https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.054



# 中蒙边界地区战略性矿产资源锂区 域地球化学分布及控制因素

刘汉粮<sup>1,2,3,4</sup>,聂兰仕<sup>1,3,4\*</sup>,Shojin Davaa<sup>5</sup>,王学求<sup>1,3,4</sup>,迟清华<sup>1,3,4</sup>,王丽君<sup>1,3,4</sup>

- 1. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所,河北廊坊 065000
- 2. 中国地质大学地球科学与资源学院,北京 100083
- 3. 自然资源部地球化学探测重点实验室,河北廊坊 065000
- 4. 联合国教科文组织全球尺度地球化学国际研究中心,河北廊坊 065000
- 5. Geological Investigation Center, Ulaanbaatar-37 P.box-318, Mongolia

摘 要:中蒙边界地区成矿地质条件优越,资源潜力巨大,是国际、国内地学研究和勘查的热点地区.锂能已被国际上公认为未来新能源的发展方向,锂矿成为关键性战略矿产资源调查和研究的热点.随着我国锂资源需求日益增加,了解其在土壤圈中的浓度和分布对缓解我国锂资源短缺问题至关重要.依托中蒙边界1:100万地球化学填图数据,探讨了汇水域沉积物中锂的地球化学参数、区域地球化学分布特征以及影响因素.中蒙边界地区汇水域沉积物锂元素中位值和平均值分别是22.50×10<sup>-6</sup>和24.46×10<sup>-6</sup>;阿尔泰构造带、阿尔泰南缘弧盆系锂含量最高,区域浓集系数分别是1.38、1.26,是锂的富集优势区;锂的区域地球化学分布主要受地质背景、成土母岩控制,地理景观、黏土含量、矿床分布等也制约着锂的分布模式.根据85%累积频率,圈定出74个锂地球化学异常区,其中23个锂地球化学异常达到地球化学省规模,根据锂地球化学异常分布模式为该区寻找锂等稀有金属矿床提供了重要选区.研究填补了中蒙边界地区锂地球化学分布的空白,为两国边境地区锂等稀有金属矿床对比提供基础数据,为缓解中国锂资源短缺优选了勘查靶区.

关键词: 锂;含量;空间分布;汇水域沉积物;中蒙边界地区;地球化学。

中图分类号: P595;P596 文章编号: 1000-2383(2022)08-2795-14 收稿日期:2021-11-10

# Regional Geochemical Distribution and Controlling Factors of Lithium in the Sino-Mongolia Border Areas

Liu Hanliang<sup>1,2,3,4</sup>, Nie Lanshi<sup>1,3,4\*</sup>, Shojin Davaa<sup>5</sup>, Wang Xueqiu<sup>1,3,4</sup>, Chi Qinghua<sup>1,3,4</sup>, Wang Lijun<sup>1,3,4</sup>

- 1. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China
- 2. School of Earth and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China
- 3. Key Laboratory of Geochemical Exploration, Ministry of Natural Resources, Langfang 065000, China
- 4. UNESCO International Centre on Global-Scale Geochemistry, Langfang 065000, China
- 5. Geological Investigation Center, Ulaanbaatar-37 P.box-318, Mongolia

基金项目:中国地质调查项目(Nos. DD20221807, DD20190451, DD20190450);中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(No. AS2022P03);国家自然科学基金项目(No. 41903071).

作者简介:刘汉粮(1985-),男,高级工程师,从事勘查地球化学及境外地球化学填图研究工作. ORCID: 0000-0001-9819-121X. E-mail: lhanliang@mail.cgs.gov.cn

<sup>\*</sup> 通讯作者: 聂兰仕, ORCID: 0000-0002-3223-9273. E-mail: nlanshi@mail.cgs.gov.cn

引用格式:刘汉粮,聂兰仕,Shojin Davaa,王学求,迟清华,王丽君,2022.中蒙边界地区战略性矿产资源锂区域地球化学分布及控制因素.地球科学,47(8):2795-2808.

Citation: Liu Hanliang, Nie Lanshi, Davaa Shojin, Wang Xueqiu, Chi Qinghua, Wang Lijun, 2022. Regional Geochemical Distribution and Controlling Factors of Lithium in the Sino-Mongolia Border Areas. *Earth Science*, 47(8): 2795—2808.

Abstract: The Sino-Mongolia border areas are advantage in ore-forming geological conditions and have huge resource potentials, which make them the hotspot for international and domestic geoscience research and exploration. Lithium energy has been recognized as the developing trend of future new energy, and lithium ore has become a hotspot in the investigation and research of strategic mineral resources. With the ever-increasing demand for lithium, understanding its concentration and distribution in thepedosphere is essential for alleviating the lithium shortage in China. Based on the 1:1 million geochemical mapping data of the Sino-Mongolia border areas, this paper discusses the geochemical parameters, regional geochemical distribution and influencing factors of lithium in the catchment sediments. The median and average values of lithium in the catchment sediments are 22.50×  $10^{-6}$  and  $24.46 \times 10^{-6}$ , respectively. The Altay tectonic belt and the arc basin system at the Altay southern margin have the highest lithium contents, with the regional concentration coefficients of 1.38 and 1.26, respectively, which are the preponderant regions of lithium enrichment. The regional geochemical distribution of lithium is mainly controlled by the geological background, while the geographical landscape, clay content, and mineral deposit distribution can also restrict the distribution patterns of lithium. Based on the 85% cumulative frequency, 74 lithium geochemical anomalies are delineated, of which 23 lithium geochemical anomalies reach the scale of geochemical province. These anomalies provide the important selection areas for exploring lithium and other rare metal deposits in this area. The paper fills the gap in the lithium geochemical distribution study and provides important data for the comparison of rare metal deposits in the Sino-Mongolia border areas, and delineates prospecting targets for alleviating the Li shortage in China.

Key words: Lithium; concentration; spatial distribution; catchment sediments; Sino-Mongolia border areas; geochemistry.

# 0 引言

锂(lithium, Li)广泛用于电池、医药、核工业、 航空航天、新能源汽车等新兴领域,是现代高科技 产业不可或缺的原料(Liu et al., 2020; 温汉捷等, 2020),被称为"21世纪新能源金属"和"促进世界进 步的金属",具有极高的经济和战略价值,也被称之 为关键性战略矿产资源(毛景文等,2019;王登 红,2019; 翟明国等,2019; 温汉捷等,2020). 作为 重要的能源金属,锂能已被国际上公认为未来新能 源的发展方向,各国争夺和开发锂资源的力度持续 加强,寻找和评价锂矿产资源是地质调查和科学研 究的主要任务之一(翟明国等, 2019; Chen et al., 2020;王学求等, 2020).中国现有锂资源供应体系 高度依赖国外. 2017年80%的锂资源供应来自进 口,其中从澳大利亚进口锂辉石8.92万吨,占比 57%,从南美进口盐湖锂约3.56万吨,占比23%(马 哲等, 2018).

利用地球化学填图数据寻找锂矿是一条有效的途径(王学求等,2020),如:利用中国地球化学基准计划汇水域沉积物地球化学数据,共圈定31个锂地球化学异常,归为19个锂地球化学省,分为花岗伟晶岩和花岗岩有关、盐湖与地下卤水有关、泥质岩类有关和次生风化黏土有关的锂地球化学异常4种类型(王学求等,2020);利用水系沉积物地球化学调查数据编制的《中国西南地区76种元素地球化学图集》显示甲基卡矿床具有明显的锂异常带(谢

学锦等,2008);矿区尺度或矿床尺度水系沉积物地球化学调查也有效圈定了甲基卡矿床地球化学异常(徐云峰等,2018).

围绕国家"一带一路"倡议及"两种资源、两个市场"和产业转移战略对矿产信息的重大急迫需求,利用中国领先的地球化学填图技术,采集中蒙边界地区地球化学数据. 笔者以中蒙边界地区1:100万地球化学填图数据为依托,(1)统计中蒙边界地区汇水域沉积物锂地球化学参数;(2)绘制中蒙边界地区汇水域沉积物锂地球化学图;(3)探讨地质背景(成土母岩)、构造单元、地理景观、矿床分布等影响因素;(4)提出锂资源勘查远景区带,为缓解中国锂资源短缺提供勘查靶区.

