

进入 21 世纪中国化探发展路线图

谢学锦¹ 任天祥¹ 严光生² 奚小环² 刘大文²
王学求¹ 程志中¹ 成杭新¹ 周国华¹ 迟清华¹ 孙忠军¹

(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. 中国地质调查局, 北京 100037)

摘要:笔者回顾了近年来中国化探的一些理论与方法技术上的重大新进展,立足于地球化学填图基础上的矿集区、多元素异常集结区与地球化学块体理论,利用地球化学资料进行矿产资源潜力评价与稀有分散元素独立成矿的可能性评价,利用地球化学资料进行成矿岩体演化与中国西南大地幔柱的初步研究,这些探索性的研究均取得了令人鼓舞的成就。化探方法技术的应用成果显著,如地球化学填图与矿产勘查一体化,多元素分析与分析质量监控方法不断完善外来物覆盖浅钻取样,深穿透地球化学方法,全国生态、农业、环境地球化学调查,全球地球化学填图方法研究等。在回顾近年化探成果的基础上,提出中国化探在 21 世纪的发展,整体思路是立足于地球化学填图及地球化学填图与矿产勘查一体化。需要有将研究、填图、调查、勘查、工程一体化的大科学计划。提出了涉及地球化学填图、矿产勘查与综合利用、能源勘查、生态环境调查、全球变化研究等的 12 个重点发展方向。

关键词:中国化探;路线图;地球化学填图;矿产勘查;多目标地球化学;深穿透地球化学

中图分类号:P632 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2010)02-0245-23

第一作者不断对中国化探进行回顾与展望,从 1987 年至今 21 年共作了十余次总结^[1-16]。平均每不到两年就要回顾与展望一次。这些文章中有很多看法与做法不断重复提出,也有许多看法与做法不断发生变化。不断重复表明中国化探一贯保持一定的明确思路,指引并推动化探事业的前进。不断变化表示中国化探不囿于成见,勇于创新。坚持一贯与不断创新并不矛盾,而是相辅相成,使中国化探在国际应用地球化学领域取得了今天的地位,并在解决资源与环境许多问题上作出重大贡献。20 余年取得的最宝贵的经验就是中国化探的发展要立足于地球化学填图,过去如此,将来也如此,并且需要整体思路和大科学计划,探索填图与矿产勘查一体化,开展全国生态农业及环境地球化学调查等。

1 立足于地球化学填图:理论与方法的发展与应用

各种地球科学如地理学、地质学、土壤学、水文

学、海洋学、气象学、地球物理学在其发展过程中莫不以各种尺度、各种类型、各种参量的空间分布图件为其支撑。中国化探在近 30 年的迅猛发展是与中国的各种地球化学填图计划的实施密不可分的。如“中国区域化探全国扫面计划”、“全国地球化学环境监测网络计划”、“全国 76 种元素地球化学填图计划”、“中国东部上地壳区域元素丰度研究计划”、“1:5 万成矿区带地球化学调查计划”及当前的多目标区域(生态、环境、农业)地球化学调查计划。这些计划累积了海量、高质量的地球化学数据。这是世界上任何一个国家都无可望其项背的。今后利用这些海量资料可以在大量理论性与应用性的研究中取得许多创新成果,实现 J.E. Potter 1990 年的预言“地球化学图的制作最终将会被证明比地质学中具革命性的板块研究更加重要”^[17]。

近年来笔者已开始不断研究这些海量数据,不断由此产生新的思路,从而酝酿出新的研究计划。这样的工作少量已有正式项目在进行,但大多数属于没有专门经费的预研究性质。以下提供一些实例,表

收稿日期:2010-01-18;改回日期:2010-03-03

基金项目:中国地质调查局地质大调查项目(1212010911036)及国土资源部 2008 年百人计划项目“基于地球化学方法技术的全国矿产资源总量预测方法研究——以铜为例”联合资助。

作者简介:谢学锦,男,1923 年生,院士,国际著名应用地球化学家,主要从事应用地球化学研究;E-mail: xuejing_xie@126.com。

明这类预研究取得的一些初步成果。

1.1 概念与理论上的发展

1.1.1 矿集区、多元素异常集结区与地球化学块体

矿集区是已知矿床的集中分布区，在地理图上显示为不连续点的集结。异常集结区是若干高含量面的聚集，而地球化学块体是以块体异常下限圈出的一个连续的面。今后在部署矿产勘查工作时最好将三种图件综合研究，但当前部署矿产勘查工作时，还主要只考虑研究矿集区。

笔者在 20 世纪末叶已提出地球化学块体的理论与研究方法^[8]，现在又提出多元素异常集结区的概念。已把多元素异常集结区分为与基性及超基性岩有关的(如 Cr、Ni、Co、Cu、Mn、Ti、V)，与酸性岩有关的(如 W、Sn、Bi、Mo、U、Th、Pb、Nb、Be)，与热液活动有关的(如 Pb、Zn、Ag、Cd、Mn、Mo、Cu、Au)，与低温热液活动有关的元素(如 As、Sb、Hg、Li、F、B、Au、Ag)。这些多元素异常以累加异常或累乘异常形式表达。今后需制作从全国到区域的多尺度、多元素异常集结区的分布图件，还可探索更多不同的元素组合及表达方式。图 1~4 示这些多元素异常集结区的分布，在图上还绘出主要只根据已知矿集区

所绘出的 16 个“十一五”矿产勘查重点部署区以资比较。可以看到如果中国地质调查局在部署重点勘查区时能将已知的矿集区与多元素异常集结区并结合单元素地球化学块体以及构造、岩性加以研究，不仅可为当前矿产勘查的部署以及 1:5 万地质与化探部署提供更合理的依据，还可为成矿理论的研究提供新资料与新看法。例如中国地质调查局在全国 1:5 万区调工作部署时，主要是根据已发现矿床的集结区及 1:20 万地质填图资料，根据化探异常在沱沱河已发现新的巨型 Pb-Zn-Cd 矿床，这在多元素异常集结区及地球化学块体图上皆有显示。而对矿集区的划定及在 1:5 万工作部署上恰在此处中止(图 3)。又例如中国地质调查局部署的雅鲁藏布江成矿带，因过去在此成矿带只发现 Cu、Pb、Zn、Ag、Fe、Cr 及 Sb 矿，故在规划中强调以找这些矿为主。如结合异常集结区及地球化学块体研究(图 2)，就可看到这里发现大型 Sn、W、Mo、U、Th 矿床可能性极大。

1.1.2 矿产资源潜力评价

自从我们提出利用矿化率来评价矿产资源潜力后已初步作了一些工作。严光生等根据全国资料已计算出一些成矿元素的“一般成矿率”(表 1)。

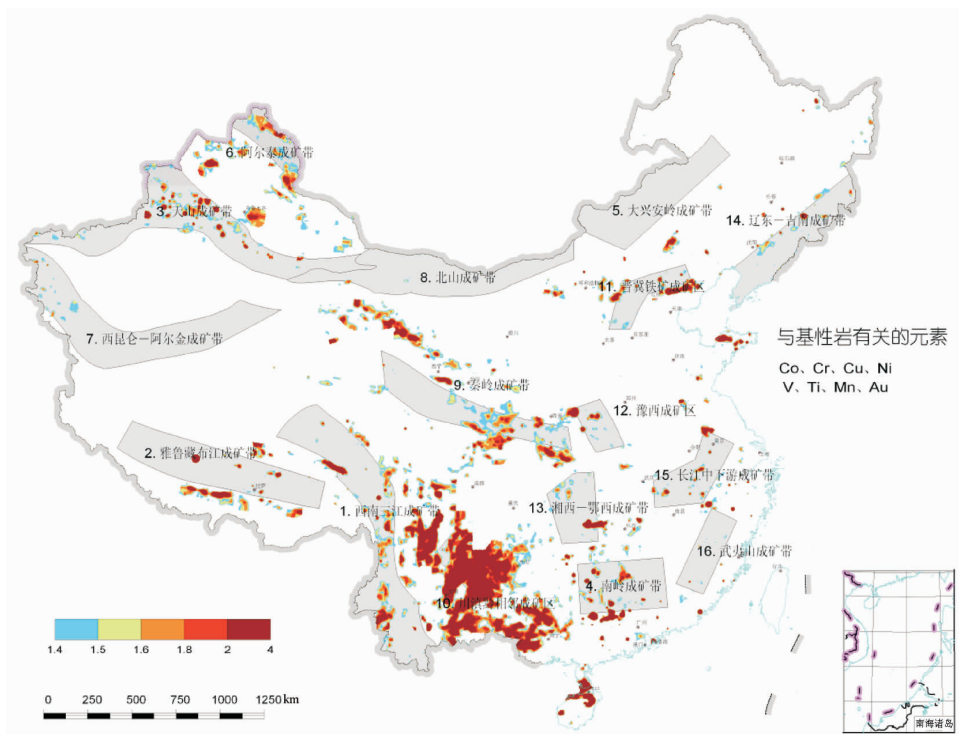


图 1 与基性岩有关的多元素异常集结区分布与国土资源大调查“十一五”部署区分布图
Fig.1 The assembly areas of multi-element anomalies related to basic rocks and deployment zone map of resources survey in “11th Five-Year Plan” period

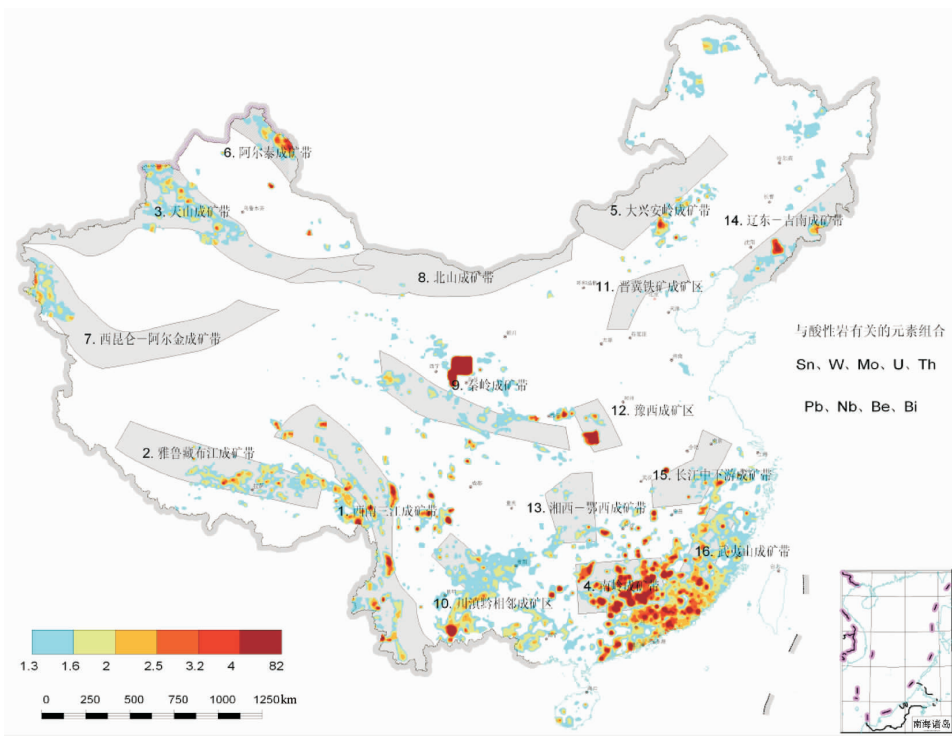


图 2 与酸性岩有关的多元素异常集结区分布与国土资源大调查“十一五”部署区分布图
 Fig.2 The assembly areas of multi-element anomalies related to acid rocks and deployment zone map of resources survey in “11th Five-Year Plan” period

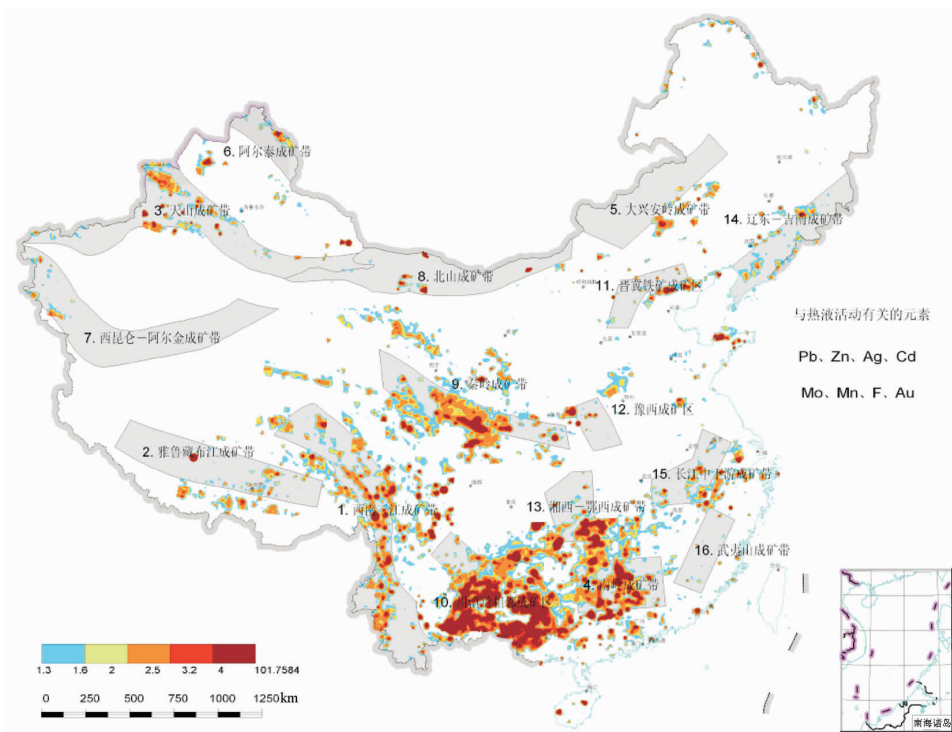


图 3 与热液活动有关的多元素异常集结区分布与国土资源大调查“十一五”部署区分布图
 Fig.3 The assembly areas of multi-element anomalies related to hydrothermal activities and deployment zone map of resources survey in “11th Five-Year Plan” period

