

功能强化型植物基肥料包裹剂的制备与性能研究

张 灿^{1,2}, 杜令攀^{1,2}, 木 强³, 伍 华³, 张 慧⁴, 彭丽群^{1,2}, 刘润哲^{1,2}

(1. 云南云天化股份有限公司研究院, 云南 昆明 650228; 2. 国家磷资源开发利用工程技术研究中心, 云南 昆明 650600; 3. 云南三环新盛化肥有限公司, 云南 昆明 650000; 4. 云南磷化集团有限公司, 云南 昆明 650600)

[摘要] 为开发绿色可降解的多功能肥料包裹剂, 本研究以植物沥青、营养液、石蜡和磷酸酯制备了基础型环保包裹剂 (ZYSP), 并在此基础上分别添加红色染料、黑色染料及增加石蜡用量, 以探究其染色强化与防吸潮功能。通过与传统矿物沥青基包裹剂 (KKSF) 对比实验表明, 新型包裹剂包覆磷酸二铵后, 具有延长养分释放时间的作用。增加石蜡用量可有效提升包裹剂黏度, 从而增强防吸潮性能; 添加染料可调节肥料颗粒的明度与色度, 其中黑色染料效果更佳, 但红色染料因含亲水基团可能劣化防吸潮性。尽管新型包裹剂在防结块等综合性能上暂未完全超越传统产品, 但其显示出环境友好、可降解的优势, 并通过组分优化展现了性能提升的可行路径, 为开发替代型多功能环保包裹剂提供了实验依据。

[关键词] 肥料包裹剂; 植物沥青; 可降解; 磷酸二铵; 防结块; 色度调控

[中图分类号] TQ444 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-4566 (2026) 04-0025-05

Preparation and performance study of functional reinforced plant-based fertilizer coating agent

ZHANG Can^{1,2}, DU Lingpan^{1,2}, MU Qiang³, WU Hua³, ZHANG Hui⁴, PENG Liqun^{1,2}, LIU Runzhe^{1,2}

(1. Research Institute of Yunnan Yuntianhua Co., Ltd., Kunming 650228, China; 2. National Engineering Technology Research Center for the Development & Utilization of Phosphorus Resource, Kunming 650600, China; 3. Yunnan Sanhuan Xinsheng Chemical Fertilizer Co., Ltd., Kunming 650000, China; 4. Yunnan Phosphate Group Co., Ltd., Kunming 650600, China)

Abstract: To develop a green, biodegradable, and multifunctional fertilizer coating agent, a basic environmentally friendly coating agent (ZYSP) is prepared using plant asphalt, nutrient solution, paraffin wax, and phosphate ester. Based on this, red and black dyes are added, and the paraffin wax content is increased to explore its dyeing enhancement and moisture-proof functions. Comparative experiments with traditional mineral asphalt-based coating agent (KKSF) demonstrate that when the new coating agent is applied to diammonium phosphate, nutrient release time is effectively prolonged. Increasing the paraffin wax content significantly enhances the viscosity of the coating agent, thereby improving moisture-proof performance. Adding dyes adjusts the brightness and chroma of fertilizer granules, with black dye shows superior effects, while red dye potentially degrades moisture-proof performance due to hydrophilic groups. Although the new coating agent has not yet fully surpassed traditional products in comprehensive performance such as anti-caking, it exhibits advantages of being environmentally friendly and biodegradable. Through component optimization, it demonstrates a feasible path for performance improvement, providing experimental evidence for developing alternative multifunctional environmentally friendly coating agents.

Key words: fertilizer coating agent; plant asphalt; biodegradable; diammonium phosphate; anti-caking; color control

0 引言

肥料作为农业发展、农作物生长环节中的必要

营养物质, 对整个农产品领域具有重要的意义^[1], 且间接地从维系人类社会生存方面发挥着显著的作

收稿日期: 2026-02-11

作者简介: 张 灿 (1995—), 男, 云南昆明人, 工程师, 从事磷化工技术研究。

通信作者: 刘润哲 (1984—), 男, 河南汝南人, 博士, 正高级工程师, 从事磷化工技术研究。

基金项目: 技术创新人才培养对象项目“刘润哲”(130000001498)

