

富钾页岩研究现状及展望

谢 杨¹, 宋英豪¹, 苏 野², 庞志勇³, 徐博会^{1*}

¹河北工程大学地球科学与工程学院, 河北 邯郸

²河北省煤田地质局第二地质队(河北干热岩研究中心), 河北 邢台

³河北省煤田地质局勘查院(河北省非常规天然气勘查研究中心), 河北 邢台

收稿日期: 2025年11月25日; 录用日期: 2026年1月4日; 发布日期: 2026年1月15日

摘要

我国作为农业大国, 针对我国水溶性钾盐资源严重匮乏、对外依存度高的问题, 开发利用储量丰富、分布广泛的非水溶性钾资源 – 富钾页岩, 已成为解决该问题的重要途径。本文系统地介绍了全球钾资源的分布, 钾矿资源的类型与特征, 着重于富钾页岩的研究现状, 深入探讨了其钾元素物质来源、赋存状态及可利用研究。富钾页岩中钾元素常赋存于结构稳固的微斜长石、伊利石之中, 目前为止开发仍受限于钾元素提取难度大、技术经济可行性低等问题。未来研究需深化成矿理论、突破高效提取技术, 本文旨在为后续的开发利用提供一个理论参考。

关键词

富钾页岩, 钾资源, 非水溶性钾矿, 硅酸盐矿物

Research Progress and Prospects of Potassium-Rich Shale

Yang Xie¹, Yinghao Song¹, Ye Su², Zhiyong Pang³, Bohui Xu^{1*}

¹School of Earth Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

²No.2 Exploration Team, Hebei Bureau of Coal Geological Exploration (Hebei Province Hot Dry Rock Research Center), Xingtai Hebei

³Hebei Provincial Coal Geological Exploration Institute (Hebei Province Unconventional Natural Gas Exploration and Research Center), Xingtai Hebei

Received: November 25, 2025; accepted: January 4, 2026; published: January 15, 2026

Abstract

As a major agricultural country, China faces significant challenges due to the severe scarcity of

*通讯作者。

soluble potassium resources and high external dependence. The development and utilization of non-soluble potassium resources-potassium-rich shale, which is abundant and widely distributed has become an important approach to addressing this issue. This paper systematically reviews the global distribution of potassium resources, the types and characteristics of potassium deposits, with a focus on the current research status of potassium-rich shale. It further explores the sources, occurrence states, and potential utilization of its potassium. In potassium-rich shale, potassium is often hosted in structurally stable minerals such as microcline and illite. To date, development remains limited by challenges in potassium extraction and low technical-economic feasibility. Future research should deepen the understanding of mineralization theories and achieve breakthroughs in efficient extraction technologies. This paper aims to provide a theoretical reference for the follow-up exploitation and application.

Keywords

Potassium-Rich Shale, Potassium Resources, Non-Soluble Potassium Ore, Silicate Minerals

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

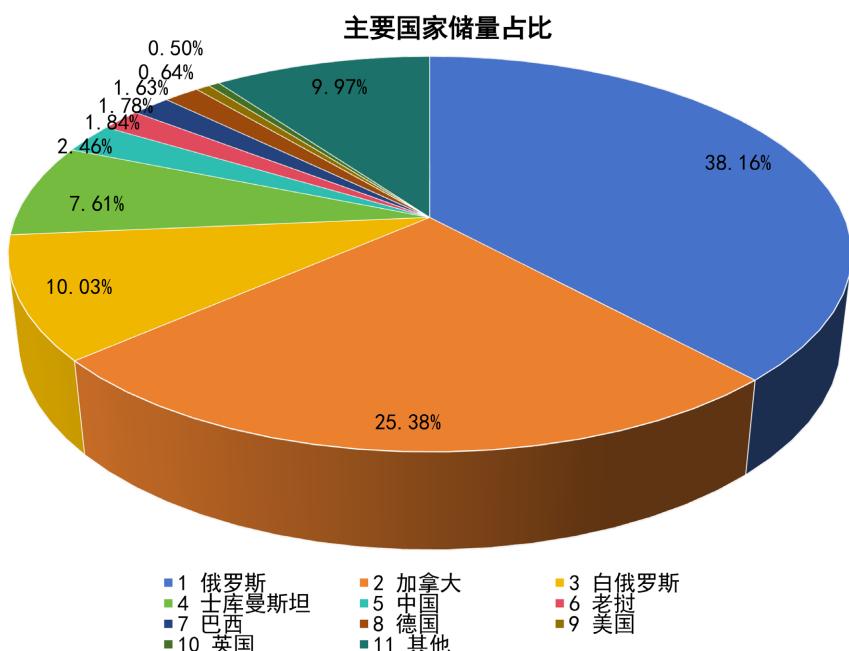
钾是构成生命体的必要矿物质，更是农业生产中氮、磷、钾三大营养要素之一，对国家粮食安全生产和保障供应具有不可替代的战略意义[1]-[3]。目前，世界上钾肥生产主要依赖于水溶性钾盐资源[4]。然而，该资源分布极不均衡，形成了国内水溶性钾资源匮乏，国外诸如加拿大、俄罗斯、白俄罗斯等国家储量丰富的分布格局[5] [6]。许多农业大国(包括中国)面临着严重的钾资源供应风险，钾资源已被美、欧、日、澳等国家列入战略性关键矿产资源，2016年11月中国国土资源部发布的《全国矿产资源规划(2016~2020年)》中，首次将钾资源列入战略性矿产之一[7]-[9]。