# 1 区域地质概况

本文所指的中蒙边界地区包括中国的新疆、甘肃、内蒙古以及与蒙古国接壤的边界地区,大地构造位置地处华北克拉通与西伯利亚地台之间的古生代褶皱带内.区内古生代地层出露广泛,深大断裂纵横交错,岩浆岩十分发育,是中亚成矿带的重要组成部分(Tomurtogoo, 2006; 聂凤军等, 2010).中蒙边界地区主体构造为古大陆边缘地体拼接带,记载了华北克拉通与西伯利亚地台分而再合的历史,留下了古蒙古洋板块扩张和消亡及其与古大陆碰撞对接过程的痕迹.新元古代早期,华北地台和西伯利亚地台同属一个古大陆,具有相似的结晶基

底、沉积盖层、古生物群落和古地磁学特征.新元古 代中一晚期,受张裂构造作用的影响,古陆块发生 裂解,形成南、北2个不同的古陆块,之间夹广阔的 大洋盆地一古蒙古洋.此时,两大古板块南、北两侧 均属被动型陆缘构造环境. 早古生代,古蒙古洋壳 开始全方位向华北地台俯冲,使其北缘成为活动型 陆缘. 古蒙古洋板块向北的多期次俯冲诱发了大规 模构造一岩浆活动,形成了一系列向南凸出的弧形 陆缘山系.晚古生代早期,受古大陆边缘地体拼贴 与增生作用的影响,西伯利亚地台向南扩展至大兴 安岭中部、东乌旗、二连浩特、额济纳旗北、甜水井 和蒙古国南部一线.晚古生代晚期,随着古洋壳与 陆壳的多期次俯冲与消减,介于华北地台和西伯利 亚地台之间的大洋盆地逐渐发生收缩,两大古陆块 最终沿内蒙古苏尼特右旗一蒙古国索朗克尔一线 发生碰撞对接,将华北地台与西伯利亚地台拼为一 整体. 中生代时期, 受库拉(太平洋) 板块向欧亚大 陆的俯冲和北侧蒙古一鄂霍茨克洋剪刀式闭合双 重作用的影响,中蒙边界中东段发生强烈的断块升 降、中酸性火山喷发和岩浆侵入活动,进而形成一 系列北东-北东东向断陷带和断隆带. 古生代洋壳 向古大陆的俯冲作用和中生代陆壳的再活化作用, 致使洋或陆壳岩层(体)发生重熔(或同熔)作用形 成花岗质岩浆. 岩浆在上侵定位过程中发生自身的 结晶分异演化,也遭受早期岩层(体)的同化混染, 使成矿组分进一步富集,形成含矿花岗岩类熔浆进 而成矿(Tomurtogoo, 2006; 聂凤军等, 2010; 卜建 军等, 2020;王涛等, 2020).

中蒙边界地区成矿地质条件优越,是世界上重要的金属成矿省和全球三大斑岩型铜(金、钼)成矿带之一(李俊建等,2015),分布有欧玉陶勒盖(Oyu-Tolgoi)超大型斑岩型铜金矿、查干苏布尔嘎(Tsagaan Suvarga)大型斑岩型铜钼矿等;中蒙边界西段的阿尔泰造山带是世界著名的稀有金属(Li、Be、Nb、Ta等)产地(邹天人等,2006),分布可可托海超大型伟晶岩稀有金属矿床、哈勒赞布热格泰(Khalzan Buregte)稀有稀土矿床等,资源潜力巨大,是国际、国内地学研究和勘查的热点地区.可可托海3号脉伟晶岩型稀有金属矿床最为重要,其完美的同心环状结构分带举世闻名,该矿床处于哈龙一青河复背斜南东侧伏端,矿区附近出露地层为新元古界富蕴群,为一套陆缘碎屑岩经中深变质作用而成的片岩、片麻岩和混合岩等,侵入岩有加里东期

的角闪辉长岩、英云闪长岩,华力西期重熔型似斑状黑云母花岗岩和二云母花岗岩,该矿床镀资源量为全国首位,锂、铯、钽资源量分别居全国第6、5、9位(邹天人等,2006;Li et al.,2015).蒙古哈勒赞布热格泰(KhalzanBuregte)稀有稀土矿床位于蒙古西部科布多省,Myangad苏木境内,距科布多市45km,Myangad村庄12km,矿床位于德伦一阿尔泰成矿带,该带中有数个中泥盆纪的稀有、稀土矿床,哈勒赞布热格泰矿床是其中规模最大的一个.该矿床位于由碱性侵入岩组成的哈勒赞布热格泰山,受Tsagaan-Shiveet区域断裂控制,矿床形成与板内碱性基性到酸性岩浆活动有关,其成矿年龄为393Ma(Kempe et al.,2015).

李俊建等(2015)以板块构造理论为指导,对中蒙边界地区构造格架进行了统一厘定和划分,认为该区 I 级构造单元主体隶属于中亚构造带的阿尔泰一兴蒙造山系,部分属塔里木一华北陆块区,阿尔泰一兴蒙造山系可划分为 10个 II 级、27个 III 级和 69个 IV 级构造单元,塔里木一华北陆块部分划分出 2个 II 级、2个 III 级和4个 IV 级构造单元;在成矿区带方面划分成古亚洲成矿域和滨太平洋成矿域(叠加在古亚洲成矿域之上),共划分出5个 II 级成矿省、16个 III 级成矿带和 34个 IV 级成矿亚带(李俊建等, 2016).

# 2 工作方法

中蒙边界地区共完成了约1300000 km2的国 家尺度(1:100万)地球化学填图工作,由中国地质 科学院地球物理地球化学勘查研究所和蒙古地质 调查中心联合完成,工作范围是东西方向(经度) E86°~E120°,南北方向沿边境线向两国境内各延伸 约100 km,共采集样品10505件(图1). 中蒙边界地 区1:100万地球化学填图以1:25万或1:20万地形 图作为野外工作用图,以1:2.5万图幅(经度差 7.5'×纬度差5.0',面积大约100 km²)作为一个采样 单元网格,每个网格采集1件样品或组合样品. 汇水 域沉积物是低密度地球化学填图的最理想采样介 质(Wang et al., 2007). 采样点分布兼顾样品均匀 性与最有效控制汇水域,样品在50m范围内多点组 合采样(3~5个点),所有采样点位筛取-100目的 细粒级样品,由于样品粒度细、介质均匀,代表性 强,同时细粒级样品具有独特的吸附特性,可以将 含矿信息捕获与富集(Wang et al., 2007; 刘汉粮

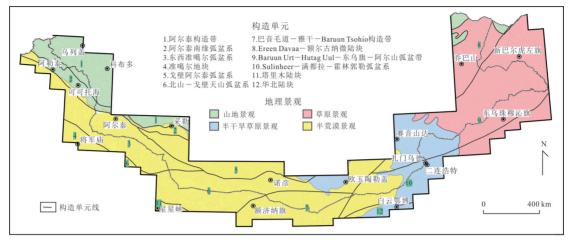


图 1 中蒙边界地球化学填图采样点位与工区构造单元、地理景观示意图

Fig. 1 Map of the working area showing the sampling sites, tectonic units and geomorphologic landscapes 据李俊建等(2015); 刘汉粮等(2020)修改

等,2018,2020). 为满足矿产勘查、基础地质和生态环境的需要,分析了包括区域化探39元素在内的69种元素,所有样品在中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所中心实验室加工、分析,采用地壳全元素配套分析方案及分析质量监控系统(张勤等,2012),以保障样品分析数据的准确性和一致性. 锂采用四酸溶矿,等离子体质谱法(ICP-MS)分析(张勤等,2012),分析检出限是1×10<sup>-6</sup>,报出率100%,标准样合格率100%,重复样合格率100%.

