

# 中国区域化探若干基本问题研究: 1999—2009

奚小环 李 敏

(中国地质调查局, 北京 100011)

**摘要:** 1999—2009 年, 中国区域化探发生了根本性改变。主导思想是以地球化学理论为指导研究区域化探方法技术问题和进行矿产资源潜力评价。区域化探方法技术研究的基本要求是最大限度保持原生地球化学分布特征, 表生地球化学条件下采样物质问题是区域化探方法研究的核心, 样品采集应以代表地质找矿信息的基岩物质成分为原则, 在全国范围内最大限度地保持采样物质的一致性。基于成矿地球化学理论建立资源潜力地球化学评价方法和实行地质找矿定量预测, 使勘查地球化学从单纯方法手段上升到指导地质找矿的理论高度。主要标志是在全国建立完整的区域化探工作方法技术系统和实行样品分析质量全程监控。在区域化探高精度数据基础上绘制与出版精美的地球化学图集, 使区域地球化学图精确地反映地质背景分布与异常特征, 促进区域化探数据信息深度开发和利用, 建立具有从区域、普查到详查进行全过程独立开展资源调查、评价和预测的方法技术体系和工作程序。区域化探长期支撑中国地质找矿工作, 是整个地质找矿工作的先导。随着新一代地区 and 全国地球化学图的形成, 将在基础地质和成矿规律研究以及揭示重大地质事件等方面提供新的发现、新的认识和新的观点, 对于未来中国勘查地球化学和整个地质工作产生重要影响。

**关键词:** 区域化探; 方法理论; 原生地球化学; 表生地球化学; 分析精度; 分析监控; 高精度地球化学图; 资源潜力评价; 定量预测

**中图分类号:** P622<sup>+</sup>.3      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3657(2012)02-0267-16

1999—2009 年, 中国区域化探发生了根本性改变。主导思想是以地球化学理论为指导研究区域化探方法技术问题和进行矿产资源潜力定量评价。主要标志是在全国建立完整的区域化探方法技术系统和实行样品分析质量全程监控, 使区域地球化学图精确地反映地质背景分布与异常特征, 促进区域化探数据信息深度开发和利用。本文主要讨论近 10 年来区域化探方法理论与方法技术研究的若干基本问题及所取得的调查评价成果, 总结经验, 提供借鉴, 推动区域化探更加科学地发展。

## 1 区域化探方法理论与方法技术

### 1.1 区域化探方法原理

勘查地球化学方法研究以元素地球化学迁移理

论为基础, 主要研究原生与表生环境条件下元素地球化学迁移形态、途径及其影响因素等, 及由此形成的地球化学分布与分配模式。在地球化学理论上建立适合于地质找矿工作的各类化探方法, 依据原生地球化学迁移理论建立岩石地球化学测量方法, 依据表生地球化学迁移理论建立水系沉积物与土壤地球化学测量方法, 依据元素迁移途径中的活动性原理建立气体、植物、地下水及偏提取等地球化学测量方法, 依据成矿元素迁移过程形成的分带规律建立资源潜力地球化学评价方法等, 以及针对上述各类方法进行采样、分析及异常评价研究, 应用于地质调查工作区域、普查及详查的各个阶段。

区域化探属于勘查地球化学基础性和战略性调查工作, 主要目的是客观地反映原生地球化学背景

收稿日期: 2011-05-19; 改回日期: 2011-12-20

**基金项目:** 中国地质调查项目“我国青藏高原西北部干旱荒漠景观区域化探方法技术研究”(DK9902119)、“我国东北部森林沼泽景观区域化探工作方法技术研究”(DK9902120)、“青海省高寒湖沼地区区域化探方法技术研究”(DK9902122)、“新疆东天山地区地球化学勘查技术及资源潜力评价方法研究”(200120130088)、“区域地球化学勘查标准分析方法研究等”(200120130094)及“青藏高原地球化学勘查技术及资源潜力评价方法研究”(20020130001)等联合资助。

**作者简介:** 奚小环, 男, 1949 年生, 教授级高级工程师, 主要从事地球化学调查工作; E-mail: xxiaohuan@sohu.com。

**通讯作者:** 李敏, E-mail: goflyyourkite@163.com。

与异常分布,进行矿产资源远景评价和基础地质研究。但是,区域化探直接采用岩石地球化学测量已经被国内外实践证明存在采样代表性、可行性及样品分析等问题<sup>[1]</sup>。我国区域化探采取以水系沉积物测量为主,土壤测量为辅的调查方法,是根据全国广袤的山地景观地貌特点作出的选择,实质上是采用表生地球化学方法认识和解决原生地球化学问题,利用成矿元素次生分散信息发现和评价原生矿床。因此,表生地球化学条件下的区域化探方法技术问题显得十分重要。

区域化探方法研究的基本要求是最大限度地保持原生地球化学分布特征。中国自然景观具有多样性特点,由南部热带亚热带湿润半湿润景观区,到东北部森林沼泽景观区,及至西北部高寒山区、高寒湖沼区、干旱荒漠区及半干旱区等景观区。受不同地理景观条件的影响,基岩中各类元素通过物理风化、化学风化及生物风化作用进行迁移与富集,在很大程度上改变了原生地球化学特征,生成各种表生地球化学形态。在特定的地理景观条件下,可能以某类风化作用为主,同时各类风化作用相互交织和渗透。在中国西北部高寒山区、干旱荒漠区及半干旱区等景观区,一般认为基岩以物理风化为主,风化产物为代

表基岩成分的岩屑物质,区域化探方法研究的重点为风成沙、风成黄土对采样物质的干扰问题,证明外来物质对水系沉积物元素含量的稀释作用十分显著,掩盖了原生地球化学特征<sup>[2-4]</sup>。但是,一些地区限于对物理风化程度及风成沙干扰特点的认识,在排除风成沙干扰时选择采样粒级随意性较大,致使采样物质较为凌乱,如甘肃<sup>[5]</sup>、青海<sup>①</sup>、新疆<sup>②</sup>等省区按照 1:20 万图幅确定采样粒级,选择各种粒级多达十余种,还有在图幅内划分不同采样粒级范围(表 1)。近年来研究表明,风成物实际波及范围可达河北、山西及辽宁等北方地区,对区域化探干扰明显。在东北森林沼泽景观区,有机质的次生富集作用成为主要问题,长期以来有较多研究<sup>[7-10]</sup><sup>③④⑤⑥</sup>,近年来对该景观条件的小西林铅锌银矿区等研究表明<sup>[11]</sup>,水系沉积物中有机质 Hg、Yb、Y、La、Ce 等异常提取率高出原生异常含量 10~20 倍,完全偏离了原生地球化学特征,而不同有机质组成元素吸附性能差异也很大,如胡敏酸富集能力 Hg>Cu>Mo,富里酸富集 Cu>As>Mo 等元素,取得同国内外类似的研究结果<sup>[12-18]</sup>。在南方热带亚热带湿润半湿润景观区,化学风化显然是主要的,基岩中元素在表生条件下发生分异作用,耐风化物质残留而活性元素流失,过去已有大量

表 1 甘肃、青海、新疆区域化探采样粒级(目)

Table 1 Grain size used for regional geochemical exploration in Gansu, Qinghai and Xinjiang (mesh)

省区	采样粒级(图幅数)
甘肃	+60(5)、-4~+20(8)、-4~+40(16)+20(1)、-10~+60(2)、-40~+80(2)、-20~+80(7)、-20(1)、-20~+60(6)、-20~+40(2)、-5~+20(2)、-6~+40(3)、-20~+60(3)、-4~+30(3)、-4~+20(1)、-60(21)
青海	-20(3)、-40(7)、-60(33)、-10~+100(14)、-10~+40与-10~+60(11)、-10~+100(13)、-20~+120(2)、-60与-20~+160(5)、-20~+160(2)、-20~+80与-20~+60(17)、-40~+80(1)、-20~+80与-40~+160(11)、-40与-20~+160(2)
新疆	-5~+20(11)、-10~+60(4)、-4~+20(13)、-10~+80(47)、-20(9)、-20~+120(10)、-20~+150(1)、-40~+40(8)、-40(30)、-60~+100(2)、-60(19)、-80(2)、-40~+40与-40(3)、-40与-20(1)、-8~+80与-120~+200(1)、-40与-40~+120(3)、-5~+40与-20~+60(1)、-5~+20与-5~+40(1)、-5~+20与-60(1)、-4~+20与-100(1)

注:引自甘肃、青海、新疆冯治汉、张文勤、杨万志及中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所张华、宋云涛等资料,2011。

