

非金属成矿与勘查开采技术

——“非金属矿产”专辑特邀主编寄语

王春连

中国地质科学院矿产资源研究所, 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037

摘 要: 历史证明, 矿产资源是人类赖以生存、社会发展的物质基础。没有矿产资源的可持续供应和安全保障, 就没有国民经济与社会的可持续发展。据统计, 世界上 95% 的能源以及 80% 的工业原料来自矿物燃料, 而世界矿产年开采量的 70% 以上为非金属矿。随着社会的发展和科技的进步, 对非金属矿材料的需求将越来越多。

为解决中国战略非金属找矿取得更大突破, 近年来在国家科技部(973 计划)、国家自然科学基金委员会(自然科学基金重点)、自然资源部(国家级整装勘查区)、中国地质调查局(地质大调查)、中国科学院及有关省市自然资源部门的项目持续支持下, 国内有关科研院所和高校的地质工作者, 基于详细的野外地质调查和室内分析研究, 获得了大量的地质资料, 取得了一些重要的进展和新认识, 并实现了一些找矿的重大进展等。为迎接党的二十大胜利召开献礼, 将部分研究成果集中发表于《地球学报》“非金属矿产”专辑。主要内容涉及与非金属有关的矿物学(描述矿物学、理论矿物学、应用矿物学、矿相学及矿物中包裹体等方面的研究成果); 岩石学(区域性的岩浆岩、变质岩、沉积岩的岩类学、实验岩石学方面的基础理论和应用研究成果); 矿床学(非金属矿床); 矿床地球化学(包括流体包裹体、稳定同位素及成矿模拟实验)、与矿床有关的岩石学和矿物学、构造演化与成矿研究等。

专辑包括综合篇、非金属矿产资源开发理论与技术篇、清洁能源篇、战略性非金属篇和找矿方法找矿预测篇 5 个部分, 本文将对收录本专辑的所有文章做简要介绍, 希望该专辑的研究成果能够为非金属矿产理论研究以及实现找矿突破提供参考和有益的帮助。

关键词: 非金属矿产; 找矿预测; 关键矿产; 战略性新兴产业; 找矿方法; 关键应用

中图分类号: P619.2 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2022.051901

The Exploration and Exploitation Technology of Non-metal Mineralization: Guest Editor's Preface to the “Non-metallic Minerals”

WANG Chun-lian

*MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources,
Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037*

Abstract: Historically, mineral resources have been the material basis for human survival and social development. Without the sustainable supply and security of mineral resources, economic and social development cannot be maintained. According to the literature, 95% of the world's energy and 80% of industrial raw materials come from fossil fuels, and more than 70% of the world's annual mineral exploitation is non-metallic ore. With the development of society and the progress in science and technology, the demand for non-metallic materials will further increase.

To solve China's strategic breakthrough in non-metallic prospecting, in recent years, with the support from Ministry of Science and Technology (973 program), National Natural Science Foundation of China, Ministry of

收稿日期: 2022-05-10; 改回日期: 2022-05-18; 网络首发日期: 2022-05-20。责任编辑: 张改侠。

作者简介: 王春连, 男, 1983 年生。博士, 研究员。主要从事矿床学方面的研究。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号。

E-mail: wangchunlian312@163.com。

Natural Resources (national integrated exploration area), China Geological Survey, Chinese Academy of Sciences, and some relevant provinces and cities, geologists in domestic scientific research institutes and colleges have obtained a large amount of geological data, and have made significant progress in developing new understanding for prospecting, based on detailed field geological surveys and indoor analysis. To welcome the 20th CPC National Congress, some of the research results were published in *Acta Geoscientica Sinica* as a special issue of “non-metallic minerals”. The main contents are related to non-metallic mineralogy (describing mineralogy, theoretical mineralogy, applied mineralogy, mineralogy, and inclusions in minerals, etc.), petrology (petrology of regional magmatic rocks, metamorphic rocks, sedimentary rocks, basic theories, and applied research achievements in experimental petrology), non-metallic mineral deposits, ore deposit geochemistry (including fluid inclusions, stable isotopes and metallogenic simulation experiments), petrology and mineralogy related to ore deposits, tectonic evolution, and metallogenic studies, etc.

This special issue includes five parts: an overview of non-metallic minerals, development theory and technology of non-metallic minerals, clean energy, strategic non-metallic minerals, and prospecting methods and prediction. This preface makes a brief introduction to all the articles in this special issue. I hope the research results of this special issue can be helpful and provide the reference for theory research and implementation of nonmetallic minerals prospecting breakthrough.

Key words: non-metallic minerals; ore prediction; critical minerals; strategic emerging industry; method of prospecting; critical applications

进入 21 世纪以来, 当今世界百年未有之大变局, 中国特色社会主义进入新时代, 人类社会进入前所未有的创造活跃期, 矿产资源对人类社会的重要性在逐步增强, 矿产资源领域的博弈成为各国竞争的重要阵地(王安建等, 2010; 王登红, 2019; 陈军元等, 2021; 郭娟等, 2021; 姜雅等, 2021; 焦森等, 2021), 全世界感觉到矿产资源供应面临危机(陈其慎等, 2021)。战略性新兴产业(节能环保、新一代信息技术、生物、高端装备制造、新能源、新材料、新能源汽车)几乎或多或少都与非金属矿及其制品有关。历史证明, 矿产资源是人类赖以生存、社会发展的物质基础。没有矿产资源的可持续供应和安全保障, 就没有国民经济与社会的可持续发展。据统计, 世界上 95% 的能源以及 80% 的工业原料来自矿物燃料, 而世界矿产年开采量的 70% 以上为非金属矿。随着社会的发展和科技的进步, 对非金属矿材料的需求将越来越多(王登红, 2019; 陈甲斌等, 2020; 郭娟等, 2021; 王春连等, 2022)。

为了使社会各界更加深入了解国内外战略性矿产, 尤其是战略非金属矿产的研究进展, 及时掌握矿产新形势和新问题, 推动我国非金属矿产资源高质量发展, 我们组织了长期从事非金属矿产研究工作的十余家单位的 30 多名专家, 撰写了 14 篇非金属矿产的文章, 组成“非金属矿产”专辑。专辑包括非金属矿产综合篇、非金属矿产资源开发理论与技术篇、清洁能源篇、战略性非金属篇和找矿方法找矿预测篇 5 个部分, 本文将对收录本专辑的所有文章做简要介绍, 希望该专辑的研究成果能够为非金属矿产理论研究以及实现找矿突破提供参考和有益的帮助。

