◆提质增效产品创制技术◆

杂卤石钾基复合肥料转鼓造粒工艺探索及其肥效验证

陈　旭，匡家灵，陈月舞，舒艺周，周吉天，徐　若

（云南云天化以化磷业研究技术有限公司，云南 昆明　650228）

［摘　要］结合杂卤石特性、在肥料中应用现状及存在问题，开展转鼓造粒工艺探索实验。通过对造粒水分、造粒温度、物料细度、物料返料比、干燥条件等工艺参数的实验研究，得到较优工艺参数，并基于优选工艺参数进行验证实验制得合格产品。实验表明，采用转鼓造粒装置以杂卤石为原料制备复合肥时，造粒水分添加量在19%、造粒温度在>70～80 ℃、<2 mm颗粒返料率在20%、在140 ℃下烘干15 min，可制备满足预期15-23-10要求的合格产品，其颗粒强度达到20.9 N；肥效实验表明，杂卤石钾基复合肥料在水稻农艺性状、产量及构成要素方面与市场其他水稻肥相比无显著差异，且在穗粒数、实粒数、产量等方面还表现出优势。实验结果将为杂卤石钾基复合肥料工业化生产的工艺参数确定及装置设计提供重要理论依据。

［关键词］杂卤石；钾；复合肥料；转鼓造粒；肥效验证

［中图分类号］TQ444.5　　［文献标志码］B　　［文章编号］2097-4566（2026）06-0056-06

Research on drum granulation process of polyhalite potassium-based compound fertilizers and fertilizer efficacy verification

CHEN Xu, KUANG Jialing, CHEN Yuewu, SHU Yizhou, ZHOU Jitian, XU Ruo

(*Yunnan ICL-YTH Phosphate Research and Technology Co., Ltd., Kunming* 650228, *China*)

Abstract: Based on the characteristics of polyhalite, current applications in fertilizer, and existing challenges, exploratory experiments on drum granulation processes are conducted. Through systematic investigation of key process parameters, including granulation moisture content, temperature, material fineness, recycle ratio, and drying conditions, optimal parameters are identified. Verification experiments under these optimized conditions successfully produce qualified products. The results demonstrate that when using polyhalite as a raw material in drum granulation, a compliant product with a target nutrient content of 15-23-10 and a granule strength of 20.9 N is obtained under the conditions which water addition amount of 19% during granulation, granulation temperature of >70 - 80 ℃, <2 mm material recycle ratio of 20%, and drying at 140 ℃ for 15 minutes. Fertilizer efficiency experiments have shown that the polyhalite potassium-based compound fertilizer has no significant differences in rice agronomic traits, yield and its constituent elements compared to other rice fertilizers on the market, and exhibits advantages in terms of grain number per spike, actual grain number, and yield. These findings provide critical theoretical support for determining industrial-scale process parameters and equipment design in polyhalite potassium-based compound fertilizer production.

Key words: polyhalite; potassium; compound fertilizer; drum granulation; fertilizer efficacy verification

钾是植物正常生长发育所必需的矿质营养元素之一。根据近些年数据，我国每年钾肥需求量在1 500万～2 000万t；由于国内钾资源有限，钾盐储量仅占全球的5%，我国钾肥很大程度上依赖进口[1]。随着我国钾肥需求问题日益突出，以及钾肥价格持续攀升，寻找潜在钾资源对于改善我国钾肥的需求状况具有重大意义。杂卤石［$K_2Ca_2Mg(SO_4)_4·2H_2O$］是一种蒸发岩矿物，不仅含钾（K），还含有钙（Ca）、

收稿日期：2026-03-24

作者简介：陈　旭（1992—　），男，吉林吉林人，助理工程师，主要从事磷化工和肥料技术研发。

通信作者：匡家灵（1983—　），男，云南保山人，高级工程师，主要从事磷化工和肥料技术研发。

镁（Mg）和硫酸盐（SO_4^{2-}），可为农作物提供营养元素，同时其盐度指数极低，连续多年大量使用不会造成土壤盐害发生，是一种很有利用前景的资源[2-3]。以杂卤石作为钾源制备肥料，对于缓解我国钾肥资源短缺现状具有重要意义。

