

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2022.01.012

帕米尔构造结锂矿资源潜力评价

——基于 1:100 万地球化学调查

范堡程^{1,2}, 张晶¹, 孟广路¹, 薛仲凯², 吴欢欢², 曹积飞¹, 刘明义¹, 洪俊¹, 唐卫东²,
刘天航², Мирзоев Тавфик³, Хасазода Сабзали³

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054; 2. 中国地质调查局西安矿产资源调查中心,
陕西 西安 710054; 3. 塔吉克斯坦地质总局, 塔吉克斯坦 杜尚别 734027)

摘要:帕米尔构造结夹持于塔吉克盆地与塔里木盆地之间,是印度板块与欧亚板块碰撞形成的巨大山结,由西侧的兴都库什山、中部的帕米尔高原、东侧的昆仑山 3 部分组成,它们经历了相同的地质演化历史。近年来,在西部的兴都库什地区发现了帕斯古斯塔、贾马纳克等大型、超大型伟晶岩型锂矿,在东侧的西昆仑地区发现了大红柳滩、停虏沟等具大型、超大型远景的伟晶岩型锂矿,而在中部的帕米尔地区由于前期工作程度较低,目前还没有成型的锂矿床,但在该地区发育大量的伟晶岩脉。笔者在成矿规律认识的基础上,基于 1:100 万地球化学调查数据,利用地球化学块体理论对帕米尔构造结进行了锂资源潜力评价,认为中部的帕米尔高原同样具有发育大型、超大型伟晶岩型锂矿的潜力,东部的西昆仑大红柳滩一带也具有巨大的找矿潜力,帕米尔构造结有望构成世界级“锂矿带”。

关键词:地球化学块体;帕米尔;伟晶岩型锂矿;资源潜力预测

中图分类号:P615.51

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2022)01-0156-11

An Assessment of Lithium Resource Potentiality in Pamir Syntax

——Based on 1:1 million Scale of Geochemical Survey

FAN Baocheng^{1,2}, ZHANG Jing¹, MENG Guanglu¹, XUE Zhongkai², WU Huanhuan², CAO Jifei¹,
LIU Mingyi¹, HONG Jun¹, TANG Weidong², LIU Tianhang², Mirzoev Tavfik³, Hasazoda Sabzali³

(1. Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Xi'an Center of Mineral Resources Survey, China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. The Main Department of Geology under the Government of Tajikistan, Dushanbe 734027, Tajikistan)

Abstract: The Pamir syntax, located between the Tajik Basin and the Tarim Basin, is a huge mountain knot formed by the collision of the Indian and Eurasian plate. It is composed of the Hindu Kush Mountain in the west, the Pamir Plateau in the middle, and the Kunlun Mountain in

收稿日期:2020-12-04;修回日期:2021-05-02;网络发表日期:2021-12-06;责任编辑:曹佰迪,吕鹏瑞

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“中塔边界帕米尔成矿带优势矿产资源潜力评价”(121201011000150010)、“乌兹别克斯坦、塔吉克斯坦及邻区矿产资源潜力评价”(12120114018601)、“中亚地区大型铜金铀矿产资源潜力评价”(DD20190445)、“北山地区月牙山-合黎山一带萤石铜钨矿调查评价”(DD20211552)。

作者简介:范堡程(1983-),男,高级工程师,主要从事中亚地区成矿规律研究及地球化学调查工作。E-mail:BaochengFan@163.com。

the east, which have experienced the same geological evolution history. In recent years, large and super-large pegmatite-type lithium deposits in Hindu Kush (e. g. Pasgusta and Jiamanak) and West Kunlun (e. g. Dahongliutan and Hulugou) have been discovered. A large number of pegmatite veins have also been found in the middle of Pamir, though there has no lithium deposits yet. On the basis of metallogenic regularity, this paper, based on 1 : 1 million geochemical survey, assesses the lithium resource potentiality in Pamir syntax using the geochemical block theory. The authors believe that the middle of Pamir has much potential for large and super-large pegmatite-type lithium deposits, while the Dahongliutan area in West Kunlun has huge prospecting potential.

Keywords: geochemical block; Pamir; pegmatite-type lithium deposit; assessment of resource potentiality

随着新兴产业的快速发展,伟晶岩型锂矿重新受到重视。近年来,前苏联地质学家及美国地质调查局先后在阿富汗兴都库什地区发现了帕斯古斯塔、贾马纳克等一批大型-超大型锂辉石矿床;美国在阿富汗兴都库什地区进行地质调查预测潜在资源量达 1 000 万 t 以上,有“锂矿界沙特阿拉伯”的说法(王秋舒等,2016);中国地质调查局在西昆仑地区也发现了大红柳滩等一批大型-超大型锂辉石矿床。根据西安地质调查中心数据,该地区锂辉石资源潜力达到 500 万 t。帕米尔与兴都库什、西昆仑处于同一构造带,经历了相同的地质构造演化,西安地质调查中心在塔吉克斯坦帕米尔地区开展地质调查过程中,在南帕米尔发现了大量伟晶岩脉,是否同样具有发育大型-超大型伟晶岩型锂矿床的潜力?笔者在成矿规律认识的基础上,利用所取得的勘查地球化学数据,结合区域化探信息系统,从地球化学块体角度对帕米尔构造结地区锂铍资源潜力进行预测。

1 地质背景及锂矿分布特征

1.1 地质背景

帕米尔构造结夹持于塔吉克盆地与塔里木盆地之间,是印度板块与欧亚板块碰撞形成的巨大山结(黄汲清等,1987)。以康西瓦-巴米扬板块缝合带(BKT)为界,北侧主要涉及古亚洲构造域卡拉库姆-塔里木板块(I);南侧特提斯构造域主要涉及中伊朗-冈底斯中间板块(II)与印度板块(III);中部帕米尔构造结“帽状”构造带则受到两大构造域、三大板块长期相互作用的影响控制(图 1、表 1)(李荣社

等,2011;肖文交等,2000)。研究区晚古生代以来经历了二叠纪一晚三叠世古特提斯洋的关闭与新特提斯洋的扩张,侏罗纪—第三纪早期新特提斯洋的俯冲消亡,新生代以来印度板块与欧亚板块的相互碰撞 3 期构造演化阶段(潘桂棠等,1997;许志琴等,2006,2007,2011;莫宣学等,2006;洪俊等,2017;计文化等,2018)。

1.2 锂矿分布特征

目前,在帕米尔构造结一带发现的锂矿主要是伟晶岩型,大地构造单元主要位于中伊朗-冈底斯中间板块(II)。在东部西昆仑发现的大红柳滩锂矿区位于大红柳滩晚古生代—中生代边缘海盆(II₁),含锂辉石的伟晶岩脉与二长花岗岩关系密切,伴随印支期岩浆热液侵入形成锂、铍矿床;成矿方式以结晶交代为主,容矿岩石为花岗伟晶岩,围岩为斜长黑云母石英片岩。矿体延伸方向与区域构造线方向一致,呈不连续的透镜状、脉状分布,常伴随着强烈钠长石化等特征;成矿时代为晚三叠世—早侏罗世(李侃等,2019;涂其军等,2019)。西部兴都库什地区在阿富汗境内发现的帕斯古斯塔等矿床均位于米特拉姆-红旗拉甫陆块(II₅),含锂辉石的伟晶岩脉在空间和成因上都与二云母花岗岩有关;花岗岩及伟晶岩的时代是早三叠世—晚白垩世,伟晶岩脉多产于花岗岩与片麻岩、结晶片岩等变质岩之间(Л. Н. Россовский 等,1978)。在中部帕米尔高原塔吉克斯坦境内的米特拉姆-红旗拉甫陆块(II₅)也发现多处伟晶岩型锂矿的找矿线索,并且野外见大量伟晶岩脉,伟晶岩脉与侏罗纪二长花岗岩关系密切。