①张文勤,张华,宋云涛,等.青海省区域化探采样粒级分布图,2011。

②杨万志,等.新疆区域化探采样粒级分布图,2011。

③李锡平.大兴安岭北部低密度水系沉积物测量工作.黑龙江物探队,1980。

④冷福荣,郭利军.内蒙古东部三河地区区域化探扫面方法研究.内蒙古第二物化探大队,1989。

⑤张华,孔牧,刘应汉.内蒙满洲里 1:20 万区域化探工作试验研究.地矿部物化探研究所,1991。

⑥汪明启,刘应汉.黑龙江森林沼泽景观区 1:20 万区域化探扫面方法研究.地矿部物化探研究所,1994。

表 2 不同景观区基岩与水系沉积物(残积物)元素平均含量比值  
Table 2 Element average content ratios of bedrocks and stream  
sediments (residue) from different landscape areas

比值**	Ag	Pb	Zn	Cu	As	Sb	Bi	Hg	W	Sn	Mo	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO
江西湿润半湿润区	1.16	1.48	0.91	1.25	2.08	2.30	1.42	4.43	1.50	1.32	1.20	1.06	0.9	0.06
广西岩溶区	1.92	3.14	2.94	4.05	2.33	1.55	12.0	27.33	19.2	31.5	11.0	18.3	12.7	0.017
东北森林沼泽区	4.3	1.99	1.52	1.44				1.14			9.0			
青藏高寒山区	0.67	1.42	2.12	3.56					0.72	1.49	1.11			
云南与海南岛热带 雨林区		0.94		0.55	0.45				1.83					

注:据任天祥等<sup>[9]</sup>整理; \*\* 比值=水系沉积物元素平均含量/基岩元素平均含量(东北森林沼泽区比值=残积物元素平均含量/基岩元素平均含量)

关于粘土及铁锰氧化物对金属元素的吸附作用产生次生异常的研究,证明表生富集作用十分强烈,而不同粘土成分对不同金属离子的吸附能力也不尽相同<sup>①</sup>。有学者详细研究了全国不同景观条件下水系沉积物与基岩元素比值及地球化学特征<sup>[9]</sup>,表明各地区元素富集程度差异十分显著,有些元素含量得到强化而另一些元素趋于贫化(表 2),使区域地球化学分布和区域异常难以对比研究,为此提出按照景观区分别进行异常筛选和对比的方法。

中国区域化探在各种自然景观区进行的方法研究都证实表生风化作用对原生地球化学的影响力度,而各类景观条件下的风化作用对于不同基岩成分、矿床类型及其元素化合物组成的影响方式和程度也极为不同<sup>[9]</sup>。如酸性岩浆岩与基性岩的风化特征不同,硅酸盐的风化特征又不同于碳酸盐岩,矿物组成为硫化物类矿床风化特征不同于氧化物类矿床,而岩石风化与矿床风化特征差异更为显著。与硅酸盐、碳酸盐风化主要表现为淋滤作用不同,硫化物矿床风化具有强烈的氧化和溶解作用,后者风化速率显著高于前者。而不同硫化物矿床的矿物类型及氧化生成硫酸盐的溶解度不同,成矿元素迁移过程也完全不同。在不同地理景观条件下,硫化物矿床风化特征也有很大区别,如干旱条件下硫化物矿床风化强烈程度一般高于湿润地区。有学者模拟实验证实干旱区蒸发作用可以产生强烈的化学风化,导致硫化物矿石分解和元素迁移等<sup>[21]</sup>,质疑以往干旱区物理风化为主的观点。研究表明元素表生地球化学行

为存在大量的不确定因素,基岩差异性风化特征极为显著。区域化探在各景观区采集由不同表生作用生成的物质,可能造成难以估量的由于采样物质不同而形成的误差,产生众多纷乱的表生地球化学现象,无法准确地反映和区分更为复杂的地质矿产所特有的原生地球化学特征。由于区域化探是从各个图幅逐步地展开,由采样物质引起的误差尚不突出。随着全国各地区调查面积不断扩大,区域化探图幅间、省区间及流域间,特别是不同自然景观之间的采样误差随之大量出现,最终导致全国范围的采样系统误差。从全国区域化探图看出<sup>②</sup>,大体以北纬 35° 线为界,北部干旱地区富集 Na、Ca、Mg 等元素,南部湿热地区化学风化强烈,富集 Al、Fe、Mn 等元素,南-北地区呈现完全不同的表生地球化学分布特征,代表各不相同的表生环境。成矿元素方面,南部 Cu、Pb、Zn 等明显高于北部地区,东北森林沼泽区形成 Sn、Mo 等富集区。

基于区域化探方法理论研究,近若干年来在总结经验基础上进行区域化探面积性试验,以反映矿产地质与基础地质信息原生地球化学特征为原则规范采样物质,规定水系沉积物测量采样介质必须代表汇水域基岩的物质成分,土壤测量采样介质代表下伏基岩的残坡积物质<sup>[22]</sup>,在全国范围内最大限度地保持采样物质的一致性。

1999 年在新疆西昆仑地区开展的区域化探具有典型意义。该地区属于高寒干旱山地景观,面积十余万平方千米,年降雨量低于 200 mm,水系发育,

① H.E.霍克斯, J.S.韦布(著),谢学锦(译),矿产勘查的地球化学,地矿部物化探研究所,1974.

② 牟绪赞,向运川,任天祥,等.中华人民共和国地球化学图集,2005.









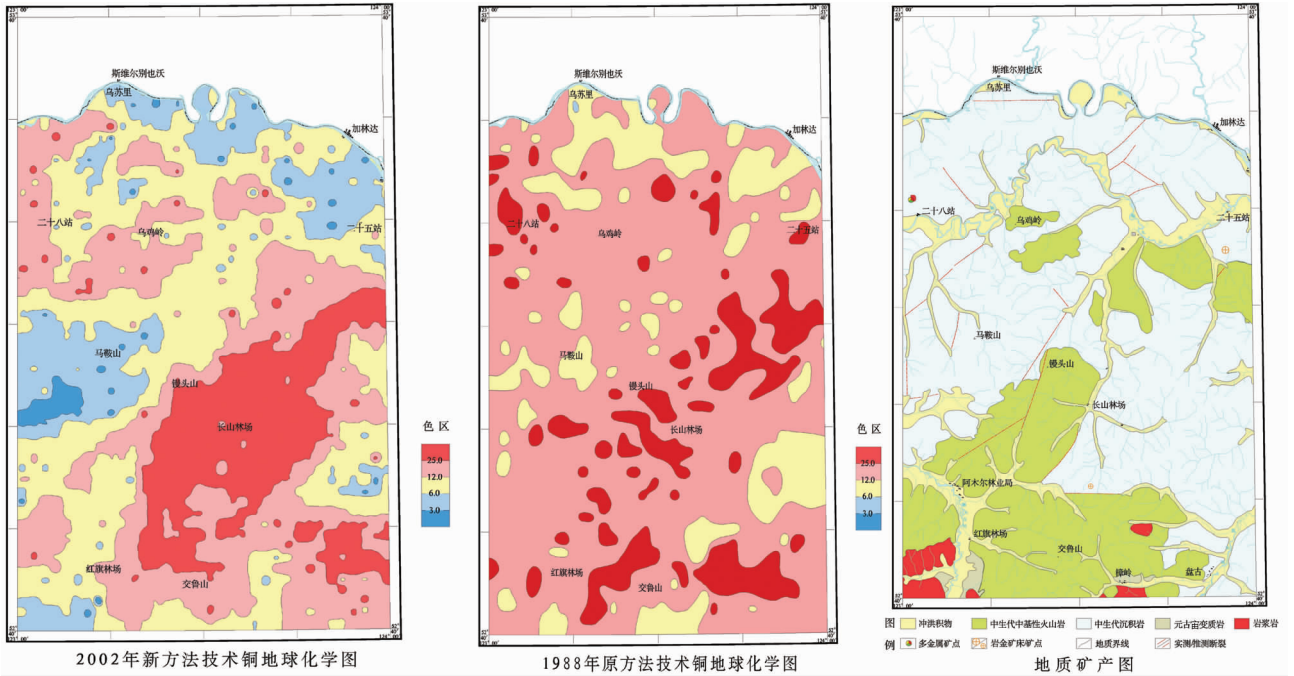


图3 黑龙江省二十五站幅与连崮幅 Cu 元素区域地球化学图

(引自黑龙江省地质调查院,崔玉军,2011)

Fig.3 Regional geochemical maps of copper in Ershiwuzhan and Lianxin Sheet, Heilongjiang Province

(after Cui Yujun, Heilongjiang Institute of Geological Survey, 2011)

