

◆ 提质增效产品创制技术 ◆

新型秸秆复混肥的工艺研究与肥效验证

刘旭杰, 严旖旎, 单海勇, 张 晋, 韩 笑, 刘 建

(江苏沿江地区农业科学研究所, 江苏 南通 226012)

[摘要] 针对传统颗粒肥易结块、肥效低、污染大、能耗高的缺点, 设计一种直径较大的球形秸秆复混肥。经过材料成型工艺的研究, 确定粉碎-过筛-复混-制坯-烘干的基本工艺流程, 然后通过系统性的试验优化原料过筛参数和混料比例。通过玉米一次性施肥的栽培试验, 验证新型复混肥的肥效。结果显示, 施用该新型秸秆复混肥能够降低玉米的株高、穗位高, 增粗茎秆, 提高抗倒伏能力, 提高玉米的干物质质量、氮素积累量和籽粒氮素分配比率。此外, 新型秸秆复混肥具有环保、低碳等优势, 可针对不同农作物定制专用肥料, 有望推进化肥减量增效。

[关键词] 新型秸秆复混肥; 工艺; 肥效验证

[中图分类号] TQ444

[文献标志码] A

[文章编号] 2097-4566 (2024) 09-0038-06

Process research and fertilizer efficiency verification of a new type straw compound fertilizer

LIU Xuji, YAN Yini, SHAN Haiyong, ZHANG Jin, HAN Xiao, LIU Jian

(Jiangsu Yanjiang Regional Institute of Agricultural Science, Nantong 226012, China)

Abstract: A larger diameter spherical straw compound fertilizer is designed to address the drawbacks of traditional granular fertilizers, such as easy clumping, low fertilizer efficiency, high pollution, and high energy consumption. After studying the material forming process, the basic process flow of crushing-screening-remixing-embryo making-drying is determined, and then the raw material screening parameters and mixing ratio are optimized through systematic experiments. Finally, the cultivation experiment of one-time fertilization of corn is conducted to verify the fertilizer efficiency of the new compound fertilizer. The results show that the application of this new type straw compound fertilizer can reduce the plant height and ear height of corn, thicken the stem, improve lodging resistance, and increase the dry matter mass, nitrogen accumulation, and grain nitrogen distribution rate of corn. In addition, the new type straw compound fertilizer has the advantages of environmental protection and low carbon, it can also customize special fertilizers for different crops, which is expected to promote the reduction and efficiency improvement of chemical fertilizers.

Key words: new type straw compound fertilizer; process; fertilizer efficiency verification

我国自2015年推进实施化肥减量增效以来, 成功实现了减少肥料施用量的同时, 稳步提升产量^[1]。但目前我国的肥料施用总量仍是全球第一, 且肥料利用率很低^[2-3]。近年来新型肥料的研究及产业化取得了很大进展, 各种微生物肥、智能型包衣缓释肥和有机无机复混肥等, 已经逐步得到市场认可^[4]。其中有机无机复混肥是最早被农户接受的肥料, 也是目前应用较为广泛的新型肥料。已有研究表明, 秸秆还田结合化肥配施有助于提升水稻、小麦、玉米等主要农作物品质和产量^[5-8]。2024年中央一号文件再一次强调了肥料减量增效与农村有机废弃物的综合利用, 因此, 基于秸秆的有机无机复混肥对于推进我国农业肥料减量增效和建设新型现代化农村具有重要意义。

1 新型秸秆复混肥结构研究**1.1 传统颗粒肥料的缺点分析**

传统粉状肥料或颗粒状肥料, 在用于一些水生农作物(如水稻)时极易流失养分, 根系吸收率低, 尽管改变施肥方法能够改善这种情况, 但耗费人力且会导致环境污染。另外, 国内目前市场上使用的颗粒肥料, 颗粒直径一般在2.0~2.5 mm, 根据球体表面积计算公式, 颗粒越小, 则其比表面积越