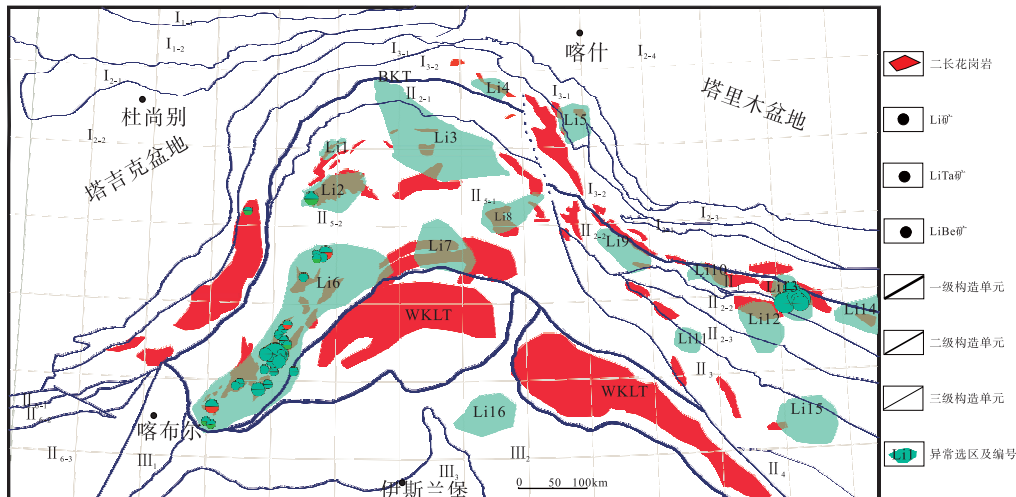


图1 帕米尔构造单元划分及Li-Be异常分布图

Fig. 1 Pamir tectonic unit division and Li-Be anomaly distribution map

表1 工作区三级构造划分表

Tab. 1 Structure division table in the working area

构造域	一级构造单元	二级构造单元	三级构造单元	
古亚洲构造域	I. 卡拉库姆-塔里木板块	I ₁ . 塔里木-卡拉库姆北部陆缘区	I ₁₋₁ . 南天山古生代弧前增生楔	
			I ₁₋₂ . 泽拉夫尚陆缘拉伸盆地	
		I ₂ . 塔里木-卡拉库姆陆块	I ₂₋₁ . 吉萨尔地块(拜松地块)	
			I ₂₋₂ . 卡拉库姆中生代盆地	
			I ₂₋₃ . 铁克里克断块	
		I ₃ . 塔里木-卡拉库姆南部陆缘区	I ₃₋₁ . 西巴达赫尚-昆北-库尔晚古生代裂谷	
I ₃₋₂ . 兴都库什-昆中多期复合岩浆弧(∈-K)				
BKT. 巴米扬-康西瓦板块缝合带(T)				
特提斯-喜马拉雅构造域	II. 土耳其-中伊朗-冈底斯(藏滇)中间板块	II ₁ . 大红柳滩晚古生代-中生代边缘海盆	II ₂₋₁ . 乌孜别里山口-麻扎达坂地块	
			II ₂₋₂ . 天神达坂-阿克赛钦地块	
		II ₂ . 塔尼玛西山-阿克赛钦陆块	II ₂₋₃ . 神仙湾-林济塘中生代(J-K)前陆盆地	
			II ₅₋₁ . 东南帕米尔中生代前陆盆地	
		II ₃ . 喀喇昆仑中生代边缘海盆	II ₅₋₂ . 霍罗格中间地块	
			II ₅₋₃ . 鲁山-明铁盖中生代岩浆弧	
	II ₄ . 班公错侏罗纪裂陷槽	II ₆₋₁ . 哈吉加克地块		
		II ₆₋₂ . 曼德河中生代裂陷槽(J)		
		II ₆₋₃ . 加尼兹地块		
	WKT. 瓦济里斯坦-科希斯坦-拉达克板块缝合带(E)			
	III. 印度板块	III ₁ . 喀布尔陆块		
			III ₂ . 白沙瓦陆缘盆地	
III ₃ . 伊斯兰堡新生代盆地				

2 理论基础

地球化学块体通常被认为是在平面上具有一系列套合的地球化学异常结构,垂向上具有一定的深度,即认为是具有较大规模立体异常的地壳物质体(王学求,2000),能够为矿床的形成提供物质来源,实际上是有一系列大小不一的矿床密集分布在周围所形成的异常。谢学锦院士提出利用区域化探数据圈定地球化学块体,并将地球化学块体定义为面积大于 1 000 km² 以上的地球化学异常(Xie X J, 1995,1999),其含义是大型-超大型矿床的形成必须有巨量的物质供应量和元素聚集。由于地球的不均一性以及地球在不断演化中元素分布的再分配作用,在地壳内部形成富含各种金属的巨大岩块——地球化学块体,它可为形成大型-超大型矿床提供巨量的成矿物质。在漫长的地质演化过程中,成矿物质逐渐在地球化学块体内有利地质构造部位富集,形成矿床密集区或超大型矿床(王学求等,2000;张晶等,2017)。通过对区域化探数据某些元素的套合和成矿元素供应量的研究,认识到这项研究不仅可以剖析其块体内部结构,追踪成矿元素在地球化学块体中逐步浓集成矿的轨迹和部位,发现大型-超大型矿床“聚集”地点,而且还可以对地球化学块体内潜在的资源量进行预测(刘拓等,2003)。

3 地球化学块体的圈定方法

笔者根据中国地质调查局西安地质调查中心在塔吉克斯坦及巴基斯坦采集的 1:100 万水系沉积物样品,结合中国西昆仑采集的水系沉积物样品(阿富汗境内没有开展该工作),针对 Li 元素的大规模地球化学块体进行锂矿资源潜力评价。使用的是 1:100 万水系沉积物地球化学采样方法,大约平均为 1 个样/100 km²;野外采样以 GPS 进行定位,采样介质为水系沉积物,粒度为小于 10 目粒级。样品送实验室磨至 200 目,使用等离子质谱(ICP-MS)、等离子光谱法(ICP-OES)、石墨炉原子吸收(GF-AAS)、原子荧光法(AFS)和化学光谱法(CP-AES)分析了 Au、Ag、Li 等 69 个元素。

