

doi: 10. 11720/wtyht. 2020. 1084
孟月玥,陈岳龙. 内蒙古地区出露地壳元素丰度估算[J]. 物探与化探,2020,44(3):470-479. [http://doi.org/10. 11720/wtyht. 2020. 1084](http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.1084)
Meng Y Y, Chen Y L. Estimating the elements' abundance of the exposed crust of Inner Mongolia[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(3):470-479. [http://doi.org/10. 11720/wtyht. 2020. 1084](http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.1084)

内蒙古地区出露地壳元素丰度估算

孟月玥^{1,2}, 陈岳龙¹

(1. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083)

摘 要: 运用区域大规模采样方法,通过对采集于内蒙古 5 条地震剖面的 392 个样品的元素含量进行计算,得到内蒙古地区出露地壳的 12 种常量元素(氧化物)及 40 种微量元素的丰度。计算方法主要采取每个时代地层用其标准剖面中各个岩性岩石厚度权重进行加权,而后按地质图上各地层及岩体出露面积进行加权的方法。计算得到的元素丰度经地表热流值、地震平均波速及元素比值方法检验后证明在合理范围内。将常量元素与不同研究者所得的上地壳元素平均值进行比较分析后可知,内蒙古地区出露地壳与全球上地壳组成基本一致,平均成分为花岗岩闪长岩,只是其中 Ca、Mg 的含量略低。由微量元素、稀土元素及元素比值等方面的分析结果可以看出,内蒙古地区两个主要构造单元——内蒙古地轴和兴蒙造山带存在较大差异,内蒙古地轴具有强烈的壳内分异作用,而兴蒙造山带则具有较强烈的地壳增生作用。

关键词: 内蒙古;出露地壳;元素丰度;构造单元

中图分类号: P632 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2020)03-0470-10

0 引言

区域地壳元素丰度的研究一直是地球化学家们重要的研究工作之一,因为它可以表征区域地球化学系统特征,同时对研究区域成岩、成矿作用特征及区域构造运动具有重要意义。出露地壳化学元素丰度为地壳最外层的平均含量,大部分地质工作和地球化学勘查都主要涉及地壳的表层,如当前最受关注的环境和农业也主要与表层的地质、地球化学作用有关,在这些工作中区域出露地壳化学元素丰度具有重要的实际意义。

迄今已有的大陆地壳成分估计方法大致有以下几种:①根据地壳中各种主要类型岩石的比例及各类岩石的典型化学成分^[1-2]进行估计;②模型法^[3-4];③以某一地区大面积区域岩石地球化学取样结果为基础,采用某种加权平均的计算方法(如加拿大地盾)^[5-8];④以沉积物代表地壳岩石的天然

混合样品的方法,如 Goldschmidt 用更新世冰积黏土来代表斯堪的纳维亚地区地壳成分^[9];⑤以地表出露的麻粒岩相岩石及火山岩和金伯利岩中地壳深部包体作为下地壳岩石样品,进行下地壳成分估计;⑥利用地震波速与岩石波速随温度压力变化关系,探测区域地壳深部组成。以上方法中,第①、②种方法只适用于全球地壳成分的研究,第⑤、⑥种方法主要用于研究下地壳的成分,第③、④种方法则主要用于研究区域上地壳平均成分。

中国学者在地壳组成方面的研究也取得了相当的进展。如黎彤等^[10]对地球和地壳元素丰度的研究,张本仁等^[11]对秦巴地区岩石圈组成的研究,鄯明才等^[12]对中国东部地壳的研究及 Gao^[13]对中国东部地壳化学组成的研究等。但对内蒙古地区出露地壳目前尚无单独研究,只是在对中国东部地壳研究^[12-13]时涉及到部分内蒙古地区的构造单元,如内蒙古地轴、内蒙兴安褶皱带等,但其样品相对较少,且没有覆盖内蒙古全区。笔者专门探讨过内蒙古中

南部地区出露地壳的元素丰度^[14],主要涉及内蒙古地轴和内蒙古中部造山带两个构造单元。本文将采用样品与前述所得丰度综合计算,给出内蒙古全区的出露地壳元素丰度。

本次研究主要应用第③种方法,即依据地表大规模采样进行加权平均计算的方法,因为该方法比较适合上地壳或出露地壳元素丰度的估算。基于大规模采样方法的区域地壳元素丰度估算方法,在中国东部地壳化学组成以及秦岭地区地壳组成的研究中都有所提及,其基本方法一致,只是在处理具体问题时有差别。

1 研究区概况

内蒙古地区横跨西伯利亚陆块、塔里木陆块和华

北陆块,经历了太古宙—中生代漫长的演化历史,形成了复杂多样的地质构造类型,既有十分典型的前寒武纪古陆块(内蒙古地轴)、艾力格庙—锡林浩特微地块,又有规模宏大的古生代陆缘增生带,中新元古代还发育了十分独特的白云鄂博—渣尔泰裂谷或裂陷槽以及温都尔庙—白乃庙拼贴陆缘增生带。中生代陆内造山运动显著,有大规模的岩浆喷发和侵入,形成令人瞩目的 NNE 向大兴安岭火山—侵入岩带,叠加于近 EW 向古生代陆缘增生带之上。

根据不同地区的主要地质特征及其所反映的形成演化历史,可将内蒙古全区划分为 4 个二级构造单元,即内蒙古地轴、北山造山带、内蒙古中部造山带和兴安造山带,而北山造山带、内蒙古中部造山带及兴安造山带由于构造环境较为相似,可以合并为兴蒙造山带(图 1)。

