

·矿产资源·

国际地球化学填图样品分析方法和数据对比

姚文生, 王学求, 谢学锦

YAO Wen-sheng, WANG Xue-qiu, XIE Xue-jing

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

Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang 065000, Hebei, China

摘要:以中国和世界发达国家或地区(欧洲、北美、澳大利亚与日本)过去 10 年内完成的或目前正在开展的全球性或国家性地球化学填图项目为例,总结了国际地球化学样品分析技术的新进展,并以中国实验室与欧洲实验室的分析数据的对比结果,剖析国际地球化学填图样品分析技术面临的挑战。研究表明:分析组成地壳所有元素的构想已被越来越多国家性、全球性地球化学填图项目所采纳;中国是世界上唯一具有填图样品 76 元素分析能力的国家;高水平的分析实验室(欧洲与中国)取得的数据大部分可以实现对比,但仍有 10 余个元素的分析数据存在明显偏差。实现所有分析元素数据的全球可对比,应是今后国际地球化学填图样品分析技术的主要发展方向。

关键词:国际地球化学填图;分析方法;分析元素;检出限;数据对比

中图分类号:P595; P622⁺.3; P623.1

文献标志码:A

文章编号:1671-2552(2011)07-1111-08

Yao W S, Wang X Q, Xie X J. A comparison of analytical techniques and data for international geochemical mapping samples. *Geological Bulletin of China*, 2011,30(7):1111-1118

Abstract: The progress of chemical analysis techniques for national and international geochemical mapping samples are reviewed, focused on the mapping programs completed in the past ten years or ongoing projects such as in China, Europe, North America, Australia and Japan. The comparison of analysis data obtained by Chinese and European laboratories are described. The study shows that the recommendation for analyses of elements by IGCP 259 has been followed by more and more national and global geochemical mapping practice. China now has the ability to determine 76 elements for geochemical mapping. The study demonstrates that comparable analytical data of certain elements can be achieved by different high-level laboratories, such as some European and Chinese laboratories. However, the obvious biases exist between two datasets for more than 10 elements. Development of standard geo-analytical methodologies is still needed to obtain globally comparable geochemical data for international geochemical mapping programs.

Key words: international geochemical mapping; analytical method; chemical element; detection limit; data comparison

地球化学是定量测定地球及其各个组成部分的物质组成,以发现每种元素分布特征及演化规律的科学^[1]。地球化学填图是使用标准化的方法,以各种比例尺的图件形式绘制化学元素在空间上的分布和变化,对资源和环境问题的解决提供基础性数据和图件。自从 20 世纪 50 年代国际上开展地球化学填图工作以来,其技术发展主要是依靠分析技术的进

步。通过发展新的分析技术,或对已有方法进行改进,为地球化学填图工作提供更高灵敏度、更加便捷的多元素分析方法^[2-5]。

在中国,分析工作一直被认为是地球化学填图的重要环节。自中国区域化探项目启动之初,谢学锦^[6]就对分析技术提出了一系列前瞻性的高要求,以求实现不同阶段、不同实验室的分析数据可以对

收稿日期:2011-02-22;修订日期:2011-03-31

资助项目:国土资源部行业专项《深部探测技术与实验研究》第四项目(编号:Sinoprobe-04)和国家“973”计划课题(编号:2007CB411406)

作者简介:姚文生(1968-),男,高级工程师,从事勘查地球化学及地球化学分析技术研究。E-mail: yaows68@yahoo.com.cn

通讯作者:王学求(1963-),男,研究员,从事勘查地球化学及地球化学基准值研究。E-mail: wangxueqiu@igge.cn

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

比。国际上,地球化学填图样品分析技术过去没有得到应有的重视,长期存在的主要问题是:分析元素少且不统一;一些痕量元素的检出限达不到分析数据报出率的要求;缺少统一的、严密的质量监控方案和数据评价体系^[3,7]。过去已开展的区域性或国家性地球化学填图积累了海量的地球表面元素分布数据,但难以应用于全球性的地球化学元素分布研究。

自 1989 年以来,当代应用地球化学家开始寻求全球地球化学填图的方法与途径,以求取得周期表内几乎所有元素在全球大陆的分布状况,为地球科学理论研究、矿产资源的发现与管理、环境的监控与防治提供全球性的基础数据。20 多年过去了,地球化学家们为此付出了巨大的热情与不懈的努力,但进展缓慢。其主要原因,一是缺少足够的资金和有效的实施途径,难以完成 IGCP259/360 所制定的全球 5000 个 160km×160km 采样格子的采样工作,需要填图理念的更新与填图技术的发展;二是国际上一些地区或国家过去开展的,特别是近年来开展的国家性或区域性地球化学填图项目,如何使其采集的样品和分析数据为全球地球化学填图工作所用,需要研究其数据的全球可对比性^[4]。