采用 MAPGIS 系统中空间分析模块的网格化数字模型绘制等值线方法。采取 $X \pm 2s$ 以外的数

据进行离群值反复剔除,直到无离群值出现,并选用剔除离群值后算术平均值(X_a)作为背景值(C_b)。大部分元素以背景值加 2 倍离差($C_b + 2s$)作为异常下限(C_{at})。塔吉克斯坦 Li 元素背景值为 30 mg/g,异常下限为 40 mg/g,研究区共圈定处 16 个 Li 元素异常区(缺少阿富汗地区地球化学数据),其中面积大于 1 000 km² 的异常区有 12 个,呈圆弧状沿帕米尔构造构造带分布;从北向南、从西向东地球化学块体编号依次为 Li-2、Li-3、Li-5、Li-6、Li-7、Li-8、Li-9、Li-12、Li-13、Li-14、Li-15、Li-16(图 1)。

4 主要 Li 元素地球化学块区地质特征

上述圈定的 Li 元素地球化学块体除了 Li-5 位于塔里木-卡拉库姆南部陆缘区,Li-16 位于印度板块白沙瓦陆缘盆地中,其余 Li 元素地球化学块体均分布在中伊朗-冈底斯(滇藏)中间板块(Ⅱ),与已知的锂矿床、矿点分布范围基本一致;Li-13、Li-14 地球化学块体位于在中国发现的大红柳滩锂矿区,属于大红柳滩地球化学块体区;Li-9、Li-12 地球化学块体主要分布在塔尼玛西山-阿克赛钦地球化学块体区;Li-15 地球化学块体主要分布在喀喇昆仑地球化学块体区;Li-2、Li-3、Li-6、Li-7、Li-8 五个 Li 元素地球化学块体分布在米特拉姆-红旗拉甫地球化学块体区。

4.1 大红柳滩地球化学块体区

大红柳滩地球化学块体区在构造单元上属于大红柳滩晚古生代—中生代边缘海盆(Ⅱ₁),发育有 Li-13 和 Li-14 两个地球化学块体。Li-13 地球化学块体面积为 1 402 km²,呈北西向展布,Li 元素平均值为 65.6 mg/g,最高达 258 mg/g,Li-Be-Y 元素套合较好;Li-14 地球化学块体位于 Li-13 的东侧,向东延伸至区外,面积为 10 165 km²(延伸至区外),近东西向沿断裂带分布,Li 元素平均值为 62.9 mg/g,最高为 192 mg/g,Li-Be-Nb-La 套合的非常好。大红柳滩晚古生代—中生代边缘海盆地(Ⅱ₁)北以巴米扬-康西瓦板块缝合带(BKT)与兴都库什-昆中多期复合岩浆弧(I₃₋₂)相接,南与天神达坂-阿克赛钦地块相邻,向东延出区外。由古元古界(P₁)片岩、变粒岩、石英岩夹少量大理岩组成。二叠纪由一套滨浅海环境的碎屑岩夹板岩、灰岩,局

部夹凝灰岩组成;三叠纪为一套中深水环境的灰色砂页岩复理石,局部夹灰岩透镜体及基性-中基性火山岩,变形强烈;侏罗纪-白垩纪以陆源碎屑岩、碳酸盐岩为主,属古陆边缘海盆沉积;新生界发育大陆型中-基性火山岩及第三纪断陷盆地。本区发育有印支期-燕山期花岗岩、花岗闪长岩,基性岩时有分布。近几年,在中国发现的阿克塔斯、509道班西、大红柳滩南、505 锂矿、507 锂矿、俘虏沟南等中大型锂矿均位于该区,并且都位于 Li-13 地区化学块体中。

4.2 塔尼玛西山-阿克赛钦地球化学块体区(Ⅱ₂)

塔尼玛西山-阿克赛钦地球化学块体区构造单元上属于塔尼玛西山-阿克赛钦陆块(Ⅱ₂),北界为阿克塞钦北缘断裂,向东接郭扎错-若拉岗日断裂,向西与康西瓦断裂相汇合,其西段被塔什库尔干右行走滑断裂所截;可进一步分为乌孜别里山口-麻扎达坂地块(Ⅱ₂₋₁)、天神达坂-阿克赛钦地块(Ⅱ₂₋₂)、神仙湾-林济塘中生代前陆盆地(Ⅱ₂₋₃)3个次级单元。Li-9 地球化学块体分布在乌孜别里山口-麻扎达坂地块上;Li-12 地球化学块体分布在天神达坂-阿克赛钦地块(Ⅱ₂₋₂)和神仙湾-林济塘中生代前陆盆地(Ⅱ₂₋₃)2个三级构造单元上。

Li-9 地球化学块体位于乌孜别里山口-麻扎达坂地块(Ⅱ₂₋₁),呈椭圆形沿北西向构造分布, Li 元素平均值为 54.6 mg/g,最高值为 91 mg/g, Li-Be-Nb-La-Y 元素套合好;北以巴米扬-康西瓦板块缝合带(BKT)与兴都库什-昆中多期复合岩浆弧(I₃₋₂)、西巴达赫尚-昆北-库尔良晚古生代裂谷(I₃₋₁)相接,南以深大断裂与中-东南中新世岩浆弧(活动陆缘)相邻,向西经帕米尔延入塔吉克-阿富汗境内,向南东消失于黑恰道班附近。在萨雷阔一带,其基底属于古元古代结晶基底。区内出露的最老地层为元古宇变质岩系;下-中奥陶统为稳定的台型沉积;志留系、中泥盆统具类复理石建造特征;上泥盆统为海陆交互复陆屑建造,类磨拉石建造,标志着一次拉张的结束;下石炭统为碳酸盐岩、碎屑岩、中基性火山岩,枕状玄武岩之上为中-上石炭统滨-浅海相碎屑岩、碳酸盐岩层,含蜓: *Triticites*、*Schwagerina*、*Pseudoschwagerina* 等,并且都是暖水动物。其中, *Triticites* 是晚石炭世晚期典型分子, *Pseudoschwagerina* 出现作为下二叠世的开始;二叠系中部为陆相磨拉石,不整合于石炭系之

上;三叠系下部为陆相含煤建造,上部为陆相火山岩。在乔戈里峰一带,西南被塔什库尔干右行走滑断裂所截,主要由古元古代结晶基底构成,表现为长期的剥蚀区,见有喜马拉雅期花岗岩侵入。

