)最高^[14],因此,本文以尿素颗粒为核芯,

SBA-15 为尿素载体,PPC/PBAT 为包膜材料,添加润滑剂硬脂酸,绿色增塑剂环氧大豆油,制备缓释包膜材料。通过调节 SBA-15 分子筛含量,研究其力学性能、润湿性能、透氧透湿性能、吸水性能,优选综合性能较好的薄膜材料制备缓释化肥。通过水溶出法和土壤溶出法探究包膜缓释肥的氮释放规律和特性,分析包膜缓释肥的缓释效果。

1 实验

1.1 材料与试剂

主要材料:聚碳酸亚丙酯(PPC),牌号 PPC1001,美国陶氏化学公司;聚己二酸/对苯二甲酸丁二醇酯(PBAT),T-2823,新疆蓝山屯河;SBA-15,XFF01,南京先丰纳米材料科技有限公司;硬脂酸,AR,登峰精细化工有限公司;尿素,总氮含量 $\geq 46.4\%$,山东乔邦化工有限公司;环氧大豆油、二氯甲烷,AR,上海麦克林生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

主要仪器和设备:GBH-1 电子万能材料试验机、W301 水汽透过率测定仪、N500 气体透过率测定仪。广州标际包装设备有限公司;Attension Theta Flow 接触角分析仪,瑞典百欧科技有限公司;S-54 紫外可见分光光度计,上海凌光技术有限公司。

1.3 PPC/PBAT/SBA-15 分子筛复合膜制备

1)取一定量尿素颗粒于真空干燥箱中干燥 1 h,干燥后称取 2 g 加入至适量超纯水中,再分别加入 0.00、0.05、0.10、0.15、0.2 g 的 SBA-15 分子筛,搅拌均匀后静置 20 min,使 SBA-15 分子筛充分负载尿素。

2)量取原材料 PPC 5 g、PBAT 2.5 g、硬脂酸 0.5 g,环氧大豆油 0.5 g,以及充分负载尿素的 SBA-15 分子筛溶液,加入 100 mL 二氯甲烷中,用高速搅拌机搅拌均匀后,形成 PPC/PBAT/SBA-15 分子筛混合液。将混合液倾倒在玻璃板上,立即用两端缠有同样厚度胶带的玻璃棒自上而下匀速刮膜液,待二氯甲烷自然挥发后揭膜。

1.4 测试与表征

1.4.1 力学性能测试

采用 GBH 电子拉力试验机依照 GB/T

1040.3—2006 实验方法, 将复合膜裁切成 150 mm×10 mm 的膜试样。设定拉伸机速度为 50 mm/min, 对薄膜进行拉伸性能测试, 平行测 5 次, 最终结果取数据平均值。

1.4.2 接触角分析

控制超纯水滴落在样品表面, 使用接触角分析仪测定复合膜的接触角, 通过分析接触角确定极性大小及表面亲水能力。实验测定 3 次取平均值。

1.4.3 透气透湿性能测试

按照 GB/T 1038—2000《塑料薄膜和薄片气体透过性试验方法 压差法》测试方法, 使用 N500 透气率分析仪测量复合膜的透气度, 测试 3 个平行样, 结果取平均值。

按照 GB/T 1037—2021《塑料薄膜与薄片水蒸气透过性能测定 杯式增重与减重法》, 通过透湿杯法使用 W301 水汽透过率测定仪测定复合膜水蒸气透过系数, 测定 3 个样, 取平均值。