1 非金属矿产综合篇

战略性新兴产业(节能环保、新一代信息技术、生物、高端装备制造、新能源、新材料、新能源汽车)几乎或多或少都与非金属矿及其制品有关。当今世界正经历百年未有之大变局, 世界主要国家在新一轮矿产资源战略实施中, 都将重点指向事关国家经济安全、产业安全、国防安全和科技安全的战略性矿产资源。开展战略性矿产综合研究对于国家制定矿产资源战略、规划和政策措施有重要意义(陈其慎等, 2021)。本部分为战略性矿产综合研究, 共有 1 篇文章, 为研究性文章, 文章题目为“战略性非金属矿产厘定、关键应用和供需形势研究”(王春连等, 2022)。

战略性非金属矿产的厘定与指导理论思想、资源背景、动因和采取的措施密切相关。这些矿种都与战略新兴产业(信息技术、新能源、新材料、生物、高端制造、节能环保、电子信息和传统应用)密不可分。萤石、高纯石英、石墨、硼、金红石、硅藻土、叶蜡石、石榴子石、金刚石、泥炭、重晶石等非金属矿产被中国、日本、澳大利亚等多个国家列为“战略性矿产”或“关键矿产”(王春连等, 2022), 美国列为“危机矿产”(U.S. Department of Commerce, 2019)。

王春连等(2022)从战略非金属矿产定义、战略性非金属矿产的界定原则、战略非金属矿种确定及战略性非金属矿产关键应用等 4 个方面进行了论述, 对其重要性及用途、资源态势等进行研究, 为国家制定勘查投入及产业发展政策提供参考。对于完善全国矿产资源规划中的战略性矿产资源目录、为国家相关产业政策制定提供借鉴参考具有重要意义。

战略性非金属矿产是指对国家经济发展和国家安全至关重要的非金属矿产。具体包括三个方面含义: (1)战略性新兴产业发展所必需; (2)国内短缺、供应存在风险; (3)国内资源丰富、能够提升国际话语权和控制力。

战略性新兴产业是某个领域重要产品生产制造的关键原材料。这些矿产或者作为组分材料进入产品之中, 或者作为辅助材料消耗于产品生产过程, 均是战略性新兴产业发展所必需, 并且难以替代的; 即便在工艺上能够实现替代, 也可能对产品的技术性能和经济成本造成影响。重点关注与战略性新兴产业密切相关的非金属矿产, 排除相关性不强的基础性非金属矿产, 以便聚焦重要矿种。用于战略性新兴产业领域的消费量占总消费量一定比例。

根据以上对战略非金属矿产的定义及界定原则, 综合考虑我国非金属资源现状、应用领域、未来需求等, 经多次研讨暂定萤石、石英、石墨、硼、金红石、硅藻土、叶蜡石、石榴子石、金刚石、泥炭和重晶石等 11 个矿种为战略非金属矿产。

2 非金属矿产资源开发理论与技术篇

柴达木盆地盐湖钾、锂、硼等资源极为丰富, 以察尔汗盐湖为主的柴达木盆地盐湖是我国最重要的钾盐钾肥基地。柴达木盆地察尔汗盐湖赋存储量可观的低品位固体钾盐矿, 其主要的开发方式为液化开采。液化开采理论和技术的提升与低品位固体钾盐采收率有直接的关系。本部分为非金属矿产资源开发理论与技术篇, 共有 2 篇文章, 为研究性文章, 文章题目分别为“察尔汗盐湖霍布逊区段资源开采过程中储卤层系统变化特征研究”(韩光等, 2022)、“察尔汗盐湖固体钾盐溶解对溶剂注入速率响应机制研究”(常政等, 2022)。

韩光等(2022)通过对研究区不同开采时段(2004 年、2011 年和 2019 年)钾盐含量变化、孔隙度变化以及卤水组分变化等进行了对比分析, 得出以下结论: (1)地下卤水资源大规模开采, 大量高矿化度卤水被带出, 低矿化度水体补给储卤层, 促进了低品位钾盐类矿物的溶解, 增大了储卤层的孔隙度。局部区域储卤层孔隙度较开发前发生减小的现象。这是由于储卤层孔隙性具有空间非均一性, 存在高渗透区和低渗透区, 低浓度水体渗流溶解过程中, 在高渗透区持续溶解而孔隙度增大, 形成渗流通道; 低渗透区中流体相对停滞, 且孔隙发生淤堵, 孔隙度降低。(2)对比不同时段固、液体 KCl 含量变化, 其 KCl 品位均发生了降低, 液体矿 KCl 品位下降值小于固体 KCl 品位下降值, 原因是低品位固体钾矿发生了固液转化, 使卤水中 KCl 总量增加, 但由于混

合稀释作用卤水中品位 KCl 品位表现为下降趋势; 同时固体钾矿溶解效率与 KCl 含量有关, KCl 品位越高, 溶解效果越好。(3)卤水中 KCl、NaCl 含量均出现降低趋势, 主要是由于大量卤水开采以及低矿化度水体的补给作用, 使得卤水出现了淡化现象; 卤水中 $MgCl_2$ 含量明显增多, 这与开采过程中老卤(主要成分为 $MgCl_2$)回灌有较大关系。上述研究成果为今后固体钾矿高效开发利用提供科学依据。

常政等(2022)通过室内模拟实验探究了不同渗透流速条件下储卤层物理结构变化特征以及储层中固体钾盐矿物溶解规律, 得到以下结论: (1)储卤层岩芯渗透系数与渗透流速之间表现出明显的非线性特征。定流速条件下, 受到矿物溶解及细粒泥沙迁移堆积双重作用, 渗透系数增加缓慢。增加流速后, 矿物溶解及细粒泥沙迁移能力增强, 岩芯骨架部分坍塌引起矿物颗粒重组, 增加了流体与矿物接触面, 从而增加了溶解速率, 储层渗透系数也迅速增加。(2)储卤层岩芯固体钾盐矿物溶解受到溶剂注入速率的影响明显。注入速率增加引起矿物颗粒重组以及滞留孔隙高浓度水体释放是造成渗出液中 K^+ 浓度短暂性升高的主要原因。上述研究成果为察尔汗盐湖固液转化机理的深入认识和液化开采方案的优化与实施提供科学依据。