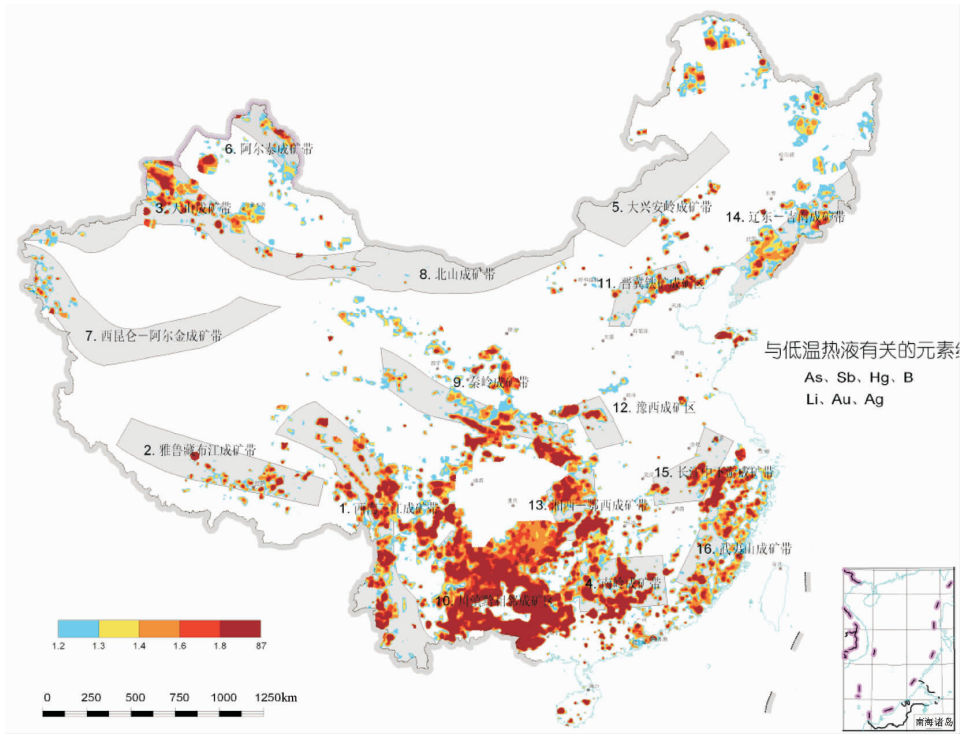


图4 与低温热液有关的多元素异常集结区分布与国土资源大调查“十一五”部署区分布图
 Fig.4 The assembly areas of multi-element anomalies related to low-temperature hydrothermal fluids and development zone map of resources survey in “11th Five-Year Plan” period

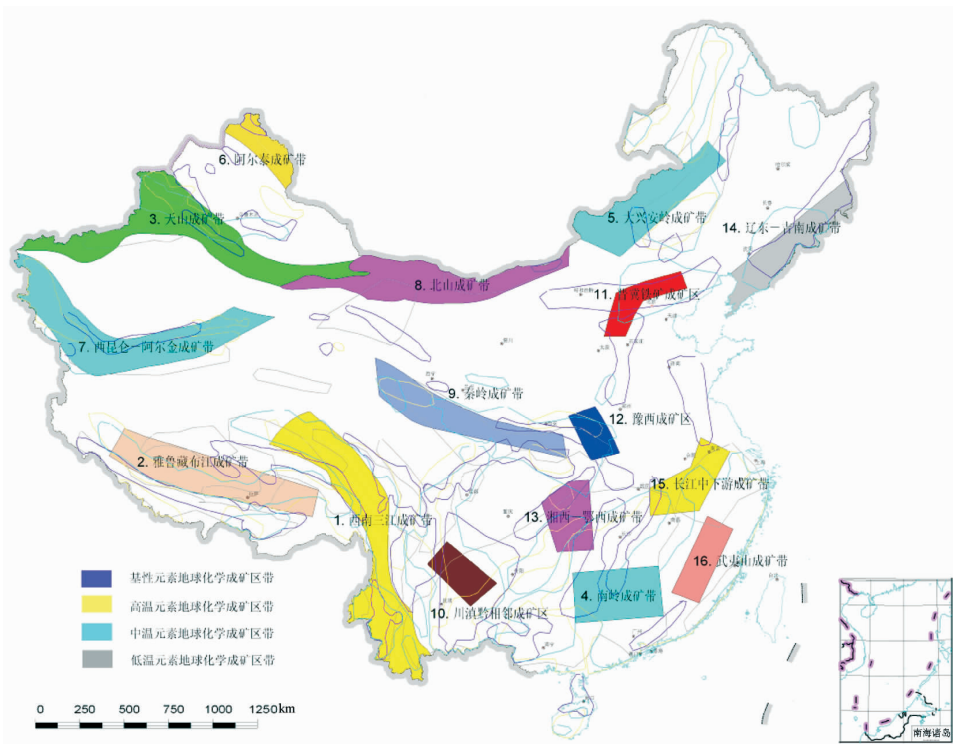


图5 多元素异常集结区分布与“十一五”地质调查重点区部署图
 Fig.5 The assembly areas of multi-element anomalies and deployment zone of geological survey in “11th Five-Year Plan” period

(Mineralization Coefficient, General MCG)。表 2 示笔者利用金的一般成矿率对黔西南卡林型矿集区所做的初步评估,这些评估都是十余年前所为,还需不断修订。

在燕辽地区有一巨大的金矿异常集结区(图 6)。刘大文挑选其中研究程度较高的 42-3 号异常进行“地区成矿率”(Mineralization Coefficient, Regional, MCR)的计算,计算出的 MCR(0.43%)与根据全国资料计算出的金的 MCG(0.47%)相差不大。

燕辽地区已求得的金储量为 175.32 t, 但利用 MCR 数据计算金资源潜力达 1898 t,看来此区有极大的找矿前景。

今后还需根据金矿成矿的不同环境与条件计算所谓“专属成矿率”(Mineralization Coefficient, Specific, MCS)。为计算这样的 MCS 须探索对矿床的合适的分类方法。与此同时应对对金成矿率的研究

经验推广于许多其他成矿元素。

1.1.3 稀有分散元素独立成矿的可能性

涂光炽^[9]曾提出各种稀有分散元素独立成矿的理论,但如何找到这类矿床,需要矿床学家与勘查地球化学家的共同努力,76 种元素的海量资料与图件为这一探索提供有力的支撑。过去中国 Te 作为副产品主要产于广东与江西。但从程志中制作的图上可看到最大的两个 Te 地球化学块体分布在云南—广西、湘南—粤北(图 7)。在这些异常中是否可能存

表 2 黔西南金异常块体中金储量预测
Table 2 The prognostic reserves of gold in gold anomaly blocks of Southwest Guizhou

金异常块体编号	块体内已知金矿	金预测量/t
1	盘梁、芹菜坪	104 (1.20)
7	泥堡	54 (23.3)
9, 15	老万场、紫木函	176 (43.3)
22, 23, 24	兴义、雄武	160 (1.55)
25, 30, 31	烂泥沟、丫他、央友	342 (95)
总计		836 (164.4)

注:括号内为当时已知储量,当时就预测烂泥沟等地有极大潜力,现已证实,故对其他现有储量及预测储量相差悬殊的地区都值得进一步工作。

表 1 部分元素成矿率(%)

Table 1 Mineralization rates of some elements (%)

元素	Ag	Au	Pb	Sb	Sn	W	Zn
成矿率/%	0.641	0.45	1.076	0.368	0.244	0.043	0.174

注:W 的成矿率引自谢学锦等^[10];其他元素的成矿率数据引自严光生、连长云等^①

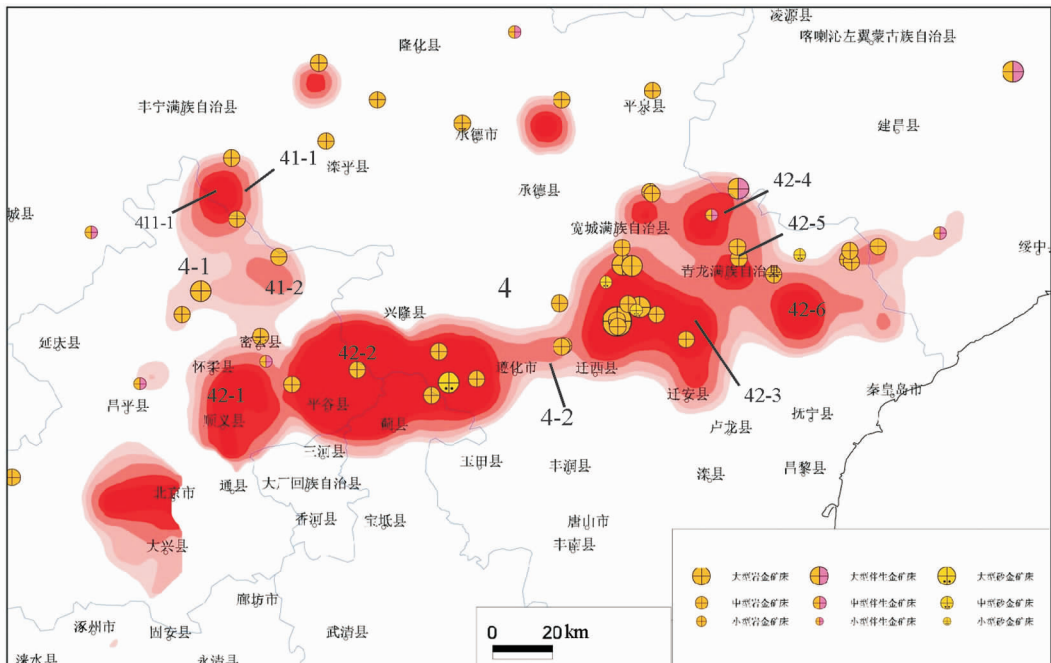


图 6 河北省北部燕辽地区地球化学金地球化学块体分布图

Fig.6 Distribution of gold geochemical blocks in northern Hebei Province

① 严光生,连长云.我国东部地区地球化学块体内矿产资源潜力预测报告.中国地质调查局发展研究中心,2003.

