中低品位磷矿与钾长石制备新型矿物肥料及其在大豆上的应用效果研究

孙　卉[1]，刘友兵[2]，邓小楠[1]，吴　娟[1]，倪　颖[1]，完玲中[1]，叶泗洪[1]，黄　飞[2]，韩效钊[2,3]

（1. 安徽省农业科学院 经济作物研究所，安徽 合肥　230041；2. 安徽地源康农业科技有限公司，安徽 合肥　230001；
3. 合肥工业大学 化学与化工学院，安徽 合肥　230009）

［摘　要］以中低品位磷矿、钾长石为原料活化制备新型矿物肥料，在冷却固化产物中添加氮、磷、钾原料和补充中微量元素后造粒、自然干燥得新型矿物复合肥料。介绍生产工艺流程，考察主要工艺条件对活化反应的影响，并在大豆上开展田间肥效试验。结果表明：在活化剂的作用下，选择合理的酸用量，当中低品位磷矿粉与钾长石粉质量比大于2、反应温度在150 ℃以上时，磷活化率可达90%左右，钾活化率可达70%以上。每667 m²基施新型矿物复合肥料30 kg，与基施同等质量16-16-16传统复合肥料相比，每667 m²增产38.1 kg，增产率达18.3%；每667 m²纯增收188.36元；同时减氮68.75%、减磷25.00%、减钾50.00%。

［关键词］新型矿物肥料；生产工艺；应用效果
［中图分类号］S143.58　　［文献标志码］B　　［文章编号］2097-4566（2025）12-0038-06

Preparation of a new mineral fertilizer from medium and low-grade phosphate rock and potash feldspar and its application performance on soybean

SUN Hui[1], LIU Youbing[2], DENG Xiaonan[1], WU Juan[1], NI Ying[1], WAN Lingzhong[1],
YE Sihong[1], HUANG Fei[2], HAN Xiaozhao[2,3]

(1. *Institute of Economic Crops, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei* 230041, *China*;
2. *Anhui Diyuankang Agricultural Technology Co., Ltd., Hefei* 230001, *China*;
3. *School of Chemistry and Chemical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei* 230009, *China*)

Abstract: A new mineral fertilizer is prepared by activating medium and low-grade phosphate rock and potassium feldspar as raw materials. Nitrogen, phosphorus and potassium materials along with trace elements are added to the cooled and solidified product, followed by granulation and natural drying to produce new mineral compound fertilizer. The production process is introduced, and the effects of key process conditions on the activation reaction are investigated. Field efficacy trials are conducted on soybeans. The results show that under the action of the activator, with an appropriate dosage of acid, when the mass ratio of medium and low-grade phosphate rock powder to potassium feldspar powder exceeds 2 and the reaction temperature is above 150 ℃, the phosphorus and potassium activation rate can reach approximately 90% and 70%. Applying 30 kg of the new mineral compound fertilizer for per 667 m² as a base fertilizer, compared to applying the same amount of 16-16-16 compound fertilizer, results in an increase of yield by 38.1 kg for per 667 m², achieving a yield increment rate of 18.3%. The net income is increased by 188.36 RMB Yuan for per 667 m². Additionally, nitrogen, phosphorus and potassium inputs are reduced by 68.75%, 25.00% and 50.00%, respectively.

Key words: new mineral fertilizers; production process; application performance

《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十五个五年规划的建议》要求提升农业综合生产能力和质量效益，坚持产量产能、生产生态、增产增收一起抓，高质量推进高标准农田建设，提高耕地质量，确保粮食及能源资源安全，加强战略性矿产资源开发和储备[1]。养分作为维持植物生长的重要物质，长期以来一直是粮食增产的重要保证。农田养