为应对这一挑战，开发和利用非水溶性钾矿资源已成为学术界和产业界关注的问题。值得关注的是，我国水溶性钾矿资源虽相较匮乏，但非水溶性钾资源(如富钾页岩、钾长石等)储量却十分丰富。其中，富钾页岩资源尤为显著，构成了我国钾资源战略性保障能力的重要补充[10]。尽管富钾页岩潜力巨大，但是相较于成熟的水溶性钾盐矿床，其相关的地质研究和关键科学问题没有形成统一的认识，这极大地制约了对该资源的评估和勘探开发。因此，本文旨在对非水溶性钾资源 - 富钾页岩的研究现状进行一次系统的介绍，并对未来研究进行展望，为今后我国富钾页岩资源的研究和开发提供参考。

2. 全球钾资源分布概况

根据中国地质调查局最新的统计数据，截止2021年世界探明钾盐储量约为129亿吨(主要为K₂O)，估计全球钾盐资源总量达430亿吨[11]。从当今世界的产能来看，钾盐资源储量可供全球开采约200年[12]。但是全球水溶性钾资源分布极不均衡，主要分布在北半球[13]。产能排前三的国家分别是俄罗斯、加拿大以及白俄罗斯，三国探明储量约占全球总量的73%，具有高度垄断性(见图1)[3] [14]。加拿大具有“世界钾都”之称，其萨斯喀彻温盆地是世界最重要的钾盐产区之一，该盆地内的钾盐矿床主要发育于中泥盆世Prairie蒸发岩层，埋深多在1000 m以内，矿物组成以钾石盐为主[15]；俄罗斯的钾盐资源位于早二叠世乌拉尔西坡的上卡姆盆地，其埋深浅(250~450 m)，以光卤石为主，钾石盐占比较少和早寒武世的东西伯利亚含盐盆地东北部涅帕钾盐盆地，其埋深为600~1000 m，主要以钾石盐为主[16]；白俄

斯的斯塔罗宾钾盐矿是该国钾资源的代表，产出于早泥盆世的彼里皮亚特凹陷西北部，矿床埋深跨度较大(400~1200 m)，矿物组成以钾石盐为主，局部夹杂少量光卤层[17]。此外，土库曼斯坦、中国、老挝、巴西、德国、美国等国家和地区也具有开发潜力的钾资源，但相较于前三个国家在资源储量的富集程度、开采条件方面存在着显著差异。



数据引自《全球锂、钴、镍、锡、钾盐矿产资源储量评估报告，2021》。

Figure 1. Share of global potash reserves by major countries

图 1. 钾盐资源主要国家储量占比

中国的水溶性钾资源相对短缺，严重依赖进口，钾矿床矿量较少且常以小型为主[18]。但是我国含钾卤水资源丰富，也是目前开采的主要对象[19]，青海柴达木盆地的储量资源约占比 80%、新疆罗布泊盐湖约占比 16%，其余分布在西藏藏北盐湖区及滇川甘等地区[20][21]。该资源受限于与我国农业发达地区距离远、交通运输条件不便且气候环境恶劣等因素，当前难以大规模地开采加工利用。除含钾卤水资源之外，我国非水溶性钾矿资源也较为丰富，当前探明的非水溶性钾资源多分布在我国中部和东部农业发达地区，华南、西南和西北地区也有零星分布[22]。中国具体的重要非水溶性钾矿产地、类型及地质特征见表 1。由于非水溶性钾资源目前提钾利用难度大，长期未得到矿产资源管理部门的充分重视。结合已有研究统计，此类矿产实际分布点远不止表中所列，约有 60 处[23]。因此，这些非可溶性钾资源具有很大的开发潜力，对我国降低钾肥对外依存度和钾资源安全保障具有重要意义。

Table 1. Important non-water-soluble potash deposits in China and their geological characteristics [24]

表 1. 中国重要非水溶性钾矿产地及地质特征[24]

矿床产地	矿床类型	成矿年代	地质特征
京津地区	大红峪组富钾火山岩	中元古代	以高钾粗面岩和凝灰岩为主、与石英砂岩和白云岩互层的火山-沉积岩系。
天津蓟县	团山子组富钾泥岩	中元古代	形成于氧化性潮坪环境、以沉积成因的紫红色伊利石页岩，中元古界长城系中一个关键的标志性层位。