Li-12 地球学块体呈纺锤状南北分布, Li-12 地球化学块体面积为 2 223 km², Li 元素平均值为 61.4 mg/g,最高值为 83.8 mg/g, Li-Nb 元素套合好;其南部位于天神达坂-阿克赛钦地块(Ⅱ₂₋₂)和北部位于神仙湾-林济塘中生代前陆盆地(Ⅱ₂₋₃)。天神达坂-阿克赛钦地块(Ⅱ₂₋₂)分布于乌孜别里山口-麻扎达坂地块(Ⅱ₂₋₁)南侧,向东延出区外。出露的最老地层为中元古代长城系,由浅变质石英砂岩、粉砂岩、硅质条带状大理岩等组成,属浅海陆棚环境陆源碎屑沉积,构成古元古代结晶基底之上的第一个盖层。长城系之上为不整合覆盖的奥陶系碳酸盐岩;再向上的古生代特别是晚古生代以来连续多发育以砂岩、粉砂岩、生物灰岩为主的陆表海沉积——上石炭统龙木错群。从大地构造位置和地层展布来看,龙木错群应是恰提尔群的东延部分,龙木错群所产化石可同印度拉达克地区含 *Triticites* 的 *Sarchu* 石灰岩相联系。其与下伏双陷大坂组为整合接触。总体上本区为一长期稳定发育的古老地块;该区发育的二长花岗岩主要分布在 Li-12 地球化学块体北部;神仙湾-林济塘中生代前陆盆地(Ⅱ₂₋₃)分布于天神达坂-阿克赛钦地块的南侧,向东延出区外。中一晚三叠世发育复理石沉积,下部见有含冷水动物群的二叠纪灰岩外来岩块,三叠纪末随着古特提斯洋向北消减,使三叠纪及其以前的地层褶皱隆起;侏罗纪碳酸盐岩、砂岩等角度不整合覆于三叠系砂板岩之上,其上又被上白垩统碳酸盐岩、碎屑岩不整合覆盖,具有古特提斯洋封闭后的前陆盆地沉积特点。西部发育大面积花岗岩。

4.3 喀喇昆仑地球化学块体

喀喇昆仑地球化学块体构造上为喀喇昆仑中生代边缘海盆(Ⅱ₃),位于研究区的南东侧。其南侧与班公错侏罗纪裂陷槽(Ⅱ₄)、北侧与林济塘-河尾滩中生代前陆盆地神仙湾-林济塘中生代前陆盆地(Ⅱ₂₋₃)为邻;西侧被塔什库尔干右行走滑断裂所截,与中-东南中新世岩浆弧(活动陆缘)、瓦济里斯坦-科希斯坦-拉达克板块缝合带(WKLT)为邻,向东延出区外。Li-15 地球化学块体位于该带,呈椭圆形,东北、西南侧均有二长花岗岩分布,面积为

3 239 km², Li 元素平均值为 57.4 mg/g, 最大值为 111.2 mg/g, Li-Be-Nb-Y 套合好。

区内出露的最老地层为前寒武系。区域上, 向东在羌塘盆地地为下古生界(O₂, S₁₋₂), 可能为泛非运动(800~500 Ma)所形成的变质基底, 上古生界(研究区为 C-P)为准地台型沉积, 以碳酸盐岩为主夹碎屑岩, 已属盖层性质。中生代发生海侵超覆, 在藏北巴青县江绵乡一带发现与滇西他念他翁山、藏东昌都地区相似的上二叠统东达村组和“甲丕拉组”。东达村组自下而上为冲积扇泥石流沉积、有障壁碎屑滨岸沉积和浅水碳酸盐台地潮坪沉积。“甲丕拉组”为湿热环境下的碳酸盐台地潮坪(包括潮汐水道砂)沉积、障壁砂坝沉积和滨外粉砂、泥沉积, 其中有地震事件记录。2 组总体上构成一套向上变深的海侵序列(李尚林等, 2004, 2005, 2008; 王根厚等, 2003)。侏罗纪-白垩纪以陆源碎屑岩、碳酸盐岩为主, 属古陆边缘海盆沉积。新生界发育大陆型中-基性火山岩及第三纪断陷盆地。本区发育有印支期-燕山期花岗岩、花岗闪长岩(100.32~239.8 Ma), 基性岩时有分布。

4.4 米特拉姆-红旗拉甫地球化学块体

米特拉姆-红旗拉甫地球化学块体构造上属于米特拉姆-红旗拉甫陆块(Ⅱ₅), 北以塔里玛西逆掩断裂与乌孜别里山口-麻扎达坂地块相邻(Ⅱ₂₋₁), 南以瓦济里斯坦-科希斯坦缝合带与印度板块相接, 其西侧为阿富汗-帕米尔左旋断裂(杰曼断裂带), 东侧为帕米尔-喀喇昆仑右旋走滑断裂带(塔什库尔干右旋走滑断裂), 总体上形成一向北凸出的突刺。米特拉姆-红旗拉甫陆块(Ⅱ₅)包括了东南帕米尔前陆盆地(Ⅱ₅₋₁)、霍罗格中间地块(Ⅱ₅₋₂)及鲁山-明铁盖中新代岩浆弧(Ⅱ₅₋₂)及 2 个三级单元。Li-3 地球化学块体位于东南帕米尔前陆盆地(Ⅱ₅₋₁); Li-2 地球化学块体位于霍罗格中间地块(Ⅱ₅₋₂); Li-6、Li-7、Li-8 三个地球化学块体位于鲁山-明铁盖中新代岩浆弧(Ⅱ₅₋₁)。

Li-3 地球化学块体位于东南帕米尔前陆盆地(Ⅱ₅₋₁), 面积为 12 873 km², 区内见多处二长花岗岩岩体出露, Li 元素平均值为 59.8 mg/g, 极大值为 191.5 mg/g, 地球化学块体内 Li-Be-Nb-La-Y 等元素套合很好。其北以鲁尚-布沙尔特大断裂与中帕米尔地块相邻(Ⅱ₂₋₁), 南进入阿富汗、巴基斯坦境内, 以瓦济里斯坦-科希斯坦缝合带与印度板块

相接, 其西侧为阿里邱-库兹克左旋断裂, 东侧为帕米尔-喀喇昆仑右旋走滑断裂带(塔什库尔干右旋走滑断裂)。该区域主要出露石炭纪、二叠纪、三叠纪及侏罗纪地层。下石炭统一下二叠统为类复理石建造(Базардаринская 层 C₁-P_{2a}), 厚度超过 1.5~2 km, 主要为石英长石砂岩、粉砂岩、泥质板岩及石英砂岩、粉砂岩互层, 中上部夹透镜状砾岩, 只有在坳陷中部发育有石灰岩, 说明该期为广泛接收沉积的海盆; 下二叠统一上三叠统为火山-硅质-碳酸盐建造, 该套岩系通常下部 Шиндыйская 组(P_{1a})和 Карабелесская 组(P_{2pm})为辉绿岩、凝灰岩等火山岩建造, 向上 Кубергандинская 组(P_{1-2bb})和 Кобригенская 组(T_{1-2an})过渡为以生物碎屑灰岩为主的碳酸盐建造, 再向上 Ганская 组(P_{2m-pm})和 Кобригенская 组(上亚组, T_{2-3k})为碳酸盐-硅质岩建造, 总体反应盆地水体加深的过程; 白垩系为海盆沉积环境, 主要为泥质灰岩、泥灰岩、生物-碎屑灰岩等。除此之外, 偶尔可见典型的陆源岩层; 上侏罗世末期, 东南帕米尔地区略有抬升, 海水倒退, 在侏罗纪末期及整个白垩纪期间此处已经形成大陆。在此期间构造运动强烈, 伴随有花岗岩类岩体侵入, 带内中-新生代深成岩浆活动及逆冲推覆构造极为发育, 反映了印度板块向北俯冲、推挤的结果。