用。氮磷肥为植物生长提供急需的大量氮、磷元素,更有效减轻了生长缓慢、叶色衰黄无光泽、光合作用减弱、种子和果实品质差等一系列不良影响^[2]。随着相关技术不断发展,肥料包裹剂的出现还解决了氮磷肥吸潮结块、养分释放较快、表面色泽花白等主要问题^[3]。然而,传统包裹剂多是以矿物沥青为基料,以矿物油和蜡类物质作为辅料,以复合油脂类物质为表面活性剂,通过加热作用把3类物质熔融在一起制备成对氮磷肥具有保护作用的包裹剂。但组成包裹剂的大部分物质多为难降解、对土壤和水质具有不可逆污染的复杂混合物,这为植物从土壤中可持续地吸收生长所必需的营养物质带来了较大挑战^[4]。从包裹剂的功能性来看,传统包裹剂组分中的部分基料、辅料、表面活性剂之间以及包裹剂包覆氮磷肥后的亲和性较差,易因外界温度、湿度条件的变化致使包裹剂稳定性不强、耐受性不理想等^[5]。针对以上问题,开发新型包裹剂显得极为关键。

在传统肥料包裹剂的组分结构和功能的基础上,选择可降解的植物沥青^[6]和营养液分别替代传统包裹剂中的矿物沥青、矿物油,将组分复杂的复合酯替换为纯度较高的磷酸酯^[7](后者兼具增强与极性和非极性物质之间的结合亲和性),考虑到基料植物沥青的黏度较矿物沥青显著下降,会引发产品吸潮和释缓功能不佳等问题,故保留高黏度的石蜡。将4种组分加热搅拌熔融后得到新的包裹剂,且对磷酸二铵的包覆效果显示具有一定的防吸潮和较好的养分释缓效果。然而,由于植物沥青的颜色较矿物沥青浅,作为包裹剂中占比过半的基料对包裹剂整体的色度产生明显影响;同时,实际生产过程中受原料磷酸品质、颜色不可控变化影响也接连导致合成磷酸二铵过程中添加的内部染料无法完全调控产品的色度^[8],出现花白粒子。因此,包裹剂若具备调整磷酸二铵色度的作用,将在调色方面和内部染料形成互补作用,从而有效保证磷酸二铵的色度质量。故针对此问题,尝试向新包裹剂中添加染料作为助剂来探究其可行性。此外,由于植物沥青常温下以液态形式存在,矿物沥青则以固态存在,前者黏度较后者低,进而使得以植物沥青为基料的新包裹剂整体黏度也降低,导致其在防吸潮性能方面与传统包裹剂差距较大,所以尝试增加组分中石蜡的添加量来提高包裹剂的黏度^[9]。

综合对比优化后的新型包裹剂的实验结果发现,添加染色剂能够使新型包裹剂具有一定的色度

调整功能,但若染料中含有亲水性基团或者物质会降低包裹剂的防吸潮性能,后续需要优化后选用合适的染料;提高包裹剂中高黏度组分的占比能够在一定程度上强化包裹剂的防吸潮功能。开发的新型包裹剂需要待可降解性、防吸潮性能优于传统包裹剂后方可完全取代传统包裹剂^[10],以此为基础开发多功能化的包裹剂也是未来可探索的开发方向。开发适用于磷酸二铵的新型包裹剂具有一定的必要性^[11],尽管总体性能上不如传统包裹剂,但通过对性能的优化已逐步缩小了和传统包裹剂之间的差距,持续的优化改进能够带来完全替代传统包裹剂的可能性。

1 实验方法

1.1 原材料

磷肥, w (总养分) 64%的磷酸二铵(DAP);基料,植物沥青、矿物沥青;表面活性剂,磷酸酯、复合酯;辅料,营养液、矿物油、石蜡;添加剂,红色染料、黑色染料。

1.2 仪器设备

烧杯, 100 mL、250 mL;电子天平, LT 5001, 常熟市天量仪器有限责任公司;电子调温万用电炉, DK-98-II, 北京市永光明医疗仪器有限公司;糖衣机, BY-300, 浙江省温岭市创力药材器械厂;数显恒温水浴锅, HH-S4, 金坛市医疗仪器厂;转动黏度测试仪, NDJ-1D, 上海民仪电子有限公司;恒温恒湿箱, RQM-1000, 上海建恒仪器有限公司;标准分光测色仪, 亨特联合实验室公司;培养皿。