［收稿日期］2025-11-10

［作者简介］孙　卉（1993-），女，山东潍坊人，助理研究员，主要研究方向为植物纤维改性。

［通信作者］叶泗洪（1983-），男，安徽长丰人，研究员，主要从事农作物育种、栽培及综合利用研究。

［基金项目］安徽省农业科学院成果转化项目（2025ZH013）

分供给主要依靠肥料，尤其是化肥，化肥对我国粮食单产增长的贡献率高达55%～57%[2]。但我国农作物平均化肥用量与世界先进水平仍有一定差距，氮肥、磷肥不合理使用，钾肥不足，中微量元素缺乏的问题尚未解决[3]。同时，我国化肥的发展还受到资源的制约，我国磷矿储量仅占世界总储量的2.64%，且平均品位只有16.85%，近90%的磷矿属于中低品位磷矿[4-5]。在富矿资源日趋紧张的背景下，要尽快补充利用中低品位磷矿资源以保证国民生产的需要；磷矿中除磷外还含有大量钙、镁、硅等养分元素，从矿产资源直接生产肥料，养分资源全量利用是绿色智能肥料生产技术与工艺创新的核心[6-7]。全球钾资源分布也极不均衡，俄罗斯、加拿大、白俄罗斯3国钾盐储量占世界总储量的近70%，我国探明的钾盐储量仅占世界总储量的5%，全球90%以上的钾盐被用于制造钾肥，我国钾肥总消费量占世界钾肥总消费量的24.5%，我国钾肥自给率不超过60%[3]。我国用于制造钾肥的可溶性钾资源仅占全球总储量的2.2%，但我国难溶性钾资源较为丰富，据估计矿石总储量在200亿t以上，其中以钾长石为主要物相的富钾岩石更是遍及全国各地，总储量超过100亿t[8]。鉴于我国现有技术可利用的磷、钾资源不足，中微量元素肥料缺乏现状，开展了中低品位磷矿和难溶性钾长石制备矿物复合肥料及其应用效果的研究工作。

1 肥料生产

1.1 试验原料

磷矿、钾长石均采购于安徽市场，主要化学成分分别见表1和表2。

表1 磷矿主要化学成分

Table 1 Chemical composition of phosphate rock %

产地	$w(P_2O_5)$	w(F)	w(Ca)	w(Fe)	w(Mg)	w(Mn)	w(Si)	w(S)	w(Zn)	w(C)
安徽	15.71	1.10	14.16	2.31	1.31	0.34	17.10	0.95	0.02	0.51
湖北	16.82	1.39	23.60	1.05	6.82	0.14	6.37	0.09	0.13	6.58

表2 钾长石主要化学成分

Table 2 Chemical composition of potash feldspar %

$w(K_2O)$	w(Ca)	w(Na)	w(Fe)	w(Al)	w(Mg)	w(Si)	w(Ti)
9.69	1.24	2.18	0.68	8.57	0.18	30.37	0.51

1.2 生产工艺

新型矿物肥料制备工艺流程见图1。

中低品位磷矿石、钾长石分别被破碎、球磨、过100目（孔径150 μm）标准筛，按照一定比例与水混合加入反应釜，与混酸、活化剂进行活化反应，体系$w(H_2O)$不超过20%，混酸是无机酸与有机酸混合物，以硫酸为主（占比95%以上），体系硫酸质量分数在50%～60%，反应在150 ℃以上温度进行，体系保持一定压力状态，气体经冷却回流罐分离出二氧化碳排出。用氨气调节反应产物的pH，以满足不同酸碱度土壤的需求，再冷却使产物固化后自然干燥、粉碎得粉状新型矿物肥料；也可以将固化产物先造粒再自然干燥得粒状新型矿物肥料；还可以在冷却固化产物中添加氮、磷、钾原料和补充不足的中微量元素后再造粒、自然干燥得新型矿物复合肥料。构建的低水含量湿固体系和自固