本文以中国和世界发达国家或地区(欧洲、北美、澳大利亚与日本)近年来完成的或正在开展的全球性或国家性地球化学填图项目为例,总结国际地球化学样品分析技术进展,并以中国实验室与欧洲实验室的分析数据为例进行对比,探讨国际地球化学样品分析技术面临的挑战。

1 国际地球化学填图新项目

中国:1999 年谢学锦院士提出 76 种元素的地球化学填图计划,该项目研制了 76 种元素的分析系统和质量监控方法,并利用中国西南和南方 11 省、自治区、直辖市 RGNR 计划的样品库存储样品,按每个 1:5 万图幅组成 1 个组合样进行分析,制作了中国南方 76 种元素地球化学图件。76 种元素除包括 IGCP259/360 建议分析的 71 种元素外,还加入了铂族的其它 4 个元素 Os、Ru、Ir、Rh 和元素 Re^[8-10]。2008 年,在中国深部探测与实验研究专项的支持下,《中国地球化学基准值项目》开始正式实施。该项目要建立 1 个覆盖全国的地球化学基准网,系统采集代表性岩石样品 10000 件,疏松物样品 6000 件,按标准化的方法分析其主量元素和微量元

素的含量(包含 78 种元素、81 种分析指标),建立中国大陆地球化学基准值,为研究化学元素的分布、演化和成矿物质背景提供基准参考数据^[11]。

欧洲 FOREGS 地球化学基准值填图计划(FOREGS Geochemical Baseline Mapping Programme):作为全球地球化学基准值计划在欧洲的实施,该计划于 1996 年被欧洲 26 个国家地质调查局长论坛(FOREGS)正式批准。计划的主要目的:一是使用标准化的采样、分析和数据处理方法制作全欧洲的地球化学图,二是将这些参考网络数据作为欧洲各个国家基准值数据库的标准^[12-13]。按照全球参考网格(Global Reference Network, GRN),每个格子大小是 160km×160km,在每个格子里布置 5 个采样点。欧洲(除俄罗斯以外)面积 420×10⁴km²,共部署 808 个采样点,约 5000km² 部署 1 个采样点。每个采样点上采集了河水、水系沉积物、土壤、腐殖质、河漫滩沉积物样品,同时在 750 个点上采集了泛滥平原沉积物样品^[12-13]。样品分析由德国、英国、法国、斯洛伐克、芬兰、匈牙利、荷兰、挪威、波兰 9 个实验室完成。经过近 10 年的工作,于 2005 年出版了电子版欧洲地球化学图集。此外,欧洲在过去 10 年内还开展了波罗的海国家土壤填图项目(The Baltic Soil Survey)和欧洲耕地、牧场土壤地球化学填图计划(Geochemical Mapping of Agricultural Soils)。在以上填图项目中,FOREGS 计划的分析技术最能代表目前欧洲的最高水平,该计划的样品介质种类多,且每种介质样品的分析方法和分析元素均有所区别,本文主要以其土壤和沉积物的分析方法为考察对象。

澳大利亚国家地球化学填图项目(The National Geochemical Survey of Australia,简称 NGSA):澳大利亚地学署于 2006 年开始此项工作,计划于 2011 年完成。该项目在澳大利亚全国 1187 个流域 1315 个采样点(含 10%的重复采样点)分别采集表层和深层样品,平均采样密度为 1 采样点/5500km²。每个样品筛取 2 种粒级样品,共将获得 5260 个分析样品,分析 68 种元素的全量和元素活动态含量^[14]。

北美土壤地球化学景观项目(The North American Soil Geochemical Landscapes Project):2002 年,美国地质调查局、加拿大地质调查局和墨西哥地质调查局联合启动了北美土壤地球化学景观这一长期合作项目,采用统一的样品采集和分析方法,开展北

美土壤地球化学填图工作。目的是通过系统的地球化学调查,研究北美土壤中化学元素或物质的地球化学基准和元素分布。该项目采样密度为 1 个样/1600km²,分析 40 余种元素、10 余种有机污染物等指标,部分样品还增加分析了 N、P 等元素^[15-16]。

日本国家地球化学填图项目:日本地质调查局于 1999 年启动了 1:200 万国家性地球化学填图项目,该项目主要目的是采用统一的采样密度、采样方法、采样介质、样品粒度、分析方法和分析元素,并于 2004 年制作日本全国陆地地球化学图集,为环境评价服务。该项目采样密度为 1 个样/100km²,采样介质以水系沉积物为主,共采集 3000 余件样品,采用 ICP-AES/MS 分析 53 种元素。此外,日本还开展了海底沉积物地球化学填图项目,共采集 5000 余件样品,同样分析 53 种元素,制作日本海底沉积物地球化学图集^[17]。