1.3 包裹剂的制备

传统包裹剂(KKSF):按一定比例分别称取矿物沥青、矿物油、石蜡和复合酯于100 mL烧杯中,再把烧杯置于60~80℃的电子调温万用电炉上加热,并将物料搅拌均匀,待物料融化后恒温持续加热搅拌30 min。

新型包裹剂:按跟传统包裹剂各组分对应的比例依次称取植物沥青、营养液、石蜡和磷酸酯,共称4份,一份不做变动(ZYSP),两份分别各加入一定量红色染料(ZYSPR)和黑色染料(ZYSPB),最后一份石蜡的量增加3倍(ZYSPS),待加料完成后,4份新包裹剂按照传统包裹剂的制备方法进行加热搅拌,制备结束后,所有的包裹剂保温留置待用。

1.4 包裹化肥工艺

取云南某公司某厂生产的 w (总养分) 64%的磷酸二铵(DAP) 6份,每份100 g,一份留作空白对

照样，另外5份依次倒入糖衣机中，再把5种包裹剂按照0.54 kg/t的用量加入60~80℃的糖衣机中搅拌5 min，待所有化肥颗粒表面都被包覆包裹剂后取出，待冷却至室温后留作测试。

1.5 各项性能测试

1.5.1 包裹剂溶解性能测试

分别将未被包裹和已被包裹的等量磷肥(25 g, 包裹剂量另计)放置于盛有100 mL水的烧杯中, 温度为室温(20℃), 烧杯中插入搅拌桨, 在电机的带动下持续对水中的磷肥进行搅拌, 直至观察不到固体磷肥存在于水中, 观察和记录磷肥、包裹剂的溶解情况。

1.5.2 包裹剂黏度性能测试

先将各包裹剂加热到60℃, 再分别取10 mL各类包裹剂倒入内部装有转子的旋转黏度测试仪的转筒中, 转筒5/6的部分垂直放置于60℃的数显恒温水浴锅中加热, 待温度恒定后, 从最小转速开始依次测量不同包裹剂的黏度, 测定时间为3 min, 最后取最高转速下的黏度作为包裹剂在该温度条件下的黏度。

1.5.3 包裹剂防潮性能测试

取6个不同的空培养皿, 并测量其质量(m_1), 再分别称取表面无包裹剂、被不同包裹剂包覆的磷肥(m_2)放置于培养皿中, 将培养皿放置于温度为40℃、相对湿度80%的恒温恒湿箱内保持5 h, 每隔1 h称量样品和培养皿的质量(m_3)。计算肥料吸潮率:

$$\text{吸潮率} = (m_3 - m_1 - m_2) / m_2 \times 100\% \quad (1)$$

1.5.4 包裹剂色度性能测试

按色度皿2/3的体积各取被不同包裹剂包覆的磷肥放置于色度测试仪测试口, 盖上盖子后按下测试键, 测试磷肥表面包裹剂的明度值 L , 色度值 a 、 b , 每个样品测3次取平均值, 白度按照Hunter白度公式计算:

$$\text{白度值} = 100 - [(100 - L)^2 + a^2 + b^2]^{1/2} \quad (2)$$

2 结果与分析

2.1 包裹剂包覆磷酸二铵的溶解性

包覆不同包裹剂的磷酸二铵完全溶解时间如表1所示。从表1结果可知, 磷酸二铵无包裹剂包覆时, 在搅拌作用下能够在短时间内完全溶解于水中, 而表面包覆有包裹剂的磷酸二铵的完全溶解时间都相对较长, 说明包裹剂本身具有一定的疏水性能, 该疏水性能发挥防吸潮作用, 具有减缓磷肥在水中溶解的效果。对比表面包覆不同包裹剂的磷酸二

铵的完全溶解时间, $\text{KKSf} > \text{ZYSPS} > \text{ZYSPB} > \text{ZYSP} > \text{ZYSPR}$, 说明传统包裹剂对磷酸二铵具有较强的释缓作用。新型包裹剂释缓能力相对较弱, 最短溶解时长仅为4.1 h, 且溶解时长最长的是包覆ZYSPS(通过增加石蜡的量来提高包裹剂自身黏度)的磷肥。从黏度角度说明若把新型包裹剂的黏度提高至跟传统包裹剂相近或者高于传统包裹剂的情况下能够大幅度提高新型包裹剂的释缓能力。根据包覆ZYSPB、ZYSP、ZYSPR磷酸二铵的完全溶解时间发现, 黑色染料比红色染料黏度高, 前者有助于提高其所组成包裹剂的黏度, 后者则相反, 且后者所组成的包裹剂的完全溶解时间低于ZYSP, 这可能跟红色染料中的生色团多以强极性的共轭基团存在有关, 该类基团中的N和H对水亲和性较佳。再看磷酸二铵完全溶解后包裹剂在水中的存在形式, KKSf以黑色不溶物形式存在, 而新型包裹剂则以油水混合物存在, 相比较而言, 新型包裹剂不易长时间在土壤中留存。