续表

京津冀地区	串岭沟组富钾页岩	中元古代	裂谷早期沉积，以黑色富钾页岩为主，夹砂岩及菱铁矿层，富含微古化石，是区域地层对比的关键标志层。
山西临县	紫金山霞石正长岩	燕山期	主要由霞石、钾长石、钠铁闪石等碱性矿物组成，以环状岩体构造和霓霞岩化等碱性交代蚀变为典型特征。
内蒙古包头市	白云鄂博含钾板岩	中元古代	属于沉积-火山变质岩，以高钾、富钠为特征，矿物组成复杂，其成因与同期富钾、富稀土的热液活动及沉积作用相关。
江苏丰县	华山富钾页岩	石炭-二叠纪	陆相湖盆沉积的灰黑、灰绿色页岩，K ₂ O含量显著偏高，主要由伊利石等粘土矿物组成，常与石膏、钙质页岩共生。
河南嵩县	磨沟霓辉正长岩	——	主要岩性为过碱性正长岩，以富含霓辉石及Nb、REE等稀有元素为显著特征。
河南卢氏县	黄家湾白云母正长岩	——	主要岩性为中粗粒白云母正长岩，以含大量原生白云母和富集Li、Rb、Cs等稀有碱金属元素为显著特征。
云南个旧市	白云山霞石正长岩	59.5~62 Ma	以霞石、钾长石为主的过碱性正长岩为核心，富含Nb、REE等稀有元素，与碱性花岗岩及碳酸岩构成杂岩体。
陕西洛南县	长岭霓辉正长岩	——	岩石以霓辉石和钾长石为主要矿物，属于硅不饱和的过碱性系列，富含锆、铌和稀土元素。
安徽金寨县	响洪甸霞石正长岩	192~130 Ma	以霞石、钾长石为核心矿物，伴生强烈钠铁闪石化、霓石化等碱性蚀变及稀有金属矿化，是碰撞后地幔物质上涌的岩浆响应。

3. 钾矿资源的类型及特征

地球上能够为人类提供钾元素的主要矿物有两种类型：可溶性含钾矿物(或称水溶性钾盐资源)和不可溶性含钾矿物(或称非水溶性钾矿资源、难溶性钾矿资源)[22][25][26]。世界主要含钾矿物类型如表2所示。

Table 2. Major potassium-bearing mineral types in the world
表 2. 世界主要含钾矿物类型

类别	矿物名称	化学成分	纯矿物 K ₂ O 含量
水溶性含钾矿物	钾石盐 sylvite	KCl	63.1%
	光卤石 carnallite	MgCl ₂ ·KCl·6H ₂ O	17.0%
	钾盐镁矾 kainite	KCl·MgSO ₄ ·3H ₂ O	18.9%
	无水钾镁矾 langbeinite	K ₂ SO ₄ ·2MgSO ₄	22.6%
	杂卤石 polyhalite	K ₂ MgCa ₂ (SO ₄) ₄ ·2H ₂ O	15.5%
	钾镁矾 leonite	K ₂ Mg(SO ₄) ₂ ·4H ₂ O	25.5%
	软钾镁矾 picromerite	K ₂ Mg(SO ₄) ₂ ·6H ₂ O	23.4%
非水溶性含钾矿物	钾石膏 syngenite	K ₂ SO ₄ ·CaSO ₄ ·H ₂ O	28.7%
	钾长石 potassiumfeldspar	K ₂ O·Al ₂ O ₃ ·6SiO ₂	16.8%
	海绿石 glauconite	K _{1-x} (Al, Fe) ₂ [Al _{1-x} Si _{3+x} O ₁₀]·(OH) ₂	2.3%~8.6%
	明矾石 alunite	K ₂ SO ₄ ·Al ₂ (SO ₄) ₃ ·2Al ₂ O ₃ ·6H ₂ O	11.4%
	霞石 nephelite	KNa ₃ [AlSiO ₄] ₄	0.8%~7.1%

如表中所列水溶性含钾矿物(如钾石盐、光卤石) K_2O 含量较高, 是当前制取钾肥及钾化合物的主要原料; 非水溶性钾矿中钾长石 K_2O 含量也高达 16.8%, 具有一定的工业价值, 可作为重要潜在开发资源利用。

3.1. 水溶性钾矿资源

水溶性钾矿矿床属于蒸发沉积矿床, 由于开发利用相对容易受到世界各国的重视, 为此做出的勘探工作和地质研究均较为丰富。前人根据矿物组合将其分为富硫酸镁钾盐矿床和贫硫酸镁钾盐矿床两大类, 进而又根据共生组合特征与沉积环境又可细分为钾石盐型、光卤石型、硫酸盐型和混合型等 4 种类型[27]。

钾石盐型矿物: 全球最主要的钾盐矿床类型及当前的开发重点。该类矿物以钾石盐为主要矿石类型, 其典型特征是常与石盐(或岩盐)、石膏等伴生, 形成颜色上红白相间的独特纹层构造。其中钾石盐多呈红色或乳白色, 石盐为白色或蓝色。该类型的典型代表位于加拿大的萨斯喀彻温钾盐矿, 其矿体蕴藏于中泥盆世的 Prairie 蒸发岩系内[27], 矿层组累计厚度达 20~25 m。从矿物组成上看, 矿石中的水溶性部分主要为石盐、钾石盐及光卤石; 同时, 硬石膏、石膏、碳酸盐及粘土矿物等作为常见的脉石矿物伴生, 多以层状或条带状产出。我国云南的勐野井白垩纪钾盐矿床亦属此类型[28]。

