

青海省青藏高原北部地质过程与矿产资源重点实验室资助

三十九种元素的分组 及元素地球化学

刘恒福 徐云甫 李善平 等 编著

地质出版社

过程与矿产资源重点实验室资助

三十九种元素的分组 及元素地球化学

刘恒福	徐云甫	李善平	吴正寿	白宗海	
陈丽娟	黄青华	刘锦绣	何 皎	熊寿加	编著
李永虎	谢祥镭	王亚栋	杨鸿鹏	林文山	

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

自 20 世纪 70 年代末开始,青海地区开展了大面积的 1:50 万和 1:20 万化探扫描工作,截至 21 世纪初,青海省范围内的区域地球化学勘查工作基本完成,其成果在指导地质找矿和深化基础地质研究方面取得了巨大成功,在此项工作成果的基础上,本书通过对 39 种元素分析,在考虑了元素的基础地球化学特征和元素在内(外)生作用中地球化学特征的变化及元素的成矿地球化学特征基础上,确定了常规化探扫面成果数据中元素的分组方式,加深了对 39 种元素地球化学行为及其某些集合信息的地质地球化学含义的了解。

本书将 39 种元素分为有色金属元素组,黑色金属元素组,分散、稀有、稀土、放射性金属元素组,常(宏)量元素组和矿化剂元素组,共 5 组,在此基础上将有色金属元素组细分为 W-Sn-Mo-Bi 亚组、Cu-Pb-Zn-Ag-Cd 亚组和 Au-As-Hg-Sb 亚组,黑色金属元素组分为 Cr-Ni-Co-V 亚组和 Fe、Mn、Ti 单元素组,分散、稀有、稀土、放射性金属元素组分为 Li、Be、Nb、Zr 4 种单元素和 Sr-Ba、Y-La、U-Th 3 个亚组,常(宏)量元素组分为 K-Na、Ca-Mg、Si-Al 3 个亚组,矿化剂元素组分为 B、F、P 3 个单元素。并对各组分元素特征进行了分析研究。

本书结合近年来高速发展的环境地球化学和生物地球化学成果,对元素与人类活动的关系进行了简单叙述,意在引起人们的注意和更深一步的认识。

本书可供相关专业科研及生产人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

三十九种元素的分组及元素地球化学 / 刘恒福等编

著. — 北京:地质出版社, 2017.6

ISBN 978-7-116-09957-9

I. ①三… II. ①刘… III. ①化学元素-研究②元素地球化学-研究 IV. ①O611②P595

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 284297 号

Sanshijiu Zhong Yuansu de Fenzu ji Yuansu Diqiu Huaxue

责任编辑:田野 宫月萱

责任校对:王 瑛

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号,100083

咨询电话:(010)66554528(邮购部);(010)66554631(编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

传 真:(010)66554686

印 刷:北京地大彩印有限公司

开 本:787mm×1092mm¹/₁₆

印 张:8.75

字 数:200 千字

版 次:2017 年 6 月北京第 1 版

印 次:2017 年 6 月北京第 1 次印刷

定 价:48.00 元

书 号:ISBN 978-7-116-09957-9

(如对本书有意见或建议,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

序

自 20 世纪 70 年代末启动的全国区域地球化学勘查（扫面）计划已经完成，其成果在指导地质找矿和深化基础地质研究方面取得了巨大成功，深受中外地学界的瞩目。

计划要求对所有样品实施 Ag、As、Au、B、Ba、Be、Bi、Cd、Co、Cr、Cu、F、Hg、La、Li、Mn、Mo、Nb、Ni、P、Pb、Sb、Sn、Sr、Th、Ti、U、V、W、Zn、Zr 和 SiO_2 、 Al_2O_3 、CaO、MgO、 K_2O 、 Na_2O 、 Fe_2O_3 等 39 种元素（化合物）进行定量测定。之所以规定 39 种测试项目，是因为考虑在当时技术条件下，经过开发配套的努力，可确保主要矿种的目标元素、指示微量元素以及反映成矿地质环境的宏（常）量元素测试能够获得高质量数据。

2007 年启动的 25 个矿种的全国矿产资源潜力评价项目，对以往 1:20 万和 1:50 万为主的已有区域地球化学资料信息的二次开发目标提出了更高的要求。为达到既定目标，不但要在现代成矿理论及预测方法引导下，充分利用现代技术平台对已有数据进行处理，而且，在信息提取及其成果解释层面上必须对 39 种元素地球化学行为及其某些集合信息的地质地球化学含义有足够的了解。《三十九种元素的分组及元素地球化学》一书的推出，无疑为加深这种了解提供了一种实时的有效工具；对相关研究与教学也有一定的参考价值。