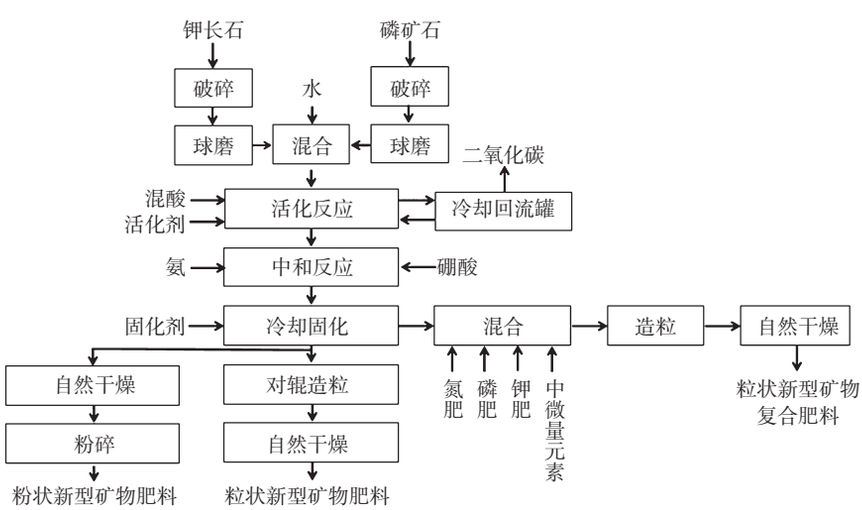

图1 新型矿物肥料制备工艺流程

Fig. 1 Production process flow of the new mineral fertilizer

化免干燥工艺，具有节能降耗优势；磷矿与钾长石的比例、活化剂用量、氨和中微量元素等添加量均可以灵活调整以满足市场需求，实现产品精细化。

1.3 主要工艺条件及其对活化反应的影响

由中低品位磷矿和钾长石制备新型矿物肥料，关键步骤在活化反应，活化剂主要作用是促进钾长石中钾的活化，其他影响活化反应的主要工艺条件是磷矿粉(产地为安徽)与钾长石粉的比例、混酸用量和反应温度，影响活化反应的机制有待进一步研究。

1.3.1 矿粉比例对活化反应的影响

反应温度 150 ℃、反应时间 60 min、磷矿粉 100 份（质量，下同）、水 30 份、混酸 35 份，钾长石粉用量对磷活化率和钾活化率的影响见图 2。

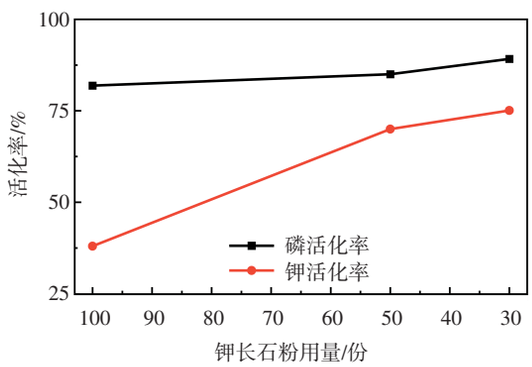

图 2 矿粉比例对活化反应的影响

Fig. 2 Effect of mineral powder ratio on the activation reaction

由图 2 可知，磷矿粉与钾长石粉比例对磷活化率影响不大，对钾活化率有较大的影响，随着钾长石粉用量减少，钾的活化率升高。当钾长石粉用量低于磷矿粉用量 50%时，钾活化率可达 70%以上。

1.3.2 混酸用量对活化反应的影响

反应温度 150 ℃、反应时间 60 min、磷矿粉 100 份、钾长石粉 50 份、水 30 份，混酸用量对磷活化率和钾活化率的影响见图 3。由图 3 可知，随着混酸用量增加，磷活化率逐渐增大，钾活化率呈现先增加后下降的趋势。在混酸用量 40 份时，钾活化率在 70%以上，磷活化率可达 90%左右。