# 3 结果

## 3.1 中蒙边界地区汇水域沉积物锂含量

中蒙边界地区汇水域沉积物锂含量大致具有对数正态分布特征,在  $25\%\sim75\%$  分位数区间内较为集中(图 2),锂含量(表 1)变化范围是  $1.03\times10^{-6}\sim400.10\times10^{-6}$ ,中位值和平均值分别是  $22.50\times10^{-6}$ 和  $24.46\times10^{-6}$ .中蒙边界地区汇水域沉积物锂含量低于中国地球化学基准计划获得的锂含量(表层汇水域沉积物锂中位值  $30.0\times10^{-6}$ ,算术平均值  $31.6\times10^{-6}$ ; Liu et al., 2020),低于中国区域化探扫描计划获得的锂含量(水系沉积物锂中位值  $32.0\times10^{-6}$ ,算术平均值  $34.0\times10^{-6}$ ; Yan and Chi, 2005).

# 3.2 中蒙边界地区不同构造单元内汇水域沉积物 锂含量

李俊建等(2015)以板块构造理论为指导,将中蒙边界地区划分为12个II级构造单元,阿尔泰构造带、阿尔泰南缘弧盆系、东西准噶尔弧盆系、准噶尔

地块、戈壁阿尔泰弧盆系、北山一戈壁天山弧盆系、 巴音毛道一雅干—Baruun Tsohio 构造带、Ereen-Davaa— 额尔古纳微陆块、Baruun Urt—Hutag Uul—东乌旗—阿尔山弧盆带、Sulinheer—满都拉— 霍林郭勒弧盆系、塔里木陆块、华北陆块(图1).

中蒙边界地区不同构造单元内汇水域沉积物 锂地球化学参数见表1、图3.锂含量以中位值排序: 阿尔泰构造带>阿尔泰南缘弧盆系>准噶尔地块 >Ereen Davaa-额尔古纳微陆块>Baruun Urt-Hutag Uul一东乌旗一阿尔山弧盆带>Sulinheer-满都拉一霍林郭勒弧盆系>华北陆块>全区>东 西准噶尔弧盆系>巴音毛道一雅干-Baruun Tsohio 构造带>北山-戈壁天山弧盆系>塔里木陆块 >戈壁阿尔泰弧盆系;以平均值排序:阿尔泰南缘 弧盆系>阿尔泰构造带>Ereen Davaa-额尔古纳 微陆块>准噶尔地块>Baruun Urt-Hutag Uul-东乌旗-阿尔山弧盆带>Sulinheer-满都拉-霍林 郭勒弧盆系>全区>华北陆块>东西准噶尔弧盆 系>巴音毛道-雅干-BaruunTsohio 构造带>北 山-戈壁天山弧盆系>塔里木陆块>戈壁阿尔泰 弧盆系(图3). 无论是中位值还是平均值阿尔泰构 造带、阿尔泰南缘弧盆系、准噶尔地块、Ereen Davaa - 额尔古纳微陆块、Baruun Urt-Hutag Uul-东乌旗-阿尔山弧盆带、Sulinheer-满都拉-霍林郭勒弧盆系6个构造单元内锂含量高于中蒙边 界全区锂含量;东西准噶尔弧盆系、巴音毛道一雅 干-Baruun Tsohio 构造带、北山-戈壁天山弧盆 系、塔里木陆块、戈壁阿尔泰弧盆系5个构造单元内 锂含量低于中蒙边界全区锂含量. 锂在各个构造单

#### 表 1 中蒙边界地区不同构造单元内汇水域沉积物锂地球化学参数(10-6)

Table 1 Lithium geochemical parameters of catchment sediments collected from different tectonic belts across the China-Mongolia boundary (10<sup>-6</sup>)

统计	样品	最小	2.5%	25%	平均	50%	75%	97.5%	最大	标准	RCC
单元	数	值	分位数	分位数	值	分位数	分位数	分位数	值	差	KCC
全区	10 505	1.03	12.67	18.31	24.46	22.50	28.18	47.73	400.10	10.10	_
1	760	10.53	15.32	24.74	32.14	30.98	37.54	55.95	125.80	11.20	1.38
2	311	11.27	14.08	22.51	32.79	28.27	36.14	67.30	400.10	26.35	1.26
3	1 038	1.03	13.16	17.91	23.03	21.81	25.84	42.80	77.00	7.71	0.97
4	171	4.09	12.95	21.16	25.88	25.08	29.39	46.33	65.67	8.18	1.11
5	614	8.31	11.14	14.74	18.50	17.62	20.98	30.66	49.22	5.16	0.78
6	1 421	7.64	11.15	15.94	20.01	18.56	22.17	39.02	63.78	6.83	0.82
7	892	8.58	14.25	17.94	22.83	20.82	25.41	42.55	67.93	7.75	0.93
8	750	10.23	15.38	21.27	26.76	24.98	29.79	48.48	110.26	9.17	1.11
9	2 979	9.07	13.57	19.50	25.26	23.71	29.00	47.63	158.98	9.22	1.05
10	1 333	8.82	13.79	19.10	24.89	23.37	28.60	45.73	100.58	8.57	1.04
11	66	7.18	9.52	13.76	18.90	17.72	22.15	36.33	51.49	7.78	0.79
12	170	7.48	16.05	20.84	24.09	23.36	26.41	37.47	52.29	5.88	1.04

注:1~12代表不同构造单元,名称同图 1; 1. 阿尔泰构造带(样品数 760 件); 2. 阿尔泰南缘弧盆系(样品数 311 件); 3. 东西准噶尔弧盆系(样品数 1 038 件); 4. 准噶尔地块(样品数 171 件); 5. 戈壁阿尔泰弧盆系(样品数 614 件); 6. 北山一戈壁天山弧盆系(样品数 1 421 件); 7. 巴音毛道一雅干一Baruun Tsohio 构造带(样品数 892 件); 8. Ereen Davaa—额尔古纳微陆块(样品数 750 件); 9. Baruun Urt—Hutag Uul—东乌旗—阿尔山弧盆带(样品数 2 979 件); 10. Sulinheer—满都拉—霍林郭勒弧盆系(样品数 1 333 件); 11. 塔里木陆块(样品数 66 件); 12. 华北陆块(样品数 170 件)

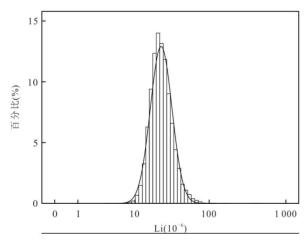


图 2 中蒙边界地区汇水域沉积物锂直方图

Fig. 2 Lithium histogram of catchment sediments collected from the China-Mongolia boundary

元分布是不均一,而正是这种局部的不均一性才能通过加密采样刻画出地球化学模式的细节变化,为逐步追踪矿化体奠定基础(刘汉粮等,2018).

# 3.3 中蒙边界地区不同地理景观内汇水域沉积物 锂含量

中蒙边界地区分为山地(高山)、草原、半干旱草原、半荒漠4种地理景观(图1, Tian et al., 2018). 山地景观区锂含量变化范围是10.25×

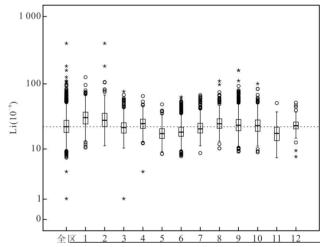


图3 中蒙边界地区不同构造单元内锂含量箱图

Fig. 3 Lithium boxplots of catchment sediments collected from different tectonic belts across the China-Mongolia boundary

1~12 构造单元名称同图1

 $10^{-6} \sim 400.10 \times 10^{-6}$ , 中位值和平均值分别是  $30.84 \times 10^{-6}$ 和  $32.89 \times 10^{-6}$ ;相应地,草原景观区  $9.07 \times 10^{-6} \sim 158.98 \times 10^{-6}$ ,  $24.37 \times 10^{-6}$ ,  $25.75 \times 10^{-6}$ ;半干旱草原景观区  $7.48 \times 10^{-6} \sim 100.58 \times 10^{-6}$ ,  $22.70 \times 10^{-6}$ ,  $24.74 \times 10^{-6}$ ;半荒漠景观区  $1.03 \times 10^{-6} \sim 77.00 \times 10^{-6}$ ,  $20.16 \times 10^{-6}$ ,  $21.59 \times 10^{-6}$ (表 2).