光卤石型矿物: 矿物核心矿石以光卤石为主, 一般与石盐紧密伴生, 有时含有钾石盐和硬石膏, 且存在大量可溶于水的镁钙质盐类[29]。矿石常形成块状、条带状或角砾状的结构形态。位于非洲刚果西南部的奎卢盆地是此类型的典型代表, 其赋存于白垩系组地层中部, 顶板埋深约 300 m, 局部埋深达 550 m, 且自东向西埋深逐渐加大[30]。该类矿床最为关键的成矿后过程是次生改造作用: 在背斜等构造部位, 原生光卤石常被大气降水改造, 形成呈透镜状产出的钾石盐, 此类次生富集带可构成局部的富矿体。

硫酸盐型矿物: 矿石矿物主要以钾盐镁矾、无水钾镁矾和杂卤石为主, 常与石盐、硬石膏等共生。根据主要钾盐矿物组合, 可划分为四个亚类: 包括以钾盐镁矾为主的类型、含钾石盐的无水钾镁矾类型、无水钾镁矾为主的类型, 以及表生作用下形成的复合型矿石。俄罗斯的前喀尔巴阡钾盐矿床(第三纪)常被引为经典实例, 其赋存于中新世-上新统砂泥质岩盐层中, 呈透镜状产出。

混合型矿物: 这种由钾石盐和硫酸盐类矿物组成的钾盐在德国通常被命名为“Hartsalz”(硬质盐类)。其矿物成分复杂, 且变化较大, 主要矿物包括石盐、钾石盐、钾盐镁矾、无水钾镁矾、硫镁矾、硬石膏, 部分情况下含有光卤石。在钾盐矿床研究中, 德国二叠纪的蔡希斯坦盆地被广泛认知为混合型矿床的代表性发育区, 这已得到相关研究的证实[31]。该盆地的标志性层位为图林根钾盐层, 该层由钾石盐-硫镁矾层、钾石盐层及相变层等共 28 个分层构成, 厚度处于 2.5 至 4 米范围之内[32]。

3.2. 非水溶性钾矿资源

我国非水溶性钾矿储量丰富, 以钾长石为主要物相的富钾岩石广泛分布于我国境内[33]。但受各种方面的影响, 目前国内外学者对此研究只集中在开发利用研究方面。我国不可溶性钾矿可分为硫酸盐矿物和硅酸盐矿物两大类[34], 目前已知的不可溶性含钾矿物多为钾铝硅酸盐矿物[25]。主要含钾岩石有含钾页岩或富钾页岩[35]、水云母黏土岩、各类钾质火山岩与侵入岩等[36]。因此常用(不溶性)含钾页岩、富钾页岩、含钾矿物、含钾资源等代指非水溶性钾资源[26]。

硫酸盐矿物: 矿石矿物主要以杂卤石为主, 常与硬石膏、石盐共生, 多呈纹层状、块状或浸染状构造[37]。其典型的形成环境是富钾、钙、硫离子的蒸发盆地环境, 常赋存于盐系地层上部或边缘地带。该类矿床规模大、层位稳定, 但杂卤石溶解度比较低, 不能通过常规水溶法提取利用, 属于我国重要的潜在钾资源。中国川中三叠系嘉陵江组(T_{1j})—雷口坡组(T_{2l})的杂卤石矿为典型代表[37]-[39], 目前因技术经济性制约仍未进行工业化开采。

硅酸盐矿物：地壳中分布最广、种类最多的矿物类型。矿石矿物主要以钾长石及海绿石为主[40][41]，常与石英、钠长石、云母等共生，呈致密块状、浸染状或层状构造。其形成与岩浆活动、高温热液作用或特定的沉积环境相关，广泛分布于花岗岩及富钾的沉积岩层中。该类矿床资源储量巨大、分布广泛，但钾元素常赋存于铝硅酸盐晶体中，化学性质极其稳定，难以通过物理或化学方法分解利用。中国山西临县、辽宁凤城等地的太古宙—元古宙变质岩系中的钾长石矿床，以及辽东半岛、海南岛等地的海绿石砂岩矿床为其典型代表。目前广泛用于陶瓷、玻璃工业领域的应用，利用难溶性钾长石制造钾肥，被认为是解决农业大国肥料问题的一种潜在方法[42]。

综上，前人已经从矿物学的角度对钾资源的类型与特征进行了划分。其中富钾页岩作为非水溶性钾资源的重要类型，要想实现形成有效的可利用资源，仍需要对其成因机制做出进一步的认识。因此，下文将围绕富钾页岩的物质来源、赋存形式及当前利用方法展开论述。

