

于扬, 王伟, 王登红, 等. 水化学找矿法及其在大型资源基地绿色调查中的应用——以川西九龙地区地表水化学找矿为例[J]. 岩矿测试, 2021, 40(2): 227 - 238.

YU Yang, WANG Wei, WANG Deng-hong, et al. Hydrochemical Prospecting and Its Application in Green Investigation for the Large Mineral Resource Base: A Case Study from Jiulong Area in Western Sichuan Province[J]. Rock and Mineral Analysis, 2021, 40(2): 227 - 238.

【DOI: 10.15898/j.cnki.11-2131/td.202004080040】

## 水化学找矿法及其在大型资源基地绿色调查中的应用 ——以川西九龙地区地表水化学找矿为例

于扬<sup>1</sup>, 王伟<sup>2</sup>, 王登红<sup>1</sup>, 高娟琴<sup>1,3</sup>, 刘善宝<sup>1\*</sup>, 袁茵平<sup>2</sup>, 于泓<sup>1,3</sup>, 张塞<sup>1,3</sup>

(1. 自然资源部成矿作用与资源评价国家重点实验室, 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;

2. 四川省地质矿产勘查开发局地质矿产科学研究所, 四川 成都 610036;

3. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

**摘要:**“战略性新兴产业矿产调查”工程积极倡导绿色调查新理论新方法在大型资源基地勘查开发中的应用,绿色调查是川西大型锂铍资源基地综合调查评价工作的主要内容之一。本文梳理了水化学找矿法的发展历程与现状,提出了水化学找矿法应用于矿产勘查及环境调查评价中存在的主要问题。在川西九龙湿润半湿润高寒山区,尝试应用水化学找矿法对地表水中的化学异常进行研究,初步阐明应进一步详细调查的锂远景区。实验方法是在野外现场运用多参数测试仪测定地表水的温度( $T$ )、pH值、电导率(EC)、溶解氧(DO)、总溶解性固体(TDS)五个参数,结合电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定锂硼铷铈镍钨钽等微量元素,进而分析水体元素含量特征与矿化的关系。结果表明:研究区水体中的锂硼铷铈镍含量明显高于背景值,在采集的60件样品中,17%的样品以上微量元素含量超过异常下限( $7.76\mu\text{g/L}$ ),其中流经乌拉溪岩体东南角(石头沟)的水体锂含量达到最大值 $20.1\mu\text{g/L}$ ,是研究区水体锂含量背景值的4.5倍,是异常下限的2.6倍,与矿化的关系密切,其明显的变化规律可作为水化学找锂的找矿标志。研究区内乌拉溪岩体东南部及洛莫岩体周边水体水化学异常与矿化关系明显,可作为下一步详细调查的远景区。研究认为,在当前环境保护战略地位不断提升、绿色勘查力度持续加大、资源调查与环境保护并重的现实条件下,水化学方法对前期找矿部署有指导意义。研究成果为解决川西高原生态脆弱区找矿部署与环境保护等实际问题提供了参考依据。

**关键词:** 水化学找矿; 锂; 电感耦合等离子体质谱法; 大型资源基地; 绿色调查

**要点:**

- (1) 评述了水化学找矿法的进展及其在矿产勘查及环境调查评价中存在的问题。
- (2) 通过川西九龙地区水化学调查实践,建立了找矿标志,提出了进一步调查远景区。
- (3) 揭示了水化学方法对前期找矿部署的指导性重要意义。

**中图分类号:** X142      **文献标识码:** A

收稿日期: 2020-04-08; 修回日期: 2020-07-25; 接受日期: 2020-11-11

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“战略性新兴产业矿产调查工程”之“松潘—甘孜成锂带锂铍多金属大型资源基地综合调查评价”(DD20190173)

第一作者: 于扬, 博士, 副研究员, 地球化学专业。E-mail: yuyang\_cags@sina.com。

通信作者: 刘善宝, 教授级高级工程师, 主要从事成矿规律、成矿预测和地质勘查及评价工作。

E-mail: liubaoshan7002@163.com。

水化学找矿法,以下简称“水化学法”,是众多地球化学找矿方法中的一种,属绿色调查手段之一。在可持续发展战略和生态文明建设被确定为国家战略的背景下,水化学找矿法作为一种绿色调查方法,对于解决生态脆弱区找矿部署与环境保护瓶颈等实际问题具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。

中国古籍记录说明古人早已有矿的存在与水体特征相关的意识,先秦古籍《山海经》之《西次二经》中提及“皇水出焉,西流注于赤水,其中多丹粟”,是辰砂(汞的硫化物矿物)存于水中的最早记载。《西次三经》中也有“丹水出焉,西流注于稷泽,其中多白玉。是有玉膏,其原沸沸汤汤”,是石油导致水体异常的最早记载。中国水化学找矿的基本思想古已有之,但真正开始将水化学法应用于找矿实践是在20世纪50年代,用于镍矿找矿尝试。国外的水化学找矿实践开展则相对较早,在20世纪30年代前苏联应用水化学方法进行了金矿勘查的试验。

本文梳理了国内外水化学找矿法的发展历程与现状,总结了目前水化学找矿法在中国矿产勘查及环境调查评价中存在的主要问题。通过对川西九龙湿润半湿润高寒山区水化学异常性质的客观解释,进而追索为其提供补给的矿体(或具有找矿潜力的地质体),初步阐明应进一步详细调查的锂远景区。九龙地区具有形成大型资源基地的潜力<sup>[3]</sup>,本文在该地区尝试运用水化学找矿法的同时,调查了环境基底,为助力大型资源基地高质量开发提供更为精准、有力的支撑。

## 1 国际上水化学找矿的发展历程与现状

国际上水化学找矿的发展历程可大致分为方法探索、普遍应用、综合研究三个阶段。

方法探索阶段。20世纪30年代开始,前苏联开始水化学找金的试验研究,到20世纪40年代,前苏联和西方的勘查地球化学家认为可将水化学普查和水系沉积物普查结合作为解决小比例尺工作任务的方法<sup>[4]</sup>。20世纪50年代,水文地球化学开始成为一门独立的学科,研究成果丰富<sup>[5]</sup>。中国运用水化学法找金属矿始于运用水化学法普查镍矿(如找到陕西的煎茶岭镍矿),并通过后续普查证实水化学法可以用于寻找稀有金属矿床<sup>[6]</sup>。

普遍应用阶段。20世纪60年代,中国的水化学找矿应用达到第一个活跃期,水化学找铅矿<sup>[7]</sup>、铜铅锌多金属矿、铜(伴生钼)矿<sup>[8]</sup>、铅、锌、镍、锑、钒、锡、锑、磷矿<sup>[9]</sup>,均取得了很好的找矿效果,同期