#### 表 2 中蒙边界地区不同地理景观内汇水域沉积物锂地球化学参数(10-6)

Table 2 Lithium geochemical parameters of catchment sediments collected from different geomorphologic landscapes across the China-Mongolia boundary (10<sup>-6</sup>)

统计单元	样品数	最小值	25% 分位数	平均值	中位值	75% 分位数	最大值	标准差	RCC
全区	10 505	1.03	18.31	24.46	22.50	28.18	400.10	10.10	_
山地	760	10.25	24.63	32.89	30.84	37.79	400.10	17.20	1.37
草原	311	9.07	20.38	25.75	24.37	29.43	158.98	8.72	1.08
半干旱草原	1 038	7.48	18.98	24.74	22.70	27.90	100.58	9.36	1.01
半荒漠	171	1.03	16.79	21.59	20.16	24.61	77.00	7.44	0.90

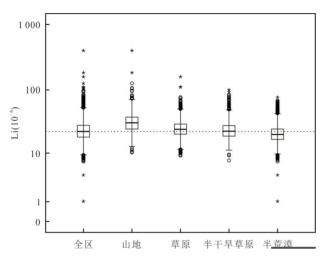


图 4 中蒙边界地区不同地理景观内锂含量箱图

Fig. 4 Lithium boxplots of catchment sediments collected from different geomorphologic landscapes across the China-Mongolia boundary

无论是中位值还是平均值,山地景观区锂含量最高,草原景观区、半干旱草原景观区次之,半荒漠景观区锂含量最低(图4).

#### 3.4 中蒙边界地区锂地球化学空间分布

为了解中蒙边界地区汇水域沉积物中锂的空间分布,利用中国地质调查局发展研究中心研发的GeoExpl软件绘制锂地球化学图.在GeoExpl中对数据进行网格化处理,网格单元间距 D<sub>x</sub>、D<sub>y</sub>均为采样网格单元间距 10 km,计算模型采用指数加权模型,其中数据搜索模式采用圆域搜索,半径为采样网格单元间距的 2.5 倍即 25 km. 根据以上方法对数据进行网格化处理后以等值线图生成地球化学图.地球化学图的编制采用累积频率的分级方法,按累积频率 0%、0.5%、1.2%、2%、3%、4.5%、8%、15%、25%、40%、60%、75%、85%、92%、95.5%、97%、98%、98.8%、99.5%、100% 划分 19级(图 5).图中显示锂高值区主要集中在工作区的西部和东部的部分区域,工作区中段锂含量总体偏低.宏观

上锂高值区基本上与中一酸性岩大面积出露区相吻合(图6).

# 4 讨论

# 4.1 锂与成土母岩的关系

锂是典型的亲石元素,在许多硅酸盐矿物中均 有分布. 锂的离子半径较小(0.68Å),与镁(0.66Å)、 铝(0.51Å)、铁(0.74Å)等离子半径相近,因此在铁 镁硅酸盐或铝硅酸盐矿物中可以形成类质同象置 换. 岩浆作用过程中镁铁硅酸盐矿物的构造直接影 响锂在矿物中的分配,层状硅酸盐矿物尤其是黑云 母是锂的主要浓集体和携带体(刘英俊等, 1984), 同时锂在岩浆过程中表现为中度不相容元素  $(D_{\text{solid/melt}} \approx 0.2,$ 薛颖瑜等, 2021),随着挥发分增加锂 在矿物/熔体相间的分配系数降低,导致锂在残余 熔体中升高,倾向于岩浆晚期阶段富集,并在伟晶 作用中进一步浓集形成有工业价值的矿床(刘英俊 等, 1984; 许志琴等, 2019; 薛颖瑜等, 2021). 在表 生风化作用中,锂可以从矿物晶格中析出Li1+离子 与卤族元素化合成可溶盐随流水带走;另一方面, 锂也可以吸附在风化形成的黏土矿物表面,同时亦 可与黏土矿物中 Fe2+和 Mg2+等产生类质同象 (Kashin, 2019), 所以在风化的土壤中具有高的锂 含量,尤其是在含锂云母、锂辉石的花岗岩或伟晶 岩风化形成的土壤中(刘英俊等, 1984; 薛颖瑜等, 2021). 这些高锂含量的土壤被运移至临近的储藏 构造内(如封闭的盆地)则有可能形成大型的卤水 型锂矿床(薛颖瑜等, 2021). 汇水域沉积物中锂含 量主要受地质背景、成土母岩的控制(Liu et al., 2020).表3列举了大陆地壳和中国不同岩性锂含量 数据. 大陆地壳锂含量在13×10<sup>-6</sup>~20×10<sup>-6</sup>之间, 中蒙边界地区汇水域沉积物锂含量明显高于大陆 地壳锂含量.岩浆岩中酸性岩锂含量最高,超基性 岩锂含量最低;沉积岩中泥(页)岩中锂含量最高,

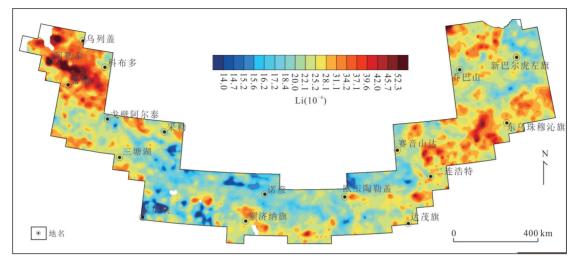


图 5 中蒙边界地区汇水域沉积物锂地球化学图

Fig. 5 Lithium geochemical map of catchment sediments collected from the China-Mongolia boundary

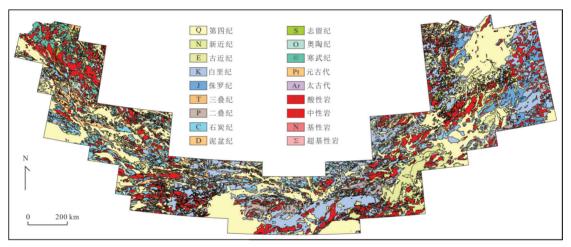


图 6 中蒙边界地区地质图(据李俊建等, 2021 修改)

Fig. 6 Geological map of the China-Mongolia boundary(modified after Li et al., 2021)

碳酸盐岩中锂含量最低;这可能导致了锂容易形成花岗伟晶岩型和泥质沉积型锂矿.中蒙边界西段阿尔泰山区,是重要的稀有金属、宝石和工业白云母成矿区,其构造位置处于西伯利亚板块阿尔泰陆源活动带内,受阿尔泰早古生界深成岩浆弧和卡尔巴一锡伯渡深成岩浆及震旦纪一早古生界变质岩控制,发育大量的花岗岩及伟晶岩,中国境内已发现伟晶岩脉10万余条(Li et al., 2015),这些高锂的花岗岩和伟晶岩造成了该区汇水域沉积物中锂含量的浓集.

为进一步解释源岩(成土母岩)和沉积物中锂含量的继承关系,收集了中国地球化学基准计划中岩石锂地球化学数据:锂含量从酸性岩( $26.35 \times 10^{-6}$ )到中性岩( $22.32 \times 10^{-6}$ )、基性岩( $21.03 \times 10^{-6}$ )、超基性岩( $12.79 \times 10^{-6}$ )由高到低依次降低;

沉积岩中泥质岩类锂含量最高,如:泥质岩(55.95×10<sup>-6</sup>)、钙质泥质岩(49.50×10<sup>-6</sup>)、粉砂质泥质岩(48.98×10<sup>-6</sup>)、泥灰岩(46.59×10<sup>-6</sup>),这也暗示了泥质岩是锂矿的重要矿源层(王学求等,2020).同时,将岩石锂点位符号图叠加到中蒙边界汇水域沉积物锂地球化学图上(图7),可以看出岩石中锂含量较高的地区,沉积物也显示锂高值区,同时也是已知矿产出的地区,证实了沉积物与成土母岩锂含量有明显的继承关系,地质背景、成土母岩决定了汇水域沉积物中锂的分布.