4. 富钾页岩成因研究

4.1. 钾元素物质来源

富钾页岩中钾的来源主要包括陆源碎屑和火山/热液物质两种途径。周中毅等指出燕山地区富钾岩石形成于浅海局限性滞水盆地，钾主要来源于古老岩石的风化产物，经搬运沉积后在特定介质条件下富集[43]。蒋天锐等通过对贵州铜仁地区中寒武统含钾页岩的研究，进一步确认其物源为长英质含钾花岗岩的风化产物，地球化学特征显示 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 比值介于 23~33 之间， $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值介于 2.80~3.59，表明其主要为陆源碎屑来源，极少有热水或生物来源的元素或矿物[44]。路小丽等指出河南省林州市盘龙山含钾岩石矿中的钾元素，最初来源于古老的太古界花岗岩类/片麻岩，以及中元古代时期广泛喷发的安山岩、玄武岩等火山岩。这些岩石经过风化、剥蚀、搬运后，在滨海—浅海环境中沉积下来，其中的长石等含钾矿物得以富集，最终形成了该沉积型含钾岩石矿床[45]。赵艳婷通过对贵州万山地区中寒武统敖溪组含钾页岩的系统研究，提出该区富钾岩石形成于被动大陆边缘的台地斜坡相弱氧化—弱还原环境，钾元素主要来源于中寒武世时期陆地上母岩的风化产物，地球化学特征显示 $\text{Al}/(\text{Al} + \text{Fe} + \text{Mn})$ 比值介于 0.64~0.69 之间，远大于 0.5； $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值介于 2.80~3.59 之间，接近 3.6； U/Th 比值均小于 1 (0.18~0.45)，进一步证实其成矿物质为典型陆源碎屑来源[46]。熊敏通过地质与岩相学分析指出万山金家场含钾页岩钾元素来源于古老基底岩石中的含钾矿物，经风化、搬运后，在海相沉积环境中与台地边缘斜坡沟槽相富集成矿[47]。

4.2. 钾元素的赋存形式

钾在富钾页岩中并非以独立矿物形式存在，而是主要赋存于铝硅酸盐矿物的晶体结构之中，如微斜长石、伊利石、绢云母、水黑云母等。前人主要通过扫描电镜、EDS 能谱仪、X 射线衍射(XRD)、ICP-MS、红外光谱分析等综合物相技术进行分析。李松涛等人指出贵州万山含钾页岩中的钾主要以离子形式赋存在铝硅酸盐矿物晶格中，其中微斜长石是核心含钾矿物，其次为伊利石，整体属于结构稳固的不溶性钾资源[10]。刘杰明确富钾页岩中钾元素约 80% 赋存于长石晶格之中，约 20% 赋存于白云母、伊利石和黑云母等云母类矿物及少量的绿泥石之中，仅有极少量以可溶性钾形式存在[48][49]。周中毅将富钾页岩划分为长石型、云母型和混合型，指出不同类型中钾的载体矿物不同，直接影响其可利用性[43]。蒋天锐等进一步指出钾元素主要赋存于微斜长石和伊利石中，黏土矿物组合以伊利石为主，伴有绿泥石和伊蒙混层矿物[44]。涂灵玲指出钾元素主要赋存在钾长石和伊利石这两种铝硅酸盐矿物中，其次为伊—蒙间层矿物，它们以结构态的形式存在于矿物晶格中，水溶性极低，属于典型的难溶性钾资源[50]。因此，通过前人做出的研究可以看出，富钾页岩中钾元素主要赋存于微斜长石，其次是伊利石之中。

5. 富钾页岩可利用研究

自 20 世纪至今,众多研究者针对富钾页岩开展了一系列研究工作,取得了丰富成果。国外学者如 Pegah Haseli 等人分析了钾肥替代资源与提取技术,并对酸浸、水热、熔盐等方法及不同含钾硅酸盐资源进行综述,指出各技术机遇挑战及工业化需进一步技术经济评估[51]。在二战前期, Saxena E 等人研究出以 CaCl_2 、 CaO 与 FeCl_2 或 MnCl_2 、 CaCO_3 与 CaSO_4 作为助剂使钾长石在高温中分解制取钾盐的方法[52]。Allerton S. Cushman 等人总结了为使天然硅酸盐中的钾肥可用作肥料而提出的各种工艺,研究表明可以足够低的成本从长石中制造出含有游离石灰的钾肥[53]。Wedisson Oliveira Santos 等人研究采用 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 作为助熔剂,通过高温煅烧法处理页岩,结果表明在最佳条件下,钾的水溶率大幅提升,并生成了钾盐等高溶性矿物,该工艺成功将难溶矿物转化为潜在的钾肥原料[54]。Jayashree Samantray 等人介绍了不可溶性钾硅酸盐(如钾长石、云母)中提取钾的技术,包括生物浸出、酸/碱浸及焙烧等方法,并指出若开发这些替代资源可缓解全球对北半球钾盐进口的依赖[55]。