2 国际地球化学填图项目
分析技术对比

2.1 分析元素

地球上一切有生命和无生命的物质,如矿物、植物、动物等,均是由元素周期表中的一种或多种元素及其化合物构成的。全球性或国家性地球化学填图应分析元素周期表中尽可能多的元素,以满足资源、环境、农业等多学科的应用需求。国际地球化学填图项目 IGCP259 提出了分析元素周期表中 71 种元素的阶段性目标(图 1)^[2]。地球化学家的最终梦想是完成覆盖全球陆地,周期表中除人工元素、惰性气体元素之外所有元素的

地球化学图^[18]。

IGCP259 推荐分析 71 种元素,中国和世界发达国家、地区近年来已开展或正在开展的全球性或国家性地球化学填图项目的沉积物或土壤样品没有分析的元素列于表 1。尽管 5 个国家或地区项目的填图目的不尽相同,但均在经费和技术许可的条件下力争分析更多的元素。5 个项目均分析的元素数达 38 种,其中 4 个项目均分析的元素数达 58 种,3 个项目均分析的元素数达 63 种,至少 2 个项目分析的元素数达 70 种。至少有 3 个项目均没有分析的元素是: Au、Br、Cl、F、Ge、I、N、Pt、Pd,其中元素 Br 只有中国的地球化学填图项目进行了分析。中国在地球化学填图样品分析方法方面取得了巨大进展^[19],除 IGCP 259 推荐的 71 种元素外,还增加分析了 Ru、Os、Ir、Rh 和 Re 五个元素,首次实现了 76 元素地球化学编图^[8-10]。



图 1 国际地球化学填图项目 IGCP259 推荐分析元素
Fig. 1 Recommended list of elements by International
Geochemical Mapping Project IGCP259

表 1 据 IGCP259 推荐分析元素地球化学填图项目未分析的元素

Table 1 Unanalyzed elements in analysis elements
recommended by International Geochemical Mapping Project IGCP259

填图项目	未分析元素数	未分析元素项目
中国南方76种元素地球化学编图	0	
欧洲FOREGS地球化学基准值填图计划	10	Au、B、Br、Cl、F、Ge、N、Pd、Pt、Se
澳大利亚国家地球化学填图项目	4	Br、C、I、N
北美土壤地球化学景观项目	25	Au、B、Br、Cl、Dy、Er、Eu、F、Gd、Ge、Hf、Ho、I、 Lu、Nd、Pd、Pr、Pt、SiO ₂ 、Sm、Ta、Tb、Tm、Yb、Zr
日本国家地球化学填图项目	18	Ag、Au、B、Br、C、Cl、F、Ge、I、 In、Lu、N、Pd、Pt、S、Se、Te、W

2.2 分析检出限

元素检出限,特别是痕量元素的检出限,是衡量分析方法是否满足地球化学填图要求的重要指标。中国的地球化学填图项目强调元素检出限必须低于测定介质的元素丰度,且数据的报出率不能低于80%^[2-3,7,20]。表2中列出的是地壳丰度小于3μg/g元素的国际地球化学填图项目分析检出限。国际上一些填图项目的样品被承包给国际商业实验室分析,因此在表2中,将总部分别位于加拿大和澳大利亚的ACME、Genalysis两家商业实验室的地球化学样品分析检出限^[19,21]一并列出比较。由于笔者尚未取得日本地球化学填图项目的分析检出限资料,表2中列出了日本全国样品分析数据的最小值,以供参

考。澳大利亚填图项目的分析检出限基本可满足IGCP259的要求,具体检出限数据因澳方尚未正式发表,本文不便列出(据Caritate与笔者个人交流)。中国实验室的分析方法已完成了大量国内外地球化学填图项目的样品分析工作,实践证明其所有元素的分析检出限均可满足IGCP259的要求。通过其它填图项目(实验室)、IGCP259的要求与中国的分析方法的检出限对比,可以看到,目前大多数元素的分析检出限均可满足填图项目的要求。

2.3 分析方法

中国运用15种分析方法成功地实现了地球化学填图样品76个元素的分析,是目前世界上分析元素最多的国家(表3)。国外几个填图项目的分析

表2 国际地球化学填图项目部分元素分析检出限和IGCP259对检出限的要求
Table 2 Detection limits of part of elements in International Geochemical Mapping
Project and the requirements of IGCP259 for detection limits