#### 4.2 锂与构造单元的关系

区域浓集系数 RCC 不仅可以清楚地反映出元素分散与富集规律,表征其空间分布趋势,指出成矿有利地质体,还可以为确定区域主要成矿元素提供信息.中蒙边界地区不同构造单元内汇水域沉积

#### 表3 大陆地壳和岩石中锂含量(10-6)

Table 3 Lithium concentrations in continental crust and rocks  $(10^{-6})$ 

		锂含量	参考文献	
	大陆地壳	20	Taylor and McLenan(1985)	
	大陆地壳	13	Taylor and McLenan (1985)	
地壳	大陆地壳	18	Wedepohl(1995)	
	大陆地壳	16	Rudnick and Gao(2003)	
	中国东部大陆地壳	17	Yan and Chi(2005)	
	中国酸性岩	19	Yan and Chi(2005)	
	中国中性岩	13	Yan and Chi(2005)	
	中国基性岩	11	Yan and Chi(2005)	
	中国超基性岩	4	Yan and Chi(2005)	
	中国花岗岩	19	Yan and Chi(2005)	
	中国流纹岩	15	Yan and Chi(2005)	
	中国闪长岩	12.6	Yan and Chi(2005)	
	中国安山岩	14	Yan and Chi(2005)	
	中国辉长岩	10	Yan and Chi(2005)	
	中国辉绿岩	11	Yan and Chi(2005)	
出了	中国玄武岩	12	Yan and Chi(2005)	
岩石	中国砂岩	25	Yan and Chi(2005)	
	中国泥(页)岩	38	Yan and Chi(2005)	
	中国碳酸盐岩含泥灰岩和泥云岩	10.5	Yan and Chi(2005)	
	中国石灰岩	9.5	Yan and Chi(2005)	
	中国白云岩	8	Yan and Chi(2005)	
	中国硅质岩	11	Yan and Chi(2005)	
	中国板岩	35	Yan and Chi(2005)	
	中国千枚岩	33	Yan and Chi(2005)	
	中国片岩	28	Yan and Chi(2005)	
	中国片麻岩	14	Yan and Chi(2005)	
	中国大理岩	8.6	Yan and Chi(2005)	

表 4 Li 与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, MnO, Corg, TC, K<sub>2</sub>O, CaO, SiO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>O 相关性分析

Table 4 Correlation analysis (R) between Li and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, MnO, Corg, TC, K<sub>2</sub>O, CaO, SiO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>O

Li	$\mathrm{Al_2O_3}$	$Fe_2O_3$	MgO	MnO	Corg	TC	CaO	$K_2O$	$Na_2O$	$SiO_2$
R	0.282	0.208	0.334	0.244	0.253	0.302	0.149	0.079	-0.205	-0.366

物锂含量中位值与中蒙边界地区全区中位值之比RCC见表1,图8.阿尔泰构造带、阿尔泰南缘弧盆系锂含量最高,RCC值分别是1.38、1.26,表明该构造单元是锂元素的富集区.阿尔泰构造带位于中蒙边界两侧的阿尔泰山区,包括阿尔泰被动大陆边缘盆地、Huhei-Huurai结合带和Hovd-Ölgii结合带(Tomurtogoo et al., 2006;李俊建等, 2015);阿尔泰南缘弧盆系北东以红山嘴断裂和图尔根断裂为界,南西以哈巴河断裂和额尔齐斯断裂为界,呈北西一南东向展布,包括额尔齐斯构造带和采勒弧盆带,两者间以中蒙古构造线为界(Tomurtogoo et al.,

2006;李俊建等,2015);两构造单元同属于阿尔泰成矿省(李俊建等,2016),已发现十余万条花岗岩伟晶岩脉,阿尔泰多金属巨型成矿带的东段,进一步划分为北阿尔泰稀有、铜、铅、锌、钼、钨、银、铁、锑、汞、白云母、宝石成矿带和南阿尔泰铜、铅、锌、铁、金、稀有、白云母、宝石成矿带(王鸿祯等,2006;李俊建等,2016).不同构造单元的地质背景、构造岩浆活动等不尽相同,导致不同构造单元内汇水域沉积物具有不同的元素含量特征,具有显著差异的区域元素地球化学特征(刘汉粮等,2020).阿尔泰构造带、阿尔泰南缘弧盆系大规模的

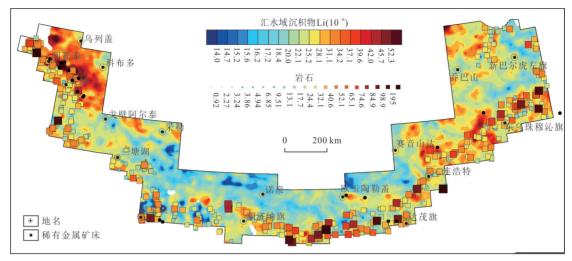


图 7 中蒙边界地区汇水域沉积物锂地球化学图叠加岩石锂点位符号图

Fig. 7 Lithium geochemical map of catchment sediments in the China-Mongolia boundary, superimposed on the Li scatter data symbol map of rocks

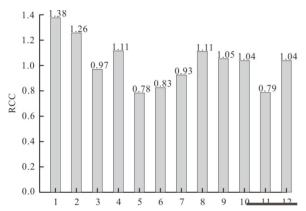


图 8 中蒙边界地区不同构造单元锂区域浓集系数(RCC) 对比图

Fig. 8 Comparison map of Lithium regional concentration coefficients for the different tectonic belts the across China-Mongolia boundary

1~12 构造单元名称同图1

华力西期花岗岩体出露,富含锂铍铌钽等稀有金属 及镧铈等稀土元素,为大型矿床的形成提供了充足 的巨量元素供给(谢学锦等,2002).

#### 4.3 锂与地理景观的关系

山地景观区锂含量最高,草原景观区、半干旱草原景观区次之,半荒漠景观区锂含量最低.可能的原因是富含石英的风成沙的存在导致了黏土含量的减少,而Li含量与黏土含量有很强的正相关性(Anderson et al., 1988; Liu et al., 2020). 表 4 列出了锂与主成分之间的相关系数,锂与代表黏土物质的元素[Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO、MnO、Corg(有机碳)、TC(全碳)等]成明显的正相关关系,与代表风成沙

成份的SiO。成明显的负相关关系.

大陆尺度下元素分布受岩石类型、地形、土壤 类型、气候、人类活动等多要素的影响(Reimann et al., 2012),上游岩石的自然风化释放的化学元素将 通过地表水的搬运,在汇水域开阔地带或低洼处沉 积下来,搬运过程中经过混匀过程代表了流域内化 学元素平均值,汇水域沉积物的元素含量主要由上 游地区的岩性单元所控制(Carranza, 2010). 此外, 地理景观又是汇水域沉积物元素含量变化的叠加 影响因素(Tian et al., 2018). 汇水域沉积物中锂含 量主要受地质背景、成土母岩的控制(Liu et al., 2020; 王学求等, 2020). 不同构造单位中, 阿尔泰构 造带锂和戈壁阿尔泰弧盆系锂含量差异最大(表1、 1.76倍);不同地理景观中,山地景观和半荒漠景观 锂含量差异最大(表2,1.53倍);构造单位导致锂的 变化范围更大.图9列举了同一构造单元内不同地 理景观区以及同一地理景观区不同构造单元的锂 含量变化情况,数据结构显示在同一构造单元内不 同景观区变化较小或者无变化,而同一景观区内不 同构造单元变化较大,也证实了锂的分布构造单 元、地质背景起主导作用,地理景观起叠加作用.