植被稀少,风成沙分布普遍。由中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所负责方法技术研究,由新疆、湖北、陕西三省区地质调查院负责野外调查工作,按照要求统一采样物质与采样方法,由不同实验室按照统一分析精度与质量要求分析样品,39种元素在国内首次实现图幅间、地区间区域地球化学图无缝拼接,真实反映了区域地质背景元素地球化学的变化起伏和大规模有色金属矿产异常系列与矿化系列信息,发现以铅锌、锑为主的大型矿集区,同时提供丰富的基础地质研究资料<sup>①</sup>。图1展示出其中镍、铜、锑元素地球化学图。

北方干旱地区选择河北围场幅为试验区。该图幅1980年区域化探扫面采用-60目样品,风成沙干扰严重,异常微弱且分布零散。2000年重新扫面时,在图幅北部地区采用-40~-80目粒级,南部依然采用-60目粒级,形成北部异常强而南部弱的分布特征。后经方法研究,于2001年再次进行扫面,全部采

用-10~+60目采样物质,结果与原来异常分布相反,强异常主要分布在南部,真实反映了地质矿产地球化学分布特征(图2)<sup>[23]</sup>。

东北森林沼泽景观区方法试验,2002年选择黑龙江森林沼泽区二十五站幅与连崮幅进行区域化探对比研究,采集代表基岩物质成分的水系沉积物,采用-10~+60目较粗粒级排除有机质干扰,从Cu地球化学图(图3)看出,与1988年采用-60目样品因有机质富集作用出现大片次生异常相比,清晰地反映了测区地层、火山岩及矿产原生地球化学分布特征,准确圈定出与矿化有关的化探异常<sup>②</sup>。

最近在位于南方热带亚热带湿润半湿润景观区的安徽省胡乐司—宁国墩地区开展区域化探试验研究,图4表明,采用-10~+80目粒级物质,清晰地反映区域地质背景与成矿异常特征<sup>③</sup>。这项试验研究目前仍在进行。

显然,通过区域化探方法试验研究选择合适的

①杨万志,等. 新疆西昆仑地区区域化探图. 新疆自治区地质调查院,2009.

②吕长生,姜春和,赵玉林,等. 二十五站幅 N-51-(28)、连崮幅 N-51-(22)地球化学元素图说明书,2004.

③贾十军,等. 安徽省 1:5 万胡乐司、宁国墩幅水系沉积物测量方法实验地球化学图册. 安徽省地质调查院,2011.

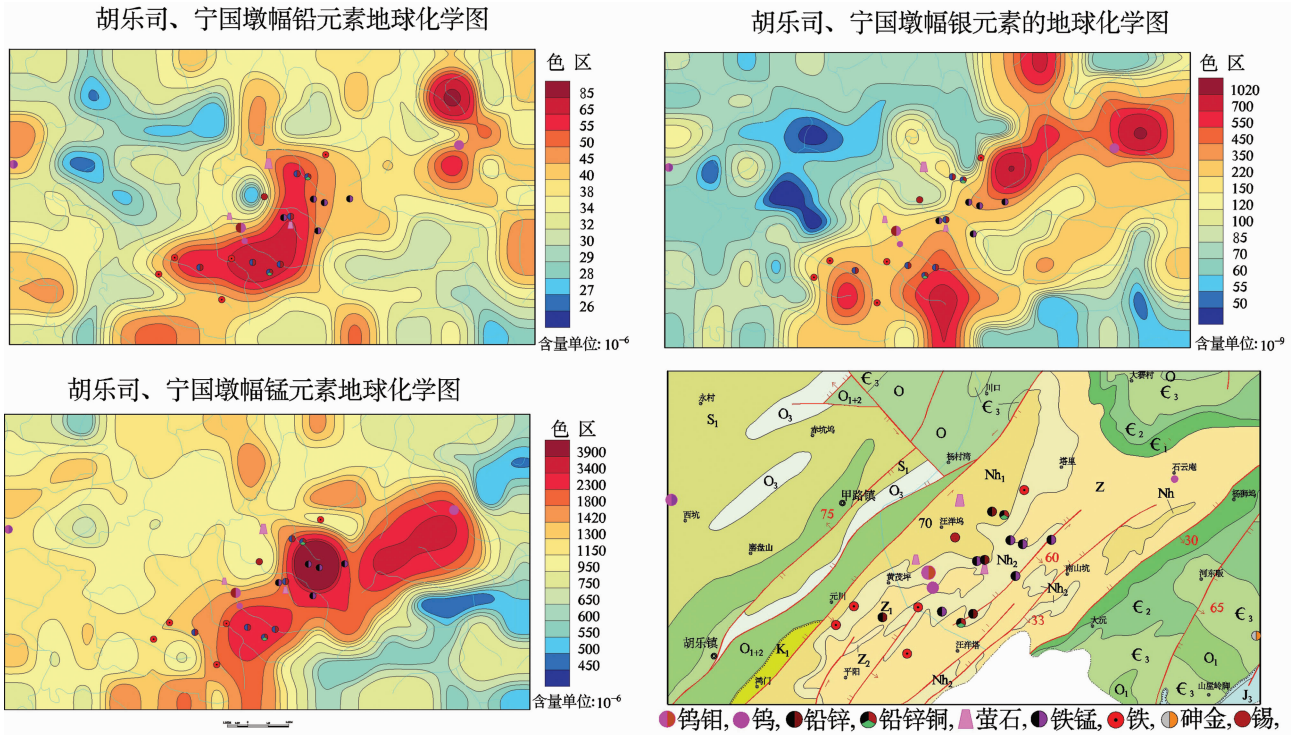


图 4 安徽省胡乐司、宁国墩幅元素区域地球化学图

(引自安徽省地质调查院,贾十军,2011)

Fig.4 Regional elemental geochemical maps of Wuleishi and Nianguodan Sheet, Anhui Province (after Jia Shijun, Anhui Institute of Geological Survey)

采样物质完全可能保持原生地球化学的基本特征,使各类数据信息真实反映地质背景与成矿异常的原生地球化学分布规律,从而在全国范围内进行对比研究。因此,表生地球化学条件下采样物质问题成为区域化探方法技术研究首先要解决的问题。

### 1.2 区域化探方法技术

区域化探工作方法技术研究的核心问题是采样物质。地理景观条件决定表生地球化学特征,进而决定区域化探采样物质。区域化探样品代表原生物质还是反映表生变化,这是产生采样物质偏差的实质。因此,要求区域化探样品采集以代表原生地质找矿信息的基岩物质成分为原则,采样物质一般应主要为基岩物理风化作用和机械方式迁移形成的介质。依据这一原则,需要具体研究采样物质的粒级问题、采样部位问题、采样布局与采样代表性问题及样品无污染加工处理问题等,实现区域化探工作方法技术的标准化。

采样物质粒级问题。中国不同气候景观条件下成壤作用差异显著,水系沉积物与土壤粒级分布反映各类景观特点和表生风化程度。研究水系沉积物

与土壤粒级分布就是为了使不同景观区采样物质更加切合基岩风化特点和代表基岩风化产物,使采样所选取的粒级更加贴近基岩物质成分和尽可能降低表生作用的影响,从而使全国各地区采样物质在代表基岩物质成分的基础上保持一致,所分析的各项元素指标也就可能在代表基岩物质成分的基础上实现全国范围的对比研究。

区域化探采样粒级的选择应符合三项基本条件:反映原生地球化学变化起伏,分布普遍(所占重量比例大)和有利于排除有机质、粘土及风成沙等表生作用干扰。基岩风化物质比例一般呈现由粗粒级到细粒级依次递减的渐变过程,显示由物理风化为风向化学风化为过渡,而有机质、粘土质及风积物等一系列干扰物质主要影响较细粒级的部分。研究中国南部湿润半湿润低山丘陵景观区可以看出(图5-I),水系沉积物粒级由+10目至-160目比例逐步降低,+60目或+80目以上粗粒级分别占80%~85%,以岩屑成分为主,主要反映物理风化作用。-80目粒级比例略有上升,表明有机质、粘土质成分增加和化学风化作用加强。物理风化与化学风化往往交互作