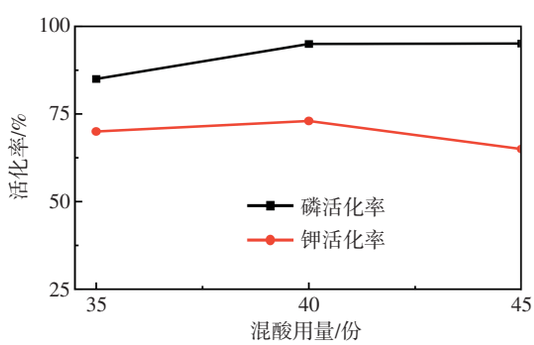

图 3 混酸用量对活化反应的影响

Fig. 3 Effect of mixed acid amount on the activation reaction

1.3.3 反应温度对活化反应的影响

反应时间 60 min、磷矿粉 100 份、钾长石粉 50 份、水 30 份、混酸 40 份，反应温度对磷活化率和钾活化率的影响见图 4。由图 4 可知，随着反应温度上升，磷活化率变化不大，钾活化率逐渐上升。在 250 ℃时，钾和磷活化率均可达 90%左右。

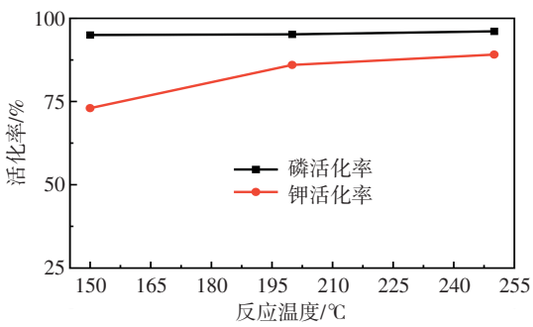

图 4 反应温度对活化反应的影响

Fig. 4 Effect of reaction temperature on the activation reaction

1.4 肥料技术指标

大豆对氮、磷元素的需求量比较大，因大豆植株根系具有固氮能力，能够通过根瘤菌吸收大豆需氮总量的 50%～67%，因此，氮肥的用量不需要太多。磷元素不仅满足大豆植株的需求，还可以促进大豆固氮能力增强，达到以磷增氮的效果，所以，要重施磷肥。钾能促进大豆根系发育和固氮能力，提升大豆对氮素的利用效率，增强抗逆性，包括抗旱、抗倒伏、抗病虫害能力，能改善籽粒品质，提高蛋白质和油分含量，减少空秕粒。中微量元素是植株体内酶、维生素和激素的组成部分，直接参与有机物质形成与转化，对产量与品质影响较大，比如钼元素不仅促进根瘤的形成与生长，还可促进大豆植株对磷的吸收、分配和转化；硼不仅能够促进碳水化合物的运输和代谢，还能增强大豆植株抗逆性，钼硼同施增产作用更大；锰元素与大豆光合作用、呼吸作用等过程关系密切[9-11]。综合考虑上述因素，结合试验地氮、钾比较丰富，磷偏低现状，设计了低氮高磷中钾富含中微量元素的复合肥料配方，产品制备采用的磷矿为湖北磷矿。其中矿物肥料制备时活化反应条件是磷矿粉 100 份，钾长石粉 30 份，水 40 份，混酸 70 份（用量与磷矿中钙、镁、磷含量有关），活化剂 1.5 份，反应时间 60 min，反应温度 200 ℃；中和过程先后加硼酸 7.2 份、氨约 2.7 份；冷却固化时固化剂加入量 2 份。矿物复合肥料配料为：上述矿物肥料 100 份，磷酸二氢铵 30 份，硝酸钾 26 份，钼酸铵 0.40 份，硫酸

锌0.65份，硫酸锰0.65份。主要有效成分见表3。

表3 新型矿物肥料主要有效成分

Table 3 Primary effective components of the new mineral fertilizer %

养分	*w*		养分	*w*	
	新型矿物复合肥料	粉状新型矿物肥料		新型矿物复合肥料	粉状新型矿物肥料
N	5.0	1.0	Fe	0.28	0.44
P_2O_5	12.0	7.1	Zn	0.12	0.05
K_2O	8.0	1.1	B	0.36	0.55
Ca	4.3	6.9	Mn	0.15	0.03
S	4.1	6.5	Mo	0.15	0.04
Mg	1.7	2.7	Si	1.80	2.80