也开始应用“放射性水化学找矿方法”寻找铀矿床<sup>[10]</sup>。1965年前苏联的《金属矿床地球化学普查指南》出版,水化学找矿法走向规范化。国外科研和生产人员通过运用水化学法,在西伯利亚、中亚、哈萨克斯坦、高加索等地区发现了大量的找矿远景区,经详查发现了一些金属矿床。从20世纪70年代初开始,中国越来越重视水化学找矿工作,将稀网度水化学普查应用在川藏三江地区水化学找铀工作中,取得较好效果<sup>[11]</sup>;美国、加拿大等国也将水化学测量作为铀矿普查最重要的方法之一。在70年代中后期,中国的水化学找矿工作处于低谷,只有少数从事油气领域的研究人员继续采用此方法。1975年,联合国教育、科学及文化组织(UNESCO)地球科学部委托捷克斯洛伐克地质调查所每两年在捷克举办一期地球化学找矿方法训练班,其中水化学方法作为短期训练班内容之一,1985年中国第一次由武汉地质学院地球化学系派人参加第六期训练班<sup>[12]</sup>。20世纪80年代到90年代初期,中国的水化学找矿工作进入第二个活跃期,主要研究成果集中在水化学找铀<sup>[13-16]</sup>、水化学找金<sup>[17-20]</sup>两个方面,并形成了一系列方法标准<sup>[21]</sup>,大量工作证明水化学法是寻找和预测深部盲矿较有效的方法<sup>[22-24]</sup>。

综合研究阶段。中国自20世纪90年代中后期以来,大部分矿种的水化学找矿工作基本停滞,水化学法开始更多地应用到农业、环境领域<sup>[25-28]</sup>。中国以找矿为目的的水化学调查基本集中在放射性水化学找铀<sup>[29-33]</sup>。而国外应用水化学方法寻找多金属矿的研究工作一直在进行,以美国、加拿大、澳大利亚、芬兰等国研究成果较多。如美国学者运用水化学法结合其他调查方法探寻辉铋矿<sup>[34]</sup>,水化学寻找金矿、铜铅锌多金属矿<sup>[35]</sup>、矽卡岩型铁铜矿<sup>[36]</sup>。加拿大学者运用水化学方法探寻金矿<sup>[37-38]</sup>,对大量温泉水地球化学数据进行分析,预测进一步工作的远景区,发现明显的元素异常组合包括锂和铍<sup>[39]</sup>。澳大利亚学者运用水化学方法探寻铜矿<sup>[40]</sup>。芬兰学者运用水化学方法探寻铜矿<sup>[41]</sup>,通过雪水探寻铜矿<sup>[42]</sup>,这些研究均取得很好的效果。

## 2 中国水化学找矿研究存在的主要问题

近年来中国资源勘查与环境保护科技创新能力明显增强,绿色勘查工作取得巨大的进展,但仍存在一些问题。

(1)水化学法作为一种绿色调查的手段方法,在资源勘查和环境保护两个领域的技术应用结合得

不够紧密,绿色调查战略布局不够清晰。2020年2月28日,生态环境部发布了中国首个生态环境基准《淡水水生生物水质基准——镉》。该基准以环境暴露、毒性效应和风险评估为核心,揭示环境因子影响人群健康和生态安全客观规律。由于自然地理和生态系统构成等方面的差异,这种客观规律呈现一定的地域特殊性。特别是在对国家能源战略发展有特殊作用的大型资源基地综合调查工作,更应重视水化学找矿法这一绿色调查工作手段的应用,在实现地质调查工作目标任务的同时,摸清环境家底,为助力大型资源基地高质量开发提供更为精准、有力的支撑保障。

(2)水化学法的跨学科应用缺乏长期规划,研究力量分散,成果产出零碎,科研任务与企业供需结合不紧密。大量实践已证明,水化学法在环境领域、资源绿色调查领域具有很好的应用前景,特别是针对海拔4000m以上的高寒山区。水化学调查法获取的微量元素数据、环境评价参数以及环境质量现状,可以为相关企业的生态环境科技需求提供服务。需要加强供需对接和交流合作,加快科技成果转化,使水化学调查成果为企业治污提供依据,不断提高绿色调查与生态环境科技服务水平。

### 3 水化学法在九龙地区的应用效果分析

本项目组依托“战略性新兴产业矿产调查”工程“松潘—甘孜成锂带锂铍多金属大型资源基地综合调查评价”项目在大型资源基地的找矿部署与勘查开发工作中,树立生态优先绿色发展的理念,因地制宜,于2019年6月在川西九龙地区尝试应用水化学找矿法,取得了一些进展。

#### 3.1 研究区概况

研究区位于川西稀有金属成矿带,属于巴颜喀拉—雅江Li—Be—Au—Cu—Zn—水晶成矿带康定—沙德—九龙子杠坪Be—Li—Pb—Zn—Cu—W—Sn—Au成矿远景区南段,具有较好的找矿潜力<sup>[3]</sup>。区内出露地层以三叠系为主,部分为二叠系及第四系。区内岩脉以酸性、中酸性为主,偶见中性、基性岩脉,岩性以二云母花岗岩为主。区内岩脉发育,主要为伟晶岩脉,其次为花岗岩脉和石英脉,以伟晶岩脉分布最为广泛,露头不易风化。研究区属于湿润半湿润高寒山区,地形切割强烈,水系发育。以往研究表明,在水系发育、切割剧烈的山区以及险峻的高山区,分散流找矿法因其异常强度高、分散距离远,是最主要的方法<sup>[9]</sup>。因此,本次工作的研究区具有

水化学找矿的有利地质条件。

#### 3.2 样品采集

本次工作从洛莫岩体开始,在具含矿特性的岩石接触带及重要地质体附近,以地下水补给的地表溪流为研究对象,沿河谷及支流系统布置采样点60处,间距1~2km,部分存在安全隐患、难以到达的点位根据野外实际情况放稀取样间隔(图1)。

样品类型分为原水(用于测定主要阴阳离子)和过滤酸化水(用于测定微量元素)两种。采用有机玻璃深水采样器采集原水样,每个点取样前用待采样品将采集器润洗三次。原水样品用0.45 $\mu\text{m}$ 孔径聚醚砜滤膜过滤后收集30mL过滤水于30mL广口瓶中,加0.3mL 50%的硝酸作为保护剂,用PM-996 Parafilm 封口膜密封广口瓶,此为过滤酸化水。

#### 3.3 样品分析方法

在野外现场运用WTW3430多参数测试仪测定水样的温度、pH值、EC、DO、TDS五个参数并记录,用于监测水体基本理化指标。原水样品的主要阳离子 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 采用原子吸收光谱法测定, $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 采用碱滴定法测定, $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 采用离子色谱法测定。过滤酸化水采用ICP-MS<sup>[43]</sup>测定锂、硼、铷、锶、镍、钨等微量元素含量,方法依据国家标准GB/T 14506.30—2010第30部分“44个元素量测定”,各微量元素的检出限均为0.01 $\mu\text{g/L}$ 。

对用于微量元素测试的样品进行过滤酸化是分析过程中重要的步骤,水样经过滤后其中的不可溶物质可以得到有效分离,不会对溶解的微量元素含量测试造成干扰。加硝酸酸化主要是为了防止水样品在运输期内发生变质,50%的硝酸相对于过滤水样品的滴加量(1:100)可有效防止变质且对测试结果不会造成影响。但值得注意的是,50%硝酸的滴加量要严加控制,硝酸过量导致水样整体体积增加,影响微量元素测试结果,且过滤酸化水由于额外加入了硝酸,不可用于测试硝酸根等主要离子含量。