该书是编著者长期从事区域矿产工作实践和关注地球化学文献资料并潜心研究的结晶。此书共分 6 章，第一章是 39 种元素分组方案的讨论；其余 5 章是关于各分组个别元素地球化学的论述。

对于 39 种元素的归类分组，基本上是相关元素矿产工业分类及其地球化学性能趋向归类的结合，并不拘泥于地球化学前辈们的某种经典分类。在对个别元素地球化学的论述中，元素化学性质、不同地质作用或物理化学条件下的行为方式，及其与其他元素相互影响下演化结果的脉络比较清楚。论述中，比较注意引用较新的研究结果论证某种观点并引出结论；因此，对相关的研究有一定的实用性参考价值。

李明喜

2015 年 12 月

前 言

近 20 年来在青海及邻省开展了大面积的区域化探扫面工作，结合多年来在区域化探扫面工作中积累的成果经验，编写了本书，目的是利用所得的资料，总结、归类，从而使其更好地为区域化探和地质矿产工作服务。

书中提出了化探扫面分析元素的实用性元素分组方案，意在加强元素间相互关系的认识，以利于在实际工作中对元素地球化学特征的深入研究。本书的主要内容是按照元素分组方案，分组对每个元素（或亚组）的主要地质地球化学特征予以简要的叙述，力图使读者对区域化探扫面分析的每一个元素的主要地球化学特征能有一个清晰而系统的认识。在元素地球化学的论述方法上与一般的地球化学论著略有不同，其一是对一些繁杂且应用面狭窄的地球化学数据及探讨性资料未予引述，仅将其主要的地球化学特征及数据予以介绍；其二是从地质地球化学实际出发对元素地球化学特征进行阐述，并重视其实际应用性。

本书首先提出了此次工作确定的元素分组原则、意义及分组意见，同时分析了此次采用分组方式的不足，在此基础上对不同元素分组的各个元素内生作用成矿地球化学，变质作用地球化学及表生作用、沉积作用过程地球化学特征进行分述，并引用环境地球化学和生物地球化学成果，对各元素与生物活动关系（特别是元素对人类有益及有害性）进行了简要叙述。

化探扫面工作是地质矿产工作的一个极其重要的方面，随着矿产勘查工作的不断深入，加强化探扫面的成果资料的二次开发与深入研究势在必行。相信本书会对地质矿产工作者了解元素地球化学特征有一定的参考价值，也会对化探扫面成果的综合研究的深入开展具有积极的推进意义。

本书最初由刘恒福撰写主体，后期由徐云甫补充完善各章节及最新资料，各类表、图由黄青华完成，资料收集由陈丽娟、熊寿加、何皎、谢祥镭、李永虎、杨鸿鹏等完成，编纂过程中吴正寿、林文山、李善平、白宗海等给出了合理化建议，统稿工作由徐云甫完成。本书在青海省地质调查院大力支持下，特别是在物化探研究所技术人员的大力支持和帮助下完成了编撰工作，青海青藏高原北部地质过程与矿产资源重点实验室、青海省地质矿产研究所为后期的出版提供资金支持，在此一并表示感谢！

目 录

序

前言

第一章 元素分组目的	1
一、分组的原则	1
二、分组的意义	2
三、分组意见	2
四、分组的不足与讨论	10
第二章 有色金属元素组元素地球化学	12
一、W、Sn、Mo、Bi 亚组	12
二、Cu、Pb、Zn、Ag、Cd 亚组	25
三、Au、As、Hg、Sb 亚组	44
第三章 黑色金属元素组元素地球化学	60
一、Cr、Ni、Co、V 亚组	60
二、Fe	73
三、Mn	80
四、Ti	85
第四章 稀有、分散、稀土及放射性元素组元素地球化学	88
一、Zr	88
二、Nb	89
三、Li	90
四、Be	92
五、Sr 和 Ba 亚组	93