杂卤石中$w(K_2O)$为12%～14%、w(CaO)为17%～18%、w(MgO)为6%～7%、w(S)达19%～20%，其成分以化学键结合，在水中溶解度低（25 ℃下100 mL水中溶解度约为0.3 g），具备平稳缓释特性，且不含氯及重金属，适用于忌氯作物与盐渍化土壤改良[4-6]。经过长期探索与实践，目前杂卤石作为肥料应用主要有3种方式：一是对高纯度杂卤石直接研磨或造粒制成钾肥；二是通过纳米研磨或化学活化提高溶解释放效率；三是与磷肥混合制包膜型磷钾镁肥，用于酸性土壤[7-10]。

大量研究表明，杂卤石作为钾源肥料在多种作物上具有良好的肥效：可用于烟叶种植，促进钾、钙、镁平衡供应，改善产量和品质；在酸性土壤中施用，可调节pH，有助于缓解土壤酸化，提升樱桃品质与产量；与硫酸钾混施可提高玉米钾肥利用效率，促进生长并改善土壤；用于番茄栽培则可显著提高产量、改善果实品质与土壤肥力[11-14]。

杂卤石基钾肥虽有诸多优势，但在实际应用中也存在若干问题：一是养分释放速率不易调控，易造成前期养分供应不足、后期养分过剩；二是粉末吸湿性强，暴露后机械性能变化快，影响均匀施用；三是颗粒成型性差、强度低、粒度不均，易破碎结块，导致施肥效率下降。杂卤石的养分释放不可控及物理性状缺陷，限制了其在肥料领域的应用。造粒工艺可有效改善肥料物理性能，提高颗粒强度，减少储运和施用过程中的损失。同时，在造粒过程中可精准调配氮、磷、钾及中微量元素，避免养分失衡并调控释放速率，从而减少环境污染，提升农学与生态效益。目前较为可行的方式是将粉状杂卤石与氮磷钾肥料混合造粒制成易于施用的颗粒产品。本文开展杂卤石钾基复合肥料转鼓造粒工艺探索实验，制备性能优良的复合肥料，为杂卤石资源的开发利用及复合肥料生产提供理论与技术支撑。

1　实验部分

1.1　实验原料与设备

（1）实验原料：杂卤石，$w(K_2O)$ ≥12.5%、$w(SO_3)$ ≥46%、w(MgO) ≥5.5%、w(CaO) ≥16%；磷酸一铵，w(总N) ≥8.9%、$w(P_2O_5)$ ≥46.5%；尿素，w(总N) ≥46%；硫酸钾，$w(K_2O)$ ≥52%。其中，杂卤石和磷酸一铵均产自云南磷化集团海口磷业有限公司，尿素产自云南云天化股份有限公司，硫酸钾产自唐山三孚钾肥有限公司。

（2）实验设备：单螺旋混合机（皖江/DSH-10L型），昆明滇田机械设备安装有限公司；转鼓造粒机，公司自制；转鼓干燥机，公司自制；振动筛标准筛分机，泉州市华顿机械设备有限公司；颗粒强度测定仪（KQ-3型），云南省化工研究院有限公司。

1.2　实验方法

本实验根据杂卤石物料的特性，依托转鼓造粒装置，与其他不同原料复配，开展目标养分为15-23-10的复合肥探索性实验及测试，其中目标产品中K_2O均来源于杂卤石，P_2O_5来源于磷酸一铵，N则由磷酸一铵和尿素提供。将一定配比的杂卤石和其他物料经混合机均匀混合，置于转鼓造粒机中，调整温度、水分和转速，借助筒体的旋转，使物料粒子间产生挤压力，团聚成球状颗粒；通过干燥机烘干水分后，转移至振动筛标准筛分机进行筛分，颗粒粒径在2.00～4.75 mm满足机械施肥均匀度要求，即为合格的肥料产品。