1.4.4 吸水率分析

将 1 g 复合膜置于 25 °C 的 300 mL 去离子水中, 以预定的时间间隔 (1、2、3、4、5 d) 取出膜, 并擦干表面水分, 直至质量不变 (m_t), 称量后将包膜放置于 40 °C 烘箱中干燥至质量不变 (m_0)。包膜吸水率计算如下:

$$\text{吸水率} = \frac{m_t - m_0}{m_0} \times 100\%$$

式中: m_t 为吸水后某一段时间的质量; m_0 为初始质量。每个样品设置 3 次, 取平均值。

1.4.5 释放性能测试

1) 养分释放水溶出率测试。准确量取 2 g 包膜尿素缓释化肥装入尼龙袋, 将尼龙袋放进装有 200 mL 蒸馏水的具塞锥形瓶, 放置于 25 °C 恒温培养箱中, 分别在第 1、3、5、7、10、14、28 天取出锥形瓶中全部浸泡液, 采用对二甲氨基苯甲醛分光光度计法测定尿素溶液中的氮含量。根据绘制标准曲线求出氮素的养分质量, 计算缓释肥料初期溶出率和微分溶出率。每次取出全部浸泡液后需重新加入 200 mL 蒸馏水至锥形瓶中, 继续浸泡以备测定。初期溶出率和微分溶出率计算如下:

$$\text{初期溶出率} = \frac{24 \text{ h 溶解养分量}}{\text{肥料中养分总量}} \times 100\%$$

$$\text{微分溶出率} = \left(\frac{7 \text{ d 养分释放量}}{\text{肥料中养分总量}} \times 100\% - \text{初期溶出率} \right) \times$$

$$\frac{1}{\text{释放天数} - 1}$$

2) 养分释放土壤溶出率测试。在无纺布袋中放入 2 g 包膜尿素缓释化肥, 将无纺布袋放置于深度约为 3~7 cm 的土壤中 (相对湿度为 25%), 然后在第

1、7、14、28 天分别取出布袋。取样后用水缓慢冲洗黏附在布袋的土壤, 冲洗干净后置于 60 °C 烘箱中干燥 24 h 再称量, 通过称量前后肥料的质量变化计算释放率 (释放前质量/释放后质量)。

2 结果与分析

2.1 力学性能分析

薄膜的力学性能越好, 抵抗压力的能力就越强。随着 SBA-15 添加量的增加, PPC/PBAT 复合膜的断裂伸长率与抗拉强度有所下降, 如图 1 所示。这是由于 SBA-15 添加量的增多, 导致颗粒部分聚集, 破坏了薄膜内部的均匀性, 致使膜的弹性下降。当 SBA-15 分子筛的添加量为 0.2 g, 即质量分数为 1.9% 时, 复合膜的断裂伸长率为 296%, 柔韧性较差, 能够保证包膜在吸水膨胀期间能够抵抗压力不破裂^[15]。

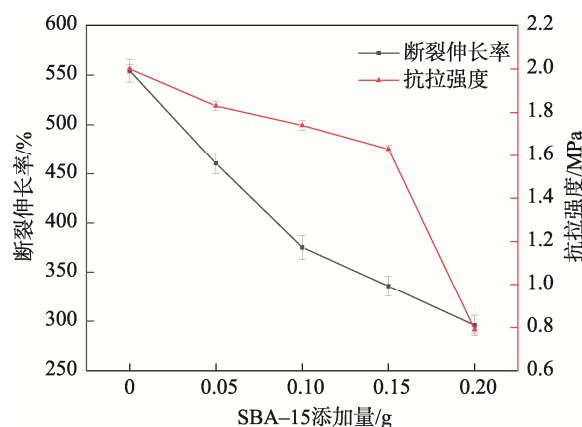


图 1 不同 SBA-15 添加量的复合膜的力学性能

Fig.1 Mechanical properties of composite films with different SBA-15 content

2.2 接触角分析

润湿性通常指液体与固体表面接触时产生的相互作用能力, 通常接触角越大, 对液体的渗透作用就越小, 越不容易被液体浸湿。加入 SBA-15 分子筛后, 复合膜的接触角变小, 润湿性增加。这是由于分子筛中的硅羟基是一种强吸附性的极性基团, 这种极性基团的引入能使复合膜变得亲水。但随着 SBA-15 分子筛含量的增加, 复合膜的疏水性提高, 如图 2 所示。这是因为 SBA-15 分子筛含量越多, 复合膜微观结构改变越明显, 分散相均匀性下降, 接触角变大。当 SBA-15 分子筛的添加量为 0.2 g (质量分数为 1.9%) 时, 复合膜的接触角为 88.8°, 其疏水性能作为机械屏障, 增加了水分子的渗透阻力, 防止复合膜因水溶引起的基材破损, 对延长缓释周期具有积极意义^[16-17]。