元素	地壳丰度	IGCP259 对检出限	各 项 目 (实 验 室) 的 分 析 检 出 限 /μg·g ⁻¹					
	/μg·g ⁻¹	的要求/μg·g ⁻¹	中国	FOREGS	北美	日本#	ACME	Genalysis
Au	0.001	0.0002	0.00005				0.0005	0.0001
Bi	0.0085	0.05-0.1	0.05	0.5	0.04	0.024	0.1	0.01
Se	0.05	0.02	0.01		0.2		0.1	0.5
Ag	0.075	0.02	0.02	0.05	0.01		0.02	10
Hg	0.085	0.01-0.05	0.002	0.0001	0.02	<10	<10	<10
Cd	0.15	0.05-0.1	0.02	0.01	0.1	0.017	0.02	0.02
Sb	0.2	0.04	0.05	0.02	0.05	0.066	0.05	0.02
Mo	1.2	0.5	0.3	0.1	0.05	0.164	0.05	0.1
W	1.25	0.2-0.5	0.3	5	0.1		0.1	0.1
As	1.8	0.5-1.0	1	0.2	1	<1	0.2	0.5
Sn	2.3	1.2	1	2	0.1	0.468	0.1	0.1
U	2.7	0.05	0.2	0.1	0.1	0.116	0.1	0.01
Be	3.0	0.5	0.2	2	0.1	0.118	1	0.05
Pt		0.001	0.0002				0.1	1
Pd	0.015	0.0005	0.0002				0.5	1
Te		0.01-0.02	0.01	0.02	0.1		0.02	0.05
In	0.25	0.05-0.1	0.01	0.01	0.02			0.005
I	0.45	0.2-0.5	0.5	2				
Tm	0.52	0.5	0.1	0.02		0.036	0.1	0.01
Tl	0.85	0.1-0.5	0.1	0.01	0.1	<0.01	10	0.02
Ho	1.3	1.0	0.1	0.02		0.091	0.1	0.01
Ge	1.5	0.5-1.0	0.1				3	0.05
Eu	2.0	0.5-1.0	0.1	0.05		0.175	0.1	0.01
Ta	2.0	1.0	0.1	0.05		0.003	0.1	0.01
Hf	3.0	1.2	0.2	0.2		0.141	0.02	0.05

注: # 日本填图项目所有样品元素分析最小值

方案相对简单,如 FOREGS 采用了融片-XRF、四酸溶样-ICPMS、定碳仪和测汞仪 4 种方法分析了 61 种元素,北美土壤地球化学景观计划采用四酸溶样-ICPMS、ICP-AES 测定了 42 种元素,日本采用四酸溶样-ICPMS、ICP-AES 分析了全部 53 种元素。在国外的几个填图项目中,澳大利亚国家地球化学填图计划分析元素最多,分析方法也较多,但采用王水溶样 ICP MS 方法测定的溶样方法不能使所有分析元素达到全溶,因此满足全量分析的元素数要少于 67 元素。当 ICP-MS 开始应用于地质实验时,欧洲地球化学家们曾认为,这种方法将会完全取代地球化学填图的多元素分析方法,谢学锦当时认为这种想法过于乐观,仍有少数元素需采用特殊的分析方法^[3]。现在看来,大型先进分析仪器还不能完全解决地球化学填图所有元素的分析问题。

2.4 分析数据的可对比性

国际地球化学填图的质量首先在于多元素分析的质量,高质量的分析数据必须实现全球对比。欧洲和中国在国际地球化学填图中起着积极的推动作用,取得的进展也是最显著的,样品分析技术的发展也是如此。笔者另文开展了中国与欧洲分析数据的

对比研究工作^[21],采用 FOREGS 项目的土壤样品分析副样,按全球地球化学填图采样格子进行组合,组合样在中国地质科学院物化探研究所实验室分析 71 种元素。同时,对每个采样格子内所有样品的 FOREGS 分析数据取平均值作为组合样 FOREGS 的分析值,通过数据统计、散点图、地球化学图等方式进行了对比研究。研究发现,Si、Sr、Al、Zr、Ba、Fe、Ti、Rb、Mn、Gd、Ca、Ga、Mg、P、Pb、Na、Y、Th、As、U、Sc、Cr 和 Co 等 23 种元素,双方数据和地球化学图高度一致;Ni、K、Tb、Tl、Cu、S、Sm、La、Ce、Pr、Nd、Eu、Ho、Er、Tm、Yb、Lu、Ta、Nb、Hf、Dy、Cd、Cs、Sb、In、Mo、I、Se 等 28 种元素,双方数据存在一定偏差但地球化学图的相似性较好。这一研究结果表明,高水平的分析实验室(欧洲与中国)取得的数据大部分可以对比,这是令人鼓舞的分析技术的重要进展^[21]。