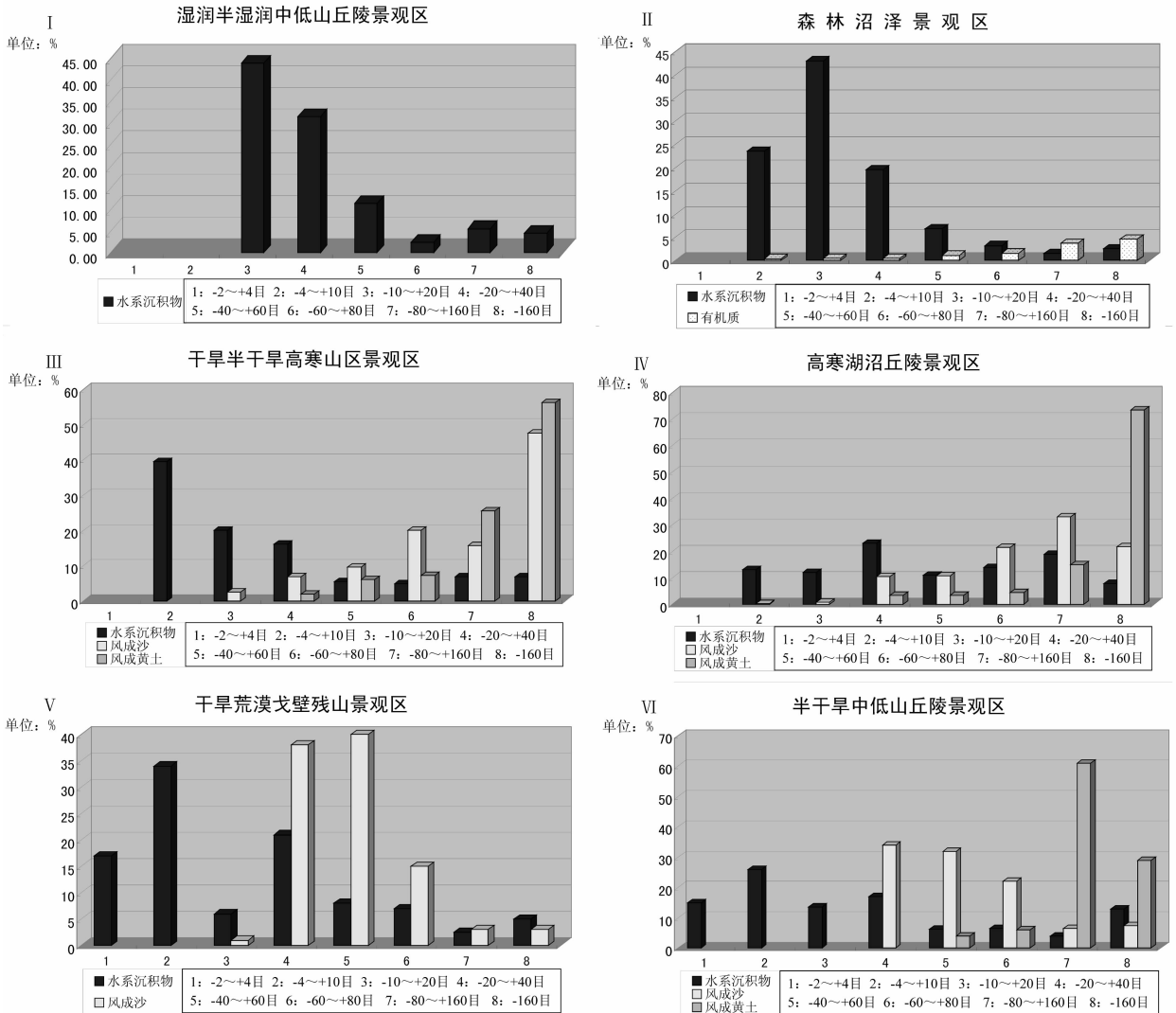


图 5 典型景观区水系沉积物、风积物粒度分布

(引自张华、宋云涛等提供资料,2011)

Fig.5 Grain size distribution of stream sediments and eolian sediments in typical landscapes

表 3 东北森林沼泽区水系沉积物不同粒级成分平均含量统计(%)

Table 3 Component statistics of different grain sizes of stream sediments in forest-swamp areas of Northeast China

粒级	样品数	岩屑	石英	长石	其他
-10~+40 目	46	76.77	15.75	3.55	3.65
-40~+60 目	36	68.94	24.08	3.37	2.43
-60~+80 目	36	55.96	34.17	4.71	5.25
-80 目	46	49.76	28.37	3.60	20.00

用,-60~+80 目可能是物理风化为向化学风化为  
主转变的粒级区间,也是采样物质选取的关键粒级

区间。我国一般由南方地区向北方过渡物理风化逐渐加强,反之,化学风化加强。由于不同景观区、不同岩性区及不同成矿类型表生风化强烈程度不同,应综合各地区特点,使采样物质在尽可能降低化学风化影响的前提下,以选择较宽的粒级区间为宜,以更加客观全面地反映各类基岩物质的元素含量范围与变化特征,特别是保留来自深部较微弱的矿化信息。一般而言,采样粒级以选择-10~+80 目为宜,化学风化较强地区可选择-10~+60 目。由于-10~+80 目(60 目)粒级比例占据最大量,涵盖各类基岩物质的原生特征,可能成为中国主要景观条件



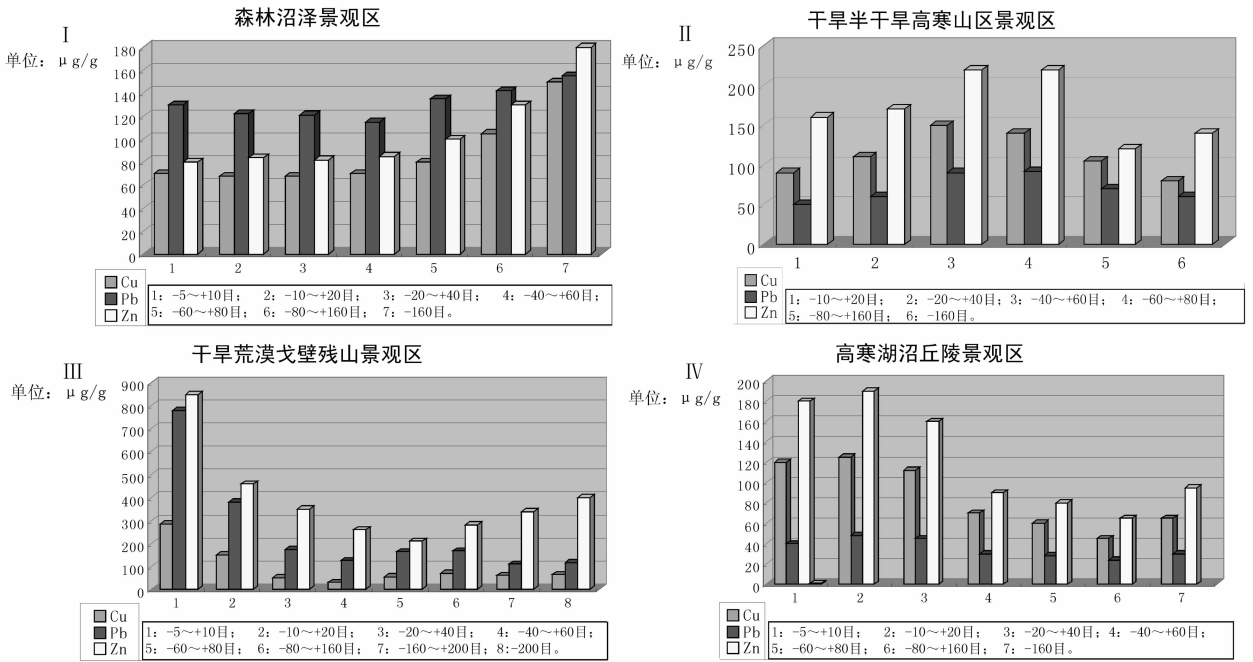


图 6 典型景观区水系沉积物元素含量分布

(引自张华、宋云涛等提供资料,2011)

Fig.6 Elemental concentrations of stream sediments in typical landscapes

下水系沉积物测量与土壤测量的基本采样粒级。

水系沉积物粒级变化通常由粗粒级向细粒级递减,但是不同景观条件下粒级分布的变化幅度往往不同。如果将中国东中部湿润半湿润低山丘陵景观区作为一般景观区,以-10~+80目(60目)粒级为水系沉积物测量的基本采样粒级,则东北部森林沼泽区,西部高寒山区、高寒湖沼区、干旱半干旱区等作为特殊景观区,需要分别研究采样粒级的分布特征,对基本采样粒级进行适度调整,确定能够反映基岩成分的特殊的采样粒级。

东北森林沼泽区地处温带寒温带,野外进行水系沉积物采样试验时为排除有机质及粘土质影响,在现场利用河流进行水筛处理,保留岩屑、矿物等基岩风化物质。研究水系沉积物粒级分布表明,-10~+80目粒级样品比例占95%以上(图5-II),其中岩屑、矿物成分达到95%<sup>[24]</sup>(表3)。因此,东北森林沼泽区可以按照一般景观区采样粒级,选择-10~+80目粒级样品。目前实际采用-10~+60目粒级证明也是

可行的(图3)。

西部高寒山区与高寒湖沼区景观,由图5-III、IV看出,水系沉积物粒级分布总体显示由粗粒级向细粒级递减,但各粒级区间比例变化幅度趋缓,反映物理风化较强和成壤作用较低的特征,能否有效排除风成沙、风成黄土干扰成为选择采样粒级的主要因素。研究各粒级岩屑比例,-4~+80目占70%~80%,风成沙与风成黄土在-60~+80目开始增多,约占25%,在-160目达到峰值,约占90%。因此,这些地区依据风积物分布特点及干扰程度,在严格采样物质、采样部位等要求情况下,仍然可以考虑选择基本采样粒级。如在藏北、青南地区采用-10~+60目粒级,在昆仑—阿尔金地区采用-10~+80目粒级(图1),均清晰地反映地质背景与成矿规律。但是,在西北极度干旱的戈壁荒漠地区及半干旱地区,基岩风化显示粗骨性特点,风积物干扰进入到较粗粒级区间(图5-V、VI),区域化探因地制宜选择采样粒级,如在新疆东天山、甘肃北山、内蒙古西部地区

① 甘肃省地质调查院.北山地区明水幅、红石山幅区域化探,2008.