2 肥效试验

2.1 试验方法

2.1.1 试验时间与地点

试验于2025年6月24日至2025年10月14日在安徽省合肥市长丰县杨庙镇开展。试验地处北亚热带季风性湿润气候的过渡带，四季分明、雨热同期、光照充足、无霜期较长（一般为194～259 d）；平均气温约15 ℃，平均年降水量约946.6 mm，降水主要集中于春夏季，约占全年降水量的60%；当地平均海拔为20～30 m，地势平坦。

2.1.2 供试土壤

供试土壤为粉质黏土，土壤pH为5.93，*w*（全氮）为2.09 g/kg，*w*（有效磷）为13.9 mg/kg，*w*（速效钾）为392 mg/kg，地块前茬作物为小麦。

2.1.3 供试肥料

试验所用新型矿物肥料包括新型矿物复合肥料和粉状新型矿物肥料，由安徽地源康农业科技有限公司生产。试验对照所用16–16–16传统复合肥料购买于安徽市场，也产于安徽本地。

2.1.4 供试作物

试验大豆品种：皖豆61。

2.1.5 试验设计

小区试验共设4个处理，每个处理3次重复，随机区组设计。采用“麦后直播”的种植方式，种植密度为667 m^2约1.0万株，每小区面积为20 m^2（4 m×5 m），具体处理设置见表4。

表4 试验方案

Table 4 Experimental scheme

处理	名称	施肥方案
1	空白对照	不施肥
2	常规对照	667 m^2施16–16–16传统复合肥料30 kg
3	新型矿物复合肥料	667 m^2施新型矿物复合肥料30 kg
4	新型矿物肥料+传统复合肥料	667 m^2施粉状新型矿物肥料12 kg+16–16–16传统复合肥料18 kg

2.1.6 试验实施与田间管理措施

2025年6月24日播种，基肥于播种时一次性作底肥施入，不追肥，其他田间管理保持一致；7月25日进入苗期；9月16日发育期开展大豆农艺性状观测；10月14日进行收获。

2.1.7 测定内容与方法

为测定供试土壤理化性质，在种植前进行了表层土样（0～20 cm）的采集。所采土样经混合均匀后，先人工去除活体根系及可见有机物残体，再于室内自然风干，最后经研磨过筛，完成测定前的全部预处理。土壤pH按NY/T 1121.2—2006方法测定，全氮按NY/T 1121.24—2012方法测定，有效磷按NY/T 1121.7—2014方法测定，速效钾含量按NY/T 889—2004方法测定。试验期间，详细记录大豆从播种到收获的全生育期进程。收获前，于各小区随机选取3株代表性植株进行考种，测定其株高、株荚数以及株质量。收获时，对各小区进行实收测产，并依据当期肥料成本与大豆售价，核算各处理的经济效益。

2.1.8 数据分析

试验中所有数据均使用Excel 2010进行整理与预处理，并采用SPSS 19.0软件，通过单因素方差分析对各处理间的差异显著性进行检验。

2.2 结果与讨论

2.2.1 不同处理对大豆生物学性状及产量结构的影响

根据田间调查结果（见表5），处理1各项生物学性状均低于其他施肥处理。处理4密度最高，处理3叶绿素含量、N含量、单株有效荚数、植株株高均为最高，分别比处理2高2.12%、1.78%、7.94%和2.33%，表明新型矿物复合肥料对植株生长具有良好的促进作用；不同处理叶绿素含量和N含量的顺序为：处理3>处理4>处理2>处理1，各处理之间差异未达显著水平。不同处理单株有效荚

表5 不同处理对大豆生物学性状和产量结构的影响

Table 5 Effects of different treatments on the biological traits and yield structure of soybeans

处理	叶绿素SPAD值	*w*(N)/%	单株有效荚数	植株株高/cm	结荚期植株质量/g	667 m^2株数
1	43.21a	16.37a	39b	68.9a	164.6	10 434
2	44.90a	16.88a	63a	73.1a	231.5	10 400
3	45.85a	17.18a	68a	74.8a	256.0	10 450
4	44.95a	16.89a	62a	70.9a	278.0	11 400