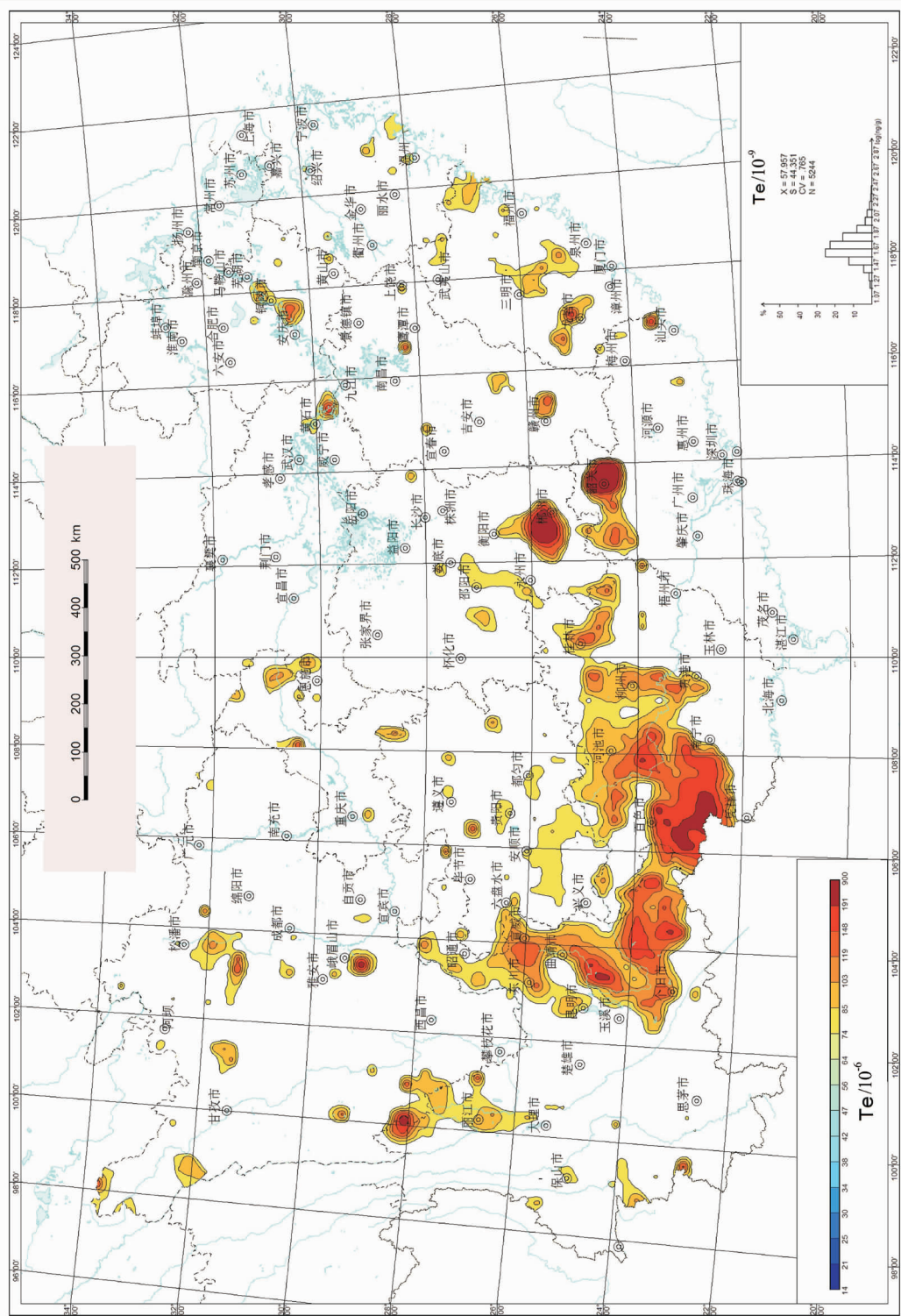


图 7 中国南方地区碲地球化学图
Fig.7 Te geochemical map of South China

在 Te 的独立矿床或以 Te 为主的矿床? 从图上可看到云南—广西的 Te 异常与 Pb、Hg、Sb 或 Au 与 Ag 的异常并不完全重合(图 8),对异常区不同时代灰岩的分析发现,桂西地区灰岩中 Te 的含量是灰岩 Te 背景值 50 倍,显示该地区 Te 具有富集的趋势。今后需进一步在逐步加密的地球化学测量中,研究 Te 异常与上述各元素异常空间分布的重合度及相关性。这将是研究 Te 元素是否有独立矿床的有效方法。同时对 In、Se、Ga、Ge、Tl 等稀有分散元素地球化学异常的研究,也会为这些元素的找矿勘查提供极有价值的线索。

1.1.4 对基础理论研究方面的贡献

各种尺度的地质图是各方研究地学基础理论的必要支撑。周期表内所有元素是构成地球的最终物质单元。因而多种元素在地球上多尺度的空间分布图件,必将为地学基础理论研究提供强有力的工具,包括对地球形成、壳幔分异、地质演化及成矿过程的研究提供新思路与新信息。

以中国东部地壳与岩石元素丰度研究为基础,编制的中国东部岩石地球化学图从宏观角度揭示了不同岩性、不同大地构造单元、不同时代岩石中元素背景含量的分布与变化趋势,表明不同大地构造单元地壳的某些元素含量背景存在着悬殊的差异性和不均匀性;不同大地构造单元各不相同的具有显著差异的区域元素地球化学特征预示着它们可能经历了完全不同的地质构造演化历史。如华北地台结晶基底特别富集 Sr、Ba,长江以南地区的扬子地台和华南褶皱系特别富集 W、Sn、Bi、Mo、U、Th、Pb、Nb、Ta、Li、Be、Rb、Cs、Tl、Cd、F 及 REE(Eu 除外)和 Y 等元素;某些大地构造单元存在着具有鲜明特征的元素岩石地球化学域,为大型矿床的形成提供了充足的巨量的元素;中国东部花岗岩中,从老到新 W 和 Sn 的背景值逐渐增加,燕山期花岗岩中最高(图 9)。这些地球化学资料为中国东部基础地质、大地构造学、区域成矿学研究提供了重要资料^[20-23]。

西南地区大火山岩省地幔柱研究,是地质基础性研究的热点。尽管发表了许多文章,但与地幔柱研究最密切的铂族元素(PGE)的分布却几乎没有什么资料。76 种元素西南地区地球化学填图计划提供的 Pt、Pd、Os、Ru、Rh、Ir 在西南 100 余万 km² 范围内分布的图件^[24](图 10),也许是世界上第一份这类图件。由此可对西南地区地幔柱研究提供许多新信息,下

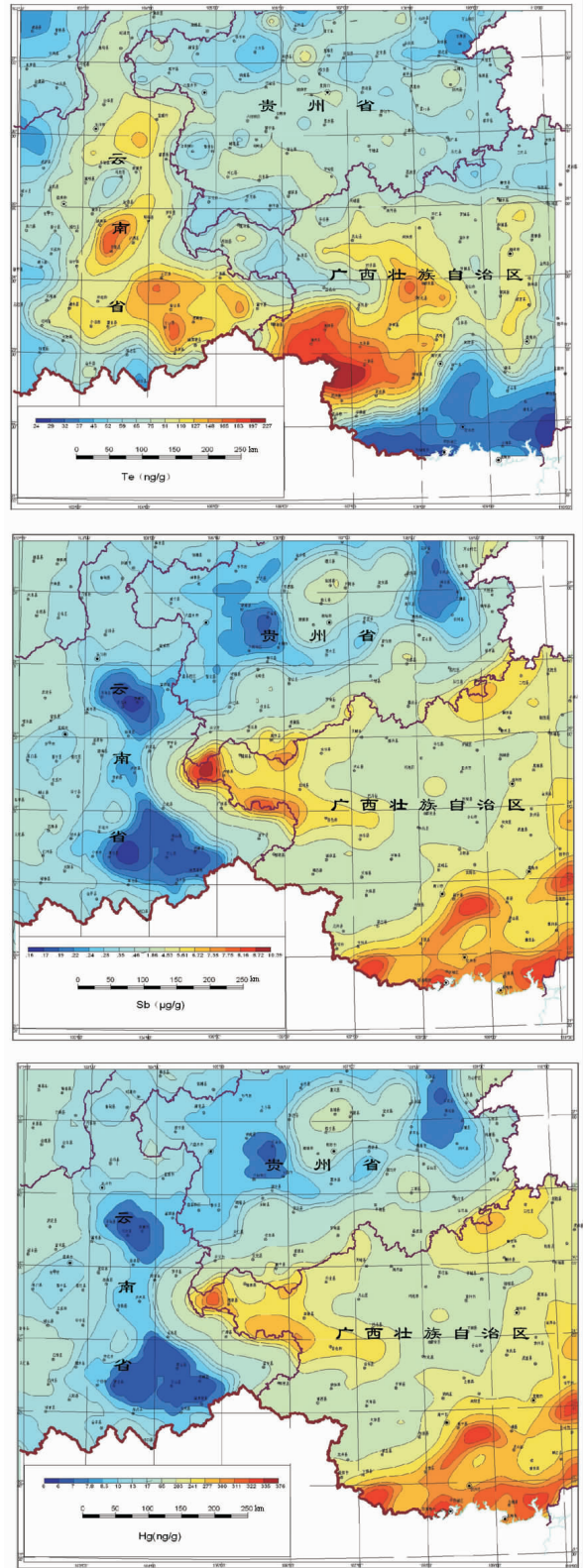


图 8 桂西—滇东南碲、锑、汞地球化学图
Fig.8 Te, Sb and Hg geochemical map of western Guangxi—eastern Yunnan area

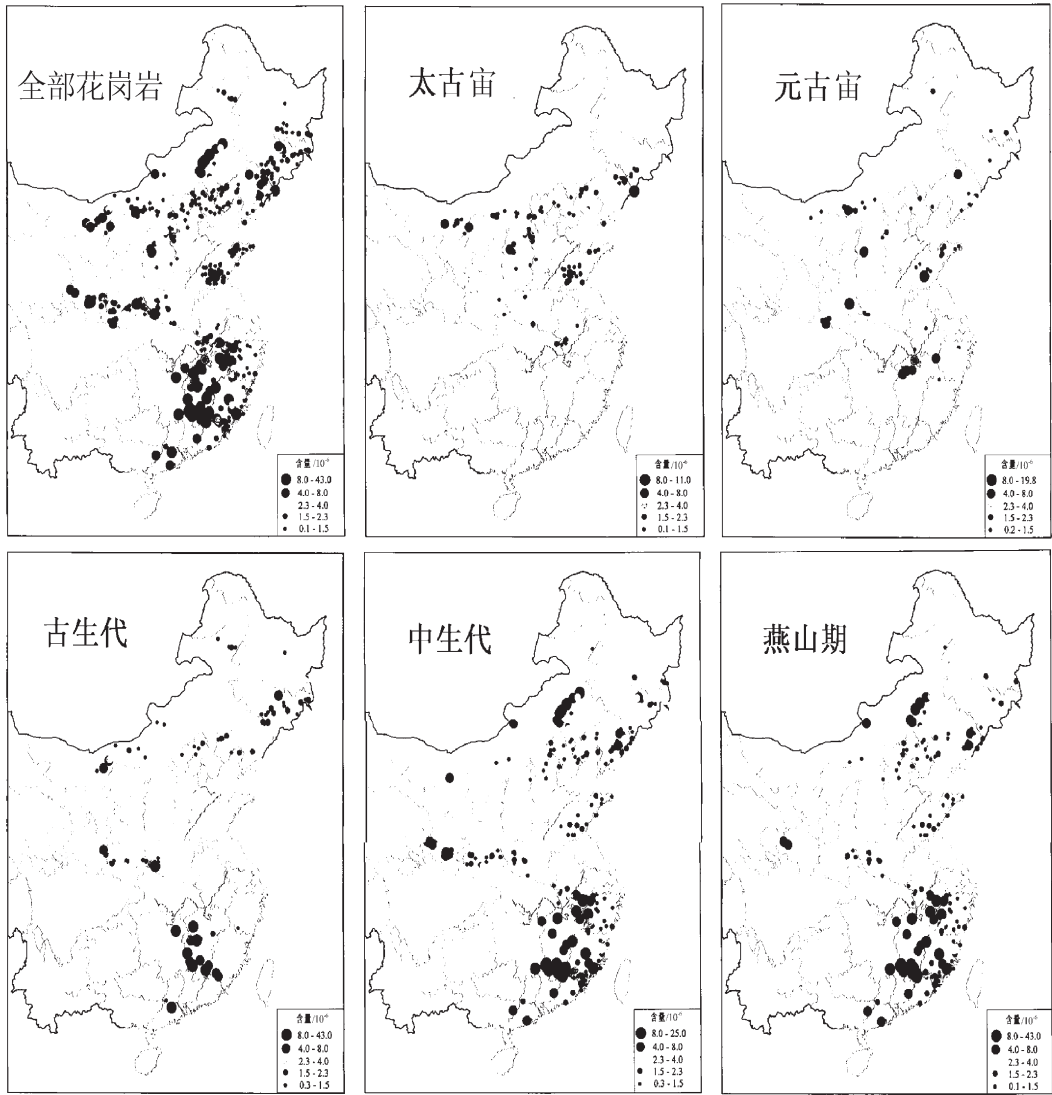


图 9 中国东部各地质年代花岗岩 Sn 地球化学图

Fig.9 Sn geochemical map of granites with various ages in eastern China

面是笔者一些初步研究结果。

表 3 是自川西南滇北地区 PGE 异常中各种 PGE 的相关系数,表 4 是川滇黔边区 PGE 异常中各种 PGE 的相关系数。可见 Pt-Pd,Os-Ru 与 Ir-Rh 的行为在不同地区内各不相同。在川西南—滇北地区 PGE 的异常中 Pt-Pd 与其他 PGE 相关性极差,但川滇黔区则相关性较好。

采用 G.H.Brimhall^[25] 1987 年提出的分异度概念,表 5 分别计算了各个 PGE 异常区自地幔上升的分异度(LLC/SC)及自基底上升的分异度(BR/SC)。

根据所取得的分析资料结合文献上的研究工作

表 3 川西南滇北地区 PGE 相关矩阵

Table 3 Correlation matrix of PGE in western Sichuan and northern Yunnan area

	Pt	Pd	Os	Ru	Ir	Rh
Pt	1	0.86	0.243	0.255	0.202	0.255
Pd		1	0.147	0.169	0.149	0.232
Os			1	0.926	0.683	0.615
Ru				1	0.595	0.537
Ir					1	0.841
Rh						1

注:川西南滇北地区: Pt-Pd 与 Os-Ru 及 Ir-Rh 都不相关, Pt-Pd 0.86,Os-Ru 0.926,Ir-Rh 0.841。

表 4 川滇黔边区 PGE 相关矩阵

Table 4 Correlation matrix of PGE in Sichuan-Yunnan-Guizhou border area

	Pt	Pd	Os	Ru	Ir	Rh
Pt	1	0.82	0.55	0.60	0.47	0.60
Pd		1	0.59	0.49	0.52	0.65
Os			1	0.77	0.47	0.61
Ru				1	0.45	0.61
Ir					1	0.68
Rh						1