Li-2 地球化学块体位于霍罗格中间地块(Ⅱ₅₋₂), 面积为 3 269 km², 呈椭圆状近东西向沿二长花岗岩岩体分布, 区内发育大量伟晶岩脉; 块体内 Li 元素平均值为 62.8 mg/g, 极大值为 106.2 mg/g, 块体内 Li-Be-Nb-La-Y 等元素具有非常好的套合, 野外见多处锂矿找矿线索。霍罗格中间地块(Ⅱ₅₋₂)位于帕米尔凸出节的西南部, 夹持于赫拉特断裂, 主喀喇昆仑断裂和沙鲁比断裂之间为太古代结晶基底的隆起部分。古陆主要由角闪岩相和变粒岩相的区域深变质岩组成, 并受后期侵入岩的叠加改造, 发育有白云母花岗大理岩、各种深成岩, 包括片麻岩、花岗正长岩、斜长花岗岩、紫苏花岗岩、辉长岩和超基性岩等, 各类岩石的同位素年龄数据集中于 2 700~2 400 Ma 和 1 600~1 400 Ma, 其中, 1 600~1 400 Ma 数据反映后期构造热事件的影响。古陆周边地区分布有元古宙地层, 与太古宇多为构造接触关系, 为一套含较多石英岩的绿片岩相岩系(何国琦等, 2004)。博格丹诺夫认为, 沙赫河群的霍罗格组由角闪石岩、变质泥岩夹超镁铁岩、似榴

辉岩、石榴子石角闪岩等岩石组成,很可能位于剖面的底部,在以后的构造变形中被推覆到变质较轻的、富含石英岩和大理岩的戈兰群之上。据达维金科的资料,太古宙岩石原先被挤压成南北走向的线性褶曲,以后(太古宙末或古元古代)由于继续的挤压,而产生叠加变形。

Li-6、Li-7、Li-8三个地球化学块体位于鲁山-明铁盖中生代岩浆弧(Ⅱ₅₋₁)。Li-6地球化学块体面积为9275 km²,平均值为59.9 mg/g,极大值为89.4 mg/g, Li-Be-La-Y元素套合好; Li-7地球化学块体面积为4082 km²,平均值为53.5 mg/g,极大值为72.2 mg/g, La-Li-Be-Nb套合好; Li-8地球化学块体面积为2302 km²,平均值为55.4 mg/g,极大值为109 mg/g, Be-Li-Nb-La-Y元素套合好。鲁山-明铁盖中生代岩浆弧(Ⅱ₅₋₁)发育古生代和中生代地层,偶见海相古近系;在晚三叠世以前的漫长时期,为相当平静的大陆边缘,堆积了陆棚碳酸盐岩建造(寒武系—奥陶系,志留系—下泥盆统,上石炭纪—中三叠统)或较厚的陆源碎屑沉积(上一中奥陶统,中一下石炭统);二叠纪时产生了大量的基性熔岩;早一中三叠世出现岩相差异,上升地段出现礁灰岩;晚三叠世发育较厚的类复理石陆源层。该带从三叠纪向侏罗纪的过渡是不平静的,东部侏罗系以角度不整合覆于三叠系凝灰岩、陆源碎屑岩夹中性火山岩(少量)之上;西北地区则与三叠纪整合接触。侏罗纪末,中帕米尔发生褶皱隆起,白垩系除个别地区外几乎都不整合于侏罗系之上,其下部(包括塞诺曼阶在内)为红色、杂色陆源粗碎屑岩,砾岩中含有来自帕米尔的砾岩,具磨拉石建造特征;其上的上白垩统下部层位(土伦—塞诺曼阶)为潟湖或浅海陆源—碳酸盐岩建造(杂色含石膏和砾岩层)。晚白垩世晚期(马斯特里克期),本区海侵规模最大,使其超覆于下伏地层之上。古新一始新统为浅海或陆相沉积,以大量中—酸性火山岩(安山玄武岩、部分英安岩和流纹岩)及粗碎屑岩为主夹少量的灰岩,不整合(或间断)于白垩系之上;渐新统和中新统火山岩—沉积岩全为湖相,分布不广且火山岩均为碱性玄武岩成分。

在中帕米尔与南帕米尔之间为一复杂推覆叠瓦构造带,前人称之为“鲁山—普沙尔特带”。总体向北逆掩,其剖面从石炭纪开始,石炭系—下二叠统为陆源碎屑岩;晚二叠世—三叠纪出现灰岩、硅质岩、放

射虫硅质岩及基性火山岩;侏罗系为硅质岩—杂砂岩建造,局部含有灰岩块的“混杂堆积”;灰岩块中含有志留纪、泥盆纪、二叠纪化石,其上为白垩系杂色碎屑岩不整合覆盖。帕什科夫和施沃里曼认为这是一条裂谷带,晚古生代位于中与东南帕米尔2个地块之间。该带的东南部见有少量蛇绿岩残块,呈叠瓦状产出。该蛇绿岩带向西可能与阿富汗的法拉河带相连,向东可能接班公错带,逆冲断裂、偃卧褶皱极为发育,研究者们认为这里至少发生过3次大规模的横向收缩。东南帕米尔的推覆运动规模远不如中帕米尔,可能与基底埋藏的深度有关。带内中—新生代深成岩浆活动及逆冲推覆构造极为发育,反映了印度板块向北俯冲、推挤的结果(何国琦等,2004)。

5 地球化学块体成矿潜力分析

通过研究区已知伟晶岩型锂矿床特征可知,研究区已知锂矿床均与二长花岗岩在时间和空间上关系密切,而在中伊朗—冈底斯(滇藏)中间板块(Ⅱ)中圈定的12个Li地球化学块体均有二长花岗岩的分布。元素富集系数是判断成矿潜力最有利的因素之一。发育大红柳滩伟晶岩型锂矿的Li-13地球化学块体是研究区最有利的成矿地区,在中国西昆仑已经发现的伟晶岩型锂矿是很好的证明。根据地球化学块体理论评价锂矿资源潜力,最有利实现找矿突破的地区包括西昆仑的Li-12和Li-14两个地球化学块体,分别位于Li-13地球化学块体的东侧和南侧,综合找矿潜力排在第2位和第4位,推测Li-12地球化学块体锂资源量为173.2万t, Li-14地球化学块体锂资源量达到811.4万t;其次在塔吉克斯坦南帕米尔地区锂矿找矿潜力巨大, Li-2和Li-3两个地球化学块体主体均位于该区,并且通过野外调查在Li-2和Li-3两个地球化学块体中均发育侏罗纪二长花岗岩,伟晶岩脉广泛发育,综合找矿潜力排在第3位和第4位, Li-2地球化学块体推测锂资源量可达260.5万t, Li-3地球化学块体推测锂资源达到976.9万t(表2)。

综合分析中国西昆仑地区的Li-14地球化学块体和塔吉克斯坦南帕米尔的Li-2地球化学块体最有希望实现锂的找矿突破。帕米尔构造结有望成为世界级“锂矿带”,中国西昆仑和塔吉克斯坦南帕米尔具有巨大的找矿潜力。

表 2 塔吉克斯坦 Li 地球化学块体特征及资源量及资源潜力表

Tab. 2 Lithium Geochemical block characteristics and resource potential in Tajikistan