② 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所,原部第二综合物探大队.内蒙古东部半干旱景观区区域化探扫面方法研究报告,1986.

③ 宁夏回族自治区地质调查院.贺兰山地区1:25万区域化探,2010.

采用-4~+20目<sup>①</sup>,内蒙古东部采用-10~+40目<sup>②</sup>,宁夏采用-5~+20目粒级<sup>③</sup>,应该说是在特定景观条件下的特殊选择。

区域化探样品各粒级成矿元素含量分布印证了关于采样物质的研究(图6)。东北森林沼泽区(图6-I)Cu、Pb、Zn峰值均在-160目最细粒级部分,反映有机质富集作用极为强烈。西北部干旱半干旱区、干旱戈壁荒漠区及高寒山区(图6-II、6-III、6-IV)各元素含量峰值在较粗粒级部分,但含量分布特点及峰值出现的粒级区间不同,表明不同景观地区、不同地质背景及成矿类型物理风化特点存在的差别。元素含量总体上由粗粒级向细粒级部分逐步降低,表明风积物干扰逐步增加,在-160目粒级元素含量又有所抬升,表明粘土吸附作用在加强。

研究全国各类景观区域化探工作方法,表明中国大部分地区采样物质可以选择基本采样粒级,仅西北干旱荒漠区及半干旱区较为特殊。在全国按照地理景观分布选择正确的采样粒级,使采样物质适合各地区基岩成分和矿床风化特点,采样粒级比例达到基岩风化物质的最大量,从而反映基岩元素地球化学分布特征、含量水平及变化规律,区域化探工作方法才可能在代表原生地球化学分布的基础上达到标准化,在图幅间、省区间及至全国层面上逼近元素地球化学真实的变化趋势,实现地质学意义上的区域地球化学填图。我国关于采样物质问题的研究持续很长时间,主要着重于研究各粒级比例、矿物成分及元素含量等,还应依据表生地球化学原理,进一步研究各类元素的表生地球化学迁移过程及其影响机制,研究气候温度、地理地貌及物理化学条件等各种复杂环境因素,研究不同基岩组成与矿床类型在不同景观区风化作用的性质及强度特征,研究表生风化作用影响程度判别和评估方法,研究各种基岩物质在不同粒级区间的分布及其风化特征,研究粘土质、有机质、风积物等表生地球化学影响特点及排除方法等。

采样部位问题。为保证采样物质的原生性质,要求水系沉积物测量采样部位必须是在活动性流水线上,目的是能够采集到新鲜的基岩风化物质。要求采样部位以适合水系沉积物-10~+80目(60目)区间各种粒级的汇集处为宜(如在水流变缓处采取混合粒级),目的是保证样品中各粒级比例处于自然分布状态。采样部位应避免粘土、有机质及风积物等分布地段,避开在活动性流水线以外的河岸、河漫滩采

样,目的是减少来自各种方式的干扰。采集基岩新鲜风化物质对于保留硫化物矿床异常尤为重要。硫化物矿床在表生条件下不稳定,水系沉积物经长时间风化和长距离搬运将大大损失其矿化元素含量信息,增大石英、长石等氧化物含量。一般识别方法,新鲜基岩风化物呈棱角状、杂色,而石英、长石等风积物呈磨圆状、灰白色等特征。

采样布局与采样密度问题。要求采样布局同时兼顾均匀性与合理性,最大限度控制调查面积。一般山区采用水系沉积物测量方法,采样布局以有效控制汇水域面积为原则;地势平缓的丘陵区采用土壤测量方法,采样点通常布置在网格的中间部位。区域化探采样布局在东中部地区基本采样密度为1~2个点/km<sup>2</sup>,主要在一级水系采样;在西部高寒陡峭山区、森林沼泽等特殊景观地区适度放稀采样密度为1~2个点/4 km<sup>2</sup>,主要在二级水系采样,目的是使采样物质尽可能接近基岩分布地区。为确保调查面积的完整性,在三、四级以上较大水系中采集控制样品,采样密度放稀至1个点/4 km<sup>2</sup>,主要反映元素地球化学的背景含量。中国山前地区或准平原区风积物、洪积物覆盖较厚,应积极推广机动浅钻采样,要求穿过覆盖层在基岩面上采集残坡积物,采样密度以不低于1个点/4 km<sup>2</sup>为宜。大量实际调查工作证明,按照目前采样布局与密度,区域化探采样误差一般不会掩盖区域地球化学的变化趋势。

采样代表性问题。采样时要求在一定范围内采集组合样品。研究表明,较粗粒级物质分布不够均匀,金、银等贵金属还存在粒径效应,水系沉积物测量采样时应特别注意沿水系多点采集组合,在羽状水系发育地区应在多条水系采样组合。西部地区往往发育“U”型谷或草皮沟,当难以采集水系沉积物时,应在汇水域内多点采集和组合残坡积土壤,代替水系沉积物样品。在平缓地区采用土壤测量时注意在较大范围多点采样组合。

样品无污染加工处理问题。区域化探样品加工处理在一般规范中都有详细规定,主要是防止采集的样品在运送、加工和处理过程各环节发生污染问题,特别要注意在样品加工时防止连续污染。

## 2 区域化探样品分析配套方案与分析质量全国监控

区域化探采样物质与样品分析是两大基本问

题。不同景观区各种风化作用在很大程度上决定采样物质的性质及特征,以不同方式改变原生地球化学状态,造成采样误差,如果在样品测试阶段形成同样失控的分析系统误差,这就会在全国范围汇集形成双重复合性的系统误差。中国区域化探样品分析具有样品数量大、物质成分杂、元素种类多、含量范围宽及测试方法多、分析实验室多、分析效率高与持续时间长等特点。为此,样品分析采取低检出限、高精度的技术路线,采用现代大型精密测试仪器,选择最优化配套分析方案,逐步建立标准分析方法系统,实行分析质量全国监控和全过程监控等。分析测试采取的一系列措施成为推动中国区域化探发展的主要技术支撑<sup>[25-26]</sup>。

2.1 样品分析检出限、精密度与配套分析方案

全国统一规定区域化探样品分析 39 种元素和氧化物,各地区根据需要增加分析 Br、C、Ce、Cl、Cs、Ga、Ge、Hf、I、In、N、Pd、Pt、Sc、Se、S、Ta、Tl、Rb 等包括稀有、稀土及分散元素在内的 19 种指标。区域化探样品分析方法检出限及准确度和精密度要求分别见表 4 与表 5。

由表看出,区域化探分析方法检出限低于或等于地壳丰度值,极大地提高方法的准确度和精密度,在现代大型精密仪器与先进技术条件支撑下,有可能实现测试方法及其配套方案的标准化。区域化探要求实验室依据技术优势及设备条件选择以下配套

分析方案,即以感耦等离子体光谱法和 X 射线荧光光谱法为主体的分析配套方案,以全谱直读光谱法为主体的分析配套方案,以等离子体质谱法为主体的分析配套方案,以仪器中子活化法和等离子体质

表 4 区域化探样品元素分析方法检出限要求<sup>①</sup>  
Table 4 Requirements of elemental detection limits for regional geochemical exploration