六、Y 和 La 亚组 97

七、Th 和 U 亚组 100

第五章 常量元素组元素地球化学特征 106

一、Na 和 K 亚组 106

二、Ca 和 Mg 亚组 109

三、Si 和 Al 亚组 113

第六章 矿化剂元素组元素地球化学 118

一、B 118

二、F 121

三、P 124

结语 128

主要参考文献 129

第一章 元素分组目的

区域化探扫面按规范要求应对 W、Sn、Mo、Bi、Cu、Pb、Zn、Ag、Cd、Au、As、Hg、Sb、Cr、Ni、Co、V、Fe₂O₃、Mn、Ti、Li、Be、Nb、Zr、Sr、Ba、Y、La、U、Th、B、P、F、K₂O、Na₂O、CaO、MgO、SiO₂、Al₂O₃等 39 种元素（或氧化物）做定量分析。这些元素包括了常见常用元素（第二、三、四、五周期）的大多数。其定量分析成果的深入研究对认识区域地球化学特征和研究区域成矿规律有着极其重要的作用，但是在已分析的 39 种元素中，某些常见且与成矿作用有关的元素仍未分析。如 C、S、Se、Te、Rb、Ge、Ga、Pt 等元素。建议在今后的工作中还应加大元素分析测试范围，提高分析方法和水平，以便能对更多的元素做出分析测试，促使区域化探扫面工作更好地为国民经济建设服务。

在众多的元素分析成果面前，只有不断地加深对各元素地球化学特征的认识，仔细探讨各种元素的相互关系，才有可能不断地提高地质找矿效果。为了提高区域化探成果的研究水平，必须对近 40 种分析元素（或氧化物）进行分组，加强对其相互关系的了解与深化认识，从而不断地提高对区域化探成果的研究水平。

一、分组的原则

根据区域化探扫面的实践和综合整理中对各种元素地球化学特征的不断认识和理解，结合近年来化探扫面成果在地质找矿中的指导作用，同时结合近年环境地球化学成果的创新，认为元素的分组应考虑以下 4 项原则。

1) 各元素地球化学的基本特征及其相关性：元素的亲合性：如亲铁、亲硫、亲氧、亲石、亲氯及亲某种岩类等特征。元素分散聚集特征、成矿特征、亲生物特征及某些独有的特征（如放射性特征等）。另外在区域分布上，众多的元素中某一种元素总会与一种或多种元素关系密切，这在分组中也必须予以考虑。

2) 元素分组必须符合区域化探工作和地质矿产工作的普遍适用性。

3) 大的分组不宜过细,但也不能太粗,应以适当合理为宜。分组过细必然考虑个性多而考虑相关性少,另外,大组之下还可根据实际情况划分亚组和单元素进行讨论;若分组太粗、太大则会考虑共性多而考虑个性不足,也可能造成一些不必要的混乱或牵强附会。

4) 分组应适用于实际工作需要。

因此此次分组方案的主导思想是从化探扫面工作的实际出发,为该项工作的综合研究服务。

二、分组的意义

此次分组的主要目的是为了探讨 39 种元素之间的组合特征,为地质找矿和人民生活提供一定的依据,因此,分组的意义在于以下 3 个方面。

1) 分组有利于加强元素间相互关系的深化认识。

2) 分组作图(指原始数据图及异常图等基础性图件)可浓缩地球化学信息容量,克服某些基础性地球化学图件欠单调的缺点,并可相对减少有关图件的数量,提高图件的质量与可读性,从而改变地球化学图内容简单偏少的缺陷。

3) 通过分组可为综合分析研究奠定基础,有利于提高元素地球化学分析研究深度。

三、分组意见

依据上述原则,本书将 39 种元素划分为下列 5 组(表 1-1)。

(一) 有色金属元素组

该组包括 W-Sn-Mo-Bi 亚组;Cu-Pb-Zn-Ag-Cd 亚组和 Au-As-Hg-Sb 亚组,共 13 个元素。本组元素以其亲硫和多与热液成矿作用有关为特征,同时某些元素也有亲氧、亲铁和与岩浆成矿作用的有关情况。3 个亚组大体上就是通常所讲的高、中、低温组合,需要注意的是,有些元素的地球化学特征往往是十分复杂的,并非只能按某种规则严格划定,3 个亚组只是大体根据元素的基本相关性的相对划分。

