◆提质增效产品创制技术◆

尿基复合肥生产工艺探索与实践

徐永胜，阙仁江，赵德松，冯伟珍

（云南云天化云峰化工有限公司，云南 宣威 655413）

［摘 要］尿基复合肥凭借以尿素为主要氮源的优势，呈现出中性特性，广泛适用于各类土壤（如酸性、中性、微碱性土壤）和不同作物，且施用便捷，同时具备高浓度、低缩二脲、缓释长效等突出特点，在复合肥料市场中占据重要地位。本文以尿基复合肥15-15-15为研究对象，系统介绍基础生产工艺流程与生产现状，重点探索矿源腐植酸钾及酵母发酵浓缩液在肥料生产中的应用价值，通过工艺优化与设备改进解决生产瓶颈，实现产品功能升级与生产效能提升。

［关键词］尿素；复合肥；矿源腐植酸钾；酵母发酵浓缩液；生产工艺

［中图分类号］TQ44 ［文献标志码］A ［文章编号］2097-4566（2026）05-0052-05

Exploration and practice of the production process for urea-based compound fertilizer

XU Yongsheng, QUE Renjiang, ZHAO Desong, FENG Weizhen

(*Yunnan Yuntianhua Yunfeng Chemical Co., Ltd., Xuanwei* 655413, *China*)

Abstract: Urea-based compound fertilizer, leveraging the main nitrogen source provided by urea, exhibits neutral characteristics and has wide adaptability to various types of soil (such as acidic, neutral, and slightly alkaline soils) and different crops. It is also convenient to apply and possesses outstanding features such as high concentration, low biuret content, and long-lasting slow-release. It holds an important position in the compound fertilizer market. Urea-based compound fertilizer 15-15-15 is taken as the research object, the basic production process flow and production status are systematically introduced, and the application value of mineral-sourced potassium humate and yeast fermentation concentrate in fertilizer production is focused on. Through process optimization and equipment improvement, production bottlenecks are solved, and product functionality is upgraded and production efficiency is enhanced.

Key words: urea; compound fertilizer; mineral-sourced potassium humate; yeast fermentation concentrate; production process

0 引言

随着测土配方施肥技术的普及与现代农业对土壤可持续利用要求的提高，传统单一营养型复合肥已难以满足生产需求——长期施用不仅易导致土壤板结、盐渍化加剧，还会造成养分利用率偏低、生态环境压力增大等问题。

尿基复合肥凭借以尿素为主要氮源的优势，呈现出中性特性，对各类土壤（如酸性、中性、微碱性土壤）和不同作物（粮食作物、经济作物、果蔬类作物等）均具有广泛适应性，且施用便捷；同时具备高浓度（w(总养分）通常可达45%以上）、低缩二脲（有效避免作物烧根烧苗问题）、缓释长效（延长养分供应周期，减少施肥次数）等突出特点，在复合肥料市场中占据重要地位。其中，尿基复合肥15-15-15（氮、磷、钾质量分数均为15%）因养分配比均衡，能满足多数作物生长周期内的基础养分需求，成为农业生产中的常用产品。通过添加矿源腐植酸钾及酵母发酵浓缩液，尿基复合肥15-15-15可升级为有机-无机复合型肥料，不仅能为植物提供必需的N、P、K营养元素，还同步引入钙、镁等中微量元素及黄腐酸等活性成分。这类功能性成分可促进土壤微生物活动，活化土壤中固定态磷、钾养分，降低土壤盐渍化程度，疏松土壤结构，同时刺激作物生长发育、增强抗逆能力，实

收稿日期：2025-12-03

作者简介：徐永胜（1985— ），男，云南宣威人，助理工程师，从事磷肥、复合肥技术研究及生产管理。

现生态环境保护与施肥效益提升的双重目标。

云南云天化云峰化工有限公司（以下简称公司）10万t/a复合肥B系列装置（以下简称10万t/a装置B系列）始建于2018年，2019年2月建成并正式投入生产。为响应市场需求与土壤改良诉求，公司依托该装置开展尿基复合肥的研发与生产工作，通过持续的工艺优化与技术改进，实现了产品质量与生产效率的同步提升。