3 清洁能源篇

随着社会和经济的发展、全球人口的增长及生活水平的不断提高, 一次能源尤其是化石能源的大规模开发利用, 导致环境破坏越来越严重, 对人类生活造成了极大的负面影响, 因此, 清洁能源的开发利用引起全球的广泛重视。在全球碳中和的大背景下, 伴随着能源体系的逐步优化, 能源消费结构将持续向更低碳能源结构转型(崔荣国等, 2021), 今后的一段时间内, 化石能源中的天然气将比石油和煤炭增长更快(邹才能等, 2020)。过去十来年, 页岩气已成为美国日渐重要的天然气资源。根据美国能源信息署(Energy Information Administration)的预测, 到 2035 年时, 美国大约 46% 的天然气供给将来自页岩气。随着美国的“页岩气革命”, 页岩气得到了全世界其他国家的广泛关注, 中国成为世界上第三个掌握页岩气勘探开发技术的国家(聂海宽等, 2020)。锂是战略新兴矿产资源, 是制造新能源汽车电池的重要原料。我国已成为世界最大的电动汽车生产和消费国, 国内锂需求呈爆炸式增长, 但大量锂盐产品仍依赖于进口; 据有关专家预测, 未来国内锂矿资源供应不能满足需求, 资源缺口仍将存在, 锂资源对外依存度将在一定时期内保持在 70% 左右。目前, 全球开发利用的锂矿资源分为卤水型和硬岩

型两大类,据国外专家统计,盐湖卤水锂占世界锂产量的 75%左右,因此,加强盐湖卤水锂矿的研究和勘查具有现实意义。本部分共有 3 篇文章,均为研究性文章,包括:“川东南石宝矿区龙潭组页岩气(煤层气)潜力分析——以 SD1 井为例”(邓敏等, 2022)、“黔西北毕节地区中二叠统碳酸盐岩岩石学、地球化学特征及意义”(兰叶芳等, 2022)、“吉泰盆地石炭系黄龙组黑色碳质泥岩物源、构造背景与古风化作用:来自稳定元素地球化学的证据”(颜开等, 2022)。

邓敏等(2022)以川东南古蔺石宝地区 SD1 井海陆过渡相的二叠系龙潭组地层为研究对象,结合岩芯观察、岩石学和地球化学分析,综合探讨龙潭组烃源岩的发育特征和影响因素,得出如下结论:(1)川东南石宝矿区龙潭组泥页岩与煤层和(粉)砂岩层交替出现,泥页岩累计厚度较大,平均厚度约为 47.74 m。泥页岩有机质丰度高,有机碳含量变化在 1.23%~26.6%之间,平均值为 7.37%;镜质体反射率介于 2.63%~2.93%之间,处于过成熟生干气阶段,生烃能力强。(2)研究区龙潭组碳质泥页岩与煤层储层非均质性强,孔隙度和渗透率都非常低,孔隙度均在 5%以下,渗透率远<0.1 mD,具超低孔超低渗特征。储集空间主要包括微裂缝、有机质孔、溶蚀孔和黄铁矿晶间孔等类型,微裂缝是本区较为重要的储集空间类型。(3)钻井证实龙潭组地层含气性好,总体表现为煤层气>页岩气>砂岩气,泥页岩及煤层具有相对较高的含气性和吸附性能,显示良好的页岩气(煤层气)勘探开发潜力。(4)高有机碳含量、高热演化程度、良好的含气性和吸附性、适度的埋深是研究区龙潭组页岩气勘探开发的有利条件,但是黏土矿物含量相对较高,脆性指数相对较小,增加了压裂难度。因此,需要聚焦于海陆过渡相的整套页岩层系,泥页岩之间的粉砂岩、砂岩夹层有利于水力压裂,勘探开发拟以碳质泥岩夹煤层组合为主,龙潭组上段 C₁₄-C₁₇ 泥煤组合夹砂岩、龙潭组中段 C₂₀-C₂₄ 泥煤层组合夹砂岩是优选有利层段,有利于实现煤层气、页岩气和致密砂岩气的高质量开采。以期丰富四川盆地海陆过渡相油气地质研究成果,为研究区内资源的进一步的勘探开发提供基础资料和科学依据。

黔西北毕节地区中二叠统碳酸盐岩广泛发育,地层出露良好。兰叶芳等(2022)通过野外剖面观察、薄片和阴极发光分析以及元素和同位素地球化学研究,得出以下结论:(1)中二叠统栖霞和茅口组地层中岩石类型以粒屑结构的颗粒灰岩和泥微晶结构的泥晶灰岩占主导,整体显示不发光-弱阴极发光特征。栖霞组上部和茅口组一段发育不彻底的白云化

作用形成豹斑灰岩,白云石呈星散状、斑块状、交代生物颗粒以及鞍形白云石等形式产出,具有暗玫红色阴极发光。(2)碳氧同位素分析表明,中二叠统碳酸盐岩的碳同位素分布在 1.2‰~4.6‰(PDB)区间,氧同位素变化在-7.4‰~-10.1‰(PDB)之间。碳氧同位素之间不具有明显的相关性, $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 数值离散特征明显。碳同位素全为正值表明其未受大气淡水或有机质的显著影响,其变化趋势与海平面变化相一致,而氧同位素的偏负则主要是埋藏成岩作用过程中相对较高温度影响的结果。(3)由常量和微量元素分析得知,栖霞组—茅口组岩石中亲铁元素 Ni 以及亲石元素 V、Cr、U 相对富集,而易于富集在陆源组分中的 Ti、Al、Zr、Th 等元素含量低,说明在沉积和成岩过程中受陆源物质影响或改造的程度较小;Si 含量高的样品主要集中在栖霞组和茅口组上部地层中,在野外以燧石条带或结核形式产出,而白云化作用主要发生在茅口组地层,从而使得其具有相对较低的 Sr 含量。(4)中二叠统碳酸盐岩总体具有典型的低稀土总量、铈负异常和铈正异常特征;轻、重稀土的分异显示为 LREE 相对亏损的左倾型稀土分配型式。结合 Ce 负异常和极低的 Re、Cd、Mo、U、Cu 含量,表明栖霞组—茅口组地层中陆源物质匮乏,总体以氧化环境为主。