表1 包覆不同包裹剂的磷酸二铵的完全溶解时间

Table 1 Complete dissolution time of diammonium phosphate coated with different coating agents

序号	包裹剂	磷肥质量/g	完全溶解时间/h	包裹剂存在形式
1		25.01	0.4	无
2	KKSf	25.12	10.6	黑色不溶物
3	ZYSP	25.17	4.8	油水混合
4	ZYSPR	25.21	4.1	红色油水混合
5	ZYSPB	25.13	5.2	黑色油水混合
6	ZYSPS	25.06	6.6	油水混合

注: KKSf(矿物沥青-矿物油-石蜡-复合酯型包裹剂), ZYSP(植物沥青-营养液-石蜡-磷酸酯型包裹剂), ZYSPR(植物沥青-营养液-石蜡-磷酸酯-红色染料型包裹剂), ZYSPB(植物沥青-营养液-石蜡-磷酸酯-黑色染料型包裹剂), ZYSPS(植物沥青-营养液-加量石蜡-磷酸酯型包裹剂)。

2.2 包裹剂黏度性能比较

不同包裹剂的黏度性能对比如表2所示。由表2数据分析可知, 各包裹剂黏度大小为 $\text{KKSf} > \text{ZYSPS} > \text{ZYSPB} > \text{ZYSP} > \text{ZYSPR}$ 。传统包裹剂由于基料是常温下以固态形式存在的矿物沥青, 导致以其为主要组分所组成的包裹剂的黏度较高; 而ZYSPS、ZYSPB、ZYSP、ZYSPR这些新型包裹剂是以黏度较低的液态形式存在的植物沥青为主要组分, 所以黏度都比KKSf的低; ZYSPB、ZYSP、ZYSPR之间的黏度大小关系表明, 由于黑色染料黏度比红色染料黏度高, 故添加等量的染料后由前者

表2 不同包裹剂的黏度性能比较

Table 2 Comparison of viscosity properties of different coating agents

序号	包裹剂	温度/°C	最大转速/(r·min ⁻¹)	黏度/(mPa·s)
1	KKSF	60	100	1 248.9
2	ZYSP	60	100	676.6
3	ZYSPR	60	100	651.7
4	ZYSPB	60	100	740.3
5	ZYSPS	60	100	861.2

所组成的新型包裹剂的黏度较高；ZYSPS的黏度在新型包裹剂中最高，这跟多加量的石蜡的黏度和疏水性能强有关。基于此，尽管新型包裹剂的黏度都比传统包裹剂低，但若提高组成包裹剂的高黏度组分的占比或者添加其他高黏度添加剂也能提高新型包裹剂的黏度，且加入量控制到一定程度能够与传统包裹剂黏度相近或者超过原包裹剂。

2.3 包裹剂防潮性能

不同包裹剂包覆的磷酸二铵吸潮率变化如图1所示。根据图1结果可得，KKSF、ZYSPS、ZYSPB、ZYSP 4类包裹剂包覆的磷肥的吸潮率都比无包裹剂的磷酸二铵低，吸潮率大小顺序为KKSF < ZYSPS < ZYSPB < ZYSP，这说明包裹剂包覆磷酸二铵后对其具有较好的防吸潮性能，但并不是所有的包裹剂都对磷酸二铵有正向的防吸潮作用。如图1结果所示，包覆ZYSPR的DAP吸潮率竟然高于无包裹剂的DAP，这说明红色染料中存在易吸潮物质，这主要是由于红色物质多为共轭的生色基团如偶氮基(—N=N—)和强极性的助色基团如羧基(—COOH)、羟基(—OH)、氨基(—NH₂)等构