块体编号	异常下限 (mg/g)	平均值 (mg/g)	极大值 (mg/g)	富集 系数	衬度	异常面积 (km ²)	可供应金属 量(万 t)	锂资源总量 (万 t)	成矿潜力 综合排序
Li-2	39.6	62.8	106.2	2.07	1.59	3 269	55 429	260.5	3
Li-3	39.6	59.8	191.5	1.97	1.51	12 873	207 847	976.9	5
Li-5	39.6	49.8	85.6	1.64	1.26	1 899	25 534	120.0	12
Li-6	39.6	59.9	89.4	1.97	1.51	9 275	150 005	705.0	6
Li-7	39.6	53.5	72.2	1.76	1.35	4 082	58 964	277.1	10
Li-8	39.6	55.4	109	1.83	1.4	2 302	34 433	161.8	8
Li-9	39.6	54.6	91	1.8	1.38	1 585	23 366	109.8	9
Li-12	39.6	61.4	83.8	2.03	1.55	2 223	36 853	173.2	4
Li-13	39.6	65.6	258	2.16	1.66	1 402	24 832	116.7	1
Li-14	39.6	62.9	192	2.07	1.59	10 165	172 632	811.4	2
Li-15	39.6	57.4	111.2	1.89	1.45	3 239	50 198	235.9	7
Li-16	39.6	53.4	61.6	1.76	1.35	3 010	43 398	204.0	11

注:异常下限为地球化学块体中 Li 的最低含量值;平均值为地球化学块体中 Li 平均含量;极大值为地球化学块体范围内 Li 的最大值;富集系数为地球化学块体中 Li 的平均值与研究区 Li 的背景值之比;衬度为地球化学块体中 Li 平均值与 Li 异常下限之比;可供应金属量指的是地球化学块体(块体厚度取 1 000 m,平均岩石密度取 2.7 kg/m³)内可提供成矿的 Li 元素总量;资源总量指的是块体内 Li 元素可供应量与成矿率的乘积,它是地球化学块体内资源潜力评价的重要参数(其中,成矿率是指块体内已探明矿床储量总和与所在块体内金属供应金属量的比值,笔者引用研究区大红柳滩锂矿集区(334)资源量 116.7 万 t 与对应 Li-13 地球化学块体的可供应金属量比值为 0.004 7)。

6 结论

笔者在成矿规律认识的基础上,基于 1:100 万地球化学调查数据,利用地球化学块体理论对帕米尔构造结进行锂资源潜力评价,圈定出 16 个找矿远景区。其中,面积大于 1 000 km²的地球化学块体有 12 个。Li-13 地球化学块体与西昆仑大红柳滩锂矿田或矿集区有很好的对应。认为西昆仑 Li-12、Li-14 两个地球化学块体具有很好的找矿前景,潜力巨大;在帕米尔高原的 Li-2、Li-3 两个地球化学块体中已经发现多处找矿线索,值得进一步部署工作,具有发育大型、超大型伟晶岩型锂矿的潜力。认为帕米尔构造结有望构成世界级“锂矿带”。

致谢:本文在样品采集过程中得到了西安地质调查中心境外室全体成员鼎力相助,同时也得到了塔吉克斯坦地质总局的大力支持;在项目实施过程中得到了李宝强教授的细心指点,在项目评审过程中得到了马中平教授、滕家欣教授、宋忠宝教授等专家的精心指导;在论文审稿过程中评审老师提出了宝贵的意见,在此一并表示感谢!

参考文献(References):

- 范堡程,李宝强,孟广路,等. 塔吉克斯坦二级成矿单元划分及其特征[J]. 矿物学报, 2015, 35(S1): 1076-1077.
- FAN Baocheng, LI Baoqiang, MENG Guanglu, et al. Division and characteristics of the second-order metallogenic unit of Tajiks[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2015, 35(S1): 1076-1077.
- 范堡程,孟广路,刘明义,等. 塔吉克斯坦成矿单元划分及其特征[J]. 地质科技情报, 2017, 36(2): 168-175.
- FAN Baocheng, MENG Guanglu, LIU Mingyi, et al. Division and features of the metallogenic units in Tajikistan[J]. Geological Science and Technology Information, 2017, 36(2): 168-175.
- 范堡程,张晶,孟广路,等. 地球化学块体理论在塔吉克斯坦金资源潜力预测中的应用[J]. 西北地质, 2020, 53(1): 139-146.
- FAN Baocheng, ZHANG Jing, MENG Guanglu, et al. Application of geochemical blocks theory in the prediction of gold resource potential in Tajikistan[J]. Northwestern Geology, 2020, 53(1): 139-146.
- 黄汲清,陈炳蔚. 中国及邻区特提斯海的演化[M]. 北京:地质出版社, 1987.
- HUANG Jiqing, CHEN Bingwei. The evolution of the tethys in China and adjacent regions[M]. Beijing: Geo-