表 1-1 化探扫面分析元素的分组及主要地质地球化学特征简表

元素 分组	原子 序数	元素 符号	地壳平 均值 ^①	边界品位 ^②	地球化学 亲合性	组成的主要矿物	存在的主要地质环境 及富集成矿特征	共生、相关及类质同象 置换元素	备注
有色金属元素组	74	W	1.5	WO ₃ 0.08%~0.1%	亲氧、亲酸性岩	黑钨矿、白钨矿	岩浆期后，高温热液、层控及含钨建造，矽卡岩和斑岩	Sn、Mo、Bi、Cu、Pb、Zn、Sb、Co、Au、Ag、Nb、Ta、TR、F	
	50	Sn	2.0	原生矿 0.1%~0.2%，锡砂矿 0.02%，锡石 100~150g/m ³	亲氧、亲酸性岩，亦亲硫	锡石、黄锡矿、硫锡铅矿、黝锡矿、辉锑锡铅矿	与中酸性岩有关的岩浆期后—高温热液及锡砂矿	W、Pb、Zn、Cu、Sb、As、S、Nb、Ta、Be、Bi、Mo、Fe、F、Ag	较“年轻”的金属元素
	42	Mo	1.5	0.03%~0.05%	亲硫（铜）、亲酸性岩，也有亲铁性	辉钼矿、钼华、铁钼华、钼钙矿、钼铅矿、蓝钼矿、胶硫钼矿	斑岩、黑色页岩和气化—热液阶段	Cu、W、Bi、V、Pb、Zn、Co、Fe、Au、Nb、Be、Re、Ln、Se、Te、U、S	亲生物元素
	83	Bi	0.17	单独 0.5%，伴生 0.08%	以亲硫为主，但也亲石、亲铁	辉铋矿、泡铋矿、自然铋、铋华、菱铋矿、方铅铋矿、铜铋矿	常与中低温热液成矿有关，单独成矿少见，多伴生在铜、铅、钴、钼、镍、锡、钨、锑等矿石中	Pb、Zn、W、Mo、Cu、Sn、As、Au	分散元素
	29	Cu	55	0.2%~0.3%	强亲硫，但在某些情况下亲铁	自然铜、黄铜矿、黝铜矿、铜蓝、斑铜矿、砷黝铜矿、孔雀石、辉铜矿、硫砷铜矿	岩浆作用、火山作用、热液作用 and 沉积作用中皆有存在。以斑岩、矽卡岩、砂岩、气成热液及黑色页岩最易成矿	Pb、Zn、Au、Ag、S、As、Fe、V、Ni、Co、W、Sn、Bi	
	82	Pb	12.5	硫化矿 0.3%~0.5% 混合矿 0.5%~0.7% 氧化矿 0.5%~1%	亲硫、亲氧	方铅矿、白铅矿、铅矾、硫锑铅矿、脆锑铅矿	层控、气成热液及中温热液	Cu、Zn、W、Sn、Mo、Bi、Co、Ni、As、Hg、Ag、Au、K、Pt	污染环境元素

元素 分组	原子 序数	元素 符号	地壳平 均值 ^①	边界品位 ^②	地球化学 亲合性	组成的主要矿物	存在的主要地质环境 及富集成矿特征	共生、相关及类质同象 置换元素	备注
有色金属元素组	30	Zn	70	硫化矿 0.5% ~ 1% 混合矿 0.8% ~ 1.5% 氧化矿 0.8% ~ 1.5%	亲硫、亲铁、 亲氧	闪锌矿、菱锌矿、硅锌矿、 红锌矿、水锌矿、异极矿、 纤维锌矿	层控、中低温热液	Pb、Cu、W、Sn、Mo、Bi、 As、Hg、Co、Ni、Au、Ag、 Ba、S	亲生物元 素
	47	Ag	0.07	40 ~ 50 g/t	亲硫	自然银、辉银矿、角银矿、 脆银矿、淡红银矿、硒银 矿、碲银矿、硫碲铜银矿	多存在于中低温热液环境及火 山岩、黑色页岩中，并与热液 多金属伴生，火山岩型成矿最 重要	Au、Pb、Ln、Cu、Ge、Ga、 Cd、Se、Sb、S、As、Co、Ni、 Te、U	贵金属元 素
	48	Cd	0.2	锌矿石和铅锌矿石 0.01% ~ 0.09%， 铅锌精矿 0.03% ~ 0.2%	显著亲硫	硫镉矿、菱镉矿、方镉矿、 硒镉矿	不能形成独立矿床，主要存在 于闪锌矿、铅锌矿和铜铅锌矿 石中。在闪锌矿特别是浅色闪 锌矿中含量最高	Zn、Pb、Cu、S、Ca	分散元素， 对生物具 毒性
	79	Au	0.004	岩金 1 ~ 2 g/t 砂金 0.06 ~ 0.1 g/m ³	亲铁、亲硫， 但不与硫化 合	自然元素、金银矿、碲金 矿、铜金矿、方铂金矿、 黑铋金矿	太古代绿岩带、岩浆岩、火山 岩、砂砾岩，低温热液及地下 热卤水	Ag、Cu、Pb、Zn、As、Hg、 Sb、Bi、S、Ni、Co、Fe、W、 Sn、Y、Mo、Se、Te、Pt 族	贵金属元 素
	33	As	1.8	雌雄黄 5% 毒砂 3% ~ 5%	亲硫类金属 的非金属	雄黄、雌黄、毒砂、砷华 (砷霜)	多为低温热液，但毒砂也出现 在高温环境	Fe、Co、Ni、V、Cr、Zn、Ca、 Mg、Ti	具变价性、 挥发活性元 素，化合物 具毒性
	80	Hg	0.08	0.04%	亲硫	自然汞、辰砂、辉汞矿、 碲汞矿、氯汞矿、橙红石	层控、低温热液	Sb、Se、Te、As、Au、Ag、 Zn、Cd、Cu、S、Ba、Ca、 Ce、Cl 等	具挥发性、 络合性， 是重要的 环境污染 元素