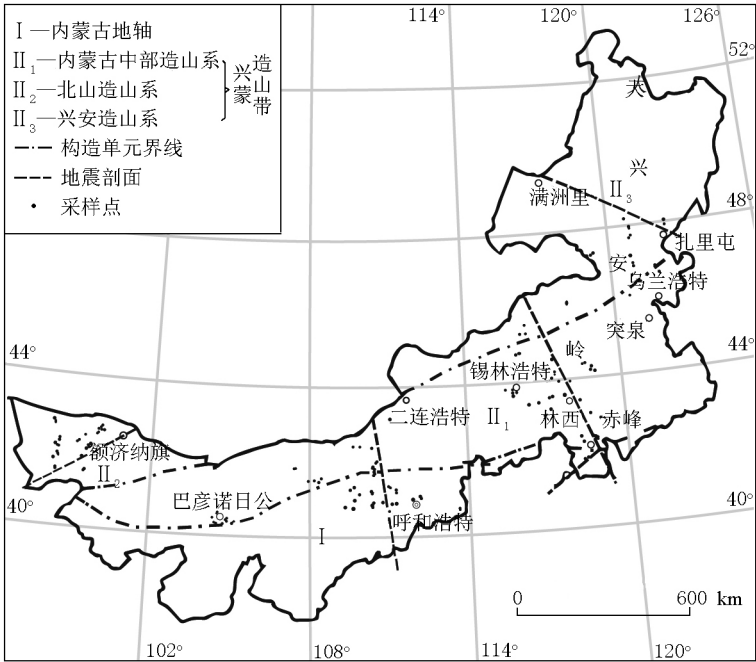


图 1 研究区构造单元划分及采样位置

Fig. 1 Tectonic unit division and sampling location in the study area

2 样品采集及测试

2.1 采样方法

元素丰度计算所采用的样品主要取自内蒙古地区 5 条地震剖面附近(见图 1),剖面中没有出现的岩石样品在剖面延伸区设计辅助路线进行补充样品采集,保证研究区出现的岩石类型都有代表性样品。另外,还补充了一些鄯明才等人研究中国东部地壳组成时在研究区所用的组合样品。

此次分析的样品共 392 个。采集的地层岩石样品基本涵盖了研究区各个时代的各种不同岩性岩石。而采集的岩浆岩样品主要为吕梁期、加里东期、海西期、燕山期产物,其中以海西期、燕山期岩浆岩为主,侵入岩主要有花岗岩、二长花岗岩、正长岩、钾长花岗岩、花岗闪长岩、辉绿岩、辉长岩、闪长岩等。

2.2 分析测试方法

先将样品用鄂式碎样机粗碎至 4~5 mm,而后用化学纯乙醇清洗过的振荡碎样机或玛瑙研钵研磨到 200 目。用 X 射线荧光光谱分析(XRF)测试了

SiO₂、TiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、FeO、FeOT、MnO、MgO、CaO、Na₂O、K₂O、P₂O₅ 等 12 种氧化物;微量元素测试在中国科学院地质与地球物理研究所进行,采用电感耦合等离子体质谱分析(ICP-MS 分析);As、W、Sn、Au、Ag、F、Mo、Sb 等成矿元素的分析在自然资源部合肥矿产资源监督检测中心进行。

3 计算方法及过程

为计算研究区出露地壳各元素的丰度,需要利用加权平均的方法,先划分不同计算单元,每个计算单元按地层厚度进行加权平均,再按单元面积进行加权平均。因此,需要先将样品按不同构造单元分类,而后进一步按不同时代分组,最后按不同岩性再分类。检查各样品数据,剔除异常值后进行加权计算。

3.1 元素丰度计算步骤

虽然前人对于根据区域大规模采样方法估算区域地壳组成的方法已经较为系统,但是在对各个地区进行具体操作时,仍会出现一些问题。笔者根据对本区的研究以及样品的具体情况,制定了下面的计算步骤:计算不同时代各类岩性元素算术平均值;对于岩体样品,按不同岩性在该构造单元出露面积加权,计算岩体总的元素平均值;对于地层样品,按该地区标准剖面中不同岩性所占厚度比例进行加权计算元素平均值,再根据不同时代地层在该构造单元的出露面积进行加权,算出地层元素平均值;根据岩体和地层在各个构造单元区中出露面积比例进行加权,算出该构造单元元素组成平均值;因为研究区中各个构造单元上地壳厚度并没有相关的资料,所以不能用体积(出露面积×综合厚度)来计算,故而采用两个构造单元面积比值进行加权的方法,计算出内蒙古地区出露地壳元素的丰度。

3.2 计算单元划分

本次计算单元划分为内蒙古地轴和兴安造山带两个单元,计算单元划分界线及样品采集位置见图 1。本文重点讨论兴安造山带。

3.2.1 北山造山带

位于内蒙古西北阿拉善北部和北山地区,属于塔里木陆块北东缘增生带。古生代地层发育齐全,除寒武系为海相碎屑岩—碳酸盐岩系外,其余均为海相火山—碎屑岩系,其中以奥陶系和石炭系、二叠

系最为发育。中生界盖层以下白垩统陆相碎屑岩为主,含少量的侏罗系碎屑岩系。侵入岩以海西中期酸性岩为主,规模较大。

3.2.2 兴安造山带

位于内蒙古东北部贺根山以北及其大兴安岭中北部地区,属西伯利亚陆块东南缘增生带。区内早古生代多为稳定的浅海相砂页岩、碳酸盐岩及笔石页岩建造,唯中奥陶统在东部发育岛弧型火山岩建造。晚古生代以泥盆系最为发育,分布广泛,主要为火山碎屑岩—碎屑岩—碳酸盐岩系。石炭系、二叠系分布零星,为过渡类型的中酸性火山岩—碎屑岩—碳酸盐岩系。

本区构造活动强烈,褶皱和断裂发育,构造线呈 NE 向。海西早期岩浆侵入活动比较轻微,仅东部有花岗岩侵入,强烈的侵入活动发生在华力西晚期和燕山期。

3.3 地层各岩性厚度统计加权

参考相关资料,对各地层不同岩性根据其厚度计算权重,而后对各元素进行加权计算,得出该地层的加权平均值。由于内蒙古地区地层划分并没有达成统一的意见^[15-17],尤其是北部造山系较为古老的地层,在岩石地层划分上存在一些争议,笔者主要参考《全国地层多重划分对比研究——15. 内蒙古自治区岩石地层》^[17],部分剖面参考《华北地区区域地层表·内蒙古分册》^[15]等有关资料。