#### 3.4 水化学特征及找矿效果

水化学异常不一定都与矿床有关<sup>[44]</sup>。地表水的化学成分取决于其在地球上循环所经的途径,而岩石是决定河流天然溶质的最基本的因素<sup>[45]</sup>。研究在矿体影响下水体化学成分变化的规律,是解释水化学异常的前提。这些规律表现在某些金属元素含量的增高和主要离子、TDS、pH值等环境特征因子的变化。根据元素分析结果来看,本区水样水化学特征可概括为以下几点。

表1 水样中部分微量元素含量特征

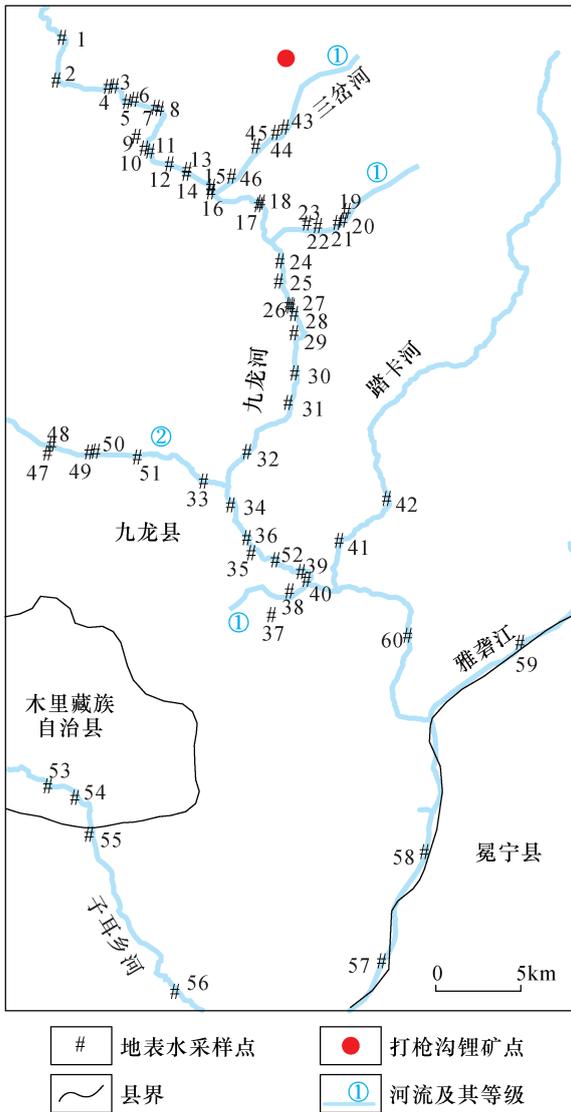
Table 1 Characteristics of trace elements contents in water samples

分析项目	Li	Ni	Sr	W	V	B
最大值( $\mu\text{g/L}$ )	20.1	5.40	505	5.53	6.80	35.0
最小值( $\mu\text{g/L}$ )	0	0.80	31.0	0.05	0.10	1.0
平均值( $\mu\text{g/L}$ )	2.90	1.90	79.0	0.68	1.00	6.0
标准离差	4.00	0.70	78.0	1.09	1.10	10.0
富集系数	0.19	0.08	0.43	1.07	0.02	0.53
变异系数	0.90	0.38	0.80	1.05	0.89	0.89
背景值( $\mu\text{g/L}$ )	4.50	2.0	97.0	1.04	1.30	11.0
异常下限( $\mu\text{g/L}$ )	7.76	2.80	141	1.47	1.77	20.8
数据个数(个)	60	60	60	60	60	60

水体平均值( $8.66\mu\text{g/L}$ )的2倍,是世界河流平均值( $1.84\mu\text{g/L}$ )的11倍。流经洛莫岩体2号点水体的锂含量( $15.2\mu\text{g/L}$ )和4号点( $11.8\mu\text{g/L}$ ),分别是异常下限的2倍和1.5倍。流经二叠系、三叠系地层的子耳乡河53、54号点水体锂含量分别为 $9.75\mu\text{g/L}$ 和 $9.61\mu\text{g/L}$ ,乃渠乡14号点水体锂含量为 $9.67\mu\text{g/L}$ ,超过异常下限1.2倍,超过甲基卡锂矿区地表水体平均值。流经某花岗岩体的雅砻江57号点(子耳乡河汇入后)、雅砻江58号点(57号点下游)水体锂含量分别为 $8.44\mu\text{g/L}$ 和 $8.37\mu\text{g/L}$ ,超过异常下限1.0倍,是世界水体平均值的4.5倍。

锂是亲石元素,活动性高。原生矿石矿物为锂辉石(稳定)、磷铝锂石(稳定)、锂云母(中等稳定)。在风化作用下,原岩发生分解,一部分锂从矿物晶格中析出,与卤族元素化合成可溶盐(如氯化锂)在水中迁移。相关分析结果显示,水样中锂离子含量与氯离子含量呈明显正相关,水体中锂离子含量与水体的TDS有密切关系,锂离子含量随矿化度值的增大而升高(图2中a,b)。九龙地区气候特别是雨量和温度较甲基卡矿区为高,地形切割较甲基卡强烈,水系较甲基卡发育,以上三点影响风化过程的因素可能是造成九龙地区水体锂含量高的原因。锂异常点经乌拉溪岩体、洛莫岩体和某花岗岩体补给,可能是矿体的反映,可作为下一步详细调查的远景区。

采集的60件样品中17%的样品超过硼异常下限( $20.8\mu\text{g/L}$ ),其中九龙河干流(31号点)硼含量达到最大值 $34.5\mu\text{g/L}$ ,是异常下限的1.7倍。其次为雅砻江58号点( $32.2\mu\text{g/L}$ ),是异常下限的1.5倍。流经洛莫岩体4号点( $31\mu\text{g/L}$ )、乃渠乡14号点