深部卤水沉积的形成受物质来源、沉积期古气候条件和盆地构造条件等因素的控制(刘成林等, 2010; 魏海成等, 2016; Sun et al., 2017; 王春连等, 2018, 2020, 2021)。目前吉泰盆地的基础地质研究还显薄弱,现有资料不足以揭示深层卤水的形成机理。为了更好地了解吉泰盆地深层卤水的成因,各成矿元素的来源及富集程度,颜开等(2022)报道了黄龙组黑色碳质泥岩的主、微量、稀有元素地球化学数据,探讨其对上层周田组卤水矿产的影响。通过分析吉泰盆地 M2 井碳质泥岩样品 La/Th-Hf 和 Zr-TiO₂ 的比值,轻稀土/重稀土比值和 Eu 的异常特征,认为吉泰盆地黄龙组的物源主要为长英质/基性岩和古老沉积物的混合区域,为富锂钾卤水矿提供了物质来源。通过主微量元素和稀土元素(TiO₂、La、Sc、Hf、Th、Zr)的含量和比值,反映出吉泰盆地黄龙组的碳质泥岩具有被动大陆边缘的构造背景特征。Th/Sc 和 Zr/Sc 的比值表明吉泰盆地黄龙组上部泥岩受到沉积再循环的影响。根据化学风化指数(CIA、CIW、PIA 和 ICV)及 Al₂O₃-(CaO+Na₂O)-K₂O 图解,黄龙组碳质泥岩是在沉积源区经历了较为强烈的风化作用和再循环形成的沉积物。强烈的化学风化作用有利于元素的迁移和富集,为卤水矿床的形成提供了丰富的成矿元素。

4 战略性非金属篇

战略性非金属被广泛应用于石油、化工、冶金、建筑、机械、农业、环保、医药等行业。无论是粮食生产所需要的硫、磷、钾,还是战略性新兴产业需要的萤石、石墨、重晶石等非金属,被越来越多地应用于国防、航天、通信、电子、新材料、新能源等高科技领域,在国家经济安全、国防安全和战略性新兴产业发展中有十分重要的作用(陈其慎等, 2022; 王春连等, 2022)。本部分共有 6 篇文章,均为研究性文章,包括“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”(龙鹏宇等, 2022)、“江汉盆地潜江凹陷王场地区深层卤水水化学特征及成因研究”(薛燕等, 2022)、“江西宁都坎田萤石矿床稀土元素地球化学特征及其指示意义”(游超等, 2022)、“闽北羊角尾萤石矿成因: 来自稀土、微量元素地球化学的证据”(金松等, 2022)、“福建邵武地区张厝萤石矿微量、稀土元素地球化学特征”(周博文等, 2022)、“福建余朋—南口火把山萤石矿地质特征及成因”(刘殿鹤等, 2022)。

马海矿区位于柴达木盆地中北部,是一个固液矿并存、贫富矿石并存,钾、镁、钠等多种组分共(伴)生的第四纪盐湖矿床。矿区开展地表低品位固体钾矿液化溶采的工程已有近十年,随着水溶开采的持续进行,固体钾矿的品位明显降低,溶出液的成分也发生了明显变化,给生产带来了很大的不确定性。要实现固液转化的可持续运行,降低生产风险,必须查清现阶段低品位固体钾矿中钾盐矿物的赋存状态(龙鹏宇等, 2022)。本文通过对矿区 10 个钻孔岩芯进行编录,开展岩芯观察、盐矿鉴定等工作,深入研究了马海矿区北部矿段 67–79 勘探线钾盐矿物类型、空间分布特征及成因,得出如下结论: (1)马海矿区北部矿段 67–79 勘探线全新统矿层中主要存在杂卤石、光卤石、钾石盐等钾盐矿物。杂卤石主要集中在 70–79 线,光卤石集中分布在 67–70 线,钾石盐集中分布在 72 线。(2)根据薄片鉴定和能谱扫描电镜观察,发现杂卤石以原生为主,呈片状、纤维状、粒状、纤维放射状集合体、花瓣状集合体与石盐、碎屑矿物共生。极少数杂卤石为后生交代成因,呈浸染状和具石膏假象的毛毡状。光卤石呈熔融状、他形粒状、裂纹状,与石盐、杂卤石、钾石盐等矿物共生。钾石盐呈自形-半自形立方单体,与光卤石、杂卤石、水氯镁石等矿物共生。(3)通过对钾盐矿物的赋存特征进行分析,初步认为,受上新世末以来多期新构造运动的影响,矿区东南部的富 K^+ 、 Mg^{2+} 的硫酸镁亚型卤水与西北部、西南部富含 Ca^{2+} 的氯化物型卤水发生掺杂作用,并在全新世中晚期干冷气

候的影响下,在研究区 70–79 勘探线干盐滩浅部形成了含杂卤石的石盐层。高盐度氯化物型卤水进一步经蒸发、浓缩后沉积了光卤石和钾石盐。(4)需要根据杂卤石的赋存特征,采取针对性的水溶开采措施。上述研究成果可为研究区溶采工作的可持续发展提供保障,并提高溶采效率。

王场地区位于潜江凹陷北部的王场背斜上,地质构造特殊,不仅是重要的油气储藏位置,也是高浓度卤水分布带,研究该区域地下卤水水化学特征及其成因给面临枯竭的油田资源转型以及同类型高浓度地下卤水资源的勘探和开发提供一定科学参考(Yu et al., 2021)。薛燕等(2022)通过测试其化学组成,分析了卤水的水化学特征、元素相关性和特征系数,得出如下结论: (1)王场地区卤水为 $Cl-Na$ 型卤水, pH 值范围为 7.03~8.014,总矿化度平均值 260.04 g/L,高于整个潜江凹陷的总矿化度平均值 238.98 g/L,位于高浓度卤水分布带,但相较于早年间潜江凹陷总矿化度平均值,呈下降趋势,这与油田开采过程中的注水以及潜江凹陷地下卤水自身封闭性较差等具有一定的关系。(2)潜江凹陷王场地区的部分微量元素达到工业品位或综合利用品位,具有较高的利用价值。Li 达工业或综合利用品位,且 Mg^{2+} 与 Li^+ 的含量比值较低,是十分优质的锂资源;部分地下卤水样品中的 B 达到综合利用工业品位;Br 含量较高,达到综合利用品位的 1~6.58 倍。B、Br、I 的含量和 Li 的含量呈正相关,这四种元素很有可能具有相同的物质来源。部分面临枯竭的油田井,可以考虑通过经济合理的手段提取伴生卤水中的微量元素。(3)综合分析特征系数认为潜江凹陷王场地区地下卤水样品可能来自于早期陆相盐湖沉积,整体封闭性较差,变质程度较低,有来自淋滤卤水的物源补给。