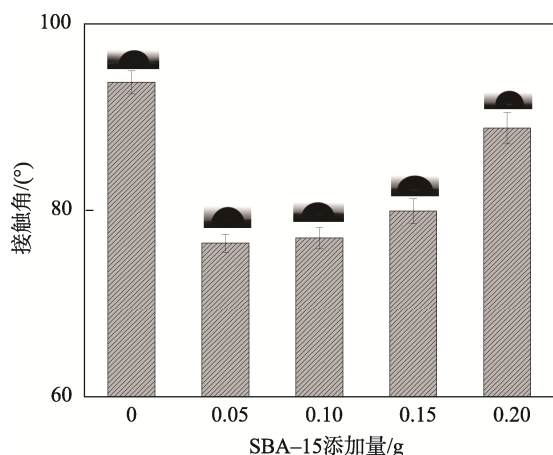


图2 不同 SBA-15 添加量的复合膜接触角的变化

Fig.2 Change of contact angle of composite films with different SBA-15 content

2.3 透气透湿性能分析

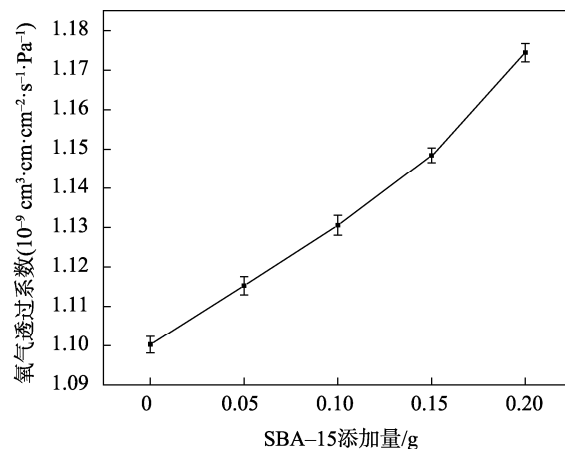
透气性是农作物吸收养分必不可少的条件。若复合膜致密性过强会影响土壤的透气,影响土壤中微生物的生命活动,造成肥力水平下降。由于 SBA-15 分子筛的介孔结构能够提供氧气进出包膜的通道,因此 SBA-15 分子筛的添加可以改善 PPC/PBAT 复合膜的透气性能,有利于进行气体交换,避免土壤酸度过高,致病霉菌过度繁殖使农作物感染病虫害^[18]。如图 3a 所示,随着 SBA-15 分子筛含量的增加,复合膜透气度值变高。当 SBA-15 分子筛的添加量为 0.2 g,即质量分数为 1.9%时,复合膜的氧气透过系数为 $1.2 \times 10^{-9} \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$,具有良好的透气性。

薄膜的水蒸气透过系数与包膜型缓释化肥的保水能力密切相关,可通过调节薄膜的水蒸气透过系数,降低蒸腾作用,提高抗旱能力。随着 SBA-15 分子筛添加量的增加,复合膜水蒸气透过系数逐渐增大,但总体差异较小。如图 3b 所示,当 SBA-15 分子筛的质量分数为 1.9%时,水蒸气透过系数为 $0.042 \times 10^{-13} \text{ g} \cdot \text{cm}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$,具有一定的保水能力。可以有效地阻止液态化肥在高温下挥发,并在一定程度上确保包膜在长期受到水溶液交换时能够通过并向包膜外侧透过水蒸气,使包膜不会胀破。