## 4.4 锂地球化学异常及远景区预测

为了更好的圈定各个构造单元内的地球化学 异常,根据各个构造单元中位值对数据进行子区中 位值衬值计算,以剔除各个构造单位背景衬值,降 低高、低背景对异常筛选的影响,制作中蒙边界地 区汇水域沉积物锂地球化学图(图10).以累积频率 85%值作为中蒙边界地区异常下限,同时满足异常

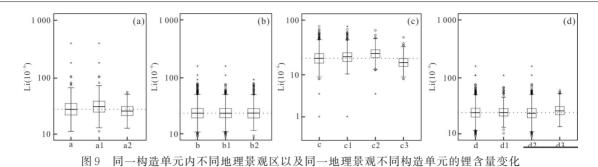


Fig. 9 Lithium contents in different geographical landscape in the same tectonic unit and different tectonic unit in the same geographical landscape

a. 阿尔泰南缘弧盆系构造单元, a1. 该单元内山地景观区, a2. 该单元内半荒漠景观区; b. Baruun Urt—Hutag Uul—东乌旗—阿尔山弧盆带构造单元, b1. 该单元内草原景观, b2. 该单元内半干旱草原景观; c. 半荒漠景观区, c1. 该单元内东西准噶尔弧盆系构造单元, c2. 该单元内准噶尔地块构造单元, c3. 该单元内戈壁阿尔泰弧盆系构造单元; d. 草原景观区, d1. 该单元内 Ereen Davaa—额尔古纳微陆块构造单元, d2. 该单元内 Baruun Urt—Hutag Uul—东乌旗—阿尔山弧盆带构造单元, d3. 该单元内 Sulinheer—满都拉—霍林郭勒弧盆系构造单元

范围内有连续异常点(3个及以上)或者具有地球化 学异常套合结构特征. 地球化学异常或地球化学化 学块体多层套合结构是指一系列由高到低多层套 合异常组成的区域地球化学分布模式,也就是说局 部异常被区域异常所包裹,而区域异常又依次被更 大规模的地球化学省(1000 km²)、地球化学巨省 (10 000 km²)等所包裹(谢学锦等, 2002). 按照这个 原则圈定出74个锂地球化学异常(编号1~74),其 中有23个异常(17、72、44、28、14、47、11、69、40、35、 31、8、59、73、60、68、5、22、25、1、20、18、62)面积大 于1000 km², 达地球化学省规模(谢学锦等, 2002; 王学求等, 2013),各个异常描述见附表 1. Doe (1991)将地球化学块体定义为具有某种或某些元 素高含量的大岩块,能够为矿床的形成提供物质 源. 谢学锦等(2002)将面积等于或大于地球化学省 范围的地球化学异常给定一定的厚度,称为地球化 学块体.而这些富含某些元素的巨大块体能为矿床 的形成提供必要的物质基础,地球化学块体(省)与 矿集区之间存在密切的对应关系(王学求等, 2007),可作为进一步勘查选区.

中蒙边界地区除了广泛分布有古生界和中新生界火山一沉积岩外,局部地段出露有中、新元古界变质岩,大多呈弧岛状或条带状产出,并且被古生界火山一沉积岩所挟持和包裹. 奥陶系地层分布范围有限,主要出现在中蒙边界西部和西北部,呈弧岛状或条带状产出,岩性组合有玄武岩、安山岩、凝灰岩、片岩、板岩、千枚岩和石英岩. 志留系地层主要分布在中部和中东部,岩性组合为安山岩、英安岩、流纹岩、板岩、硬砂岩和灰岩. 与奥陶系和志留系相比,泥盆系地层以分布范围广、出露厚度大、

层序较齐全和岩性组合复杂为特点,岩石类型主要 有英安岩、流纹岩、粉砂岩、泥岩、板岩和生物灰岩. 石炭系火山-沉积岩分布范围仅次于泥盆系地层, 代表性岩石有安山岩、英安岩和流纹岩以及板岩、 砂岩和灰岩.二叠系地层出露范围有限,主要出现 在中部和东部,岩石类型有英安岩、流纹岩、火山角 砾岩、砂岩、板岩、凝灰岩和生物碎屑灰岩. 受地壳 隆升和剥蚀作用影响,三叠系地层缺失,仅零星出 露. 侏罗系和白垩系地层以分布范围广、厚度变化 大和岩性组合复杂为特点,代表性岩石类型有各类 熔岩、凝灰岩、砂岩、粉砂岩和泥岩.同时,该区断裂 构造极为发育,一系列近东西向、北东向和北西向 深大断裂不仅是古板块碰撞、对接和俯冲带,也是 岩浆和含矿流体上升运移的通道. 不同规模和各种 类型侵入岩十分发育,除了局部地段见有镁铁质到 超镁铁质侵入岩株(墙或脉)外,大部地区产出的是 加里东期、海西期、印支期和燕山期花岗岩基、岩株 和岩脉群,主要岩石类型有二长岩、闪长岩、花岗闪 长岩、花岗岩、正长岩、碱性花岗岩、煌斑岩和碳酸 岩(聂凤军等, 2010). 正是这广泛发育的中酸性岩 体控制了锂空间分布中升高的部分(Liu et al, 2020). 如,中蒙边界西段的阿尔泰山内出露古生界 火山一沉积岩以及大量的海西期花岗岩类(图6), 岩石中显示出高的锂含量(图7),汇水域沉积物中 也显示出高的锂异常区(图10),既反映了高地质背 景和地球化学分布的关系,也反映了沉积物对成土 母岩的继承关系.同时锂异常区内(图10,72号异 常),中国一侧有大量矿床产出,可可托海、柯鲁木 特、库卡拉盖、阿斯喀尔特等.高背景岩石提供了成 矿元素的初始物源,成矿过程使元素进一步活化和

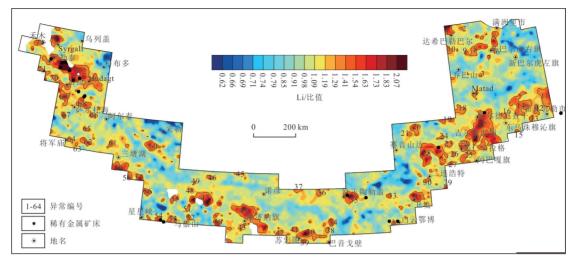


图 10 中蒙边界地区汇水域沉积物锂地球化学图(按构造单元中位值剔除衬值后)

Fig. 10 Lithiumgeochemical map of catchment sediments collected from the China-Mongolia boundary (after removing the contrast value according to the median value of the tectonic unit)

富集,矿床风化产生元素的点源分散形成叠加异常浓集中心,最后形成了具有多层套合的地球化学异常(王学求等,2013).根据异常的走向和相似的地质条件,在矿床深部及外围(尤其是蒙古一侧)有着广阔的找锂矿前景.中蒙边界东段大规模的火山岩分布区也值得进一步开展工作,尤其是蒙古的吉尔嘎郎图一额尔德尼查干一带,异常浓集中心高(图10,17号异常),海西期花岗岩发育.卤水型锂矿床大多数都是地质史上新近圈闭的盆地,盆地中含有因蒸发率高于降水量而产生的湖泊蒸发盐(Kesler et al.,2012),中蒙边界中部的干旱盆地,锂高值区具有寻找盐湖锂的可能,如内蒙古吉兰泰盐湖.

锂资源主要来自于盐湖卤水型和硬岩型锂矿, 沉积型等新类型锂矿比重很小(许志琴等,2018). 全球锂花岗伟晶岩的年龄表现为幕式分布,年龄峰 值由老到新分别为 2 638 Ma、1 809 Ma、962 Ma、 485 Ma、309 Ma、274 Ma和 97 Ma, 与全球伟晶岩、 造山带花岗岩以及碎屑锆石的年龄峰值一致,而且 与超大陆聚合的年龄也是对应的,表明硬岩型锂矿 床与板块构造具有紧密联系(Bradley, 2011). 中国 硬岩型锂矿多处于各种大地构造单元内部的褶皱 造山带,成因上与板块碰撞导致的构造岩浆活动有 关,大多数锂矿,特别是大型锂矿,形成于岩浆活动 中晚期热液蚀变体或伟晶岩脉中. 中蒙边界西段的 阿尔泰造山带内,伟晶岩的形成及锂铍铌钽等成矿 元素的富集是有规律的,与造山过程和热演化历史 是耦合的,基本上显示了在造山强烈阶段稀有金属 由于缺乏稳定的环境而得不到充分而有效的聚集,

直至造山之后的相对稳定阶段才有了相对稳定的环境和有利于岩浆成分结晶分异的时空条件,从而形成可可托海等超大型稀有金属矿床. 白垩纪一古近纪时期,北半球欧亚大陆中部地区中亚、蒙古、中国逐渐形成一个狭长的干旱气候带,为中蒙边界中段的干旱盆地形成卤水型锂矿床提供了气候条件(Keller, 2008). 形成卤水型锂矿一般需具备以下条件:干旱的气候;含盐湖或盐滩的封闭盆地;地层下陷;伴生的地热活动;含锂的岩石源区;具有足够的含水层,以寄存卤水;足够的时间浓缩(Munk et al., 2016). 卤水型锂矿床通常形成于造山带构造伸展、转换和造山作用期间(薛颖瑜等, 2021). 结合地质、构造情况,利用低密度地球化学填图方法寻找潜在的大型、超大型矿床是一条高效率、低成本的可行途径.