元素	检出限 ( $\mu\text{g/g}$ )	元素	检出限 ( $\mu\text{g/g}$ )	元素	检出限 ( $\mu\text{g/g}$ )
Ag	0.02	Pb	2	Br	1
As	1	Sb	0.1	C	*0.05
Au	$\Delta 0.3$	Sn	1	Ce	1
B	5	Sr	5	Cl	20
Ba	50	Th	4	Cs	0.2
Be	0.5	Ti	100	Ga	2
Bi	0.1	U	0.5	Ge	0.1
Cd	0.05	V	20	Hf	0.2
Co	1	W	0.5	I	0.5
Cr	15	Y	5	In	0.01
Cu	1	Zn	10	N	*0.02
F	100	Zr	10	Pd	$\Delta 0.1$
Hg	0.0005	SiO <sub>2</sub>	*0.1	Pt	$\Delta 0.2$
La	30	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	*0.05	Rb	10
Li	5	TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	*0.05	S	50
Mn	30	K <sub>2</sub> O	*0.05	Sc	1
Mo	0.4	Na <sub>2</sub> O	*0.05	Se	0.01
Nb	5	CaO	*0.05	Ta	0.1
Ni	2	MgO	*0.05	Tl	0.1
P	100				

注: \* 单位为%,  $\Delta$  单位为 ng/g。

表 5 区域化探多元素分析方法的准确度和精密度要求<sup>①</sup>

Table 5 Accuracy and precision requirements of multi-elemental analytical methods for regional geochemical exploration

表示方法	准 确 度		精 密 度
	$ \Delta \lg \bar{C}_i(GBW)  =  \Delta \lg \bar{C}_i - \lg C_s $	$RE\% (GBW) = \frac{ \bar{C}_i - C_s }{C_s} \times 100\%$	$RSD\% (GBW) = \frac{\sqrt{[\sum_{i=1}^{12} (C_i - C_s)^2] / (n-1)}}{C_s} \times 100\%$
检出限 3 倍以内	$\leq 0.10$	$\leq 23$	17
检出限 3 倍以上	$\leq 0.05$	$\leq 12$	10
1%~5%	$\leq 0.04$	$\leq 10$	8
>5%	$\leq 0.02$	$\leq 4$	3

注:  $C_i$  为 GBW 标准物质的第  $i$  次测量值;  $\bar{C}_i$  为 GBW 标准物质  $n$  次测量值的平均值;  $C_s$  为 GBW 标准物质的推荐值;  $n$  为 GBW 标准物质的测量次数。

① 中国地质调查局. 区域地球化学勘查规范 (1:250000) (讨论稿), 2010.



谱法为主的分析配套方案。从而,在实行样品分析质量全国监控条件下,确保样品分析在各地不同时间、不同实验室及不同人员分析情况下能够达到各项测试指标的质量要求。

## 2.2 样品分析质量全国监控系统

近 10 年来区域化探样品分析的总体目标是实现全国元素地球化学图无系统误差拼接。中国区域化探样品分析经历了由高检出限到低检出限,由低精度到高精度,由分析质量局部监控到实现全国全过程监控的发展。区域化探样品分析质量监控方法与目前正在实施的全国多目标区域地球化学调查完全一致,已经在同时撰写的“全国多目标区域地球化学调查:21 世纪国家地球化学填图计划”<sup>①</sup>中论述,这里的表述与之基本相同。

区域化探样品分析产生系统误差面临的最大问题就是分析实验室众多和持续时间长达数十年之久。为此,消除分析系统误差,使全国各省区实验室在不同时间的分析精度保持稳定的质量水平,实现图幅间、省际间以至全国地球化学图无系统误差接图是建立样品分析质量全国监控系统的主要目标。中国地质调查局于 1999 年设立全国区域性地球化学样品分析质量检查验收专家组,负责分析质量全国监控和管理。主要任务:①对实验室仪器设备、技术水平及测试指标等方面进行资格认定,通过国家标准样分析考核证明其各项指标达到要求和具有承担样品测试的能力;②建立样品分析质量全国监控系统,采用密码标准控制样进行实验室分析质量外部监控,采用国家标准物质进行实验室分析质量内部监控;③对各地实验室按照全国统一精度要求进行全程监控,对分析成果进行检查、评定和验收,处理分析技术与分析质量问题等。

实验室外部质量管理是控制全国分析精度的重要措施和关键环节<sup>②</sup>。外部质量控制由全国分析质量专家组通过密码插入标准控制样方法进行监控。密码标准控制样采用国家土壤一级标准物质按不同比例、不同含量及不同基体组成,由全国分析质量监控站统一配制,提供各省区实验室使用。标准控制样按样品分析批次,每 50 件插入 4 件与样品同时分析。统计标准控制样各元素测量值与控制样标准值

间对数差( $\Delta \lg C$ )以确定其准确度,按统计单元计算控制样对数标准偏差( $\lambda$ )以确定其精密度,要求各项参数合格率 $\geq 90\%$ 。为检验元素地球化学成图效果,分别绘制标准控制样标准值与测量值虚拟相似图,对相似图及有关参数进行相似性判别,同时绘制区域地球化学图,实际检验元素地球化学分布与地质背景分布的吻合程度。采用实验室外部质量控制首次实现分析精度的全国监控,最大限度地消除分析系统误差,极大地提高分析精度,在可控误差范围内实现图幅间、省际间以至全国区域地球化学图的无缝拼接。

## 3 区域地球化学填图与资源潜力评价

### 3.1 区域地球化学填图

全国区域化探按照正确的采样工作方法技术和实行样品分析质量监控,消除由于采样和分析原因造成的各类系统误差,实现区域地球化学全国接图,绘制和出版精美的地球化学图集,在矿产勘查和基础地质研究等各方面取得重大成果。

新疆西昆仑地区区域化探是一个标志性的起点。图 1 所示西昆仑区域地球化学图代表了野外调查与实验室分析的共同成果。从西昆仑地区实现图幅间无缝拼接的成功范例开始,青藏高原、西北干旱区及东北森林沼泽区等全国区域化探普遍实行规范化的工作方法与样品分析质量监控,使区域地球化学填图进入一个崭新的阶段。

1999—2009 年期间完成区域化探扫面 140 余万  $\text{km}^2$ (表 6)。高精度区域地球化学图清晰地反映成矿地球化学异常特征,为异常评价提供可靠基础资料,在找矿难度加大情况下找矿效果得到持续提高。10 年期间发现异常 1 万余处,经检查验证形成各类矿床 1 千余处(表 7~8)。同 1981—1998 年期间比

表 6 区域、普查与详查化探完成面积( $\text{km}^2$ )<sup>②</sup>  
Table 6 Areas of regional, reconnaissance and detailed geochemical exploration coverage ( $\text{km}^2$ )

年份	区域化探	普查化探	详查化探	合计
	(1:25 万~1:50 万)	(1:5 万)	(>1:5 万)	
1999—2009	1414412	442529	11766	1868707
1981—1998	5926173	1111689	110848	7148710
总计	7340585	1554218	122614	9017417

① 奚小环,李敏.多目标区域地球化学调查与评价文集,2012(待出版).

② 中国地质调查局.地质调查项目统计年报,1981—2009.

表 7 区域化探发现、检查、验证及见矿异常数<sup>①</sup>  
Table 7 Numbers of delineated, checked-up, validated anomalies and deposits discovered by regional geochemical exploration

5 年计划	发现异常数	检查异常数	验证异常数	见矿数
1999—2009	10234	3558	1301	1215
1981—1998	50711	14739	3167	2332
总计	60945	18297	4468	3547

较,平均每万平方千米见矿数,由 3.9 个上升为 8.6 个,其中新发现有色金属矿床比例由 22.8% 提高为 44.3%,这是区域化探找矿效果从以金为主扩大到其他矿种的重要进展,继续引领和保持地质找矿发展势头。

有色金属矿产方面的最大发现是青海沱沱河大型铅锌银矿,新疆祁漫塔格、彩霞山大型铅锌矿,内蒙达莱大型有色金属矿产基地等。其中青海沱沱河地区发现世界级超大规模有色金属矿产异常,异常面积连续达数万平方千米,异常元素强度高,区域分带清楚,Pb、Zn、Ag、Cd 等异常带宽 200 km,长 300 km,异常元素组合好,离差大、强度高,Pb、Zn 平均值分别为  $160 \mu\text{g/g}$ 、 $400 \mu\text{g/g}$ 。区内岩浆、构造活动发育,成矿有利地层主要为二叠系等。经深部工程验证发现储量巨大的铅、锌、铜等块状硫化物矿体,有望形成超大型矿集区<sup>②</sup>。

### 3.2 矿产资源潜力评价

矿产资源潜力地球化学评价的理论基础是成矿元素分带原理<sup>[27]</sup>。区域化探反映成矿地质原生地球化学分布特征,为资源潜力地球化学评价与定量预测提供了可靠的基础数据。国土资源部中国地质调查局 2006 年开始实施全国矿产资源潜力评价工作,依据现代成矿地质理论研究成果,系统制定资源潜力评价总体思路、技术路线及工作流程<sup>③</sup>,极大推动资源潜力地球化学评价工作,使化探从单纯提供异常信息,提高到深化成矿地球化学规律研究,进行矿产资源定量评价。资源潜力地球化学评价以成矿地球化学理论为指导,一般在区域化探阶段主要针对发现的区域性异常,研究成矿区带地质地球化学规