3.4 出露面积统计

各个地质体出露面积由内蒙古自治区 1:100 万地质图统计得出。由于 1:100 万地质图中较小的第四纪沉积区都被忽略,因此总体上各个统计单元的面积都偏大,这对面积的比例关系及统计结果影响不大。同时,也存在一些地质体边界认定不甚一致或较小地质体被忽略而造成的面积统计上的误差,这对面积统计以致最后估算结果造成一定的影响,但误差尚在可接受范围内。

4 计算结果

鄯明才等^[12]认为碳酸盐岩在表生作用中多被分解,CaO、MgO 和 CO₂ 大部分流失,残留下硅酸盐成分。因而为适应不同目的的应用,笔者同时给出了去碳酸盐岩和含碳酸盐岩的出露地壳元素丰度(表 1、表 2)。

表 1 内蒙古地区出露地壳元素丰度(含碳酸盐岩)

Table 1 The estimated elemental abundance values of the exposed crust of Inner Mongolia (including carbonate rocks)

元素	I	II	IM	元素	I	II	IM
SiO ₂	62.97	66.08	65.50	Y	18	19	19
TiO ₂	0.42	0.64	0.60	Zr	161	218	207
Al ₂ O ₃	13.28	13.61	13.55	Nb	13	13	13
Fe ₂ O ₃	3.03	2.49	2.59	Mo	0.69	0.77	0.75
FeO	1.40	1.66	1.61	Ag	50	82	76
TFeO	4.58	4.33	4.38	Sn	1.8	2.9	2.7
MnO	0.10	0.085	0.088	Sb	0.31	0.60	0.55
MgO	1.93	1.82	1.84	Cs	3.7	5.8	5.4
CaO	6.55	3.14	3.77	Ba	818	701	723
Na ₂ O	2.49	3.02	2.93	La	40	33	34
K ₂ O	3.06	2.97	2.99	Nd	34	30	31
P ₂ O ₅	0.18	0.16	0.16	Sm	5.4	5.7	5.6
Li	22	23	23	Eu	1.3	1.1	1.2
Be	1.8	2.5	2.3	Gd	4.1	4.6	4.5
F	597	608	606	Tb	0.65	0.74	0.73
Sc	11	9.8	9.9	Yb	1.8	2.3	2.2
V	67	71	71	Lu	0.28	0.42	0.39
Cr	45	57	54	Hf	4.1	5.8	5.5
Co	11	12	12	Ta	0.77	0.93	0.90
Ni	19	30	28	W	0.70	1.1	1.0
Cu	18	18	18	Au	1.1	0.65	0.74
Zn	62	75	72	Tl	0.53	0.73	0.69
Ga	16	18	18	Pb	19	16	17
As	3.1	7.5	6.6	Bi	0.13	0.26	0.23
Rb	96	95	95	Th	9.5	11	10
Sr	291	293	293	U	2.1	2.4	2.4

注:I—内蒙古地轴,II—兴蒙造山带,IM—内蒙古全区;氧化物含量单位为%,Au、Ag 含量单位 10⁻⁹,其他元素含量单位为 10⁻⁶。表 2 同。

表 2 内蒙古地区出露地壳元素丰度(去碳酸盐岩)

Table 2 The estimated elemental abundance values of the exposed crust of Inner Mongolia (without carbonate rocks)

元素	I	II	IM	元素	I	II	IM
SiO ₂	65.87	66.37	66.27	Y	19	20	19
TiO ₂	0.48	0.65	0.61	Zr	188	218	213
Al ₂ O ₃	13.18	13.66	13.57	Nb	12	13	13
Fe ₂ O ₃	2.30	2.50	2.46	Mo	0.67	0.77	0.75
FeO	2.24	1.67	1.77	Ag	51	82	76
TFeO	4.79	4.35	4.43	Sn	1.9	2.9	2.7
MnO	0.18	0.085	0.10	Sb	0.32	0.60	0.55
MgO	1.30	1.82	1.72	Cs	5.4	5.8	5.7
CaO	3.72	2.89	3.05	Ba	823	702	725
Na ₂ O	2.66	3.03	2.96	La	32	33	33
K ₂ O	3.29	2.98	3.04	Nd	29	30	30
P ₂ O ₅	0.16	0.16	0.16	Sm	5.1	5.7	5.6
Li	23	23	23	Eu	1.1	1.1	1.1
Be	1.9	2.5	2.4	Gd	4.0	4.6	4.5
F	560	609	600	Tb	0.68	0.75	0.73
Sc	9.8	9.8	9.8	Yb	2.0	2.3	2.3
V	60	72	70	Lu	0.32	0.42	0.40
Cr	34	57	53	Hf	4.8	5.8	5.6
Co	9.3	12	11	Ta	0.79	0.93	0.90
Ni	15	31	28	W	0.72	1.1	1.1
Cu	14	18	18	Au	1.1	0.66	0.74
Zn	61	75	72	Tl	0.59	0.73	0.71
Ga	17	18	18	Pb	20	16	17
As	3.3	7.6	6.8	Bi	0.12	0.26	0.23
Rb	99	95	96	Th	9.3	11	10
Sr	280	290	288	U	2.0	2.4	2.3

5 元素丰度检验

为验证计算出的内蒙古地区出露地壳元素丰度的合理性,选择区域地表热流、区域地壳平均波速和元素比值 3 个方面进行论证。

5.1 区域地表热流

地壳总体元素丰度中热产生元素 U、Th 和 K 的含量应满足地表热流的限制,即地壳热流值必定小于地表实测热流值^[11]。而地壳热流值则取决于壳体厚度和地壳平均生热率,即

$$q = A \times T,$$
(1)