[收稿日期] 2024-05-06

[作者简介] 刘旭杰(1995-), 男, 安徽淮北人, 助理研究员, 从事新型肥料生产工艺、智能农业装备研究。E-mail: 20212017@jaas.ac.cn

[通信作者] 刘 建。

[基金项目] 江苏沿江地区农业科学研究所青年科技基金项目(YJ(2022)003)

大^[8]。因此,要给肥料颗粒包衣,相同质量下肥料颗粒越小耗费的包衣材料越多。此外,比表面积大,颗粒间的接触面积大,容易导致肥料结块,为了防止结块一般还需要喷涂防结块剂,颗粒较小的肥料耗费的防结块剂也越多。此外,颗粒较小时遇到大风天气施用易随风飘移,导致分散不均匀。比表面积大,肥料颗粒与土壤接触面积大,进而导致肥料的养分容易被土壤固定,最终导致肥料养分利用率低。因此,传统颗粒肥料的生产成本和使用成本较高,且肥效较低^[9]。

1.2 新型秸秆有机无机复混肥设计

为了克服上述颗粒肥的缺点,目前不仅研发了新型缓释肥料,确保在农作物生育期内持续供给养分,还在施肥方式上将肥料集中施在需要的区域,比如沿着耕作条带的带施和针对每株农作物的穴施,从而实现减少施肥次数和提高肥料利用率的目的^[10]。但这些新型肥料和施肥方式仍然具有一定的缺陷,比如难以机械化作业,或机械化作业难以精准定量。针对目前颗粒肥的问题,设计了一种球形新型肥料,肥料的直径远超普通颗粒肥,比表面积小,不会因受潮发生粘连出现结块,也不会施用飘移。

本研究目前在南通地区江苏沿江地区农业科学研究所开展。南通地区为稻麦轮作区,水稻秸秆产量丰富且处理较为困难,因此肥料的有机成分选择水稻秸秆;无机养分使用尿素提供氮元素,磷酸一铵提供磷元素,氯化钾提供钾元素,配方为15-15-15;使用工业用预糊化淀粉作为肥料的黏结助剂。

2 新型秸秆复混肥材料成型工艺研究

新型秸秆复混肥可以看成一种复合材料,原料的处理、混合方式和成分配比都会影响材料强度^[11]。一般情况下原料的颗粒越细,其原料的比表面积越大,材料成型后颗粒间结合更加紧密,复合材料强度越高^[12]。但原料颗粒度过细又会提高处理成本。因此,本研究按照肥料生产工艺顺序,依次从原料的处理和复混方式、原料颗粒度的选择、原料复混比例3个方面开展研究^[13]。

2.1 基本工艺流程研究

2.1.1 试验设计

原料处理:使用高速磨粉机将有机和无机原料分别粉碎,经不同处理后混合,添加总质量2%的工业用预糊化淀粉和适量水。将混合物料通过模具挤压制成球胚后,放入滚筒中,用热风枪设定60℃

高风量烘干。本次试验设计了3个处理,用来讨论原料的不同处理方式对肥料球材料强度的影响,处理1(A1),将混合无机盐溶解制成饱和溶液,与粉碎后未过筛的秸秆混合;处理2(A2),将混合无机盐粉末与粉碎后未过筛的秸秆混合;处理3(A3)将混合无机盐粉末与秸秆粉末过60目筛(孔径0.25 mm)后混合。

2.1.2 测定指标

(1) 圆度指数(K):用来记录肥料球在烘干过程中的形态变化程度的参数,反映复混肥定型后的强度是否可以大批量烘干。该指标越接近1表示该处理越好。

测定方法:取20个烘干处理后的肥料球,使用游标卡尺测量其在笛卡尔坐标系中x、y、z3个方向上的直径,记3个直径数据最大差值不超过3 mm的个数为n,圆度指数 $K=n/20$ 。