以等氮等磷等钾为原则，设计研究开发的15-23-10复合肥与市场水稻肥15-11-14复合肥(w(有效钙) 5.45%、w(有效镁) 1.52%、w(可溶性硅) 2.79%)、23-12-10复合肥在水稻上开展肥效对比评价，按照667 m^2水稻目标产量600～700 kg，667 m^2总需肥量为N 18 kg、P_2O_5 8 kg、K_2O 15 kg（吸收纯量）计算施肥量，不足部分以磷酸二铵、尿素和氯化钾补充。

实验过程中，主要考察造粒产品率和颗粒强度指标，以此对造粒性能进行评价。其中：

$$\text{造粒产品率} = m_1 \times 100\%/m_2。 \quad (1)$$

式中，m_1为干燥后粒径在2.00～4.75 mm的合格品质量；m_2为用于造粒的干燥物料总质量。

颗粒强度，取大小均匀的20粒合格品肥料，采用KQ-3型颗粒强度测定仪测定。

肥效评价中，主要观察农艺性状（株高、茎粗、叶绿素含量）、理论产量及构成要素等指标。

2　结果与分析

2.1　物料粒度对造粒产品率的影响

将杂卤石研磨、筛分成≤0.80 mm、>0.80～1.25 mm、>1.25～1.50 mm 3种粒径，在$w(H_2O)$ 16%～18%、温度70～80 ℃、转速25 r/min条件下造粒，造粒产品率结果见图1。由图1可知，随着杂卤石粒度增大，造粒产品率呈现降低趋势，这是因

为杂卤石本身属于沙性材料，黏性较差，同等条件下颗粒越细越容易成粒。从机制分析，杂卤石属硫酸盐型矿物，晶体致密、表面亲水性差，为典型难成球材料。细颗粒（粒径≤0.80 mm）比表面积大、接触点多，水分易均匀润湿形成稳定液桥，毛细管力强，可有效克服颗粒分离力促进团聚。粗颗粒（粒径 >0.80 mm）比表面积小、孔隙率大，液桥连接强度不足，且滚动时易发生相对滑动而非黏附，成粒率显著降低。因此确定杂卤石最优粒径为≤0.80 mm。

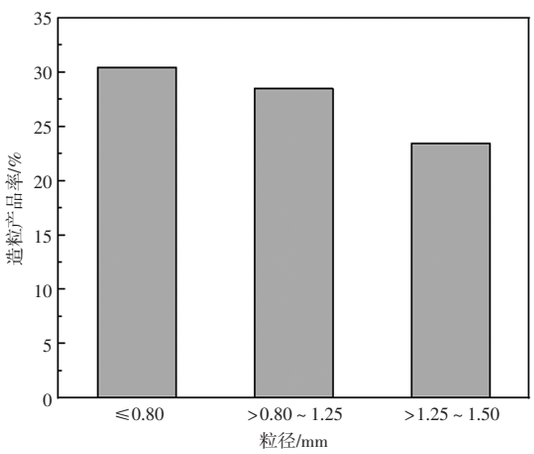

图 1　杂卤石粒度对造粒产品率的影响

Fig. 1　Effect of polyhalite particle size on granulation product yield

2.2　水分对造粒产品率的影响

液相量是造粒过程的主要控制因素。将造粒 $w(H_2O)$ 控制在 17%、18%、19%、20%，在杂卤石粒径≤0.80 mm、温度 70 ~ 80 ℃、转速 22.5 r/min 条件下造粒，造粒产品率结果见图 2。由图 2 可知，造粒产品率随水含量增加先升后降，$w(H_2O)$ 超过 19%后大颗粒增多，造粒产品率降低。通过调控液相量影响成粒：$w(H_2O)$ 低于 18%时液桥数量少、强度低，细粉难以团聚；$w(H_2O)$ 19%时液相量适中，液桥分布均匀，颗粒密实成形；$w(H_2O)$ ≥ 20%后颗粒过湿，形成低强度大团聚体，在转鼓翻滚中易被挤压破碎。因此造粒过程 $w(H_2O)$ 最优范围为 18% ~ 20%，最佳值约 19%。