国内学者如周中毅、王安东总结了燕山地区富钾岩石的地质特征与类型,通过物质组成分析,探讨了其钾元素来源与在浅海局限盆地富集的形成机制[43]。甘朝勋针对黔北、黔东北与黔中区域的富钾页岩开展研究,总结了该类页岩的分布状况、地质特点及开发利用存在的问题,指出其储量丰富、层位稳定,并探讨了将其加工成钾肥等产品的潜力[56]。薛步高阐述了云南昆阳群因尼组富钾页岩的地质特征,通过其他地区结论论证了其综合开发为钾肥及化工产品的可行性与前景[57]。任耀武指出我国华北地区长城系富钾岩石(K_2O 平均为 12.05%)储量大、层位稳定,是缓解钾盐紧缺的战略资源[58]。刘杰阐明了钾元素主要赋存于沸石、长石及云母等硅酸盐矿物中,采用酸浸与氟化钠活化方法,探索出高效提钾工艺,为开发难溶性钾矿资源提供了理论依据与技术路径[49]。侯兵德指出了贵州万山具有丰富的水云母型含钾页岩,平均氧化钾含量约 8.7%。可采用直接破碎作混合肥,或通过 CaCl_2 助剂高温焙烧 - 水浸工艺提钾,用以制备钾肥[59]。顾汉念等人综述了从不溶性含钾页岩中提取钾肥的主要方法,包括直接施用、活化转化与化学提取等,同时指出其对于农业钾肥供应、降低对外依赖具有重要战略意义[26]。杨国峰、张杰指出了贵州省含钾页岩分布范围广,资源储量大,通过正交实验得出较佳提钾工艺,加入其他添加剂可制成含钾复合肥[60]。李松涛等人针对贵州万山地区含钾页岩,通过 XRD、能谱分析和地球化学方法,得出钾富集机制为风化过程中斜长石被钾长石取代的钾交代作用,研究认为该资源目前难以利用,但潜力巨大[10]。通过对上述主要提钾方法进行系统梳理,可从技术成熟度、钾提取效率、能耗水平、经济成本及环境影响等方面进行综合评估,如表 3 所示。

Table 3. Comparison of characteristics of main potassium extraction methods for potassium-rich shale
表 3. 富钾页岩主要提钾方法特性对比

方法类别	主要方法	优点	缺点
火法	高温烧结/熔浸	转化率高, 工艺相对成熟	能耗极高, 设备投资大, 污染控制难
湿法	酸浸/碱浸	反应温度低, 浸出率高	酸碱消耗大, 腐蚀与污染严重, 成本高
生物法	微生物浸出	环境友好, 能耗极低	周期长, 效率低, 过程难控制
农用直接法	制备矿物肥料	工艺简单, 成本低, 资源全利用	产品附加值低, 肥效慢

6. 结论与展望

6.1. 结论

(1) 我国水溶性钾资源相对匮乏,而非水溶性钾资源储量大、分布广,尤其多位于中部及东部农业发

达区，可作为我国钾资源安全的重要战略补充。

(2) 钾资源可分为水溶性与非水溶性钾资源两大类型。水溶性钾资源常以钾石盐、光卤石为主，是当前全球钾肥工业的绝对主体；非水溶性钾资源以钾长石、海绿石等硅酸盐矿物为主，是我国优势潜在资源。

(3) 目前在难溶性钾资源转化为可溶资源方法方面取得突破，如酸浸、高温焙烧-水浸、生物浸出或加入活化剂等，目的都是在破坏硅酸盐稳固结构。

(4) 综合前人研究可知，富钾页岩中钾元素主要物质来源为陆源为主，主要稳定地赋存于微斜长石、伊利石等硅酸盐矿物晶体格架中，因其结构稳定、水溶性极低，导致现有提钾工艺能耗高、效率低的根本原因。

6.2. 展望

(1) 对成矿理论与富集规律做出进一步研究，为矿产勘查预测提供理论指导。同时，未来技术研发可侧重于新型活化剂的开发，用来破坏硅酸盐结构稳定。

(2) 富钾页岩广泛分布于我国农业发达地区，可探索不经过工业提钾，将富钾页岩直接作为地质施肥使用。

(3) 近五年来，该领域研究数量有限，且多数仍集中于对传统高温焙烧或强酸浸出工艺的改进。未来突破方向可以尝试将其他领域的绿色技术原理引入本领域，以降低能耗和成本。

基金项目

河北省煤田地质局公共财政专项资金基金项目“河北省本溪组重点成矿区带共伴生钛锂镓稀土等矿产找矿预测”(13000025P00B04410112E)；自然资源部新一轮找矿突破战略行动科技支撑项目“重点成矿区带本溪组金红石型钛等矿产靶区优选和勘查示范”(ZKKJ202403-4)。