(2) 落下强度指数(Δ):参考YB/T 4848—2020《焙烧生球物理检验方法》设计的肥料球强度测定指标。

测定方法:取20个肥料球试样在200 mm高处反复下落,最多20次。记录没有出现碎裂的次数的平均值作为肥料球落下强度指数。

2.1.3 测定结果

每个处理各设置3次重复,每个重复各制作20个样本。采用Excel 2019处理数据,用DPS7.05软件统计分析,数据显著性检验(LSD)用SPSS 25进行。统计和分析的结果如表1所示,不同处理对肥料球成品的K值和 Δ 值的影响都极为显著。其中A3处理的肥料球强度水平最高,K值分别是A1和A2处理的27.33倍和2.48倍,A3处理的 Δ 值水平分别是A1和A2的9.57倍和2.52倍。

表1 基本工艺流程研究试验结果

Table 1 Test results of basic process flow study

处理	K	Δ
A1	0.03 c	2.07 c
A2	0.33 b	7.87 b
A3	0.82 a	19.82 a

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著($p<0.05$),下同。

由表1可知,直接使用混合无机盐的水溶液基本无法得到一个可以定型的球形复混肥,而使用粉碎后未过筛的秸秆由于存在大量粗纤维,导致原料间黏合强度不足,在烘干过程中变形较为严重,成品强度一般。使用过筛后的原料混合,由于其颗粒度一致,且无粗纤维造成的材料薄弱点,原料颗粒

之间黏合强度足够且均匀，烘干过程中强度表现良好且稳定，成品的强度也完全达标。说明在原料预处理过程中，将秸秆和混合无机盐进行粉碎和过筛的预处理相对于其他工艺优势明显。因此，球形秸秆复混肥的最佳工艺流程应当是粉碎→过筛→混料→制坯→烘干。

2.2 原料过筛参数研究

从工艺流程研究中发现，原料是否过筛对肥料球的强度影响很大，但原料的过筛参数是否存在更优解尚未可知。因此，本研究在基本工艺研究结果基础上进一步设计了关于筛网目数对肥料球强度影响的梯度试验。

2.2.1 试验设计

原料处理：使用高速磨粉机将水稻秸秆和混合无机盐分别粉碎，过筛后将相同颗粒度的原料按照质量比1:1混合，然后添加2%的黏结助剂和适量的水，通过模具挤压定型后在相同条件下进行干燥。

本次试验设计了5个处理，每个处理3个重复。通过圆度指数和落下强度指数测试，研究筛网目数对肥料球材料强度的影响。根据原料处理方式的经验和查阅的相关资料，设置0.83 mm (20目)的3个重复为B1-1、B1-2、B1-3；0.38 mm (40目)的3个重复为B2-1、B2-2、B2-3；0.25 mm (60目)的3个重复为B3-1、B3-2、B3-3；0.18 mm (80目)的3个重复为B4-1、B4-2、B4-3；0.15 mm (100目)的3个重复为B5-1、B5-2、B5-3。加工处理过程与A3处理仅有筛网目数的区分，其余操作均相同。

2.2.2 测定指标

与A组试验相同，仍然测定圆度指数(K)和落下强度指数(Δ)两项数值。

2.2.3 测定结果

每个重复各制作20个样本，数据处理方式与A组试验相同。统计结果见表2。

表2 原料过筛参数研究试验结果

Table 2 Experimental results of raw material sieving parameter study

处理	K	Δ
B1	0.75 c	19.0 b
B2	0.78 ab	19.8 a
B3	0.97 a	19.9 a
B4	0.98 a	19.9 a
B5	0.85 b	20.0 a

由表2可知，圆度指数K最佳的是B4处理，但与B3处理无显著差异。烘干后强度最好的是B5处理，但与B2、B3、B4处理均无显著差异。但工业

生产中，考虑到将原料破碎到更高的颗粒度往往需要更多的能耗，故选择K值与最好的B4处理无明显差异、Δ值与最好的B5无显著性差异的B3处理的参数作为最佳的过筛工艺参数。