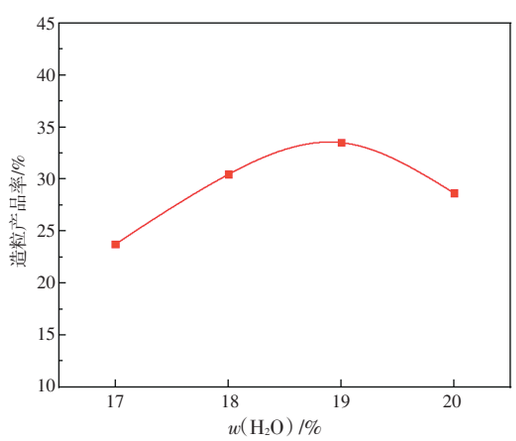

图 2　水分对造粒产品率的影响

Fig. 2　Effect of moisture content on granulation product yield

2.3　温度对造粒产品率的影响

将造粒温度维持在 50 ~ 60 ℃、>60 ~ 70 ℃、>70 ~ 80 ℃、>80 ~ 90 ℃ 4 个范围，在杂卤石粒径≤0.80 mm、$w(H_2O)$ 18% ~ 20%、转速 22.5 r/min 条件下造粒，造粒产品率结果见图 3。由图 3 可知，造粒产品率随温度升高先增后降，温度>70 ~ 80 ℃时造粒产品率最高，温度超过 80 ℃后水分减少、小颗粒增多。温度通过影响盐类溶解度和水分蒸发速率双重机制作用于造粒。当温度>70 ~ 80 ℃时，杂卤石中 K^+、Ca^{2+}、SO_4^{2-}等溶解度升高，液桥黏结强度增加，利于颗粒均匀长大。当温度为>80 ~ 90 ℃时，虽然溶解度进一步提高，但水分蒸发加快，体系实际液相量减少，反而降低黏附能力。因此>70 ~ 80 ℃是溶解度提升正效应与水分蒸发负效应的平衡区间，为最佳造粒温度。

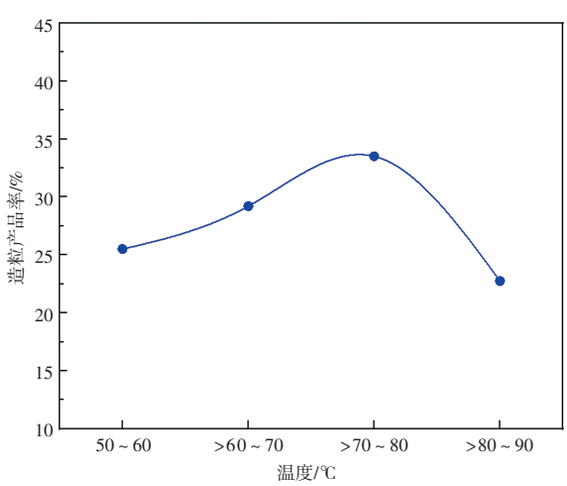

图 3　温度对造粒产品率的影响

Fig. 3　Effect of temperature on granulation product yield

2.4　滚筒转速对造粒产品率的影响

将滚筒转速分别调节至 17.5、20.0、22.5、25.0、27.5 r/min，在杂卤石粒径≤0.80 mm、$w(H_2O)$ 18% ~ 20%、温度>70 ~ 80 ℃条件下造粒，造粒产品率结果如图 4 所示。由图 4 可知，造粒产品率随转速提升先升后降，转速为 25.0 r/min 时最优，达到 27.5 r/min 后冲击破坏加剧。转速通过改变物料翻滚频率和冲击能量影响造粒。当转速为 17.5 ~ 22.5 r/min 时，物料以滚动为主，碰撞能量低，团聚效率不高；当转速为 25.0 r/min 时，物料被提升

至适当高度呈瀑布状落下，适度碰撞促进黏附长大；当转速达到27.5 r/min时，离心力增大，部分物料贴壁旋转破坏抛落轨迹，同时高处下落颗粒冲击动能过大，造成颗粒破碎、粒径不均。因此，25.0 r/min是平衡成粒速率与颗粒完整性的最优转速。