其中, q 指壳体(包括地壳和岩石圈地幔在内)内放射性生热元素衰变产生的热流值(mWm^{-2}); T 是壳体厚度(km); A 为地壳的平均生热率(μWm^{-3})。

根据物质和能量守恒原理可知,壳体内各层位热流贡献值总和应为地表实测热流值^[18],即

$$q = q_{\text{m}} + q_{\text{c}} = q_{\text{m}} + q_{\text{uc}} + q_{\text{dc}},$$
(2)

其中, q_{m} 为地幔热流; q_{c} 为地壳热流; q_{uc} 为上地壳热流贡献值;而 q_{dc} 为中下地壳热流贡献值。

由式(2)可知,上地壳热流值必小于地壳热流值,即

$$q_{\text{uc}} < q_{\text{c}}。$$
(3)

根据地壳热流值通常占地表实测热流值的 40%^[11],可以计算出地壳热流值 q_{c} 。另一方面,可以利用上地壳平均生热率 A 与上地壳厚度来求出上地壳的热流贡献值 q_{uc} 。又因岩石的放射性生热率则取决于其中的 U、Th、K 丰度和岩石密度^[19],即

$$A = 0.01\rho(9.52C_{\text{U}} + 2.56C_{\text{Th}} + 3.48C_{\text{K}})。$$
(4)

其中, ρ 为岩石密度(g/cm^3); C_{U} 、 C_{Th} 和 C_{K} 分别为铀、钍、钾的丰度,其中铀、钍的单位是 10^{-6} ,钾的单位是 10^{-2} 。此处用估算所得的出露地壳产热元素丰

度来替代上地壳丰度,根据式(3)来检验所估算的出露地壳的铀、钍、钾的丰度是否合理。

由于两个构造单元的演化程度不同,岩石差异较大,故对两个单元的数据分别进行检验。内蒙古地轴的上地壳热流值及地壳热流值在此不再赘述。将兴蒙造山带计算所得结果中的 U、Th、K 丰度代入式(4)中,上地壳平均密度取 $2.79\text{ g}/\text{cm}^3$ ^[20],求出 A 为 $1.65\text{ g}/\text{c}^{-3}$ 。上地壳厚度按 14 km ^[21]算,求出兴蒙造山带上地壳热流贡献值 q_{u} 为 23.09 mWm^{-2} 。根据相关文献可知,内蒙褶皱系地表平均热流值为 62.4 mWm^{-2} ^[22],可计算出地壳热流值 q_{c} (约占地表 40%)为 24.96 mWm^{-2} 。

从以上计算可知,计算结果都符合式(3)的要求,说明所计算的元素丰度是合理的。但估算的出露地壳热流值占整个地壳热流值的比例较大,这可能是由于出露地壳的产热元素丰度占地壳中产热元素丰度的比重较大。

5.2 区域地壳平均波速

由地质断面所测得的资料可知,研究区上地壳地震波速 V_{p} 约为 $6.1\sim6.2\text{ km}/\text{s}$ ^[21],这相当于花岗闪长质成分^[23],与计算所得的区域出露地壳平均成分相一致。

5.3 元素比值

张本仁等^[11]认为一些具有相似地球化学行为的元素,其丰度总是成正比的,如 $w(\text{Ga})/w(\text{Al})$ 、 $w(\text{Sm})/w(\text{Nd})$ 及 $w(\text{K})/w(\text{Th})$,其比值基本为常数。表 3 列出了本文给出的这 3 组元素比值,并给出了前人得到的相应上地壳元素比值,可以看出这三组元素比值基本相一致。

由上面区域地表热流、区域地壳平均波速及元素比值三方的检验,可知计算所得的内蒙古地区出露地壳元素丰度是合理的。

表 3 本文及不同研究者给出的元素比值对比
Table 3 Element ratios, compared with other researchers' results

元素比值	I	II	IM	R&G ^[24]	Shaw ^[5]	Gao ^[13]	T&M ^[25]	Wedepohl ^[26]
$[w(\text{Ga})/w(\text{Al})]/10^4$	2.2	2.4	2.4	2.0	1.7	2.3	2.0	1.7
$w(\text{Sm})/w(\text{Nd})$	0.18	0.19	0.19	0.17	0.18	0.17	0.17	
$[w(\text{K})/w(\text{Th})]/10^{-4}$	0.29	0.23	0.24	0.22	0.26	0.25	0.26	0.26
$w(\text{La})/w(\text{As})$	9.63	4.32	4.81	6.46		7.91	20.00	16.15
$w(\text{La})/w(\text{Nb})$	2.73	2.55	2.58	2.58	1.24	2.90	2.50	1.24
$w(\text{Nb})/w(\text{Th})$	1.25	1.20	1.21	1.14	2.52	1.34	1.12	2.52
$w(\text{Nb})/w(\text{U})$	5.94	5.31	5.41	4.44	10.61	7.74	4.29	10.40
$w(\text{Ba})/w(\text{Th})$	88.32	65.50	69.34	59.81	103.88	75.75	51.40	64.85

注:I—内蒙古地轴,II—兴蒙造山带,IM—内蒙古全区;R&G 为 Rudnick and Gao,T&M 为 Taylor and McLennan。

6 讨论

下面就本文所得的内蒙古地区出露地壳元素丰度进行进一步的分析讨论,给出内蒙古地区出露地壳化学组成的特点及其意义。由于研究区域碳酸盐岩较为发育,而在表生作用中,碳酸盐又极易分解,因此在与其他数据对比中,我们仅以去碳酸盐岩的结果进行对比。