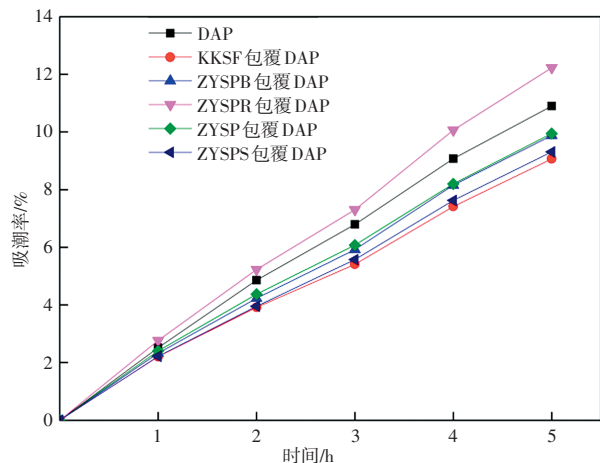


图1 不同包裹剂包覆的磷酸二铵吸潮率变化

Fig. 1 Change in moisture absorption of diammonium phosphate coated with different coating agents

成，这两类基团都对水中的水分子具有较高的亲和性，从结果来看，红色染料的亲水性基团的作用要强于其他组分由黏度所影响的疏水性作用。同时，以增加石蜡量进而提高黏度的ZYSPS的吸潮率为新型包裹剂中最低，且与KKSF差值较小。KKSF中矿物沥青黏度高于新型包裹剂中的植物沥青，致使其占比较高的包裹剂黏度也较高，从而发挥出较佳的防吸潮性能，这表明提高包裹剂高黏度组分的量能够间接对其防吸潮性能起到正向影响。这主要是由于黏度高压缩了包裹剂内部的空隙并减缓了整个包裹剂的流动性，而空气中水分子进入空隙后受黏度影响难以大量进入到内部的磷酸二铵表面。

以上结果说明，选用亲水性基团作用弱于疏水性基团作用或者疏水性受高黏度组分影响且呈正向作用的组分能够提高包裹剂的防潮性能，且疏水性基团作用较强或者黏度跟传统包裹剂相近或较强时，也能发挥出跟传统包裹剂相同的防吸潮效果。

2.4 包裹剂白度性能比较

不同包裹剂包覆的磷酸二铵色度和白度性能如表3所示。由表3数据可知，无包裹剂包覆的DAP的明度值和白度值显著高于新型包裹剂包覆的磷酸二铵，传统包裹剂包覆的磷酸二铵明度值和白度值最低，说明磷酸二铵表面被包裹剂包覆后能够降低其明度，使整体粒子颜色更加趋于一致，且传统包裹剂效果较强，主要是受矿物沥青和矿物油自身较深的颜色影响，故KKSF包覆DAP与DAP的明度差值最大达到13.39，白度值差值也是最大达到14.02。对比新型包裹剂包覆的DAP的明度值，存在ZYSPS > ZYSPR > ZYSP > ZYSPB的关系，表明添加黑色染料有利于降低磷酸二铵表面的明度值；而从色度值a来看，添加红色染料对提高a值效果更佳，黑色染料则相反，这也直接证明在包裹剂中控制好红色染料和黑色染料的量能够从生产上二次实

表3 不同包裹剂包覆的磷酸二铵色度和白度性能

Table 3 Comparison of chroma and whiteness properties of DAP coated with different coating agents

序号	包裹剂	DAP颜色指标			
		L	a	b	白度
1		38.03	2.72	6.11	37.67
2	KKSF	24.64	4.63	11.35	23.65
3	ZYSP	32.26	3.43	9.76	31.47
4	ZYSPR	33.41	5.06	9.11	32.60
5	ZYSPB	31.83	2.25	5.71	31.55
6	ZYSPS	35.65	3.15	8.46	35.02

现对磷酸二铵产品的色度指标的质量控制。此外,考虑到添加染料调控磷酸二铵色度质量的影响,要同时调控明度则需从基料、辅料和表面活性剂的颜色深度作为重点开发方向。

3 结论与展望

研究以开发探索环保可降解、调控色度和强化防吸潮性能的包裹剂的可行性为方向,并以传统包裹剂作为参考对象,得出尽管新型包裹剂从提高磷酸二铵的释缓能力、提高包裹剂黏度和防吸潮性能、降低明度与白度值等方面的性能都不如传统包裹剂,但研究结果从可行性方面来看,以提高组成包裹剂的基料、辅料或表面活性剂中高黏度组分的占比或者加入高黏度、强疏水性的添加剂的方式能够优化包裹剂的黏度性能,进而正向影响其防吸潮性能,通过添加红色内染剂及其用量可以二次调控磷酸二铵的明度值和色度 a 值,这指明了一个可行性:即当具有绿色可降解性能优势的新型包裹剂自身的黏度被提高到等同于传统包裹剂黏度时,可以逐步替代传统包裹剂在磷酸二铵中的作用,且添加功能性的添加剂能够让新型包裹剂具备新功能,该可行性对肥料生产、农业应用等领域有着重要的意义。