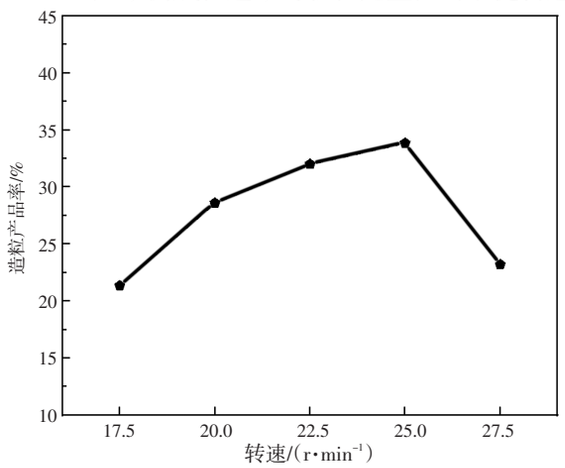

图4　转速对造粒产品率的影响

Fig. 4　Effect of rotational speed on granulation product yield

2.5　物料返料率对造粒产品率的影响

工业化生产常常伴随有返料的加入，将粒度＜2 mm的小颗粒作为返料，添加量分别占总物料的0、15%、20%、25% 4个比例，在杂卤石粒径≤0.80 mm、$w(H_2O)$ 18%～20%、温度>70～80 ℃、转速25.0 r/min条件下造粒，造粒产品率结果见图5。

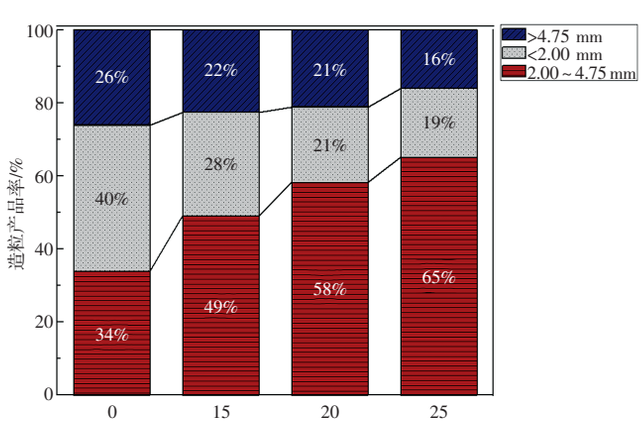

图5　返料率对造粒产品率的影响

Fig. 5　Effect of recycle rate on granulation product yield

由图5可知，造粒产品率随返料率增加呈线性增长，但返料率达到25%后，粒度＜2 mm的小颗粒仅占19%，以该部分物料作为下一批次造粒的返料时，返料不足，不利于下一次造粒循环。综合分析，返料率在20%时，粒径＜2 mm的小颗粒占比21%，可以形成造粒平衡循环体系，故为最佳返料率。返料充当“晶核”角色，其表面被水分润湿后，细粉逐层包裹形成“核-壳”结构，提高成粒速率并赋予产品一定强度。从循环可持续性考量，20%返料率可确保连续生产时物料组成恒定。

2.6　干燥温度、时间对颗粒强度的影响

刚造粒后的肥料颗粒含有大量水分，水含量高，颗粒强度弱，容易崩塌，不利于保管、运输和施用，因而需要干燥。在转鼓干燥机内温度80、100、120、140、160 ℃条件下分别烘干5、10、15、20、25 min后冷却至室温，测试颗粒强度，结果见表1。由表1可知，在140 ℃下烘干15 min，颗粒强度21.3 N，效果最佳。140 ℃时水分均匀蒸发，溶解盐类迁移至表面及接触点重新结晶，形成“晶桥”，强度显著增大。15 min短时干燥可实现表面快速定型，避免颗粒因长时间滚动摩擦而破碎。

表1　干燥温度、时间对颗粒强度的影响

Table 1　Effect of drying temperature and time on granule strength

干燥温度/℃	不同干燥时间(min)下平均颗粒强度/N				
	5	10	15	20	25
80	2.7	4.1	6.5	9.2	13.5
100	3.2	4.9	8.1	11.7	16.5
120	5.4	7.8	12.1	19.3	17.6
140	9.6	13.6	21.3	17.2	14.2
160	12.4	17.2	18.5	13.1	10.7