2.3 混料比例研究

由于秸秆粉末质地松散，用量对肥料球的体积有明显影响，较大体积的肥料球不方便运输、储存及机械化施用。因此，为在保证肥料球养分和强度的条件下进一步减少秸秆用量，在上述两项研究基础上继续设计了关于秸秆复混比例的梯度试验。

2.3.1 试验设计

本次试验材料使用过0.25 mm筛的水稻秸秆。无机养分的质量不变，仅调整水稻秸秆粉末的质量，其余工艺条件均与A、B 2组试验相同。

本次试验设计了4个处理，每个处理3个重复，以相同无机纯氮质量下体积最小的处理作为最佳处理。秸秆与混合无机盐的质量比例梯度分别为(C1) 1:1、(C2) 1:2、(C3) 1:4、(C4) 1:8。制作工艺过程与A、B两组实验保持一致。

2.3.2 测定指标

由于A、B两组试验结果已经确定了基本的工艺流程参数，而且原料按照质量比1:1混合的处理各项强度表现良好，本次试验仅是在保证成品物理强度的条件下尽可能缩小体积，故仅需要测试样品的落下强度指数(Δ)。

2.3.3 测定结果

每个重复各制作20个样本，统计结果见表3。

表3 原料混料比例参数研究试验结果

Table 3 Experimental results of raw material mixing ratio parameter study

处理	Δ
C1	19.6 a
C2	19.9 a
C3	19.9 a
C4	0.1 b

从表3可知，C1、C2、C3处理中秸秆用量对肥料球强度影响并不明显，但当秸秆用量减少到C4处理的水平时，会在烘干阶段发生较大形变，基本不成型，少数成型的肥料球强度也完全不达标。因此，肥料球中无机原料与有机原料的最佳复混质量比为4:1。这个复混比例既能保证肥料球的强度，又减小了肥料球的体积。

2.4 小结

根据试验结果，新型秸秆复混肥基本制作流程

为：首先将水稻秸秆和混合无机盐原料粉碎，然后分别过0.25 mm孔径筛，接着按照质量比1:4复混，并添加2%的黏结助剂和适量的水，最后把复混后的料浆通过模具制成球胚，在滚筒中使用热风枪在60℃最大风量下烘干。通过该工艺流程制成的肥料球，其无机养分含量基本相同，大小基本一致，强度也符合后续试验要求。

3 新型秸秆复混肥肥效验证试验

本研究的新型秸秆复混肥的肥效期望是通过一颗肥料球供应植株全生长周期的养分，故设计栽培试验与目前大范围推广的一次性条施肥和一次性穴施两种一次性施肥技术对比，比较相同化学纯氮量下，不同一次性施肥方式对玉米全生长周期的影响。

3.1 试验地概况

2022年在江苏沿江地区农业科学研究所薛窑基地(120.87°E, 32.01°N)进行试验。该地位于长江中下游地区，地势低平，属于亚热带季风气候，气候温和，无霜期长，夏季高温多雨，冬季温和少雨，雨热同期。试验地土壤肥力较高，耕作层(0~20 cm)土壤 w (有机质) 24.45 g/kg, w (全氮) 1.60 g/kg, w (速效磷) 24.99 mg/kg, w (速效钾) 91.67 mg/kg, pH值7.94。

3.2 试验设计

玉米供试品种为苏玉30(国审玉2011022)。苏玉30由江苏沿江地区农业科学研究所选育，适宜在江苏省中南部种植，是江苏省大面积推广品种，具有地区代表性。

2022年7月22日播种，密度为67 500株/hm²，采用宽窄行种植方式。株距20 cm，行距：窄行30 cm，宽行103 cm。设置3种施肥方式，即条施、穴施、肥料球穴施，均为一次性基施，后期不再追肥，施肥方法如图1所示。每个处理设置3次重复，