图中按照 Shreve 河流分级法结合野外实际情况对采样河段标注河流等级,九龙河、子耳乡河、踏卡河、雅砻江上游均混入多级支流,未标注河流等级。

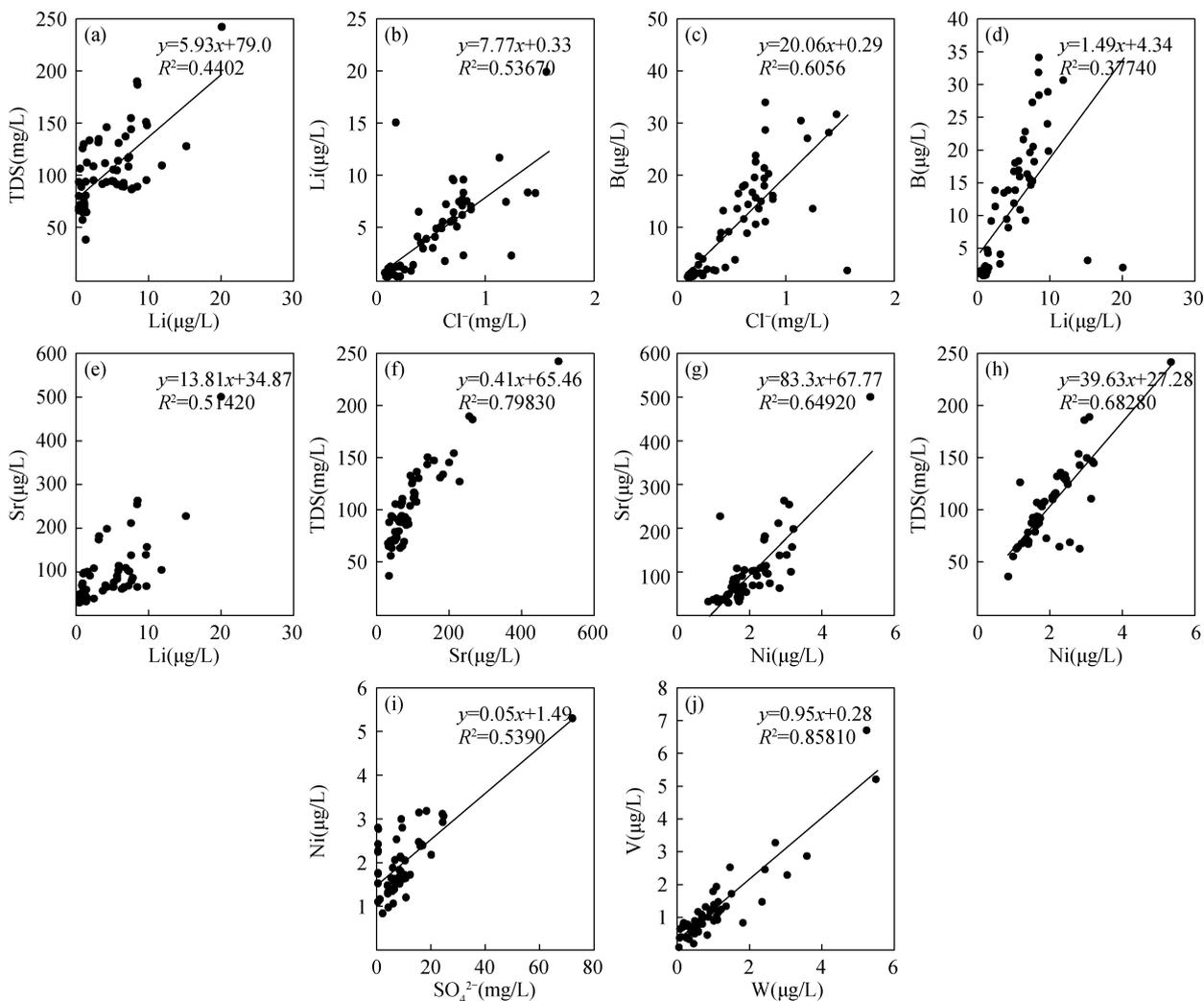
图1 采样点分布图

Fig. 1 Distribution map of sampling sites

### 3.4.1 研究区水体元素含量特征

研究区水体锂、硼、锶、镍元素含量明显高于背景值,与矿化的关系密切,其明显的变化规律可作为水化学找锂的找矿标志。水中主要金属元素含量特征见表1。

采集的60件样品中17%的样品超过锂异常下限( $7.76\mu\text{g/L}$ ),其中流经乌拉溪岩体东南角(石头沟)的水体(35号点)锂含量达到最大值 $20.1\mu\text{g/L}$ ,是研究区水体锂含量背景值的4.5倍,是异常下限的2.6倍,是亚洲最大已开采的甲基卡锂矿区地表



(a) TDS - Li; (b) Li - Cl; (c) B - Cl; (d) B - Li; (e) Sr - Li; (f) TDS - Sr; (g) Sr - Ni; (h) TDS - Ni; (i) Ni -  $\text{SO}_4^{2-}$ ; (j) V - W.

图 2 部分微量元素与主要离子相关性图解

Fig. 2 Correlation diagrams among trace elements and major ions

( $29.2\mu\text{g/L}$ ), 流经某花岗岩体的雅砻江 57 号点 ( $28.7\mu\text{g/L}$ ), 流经三叠系地层的 54 号点 ( $24.3\mu\text{g/L}$ ) 样品硼含量均超过异常下限。60% 的硼异常点与锂异常点重叠。硼是亲石元素, 在伟晶岩脉中与锂共生, 本次采集的水样中硼与氯离子显著正相关, 硼与锂显示正相关 (图 2 中 c, d)。硼的主要造岩矿物是电气石 (很稳定), 次生矿物主要是黏土矿物和可溶性硼酸盐, 土壤相主要有黏土矿物、电气石和可溶性硼酸盐。硼的活性虽高, 但在电气石中存在则是例外。据已有资料判断, 研究区水体中的硼应主要来自电气石。而电气石是指示矿物, 因此水体中的硼元素异常可以作为间接找矿标志。

研究区有 10 件样品 (17%) 超过锶异常下限 ( $141\mu\text{g/L}$ ), 最高值出现在流经乌拉溪岩体东南角 (石头沟) 的水体 (35 号点), 锶含量达到  $505\mu\text{g/L}$ ,

是研究区水体锶含量背景值的 5 倍, 是异常下限的 3.6 倍。其次为流经某花岗岩体的雅砻江 57 号点 (子耳乡河汇入后)、雅砻江 58 号点 (57 号点下游) 水体锶含量分别为  $266\mu\text{g/L}$  和  $257\mu\text{g/L}$ , 是异常下限的 1.9 倍。流经洛莫岩体的 2 号采样点水体锶含量也较高, 为  $230\mu\text{g/L}$ , 是异常下限的 1.6 倍。流经二叠系、三叠系地层的子耳乡河 53、54 号点水体锶含量分别为  $159\mu\text{g/L}$  和  $141\mu\text{g/L}$ , 超过九龙地区水体 Sr 背景值 ( $97\mu\text{g/L}$ ) 的 1.5 倍, 是甲基卡矿区水体锶含量平均值 ( $16.44\mu\text{g/L}$ ) 的 9.7 倍和 8.5 倍。研究区的锶含量和锂含量呈正相关, 锶含量与 TDS 呈显著正相关 (图 2 中 e, f)。经统计, 60% 的样品中锶异常与锂异常点位重叠, 这些矿化水经乌拉溪岩体、洛莫岩体和某花岗岩体补给, 可能是矿体的反映, 可作为下一步详细调查的远景区。

研究区有9件样品(占比15%)超过镍异常下限(2.8 $\mu\text{g/L}$ ),最高值出现在流经乌拉溪岩体东南角(石头沟)的水体(35号点),镍含量达到5.37 $\mu\text{g/L}$ ,是研究区水体镍异常下限的1.9倍。流经二叠系、三叠系地层的子耳乡河53、54号点水体镍含量分别为3.18 $\mu\text{g/L}$ 和3.03 $\mu\text{g/L}$ ,超过九龙地区水体镍背景值(2 $\mu\text{g/L}$ )的1.5倍。雅砻江58、57号点水体镍含量分别为3.1 $\mu\text{g/L}$ 和2.96 $\mu\text{g/L}$ ,是背景值的1.5倍。研究区所有水样镍含量与锂、TDS呈显著正相关,镍与硫酸根离子呈显著正相关(图2中g,h,i)。受流域岩石化学风化作用的影响,不同岩石地区河流地表水中主要溶解性离子含量有很大差异(表2)。而岩石又是矿物的集合体,不同岩石中各含有某些优势矿物,不同类别的矿物稳定性、对风化的敏感程度各不相同,水体中溶解性离子的种类和含量特征受其影响较大。可能是由于在伟晶岩接触带,硫化物成分变为针镍矿(NiS)导致水体中的镍含量和硫酸根含量发生变化。