2.7　基于优选工艺参数的验证实验

以上述优选的最佳条件，开展造粒验证实验。结果显示，造粒产品率达58.2%，平均颗粒强度20.9 N，所得产品主要养分含量如表2所示。由表2可知，产品养分含量符合预设的目标产品15-23-10要求，且优于GB/T 15063—2020复合肥料中的各项技术指标。产品颗粒外观呈灰白色类球

表2　杂卤石钾基复合肥15-23-10养分含量分析

Table 2　Nutrient content analysis of polyhalite potassium-based compound fertilizer 15-23-10　%

项目	w(总养分)	w(N)	w(有效P_2O_5)	w(水溶P_2O_5)	w(K_2O)	水溶性磷占有效磷比例	w(H_2O)	w(Cl)	w(有效Ca)	w(有效Mg)	w(S)
标准要求①	≥40.0					≥60	≤2.0	≤3.0	≥1.0	≥1.0	≥2.0
产品	49.1	15.4	23.5	19.4	10.6	84.2	1.4	0.9	1.2	1.5	7.2

注：①GB/T 15063—2020高浓度复合肥指标。

形，轮廓较为圆润，表面相对粗糙但无明显粉粒附着或孔隙结构，产品见图6，可以得到合格的粒状杂卤石钾基复合肥料。



图6 杂卤石钾基复合肥15-23-10转鼓造粒产品

Fig. 6 Drum granulation product of polyhalite potassium-based compound fertilizer 15-23-10

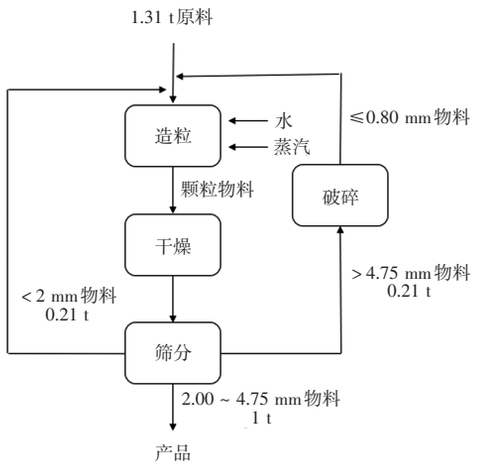

图7 杂卤石钾基复合肥转鼓造粒主要物料平衡简易流程

Fig. 7 Simplified material balance flow for main materials in drum granulation of polyhalite compound fertilizer

在验证实验中，通过对主要物料平衡进行计算，得出了图7所示结果。其中粒径<2 mm的物料为0.21 t，该部分物料无需加工处理，可直接全部返回造粒机作为小颗粒核心，能够有效改善造粒效果，这一现象与前述研究中物料返料率对造粒影响的结果一致。同时，也进一步验证了在较优工艺条件下，利用小颗粒返料可维持造粒系统平衡，显著提升造粒效率与质量。

3 肥效评价

3.1 杂卤石钾基复合肥对水稻农艺性状的影响

不同处理对水稻株高、茎粗及叶绿素含量的影响分别见表3和表4。由表3、表4可知，以杂卤石为原料，通过转鼓造粒工艺制备的15-23-10复合肥在有效钙、有效镁、可溶性硅含量低于15-11-14的情况下，水稻各时期的株高、茎粗以及叶绿素含量（SPAD值）与15-11-14和23-12-10复合肥处理无显著差异。

表3 不同处理对水稻株高、茎粗的影响

Table 3 Effect of different treatments on plant height and stem diameter of rice

肥料	株高/cm			茎粗/mm		
	分蘖期	齐穗期	成熟期	分蘖期	齐穗期	成熟期
15-11-14	74.10 ± 3.60a	130.80 ± 6.76a	134.06 ± 7.00a	11.38 ± 1.06a	11.74 ± 1.40a	10.90 ± 1.24a
23-12-10	75.26 ± 3.73a	134.18 ± 6.84a	138.22 ± 7.13a	11.71 ± 1.18a	11.22 ± 1.38a	9.55 ± 1.09a
15-23-10	80.14 ± 4.12a	142.20 ± 6.86a	151.70 ± 7.87a	11.06 ± 1.02a	11.15 ± 1.24	9.73 ± 1.06a