参考文献

- [1] 刘成林, 焦鹏程, 王弭力. 盆地钾盐找矿模型探讨[J]. 矿床地质, 2010, 29(4): 581-592.
- [2] 刘杰, 韩跃新, 印万忠. 难溶性钾矿资源制备钾肥研究现状及展望[J]. 有色矿治, 2005(S1): 172-174.
- [3] Rawashdeh, R.A. and Maxwell, P. (2014) Analysing the World Potash Industry. *Resources Policy*, **41**, 143-151. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2014.05.004>
- [4] 龙鹏宇, 赵艳军, 胡宇飞, 等. 马海盐湖北部矿段低品位固体钾矿中钾盐矿物的赋存特征及成因探讨[J]. 地球学报, 2022, 43(3): 338-346.
- [5] 崔晓寰, 杨云松, 李正. 世界钾盐资源分布及特点[J]. 科技创新导报, 2014(1): 214.
- [6] 郭明强, 牛之建, 田兆雪. 浅析我国钾盐现状与存在问题及应对措施[J]. 中国矿业, 2011, 20(S1): 37-40.
- [7] 谭慧婷, 孙伟, 崔玉照, 等. 钾矿资源现状与杂卤石的开发利用分析[J]. 无机盐工业, 2022, 54(6): 23-30.
- [8] 王登红. 关键矿产的研究意义、矿种厘定、资源属性、找矿进展、存在问题及主攻方向[J]. 地质学报, 2019, 93(6): 1189-1209.
- [9] 黄广文. 东秦岭华阳川-大石沟矿集区碳酸岩型 U-REE 成矿作用研究[D]: [博士学位论文]. 抚州: 东华理工大学, 2023.
- [10] 李松涛, 张兵强, 蒋天锐, 等. 黔北万山地区含钾页岩中钾的赋存状态、富集机制及资源利用前景[J]. 地质通报, 2025, 44(9): 1607-1628.
- [11] 王鑫, 李恩泽, 程芳琴. 国内外钾资源及钾肥生产现状[J]. 广州化工, 2018, 46(14): 9-10.
- [12] 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.
- [13] Shete, M.H., Murumkar, D.R., Indi, D.V., et al. (2020) Isolation of Potash Mobilizing Bacteria and Evaluation of Their Efficacy for Potash Mobilization. *Journal of Plant Disease Sciences*, **15**, 139-141.
- [14] Gamrad-Streubel, L., Theis, L.M., Birk, T., Bachand, A.M., Bünger, J., Pallapies, D., et al. (2021) Salt and Potash Miners

- Exposed to Nitrogen Oxides and Diesel Exhaust—Assessment of Health Effects. *Toxicology Letters*, **350**, S205. [https://doi.org/10.1016/s0378-4274\(21\)00719-0](https://doi.org/10.1016/s0378-4274(21)00719-0)
- [15] 马黎春, 马建强, 韩继秋, 等. 加拿大萨斯喀彻温省索西(Southey)钾盐矿床特征及成因[J]. 矿床地质, 2014, 33(5): 964-976.
- [16] 王石军. 全球钾肥产业发展现状与展望[J]. 磷肥与复肥, 2019, 34(10): 9-13.
- [17] 熊增华, 王石军. 中国钾资源开发利用技术及产业发展综述[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(6): 1-7.
- [18] 王春宁, 余俊清, 陈良, 等. 钾盐资源全球分布和我国找钾实践及方法探究[J]. 盐湖研究, 2007(3): 56-72.
- [19] 白仟, 袁俊宏, 王章俊. 国内外水溶性钾盐资源及我国钾盐产业发展现状[J]. 资源与产业, 2014, 16(2): 37-46.
- [20] 刘颖. 柴达木盆地黑北凹地深层卤水钾资源利用研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- [21] 刘成林, 王弭力, 焦鹏程, 等. 罗布泊盐湖钾盐矿床分布规律及控制因素分析[J]. 地球学报, 2009, 30(6): 796-802.
- [22] 马鸿文, 苏双青, 刘浩, 等. 中国钾资源与钾盐工业可持续发展[J]. 地学前缘, 2010, 17(1): 294-310.
- [23] 胡波, 韩效钊, 肖正辉, 陆亚玲, 等. 我国钾长石矿产资源分布、开发利用、问题与对策[J]. 化工矿产地质, 2005(1): 25-32.
- [24] 苏双青, 杨静, 马鸿文, 等. 非水溶性钾资源制取钾盐技术评价[J]. 化工矿物与加工, 2014, 43(2): 46-51.
- [25] 庚莉萍. 积极解决我国钾资源短缺的问题[J]. 磷肥与复肥, 2007(6): 7-11.
- [26] 顾汉念, 王宁, 杨永琼, 等. 不溶性含钾岩石制备钾肥研究现状与评述[J]. 化工进展, 2011, 30(11): 2450-2455+2553.
- [27] 白仟. 中国钾盐产业发展环境分析与发展战略研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
- [28] 李永寿, 马海州, 苗卫良, 等. 兰坪—思茅盆地勐野井组钾盐矿床成矿构造背景[J]. 盐湖研究, 2016, 24(3): 17-23+9.
- [29] 白仟, 张寿庭, 袁俊宏, 等. 钾盐矿物与矿床[J]. 化工矿物与加工, 2014, 43(7): 20-26.
- [30] 程涛, 陶维祥, 于水, 等. 下刚果盆地北部碳酸盐岩层序地层分析[J]. 特种油气藏, 2012, 19(2): 25-8+136.
- [31] 罗晓峰, 郑绵平, 齐文, 等. 蔡希斯坦盆地二叠纪钾盐成矿条件和资源开发利用[J]. 西北地质, 2014, 47(2): 231-237.
- [32] 裴立刚. 世界海相固体钾盐矿床基本特征及找钾指标体系[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.
- [33] 马鸿文, 苏双青, 杨静, 等. 富钾岩石制取钾盐研究 20 年: 回顾与展望[J]. 地学前缘, 2014, 21(5): 236-254.
- [34] 王晓丽, 高洪, 周萍. 难溶性含钾矿石中提钾技术的研究进展[J]. 广州化工, 2015, 43(4): 12-3+24.
- [35] 石林. 脱硫灰与钾矿石复合生产钾钙硅镁硫肥料研究[J]. 环境工程学报, 2010, 4(10): 2339-2342.
- [36] 王万金, 白志民, 马鸿文. 利用不溶性钾矿提钾的研究现状及展望[J]. 地质科技情报, 1996(3): 60-64.
- [37] 张永生, 邢恩袁, 郑绵平, 等. 川东北宣汉地区海相“新型杂卤石钾盐矿”的发现、突破与前景[J]. 地质学报, 2024, 98(10): 2823-2846.
- [38] 黄长兵. 四川盆地三叠系隐伏性钾矿测井识别与评价研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2017.
- [39] 苏克露, 仲佳爱, 王威, 等. 四川盆地东北部中-下三叠统钾锂资源富集条件及成矿模式[J]. 石油勘探与开发, 2025, 52(1): 241-252.
- [40] Shekhar, S., Sinha, S., Mishra, D., Agrawal, A. and Sahu, K.K. (2020) A Sustainable Process for Recovery of Potash Fertilizer from Glauconite through Simultaneous Production of Pigment Grade Red Oxide. *Sustainable Materials and Technologies*, **23**, e00129. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2019.e00129>
- [41] Ciceri, D., de Oliveira, M., Stokes, R.M., Skorina, T. and Allanore, A. (2017) Characterization of Potassium Agrominerals: Correlations between Petrographic Features, Comminution and Leaching of Ultrapotassic Syenites. *Minerals Engineering*, **102**, 42-57. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.11.016>
- [42] 刘思旭, 周霄, 程林. 我国钾长石矿床资源特征及利用[J]. 石材, 2025(2): 4-6.
- [43] 周中毅, 王东安. 燕山某地新型富钾岩石物质组成及其成因[J]. 地质科学, 1966(1): 79-88.
- [44] 蒋天锐, 潘文, 苏特, 等. 贵州铜仁中寒武统含钾页岩地质特征与钾富集规律研究[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2024, 41(4): 28-33.
- [45] 路小丽, 耿同升. 河南省林州市盘龙山含钾岩石矿地质特征及找矿方向[J]. 中国科技信息, 2012(12): 37-38.