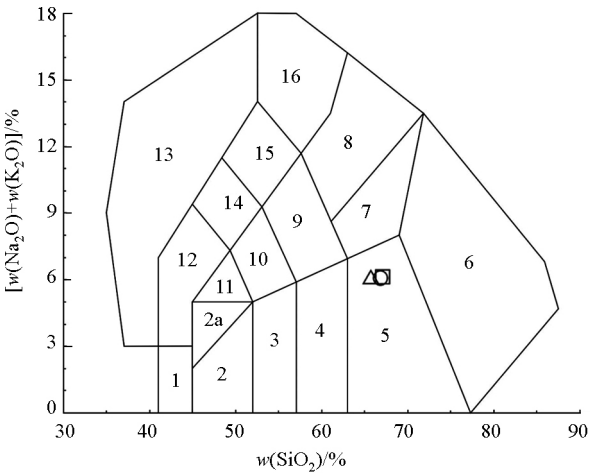
6.1 常量元素

去碳酸盐岩和挥发组分的数据中,将氧化物含量按总含量 100% 归算后,在 Middlemost^[27] 修正的硅碱图(图 2)中,内蒙古地轴及兴蒙造山带出露地壳的平均成分为花岗闪长质,与目前一般得出的全球大陆上地壳平均成分为花岗闪长质的结论相符^[28]。

通过表 4 的对比可知,本文所得的内蒙古地区出露地壳的常量元素丰度与前人在其他地区研究所得数据基本一致。然而,内蒙古地区还具有一定的区域独特性。Rudnick and Gao^[24] 的这组数据是综合以往全球上地壳研究得出,他们分析了各个研究的特点,并加以对比,因而所得数据是比较可靠和权威的。通过与本次研究对比,兴蒙造山带的 Mg、Ca 含量偏低,而其他常量元素丰度则与 Rudnick and Gao^[24] 给出的全球上地壳平均成分相当。

6.2 微量元素

从表 5 可以看出,兴蒙造山带强烈富集 As、Ag、Sb、Bi,这可能与该区火山活动较频繁有关。因 As 与热液成矿作用关系密切,因此兴蒙造山带 As 的富集可以说明该区具有较强烈的热液成矿作用。从现有资料可知,兴蒙造山带存在多个与岩浆热液有关的成矿带。



△—内蒙古地轴;□—兴蒙造山带;○—内蒙古全区
1—橄榄辉长岩;2—辉长岩;2a—碱性辉长岩;3—辉长闪长岩;4—闪长岩;5—花岗闪长岩;6—花岗岩;7—石英二长岩;8—正长岩;9—二长岩;10—二长闪长岩;11—二长辉长岩;12—副长石辉长岩;13—副长石岩;14—副长石二长闪长岩;15—副长石二长正长岩;16—副长石正长岩
△—Inner Mongolia axis;□—Xingmeng orogenic belt;
○—Inner Mongolia
1—olivine-gabbro; 2—gabbro; 2a—alkaline gabbro; 3—gabbro-diorite; 4—diorite; 5—granodiorite; 6—granite; 7—quartz monzonite; 8—syenite; 9—monzonite; 10—monzodiorite; 11—monzogabbro; 12—foid-gabbro; 13—feldspatite; 14—foid-monzodiorite; 15—foid-monzosyenite; 16—foid-syenite

图 2 TAS 图解(底图据参考文献[27])
Fig. 2 TAS diagram(base map according to reference[27])

通过图 3 可以看出,内蒙古地轴 Rb、Cs 等不相容元素有较明显的富集,这可能说明该区地壳的壳内分异程度较强烈。而兴蒙造山带 As、Sb 的富集则与岩浆热液有关,这也可以证明研究区域具有较好的铜多金属热液成矿前景^[29]。

表 4 内蒙古地区出露地壳常量元素丰度与不同研究者给出数据的对比

Table 4 Elements' abundance of the exposed crust of Inner Mongolia, compared with other researchers' results								
元素	I	II	IM	R&G ^[24]	Shaw ^[5]	Gao ^[13]	T&M ^[25]	Wedepohl ^[26]
SiO ₂	65. 69	66. 55	66. 38	66. 60	66. 80	67. 97	65. 89	66. 80
TiO ₂	0. 48	0. 65	0. 62	0. 64	0. 54	0. 67	0. 50	0. 54
Al ₂ O ₃	13. 14	13. 70	13. 59	15. 40	15. 05	14. 17	15. 17	15. 05
TFeO	4. 77	4. 36	4. 44	5. 04	4. 09	5. 33	4. 49	4. 09
MnO	0. 18	0. 09	0. 10	0. 10	0. 07	0. 10	0. 07	0. 07
MgO	1. 30	1. 83	1. 73	2. 48	2. 30	2. 62	2. 20	2. 30
CaO	3. 71	2. 90	3. 05	3. 59	4. 24	3. 44	4. 19	4. 24
Na ₂ O	2. 65	3. 04	2. 97	3. 27	3. 56	2. 86	3. 89	3. 56
K ₂ O	3. 28	2. 99	3. 04	2. 80	3. 19	2. 68	3. 39	3. 19
P ₂ O ₅	0. 16	0. 16	0. 16	0. 15	0. 15	0. 16	0. 20	0. 15

注:I—内蒙古地轴,II—兴蒙造山带,IM—内蒙古全区;R&G 为 Rudnick and Gao,T&M 为 Taylor and McLennan;含量单位为%。

表 5 内蒙古地区出露地壳微量元素丰度与不同研究者给出数据的对比

Table 5 Minor elements' abundance of the exposed crust of Inner Mongolia, compared with other researchers' results