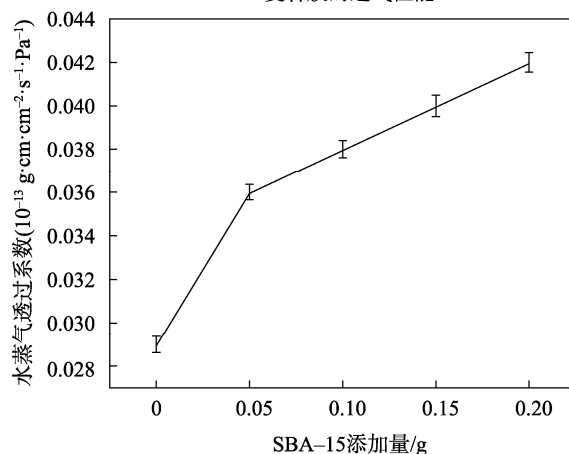
2.4 吸水性分析

包膜具有吸水性,能够从雨水或灌溉中吸收更多水分,有利于农作物生长^[19]。如图 4 所示,复合膜的吸水率随时间的增加而增大。开始阶段薄膜吸水率较快,达到饱和后吸水率不随时间的增加而改变,其中未添加 SBA-15 分子筛的 PPC/PBAT 复合膜吸水率最低。当 SBA-15 分子筛的添加量为 0.2 g,即质量分数为 1.9%时,复合膜吸水率可以达到 6.9%,几乎是 PPC/PBAT 复合膜的 2 倍。这是由于 SBA-15 分子筛具有能够储存水分的介孔结构以及其优异的吸附性能,可将水吸入孔

道,使分子更容易渗透到膜内,提高了土壤的保水性,增强土壤的持水性,尤其适合于干旱和半干旱地区。



a 复合膜的透气性能



b 复合膜的透湿性能

图3 不同 SBA-15 添加量的复合膜的阻隔性能

Fig.3 Barrier properties of composite films with different SBA-15 content

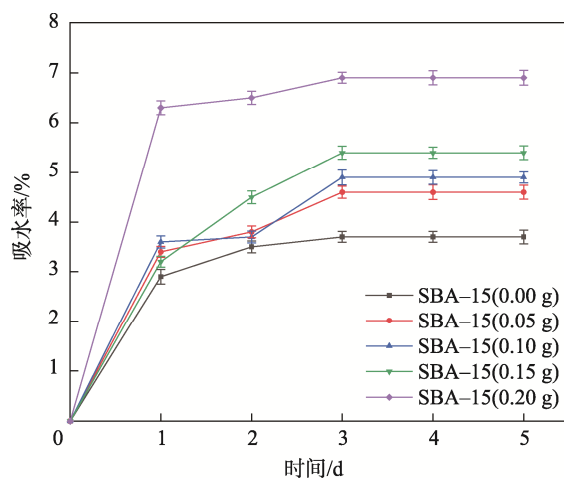


图4 不同 SBA-15 添加量的复合膜吸水率随时间的变化曲线

Fig.4 Curves of water absorption of composite films with different SBA-15 content with time

2.5 养分释放性能分析

综合以上性能测试分析结果,选取 SBA-15 分子筛的添加量为 0.2 g (质量分数为 1.9%) 制备包膜尿素缓释化肥,用于测定水溶出法和土壤溶出法 N 的累积释放率。如图 5 所示,在水中溶出初始阶段,缓释包膜肥料吸水膨胀,第 1 天 N 累积释放率仅为 2.41%,释放量较少;随着水分通过分子筛中的微孔迁移量越多,尿素会逐渐溶解并产生内部渗透压,从而使柔性薄膜膨胀,导致介孔扩大,然后将养分释放到土壤溶液中。包膜缓释化肥尿素的初期溶出率为 2.41%,微分溶出率为 2.60%,在第 28 天时 N 累积释放率达到了 61.5%。初期溶出率满足 $\leq 15\%$ 的国家标准,第 28 天的累积释放率满足 $\leq 80\%$ 的国家标准,能够有效延缓和控制土壤中肥料养分的释放,提高肥料利用率^[20]。

包膜尿素缓释化肥在土壤溶出的第 1 天 N 累积释放率为 1.18%,第 7 天释放率为 6.73%。相较于水溶出法,土壤溶出法的缓释肥 N 累积释放率都较低,这是因为土壤周围水分有限,并不能使薄膜保持吸水饱和的状态。然而,后期释放率有显著提升的原因可能是包膜受到土壤中微生物的干扰,致使化肥的流出速率变快。总体而言,在土壤溶出法中,第 28 天的 N 累积释放率仅为 55.5%,满足第 28 天的累积释放率 $\leq 80\%$ 的国家标准,能实现作物不同生长阶段养分需求的供给,具有长期的缓释性能。