1　生产工艺及路线

1.1　原料预处理及配料

将公司磷酸装置的清磷酸、渣酸按比例输送到磷酸储槽进行混合（控制指标为w（固）14%～16%、w(P_2O_5）40%～42%），根据生产配方通过磷酸泵计量加入造粒文丘里洗涤系统，加入工艺循环水调整至合适的相对密度（1.46～1.48），洗涤造粒机逸出的氨、粉尘后，将w(N)/w(P)≤0.6的洗涤液送入中和槽，并在中和槽中通入适量的氨，将料浆n(N)/n(P）调整到0.7～0.8形成合格料浆。

硫酸钾、尿素、氧化镁、磷酸一铵（MAP，7–37）、硫酸铵等原料经人工解袋后，按配方计量后输送到造粒机内造粒。

1.2　造粒及后处理

中和槽内的合格浆料经给料泵输送到管式反应器喷嘴分散后喷洒在返料和固体原料表面进行造粒，同时根据造粒机出口物料的w(H_2O）和n(N)/n(P)，经造粒机内的氨分布器通入适量的二次氨；造粒物料依次经烘干、筛分、冷却处理，在包裹筒内加入包裹剂后，送入散装堆存，下线产品经质量检验合格后，包装入库。基础生产工艺流程见图1。

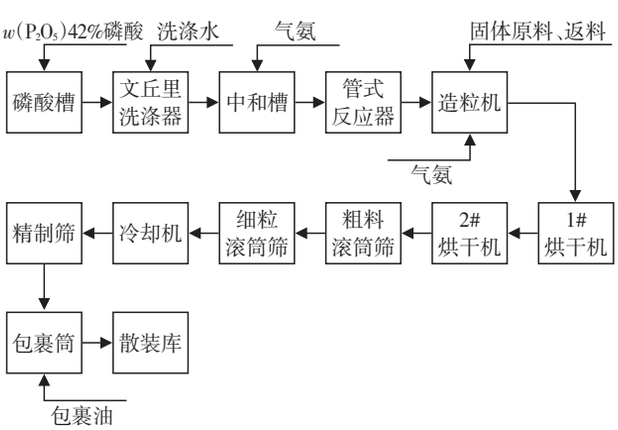


图1　生产工艺流程

Fig. 1　Production process flow

粗料滚筒筛筛分下的大颗粒经破碎后与布袋除尘器回收的细粉、细粒滚筒筛及精制筛筛分下的细颗粒直接作为返料返回造粒机。

2　生产存在的问题及改进措施

2.1　生产存在的问题

2.1.1　造粒物料温度偏低

生产初期，采用中和槽通氨制成磷酸一铵料浆的生产工艺，料浆经管式反应器喷洒在造粒机料床上，在通入二次氨涂布成粒过程中，造粒机成粒效率较差，造粒出口物料温度偏低（＜55 ℃），部分尿素还未溶解便随物料进入干燥机，在干燥机内溶解后导致产品二次成粒，影响产品质量和生产负荷。

2.1.2　生产清理频繁

10万t/a装置B系列设置有1#、2#烘干机，进口温度均控制在200 ℃左右，烘干机出口产品温度较高，粒子容易发生软化变形，导致筛分、冷却后的成品中异形粒子占比大。粗筛和细筛在筛分物料时，软化的颗粒极易堵塞网孔，导致筛网堵塞，影响合格粒子取出，同时装置必须停车清理。10万t/a装置B系列运行2～3 d就要停车清理6～8 h，开工率较低。

2.1.3　料浆浓度波动大

中和槽内制成磷酸一铵料浆后，由于内部无搅拌桨搅动料浆，底部沉积物较多，中和槽出口管道以及给料泵进口管滤网经常堵塞，生产运行中每天需利用蒸汽吹扫中和槽出口管道2～3次，2 d需清理1次给料泵进口管滤网箱，导致生产中磷酸一铵料浆浓度波动幅度大；同时，停车清理滚筒筛的过程中，为防止中和槽内磷酸一铵料浆降温结晶凝固，需通入饱和蒸汽控制料浆温度在110～120 ℃，能源损失增加，还提高了产品水分的处理难度；另外，底部沉积物长期累积后，中和槽使用20 d左右，就需停车进行清理。