注：各列数字后不同小写字母表示同列数值之间差异达显著水平（$P<0.05$），下同。

数的顺序为：处理3>处理2>处理4>处理1，处理2、3、4显著高于处理1（$P<0.05$）。不同处理的植株株高的顺序为：处理3>处理2>处理4>处理1，各处理之间差异未达显著水平。处理4植株质量（结荚期）最大，处理3次之。总体来看，新型矿物复合肥料和粉状新型矿物肥料均能促进大豆植株的生长发育，为后期产量提升奠定基础。

2.2.2 不同处理对大豆产量的影响

各小区产量和折算的667 m²产量见表6。不同处理的大豆产量的顺序为：处理3>处理4>处理2>处理1，处理3的产量显著高于处理1和2，处理2、3、4的产量均显著高于处理1。处理3大豆667 m²产量平均值达到246.0 kg，较处理1空白对照增产104.5 kg，增产率为73.9%；较处理2常规施肥增产38.1 kg，增产率为18.3%。处理4大豆667 m²产量达到237.4 kg，较处理1空白对照增产95.9 kg，增产率为67.8%；较处理2常规施肥增产29.5 kg，增产率为14.2%。总体来看，新型矿物复合肥料和粉状新型矿物肥料均能提升大豆的产量。

表6 不同处理下大豆的产量对比

Table 6 Comparisons of soybeans yields under different treatments

处理	小区产量/g			667 m² 产量/kg	667 m²比处理1增产/%	667 m²比处理2增产/%
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ			
1	4 364.7	5 001.6	3 368.1	141.5c		
2	5 750.1	6 660.9	6 295.5	207.9b	46.9	
3	7 703.1	7 528.8	6 904.5	246.0a	73.9	18.3
4	7 415.4	6 736.2	7 210.8	237.4ab	67.8	14.2

2.2.3 各处理经济效益对比

各处理除去用肥有区别外，其他田间管理及施肥人工费用基本一致，经济效益分析结果见表7。由表7可知，处理3每667 m²收益为900.00元，比处理1增收334.00元，比处理2增收188.36元；处理4每667 m²收益为853.60元，比处理1增收287.60元，比处理2增收141.96元。

表7 经济效益

Table 7 Economic benefit

处理	667 m² 产量/kg	667 m² 产值/元	667 m²肥料成本/元	667 m² 收益/元	667 m²增加收益/元	
					比处理1	比处理2
1	141.5	566.00	0	566.00		
2	207.9	831.64	120	711.64	145.64	
3	246.0	984.00	84	900.00	334.00	188.36
4	237.4	949.60	96	853.60	287.60	141.96

注：大豆市场价按4元/kg，常规肥料（16–16–16传统复合肥料）4元/kg，新型矿物复合肥料2.8元/kg，粉状新型矿物肥料2元/kg。

2.2.4 氮磷钾减量化分析

农业农村部大力提倡减肥增效，要求在保障粮食增产的前提下减少氮磷施用量，降低农业面源污染。设验各处理氮磷钾施用量如表8所示。由表8可知，与处理2相比，处理3减氮68.75%、减磷25.00%、减钾50.00%；处理4减氮37.50%、减磷22.29%、减钾37.29%，表明新型矿物质肥料具有显著的减肥增效效果。

表8 667 m²各处理氮磷钾施用量

Table 8 Dosage of nitrogen, phosphorus and potassium in each treatment for 667 m²

处理	m(N)/kg	m(P_2O_5)/kg	m(K_2O)/kg	与处理2相比/%		
				减N	减P_2O_5	减K_2O
1	0	0	0			
2	4.80	4.80	4.80			
3	1.50	3.60	2.40	68.75	25.00	50.00
4	3.00	3.73	3.01	37.50	22.29	37.29