元素	I	II	IM	R&G ^[24]	Shaw ^[5]	Gao ^[13]	T&M ^[25]	Wedepohl ^[26]
Li	23	23	23	24	22	20	20	22
Be	1.9	2.5	2.4	2.1	1.3	2.0	3.0	3.1
F	560	609	600	557	500	561		
Sc	9.8	9.8	9.8	14	7.0	15	14	7.0
V	60	72	70	97	53	98	107	53
Cr	34	57	53	92	35	80	85	35
Co	9.3	12	11	17	12	17	17	12
Ni	15	31	28	47	19	38	44	19
Cu	14	18	18	28	14	32	25	14
Zn	61	75	72	67	52	70	71	52
Ga	17	18	18	17.5	14	18	17	14
As	3.3	7.6	6.8	4.8		4.4	1.5	2.0
Rb	99	95	96	84	110	82	112	110
Sr	280	290	288	320	316	266	350	316
Y	19	20	19	21	21	17.4	22	21
Zr	188	218	213	193	237	188	190	237
Nb	12	13	13	1	26	12	12	26
Mo	0.67	0.77	0.75	1.1		0.78	1.5	1.4
Ag	51	82	76	53		55	50	55
Sn	1.9	2.9	2.7	2.1		1.73	5.5	2.5
Sb	0.32	0.60	0.55	0.40		0.30	0.20	0.31
Cs	5.4	5.8	5.7	4.9		3.55	4.6	5.8
Ba	823	702	725	628	1070	678	550	668
La	32	33	33	31	32.3	34.8	30	32.3
Nd	29	30	30	27	25.9	30.4	26	
Sm	5.1	5.7	5.6	4.7	4.61	5.09	4.5	4.7
Eu	1.1	1.1	1.1	1.0	0.94	1.21	0.88	0.95
Gd	4.0	4.6	4.5	4.0			3.8	2.8
Tb	0.68	0.75	0.73	0.70	0.48	0.82	0.64	0.50
Yb	2.0	2.3	2.3	1.96	1.47	2.26	2.2	1.5
Lu	0.32	0.42	0.40	0.31	0.23	0.35	0.32	0.27
Hf	4.8	5.8	5.6	5.3	5.8	5.12	5.8	5.8
Ta	0.79	0.93	0.90	0.90	5.7	0.74	1.0	1.5
W	0.72	1.1	1.1	1.9		0.91	2.0	1.4
Au	1.1	0.66	0.74	1.5	1.81	1.24	1.8	
Tl	0.59	0.73	0.71	0.90	0.52	1.55	0.75	0.75
Pb	20	16	17	17	17	18	17	17
Bi	0.12	0.26	0.23	0.16	0.04	0.23	0.13	0.12
Th	9.3	11	10	10.5	10.3	8.95	10.7	10.3
U	2.0	2.4	2.3	2.7	2.45	1.55	2.8	2.5

注:I—内蒙古地轴,II—兴蒙造山带,IM—内蒙古全区;R&G 为 Rudnick and Gao,T&M 为 Taylor and McLennan;Au、Ag 含量单位为 10⁻⁹,其他元素含量单位为 10⁻⁶。

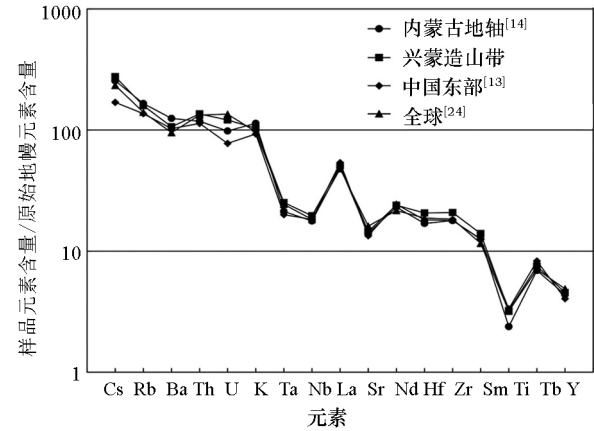


图 3 本文及不同研究者^[13,24]给出的微量元素原始地幔标准化蛛网图

Fig. 3 Normalized mantle spider graph of minor elements, compared with other researchers' results

6.3 稀土元素

由图 4 的稀土元素分布型式可以看出,内蒙古地轴和兴蒙造山带两个区的稀土元素分布都呈现右倾的型式,这与 Rudnick and Gao^[24]给出的全球上地壳稀土元素的分布型式基本一致。这种轻稀土元素比重稀土元素更为富集的模式正反映了轻稀土元素具有比重稀土元素更不相容的性质,这也是导致轻稀土元素在地壳中更为富集的原因。另外,从图上还可以看出,兴蒙造山带的 Yb 和 Lu 富集较为明显,比其他地区稀土元素含量也稍高,说明该地区壳幔分异作用处于比较强烈的时期。

6.4 元素比值

上文提到某些元素比值,如 $w(\text{Ga})/w(\text{Al})$ 、 w

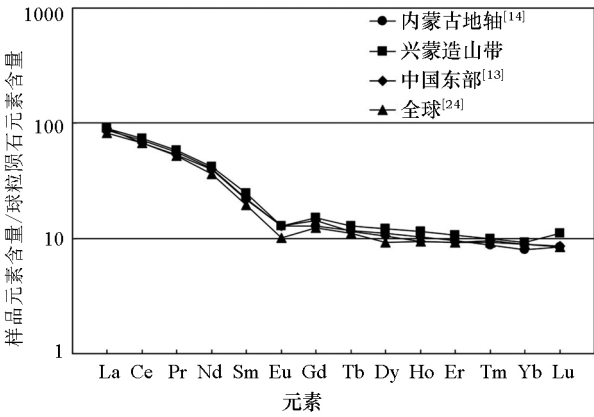


图 4 本文及不同研究者^[13,24]给出的稀土元素球粒陨石标准化分布型式图

Fig. 4 REE pattern normalized to the chondrite, compared with other researchers' results

(Sm)/w(Nd)及w(K)/w(Th)等,是一个较为固定的值,这为检验丰度的正确性提供了依据。另外还有一些元素的比值,如w(La)/w(As)、w(La)/w(Nb)、w(Nb)/w(Th)、w(Nb)/w(U)、w(Ba)/w(Th)等,其不同地质环境下差异较明显,根据这些元素比值可以得出该区域的一些构造特点。