表 8 区域化探发现各类矿产数<sup>①</sup>

Table 8 Numbers of different kinds of ore deposits discovered by regional geochemical exploration

5 年计划	总计	能源矿产	黑色矿产	有色矿产	贵金属矿产	其他矿产
1999—2009	1232	24	23	546	343	296
1981—1998	1619	19	5	369	919	307
总计	2851	43	28	915	1262	603

律,依据区域成矿地质背景与地球化学特征划分区域异常系列及找矿远景区,指导成矿区带找矿方向,选择重要异常进行踏勘性检查。普查化探阶段主要解析区域异常系列结构与分布特征,研究矿田级成矿地球化学规律,依据典型矿床研究建立地球化学找矿预测模型进行异常筛选和找矿靶区圈定,对具有找矿意义的异常进行地表查证。详查化探阶段主要针对筛选的异常靶区进行找矿定位,研究矿床级成矿地球化学规律,依据找矿预测模型地质地球化学指标,采用类比方法进行资源定量预测及储量估算,实施深部工程验证。将资源潜力评价融入化探工作的全过程,形成化探异常定量评价的工作程序,有利于促进化探工作结合基础地质、矿产地质及各方面信息资料,提高异常解释推断水平,深化异常评价内涵。

从区域、普查到详查化探,不仅在空间上逐步缩小异常靶区,而且通过逐步深化的成矿地球化学模式研究在资源评价上趋于定量化。资源潜力地球化学评价以成矿地球化学研究为主线,按照矿床成因类型,系统研究成矿物质来源、地质环境、控矿条件、赋存状态、演化过程及地球化学特征等,研究矿床成矿系列<sup>[28]</sup>,建立区域、矿田(矿集区)及矿床等各级次找矿地球化学模式,指导相应阶段的资源评价工作。各级次成矿地球化学作用形成于特定成矿区带成矿系统中<sup>[29]</sup>,具有相互关联与相互套合的成矿地球化学模式。一般区域成矿地球化学模式主要研究重大地质事件中由系列成矿作用引起的区域异常系列,反映成矿区带中多种成矿类型的异常特征,如长江中下游成矿带燕山期岩浆-热液作用产生的斑岩型铜钼矿床、矽卡岩型铁铜矿床及角砾岩型铜金矿床等,不同成矿类型成矿元素异常成带成群分布;矿田

①中国地质调查局.地质调查项目统计年报,1981—2009.

②刘长征,等.青海沱沱河地球化学特征及找矿前景.青海省地质调查院,2009.

③叶天竺.矿产资源潜力评价方法技术要点,国土资源部,2009.

级成矿地球化学模式主要研究系列成矿作用中的某种成矿作用或成矿过程某个阶段引起的异常集群,反映可能由某种成矿类型若干矿床组成的异常特征,如长江中下游成矿带斑岩型铜铅矿田及元素异常分布;矿床级成矿地球化学模式主要研究由局部成矿要素与控矿因素形成的异常浓集区,反映某个具体矿床或矿体的异常特征,如斑岩型铜铅矿田中的某个铜铅矿床(矿体)及异常分布。资源潜力地球化学评价通过成矿地球化学异常系列划分和异常模式研究,提供大量地质找矿信息,指导找矿方向和指示找矿部位,同时进行成矿地球化学规律研究,丰富成矿地质理论体系。

## 4 结 语

随着区域化探方法技术水平与测试分析精度的提高,在高质量区域化探数据信息基础上,基于区域成矿地球化学理论建立资源潜力地球化学评价系统和实行地质找矿定量预测,建立从区域、普查到详查的全过程完整的方法技术体系和工作程序,促进勘查地球化学从单纯方法手段上升到能够指导地质找矿的理论高度,从而具备独立开展资源调查、评价和预测的能力。同时,随着地区和全国地球化学图的形成,将在基础地质、成矿规律研究以及揭示重大地质事件等方面进行对比研究,提供新的发现、新的认识和新的观点,对于未来中国勘查地球化学和整个地质工作产生重要的影响。

中国区域化探长期支撑地质找矿工作,取得重大地质找矿成果,成为整个地质找矿工作的先导。与此同时,不断完善工作方法技术和解决各种科学问题的努力与探索也从未间断过。区域化探发展表明,一门学科无论看似达到多么显著的地步,都只是另一个高度的起点。必须用科学眼光不断认识和解决存在的局限性,推动这门学科获得新的发展。

**致谢:**承蒙任天祥、张华、成杭新、宋云涛、马振东、周国华、杨忠芳、叶家瑜、杨万志、贾十军、崔玉军、陈军威、刘长征、陈惠强、孔牧、李宝强、杨少平、刘驰、陈国光、赵更新、周平、郝国杰、余涛、龚庆杰、曾春芳、杨晓军、龚鹏、张玉领等提供宝贵资料和重要修改意见,在此一并致谢!

## 参考文献(References):

- [1] 谢学锦. 区域化探[M]. 北京:地质出版社, 1979.  
Xie Xuejing. Regional Geochemical Exploration [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1979(in Chinese).
- [2] 任天祥, 赵云, 张华. 内蒙古中西部干旱、半干旱区区域化探方法技术研究 [C]//第三届勘查地球化学学术讨论会论文选编. 北京:冶金工业出版社, 1988.  
Ren Tianxiang, Zhao Yun, Zhang Hua. Researches on the methods and techniques of regional geochemical exploration in arid and semi-arid regions of middle and west inner Mongolia [C]//The Papers of the 3rd Symposium on National Exploration Geochemistry. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1988(in Chinese).
- [3] 任天祥, 杨少平, 刘应汉. 甘肃东部黄土、红土覆盖区元素迁移特征及寻找隐伏矿的地球化学方法探索[C]//第五届勘查地球化学学术讨论会论文摘要. 北京:地质出版社, 1993.  
Ren Tianxiang, Yang Shaoping, Liu Yinhan. Geochemical method study of elemental transport properties and buried deposit prospecting at loess and laterite areas in east Gansu Province [C]//The abstract of the 5th Symposium on National Exploration Geochemistry. Beijing: Geological Publishing House, 1988(in Chinese).
- [4] 张华, 刘拓, 孔牧, 等. 新疆东天山地区地球化学勘查方法技术研究[J]. 地质与勘探, 2003, 39(6): 99-102.  
Zhang Hua, Liu Tuo, Kong Mu, et al. Supergene geochemistry and geochemical exploration technology in the eastern Tianshan area, Xinjiang [J]. Geology and Prospecting, 2003, 39 (6): 99-102 (in Chinese with English abstract).
- [5] 冯治汉, 徐家乐. 甘肃省景观地球化学特征及区域化探工作方法研究[J]. 地质与勘探, 2003, 39(6): 2-5.  
Feng Zhihan, Xu Jiale. Landscape geochemistry features and working methods of regional geochemistry in Gansu Province [J]. Geology and Prospecting, 2003, 39(6): 2-5 (in Chinese with English abstract).
- [6] 庄道泽, 刘拓, 胡建伟, 等. 新疆区域地球化学勘查的回顾与展望 [J]. 物探与化探, 2003, 27(6): 425-427.  
Zhuang Daoze, Liu Tuo, Hu Jianwei, et al. The review and prospect of regional geochemical exploration in Xinjiang [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2003, 27(6): 425-427 (in Chinese with English abstract).
- [7] 丁汝福, 金凌, 陈伟民, 等. 森林沼泽景观元素次生分散富集特征 [J]. 地质与勘探, 2005, 41(6): 80-83.  
Ding Rufu, Jin Jun, Chen Weimin, et al. Characteristics of secondary dispersion and enrichment of elements in the forest-swamp area, northeastern China [J]. Geology and prospecting, 2005, 41(6): 80-83 (in Chinese with English abstract).
- [8] 金凌, 丁汝福, 陈伟民. 森林沼泽区矿产资源地球化学勘查 [J]. 物探与化探. 2003, 27(6): 431-448.  
Jin Jun, Ding Rufu, Chen Weiming. Geochemical mineral exploration in forest-swamp areas [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2003, 27(6): 431-448 (in Chinese with English abstract).
- [9] 王会峰, 叶柱才. 内蒙古森林沼泽区(五岔沟幅)1:20 万区域化探新方法的应用 [J]. 物探与化探, 2003, 27(6): 435-437.  
Wang Hui Feng, Ye Zhucui. The application of new 1:200000 regional geochemical methods to Wuchagou sheet in Inner