注:川滇黔边区 Pt-Pd 与 Os-Ru 及 Ir-Rh 相关性都较好。

可以提出下列看法。

地幔柱虽沿攀西裂谷上升,但溢流玄武岩与其中心 PGE 异常所在的隆起部分可能已被剥蚀,故此区

既未出露玄武岩,也无 PGE 异常。在攀西裂谷西侧的溢流玄武岩中有大片低 Ti 异常而东侧为高 Ti 异常,故西部 PGE 异常可能是从高温熔融带上升形成的,这可从西部苦橄岩的发现得到进一步佐证。而东部玄武岩及 PGE 异常可能源于温度较低的地幔柱头部分。这样西部 PGE 的分异度(LLC/SC)差别甚大,是可能导致 Pt-Pd 与 Os-Ru 及 Rh-Ir 的相关性有很大差别的原因(图 11)。

从以上仅举的少数初步研究结果也可看到已取得的海量地球化学填图数据在地学理论与应用研究中的重大意义。

1.2 方法的发展与应用领域的扩大

1.2.1 地球化学填图与矿产勘查一体化

19—20 世纪各国在进行国家性地球化学填图,采样密度一般在低密度(1~100 km² 采集 1 个样)的

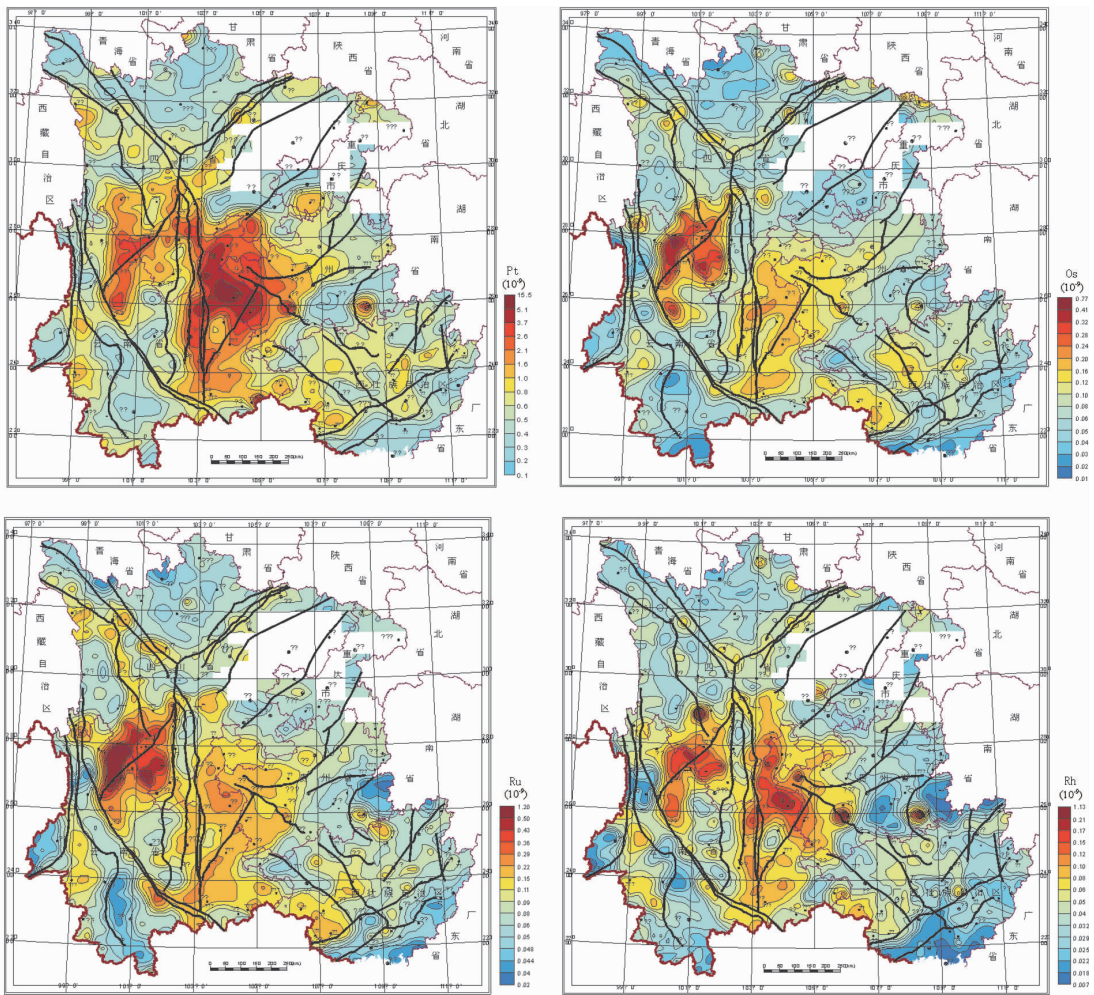


图 10 中国西南地区铂、钨、钌和铑地球化学图

Fig.10 Pt, Os, Ru, Rh geochemical maps of Southwest China

表5 川西南—滇北地区与川滇黔地区PGE的分异度

Table 5 The differentiation degree of PGE in western Sichuan—northern Yunnan and Sichuan—Yunnan—Guizhou border area

区域 X	川西南-滇北			川滇黔		
	SC (10^{-9})	LLC (10^{-9})	f_x (LLC/SC)	SC (10^{-9})	BR (10^{-9})	f_x (BR/SC)
Pt	0.25	4.10	16.40	0.25	0.50	2.00
Pd	0.35	3.60	10.29	0.35	0.45	1.29
Pt+Pd	0.60	7.7	12.8	0.60	0.95	1.58
Os	0.066	0.09	1.36	0.066	0.05	0.76
Ru	0.035	0.09	2.57	0.035	0.03	0.86
Os+Ru	0.101	0.18	1.78	0.101	0.08	0.79
Ir	0.016	0.05	3.12	0.016	0.017	1.06
Rh	0.016	0.14	8.75	0.016	0.029	1.81
Ir+Rh	0.032	0.19	5.94	0.032	0.046	1.44

注:SC为沉积盖层(厚3 km)丰度;BR为基底(厚12 km)丰度;LLC为大陆下地壳下部(厚4 km)丰度。引自郇明才、迟清华(1997)华北地台地壳元素丰度^[21]。

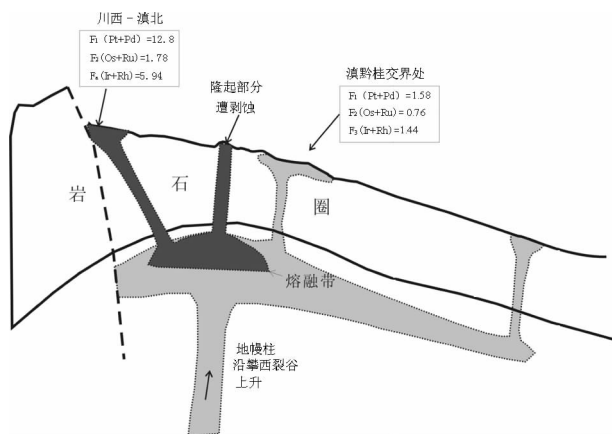


图11 攀西地区地幔柱与铂族元素分布空间示意图
Fig.11 Schematic diagram of mantle plumes and spatial distribution of PGE in Southwest China

范畴之内。那时西方与中国学者在填图的主要作用上已有很大分歧,西方学者认为地球化学填图的主要作用是取得多种化学元素分布的基础性资料,特别是所谓的地球化学基准值(geochemical baseline data)并解决一些环境及基础地质问题,而中国认为国家性的地球化学填图其主要或首要的作用是为矿产勘查提供重要线索。

区域化探全国扫面计划使用了当时国际上填图普遍的采样密度1个样/1 km²,采集水系沉积物样品,以4 km²范围内的样品组合后分析39种元素。它不仅提供了元素分布的基础性资料而且在提供找矿线索上取得了巨大成功。这样就将填图与矿产勘

查及探矿工程相关联,初步实现了从低密度填图开始将填图与矿产勘查及探矿工程的一体化。

然而伴随着成功实例地不断增加,新的有待解决的问题也就不断出现。在黔西南已发现的金矿床中有2个最大的百吨级金矿床:一个是位于巨大地球化学块体边缘的烂泥沟金矿,另一个却在只有1个金高含量点的水银洞金矿(图12),水银洞金矿只在4 km²范围内有一个金的高含量数据(3×10⁻⁹)。其后1:5万的水系沉积物测量在更大范围内圈出一些零星的金异常,槽探发现一些小的金矿脉。由于在其西北方向的紫木函金矿已在深部钻探发现了多条金矿脉,且两地地质构造条件类似,故在1998年开始施钻,于200 m左右深部亦发现多条金矿脉。近年来在向深部找矿的号召下,加深钻孔进尺,在400 m左右深处见规模巨大的层状金矿床(图13)。由此可见需进一步发展一些新的技术方法,能在地表辨认出常规方法只发现弱异常的地区深部是否有隐伏大矿。

从1989年开始,IGCP批准了IGCP259/360的全球性地球化学填图项目,中国和西方学者的分歧继续延续。西方学者致力于宣传Wide-spaced地球化学填图在解决环境问题上的作用,而中国学者则认为不仅可解决环境问题,还应继续努力探索用甚低(1个样/100~10000 km²)及超低密度(1个样/10000~100000 km²)采样的地球化学填图取得的图件是否仍能对找矿提供重要线索。

中国的环境地球化学监控网络计划一方面是为国际IGCP259计划探寻适用于甚低至超低密度填

表 6 米易地区 Pt-Pd 资源潜力预测
Table 6 Prognostic potential resource of Pt-Pd in Miyi area

	异常下限/ 10^{-9}	面积/ km^2	平均值/ 10^{-9}	1000m 厚岩块/万 t	预测结果/t
南非新发现矿带 预测 372 t (Pt), 120 t (Pd)					
Pt	5	392	17.5	1.86	372
Pd	5	282	7.86	0.6	120
米易异常带 预测 74.5 t (Pt), 86 t (Pd)					
Pt	2	540	3.50	0.51	102
Pd	2	540	4.17	0.61	122
Pt	5	184	7.48	0.24	47
Pd	5	128	7.42	0.26	51
杨柳坪 勘探储量 52 t 预测 61 t (Pt)					
Pt	2	412	3.9	0.43	86
Pd	2	376	3.7		
Pt	5	104	6.37	0.18	36
Pd	5	52	6.52		
大岩子 勘探储量 4 t 预测 2.7 t (Pt)					
Pt	2	4	14.7	0.016	3.2
Pd	2	4	10.8		
Pt	5	4	9.9	0.011	2.2
Pd	5	1	9.9		

注: 预测资源量是以用两种异常下限(块体异常下限及浓集中心异常下限)勾绘出的异常计算结果的平均值。

类标准监控样, 每个样品约有 25 kg。今后建议利用这些样品考核世界各国实验室。

1.2.3 深穿透地球化学填图的进展

获取被各种运积层覆盖地区深埋地下矿床的微弱信息已成为国际勘查地球化学在 21 世纪研究的热点。

过去国内外进行深穿透地球化学方法研究时都是沿偏提取的思路进行, 即用一些弱溶剂只提取动态金属。但我们发现弱溶剂提取(如水提取、柠檬酸盐、醋酸盐等提取)不够稳定, 易受许多因素影响致使分析误差(重现性)很大。王学求发现在各种地球化学障下方选取极细粒物质进行分析可获得深部被运积物阻挡的矿化信息。在东天山荒漠戈壁区进行的大规模深穿透地球化学填图在钙质层下方取样筛取小于 120 目的物质^[47], 发现吐哈盆地铀异常(图 14), 经钻探证实为深埋的, 产状平缓的砂岩型铀矿所引起。最近他们成功研制的微米筛分设施可筛分出从小于 200 目至小于 $10 \mu\text{m}$ 的疏松物质, 这是深穿透的地球化学研究中在方法技术上的一项重大的突破。

另一项重大的突破是卢荫麻提出的显微相分析技术。即将苏联学者提出, 经中国龚美菱等发展的相

分析用于分析微克级以下活动态硫化物及氧化物含量的技术(图 15)。有了这些深穿透技术方法: 偏提取分析、微米筛方法、显微相分析方法, 看来现在是制定大规模科学研究计划, 分别研制被外来运积物覆盖的各种景观区最优化的深穿透地球化学方法或方法组合的时候了。

1.2.4 外来覆盖层浅钻取样开始进行

此项工作最初在澳大利亚大规模进行, 制造出先进的浅钻, 并将这项工作称为浅钻地球化学(RAB 地球化学)。中国地调局探矿工程所设计出了先进的 TGQ 气压及液压式钻机系列, 钻探深度 1~30 m 及 30~100 m。并在任天祥指导下在内蒙花敖包特及黑龙江多宝山用这种钻探取样进行了 1:20 万、1:5 万及勘查与详查实验, 取得极好的效果。

1.2.5 全国生态、农业、环境地球化学调查

解决农业、环境及生态问题亦须立足于地球化学填图。这种思想之所以在国土资源部系统产生, 是区域化探全国扫面从 20 世纪 80 年代形成的传统的延续。中国地质调查局从 1999 年在广东珠江三角洲、湖北江汉平原、四川成都盆地试点及 2000 年省部合作浙江项目启动后, 这项工作开始席卷全国, 给全国国土资源系统及实验室带来了第二次地球化学