同时,尽管以上新型包裹剂具有一定可行性,但向实际产业化生产与农业应用方面迈进仍需解决其他磷肥产品适用性、规模化制备工艺稳定性、高湿高热极端环境下长期储存性能验证、长期田间施用过程中降解性能与肥效验证等关键问题,尤其在 不同气候条件下的防吸潮实效性 与染色均匀性亟待田间试验数据支撑。

[参考文献]

- [1] 刘美生.浅谈土壤肥料对农产品的影响[J].花卉,2018(10): 262-263.
- [2] 张金霞,李爱堂,杨希文,等.氮磷肥对金银花生长发育及其有效成分含量的影响[J].现代农业科技,2024(12):61-64.
ZHANG J X, LI A T, YANG X W, et al. Effects of nitrogen and phosphorus fertilizers on growth and development of *Lonicera japonica* and content of its effective components [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2024(12): 61-64.
- [3] 陈红琼,马航.水溶性磷酸一铵防结块剂的研究与应用[J].无机盐工业,2022,54(2):78-80.
CHEN H Q, MA H. Research and application of anti-caking agent for water soluble monoammonium phosphate [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2022, 54(2): 78-80.
- [4] 李书海,黄祥川,徐爱叶.浅析复合肥料结块原因及防结块剂的开发[J].化肥工业,2018,45(4):23-25,49.
LI S H, HUANG X C, XU A Y. Discussion on the reasons of caking of compound fertilizer and development of anti-caking agent[J]. Chemical Fertilizer Industry, 2018, 45(4): 23-25, 49.
- [5] 汪敬恒,谷利敏,杨素芬,等.化学肥料防结块研究与应用[J].河南科学,2018,36(8):1200-1204.
WANG J H, GU L M, YANG S F, et al. Study and application on anti-caking of chemical fertilizer [J]. Henan Science, 2018, 36(8): 1200-1204.
- [6] 姚汉敏,陆江银.SBS/橡胶粉复合改性混合植物沥青的制备及其性能研究[J].化工新型材料,2024,52(4):254-263,267.
YAO H M, LU J Y. Preparation and performance study of SBS/rubber powder composite modified mixed plant asphalt [J]. New Chemical Materials, 2024, 52(4): 254-263, 267.
- [7] 熊伟,盛先芳,王金平,等.植物油制备肥料防结块剂及其应用效果研究[J].磷肥与复肥,2018,33(10):7-10.
XIONG W, SHENG X F, WANG J P, et al. Study on anti-caking agent prepared from vegetable oil and its application effect [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2018, 33(10): 7-10.
- [8] 于程程,王梦,郭武松,等.含黄腐酸钾磷酸一铵产品开发及肥效试验[J].生态产业科学与磷氟工程,2024,39(12):40-44.
YU C C, WANG M, GUO W S, et al. Development of monoammonium phosphate containing potassium fulvate and its fertilizer efficiency [J]. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering, 2024, 39(12): 40-44.
- [9] 卢啸吻,艾波,张伟,等.高聚物/表面活性剂型液体防结块剂对高塔复合肥防结块效果的研究[J].磷肥与复肥,2012,27(6): 17-19.
LU X Y, AI B, ZHANG W, et al. Study on anti-caking effect of polymer/surfactant based liquid anti-caking agent on high-tower compound fertilizer [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2012, 27(6): 17-19.
- [10] 湖北富邦科技股份有限公司.高塔造粒尿基复合肥专用环保型防结块剂及制备方法:CN201010528720.7[P].2012-10-10.
- [11] 李淑华,孙阳,吴初柱,等.新型化肥多功能包裹剂在磷酸二铵上的应用效果评价[J].磷肥与复肥,2018,33(3):19-20,27.
LI S H, SUN Y, WU C Z, et al. Application effect of new fertilizer multi-functional package agent on DAP [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2018, 33(3): 19-20, 27.