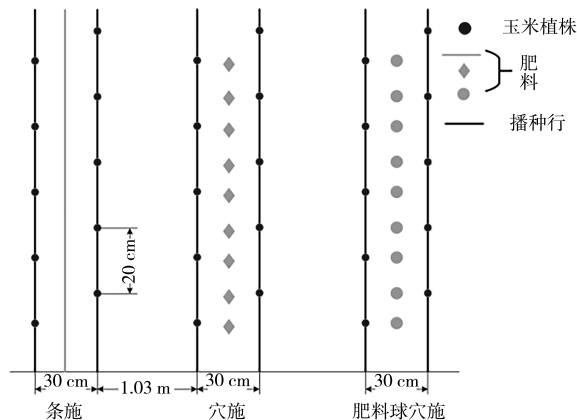


图1 试验设置示意

Fig.1 Schematic diagram of the test setup

每次重复为一个小区，小区面积约92 m²。条施和穴施处理施用复合肥(15-15-15) 2 000 kg/hm²，肥料球穴施处理施用含有29.6 g混合无机盐的新型秸秆复混肥肥料球，所有处理均在10月25日统一收获。

3.3 测定项目与方法

(1) 株高、穗位高、茎粗及产量测定。每个重复各取5株代表性玉米植株，测量其拔节期、大喇叭口期和籽粒充实期的株高，并在籽粒充实期测量样品的穗位高和茎粗，并估计最终产量。

(2) 玉米有效叶面积测定。每个重复试验各取5株代表性玉米植株，测量其拔节期、大喇叭口期和籽粒充实期每片绿叶的长宽，记单叶叶片长度的最大值为 L_{max} ，单位是cm；记单叶叶片宽度的最大值为 D ，单位是cm；单叶伸展系数 $r=0.75$ 。单株有效叶面积计算公式为 $S = \sum L_{max} \times D \times r$ 。

(3) 单株干物质质量测定。分别于拔节期、大喇叭口期、籽粒充实期和成熟期取各小区具有代表性的5株植株作为样品，在烘箱中设定105℃烘30 min杀青，然后设定80℃烘干至恒质量并称量。

(4) 单株氮素含量测定。分别于拔节期、大喇叭口期、籽粒充实期和成熟期取各小区具有代表性的5株植株作为样品，将拔节期和大喇叭口期的样品分为茎秆和叶片2部分，将籽粒充实期的样品分为茎秆、叶片和苞叶3部分，将成熟期的样品分为茎秆、叶片、苞叶、穗轴和籽粒5部分，测定其氮素含量，记为 w (mg/g)，将植株各部分干物质质量记为 m (g)，单株氮素质量 $m(N)$ 的计算方法为： $m(N) = \sum w \times m / 1000$ 。

(5) 玉米成熟期单株各部分氮素分配比率(α)计算。 $\alpha = w \times m \times 100\% / (1000 \times m(N))$ 。

3.4 统计结果与分析

采用Excel 2019处理数据。用DPS7.05软件统计分析，在0.05水平进行数据显著性检验(LSD)分析，用SPSS 17.0对数据进行相关性分析。

3.4.1 对玉米株高、穗位高、茎粗及产量的影响

各施肥方式下玉米株高、穗位高、茎粗及产量见表4。由表4可知，肥料球穴施处理在拔节期的株高水平与条施肥和穴施肥处理无明显差异，但比穴施肥处理提高了5.6%，比条施处理降低7.0%；肥料球处理在拔节期的株高与条施处理相比差异明显，低了7.9%，与穴施处理的差异无统计学意义，但低了3.7%；籽粒充实期株高与条施和穴施肥处理差异明显，分别降低了12.6%和7.13%。肥料球穴施处理籽粒充实期的穗位高与条施和穴施处