# 5 结论

在中蒙边界地区开展1:100万地球化学填图工作,覆盖了约1300000km²,获得了高质量锂地球化学数据和图件.本文初步探讨了汇水域沉积物中锂区域地球化学分布特征,结果表明:(1)中蒙边界地区汇水域沉积物锂元素中位值和平均值分别是22.50×10<sup>-6</sup>和24.46×10<sup>-6</sup>,明显高于大陆地壳锂含量;(2)阿尔泰构造带、阿尔泰南缘弧盆系锂含量最高,区域浓集系数分别是1.38、1.26,是锂的富集构造成矿带优势区;(3)根据85%累积频率,圈定出74个锂地球化学异常区,其中23个锂地球化学异常达

到地球化学省规模,根据锂地球化学异常分布模式 为该区寻找锂等稀有金属矿床提供了重要选区; (4)锂的区域地球化学分布主要受地质背景控制, 地理景观、黏土含量、矿床分布等也制约着锂的分 布.利用低密度地球化学填图方法寻找潜在的大 型、超大型矿床是一条高效率、低成本的可行途径.

致谢:感谢所有参与样品采集和样品分析测试 的工作者!感谢审稿人和责任编辑提出的宝贵修 改意见!

附件见本刊官网(www.earth-sceience.net).

#### References

- Anderson, M. A., Bertsch, P. M., Miller, W. P., 1988. The Distribution of Lithium in Selected Soils and Surface Waters of the Southeastern U.S.A.. *Applied Geochemistry*, 3(2): 205—212. https://doi.org/10.1016/0883-2927 (88)90008-x
- Bradley, D. C., 2011. Secular Trends in the Geologic Record and the Supercontinent Cycle. *Earth-Science Reviews*, 108 (1/2): 16—33. https://doi.org/10.1016/j.earscirev. 2011. 05. 003
- Bu, J.J., He, W.H., Zhang, K.X., et al., 2020. Evolution of the Paleo-Asian Ocean: Evidences from Paleontology and Stratigraphy. *Earth Science*, 45(3): 711-727 (in Chinese with English abstract).
- Carranza, E. J. M., 2010. Catchment Basin Modelling of Stream Sediment Anomalies Revisited: Incorporation of EDA and Fractal Analysis. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 10(4): 365—381. https://doi.org/10.1144/1467-7873/09-224
- Chen, C., Lee, C. T. A., Tang, M., et al., 2020. Lithium Systematics in Global Arc Magmas and the Importance of Crustal Thickening for Lithium Enrichment. *Nature Communications*, 11(1): 5313. https://doi.org/10.1038/s41467-020-19106-z
- Doe, B. R., 1991. Source Rocks and the Genesis of Metallic Mineral Deposits. *Global Tectonics and Metallogeny*, 4(1/2): 13-20. https://doi.org/10.1127/gtm/4/1991/13
- Kashin, V. K., 2019. Lithium in Soils and Plants of Western Transbaikalia. Eurasian Soil Science, 52(4): 359—369. https://doi.org/10.1134/s1064229319040094
- Kempe, U., Möckel, R., Graupner, T., et al., 2015. The Genesis of Zr-Nb-REE Mineralisation at Khalzan Buregte (Western Mongolia) Reconsidered. *Ore Geology Re*views, 64: 602-625.https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.05.003
- Keller, G., 2008. Cretaceous Climate, Volcanism, Impacts,

- and Biotic Effects. *Cretaceous Research*, 29(5/6): 754—771. https://doi.org/10.1016/j.cretres.2008.05.030
- Kesler, S. E., Gruber, P. W., Medina, P. A., et al., 2012.
  Global Lithium Resources: Relative Importance of Pegmatite, Brine and other Deposits. *Ore Geology Reviews*, 48(B10): 55-69. https://doi.org/10.1016/j. oregeorev.2012.05.006
- Li, J.J., Tang, W.L., Fu, C., et al., 2016. The Division of Metallogenic Belts in Sino-Mongolian Border Area. Geological Bulletin of China, 35(4): 461—487 (in Chinese with English abstract).
- Li, J.J., Zhang, F., Ren J.P., et al., 2015. Tectonic Units in China Mongolia Border Area and Their Fundamental Characteristics. *Geological Bulletin of China*, 34(4): 636—662 (in Chinese with English abstract).
- Li, J.J., Orolmaa., D., 2021. Geological Map of the China-Mongolian Boundary Areas.: Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Li, J. K., Zou, T. R., Liu, X. F., et al., 2015. The Metallogenetic Regularities of Lithium Deposits in China. Acta Geologica Sinica-English Edition, 89(2): 652-670. https://doi.org/10.1111/1755-6724.12453
- Liu, H.L., Nie, L.S., Wang, X.Q., et al., 2018. Regional Geochemistry of Lithium in the Altay Area across the Boundary of China and Mongolia. *Geoscience*, 32(3): 493—499 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H.L., Nie, L.S., Shojin, D., et al., 2020. Background Values of 69 Elements in Catchment Sediments of the China: Mongolia Boundary Region. Earth Science Frontiers, 27(3): 202-221 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H. L., Wang, X. Q., Zhang, B. M., et al., 2020. Concentration and Distribution of Lithium in Catchment Sediments of China: Conclusions from the China Geochemical Baselines Project. *Journal of Geochemical Exploration*, 215(4): 106540. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2020.106540
- Liu, Y.J., Cao, L.M., Li, Z.L., et al., 1984. Geochemistry of Elements. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Mao, J.W., Yang, Z.X., Xie, G.Q., et al., 2019. Critical Minerals: International Trends and Thinking. *Mineral Deposits*, 38(4): 689-698 (in Chinese with English abstract).
- Ma, Z., Li, J.W., 2018. Analysis of China's Lithium Resources Supply System: Status, Issues and Suggestions. *China Mining Magazine*, 27(10): 1—7 (in Chinese with English abstract).
- Munk, L., Hynek, S., Bradley, D., et al., 2016. Rare Earth and Critical Elements in Ore Deposits. In: Philip, L.V.,

- Murray, W.H., Lithium, B., eds., A Global Perspective. *Society of Economic Geologists*, 18: 339—365.
- Nie, F.J., Jiang, S.H., Bai, D.M., et al., 2010. Types and Temporal Spatial Distribution of Metallic Deposits in Southern Mongolia and Its Neighboring Areas. *Acta Geoscientica Sinica*, 31(3): 267—288 (in Chinese with English abstract).
- Reimann, C., de Caritat, P., 2012. New Soil Composition Data for Europe and Australia: Demonstrating Comparability, Identifying Continental Scale Processes and Learning Lessons for Global Geochemical Mapping. Science of The Total Environment, 416(12): 239—252. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.11.019
- Rudnick, R.L., Gao, S., 2003. The Composition of the Continental Crust. In: Holland, H.D., Condie, K., eds., Treatise on Geochemistry. Elsevier Pergamom, Amsterdam, 1—64.
- Taylor, S.R., McLenan, S.M., 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Blackwell Scientific Publications, London, 312.
- Tian, M., Wang, X. Q., Nie, L. S., et al., 2018. Recognition of Geochemical Anomalies Based on Geographically Weighted Regression: A Case Study Across the Boundary Areas of China and Mongolia. *Journal of Geochemical Exploration*, 190(4): 381—389. https://doi.org/10.1016/ i.gexplo.2018.04.003
- Tomurtogoo, O., 2006. Tectonic Framework of Mongolia. In:
  Tomurhuu, D., Natal' in, B., Ya, A., eds., 2006.
  Structural and Tectonic Correlation across the Central
  Asian Orogenic Collage: Implications for Continental
  Growth and Intracontinental Deformation. Mongolian
  University of Science and Tectonology Press, Ulaanbaatar, 18—20.
- Wang, D.H., 2019. Study on Critical Mineral Resources: Significance of Research, Determination of Types, Attributes of Resources, Progress of Prospecting, Problems of Utilization, and Direction of Exploitation. *Acta Geologica Sinica*, 93(6): 1189—1209 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H.Z., He, G.Q., Zhang, S.H., 2006. The Geology of China and Mongolia. *Earth Science Frontiers*, 13(6): 1—13 (in Chinese with English abstract).
- Wang, T., Huang, H., Song, P., et al., 2020. Studies of Crustal Growth and Deep Lithospheric Architecture and New Issues: Exemplified by the Central Asian Orogenic Belt (Northern Xinjiang). *Earth Science*, 45(7): 2326—2344 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. Q., Chi, Q. H., Liu, H. Y., et al., 2007. Wide-