- Mongolian forest-swamp area [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2003, 27(6):435-437.
- [10] 马晓阳, 白显清, 臧晓凡, 等. 黑龙江沙兰站幅森林沼泽区基础地质调查中的区域化探新方法 [J]. 物探与化探, 2005, 29(2):108-110.
- Ma Xiaoyang, Ba Xianqing, Zang Xiaofan, et al. New regional geochemical exploration methods in basic geological survey of Shalanzhan sheet forest-swamp area, Heilongjiang Province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2005, 29(2):108-110 (in Chinese with English abstract).
- [11] 杨少平, 刘还林, 刘新华, 等. 我国森林沼泽景观区水系沉积物中腐殖作用的地球化学特征[J]. 物探与化探, 2009, 33(5):529-532.
- Yang Shaoping, Liu Huailin, Liu Xinhua, et al. Geochemical characteristics of humification in stream sediments of the forest swamp landscape area[J]. Geophysical and Geochemical exploration, 2009, 33(5):529-532(in Chinese with English abstract).
- [12] 王丹丽, 关子川, 王恩德. 腐殖质对重金属离子的吸附作用[J]. 黄金, 2003, 24(1):47-49.
- Wang Danli, Guan Zichuan, Wang Ende. Absorption of heavy metal ions onto humus [J]. Gold, 2003, 24(1):47-49 (in Chinese with English abstract).
- [13] 卢家烂, 傅家谟, 刘金钟. 腐殖酸与铅锌相互作用的实验地球化学[J]. 矿床地质, 1995, 14(4):362-368.
- Lu Jialan, Fu Jiamo, Liu Jinzhong. Experimental geochemistry of interaction between humic acid and  $Pb^{2+}(Zn^{2+})$  [J]. Mineral Deposits, 1995, 14(4):362-368(in Chinese with English abstract).
- [14] Boyle R W. Cupriferous bogs in the Sackville area, New Brunswick, Canada[J]. J. Geoch. Expl., 1977, 8:495-528.
- [15] Gleeson C F, Coope J A. Some observations on the distribution of metals in swamps in eastern Canada [C]//Cameron E M (ed.). Proc. Symp. Geochem. Prospecting, Ottawa. Geol. Survey. Can. Pap., 1966, 66:145-166.
- [16] Chowdhury A N, Bose B B. Role of humus matter in the formation of geochemical anomalies [C]//Boyle R W, McGerrigle (eds.). Geochemical Exploration. C.I.M. Special Vol., 1971, 11:410-413.
- [17] Baker W E. The role of humic acids from Tasmanian podzolic soils in mineral degradation and metal mobilization [J]. Geochem. Cosmochim. Acta., 1973, 37:269-281.
- [18] Jackson K S, Skippen G B. Geochemical dispersion of heavy metals via organic complexing: a laboratory study of copper, lead, zinc, and nickel behaviour at a simulated sediment-water boundary[J]. J. Geochem. Explor., 1978, 10:117-138.
- [19] 任天祥, 伍宗华, 羌荣生. 区域化探异常筛选与查证的方法技术 [M]. 北京:地质出版社, 1998.
- Ren Tianxiang, Wu Zonghua, Qiang Rongsheng. Methodology and technology on screening and exploration of regional geochemical anomalies [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1998(in Chinese).
- [20] 陈骏, 王鹤年. 地球化学[M]. 北京:科学出版社, 2004.
- Chen Jun, Wang Henian. Geochemistry[M]. Beijing:Science Press, 2004(in Chinese).
- [21] 刘铁庚, 叶霖, 王兴理, 等. 化学作用是干旱地区岩石风化的主要因素——蒸发与淋漓模拟实验 [J]. 中国地质, 2007, 34(5):814-821.
- Liu Tiegeng, Ye Lin, Wang Xingli, et al. Chemical action is an important factor for rock weathering in arid areas—Simulating experiments of evaporation and leaching [J]. Geology in China, 2007, 34(5):814-821(in Chinese with English abstract).
- [22] 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. Multi-purpose comprehensive geological survey: the strategic choice of exploration geochemistry in 21st century [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2007, 31(4):283-288 (in Chinese with English abstract).
- [23] 张华, 张玉领, 史新民. 河北围场幅 1:20 万化探方法技术讨论[J]. 物探与化探, 2004, 28(1):35-38.
- Zhang Hua, Zang Yuling, Shi Xinmin. A discussion on methods and techniques for 1:200000 regional exploration in Weichang sheet, Hebei Province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2004, 28(1):35-38(in Chinese with English abstract).
- [24] 杨少平, 孔牧, 刘华忠, 等. 我国东北部森林沼泽景观区化探扫面方法技术研究[J]. 地质与勘探, 2003, 39(6):94-98.
- Yang Shaoping, Kong Mu, Liu Huazhong, et al. A research on regional geochemical methodology for the landscape of forest-swamp in the northeast of China [J]. Geology and Prospecting, 2003, 39(6):94-98(in Chinese with English abstract).
- [25] 叶家瑜, 江保林. 区域地球化学勘查样品分析方法[M]. 北京:地质出版社, 2004.
- Ye Jiayu, Jiang Baolin. Sample Analytical Methods for Regional Geochemical Exploration [M]. Beijing:Geological Publishing House, 2004(in Chinese).
- [26] 叶家瑜, 姚岚. 区域地球化学调查样品分析质量控制方法探讨 [J]. 岩矿测试, 2004, 23(2):137-142, 147.
- Ye Jiayu, Yao Lan. Discussion of quality control method for the analysis of samples in regional geochemical survey [J]. Rock and Mineral Analysis, 2004, 23(2):137-142, 147(in Chinese).
- [27] 奚小环. 1999—2001· 勘查地球化学· 资源与环境 [J]. 物探与化探, 2003, 27(1):1-6.
- Xi Xiaohuan. Exploration geochemistry·resources and environment in 1999—2001[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2003, 27(1):1-6(in Chinese with English abstract).
- [28] 陈毓川, 裴荣富, 宋天锐. 中国矿床成矿系列初论[M]. 北京:地质出版社, 1998.
- Chen yuchuan, Pei Rongfu, Song Tianrui. Primary Introduction on Minerogenetic Series of Mineral Deposits in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998(in Chinese).
- [29] 翟裕生, 邓军, 李晓波. 区域成矿学[M]. 北京:地质出版社, 1999.
- Zhai Yusheng, Deng Jun, Li Xiaobo. Essentials of metallogeny[M]. Beijing:Geological Publishing House, 1999(in Chinese).

## Regional geochemical exploration in China: from 1999 to 2009

XI Xiao-huan, LI Min

(China Geological Survey, Beijing 100011, China)

**Abstract:** Regional geochemical exploration in China changed greatly from 1999 to 2009. Regional geochemical exploration methods and techniques as well as mineral resources potential assessment have been deliberately studied and remarkable progress has been achieved under the guidance of geochemical theory. The principle of regional geochemical exploration methods and techniques developed aims at demonstrating the primary state of geochemical distribution in the highest degree. Selection of sampling media suitable for landscape and surficial geochemical condition is the key problem for regional geochemical survey. Samples collected should reflect the information of geology and mineralization, and hence weathered material of rocks is usually selected as sampling media. Efforts have also been made to collect the same material over the whole country. The established methods for mineral resources potential assessment and quantitative mineralization prognosis based on the theory of geochemical zoning have promoted the exploration geochemistry from pure methods to a theoretical level for steering mineral prospecting. The main achievements are as follows: systematic methods and techniques of national regional geochemical exploration have been established; analytical process and its quality are strictly controlled; Several geochemical atlases have been published based on accurate geochemical data, which can exactly reveal geological setting and anomalous characteristics; regional geochemical data and its information have been studied profoundly and applied widely; the methodology system and working procedure from regional, reconnaissance to detailed exploration have been established for resource survey, assessment and prognosis. Regional geochemical exploration has been supporting mineral survey in China for a long period, acting as a forerunner of all geological work. It is certain that regional geochemical data will play an important role in new discovery, new understanding and new viewpoints of basic geology, mineralization regularity, and great geological events with the compilation of new geochemical maps covering various regions and the whole country. All this will have great influence on exploration geochemistry and geological work in China.

**Key words:** regional geochemical exploration; method and theory; primary geochemistry; surficial geochemistry; analytical precision; analytical monitoring; accurately

---

**About the first author:** XI Xiao -huan, male, born in 1949, senior engineer, engages in exploration geochemistry; E-mail: xxiaohuan@sohu.com.

**About the corresponding author:** LI Min, E-mail: goflyyourkite@163.com.