表2 研究区水体中主要溶解性离子含量

Table 2 Main soluble ions content in water system

分析项目	离子含量(mg/L)							
	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	F <sup>-</sup>
最大值	66.8	13.7	6.12	11.0	1.57	72.8	171	0.63
最小值	11.0	0.76	0.56	0.74	0.09	0.05	38.7	0.03
平均值	28.3	3.15	2.19	2.64	0.54	9.16	99.8	0.14
标准离差	9.07	2.59	1.21	1.33	0.38	10.4	29.50	0.11
参考值	0.78	0.38	0.3	0.3	0	1.5	7.8	-

注:参考值为常见花岗岩地区的天然河流主要溶质浓度<sup>[45]</sup>。

九龙河东侧三岔河等支流钨和钒含量高于背景值,呈显著正相关(图2j),打枪沟岩体和七日沟可能具有钨矿找矿远景。数据分析结果显示,钨含量最高值出现在洛莫岩体与打枪沟岩体中间(图4),8号点水体钨含量高达5.53 $\mu\text{g/L}$ ,2号点为5.27 $\mu\text{g/L}$ ,是研究区钨背景值(1.04 $\mu\text{g/L}$ )的5倍,高于异常下限的3倍以上。流经打枪沟岩体的九龙河东侧支流(三岔河)44号点钨含量3.61 $\mu\text{g/L}$ ,高于背景值的3.5倍,是异常下限的2.5倍。流经七日沟的九龙河西侧支流29号点水体钨含量为1.51 $\mu\text{g/L}$ ,高于异常下限。钨的原生矿石矿物有白钨矿和黑钨矿,活动性中等偏高,水体中钨含量的增高可能受钨矿物的影响。

### 3.4.2 水化学类型判定及矿相组成

研究区地表水体水化学类型均为HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Ca

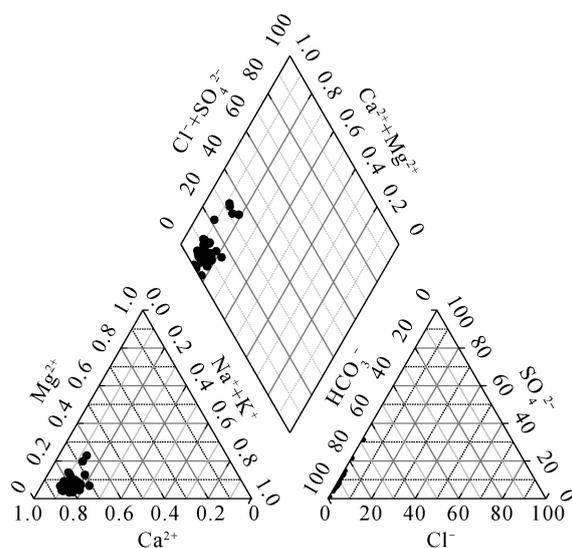


图3 研究区水化学 Piper 图

Fig. 3 Piper diagram of hydrochemistry in the study area

型(图3),具有地表水最常见的主要离子组合。所有样品HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>毫克当量百分数大于60%,Ca<sup>2+</sup>毫克当量百分数均超过70%,地表水体中优势阴离子和优势阳离子分别为HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>和Ca<sup>2+</sup>,其余主要离子占比均小于30%,反映了该地区地表水中溶解离子为HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>和Ca<sup>2+</sup>主导,无论是山间支流还是下游河流受地下水混入的影响极小。

水化学异常所处的环境特征分析结果(表3)显示,除TDS、电导率以外,其他环境因子如温度、pH值、溶解氧与找矿指标都没有明确关联,变化趋势不明。

表3 研究区水环境因子特征

Table 3 Characteristics of environmental factors of water in the study area

统计项目	温度(°C)	pH	电导率(μS/cm)	溶解氧(mg/L)	TDS(mg/L)
最大值	22.70	8.70	387.00	8.22	245
最小值	9.60	7.31	61.80	6.82	38.6
平均值	15.65	8.24	168.02	7.46	100
标准离差	3.15	0.24	56.82	0.36	35.9

### 3.5 找矿效果分析

本次工作的初衷是在大型资源基地开发之前开展环境本底调查,同时运用同一批水样开展水化学找锂的初步尝试。从结果来看,九龙地区水化学找锂的地质效果是比较满意的。综合水化学异常数据处理与解释,结合地理信息系统空间分析功能,在