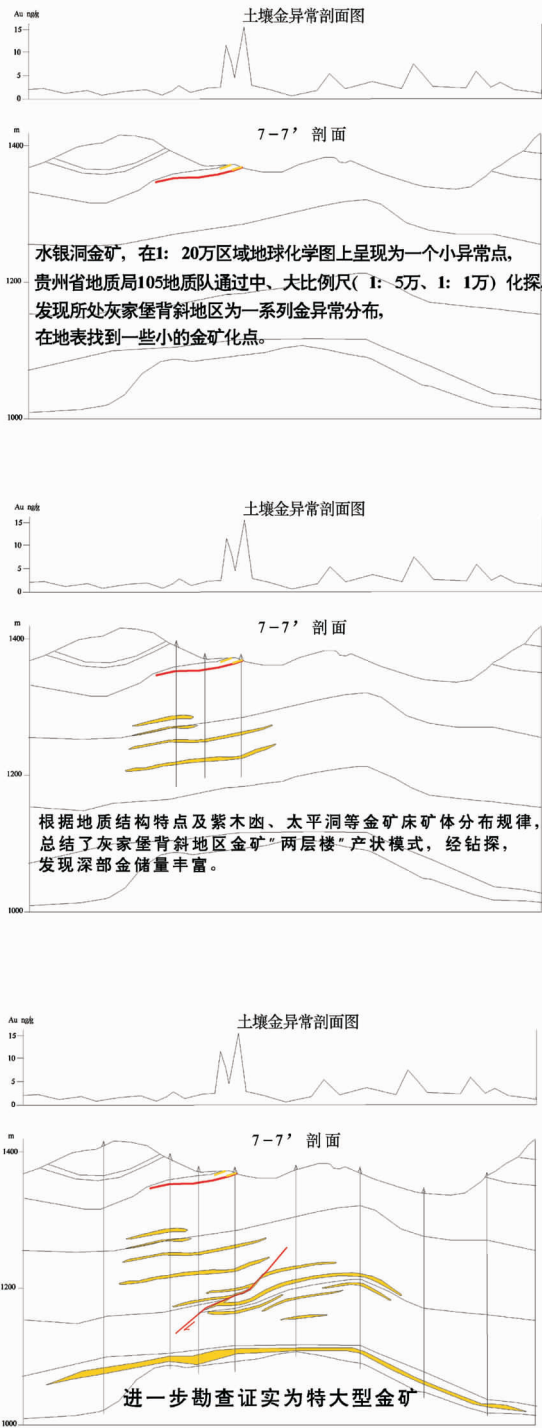


图 13 贵州贞丰县水银洞金矿勘查过程
 Fig.13 Prospecting process of the Shuiyindong gold deposit in Zhenfeng County, Guizhou Province

填图工作发展高潮^[48-56]。虽然多年来农业、土壤、环境、卫生及生态专家对各自领域的许多问题进行过大量研究, 但区域地球化学填图成果将极大地扩大他们的眼界, 发现过去局部及区域性工作难以发现的问题, 深化研究工作, 更好地解决农业、土壤、环境、卫生及生态领域的重大问题(图 16)。

地球化学填图本身在这次多目标大科学计划中亦将发生重大变革。例如, 过去的地球化学填图着眼于系统勾绘元素在自然界的分布、分散、富集, 而多目标区域地球化学填图则着眼于人类活动影响下整个生态系统内的地球化学分布、分散、富集及其生态效应。生态地球化学研究周期表内所有元素、同位素及化合物在岩石、土壤、沉积物、水、空气、植物、动物、人体内的空间分布迁移与转化。而且这种填图需要分层次、多阶段地进行, 以便取得人类活动介入后生态系统发生的地球化学变化的连续纪录。这当然需要庞大的工作量与资金。科学合理、逐步渐进地部署与各研究阶段工作目标相适应的生态地球化学填图任务十分重要。

1.2.6 全球地球化学填图

区域性与国家性的地球化学填图已取得进展, 如何在可期待的未来以极低密度采样(十万至百万平方千米采 1 个组合样)获得周期表内大多数元素在全球的分布, 有赖于对填图理念的更新及采样介质、采样部署与采样方法研究的进展。

自然界事物往往符合分形规律。Webb 早期工作发现水系中沉积物的自然混匀作用使水系沉积物中元素可大致逼近其上游数平方千米汇水盆地内土壤中元素的均值^[57], 其后这一规律延展至数十平方千米的汇水盆地亦皆适用^[58]。英国人的研究工作表明, 由于自然分选作用, 在更大河道中细粒物质遭到流失, 水系沉积物中已大部为长石与石英, 故坚持不能在更大河口采水系沉积物样品^[59]。但中国与挪威的研究表明, 在洪水期间, 在分选作用很差的条件下, 在大河口采集细粒的河漫滩沉积物或泛滥平原沉积物可遥测其上游数百至数千平方千米汇水盆地土壤中元素的平均值^[60-61]。为减少随机误差的影响, 采样是在几百米至几千米范围内采集若干样品进行组合。中国的环境监控网络计划采集了 800 余泛滥平原沉积物覆盖全国, 所制作的各种元素分布图与根据化探扫面百余万件样品分析结果制作的分布图宏观上惊人的相似^[62]。现在的全球地球化学填图研

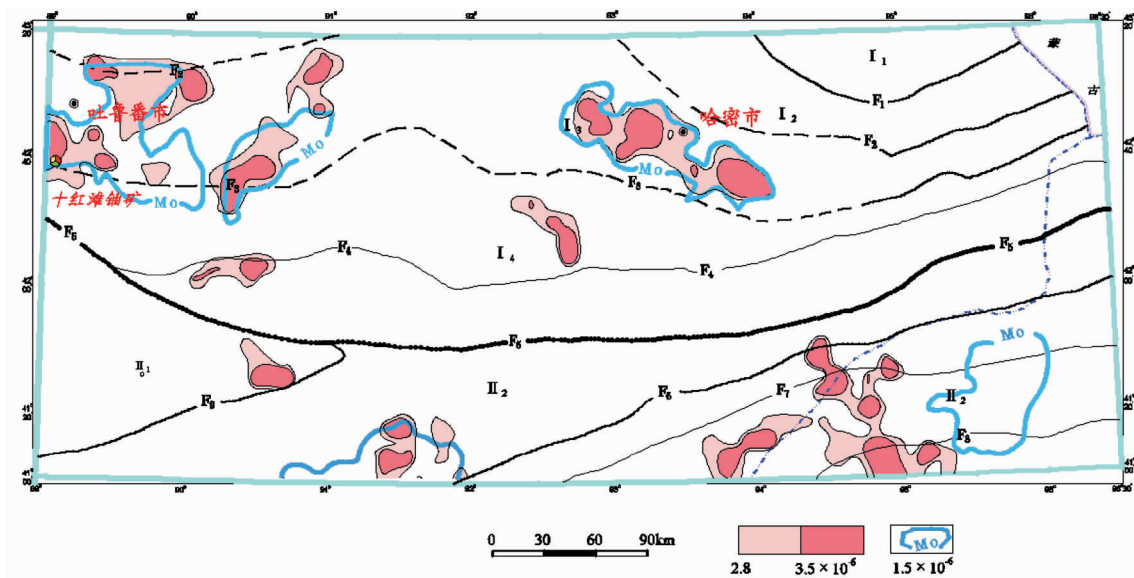


图 14 吐哈盆地铀、钼地球化学异常图

Fig.14 Geochemical map of U and Au in the Turpan-Hami Basin

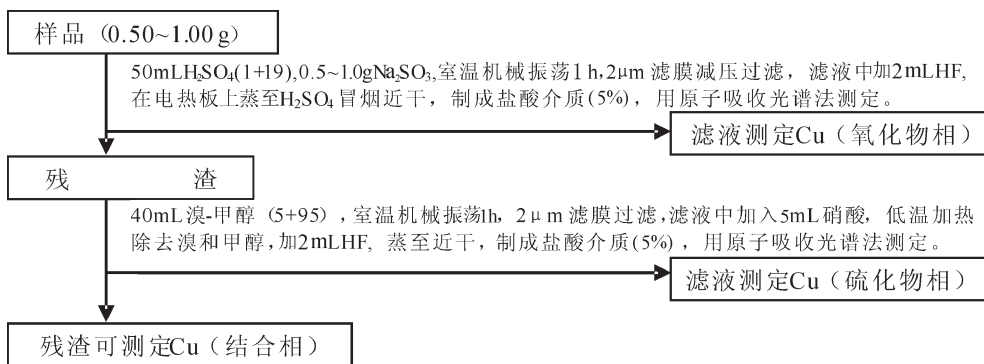


图 15 痕量铜元素相态提取、分析流程

Fig.15 Flow chart for phase extraction and analysis of trace copper

究有望证实此项规律适用于更大的汇水盆地。

近年的研究工作初步表明,在 1~10 万 km² 汇水盆地的河口泛滥平原或三角洲上,在数十至上百平方千米范围内采样组合样后的分析结果(表 7),不仅可以估计整个汇水盆地内各元素的平均值,还可以预测汇水盆地内的矿产资源潜力^[63]。但这类实验研究尚需在更多地区继续进行。

在面积达数十万乃至上百万平方千米的汇水盆地的大河入海口的三角洲上,在数千至上万平方千米范围内采样能否近似估计元素在整个汇水盆地的平均值或背景平均值,尚无定论。童霆在长江口三角洲 1 万多平方千米范围内采集了 40 余件三角洲沉

积物样品,初步研究表明似乎入海口三角洲沉积物中的元素含量更接近于整个汇水盆地的背景平均值(表 8)。

表 9 总结了这种分形自相似思想在从区域到全球地球化学填图研究中所取得的进展。今后全球地球化学填图将继续沿这一思路探索、实施。

2 21 世纪的地球化学填图路线图

笔者对于中国化探今后在 21 世纪的发展,整体思路是立足于地球化学填图,地球化学填图与矿产勘查一体化。过去中国化探由于种种客观原因偏重于找矿,今后对环境监控与环境调控将是中国化探

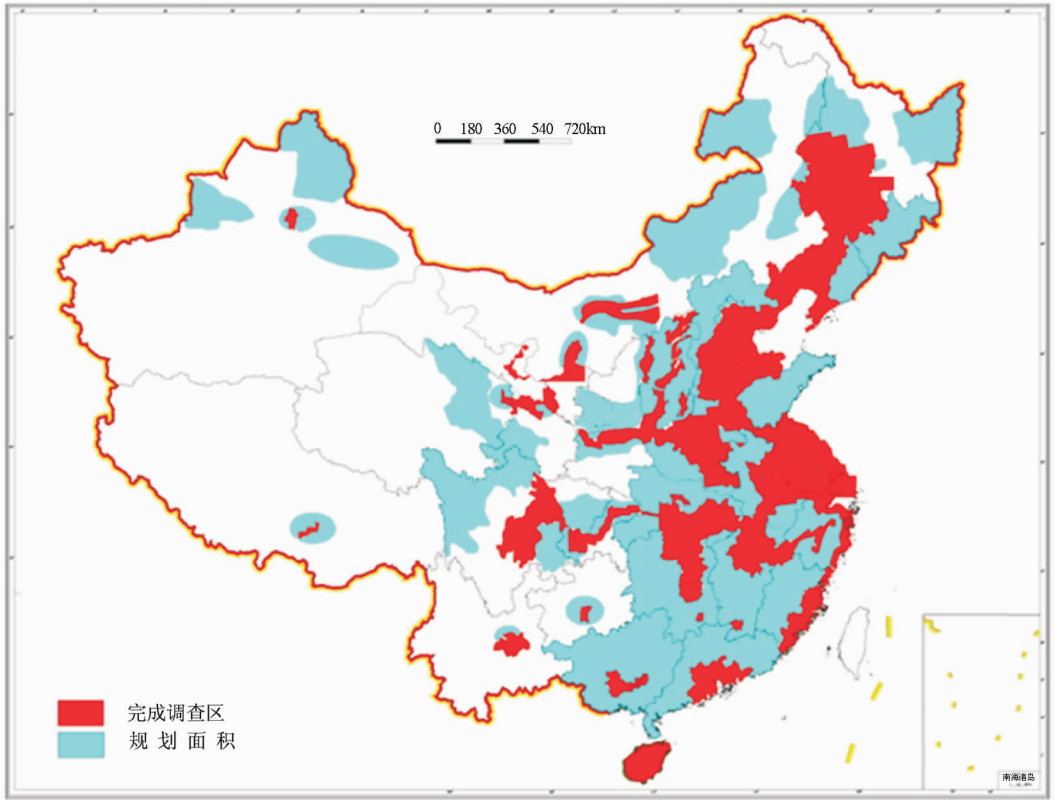


图 16 全国多目标区域地球化学调查工作程度图(截至到 2009 年底)
 Fig.16 Work plan of multi-purpose geochemical survey in China (by the end of 2009)

表 7 湘、资、沅三江两次河口采样分析结果与各汇水盆地内平均值的对比(10⁻⁶)
 Table 7 Comparison of results between two times of sampling of floodplain sediments in Xiang, Zi and Yuan Rivers (10⁻⁶)