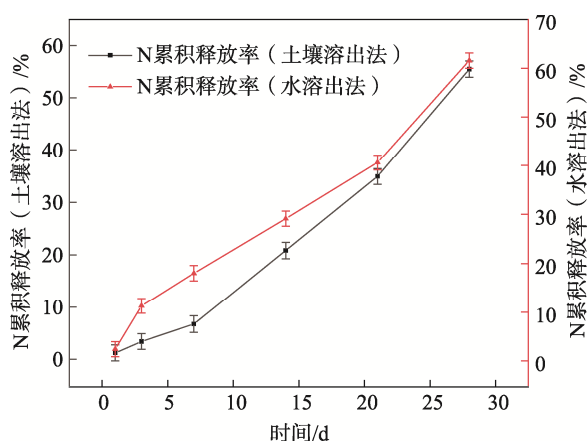


图 5 包膜尿素缓释化肥在土壤/水溶出的 N 累积释放率
Fig.5 Cumulative N release rate of coated urea sustained release fertilizer in soil/water dissolution

3 结语

目前,我国农业发展正处于转型升级阶段,化肥行业正迎来产品结构改革。在“十四五”规划中明确提出要推进发展绿色农业,促进农业高质高效。其中,发展缓控释肥是实现化肥减量增效的重要方向。本文

以 PPC/PBAT 为主要材料,加入不同含量的 SBA-15 分子筛制备降解塑料包膜缓释化肥,进行各种性能测试分析。当 SBA-15 分子筛的添加量为 0.2 g,即质量分数为 1.9%时,断裂伸长率为 296%,复合膜柔韧性较佳,可有效抵抗土壤吸水膨胀产生的渗透压,防止薄膜胀破。同时,复合膜具有良好的保水性、透气性及耐雨水冲刷性能,可有效提高作物的抗旱能力。另外,该降解包膜缓释肥在水溶出法尿素养分的初期溶出率为 2.41%,微分溶出率为 2.60%,在第 28 天时 N 累积释放率为 61.5%;在土壤溶出法中,第 28 天尿素 N 累积释放率仅为 55.5%,因此满足初期溶出率 $\leq 15\%$ 的国家标准、第 28 天的累积释放率 $\leq 80\%$ 的国家标准。该降解塑料包膜肥料能有效延缓和控制土壤中肥料养分的释放,满足养分释放与作物需求同步,提高了肥料利用率,减少了环境污染,具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 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.
HUANG Yun, XU Tian-cheng, GAO Heng-kuan, et al. Research Progress in Application of Slow and Controlled Release Fertilizer[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2020, 59(S1): 32-36.
- [2] HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, ZHOU Yu-ling, et al. Yield and N Utilization of Transplanted and Direct-Seeded Rice with Controlled or Slow-Release Fertilizer[J]. Agronomy Journal, 2019, 111(3): 1208-1217.
- [3] RASHID M, HUSSAIN Q, KHAN K, et al. Carbon-Based Slow-Release Fertilizers for Efficient Nutrient Management: Synthesis, Applications, and Future Research Needs[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2021, 21(2): 1144-1169.
- [4] LAWRENCIA D, WONG S K, LOW D Y S, et al. Controlled Release Fertilizers: A Review on Coating Materials and Mechanism of Release[J]. Plants, 2021, 10(2): 238.
- [5] VEJAN P, KHADIRAN T, ABDULLAH R, et al. Controlled Release Fertilizer: A Review on Developments, Applications and Potential in Agriculture[J]. Journal of Controlled Release, 2021, 339: 321-334.
- [6] 毛美琴,龙秉文,邓伏礼,等.磷酸二铵包膜缓释肥料的性能研究[J].无机盐工业,2020,52(11):47-51.
MAO Mei-qin, LONG Bing-wen, DENG Fu-li, et al. Study on Properties of DAP Coated Slow-Release Fertilizers[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2020, 52(11): 47-51.