2.2　改进措施

2.2.1　新增给料槽及搅拌系统

通过修旧利废利用闲置设施，在中和槽旁新增1台规格为ϕ3 000 mm×3 000 mm的给料槽，并在槽内安装搅拌桨，有效防止洗涤液沉积，稳定料浆性质，避免料浆波动对生产造成的影响。

2.2.2　料浆制备与造粒工艺改进

生产磷酸一铵（MAP）和磷酸二铵（DAP）的化学反应（标准状态）如下：

$$H_3PO_4 + NH_3 \longrightarrow NH_4H_2PO_4,\ \triangle H = -126\ kJ/mol; \quad (1)$$

$$H_3PO_4 + 2NH_3 \longrightarrow (NH_4)_2HPO_4,\ \triangle H = -203\ kJ/mol。 \quad (2)$$

通过对比反应热值，磷酸与氨反应生成磷酸二铵的反应热更高。另外，采用中和槽制备磷酸一铵

料浆生产尿基复合肥时，在管式反应器喷洒料浆过程中需加入蒸汽对料浆进行雾化，增加产品水分处理的难度；而改用在管式反应器通过氨和酸直接反应制备磷酸二铵料浆时，其反应形成的压力可直接将料浆更好地雾化后喷洒在造粒机料床上，喷洒出来的料浆更均匀地黏附在造粒机内含磷、钾的粉状物料上，能进一步提高造粒机出口物料颗粒的均匀性、圆整度及光滑性；同时不用蒸汽进一步雾化料浆，有效避免了蒸汽带入的水分，降低了造粒出口物料的水含量[1]。

经综合考虑和对比，公司10万t/a装置B系列采用磷酸二铵工艺生产尿基复合肥。将洗涤液直接送入给料槽，由给料泵送至造粒机管式反应器内加入一次氨，制备磷酸二铵料浆；同时公司内部有自产的硫酸，能自制一部分硫酸铵，通过硫酸泵将适量硫酸直接通入管式反应器，利用硫酸与氨的反应热进一步提高料浆温度，增强反应强度。

工艺措施优化改进后，造粒机物料温度显著提升，尿素溶解效率与造粒成粒效率大幅度提高，生产负荷由原来的10 t/h提升至15 t/h。

3 产品的优化升级

结合市场需求和土壤调研，在尿基复合肥15–15–15中添加矿源腐植酸钾以及酵母发酵浓缩液后，可以改良土壤，活化矿质元素，促进微量元素的利用，提升营养元素的缓释效果，还可刺激植物发育，增强植物抗性。

3.1 腐植酸的作用

腐植酸是一种天然高分子有机化合物，可增强作物呼吸强度，进而促进作物更好地生长，增强作物抗旱抗逆性能，提高作物产量和品质。

3.1.1 物理作用

腐植酸能改善盐碱土表层结构、土壤理化性状，起到隔盐效果；促使土壤疏松，改良土壤团粒结构，提高土壤的保肥、保水能力，减少养分流失，延长供肥周期；提升土壤持水量与抗寒能力；同时腐植酸属于深色物料，能加深土壤颜色，提升土壤对阳光的吸收能力[2–7]。

3.1.2 化学作用

肥料产品中添加腐植酸可以正反双向调节土壤pH值，从而提高土壤对酸碱的缓冲能力，增强离子交换与吸附能力，提高氮、磷、钾施用后的利用效率。

相关研究表明，肥料产品中添加腐植酸后，腐植酸中的酸性官能团能够与氮元素反应，形成稳定络合物，缓慢分解释放氮元素，减少氮损失，提高氮肥利用率，与土壤中Fe、Al等金属离子形成螯合物，降低其对磷的固定作用，氮肥的利用率由30.1%提高到了34.1%，磷肥利用率由15.4%提高至19.3%，土壤w（速效磷）从21.6 mg/kg提升至26.9 mg/kg；同时官能团还能吸附储存钾离子，使作物吸钾量增加30%以上[8–9]。