		W	Sn	Sb	Pb	Zn	Cu	Ag
湘江	ss	6.31	8.45	3.93	39.7	87	30.0	103
	1	6.5	9.67	4.22	55.1	133	31.3	141
	2	5.5	10.4	3.55	62.0	125	34.6	147
资江	ss	3.55	6.18	12.9	32.5	91	28.8	76
	1	2.94	4.92	10.15	31.7	97	26.0	85
	2	2.57	4.1	13.47	31.0	81	27.0	94
沅江	ss	2.39	3.56	3.27	25.5	91	28.3	104
	1	2.84	3.11	2.49	30.5	104	25.6	113
	2	2.24	3.28	4.32	31.9	92	27.6	107
湘	探明储量(万 t)	147	92.2	10	425	618	60	0.9
资	探明储量(万 t)	19	37	220	23	76	-	0.1
沅	探明储量(万 t)	9.4	-	-	24	265	-	-

注: ss-汇水盆地内元素平均值; 1-第一次在河口采集的泛滥平原沉积物组合样中元素含量; 2-第二次在河口采集的泛滥平原沉积物组合样中元素含量。

表 8 利用长江三角洲沉积物分析结果预测长江流域中某些元素的含量水平

Table 8 Comparison of average element values of Yangtze delta floodplain sediments with average element values of the whole Yangtze basin region

元素	X_s	X_{si}	X_d	元素	X_s	X_{si}	X_d
Ag	102	76.6	76.6	Nb	19.0	17.0	16.9
Au	2.4	1.5	1.4	Ni	34.6	29.3	35.0
Hg	107	54.3	54.0	Pb	33.1	25.7	24.0
Co	15.7	13.8	13.4	Sb	1.7	0.9	0.6
Cu	33.4	24.5	24.9	Sn	4.4	3.2	2.9
Li	41.2	38.4	40.0	U	3.3	2.8	2.2
Mn	810.3	731.2	647.0	W	3.3	1.9	1.6
Mo	13	0.8	0.5	Zn	89.2	79.2	74.0

注： X_s 为整个长江流域 40 余件水系沉积物分析的平均值。 X_{si} 将这 40 余件样品数据多次叠代剔除，每次剔除 $X \pm 3\sigma$ 以外的数据直至无剔除值为止，其平均值大致代表了地质演化过程中全域的原始背景； X_d 表示中国区域化探扫面计划全国平均值；Ag、Au、Hg 含量单位以 10^{-9} 计，其他为 10^{-6} 。

21 世纪的另一重点。但环境研究首先亦要立足于地球化学填图。

需要有将研究、填图、调查、勘查、工程一体化的大科学计划。还需加强国内多学科学者与国外学者的合作与交流，不仅有涉及国内的大科学计划，还需要有全球合作的大科学计划。

区域化探全国扫面计划的成功，不仅启发了其

后一些大科学计划的思路，而且对其海量数据所作的一些预研究使其后的大科学计划有了坚实的立足点。这一好的开端形成了良性循环，使得其后已进行或正进行的大科学计划，甚至酝酿中的大科学计划能够前后呼应左右逢源。

这些大科学计划应包括：(1) 建立全国化探数据库，研究化探海量信息在矿产勘查、环境污染、土地利用、人类健康各方面的应用；(2) 继续进行各种形式、各种尺度、多种介质、多种元素的地球化学填图工作；(3) 出版中英文版全国及分省多元素地球化学图集，编著中英文地球化学填图专著；(4) 继续更大规模开展全国生态、农业、环境地球化学调查；(5) 特殊景观区深穿透地球化学扫面计划；(6) 开展中国境内外矿产资源战略勘查；(7) 探寻解决危机矿山接替资源的化探新思路与新技术，特别是对全国尾矿堆进行大普查；(8) 实施油气化探全国扫面计划；(9) 全球地球化学填图；(10) 在中国建立全球地球化学填图研究中心；(11) 中国农耕区土壤碳库与固碳潜力评价。

2.1 建立全国化探数据库，应用化探海量信息于矿产勘查

此项工作是建立全国物化探数据库的组成部分，为各方所期待。故在尚未正式批准前已经开始进行，不是为建库而建库，而是在建库基础上开展一系列具创新思路的研究工作并逐步对数据解密，使之

表 9 各类沉积物中元素数据接近上游汇水盆地内元素平均值的自相似分形特征
Table 9 Fractal nature of various kinds of sediments to approximate the average element values of the corresponding drainage basins

沉积物	上游汇水盆地面积/ km^2	采样方法	取得之成果	文献
水系沉积物	n	在河流底部采活性沉积物	效果好	Webb et al., 1964
	$n \times 10 \sim 100$		效果显著 广泛用于矿产勘查	Meyer et al., 1997
河漫滩沉积物	60~300	距当今河道 2~200 m 垂直采样除掉表层 5~10 cm	效果好，用于挪威全国地球化学填图	Bolviken et al., 1988 Ottesen et al., 1989
	100~800	垂直取样，上层 5~40 cm，下层 50~100 cm	与化探扫面数据比较效果好	Shen and Yan, 1995
泛滥平原沉积物	$n \times 1\ 000 \sim 10\ 000$	每个采样点取 3 个样，相隔 500 m，上层 5~25 cm，下层 80~120 cm	效果显著，用于环境监控网络计划	Xie and Cheng, 1997
泛滥平原沉积物	$n \times 10\ 000 \sim 100\ 000$	在 10~100 km^2 范围内取数十个样品进行组合	效果好，还需作更多研究	童霆, 2005
三角洲沉积物	$n \times 100\ 000 \sim n \times 1\ 000\ 000$	在 100~10 000 km^2 范围内取若干样品组合，上层 10~20 cm，下层 30~100 cm	在扬子江三角洲上初步结果令人鼓舞，还需要作更多的实验	童霆, 2007 (未发表)

可为其他部门的学者利用,广泛进行各种研究,最后应收集全世界的地球化学填图数据并进入互联网,使人类社会与许多国家都逐步认识到今后人类的发展不只是盲目追求 GDP 的增高,而是要更好地进行环境的调控与资源的合理利用与管理。以使人类能继续生存。建议给这样的化探数据库命名为“数字元素地球”(Digital Element Earth)。

2.2 继续进行各种尺度、各种介质、多种元素的地球化学填图工作

这项工作可以非常灵活或成一个独立项目或从其他大科学计划中取得数据进行综合研究。像最近国土资源部“深部地壳探测专项计划”内的“全国地球化学基准值建立”项目就属于这类的独立项目。该项目旨在与国际全球地球化学基准值研究接轨。在国际 160 km×160 km 的网格中取得岩石、土壤及各种沉积物中 76 种元素的含量数据。

2.3 出版中英文全国及各省多元素地球化学图集,编著中英文地球化学填图专著

这项计划已经得到批准,正在进行之中。它既是对过去化探工作进行总结的最好办法,又是对未来工作的指南。就像《区域化探》一书对区域化探全国扫面计划所起的作用一样。

2.4 继续更大规模开展全国生态、农业、环境地球化学调查

这项大科学计划有三个组成部分:① 全国多目标区域地球化学调查;② 全国区域生态地球化学评价;③ 国家土地地球化学评估与监测。从 1999 年至今研究工作主要涉及①及②部分。今后重点应是②及③部分。但还应加入以下两个内容:

一是要使环境地球化学监测制度化。自 1993 年实行全国环境地球化学监控网络计划,以采集 500 余泛滥平原沉积物组合样覆盖全国以来至今近 20 年,定期监测环境变化的意义似乎已有共识,现需要将其制度化,规定每 10 年进行一次全国、大流域、重要工业区及重要城市的环境地球化学监测。

二是在进行全国生态地球化学评价及国家土地地球化学评估与监测研究的同时,应考虑环境调控与修复的试点研究。第一作者过去曾强调植物修复与微生物修复研究,经过各单位多年努力,看来在目前技术水平上,这类研究还只能大多停留在学院式研究阶段。也许就地取材可大规模运作的地球化学工程在某些适当地区进行试点可以有成效。在修复

技术未能普遍应用之前,调控研究更加重要。调控研究包括各种向空气、土壤、沉积物及水中的减排措施及各种阻断有害物质入口,入呼吸道及与生物体各部分接触的措施。而调控研究不仅是科学研究,而且是社会与政治问题。

2.5 外来覆盖区浅钻地球化学扫面计划

外来覆盖区指被风积物、冲积物及黄土覆盖地区,在这些地区被埋藏的矿床发出的常规信息完全被这些覆盖物所阻挡,在中国约占 400 万 km²。在这些地区应大规模使用浅钻取样方法作 1:20 万区域化探扫面工作定会有惊人的发现。因为这些地区过去的找矿方法难以奏效,从而给浅钻找矿带来巨大机遇,加之这些地区的山前及盆地边缘多为埋藏的断裂带和地质构造转换带对成矿特别是大型矿床成矿有利。

2.6 深穿透地球化学扫面计划

利用各种弱提取方法检出能穿越外来覆盖地达于地表的各种活动态金属已成为国外研究之热点,但国内有不少人心存疑虑。部分原因是弱提取分析误差较大,利用王学求与卢荫麻的方法可补足这项缺陷。另外,如果外来覆盖物浅钻取样地球化学扫面计划得以大规模进行,就可验证深穿透地球化学成果的有效性,并可以预料地球化学分散与分布的理论亦将取得大的进展。

2.7 开展中国境内外矿产资源战略勘查

这一大科学计划重点在于:中国北方周边国家哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦、蒙古、俄罗斯靠近中国边境地区,在北纬 40°~55°之间都有大型矿产出。如大型砂岩铀矿、黑色页岩中的铂族矿、金矿以及斑岩铜矿等。这些大型成矿带是否延伸至中国境内,需要提出一项大科学计划,用覆盖层钻探取样填图方法及深穿透地球化学填图覆盖境外这些大型成矿带地区及中国一侧高山、戈壁荒漠、半干旱草原及森林沼泽区,将取得结果进行对照,定可突破中国一侧长期未有重大发现之局面。

除周边国家之外,在非洲和拉丁美洲,中国也在利用地球化学填图方面的优势,通过国际合作,在马达加斯加、埃塞俄比亚、津巴布韦、圭亚那等国家开展不同比例尺的区域地球化学填图工作。这不仅提高合作国地球化学工作程度,也将推广中国先进的地球化学理论与方法技术,培养合作国的地球化学填图专家。

2.8 探寻解决危机矿山接替资源的化探新思路与新技术

在危机矿山进行深部探测的计划已取得很大的效果,这项工作主要依靠构造地质分析、地球物理探测及原生晕研究。但在全国许多成矿元素地球化学块体内的浓集中心计算其潜在资源量会使挑选深钻对象更加合理并提高成功率。

对全国尾矿堆进行大普查是解决危机矿山问题的另一项新思路。全国现有各类大型尾矿堆 2700 多座,累积堆存超过 50 亿 t。对尾矿堆的危害及利用潜力,各方已有共识,纷纷提出各种综合利用的建议,重点还是制备各种建筑材料或回收主要矿种的金属,但对全国尾矿堆内到底含有多少有价值可供利用的成分并不完全知情。另外在对尾矿堆中有害物质不知情的情况,就利用之作建筑材料也很危险。故建议开展尾矿堆全国地球化学大普查计划。先选择若干尾矿堆进行试点。然后用三年的时间对各种类型矿床尾矿堆进行全国性大普查。家底一旦摸清,其后的综合利用就会有的放矢,提出最佳综合利用方案,就会推动技术进步,挽救许多危机矿山,并为国家创造大量的财富。

2.9 实施油气化探全国扫面计划

现在国土资源部准备进行新一轮的油气大普查。地质、地震及钻探都已拟定了大规模计划,唯独油气化探仍在被遗忘之中。如果这次国土资源部筹划的油气大普查能不负国家领导的殷切期望,势必不能完全走“地质+地震+钻探”的老路。要有一些新思路才能有重大突破,就需要像金属矿勘查有一个区域化探全国扫面计划,也制定一个油气化探全国扫面计划^[64-67],以更好的预测油气远景,并大量减少干井数目、提高成功率。并使油气化探摆脱向着各个以地质或地震为主的项目去讨饭吃的局面,相信制定长远独立的像金属矿区域化探扫面那样的大计划,没有理由不像金属矿区域化探扫面那样作出重大贡献。因为经过 80 年的发展,油气化探一直处于坎坷起伏,不是技术问题,而是人为问题和没有高瞻远瞩的政策问题。

2.10 全球地球化学填图计划

前文已述及我们对全球地球化学填图进行了一些没有项目资金支持的预研究并根据元素在地球表层分布的分形自相似规律提出了多密度层次全球地球化学填图的新思路与新作法。2009 年 10 月在廊

坊召开的国际会议讨论了我们的新思路与新作法,重点是寻求与欧洲、美国和加拿大合作研究入海大河三角洲沉积物采样方法,并根据取得的结果研究利用入海大河三角洲采样进行全球第一层次地球化学填图的可行性。

2.11 在中国建立全球地球化学填图研究中心

为了用新的地球化学填图理念与方法指导全球地球化学填图工作,需要在中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所建立全球地球化学填图研究中心以便组织全球科学家进行这项工作。这项工作的初步完成——取得全球 26 条大河入海口三角洲沉积物及部分国家支流口泛滥平原沉积物中 76 种元素含量将是继门捷列夫发现周期表后的一件大事,同时表明中国关心全世界人类的生存环境与生存条件。