- logical Publishing House, 1987.
- 何国琦, 徐新. 关于中国天山的板块构造分区问题——兼论哈萨克斯坦板块[A]. 中国新疆天山地质与矿产论文集[C]. 北京: 地质出版社, 2003: 1-12.
- HE Guoqi, XU Xin. On the plate tectonic zoning of Tianshan Mountains in China—Also on the Kazakhstan plate[A]. Collected Papers on Geology and Mineral Resources of Tianshan Mountains, Xinjiang, China[C]. Beijing: Geological Publishing House, 2003: 1-12.
- 洪俊, 计文化, 张海迪, 等. 帕米尔地区穆尔杂布辉长岩-闪长岩的成因: 锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素及岩石地球化学证据[J]. 中国地质, 2017, 44(04): 722-736.
- HONG Jun, JI Wenhua, ZHANG Haidi, et al. Petrogenesis of Murgab gabbrro-diorite from Pamir: Evidence from zircon U-Pb dating, Hf isotopes and geochemistry[J]. Geology in China, 2017, 44(04): 722-736.
- 计文化, 陈守建, 李荣社, 等. 西昆仑奥依塔格石炭—二叠纪岩浆岩: 弧后盆地的产物[J]. 岩石学报, 2018, 34(08): 2393-2409.
- JI Wenhua, CHEN Shoujian, LI Rongshe, et al. The origin of Carboniferous-Permian magmatic rocks in Oytage area, West Kunlun: Back-arc basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 34(08): 2393-2409.
- 刘大文, 谢学锦, 严光生, 等. 地球化学块体的方法技术在山东金资源潜力预测中的应用[J]. 地球学报, 2002, 23(2): 169-174.
- LIU Dawen, XIE Xuejin, YAN Guangsheng, et al. The Application of geochemical blocks methods to gold resources assessment in Shandong Province[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2002, 23(2): 169-174.
- 刘拓, 王庆明, 郑启平. 新疆金地球化学块体内资源潜力评价及找矿方向探讨[J]. 新疆地质, 2003, 21(3): 298-302.
- LIU Tuo, WANG Qingming, ZHENG Qiping. Prediction of resource potential and discussion about prospecting-directions of gold mineral resources by geochemical blocks theory in Xinjiang[J]. Xinjiang Geology, 2003, 21(3): 298-302.
- 莫宣学, 赵志丹, 周肃, 等. 印度-亚洲大陆碰撞的时限[J]. 地质通报, 2007, 26(10): 1240-1244.
- MO Xuanxue, ZHAO Zhidan, ZHOU Su, et al. The time frame of the India-Asian collision[J]. Geological Bulletin of China, 2007, 26(10): 1240-1244.
- 莫宣学, 潘桂棠. 从特提斯到青藏高原形成: 构造-岩浆事件的约束[J]. 地学前缘, 2016, 13(6): 43-51.
- MO Xuanxue, PAN Guitang. From the Tethys to the formation of the Qinghai-Tibet Plateau: constrained by tectono-magmatic events[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 13(6): 43-51.
- 潘桂棠, 陈智梁. 东特提斯地质构造形成演化[M]. 北京: 地质出版社, 1997.
- PAN Guitang, CHEN Zhiliang. The formation and evolution of Eastern Tethys geological structure[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997.
- 涂其军, 韩琼, 李平, 等. 西昆仑大红柳滩一带锂辉石矿基本特征和勘查新进展[J]. 地质学报, 2019, 93(11): 2862-2873.
- TU Qijun, HAN Qiong, LI Ping, et al. Basic characteristics and exploration progress of the spodumene ore deposit in the Dahongliutan area, West Kunlun[J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(11): 2862-2873.
- 李宝强, 孟广路, 祁世军, 等. 兴都库什-西昆仑成矿带地质矿产概论[M]. 北京: 地质出版社, 2013.
- LI Baoqiang, MENG Guanglu, QI Shijun, et al. Introduction to geology and mineral resources of Hindu Kush-West Kunlun metallogenic belt[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013.
- 李尚林, 王根厚, 胡敬仁, 等. 藏北聂荣县查吾拉区巴通阶与基底岩系角度的不整合及地质意义[J]. 地质通报, 2004, 24(3): 239-242.
- LI Shanglin, WANG Genhou, HU Jingren, et al. Discovery of the angular unconformity between the Middle Jurassic Batongian and basement rocks in Chawula District, Nierong County, Northern Tibet and its geological significance[J]. Geological Bulletin of China, 2004, 24(3): 239-242.
- 李尚林, 王根厚, 马伯永, 等. 藏东北巴县江绵乡上三叠统东达村组 and “甲丕拉组”的沉积特征及其意义[J]. 地质通报, 2005, 24(1): 58-64.
- LI Shanglin, WANG Genhou, MA Boyong, et al. Sedimentary characteristics and significance of the Upper Triassic Dongdacun Formation and “Japila Formation” in Jiangmian Township, Ba County, Northeast Tibet[J]. Geological Bulletin of China, 2005, 24(1): 58-64.
- 李尚林, 王根厚, 马伯永, 等. 藏北比如县玛双布上三叠统波里拉组震积事件沉积的发现及意义[J]. 吉林大学学报地球科学版, 2008, 38(6): 973-979.
- LI Shanglin, WANG Genhou, MA Boyong, et al. Discovery and its significance of earthquake event deposits of the Upper Triassic Bolila formation in Mashuangbu, Biru County, Northern Tibet[J]. Journal of Jilin University Earth Science Edition, 2008, 38(6): 973-979.
- 李荣社, 计文化, 何世平, 等. 中国西部古亚洲与特提斯两大构造域划分问题讨论[J]. 新疆地质, 2011, 29(3): 247-250.
- LI Rongshe, JI Wenhua, HE Shiping, et al. The two tectonic domain division discussion between the ancient Asian and tethys in Western China[J]. Xinjiang Geology, 2011, 29(3): 247-250.
- 李侃, 高永宝, 滕家欣, 等. 新疆和田县大红柳滩一带花岗

- 伟晶岩型稀有金属矿成矿地质特征,成矿时代及找矿方向[J]. 西北地质, 2019, 52(4):206-221.
- LI Kan, GAO Yongbao, TENG Jiixin, et al. Metallogenic Geological characteristics, Mineralization Age and Resource Potential of the Granite-Pegmatite-Type Rare Metal Deposits in Dahongliutan Area, Hetian County, Xinjiang[J]. *Northwestern Geology*, 2019, 52(4): 206-221.
- 王根厚,贾建称,李尚林,等. 藏东巴青县以北基底变质岩系的发现[J]. 地质通报, 2004, 23(5-6):613-615.
- WANG Genhou, JIA Jiancheng, LI Shanglin, et al. Discovery of basement metamorphic rock series north of Baqing County, East Tibet[J]. *Geological Bulletin of China*, 2004, 23(5-6): 613-615.
- 王秋舒. 全球锂矿资源勘查开发及供需形势分析[J]. 中国矿业, 2016, 25(3):11-24.
- WANG Qiushu. Analysis of global lithium resources exploration and development, supply and demand situation [J]. *China Mining Magazine*, 2016, 25(3): 11-24.
- 王学求. 矿产勘查地球化学:过去的成就与未来的挑战[J]. 地学前缘, 2003, 10(1):239-248.
- WANG Xueqiu. Exploration geochemistry: past achievements and future challenges[J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(1): 239-248.
- 王学求. 勘查地球化学 80 年来重大事件回顾[J]. 中国地质, 2013, 40(1):322-330.
- WANG Xueqiu. Landmark events of exploration geochemistry in the past 80 years[J]. *Geology in China*, 2013, 40(1): 322-330.
- 王学求,谢学锦. 金的勘查地球化学—理论与方法战略与战术[M]. 济南:山东科学技术出版社, 2000:51-52.
- WANG Xueqiu, XIE Xuejin. Exploration geochemistry of gold principles and methodology, tactics and strategy [M]. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 2000: 51-52.
- 王玮,王学求,张必敏,等. 老挝全国地球化学填图与成矿远景区预测[J]. 地球学报, 2020, 41(1): 80-90.
- WANG Wei, WANG Xueqiu, ZHANG Bimin, et al. National-scale geochemical mapping and prediction of metallogenic prospective areas in Laos[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2020, 41(1): 80-90.
- 奚小环. 多目标的地质大调查—21 世纪勘查地球化学的战略选择[J]. 物探与化探, 2007, 31(4): 283-288.
- XI Xiaohuan. Multipurpose comprehensive geological survey: The strategic choice of exploration geochemistry geochemistry in 21st century[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2007, 31(4): 283-288.
- 谢学锦. 区域化探[M]. 北京:地质出版社, 1979.
- XIE Xuejin. Regional geochemical exploration[M]. Beijing: Geological Publication House, 1979.
- 谢学锦. 勘查地球化学:发展史·现状·展望[J]. 地质与勘探, 2002, 38(6): 1-9.
- XIE Xuejin. Exploration geochemistry: retrospect and prospect[J]. *Geology and Exploration*, 2002, 38(6): 1-9.
- 谢学锦. 全球地球化学填图[J]. 中国地质, 2003, 30(1): 1-9.
- XIE Xuejin. Global geochemical mapping[J]. *Geology in China*, 2003, 30(1): 1-9.
- 谢学锦,刘大文. 地球化学填图与地球化学勘查[J]. 地质评论, 2006, 52(6): 721-736.
- XIE Xuejing, LIU Dawen. Geochemical mapping and geochemical exploration[J]. *Geological Review*, 2006, 52(6): 721-736.
- 谢学锦. 地球化学填图的历史发展(代总序)[J]. 地质通报, 2007, 26(11):1399-1404.
- XIE Xuejing. Historical development of geochemical mapping (in lieu of preface) [J]. *Geological Bulletin of China*, 2007, 26(11): 1399-1404.
- 谢学锦. 全球地球化学填图—历史发展与今后工作之建议[J]. 中国地质, 2008, 35(3):357-374.
- XIE Xuejin. Global geochemical mapping—Historical development and suggestions of future work[J]. *Geology in China*, 2008, 35(3): 357-374.
- 谢学锦,任天祥,奚小环,等. 中国区域化探全国扫面计划卅年[J]. 地球学报, 2009, 30(6):700-716.
- XIE Xuejing, REN Tianxiang, XI Xiaohuan, et al. The implementation of the regional Geochemistry-National Reconnaissance Program (RGNR) in China in the past thirty years[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2009, 30(6): 700-716.
- 向运川,牟绪赞,任天祥,等. 全国区域化探数据库[J]. 中国地质, 2018, 45(1):32-57.
- XIANG Yunchuan, MOU Xuzan, REN Tianxiang, et al. China regional geochemical exploration database [J]. *Geology in China*, 2018, 45(1): 32-57.
- 许志琴,杨经绥,戚学祥,等. 印度亚洲碰撞——南北向和东西向拆离构造与喜马拉雅造山机制的再讨论[J]. 地质通报, 2006, 25(1):1-14.
- XU Zhiqin, YANG Jingsui, QI Xuexiang, et al. India-Asia collision: A further discussion of N-S- and E-W-trending detachments and the orogenic mechanism of the modern Himalayas[J]. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25(1): 1-14.
- 许志琴,杨经绥,李海兵,等. 造山的高原——青藏高原的地体拼合、碰撞造山及隆升机制[M]. 北京:地质出版社, 2007.
- XU Zhiqin, YANG Jingsui, LI Haibing, et al. Orogenic plateaus—the terrane assembly, collision orogeny and uplift mechanism of the Qinghai-Tibet Plateau[M]. Beijing: Geological Publication House, 2007.