汪洋^[30]认为对于可以指示岛弧岩浆作用的w(La)/w(As)、w(La)/w(Nb)、w(Nb)/w(Th)、w(Nb)/w(U)和w(Ba)/w(Th)比值,岛弧和地盾上地壳存在明显差异。岛弧w(La)/w(As)、w(Nb)/w(Th)、w(Nb)/w(U)、w(Ba)/w(Th)比值低,而w(La)/w(Nb)比值高,地盾则相反。表3列出了上面这些元素比值在不同模型里的值。从表中的数据可以看出,兴蒙造山带的w(La)/w(As)、w(Nb)/w(Th)、w(Nb)/w(U)、w(Ba)/w(Th)比值在所列数据中都属于偏低,由此可判断其更接近于岛弧上地壳。而内蒙古地轴的w(La)/w(As)、w(Nb)/w(Th)、w(Nb)/w(U)、w(Ba)/w(Th)比值都较高,尤其高于Rudnick and Gao^[24]模型。然而,与Shaw et al.^[5]和Taylor and McLennan^[25]模型相比都偏低。这可能由于Shaw et al.^[5]和Taylor and McLennan^[25]模型都来源于地盾地区,而Rudnick and Gao^[24]则是综合了地盾地区和造山带的数据。由此综合而言,内蒙古地轴出露地壳的成分还是更接近地盾地区上地壳平均成分,这也与其位于华北地盾北缘的构造位置相符合。

另外,兴蒙造山带的w(Ga)/w(Al)比值比其他研究者的数据高,这可能显示该区地壳增生作用较为强烈。Joseph等^[31]认为具有较高的w(Ga)/w(Al)比值是判定A型花岗岩的重要依据,而A型花

岗岩又被认为是地壳增生作用(即地幔来源的基性岩浆侵入至下地壳)的产物,由此可推断具有高w(Ga)/w(Al)比值的兴蒙造山带具有较多的A型花岗岩的成分,其地壳增生作用也较为强烈。

7 结论

- 1) 通过区域大规模采样,由加权平均法得到内蒙古地区出露地壳元素丰度的估算值。从地表热流限制、地震平均波速及元素比值等方面对计算结果进行检验,说明所得结果是合理的。
- 2) 由TAS图解可以得出内蒙古地区出露地壳平均成分为花岗闪长岩质,与目前大多数学者认同的全球上地壳的平均成分是花岗闪长岩质的结论相一致。
- 3) 内蒙古地区出露地壳中常量元素与不同研究者所得上地壳平均成分相比,其组成基本一致,仅Ca、Mg含量略低。微量元素与全球上地壳相比,兴蒙造山带富集As、Ag等矿化元素,显示了该区较好的热液成矿潜力。
- 4) 由稀土元素的分析可知,内蒙古地区两个构造单元都为右倾的形式,符合轻稀土元素在地壳中更富集这一理论,其中各个稀土元素含量也与其他研究者所得结果相一致。
- 5) 将某些指示岛弧型岩浆的元素比值与其他研究者的数据进行对比,可以看出内蒙古地轴接近于地盾型上地壳,而兴蒙造山带则更接近岛弧型造山带。另外,兴蒙造山带的w(Ga)/w(Al)比值较高,很可能指示着较为强烈的地壳增生作用。
- 6) 综合微量元素、稀土元素及元素比值几方面分析结果,可以认为,内蒙古地轴具有强烈的壳内分异作用,而兴蒙造山带则具有较强烈的地壳增生作用。

参考文献 (References):

[1] Clarke F W. The relative abundance of the chemical elements[J]. Phil. Soc. Washington Bull., 1889, XI: 131 - 142.

[2] Clarke F W, Washington H S. The composition of the Earth's crust [J]. USGS Professional Paper., 1924, 127: 117.

[3] Taylor S R. The abundance of chemical elements in the continental crust: a new table[J]. Geochim. et Cosmochim. Acta, 1964, 28: 1273 - 1285.

[4] 黎彤,饶纪龙. 论化学元素在地壳及其基本构造单元中的丰度 [J]. 地质学报, 1965, 45(1): 82 - 92.

Li T, Yio C L. The abundance of chemical elements in the earth's crust and its major tectonic units [J]. Acta Geologica Sinica, 1965, 45(1): 82 - 92.