2.12 中国农耕区土壤碳库与固碳潜力评价

中国已完成的 160 万 km² 多目标区域地球化学调查,已获得主要农耕区土壤中有有机碳和全碳等 54 种元素及指标,是迄今为止全球数据质量最高、覆盖范围最广的地球化学填图数据。这就使中国在准确计算土壤碳储量,查明土壤碳库时空分布,探索土壤碳汇机理,评估土壤固碳潜力,研究农业增产、土壤固碳技术,开展土壤碳源汇变化监测等研究中具备全球任何其他国家均不具备的基础条件,其科学意义重大,应用前景广阔,极有可能获得具有地域特色的重大原始创新。

最近国土资源部公益性行业科研专项已批准实施“中国农耕区土壤碳库与固碳潜力评价”项目(项目负责人:成杭新),来推动我们在这一领域的前沿进行深入研究。这对提高中国在全球变化研究中的作用和地位,科学制订碳限量减排方案,具有重要的现实意义。

这些大科学计划有的正在进行,有的目标及内容分散于一些小计划中,有的还在酝酿。不论是何种状况,今后中国化探在 21 世纪的发展需要充分利用过去的累积,需要有整体思想贯穿于所有项目。

这些大科学计划的基本特征都是研究与大规模调查的密切结合,使科研工作可直接指挥大调查的进行,而大调查取得的海量新的信息使科研能进一步取得创新成果。这种中国化探执行了数十年的传统使中国做到西方国家做不到的事,从而使中国化探领先于世界。那种认为大规模调查不应列入科研项目,只有根据少量资料大做文章才是科研的认识

是极端错误的。

这些大科学计划还必须要有领导的坚决支持及管理部门的有力推动。区域化探全国扫面计划及多目标地球化学填图计划的成功已经对此提供了充分的例证。

参考文献 (References):

- [1] 谢学锦. 继续努力 迎接我国化探事业的更大发展[J]. 1984, 中国地质报, 1984-07-09(2).
Xie Xuejing. Keep work hard, to meet the great development of exploration geochemistry of China[J]. China Geological Newspaper, 1984-07-09(2)(in Chinese).
- [2] 谢学锦. 三十而立——为庆祝物化探所成立 30 周年而作[M]//面向 21 世纪的应用地球化学——谢学锦院士从事地球化学研究 50 周年. 北京:地质出版社, 2001:186-187.
Xie Xuejing. Thirty years achievement—Celebration for 30 anniversary of establishment of IGGE[M]//Applied Geochemistry in the 21st Century. Beijing:Geological Publishing House, 2001:186-187 (in Chinese).
- [3] 谢学锦. 欧阳宗圻, 勘查地球化学十年回顾与展望[C]//八十年的中国地质科学. 中国地质学会编辑. 北京:地质出版社, 1992, 137-144 (in Chinese).
Xie Xuejing, Ouyang Zongqi. Ten years of exploration geochemistry in China [C]//China Geological Science in 1980's, Edited by China Geological Association. Beijing: Geological Publishing House, 1992:137-144.
- [4] 谢学锦. 中国化探发展的新战略 [M]. 中国地质学会勘查地球化学专业委员会会志, 1991:3-5.
Xie Xuejing. New Strategy for Exploration Geochemistry in China [M]. China Geological Association, Exploration Geochemistry Association, Beijing:Geological Publishing House, 1991:3-5 (in Chinese).
- [5] 谢学锦. 中国化探走向 2000 年[J]. 物探与化探, 1992, 16(2):81-86.
Xie Xuejing. Geochemical exploration in China toward the year 2000, Geophysical and Geochemical Exploration, 1992, 16 (2)81-86 (in Chinese).
- [6] 谢学锦. 勘查地球化学的过去、现在和未来 [J]. 物探与化探, (4/5), 1992, 20-31.
Xie Xuejing. The Past, present and future of exploration geochemistry [J], Geophysical and Geochemical Exploration, 1992, 16(4/5):20-31 (in Chinese).
- [7] 谢学锦. 勘查地球化学的现状与未来展望[J]. 地质论评, 1996, 42 (4)346-355.
Xie Xuejing. The present and future expectation for exploration geochemistry [J]. Geological Review, 1996, 42 (4):346-355 (in Chinese).
- [8] 谢学锦. 论矿产勘查史——经验找矿、科学勘查与信息勘查[J]. 地学研究, 1997, 第 29-30 号, 254-266
Xie Xuejing. History of mineral exploration—empirical prospecting, scientific exploration and information exploration [J]. Journal of Geochemical Exploration, 1999, 67:97-108.
- [9] 谢学锦. 矿产勘查的新战略[J]. 物探与化探, 1997, 21(6)402-410.
Xie Xuejing. New strategy on mineral exploration [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1997, 21 (6):402-410 (in Chinese).
- [10] 谢学锦. 我国基础地球化学调查现状与发展 [M]//面向 21 世纪的应用地球化学——谢学锦院士从事地球化学研究 50 周年. 北京:地质出版社, 2001:233-238.
Xie Xuejing. The Present status and future development of basic geochemistry in China [M]// Applied Geochemistry in the 21st Century. Beijing: Geological Publishing House, 2001:233-238(in Chinese).
- [11] 谢学锦. 蛛丝马迹探宝藏——勘查地球化学发展的里程碑[C]//陈建礼主编. 科学的丰碑——20 世纪重大科技成就纵览. 济南:山东科学技术出版社, 1998:491-495.
Xie Xuejing. Development—landmarks of exploration geochemistry [C]//Chen Jianli (ed.). Scientific Landmark—Collection of Great Scientific and Technical Achievement in China in 20st century. Jinan:Shandong Scientific and Technical Publishing House, 1998:491-495(in Chinese).
- [12] 谢学锦. 进入 21 世纪的勘查地球化学 [J]. 中国地质, 2001, 28 (4):11-18.
Xie Xuejing. Exploration geochemistry into the 21st century [J]. Geology in China, 2001, 28 (4):11-18(in Chinese).
- [13] 谢学锦. 勘查地球化学:发展史·现状·展望[J]. 地质与勘探, 2002, 38(6):1-9.
Xie Xuejing. Exploration geochemistry: retrospect and prospect [J]. Geology and Propecting, 2002, 38 (6): 1-9 (in Chinese with English abstract).
- [14] 谢学锦. 大地调中的勘查地球化学. 中国国土资源报, 2002-05-22(7).
Xie Xuejing. Exploration geochemistry in Comprehensive Geological Survey program. China Land and Resources Newspaper, 2002-05-22(7) (in Chinese).
- [15] 谢学锦, 施俊法. 中国勘查地球化学 50 年回顾 [M]//田凤山主编. 中国地质学会 80 周年纪念文集. 北京:地质出版社, 2002:104-109.
Xie Xuejing, Shi Junfa. 50 Years of exploration geochemistry in China [M]//Tian Fengshan (ed.). Collected Works of 80 Years Anniversary for China Geological Association. Beijing:Geological Publishing House, 2002:104-109(in Chinese).
- [16] 谢学锦. 2020 年的勘查地球化学 [J]. 地质通报, 2003, 22(11/12):863-868.
Xie Xuejing. Exploration geochemistry in years 2020—from exploration geochemistry to applied geochemistry [J]. Geological Bulletin of China, 2003, 22 (11/12):863-868 (in Chinese with English abstract).
- [17] Potter J F. Geochemical Atlases [J]. The environmentalist, 1990, 10 (4):241-242.

- [18] 谢学锦, 刘大文, 向运川, 等. 地球化学块体——概念与方法学发展[J]. 中国地质, 2002, 29(3):225-233.
Xie Xuejing, Liu Dawen, Xiang Yunchuan, et al. Geochemical blocks—Development of concept and methodology [J]. Geology in China, 2002, 29(3):225-233(in Chinese with English abstract).
- [19] 涂光炽, 高振敏, 胡瑞忠, 等. 分散元素地球化学及成矿机制[M]. 北京:地质出版社, 2004.
Tu Guangchi, Gao Zhenmin, Hu Ruizhong, et al. Geochemistry of dispersed elements and Minerogenetic Mechanism [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004:268-319-109(in Chinese).
- [20] 鄯明才, 迟清华. 中国东部地壳与岩石的化学组成[M]. 北京:科学出版社, 1997:1-292.
Yan Mingcai, Chi Qinghua. Chemical Compositions of the Continental Crust and Rocks in the Eastern Part of China [M]. Beijing:Sceneces Press, 1997:1-292.
- [21] 迟清华, 鄯明才. 中国东部岩石地球化学图 [J]. 地球化学, 2005, 34(2):97-108.
Chi Qinghua, Yan Mingcai. Lithochemical map in the eastern Part of China [J]. Geochemistry, 2005, 34 (2):97-108(in Chinese with English abstract).
- [22] 迟清华. 中国东部大陆岩石地球化学图揭示的信息 [J]. 地质通报, 2005, 24(10/11):897-905.
Chi Qinghua. Information revealed by lithochemical maps in the continent of eastern China [J]. Geological Bulletin of China, 2005, 24 (10/11): 897-905(in Chinese with English abstract).
- [23] 迟清华. 应用岩石化学元素丰度研究地球化学块体[J]. 地质与勘探, 2002, 38 (增刊):164-167.
Chi Qinghua. The significance of element abundances of rocks in study of geochemical blocks [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2002, 38 (supp.):164-167(in Chinese).
- [24] 谢学锦, 程志中, 张立生, 等. 中国西南地区 76 种元素地球化学图集[M], 北京:地质出版社, 2008.
Xie Xuejing, Cheng Zhizhong, Zhang Lisheng, et al. Geochemical Atlas of 76 elements in Southwesrern China [M], Beijing: Geological Publishing House, 2008:110 (in Chinese with English abstract).
- [25] Brimhall G. H. Preliminary fractionation patterns of ore metals through earth history[J]. Chemical Geology, 1987, 64:1-16.
- [26] Cheng Hangxin, Xie Xuejing, Yan Guangsheng, et al. Platinum and palladium abundances in floodplain sediments and their geochemical provinces [J]. Chinese Journal of Geochemistry, 1999, 18(1):18-24.
- [27] 钱德孙, 谢学锦. 大规模操作快速分析流水作业法[J]. 科学通报, 1953, 3月号:54-60.
Qian Desun, Xie Xuejing. Stream line operation of rapid chemical analysis for geological samples[J]. Science Bulletin, 1953, No.3:54-60(in Chinese).
- [28] Xie Xuejing, Yan Mingcai, Li Liangzhong, et al. Geochemical reference Samples, drainage sediment GSD1 -8 from China [J]. Geostandard Newsletter, 1985, V. IX, No. 1:83-159.
- [29] Xie Xuejing, Yan Mingcai, Li Liangzhong, et al. Usable values for Chinese standard reference samples of stream sediments, soils and rocks: GSD9 -12, GSS1 -8 and GSR1 -6 [J]. Geostandard Newsletter, 1985, V. IX, No. 2:277-280.
- [30] Xie Xuejing, Yan Mingcai, Wang Chunshu, et al. Geochemical standard reference samples GSD9-12, GSS1-8 and GSR1-6 [J]. Geostandard Newsletter, 1989, V. X III, No. 1, 83-179.
- [31] Yan Mingcai, Chengzhizhong, Study and Application of Geochemical Reference Materials in the IGGE[J]. China, 2007, 31, (4):301-310.
- [32] 地球化学标准参考样研究组. 地球化学标准参考样的研制与分析方法 GSD 1-8, 地质专报, 系列 9, 第一卷[M]. 北京:地质出版社, 1986:1-358.
Team of Geochemical Reference Materials research, Samples preparation and analytical methods of geochemical reference materials GSD 1-8, Geological Bulletin, Series 9, Vol 1 [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1986:1-358(in Chinese).
- [33] 地球化学标准参考样研究组. 地球化学标准参考样的研制与分析方法 GSR 1-8, GSS 1-8, GSD 9-12, 地质专报. 系列 9, 第二卷[M]. 北京:地质出版社, 1987:1-296.
Team of Geochemical Reference Materials Research, Samples Preparation and Analytical Methods of Geochemical Reference Materials GSR1 -6, GSS1 -8, GSD9 -12. Geological Bulletin, Series 9, Vol 2 [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987: 1-296(in Chinese).
- [34] 谢学锦, 成杭新, 谢渊如. 川滇黔桂 76 种元素地球化学图编制中分析方法与分析质量研究(一)不同实验室产生地球化学图的相似性——以 Ag,Cs,Ga,Ge 为例[J]. 地质通报, 2002, 21(6):277-284.
Xie Xuejing, Cheng Hangxin, Xie Yuanru. Analytical methods and date quality in the compilation of 76 elements geochemical atlas of Sichuan, Yunnan, Guizhou, and Guangxi provinces of China (1): Similarity of geochemical maps compiled from data generated by different laboratories——Examples from Ag, Cs, Ga, Ge [J]. Geological Bulletin of China, 2002, 21 (6): 277-284(in Chinese with English abstract).
- [35] 谢学锦, 叶家瑜, 鄯明才, 等. 川滇黔桂 76 种元素地球化学图编制中分析方法与分析质量研究(三)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.
Xie Xuejing, Ye Jiayu, Yanmingcai, et al. Analytical methods and quality in the compilation of 76 elements geochemical atlas of Sichuan, Yunnan, Guizhou, and Guangxi Provinces of China(3): New proficiency test for analytical laboratories involved in environmental geochemical mapping [J]. Geological Bulletin of China, 2003, 22(1):41-11(in Chinese with English abstract).
- [36] Xie Xuejing, Wang Xueqiu, Xu Li, et al. Orientation study of strategic deep -penetration geochemical methods in central Kyzikum desert terrain Uzbekistan [J]. J. Geochem. Explor., 2000, 66:135-143.
- [37] 王学求. 地球气纳微金属测量的的概念理论与方法[M]//谢学锦