3 结论

（1）构建了低水含量湿固体系和自固化免干燥工艺，以中低品位磷矿与钾长石为原料制备出了新型矿物肥料。在活化剂的作用下，选择合理的酸用量，当中低品位磷矿粉与钾长石粉质量比大于2、反应温度在150 ℃以上时，磷活化率可达90%左右，钾活化率可达70%以上。

（2）在播种期基施新型矿物复合肥料作为基肥，或以粉状新型矿物肥料部分替代传统复合肥料作为基肥，均能促进大豆植株的生长发育。基施新型矿物复合肥料，叶绿素含量、N含量、单株有效荚数、植株株高均为最高。

（3）在播种期基施新型矿物复合肥料作为基肥，或以新型矿物肥料部分替代传统复合肥料作为基肥可以实现增产增收与化肥减施的协同效应。与常规施肥相比，基施等质量的新型矿物复合肥料可增产18.3%、667 m²增收188.36元，并减氮68.75%、减磷25.00%、减钾50.00%；采用粉状新型矿物肥料40%替代传统复合肥料作为基肥，可增产14.2%、667 m²增收141.96元，同时减氮37.50%、减磷22.29%、减钾37.29%。

综上，新型矿物肥料在大豆上增产效果明显，节本增收显著。加强其产业化建设和应用推广，具有良好的发展前景。

［参考文献］

［1］ 习近平.关于《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十五个五年规划的建议》的说明[N].人民日报,2025–10–29(001).

［2］ 王激清,马文奇,江荣风,等.养分资源综合管理与中国粮食安

全[J].资源科学,2008(3):415-422.
WANG J Q, MA W Q, JIANG R F, et al.Integrated Soil Nutrients Management and China's Food Security[J].Resources Science, 2008(3):415-422.

[3] 王石军.国内外钾资源开发利用现状及未来发展趋势[J].肥料与健康,2024,51(6):35-43.
WANG S J. Current Situation and Future Development Trends of Potassium Resource Development and Utilization at Home and Abroad[J]. Fertilizer & Health,2024,51(6):35-43.

[4] 苗俊艳,齐帅亮,侯翠红,等.磷矿资源绿色全量利用技术研究现状及突破思路[J].化学与生物工程,2024,41(5):1-8.
MIAO J Y, QI S L, HOU C H, et al. Research Status and Breakthrough Ideas of Green Full Utilization Technology of Phosphate Ore Resources[J]. Chemistry & Bioengineering, 2024, 41(5):1-8.

[5] 贾晗,刘军省,焦森,等.长江经济带磷矿资源开发与生态保护现状分析及对策建议[J].中国矿业,2021,30(2):67-72.
JIA H, LIU J S, JIAO S, et al. Situation analysis and countermeasures of phosphate rock resources exploitation and ecological protection in Yangtze River Economic Belt[J]. China Mining Magazine,2021,30(2):67-72.

[6] 张福锁,黄成东,申建波,等.绿色智能肥料:矿产资源养分全量利用的创新思路与产业化途径[J].土壤学报,2023,60(5):1203-1212.
ZHANG F S, HUANG C D, SHEN J B, et al. Green Intelligent Fertilizer: New Insight into Making Full Use of Mineral Nutrient Resources and Industrial Approach[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(5): 1203-1212.

[7] 张卫峰,马文奇,张福锁,等.中国、美国、摩洛哥磷矿资源优势及开发战略比较分析[J].自然资源学报,2005(3):378-386.
ZHANG W F, MA W Q, ZHANG F S, et al. Comparative Analysis of the Superiority of China's Phosphate Rock and Development Strategies with that of the United States and Morocco[J]. Journal of Natural Resources,2005(3):378-386.

[8] 张晓慢,雍倩禧,祁梦瑶,等.钾长石提钾技术进展[J].矿产保护与利用,2020,40(4):172-178.
ZHANG X M, YONG Q X, QI M Y, et al. Status and Prospect of Potassium Extracting from Potassium Feldspar[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources,2020,40(4):172-178.