表4 不同处理对水稻叶绿素含量（SPAD值）的影响

Table 4 Effect of different treatments on chlorophyll content （SPAD value） of rice

肥料	分蘖期	齐穗期	成熟期
15-11-14	38.05 ± 4.00a	45.20 ± 1.09a	49.74 ± 1.10a
23-12-10	38.76 ± 4.51a	44.76 ± 0.99a	47.90 ± 0.98a
15-23-10	40.20 ± 4.04a	44.88 ± 0.45a	49.30 ± 1.25a

3.2 杂卤石钾基复合肥对水稻产量及其构成要素的影响

不同处理对水稻产量及其构成要素的影响见表5。从表5可以看出，以杂卤石为原料，通过转鼓造粒工艺制备的15-23-10复合肥在有效钙、有效镁、可溶性硅含量低于15-11-14复合肥的情况下，水稻穗粒数、实粒数、千粒质量、结实率和产量与市场水稻复合肥15-11-14和23-12-10均无显

表5 不同处理对水稻产量及构成要素的影响

Table 5 Effect of different treatments on yield and its components

肥料	穗粒数	实粒数	千粒质量/g	结实率/%	667 m^2理论产量/kg	667 m^2实际产量/kg
15-11-14	283.33 ± 41.49a	244.68 ± 41.04a	25.29 ± 2.45a	88.86	788.93	754.64a
23-12-10	289.25 ± 41.87a	250.75 ± 32.24a	25.09 ± 0.57a	90.32	776.54	751.58a
15-23-10	296.75 ± 29.78a	265.50 ± 26.64a	26.28 ± 0.58a	86.01	848.53	816.10a

著差异，在穗粒数、实粒数、产量等方面还表现出优势，即杂卤石钾基复合肥对水稻产量及其构成要素与市场其他水稻肥无显著差异，其产量也高于15-11-14处理，以及不含钙、镁的23-12-10复合肥处理。

4　结论

本研究针对我国钾肥资源紧缺、对外依存度高的现实问题，围绕杂卤石这一潜在的多营养元素矿物资源，系统开展了其作为钾源制备复合肥料的工艺探索与效果验证研究。在系统梳理杂卤石肥料化利用研究进展的基础上，重点开展了模拟工业化条件的转鼓造粒工艺实验，并辅以农作物肥效验证实验，得出以下主要结论。

（1）工艺可行性：通过转鼓造粒的方式，杂卤石为原料的复合肥15-23-10的最佳造粒工艺参数为杂卤石粒径≤0.80 mm，造粒$w(H_2O)$为15%～20%，造粒温度在>70～80 ℃，<2 mm颗粒返料率20%，物料干燥温度140 ℃，干燥时间15 min。

（2）产品性能：在优化工艺条件下可得到造粒产品率高、大小均匀、形态圆整、颗粒强度较好且满足造粒循环体系平衡的颗粒肥。

（3）农艺性能：含杂卤石的复合肥对水稻的穗粒数、实粒数、产量等方面具有提升作用。

综上所述，杂卤石作为一种潜在的、环境友好型的多营养元素矿物资源，其在复合肥料生产中的应用是缓解我国钾肥供需矛盾、推动肥料产业绿色转型的一条值得探索的技术路径。本研究的工艺探索与肥效验证为杂卤石的农业利用提供了理论依据和技术支撑。

然而，目前的研究仍处于初步探索阶段，未来可在以下几个方面深入开展工作：一是进一步优化造粒工艺，探索更大规模连续生产条件下的设备适配性与工艺稳定性；二是深入研究杂卤石中钾、钙、镁在土壤中的释放机制及其与农作物需求的匹配规律；三是开展多种农作物、多区域的长期定位田间试验，系统评估其在不同土壤类型和气候条件下的增产效应、养分吸收效率及后效影响，为杂卤石钾基复合肥料的科学施用与大面积推广提供更为坚实的理论与实践依据。

[参考文献]

[1] 王莹.中国钾资源供需现状与资源保障程度[J].矿产勘查，2023,14(10):1805-1813.
WANG Y. The supply and demand status and resource guarantee degree of potash in China[J]. Mineral Exploration, 2023,14(10): 1805-1813.