但还有近 10 种元素,双方的分析数据存在明显偏差(图 2、图 3)。特别是 Ag,虽然双方的分析方法和检出限均满足数据报出率的要求,但存在明显偏差,地球化学图的相似程度差(图 4)^[20]。从分析方法的角度考虑,中欧双方均采用 XRF 方法分析的元素的数据最接近,均采用 ICP-MS 分析元素的数据相似

表 3 中国地质科学院物化探研究所实验室地球化学填图样品 76 元素分析方案^[19]

Table 3 Analytical scheme for 76 elements in geochemical mapping samples designed by laboratory of Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences

序号	分 析 方 法	指标个数	分 析 指 标
1	ICP-MS(等离子体质谱法)	13	Bi、Cd、Cs、Hf、In、Mo、Pb、Sc、Ta、Th、Tl、
2	ICP MS(等离子体质谱法)	15	La、Y、Ce、Dy、Er、Eu、Gd、Ho、Lu、Nd、Pr、 Sm、Tb、Tm、Yb
3	ICP MS(铈锆试金法-等离子体质谱法)	6	Ir、Os、Pd、Pt、Rh、Ru、(Re)
4	ICP MS(等离子体质谱法)	1	Te
5	FU-XRF (溶片-X射线荧光光谱法 对常量氧化物)	20	SiO ₂ 、Al ₂ O ₃ 、TFe ₂ O ₃ 、K ₂ O、Ba、Br、Cl、Co、Cr、 Cu、Ga、Nb、Ni、P、Rb、S、Ti、V、Zn、Zr
6	ICP-OES (等离子体光学发射光谱法)	7	CaO、MgO、Na ₂ O、Be、Li、Mn、Sr
7	ES(发射光谱法)	3	Ag、Sn、B
8	GF-AAS(石墨炉原子吸收光谱法)	1	Au
9	HG-AFS(氢化物原子荧光光谱法)	2	As、Sb
10	HG-AFS(氢化物原子荧光光谱法)	1	Se
11	HG-AFS(氢化物原子荧光光谱法)	1	Ge
12	CV-AFS(冷蒸气-原子荧光光谱法)	1	Hg
13	ISE(离子选择性电极法)	1	F
14	COL(分光光度法)	1	I
15	GC(气相色谱法)	2	C、N
16	VOL(容量法)	1	TOC

表 4 澳大利亚国家地球化学填图计划 67 元素分析方案^[14]

Table 4 Analytical scheme for 67 elements in Australian national geochemical mapping program

序号	分 析 方 法	指标个数	分 析 指 标
1	四酸溶样-ICP-MS(等离子体质谱法)	43	Ag、As、Ba、Be、Bi、Cd、Ce、Co、Cr、Cs、Cu、Dy、Er、Eu、Ga、Gd、Ge、Hf、Ho、La、Lu、Mo、Nb、Nd、N、Pb、Pr、Rb、Sb、Sc、Sm、Sn、Sr、Ta、Tb、Th、U、V、W、Y、Yb、Zn、Zr
2	王水溶样-ICP MS(等离子体质谱法)	60	Ag、Al、As、Au、B、Ba、Be、Bi、Ca、Cd、Ce、Co、Cr、Cs、Cu、Dy、Er、Eu、Fe、Ga、Gd、Ge、Hf、Hg、Ho、In、La、Lu、Mo、Nb、Nd、K、Li、Mg、Mn、Na、Re、Se、Te、Tl、Tm、N、Pb、Pr、Rb、Sb、Sc、Sm、Sn、Sr、Ta、Tb、Th、U、V、W、Y、Yb、Zn、Zr
3	FA-AR-ICP MS(火试金-等离子体质谱法)	3	Au、Pd、Pt
4	XRF (X射线荧光光谱法对常量氧化物)	19	Al、Ca、Cl、Cu、F、Fe、K、Mg、Mn、Na、Ni、P、Rb、S、Si、Sr、Ti、Zn、Zr
5	ISE(离子选择性电极法)	1	F
6	MMI-ME ICP-MS(金属活动离子法)	54	Ag、Al、As、Au、Ba、Bi、Ca、Cd、Ce、Co、Cr、Cs、Cu、Dy、Er、Eu、Fe、Ga、Gd、Hg、La、Mo、Nb、Nd、K、Li、Mg、Mn、Ni、P、Pd、Pt、Te、Tl、Ti、Pb、Pr、Rb、Sb、Sc、Se、Sm、Sn、Sr、Ta、Tb、Th、U、V、W、Y、Yb、Zn、Zr