3.1.3 生物作用

腐植酸的活性官能团可增强作物体内多酚氧化酶、过氧化氢酶活性，刺激作物生理代谢；络合土壤中难溶性铜、铁、锰、锌等金属离子，使其转化为水溶性离子被根系吸收；促进土壤有益微生物活动，产生热量使地温提高1～3 ℃，增强作物抗寒抗冻能力；调节微量元素与大量元素的比例平衡，提升酶活性，促进蛋白质、脂肪、糖分等物质的合成与运转，实现果实膨大、籽粒饱满。

3.2 酵母发酵浓缩液

酵母发酵浓缩液是一种通过现代生物发酵工程技术，以酵母菌（如酿酒酵母、产朊假丝酵母等）为核心，对特定培养基（如糖蜜、植物提取物、无机盐等）进行深层有氧发酵后，再经过滤、浓缩而制成的高活性、多功能的生物代谢产物复合物。酵母发酵浓缩液成分与功能特性见表1。

表1 酵母发酵浓缩液成分与功能特性

Table 1 Components and functional characteristics of yeast fermentation concentrate

成分类别	代表性物质	主要功能与作用
活性酵母细胞及代谢产物	完整酵母细胞、细胞壁片段、胞内酶	提供益生菌源，改善土壤微生态；细胞壁富含葡聚糖、甘露聚糖，激发植物抗逆性
天然有机质与营养元素	游离氨基酸、多肽、核苷酸、水溶性有机碳	速效有机氮源，促进叶片吸收；螯合中微量元素，提高养分利用率
生物刺激素	维生素（B族、肌醇）、植物内源激素（IAA、GA前体）、多糖	调节植物生长发育，增强抗逆性（抗旱、抗寒、抗盐碱），提高坐果率与品质
有机酸与酶类	乳酸、乙酸、琥珀酸；蛋白酶、纤维素酶	调节pH，活化土壤中被固定的磷、钾等养分；促进有机物分解

酵母发酵浓缩液作用原理如下：

（1）协同增效。浓缩液中的有机小分子（氨基酸、有机酸）可螯合化肥中的金属离子，减少养分固定，提高N、P、K及中微量元素的利用率。

（2）激发抗逆性。酵母细胞壁多糖、寡糖等成分可作为植物免疫激发子，提升作物对干旱、低温、病害的抵抗力。

（3）改良根际。为土壤有益微生物提供碳源和营养，优化根际微生态，活化土壤。

（4）缓解盐害。有机质可缓冲化肥对土壤和种子/幼苗带来的盐指数压力。

3.3　功能性肥料应用效果参考

相关研究表明温室黄瓜施用含腐植酸水溶肥料后，在其他管理条件相同的情况下，土壤养分含量较清水对照明显提高，土壤w（有机质）增加9.8%～17.8%，w（碱解氮）增加12.9%～64.5%，w（有效磷）增加15.5%～68.8%，并能中和土壤酸性；黄瓜产量增加4.7%～21.6%，增产效果显著。其中，习惯施肥+含腐植酸水溶肥料33.75 L/hm^{2}处理对温室黄瓜的增产效果较好，经济效益最高[10]。

在苹果上的施用试验中，腐植酸螯合肥通过“营养供给+土壤改良+生物刺激”三位一体的功效，能促进根系生长、提高根系活性，促进光合作用，加速光合产物向果实转运；还能缓解缺钙导致的苦痘病、裂果，降低生理性病害发生率；激活树体免疫，减少部分病虫害处理。田间试验数据表明，施用腐植酸螯合肥苹果平均产量可达47 700 kg/hm^2，增产6 180 kg/hm^2，增产率14.88%；增收30 900元/hm^2，节肥增收37 515元/hm^2[11]。

3.4　产品优化升级后存在的问题

3.4.1　产品颜色不稳定

尿基复合肥15–15–15产品升级后，加入生化黄腐酸和矿源黄腐酸钾时，随同MAP、硫酸钾、硫酸铵等原料经计量皮带加入，由于使用量偏小，加入量不稳定导致产品颜色波动较大。