- 等主编. 走向 21 世纪的矿产勘查地球化学. 北京: 地质出版社, 1999:105-124.
- Wang Xueqiu. The concept, theory and method of determination of nanoscale metals in earth gas [M]//Xie Xuejing (ed.). In to the 21st Century of mineral Exploration Geochemistry. Beijing: Geological Publishing House, 1999: 105-124(in Chinese).
- [39] 王学求. 荒漠戈壁区超低密度地球化学调查与评价—以东天山为例[J]. 新疆地质, 2001, 19(3):200-206.
- Wang Xueqiu. Wide-spaced geochemical survey in arid desert terrain, a case history from the eastern tianshan regions, northwestern China[J]. Xinjiang Geology, 2001, 19(3):200-206(in Chinese with English abstract).
- [39] 王学求, 程志中, 刘大文. 中国东部覆盖区地球化学块体的圈定与评价[M]//谢学锦等主编. 走向 21 世纪的矿产勘查地球化学. 北京:地质出版社, 1999:223-233.
- Wang Xueqiu, Cheng Zhizhong, Liu Dawen. Delineation and evaluation of geochemical blocks in covered area in East China[M]//Xie Xuejing (ed.). Into the 21st century of mineral exploration geochemistry, Beijing:Geological Publishing House, 1999:223 - 233(in Chinese).
- [40] Wang Xueqiu, Cheng Zhizhong, Lu Yinxiu, et al. Nanoscale metals in earth gas and mobile forms of metals in overburden in wide-spaced regional exploration for giant ore deposits in overburden terrains[J]. J. Geochem. Explor, 1997, 58(1):63-72.
- [41] Wang Xueqiu, Xie Xuejing, Cheng Zhizhong, et al. Delineation of regional geochemical anomalies penetrating through thick covers in concealed terrians—a case history from the Olympic Dam deposit[J]. J. Geochem. Explor, 2000, 66:85-97.
- [42] Wang Xueqiu, Chi Qinghua, Liu Hongyan, et al. Wide-spaced sampling for delineation of geochemical provinces in desert terrains, northwestern China [J]. Geochemistry:Exploration, Environment, Analysis, 2007, 7:153-161.
- [43] Wang Xueqiu. Leaching of mobile forms of metals in overburden: development and applications [J]. J. Geochem. Explor., 1998, 61: 39-55.
- [44] Wang Xueqiu. Delineation of geochemical blocks for undiscovered large ore deposits using deep-penetrating methods in alluvial terrains of eastern China [J]. J. Geochem. Explor. 2003,77 (1):15-24.
- [45] 谢学锦, 王学求. 深穿透地球化学新进展[J].地学前缘, 2003, 10 (1):225-238.
- Xie Xuejing, Wang Xueqiu. Recent developments on deep penetrating geochemistry [J]. Earth Sciences Frontiers, 2003,10(1): 225-238(in Chinese with English abstract).
- [46] 刘大文, 王学求, 程志中, 等. 金属活动态与地气测量技术在高寒草原区的试验研究—川西北若尔盖草原覆盖区的实例[C]//谢学锦等主编.走向 21 世纪的矿产勘查地球化学. 北京:地质出版社, 1999:212-222.
- Liu Dawen, Wang Xueqiu, Cheng Zhizhong, et al. The pilot study on nanoscale metals in earth gas and mobile forms of metals in overburden in alpine grassland—A case history from Ruoergai grassland coverage area in northwest Sichuan [C]// Xie Xuejing (ed.). Into the 21st Century of Mineral Exploration Geochemistry. Beijing:Geological Publishing House, 1999:212-222(in Chinese).
- [47] 王学求, 程志中, 迟清华, 等. 吐哈盆地砂岩型铀矿战略性地球化学调查与评价[J]. 地质与勘探, 2002, 38(Z1):148-151.
- Wang Xueqiu, Cheng Zhizhong, Chi Qinghua, et al. Geochemical exploration for sandstone type uranium deposits in the Turpan - Hami basin[J]. Geology and Propecting, 2002, 38(Z1):148-151(in Chinese with English abstract).
- [48] 王平, 奚小环. 全国农业地质工作的蓝图——“农业地质调查规划要点”评述[J]. 中国地质, 2004, 31(增刊):11-15.
- Wang Ping, Xi Xiaohuan. Blueprint of nationwide agrogeological environmental survey—On the "Main Points of the Plan of Nationwide Agrogeological Environmental Survey" [J]. Geology in China, 2004, 31(supp.):11-15(in Chinese with English abstract).
- [49] 杨忠芳, 陈岳龙, 汪明启, 等. 地球化学填图的国际研究现状及建议[J]. 地球科学进展, 2002, 17(6):826-831.
- Yang Zhongfang, Chen Yuelong, Wang Mingqi, et al. The status of international geochemical mapping and suggestions to China's mapping[J]. Advance in Earth Sciences, 2002, 17(6):826-831(in Chinese with English abstract).
- [50] 奚小环. 多目标的地质大调查—21 世纪勘查地球化学的战略选择[J]. 物探与化探, 2007, 31 (4):283-288.
- Xi Xiaohuan. Multipurpose comprehensive 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).
- [51] 奚小环. 多目标区域地球化学调查与生态地球化学—第四纪研究与应用的新方向[J]. 第四纪研究, 2005, 25(3):269-274.
- Xi Xiaohuan. Multipurpose regional geochemical survey and ecogeochemistry:new direction of Quaternary research and application [J]. Quaternary Sciences, 2005, 25 (3):269-274 (in Chinese with English abstract).
- [52] 奚小环, 杨忠芳, 夏学齐, 等. 基于多目标区域地球化学调查的中国土壤碳储量计算方法研究[J]. 地学前缘, 2009, 16(1):194-205.
- Xi Xiaohuan, Yang Zhongfang, Xia Xueqi, et al. Calculation techniques for soil carbon storage of China based on multi-purpose geochemical survey[J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(1):194-205(in Chinese with English abstract).
- [53] 杨忠芳, 奚小环, 成杭新, 等. 区域生态地球化学评价核心与对策[J]. 第四纪研究, 2005, 25(3):275-284.
- Yang Zhongfang, Xi Xiaohuan, Cheng Hangxin, et al. The core and countermeasures of regional ecological geochemical assessment [J]. Quaternary Sciences, 2005, 25 (3):275-284 (in Chinese with English abstract).
- [54] 奚小环. 全面发展时期的勘查地球化学 [J]. 物探与化探, 2009, 33(1):1-2,7.
- Xi Xiaohuan. Exploration geochemical at the all-round development

- stage [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2009, 33(1): 1-2,7(in Chinese with English abstract).
- [55] 奚小环. 生态地球化学: 从调查实践到应用理论的系统工程[J]. *地学前缘*, 2008, 15(5): 1-8.
- Xi Xiaohuan. Ecological geochemistry: from a geochemical survey to an applied theory[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(5): 1-8 (in Chinese with English abstract).
- [56] 奚小环. 生态地球化学与生态地球化学评价 [J]. *物探与化探*, 2004, 28(1): 10-15.
- Xi Xiaohuan. Eco-geochemical research and ecogeochemical evaluation [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2004, 28(1): 10-15(in Chinese with English abstract).
- [57] Webb J S, Fortescue J I, Nichol I, et al. Regional geochemical Reconnaissance in the Namwala Concession area, Zambia [M]. *Geochemical Prospecting Research Centre, Technical Communication*, 47, 1964: 42.
- [58] Meyer W T, Theobald P K, Bloom H. Stream Sediment Geochemistry[M]. *Proceedings, Exploration 77*, 1997.
- [59] Plant J, Orientation studies on stream-sediment sampling for a regional geochemical survey in northern Scotland [J]. *Trans. IMM, section B*, 1997, 80: B 324-B345.
- [60] Cheng Hangxin, Shen Xiachu, Yan Guangsheng, et al. Wide-spaced floodplain sediment sampling as a global sampling medium for international geochemical mapping [M]/Xie Xuejing (ed.). *Proceedings of the 30th International Geological Congress, Vol. 19-Geochemistry*, Beijing China, 1997: 89-109.
- [61] Bolviken B, Bogen J, Demetriades A, et al. Regional geochemical mapping of western Europe toward the year 2000 [J]. *J. Geochem. Explor.* 1996, 56(2): 141-166.
- [62] Xie Xuejing, Cheng Hangxin. Global geochemical mapping and its implementation in the Asia-Pacific region [J]. *Applied Geochemistry*, 2002, 16: 139-1321.
- [63] 童霆. 河口三角洲元素含量与矿产资源—以湘资源遭为例[J]. *第四纪研究*, 2005, 25(3): 298-304.
- Tong Ting. Element concentrations in river delta sediments and mineral resources potential in the drainage basin: A case study in the Xiangjiang, Zishui, Yuanjiang and Lishui rivers basins [J]. *Quaternary Sciences*, 2005, 25(3): 298-304 (in Chinese with English abstract).
- [64] 谢学锦. 油气化探, 何去何从? (代序)[J]. *地质通报*, 2009, 28(11): 1533-1535.
- Xie Xuejing. Oil and gas surface geochemistry, past development and future prospect [J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(11): 1533-1535(in Chinese).
- [65] 谢学锦. 国外油气化探的成功案例——通过图的显示[J]. *地质通报*, 2009, 28(11): 1542-1561.
- Xie Xuejing. Case histories of hydrocarbon survey success in abroad [J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(11): 1536-1538 (in Chinese).
- [66] 谢学锦, 孙忠军. 油气化探全国扫面计划[J]. *地质通报*, 2009, 28(11): 1536-1538.
- Xie Xuejing, Sun Zhongjun. Hydrocarbon surface geochemistry-national reconnaissance (HSGNR program, a proposal) [J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(11): 1542-1561 (in Chinese).
- [67] 吴传璧. 中国油气化探 50 年[J]. *地质通报*, 2009, 28(11): 1573-1604.
- Wu Chuanbi. Fifty years history of Chinese oil and gas geochemical exploration [J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(11): 1573-1604(in Chinese).

21st Century's roadmap for exploration geochemistry in China

XIE Xue-jing¹, REN Tian-xiang¹, YAN Guang-sheng²,
XI Xiao-huan², LIU Da-wen², WANG Xue-qiu¹, CHENG Zhi-zhong¹,
CHENG Hang-xin¹, ZHOU Guo-hua¹, CHI Qing-hua¹, SUN Zhong-jun¹

(1. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Langfang 065000, Hebei, China; 2. China Geological Survey, Beijing 100037, China)

Abstract: Recent advances of exploration geochemistry in China are reviewed including (1) In-depth study of the tremendous amount of data obtained in past geochemical mapping projects for: (a) better planning of future exploration in China. (b) prediction of ore reserves potential by using the idea of mineralization coefficient, general, regional, and specified (MCG, MCR & MCS). (c) new idea and methodology for searching economic & independent Se, Te, Ga, Ge, In, Tl deposits. (d) understandings of the evolution of S. China tin and tungsten granites from Archaean to Yanshan period. (e) calculation of the fractionation coefficients to describe the behavior of Pt, Pd, Os, Ru, Ir, Rh during and after the formation of SW China mantle plume, (2) advancement of 76 element analytical scheme and new data quality monitoring procedure using the idea of virtualized standard maps. (3) New idea and methodology in deep penetrating Geochemistry including micro-sieving method and micro-phase analysis. (4) new program of regional geochemistry with overburden drilling. (5) Eco-agro-environmental mapping program to cover whole China. (6) New idea and methodology for geochemical mapping in global scale based on the fractal self-similarity principle controlling the distribution of elements in diff kinds of sediments. In order to widen the scope of exploration geochemistry in 21st century 12 big geochemical programs are suggested, all based on the ideas that mapping in diff scales and of nearly all elements in the periodic table provides the foothold for the advancement of exploration geochemistry in the 21st century, that close integretion of mapping, research, exploration and engeieering (drilling, trenching, etc) are necessary, for increasng the success of discoveries, that establishment of a global geochemical mapping research center in IGGE, China with our new mapping cocept will promote to get a global picture of elements distribution in earlier days.

Key Words: Geochemical exploration in China; Roadmap; Geochemical Mapping; Mineral exploration; Multipurpose geochemical survey; deep-penetrating geochemistry

About the first author: XIE Xue-jing, born in 1923, Academician of Chinese Academy of Sciences, mainly engages in the study of applied geochemistry; E-mail: Xuejing_xie@126.com.