[2] 焦鹏程,刘成林,张华,等.罗布泊盐湖深部卤水钾盐找矿取得新进展[J].矿床地质,2018,37(1): 191-194.

[3] 刘彤彤. 杂卤石不同比例替代钾肥对大樱桃产量、品质及土壤特性的影响[D].泰安:山东农业大学,2023.
LIU T T. Effect of different proportion of polyhaite replacing potassium fertilizer on cherry yield, quality and soil properties[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University,2023.

[4] 赵丽娅,李文庆.杂卤石,一种潜在的钾肥资源[J].磷肥与复肥,2015,30(4):18-21.
ZHAO L Y, LI W Q. Polyhalite, a potential resource of potash fertilizer[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2015, 30(4): 18-21.

[5] 杨柳,汤志凯.我国西南某地的杂卤石[J].中国地质,1965(3): 25-26.

[6] 谭慧婷,孙伟,崔玉照,等.钾矿资源现状与杂卤石的开发应用分析[J].无机盐工业,2022,54(6):23-30.
TAN H T, SUN W, CUI Y Z, et al. Present situation of potash resources and analysis of development and application of polyhalite[J]. Inorganic Chemicals Industry,2022,54(6): 23-30.

[7] SERGIO P P, EDUARDO C J, ALINE C S, et al.Sugarcane response to polyhalite fertilizer in Brazilian Oxisols[J]. Agronomy Journal,2020,112(6):5264-5278.

[8] 黎春阁,安莲英,汪本高.杂卤石生产硫酸钾工艺研究[J].化工矿物与加工,2013,42(7):4-7.
LI C G,AN L Y,WANG B G. Research on a process to produce potassium sulfate with polyhalite[J]. Industrial Minerals & Processing,2013,42(7): 4-7.

[9] 程怀德,海擎宇,李俊,等.昆特依盐湖杂卤石矿"焙烧-热浸"溶钾实验研究[J].无机盐工业,2019,51(1):26-28.
CHENG H D, HAI Q Y, LI J, et al. Experiment research on K extraction of polyhalite from Kunteyi salt lake by Roasting-Hot Leaching method[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2019, 51(1): 26-28.

[10] 黄宣镇.杂卤石——一种理想的钾肥[C]//中国硅酸盐学会.非金属矿物材料与环保、生态、健康研讨会论文集.北京:[出版者不详],2003:99-105.

[11] 阮彦楠,赵文军,王志远,等.杂卤石矿质肥料对烟草生长及烟叶养分含量的影响[J].安徽农业科学,2024,52(15):164-171.
RUAN Y N,ZHAO W J,WANG Z Y,et al. Effect of polyhalite mineral fertilizer on tobacco growth and nutrient in tobacco leaves[J].Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2024, 52(15): 164-171.

[12] 徐玉洁.杂卤石替代硫酸钾对大樱桃品质、养分利用及土壤肥力的影响[D].泰安:山东农业大学,2024.
XU Y J. Effect of polyhalite replacing potassium sulfate on cherry quality, nutrient utilization and soil fertility[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University,2024.

[13] 陈修光.不同类型钾肥配施杂卤石对玉米生长、根际微环境和土壤质量的影响[D].济南:山东大学,2023.
CHEN X G. Effects of different types of potassium fertilizers with polyhalite on maize growth, rhizosphere microenvironment and soil quality[D]. Jinan: Shandong University,2023.

[14] 朱岩.杂卤石配方肥对番茄产量、品质及土壤养分的影响[D].泰安:山东农业大学,2023.
ZHU Y. Effect of polyhalite formula fertilizer on tomato yield, quality and soil nutrients[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University,2023.