有色金属元素组

续表

元素 分组	原子 序数	元素 符号	地壳平 均值 ^①	边界品位 ^②	地球化学 亲合性	组成的主要矿物	存在的主要地质环境 及富集成矿特征	共生、相关及类质同象 置换元素	备注
有色 金属	51	Sb	0.2	0.7%	亲硫	辉钨矿、方铅矿、黄铜矿、 镍华、镍赭石、脆硫镍铅 矿	层控、低温热液	Hg、Au、W、Pb、Zn、Cu、 Sn、S、As、Bi、Cd、Fe、Ni、 Co、Mn	
	24	Cr	100	Cr ₂ O ₃ 贫5%~8% 砂矿1.5%	亲铁、亲氧	铬铁矿、铝铬铁矿、富铬 尖晶石	多存在于超基性岩、基性岩及 黑色页岩中，并多在纯橄辉岩 中成矿	Fe、Co、Ni、Mn、Mg、Zn、 Al	生物所需 的微量元 素
黑色 金属 元素组	28	Ni	75	硫化镍：氧化 矿0.7%原生 矿0.2%~0.3% 硅酸镍矿0.5%	亲铁、亲铜 (硫)，并弱 亲氧	镍黄铁矿、辉砷镍矿、针 硫镍矿、红砷镍矿，针镍 矿、暗镍蛇纹石	多存在于基性—超基性岩及黑 色页岩中，并主要在铜镍硫化 物矿中成矿	Fe、Cu、Cr、Co、Mn、Pt族、 S、Au、Ag、As、Se、Te、Mg	幔型元素、 基性岩的 特征元素
	27	Co	25	硫化钴矿、 砷化钴矿 0.02%钴土矿 0.3%	亲铁、亲硫	辉砷钴矿、砷钴矿、硫镍 钴矿、含钴黄铁矿、土状 钴矿、纤维钴矿	存在于基性—超基性、黄铁矿 及硫化物中。成矿多为红土型 镍矿，少量在硫砷化合物和氧 化物中	Fe、Ni、Cu、Zn、Mg、Mn、 As、S	分散元素、 地幔元素
	23	V	135	V ₂ O ₅ 0.5%	新氧(石)、 亲铁	绿硫钒矿、钒云母、硫钒 铜矿、钒铅锌矿、钒钾钼 矿、钒铅矿、钒钙钼矿	多存在于基性—超基性岩和富 含有机质的沉积岩中。单独矿 床很少，多伴生在磁铁矿、煤 矿、铀矿、铝土矿等矿床中	Fe、U、P、Ti、Mg、Al、Mn、 Ni、Mo	氧化—还 原反应指 示元素
	26	Fe	5.63%	磁铁矿、菱铁 矿20%，褐铁 矿、赤铁矿25%	亲铁、亲硫、 亲氧	磁铁矿、赤铁矿、菱铁矿、 镜铁矿、褐铁矿、针铁矿	各种环境条件下都可存在。岩 浆作用、沉积作用、沉积变 质、矽卡岩、风化壳、火山岩 和玢岩均可成矿	O、V、Ti、Co、Cu、Ni、Pb、 Zn、Sn、Cr、Mo、S、P、As、 Ca、Ge、B、Al、Mg、Pt族	变价元素