萤石作为一种常见的氟化物矿物,被广泛用于光学、陶瓷、冶金、玻璃等领域,萤石矿在我国是一种非常重要的战略性非金属矿产原料,对我国国民经济的发展具有极其重大的意义。中国作为全球第三大萤石资源储量国,拥有非常丰富的萤石资源,萤石矿床主要分布在江西、浙江、内蒙古以及湖南等省区。近两年来,在中国地质大调查项目的支持下,经探矿工程验证和采样分析,在武夷山成矿带初步估算萤石预测资源量达超大型规模。本专辑收录了 4 篇战略性非金属萤石的文章。因此,通过微量元素、稀土元素等地球化学特征,探究余朋—南口等地区萤石矿床的成矿物质来源、矿床成因等,为我国闽西北萤石成矿带的深入找矿提供借鉴与参考。这些文章均通过微量元素、稀土元素等地球化学特征,探究研究区萤石矿床的成矿物质来源、矿床成因等,为我国萤石成矿带的深入找矿提供借鉴与参考。

5 找矿方法找矿预测篇

闽北地区是我国萤石矿主要矿集区,以往找矿工作多采用地质填图寻找地表露头、槽探工程揭露和钻探工程深部验证等传统地质方法组合,对隐伏-半隐伏萤石矿的综合勘查方法研究较少(张江海等, 2014),因此找矿效果不甚理想。目前,萤石矿勘查找矿工作逐渐向隐伏矿和深部矿转移,研究有效的萤石矿综合信息找矿方法组合,建立萤石矿综合信息预测模型对指导我国萤石矿勘查评价,保证萤石矿资源储备具有重要意义(栗克坤等, 2022)。本部分共有 2 篇文章,均为研究性文章,包括“闽北邵武地区萤石矿综合信息找矿方法研究”(栗克坤等, 2022)、“闽北邵武地区水系沉积物地球化学特征及找矿预测”(韩志坤等, 2022)。

王猛等(2018)利用 1:1 万高精度磁测、高密度电法以及联合剖面法测量对隆化县招素沟萤石矿进行了试验,取得一定的效果。栗克坤等(2019)在闽北光泽地区利用区域化探、高精度磁法测量、视电阻率联合剖面测量和高密度电阻率法测量等物化探综合信息找矿方法取得了较好的找矿效果。栗克坤等(2022)以福建邵武地区物化探综合找矿勘查实例,探讨隐伏-半伏热液充填型萤石矿物化探综合预测方法组合,总结寻找隐伏-半隐伏热液充填型萤石矿的地物化技术方法组合特征,得出如下结论:(1)化探测量圈出的 F、CaO 等元素综合异常信息可初步圈定萤石矿找矿预测区。物探测量可用于判别是否存在断裂及断裂规模、形态。物化探综合找矿方法对闽北地区隐伏-半隐伏热液充填型萤石矿勘查评价工作具有较好的效果。(2)可控源大地音频电磁测深对萤石矿体深部形态具有较好的指示,通过地物化综合信息找矿方法,在福建邵武张厝萤石矿预测区新发现热液充填型中型萤石矿床 1 处。为萤石矿勘查评价工作提供参考。

韩志坤等(2022)为进一步明确找矿方向,在邵武地区开展 1:5 万水系沉积物测量,对水系沉积物地球化学特征和异常所处地质背景进行定性和定量综合评价,圈定找矿预测区,得出如下结论:(1)通过元素含量、分布特征、及相对丰度曲线和变异系数曲线,综合分析研究区内主成矿元素为 F、Au、Pb、Zn、Nb、Ta。(2)结合元素 R 型聚类分析及元素的分布特征,与萤石矿组成元素 F 密切相关的有 Li、Be、Nb、Ta、U,可作为区域找萤石矿的指示元素。(3)综合研究元素的地球化学特征参数,圈定单元元素异常 652 个,综合异常 26 处,找矿预测区 4 处。(4)优选出半岭—张厝萤石矿找矿预测区,通过异常查证新发现萤石矿点 3 处,该预测区内具

有寻找南山下式中低温热液充填型萤石矿床的良好前景。以期为该区深入开展矿产勘查提供基础资料和有利依据。

6 致谢

本专辑得到中国地质科学院和中国地质科学院矿产资源研究所领导的支持,《地球学报》编辑部付出了大量辛苦的劳动,同时也得到了许多从事非金属矿产研究专家们的帮助和支持,在此一并表示衷心的感谢。希望本专辑的介绍,起到“抛砖引玉”的作用,吸引更多研究者的兴趣。

专辑的绝大部分成果得到国家自然科学基金项目(编号:U20A2092;42002106;41907262;41502089;42102039;41807216)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(编号:KK2005;KK2016;KK2110;KK2119)、中国地质调查局地质调查二级项目(编号:DD20221684;DD20190606;DD20221684;DD20221661;DD20190816;DD20190437)、国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(编号:2011CB403007)、国家重点研发计划课题“重点锂、铍成矿带成矿规律与预测评价研究与综合”(编号:2019YFC0605203)和第二次青藏高原综合科学考察研究项目(编号:2019QZK0805)的联合资助。

参考文献:

- 常政,袁小龙,刘万平,李梦玲,苗卫良,程怀德,卜迪,张昊,张西营. 2022. 察尔汗盐湖固体钾盐溶解对溶剂注入速率响应机制研究[J]. 地球学报, 43(3): 287-294.
- 陈甲斌,霍文敏,冯丹丹,王婧,余良晖,刘超,苏轶娜,殷俐娟,殷俐娟,胡德文,闻少博. 2020. 中国与美欧战略性(关键)矿产资源形势分析[J]. 中国国土资源经济, 33(8): 9-17.
- 陈军元,刘艳飞,颜玲亚,高树学,欧阳友和,龙涛. 2021. 石墨、萤石等战略非金属矿产发展趋势研究[J]. 地球学报, 42(2): 287-296.
- 陈其慎,张艳飞,邢佳韵,龙涛,郑国栋,王琨,崔博京,覃升. 2021. 国内外战略性矿产厘定理论与方法[J]. 地球学报, 42(2): 137-144.
- 崔荣国,郭娟,程立海,张迎新,刘伟. 2021. 全球清洁能源发展现状与趋势分析[J]. 地球学报, 42(2): 179-186.
- 邓敏,兰叶芳,程锦翔,王正和,余谦,刘安然,赵安坤. 2022. 川东南石宝矿区龙潭组页岩气(煤层气)潜力分析——以 SD1 井为例[J]. 地球学报, 43(3): 295-308.
- 郭娟,闫卫东,徐曙光,崔荣国,胡容波,林博磊,周起忠,周舟,杨玲. 2021. 中国关键矿产评价标准和清单的探讨[J]. 地球学报, 42(2): 151-158.
- 韩光,袁小龙,韩积斌,刘久波,范增林,胡燕,张西营. 2022. 察尔汗盐湖霍布逊区段资源开采过程中储卤层系统变化特征研究[J]. 地球学报, 43(3): 279-286.

- 韩志坤, 栗克坤, 张青松, 张静杰, 闫晓博, 靳乾峰, 蒋济勇, 刘增政. 2022. 闽北邵武地区水系沉积物地球化学特征及找矿预测[J]. 地球学报, 43(3): 411-420.
- 姜雅, 王婷, 龙涛. 2021. 关于将重晶石列为战略性矿产的原则分析[J]. 地球学报, 42(2): 297-302.
- 焦森, 郑厚义, 任永健, 刘丙秋, 韩贝贝, 曹光远. 2021. 中国主要农用矿产资源安全保障战略研究[J]. 地球学报, 42(2): 279-285.
- 金松, 王春连, 高立湧, 张成信, 王占兵, 王畅, 孟都, 商朋强. 2022. 闽北羊角尾萤石矿成因: 来自稀土、微量元素地球化学的证据[J]. 地球学报, 43(3): 371-382.
- 兰叶芳, 任传建, 李小彩, 任成明, 高柱. 2022. 黔西北毕节地区中二叠统碳酸盐岩岩石学、地球化学特征及意义[J]. 地球学报, 43(3): 309-324.
- 栗克坤, 陈新立, 商朋强, 于雪良, 韩志坤, 魏凡超, 刘增政. 2019. 物化探综合信息找矿方法在萤石矿找矿中的应用[J]. 中国地质调查, 6(06): 98-104.
- 栗克坤, 商朋强, 韩志坤, 王春连, 焦森, 王桂香, 袁昌盛, 张青松, 刘增政, 闫晓博, 范亚洲, 蒋济勇, 靳乾峰. 2022. 闽北邵武地区萤石矿综合信息找矿方法研究[J]. 地球学报, 43(3): 404-410.
- 刘成林, 焦鹏程, 王弭力. 2010. 盆地钾盐找矿模型探讨[J]. 矿床地质, 29(4): 581-592.
- 刘殿鹤, 王春连, 张雪花, 余小灿, 颜开, 刘思晗, 周博文, 游超, 刘雪, 尹传凯. 2022. 福建余朋一南口火把山萤石矿地质特征及成因[J]. 地球学报, 43(3): 383-392.
- 龙鹏宇, 赵艳军, 胡宇飞, 杜江民, 何继辉, 王朝旭. 2022. 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, 43(3): 338-346.
- 聂海宽, 何治亮, 刘光祥, 张光荣, 卢志远, 李东晖, 孙川翔. 2020. 中国页岩气勘探发现状与优选方向[J]. 中国矿业大学学报, 49(1): 13-35.
- 王安建, 王高尚, 陈其慎, 于汶加. 2010. 矿产资源需求理论与模型预测[J]. 地球学报, 31(02): 137-147.
- 王春连, 黄华, 王九一, 徐海明, 余小灿, 高超, 孟令阳, 蔡芃睿, 颜开, 方景玲. 2018. 江陵凹陷富钾锂卤水矿田地质特征及成藏模式研究[J]. 地质学报, 92(8): 1630-1646.
- 王春连, 刘丽红, 李强, 孟令阳, 刘成林, 张媛媛, 王九一, 余小灿, 颜开. 2020. 江西吉泰盆地卤水型锂钾矿物源区岩石地球化学特征及成因分析[J]. 岩石矿物学杂志, 39(1): 65-84.
- 王春连, 孟令阳, 刘成林, 余小灿, 颜开, 刘思晗, 游超, 栗克坤, 滕晓华. 2021. 江陵凹陷古新世地下卤水型硼成因研究[J]. 岩石矿物学杂志, 40(1): 1-13.
- 王春连, 王九一, 游超, 余小灿, 刘殿鹤, 颜开, 刘思晗, 薛燕, 刘延亭, 刘雪, 尹传凯. 2022. 战略性非金属矿产厘定、关键应用和供需形势研究[J]. 地球学报, 43(3): 267-278.
- 王登红. 2019. 战略性关键矿产相关问题探讨[J]. 化工矿产地质, 41(2): 65-72.
- 王猛, 黄俭合. 2018. 综合物探方法在萤石矿勘查中的应用[J]. 中国煤炭地质, 30(S1): 118-124.
- 魏海成, 樊启顺, 安福元, 山发寿, 马海州, 袁秦, 秦占杰. 2016. 94—9 ka 察尔汗盐湖的气候环境演化过程[J]. 地球学报, 37(2): 193-203.
- 薛燕, 王春连, 刘殿鹤, 王九一, 颜开, 彭琰聪, 高绣纺. 2022. 江汉盆地潜江凹陷王场地区深层卤水水化学特征及成因研究[J]. 地球学报, 43(3): 347-358.
- 颜开, 王春连, 王九一, 沈立建, 余小灿, 孟令阳. 2022. 吉泰盆地石炭系黄龙组黑色碳质泥岩物源、构造背景与古风化作用: 来自稳定元素地球化学的证据[J]. 地球学报, 43(3): 325-337.
- 游超, 王春连, 刘殿鹤, 余小灿, 颜开, 刘思晗, 周博文. 2022. 江西南都坎田萤石矿床稀土元素地球化学特征及其指示意义[J]. 地球学报, 43(3): 359-370.
- 周博文, 王春连, 游超, 刘殿鹤, 刘思晗, 余小灿, 颜开, 刘雪, 刘延亭. 2022. 福建邵武地区张厝萤石矿微量、稀土元素地球化学特征[J]. 地球学报, 43(3): 393-403.
- 邹才能, 杨智, 孙莎莎, 赵群, 拜文华, 刘洪林, 潘松圻, 吴松涛, 袁懿琳. 2020. "进源找油": 论四川盆地页岩油气[J]. 中国科学: 地球科学, 50(7): 903-920.