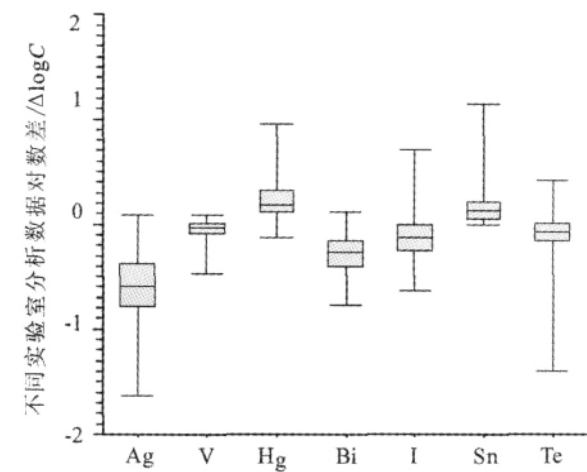


图 2 中国与 FOREGS 部分元素分析数据 $\Delta\log C$

Fig. 2 $\Delta\log C$ of analytical data of some elements analyzed by China and FOREGS laboratories

性较好，但中国实验室采用的具有中国特色的分析技术如原子荧光、发射光谱分析数据与欧洲采用 ICP-MS 分析数据的相似性相对较差。这些差异性，

可能也正是中国实验室选用中国特色分析技术的主要原因。

提高分析数据的全球可对比性，需要全球地球化学分析工作者的共同努力。首先是标准样品问题。目前，只有中国地质科学院物化探研究所研制的地球化学标样开展了 76 种元素的定值工作，其它国家研制的地球化学标样较少，定值元素少、元素含量覆盖范围少，不能满足样品分析质量监控的需要。其次是分析数据质量评价方法需要建立统一的标准，来指导全球不同实验室的分析方法研发和质量监控工作。

3 结 语

随着等离子体光谱和质谱仪器引入地质测试实验室，国际地球化学填图样品分析技术有了明显的提高，特别是多元素分析能力得到较大的提高，分析成本降低，分析元素周期表中所有元素的构想已被越来越多的国家性、全球性地球化学填图项目所采

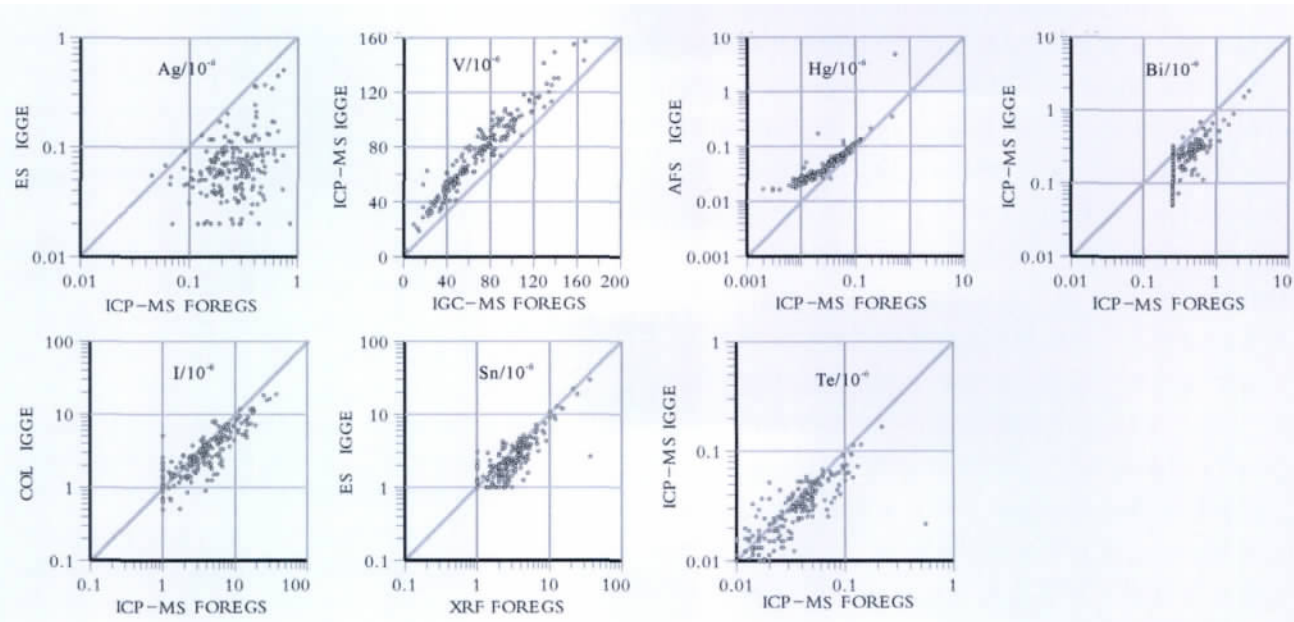


图 3 FOREGS 地球化学填图项目土壤样品中国和欧洲实验室部分元素分析数据散点对比图

Fig. 3 Scatter diagram comparison of analytical data of some elements in soil samples between laboratories in China and in Europe for FOREGS geochemical mapping project