续表

元素 分组	原子 序数	元素 符号	地壳平 均值 ^①	边界品位 ^②	地球化学 亲合性	组成的主要矿物	存在的主要地质环境 及富集成矿特征	共生、相关及类质同象 置换元素	备注
黑色金属元素组	25	Mn	950	氧化锰矿 10% ~ 15% , 碳酸锰矿 8% ~ 10%	亲氧 (石)、 亲铁	硬锰矿、软锰矿、水锰矿、 褐锰矿、黑锰矿、菱锰矿、 硫锰矿、蔷薇辉石	自然界普遍存在,但成矿主要 为沉积成因与深海锰结核	Fe、Co、Ni、V、Cr、Zn、Ca、 Mg、Ti	
	22	Ti	5700	原生金红 石矿: TiO_2 1% , 砂矿: 金红石 1kg/m ³ , 钛铁矿 10kg/m ³	亲铁、亲氧 (石)	钛铁矿、金红石、钙钛矿、 钛磁铁矿、白钛矿、榍石	钛铁矿多伴生在基性岩有关 的钒钛磁铁矿床中,碱性岩有 金红石的富集	V、Fe、Cr、Ni、O、F、Nb、 Ta、TR、U、Th	
	40	Zr	165	ZrO_2 内生矿床 0.3% , 风化壳 矿床 0.3% , 滨海 砂矿 0.04% ~ 0.06%	亲氧	锆石、铅锆石、异性石、 斜锆石	主要为内生,在酸性岩和碱性 岩中都含量较高,Zr 主要聚集 在锆石中	Hf、Ti、Nb、Y、Ce、U、Th、 P	
分散、稀有、稀土、放射性元素组	41	Nb	20	原生矿 (Nb + Ta) ₂ O ₅ 0.05% ~ 0.06% , 砂矿 钽铁 矿 100g/m ³	亲石	铌铁矿、钽铌铁矿、易解 石、褐钨铌矿、钽铁金红 石、细晶石、烧绿石	多存在于伟晶岩,碱性花岗 岩,风化壳和砂矿中,并显著 在碱性岩中富集,还与钠长石 化及萤石、黄玉关系密切	Ta、Li、Be、Cs、Zr、Sn、Th、 Ti、W、Na、TR、Fe、Sr、 Ba、F	

续表

元素 分组	原子 序数	元素 符号	地壳平 均值 ^①	边界品位 ^②	地球化学 亲合性	组成的主要矿物	存在的主要地质环境 及富集成矿特征	共生、相关及类质同象 置换元素	备注
分散、稀有、稀土、放射性元素组	3	Li	20	Li ₂ O 花岗伟晶岩 0.4% ~0.6%, 碱性花岗岩 0.5% ~0.7%, 盐湖 LiCl 1g/L	亲石 (氧) 活泼的碱金属	锂辉石、锂云母、磷铝石、铁云母、铁锂云母、透锂长石、锂霞石、香花石	多存在于挥发分含量高的花岗伟晶岩、碱性花岗岩及大陆蒸发卤水—盐湖中	Nb、Ta、Be、Rb、Cs、Al、K、Na、Mg、Cl、Ca、B、I、Br、F	
	4	Be	2.8	原生矿 (机选) BeO 0.04% ~ 0.07%, 砂矿、绿柱石 0.6kg/m ³	亲石 (氧) 弱碱性	绿柱石、硅铍石 (似晶石)、羟硅铍石、日光榴石、铍尖晶石、金绿宝石、金绿柱石、顾家石	气成—热液阶段, 花岗伟晶岩、碱性花岗岩和碱性岩	Li、Nb、Ta、Cs、F、W、Sn、Pb、Zn 等	
	38	Sr	375	SiSO ₄ > 15%, 铅铋矿中天青石矿 [≥] 10%	亲石 碱性	天青石、菱铈矿	多出现在岩浆结晶的最晚期及碱性岩中, 热液用时富集成矿。也存在于与盐有关的沉积岩及盐湖中	Ca、Mg、Ba、K、Rb、Mn 等	
	56	Ba	425	BaSO ₄ > 30%, 化工用毒重石 BaCO ₃ > 36%	亲石	重晶石、毒重石	多与酸性及岩浆期后热液有关, 但也有沉积型和残积型矿存在	Sr、Ca、Fe、K、Au、Pb、Si 等	
	39	Y	33	Y ₂ O ₃ < 0.05% ~ 0.1%, 砂矿磷钇矿 30g/m ³	亲氧 弱碱性	磷钇矿、褐钇铈矿、钽钼矿、硅铍钇矿、钇易解石、黑稀金矿	出现在伟晶期、热液期, 并与碱性花岗岩有关, 亦出现在风化壳及砂矿中	Nb、Ta、U、Ta、Ti、Fe、Na、F、Ba、Ca、Zr、Mn	稀土元素
	57	La	30	独居石砂矿 100 ~ 200g/m ³	亲氧 弱碱性	独居石、氟碳铈镧矿、褐帘石、鄂博矿、磷铈镧矿、氟铈镧矿、绿帘石	多与伟晶期、热液期成矿有关, 碱性岩中成矿, 亦有砂矿	U、Th、Nb、Ta、Ti、Fe、K、Zr、Au、W、Sn、Ba、Sr	稀土元素