References:

- CHANG Zheng, YUAN Xiao-long, LIU Wan-ping, LI Meng-ling, MIAO Wei-liang, CHENG Huai-de, BU Di, ZHANG Hao, ZHANG Xi-ying. 2022. A Study on the Mechanism of Influence of the Dissolution of Solid Potassium Salt in Qarhan Salt Lake to the Rate of Solvent Injection[J]. Acta Geoscientica Sinica, 43(3): 287-294(in Chinese with English abstract).
- CHEN Jia-bin, HUO Wen-min, FENG Dan-dan, WANG Qianag, YU Liang-hui, LIU Chao, SU Yi-na, YIN Li-juan, HU De-wen, WEN Shao-bo. 2020. Analysis of Strategic (Critical) Mineral Resources Situation in China and the U.S. and the EU[J]. Natural Resource Economics of China, 33(8): 9-17(in Chinese with English abstract).
- CHEN Jun-yuan, LIU Yan-fei, YAN Ling-ya, GAO Shu-xue, OUYANG You-he, LONG Tao. 2021. Research on Development Trend of Strategic Nonmetallic Minerals such as Graphite and Fluorite[J]. Acta Geoscientica Sinica, 42(2): 287-296(in Chinese with English abstract).
- CHEN Qi-shen, ZHANG Yan-fei, XING Jia-yun, LONG Tao, ZHENG Guo-dong, WANG Kun, CUI Bo-jing, QIN Sheng. 2021. Methods of Strategic Mineral Resources Determination in China and Abroad[J]. Acta Geoscientica Sinica, 42(2): 137-144(in Chinese with English abstract).
- CUI Rong-guo, GUO Juan, CHENG Li-hai, ZHANG Ying-xin, LIU Wei. 2021. Status and trends analysis of global clean energies[J]. Acta Geoscientica Sinica, 42(2): 179-186(in

- Chinese with English abstract).
- DENG Min, LAN Ye-fang, CHENG Jin-xiang, WANG Zheng-he, YU Qian, LIU An-ran, ZHAO An-kun. 2022. Shale Gas (CBM) Potential of Longtan Formation in Shibao Mining Area, Southeast Sichuan: A Case Study of Well SD1[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 43(3): 295-308(in Chinese with English abstract)
- GUO Juan, YAN Wei-dong, XU Shu-guang, CUI Rong-guo, HU Rong-bo, LIN Bo-lei, ZHOU Qi-zhong, ZHOU Zhou, YANG Ling. 2021. A Discussion on Evaluation Criteria and List of Critical Minerals in China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 42(2): 151-158(in Chinese with English abstract).
- HAN Guang, YUAN Xiao-long, HAN Ji-bin, LIU Jiu-bo, FAN Zeng-lin, HU Yan, ZHANG Xi-ying. 2022. Comparative Analysis on the Characteristic Changes of the Brine Reservoir System before and after Exploration of the Qarhan Salt Lake (Huobuxun Area)[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 43(3): 279-286(in Chinese with English abstract).
- HAN Zhi-kun, LI Ke-kun, ZHANG Qing-song, ZHANG Jing-jie, YAN Xiao-bo, JIN Qian-feng, JIANG Ji-yong, LIU Zeng-zheng. 2022. Geochemical Characteristics and Prospecting Prediction of Stream Sediments in Shaowu Area, Northern Fujian Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 43(3): 411-420(in Chinese with English abstract).
- JIANG Ya, WANG Ting, LONG Tao. 2021. Research on Listing Barite as a Strategic Mineral Resource[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 42(2): 297-302(in Chinese with English abstract).
- JIAO Sen, ZHENG Hou-yi, REN Yong-jian, LIU Bing-qiu, HAN Bei-bei, CAO Guang-yuan. 2021. A Study of the Security Strategy of Main Agricultural Mineral Resources in China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 42(2): 279-285(in Chinese with English abstract).
- JIN Song, WANG Chun-lian, GAO Li-Yong, ZHANG Cheng-xin, WANG Zhan-bing, WANG Chang, MENG Du, SHANG Peng-qiang. 2022. Evidence from REE and Trace Element Geochemistry for Genesis of Yangjiaowei Fluorite deposit in Northern Fujian[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 43(3): 371-382(in Chinese with English abstract).
- LAN Ye-fang, REN Chuan-jian, LI Xiao-cai, REN Shu-ming, GAO Zhu. 2022. Petrological and Geochemical Characteristics and Their Significance of Middle Permian Carbonate Rocks in Bijie Area, Northwestern Guizhou[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 43(3): 309-324(in Chinese with English abstract).
- LI Ke-kun, CHEN Xin-li, SHANG Peng-qiang, YU Xue-liang, HAN Zhi-kun, WEI Fan-chao, LIU Zeng-zheng. 2019. Application of the prospecting method of geophysical and geochemical integrated information in the exploration of fluorite deposits[J]. *Geological Survey of China*, 6(06): 98-104.
- LI Ke-kun, SHANG Peng-qiang, HAN Zhi-kun, WANG Chun-lian, JIAO Sen, WANG Gui-xiang, YUAN Chang-sheng, ZHANG Qing-song, LIU Zeng-zheng, YAN Xiao-bo, FAN Ya-zhou, JIANG Ji-yong, JIN Qian-feng. 2022. Comprehensive Information Prospecting Method for Fluorite Deposits in Shaowu Area, Northern Fujian Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 43(3): 404-410(in Chinese with English abstract).
- LIU Cheng-lin, JIAO Peng-cheng, WANG Mi-li. 2010. A tentative discussion on exploration model for potash deposits in basins of China[J]. *Mineral Deposits*, 29(4): 581-592(in Chinese with English abstract).
- LIU Dian-he, WANG Chun-lian, ZHANG Xue-hua, YU Xiao-can, YAN Kai, LIU Si-han, ZHOU Bo-wen, YOU Chao, LIU Xue, YIN Chuan-kai. 2022. Geological Characteristics and Genesis of Huobashan Fluorite Deposit in Yupeng-Nankou Area, Fujian Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 43(3): 383-392(in Chinese with English abstract).
- LONG Peng-yu, ZHAO Yan-jun, HU Yu-fei, DU Jiang-min, HE Ji-hui, WANG Zhao-xu. 2022. Occurrence Characteristics and Genetic Study of Potassium Salt Minerals in Low Grade Solid Potassium Ore in the North Section of Mahai Salt Lake[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 43(3): 338-346(in Chinese with English abstract).
- NIE Hai-kuan, HE Zhi-liang, LIU Guang-xiang, ZHANG Guang-rong, LU Zhi-yuan, LI Dong-hui, SUN Chuan-xiang. 2020. Status and direction of shale gas exploration and development in China[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 49(1): 13-35(in Chinese with English abstract).
- SUN Xiao-hong, ZHAO Yan-jun, LIU Cheng-lin, JIAO Peng-cheng, ZHANG Hua, WU Chi-hua. 2017. Paleoclimatic information recorded in fluid inclusions in halites from Lop Nur, Western China[J]. *Scientific Reports*, 7: 16411.
- USGS. 2019. National Minerals Information Center[OL]. [2020-09-15]. <https://www.usgs.gov/centers/nmic/commodity-statistics-and-information>.
- WANG An-jian, WANG Gao-shang, CHEN Qi-shen, YU wen-jia. 2010. The Mineral Resources Demand Theory and the Prediction Model[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 31(2): 137-147(in Chinese with English abstract).
- WANG Chun-lian, HUANG Hua, WANG Jiu-yi, XU Hai-ming, YU Xiao-can, GAO Chao, MENG Ling-yang, CAI Peng-rui, YAN Kai, FANG Jing-ling. 2018. Geological features and metallogenic model of K-and Li-rich brine ore field in the Jiangling Depression[J]. *Acta Geologica Sinica*, 92(8): 1630-1646(in Chinese with English abstract).
- WANG Chun-lian, LIU Li-hong, LI Qiang, MENG Ling-yang, LIU