IGGE 为地球物理地球化学勘查研究所的英文名缩写

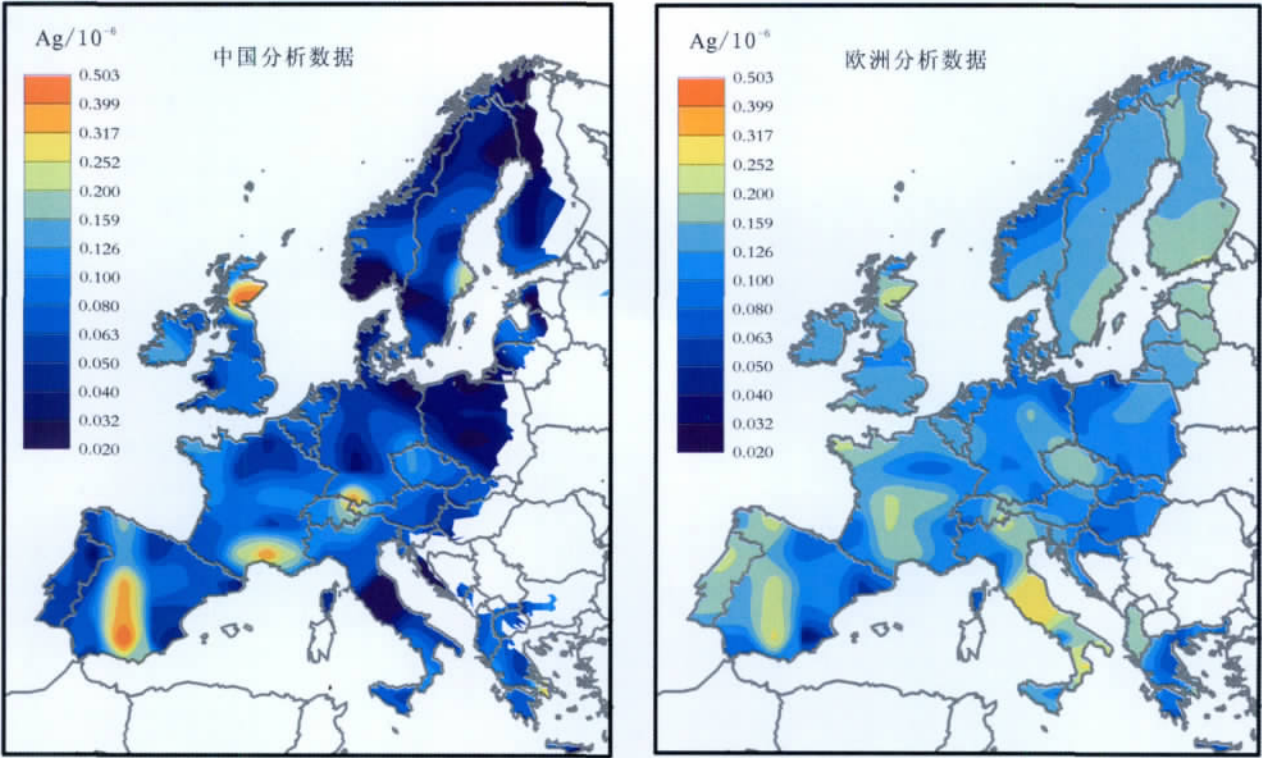


图 4 不同实验室分析数据的 Ag 地球化学图对比

Fig. 4 A comparison of Ag geochemical maps based on analytical data of different laboratories

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

纳。高水平的分析实验室(欧洲与中国)取得的填图数据大部分元素可以实现对比,这是地球化学填图分析技术所取得的令人鼓舞的重要进展。以中国和欧洲分析数据对比为例,仍有 10 余个元素的分析数据存在明显偏差,要实现国际地球化学填图数据的完全可对比仍是地质分析界要面对的挑战。值得注意的是,随着等离子体光谱和质谱仪器大量引入地质测试实验室,样品分析技术有了明显的提高,但大型分析仪器并不能解决所有元素的分析问题。目前只有中国实验室采用多种分析方法的配套方案实现了 76 个元素的分析,国外地球化学样品分析技术在实现 71 元素分析方面尚需进一步发展与提高。

致谢:物化探研究所实验室张勤教授与白金峰高级工程师在成文过程中给予指导,澳大利亚国家地球化学填图项目负责人 Patrice de Caritat 博士为本文研究提供资料,在此深表谢意。

参考文献

[1]Goldschmidt V M. Geochemistry[C]. Oxford:Clarendon Press, 1954: 730.