3.4.2　粒子强度不足，下线后易吸湿粉化

尿基复合肥15–15–15颗粒强度在13～15 N，并且产品下线后，在空气相对湿度大于80%的环境下，产品易吸湿粉化，导致产品质量不合格。

3.5　改进措施

3.5.1　原料优化

通过实验室试验，公司8万t/a MAP装置73%水溶磷酸一铵副产的渣（7–37）干燥后的粒度较细，黏性较好，可以有效提高造粒成粒率。同时通过装置在线试用检测寻找合适的造粒助剂，吨产品加入3～4 kg可以明显改善造粒工况。

3.5.2　生产流程优化

干燥工序工艺流程由原来的两段烘干、一段冷却改为一段烘干、二段冷却。在保障产品水分的前提下，1#烘干机作为主要干燥设备，烘干机进口温度控制在180 ℃以内；一段烘干尾气温度控制在70～75 ℃；降低2#烘干机负荷，全开配风阀将2#烘干机进口温度降至常温，将其作为一个冷却通道，在冷却降温的同时达到干燥产品的效果。粗筛和细筛筛分后的粒子经过冷却机进一步冷却降温后，再送至包裹机。同时将原料除尘布袋的冷空气并入冷却系统，进一步增大冷却风量，提高冷却机冷却效果，降低产品温度。

3.5.3　加料设备优化

在返料皮带上安装给料螺旋分别用于添加生化黄腐酸和矿源黄腐酸钾，确保两种功能性原料连续均匀加入，解决产品颜色波动问题。

3.5.4　包膜流程优化

在包裹筒进口新增扑粉螺旋，采用“油粉结合”的包裹方式：在原有尿基专用防结油剂基础上，添加特定粉状防结剂，既提高产品防结性能，又增强对空气中水分子的阻断能力，缓解产品下线后的吸湿粉化现象。

优化后的生产工艺流程见图2。

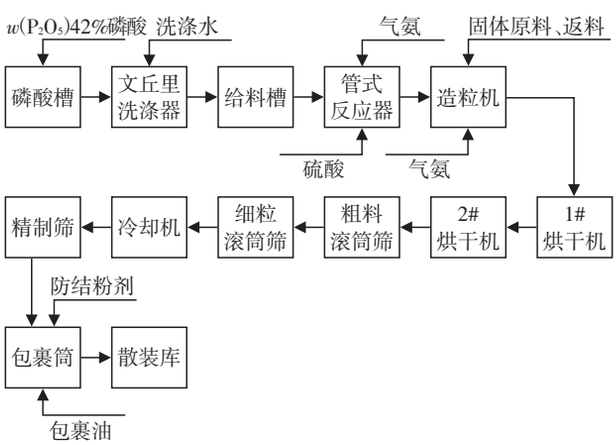


图2　工艺优化后的生产流程

Fig. 2　Production process after process optimization

4　效果验证

2023年1月10—12日，在生产升级版尿基复合肥15–15–15产品期间，公司10万t/a B系列装置对产品生产能力、消耗指标、产品质量、设备性能、环境保护等方面进行72 h连续运行综合性能考核，装置主要技术指标见表2。

表2　装置主要指标

Table 2　Main technical indicators of plant

项目	产量/（t·h^{-1}）	综合电耗/（kW·h·t^{-1}）	天然气消耗/（m^3·t^{-1}）	产品w（富余养分）/%	产品一检验合格率/%
考核值	≥14	≤55	≤5	≤0.5	≥98
实际值	15.7	49.2	3.7	0.47	100

产品质量指标和产量见表3。

表3　产品质量指标和产量

Table 3　Quality indicators and output of product

日期	班次	w(N)/%	w(P_2O_5)/%	w(K_2O)/%	w(总养分)/%	w(水溶磷)/%	粒度2.0～4.0 mm占比/%	产量/t
1-10	夜	15.4	15.5	14.4	45.3	63	100	119
	早	15.9	15.1	14.5	45.5	65	100	129
	中	15.1	16.5	14.4	46	68	100	125
1-11	夜	14.8	15.9	14.5	45.2	66	100	127
	早	15.2	16.7	13.8	45.7	65	100	128
	中	14.4	15.1	15.7	45.2	63	100	136
1-12	夜	15.0	15.9	14.5	45.4	65	100	128
	早	15.1	14.9	15.5	45.5	63	100	126
	中	14.8	16.4	14.2	45.4	65	100	122
平均		15.08	15.78	14.61	45.47	64.78	100	126.7