- Cheng-lin, ZHANG Yuan-yuan, WANG Jiu-yi, YU Xiao-can, YAN Kai. 2020. Petrogeochemical characteristics and genetic analysis of the source area of brine type lithium-potassium ore sources area in Jitai basin of Jiangxi Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 39(1): 65-84(in Chinese with English abstract).
- WANG Chun-lian, MENG Ling-yang, LIU Cheng-lin, YU Xiao-can, YAN Kai, LIU Si-han, YOU Chao, LI Ke-kun, TENG Xiao-hua. 2021. A study of the genesis of Paleocene underground brine boron deposits in Jiangling Depression[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 40(1): 1-13(in Chinese with English abstract).
- WANG Chun-lian, WANG Jiu-yi, YOU Chao, YU Xiao-can, LIU Dian-he, YAN Kai, LIU Si-han, XUE Yan, LIU Yan-ting, LIU Xue, YIN Chuan-kai. 2022. A Study on Strategic Non-metallic Mineral Definition, Key Applications, and Supply and Demand Situation[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 43(3): 267-278(in Chinese with English abstract).
- WANG Deng-hong. 2019. Discussion on issues related to strategic key mineral resources[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 41(2): 65-72(in Chinese with English abstract).
- WANG Meng, HUANG Jian-he. 2018. Application of integrated geophysical prospecting in fluorite orebody exploration[J]. *Coal Geology of China*, 30(S1): 118-124(in Chinese with English abstract).
- WEI Hai-cheng, FAN Qi-shun, AN Fu-yuan, SHAN Fa-shou, MA Hai-zhou, YUAN Qin, QIN Zhan-jie. 2016. Chemical elements in core sediments of the Qarhan Salt Lake and palaeoclimate evolution during 94—9 ka[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 37(2): 193-203(in Chinese with English abstract).
- XUE Yan, WANG Chun-lian, LIU Dian-he, WANG Jiu-yi, YAN Kai, PENG Yan-cong, GAO Xiu-fang. 2022. Hydrochemical Characteristics and Genesis of Deep Brines in Wangchang Area, Qianjiang Depression, Jiangnan Basin[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 43(3): 347-358(in Chinese with English abstract).
- YAN Kai, WANG Chun-lian, WANG Jiu-yi, SHEN Li-jian, YU Xiao-can, MENG Ling-yang. 2022. Provenance, Tectonic Setting and Palaeo-weathering of Black Carbonaceous Mudstones from Carboniferous Huanglong Formation in the Jitai Basin: Evidence from Stable Element Geochemistry[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 43(3): 325-337(in Chinese with English abstract).
- YOU Chao, WANG Chun-lian, LIU Dian-he, YU Xiao-can, YAN Kai, LIU Si-han, ZHOU Bo-wen. 2022. REE Geochemistry of Fluorite from Kantian Fluorite Deposit and Its Geological Implications in Ningdu Area, Jiangxi Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 43(3): 359-370(in Chinese with English abstract).
- YU Xiao-can, LIU Cheng-lin, WANG Chun-lian, ZHAO Jian-xin, WANG Jiu-yi. 2021. Origin of geothermal waters from the Upper Cretaceous to Lower Eocene strata of the Jiangling Basin, South China: Constraints by multi-isotopic tracers and water-rock interactions[J]. *Applied Geochemistry*, 124: 104810.
- ZHOU Bo-wen, WANG Chun-lian, YOU Chao, LIU Dian-he, LIU Si-han, YU Xiao-can, YAN Kai, LIU Xue, LIU Yan-ting. 2022. Geochemical Characteristics of Trace Elements and REE in Zhangcuo Fluorite Deposit in Shaowu Area, Fujian Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 43(3): 393-403(in Chinese with English abstract).
- ZOU Cai-neng, YANG Zhi, SUN Sha-sha, ZHAO Qun, BAI Wen-hua, LIU Hong-lin, PAN Song-qí, WU Song-tao, YUAN Yi-lin. 2020. "Exploring petroleum inside source kitchen": Shale oil and gas in Sichuan Basin[J]. *Science China(Terrae)*, 50(7): 903-920(in Chinese with English abstract).

中国地质科学院矿产资源研究所研究员
中国地质科学院矿产资源研究所新能源新材料矿产研究室副主任(主持工作)
山东瑞福锂业有限公司首席专家
《地球学报》编委

王春连

二〇二二年五月十八日于北京