理差异显著，分别降低了14.5%和6.8%。肥料球穴施处理的茎粗与条施和穴施处理的差异无统计学意义，但分别粗了33.3%和11.1%。肥料球处理的籽粒产量与条施和穴施处理的差异无统计学意义，但分别高了1.8%和0.8%。

表4 各施肥方式下玉米株高、穗位高、茎粗及产量

Table 4 Plant height, spike height, stem thickness and yield of corn in various fertilization methods

施肥方式	拔节期 株高/cm	大喇叭口期 株高/cm	籽粒充实期			籽粒产量/ (kg·hm ⁻²)
			株高/ cm	穗位高/ cm	茎粗/ cm	
条施	78.9 a	136.3 a	207.1 a	86.3 a	1.5 a	8 367.0 a
穴施	69.5 a	130.4 b	194.9 a	79.2 b	1.8 a	8 450.7 a
肥料球 穴施	73.4 a	125.5 b	181.0 b	73.8 c	2.0 a	8 518.3 a

3.4.2 对玉米单株有效叶面积的影响

各施肥方式下玉米单株有效叶面积见表5。由表5可知，拔节期肥料球穴施处理的单株有效叶面积水平与条施处理无差异，但与穴施处理差异较为明显，比穴施肥处理高了25%；大喇叭口期肥料球穴施处理的叶面积水平较其他两种施肥方式的差异无统计学意义，但比条施处理低了10%，比穴施处理高了7.1%；籽粒充实期肥料球穴施处理的叶面积水平较条施处理差异较为明显，低了6.9%，与穴施处理的差异无统计学意义，但低了1.8%。

表5 各施肥方式下玉米单株有效叶面积

Table 5 Effective leaf area of corn in various fertilization methods

施肥方式	单株有效叶面积/m ²		
	拔节期	大喇叭口期	籽粒充实期
条施	1.5 a	5.0 a	5.8 a
穴施	1.2 b	4.2 a	5.5 b
肥料球穴施	1.5 a	4.5 a	5.4 b

3.4.3 对玉米单株干物质质量的影响

各施肥方式下玉米单株干物质质量见表6。由表6可知，有效叶面积，肥料球穴施处理在拔节期的单株干物质质量水平，与条施处理存在显著差异，高了13.3%，与穴施处理的差异无统计学意义，但高了2.5%；在大喇叭口期的单株干物质水平与条施和穴施处理都存在显著差异，分别高了10.3%和12.5%；在籽粒充实期的单株干物质质量水平，与条施处理存在显著差异，高了5.1%，与穴施处理的差异无统计学意义；在成熟期与条施和穴施处理差异明显，分别高了2.3%和12.2%。

表6 各施肥方式下玉米单株干物质质量

Table 6 Dry matter quality of corn monoculture plants in various fertilization methods

施肥方式	单株干物质质量/g			
	拔节期	大喇叭口期	籽粒充实期	成熟期
条施	25.5 b	105.8 b	117.8 b	247.1 b
穴施	28.2 a	103.7 b	123.7 a	225.3 c
肥料球穴施	28.9 a	116.7 a	123.8 a	252.7 a

3.4.4 对玉米单株氮素质量的影响

各施肥方式下玉米单株氮素质量见表7。由表7可知，肥料球穴施处理在各时期与条施和穴施处理的单株氮素质量水平均存在显著差异；拔节期单株氮素质量分别提高了20.5%、29.9%；在大喇叭口期分别提高了34.4%和7.9%；在籽粒充实期较条施肥条理提高了13.2%，较穴施处理低了6.5%；在成熟期分别提高了34.4%和13.1%。

表7 各施肥方式下玉米单株氮素质量

Table 7 Nitrogen quality of corn monoculture plants in various fertilization methods

施肥方式	单株氮素质量/g			
	拔节期	大喇叭口期	籽粒充实期	成熟期
条施	0.83 b	6.1 c	3.8 c	9.0 c
穴施	0.77 b	7.6 b	4.6 a	10.7 b
肥料球穴施	1.00 a	8.2 a	4.3 b	12.1 a