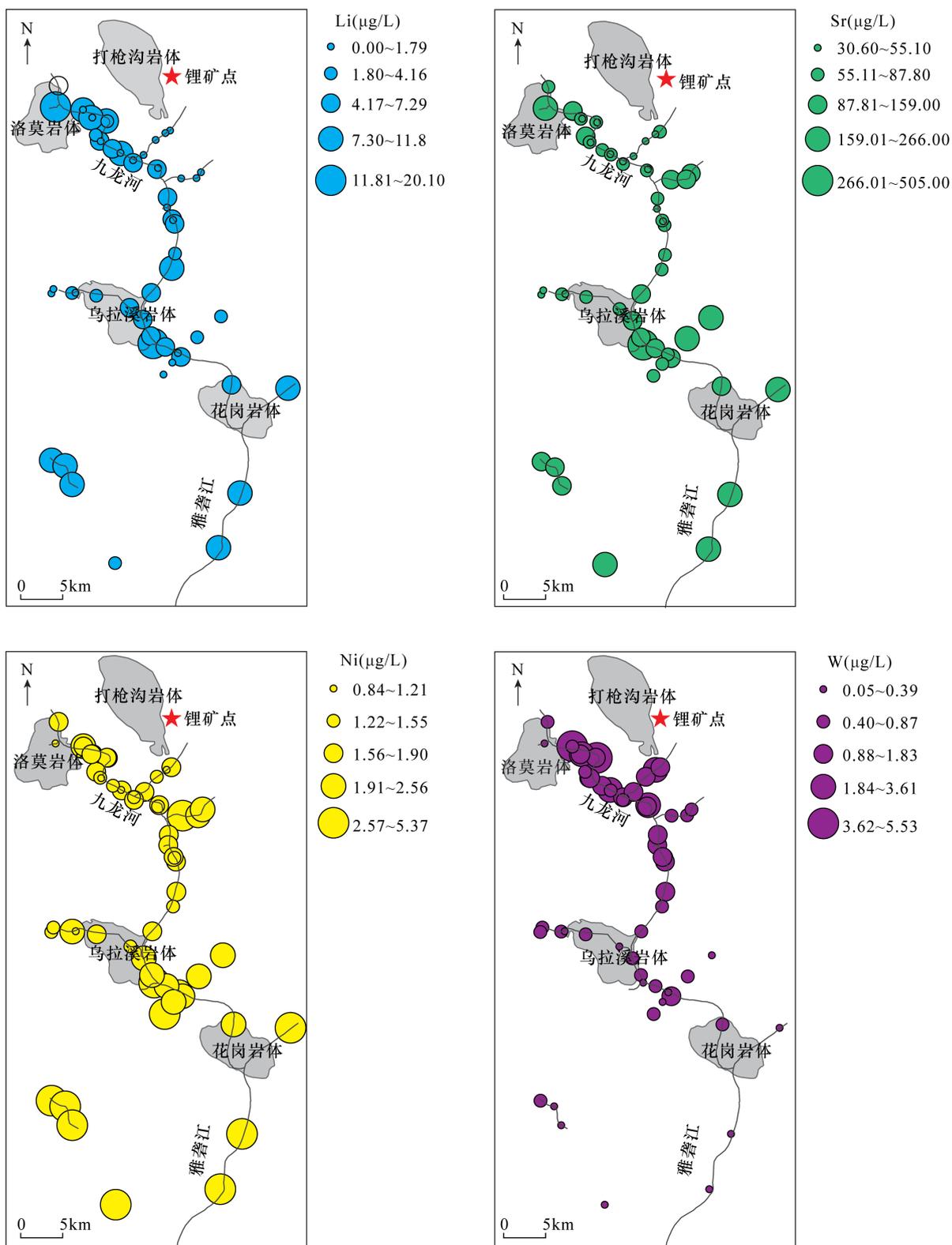


图4 水体中 Li, Sr, Ni, W 元素空间分布

Fig. 4 Spatial distribution maps of Li, Sr, Ni and W in water system

ArcGIS 软件中可清楚地发现一些异常区域(图4)。研究共发现5个异常区,其中乌拉溪岩体东南部、洛莫岩体异常与矿化关系明显,可作为下一步详细调

查的远景区。打枪沟岩体、七日沟可能具有钨矿找矿远景。流经二叠系、三叠系地层的子耳乡河53号、54号点附近、雅砻江上游某花岗岩体可能具有

锂成矿远景,建议考虑进一步开展地质工作。

王伟等<sup>[3]</sup>通过在川西九龙三岔河地区开展综合地质调查工作,发现九龙地区具有明显的锂异常,且与地质体的套合度高。外围乌拉溪地区发现大量含锂辉石矿化伟晶岩转石,表明该区具有良好的稀有金属成矿条件及找矿潜力。2019年依托同一项目,王伟等在研究区开展了1:5万水系沉积物测量和1:5万土壤测量,研究结果与水化学找矿结论吻合(成果将另文发表)。

## 4 结论

水化学法在九龙地区的应用实例证明,川西地表水锂、硼、锶、镍等元素在地表水中的化学异常与矿化的对应关系明显,其明显的变化规律可作为这些元素的找矿标志;乌拉溪岩体东南部及洛莫岩体水化学异常与矿化关系明显,可考虑作为下一步详细调查的远景区。但单独采用水化学法是无法完成远景选区任务的,在下一步工作中需结合化探、遥感等其他地质手段进行综合分析才能得出比较客观、实际的结果。研究认为水地球化学工作的开展对于前期找矿部署具有指导意义。

在当前保障国家资源安全与环境保护并重的现实要求下,如何绿色环保地勘查战略性关键矿产,是当务之急。本研究结果表明,地表水化学找矿法在助力锂能源金属矿产地质找矿、大型资源基地合理开发布局是较为有效的方法之一。该方法具有简便快速、绿色环保、工作强度低的优点,在今后的绿色调查工作中值得进一步推广、使用。但该方法对于其他类型、其他地区的关键矿产勘查是否适用,需要进一步试验研究。发展和创新水化学找锂的绿色调查方法,建立水化学找锂的找矿标志,并尝试拓展应用到其他矿种,是今后长期的研究方向。

## 5 参考文献

[1] 王登红,王瑞江,付小方,等.对能源金属矿产资源基地调查评价基本问题的探讨——以四川甲基卡大型锂矿基地为例[J].地球学报,2016,37(4):471-480.  
Wang D H, Wang R J, Fu X F, et al. A discussion on the major problems related to geological investigation and assessment for energy metal resources base: A case study of the Jiajika large lithium mineral resource base [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2016, 37(4): 471-480.

[2] 王登红,刘善宝,于扬,等.川西大型战略性新兴产业矿产基地勘查进展及其开发利用研究[J].地质学报,2019,93(6):1444-1453.

Wang D H, Liu S B, Yu Y, et al. Exploration progress and development suggestion for the large-scale mining base of strategic critical mineral resources in western Sichuan [J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(6): 1444-1453.

[3] 王伟,刘图强,袁福平,等.川西九龙黄牛坪铍矿床地质特征及找矿潜力[J].中国地质调查,2019,6(6):72-78.  
Wang W, Liu T Q, Yuan L P, et al. Geological characteristics and prospecting potential of Huangniuping beryllium deposit in Jiulong of West Sichuan [J]. Geological Survey of China, 2019, 6(6): 72-78.

[4] 杨少平.关于水地球化学测量的回顾和思考[J].物探与化探,2008,32(1):13-18.  
Yang S P. A review and some considerations of water geochemical survey [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2008, 32(1): 13-18.

[5] 地质部水文地质研究所.水化学找矿的基本原理及方法[J].地质月刊,1959(1):13-17.  
Institute of Hydrogeology, Ministry of Geology. Basic principles and methods of hydrochemical prospecting [J]. Geological Monthly, 1959(1): 13-17.

[6] 陈扬.谈谈利用水化学作为找矿标志的几个问题[J].水文地质工程地质,1958(2):43-46.  
Chen Y. Discussions about using water chemistry as a prospecting indicator [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1958(2): 43-46.

[7] 309地质队.云南某铅矿水化学测量工作初步总结[J].地质与勘探,1960(7):11-14.  
No. 309 Geological Team. A preliminary summary of the hydrochemical measurement of a lead mine in Yunnan [J]. Geology and Prospecting, 1960(7): 11-14.

[8] 康继本,吴承烈,李善芳.略论综合地质普查工作中分散流与水化学找矿方法的作用及其合理应用[J].地质学报,1961,41(2):175-185.  
Kang J B, Wu C L, Li S F. A discussion on the function and reasonable application of dispersed flow and hydrochemical prospecting methods in comprehensive geological survey [J]. Chinese Journal of Geology, 1961, 41(2): 175-185.

[9] 李善芳,康继本.地球化学探矿方法在地质测量中的作用及若干技术问题[J].中国地质,1962(增刊1):37-43.  
Li S F, Kang J B. The role of geochemical prospecting methods in geological survey and some related technical issues [J]. Geology in China, 1962 (Supplement 1): 37-43.