[9] 宗利锋,杜国春.简析大豆需肥规律及施肥技术[J].农民致富之友,2021(2):122.

[10] 吴浩,范飞,张瑞.太和县夏大豆需肥特点及施肥方法[J].现代农业科技,2015(9):44,46.
WU H, FAN F, ZHANG R. Characteristics of Fertilizer Requirement and Fertilization Applying Methods for Summer Soybean in Taihe County[J]. Modern Agricultural Science and Technology,2015(9):44,46.

[11] 王志好.大豆需肥特性及水肥运筹[J].安徽农学通报,2008,14(24):38,99.
WANG Z H. Soybean fertilizer requirement characteristics and water and fertilizer management[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin,2008,14(24):38,99.

(上接第31页)

[8] 唐雪梅,王美波,徐丽,等.磷石膏低温煅烧增白研究[J].无机盐工业,2024,56(8):110-115.
TANG X M, WANG M B, XU L, et al.Study on whitening of phosphogypsum by low-temperature calcination[J]. Inorganic Chemicals Industry,2024,56(8):110-115.

[9] 李江丽,郭永杰,李海兵,等.磷石膏除杂增白研究进展[J].磷肥与复肥,2022,37(9):30-33.
LI J L, GUO Y J, LI H B, et al.Research progress on impurity removal and whitening of phosphogypsum[J]. Phosphate & Compound Fertilizer,2022,37(9):30-33.

[10] 张华,杨稳权,李海兵,等.云南某磷石膏工艺矿物学特征及浮选制备高纯石膏研究[J].生态产业科学与磷氟工程,2025,40(8):88-93.
ZHANG H, YANG W Q, LI H B, et al.Research on mineralogical characteristics and preparation of high-puritygypsum by flotation of a phosphogypsum in Yunnan province[J]. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering, 2025, 40(8): 88-93.

[11] 柳凌,王斌杰,汪小平.低温煅烧过程中铵盐对磷石膏的影响[J].生态产业科学与磷氟工程,2024,39(8):17-20.
LIU L, WANG B J, WANG X P. Effect of ammonium salt on phosphogypsum during low temperature calcination[J]. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering, 2024, 39(8):17-20.

[12] 张富强,卢玉莲,张澜曦,等.年处理100万t中低品位磷矿高效清洁生产工艺[J].无机盐工业,2020,52(11):52-55.
ZHANG F Q, LU Y L, ZHANG L X, et al.Efficient and clean production process for treating 1×10^6 t/a of low and medium grade phosphate rock[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2020, 52(11):52-55.

[13] 余攀,丁湛,袁家巧,等.我国胶磷矿浮选药剂研究进展[J].化工矿物与加工,2024,53(2):71-86.
YU P, DING Z, YUAN J Q, et al.Research progress on flotation reagents for colloidal phosphate ore in China[J]. Industrial Minerals & Processing,2024,53(2):71-86.

[14] 丁威,包申旭,辛椿福,等.中低品位磷矿制备湿法磷酸及净化技术研究进展[J].化工进展,2025,44(4):2274-2284.
DING W, BAO S X, XIN C F, et al.Research progress on preparation and purification technology of wet-process phosphoric acid from middle-low-grade phosphorus ore[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2025, 44(4): 2274-2284.

[15] 韦仕朝,冉春勇.中低品位磷矿制磷酸研究[J].磷肥与复肥,2022,37(4):23-25.
WEI S C, RAN C Y. Phosphoric acid production from medium and low grade phosphate rock[J]. Phosphate & Compound Fertilizer,2022, 37(4):23-25.

[16] 方进,覃梅,孟品品,等,磷矿中磷灰石及脉石与盐酸反应活性的研究[J].肥料与健康,2024,51(1):62-67.
FANG J, QIN M, MENG P P, et al.Study on Reactivity of Apatite and Gangue in Phosphate Rock with Hydrochloric Acid[J]. Fertilizer & Health,2024,51(1):62-67.