[2]Darnley A, Björklund A, Bolviken, et al. A global geochemical database for environmental and resource management [R]//Recommendations for international geochemical mapping (Final report of IGCP-project 259). UNESCO, Paris, 1995.

[3]Xie Xuejing. Analytical requirements for international geochemical mapping[J]. Analyst, 1995,120 (5): 1497-1504.

[4]Xie Xuejing, Yao Wensheng .Outlines of New Global Geochemical Mapping Program[J]. Acta Geologica Sinica (English edition), 2010,84 (3): 441-453.

[5]Xie Xuejing, Wang Xueqiu, Cheng Hangxin, et al. Digital Element Earth[J]. Acta Geologica Sinica (English edition), 2011, 85(1): 1-16.

[6]Xie Xuejing. Some problems, strategical and tactical in international geochemical mapping[J]. (Darnley A G, Garrett R G. International Geochemical Mapping) Journal of Geochemical Exploration,1990, 39: 15-33.

[7]Xie Xuejing, Cheng Hangxin, Liu Dawen. Geochemical mapping: with special emphasis on analytical requirements[J]. Acta Geologica Sinica(English edition), 2008, 82(2):451-462.

[8]程志中, 谢学锦. 中国西南地区 76 种元素地球化学填图[J].物探化探计算技术,2007,29(增刊 1):174-179.

[9]谢学锦,叶家瑜,鄢明才,等.考核不同实验室分析质量的新方法[J].

地质通报,2003, 22(1): 1-11.

[10]Cheng Zhizhong , Xie Xuejing. 76 elements geochemical mapping in Southwest China[C]//Extended Abstract, Proceedings of the 24th international applied geochemistry symposium fredericton. New Brunswick, Canada, 2009: 987-990.

[11]王学求,谢学锦,张本仁,等. 地壳全元素探测——构建“化学地球”[J].地质学报,2010,84(6):854-864.

[12]Salminen R, Batista M J, Bidovec, et al. Geochemical Atlas of Europe[M]. Geological Survey of Finland, Espoo, 2005: 526.

[13]Sandström H, Reeder S, Bartha A, et al. FOREGS Geochemical Atlas of Europe, Part 1: Background Information, Methodology and Maps[M]. Geological Survey of Finland, Espoo, 2005.

[14]Caritat P de Cooper M, Pappas W, et al. National Geochemical Survey of Australia: Analytical Methods Manual[S]. Geoscience Australia, Record 2010/15, 2010: 22.

[15]Friske P W B H, Kettles I M, Garrett R G, et al. Sampling, Analytical and Data Handling Protocols for the North American Soil Geochemical Landscape Project[R]. Poster: 2008 Joint Meeting of The Geological Society of America, Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Gulf Coast Association of Geological Societies with the Gulf Coast Section of SEPM, 2008.

[16]David B Smith, Laurel G Woodruff, Richard M O’Leary, et al. Pilot studies for the North American Soil Geochemical Landscapes Project-Site selection, sampling protocols, analytical methods, and quality control protocols[J]. Applied Geochemistry, 2009, 24:1357-1368.

[17]Imai N, Terashima S, Ohta A, et al. Geochemical map of Japan-elemental distribution in Japan[M]. Published by Geological Survey of Japan, AIST, 2004, 209 (in Japanese with English Abstract).

[18]王学求,徐善法,程志中,等. 国际地球化学填图新进展[J].地质学报,2006,80(10):1598-1606.

[19]Zhang Qin. Multi-element Analytical Schemes on Geochemical Mapping Projects:Determination of ultra-trace Platinum Group Elements and its application in geochemical mapping programs[C]//Abstract Proceedings of the 6th Internation Conference on the Analysis of Geological and Environmental Materials. 2006: 124.

[20]刘红艳,王学求,程志中,等.中国与欧洲全球尺度地球化学填图分析方法的对比[J].吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(4):678-683.

[21]Yao Wensheg, Xie Xuejing, Wang Xueqiu. Comparison of Results Analyzed by Chinese and European Laboratories for FOREGS Geochemical Baselines Mapping Samples[J]. Geoscience Frontier (English edition), 2011, 2(2) :247-259.