- Spaced Sampling for Delineation of Geochemical Provinces in Desert Terrains, Northwestern China. *Geochemistry: Exploration*, *Environment*, *Analysis*, 7(2): 153—161. https://doi.org/10.1144/1467-7873/07-124
- Wang, X.Q., Liu, H.L., Wang, W., et al., 2020. Geochemical Abundance and Spatial Distribution of Lithium in China: Implications for Potential Prospects. Acta Geoscientica Sinica, 41(6): 797-806 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X.Q., Shen, W.J., Zhang, B.M., et al., 2007. Relationship of Geochemical Blocks and Ore Districts: Examples from Eastern Tianshan Metallogenic Belt, Xinjiang, China. *Earth Science Frontiers*, 14(5): 116—123 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X.Q., Xu, S.F., Chi, Q.H., et al., 2013. Gold Geochemical Provinces in China: A Micro- and Nano-Scale Formation Mechanism. *Acta Geologica Sinca*, 87(1), 1—8 (in Chinese with English abstract).
- Wedepohl, K. H., 1995. The Composition of the Continental Crust. *Mineralogical Magazine*, 58A(2): 959—960. https://doi.org/10.1180/minmag.1994.58a.2.234
- Wen, H.J., Luo, C.G., Du, S.J., et al., 2020. Carbonate-Hosted Clay-Type Lithium Deposit and Its Prospecting Significance. *Chinese Science Bulletin*, 65(1): 53—59 (in Chinese with English abstract).
- Xie, X.J, Cheng, Z.Z., Zhang, L.S., 2008. Geochemical Atlas of Southern China. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Xie, X.J., Liu, D.W., Xiang, Y.C., et al., 2002. Geochemical Blocks: Development of Concept and Methodology. Geology in China, 29(3): 225—233 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Y.F., Wang, X.F., Hu, C.Y., et al., 2018. Prospecting Potential of Rare Metal and 1:50 000 Stream Sediment Geochemical Characteristics in Jiajika Area in Sichuan Province. *Metal Mine*, 47(2): 121-130 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z.Q., Wang, R.C., Zhao, Z.B., et al., 2018. On the Structural Backgrounds of the Large-Scale "Hard-Rock Type" Lithium Ore Belts in China. *Acta Geologica Sinica*, 92(6): 1091—1106 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z.Q., Fu, X.F., Zhao, Z.B., et al., 2019.Discussion on Relationships of Gneiss Dome and Metallogenic Regularity of Pegmatite-Type Lithium Deposits. *Earth Science*, 2019, 44(5): 1452—1463 (in Chinese with English abstract).
- Xue, Y.Y., Liu, H.Y., Sun, W.D., 2021. The Geochemical Properties and Enrichment Mechanism of Lithium. Geotectonica et Metallogenia, 45(6): 1202-1215 (in Chinese with English abstract).

- Yan, M.C., Chi, Q.H., 2005. The Chemical Composition of the Continental Crust and Rocks in the Eastern Part of China. Science Press, Beijing, 171 (in Chinese).
- Zhai, M.G., Wu, F.Y., Hu, R.,Z., et al., 2019. Critical Metal Mineral Resources: Current Research Status and Scientific Issues. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, (2): 106—111 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Bai, J.F., Wang, Y., 2012. Analytical Scheme and Quality Monitoring System for China Geochemical Baselines. *Earth Science Frontiers*, 19(3): 33—42 (in Chinese with English abstract).
- Zou, T.R., Li, Q.C., 2006. Rare and Rare Earth Metallic Deposits in Xinjiang, China. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).

#### 附中文参考文献

- 卜建军,何卫红,张克信,等,2020. 古亚洲洋的演化:来自古生物地层学方面的证据. 地球科学,45(3):711-727.
- 李俊建, 唐文龙, 付超, 等, 2016. 中蒙边界地区成矿区带划分. 地质通报, 35(4): 461-487.
- 李俊建, 张锋, 任军平, 等, 2015. 中蒙边界地区构造单元划分. 地质通报, 34(4): 636-662.
- 李俊建,Orolmaa, D., 2021. 中蒙边界地区地质图. 北京: 地质出版社.
- 刘汉粮, 聂兰仕, 王学求, 等, 2018. 中蒙跨境阿尔泰构造带稀有元素锂区域地球化学分布. 现代地质, 32(3): 493-499.
- 刘汉粮, 聂兰仕, Davaa, Shojin, 等, 2020. 中蒙边界地区汇水域沉积物69种元素的背景值. 地学前缘, 27(3): 202-221.
- 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 等, 1984. 元素地球化学. 北京: 科学出版社.
- 毛景文, 杨宗喜, 谢桂青, 等, 2019. 关键矿产——国际动向与 思考. 矿床地质, 38(4): 689-698.
- 马哲, 李建武, 2018. 中国锂资源供应体系研究: 现状、问题与建议. 中国矿业, 27(10): 1-7.
- 聂凤军, 江思宏, 白大明, 等, 2010. 蒙古国南部及邻区金属矿 床类型及其时空分布特征. 地球学报, 31(3): 267-288.

- 王登红,2019. 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. 地质学报,93(6): 1189-1209.
- 王鸿祯,何国琦,张世红,2006.中国与蒙古之地质.地学前缘, 13(6):1-13.
- 王涛, 黄河, 宋鹏, 等, 2020. 地壳生长及深部物质架构研究与问题:以中亚造山带(北疆地区)为例. 地球科学, 45(7): 2326-2344.
- 王学求, 刘汉粮, 王玮, 等, 2020. 中国锂矿地球化学背景与空间分布: 远景区预测. 地球学报, 41(6): 797-806.
- 王学求,申武军,张必敏,等,2007. 地球化学块体与大型矿集区的关系一以东天山为例. 地学前缘,14(5):116-123.
- 王学求,徐善法,迟清华,等,2013.中国金的地球化学省及其成因的微观解释.地质学报,87(1):1-8.
- 温汉捷, 罗重光, 杜胜江, 等, 2020. 碳酸盐黏土型锂资源的发现及意义. 科学通报, 65(1): 53-59.
- 谢学锦,程志中,张立生,2008.中国西南地区76种元素地球化学图集.北京:地质出版社.
- 谢学锦, 刘大文, 向运川, 等, 2002. 地球化学块体——概念和 方法学的发展. 中国地质, 29(3): 225-233.
- 徐云峰, 王显峰, 胡朝云, 等, 2018. 四川甲基卡地区 1:5万水 系沉积物地球化学特征及稀有金属找矿远景. 金属矿山, 47(2): 121-130.
- 许志琴, 王汝成, 赵中宝, 等, 2018. 试论中国大陆"硬岩型"大型锂矿带的构造背景. 地质学报, 92(6): 1091-1106.
- 许志琴, 付小芳, 赵中宝, 等, 2019. 片麻岩穹窿与伟晶岩型锂 矿的成矿规律探讨. 地球科学, 44(5): 1452-1463.
- 薛颖瑜, 刘海洋, 孙卫东, 2021. 锂的地球化学性质与富集机理. 大地构造与成矿学, 45(6): 1202-1215.
- 翟明国, 吴福元, 胡瑞忠, 等, 2019. 战略性关键金属矿产资源: 现状与问题. 中国科学基金, (2): 106-111.
- 张勤,白金峰,王烨,2012. 地壳全元素配套分析方案及分析质量监控系统. 地学前缘,19(3):33-42.
- 邹天人,李庆昌,2006.中国新疆稀有及稀土金属矿床.北京: 地质出版社.