续表

元素 分组	原子 序数	元素 符号	地壳平 均值 ^①	边界品位 ^②	地球化学 亲合性	组成的主要矿物	存在的主要地质环境 及富集成矿特征	共生、相关及类质同象 置换元素	备注
分散、稀有、稀土、放射性元素组	90	Th	9.6	方钍石、钍石 ThO ₂ < 0.1%, 独新局面石砂矿 100 ~ 300g/m ³	亲石 (氧) 碱性	方钍石、钍石、独居石、 褐帘石、磷灰石	多产出在与超基性岩、碱性岩 有关, 碱性岩中成矿, 亦有砂 矿	U、Ce、Zr、K、Na、F、Fe、 Al	放射性元 素
	92	U	2.7	0.03%	亲石 (氧) UO ₂ 弱碱性	沥青铀矿、晶质铀矿、铀 石、钋铀矿、钒钙铀矿、 钛铀矿、钙铀云母、铜铀 云母、硅钙铀矿	存在多与花岗岩、火山岩、砂 岩、碳硅质泥岩有关, 酸性岩 体边缘带和中低温热液有利成 矿	K、Na、Si、Mo、Be、Ag、 Pb、Zn、Cu、Ni、Ge、Se、F、 V、P、Zr、TR、Y、La、Ca	放射 性元 素
	11	Na	2.36%	NaCl 岩盐 10% ~ 15%, 天然卤水 5% ~ 10%	亲石、亲伟 晶岩碱素	斜长石、钠长石、单斜辉 石、角闪石、方柱石、霞 石、方佛石、石盐、芒硝	陆壳、海水蒸发盐湖均含 Na 较高, 中酸性岩的斜长石和盐 湖中 Na 最富集	K、Cl、Ca、B、Li、Rb、Cs、 Ca、Ge、Br、I 等	亲生物元 素
	19	K	2.09%	热湖型固体 KCl 12%, 卤水 KCl 0.5%, 含钾 岩石 K ₂ O 7% ~ 9%	亲石、亲伟 晶岩碱素	钾盐、光卤石、钾长石、 云母、云长石、茶卤石、 透长石、白榴石、明矾石、 钾镁矾、海绿石	主要存在于陆壳、酸性岩中及 蒸发盐湖的后期, 以酸性岩、 盐湖和含钾岩石最为富集	Na、Mg、Ca、Sr、Ba、Pb、 Li、I、F、Br、Rb、Cs、B、 Cl	植物必须 元素
常量元素组	20	Ca	4.15%	水泥用 CaO ≥ 48%, 溶剂用 CaO ≥ 48%, 电石 用 CaO 53% ~ 54%	亲石的碱土 元素	方解、白云石、石膏、基 性斜长石	主要存在于中基性岩和灰岩 中, 以海相灰岩和与超基性岩 有关的碳酸盐岩最易富集成矿	Mg、Na、TR、Pb、Cd、Mn、 U、Th、Ba、Ti、Sr、Y、O	生命攸关 元素
	12	Mg	2.33%	白云岩 MgO ≥ 19%, 菱镁矿 MgO 42% ~ 46%	亲石、亲基 性岩碱土元 素	菱镁矿、白云石、水镁石、 光卤石、泻利盐、钾盐镁 矾、水卤镁石	主要含在基性—超基性岩、白 云岩和蒸发类沉积物中, 成矿 主要为碳酸盐岩和蒸发岩	Fe、Ca、Mn、Co、Ni、Li、 Al、Zn、Ti、O 等	生命攸关 元素