5　总结与展望

公司10万t/a装置B系列通过“工艺路线优化+设备改造+功能性原料集成”，成功解决了尿基复合肥15-15-15生产中的产能瓶颈、产品稳定性及功能性不足等问题，构建起具有鲜明企业特色的成熟生产技术体系，有力推动了公司的产品结构调整，既拓宽了市场覆盖面，也为公司开创了新的经济增长点。核心技术成果包括：一是通过管式反应器工艺与硫酸添加优化，将生产负荷从10.0 t/h提升至15.7 t/h，能耗显著降低；二是通过“油粉包裹+原料优化”，为产品颜色不均、强度不足、吸湿粉化等关键问题提供了解决方法；三是矿源腐植酸钾与酵母发酵浓缩液的协同应用，实现了“营养供给+土壤改良+生物刺激”的三重功能。

这种将“化学营养供给”与“生物刺激”“土壤改良”相结合的发展方向，正在推动复合肥料向综合功能化转型，为农业可持续发展提供技术支撑。深入研究其生产技术工艺，进一步开展功能性成分配比优化，对推动复合肥产业升级、提升产品竞争力与生产效能具有重要意义。

［参考文献］

［1］ 季保德.尿基复合肥生产工艺[J].磷肥与复肥,2001,16(6):57-58.
JI B D. Production technology of urea-based compound fertilizer [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2001,16(6):57-58.

［2］ 王曰鑫,李强.论腐植酸肥料及有关研究课题[J].腐植酸,2020(3):19-24.
WANG Y X, LI Q. Discussion on Humic Acid Fertilizers and Related Research Subjects[J]. Humic Acid, 2020(3):19-24.

［3］ 程亮,张保林,王杰,等.腐植酸肥料的研究进展[J].中国土壤与肥料,2011(5):1-6.
CHENG L, ZHANG B L, WANG J, et al. Research progress of humic-acid containing fertilizers[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2011(5):1-6.

［4］ 郭坤友,姜永久.普绿通含腐植酸水溶肥在水稻上的应用试验总结[J].北方水稻,2013,43(1):64-66.

［5］ 马金奉,朱昌雄,李红娜,等.模拟条件下生物腐殖酸肥对土壤磷素淋失及流失的影响[J].中国农业气象,2017,38(11):699-708.
MA J F, ZHU C X, LI H N, et al. Effects of Bio-active Humic Acid Fertilizer on Phosphorus Leach-loss and Runoff-loss under Simulated Conditions[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2017,38(11):699-708.

［6］ 黄志浩.腐植酸与磷互作对玉米种子萌发、幼苗生长及根系活力的影响[J].腐植酸,2026(1):62-68.
HUANG Z H. Effects of Interaction between Humic Acid and Phosphoric on Corn Seed Germination, Seeding Growth and Root Activity[J].Humic Acid,2026(1):62-68.

［7］ 刘畅,王茜,贺浩强,等.高磷条件下腐殖酸和生物炭配施对土壤磷素转化的影响[J].江苏农业科学,2020,48(8):284-287.

［8］ 刘征捷.腐殖酸及腐殖酸肥的性质与应用[J].化工管理,2021(25):73-74,86.
LIU Z J. Properties and Applications of Humic Acid and Humic Acid Fertilizers [J]. Chemical Engineering Management, 2021(25):73-74,86.

［9］ 贺英.新型高效腐植酸复合肥的生产工艺[J].化学工业与工程技术,1999(1):32-34.
HE Y. Process for production of new high efficiency humic acid compound fertilizer[J]. Chemical Industry and Engineering, 1999(1):32-34.

［10］ 郑镇勇.温室黄瓜施用含腐殖酸肥料的效果研究[J].现代农业科技,2021(9):58-59.

［11］ 崔金洲,雒家其,王香玉,等.腐殖酸螯合肥在苹果上的应用效果[J].农业科技与信息,2018(24):89-91.