- [7] LI Li-xia, SUN Yu-meng, CAO Bing, et al. Preparation and Performance of Polyurethane/Mesoporous Silica Composites for Coated Urea[J]. *Materials & Design*, 2016, 99: 21-25.
- [8] XIA Xiao-song, ZHANG Feng, YANG Le, et al. Low-Temperature Flowable Poly (lactic acid)/Polycaprolactone Blends for the Solvent-Free Preparation of Slow-Released Urea Fertilizer in a Thermal Shear Field[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2020, 59(47): 20601-20611.
- [9] TAO Yao, XIA Xiao-song, LUO Zhu, et al. Preparation of Modified Polylactic Acid Melt Coated Urea Material and Its Green Coating Technique[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2022, 173: 107214.
- [10] WANG An, CHANG Qing-tao, CHEN Chun-sheng, et al. Degradation Characteristics of Biodegradable Film and Its Effects on Soil Nutrients in Tillage Layer, Growth and Development of Taro and Yield Formation[J]. *AMB Express*, 2022, 12(1): 1-10.
- [11] WANG Xiang-yu, PAN Hong-wei, JIA Shi-ling, et al. Mechanical Properties, Thermal Behavior, Miscibility and Light Stability of the Poly (Butylene Adipate-Co-Terephthalate)/Poly (Propylene Carbonate)/Polylactide Mulch Films[J]. *Polymer Bulletin*, 2023, 80(3): 2485-2501.
- [12] 韩书宇, 陈颖, 丛书丽. 介孔 SBA-15 分子筛的改性研究进展[J]. *辽宁化工*, 2017, 46(11): 1120-1122.
- HAN Shu-yu, CHEN Ying, CONG Shu-li. Research Progress in Modification of Mesoporous SBA-15 Molecular Sieve[J]. *Liaoning Chemical Industry*, 2017, 46(11): 1120-1122.
- [13] KORZENIOWSKA A, STRZEMPEK W, MAKOWSKI W, et al. Incorporation and Release of a Model Drug, Ciprofloxacin, from Non-Modified SBA-15 Molecular Sieves with Different Pore Sizes[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2020, 294: 109903.
- [14] ZHANG Ying-ying, WANG Wei-jin, YAO Huai-ying. Urea-Based Nitrogen Fertilization in Agriculture: A Key Source of N₂O Emissions and Recent Development in Mitigating Strategies[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2023, 69(5): 663-678.
- [15] ZHAO Xiao-han, QI Xin, CHEN Qian-lin, et al. Sulfur-modified Coated Slow-Release Fertilizer Based on Castor Oil: Synthesis and A Controlled-Release Model[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2020, 8(49): 18044-18053.
- [16] CONG Jia, ZHANG Xiao, LI Yu-feng, et al. Synthesis and Characterization of Bio-Based PA/EP Interpenetrating Network Polymer as Coating Material for Controlled Release Fertilizers[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2018, 135(13): 46052.
- [17] WANG Xiao-song, ZHANG Xu, HAN Xiao-zhao, et al. Performance Adjustable Porous Polylactic Acid-Based Membranes for Controlled Release Fertilizers[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2021, 138(2): 49649.
- [18] XIAO Yuan-song, PENG Yan, PENG Fu-tian, et al. Effects of Concentrated Application of Soil Conditioners on Soil-Air Permeability and Absorption of Nitrogen by Young Peach Trees[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2018, 64(3): 423-432.
- [19] LI Hui, WANG Ning, ZHANG Li, et al. Engineering and Slow-Release Properties of Lignin-Based Double-Layer Coated Fertilizer[J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2023, 34: 2029-2043.
- [20] QIAO Dong-ling, LIU Hong-sheng, YU Long, et al. Preparation and Characterization of Slow-Release Fertilizer Encapsulated by Starch-Based Superabsorbent Polymer[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2016, 147: 146-154.

责任编辑：曾钰婵