[10] 叶正祥,魏泉海.放射性水化学找矿方法[J].原子能

- 科学技术,1962(5):340-343.
- Ye Z X, Wei Q H. Radioactive water chemical prospecting method [J]. Atomic Energy Science and Technology, 1962(5):340-343.
- [11] 刘金河. 水化学稀网度普查方法及应用效果[J]. 放射性地质, 1984(3):41-47.
- Liu J H. Methods and application effect of the sparse net survey of hydrochemistry [J]. Uranium Geology, 1984(3):41-47.
- [12] 杜海燕. 联合国教科文地球化学找矿方法训练班[J]. 地质科技情报, 1986(1):67.
- Du H Y. United nations educational and scientific geochemical prospecting method training course [J]. Geological Science and Technology Information, 1986(1):67.
- [13] 张景廉. 利用矿物溶液平衡的铀的水化学找矿方法[J]. 放射性地质, 1983(5):19, 85-90.
- Zhang J L. Hydrochemical prospecting method of uranium using mineral solution balance [J]. Uranium Geology, 1983(5):19, 85-90.
- [14] 杜龙明. 放射性水化学测量在铀矿地质区域调查中的应用效果[J]. 铀矿地质, 1987(1):53-59.
- Du L M. Application effect of radioactive water chemical survey in uranium mine geological survey [J]. Uranium Geology, 1987(1):53-59.
- [15] 黄际能. 大富岭铀矿床放射性水化学数据处理方法及其找矿效果[J]. 华东地质学院学报, 1989, 12(4):48-57.
- Huang J N. Radioactive hydrochemical data processing techniques used in Dafuli uranium deposit and the ore prospecting effects [J]. Journal of East China College of Geology, 1989, 12(4):48-57.
- [16] 朱基忠, 陈仁祥. 隘高岩体地下水的放射性特征及其找矿效果[J]. 铀矿地质, 1990(2):85-92.
- Zhu Z J, Chen R X. Radioactive characteristics of groundwater in Aigao rock mass and its prospecting effect [J]. Uranium Geology, 1990(2):85-92.
- [17] 毛秀茹. 水化学找金新方法的现状和展望[J]. 黄金, 1990(12):8-15.
- Mao X R. The current situation and vista of hydrochemical prospect for gold [J]. Gold, 1990(12):8-15.
- [18] 郭三民. 陕西葫芦沟地区水文地球化学找金研究[J]. 黄金地质科技, 1993(1):38-43.
- Guo S M. Researches on gold exploration by hydrochemical methods in Hulugou Area in Shaanxi Province [J]. Gold Geology, 1993(1):38-43.
- [19] 郭三民, 乔海明, 高改玲. 水化学找金试验研究[J]. 物探与化探, 1994(2):97-103.
- Guo S M, Qiao H M, Gao G L. Experimental research on explore gold by hydrochemical methods [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1994(2):97-103.
- [20] 袁晓庆, 史维浚, 张卫民. 温暖潮湿地区金水文地球化学找矿方法探讨[J]. 华东地质学院学报, 1994, 17(2):161-171.
- Yuan X Q, Shi W J, Zhang W M. Probe into the method of hydrogeochemical prospecting for gold in warm and moist areas [J]. Journal of East China Geological Institute, 1994, 17(2):161-171.
- [21] 蒋敬业. 水化学找金方法述评[J]. 地质科技情报, 1998, 7(1):98-103.
- Jiang J Y. Review of the method of hydrogeochemical exploration gold [J]. Geological Science and Technology Information, 1998, 7(1):98-103.
- [22] 刘崇民. 隐伏矿的地球化学找矿方法技术研究[J]. 物探与化探, 1993, 17(6):474-475.
- Liu C M. Research on geochemical prospecting methods and technology of hidden ore [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1993, 17(6):474-475.
- [23] 蒋敬业, 谭大芳, 柴红年, 等. 水化学方法在区域化探异常评价中的应用研究[J]. 地质科技情报, 1999, 18(3):104-108.
- Jiang J Y, Tan D F, Chai H N, et al. Application of hydrochemical method in appraising regional geochemical anomaly [J]. Geological Science and Technology Information, 1999, 18(3):104-108.
- [24] 马生明, 朱立新, 周国华, 等. 高山峡谷区快速评价找矿靶区的化探方法技术[J]. 物探与化探, 2002, 26(3):185-191.
- Ma S M, Zhu L X, Zhou G H, et al. Geochemical techniques for rapid appraisal of ore prospecting targets in high mountain and canyon areas [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2002, 26(3):185-191.
- [25] Simpson P R, Edmunds W M, Breward N, et al. Geochemical mapping of stream water for environmental studies and mineral exploration in the UK [J]. Journal of Geochemical Exploration, 1993, 49(1-2):63-88.
- [26] Yue S, Wang G. Relationship between the hydrogeochemical environment and sandstone-type uranium mineralization in the Ili Basin, China [J]. Applied Geochemistry, 2011, 26:133-139.
- [27] Mazzucchelli R H. The Frederick Project: Geochemical exploration for sediment-hosted base metals in covered terrain in the Bangemall Basin, western Australia [J]. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, 2012, 12:257-264.

- [28] Benabdelkader A, Taleb A, Probst J L, et al. Anthropogenic contribution and influencing factors on metal features in fluvial sediments from a semi - arid Mediterranean River Basin (Tafna River, Algeria): A multi - indices approach [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 626: 899 - 914.
- [29] 辛至秀. 运用放射性水化学方法寻找隐伏铀矿体 [J]. *世界核地质科学*, 2012, 29(2): 92 - 98.  
Xin Z X. The exploration of buried uranium ore bodies by hydrochemical radioactive method [J]. *World Nuclear Geoscience*, 2012, 29(2): 92 - 98.
- [30] 林效宾, 李西得, 邹耀林, 等. 二连盆地铀矿床放射性水文地球化学异常特征研究 [J]. *世界核地质科学*, 2017, 34(2): 80 - 86.  
Lin X B, Li X D, Zou Y L, et al. Study on radioactive hydrogeochemical characteristics in uranium deposit of Erlian Basin [J]. *World Nuclear Geoscience*, 2017, 34(2): 80 - 86.
- [31] 杨安林, 王太平. 铀矿水文地球化学找矿方法在找矿中的应用 [J]. *地下水*, 2018, 40(5): 149 - 150.  
Yang A L, Wang T P. Application of hydrogeological prospecting method for uranium ore in prospecting [J]. *Ground Water*, 2018, 40(5): 149 - 150.
- [32] 王刚, 邵东, 陈云杰, 等. 甘肃省龙首山成矿带放射性水文地质特征浅析 [J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 2018, 41(3): 236 - 243.  
Wang G, Shao D, Chen Y J, et al. Analysis on the characteristics of radioactive hydrogeology in the Longshoushan metallogenic belt of Gansu Province [J]. *Journal of East China University of Technology (Natural Science)*, 2018, 41(3): 236 - 243.
- [33] 王太平, 杨安林. 安康地区采集地表溪水作为铀矿水化学找矿可行性研究 [J]. *地下水*, 2018, 40(5): 102 - 104.  
Wang T P, Yang A L. Feasibility study on collecting surface water from Ankang Area as uranium ore chemical prospecting [J]. *Ground Water*, 2018, 40(5): 102 - 104.
- [34] Gray J E, Goldfarb R J, Detra D E, et al. Geochemistry and exploration criteria for epithermal cinnabar and stibnite vein deposits in the Kuskokwim River Region, southwestern Alaska [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1991, 41: 363 - 386.
- [35] Graham G E, Taylor R D, Lee G K, et al. Targeting Cu - Au and Mo resources using multi - media exploration geochemistry: An example from Tyonek Quadrangle, Alaska Range, Alaska [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2015, 157: 52 - 65.
- [36] Manning A H, Morrison J M, Wanty R B, et al. Using stream - side groundwater discharge for geochemical exploration in mountainous terrain [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2020, 209: 106415.
- [37] Hamilton S M, Cameron E M, McClenaghan M B, et al. Redox, pH and SP variation over mineralization in thick glacial overburden. Part I: Methodologies and field investigation at the Marsh Zone gold property [J]. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2004, 4: 33 - 44.
- [38] Hamilton S M, Cameron E M, McClenaghan M B, et al. Redox, pH and SP variation over mineralization in thick glacial overburden. Part II: Field investigation at Cross Lake VMS property [J]. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2004, 4: 45 - 58.
- [39] Marie - Eve Caron, Stephen E, Grasby M, et al. Spring water trace element geochemistry: A tool for resource assessment and reconnaissance mineral exploration [J]. *Applied Geochemistry*, 2008, 23: 3561 - 3578.
- [40] Noble R R P, Anand R R, Gray D J, et al. Metal migration at the DeGrussa Cu - Au sulphide deposit, western Australia: Soil, vegetation and groundwater studies [J]. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2017, 17: 124 - 142.
- [41] Hulkkki H, Taivalkoski A, Lehtonen M. Signatures of Cu - Au mineralisation reflected in inorganic and heavy mineral stream sediments at Vähäkurkkio, north - western Finland [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2018, 188: 156 - 171.
- [42] Taivalkoski A, Sarala P, Lahaye Y, et al. Snow in mineral exploration - examples and practices in glaciated terrain [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2019, 200: 1 - 12.
- [43] 马生凤, 温宏利, 许俊玉, 等. 电感耦合等离子体质谱法测定地下水中 44 个元素 [J]. *岩矿测试*, 2010, 29(5): 552 - 556.  
Ma S F, Wen H L, Xu J Y, et al. Determination of 44 elements in groundwater by inductively coupled plasma - mass spectrometry [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2010, 29(5): 552 - 556.
- [44] 阎葆瑞, 张锡根. 湘粤地区几个多金属矿床水的某些地球化学特征 [J]. *中国地质*, 1962(1): 21 - 26.  
Yan B R, Zhang X Y. Some geochemical characteristics of water in several polymetallic deposits in Hunan and Guangdong Area [J]. *Chinese Geology*, 1962(1): 21 - 26.
- [45] 陈静生. 河流水质原理与中国河流水质 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.  
Chen J S. Principles of river water quality and river water quality in China [M]. Beijing: Science Press, 2006.