续表

元素 分组	原子 序数	元素 符号	地壳平 均值 ^①	边界品位 ^②	地球化学 亲合性	组成的主要矿物	存在的主要地质环境 及富集成矿特征	共生、相关及类质同象 置换元素	备注
常(宏)量元素组	13	Al	8.23%	—水硬铝石型 $Al_2O_3 \geq 40\%$	亲氧(石)	高岭石、刚玉、红柱石、蓝晶石、砂线石、尖晶石、—水硬铝石、明矾石、黄玉、—水软铅石、三水铝石	主要存在于铝硅酸盐、风化壳和土壤中,以中性岩、风化壳和黏土类沉积岩最为富集	Si、K、Ca、Be、Mg、B、Ga、Fe、Ti、V、Cr、Ge、Nb、Se、O	
	14	Si	28.15%	玻璃用 $SiO_2 > 89\%$	亲氧(石)	石英、水晶、蛋白石	主要存在于酸性岩、硅质岩和石英脉中,水晶主要为伟晶型和中低温热液	Al、O、B、Be、TR、Zr、As、P、Fe等	
	5	B	10	B_2O_3 硼镁石矿、 硼镁铁矿 $> 3\%$ 、 盐湖:固体、 卤水 400mg/L	亲氧、亲高 盐度水、亲 生物	硼镁石、水方硼石、钠硼解石、硼镁铁矿、方硼石、硼钾镁石、硼砂、电金石、硬硼钙石板硼石	硼镁石、硼镁铁矿常与磁铁矿和赤铁矿共生。火山沉积和含硼盐湖有利于硼的富集成矿	K、Na、Mg、Be、Mn、Ca、Cl等	亲生物元素,趋富于高盐度水体元素
矿化剂元素组	9	F	625	$CaF_2 > 20\%$	亲石、亲酸性岩、亲沉积岩	萤石、氟石、磷灰石、黄玉、电气石	多存在于与酸性岩有关的中低温热液矿床和火山喷气沉积物中,萤石多产于花岗岩及某些灰岩中	Ca、Cl、TR、U、Fe、P、Ph、Zn、Sn、W、Si、O(OH)	新生代元素
	15	P	1050	P_2O_5 5% ~ 6%	亲氧、亲铁、亲生物	磷灰石、硫磷铝铀矿	主要赋存在磷块岩、碱性岩和基性岩中,以碱性岩中的磷灰石矿床和磷块岩最为重要	F、C、H、TR、Ca、V、Mn、U、Fe、Au、Si、S、Ti、O、Th	植物必须元素

注: ①地壳平均值,使用1964年泰勒资料,含量单位除%表示者外,均为 $n \times 10^{-6}$; ②边界品位引自1987年版《矿产工业要求参考手册》。

(二) 黑色金属元素组

该组包括 Cr - Ni - Co - V 亚组和 Fe、Mn、Ti 共 7 个元素。以其亲铁和与基性岩石黑色岩层关系较密切为特征，因而划归一组，同时各元素都具各自独特的地球化学特征。

(三) 分散、稀有、稀土、放射性金属元素组

该组包括 Li、Be、Nb、Zr 4 种元素和 Sr - Ba、Y - La、U - Th 3 个亚组，共计 10 个元素。该组元素在区域分布中相对稀少、分散，并具有各自相对独特的地球化学性质，是一个相对较为复杂的元素组，及通常意义上的稀有、稀散元素组。

(四) 常（宏）量元素组

该组包括 K - Na、Ca - Mg、Si - Al 3 个亚组，共 6 个元素。这些元素以其含量高，分布普遍和亲氧、亲石为特征。3 个亚组中相关验收相对关系较为密切，这些元素都是组成岩石的最主要元素，及通常意义上的造岩元素。

(五) 矿化剂元素组

该组包含 B、F、P 3 个元素。这 3 个元素不同程度地与岩浆挥发分有关，在成矿作用的某些情况下都具有一定的矿化剂作用，虽然都是非金属元素，但在地球化学亲缘性上却有所不同，地球化学性状也各异。

四、分组的不足与讨论

化探扫面分析元素的分组是基于各元素的基本地球化学特征及共生组合的相似性做出的相对应用性地球化学分组，而不是单纯的元素地球化学性质的归属性分组。由于各元素的地球化学特征虽有一些共性，但各自又有其特性，所以此次的分组意见必定存在局限性和考虑不周之处，正因如此，通过地质工作的不断开展和技术水平的不断更新，给予改正