3.4.5 对玉米成熟期单株氮素分配比率的影响

各施肥方式下玉米成熟期单株氮素分配比率见表8。由表8可知，肥料球穴施处理各部位的氮素分配比率对比条施处理和穴施处理均存在一定差异，在茎秆、叶片、穗轴、苞叶4个部位的氮素分配比率均处于最低水平或与最低水平的差异无统计学意义。在茎秆部位肥料球穴施与条施处理存在显著差异，低了3.17%，与穴施处理的差异无统计学意义；在叶片部位分配的氮素比例与条施的差异无统计学意义，与穴施处理存在差异，低了16.8%；在苞叶、穗轴两个部位，对比条施处理分别低了34.6%、6.6%，对比穴施分别低了43.3%、1.16%。但是，肥料球穴施处理籽粒中氮素分配比率最高，比条施处理和穴施处理分别高3.0%和9.8%，即肥料球穴施处理的玉米在籽粒中分配的氮素较多。

表8 各施肥方式下玉米成熟期单株氮素分配比率

Table 8 Nitrogen partitioning ratios of monoculture at maturity in corn in various fertilization methods

施肥方式	氮素分配比率/%				
	茎秆	叶片	苞叶	穗轴	籽粒
条施	12.6 a	19.1 b	2.6 b	9.1 a	56.6 b
穴施	12.1 b	23.2 a	3.0 a	8.6 b	53.1 c
肥料球穴施	12.2 b	19.3 b	1.7 c	8.5 b	58.3 a

3.5 讨论与分析

田间栽培试验结果表明,在一次性施肥的条件下,在保证产量不变的前提下,肥料球穴施处理相较于穴施和条施处理表现出了较为明显的矮壮趋势,株高、穗位高较低,茎秆较粗,提高玉米的抗倒伏能力。虽然肥料球穴施对各时期的单株有效叶面积与其他处理差异不大,但肥料球产品本身施用更加方便和精准,没有颗粒肥的各种缺陷。肥料球穴施在各时期的干物质积累量均最高且成熟期较其他处理有明显差异。肥料球穴施处理除了籽粒充实期外,在其余各时期的单株氮素质量均最高,籽粒中的氮素分配比率最高。新型秸秆复混肥具有绿色、环保、低碳、节本且适宜机械化作业的优势,对推进化肥减量增效的工程具有重要意义。

4 总结与展望

新型秸秆复混肥的提出,是基于目前传统颗粒肥的缺陷及秸秆深埋还田配施化肥对农作物产量和品质的促进作用。本研究通过一系列试验逐步探索出了这种新型秸秆复混肥的主要工艺流程和关键工艺参数,并成功实现了批量生产。通过苏玉30玉米的栽培试验验证了其肥效,发现施用该肥料还能够提高玉米的抗倒伏能力,提高玉米的干物质质量、单株氮素质量和籽粒中的氮素分配比率,但对其作用机制尚有待进一步研究。新型秸秆复混肥将肥料做成球状,相当于为农作物定制的营养胶囊,未来可根据农作物种类定制养分配比,一颗肥料可以提供一株农作物一生所需的养分,施用方式更加简单,更加适合机械化作业。在后续研究工作中可针对其缓释功能进行升级,通过喷涂包膜材料实现养分的可控释放,进一步深入研究其作用机制。

【参考文献】

[1] 中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2023.
National Bureau of Statistics of China.China Statistical Yearbook [M]. Beijing:China Statistics Press,2023.

[2] 付浩然,李婷玉,曹寒冰,等.我国化肥减量增效的驱动因素探究[J].植物营养与肥料学报,2020,26(3):561-580.
FU H R, LI T Y, CAO H B, et al. Research on the driving factors of fertilizer reduction in China [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020,26(3):561-580.

[3] ZHANG X,DAVIDSON E A,MAUZERALL D L,et al. Managing nitrogen for sustainable development [J]. Nature, 2015, 528: 51-59.