- [5] Shaw D M, Reilly G A, Muysson J R, et al. An estimate of the chemical composition of the Canadian Precambrian shield [J]. *Can. J. Earth Sci.*, 1967, 4: 829–853.
- [6] Shaw D M, Dostal J, Keays R R. Additional estimates of continental surface Precambrian shield composition in Canada [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 1976, 40: 73–83.
- [7] Eade K E, Fahrig W F. Chemical evolutionary trends of continental plates—preliminary study of the Canadian shield [J]. *Geol. Sur. Can. Bull.*, 1971, 179: 51.
- [8] Eade K E, Fahrig W F. Regional, lithological, and Ttemporal variation in the abundances of some trace elements in the Canadian shield [J]. *Geol. Sur. Canada Paper.*, 1973: 72–46.
- [9] Goldschmidt V M. *Grundlagen der quantitativen Geochemie* [J]. *Fortschr. Mienral. Kirst. Petrogr.*, 1933, 17: 112.
- [10] 黎彤, 倪守斌. 地球和地壳的化学元素丰度 [M]. 北京: 地质出版社, 1990.
Li T, Ni S B. The abundance of chemical elements in the earth and crust [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990.
- [11] 张本仁, 骆庭川, 高山, 等. 秦巴岩石圈构造及成矿规律地球化学研究 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1994: 7–32.
Zhang B R, Luo T C, Gao S, et al. Geochemistry of the Qinba lithosphere structure and metallogenic regularity [M]. Wuhan: China university of geosciences Press, 1994: 7–32.
- [12] 鄢明才, 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.
Yan M C, Chi Q H. The chemical compositions of crust and rocks in the Eastern part of China [M]. Beijing: Science Press, 1997.
- [13] Gao S, Luo T C, Zhang B R, et al. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in east China [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 1998, 62: 1959–1975.
- [14] 孟月玥, 陈岳龙, 林宇, 等. 内蒙古中南部出露地壳元素丰度的估算 [J]. *地质通报*, 2010, 29(6): 18–28.
Meng Y Y, Chen Y L, Lin Y, et al. The estimated elemental abundance values of the exposed crust of southern-central Inner Mongolia [J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(6): 18–28.
- [15] 内蒙古自治区地层表编写组. 华北地区区域地层表·内蒙古分册 [M]. 北京: 地质出版社, 1978.
Stratigraphic scale compilation group of Inner Mongolia autonomous region. Regional stratigraphic scale in North China-Inner Mongolia volume [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1978.
- [16] 内蒙古自治区地质矿产局. 内蒙古自治区区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1991.
Bureau of geology and mineral resources of Inner Mongolia autonomous region. Regional geology of Inner Mongolia autonomous region [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991.
- [17] 内蒙古自治区地质矿产局. 全国地层多重划分对比研究-15, 内蒙古自治区岩石地层 [M]. 北京: 地质出版社, 1996.
Bureau of geology and mineral resources of Inner Mongolia autonomous region. The comparative study of stratigraphic division in China: 15. Lithostratigraphy of Inner Mongolia autonomous region [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996.
- [18] 汪洋, 汪集, 邓晋福, 等. 对中国大陆壳体的放射性生热元素丰度的大地热流检验 [J]. *大地构造与成矿学*, 2001, 25(2): 210–216.
- Wang Y, Wang J, Deng J F et al. The test on the abundances of radioactive heat production elements in continental crustobodies of China by heat flow data [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2001, 25(2): 210–216.
- [19] Rybach L. Determination of heat production rate [G]//Haenel R, Rybach L, Stegena L. *Handbook of terrestrial heat-flow density determination* [M]. Kluwer, 1988: 125–142.
- [20] 马杏垣, 刘昌铨, 刘国栋. 江苏响水至内蒙古满都拉地学断面 [M]. 北京: 地质出版社, 1991.
Ma X Y, Liu C Q, Liu G D. Geoscience transect from Xiangshui, Jiangsu to Mandula, Inner Mongolia [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991.
- [21] 卢造勋, 夏怀宽. 内蒙古东乌珠穆沁旗至辽宁东沟地学断面 [M]. 北京: 地震出版社, 1992.
Lu Z X, Xia H K. Geoscience transect from Dongwuzhumuqinqi, Inner Mongolia to Donggou, Liaoning [M]. Beijing: Seismological Press, 1992.
- [22] 孙武城, 马宝林, 宋松岩, 等. 湖北随州至内蒙古喀拉沁旗地学断面 [M]. 北京: 地震出版社, 1992.
Sun W C, Ma B L, Song S Y, et al. Geoscience transect from Suizhou, Hubei to Kalaqinqi, Inner Mongolia [M]. Beijing: Seismological Press, 1992.
- [23] Fountain D M, Christensen N I. Composition of the continental crust and upper mantle: A review [G]//Pakiser L C, Mooney W D. *Geophysical framework of the Continental United States*. *Geol. Soe. Amer. Memoir*, 1989, 172: 711–742.
- [24] Rudnick R L, Gao S. Composition of the continental crust [G]//Rudnick R L. *Treatise on geochemistry*. Oxford: Elsevier-Perгамon, 2003: 1–64.
- [25] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: Its composition and evolution [M]. Oxford: Blackwell, 1985.
- [26] Wedepohl H. The composition of the continental crust [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 1995, 59: 1217–1239.
- [27] Middlemost E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system [J]. *Earth-Sci. Rev.*, 1994, 37: 215–224.
- [28] Wood D A, Joron J L, Treuil M, et al. Elemental and Sr isotope variations in basic lavas from Iceland and the surrounding ocean floor [J]. *Contrib. Minerla. Petrol.*, 1979, 70: 319–339.
- [29] 邵和明, 张履桥. 内蒙古自治区主要成矿区(带)和成矿系列 [M]. 北京: 中国地质大学出版社, 2016: 42–56.
Shao H M, Zhang L Q. Main metallogenic province (belt) and metallogenic series [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2016: 42–56.
- [30] 汪洋. 中国大陆部分构造单元出露地壳与全球大陆上地壳化学成分的比较 [J]. *地质通报*, 2005, 24(10–11): 906–915.
Wang Y. Comparison of element abundances between the exposed crust of the continent of China and the global average continental upper crust [J]. *Geological Bulletin of China*, 2005, 24(10–11): 906–915.
- [31] Joseph B W, Kenneth L C, Bruce W C. A-type Granites: Geochemical Characteristics, Discrimination and Petrogenesis [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, 95: 407–419.

Estimating the elements' abundance of the exposed crust of Inner Mongolia

MENG Yue-Yue^{1,2}, CHEN Yue-Long¹

(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: We figured out the estimated values of 12 major elements and 40 minor elements of the exposed crust of Inner Mongolia with 392 samples which are collected from five seismic sections of Inner Mongolia. And the weighted values are obtained by the thickness of different rocks in every stratigraphy and the areas of stratigraphies and magmatic bodies in the geology map. The estimated values are proved reasonable by surface heat flow value, average seismic wave velocity and elements ratio. Comparing the major element estimated values with ones given by other researchers, the average composition of Inner Mongolia is similar to others', which are also granodioritic, except that the Ca and Mg abundances are a little low. Researching on the estimated values of minor element, rare earth element and some element ratio, we found that there is intense crust differentiation in the north margin of North China Plate, and intense accretion in Xingmeng Orogenic Belt.

Key words: Inner Mongolia; exposed crust; elements' abundance; tectonic unit

(本文编辑:蒋实)