- [46] 赵艳婷. 贵州万山钾矿地质地球化学特征及成矿环境探讨[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2013.
- [47] 熊敏. 贵州万山金家场含钾页岩地质特征及找矿远景分析[J]. 西部探矿工程, 2014, 26(6): 162-165.
- [48] 刘杰. 富钾页岩钾赋存状态及提钾过程机理研究[D]: [博士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2009.
- [49] 刘杰. 富钾岩石钾赋存状态及提钾研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2005.
- [50] 涂灵玲. 贵州铜仁寒武系敖溪组钾资源分布规律及成因[D]: [硕士学位论文]. 贵阳: 贵州大学, 2025.
- [51] Haseli, P., Majewski, P., Christo, F., Keane, P., Jafarian, M. and Bruno, F. (2023) A Review Paper on the Extraction of Potassium from Non-Soluble Resources with the Use of Acid and Alkaline Solution and Molten Salts. *Minerals Engineering*, **204**, Article 108365. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108365>
- [52] Saxena, E.E. (1956) Extraction of Potash from Feldspars. *Transactions of the Indian Ceramic Society*, **1**, 27-29.
- [53] Cushman, A.S. and Coggeshall, G.W. (1912) The Production of Available Potash from the Natural Silicites. *Journal of the Franklin Institute*, **174**, 663-678. [https://doi.org/10.1016/s0016-0032\(12\)90741-3](https://doi.org/10.1016/s0016-0032(12)90741-3)
- [54] Santos, W.O., Mattiello, E.M., Pacheco, A.A., Vergutz, L., da Silva Souza-Filho, L.F. and Abdala, D.B. (2017) Thermal Treatment of a Potassium-Rich Metamorphic Rock in Formation of Soluble K Forms. *International Journal of Mineral Processing*, **159**, 16-21. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2016.12.004>
- [55] Samantray, J., Anand, A., Dash, B., Ghosh, M.K. and Behera, A.K. (2022) Silicate Minerals—Potential Source of Potash—A Review. *Minerals Engineering*, **179**, Article 107463. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107463>
- [56] 甘朝勋. 贵州的富钾岩石资源及其开发利用问题[J]. 贵州地质, 1992(4): 358-362.
- [57] 薛步高. 昆阳群富钾岩石地质特征及开发探讨[J]. 化工矿物与加工, 1999(11): 6-9.
- [58] 任耀武. 华北长城系富钾岩石特征及开发利用[J]. 河南地质, 2000(1): 67-68.
- [59] 侯兵德. 贵州万山钾页岩地质特征及开发利用[J]. 科协论坛(下半月), 2010(10): 109-110.
- [60] 杨国峰, 张杰. 贵州难溶性含钾页岩提钾试验研究[J]. 化工矿物与加工, 2008(9): 7-9.