# Hydrochemical Prospecting and Its Application in Green Investigation for the Large Mineral Resource Base: A Case Study from Jiulong Area in Western Sichuan Province

YU Yang<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>2</sup>, WANG Deng-hong<sup>1</sup>, GAO Juan-qin<sup>1,3</sup>, LIU Shan-bao<sup>1\*</sup>,  
YUAN Lin-ping<sup>2</sup>, YU Feng<sup>1,3</sup>, ZHANG Sai<sup>1,3</sup>

- (1. Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Resource Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;
2. Geology and Mineral Resources Scientific Institute, Sichuan Exploration Bureau of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610036, China;
3. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

## HIGHLIGHTS

- (1) The progress of the hydrochemical prospecting method and its problems in mineral exploration and environmental investigation and evaluation were summarized.
- (2) Through the practice of hydrochemical surveys in the Jiulong area of western Sichuan, a prospecting mark was established and a prospective area for further investigation was proposed.
- (3) Guiding significance of the hydrochemical method to the early prospecting deployment was revealed.



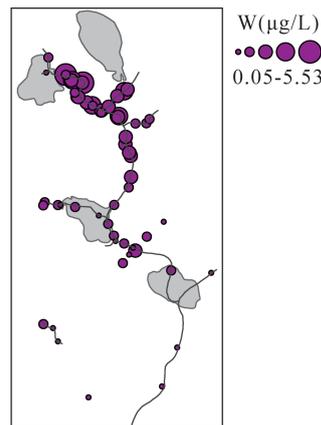
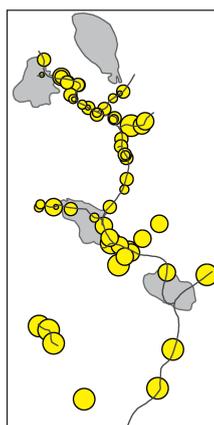
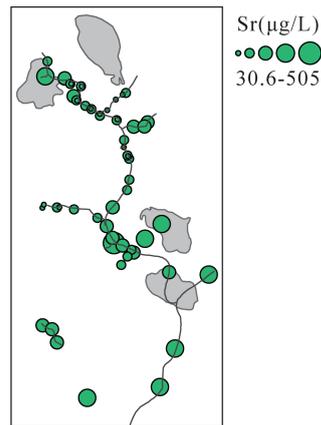
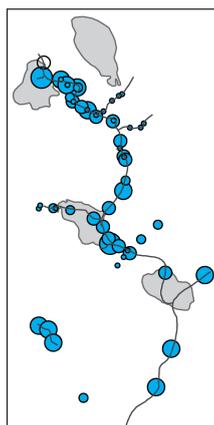
Water samples from Jiulong



ICP-MS analysis



Li, Ni, Sr, W, V, B



**ABSTRACT**

**BACKGROUND:** The ‘Strategic Emerging Industry Mineral Investigation’ project actively advocates the application of new theories and methods of green investigation in the exploration and development of large – scale resource bases. Green investigation is one of the main content of the comprehensive investigation and evaluation work of large – scale lithium and beryllium resource bases in western Sichuan.

**OBJECTIVES:** To summarize the development history and current situation of the hydrochemical prospecting method, and the main problems of the hydrochemical prospecting method in mineral exploration and environmental investigation are put forward. To preliminarily elucidate the lithium prospect area which should be further investigated in details, by using hydrochemical prospecting method in the humid and semi – humid alpine mountainous area of Jiulong, West Sichuan.

**METHODS:** The temperature, pH value, electrical conductivity, dissolved oxygen and total dissolved solids (TDS) of surface water were measured by field multi – parameter tester. The content of trace elements such as Li, B, Rb, Sr, Ni, W and Sc were determined by inductively coupled plasma – mass spectrometry (ICP – MS).

**RESULTS:** The content of lithium, boron, strontium and nickel in the water body of the study area was significantly higher than the background value. Among the 60 samples, more than 17% of the samples had content of trace elements in excess of the abnormal lower limit ( $7.76\mu\text{g/L}$ ). The lithium content of the water body flowing through the southeast corner of the Wulaxi rock mass (Shitougou) reached the maximum value of  $20.1\mu\text{g/L}$ , which was 4.5 times the background value of the water body lithium content in the study area and 2.6 times the abnormal lower limit. These anomalies were closely related to mineralization, and its obvious change law can be used as a hydrochemical lithium search prospecting sign. The southeastern part of the Wulaxi pluton and the surrounding water body of the Lomo Pluton had an obvious relationship with mineralization, which can be used as a prospective area for the next detailed investigation.

**CONCLUSIONS:** Under the current conditions of continuous improvement of the strategic position of environmental protection, continuous increase of green exploration efforts, and equal emphasis on resource investigation and environmental protection, hydrochemical methods have important guiding significance for early prospecting deployment. The research results provide a reference for solving practical problems such as prospecting deployment and environmental protection bottlenecks in the ecologically fragile areas of the Western Sichuan Plateau.

**KEY WORDS:** hydrochemical prospecting; lithium; inductively coupled plasma – mass spectrometry; large mineral resource base; green investigation