[4] 刘旭杰,严旖旎,单海勇,等.我国新型肥料产业现状与发展展望[J].磷肥与复肥,2024,39(2):1-5.
LIU X J, YAN Y N, SHAN H Y, et al. Current situation and development outlook of new type fertilizer industry in China [J].

Phosphate & Compound Fertilizer, 2024,39(2):1-5.

[5] 韩笑,张晋,石吕,等.稻秸行间集覆宽窄行播种技术下小麦经济效益和碳效率分析[J].大麦与谷类科学,2023,40(2):62-67.
HAN X, ZHANG J, SHI L, et al. Analysis of the Economic Benefits and Carbon Efficiency of Wheat Production Using the Technology of Centralizing Rice Straw to Cover Wide Rows and Sowing in Narrow Rows [J]. Barley and Cereal Sciences, 2023, 40(2):62-67.

[6] 薛亚光,魏亚凤,李波,等.麦秸还田和耕作方式对水稻产量和品质的影响[J].中国农学通报,2018,34(22):10-14.
XUE Y G, WEI Y F, LI B, et al. Wheat Straw Returning and Tillage Patterns Affecting Grain Yield and Quality of Rice [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018,34(22):10-14.

[7] 薛亚光,魏亚凤,李波,等.不同稻秸还田方式对冬小麦产量及冻害的影响[J].中国农学通报,2017,33(32):58-63.
XUE Y G, WEI Y F, LI B, et al. Different Rice Straw Returning Patterns: The Effects on Yield and Freezing Injury of Winter Wheat [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017,33(32): 58-63.

[8] 张馥显,艾秀兰,童小英,等.球磨工艺对SiC粉体研磨质量影响的研究[J].铸造设备与工艺,2023(5):18-21.
ZHANG F X, AI X L, TONG X Y, et al. Study on the Influence of Ball Milling Process on the Grinding Quality of SiC Powder [J]. Foundry Equipment and Technology, 2023(5):18-21.

[9] 孟翠萍.新型大颗粒缓控释肥料的制备及在花生种植的应用[D].青岛:青岛科技大学,2023.
MENG C P. Preparation and Application in Peanut Planting of a New Large Granular Slow Controlled Release Fertilizer for Peanut [D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2023.

[10] 严旖旎,单海勇,刘旭杰,等.3种一次性施肥方式对夏玉米生长发育及氮素利用的影响[J].大麦与谷类科学,2023,40(3): 41-46.
YAN Y N, SHAN H Y, LIU X J, et al. Effects of Three One-off Fertilization Methods on Growth and Nitrogen Utilization of Summer Maize [J]. Barley and Cereal Sciences, 2023, 40(3): 41-46.

[11] 王冲威,张天赐,金听祥,等.生物基多孔炭复合相变材料的制备及性能研究[J/OL].化工新型材料.https://doi.org/10.19817/j.cnki.issn/006-3536.2024.09.003.
WANG C W, ZHANG T C, JIN T X, et al. Preparation and performance study of bio-based porous carbon composite phase change material [J/OL]. New Chemical Materials. https://doi.org/10.19817/j.cnki.issn/006-3536.2024.09.003.

[12] 杨阳,崔彦.秸秆纤维对混凝土复合材料抗冻性能的影响[J].塑料科技,2024,52(2):75-77.
YANG Y, CUI Y. Effect of Straw Fiber on Frost Resistance of Concrete Composites [J]. Plastics Science and Technology, 2024,52(2):75-77.

[13] 李医虹,李亚飞,冯小东,等.微波陶瓷介质滤波器成型烧结工艺可靠性研究[J].压电与声光,2024,46(2):164-170.
LI Y H, LI Y F, FENG X D, et al. Reliability Study on the Molding and Sintering Process of Microwave Ceramic Dielectric Filter [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2024, 46(2): 164-170.