- 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等. 印度-亚洲碰撞大地构造[J]. 地质学报, 2011, 85(1): 1-32.
- XU Zhiqin, YANG Jingsui, LI Haibing, et al. On the tectonics of the India-Asia collision[J]. Acta Geological Sinica, 2011, 85(1): 1-32.
- 许志琴, 李思田, 张建新, 等. 塔里木地块与古亚洲特提斯构造体系的对接[J]. 岩石学报, 2011, 27(1): 1-22.
- XU Zhiqin, LI Sitian, ZHANG Jianxin, et al. Paleo-Asian and Tethyan tectonic systems with docking the Tarim block[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(1): 1-22.
- 许志琴, 杨经绥, 李文昌, 等. 青藏高原中的古特提斯体制与增生造山作用[J]. 岩石学报, 2013, 29(6): 1847-1860.
- XU Zhiqin, YANG Jingsui, LI Wenchang, et al. Paleo-Tethys system and accretionary orogen in the Tibet Plateau [J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(6): 1847-1860.
- 许志琴, 杨经绥, 侯增谦, 等. 青藏高原大陆动力学研究若干进展[J]. 中国地质, 2016, 43(1): 1-42.
- XU Zhiqin, YANG Jingsui, HOU Zengqian, et al. The progress in the study of continental dynamics of the Tibetan Plateau[J]. Geology in China, 2016, 43(1): 1-42.
- 肖文交, 侯泉林, 李继亮, 等. 西昆仑大地构造相解剖及其多岛增生过程[J]. 中国科学辑, 2000, 30(S1): 22-28.
- XIAO Wenjiao, HOU Quanlin, LI Jiliang, et al. Anatomy of the tectonic facies of the West Kunlun and its multi-island accretion process[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2000, 30(S1): 22-28.
- 于德福, 王鑫. 西昆仑成矿带发现首个超大型伟晶岩型锂矿[N]. 中国自然资源报, 2018, 11.
- YU Defu, WANG Xin. The first super-large pegmatite-type lithium deposit discovered in the West Kunlun metallogenic belt[N]. China Natural Resources News, 2018, 11.
- 张晶, 李宝强, 李慧英. 区域地球化学方法在西天山地区成矿潜力评价中的应用[J]. 西北地质, 2017, 50(3): 162-172.
- ZHANG Jing, LI Baoqiang, LI Huiying. Application of geochemical method on the prospecting potential evaluation of West Tianshan Belt in China[J]. Northwestern Geology, 2017, 50(3): 162-172.
- 谢学锦, 邵跃, 王学求. 走向 21 世纪矿产勘查地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 1999.
- XIE Xuejin, SHAO Yue, WANG Xueqiu. Exploration geochemistry into the 21st Century[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999.
- Л. Н. Россовский. 阿富汗锂辉石矿床的形成特征[J]. Геология и Геофизика. 1978, 11: 102-109.
- Л. Н. Россовский. Formation characteristics of spodumene deposits in Afghanistan [J]. Геология и Геофизика. 1978, 11: 102-109.
- Alexander M S, Victor A G. Regional to detailed geochemical mapping of the Kariisk ore district, eastern Trans-Baikal region, Russia[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1995, 55: 67-74.
- Atsuyuki O, Noboru I, Shigeru T, et al. Application of multi-element statistical analysis for regional geochemical mapping in Central Japan[J]. Applied Geochemistry, 2005, 20: 1017-1037.
- Bölviken B, Bogen J, Demetriades A, et al. Regional geochemical mapping of Western Europe towards the year 2000[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1996, 56: 141-166.
- Butt C R M, Nichol I. The identification of various types of geochemical stream sediment anomalies in Northern Ireland[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1979, 11(1): 13-32.
- Cheng Zhizhong, Xie Xuejing, Yao Wensheng, et al. Multi-element geochemical mapping in Southern China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2013, 139: 183-192.
- Elsensbroek J H, Naser J A. An environmental application of regional geochemical mapping in understanding enzootic geophagia of calves in the reivilo area, south africa[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2002, 24: 159-181.
- Ottesen R T, Bogen J, Bölviken B, et al. Overbank sediment: a representative sample medium for regional geochemical mapping[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1989, 32(1): 257-277.
- Xie Xuejin. Surficial and superimposed geochemical exploration for giant ore deposits[A]. Clark A H. Giant ore deposits II [C]. Kingston, Canada: Queen's University Press, 1995: 475-485.
- Xie Xuejin, Cheng Hangxin. The suitability of floodplain sediment as a global sampling medium: evidence from China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1997, 58(1): 51-62.
- Xie Xuejin, Mu Xuzhan, REN Tianxiang. Geochemical mapping in China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1997, 60: 99-113.
- Xie Xuejin, Cheng Hangxin. Global geochemical mapping and its implementation in the Asia-Pacific region[J]. Applied Geochemistry, 2004, 16: 139-1321.
- Xie Xuejin. Geochemical Mapping-Evolution of Its Aims, Ideas and Technology[J]. Acta Geologica Sinica(English Edition), 2008, 82(5): 927-937.
- Xie Xuejin, Cheng Hangxin. Sixty years of exploration geochemistry in China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2013, 139: 4-8.